

高摩擦すべり支承の熱・力学連成挙動解析システムの開発

北海道大学 ○菊地 優*
北海道大学 石井 建**
University of California Frank Mckenna***

免震 高摩擦すべり支承 摩擦係数
地震応答解析 熱伝導解析

研究の目的

高摩擦すべり支承は、滑動時に水平剛性がゼロとなることで免震建物を容易に長周期化し、いっそうの免震効果を得ることができる。このため、今後も免震構造への適用が期待される主要な免震装置の一つである。その一方で、滑動時に摩擦熱が生じることで装置のエネルギー吸収性能が変化する熱・力学連成挙動が顕著であることが指摘されている。本研究は、高摩擦すべり支承に着目し、精緻な熱・力学連成挙動解析システムを構築することを目的とする。この解析システムにより、長周期・長時間地震動の作用下における高摩擦すべり支承の特性変動を再現でき、安全性および信頼性の高い免震建物の設計が可能となる。

研究の内容

図1に示す高摩擦すべり支承の縮小試験体を対象とし、24ケースの水平二方向加振実験および4ケースの多数回繰り返し加振実験を行った。ゴム層に天然ゴム (G0.8)・すべり材に PTFE・すべり板に SUS304・その他の鋼板に SS400 が使用されている。図2に多数回繰り返し加振実験から得られた荷重-変位関係を示す。

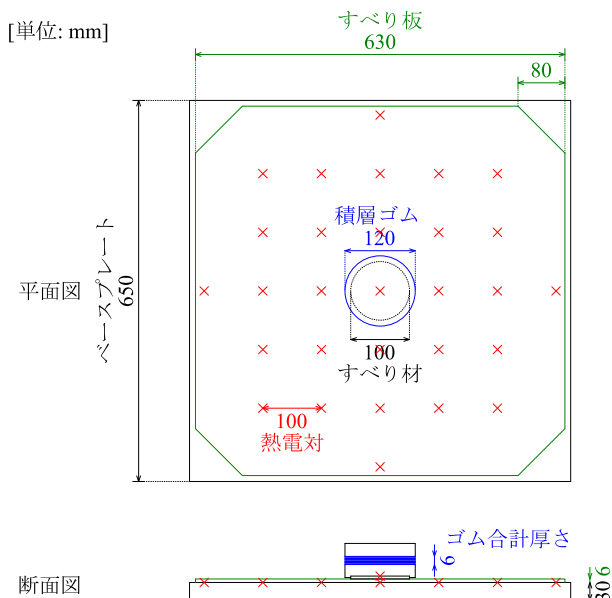
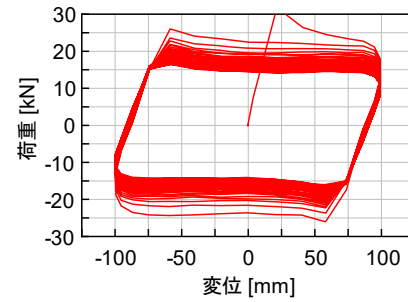
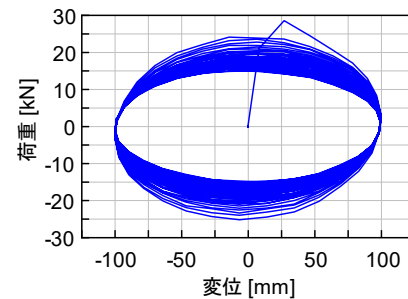


図1 高摩擦すべり支承試験体



(a) 一方向加力



(b) 真円加力

図2 実験結果 (軸力 203kN, 周期 3秒)

実験結果から、図3のような摩擦係数の温度依存性が得られた。既知の速度・面圧依存性は(1)式で、実験から同定された温度依存性は(2)式で、それぞれ表現できる。

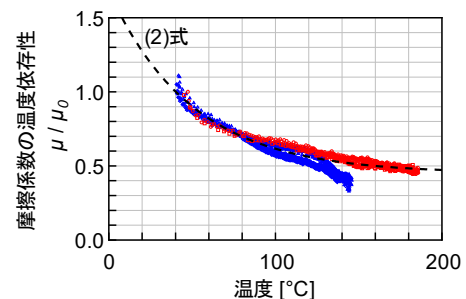


図3 摩擦係数の温度依存性

$$\mu_0 = (0.305 - 0.103 \exp[-0.019v]) \cdot \sigma^{-0.29} \quad (1)$$

$$\mu/\mu_0 = 0.5 \exp[-0.02(T - 45)] + 0.45 \quad (2)$$

ここで、 v はすべり速度[mm/s], σ はすべり材面圧[MPa], T はすべり材接触部のすべり板表面温度[°C]である。

高摩擦すべり支承の熱・力学連成挙動を再現するために、力学モデルと熱伝導解析モデルを組み合わせた連成解析システムを、OpenSees (<http://opensees.berkeley.edu>)をプラットフォームとして構築した。図4に連成解析モデルの概要を示す。

