

ロッキング制震構造システムの開発

Development of Seismic Response Controlled Structural System on Rocking

金川 基* 高橋 孝二**
 Motoi Kanagawa Koji Takahashi
 高井 茂光** 飯塚 信一**
 Shigemitsu Takai Shinichi Iizuka
 鹿籠 泰幸*
 Yasuyuki Shikamori

要 約

地震時に建築物脚部がロッキングすることによる地震応答への影響を検討した研究は数多くある。耐震設計上では保有耐力がロッキングによって決まる場合があり、地震入力が減少するともいえる。したがって、ロッキング現象は地震被害の低減に効果がある。このような観点から近年、上部構造脚部と基礎部を積極的に切り離してロッキングを許容する、またその間にデバイスを組み込んだシステムの検討がなされてきた。

本論は、ロッキングを許容する構造とすることによって上部構造への地震入力を低減し、脚部上下方向に設置したダンパーによってロッキングによる上部構造の回転変形およびもどりの着地時における衝撃力が過大とならないようにする制震構造システムについて、ダンパーの単体実験、振動台による挙動確認実験およびシミュレーション解析によって検討したものである。なお、この技術は、戸田建設(株)との共同開発であり、平成 19 年 3 月に(財)ベターリビングの建築技術性能証明を取得している。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 振動台実験
- § 3. シミュレーション解析
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

地震時に建築物脚部が浮き上がることによる地震応答への影響を検討した研究は数多くある^{例えは1)}。耐震設計上では保有耐力がロッキングによって決まる場合があり、地震入力が減少するともいえる^{例えは2)}。したがって、ロッキング現象は地震被害の低減に効果がある³⁾。このような観点から近年、上部構造脚部と基礎部を積極的に切り離してロッキングを許容する⁴⁾、またその間にデバイスを組み込んだシステムの検討がなされてきた⁵⁾。

本論は、ロッキングを許容する構造とすることによって上部構造への地震入力を低減し、脚部上下方向に設置

したダンパーによってロッキングによる上部構造の回転変形および戻りの着地時における衝撃力が過大とならないようにする制震構造システムについて、実験と解析によって検討したものである。

§ 2. 振動台実験

2-1 実験概要

(1) 実験対象

振動台実験の対象は、表一1に示すロッキングを許容した場合、それにダンパーを設置した場合、および比較のための基礎固定のモデルである。付加ダンパーとしては後に示す粘弾性ダンパーと摩擦ダンパーとした。振動台入力には、表一1の2種類の波の振幅を修正して用いた。また、JMA Kobe (150 gal) の水平・上下同時入力実験も行った。

表一1 実験パラメータ

脚部状態	ロッキングモデル、ダンパー付加、基礎固定
付加ダンパー	粘弾性、摩擦
入力地震動	BCJ L2, JMA Kobe

* 技術研究所技術研究部建築技術研究課

**建築設計部構造課

(2) 試験体・支承部とダンパー

試験体概要を図一に示す。試験体は、想定建物の1/10縮小模型とし、加振方向が純ラーメンの800mmスパンで高さが4,000mmの鉄骨造5層モデルである。全重量は184kN、基礎固定時の1次固有振動数は3.4Hzである。

ロッキングモデルの脚部は、試験体基礎梁下4隅の脚部に突起を設けて支承部に自由設置し、突起の周囲に支承部からの鋼製押さえブロックを配し、ロッキングが自由で上部からのせん断力が伝達できる仕組みとした。

ダンパーは、予備解析に基づいてレベル2入力程度のロッキング時に自重の10%程度の引っ張り抵抗力を持つように計画した。

ダンパー詳細を図二に示す。粘弾性ダンパーは160mm×125mm×10mmのジエン系の粘弾性体と鋼板とを交互に4層重ねている。摩擦ダンパーは1枚の鋼板を摩擦材を介して2枚の鋼板ではさむ2面接合とし、M22高力ボルトで締め付けた。摩擦材として100mm×30mm×8mmのPTFE板を片面2枚、計4枚用いた。

これらのダンパーは、図一に示すように加振直交方向の基礎梁下に4基配置した。

(3) 計測概要

計測は、脚部下の分力計によって鉛直力およびせん断

力を、加速度計によって各階の水平加速度、1階、屋上階の上下加速度を、レーザー変位計によって脚部の浮き上がり変位、全層間変位を、歪ゲージによって1層柱の軸力とせん断力を測定した。

