

1. はじめに

免震構造の主要部材である積層ゴムについては、これまで復元力特性や破断特性に関する多くの実験評価がなされている。そのなかで、2007年に、嶺脇、山本ら¹⁾²⁾は、実大サイズの積層ゴムを用いた定面圧下の水平二方向加力実験を実施し、高減衰積層ゴムのみ一方加力時に比べて破断せん断歪が大きく減少することや水平二方向加力時に特異な荷重変位関係を示すことを確認し、その特性を反映したモデル化の方法を提案した。また、加藤、森ら³⁾⁴⁾は、縮小試験体による圧縮二方向せん断破断実験及びFEM解析による検討を実施し、振れ力により生じる振れ歪をせん断歪に加算した全体歪が、水平一方向加力時の破断せん断歪に達することで破断が起きることを明らかにした。これらの状況を受け、日本免震構造協会⁵⁾⁶⁾は、高減衰積層ゴムの水平二方向加力時の限界歪の設定方法とその試験方法や水平二方向加力時の履歴特性を考慮した免震建物の応答性状と設計上の留意点について提示している。これらの研究で採用された水平二方向加力は、積層ゴムに大きな振れ歪が発生するように、長軸と短軸の比率が2:1の楕円加力を基本としているが、実地震動による高減衰積層ゴムの振れ応答については明らかにされていない。これらの背景を受けて、本論文では高減衰積層ゴムで支持された免震建物に観測地震動を入力とした応答解析を行い、水平二方向入力による高減衰積層ゴムの振れ応答を検討することを目的とする。

2. 画像解析による振れ歪の算出

高減衰積層ゴムは減衰性能を持つため、水平二方向加力時に図1に示すように振れ歪が発生する。積層ゴム支承の表面に転写した各格子点の変位を画像解析によって読み取り、その分布を文献5)に示す方法で求め、最大振れ歪 $\gamma_{\phi, \max}$ を算出する。時間刻み $\Delta t = 0.03 \text{sec}$ で画像解析して求めた振れ歪の時刻歴波形を図2に示す。水平二方向加力時にはX軸上にある時、Y方向の力 F_y の値が、また、Y軸上にある時、 F_x の値が振れ力 F_s に等しくなる(図9参照)。従って、 F_x と F_y の計測時刻歴データを用い、X軸上の時の F_y の値及びY軸上の時の F_x の値からそれぞれ振れ応力 τ_s を求める。この τ_s の生起時刻と同時刻に計測された図2に示す $\gamma_{\phi, \max}$ の値を γ_s として、 $\tau_s - \gamma_s$ 関係を図3に示す。さらに、高減衰積層ゴムのせん断力とせん断歪の関係を簡便に表すBi-linear型復元力特性で振れ歪と振れ応力の関係も表すことにする。図3から2次剛性を一次関数で近似する。

