

杭頭免震構造の開発（その3） 免震部材の傾斜付水平加力試験と再現解析 Development of Pile-head Seismic Isolation Structure (Part3) Loading test of Seismic Isolation and Simulation Analysis

山崎 康雄*

高橋 孝二**

Yasuo Yamasaki

Koji Takahashi

飯塚 信一***

Shinichi Iizuka

要 約

杭頭免震構造では、通常の基礎免震構造に比べて躯体工事・土工事が減り、コスト低減・工期短縮が可能となる。しかし、杭頭の回転固定度が低くなるため、免震部材下面に回転角が生じ力学特性に影響が生じることが考えられる。本報では、免震部材の性能に回転角が与える影響を把握することを目的とし実施した高減衰系積層ゴム、鉛プラグ挿入型積層ゴムの傾斜付水平加力試験と、その再現解析を行った。試験結果から両積層ゴムは傾斜角 1/100 rad. までであれば、各種性能へ与える影響は小さく、本報で示す解析モデルであれば試験を再現できることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 高減衰系積層ゴムの傾斜付水平加力試験
- § 3. 鉛プラグ挿入型積層ゴムの傾斜付水平加力試験
- § 4. 傾斜付水平加力試験の再現解析
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

杭頭免震構造では、通常の基礎免震構造に比べて躯体工事・土工事が減り、コスト低減・工期短縮が可能となる。しかし、杭頭の回転固定度が低くなるため、免震部材下面に回転角が生じ力学特性に影響が生じることが考えられる。

前報¹⁾²⁾では、杭頭免震構造と基礎免震構造の地盤－杭－建物連成系一体解析モデル（以下、一体解析モデル）の時刻歴応答解析結果を比較し、杭頭回転角 1/100 rad. 以下の範囲においては、有意な差がないことの確認と、杭頭免振構造の設計の際に考慮すべき応力の算出方法を提案し、6 階建て物流倉庫の試設計について報告した。

本報では、免震部材の性能に回転角が与える影響を把

握することを目的とし実施した、高減衰系積層ゴム（HRD）、鉛プラグ挿入型積層ゴム（LRB）の傾斜付水平加力試験と、その試験の再現解析について報告する。

§ 2. 高減衰系積層ゴムの傾斜付水平加力試験

2-1 試験体と加力方法

試験体の諸元を、表－1 に示す。試験体は $\phi 1000$ の HRD とした。試験方法を、図－1 に示す。積層ゴムの下フランジに傾斜プレートを取付けて傾斜角を与え、鉛直アクチュエータで所定の面圧を載荷した状態で水平加力試験を行った。試験装置を、図－2 に示す。試験パラメータは、傾斜角、せん断ひずみ、面圧とし、表－2 に示す組み合わせで試験を行った。なお、荷重履歴依存性や温度依存性の影響を考慮するため、試験中に標準試験（傾斜角 0、基準面圧 15 N/mm²、せん断ひずみ 100%）を実施した。各試験条件で、3 回繰返し加力を行っており、以下に示す試験結果は 3 回目の繰返し時のデータによる。

鉛直加力試験は、水平アクチュエータにより水平方向変位を拘束した状態で面圧 1 N/mm²～30 N/mm²～1 N/mm²～15 N/mm²～1 N/mm² の順に載荷し、面圧 15 N/mm² と 30 N/mm² の勾配を鉛直剛性とした。

水平方向荷重・変位は、アクチュエータのロードセルと内部変位計により計測した。鉛直荷重は鉛直アクチュエータ 2 台のロードセルによる値の合計とし、鉛直変位は試験体近傍に加力方向に対して直角な位置に 2 台設置

