高減衰積層ゴムの熱・力学的連成挙動の免震建物応答への影響評価

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF HEAT-MECHANICS INTERACTION BEHAVIOR IN HIGH-DAMPING RUBBER BEARINGS ON SEISMIC RESPONSE OF BASE-ISOLATED BUILDINGS

北村 春幸^{*1}, 早川 修平^{*2}, 竹中 康雄^{*3}, 高岡 栄治^{*4}, 室田 伸夫^{*5}

*Haruyuki KITAMURA, Shuhei HAYAKAWA, Yasuo TAKENAKA,
Eiji TAKAOKA and Nobuo MUROTA*

This paper presents evaluation of the influence on the seismic response of the structures base-isolated with High-Damping Rubber Bearings (HDB) under long-duration, and long-period earthquake motion. The dynamic properties of HDB, such as horizontal stiffness and equivalent damping ratio, are affected by heat in the rubber due to energy absorption during earthquake. In this study, relation of absorbed energy to dynamic properties is investigated by dynamic cyclic-loading test of HDB with large amplitude, and empirical equations are proposed. Additionally, seismic response analysis, under long-period earthquake motion is conducted and the influence of the heat-mechanics interaction of HDB on the response of the structure is evaluated.

Keywords : Base-isolated structure, High damping rubber bearings, Dynamic loading test, Cyclic deformation,
Heat-mechanics interaction behavior, Long period seismic ground motion

免震構造, 高減衰積層ゴム, 動的載荷試験, 繰り返し変形, 熱・力学的連成挙動, 長周期地震動

1. はじめに

近い将来の発生が危惧される東海・東南海・南海地震等の海溝型巨大地震が起きると東京・横浜, 名古屋, 大阪などの大都市では, 数秒から十秒の周期の地動が数分から十分間近く続く長周期地震動に襲われると指摘されている。特に, 震源特性やその地域の深い地下構造に起因した「特定の周期帯」が存在し, その周期帯では応答スペクトルやエネルギースペクトルが大きなピーク値を示す¹⁾。

免震建物を支える積層ゴムは, 解析モデルに用いる基準値として 1 次・2 次水平ばね定数と切片荷重, 鉛直ばね定数など力学特性や, 圧縮・引張限界面圧と限界せん断歪の関係やエネルギー吸収能力など限界性能が実大試験により評価されている。さらに, 水平ばね定数と切片荷重は, せん断歪み・面圧・温度に対する各種依存性が試験により評価されている^(例えば2)。これらの試験により, 減衰性能を併せ持つ高減衰積層ゴム(HDB)や鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)では, 減衰力を熱エネルギーに変換してエネルギーを消費するため, 大きなせん断変形が繰り返し加わると積層ゴムの温度上昇を招き, その結果として水平剛性や減衰性能が低下することがわかっている³⁾⁴⁾。本研究では, この現象を積層ゴムの熱・力学的連成挙動と呼ぶ。

これまで, 免震構造の設計の際には, 継続時間が数十秒から 120 秒以内の標準波や告示波を用いた時刻歴応答解析から, 上部構造の層間変形角や層せん断力, 免震層変位などの最大値に対して耐震性能を判定してきた。積層ゴムに対してもせん断歪や圧縮・引張面圧などの最大値に対して耐震性能を判定してきた^(例えば5)。このような最

大値による評価の前提として, 標準波や告示波では, 高減衰積層ゴム(HDB)や鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)の水平ばね定数と切片荷重の低下が無視できる程度に留まり, かつ限界値がエネルギー吸収量に対して数倍以上の余裕度を持つことが確認されている^(例えば4)。免震構造は免震層の水平変位に応じて 1 次固有周期が 1 秒を下回る値から 4.5 秒までの広範囲に変動するため, 長周期地震動の「特定の周期帯」の影響を受けることになる。さらに, 継続時間が標準波や告示波の数倍から十倍も長いことも加わって, 長周期地震動により免震構造には, 標準波や告示波の数倍からときには十倍以上の地震エネルギーが入力することになる¹⁾⁶⁾。従って, 長周期地震動に対しては, 一つの地震動による応答解析のなかでも減衰性能を併せ持つ積層ゴムの減衰性能の低下を考慮することが必要になる。

本研究では, 大振幅・多数回繰返しによる積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した免震構造の地震応答解析手法の提案を目的に, 高減衰積層ゴム(HDB)と鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)を対象に, 正弦波及び地震応答波を入力とした大振幅・多数回繰返し変形下での動的載荷実験を実施した。既報⁷⁾ではこれらの実験データをもとに高減衰積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムの多数回繰返し変形下での荷重変形関係, 切片荷重, 2 次剛性, ゴム内部温度の変化を示した。実験結果から, 鉛プラグ入り積層ゴムでは吸収エネルギーの増加に伴い, 2 次剛性の変化は小さいものの, 鉛プラグの温度上昇により切片荷重が 40~60%に低下し, 高減衰積層ゴムは温度上昇も小さく, 力学的特性の変化も小さいことを示した。

*1 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

*2 鹿島建設㈱ 工修
(元 東京理科大学 大学院生)

*3 鹿島建設㈱小堀研究室 室次長・工修

*4 鹿島建設㈱技術研究所 主任研究員・博士(工学)

*5 ㈱ブリヂストン免震開発部 ユニットリーダー・Ph. D.

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Kajima Corporation, M. Eng.

(Former Graduate Student, Tokyo University of Science)

Assistant Director, Kobori Research Complex, Kajima Corporation, M. Eng.

Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Kajima Corporation, Dr. Eng.
Unit Leader, Seismic Isolation Products Dept., Bridgestone Corporation, Ph. D.

本論文では、大振幅・多数回繰返し変形下での積層ゴム内部の温度上昇が累積履歴エネルギー吸収量により置き換えられることを確認する。実験結果より既往の各種依存式の精度を検討するとともに、これまで規定されていなかった履歴依存性の定式化を試みる。次に、これらの各種依存式を適用して、実験結果から大振幅・多数回繰返し依存性を抽出し、高減衰積層ゴムの累積履歴エネルギー吸収量と水平剛性と減衰性能の関係を定式化する。さらに、定式化した累積履歴エネルギー依存式を復元力特性に組込んだ熱・力学的連成挙動を考慮した免震構造の地震応答解析手法を提案する。最後に、時刻歴解析により、熱・力学的連成挙動による積層ゴムの水平剛性や減衰性能の低下が、継続時間が長い長周期地震動による免震構造の応答性状に与える影響を評価する。

2. 高減衰積層ゴムの基本特性と既往の実験式

高減衰積層ゴムは、特殊充填剤を配合してゴムの弾性に塑性特性を付与したもので、ゴム材料そのものが減衰性能を持つ。その結果、天然ゴム系積層ゴムに比べて、以下のような依存性が顕在化する⁴⁾。

