加速度計を用いた実建造物の性能曲線算出におけるロッキング除去方法 に関する研究

STUDY ON A NEW METHOD TO ELIMINATE ROCKING BEHAVIOR FROM A PERFORMANCE CURVE OF REAL STRUCTURES WITH ACCELERATION SENSORS

楠 浩一*, 山下美帆**, 服部勇樹**, 日向大樹***, 田才 晃****
Koichi KUSUNOKI, Miho YAMASHITA, Yuki HATTORI,
Daiki HINATA and Akira TASAI

Rocking behavior can affect the performance curve of structure derived by structural monitoring with accelerometers. The performance curve may show nonlinear behavior if rocking behavior shows nonlinearity due to lift-up. In order to investigate a method to eliminate rocking effect from derived performance curve, a series of shaking table test with three-story steel frame with rocking device was conducted. The test results showed that rocking behavior can be measured by accelerometers and the effect can be eliminated from the measured performance curve.

Keywords : Quick Inspection, Measurement of Acceleration, Rocking Behavior, Performance Curve, Wavelet Transformation, Shaking Table Test

応急危険度判定, 加速度計測, ロッキング挙動, 性能曲線, ウェーブレット変換, 振動台実験

1. はじめに

地震を受けた建造物に対する新しい被災度判定手法の確立を目的に、実建造物に設置した加速度計の地震時の計測記録から建造物の性能曲線を算出する方法について筆者等は検討してきた^{1)~17)}。ここで、性能曲線とは建造物の等価荷重—等価応答変位関係の骨格曲線を指し、荷重は絶対加速度（以下、代表加速度）、変位は基礎からの相対変位（以下、代表変位）とする。本手法の特徴はこの相対変位を加速度の2階積分により求める点にある。

近年では加速度計の小型軽量化が進んでおり、本手法の確立によって平常時の建物の使用性は損ねることなく、地震時には建物の被災度を性能曲線から迅速かつ定量的に判定することが可能となれば、より適切な避難誘導や救助活動等にも大いに貢献が期待できる。これまで、観測記録から基礎固定として考えた場合の性能曲線の作成方法^{例えば16)}を示し、多質点系建物に対する算出方法¹⁷⁾を示してきた。

提案する建物の被災度判定方法を検証するため、筆者等は 2008

年より横浜国立大学建築学棟（SRC 造、地上9階建てとして計算）を対象に、建物の各階に加速度計を配して、観測を続けている¹³⁾。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震にて横浜国立大学建築学棟で観測された加速度記録から算出した建物全体の転倒モーメント—回転角関係（以下 $M_t - \theta$ 関係）を図1に示す。ここで M_t は、各階に設置した加速度計の水平方向計測値に各階重量と建物基部からの高さをかけたものを全階にわたって加えたものであり、 θ は建物基部に設置した3台の加速度計の鉛直方向計測値を2階積分¹⁶⁾する事により算出した鉛直変位と加速度計間の距離を用いて算出した。 $M_t - \theta$ 関係に有意な相関がみられたことから、ロッキング挙動が生じていたと考えられる。

ロッキング挙動自体は、これまでも多くの研究なされている。最近では例えば、文献18)~20)において緑川らは、積極的に建物の脚部のベースプレートを降伏させることで建物を浮き上がらせ、ロッキング挙動を発生させることにより、地震の入力エネルギーを位置

* 東京大学地震研究所 准教授・博士(工学)

** 清水建設設計本部 修士(工学)

*** 鹿島建設技術研究所 修士(工学)

**** 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院
教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng.

Dept. of Design, Shimizu Corporation, M. Eng.

Kajima Technical Research Institute, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Urban Innovation, Graduate School of Yokohama National University, Dr. Eng.

