積層ゴムで支持した塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験

SHAKING TABLE TESTS ON ULTIMATE BEHAVIOR OF SLENDER BASE-ISOLATED BUILDINGS SUPPORTED BY LAMINATED RUBBER BEARINGS

高岡 栄治*¹, 二村 有則*¹, 飯塚 真巨*², 竹中 康雄*³, 吉川 和秀*⁴

*Eiji TAKAOKA, Arinori NIMURA, Masao IIZUKA,
Yasuo TAKENAKA and Kazuhide YOSHIKAWA*

This paper describes results of shaking table tests on ultimate behavior of high aspect ratio base-isolated buildings. In the tests, a base-isolated structure model weighing 192kN supported by 4 laminated rubber bearings was used. The aspect ratio of superstructure (4 or 6), and shape and axial stress of a laminated rubber bearing were set for experimental parameter. The results of tests indicate that the ultimate behavior of base-isolated buildings are roughly classified into two types; one is caused by buckling fracture of rubber bearings and the other is caused by tensile fracture of rubber bearings. These types are dependent on relationship between lateral restoring characteristics of base-isolated story and static ultimate lateral force by uplift of superstructure.

Keywords : base-isolated building, laminated rubber bearing, aspect ratio, ultimate behavior, shaking table test

免震建物、積層ゴム、塔状比、終局挙動、振動台実験

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、積層ゴムを用いた免震構造はその有効性が認知され、広く普及するところとなった。従来免震構造が適用対象とされてきた建物は、塔状比（建物の高さとの比）の比較的小さい中低層建物を中心であった。しかし、近年ではその適用が高層建物へも及び、塔状比が3を超えるような事例も多く見受けられる。一般に、塔状比が大きくなると建物には大きな転倒モーメントが生じる。よって、地震時にはロッキング振動が生じやすく、隅角部の積層ゴムには大きな変動軸力が生じる。さらに設計レベルを超える地震動が入力された場合、積層ゴムには引張力あるいは過大な圧縮力が生じ、建物は不安定な状態へ、また最悪の場合積層ゴムの破壊により終局的な状態へと至ることも予想される。このような終局挙動を把握することは、免震建物の安全余裕度の定量的な評価に有益であるのみならず、今後予想されるさらなる高塔状化に対する設計資料ともなり得る重要な課題である。

免震構造の終局挙動に関する研究は、主として免震部材単体の終局挙動を把握することに重点が置かれてきた。積層ゴムについては、圧縮、引張り、せん断の各特性に関する実験結果より限界性能に関する考察が行われ、終局挙動が概ね明らかにされている¹⁾²⁾。一方、免震建物の性能を確認するためには、模型等による振動台実験が有効である。終局挙動の把握を目的として、積層ゴムが破断するまでの振動台実験も数多く実施されているが、主に塔状比の小さい原子

炉建屋を対象としたものである³⁾。また、塔状比の大きい試験体を用いて大入力に対する挙動を確認する実験も実施されている。猿田等は高減衰積層ゴムと塔状比 6.2 の試験体を用いた実験を⁴⁾、久野等は弾性滑り支承と積層ゴムを組み合わせた構法と塔状比 5 の試験体を用いた実験を実施し⁵⁾、それぞれ既往地震波 100cm/s 相当の入力時に積層ゴムに引張りが生じるが、その後の挙動に大きな影響を与えないことを確認している。また、三山等は積層ゴムとオイルダンパーを組み合わせた構法と塔状比 5 の試験体を用いた実験より、振動台実験の積層ゴム特性が理論値と対応することを確認した他、引張りが生じた後の着座による最大軸力が予測できることを示した⁶⁾。しかし、これまで塔状比の大きい建物を対象とし、積層ゴムの破壊までの終局挙動の把握を目的とした研究は行われていない。また、積層ゴムの形状や塔状比など終局挙動に影響を与える要因をパラメトリックに扱った研究も見られない。

以上の背景の下、積層ゴムで支持した塔状免震建物の終局挙動を解明することを目的として、縮小免震建物模型を用いた振動台実験を実施した。実験要因として、建物上部構造の塔状比、積層ゴムの形状・面圧を採用し、水平1方向入力により積層ゴムが破壊に至るまで加振した。実験結果より、終局時における上部構造と積層ゴムの詳細な挙動について分析し、各要因が終局挙動に与える影響について検討した。

本論文の一部は文献12)~17)にて発表している。

*¹ 鹿島技術研究所 主任研究員・修士(工学)

*² 鹿島技術研究所 上席研究員・修士(工学)

*³ 鹿島小堀研究室 室次長・修士(工学)

*⁴ 鹿島 IT ソリューション部 グループ主事

Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., M. Eng.

