

転がり摩擦ダンパーを用いた免震装置（CRS）の開発

高橋道弘* 早川邦夫* 安井健治*
舟木秀尊* 山田高之**

1. まえがき

兵庫県南部地震では建物自体に損傷がないものの、建物内部に収容されている展示品や機器などが転倒する被害が発生した。これを契機に展示品などの地震安全対策として、機器免震装置の需要が増し、当社では『コサインレールシステム（Cosine Rail System：以下CRS）』を用いた免震装置（ガルレス、ガルレスL）を開発した。しかし、これらの装置は優れた免震性能を示していたが、低コスト化や装置の低床化などを望まれていた。一方、従来の機器免震装置のトリガー機構には感震器に連動した電磁ブレーキを用いており、電気配線が必要なことから複雑なシステムになっていた。また、粘性ダンパーやトリガー機構も装置のコンパクト化を制約していた。

今回、転がり摩擦ダンパーを用いた免震装置（ガルレスLC）を開発した。この転がり摩擦ダンパーをトリガーとして兼用することで従来の粘性ダンパーとトリガー機構が不要となり、装置の低廉化と低床化が図れた。

本報では転がり摩擦ダンパーを用いた免震装置について、振動台で行った性能確認実験と解析による応答予測の結果について報告する。さらに免震展示ケースの振動台実験を行ったので、その結果を併せて報告する。

2. 免震装置の概要

2.1 システムの概要

本装置は水平2方向の応答加速度を低減し、地震時に展示品など貴重品の転倒を防止する免震システムである。

免震装置を写真-1、2に示す。免震装置は転がり振り子を応用したローラー支承とローラー軸に取り付けた摩擦ダンパーから構成されている。

2.2 水平免震機構¹⁾

CRS支承の形状と復元力特性、周期特性を図-1に示す。CRS支承は直交する上下2段のローラーとレールで構成されており、水平全方向に作動できる構造になっている。また、ローラーは上下をコサインカーブ形状のレールで挟まれており、レールの幾何学形状による転がり振り子運動を行い、復元力特性は非線形性を有



写真-1 装置全景（最大ストローク時）



写真-2 ローラー周辺部

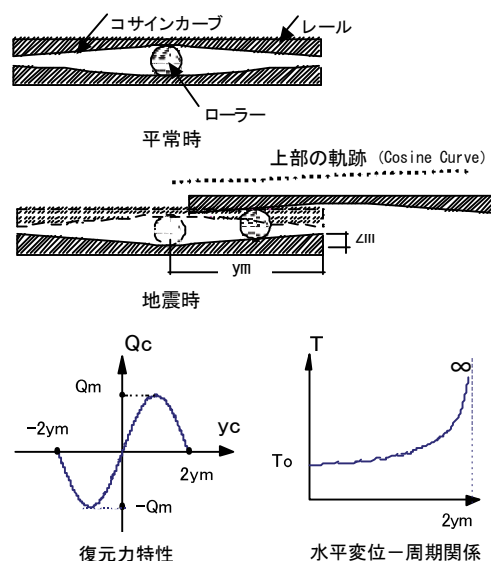


図-1 CRS支承の形状と特性

*耐震研究室 **技術開発部

する。このため、積載物の重量にかかわらず微小振幅時の周期 T_0 が設定でき、周期は変位に依存して変化する。

2.3 転がり摩擦ダンパー機構

転がり摩擦ダンパーの機構を図-2に示す。摩擦ダンパー材には耐摩耗性に優れている四フッ化エチレン樹脂を塗布した金属メッシュ材を採用している。この金属メッシュ材を装着したローラー軸部を繋ぎ材で挟み込む事によってトルク抵抗を与え、転がり摩擦力一定の摩擦ダンパーとしている。また、ローラー軸部の締め付けボルトによって摩擦力を調整し履歴減衰を与える仕組みを採用している。摩擦ダンパーを用いたCRS支承の履歴特性を図-3に示す。この図では摩擦ゼロのCRSの復元力特性(図-1)とダンパーの摩擦力の履歴特性を合成した特性を示している。人が押しても容易に動かない程度の摩擦力(0.1~0.15kN)をトリガー力として利用することで、従来のトリガー機構は不要となる。

