

1. はじめに

免震構造の主要部材である積層ゴムは、定面圧下の水平 1 方向加振試験により、限界歪などの限界性能が設定されている。2007 年、山本・嶺脇らにより、実大試験体を用いた水平 2 方向加振試験を実施され、高減衰積層ゴムでは、減衰性能によって捩れ歪が発生し、1 方向加振時と比較して破断せん断歪が大きく減少することが確認された^{1),2)}。しかし、免震建物の水平 2 方向応答解析で広く利用されている MSS モデル³⁾などの方法では、捩れ歪は直接算出できない現状である。

本研究では、捩れ歪が試験において直接計測できないため、既往の研究で行われた水平 2 方向加振試験を用いて、画像解析によって捩れ歪を算出し、分析検討する。次に、応答結果である水平変位とせん断力から算出できる捩れ応力に着目し、捩れ応力に基づく捩れ歪の評価方法を提案する。その後、観測波を入力とする地震応答解析を実施し、捩れ応力から捩れ歪を算出することで、水平 2 方向応答を検討する。

2. 捩れ歪と捩れ応力の定義

積層ゴムには、水平 2 方向加振時に、減衰性能により捩れモーメント M_t が発生し、捩れ変形 u が生じる²⁾。水平 2 方向加振時の高減衰積層ゴムの概念図を図 1 に、捩れモーメント M_t と捩れ変形 u の高さ方向分布を図 2 に示す。図 1 において、 δ_x と δ_y 及び F_x と F_y は、X 方向と Y 方向の水平変位及びせん断力を表す。捩れモーメント M_t は、上下フランジが回転固定されているため、上下端部で最大となり、下式で表される。

$$M_t = (F_x \cdot \delta_y - F_y \cdot \delta_x) / 2 \quad (1)$$

捩れ変形 u は、積層ゴムの表面に転写した格子点を試験動画から取り込んだ静止画像より読み取り、積層ゴムの各層において全体変形から水平変位を取り除いた変形とする。捩れ変形 u は、 z 軸の原点を積層ゴムの中間高さに取り、高さ z の 2 次関数で近似し、下式で表される。

$$u(z) = a(z^2 - H^2 / 4) \quad (2)$$

ここで、 a は近似した 2 次曲線の係数である。

積層ゴムに生じる X 方向と Y 方向、変位方向の平均せん断歪は、次式で算出される。

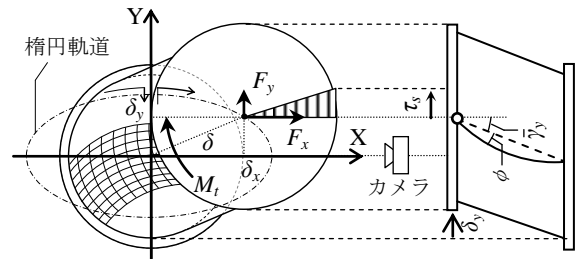


図 1 水平 2 方向加振時の高減衰積層ゴムの概念図

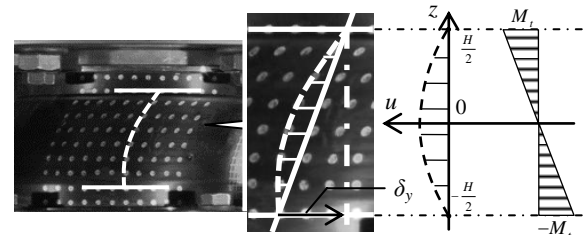


図 2 捩れモーメントと捩れ変形の高さ方向分布

$$\bar{\gamma}_x = \delta_x / h_r, \quad \bar{\gamma}_y = \delta_y / h_r \quad (3a, b)$$

$$\bar{\gamma} = \delta / h_r \quad (4)$$

ここで、 h_r は積層ゴムのゴム総厚さを表し、積層ゴムの内部鋼板は、水平変形に寄与しないと考える。積層ゴムの外周部には、図 1 に示すように、平均せん断歪に加えて、捩れ変形 u の発生に伴い、捩れ歪 ϕ が発生する。捩れ歪 ϕ は、式(2)を高さ z で微分して算出され、積層ゴムの上下端 ($z = \pm H/2$) において最大となり、下式で表される⁴⁾。

$$\phi = \mp \alpha \beta a H \quad (5)$$

α は捩れ変形に寄与しない内部鋼板の厚さに対する補正項 ($= h_r / H$)、 β は試験画像の遠近補正項である⁵⁾。捩れ歪 ϕ は、図 2 に示すように、鉛直軸に対して時計回りを正とする。