Supervisory Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., M. Eng.

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

Senior Coordinator, Intelligent Systems Department, Kajima Corp.

2. 実験要因と水準の設定

終局挙動に影響を与える要因として、上部構造の塔状比 H/B (H : 建物高さ、 B : 積層ゴムの軸芯間距離)、積層ゴムの形状・面圧を選定した。塔状比は 4 及び 6 の 2 つの水準を設定した。積層ゴムの形状は、後述の想定構造物における原型の大きさと設定し、ゴム総厚 h を共通の 200mm、直径 D を 800mm 及び 1000mm とした。2 次形状係数 ($S_2=D/h$) はそれぞれ 4 及び 5 である。想定構造物における面圧 σ (鉛直荷重/積層ゴム断面積) はそれぞれ 7.90MPa 及び 5.05MPa であり、前者では形状・面圧を相対的に小径・高面圧とすることで水平力低下型の復元力特性が、後者では大径・低面圧とすることでハードニング型の復元力特性が現れることを想定している。積層ゴムは鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) とした。以上を組み合わせた実験ケースを表 1 に示す。実験ケースは計 4 ケースである。

3. 試験体

想定構造物における原型として、直径 D が 800mm 又は 1000mm の積層ゴム 4 体で支持した総重量 15880kN の剛な塔状免震建物を想定した。試験体は、表 2 に示す相似則に従って原型を 1/9 に縮尺した縮小模型である。試験体の形状・寸法を図 1 に示す。

3.1 上部構造

上部構造は、鉄筋コンクリート製の重錘 4 個を PC 鋼棒で締結したものである。全体寸法は、短辺 1,300mm×長辺 1,600mm×高さ 4,000mm である。短辺方向の積層ゴム軸芯間距離 B は、塔状比 4 で 1,000mm、塔状比 6 で 680mm とした。上部構造の総重量 W の測定値は 192kN である。以下ではこの上部構造を「重錘」と呼ぶ。

3.2 積層ゴム

模型積層ゴムの形状諸元を表 3 に、材料の物性規格を表 4 に示す。積層ゴムは鉛プラグ入り積層ゴムであり、ゴム総厚 h が全ケース共通で 22mm、直径 D が 90mm 及び 110mm、面圧 σ が 7.55MPa 及び 5.05MPa である。表 5 に、これらの積層ゴムを用いた場合の試験体全体の力学特性設計値を示す。免震周期は 1.33 秒及び 1.09 秒で、原型に換算すると 4 秒及び 3.3 秒程度である。また、鉛プラグの降伏せん断力係数は 0.0441 及び 0.0659 である。積層ゴムは、水平及び鉛直の 2 方向荷重計 (分力計) とレベリング装置を介して振動台に固定した。レベリング装置は、ボルトを回転させることにより、各積層ゴムの支持荷重を均等にするための装置である。

4. 実験方法

4.1 加振方法

入力地震動は BCJ-L2 波⁷⁾を用いた。加速度の最大値は 356cm/s² であり、10 秒までの長周期域で高く安定したパワーを持つ。これを相似則に従い時間軸を 1/3 に縮小した。入力方向は短辺水平 1 方向とした。加振レベルは、原波を基準として 0.5 倍、1.0 倍…と 0.5 倍刻みで、積層ゴムが破壊するまで振幅を増幅させた。以下では加振レベルを「倍率×L2」と表記する。また、図 2 に、ケース①の加振レベル 2.5×L2 の時の、振動台上での加速度測定波と縮小原波の擬似速度応答スペクトルを比較して示す。これより、3 秒以上の周期領域で測定波のパワーが低下しているが、3 秒以下ではほとんど一致しており、試験体の免震周期近傍でのスペクトル特性を忠実に再現できている。

