

# 論文 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

兎澤 圭亮\*1・小幡 昭彦\*2・西田 哲也\*3・小林 淳\*3

**要旨:** 曲げ型部材で構成される中低層 RC 建物を対象として、本震で損傷を生じた状態で余震を受ける建物の応答性状を実験的により明らかにし、筆者らが既往の研究で提案した余震時応答推定法の妥当性を検証することを目的として、静的正負繰り返し載荷実験、および連続的に地震動を入力したオンライン地震応答実験を実施し、応答推定法に関する検討を行った。その結果、同一レベルの地震動を入力した場合でも、入力前の損傷の有無やその程度に応じて最大応答変位が異なり、損傷が大きいほど最大応答変位も大きくなる傾向を確認し、既往の研究で提案された余震時応答推定法の妥当性を検討した。

**キーワード:** 中低層 RC 建物, 静的正負繰り返し載荷実験, オンライン実験, 等価減衰定数, 応答推定

## 1. 研究背景・目的

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震のような巨大地震においては、本震後にも大地震に匹敵するような余震が発生するため、本震により倒壊を免れたとしても、本震後の余震によって損傷の進行や倒壊に至る可能性があることが再認識された。同様の事例として、2004 年の新潟県中越地震で被災し小破の判定を受けた 1981 年以前築の学校建物が、補修等を行わずに使用し続け、2007 年の新潟県中越沖地震で中破の被害を受けたものがある<sup>1)</sup>。したがって、今後巨大地震に対する耐震設計や耐震補強を行う場合、継続使用が必要となる防災拠点や避難所等の建物では、このような連続的な地震動や、余震が建物に与える被害等についても考えておく必要があると言える。そのためには、本震による地震動入力によりある程度の損傷が発生した状態で余震による地震動が入力された場合の応答推定が必要となる。筆者らが行った既往の研究<sup>2)</sup>では、RC 造建物に対して多く用いられている TAKEDA モデルの復元力特性に基づいて、本震後の余震に対する応答推定法を提案し、地震応答解析結果との対応を検討した。この研究では、最大応答後の中小ループは本震時の最大応答点に指向するとした余震用耐力スペクトルと余震用等価減衰定数式による余震時応答推定法が提案されているが、この余震時応答推定法の検証や、連続地震入力時の地震応答性状を実験的に把握しておく必要がある。

曲げ型 RC 部材を対象として実験的検討を行った文献<sup>3)-5)</sup>では、電算機-アクチュエータオンラインシステムを用いて一連の RC 柱部材群の中から代表的な 1 本を取り出し、ある固有周期を持った一質点系に置き換え、一定の軸力を下で、定振幅繰り返し加力実験、およびオンラ

イン地震応答実験が実施されている。このように 1 波の地震動入力を行った実験例はあるものの、曲げ柱を対象に本震を経験した後に本震より小さな余震を入力した実験例はほとんどない。

そこで、本論文では、連続地震入力時の地震応答性状と余震時応答推定法の適合性を実験的に検討するために曲げ型部材で構成される RC 造中低層建物を対象に、連続的な地震動入力を想定した静的およびオンライン地震応答実験を行い、実験結果および余震時応答推定結果との比較検討を行った。

