

論文 残余耐震性能判定のための余震応答点推定の精度検証に関する実験的研究

日向 大樹*1・楠 浩一*2・服部 勇樹*1・田才 晃*3

要旨：建物各階の本震加速度計測値から、大地震後すぐに余震に対する建物の残余耐震性能を判定する装置の開発を目的とし、主として鉄筋コンクリート構造建物を対象とした検討を進めてきた。本研究では、4本の鉄筋コンクリート造柱と錘からなる1自由度系の試験体を製作し、本震および最大余震を想定した本震と同じ地震動を入力した振動台実験を実施した。本震の応答値から推定した余震応答値と、余震応答の計測値を比較し、余震応答点の推定精度について検討を行った。

キーワード：振動台実験、等価線形化法、余震応答点、応急危険度判定、ヘルスマonitoring

1. はじめに

建物の各階に安価な加速度センサーを設置し、本震後に建物の余震に対する残余耐震性能を、本震直後に自動的かつ瞬時に判定する技術の開発を進めてきた。本技術を用いれば、大地震後の避難者数の抑制や余震による2次災害の軽減が期待できる。余震に対する応答を対象に検討を行っている研究は数が少ないが、例えば西田ら^{1),2)}は本震で損傷を受けた鉄筋コンクリート柱を対象に、主に本震よりも小さい余震時の応答性状について、解析とオンライン実験を用いて検討を行っている。一方、地震後の建物の損傷状態を同定するヘルスマonitoring技術に関する研究は数多くなされている^{例えば3),4)}。しかし、その多くは建物の固有周期や層剛性を同定するに留まり、それらの値から建物の損傷状態を判断するためには、工学的判断が必要である点で実用化には至っていない。

これらに対して楠らの手法⁵⁾⁻⁸⁾は、大地震により損傷が生じた建物の評価を、余震に対する残余耐震性能として定量的に行うことができる点で新しい手法であると言える。これまで楠らの研究においては、文献5),6)で性能曲線の算出手法が提案され、加速度計測値のみから有意な性能曲線を算出できることが示された。文献7)では、本震および余震を想定した本震と同じ地震動（以降、本論文では単に余震と呼ぶ）を入力した1自由度系の解析結果から、本判定手法で用いる余震応答点の推定手法が提案された。ここで、本判定手法では、その推定された余震の応答点が予め設定された安全限界変形を下回る場合に「安全」、上回る場合に「危険」の評価を与える。

しかし、本判定手法において重要であると考えられる余震の応答点の推定精度については、これまで解析上での検討に留まり、計測値を用いた検討はなされていない。

既往の振動台実験結果は、入力地震動を漸増し建物に

徐々に損傷を与えていくものが殆どであり、この実験方法では、大きな地震動により1度で大きな損傷を受ける本来の巨大地震での建物の応答と異なる。さらに、本震入力後に余震を想定した地震動を入力した振動台実験はこれまで例が少ない。これより、既往の振動台実験結果は、巨大地震時の応答から性能曲線を作成し、余震の応答点を推定する本手法の精度検証には不向きである。

そこで、本論文では4本の鉄筋コンクリート柱と錘からなる1自由度系の試験体を製作し、本震および余震を入力とする振動台実験を実施した。本震の応答値のみから文献7)で提案された手法により推定した余震応答点と、余震応答の計測値を比較し、余震応答点の推定精度について検討を行った。

2. 判定手法概要

ここでは1.で述べた余震応答点の推定手法の概要と算出方法について述べる。詳しい検討内容については、文献7)を参照されたい。

余震応答値の推定手法には等価線形化法の考え方をを用いている。建物の等価1自由度系における荷重-変形関係に相当する代表加速度-代表変位関係である性能曲線と、建物基礎部の加速度計測値から算出される加速度応答スペクトル-変位応答スペクトル関係である要求曲線の交点として、地震により損傷が生じた建物における余震に対する応答値を推定する。判定方法の概要図を図-1に示す。ここで、要求曲線を算出するためには、減衰定数を仮定する必要がある。建物が弾性的の場合、要求曲線は地動加速度計測値と建物の内部粘性減衰定数から求めることができる(図中 Curve1)。しかし、図中(A)点で建物の剛性が大きく低下すると、建物の非線形性により生じる履歴減衰効果を更に考慮する必要がある。履歴減

