べた基礎を有する軽量建物を想定した免震方式の3軸振動台実験 THREE DIMENSIONAL SHAKING TABLE TESTS ON A BASE-ISOLATION SYSTEM FOR LIGHT-WEIGHT BUILDINGS

堀 昭夫*
Akio HORI

Three-dimensional shaking table tests were carried out for a new base-isolation system of a lightweight building with a mat foundation. The new system uses resin balls between the mat and an under-mat reinforced concrete slab. A type using fiber-reinforced cement boards and phenol resin balls caused a load concentration in its virgin state and amplified its response in case of a small input. Another type with layers of polystyrene foam, the cement board, polystyrene balls and the cement board absorbed relative unevenness between the moving mat and the under-mat slab and decreased its acceleration under about 40 cm/sec².

Keywords: base isolation, mat foundation, shaking table, ball, resin, test
免震、べた基礎、振動台、球、樹脂、実験

1. はじめに

軽量建物の免震化では、通常の中層建物の免震化とは異なるいくつかの問題を考慮する必要がある。問題の内容は文献^{1), 2)}でも述べられているが、①地震時の免震性能を良くすると風荷重が地震荷重を上回って暴風時対策が必要となる事、②強風時の揺れによる居住性の低下を防ぐ必要がある事、③壁式構造や戸建住宅では標準的なスパンが小さいので通常の免震装置間隔だと上部構造や基礎を補強する必要が生じる事、④仮に積層ゴムを用いると固有周期の関係でゴムの断面積が小さくなって積層ゴムの座屈防止対策が必要となる事、等があげられる。軽量建物や戸建住宅の免震化に関しては、既に積層ゴムやすべり、転がりを利用した各種免震装置が開発・試験されており^{1)~3)}、一部は実際の建物にも適用されている。しかしながら軽量建物や戸建住宅は、着工総数が多いにも拘わらず免震化された例が中層建物に比べてむしろ少ない¹⁾のが現状となっている。これは建物工事費用に占める免震化のための費用が大きいためと言われており、性能が良くかつ簡便な免震方式が求められている。

本報では、べた基礎を有する軽量建物や戸建住宅を対象に、べた基礎とべた基礎の下に設けた鉄筋コンクリートスラブの間に樹脂球を挿入した新たな転がり免震方式について、3軸振動台実験を行った。実験結果に基づいて提案する免震方式は、べた基礎下に鉄筋コンクリートスラブを設ける以外は上部構造や基礎の補強を特に必要とせず、施工性に配慮した免震方式となっている。

2. 免震方式および試験体

実験対象とする免震方式 F25 タイプおよび P6 タイプの概要を図-1(a)および(b)に示す。免震方式は、布基礎と同様の立ち上がり部分を有するべた基礎(以下、上基礎と呼ぶ)の下に、鉄筋コンクリート製の基礎板(以下、下基礎と呼ぶ)を設けて、その間に樹脂球を敷き詰めた方式とした。下基礎および上基礎の平面形状を図-2に示す。下基礎は平面寸法が 5.65m x 4.10m で、振動台に固定するための鉄骨架台を含む計算重量が 11.4t であり、上面は金ゴテ仕上げしてある。上基礎は平面寸法が 4.71m x 3.80m であり、戸建住宅基礎と同様の立ち上がり部分を有する。ただし上基礎平面は計測用およびブレイキ装置取付用の計 4 つの開口を有する。上基礎の計算重量は、上基礎側のボードを含めて F25 タイプで 9.7t、P6 タイプで 9.6t であり、上基礎下面の面積は 13.3m² である。上基礎には付加重量として計 5.2t の鋼板を固定した(図-2 参照)。このため免震層の平

図-1 免震方式の概要

* ハザマ技術研究所 主任研究員・博士(工学)

Chief Research Engineer, T.R.I., Hazama Corp., Dr. Eng.

均面圧は 1.1tf/cm^2 程度となり、べた基礎を有する戸建住宅での値(文献⁴⁾を参考に建物重量を 0.45t/m^2 とすると 0.9t/m^2 程度になる)と近い。両基礎のコンクリートは設計基準強度 270kgf/cm^2 のものを用いた。なお本実験では上基礎と下基礎間の相対不陸がより大きくなるよう、下基礎上で製作した上基礎を下基礎に対して平面的に 180° 回転させて振動台上に設置した。

上基礎の下面には厚さ 5mm のセメント系繊維補強板(フレキシブルボード、以下ボードと略す)を貼付した。ボードは実際の施工では型枠として使用してコンクリートと一体化されるが、本実験では上基礎下面の既存ボードの下に新たなボードを厚手の両面テープにより貼付した。実験の都合で F25 タイプではボードを 2 層に貼付し、P6 タイプではそのうちの外側 1 層をはがして実験した。