- ①振幅(歪)依存性：小変形では線形で剛性が高く、大変形ではループを描き剛性が低下するなど、振幅に応じて水平剛性が変化する。
- ②振動数(速度)依存性：振動数が高くなると水平剛性が大きくなるなど、荷重の載荷速度により水平剛性が変化する。
- ③面圧依存性：面圧が高くなると水平剛性が低下し、座屈限界歪みが減少するなど、面圧により水平剛性が変化する。
- ④温度依存性：水平剛性の温度による変化。温度が高くなると水平剛性が低下する。
- ⑤履歴依存性：大きな水平変形を受けた直後に水平剛性が低下するが、時間が経過すると剛性の回復がみられる。
- ⑥大振幅・多数回繰返し依存性：大振幅・多数回繰返しを受けると減衰エネルギー吸収による温度上昇に伴い水平剛性が低下する。ゴムの塑性が大きいほど、影響を受けやすい。

高減衰積層ゴムの復元力特性は、図1に示すようにスケルトンカーブと履歴ループを用いて定式化している。

図1 高減衰積層ゴムの復元力特性の概念図

スケルトンカーブを規定する最大変形 $\delta_{\max}(\gamma)$ と等価せん断剛性 $K_{eq}(\gamma)$ は、ゴム材料により定まる等価せん断弾性率 $G_{eq}(\gamma)$ によって表される。履歴ループを規定する2次剛性 $K_2(\gamma)$ と切片荷重 $Q_d(\gamma)$ は、 $K_{eq}(\gamma)$ と降伏荷重特性係数 $u(\gamma)$ により表され、それまで経験した最大せん断歪に応じて $K_2(\gamma)$ と $Q_d(\gamma)$ が変化する履歴則が採用されている。また、切片応力 $\tau_d(\gamma)$ とせん断弾性率 $G_2(\gamma)$ は、 $Q_d(\gamma)$ と $K_2(\gamma)$ により表される。

$$\delta_{\max}(\gamma) = h_r \cdot \gamma \quad (1)$$

$$K_{eq}(\gamma) = G_{eq}(\gamma) \cdot A_{ef} / h_r \quad (2)$$

$$K_2(\gamma) = K_{eq}(\gamma) \{1 - u(\gamma)\} \quad (3)$$

$$G_2(\gamma) = K_2(\gamma) \cdot h_r / A_{ef} \quad (4)$$

$$Q_d(\gamma) = u(\gamma) \cdot K_{eq}(\gamma) \cdot h_r \cdot \gamma \quad (5)$$

$$\tau_d(\gamma) = Q_d(\gamma) / A_{ef} \quad (6)$$

ここで、 γ ：積層ゴムのせん断歪 $= \delta / h_r$ (ただし、 $10 \leq \gamma \leq 270\%$)、 h_r ：ゴム総厚、 A_{ef} ：有効断面積 $(= \pi/4 \cdot (D^2 - d^2))$ 、 D ：内部鋼板外径、 d ：内部鋼板内径を示す。この復元力を規定する G_{eq} 、 u 及び等価減衰定数 H_{eq} は、せん断歪 γ の関数として、以下のように実験式が与えられている⁴⁾。

$$G_{eq}(\gamma) = G_{eq0} (2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4) \quad (7)$$

$$H_{eq}(\gamma) = H_{eq0} (0.9150 + 0.2364\gamma - 0.1804\gamma^2 + 0.02902\gamma^3) \quad (8)$$

$$u(\gamma) = u_0 (0.9028 + 0.2711\gamma - 0.2083\gamma^2 + 0.03421\gamma^3) \quad (9)$$

ここで、 G_{eq0} 、 H_{eq0} 、 u_0 ： G_{eq} 、 u 、 H_{eq} の基準値、ゴム材料呼称 X0.6 (材料認定番号: MVBR-0341) の場合は $G_{eq0}=0.620$ (N/mm²)、 $H_{eq0}=0.240$ 、 $u_0=0.408$ で与えられる。なお、基準値は、基準面圧 (2次形状係数 $S_2=3 \sim 10$ に応じて $\sigma_0=6 \sim 13$ N/mm²)、振幅 $\gamma=100\%$ 、周期 3s 正弦波加振実験による3サイクル目の履歴ループから求めた値を温度 20℃ に換算している。なお、製品検査は、基準面圧、振幅 $\gamma=100\%$ 、周期 100s の基本特性試験による3サイクル目の履歴ループから求めた基本特性値 G_{eqB} 、 H_{eqB} 、 u_B を用いて検証を行っている。

振動数 f 時の $K_{eq}(f)$ と $H_{eq}(f)$ を規定する振動数(速度)依存性として、基準振動数 f_0 時の $K_{eq}(f_0)$ と $H_{eq}(f_0)$ に乗ずる係数を求める実験式が提案されている。ゴム材料呼称 X0.6 の場合は、下式で与えられる。

$$K_{eq}(f) = \{0.0628 \log(f) + 1.030\} K_{eq}(f_0) \quad (10)$$

$$H_{eq}(f) = \{0.0991 \log(f) + 1.047\} H_{eq}(f_0) \quad (11)$$

ここに、 f ：振動数(Hz)、 $f_0 = 0.33$ Hz

面圧 σ 時の $K_{eq}(\sigma)$ と $H_{eq}(\sigma)$ を規定する面圧依存性として、基準面圧 σ_0 時の $K_{eq}(\sigma_0)$ と $H_{eq}(\sigma_0)$ に乗ずる係数を求める実験式が基準とするせん断歪 γ_0 ごとに提案されている。ゴム材料呼称 X0.6 の場合は、下式で与えられる。

$\gamma_0=100\%$ ：

$$K_{eq}(\sigma) = \{1.134 - 0.003\sigma - 0.001\sigma^2 + 4.20\sigma^3 \times 10^{-5}\} K_{eq}(\sigma_0) \quad (12)$$

$$H_{eq}(\sigma) = \{0.746 + 0.009\sigma + 7.926\sigma^2 \times 10^{-4}\} H_{eq}(\sigma_0) \quad (13)$$

$\gamma_0=200\%$ ：

$$K_{eq}(\sigma) = \{1.070 - 0.0075\sigma - 5.10\sigma^2 \times 10^{-4} + 1.35\sigma^3 \times 10^{-5}\} K_{eq}(\sigma_0) \quad (14)$$

$$H_{eq}(\sigma) = \{0.768 + 0.008\sigma + 6.679\sigma^2 \times 10^{-4}\} H_{eq}(\sigma_0) \quad (15)$$

ここに、 σ ：面圧(N/mm²)、 $\sigma_0 = 13$ N/mm²

外部温度 t 時の $K_{eq}(t)$ と $H_{eq}(t)$ を規定する温度依存性として、基準温度 t_0 時の $K_{eq}(t_0)$ と $H_{eq}(t_0)$ に乗ずる係数を求める実験式が提案されている。ゴム材料呼称 X0.6 の場合は、下式で与えられる。

$$K_{eq}(t) = \{1.143 - 1.014 \times 10^{-2}t + 2.057 \times 10^{-4}t^2 - 2.943 \times 10^{-6}t^3\} K_{eq}(t_0) \quad (16)$$

$$H_{eq}(t) = \{1.104 - 5.825 \times 10^{-3}t + 1.760 \times 10^{-5}t^2 + 6.396 \times 10^{-7}t^3\} H_{eq}(t_0) \quad (17)$$