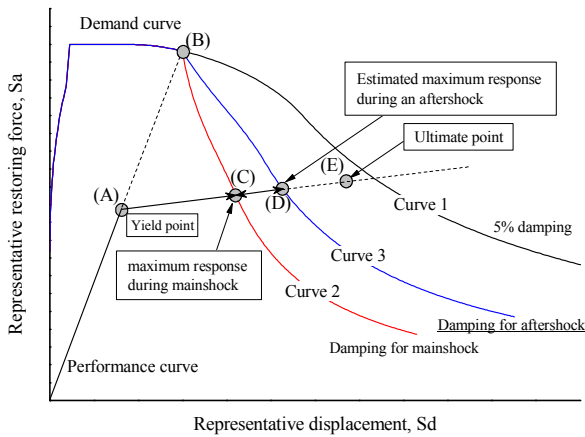
*1 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション学府 建築都市文化専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション研究院 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション研究院 教授 工博 (正会員)

衰は建物の損傷に応じて増加すると考えられるため、代表変位が大きくなるに従って履歴減衰も大きくなる。その為、要求曲線は(B)点より図中 Curve2 のように Curve1 に比べ低減される。性能曲線と履歴減衰を考慮した要求曲線の交点(図中(C)点)が本震の最大応答点と推定できる。

一方余震に関しても、本震と余震を非常に長時間の1つの地震動と考えると、同じ手法で余震での最大応答点を推定できる。本震のみの場合に比べ、本震と余震を1つの地震動と考えると、建物への入力エネルギーはその分増えるため、建物の応答変位は本震のみの場合と比べ増加する。つまり、相対的に履歴減衰効果が低下したと考えることができる(図中 Curve3)。余震での最大応答変位は、この要求曲線と性能曲線の交点となる。



図一 余震応答値推定の概要図

2.1 履歴減衰効果を考慮した要求曲線

限界耐力計算法では、国土交通省告示 1457 号第 6 号の通り、履歴減衰効果を考慮した減衰定数 h_{eq} を、塑性率 μ を用いて式(1)により推定している。ただし、履歴減衰効果の大小は構造物の復元力特性に大きく左右される。その影響を反映する補正係数として、復元力の形状に関する係数 γ が表-1 の通り定められている。

表-1 復元力の形状に関する係数 γ の一覧

0.25	部材を構成する材料及び隣接する部材との接合部が緊結された部材
0.20	その他の部材又は地震力が作用するときに座屈による耐力低下を生ずる圧縮力を負担する筋かい部材

さらに国土交通省告示 1457 号第 6 号では、減衰定数に応じた要求曲線の低減率 F_h が式(2)のように定義されている。 h は構造物の等価粘性減衰定数であり、弾性時の粘性減衰定数を h_e と仮定して式(3)により計算する。

$$h_{eq} = \gamma \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) \quad (1)$$

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10h} \quad (2)$$

$$h = h_{eq} + h_e \quad (3)$$

2.2 余震用要求曲線の算出

余震の応答点を推定するためには、2.で述べたように、余震は本震時と比べて相対的に履歴減衰効果が低下したと考え、余震時の最大応答点を推定するための要求曲線(以降、余震用要求曲線と言う。)を算出する必要がある。文献7)では、要求曲線の低減率 F_h は限界耐力計算法と同じく式(2)を用いて算出し、復元力の形状に関する係数 γ を適切に設定することで余震用要求曲線を算出する手法を提案している。余震時の応答値を安全側に評価するために提案された係数 γ は本震の場合 0.20、余震の場合 0.10 である⁷⁾。これら係数 γ は余震時の応答点を正確に推定するための値ではなく、残余耐震性能を安全側に評価するための余震における建物の最大変位を推定するための値である。さらに、係数 γ は本震により生じた残留変形を含む余震時の最大応答点を推定するものである⁷⁾。

3. 振動台実験

試験体は、鉄筋コンクリート造柱(以後、RC 柱と呼ぶ)4本とRC製の錘(33.2(kN))からなる。入力は一方向入力とした。試験体の外観を写真-1に示す。本試験体はRC柱の上下端に設置された鉄板と錘が、治具を介してボルト接合されており、RC柱のみを取り換えることができる。このRC柱は計12本作成した。つまり、試験体は3体分(SP1, SP2, SP3)であり、入力地震動のみをパラメーターとした場合には、3波の本震・余震を一連の入力とした加振が可能である。なお、錘の下部には倒壊時の安全対策として衝撃緩衝材を設置した。