本実験では、転がり材が異なる 2 種のタイプを試験した。F25 タイプでは、ガラス繊維入りフェノール樹脂の 25mm 球(以下、F25 球と呼ぶ)を間隔保持板にはめ込んで縦横ほぼ 12cm 間隔で計約 1060 個を上基礎の下に配した(写真 1(a))。一方、P6 タイプではポリスチレンの 6mm 球(平均重量 0.114g、以下、P6 球と呼ぶ)を密

図-2 試験体平面形状

(a) F25 タイプ

(b) P6 タイプ

(c) P6 タイプ詳細

写真-1 転がり材の敷き並べ状況

に近い状態で同じ範囲に敷き詰めた(写真- 1(b),(c))。P6 球の敷き詰め重量は計 43.5kg(約 38 万個、敷詰密度 3.27kg/m^2)であった。

P6 タイプでは、下基礎上面と上基礎下面の間の相対不陸の吸収および荷重集中の低減を意図して、下基礎の上に不陸吸収層を設けた。加振時に上基礎が下基礎に対して移動すると、両基礎間の相対不陸が変化するが、不陸吸収層はその吸収をも意図した。不陸吸収層には厚 20mm の押出法ポリスチレンフォーム保温板 1 種 b（以下、フォーム板と呼ぶ）を用いた。フォーム板は JIS A9511 に圧縮強さや燃焼性が規定されている。押出法ポリスチレンフォームは、軽量盛土工法(EPS 工法)において大きな耐圧強度が必要な場合にも用いられており⁵⁾、構造材料としての実績を有する。フォーム板は P6 球と比べて強度が小さいため、フォーム板と P6 球の間にはボードを敷き並べた。ただしボードの敷き並べは、実施工において上下 2 枚のボードの間に P6 球を詰め込んだまま現場で敷き並べる場合を考えて、各ボード間に 3mm 程度の隙間をあけて並べた。また P6 球の外周位置のボード上には市販のスポンジ付きテープを貼付して、加振時には P6 球が乗り越えるが、非加振時には P6 球がこぼれないようにした。一方 F25 タイプでは、F25 球および保持板をボードや不陸吸収層を介する事なく直接、上基礎のコンクリート面上に置いた。

試験体には、暴風・強風時に免震部分の変形を拘束する事を想定した摩擦ブレーキ装置を2ヶ所に取り付けた(図-2参照)。同装置は上基礎側に固定した鋼板と下基礎側に固定した鋼板を摩擦板を介して交互に積ねて、積ねた部分に油圧ジャッキで押圧力を与えてブレーキ力を生じさせる方式となっている。暴風時に大きな地震が起きる確率は非常に小さいと考えられるが、その場合を想定したブレーキ作動下の加振実験も行った。免震部分の拘束に摩擦ブレーキを用いた理由は、①地震後の残留変位は必ずしも0でないがその状態でも拘束できること、②もしクリアランスが大きい拘束方法にすると風揺れが止まらないこと、③地震が来ても特に状態変化させる必要がないこと、④拘束状態で地震が来ても損傷しないこと、等である。なお本試験では、油圧を用いて2ヶ所のブレーキに等しい摩擦面押圧力を与えておき、油圧弁を閉じた状態で加振した。

加振後の残留変位の低減を目的として、2ヶ所のブレーキ装置にはブレーキとは独立にそれぞれ4本の引張ばねを菱形状に組み込んだ(図-2参照)。各ばねの定格は、剛性4.5kgf/cm、ストローク0～+250mmであり、圧縮力が作用しないような方法で取り付けた。変位が小さい時のばね剛性計算値は、菱形状4本では強軸方向5.43kgf/cm、弱軸方向3.57kgf/cmであるが、試験体全体では南北方向・東西方向ともに9kgf/cmとなる。試験体全体でのばね剛心は、菱形による強軸・弱軸の関係で平面中心から東に282mm、南に188mmの位置にある。

3. 素材試験

中央集中線荷重によるボードの曲げ試験の結果を表-1 および図-3 に示す。ただし図の縦軸は、弾性時の関係を用いて曲げモーメントを曲げ応力度に換算し、横軸も同様に変位を縁歪に換算してある。ボードの曲げ強度は、長尺方向 35MPa 程度、短尺方向 47 ~ 54MPa であり、通常のコクリートの圧縮強度並の値を示した。しかし破断面の目視では層状のはがれが板厚方向に認められ、製造