エネルギーに変換し、上部構造の歪みエネルギー、つまり損傷を低減する機構の研究を実施し、その有効性を確認している。また、文献 21)において和田等は、脚部にロッキングを再現する弾性バネを配し、水平変形だけを拘束し、回転および上下方向の変位は拘束しない装置を脚部に組み込んだ 2 層フレームの振動台実験を実施し、浮き上がり挙動の基礎的な研究を実施している。

一方、実建物を対象に、ロッキング挙動の計測を試みた例としては、文献 22)が挙げられる。この文献で生部等は、名古屋市内にある 4 層の鉄筋コンクリート造校舎に、各階 7 台、建物全体で 28 台の加速度計を配し、その挙動を実測している。2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾を震源とする地震 (M6.5) を含む 4 つの地震記録に対して、観測から算出したロッキング剛性と、杭の計算軸剛性から求めた計算ロッキング剛性を比較し、ほぼ同じ値となったことを示しており、ロッキング挙動計測の可能性が示されたと言える。なお、文献 22)で用いられた加速度計は、本論文で使用する加速度計と同一モデルである。

ロッキング挙動が生じた場合、計測した水平方向の加速度の 2 階積分により算出する変形には、上部構造の変形とロッキングによる回転角 (以下、ロッキング回転角) に起因する変位 (以下、ロッキング変位) が含まれる。特にロッキングにより基礎の浮き上がりが生じた場合、上部構造に損傷がなくても性能曲線には浮き上がりによる剛性低下が生じる。それにより、建物各階に損傷が生じたと誤判断する可能性がある。

そこで本論文では、加速度計測値から建物脚部のロッキング回転角を算出し、性能曲線上のロッキング変位を除去することで、上部構造の損傷のみを評価する性能曲線の算出方法を検討した。具体的には、柱脚部に設置したバネによりロッキング挙動を生じさせる試験体の振動台実験を行い、その計測値を用いて、性能曲線からロッキング変位を除去する手法の有効性を検討した。なお、スウェイ変形については、建物の水平変位を建物基部の変形との相対変位として求めるため、自動的に除去される。

図 1 $M_t - \theta$ 関係の一例

2. 試験体概要

試験体はいずれも、鉄の錘 (約 18.5kg) 6 個と幅 100mm、厚さ 6mm の鋼板ばねをボルト接合によって組み合わせた 3 層 1 スパンの鉄骨平面フレームである。1 層の柱材については、強度を制御するため、柱脚側の断面の幅を 50mm に削除した。建物基部には、ロ

ッキング挙動を簡易的に再現するため、基部中央にピン支点を設置し、ロッキング剛性を調整するために、柱下に鋼製バネを配した。試験体の一例 (S-BN 試験体) を図 2 に示す。鋼板の鋼種はすべて SS400 材であり、材料試験により得られた材料特性を表 1 に示す。実験では製作の都合上、2 種類の鋼材を用いた。

試験体は 2・3 層をブレースにより固定することで、1 層の柱崩壊形に至るように計画している。転倒モーメントを大きくするために 3 層としているが、1 層に変形が集中し、ほぼ 1 自由度系の挙動を示すと考えている。

図 2 試験体立面図 (S-BN 試験体) 単位 mm

表 1 1 階柱部材の材料特性

部材区別	材種	ヤング係数 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
部材 A	SS400	205,000	326	430
部材 B			341	460

試験体名の番号は入力地震波と柱脚部の浮き上がりの有無による区別である。各試験体と 1 質点系モデルの関係性を図 3 に示す。試験体の脚部の条件は、基礎を固定としてロッキングを生じない基礎固定試験体 (同図 a)。以降、S-F)、脚部でロッキングを生じる基礎回転試験体 (同図 b)。以降、S-S および S-N)、および脚部でロッキングは生じるが、1 層にもブレースを入れて建物は変形が生じない基礎回転ブレース付き試験体 (同図 c)。以降、S-BS および S-BN) の 3 種類である。

更に柱脚部はバネの初期縮み量を変えることでばねに浮き上がりの有無を変化させた。以降、「浮き上がりバネ」と呼ぶバネ配置では、振動時の脚部の回転により一定以上の引張側変形が生じると、バネと試験体脚部が離間するように、バネ上端は試験体脚部と緊結せず、かつ小さな初期縮みを与えたものである。

また、以降「弾性バネ」と呼ぶバネ配置では、振動時でもバネの浮き上がりが生じないように加振前の初期縮み量を大きく設定している。また固定時には、バネを取り外し、同じ個所に固定用の鉄骨部材を入れた。