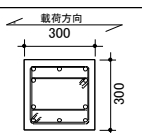
## 2. 実験概要

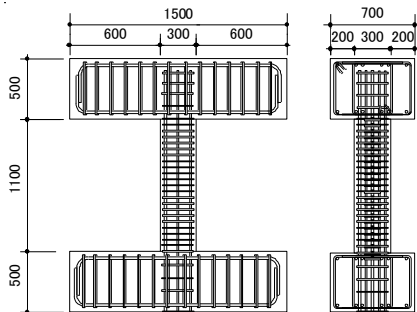
表-1, 図-1 に試験体, 表-2 に使用材料の試験結果, をそれぞれ示す。対象建物は 1981 年以降の新耐震設計法施行後の建物を想定し、固有周期 0.25s の中低層 RC 造とした。本震後の余震における履歴性状を把握するための静的正負繰り返し載荷実験(以下、静的実験と略記)と、連続地震動を入力したオンライン地震応答実験(以下オンライン実験と略記)を行った。試験体は、文献 3) 同様、建物内の代表的な柱 1 本を取り出したものとした。試験体寸法は 300mm×300mm×1100mm で、想定した建物モデルの 1/3 スケールである。軸力は 249kN(軸力比 0.09 相当)で一定とした。オンライン実験における振動モデルの設定では、試験体を 1 質点系に置き換え、固有周期に合わせて質量を設定した。また、オンライン実験時には、減衰定数を 0.03、時間刻みを 0.01s と設定した。図-2 に載荷装置を示す。ジャッキ 1 で水平力を、ジャッキ 4 で一定軸力を加え、ジャッキ 2, 3 で上スタブの回転を制御して逆対称曲げ加力を行った。表-3 に各試験体に対応する実験について示す。ARS 試験体を用いた静的実験

*1 秋田県立大学大学院	修士課程 (現 株式会社 安藤・間)	(正会員)
*2 秋田県立大学	建築環境システム学科 助教・博士(工学)	(正会員)
*3 秋田県立大学	建築環境システム学科 教授・博士(工学)	(正会員)

では定常応答時の履歴ループを確認するため、本震想定、余震想定、大変形の順番で載荷した。本震想定では最大塑性率2程度まで載荷し、その後、一般的な地震時変位履歴を模擬して0点付近まで徐々に変位を小さくした加力を行った。次に、余震想定として再度最大塑性率2まで載荷し、その後は塑性率2以上の大変形加力を行った。ARD1 試験体を用いたオンライン実験では、まず塑性率2となるような地震動(最大速度 42.3cm/s)を本震規模として入力し、その後、本震規模の2/3の入力倍率をもつ入力地震動を余震規模と位置づけて連続的な地震動入力を想定した実験を行った。ARD2 試験体を用いたオンライン実験では、本震入力後の余震時応答と無損傷状態から余震時応答を比較するため、ARD1 試験体で入力した余震規模をまず入力し、さらに比較として再度余震規模の入力を行った。

表一 試験体諸元(全試験体共通)

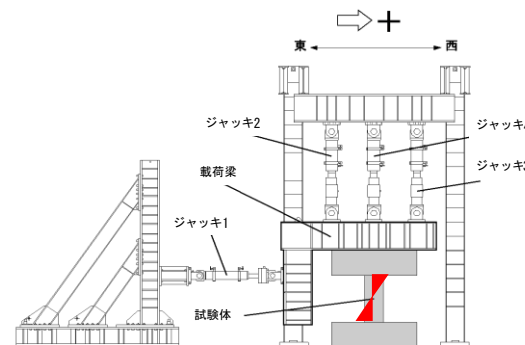
試験体断面	
引張主筋	4-D16( $p_t=1.07\%$ )
せん断補強筋	S6-@50( $p_w=0.85\%$ )
軸力比	0.09



図一 試験体形状・配筋(全試験体共通)

表二 使用材料の試験結果

柱主筋 D16(SD345)	$\sigma_y = 401.5\text{N/mm}^2$
せん断補強筋 S6(KSS785)	$\sigma_u = 1062.4\text{N/mm}^2$
コンクリート圧縮強度	$\sigma_B = 31.5\text{N/mm}^2$



図二 載荷装置

表三 各試験体に対応する実験

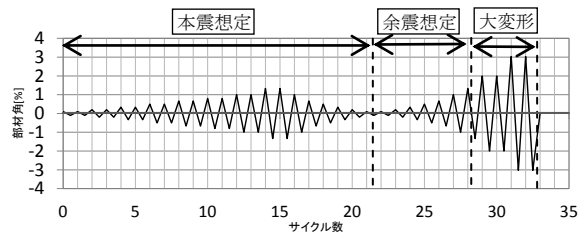
試験体	実験
ARS	静的正負繰り返し載荷実験
ARD1	本震後余震入力オンライン実験
ARD2	余震規模地震2回連続入力オンライン実験