図 1 試験体の形状・寸法、変位計・加速度計の設置

表 1 実験ケース

		塔状比 (H/B)	
		4	6
原型積層ゴム	D=800mm, $S_2=4$ $\sigma=7.90\text{MPa}$	ケース①	ケース③
形状・面圧	D=1000mm, $S_2=5$ $\sigma=5.05\text{MPa}$	ケース②	ケース④
(h=200mm)			

表 2 相似則 ($\lambda=9$)

項目	(模型)/(原型)	項目	(模型)/(原型)
時間 (周期)	$1/\sqrt{\lambda}$	力 (重量)	$1/\lambda^2$
加速度	1	剛性	$1/\lambda$
速度	$1/\sqrt{\lambda}$	応力度	1
変位 (長さ)	$1/\lambda$	ひずみ度	1

表 3 模型積層ゴムの形状諸元

実験ケース	①、③	②、④
直径 D (外径) (mm)	90	110
内径 (鉛径) (mm)	18	22
1 層ゴム厚 (mm)	1.0	
ゴム総厚 h (mm)	22	
中間鋼板厚 (mm)	1	
1 次形状係数 S_1	22.5	27.5
2 次形状係数 S_2	4.1	5.0
支持重量 (kN)	48.0	
静止時面圧 (MPa)	7.55	5.05

4.2 測定方法

重錘について、上端と重心の水平加速度をサーボ型加速度計で、重心と下端の水平変位をインダクタンス式変位計で、下端四隅の鉛直変位をレーザー変位計でそれぞれ測定した。加速度計と変位計の設置位置を図1に示す。積層ゴムの水平変形は重錘下端の水平変位で代用し、積層ゴムの鉛直変形は、重錘四隅の鉛直変位を積層ゴム位置の変位に換算して求めた。積層ゴムの水平荷重と鉛直荷重は積層ゴムに直結した分力計によって測定した。水平方向の極性は入力波の符号と対応させ、鉛直方向は上方を正にした。積層ゴムに作用する鉛直荷重については、引張りを正、圧縮を負とし、重錘重量分を差し引いて荷重がかかっていない状態が原点となるように後で補正した。測定サンプリングは200Hzとした。

5. 実験結果

一連の加振シリーズを通して、振れ振動や加振と直交方向の振動はわずかであり、積層ゴムの個体差もほとんど認められなかった。よって、正側の2つの積層ゴム同士あるいは負側の2つの積層ゴム同士はほとんど同一の荷重・変形挙動を示した。そこで以後、負側の2つをまとめて「積層ゴムA」、正側をまとめて「積層ゴムB」と呼ぶことにする(図1平面図参照)。そして、積層ゴムA(あるいは

B)の荷重及び変形として、負側(あるいは正側)の2つの積層ゴムの荷重の和及び変形の平均値を求めた。以下に実験結果を項目に分けて詳述する。

5.1 積層ゴム破壊時加振レベルと破壊形式

いずれのケースについても、加振レベルの増大に伴い積層ゴムに過大な水平変形や引張り変形又は沈み込み変形が生じ、積層ゴムの破壊により終局に至った。表6に、積層ゴム破壊時における加振レベルと積層ゴムの破壊形式を示す。また、各ケースの破壊状況を以下に記す。

ケース①：水平変形が直径相当の変形を超え重錘全体が沈み込み、積層ゴムAが座屈破壊し、その直後に積層ゴムBも座屈破壊した。

ケース②：水平変形が直径にほぼ相当する変形に達したが、重錘が浮き上がり、積層ゴムBが引張り破断した。

ケース③：積層ゴムBには引張り変形が生じたが、水平変形が直径に相当する変形を超えて重錘の積層ゴムA側が沈み込み、積層ゴムAが座屈破壊した。

ケース④：水平変形は直径相当の変形で留まるが、重錘が頻繁に浮き上がり、両方の積層ゴムに引張り変形が生じた。最後は積層ゴムBが引張り破断した。

5.2 大入力時の運動パターン

時刻歴波形によって大入力時における重錘の運動パターンを調べた。図3に、大変形が生じた加振レベル2.5×L2について、積層ゴムA、Bの鉛直変形、重錘重心水平変位と免震層水平変位、免震層回転角、重錘重心と頂部の水平加速度、重錘頂部の鉛直加速度、積層ゴムA、Bの鉛直荷重の時刻歴波形を示す。時刻は最も大きな変形が生じた15～17秒である。これより、以下のことが指摘できる。
ケース①：積層ゴムAに大きな沈み込み変形が生じているが、積層ゴムBにも沈み込み変形が生じている。一方、免震層水平変位と重心水平変位の差異は僅かであり、免震層回転角も他ケースと比較して小さい。よって、重錘の運動は、若干下方へ沈み込みながらも概ね並進的であることが分かる。水平加速度及び重心鉛直加速度は他のケースと比較して穏やかな波形となっている。鉛直荷重は、積層ゴムAの沈み込み変形の最大値が生じる時刻に対応して、静止時荷重のほぼ2倍程度となるが、他ケースと比べて変動は小さい。