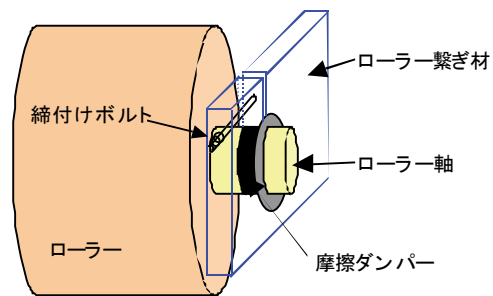


図-2 摩擦ダンパーの機構

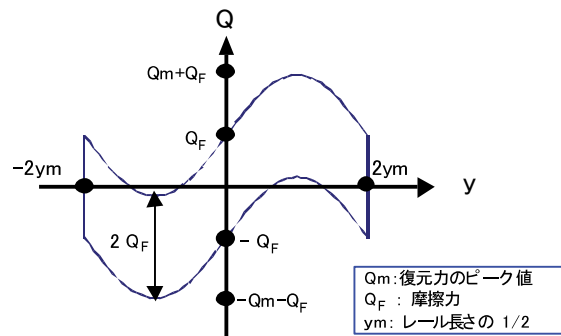


図-3 摩擦ダンパーを用いたCRS支承の履歴特性

3. 性能確認実験

3.1 実験概要

免震装置試験体の概要を図-4に、実験状況を写真-3に、試験体の諸元を表-1に示す。試験体のコサインレール形状は長さ30cm、溝深さ0.3cmとし、微小振幅時の周期は3.5秒、変形限界は30cmである。

摩擦ダンパーを用いたCRS支承の免震性能を確認することを目的に錘を搭載して、一方向の地震波加振実験を行った。次に水平2方向の免震性能確認と解析の妥当性の検証を目的に3方向加振実験を行った。実験に用いた加振波を表-2に示す。実験は静摩擦係数と地震波の入力レベルをパラメータとした。計測は振動台と免震装置上の加速度と相対変位を水平2方向について行った。

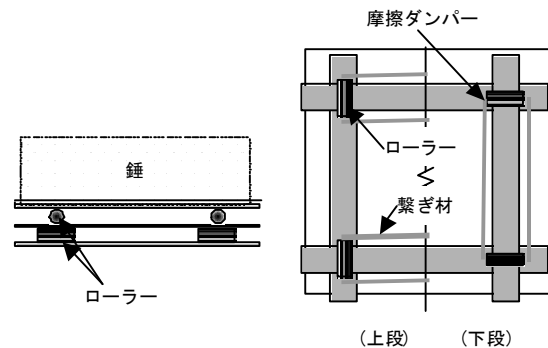


図-4 免震装置試験体の概要

表-1 試験体の諸元

		装置	CRS支承 (レール \times 寸法)	
免震装置		寸法	930 \times 930 \times 150	mm
		積載重量*1	485.0	kgf
コサインレール		長さ	300	mm
		溝の深さ	3.0	mm
		周期*2	3.5	sec
		静摩擦係数	0.04、0.02、0.015	-
ダンパー			転がり摩擦ダンパー	

*1 錘とローラー上部の装置重量の和、*2 微小振幅時

表-2 設計目標と加振波

目標性能		応答加速度が100cm/s ² 以下に低減
加振波	1方向	JMA KOBE 1995 NS (200, 400, 600cm/s ²) EL CENTRO 1940 NS (25, 50cm/s) HACHINOHE 1968 NS (25, 50cm/s)
	3方向	JMA KOBE 1995 NS+EW+UD (原波レベル)



写真-3 実験状況

3.2 振動台加振実験結果

a. 一方向加振実験

免震装置の最大応答値を図-5に示す。静摩擦係数 0.015, 0.02 の場合は入力加速度レベルが大きくなるにつれて加速度応答倍率は小さくなり、その倍率は 1/5~1/10 程度と従来の粘性ダンパーを用いた装置（応答倍率 1/10 程度）に近い免震性能¹⁾を示している。また、800cm/s² を越える入力に対しては、加速度応答倍率は 1/12 程度となり、装置の水平変位量が増加することでさらに長周期化し免震性能が向上する傾向を示している。CRS 支承は、図-1 に示すように応答変位がレール長さの 1/2 (15cm) を越えると復元力が低下して周期は急激に長くなり、応答低減効果が顕著になる。しかし、応答変位が 15cm 以下であった本実験では、緩やかな応答低減効果を示している。一方、静摩擦係数 0.04 の場合は入力加速度レベルにかかわらず応答加速度は 80cm/s² 程度とほぼ一定となっており、特に入力小さいレベルでは加速度応答倍率は大きく、入力が 600cm/s² を越えると応答倍率は 1/7 以下となっている。これは摩擦力と等価な加速度と作動時の「がたつき」から応答加速度が大きくなったと考えられ、入力レベルが大きくなるにつれて動きがスムーズになり、応答加速度は上昇せず応答倍率は小さくなる傾向にある。

