

錫プラグ入り積層ゴムの熱・力学連成挙動に関する研究

Thermal-Mechanical Coupled Behavior of Tin Rubber Bearings

柳 勝幸
Masayuki YANAGI

清水美雪
Miyuki SHIMIZU

木田英範*
Hidenori KIDA

長井大樹**
Hiroki NAGAI

石井 建***
Ken ISHII

菊地 優***
Masaru KIKUCHI

本研究では、長時間の繰り返し変形による錫プラグ入り積層ゴム (SnRB) の熱・力学連成挙動に着目している。最初に、SnRB に長時間の繰り返し試験を実施した。次に、地震応答解析と熱伝導解析を組み合わせることにより、熱・力学連成挙動を考慮した新たな解析モデルを構築した。最後に、SnRB を用いた免震建物の動的挙動を評価するために、このモデルを使用した地震応答解析を実施した。SnRB は長周期地震動に対する長時間の繰り返し変形による特性変化を考慮することが必要である。

The authors focus on the thermal-mechanical coupled behavior of tin rubber bearings (SnRBs) under cyclic loading. First, the tests providing a large number of cyclic deformations to the SnRBs were performed. Second, an analysis model considering the thermal-mechanical coupled behavior was constructed by combining a seismic response analysis and thermal conductivity analysis. Finally, seismic response analyses using the model were conducted to evaluate the dynamic behavior of seismically isolated buildings with SnRBs. The authors conclude that characteristic change due to cyclic deformations of the SnRBs should be considered for long-duration earthquake ground motions.

1. はじめに

錫プラグ入り免震積層ゴム (以下、SnRB と呼称) は、積層ゴム中央に錫プラグが挿入されており、地震時に積層ゴムの水平変形により錫プラグが塑性変形することによって履歴減衰を発揮して、建物の揺れを抑える。錫は常温で再結晶し延性に富むなど鉛と同様の性質を有する。一方、切片荷重は鉛の 1.7 倍と高くエネルギー吸収性能に富むことが特徴である。錫は環境に配慮した材料として、様々な工業製品に使用されており、SnRB の開発については、鉛に代わるプラグ材料の模索から始まり¹⁾、様々な条件の下での実大 SnRB の試験実施と性能評価法の確立²⁾を経て、2005 年に実用化に至った。SnRB は、2022 年 2 月の時点で、144 棟の免震建物に供されている。SnRB の復元力特性のモデル化に関しては、履歴ループ形状がバイリニア型に近いことから、バイリニアモデルの適用を前提とし、切片荷重や剛性のせん断ひずみ依存性を考慮した修正バイリニアモデル³⁾が提案され、すでに設計実務に用いられている。

一方 2003 年十勝沖地震を契機として、海溝型巨大地震の発生で予測される長周期地震動に対する関心が高まり、国土交通省は免震建築物や鉄骨造の超高層建築物等について長時間の繰り返しの累積変形の影響を考慮して安全性の検証を行うことを要求している⁴⁾。材料の塑性化によって履歴減衰を発揮する免震部材は、長周期地震動下では多数回の大変形繰り返し変形を受けて力学特性が変化すると懸念から、時刻歴解析における免震建物の耐震安全性検証では力学特性の変化を考慮する必要がある⁵⁾。著者らは 2021 年に長周期地震動に対応するために、せん断ひずみ 400% まで適用可能な大変形復元力モデル (Kikuchi-Aiken モデル)⁶⁾を構築した。これにより、長周期地震動に対する懸念事項の一つである免震層の過大な応答変形に関する詳細検討が可能となった。

本研究は、長周期地震動に対するもう一つの懸念事項である長時間の繰り返し変形による SnRB の発熱の影響に関する詳細検討を行い、SnRB の熱・力学連成挙動を解明することを目的とする。この目的に沿い、初めに SnRB の実大サイズであるゴム直径 ϕ 700 試験体を用いて標準プラグ径と小径プラグ径の 2 種類について長時間繰り返し試験を実施して熱・力学連成挙動を把握する。続いて、地震応答

* 株式会社 免制震デバイス

** 住友金属鉱山シボレックス株式会社

*** 北海道大学大学院工学研究院

解析と熱伝導解析を組み合わせることにより、熱・力学連成挙動を考慮した新たな解析モデルを構築する。今回、SnRB 特有の構造（内部鋼板露出型）を忠実に再現したモデル化を実施する。また、標準プラグ径だけでなく小径プラグ径についても解析を実施することにより、解析モデルの汎用性を検証する。最後に、SnRB を用いた免震建物モデルの地震応答解析を実施して、復元力モデルの違いによる応答値の差異について検証する。また、著者らは長周期地震動に対する設計上の対応として、熱・力学連成挙動を簡易な方法で考慮して地震による応答を評価できる手法（簡易法）⁷⁾ をすでに提案しているが、この簡易法に対する応答評価精度についても検証を行った。

2. 繰り返し载荷試験

2.1 試験体

繰り返し载荷試験に用いた SnRB 試験体の形状を図 1 (a), (b) に示す。ゴム外径は $\phi 700$ mm, 錫プラグ径は標準径の $\phi 140$ mm と小径の $\phi 100$ mm (以下, $\phi 700-140$, $\phi 700-100$ と呼称), ゴム総厚は 137.8 mm (5.3 mm 厚 \times 26 層), 内部鋼板は 4.5 mm 厚 \times 25 層であり, 2 次形状係数は 5.1 である。試験体は各 1 体製作した。また, 各試験体には温度測定のため, 図 1 (c) に示す箇所にて熱電対を挿入した。ゴム表面, 中間鋼板表面については, 接着剤を用いて熱電対を固定した。

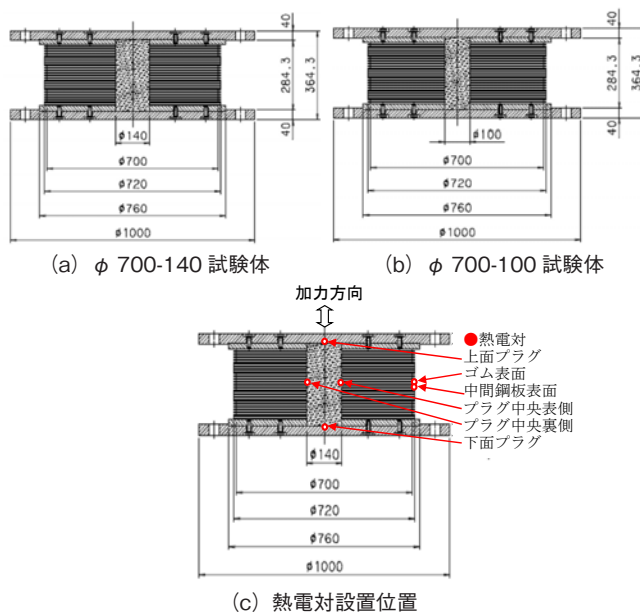


図 1 試験体の形状

2.2 試験方法

試験条件を表 1 に示す。各々の試験体に対して, 基本性能試験とせん断ひずみ $\pm 100\%$ と $\pm 178\%$ の 150 サイクルの繰り返し载荷試験を行った。 $\pm 178\%$ の繰り返し载荷試験は, 試験機の制約から最大水平ストローク ± 245 mm のせん断

ひずみ量とした。また, 同様に試験機能力の制約から連続 150 サイクルの加振ができないため, 30 サイクル + 約 5 分間のインターバル (アキュムレータへの再蓄圧) を 1 セットとして, 5 セットを繰り返す手順で試験を実施した。