脚部に配するバネは、硬いバネと軟らかいバネの2種類を用意した。脚部の回転角は、実際に建物のモニタリングで使用する加速度計を用いて計測する。その為、試験体の縮尺にかかわらず、実物と同程度の鉛直変位が発生しないと計測誤差の影響が縮尺により拡大することとなる。そこで、図1に示した、2011年東北地方太平洋沖地震の際に横浜国立大学建築学棟で計測された建物基部での鉛直変位の最大値（約2mm程度）を参考に、本実験でも同程度の鉛直変位が発生するように、あらかじめ数値解析により検討してバネ定数を決定した。このバネを以降は硬いバネ（SH）と呼ぶ。

図3 各試験体と1質点系モデルの関係

表2 バネの性能と初期縮み

名称	自由高さ (mm)	バネ定数 N/mm	初期縮み (mm)	
			浮き上がりバネ	弾性バネ
SH-1	236.0	675	1.0	7.0
SH-2	235.5	675	0.5	6.5
SS-1	240.5	110.5	5.5	24.5
SS-2	240.5	110.5	5.5	24.5

また、ロッキング変形が大きい場合を検討するため、弾性時のロッキングによる水平変位が、建物自体の水平変位とほぼ等しくなるよう、あらかじめ数値解析により検討してバネ定数を決定したバネを別に用意した。このバネは以降、軟らかいバネ（SS）と呼ぶ。それぞれのバネ性能と初期縮み量を表2に示す。

3. 計測概要

計測は、各層の加速度、変位の他に、ひずみゲージにより1層柱の上下端の両面のひずみを計測した。

加速度計測には、IT 強震計（分解能 24bit、有効最小計測加速度 0.2gal 以下）を用いた。サンプリング周波数は 100Hz である。計測は、モニタリングシステムを用いているため、振動台の計測システムとは独立に、24 時間計測を実施した。計測位置は、図2に示したように、各層梁中央、ピン上部、1 層柱脚部、ピン下部、および振動台上である。

各層の変形は、インダクタンス式変位計を用いて、各層のおもり、振動台上、および1 層脚部の変位を振動台外から計測した。変位の計測は、ひずみの計測とともに振動台の計測システムを用いて行った。サンプリング周波数は 200Hz であり、入力信号が振動台に送られている時間帯について計測データが保存される。

また、ロッキング試験体では、ロッキング回転角を計測するため、鋼製ばね部分で、上下の鋼板間の変位をレーザー変位計により計測した。このレーザー変位計による計測も振動台の計測システムにより行われたため、サンプリング周波数は 200Hz であり、入力信号が振動台に送られている時間帯について計測データが保存される。

4. 入力地震動

入力波は、告示波 wg60（以下 wg60 波）、1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された波形の NS 成分（以下 Kobe 波）、2011 年 3 月 11 日に K-net 宮城仙台（MYG013 サイト）で観測された地震波の NS 成分（以下 MYG013 波）の3 種類の地震波を基とした。ここで、告示波とは、図4に示すような周波数特性を持ち、時刻歴は 120 秒間で、ランダム位相を用い、図5に示すような包絡関数を使用して算出した。ここで、包絡関数 $Env(t)$ は、式(1)とした。

$$Env(t) = \begin{cases} (t/5)^2 & 0 \leq t \leq 5 \\ 1.0 & 5 \leq t \leq 35 \\ e^{\frac{\ln 0.1}{85}(t-35)} & 35 \leq t \leq 120 \end{cases} \quad \text{式(1)}$$

更に振動台に入力するため、各入力波に対して、0.1Hz のハイパスフィルターを施した。また、モニタリングシステムと振動台の計測システムのデータの同期を取るため、各入力波の先頭に 200gal のパルスを挿入し、その後 5 秒間または 2.5 秒間の 0 信号の後に、地震動を入力した。各入力波の 100% 倍率での加速度応答スペクトルを図6に示す。入力倍率は、各試験体に対する各入力波で、予備計算から弾性応答となる入力レベルと、塑性化が予想される入力レベルの2つのレベルを、本震と余震を模擬して各2 回ずつ入力した。また、各入力の前後で、試験体の周波数特性を把握するために、ホワイトノイズによるランダム波加振を実施した。ランダム波は、RMS を 40gal、周波数帯を 0.5~20Hz に設定した。