ここに、 t ：ゴム温度(℃)、 $t_0 = 20$ ℃

高減衰積層ゴムでは、履歴依存性に対応するため製品出荷時に大振幅 $\gamma=270\%$ 載荷を行い、水平剛性を低下させた後、剛性の回復予測値を基準値として採用してきた。ゴム材料呼称 X0.6 では、大きな水平変形を受けた直後の水平剛性の低下が少ないとの判断により、大振幅載荷を行わずに基準値を定めている。いずれにしても、時間経過に応じた水平剛性の変動は考慮されず、設計では一つの基準値が用いられてきた。

標準波・告示波では一つの地震動のなかでの温度上昇に伴う K_{eq}

と H_{eq} の変動は小さいと判断され、大振幅・多数回繰返し依存性は時刻歴応答解析には考慮されなかった。ただし、減衰性能を持つ免震部材について、終局状態に至るまでのエネルギー吸収量や繰返し回数依存性などを評価する動的加振実験が行われていた。

3. 動的載荷実験による高減衰積層ゴムの基本特性

3.1 実験計画

高減衰積層ゴムの試験体は、実大装置サイズを直径 $\phi 1000\text{mm}$ 、ゴム総厚 200mm に設定し、載荷試験機の加振能力を勘案した上で、スケール効果の影響を明らかにするための縮尺を設定し、HDB500 (1/2)、HDB300 (1/3.3)、HDB225 (1/4.4) の縮小試験体を用いた。試験体一覧を表 1 に示す。縮尺試験体については積層ゴムの熱容量や熱移動の特性を変化させないよう中間鋼板の厚さなどの積層ゴム各部の縮尺率が一律になるよう設定している。図 2 に HDB500 試験体の積層ゴム内部の温度計測位置を示す。温度は熱電対により計測し、ゴム内部 1/2 高さ位置に 7 点 (C1~C7)、ゴム内部 1/4 高さ位置に 3 点 (Q1~Q3)、鋼製フランジ下面近傍に 2 点 (T1,T2)、フランジ上面に 3 点 (F1~F3) の計 15 点とした。

本論文では地震動が始まってから終わるまでの高減衰積層ゴムの発熱・温度上昇による水平剛性や切片荷重の低下および損傷を確認するために、面圧を一定に保った状態で、積層ゴムに繰返し水平変形を与える実験と、地震動終了後、次の地震動までの水平剛性や切片荷重の回復の程度を計測する履歴依存性確認実験を行った。

表 2,3,4 に本実験の加振ケース一覧を示す。表 2 の名称 gN1tN2cN3 の数値は、N1 は加振振幅のせん断歪(%)を、N2 は加振周期(s)、N3 は繰返し回数を表す。正弦波加振試験は、加振周期、せん断歪振幅、繰返し回数をパラメータに行った。地震波加振は、表中の地震動による、免震周期 4.0,4.6,5.6 秒、切片荷重に等価な降伏せん断力係数 0.044,0.03,0.022 の修正 Bi-Linear 型復元力特性を用いた 1 質点系モデルによる応答解析を行い、その応答変位波形を用いた⁷⁾。履歴依存性確認実験は、一つの積層ゴムに対して、加振から次の加振までのインターバルとして 2 時間、4 時間、18 時間の順に 3 回取る場合と、その逆の順に取る 2 ケースを実施し、さらに 37 日後に加振を行った。なお、全ての加振ケースの前後に、基本特性値の変化を確認する基本特性試験を行っている。

3.2 振動諸元の実験値を基本履歴曲線から求める計算式

実験で得られる履歴ループから履歴特性を規定する振動諸元 K_{eq} 、 G_{eq} 、 H_{eq} 、 u 、 Q_d を求める計算式を以下に示す。(図 1 参照)

$$K_{eq} = \frac{Q_{\max}^+ + Q_{\max}^-}{\delta_{\max}^+ + \delta_{\max}^-} \quad (18)$$

$$G_{eq} = K_{eq} \cdot h_r / A_{ef} \quad (19)$$

$$H_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_{\max}^2} \quad (20)$$

$$u = Q_d / Q_{\max} \quad (21)$$

$$Q_d = \frac{Q_{\max}^+ + Q_{\max}^-}{2} \quad (22)$$

ここで、 $Q_{\max}^+$ 、 $Q_{\max}^-$: 正負の最大せん断力、 $\delta_{\max}^+$ 、 $\delta_{\max}^-$: 正負の最大変位、 ΔW : 1 ループ当たりの履歴エネルギー吸収量、基本履歴曲線において、歪 $\gamma = \pm 50\%$ の点を結ぶ直線の傾きを、そのループにおける 2 次剛性 K_2 とする。

表 1 試験体諸元

試験体	HDB500	HDB300	HDB225
外径(mm)	500	300	225
内径(mm)	15	0	0
ゴム総厚(mm)	102	60	44.8
1次形状係数	35.7	37.5	35.2
2次形状係数	4.9	5	5.02
せん断弾性率(N/mm ²)	0.62	0.62	0.62
等価減衰定数	0.24	0.24	0.24

図 2 HDB500 試験体の内部温度計測位置

表 2 正弦波加振ケース一覧

名称	HDB500 加振順	HDB300 加振順	周期(s)	せん断歪み(%)	繰返し回数
g50t0.75c50	1	1	0.75	50	50
g50t3c100	2	2	3	50	100
g100t3c100	3	3	3	100	50
g100t5c50	4	8	5	100	50
g200t5c100	5	9	5	200	100
g200t3c100	6	4	3	200	100
g100t1.8c100	-	5	1.8	100	100

表 3 地震波加振ケース一覧

入力地震波 名称	HDB500 加振順	HDB300 加振順	最大速度 (kine)	主要動継続時間 Tm(sec)	最大変形 Disp(mm)
JMA KOBE	7	-	45.0	180	145
JSCA 告示波	8	-	22.3	60	118
BCJ L2	9	-	37.9	120	218
MEXICO	10	-	41.7	180	166
TOMAKOMAI	11	6	24.8	290	217
三の丸 EW	12	7	35.1	320	192

注)HDB300 の加力速度、変位は HDB500 と相似な値を使用している。

表 4 履歴特性実験加振ケース一覧

1セット	面圧 (N/mm ²)	周期(sec)	せん断歪み(%)	繰返し回数
基本特性(前)	10	100	100	3
正弦波	5	3	200	50
基本特性(後)	10	100	100	3

3.3 大振幅・多数回繰返し実験による振動諸元の変動

図 3 に、HDB500 試験体の正弦波加振実験 g100t3c100(せん断歪振幅 100%，加振周期 3s、繰返し回数 100 回)ケースにおける水平変位 δ と累積履歴エネルギー吸収量 E の時刻歴、水平荷重 Q —水平変位 δ の関係、試験体各部温度の時刻歴を示す。図 4 に同じ正弦波加力実験における、温度または累積履歴エネルギー吸収量と基準値 Q_{d0} 、 $K_{2,0}$ に対する切片荷重 Q_d 及び 2 次剛性 K_2 の低下率 Q_d/Q_{d0} 、 $K_2/K_{2,0}$ との関係を示す。

