

繰返し変形を受ける鉛プラグ入り積層ゴム支承における  
熱影響評価手法に関する研究

令和 2年 9月

湯 川 正 貴



## 目次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往研究の紹介と本研究の位置付け	4
1.3 本書の構成	6
2. 鉛プラグ入り積層ゴムの繰返し加力試験	13
2.1 試験体	13
2.2 試験装置	16
2.3 試験方法	19
2.4 試験結果	29
2.5 まとめ	58
3. 熱・力学連成解析を用いた評価	61
3.1 熱・力学連成解析プログラムの開発	61
3.2 解析モデル	69
3.3 解析結果	71
3.4 まとめ	82
4. 熱物性値評価試験	83
4.1 試験方法	83
4.2 試験結果	88
4.3 まとめ	96
5. 鉛プラグの接触状態を考慮した非線形熱・力学連成解析	97
5.1 接触状態の確認	97
5.2 接触状態のモデル化	109
5.3 接触状態を考慮した再現解析	115
5.4 まとめ	126
6. 鉛プラグ入り積層ゴムの熱影響を考慮した原子炉免震建屋の応答評価	129
6.1 解析モデル	129
6.2 入力地震波	134
6.3 解析結果	136
6.4 まとめ	155
7. 結論	157

謝辞 .....	161
付録 1 繰返し加力試験の試験結果 .....	付-1
付録 2 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 .....	付-23
付録 3 鉛プラグの降伏応力度－温度関係 .....	付-27
付録 4 鉛プラグの降伏応力度低下率－単位体積吸収エネルギー量関係 .....	付-28
付録 5 各面圧レベルの接触状態 .....	付-29

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景

免震構造は、建屋全体もしくは建屋の一部を免震装置で支持する構造形式である。免震装置には、建屋重量を支持する支承材、免震建屋に周期性を与える復元材、減衰性能を付与する減衰材があり、単一もしくは複数の種類の免震装置を組み合わせることで、必要な「支持機能」「復元機能」「減衰機能」<sup>1)</sup>を確保している。免震構造は国内外で数多く採用されており、建物規模は低層から超高層、用途は戸建て住宅から大型商業施設まで多岐にわたっている<sup>2)</sup>。また、高い安全性が求められる原子力関連施設への適用検討についても、免震研究の黎明期である 1980 年代から進められており、縮小試験体を使用した動的特性試験<sup>3)</sup>、大口径の免震装置を使用したハードニング特性試験<sup>4)</sup>や破断特性試験<sup>5)</sup>による実験的検討から、3次元 FEM モデルを用いた非線形応答解析<sup>6)</sup>や破断特性を考慮したフラジリティ評価<sup>7)</sup>などの数値解析的検討などが行われてきた。現在、国内では複数の原子力発電所構内に免震事務棟が建設<sup>8)・10)</sup>されており、海外では原子炉免震建屋の建設実績<sup>11)・12)</sup>も存在している。

ここで、運動方程式から免震構造の特徴と効果を整理する。まず、剛性マトリクスについては、免震装置を設置した建屋内 1 層分の水平剛性を低く設定している。当該層は免震層と呼ばれ、建屋最下層に設置される場合は基礎免震構造、建屋内部に設置される場合は中間層免震構造となる。なお、支承材として採用される免震装置は、鉛直剛性は免震層より上部の建屋（上部建屋）を支持する必要があるため、一般的には低剛性とならない。支承材である免震装置としては、天然ゴム系積層ゴム支承（NRB）、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）、高減衰積層ゴム支承（HRB）や弾性滑り支承などがある。なお、積層ゴム支承は復元材としての機能も有している。免震層の水平方向が長周期化されることで上部建屋の応答加速度が低減し、構造部材の合理化、非構造部材の破損抑制や家具の転倒防止などの利点がある。また、平 12 建告第 1461 号に規定されている地震動（告示波）<sup>13)</sup>では、周期 0.64s 以上の加速度応答を低下させている（速度応答は一定）ことから、免震層をより低剛性化（長周期化）することで更なる上部建屋の応答加速度低減が期待できる。しかし、過度な低剛性化は応答変位の増大に繋がり、上部建屋と擁壁との離間距離（クリアランス）の拡大や地震後に生じる残留変形の増大が懸念されるため、必要な復元機能の確保と免震効果のトレードオフから、現在は免震周期を 3~5s 程度に設定する例が多い<sup>14)</sup>。

減衰マトリクスについては、免震層に大きな減衰係数を設定している。これは、応答変位が集中する免震層に粘性系の減衰材を付与することで、効率的なエネルギー吸収による減衰機能確保を期待したものである。粘性系の減衰材はオイルダンパーなどがあり、これらは支承材とは別に設置される。減衰材には、粘性系の他に履歴系も存在しており、主として履歴による吸収エネルギーにより減衰機能を付与することから減衰マトリクスに反映されるものではないが、ここでは併せて紹介する。履歴系の減衰材は、支承材と一体化した装置として LRB や HRB などが、支承材とは別に設置される装置として鋼材ダンパーや鉛ダンパーなどがある。ここで、上記の特徴は地震時など比較的応答変位が大きい状態において発揮されるものである。これまで、通常時における免震構造の減衰評価は行われておらず、免震化による建屋減衰への影響は不明確であった。そこで、著者らは同一構造に対して異なる耐震補強が行われた日本大学船橋校舎 1 号館（補強無し）、2 号館（制振補強）および 3 号館（免震レトロフィット）を対象に常時微動計測および人力加振実験を行い、減衰定数を評価した<sup>15)</sup>。減衰評価結果から、免震化により減衰定数が常時微動

計測で 0.3%、人力加力実験で 1.5%増加しており、通常時においても高い減衰性能を有していることが明らかとなっている。

質量マトリクスについては、これまで、主として制振構造に対して、建屋頂部に定点理論を用いて最適化された付加錘と減衰材を設置した同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper) を設置することで応答制御する手法が開発<sup>16)17)</sup>されているが、免震構造への適用は限られていた。しかし、近年、建屋の層間に設置できる慣性質量ダンパー (Dynamic Mass Damper)<sup>18)19)</sup>が開発されたことで、免震層などに慣性質量効果による周期伸長、入力低減および減衰低減を付与することが可能となった。これらは、積層ゴム支承やダンパー材よりも比較的新しい装置であり、減衰機能、復元機能、支持機能に直接該当しないが、同調制御やモード制御<sup>20)</sup>により建屋や免震層の応答低減を実現することが可能である。

以上に示す通り、免震構造は設計段階において、免震層の剛性、減衰 (慣性質量ダンパー等を使用する場合は質量) を免震装置によって調整することで、必要な「支持機能」「復元機能」「減衰機能」を確保しているが、これらの機能は種々の依存性を有している。これまで、免震設計では、これらの依存性を高精度な復元力モデル<sup>21)22)</sup>で再現する、或いは装置特性のばらつきとして付与する<sup>23)</sup>ことで考慮してきた。これらの依存性の中に、多数回繰返し変形による減衰機能の低下がある。減衰機能の低下は、減衰材が吸収したエネルギーを熱エネルギーに変換した際の発熱による温度影響を受け、特性変化が発生することによって引き起こされる。繰返し変形による発熱影響は、LRB、HRB および高摩擦タイプの弾性滑り支承などで発生することが知られており、NRB、低摩擦タイプの弾性滑り支承およびオイルダンパーなどでは殆ど影響を受けないとの報告<sup>24)</sup>がある。

これまで我が国では、1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震などで長周期地震動が観測されているものの、継続時間が比較的短く、繰返し変形による影響が小さいことから、繰返し変形による熱影響が免震設計において注目されることは殆ど無かった。しかし、2003 年十勝沖地震にて発生した長周期地震動により、スロッシングによる石油タンク火災が発生し、長周期地震動対策について注目が集まった。更に、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震において発生した長周期地震動により、都内の免震建屋において 1 分を超える繰返し変形が観測<sup>25)</sup>されたことから、長周期・長時間地震動が社会的な課題として取り上げられることとなった。これを受けて、2016 年 6 月 国土交通省は「超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動対策について (技術的助言)」<sup>26)</sup>を発行し、長周期地震動への対策案を公表している。同資料では、南海トラフ沿いで約 100~150 年の間隔で発生しているとされる M8~9 クラスの地震を対象として震源規模および震源断層領域を想定することで得られた地域毎の疑似速度応答スペクトルが提示された。提示された疑似速度応答スペクトルの中には、1s~5s のやや長周期帯域において告示波の 2 倍程度となる地震動があり、継続時間も 500s 以上とされていることから、減衰材の発熱が顕著に発生する可能性がある。また、資料中には繰返し変形による熱影響を考慮する 2 つの手法も提示されている。1 つ目の手法は、長時間の繰返し累積変形によって減衰性能が低下する可能性がある免震材料を指定するとともに、発熱分布と履歴特性の相互作用効果を同時並行的に処理する時刻歴応答解析 (熱・力学連成解析) を用いた手法 (精算法) である。2 つ目の手法は、熱影響を考慮しない時刻歴応答解析結果により得られた累積吸収エネルギー量から減衰性能の低下率を評価し、初期状態から減衰性能を低下させた地震応答解析を実施する手法 (簡略法) である。なお、

技術的助言の発行後、2017年1月 指定性能評価機関の業務方法書<sup>27)</sup>が変更され、指定区域内において、現在は上記いずれかの手法により熱影響を考慮した免震設計が行われている<sup>28)</sup>。

この様な背景から、長周期・長時間地震動による熱影響を精度良く評価することが求められている。本研究では、熱影響を受ける免震装置の中から、研究対象として「LRB」を選定した。LRBは、中心部に封入された鉛プラグによる減衰機能、外周部に設置された積層ゴムによる復元機能および支持機能を有しており、単独で全ての機能を有することから配置性に優れた免震装置である。軽水炉免震建屋では、原子炉建屋とタービン建屋を渡す主蒸気配管の変形量を低減するため、免震装置の配置が高密度化することから、全数LRB（計310体）の採用が予定されている<sup>29)</sup>。一方、LRBは減衰材である鉛プラグが装置内部に封入されていることから、発熱による影響が特に大きい装置であり、その繰返し依存特性を詳細に把握することは極めて重要である。

## 1.2 既往研究の紹介と本研究の位置づけ

これまで、LRB の熱影響評価を試験的および数値解析的に検討した研究報告が為されている。例えば、竹中・近藤ら<sup>30) 31)</sup>は、 $\phi 1000\text{mm}$  の実大 LRB および  $\phi 510\text{mm}$ 、 $\phi 255\text{mm}$  の縮小 LRB を対象に水平 1 方向正弦波繰返し加力試験と地震応答波加力から、鉛プラグの温度上昇に伴い降伏応力度が 40~60%程度まで低下することを示すと共に、発熱分布と履歴特性の相互作用効果を取り込んだ熱・力学連成解析を開発し、繰返し加力試験の再現解析から降伏荷重や累積吸収エネルギー量を精度良く再現できることを確認した。村松・日比野ら<sup>32)</sup>は、装置径の異なる 3 種類の LRB に対して水平 1 方向および水平 2 方向の正弦波繰返し加力試験を実施し、鉛プラグ中心部で  $250^{\circ}\text{C}$  を上回る温度上昇を観測すると共に、 $150^{\circ}\text{C}$  以上で降伏耐力低下が緩やかになる現象を模擬した熱・力学連成解析を実施した。国土交通省が主催する建築基準整備促進事業<sup>33)</sup>では、 $\phi 1000\text{mm}$  の実大 LRB を使用した水平 1 方向の正弦波繰返し加力と水平 2 方向の正弦波繰返し加力および地震応答波加力を実施した。試験結果から、鉛プラグ周辺部、フランジ部および積層ゴム表面の温度変化と降伏荷重の低下を計測すると共に、熱・力学連成解析からフランジ部の温度変化と累積吸収エネルギー量が適切に再現できることを確認した<sup>34)</sup>。和氣・菊地ら<sup>35)</sup>は、 $\phi 250\text{mm}$  と  $\phi 500\text{mm}$  の LRB を用いた正弦波繰返し加力試験から、速度依存性を考慮した鉛プラグの温度と降伏応力度の関係式を提案し、差分法および定熱流束法を用いた熱・力学連成解析から提案式の妥当性を確認している。

また、これらの基礎的研究成果を使用し、LRB の熱影響評価による免震建屋挙動の評価が行われている。黒嶋・石井ら<sup>36)</sup>は、熱・力学連成解析を用いた免震建物の応答解析を実施し、長時間地震動を入力した際、発熱を考慮した解析結果は、発熱を考慮しない解析結果と比較して、免震層の応答変位が最大で約 8 割増加し、上部建屋の応答値も増大傾向になることを確認した。中山・近藤ら<sup>37)</sup>は、東北地方太平洋沖地震で得られた観測記録および継続時間 125.8s の標準波を 2 波連続入力した長時間地震動を用いて、次世代原子炉免震建屋を対象に熱影響考慮の有無による積層ゴムの応答変位量を比較し、熱影響を考慮することで応答変位が最大 1.4 倍に増加することを確認した。

更に、装置仕様を改良することで熱影響を低減する試みも為されている。Wake・Kikuchi et al.<sup>38)</sup>は、鉛プラグの放熱量を増加させて繰返し加力時の減衰性能低下を抑制するため、中間鋼板厚を増やした高熱容量 LRB を開発した。また、高熱容量 LRB と市販の LRB を対象に、装置内部に 15 箇所の高熱電対を設置した水平 1 方向正弦波繰返し加力試験および熱・力学連成解析を実施し、高熱容量 LRB を用いることで鉛プラグの温度上昇と減衰性能の低下が抑制されることを確認した。

上記の研究報告では、精算法による高度な解析プログラムを使用した検討が行われているが、並行して簡略法に関する検討も進められている。建築研究所<sup>39) 40)</sup>では、熱・力学連成解析結果に基づく累積吸収エネルギー量と鉛プラグの降伏応力度の関係式を整理し、熱影響の有無に係わらず鉛プラグの吸収エネルギーが釣合うと仮定した際の応答予測式を提案している。更に、積層ゴム製造メーカー<sup>41) 42)</sup>では、上記関係式に装置径による放熱影響を取込んだ評価式を提案し、個別評定を取得している。しかし、簡略法では吸収エネルギー量から減衰性能の低下を評価しており、放熱特性については装置径による影響が考慮されているものの、継続時間による温度変化を考慮できないため、減衰性能の低下を安全側に評価しており、免震層の応答変位を過大評価する可能



性がある。竹内・中島ら<sup>43) 44)</sup>は、6階建て免震建屋を対象として、南海トラフ地震を用いた地震応答解析から精算法と簡略法の応答差を比較し、簡略法を使用することで免震層の応答変位を安全側に評価する傾向が見られるものの、位相に依っては危険側に評価する場合があることを示している。また、熱影響の有無によって上部建屋の振動性状が変化することを確認しており、高精度な精算法を開発する必要性は高い。

この様な研究が精力的に進められているものの、繰返し加力による LRB の熱影響評価については、未だ不明確な部分が多く存在している。「実験的検討」においては、繰返し加力に伴う熱電対の破損や抜け出しが発生するため、鉛プラグの中心温度や装置全体の温度分布を確認した報告は少ない。また、長周期成分を含む地震動では、従来よりも免震効果が発揮しづらいため、上部建屋のロッキング応答によって引張変形が発生することが懸念されるが、水平方向と鉛直方向を同時に入力した加力試験は、これまで主として LRB の応答特性を確認する目的で実施<sup>45) 46)</sup>されており、引張領域を含む水平・鉛直同時加力試験から、鉛プラグの発熱量と履歴特性の関係を確認した例は、著者の知る限りない。「数値解析的検討」においては、履歴曲線や累積吸収エネルギー量を比較した検討は為されているものの、温度変化の計測記録が十分で無いことから、鉛プラグの発熱現象や積層ゴムおよび中間鋼板（積層ゴム部）等への放熱現象について十分な検討が為されていない。また、せん断加力を受けた際の鉛プラグと周辺部との接触状態について検討した報告は無く、放熱現象を適切に再現することが困難であり、長時間の地震動や余震時の免震応答を適切に再現できない可能性が考えられる。

そこで、本研究では、 $\phi 500\text{mm}$  の太径プラグ LRB を使用した繰返し加力試験を行い、鉛プラグ中心部を含む装置内部の温度変化を計測する。得られた温度記録から、熱エネルギーを用いた手法で鉛プラグの発熱範囲と装置内部における熱の移動経路を明らかにする。また、鉛プラグの温度変化と履歴特性の変化から、繰返し加力による LRB の熱影響特性を確認するとともに、加力条件が熱影響特性に与える影響について考察する。更に、引張領域を含む水平・鉛直同時加力を実施し、鉛プラグの発熱量と履歴特性の関係を確認する。これらの検討から、既往の「実験的検討」において不明確であった部分を明確化し、LRB の熱影響特性を明らかにすると共に、熱・力学連成解析のモデル化手法を提案する。

次に、FEM を用いた熱伝導解析と地震応答解析の連成効果を考慮できる熱・力学連成解析プログラムを開発する。開発プログラムを使用した繰返し加力試験の再現解析から、LRB の力学特性を比較すると共に、既往の「数値解析的検討」において十分な検討が為されていない装置全体の温度分布を比較し、鉛プラグの発熱現象や放熱現象を再現した解析手法に関する考察を行い、熱・力学連成解析プログラムの高度化を目指す。

更に、これまでの研究で着目されていなかった熱物性値の依存性と鉛プラグープラグ周辺部（鉛プラグ境界部）の接触状態を考慮することで、鉛プラグの放熱影響をモデル化できると考え、熱物性値評価試験による実験的検討と接触解析による数値解析的検討から、LRB の熱影響評価において鉛プラグの接触状態を適切に考慮する必要性を示した。また、鉛プラグ境界部における接触状態の変動を熱・力学連成解析に取込む手法を提案すると共に、本手法を適用可能な熱・力学連成解析プログラムを開発する。開発プログラムを使用した繰返し加力試験の再現解析から提案手法の妥当性を検証すると共に、仮想の原子力免震建屋を対象とした地震応答解析から、免震応答および建屋応答に与える影響を確認する。

### 1.3 本書の構成

本書は、大きく分けて 2 つの検討内容から構成される。1 点目は、既往研究において実験的・数値解析的な検討課題であった LRB 全体における温度変化と熱影響特性の依存性を把握し、熱・力学連成解析における鉛プラグの発熱範囲や装置内部における熱の移動経路を考慮したモデル化手法を提案することで、既往研究で提示された熱影響評価手法の更なる高度化を目指した検討である。2 点目は、既往研究の高度化では解決できなかった鉛プラグの放熱影響を再現可能なモデルの構築を目指して、実験的・数値解析的な新しいアプローチとして熱物性値評価と接触解析を実施し、得られた知見から鉛プラグ境界部の接触状態を取込んだ熱・力学連成解析手法を提案すると共に、本手法を適用できる解析プログラムを開発し、繰返し加力試験の再現解析と原子炉免震建屋の地震応答解析から本手法の妥当性と有効性を確認する検討である。

1 章では、免震構造の有用性を述べると共に繰返し変形を受ける免震装置の熱影響評価に関する最近の基準改正を踏まえた背景から本研究の重要性を示している。また、LRB の熱影響評価に関する既往研究について概観し、本研究の目的と位置づけを明確化すると共に、本書の構成を示している。

2 章では、繰返し加力試験の概要と試験結果を示すと共に、試験から得られた履歴曲線および温度変化から LRB の熱影響評価に関する分析・考察を述べる。

繰返し加力試験では、 $\phi 500\text{mm}$  の太径プラグ LRB を使用し、最大せん断ひずみ、最大加力速度および面圧をパラメータとした正弦波繰返し加力、4 種類の地震応答波加力および水平・鉛直方向の 2 方向同時加力試験を行う。試験体内部には、鉛プラグ中央部を含んだ 7 個の熱電対を設置し、試験体全体の温度変化を記録している。取得した試験結果から、鉛プラグの減衰性能低下と鉛プラグの温度上昇および累積吸収エネルギー量との相関関係を確認すると共に、試験体内部の温度分布を使用した熱エネルギー評価による発熱および伝熱現象の考察を行い、LRB の熱影響特性を明らかにすることで、熱・力学連成解析のモデル化手法を提案する。また、過大な経験変形や鉛プラグの温度上昇を受けた LRB の力学特性を確認すると共に、引張領域と圧縮領域を跨いだせん断変形を受ける LRB の挙動を確認し、装置の健全性確認範囲を拡充している。

3 章では、開発した熱・力学連成解析プログラムと解析モデルの概要を示すと共に、繰返し加力試験の再現解析を実施し、2 章で得られたモデル化手法の妥当性と課題を確認した。

熱・力学連成解析は、地震応答解析では Newmark  $\beta$  法を用いた直接積分法を使用し、熱伝導解析では有限要素法を用いた非定常熱伝導解析を使用している。これまで熱・力学連成解析で用いる熱伝導解析には差分法が用いられる場合が殆どであったが、本研究では鉛プラグとプラグ周辺部に極小の接触要素を設置することから、計算コスト低減のため有限要素法による熱伝導解析を採用した。解析モデルは、2 章で実施したエネルギー評価から得られた発熱範囲の設定と鉛プラグ温度の評価方法を適用すると共に、鉛プラグと周辺部の接触状態を考慮して作成した。繰返し加力試験の再現解析から、接触要素の有無による影響検討や本モデル化手法の妥当性を確認できたものの、放熱現象のモデル化に課題を残した。

4 章では、免震装置の使用材料を用いた熱物性値評価試験を実施し、熱物性値の温度依存性や加力履歴による影響を把握すると共に、熱・力学連成解析から熱物性値が LRB の力学特性や放熱現象に及ぼす影響を確認する。

熱物性値評価試験では、試験体と同種のゴム材料および中間鋼板の試験片を使用し、免震装置

の熱環境を対象として熱伝導率、比熱および密度の温度依存性を計測した。また、ゴム材料と中間鋼板を架硫接着して作成した積層体に累積変形量 50m 相当の正弦波繰返し加力を行い、加力履歴の有無による熱伝導率の差異を計測した。試験片の試験結果から、ゴム材料の比熱に温度依存性を確認したものの、熱・力学連成解析結果に及ぼす影響が小さいことを確認した。積層体の試験結果から、加力履歴による熱物性値の差異が無く、熱物性値は繰返し変形に依る影響を受けないことを確認している。また、計測した熱物性値を使用した繰返し加力試験の再現解析結果から、解析結果に与える熱物性値の感度が小さく、放熱影響を適切に再現することは出来なかったが、熱物性値評価試験を実施していない既往の研究成果の妥当性が確認することが出来た。

5 章では、繰返し加力試験に用いた試験体の 3 次元 FEM モデルを使用した接触解析を実施して、鉛プラグと積層ゴムおよび中間鋼板との接触状態を確認すると共に、接触状態を熱・力学連成解析において考慮する手法を提案している。更に、非線形熱伝導解析を用いた熱・力学連成解析プログラムを開発し、本提案手法を用いた再現解析結果から、放熱影響を適切に再現出来ることを確認した。

鉛プラグと積層ゴムおよび中間鋼板との境界部の接触状態を直接確認することは困難であるため、試験体の上下連結鋼板間を対象とした非線形 FEM モデルを作成し、直接拘束法を用いた接触解析を実施して境界部の接触状態を確認すると共に、鉛プラグと鉛プラグ周辺部との接触率におけるせん断ひずみ依存性および面圧依存性を確認した。そこで、接触状態の変動を熱・力学連成解析に取込むための解析手法を提案し、新たに開発した非線形熱伝導解析を有する熱・力学連成解析プログラムを用いて繰返し加力試験の再現解析を実施した。再現解析結果から、本解析手法を用いることで LRB の放熱影響を適切に評価した熱・力学連成解析が可能となり、より精度の高い応答評価を行うことが可能となった。

6 章では、原子炉免震建屋を対象として、接触状態の変動を模擬した本解析手法を用いた地震応答解析を実施し、免震装置および上部建屋の応答性状を算出した。また、接触状態を完全固定としている従来の解析手法を使用したモデルの応答解析結果と比較することで、本解析手法の有効性を検証した。

地震応答解析では 2 種類の入力地震波を使用し、単独入力と余震動を想定した 2 波連続入力を行った。免震建屋は基礎下免震構造とし、免震装置は入力地震波を用いた際に、熱影響を考慮せずに減衰性能を一定としたモデル（熱影響未考慮）の応答変位が線形限界の 1/1.5 以下になるよう設計した LRB を使用した。応答解析結果から、入力地震波をハードニング応答が生じる程度に係数倍した余震時において、接触状態の違いに起因した鉛プラグの内部温度差が生じることを示した。また、内部温度差が大きくなることで、本解析手法は従来の解析手法よりも上部建屋の応答増幅が生じる傾向を示しており、放熱影響が大きい場合において本解析手法を用いた適切な応答評価を行う必要性を認めた。更に、熱影響評価手法の内、精算法（接触状態一定、接触状態変動）と簡略法を使用した地震応答解析を実施し、熱影響未考慮の解析結果との比較から各評価手法の応答性状について考察している。

7 章では、本研究で得られた成果を取り纏めると共に、今後の課題を示す。

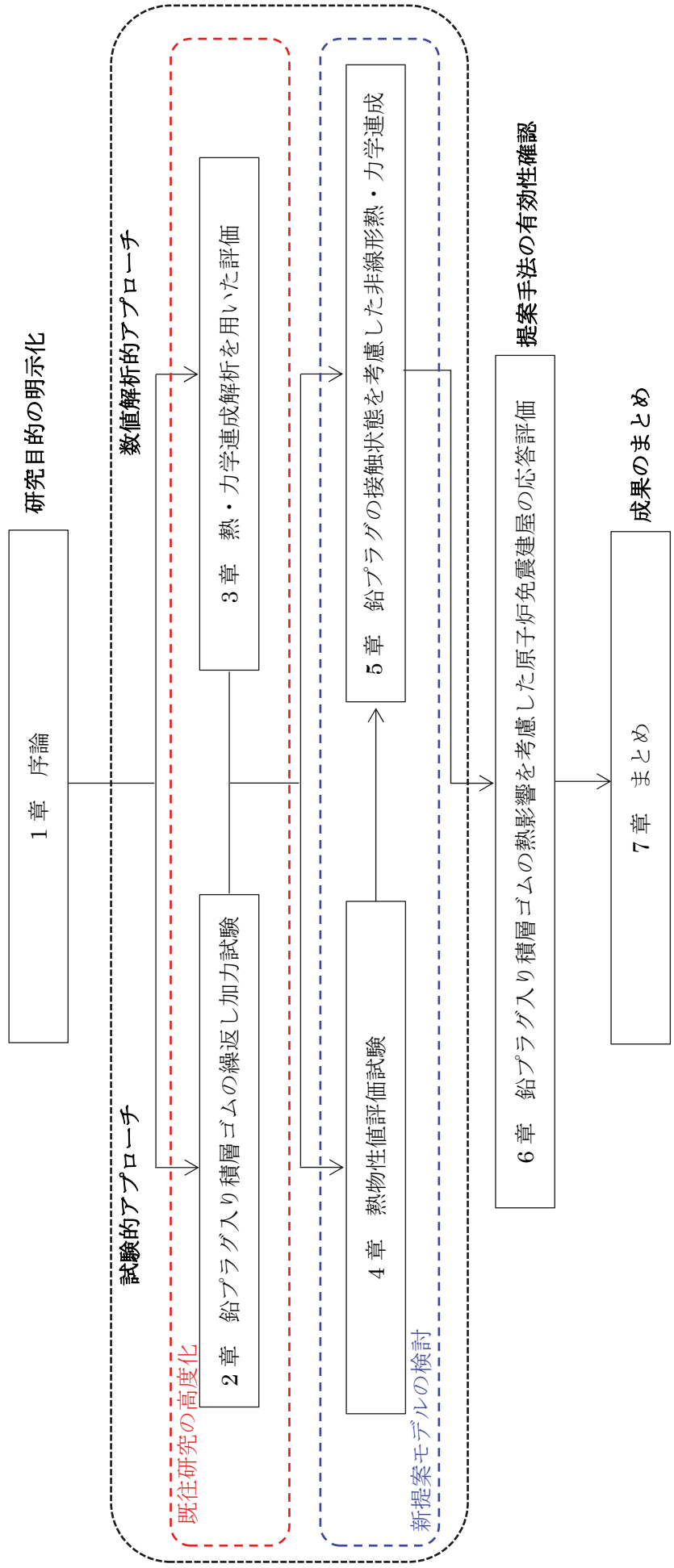


図 1-1 本書の構成

## 【1章 参考文献】

- 1) 日本ゴム協会, 日本免震構造協会: 建築免震用積層ゴム支承ハンドブック, 大應, 2017年6月
- 2) 日本免震構造協会: MENSIN No.105, 2019年7月
- 3) 加藤朝郎, 小山実, 高柳武平, 寺崎浩: FBR 免震型プラントの構築に関する研究 その10 免震層の動的破断試験(積層ゴムの要素試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.1567-1568, 1992年8月
- 4) 廣谷勉, 佐藤邦彦, 平井秀男, 今岡哲男, 中川進一郎, 島本龍: 次世代軽水炉の免震技術の開発その14) 実規模免震装置のハードニング試験(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1251-1252, 2012年9月
- 5) 平木隆文, 金澤健司, 永田聖二, 小杉慎司, 中山尚之, 佐藤邦彦, 平井秀男, 梅木芳人: 原子力施設の免震技術の開発(その5) 実規模免震装置の破断試験(せん断破断における終局特性評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.1137-1138, 2014年9月
- 6) TETSUO KUBO, TOMOFUMI YAMAMOTO, KUNIHICO SATO, MASAKAZU JIMBO, TETSUO IMAOKA<sup>5</sup>, and YOSHITO UMEKI: A SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR REACTOR BUILDING STRUCTURES APPLYING SEISMIC ISOLATION SYSTEM IN A HIGH SEISMICITY REGION –A FEASIBILITY CASE STUDY IN JAPAN–, NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY, VOL.46 NO.5, pp.581-594, 2014.11
- 7) 竹内義高, 梅木芳人, 今岡哲男, 笹島圭輔, 平井秀男, 藪内耕一, 浅原信吾, 吉田伸一: 原子力施設の免震技術の開発(その11) 免震装置及び免震建屋のフラジリティ評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.1149-1150, 2014年9月
- 8) 佐古大, 真下貢, 金谷淳二, 中田達也, 寺山武志: 東北地方太平洋沖地震における福島第二原子力発電所免震重要棟の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1249-1250, 2012年9月
- 9) 山崎敏彦, 瓜生満, 中西龍二, 川井伸泰, 橋村宏彦: 免震構造物の維持管理手法の検討(その3 再処理ユーティリティ施設における積層ゴムの静的変形傾向), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.847-848, 2005年9月
- 10) 湯川正貴, 棟方善成, 中村嶽, 富樫亮仁, 稲葉学, 稲妻祐介: 高減衰積層ゴムを用いた免震建物の免震特性確認試験(その3. 解析的検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.1305-1306, 2013年8月
- 11) Mahaboob Basha Syed, Laurent Patisson, Miguel Curtido, Ben Slee and Sebastien Diaz: The Challenging Requirements of The ITER Anti Seismic Bearings, Nuclear Engineering and Design, Vol.269 pp.212-216, 2014. 4
- 12) Pierre Labbe: Pioneering actual use of seismic isolation for nuclear facilities, 1st Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations, WS2-02, 2010
- 13) 日本免震構造協会: 免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン, 大應, 2005年11月
- 14) 北村春幸: 長周期地震動と免震構造, 日本免震構造協会機関誌 MENSIN No.55号, pp.1-4,

2007年2月

- 15) 湯川正貴, 新宮清志, 平塚聖敏: 同一構造に対して異なる耐震補強を施した重層構造物の減衰特性, 日本建築学会技術報告集, 第16巻 第32号, pp.119-124, 2010年2月
- 16) 日本建築学会: やさしくわかる建物振動制御, 丸善出版, 2014年6月
- 17) 酒井和成, 石丸辰治, 新谷隆弘, 中島徹: 超高層構造物の制震設計に関する基礎的研究(その1. エネルギー吸収率によるTMDの最適化の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.679-680, 1993年9月
- 18) 斉藤賢二, 栗田哲, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した線形粘弾性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御とKelvinモデル化手法に関する考察, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.53B, pp.53-66, 2007年3月
- 19) 石丸辰治, 三上淳治, 秦一平, 古橋剛: D.M.同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻 第652号, pp.1105-1112, 2010年6月
- 20) 古橋剛: モード制御制震法に関する基礎的研究 - 慣性質量増幅装置を用いた地震応答制御法について -, 博士論文, 日本大学, 2006年
- 21) MASARU KIKUCHI, IAN D. AIKEN: AN ANALYTICAL HYSTERESIS MODEL FOR ELASTOMERIC SEISMIC ISOLATION BEARINGS, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 26, pp.215-231, 1997
- 22) 電力中央研究所: 高速増殖炉免震設計法に関する研究, 電力中央研究所報告, 1998年12月
- 23) エネルギー総合研究所: 原子力発電施設への免震技術の適用検討, 公開可能報告書, 2018年12月
- 24) 欄木龍大, 長島一郎, 日比野浩, 新居藍子, 青野翔, 佐藤栄児, 飯場正紀: 大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験 その3 オイルダンパー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.399-400, 2012年9月
- 25) 猿田正明, 山本祥江, 森川和彦, 中西啓二, 飯場正紀, 小豆畑達哉, 井上波彦: 東北地方太平洋沖地震における超高層免震建物の挙動, 日本建築学会技術報告集, 第19巻 第42号, pp.477-480, 2013年6月
- 26) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言), 2016年6月
- 27) 日本建築センター: 時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書, 2016年1月
- 28) 日本免震構造協会: 時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例, 大應, 2018年5月
- 29) 浅原信吾, 乗物丈巳, 清水弘, 神保雅一, 池田正樹, 廣谷勉, 梅木芳人: 原子力施設の免震技術の開発(その33) 開発成果の概要(その2) 免震建屋の設計・評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1359-1360, 2016年8月
- 30) 竹中康雄, 近藤明洋, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 仲村崇仁: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻 第646号, pp.2245-2253, 2009年12月
- 31) 近藤明洋, 竹中康雄, 高岡栄治, 引田真規子, 兵頭陽, 北村春幸: 鉛入り積層ゴムの熱・力学

- 連成挙動を考慮した応答解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 卷 第 753 号, pp.1595-1605, 2018 年 11 月
- 32) 村松晃次, 日比野浩, 猪野晋, 栗栖藍子, 小室努, 仲村崇仁, 和氣知貴: 太径鉛プラグ入り積層ゴム支承の繰返し載荷試験, 日本建築学会技術報告集, 第 22 卷 第 52 号, pp.987-992, 2016 年 10 月
- 33) 国土交通省: 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討, 平成 24 年度建築基準整備促進事業 成果概要, 調査番号 27-3, 2013 年
- 34) 竹中康雄, 近藤明洋, 引田真規子, 梶原浩一, 田原健一, 高山峯夫, 飯場正紀: 大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験 その 5: 鉛プラグ入り積層ゴム実験結果の分析およびシミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.343-344, 2013 年 8 月
- 35) 和氣知貴, 菊地優, 石井建, 黒嶋洋平, 仲村崇仁: 繰返し加力を受ける鉛プラグ入り積層ゴム支承の降伏荷重評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 卷 第 750 号, pp.1105-1115, 2018 年 8 月
- 36) 黒嶋洋平, 石井建, 菊地優, 飯場正紀, 白井和貴: 熱・力学的連成挙動を考慮した免震建物の地震応答解析, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.63B, pp.1-9, 2017 年 3 月
- 37) 中山尚之, 近藤明洋, 清水弘, 平井秀男, 朝倉伸治, 中川進一郎, 島本龍: 次世代軽水炉の免震技術の開発 (その 15) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた継続時間の長い地震動に対する免震装置の熱的影響評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.1253-1254, 2012 年 9 月
- 38) Tomotaka Wake, Masatu Kikuchi, Ken Ishii: Strength Degradation in Lead-Rubber Bearings during a Long-duration Earthquake, NZSEE Conference, O4B.2, 2017.4
- 39) 建築研究所: 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討—南海トラフ 4 連動地震による超高層・免震建物の応答解析—, 建築研究資料, No.147, 2013 年 9 月
- 40) 建築研究所: 免震部材の多数回繰返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究, 建築研究資料, No.170, 2016 年 4 月
- 41) ブリヂストン: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化(ブリヂストン鉛プラグ挿入型積層ゴム支承), 日本建築センター, 評定書, BCJ 評定-IB0012-01, 2017 年 5 月
- 42) オイレス工業: 周期地震動に対する免震材料の性能変化(オイレス式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承, オイレス式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承(G3)), 日本建築センター, 評定書, BCJ 評定-IB0013-01, 2017 年 9 月
- 43) 竹内貞光, 中島陽, 山下忠道, 伊藤真二, 犬伏徹志, 白山敦子: 南海トラフ地震における免震部材の繰返し特性変化を考慮した免震建物の応答性状 —簡略法を用いた免震部材の組み合わせによる検討—, 日本建築学会技術報告集, 第 25 卷 第 59 号, pp.97-102, 2019 年 2 月
- 44) 中島陽, 白山敦子, 竹内貞光, 伊藤真二, 山下忠道: 基礎免震建物の長周期地震動に対する簡易応答評価法の精度検証 (その 1 高減衰ゴム系積層ゴム支承のケース), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.177-178, 2019 年 9 月
- 45) 可児長英, 岩部直征, 高山峯夫, 森田慶子, 和田章: 天然ゴム系・高減衰型・鉛プラグ入り積層ゴム入り積層ゴムのオフセットせん断—引張特性試験 (その 1) 試験計画の概要, 日本建築

学会大会学術講演梗概集（中国），pp.559-560, 1999年9月

- 46) 池田正樹, 今岡哲男, 金澤健司, 藪内耕一, 山本知史, 神保雅一, 梅木芳人:原子力施設の免震技術の開発（その 25）実規模免震装置の破断試験（破断曲面に関する詳細評価）, 日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）, pp.1343-1344, 2016年8月



## 2. 鉛プラグ入り積層ゴムの繰返し加力試験

### 2.1 試験体

本研究では、繰返し変形による LRB 内部の温度変化を計測することを目的としているため、鉛プラグで生じた発熱により、積層ゴム部やフランジ鋼板で有意な温度変化が確認できるように、軽水炉免震研究<sup>1)2)</sup>で使用されるφ1600mmの大口徑LRBではなく、比較的小徑であるφ500mmのLRBを試験体に選定した。軽水炉免震建屋では、原子炉建屋とタービン建屋を繋ぐ渡り配管の許容変形量や原子力免震構造設計技術指針<sup>3)</sup>(JEAG4614)において規定された設計限界ひずみ(線形限界ひずみの1/1.5)以下に応答変位を低減するため、高い減衰性能が求められることから、鉛プラグ径が装置径の1/4程度となる太徑の鉛プラグを挿入している。そこで、本研究でもφ125mmの太徑プラグを用いることとした。装置形状は、座屈が生じず、安定的な履歴形状が得られるように、2次形状係数5.0以上を確保した。また、ゴム材料は、免震周期をより長周期化できるように、比較的低剛性であるG4ゴム(せん断弾性率0.392N/mm<sup>2</sup>)を使用することとした。試験体の諸元を表2-1に、試験体の寸法を図2-1に、試験体の外観を写真2-1に示す。

表 2-1 試験体の諸元

項目	仕様
ゴム種	G4
装置外径 (mm)	500
鉛プラグ径 (mm)	125
ゴム単層厚 (mm)	3.0
ゴム総数 (層)	33
中間鋼板厚 (mm)	2.2
1次係数係数	41.7
2次形状係数	5.1
降伏震度	0.12

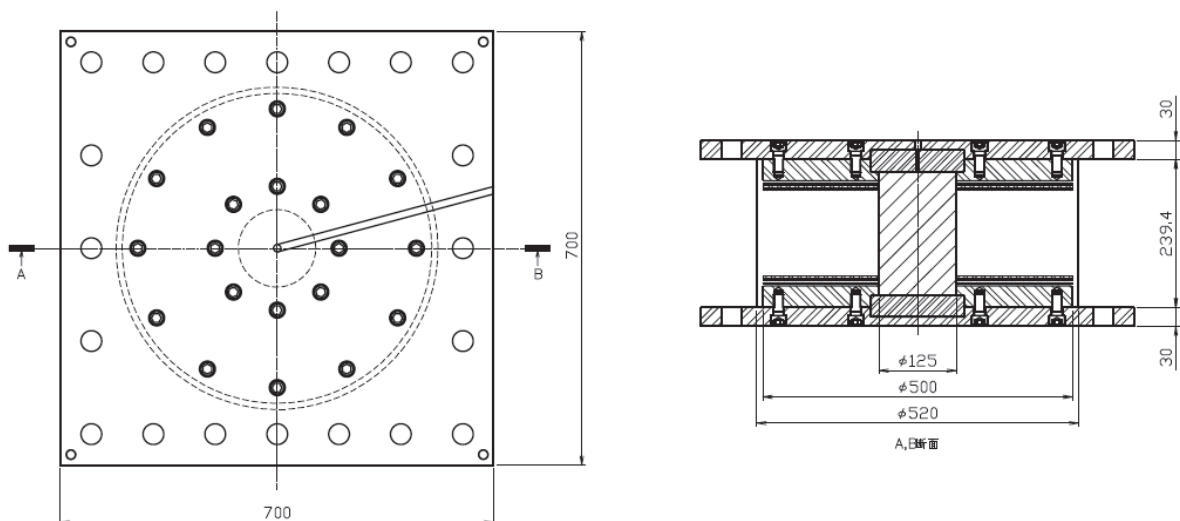


図 2-1 試験体の寸法



写真 2-1 試験体の外観（左）と試験機設置状況（右）

試験体は、線形限界近傍のひずみレベル（せん断ひずみ  $\gamma=200\sim300\%$ ）や過大な経験変形量（80m 程度）を受けることから、力学特性の変化や熱電対の破損が生じる可能性があるため、4体使用することとした。各試験体の出庫試験結果を表 2-2 に、履歴曲線を図 2-2 に示す。なお、出庫試験は面圧  $-5.0\text{N/mm}^2$ （本研究では、引張領域の面圧を正、圧縮領域の面圧を負として記載する）、せん断ひずみ 100%、4 サイクル加力とし、表 2-2 で示す物性値は、JIS K 6410-2<sup>4)</sup>に基づき 3 サイクル目の履歴曲線から算出している。2 次剛性は水平最大振幅の 1/2 区間における上部・下部回帰直線の傾きの平均値とし、降伏荷重は同区間における回帰直線の上側切片荷重と下側切片荷重の平均値とする。物性値の算出方法を図 2-3 に示す。また、温度によるばらつきを排除するため、試験体の表面温度を使用して試験結果を補正する。降伏荷重の算出方法および温度補正式を式 2-1、式 2-2 に、2 次剛性の算出方法および温度補正式を式 2-3、式 2-4 に示す<sup>5)</sup>。

表 2-2 より、全ての試験体は装置メーカーが定める製造ばらつきの範囲内（ $\pm 15\%$ ）に収まっている。また、図 2-2 より、履歴曲線は概ね一致していることから、各装置の力学特性は殆ど同じになることが確認できる。

$$Kd(t) = \frac{Kd_u + Kd_b}{2} \quad (2-1)$$

$$Kd(t_0) = Kd(t) \times \exp\{0.00271 \times (t_0 - t)\} \quad (2-2)$$

ここで、

$Kd(t)$  : 計測 2 次剛性

$Kd(t_0)$  : 温度補正後の 2 次剛性

$Kd_u$  : 水平最大振幅 ( $\delta$ ) の 1/2 区間における上側回帰直線の傾き

$Kd_b$  : 水平最大振幅 ( $\delta$ ) の 1/2 区間における下側回帰直線の傾き

$t$  : 計測温度

$t_0$  : 補正温度 (20°C)

$$Kd(t) = \frac{|Qd_u| + |Qd_b|}{2} \quad (2-3)$$

$$Qd(t_0) = Qd(t) \times \exp\{0.00879 \times (t_0 - t)\} \quad (2-4)$$

ここで、

$Qd(t)$  : 計測降伏荷重

$Qd(t_0)$  : 温度補正後の降伏荷重

$Qd_u$  : 水平最大振幅 ( $\delta$ ) の 1/2 区間における上側切片荷重

$Qd_b$  : 水平最大振幅 ( $\delta$ ) の 1/2 区間における下側切片荷重

表 2-2 出庫試験結果の一覧

試験体番号	表面温度 (°C)	2次剛性 (kN/mm) [設計値 : 0.791kN/mm]		降伏応力 (kN) [設計値 : 97.83kN]	
		試験結果	対設計値	試験結果	対設計値
試験体 1	20.3	0.748	-5.5%	90.50	-7.5%
試験体 2	18.9	0.740	-6.5%	91.02	-7.0%
試験体 3	18.5	0.730	-7.7%	90.34	-7.7%
試験体 4	15.5	0.743	-6.1%	91.99	-6.0%

表中の物性値は、式 2-2 および式 2-4 を用いて補正した値である。

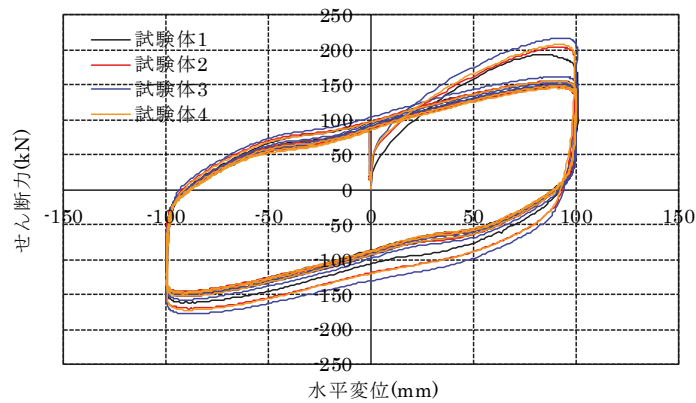


図 2-2 出庫試験の履歴曲線

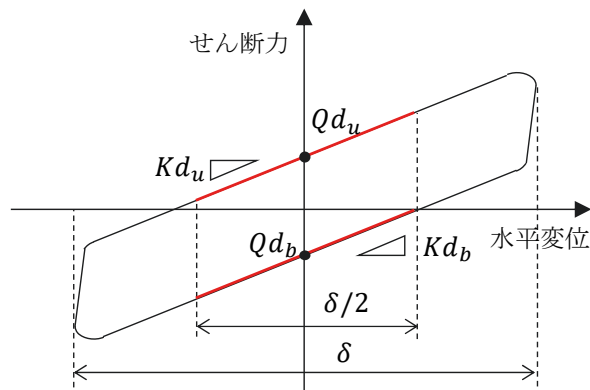


図 2-3 物性値の算出方法

## 2.2 試験装置

### 2.2.1 試験機

試験機は、オイレス工業株式会社 足利事業所の 3000kN (300ton) 二軸試験機を用いる。鉛直荷重の計測は鉛直アクチュエーターに取り付けたロードセルにて行う。鉛直変位の計測は上下面盤間に設けたひずみゲージ式変位計にて行う。水平力の計測は試験機上面盤内に設けたロードセルにて行うため、試験体の水平力は加力テーブルの摩擦力を排除した計測が可能である。また、水平変位は上下面盤間に設置したレーザー変位計にて計測する。試験機の加力性能を表 2-3 に、試験機および計測器の模式図を図 2-4 に示す。

本試験では、LRB 内部における熱移動経路の評価を目的とすることから、試験機への熱伝導を最小限に抑えるため、試験体と試験機の間には断熱板を挿入している。断熱板には、硬質断熱材である D・M・E (アルミニウムカーボネイト+ガラスファイバー+不飽和ポリエステル) を使用する。

表 2-3 試験機の加力性能

項目	性能
最大鉛直力	3000kN (引張 1000kN)
最大水平力	700kN (静的 1000kN)
水平最大変位	500mm
水平最大速度	200cm/s

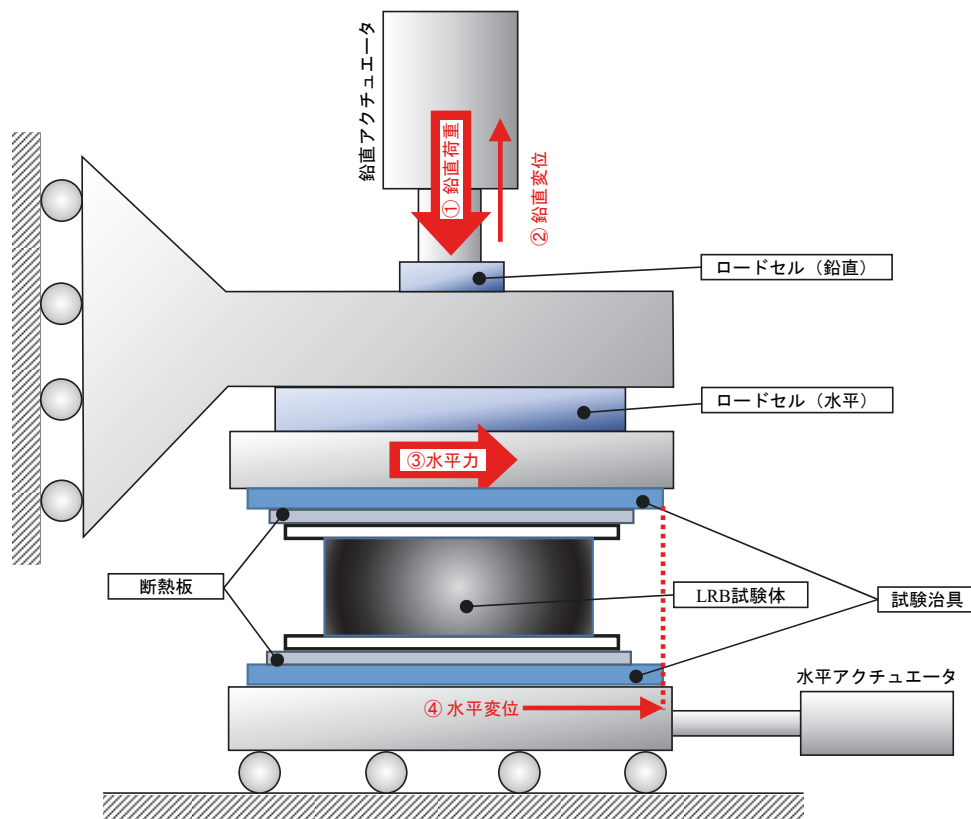


図 2-4 試験機および計測器の模式図

## 2.2.2 熱電対

LRB 内部の温度計測は、装置内部に配置したシース T 熱電対（φ 1.6mm）6 個と装置表面および試験機周辺に配置した被覆型 T 熱電対 2 個を使用する。熱電対の設置位置は、装置の半径方向に対して鉛プラグ中央部、鉛プラグ外周部、積層ゴム内周部、積層ゴム中間部及び被覆ゴム表面部の合計 5 点に設置し、鉛直方向に対して鉛プラグ頂部及びキープレート頂部の合計 2 点に設置することで、装置全体の温度変化を測定することが可能である。鉛プラグの外周部に設置する熱電対は、鉛プラグ径の 2/3 に設置している。これは、鉛プラグ内部の温度分布を確認するに当たって、鉛プラグの発熱範囲が鉛プラグ径の 2/3 より内側の範囲であるとの報告<sup>6)</sup>があったためである。熱電対の設置位置を表 2-4 と図 2-5 に、熱電対の写真を写真 2-2 に示す。

内部に設置する熱電対は、積層ゴムのドリルで穿孔して挿入する。穿孔径は、対象位置の温度を正確に計測できるように計測部を小径に加工している。熱電対は挿入後にシール材で固定するが、経験変位量の増大に伴い抜出しが生じるため、例えば、鉛プラグ外周部の熱電対が積層ゴム部まで移動するなど、計測対象の温度変化を記録することが困難となる場合がある。そこで、加力試験終了毎に抜出し量を計測して、各試験の温度測定位置を明確にするとともに、過大な抜出しが生じた熱電対を押込むことで計測位置を修正し、再度シール材にて固定している。積層ゴムの穿孔位置は、加力方向直交方向から角度を振って配置し、装置のせん断変形による熱電対の断線が極力発生しないように配慮している。なお、断線の可能性が最も高い鉛プラグ中心位置の穿孔位置は、加力方向に直交して配置した。

表 2-4 熱電対の設置位置と凡例

設置部位	設置位置	凡例
鉛プラグ	中央部	Lead Cen.
	外周部	Lead O.S.
	頂部	Lead Top
積層ゴム	内周部	Rub. I.S.
	中央部	Rub. Cen.
	表面部	Rub. Suf.
フランジ	キープレート頂部	Flange
雰囲気温度	—	Ambi.

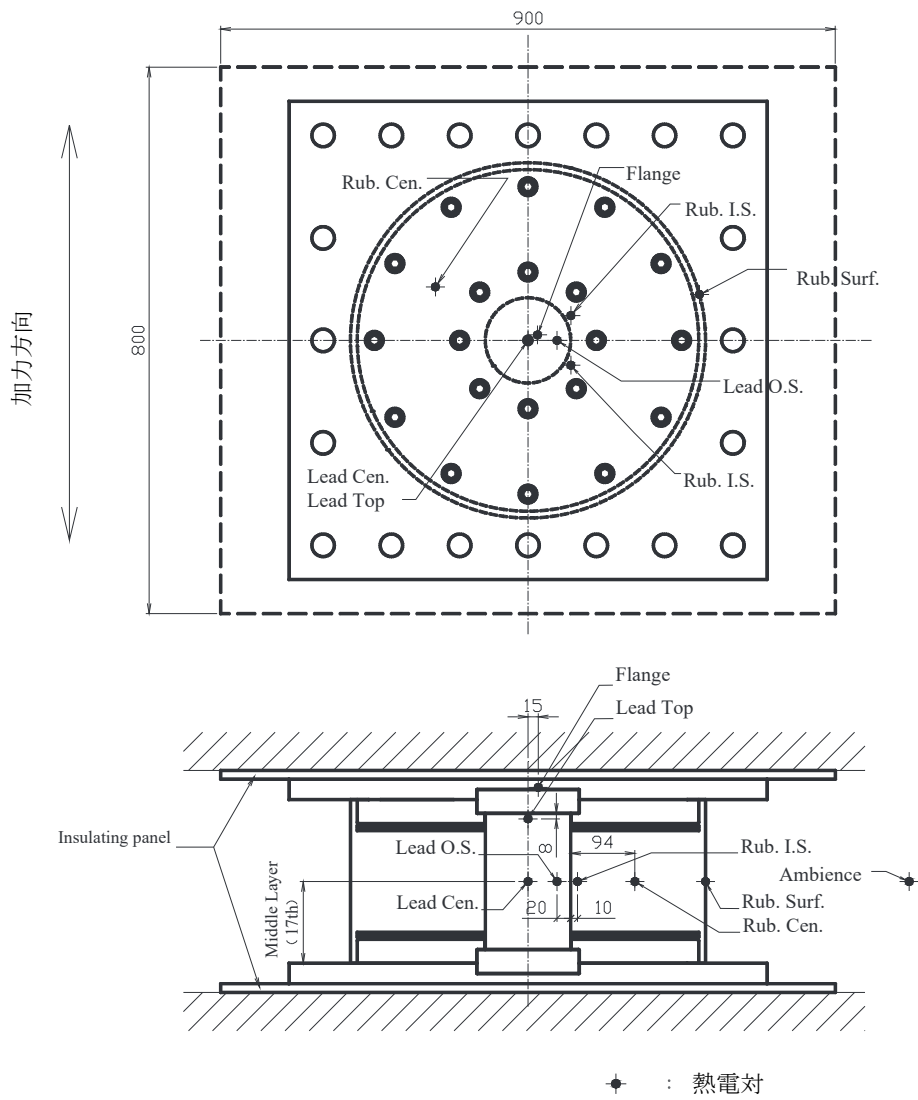


図 2-5 熱電対の設置位置



写真 2-2 熱電対の外観

## 2.3 試験方法

ここでは、繰返し加力試験の加力方法と計測方法について示す。使用する試験体と試験ケースの対応を表 2-5 に、計測作業のフローを図 2-6 に示す。

本試験では、LRB を対象として、熱影響に対する速度依存性、ひずみ依存性および面圧依存性の確認、地震時における熱影響および履歴特性の確認、水平方向・鉛直方向の 2 方向同時加力による熱影響および履歴特性の確認を行う。

計測データは、荷重、変位、および温度を同じデータロガーで記録することで、時刻歴を同期させている。計測のサンプリングについて、加力中および加力終了から約 2 分間は 1 サイクルのデータ点数が 500 点となるように設定している。但し、地震応答波は 0.01s に固定している。一方、加力終了後はサンプリング間隔を 1s に変更し、温度計測のみを実施している。

加力ステップ終了後、次の加力ステップに移行する際は、前ステップの熱影響を極力排除するため、鉛プラグの中心温度が 20℃を下回るまでのインターバルを設けている。また、ひずみレベルが更新されるごとに基本特性試験を実施し、試験体のへたり（履歴特性の変化）が無いことを確認した後に、次の加力ステップを実施する。なお、基本特性試験の加力方法は、出庫試験と同じとした。上記の計測方法を採用することで、繰返し加力による影響を受けない、信頼性の高いデータ取得が可能となった。

表 2-5 試験体と試験ケースの対応

試験体番号	試験内容	試験ケース
試験体 1	正弦波繰返し加力試験 (速度依存性、ひずみ依存性)	試験ケース 1
試験体 2	正弦波繰返し加力試験 (面圧依存性、ひずみ依存性)	試験ケース 2
試験体 3	地震応答波加力試験	試験ケース 3
試験体 4	水平方向・鉛直方向の 2 方向同時加力試験	試験ケース 4

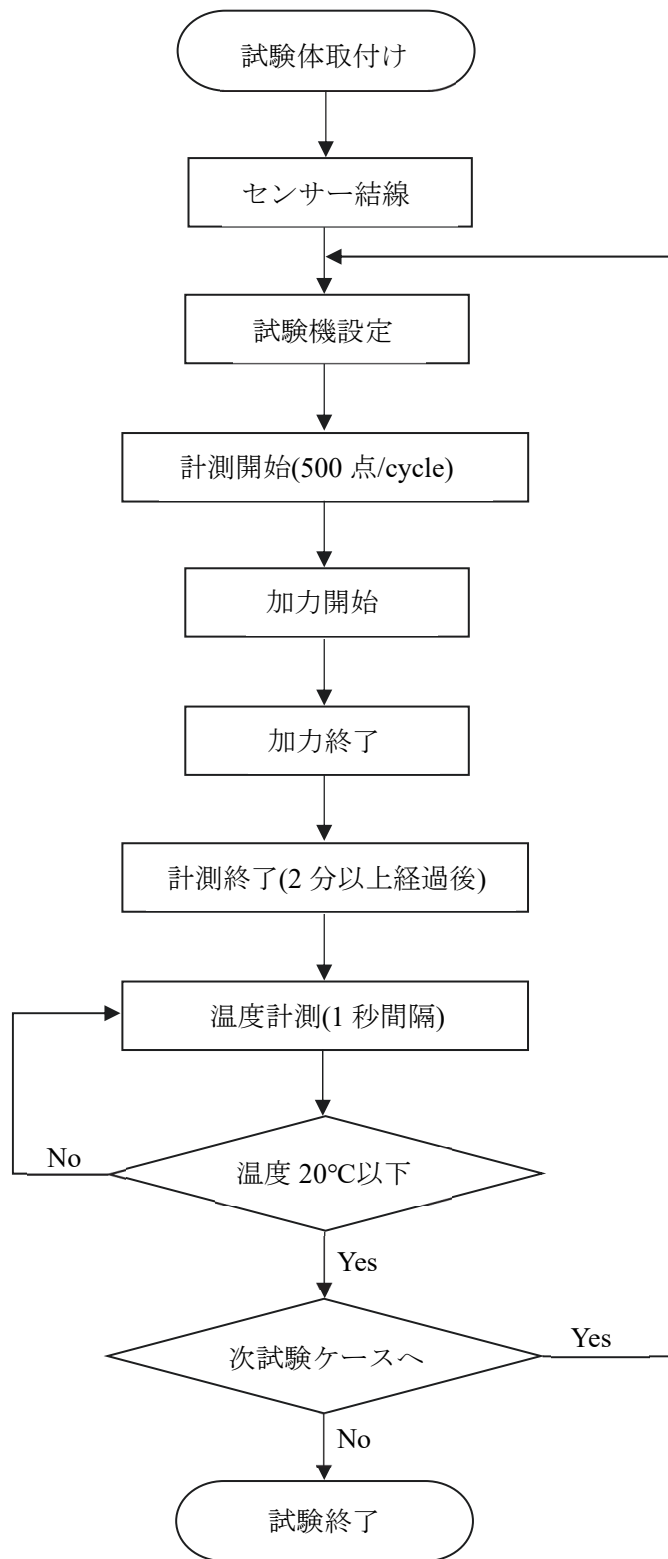


図 2-6 計測作業のフロー図



### 2.3.1 試験ケース 1

試験ケース 1 では、正弦波加力を行い、熱影響の速度依存性とひずみ依存性を確認する。各試験ケースの加力条件を表 2-6 に示す。

試験ケース 1-1~1-3 ではせん断ひずみ 100%、試験ケース 1-5~1-7 ではせん断ひずみ 150%、試験ケース 1-9~1-11 ではせん断ひずみ 200%とし、各々の最大加力速度を 1.5cm/s、12.4cm/s、20.5cm/s に変更して正弦波繰返し加力を実施する。せん断ひずみが異なる際に加力速度を一定にするため、加力振動数を変更しており、出庫試験で使用される静的加力 (0.024Hz)、一般建築で用いられる免震周期相当<sup>7)</sup>である 5.0s (0.2Hz)、軽水炉免震研究で用いられる免震周期相当<sup>8)</sup>である 3.0s (0.33Hz) に設定した。加力振動数ではなく、最大加力速度を一定としたのは、瞬間入力エネルギー量を同じとして鉛プラグの発熱量を均一にするためである。なお、本研究では、既往報告<sup>9)</sup>を参考にして加力速度 3.0cm/s 以下を静的加力試験と定義している。面圧は、軽水炉免震研究にて基準面圧とされている $-5.0\text{N/mm}^2$  (MPa) とした。また、繰返し回数は、試験ケース 1-1~1-11 における累積吸収エネルギー量が概ね同じとなり、かつ、経験変位が 100m 以下となるように設定した。試験ケース 1-4、1-8 は、ひずみレベル更新前の基本特性試験である。

表 2-6 試験ケース 1 の加力条件

試験ケース	加力方法	せん断ひずみ (%)	加力速度 (cm/s)	振動数 (Hz)	鉛直面圧 ( $\text{N/mm}^2$ )	繰返し回数 (cycle)	累積変形量 (m)
試験ケース1-1	静的加力	100	1.5	0.02	-5.0	20	7.92
試験ケース1-2	動的加力	100	12.4	0.20	-5.0	20	7.92
試験ケース1-3	動的加力	100	20.5	0.33	-5.0	20	7.92
試験ケース1-4	基本特性	100	1.5	0.02	-5.0	4	1.58
試験ケース1-5	静的加力	150	1.5	0.02	-5.0	15	8.91
試験ケース1-6	動的加力	150	12.4	0.13	-5.0	15	8.91
試験ケース1-7	動的加力	150	20.5	0.22	-5.0	15	8.91
試験ケース1-8	基本特性	100	1.5	0.02	-5.0	4	1.58
試験ケース1-9	静的加力	200	1.5	0.01	-5.0	10	7.92
試験ケース1-10	動的加力	200	12.4	0.10	-5.0	10	7.92
試験ケース1-11	動的加力	200	20.5	0.17	-5.0	10	7.92

### 2.3.2 試験ケース 2

試験ケース 2 では、正弦波加力を行い、熱影響の面圧依存性とハードニング領域を含むひずみ依存性を確認する。各試験ケースの加力条件を表 2-7 に示す。

試験ケース 2-1~2-3 は、せん断ひずみ 100%、加力速度 1.5cm/s、20 サイクルとし、面圧を軽水炉免震研究の基準面圧である $-5.0\text{N/mm}^2$ 、装置メーカーの基準面圧である $-15.0\text{N/mm}^2$ 、面圧が作用しない $0.0\text{N/mm}^2$ に変更して正弦波繰返し加力を行う。

試験ケース 2-1、2-5、2-7 は、加力振動数 0.0024Hz、面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ とし、せん断ひずみを 100%、200%、300%に変更して繰返し加力を行う。積層ゴムの線形限界は 250%程度であるため、せん断ひずみ 300%時はハードニングが発生しているものと考えられる。試験ケース 1 では、加力速度を一定とし、瞬間吸収エネルギー量が同じとなるようにせん断ひずみ量を増減させている

ため、加力振動数が異なっている。そこで、試験ケース 2 では、加力振動数を一定としてせん断ひずみ量を増減させる。

表 2-7 試験ケース 2 の加力条件

試験ケース	加力方法	せん断ひずみ (%)	加力速度 (cm/s)	振動数 (Hz)	鉛直面圧 (N/mm <sup>2</sup> )	繰返し回数 (cycle)	累積変形量 (m)
試験ケース2-1	静的加力	100	1.5	0.02	-5.0	20	7.92
試験ケース2-2	静的加力	100	1.5	0.02	-15.0	20	7.92
試験ケース2-3	静的加力	100	1.5	0.02	0.0	20	7.92
試験ケース2-4	基本特性	100	1.5	0.02	-5.0	4	1.58
試験ケース2-5	静的加力	200	3.0	0.02	-5.0	20	15.84
試験ケース2-6	基本特性	100	1.5	0.02	-5.0	4	1.58
試験ケース2-7	静的加力	300	4.5	0.02	-5.0	20	23.76

### 2.3.3 試験ケース 3

試験ケース 1 および試験ケース 2 では、正弦波入力を使用して LRB の熱影響を確認した。そこで、試験ケース 3 では、ランダム位相および観測波位相を有する地震応答波を使用して、LRB の履歴特性や温度変化を計測する。

使用する地震波は、軽水炉免震研究<sup>10)</sup>にて提示された短周期領域 800cm/s<sup>2</sup>、長周期領域 200cm/s のスペクトル特性に適合させたランダム位相の模擬地震波（スペクトル波）、免震設計において一般的に用いられている告示スペクトル（極めて稀に発生する地震動）<sup>11)</sup>に適合させ、1968 年十勝沖地震の八戸港湾で観測された NS 方向位相特性<sup>12)</sup>を与えた地震波（告示波 八戸位相）、フリングステップによる過大な地動変位が生じた 2016 年熊本地震（本震）において、西原村小森の観測点に設置された気象庁の震度計で観測された EW 方向の西原観測波<sup>13)</sup>（JMA 西原観測波）、国土交通省にて公表されている南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震波のうち、浜岡原子力発電所を含む静岡地方の SZ1 区域で使用する地震波<sup>14)</sup>（南海トラフ地震波 SZ1）の計 4 波とする。

地震応答波は、繰返し加力試験で使用する試験体を模擬した 1 質点系モデルに対して、上記 4 波を入力した時刻歴応答解析を実施し、最大応答せん断ひずみが 200%となるように基準化して作成する。時刻歴応答解析は、Newmark β 法による直接積分法を使用し、積分間隔は地震波の入力時間刻みを 1/20 倍した値とする。収束判定は、残差ノルム 0.01、残差ベクトル 0.01 以下とし、残差力は次ステップに持ち越している。解析モデルは、積層ゴムを弾性ばね、鉛プラグを完全弾塑性の MSS（Multi-shear spring）<sup>15)</sup>でモデル化し、熱影響による減衰性能の低下は考慮していない。MSS は平面内を 12 等分するように 6 本設置し、鉛プラグの降伏応力度は 8.33N/mm<sup>2</sup>とした。積層ゴムの材料減衰は 2.0%とし、鉛プラグは履歴減衰のみ考慮する。

各解析ケースの加力条件および地震応答波の諸元を表 2-8 に、加速度応答スペクトルを図 2-7 に、エネルギースペクトルを図 2-8 に、時刻歴波形を図 2-9～図 2-12 に示す。なお、時刻歴波形、加速度応答スペクトルおよびエネルギースペクトルは基準化前の原波を示しており、試験機の出力は原波に表 2-8 で示す入力倍率を乗じた値となる。また、時刻歴応答解析で使用する解析モデルの諸元を図 2-13 に示す。

表 2-8 地震応答波の諸元

試験 ケース	地震波名称	最大加速度*1 (cm/s <sup>2</sup> )	累積変形量*2 (m)	継続時間 (s)	入力倍率
3-2	スペクトル波	801	17.8	125.79	0.41
3-3	告示波 八戸位相	334	10.5	163.83	2.23
3-4	JMA 西原観測波	770	11.7	119.99	0.20
3-5	南海トラフ地震波 SZ1	282	27.9	655.34	1.51

試験ケース 3-1 は、基本特性試験を実施する。

\*1：原波（基準化前）の最大入力加速度を示す。

\*2：原波（基準化前）の最大応答値を示す。

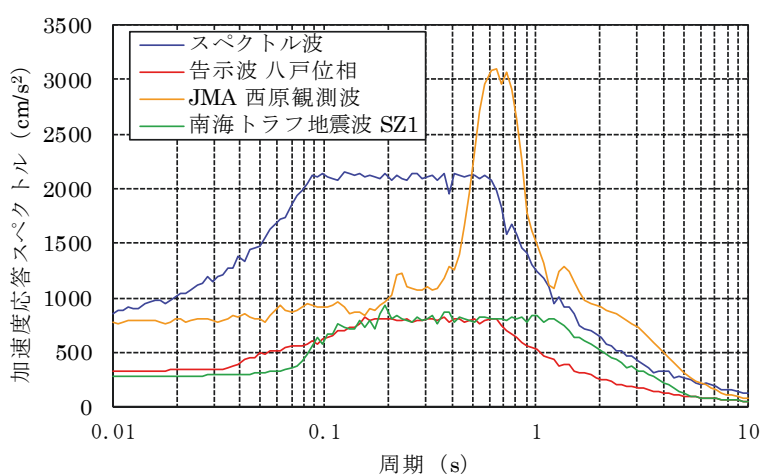


図 2-7 加速度応答スペクトル

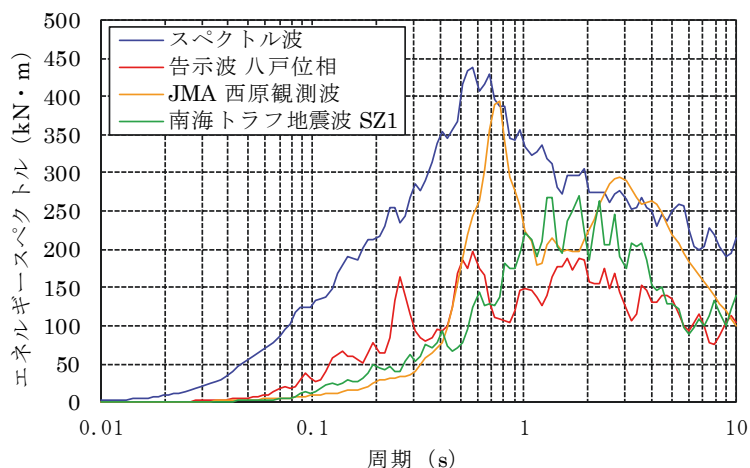


図 2-8 エネルギースペクトル

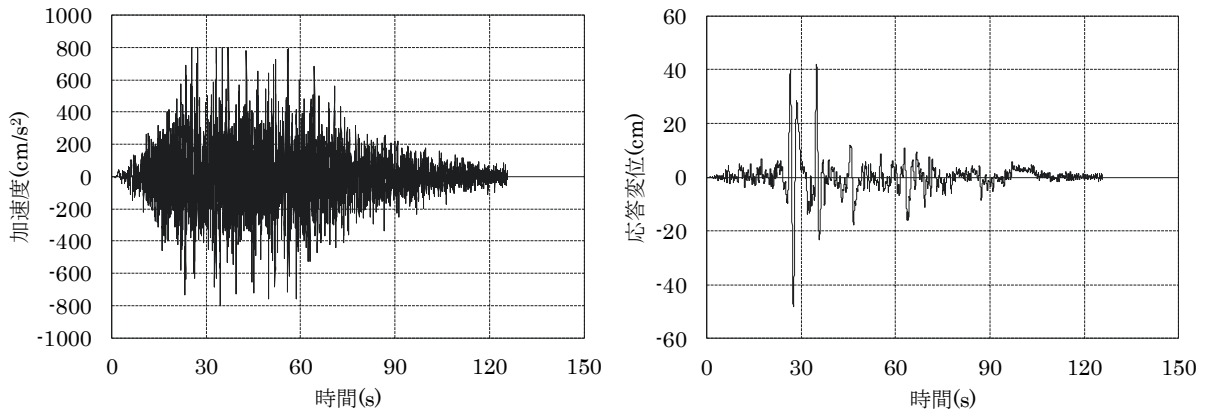


図 2-9 スペクトル波の時刻歴波形 (左：入力加速度、右：地震応答波)

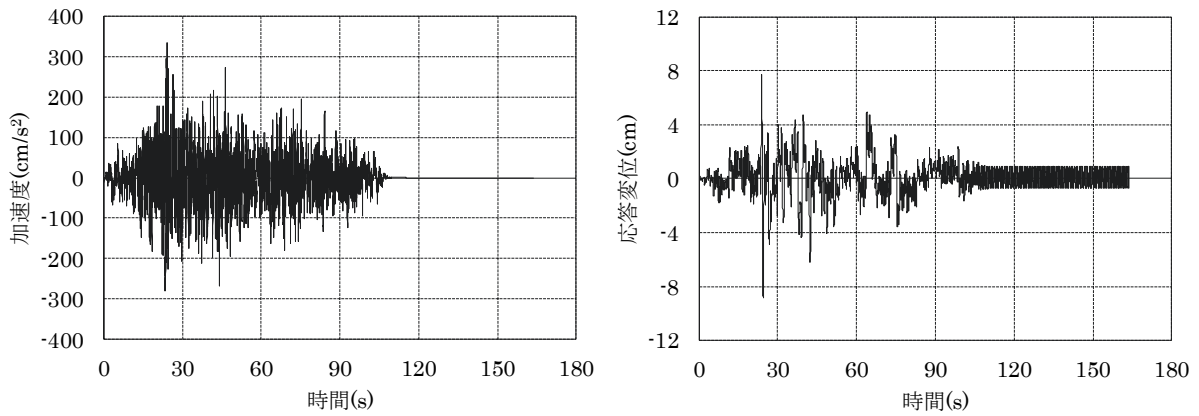


図 2-10 告示波 八戸位相の時刻歴波形 (左：入力加速度、右：地震応答波)

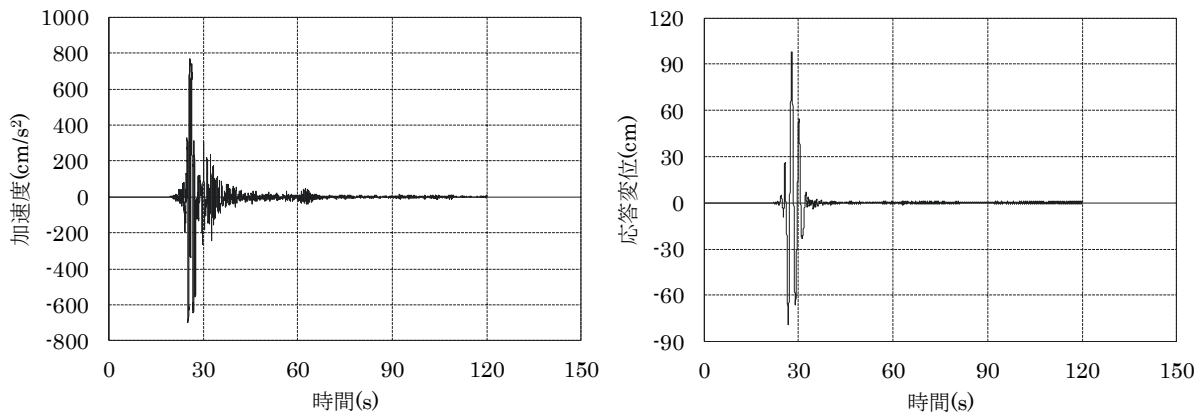


図 2-11 JMA 西原観測波の時刻歴波形 (左：入力加速度、右：地震応答波)

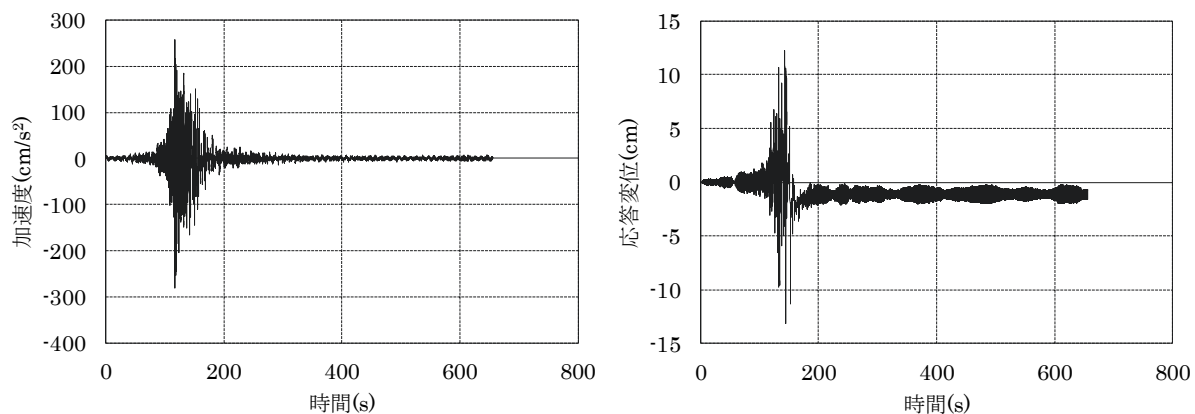


図 2-12 南海トラフ地震波 SZ1 の時刻歴波形（左：入力加速度、右：地震応答波）

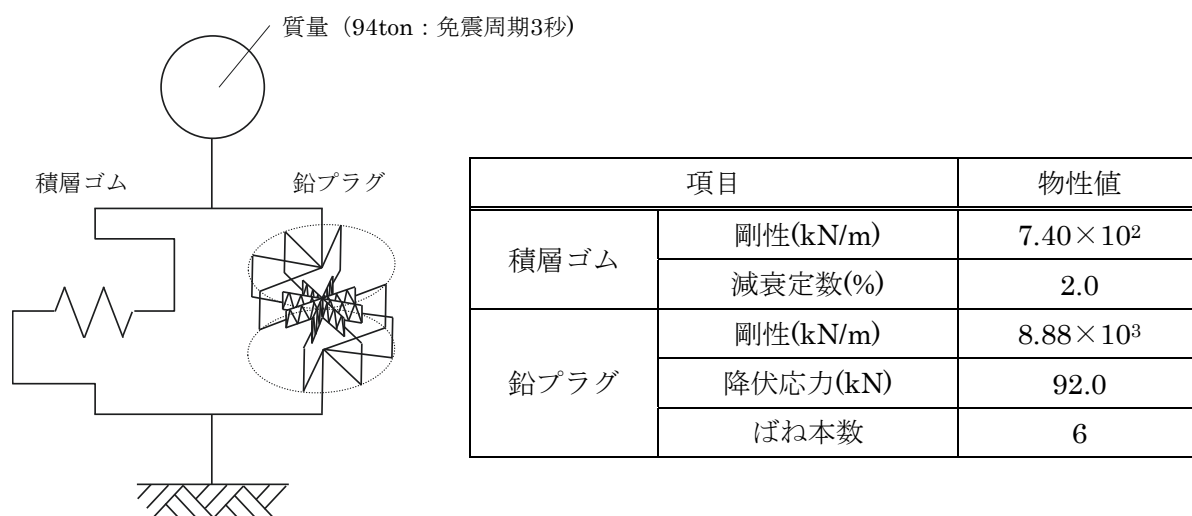


図 2-13 解析モデルの概要

#### 2.3.4 試験ケース 4

LRB は、圧縮領域では積層ゴムの形状効果により剛性・強度が高いものの、引張領域では圧縮領域と比較して剛性・強度が著しく低下する<sup>16)</sup>ことから、免震設計時において、極力 LRB に引張力が作用しないよう配慮されている。しかし、入力地震動レベルが大きい原子力免震施設やアスペクト比が大きい高層免震建屋などでは、水平地震動によるロッキング応答や鉛直地震動によって引張変形が生じる場合がある。

JEAG4614 では、地震荷重に対する許容限界をせん断ひずみと面圧により規定している。許容限界は、線形限界に対して 1.5 以上の安全余裕を見込むこととされているが、経年変化、温度変化および製造ばらつきを考慮する場合は線形限界とすることができる。ここで、引張領域の線形限界は引張面圧が  $1.0\text{N/mm}^2$  相当となることが知られており、設計範囲内において、免震装置が圧縮領域と引張領域を跨いだ状態となる。しかし、面圧一定条件下でのせん断載荷試験やオフセットせん断ひずみを与えた状態での鉛直載荷試験などは数多く実施されている<sup>17)18)</sup>ものの、水平方向加振と鉛直方向加振を逐次変動させた同時載荷試験の報告<sup>19)</sup>は限られている。また、圧縮域と引張域を跨いだ同時載荷試験は殆ど行われておらず、装置内部の温度変化を計測した例は著者の知る限り無い。

そこで、免震層の端部に配置された LRB に水平地震動によるロッキング応答が作用する状態を想定し、圧縮領域と引張領域を跨いだ水平方向および鉛直方向の 2 方向同時入力による正弦波加力試験を実施する。LRB の基準面圧は $-5.0\text{N/mm}^2$ とし、引張領域の線形限界である $1.0\text{N/mm}^2$ から $-11.0\text{N/mm}^2$ まで面圧を変動させる。また、最大せん断ひずみは線形限界である 250%と 1.5 の安全余裕を見込んだ 167%とする。試験ケース 4-2、試験ケース 4-4 では水平方向加力と鉛直方向加力を同位相とし、試験ケース 4-3、試験ケース 4-4 では水平方向を動的加力、鉛直方向を静的加力（別位相）とする。免震建屋において、鉛直方向の応答増加を低減するため、鉛直剛性は水平剛性よりも高く設定することが一般的であるが、試験機の加力性能から、鉛直方向加力に免震周期相当の動的力を与えることが出来なかった。また、JEAG4614 では、引張面圧にも 1.5 の安全余裕を見込むことが規定されているが、試験機の荷重制御が難しいことから、いずれも $1.0\text{N/mm}^2$ まで加力を行っている。各試験ケースの加力条件を表 2-9 に、時刻歴の加力波形を図 2-14 および図 2-15 に、加力方法の概要を図 2-16 に示す。

表 2-9 各試験ケースの加力条件

試験ケース	加力方法	せん断ひずみ (%)	加力速度 (cm/s)	振動数 (Hz)	鉛直面圧 ( $\text{N/mm}^2$ )	繰返し回数 (cycle)
試験ケース4-1	基本特性	100	水平:1.5	0.02	-5	4
試験ケース4-2	同時入力	167	水平:2.5	水平:0.02 鉛直:0.02	-5 (-6/+6)	水平:4 鉛直:4
試験ケース4-3		167	水平:49.9	水平:0.48 鉛直:0.02	-5 (-6/+6)	水平:20 鉛直:1
試験ケース4-4		250	水平:3.7	水平:0.02 鉛直:0.02	-5 (-6/+6)	水平:4 鉛直:4
試験ケース4-5		250	水平:74.6	水平:0.48 鉛直:0.02	-5 (-6/+6)	水平:20 鉛直:1
試験ケース4-6		基本特性	100	水平:1.5	0.02	-5