方法にも関係すると思われるが板厚方向には繊維がより少ないと思われた。なおボードは高圧プレス成型されており目視では表面が平滑である。

フォーム板の圧縮試験結果を表-2および図-4に示す。降伏強度は0.29MPa程度であるが、これは1m²あたり30tfに相当し、軽量建物のべた基礎面積あたりの平均重量に比べれば非常に大きい。

F25球の圧縮試験結果を図-5の実線および表-3に示す。最大荷重は19～35kNとばらついたが、いずれも突然爆裂して破壊した(図中●点)。⁴このうち、最大荷重が小さかったNo.3は半球状金型の接合面に沿った爆裂が認められ、圧縮方向が関係している可能性がある。F25球の上下にボードを挿入して圧縮した場合の結果を同図に点線で示す。ボードには直径12mmの球面状の凹みが見られ(写真-2)、荷重47kNでF25球が突然爆裂した。なお爆裂の原

表-1 ボードの曲げ試験結果

方向	No	板厚 (mm)	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
長尺	1	4.96	34.5	15.9
	2	4.96	35.5	
	3	4.94	36.4	
短尺	1	5.01	46.8	17.0
	2	5.08	50.0	17.6
	3	5.07	54.0	18.5

図-3 ボードの曲げ試験結果と相似な応力-歪関係

表-2 フォーム板の圧縮試験結果

No	板厚 (mm)	歪速度 (1/min)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
1	20.5	0.10	0.292	6.5
2	20.5	0.24	0.301	8.3
3	20.5	0.24	0.279	8.3

図-4 フォーム板の応力-歪関係

表-3 F25球の圧縮試験結果

No	直径 (mm)	最大荷重 (kN)
1	24.9	34.6
2	24.9	26.0
3	24.9	19.2
4	24.9	28.3
5	24.9	28.6

図-5 F25球の圧縮試験結果

写真-2 ボードの凹みとF25球の爆裂

写真-3 P6球の割れとつぶれ

因としては、F25球の材料が熱硬化性樹脂である事、ガラス繊維入りである事が考えられる。

P6球の圧縮試験結果を図-6の実線および表-4に示す。降伏荷重は760～830Nであったが、降伏後も割れおよび接触面の拡大を生じながら荷重が上昇した。P6球の上下にボードを挿入して圧縮した場合の結果を同図に点線で示すが、初期剛性がやや小さくなった点を除けば結果はあまり変わらない。P6球は素材試験と同様に割れてつぶれたが、ボードは接触面がやや黒ずんだ程度で目視できる変形はなかった(写真-3)。

P6タイプと同順に、ボード(150mm角)、フォーム板(100mm角)、ボード(150mm角)、およびP6球を重ねた状態で圧縮試験を行った。P6球が過少になった場合を想定して、P6球の個数は1個、2個、または4個とし、図-7に示す平面位置に置いた。試験結果を図-8に実線で示す。ただし荷重はP6球1個あたりの荷重に換算してある。破線は素材試験結果を示すが、フォーム板の結果は断面積25cm²の場合に換算してP6球4個の試験と対応させた。本試験の結果を以下にまとめる。

① P6球1個の試験では、P6球が素材試験と同様に割れてつぶれたが、荷重1400N程度でボードが押し抜き破壊した。P6球側のボードの凹み領域はP6球の大きさと一致したが、裏側では直径40mm程度にわたる盛り上がりが見られた(写真-4)。ボードの内部では板厚方向の剥がれが認められた。なおフォーム板には裏側の盛り上がりに対応した凹みが見られた。

表-4 P6球の圧縮試験結果

No	直径 (mm)	載荷速度 (mm/min)	降伏荷重 (N)
1	5.95	0.1	758
2	5.93	1.0	804
3	5.92	1.0	825

図-6 P6球の圧縮試験結果

図-7 P6球の平面位置

図-8 重ね圧縮試験の結果

(a) P6球側

(b) 裏側

写真-4 P6球1個の重ね圧縮試験の損傷

② P6 球 2 個の試験では、荷重 1730N でボードが短尺方向に曲げ破壊した。破壊荷重は P6 球 1 個あたりにすると①に比べて小さい。

③ P6 球 4 個の試験では、フォーム板が降伏した後、荷重がさらに上昇して P6 球 1 個あたり 1230N で試験を中止した。P6 球には素材試験と同様な割れおよびつづれが見られた。

これらの結果から、静止状態で均等な荷重を受ける P6 球の間隔が 5cm 以内であれば、フォーム板の降伏やそれに伴う荷重集中の緩和を期待できると思われる。仮に荷重集中を無視して 1m^2 あたりの荷重に換算すると、フォーム板の圧縮降伏が $30\text{tf}/\text{m}^2$ 、縦横 12cm 間隔の F25 球の爆裂が $190\text{tf}/\text{m}^2$ 程度、密に敷き詰めた P6 球の降伏が $2600\text{tf}/\text{m}^2$ 程度であり、いずれも軽量建物のべた基礎面積当たりの自重に比べて十分大きい、 $30\text{tf}/\text{m}^2$ 以上の荷重集中はフォーム板の降伏によって大きく緩和されると期待される。