図 3(a),(b)より、一定振幅での繰返し回数が増えると累積履歴エネ

ルギー吸収量 E はほぼ線形に増加していき、最大層せん断力 Q_{max} は僅かに低下していく。図 3(c)より、積層ゴムのフランジプレート (F1~3)の表面温度は上昇が見られず外気温とほぼ同じ値を示す。積層ゴムの内部温度は、1/2 高さ位置(C1~C7)、1/4 高さ位置(Q1~Q3)とともに、表面からの距離が異なってもほぼ同じ値を示す。最初の数回は大きく温度が上昇するが、その後はほぼ線形に上昇していく。ゴム表面温度は、内分温度と外気温の中間的な値で上昇する。

図 4 より、切片荷重と 2 次剛性の低下率 Q_d/Q_{d0} , K_2/K_{20} は、ほぼ同じ値を示し、最初の数回は大きく低下し、その後はほぼ同じ割合で低下していく。高減衰積層ゴムは、せん断変形することにより、内部ゴムがほぼ一様に温度上昇し、内部温度に逆比例して切片荷重 Q_d と 2 次剛性 K_2 が低下していく⁷⁾。積層ゴム内部での温度分布はほぼ一様であり、内部温度と累積履歴エネルギー吸収量は相関関係にあると見なせるため、水平剛性と減衰性能は単位体積当たりの累積履歴エネルギー吸収量 E/V (V : ゴム体積= $A_{ef} \cdot h_r$) の関数として評価する。

3.4 履歴依存性に着目した振動諸元の変動

図 5 に、HDB500 と HDB300 に対して行った表 2, 3 の正弦波加力実験と基本特性試験の全加力ケースにわたって基準値に対する G_{eq} , u , H_{eq} , G_2 と τ_d の変動を、積層ゴムの単位体積当たりの累積履歴エネルギー吸収量 E/V の累積値を横軸に取って示す。表 4 の履歴特性確認実験についても同様に、HDB225 に対して行った基本特性試験を含む全加力ケースについて、基準値に対する K_{eq} , u , H_{eq} の変動と E/V の関係を図 6 に示す。図中の▲印は正弦波加振実験を、△印は加振前に、△印は加振後に行った基本特性試験を示す。

図 5 より、 G_{eq} と G_2 の各加振ケースの 1 サイクル目の値は、試験

図 3 正弦波加振実験 (HDB500g100t3c100)

図 4 正弦波加振実験(HDB500g100t3c100)による力学特性と時刻歴

後のインターバル時間により次の試験では多少回復するが、1 ケース目の値が最大で全体的には徐々に低下する傾向を示す。どの加振ケースも、加振が始まる数回は急激に低下し、その後は一定の割合

図 5 基準値に対する G_{eq} , u , H_{eq} , G_2 , τ_d の変動と E/V の関係

で低下する傾向を示す。切片応力 τ_d は、どの加振ケースも1サイクル目が最大で加振回数が増えると低下していく。加振実験の前後に行われる基本特性試験における切片応力 τ_d は、累積履歴エネルギー吸収量が増加することにより僅かに低下する傾向を示すがその影響は小さい。また、降伏荷重特性係数 u と等価減衰定数 H_{eq} は1ケース目の1サイクル目が最大で、徐々に低下する傾向を示すがその影響は小さい。低下率が小さいため、インターバル時間による回復も無視できる程度に留まる。

図6より、いずれの加振ケースにおいても、加振中の等価せん断弾性率 G_{eq} は、ほぼ同じ割合で低下する。加振後の基本特性試験における等価せん断弾性率 G_{eq} はほぼ同じ値を示し、加振前の基本特性試験における G_{eq} はインターバル時間が長くなるほど初期値に近づき、回復の割合が増す。降伏荷重特性係数 u と等価減衰定数 H_{eq} は、加振回数が増えても僅かに低下するのみで、累積履歴エネルギー吸収量の影響は小さい。従って、インターバルによる回復も無視できる。積層ゴムの復元力特性は、 G_{eq} , u , H_{eq} により規定される。図6(b),(c)から正弦波加振時の u/u_0 及び H_{eq}/H_{eq0} と E/V の関係を直線で近似する。それら勾配の平均値はそれぞれ -0.0002 , -0.0004 であり、正弦波加振による E/V が概ね 100N/mm^2 であることから加振前後でわずかに 0.02 , 0.04 低下するのみである。以上から、 E/V が u と H_{eq} に与える影響は小さいと判断して、 $u/u_0=1.0$, $H_{eq}/H_{eq0}=1.0$ と設定する。以降は、 G_{eq} と E/V との関係の定式化を試みる。

3.5 基本特性試験に基づく履歴依存性の定式化

ここでは、表2,4の正弦波加振実験の前後に行われる基本特性試験の結果をもとに、等価せん断剛性 K_{eq} の回復率とインターバル時間 t との関係の定式化を試みる。図7に積層ゴムの単位体積当たりの累積履歴エネルギー吸収量 E/V を横軸に取り、加振実験の前後に行われた基本特性試験の等価せん断剛性 K_{eqB} の、最初に実施した基本特性試験の値 K_{eqB1} に対する比率 K_{eqB}/K_{eqB1} を示す。

図7より、積層ゴムの累積履歴エネルギーが大きくなるほど等価せん断剛性の低下率 K_{eqB}/K_{eqB1} は大きくなるが、積層ゴムの大きさ 500ϕ , 300ϕ , 225ϕ に関係なく、破線で示す下限に収斂している。ここでは、実験における最大振幅 $\gamma=\pm 200\%$ 時の値を、下限値 $K_{eqB}/K_{eqB1}=0.6$ として採用する。

図8(a)に $i-1$ 番目の加振実験の直後に行った基本特性試験の $K_{eqBa,i-1}$ 値と次の i 番目の加振実験の直前に行った基本特性試験の $K_{eqBb,i}$ 値との比率 $K_{eqBb,i}/K_{eqBa,i-1}$ と $i-1$ 番目と i 番目の加振実験のインターバル時間 t との関係を示す。図7から求めた下限値 $K_{eqB}/K_{eqB1}=0.6$ を、図8(a)の $K_{eqBb,i}/K_{eqBa,i-1}$ に乗じた値を回復率 K_{eqR} と定義し、下式で表す。

$$K_{eqR} = \frac{K_{eqB}}{K_{eqB1}} \cdot \frac{K_{eqBb,i}}{K_{eqBa,i-1}} = 0.6 \frac{K_{eqBb,i}}{K_{eqBa,i-1}} \quad (23)$$

等価せん断剛性の回復率 K_{eqR} とインターバル時間 t との関係を図8(b)に示す。⑤履歴依存性として、図8(b)より回復率 K_{eqR} をインターバル時間 t の関数で表す。 $t=0$ のとき 0.6 に、 $t=\infty$ のとき 1.0 となることから、回復率 $K_{eqR}(t)$ として下式を設定する。

$$K_{eqR}(t) = 1.0 - \frac{0.4}{1 + 0.1t^{0.5}} \quad (24)$$

なお、等価減衰定数の回復率 $H_{eqR}(t)$ は、図6(b)よりインターバルによる回復も無視できることから、下式を設定する。

$$H_{eqR}(t) = 1.0 \quad (25)$$

図6 基準値に対する K_{eq} , H_{eq} , u の変動と E/V の関係

図7 等価せん断剛性 K_{eqB}/K_{eqB1} と累積履歴エネルギーの関係

図8 等価せん断剛性の回復率とインターバル時間の関係

4. 各種依存式の加振実験に基づく検証

4.1 振幅(歪)依存式の検証

図5(a),(d)より、 $\gamma=200\%$ の大歪振幅で繰返し回数100回の正弦波加振を受けた後は、本実験のインターバル時間では力学特性の十分な回復が望めない。従って、振幅依存式の検証は、表2に示す歪振

