

博物館の展示室における 免震床緩衝帯の検証について

山下 彩¹・竹内 和輝²

¹近畿地方整備局 営繕部 整備課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 営繕部 計画課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

博物館では国宝や重要文化財など貴重な物を展示しながら、それらの文化財を保管・保存している。この展示と保存を両立するひとつの手段として、展示室の床を免震化する床免震は有効である。ただし、床免震には免震部分と非免震部分の緩衝帯が生じるため、展示室という高い意匠性を確保しながら、その機構が地震時の免震機能を妨げないようにすることが求められる。

そこで、本研究では、加振実験によってその複雑な構造である免震床が適正に機能することを確認し、安全性の面からもより良い緩衝帯の構造を確かめる。

キーワード 免震床, 安全性検証, 博物館

1. はじめに

博物館では国宝や重要文化財など貴重な物が収蔵庫にて「保存」されている。一方で、これら文化財の存在の重要性やすばらしさを伝えるために文化財を展示室にて「展示」している。博物館には、この「保存」と「展示」という2つの役割がある。展示の自由度を実現しながら破損のリスクから守るために、博物館の建物に免震化を取り入れる事は「展示」と「保存」を両立させる手段の一つである。

京都国立博物館平常展示館では、展示室及び収蔵庫の床に免震装置を備えることで、建物全体を免震化するよりもコストを抑えて文化財を保護する計画としている。

ただし、床免震には、地震時に揺れを免れる部分と、地震と共に動く部分との複雑な取り合い部(緩衝帯)が発生するため、緩衝帯が地震時に床免震の動きを妨げないことを確かめる必要がある。

そこで本研究では、振動台を用いた加振実験により、複雑な取り合いにおいても適正に機能し、安全性、意匠性に優れたより良い緩衝帯パネル形状について確認した。

2. 緩衝帯パネルの事前検討

(1) 緩衝帯パネル(跳ね上がりパネル)について

床免震では、地震時に揺れを免れる部分(免震床側)と、地震と共に動く部分(固定床側)との隙間が生じる。そこを緩衝帯と呼び、緩衝帯を塞ぐ材料が緩衝帯パネルである(図-1)。

緩衝帯パネルは、免震床が建物に固定された床に近づく際には免震側(押しパネル)が固定側(跳ね上がりパネル)を押し上げることで変位を吸収する仕組みとなっている。

展示室では、緩衝帯パネルの仕上げが来館者の目に触れるため、周りの仕上げと異なるものにすることを意匠上の問題も考慮する必要がある。

(2) パネル厚の検討

(1)により当初検討した緩衝帯パネル形状は図-2の通りであった。当初の緩衝帯パネルの厚みは41mmであり重かった。そのため、地震時にパネルが離れた際、来館者がパネルの隙間に挟まったり、パネルへ衝突することで、大きな衝撃を加えるのではとの懸念があった。

そこで、この衝撃力を小さくするために、パネルの厚みを小さくすることで重量を抑えることを試みた。

仕上げ(フローリング)を貼り付ける際には、下地張りを張るのが一般的であるが、接着剤性能の確認により、下地張りの合板を無くして、金属パネルに直接貼り付けても問題がないと判断出来た。そうして約24mmの厚みまで薄くして製作を行い、サンプルにて軽量化が可能であることを確認した。

次に、振動台を用いて動的な加振試験を行うことにより、実際に免震床が挙動した際に、複雑な取り合いにおいても適切に挙動することを確認した。併せて、上記のパネル厚をもとに数パターンの緩衝帯パネル形状を製作して加振試験をおこなうことで、より安全性の高いパネル形状を検討するための検証を行った。

3. 加振試験

(1) 確認事項

工事の特記仕様書に設計要件として記されている免震性能のうち、以下の点を満たすことを試験により確認する。

「入力地震波EL CENTRO NS 1940 レベル0.5m/s、
HACHINOHE NS 1968 レベル0.5m/s、JMA KOBE NS 原波
の3種類の地震波を入力し、応答加速度120Gal以下、
応答変位25cm以下であること（鉄骨床組上とする）」

さらに、最も複雑である入隅部の作動状況を確認するための入力波には、上記の地震波（単軸波）にJMA KOBE（3軸波）を追加する。また、緩衝帯パネルの想定外の挙動により来館者へ危害を及ぼす可能性を考慮し、挙動の安全性検証として、緩衝帯パネルについて後述する4つの形状パターンを用いて加振試験を行う。

