

論文 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

兎澤 圭亮*1・寺本 尚史*2・西田 哲也*3・小林 淳*3

要旨：曲げ型部材で構成されている中高層 RC 建物を対象として、本震である程度の損傷を受けた状態で余震を受ける建物の応答性状を明らかにすることを目的とし、等価線形化法を用いた応答スペクトル法による余震応答推定のための耐力スペクトルと等価減衰定数式を提案し、1 質点系モデルを用いた地震応答解析を行ってその精度等を検討した。その結果、本震に相当する地震応答を経験した後に入力した地震動に対する応答は、同じ地震動を単独で入力した場合の応答と比較して 1.2~1.4 倍程度が大きくなっていることが確認されるとともに、余震に対する応答推定精度は、残留変形が大きくなる地震波を除いて、解析結果との対応が概ね良好であることがわかった。

キーワード：中高層 RC 建物, 地震応答推定, 余震, 等価減衰定数, 耐力スペクトル

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。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、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。既往の研究として、せん断柱を対象とした連続地震入力の研究²⁾がなされているが、曲げ型 RC 部材を想定して行われた連続地震動入力に関する研究例はほとんどないのが現状である。

現状で構造物の最大応答変位を簡易的に評価できる方法の一つとして、等価線形化法を用いた応答スペクトル法がある³⁾。応答スペクトル法では、Capacity - Spectrum(耐力スペクトル)と Demand - Spectrum(要求スペクトル)との交点により地震の応答推定を行うことが可能であるが、この方法では、最大応答時における塑性化に伴う等価粘性減衰定数を適切に考慮する必要がある。楠らの研究⁴⁾では、余震応答における等価粘性減衰定数を評価しており、本震のみ入力した場合の等価粘性減衰定数と、本震後と余震を一連の地震動として入力した際の等価粘性減衰定数を評価している。この研究では、本

震と余震が同レベルの地震動を入力し検討を行っており、substitute structure 法⁵⁾を用いて余震用の等価粘性減衰定数式を算定しているが、入力地震動については、本震と余震ともに同じ入力速度としており、本震後により入力速度が小さい余震が入力される場合についての検討はなされていない。また、この文献以外に余震応答を対象とした研究は未だに少なく、損傷を受けた建物に対して、適用可能な応答推定法の確立には至っていない。

本論文では、一連の地震活動の中で最も大きな地震動を本震、本震より小さな地震動を余震と定義し、曲げ型部材で構成される RC 造中高層建物を対象に、本震後に本震より入力速度の小さな余震を受ける建物の応答性状を明らかにすることを目的とし、等価線形化法を用いた応答スペクトル法において余震応答のために用いる耐力スペクトルと等価減衰定数式を提案した。さらに、ベースシア係数をパラメータとして地震応答解析を行い、提案した応答推定法の適合性を検討した。

2. 余震による地震入力を受ける場合の応答推定法

2.1 応答推定法の概要

現行の応答推定法では、無損傷の建物を対象とした推定が可能であるが、建物が連続的に地震動を受ける場合、すなわち、あらかじめ損傷を受けた架構に対しては適用することができない。そこで、本震後に余震を受ける建物の応答推定法として、本震による損傷を考慮した余震用の耐力スペクトルと等価減衰算定式を提案した。

2.2 余震用耐力スペクトル

曲げ型 RC 部材の履歴特性はある最大応答に達すると、その後の応答では最大応答点を指向する傾向がある。そ

*1 秋田県立大学大学院	システム科学技術研究科	建築環境システム学専攻		(正会員)
*2 秋田県立大学	システム科学技術学部	建築環境システム学科	助教授・博士(工学)	(正会員)
*3 秋田県立大学	システム科学技術学部	建築環境システム学科	教授・博士(工学)	(正会員)

のため、最大応答より小さな中小振幅応答は、最大応答点に関する割線剛性上に分布すると考えられる。このことから、図-1のように本震の応答推定結果に対して割線を引き、この線を余震用耐力スペクトルと定義した。