\*試験ケース 4-6 は、試験ケース 4-5 の加力ステップ終了後に 1 日程度放置し、前ステップまでの発熱影響が殆ど無い状態で加力を行っている。

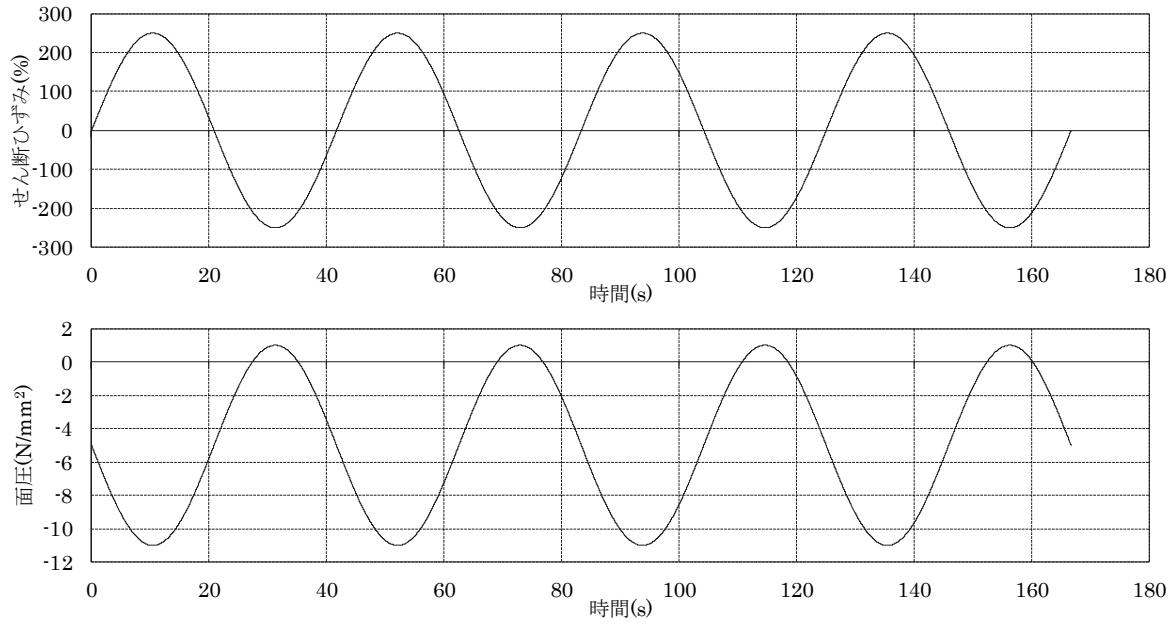


図 2-14 試験ケース 4-4 の時刻歴加力波形（上：水平方向、下：鉛直方向）

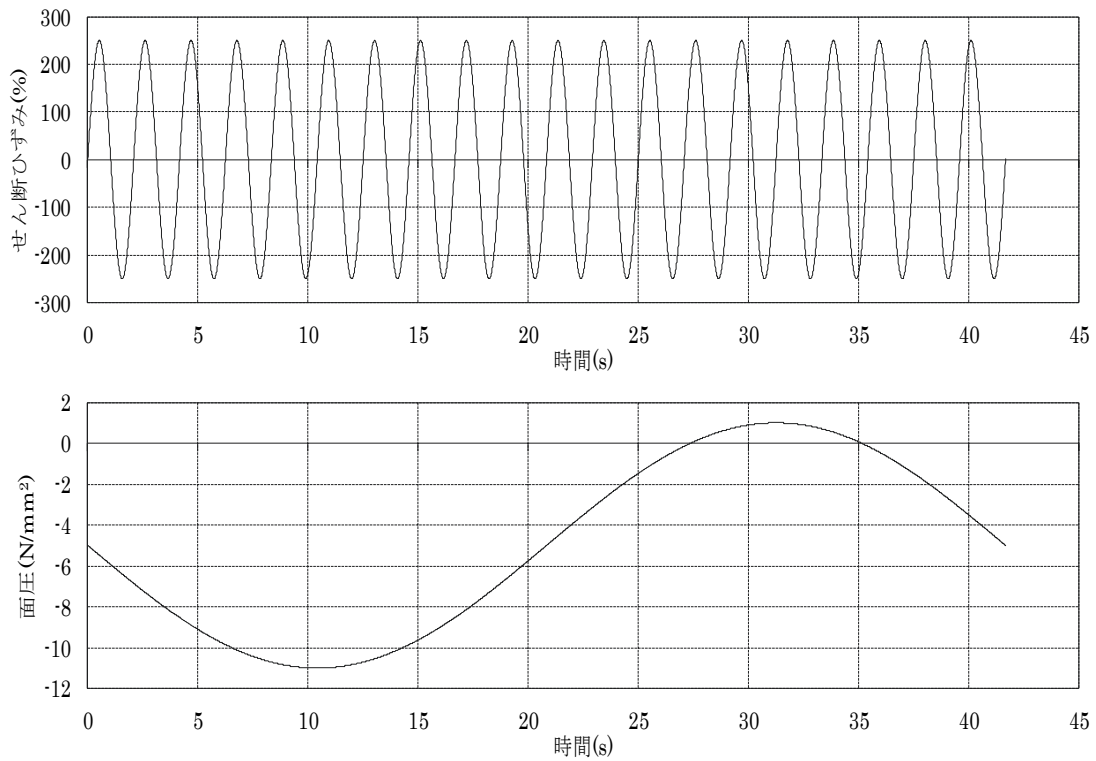


図 2-15 試験ケース 4-5 の時刻歴加力波形（上：水平方向、下：鉛直方向）

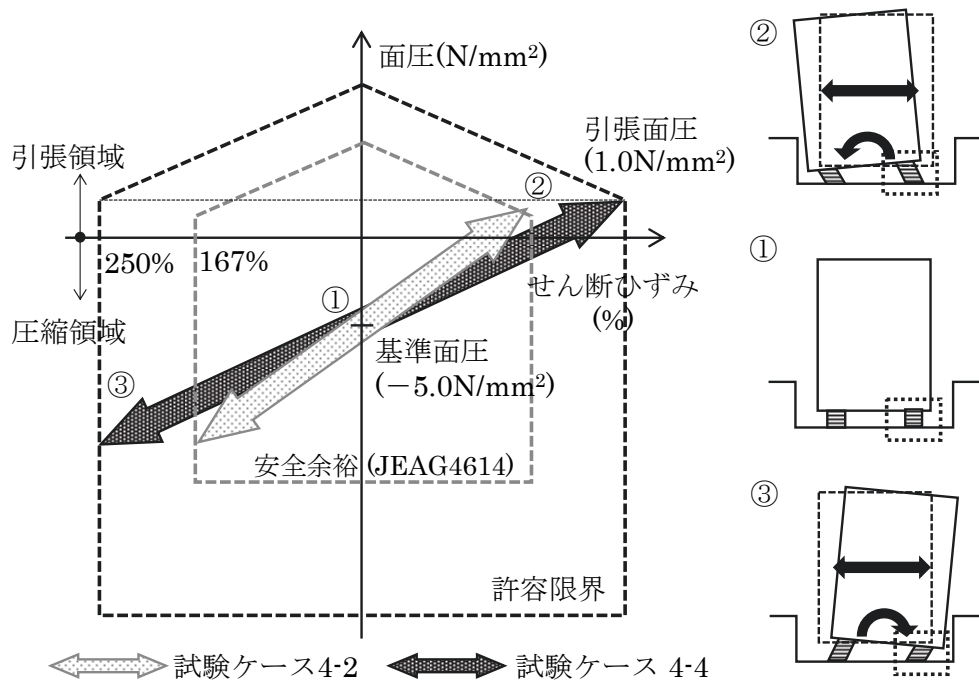


図 2-16 試験方法の概要



## 2.4 試験結果

ここでは、繰返し加力試験の試験結果を示すと共に、繰返し加力に伴う LRB の熱影響評価を行う。2.4.1 項では、加力試験から得られた物性値の変化を示すとともに、繰返し加力による温度変化と履歴特性を確認する。2.4.2 項では、試験結果を分析することで、熱影響による LRB の健全性評価、エネルギー評価を用いた鉛プラグの発熱範囲と熱移動経路の検討、速度、変位および面圧に対する依存性の確認、放熱特性の分析を行う。

### 2.4.1 試験結果の整理

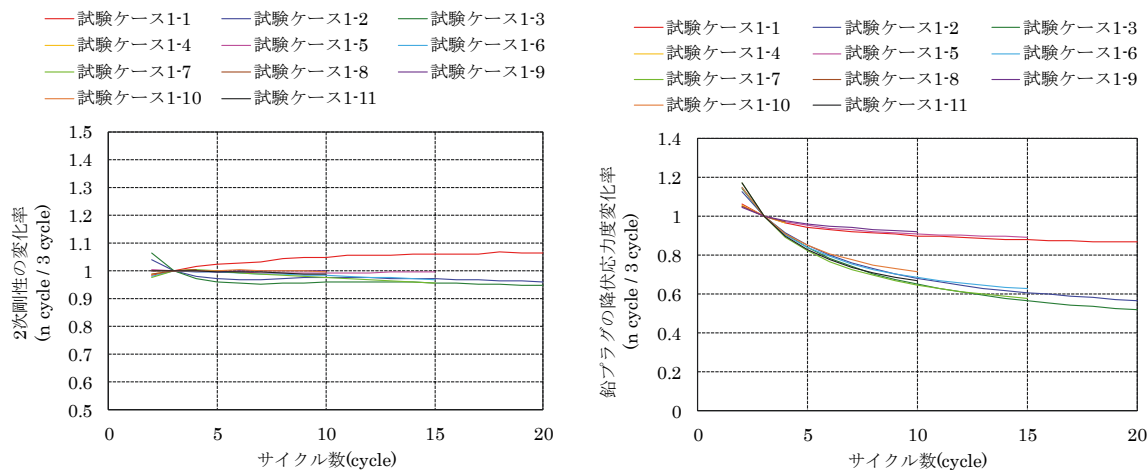
#### (1) 試験ケース 1

試験ケース 1 の繰返し加力試験から得られた LRB の物性値変化について、出庫試験と基本特性試験との比較を表 2-10 に、各サイクルの 2 次剛性および鉛プラグにおける降伏応力度の変化率を図 2-17 に示す。なお、出庫試験および基本特性試験の物性値は 3 サイクル目の加力結果を使用し、降伏応力後および 2 次剛性の変化率は 3 サイクル目の物性値に対する比率で示す。

表 2-10 より、ひずみレベルの更新前に実施している基本特性試験（試験ケース 1-4、試験ケース 1-8）から得られた 2 次剛性は、出庫試験時の 2 次剛性と比較して 2%程度しか低下しておらず、繰返し加力による積層ゴムのへたりは殆ど確認できない。基本特性試験から得られた降伏応力は、出庫試験結果と比較して 6%程度増加しているが、その差は僅少である。また、図 2-17 より、いずれの試験ケースについても、2 次剛性の変化は 3 サイクル時から±6%程度に収まっており、本試験条件においては、繰返し加力および発熱影響が積層ゴムの物性値に与える影響は殆ど無いものと考えられる。一方、降伏応力度については、サイクル数の増加に伴い、徐々に低下する傾向が確認できる。降伏応力度の低下量は、加力速度が遅い試験ケース 1-1、試験ケース 1-6、試験ケース 1-9 では-15~-8%程度であり、加力速度が速い試験ケース 1-3、試験ケース 1-8、試験ケース 1-11 では-38~-34%程度となっている。降伏応力度の熱影響評価については、2.4.2 項で考察する。

表 2-10 出庫試験と基本特性試験結果の比較

	2 次剛性 (kN/mm)	鉛プラグの降伏応力 (kN)
出庫試験	0.748	90.50
試験ケース 1-4	0.734	93.05
試験ケース 1-8	0.740	95.99



(a) 2次剛性

(b) 降伏応力度

図 2-17 繰返し加力による物性値の変化率

次に、試験ケース 1 の繰返し加力試験から得られた LRB の温度変化について、熱電対の拔出し量と断線の有無を表 2-11 および図 2-18 に、熱電対によって得られた各試験ケースの最高温度を表 2-12 に、LRB の温度変化と履歴曲線の一例を図 2-19、図 2-20 に示す。なお、全試験ケースの LRB の温度変化と履歴曲線は、付録 1 に纏めている。

表 2-11 および図 2-18 より、Lead Cen.の拔出し量が最も多く、試験ケース 1-7 以降は鉛プラグ径の 1/3 程度まで移動している。また、試験ケース 1-10 にて断線が確認されているが、次加力ステップまでのインターバル時に復旧しており、試験ケース 1-11 では温度変化を計測できている。Lead O.S.の拔出し量は、最大 15mm 程度であり、22.5mm 以下に抑えられていることから積層ゴム部への拔出しは発生していない。なお、Lead Top と Flange は、加力治具と接しているため拔出し量を確認できないが、試験終了後に拔出しが無かったことを確認している。

表 2-12 より、鉛プラグ中央部の最高温度は、加力速度が遅い試験ケース 1-1、試験ケース 1-6、試験ケース 1-9 において 39℃～56℃程度、加力速度が速い試験ケース 1-3、試験ケース 1-8、試験ケース 1-11 においては 152℃～175℃程度となっている。積層ゴム内周部では、最高温度が 45℃程度であり、鉛プラグの発熱量が大きい場合であっても、積層ゴムの温度上昇は抑えられている。また、積層ゴム内周部では 24℃程度、積層ゴム外周部は概ね外気温と同じとなることから、繰返し加力による積層ゴムの熱劣化は殆ど発生しないものと考えられる。

図 2-19 および図 2-20 より、LRB の履歴曲線と鉛プラグ中央部を含めた装置内部の温度変化が計測できていることが確認できる。なお、履歴曲線の 1 サイクル目にて、Mullins 効果<sup>20)</sup>による荷重の増大が確認できるが、これは加硫ゴムの特性であり、鉛プラグの発熱に影響を与える応答では無い。試験ケース 1-1 では、Lead Cen.等において試験ケース 1-3 で確認できない温度の周期的な上下変化が確認できる。試験ケース 1-1 において、温度が上昇する時間ではせん断ひずみ量が大きく、温度が下降する時間ではせん断ひずみ量が小さくなっていることから、鉛プラグの発熱が顕著な時間では温度が上昇し、鉛プラグからの放熱が顕著な時間では温度が下降しているものと考えられる。試験ケース 1-3 において本現象が確認できなかった原因は、加力速度が速く、発熱影響による温度上昇が放熱影響による温度低下を上回っていたためと考えられる。LRB 内部

の熱移動については、2.4.2 項で考察する。

表 2-11 各試験ケースにおける熱電対の拔出し量と断線の有無

ケース名	Lead Cen. (mm)	Lead O.S. (mm)	Rub. I.S. (mm)	Rub. Cen. (mm)	Rub. Sur. (mm)	Lead Top (mm)	Flange (mm)	Ambi. (mm)
試験ケース1-1	3	2	0	0	—	—	—	—
試験ケース1-2	8	4	0	0	—	—	—	—
試験ケース1-3	8	4	0	0	—	—	—	—
試験ケース1-4	8	6	1	0	—	—	—	—
試験ケース1-5	13	6	2	0	—	—	—	—
試験ケース1-6	18	8	3	0	—	—	—	—
試験ケース1-7	23	10	3	0	—	—	—	—
試験ケース1-8	23	10	4	0	—	—	—	—
試験ケース1-9	26	10	6	0	—	—	—	—
試験ケース1-10	<u>30</u>	13	7	0	—	—	—	—
試験ケース1-11	(38)	15	11	0	—	断線	—	—

\*下線部は断線した熱電対を示す。

\*括弧は断線後に復旧した熱電対もしくは再挿入後の熱電対を示す。

表 2-12 各試験ケースの最高温度

ケース名	Lead Cen. (°C)	Lead O.S. (°C)	Rub. I.S. (°C)	Rub. Cen. (°C)	Rub. Sur. (°C)	Lead Top (°C)	Flange (°C)	Ambi. (°C)
試験ケース1-1	55.6	51.6	30.5	19.5	17.2	36.3	27.1	18.6
試験ケース1-2	153.3	137.6	43.7	21.8	19.0	59.7	32.8	19.2
試験ケース1-3	174.7	157.4	45.1	22.9	19.6	61.0	32.4	19.2
試験ケース1-4	39.7	37.0	18.2	13.1	11.2	22.3	16.1	7.0
試験ケース1-5	53.0	50.0	30.2	18.4	11.3	33.2	24.3	6.9
試験ケース1-6	145.5	133.8	45.0	20.8	13.3	59.1	31.0	8.5
試験ケース1-7	168.1	149.6	41.3	19.3	14.4	59.4	29.2	12.9
試験ケース1-8	39.0	35.9	18.9	14.2	13.4	22.4	17.1	14.7
試験ケース1-9	51.4	47.5	30.5	19.9	14.7	32.6	24.6	15.6
試験ケース1-10	131.5	113.4	43.1	22.7	16.7	57.3	31.4	16.0
試験ケース1-11	151.6	116.4	42.9	24.2	17.7	22.1	31.3	15.8

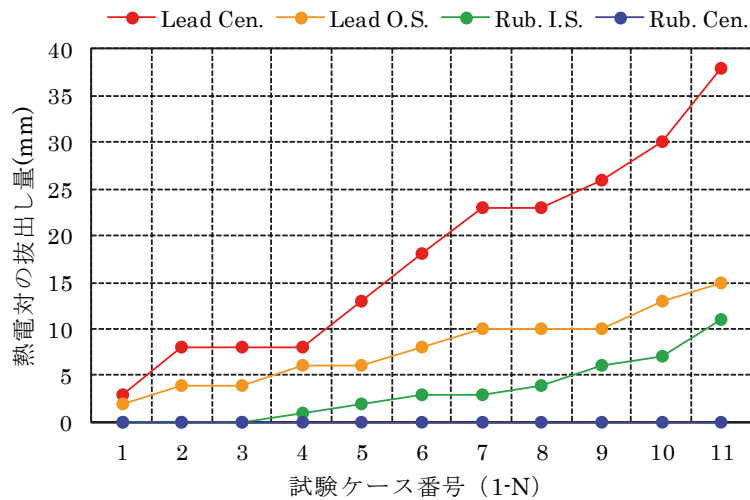


図 2-18 各試験ケースにおける熱電対の拔出し量

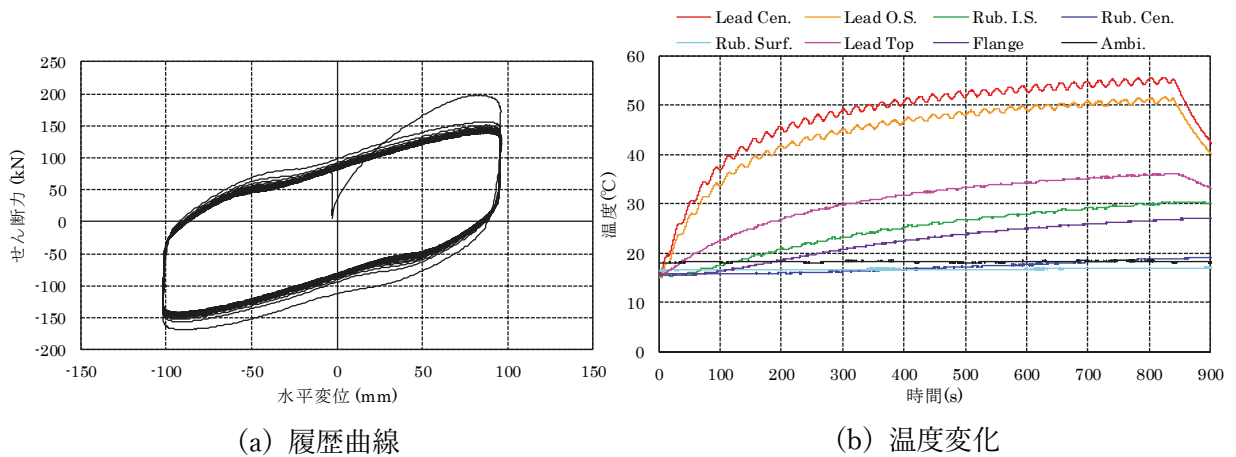


図 2-19 試験ケース 1-1 の履歴曲線と時刻歴温度変化

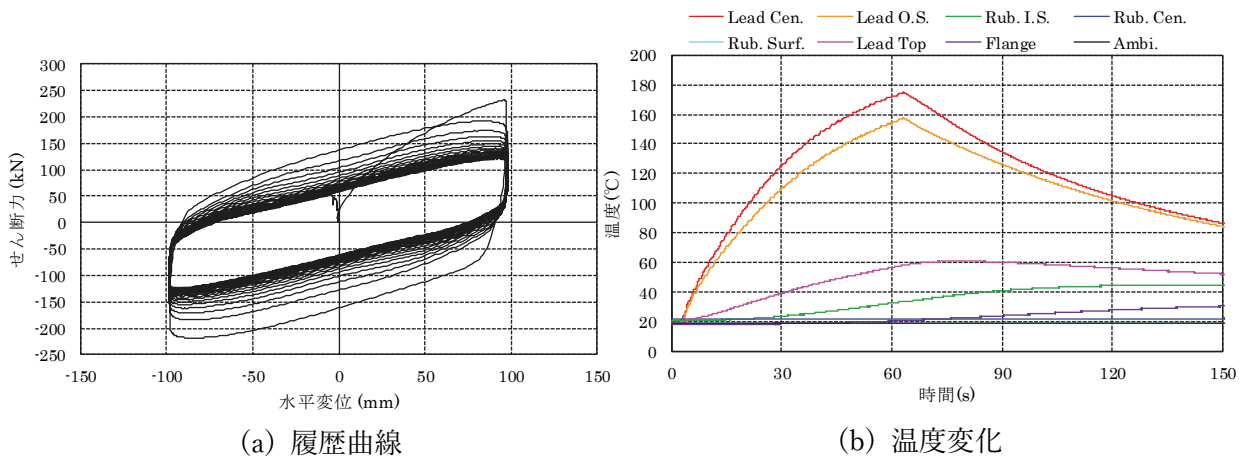


図 2-20 試験ケース 1-3 の履歴曲線と時刻歴温度変化

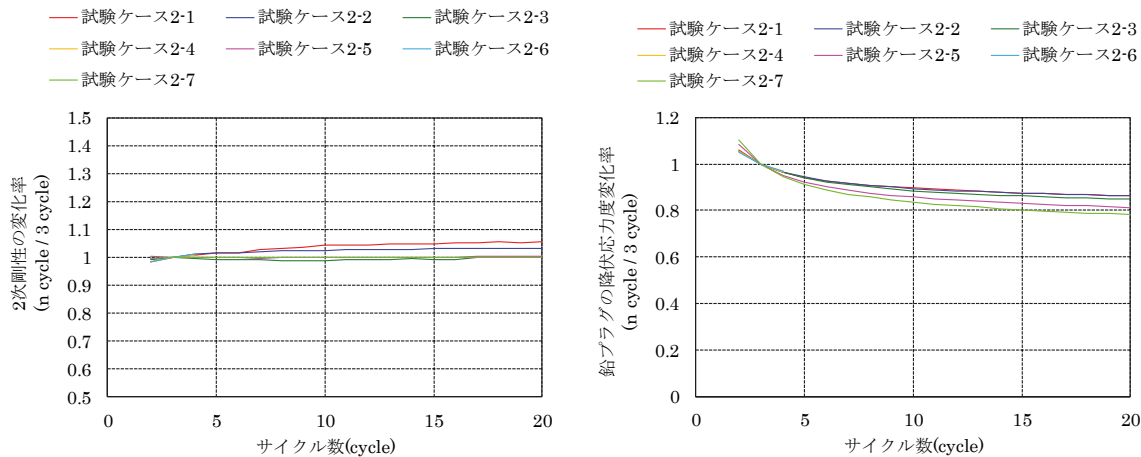
## (2) 試験ケース 2

試験ケース 2 の繰返し加力試験から得られた LRB の物性値変化について、出庫試験と基本特性試験との比較を表 2-13 に、各サイクルの 2 次剛性および鉛プラグにおける降伏応力度の変化率を図 2-21 に示す。なお、物性値の算出方法は試験ケース 1 と同じである。

表 2-13 より、ひずみレベルの更新前に実施している基本特性試験（試験ケース 2-4、試験ケース 2-6）から得られた 2 次剛性は、出庫試験時の 2 次剛性と概ね同じであり、繰返し加力による積層ゴムのへたりは確認できない。基本特性試験から得られた降伏応力は、出庫試験結果と比較して 8%程度増加しているが、その差は僅少である。また、図 2-21 より、いずれの試験ケースについても、2 次剛性の変化は 3 サイクル時から-2~+6%程度に収まっており、本試験条件においては、繰返し加力および発熱影響が積層ゴムの物性値に与える影響は殆ど無いものと考えられる。一方、降伏応力度については、サイクル数の増加に伴い、徐々に低下する傾向が確認できる。降伏応力度の低下量は、せん断ひずみ量が小さい試験ケース 2-1 では-14%程度であり、せん断ひずみ量が大きい試験ケース 2-7 では-22%程度となっている。降伏応力度の熱影響評価については、2.4.2 節で考察する。

表 2-13 出庫試験と基本特性試験結果の比較

	2次剛性 (kN/mm)	鉛プラグの降伏応力 (kN)
出庫試験	0.740	91.02
試験ケース 2-4	0.740	98.65
試験ケース 2-6	0.741	97.16



(a) 2次剛性

(b) 降伏応力度

図 2-21 繰返し加力による物性値の変化率

次に、試験ケース 2 の繰返し加力試験から得られた LRB の温度変化について、熱電対の拔出し量と断線の有無を表 2-14 および図 2-22 に、熱電対によって得られた各試験ケースの最高温度を表 2-15 に、LRB の温度変化と履歴曲線の一部を図 2-23、図 2-24 に示す。なお、全試験ケースの LRB の温度変化と履歴曲線は、付録 1 に纏めている。

表 2-14 および図 2-22 より、Lead Cen.の拔出し量が最も多く、試験ケース 2-7 は鉛プラグ径の 1/3 程度まで移動している。Lead O.S.は試験ケース 2-3 にて断線が生じたが、熱電対の取外し可能であったため、次ステップまでのインターバル中に再設置して計測した。また、Rub. I.S.は試験ケース 2-3 において顕著な拔出しが発生したため、再挿入後して復旧させた。なお、Lead Top と Flange は、加力治具と接しているため拔出し量を確認できないが、試験終了後に拔出しが無かったことを確認している。

表 2-15 より、鉛プラグ中央部の最高温度は、せん断ひずみ量が小さい試験ケース 2-1 において 54℃程度、せん断ひずみ量が大きい試験ケース 2-7 において 101℃程度となっている。積層ゴム内周部では、最高温度が 62℃程度であり、鉛プラグの発熱量が大きい場合であっても、積層ゴムの温度上昇は抑えられている。また、積層ゴム内周部では 31℃程度、積層ゴム外周部は概ね外気温と同じとなることから、繰返し加力による積層ゴムの熱劣化は殆ど発生しないものと考えられる。

図 2-23 および図 2-24 より、LRB の履歴曲線と鉛プラグ中央部を含めた装置内部の温度変化が計測できていることが確認できる。試験ケース 2-1 と試験ケース 2-2 を比較すると、面圧の高い

試験ケース 2-2の方が履歴面積および温度上昇がやや大きく評価されているものの、顕著な差異は確認できない。LRB内部の熱移動については、2.4.2項で考察する。

表 2-14 各試験ケースにおける熱電対の抜き出し量と断線の有無

ケース名	Lead Cen. (mm)	Lead O.S. (mm)	Rub. I.S. (mm)	Rub. Cen. (mm)	Rub. Sur. (mm)	Lead Top (mm)	Flange (mm)	Ambi. (mm)
試験ケース2-1	2	2	0	0	—	—	—	—
試験ケース2-2	2	2	0	0	—	—	—	—
試験ケース2-3	4	<u>2</u>	11	0	—	—	—	—
試験ケース2-4	4	(0)	(0)	0	—	—	—	—
試験ケース2-5	8	(0)	(1)	2	—	—	—	—
試験ケース2-6	8	(0)	(1)	2	—	—	—	—
試験ケース2-7	<u>25</u>	<u>(5)</u>	(5)	7	—	—	—	—

\*下線部は断線した熱電対を示す。

\*括弧は断線後に復旧した熱電対もしくは再挿入後の熱電対を示す。

表 2-15 各試験ケースの最高温度

ケース名	Lead Cen. (°C)	Lead O.S. (°C)	Rub. I.S. (°C)	Rub. Cen. (°C)	Rub. Sur. (°C)	Lead Top (°C)	Flange (°C)	Ambi. (°C)
試験ケース2-1	54.2	51.1	30.4	17.8	14.3	33.8	25.3	14.9
試験ケース2-2	55.5	51.8	34.1	21.6	16.5	34.7	25.7	14.9
試験ケース2-3	53.0	36.7	28.4	21.6	16.3	34.6	25.9	13.9
試験ケース2-4	42.0	39.0	20.7	14.9	14.3	23.3	18.2	14.7
試験ケース2-5	81.0	77.5	46.7	23.7	16.1	47.4	34.2	15.3
試験ケース2-6	42.9	41.1	25.3	20.1	17.7	25.6	20.2	16.7
試験ケース2-7	100.7	19.4	62.0	31.2	19.9	57.6	41.5	17.5

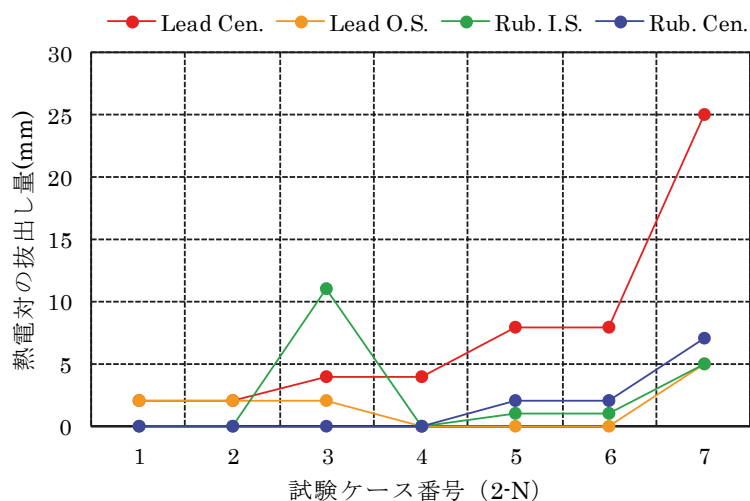


図 2-22 各試験ケースにおける熱電対の抜き出し量

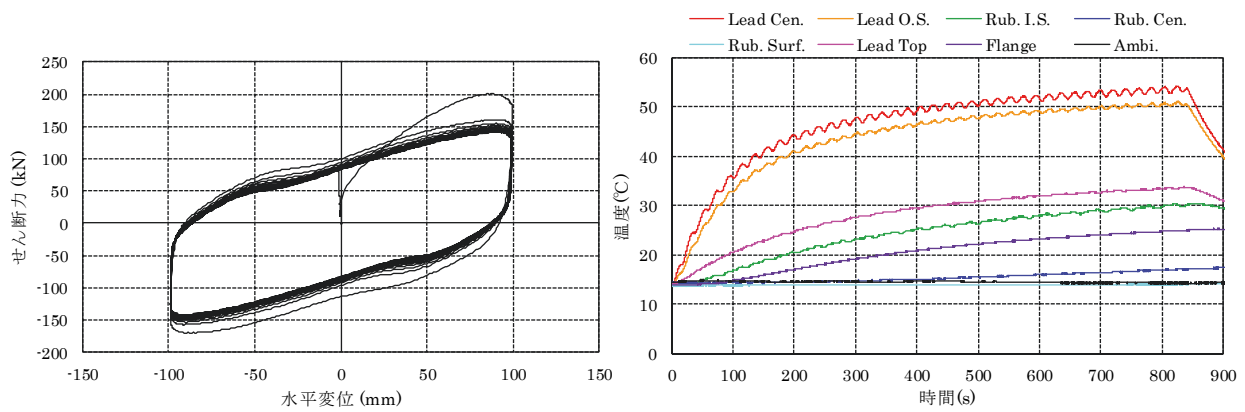


図 2-23 試験ケース 2-1 の履歴曲線と時刻歴温度変化

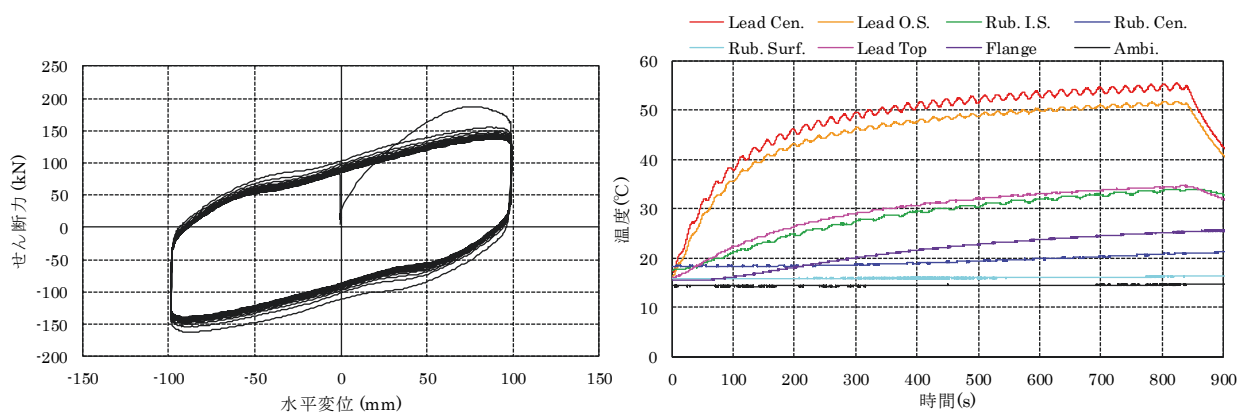


図 2-24 試験ケース 2-2 の履歴曲線と時刻歴温度変化

### (3) 試験ケース 3

試験ケース 3 の地震応答波加力試験から得られた LRB の温度変化について、熱電対の拔出し量と断線の有無を表 2-16 および図 2-25 に、熱電対によって得られた各試験ケースの最高温度を表 2-17 に示す。なお、2.3.3 項に示す通り、4 波とも表 2-8 に示す係数倍を乗じることで、最大せん断ひずみが 200%になるように基準化しており、原波入力時の熱影響評価とは一致しない。

表 2-16 および図 2-25 より、Lead O.S.の拔出し量が最も多いものの、拔出し量が試験ケース 3-5 までに 13mm 程度であり、20mm 以下に抑えられていることから、熱電対は鉛プラグ内に残存している。試験ケース 3-3 にて発生した Lead Top の断線は、再設置が困難であったため、復旧することができなかった。

表 2-17 より、継続時間が長い試験ケース 3-5 において、放熱影響が顕著に発生し、積層ゴム部の温度が最大となるが、積層ゴム部の内周部は 70°C 程度、積層ゴム中央部は 30°C 程度、積層ゴム表面部は外気温と概ね同じ程度であり、正弦波加力試験と同様に積層ゴム部の熱影響は殆ど発生しないものと考えられる。

LRB の履歴曲線と装置内部の温度変化を図 2-26～図 2-29 に、各試験ケースの累積吸収エネルギー量を図 2-30 に示す。図 2-26 より、28s 付近で鉛プラグの温度が急激に上昇している。これは、図 2-30 (a)から、累積吸収エネルギー量が急激に増大している時刻と一致しており、位相による発熱影響によるものと考えられる。一方、積層ゴム部では 28s 付近における著しい温度上昇は

確認できない。また、40s以降は鉛プラグ中央部と周辺部で計測温度が乖離し、80s以降では鉛プラグ全体が緩やかに温度低下しているが、積層ゴム部は40s以降も温度上昇が継続している。これは、図 2-30 (a)より、40s以降は累積吸収エネルギー量の増加が緩やかになっていることから、徐々に放熱影響が発熱影響を上回ったためと考えられる。次に、図 2-27 では、図 2-26 とは異なり、地震波継続時間中では鉛プラグの温度が低下せず、概ね一定となっている。これは、図 2-30 (b)において、累積吸収エネルギー量の増加が継続時間中は一定であるため、発熱影響と放熱影響が釣り合っているためと考えられる。更に、図 2-28 では、28s程度で鉛プラグの温度が約 20°C から約 73°Cまで増加し、その後は温度が降下している。これは、図 2-30 (c)に示す通り、パルス成分を含んだ試験ケース 3-4 は、28s 付近で累積吸収エネルギーが増大しているものの、この前後の累積吸収エネルギー量の増加が殆ど見られないことが原因と考えられる。一方、積層ゴム部では、鉛プラグの発熱時は温度増加が確認できず、鉛プラグの温度降下に合わせて温度上昇しているものの、最高温度は 29.7°Cと上昇量は小さい。また、図 2-28 に示す履歴曲線は、他の試験ケースよりも降伏応力度が大きいことが確認できる。これは、鉛プラグの速度依存性に依るものと考えられる。速度依存性が LRB の熱影響特性に与える影響については、2.4.2 項で考察する。最後に、図 2-29 では、鉛プラグの温度が 150s 程度までに 197.7°Cまで上昇しているものの、以降の継続時間中は約 130°Cで概ね一定となっている。積層ゴム部は、210s 程度までに 65°C程度まで上昇し、その後も緩やかに上昇して地震波終了時に 70.1°Cまで温度上昇が発生している。積層ゴム部の温度が 70°C付近まで上昇した後、フランジ部の温度上昇が見られることから、熱伝導は半径方向が支配的であるものの、時間経過とともに鉛直方向にも伝導する傾向が確認できる。LRB 内部の熱移動については、2.4.2 項で考察する。

表 2-16 各試験ケースにおける熱電対の抜き出し量と断線の有無

ケース名	Lead Cen. (mm)	Lead O.S. (mm)	Rub. I.S. (mm)	Rub. Cen. (mm)	Rub. Sur. (mm)	Lead Top (mm)	Flange (mm)	Ambi. (mm)
試験ケース3-1	0	0	0	0	—	—	—	—
試験ケース3-2	1	3	1	0	—	—	—	—
試験ケース3-3	3	6	2	0	—	断線	—	—
試験ケース3-4	3	6	3	0	—	断線	—	—
試験ケース3-5	6	13	3	0	—	断線	—	—

\*下線部は断線した熱電対を示す。

\*括弧は断線後に復旧した熱電対もしくは再挿入後の熱電対を示す。

表 2-17 各試験ケースの最高温度

ケース名	Lead Cen. (°C)	Lead O.S. (°C)	Rub. I.S. (°C)	Rub. Cen. (°C)	Rub. Sur. (°C)	Lead Top (°C)	Flange (°C)	Ambi. (°C)
試験ケース3-1	44.3	38.7	21.5	15.7	15.3	25.5	18.9	16.2
試験ケース3-2	121.7	101.0	37.4	17.5	16.1	48.5	26.9	17.1
試験ケース3-3	206.0	161.8	72.0	22.7	17.5	30.5	39.9	17.5
試験ケース3-4	75.6	67.3	29.7	22.9	18.8	26.0	22.6	16.5
試験ケース3-5	197.7	145.2	70.1	30.9	19.7	65.8	43.5	17.0



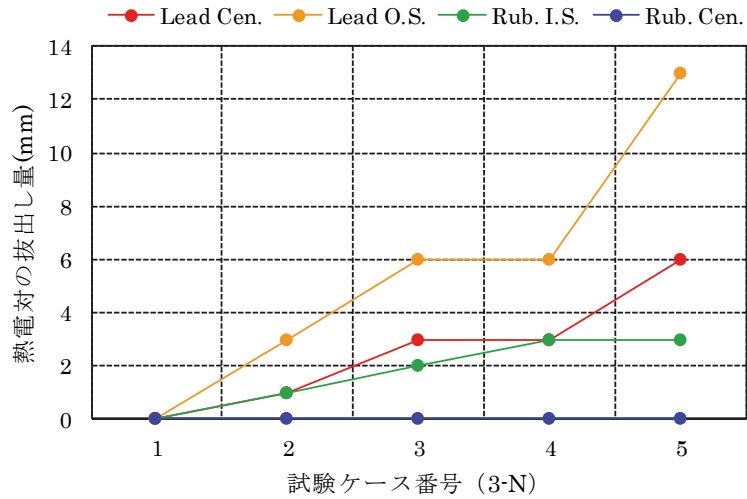


図 2-25 各試験ケースにおける熱電対の抜き出し量

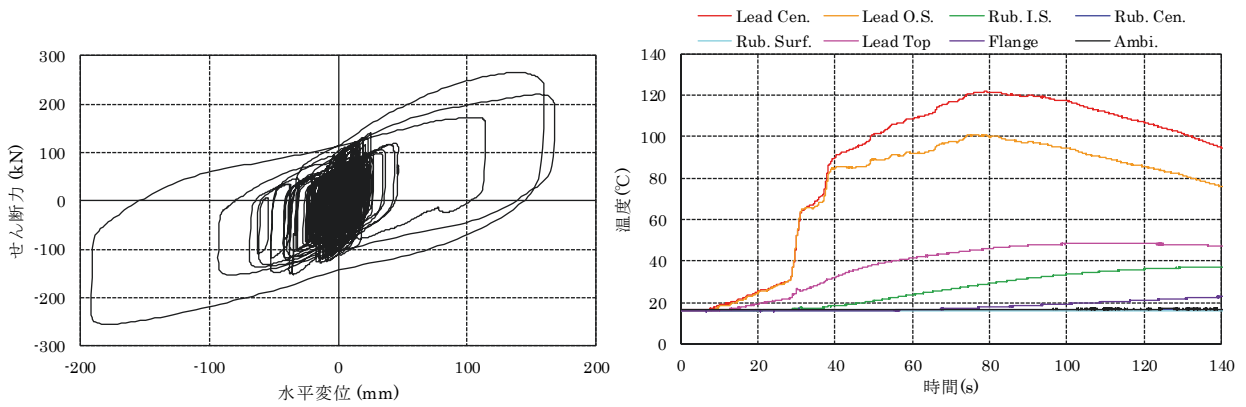


図 2-26 試験ケース 3-2 の履歴曲線と温度変化 (スペクトル波、入力倍率 0.41)

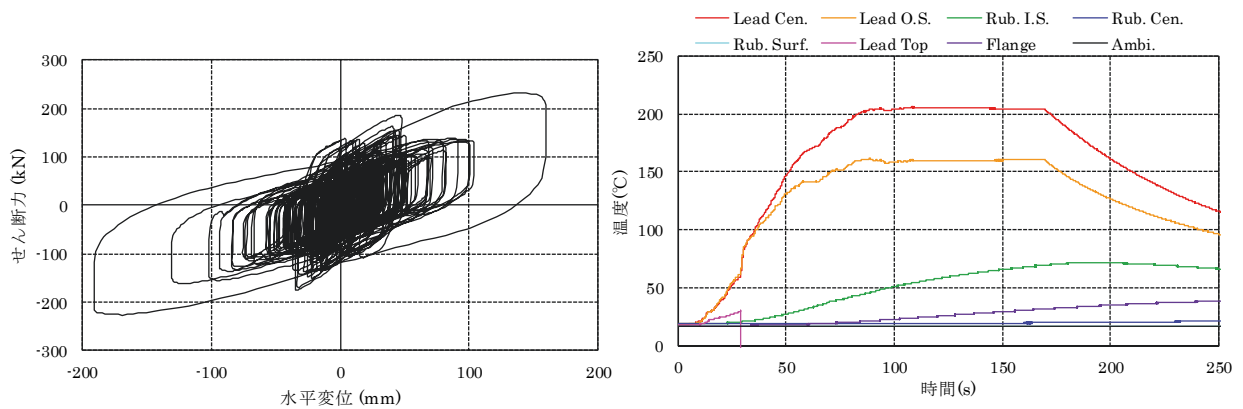


図 2-27 試験ケース 3-3 の履歴曲線と温度変化 (告示波 八戸位相、入力倍率 2.23)

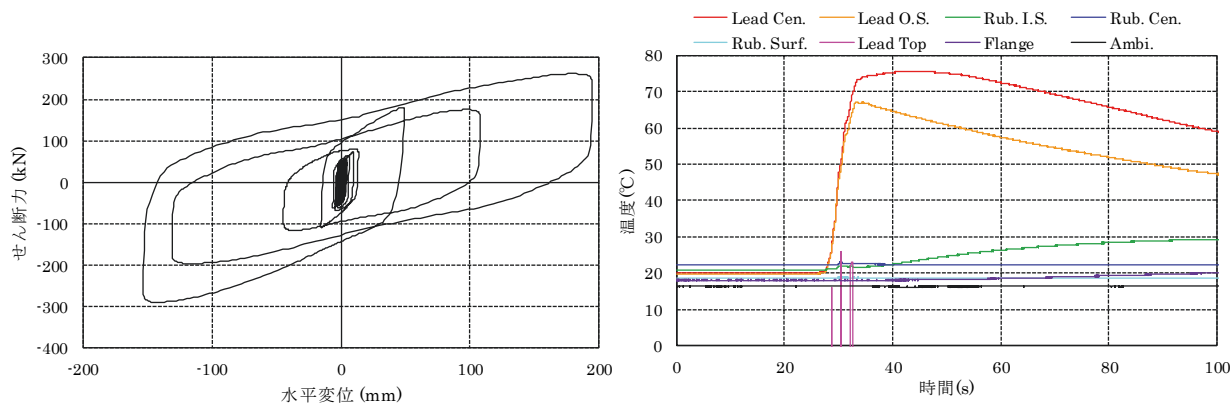


図 2-28 試験ケース 3-4 の履歴曲線と温度変化 (JMA 西原観測波、入力倍率 0.20)

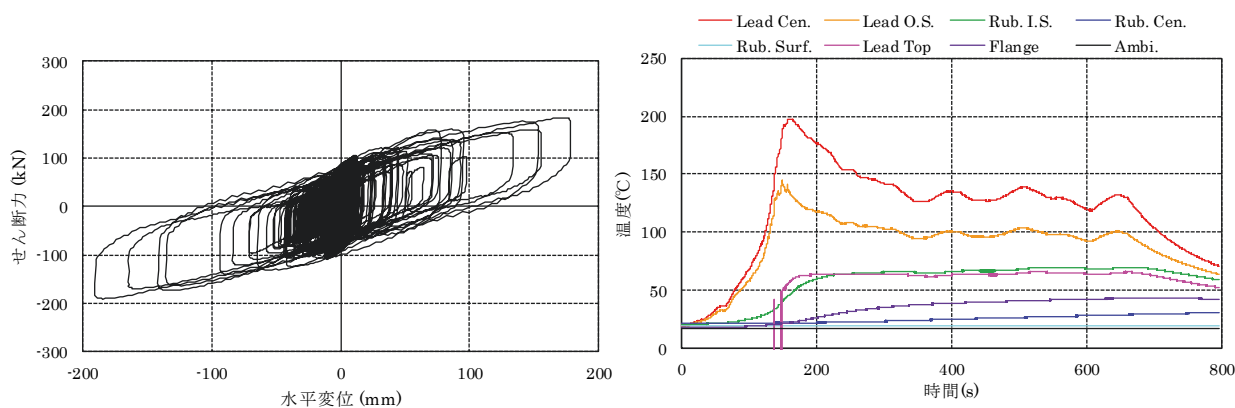
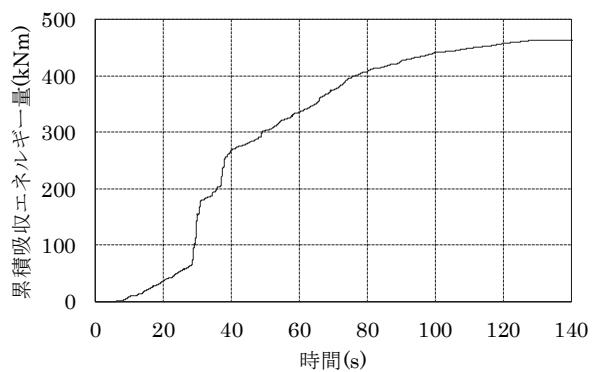
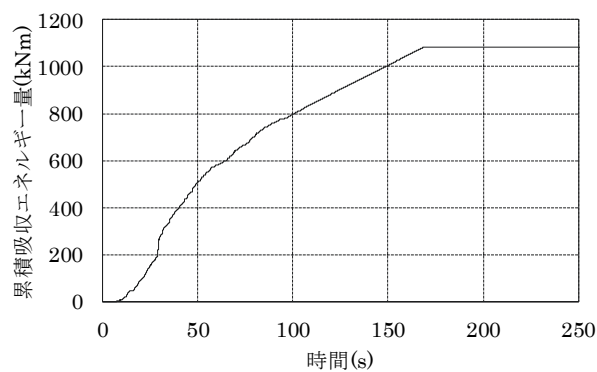


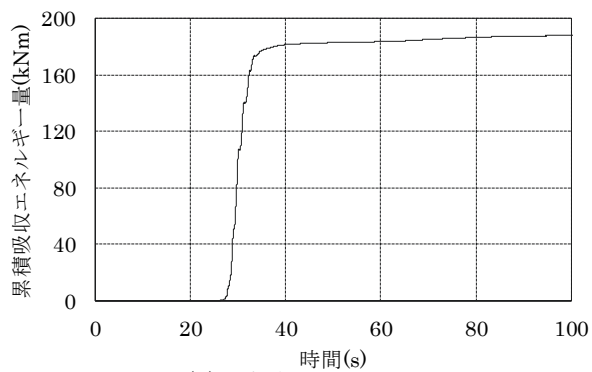
図 2-29 試験ケース 3-5 の履歴曲線と温度変化 (南海トラフ地震波 SZ1、入力倍率 1.51)



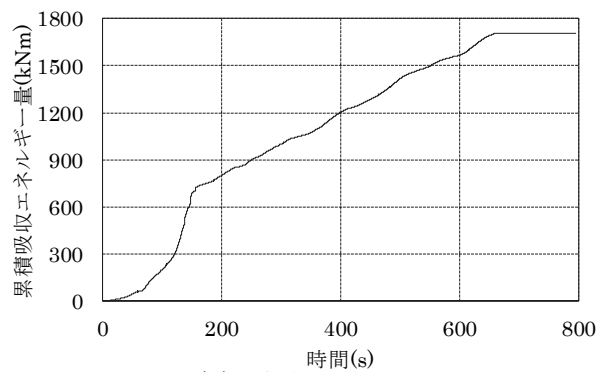
(a) 試験ケース 3-2



(b) 試験ケース 3-3



(a) 試験ケース 3-4



(b) 試験ケース 3-5

図 2-30 各試験ケースの累積吸収エネルギー量

#### (4) 試験ケース 4

試験ケース 4 の水平方向・鉛直方向同時加力試験から得られた LRB の物性値変化について、出庫試験と基本特性試験との比較を表 2-18 に、各サイクルの 2 次剛性および鉛プラグにおける降伏応力の変化率を図 2-31 に示す。なお、物性値の算出方法は試験ケース 1 と同じである。

試験ケース 4 は、試験ケース 1~3 終了後に実施しており、出庫試験実施から 1 週間程度が経過していたため、出庫時の物性値が変化していないか確認することを目的に、同時加力試験実施前に基本特性試験を行った。表 2-18 より、2 次剛性、降伏応力ともに出庫試験と概ね同じであり、試験体の保管は適切に行われていたことを確認した。試験ケース 4-6 は、300℃程度の発熱が生じた LRB の降温後残存性能を確認するため、試験ケース 4-5 の加力終了後から 24 時間のインターバルを設けている。なお、試験ケース 4-6 の試験結果は 2.4.2 項で示す。また、図 2-31 より、いずれの試験ケースについても、2 次剛性の変化は 3 サイクル時から -5~+1%程度に収まっており、本試験条件においては、繰返し加力および発熱影響が積層ゴムの物性値に与える影響は殆ど無いものと考えられる。一方、降伏応力については、サイクル数の増加に伴い、徐々に低下する傾向が確認できる。降伏応力度の低下量は、加力速度が遅い試験ケース 4-2 および 4-4 では -5%程度であり、加力速度が速い試験ケース 4-3 および試験ケース 4-5 では -56%程度となっている。各サイクルの降伏応力度低下率がひずみ量に係わらず概ね同じとなっている原因は、加力速度が同じであるため、ひずみ量が大きいケースでは 1 サイクル加力に要する時間が長くなり、より放熱の影響を受けたことが一因であると考えられる。

表 2-18 出庫試験と基本特性試験結果の比較

	2 次剛性 (kN/mm)	鉛プラグの降伏応力 (kN)
出庫試験	0.743	91.99
試験ケース 4-1	0.742	92.32

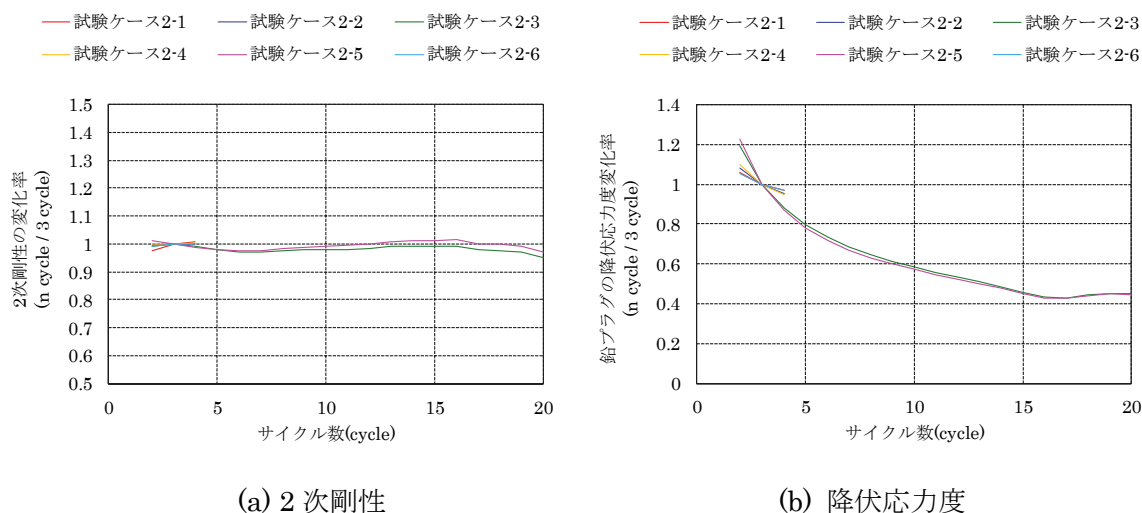


図 2-31 繰返し加力による物性値の変化率

次に、試験ケース 4 の繰返し加力試験から得られた LRB の温度変化について、熱電対の拔出し量と断線の有無を表 2-19 および図 2-32 に、熱電対によって得られた各試験ケースの最高温度を表 2-20 に、LRB の温度変化と履歴曲線の一例を図 2-33～図 2-36 に示す。

表 2-19 および図 2-32 より、Lead O.S.の拔出し量が最も多く、試験ケース 4-5 及び 4-6 で拔出し量が 20mm を超過しており、積層ゴム部まで拔出している。また、試験ケース 4-2 にて Lead Top が断線したが、復旧が困難であり、以降の温度記録が取得できていない。

表 2-20 より、鉛プラグ中央部の最高温度は、加力速度が遅い試験ケース 4-2 および試験ケース 4-4 において 60～75℃程度、加力速度が速い試験ケース 4-3 および試験ケース 4-5 において 258～298℃程度となっている。積層ゴム内周部では、最高温度が 62℃程度であり、鉛プラグの発熱量が大きい場合であっても、積層ゴムの温度上昇は抑えられている。また、積層ゴム内周部では 49℃程度、積層ゴム外周部は概ね外気温と同じとなることから、繰返し加力による積層ゴムの熱劣化は殆ど発生しないものと考えられる。

図 2-33 および図 2-35 にて、水平方向・鉛直方向の同位相加力時における履歴曲線を比較すると、圧縮領域（第 1 象限）の履歴面積と引張領域（第 3 象限）の履歴面積に差異が確認できる。そこで、表 2-21 に 3 サイクル目の圧縮領域と引張領域における累積吸収エネルギー量を、図 2-37 に 3 サイクル目の履歴曲線を示す。図 2-37 より、引張領域では圧縮領域よりも除荷時の降伏応力が低下しており、履歴面積が小さくなっている。しかし、表 2-33 より、累積吸収エネルギー量の差異は 8～9%程度であり、面圧の差異による発熱影響は小さいものと考えられる。また、図 2-33 および図 2-35 の温度変化より、試験ケース 1 と同様のうねりが確認できる。これは、うねりの腹部分はせん断ひずみが大きい時間帯、節部分はせん断ひずみが小さい時間帯と概ね一致しており、発熱が支配的となる場合に温度上昇し、放熱が支配的となる場合に温度上昇量が抑制されることが原因と考えられる。次に、図 2-34 および図 2-36 にて、水平方向・鉛直方向の別位相加力時における履歴曲線を確認すると、水平方向に動的応答が発生している際に、引張領域と圧縮領域を跨いだ加力を行った場合であっても、異常な応答は確認できず、スムーズに挙動することが確認できた。よって、LRB は水平・鉛直同時加力を受けた際でも、線形限界の範囲内であれば所定の性能を確保できることを確認した。また、図 2-34 および図 2-36 の温度変化より、発熱による鉛プラグの温度変化や放熱による積層ゴム部の温度変化では、鉛直方向の 1 サイクル正弦波加力による影響が確認できない。LRB の熱影響に関する面圧依存性については、2.4.2 項で考察する。

表 2-19 各試験ケースにおける熱電対の拔出し量と断線の有無

ケース名	Lead Cen. (mm)	Lead O.S. (mm)	Rub. I.S. (mm)	Rub. Cen. (mm)	Rub. Sur. (mm)	Lead Top (mm)	Flange (mm)	Ambi. (mm)
試験ケース4-1	0	0	0	0	—	—	—	—
試験ケース4-2	1	2	1	1	—	断線	—	—
試験ケース4-3	7	9	4	1	—	断線	—	—
試験ケース4-4	7	12	4	1	—	断線	—	—
試験ケース4-5	13	<u>32</u>	9	1	—	断線	—	—
試験ケース4-6	14	<u>32</u>	10	1	—	断線	—	—

\*下線部は断線した熱電対を示す。

\*括弧は断線後に復旧した熱電対もしくは再挿入後の熱電対を示す。

表 2-20 各試験ケースの最高温度

ケース名	Lead Cen. (°C)	Lead O.S. (°C)	Rub. I.S. (°C)	Rub. Cen. (°C)	Rub. Sur. (°C)	Lead Top (°C)	Flange (°C)	Ambi. (°C)
試験ケース4-1	41.9	38.9	16.4	12.5	13.0	22.6	15.8	14.7
試験ケース4-2	59.5	55.8	21.0	14.0	13.4	27.6	18.7	14.9
試験ケース4-3	258.0	223.9	43.3	18.0	14.4	69.3	32.9	14.7
試験ケース4-4	75.0	65.9	23.9	14.0	13.3	32.2	20.1	14.8
試験ケース4-5	297.6	179.2	49.1	21.7	15.0	85.5	37.5	14.9
試験ケース4-6	41.2	19.0	18.2	14.4	14.1	21.9	17.0	15.5

表 2-21 水平方向・鉛直方向同位相入力時における 3 サイクル目の累積吸収エネルギー量

	累積吸収エネルギー量 (kN/mm)		比率
	圧縮領域	引張領域	圧縮/引張
試験ケース4-2	30922	28416	1.09
試験ケース4-3	46593	42946	1.08

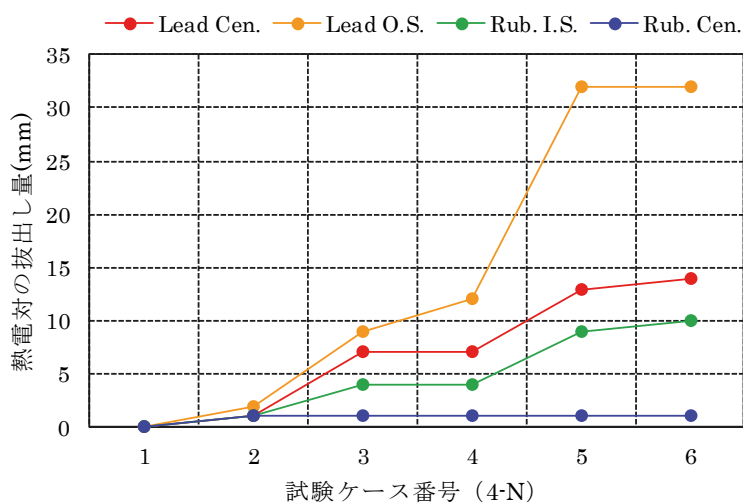


図 2-32 各試験ケースにおける熱電対の抜出し量

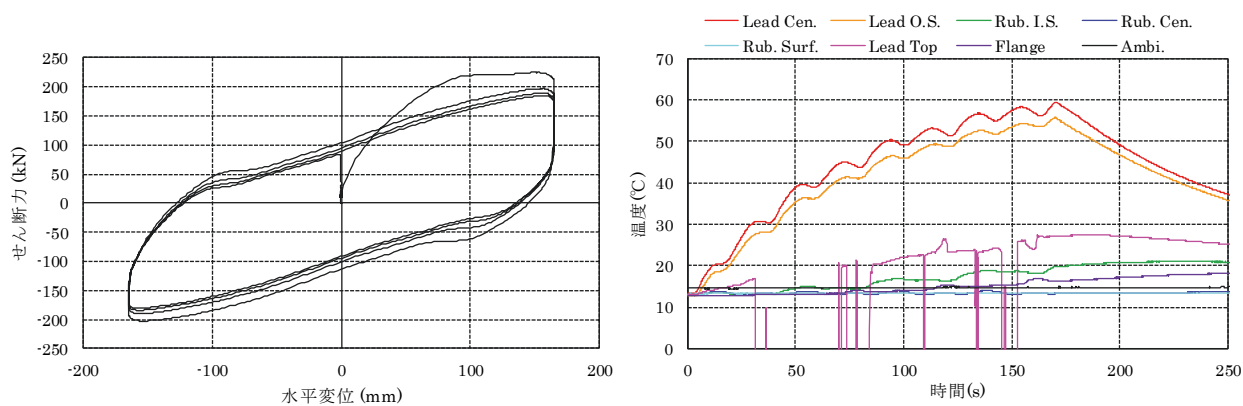


図 2-33 試験ケース 4-2 の履歴曲線と温度変化

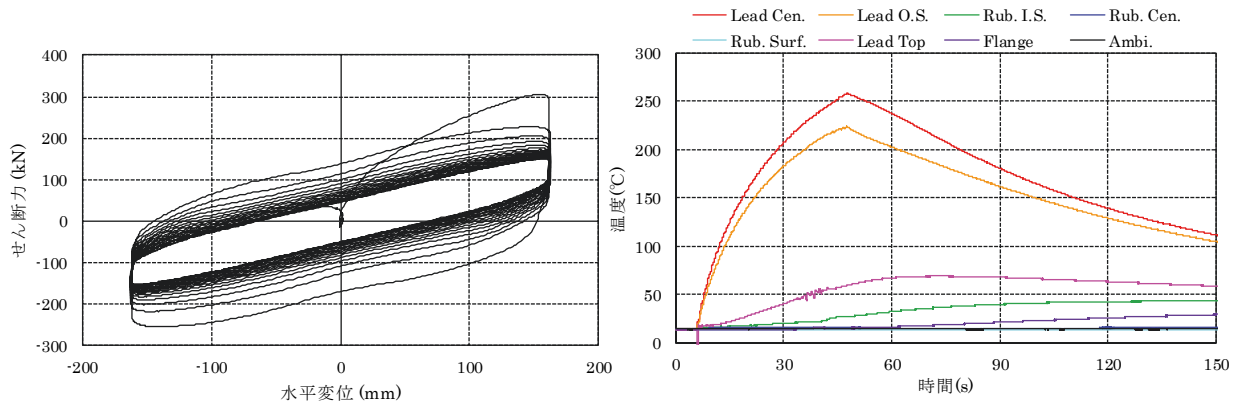


図 2-34 試験ケース 4-3 の履歴曲線と温度変化

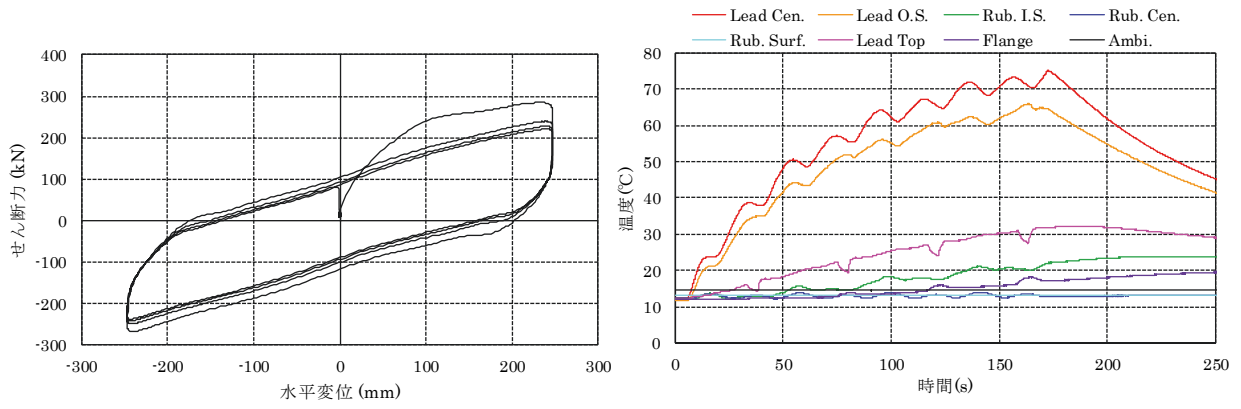


図 2-35 試験ケース 4-4 の履歴曲線と温度変化

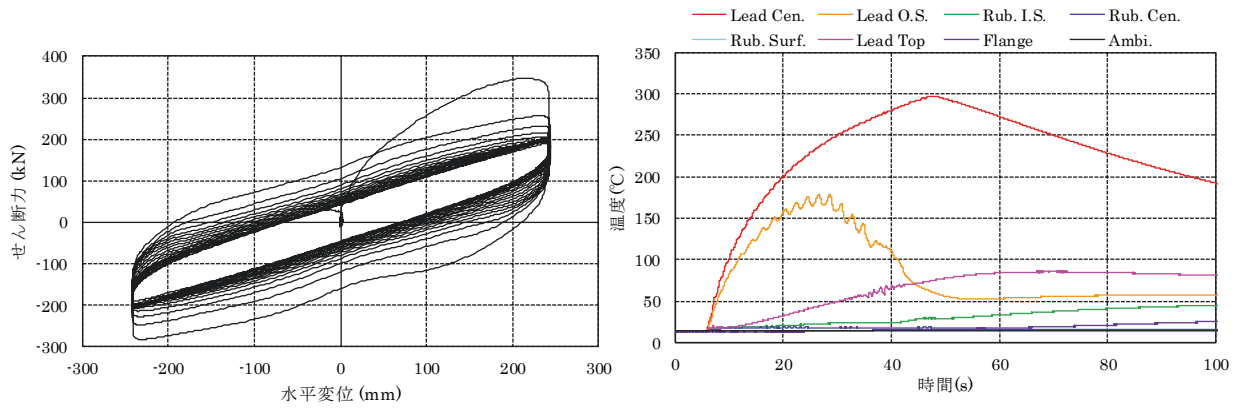


図 2-36 試験ケース 4-5 の履歴曲線と温度変化

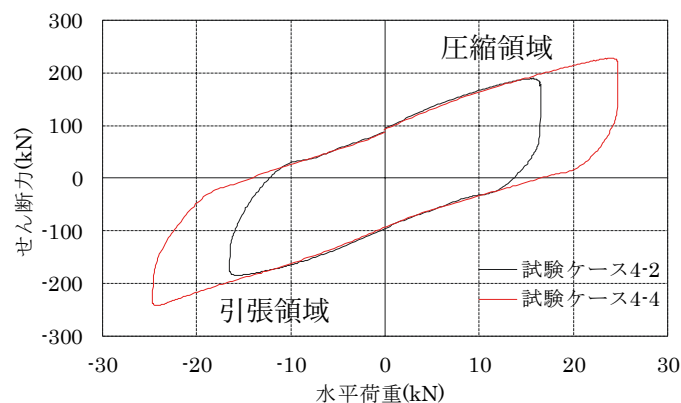


図 2-37 水平方向・鉛直方向同位相入力時における 3 サイクル目の履歴曲線

## 2.4.2 熱影響評価

### (1) 健全性評価

前項で示した試験ケース 4 にて、鉛プラグの中心温度が 300°C 程度となり、繰返し加力により鉛の融点近傍まで温度上昇が確認されている。そこで、高温時における鉛プラグの履歴曲線を確認するため、試験ケース 4-3 (Lead Cen. : 258°C) および試験ケース 4-5 (Lead Cen. : 298°C) における 3 サイクル目および 16 サイクル目以降を抜粋した履歴曲線を図 2-38 に示す。なお、16 サイクル目以降は、試験ケース 4-3 において 200°C 以上、試験ケース 4-5 において 250°C 以上となっている (図 2-39)。図 2-38 より、16 サイクル目以降の履歴曲線は、3 サイクル目の履歴曲線と比較して熱影響により鉛プラグの降伏応力度が低下しているものの安定した履歴形状を示しており、高温時でも減衰性能を発揮できることが確認できる。

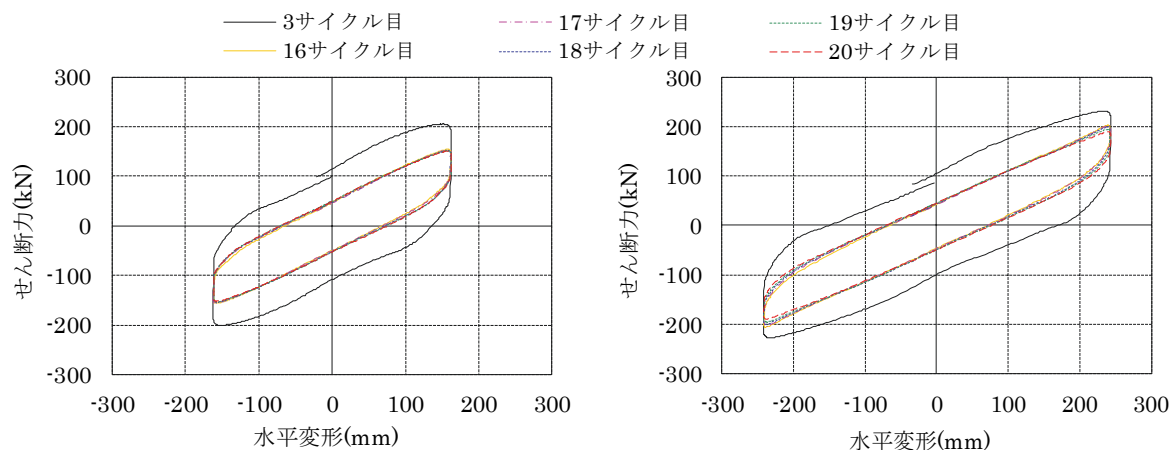


図 2-38 各サイクルの履歴曲線 (左 : 試験ケース 4-3、右 : 試験ケース 4-5)

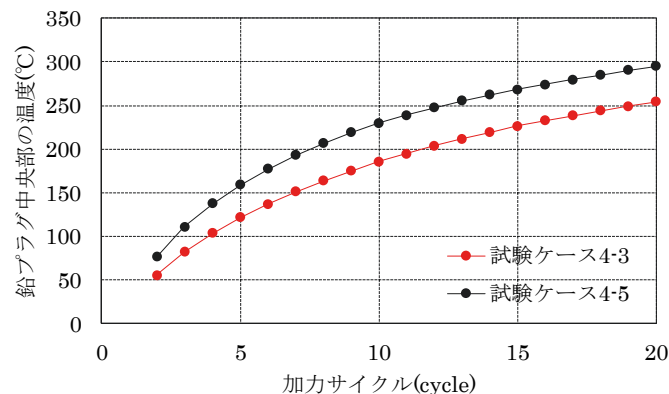


図 2-39 各サイクルにおける鉛プラグ中心部の温度変化

次に、経験変位が 41.2m に達し、かつ、融点近傍 (327.5°C) まで鉛プラグの温度上昇が生じた試験ケース 4 の試験体を対象として、一連の加力試験を実施した翌日、鉛プラグが外気温と同程度まで降温したことを確認した後に、基本特性試験 (試験ケース 4-6) を行った。試験ケース 4-6 と出庫試験の物性値を表 2-22 に、履歴曲線を図 2-40 にて比較する。

表 2-22 より、試験ケース 4-6 は出庫試験と比較して、2 次剛性が+1%程度、降伏応力が+3%程度とその差は僅少であり、LRB は過酷な発熱影響を受けても降温後には物性値が回復することを確認した。また、図 2-40 より、試験ケース 4-6 は、出庫試験と同様の安定した履歴曲線を描いており、繰返し加力による熱影響を受けた LRB の健全性を確認することが出来た。

表 2-22 繰返し加力試験前後における基本特性試験結果の比較

	2 次剛性		鉛プラグの降伏応力	
	(kN/mm)	比率	(kN)	比率
出庫試験	0.743	1.00	91.99	1.00
試験ケース 4-6	0.751	1.01	94.53	1.03

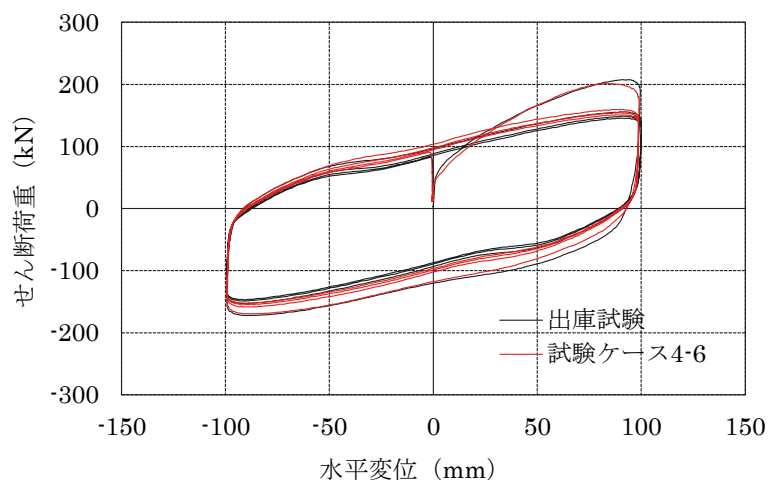


図 2-40 繰返し加力試験前後における履歴曲線の比較



## (2) 熱エネルギー評価を用いた検討

前項で提示した通り、本試験では鉛プラグ中央部を含む LRB 全体の温度変化を記録することができた。そこで、履歴曲線から算出した累積吸収エネルギー量と各部位の熱エネルギー量を比較することで、温度記録から鉛プラグの発熱範囲や LRB 内部の熱移動を考察する。熱エネルギー量の評価方法を下記に示す。また、評価に用いた温度区分を図 2-41 に示す。

- 1) 積層ゴム部における温度区分の設定は、各熱電対の中間位置まで、熱電対の計測温度が一樣に分布していると仮定して、熱エネルギー量を算出した。温度区分の仮定より、積層ゴムと中間鋼板は同じ温度になるため、積層ゴムの熱容量は、積層ゴムと中間鋼板の比熱を体積等価とした値に、両者の体積の総和を乗じて計算している。
- 2) 鉛プラグ部における半径方向の温度区分の設定に関して、図 2-19 や図 2-20 等に示した時刻歴の温度変化より、Lead Cen. と Lead O.S. の計測温度は積層ゴム部や Lead Top と比較して差異が小さく、かつ、温度変化の傾向が概ね同じになることから、両者の計測温度を平均し、半径方向の温度分布が一樣であるとして、熱エネルギー量を算出した。
- 3) 図 2-19 や図 2-20 等に示した時刻歴の温度変化より、Lead Cen. と Lead Top の計測温度及び温度変化に差異が見られる。これは、鉛プラグの頂部は連結鋼板で拘束されており、せん断変形による発熱が生じず、鉛プラグの中央部よりも温度上昇が小さくなったためと考えられる。なお、Lead Top では、プラグ上部からシアキーおよびフランジへ熱伝導が生じたため、周囲が積層ゴムである Lead Cen. よりも温度が低下したことも考えられるが、Lead Top と Flange の温度変化が異なることから、温度変化の主要因はプラグ上部で発熱が生じていないことであると考えられる。そこで、鉛プラグ部における高さ方向の温度区分は、連結鋼板に拘束される範囲のみ Lead Top の計測温度が一樣に分布しているものとして、熱エネルギー量を算出した。
- 4) Flange の計測温度は、他測定点と比較して温度変化が小さい。これは、鉛プラグ上部に非発熱の部位が存在するため、伝熱量が小さいことが原因の 1 つであると考えられる。よって、フランジおよび連結鋼板の広範囲で一樣な温度変化が生じるとは考え難いことから、放熱経路が最短となるプラグの直上部のみに一樣な温度変化が生じるものとして、熱エネルギー吸収量を算出した。

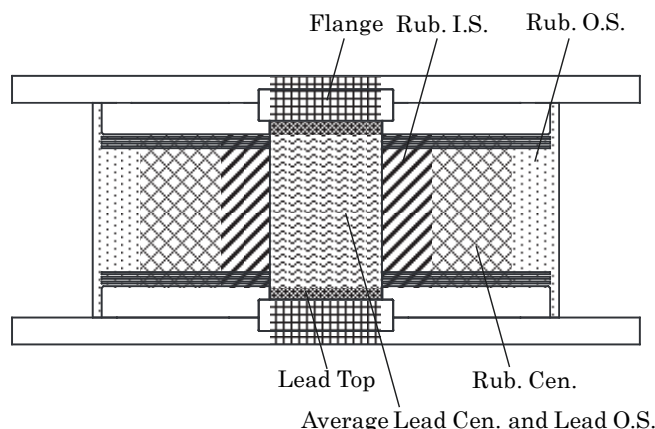


図 2-41 熱エネルギー評価に使用する温度区分

上記で提案した熱エネルギー評価手法を用いて、正弦波加力の一例として、試験ケース 1-1、試験ケース 1-2 および試験ケース 1-3 の熱エネルギー量と履歴面積から算出した鉛プラグの累積エネルギー吸収量における経時変化の比較を図 2-42～図 2-44 に示す。なお、その他の試験ケースについては付録 2 に示す。

評価結果から、動的加力試験（図 2-43、図 2-44）の加力継続時と静的加力試験（図 2-42）の加力開始後 280s 程度は、熱エネルギー量（装置全体における熱エネルギーの総和）と累積吸収エネルギー量が概ね一致することが確認出来た。各部の熱エネルギー量を比較すると、熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量が一致する時間領域では、鉛プラグ部の熱エネルギー量が積層ゴム部の熱エネルギー量と同等か大きく評価されている。よって、鉛プラグの発熱特性が放熱特性と同等若しくは上回る時間領域にて、評価結果と試験結果が一致しており、本手法により鉛プラグの発熱量を適切に評価できるものと考えられる。以上の検討から、鉛プラグの温度変化は、連結鋼板間の鉛プラグの発熱量を平均化することで評価でき、また、連結鋼板により拘束されている鉛プラグは非発熱とすることで、試験結果と評価結果が良く一致することを確認した。

一方、加力後や静的加力試験の 280s を超える加力継続時では、熱エネルギー量が累積吸収エネルギー量よりも小さく評価される傾向が見られる。累積熱エネルギー吸収量が小さく評価される時間領域では、積層ゴム部の熱エネルギー量が支配的であり、鉛プラグから積層ゴム部に逸散した放熱量が鉛プラグの熱エネルギー量を上回ることが分かる。本試験では、積層ゴム部における熱電対の設置間隔が広く、図 2-41 に示す温度区分では積層ゴム部の熱エネルギー量を十分に評価できなかったため、累積熱エネルギー吸収量と累積塑性ひずみエネルギー量に差異が生じた可能性が考えられる。

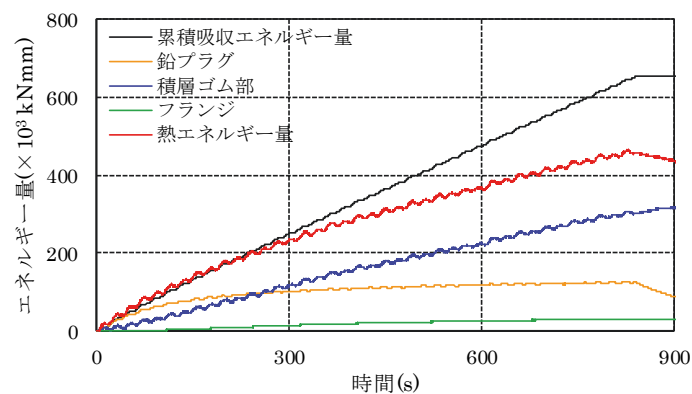


図 2-42 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較（試験ケース 1-1）

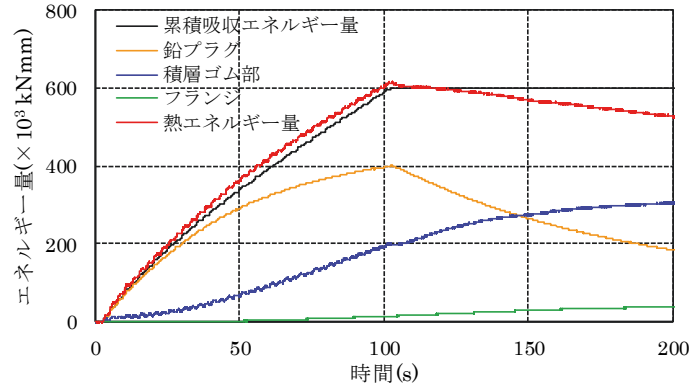


図 2-43 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 (試験ケース 1-2)

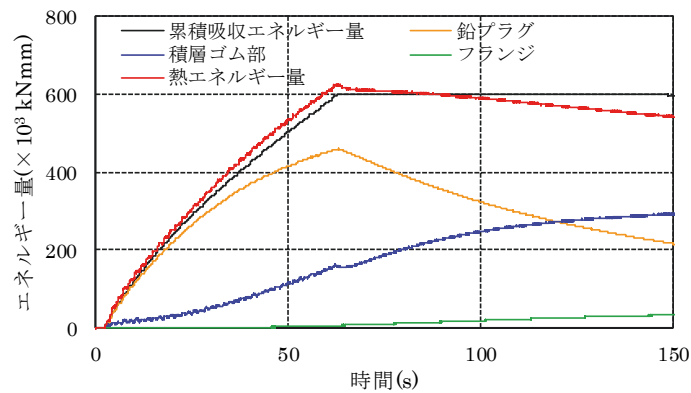


図 2-44 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 (試験ケース 1-3)

提案した熱エネルギー評価手法を用いて、水平方向・鉛直方向の同時加力試験を対象に熱エネルギー量と鉛プラグの累積吸収エネルギー量を算出する。熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較を図 2-45～図 2-48 に示す。但し、加力開始直後に Lead Top の熱電対が断線したため累積熱エネルギー吸収量には、鉛プラグ頂部分が含まれていない。また、試験ケース 4-5 および 4-6 は Lead O. S. の熱電対が積層ゴム部まで抜け出しているため、Lead Cen. の計測温度が鉛プラグの半径方向に一様分布しているものと仮定して累積熱エネルギー吸収量を計算している。

比較結果から、前述の水平方向単独加力試験結果と同様に、鉛プラグの発熱影響が支配的となる加力直後において熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量が概ね一致しており、提案した熱エネルギー評価手法の妥当性を確認することが出来る。なお、図 2-48 に示す試験ケース 4-5 の 15s～20s 付近で、加力時の熱エネルギー量が累積吸収エネルギー量を上回っている。これは、半径方向の鉛プラグ全体に Lead Cen. の温度を使用したことにより、鉛プラグの熱エネルギーが過大評価となったためと考えられる。また、加力終了時の吸収エネルギーが入力エネルギーを下回っている原因として、表 2-19 から他の試験ケースよりも加力経過に伴う Lead Cen. の抜け出し量が多いためと考えられる。

次に、鉛直加力が鉛プラグの発熱に与える影響について考察する。図 2-45 および図 2-47 に示した静的加力試験において、熱エネルギー量が累積吸収エネルギー量よりも大きく評価される傾向が見られる。この傾向は圧縮時のみ現れることから、熱電対に圧縮力による変形が生じること

で計測誤差が生じた等が考えられるものの、本試験では原因を特定するに至らなかった。一方、引張変形時の熱エネルギー吸収量は、累積吸収エネルギー量と同程度であった。なお、図 2-46 および図 2-48 に示す動的加力試験では、圧縮変形時であっても、熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量が概ね一致することが確認できる。よって、本試験条件では、鉛直加力による鉛プラグの発熱量は、水平加力による発熱量と比較して小さく、鉛プラグの履歴特性に大きな影響を与える要因にならないことが分かった。

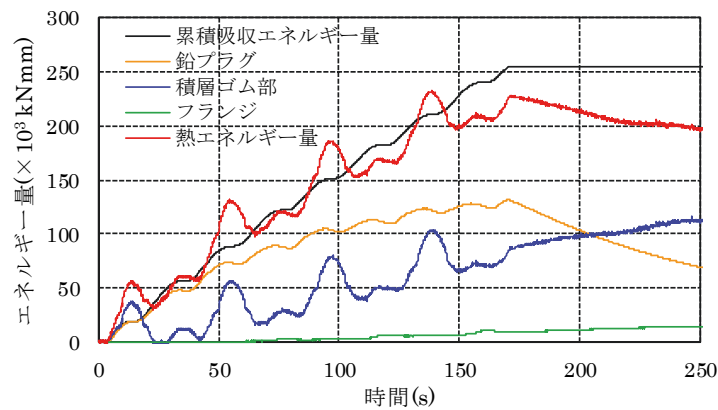


図 2-45 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 (試験ケース 4-2)

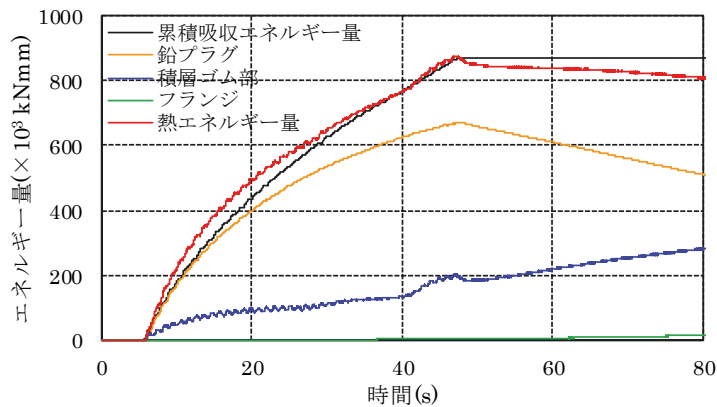


図 2-46 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 (試験ケース 4-3)

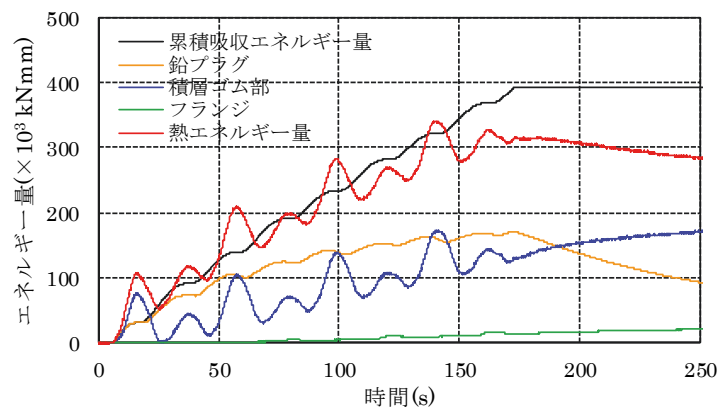


図 2-47 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 (試験ケース 4-4)

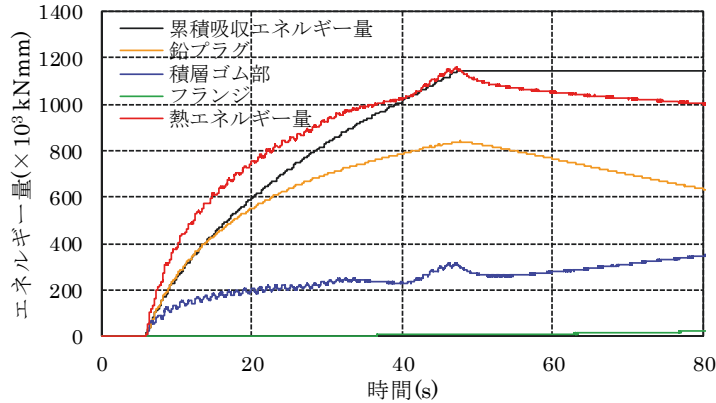


図 2-48 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較 (試験ケース 4-5)

### (3) 熱影響の各種依存性

ここでは、鉛プラグの熱影響評価において、速度、ひずみおよび面圧による依存性を有しているか確認するため、鉛プラグの温度変化、降伏応力度および吸収エネルギー量の相関関係を整理して検討を行う。また、LRBの熱影響による減衰性能低下について、鉛プラグの温度-降伏応力度関係と鉛プラグの単位体積吸収エネルギー量-降伏応力度関係から整理する。なお、熱エネルギー評価から、鉛プラグの発熱範囲は連結鋼板間の鉛プラグ全体となることを確認しているため、依存性確認の際に用いる鉛プラグ温度は、Lead Cen.と Lead O.S.の平均値を使用することとした。

#### a) 速度依存性

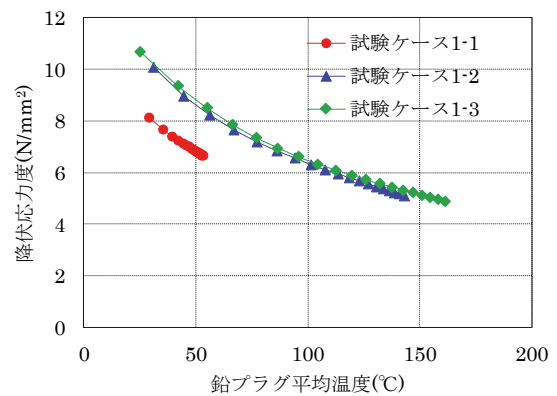
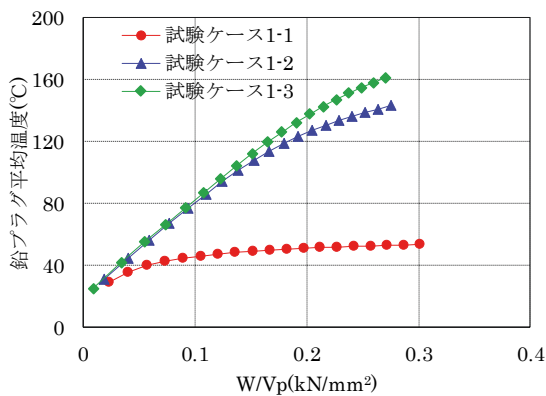
最大せん断ひずみと面圧を同じとし、最大加速度をパラメータとした試験ケースを比較することで、熱影響の速度依存性を確認する。最大せん断ひずみ 100%とした比較を図 2-49 に、最大せん断ひずみ 150%とした比較を図 2-50 に、最大せん断ひずみ 200%とした比較を図 2-51 に示す。いずれも面圧 $5.0\text{N/mm}^2$ としている。なお、試験ケース 1-10 は加力中に熱電対が断線したため、断線前の試験結果のみ示す。また、表 2-6 に示す通り、試験ケース 1-1、試験ケース 1-5、試験ケース 1-9 は静的加力試験、それ以外の試験ケースは動的加力試験となる。