(2) 試験体

試験体で使用する免震装置は、表-1の性能を満たすものとし、床梁鉄骨上は実際の展示室の床と同じ構造を再現した。緩衝帯パネルは4パターンを製作し、各々加振試験を行った。

a) 免震装置

免震装置は免震支承を4基使用し、配置は展示室角部を再現するため図-3のような配置とした。

b) 免震床

床梁鉄骨はH形鋼125×125×6.5/9とし図-3のような形状とした。その上に、厚さ6mmの敷鉄板及び根太を設置し、床板を貼り、展示ケースのモデルを設置した。（図-1）

c) 固定床

固定床は石材及びフローリング材で仕上げ、展示室入隅部を再現するため入隅部壁のモデルを設置した。

d) 緩衝帯

本試験で使用する展示室の緩衝帯パネル4パターンの断面詳細を表-2に示す。パターン1は前述の軽量化を図ったうえで、先端をステンレスとしたもので、可動性に重点を置いている。パターン2、4はそれに対してそれぞれ免震側、固定側の緩衝帯パネル先端を柔らかい材料に変更し、来館者へ当たった場合の安全性を向上させることを意図している。パターン3は、緩衝帯跳ね上がりパネルの仕上げを変更することで軽量化し、来館者への衝撃を軽減することを意図したものである。ただし本件では、文化財保存の観点から病害虫を巣くわせるリスクを懸念し、絨毯状のものは基本的に使用しない方針としている。そのため、採用の可能性は低いものとして扱った。