表 1 試験条件

基本性能試験	鉛直試験	面圧 15 MPa 荷重振幅 $\pm 30\%$ 3 サイクル
	水平試験	面圧 15 MPa せん断ひずみ $\pm 100\%$ 4 サイクル
多数回繰り返し試験	試験面圧	15 MPa
	最大せん断ひずみ	$\pm 100\%$, $\pm 178\%$
	繰り返し回数	$\pm 100\%$: 連続 150 サイクル $\pm 178\%$: 連続 30 サイクル \times 5 セット
	試験波形	Sin 波
	周期 (最大速度)	5 sec (max 173 mm/s 100% 時) 5 sec (max 308 mm/s 178% 時)

試験機の概要を図 2 に示す。鉛直荷重は試験機のアクチュエータに内蔵されているロードセル, 水平荷重は 400 kN 電気サーボ型油圧式疲労試験機に内蔵されているロードセル, 水平変位はレーザー変位計で計測した。測定状況を写真 1 に示す。また, 試験体と試験機面板の間には断熱材 (板厚 10 mm, 熱伝導率: 0.3 W/m \cdot K) を設置した。

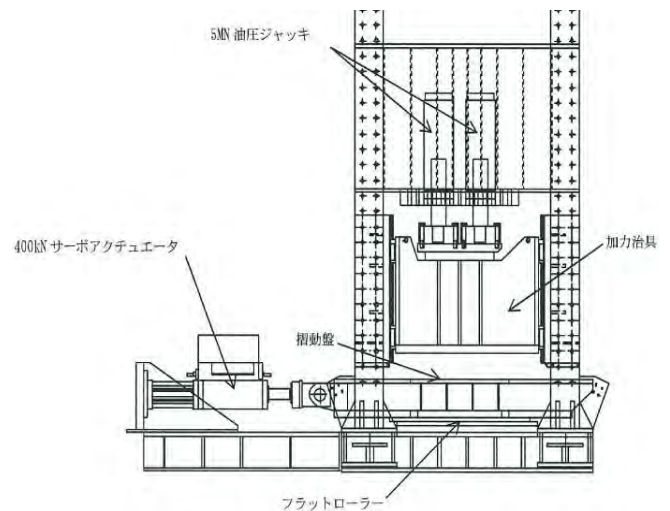


図 2 試験機の概要

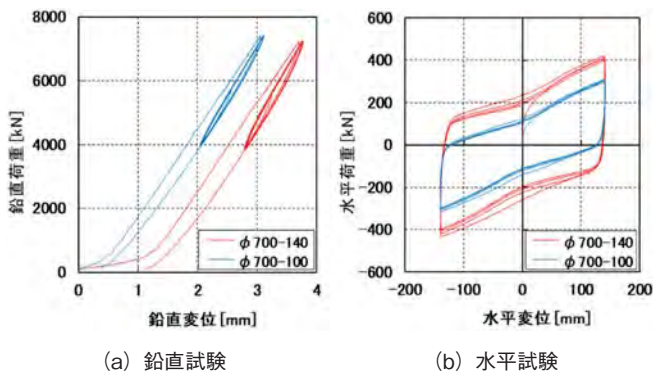


写真 1 測定状況

2.3 試験結果

(1) 基本性能試験結果

基本性能試験で得られた各々の鉛直・水平の荷重変形関係を図3(a)(b)に重ね描く。また、各試験体の鉛直剛性(K_V)、2次剛性(K₂)、切片荷重(Q_d)の算出方法を図3(c)に、算出結果および補正結果を表2、3に示す。鉛直剛性・2次剛性については温度依存性があり、試験体の初期温度が約28℃であったことから、標準温度20℃で温度補正を実施した。切片荷重については速度依存性があることから、標準速度400 mm/sへの速度補正を実施した。各補正後の結果はSnRBの設計式²⁾による鉛直剛性、切片荷重に対して±20%以内、2次剛性に対して±15%以内であり、大臣認定値の許容範囲内であることを確認した。



(c) K_V, K₂, Q_dの算出方法

図3 基本性能試験結果

表2 基本性能試験結果 (φ 700-140)

φ 700 - 140	試験体初期温度 [°C]	K _V [kN/mm]		K ₂ [kN/mm]		Q _d [kN]	
		設計値	測定値	設計値	測定値	設計値	測定値
試験結果	27.6	3527	—	1.155	—	209.0	—
補正後	—	3606	-1.7%	1.178	12.2%	258.1	13.2%

表3 基本性能試験結果 (φ 700-100)

φ 700 - 100	試験体初期温度 [°C]	K _V [kN/mm]		K ₂ [kN/mm]		Q _d [kN]	
		設計値	測定値	設計値	測定値	設計値	測定値
試験結果	27.7	3283	—	1.136	—	111.4	—
補正後	—	3367	-11.6%	1.159	8.4%	137.6	18.6%

(2) 長時間繰り返し試験結果

図4、図5に各試験体のひずみ±100%連続150サイクルおよびひずみ±178%断続150サイクルの水平荷重—水平変形関係とφ700-140試験体の試験時の外観写真を写真2、3に示す。また、図6、図7にはサイクル数と錫プラグ上下面の温度の関係を示す。なお、両試験体とも錫プラグ中央部に挿入した熱電対が試験途中から抜け出たため試験結果からは除外している。錫プラグ上下面の温度は±100%の試験では上面が高くなっているが、±178%の試験では下面が高い結果となった。これは写真2、3の赤点線部に示す試験時の外観の目視状況より、±100%の試験の方が±178%の試験よりも試験体の下部側のせん断変形に対する上部側のせん断変形の比率が大きくなっている傾向が見られることから、せん断ひずみに応じた錫プラグの変形状態に起因している可能性が考えられる。したがって局所的な錫プラグの変形による発熱量のアンバランスにより、蓄熱した錫プラグの上下面に温度差が生じた可能性がある」と推定されるが、検討の余地を残す結果となった。

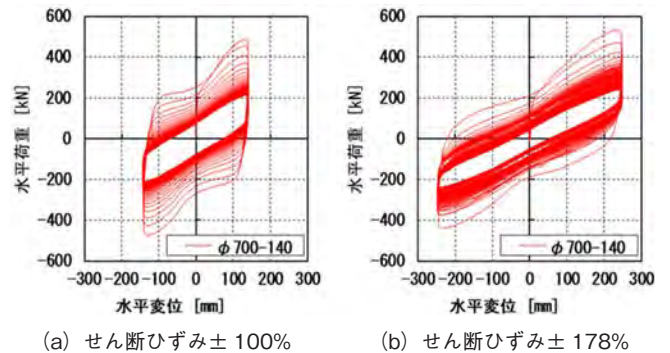


図4 φ700-140試験体

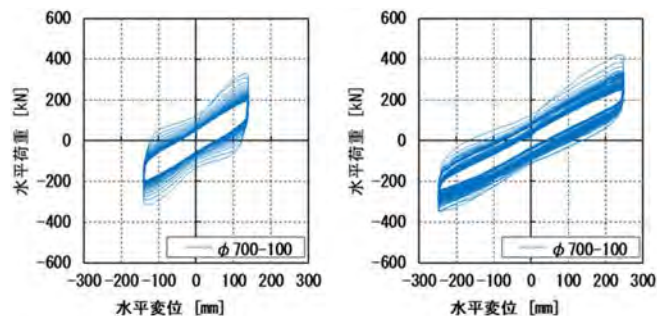


図5 φ700-100試験体

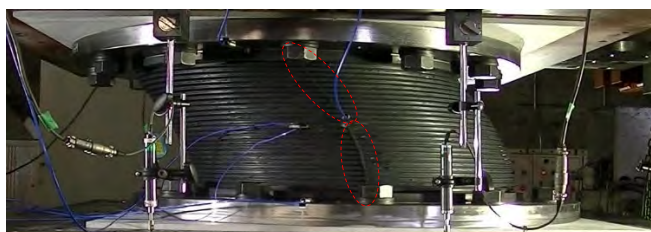


写真2 せん断ひずみ±100%の試験時外観 (φ 700-140)