図4 wg60の周波数特性

図5 wg60の時刻歴波形と包絡関数

図6 各入力波 100%倍率での加速度応答スペクトル

加振一覧を表3に示す。表中のS-Bシリーズは1層にもプレー

スを配した試験体シリーズであり、塑性化はしていない。また、想定した塑性化するレベルの入力で塑性化していない場合は、レベルを増加させて再度入力している。

5. 振動台実験結果

5.1 試験体の初期周期

各試験体で、加振最初に実施したランダム加振時の、試験体ピン下の加速度計（図2中ITK09）から試験体上部（図2中ITK06）への伝達関数から算出した各周期の平均値は、S-Fで0.91秒、S-Sで0.98秒（浮き上がりバネ）および0.95秒（弾性バネ）、S-Nで1.11秒（浮き上がりバネ）および1.11秒（弾性バネ）であった。基礎固定のS-Fに比べて、硬いバネを用いたS-Sでは、若干周期が長くなっているが、軟らかいバネを用いたS-Nでは大きく周期が延びている。また、1層にもブレースを配したS-Bシリーズでは、S-BSで0.30秒（浮き上がりバネ）および0.26秒（弾性バネ）、S-BNで0.65秒（浮き上がりバネ）および0.64秒（弾性バネ）であった。上層部が剛に近づいているため、バネの剛性の比率($675/110.5 = 6.11$)より、周期がちょうど $\sqrt{6.11} = 2.47$ 倍となっていることが分かる。

5.2 ロッキング回転角

ロッキング回転角は、試験体脚部に配置した、図2中のITK07およびITK08で観測された鉛直方向の加速度を2階積分して算出した鉛直方向変位の差分を、2つの加速度計の間隔（150cm）で除すことにより求めた。2階積分では、文献16)を参考に、Wavelet分解を用いて行った。5.1節に示した試験体の卓越周期から、Wavelet分解後の4～7 rank(Nyquist振動数3.125～0.39063Hz)を主要成分とし、他の成分は除去した。ただし、S-BSシリーズは、他の試験体と

表3 加振一覧

試験体	柱脚の状態	Spring N/mm	Input	amplification factor for each input						Steel Type
				1	2	3	4	5	6	
S-F01	固定	-	Wg60	15%	60%	60%				A
S-F02			Kobe	10%	15%	45%	45%			
S-F03			MYG013	5%	10%	25%	25%	30%	30%	
S-BS01	浮き上がりバネ 初期縮み1.0mmおよび0.5mm	675.0	Wg60	15%						
S-S01				15%	60%	60%				
S-BS02			Kobe	15%						
S-S02				15%	45%	45%				
S-BS04	弾性バネ 初期縮み7.0mmおよび6.5mm	675.0	Wg60	15%						
S-S04				15%	60%	60%				
S-BS05			Kobe	15%						
S-S05				15%	45%	45%				
S-BN01	浮き上がりバネ 初期縮み5.5mm	110.5	Wg60	15%	25%					
S-N01				15%	25%	60%	50%			
S-BN02			Kobe	10%	15%					
S-N02				10%	15%	45%	50%	50%		
S-BN03			MYG013	5%	10%					
S-N03				5%	10%	30%	40%	50%	50%	
S-BN04	弾性バネ 初期縮み24.5mm	110.5	Wg60	15%	25%					B
S-N04				15%	25%	50%	50%	60%	60%	
S-BN05			Kobe	15%						
S-N05				15%		50%	50%			
S-BN06			MYG013	10%						
S-N06				10%	50%	50%				

比べて卓越周期が短いため、4～6 rank を主要成分とした。また、レーザー変位計による回転角は、レーザー変位計で計測された変位の差分を、レーザー変位計間の距離（105cm）で除すことにより求めた。