試験体寸法及び画像は図-1、3、4の通りである。

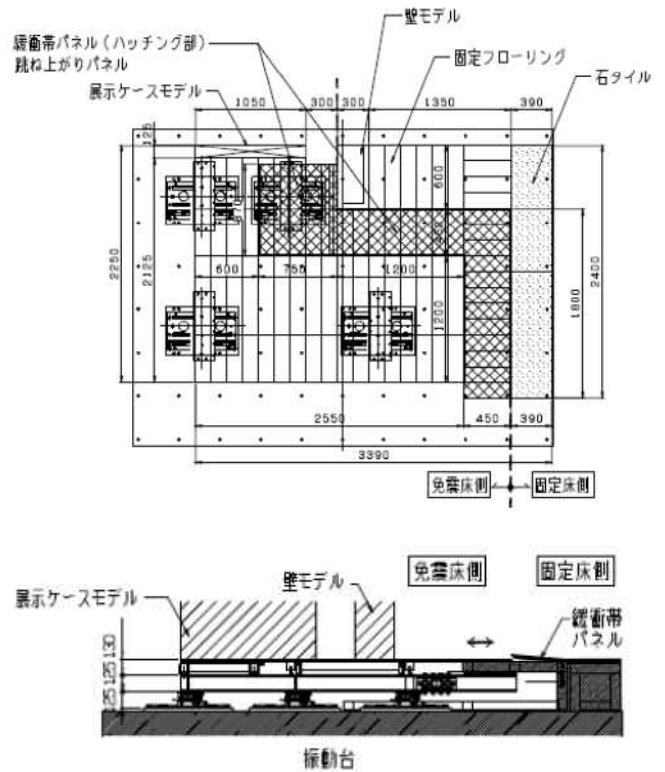


図-1 緩衝帯パネル部 断面・平面詳細図（試験体）

表-1 免震装置性能仕様

周期	6秒 トリガー付
摩擦係数	0.042
ストローク	± 27 cm
積載荷重	1.5 ton/m ²

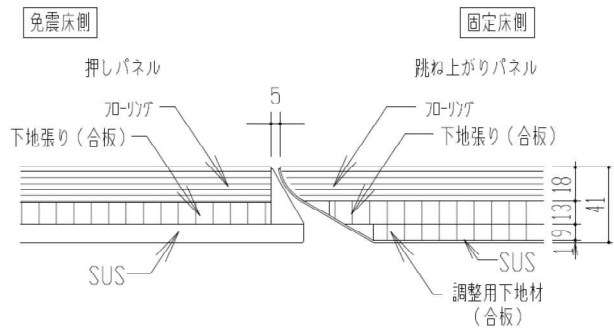


図-2 緩衝帯パネル詳細図（当初案）

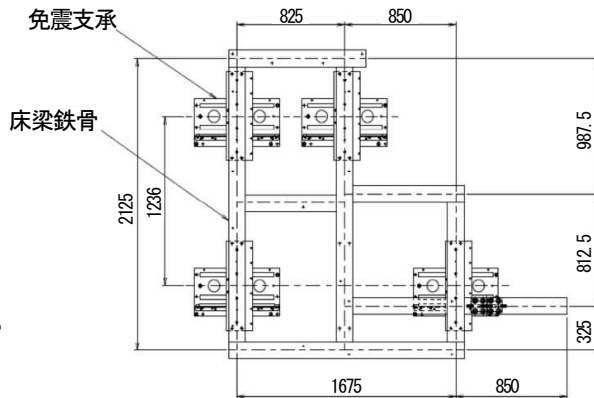


図-3 免震装置 床梁鉄骨形状

表-2 緩衝帯形状一覧

	緩衝帯形状	目地部断面図
パターン1	固定床側の跳ね上がりパネル、免震床側の押しパネルとも先端をSUSとしたもの (パネル接触面を摩擦抵抗の低い金属とすることで、可動性に重点を置いたもの) <仕上げ>両パネルともフローリング	
パターン2	免震床側の押しパネル先端部材質をゴムにしたもの (揺れによりパネルの間に挟まった際の衝撃軽減を目的とする) <仕上げ>両パネルともフローリング	
パターン3	固定床側の跳ね上がりパネルの仕上げをタイルカーペットにしたもの (軽量化により、跳ね上げによる衝突や挟み込みでの衝撃軽減を目的とする) <仕上げ>固定床側: タイルカーペット 免震床側: フローリング	
パターン4	固定床側の跳ね上がりパネル先端上面にスポンジ、下面にゴムを取付けたもの (パターン2とは反対側に衝撃軽減材を取り付けた) <仕上げ>両パネルともフローリング	

(3) 試験方法

試験は、UR都市機構都市住宅技術研究所の振動試験棟3次元振動台を用いる。振動台の仕様は以下の通りである。ここで、加速度 1G = 980Galである。

テーブル寸法 (4m×3m)

最大変位 (X: ±25cm Y: ±20cm Z: ±10cm)

最大速度 (X, Y, Z: 75cm/s)

最大加速度 (X, Y: ±1.2G Z: ±0.8G)

図-4のように試験体を加振台上に設置後、パターン1から4の緩衝帯それぞれに表-3に示す加振試験を行い、加速度変換器及びレーザー変位計でX方向、Y方向それぞれの加速度及び変位を測定した。

(4) 試験結果

表-4に試験結果一覧を示す。パターン2は、加振前の手動動作確認にて正常な可動が確認できず試験体破損のおそれがあったため、加振試験は行わなかった。また、パターン4は設計基準波において大きな応答加速度となったため、JMA KOBEによる3軸加振は行わなかった。

可動確認では、パターン1、3はスムーズに可動、パターン4についてはパネル下面のゴムが外れてしまった。次章にて、応答加速度の計測値を、展示室形状に合わせて補正を行う。

表-3 加振試験項目一覧

	加振波	入力加振波 最大加速度	方向	判定基準	検証項目
1	EL CENTRO NS	468Gal	X	応答加速度 120Gal以下	免震性能確認
2	1940 レベル0.5m/s		Y		
3	HACHINOHE NS	393Gal	X	応答変位 25cm以下	
4	1968 レベル0.5m/s		Y		
5	JMA KOBE NS	818Gal	X		
6	原波		Y		
7	JMA KOBE 3軸	NS 818Gal EW 617Gal UD 332Gal			安全性検証 動作確認



図-4 試験装置画像 (パターン3)

表-4 試験結果一覧

緩衝帯	加振波	方向	応答加速度 [Gal]	応答変位 [cm]	残留変位 [cm]	可動性
パターン1 (SUS)	EL CENTRO NS 1940	X	206	12	0	○ スムーズに作動した。
	レベル0.5m/s	Y	134	11.3	0.3	
	HACHINOHE NS 1968	X	155	7.8	0	
	レベル0.5m/s	Y	130	8.4	0	
	JMA KOBE NS 原波	X	212	18.4	0	
	JMA KOBE 3軸	X	250	21.1	0.1	
		Y	175	15.4	0.1	
パターン2	-	-	-	-	-	× 手動確認にて正常に作動しなかった。
パターン3 (カーペット)	EL CENTRO NS 1940	X	131	10.8	0.2	○ スムーズに作動した。
	レベル0.5m/s	Y	157	10.8	0	
	HACHINOHE NS 1968	X	148	7.8	0.1	
	レベル0.5m/s	Y	132	9.1	0.2	
	JMA KOBE NS 原波	X	152	16.3	0.1	
	JMA KOBE 3軸	Y	144	15.7	0.1	
		X	197	17.5	0.1	
パターン4 (クッション)	EL CENTRO NS 1940	X	306	12.8	0.2	× 先端ゴムクッションが外れてしまい、可動部への障害となり、応答加速度が大きくなった。
	レベル0.5m/s	Y	191	12.4	0.2	
	HACHINOHE NS 1968	X	263	5.7	0.1	
	レベル0.5m/s	Y	203	6.8	0.2	
	JMA KOBE NS 原波	X	298	21.1	0.3	
	Y	173	19.5	0.3		