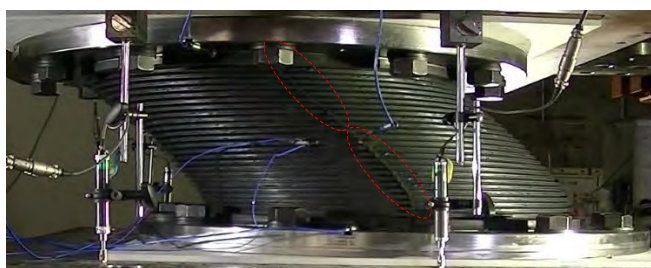
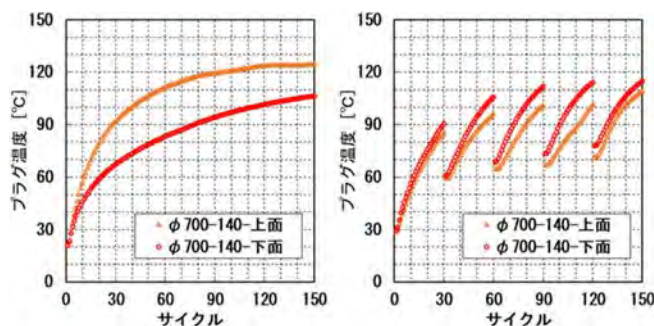
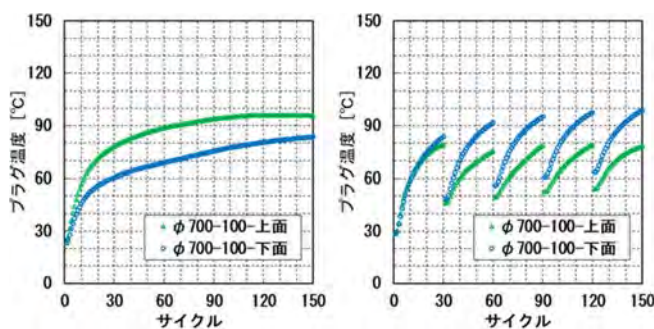


写真3 せん断ひずみ±178%の試験時外観 (φ 700-140)



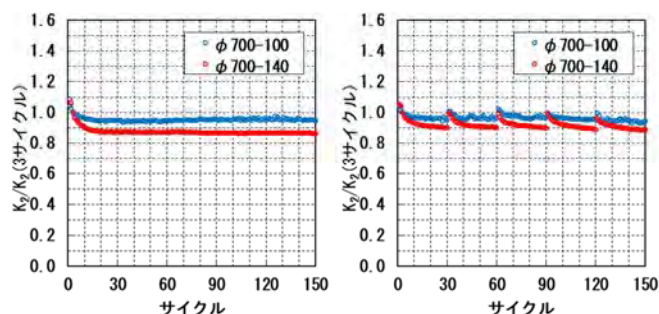
(a) せん断ひずみ±100% (b) せん断ひずみ±178%

図6 サイクル数と錫プラグ温度 (φ 700-140)

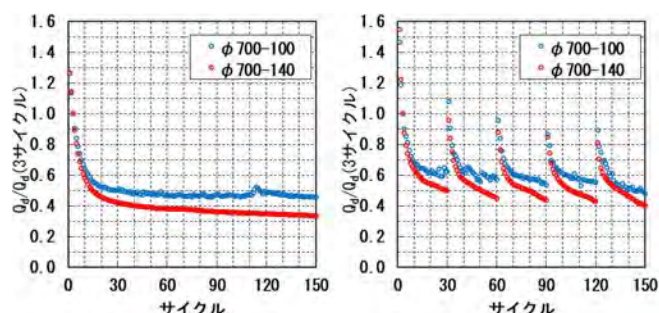


(a) せん断ひずみ±100% (b) せん断ひずみ±178%

図7 サイクル数と錫プラグ温度 (φ 700-100)



(a) せん断ひずみ±100% (b) せん断ひずみ±178%

図8 サイクル数と2次剛性 K_2 の変化率

(a) せん断ひずみ±100% (b) せん断ひずみ±178%

図9 サイクル数と切片荷重 Q_d の変化率

図8に2次剛性 (K_2), 図9に切片荷重 (Q_d) の各サイクルの数値を3サイクル目の値で基準化して比較した結果を示す。小径プラグのφ700-100試験体はφ700-140試験体と比べて、温度上昇量が少なく、特性低下量も少ない結果となった。これは、発熱温度が低いため特性低下量も少なくなったと推定される。また、今回の繰り返し試験では、試験体1体を用いてせん断ひずみ±100%, ±178%の試験を実施しているため、±178%の試験結果は±100%の試験を経験したことによる試験履歴の影響により、1~3サイクル目の水平荷重が低下傾向にあると考えられる。このため、図9に示す±178%の Q_d の変化率が±100%の変化率に比べて小さくなっていると推定される。

3. 熱・力学連成モデルの構築と検証

3.1 熱・力学連成モデルの構築

本節では、SnRBの熱・力学連成挙動を再現するための解析手法について記述する。本解析では、下記に示す復元力モデルと熱伝導解析モデルを併用して時刻歴解析を行う。

まず、熱・力学連成挙動解析の復元力モデルには、Kikuchi-Aikenモデル[®] (以下、KAモデルとする) を適用する。錫プラグの温度上昇による降伏耐力の変化を考慮したKAモデルの基本式を(1)~(3)式に、履歴ループの概略を図10に示す。

$$F = F_1 + c_T \cdot F_2 \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{2}(1 - u)F_m\{x + \text{sgn}(x)|x|^n\} \quad (2)$$

$$F_2 = \pm uF_m\{1 - 2e^{-a(1\pm x)} + b(1 \pm x)e^{-c(1\pm x)}\} \quad (3)$$

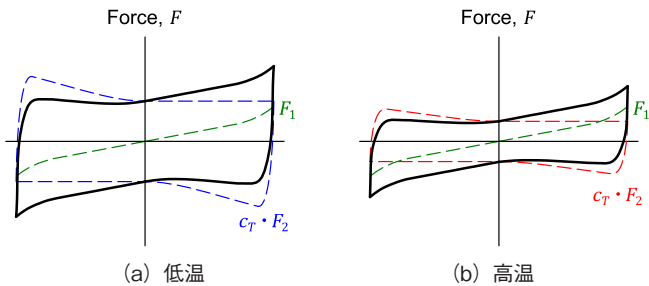


図 10 KA モデルの履歴ループの概略

(1) 式において、 F は荷重、 F_1 は荷重の非線形弾性成分、 F_2 は荷重の履歴減衰成分、 c_T はプラグ温度による修正係数である。パラメータ c_T は本研究における熱・力学連成挙動解析のために、新たに導入されたものである。(2) 式および (3) 式を構成する各パラメータは、加力試験に基づきせん断ひずみ 400% の大変形領域まで対応した値が著者らによって提案されている⁶⁾。具体的なパラメータの評価方法は文献⁶⁾を参照されたい。KA モデルは、図 10 のように非線形弾性成分と履歴減衰成分を分離して評価し、それらを重ね合わせるというコンセプトを有する。この履歴減衰成分に錫プラグの温度上昇による降伏耐力の変化を考慮することで、繰り返し変形による力学特性の変化を容易に表現できることから、熱・力学連成挙動解析との親和性は非常に高い。また、比較のために、修正バイリニアモデルに対しても同様に温度による修正係数を考慮した復元力モデルを別途、作成した。