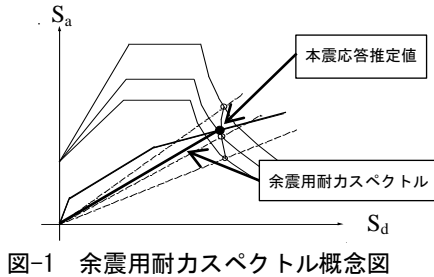


図-1 余震用耐力スペクトル概念図

2.3 等価減衰定算定式

ここでは、曲げ型 RC 部材の代表的な TAKEDA モデルの履歴則に基づき等価減衰算定式を提案した。無損傷時（本震応答時に対応）あるいは余震による応答が本震時の最大応答を超えたときの等価減衰定数 h_{eq} は一般的に式(1)で算定される。一方、余震による応答が本震による最大応答点 (δ_{max}, Q_{max}) を超えない範囲においては、図-2のような定常応答の履歴ループが想定されるため、その応答 (δ, Q) が最大応答の割線剛性上に分布すると仮定すると、等価減衰定数 h_{eq} は式(2)で求められる。このとき等価減衰定数 h_{eq} は本震時の最大応答変位(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。これは、図-2に示すように本震の最大応答時のループ形状と中小振幅時のループ形状が相似形となり、余震応答時の h_{eq} が本震の最大応答時の h_{eq} と等しくなるためである。

1)本震時

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

ここで δ_c, δ_y : ひび割れ変位, 降伏変位
 Q_c, Q_y : ひび割れ耐力, 降伏耐力
 β : K_2/K_1
 K_1 は荷重と変位の降伏点までの割線剛性
 K_2 は降伏後の勾配の剛性としている。
 μ : 最大塑性率(ただし $1 \leq \mu$)
 α : 除荷剛性低下指数

2)余震時

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \left\{ 1 - \frac{1+(\delta_c/\delta_y)}{1+(Q_c/Q_y)} \cdot \frac{1+\beta(\gamma-1)}{\gamma} \cdot \gamma^\alpha \right\} \quad \dots(2)$$

ここで γ : 最大応答塑性率
(ただし $\delta \leq \delta_{max}$ の時 $\gamma = \delta_{max}/\delta_y$)

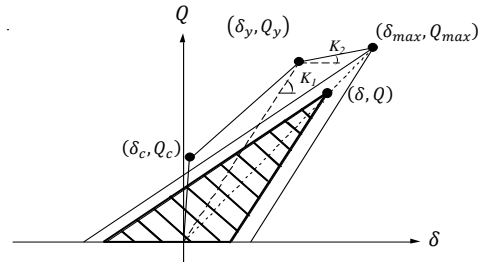


図-2 中小履歴ループの概念

3. 余震応答を考慮した地震応答解析

3.1 解析モデル

解析モデルは曲げ型部材により構成された RC 造の中高層建物を想定した一質点系モデルを使用する。解析モデルは降伏ベースシア係数 C_B をパラメータとして作成しており、表 1 に示すようにベースシア係数 C_B ごとに弾性固有周期 T を設定した。質量は 880t, 復元力特性は図-3 に示すようにひび割れ点耐力 Q_c は降伏点耐力 Q_y の 1/3 とし、降伏時割線剛性は初期剛性 K_0 の 0.3 倍とした。各モデルの降伏変位 δ_y は $C_B=0.3$ のモデルを基準に設定しており、事前に $C_B=0.3$ のモデルについて周期を変化させて地震応答解析を行い、最大速度 25cm/s では降伏せず、50cm/s では降伏点を超えるような応答となるように周期を設定した。他のモデルに対しては、降伏変位を $C_B=0.3$ と等しくしてベースシア係数ごとに周期を設定した。履歴モデルは、設計で一般に用いられる TAKEDA モデルを使用し、除荷剛性低下指数 α を 0.5 とした。降伏後の剛性は、実用的な応答領域を考慮し、実験結果を参考に初期剛性の 1/20 とした。減衰は瞬間剛性比例型で初期減衰を 3% とした。