幅 $\gamma=50,100,200\%$ で加振順序が HDB500 で 6 ケースまで、HDB300 で 4 ケースまでの比較的累積履歴エネルギー吸収量の少ない範囲の正弦波加振実験の結果に対して行う。それらの 3 サイクル目の履歴ループから求めた G_{eq} , H_{eq} と加振歪振幅 γ の関係を図 9 に示す。左列の図は実験値を、右列は実験値に歪振幅以外の振動数(10),(11)式、面圧(12)~(15)式、温度(16),(17)式、インターバル時間(24),(25)式による補正を加えた値 G'_{eq} , H'_{eq} (符号に'を付加)を示す。インターバル時間 t は直前の正弦波または地震波による加振実験終了時からの経過時間とする。図中の太実線は、 $G_{eq}(\gamma)$ と $H_{eq}(\gamma)$ の歪振幅依存式(7),(8)を示す。図 9 より、等価せん断弾性率 G_{eq} は歪振幅が大きくなるに従って急激に低下するが、等価減衰定数 H_{eq} は歪振幅に依存せず概ね一定の値を示す。また、 G_{eq} , H_{eq} ともに、積層ゴム 300 ϕ と 500 ϕ の差は少ない。歪振幅依存式は実験値の傾向を比較的良く捉えており、補正後の値に対してはほぼ平均的な値を示す。しかしながら、補正値は依存式に対して 2,3 割の幅を持つてばらつく。

4.2 振動数(速度)依存式の検証

振動数依存式(10),(11)は、平 12 建告第 1446 号免震材料認定⁹⁾における基準値(加振振動数 0.33Hz)と出荷時の製品検査で行われる基本特性値(加振振動数 0.01Hz)とを関係付けるために作られた振動数補正式であり、振動数 $f=0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.33\text{Hz}$ の 6 点の実験結果を用いて作成されている。図 9 と同じ正弦波加振実験の結果を用いて、等価せん断剛性と等価減衰定数の基準値 K_{eq0} , H_{eq0} に対する実験値 K_{eq} , H_{eq} の比率 K_{eq}/K_{eq0} , H_{eq}/H_{eq0} と加振振動数 $f(\text{Hz})$ の関係を図 10 に示す。左列の図は実験値を、右列は実験値に振動数以外の歪振幅(2),(7),(8)式、面圧(12)~(15)式、温度(16),(17)式、インターバル時間(24),(25)式による補正を加えた値 K'_{eq0}/K_{eq0} , H'_{eq0}/H_{eq0} を示す。図中の太実線は、振動数 $f=0.01\sim 0.33\text{Hz}$ の範囲で求めた $G_{eq}(f)$ と $H_{eq}(f)$ の振動数依存式 (10),(11)を表し、それらを 0.001~5Hz まで外挿して太破線です。図 10 より、 G_{eq} , H_{eq} ともに振動数に比例して僅かに大きくなる傾向を示す。また、振動数依存式は補正後の値に対してほぼ平均的な値を示すが、補正後の値は 2,3 割の幅でばらつく。

4.3 各種依存式の検証

積層ゴムの累積履歴エネルギー吸収量 E/V を横軸に取って、表 2 に示す正弦波加振試験と基本特性試験の全てについて、それぞれの 3 サイクル目の履歴ループから求めた等価せん断剛性と等価減衰定数の基準値に対する比率 K_{eq}/K_{eq0} , H_{eq}/H_{eq0} を図 11 に示す。左列の図は実験値を、右列は実験値に各種依存式(2),(7)~(17),(24),(25)を用いた補正を加えた値 K'_{eq0}/K_{eq0} , H'_{eq0}/H_{eq0} を示す。図中、□と○がそれぞれ HDB500 と HDB300 の図 9,10 に示した累積履歴エネルギー吸収量の少ない範囲の正弦波加振実験の値を、■と●がそれ以降の正弦波加振実験と基本特性試験の値を示す。

図 11 の左列の実験値 K_{eq}/K_{eq0} , H_{eq}/H_{eq0} は、1 日の実験終了後、翌日の実験まで若干の回復が見られるものの、全体的に右下がりの傾向を示す。右列の補正後の値 K'_{eq0}/K_{eq0} , H'_{eq0}/H_{eq0} は、大幅に改善され、ともに 1.0 の近傍にばらつき、補正が有効なことを示している。ただし、 K'_{eq0}/K_{eq0} については累積履歴エネルギー吸収量の多い■と●印は徐々に低下し、へたる傾向を示す。

以上の検討から、振幅(2),(7),(8)式、振動数(10),(11)式、面圧(12)~(15)式、温度(16),(17)式、インターバル時間(24),(25)式を用いた補正は実験値の概ね平均的な値を示し、妥当であることがわかる。ただ

図 9 振幅依存性に関する実験値と実験式の比較

図 10 振動数依存性に関する実験値と実験式の比較

図 11 正弦波加振実験を用いた各種依存式の検証

し、実験値は2,3割の幅でばらつく。

5. 大振幅・多数回繰返し実験による熱・力学的連成挙動の定式化

表2に示す繰返し回数50, 100回の正弦波加振実験の結果を用いて、積層ゴムの等価せん断剛性 K_{eq} と累積履歴エネルギー吸収量 E/V との関係の定式化を試みる。図12に各種依存式(2),(7)~(17),(24),(25)による補正を加えた等価せん断剛性 K'_{eq0} の基準値 K_{eq0} に対する比率 K'_{eq0}/K_{eq0} と累積履歴エネルギー E/V の関係を示す。補正式そのものが実験値に対してばらつきを示すため、図12の K'_{eq0}/K_{eq0} と E/V の関係にもばらつきが現れる。ただし、 K'_{eq0}/K_{eq0} と E/V の関係は、積層ゴムの直径、加振振幅や振動数が異なっても、最初は急激に低下するがその後は緩やかに減少する相似な性状を示す。そこで、各種依存式が3サイクル目の履歴ループから求まる値を定めていることに着目して、3サイクル目の履歴ループから求めた等価せん断剛性 K_{eq3} を基準にした等価せん断剛性の低下率 K_{eq}/K_{eq3} と E/V の関係を図13に示す。図中の横軸の E/V は、3サイクル目を原点として1から2サイクル目は負の値で示す。免震層の剛性の低下を大きく見込むことは応答変位にとって安全側の評価になることから、図13において下限値を包絡するよう、 K_{eq}/K_{eq3} と $(E-E_3)/V$ の関係を下式で定める。