累積吸収エネルギー-鉛プラグ温度関係から、加力初期では吸収エネルギーに対して鉛プラグ温度は直線的に増加しているが、加力経過に伴い、吸収エネルギーに対する温度上昇量の低下が見られる。この傾向は静的加力を与えた試験にて顕著に現れるため、加力経過に伴い放熱によって積層ゴム部の熱エネルギー量が増加するためと考えられる。そこで、加力初期の直線関係に近い範囲を対象とすることで、鉛プラグの発熱量に着目した比較・検討を行った。免震周期（本研究では 3s~10s 程度）で加力した動的加力試験において、鉛プラグの発熱量は、最大加力速度に関わらず殆ど一致しており、LRBの熱影響特性に速度依存特性が無いことが確認できる。

次に、温度-降伏応力度関係から、動的加力試験は加力速度に係わらず概ね同じとなっているが、静的加力試験は動的加力試験よりも降伏応力度が小さく評価されている。既往の報告<sup>21)</sup>から、LRBの降伏応力度は、速度による依存特性を有しており、加力速度が遅い場合は降伏応力度が小さくなるため、このような差異が生じたものと考えられる。発熱影響は速度依存性を持たないことから、降伏応力度の速度依存性を考慮することで温度-降伏応力度関係を再現できるものと考え

られる。なお、動的加力試験では、加力速度に係わらず概ね同様の傾向を示すことから、地震時では動的加力時の温度－降伏応力度関係を採用し、加力速度が遅い出庫試験時や継続時間が長い風応答時など、発熱影響よりも放熱影響が顕著な場合では静的加力時の温度－降伏応力度関係を採用することが望ましいと考えられる。

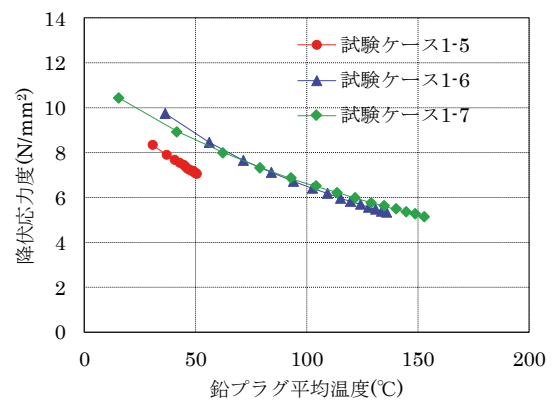
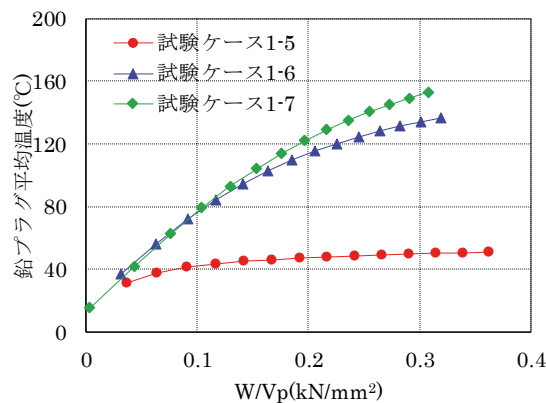
以上の点から、LRBの熱影響特性は発熱量に速度依存性が見られないものの、静的加力時における降伏応力度の速度依存性を考慮する必要がある。但し、入力速度が小さい場合は、入力エネルギー量も小さくなるため地震応答解析結果に与える影響は小さいものと考えられる。また、動的加力時における降伏応力度の速度依存性は、本試験の範囲ではLRBの熱影響特性に殆ど影響しないものと考えられる。



(a) 累積吸収エネルギー－鉛プラグ温度関係

(b) 温度－降伏応力度関係

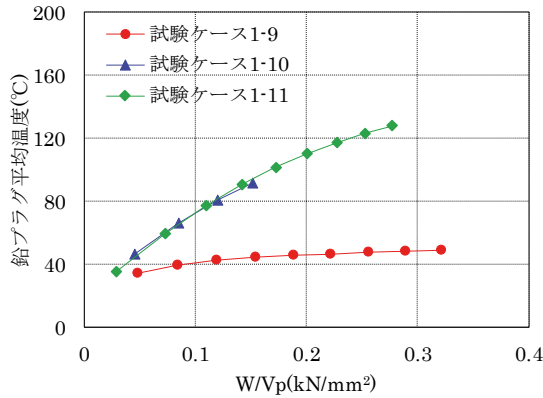
図 2-49 最大せん断ひずみ 100%時の速度依存性



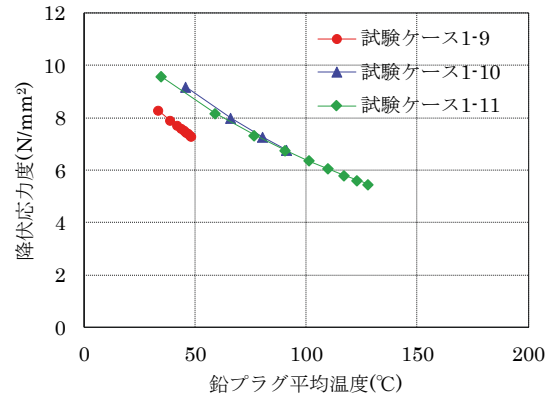
(a) 累積吸収エネルギー－鉛プラグ温度関係

(b) 温度－降伏応力度関係

図 2-50 最大せん断ひずみ 150%時の速度依存性



(a) 累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係



(b) 温度—降伏応力度関係

図 2-51 最大せん断ひずみ 200%時の速度依存性

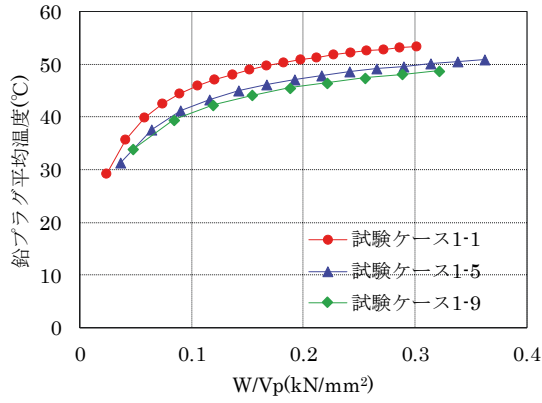
### b) ひずみ依存性

最大加力速度と面圧を同じとし、最大せん断ひずみをパラメータとした試験ケースを比較することで、熱影響の速度依存性を確認する。最大加力速度を 1.5cm/s とした比較を図 2-52 に、最大加力速度を 12.4cm/s とした比較を図 2-53 に、最大加力速度を 20.5cm/s とした比較を図 2-54 に示す。また、加力振動数を 0.02Hz (加力速度は 1.5cm/s～4.5cm/s) とした比較を図 2-55 に示す。いずれも面圧—5.0N/mm<sup>2</sup>としている。なお、試験ケース 1-10 は加力中に熱電対が断線したため、断線前の試験結果のみ示す。試験ケース 2-7 は鉛プラグ周辺部が断線したため、加力振動数一定とした比較は、鉛プラグ中心部の温度を用いて整理する。また、表 2-6 および表 2-7 に示す通り、試験ケース 1-1、試験ケース 1-5、試験ケース 1-9、試験ケース 2-1、試験ケース 2-5、試験ケース 2-7 は静的加力試験、それ以外の試験ケースは動的加力試験となる。

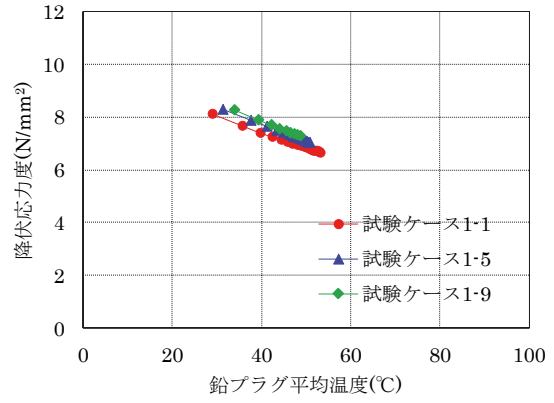
累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係から、図 2-53 および図 2-54 に示す最大加力速度一定の場合、加力初期時の累積吸収エネルギーが小さい範囲では、最大せん断ひずみに係わらず概ね同じ傾向を示す。一方、累積吸収エネルギーが大きい範囲では、最大せん断ひずみが大きい試験ケースにおいて平均温度が低くなっている。これは、加力速度が同じ場合、最大せん断ひずみが大きい試験ケースでは、同じ累積吸収エネルギーに到達するまでの加力時間が長いため、放熱影響を受けて温度低下が生じたものと考えられる。よって、LRB の熱影響特性にひずみ依存特性が無いことが確認できる。図 2-55 に示す加力振動数一定の場合、いずれも累積吸収エネルギー量の増大に伴い、プラグ温度が上昇する傾向が確認できるものの、加力速度の違いから累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係は異なっているため、ひずみ依存性の有無は確認できなかった。

次に、図 2-53 および図 2-54 に示す温度—降伏応力度関係から、最大加力速度一定の場合、最大せん断ひずみに係わらず、殆ど同じとなることから、LRB の熱影響特性にひずみ依存特性が無いことが確認できる。なお、図 2-55 に示す加力振動数一定の場合、加力速度が遅い程、降伏応力度が小さく評価されている。これは、降伏応力度の速度依存性に依るものと考えられる。

以上の点から、最大せん断ひずみ量の違いが発熱や降伏応力度の低下に与える影響は確認できないため、LRB の熱影響特性はひずみ依存性を持たないことが分かった。

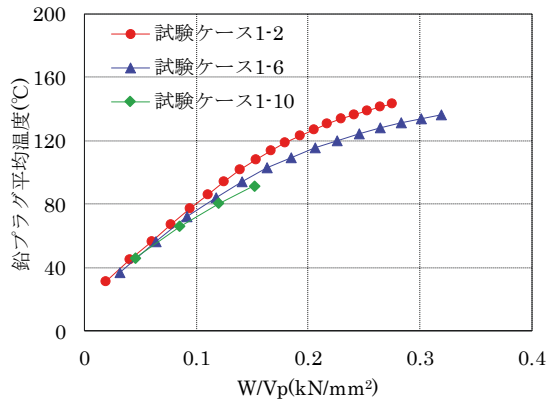


(a) 累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係

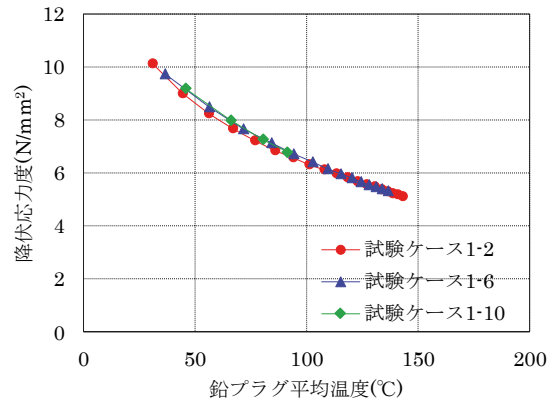


(b) 温度—降伏応力度関係

図 2-52 最大加力速度 1.5cm/s 時の熱影響特性

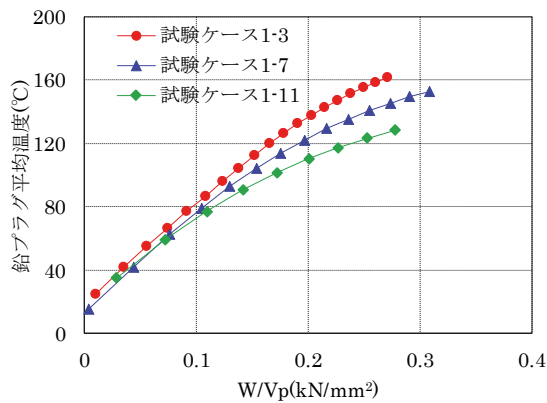


(a) 累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係

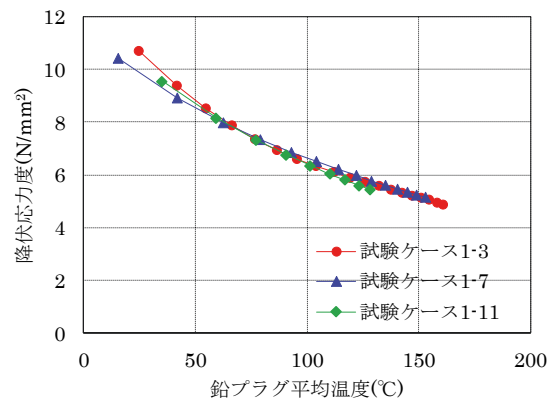


(b) 温度—降伏応力度関係

図 2-53 最大加力速度 12.4cm/s 時の速度依存性



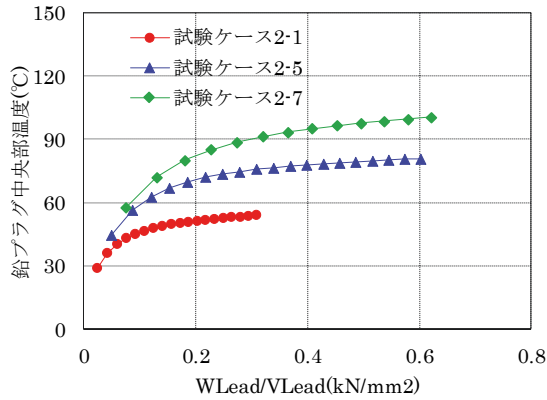
(a) 累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係



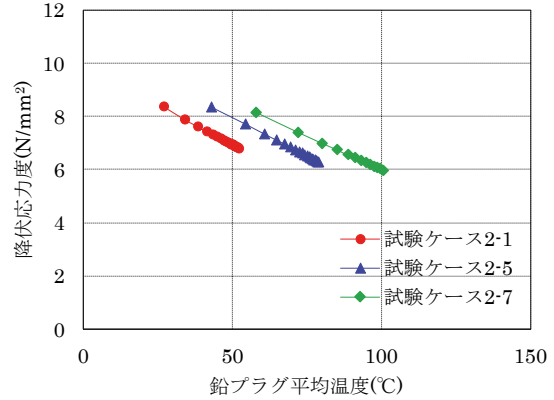
(b) 温度—降伏応力度関係

図 2-54 最大加力速度 20.5cm/s 時の速度依存性





(a) 累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係



(b) 温度—降伏応力度関係

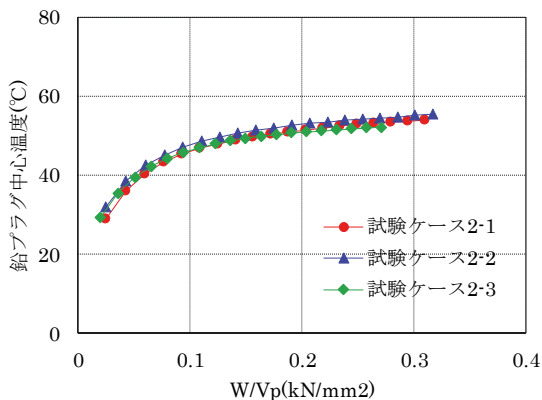
図 2-55 加力振動数 0.02Hz 時の速度依存性

c) 面圧依存性

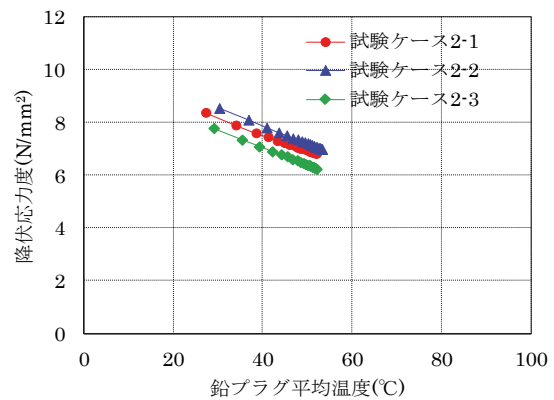
最大せん断ひずみと最大加力速度を同じとし、面圧を変化させた静的加力試験から、LRB の発熱影響に対する面圧依存性を確認する。最大せん断ひずみ 100%、最大加力速度 1.5cm/s とした比較を図 2-56 に示す。

累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係は、全ての試験ケースで概ね同じとなり、発熱影響の面圧依存性は確認できない。また、図 2-56 では、累積吸収エネルギーが大きい範囲でも、中心温度の変化量が同じとなっている。これは、最大加力速度と最大せん断ひずみが同じであり、累積吸収エネルギー量の時間増分が同じとなるため、各試験ケースの放熱影響に殆ど差異がなかったことが原因と考えられる。次に、温度—降伏応力度関係から、降伏応力度の面圧依存性により、面圧が高い試験ケースでやや降伏応力度が大きくなるが、その差は僅少であるため、LRB の発熱影響に面圧依存性を与えないことを確認した。

以上の点から、LRB の熱影響特性は、鉛プラグ降伏応力度の面圧依存性が発熱影響に影響を与えないことから、面圧依存性を考慮する必要がないことが分かった。また、a)~c)より、動的加力時における鉛プラグの吸収エネルギー量に対する温度上昇は加力条件に依らず一定であるため、鉛プラグの熱物性値は温度や加力条件に係わらず一定であると考えられる。



(a) 累積吸収エネルギー—鉛プラグ温度関係



(b) 温度—降伏応力度関係

図 2-56 最大せん断ひずみ 100%、最大加力速度 1.5cm/s 時の面圧依存性

#### d) 降伏応力度の温度依存性

熱・力学連成解析を行う際、熱伝導解析により算出した鉛プラグの温度から、地震応答解析に使用する降伏応力を修正する。この際に使用する鉛プラグの降伏応力度－温度の関係を評価するため、図 2-57 に試験結果から得られた降伏応力度－温度の関係を示す。ここでは、正弦波繰返し加力を実施した試験ケース 1-1～試験ケース 1-3 および水平方向・鉛直方向の同時加力を実施した試験ケース 4-2～試験ケース 4-5 を対象に整理する。なお、その他の試験ケースについては付録 3 に示す。また、図 2-57 には既往研究<sup>22)</sup>の評価式（既往評価式）と文献 5 に示すメーカー技術資料の評価式（メーカー式）を併記する。既往評価式を式 2-5 に、メーカー式を式 2-1 に示す。既往評価式は、出庫試験時の温度補正式であるメーカー式から、3 サイクル目の温度上昇分を考慮して 35°C 程度高温側にシフトし、温度上昇に伴い鉛の降伏応力度が単調減少し、鉛の融点である 327.5°C で降伏応力度が 0.0N/mm<sup>2</sup> となるように設定されている。

図 2-57 (a) から、動的加力試験結果は既往提案式と同じか、やや降伏応力度が大きく評価されている。一方、静的加力試験結果は既往提案式よりも降伏応力度が小さく評価され、メーカー提案式よりも降伏応力度が大きく評価されている。これは、LRB の降伏応力度は速度による依存特性を有しており、加力速度が遅い場合は降伏応力度が小さくなるため、このような差異が生じたものと考えられる。なお、速度依存性を検討する際、放熱影響の差異により静的加力試験において動的加力試験よりも温度低下することが確認されており、図 2-57 における温度差が加力速度の違いによる放熱量の差異である可能性も考えられるが、放熱影響が小さい初期サイクル時から降伏応力度に差異が見られることから、放熱特性の違いが原因ではなく、速度依存性によるものと考えられる。

次に、図 2-57 (b) は図 2-57 (a) と比較して、試験結果は既往提案式よりも降伏応力度が高く評価される傾向にある。試験結果の降伏応力度が高めに評価される原因として、図 2-56 に示す面圧依存性の検討から、水平加力による鉛プラグの発熱量と比較して、鉛直加力による発熱量は僅少であるため鉛直加力による温度上昇による影響とは考え難く、本試験の加力条件から原因を特定することは出来なかった。なお、既往研究<sup>23)</sup>でも同様の結果が示されていることから、試験結果は妥当であると考えられる。また、限られた試験結果からの知見であるが、鉛プラグの降伏応力度が約 4.0N/mm<sup>2</sup> で収束するのに対して、既往提案式は 0.0N/mm<sup>2</sup> まで低下するため、200°C を超える高温時における鉛プラグの減衰性能を適切に再現できないことが分かった。今後、更なるデータ蓄積により降伏応力度低下の収束傾向が明らかとなれば、減衰性能の過度な減少を抑制することが可能となり、合理的な設計が期待できる。

上記の知見から、高温域における差異が見られるものの、水平・鉛直同時入力時を含めて、地震応答解析等の動的加力時では既往提案式を使用し、出庫試験等の静的加力時ではメーカー提案式を使用することで、鉛プラグの履歴特性を安全側に評価できることが分かった。

$$\sigma_Y(T) = \sigma_0 \left\{ 1 - \left( \frac{T_p}{T_L} \right)^{\alpha_T} \right\} \quad (2-5)$$

$$\alpha_T = 0.4 + 0.25 \left( \frac{T_p}{T_L} \right) \quad (2-6)$$

ここで、

$\sigma_Y(T)$  : 熱影響を受けた鉛プラグの降伏応力度

$\sigma_0$  : 15.0(N/mm<sup>2</sup>)

$T_L$  : 327.5(°C)

$T_p$  : 鉛プラグの温度(°C)

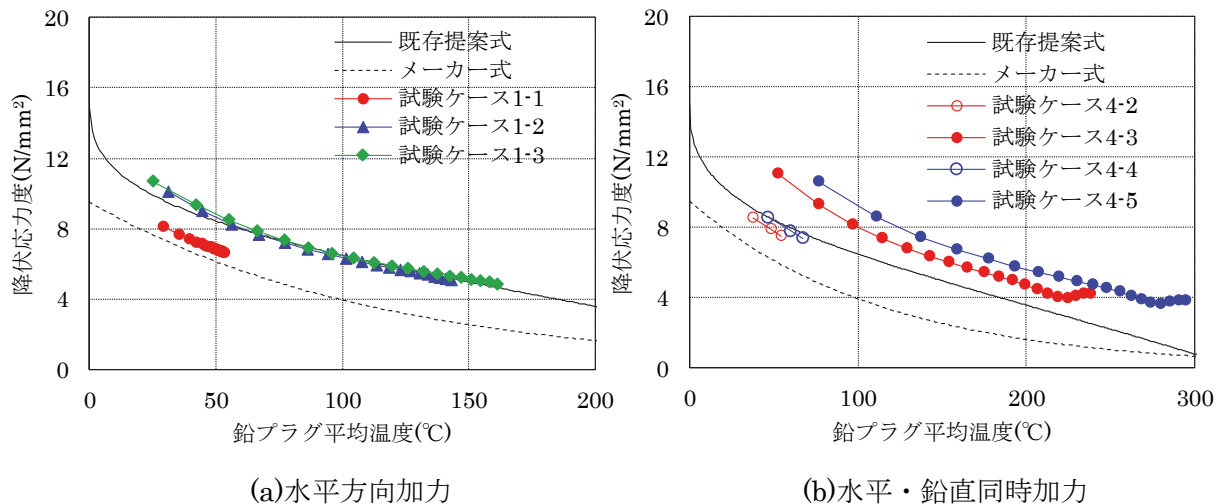


図 2-57 鉛プラグの降伏応力度－温度の関係

e) 降伏応力度の吸収エネルギー依存性

LRB の熱影響による減衰性能低下について簡略法を使用して熱影響評価を実施する際、鉛プラグの単位体積吸収エネルギー量から降伏応力度を算出する手法が提示されている。鉛プラグの単位体積吸収エネルギー量－降伏応力度関係は、既往研究<sup>24) 25)</sup>において熱伝導解析結果を安全側に包絡した評価式(式 2-7)が提示された。その後、式 2-7 に LRB の形状効果を考慮し、基準温度を 15°C から 20°C に修正した評価式(式 2-8)が各メーカーより提示され、個別評定<sup>例えば 26)</sup>(以下、評定式)を取得している。そこで、本試験結果と評定式を比較するため、鉛プラグの降伏応力度－単位体積吸収エネルギー量の関係を図 2-58 に示す。ここでは、正弦波繰返し加力を実施した試験ケース 1-1～試験ケース 1-3 および水平方向・鉛直方向の同時加力を実施した試験ケース 4-2～試験ケース 4-5 を対象に整理する。なお、その他の試験ケースについては付録 4 に示す。

図 2-58 より、動的加力時における単位体積吸収エネルギー量が 0.1kN/mm<sup>2</sup> 以下となる範囲、単位体積吸収エネルギー量が 0.3kN/mm<sup>2</sup> を超える範囲、および静的加力時において、試験結果は評定式よりも降伏応力度の低下率が小さく評価されている。よって、評定式は広い範囲で LRB の放熱影響や降伏応力度の低下による吸収エネルギー量の減少影響を安全側に考慮しているため、精算法を使用した方が合理的な設計が可能であると考えられる。また、静的加力時は加力初期で適合性が高く、動的加力時は加力後半で適合性が高いことから、装置径による放熱特性は安全側に考慮されているものと考えられる。なお、LRB の熱影響評価を行う際は、降伏応力度の速度依存性、加力経過に伴う放熱影響、吸収エネルギー量の時刻歴変化を適切に評価する必要であり、鉛プラグの吸収エネルギーのみで降伏応力度を直接的に評価することは困難であるため、簡略法を使用する際に試験結果を安全側に包絡できている評定式を適用することは妥当であると考えら

れる。

$$k = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{W}{360V_p}\right) \quad (2-7)$$

$$k = \frac{8.33}{7.967} \times \left\{ -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{W'}{360V_p}\right) \right\} \quad (2-8)$$

$$\frac{W'}{V_p} = r \cdot \frac{W}{V_p} \quad (2-9)$$

$$r = \begin{cases} 0.001214D_p + 0.5698, & D_p \leq 354 \\ 1, & D_p > 354 \end{cases} \quad (2-10)$$

ここで、

$k$  : 鉛プラグの降伏応力度低下率

$V_p$  : 鉛プラグの体積 (mm)

$D_p$  : 鉛プラグ径 (mm)

$W$  : 鉛プラグの累積吸収エネルギー量 (N・mm)

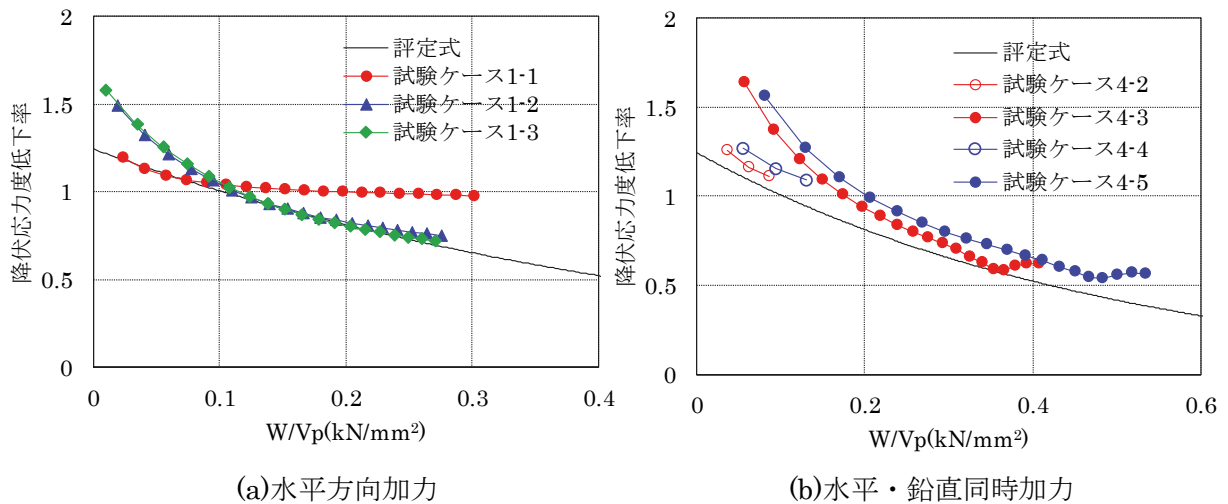


図 2-58 鉛プラグの降伏応力度低下率－単位体積吸収エネルギー量の関係

#### (4) 放熱特性の分析

ここでは、LRB の熱物性値が繰返し加力により変化するか確認するため、入力条件が異なる繰返し加力を受けた LRB の放熱特性を比較する。

同じ試験体を対象に実施した試験ケース 1-1～試験ケース 1-11（基本特性試験及び熱電対が破損した Test1-10 を除く）における繰返し加力終了直後から、Lead Cen.の温度変化を抽出して、各試験ケースにおける加力終了直後の温度が試験ケース 1-7 の温度と一致する時間からプロット

を開始することで、各試験ケースの温度変化を比較した結果を図 2-59 に示す。図 2-59 から、熱電対の拔出し量による若干の差異は見られるものの、各試験ケースの温度変化は殆ど一致しており、繰返し加力による熱物性値の変化は確認できない。また、放熱特性が一致していることから、加力終了後における鉛プラグと積層ゴム部の境界面は、加力条件に依らず同じ接触状態になるものと考えられる。

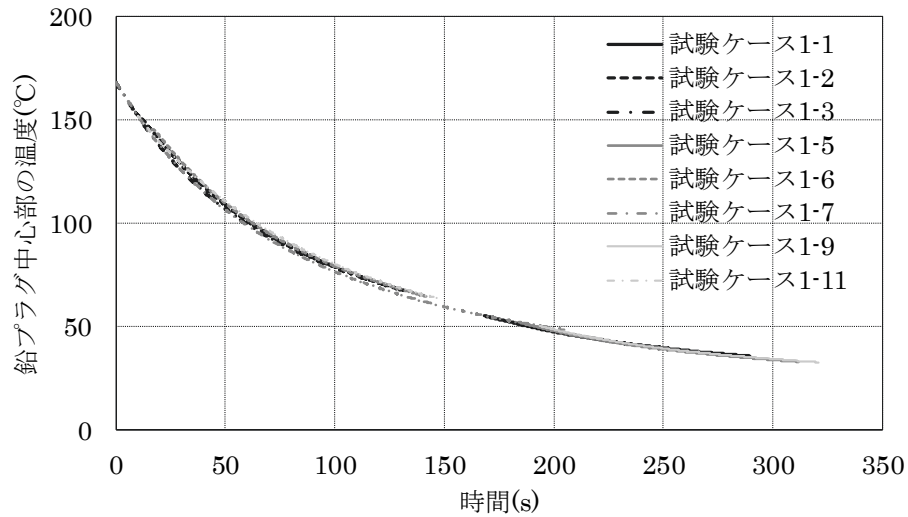


図 2-59 試験ケース 1 における加力終了後の温度変化

## 2.5 まとめ

φ500mm の LRB を用いた繰返し加力試験を実施した。繰返し加力試験では、最大せん断ひずみ量、最大加力速度、面圧をパラメータとした正弦波加力、最大せん断ひずみを 200% に基準化した 4 種類の地震応答波加力および引張領域を跨ぐ水平方向・鉛直方向の 2 方向同時加力を行い、試験体内部の温度変化と LRB の力学特性を計測した。本試験から得られた知見を以下に示す。

- 1) 試験体内部に鉛プラグ中央部を含む 7 個の熱電対を設置し、殆どの試験ケースにおいて試験体内部の詳細な温度変化を計測することが出来た。また、熱電対の抜きし量を計測することで、再現解析の精度向上に資する記録を取得した。
- 2) 試験体内部の温度記録を使用し、試験体各部における熱エネルギーの総和と履歴吸収エネルギーを比較することで、鉛プラグの発熱範囲が連結鋼板間の鉛プラグ全体となること、鉛プラグの発熱は主として半径方向の積層ゴム部に伝導していることを確認した。
- 3) LRB の温度－降伏応力度関係において、せん断ひずみ、加力速度および面圧の依存性が無いことを確認した。但し、鉛プラグの降伏応力における速度依存性から、既往の提案式およびメーカー式には加力速度の適用範囲があることを確認した。
- 4) 降伏応力度算出時の鉛プラグ温度に発熱範囲の平均温度を使用することで、動的加力時では既往の提案式、静的加力時ではメーカー式の温度－降伏応力度関係を用いて鉛プラグの履歴曲線を安全側に評価できることを確認した。また、鉛プラグの平均温度を使用して発熱範囲の熱エネルギーを評価することで、履歴吸収エネルギーとの釣合いが取れることから、降伏応力度算出時の鉛プラグ温度に平均温度を使用することは適当であると考えられる。
- 5) 4)において、試験結果の温度－降伏応力度関係は、200℃程度まで既往の提案式と同様の傾向を示しているが、200℃から融点に近い 300℃程度まで温度上昇した際には、試験結果の鉛プラグの降伏応力度は約 4N/mm<sup>2</sup> に収束するのに対し、既往の提案式は鉛プラグの温度の上昇に伴い降伏応力度を漸減させており、提案式は試験結果を再現できていない。よって、鉛プラグの降伏応力度を約 4N/mm<sup>2</sup> に収束した温度－降伏応力度関係を用いることで、長周期・長時間地震動などの過大な繰返し変形による温度上昇が生じる際、降伏応力度が必要以上に低下し、免震装置の応答が増大することを防ぐことで、合理的な設計が期待できる可能性がある。
- 6) 入力条件が異なる繰返し加力を受けた LRB の加力後温度変化は概ね一致しており、繰返し加力により熱物性値は変化せず、鉛プラグと積層ゴム部における境界面の接触状態は加力条件に依らず同じになるものと考えられる。
- 7) 単位体積吸収エネルギー量と降伏応力度低下率の関係について、評定式は試験結果を安全側に包絡できることを確認したものの、広い範囲で LRB の放熱影響や降伏応力度の低下による吸収エネルギー量の減少影響を安全側に考慮しているため、精算法を使用した方が合理的な設計が可能であると考えられる。
- 8) 50m を超える累積変形を受けた場合や鉛プラグに 300℃程度の発熱温度が生じた場合であっても、プラグ温度が常温まで低下することで力学特性が同じとなること、また、水平方向に線形限界ひずみ相当の繰返し変形を、鉛直方向に引張領域と圧縮領域を横断する繰返し変形を与えた同時加力試験においても、LRB が適切に動作することを確認し、従来、実験的に確認されていない熱・荷重状態における LRB の力学特性を把握することで、装置の健全性確認範囲を拡

充した。

## 【2章 参考文献】

- 1) 山本知史, 古川茂, 島本龍, 佐藤邦彦, 清水弘: 次世代軽水炉の免震技術の開発 (その 1) 免震技術の開発計画, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), pp.1131-1132, 2010 年 9 月
- 2) 浅原信吾, 乗物丈巳, 清水弘, 神保雅一, 池田正樹, 廣谷勉, 梅木芳人: 原子力施設の免震技術の開発 (その 33) 開発成果の概要 (その 2) 免震建屋の設計・評価, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), pp.1359-1360, 2016 年 8 月
- 3) 日本電気協会: 原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG4614-2019, 2019 年 6 月
- 4) 日本規格協会: 建築免震用積層ゴム支承—第 2 部: 試験方法 JIS K 6410-2, 2015 年 10 月
- 5) オイレス工業: 鉛プラグ挿入型積層ゴム支承 LRB 認定番号: MVBR-0355, 2011 年 1 月
- 6) Ioannis V. Kalpakidis, Michael C. Constantinou: Effects of Heating on Behavior of Lead-Rubber Bearings. II: Verification of Theory, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, pp.1440-1449, 2009.12
- 7) 日本ゴム協会, 日本免震構造協会: 建築免震用積層ゴム支承ハンドブック, 大應, 2017 年 6 月
- 8) 馬場丈雄, 山本知史, 古川茂, 島本龍, 佐藤邦彦: 次世代軽水炉の免震技術の開発 (その 3) 免震装置の仕様決定のためのパラメータ解析, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), pp.1135-1136, 2010 年 9 月
- 9) 人見泰義, 加治木茂明, 荒井芳和: 鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性
- 10) 清水弘, 山本知史, 古川茂, 島本龍, 佐藤邦彦: 次世代軽水炉の免震技術の開発 (その 2) 免震技術の設計条件, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), pp.1133-1134, 2010 年 9 月
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015 年 6 月
- 12) 建築性能基準推進協会 HP: <https://www.seinokyo.jp/jsh/top/> (2020 年 5 月参照)
- 13) 気象庁 HP: [http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016\\_04\\_14\\_kumamoto/index.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/index.html) (2020 年 5 月参照)
- 14) 建築研究所 HP: <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html> (2020 年 5 月参照)
- 15) 和田章, 木下雅彦: MSS モデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析 (その 1), 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), pp.313-314, 1985 年 10 月
- 16) 平井秀男, 廣谷勉, 清水弘, 朝倉伸治, 中川進一郎, 島本龍: 原子力施設の免震技術の開発 (その 2) 実規模免震装置の鉛直方向ソフトニング試験, 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道), pp.1297-1298, 2013 年 8 月
- 17) 可児長英, 岩部直征, 高山峯夫, 森田慶子, 和田章: 天然ゴム系・高減衰型・鉛プラグ入り積層ゴム入り積層ゴムのオフセットせん断—引張特性試験 (その 1) 試験計画の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.559-560, 1999 年 9 月
- 18) 池田正樹, 今岡哲男, 金澤健司, 藪内耕一, 山本知史, 神保雅一, 梅木芳人: 原子力施設の免震技術の開発 (その 25) 実規模免震装置の破断試験 (破断曲面に関する詳細評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.1343-1344, 2016 年 8 月

- 19) 西村拓也, 山本祥江, 黒澤到, 菊地優, 甲斐義郎, 仲村崇仁: 天然ゴム系積層ゴムの水平鉛直同時加力時の大変形挙動特性に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.55B, pp.517-525, 2009年3月
- 20) 内藤伸幸, 松田泰治, 宇野裕恵, 川神雅秀: 鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)のMullins効果とハードニングが耐震性に及ぼす影響, 土木学会論文集A1, Vol.73 No.4, pp.499-510, 2017年
- 21) 和氣知貴, 菊地優, 石井建, 黒嶋洋平, 仲村崇仁: 繰り返し加力を受ける鉛プラグ入り積層ゴム支承の降伏荷重評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻第750号, pp.1105-1115, 2018年8月
- 22) 近藤明洋, 竹中康雄, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 宮崎充: 大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その10 鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.399-400, 2008年9月
- 23) 金子修平, 西村拓也, 山本祥江, 仲村崇仁: 多数回繰り返し変形による特性変動を考慮した鉛プラグ入り積層ゴムの復元力モデルの構築 その1: 鉛プラグ入り積層ゴムの多数回繰り返し加振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.385-386, 2012年9月
- 24) 建築研究所: 免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究, 建築研究資料, No.170, 2016年4月
- 25) 近藤明洋, 竹中康雄, 矢口友貴, 古橋剛, 菊地優, 飯場正紀: 長周期地震動に対する免震建築物の簡易応答評価法 その1: 鉛プラグ入り積層ゴム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.765-766, 2013年8月
- 26) ブリヂストン: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化(ブリヂストン鉛プラグ挿入型積層ゴム支承), 日本建築センター, 評定書, BCJ 評定-IB0012-01, 2017年5月



### 3. 熱・力学連成解析を用いた評価

2章では、LRBの繰返し加力試験を実施し、試験体の履歴曲線と内部の温度変化を計測した。試験結果から、熱エネルギー評価を用いて鉛プラグの発熱範囲と熱伝導経路を明らかにすると共に、熱影響による減衰性能低下の依存性評価から、鉛プラグ温度-降伏応力度関係式の適用性を確認した。その結果、簡略法を用いて熱影響を精度良く評価することは困難であり、LRBの力学特性と温度変化を逐次評価できる精算法の採用が望ましいことが分かった。

そこで、3.1節では、発熱分布と履歴特性の相互作用効果を取り込んだ熱・力学連成解析プログラムを開発する。3.2節では、2章に示した知見を活かした熱・力学連成解析モデルを構築する。構築した解析モデルを用いて、3.3節にて繰返し加力試験の再現解析を実施し、開発プログラムおよびモデル化手法の妥当性検証を行う。

#### 3.1 熱・力学連成解析プログラムの開発

精算法で使用する熱・力学連成解析は、上部建屋および免震層の応答値を算出し、LRBの吸収エネルギー量を評価する地震応答解析と、力学モデルで得られた吸収エネルギー量を発熱量に変換し、装置内部の温度分布を算出する熱伝導解析を同時並行的に実施する解析手法である。本研究で開発する熱・力学連成解析プログラムでは、地震応答解析にNewmark  $\beta$ 法を用いた直接積分法を使用し、熱伝導解析に有限要素法(FEM)を用いた非定常熱伝導解析を使用する。

まず、地震応答解析から積分ステップ( $t + \Delta t$ )の応答値を算出し、応答値から累積吸収エネルギーを評価する。増分形式で整理した運動方程式を式3-1に示す。なお、本プログラムでは、Newmark  $\beta$ 法の内、数値積分が無条件安定となる平均加速度法( $\delta = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ )を使用する。

$$[M]\{\Delta\ddot{x}_t\} + [C]\{\Delta\dot{x}_t\} + [K_t]\{\Delta x_t\} + \{E_t\} = \{F_{t+\Delta t}\} \quad (3-1)$$

ここで、

$\{\Delta x_t\}$ : 増分変位 (=  $\{x_{t+\Delta t}\} - \{x_t\}$ )

$\{\Delta\dot{x}_t\}$ : 増分速度 (=  $\{\dot{x}_{t+\Delta t}\} - \{\dot{x}_t\}$ )

$\{\Delta\ddot{x}_t\}$ : 増分加速度 (=  $\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\} - \{\ddot{x}_t\}$ )

$[M]$ : 質量マトリクス

$[C]$ : 減衰マトリクス

$[K_t]$ : 剛性マトリクス

$\{E_t\}$ : 負担力ベクトル (=  $\{F_t\} + \{\gamma_t\}$ )

Newmark  $\beta$ 法の公式<sup>1)</sup>から、

$$\{\dot{x}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{x}_t\} + [(1 - \delta)\{\ddot{x}_t\} + \delta\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\}]\Delta t \quad (3-2)$$

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_t\} + \{\dot{x}_t\}\Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \{\ddot{x}_t\} + \beta\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\} \right] \Delta t^2 \quad (3-3)$$

式 3-2 および式 3-3 を増分系として整理する。

$$\{\Delta \dot{x}_t\} = [\{\dot{x}_t\} + \delta\{\Delta \ddot{x}_t\}]\Delta t \quad (3-4)$$

$$\{\Delta \ddot{x}_t\} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \left[ \{\Delta x_t\} - \{\dot{x}_t\} \Delta t - \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{x}_t\} \right] \quad (3-5)$$

式 3-4 および式 3-5 を式 3-1 に代入して応答値を算出する。ここで、 $[K_t]$  は LRB の履歴則に基づき逐次変化するため、Newton 法を用いた収斂計算を行う。発生した残差ベクトル $\{\gamma_t\}$ は、負担力ベクトル $\{E_t\}$ として次ステップに持ち越している。

式 3-1 から算出した鉛プラグの吸収エネルギー量を、式 3-6 を用いて単位体積当たりの発熱エネルギーに変換する。

$$\dot{Q} = \frac{W}{C \cdot V_p} \quad (3-6)$$

ここで、

$\dot{Q}$  : 単位体積・単位時間当たりの発熱量 (kW/m<sup>3</sup>)

$W$  : 鉛プラグの吸収エネルギー量 (kW・m)

$C$  : 鉛プラグの熱容量 (kW・m/K)

$V_p$  : 発熱範囲の鉛プラグ体積 (m<sup>3</sup>)

次に、式 3-6 で算出した熱エネルギーを、式 3-7 に示す熱伝導方程式<sup>2)</sup>に入力し、LRB の温度変化を算出する。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{Q} \quad (3-7)$$

ここで、

$T$  : 要素内温度 (°C)

$\rho$  : 要素密度 (ton/m<sup>3</sup>)

$c$  : 要素比熱 (kJ/ton・K)

$\lambda$  : 要素熱伝導率 (kW/m・K)

本プログラムでは、LRB と外部環境の境界条件として、ノイマン境界 (式 3-8) とディリクレ境界 (式 3-9) を組込むこととした。これは、2 章で示した繰返し加力試験結果でも確認できる通り、LRB は鉛プラグの周辺を積層ゴムで被覆されており、装置外周部の温度上昇は殆ど見られないことから、対流を考慮せず、外気温一定条件下で熱伝達を再現したノイマン境界を選択した。また、LRB の上下端には、繰返し加力試験では断熱材が設置されており、実建物では一般

的にコンクリート造のペデスタルが設置されている。よって、断熱材もしくはペデスタルから外部に伝導する熱量は半径方向に伝導する熱量より小さいと考えられることから、境界上の温度を予め規定できるディリクレ境界を選択した。

$$q = \alpha_c(T - T_c) \quad (3-8)$$

$$T = \bar{T} \quad (3-9)$$

ここで、

$\alpha_c$  : 外部熱伝導率 (kW/m · K)

$T_c$  : 外部温度 (°C)

$\bar{T}$  : 規定温度 (°C)

式 3-7 に要素内温度の変分 $\delta T$ を乗じ、要素領域 $V$ 全体で積分を行う。

$$\begin{aligned} \int_V \rho c \delta T \dot{T} dV &= \int_V (\delta T (\nabla(\lambda \nabla T))) dV + \int_V (\delta T \cdot \dot{Q}) dV \\ &= \int_V \nabla(\delta T (\lambda \nabla T)) dV - \int_V \nabla \delta T (\lambda \nabla T) dV + \int_V (\delta T \cdot \dot{Q}) dV \end{aligned} \quad (3-10)$$

次に、式 3-10 の右辺第 2 項を移項し、右辺第 1 項に発散定理<sup>3)</sup>を適用する。なお、 $dS$ は境界面の微小面積を示す。右辺第 1 項は、要素領域 $V$ の境界面法線方向熱流速となるため、フーリエ則 ( $q = -n \cdot \nabla(\lambda T)$ ) から式 3-11 となる。

$$\begin{aligned} \int_V \rho c \delta T \dot{T} dV + \int_V \nabla \delta T (\lambda \nabla T) dV &= \int_S n \cdot (\delta T (\lambda \nabla T)) dS + \int_V (\delta T \cdot \dot{Q}) dV \\ &= \int_V (\delta T \cdot \dot{Q}) dV - \int_S (\delta T \cdot q) dS \end{aligned} \quad (3-11)$$

既往研究<sup>4)</sup>では、差分法により熱伝導解析を行う熱・力学連成解析手法が開発されている。しかし、差分法は要素サイズにより解析刻みに制限を受けるため、極小の接触要素をモデル化する本研究の提案手法には適していない。そこで、本プログラムでは、有限要素法を用いて熱伝導解析を行う。まず、式 3-11 を要素内積分の重ね合わせで表現する。なお、右辺第 1 項は発熱量ベクトルを表しているため、要素の重ね合わせは鉛プラグの発熱範囲のみである。

$$\sum_e \left( \int_{V_e} \rho c \delta T \dot{T} dV_e \right) + \sum_e \left( \int_{V_e} \nabla \delta T (\lambda \nabla T) dV_e \right) = \sum_e \left( \int_{V_e} (\delta T \cdot \dot{Q}) dV_e \right) - \sum_e \left( \int_{S_e} (\delta T \cdot q) dS_e \right) \quad (3-12)$$

次に、要素内温度を節点温度と内挿関数 $N$  (境界上の内挿関数は $\bar{N}$ ) に置換する。ここで、要素

構成節点番号を $p, q$ としている。

$$T = N^p T^p \quad (3-13)$$

$$\delta T = N^p \delta T^p \quad (3-14)$$

$$\delta T = \bar{N}^p \delta T^p \quad (3-15)$$

式 3-13～式 3-15 を式 3-12 に代入して整理する。

$$\begin{aligned} \sum_e \left( \int_{V_e} \rho c N^p \delta T^p N^q \dot{T}^q dV_e \right) + \sum_e \left( \int_{V_e} \nabla N^p \delta T^p (\lambda \nabla N^q T^q) dV_e \right) \\ = \sum_e \left( \int_{V_e} (N^p \delta T^p \cdot \dot{Q}) dV_e \right) - \sum_e \left( \int_{S_e} (\bar{N}^p \delta T^p \cdot q) dS_e \right) \end{aligned} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \sum_e \left\{ \delta T^p \left( \int_{V_e} \rho c N^p N^q dV \right) \dot{T}^q \right\} + \sum_e \left\{ \delta T^p \left( \int_{V_e} \nabla N^p (\lambda \nabla N^q) dV_e \right) T^q \right\} \\ = \sum_e \left\{ \delta T^p \left( \int_{V_e} (N^p \cdot \dot{Q}) dV_e \right) \right\} - \sum_e \left\{ \delta T^p \left( \int_{S_e} (\bar{N}^p \cdot q) dS_e \right) \right\} \end{aligned} \quad (3-17)$$

要素構成節点番号 $p, q$ と領域全体での節点番号 $a, b$ の対応付けができるものとする、式 3-17 は以下のように整理できる。

$$\begin{aligned} \delta T^a \sum_e \left( \int_{V_e} \rho c N^p N^q dV \right) \dot{T}^b + \delta T^a \sum_e \left( \int_{V_e} \nabla N^p (\lambda \nabla N^q) dV_e \right) T^b \\ = \delta T^a \sum_e \left( \int_{V_e} (N^p \cdot \dot{Q}) dV_e \right) - \delta T^a \sum_e \left( \int_{S_e} (\bar{N}^p \cdot q) dS_e \right) \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} \sum_e \left( \int_{V_e} \rho c N^p N^q dV \right) \dot{T}^b + \sum_e \left( \int_{V_e} \nabla N^p (\lambda \nabla N^q) dV_e \right) T^b \\ = \sum_e \left( \int_{V_e} (N^p \cdot \dot{Q}) dV_e \right) - \sum_e \left( \int_{S_e} (\bar{N}^p \cdot q) dS_e \right) \end{aligned} \quad (3-19)$$

本研究では、円筒形の LRB を対象にモデル化を行うため、3次元直交座標系である式を円筒座標系に置き換える<sup>5)</sup>。直交座標系と円筒座標系の関係は式 3-20 の通りである。ここで、 $r$  ( $r^2 = x^2 + y^2$ ) は半径方向、 $\theta$  は円周方向の自由度を示す。

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = \begin{cases} r \cos \theta \\ r \sin \theta \\ z \end{cases} \quad (3-20)$$

次に、領域積分と境界積分を円筒座標系に置き換える。領域積分を式 3-21 に示す。

$$\begin{aligned} dV = dx dy dz &= \frac{\partial(x \ y \ z)}{\partial(r \ \theta \ z)} dr d\theta dz \\ &= \det \begin{vmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & r \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} dr d\theta dz \\ &= r \cdot dr d\theta dz \end{aligned} \quad (3-21)$$

境界積分<sup>6)</sup>を式 3-22 に示す。なお、 $ds$  は境界面の線素（境界面微小面積における 1 辺の長さ）を示す。

$$\begin{aligned} dS &= r \cdot ds d\theta + \frac{1}{2} ds^2 d\theta \\ &\doteq r \cdot ds d\theta \end{aligned} \quad (3-22)$$

式 3-21 および式 3-22 から、式 3-19 の非定常熱伝導方程式を円筒座標系に変換する。

$$\begin{aligned} \sum_e \left( \int_r \int_\theta \int_z (\rho c N^p N^q r) dz d\theta dr \right) \dot{T}^b + \sum_e \left( \int_r \int_\theta \int_z (\nabla N^p \lambda \nabla N^q r) dz d\theta dr \right) T^b \\ = \sum_e \left( \int_r \int_\theta \int_z (N^p \cdot \dot{Q} \cdot r) dz d\theta dr \right) - \sum_e \left( \int_\theta \int_s (\bar{N}^p \cdot q \cdot r) ds d\theta \right) \end{aligned} \quad (3-23)$$

LRB は軸対称の形状であるため、 $\theta$  方向一定条件を加えると式 3-24 に整理できる。ここで、左辺第 1 項は熱容量マトリクス、第 2 項は熱伝導マトリクス、右辺第 1 項は発熱量ベクトル、第 2 項は熱流束境界条件を示す。

$$\begin{aligned} \sum_e \left( \int_r \int_z (\rho c N^p N^q r) dz dr \right) \dot{T}^b + \sum_e \left( \int_r \int_z (\nabla N^p \lambda \nabla N^q r) dz dr \right) T^b \\ = \sum_e \left( \int_r \int_z (N^p \cdot \dot{Q} \cdot r) dz dr \right) - \sum_e \left( \int_s (\bar{N}^p \cdot q \cdot r) ds \right) \end{aligned} \quad (3-24)$$

本研究では、非線形熱伝導方程式の解法として後退差分法を用いることとする。ここでは、簡単のためにマトリクス表示とし、未知量である温度ベクトル $\{T\}$ を左辺に移行して整理する。

$$\sum_e ([M]_e) \{\dot{T}\} + \sum_e ([K]_e) \{T\} = \dot{Q} \sum_e \{f_1\}_e + \sum_e (\{f_s\}_e - [K_s]_e \{T\}) \quad (3-25)$$

$$[M] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (3-26)$$

ここで、

$[M]_e$  : 要素熱容量マトリクス

$[K]_e$  : 要素熱伝導マトリクス

$[K_s]_e$  : 境界要素熱伝導マトリクス

$\{F\}$  : 発熱量と熱流速による境界面からの放熱量ベクトル

時間刻みを $dt$ として後退差分近似する。

$$[M] \frac{\{T\}^{t+dt} - \{T\}^t}{dt} + [K] \{T\}^{t+dt} = \{F\}^{t+dt} \quad (3-27)$$

左辺に未知量である $\{T\}^{t+dt}$ を移項すると以下の連立1次方程式を得る。

$$\left( \frac{1}{dt} [M] + [K] \right) \{T\}^{t+dt} = \{F\}^{t+dt} + \frac{1}{dt} [M] \{T\}^t \quad (3-28)$$

$\left( \frac{1}{dt} [M] + [K] \right)$ は実対称行列であるため、LDL<sup>T</sup>分解することができる。そこで、連立1次方程式の解は、以下に示す前進消去(式3-31)と後退代入(式3-32)により算出する。

$$[A] \{x\} = \{y\} \quad (3-29)$$

$$[L][D][L]^T \{x\} = \{y\} \quad (3-30)$$

$$[L]\{b\} = \{y\} \quad (3-31)$$

$$[D][L]^T \{x\} = \{b\} \quad (3-32)$$

ここで、

$$[A] = \frac{1}{dt} [M] + [K] = [L][D][L]^T \quad (3-33)$$

$$\{x\} = \{T\}^{t+dt} \quad (3-34)$$

$$\{y\} = \{F\}^{t+dt} + \frac{1}{dt} [M]\{T\}^t \quad (3-35)$$

なお、 $[D]$ は対角行列、 $[L]$ は下三角行列を示す。行列 $[A]$ が実対称行列であれば、 $[A] = [L][D][L]^T$ と表すことができ、LDL<sup>T</sup>分解が可能となる。

式 3-28 から算出した鉛プラグの温度分布から、発熱範囲の体積平均温度を算出し、式 2-5 に示す既往提案式に代入することで、次ステップの地震応答解析で使用する鉛プラグの降伏応力度を算出する。

$$T_p = \frac{\sum T_n \cdot V_n}{V_p} \quad (3-36)$$

ここで、

$T_p$  : 鉛プラグの体積平均温度 (°C)

$T_n$  : 発熱範囲の節点温度 (°C)

$V_n$  : 節点 $n$ の支配体積 (m<sup>3</sup>)

本解析プログラムでは、式 3-1 の運動方程式における残差力が基準値以下となるまで収斂計算を行い、各積分ステップの地震応答解析および熱伝導解析の解を算出する。熱・力学連成解析のフローチャートを図 3-1 に示す。

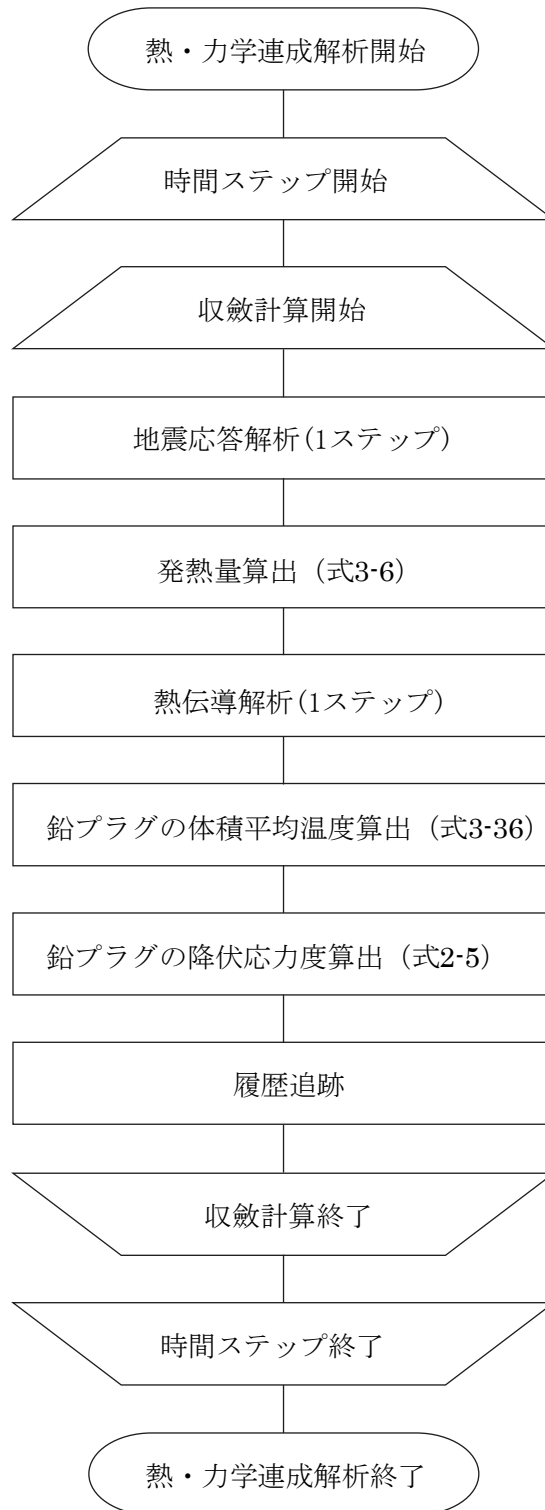


図 3-1 熱・力学連成解析のフローチャート



### 3.2 解析モデル

ここでは、繰返し加力試験の再現解析を行うため、熱・力学連成解析に使用する地震応答解析モデルと熱伝導解析モデルを作成する。

地震応答解析モデルは、LRB を鉛プラグと積層ゴムに分離してモデル化を行う。鉛プラグは、完全バイリニア型の Multi-Shear Spring (MSS) 要素とし、ばねの本数は 6 本とした。繰返し加力試験は、いずれも積層ゴムの線形範囲内で実施しているため、積層ゴムは線形ばね要素でモデル化した。加力試験は室内で実施しており、外気温は 15~20℃程度であるため、積層ゴムの物性値は 20℃の設計値を使用する。また、2.4.1 項より、鉛プラグが高温状態となっても、積層ゴム部の温度上昇は積層ゴム内周部 (Rub. I.S.) で 50℃程度と小さく、かつ、温度上昇する範囲も局部的であることを確認しているため、積層ゴム部における熱物性値の温度依存性は考慮していない。地震応答解析モデルの諸元を表 3-1 に、解析モデル図を図 3-2 に示す。なお、再現解析では、強制変位入力により応答解析を実施している。

熱伝導解析モデルは、円周方向に軸対称条件、高さ方向に線対称条件を設定した 1/4 断面でモデル化する。繰返し加力試験では、試験機に熱が逸散しないよう LRB 上部に断熱材を設置しているため、解析モデルでもフランジの上下端に断熱材をモデル化する。半径方向のメッシュ分割<sup>8)</sup>は、鉛プラグを 10 分割、積層ゴム部を 25 分割し、鉛プラグと積層ゴムの境界部にゴム膜、装置外周部に被覆ゴムを各 1 要素設置する。高さ方向のメッシュ分割は、積層ゴムおよび中間鋼板を 1 分割、連結鋼板を 6 分割、フランジ鋼板を 5 分割、断熱材を 2 分割する。境界条件は断熱材上部をディレクリ境界、それ以外は外気を想定したノイマン境界とした。LRB の熱物性値は既往文献<sup>9)</sup>を参考に設定した。天然ゴムは硬質タイプの熱物性値を使用している。LRB の熱物性値を表 3-2 に、試験体のメッシュモデルを図 3-3 に示す。図 3-3 には、熱電対の初期設置位置近傍の節点を示しているが、2.4.1 項に示す熱電対の抜け出し量 (例えば表 2-13) に合わせて、節点温度の評価位置を変更している。

ここで、2.4.2 項の熱エネルギー評価から、連結鋼板間における鉛プラグの内部温度を平均化することで、累積吸収エネルギーと熱エネルギーが一致したことから、鉛プラグのせん断変形は連結鋼板によって拘束されるが、中間鋼板による拘束効果は小さいものと考え、鉛プラグの発熱範囲は連結鋼板間に設定した。また、鉛プラグ (Lead Cen. と Lead O.S.) の平均温度を使用することで、既往の評価式における鉛プラグの温度-降伏応力度関係から試験結果を良く再現できることを確認したため、鉛プラグ温度は発熱範囲における体積平均温度を用いることとした。鉛プラグの温度-降伏応力度関係は、せん断ひずみおよび面圧の依存性を持たないが、降伏応力度の速度依存性の影響を受けるため、動的加力時は既往提案式 (式 2-5) を使用し、静的加力時はメーカ式 (式 2-2) を使用する。なお、鉛プラグ頂部は連結鋼板に拘束された非発熱範囲としたため、平均化の対象としない。

本研究では、鉛プラグと鉛プラグ周辺部の境界条件を変えた 3 ケースの熱伝導解析モデルを作成し、再現解析結果と試験結果の比較を行う。接触状態は、鉛プラグの境界部に接触要素 (図 3-3) を設置してモデル化する。使用する接触要素は、半径方向において積層ゴムと中間鋼板との内径差により生じるゴム膜を、高さ方向において加力時に鉛プラグがせん断変形を生じることで、シアキーと非接触になる箇所があると仮定した空気層をモデル化している。なお、接触要素はせん断ひずみに係わらず一定 (完全接触) とした。解析に使用するモデルは、鉛プラグと鉛プラグ

周辺部が接触している（接触要素を設置しない）モデル（Model1）、半径方向のみ接触要素を設置したモデル（Model2）、および、半径方向および高さ方向の接触要素を設置したモデル（Model3）とした。

表 3-1 地震応答解析モデルの諸元

部位	項目	物性値
積層ゴム	初期剛性 (kN/m)	791
鉛プラグ	初期剛性 (kN/m)	23000
	降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	式 2-5
	降伏後剛性低下率	0.001

表 3-2 各材料の熱伝導特性

材料	熱伝導率 (W/(m・K))	比熱 (kJ/(kg・K))	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
鋼材	80.3	0.442	7850
天然ゴム (硬質)	0.13	1.90	911
鉛	35.2	0.13	11330
断熱板	0.274	0.931	2049
空気	0.0241	1005	1.21

フランジプレート、連結鋼板、シアキー、中間鋼板は同じ鋼材を使用  
積層ゴム、ゴム膜、被覆ゴムは同じゴム材料を使用

表 3-3 各解析モデルの接触状態

解析モデル	半径方向	高さ方向
Model1	—	—
Model2	接触要素 (ゴム膜)	—
Model3	接触要素 (ゴム膜)	接触要素 (空気層)

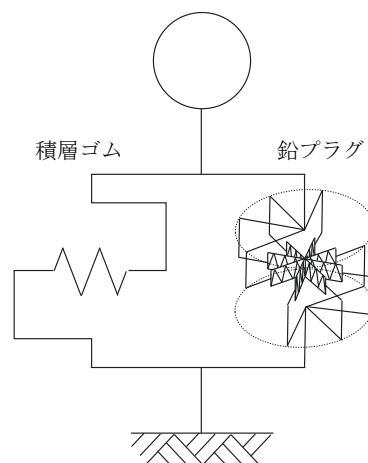


図 3-2 地震応答解析モデル

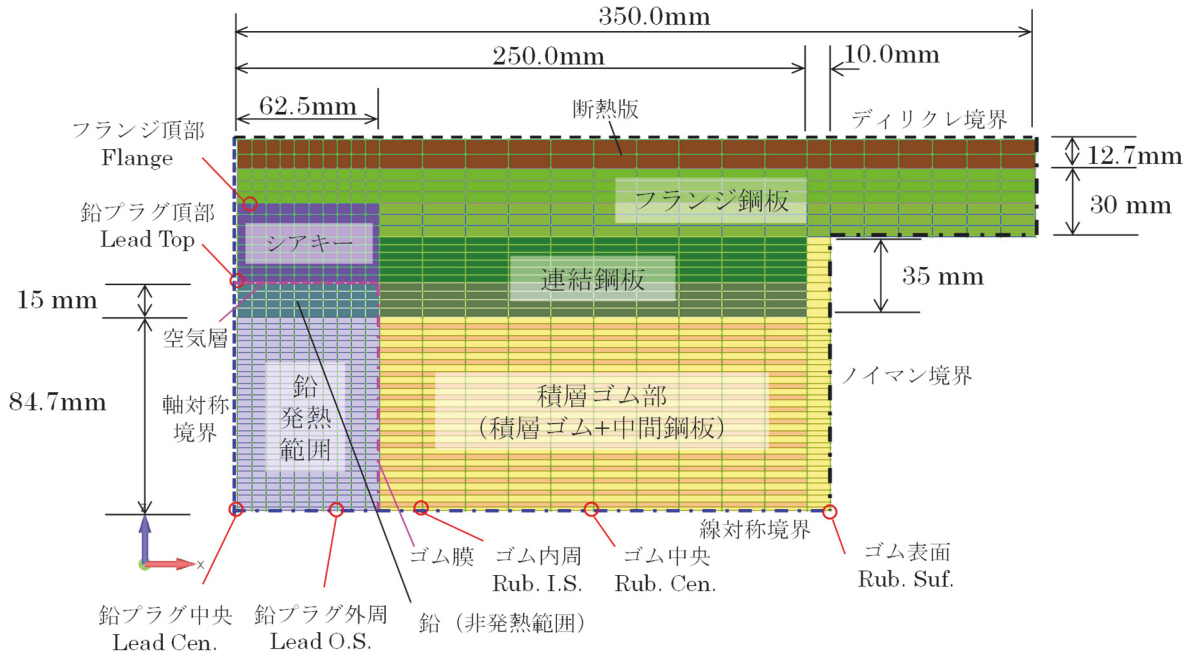


図 3-3 熱伝導解析モデル

### 3.3 解析結果

熱エネルギー評価から考案したモデル化手法および開発した熱・力学連成解析プログラムの適用性を検討するため、繰返し加力試験の再現解析を実施した。2章の試験結果から、発熱影響はせん断ひずみ、加力速度および面圧の依存性を持たないが、降伏応力度の速度依存性により温度—降伏応力度関係を変更する必要があることを確認している。そこで、加力速度の異なる正弦波繰返し加力試験である試験ケース 1-1 および試験ケース 1-3 を対象として再現解析を実施することとした。なお、試験ケース 1-1 は静的加力、試験ケース 1-3 は動的加力である。

また、ランダム位相入力時の適用性検討を実施するため、地震応答波を用いた実位相の加力試験である試験ケース 3-2～試験ケース 3-5 を対象として再現解析を実施する。地震応答波は主要動が動的加力となるため、鉛プラグの温度—降伏応力度関係は既往提案式(式 2-5)を使用して解析を行う。

#### 3.3.1 正弦波繰返し加力試験

試験結果と解析結果の比較について、試験ケース 1-1 の温度変化を図 3-4 に、累積吸収エネルギー量を図 3-5 に、履歴曲線を図 3-6 に示し、試験ケース 1-3 の温度変化を図 3-7 に、累積吸収エネルギー量を図 3-8 に、履歴曲線を図 3-9 に示す。

##### (1) 温度変化

図 3-4 および図 3-7 より、半径方向の温度変化に注目する。Model1 では、試験ケース 1-3 の動的加力時において鉛プラグ中央部 (Lead Cen.) および外周部 (Lead O.S.) の温度は他解析結果よりも最大で 10℃程度低く評価されるのに対して、積層ゴム内周部 (Rub. I.S.) の温度は試験結果および他解析結果よりも 52℃程度高く評価されている。また、試験ケース 1-1 の静的加力時において鉛プラグ中央部および外周部の温度が試験結果および他解析結果よりも最大 3℃程度低く

評価されるのに対して、積層ゴム内周部の温度は最大 6°C程度高く評価されている。これは、Model1 では鉛プラグと積層ゴム部の接触状態を考慮していないため、鉛プラグの発熱が積層ゴム部へ過剰に流出したことが原因と考えられる。一方、Model2 では、静的加力の加力初期および動的加力の加力時において、解析結果と試験結果の差異は最大で鉛プラグ中央部が 9°C程度、積層ゴム内周部が 2°C程度と僅少であり、解析結果は試験結果を概ね再現出来ており、発熱影響が顕著に生じる時間領域では鉛プラグから積層ゴム部への熱伝導特性が適切にモデル化されていることを確認した。また、Model3 の解析結果は、Model2 と殆ど同じとなり、高さ方向の接触状態は半径方向の温度変化に影響を与えないことが分かる。よって、発熱影響が顕著に生じる時間領域では、鉛プラグと積層ゴム部との接触要素としてゴム膜を設置することで、半径方向の放熱影響を適切に再現できることを確認した。但し、Model2 および Model3 とも、鉛プラグ中央部および鉛プラグ外周部における静的加力の加力開始から約 100s 経過後と静的加力および動的加力の加力終了後において、解析結果の温度が試験結果の温度よりも低く評価されており、LRB の放熱特性を適切に再現できていない。これらの原因分析については、4 章および 5 章にて考察を行う。

次に、高さ方向の温度変化に注目する。Model1 および Model2 において、動的加力時では鉛プラグ頂部 (Lead Top) の温度は試験結果よりも解析結果の方が最大 10°C程度低く評価されるのに対して、フランジ部 (Flange) の温度は試験結果よりも解析結果の方法が最大 6°C程度高く評価されている。一方、Model3 では、Lead Top および Flange における加力時の温度について、初期温度の違いはあるものの、解析結果と試験結果の差異は最大 7°C程度であり、概ね試験結果の温度変化を再現出来ている。なお、静的加力時においても Model1 および Model2 における鉛プラグ頂部の温度は Model3 の温度よりも最大 1°C程度低く評価されており、フランジ部の温度は最大 2°C程度高く評価されているが、動的加力時よりも解析モデルによる顕著な温度差は確認できない。これは、静的加力時は単位時間当たりの発熱量が小さいため、伝導する熱量が小さい鉛直方向では解析結果の差異が小さくなったものと考えられるが、解析結果と試験結果との差異は最大 5°C程度と僅少であり、解析結果は試験結果を概ね再現できている。よって、鉛プラグ上部とシアキーは完全に接触しておらず、この接触状態をモデル化することで、高さ方向の放熱影響を適切に再現できることを確認した。

以上の検討結果から、発熱範囲や温度評価方法を提案した本モデル化手法を使用すると共に、半径方向および高さ方向の接触状態を考慮することで LRB 内部の温度変化を適切に再現できることを確認した。

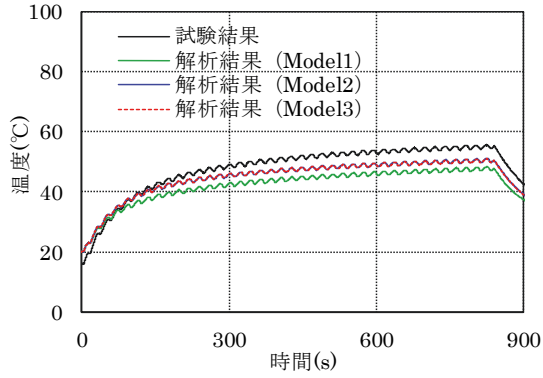
## (2) 力学特性

図 3-5 より、試験ケース 1-1 の静的加力時において、各モデルにおける解析結果の温度変化は鉛プラグ中央部で試験結果よりも 6~8°C程度低くなっているため降伏応力度が若干大きくなる傾向にあるものの、累積吸収エネルギー量は小さく評価されている。これは、図 3-6 に示す除荷時の材料剛性について試験結果よりも解析結果の方が小さく評価されたことが原因と考えられる。しかし、解析結果と試験結果における累積吸収エネルギー量の差異は、Model1 で 2%程度、Model2 および Model3 で最大 4%程度であり、鉛プラグのモデル化手法による差異は小さい。

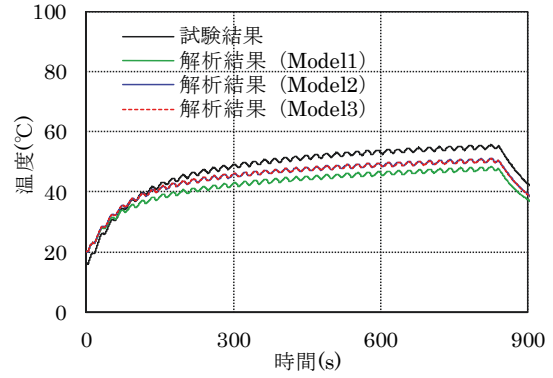
図 3-8 より、試験ケース 1-3 の動的加力時において、Model1 の試験結果は鉛プラグ中央部および周辺部の温度を最大 10°C程度低く評価され降伏応力度が大きくなったため、累積吸収エネルギー

一量が試験結果より 7%程度大きく評価されている。一方、Model2 および Model3 の試験結果は、解析結果の温度変化を精度良く再現しており、累積吸収エネルギー量の差異も 2%程度と僅少になっている。Model2 と Model3 で累積吸収エネルギー量に差が見られないことから、高さ方向の接触状態は力学特性に大きな影響を与えないものと考えられる。これは、高さ方向の熱移動量が半径方向と比較して小さいためと考えられ、2 章で示した熱エネルギー評価結果から得られた知見と一致する。また、図 3-9 より、除荷時の材料剛性に若干の差異が見られるものの、解析結果における降伏応力度の低下は試験結果を良く再現できている。

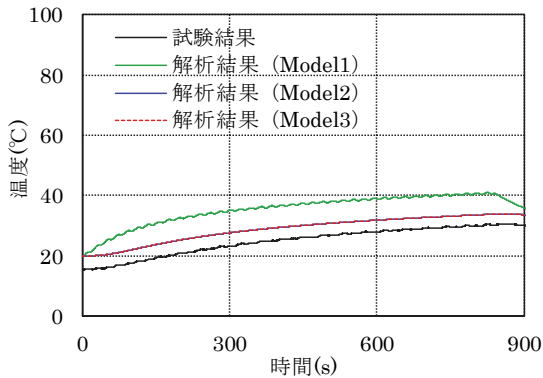
以上の検討結果から、本モデル化手法を使用し、半径方向の接触状態を考慮することで熱影響を考慮した LRB の力学特性を適切に再現できることを確認した。



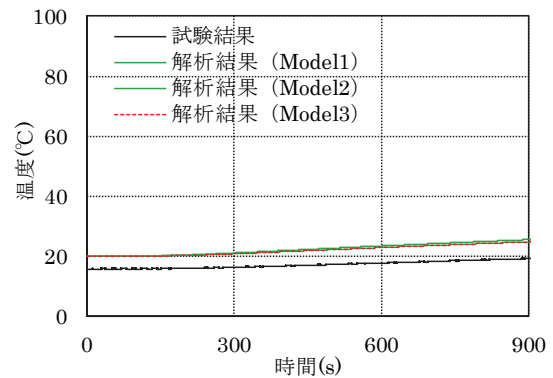
(a) 鉛プラグ中央部



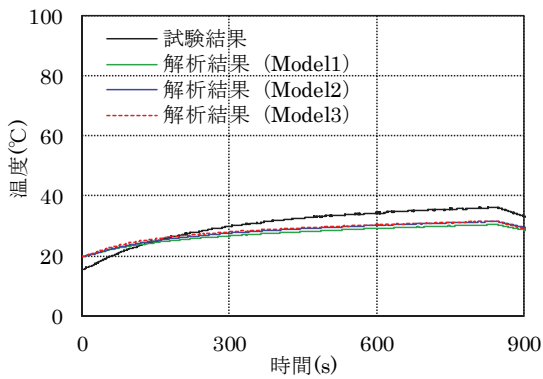
(b) 鉛プラグ周辺部



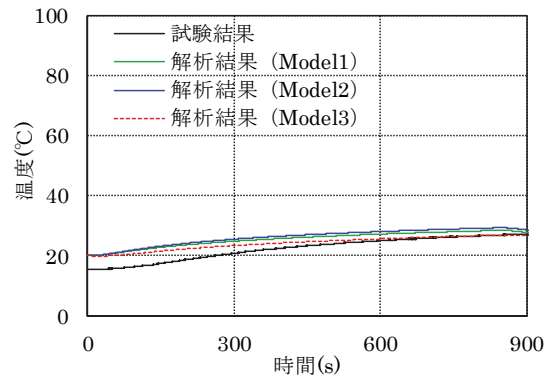
(c) 積層ゴム内周部



(d) 積層ゴム中央部



(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

図 3-4 試験ケース 1-1 の温度変化

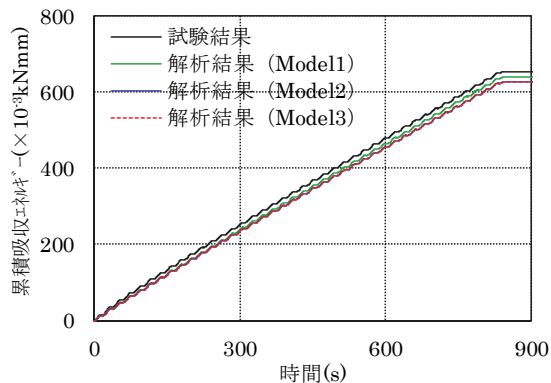


図 3-5 試験ケース 1-1 の累積吸収エネルギー量

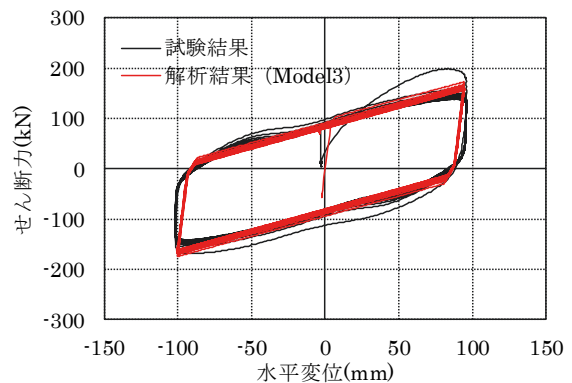
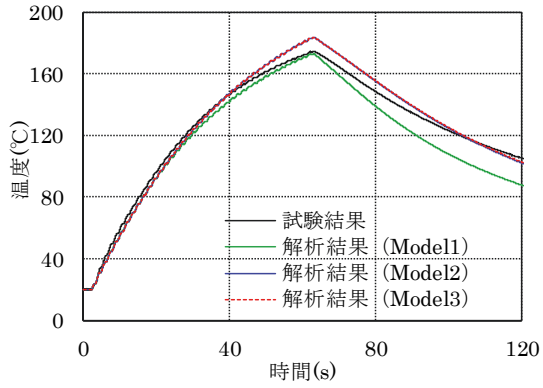
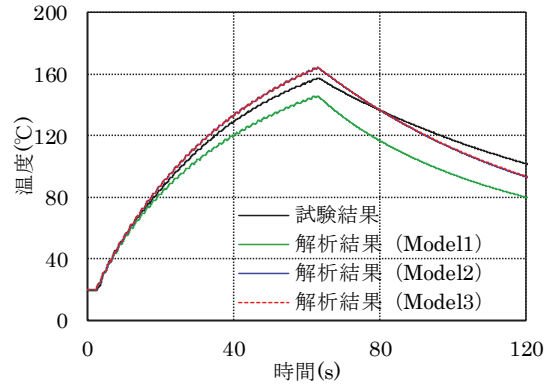


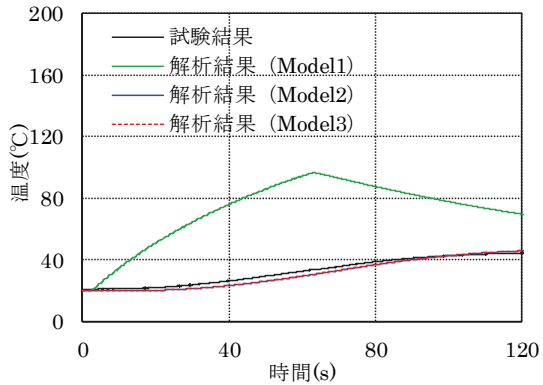
図 3-6 試験ケース 1-1 の履歴曲線



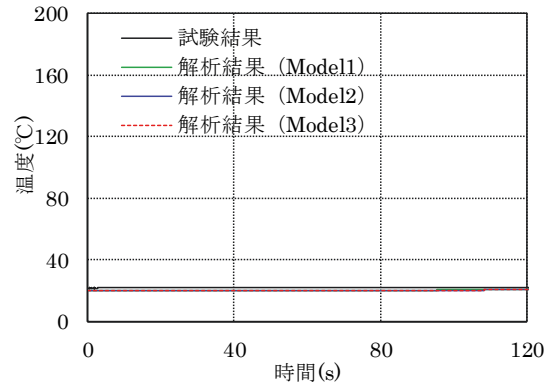
(a) 鉛プラグ中央部



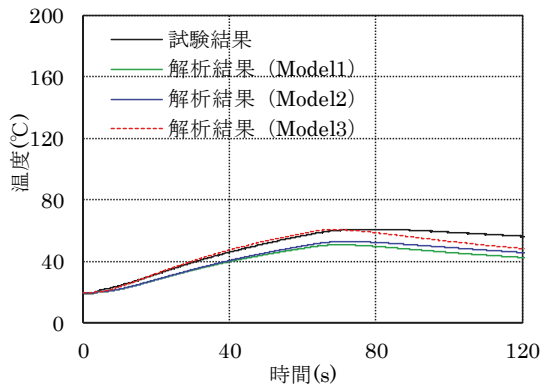
(b) 鉛プラグ周辺部



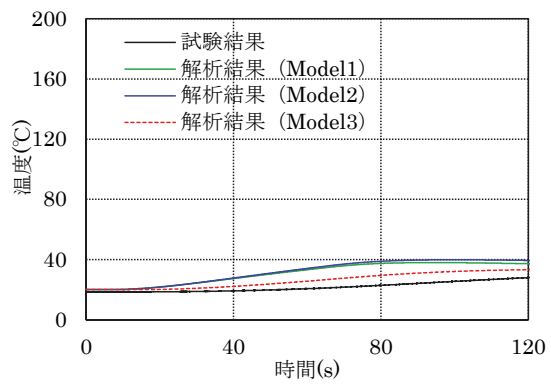
(c) 積層ゴム内周部



(d) 積層ゴム中央部



(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

図 3-7 試験ケース 1-3 の温度変化

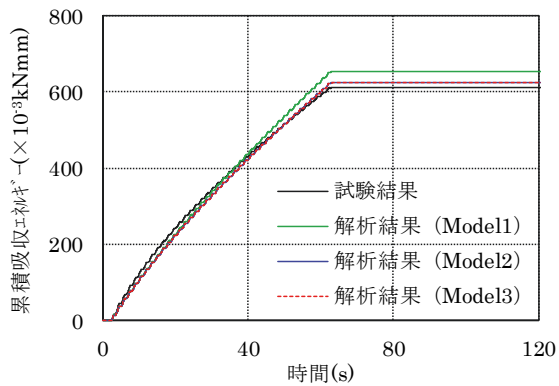


図 3-8 試験ケース 1-3 の累積吸収エネルギー量

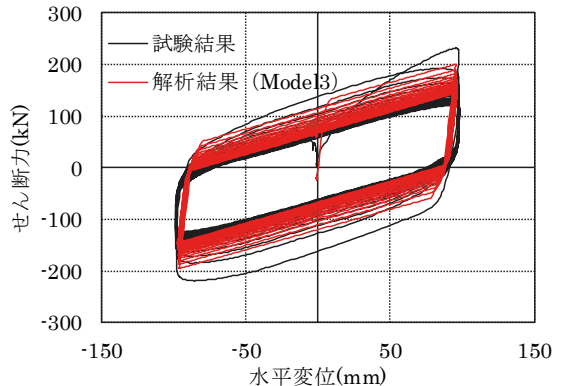


図 3-9 試験ケース 1-3 の履歴曲線

### 3.3.2 地震応答波加力試験

前項にて構築した解析モデルに対し、種々の位相を持った地震動を入力した際でも、LRB の応答特性を適切に再現できるか確認するため、地震応答波を用いた試験ケース 3 の再現解析を実施する。温度変化、履歴曲線および累積吸収エネルギー量の解析結果について、試験ケース 3-2 を図 3-10～図 3-12 に、試験ケース 3-3 を図 3-13～図 3-15 に、試験ケース 3-4 を図 3-16～図 3-18 に、試験ケース 3-5 を図 3-19～図 3-21 に示す。

図 3-10 に示す試験ケース 3-2 の温度変化から、初期温度により 4℃程度の差異が見られるものの、主要動発生時における鉛プラグ部および積層ゴム部の解析結果は試験結果と概ね一致している。一方、主要動（60s 程度）以降については、解析結果が試験結果を下回っている。これは、3.3.1 項と同様に放熱影響を適切に再現できていないことが原因と考えられる。また、本研究では、鉛プラグの吸収エネルギー量と直接関係しないため LRB の熱影響評価に与える影響は軽微であると考え、積層ゴムの Mulins 効果をモデル化していないことから、処女加力時の履歴曲線に差異が見られるものの、図 3-11 に示す解析結果の履歴曲線は試験結果と概ね一致することが確認できる。図 3-12 に示す累積吸収エネルギー量については、式 2-5 に示す温度—降伏応力度関係が試験結果を安全側に評価するため、解析結果が試験結果を下回ったものと考えられる。しかし、主要動発生時における解析結果と試験結果の差異は最大 8%程度であり、LRB の力学特性は概ね再現できている。