※表中の応答加速度は、基線補正及び高周波成分を除去するため10Hzのローパスフィルター処理を施したものである。

(5) 応答加速度の補正

a) 緩衝帯の影響

緩衝帯では、地震時、免震床側の跳ね上がりパネルが押しパネルの上に乗上げる際に抵抗力が生じるため、免震床の応答加速度が大きくなる。その抵抗力は、緩衝帯の長さ に 比例すると考えれば、緩衝帯による応答加速度の増加分は、下記の通り、展示ケース等を含む可動部の質量に対する緩衝帯長さの比に比例するものとして評価できる。

緩衝帯比 (緩衝帯の影響度) の考え方

$$m(a+a') = F+F'$$

$$F = ma$$

$$a' = F' / m$$

ここで緩衝帯は全て同じ構造で目地直角方向 (短辺) 長さは一定であるので、 α を単位長さ当たりの緩衝帯抵抗力とすると、

$$F' = \alpha L$$

よって

$$a' = \alpha \times L/m$$

となるので緩衝帯が免震床の応答加速度に与える影響は緩衝帯長さ L と可動部質量 m の比で表せる。

L/m を緩衝帯比 (β) とする

- m : 可動部質量 (※)
- a : 緩衝帯がないときの応答加速度
- a' : 応答加速度の緩衝帯影響分
- F : 免震装置の復元力+減衰力
- F' : 緩衝帯による抵抗力
- L : 緩衝帯長さ

※ 床梁鉄骨・敷鉄板・根太・床板及び展示ケース (展示物は除く) の合計

試験体は実際の展示室よりも、相対的に緩衝帯パネルの占める割合が大きいことにより、緩衝帯比も大きくなる。そのため、実験結果は過大な応答加速度となると考えられる。よって、計測した応答加速度にこの点を考慮した補正を行うものとする。

b) 補正加速度算出方法

上記の考え方に基づき、以下の算式により、緩衝帯の影響による応答加速度増加分を緩衝帯比により補正する。

$$a_a = (a - a_0) \times \beta / \gamma + a_0$$

緩衝帯の影響による
応答 加速度増加分

緩衝帯が無い時の
応答加速度

試験時計測加速度

想定応答加速度
(補正加速度)

- a_0 : 補正加速度
- a : 試験時計測加速度
- a_0 : 緩衝帯が無い時の応答加速度 (※)
- β : 展示室緩衝帯比
- γ : 試験体緩衝帯比

※ 事前の収蔵庫免震床性能実証実験時に計測した、緩衝帯が無い状態でのJMA KOBE NSの応答加速度 (109Gal) を採用する。

補正に用いる各展示室と試験体の緩衝帯比等のパラメータを表-5に示す。加速度が最大になるのは、跳ね上がりパネルを押し上げる時なので、緩衝帯長さは、4面ある緩衝帯のうち、加算した長さが最大のものとした (図-5)。なお、可動部の質量、緩衝帯長さは当時における暫定の設計案 (緩衝帯幅450mm) とした。可動部質量には展示ケース以外の積載荷重は、安全側の評価としてゼロとしている。