$$\tau_s = 0.48606 \gamma_s + 0.1279 \quad (1)$$

なお、1次剛性(=4.86N/mm²)は2次剛性の10倍とする⁸⁾。

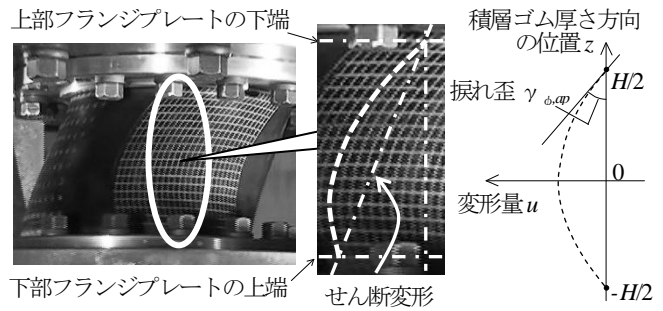


図1 振れ歪算出方法

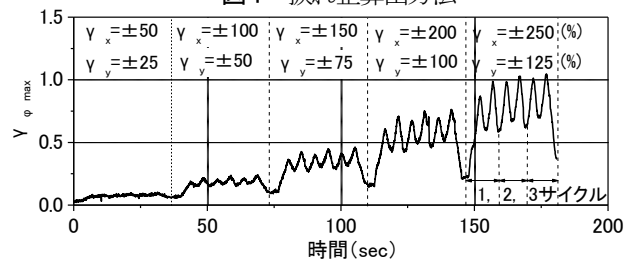


図2 振れ歪の時刻歴波形

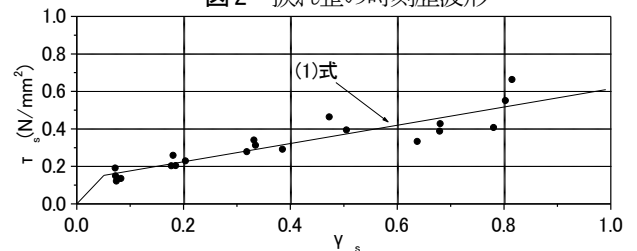


図3 振れ力-振れ歪関係

(1)式は実験で用いた特定の高減衰積層ゴム($G = 0.6 \text{N/mm}^2$, $S_2 = 5.02$)の $\tau_s - \gamma_s$ 関係であるが、本論文では、高減衰積層ゴムの代表例として(1)式を採用する。

3. 振れ力に着目した解析モデルの提案

ここでは、図4に示す簡便な1質点系水平2自由度振動解析モデルを作成する。高減衰積層ゴムは、図5に示すように弾性バネ要素(a)、速度に応じた減衰力を発現するダッシュポット要素(b)、及び摩擦減衰要素(c)の並列接続で表現される。しかしながら、高減衰積層ゴムは図6(d)に示す1次剛性 K_1 と2次剛性 K_2 、切片荷重 Q_d で設定されるBi-linear型復元力特性でモデル化されることが多い。そこで、Bi-linear型復元力特性を、図6(a)に示す1次剛性 $K_2 (=K_1)$ で与えられる弾性バネ要素と、図6(c)に示す完全弾塑性型復元力特性を持つ履歴型減衰要素に分け、それに図6(b)に示す速度依存型の粘性型減衰要素を加えたモデルとする。粘性減衰を考慮するに当たっては、全体の減衰を一致させるために、図6(d)のBi-linear型の1サイクル分のエネルギー吸収量 ΔW の β 倍のエネルギー吸収量 $\beta \Delta W$ を持つ粘性型減衰要素を設定する。履歴型減衰要素は、図6(c)に示すように $(1-\beta)$ 倍のエネルギー吸収量 $(1-\beta) \Delta W$ になるように設定する。以下に図6(d)に示す1次剛性

$K_1(=10K_2)$, 2次剛性 K_2 , 降伏荷重特性値 Q_d と, 等価剛性 K_{eq} , せん断弾性係数 G_{eq} , 降伏荷重特性係数 u , 等価減衰定数 H_{eq} との関係式を示す⁸⁾.

$$K_2 = K_{eq}(1-u), \quad K_1 = 10K_2 \quad (2), (3)$$

$$K_{eq} = G_{eq} \cdot A / h \quad (4)$$

$$H_{eq} = \Delta W / (2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta^2) \quad (5)$$

ここに, h : 積層ゴムのゴム総厚, A : 積層ゴム断面積を示す。次に, 図6(b)に示す粘性型減衰要素の復元力特性の諸元を定める。1 サイクル分のエネルギー吸収量 ΔW は, (5)式より下式で求まる。

$$\Delta W = 2\pi H_{eq} K_{eq} \delta^2 \quad (6)$$

粘性減衰の減衰力は一般的に $F = CV^\alpha$ で表され, ここでは $\alpha = 1.0$ として,

$$F = CV \quad (7)$$

とする。粘性型減衰要素が最大振幅 δ , 固有振動 ω で正弦波加振されると想定し, 図6(b)の粘性型減衰要素の最大減衰力は,

$$F = C\omega\delta \quad (8)$$

になる。また, 粘性型減衰要素の1 サイクル分のエネルギー吸収量 $\beta\Delta W$ は, 図6(b)に示す楕円の面積で求まるため,

$$\beta\Delta W = \pi F\delta = \pi C\omega\delta^2 \quad (9)$$

となる。(6), (9)式より, C は下式で定まる。

$$C = 2\beta H_{eq} K_{eq} / \omega \quad (10)$$

以上より, 履歴型減衰要素と粘性型減衰要素の比率 β をパラメータとして様々な高減衰積層ゴムに対応できるモデルとした。図4に示す解析モデルの免震層を構成する履歴型減衰要素には, 16本の弾塑性バネを用いた MSS モデルで, 弾性バネ要素と粘性型減衰要素は, それぞれ直交する2本の弾性バネとダッシュポットでモデル化する。解析モデルの諸元を表1に示す。