* 技術研究所建築技術グループ

** 建築設計部構造一課

（現：技術研究所建築技術グループ）

*** 技術研究所

表-1 HRDの試験体諸元

外 径	φ 1000 mm
ゴム層	6.7 mm×30 層
内部銅板	4.4 mm×29 枚
一次形状係数	36.4
二次形状係数	4.98

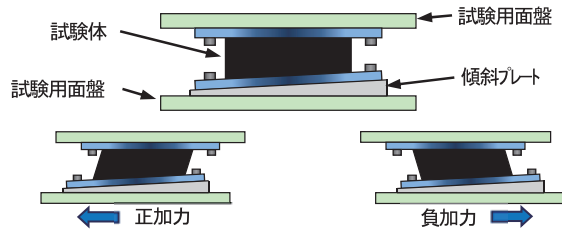


図-1 試験方法

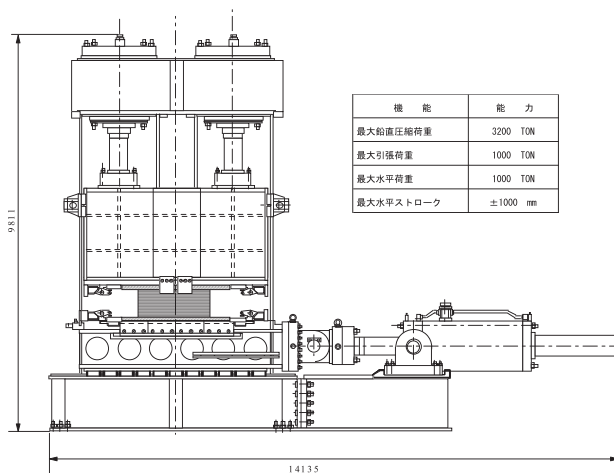


図-2 試験装置

表-2 加力パラメータ

傾斜角 [rad.]	水平せん断ひずみ [%]	面圧 [N/mm ²]
0	100,200	0,15,30
	300	15
1/100	100,200	0,15,30
	300	15
1/75	100,200	0,15,30

したダイヤルゲージ式変位変換器により計測した。

2-2 試験結果

(1) 履歴曲線

基準面圧、せん断ひずみ 200%における水平加力試験の履歴曲線を、図-3 に示す。傾斜角の影響で、履歴曲線はやや正負非対称となる傾向がみられるが、全体的には大きな差はみられない。鉛直加力試験による履歴曲線を、図-4 に示す。同一鉛直荷重では、傾斜角があると鉛直変位が大きくなる傾向がみられる。

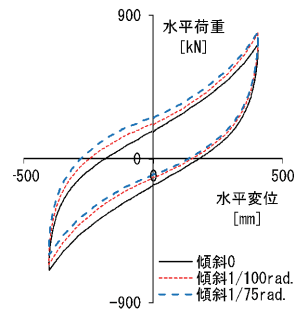


図-3 履歴曲線（水平）

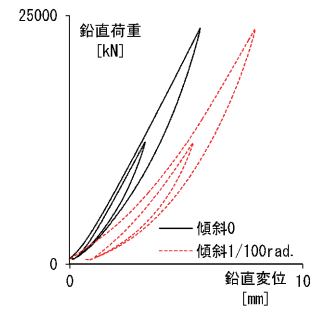


図-4 履歴曲線（鉛直）

(2) 等価水平剛性

等価水平剛性について、傾斜角 0 を基準とした変化率を、図-5 に示す。等価水平剛性は、正負のピークを結ぶ直線の勾配とした。せん断ひずみ 100%で面圧が 1 N/mm² の場合は、傾斜角が大きくなると等価水平剛性が小さくなる傾向がみられ、傾斜角 0 と比較して傾斜角 1/100 rad. で 0.92, 1/75 rad. で 0.86 となった。せん断ひずみ 100%で面圧 15 N/mm² では、傾斜角 1/100 rad. で 0.94 と若干低下しているが、1/75 rad. では 0.97 となり傾斜角の等価水平剛性に対する明確な影響はみられない。その他のせん断ひずみと面圧の組み合わせでは、傾斜角 1/75 rad. まで等価水平剛性に対する影響はみられない。

