

# 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

東京理科大学 早川修平

## 1. はじめに

近い将来の発生が危惧される東海・東南海地震等の海溝型巨大地震が起きると、大都市では長周期地震動に襲われると指摘されている。減衰性能を併せ持つ免震装置においては、大きなせん断変形が繰返し加わると装置の温度上昇を招き、その結果、水平剛性や減衰性能が低下し、それに伴う免震建物の揺れの増大や装置の損傷が懸念されている<sup>1), 2)</sup>。長周期地震動に対しては、標準波・告示波と異なり、応答解析の際に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<sup>3)</sup>。既往の研究により、高減衰積層ゴム(HDB)においては、動的加振実験を基に熱・力学的連成挙動の評価が行われている<sup>4)</sup>。本報ではこれまで規定されていなかった地震継続中の履歴依存性の定式化を行ったうえで、HDBの熱・力学的影響を考慮した免震構造の地震応答解析手法を提案し、長周期地震動に対する免震構造の応答解析に与える影響を検討することを目的とする。

## 2. 大振幅・多数回繰返し実験結果

図1に正弦波加振実験結果を示す。HDB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、切片荷重 $Q_d$ や二次剛性 $K_2$ が低下していく。積層ゴム内部での温度分布はほぼ一様で内部温度と単位体積当たりの履歴エネルギー吸収量 $E/V$ ( $V$ : ゴム体積)は相関関係にあると見なし、水平剛性と減衰性能は $E/V$ の関数として地震動継続中の履歴依存性を評価する。

## 3. HDBの熱・力学的連成挙動の定式化

図2に実験結果により求まる基準値に対する $K_{eq}$ の変動と $E/V$ の累積値との関係を示す。いずれの加振ケースも加振初期は急激に低下し、その後は一定の割合で低下する相似な傾向を示す。この結果より $K_{eq}$ と $E/V$ の関係の定式化を試みる。図3に実験値 $K_{eq}$ を3サイクル目の $K_{eq3}$ で除した比率と $E/V$ の関係を示す。この関係の下限を包絡するように関係式(1)を定める。

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq3}} \left( \frac{E - E_3}{V} \right) = -2.5 + 0.1e^{-\left( \frac{E - E_3}{3V} \right)} + 3.4e^{-\left( \frac{E - E_3}{1000V} \right)} \quad (1)$$

## 4. 熱・力学的連成挙動を考慮した地震応答解析法

HDBの復元力特性の中の $K_{eq}$ に(1)式を乗じ、熱・力学的挙動を考慮した復元力特性を設定する。非考慮の場合と(1)式を用いて考慮した場合の解析値と実験値の履歴曲線による比較をそれぞれ図4に示す。考慮した解析結果は、実験結果に現れる $Q_d$ 、 $K_2$ 、 $Q_{max}$ の低下をよく表している。(1)式は、加振実験による履歴依存性を概ね考慮できるものと判断する。