4. 検討用入力地震動

本論文では, 内陸型地震4波, 海溝型地震5波を用いた。検討用地震動諸元を表2に示し, 地震動の速度応答スペクトル (減衰定数: 5%) とエネルギースペクトル (減衰定数: 10%) を図7に示す。また, 実験値との比較を行うために, 前述の1 質点系モデルで最大せん断歪振幅が長軸で $\gamma = 200\%$, 短軸で $\gamma = 100\%$ の楕円応答変位となるように長軸と短軸の振幅と周期をそれぞれ調整して作成した加速度波形を入力した。

5. 振れ力 F_s の算定

高減衰積層ゴムは, その減衰性能から, 図8に示すように変位方向 ϕ_1 と応力方向 ϕ_2 に位相差 ϕ_3 を生じる。この位相差 ϕ_3 により, 各直交軸方向のせん断力 F_x, F_y の合力 F を, 変位方向のせん断力 F_r とそれに直交する力 F_s に分解できる。ここでは, この直交方向の力を振れ力 F_s と呼び, この力にせん断変形を乗じたものを 1/2 して上下に分配した値を振れモーメント M_T と呼び, $M_T = (F_s \cdot \delta) / 2$ で算出する。

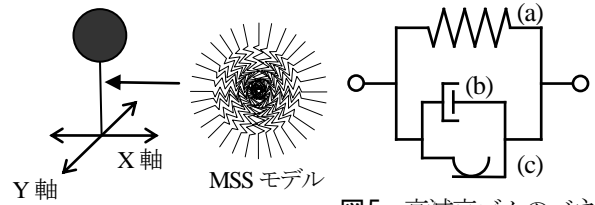


図4 解析モデル

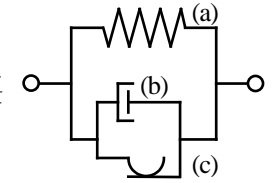


図5 高減衰ゴムのバネと減衰メカニズム

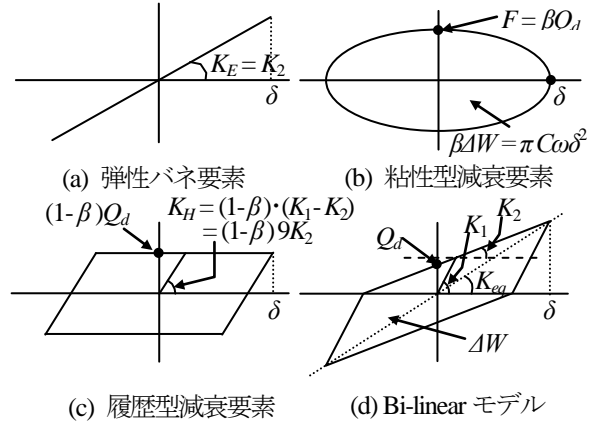


図6 高減衰積層ゴムのモデル化

表1 解析モデル諸元

積層ゴム直径 ϕ (mm)	二次形状係数 S_2	積層ゴム高さ h (mm)	積層ゴム断面積 A (mm ²)	免震周期 T (s)	質量 M (ton)
1000	5.0	200	785398	4.0	482.4
降伏荷重特性係数 u	等価剛性 K_{eq} (N/mm)	せん断弾性係数 G_{eq} (N/mm ²)	降伏荷重特性値 Q_d (kN)	等価減衰定数	面圧 σ (N/mm ²)
0.408	2435.7	0.620	198.7	0.240	6.140
β	0.00	0.25	0.50	0.75	
C (N·s/mm)	0.0	186.2	372.4	558.6	
K_1 (N/mm)	12979	9734	6490	3245	
K_2 (N/mm)	1443	1443	1443	1443	
$\beta \cdot Q_d$ (kN)	0.0	49.7	99.4	149.0	