上下 2 枚のボードの間に 4 個の球を挿入して上載荷重を与え、室内に 20 時間または 600 時間放置したクリープ試験の結果を表-5 に示す。F25 球および P6 球の場合とも、球の損傷は特になく、ボードに球面状の凹みが生じ、20 ～ 600 時間の間で凹み深さが 2 割程度増加した。大きくはないがクリープがあると言える。上載荷重を、球面状の凹みを仮定して求めた接触平面積で除して求めた接触面圧は、40 ～ 80MPa 程度と素材試験の曲げ強度をやや上回った。なお P6 球の場合に素材試験と異なりボード側が変形した理由としては、クリープ試験および次の小型加振試験ではボードのロットが他試験と異なるために板厚方向特性が相違した可能性が考えられる。樹脂球の材料劣化については、フェノール樹脂およびポリスチレンとも耐薬品性に優れており⁶⁾、想定使用条件では紫外線による劣化⁷⁾も少ないと考えられる。ただし長期間水中に浸漬させない必要があろう。

表-5 クリープ試験の結果

球	上載荷重 (N/球)	放置時間* (h)	ボードの 凹み(mm)	球のつづれ (mm)	上載荷重/接触 平面積** (MPa)
F25 球+ ボード	570	20 [600]	0.16 [0.19]	特になし	46 [38]
	1080	20 [600]	0.25 [0.33]		56 [42]
	1460	20 [600]	0.31 [0.40]		61 [47]
P6 球+ ボード	53	20 [600]	0.03 ?	特になし	?
	100	20 [600]	0.08 [0.10]		67 [54]
	210	20 [600]	0.14 [0.16]		81 [72]

* : 温度(湿度)は、20h が 17-19 °C (67-85%)、600h が 13-24 °C (36-76%)

** : 球面状の凹みを仮定して求めた。

表-6 小型加振試験の結果

球	平均上載 荷重 (N/球)	加振 周波数 (Hz)	最大応答 加速度* (gal)	ボードの筋状損傷 (最大凹み mm)	球の損傷
F25 球	51	1, 1.5, 2	20 程度	若干の変色	特になし
	100		30 程度	若干の転がり跡(0.05)	
	250		35 程度	明瞭な転がり跡(0.2)	
	490		60 程度	顕著な転がり跡(0.8)	
P6 球	13	1, 1.5, 2	25 程度	若干の変色	特になし
	27		30 程度	若干の転がり跡(0.02)	
	51		40 程度	明瞭な転がり跡(0.08)	
	100		50 程度	明瞭な転がり跡(0.2)	
	250	2**	200 程度	割れ(0.6)	わずかなしわ
	100			若干の転がり跡(0.03)	特になし
	160			若干の転がり跡(0.05)	剥がれ***
	250			明瞭な転がり跡(0.4)	剥がれ
	490	略円形 軌跡		明瞭な転がり跡(0.4)	割れ・つづれ

* : 加振振幅が $\pm 25\text{mm}$ に達した後の値。

** : 2Hz 加振のみ行った。

*** : P6 球が剥がれた位置のみボードに明瞭な跡(0.4)があった。

上下 2 枚のボードの間に 4 個の球を挿入して小型振動台上に置き、上載重量を乗せて水平 1 方向に正弦波加振する試験(小型加振試験と呼ぶ)を行った。加振振動数は 1.0, 1.5 または 2.0Hz とし、振幅を $0 \sim \pm 25\text{mm}$ まで漸増させた(それぞれ最大加速度は 100, 220, 390gal 相当、最大速度は 16, 24, 31cm/s に相当)。試験結果を表-6 に示すが、加振振動数による相違は特になかった。F25 球 (P6 球)を用いた試験では、球あたりの平均上載荷重 100N (30N) 程度でボードに筋状の若干の凹みが生じて応答加速度の増加が見られ、500N (250N) 程度ではボード側に破片および深さ 0.6mm 以上の顕著な転がり跡(削れ)が生じて応答加速度が 60gal (200gal) 程度に増加した。ただし応答加速度の値は、転がり軌跡が 1 方向加振のためほぼ同一線状になっており、後述の 3 軸振動台実験の結果とは単純な比較がしにくいと思われる。例えば球が同一線状の凹みに沿って転がる場合、凹み両端では面接触に近いが、中間ではより線接触に近くなると思う必要がある。なお後述の試験で生じた P6 球表面のはがれは認められなかったが、加振ではなく人力により略円形の軌跡を与えたところ、球あたり上載荷重 160N 程度で P6 球表面のはがれが認められた(表-6 参照)。