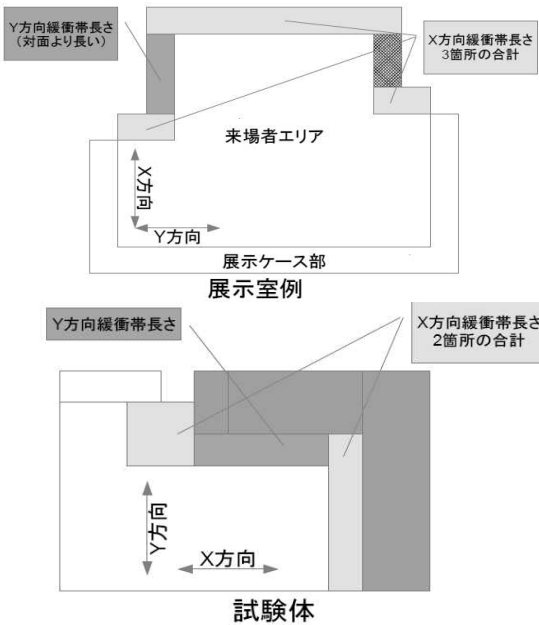


図-5 緩衝帯長さ

表-6 補正後の応答加速度

緩衝帯	パターン1(SUS)			パターン3(カーペット)			パターン4(クッション)			
	EL CENTRO NS 1940 レベル 0.5m/s	HACHINOHE NS 1988 レベル 0.5m/s	JMA KOBE NS 原波	EL CENTRO NS 1940 レベル 0.5m/s	HACHINOHE NS 1988 レベル 0.5m/s	JMA KOBE NS 原波	EL CENTRO NS 1940 レベル 0.5m/s	HACHINOHE NS 1988 レベル 0.5m/s	JMA KOBE NS 原波	
展示室1	X	119	114	120	111	113	114	130	125	129
	Y	111	110	112	112	110	111	114	115	113
展示室2	X	112	111	112	110	110	110	115	114	115
	Y	109	109	109	109	109	109	109	109	109
展示室3	X	113	111	113	110	111	111	118	116	117
	Y	109	109	110	110	109	110	110	111	110
展示室4	X	113	111	113	110	111	111	117	115	117
	Y	110	110	110	110	110	110	111	111	111
展示室5	X	113	111	113	110	111	111	118	116	117
	Y	109	109	110	110	109	110	110	111	110
展示室6	X	115	112	115	110	111	112	120	118	120
	Y	109	109	110	110	109	110	110	111	110
展示室7	X	113	111	113	110	111	111	117	116	117
	Y	110	109	110	110	109	110	111	111	110
展示室8	X	113	111	113	110	111	111	117	115	117
	Y	109	109	110	110	109	110	110	111	110
展示室9	X	113	111	114	110	111	111	118	116	118
	Y	109	109	110	110	109	109	110	110	110
展示室10	X	113	111	114	110	111	111	118	116	118
	Y	109	109	110	110	109	109	110	110	110
展示室11	X	113	111	113	110	111	111	117	115	117
	Y	109	109	110	110	109	110	110	111	110
展示室12	X	115	112	115	110	111	112	121	118	121
	Y	110	110	111	111	110	111	113	114	112
展示室13	X	114	111	114	110	111	111	119	117	119
	Y	110	110	110	110	110	111	112	111	111

表-5 緩衝帯比一覧

部屋名	可動部 質量 (t)	展示 ケース (t)	合計 質量 (t)	X		Y	
				緩衝帯長 (m)	緩衝帯比 (m/t)	緩衝帯長 (m)	緩衝帯比 (m/t)
展示室1	80.6	0.00	80.6	39.12	0.485	10.69	0.133
展示室2	17.8	25.9	43.6	10.13	0.232	0.00	0.000
展示室3	17.9	20.4	38.3	11.06	0.289	2.10	0.055
展示室4	12.9	17.1	30.0	7.82	0.261	2.10	0.070
展示室5	16.1	20.7	36.9	11.41	0.309	2.10	0.057
展示室6	24.8	19.9	44.6	15.46	0.346	2.10	0.047
展示室7	19.0	39.9	58.9	11.28	0.192	2.50	0.042
展示室8	15.7	36.7	52.5	9.94	0.189	1.80	0.034
展示室9	21.1	41.3	62.4	12.99	0.208	1.80	0.029
展示室10	21.1	41.3	62.4	12.99	0.208	1.80	0.029
展示室11	15.7	36.7	52.5	9.94	0.189	1.80	0.034
展示室12	32.1	15.4	47.5	18.5	0.389	6.66	0.140
展示室13	31.4	20.7	52.0	18.49	0.355	4.51	0.087
試験体	0.511	0.075	0.586	2.66	4.539	1.20	2.048



図-6 パターン1 靴+錘

d) 補正加速度結果

各展示室の補正後の応答加速度一覧を表-6に示す。パターン1、3はすべての展示室において応答加速度120Gal以下である。本設計仕様の試験体はパターン1、3の緩衝帯において、設計基準波に対してすべて応答加速度120Gal以下を満足していることが確認できた。

パターン4はパターン1と基本構造は同じだが、補正後の応答加速度がパターン1に比べて大きい。表-6の網掛けに示すように、緩衝帯比の大きい展示室1において120Galを超えている。跳ね上がりパネル先端下面のゴムが、跳ね上がる際に免震床側の押しパネルに巻き込まれ抵抗になったためと考えられる。

