

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 北嶋圭二

（副査） 教授 近藤典夫 教授 秦一平

特任教授 古橋剛 名誉教授 新宮清志

これまで我が国では、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、鉛プラグ入り積層ゴム支承（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。このような背景から、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おり、鉛プラグ温度や累積吸収エネルギー量から減衰性能の低下を評価する手法が提案されている。しかし、温度計測の難しさによる評価・分析不足が指摘されており、解析手法も放熱特性の再現性に課題を抱えていることから、更なる応答評価精度の向上が望まれている。

このような背景のもと、本論文では、繰返し変形を受けるLRBを対象に、既存熱影響評価手法の高精度化と放熱特性を模擬した新たな解析手法の提案という2つの大目標を設定して研究を実施し、以下の通りにまとめている。

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、本論文の構成を示している。既往の研究を精査し、研究課題の妥当性と社会的意義が高いことを明確にしている。

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ている。これまで精度の高い計測記録が少なかった鉛プラグ中央部を含むLRB全体の温度変化を捉えることに成功し、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ている。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ている。プラグ温度が 200°C から融点に近い 300°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ている。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°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ている。以上のことから、本章の内容に新規性と有効性が認められると判断できる。

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ている。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

している。本章では、提案したモデル化手法により既往の解析技術の更なる高度化を実現しており、有効性が高いと認められる。

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ている。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が判明した。以上の結果より、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、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ており、工学的に意義の高い知見が得られていると判断できる。

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ている。具体的には、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、面圧の増加に伴い接触率が低下する傾向を確認している。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ている。更に、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ている。以上のことから、本章の内容に新規性および独創性が認められると判断できる。

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、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ることを示しており、社会的意義の高い結論が得られている。

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。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

令和3年2月18日