2-2 ダンパー性能試験

実験に使用する粘弾性ダンパーおよび摩擦ダンパーの性能を確認するためにサーボパルサーにより正弦波変位振幅を与えて加振を行った。

粘弾性ダンパーの場合、入力正弦波の振幅は5mm、10mmの2種類とし、加振振動数は0.2Hz、1.0Hzとした。荷重変形関係例を図三に、各特性値を表二にそれぞれ示す。等価減衰定数はいずれも0.25程度であった。

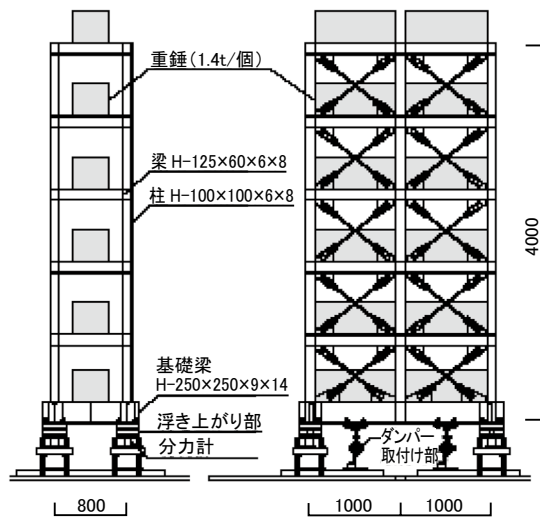
摩擦ダンパー実験での高力ボルトの締め付けトルクは140N・m、270N・m、410N・mの3種類とし、入力正弦波の振幅は10mm、加振振動数は0.5Hzとした。荷重変形関係例を図四に、累積変形-荷重関係例を図五にそれぞれ示す。振動台実験時には高力ボルトの初期導入軸力は締め付けトルクによって管理し、270N・mとした。また、実験結果から求まる摩擦係数は約0.06であった。トルクが特に大きくない場合には、摩擦耐力の繰り返し変化は小さい。

2-3 実験結果

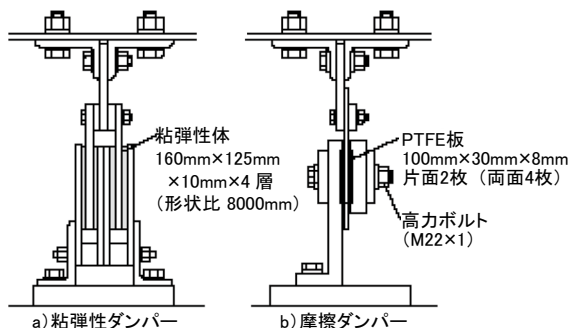
(1) ロッキングモデル

ロッキングモデルでは、BCJ L2とJMA Kobeともに100gal入力時には、脚部に浮き上がりが生じた。ロッキングモデルにBCJ L2原波を入力した場合の浮き上がり量と鉛直反力、第3層目の層間変位の時刻歴の一部を図六に示す。鉛直反力は脚部にある片側2つの分力計から得られた鉛直方向荷重の合計値で圧縮力を負としている。

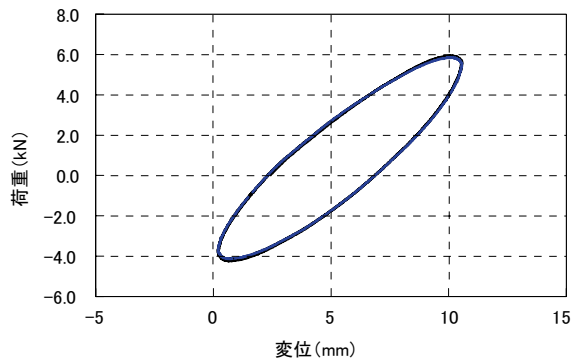
また、基礎固定モデルの応答は入力レベルに比例すると思われるため、100gal入力時の応答結果を3.55倍したものを併せて示している。7.3秒までは浮き上りを生じていないので、2ケースの鉛直反力・層間変位は一致している。



図一 試験体概要



図二 ダンパー詳細



図三 粘弾性ダンパーの荷重変形関係 (0.2 Hz, 5 mm, 20度)