表2 入力地震動諸元

地震名称	地震波名称	最大加速度 (cm/s ²)		継続時間 (s)
		NS	EW	
1995年兵庫県南部地震	JMA KOBE	818.02	617.29	152
2004年新潟県中越地震	K-NET NIG019	1147.42	1307.91	299
2008年四川汶川地震	0513FB	581.59	556.17	225
	051WCW	652.85	957.70	180
2011年東北地方太平洋沖地震	K-NET MYG006	444.15	571.50	300
	K-NET MYG013	1517.20	982.30	300
	K-NET KNG013	96.51	163.59	300
1968年十勝沖地震	HACHINOHE	224.95	210.10	120
2003年十勝沖地震	K-NET HKD129	86.67	72.92	327

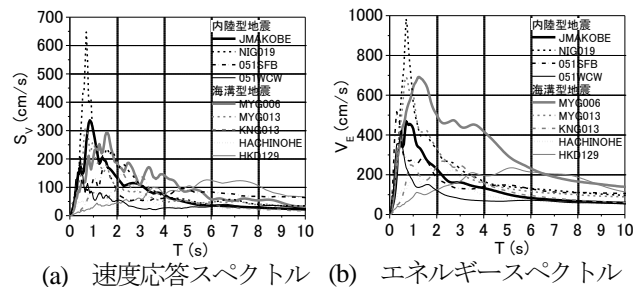


図7 入力地震動スペクトル

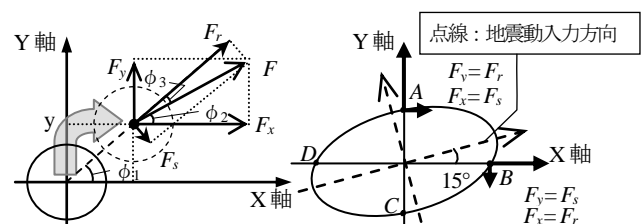


図8 振れ力発生概念図

図9 F_r, F_s の評価方法
地震動入力方法

6. 水平二方向地震動入力時の最大応答値の包絡分布

6.1 最大応答値の包絡分布の算定

図6 (a), (b), (c)の3つの要素モデルにおいて、粘性減衰のない $\beta=0$ のときは図8の関係を用いて振れ力 F_s が計算できる。ただし、粘性減衰の加わったモデルに対して、汎用応答解析プログラムを用いた応答解析では、 F_x , F_y は出力されるが F_r , F_s は出力されない。そこで、図9に示すようにX軸, Y軸方向の力 F_x , F_y からせん断力 F_r と振れ力 F_s を求めることを考える。X軸上(B,D点)にある時、Y方向の力 F_y の値が、また、Y軸上(A,C点)にある時、X方向の力 F_x の値が振れ力 F_s に等しくなる。次に、図9に示すように地震動の入力方向を 15° ピッチで変え、軸上の4地点の箇所を増やし、全24地点においてせん断歪と振れ歪を求め⁹⁾。また、最大振れ応力 τ_s から(1)式を用いて振れ歪 γ_s を、振れ力 F_s とせん断変形から振れモーメント M_T を求めることができる。せん断歪, 振れ歪, せん断歪と振れ歪の和, 振れモーメントについてそれぞれの最大値をプロットすることで包絡分布を求めて評価する(以降, 最大値包絡法と略す)。

6.2 履歴型と粘性型減衰要素の割合による最大応答値の比較

表2に示す地震動のうち、JMA KOBE 1995 (神戸), K-NET KNG013 2011 (小田原)の水平二方向入力時のせん断歪 γ_r , 振れ歪 γ_s , せん断歪と振れ歪の和($\gamma_r + \gamma_s$), 振れモーメント M_T に関する最大応答値の包絡分布を、 $\beta(=0\sim 0.75)$ をパラメータとして、それぞれ図10に示す。また、せん断歪 γ_{max} とせん断歪に対する振れ歪の比率 $\gamma_{smax}/\gamma_{max}$ の関係を図11に示す。図中の○▽△□印は、それぞれ $\beta=0, 0.25, 0.5, 0.75$ の場合を、白抜きは内陸型地震の観測記録を、黒塗りは海溝型地震の観測記録を示す。