(6) 挙動の安全性検証

加振実験では、緩衝帯の挙動による人的被害への影響の検証もおこなった。

来館者が緩衝帯パネル部分に立っていることを模して、靴に錘を付けて試験体上に設置したところ、パネルが離れた際に隙間に靴が入ったが、パネルが跳ね上がる際には靴はパネル上に戻り、挟まれたり転倒することはなかった。また、次にパネルが離れる際には、靴が転倒したが、挟まれることはなかった。(図-6)

4. 考察とまとめ

免震性能は、パターン1とパターン3では、緩衝帯比を考慮した補正の結果、すべての展示室で設計要件の3地震波における応答加速度120Gal以下を満足することが確認された。しかし、パターン4では、同様の補正の結果をおこなっても、展示室1および展示室12において応答加速120Galを超えてしまった。

応答変位は最大でも17cm以下ですべての実験結果で25cmを満足している。応答変位は緩衝帯により小さくなるが、収蔵庫の性能確認実験時に行った緩衝帯のない試験体の実験結果でも25cm以下が確認されており、展示室の応答変位もこれを超えることはないと考えられる。すべての展示室で、応答変位25cm以下が満足されるものと判断される。

また残留変位も最大でも0.3cmで、復元作業を必要とするほどでないことが確認された。可動性については、パターン4及び加振を行わなかったパターン2を除き、スムーズに作動することが確認された。

これらの結果をパターンごとに比較したものを表-7にまとめた。パターン3は可動性に問題が無く、跳ね上がりパネルが軽量であるため衝突したときの衝撃が抑えられ、来館者への安全性は高いと考えられる。しかしながら、害虫の問題が残るため本件では、可動性に優れ、挙動の安全性においても確かめることができたパターン1が採用に至った。

今後の運用においては、パターン2や4の実験結果より、先端の摩擦抵抗が免震性能に悪影響を及ぼすことが判明したことについて、注意事項として施設管理者に伝えることも重要である。

本研究では入隅部の複雑な取り合いでも免震床が適正に機能し、かつ本建物に適した素材による最善の緩衝帯パネルの形状について確認することができ、一定の成果が得られたと考える。

表-7 緩衝帯加振実験結果比較表

緩衝帯	波形状	計測値						補正後の応答加速度(展示室1)						可動性	安全性		その他 (メンテナンス等)
		EL CENTRO NS 1940 レベル0.5m/s		HACHINOHE NS 1986 レベル0.5m/s		JMA KOBE NS 原波		EL CENTRO NS 1940 レベル0.5m/s		HACHINOHE NS 1986 レベル0.5m/s		JMA KOBE NS 原波					
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y				
パターン1 (SUS)	応答 加速度 [Gal]	206	134	155	130	212	152	119	111	114	110	120	112	○ スムーズに作動した	○ 加振実験において跳 が挟まれることは無 かった	・メンテナンスが不要	
	応答 変位 [cm]	12	11.3	7.8	8.4	18.4	18.4	-	-	-	-	-	-				
	残留 変位 [cm]	0	0.3	0	0	0	0.3	-	-	-	-	-	-				
パターン2	応答 加速度 [Gal]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	× 正常に作動しなかった	-		
	応答 変位 [cm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	残留 変位 [cm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
パターン3 (カーペット)	応答 加速度 [Gal]	131	157	148	132	152	144	111	112	113	110	114	111	○ スムーズに作動した	◎ 跳ね上がりパネルが 軽量	・仕上材をカーペットとするこ とは、害虫による被害が懸念 され、総合的病害虫管理 (IPM)上好ましくない ・他の部分と床仕上げを変 える場合は、つまずきやす くなる可能性がある ・クッション部の定期的な交換 が必要	
	応答 変位 [cm]	10.8	10.8	7.8	9.1	16.3	15.7	-	-	-	-	-	-				
	残留 変位 [cm]	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-				
パターン4 (クッション)	応答 加速度 [Gal]	306	191	263	203	298	173	130	114	125	115	129	113	× クッションが外れ応答 加速度が大きくなった	○ クッションにより挟まれ た際の衝撃を軽減して いる	・クッション部の定期的な交換 が必要	
	応答 変位 [cm]	12.8	12.4	5.7	6.8	21.1	19.5	-	-	-	-	-	-				
	残留 変位 [cm]	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	-	-	-	-	-	-				