それ以後では浮き上がりを生じるため、基礎固定モデルの鉛直反力・層間変位は増大していくのに対し、ロッキングモデルの応答は抑えられている。以後の基礎固定

モデル結果は50, 100 gal 入力結果から外挿したものである。入力最大加速度と鉛直反力最大値および第1層最大層せん断力との関係を図-7と図-8に示す。基礎固定モデルでは入力加速度が増大するにつれて応力が増大する。一方、ロッキングモデルでは浮き上がり後、入力加速度が増大しても応力はほとんど増加せず、頭打ちの傾向を示す。鉛直反力については、静的な場合と異なって自重を上回る圧縮力が生じており、いわゆる衝撃力の影響である。各層の最大層間変形角を図-9に示す。基礎固定モデルの355 galの結果は100 galの結果を比例倍したものである。ロッキングモデルでは100 gal 入力でも基礎固定モデルの応答を下回っており、入力が増大しても層間変形角はほとんど大きくなる。これは浮き上がりが上部構造の損傷を抑制することを示している。

表-2 粘弾性ダンパー実験結果

	5 mm		10 mm
	0.2 Hz	1.0 Hz	0.2 Hz
等価剛性 K_{eq} (N/mm)	887	1313	686
貯蔵せん断弾性率 G' (MPa)	0.222	0.328	0.171
等価減衰係数 C_{eq} (N·s/mm)	357.3	99.4	304.2
等価減衰定数 h_{eq}	0.253	0.257	0.279