図10(a)に示す内陸型地震のJMA KOBE波は、 β の増加に伴って(1)に示すせん断歪は殆ど変わらないが、(2)に示す振れ歪が著しく増加する。振れ歪の増加により(3)に示すせん断歪と振れ歪の和と(4)に示す振れモーメントはともに増加する。このことから、JMA KOBE波は粘性型減衰要素による振れ歪を増加させる地震動と言える。一方、図10(b)に示す海溝型地震のKNG013波は、 β の増加に伴い(1)に示すせん断歪は低下するが、(2)に示す振れ歪はわずかに増加する。せん断歪それ自体の値が大きいため、(3)に示すせん断歪と振れ歪の和は低下する。このことから、KNG013波は履歴型減衰要素による振れ歪が支配的な地震動と言える。また、図11より、せん断歪と振れ歪の比率 $\gamma_{smax}/\gamma_{max}$ は、 $\beta=0$ のとき概ね0.3以下に、 $\beta=0.25$ のとき概ね0.5以下に留まる。内陸型地震による観測波は β が0.5より大きくなると、せん断

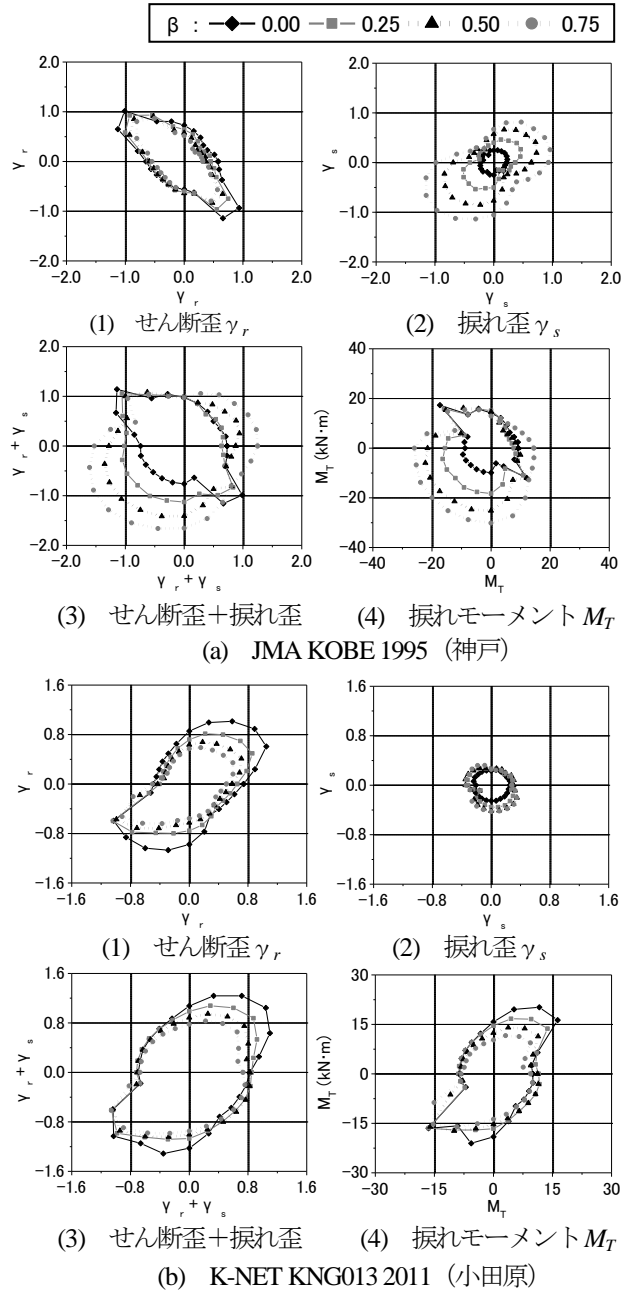


図10 最大値包絡法による最大応答値の比較

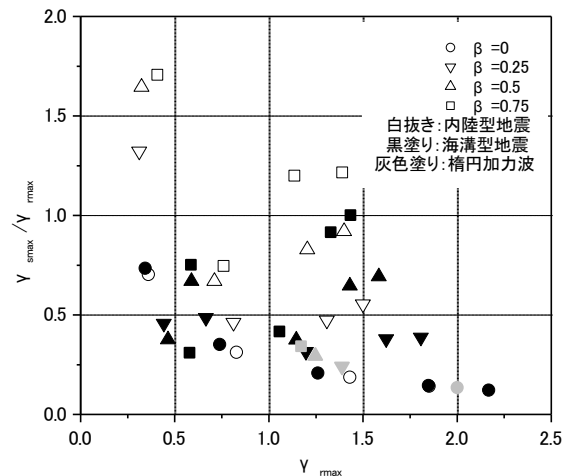


図11 地震動と楕円加力によるせん断歪に対する振れ歪の比率の比較

歪を上回る捩れ歪が発生することがある。以上から、内陸型地震の観測波では、粘性型減衰要素による捩れ歪が相対的に大きくなり、海溝型地震の観測波では履歴型減衰要素による捩れ歪が大きくなる傾向を示す。

7. 楕円加力との比較

図12に楕円加力波を入力したときの最大応答値の包絡分布を、図13に観測波と楕円加力によるせん断歪に対するせん断歪と捩れ歪の和の比率 $(\gamma_r + \gamma_s)_{max} / \gamma_{rmax}$ の比較を示す。図12より、楕円加力波は周期4秒としているため、速度が観測波に比べて小さく、 β の増加に応じた捩れ歪の増加が見られない。