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq3}} \left(\frac{E-E_3}{V} \right) = -2.5 + 0.1e^{-\left(\frac{E-E_3}{3V}\right)} + 3.4e^{-\left(\frac{E-E_3}{1000V}\right)} \quad (26)$$

(26)式中の3サイクル目までの E_3/V は、振幅、振動数により異なるが、ここでは基準値 K_{eq0} を定める基準面圧、加振振幅 $\gamma=100\%$ 、加振周期3sの正弦波加振実験による3サイクル目までの値を用いることにする。求めた $E_3/V=2.1\text{N/mm}^2$ を(27)式に代入して、1サイクル目からの K_{eq}/K_{eq0} と E/V の関係式を下式で定める。

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq0}} \left(\frac{E}{V} \right) = -2.5 + 0.2e^{-(E/V)} + 3.4e^{-(E/1000V)} \quad (27)$$

表3に示す地震波加振実験の結果を用いて、累積履歴エネルギー依存式(27)を検証する。HDB500加振実験の中から苦小牧波と三の丸EW波の履歴ループを図14(a)に示す。図14(a)中の口印で示す履歴曲線の正負のピーク値から K_{eq} を求め、この値に振幅(2),(7),(8)式、振動数(10),(11)式、面圧(12)~(15)式、温度(16),(17)式による補正を加えた値 K'_{eq0} を求める。等価せん断剛性の低下率 K_{eqH} は、 K'_{eq0}/K_{eq0} に履歴依存性を考慮するため、最初の基本特性試験の値 K_{eqB1} と地震波加振実験の直前に行われた基本特性試験の値 K_{eqBi} の比率 K_{eqB1}/K_{eqBi} を乗じた下式で定める。

$$K_{eqH} = \frac{K_{eqB1}}{K_{eqBi}} \cdot \frac{K_{eq0}'}{K_{eq0}} \quad (28)$$

等価せん断剛性の低下率 K_{eqH} と累積履歴エネルギー吸収量 E/V の関係を図14(b)に示す。図中の口印は図14(a)中の口印で示す履歴曲線の正負のピーク値から求まる K_{eqH} を示し、実線は(27)式を示す。図14(b)より、実験値にばらつきが見られるものの、(27)式は地震波加振実験から求まる値のほぼ平均的な値を示すことがわかる。

6. 積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した地震応答解析法

これまで、高減衰積層ゴムの復元力特性は、歪依存性を考慮した修正Bi-linear型が一般的に用いられてきた。この復元力特性の中の等価剛性 $K_{eq}(\gamma)$ の歪依存式(7)に累積履歴エネルギー依存式(27)を付

図12 大振幅・多数回繰返し実験における K'_{eq0}/K_{eq0} と E/V の関係

図13 3サイクル目で規準化した K_{eq}/K_{eq3} と E/V の関係

(a) 履歴ループ

(b) K_{eq}/K_{eq0} と E_3/V

図14 地震動加振実験の $K_{eq}/K_{eq0}-E_3/V$ 関係を用いた実験式の検証

(a) 正弦波加振実験 HDB500g100t3.0c50

(b) 地震波加振実験 HDB500 三の丸波

図15 加振実験の履歴曲線を用いた熱・力学的連成挙動の影響評価

け加え、熱・力学的挙動を考慮した復元力特性を下式で設定する。

$$K_{eq}(\gamma, E/V) = G_{eq0} \cdot A_{ef} / h_r \left(-2.5 + 0.2e^{-(E/V)} + 3.4e^{-(E/1000V)} \right) \cdot (2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4) \quad (29)$$

表2の正弦波加振実験 HDB500g100t3.0c50 と、表3の地震波加振実験 HDB500 三の丸波について、(7)式を用いた累積履歴エネルギー依存性を無視した場合と(29)式を用いた累積履歴エネルギー依存性を考慮した場合の解析値と実験値の履歴曲線と累積履歴エネルギーの時刻歴による比較をそれぞれ図15、16に示す。図15(a),(b)より、地震波加振実験におけるせん断歪150%以上に現れるハードニングを除き、累積履歴エネルギー依存性を考慮した解析結果は、実験結果に現れる切片荷重 Q_d 、2次剛性 K_2 、最大せん断力 Q_{max} の低下をよく表している。また、図16より、累積履歴エネルギー依存性を無視した場合、実験値に比べて累積履歴エネルギー吸収量が1.5倍程度多かったものが、考慮することにより1.2倍程度まで近づいている。 K'_{eq0}/K_{eq0} の下限值を取ることで剛性低下を多めに評価してきたが、エネルギー吸収量の低下に対しては不十分なようである。これは G_{eq} 、 u 、 H_{eq} の振幅(歪)依存式(7),(8),(9)のばらつきと、 H_{eq} の累積履歴エネルギー依存式を $H_{eq}/H_{eq0}=1.0$ としたことによる誤差に起因すると思われる。以上の検討から、修正 Bi-linear 型の高減衰積層ゴムの復元力特性そのものも、さらにその復元力特性に累積履歴エネルギー依存性を付与した(29)式も、加振実験による累積履歴エネルギー依存性を概ね考慮するものと判断できるが、応答結果の評価の際には2,3割のばらつきを含むことを前提にする必要がある。従って、7章の免震建物の応答性状の検討にあたっては、累積履歴エネルギー依存性を考慮した場合と無視した場合の比較を主な検討とする。

7. 積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した免震建物の応答性状

7.1 解析モデルの作成手順

熱・力学的連成挙動を考慮することによる応答に与える影響を検討するための解析モデルの作成手順を以下に示す。

- ①高減衰積層ゴムを使用した免震建物を質点系にモデル化する。
- ②各種依存性を考慮するために、基準値 K_{eq} 、 H_{eq} に乗ずる係数を求める。振動数(速度)依存性は免震建物の応答せん断歪を想定した等価周期を(10),(11)式に代入して、面圧依存性は常時面圧を(12)～(15)式に代入して、温度依存性は想定外気温度を(16),(17)式に代入して、履歴依存性は免震層に変位を与えた地震から経過時間を(24)式に代入して、それぞれの係数を求める。
- ③②の係数を考慮した上で免震層の復元力特性は、振幅(歪)依存性と累積履歴エネルギー依存性を考慮した(29)式を用いた場合と振幅(歪)依存性のみを考慮し累積履歴エネルギー依存性を無視した(2)式を用いた場合について、地震応答解析を行う。

7.2 解析モデルと検討用入力地震動

直径 $\phi 800$ 、 $\phi 1000$ 、 $\phi 1200$ の高減衰積層ゴムとその常時面圧を8～13N/mm²に設定し、(7)式を用いたせん断ひずみ $\gamma=1.0$ 時の等価免震周期 $T_{eq}=3.0\sim 4.5$ sとなる1質点系モデルを作成する。解析モデルの諸元を表5に示す。表中の C_d はせん断ひずみ $\gamma=2.0$ のときの(2)式を用いた復元力特性の切片荷重の建物重量に対する比率を示す。作成手順②で求めた基準値に乗ずる係数は、4つの解析モデルの K_{eq} で0.97～1.0、 H_{eq} で1.0～1.14であり、ここでは累積履歴エネ