ケース②：積層ゴムAに僅かな沈み込み変形と、積層ゴムBに大きな引張り変形が生じている。引張り変形が生じている間、免震層水平変位は増加せず重心水平変位よりも小さくなっている。よって、重錘の運動は、積層ゴムAを支点として積層ゴムB側が浮上する回転的な運動であることが分かる。また、頂部水平加速度及び重心鉛直加速度には、引張り変形が収まった時刻(16s付近)すなわち重錘が着地した時刻に衝撃的な加速度が生じ、その後自由振動する波形が認められる。鉛直荷重は、引張り変形が生じている間、積層ゴムBには引張り荷重が生じるが、積層ゴムAでは静止時荷重の2倍を超える圧縮荷重となる。また、重錘の着地により両積層ゴムの鉛直荷重が大きく変動し、その変動量は最大で静止時荷重の2倍を超える。
ケース③：積層ゴムAに沈み込み変形が、積層ゴムBに引張り変形が生じているが、鉛直変位の平均値はゼロ近傍の値で推移している。また、引張り変形が生じている間、免震層水平変位は増加せず重心水平変位よりも小さくなっている。よって、重錘の運動は、重錘下端中央部を支点とした回転的な運動であることが分かる。着地時に

表4 材料の物性規格

ゴ ム	硬度(JISA)	(度)	39±4	鉛	引張り強度(MPa)	11.8～22.5
	引張り強度	(MPa)	17.7以上		伸 び (%)	40～50
	破断伸び	(%)	600以上		降伏せん断応力(MPa)	8.33
	せん断弾性係数G	(MPa)	0.392			
	縦弾性係数E	(MPa)	2.20			
	体積弾性係数E _∞	(MPa)	1176			

表5 試験体の力学特性(設計値)

実験ケース	①	②	③	④
免震周期(s)	1.33	1.09	1.33	1.09
水平剛性(積層ゴム4体)(×10 ⁶ N/m)	4.35	6.51	4.35	6.51
鉛直固有振動数(Hz)	32.3	42.2	32.3	42.2
鉛直剛性(積層ゴム4体)(×10 ⁶ N/m)	8052	13770	8052	13770
鉛プラグの降伏せん断力係数	0.0441	0.0659	0.0441	0.0659

図2 擬似速度応答スペクトル(ケース①、2.5×L2)

表6 積層ゴム破壊時加振レベルと破壊形式

ケース	①	②	③	④
加振レベル	3.0×L2	4.5×L2	3.0×L2	4.0×L2
積層ゴムA	座屈	—	座屈	—
積層ゴムB	—	引張り破断	—	引張り破断

図3 時刻歴波形の比較 (2.5×L2)

頂部水平加速度及び重心鉛直加速度がやや大きくなっているが、ケース②、④と比べれば小さい。鉛直荷重の性状はケース②とほぼ同様である。

ケース④: 積層ゴム A に僅かな沈み込み変形と、積層ゴム B に大きな引張り変形が生じている。他ケースと比較すると最も大きな引張り変形及び免震層回転角が生じている。重錘の運動はケース②と同じく積層ゴム A を支点として積層ゴム B 側が浮き上がる回転的な運動であるが、積層ゴム B 側での着地と同時に積層ゴム A に引張り変形が生じており、回転的な運動が連続して現れている。このため、頂部水平加速度及び重心鉛直加速度には、重錘の着地に伴う衝撃的な加速度が数回認められる。また、重錘の着地により、最大で静止時荷重の 4 倍に相当する鉛直荷重が生じている。