次に、熱・力学連成挙動解析の熱伝導解析モデルには、上下方向および中心軸周りに対称の有限差分モデル⁸⁾を適用する。図 11 に繰り返し載荷試験における標準プラグ径積層ゴムのモデル断面図を示す。同図に示すように、SnRB 特有の内部鋼板露出型構造を忠実にモデル化している。また積層ゴム取り付け部の持つ熱容量も評価するために、フランジプレートの上側の断熱材および試験機の鋼製クロスヘッドについてもモデル化した。表 4 に、熱伝導解析モデルに用いる物性値を示す。コンクリートの物性値は、後述する 4 章の解析モデルにおける積層ゴム取り付け部に使用する。

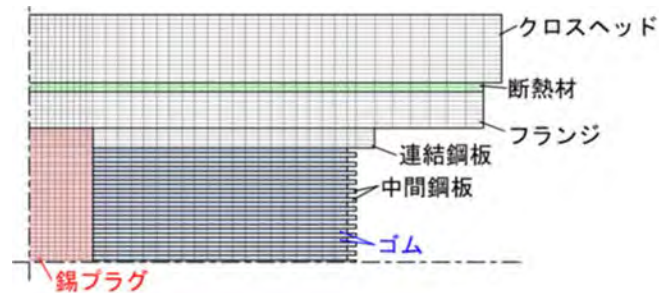


図 11 熱伝導解析モデルの断面図

表 4 熱伝導解析に用いる物性値

材質	熱伝達率 [w/(m ² /K)]	体積熱容量 [J/(m ³ ·K)]
鉄	59	3.718 × 10 ⁶
ゴム	0.13	1.976 × 10 ⁶
錫	64	1.679 × 10 ⁶
コンクリート	2.1	2.410 × 10 ⁶
断熱材	0.3	1.980 × 10 ⁶

モデル表面からの熱伝達率は 15 W / (m²·K) とした。差分モデルにおいて、各コントロールボリュームの温度変化は次のように差分化された熱伝導方程式により計算される⁸⁾。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\lambda \Sigma (\delta_s \frac{\delta T}{\delta l}) + \alpha \frac{\Delta Q}{\Delta t}}{C_v} \quad (4)$$

ここで、 Δ は時間差分、 δ は空間差分、 T は温度、 t は時刻、 λ は熱伝導率、 C_v はコントロールボリュームの熱容量である。 δ_s と δ_l は、それぞれ、隣接するコントロールボリュームの接触面積と中心間距離である。空間差分と Σ で計算される総和は温度分布のラプラシアンを表す。 $\alpha \Delta Q$ は発生する熱量の空間分布を表し、本研究ではゴム層と同じ高さにある錫プラグ部分のみに熱エネルギーを与える。

以上の復元力モデルおよび熱伝導解析モデルを用いて、熱・力学連成挙動解析を行う。図 12 に連成解析の流れを示す。

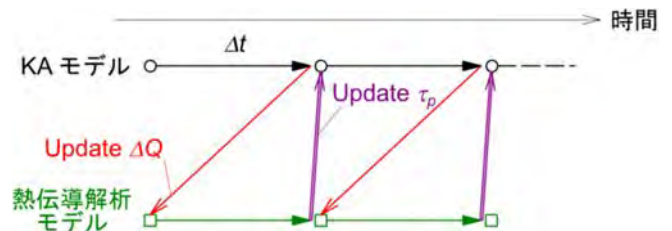


図 12 熱・力学連成挙動解析の流れ

連成解析では、二つの解析モデルが互いの計算結果を参照しながら時刻歴解析を行う。復元力モデルにおいて (1) 式の $c_T \cdot F_2$ の項が生じる履歴吸収エネルギーに相当する

熱量 ΔQ が、熱伝導解析モデルの発熱部分に分配される。また、熱伝導解析により計算される錫プラグの体積平均温度 T に応じて、復元力モデルの降伏応力度 τ_p が更新される。プラグの降伏応力度 τ_p [MPa] と温度 T [°C] の関係を図 13 に示す。これは、著者らの提案した (5) 式⁹⁾ に基づいており、(1) 式における履歴成分の係数 c_T は基準となる降伏応力度 14.8 MPa で基準化して (6) 式で与えられる。

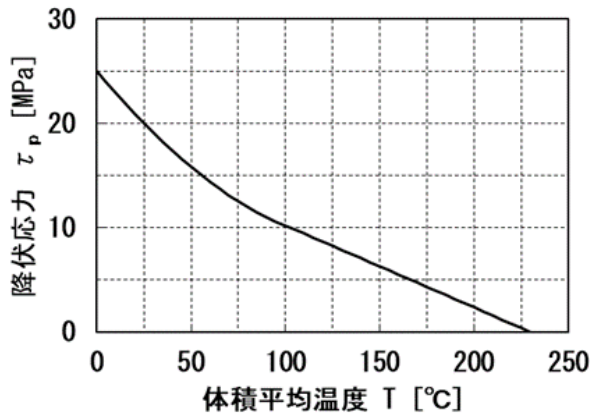


図 13 プラグの降伏応力度と体積平均温度との関係

$$\tau_p = \begin{cases} 25.0 - 0.218T + 0.000695T^2 & (T < 100) \\ (230.0 - T)/12.7 & (T \geq 100) \end{cases} \quad (5)$$

$$c_T = \tau_p / 14.8 \quad (6)$$

これらの連成解析手法を、オープンソースの構造解析フレームワークである OpenSees¹⁰⁾ に実装した。

3.2 熱・力学連成モデルの検証

本節では 2.3 項で示した長時間繰り返し試験の結果に対して、3.1 項の連成解析を行った検証結果について記述する。連成解析については、KA モデルとの比較のため、既往の修正バイリニアモデルについても実施した。解析モデルの初期温度については、各試験結果の試験開始温度を与えた。図 14, 15 に標準プラグ径の ϕ 700-140 試験体、図 16, 17 に小径プラグ径の ϕ 700-100 試験体について、各モデルの履歴ループと試験結果との比較を示す。各モデルのひずみ依存性はほぼ同じであることから、二次剛性、切片荷重については整合していることを確認した。また、KA モデルについては、せん断ひずみ $\pm 100\%$ の試験結果の履歴ループの戻り勾配の丸みを帯びた形状を既往バイリニアモデルよりも良く再現していることが確認できた。今回の繰り返し試験では、試験体 1 体を用いてせん断ひずみ $\pm 100\%$ 、 $\pm 178\%$ の試験を実施しているため、 $\pm 178\%$ の試験結果は $\pm 100\%$ の試験を経験したことによる試験履歴の影響により、1~3 サイクル目の水平荷重が低下傾向にあると考えられる。このため、図 15, 17 に示す $\pm 178\%$ の試験結果については、KA モデルでの履歴ループの戻り勾配の丸みを帯びた形状との差が生じたと考えられる。