写真-1 試験体外観

3.1 試験体設計

RC柱は、断面70(mm)×120(mm)であり600(mm)の内法高さを持つ。加振中に一部のRC柱に損傷が生じた場合にも、未損傷RC柱との耐力および剛性の違いにより

生じる試験体のねじれ挙動の影響を極力減らすため、加振直交方向のRC柱断面せいを大きくした。図-2にRC柱断面図を示す。RC柱の上下端には、M16ボルト用の穴を4隅に持つ12(mm)厚の鉄板を設けた。この鉄板とRC柱の主筋は溶接接合されている。RC柱のコンクリートは設計基準強度Fc24であり、早強ポルトランドセメントを用いて打設した。粗骨材の最大粒径は13(mm)である。主筋には、SD295の異形鉄筋D4を4本、帯筋にはSS400の丸鋼φ2を20(mm)ピッチで配置した。引張り鉄筋比 p_t は0.402(%)、せん断補強筋比 p_w は0.0026、加振方向の断面2次モーメント I は $3.43 \times 10^6(\text{mm}^4)$ である。コンクリートの配合表を表-2に、材料特性を表-3に示す。ただし、コンクリートの材料試験は各試験体の加振日の前日に行った結果である。

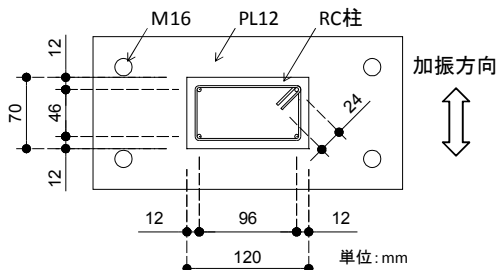


図-2 RC柱断面図

表-2 配合表

配合 (kg/m ³)	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
		354	196	886	795
水セメント比	55.30%		細骨材率	53.60%	

表-3 材料特性

(a) コンクリート

	SP1	SP2	SP3
最大応力度 (N/mm ²)	29.86	29.89	29.88
ヤング係数 (N/mm ²)	24887	25619	25595
材齢 (日)	20	24	26

(b) 鉄筋

鉄筋種	ヤング係数	降伏強度	最大応力度
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
D4	192500	348.7	514.2
φ2	174842	637.6	685.4

表-4 試験体の耐力一覧

	柱1本	試験体全体
曲げ耐力 (kN)	2.89	11.55
せん断耐力 (kN)	8.69	34.74
せん断余裕度	3.01	

RC柱1本に働く長期の軸力は、RC製の錘、上部鉄骨

治具、およびRC柱の半分の重さの合計より算出し、8.59(kN)である。また、軸力比は0.043である。

文献9)に従い算出した終局時の曲げ耐力、終局時のせん断耐力、およびせん断余裕度を表-4に示す。

3.2 計測計画

加速度計測値の収録には、横浜国立大学のPC(計測時間刻み0.01(sec))、変位計測値の収録にはUR都市機構のPC(計測時間刻み0.005(sec))を用いた。加速度計は株式会社ALABのITK-002(加速度分解能0.01(gal))、変位計は株式会社キーエンスのレーザー変位計(LB-300)(測定範囲±150(mm))である。加速度計および変位計の計測箇所を、試験体の立面図および平面図にて図-3、図-4に示す。なお、本研究で使用した相対変位は、試験体両側面2点における錘の基礎に対する相対変位の平均値である。加振の際には、両PCの計測値の同期を行うために、各加振前に100(gal)のパルスを入力した。

なお、本論文で検討対象としている鉄筋コンクリート造試験体は1自由度系であるため、性能曲線に用いる代表加速度は試験体上の計測加速度値、代表変位は試験体の基礎に対する計測相対変位とする。さらに、性能曲線は、代表加速度-代表変位関係の履歴曲線において、振動中のそれまでの正負最大変位を更新する点を逐次結ぶ曲線とした。