応答変位については、JMA KOBE NS 波では静摩擦係数の影響はほとんどみられなかった。しかし、EL CENTRO NS 波や HACHINOHE NS 波では静摩擦係数が大きくなると応答変位はやや小さくなり、摩擦係数の影響がみられた。また、応答変位は入力加速度に比例して大きくなった。

各時刻の慣性力と復元力から逆算して動摩擦力を求めることができる。摩擦力と変位、速度の関係の一例として、入力加速度 867cm/s² の結果を図-6に示す。静摩擦係数 0.02 の、JMA KOBE NS 波入力 (100, 400, 800 cm/s² レベル) の摩擦力-変位関係から求めた動摩擦力は 0.12, 0.14, 0.19kN であった。これを摩擦係数に換算すると 0.025, 0.029, 0.039 であり、変動していた。入力加速度に比例して速度と動摩擦力は大きくなること、摩擦力-速度関係は 2 次勾配を有していることから摩擦力に速度依存性があることが推定できる。また、摩擦力-変位関係から転がり摩擦力に変位依存性はみられないことが分かった。なお、履歴ループの丸みは速度依存性、「ひげ」は鉛直振動による影響と考えられる。

b. 三方向加振実験

JMA KOBE 波 (原波レベル) 三方向加振実験を行った。振動台加加速度を図-7 a) に、実験で得られた免震装置の NS 成分方向応答加速度と相対変位の時刻歴波形を図-7 b) に示す。NS 成分方向で 90cm/s² を下回っており、変位も限界の 1/2 程度に収まった。また、加速度応答倍率は 1/10 程度であった。

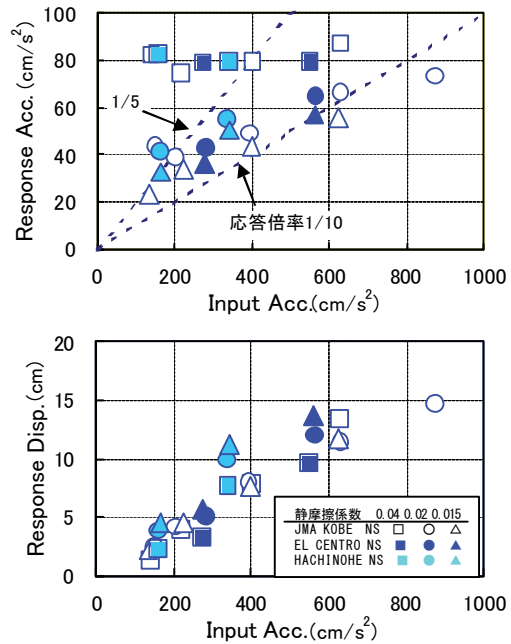


図-5 最大応答値 (一方向加振)

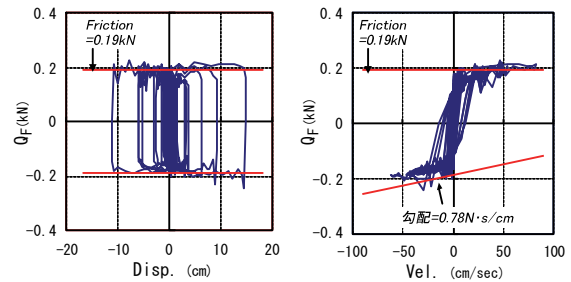


図-6 摩擦力と変位、速度の関係 (一方向加振)