図 7 に、硬いバネを用いた S-S シリーズおよび S-BS シリーズでの、加速度計から求めた回転角とレーザー変位計から求めた回転角の関係を示す。なお、同図では、レーザー変位計の計測に問題が発生した S-S01～02 および S-BS04 は除外している。S-S および S-BS シリーズでは、回転角 0.0065 rad.以下（柱下東側最大鉛直変位 5.4mm、西側最大鉛直変位 0.8mm）となったことが分かる。この範囲では、鉛直加速度により求めた回転角は、およそ±15%の範囲でレーザー変位計による回転角と良好に一致した。製作の都合上、2つの SH バネの自由長さが異なったことにより、S-S および S-BS シリーズ試験体は東側に傾きやすい傾向があった。そのため、最大鉛直変位は東側に生じ、西側には僅かな鉛直変位しか生じなかった。

図 8 に、軟らかいバネを用いた S-N シリーズおよび S-BN シリーズでの、加速度計から求めた回転角とレーザー変位計から求めた回転角の関係を示す。この範囲では、鉛直加速度により求めた回転角は、およそ±5%の範囲でレーザー変位計による回転角と非常に良好に一致した。

図 7 レーザー変位計と加速度計による回転角の比較 (S-S、S-BS)

図 8 レーザー変位計と加速度計による回転角の比較 (S-N、S-BN)

5.3 性能曲線

各試験体の性能曲線は、文献 17)を参考に次のようにして求めた。すなわち、まず代表加速度 $\ddot{\Delta}$ は、2・3・R 階床梁に配した加速度計 ITK04～ITK06 の加速度計測値の主要 rank 成分のみを抽出した $\dot{x}_i$ を用いて、式(2)により求めた。

$$\ddot{\Delta} = \frac{\sum m_i \ddot{x}_i}{\sum m_i} \quad \text{式(2)}$$

同様に、代表変位 Δ は、同じく 2・3・R 階床梁に配した加速度計 ITK04～ITK06 の加速度計測値の主要 rank 成分のみを抽出した $\dot{x}_i$ を 2 階積分した変位の、建物脚部の加速度計 (ITK02) の主要 rank 成分の変位との相対値 $\dot{x}_i$ を用いて、式(3)により求める。

$$\Delta = \frac{\sum m_i \dot{x}_i}{\sum m_i} \quad \text{式(3)}$$

式(2)および式(3)から求めた $\ddot{\Delta}$ — Δ 関係で、文献 1)に従って、各ステップで正側は最大変位、負側は最小変位を更新する点を抽出し、 $\ddot{\Delta}$ — Δ 関係の骨格曲線、すなわち性能曲線を作成する。また、各ステップでの等価高さ H^* は、加速度計 ITK04～ITK06 の加速度計測値の主要 rank 成分のみを抽出した $\dot{x}_i$ および、各加速度計のピン中心からの高さ h_i 、各階質量 m_i を用いて、各ステップで式(4)を用いて計算する。

$$H^* = \frac{\sum m_i \dot{x}_i h_i}{\sum m_i \ddot{x}_i} \quad \text{式(4)}$$

また、性能曲線からロッキング成分を除去する方法は、次のようにして行った。すなわち、5.2 節で示した方法で加速度計により算出したロッキング回転角 θ に等価高さ H^* を掛け合わせた変形を代表変位に占めるロッキング成分 Δ_R とし、性能曲線で Δ の代わりに $(\Delta - \Delta_R)$ を用いることで、ロッキング成分を除去した。

結果の一例として、S-S01 60%入力 1 回目の性能曲線を図 9 に示す。5.4 節で詳細に示すが、この S-S01 では、浮き上がりバネを用いており、60%入力では引張側に浮き上がりが生じており、転倒モーメント—ロッキング回転角は非線形関係を示している。図から、硬いバネを用いた場合は、ロッキング挙動が性能曲線に与える影響は大きくなかったことが分かる。しかし、ロッキングを除去していない性能曲線の初期の傾きは、5.1 節で示した周期 0.95 秒の傾きに近く、また、除去後の性能曲線の初期の傾きは、S-F の初期周期 0.92 秒に近いことが分かる。また、図中には、基礎固定時の性能曲線 (S-F01) も併せて示している。ロッキング除去後の性能曲線は、基礎固定時の性能曲線と初期剛性、剛性低下点、剛性低下後の傾きがほぼ一致していることが分かる。