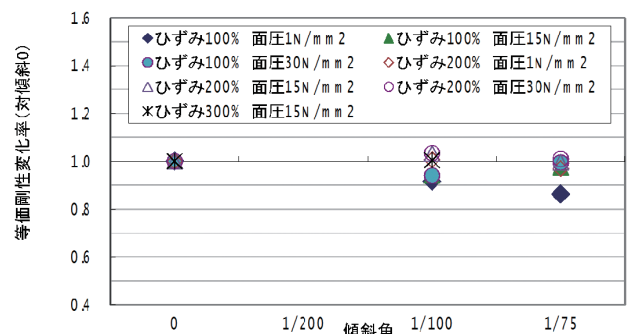


図-5 等価水平剛性（傾斜角 0 を基準）

(3) 等価粘性減衰定数

傾斜角 0 に対する等価粘性減衰定数の変化率を、図-6 に示す。履歴曲線は正負非対称となっているが、ここでは、1 サイクル全体で等価粘性減衰定数を算出した。せ

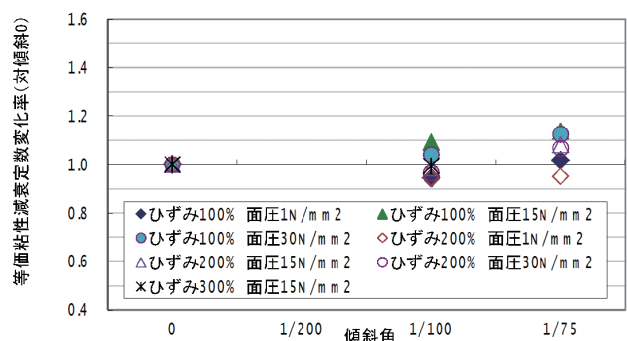
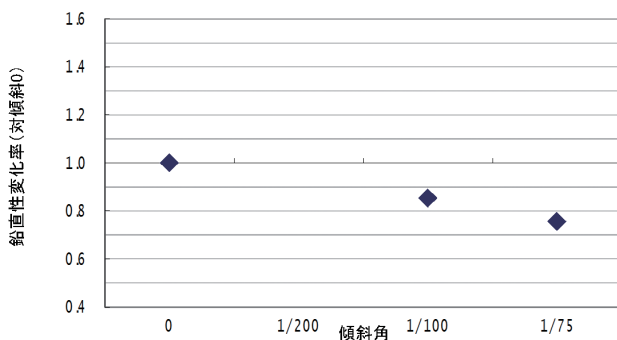


図-6 等価粘性減衰定数（傾斜角 0 を基準）

せん断ひずみ 100%では、各面圧で傾斜角が大きくなると等価粘性定数は大きくなる傾向がある。せん断ひずみ 200%では、面圧が 1 N/mm^2 の場合は、等価粘性減衰定数は傾斜角 $1/100 \text{ rad.}$ 、 $1/75 \text{ rad.}$ で 5%程度小さくなるが、面圧 $15 \text{ N/mm}^2 \sim 30 \text{ N/mm}^2$ では、ほぼ同等以上の値となっている。面圧 30 N/mm^2 の場合の等価粘性減衰定数は、面圧 $0 \sim 15 \text{ N/mm}^2$ の値と顕著な差が見られ、この傾向は傾斜角の有無によらない。

(4) 鉛直剛性

傾斜角と鉛直剛性の関係を、図一七に示す。縦軸は傾斜角 0 の時の値で基準化している。鉛直剛性は傾斜角が大きくなると減少し、傾斜が無い場合に対して傾斜角 $1/100 \text{ rad.}$ では 0.85、傾斜角 $1/75 \text{ rad.}$ では 0.76 となった。