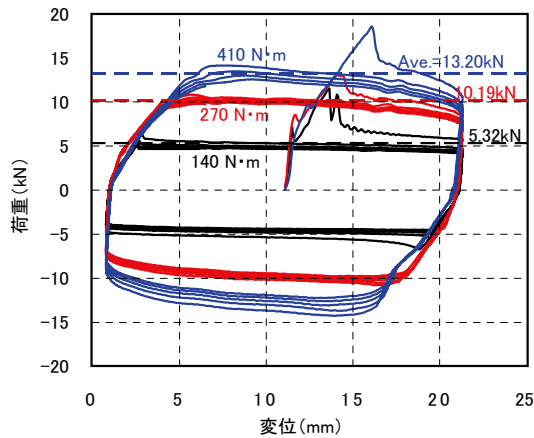


図-4 摩擦ダンパーの荷重変形関係例

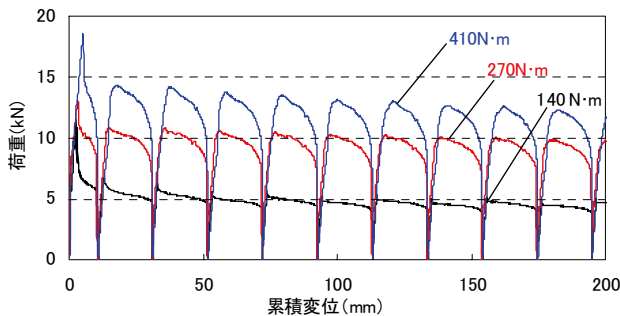


図-5 摩擦ダンパーの荷重-累積変位関係

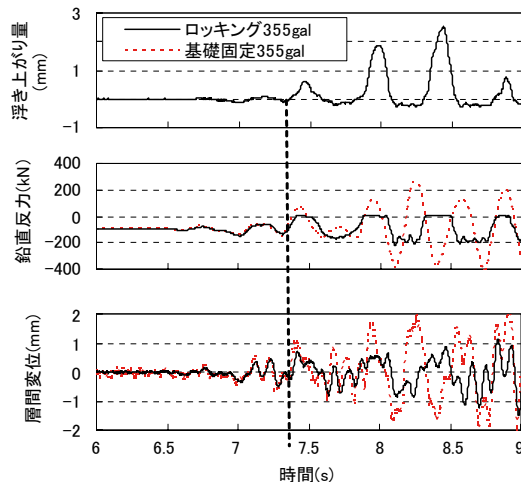


図-6 BCJ L2 入力時の応答時刻歴波形

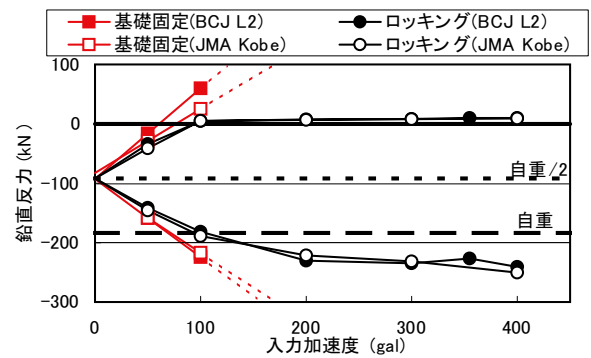


図-7 入力加速度と鉛直反力

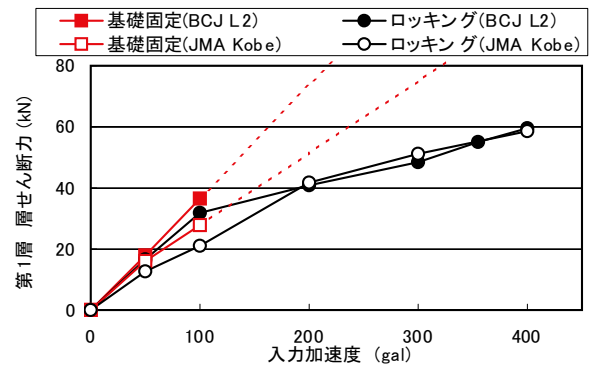


図-8 第1層最大層せん断力

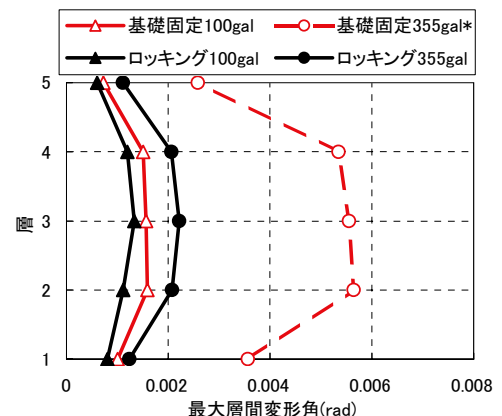


図-9 最大層間変形角 (BCJ L2)

(2) ダンパー付加モデル

入力最大加速度と最大浮き上がり量および頂部水平変位との関係を図-10と図-11に示す。頂部水平変位は各層層間変位と基礎浮き上がりによる頂部水平変位を合計した値である。最大300gal以上入力のロッキングモデルの浮き上がり量は、同じ最大入力ではBCJ L2に比べてJMA Kobeの方が小さい。ダンパー付加による浮き上がり量とダンパー無しのモデルとの差がJMA Kobe入力の場合に小さいのは、ダンパー無しでの浮き上がり量がやや小さいこと、図-13に示す浮き上がり時刻歴波形から分かるように入力がインパルス状であることと対応した応答波形の特徴があることによる。また、頂部水平変位では、ダンパー付加により基礎部回転が小さくなって、基礎固定モデルと同等の変位となる効果が表れている。

入力最大加速度と1階柱圧縮軸力の関係を図-12に示す。ロッキングモデルの場合と比較して、ダンパーが引張力を負担しているにも関わらず、ダンパー付加の場合も柱軸力は同様に頭打ちとなっている。

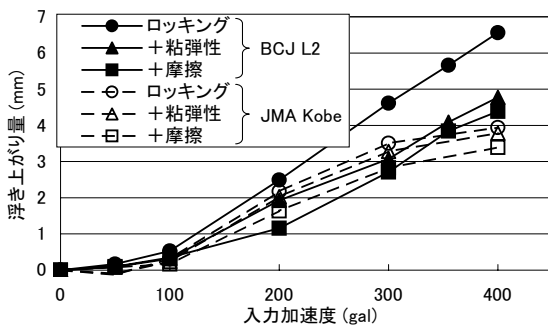


図-10 最大浮き上がり量

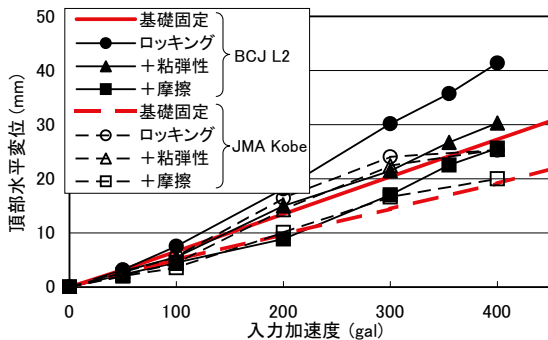


図-11 頂部水平変位

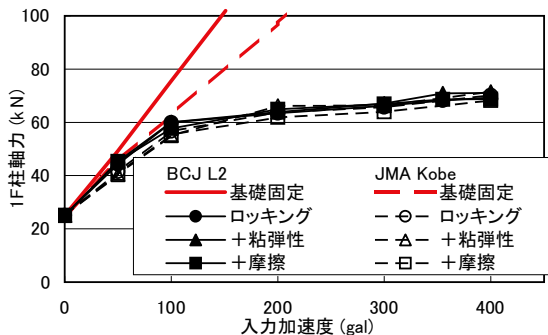


図-12 1階柱圧縮軸力(隅柱1本あたり)