### 3. 静的実験およびオンライン実験

#### 3.1 静的実験

##### (1) 載荷方法

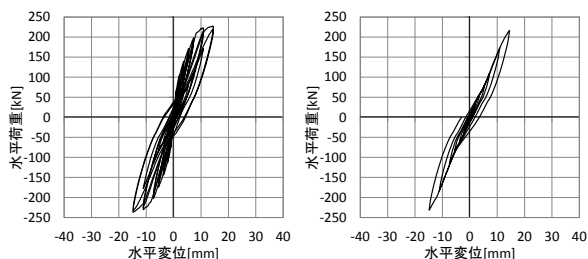
図一3 に載荷履歴を示す。まず、本震想定では $\pm 1/1000(1.1\text{mm})$ 、 $\pm 1/500(2.2\text{mm})$ 、 $\pm 1/300(3.67\text{mm})$ 、 $\pm 1/200(5.5\text{mm})$ 、 $\pm 1/150(7.33\text{mm})$ 、 $\pm 1/100(11\text{mm})$ をそれぞれ2サイクルずつ載荷し、その後、 $\pm 1/150$  載荷で主筋のひずみが  $2000\mu\epsilon$  を初めて越えたことを確認して、 $\pm 1/100$  の次に塑性率2 想定となる $\pm 1/75(14.67\text{mm})$ を載荷した。塑性率2 まで載荷した後、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/150$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/300$ 、 $\pm 1/500$ 、 $\pm 1/1000$  を1サイクルずつ加力して、本震想定載荷を終了した。次に余震想定載荷として、再度 $\pm 1/1000$ 、 $\pm 1/500$ 、 $\pm 1/300$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/150$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/75$  までを1サイクルずつ加力し、その後、大変形載荷として、 $\pm 1/50(22\text{mm})$ 、 $\pm 1/33(33.3\text{mm})$ を2サイクルずつ加力した。



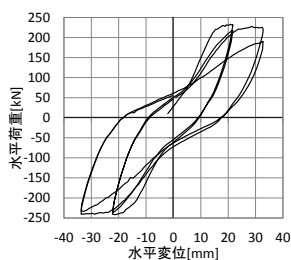
図一3 載荷履歴

##### (2) 実験結果

図一4 に荷重-変位関係の本震想定、余震想定、大変形に分けて示す。図一4 より余震応答時の履歴ループは本震想定時の最大応答点を指向する傾向となっており、本震想定時の履歴ループと余震想定時の履歴ループを比較すると、両履歴ループ形状ともほとんど同じになっていることが分かる。図一5 に、各載荷におけるひび割れ状況を示す。図一5 には、本震想定における主筋が降伏した  $1/150$  および塑性率が約2となる  $1/75$  載荷時、余震想定における  $1/75$  載荷時と大変形の  $1/30$  載荷時の各損傷状況を示している。初ひび割れは $\pm 1/1000$  で発生し、その後曲げひび割れが増加・進展した。 $\pm 1/100$  では、圧縮側のコンクリートの圧壊が発生し、引張側のひび割れ幅は約  $1.0\text{mm}$  となった。本震想定時に、少しずつ変形角を小さくしていき $\pm 1/1000$  を加力した後の状態では、ひび割れはほぼ完全に閉じた状態になっていた。

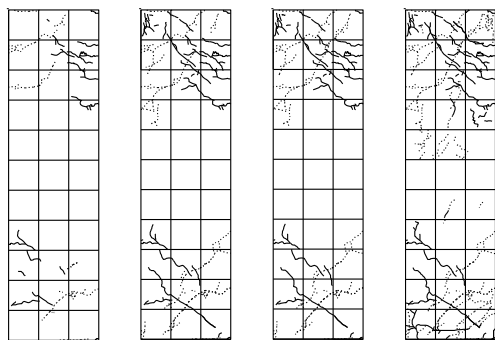


a) 本震想定時                      b) 余震想定時



c) 大変形時

図-4 荷重-変位関係(ARS試験体)



a) 1/150      b) 1/75      c) 1/75      d) 1/30  
**本震想定時**                      **余震想定時**                      **大変形時**