図 18, 19 に各モデルの錫プラグ上部の温度の解析結果と実験結果の比較を示す。解析では積層ゴムの上下方向および中心軸周りを対称としてモデル化していることから、解析上の錫プラグ上下面の温度は同じとなる。各モデルによる錫プラグ上(下)部の温度差はわずかであった。図 18 に示す $\pm 100\%$ 試験の錫プラグ上(下)部の温度の解析結果は両試験体ともに上下プラグ温度のほぼ中央の値となり、図 19 に示す $\pm 178\%$ 試験の解析結果は下プラグ温度と概ね合致することを確認した。また、図 19 は 30 サイクル + 約 5 分間のインターバルの 5 セットの断続試験であるが、このインターバルを伴う断続試験結果についても概ね再現していることを確認した。2.3 項の長時間繰り返し試験結果で示した通り、試験結果の錫プラグ上下面の温度差は、局所的な錫プラグの変形による発熱量のアンバランスにより生じた可能性があるが、今回の解析では上下面の温度差の再現はできず、検討の余地を残す結果となった。

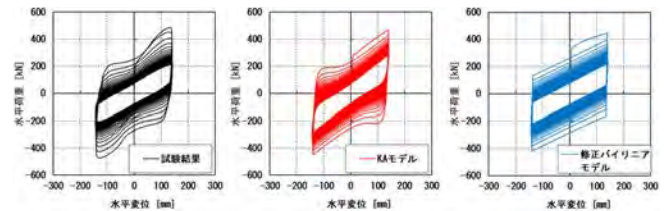


図 14 ϕ 700-140 のひずみ $\pm 100\%$ の解析結果

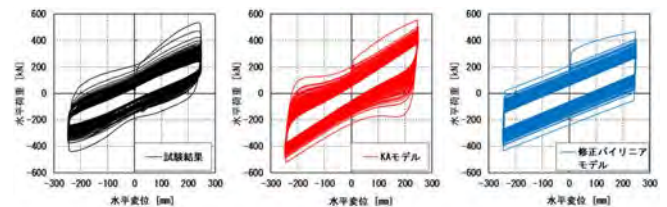


図 15 ϕ 700-140 のひずみ $\pm 178\%$ の解析結果

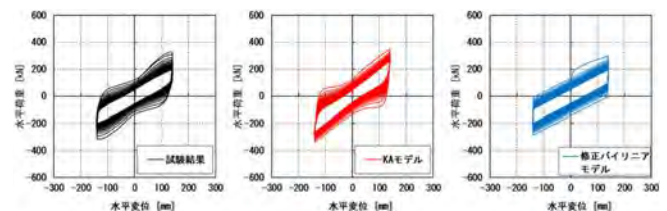


図 16 ϕ 700-100 のひずみ $\pm 100\%$ の解析結果

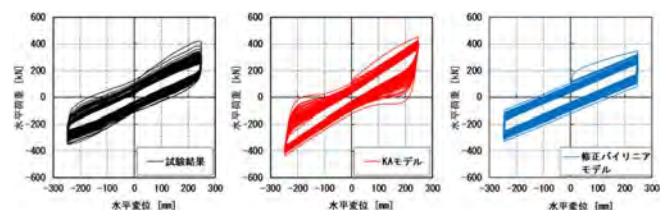
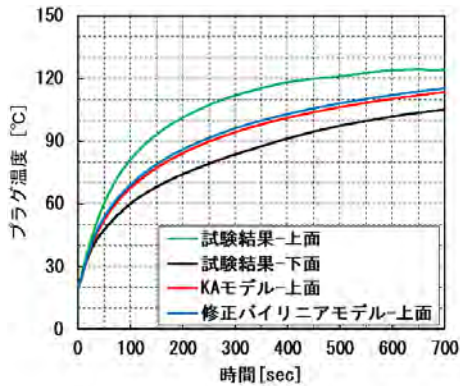
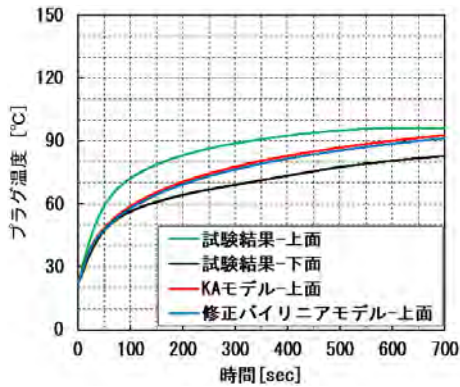


図 17 ϕ 700-100 のひずみ $\pm 178\%$ の解析結果

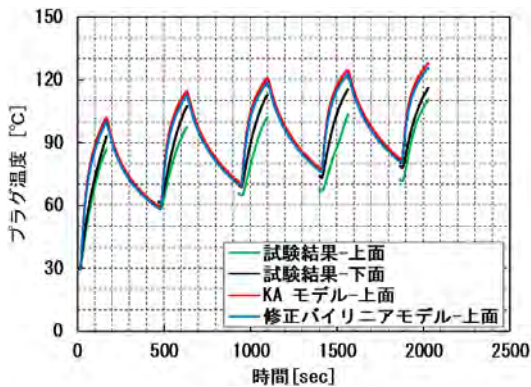


(a) φ 700-140

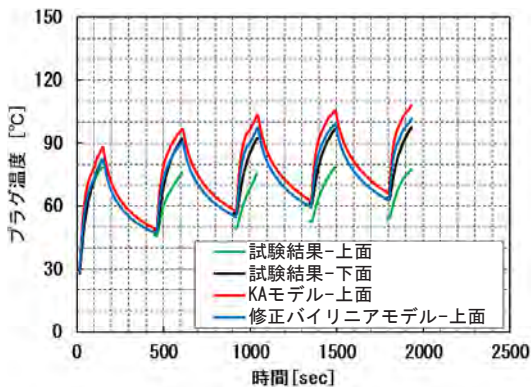


(b) φ 700-100

図 18 ひずみ 100% 試験での錫プラグ温度の解析結果



(a) φ 700-140



(b) φ 700-100

図 19 ひずみ 178% 試験での錫プラグ温度の解析結果

4. 地震応答解析

4.1 建物モデル

検討対象の建物モデルとしては、各階の床面積を 1000 m² 程度とする 12 層の RC 造免震建物を想定し、図 20 のような多質点系せん断型振動モデル⁶⁾を作成した。上部構造は弾性とし、基礎固定時に建物高さ (m) に 0.02 を乗じた値が 1 次固有周期となるような直線分布の層剛性を仮定し、減衰は基礎固定時の 1 次固有振動数に対して 2% の剛性比例型減衰とする。免震層はゴム外径 φ 900 mm の SnRB20 台とし、建物規模を考慮して設定した SnRB の構成を図 20 に合わせて示す。免震層上部質量と 20 台の SnRB の降伏後 2 次剛性 K₂ (100%) から算出した免震層の接線周期 (略算) は 4.66 秒であり、免震層全体の切片荷重の上部重量に占める割合は約 5.8% である。また熱伝導解析モデルは表 4 に示す物性値を用い、積層ゴム取り付け部の持つ熱容量を評価するために、フランジプレートの上側のコンクリート層についてもモデル化している。

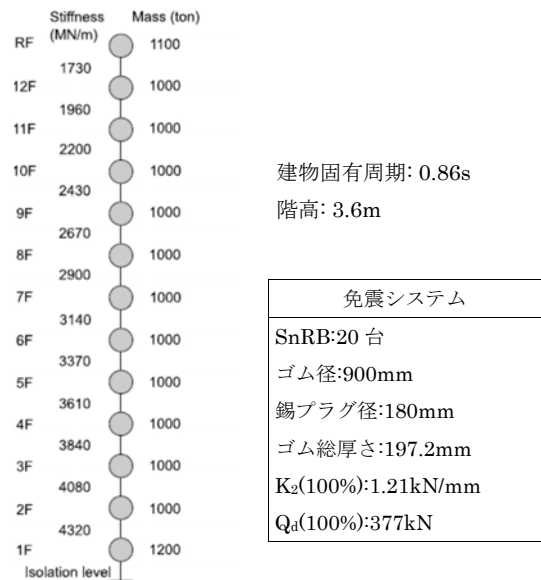


図 20 地震応答解析のための建物モデル

4.2 入力地震動

入力地震動には、設計用長周期地震動 (基整促波)⁴⁾ の 3 波 (CH1, OS1, SZ1) と告示スペクトル¹¹⁾ に適合させ、位相を 3 通りに設定した波 (1968 年十勝沖地震八戸 NS 成分位相 (以下、八戸位相) と 1995 年兵庫県南部地震 JM-Kobe NS 成分位相 (以下、神戸位相) およびランダム位相) を用いた。