§3. シミュレーション解析

3-1 解析モデル

振動実験結果に対するロッキングを考慮したシミュレーション解析を行い、実験結果との比較検証を行った。解析モデルを図-14に示す。上部構造は線形梁要素とし、基礎部の水平変位は拘束した。鉛直ばねは、試験結果から圧縮側剛性を設定し、引張側剛性は圧縮側剛性の1/10,000とした非線形ばね要素でモデル化した。上部構造の減衰は剛性比例型とし、試験結果より1次固有周期に対し $\eta=5\%$ とした。ダンパーは、図-15に示すように粘弾性ダンパーは線形ばねとダッシュポットを並列に配置、摩擦ダンパーはバイリニア型でモデル化し、それぞれ鉛直ばねと並列に配置した。ダンパーに関する諸係数は性能試験より得られた値を用いた。

3-2 解析ケース

解析ケースは表-3に示すように、実験と同じロッキングモデル、粘弾性、または摩擦ダンパー付加モデルとした。また、JMA Kobe 150gal入力では、水平・上下同時入力による解析も行った。

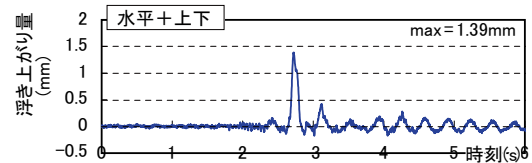
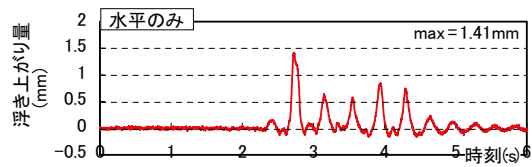


図-13 浮き上がり時刻歴 (JMA Kobe)

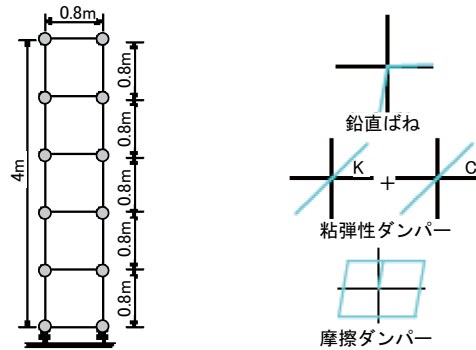


図-14 解析モデル

図-15 復元力特性

表-3 解析ケース

No.	ダンパー	入力波	上下動
1	なし	BCJ L2	—
2	粘弾性	BCJ L2	—
3	摩擦	BCJ L2	—
4	なし	JMA Kobe	—
5	なし	JMA Kobe	○

3-3 解析結果

浮き上がり量と鉛直反力の時刻歴を実験結果と比較して、それぞれ図-16と図-17に示す。ダンパーなしモデルでは11~14秒付近において実験値と解析値で多少異なるものの、浮き上がり量、鉛直反力とも全体的に良好な対応を示していることがわかる。

ダンパー付加モデルの解析では、ダンパーなしモデルに比較して浮き上がり量の最大値(9秒付近)が実験値と同様に抑えられている。また、加振初期(2~4秒)でダンパーなしモデルと似た挙動を示すことも、実験値と概ね対応している。

鉛直反力は、浮き上がり時に負担自重の2倍程度をやや上回る反力となることや、ダンパーを付加することによって、ダンパーなしモデルの浮き上がり着地時の衝撃的な反力増大が緩和されることが解析でも表されている。

BCJ L2 入力による最大加速度と浮き上がり量および第1層せん断力との関係を図-18に示す。解析結果は、実験結果をやや下回るものの、前述の100gal入力で浮き上がりが生じること、ダンパー付加モデルでもダンパーなしモデルと同程度に層せん断力が抑えられることなど、解析結果は実験結果と概ね対応している。さらに、600gal入力の解析結果より、ダンパーを付加することによりロッキングが大きく抑制されることが推定される。