4. 加振、計測、試験一覧

加振波は以下の 5 種類とした。K100 : 神戸海洋気象台記録を模擬した 3 方向の振動台加振波。K50 : K100 を 50% に縮小したもの。K100H : K100 の水平 2 方向成分だけを取り出したもの。BCJ : レベル 2 の建築センター波(BCJ-L2)を 70% に縮小して模擬した波。SIN : 2Hz の正弦波で振幅を徐々に大きくしたもの。なお必要に応じてワイヤ引張による静的加力 STA を行った。使用した振動台の定格は、最大加速度が南北 1G ・東西 3G ・上下 1G、最大変位が南北 $\pm 300\text{mm}$ ・東西 $\pm 150\text{mm}$ ・上下 $\pm 100\text{mm}$ で、テーブル寸法は南北 6m ・東西 4m である。

測定項目は、下基礎および上基礎の 3 方向絶対加速度、上基礎ー下基礎間の水平相対変位(光学式変位計による)、上基礎の水平絶対変位(ワイヤ式変位計による)、振動台の 3 方向の絶対加速度および変位(振動台浮き基礎からの相対変位)である。測定時間間隔は 1/100 秒とし、50Hz 以上ではフィルタをかけた。静的加力では引張荷重も測定した。測定位置を図-2 中に示す。

実施した試験の一覧を実施順に表-7 に示す。主なパラメータは、免震タイプ、質量偏心、加振波、ばねの本数(偏心)、ブレーキ油圧である。質量偏心がある試験(試験名に-EM を付す)では、付加重量を南側へ約 840mm 移動させた。この場合、仮に免震層の剛性を重量分布と無関係に平面的に一樣と考え、質量偏心の率を、重心のずれを上基礎平面の(極 2 次モーメント/面積)^{0.5}=1.76m で除した値と定義するなら、質量偏心の率は 0.17 となる。ばねの偏心の率は、ばね重心のずれを同様に 1.76m で除した値と定義するなら、ばねが全て(8 本)ある場合で 0.19、北西側装置内の 4 本を外した場合(試験名に-ES を付す)で 0.93 となる。なお P6 タイプの試験名の最後に-2 または-3 を付した試験は、光学式変位計の光を P6 球が横切って測定上の問題が起きた事による再試験を示す。ブレーキによる摩擦力の合計は、油圧から装置自重分 $2.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ を除いた値に摩擦係数および 616cm^2 を乗じた値として計算される。実験状況を写真-5 に示す。

表－7 実施した試験の一覧

F25 タイプ 試験名 (実施順)	質量 偏心	加振 ^{*1}	ばね 本数	油圧 (kgf/cm ²)	P6 タイプ 試験名 (実施順)	質量 偏心	加振	ばね 本数	油圧 (kgf/cm ²)
F-K50		K50			P-STA1			0	OFF
F-K100		K100			P-STA1-BR		STA	0	6.12
F-K75		K75			P-STA1-SP				
F-K100-2		K100	8	OFF	P-K50		K50		
F-K100H		K100H			P-K100				
F-BCJ65		BCJ65			P-K100-2	無	K100		OFF
F-BCJ		BCJ			P-K100-3				
F-STA2-SP					P-K100H		K100H		
F-STA2-BR		STA	0	9	P-BCJ		BCJ	8	
F-STA2-BR-2				12	P-K50-BR ^{*3}		K50		17 ^{*4}
F-K50-BR		K50			P-K100-BR		K100		
F-K100-BR		K100	17 ^{*2}		P-K50-EM		K50		
F-K50-EM		K50			P-K100-EM	有	K100		
F-K100-EM		K100	8		P-K100H-EM		K100H		
F-K100H-EM	有	K100H			P-K100H-EM-2				
F-K100-EM-2		K100			P-K50-ES		K50		OFF
F-BCJ-EM		BCJ			P-K100-ES		K100		
F-K50-ES		K50		OFF	P-K100H-ES		K100H	4	
F-K100-ES		K100	4		P-K100H-ES-2	無			
F-K100H-ES	無	K100H			P-STA3-SP		STA	8	
F-STA3			0		P-STA3			0	
F-STA3-SP		STA	8		P-SIN-BR35		SIN	8	35 ^{*5}