図 3-13 に示す試験ケース 3-3 において、解析結果は試験結果における温度変化の傾向を大まかに捉えられているものの、鉛プラグ中央部で最大 33℃程度、鉛プラグ周辺部で最大 31℃程度の差異が見られる。これは、試験ケース 3-2 では鉛プラグ中央部において 2mm、鉛プラグ周辺部において 3mm の抜け出しが加力初期において発生し、解析モデルの節点温度評価位置と熱電対の設置位置に差異が生じたことが原因と考えられる。一方、図 3-14、図 3-15 に示す履歴曲線および主要動発生時の累積吸収エネルギー量の解析結果は試験結果を概ね良く再現できている。主要動発生後の累積吸収エネルギー量において、解析結果が試験結果よりも大きく評価される原因として、加力速度の低下により降伏応力度が式 2-5 を下回ったことが原因と考えられる。

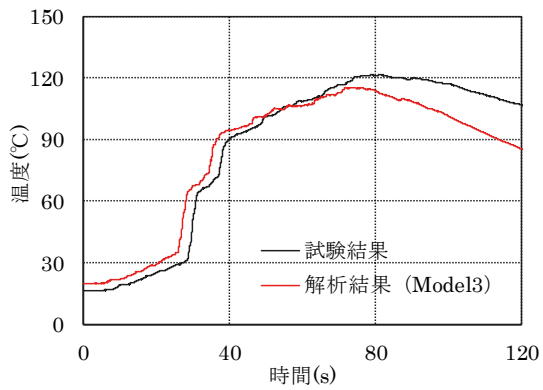
図 3-18 に示す試験ケース 3-4 では、解析結果の累積吸収エネルギー量が試験結果よりも 20%程度小さくなっている。これは履歴曲線において、解析結果のループ形状が試験結果よりも小さく評価されていることから、瞬間入力エネルギー量（加力速度）が大きく、降伏応力度が式 2-5 を上回ったことが原因であると考えられる。

図 3-19 に示す試験ケース 3-5 の温度変化から、主要動発生時における鉛プラグ中央部の解析結果は試験結果と概ね一致しているが、主要動（150s 程度）以降において解析結果が試験結果を下回っている。これは、放熱影響が適切に再現できていないことが原因と考えられる。また、鉛プラグ周辺部では、解析結果が試験結果を 41℃程度上回っている。これは、鉛プラグ周辺部において 7mm の抜け出しが発生し、解析モデルの節点温度評価位置と熱電対の設置位置に差異が生じたことが原因と考えられる。図 3-10、図 3-21 に示す履歴曲線および累積吸収エネルギー量から、主要動発生時における大変形時において解析結果は試験結果を良く再現できている。一方、主要動以降ではせん断ひずみ 10%程度の微小振動が継続しており、鉛プラグの降伏応力度や積層ゴムの剛性に差異が生じるため、時間経過に伴い徐々に累積吸収エネルギー量の差異が拡大している。但し、本時間領域では応答値が小さく、免震装置や上部建屋の構造設計に与える影響は殆

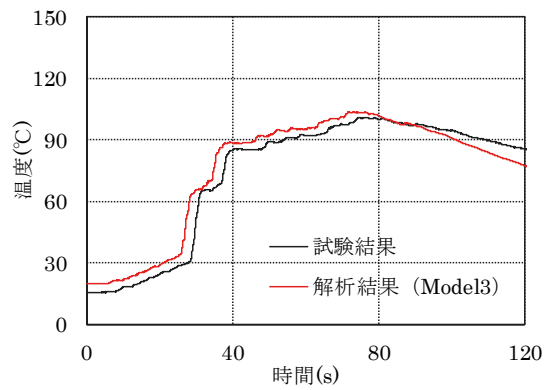


どないと考えられる。

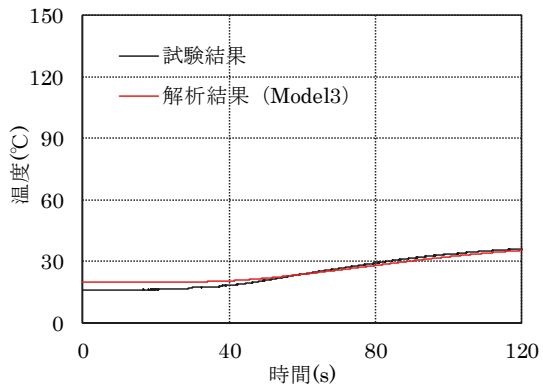
上記の検討結果から、各地震波の温度変化については、放熱特性が適切に再現できていない点を除いて、解析結果は試験結果を概ね良く再現できることを確認した。また、履歴曲線と累積吸収エネルギー量については、降伏応力度の速度依存性による差異が見られるものの、解析結果は試験結果を概ね再現できることを確認した。



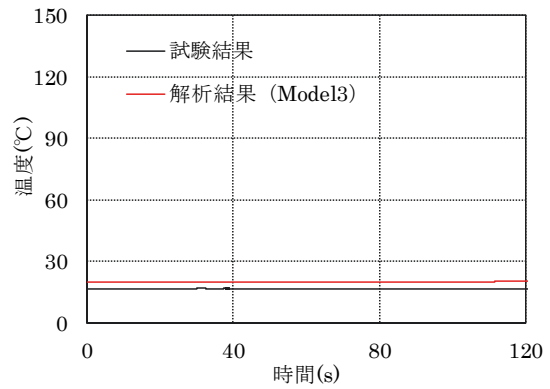
(a) 鉛プラグ中央部



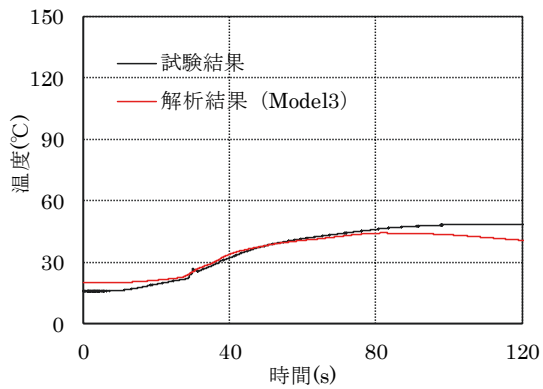
(b) 鉛プラグ周辺部



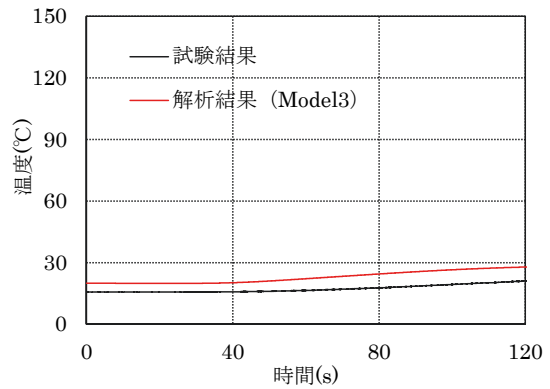
(c) 積層ゴム内周部



(d) 積層ゴム中央部



(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

図 3-10 試験ケース 3-2 の温度変化

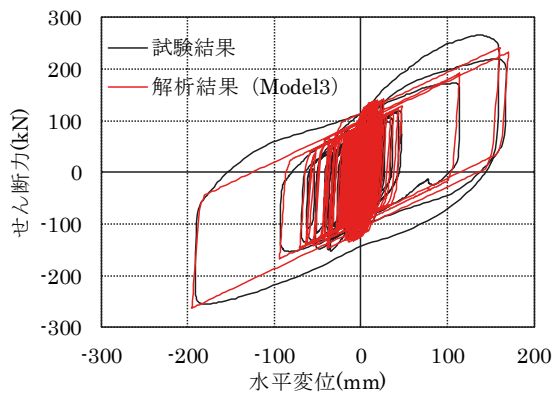


図 3-11 試験ケース 3-2 の履歴曲線

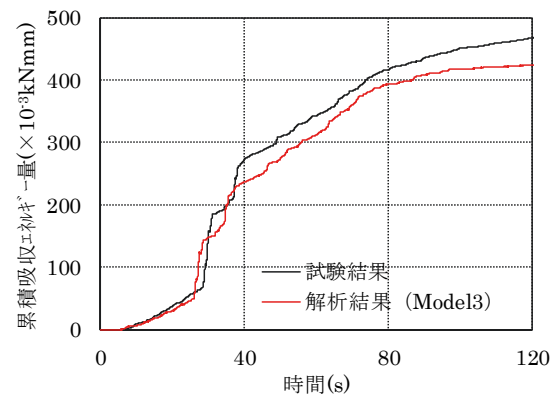
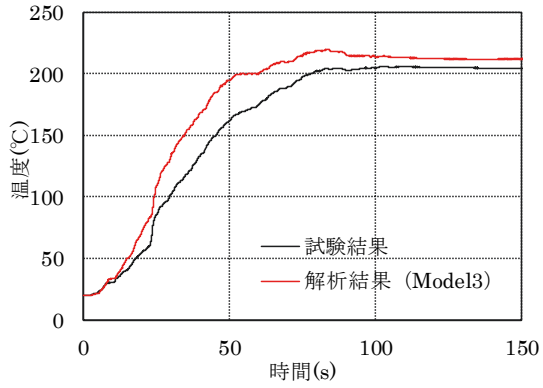
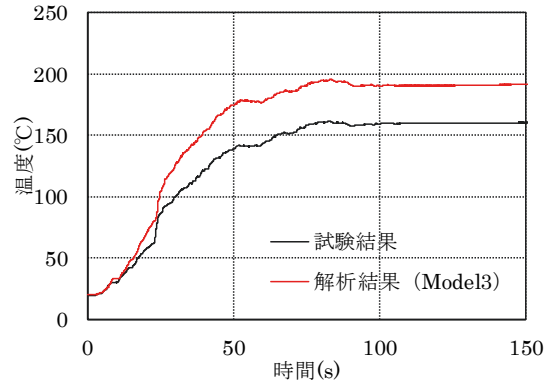


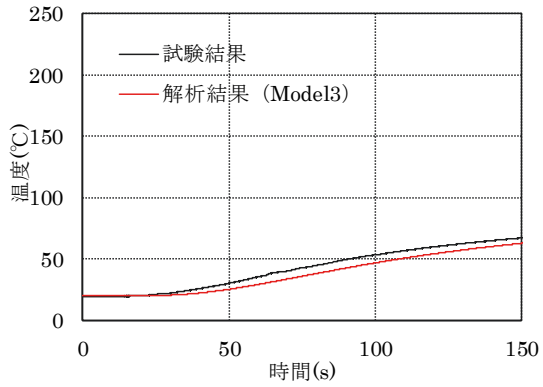
図 3-12 試験ケース 3-2 の累積吸収エネルギー量



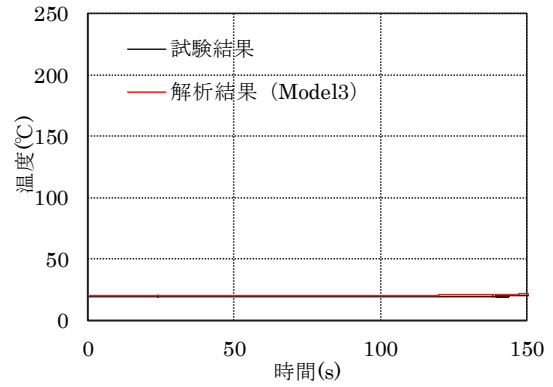
(a) 鉛プラグ中央部



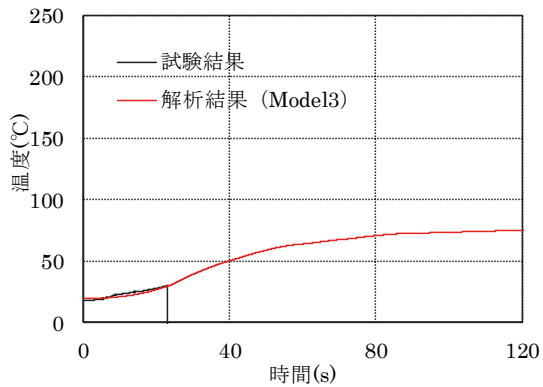
(b) 鉛プラグ周辺部



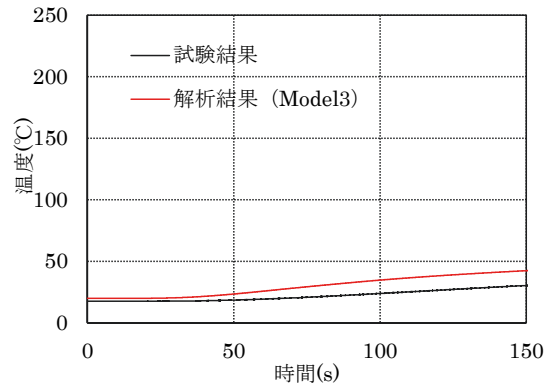
(c) 積層ゴム内周部



(d) 積層ゴム中央部



(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

図 3-13 試験ケース 3-3 の温度変化

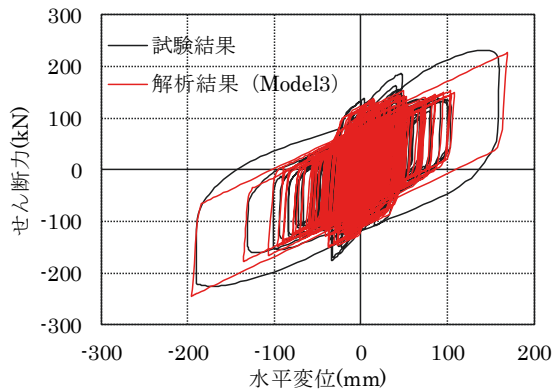


図 3-14 試験ケース 3-3 の履歴曲線

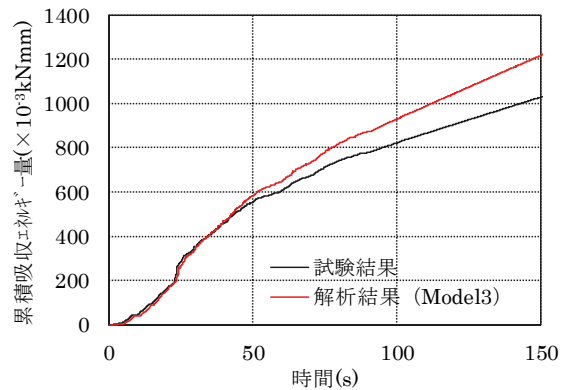
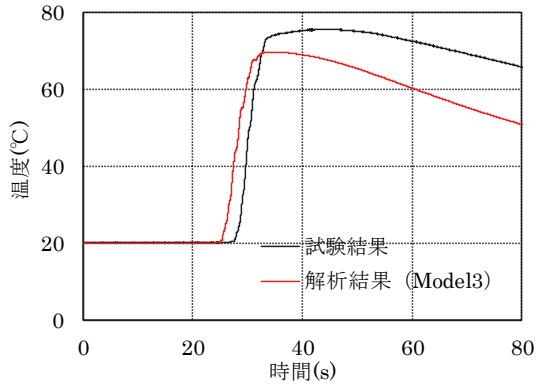
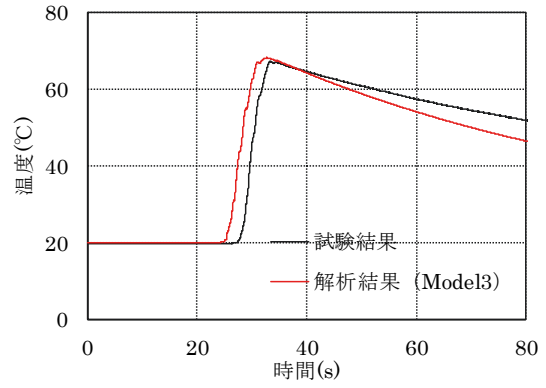


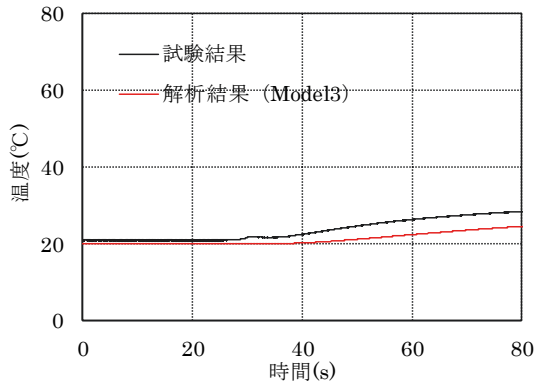
図 3-15 試験ケース 3-3 の累積吸収エネルギー量



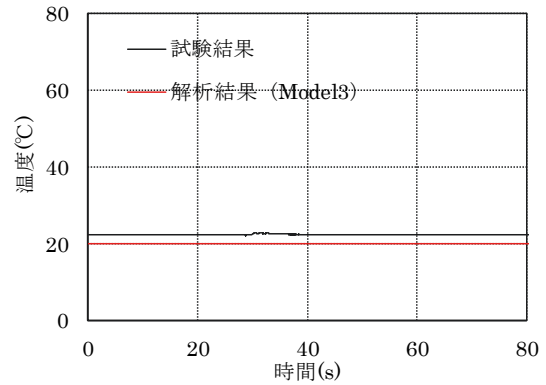
(a) 鉛プラグ中央部



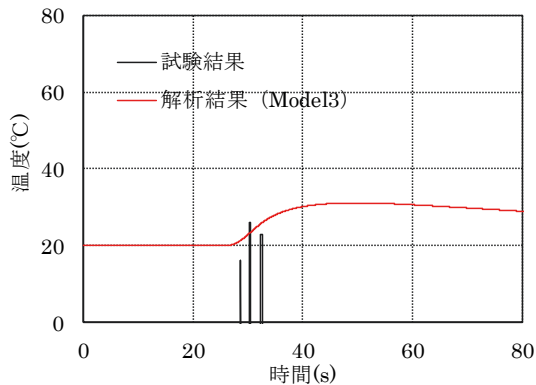
(b) 鉛プラグ周辺部



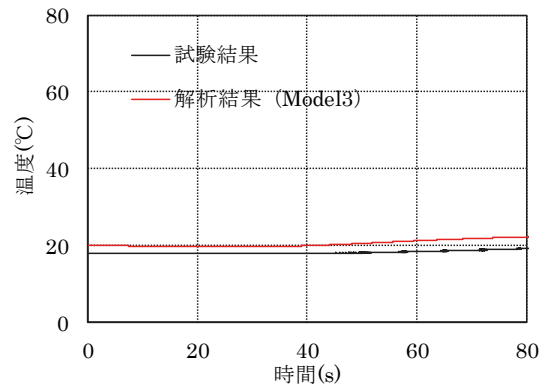
(c) 積層ゴム内周部



(d) 積層ゴム中央部



(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

図 3-16 試験ケース 3-4 の温度変化

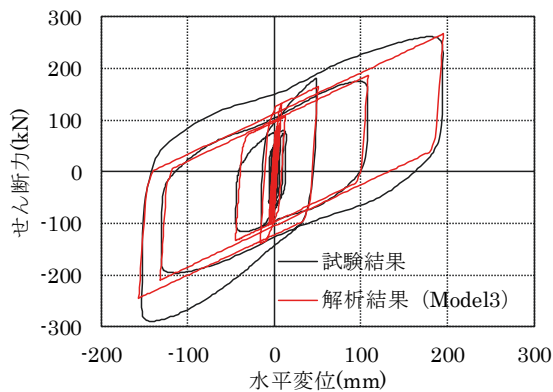


図 3-17 試験ケース 3-4 の履歴曲線

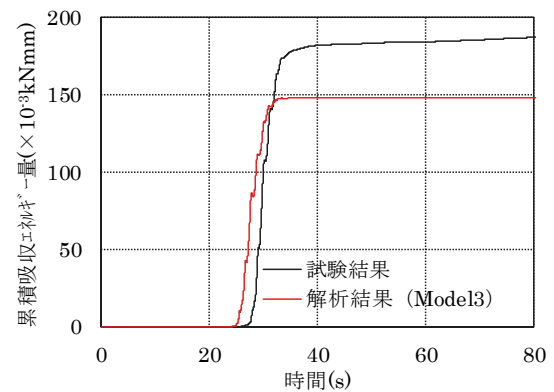
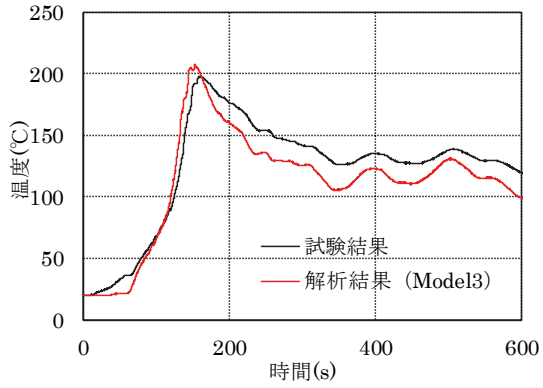
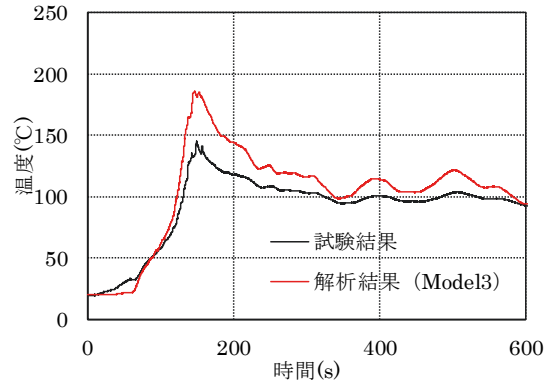


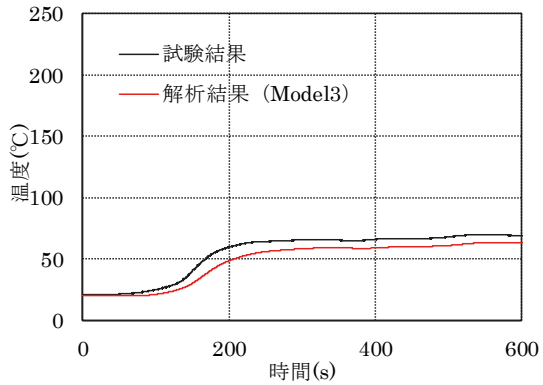
図 3-18 試験ケース 3-4 の累積吸収エネルギー量



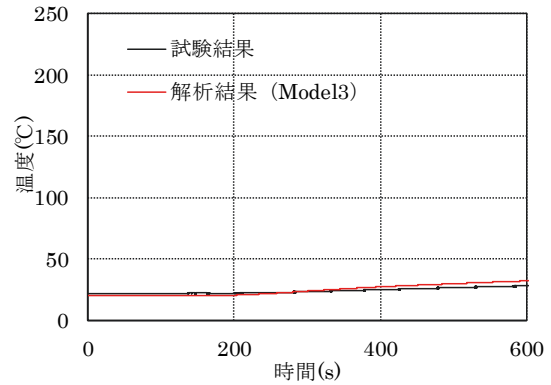
(a) 鉛プラグ中央部



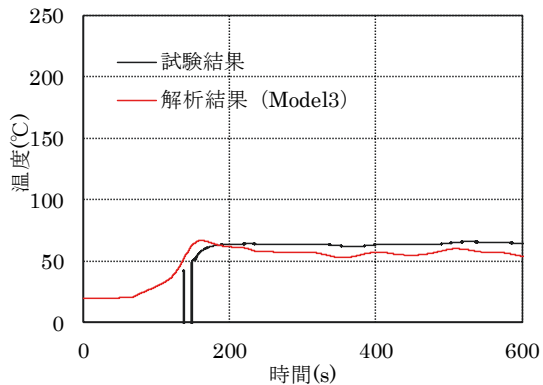
(b) 鉛プラグ周辺部



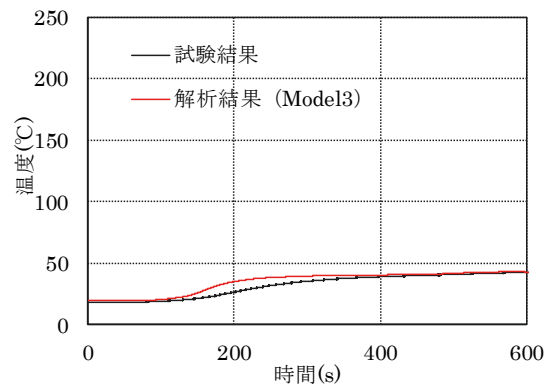
(c) 積層ゴム内周部



(d) 積層ゴム中央部



(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

図 3-19 試験ケース 3-5 の温度変化

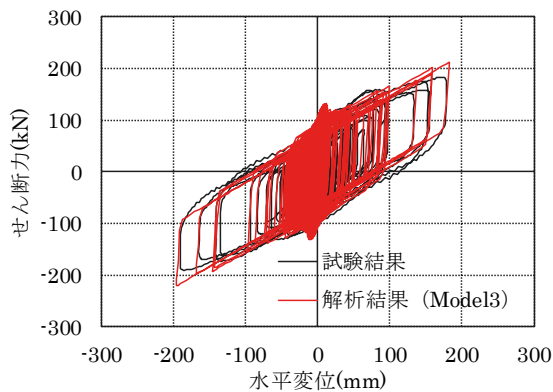


図 3-20 試験ケース 3-5 の履歴曲線

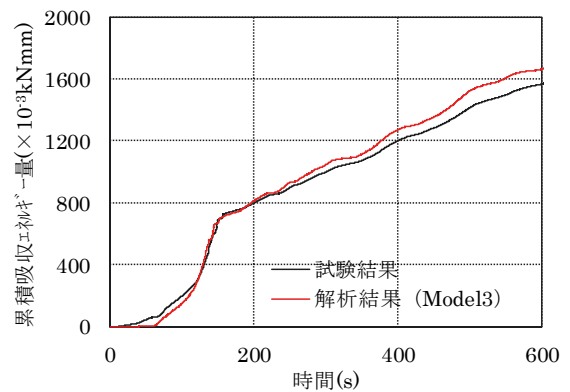


図 3-21 試験ケース 3-5 の累積吸収エネルギー量

### 3.4 まとめ

FEM を用いた熱伝導解析と直接積分法を用いた地震応答解析の連成した熱・力学連成解析プログラムを開発し、2 章で示したエネルギー評価から得られた発熱範囲の設定と鉛プラグ温度の評価方法を適用すると共に、鉛プラグと周辺部の接触状態を考慮した繰返し加力試験の再現解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 静的加力試験の加力初期および動的加力試験において、鉛プラグと積層ゴム部との境界部に接触要素をモデル化することで、試験体半径方向の温度変化と LRB の力学特性を精度良く再現できることを確認した。また、鉛プラグとシアキーとの境界部に接触要素をモデル化することで、試験体高さ方向の温度変化を適切に再現できることを確認した。一方、力学特性の改善効果は殆ど無いことから、熱・力学連成解析において半径方向の接触状態を確認することが重要であることが分かった。
- 2) 静的加力試験の加力後半および加力終了後において、接触要素の有無に係わらず鉛プラグ内部温度の解析結果は試験結果よりも低く評価されており、放熱特性のモデル化に課題がある。
- 3) 地震応答波の再現解析結果から、試験ケース 3-4 において鉛プラグにおける降伏応力度の速度依存性による影響と考えられる履歴曲線や累積吸収エネルギー量の差異が見られるものの、その他の試験ケースでは主要動発生時までの温度変化および力学特性について、解析結果は試験結果よりを良く再現できている。一方、主要動発生後の解析結果では温度低下が顕著に発生しており、放熱影響が適切に再現できていない。

#### 【3 章 参考文献】

- 1) 柴田明德：最新耐震構造解析（第 3 版），森北出版，2015 年 5 月
- 2) 日本機械学会：伝熱工学，丸善，2014 年 5 月
- 3) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，1983 年 5 月
- 4) 本間友規，竹中康雄，近藤明洋，高岡栄治，引田真規子，北村春幸，仲村崇仁：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 9 熱伝導解析による実験結果のシミュレーション），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.397-398，2008 年 9 月
- 5) O.C.ツイエンキーヴィッツ 著，吉織雅夫，山田嘉昭 監訳：マトリックス有限要素法，培風館，1984 年 9 月
- 6) 田中正隆，田中喜久昭：境界要素法－基礎と応用，丸善，1982 年 4 月
- 7) 森正武：数値解析（第 2 版），共立出版，2002 年 2 月
- 8) 渡部翔太郎，湯川正貴，稲葉学，正木信男，丸山健司，古橋剛，内藤伸幸：鉛プラグ入り積層ゴムの繰返し加力試験 その 3 熱物性値評価試験及び熱伝導解析モデルの合理化検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.149-150，2019 年 7 月
- 9) 日本機械学会：伝熱ハンドブック，丸善，1997 年 11 月

#### 4. 熱物性値評価試験

3章にて、熱・力学連成解析プログラムを開発し、熱エネルギー評価結果に基づく解析モデル化手法を用いて繰返し加力試験の再現解析を行った。解析結果から、動的加力時におけるLRBの温度変化と履歴変化を適切に再現できることを確認した。一方、加力終了後および放熱影響が顕著な静的加力時における装置内部の温度分布を十分に再現しておらず、放熱影響のモデル化に課題が残った。放熱影響を適切にモデル化できない場合、余震時や長時間地震動による多数回の繰返し加力など放熱影響が比較的大きい場合において、鉛プラグの温度が低く評価されるため、減衰性能の低下を過小評価する可能性が考えられる。

3章に示した解析モデルで放熱影響が適切に評価できない原因について、著者は次の2点が関係していると予想した。1点目は、免震装置内部ゴムの熱物性値の設定に関する問題である。3章の解析では、既往文献<sup>1)</sup>に記載されている硬質天然ゴムの物性値を使用した<sup>2)</sup>が、免震装置で使用しているゴム材料は補強材として天然ゴムにカーボンブラックや酸化防止剤が配合<sup>3)</sup>されており、試験体の熱物性値と乖離している可能性が考えられる。また、熱物性値は温度変化に係わらず一定値としており、ゴム材料の温度依存性が熱・力学連成解析結果に与える影響について検討が為されていない。2点目は、鉛プラグと内部ゴムおよび中間鋼板（積層ゴム部）における接触状態を、応答値に関わらず節点共有（完全接触）としてモデル化している点である。既往文献<sup>3)4)</sup>の応力解析や熱・力学連成解析では、節点共有としてモデル化されており、水平加力を受ける鉛プラグー積層ゴム部境界（鉛プラグ境界部）の接触状態に関する議論は殆ど行われていない。しかし、2章で示した熱エネルギー評価から、鉛プラグの発熱は主として半径方向の積層ゴム部に伝導するため、LRBの熱影響評価において、鉛プラグ境界部の接触状態を適切に模擬することは重要である。

そこで本章では、放熱影響を適切に再現することで減衰性能の低下をより精緻に評価できる熱・力学連成解析を実施するため、免震装置に使用されるゴム材料および中間鋼板の熱物性値評価試験を実施し、解析に用いる物性値の妥当性を確認するとともに、繰返し加力試験で得られた装置内部の温度分布に対応した熱物性値の温度依存性を確認する。なお、鉛プラグ境界部における接触状態の確認は5章で述べる。

##### 4.1 試験方法

###### (1) ゴム材料および中間鋼板

本試験では、繰返し加力試験で使用した試験体と同種（G4）のゴム材料と免震装置に使用する中間鋼板（SS400材）を使用し、熱物性評価試験を実施する。使用するゴム材料のせん断弾性係数を表4-1に示す。せん断弾性係数は、図4-2に示す1ブロック・ラップ・シエア型ゴムブロック<sup>5)</sup>の試験片を使用し、加力振動数0.3Hz、せん断ひずみ±100%正弦波加力の3サイクル目から算出した。表4-1より、本試験で使用するゴム材料と繰返し加力試験体の設計値（0.392N/mm<sup>2</sup>）との差異は4%程度と僅少であることを確認している。

計測対象の熱物性値は、熱・力学連成解析に使用する熱伝導率、比熱および密度の3種類とする。ゴム材料における熱伝導率および比熱の計測温度は、30℃、50℃および80℃の3水準とした。計測温度は、鉛プラグ中心温度が300℃付近まで上昇した試験ケース4-5における積層ゴム内周部の最大温度が50℃程度（図4-1）であったことから、50℃を中間値として設定している。

中間鋼板における熱伝導率および比熱の計測温度は 30℃とした。文献 1)に記載された中間鋼板における熱物性値の温度変化率から免震装置の熱環境における熱物性値を比較(表 4-2)した結果、その差異は 3%程度と僅少であり中間鋼板の温度依存性は無いと考えられることから、計測温度は 30℃のみとしている。ここで、免震装置の熱環境は、基準温度を 20℃とし、メーカーが設定する温度ばらつき<sup>6)</sup>と試験ケース 4-5 の試験結果から 0℃～50℃程度を想定した。

熱物性値評価試験方法<sup>7)</sup>について、ゴム材料の熱伝導率は熱流速法、比熱は示差走査熱量計測(DSC : Differential Scanning Calorimetry)法を使用し、中間鋼板の熱伝導率はレーザーフラッシュ法、比熱はレーザーフラッシュ示差熱量法を使用する。密度の計測はゴム材料、中間鋼板ともに水中置換法<sup>8)</sup>を使用するため、計測温度は 22℃のみである。なお、ゴム材料の線膨張率は約  $77 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>9)</sup>であり、免震装置の熱環境において殆ど体積変化が生じないことから、密度の温度依存性は殆ど無いと考えられる。使用する試験体について、ゴム材料は 25mm×25mm の試験片(図 4-3)を 3 枚、中間鋼板は 5mm×5mm の試験片を 2 枚使用し、試験片の平均値から熱物性値を計測する。熱伝導率の試験方法を表 4-3、比熱の試験方法を表 4-4、定常法熱伝導率計測装置を写真 4-1、レーザーフラッシュ法熱物性計測装置を写真 4-2 に示す。

表 4-1 ゴム材料のせん断弾性係数

		せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
試験片番号	1	0.415
	2	0.400
	3	0.410
	平均	0.408

表 4-2 中間鋼板における熱物性値の温度依存性

温度 (℃)	熱伝導率 (W/(m・K))	比熱 (kJ/(kg・K))	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
0	65.8	0.451	7880
30	64.8	0.459	7870
50	64.1	0.464	7860
0℃/50℃	0.97	1.03	1000

※文献 1)記載値を参考に評価している。



表 4-3 熱伝導率の計測方法

項目	ゴム材料	中間鋼板*1
試験方法	熱流速法	レーザーフラッシュ法
規準	ASTM E 1530-04	JIS R 1611
計測装置	アルバック理工(株)製 定常法熱伝導率計測装置 GH-1	京都電子工業(株)製 レーザーフラッシュ法熱物性計測装置 LFA-502
圧力	0.1N/mm <sup>2</sup>	—

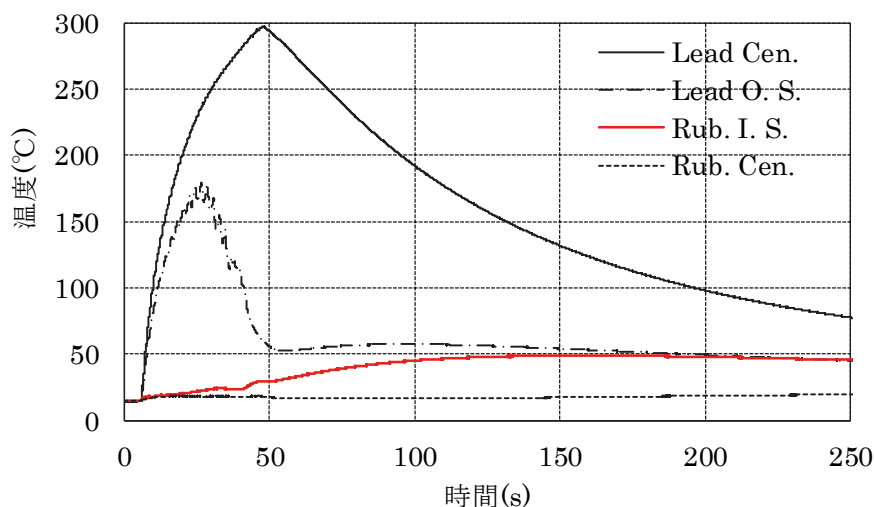
\*1：解析法はカーブフィッティング法を使用する。

表 4-4 比熱の計測方法

項目	ゴム材料*1	中間鋼板*2
試験方法	DSC 法	レーザーフラッシュ示差熱量法
規準	JIS K 6240	JIS R 1611
計測装置	PerkinElmer 製 Pyris Diamond DSC	京都電子工業(株)製 レーザーフラッシュ法熱物性計測装置 LFA-502
雰囲気	ヘリウム 20ml/min	窒素 20mL/min

\*1：昇温速度は 10°C/min とする。

\*2：参照物質はタンタルを使用する。



※Lead O.S.は加力途中で断線したため、温度記録が 30s 程度までしか記録されていない。

図 4-1 試験ケース 4-5 における積層ゴム内周部 (Rub. I.S.) の温度変化

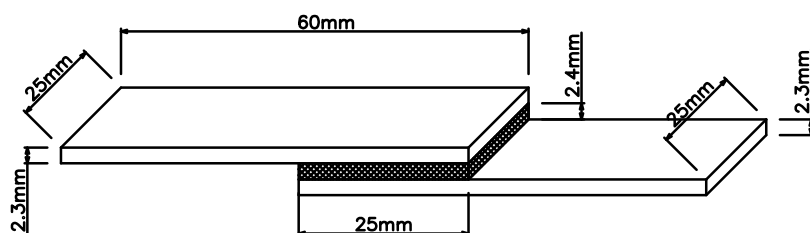


図 4-2 せん断試験片

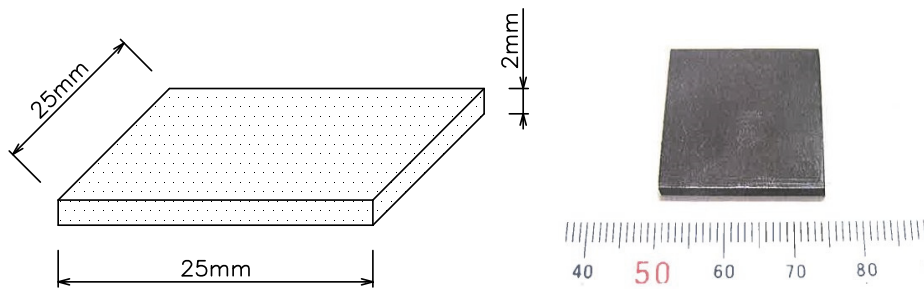


図 4-3 ゴム材料試験片の寸法と外観



写真 4-1 定常法熱伝導率計測装置（左：外観、右：計測部）

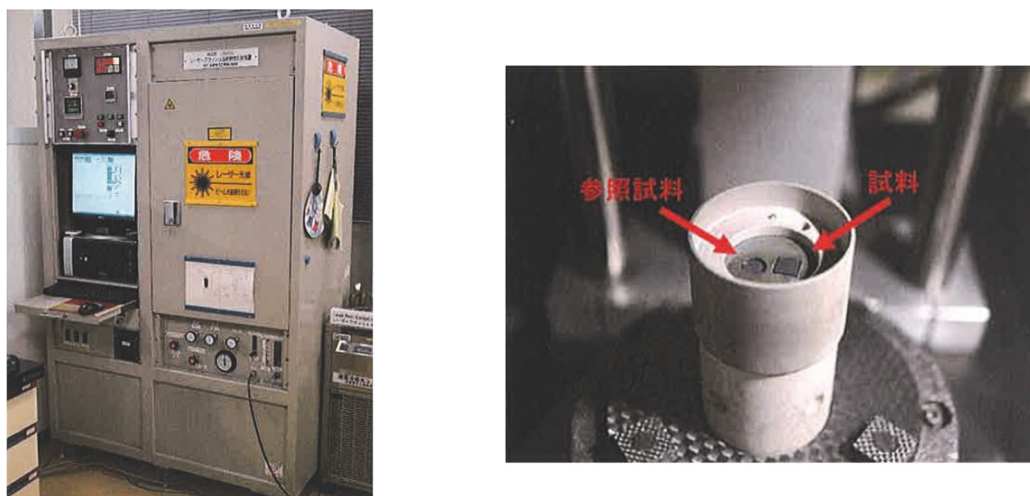


写真 4-2 レーザーフラッシュ法熱物性計測装置（左：外観、右：計測部）

## (2) 積層体

LRB の熱物性値について、ゴム材料と中間鋼板を積層させた積層体 (25×25×2.3mm) を作成し、加力履歴の有無による熱伝導率の差異を計測することで、繰返し加力による熱物性値の変化を確認する。積層体は、図 4-4 に示すせん断試験体から切出した試験片を積層し、上下にゴム片を重ねて作成した。作成した積層体 (積層体 1) を図 4-5 に示す。熱伝導率の計測方向は積層方向と直交する方向とし、ゴム片の寄与を差し引いて積層体の熱伝導率を算出する。ゴム材料は G4 ゴムとし、単材 (ゴム材料) 試験と同じロッド番号のゴムシートを使用する。加力履歴は、繰返し加力試験に用いた試験体 (3mm×33 層) が 50mm の累積変形量をせん断ひずみ 200% の正弦波加

力で経験する場合を想定し、せん断試験体に対してせん断ひずみ 200%の正弦波加力を 63 サイクル入力する。なお、試験体に積層体を採用した理由は、ゴムシートと鋼板を連結する接着材の繰返し変形による影響を考慮して検討を行うためである。熱物性値評価試験方法は、ゴム材料と同じである。

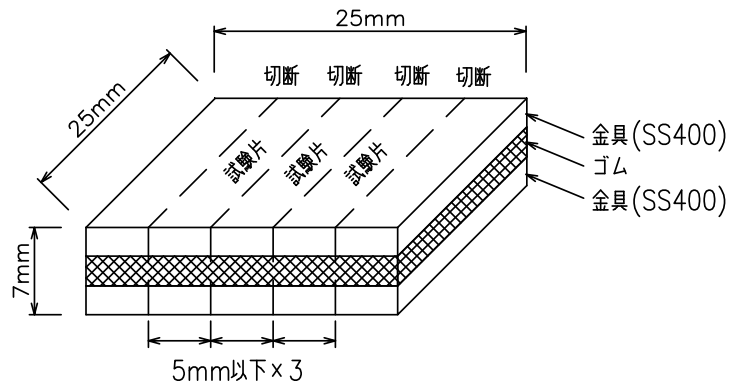


図 4-4 せん断試験体

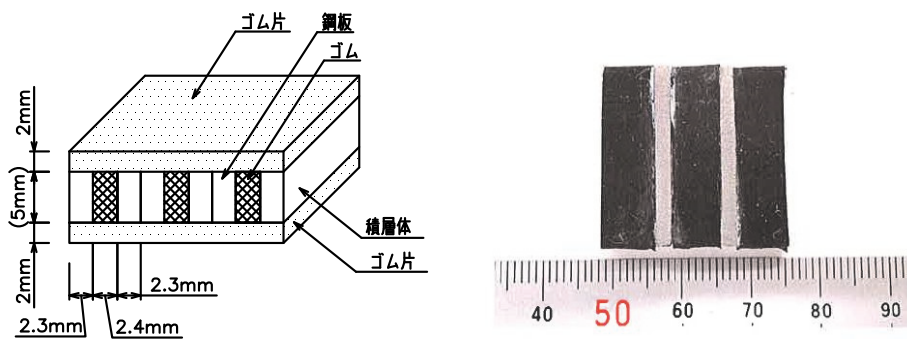


図 4-5 積層体 1 の寸法と外観

## 4.2 試験結果

### (1) ゴム材料および中間鋼板

ゴム材料の熱物性値評価試験結果の一覧を表 4-5 に、中間鋼板の熱物性値評価試験結果の一覧を表 4-6 に示す。なお、表 4-5 および表 4-6 には、3 章の熱・力学連成解析で使用した熱物性値（3 章熱物性値）を併記している。表 4-5 から、熱伝導率は 30°C から 80°C の温度上昇により 4% 程度低下するものの、その差異は僅少であり温度依存性は確認できない。一方、比熱は 30°C から 80°C の温度上昇により 14% 程度増加している。そこで、30°C および 80°C の熱物性値を使用した解析モデルを作成して、試験ケース 1-1（静的加力）および試験ケース 1-3（動的加力）の加力条件を用いた熱・力学連成解析を実施し、鉛プラグ中央部の温度変化と累積吸収エネルギー量を比較した。なお、内部ゴムの線膨張率は約  $77 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  であり、免震装置の熱環境において殆ど体積変化が生じないことから、密度の温度依存性は殆ど無いと考えられる。解析モデルは、熱伝導解析および応答解析モデルともに、熱物性値を除いて 3 章に示す解析モデルと同じである。試験ケース 1-1 の解析結果を図 4-6 に、試験ケース 1-3 の解析結果を図 4-7 に示す。

解析結果から、静的加力時および動的加力時において、熱物性値に係わらず装置内部の温度分布、累積吸収エネルギー量および履歴曲線ともに概ね一致しており、熱・力学連成解析を行う上で、比熱の温度依存性を考慮する必要がないことが分かった。上記の結果から、ゴム材料の熱物性値は温度依存性を考慮する必要が無いため、本研究では計測温度 30°C の試験結果を用いて熱・力学連成解析を実施することとする。

次に、表 4-5 および表 4-6 から、熱物性値評価試験結果と 3 章熱物性値を比較する。ゴム材料では熱伝導率に 38% 程度、比熱に 15% 程度の差異が、中間鋼板では熱伝導率に 24% 程度の差異が確認できる。密度および中間鋼板の比熱については差異が 5% 以下であり、殆ど同じ物性値であった。そこで、熱物性値の差異が熱・力学連成解析結果に与える影響を確認するため、計測温度 30°C の試験結果から得られた熱物性値を用いた解析モデルを作成し、3 章に示す試験ケース 1-1 および試験ケース 1-3 の解析結果と比較した。なお、鉛プラグおよび断熱材の熱物性値は同じとする。試験ケース 1-1 の解析結果を図 4-8 に、試験ケース 1-3 の解析結果を図 4-9 に示す。

LRB 内部の温度変化から、3 章解析結果と比較して 30°C 熱物性値を用いた解析結果は、鉛プラグ中央部および周辺部の温度を試験ケース 1-1 では 3°C 程度、試験ケース 1-3 では 8°C 程度低めに評価されているが、積層ゴム内周部では、30°C 熱物性値を用いた解析結果の方が試験ケース 1-1 で 1°C 程度、試験ケース 1-3 で 7°C 程度高めに評価されている。これは、鋼板の熱伝導率が 24% 小さく評価されるが、内部ゴムの熱伝導率が 38% 大きく評価されていることから、積層部への放熱量が増加したことが原因であると考えられる。また、加力後の温度低下については、どちらの解析結果も試験結果を適切に再現できていない。一方、熱物性値を変更しても解析結果の累積吸収エネルギー量および履歴曲線は殆ど同じになっており、いずれも繰返し加力試験結果を適切に再現できていることから、熱物性値の差異が力学特性に与える影響は僅少であると考えられる。

上記の熱物性値評価試験結果から、ゴム材料および中間鋼板の熱物性値を明らかにしたものの、放熱影響を適切に再現することはできなかった。しかし、LRB の熱・力学連成解析において、解析モデルの熱物性値に温度依存性を考慮する必要が無いことが分かった。また、LRB の力学特性は熱物性値の変化による感度が低いと考えられるため、放熱影響が過大に生じない場合において、ゴム材料の熱物性値を実測により評価せずに熱・力学連成解析を実施している既往研究について

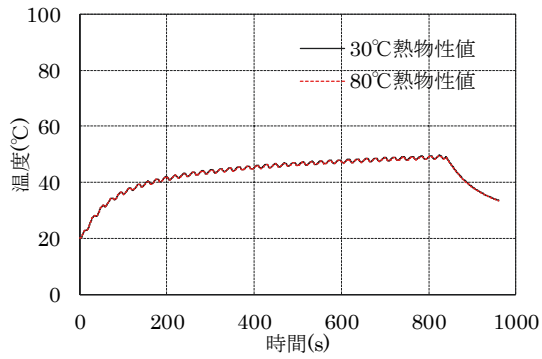
も、妥当な評価結果が得られているものと考えられる。

表 4-5 ゴム材料における熱物性値評価試験結果の一覧

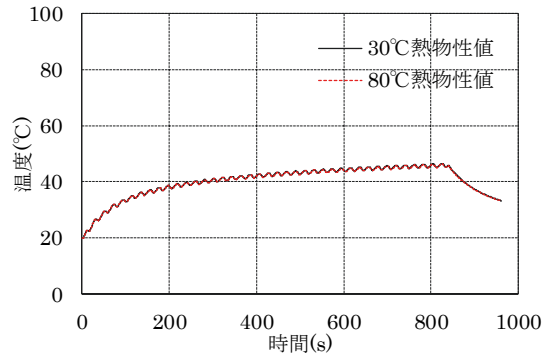
	計測温度 (°C)	試験片				3章 熱物性値
		1	2	3	平均値	
熱伝導率 (W/(m·K))	30	0.208	0.206	0.208	0.207	0.150
	50	0.205	0.202	0.204	0.204	
	80	0.201	0.198	0.200	0.200	
比熱 (kJ/(kg·K))	30	1.63	1.66	1.67	1.65	1.90
	50	1.75	1.79	1.81	1.78	
	80	1.85	1.89	1.91	1.88	
密度(kg/m <sup>3</sup> )	22	1090	1090	1090	1090	1040

表 4-6 中間鋼板における熱物性値評価試験結果の一覧

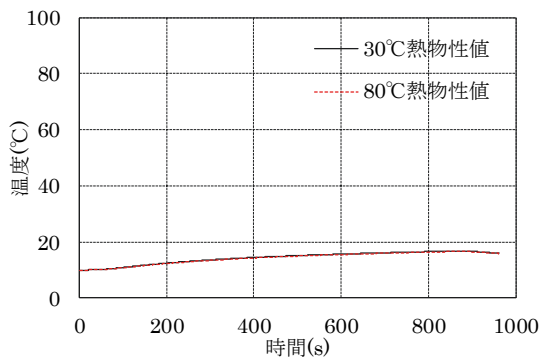
項目	計測温度 (°C)	試験片			3章 熱物性値
		1	2	平均値	
熱伝導率 (W/(m·K))	30	65.3	64.3	64.8	80.3
比熱 (kJ/(kg·K))	30	0.451	0.467	0.459	0.442
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	22	7870	7870	7870	7850



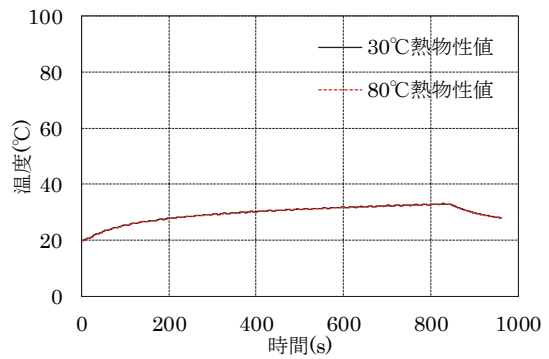
(a) 鉛プラグ中心部



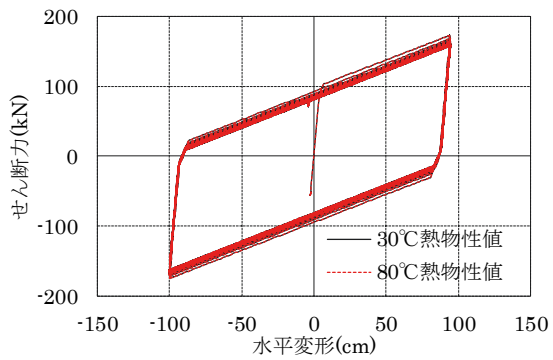
(b) 鉛プラグ外周部



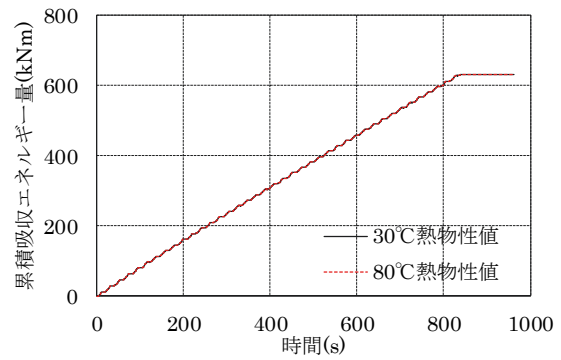
(c) 積層ゴム内周部



(d) 鉛プラグ頂部

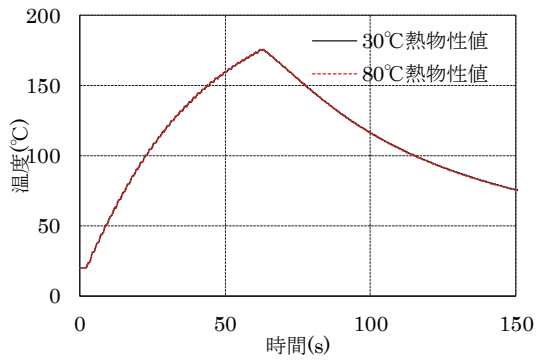


(e) 履歴曲線

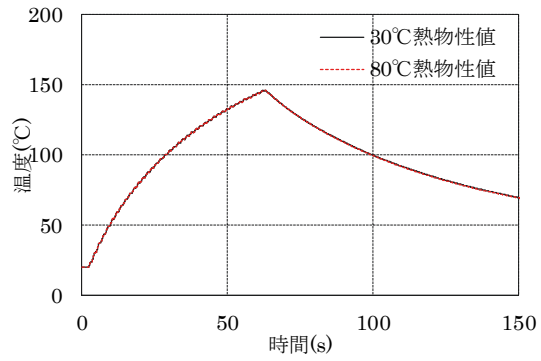


(f) 累積吸収エネルギー量

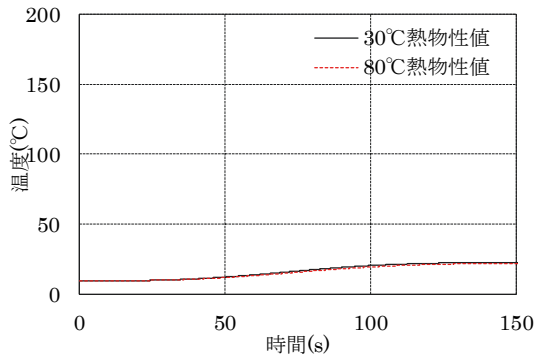
図 4-6 熱物性値の温度依存性による熱・力学連成解析結果の比較 (試験ケース 1-1)



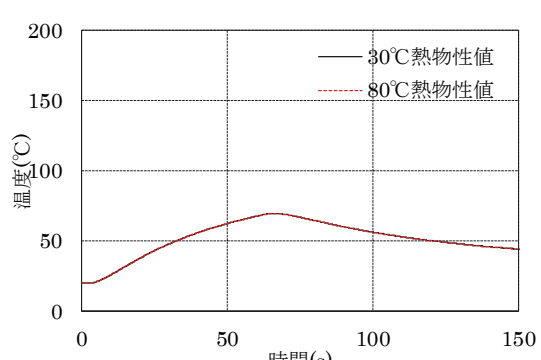
(a) 鉛プラグ中心部



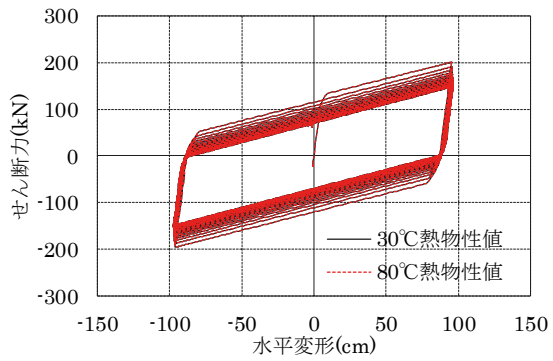
(b) 鉛プラグ外周部



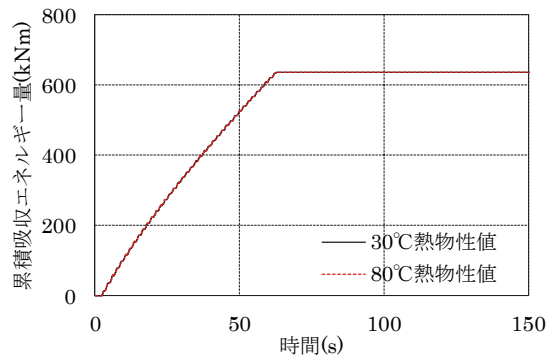
(c) 積層ゴム内周部



(d) 鉛プラグ頂部

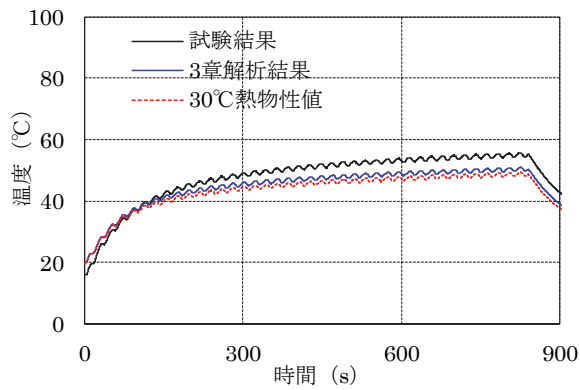


(e) 履歴曲線

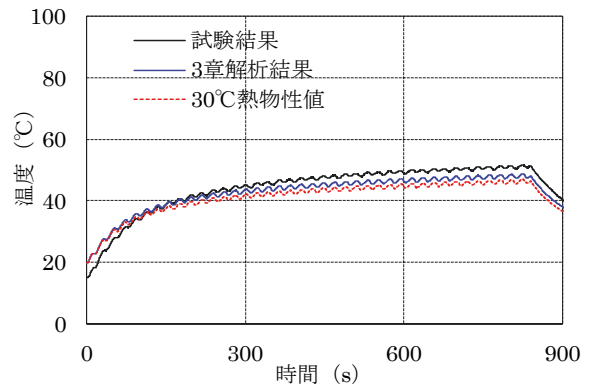


(f) 累積吸収エネルギー量

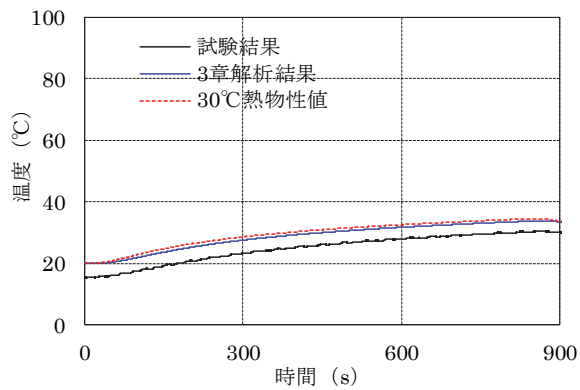
図 4-7 熱物性値の温度依存性による熱・力学連成解析結果の比較 (試験ケース 1-3)



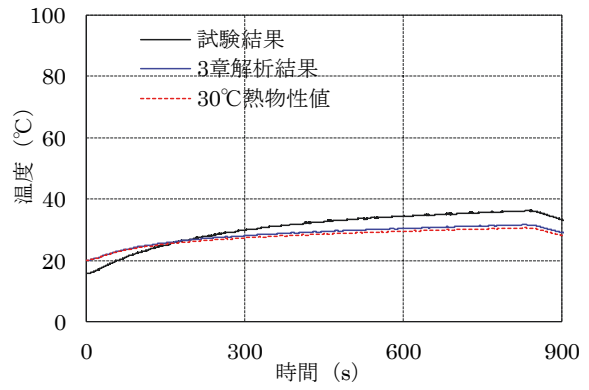
(a) 鉛プラグ中心部



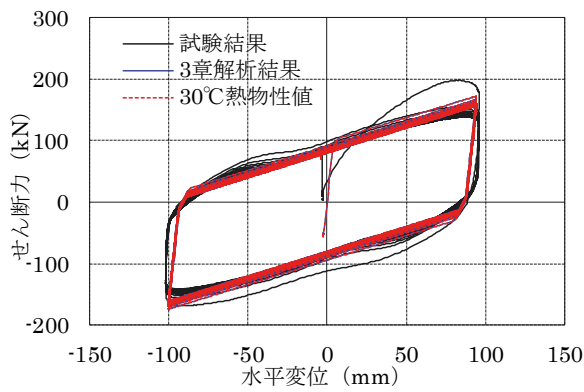
(b) 鉛プラグ外周部



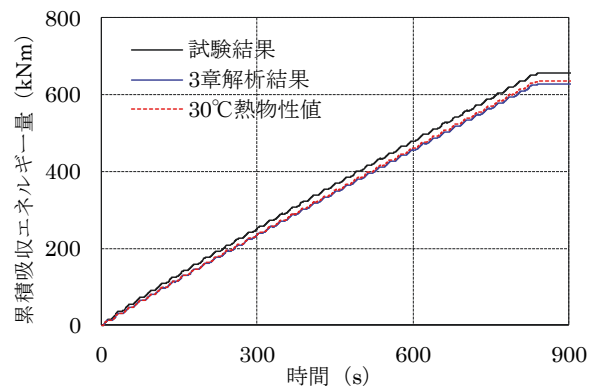
(c) 積層ゴム内周部



(d) 鉛プラグ頂部



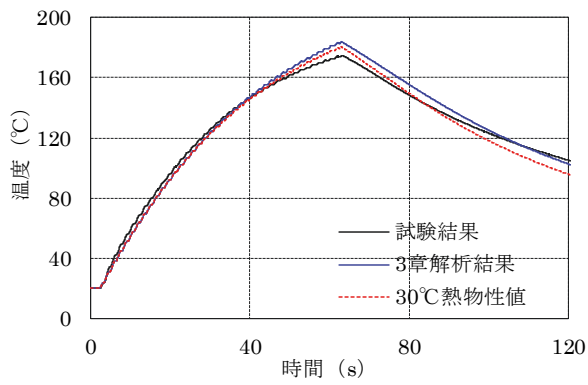
(e) 履歴曲線



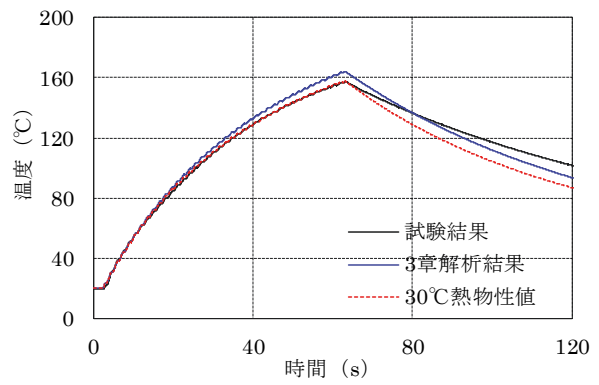
(f) 累積吸収エネルギー量

図 4-8 熱物性値の差異による熱・力学連成解析結果の比較 (試験ケース 1-1)

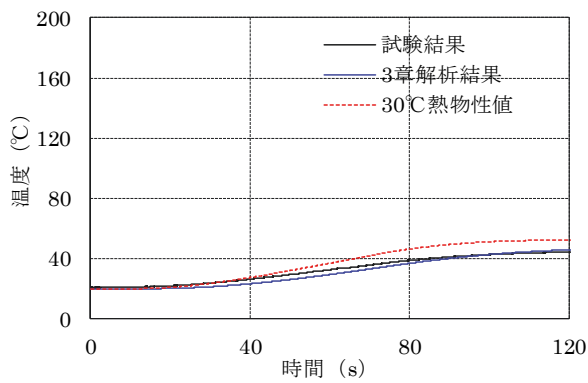




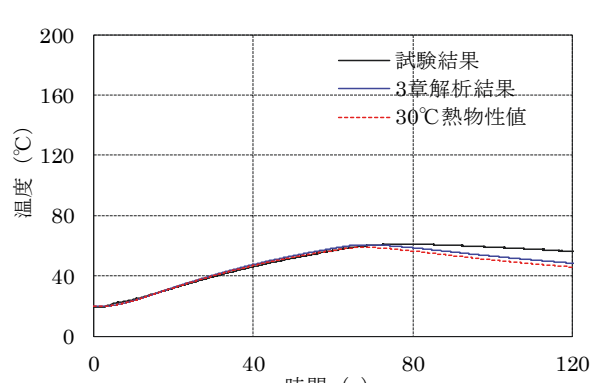
(a) 鉛プラグ中心部



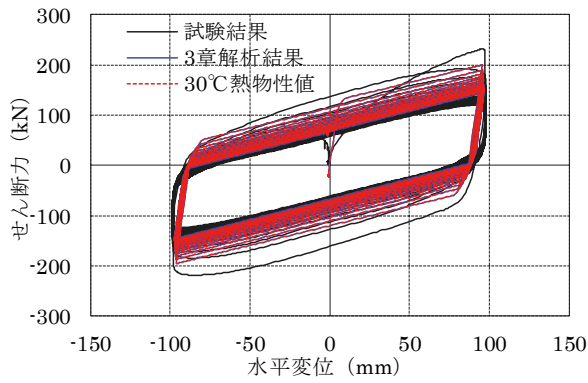
(b) 鉛プラグ外周部



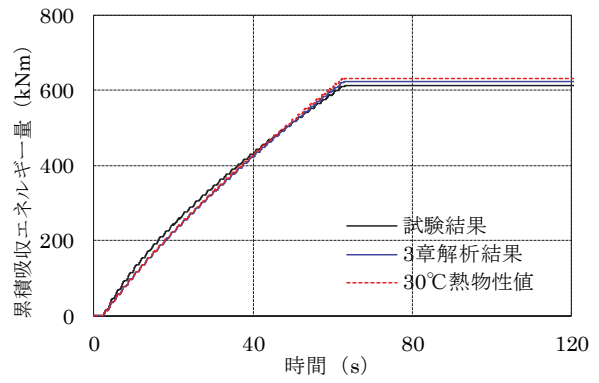
(c) 積層ゴム内周部



(d) 鉛プラグ頂部



(e) 履歴曲線



(f) 累積吸収エネルギー量

図 4-9 熱物性値の差異による熱・力学連成解析結果の比較 (試験ケース 1-3)

## (2) 積層体

積層体 1 を使用した熱物性評価試験結果を表 4-7 に示す。加力履歴の有無を比較すると、計測温度に係わらずその差異は 3%程度以下であり、繰返し加力による熱伝導率の変化は殆ど見られない。ここで、計測した熱伝導率に関して、表 4-5 と表 4-6 に示すゴム材料と鋼材の体積等価熱伝導率 $K_{ve}$ を算出すると  $27.1\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ となり、表 4-7 に示す試験結果と一致しない。これは、熱伝導率が大きく異なる材料を積層したため、熱伝導率が正しく計測できなかったことが原因と考えられる。そこで、鋼材の体積分率 $V_f$ が異なる積層体（積層体 2）を作成し、計測温度  $30^\circ\text{C}$ にて熱伝導率の変化を比較した。鋼材の体積分率 $V_f$ は式 4-1 から算出している。表 4-8 に $V_f$ の異なる積層体を用いた試験結果、図 4-10 に作成した積層体 2、図 4-11 に $V_f$ と熱伝導率の関係を示す。試験結果から、 $V_f$ の増加に伴い熱伝導率が増加する傾向が確認できる。よって、本試験方法では、積層体の熱伝導率を直接計測することはできないが、計測結果の相対関係は適切に評価できるものと考えられる。以上の点から、加力履歴の有無による熱伝導率の差異が僅少であるため、LRB の熱物性値は繰返し加力による影響を受けないことが分かった。

$$V_f = \frac{V_{steel}}{V_{steel} + V_{rubber}} \quad (4-1)$$

$$K_{ve} = V_f \cdot K_{steel} + (1 - V_f)K_{rubber} \quad (4-2)$$

ここで、

$V_{steel}$  : 積層体における鋼板の体積

$V_{rubber}$  : 積層体におけるゴム材料の体積

$K_{steel}$  : 鋼板の熱伝導率（計測温度  $30^\circ\text{C}$ の平均値）

$K_{rubber}$  : ゴム材料の熱伝導率（計測温度  $30^\circ\text{C}$ の平均値）

表 4-7 積層体 1 ( $V_f = 0.416$ ) の熱伝導率 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )

計測温度 ( $^\circ\text{C}$ )	加力履歴	積層体番号				比率 (有/無)
		1	2	3	平均値	
30	無し	2.06	1.95	2.00	2.00	1.02
	有り	2.12	1.98	2.00	2.03	
50	無し	1.96	1.86	1.92	1.91	1.03
	有り	2.06	1.94	1.89	1.96	
80	無し	1.88	1.82	1.86	1.85	1.03
	有り	1.96	1.87	1.86	1.90	

表 4-8 積層体 2 ( $V_f = 0.184$ ) の熱伝導率

	積層体番号		
	1	2	平均値
熱伝導率 (W/(m・K))	0.57	0.55	0.56

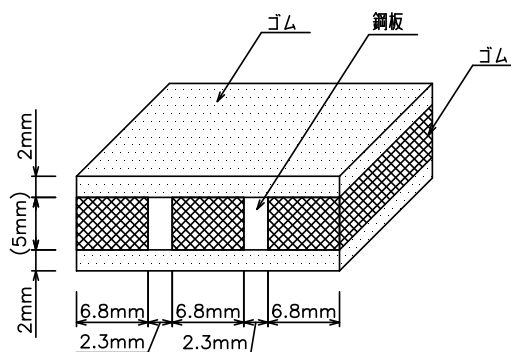
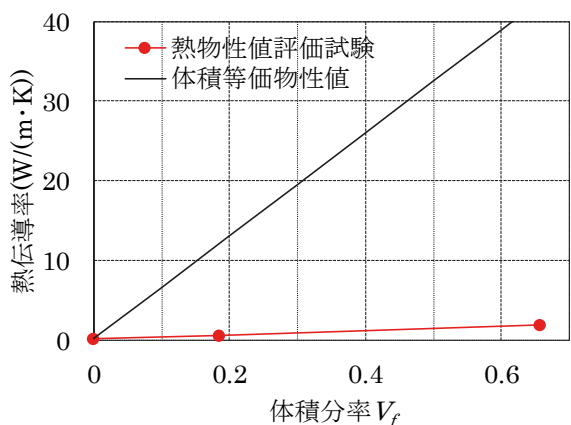
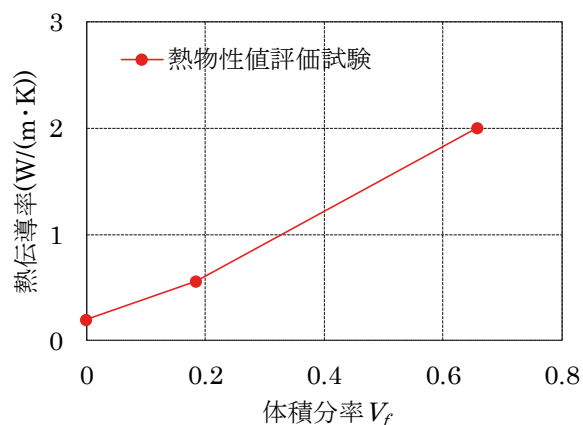


図 4-10 積層体 2 の寸法と外観



(a) 体積等価物性値との比較



(b) 試験結果の比較

図 4-11 鋼材の体積分率と熱伝導率の関係

#### 4.3 まとめ

LRB で使用されているゴム材料および中間鋼板を対象に熱物性値評価試験を実施し、熱・力学連成解析に使用する熱物性値を算出すると共に、熱物性値の温度依存性が解析結果に与える影響を確認した。また、ゴム材料と中間鋼板を架硫接着した積層体を作成し、加力履歴の有無による熱物性値の差異を確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 免震装置の熱環境において、ゴム材料の比熱に温度依存性（14%程度）が確認されたが、ゴム材料の他熱物性値および中間鋼板に温度依存性は見られなかった。そこで、ゴム材料の比熱を変更した熱・力学連成解析結果を比較したところ、試験体内部の温度分布および力学特性に有意な差異は生じなかった。よって、熱・力学連成解析において、熱物性値の温度依存性を考慮する必要がないことが分かった。
- 2) 熱・力学連成解析に使用する熱物性値について、既往の文献記載値と熱物性値評価試験結果はゴム材料の熱伝導率に 38%程度、比熱に 15%程度、中間鋼板の熱伝導率に 24%程度の差異が見られた。そこで、熱物性値評価試験から得られた値を使用した熱・力学連成解析を実施したが、課題であった放熱影響を再現することは出来なかった。また、文献記載値を使用した試験結果との差異は僅少となることから、試験結果に対する熱物性値の感度が低いと考えられ、熱物性値評価試験を実施していない既往の研究成果の妥当性が確認できた。
- 3) 積層体の熱物性値評価試験から、加力履歴の有無による差異は 2~3%であったことから、熱物性値は加力履歴による影響を殆ど受けないことが確認できた。

#### 【4章 参考文献】

- 1) 日本機械学会：伝熱ハンドブック，丸善，1997年11月
- 2) 小田観世，中村嶽，稲葉学，湯川正貴，正木信男，櫻井祐：免震建物の維持管理に関する研究（その6：30年を経過した積層ゴムの材料特性試験），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.941-942，2017年8月
- 3) 森隆浩，中川進一郎，島本龍，室田伸夫，近藤明洋，中山尚之：高い変形能力を有する2段組積層ゴムの力学挙動（その7 FEMモデルによる水平変形・引張変形解析），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.503-504，2011年8月
- 4) 黒嶋洋平，石井建，菊地優，飯場正紀，白井和貴：鉛プラグ入り積層ゴムの熱・力学連成挙動を考慮した免震建物の地震応答解析，構造工学論文集，Vol.63B，pp.231-239，2017年3月
- 5) 日本規格協会：JIS K 6410-2，2015年10月
- 6) ブリヂストン：建築免震用積層ゴム製品仕様一覧，2018年3月
- 7) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，1983年5月
- 8) 日本規格協会：JIS K 6268，2016年10月
- 9) 国立天文台：理科年表 平成27年，丸善，2014年11月

## 5. 鉛プラグの接触状態を考慮した非線形熱・力学連成解析

4章の熱物性値評価試験結果から、LRBで使用されている材料における熱物性値の温度依存性が確認されたものの、熱・力学連成解析に与える影響は限定的であり、再現解析から放熱影響を適切に評価することができなかった。そこで本章では、3次元FEMモデルを使用した接触解析を行い、鉛プラグと積層ゴムおよび中間鋼板との境界部（鉛プラグ境界部）の接触状態を確認すると共に、接触状態とせん断ひずみの関係を整理する。更に、せん断ひずみに応じて変動する接触状態を再現した熱・力学連成解析の解析手法を提案し、新たに開発した非線形熱伝導解析を有する熱・力学連成解析プログラムを使用した繰返し加力試験の再現解析から、提案手法の妥当性を検証する。

### 5.1 接触状態の確認

#### 5.1.1 接触解析モデル

繰返し加力試験の熱エネルギー評価結果から、鉛プラグの発熱量は主として半径方向に伝導することが確認された。よって、LRBの放熱影響を再現する際、鉛プラグで発生した熱の逸散経路である鉛プラグ境界部の接触状態を確認することは非常に重要である。しかし、加力後の鉛プラグー積層ゴムおよび中間鋼板境界部（鉛プラグ境界部）の接触状態を確認した例は報告<sup>1)</sup>されているものの、加力中の鉛プラグ境界部を直接観察することは困難である。また、予め切断したLRBの切断面に透明の亚克力板を設置した加力試験が実施されているが、鉛プラグの封入状態を再現することが出来ず、接触状態を確認するには至っていない。そこで、本研究では、繰返し加力試験に使用した試験体の上下連結鋼板間を対象とした非線形FEMモデルを作成し、直接拘束法を用いた接触解析を実施して鉛プラグ境界部の接触状態を数値解析的アプローチにより確認する。

使用するFEMモデルは、対称性を考慮した1/2モデルとし、鉛プラグ、積層ゴムおよび中間鋼板を対象にモデル化を行う。使用要素について、積層ゴムは変位8節点と圧力1節点の六面体ハイブリッド要素、中間鋼板および鉛プラグは8節点の六面体一様次数低減積分要素とする。なお、鉛プラグ境界部のゴム膜と装置外周部の被覆ゴムは、アスペクト比が大きく、解析精度が低下することから、本解析では積層部と一体化して変形するものとしてモデル化していない。境界条件は、モデル下面に変位拘束、モデル上面に水平・上下2自由度のタイイングを設定した。鉛プラグと積層部の接触面における摩擦係数は、熱・力学連成解析において試験結果の再現性が高い接触状態が得られる0.5を採用した。高さ方向のメッシュ分割は、中間鋼板を1分割、せん断変形量が大きい積層ゴムの2分割とし、鉛プラグは積層部から更に2分割している。また、本解析では、積層ゴムより鉛プラグの方が柔軟に変形すると仮定し、積層部をマスター、鉛プラグをスレーブとして設定した。解析モデルに使用する材料定数<sup>2)</sup>を表5-1に、解析モデルの外観を図5-1に示す。

積層ゴムの履歴モデルは式5-1に示す超弾性モデル<sup>3)</sup>を使用し、材料定数は設計値の履歴曲線に合わせて調整（ $\alpha = 0.2\text{N/mm}^2$ 、 $\kappa = 1440\text{N/mm}^2$ ）している。鉛プラグの履歴モデルは完全弾塑性モデルを使用し、塑性判定にはMises降伏条件を用いる。

$$W = \alpha(\bar{I}_1 - 3) + \frac{9}{2}\kappa\left(I_3^{\frac{1}{6}} - 1\right)^2 \quad (5-1)$$

ここで、

$W$  : ひずみエネルギー密度関数

$\bar{I}_1$  : 偏差ひずみの第 1 不変量

$I_3$  : ひずみの第 3 不変量

$\alpha$  : せん断弾性率に比例する材料定数

$\kappa$  : 体積弾性率を表す材料定数

表 5-1 接触解析モデルの材料定数

	鉛プラグ	中間鋼板
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$1.00 \times 10^3$	$2.05 \times 10^5$
ポアソン比	0.499	0.30
降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	15	—

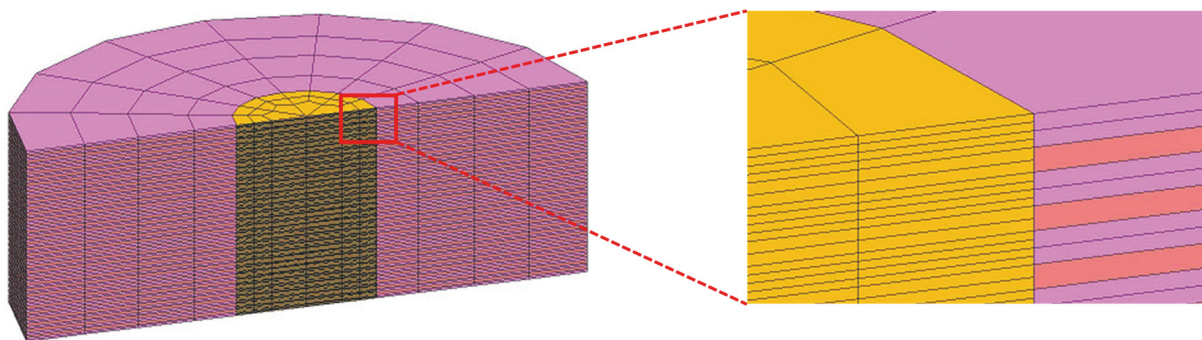


図 5-1 接触解析モデルの外観 (Model-LRB)

### 5.1.2 解析結果

本解析では、繰返し加力試験における試験ケース 1 および試験ケース 3 の試験条件に合わせ、 $-5\text{N/mm}^2$  の一定面圧下でせん断ひずみ 100%のサイクル加力を実施した。解析結果から得られた履歴曲線と設計値および出庫試験結果の履歴曲線を図 5-2 で比較する。なお、出庫試験結果は、試験体 1 の 3 サイクル目における履歴曲線を抽出して示す。図 5-2(a)より、3/4 サイクル (負加力) を超えた時点で不安定となり、以降の履歴曲線が得られていないが、解析結果が得られた 3/4 サイクル以前の履歴曲線は、設計値および試験結果の履歴曲線と概ね一致している。また、図 5-2(b)より、面圧-鉛直ひずみ関係は設計値を概ね再現できている。よって、接触解析モデルの妥当性を確認することができる。

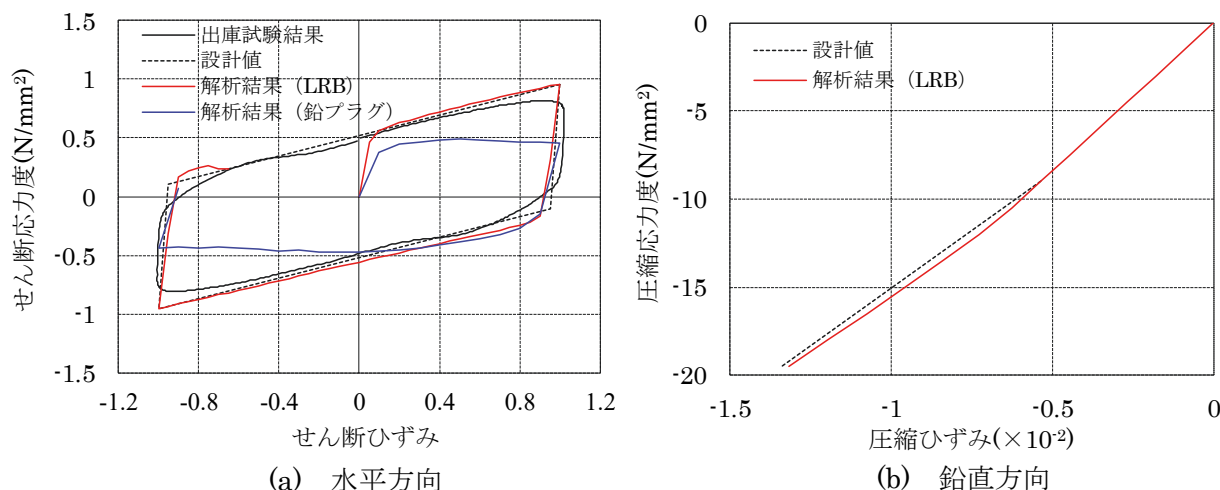


図 5-2 出庫試験と接触解析における履歴曲線の比較

### (1) 接触状態

せん断ひずみ量に応じた鉛プラグ境界部の接触状態を確認するため、せん断ひずみと鉛プラグの接触面積比の関係と鉛プラグ境界部の切断断面を示す。せん断ひずみと鉛プラグの接触面積比  $\xi$  の相関関係を図 5-3 に示す。接触面積比は、接触状態にある鉛プラグの節点数を鉛プラグ外周部の総節点数で除して算出している。図 5-3 より、正加力時は処女載荷となるため加力開始時点で接触面積比が 1.0 となっており、加力時と除荷時のひずみ依存性が異なる。一方、負加力時は加力時と除荷時のいずれもせん断ひずみの増加に伴い接触面積比が低下する傾向が確認できる。本報では繰り返し加力時の接触状態としては負加力時の接触面積比を用いる方が妥当であると判断し、2/4 サイクル以降の接触状態に着目した検討を行う。接触状態の確認位置を図 5-4 に、せん断ひずみ 0%~100% (2/4 サイクル~3/4 サイクル) 時における加力方向の断面を図 5-5、加力 45° 方向の断面を図 5-6、加力直交方向の断面を図 5-7 に示す。なお、コンターは Mises 応力、形状は変形量を示している。

図 5-5(1)より、原点付近 (せん断ひずみ 0%) であっても非接触部が発生することが確認でき、非接触部は主としてせん断変形角が不連続となる積層ゴムと中間鋼板の境界部で発生する傾向が見られる。これは、鉛プラグの残留変形が原因と考えられる。図 5-5(2)に示すせん断ひずみ 25% 時では、せん断ひずみ 0% 時と同様の接触状態となっているが、図 5-5(3)に示すせん断ひずみ 50% 時では、非接触部はせん断ひずみ 25% 以下と同様に積層ゴムと中間鋼板の境界部で発生しているが、せん断ひずみの増大により中間鋼板部の非接触部が増大する傾向が確認できる。図 5-5(4)に示すせん断ひずみ 75% 時および図 5-5(5)に示す 100% 時では、せん断ひずみの増大に伴い中間鋼板部を中心に非接触部が増大する傾向が確認できる。また、図 5-6 より、非接触部は加力方向以外にも発生しており、加力直交方向においても、主として積層ゴムと中間鋼板の境界部で発生する傾向が見られるものの、非接触部の発生位置や形状が異なっている。一方、図 5-7 に示す加力 45° 方向では、加力方向と概ね同様の接触状態となっていることから、鉛プラグ境界部の接触状態は加力方向の接触状態が支配的であると考えられる。

次に、図 5-3 より、せん断ひずみが 0%~50% 程度まで接触面積比は 0.8 程度となり、ひずみ量に依らず概ね一定の傾向を示す。一方、せん断ひずみが 50% を超過すると接触面積比が低下し、

せん断ひずみ 100%時には 0.6 程度になることが確認できる。上記の傾向は、図 5-5 に示す鉛プラグ境界部の加力方向断面図から得られた知見と一致する。ここで、接触率とせん断ひずみの関係から、せん断ひずみに関わらず接触率が一定となる範囲（接触状態 A）とせん断ひずみに応じて接触率が低下する範囲（接触状態 B）の 2 種類に分類できることに着目し、図 5-3 にて各接触状態における非接触部の分類を確認した。積層ゴムおよび中間鋼板の共有節点のみ非接触となる場合を Type A、積層ゴムおよび中間鋼板ともに 2 節点以上が非接触となる場合を Type B、その他の接触状態を Type C として接触状態の分類を行うと、図 5-5 より接触状態 A では Type A、接触状態 B では Type B が支配的になることが確認できる。接触状態 A と接触状態 B の境界は、両方の非接触分類を含んだ断面を有し、かつ、接触面積比の低下開始点付近であるせん断ひずみ 50% とする。上記の検討から、せん断ひずみ 0%~50% 時において  $\xi=0.8$ 、せん断ひずみ 100% 時において  $\xi=0.6$  とし、せん断ひずみ 50~100% 時においてひずみ量の増大に伴い接触率が低下する近似折れ線を作成し、接触率のせん断ひずみ依存性を仮定した。作成した近似折れ線と決定係数を図 5-3 に併記する。