積層ゴムの外周部には、捩れ歪 ϕ に対応する捩れ応力 τ_s が作用する。捩れ応力 τ_s は、図 1 に示すように、半径方向に一様に変化すると仮定し、下式で算出される。

$$\tau_s = M_t / Z_p \quad (6)$$

ここで、 Z_p は極断面係数を表す。

3. 水平 2 方向加振試験に基づく捩れ歪の分析

3.1 試験概要

本論文は、2009 年に日本免震構造協会で開催された縮小試験⁶⁾と、2012 年に国土交通省平成 24 年度建築基準整備促進事業で実施された実大試験⁵⁾を使用する。

2つの試験における試験体諸元を表1に示す。一例として縮小試験の $S_2=4.05$ の積層ゴムにおける変位オービットを図3に示す。縮小試験は、X軸とY軸の比が2:1となる楕円加振と8の字加振を行っている。楕円加振は、加振周期10秒で $\bar{r}_x=50\sim 250\%$ まで50%ずつ漸増させ、8の字加振は、 $S_2=4.05$ の積層ゴムにおいて、加振周期100秒で $\bar{r}_x=100, 200\%$ としている。試験は基準面圧とし、それぞれ3サイクルずつ行っている。実大試験の地震応答波加振における水平変位の時刻歴波形を図4に示す。地震応答波加振は、長周期地震動を想定した模擬波を使用している。ただし、試験機能力の都合により、面圧は基準面圧よりも小さい状態で行っている。

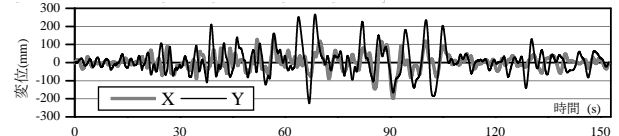
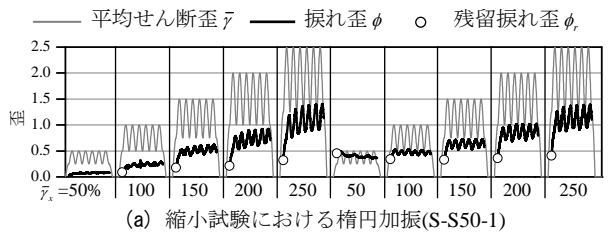
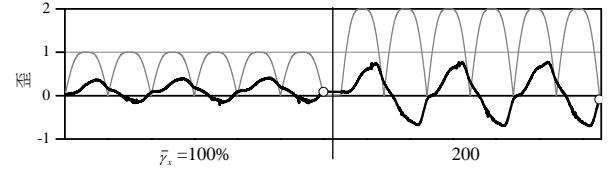


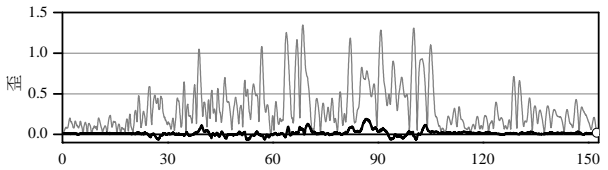
図4 地震応答波加振における変位の時刻歴波形



(a) 縮小試験における楕円加振(S-S50-1)



(b) 縮小試験における8の字加振(S-S40-2)



(c) 実大試験における地震応答波加振(L-S50)