表-1 C_B ごとの周期

C_B	$T[s]$
0.20	0.86
0.30	0.70
0.40	0.61
0.50	0.54
0.60	0.50

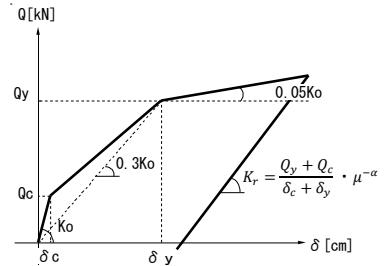


図-3 復元力特性

3.2 入力地震動

表-2 に入力地震動を示す。過去の連続地震被害においてスペクトル形状が異なる場合もあるが、ここでは、本震と余震に同一地震動を用いた。ここでは、本震による最大速度を 75cm/s, 余震による最大速度を 50cm/s とし、基準化した。また、同じ 50cm/s 入力における本震の影響を検討するため、Case1 と Case2 の 2 つの入力パターンを用いた。Case1 は最大速度 50cm/s とした地震動のみを入力した場合であり、Case2 は本震と余震の連続地震動入力を想定し、1 波目に本震による最大速度 75cm/s を入力し、その後余震による 50cm/s を入力した場合である。

表-2 入力地震動

表示名	地震名	発生日付	観測地点	方向
ELC-NS	Imperial Vally地震	1940.05.18	Ei Centoro 変電所 BF	N-S
TAFT-EW	Kern Country地震	1952.07.21	Taft Licoln School Tunnel	E-W
HACH-NS	土橋沖地震	1968.05.16	八戸港	N-S
THKU-NS	宮城県沖地震	1978.06.12	東北大学 建築系建物 1F	N-S
KOBJ-NS	兵庫県南部地震	1995.01.17	神戸海洋気象台	N-S
KWG-NS	新潟県中越地震	2004.10.23	JMA 川口	N-S
OSKM-NS	東北地方太平洋沖地震	2011.03.11	JMA 大崎市古川 三日町	N-S
BCJ-L2	日本建築センター 模擬地震動 レベル2			
SIM-TK	告示波 THKU-NS 位相			
SIM-KB	告示波 KOBJ-NS 位相			

3.3 解析結果

表-3 に Case1, Case2 の地震応答解析結果による最大塑性率の一覧を示し、図-4 には、横軸に Case1, 縦軸に Case2 とした 50cm/s 入力時の応答塑性率の比較を示す。図-4 で 1.0 の線の上にプロットされていれば、Case1 と Case2 の最大速度 50cm/s 入力時の応答が等しく、本震の影響がほとんどないことを示すが、Case2 の解析結果の多くは Case1 の 1.2~1.4 倍程度となっており、本震の影響が小さくないことがわかる。

図-5 は、 $C_B=0.3$ のモデルに対して BCJ 波を入力した地震応答解析結果を耐力スペクトル上にプロットしたものである。Case2 の 50cm/s の応答値(●印)が骨格曲線から大きく外れ、75cm/s の最大応答変位点における割線剛性近傍に位置しており、2.2 節で示した余震用耐力スペクトルの妥当性が確認できる。また、図-6 に、図-5 で示した Case1, Case2 の 50cm/s を入力した際の履歴ループを示す。Case1 は無損傷時の耐力スペクトル上に応答点があるが、Case2 では 75cm/s を経験しているため、ほぼ 75cm/s の最大応答点における割線剛性上で応答し、Case1 より大きな最大応答変位となっている。

表-3 において、多くの解析ケースでは、ベースシア係数が增大すると応答変位が小さくなる傾向がみられたが、KOBJ-NS 波と OSKM-NS 波に関しては、ベースシア係数の増大とともに応答変位が増大している。このことについて OSKM-NS 波を例にあげ考察する。OSKM-NS 波を用いた地震応答解析結果のうち最大応答変位が最小になった $C_B=0.4$ のモデルと最大となった $C_B=0.6$ のモデルの比較を行う。図-7 に減衰定数ごとの OSKM-NS 波の要求スペクトル、 $C_B=0.4$ と $C_B=0.6$ のモデルの耐力スペクトル、および耐力スペクトル上に▲印で 75cm/s 最大速度入力時の各モデルの最大応答変位を示す。また、図-7 には周期 1.3s を示す破線も併せて示している。また、図-8 には減衰定数ごとの加速度応答スペクトルを示し、併せ