*1: K75はK100を75%に縮小、BCJ65はBCJを65/70に縮小した。

*2: 加振後の値はF-K50-BRで14程度。

*3: 過去に飛び出したP6球をP6球が少ない箇所に戻した後に試験した。

*4: 加振後の値はP-K100-BRで12程度。

*5: 加振中は36～40で振動し、加振後の値は34であった。

写真－5 実験状況

5. F25タイプの試験

F25 タイプ試験終了後の状況を写真－6に示す。上基礎下面のボードが部分的に破損して(写真(a),(b))、層状の破片が生じ(写真(c))、大型の破片も見られた(写真(d))。F25 球による荷重分担が均一でなく、一部に荷重が集中して、ボードが局部的に板厚方向に剥がれたと判断される。板厚方向の剥がれはボード素材試験でも見られており、ボードの素材特性に起因すると思われる。下基礎上面のコンクリートには荷重集中部分に最大で幅3mm程度のF25球の転がり跡が見られた。一方、荷重集中があまりなかった箇所ではボードに茶色の筋がついた程度であった(写真(b)の最下部)。試験体の上下応答を無視した球あたり上載荷重の平均値は136Nであるが、茶色の筋は小型加振試験の50N/球程度の損傷状況とある程度似ている。剥がれた箇所での荷重集中の程度は不明であるが、小型加振試験結果から推察すると500N/球程度以上と思われる。

試験結果の概要を表－8の左半に示す。各試験とも加速度の頭打ちによる免震効果が認められる。すべり変位の最大値は25cm程度で、残留すべり変位は、ブレーキ力を作用させた試験およびばねを外した試験を除けば大略3cm以下であった。質量偏心・ばねの本数(偏心)・ブレーキ油圧を変化させた場合の傾向は後述のP6タイプとほぼ同様であったため、以下F25タイプの試験結果に特有の

写真－6 F25タイプの試験終了後状況

表－8 水平加速度オービットの半径およびすべり変位

F25 タイプ 試験名 (実施順)	加速 度の 半径 (gal)	すべり変位		P6 タイプ 試験名 (実施順)	加速 度の 半径 (gal)	すべり変位	
		最大 (cm)	残留 (cm)			最大 (cm)	残留 (cm)
F-K50	110	12.2	3.2	P-K50	25	12.2	2.2
F-K100	105	24.5	1.9	P-K100	45	25.4	1.9
F-K75	55	18.2	1.0	P-K100-2	40	24.5	2.6
F-K100-2	60	24.6	1.8	P-K100-3	40	24.7	2.2
F-K100H	60	25.6	1.8	P-K100H	40	24.8	2.8
F-BCJ	55*	24.0	1.1	P-BCJ	35*	26.6	2.4
F-K50-BR	120	12.7	2.6	P-K50-BR	95	13.5	4.8
F-K100-BR	115	21.6	4.8	P-K100-BR	100	23.0	8.8
F-K50-EM	55	10.8	0.3	P-K50-EM	20	12.1	2.1
F-K100-EM	65	22.5	0.6	P-K100-EM	40	25.1	0.7
F-K100H-EM	60	24.8	0.8	P-K100H-EM	40	24.9	1.8
F-K100-EM-2	60	26.1	1.0	P-K100H-EM-2	40	24.8	1.9
F-BCJ-EM	55*	20.8	1.6	P-K50-ES	20	12.0	2.4
F-K50-ES	45	12.5	0.8	P-K100-ES	35	26.8	1.8
F-K100-ES	55	24.7	6.5	P-K100H-ES	40	27.0	3.1
F-K100H-ES	55	27.4	0.8	P-K100H-ES-2	35	26.0	3.7

*: 1 方向加振での最大値

事項を中心にして記す。なお各試験とも上基礎の鉛直方向加速度は下基礎とほとんど同じであった。

F-K50 および F-K100-2 について、下基礎および上基礎の絶対加速度時刻歴を図－9に点線および実線で示し、上基礎の絶対加速度および、上基礎の下基礎に対する相対すべりのオービットを図－10に示す。ただし加速度およびすべりは平面中心位置に換算しており、X方向は北を正、Y方向は西を正とした。両図から以下のことがわかる。

- ①上基礎の水平加速度には、免震効果による頭打ちが見られる(図－9)。しかし最初の加振であるF-K50の0～2.5secでは、上基礎の水平加速度の大きさが下基礎の3倍程度に増幅されている(図－9(a))。この増幅現象はF-K100-2(正確にはF-K75以後の試験)では見られておらず(図－9(b))、ボードの剥がれによってこの現象が起きなくなったと考えられる。初期の増幅原因は特定できないが、初期状態ではボードに素材試験(写真－2)やクリープ試験で認められた球面状の凹みが存在し、応答を増幅したと推察される。
- ②加速度オービットの大きさは最初の加振のF-K50では約110gal