図5 平均せん断歪と捩れ歪の時刻歴波形

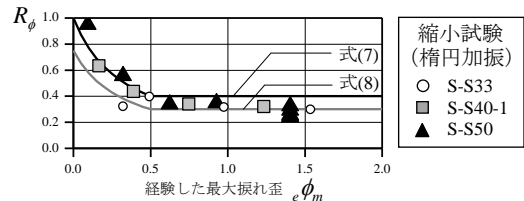


図6 経験した最大捩れ歪 $e\phi_m$ と比率 R_ϕ の関係

3.2 捩れ歪の試験結果

捩れ歪 ϕ は、加振時の積層ゴムで X 方向より撮影した動画から、縮小試験においては 60Hz、実大試験においては 30 Hz で静止画像を読み取る画像解析によって算出した。縮小試験における $S_2=5.02$ の積層ゴムの楕円加振と8の字加振、実大試験の地震応答波加振による平均せん断歪 \bar{r} と捩れ歪 ϕ の時刻歴波形を図5に示す。図5より、捩れ歪 ϕ は、平均せん断歪 \bar{r} の増加に伴って増大する。図5(c)の地震応答波加振では、他の2つの加振と比較して捩れ歪 ϕ が小さい。図5(a)の楕円加振では、大きな残留捩れ歪 ϕ_r が確認でき、その影響で1回目の楕円加振と比較して、2回目の捩れ歪 ϕ が増加した。楕円加振の残留捩れ歪 ϕ_r は、1回目の加振において捩れ歪 ϕ の増加に伴って増大し、2回目では1回目の最終加振時の残留捩れ歪 ϕ_r を維持して、ほぼ同じ大きさのまま変化しない。一方、図5(b),(c)の8の字加振と地震応答波加振では、残留捩れ歪 ϕ_r が小さく、捩れ歪 ϕ の向きが変化することで、残留捩れ歪 ϕ_r が打ち消されると考えられる。以上より、残留捩れ歪 ϕ_r は、経験した最大捩れ歪 $e\phi_m$ に依存して発生すると考えられる。

3.3 経験した最大捩れ歪と残留捩れ歪の関係

経験した最大捩れ歪に対する残留捩れ歪の比率を $R_\phi (= \phi_r / e\phi_m)$ とし、経験した最大捩れ歪 $e\phi_m$ と比率 R_ϕ の関係を図6に示す。図6より、経験した最大捩れ歪 $e\phi_m$ が 50%より小さい範囲では、比率 R_ϕ は比較的大きくなり、50%より大きい範囲では概ね一定の値に近づく傾向を示すことから、比率 R_ϕ の上限値と平均値は、秋山

ら方法⁷⁾にならって、次式を設定した。

$$\text{上限値} : R_\phi = \begin{cases} 1/(1+3e\phi_m) & (e\phi_m \leq 0.5) \\ 0.4 & (e\phi_m > 0.5) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{平均値} : R_\phi = \begin{cases} 3/(4+12e\phi_m) & (e\phi_m \leq 0.5) \\ 0.3 & (e\phi_m > 0.5) \end{cases} \quad (8)$$

4. 捩れ応力に基づく捩れ歪の評価方法

4.1 捩れ歪と捩れ応力の関係

縮小試験における1サイクル目の捩れ歪 ϕ と捩れ応力 τ_s の関係を実線で、最大捩れ歪 ϕ_m と最大捩れ応力 τ_m の関係をプロットで図7に示す。図7より、楕円加振における最大捩れ歪 ϕ_m が8の字加振(◆プロット)より大きい。この違いは、楕円加振時の最大捩れ歪 ϕ_m に残留捩れ歪 ϕ_r が付加されているためだと考えられ、捩れ歪 ϕ を

振れ応力 τ_s の影響で作用する純振れ歪 ϕ_e と残留振れ歪 ϕ_r の 2 つの成分に分離する。試験結果では、振れ歪 ϕ から試験開始時の残留振れ歪 ϕ_r を差し引いた値を純振れ歪 ϕ_e とする。縮小試験における 1 サイクル目の最大振れ歪 ϕ_m と最大振れ応力 τ_{sm} の関係を色塗りで、最大純振れ歪 ϕ_{em} と最大振れ応力 τ_{sm} の関係を白抜きで図 8 に示す。図 8 より、楕円加振の最大純振れ歪 ϕ_{em} が、8 の字加振(◆プロット)と概ね一致する。よって、振れ歪 ϕ は、2 つの成分に分離して評価する。