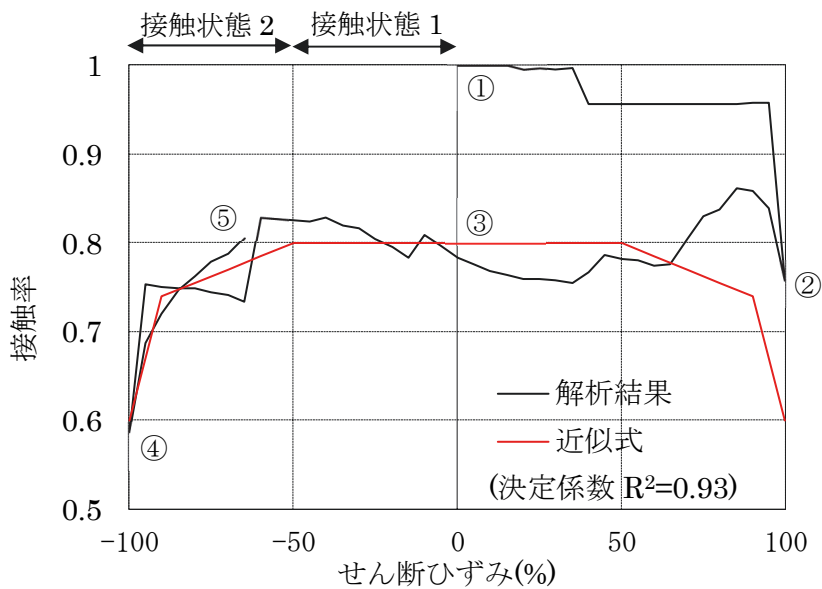


図 5-3 せん断ひずみと鉛プラグの接触面積比  $\xi$  の相関関係

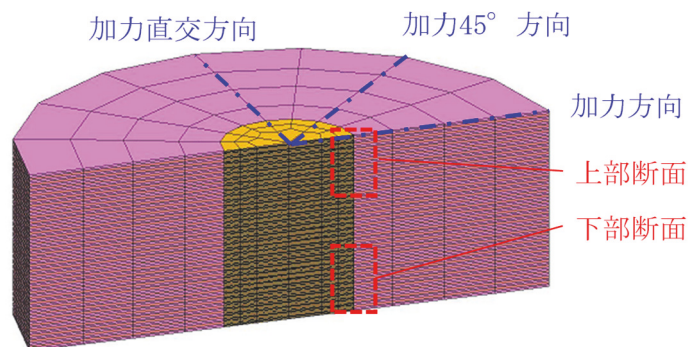
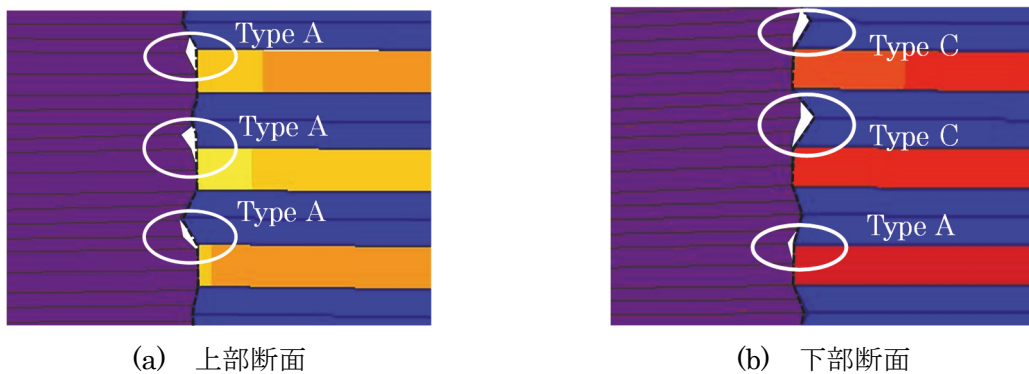


図 5-4 断面図の切断位置

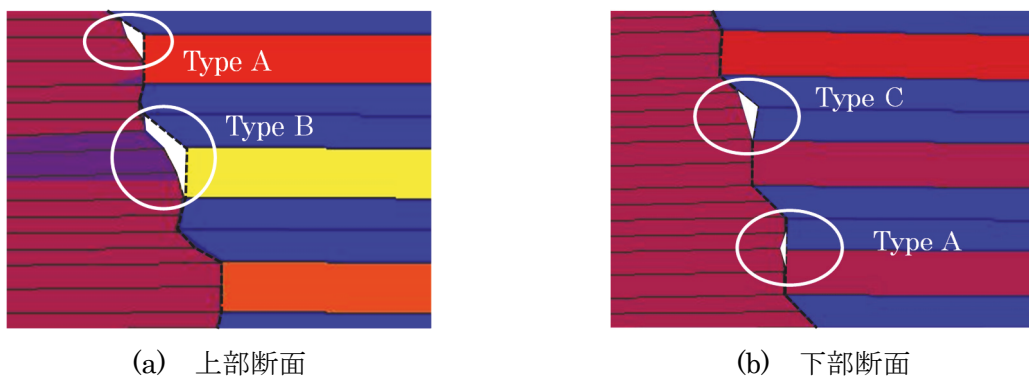




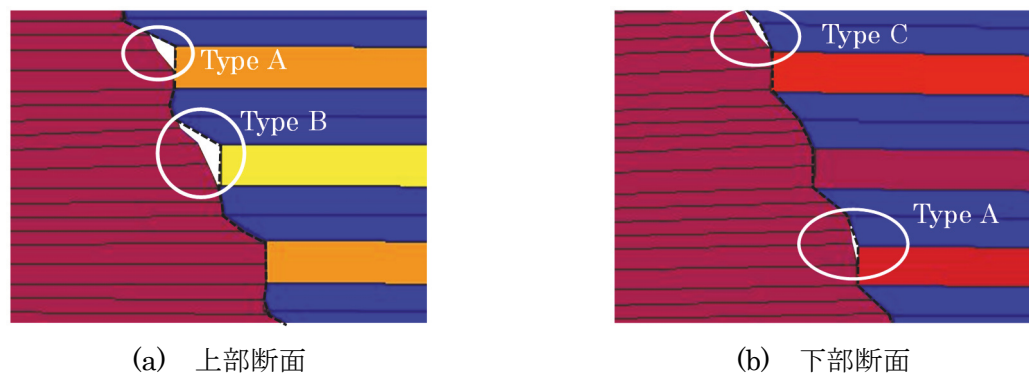
(a) 上部断面 (b) 下部断面  
 図 5-5(1) セン断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態



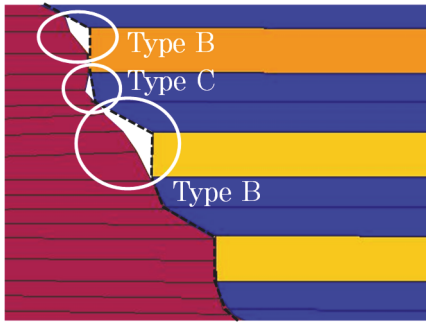
(a) 上部断面 (b) 下部断面  
 図 5-5(2) セン断ひずみ 25%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )



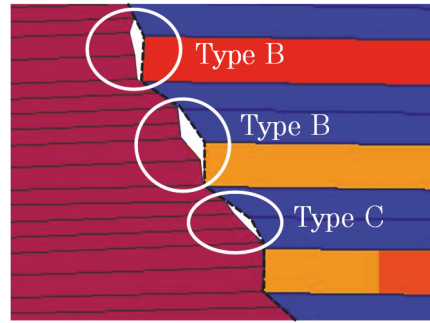
(a) 上部断面 (b) 下部断面  
 図 5-5(3) セン断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面 (b) 下部断面  
 図 5-5(4) セン断ひずみ 75%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

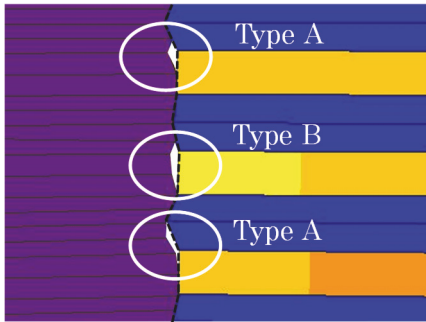


(a) 上部断面

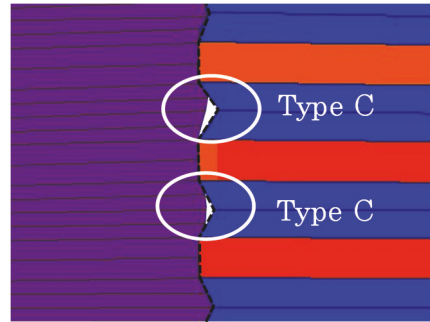


(b) 下部断面

図 5-5(5) せん断ひずみ 100%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

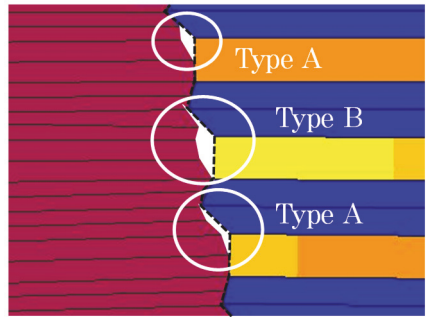


(a) 上部断面

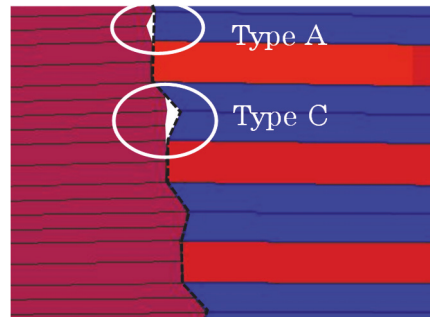


(b) 下部断面

図 5-6(1) せん断ひずみ 0%時における加力 $45^\circ$ 方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

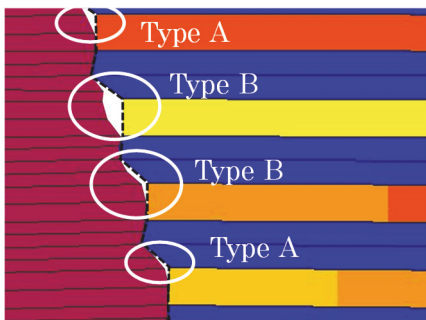


(a) 上部断面

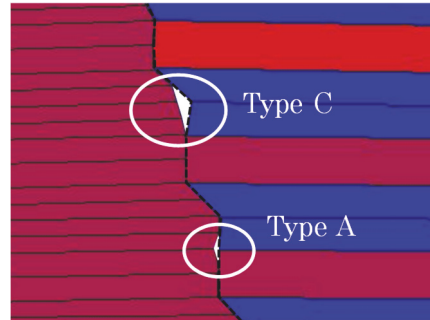


(b) 下部断面

図 5-6(2) せん断ひずみ 25%時における加力 $45^\circ$ 方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

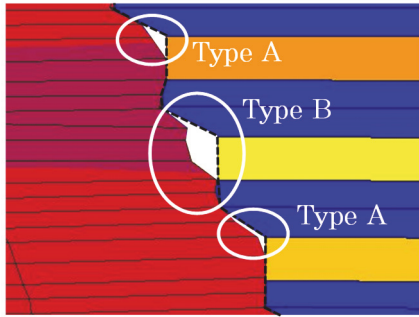


(a) 上部断面

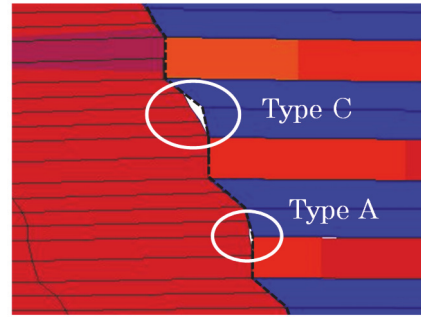


(b) 下部断面

図 5-6(3) せん断ひずみ 50%時における加力 $45^\circ$ 方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

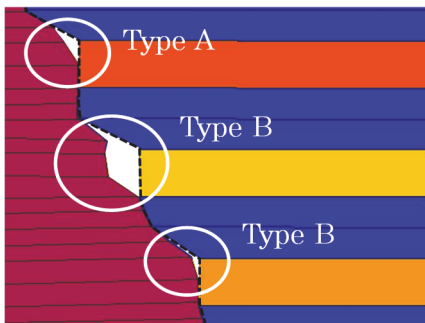


(a) 上部断面

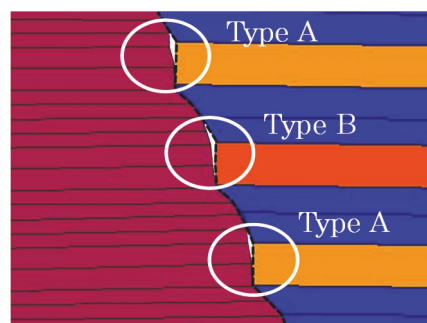


(b) 下部断面

図 5-6(4) せん断ひずみ 75%時における加力 45° 方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)

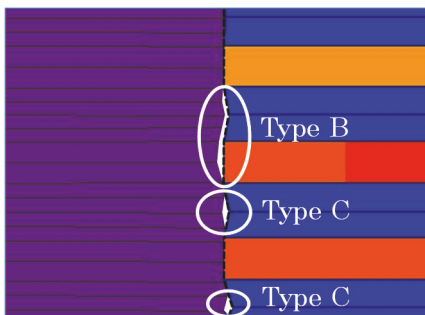


(a) 上部断面

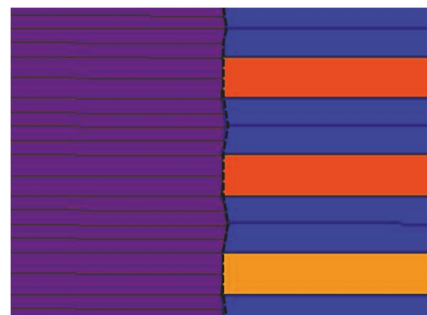


(b) 下部断面

図 5-6(5) せん断ひずみ 100%時における加力 45° 方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)

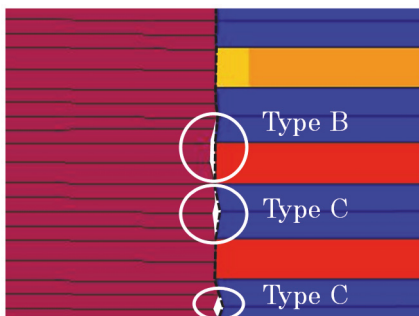


(a) 上部断面

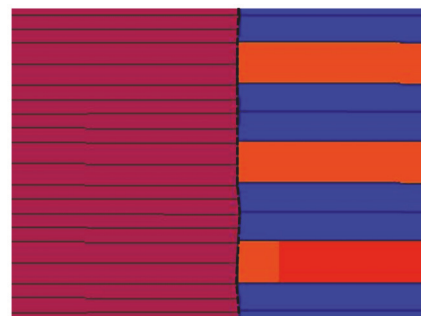


(b) 下部断面

図 5-7(1) せん断ひずみ 0%時における加力直交方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)



(a) 上部断面



(b) 下部断面

図 5-7(2) せん断ひずみ 25%時における加力直交方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)

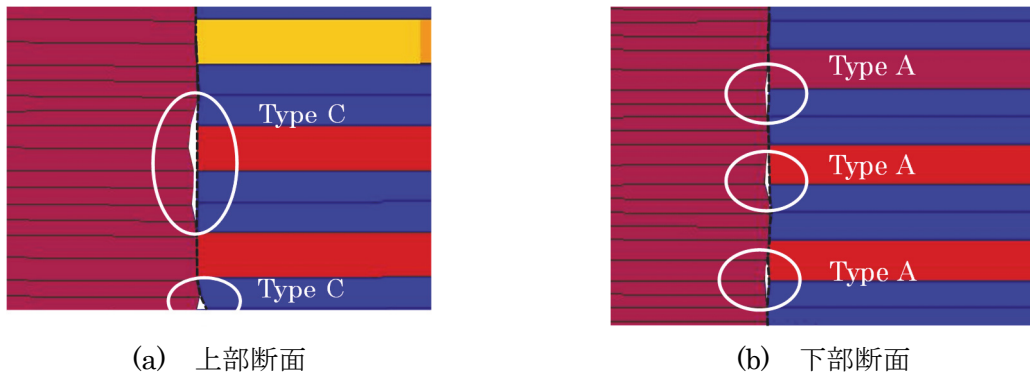


図 5-7(3) せん断ひずみ 50%時における加力直交方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

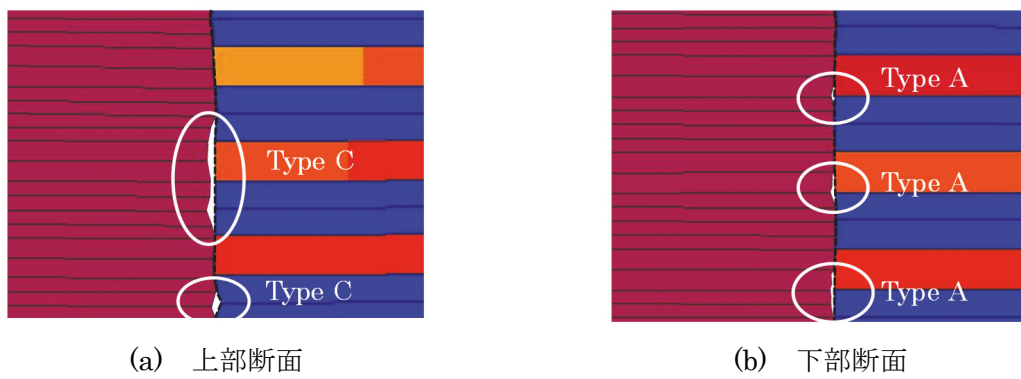


図 5-7(4) せん断ひずみ 75%時における加力直交方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

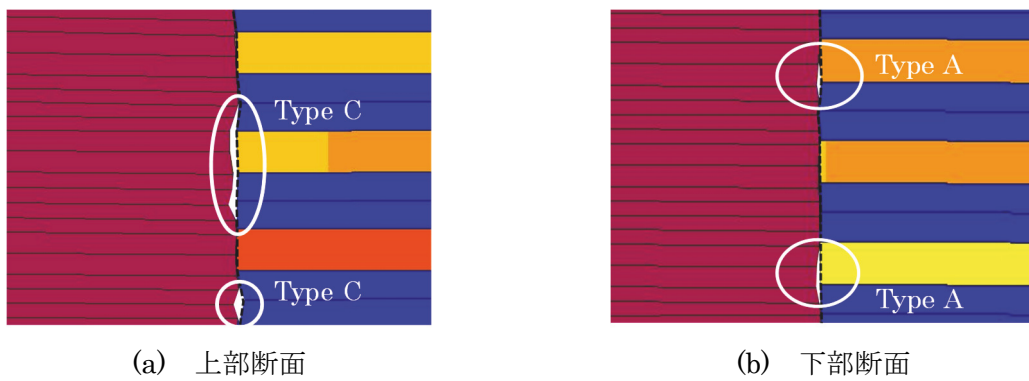


図 5-7(5) せん断ひずみ 100%時における加力直交方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

## (2) 力学特性

これまで、天然ゴム系積層ゴム（以下、RB と称する）などの中空部が小さい免震装置では、中空部を跨いだ圧縮ストラットを形成するため大変形時の性状が比較的安定するが、中空部が大きい場合は水平剛性の低下が大きく、鉛直沈み込み量も増加し、変形能力や水平履歴特性の安定性に影響を与えることが指摘されている<sup>4)</sup>。LRB では中空部に鉛プラグを挿入することで上記に示す応答履歴の不安定化を防止できる可能性は指摘されているが、既往研究では鉛プラグ境界部を節点共有としてモデル化することが殆ど<sup>5)</sup>であり、鉛プラグの非線形性を考慮した接触解析によって装置内部の応力分布やプラグへの応力伝達を確認した例は見当たらない。そこで、本研究では、前項で作成した FEM モデル (Model-LRB) から、積層部のみを抽出したモデル (Model-Plug Remove) を作成し、接触解析の妥当性と LRB 内部の応力分布を確認する。Model-Plug Remove の外観を図 5-8 に、最大変形時（せん断ひずみ 100%、3/4 サイクル）における Model-LRB と Model-Plug Remove の Mises 応力コンターを図 5-9 に示す。なお、形状は変形量を示している。

図 5-9 (b) に示す Model-Plug Remove では、中空部を挟んで細い 2 つの圧縮ストラットが形成されており、せん断ひずみの増大に伴い装置全体が一体化して荷重を負担できなくなることが予想されることから、これまでの知見と整合した解析結果が得られている。なお、本試験体は太径プラグを使用しているため、装置内部における応力分布のばらつきが特に大きく示されている。一方、図 5-9 (a) に示す鉛プラグを挿入した Model-LRB では、鉛プラグと積層部を跨いだ圧縮ストラットが形成されており、接触解析の妥当性を確認するとともに、各部が接触することでプラグ内に応力伝達が生じて荷重を負担できることが分かった。しかし、鉛プラグは完全弾塑性モデルであり、降伏後は一定荷重しか支持できないことから、積層部の応力負担が大きいことが確認できる。また、鉛プラグ境界部の接触状態が一定でないため、積層部の応力分布が不均一となっており、これらの影響から中空部の小さい RB と比較して大変形時の応答性状が悪化するものと考えられる。

次に、鉛プラグのせん断応力度分布と変形形状から、水平加力を受ける鉛プラグの発熱特性を確認するため、Model-LRB の鉛プラグ部におけるせん断応力コンターを図 5-10 に示す。図 5-10 から、鉛プラグのせん断応力度は高さ方向に概ね均一であり、中間鋼板による拘束は殆ど見られず、プラグ全体が塑性化していることが確認できる。また、プラグの変形形状は、一様なせん断変形形状にはならないものの、非接触域が生じることで積層ゴムと中間鋼板の変形を完全に追従せず、各部における変形量の差が僅少となるものと考えられる。よって、熱・力学連成解析において、鉛プラグの発熱範囲は上下連結鋼板間全体とし、発熱量は当該範囲に対して均一に与えて解析を行うことが適当と考えられる。なお、本考察は 3 章に示す熱エネルギーから評価した発熱特性と一致する。なお、本知見は限られた解析条件に関するものであり、更なる検討が必要である。

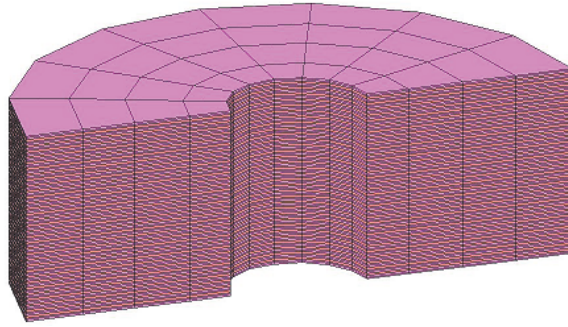
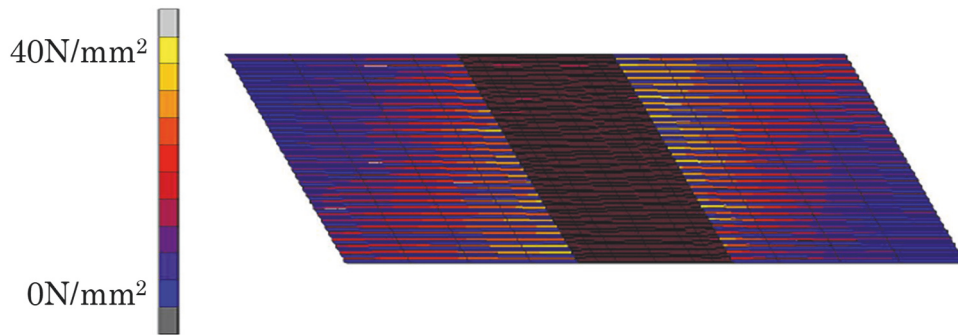
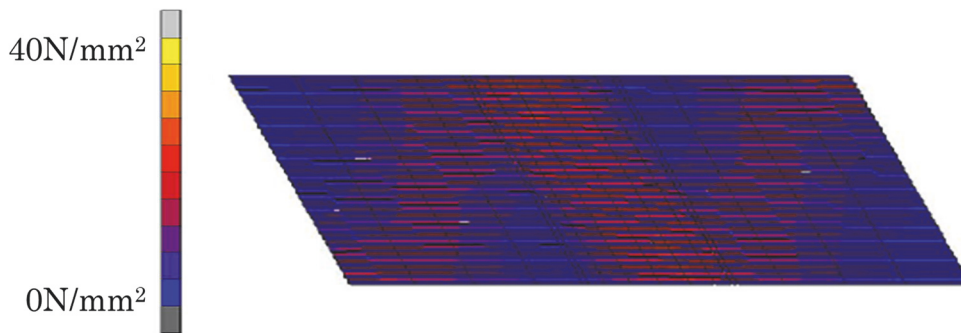


図 5-8 解析モデルの外観 (Model-Plug Remove)



(a) Model-LRB



(b) Model-Plug Remove

図 5-9 3/4 サイクル時における全体モデルの応力コンター

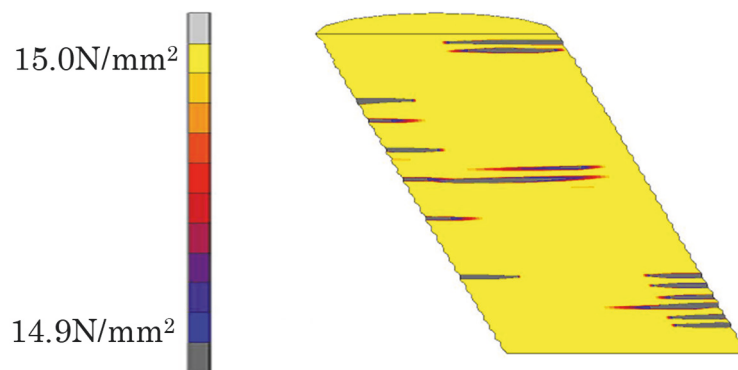


図 5-10 3/4 サイクル時における鉛プラグ部の応力コンター (Model-LRB)

### 5.1.3 面圧依存性の検討

5.1.2 項で示した解析結果は、面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ 時におけるせん断ひずみ依存性に関する知見である。せん断ひずみ以外において鉛プラグ境界部の接触状態に影響を与える要因として、面圧、寸法効果および経年変化等が考えられるが、ここでは繰返し加力試験においてパラメータとしている面圧依存性に着目した検討を行う。なお、その他の項目については繰返し加力試験のパラメータとしておらず、本研究において妥当性検証を実施できないため、今後の検討課題としたい。

接触状態の面圧依存性検討のため、積層ゴム製造メーカーにおいて設定されている基準面圧( $-10.0\sim-15.0\text{N/mm}^2$ 程度)から引張領域の線形限界である $1.0\text{N/mm}^2$ を対象として接触解析を実施した。しかし、接触解析は積層ゴムの構成則が複雑であり、特に低面圧下での解析において接触要素の収束計算で生じる残差力処理過程で解の発散が確認されたことから、本研究では $-5.0\text{N/mm}^2\sim-15.0\text{N/mm}^2$ の範囲を対象として面圧依存性の検討を実施する。せん断ひずみと鉛プラグの接触面積比 $\xi$ の相関関係を図 5-11 に、面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ における加力方向の断面を図 5-12、図 5-13 に示す。鉛プラグ境界部の断面図は、殆どの解析ケースで解析結果が得られているせん断ひずみ 0%および 50% (2/4 サイクル $\sim$ 3/4 サイクル) 時について示す。なお、その他の断面図は付録 5 に示す。

図 5-11 より、 $-10.0\text{N/mm}^2$ 時では、負側加力時の接触率が得られていないものの、除荷を含む正側加力時の接触率は 0.9 以上となり非接触部は殆ど無い。 $-10.0\text{N/mm}^2$ 時では、3/4 サイクル後に接触率が回復する傾向が見られないものの、負側加力時ではせん断ひずみ 90%程度まで接触率は 0.9 以上、せん断ひずみ 90%以降は接触率が 0.8 程度まで低下する傾向が見られる。 $-7.5\text{N/mm}^2$ 時では、せん断ひずみ 0%の接触率が 0.88 となり、 $-5.0\text{N/mm}^2$ と $-10.0\text{N/mm}^2$ の中間値となる。また、せん断ひずみの増大に伴い接触率が低下する傾向が確認できる。

上記の解析結果から、面圧の増大に伴い接触率が増加する傾向が確認できる。また、せん断ひずみの増大に伴う接触率の低下についても、面圧の増加に伴い低下量が減少する傾向が確認できる。図 5-12、図 5-13 より、鉛プラグ境界部の非接触部は、主として積層ゴムと中間鋼板の境界部で見られるが、図 5-5(1)、図 5-5(3)と比較して高面圧時では境界部が接触状態となる箇所が増加する傾向が確認できる。これは、高面圧時では塑性後の鉛プラグが半径方向に膨らむことで、接触範囲が増加することが原因と考えられる。

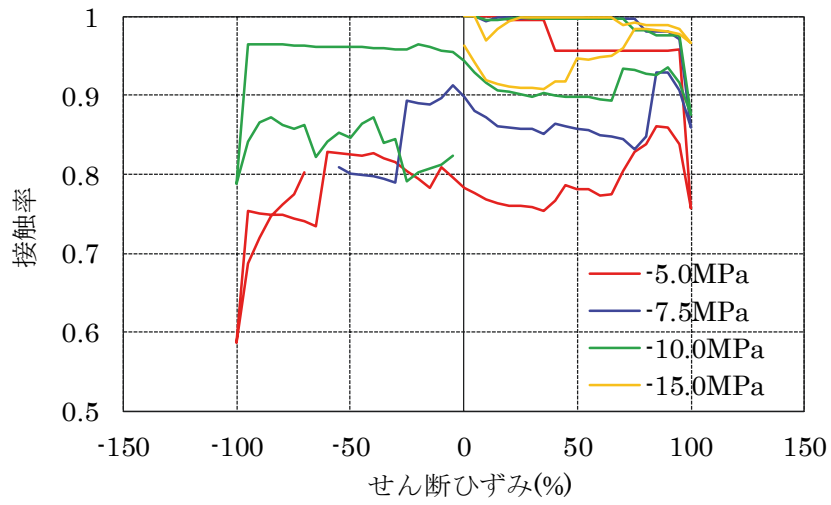


図 5-11 せん断ひずみと鉛プラグの接触率  $\xi$  の相関関係

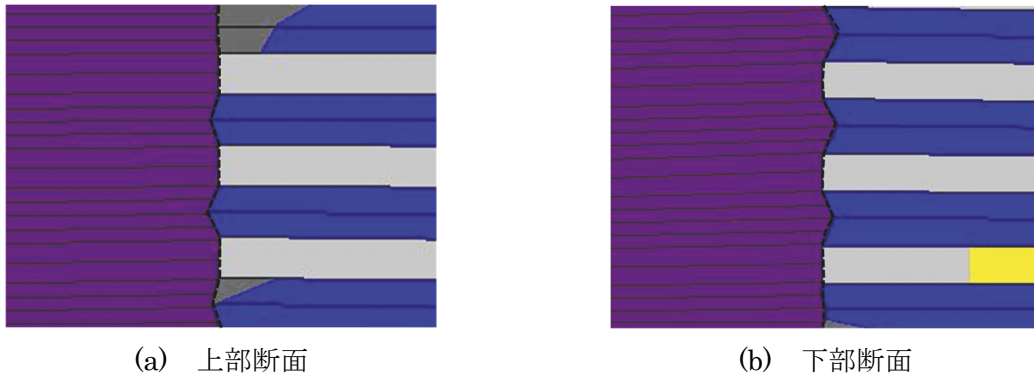


図 5-12 せん断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態 (面圧  $10.0\text{N/mm}^2$ )

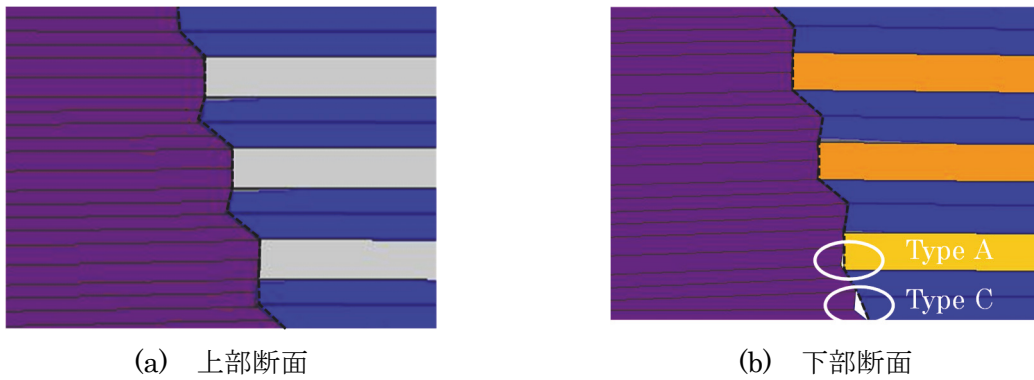


図 5-13 せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧  $10.0\text{N/mm}^2$ )



## 5.2 接触状態のモデル化

5.1 節で示した接触解析結果から、せん断ひずみ量に応じて接触状態が変化することを確認した。そこで本研究では、非接触部は空気層相当の熱伝導抵抗を有しており、接触部と比較して熱伝導抵抗が非常に大きいと考え、図 5-3 に示す接触率のせん断ひずみ依存性を装置の半径方向における伝導伝熱の比率に置換することで、鉛プラグ境界部の接触状態を熱・力学連成解析に適用するための手法を提案する。なお、 $-10\text{N/mm}^2$  以下の高面圧時は非接触部が殆どなく、 $-5.0\text{N/mm}^2$  を上回る低面圧時は接触解析解が得られていないことから、本研究では繰返し加力試験において基準面圧とした $-5.0\text{N/mm}^2$ 時を対象としてモデル化を行う。

本手法は、せん断ひずみ量に応じた伝導伝熱の比率を積層部の熱伝導率に乗じることで、接触状態を考慮した等価な熱伝導率の算出を試みている。積層部を対象とした理由は、前章の熱エネルギー評価および再現解析にて、LRB の熱影響評価において半径方向の熱移動を再現することが重要であったためである。また、境界部のみを対象とすると、収斂計算で処理できない不釣り合い力が発生し、試験結果を正確に模擬できなかったため、せん断ひずみ量に応じた伝導伝熱の比率を積層部の熱伝導率に乗じることとした。しかし、図 5-3 に示す接触率は、接触している節点数から評価しているのに対して、積層ゴムと中間鋼板は総節点数が異なっているため、近似折れ線の比率を各部の熱伝導率に乗じることが適当でない。

そこで、図 5-5 で示した加力方向の断面図から、代表的な非接触分類である Type A と Type B を図 5-14 の通りに設定する。次に、接触率とせん断ひずみの関係について、前述の通り接触状態 A と接触状態 B の 2 種類に分類することができ、接触状態 A では Type A、接触状態 B では Type B が支配的になることが確認されていることから、各接触状態における非接触分類から算出した接触率 (図 5-14) と接触解析から得られた接触率 (図 5-3) を比較することで、積層部の熱伝導率に乗じる補正係数を算出する。なお、積層ゴムのみ共有節点以外も非接触となる場合 (Type C) については、ゴムの熱伝導率が鋼板と比較して僅少であり、放熱作用が顕著な中間鋼板の接触状態が Type A に近いことから、本検討では Type A に分類する。また、最下端の積層ゴム節点は全体の 2.5%と僅少であるため、接触状態 A、B ともに積層ゴムと中間鋼板が 1 対で存在するものとして検討を行う。

せん断ひずみ 50%以下の範囲に該当する接触状態 A では、非接触部が Type A であると仮定してモデル化する。ここで、仮定した接触状態 (Type A) から算出した接触率と接触解析から得られた接触率 ( $\xi=0.8$ ) に差異が見られるが、これは図 5-7 に示す通り加力直交方向の接触状態が加力方向と異なる傾向を示すことが原因と考えられる。そこで、円周方向の補正值  $\epsilon$  を乗じることで仮定断面において接触解析結果を模擬することとする。Type A における積層ゴムおよび中間鋼板の各部位が接触している面積比を算出し、円周方向の補正值  $\epsilon_A$  を乗じて係数  $\alpha$  を算出する (図 5-14 (a))。接触状態 A はせん断ひずみに依らず一定値であるため、熱伝導率に係数  $\alpha$  を乗じて接触状態をモデル化する。

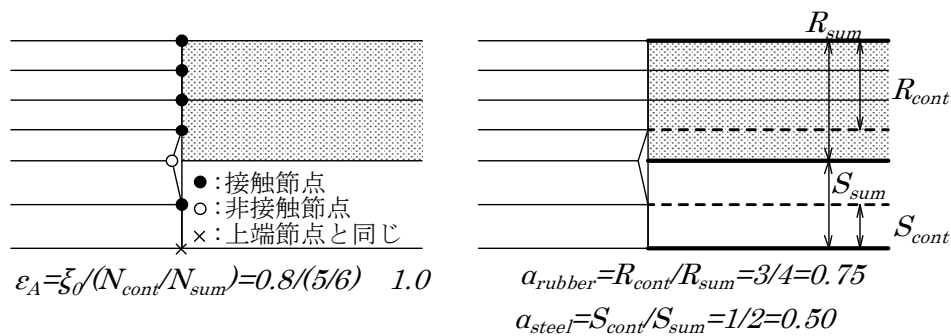
せん断ひずみ 50%を上回るせん断ひずみの範囲に該当する接触状態 B では、せん断ひずみに応じて接触面積が異なるため、せん断ひずみ  $\gamma=100\%$  の非接触部が Type B であると仮定し、各ひずみレベルの接触面積比  $\xi_\gamma$  との比率から接触状態をモデル化する。まず、各部位において接触している節点の支配面積比に円周方向の補正值  $\epsilon_B$  を乗じて係数  $\beta$  を算出する (図 5-14 (b))。次に、せん断ひずみ 100%時の接触面積比  $\xi_{100}$  と各ひずみレベルの接触面積比  $\xi_\gamma$  との比率 ( $\beta \times \xi_\gamma / \xi_{100}$ )

を熱伝導率に乗じることで、ひずみ依存性を考慮した接触状態をモデル化する。ここで、接触状態 B ではせん断ひずみが大きいので、図 5-5 にて鉛プラグと積層ゴムの節点同士が接触しないケースが見られることから、係数  $\beta$  を算出する際、節点の支配面積比を使用している。なお、積層ゴムは  $\alpha$ 、 $\beta$  とも同じ係数であり、鉛プラグの変形に追従して同様な接触状態が維持されることが考えられるため、せん断ひずみに関わらず一定値とした。

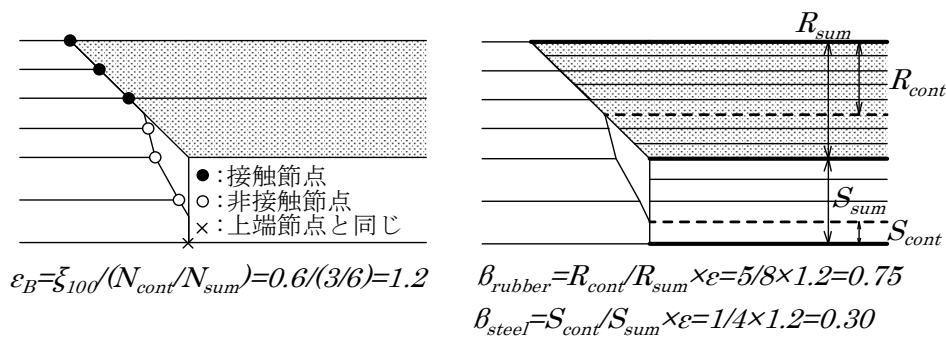
上記の手法で算出した係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の一覧表を表 5-2 に、係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の算出方法を図 5-14 に、各部位の熱伝導率に乗じる係数のせん断ひずみ依存性を図 5-15 に示す。

表 5-2 熱伝導率の補正係数

	積層ゴム	中間鋼板
$\alpha$	0.75	0.50
$\beta$	0.75	0.30



(a) Type A (接触状態 A)



(b) Type B (せん断ひずみ 100%)

$R_{cont}$ : 積層ゴムの接触面積       $S_{cont}$ : 中間鋼板の接触面積  
 $R_{sum}$ : 積層ゴムの総断面積       $S_{sum}$ : 中間鋼板の総断面積  
 $N_{cont}$ : 接触節点の総数

図 5-14 非接触分類の接触面積

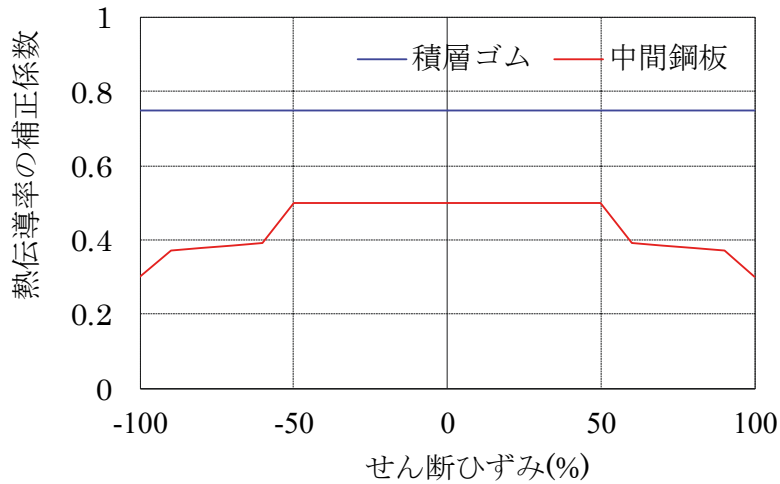


図 5-15 各部位の熱伝導率に乗じる係数のせん断ひずみ依存性

図 5-15 に示す熱伝導率の補正係数はせん断ひずみ 100%以下を対象としている。一方、せん断ひずみ±100%を超えるひずみ域において、鉛プラグや積層部の大変形を伴う接触解析では強い非線形性の影響で収束解が得ることが困難であり、接触率のせん断ひずみ依存性を算出出来なかった。ここで、せん断ひずみの増大に伴い LRB の有効軸断面積が低下することが知られている。せん断ひずみと有効軸断面積の関係式を式 5-2 および図 5-16 に示す。免震装置の支持荷重はせん断ひずみ量に係わらず一定となるため、有効軸断面積の低下に伴い高面圧化する。また、前項に示す面圧依存性の検討から、高面圧化によって接触率が増加する傾向が確認されている。そこで、せん断ひずみ 100%を超える接触状態について、有効軸断面積の低下に応じた高面圧化により接触率が増加するものと仮定して接触率のせん断ひずみ依存性を設定する。接触率の面圧依存性については、図 5-11 より全ての面圧で解析解が得られている 1/2 サイクル時 (せん断ひずみ 0%) の接触率と面圧の関係を図 5-17 で整理し、最小二乗法を用いた対数近似から算出した。接触率の面圧依存性を式 5-5 に示す。せん断ひずみが 100%を超える範囲において各部位の熱伝導率に乗じる補正係数  $\kappa$  は、式 5-5 をせん断ひずみ 100%時に  $\kappa=1.0$  となるように基準化 (式 5-6) して算出する。各部位の熱伝導率に乗じる補正係数を図 5-18 に示す。

また、本節で示した鉛プラグ境界部の接触状態を熱・力学連成解析に適用するための手順を図 5-19 に示す。

$$A_e(\gamma) = \frac{1}{4}\theta D^2 - \frac{1}{2}D|\delta|\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) \quad (5-2)$$

$$\theta = 2 \cos^{-1}\left(\frac{|\delta|}{D}\right) \quad (5-3)$$

$$\gamma = \frac{\delta}{H_r} \times 100 \quad (5-4)$$

ここで、

$\delta$  : 水平変位 (mm)

$H_r$  : ゴム総厚 (mm) ( $= T_r \times N_r$ )

$D$  : 装置直径 (mm)

$\gamma$  : せん断ひずみ (%)

$A_e(\gamma)$  : せん断ひずみ $\gamma$ %時の有効断面積 (mm<sup>2</sup>)

$$\xi' = 0.153 \ln(-\sigma) + 0.55 \quad (5-5)$$

ここで、

$\xi'$  : 面圧依存性を考慮した接触率

$\sigma$  : 面圧 (N/mm<sup>2</sup>)

$$\kappa_\gamma = \frac{\xi'_\gamma}{\xi'_{100}} \times \beta \quad (5-6)$$

$$\xi'_\gamma = 0.153 \ln(-\sigma_\gamma) + 0.55 \quad (5-7)$$

$$\sigma_\gamma = \frac{A_0}{A_e(\gamma)} \sigma_0 \quad (5-8)$$

ここで、

$\kappa_\gamma$  : せん断ひずみ $\gamma$ %時 ( $\gamma \geq 100$ ) における熱伝導率の補正係数

$\xi'_\gamma$  : せん断ひずみ $\gamma$ %時 ( $\gamma \geq 100$ ) における面圧依存性を考慮した接触率

$\sigma_\gamma$  : せん断ひずみ $\gamma$ %時の面圧 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_0$  : 初期面圧 (N/mm<sup>2</sup>)

$A_0$  : 装置の断面積 (mm<sup>2</sup>)

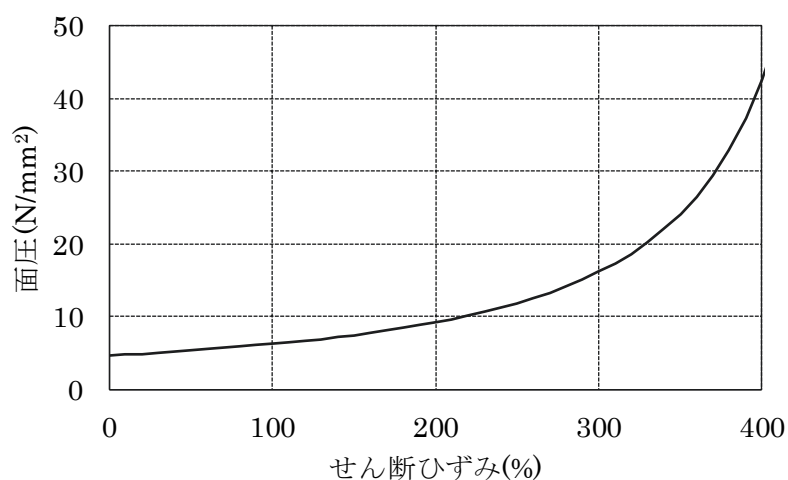


図 5-16 せん断ひずみと面圧の相関関係

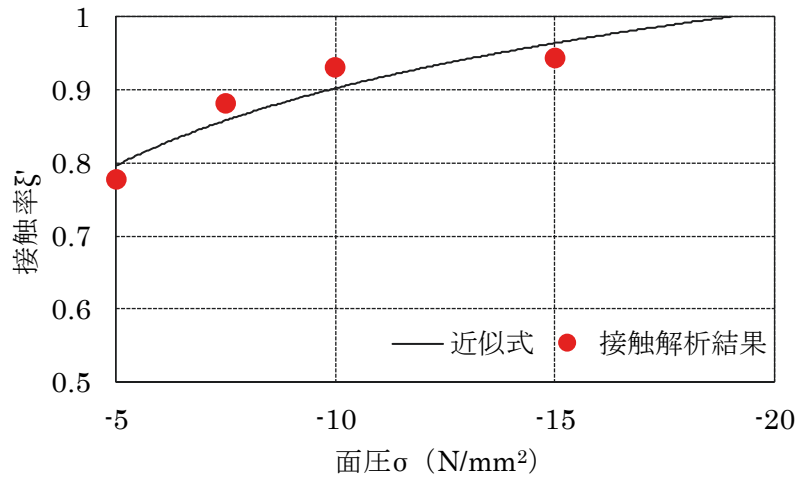


図 5-17 面圧と鉛プラグの接触率  $\xi'$  の相関関係

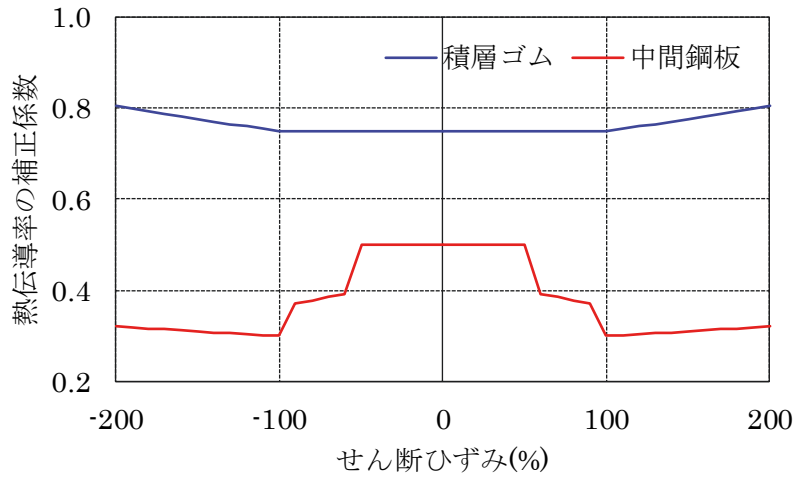


図 5-18 各部位の熱伝導率に乗じる係数のせん断ひずみ依存性

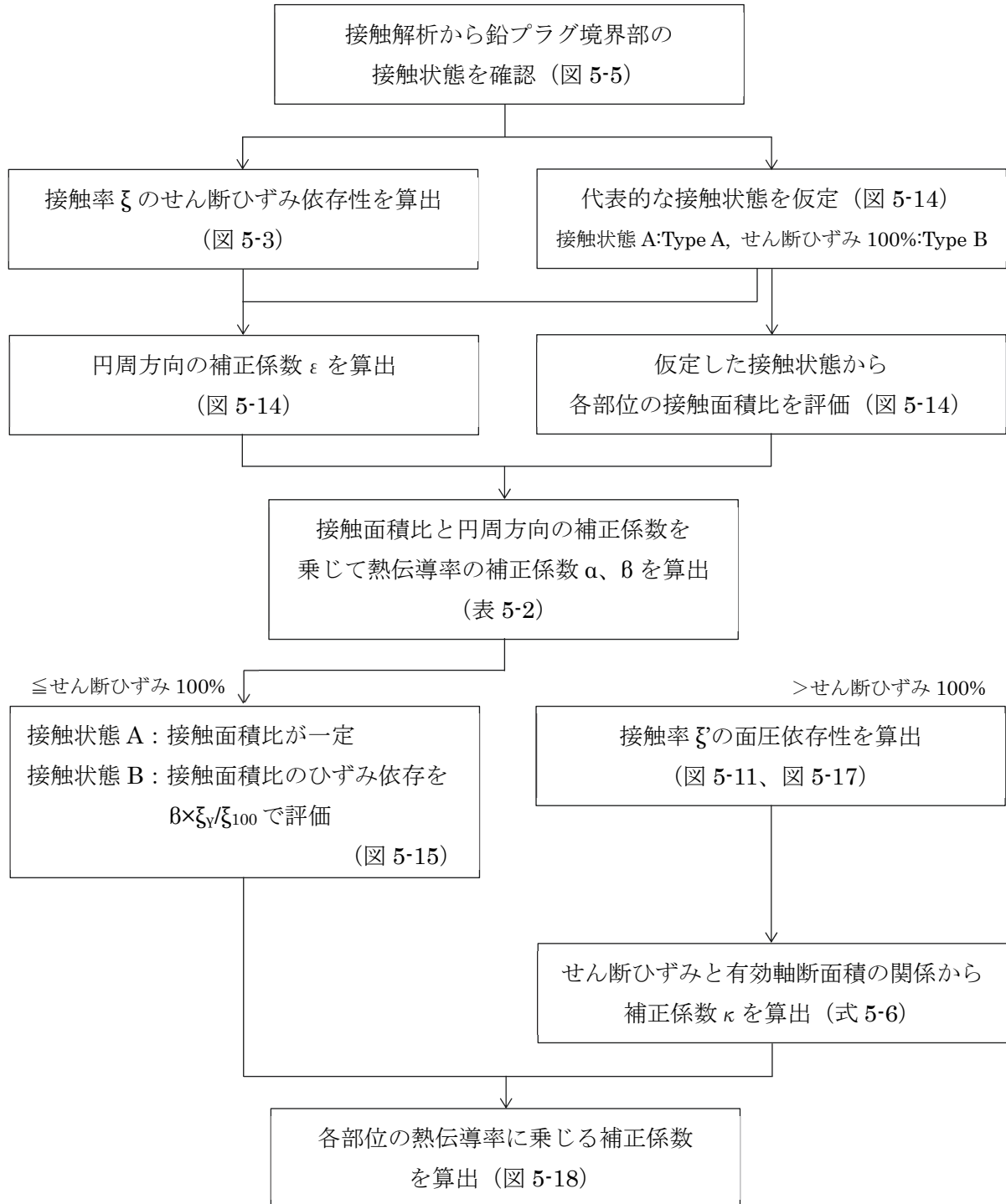


図 5-19 鉛プラグ境界部の接触状態を熱・力学連成解析に適用する提案手法

### 5.3 接触状態を考慮した再現解析

#### 5.3.1 非線形熱伝導解析を用いた熱・力学連成解析プログラムの開発

5.2節で示した鉛プラグ境界部の接触状態を熱・力学連成解析に反映するため、3章にて開発した熱・力学連成解析プログラムの内、線形としていた熱伝導解析をせん断ひずみ量に応じて逐次熱伝導率を更新する非線形熱伝導解析に修正する。

まず、3章で示した非定常熱伝導解析の連立方程式を非線形解析とするため、増分系に書き直す。

$$\left(\frac{1}{dt}[M]^{t-dt} + [K]^{t-dt}\right)\{T\}^t = \{F\}^t + \frac{1}{dt}[M]^{t-dt}\{T\}^{t-dt} \quad (5-9)$$

式 3-28 と式 5-9 の差分により、式 5-10 を導出する。

$$\left(\frac{1}{dt}[M] + [K]^t\right)\{\Delta T\}^t = \{F\}^{t+dt} + \frac{1}{dt}[M]\{T\}^t - \{E\}^t - \frac{1}{dt}[M]\{T\}^{t-dt} \quad (5-10)$$

$$\{T\}^{t+dt} = \{T\}^t + \{\Delta T\}^t \quad (5-11)$$

本研究では、積層ゴム部の熱伝導率をせん断ひずみに応じて逐次修正する。そこで、反復指標*i*を用いて式を整理し、以下の連成1次方程式を解いて時刻の増分温度を算出する。

$$[K^*]_i\{\Delta T\}_i^t = \{F\}^{t+dt} + \frac{1}{dt}[M]\{T\}^t - \{E\}_i^t - \frac{1}{dt}[M]\{T\}^{t-dt} \quad (5-12)$$

$$[K^*]_i = \frac{1}{dt}[M] + [K]_i^t \quad (5-13)$$

なお、本プログラムでは、残差の収斂に修正 Newton 法を使用する。よって、係数マトリクスは  $[K^*] = const$  となり、残差ベクトル  $\{\gamma\}^t$  および負担力ベクトル  $\{E\}^t$  は下式で表される。負担力ベクトル  $\{E\}^t$  は線形では  $\{F\}^t$  と一致するが、非線形では負担力ベクトル  $\{E\}^t$  を内部発熱、境界条件および残差ベクトルの総和と定義しているため、内部発熱と境界条件の総和である  $\{F\}^t$  とは一致しない。

$$\{\gamma\}_i^t = \sum \left\{ \{K^*\}\{\Delta T\}_{i-1} - \{\Delta f\}_{i-1} \right\} \quad (5-14)$$

$$\begin{cases} i = 1 : \{E\}_i^t = \{F\}^{t+dt} - \{\gamma\}_i^t \\ i \geq 2 : \{E\}_i^t = \{F\}^{t+dt} + \{\gamma\}_{i-1}^t - \{\gamma\}_i^t \end{cases}$$

### 5.3.2 解析モデル

本開発プログラムを用いて、最大せん断ひずみが 100%となる試験ケース 1-1 (静的加力) および試験ケース 1-3 (動的加力)、最大せん断ひずみが 100%を超過する正弦波加力として試験ケース 1-9 (静的加力) および試験ケース 1-11 (動的加力)、地震応答波加力として試験ケース 5-3 (南海トラフ地震波 SZ1) を対象とした熱・力学連成解析を実施する。地震応答解析モデルおよび熱伝導解析モデルは 3 章と同じとする。試験ケース 1-1 では、温度—降伏応力度関係式は図 5-20 に示す試験結果の近似直線である式 5-15 を使用し、装置内部の初期温度は試験結果に併せて 17°C に、外気温を 18°C に設定した。試験ケース 1-3 では、温度—降伏応力度関係式は図 5-20 に示す試験結果と良く一致していることを確認している既往評価式 (式 2-5) を使用し、装置内部の初期温度及び外気温は試験結果に併せて 20°C に設定した。試験ケース 1-9 では、温度—降伏応力度関係式は図 5-20 に示す試験結果の近似直線である式 5-16 を使用し、装置内部の初期温度及び外気温は試験結果に併せて 15°C に設定した。試験ケース 1-11 および試験ケース 5-3 において、温度—降伏応力度関係式は動的加力であるため既往評価式を使用し、装置内部の初期温度及び外気温は試験結果に併せて 18°C に設定した。熱物性値は 4 章に示す熱物性値評価試験結果を使用し、装置内部の温度評価地点は 2 章に示す熱電対の抜き出し量に併せて節点温度の評価位置を変更している。なお、せん断ひずみ量に応じた熱伝導率の補正係数は、本提案手法により算出した図 5-18 の近似折れ線を使用する。

$$\sigma_Y(T) = -0.0593 \times T + 9.78 \quad (5-15)$$

$$\sigma_Y(T) = -0.0668 \times T + 10.52 \quad (5-16)$$

ここで、

$\sigma_Y(T)$  : 熱影響を受けた降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

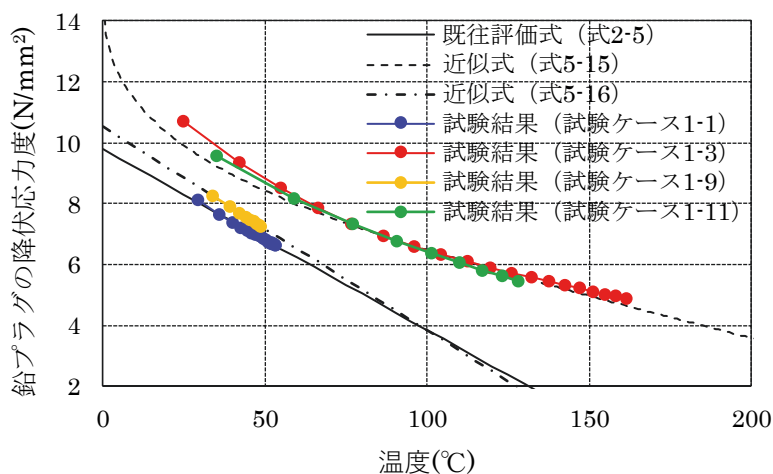


図 5-20 鉛プラグの温度—降伏応力度関係



### 5.3.3 解析結果

前項で示した解析モデルを使用し、せん断ひずみに応じて鉛プラグ境界部の接触状態を逐次変動させた熱・力学連成解析を実施した。解析結果から得られた温度変化、履歴特性および累積吸収エネルギー量について、試験ケース 1-1 を図 5-21、試験ケース 1-3 を図 5-22 に示す。図中には、繰返し加力試験結果および 3 章と同様に鉛プラグ境界部を完全接触とし、熱伝導率を変動させず接触状態を一定とした熱・力学連成解析結果を併記している。

#### (1) 試験ケース 1-1

鉛プラグ内部（鉛プラグ中央部、鉛プラグ外周部）における接触状態の変動を考慮した解析結果（以下、本解析結果と称する）と試験結果の温度変化を比較すると、加力初期では鉛プラグ中央部にて本解析結果の方がやや温度が低く評価されているものの、加力継続時間中（約 840 秒）における殆どの時刻で本解析結果は試験結果を適切に再現できていることが確認できる。加力初期において温度が低く評価されたのは、低温域にて温度-降伏応力度関係式が試験結果を若干下回っており、吸収エネルギー量が小さいことが原因と考えられる。また、加力終了後においても、接触状態を一定とした解析結果（以下、完全接触時の解析結果と称する）では試験結果よりも温度低下が顕著であるのに対して、鉛プラグ内部の本解析結果は試験結果の温度変化を良く再現できていることが確認できる。なお、鉛プラグ外周部の本解析結果は、試験結果よりも若干（継続時間 960 秒において約 2℃）差異が見られるが、メッシュ分割の関係上、本解析結果の評価位置が熱電対設置位置よりもやや中心部寄りになっていることが原因と考えられる。次に、積層ゴム内部（ゴム内周部、ゴム中央部）における本解析結果と試験結果の温度変化を比較すると、ゴム内周部において本解析結果の評価位置が熱電対設置位置よりも中心部寄りになっているため、最高温度で約 5℃程度の差異が見られるものの、温度変化の傾向は概ね再現できている。また、装置上部（鉛プラグ頂部、フランジ部）における本解析結果と試験結果の温度変化の比較においても、最高温度で約 2℃程度の差異が見られるが、温度変化の傾向は一致していることから、いずれも試験結果を概ね再現できるものと考えられる。

履歴曲線では、積層ゴムを線形、鉛プラグを完全弾塑性としてモデル化しており、Mullins 効果や鉛プラグにおける降伏荷重の速度依存性は再現できていないものの、解析結果の履歴特性は試験結果を概ね良く再現できている。累積吸収エネルギー量では、やや本解析結果が試験結果を上回っているものの、差異は最大 4%程度と僅少であることから、力学特性を適切に再現できているものと考えられる。また、完全接触時の解析結果と試験結果の差異は最大で 9%程度であり、接触状態を考慮することで力学特性の精度向上が期待できる。

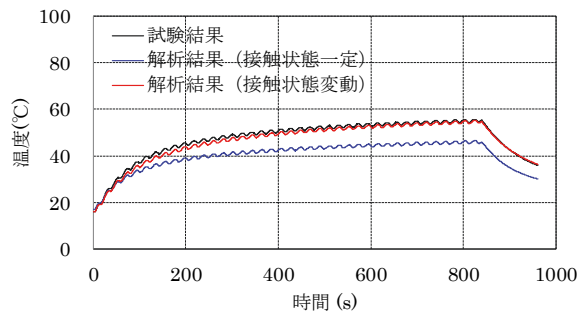
よって、限られた解析条件に関する知見であるが、本解析手法により、放熱影響が顕著な静的加力時においても接触状態を模擬した放熱特性を精緻にモデル化することで、免震装置の内部温度変化や力学特性を適切に再現できることが分かった。

#### (2) 試験ケース 1-3

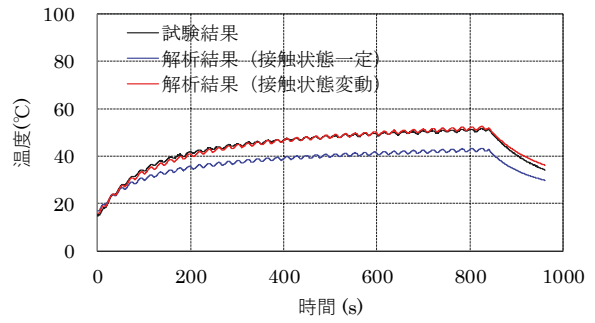
加力継続時間中の温度変化は、本解析結果および完全接触時の解析結果ともに試験結果を適切に再現できていることが確認できる。一方、加力終了後の温度変化では、完全接触時の解析結果が試験結果よりも温度低下が顕著に生じているのに対して、接触解析結果から加力終了後もせん断ひずみ 0%時での非接触範囲を考慮した本解析結果では、試験結果を良好に再現できることが分かった。なお、静的加力後および動的加力後において放熱状態を適切に再現できることから、

加力終了後における鉛プラグと積層ゴム部の境界面は、加力条件に依らず同じ接触状態に復元するものと考えられる。本考察は、2章で示した放熱特性の分析結果（図 2-59）と同じである。また、履歴特性および累積吸収エネルギー量についても、試験結果と概ね一致することを確認した。累積吸収エネルギー量から、接触状態を考慮した解析結果と試験結果の差異は最大で 2%程度に対して、完全接触とした解析結果は 4%程度であり、接触状態を考慮することで力学特性の精度向上が期待できる。ここで、解析結果の累積吸収エネルギー量が試験結果よりも大きく評価される傾向にある原因は、静的加力時と動的加力時で異なる温度—降伏応力度関係式を使用しているものの、鉛プラグにおける降伏荷重の速度依存性を完全に再現できていないため、履歴曲線から変位最大点付近（応答速度 0m/s 付近）において、解析結果のせん断力が試験結果よりも大きく評価されることが原因と考えられる。

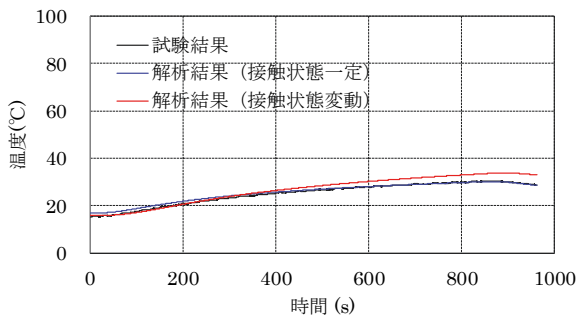
よって、限られた解析条件に関する知見であるが、鉛プラグ境界部の接触状態を再現した本解析手法を用いることで、動的加力時における免震装置の内部温度変化や力学特性、及び、加力終了後の放熱特性を適切に再現できることを確認した。また、本解析手法は、鉛プラグの温度—降伏応力度関係を適切に設定することで、静的加力時と動的加力時のいずれにも適用できることから、接触状態は鉛プラグの速度依存性に影響を受けないものと考えられる。接触状態に影響を与える要因として、寸法効果、経年変化およびクリープ等が挙げられるが、繰り返し加力試験において、これらをパラメータとしておらず、本研究にて影響検討を実施できていないため、今後の検討課題としたい。



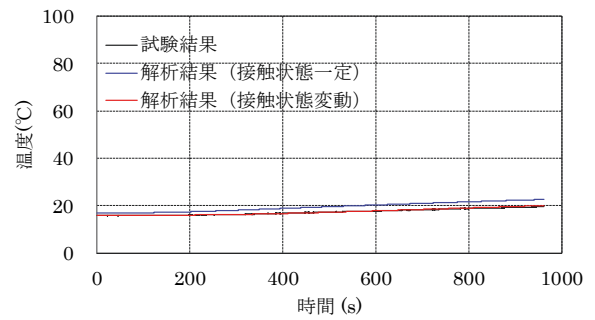
(a) 鉛プラグ中央部



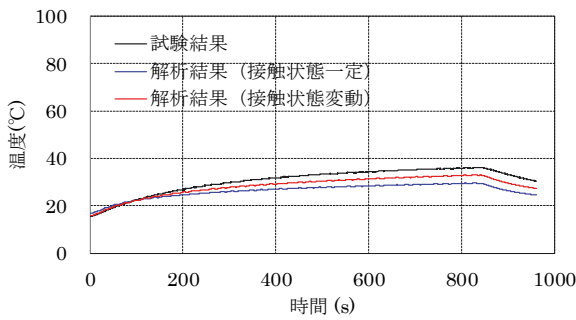
(b) 鉛プラグ外周部



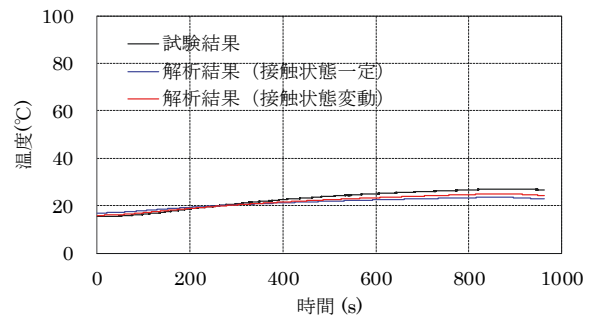
(c) 積層ゴム内周部



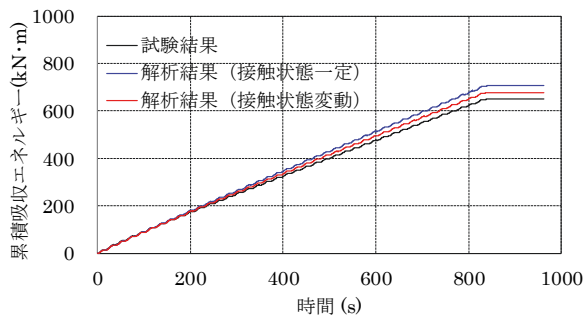
(d) 積層ゴム中央部



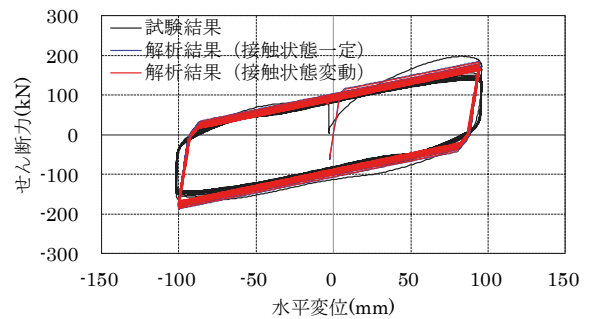
(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

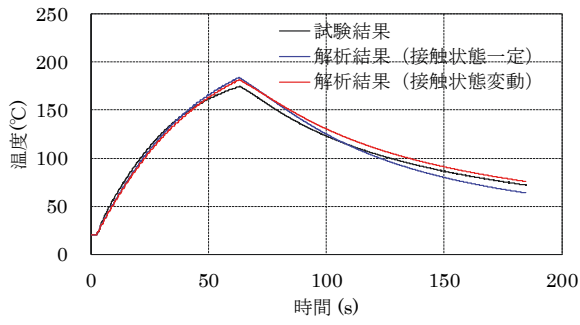


(e) 累積吸収エネルギー量

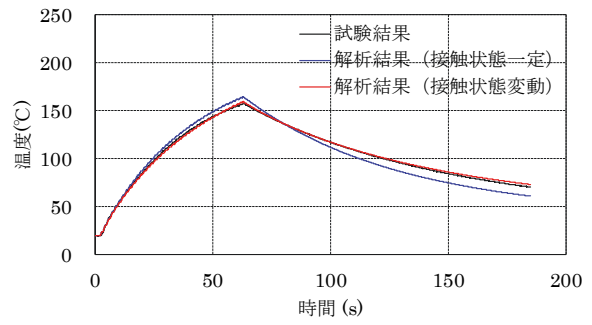


(f) 履歴曲線

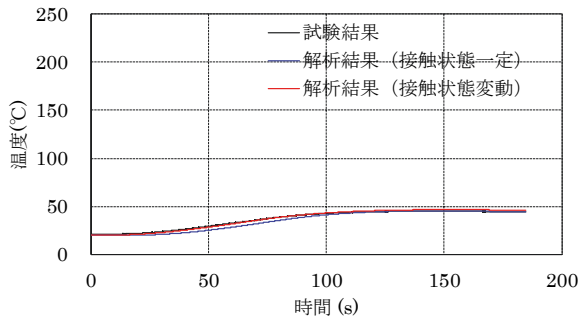
図 5-21 解析結果 (試験ケース 1-1)



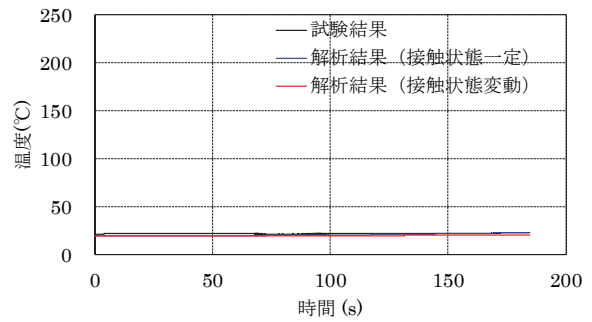
(a) 鉛プラグ中央部



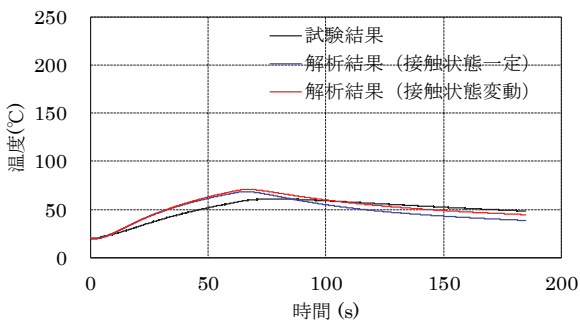
(b) 鉛プラグ外周部



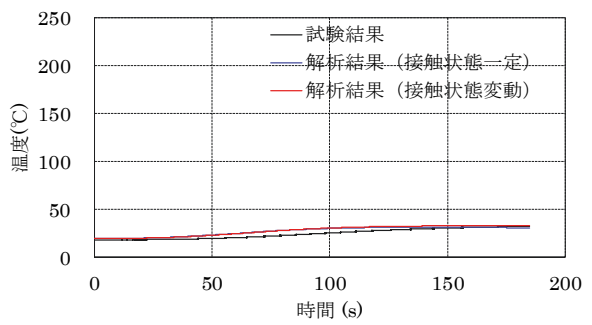
(c) 積層ゴム内周部



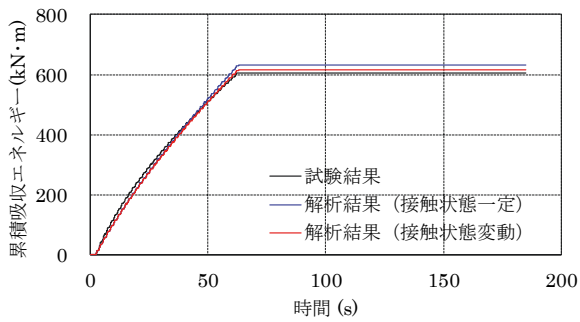
(d) 積層ゴム中央部



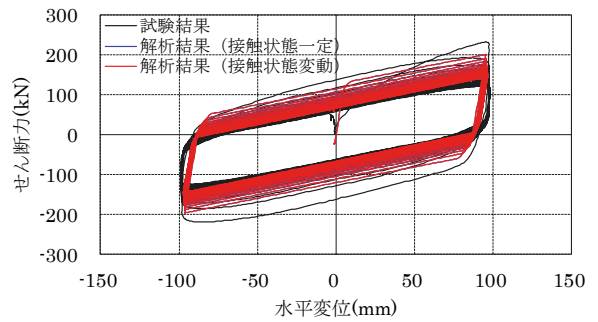
(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部



(e) 累積吸収エネルギー量



(f) 履歴曲線

図 5-22 解析結果 (試験ケース 1-3)

次に、最大せん断ひずみが 100%を超過する解析結果から、得られた温度変化、履歴特性および累積吸収エネルギー量について、試験ケース 1-9 を図 5-23 に、試験ケース 1-11 を図 5-24 に、試験ケース 3-5 を図 5-25 に示す。図中には、繰返し加力試験結果および 3 章と同様に鉛プラグ境界部を完全接触とし、熱伝導率を変動させず接触状態を一定とした熱・力学連成解析結果を併記している。

### (3) 試験ケース 1-9 および試験ケース 1-11 (正弦波加力試験)

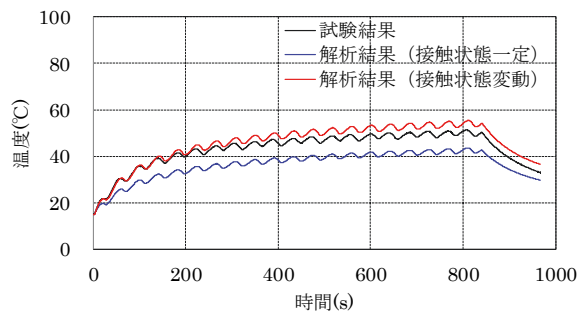
図 5-23 に示す試験ケース 1-9 の温度変化から、鉛プラグ中央部および周辺部の本解析結果は試験結果よりも最大 4℃程度高く評価されているものの、加力時および加力終了後の温度変化傾向を適切に再現できている。一方、完全接触時の解析結果は試験結果よりも最大 9℃程度低く評価されており、加力経過に伴い差異が増大する傾向が見られることから、鉛プラグ境界部の接触状態を考慮することで LRB の放熱特性を適切に再現できるものと考えられる。なお、積層ゴム内周部において、本解析結果は試験結果よりも最大 6℃程度高く評価されている。その原因として、積層ゴム部全体の熱伝導率を変動させたため、積層ゴム部内部における温度分布の再現性が低下したことが考えられる。しかし、温度の差異は僅少であり、また、熱・力学連成解析において重要である鉛プラグ内部における温度分布の再現性が向上していることから、本提案の妥当性が確認できる。次に、累積吸収エネルギー量について、完全接触時の解析結果と試験結果の差異は 3%程度であるのに対して、本解析結果と試験結果の差異は 1%以下であり、鉛プラグ境界部の接触状態を考慮することで、力学特性の精度向上が期待できる。履歴曲線から、原点（水平変形 0mm）付近では概ね一致しており、鉛プラグの降伏応力度について試験結果は解析結果を概ね再現できている。一方、最大変位発生時付近では、試験結果の履歴曲線が解析結果よりも低下傾向にある。これは、繰返し加力により、積層ゴムのせん断剛性に若干へたりが発生したことが原因でと考えられる。なお、累積吸収エネルギー量において、本解析結果と試験結果の差異は僅少であることから、履歴曲線の差異が鉛プラグのモデル化ではなく、エネルギー吸収量が殆どない積層ゴムのモデル化が原因であると考えられる。

図 5-24 に示す試験ケース 1-11 の温度変化から、鉛プラグ中央部における本解析結果は試験結果よりも最大 10℃程度高く評価するがその差異は僅少であり、かつ加力終了後の温度低下を適切に再現できている。一方、完全接触時の解析結果では、加力終了後の温度低下が顕著に発生しており、放熱特性を適切に評価できていない。よって、鉛プラグ境界部の接触状態を考慮することで LRB の放熱特性を適切に再現できるものと考えられる。ここで、鉛プラグ周辺部の温度変化について、試験結果と本解析結果および完全接触時の解析結果に大きな乖離が確認できる。これは、図 5-22 に示す試験ケース 1-3 において鉛プラグ周辺部の最高温度と鉛プラグ中央部の最高温度の差異は 15℃程度となっているが、試験ケース 1-11 では 35℃程度の差異が見られる。よって、熱電対の計測記録が適切でない可能性が考えられるが、原因を特定するには至っていない。なお、積層ゴム部およびフランジ部の温度変化について、本解析結果は試験結果を概ね再現できている。履歴曲線については、試験ケース 1-9 と同様に積層ゴムに若干のへたりが確認できるが、原点付近では概ね一致しており鉛プラグの降伏応力度は適切に再現できている。また、累積吸収エネルギー量について、本解析結果と試験結果との差異は 3%程度であり、試験結果を適切に再現できている。なお、累積吸収エネルギー量において、本解析結果と完全接触時の解析結果は概ね一致し

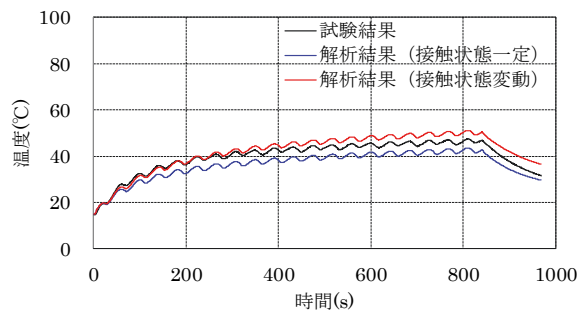
ているが、これは3章の解析結果から、加力時間が比較的短い動的加力時においては放熱の影響が小さいため力学特性を適切に再現できることが確認されているため、接触状態を考慮することに依る力学特性の精度向上効果が限定的となったことが原因と考えられる。

#### (4) 試験ケース 3-5 (地震応答波加力試験)

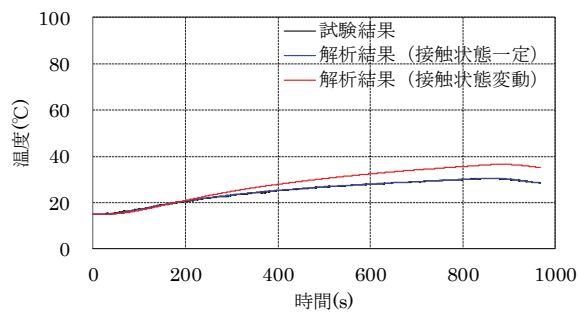
図 5-25 に示す試験ケース 3-5 の温度変化から、鉛プラグ中央部の本解析結果は試験結果よりも最大 10℃程度高く評価するがその差異は僅少であり、150s 以降の加力後半についても試験結果を概ね適切に再現している。一方、完全接触時の解析結果では放熱が顕著に生じており、加力後半において試験結果よりも温度変化を低く評価している。積層ゴム内周部において、本解析結果と試験結果の温度変化に差異が見られるが、これは試験ケース 1-9 と同様に積層ゴム部全体の熱伝導率を変動させたため、積層ゴム部内部における温度分布の再現性が低下したことが考えられる。累積吸収エネルギー量について、本解析結果は試験結果を 250s までは良く再現できているものの、250s 以降は徐々に吸収エネルギー量を過大に評価している。これは、加力後半では応答速度が小さいため、既往の提案手法を用いた本解析結果では鉛プラグの温度-降伏応力度関係を過大評価したことで降伏応力度が大きく評価されたことが原因と考えられる。しかし、試験結果との差異は、本解析結果で 6%程度、完全接触時の解析結果で 7%程度とその差は僅少であり、LRB の力学特性は概ね再現できることが分かった。なお、本解析結果と完全接触時の解析結果における累積吸収エネルギー量が概ね同じであり、接触状態を考慮することに依る力学特性の精度向上効果は限定的であったが、長時間地震動や余震時など放熱影響が顕著な場合では精度向上が期待できる。



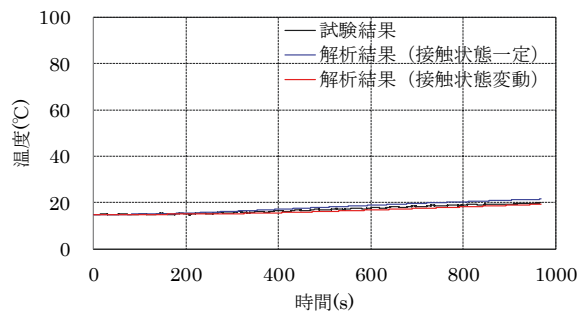
(a) 鉛プラグ中央部



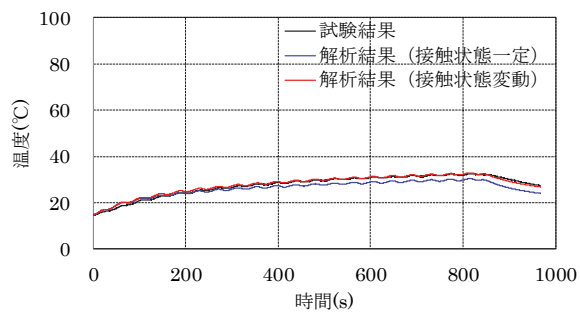
(b) 鉛プラグ外周部



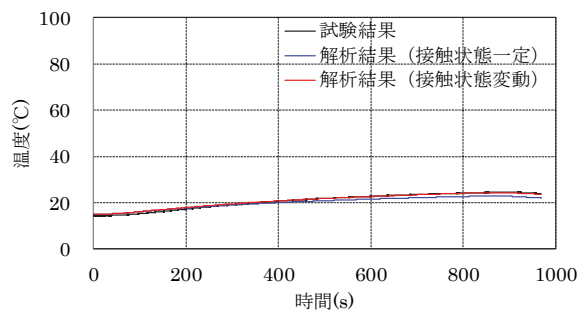
(c) 積層ゴム内周部



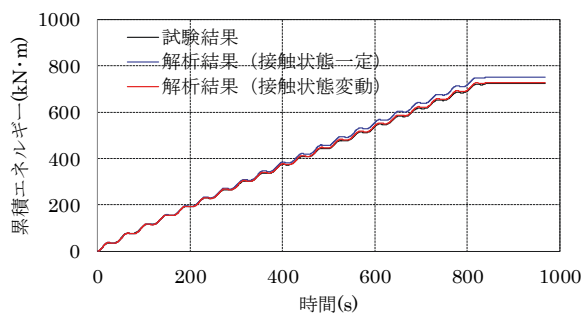
(d) 積層ゴム中央部



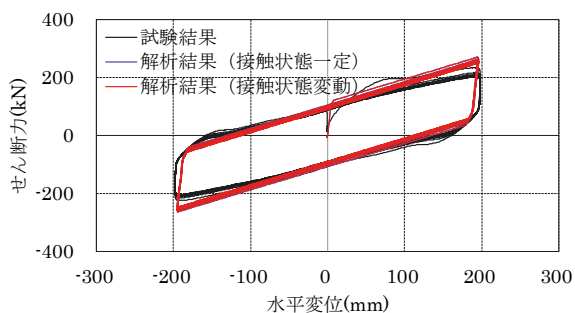
(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部

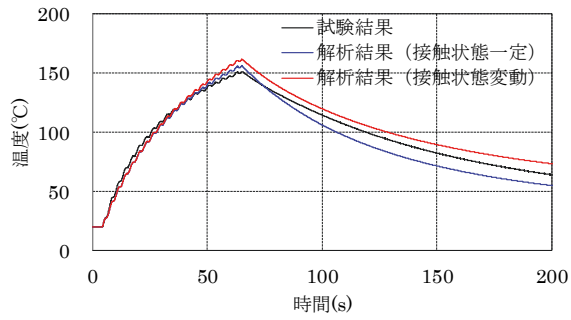


(g) 累積吸収エネルギー量

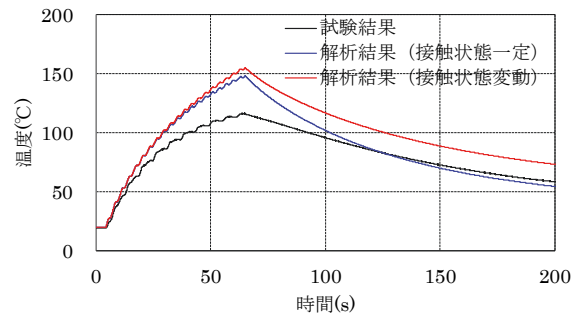


(h) 履歴曲線

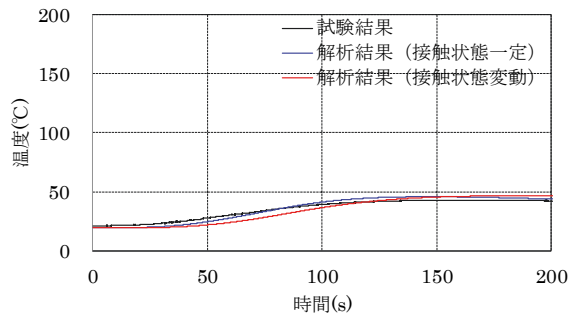
図 5-23 解析結果 (試験ケース 1-9)