図-9 F25タイプの加速度時刻歴 (----下基礎、——上基礎)

図-10 加速度およびすべり変位のオービット(F25タイプ)

(図-10(a)、F-K100-2(正しくは F-K75 以後の試験)では約 60gal (図-10(b))となっており、入力小さい F-K50 の方が大きい。この逆転現象もボードの剥がれに起因すると思われる。表-8の F-K100 と F-K100-2 の応答加速度の相違はボードの剥がれによると判断され、剥がれが結果的に再加振時の荷重集中を緩和して応答加速度を低減させたと考えられる。しかしボードの剥がれは上基礎-下基礎間の時々刻々の相対不陸にも関係しており、本タイプでは実施工における不陸分布の定量化や、不陸に起因するねじれ応答の設計上の評価に課題が残されていると言える。

6. P6タイプの試験

P6 タイプの試験後の状況を写真-7に示す。K100 および K100H 加振では、周辺部の P6 球が外周へ飛び出す状況が見られた。なお K50 加振では P6 球の飛び出しはごくわずかであった。飛び出した P6 球を集めて P6 球が少ない箇所に戻す修正作業を 6 加振(P-K50~P-BCJ)終了後に行った。6 加振終了後の P6 球の状況を写真(a)に、全試験終了後の状況を写真(b)に、その中央部詳細を写真(c)に、周辺部詳細を写真(d)にそれぞれ示す。写真(a)と(b)はよく似ており、周辺部では P6 球が少なくなっているが、中央部では密に近い部分が多い。なお最終時に残った P6 球は計 24.0kg となったが、これには加振回数が多い事および上基礎が開口を有する事が関係している。全試験終了後の塑性化状況を見ると、フォーム板には、下基礎側ボード継目の隙間に応じた高さ約 1mm の盛り上がりや、F25 タイプの実験で生じたコンクリート面の転がり跡の反転による盛り上がり認められた(写真(e))。一方、ボードには目視できる損傷がなく、コンクリート面にも新たな損傷はなかった。P6 球はごく一部で、表面が層状に剥がれたものが見つかったが、その数は 20 個程度と非常に少なかった(写真(f))。P6 球の層状の剥がれは、弾性接触理論によれば最大せん断応力点が球内部にあるので、転がり時にそれが移動したと考えれば説明できる。試験体の上下応答および P6 球の減少を無視すれば、球あたり上載荷重の平均値は 0.38N/球で、フォーム板の不陸吸収は 10N/球 であるから、ごく単純には 30 倍程度以上の荷重集中があったと推察される。なお小型加振試験では 160 N/球 で P6 球の剥がれが見られたが、本試験ではボード継目が影

写真-7 試験後状況(P6タイプ)

図-11 P-K100-3の加速度時刻歴 (----下基礎、——上基礎)

響した可能性も考えられる。

試験結果の概要を表-8の右半に示す。各試験の応答加速度はF25タイプに比べて小さい。すべり変位の最大値は25cm程度で、残留すべり変位は、ブレーキ力を作用させた試験を除けば大略3cm以下となった。残留変位は、入力が小さい方が小さい傾向は特になく、むしろ入力の後揺れ部分の影響を受けると考えられる。なお各試験とも上基礎の鉛直加速度は下基礎とほとんど同じであった。

P-K100-3の下基礎および上基礎の加速度時刻歴を図-11に点線および実線で示し、P-K50およびP-K100-3の上基礎加速度および相対すべりのオービットを図-12(a)~(d)に示す。上基礎の水平加速度には免震効果による頭打ちが見られ(図-11)、加速度オービットの半径はP-K50で大略25gal(図-12(a))、P-K100-3で大略40gal(図-12(c))と非常に小さい。なお加速度オービットの形状はきれいな円形ではないが、これは変位に略比例してばねの復元力が増加する事(変位250mmだと19gal程度)、および下基礎に上向き加速度が作用すると両基礎間の見かけの転がり摩擦係数が増加する事が原因として考えられる。図-13(a)にP-K100-3の振動台変位および上基礎絶対変位の時刻歴を点線および実線で示し、図(b)にねじれ回転角の時刻歴を実線で示す。上基礎変位が振動台変位に比べて小さかった事、ねじれはむしろ小さかった事がわかる。

水平2方向加振によるP-K100Hのオービットを図-12(e),(f)に示すが、3方向加振のP-K100-3の結果とほとんど変わらない。

ブレーキ作動状態で加振したP-K50-BRのオービットを図-12(g),(h)に示し、ねじれの時刻歴を図-13(c)に点線で示す。ブレーキにより加速度オービットの半径は95gal程度に増大したが、依然として良好な加速度低減効果を示しており、ねじれも大きくない。