て $C_B=0.6$ のモデルにおいて無損傷状態から最大応答変位に達するまでの等価周期の変化も示す。図-7 において、要求スペクトル形状は周期 0.8s から 1.3s に向けて非常に大きな膨らみとなっている一方で、等価周期 1.3s 以上では、急激にすぼまる形状になっているため、最大応答点でより等価周期の長い $C_B=0.4$ の耐力スペクトルに対しては、応答が小さくなっていると考えられる。また、図-8 においても同様に、 $C_B=0.6$ のモデルでは降伏時の等価周期 0.9s から最大応答変位点における等価周期 1.4s に至るまでの変化が見られることから、最大応答点近傍の等価周期 1.3s 付近の状態では応答が励起されたためと最大応答値が大きくなったと考えられる。

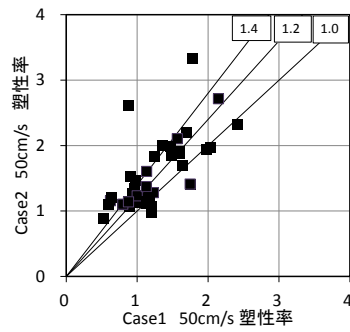


図-4 Case1, Case2 50cm/s 応答塑性率比較

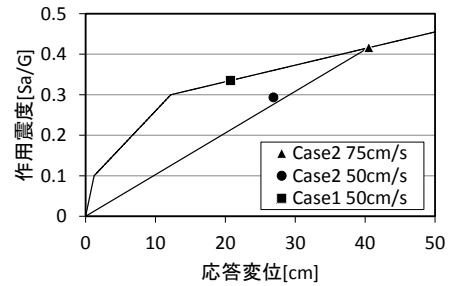
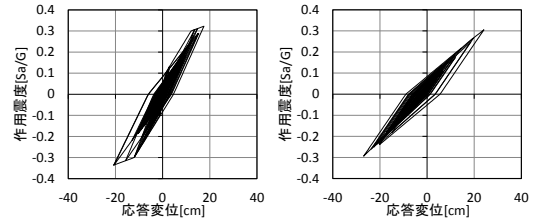


図-5 Case1 および Case2 の応答変位関係



a) Case1 50cm/s b) Case2 50cm/s

図-6 50cm/s 地震応答解析結果

表-3 Case ごとの最大応答塑性率

C_B	地震動	ELC-NS		TAFT-EW		HACH-NS		THKU-NS		KOBJ-NS		KWG-NS		OSKM-NS		BCJ		SIM-TK		SIM-KB	
		75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s	75cm/s	50cm/s
$C_B=0.2$	Case1	1.16	1.16	1.69	1.69	1.24	1.24	2.41	2.41	1.83	1.83	1.34	1.34	2.24	2.12	1.84	1.84	1.45	1.45	1.45	1.45
	Case2	2.19	1.69	2.84	1.69	2.70	2.10	3.41	2.16	2.32	1.77	1.99	1.92	3.12	2.27	3.65	2.77	2.93	2.02	1.92	1.54
$C_B=0.3$	Case1	1.20	1.20	1.24	1.24	1.13	1.13	1.78	1.78	1.59	1.59	1.15	1.15	2.04	1.70	1.60	1.60	1.60	1.60	0.97	0.97
	Case2	1.77	1.07	2.14	1.83	2.09	1.13	3.38	3.33	2.51	1.91	1.64	1.23	3.05	1.97	3.32	2.20	2.03	1.87	1.92	1.46
$C_B=0.4$	Case1	1.14	1.14	0.93	0.93	0.96	0.96	1.98	1.98	1.65	1.65	1.06	1.06	2.41	2.13	1.36	1.36	1.49	1.49	0.90	0.90
	Case2	1.78	1.12	1.58	1.27	1.70	1.34	2.69	1.94	2.17	1.69	1.60	1.13	2.98	2.33	2.57	2.00	2.24	1.84	1.26	1.07
$C_B=0.5$	Case1	1.23	1.23	1.00	1.00	0.80	0.80	1.57	1.57	1.75	1.75	0.88	0.88	2.15	1.13	1.13	1.13	1.14	1.14	0.62	0.62
	Case2	1.77	1.28	1.42	1.23	1.40	1.10	2.81	2.10	2.29	1.41	1.51	1.14	3.40	2.71	1.89	1.37	2.04	1.60	1.36	1.16
$C_B=0.6$	Case1	1.18	1.18	1.20	1.20	0.60	0.60	1.55	1.55	1.48	1.48	0.64	0.64	0.88	1.13	1.13	1.13	0.91	0.91	0.52	0.52
	Case2	1.76	1.21	1.46	0.97	1.13	1.10	2.23	1.89	2.50	1.99	1.30	1.21	3.41	2.61	1.52	1.14	1.75	1.53	0.97	0.88