図一七 鉛直剛性（傾斜角 0 を基準）

§ 3. 鉛プラグ挿入型積層ゴムの傾斜付水平加力試験

3-1 試験体と加力方法

試験体の諸元を、表一三に示す。試験体は、ゴム外径 $\phi 1000$ で、鉛プラグ径 $\phi 200$ の LRB とした。また、試験状況を、写真一1に示す。

表一三 LRB試験体諸元

外 径	$\phi 1000 \text{ mm}$
鉛プラグ径	$\phi 200 \text{ mm}$
ゴム層	7 mm×29 層
内部銅板	4.3 mm×28 枚
一次形状係数	35.7
二次形状係数	4.9



写真一1 試験状況

試験パラメータは、傾斜角、面圧、せん断ひずみとし、表一四に示す組み合わせで試験を行った。傾斜角 0, $1/200$, $1/100$, $1/75 \text{ rad.}$ の傾斜がついた四水準とし、面圧は 0, 15, 30 N/mm^2 の三水準とする。水平せん断ひずみは、ゴム厚さに対して 100, 200, 300%とするが、300%時の加力は、面圧 15 N/mm^2 、傾斜角 0, 100 rad. のみとした。なお、荷重履歴依存性や温度依存性の影響を考慮するため、標準試験（傾斜角 0, 基準面圧 15 N/mm^2 、せん断ひずみ 100%）を実施した。試験は最初に標準試験と鉛直の基本特性の確認試験を行い、その後、面圧と水平せん断ひずみを変化させた水平加力試験を行った。傾斜角の付加は 0 から順次傾斜角を増加させ、各試験は傾斜角毎に 1 シリーズとして連続して行った。各加力間におけるインターバル時間は 5 分以上とした。面圧 0 N/mm^2 の加力試験を計画したが試験機制御の安定性確保のため、 1 N/mm^2 を作用させ、これに代わるものとした。

水平方向の荷重は試験機に設置したロードセルにより計測し、変位は、試験機の上下面盤間に設置した変位計により計測した。鉛直荷重は鉛直アクチュエータによる荷重とし、鉛直変位は試験体近傍に設置したひずみゲージ式変位変換器により計測した。鉛直変位測定用の変位変換器は、加力方向に対して設置した。

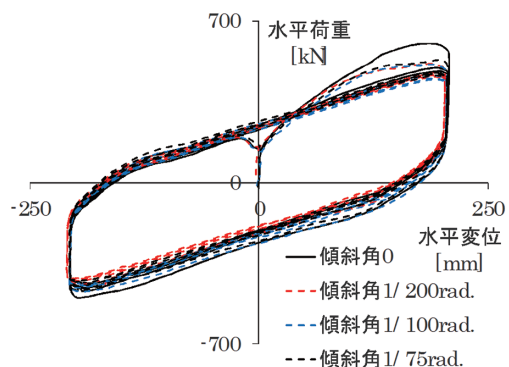
表一四 加力パラメータ

傾斜角 [rad.]	水平せん断ひずみ [%]	面圧 [N/mm ²]
0	100,200	0,15,30
	300	15
$1/200$	100,200	0,15,30
$1/100$	100,200	0,15,30
	300	15
$1/75$	100,200	0,15,30

3-2 試験結果

(1) 履歴曲線

傾斜角 0, $1/200$, $1/100$, $1/75 \text{ rad.}$ 、基準面圧 15 N/mm^2 、せん断ひずみ 100%における水平加力試験の履歴曲線の比較を、図一八に示す。履歴曲線は、傾斜の影響で水平荷重の増加がみられ、やや上方向にシフトしているが、全体的には大きな差はみられない。



図一八 履歴曲線（水平）

傾斜角 0, 1/200, 1/100, 1/75 rad. による鉛直加力試験の履歴曲線の比較を、図-9 に示す。同一鉛直荷重では、傾斜角が大きいく程、変位が大きくなる傾向がみられる。