従って、図12(3)に示すせん断歪と捩れ歪の和においてもせん断歪の割合が大きくなる。また、図13より $\beta = 0$ のときは、楕円加力波と観測波のせん断歪に対するせん断歪と捩れ歪の和の比率 $(\gamma_r + \gamma_s)_{max} / \gamma_{rmax}$ が概ね同程度の値になる。一方、 β が大きくなると観測波のせん断歪に対するせん断歪と捩れ歪の和の比率は楕円加力波の値を上回る。

以上から、履歴型減衰要素が支配的な積層ゴムでは、楕円加力波により観測波とほぼ同じ程度の捩れ歪を発生させることができる。一方、粘性型減衰要素が支配的な積層ゴムでは楕円加力よりも観測波の方が大きい捩れ歪を生じさせる可能性が高い。

8. 結論

本論文では、簡便な1質点系水平2自由度振動解析モデルを用いて、水平二方向入力により高減衰積層ゴムに生じる捩れ応答について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 水平二方向入力時に発生する高減衰積層ゴムの捩れ応力や捩れ歪等の最大応答値の包絡分布を一般の解析プログラムを用いて作成する方法を示した。
- (2) 高減衰積層ゴムの粘性型減衰要素の影響で捩れ歪が大きくなる観測波と履歴型減衰要素により捩れ歪が大きくなる観測波がある。前者はJMA KOBE波等の内陸型地震による観測波に、後者はKNG013波等の海溝型地震による長周期地震動にその傾向が表れる。
- (3) 履歴型減衰要素のみのとき、殆どの観測波で全体歪に対する捩れ歪の影響は少ない。一方、粘性型減衰要素の割合が増えると海溝型地震による観測波に比べて内陸型地震による観測波では捩れ歪が大きくなる。
- (4) 履歴型減衰要素が支配的な積層ゴムでは、楕円加力波により観測波とほぼ同じ程度の捩れ歪が発生する。一方、粘性型減衰要素が支配的な積層ゴムでは、楕円加力よりも観測波の方が大きい捩れ歪を生じる可能性が高い。