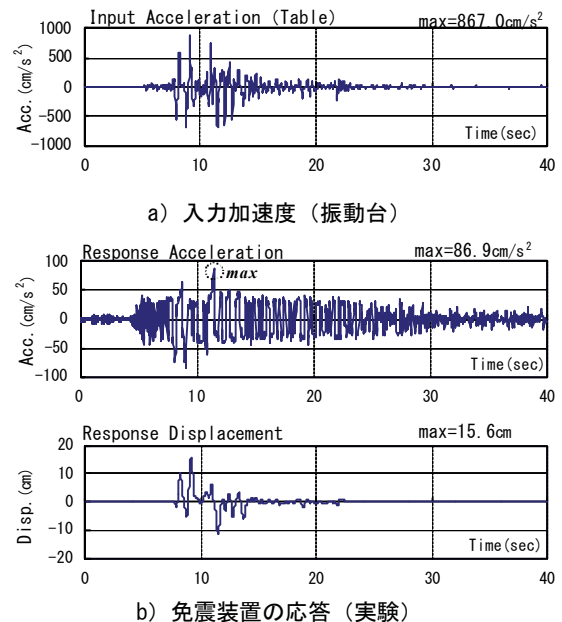


図-7 実験値の時刻歴応答 (NS 成分方向)

水平面内での入力加速度と免震装置の応答加速度の軌跡を図-8に示す。800cm/s²を越える入力に対して、水平の全方向の応答加速度は100cm/s²を下回り目標性能を満足した。図-9に加速度フーリエスペクトルとスペクトル振幅比を示す。加速度スペクトルは装置上では大きく低減していることが分かる。また、免震装置の微小振幅時の周期は3.5秒であるが、スペクトル振幅比から周期は5.8秒(0.171Hz)で卓越して、変位に依存して長周期化したことが分かる。

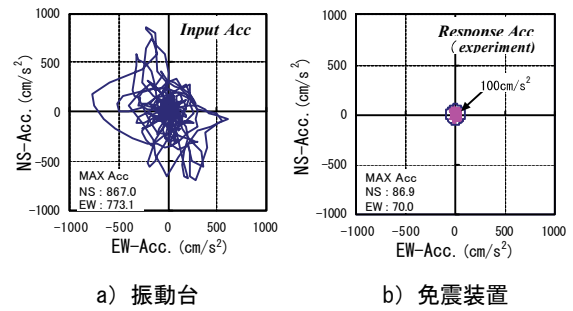


図-8 加速度のオービット

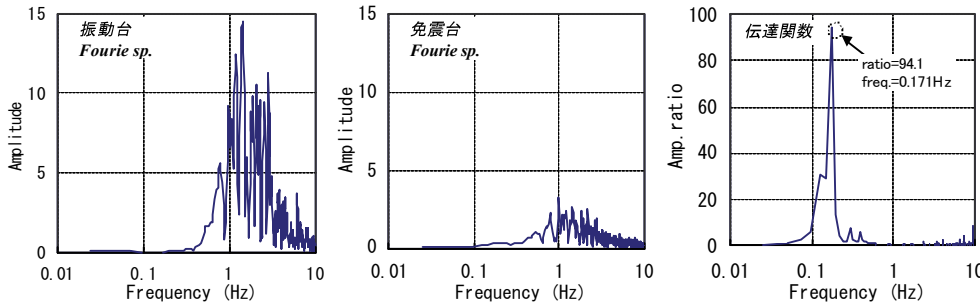


図-9 加速度フーリエスペクトルとスペクトル振幅比

4. シミュレーション解析

4.1 解析方法

錘とローラー上部の免震装置重量を併せて1質点とし、コサインレールの幾何学的非線形を考慮した解析モデルを用いた。摩擦力によるローラーの「転がる」「転がらない」を時々刻々判定して、三方向振動台実験(写真-3)の振動台波形と神戸海洋気象台波形を用いたシミュレーション解析を行った。ただし、免震装置は直交2段重ねであることから、直交方向の振動の影響はないと考え、解析は直交2段を別々に行った。入力には水平・鉛直の各1方向の2方向入力(XZまたはYZ加振)とした。なお、錘は重心の偏りのないように設置した。

運動方程式¹⁾は次式のとおりとした。

$$m(\ddot{y} + \ddot{y}_0) + Q_F + m(\ddot{z} + \ddot{z}_0 + g) - \frac{\pi}{2y_m} z_m \sin\left(\frac{\pi}{2y_m} y\right) = 0$$