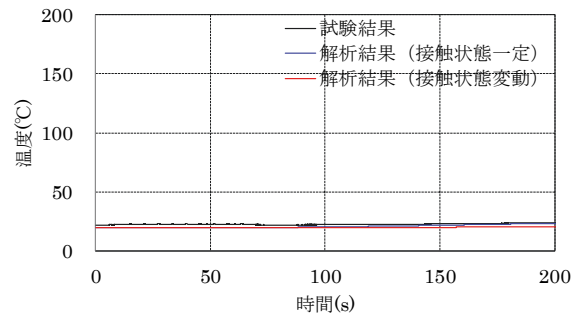
(a) 鉛プラグ中央部



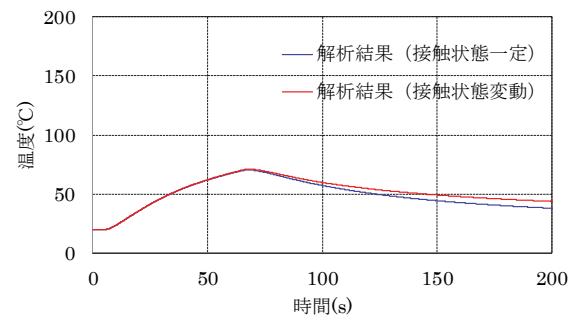
(b) 鉛プラグ外周部



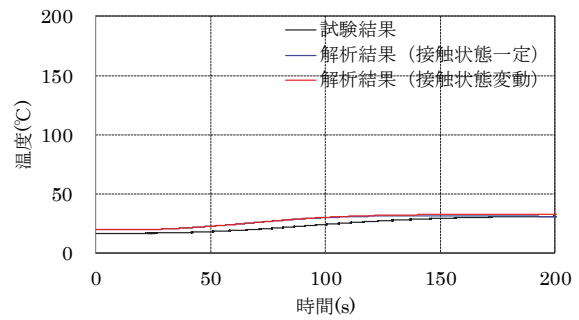
(c) 積層ゴム内周部



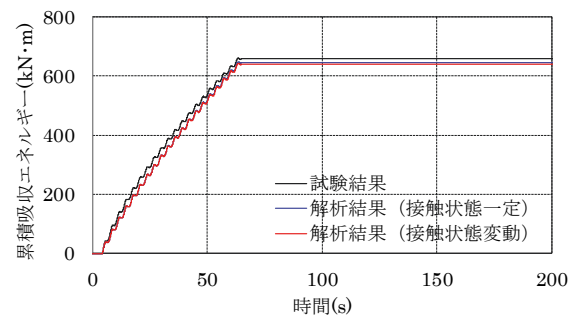
(d) 積層ゴム中央部



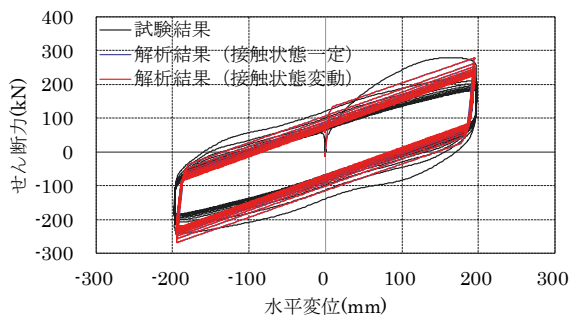
(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部



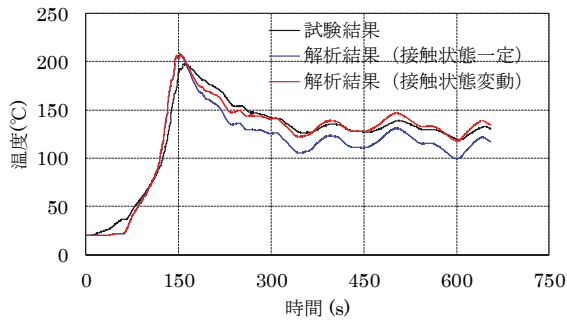
(e) 累積吸収エネルギー量



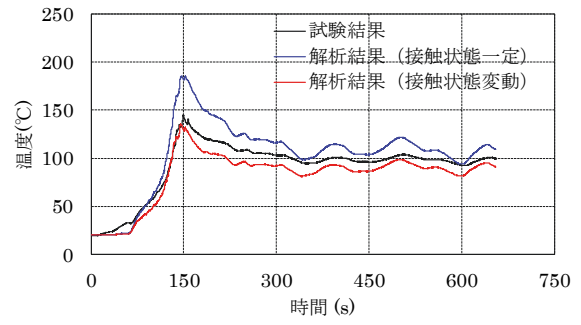
(f) 履歴曲線

図 5-24 解析結果 (試験ケース 1-11)

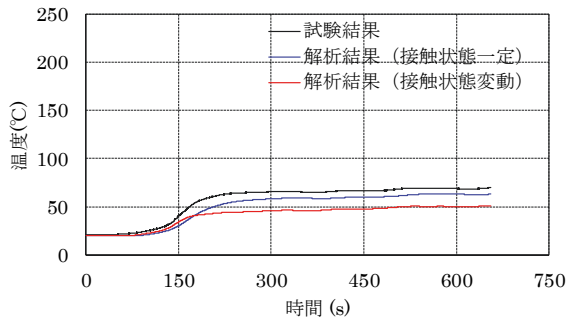




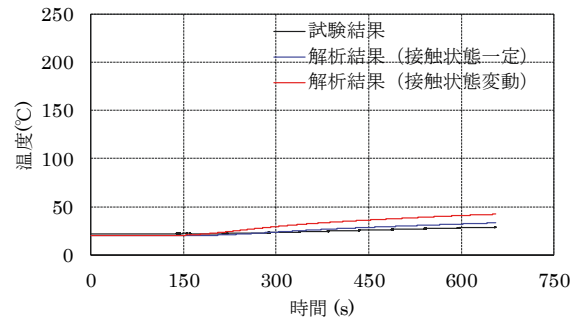
(a) 鉛プラグ中央部



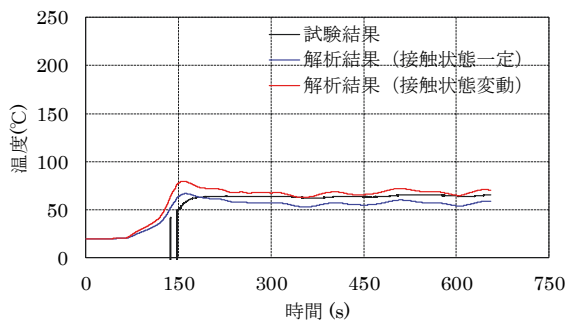
(b) 鉛プラグ外周部



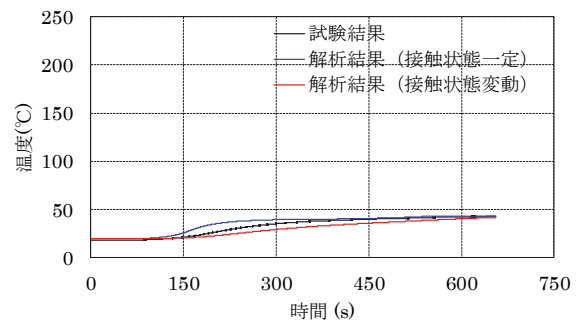
(c) 積層ゴム内周部



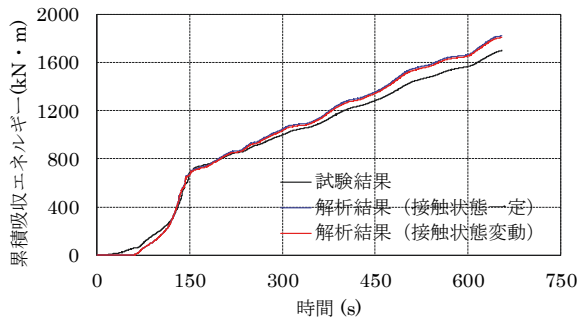
(d) 積層ゴム中央部



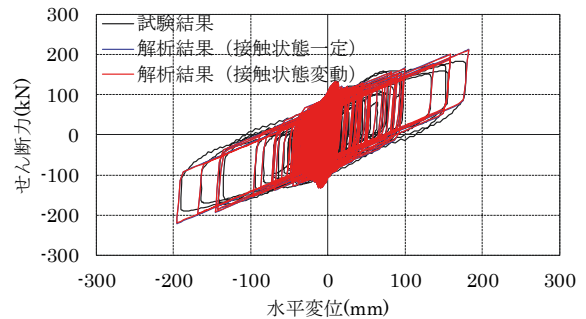
(e) 鉛プラグ頂部



(f) フランジ部



(e) 累積吸収エネルギー量



(f) 履歴曲線

図 5-25 解析結果 (試験ケース 3-5)

#### 5.4 まとめ

非線形 FEM を用いた接触解析を実施し、鉛プラグ境界部における接触状態のせん断ひずみ依存性を確認した。そこで、接触状態の変動を熱・力学連成解析に取込むための手法を提案し、新たに開発した非線形熱伝導解析を有する熱・力学連成解析プログラムを用いた繰返し加力試験の再現解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 鉛プラグの接触解析結果から、せん断ひずみに依存して鉛プラグの接触状態が変化することが分かった。接触率は、せん断ひずみ 0%時においても 0.8 程度であり完全接触しておらず、せん断ひずみが 50%まで殆ど一定となり、せん断ひずみが 50%を超過するとせん断ひずみの増加に応じて接触面積比は低下し、せん断ひずみ 100%時に 0.6 程度となることを確認した。また、なお、装置形状や面圧などが限られた範囲の知見であり、今後更なるパラメータスタディが必要である。
- 2) 面圧を変更した接触解析結果から、接触率はせん断ひずみに係わらず高面圧ほど大きくなることを確認した。これは、鉛プラグ境界部の断面から、高面圧時では積層ゴムと中間鋼板境界部における鉛プラグの変形追従性が高く、塑性後の鉛プラグが半径方向に膨らむことで接触範囲が増加することが原因と考えられる。
- 3) 接触解析から得られた LRB の Mises 応力分布より、中空部に鉛プラグを挿入することで、鉛プラグと積層ゴムを跨いだ圧縮ストラットが形成されており、接触面での応力伝達を確認できることから、接触解析の妥当性を確認するとともに、水平剛性の低下や鉛直沈み込み量の増大による変形能力や水平履歴特性の不安定化を抑制する効果が期待できる。しかし、非接触部等の影響から、装置内部の応力度分布は不均一であり、抑制効果は限定的であると考えられる。
- 4) 接触解析から得られた鉛プラグのせん断応力度分布では、全断面で概ね一様に降伏状態となっており、中間鋼板によって拘束されることなくせん断力を伝達することを確認した。また、鉛プラグの変形形状は、内部ゴムと中間鋼板におけるせん断変形量の差異によって不連続となるが、内部ゴムと中間鋼板境界部の非接触域にて緩和されるものと考えられる。よって、鉛プラグの発熱範囲を上下連結鋼板間全体とし、発熱量は当該範囲へ均一に与えるものとした 2 章で示すモデル化方針の妥当性を確認した。
- 7) 接触解析で得られた鉛プラグ境界部の接触状態を熱・力学連成解析に反映させるため、せん断ひずみに応じた補正係数を乗じることで熱伝導率を変動させる手法を提案した。更に、非線形熱伝導解析を使用した熱・力学連成解析プログラムを開発し、本モデルを適用した再現解析を実施した。解析結果から、加力速度に依存せず装置内部の温度分布を精度良く再現しており、また、加力終了後の放熱特性も試験結果と殆ど一致している。よって、本手法を用いることで、LRB の放熱影響を適切に評価した熱・力学連成解析が実施できることを確認した。更に、累積吸収エネルギー量の再現性が向上しており、より精度の高い応答評価を行うことが可能となった。

#### 【5章 参考文献】

- 1) 竹中康雄, 近藤明洋, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 仲村崇仁: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 卷 第 646 号, pp.2245-2253, 2009 年 12 月
- 2) 森隆浩, 中川進一郎, 島本龍, 室田伸夫, 近藤明洋, 中山尚之: 高い変形能力を有する 2 段組積層ゴムの力学挙動 (その 7 FEM モデルによる水平変形・引張変形解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.503-504, 2011 年 8 月
- 3) MSC.Marc : Theory and User Information, MSC Software, 2011 年 7 月
- 4) 日本ゴム協会, 日本免震構造協会: 建築免震用積層ゴム支承ハンドブック, 大應, 2017 年 6 月
- 5) 和氣知貴, 菊地優, 石井建, 黒嶋洋平, 仲村崇仁: 繰り返し加力を受ける鉛プラグ入り積層ゴム支承の降伏荷重評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 卷 第 750 号, pp.1105-1115, 2018 年 8 月
- 6) 矢川元基: 流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 1983 年 5 月



## 6. 鉛プラグ入り積層ゴムの熱影響を考慮した原子炉免震建屋の応答評価

5 章にて接触状態を考慮した熱・力学連成解析手法を開発し、その妥当性を確認した。ここでは、原子炉免震建屋を対象とした地震応答解析を実施し、各熱影響評価手法による免震層および上部建屋の応答性状を比較する。

### 6.1 解析モデル

本解析で使用する熱影響評価手法は、熱・力学連成解析を使用せず、式 2-2 を用いて吸収エネルギー量から減衰性能の低下率を評価する簡略法（簡略法）、3 章に示す鉛プラグの発熱範囲と接触要素を設定した熱・力学連成解析を用いる精算法（精算法（接触状態一定））、5 章に示す接触状態のせん断ひずみ依存性を考慮した熱・力学連成解析を用いる精算法（精算法（接触状態変動））の 3 ケースとする。なお、精算法（接触状態一定）における鉛プラグ境界部の接触状態は、せん断ひずみに係わらず常に完全接触状態となっている。また、熱影響による応答性状の変化を確認するため、熱影響を考慮しない地震応答解析（熱影響未考慮）についても実施することとした。

地震応答解析に使用する建屋諸元は、既往文献<sup>1)</sup>に掲載された PWR 型原子炉建屋を免震化して作成した原子炉免震建屋モデルを使用して検討を行う。原子炉建屋は、内部コンクリート (I/C) 建屋、プレストレストコンクリート製格納容器 (PCCV) 建屋、原子炉周辺建屋 (REB) が基礎版を介して接続されている。I/C 建屋にある PRZ 壁についても耐震モデルに反映されている。また、免震層は基礎版直下に配置した。本来、免震層は下部基礎版を介して地盤に接続されているが、本検討では下部基礎版は十分に剛であるとし、基礎免震を採用しており地盤との相互作用効果は小さいと考えられることから、免震層下端を固定点とし、検討用地震波を入力する。上部建屋の復元力特性が掲載されていないため、免震装置以外は線形モデルとした。建屋諸元と物性値を表 6-1 および表 6-2 に、地震応答解析モデルを図 6-1、精算法で使用する熱伝導解析モデルを図 6-2、応答解析で使用する復元力特性を図 6-3 および図 6-4 に示す。減衰マトリクスはひずみエネルギー比例減衰<sup>2)</sup>を使用する。また、本検討は LRB の熱影響評価手法による応答性状の差異を確認するものであり、前章までの検討により LRB の熱影響は上下応答に依存しないことを確認している点と低面圧時の接触状態が確認できていない点を踏まえて、解析モデルの自由度は水平方向のみとしている。

使用する免震装置は全数 LRB とし、検討用地震波入力時のせん断ひずみが線形限界の 1/1.5 以下、上部基礎版の応答加速度が  $300\text{cm/s}^2$  以下となるように設計している。免震装置の諸元を表 6-3 に、地震応答解析モデルの固有値解析結果を表 6-4 に示す。積層ゴムはハードニング効果およびスリップ効果を考慮した非線形ばね要素<sup>3)</sup>、鉛プラグは完全弾塑性のバイリニアモデルを有する非線形ばね要素でモデル化している。熱伝導解析モデルは、発熱範囲を上下連結鋼板間とし、鉛プラグの温度-せん断応力度関係は既往の提案式 (式 2-5) を使用した。鉛プラグと積層ゴム部との境界部にはゴム層、シアキーとの境界部には空気層をモデル化する。免震装置の初期温度および雰囲気温度は  $20^\circ\text{C}$  とした。精算法（接触状態変動）で使用する接触状態のせん断ひずみ依存性は、LRB の基準面圧が  $4.1\text{N/mm}^2$  とやや低面圧であるが、5 章で示した提案手法が適用できるものと考えて、図 5-18 を使用することとした。

表 6-1 地震応答解析モデルの物性値

部位	ヤング係数 (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 ( $\times 10^6$ kN/m <sup>2</sup> )	コンクリート 強度F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
I/C, PRZ	2.26	9.61	23.5
PPCV	2.98	12.8	41.2
REB	2.26	9.61	23.5
基礎版	2.26	9.61	23.5

表 6-2 地震応答解析モデルの諸元

部位	節点 番号	高さ EL (m)	重量 (tf)	回転慣性 ( $\times 10^6$ tfm <sup>2</sup> )	部材 番号	せん断 断面積 (m <sup>2</sup> )	断面2次 モーメント (m <sup>4</sup> )
I/C PRZ	1	5.8	3,000	—	1	147	17,400
	2	7.1	—	—	2	130	15,100
	3	8.9	4,600	—	3	134	15,200
	4	16.2	—	—	4	102	11,500
	5	16.5	5,000	—	5	102	11,500
	6	18.2	260	—	6	13	180
	7	23.7	440	—	7	13	180
	8	30.9	200	—	8	13	180
	9	21.5	—	—	9	28	1,000
	10	22.4	950	—	10	13	36
	11	26.8	290	—	11	13	36
PCCV	12	6.0	2,280	—	12	90	44,420
	13	9.8	3,230	—	13	90	44,420
	14	19.9	3,920	—	14	90	44,420
	15	26.7	4,780	—	15	90	44,420
	16	40.5	5,930	—	16	90	44,420
	17	48.5	3,380	—	17	83	39,780
	18	57.6	3,020	—	18	76	29,240
	19	63.6	1,390	—	19	76	13,480
REB	20	65.1	320	—	20	44	610
	21	8.9	31,700	21	21	610	265,600
基礎版	22	16.5	25,100	16	22	460	230,400
	23	0	—	—	23	5,100	2,810,000
	24	-4.0	136,400	55	24	5,100	2,810,000
25	-8.0	—	—				

表 6-3 免震装置の諸元

項目	仕様
ゴム種	G4
装置外径 (mm)	1600
鉛プラグ径 (mm)	390
ゴム単層厚 (mm)	10.4
ゴム総数 (層)	31
中間鋼板厚 (mm)	5.8
1次係数係数	38.5
2次形状係数	5.0
降伏震度	0.13
免震周期 (s)	3.54
設計面圧 (N/mm <sup>2</sup> )	4.1
個数 (個)	299

表 6-4 固有値解析結果の一覧

次数	Hz	備考	次数	Hz	備考
1	1.02	免震1次周期	12	47.20	
2	6.45	PCCV1次	13	52.82	
3	13.89	REB・I/C1次	14	55.05	
4	17.21		15	56.37	
5	18.39		16	64.72	
6	24.59		17	85.40	
7	27.36		18	86.07	
8	30.16		19	98.12	
9	36.84		20	99.02	
10	37.19		21	135.72	
11	40.45		22	191.89	

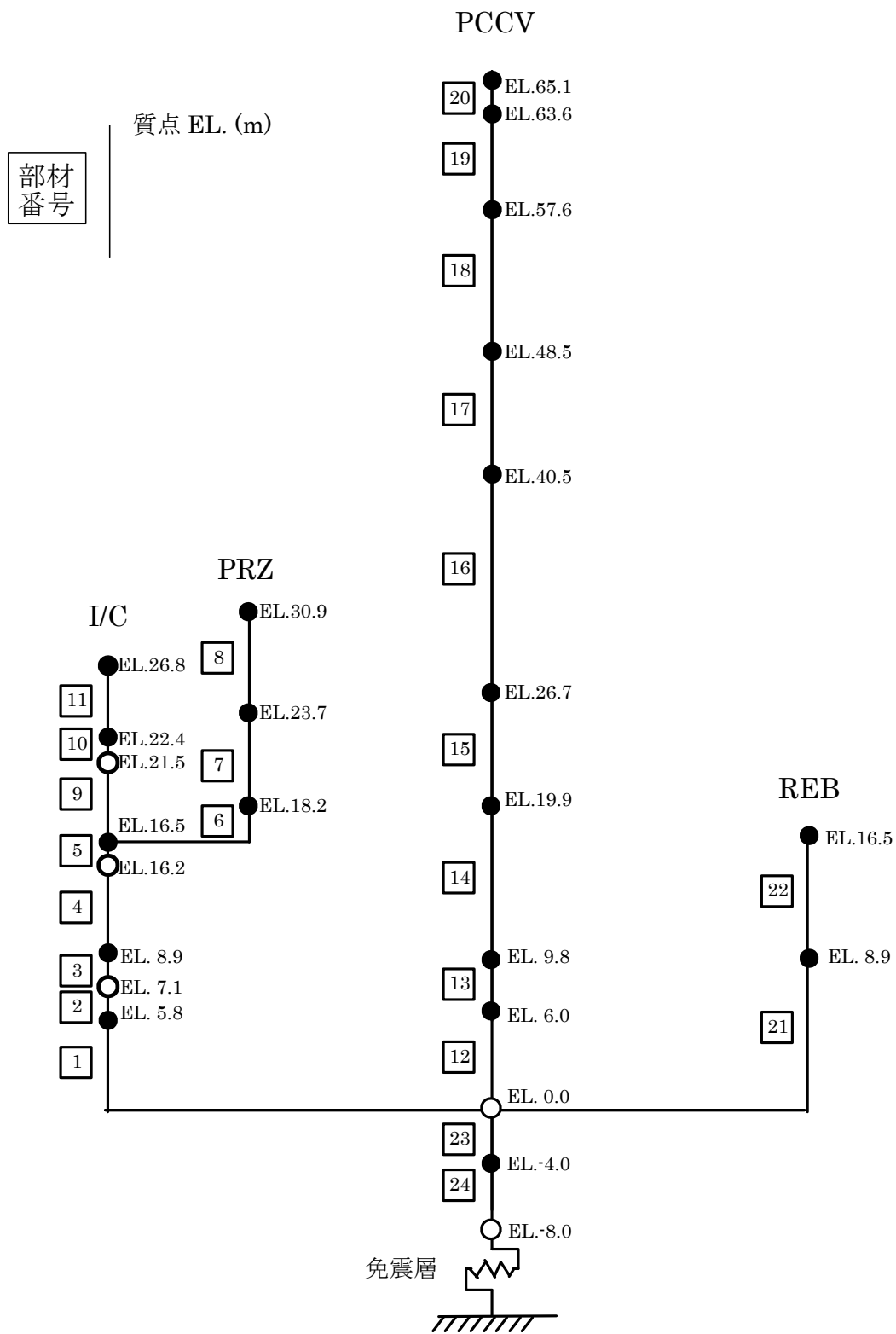


図 6-1 地震応答解析モデル図



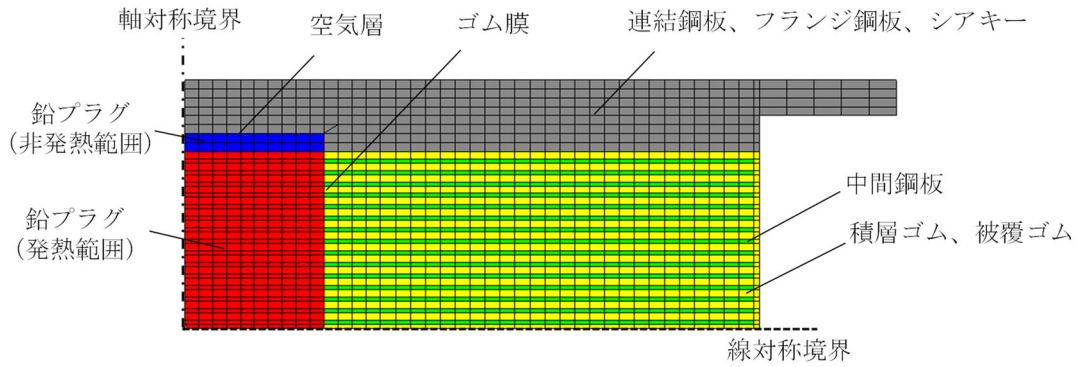


図 6-2 熱伝導解析モデル

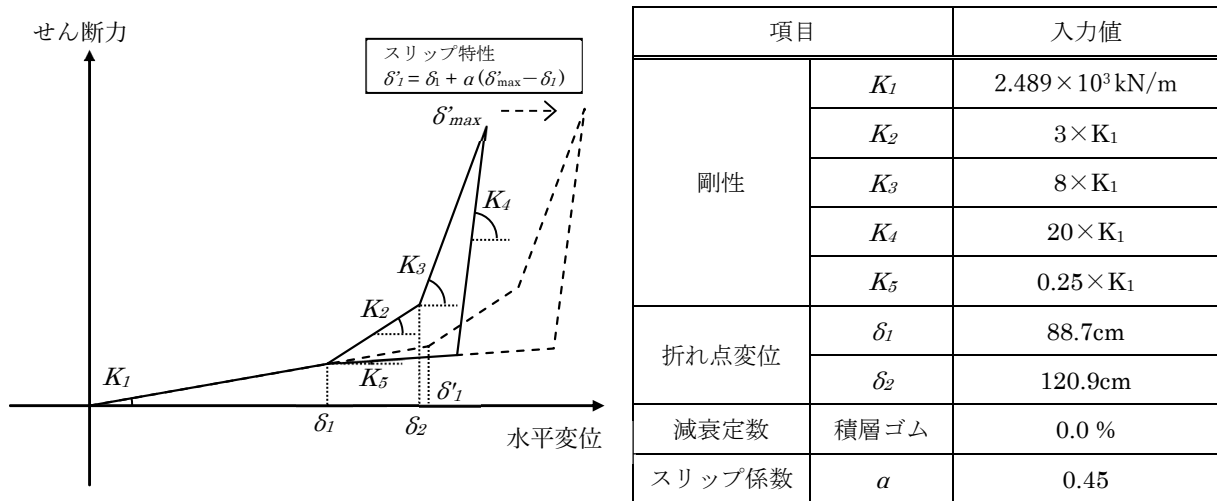


図 6-3 積層ゴムの諸元

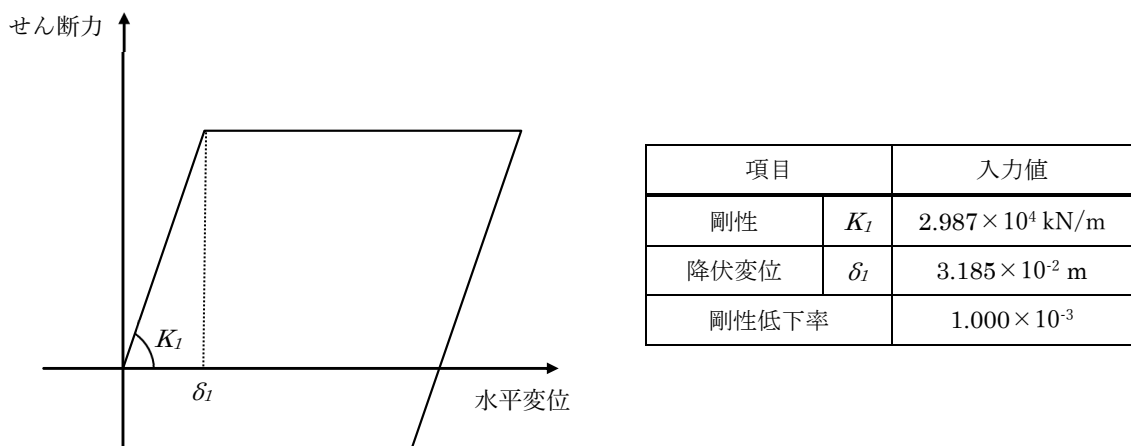


図 6-4 鉛プラグの諸元

## 6.2 入力地震波

入力地震波は、2章で示したスペクトル波および南海トラフ地震波 SZ1 を使用する。本解析に採用した免震装置は、原子力発電所免震構造設計指針 JEAG4614-2019 (JEAG4614) ④に基づき入力地震波を用いた場合にせん断変形が線形限界の 1/1.5 倍となるよう設計しており、入力地震波単独では免震装置の減衰性能に対する入力エネルギー量が小さいため、熱影響評価手法による免震層および上部建屋の応答性状を比較するには適していない。そこで、免震装置がハードニング領域に達する程度に入力地震波を係数倍することで、入力エネルギー量を増加させ、各評価手法の応答性状を比較することとする。

また、5章で提案した放熱状態を精緻に評価可能なモデル化手法である精算法 (接触状態変動) が応答性状に与える影響を評価するため、600s のインターバルを設けた 2 波連続入力を実施する。なお、2 波連続入力時において簡略法を使用する際は、2 波分の累積吸収エネルギー量から鉛プラグの降伏応力度低下率を算出することとする。

本解析で使用する入力地震波の一覧を表 6-5 に、スペクトル波の時刻歴波形を図 6-5 および図 6-6 に、南海トラフ地震波 SZ1 の時刻歴波形を図 6-7 および図 6-8 に示す。

表 6-5 入力地震波の一覧

地震波	入力方法	係数倍	継続時間 (s)	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )
スペクトル波	単独入力	1.0	125.8	801
		1.7		1362
	2 波連続入力 (インターバル 600s)	1.0	851.6	801
		1.7		1362
南海トラフ地震波 SZ1	単独入力	1.0	655.34	282
		2.3		649
	2 波連続入力 (インターバル 600s)	1.0	1910.70	282
		2.3		649

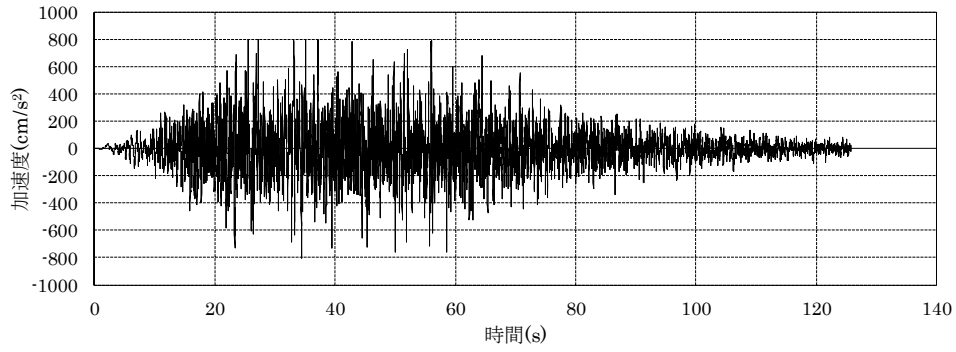


図 6-5 スペクトル波 (単独入力)

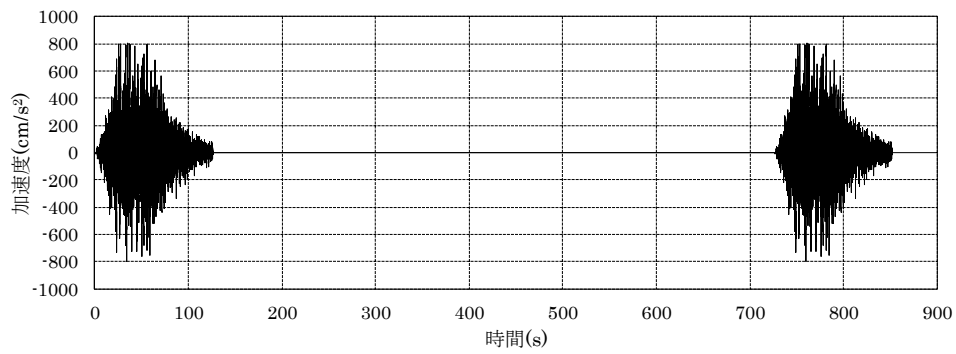


図 6-6 スペクトル波 (2波連続入力、インターバル 600s)

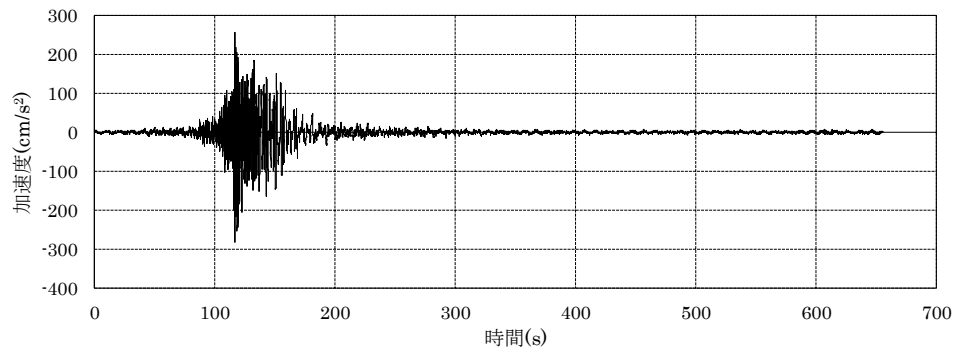


図 6-7 南海トラフ地震波 SZ1 (単独入力)

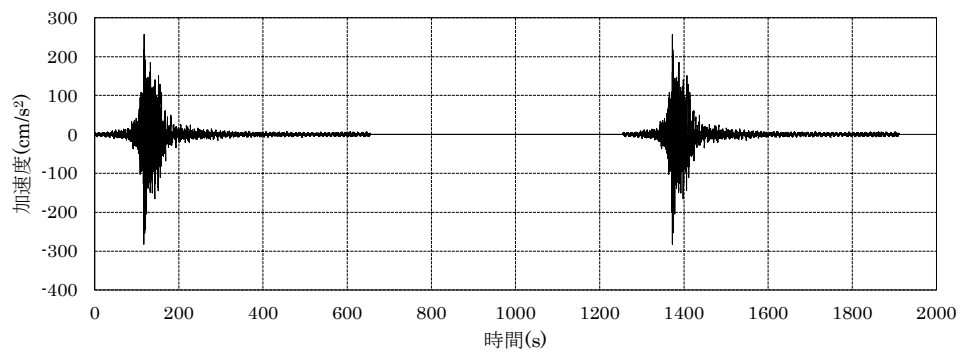


図 6-8 南海トラフ地震波 SZ1 (2波連続入力、インターバル 600s)

## 6.3 解析結果

### 6.3.1 本震時の解析結果

#### (1) 設計入力レベル (1.0 倍)

スペクトル波を用いた解析結果から、精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-9(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-9(b)に、履歴曲線を図 6-9(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-9(d)に、最大応答分布を図 6-9(e)～図 6-9(f)に示す。図 6-9(a)から、接触状態一定および接触状態変動の温度変化は 70s 付近まで殆ど一致しており、主要動後半の 87.2s で最高温度の 80°C 程度となる。主要動終了後は放熱特性の差異による温度差が発生しており、加力終了時は接触状態変動モデルの方が 1.5°C 程度温度が高く評価されている。図 6-9(b)から、簡略法を用いた際の降伏応力度低減率は 0.87 となり熱影響未考慮モデルよりも減衰性能が低下するため、図 6-9(c)に示す通り簡略法の応答変位は熱影響未考慮よりも 3% 程度大きく評価されている。また、LRB の最大応答変位は熱影響未考慮および簡略法より精算法を用いた解析結果の方が小さく評価されている。精算法では鉛プラグの発熱に応じて降伏応力度を低減するが、既存提案式より低温時の降伏応力度は熱影響未考慮および簡略法よりも大きくなるため、発熱量が小さい設計入力レベルでは精算法の応答が小さく評価されたためと考えられる。なお、図 6-9(a)から精算法の内、接触状態一定および接触状態変動の温度変化が僅少であるため、両者の履歴曲線は殆ど一致している。上部建屋の応答性状について、図 6-9(e)から各層の層間変形角は各評価モデルとも概ね一致しているが、図 6-9(f)から応答加速度は精算法モデルが熱影響未考慮および簡略法モデルよりも大きく評価される傾向が見られる。ここで、図 6-9(d)に示す加速度応答スペクトルより、精算法を使用することで建屋高次モードが励起されていることが確認できる。よって、逐次力学特性が変化する精算法を用いた場合、幅広い周期域の振動モードが励起されるため、建屋高次振動数の振動が発生して高さ方向の応答増幅に繋がったものと考えられる。なお、加速度の差異が層間変形に現れなかったことから、解析モデルの際による高次振動の影響が建屋の耐震成立性に与える影響は無いと考えられるが、上部建屋内に存在する機器・配管設計に影響を与える可能性がある。なお、精算法の内、接触状態一定および接触状態変動における上部建屋の応答分布は概ね一致しており、放熱影響が小さい入力条件では、接触状態の違いによる免震装置および上部建屋の応答性状の差異は見られない。

次に、南海トラフ地震波 SZ1 を入力した解析ケースにおける精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-10(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-10(b)に、履歴曲線を図 6-10(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-10(d)に、最大応答分布を図 6-10(e)～図 6-10(f)に示す。図 6-10(a)から、スペクトル波と異なり主要動が短い南海トラフ地震波 SZ1 では、主要動における接触状態一定および接触状態変動の鉛プラグ温度変化は概ね同じとなっており、いずれも主要動後半の 166s 付近にて最高温度 54°C まで温度上昇している。一方、主要動終了後の微動時では、放熱量が発熱量を上回るため鉛プラグに温度低下が生じているが、接触状態変動モデルでは 5 章の接触解析結果から完全接触状態に復元しないことから、接触状態一定モデルと比較して温度低下が緩やかであり、加力終了後は 2°C 程度温度が高く評価される。図 6-10(b)から、簡略法モデルの降伏応力度低下率は 0.98 であり、熱影響未考慮モデルと概ね同じとなる。また、図 6-10(c)においても LRB の最大応答変位は各評価モデル概ね同じとなることから、本入力条件における熱影響は小さいものと推測される。一方、図 6-10(e)

および図 6-10(f)から、上部建屋の応答性状は精算法モデルと熱影響未考慮および簡略法モデルとで異なっている。図 6-10(d)から、スペクトル波と同様に高次振動数の励起が確認できることから、逐次降伏応力度が変化することで広範囲の振動モードが励起されたことが原因と考えられる。

なお、熱影響未考慮時のせん断ひずみは線形範囲の 1/1.5 以下、上部基礎版の最大応答加速度は  $300\text{cm/s}^2$  以下となり、設計目標値を満足した装置計画が為されていることが確認できる。

上記の検討結果から、設計入力レベルにおいて JEAG4614 に基づき設計した本免震装置では、簡易法を用いた場合に免震応答を大きく評価し、精算法を用いた場合に免震応答を小さく評価する傾向が見られるが、その差は 10%未満であり熱影響評価による応答性状の変化は見られない。一方、上部建屋の応答性状については、精算法を用いた場合に高次モードが励起されるため、熱影響未考慮および簡略法より層間変形角および応答加速度が 1.5~2.0 倍程度に増加する部位が見られることから、熱影響を考慮する際に簡略法を用いた場合、上部建屋や機器・配管応答を過小評価する可能性が考えられる。なお、設計入力レベルでは、入力エネルギーが小さく、放熱影響が小さいことから、接触状態の差異による応答性状の変化は確認出来なかった。

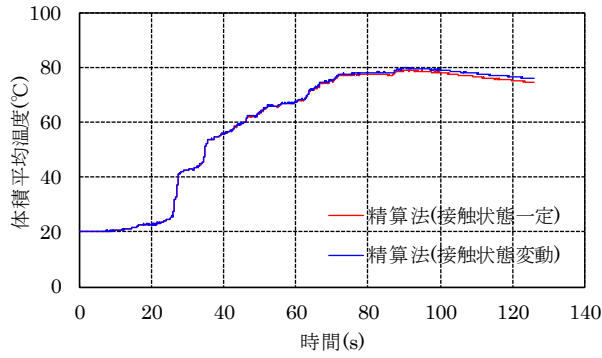
## (2) 設計超入力レベル (係数倍)

スペクトル波を用いた解析結果から、精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-11(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-11(b)に、履歴曲線を図 6-11(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-11(d)に、最大応答分布を図 6-11(e)~図 6-11(f)に、接触状態変動モデルの時刻歴応答変位と鉛プラグの体積平均温度を図 6-11(g)に示す。図 6-11(a)から、接触状態一定および接触状態変動の温度変化は 80s 付近まで殆ど一致しており、最高温度は主要動後半の 99s 付近で接触状態一定  $174^{\circ}\text{C}$ 、接触状態変動  $176^{\circ}\text{C}$  となり、その差異は  $2^{\circ}\text{C}$ 程度と僅少である。主要動終了後は放熱特性の差異による温度差が発生しており、加力終了時は接触状態変動モデルの方が  $4^{\circ}\text{C}$ 程度高く評価されている。図 6-11(b)から、簡略法を用いた場合の降伏応力度低減率は 0.48 となるため、減衰性能の低下とハードニング領域におけるスリップ効果から、図 6-11(c)では簡略法の最大応答変位は熱影響未考慮よりも 25%程度増加している。一方、図 6-11(a)と図 6-11(g)から、精算法では最大応答発生時刻と最高温度到達時刻に差異があるため、最大応答変位は熱影響未考慮と概ね同じとなっている。図 6-11(e)から、熱影響非考慮と精算法は概ね一致しているものの、簡略法は他評価手法よりも大きく評価されている。これは、ハードニングによる応答増加が原因と考えられる。図 6-11(f)から、設計入力レベルと同様に精算法では建屋上部に向かって応答増幅が生じている。これは、図 6-11(d)より上部建屋の高次モードによる応答が励起されていることから、逐次力学特性が変化する精算法を用いた場合、幅広い周期域の振動モードが励起されるため、建屋高次振動数の振動が発生して高さ方向の応答増幅に繋がったものと考えられる。また、図 6-11(d)~図 6-11(f)より、精算法の内、接触状態一定および接触状態変動における上部建屋の応答性状は概ね一致していることが確認できる。これは、最大応答発生時刻では発熱影響が顕著であり、放熱影響が鉛プラグの温度差に現れる主要動後半部の応答差が解析結果に反映されないことが原因と考えられる。

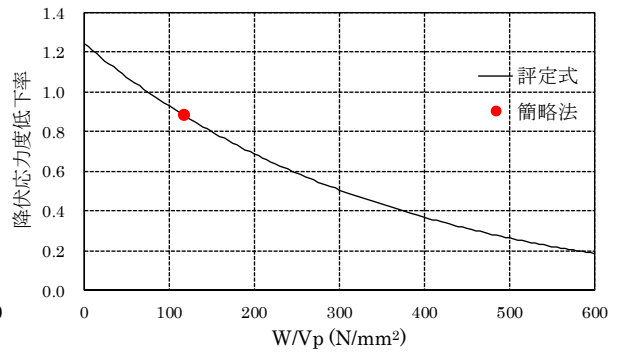
次に、南海トラフ地震波 SZ1 を入力した解析ケースにおける精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-12(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-12(b)に、履歴曲線を図 6-12(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-12(d)に、

最大応答分布を図 6-12(e)～図 6-12(f)に、接触状態変動モデルの時刻歴応答変位と鉛プラグの体積平均温度を図 6-12(g)に示す。図 6-12(a)から、接触状態一定および接触状態変動の温度変化は主要動後半の 180s 付近まで殆ど一致しており、最高温度は 180s 付近で 212°Cまで上昇した。主要動終了後は放熱特性の差異による温度差が発生しており、加力終了時は接触状態変動モデルの方が 15°C程度高く評価されている。図 6-12(b)から、簡略法を用いた場合の降伏応力度低減率は 0.48 となるため、図 6-12(c)ではスペクトル波と同様に簡略法の最大応答変位は熱影響未考慮よりも 2 倍程度に増大している。一方、スペクトル波と異なり、精算法の応答変位は熱影響未考慮と比較すると 1.7 倍程度に増大している。これは、図 6-12(g)から最高温度発生時刻と最大応答発生時刻が比較的近いことから、南海トラフ地震波 SZ1 の位相特性では精算法の応答変位が大きくなったことが原因と考えられる。なお、最高温度発生時刻では放熱よりも発熱が支配的となるため、図 6-12(a)から接触状態一定および接触状態変動では最高温度に差異が見られないため、図 6-12(d)～図 6-12(f)にて応答性状は殆ど同じとなっている。

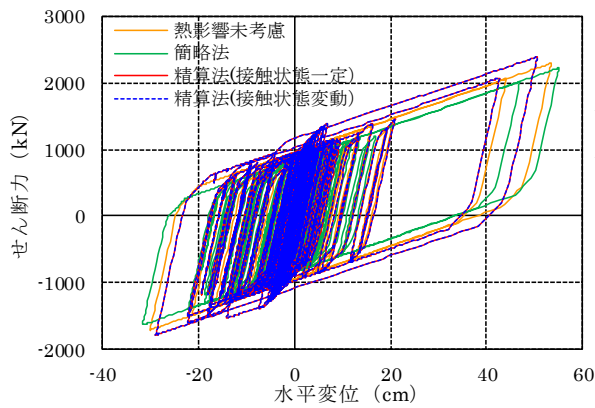
上記の検討結果から、免震応答については、ハードニング応答が顕著な簡易法モデルにおいて応答変位、応答加速度ともにその他の熱影響評価手法よりも増大する傾向がある。精算法の最大応答値は、位相特性により最大応答発生時刻と最高温度到達時刻の差異がある場合は熱影響未考慮の最大応答値と概ね同じ結果となり、最大応答発生時刻と最高温度到達時刻が近い場合は応答変位、応答加速度ともに増大する傾向がある。また、本検討に用いた地震波の位相特性では、最大応答発生時は放熱よりも発熱が支配的となり、接触状態のせん断ひずみ依存性の有無による温度差が見られないことから、単独入力時では接触状態の差異による応答性状の変化は確認出来なかった。



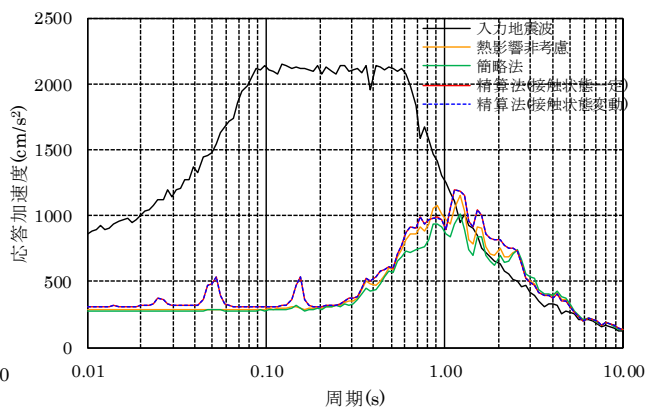
(a) 鉛プラグの体積平均温度



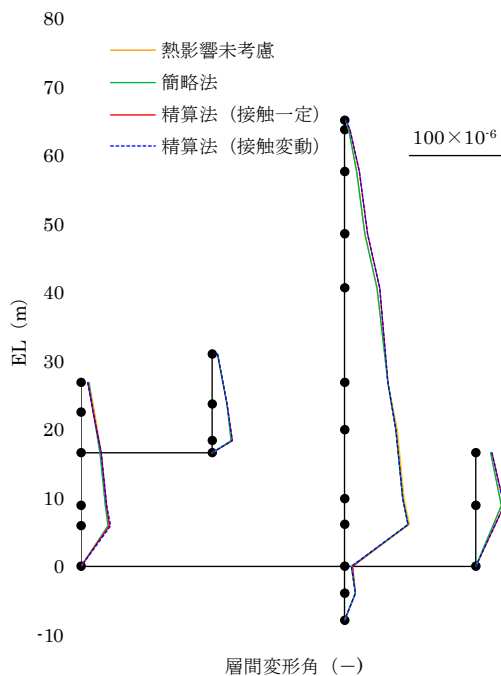
(b) 簡略法の応力低下率



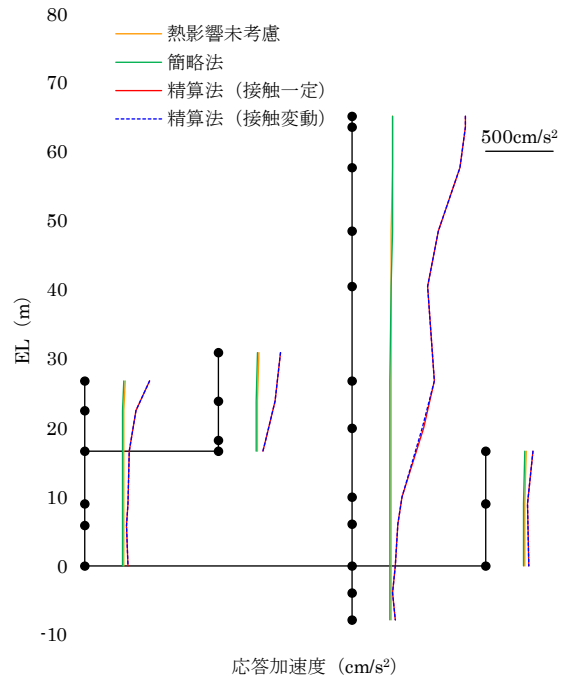
(c) 履歴曲線



(d) 加速度応答スペクトル(h=5%)

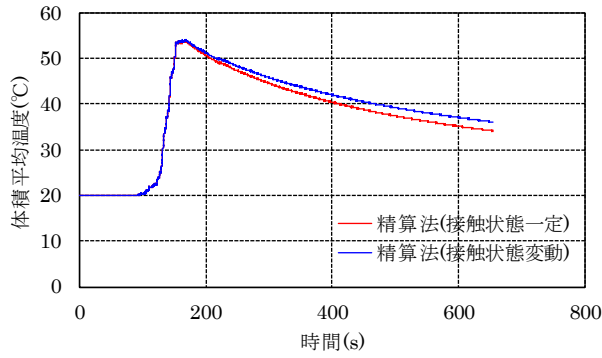


(e) 最大層間変形角分布

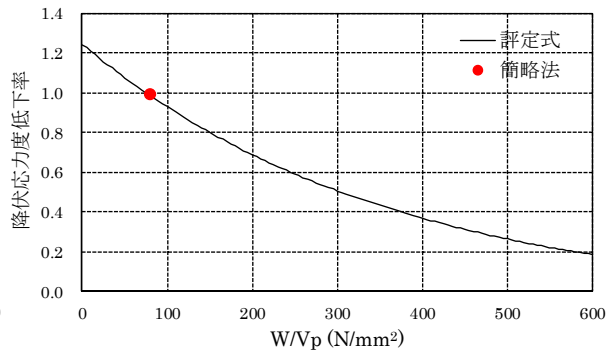


(f) 最大応答加速度分布

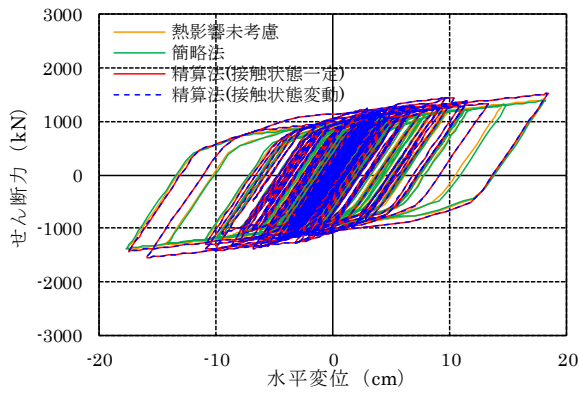
図 6-9 スペクトル波・単独入力時 (設計入力レベル) の応答解析結果



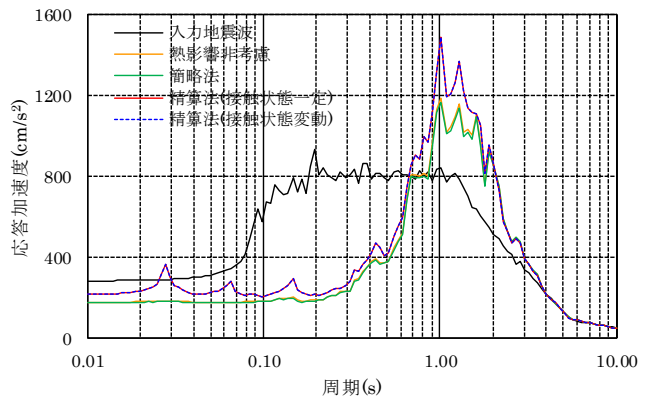
(a) 鉛プラグの体積平均温度



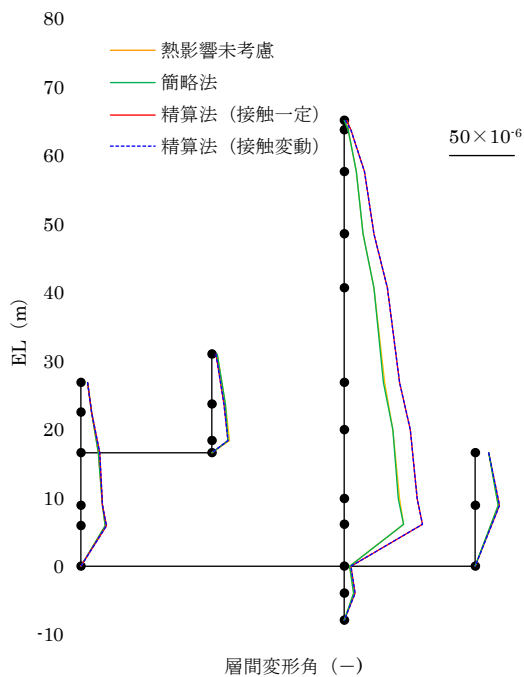
(b) 簡略法の応力低下率



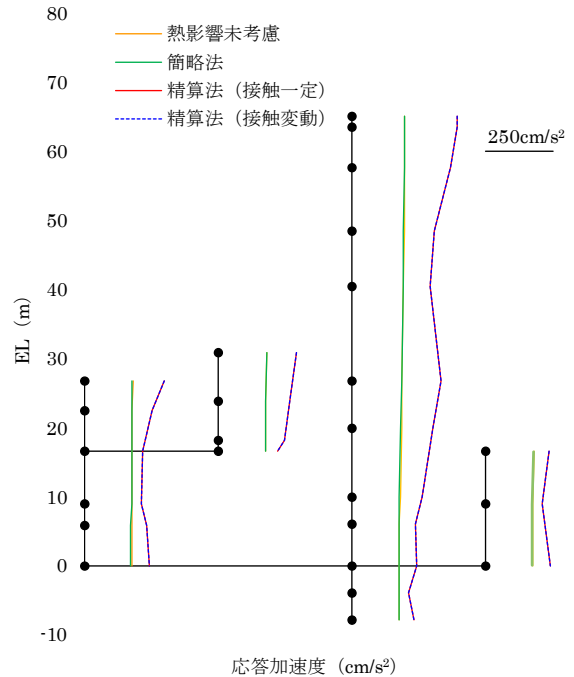
(c) 履歴曲線



(d) 加速度応答スペクトル(h=5%)



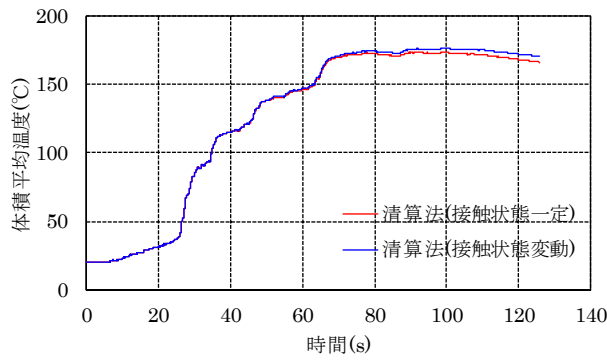
(e) 最大層間変形角分布



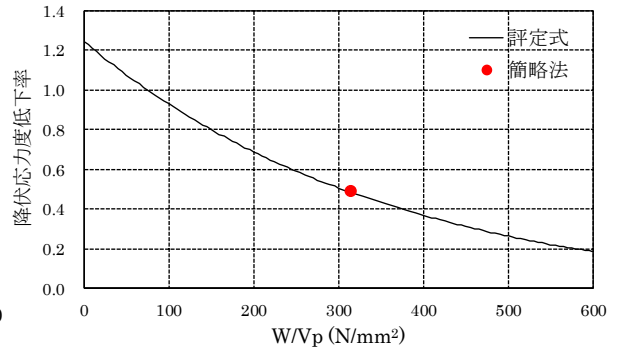
(f) 最大応答加速度分布

図 6-10 南海トラフ地震波 SZ1・単独入力時 (設計入力レベル) の応答解析結果

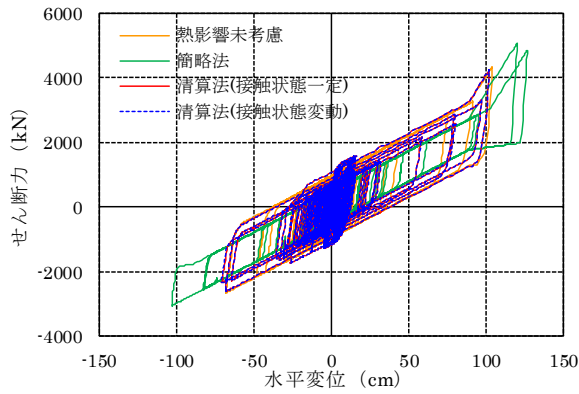




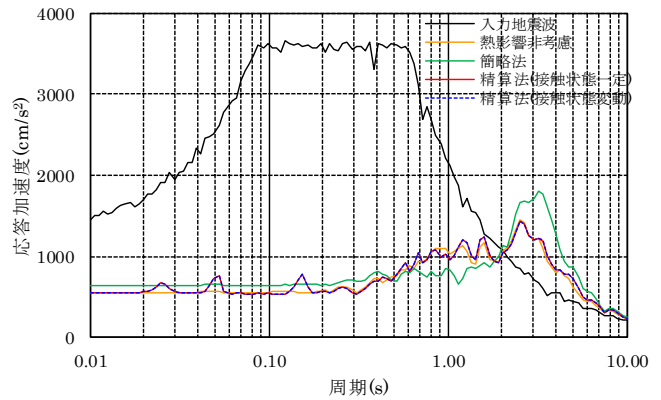
(a) 鉛プラグの体積平均温度



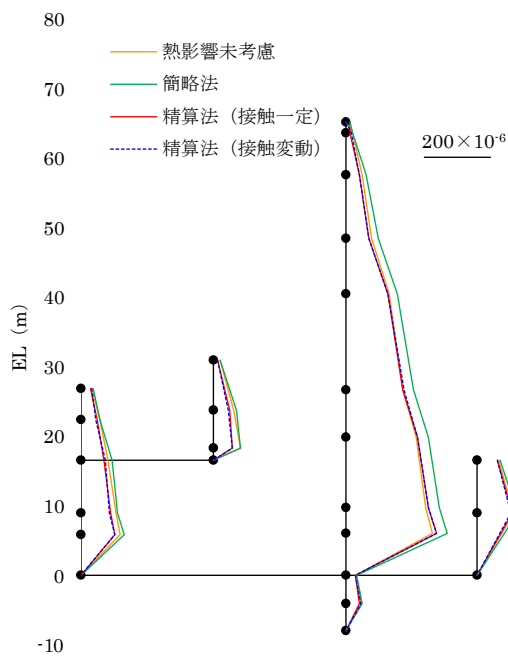
(b) 簡略法の応力低下率



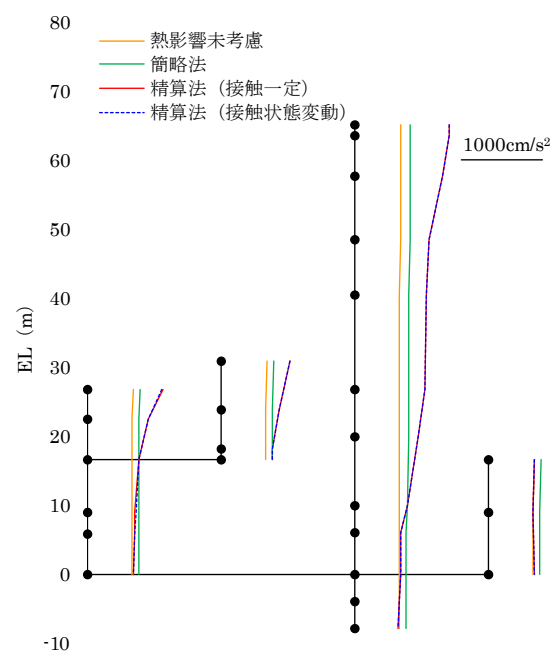
(c) 履歴曲線



(d) 加速度応答スペクトル(h=5%)

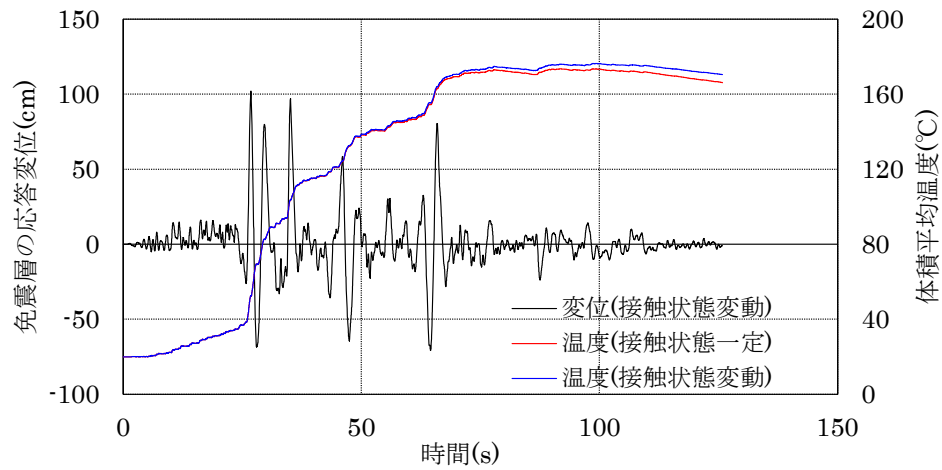


(e) 最大層間変形角分布



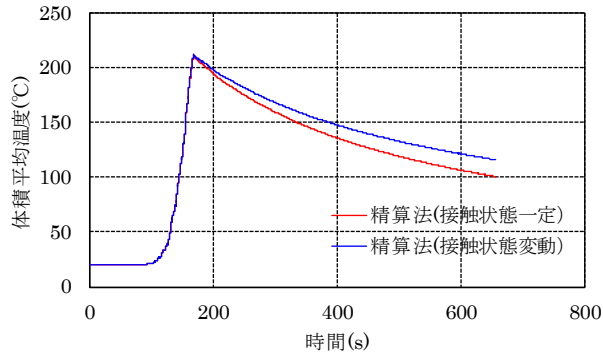
(f) 最大応答加速度分布

図 6-11 スペクトル波・単独入力時 (設計超入力レベル) の応答解析結果 (1/2)

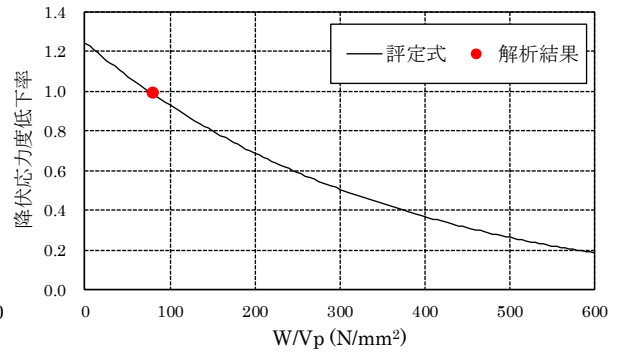


(g) 接触状態変動モデルの時刻歴応答変位と鉛プラグの体積平均温度

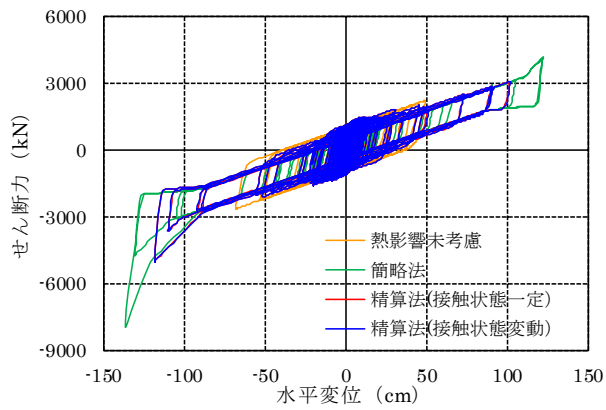
図 6-11 スペクトル波・単独入力時（設計超入力レベル）の応答解析結果（2/2）



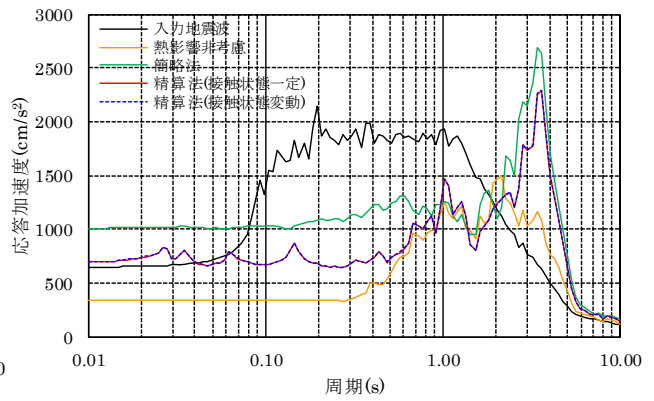
(a) 鉛プラグの体積平均温度



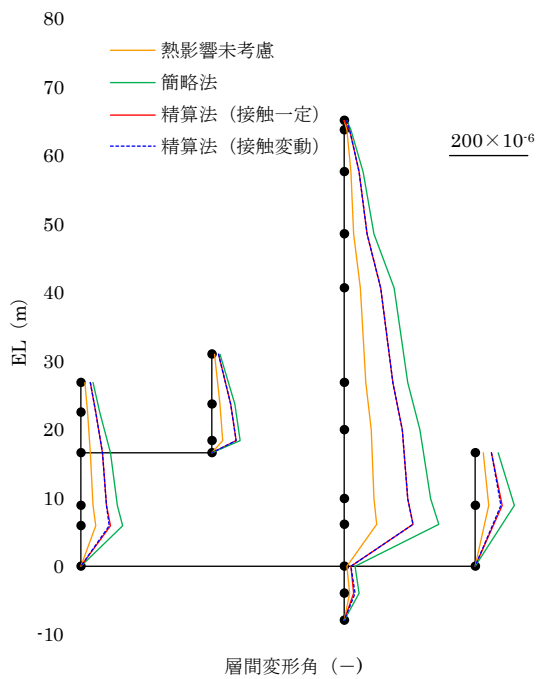
(b) 簡略法の応力低下率



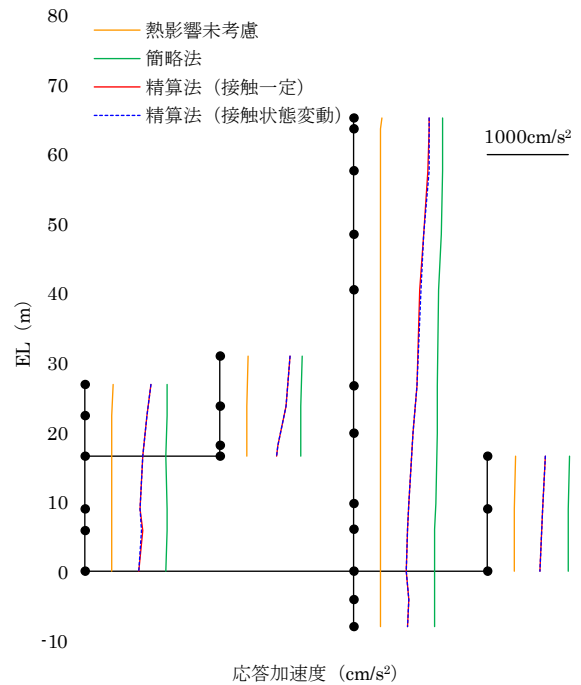
(c) 履歴曲線



(d) 加速度応答スペクトル(h=5%)

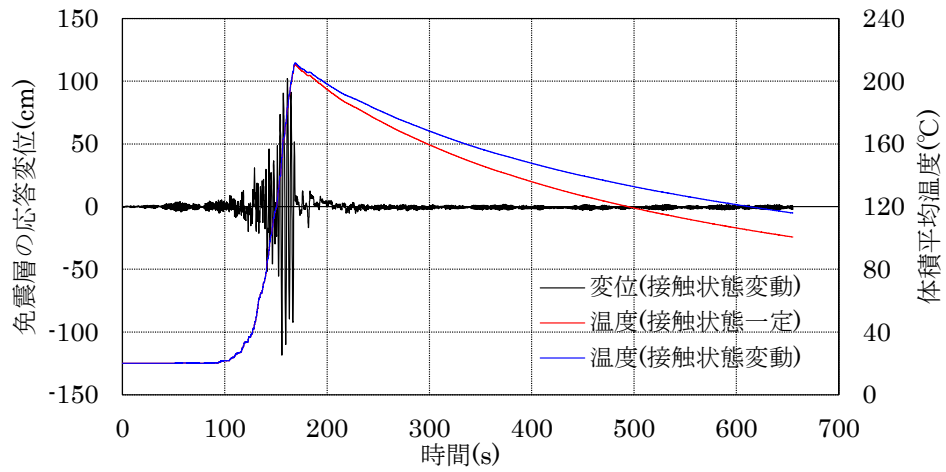


(e) 最大層間変形角分布



(f) 最大応答加速度分布

図 6-12 南海トラフ地震波 SZ1・単独入力時 (設計超入力レベル) の応答解析結果 (1/2)



(g) 接触状態変動モデルの時刻歴応答変位と鉛プラグの体積平均温度

図 6-12 南海トラフ地震波 SZ1・単独入力時（設計超入力レベル）の応答解析結果（2/2）

### 6.3.2 余震時の解析結果

ここでは、余震発生時に本震の熱影響が残存する際の免震装置および上部建屋の応答性状を比較するため、インターバル 600s を挟み入力地震波を 2 波連続で入力した解析結果を示す。ここで、熱影響未考慮モデルは残留変形が小さいため、1 波目と 2 波目の応答差が僅少となり、簡略法モデルでは 2 波分の累積吸収エネルギー量を考慮しているため減衰性能低下が著しく（図 6-13～図 6-16 の(b)）、単独入力時と比較して LRB および上部建屋の応答値が増大傾向を示しているが、いずれも余震時の温度変化を捉えた結果ではない。そこで、本項では、精算法の接触状態一定モデルおよび接触状態変動モデルの応答性状を比較することで、5 章で示した本論文の提案手法における有効性を検証する。

#### (1) 設計入力レベル (1.0 倍)

スペクトル波を用いた解析結果から、精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-13(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-13(b)に、履歴曲線を図 6-13 (c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-13(d)および図 6-13(e)に、最大応答分布を図 6-13 (f)および図 6-13(g)に示す。なお、熱影響非考慮および簡略法の解析結果も併記している。図 6-13(a)より、放熱影響の差異により 2 波目入力時における接触状態変動の温度変化は、接触状態一定と比較して入力開始時に約 4℃、最高温度時に約 5℃程度高く評価されているが、その差は僅少である。そのため、図 6-13(d)では主に高次振動数側にて接触状態一定モデルの加速度応答スペクトルは接触状態変動モデルよりも大きく評価される傾向が見られるものの、図 6-13(c)、図 6-13(f)および図 6-13(g)では両モデルの LRB および上部建屋の応答性状は殆ど同じになっている。なお、図 6-13(d)は、主に高次振動数側にて接触状態一定モデルの加速度応答スペクトルは接触状態変動モデルよりも大きく評価される傾向が見られる。LRB および上部建屋の応答について、免震周期の加速度応答スペクトルは 2 波目を抽出した図 6-13(e)よりも全時刻歴を用いた図 6-13(d)の方が大きいことから、免震層の応答加速度は降伏応力度が大きい 1 波目入力時の応答が支配的となるが、高次振動数ではどちらの図も同程度であることから、上部建屋の応答加速度は 2 波目入力時の応答が支配的となることが分かる。

次に、南海トラフ地震波 SZ1 を入力した解析ケースにおける精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-14(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-14(b)に、履歴曲線を図 6-14(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-14(d)および図 6-14(e)に、最大応答分布を図 6-14(f)および図 6-14(g)に示す。図 6-14(a)から、放熱影響の差異により 2 波目入力時における接触状態変動の温度変化は、接触状態一定と比較して入力開始時に約 2℃、最高温度時に約 4℃程度高く評価されているが、その差は僅少である。そのため、図 6-14(c)から両モデルの履歴曲線は殆ど一致している。また、図 6-14(d)および図 6-14(e)にて、接触状態一定モデルと比較して、接触状態変動モデルの方が高次振動数域の一部でスペクトルピークがやや大きくなるものの、図 6-14(f)および図 6-14(g)は両モデルで殆ど一致していることから、接触状態のせん断ひずみ依存性を考慮することで、鉛プラグの温度変化に若干の差異が見られるものの、免震装置および上部建屋の応答性状は変わらないことを確認した。

上記の検討結果から、接触状態の違いにより余震時における鉛プラグの体積平均温度は接触状態変動モデルの方が 3～5℃程度の大きく評価されるものの、本免震装置を用いた場合では、設計

入力レベルでは入力エネルギー量が小さいため温度差が僅少となり、LRB および上部建屋の応答性状に殆ど影響を与えなかった。一方、加速度応答スペクトルにおいて、接触状態変動モデルは接触状態一定モデルよりも主として高次モードで 10%超の応答増加を確認しており、上部建屋内部の機器・配管設計に影響を与える可能性を示唆している。

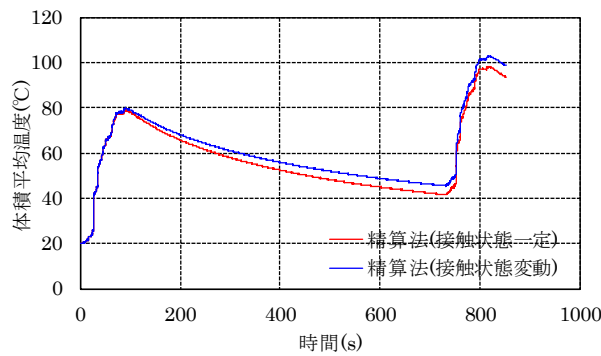
## (2) 設計超入力レベル (係数倍)

スペクトル波を用いた解析結果から、精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-15(a)に、簡略法による累積吸収エネルギーと降伏応力度低下率の関係を図 6-15(b)に、履歴曲線を図 6-15(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-15(d)および図 6-15(e)に、最大応答分布を図 6-15(f)および図 6-15(g)に示す。なお、熱影響非考慮および簡略法の解析結果も併記している。図 6-15(a)より、放熱影響の差異により 2 波目入力時における接触状態変動の温度変化は、接触状態一定と比較して入力開始時に約 15℃、最高温度時に約 20℃程度高く評価されており有意な差異が確認できる。図 6-15(c)および図 6-15(d)から、接触状態変動モデルは接触状態一定モデルと比較して、免震装置の最大応答変位は 2%程度、免震周期である 3s 付近の加速度応答スペクトルは 5~6%増大する傾向が見られるがその差は僅少である。一方、図 6-15(g)より、接触状態変動モデルは接触状態一定モデルと比較して、主として PCCV および PRZ の建屋上部にて 15~20%程度応答増幅する傾向が見られる。また、図 6-15(f)では PCCV にて 12~19%程度の応答低減が確認されており、放熱影響の差異が上部建屋の応答性状に影響を及ぼすことが確認できる。図 6-15(d)および図 6-15(e)においても、主として高次振動数において 15%程度応答増加している周期域が確認できる。これは、余震時に 20℃程度の温度差が生じたことで、より減衰性能が低下した接触状態変動モデルにおいて高次の振動モードが励起され、上部建屋の応答増幅が生じたものと考えられる。よって、本地震波の位相では、本震後の放熱影響を精緻に評価することで余震時の建屋応答性状をより安全側に評価できることを確認した。

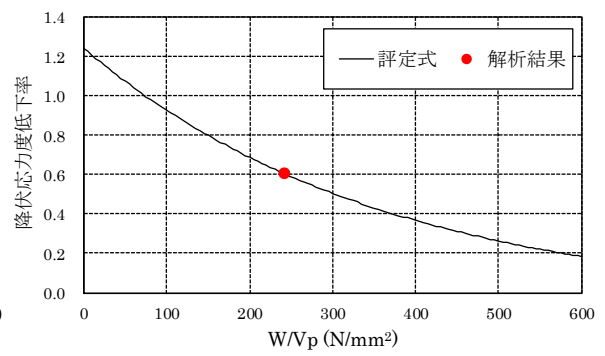
次に、南海トラフ地震波 SZ1 を入力した解析ケースにおける精算法による鉛プラグの体積平均温度と降伏応力度の関係を図 6-16(a)に、履歴曲線を図 6-16(c)に、上部基礎版の加速度応答スペクトルを図 6-16(d)および図 6-16(e)に、最大応答分布を図 6-16(f)および図 6-16 (g)に示す。図 6-16 (a)から、放熱影響の差異により 2 波目入力時における接触状態変動の温度変化は、接触状態一定と比較して入力開始時に約 21℃、最高温度時に約 35℃程度高く評価されており有意な差異が確認できる。スペクトル波と比較して南海トラフ波 SZ1 では温度差が大きい原因として、これは主要動後の微小振動継続時間が長いため、放熱影響による温度差が拡大したことが考えられる。図 6-16(c)および図 6-16(d)から、接触状態変動モデルは接触状態一定モデルと比較して、免震装置の最大応答変位は 7%程度、免震周期である 3s 付近の加速度応答スペクトルは 11~14%増大する傾向が見られる。一方、図 6-16(g)より、接触状態変動モデルは接触状態一定モデルと比較して、主として PCCV および PRZ の建屋上部にて最大 34%程度応答増幅する傾向が見られる。また、図 6-16(f)では PCCV にて 15~32%程度の応答低減が確認されており、放熱影響の差異が上部建屋の応答性状に影響を及ぼすことが確認できる。図 6-16(d)および図 6-16(e)においても、主として高次振動数において 87%程度応答増加している周期域が確認できる。

これらの点から、放熱影響を適切に評価することは上部建屋の耐震性、建屋内部に設置された機器・配管の耐震性を評価する際に重要な要因となることが明らかとなった。よって、原子炉建

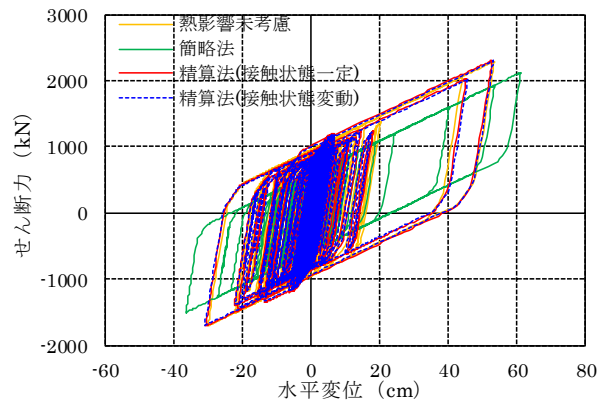
屋の地震解析結果から、LRBの放熱現象を適切に再現できる本提案手法の有効性を確認することができた。



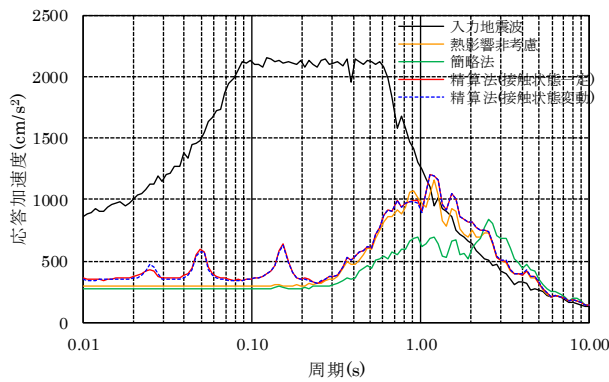
(a) 鉛プラグの体積平均温度



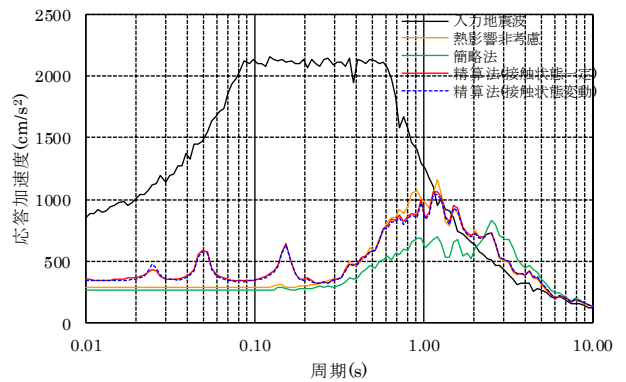
(b) 簡略法の応力低下率



(c) 履歴曲線 (2波目)

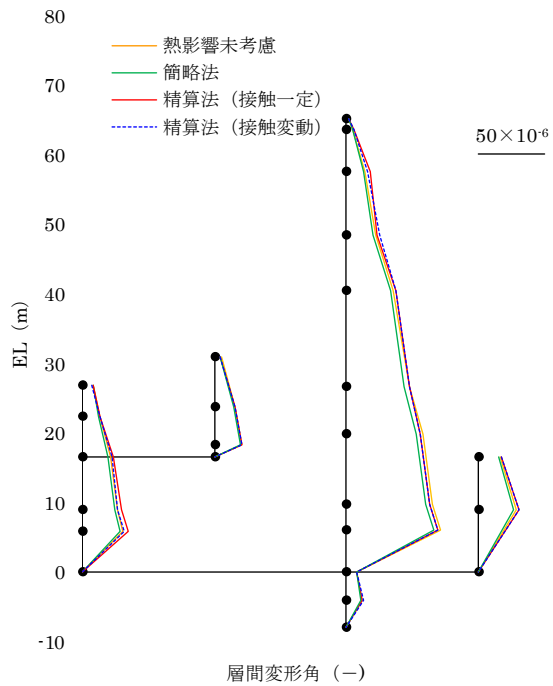


(d) 加速度応答スペクトル(h=5%) (全時刻歴)

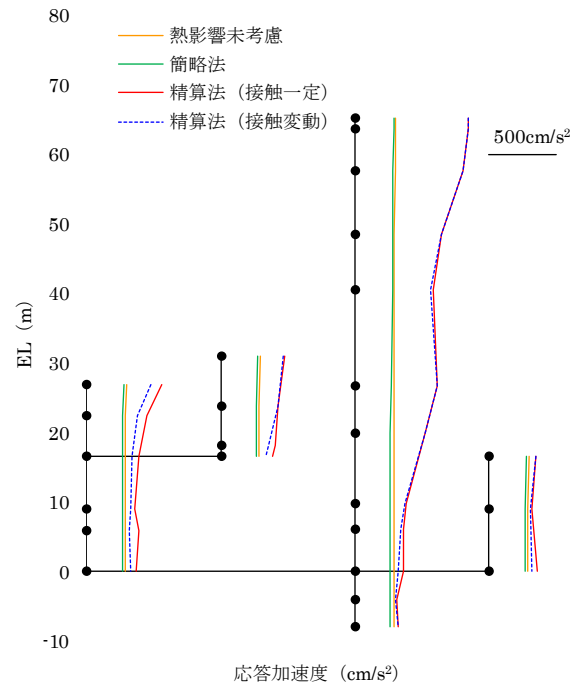


(e) 加速度応答スペクトル(h=5%) (2波目)

図 6-13 スペクトル波・2波連続入力時 (設計入力レベル) の応答解析結果 (1/2)



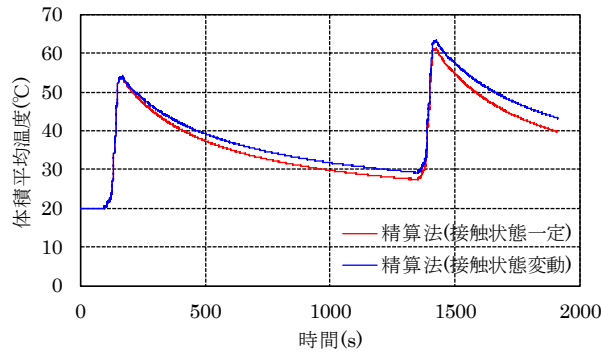
(f) 最大層間変形角分布



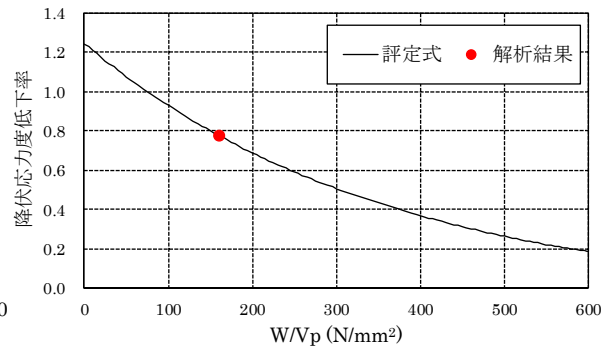
(g) 最大応答加速度分布

図 6-13 スペクトル波・2波連続入力時（設計入力レベル）の応答解析結果（2/2）

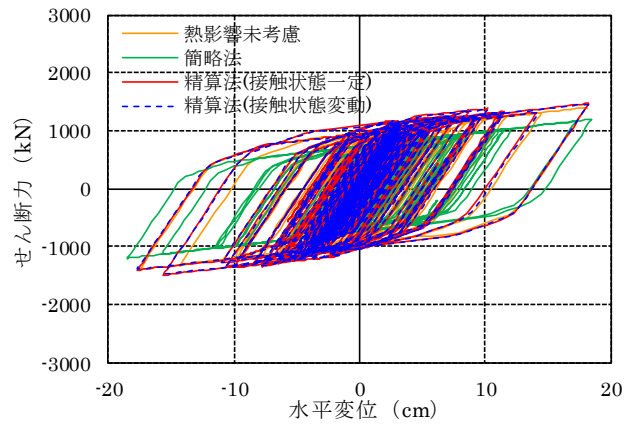




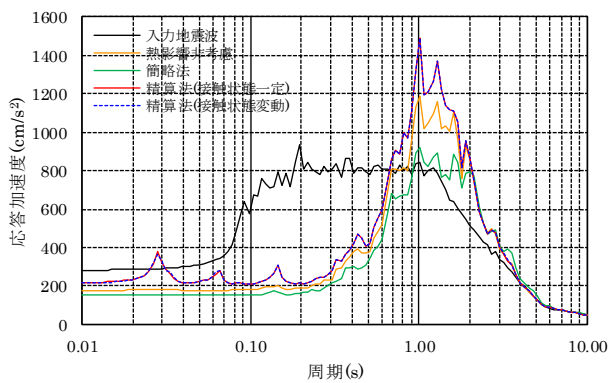
(a) 鉛プラグの体積平均温度



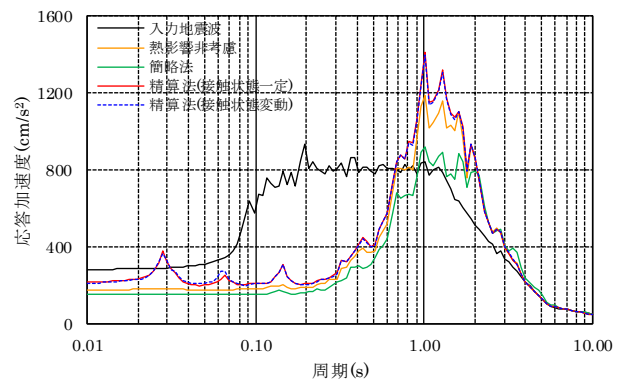
(b) 簡略法の応力低下率



(c) 履歴曲線 (2波目)

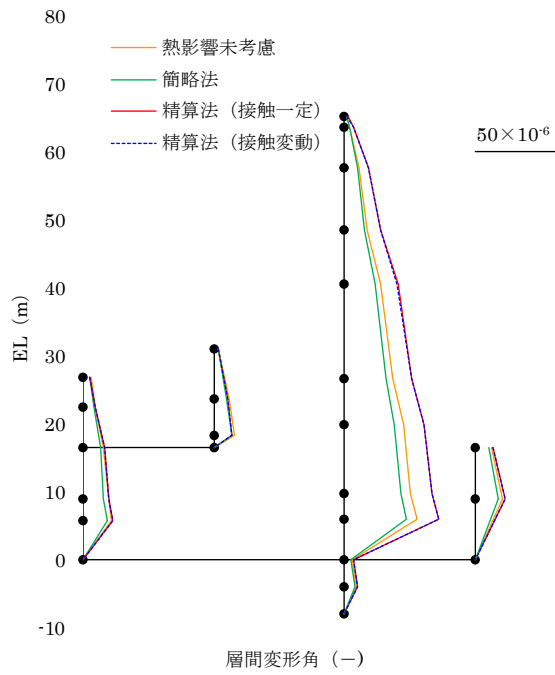


(d) 加速度応答スペクトル(h=5%) (全時刻歴)