## 5. 熱・力学的連成挙動が応答に与える影響

HDBを使用した免震建物を1質点系にモデル化する。考慮した場合と非考慮の場合の地震応答解析を行

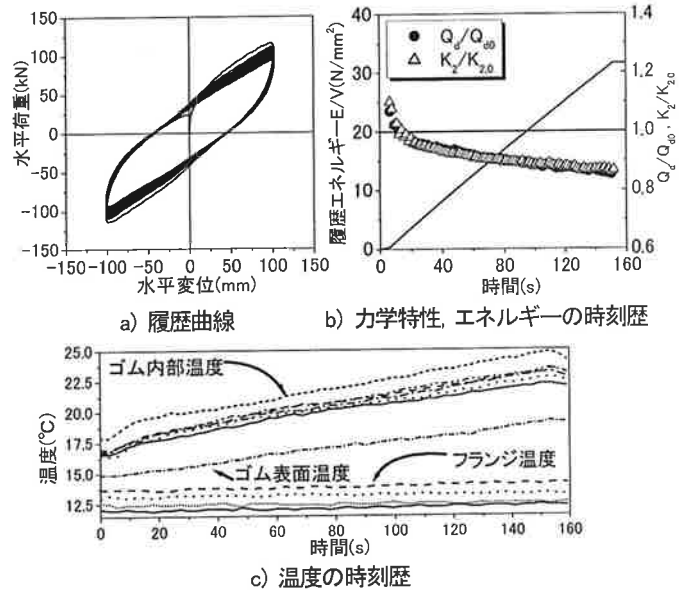


図1 φ500HDB 動的加振実験結果

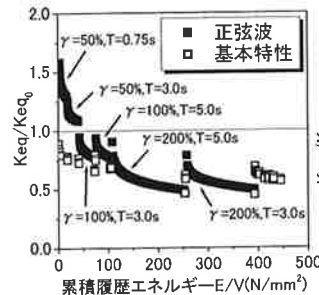


図2  $K_{eq}-E/V$  (累積値)の関係

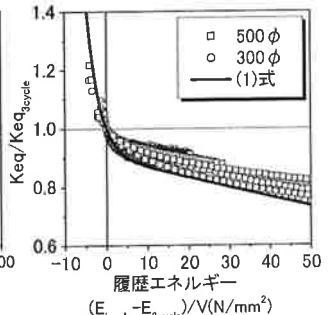


図3  $K_{eq}-E/V$  関係の定式化

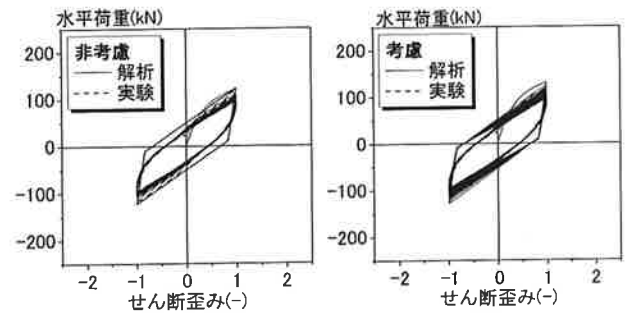


図4 加振実験の履歴曲線を用いた(1)式の影響評価

表1 解析モデルの諸元

直径(mm)	ゴム総厚(mm)	面圧(N/mm²)	$T_{eq}(\gamma=1.0)$ (s)	$T_{eq}(\gamma=2.0)$ (s)	$Q_d/Mg(\gamma=2.0)$
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	250	13	4.6	5.2	0.026

表2 検討用入力地震動

地震	地点	地震波名	最大加速度 (cm/s²)	最大速度 (cm/s)	計測震度	継続時間 $t_0$ (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 KOBENS	818.0	91.7	6.4	9.5
長周期地震動	名古屋三の丸	C-SAN-EW	185.9	50.5	5.2	119.9
	大阪管区気象台	KK-OSA-NS	68.3	28.3	4.5	214.1
予割波	西大阪	KK-WOS-EW	69.3	24.8	4.6	179.4

い、応答に与える影響を検討する。解析モデルの諸元を表1に、検討用地震動を表2に示す。ここでHDBの吸収する累積履歴エネルギー量が、最大変位時の履歴ループの消費するエネルギーの何ループ分にあたるかを示す等価繰返し数  $n_1$  とすると、HDBが消費する減衰エネルギー  $DW_p$  を用いて、次のように書ける<sup>5),6)</sup>。

$$n_1 = DW_p / (4_s Q_y \cdot \delta_{\max}) \quad (2)$$

ここで、 $sQ_y$  : HDBの切片荷重( $=\alpha_1 Mg$ )、 $\delta_{\max}$  : 免震層最大変位、 $n_1$  : 等価繰返し数、 $\alpha_1$  : 応答せん断力係数  
表1に示すうち、2つの解析モデルによる応答結果一覧を表3に示す。地震波5波のエネルギースペクトルと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5に示す。免震層変位が大きくなると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。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<sup>3)</sup>による免震層の履歴曲線と履歴エネルギーの時刻歴をそれぞれ図6、図7に示す。JMA KOBE NS は、考慮と非考慮の差はほとんど無く、KK-WOS-EWでは、考慮することにより累積履歴エネルギー量も増加するが、それ以上に剛性低下と変形の増加が見られる。このように大きな応答を示すモデルで考慮と非考慮の差が大きい。ここで、HDBの応答せん断力係数  $\alpha_1$  と  $\delta_{\max}$  の関係が次式のように求まる<sup>5)</sup>。

$$\left( \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right) = \frac{1}{8n_1} \left\{ \left( \frac{\delta_0}{\delta_{\max}} \right) + (8n_1 - 1) \left( \frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\text{ここで、} \alpha_0 = \frac{2\pi \cdot V_E}{T_f \cdot g}, \delta_0 = \frac{T_f \cdot V_E}{2\pi}, T_f = 2\pi \sqrt{\frac{M}{kf}}$$

(3)式の  $\alpha_0$  と  $\delta_0$  を用いて  $\delta_{\max}$  と  $\alpha_1$  を無次元化して図8にその関係を示す。図中の実線は  $n_1 = 2.0 \sim 15.0$  の時の(2)式を表す。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。