図16 累積履歴エネルギー依存性を考慮した履歴エネルギーの検証

表5 解析モデルの諸元

直径 (mm)	ゴム総厚 (mm)	面圧 (N/mm ²)	$T_{eq}(\gamma=1.0)$ (s)	$T_{eq}(\gamma=2.0)$ (s)	$C_d(\gamma=2.0)$
800	160	8	3.0	3.4	0.043
800	160	11	3.5	4.0	0.031
1000	200	13	4.1	4.7	0.026
1200 ⁽¹⁾	250	13	4.6	5.2	0.026

表6 検討用入力地震動

地震	地点	地震波名	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	計測 震度	継続時 間 t_d (s)
模擬波		ART HACHI	466.7	64.0	5.5	55.7
直下型地震	神戸海洋気象台	JMA KOBE NS	818.0	91.7	6.4	9.54
長周期地震動	名古屋三の丸	C-SAN-EW	185.9	50.5	5.2	119.9
予測波	大阪管区気象台	KK-OSA-NS	68.3	28.3	4.5	214.1
	西大阪	KK-WOS-EW	69.3	24.8	4.6	179.4

ギー依存性の考慮と無視の比較が主検討のため、1.0にした。

検討に用いる入力地震動は、「標準波・告示波」に相当する模擬波として、Bi-linear 形状の速度応答スペクトル $S_p=100$ cm/s($h=5\%$)を目標スペクトルとし、位相特性として HACHINOHE EW を用いた ART HACHI を作成する⁸⁾。直下地震として、1995 年兵庫県南部地震の観測波 JMA KOBE NS を、長周期地震動として、東海・東南海地震を想定した名古屋三丸波 C-SAN-EW、南海地震を想定した大阪管区気象台波 KK-OSA-NS と西大阪波 KK-WOS-EW を採用する¹⁾。検討用地震動を表6に示す。

7.3 積層ゴムの熱・力学的連成挙動が応答に与える影響

免震構造においては、免震層で総入力エネルギーのほとんど大部分を吸収してしまうため、エネルギーのつり合い式は上部構造を剛体と見なし、次式のように表す⁹⁾。

$${}_DW_e + {}_DW_p = E \quad (30)$$

ここで、 ${}_DW_e$ ：高減衰積層ゴムの弾性振動エネルギー

${}_DW_p$ ：高減衰積層ゴムによる累積履歴エネルギー吸収量

E ：入力エネルギー ($=M \cdot V_E^2/2$)

図17に高減衰積層ゴムの復元力特性を弾性成分と減衰成分に分けて示す。高減衰積層ゴムが蓄える弾性歪エネルギー ${}_DW_e$ は図17(a)に示す三角形の面積で表される。高減衰積層ゴムが消費する減衰エ

エネルギー DW_p は、図 17(b)に示す最大変位振幅時の履歴ループ面積 ΔDW_p の等価繰返し数 n_1 倍で表される。この DW_e と DW_p を、(30)式に代入すると、エネルギーの釣り合い式は次のように書ける。

$$\frac{1}{2} Q_{\max} \cdot \delta_{\max} + 4n_1 \cdot Q_y \cdot \delta_{\max} = \frac{1}{2} M \cdot V_E^2 \quad (31)$$

ここに、 sQ_y ：高減衰積層ゴムの切片荷重($=\alpha_s Mg$)

$fQ_{\max}$ ：高減衰積層ゴムの弾性成分最大せん断力($=\alpha_f Mg$)

$\delta_{\max}$ ：免震層の最大変位

n_1 ：等価繰返し数

$$n_1 = \frac{DW_p}{4 \cdot Q_y \cdot \delta_{\max}} \quad (32)$$

(31)式を解くと、免震層の応答せん断力係数 α_1 と最大変位 $\delta_{\max}$ の関係が次のように求まる⁸⁾。

$$\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right) = \frac{1}{8n_1} \left\{ \left(\frac{\delta_0}{\delta_{\max}} \right) + (8n_1 - 1) \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \right) \right\} \quad (33)$$

ここに、 α_1 ：免震層の応答せん断力係数($=\alpha_f + \alpha_s$)

$$\alpha_0 = \frac{2\pi \cdot V_E}{T_f \cdot g}, \quad \delta_0 = \frac{T_f \cdot V_E}{2\pi} \quad (34)$$

ここに、 $T_f = 2\pi \sqrt{M/k_f}$ ：免震周期

図 17 高減衰積層ゴムの復元力特性

表 5 に示す 4 つの解析モデルの表 6 に示す検討用入力地震動 5 波による応答結果一覧を表 7 に示す。表中の n_1 は(32)式を用い、累積履歴エネルギー依存性を考慮する場合の最大変位時の履歴ループは地震終了時の累積履歴エネルギーを用いて求める。また、地震波 5 波のエネルギースペクトルとそれらの地震動による 4 つの解析モデルの入力エネルギーの速度換算値 V_E の関係を図 18 に示す。図中、解析モデルの V_E は積層ゴムのせん断ひずみ $\gamma=1.0$ 時の等価周期上にプロットしており、免震層変位が大きくなると等価周期が長くなることを考慮すると両者は良く一致している。表 5 と図 18 より、ART HACHI と JMA KOBE NS は、累積履歴エネルギー依存性考慮と無視の差はほとんどなく、どの等価周期のモデルでも免震層変位 $\delta_{\max}$ は 0.3m 以下であり、 V_E も 85~150cm/s、 n_1 も 1.8~5.6 にとどまる。長周期地震動は、地震波により大きな値を示すモデルが異なり、C-SAN-EW では、 $\delta_{\max}$ は 0.4m 近い値を示し、 V_E も 240~380cm/s、 n_1 も 11~16 と大きな値を示す。KK-OSA-NS と KK-WOS-EW も、 $T_{eq}=4.1, 4.6s$ のモデルで $\delta_{\max}=0.27 \sim 0.35m$ 、 $V_E=240 \sim 380cm/s$ 、 $n_1=6 \sim 11$ と大きな値を示す。このように大きな応答を示すモデルで累積履歴エネルギー依存性考慮と無視の差が大きい。

等価周期 $T_{eq}=4.1s$ ($\gamma=1.0$)の解析モデルの JMA KOBE NS と KK-WOS-EW による免震層の履歴曲線と累積履歴エネルギーの時刻歴をそれぞれ図 19、図 20 に示す。また、KK-WOS-EW の免震層変位の時刻歴波形を図 21 に示す。図中の実線は累積履歴エネルギー依存性を考慮した場合を、破線は無視した場合を示す。図 19、20

表 7 応答結果一覧表

(a) $T_{eq}=3.0s$ ($\gamma=1.0$)

地震波	熱・力学的連成挙動依存性考慮				熱・力学的連成挙動依存性無視			
	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1
ART HACHI	0.171	0.075	148	5.6	0.180	0.080	147	4.8
JMA KOBE NS	0.272	0.100	118	2.2	0.269	0.101	117	2.1
C-SAN-EW	0.380	0.109	353	16.5	0.395	0.136	381	14.9
KK-OSA-NS	0.139	0.072	149	7.0	0.140	0.072	148	6.3
KK-WOS-EW	0.114	0.066	152	9.0	0.110	0.066	150	8.3