謝辞

本論文では、防災科学技術研究所K-NET観測記録、北京工業大学李振宝教授が提供を受けた中国国家強震動台網中心の四川省文川地震観測記録を利用していただきました。解析モデルの作成に当たっては日建設計石井正人博士にご指導頂きました。また、日本免震構造協会の水平二方向加力時の免震部材の特性と検証法WG高減衰ゴム系積層ゴム支承SWG(主査:北村春幸東京理科大学教授)の委員各位からご意見を頂きました。ここに感謝の意を示します。

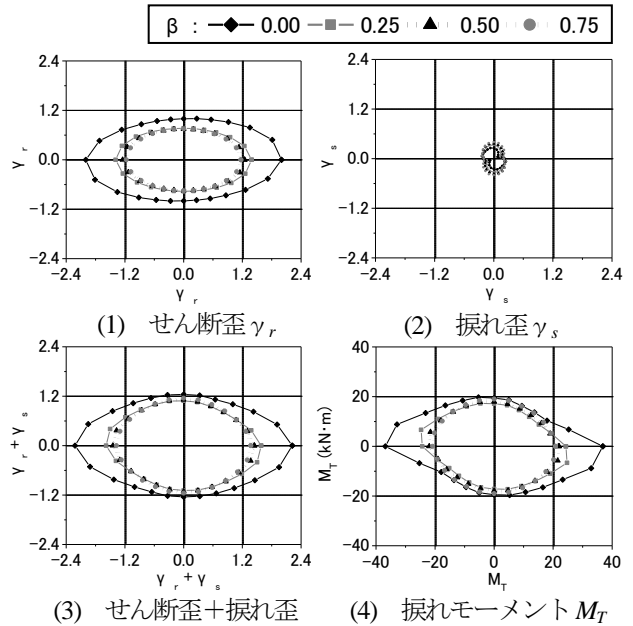


図12 楕円の最大応答値の比較

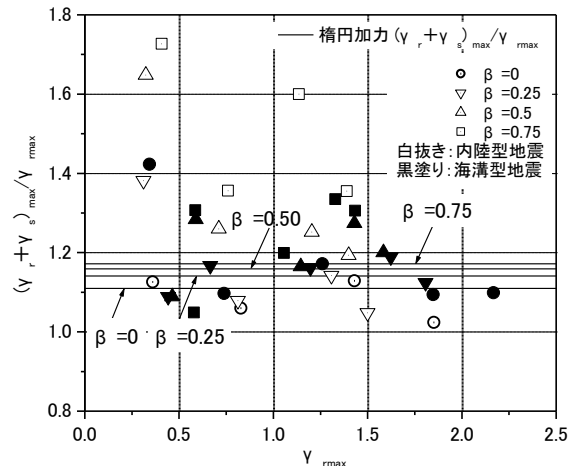


図13 地震動と楕円加力によるせん断歪に対する全歪の比率の比較

参考文献

- 1) 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 和田章ほか: 超高層免震建築物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験, 構造工学論文集 Vol.55B, pp.469-477, 2009.3
- 2) 山本雅史, 嶺脇重雄, 米田春美, 東野雅彦, 和田章: 高減衰ゴム支承の水平2方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第638号, pp.639-645, 2009.4
- 3) 加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 鈴木重信, 嶺脇重雄, 山本雅史, 米田春美, 東野雅彦: 免震用積層ゴムの水平2方向加力時の限界性能に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第16巻, 第32号, pp.167-172, 2010.2
- 4) 森隆浩, 加藤秀章, 室田伸夫: 変形履歴積分型の弾塑性構成則を用いた高減衰積層ゴムFEM解析, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第658号, pp.2171-2178, 2010.12
- 5) 日本免震構造協会: 水平2方向加力時の高減衰ゴム系積層ゴム支承の性状について—限界特性—, 2009.7
- 6) 日本免震構造協会: 高減衰ゴム系積層ゴム支承水平2方向加力試験報告書, 日本免震構造協会, 2009.7
- 7) 日本免震構造協会: 水平2方向加力時の高減衰ゴム系積層ゴム支承の性状について—応答特性—, 2010.5
- 8) ブリヂストン(株): 高減衰積層ゴム(X0.6)技術資料, 認定番号: MVBR-0341, 2007.4
- 9) 北村春幸: 性能設計のための建築振動解析入門(第2版), 彰国社, 2009.4