4.3 応答評価法

応答評価法として以下の 3 種類の方法を用いて、応答値を比較検討する。

- ① KA モデルを用いた熱・力学連成挙動解析 (詳細法 1)
- ② 修正バイリニアモデルを用いた熱・力学連成挙動解析

(詳細法2)

③簡易法 (図21に示す方法)

詳細法1, 詳細法2については3章で説明した方法を用いる。簡易法は錫プラグの多数回繰り返し依存性を考慮しない時刻歴応答解析を行って算出した累積吸収エネルギー量から錫プラグ特性を評価し, 多数回繰り返し依存性を考慮した地震応答解析を行うものである。累積吸収エネルギー量を評価する際, ④地震応答解析終了時, もしくは⑥免震層が最大応答変位に至るまでの値を用いる2種類の方法が著者らによって提案されている⁷⁾。本解析では, ⑥の方法を用いた。簡易法による応答解析フロー⁷⁾を図21に, 適用範囲を表5に示す。適用範囲については, 熱・力学連成挙動解析より, 錫プラグの最高温度が融点230℃となる時の錫プラグの体積平均温度 $T_p = 190℃$ とし, その時の累積変位量, 切片荷重の残存率としている。また, 簡易法の力学モデルには修正バイリニアモデルを使用した。累積吸収エネルギー量と切片荷重の残存率との関係式⁷⁾を(7)式に, 累積吸収エネルギー量と錫プラグ温度との関係式⁷⁾を(8)式に示す。

表5 適用範囲

項目	適用範囲
累積変位	$\Sigma\delta \leq 100 \text{ m}$
錫プラグ温度	$T_p \leq 190 \text{ }^\circ\text{C}$
切片荷重の低下率	$\frac{T_p}{T_{p0}} \geq 0.2$

$$\frac{T_p}{T_{p0}} = \frac{\zeta}{\left(1 + \alpha \cdot \frac{\Sigma E}{V_p}\right)^\beta} \quad \text{ただし } \frac{T_p}{T_{p0}} \geq 0.2 \quad (7)$$

$$T_p = \psi_1 \cdot \left(\frac{\Sigma E}{V_p}\right)^{\psi_2} + 20 \quad \left(\frac{\Sigma E}{V_p} < \varepsilon\right)$$

$$T_p = \psi_3 \cdot \left(\frac{\Sigma E}{V_p}\right) + \psi_4 \quad \left(\frac{\Sigma E}{V_p} \geq \varepsilon\right) \quad \text{ただし } T_p \leq 190 \quad (8)$$

$\frac{T_p}{T_{p0}}$: 切片荷重の残存率, T_p : 降伏応力度(MPa), T_{p0} : 基準降伏応力度(MPa)

ζ : せん断歪み影響係数, ΣE : 累積吸収エネルギー量(N・mm)

V_p : 錫プラグ体積(mm³), α, β : プラグ径の影響係数

T_p : 錫プラグ温度(°C), ε : 判別値, ψ_1 : 周期・プラグ径の影響係数(1.1~4)

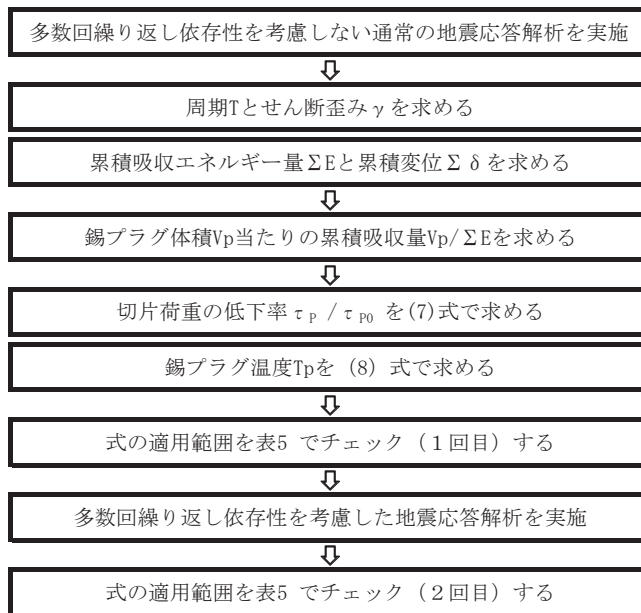


図21 簡易法のフローチャート

4.4 解析結果と考察

最初に設計用長周期地震動であるCHIを入力した場合の建物内の最大応答加速度および最大応答変位の高さ方向の分布について, 図22に解析結果を示す。修正バイリニアモデルの適用限界ひずみ200%を超える領域についてはKAモデルとの差が徐々に大きくなることから, せん断ひずみ200%を超えるような入力地震動レベルの地震応答解析にはKAモデルが必要である。

図22から復元力モデルによる応答値の違いを見ると, KAモデルによる応答加速度は既往の修正バイリニアモデルよりも下回る。また, 修正バイリニアモデルでは頂部が振られる傾向が強い。一方, 応答変位については復元力モデルによる差は少ない。

上部構造の応答加速度に大きな差が生じた要因については, バイリニアモデルのように一定の剛性が継続する場合は特定の振動モードが励起されやすく, 曲線系の復元力モデルではそれが抑制されることが, 高次モードの励起状態の差となって応答加速度分布の大小に現れたものと推察される。

図23に12層モデルの頂部節点の応答加速度波形に対する加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を, 表6に免震層の評価する剛性の違いに対する固有値結果を示す。図23より, 各復元力モデルは表6に示す固有周期近傍に対応するピークが見られる。

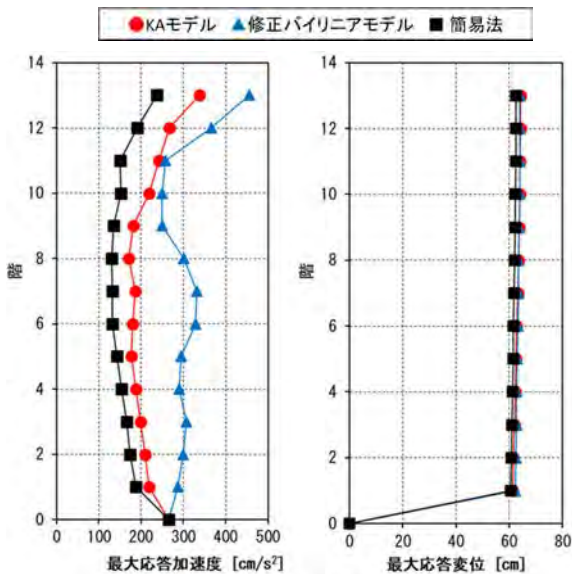


図 22 12 層モデルの最大応答値 (CH1)