以上より、大入力時における重錘の運動パターンは、積層ゴムの沈み込み変形によって重錘全体が沈み込んだケース①の沈み込み型、積層ゴムの引張り変形によって重錘が回転し浮き上がったケース②、④の浮き上がり型、積層ゴムの沈み込み変形と浮き上がり変形が同

図4 重錘の運動状態の概略

時に生じたケース③の混在型に分類することができる。図4に運動パターンの概略を示す。

5.3 大入力時の運動パターンを支配する要因

前記の 3 つの運動パターンを決定づける要因として、免震層の水平復元力特性と剛体の静的浮き上がり限界水平力に着目した。前者は実験要因である積層ゴムの形状・面圧に、また、これから述べるように後者は塔状比に関連している。剛体の静的浮き上がり限界水

水平力とは、水平面上に置いた剛な直方体の重心に水平力を静的に作用させ、直方体が圧縮端を回転中心にして浮き上がり始めた瞬間の水平力である。モーメントの釣り合いから、剛体の静的浮き上がり限界水平力 Q_{up} は次式で定義される。

$$Q_{up} = W / (H/B) \quad (1)$$

ここで、 W は直方体の重量である。図 5 に、各ケースの免震層水平力 (Q) - 水平変形 (δh) 曲線を示す。加振レベルは $2.5 \times L2$ であり、図中には Q_{up} を示している。これらの図より、以下のことが指摘できる。

沈み込み型 (ケース①)：最大水平変形は 91mm であり、積層ゴム直径 90mm に対して 100% を超えている。また、 $Q - \delta h$ 曲線は最大変形時に頭打ちとなり、水平力は常に Q_{up} 以下である。

混在型 (ケース③)：最大水平変形は 80mm であり、積層ゴム直径 90mm に対して 90% 程度に達している。このケースの $Q - \delta h$ 曲線はケース①とほぼ同様であるが、 H/B が 6 のため Q_{up} がケース①よりも小さくなり、水平力が Q_{up} を上回っている。なお、時刻歴波形によると、水平力が Q_{up} を超えた時刻が浮き上がり開始時刻にほぼ対応していた。

浮き上がり型 (ケース②、④)：ケース①、③と比較して水平剛性と水平力の最大値が大きくなっているのは、ケース②、④の方が積層ゴム直径が大きく、面圧も低いためである。最大水平変形はそれぞれ 74mm、60mm であり、積層ゴム直径 110mm に対してそれぞれ 67% 及び 55% に抑えられている。両ケース共に水平力が Q_{up} を上回っている部分が認められる。 H/B が 4 のケース②では、水平力にハードニングが生じており、水平力が Q_{up} を大きく超えている。一方、ケース④では、水平力の最大値はケース②よりも小さいが、 H/B が 6 のため Q_{up} がケース②よりも小さい。このため、最大変形時だけでなく、-30mm 付近、さらに正側変形時など、水平力が頻繁に Q_{up} を超えている。また、時刻歴波形によれば、両ケース共にケース③と同様、水平力が Q_{up} を超えた時刻が浮き上がりの開始時刻にほぼ対応していた。以上より、積層ゴムの引張り変形の生起は、 Q_{up} と Q の大小関係に支配されており、沈み込み変形の生起は免震層水平

変形の直径に対する割合に関係することが分かる。よって、大入力時における重錘の運動パターンは、 $Q_{up} < Q$ の場合には基本的に浮き上がり型となり、 $Q_{up} < Q$ でも水平変形が積層ゴム直径に近づくとき混在型となる。一方、 $Q_{up} > Q$ の場合には水平変形が積層ゴム直径に近づくとき沈み込み型となる。

5.4 積層ゴムの挙動

沈み込み型 (ケース①) と浮き上がり型 (ケース②) の大入力時における積層ゴムの詳細挙動を調べた。図 6、7 に、加振レベル $2.5 \times L2$ における、各積層ゴムの水平力 (Q) - 水平変形 (δh) 曲線、鉛直変形 (δv) - δh 曲線、鉛直荷重 (P) - δh 曲線、 $P - \delta v$ 曲線を示す。図中の a 又は b の記号は各ループ上の同時刻の地点を表す。これより、以下のことが指摘できる。