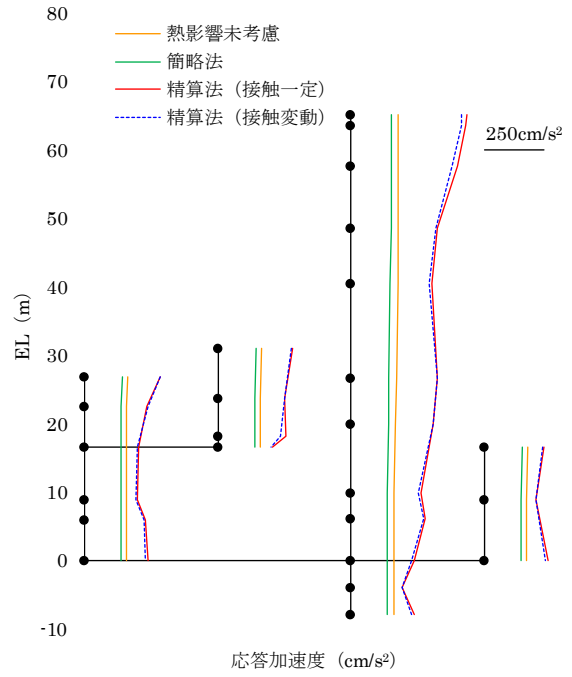


(e) 加速度応答スペクトル(h=5%) (2波目)

図 6-14 南海トラフ地震波 SZ1・2 波連続入力時 (設計入力レベル) の応答解析結果 (1/2)

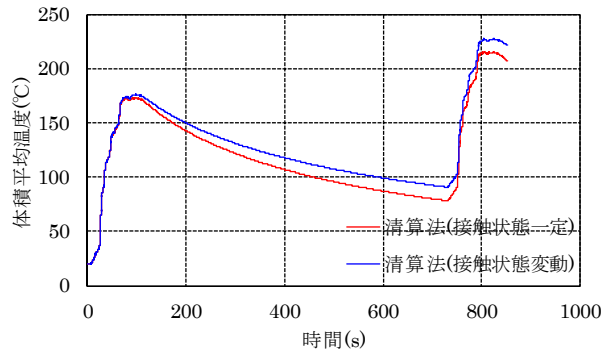


(f) 最大層間変形角分布

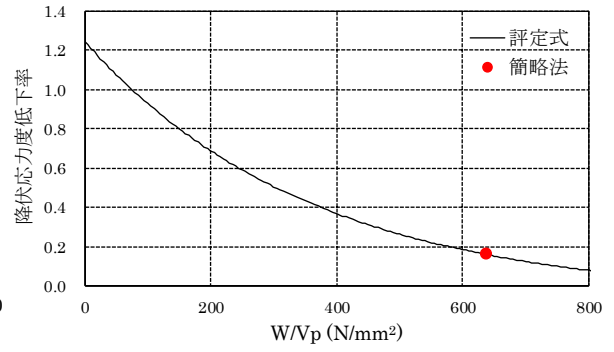


(g) 最大応答加速度分布

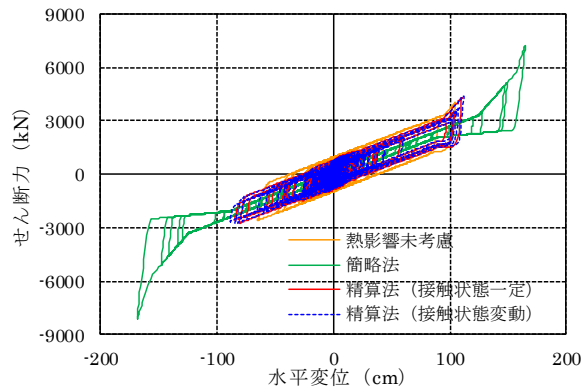
図 6-14 南海トラフ地震波 SZ1・2 波連続入力時 (設計入力レベル) の応答解析結果 (2/2)



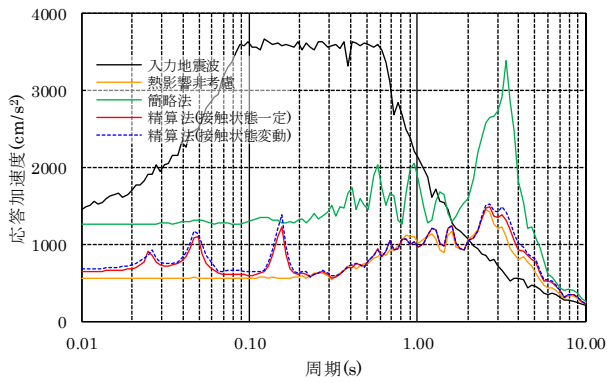
(a) 鉛プラグの体積平均温度



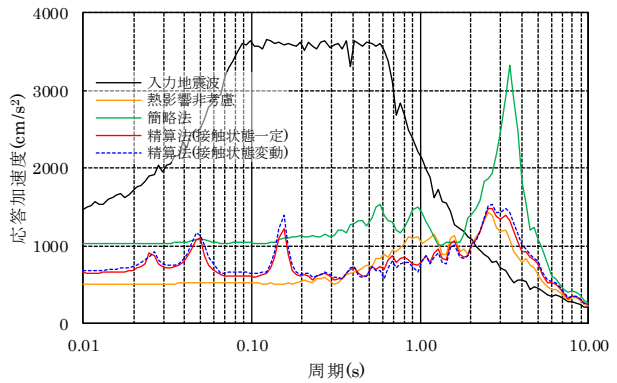
(b) 簡略法の応力低下率



(c) 履歴曲線 (2波目)

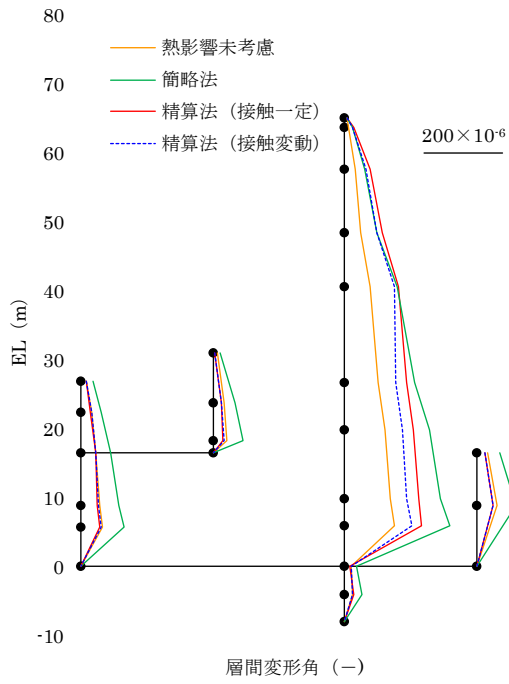


(d) 加速度応答スペクトル(h=5%) (全時刻歴)

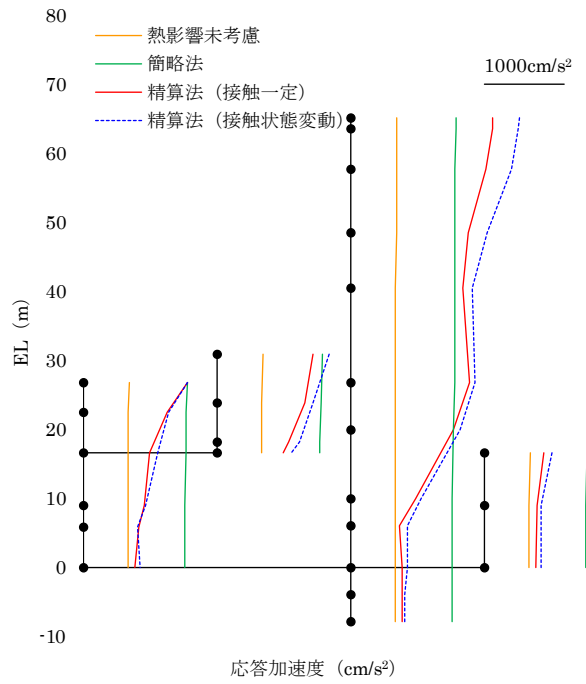


(e) 加速度応答スペクトル(h=5%) (2波目)

図 6-15 スペクトル波・2波連続入力時 (設計超入力レベル) の応答解析結果 (1/2)

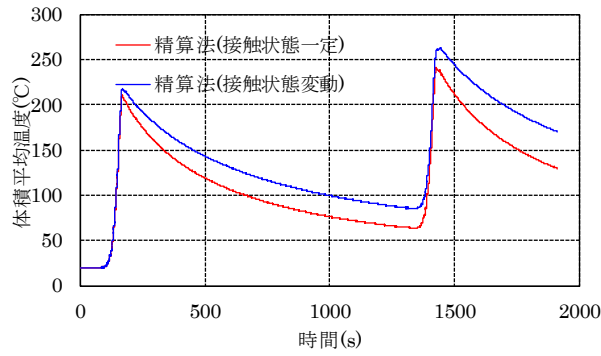


(f) 最大層間変形角分布

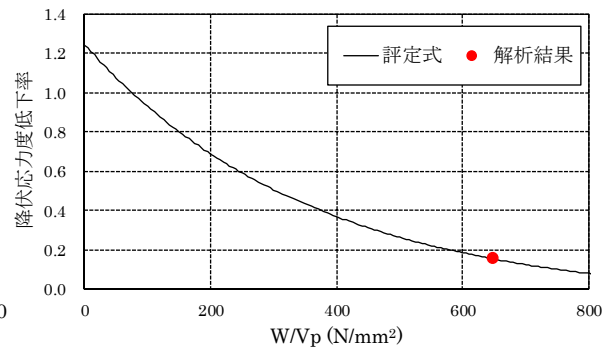


(g) 最大応答加速度分布

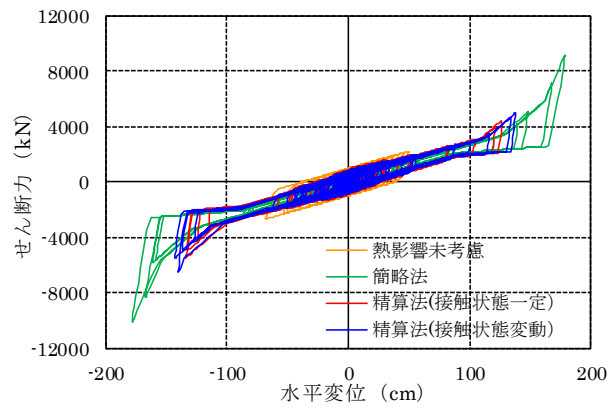
図 6-15 スペクトル波・2波連続入力時（設計超入力レベル）の応答解析結果（2/2）



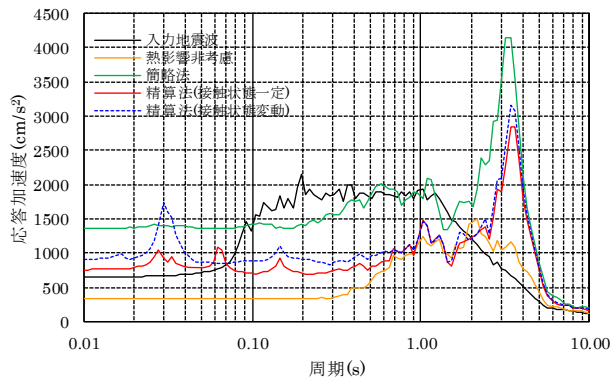
(a) 鉛プラグの体積平均温度



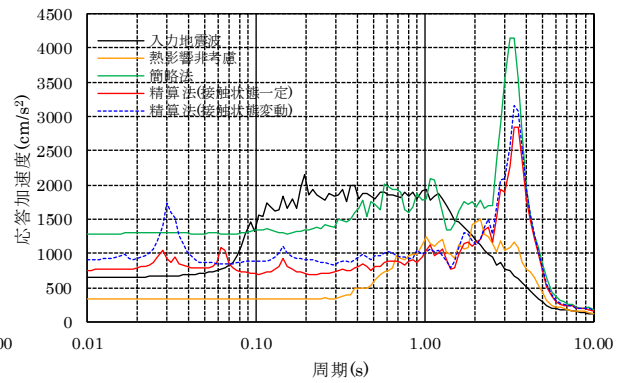
(b) 簡略法の応力低下率



(c) 履歴曲線 (2波目)



(d) 加速度応答スペクトル(h=5%) (全時刻歴)



(e) 加速度応答スペクトル(h=5%) (2波目)

図 6-16 南海トラフ地震波 SZ1・2 波連続入力時 (設計超入力レベル) の応答解析結果 (1/2)

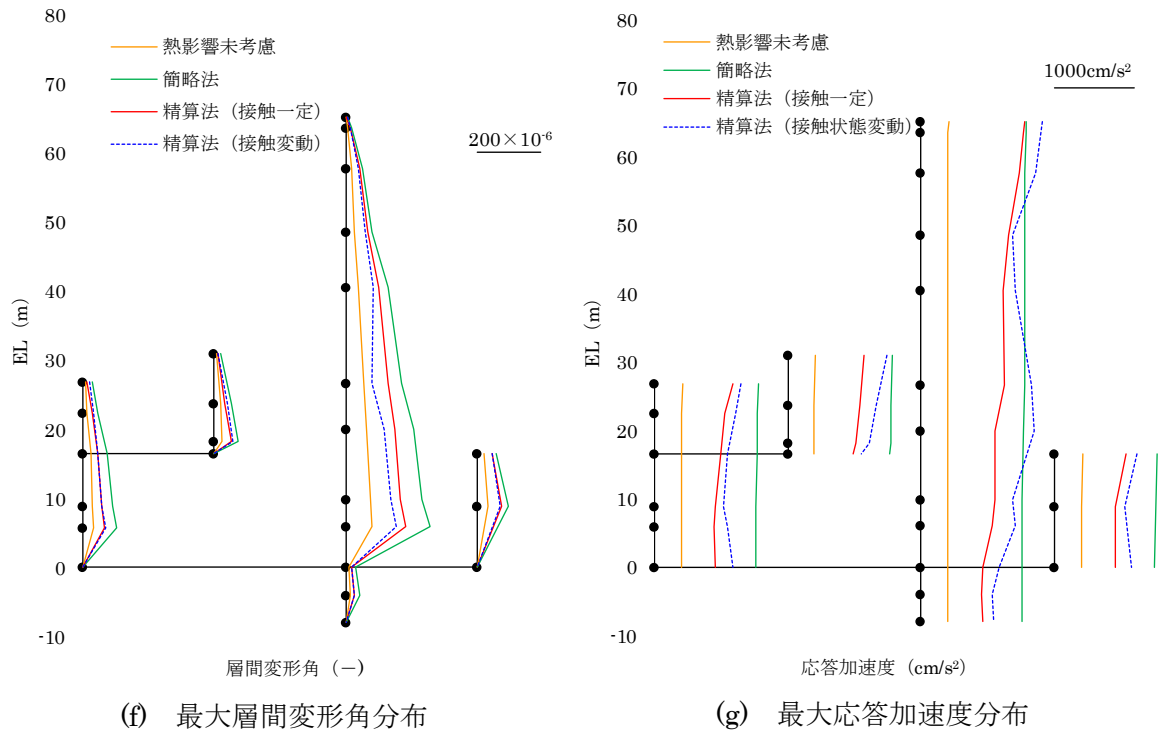


図 6-16 南海トラフ地震波 SZ1・2 波連続入力時 (設計超入力レベル) の応答解析結果 (2/2)

## 6.4 まとめ

原子力免震建屋を対象として、熱影響評価に簡略法および精算法を用いた地震応答解析を実施し、免震装置および上部建屋の応答性状を比較した。また、精算法には、既往研究で用いられてきた鉛プラグと周辺部の境界部を完全接触とした熱・力学連成解析と本研究にて提案した接触状態のせん断ひずみ依存性を考慮したモデル化手法を使用した熱・力学連成解析を実施し、解析結果の比較・検討から、提案した本解析手法の有効性を確認した。

得られた知見を以下に示す。なお、本知見は限られた位相特性によるものであり、今後更なる検討が必要である。

(各熱影響評価法の応答性状へ与える影響について)

- 1) 熱影響を考慮することで免震層の応答変位については、減衰を一律に低減する簡略法が最も大きくなる傾向を示し、詳細法についても接触状態に係わらず熱影響未考慮よりも大きく評価される傾向が見られた。一方、入力エネルギー量が小さい場合、簡略法、詳細法とも低減率が1.0を上回るケースが確認された。
- 2) 熱影響を考慮することで免震層の応答加速度について、設計入力レベルの場合、簡略法は熱影響未考慮と同じかやや小さく評価される傾向が見られた。一方、詳細法は接触状態に係わらず熱影響未考慮よりやや大きく評価される傾向がある。設計超入力レベルの場合、応答変位が大きい簡略法にてハードニング挙動が顕著に発生するため、応答加速度が大きく評価される。詳細法は熱影響未考慮よりも大きく評価される傾向にあり、せん断ひずみに係わらず完全接触状態となる接触状態一定モデルよりも、本提案手法を用いて接触状態のせん断ひずみ依存性をモデル化した接触状態変動モデルの方がやや大きく評価される傾向がある。
- 3) 上部建屋の応答性状について、最大応答分布および加速度応答スペクトルより、熱影響未考慮および簡略法を用いた場合、高次モードが建屋応答に与える影響は僅少であり上部建屋での応答増幅は小さい。一方、精算法を用いた場合、発熱に応じて逐次免震層の周期が変化することから幅広い周期域の振動が励起されて上部建屋が振動する高次モードの振動が発生するため、上部建屋での応答増幅が発生することが確認できる。

(本解析手法の有効性について)

- 4) 単独入力時では積層ゴムがハードニング領域に到達する大入力を受けた際でも、接触状態を一定とした解析結果と接触状態を変動された解析結果に明確な差異が確認できなかった。これは、両モデルの温度差が10℃程度と小さかったこと、最高温度発生時と最大応答発生時が一致していないことが原因と考えられる。よって、本位相特性の地震波では、単独入力時では接触状態の差異が免震装置および上部建屋の応答性状に影響しないことが分かった。
- 5) 余震時を想定した2波連続入力時において、入力エネルギー量が小さい設計入力レベルにおいては、接触状態一定と接触状態変動で鉛プラグの温度変化および免震建屋の応答性状は概ね一致することを確認した。これは、JEAG4614に則り設計入力レベルにおいて免震装置のせん断ひずみを線形限界の1/1.5以下としたため、鉛プラグの総熱容量が大きく発熱量が抑えられた点、φ1600mmの大口径LRBを採用したため、接触状態が完全接触となっても放熱量が小さく温度差が生じなかった点が原因と考えられる。

- 6) 余震時を想定した 2 波連続入力時において、入力エネルギー量が大きい設計超入力レベルにおいては、接触状態変動モデルは接触状態一定モデルと比較して、接触状態一定モデルと接触状態変動モデルで 2 波目の余震動入力開始時における鉛プラグ温度が 15°C~20°C程度大きく評価されており、最高温度も 20~40°C程度大きく評価されている。また、スペクトル波では免震応答は殆ど変わらなかったものの、南海トラフ波 SZ1 では免震応答を 10~20%程度大きく評価しており、いずれの地震波においても上部建屋の応答加速度を大きく評価する傾向が見られる。これは、大入力エネルギーによって鉛プラグの発熱量が大きくなるため、採用した免震装置においても放熱特性のモデル化による温度差が免震装置および上部建屋の応答性状に影響を及ぼしたことが原因であると考えられる。
- 7) 上記の点から、放熱影響が顕著に生じる余震動を用いた地震応答解析を実施する場合において、放熱特性を適切に再現できる本解析手法を採用することが望ましいと言える。また、長時間地震動や放熱影響を受けやすい小径 LRB を採用する場合でも同様に本解析手法の採用が望ましいと考えられるため、今後更なる検討を行う必要がある。

(簡略法の利用について)

- 8) 降伏応力度が一定となる熱影響未考慮および簡略法では、免震周期において精算法よりも加速度応答スペクトルが大きく評価される傾向があり、本地震波では安全側に評価されている。一方、精算法で見られる高次モードのピークが確認出来ない。これは、精算法を使用した場合、降伏応力度が逐次変化するため、時刻歴の中で上部建屋の高次モードが励起される力学特性が存在する可能性を示唆している。よって、簡略法を使用することで免震建屋の応答を安全側に評価できるとは言えないため、簡略法を使用した構造設計を実施する際は注意が必要である。

#### 【6 章 参考文献】

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4614-1987, 1987 年 3 月
- 2) 日本建築学会：建築物の減衰, 丸善, 2000 年 10 月
- 3) エネルギー総合研究所：原子力発電施設への免震技術の適用検討, 公開可能報告書, 2018 年 12 月
- 4) 日本電気協会：原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG4614-2019, 2019 年 6 月



## 7. 結論

本研究は、繰返し加力試験や熱物性値評価試験による実験的アプローチと熱・力学連成解析や接触解析による数値解析的アプローチから、繰返し加力を受ける LRB の熱影響評価手法を高精度化すると共に、長周期・長時間地震動や繰返し発生する余震動など、今後課題となることが想定される新しい地震動に対して LRB の熱影響を適切に再現できる評価手法の構築を目指したものである。

LRB の熱影響評価については、これまでいくつかの試験結果から得られた知見を基に、熱・力学連成解析手法が報告されているが、LRB 内部の温度変化を実験的に確認している報告は少なく、解析結果の妥当性検証が十分に行われていない。そこで、本論文では、繰返し加力試験から LRB 内部の温度変化を計測し、試験結果から鉛プラグにおける温度－降伏応力度関係の各種依存性を確認すると共に、既往評価方法の適用範囲について検討を行った。また、熱エネルギー評価から、熱エネルギーの移動経路を明らかにすると共に、熱・力学連成解析のモデル化手法を提案した。更に、熱・力学連成解析プログラムを開発し、繰返し加力試験の再現解析から本モデル化手法の妥当性を確認することで、LRB の熱影響評価に関する既往研究成果を高精度化することが出来た。

一方、既往研究成果の延長では LRB の放熱特性を適切にモデル化することが出来ず、加力終了後の温度低下や静的加力時の温度変化を再現できなかった。放熱特性を精緻に再現出来ない場合、東北地方太平洋沖地震で観測されたような長時間地震動や熊本地震で観測された繰返しの余震動を検討する際に適切な応答評価を行えないことが懸念される。そこで、本論文では、熱物性値の温度依存性と鉛プラグ境界部の接触状態に着目することで、LRB の放熱特性を再現できる解析手法の構築を行った。熱物性値評価試験では、免震装置の使用環境下における熱物性値の温度依存性を確認すると共に、熱物性値の温度依存性が LRB の力学特性に与える影響を検証したが、放熱特性を適切に再現することは出来なかった。次に、鉛プラグ境界部の接触状態を確認するため、有限要素法を用いた接触解析を実施し、接触状態のせん断ひずみ依存性および面圧依存性を確認すると共に、各種依存性を反映した熱・力学連成解析手法を提案し、繰返し加力試験の再現解析結果から、本提案手法を用いることで LRB の放熱特性が適切に再現出来ることを確認した。更に、原子力免震建屋を対象にした地震応答解析を実施し、余震時など放熱現象が顕著な際に接触状態のモデル化が免震装置および上部建屋の応答性状に影響を及ぼすことを確認した。よって、長時間地震動および繰返し発生する余震動について検討する際や小径 LRB など放熱影響が大きい装置を使用する際には、本提案手法を用いることが望ましいと言える。

本研究で得られた知見は、各章のまとめに示したが、これらを要約すると以下ようになる。

**1 章**では、繰返し変形を受ける免震装置の熱影響評価に関する最近の基準改正を踏まえた背景と既往研究について概観し、本研究の目的と位置づけを明確化すると共に、本書の構成を示している。

**2 章**では、 $\phi 500\text{mm}$  の LRB を対象とした繰返し加力試験結果を提示し、装置内部の温度変化と力学特性の関係性を整理して LRB の熱影響特性を評価した。繰返し加力試験結果から、殆どの試験ケースにおいて試験体内部の詳細な温度変化を計測することができ、得られた温度記録から熱エネルギー評価を行うことで、鉛プラグの発熱範囲や装置内部の熱移動経路を明らかにすると共に、本知見を反映したモデル化手法を提示した。また、鉛プラグ温度－降伏応力度関係の加力条件による依存性が見られないことを確認し、動的加力時では既存提案式、静的加力時ではメー

カー式を使用することで熱影響による減衰性能低下を安全側に考慮できることを確認した。特に、プラグ温度が 200℃から融点に近い 300℃程度まで温度上昇した際、既存提案式では降伏応力度を漸減させているのに対して試験結果は約 4N/mm<sup>2</sup>に収束する傾向を示しており、今後データ拡充を行うことで、LRB の減衰性能低下を抑制した合理的な免震設計が期待できる。更に、これまで実施されていない引張領域と圧縮領域を横断した水平・鉛直同時加力試験を実施し、設計範囲内において LRB が適切に動作することを確認すると共に、鉛プラグに 300℃程度の発熱温度が生じた場合であっても、プラグ温度が常温まで低下することで力学特性が復元することを確認し、LRB の健全性確認範囲を拡大した。

3章では、熱伝導解析に有限要素法を使用した熱・力学連成解析プログラムを開発し、本プログラムを用いた繰返し加力試験の再現解析結果を示した。解析モデルは、2章で示したモデル化手法を用いて構築すると共に、鉛プラグ境界部の接触条件を実機に合わせて設定することで、動的加力時における LRB 内部の温度変化と力学特性を精度良く再現できることを確認した。一方、静的加力時、加力終了後および特定位相の地震応答波加力時の鉛プラグ温度について、試験結果と比較して解析結果が低めに評価されており、放熱特性のモデル化に課題を残した。

4章では、実機の使用環境下における熱物性値の温度依存性を確認すると共に、熱物性値の温度依存性および加力履歴依存性が LRB の力学特性に与える影響について検討した。ゴム材料を用いた熱物性値評価試験結果から比熱の温度依存性が確認されたものの、熱・力学連成解析から得られた装置内部の温度分布および力学特性に影響を及ぼさないことから、LRB の熱影響評価において装置材料の温度依存性を考慮する必要がないことを確認した。また、積層体を用いた熱物性値評価試験結果から、加力履歴の有無による熱物性値の変化が殆ど無いことを確認した。よって、放熱特性の再現には至らなかったものの、熱・力学連成解析において熱物性値の感度が低いものと考えられることから、熱物性値評価試験を実施していない既往の研究成果が妥当であることを示した。

5章では、非線形 FEM モデルを用いた接触解析から鉛プラグ境界部における接触状態のせん断ひずみおよび面圧依存性を確認すると共に、接触状態の変動を熱・力学連成解析に反映するための解析手法を提案し、再現解析結果から本手法の妥当性を示した。接触解析結果から、せん断ひずみの増加に伴い鉛プラグ境界部の接触率は低下し、加力履歴を受けた装置は加力終了後も完全接触に復元しないことを確認した。また、面圧の増加に伴い接触率が低下する傾向を確認した。次に、3種類に分類した非接触状態から、各ひずみレベルの接触状態を仮定して算出した積層ゴムおよび中間鋼板と鉛プラグの接触面積比を熱伝導率に乗じることで、接触時状態の変動を考慮した解析手法を提案した。更に、本解析手法を適用するため、非線形熱伝導解析を用いた熱・力学連成解析プログラムを開発し、繰返し加力試験の再現解析から、放熱影響が顕著な静的加力試験や継続時間の長い地震応答波加力試験において、接触状態を完全接触とした3章解析結果と比較して、LRB の温度変化および力学特性を精度良く再現できることを確認し、放熱特性の再現に成功した。

6章では、原子力免震建屋を対象に地震波単独入力時と余震動を想定した2波連続入力時の地震応答解析を実施し、放熱特性のモデル化が免震装置および上部建屋の応答性状に与える影響を整理することで、繰返し発生する余震動を評価する際に本提案手法の有効性を示している。入力エネルギー量が大きい設計超入力レベルの地震動を使用した際、余震動発生前のインターバル時

間において、これまでの接触状態を完全接触とした解析結果では放熱により温度低下が顕著となるが、接触状態を精緻に評価した本提案手法では温度低下が小さく評価されており、余震動発生時において減衰性能の低下による応答増加が確認された。よって、これまでの解析手法では、実際よりも免震装置および上部建屋高次モードの応答を非安全側に評価する可能性があるが、本提案手法を採用することで適切な応答評価が可能となった。本論文では余震動を対象としたが、長時間地震動や小径 LRB 採用時など、放熱影響が顕著に生じることが想定される場合においても本解析手法の有効性が期待できるため、今後更なる検討を行う必要がある。また、熱影響未考慮、簡略法、精算法（接触状態一定・変動）を用いた地震応答解析を実施し、各熱影響評価手法の応答性状を比較した結果、簡略法を使用する場合は免震応答を安全側に評価するが、上部建屋の高次モードが励起され難いため、上部建屋の耐震設計や建屋内に設置された機器・配管設計において非安全側の評価に繋がる可能性がある。

以上の研究成果から、既往研究成果の高精度化、放熱特性を精度良く再現した解析手法の開発に成功したものの、開発した手法は限定的な設計条件下を対象としており、一般化に向けた更なる研究が必要である。東北地方太平洋沖地震を契機として、今日、南海トラフ沿い地震動や相模トラフ沿い地震動など新たな断層モデルの想定、熊本地震で観測された多数回の大地震やパルス性地震といった新たな地震波が議論されている。将来にわたって、より過酷な設計条件が課された際にも適用できる優れた解析手法の構築を目指して、引き続き研究を進めていきたい。



## 謝辞

本研究を行うにあたり、社会人博士課程から起算して5年に渡り、根気強く且つ丁寧にご指導いただいた日本大学理工学部特任教授 古橋剛先生には、心から謝意を表します。本研究は、LRBの力学特性と熱伝導特性の相互作用問題に対して、実験的手法と数値解析的手法を用いて取り組む難解なテーマのため、何度も研究に行き詰まり、方向性を見出せない時期がありましたが、その都度、古橋剛先生には、振動工学、熱工学を始めとする幅広い分野のご指導をいただくと共に、免震構造に関する種々の貴重な知見を伝授いただき、なんとか本論文を纏めるに至りました。また、研究の過渡期には毎週のように研究室へ伺い、本研究内容に限らず、モード制御、機械学習、免震構造設計等について、深夜に及ぶ闊達な議論の中で、研究者としての在り方をご教示いただき、今後の研究者人生の礎を築くことが出来ました。

本論文の審査を快諾いただくと共に、多くの有益なご指導、ご助言を賜りました日本大学理工学部教授 北嶋圭二先生（主査）、日本大学理工学部教授 近藤典夫先生（副査）、日本大学理工学部教授 秦一平先生（副査）に、心から謝意を表します。北嶋圭二先生、近藤典夫先生、秦一平先生には、試験結果の分析方法および解析結果の検証方法に関するご助言、論文名称に関するご助言を賜り、本論文を形にすることが出来ました。

学部・修士課程においてご指導いただき、また、著者が博士課程に挑戦する際に多大なるご助力をいただいた日本大学理工学部名誉教授 新宮清志先生には、心から謝意を表します。著者が、新宮清志先生の専門ではない免震構造を研究テーマに選択した際、古橋剛先生、北嶋圭二先生をご紹介いただき、研究活動の下地を築いていただくと共に、本論文の審査においても副査として、多くの有益なご指導、ご助言を賜りました。思い返せば、学生時代に航空宇宙工学部、精密機械工学部、機械工学部の研究室との共同発表会、意見交換会を通じて、建築工学以外の分野にも興味の幅を広げていたことが、本研究テーマである熱・力学連成解析に取り組んだ遠因ではないかと考えております。

本研究において、LRBの繰返し加力試験ではオイレス工業株式会社免制震事業部 仲村崇仁博士、積層ゴムの熱物性値評価試験では株式会社ブリヂストン免制震開発部 正木信男博士、熱・力学連成解析プログラムの実装ではアーク情報システム株式会社数理解析部 内藤伸幸博士、接触解析では株式会社ブリヂストン免制震開発部 森隆浩博士に多大なご協力を賜りました。この場を借りて深く感謝いたします。

本研究に対するご理解とご支援をいただいた株式会社大林組原子力本部 今塚善勝本部長、圓幸史朗統括部長、吉田伸一技術部部長に深く謝意を表します。また、株式会社大林組原子力本部 竹内義高上級主席技師、稲葉学副部長には、本研究に直接関わる論文の共著者として、数多くの議論を重ね、有益なご助言を賜りました。この場を借りて深く感謝いたします。

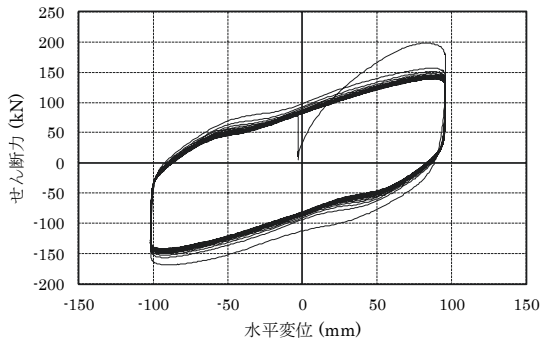
最後に本研究活動を温かく見守り続けてくれた両親と妻・奈央に心から感謝の意を表します。

2021年1月 湯川 正貴

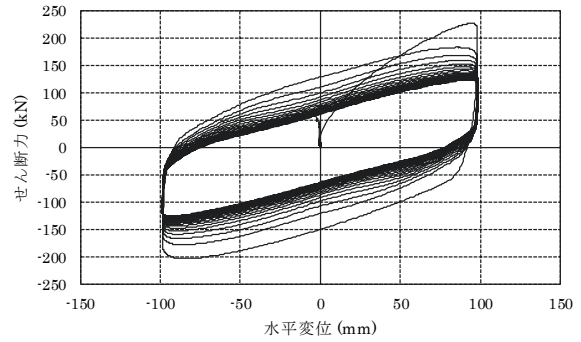


付録 1 繰返し加力試験の試験結果

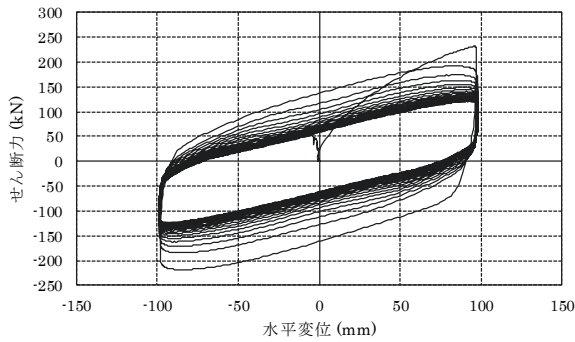
2章で示した繰返し加力試験から得られた履歴曲線、温度変化、2次剛性および降伏応力度とそ  
 の変化率を纏める。温度記録は鉛プラグ中心部 (Lead Cen.) が 20℃以下になるまで継続してい  
 るが、ここでは装置内部の発熱による温度上昇と放熱による温度低下が確認できる範囲の温度変  
 化を提示している。また、2次剛性および降伏応力度の変化率は、3 サイクル目の物性値に対する  
 比率としている。



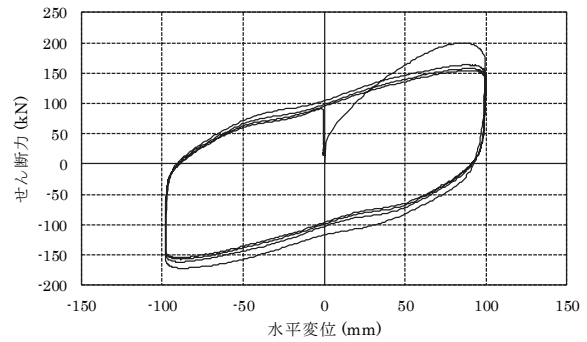
付図 1-1(1) 試験ケース 1-1 の履歴曲線



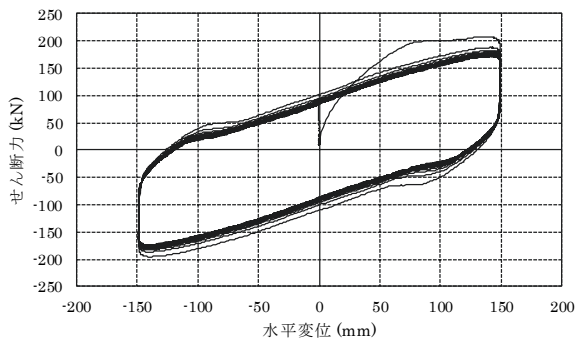
付図 1-1(2) 試験ケース 1-2 の履歴曲線



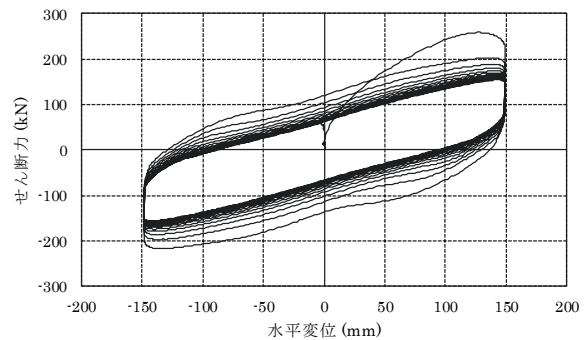
付図 1-1(3) 試験ケース 1-3 の履歴曲線



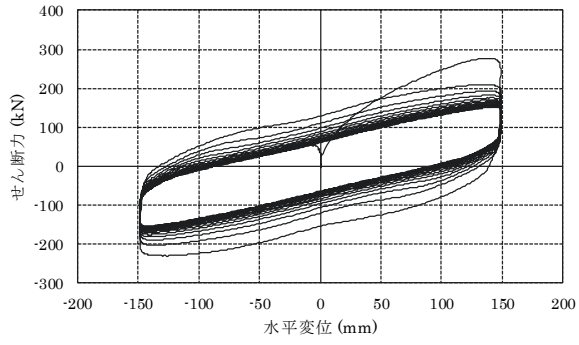
付図 1-1(4) 試験ケース 1-4 の履歴曲線



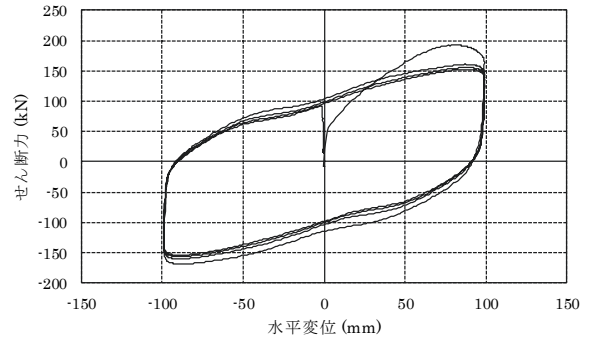
付図 1-1(5) 試験ケース 1-5 の履歴曲線



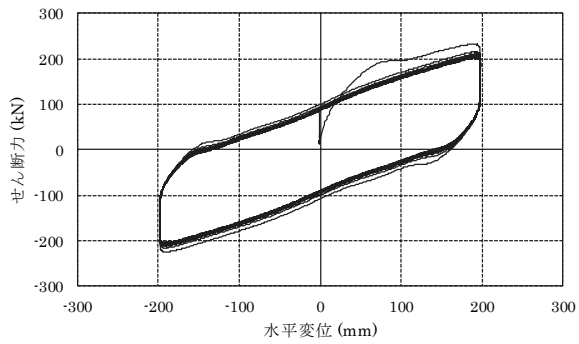
付図 1-1(6) 試験ケース 1-6 の履歴曲線



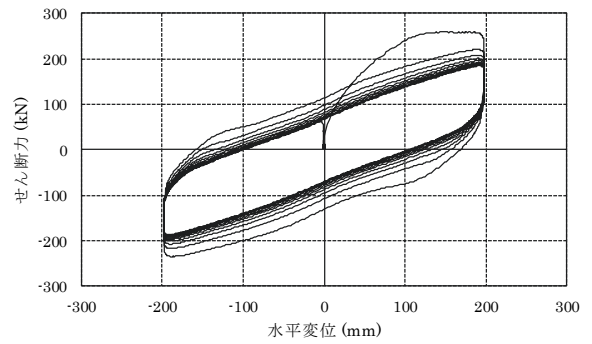
付図 1-1(7) 試験ケース 1-7 の履歴曲線



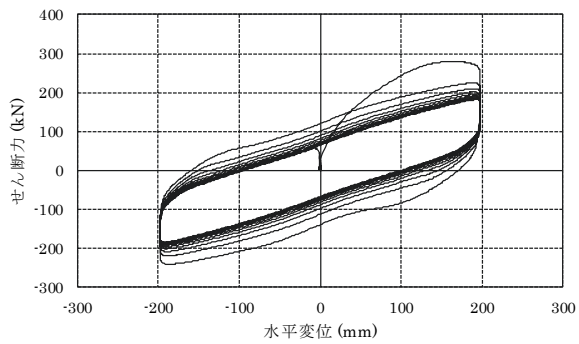
付図 1-1(8) 試験ケース 1-8 の履歴曲線



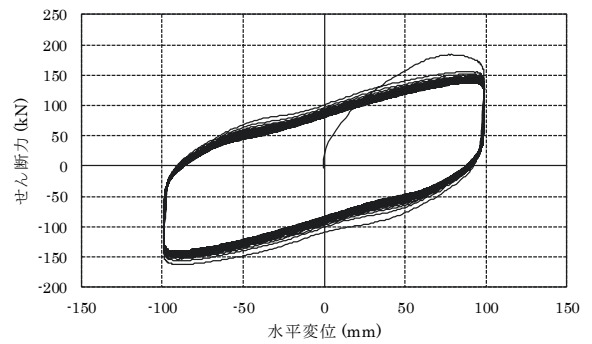
付図 1-1(9) 試験ケース 1-9 の履歴曲線



付図 1-1(10) 試験ケース 1-10 の履歴曲線

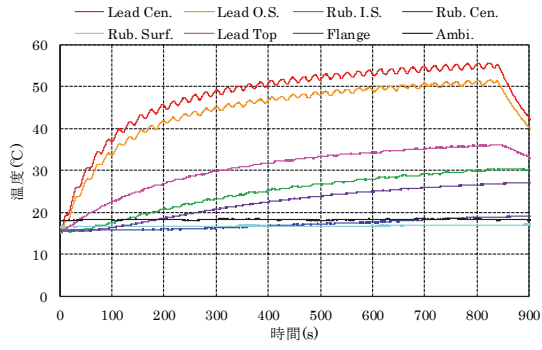


付図 1-1(11) 試験ケース 1-11 の履歴曲線

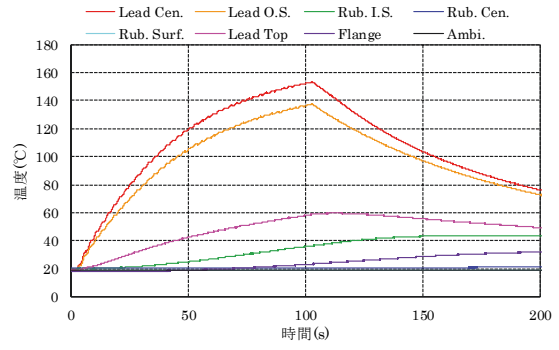


付図 1-1(12) 試験ケース 1-12 の履歴曲線

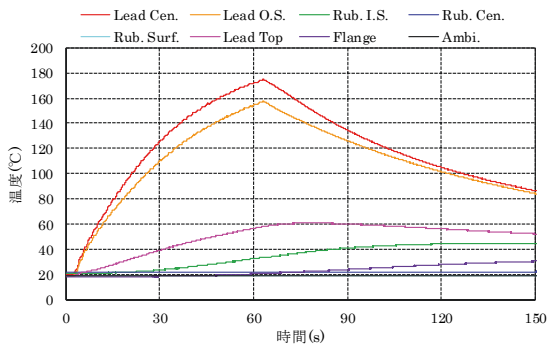




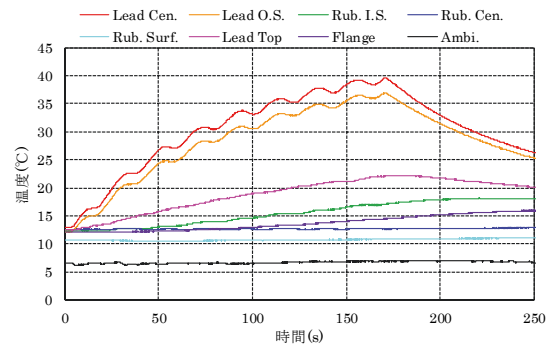
付図 1-2(1) 試験ケース 1-1 の温度変化



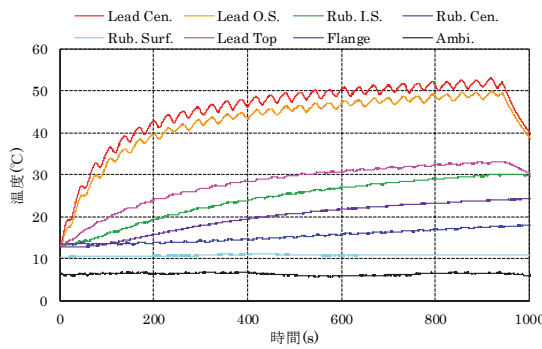
付図 1-2(2) 試験ケース 1-2 の温度変化



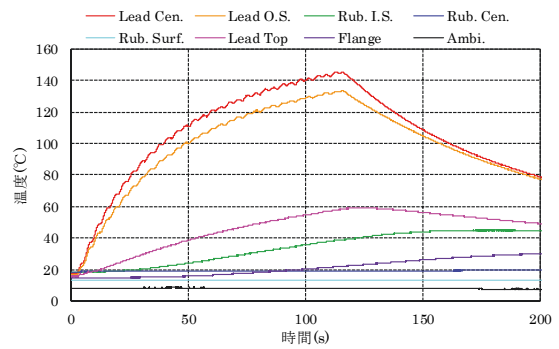
付図 1-2(3) 試験ケース 1-3 の温度変化



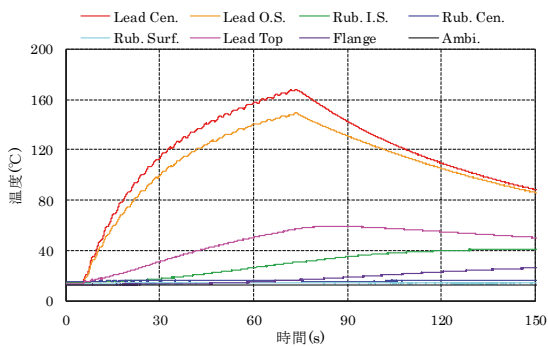
付図 1-2(4) 試験ケース 1-4 の温度変化



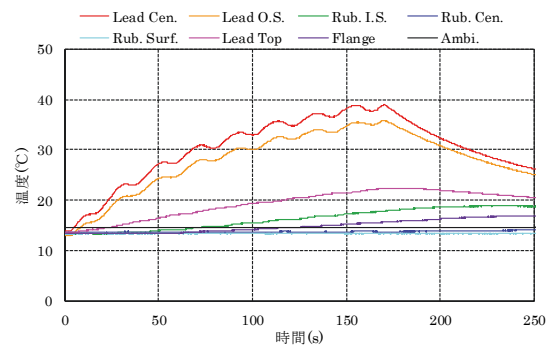
付図 1-2(5) 試験ケース 1-5 の温度変化



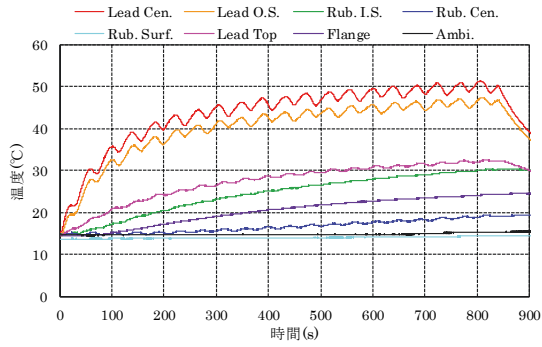
付図 1-2(6) 試験ケース 1-6 の温度変化



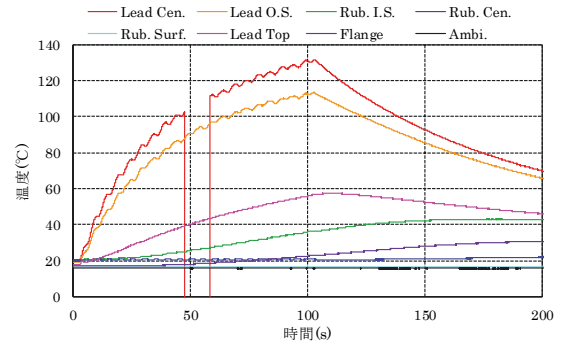
付図 1-2(7) 試験ケース 1-7 の温度変化



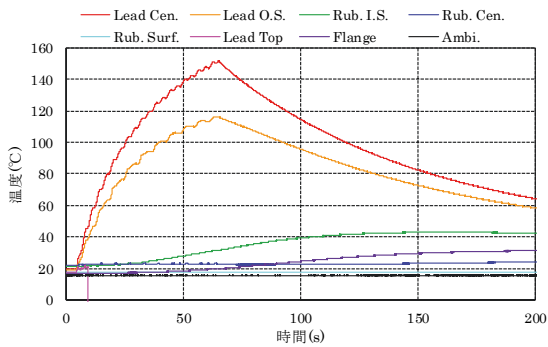
付図 1-2(8) 試験ケース 1-8 の温度変化



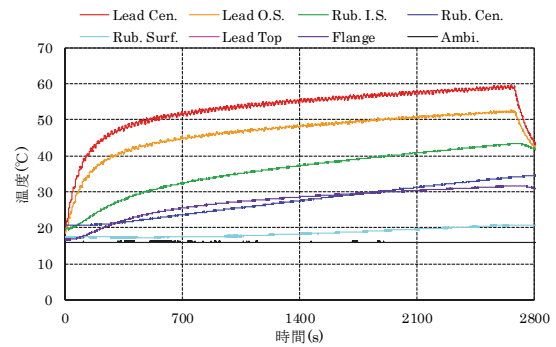
付図 1-2(9) 試験ケース 1-9 の温度変化



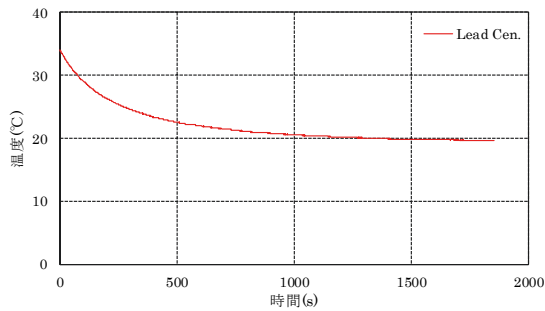
付図 1-2(10) 試験ケース 1-10 の温度変化



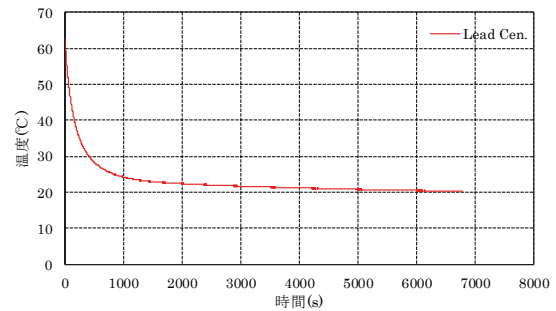
付図 1-2(11) 試験ケース 1-11 の温度変化



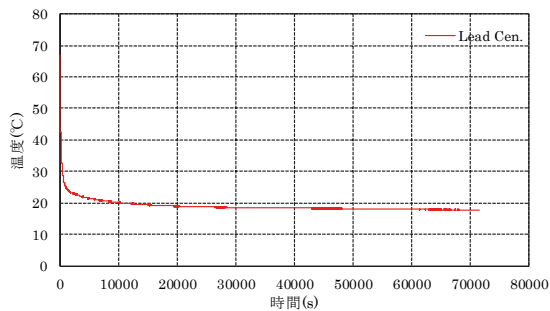
付図 1-2(12) 試験ケース 1-12 の温度変化



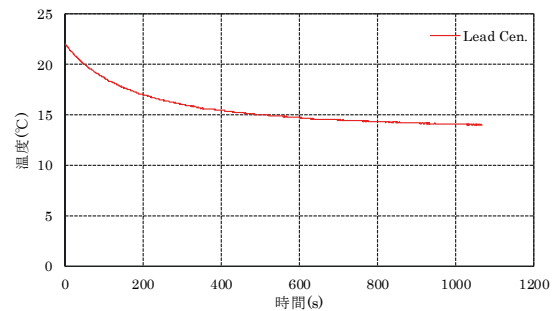
付図 1-3(1) 試験ケース 1-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプリング時\*)



付図 1-3(2) 試験ケース 1-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプリング時\*)

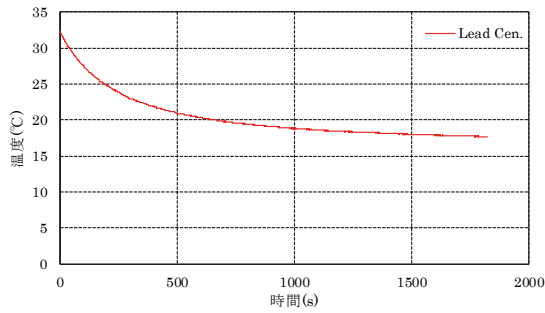


付図 1-3(3) 試験ケース 1-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプリング時\*)

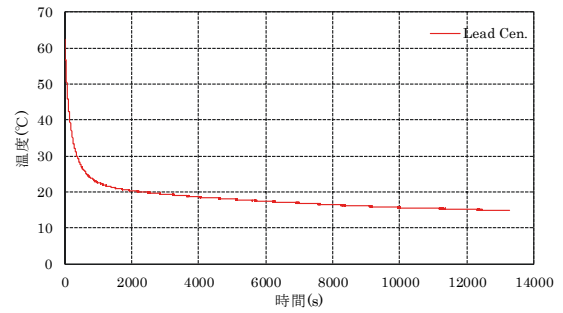


付図 1-3(4) 試験ケース 1-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプリング時\*)

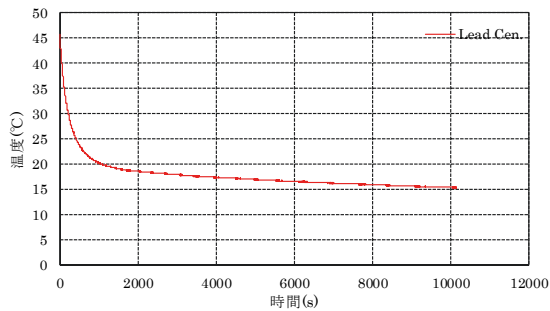
\* : 図 2-6 参照



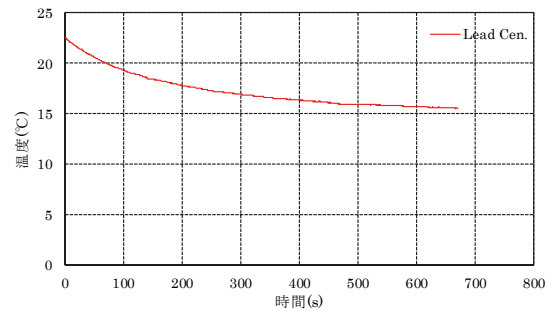
付図 1-3(5) 試験ケース 1-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



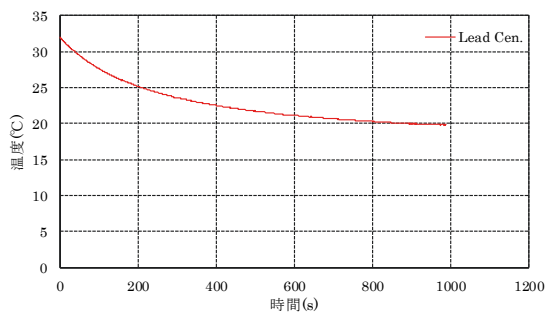
付図 1-3(6) 試験ケース 1-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



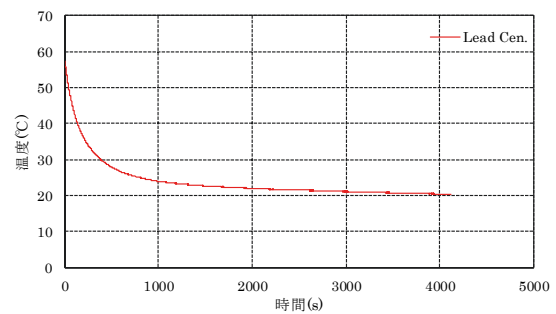
付図 1-3(7) 試験ケース 1-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



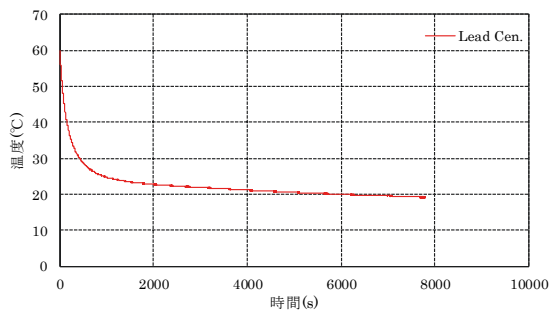
付図 1-3(8) 試験ケース 1-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



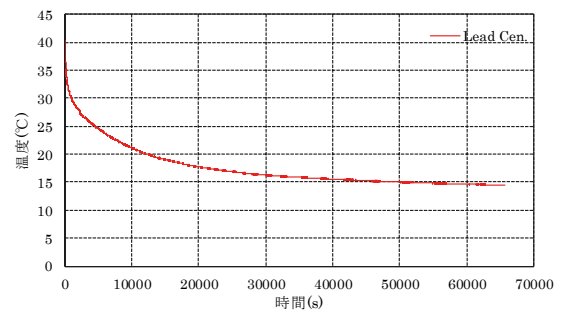
付図 1-3(9) 試験ケース 1-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



付図 1-3(10) 試験ケース 1-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

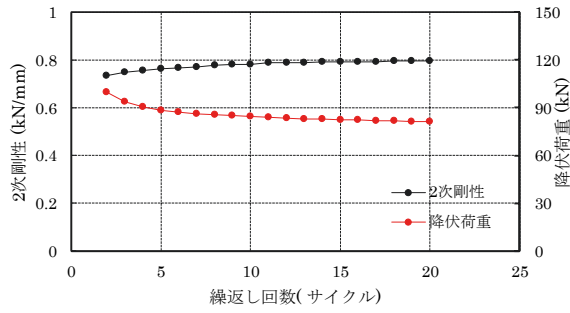


付図 1-3(11) 試験ケース 1-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

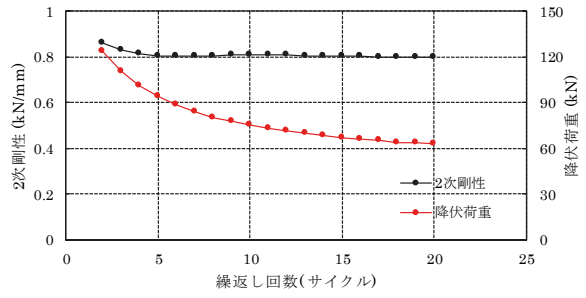


付図 1-3(12) 試験ケース 1-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

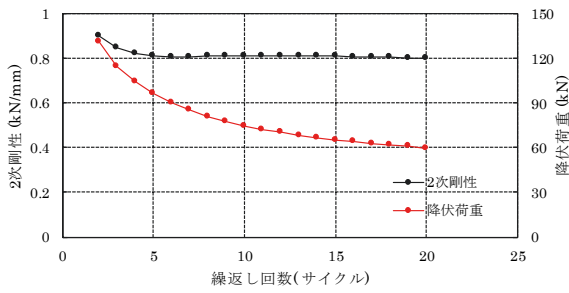
\* : 図 2-6 参照



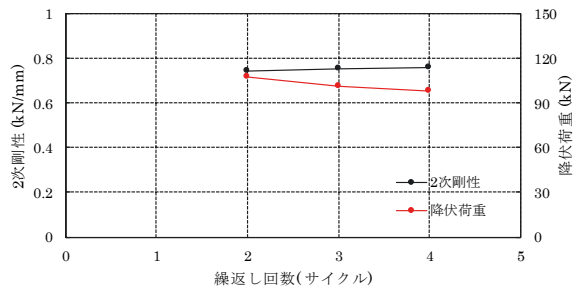
付図 1-4(1) 試験ケース 1-1 の物性値変化



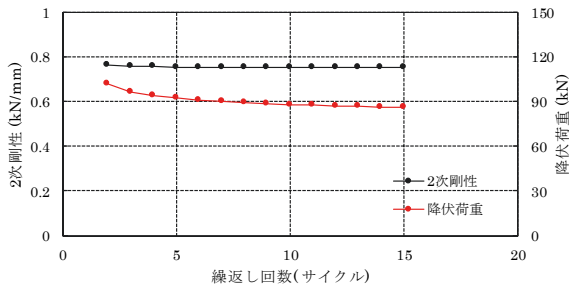
付図 1-4(2) 試験ケース 1-2 の物性値変化



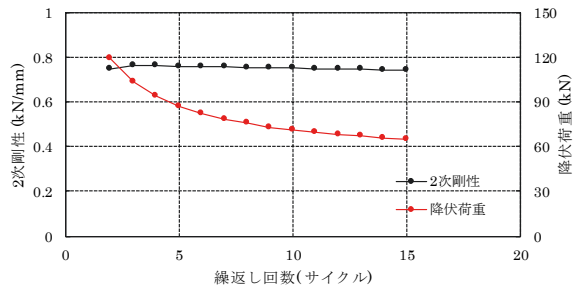
付図 1-4(3) 試験ケース 1-3 の物性値変化



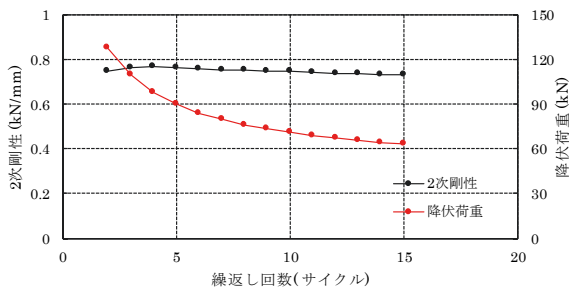
付図 1-4(4) 試験ケース 1-4 の物性値変化



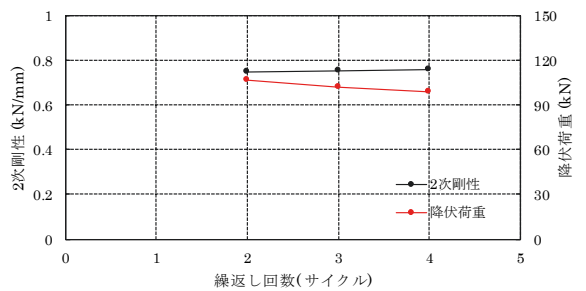
付図 1-4(5) 試験ケース 1-5 の物性値変化



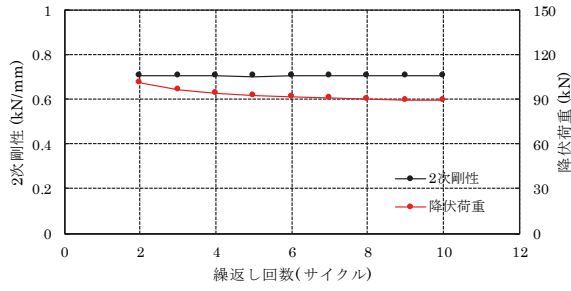
付図 1-4(6) 試験ケース 1-6 の物性値変化



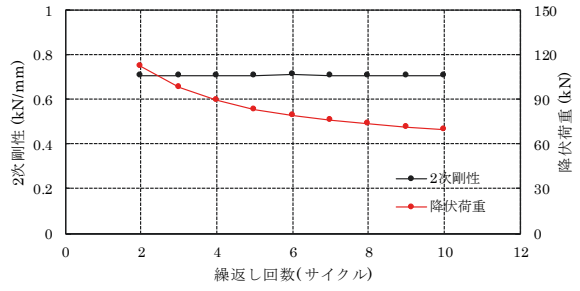
付図 1-4(7) 試験ケース 1-7 の物性値変化



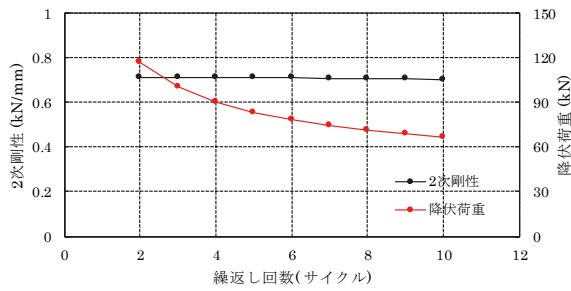
付図 1-4(8) 試験ケース 1-8 の物性値変化



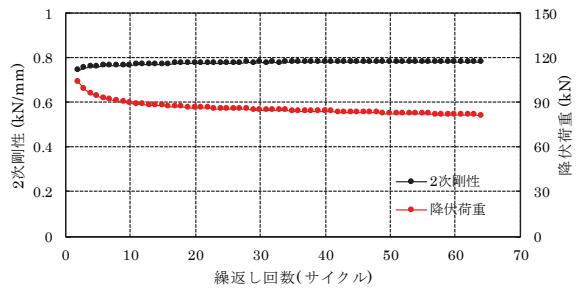
付図 1-4(9) 試験ケース 1-9 の物性値変化



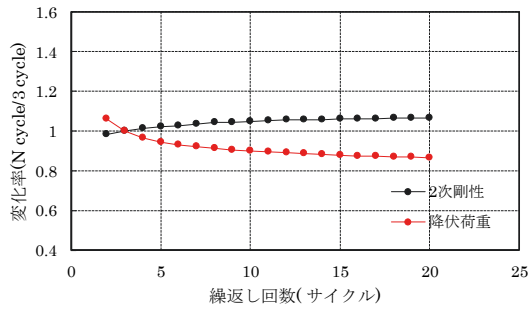
付図 1-4(10) 試験ケース 1-10 の物性値変化



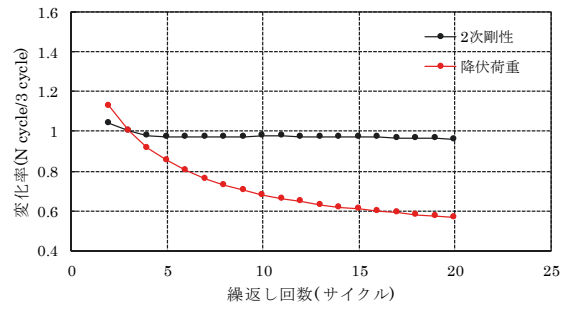
付図 1-4(11) 試験ケース 1-11 の物性値変化



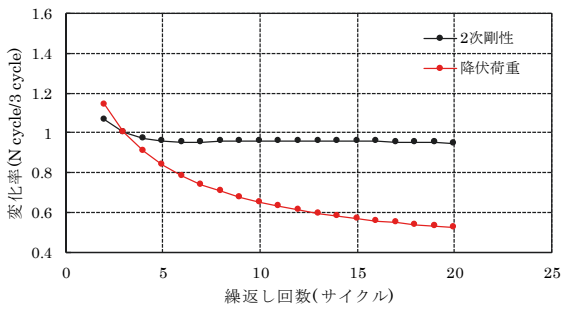
付図 1-4(12) 試験ケース 1-12 の物性値変化



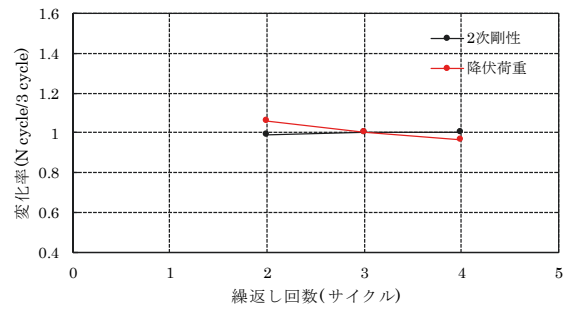
付図 1-5(1) 試験ケース 1-1 の物性値変化率



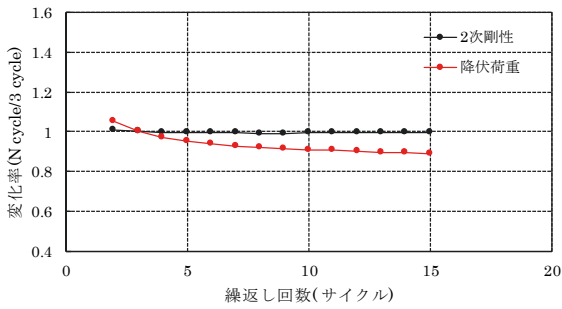
付図 1-5(2) 試験ケース 1-2 の物性値変化率



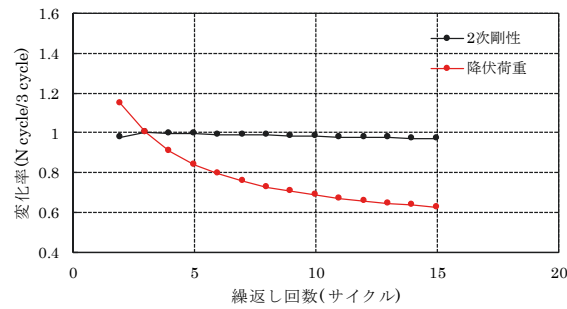
付図 1-5(3) 試験ケース 1-3 の物性値変化率



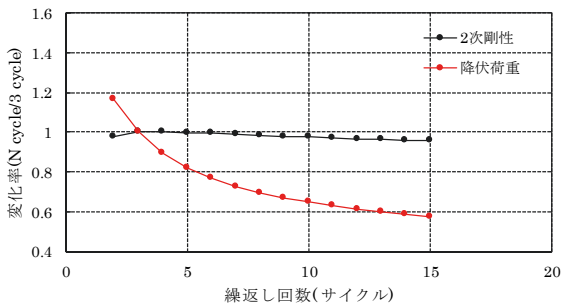
付図 1-5(4) 試験ケース 1-4 の物性値変化率



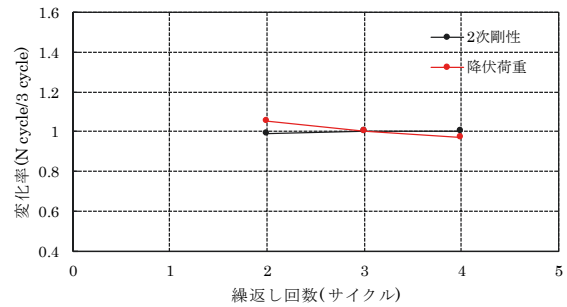
付図 1-5(5) 試験ケース 1-5 の物性値変化率



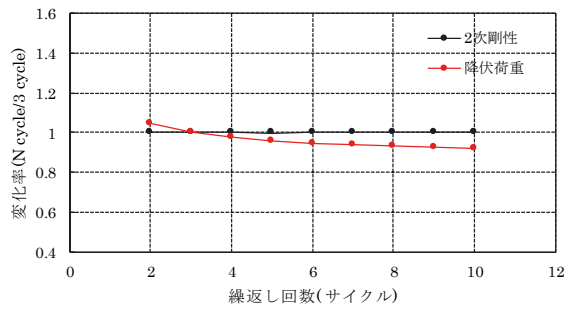
付図 1-5(6) 試験ケース 1-6 の物性値変化率



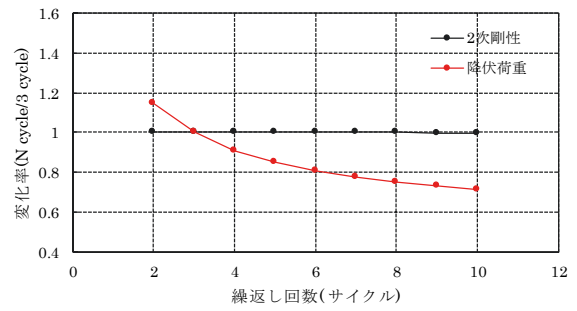
付図 1-5(7) 試験ケース 1-7 の物性値変化率



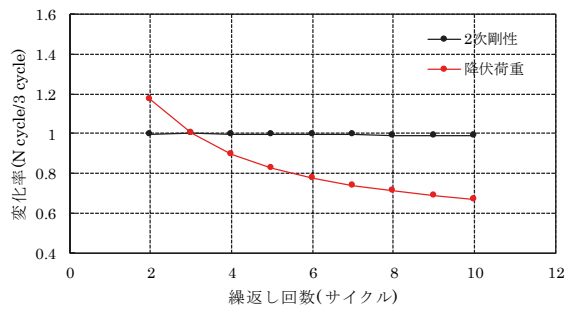
付図 1-5(8) 試験ケース 1-8 の物性値変化率



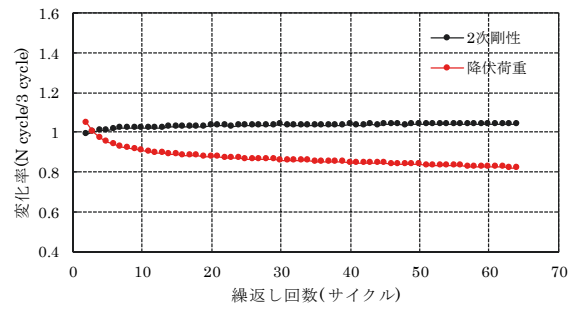
付図 1-5(9) 試験ケース 1-9 の物性値変化率



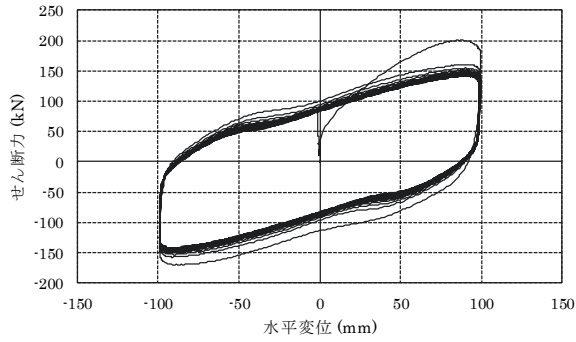
付図 1-5(10) 試験ケース 1-10 の物性値変化率



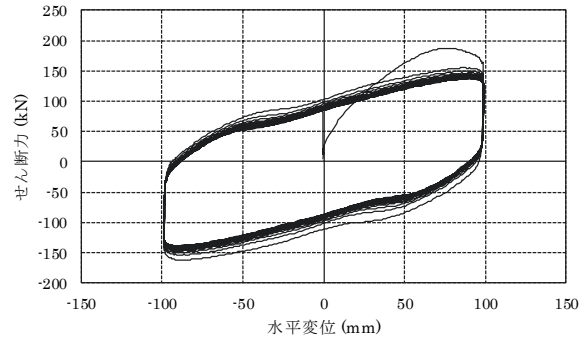
付図 1-5(11) 試験ケース 1-11 の物性値変化率



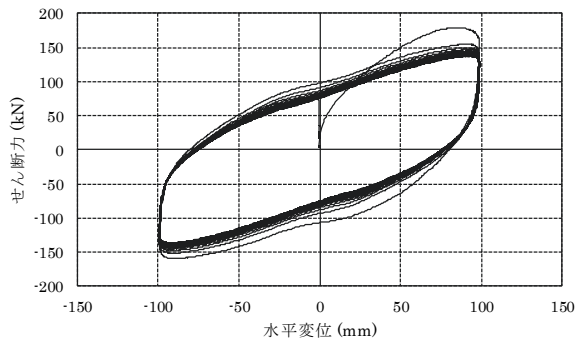
付図 1-5(12) 試験ケース 1-12 の物性値変化率



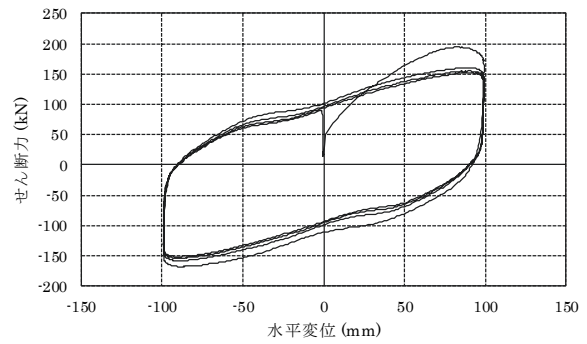
付図 1-6(1) 試験ケース 2-1 の履歴曲線



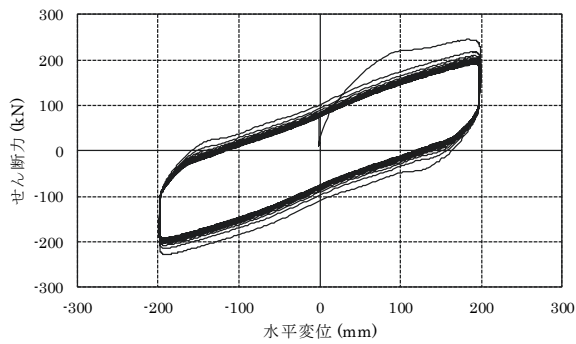
付図 1-6(2) 試験ケース 2-2 の履歴曲線



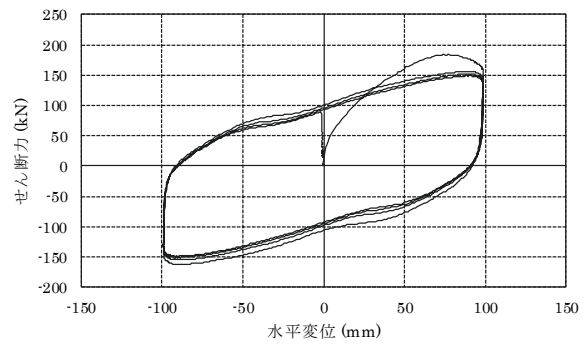
付図 1-6(3) 試験ケース 2-3 の履歴曲線



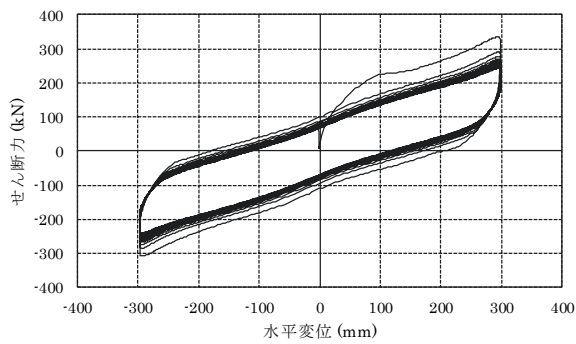
付図 1-6(4) 試験ケース 2-4 の履歴曲線



付図 1-6(5) 試験ケース 2-5 の履歴曲線

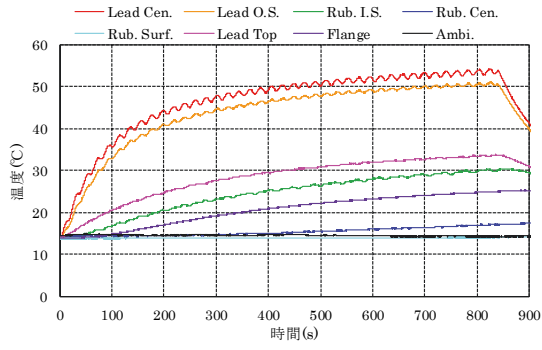


付図 1-6(6) 試験ケース 2-6 の履歴曲線

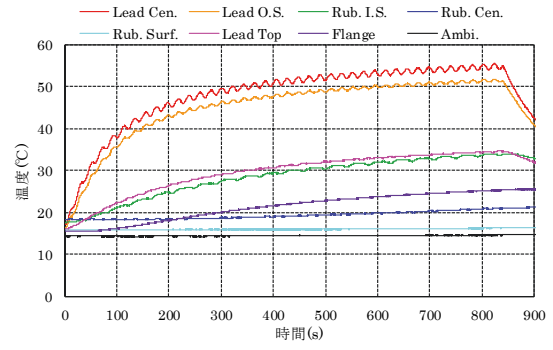


付図 1-6(7) 試験ケース 2-7 の履歴曲線

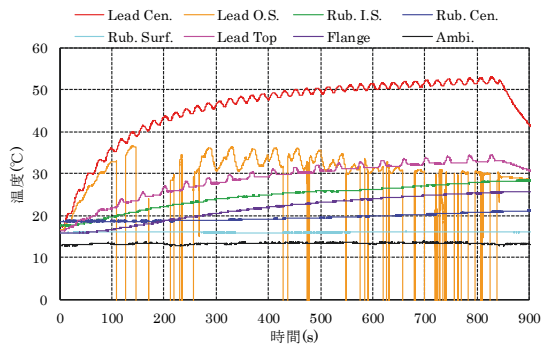




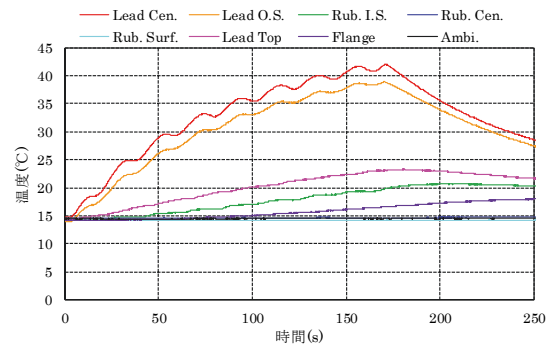
付図 1-7(1) 試験ケース 2-1 の温度変化



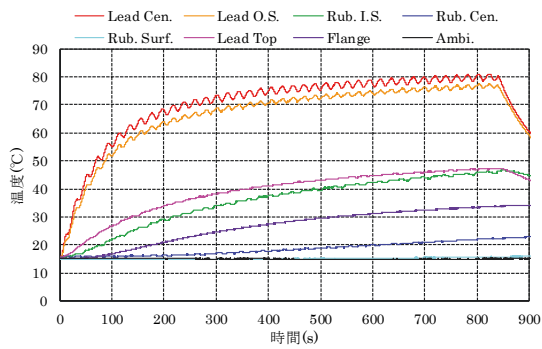
付図 1-7(2) 試験ケース 2-2 の温度変化



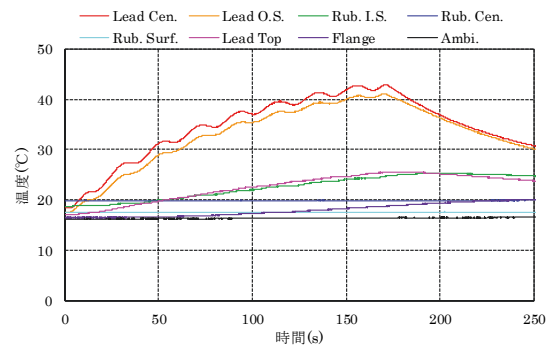
付図 1-7(3) 試験ケース 2-3 の温度変化



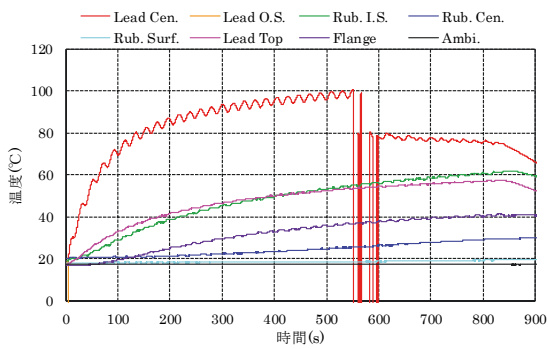
付図 1-7(4) 試験ケース 2-4 の温度変化



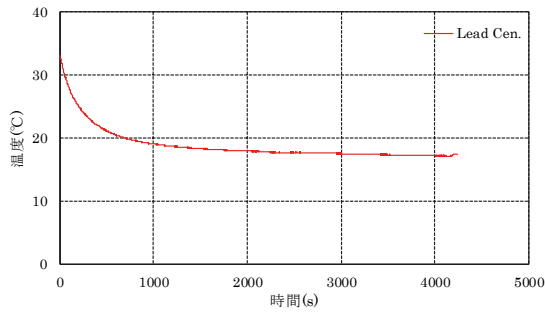
付図 1-7(5) 試験ケース 2-5 の温度変化



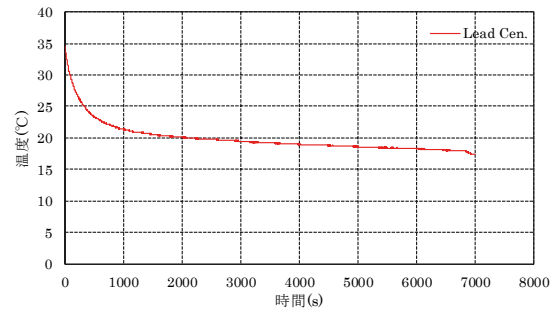
付図 1-7(6) 試験ケース 2-6 の温度変化



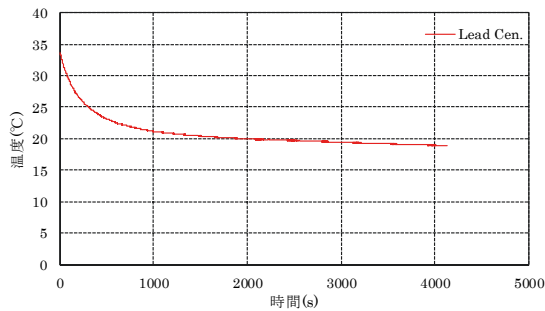
付図 1-7(7) 試験ケース 2-7 の温度変化



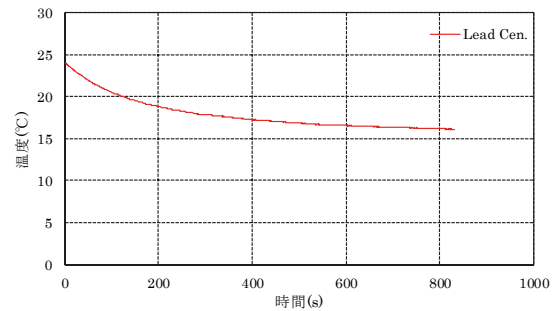
付図 1-8(1) 試験ケース 2-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



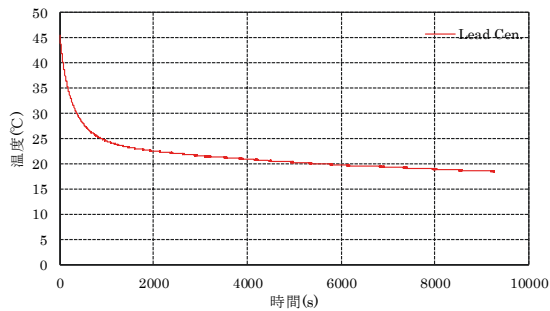
付図 1-8(2) 試験ケース 2-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



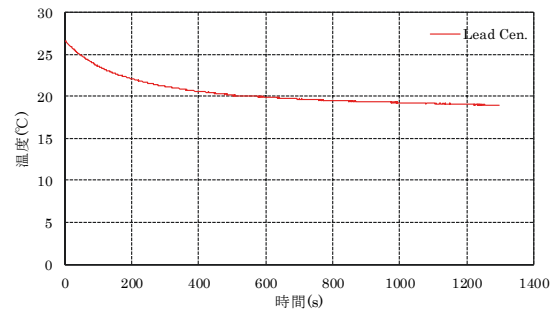
付図 1-8(3) 試験ケース 2-3 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