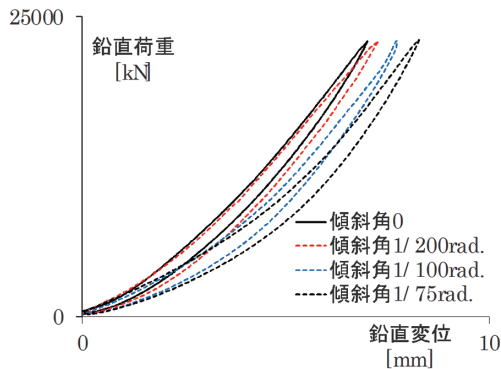


図-9 履歴曲線（鉛直）

(2) 降伏荷重

降伏荷重の変化率を、図-10 に示す。降伏荷重は、面圧による影響は少なく、傾斜角が大きくなると若干増加する傾向にある。面圧が 0~30 N/mm²，せん断ひずみが 100%~300% の範囲内であれば、傾斜角 0 と比較して 0.98~1.12 となっている。

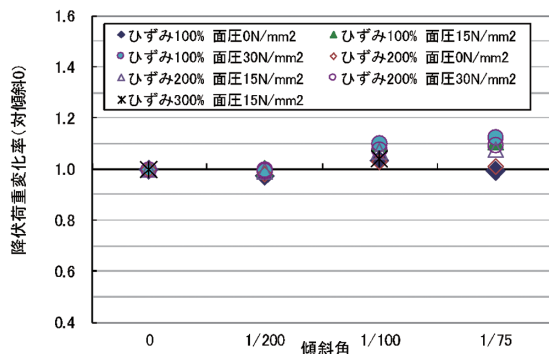


図-10 降伏荷重の変化率（傾斜角 0 を基準）

(3) 二次剛性

二次剛性の変化率を、図-11 に示す。二次剛性は、傾斜角が大きくなると低下する傾向がみられ、面圧が 0~30 N/mm²，せん断ひずみが 100%~300% の範囲内で、傾斜角 0 と比較して 0.74~1.02 となっている。

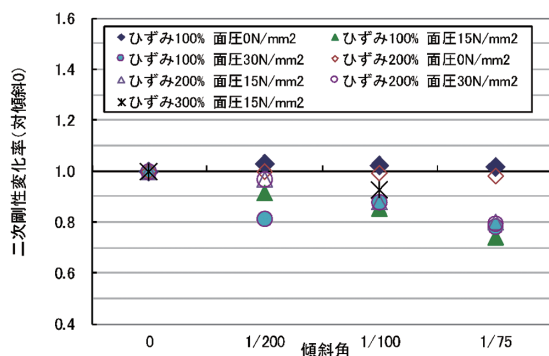


図-11 二次剛性の変化率（傾斜角 0 を基準）

(4) 等価剛性

等価剛性の変化率を、図-12 に示す。等価剛性は、面圧による影響は少なく、傾斜角が大きくなると若干減少する傾向にある。面圧が 0~30 N/mm²，せん断ひずみが 100%~300% の範囲内であれば、傾斜角 0 と比較して 0.92~1.00 となっている。

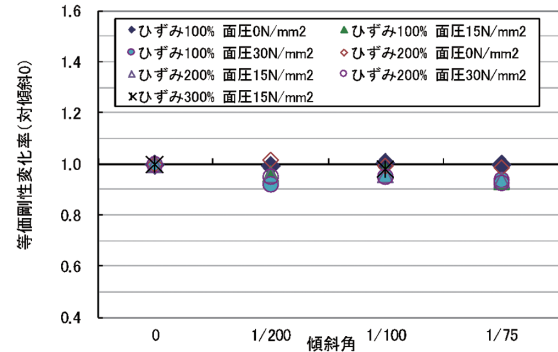


図-12 等価剛性の変化率（傾斜角 0 を基準）

(5) 等価減衰定数

等価減衰定数の変化率を、図-13 に示す。等価減衰定数は、面圧，せん断ひずみによる影響は少なく、面圧が 0~30 N/mm²，せん断ひずみが 100%~300% の範囲内であれば、傾斜角 0 と比較して 0.99~1.18 となっている。