(b) $T_{eq}=3.5s$ ($\gamma=1.0$)

地震波	熱・力学的連成挙動依存性考慮				熱・力学的連成挙動依存性無視			
	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1
ART HACHI	0.171	0.075	147.6	5.6	0.180	0.080	146.9	4.8
JMA KOBE NS	0.272	0.100	118.2	2.2	0.269	0.101	117.2	2.1
C-SAN-EW	0.380	0.109	352.5	16.5	0.395	0.136	381.4	14.9
KK-OSA-NS	0.139	0.072	148.7	7.0	0.140	0.072	147.9	6.3
KK-WOS-EW	0.114	0.066	152.4	9.0	0.110	0.066	150.5	8.3

(c) $T_{eq}=4.1s$ ($\gamma=1.0$)

地震波	熱・力学的連成挙動依存性考慮				熱・力学的連成挙動依存性無視			
	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1
ART HACHI	0.298	0.057	141	4.8	0.294	0.059	140	4.3
JMA KOBE NS	0.260	0.056	91	2.1	0.260	0.054	140	4.9
C-SAN-EW	0.391	0.064	251	12.7	0.381	0.070	270	12.5
KK-OSA-NS	0.268	0.054	162	7.2	0.267	0.055	158	6.1
KK-WOS-EW	0.350	0.056	231	11.9	0.287	0.058	208	9.9

(d) $T_{eq}=4.6s$ ($\gamma=1.0$)

地震波	熱・力学的連成挙動依存性考慮				熱・力学的連成挙動依存性無視			
	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1	$\delta_{\max}(m)$	α_1	$V_E(cm/s)$	n_1
ART HACHI	0.298	0.051	141	4.7	0.300	0.052	139	4.2
JMA KOBE NS	0.258	0.051	87	1.9	0.256	0.048	85	1.8
C-SAN-EW	0.400	0.057	239	11.0	0.395	0.062	253	10.6
KK-OSA-NS	0.284	0.050	170	7.5	0.282	0.051	166	6.4
KK-WOS-EW	0.353	0.053	244	13.1	0.322	0.054	229	10.6

図 18 エネルギースペクトルと入力エネルギー換算速度値

図 19 熱・力学的連成挙動の影響の免震層の履歴曲線による比較

図 20 熱・力学的連成挙動の影響の累積履歴エネルギー時刻歴による比較

より、JMA KOBE NS では、履歴曲線、累積履歴エネルギーとともに累積履歴エネルギー依存性の考慮と無視の差はほとんど無く、KK-WOS-EW では、考慮することにより入力エネルギーも増加するが、それ以上に剛性低下と変形の増加が見られる。図 21 より、無視モデルでは 100 秒過ぎに 0.29m の最大変形を生じたものが、考慮モデルでは累積履歴エネルギーの増加に伴い減衰性能が低下し、100s 過ぎの最大変形を上回る 0.35m の変形が 200s 過ぎに現れる。

地震波 5 波のエネルギースペクトルとそれらの地震動による 4 つ

図 21 熱・力学的連成挙動の影響の免震層変位時刻歴波形による比較

図 22 熱・力学的連成挙動の影響の免震層変位による比較

図 23 熱・力学的連成挙動の影響の応答せん断力係数による比較

図 24 熱・力学的連成挙動の影響の等価繰返し数による比較

の解析モデルの免震層の最大変位と最大層せん断力係数を図 22, 23 に示す。図中の□△印は考慮を、■▲印は無視の場合を示す。告示波・直下地震である ART HACHI と JMA KOBE NS は、考慮・無視の差がほとんど見られない。一方、長周期地震動である C-SAN-EW, KK-OSA-NS と KK-WOS-EW では、考慮と無視で差が現れている。また、表 7 と図 18 からわかるように、考慮と無視により V_E が異なるため累積履歴エネルギー依存性の影響を評価するには、これらの図では十分でない。そこで、 T_f と V_E を取り込んだ(34)式の α_0 と δ_0 を用いて免震層変位 δ_{max} とせん断力係数 α_1 を無次元化して、免震層の最大変位と最大層せん断力係数を図 24 に示す。図中の点線と実線は $n_1=2.0 \sim 15.0$ の時の(33)式を表す。ART HACHI と JMA KOBE NS は、考慮と無視による明確な傾向が見られないが、長周期地震動では、概ね免震層変位が大きくなり、せん断力係数が若干小さくなる傾向を示す。

8. 結論

本論文では、高減衰積層ゴムの大振幅・多数回繰返し変形下での動的載荷実験に基づき、積層ゴム内部での温度分布はほぼ一様で内部温度と累積履歴エネルギー吸収量は相関関係にあることを見出し、単位体積当たりの累積履歴エネルギー吸収量と水平剛性や減衰性能との関係を表す実験式を導出した。この累積履歴エネルギー依存式を既往の復元力特性に組込んだ 1 質点系免震建物モデルを作成し、告示波・直下地震波と長周期地震動による地震応答解析を行った。

1 種類の高減衰積層ゴムの縮尺率 1/4.4~1/2 の $\phi 225$, $\phi 300$, $\phi 500$ の縮小試験体を用いた限られた動的載荷実験に基づくものであるが、高減衰積層ゴムが地震入力エネルギーを消費することで内部温度が上昇し、それに伴い水平剛性と減衰性能が低下する熱・力学的連成挙動が、長周期地震動を入力とする免震建物の応答挙動に与える影響を評価する方法を示せたと考える。

謝辞

本研究は、平成 18,19 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号:18360271, 研究代表者:竹中康雄)の援助の下、鹿島建設(株)、(株)ブリヂストン、東京理科大学北村研究室の共同研究の一部です。共同研究者の鹿島建設(株)の近藤明洋氏、引田真規子氏、本間友規氏、(株)ブリヂストンの菊地隆志氏から協力を得ました。また、図表の作成には東京理科大学北村研究室の大学院生下沖航君の協力を得ました。地震波は、日本建築学会・東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会と国土交通省中部地方整備局の中田猛氏から提供を受けました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 日本建築学会東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会：長周期地震動と建築物の耐震性，日本建築学会，2007.12
- 2) 日本免震構造協会編：免震部材標準品リスト 2009 版，2009.11
- 3) 鳥井、室田他：高減衰積層ゴムの各種依存性を評価した解析手法と製品検査に関する一考察，日本建築学会技術報告集，第 8 号，pp101-106,1999-6
- 4) ブリヂストン，高減衰積層ゴム (X0.6) 技術資料，認定番号:MVBR-0341，2007.4
- 5) 日本建築センター編：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説，2001.5
- 6) 北村春幸，東野さやか，竹中康雄，田村和夫：長周期地震動による既存免震建築物の耐震性能評価，日本建築学会技術報告集，第 22 号，pp.127-132，2005.12
- 7) 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 -2253，2009.12
- 8) 北村春幸：性能設計のため建築振動解析入門(第 2 版)，彰国社，2009.4
- 9) 秋山宏：エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999.1

(2010 年 2 月 3 日原稿受理，2010 年 5 月 27 日採用決定)