図-5 ひび割れ状況(ARS試験体)

### 3.2 本震後余震入力オンライン実験

#### (1) 入力地震動

図-6 に入力地震動を示す。入力地震動は El Centro NS 波の位相を用いて作成した告示波を 10 秒間使用し、本震と余震は同地震動で入力倍率を変えて用いた。最初に入力する本震では予備解析を参考に変形角で 1/75(塑性率 2 相当)程度となるように最大加速度を  $369\text{cm/s}^2$ (最大速度  $42.3\text{cm/s}$ )と設定し、その後の余震による地震動は本震の  $2/3$  である最大加速度  $246\text{cm/s}^2$ (最大速度  $28.2\text{cm/s}$ )とした。なお、本震と余震の地震動の入力間隔は 5 秒間とした。

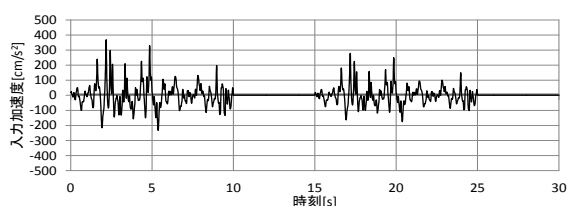


図-6 入力地震動(ARD1試験体)

#### (2) 実験結果

図-7 に応答変位時刻歴を、図-8 に本震入力、余震入力時の荷重-変位関係をそれぞれ示す。本震時の最大応答変位は  $14.24\text{mm}$ 、余震時の最大応答変位は  $12.27\text{mm}$  となった。本震後の余震時の履歴ループは、静的実験同様、本震の最大応答点を指向する傾向が見られた。

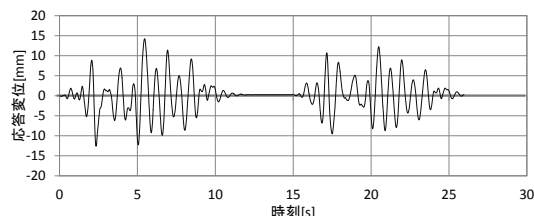
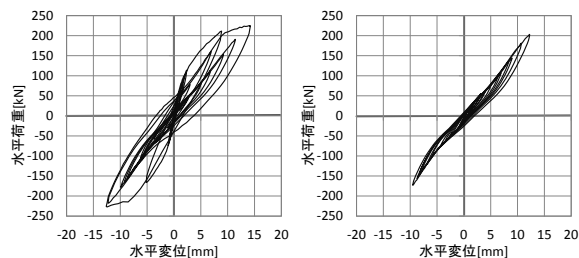


図-7 応答変位時刻歴(ARD1試験体)



a) 本震                                      b) 余震

図-8 荷重-変位関係(ARD1試験体)

### 3.3 余震規模地震 2 回連続入力オンライン実験

#### (1) 入力地震動

図-9 に入力地震動を示す。入力地震動は本震後余震入力オンライン実験で使用した余震規模の告示波(最大加速度  $246\text{cm/s}^2$ 、最大速度  $28.2\text{cm/s}$ )の 10 秒間を用いて、5 秒間隔で 2 回入力した。

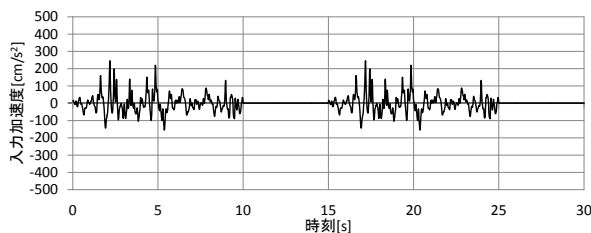


図-9 入力地震動(ARD2試験体)

#### (2) 実験結果

図-10 に応答変位時刻歴を、図-11 に余震規模の地震動を 1 回目に入力した時と 2 回目に入力した時の荷重-変位関係をそれぞれ示す。入力 1 回目の最大応答変位は  $7.38\text{mm}$ 、2 回目の最大応答変位は  $9.63\text{mm}$  となった。同一地震動を 2 回連続で入力すると 2 回目の応答変位が約 30% 大きくなった。