図 9 性能曲線の比較 (S-S01)

図 10 に、S-N01 60%入力の性能曲線を示す。同じく 5.4 節で詳細に示すが、S-N01 も浮き上がりバネを用いており、60%入力では引張側に浮き上がりが生じており、転倒モーメント—ロッキング回転角は非線形関係を示している。図から、軟らかいバネを用いた場合は、図 9 とは異なり、ロッキング挙動が性能曲線に与える影響が大きくなったことが分かる。また、ロッキングを除去していない性

能曲線の初期の傾きは、5.1 節で示した周期 1.11 秒の傾きとほぼ一致しており、除去後の性能曲線の初期の傾きは、S-F の初期周期 0.92 秒に近いことが分かる。また、図中には、基礎固定時の性能曲線 (S-F01) も併せて示している。S-N01 でも同様に、ロッキング除去後の性能曲線は、基礎固定時の性能曲線と初期剛性、剛性低下点、剛性低下後の傾きがほぼ一致していることが分かる。

図 10 性能曲線の比較 (S-N01)

他の試験体でも同様に、ロッキング除去後の性能曲線は、S-F シリーズの性能曲線と良好に一致した。また、図 11 に、各試験体の弾性応答レベルの入力における、最大応答点から求めた等価剛性を示す。図では、S-S および S-N シリーズではロッキング除去後の性能曲線における最大応答点から求めた等価剛性も併せて示している。図から、バネの剛性に従って、S-F シリーズ (基礎固定) より等価剛性が低下していること、およびロッキング除去後は S-S、S-N シリーズともに S-F シリーズの等価剛性とほぼ一致しており、良好にロッキングの影響が除去されていることが分かる。

図 11 最大点応答点での等価剛性の比較

5.4 転倒モーメントーロッキング回転角関係

試験体の転倒モーメントは、式(4)で求まる等価高さ H^* に、代表加速度 $\ddot{A}$ および試験体の質量 0.152ton を掛け合わせたものに、ピン中心から試験体脚部までの高さ H_0 に、基礎の加速度 $\ddot{x}_0$ および等価質量を掛け合わせたものを加えて求めた。また、ロッキング回転角は 5.2 節に示した方法により、加速度計により求めた。算出した転倒モーメントーロッキング回転角関係の一例として、図 12 に硬いバネを用いた場合の S-S01 15% 入力の場合と、図 13 に同 60% 入力の場合を示す。バネ剛性が高いため、ロッキング回転角は非常に小さいが、浮き上がりが生じていない 15% 入力では、転倒モーメントーロッキング回転角関係がほぼ線形であることが見て取れる。また、60% 入

力では、回転角 0.003rad. 程度で浮き上がりが生じ、非線形弾性挙動を示していることが見て取れる。

図 12 ロッキング回転角ー転倒モーメント関係 (S-S01 15%入力)

図 13 ロッキング回転角ー転倒モーメント関係 (S-S01 60%入力)

図 14 ロッキング回転角ー転倒モーメント関係 (S-N01 15%入力)

図 15 ロッキング回転角ー転倒モーメント関係 (S-N01 60%入力)

同様に軟らかいバネを用いた場合の例として、S-N01 15% 入力の結果を図 14 に、同 60% 入力の結果を図 15 に示す。軟らかいバネでは、ロッキング回転角が S-S01 に比べて大きくなっているが、浮き上がりが生じていない 15% 入力では、同じく転倒モーメントーロ

キング回転角関係がほぼ線形であることが見て取れる。また、60% 入力では、回転角 0.012rad.程度で浮き上がりが生じ、非線形弾性挙動を示していることが見て取れる。他の試験体でも同様に、浮き上がりによる非線形挙動も含めて、加速度記録のみから転倒モーメントロッキング回転角関係で非線形性を判断することが出来た。