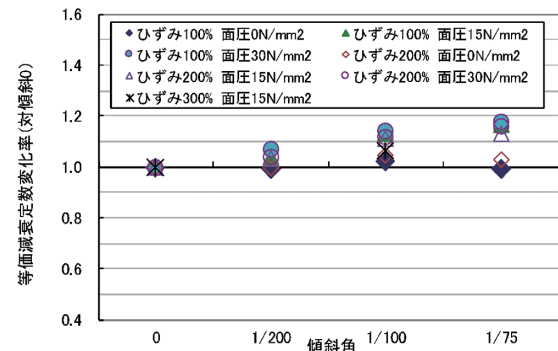


図-13 等価減衰定数の変化率（傾斜角 0 を基準）

§ 4. 傾斜付水平加力試験の再現解析

4-1 再現解析諸元

部材の力学モデル³⁾を、図-14 に示す。モデルは、剛棒に水平剛性と回転剛性を考慮した剛棒ばねとした⁴⁾⁵⁾。

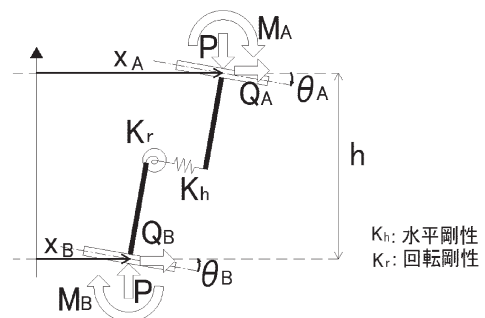


図-14 部材の力学モデル

$$\begin{Bmatrix} Q_A \\ M_A \\ Q_B \\ M_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -h/2 & -1 & -h/2 \\ h^2/4 & h/2 & h^2/4 & \\ \text{sym.} & 1 & h/2 & \\ & & h^2/4 & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 & -1/2 & 0 & -1/2 \\ h/4 & 1/2 & h/4 & \\ \text{sym.} & 0 & 1/2 & \\ & & h/4 & \end{Bmatrix} + P \begin{Bmatrix} 0 \\ h/4 \\ \text{sym.} \\ h/4 \end{Bmatrix} + K_r \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \\ \text{sym.} & 0 & 0 & \\ 1 & & & \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_A \\ \theta_A \\ x_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} \quad (1)$$

(1)式中の K_h は、水平剛性で(2)式により表わされる。

$$K_h = \frac{G \cdot A}{n t_r} \left(1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right) \phi_h \quad (2)$$

ここで、 G ：ゴムのせん断弾性率、 A ：ゴム部のせん断面積、 n ：ゴム層数、 t_r ：ゴム1層の厚さ、 P ：鉛直荷重、 P_{cr} ：座屈荷重である。

また、(2)式中の ϕ_h は、天然ゴム系積層ゴム（以下、NRB）の水平剛性に関する水平変位依存性で(3)式により表される。ここで、 x ：水平変位、 D ：積層ゴム円形断面外径である。

$$\phi_h = \left(\frac{x}{n t_r} \right)^{-0.16} \quad (3)$$

(3)式はNRBの履歴則であるため、本検討では、HDRはひずみ依存バイリニア型、LRBはひずみ依存トリリニア型のそれぞれの履歴則を設定し、以降の検討を行う。

解析モデルは、前節で示した剛棒ばねモデルとした。解析対象とした試験体は、表一1、表一3に示した諸元とした。境界条件は、一端自由、他端固定とし、荷重を、自由端側に①回転、②鉛直、③水平の順で作用させた。