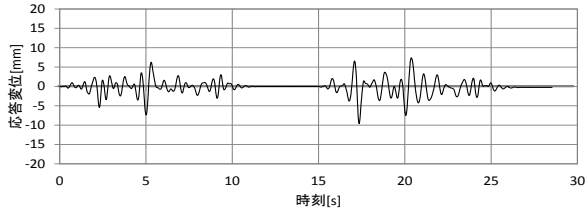
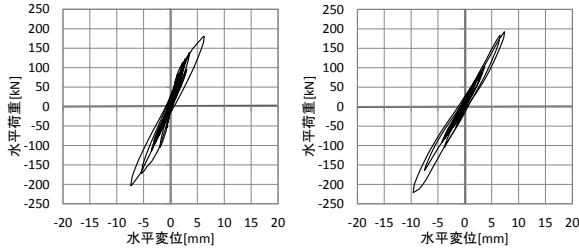


図-10 応答変位時刻歴 (ARD2 試験体)



a) 1 回目入力時      b) 2 回目入力時

図-11 荷重 - 変位関係 (ARD2 試験体)

#### 4. 最大応答変位の検討

表-4 に本震後余震入力オンライン実験、余震規模地震 2 回連続入力オンライン実験の最大応答変位一覧を、図-12 に ARD1 試験体の余震入力時、ARD2 試験体の余震 1 回目入力時の荷重-変位関係を比較して示す。一度本震想定入力を経験した ARD1 試験体の余震入力時の最大応答変位は ARD2 試験体の余震相当 1 回目入力時の最大応答変位の 1.66 倍となっている。また、ARD2 試験体では、2 回目入力時の最大応答変位が 1 回目入力時の 1.30 倍となっていることから、同一地震動を入力した場合でも、入力前の損傷状態およびその程度で最大応答変位が異なることが分かる。この変位増加の傾向は被災区分判定基準<sup>6)</sup>で示されている損傷程度による耐震性能低下の考え方に対応すると考えることができる。

表-4 最大応答変位一覧

試験体	最大応答変位[mm](入力規模)	
	入力1	入力2
ARD1	14.24 (本震)	12.27 (余震)
ARD2	7.38 (余震)	9.63 (余震)

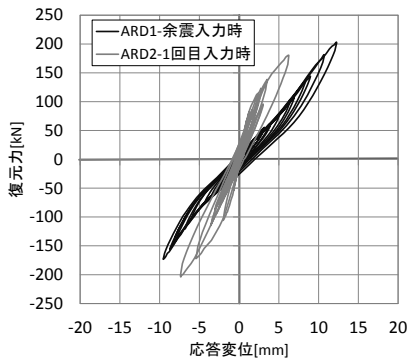


図-12 荷重-変位関係の比較

#### 5. 等価減衰定数の検討

##### 5.1 余震時等価減衰定数式の概要

文献 2) では、一般的に RC 造の解析に多く用いられている TAKEDA モデルに基づいて、本震経験後の余震時応答に対する等価減衰定数式(1)を提案しており、この式(1)による等価減衰定数は、余震時応答が本震時最大応答を越えない範囲においては本震時最大応答変位(塑性率)のみに依存し、余震時の応答変位によらず一定となる。ここでは文献 2) で提案された式(1)の妥当性を確認するために、3 つの実験より履歴ループを用いて等価減衰定数を算定し検討を行った。

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \left\{ 1 - \frac{1 + (\delta_c / \delta_y)}{1 + (Q_c / Q_y)} \cdot \frac{1 + \beta(\gamma - 1)}{\gamma} \cdot \gamma^\alpha \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\delta_c$ 、 $\delta_y$  はひび割れ変位、降伏変位を、 $Q_c$ 、 $Q_y$  はひび割れ耐力、降伏耐力を、 $\beta$  は降伏後の三次勾配剛性  $K_2$  と降伏時割線剛性  $K_1$  の比を、 $\alpha$  は除荷剛性低下指数 ( $\alpha=0.5$ ) を、 $\gamma$  は本震時最大応答塑性率である。ただし、余震時応答が本震時最大応答塑性率を超える場合は、その時の塑性率を  $\gamma$  とする。