ただし、

- m : 質点の質量
- \ddot{y}, \ddot{z} : 水平、鉛直方向の応答相対加速度
- \ddot{y}_0, \ddot{z}_0 : 水平、鉛直方向の入力加速度
- g : 重力加速度
- y : 応答変位
- y_m, z_m : レール長さの1/2、溝の深さ
- Q_F : 転がり摩擦力

ここで、第1項は慣性力を、第2項は摩擦力を、第3項は復元力を示す。

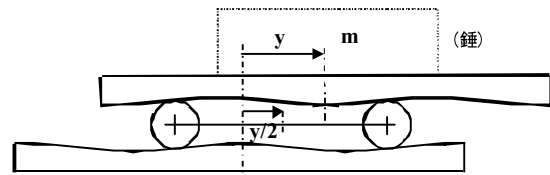


図-10 振動解析モデル

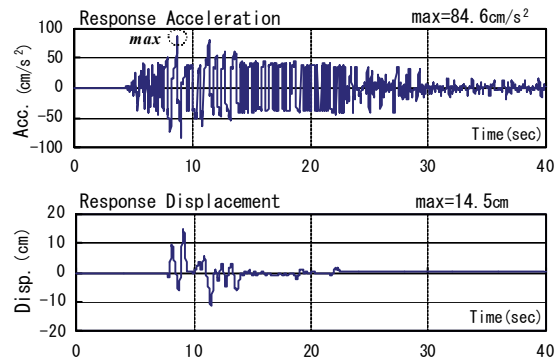


図-11 免震装置の応答(解析: NS成分方向)

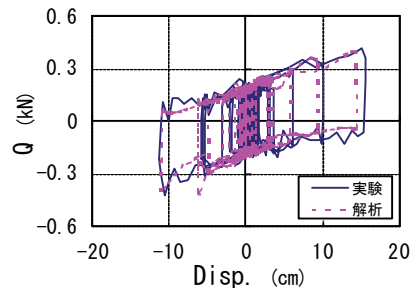


図-12 実験値と解析値との比較

4.2 三方向加振実験と解析との比較

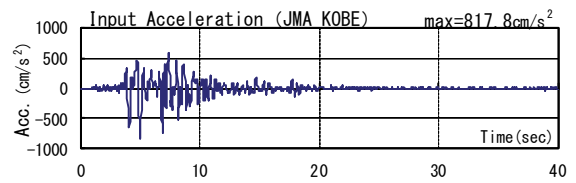
図-7a)に示す振動台波（JMA KOBE 波）を入力して、時刻歴応答解析を行った。摩擦係数は実験結果から動摩擦係数0.039（摩擦力0.19kN）を用い、変位や速度の依存性はないものとした。解析による免震装置の応答加速度と相対変位の時刻歴波形（NS 成分方向）を図-11に示す。最大応答加速度は実験値 86.9cm/s^2 に対して解析値 84.6cm/s^2 、最大応答変位は実験値 15.6cm に対して、解析値 14.5cm となり、解析と実験結果はよく一致した。応答時刻歴波形では最大応答発生時刻（実験 11.0sec 、解析 9.0sec ）やその時刻でのピーク値はやや異なるが、解析は実験の応答波形形状をほぼ再現した。図-12に実験と解析による免震装置の履歴を重ねて示す。解析は実験の履歴形状を再現しており、振動台実験との比較から、解析の妥当性が検証できた。

4.3 神戸海洋気象台観測波を用いた解析

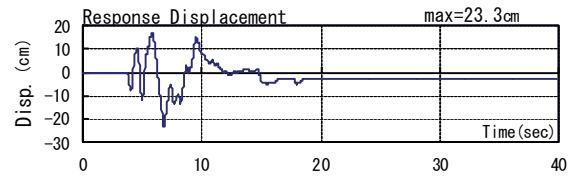
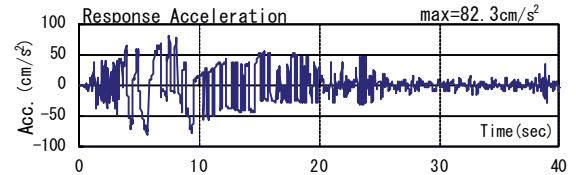
神戸海洋気象台観測波（JMA KOBE 波）を用いた時刻歴応答解析による装置の性能確認を行った。入力に用いた加速度波形（NS 成分）を図-13a)に、免震装置の NS 成分方向の応答加速度と相対変位の時刻歴波形を図-13b)に示す。JMA KOBE 観測波入力時の最大応答は加速度 82.3cm/s^2 、変位 23.3cm となり、加速度応答倍率は約 $1/10$ と良好な結果が得られた。三方向振動台実験と比較すると、入力レベルが実験の振動台加速度より小さいことから、応答加速度はやや小さくなっている。しかし、長周期成分の影響から応答変位は大きくなっている。図-14に水平面内での入力加速度と各免震装置の応答加速度の軌跡を示す。水平の全方向に対して 100cm/s^2 を下回っており、目標性能を満足した。