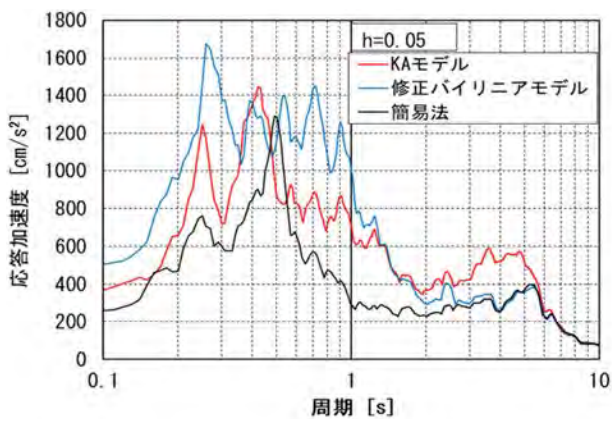
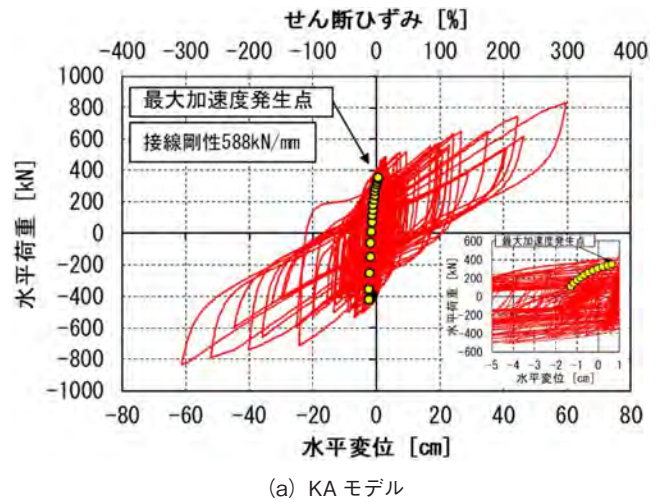


図 23 CH1 波による頂部節点の加速度応答スペクトル

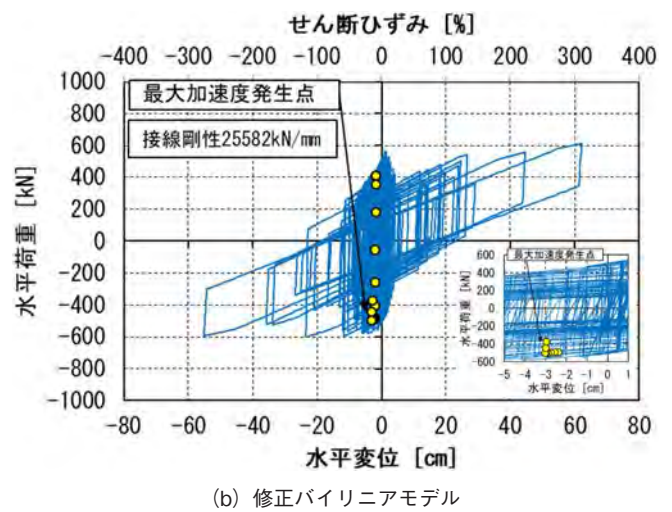
表 6 免震層を評価する剛性の違いに対する固有値結果

免震層を評価する剛性	1次モード	2次モード	3次モード
1次剛性 K_1 (100%)	0.95 s	0.35 s	0.21 s
2次剛性 K_2 (100%)	4.72 s	0.49 s	0.25 s

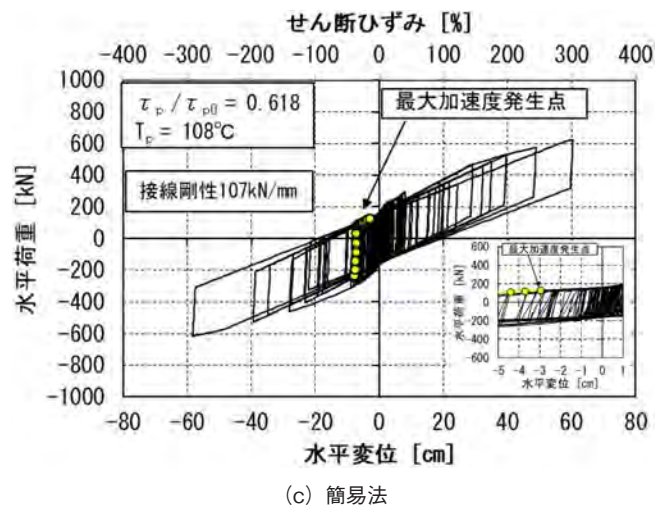
免震層の評価する剛性を1次剛性 K_1 (100%) とした場合の1次モードの約 0.95 s や、3次モードの約 0.21 s 近傍では、修正バイリニアモデルによる加速度応答スペクトルはKAモデルの約 1.4 倍となっており、応答加速度の影響が大きい K_2 (100%) 評価時の免震周期 4.72 s より十分短い短周期領域の振動モードで大きな差が現れている結果となっている。文献^{12), 13)}では他種の免震部材について、曲線系と直線系の復元力モデルによる地震応答値の違いが検討されており、短周期領域の高次振動モードの励起状態による差が要因であるとする本検討結果と調和的な結論が示されている⁶⁾。



(a) KA モデル



(b) 修正バイリニアモデル



(c) 簡易法

図 24 各モデルによる履歴曲線の比較

各復元力モデルによる履歴ループを図 24 に示す。図 24 には最大加速度発生ポイントとその直前のポイントを含めた拡大図も合わせて示す。最大加速度発生ポイント直前の履歴ループ形状から、KAモデルの最大加速度発生ポイント近傍での接線剛性 588 kN/mm は、修正バイリニアモデ

ルの1次剛性 $K_1=14400$ kN/mm よりも小さいことが確認できる。この剛性の違いについても、上部構造の応答加速度に大きな差を生じた要因の一つと考えられる。また、簡易法について、3つの復元力モデルの中で最も応答加速度が小さくなったのは、最大加速度発生ポイントが降伏後の2次剛性 K_2 の領域で発生していることや免震層の負担せん断力が他のモデルに比べて小さいことが要因と推察される。一方、免震層の応答変形に関しては、各復元力モデルで最大変形に至る履歴減衰の大きさはほぼ同じであったため、免震層の最大応答変形にあまり差が見られない傾向となっている。

次に図25に各地震波における免震層最大層せん断力係数、頂部の最大加速度、免震層最大水平変形について、それぞれKAモデル、修正バイリニアモデル、簡易法の結果をKAモデルによる結果と比較して示す。免震層最大層せん断力係数については、修正バイリニアモデル、簡易法ともにハードニング現象についてはモデル化されていないため、いずれの地震波においてもKAモデルよりも小さい値を示しており、危険側の評価となっている。修正バイリニアモデル、簡易法における頂部の最大加速度については、簡易法のCH1、SZ1を除くほとんどの地震波でKAモデルよりも大きい値を示しており、安全側の評価となっている。免震層最大応答変形については、簡易法のOS1を除いて修正バイリニアモデル、簡易法ともにKAモデルと良く一致している。簡易法については、免震層が最大応答変位に至るまでのエネルギー量を用いて評価することにより、概ねKAモデルと同様な傾向となるが、入力地震動によっては、最大応答変位に達した後免震層が繰り返し大きく変形する場合があります、この場合は免震層最大水平変形が過小評価となるため注意が必要となる。また、長周期地震動のOS1波のように長周期成分の影響が強い波の場合は、水平変形が過大評価となる可能性があるため注意が必要となる⁹⁾。