ケース①：負側の最大水平変形は 91mm (せん断ひずみ γ = 水平変形 / ゴム総厚 = 414%) である。積層ゴムの直径は 90mm であるので、上下の端面がちょうどずれたような状況になっている。 $Q - \delta h$ 曲線より、積層ゴム A では、水平変形が -60mm ($\gamma = 270\%$) 付近で負勾配が発生するが、その後も水平力が最小となる点 a まで変形が進む。よって、負勾配発生点に対して、概ね 1.5 倍程度の水平変形能力を有していることが分かる。一方、積層ゴム B では、水平力は若干のハードニングを伴い点 a にて最大となる。 $Q - \delta h$ 曲線における差異は、それぞれの積層ゴムに生じる鉛直荷重の違いによる。 $P - \delta h$ 曲線によれば、点 a 付近において積層ゴム A に静止時荷重のほぼ 2 倍程度が生じているのに対し、積層ゴム B はほぼ無負荷の状態となっている。また、 $\delta v - \delta h$ 曲線より、沈み込み変形は水平変形の増大に伴い大きくなる。鉛直荷重が大きいほど沈み込み変形は大きくなる傾向にあり、積層ゴム A では点 a において最大の沈み込み変形 6.6mm (鉛直ひずみ ε = 鉛直変形 / ゴム総厚 = 30%) が生じている。 $P - \delta v$ 曲線より、積層ゴム A では、点 a に向かうループにおいて鉛直剛性が低下し、その後大きな履歴ループを描いている。一方、積層ゴム B では、点 a 前後において小さな履歴ループを描くが、ここではループの向きは図中矢印に示す左回りである。このような $P - \delta v$ 曲線の複雑さは、鉛直沈み込みの挙動が鉛直荷重だけでなく水平変形にも依存するためである。

本ケースでは相対的に直径の小さい積層ゴムを比較的高い面圧で使用している。よって、直径に近い水平変形下では、積層ゴムの水平力が水平変形だけでなく鉛直荷重にも、鉛直変形が鉛直荷重だけでなく水平変形にもそれぞれ影響を受け、複雑な挙動を示すことが分かる。また、これらの依存性は、定性的には既往の積層ゴム単体の圧縮せん断試験と一致する結果となっている。一方、図 5 ケース①の免震層 $Q - \delta h$ には負勾配やハードニングは認められず、免震層全体の復元力特性に、個々の積層ゴムの不安定な特性が与える影響は小さいことが分かる。

ケース②：負側の最大水平変形は 74mm ($\gamma = 340\%$) である。積層ゴムの直径は 110mm であるので、水平変形は直径の 67% に相当する。 $Q - \delta h$ 曲線については、両積層ゴムに大きな違いは認められず、概ねバイリニアで表される安定した履歴ループを描いている。 $P - \delta h$ 曲線によると、鉛直荷重の変動量が静止時荷重の 2 倍を超える部分も認められるが、 $Q - \delta h$ 曲線にはその影響がほとんど現れていない。また、積層ゴム A では点 a において静止時荷重の 2 倍を超える鉛直荷重が生じ、積層ゴム B の点 b 付近では概ね降伏荷重

図 5 免震層水平力 (Q) - 水平変形 (δh) 曲線 ($2.5 \times L2$)

図6 沈み込み型の履歴曲線 (ケース①、2.5×L2)

に達している。一方、 $\delta v - \delta h$ 曲線によると、鉛直変形の水平変形依存性は小さく、鉛直荷重の変動に対応して、積層ゴム A の点 a では 1.0mm ($\varepsilon=5\%$) 程度の沈み込み変形が、積層ゴム B の点 b では 8.9mm ($\varepsilon=40\%$) の引張り変形が生じている。 $P - \delta v$ 曲線より、積層ゴム A では高い剛性を持った弾性的な挙動を示しているのに対し、積層ゴム B では圧縮域から引張り降伏までは高い剛性を保ち、引張り降伏以降は塑性流れを起こす弾塑性的な性状を示している。

本ケースでは相対的に直径の大きな積層ゴムを比較的低い面圧で使用している。また、水平変形は積層ゴム直径の 2/3 程度の大きさであった。このため、水平特性は鉛直荷重の比較的大きな変動に対しても安定し、鉛直変形は水平変形の影響を受けにくい結果となった。すなわち、水平力は主として水平変形だけに、鉛直変形は主として鉛直荷重だけに依存する単純な性状を示すと言える。