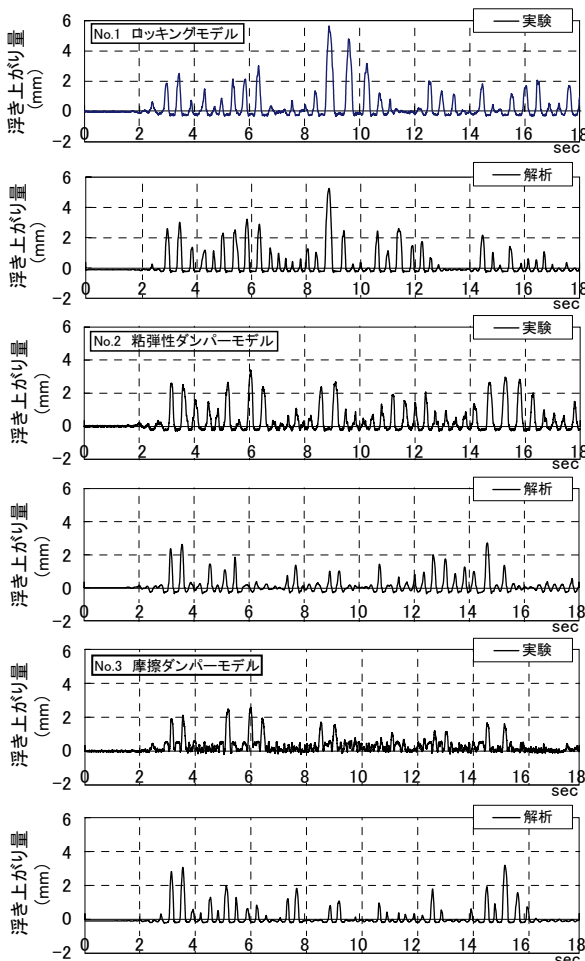


図-16 浮き上がり量時刻歴 (BCJ L2 355 gal)

上下同時入力の影響を確認した浮き上がり量時刻歴を図-19に示す。最大値や、それ以降で上下動を同時入力した方が浮き上がり量が小さくなることなども、解析で良くシミュレートされている。

§4. おわりに

ロッキングを許容する構造とすることによって上部構造への地震入力を低減し、脚部上下方向に設置したダンパーによって浮き上がりによる上部構造の回転変形およ

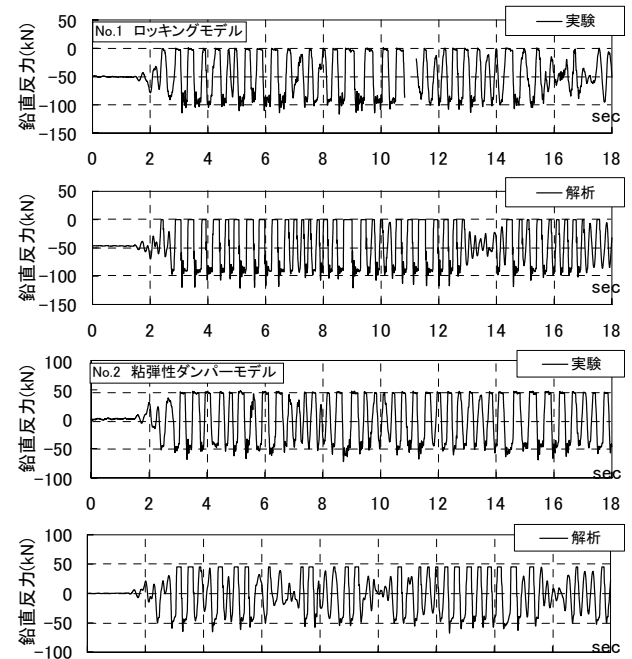


図-17 鉛直反力時刻歴 (BCJ L2 355 gal)