5. まとめ

本研究は、長周期地震動に対する懸念事項である免震層の過大な応答変形や長時間の繰り返し変形によるSnRBの発熱の影響に関する詳細検討を行い、SnRBの熱・力学連成挙動を解明した。初めにSnRBの実大サイズであるゴム直径 ϕ 700の試験体を用いて標準プラグ径と小径プラグ径の2種類について長時間繰り返し試験を実施して力学挙動を把握した。続いて、地震応答解析と熱伝導解析を組み合わせることにより、熱・力学連成挙動を考慮した新たな解析モデルを構築した。今回、SnRB特有の構造（内部鋼板露出型）を忠実に再現したモデル化を行った。また、標準プラグ径だけでなく、小径プラグ径の場合にも、今回構築した解析モデルによる結果が試験結果を良く再現できることを確認した。最後に、SnRBを用いた免震建物モデルの地震応答解析を実施して、復元力モデルの違いによる応答値の差異について検討した。複数の入力地震動による結果

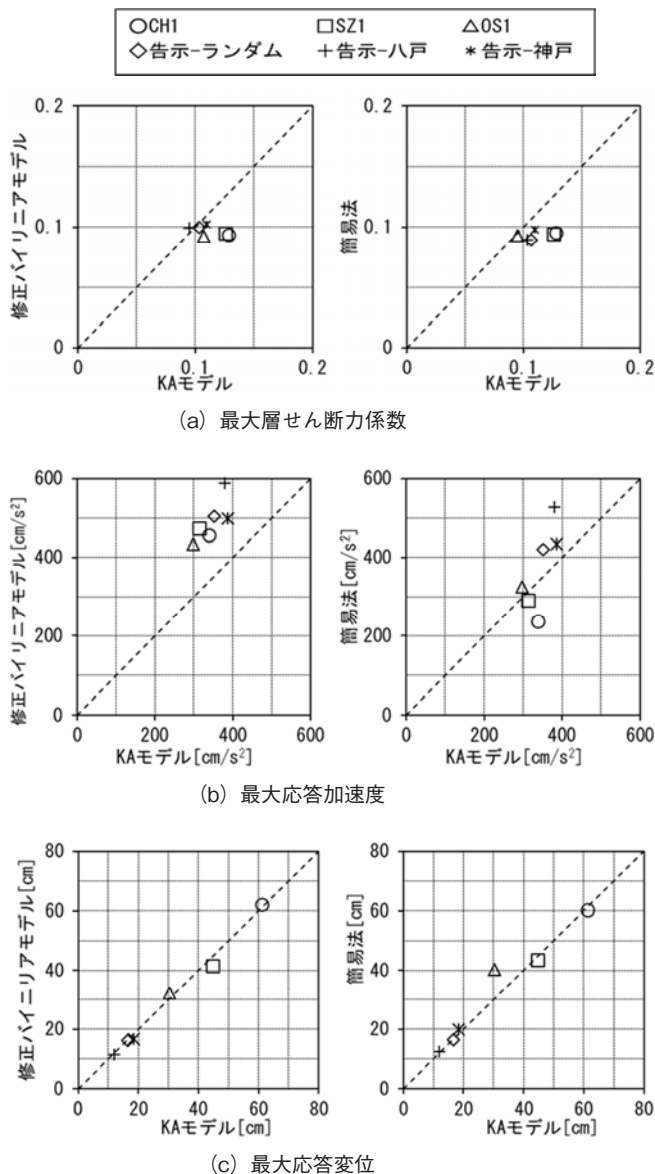


図25 各モデルの比較

からは、構築した復元力モデル（熱・力学連成挙動解析のKAモデル）による応答加速度は既往の修正バイリニアモデル（熱・力学連成挙動解析のバイリニアモデル）よりも小さく、応答変位はほぼ同じとなる傾向が共通して見られた。

また、長周期地震動に対する設計上の対応として、熱・力学連成挙動を簡易な方法で考慮して地震による応答を評価できる手法（簡易法）がすでに適用されているが、この簡易法に対する応答評価精度についても検証を行った。

簡易法において免震層が最大応答変位に至るまでのエネルギー量を用いて評価する方法と、本研究で構築した熱・力学連成挙動解析モデルとの比較により、4.4項に示す特殊な入力地震動を除き概ね同様な傾向となることが示された。

本研究で構築した熱・力学連成挙動解析により、長周期

地震動に対する免震層の過大な応答変形や長時間の繰り返しによる錫プラグの発熱の影響に関する詳細検討が可能となった。SnRBは長周期地震動に対する長時間の繰り返し変形による特性変化を考慮することが必要である。

今後は、積層ゴム直径や錫プラグ径を変更した他形状のSnRBを用いた場合の長周期地震動に対する免震建物の応答評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 山口直之, 柏木栄介, 福田滋夫, 中田安洋, 田中久也: 錫プラグ入り積層ゴム免震装置の開発(その1) 非鉛金属の機械特性試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.747-748, 2005
- 2) 免制震デバイス, 昭和電線電纜: 免制震デバイス式錫プラグ入り積層ゴムアイソレータ, 大臣評定-MVBR-0257, 2005
- 3) 光阪勇治, 朴紀衍, 山口直之, 福田滋夫, 中田安洋: 錫プラグ入り積層ゴム免震装置の開発(その5) 復元力特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.755-756, 2005
- 4) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について(プレスリリース), 2016
- 5) 北村春幸, 大宮幸: 長周期地震動対応を行う際の注意点, 特集今知りたい長周期地震動の基本と対処法, 建築技術, 第815号, pp.116-125, 2017
- 6) 柳勝幸, 清水美雪, 齊木健司, 安永亮, 菊地優: 錫プラグ入り免震積層ゴムの大変形復元力モデルに関する研究, 構造工学論文集, Vol. 67B, pp. 519-529, 2021
- 7) 免制震デバイス: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化(免制震デバイス式錫プラグ入り積層ゴム2017)
- 8) Masaru Kikuchi, Ken Ishii: Thermal-mechanical coupled behavior of elastomeric isolation bearings under cyclic loading, 16th European conference on earthquake engineering, pp. 18-21, 2018
- 9) 本田栄, 菊地優, 石井建, 中南滋樹, 安永亮, 福田滋夫: 長周期地震動に対する錫プラグ入り積層ゴム免震建物の応答評価精度に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, pp. 155-156, 2019
- 10) Open System for Earthquake Engineering Simulation - Home Page, <https://opensees.berkeley.edu/>, accessed Feb. 1, 2022.
- 11) 建設省: 平成12年建設省告示第1461号「超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」
- 12) 菊地優, 北村佳久, 井上圭一, 上田正生: 履歴減衰型免震部材の復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp.63-71, 2003 (DOI:https://doi.org/10.3130/aijs.68.63_2)
- 13) Masaru Kikuchi, Ian D. Aiken, Yoshihisa Kitamura, Masaiki Ueda, 'Seismic Response of Isolated Structures Depending on Hysteresis Models for Isolation Devices', JSSI 10th Anniversary Symposium on Performance of Response Controlled Buildings, Yokohama, Japan, 2004

SWCC(株)
柳 勝幸(やなぎ まさゆき)
電力・インフラ営業部 免震営業課
博士(工学)
免震製品の拡販に従事

SWCC(株)
清水 美雪(しみず みゆき)
免震制振部 技術課 課長
免震製品の設計・開発に従事

株式会社 免制震デバイス
木田 英範(きだ ひでのり)
開発設計部
博士(工学)

住友金属鉱山シボレックス株式会社
長井 大樹(ながい ひろき)
免制震材料部

北海道大学大学院工学研究院
石井 建(いしい けん)
助教
博士(工学)

北海道大学大学院工学研究院
菊地 優(きくち まさる)
教授
博士(工学)