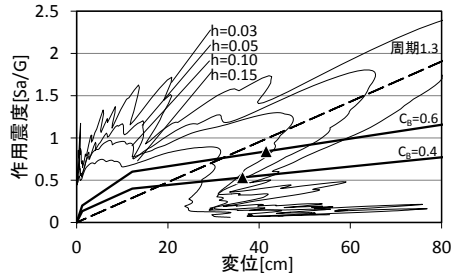


図-7 OSKM-NS波 75cm/s 耐カスペクトルとの整合

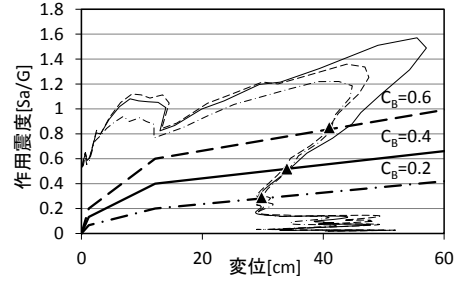


図-10 OSKM-NS 75cm/s 応答推定

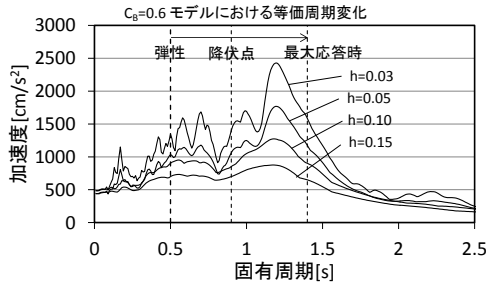


図-8 OSKM-NS波 75cm/s 加速度応答スペクトル

4. 余震応答推定

4.1 本震応答推定に関する検討

余震による応答推定を行う前段階として、Case2における本震を想定した最大速度 75cm/s の応答推定結果を示す。また、応答推定結果で特徴的だった OSKM-NS 波の結果の詳細も併せて示す。本震による応答推定には、2.3 節で示した等価減衰定数算定式(1)を用いた。

図-9 に 75cm/s 入力時の応答推定結果と 3.3 節で示した地震応答解析結果の比較を示す。図-9 から推定値と解析値は概ね良い対応を示していることがわかる。

図-10 には OSKM-NS 波について最大速度 75cm/s では入力した際の代表的な応答推定結果を示す。図-10 中で一点鎖線は $C_B=0.2$ のモデル、実線は $C_B=0.4$ のモデル、破線は $C_B=0.6$ のモデルの耐カスペクトルと要求スペクトルをそれぞれ対応させて示している。ここでも、3.3 節で考察した OSKM-NS 波の場合と同様にベースシア係数が大きくなると推定変位が増加する傾向が見られた。

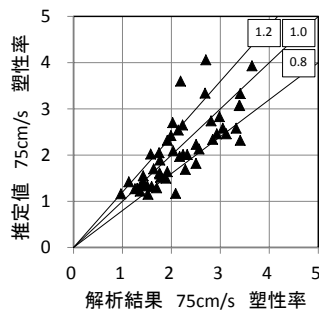


図-9 75cm/s 解析値-推定値比較

4.2 余震応答推定

図-11 に余震による応答推定法の概念を示す。2 章で述べたように 1 波目の本震に対して応答推定を行い、その推定点に対して割線を引いたものを余震用耐カスペクトルと定義した。そして、本震より応答の小さな領域においては本震の応答推定値をもとに式(2)を用いて等価減衰定数を算出し、それを用いて求まる要求スペクトルとの交点を余震による応答推定値とした。

図-12 に余震による応答推定結果と 3.3 節で示した Case2 で最大速度 50cm/s 入力時の地震応答等解析結果の比較を示す。図-12 で余震応答推定結果は地震応答解析結果に対して全般的に若干小さめではあるが、概ね良い対応を示していることが分かる。