純振れ歪 ϕ_e と振れ応力 τ_s の関係において、振れの等価せん断弾性率 G'_{eq} は下式で算出される。

$$G'_{eq} = \tau_{sm} / \phi_{em} \quad (9)$$

縮小試験の 1 サイクル目における振れの等価せん断弾性率 G'_{eq} と純振れ歪 ϕ_e の関係を図 9 に示す。図 9 より、振れの等価せん断弾性率 G'_{eq} は、試験ごとにばらつきが見られるものの、歪依存性は比較的小さく、概ね 0.7 の値を示す。

4.2 振れ応力に基づく振れ歪の評価方法

振れ応力 $\tau_s(t)$ を用いた振れ歪 $\phi(t)$ の評価方法を示す。振れ歪 $\phi(t)$ の算出方法の概念図について地震応答加振結果を用いて図 10 に示す。図 10(a)に示すように、振れ応力 $\tau_s(t)$ は、X 方向と Y 方向の水平変位 δ_x と δ_y 、及びせん断力 F_x と F_y を式(1), (6)に代入して算出する。次に、図 10(b)に示すように、算出した振れ応力 $\tau_s(t)$ を振れの等価せん断弾性率 G'_{eq} で除し、純振れ歪 $\phi_e(t)$ を算出する。その後、純振れ歪 $\phi_e(t)$ と残留振れ歪 $\phi_r(t)$ を加算し、振れ歪 $\phi(t)$ を算出する。図 10(c)に示すように、残留振れ歪 $\phi_r(t)$ は、振れ応力の向きが変化した時刻 t_0 から経験した最大振れ歪 ϕ_m を式(7), (8)に代入して算出し、振れ歪 $\phi(t_0)$ の絶対値と大きい方の値を用いる。ただし、図 10(c)のように、残留振れ歪 $\phi_r(t)$ が打ち消し合う場合($\phi(t_0) \cdot \phi_e(t) < 0$)、振れ歪 $\phi(t_0)$ からの歪量を用いて経験した最大振れ歪 ϕ_m を算出し、振れ歪 $\phi(t_0)$ から残留振れ歪 $\phi_r(t)$ を減少させる。

4.3 振れ歪の評価方法の精度検証

実大試験の地震応答加振試験における振れ応力 $\tau_s(t)$ を用いて、前節で示した評価方法より振れ歪 $\phi(t)$ を算出し、試験結果と比較検証する。地震応答加振試験における振れ歪 ϕ の時刻歴波形について、試験結果を灰色線で、提案する評価方法の結果を黒線で図 11 に示す。図 11 より、提案する評価方法は、試験結果の振れ

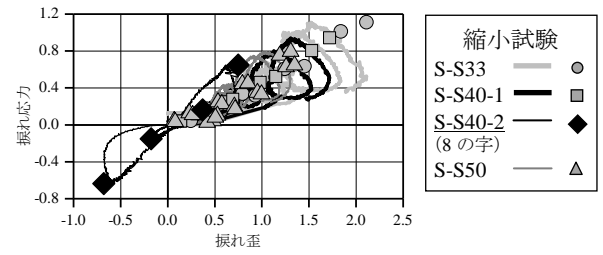


図 7 振れ歪 ϕ と振れ応力 τ_s の関係

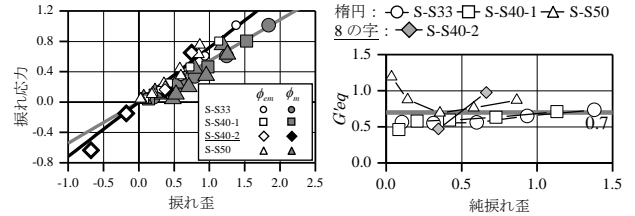


図 8 振れ歪と振れ応力の関係 (1 サイクル目の $\phi_{em} - \tau_{sm}$ と $\phi_m - \tau_{sm}$)