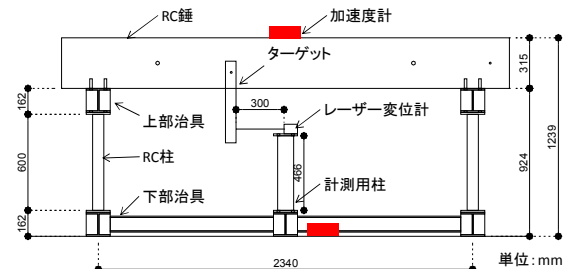


図-3 試験体立面図

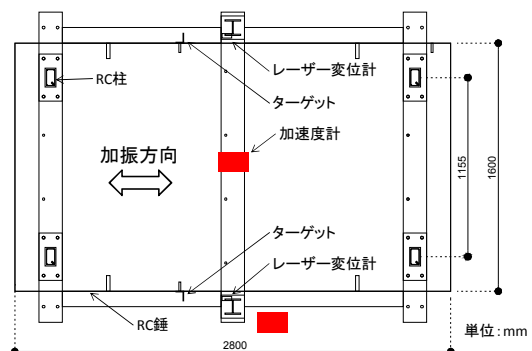


図-4 試験体平面図

3.3 入力地震波

本実験では、SP1に告示波wg60(以降wg60と呼ぶ)、

SP2に JMAkobeNS 波(以降 kobe と呼ぶ), SP3に 2011年3月11日に K-NET 宮城仙台で記録された地震波 MYG013NS(以降 MYG013 と呼ぶ), をそれぞれ加振した。ただし, 入力地震動の周期は, 試験体の固有周期を考慮して 1/3 倍に短縮している。それぞれの加速度波形(周期 1/3 倍, 入力倍率 100%)および要求曲線(減衰定数 5%)を 図-5~図-8 に示す。なお振動台への入力地震波には, 振動台の性能限から 0.1(Hz)のハイパスフィルター処理を行っている。試験体設置時, 本震入力後, 余震入力後には, 試験体の性能同定を行うために, ホワイトノイズ(以降, WN と呼ぶ)を入力した。この WN の周期帯は 1~30(Hz)であり, 継続時間は 1 分間である。

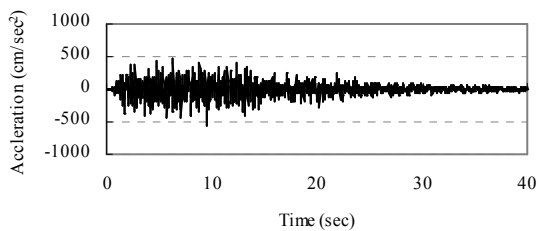


図-5 wg60 (SP1)

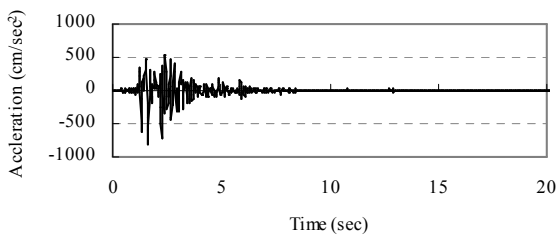


図-6 kobe (SP2)

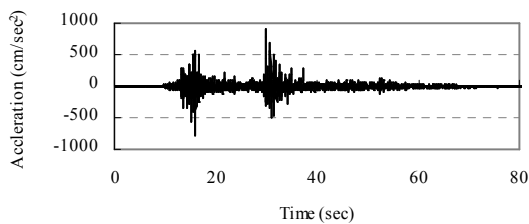


図-7 MYG013 (SP3)

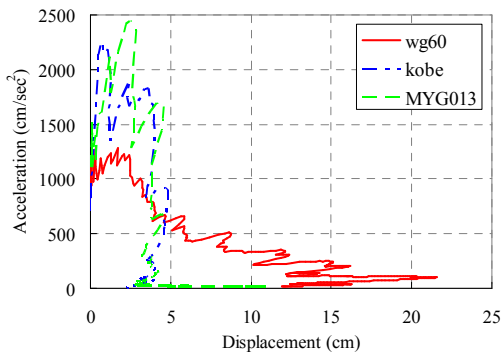


図-8 要求曲線一覧

試験体に十分な損傷を与えつつ, 試験体が倒壊して本

震の計測値から余震の応答値を推定できなくなることを防ぐため, 実際に各試験体に入力した地震動は, 事前解析に基づき入力倍率を wg60 を 70%, kobe を 60%, MYG013 を 50%に低減した。