応答推定値が小さめであることの一因としては、残留変形が考えられる。顕著な例として図-12 で最も危険側となった $C_B=0.3$ のモデルに THKU-NS 波を入力した場合の余震応答推定結果と地震応答解析結果、および同モデルの耐カスペクトルを図-13 に示す。図-13 から耐カスペクトル上にプロットされた Case2 の最大速度 75cm/s と 50cm/s 入力時の応答が同程度になっていることがわかる。また、 $C_B=0.3$ のモデルに THKU-NS 波を入力した場合の Case1(50cm/s 入力)の応答変位時刻歴波形を図-14 に、Case2(75cm/s + 50cm/s 入力)の応答変位時刻歴波形を図-15 に示す。Case1(図-14)では、残留変形はほとんど見られないものの、Case2(図-15)では本震に相当する 75cm/s で比較的大きな残留変形を生じ、最終的に 7.5cm の残留変形を生じており、これが余震応答を過小評価した一因であると考えられる。すなわち、式(2)では定常応答を仮定している一方、図-16 に示すような残留変形のある半ループを推移したとすると、等価ポテンシャルエネルギーを算出する際に残留変形を考慮する必要がある。結果として、本震で残留変形が生じた場合には、式(2)による等価粘性減衰は過大評価となり、余震応答の過小評価につながったと考えられる。

もう一つの要因としては、75cm/s の推定精度が応答推定に影響することが考えられる。表-4 には、Case2 にお

ける ELC-NS 波と TAFT-EW 波の地震応答解析結果と応答推定結果の比較を示す。C_B=0.2 のモデルについて ELC-NS 波 75cm/s 入力時の解析結果と推定値を比べると推定値の方が大きくなっており、その影響で余震の 50cm/s の推定値が大きな値として評価されている。表-4 中の他の解析結果と推定値を比較すると概ね対応が良いことから、75cm/s の推定精度を上げることができれば、余震用耐力スペクトルの精度が向上し、余震の 50cm/s の応答推定精度も向上するものと考えられる。

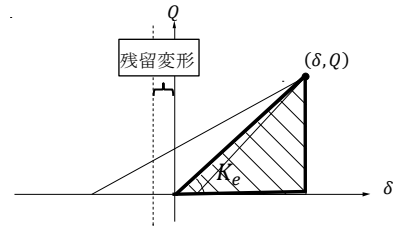


図-16 残留変形時履歴ループ

表-4 ELC-NS 波、TAFT-EW 波における地震応答解析結果 (Case2) と応答推定結果の比較

地震名	ELC-NS				TAFT-EW			
	75cm/s		50cm/s		75cm/s		50cm/s	
C _B	解析結果	推定値	解析結果	推定値	解析結果	推定値	解析結果	推定値
C _B =0.2	2.19	3.60	1.69	2.31	2.84	2.34	1.69	1.61
C _B =0.3	1.77	1.89	1.07	1.23	2.14	2.54	1.83	1.62
C _B =0.4	1.78	1.52	1.12	1.01	1.58	2.02	1.27	1.30
C _B =0.5	1.77	1.59	1.28	1.02	1.42	1.55	1.23	1.02
C _B =0.6	1.76	1.61	1.21	1.06	1.46	1.36	0.97	0.94