図 9 振れの等価せん断弾性率 G'_{eq} と純振れ歪 ϕ_e の関係

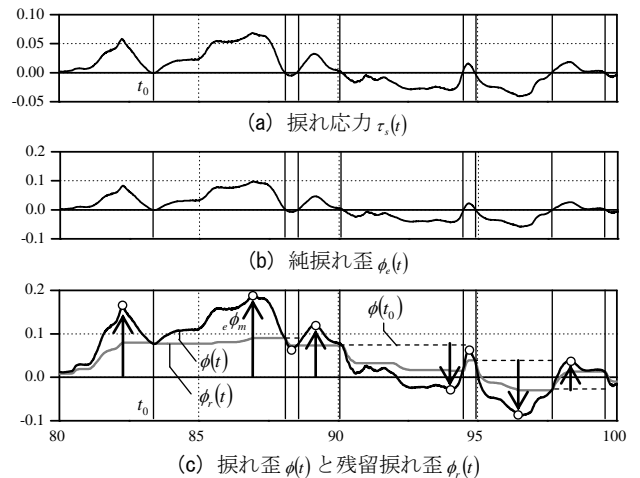


図 10 振れ歪 $\phi(t)$ の算出方法の概念図

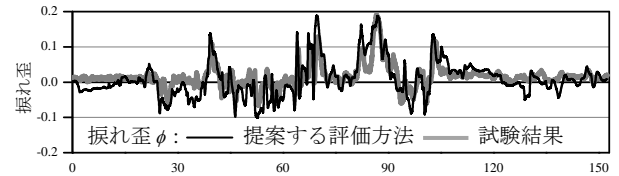


図 11 振れ歪 ϕ の時刻歴波形

歪 ϕ や残留振れ歪 ϕ_r を概ね再現でき、楕円加振や 8 の字加振の試験結果に基づいて提案した評価方法の妥当性を示した。

5. 地震動による水平 2 方向応答への影響

5.1 建物モデル

免震層を高減衰積層ゴムのみで構成した免震建物を、水平 2 方向のみに自由度を有する 1 質点 2 自由度振動系にモデル化する。解析モデルの諸元を表 2 に、積層ゴムの復元力特性を図 12 に示す。積層ゴムには、水平 2 方向の検討において広く利用されている MSS モデルを使用し、せん断ばねを 16 本、せん断ばねに与える復元力特性を修正バイリニアモデルとする。解析パラメータである 1 次剛性 K_1 、2 次剛性 K_2 、

切片荷重 Q_d は、次式で算出される⁸⁾。

$$K_1 = 10K_2, \quad K_2 = K_{eq}(1-U) \quad (10a, b)$$

$$Q_d = UK_{eq}\delta \quad (11)$$

ここで、 K_{eq} は等価剛性、 U は降伏荷重特性係数を表す。また、減衰は履歴減衰のみとする。

5.2 入力地震動

入力地震動は、直下地震として、1995年兵庫県南部地震の JMA KOBE 波（神戸）、2008年四川汶川地震の 051SFB 波（什邡八角）を用い、長周期地震動として、1968年十勝沖地震の HACHINOHE 波（八戸港湾）、2011年3月東北地方太平洋沖地震の K-NET MYG013 波（仙台）、K-NET KNG013 波（小田原）を用いる。

5.3 解析結果の分析

地震波入力時における平均せん断歪 $\bar{\gamma}$ 、捩れ歪 ϕ 、2つの歪の絶対値和である最大せん断歪 γ_{max} のそれぞれの最大値、および残留捩れ歪 ϕ_r 、平均せん断歪に対する最大せん断歪の比率 $\gamma_{max}/\bar{\gamma}$ を表3に示す。表3に示した平均せん断歪 $\bar{\gamma}$ と捩れ歪 ϕ の関係を図13(a)に、平均せん断歪 $\bar{\gamma}$ と最大せん断歪 γ_{max} の関係を図13(b)に、解析結果と同じ $S_2=5$ である縮小試験の楕円加振の試験結果とともに示す。表3より、地震応答では、地震応答波加振試験と同様に、残留捩れ歪 ϕ_r が小さい。長周期地震動の比率 $\gamma_{max}/\bar{\gamma}$ は、直下地震より大きく、1.2程度の大きさとなる。図13より、捩れ歪 ϕ は、平均せん断歪 $\bar{\gamma}$ の増加に伴って増大し、その影響で最大せん断歪 γ_{max} も同様に増大するが、楕円加振試験の結果よりも小さく、水平2方向の評価に使用されている楕円加振試験が安全側の評価となる。