4. 振動台実験結果

4.1 減衰定数算定

2.1 および 2.2 で述べた手法⁷⁾により余震応答点を推定するためには, 試験体の弾性時の粘性減衰定数を同定する必要がある。減衰定数の推定方法は, 様々なものが検討されているが⁸⁾, ここでは比較的安定して同定が可能である, 非線形最小 2 乗近似を用いた伝達関数カーブフィット法を用いて同定した値を用いる。伝達関数は, 各試験体ともに試験体設置時に入力した WN に対する応答値から算出したものとする。カーブフィットに用いる伝達関数の理論式は式(4)による。同定した試験体の固有周期と減衰定数の一覧を表-7 に示す。

$$H(\omega) = \left\{ \sum_{s=1}^N s u_i \cdot s \beta \sqrt{\frac{1 + 4 s h^2 \left(\frac{X}{F_s}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{X}{F_s}\right)^2\right]^2 + 4 s h^2 \left(\frac{X}{F_s}\right)^2}} \right\} \quad (4)$$

ここで, N: 自由度, $s u_i \cdot s \beta$: s 次の刺激関数, $s h$: s 次の減衰定数, X: 振動数, F_s : s 次の卓越振動数

表-5 固有周期と減衰定数

試験体 NO.	固有周期	減衰定数
SP1	0.219 sec	1.43 %
SP2	0.196 sec	1.27 %
SP3	0.212 sec	1.49 %

4.2 余震応答点の推定精度

余震用要求曲線を算出するためには, 性能曲線から塑性率を算出する必要がある。しかし, 実計測値から算出された性能曲線は降伏点が明確でないため, 適切に降伏点を設定する必要がある。そこで, 性能曲線の復元力モデル化を行い, 降伏点に相当する点を算出する。復元力モデル化の方法は, 文献 6)にて提案された曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート柱を想定した復元力モデル化とする。ここでは簡単に手法のみを(1)~(4)にて述べるに留めるが, 詳しい計算方法については文献 6)を参照されたい。なお, 各折れ点はそれぞれ, ひび割れ点(第 1 折れ点)(δ_c, F_c), 降伏点(第 2 折れ点)(δ_y, F_y), 最大耐力点(第 3 折れ点)(δ_{Fmax}, F_{max})および最大変形点(δ_u, F_u)を想定したものである。復元力特性モデル算出の概要図を 図-9 に示す。

- (1) ひび割れ点は, 原点と最大耐力の 1/4 に相当する点を直線で結んだ線(この傾きを初期剛性とする)上であり, 第 2 折れ点の 1/3 耐力点とする。

- (2) 降伏点は、第3折れ点を通り初期剛性の1/1000の傾きを持った直線上とする。この時、モデル化前の最大耐力点までの性能曲線と等価なエネルギー吸収能力を持つ様に降伏点を定める。
- (3) 第3折れ点は最大耐力点とする。
- (4) 最大変形点は、算出された代表変位の最大値を最大変形点の変形とし、耐力は、最大耐力点以降の性能曲線のエネルギー吸収能力が等価になるように決定する。

なお、最大耐力点と最大変形点と同じ場合は、3折れ線の復元力モデル、最大耐力点と最大変形点異なる場合は、4折れ線の復元力モデルとなる。

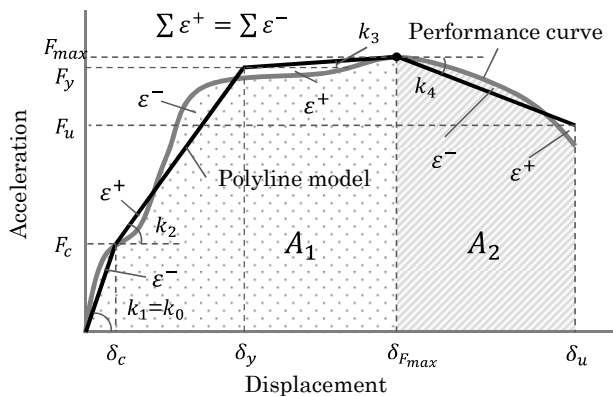


図-9 復元力モデル化の概要図

図-10には kobe 波を入力した SP2 の本震及び余震の履歴曲線を示す。図-11には、性能曲線、および本震の性能曲線から算出した復元力モデルを示す。なお、図中の◆は復元力モデルの各折れ点、●は余震時の最大応答点を示す。図-10および図-11より、試験体の計測値から性能曲線が算出できていることが確認できる。さらに、復元力モデルは、性能曲線の特性を良く捉えていることが分かる。