加速度フーリエスペクトルを図-15に示す。免震装置の応答加速度スペクトルは 4.1 秒 (0.244Hz) で卓越し、入力加速度の長周期での卓越成分と一致している。しかし、加速度スペクトル振幅比は 1.57 とやや増幅した程度に収まっており、変位することでさらに長周期化したため、共振しにくい性質をもっていることが分かる。図-16に加速度スペクトル振幅比を示す。振幅比の卓越成分のピークは 5.8 秒 (0.171Hz) と 3.4 秒 (0.293Hz) にあり、前者は長周期化した免震装置の周期であり、後者は微小振幅時の周期である。これらのピーク値は 6.03 (0.171Hz)、 3.59 (0.293Hz) と大きい。この周波数領域では入力スペクトルが小さいため、時刻歴応答への影響は小さい。

本免震装置は共振しにくい性質をもつため、 0.4Hz 以下の周波数領域では応答スペクトルはやや大きくなった程度である。一方、 0.4Hz 以上の周波数領域の応答スペクトルが大きく低下している。これより、加速度応答低減効果の高い装置であること、神戸海洋気象台観測波に対しても有効であることが確認できた。



a) 入力加速度 (JMA KOBE NS)



b) 免震装置の応答 (解析)

図-13 時刻歴応答 (観測波入力)

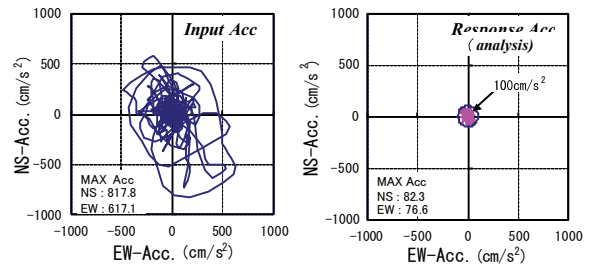


図-14 加速度のオービット (観測波入力)

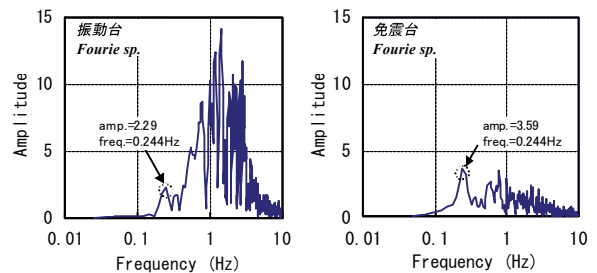


図-15 加速度フーリエスペクトル

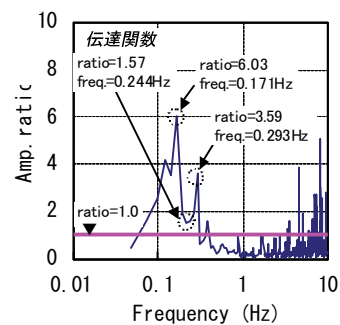


図-16 加速度スペクトル振幅比

5. 免震展示ケース

展示ケースを搭載した振動台実験を行った。その結果を以下に報告する。

5.1 実験概要

平面寸法 1.0m×1.0m、高さ 1.9m の5面ガラスの免震展示ケースを用いて、1方向および3方向加振を行った。入力波には JMA KOBE 波を用いた。試験体の諸元を表-3に、加振波を表-4に示す。



