

## 論文の内容の要旨

氏名：湯川 正 貴

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：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

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鉛プラグ入り積層ゴム支承（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の応答評価精度向上のため、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。

これまで我が国では、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、2003年十勝沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震などの長周期・長時間地震動を経験している。免震建物に長周期・長時間地震動が入力された際、LRB 内部に挿入された鉛プラグの減衰性能が、繰返し変形による発熱影響によって低下する可能性が示唆されてきた。また、2016年6月国土交通省より発行された技術的助言により、南海トラフの断層モデルによる海溝型巨大地震を想定した模擬地震波に対して免震部材の発熱による減衰性能の低下を考慮した設計が求められることになり、熱影響を考慮した免震建物の応答評価に対する社会的ニーズが高まっている。この様な背景から、長周期・長時間地震動による免震装置の大変形・繰返し変形が免震装置の履歴特性に与える影響を評価するため、実験研究や数値解析的検討が為されてきた。既往の研究成果から、熱伝導解析と地震応答解析を同時並行的に実施することで LRB の熱影響を考慮した熱・力学連成解析や吸収エネルギー量に応じて減衰性能を全時刻一律に低減する簡略法が提案されている。しかし、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。また、LRB の放熱特性を適切にモデル化することが出来ず、静的（低速度）加力時の温度変化や加力終了後の温度低下を再現できていないため、継続時間の長い地震動や余震動等の繰返し発生する地震動を用いた応答評価に課題がある。

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降伏応力度－温度関係の各種依存性を確認した。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、鉛プラグの発熱範囲など熱・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 の熱影響評価手法を高精度化することが出来た。

次に、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。まず、実機の温度環境下における積層ゴムの熱物性値評価試験を実施して熱物性値の温度依存性を明らかにすると共に、本依存性が熱・力学連成解析に大きく影響しないことを確認した。また、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、接触状態の変動を反映した熱・力学連成解析手法を提案した。提案した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新たに開発し、本解析手法を用いた繰返し加力試験の再現解析結果から、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、余震動の応答評価を行う際、放熱特性を適切にモデル化しない従来の解析手法では免震装置および上部建屋の応答性状を非安全側に評価する可能性を示した。よって、LRB の放熱特性を精度良く再現できる解析手法を構築すると共に、提案した解析手法の有用性を確認することが出来た。

本論文の構成は以下の通りである。

1 章「序論」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「鉛プラグ入り積層ゴムの繰返し加力試験」では、 $\phi 500\text{mm}$ のLRBを対象とした繰返し加力試験結果を実施し、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案した。また、鉛プラグの吸収エネルギー量に対する発熱量は加力条件に係わらず一定となることを明らかにすると共に、既往の鉛プラグ降伏応力度-温度関係式の適用範囲を示した。プラグ温度が $200^{\circ}\text{C}$ から融点に近い $300^{\circ}\text{C}$ 程度まで温度上昇した際には、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 $4\text{N}/\text{mm}^2$ に収束する傾向を示しており、LRBの減衰性能低下を抑制した合理的な免震設計に資する知見を得た。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 $300^{\circ}\text{C}$ 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「熱・力学連成解析を用いた評価」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、同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使用すると共に、実機に即した鉛プラグ境界部の接触条件を設定することで、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。

4章「熱物性値評価試験」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から比熱の温度依存性を確認すると共に、熱・力学連成解析からLRBの熱影響評価において温度依存性を考慮する必要がないことを明らかにした。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は判明した。よって、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「鉛プラグの接触状態を考慮した非線形熱・力学連成解析」では、非線形FEMモデルを用いた接触解析から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）における接触状態のせん断ひずみ依存性および面圧依存性を明らかにすると共に、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、各ひずみレベルの接触状態を仮定することで熱伝導率の補正係数を算出し、接触状態の変動を考慮した解析手法を提案した。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、本解析手法を用いた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、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「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」では、原子炉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、提案した解析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。

7章「結論」では、本研究を通じて得られた知見を整理すると共に、今後の課題について述べている。