6. まとめ

ロッキング挙動を有する建物の計測加速度のみから作成した性能曲線からロッキング挙動の影響を除去する方法を検討するため、3 層鋼製平面フレームを作成し、脚部にロッキング挙動を再現する機構を組み込み、振動台実験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1). 柱脚部にバネを設置したいずれの試験体でも、上下方向加速度計測値からロッキングによる回転角 θ を算出することが可能であった。
- 2). いずれの試験でもロッキングの影響を除去した後の性能曲線の弾性剛性と、柱脚固定時の性能曲線の弾性剛性はほぼ一致した。本手法により柱脚部の浮き上がりの有無によらず、ロッキングの影響を除去した性能曲線を算出することができた。
- 3). $M_t - \theta$ 関係から柱脚部の浮き上がり挙動を検出することが可能であった。性能曲線自体から柱脚部の浮き上がりが判断できない場合にも、 $M_t - \theta$ 関係から浮き上がりの有無の判定が可能であると考えられる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 基盤研究(C) (H23-H25 課題番号 23560665 研究代表者: 楠浩一) の補助を受けて実施しました。また振動台実験は、UR 都市機構都市住宅技術研究所で実施しました。実験実施において研究所から多大なる御協力を頂きました。入力波の一部には、防災科学技術研究所の K-Net の観測記録を使用しました。また、入力波の 1 つとして使用した告示波(wg60)は、独立行政法人 建築研究所 大川 出博士(当時、現 東京ソイルリサーチ) より提供を受けました。ここに記し、関係諸氏に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 楠浩一、勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法、日本建築学会構造系論文集、第 569 号、pp119-126、2003. 7
- 2) 楠浩一、勅使川原正臣、小出栄治：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 1 判定方法の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 961-962、2003
- 3) 楠浩一、勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 2 鉄骨平面フレームの振動台実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 797-798、2004
- 4) 楠浩一、勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 3 余震を含めた等価粘性減衰定数の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 949-950、2006
- 5) 松本裕史、茜絢也、楠浩一、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 4 性能曲線の精度検討法概要、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 25-26、2007
- 6) 茜絢也、松本裕史、楠浩一、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装

- 置の開発 その 5 解析結果の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 27-28、2007
- 7) 伊佐治勝大、楠浩一、松本裕史、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 6 加速度計配置についての検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 249-250、2008
 - 8) 楠浩一、松本裕史、伊佐治勝大、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 7 計測計画と性能曲線の作成方法、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 251-252、2008
 - 9) 松本裕史、楠浩一、伊佐治勝大、田才晃、田中稲子：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 8 計測記録からの性能曲線作成と応答評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 253-254、2008
 - 10) 松本裕史、楠浩一、前田礼一郎、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 9 1・2 次モードが卓越する鉄骨試験体の振動台実験 結果と検討その 1 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 703-704、2009
 - 11) 前田礼一郎、楠浩一、松本裕史、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 10 1・2 次モードが卓越する鉄骨試験体の振動台実験 結果と検討その 2 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、B-2 構造 II、pp. 705-706、2009
 - 12) 前田 礼一郎、楠浩一、伊佐治勝大、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 11 等価周期・等価粘性減衰算出方法の比較 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 175-176、2010
 - 13) 伊佐治勝大、楠浩一、前田 礼一郎、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 12 等価周期・等価粘性減衰算出結果・検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 177-178、2010
 - 14) 山下美帆、楠浩一、川村学、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 13 減衰力の計測及び復元力の算出 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 883-884、2011
 - 15) 川村学、楠浩一、山下美帆、田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 14 実大 RC 建物の振動台実験記録を用いた検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II、pp. 885-886、2011
 - 16) 川村学、楠浩一、山下美帆、服部勇樹、日向大樹、ミゲールディアス、田才晃：加速度計を用いた実建造物の性能曲線算出法に関する研究 1 質点系構造物の場合、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻 第 688 号、pp. 1061-1070、2013. 6
 - 17) 楠浩一、日向大樹、服部勇樹、田才晃：加速度計を用いた実建造物の性能曲線算出法に関する研究 多質点系構造物の場合、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻 第 699 号、pp. 613-620、2014. 5
 - 18) 緑川光正、小豆畑達哉、石原直、和田章：地震応答低減のためベースプレートに浮き上がり降伏させた鉄骨架構の動的挙動、日本建築学会構造系論文集、第 572 号、pp. 97-104、2003. 10
 - 19) 緑川光正、堀泰健、石原直、小豆畑達哉、草刈崇圭、麻里哲広：ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した鉄骨造縮小模型架構の 3 次元振動台地震応答実験、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、第 647 号、pp. 213-221、2010. 1
 - 20) 緑川光正、竹内徹、引野剛、笠井和彦、グレゴリー・ディアライン、大林優、山崎僚平、吉敷祥一：せん断パネル及び張力材を有するロッキング架構の耐震性能一汎用慣性質量装置を用いた鉄骨造ロッキング架構の震動台実験その 1一、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、第 654 号、pp. 1547-1556、2010. 8
 - 21) 和田章、山田哲、小野泰寛、小林勝巳、佐々木康人：弾性地盤上の建築構造物の地震時浮き上がり現象に関する基礎実験、日本建築学会構造系論文集、第 595 号、pp. 57-64、2005. 9
 - 22) 生部宏幸、中村聡宏、勅使川原正臣：強震観測による中層鉄筋コンクリート造校舎の振動特性の評価、東海支部研究報告集、Vol. 48、pp. 237-240、2010. 2