5.5 終局加振レベルの評価

本実験の結果を既往の限界特性に関する提案式と比較し、本実験による積層ゴムの終局加振レベルを評価した。

沈み込み型のケース①及び混在型のケース③について、沈み込み変形が生じた積層ゴム A に着目した。図 8 に、1.5×L2 以上の加振レベルにおける最大せん断ひずみとその時の面圧 σ をプロットした。

図7 浮き上がり型の履歴曲線 (ケース②、2.5×L2)

図8 限界特性との比較 (圧縮)

図9 限界特性との比較 (引張り)

■と●は水平復元力特性において負勾配が生じたことを表す。図中の直線は積層ゴムメーカーが提示する圧縮荷重下での限界性能線で、水平復元力特性における負勾配の発生に応じて規定されたものである⁹⁾。これより、実験で初めて負勾配が確認された加振レベル $2.0 \times L_2$ が限界性能線に概ね対応することが分かる。一方、積層ゴムの破壊は $3.0 \times L_2$ で生じているが、 $2.0 \times L_2$ 以上において負勾配が発生し、水平変形が直径相当の変形に近づくことを考慮すれば、圧縮に対する終局加振レベルは $2.5 \times L_2$ 前後と考えるのが妥当である。

浮き上がり型のケース②、④について、引張り変形を受ける積層ゴム B に着目した。図 9 に、 $2.0 \times L_2$ 以上の加振レベルの最大鉛直ひずみ（鉛直変形／ゴム総厚）とその時のせん断ひずみをプロットした。直線は積層ゴムの引張り限界ひずみである⁹⁾。これより、両ケース共に $3.0 \times L_2$ において引張り限界ひずみを超えている。破断レベルが引張り限界ひずみを大きく上回った原因については、使用した積層ゴムが引張り変形能力に優るとされる小型模型であること、さらに、引張り限界ひずみが直径 500mm 程度の積層ゴムの引張り試験結果を安全側に評価したものであることが考えられる。積層ゴムの終局挙動に及ぼすスケール効果については、実大規模の積層ゴムを用いた実験のデータが少なく、十分な検証がなされていないのが現状である¹⁰⁾。ただし、引張りを受ける積層ゴムの挙動については、フランジの面外変形によりゴム層の応力分布が不均一になるため、直径が大きいほどスケール効果が顕著になることが予想される。例えば、文献 11) には直径 500～1200mm の積層ゴムの実験結果より、直径が大きくなるにつれて引張り破断ひずみが低下の傾向を示すことが報告されており、実大規模の積層ゴムの引張り破断ひずみは、模型のそれよりも小さくなると考えられる。すなわち、実大規模の建物を想定した場合、引張りに対する終局加振レベルは、本実験から得られた結果よりもさらに小さくなると考えるべきである。

6. 結論

積層ゴムで支持した塔状免震建物の終局挙動を解明することを目的として、縮小免震建物模型を用いた振動台実験を実施した。実験要因としては、上部構造の塔状比と積層ゴムの形状・面圧を採用した。塔状比は 4 及び 6 の 2 水準、積層ゴムの形状・面圧は、直径 90mm・面圧 7.55MPa（相対的に小径・高面圧）と直径 110mm・面圧 5.05MPa（相対的に大径・低面圧）の 2 水準を設定した。ゴム総厚は 22mm で共通である。これらを組み合わせた 4 ケースについて、BCJ-L2 波の振幅拡幅波の水平 1 方向入力により積層ゴムが破壊に至るまで加振した。実験結果より、各要因が終局挙動に与える影響について検討し、以下の知見を得た。

(1) 大入力時における運動パターンは、重錘の並進的な運動により両方の積層ゴムに沈み込み変形が生じ重錘全体が沈み込む「沈み込み型」、重錘の回転的な運動により積層ゴムに引張り変形が生じ重錘が浮き上がる「浮き上がり型」、積層ゴムの沈み込み変形と浮き上がり変形が同時に生じる「混在型」に分類された。沈み込み型では、最終的に水平変形が直径相当の変形を超え、積層ゴムが座屈で破壊した。浮き上がり型では、積層ゴムに大きな引張り変形が生じ最終的に積層ゴムが引張り破断した。