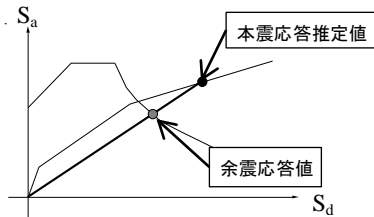


図-11 余震応答推定

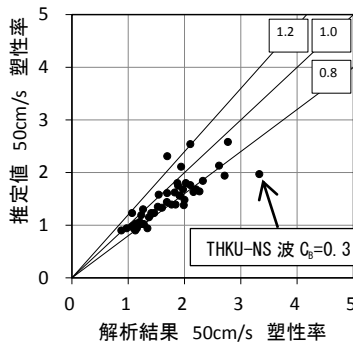


図-12 50cm/s 解析値-推定値比較

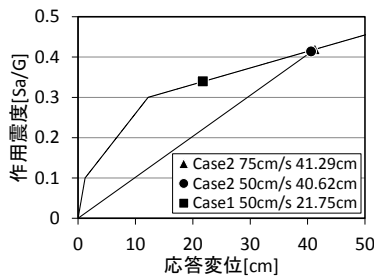


図-13 THKU-NS 波 Case2 C_B=0.3

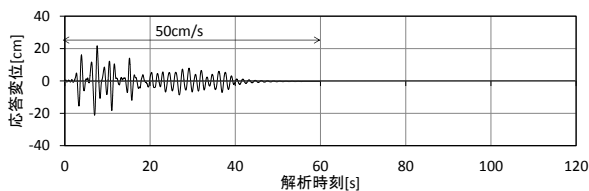


図-14 THKU-NS 波 Case1 C_B=0.3

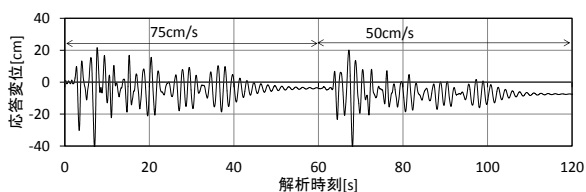


図-15 THKU-NS 波 Case2 C_B=0.3

4.3 等価減衰定数との比較

2.3 節で示した等価減衰定数算定式(1)、(2)の算定精度を検証するため、Case2 の地震応答解析結果から得られた履歴ループごとの等価減衰を式(3)により算出し、式(1)、(2)による算定値との比較を行った。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta W}{W_e} \right) \quad \dots(3)$$

ここで、 ΔW : 履歴ループの 1 サイクルの面積
 W_e : 等価ポテンシャルエネルギー

式(3)で使用した ΔW は、履歴ループの半サイクルの面積を 2 倍した面積である。履歴ループは、75cm/s では塑性率 1.0 以上の半ループのうち過去の最大塑性率を更新した半ループを抜き出した。50cm/s においては、塑性率が 0.5 程度から最大までの代表的な半ループを抜き出している。図-17 a) ~ f) に、これらの方法により抜き出した半ループを用いて式(3)により算出した等価減衰定数と、式(1)から得られる等価減衰定数と塑性率の関係を実線で示す。図-17 中に示す破線は、75cm/s 最大速度入力に対する最大塑性率を用いて式(2)より求められた等価減衰定数を示しており、これは定常共振状態で 75cm/s の最大応答より小さな範囲で応答する際の等価減衰定数を示している。最大速度 75cm/s の解析結果を用いて等価減衰定数を算出した地震波のうち、KWG-NS 波、OSKM-NS 波、BCJ 波は概ね式(1)で算定される実線に近い値となった。また、最大速度 50cm/s の解析結果から算出した等価減衰定数は、KOBJ-NS 波や KWG-NS 波、ELC-NS 波の 3 つの地震波で余震時の減衰定数が破線の 1/2 付近に近い値となった。75cm/s、50cm/s の解析結果から算出された等価減衰定数のうち、適切に評価できなかった C_B=0.4 のモデルに SIM-TK 波 50cm/s を入力したときの履歴ループを図-18 に示す。この解析結果では、残留変形を生じていたことが影響して、4.2 節でも述べたように仮定して

いる履歴性状とは異なったため適切に評価できなかったと考えられる。また、全般的な傾向として75cm/sの地震応答解析結果から算出した等価減衰定数は約6%となっており、50cm/sの等価減衰定数値も6%付近に集中していることから、余震応答に関しては残留変形が発生した状態で定常応答を繰り返していたと考えられる。これは、**図-18**に示した履歴ループ性状とも一致する。