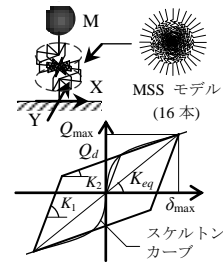
6. まとめ

既往の水平2方向加振試験をもとに、捩れ応力に基づく捩れ歪の評価方法を提案した。一連の検討から得られた知見を以下に示す。

- (1) 楕円加振では、残留捩れ歪が生じ、捩れ歪が増大する。8の字加振と地震応答波加振では、捩れ歪の向きが変化するため、残留捩れ歪が打ち消され、小さくなる。
- (2) 平均せん断歪に対する最大せん断歪の比率は、直下地震よりも長周期地震動において大きく、1.2程度の大きさとなる。
- (3) 捩れ歪の地震応答は、楕円加振試験の結果よりも小さく、水平2方向の評価に使用される楕円加振試験が安全側の評価となる。

表2 解析モデル諸元

積層ゴム直径 D (mm)	1000
2次形状係数 S_2	5
免震周期 T (s)	4.0
質量 M (ton)	482.4
せん断弾性率 G_{eq} (N/mm ²)	0.62*
等価減衰定数 H_{eq}	0.24*
降伏荷重特性係数 U	0.408*



* 平均せん断歪 100%時の特性値 図15 積層ゴムの復元力特性

表3 地震波ごとの応答解析結果

地震波	$\bar{\gamma}$	ϕ	γ_{max}	ϕ_r	$\gamma_{max}/\bar{\gamma}$	
直下地震	JMA KOBE	1.84	0.33	1.98	0.00	1.08
	051SFB	0.93	0.15	0.96	0.00	1.03
長周期地震	HACHINOHE	0.88	0.20	1.04	0.00	1.19
	K-NET MYG013	1.86	0.43	2.12	0.01	1.14
	K-NET KNG013	1.37	0.31	1.55	0.00	1.14

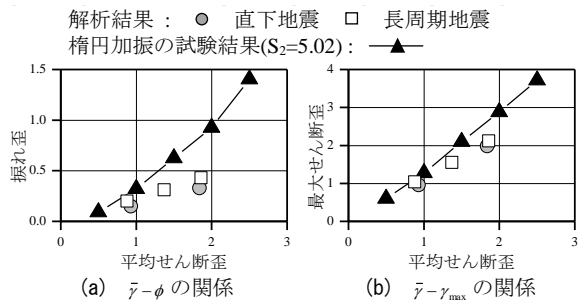


図16 地震波入力時の応答解析結果と楕円加振の試験結果

謝辞

本研究は、(株)ブリヂストンと東京理科大学北村研究室の共同研究の成果の一部を用いたものです。国土交通省平成24年度建築基準整備事業「27-3長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」で実施した内容の一部を使用しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 嶺脇重雄他：超高層免震建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, 2009.3
- 2) 山本雅史他：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) 和田章，木下雅彦：MSSモデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析(その1-2)，日本建築学会大会学術講演梗概集B, pp.313-316, 1985.10
- 4) 下沖航他：水平二方向入力時の履歴型・粘性型減衰機構を持つ高減衰積層ゴムの捩れ歪の検討，日本建築学会構造系論文集，第77巻，第678号，pp.1247-1256, 2012.8
- 5) Sachie Yamamoto et al.: Study on Multi-cyclic Characteristics of Devices for Seismic Isolation against Long Period Earthquake Motions (Multi-cyclic Loading Experiment on Full-scale High-damping Rubber Bearing), 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 885070, 2013.9
- 6) 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
- 7) 秋山宏他：地震時における柔剛混合せん断型多層骨組の残留変形，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2, pp.397-398, 1998.9
- 8) (株)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