検討対象とした試験を、表一5に示す。対象とした試験は、面圧を基準面圧 15 N/mm² のケースとし、傾斜角を三水準、水平せん断ひずみ（水平変位）を二水準とした。

表一5 検討対象の試験

Case	面圧 [N/mm ²]	傾斜角 [rad.]	水平せん断ひずみ [%]
H(L)1-1	15	0	100
H(L)1-2			200
H(L)2-1		1/100	100
H(L)2-2			200
H(L)3-1		1/75	100
H(L)3-2			200

※ 表中 H：HDR，L：LRB

結果の比較は、試験の3ループ目の等価剛性（正負のピークを結ぶ直線の勾配）と履歴面積⁶⁾により行った。

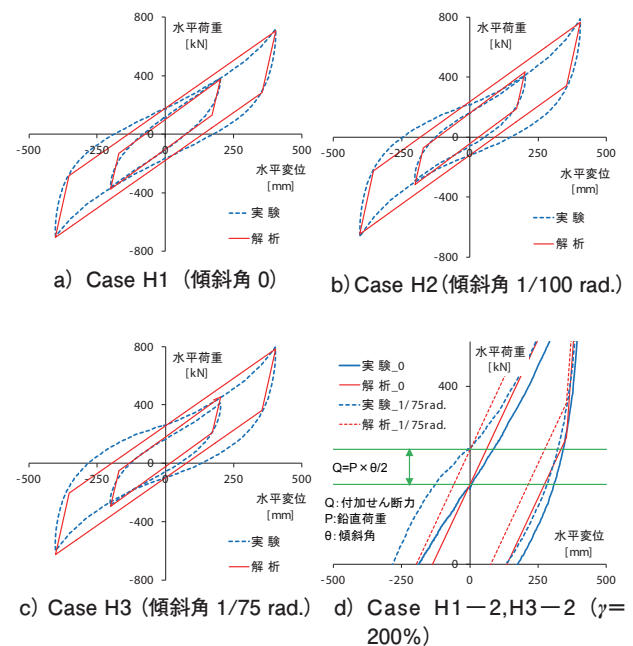
なお、本検討では、免震部材の端部回転による影響を解析的に把握するため、傾斜角0での試験結果と解析結果が概ね一致するように、解析モデルの剛性等を調整し

た。また、試験は変位制御によるが、解析は解析ソフトの都合上、荷重制御により正負の最大水平変位を等しくした。

4-2 試験結果と再現解析結果の比較

(1) 高減衰系積層ゴム（HDR）

HDRの履歴曲線の比較を図一15、試験結果を基準にして求めた各種特性値の比率を表一6に示す。図一15より、試験結果と解析結果の各Caseの履歴曲線は、概ね一致している。また図一15 d)より、試験結果と解析結果ともに、鉛直荷重と傾斜角による付加せん断力（ $P\theta$ 効果）の影響により切片荷重が増加しており、その値は概ね等しい。



図一15 履歴曲線の比較（HDR）

表一6 各種特性値の比率（HDR）

Case	荷重	等価剛性	履歴面積	付加せん断力
H1-1_+側	0.97	1.00	1.00	—
〃_ -側	1.03			
H1-2_+側	0.98	1.00	1.00	—
〃_ -側	1.01			
H2-1_+側	1.05	1.07	0.98	1.06
〃_ -側	1.09			
H2-2_+側	0.97	0.97	0.99	1.19
〃_ -側	0.98			
H3-1_+側	1.00	1.03	0.92	0.95
〃_ -側	1.10			
H3-2_+側	0.99	1.01	0.94	0.97
〃_ -側	1.04			