正側の応答値に注目すると、余震時よりも本震時の方が最大変形が大きいことが分かる。負側については本震時よりも余震時の方が応答が大きくなっていることが確認できる。本震および余震に対する計測最大変位を表-8に示す。余震応答変位が本震から増加しているのは、SP1の正側(1.23(cm)→1.25(cm))、SP2の負側(-1.47(cm)→-1.73(cm))、SP3の正側(1.59(cm)→1.69(cm))および負側(-1.02(cm)→-1.36(cm))の全6ケース中の4ケースであることが分かる。ただし、正負の絶対値で考えた場合は、余震時の応答が本震時の応答値を上回っているのはSP3のみである。SP1およびSP2では、余震時の応答変位の絶対値が本震の最大応答変位の絶対値を上回っておらず、実質的には変位が増加したとは言えない。

これらの結果より、鉄筋コンクリート構造建物に本震と同様の余震が入力された場合、理論上は余震時の応答は本震時よりも大きくなるが、実際には必ずしも応答が大きくなるとは限らないことが分かる。これは本震により試験体に損傷が生じ、試験体によっては地震動の影響を受けにくい周期に変化したために、余震時の変位が本震時より小さくなったと考えられる。

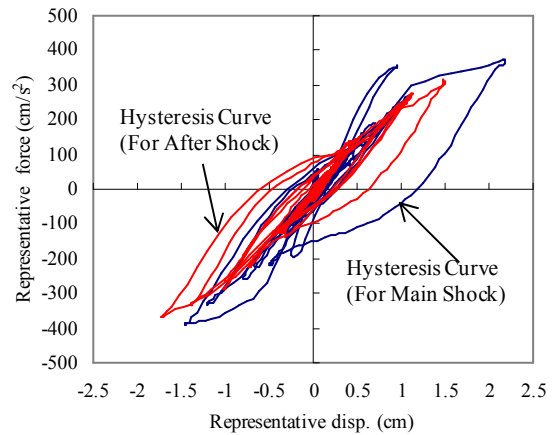


図-10 履歴曲線 <SP2_kobe>

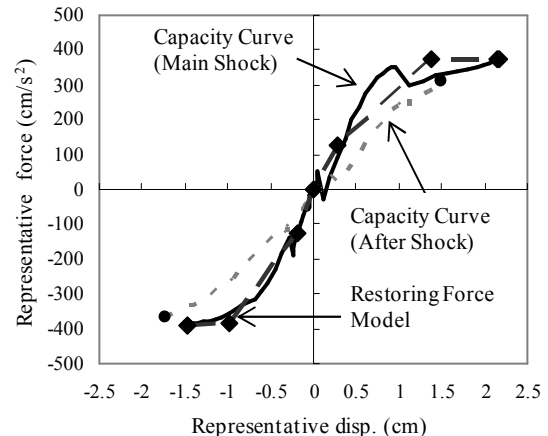


図-11 性能曲線 <SP2_kobe>

図-12には、SP2の計測値から得られた[1]本震における復元力モデル(最大応答点から横軸と水平に復元力モデルを延長)、[2]本震用および余震用要求曲線、[3]計測最大応答点、[4]推定応答点を示す。本震および余震に対する推定変位と推定変位の計測最大変位に対する比率を表-6に示す。

文献7)では、余震用要求曲線算出のための等価粘性減衰定数算出に用いる係数として $\gamma=0.10$ を用いている。表-6を見ると、計測値に対する余震応答変位の推定値の比率は150(%)~324(%)であり、本検討の範囲では、本余震応答点の推定手法は安全側の評価を与えた。

より精度の高い余震応答点の算出には、(1)建物の解析モデルの作成、(2)建物の詳細な損傷状態確認に基づ

くデータ入力, (3) 解析による検討, などが必要であると考えられるが, 多大な手間がかかり多数の建物に判定装置を設置するには現実的でない。一方, 文献7)で提案された減衰定数 h_{eq} を用いて余震の応答点を推定する手法は, 余震時の応答点を精度高く算出することはできないが, 本検討の範囲では実際の構造物においても安全側の評価を与えることを確認した。これより, 本余震応答点の推定手法は, リアルタイムに建物の残余耐震性能を判定する際に適応可能であると考えられる。