写真-4 実験状況

5.2 実験結果

NS 成分方向の最大応答加速度を図-17に、高さ方向の応答加速度分布を図-18に示す。1方向および3方向加振ともに免震装置と展示床の最大応答加速度はほぼ同じであった。装置の応答倍率は1/5~1/10程度であり、錘を搭載して行った性能確認実験と同等の性能を示した。また、応答加速度は性能目標値 100cm/s²を下回っており、展示ケースを搭載した時も良好な応答低減効果を示すことが確認できた。しかし、頂部の応答加速度はガラスケースが振られることから展示床の2倍程度となり、100cm/s²を大きく上回る結果となった。1方向加振の頂部応答は頭打ち傾向を示し 150 cm/s²以下となったが、3方向加振では 200 cm/s²に近い応答を示した。鉛直動が水平方向の復元力特性に影響することから、1方向加振と比べて3方向加振の応答はやや大きくなっている。

6. まとめ

転がり摩擦ダンパーを用いた免震装置の振動台実験とシミュレーション解析から得られた結果を以下に示す。

- i. 一方向加振実験から、静摩擦係数を2%程度に設定すると入力加速度を1/5~1/10程度に低減できる
- ii. 静摩擦係数を4%程度に設定すると入力レベルの小さい範囲では応答倍率は大きいですが、入力が600cm/s²を越えると1/7以下に低減できる
- iii. 転がり摩擦ダンパーは速度依存性を持ち、変位依存性はみられない
- iv. CRSは共振しにくい性質をもつため、入力スペクトルの卓越成分での増幅率は小さい
- v. 摩擦係数を一定とした解析は実験結果をよく再現し、精度よく免震装置の応答予測ができる
- vi. 振動台波形や JMA KOBE 観測波に対しても性能目標値 100cm/s²を満足し、本装置は優れた免震性能を有している
- vii. 免震展示ケースの装置と展示床は一体的に挙動し、ケースを搭載しても応答低減効果は良好である

表-3 試験体の諸元

搭載物	搭載物	展示ケース	
	寸法 B×D×H	1000×1000×1900	mm
重量	300.0	kgf	
免震装置	寸法	850×850×96	mm
	周期*1	3.5	sec
	変位限界	250	mm
	転がり摩擦係数	0.03	—

*1 微小振幅時

表-4 加振波

加振波	JMA KOBE 1995 NS (200, 400, 600cm/s ²)
	JMA KOBE 1995 NS+EW+UD (原波レベル)
加振方向	1方向、KOBE 原波レベルのみ3方向

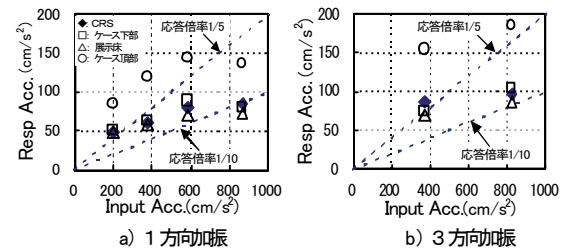


図-17 最大応答加速度

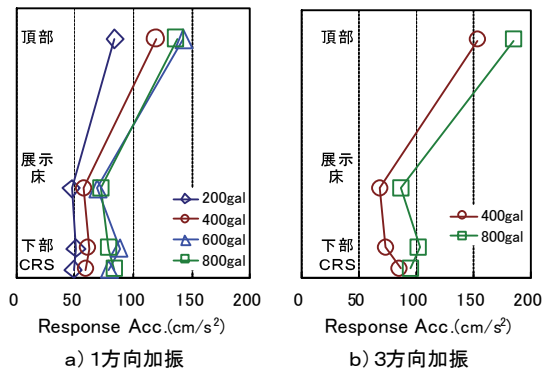


図-18 最大応答加速度分布

7. あとがき

今回、転がり摩擦ダンパーを用いたCRS免震装置(ガルレスLC)を開発し、その免震性能を検証した。本装置は従来の粘性ダンパーを採用した機器免震と比べて、やや性能は劣るものの低床化・低コスト化が図れる。

一連の免震装置の開発(ガルレスシリーズ)により、選択の幅が広がり、顧客の要望に対応できるようになった。今後は摩擦ダンパーの改良や装置の軽量化などに取り組む予定である。なお、本研究開発はオイレス工業株式会社と共同で行った。

謝辞

本研究にあたり、東京大学生産技術研究所・藤田隆史教授にご指導賜り、ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 山田高之他、「コイルレールシステム(CRS)を用いた免震装置の開発」、奥村組技術研究年報、No. 24、1998、pp. 85~90