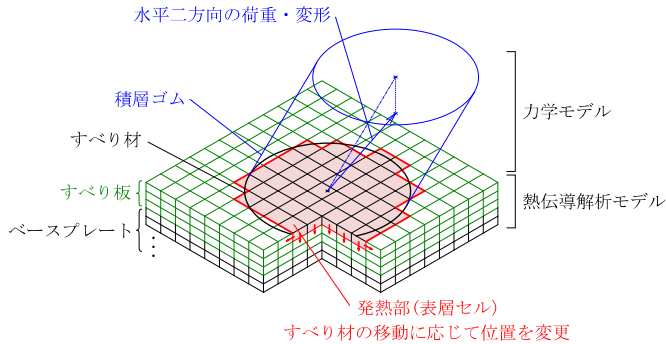


図4 連成解析モデル

力学モデルは、摩擦係数の各種依存性および変動軸力を考慮した三軸連成モデルである。熱伝導解析モデルは、すべり材の移動に応じて発熱部が変更される三次元差分モデルである。摩擦による発熱が力学特性に与える影響は、(2)式により反映される。

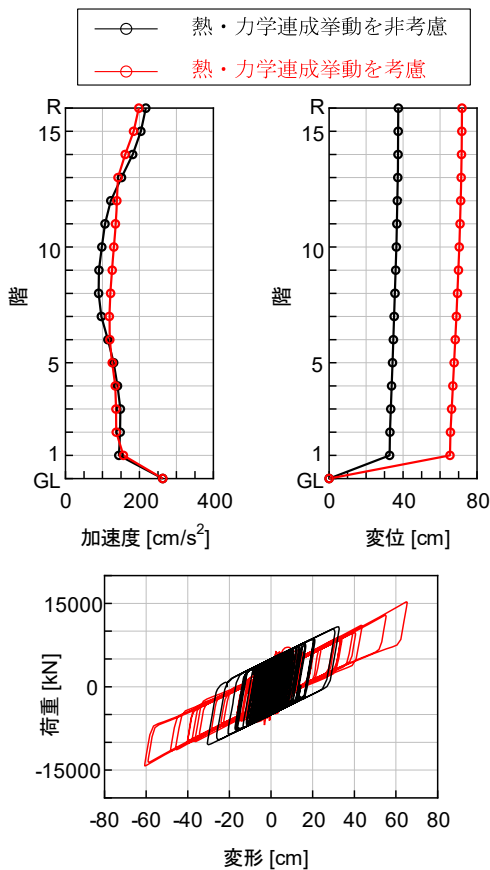


図5 地震応答解析結果

加力実験の再現解析を行ってモデルの妥当性を別途検証したうえで、解析システムの応用例として、15階建て免震建物の地震応答解析を行った。免震層は、装置外形1100 mmの天然ゴム系積層ゴム10基と、ゴム径1100 mm、すべり材径900 mmの高摩擦すべり支承4基で構成されている。入力地震動は基整促波OS1とした。図5に、解析結果として、各階の応答加速度・各階の応答変位・免震層の荷重-変位関係を示す。この例において、熱・力学連成挙動が上部構造の加速度に与える影響は小さい。一方、連成挙動が免震層の変位に与える影響は甚大であり、約2倍に増加している。これは、最大で200°C程度の温度上昇が生じたことで、切片荷重が初期の半分程度に減少したためである。

研究の成果、新発見

本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 高摩擦すべり支承の水平二方向加力実験を実施した。変位オービット形状および鉛直軸力を変化させて加力を行い、荷重-変位関係および温度変化を取得した。
- (2) 同装置について、多数回繰り返し加力実験を実施した。180°C程度の高温領域に至るまでの摩擦係数の変化を計測し、温度依存性を同定した。
- (3) 実験結果を反映させた高摩擦すべり支承の水平二方向力学モデルを作成した。
- (4) すべり板およびベースプレート部分について、すべり材の水平二方向移動を摩擦熱の発生位置として反映させることのできる熱伝導解析モデルを作成した。
- (5) 力学モデルと熱伝導解析モデルの連携により、熱・力学連成挙動解析システムを構築した。
- (6) 加力実験の再現解析により、モデルの妥当性を確認した。
- (7) 連成解析システムを用いて、免震建物の地震応答解析を行った。長周期・長時間地震動の作用下において、熱・力学連成挙動が応答値に与える影響を把握した。

今後の予定

今後は、国内外での論文発表およびOpenSeesのフレームワークを利用したデータ公開により、研究成果の社会展開を図る予定である。2019年7月に、国際会議での発表1件が決定済みとなっている。

謝辞

加力実験はオイレス工業の協力を得て行った。ここに記して関係各位に感謝の意を表す。

* 北海道大学大学院工学研究院 教授
 ** 北海道大学大学院工学研究院 学術研究員
 *** UC Berkeley, PEER Center, Research Engineer

* Hokkaido University, Faculty of Engineering, Professor
 ** Hokkaido University, Faculty of Engineering, Research Fellow
 *** UC Berkeley, PEER Center, Research Engineer