質量を偏心させたP-K100-EMのすべりのオービットを図-12(i)に示し、ねじれの時刻歴を図-13(b)に点線で示す。オービットは偏心のないP-K100-3とほとんど同じであり、ねじれの増大もなかったことから、質量偏心による影響は小さいと判断される。これは上基礎と下基礎間の転がり摩擦係数が質量偏心の影響をあまり受けないと考ええると容易に説明できる。

北西側装置内のばねを全て外したP-K100-ESのすべりのオービ

図-12 加速度およびすべり変位のオービット(P6タイプ)

ットを図-12(j)に示すが、オービットがいくらか右下にずれている。ねじれの時刻歴を図-13(c)に実線で示すが、ばねがねじれを拘束しない場合、大きなねじれが生じる事がわかる。

上基礎絶対加速度とすべり変位の関係を図-14に示す。ただし1方向加振したP-BCJではX方向の関係を示し、他の試験ではす

図-13 変位およびねじれの時刻歴

べり変位の主軸方向に近いX-30°Y方向の関係を示す。図では加速度の符号を逆符号にして、慣用の荷重変位曲線の向きと合わせてある。なおX-30°Y方向でなくノルムにする方法も考えられるが、ばねの復元力による加速度があるため加速度ノルムにする意味は薄い。図を見ると、すべり後の勾配がばねによる勾配とほぼ一致している事、変位が大きいとループ形状がやや広がる事がわかる。後者はフォーム材を圧縮する時に転がり抵抗がやや増加すると考えると容易に説明できる。なおP-K100-EMをP-K100-3と比べるとループ形状が若干細くなっている。多数回の加振もしくはP6球の減少によって転がり抵抗がやや減少した可能性も考えられる。

以上の実験結果よりP6タイプでは、①フォーム材による不陸吸収が有効に作用して極端な荷重集中を防ぎ、②多数回の加振後でも問題となるような塑性化がなく、③質量を偏心させた場合でもねじれ応答があまり増大しない、という良好な免震性能を示したと判断される。

7. 結論

べた基礎を有する軽量建物や戸建住宅を対象に、べた基礎とべた基礎の下に設けた鉄筋コンクリートスラブ(下基礎)の間に樹脂球を挿入した新たな免震方式について、3軸振動台実験を行った。

セメント系繊維補強板を介して直径25mmのフェノール樹脂球を縦横12cm間隔で挿入したF25タイプでは、以下の結果が得られた。①初期状態では荷重分担が均一でなく、一部に荷重が集中して、繊維補強板が局部的に板厚方向に剥がれた。②加速度の頭打ちによ

図-14 絶対加速度とすべり変位の関係

る免震効果が認められたが、初期状態では小さな入力に対して応答加速度を3倍程度に増幅する場合がある事がわかった。

押出法ポリスチレンフォーム板、繊維補強板、直径6mmのポリスチレン樹脂球、繊維補強板を順に敷き並べたP6タイプでは、以下の結果が得られた。①フォーム板は、べた基礎の移動に伴って変化するべた基礎一下基礎間の相対不陸を吸収し、過大な荷重集中や樹脂球の損傷を防ぎ、応答加速度の低減に役立ったと考えられる。②応答加速度が大略40gal程度に低減され、残留変位や変位のねじれ成分も小さかった。③質量偏心による影響は小さいと判断される。④ブレーキ装置の作動状態でも良好な加速度低減効果が得られ、摩擦ブレーキは小規模免震建物の望ましい風荷重対策の1つと考えられる。

本実験結果をもとに、べた基礎を有する軽量建物の免震方式としてP6タイプを提案する。解析との比較検討結果は今後報告する予定である。

参考文献

- 1)飯場正紀：免震住宅の性能に関する基本的な考え方と住宅用免震装置の特性、ビルディングレター、pp.17-27、1999.3
- 2)新谷隆弘、石丸辰治ほか：ゴム球支承を用いた耐震構造システムに関する基礎的研究(その1～その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp.505-510、1998.9
- 3)飯場正紀、緑川光正ほか：戸建住宅用免震装置の振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp.661-662、1998.9
- 4)木質構造設計規準・同解説p115：日本建築学会、1995.1
- 5)The 10th Anniversary (EDO10周年記念誌)、発泡スチロール土木工法開発機構、1995.9
- 6)例えば、伊藤公正編：プラスチックデータハンドブック、工業調査会、1980
- 7)例えば、大石不二夫、成沢郁夫：プラスチック材料の寿命-耐久性と破壊-、日刊工業新聞社、1987

(1999年6月9日原稿受理、1999年12月20日採用決定)