##### 5.2 等価減衰定数算定式

実験より得られた履歴ループから等価減衰定数を算定する場合、一般的には式(2)の定常共振状態の応答ループを用いる式が使用される。静的実験では、2 サイクル目の履歴ループがこれに相当すると考え、1 ループ面積からの  $\Delta W$  と、等価ポテンシャルエネルギー  $W_e$  は当該ループの正負の  $W_e$  の平均値を用いて等価減衰定数を算定した。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \left( \frac{\Delta W}{W_e} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta W$  は履歴ループの 1 サイクルの面積を、 $W_e$  は等価ポテンシャルエネルギー ( $W_e = 1/2 \cdot P_m \cdot d_m$ ) を、 $d_m$  は最大変位 [mm] を、 $P_m$  は  $d_m$  変位時の復元力 [kN] である。

一方、定常状態のループが得られないオンライン実験および静的実験の 1 サイクル載荷部においては、半ループに対する式(3)を用いて等価減衰定数を算定した。対象とした履歴ループは、オンライン実験では、片振幅が 0.1mm 以上のすべてのループ、静的実験では 1 サイクル載荷部における負側部分の履歴ループである。なお、オンライン実験において、対象となる半ループで正負の振幅差が極端に大きい場合には、適切な等価減衰定数が得られないと判断して対象外とした。

$$h_{eq} = \frac{\Delta W_{half}}{\pi \cdot d_m \cdot P_m} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta W_{harf}$ は履歴ループ分の半サイクルの面積であり、 $d_m$ 、 $P_m$ は式(2)と同様である。

### 5.3 静的実験結果

図-13 に载荷時の塑性率-等価減衰定数の関係を示す。図-13b)で示す\*は、本震想定における最大塑性率(約2)時の等価減衰定数算定結果である。本震想定载荷時において、最大変位以前の塑性率1程度までは等価減衰定数が0.05程度となっており、塑性率1以上では塑性率に応じて等価減衰定数が大きくなっている。一方、最大変位後の中小ループでは、等価減衰定数は0.05から0.07となっている。余震想定载荷時の等価減衰定数は、本震想定時の最大変位後と同程度であり、本震想定時の最大変位以前と比べると少し大きくなる傾向があるが、余震時応答推定で用いる5.1節の式(1)による $h_{eq}$ 相当と考えられる本震最大変位時の等価減衰定数( $h_{eq}=0.097$ )と比較すると0.01~0.04程度小さくなる傾向である。

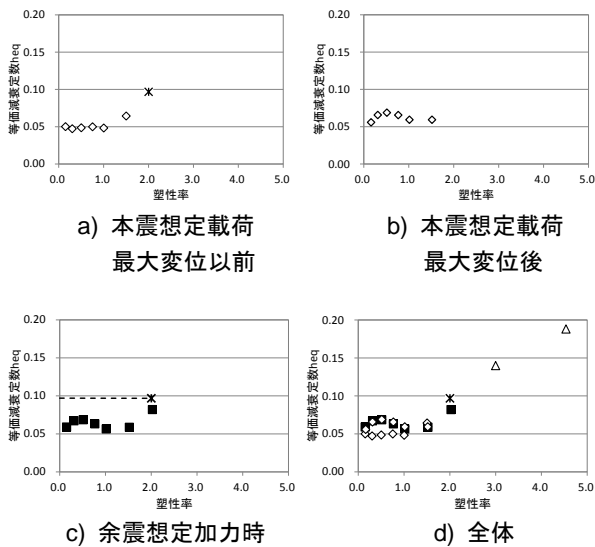


図-13 静的実験の等価減衰定数

### 5.4 本震後余震入力オンライン実験結果

図-14 に本震後余震入力オンライン実験の履歴ループを用いて等価減衰定数を算定した結果を示す。図-14b)中の破線は静的実験で得られた塑性率が約2のときに5.1節の式(1)から算定される $h_{eq}$ 相当の等価減衰定数( $h_{eq}=0.097$ )を示している。なお、図-14a)にプロットされたオンライン実験での最大応答時の塑性率も約2であるが、この時の履歴ループは定常応答のループではなく、最大変位更新時のループとなるため、図-14b)中の破線の $h_{eq}$ より大きくなっている。図-14a)の本震入力時では、過去の最大変位を更新する履歴ループが多く、この