(2) 大入力時における重錘の運動パターンは、塔状比 (H/B) によって定まる剛体の静的浮き上がり限界水平力 $Q_{up} (=W/(H/B))$ と

積層ゴムの形状・面圧に関係する免震層水平力 Q の大小関係に支配されており、さらに免震層水平変形の積層ゴム直径に対する割合が関係している。 $Q_{up} < Q$ では基本的に浮き上がり型、 $Q_{up} < Q$ でも水平変形が積層ゴム直径に近づく混在型、 $Q_{up} > Q$ では水平変形が積層ゴム直径に近づく沈み込み型となる。

(3) 大入力時における積層ゴムの水平力－水平変形曲線及び鉛直荷重－鉛直変形曲線は沈み込み型と浮き上がり型で大きく異なっていた。浮き上がり型では、水平力は水平変形だけに、鉛直変形は鉛直荷重だけに専ら依存する単純な性状を示すが、沈み込み型では、水平力が水平変形だけでなく鉛直荷重にも、鉛直変形が鉛直荷重だけでなく水平変形にも強く影響され、複雑な挙動を示した。

(4) 小径・高面圧のケースでは、加振レベル $2.0 \times L_2$ で水平復元力特性に負勾配が初めて確認され、このレベルが圧縮に関する限界性能線に概ね対応した。最終的には $3.0 \times L_2$ で座屈破壊に至ったが、負勾配が発生し水平変形が直径相当の変形に近づくことを考慮すれば、本実験における座屈に対する終局加振レベルは $2.5 \times L_2$ 前後と考えられる。一方、大径・低面圧のケースは、引張りに関する限界性能線を大きく超えた $4.0 \times L_2$ あるいは $4.5 \times L_2$ で引張り破断した。これは、引張り変形能力に優るとされる小型積層ゴムを用いたことが原因と考えられる。よって、実大規模を想定した場合、本実験結果よりもさらに低い加振レベルで積層ゴムの引張り破断が生じると考えるべきである。

上記の知見は上部構造を剛体とした実験より導かれたものであるが、実免震建物の終局挙動の定性的な評価にも適用可能と考えられる。一方、終局挙動を予測するためには解析的な検討が必要となる。大入力時における上部構造の運動パターンが免震層水平力に依存することを考慮すれば、今後、積層ゴムの終局時の復元力特性を精度よく表現するモデルを取り入れた解析手法の構築が必要である。

参考文献

- 水越熏、八坂厚彦、飯塚真巨、高林勝人：形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性実験（その 2 破壊限界特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.601-602、1991.9
- 日本建築学会編：免震構造設計指針、pp.37-38、2001
- 鬼丸貞友、加藤朝朗、鶴巻静雄、広谷勉、小山実：FBR 免震型プラントの構築に関する研究 その 11 免震層の動的破断試験（試験結果の概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.1569-1570、1992.8
- 猿田正明、田村和夫、菊池優：積層ゴムに引張り軸力を生じる免震架構の振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.669-670、1997 年 9 月。
- 久野雅祥、長島一郎、欄木龍大、富島誠司、飯島昭治：「複合免震構法の高さ幅比の大きい建物への適用に関する実験的研究（その 1 振動台実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.603-604、1998 年 9 月。
- 三山剛史、増田圭司：積層ゴムを用いたアスペクト比の高い免震建物の振動台実験 積層ゴムに生じる引張力とその後の着座による振動性状、日本建築学会構造系論文集、第 573 号、pp.61-68、2003.11
- 建設省建築研究所、(財)日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針（案）、1991
- (株)ブリヂストン：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承技術資料
- 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能、日本建築学会技術報告集、第 1 号、pp.160-165、1995.12
- 日本免震構造協会技術委員会実験 WG：積層ゴムのスケール効果確認試験結果の報告、MENSIN、No.35、pp.22-37、2002.2
- 村松佳孝、西川一郎、川端一三、高山正春、木村雄一：大サイズ天然ゴム系積層ゴムアイソレータの引張特性、日本建築学会技術報告集第 12 号、pp.53-56、2001.1
- ～14) 竹中康雄、飯塚真巨、二村有則、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験（その 1）～（その 3）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.783-788、1999.9
- ～17) 飯塚真巨、二村有則、竹中康雄、吉川和秀、高岡栄治：塔状免震建物の終局挙動に関する振動台実験（その 4）～（その 6）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.645-650、2000.9

(2006 年 1 月 10 日原稿受理、2006 年 3 月 2 日採用決定)