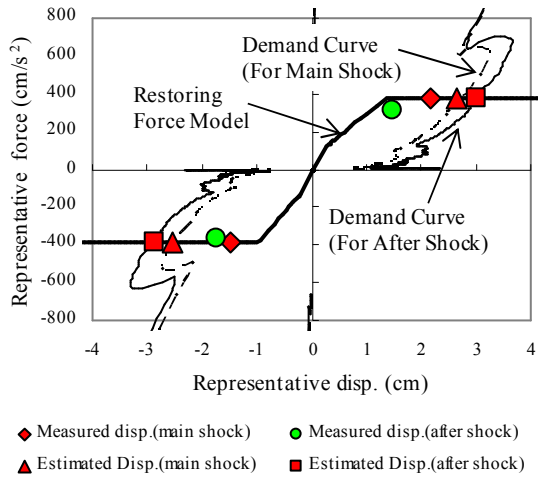


図-12 余震応答点の推定精度 <SP2_kobe>

表-6 余震応答の最大変位と推定値の比較

加振内容	算出方法	Main Shock		After Shock	
		正側	負側	正側	負側
SP1 wg60	計測	1.23cm	-1.48cm	1.25cm	-1.40cm
	推定	2.95cm	-3.05cm	4.05cm	-4.14cm
	比率	241 %	207 %	324 %	295 %
SP2 kobe	計測	2.18cm	-1.47cm	1.49cm	-1.73cm
	推定	2.67cm	-2.53cm	3.00cm	-2.85cm
	比率	122 %	173 %	201 %	165 %
SP3 MYG013	計測	1.59cm	-1.02cm	1.69cm	-1.36cm
	推定	1.90cm	-1.73cm	2.53cm	-2.37cm
	比率	120 %	170 %	150 %	175 %

5. まとめ

本震および余震を入力した鉄筋コンクリート造試験体を用いた振動台実験の結果を用いた検討から, 以下の知見が得られた。

- 1). 本震および余震を想定した本震と同じ入力地震動を鉄筋コンクリート造試験体に入力した場合について, 必ずしも余震の最大応答点の本震の最大応答点を上回らないことが分かった。
- 2). 本震の計測値のみから性能曲線および余震用の要求曲線を算出し, その交点より余震時の推定応答点を算出できることを示した。
- 3). 本検討の範囲では, 推定された余震の応答点は, 振

動台実験において実際に計測された余震の応答点よりも変位が小さく, 推定値は安全側の評価であった。これより, 本余震応答の推定手法は, リアルタイムに建物の健全性を判定する際に適応可能であると考えられる。

謝辞

本実験は UR 都市機構の技術研究所で行いました。また, 本研究は科学研究費補助金 基盤研究(C)(H23-H25 課題番号 23560665 代表研究者 楠浩一), および前田記念工学振興財団の補助を受けて実施しました。実験の加振には, 防災科学技術研究所の地震観測網(K-NET)の観測記録を利用しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 兎澤圭亮, 寺本尚史, 西田哲也, 小林 淳: 余震による地震入力を受ける場合の応答推定手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 34 巻 2 号, pp.895-900, 2012
- 2) 兎澤圭亮, 小幡昭彦, 西田哲也, 小林 淳: 連続地震動を受ける RC 造架構の応答性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 35 巻 2 号, pp.895-900, 2013
- 3) 濱本卓司, 森田高市, 勅使川原正臣: 複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, 第 560 号, pp.93-100, 2002.10
- 4) 仁田佳宏, 西谷章: 各層を単位とするサブシステムの同定に基づく剛性のヘルスマニタリング, 日本建築学会構造系論文集, 第 573 号, pp.75-79, 2003.11
- 5) 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, pp.119-126, 2003.7
- 6) 川村 学, 楠 浩一他: 加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出方法に関する研究 1 質点系構造物の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第 688 号, pp1061-1069, 2013.6
- 7) 楠浩一, 勅使川原正臣: 余震に対する等価粘性減衰定数評価に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, 28 巻 2 号, pp.1057-1062, 2006
- 8) 伊佐治勝大, 前田礼一郎, 楠浩一, 田才晃: Wavelet 変換を用いた残余耐震性能判定のための等価周期と等価粘性減衰算出方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 32 巻 2 号, pp.925-930, 2010
- 9) 国土交通省住宅局建築指導課他: 2007 年版 建築物の構造関係技術規準解説書, 全国官報販売協同組合, 2007.8