場合の等価減衰定数は、過去の最大変位を更新しない中小履歴ループの等価減衰定数より大きくなるため、同一塑性率でも若干ばらつきが大きい。一方、図-14b)の余震入力時では、本震入力時の応答を下回っているため、ばらつきは比較的小さい。余震入力時で塑性率が小さい範囲では等価減衰定数が破線の $h_{eq}$ より大きくなっている場合もあるが、余震時の最大応答付近では破線の $h_{eq}$ より0.04程度小さく、静的実験結果と同様の傾向を示していることがわかる。

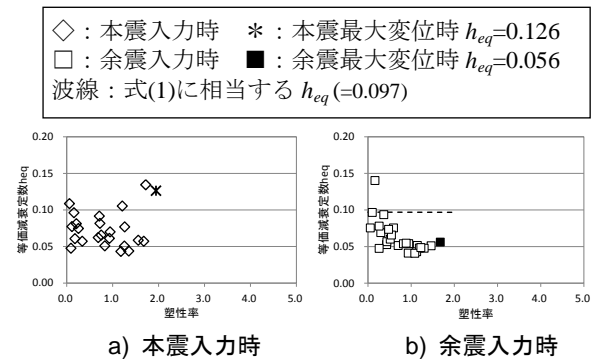


図-14 本震後余震入力時の等価減衰定数

### 5.5 余震規模地震2回連続入力オンライン実験結果

図-15 に余震規模を2回連続で入力した際の等価減衰定数を示す。本震後余震入力の場合同様、1回目入力時には、過去の最大変位を更新する履歴ループが多いため、等価減衰定数は若干ばらつくが、2回目入力時はばらつきが少なく、概ね図-14b)と同様の値となっていることがわかる。

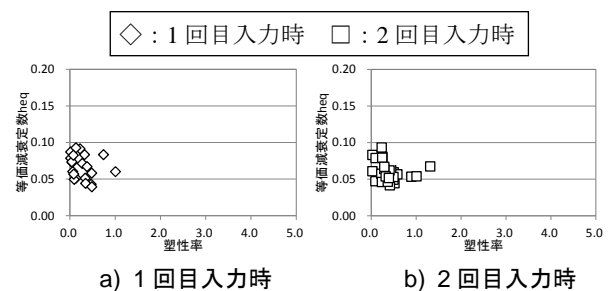


図-15 余震規模2回連続入力時の等価減衰定数

## 6. 既往の余震時応答推定手法<sup>2)</sup>を用いた検討

本震を経験した建物の余震時応答推定法の適合性を確認するため、ARDI試験体を用いた本震後余震入力オンライン実験を行った結果との比較検討を行った。表-5に2章で示したARDI試験体の諸元を用いて文献2)の方法で計算した質点系の復元力特性パラメータの計算値を示す。また、等価減衰には式(1)の履歴減衰に、初期減衰0.03を加算した値を用いた。図-16に本震および余震時