※ 表中の値は、解析結果／試験結果

(2) 鉛プラグ挿入型積層ゴム（LRB）

LRBの履歴曲線の比較を図-16、試験結果を基準として求めた各種特性値の比率を表-7に示す。HDRと同様に、各Caseの履歴曲線、各種特性値は、概ね等しい。

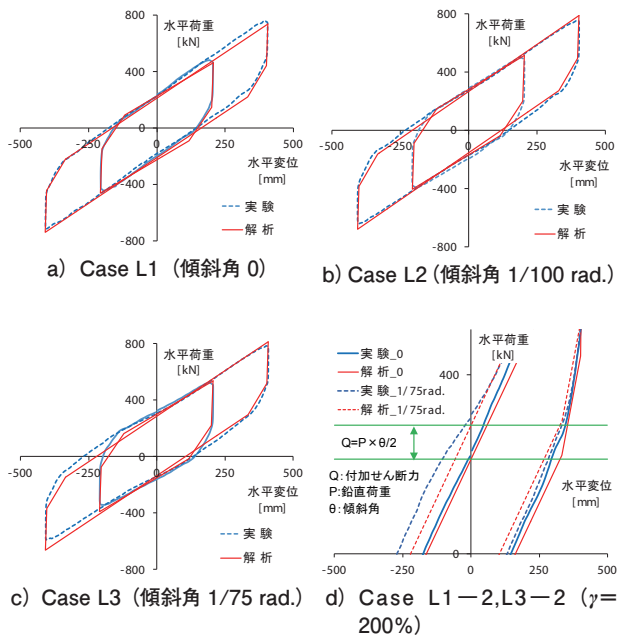


図-16 履歴曲線の比較（LRB）

表-7 各種特性値の比率（LRB）

Case	荷重	等価剛性	履歴面積	付加せん断力
L1-1_+側	0.96	1.00	1.00	—
〃_ -側	1.05			
L1-2_+側	0.97	1.00	1.00	—
〃_ -側	1.03			
L2-1_+側	1.03	1.03	0.92	1.15
〃_ -側	1.03			
L2-2_+側	1.04	1.05	0.95	1.08
〃_ -側	1.06			
L3-1_+側	1.03	1.07	0.92	0.94
〃_ -側	1.14			
L3-2_+側	1.04	1.07	0.94	0.91
〃_ -側	1.12			

※ 表中の値は、解析結果／試験結果

§5. まとめ

本報では、免震部材の性能に回転角が与える影響を把握することを目的とし実施した高減衰系積層ゴム、鉛プラグ挿入型積層ゴムの傾斜付水平加力試験と、その再現解析を行った。試験結果から両積層ゴムは傾斜角 1/100 rad. までであれば、各種性能へ与える影響は小さいく、本報で示す解析モデルであれば試験を再現できることを確認した。

謝辞. 本報は、杭頭免震構造研究会（青木あすなろ建設、安藤ハザマ、東亜建設工業、西松建設、長谷工コーポレーション）での検討成果の一部である文献7, 8を再構成したものである。

参考文献

- 1) 成田悠他：杭頭免震構造の開発（その1）、西松建設技報，vol. 39
- 2) 山崎康雄他：杭頭免震構造の開発（その2）、西松建設技報，vol. 40
- 3) 三山剛史：積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第556号，pp. 43-50, 2002年6月
- 4) 小林正人他：端部回転を有する免震用積層ゴムの水平剛性と取付け部材の設計用応力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第77巻，第682号，1873-1880, 2012年12月
- 5) 小林正人他：端部回転を有する積層ゴムの部材端荷重に関する分析，日本建築学会技術報告集，第21巻，第48号，pp. 569-574, 2015年6月
- 6) 田中美子他：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承LRB解析モデルの提案，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 745-746, 2005年9月
- 7) 牧田敏郎他：杭頭回転角を考慮した免震部材の構造性能（その1～4）、日本建築学会学術講演梗概集，pp. 449-456, 2016年8月
- 8) 山崎康雄他：杭頭回転角を考慮した免震部材の構造性能（その5）、日本建築学会学術講演梗概集，pp. 917-918, 2017年8月