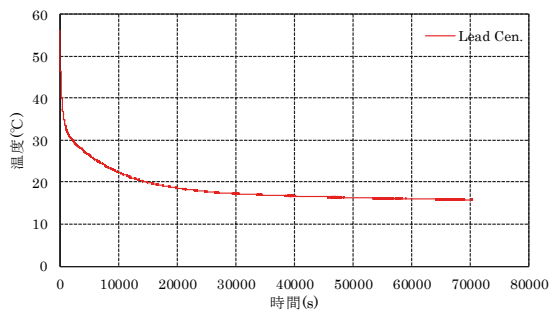
付図 1-8(4) 試験ケース 2-4 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



付図 1-8(5) 試験ケース 2-5 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

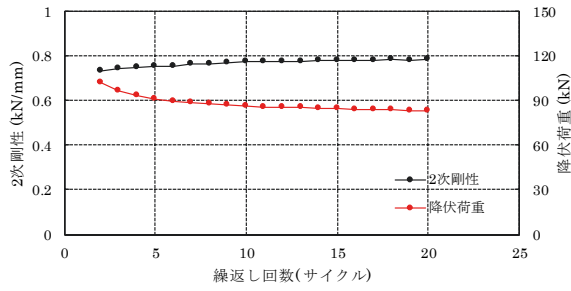


付図 1-8(6) 試験ケース 2-6 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

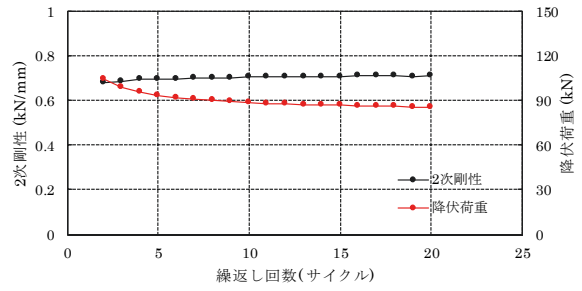


付図 1-8(7) 試験ケース 2-7 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

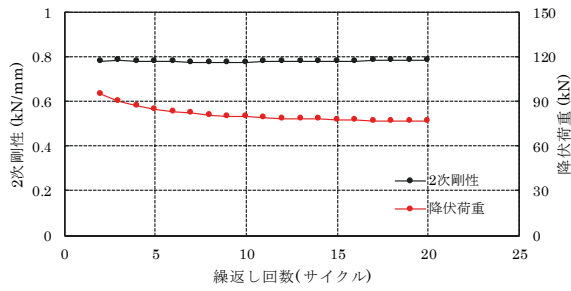
\* : 図 2-6 参照



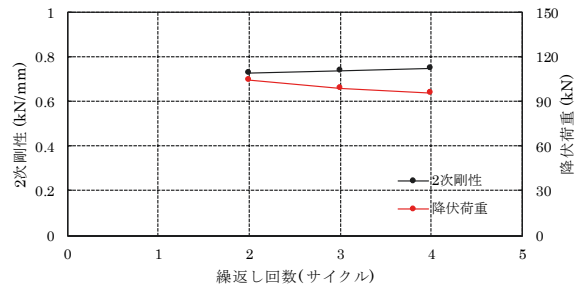
付図 1-9(1) 試験ケース 2-1 の物性値変化



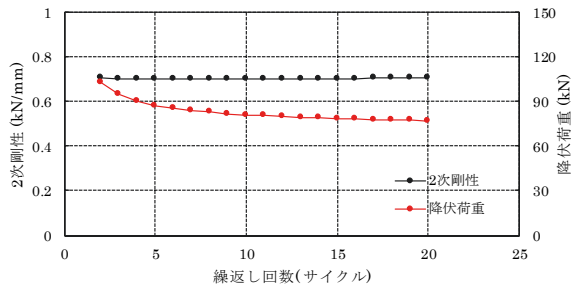
付図 1-9(2) 試験ケース 2-2 の物性値変化



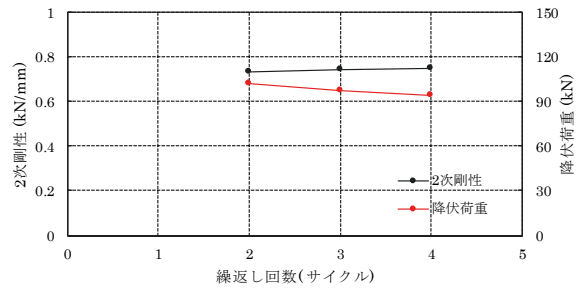
付図 1-9(3) 試験ケース 2-3 の物性値変化



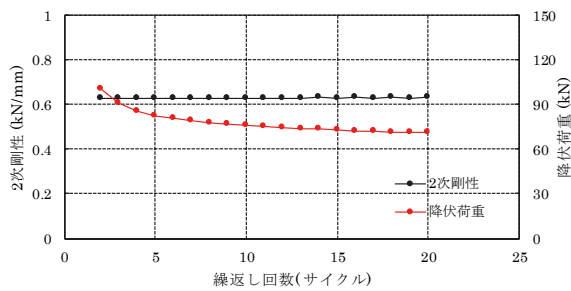
付図 1-9(4) 試験ケース 2-4 の物性値変化



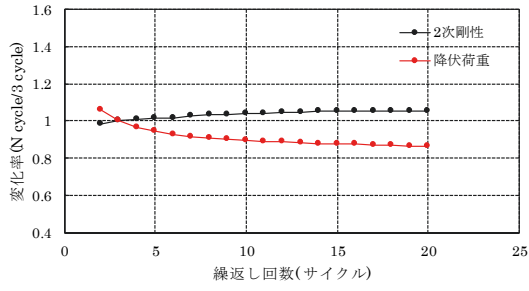
付図 1-9(5) 試験ケース 2-5 の物性値変化



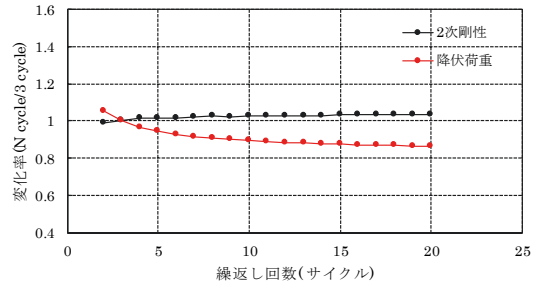
付図 1-9(6) 試験ケース 2-6 の物性値変化



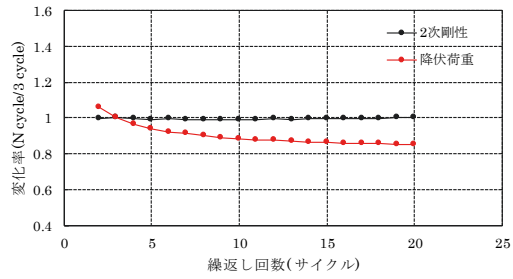
付図 1-9(7) 試験ケース 2-7 の物性値変化



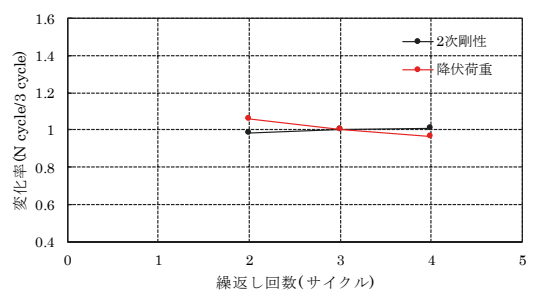
付図 1-10(1) 試験ケース 2-1 の物性値変化率



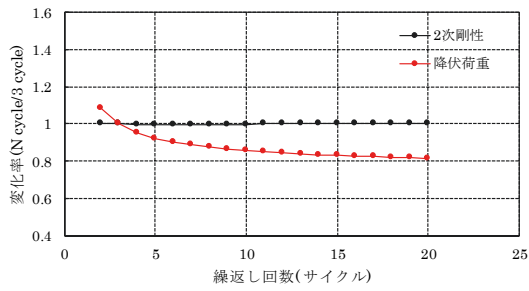
付図 1-10(2) 試験ケース 2-2 の物性値変化率



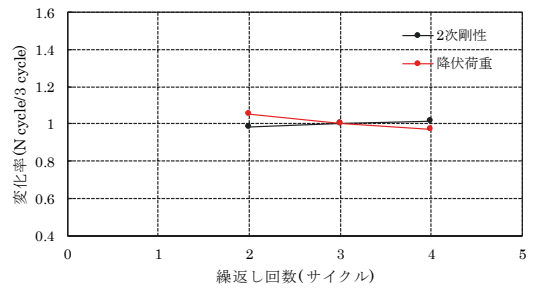
付図 1-10(3) 試験ケース 2-3 の物性値変化率



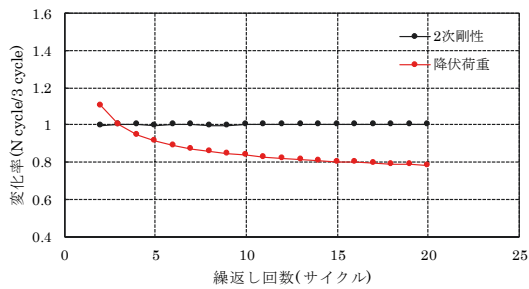
付図 1-10(4) 試験ケース 2-4 の物性値変化率



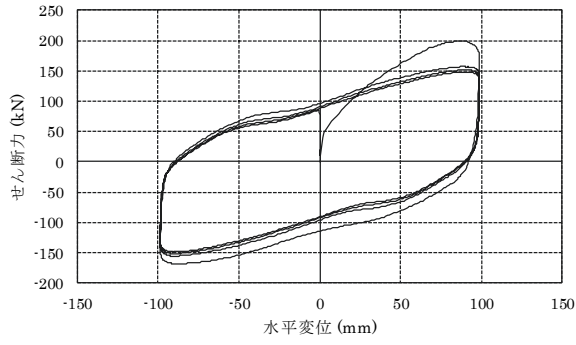
付図 1-10(5) 試験ケース 2-5 の物性値変化率



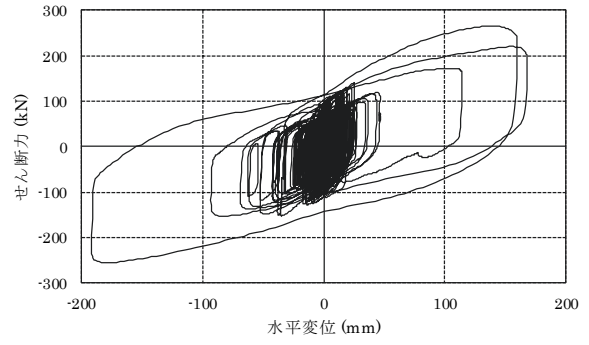
付図 1-10(6) 試験ケース 2-6 の物性値変化率



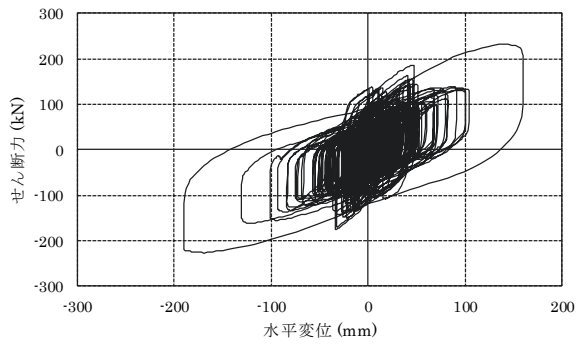
付図 1-10(7) 試験ケース 2-7 の物性値変化率



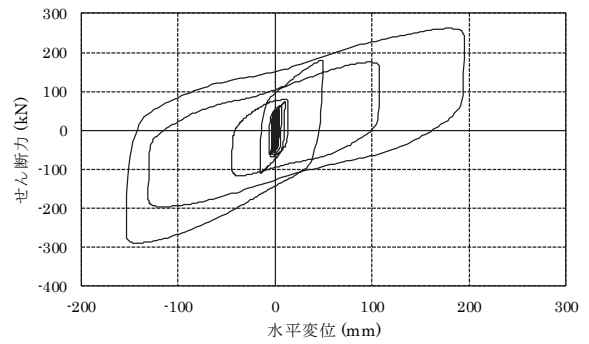
付図 1-11(1) 試験ケース 3-1 の履歴曲線



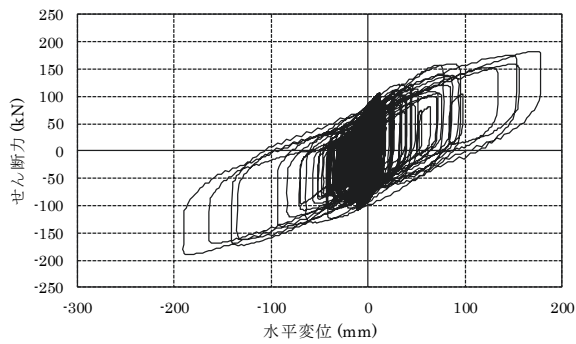
付図 1-11(2) 試験ケース 3-2 の履歴曲線



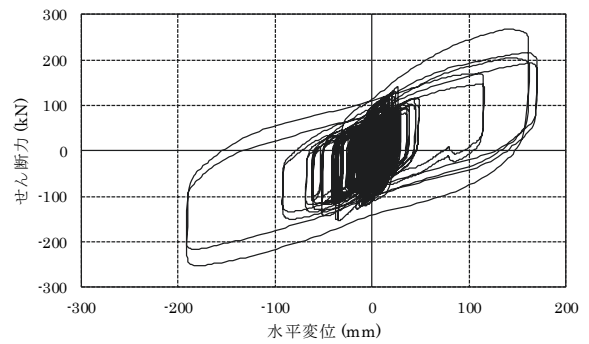
付図 1-11(3) 試験ケース 3-3 の履歴曲線



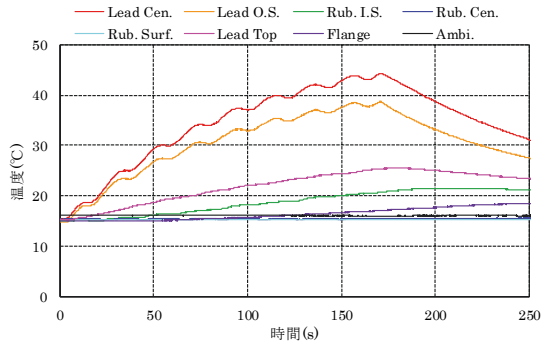
付図 1-11(4) 試験ケース 3-4 の履歴曲線



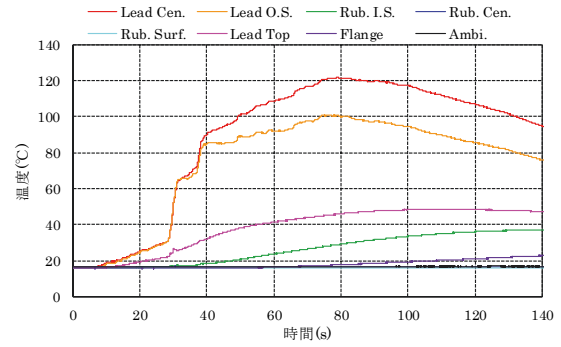
付図 1-11(5) 試験ケース 3-5 の履歴曲線



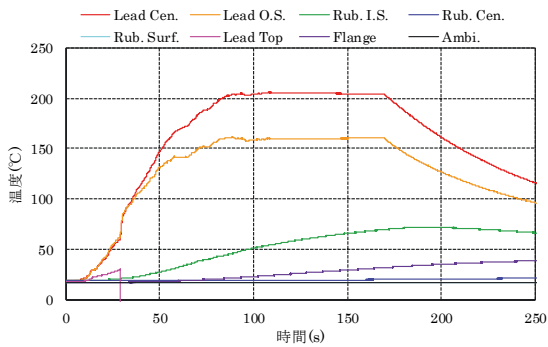
付図 1-11(6) 試験ケース 3-6 の履歴曲線



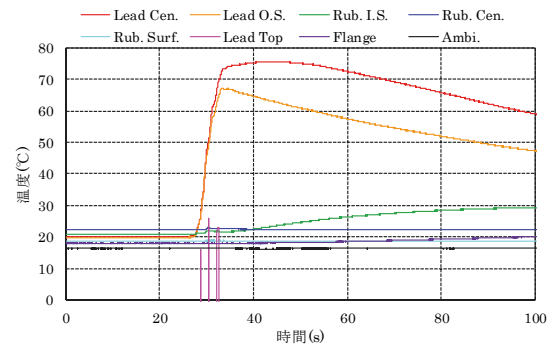
付図 1-12(1) 試験ケース 3-1 の温度変化



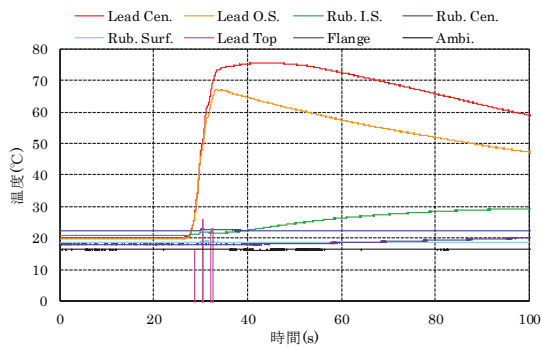
付図 1-12(2) 試験ケース 3-2 の温度変化



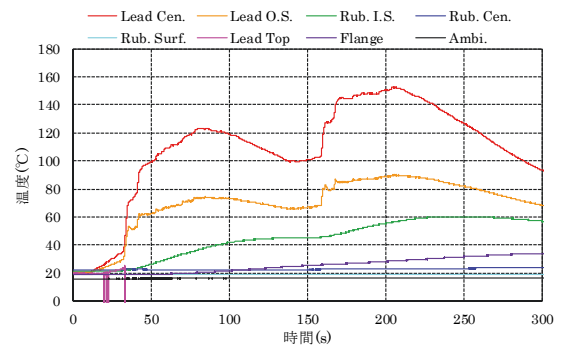
付図 1-12(3) 試験ケース 3-3 の温度変化



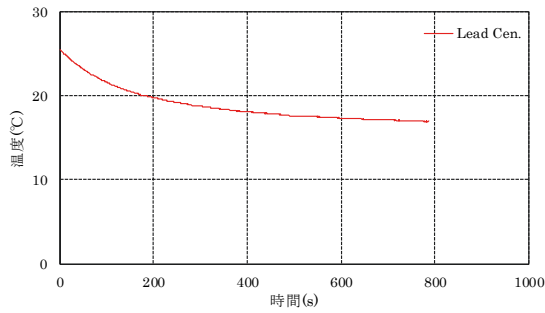
付図 1-12(4) 試験ケース 3-4 の温度変化



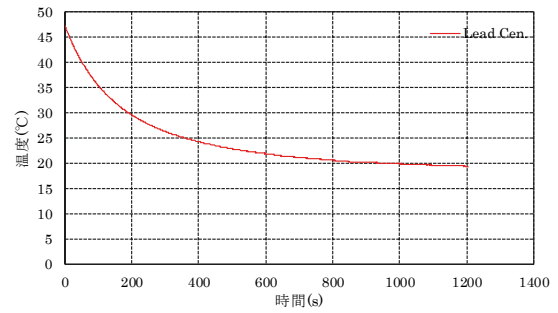
付図 1-12(5) 試験ケース 3-5 の温度変化



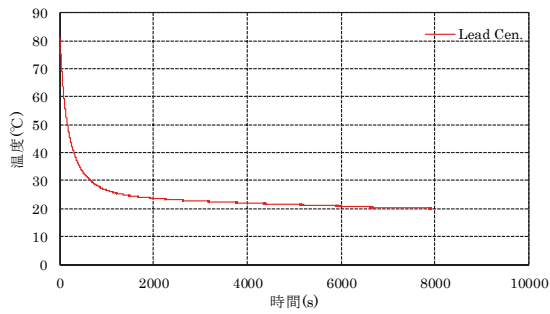
付図 1-12(6) 試験ケース 3-6 の温度変化



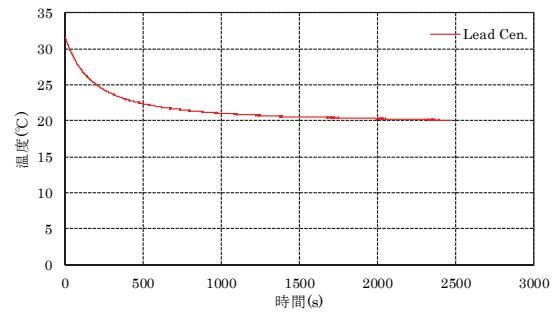
付図 1-13(1) 試験ケース 3-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



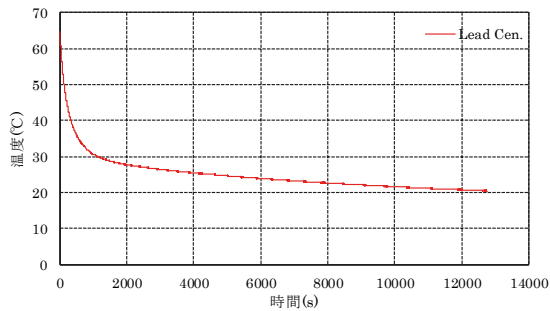
付図 1-13(2) 試験ケース 3-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



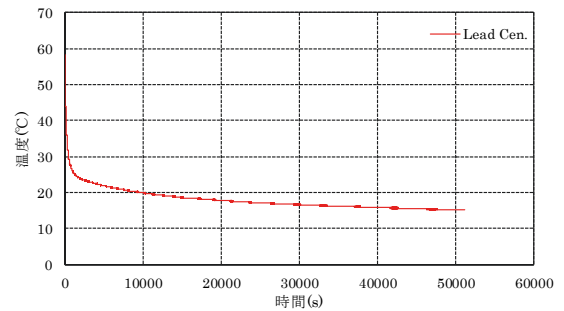
付図 1-13(3) 試験ケース 3-3 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



付図 1-13(4) 試験ケース 3-4 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

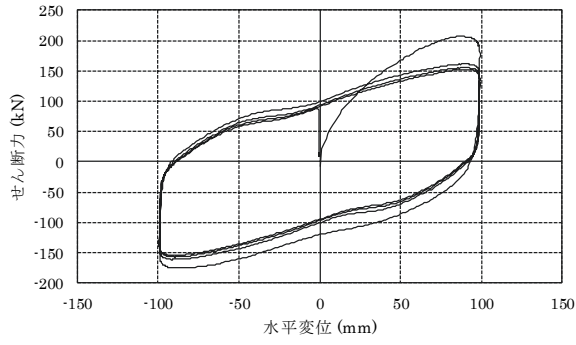


付図 1-13(5) 試験ケース 3-5 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

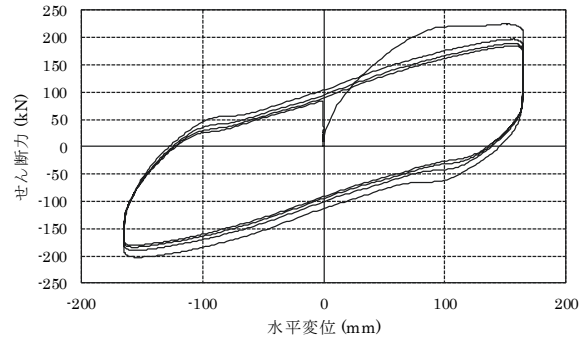


付図 1-13(6) 試験ケース 3-6 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

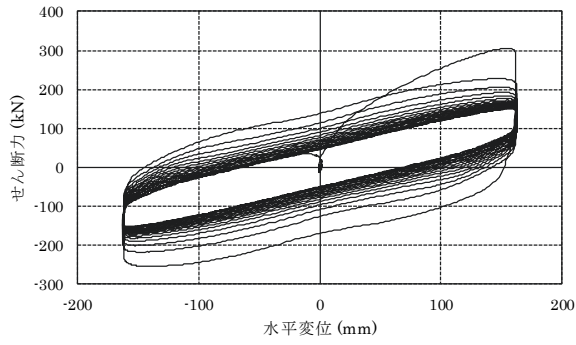
\* : 図 2-6 参照



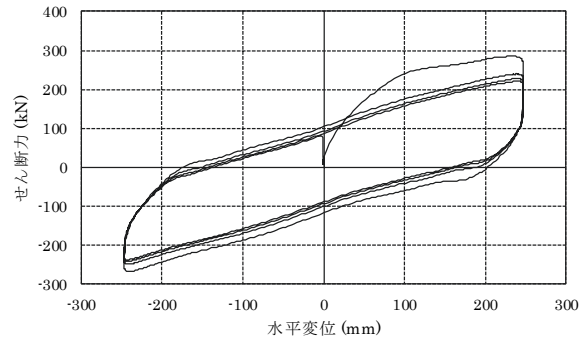
付図 1-14(1) 試験ケース 4-1 の履歴曲線



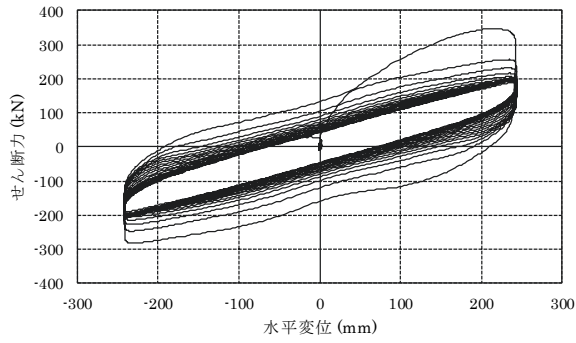
付図 1-14(2) 試験ケース 4-2 の履歴曲線



付図 1-14(3) 試験ケース 4-3 の履歴曲線

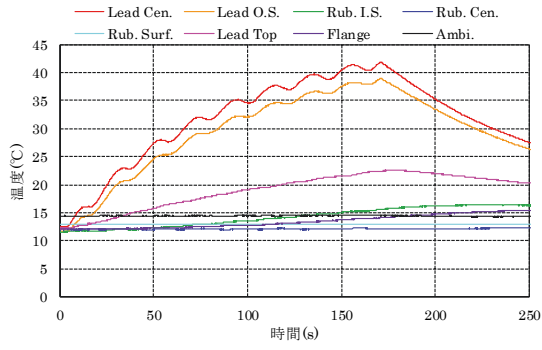


付図 1-14(4) 試験ケース 4-4 の履歴曲線

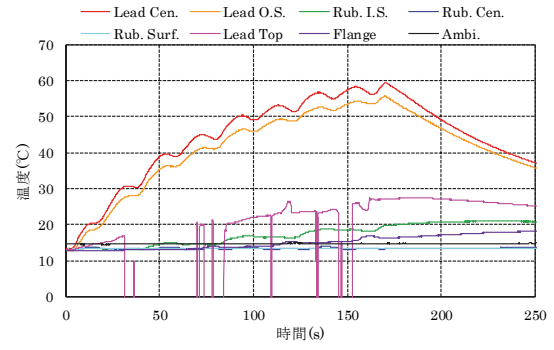


付図 1-14(5) 試験ケース 4-5 の履歴曲線

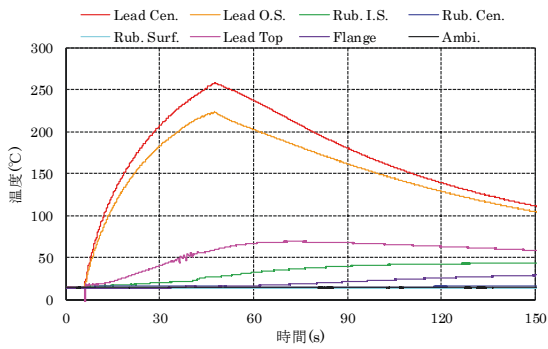




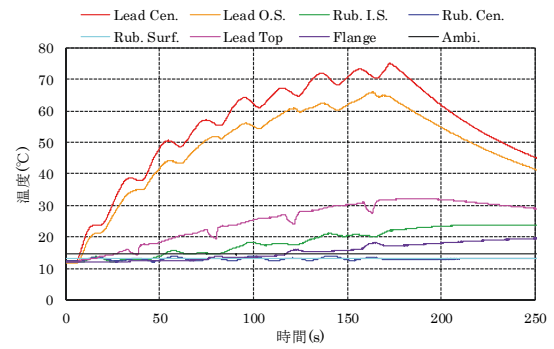
付図 1-15(1) 試験ケース 4-1 の温度変化



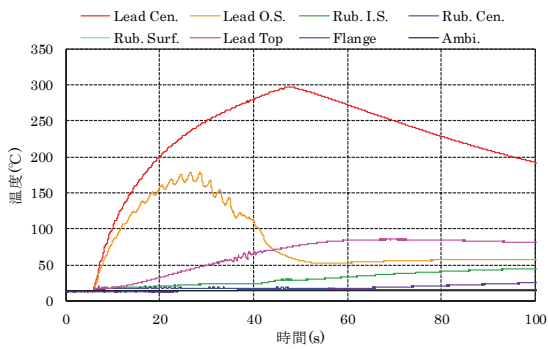
付図 1-15(2) 試験ケース 4-2 の温度変化



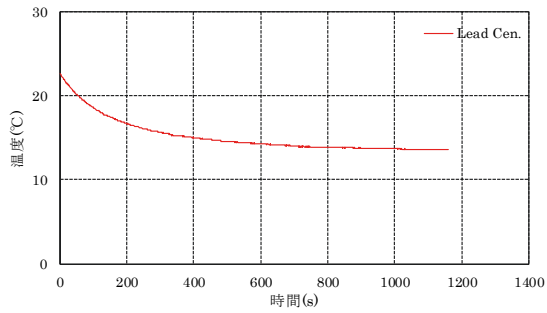
付図 1-15(3) 試験ケース 4-3 の温度変化



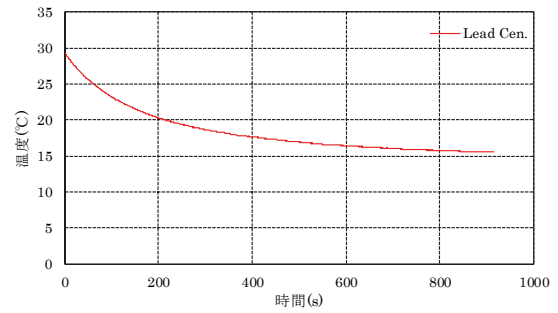
付図 1-15(3) 試験ケース 4-4 の温度変化



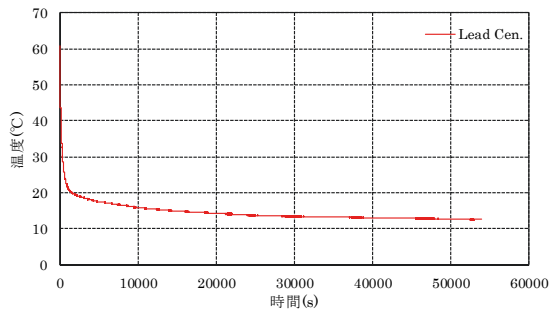
付図 1-15(4) 試験ケース 4-5 の温度変化



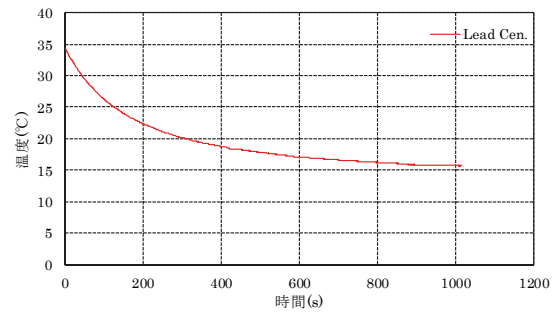
付図 1-16(1) 試験ケース 4-1 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



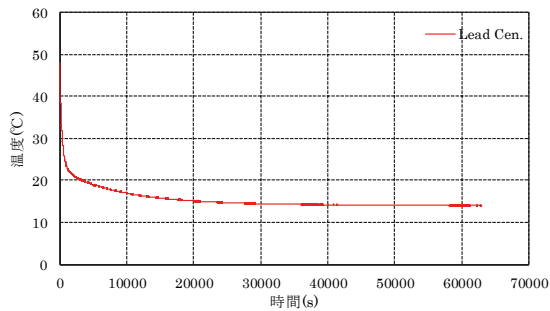
付図 1-16(2) 試験ケース 4-2 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)



付図 1-16(3) 試験ケース 4-3 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

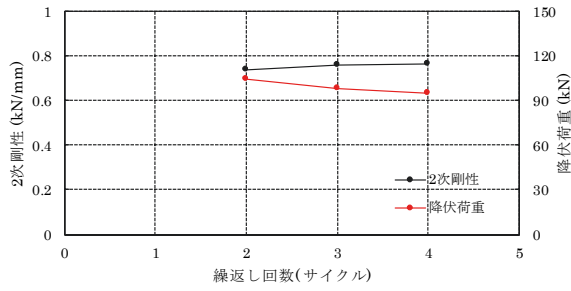


付図 1-16(4) 試験ケース 4-4 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

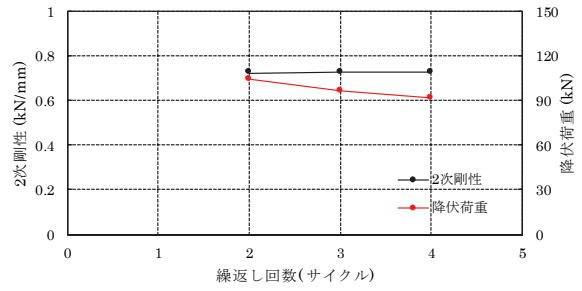


付図 1-16(5) 試験ケース 4-5 の温度変化  
(加力終了後 1.0Hz サンプルング時\*)

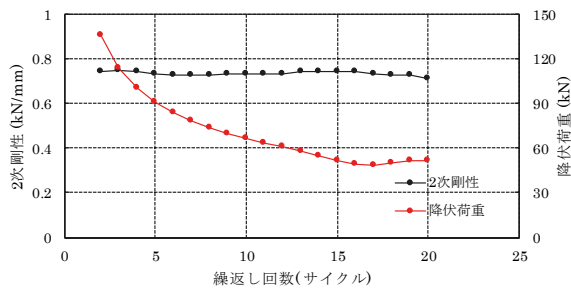
\* : 図 2-6 参照



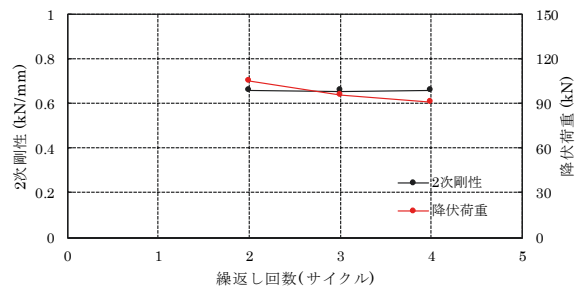
付図 1-17(1) 試験ケース 4-1 の物性値変化



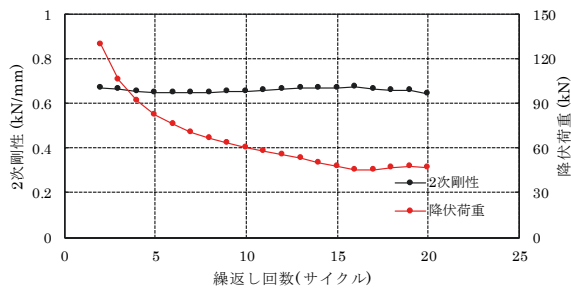
付図 1-17(2) 試験ケース 4-2 の物性値変化



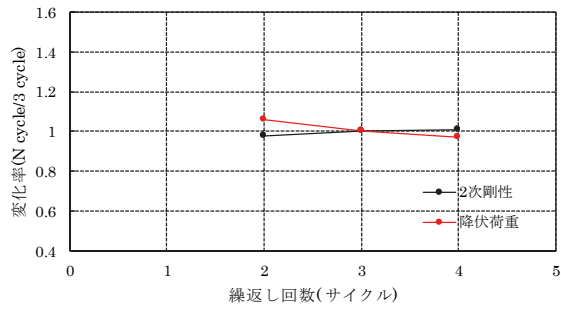
付図 1-17(3) 試験ケース 4-3 の物性値変化



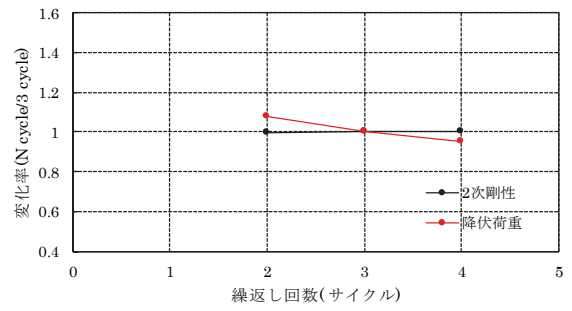
付図 1-17(4) 試験ケース 4-4 の物性値変化



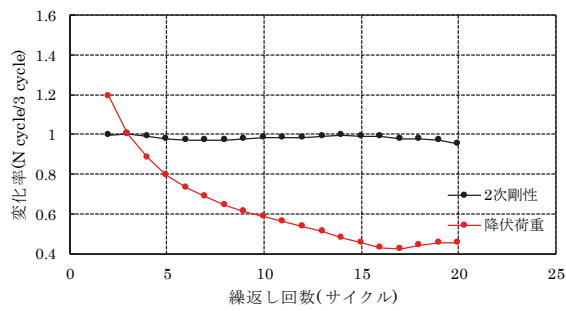
付図 1-17(5) 試験ケース 4-5 の物性値変化



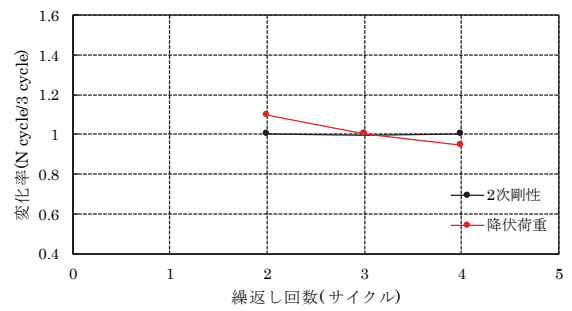
付図 1-18(1) 試験ケース 4-1 の物性値変化率



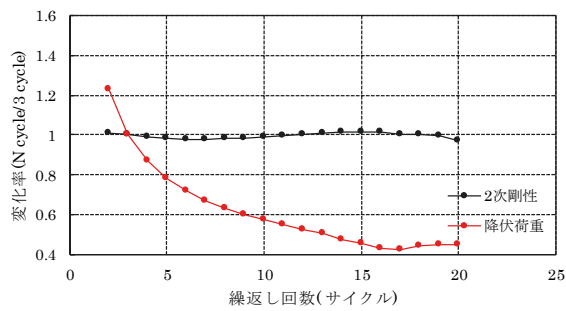
付図 1-18(2) 試験ケース 4-2 の物性値変化率



付図 1-18(3) 試験ケース 4-3 の物性値変化率



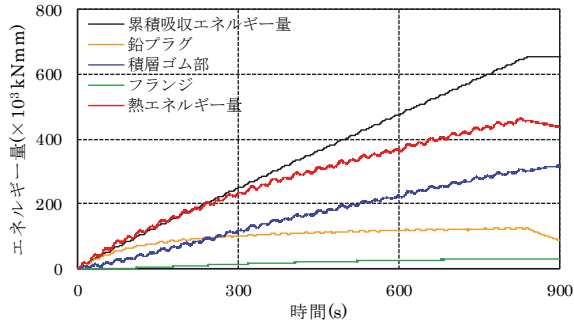
付図 1-18(4) 試験ケース 4-4 の物性値変化率



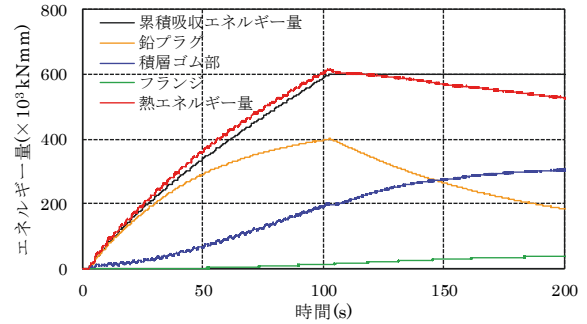
付図 1-18(5) 試験ケース 4-5 の物性値変化率

付録 2 熱エネルギー量と累積吸収エネルギー量の比較

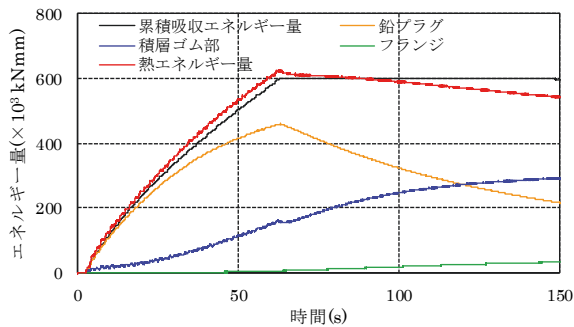
繰返し加力試験の温度記録から評価した熱エネルギー量と履歴曲線から評価した累積吸収エネルギー量を比較する。熱エネルギー量の評価方法は 2.4.2 項 (2) に示している。なお、試験ケース 3 および試験ケース 4 の繰返し加力試験前に実施した基本特性試験ケースは、保管期間中における力学特性変化の有無を確認する目的で実施した試験であるため、熱エネルギー評価は実施していない。



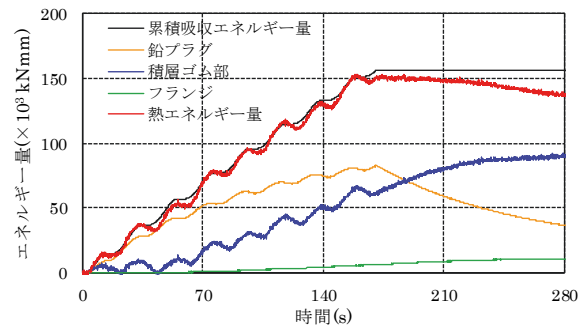
付図 2-1(1) 試験ケース 1-1



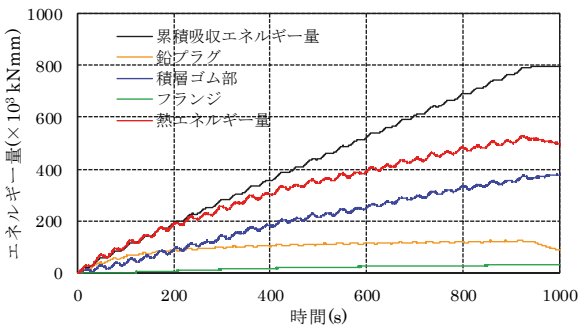
付図 2-1(2) 試験ケース 1-2



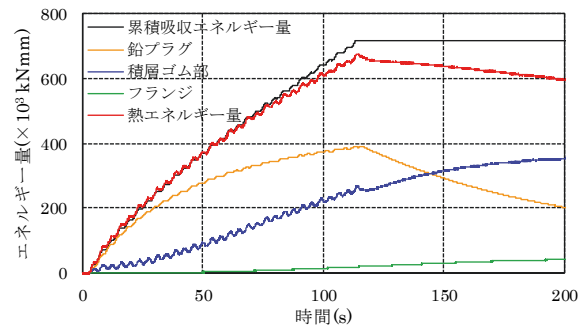
付図 2-1(3) 試験ケース 1-3



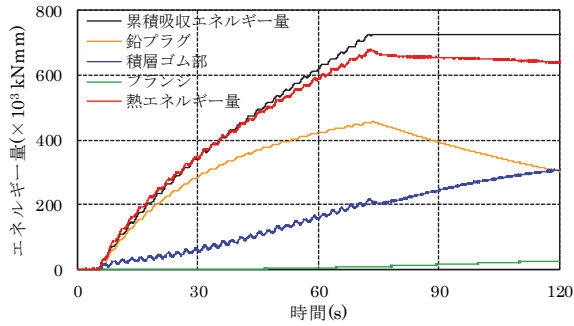
付図 2-1(4) 試験ケース 1-4



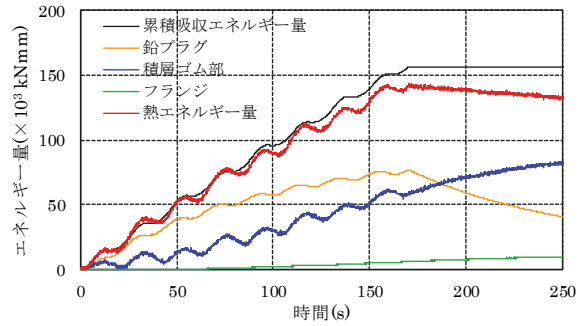
付図 2-1(5) 試験ケース 1-5



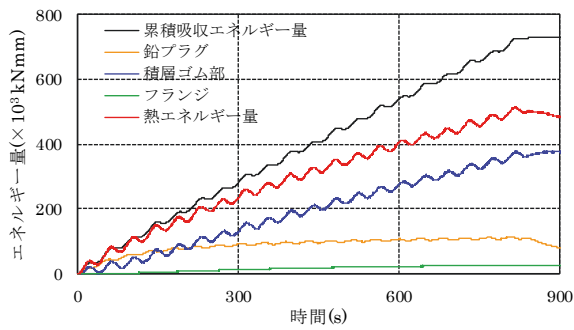
付図 2-1(6) 試験ケース 1-6



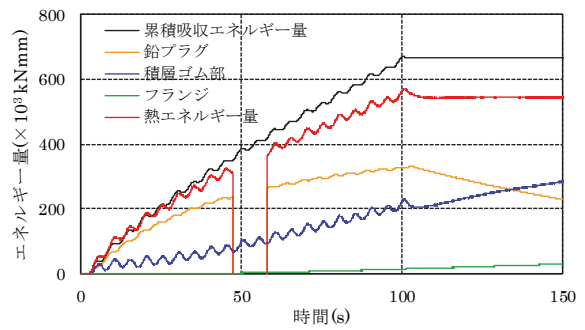
付図 2-1(7) 試験ケース 1-7



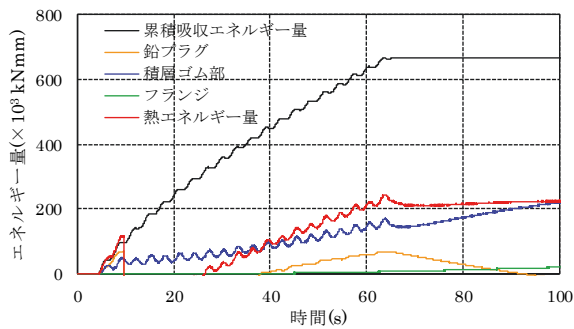
付図 2-1(8) 試験ケース 1-8



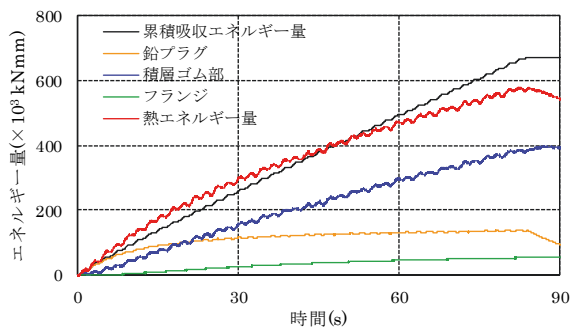
付図 2-1(9) 試験ケース 1-9



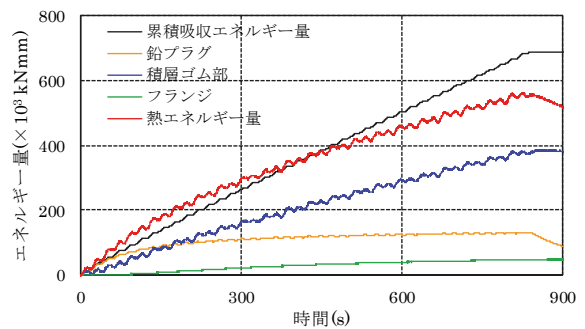
付図 2-1(10) 試験ケース 1-10



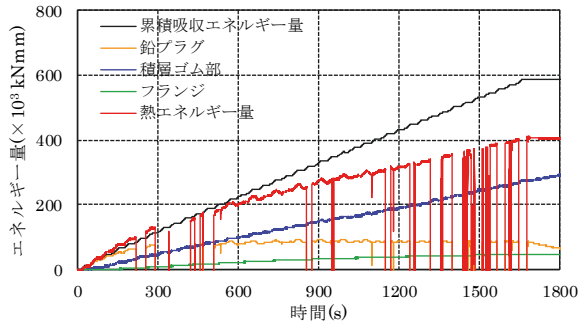
付図 2-1(11) 試験ケース 1-11



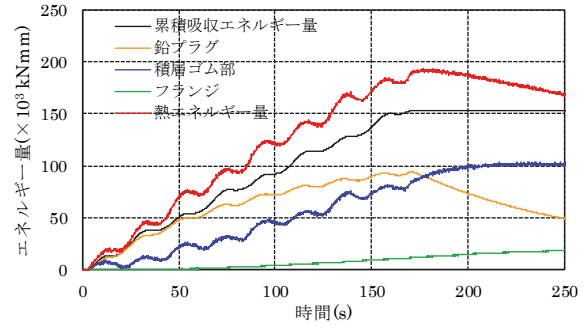
付図 2-2(1) 試験ケース 2-1



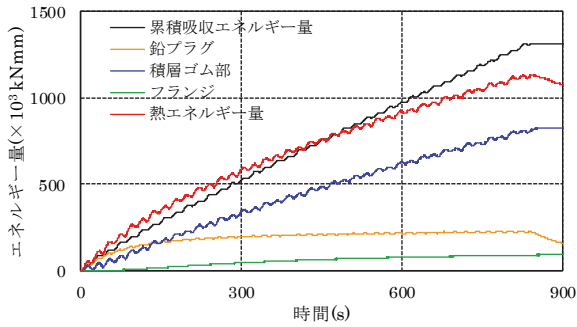
付図 2-2(2) 試験ケース 2-2



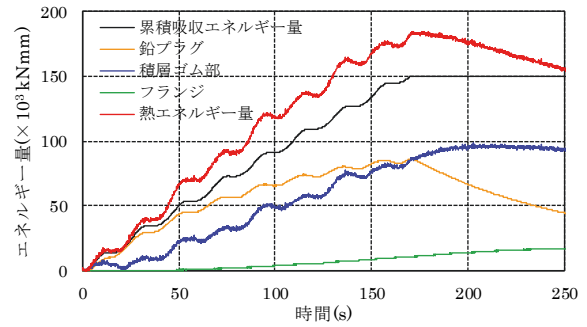
付図 2-2(3) 試験ケース 2-3



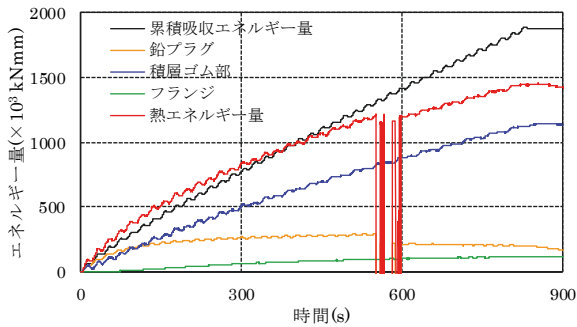
付図 2-2(4) 試験ケース 2-4



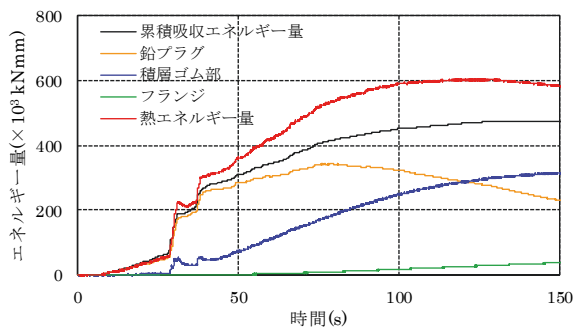
付図 2-2(5) 試験ケース 2-5



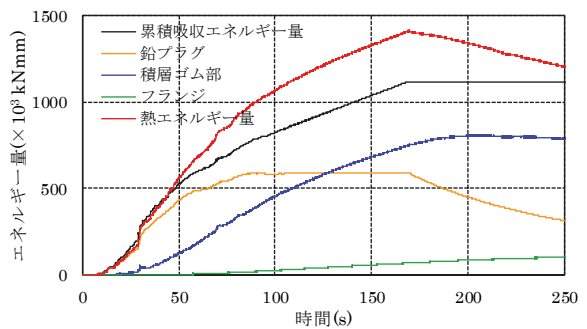
付図 2-2(6) 試験ケース 2-6



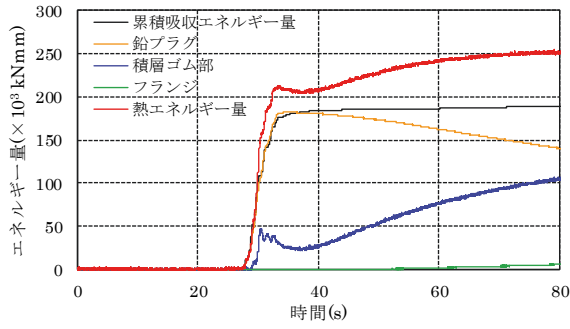
付図 2-2(7) 試験ケース 2-7



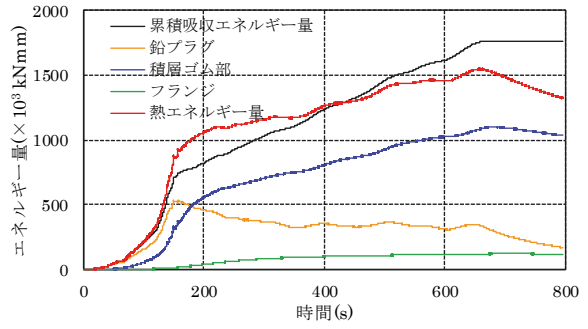
付図 2-3(1) 試験ケース 3-2



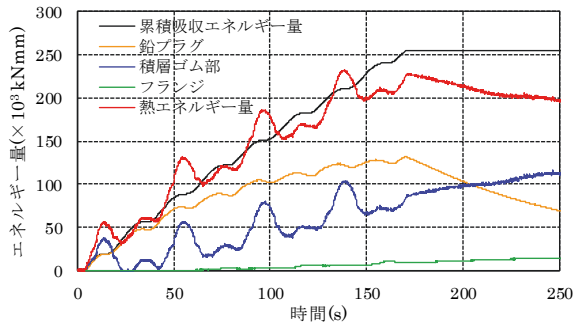
付図 2-3(2) 試験ケース 3-3



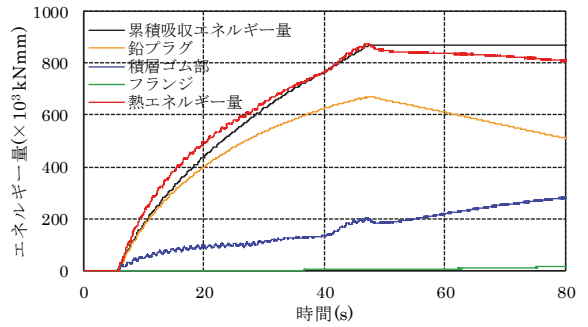
付図 2-3(3) 試験ケース 3-4



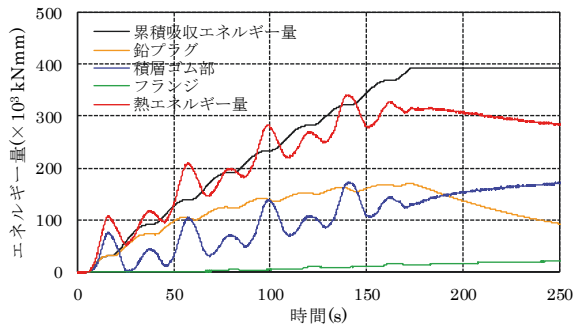
付図 2-3(4) 試験ケース 3-5



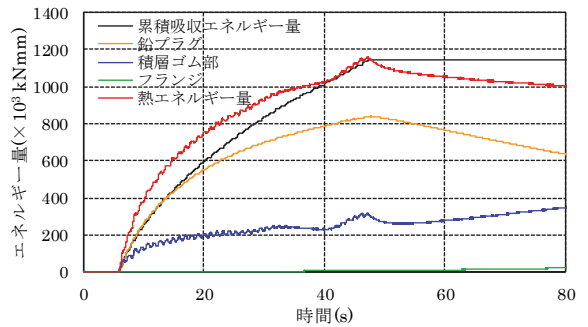
付図 2-4(1) 試験ケース 4-2



付図 2-4(2) 試験ケース 4-3



付図 2-4(3) 試験ケース 4-4

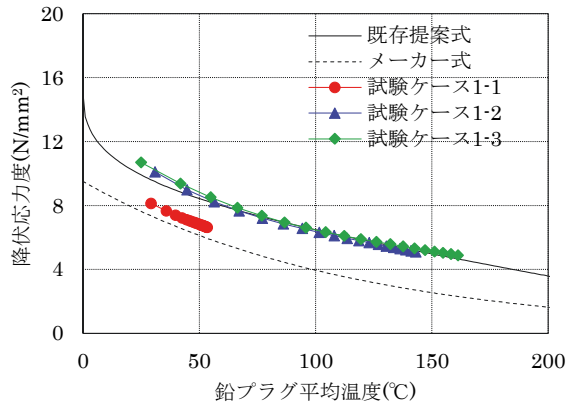


付図 2-4(4) 試験ケース 4-5

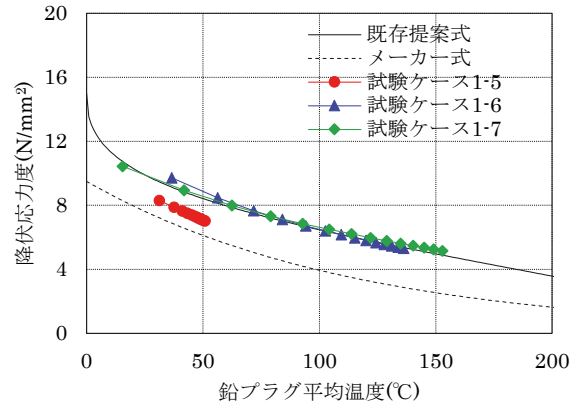


付録3 鉛プラグの降伏応力度－温度関係

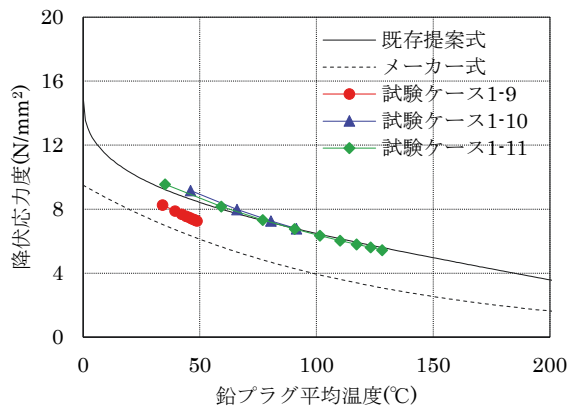
正弦波繰返し加力試験結果の内、鉛プラグの降伏応力度－温度関係を示す。図中には既存提案式（式2-5）とメーカー式（式2-1）を併記している。なお、基本特性試験は4サイクルのみであり、繰返し依存性の確認が困難であるため除外した。



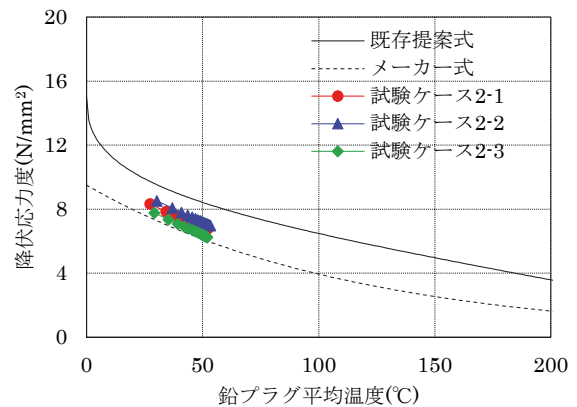
付図 3-1(1) 試験ケース 1 ( $\gamma=100\%$ )



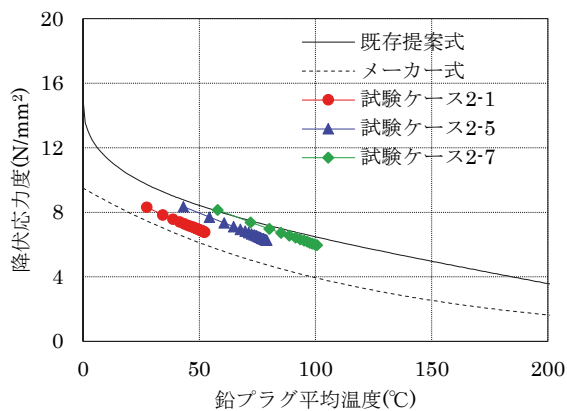
付図 3-1(2) 試験ケース 1 ( $\gamma=150\%$ )



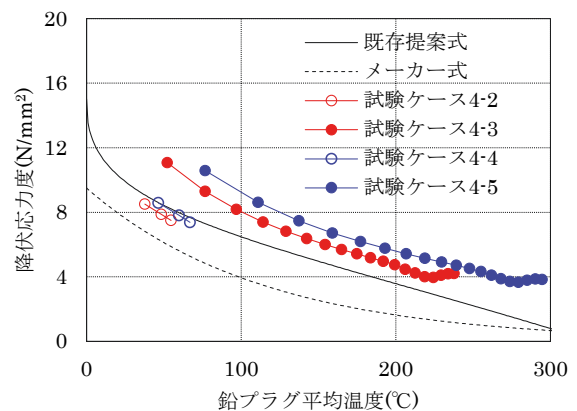
付図 3-1(3) 試験ケース 1 ( $\gamma=200\%$ )



付図 3-2(1) 試験ケース 2  
(面圧-15~0N/mm<sup>2</sup>)



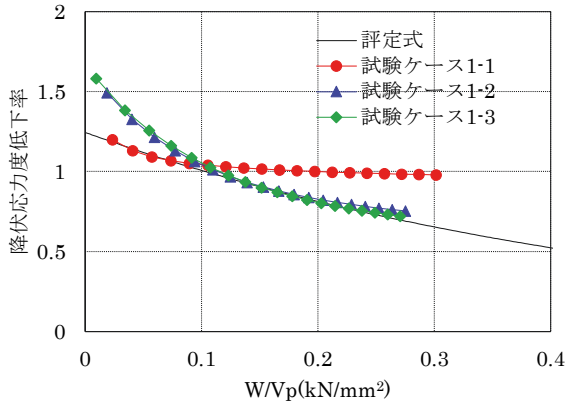
付図 3-2(2) 試験ケース 2  
( $\gamma=100\sim300\%$ )



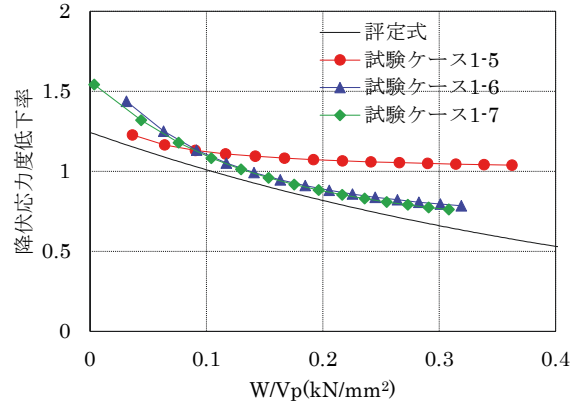
付図 3-3 試験ケース 4

付録 4 鉛プラグの降伏応力度低下率－単位体積吸収エネルギー量関係

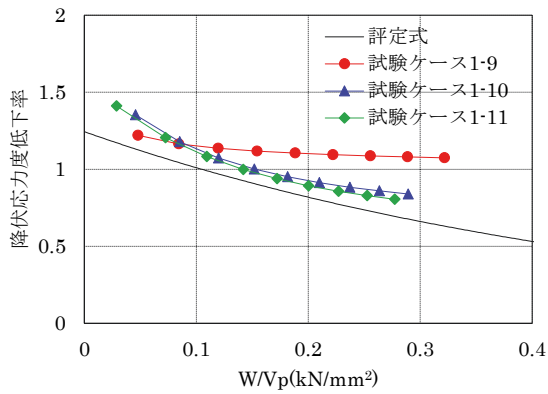
正弦波繰返し加力試験結果の内、鉛プラグの降伏応力度－単位体積吸収エネルギー量関係を示す。図中には評定式（式 2-8）を併記している。なお、基本特性試験は 4 サイクルのみであり、繰返し依存性の確認が困難であるため除外した。



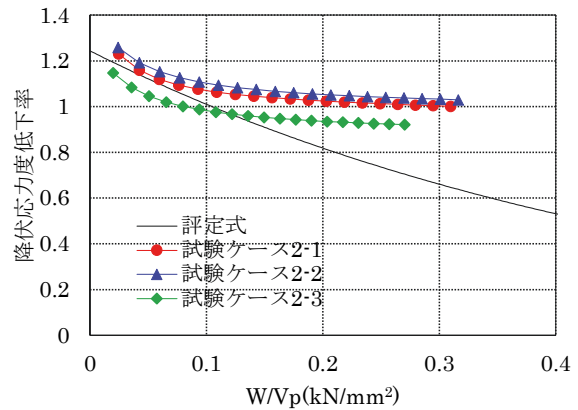
付図 4-1(1) 試験ケース 1 ( $\gamma=100\%$ )



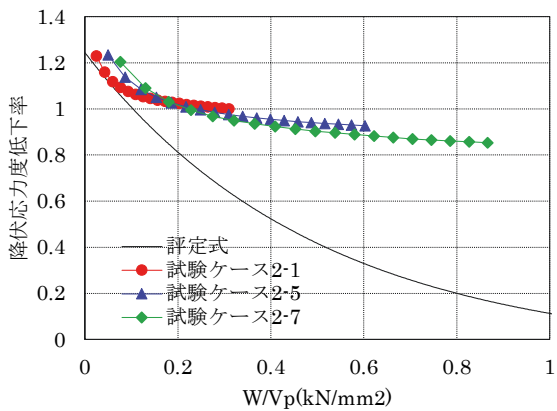
付図 4-1(2) 試験ケース 1 ( $\gamma=150\%$ )



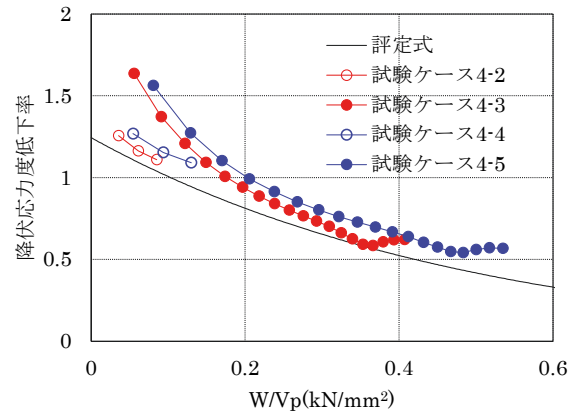
付図 4-1(3) 試験ケース 1 ( $\gamma=200\%$ )



付図 4-2(1) 試験ケース 2  
(面圧-15~0N/mm²)



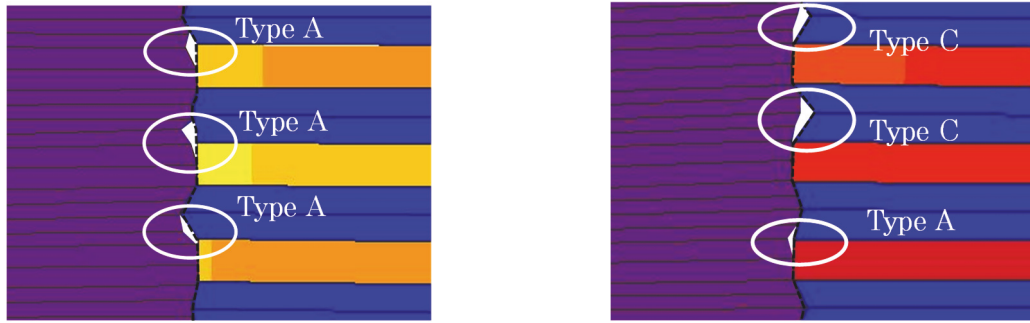
付図 4-2(2) 試験ケース 2  
( $\gamma=100\sim300\%$ )



付図 4-3 試験ケース 4

付録 5 各面圧レベルの接触状態

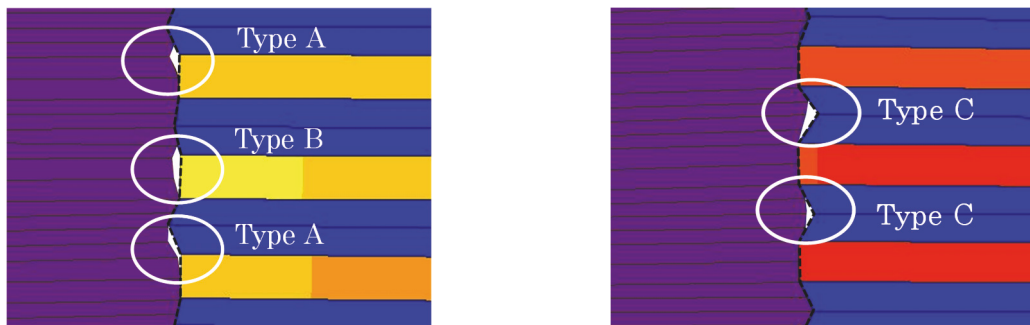
接触状態の面圧依存性を検討した接触解析結果の内、各面圧レベルの接触状態を示す。接触状態は、負側加力時のせん断ひずみ $\gamma=0\%$ およびせん断ひずみ $\gamma=50\%$ とし、切断面は加力方向、加力 $45^\circ$ 方向および加力直交方向とする。面圧 $-15.0\text{N/mm}^2$ 時はせん断ひずみ $\gamma=50\%$ 到達前に解が不安定となり、接触状態が得られていない。なお、図中には、5章に示す非接触分類を併記している。



(a) 上部断面

(b) 下部断面

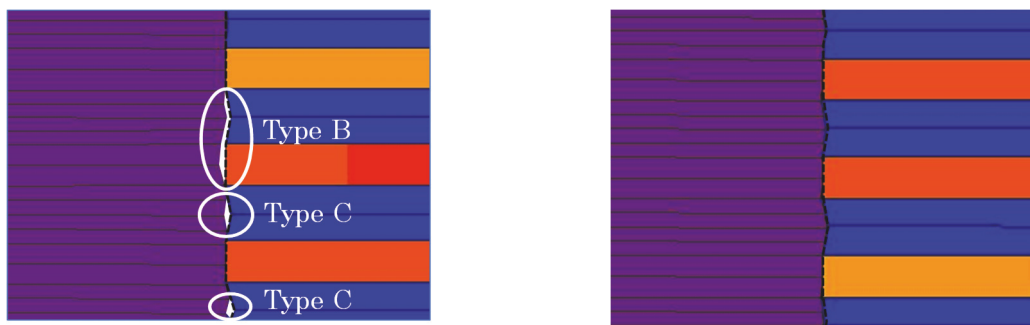
付図 5-1(1) せん断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

(b) 下部断面

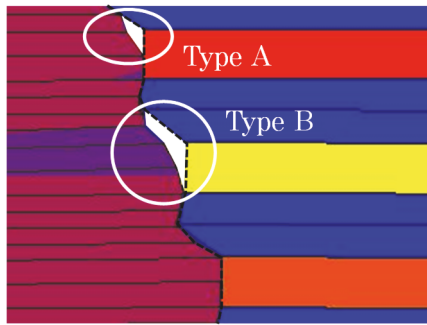
付図 5-1(2) せん断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )



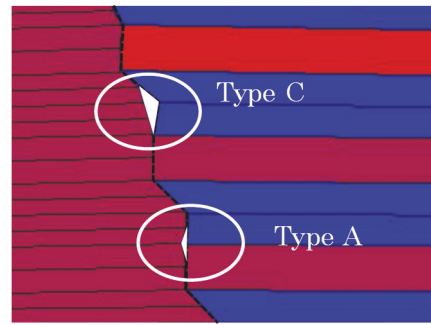
(a) 上部断面

(b) 下部断面

付図 5-1(3) せん断ひずみ 0%時における加力直交方向の接触状態 (面圧 $-5.0\text{N/mm}^2$ )

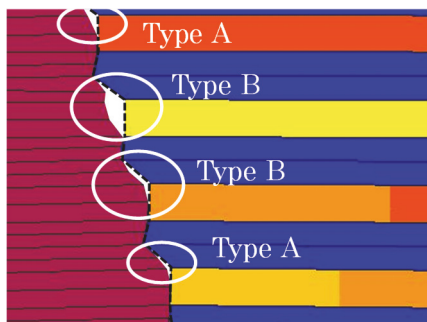


(a) 上部断面

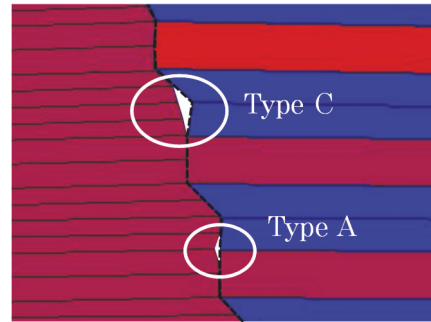


(b) 下部断面

付図 5-1(4) せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)

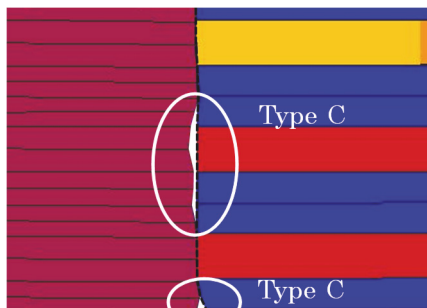


(a) 上部断面

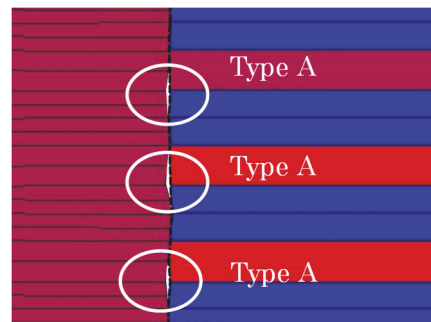


(b) 下部断面

付図 5-1(5) せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)



(a) 上部断面

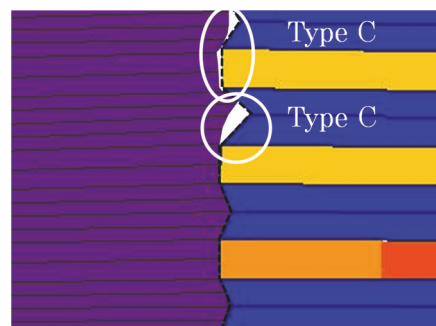


(b) 下部断面

付図 5-1(6) せん断ひずみ 50%時における加力直交方向の接触状態 (面圧-5.0N/mm<sup>2</sup>)

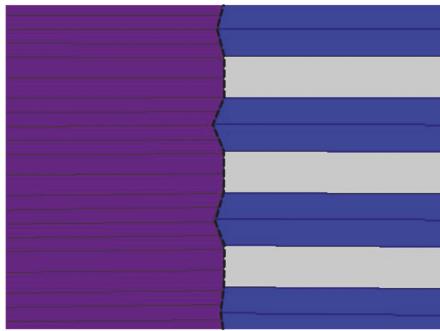


(a) 上部断面

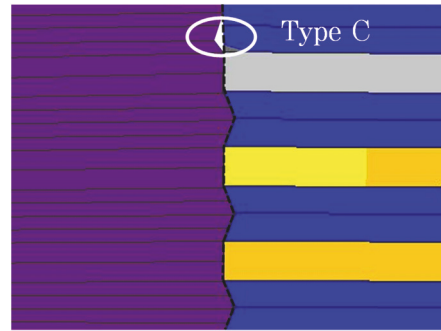


(b) 下部断面

付図 5-2(1) せん断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態 (面圧-7.5N/mm<sup>2</sup>)

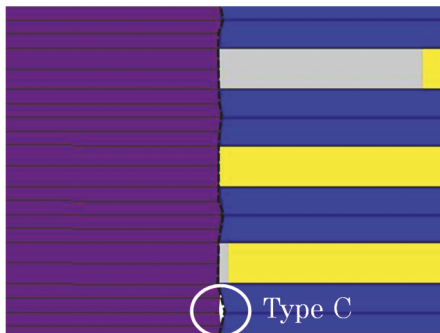


(a) 上部断面

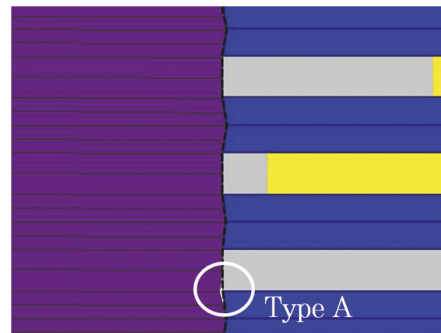


(b) 下部断面

付図 5-2(2) せん断ひずみ 0%時における加力  $45^\circ$  方向の接触状態 (面圧  $-7.5\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

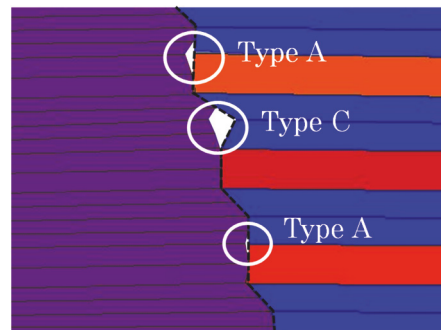


(b) 下部断面

付図 5-2(3) せん断ひずみ 0%時における加力直交方向の接触状態 (面圧  $-7.5\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

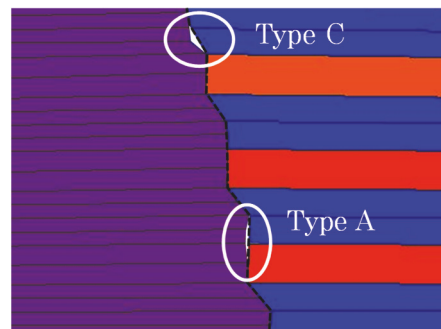


(b) 下部断面

付図 5-2(4) せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧  $-7.5\text{N/mm}^2$ )

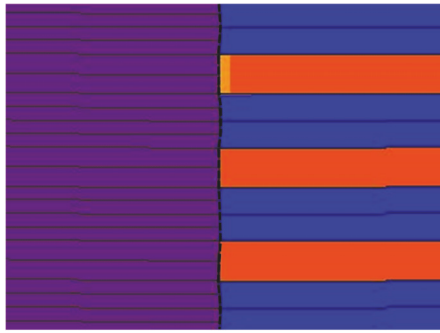


(a) 上部断面

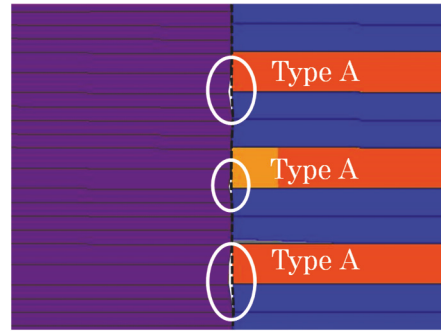


(b) 下部断面

付図 5-2(5) せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧  $-7.5\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

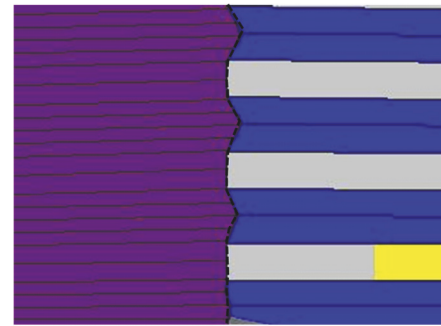


(b) 下部断面

付図 5-2(6) せん断ひずみ 50%時における加力直交方向の接触状態 (面圧 $-7.5\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

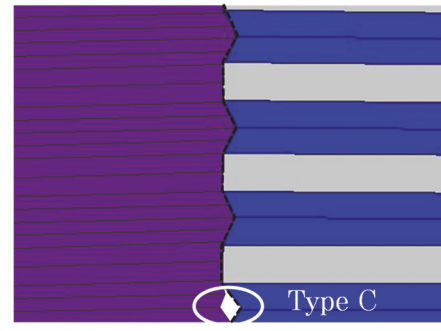


(b) 下部断面

付図 5-3(1) せん断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ )

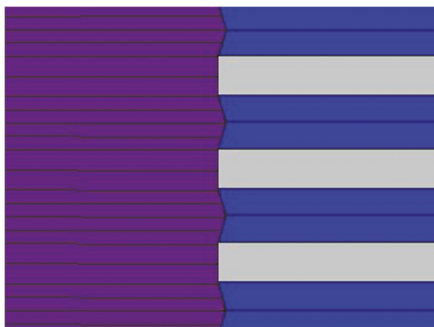


(a) 上部断面

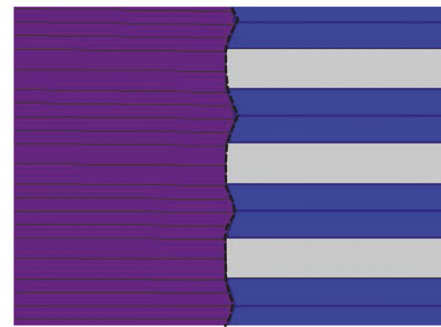


(b) 下部断面

付図 5-3(2) せん断ひずみ 0%時における加力 $45^\circ$ 方向の接触状態 (面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ )

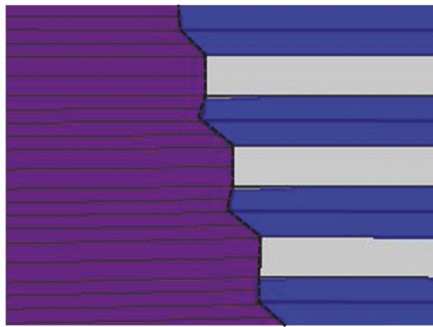


(a) 上部断面

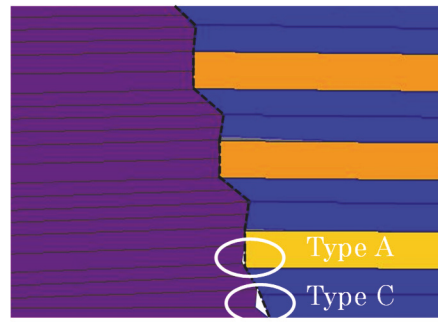


(b) 下部断面

付図 5-3(3) せん断ひずみ 0%時における加力直交方向の接触状態 (面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

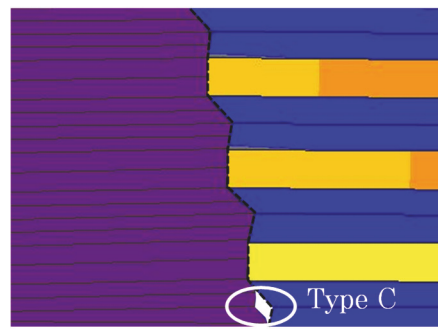


(b) 下部断面

付図 5-3(4) せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ )

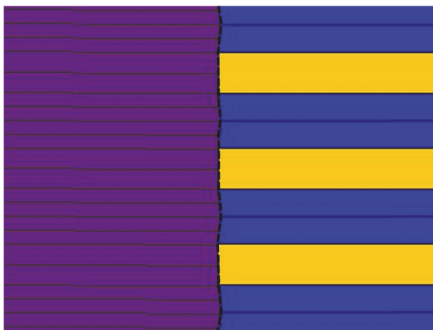


(a) 上部断面

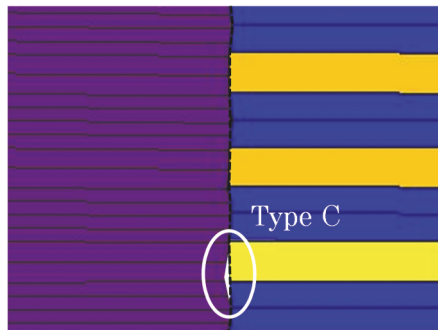


(b) 下部断面

付図 5-3(5) せん断ひずみ 50%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ )



(a) 上部断面

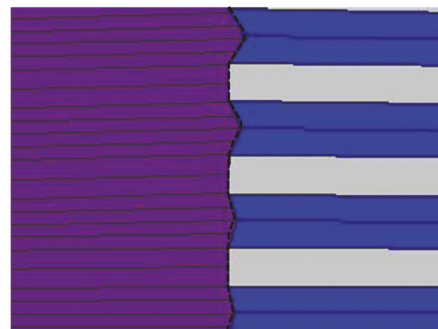


(b) 下部断面

付図 5-3(6) せん断ひずみ 50%時における加力直角方向の接触状態 (面圧 $-10.0\text{N/mm}^2$ )

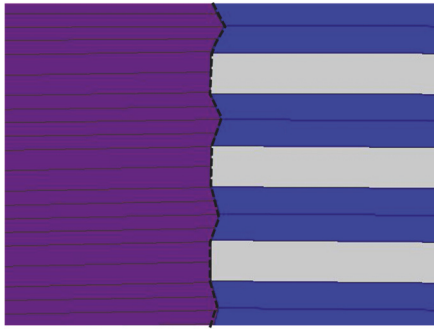


(a) 上部断面

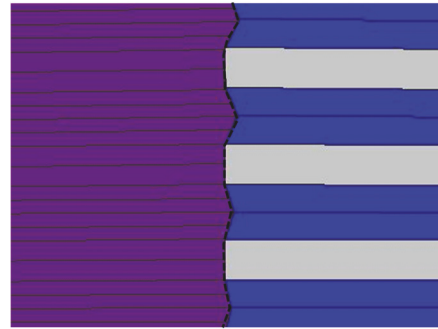


(b) 下部断面

付図 5-4(1) せん断ひずみ 0%時における加力方向の接触状態 (面圧 $-15.0\text{N/mm}^2$ )

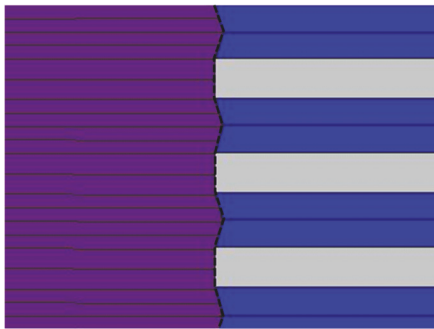


(a) 上部断面

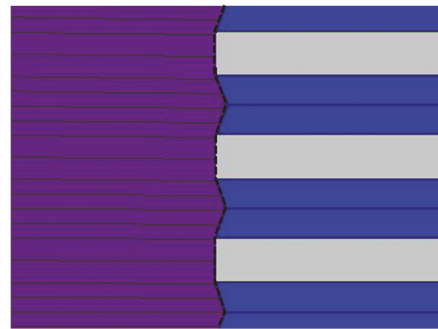


(b) 下部断面

付図 5-4(2) せん断ひずみ 0%時における加力 45° 方向の接触状態 (面圧-15.0N/mm<sup>2</sup>)



(a) 上部断面



(b) 下部断面

付図 5-4(3) せん断ひずみ 0%時における加力直交方向の接触状態 (面圧-15.0N/mm<sup>2</sup>)