応答推定結果と実験値を比較して示す。図-16に示す試験体ARSのスケルトンカーブと計算値から算出した復元力特性を比較すると、10mm程度までは概ね対応が良いことが分かったが、10mm以上では差がみられる。本震入力時の応答推定には一般的な耐力-要求スペクトルによる手法を用い、余震入力時の応答推定には文献2)の手法を用いた。なお、余震時の応答変位は、本震入力前の原点からの値である。その結果、本震入力時における推定値と実験値の比は1.34、余震入力時の推定値と実験値の比は1.04となった。余震時応答推定においては、本震時の応答推定精度も関係してくるため、本検討のみで十分に適合性を確認できるわけではないが、余震時応答推定で用いる耐力スペクトル（本震時の最大応答点における割線）が推定値と実験値ではほぼ等しくなっており、ある程度適合性の確認はできたと考えられる。本震時推定値が実験値より大きくなったにも関わらず、余震時応答の推定値と実験値との対応がよかったことに関しては、5章で実験結果を用いて検討した余震時応答時の等価減衰定数が、5.1節の式(1)で提案された余震時応答推定で用いる値より小さくもなっていたことも関係していると考えられる。今後、式(1)について再検討し、余震時応答推定に用いる等価減衰定数をより小さく見積もる方向に修正する必要があると思われる。

表-5 質点系復元力特性パラメータ計算値

ひび割れ耐力[kN]	56.8
ひび割れ変位[mm]	0.41
降伏耐力[kN]	201.9
降伏時ベースシア係数	0.295
降伏変位[mm]	6.74
三次勾配剛性低下係数	0.05

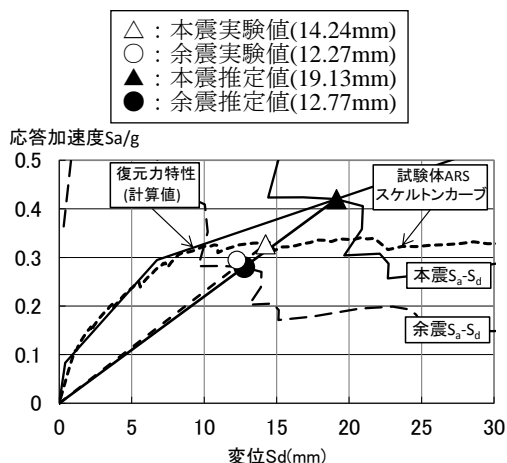


図-16 応答推定結果と実験結果の比較

## 7. まとめ

本論文では、筆者らが既往の研究で提案した余震時応答推法の適合性を確認するために曲げ型部材で構成されるRC造中低層建物を対象に、連続地震入力を想定した

静的実験とオンライン実験を実施し、実験結果と既往の余震時応答推定法に関する比較検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 同一レベルの地震動を入力した場合でも、入力前の損傷の有無やその程度に応じて最大応答変位が異なることは以前から指摘されていたが、今回実施した連続的に地震動を入力したオンライン実験によっても、事前の損傷が大きいほど最大応答変位も大きくなる傾向を確認することができた。
- (2) 静的正負繰り返し載荷実験および本震後余震入力オンライン実験結果から、本震で最大応答を経験した後の等価減衰定数は文献2)の余震時応答推定法で提案されている等価減衰定数式による値を下回る結果となった。
- (3) 本震後余震入力オンライン実験結果との比較検討から既往の研究で提案された余震時応答推定法の妥当性はある程度確認されたが、上記(2)で示した通り等価減衰定数式の再検討が必要であると考えられる。

今後は、余震時応答推定法の推定精度向上に関する検討を行うと共に、連続的な地震動入力により過去の最大応答を超える場合の応答性状や推定法についても検討して行く予定である。

## 謝辞

本実験を実施するにあたり、秋田工業高等専門学校の寺本尚史准教授に多大なご協力を賜りました。ここに記し、謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 日本建築学会：2007年能登半島地震災害調査報告，2007年新潟県中越沖地震災害調査報告，2010.3
- 2) 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，Vol.34，No.2，pp.895-900，2012.7
- 3) 岡田恒男，関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組みの地震応答実験 その2 オンライン応答実験-1，日本建築学会論文報告集，第279号，pp.77-84，1979.5
- 4) 岡田恒男，関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組みの地震応答実験 その3 オンライン応答実験-2，日本建築学会論文報告集，第280号，pp.79-89，1979.6
- 5) 岡田恒男，関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組みの地震応答実験 その4 地震応答特性の検討，日本建築学会論文報告集，第282号，pp.57-64，1979.8
- 6) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，pp.19-34，2001.9