## 7. まとめ

HDBの動的载荷実験に基づき、 $K_{eq}$  と  $E/V$  との関係を表す実験式を導出した。これを既往の復元力特性に組み込み、1質点系免震建物モデルを作成し、地震応答解析を行った。HDBの性能が低下する熱・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:竹中康雄氏)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。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) 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号号, pp101-106, 1999-6
- 2) 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
- 3) 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

表3 応答結果一覧表

地震波	$T_{eq}=3.0s(\gamma=1.0)$								$T_{eq}=4.1s(\gamma=1.0)$							
	考慮				非考慮				考慮				非考慮			
	$\delta_{\max}$ (m)	$\alpha_1$	$V_E$ (cm/s)	$n_1$	$\delta_{\max}$ (m)	$\alpha_1$	$V_E$ (cm/s)	$n_1$	$\delta_{\max}$ (m)	$\alpha_1$	$V_E$ (cm/s)	$n_1$	$\delta_{\max}$ (m)	$\alpha_1$	$V_E$ (cm/s)	$n_1$
ART HACHI	0.17	0.075	148	5.6	0.18	0.080	147	4.8	0.30	0.057	141	4.8	0.29	0.059	140	4.3
JMA KOBE NS	0.27	0.100	118	2.2	0.27	0.101	117	2.1	0.26	0.056	91	2.1	0.26	0.054	140	4.9
C-SAN-EW	0.38	0.109	353	17	0.40	0.136	381	15	0.39	0.064	251	13	0.38	0.070	270	12.5
KK-OSA-NS	0.14	0.072	149	7	0.14	0.072	148	6.3	0.27	0.054	162	7.2	0.27	0.055	158	6.1
KK-WOS-EW	0.11	0.066	152	9	0.11	0.066	150	8.3	0.35	0.056	231	12	0.29	0.058	208	9.9

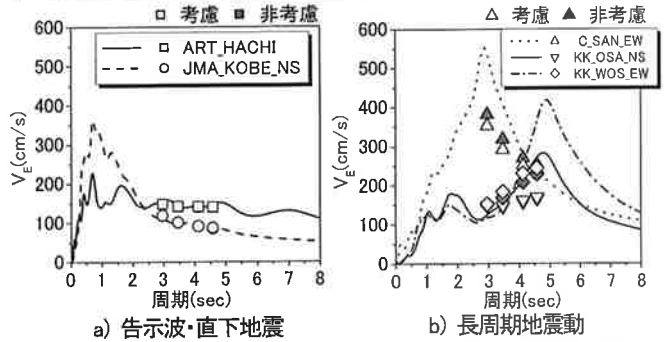


図5 エネルギースペクトルと入力エネルギーの換算速度値

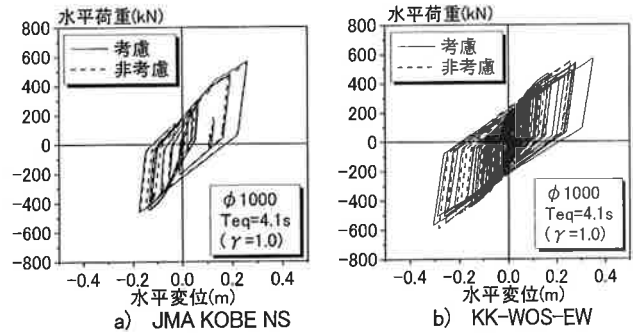


図6 免震層の履歴曲線による比較

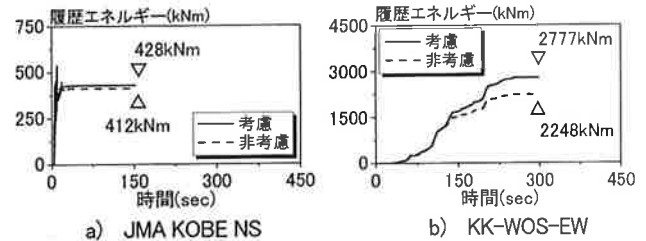


図7 履歴エネルギー時刻歴による比較

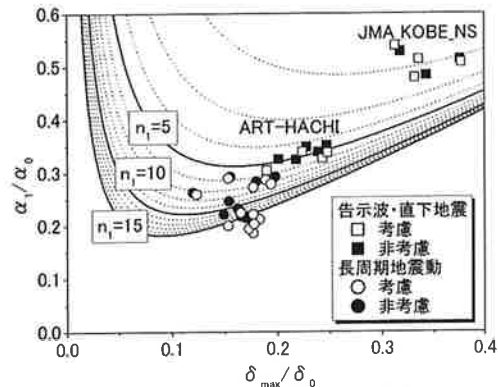


図8 等価繰返し数  $n_1$  による比較

- 4) 竹中他: 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
- 5) 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
- 6) 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