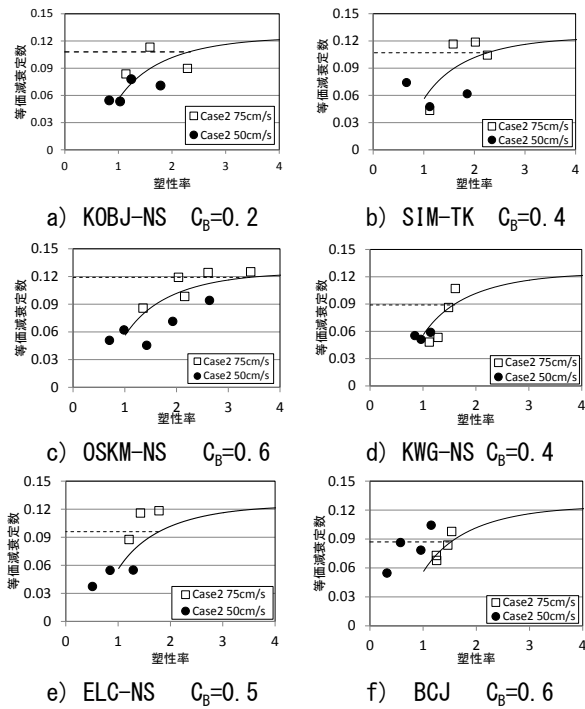


図-17 地震応答解析結果ごとの等価減衰定数

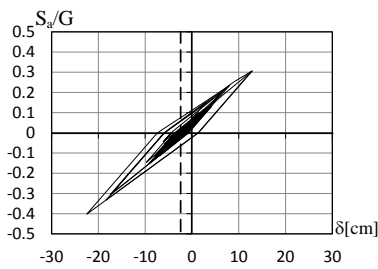


図 18 SIM-TK 波 Case2 50cm/s 履歴ループ

5. まとめ

本論文では、余震に対する応答推定法として、本震の影響を考慮した耐力スペクトルと等価減衰算定式の提案を行うとともに、一質点系モデルを用いてベースシア係数の異なる曲げ系 RC 造中高層建物を対象に、本震で損傷を受けた建物を想定して、本震後に起こる余震に対する地震応答解析を行い、余震による応答推定法の検討を行った。地震応答解析では、最大速度 50cm/s の 1 波のみを入力した場合と、本震に相当する最大速度 75cm/s 入力後、余震を想定した 50cm/s を入力した解析を行っており、この地震応答解析結果と応答推定結果の比較検討を行った結果、以下の 4 つの知見が得られた。

1) TAKEDA モデルの履歴則において定常応答のもとに、余震時の応答が本震時の応答より小さな応答となる場合の等価減衰定数算定式を示した。その結果、この応答領域においては最大応答時の履歴ループと余震時の応答による履歴ループの形状が相似な関係にあるため、このときの等価減衰定数は最大応答時の等価減衰定数と等しくなることを示した。

2) 本震に相当する最大速度 75cm/s の応答を経験した後に入力した最大速度 50cm/s に対する応答は、単独で最大速度 50cm/s を入力した場合の応答と比較して、ほとんどの地震波で大きくなることが確認され、1.2~1.4 倍程度になっている場合が多かった。また、多くの余震に対する地震応答解析結果は、概ね本震による最大応答変位点に関する割線上で最大応答変位が発生しており、本論文で提案した余震用耐力スペクトルの妥当性が確認された。

3) 残留変形が生じた場合、ここで提案した余震に対する応答推定法の精度が低下することが確認された。これは、余震用に提案した等価減衰定数算定式(2)を作成する際に残留変形がない場合の定常応答を仮定しているため、残留変形が生じると等価減衰の推定精度が低下することが原因と考えられる。

4) ここで提案した余震に対する応答推定法の精度について、設定モデルや地震波によって、本震に対する応答推定値が過大または過小に評価される場合、余震用耐力スペクトルに影響を及ぼし、余震に対する応答推定の精度に影響することが確認された。

以上、今後巨大地震に対する耐震設計や耐震補強を行う場合に必要となると考えられる余震に対する地震応答推定法の提案を行ったが、今後は、さらに精度を向上に関する検討を行うと共に、RC 造中低層建物を対象とした検討やオンライン地震応答実験による検証も行う予定である。

<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) 中村孝也，芳村学，上野裕美子：余震を考慮した既存鉄筋コンクリート建物の I_s 値と倒壊の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp1009-1014，2005
- 3) 日本建築学会：建築物の耐震性能評価手法の現状と課題 - 限界耐力計算・エネルギー法・時刻歴応答解析 - ，2009.2
- 4) 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，Vol.28，No.2，pp1057-1062，2006
- 5) 柴田明德，最新 耐震構造解析，森北出版株式会社，1991