STUDY ON A NEW METHOD TO ELIMINATE ROCKING BEHAVIOR
FROM A PERFORMANCE CURVE OF REAL STRUCTURES
WITH ACCELERATION SENSORS

Koichi KUSUNOKI^{}, Miho YAMASHITA^{**}, Yuki HATTORI^{**},
Daiki HINATA^{***} and Akira TASAI^{****}*

^{*} Assoc. Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng.

^{**} Dept. of Design, Shimizu Corporation, M. Eng.

^{***} Kajima Technical Research Institute, M. Eng.

^{****} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Urban Innovation, Graduate School of Yokohama National University, Dr. Eng.

After a large earthquake, quick inspection of the buildings in the affected area is essential to avoid another catastrophic damages or collapse of the buildings damaged due to the main shock during an aftershock. On the other hand, it is also essential to reduce the number of refugees evacuated from their buildings that has enough seismic capacity for aftershock. According to the Japanese quick inspection method, the inspection is based on the one-by-one visual observation by engineers. Accordingly, it takes time to inspect enough number of buildings.

Authors have been developing a new residual seismic capacity evaluation system with few inexpensive accelerometers. Inertia force at each floor is calculated from the assumed mass and measured absolute acceleration. Response displacement is calculated by double integral with measured acceleration. The wavelet transform technique is applied for the integral to reduce the effect of the error contained in the measured acceleration. The residual seismic capacity of a building is evaluated with the capacity spectrum method with measured inertia force and derived displacements. Before the 2011 off the pacific coast of Tohoku Earthquake, two buildings in Yokohama National University were instrumented, and its performance curve during the earthquake was successfully measured. Moreover, rocking behavior was measured and it can affect the performance curve of the buildings.

Therefore, 3-story plain steel frame specimen with mechanical rocking system as shown in the figure was prepared and tested on the shaking table of the Urban Renaissance Agency to investigate how to subtract the effect of rocking behavior from the calculated performance curve. Second and third story has stiff steel bracing so that specimen behave as a single-degree-of-freedom system. Single pin support is located at the center of the bottom of the specimen with two springs located at both ends of the specimen to support rocking behavior. There were two different initial compressive deformation of the spring, where no initial deformation so that the spring will separate from the bottom of the specimen in the tensile direction and rocking stiffness degrade, and enough initial deformation so that the spring will never separate even in the tensile direction. One specimen for each spring condition had brace in the first story, too, to discuss the rocking behavior. One fixed support specimen was also shaken for comparison. Two different stiffness of the springs were prepared. Two 3-dimensional accelerometers were located both end of the bottom plate of the specimen to measure vertical accelerations to calculate rocking angle.

As the results, following findings were obtained:

- 1) Rocking angle was able to be obtained from the vertical accelerations measured by the accelerometers.
- 2) The performance curve of the rocking specimen of which representative displacement due to rocking agreed very well with the performance curve of the fixed specimen. The representative displacement due to rocking was calculated as the product of measured equivalent height and rocking angle.
- 3) Lift up of the specimen can be found from the measured overturning moment-rocking angle relationship.

(2014年8月20日原稿受理, 2014年10月27日採用決定)