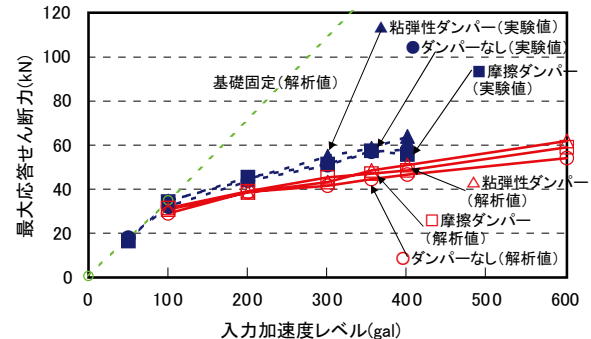
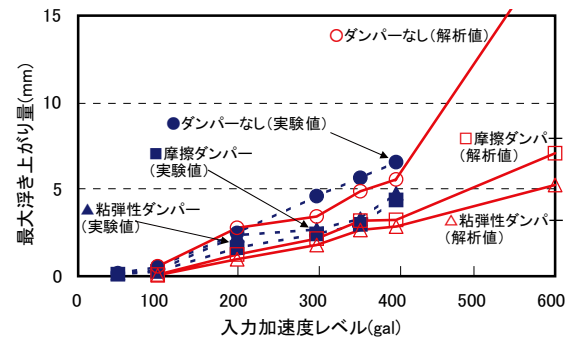
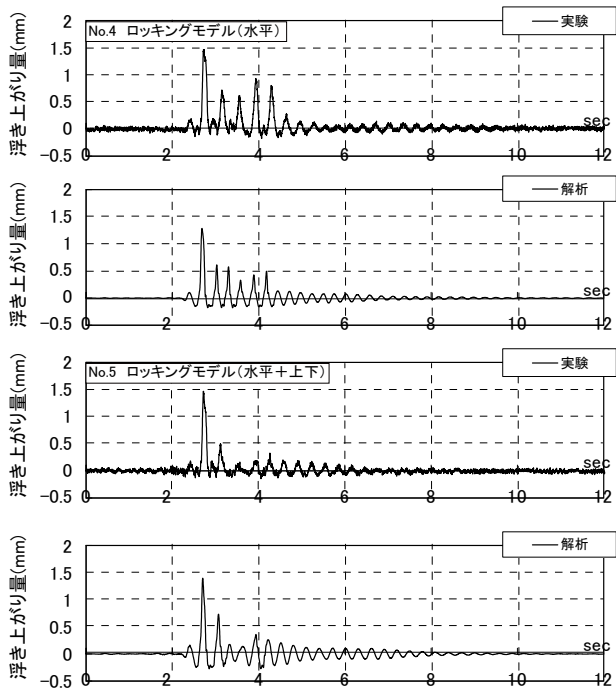


図-18 最大応答値の比較 (BCJ L2 波)



図一十九 水平・上下同時入力による浮き上がり量時刻歴の比較 (JMA Kobe 150 gal)

び戻りの着地時における衝撃力が過大とならないようにする制震構造システムについて、ダンパーの単体実験、振動台による挙動確認実験およびシミュレーション解析から、平成 19 年 3 月に(財)ベターリビングの建築技術性能証明を取得している。最後に、本論で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 基礎部を固定した場合に比べて、基礎部が浮き上がるロッキングモデルでは上部構造への入力加速度が低減された。

- (2) 基礎部にダンパーを付加することによって、特に継続時間が長い BCJ L2 入力では浮き上がり量と頂部水平変位をダンパー無しの場合より抑えられた。
- (3) 上下動入力による影響はほとんど見られなかった。
- (4) ロッキングモデル、ダンパー付加モデル、上下動同時入力モデルとも、実験結果と解析結果は概ね良好な対応を示した。
- (5) ダンパーを付加することにより、浮き上がり量が抑えられること、および、浮き上がり着地時の反力増大が緩和されることなどが、解析によっても確認された。

謝辞：本研究は、戸田建設(株)との共同研究にて実施され、本論作成にあたり、多大なるご協力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) M. Izumi, I. Sakamoto, O. Chiba et al.: Rocking Vibration Considering Up-lift and Yield of Supporting Soil, 4th Japan, Earthquake Engineering Symposium, 1975
- 2) 千葉, 藤堂他: 連層耐震壁付鉄筋コンクリート造中層建築物の地震応答特性の検討例, 電子計算機利用シンポジウム, 1984
- 3) 林: 直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 485 号, 1996
- 4) 木村, 岩下他: 建物の浮き上がり許容による制震構造の開発 (その 1~その 6), 2001 年大会梗概集
- 5) 緑川, 小豆畑他: ベースプレート降伏型ロッキングシステムの振動台実験 (その 1, 2), 2002 年大会梗概集