

論文 損傷部材の強度・変形・減衰性能の低下に基づく被災 RC 造建物の残存耐震性能評価

伊藤 淑紘*¹・鈴木 裕介*²・前田 匡樹*³

要旨：震災 RC 造建物の耐震性能残存率評価法として、被災度区分判定基準及び既往の研究では、部材の損傷に基づいた耐震性能低減を評価しているが耐力、変形、減衰性能を一纏めにした低減係数を用いている。本研究では損傷とこれら 3 要素を分離して考慮した残存耐震性能評価手法の構築を目的とする。まず、既往の実験結果から曲げ部材とせん断部材の各性能低下を評価した。次に評価した各性能低下を考慮した被災後フレームモデルを増分解析することで応答スペクトル法に基づく残存耐震性能評価（精算法）を行うが、解析等を用いない簡略的な略算法を提案し両手法での算定値を比較した結果、精度良く推定することが出来た。

キーワード：残存耐震性能、地震被害、破壊モード、耐力低下、変形性能、減衰性能

1. はじめに

地震で被災した建物の耐震性能を正確に評価することは適切な復旧計画を立案するために重要である。現状の被災建物の被災度を判定する基準としては、日本建築防災協会の被災度区分判定基準¹⁾で提案されている耐震性能残存率 R が挙げられる。これは各部材の耐力に損傷度から決定される耐震性能低減係数 η (表-1) を乗じて集計することで求められる。耐震性能低減係数 η は図-1 に示すようにエネルギー吸収能力の減少割合と定義されている。損傷により低下する部材の性能には、耐力、変形性能、履歴吸収エネルギーに基づく減衰性能があるが、耐震性能低減係数 η ではこれらの要素を分離して評価していない。従って、耐震性能低減係数 η を被災建物の等価線形化法や動的地震応答解析に適用しようとしても、損傷建物の復元力特性を設定することが出来ない。そこで、本研究では損傷に基づく耐震性能の低下についてこれら 3 性能を後述する η_s, η_d, η_h に分離して評価し、フレーム解析に基づく残存耐震性能評価を可能とすることを目的とする。

上記課題解決の基礎検討として、姚・前田らは 1 質点系モデルを用いて応答スペクトル法に基づく残存耐震性能評価を行い、モデルの耐力、変形及び減衰性能を一定量低下させた場合、それぞれの性能低下が架構の耐震性能残存率 R に及ぼす影響について検討した²⁾。

本研究では被災建物の残存性能をよりの確に評価するため、まず、既往の部材実験結果を基に各損傷度における各種部材の耐力、変形及び減衰性能の低減係数を定量化する。次に、被災前フレームモデル、及び対象モデルの構成部材に各性能の低減係数を考慮した被災後フ

表-1 耐震性能低減係数 η

損傷度	曲げ柱	せん断柱	柱なし壁	柱型付壁	両側柱付壁
I	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
II	0.75	0.6	0.6	0.6	0.6
III	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3
IV	0.1	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0

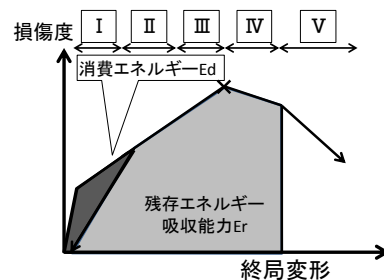


図-1 耐震性能低減係数 η の概念

レームモデルの増分解析結果（荷重-変形関係）を用い、応答スペクトル法による架構の残存耐震性能を算定する（精算法）。更に、より実用的な手法として解析を必要としない評価法（略算法）を提案し、精算法による結果との比較を通し、その有用性を検討する。

2. 損傷部材の耐力、変形、減衰性能の低減係数の検討

2.1 既往の実験概要

本研究で検討した試験体は 1998 年～2012 年に実施された既往の部材実験^{3),4),5)}及び架構実験⁶⁾であり、曲げ部材 10 体、せん断部材 7 体、計 17 体である。試験体諸元を表-2 に、荷重-変形関係の包絡線を図-2 に示す。

2.2 耐力性能低減係数 η_s

図-3 は現行の被災度判定基準¹⁾で採用されている荷重-変形関係と損傷度の概念図である。本研究では、

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)

*2 東北大学 災害科学国際研究所 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 博士 (工学) (正会員)

図-3を参照し、ひび割れ幅ではなく実験による骨格曲線(図-2)から各部材の損傷度を決定する。ここで、損傷度Ⅰがひび割れ発生(第一折れ点)時、損傷度Ⅱが主筋降伏(第二折れ点)時であり最大耐力に達するまでが損傷度Ⅲである。最大耐力に達した後である損傷度Ⅳ以降で耐力低下が生じるので、その時の耐力 Q_{dIV} を最大耐力 Q_{max} で除して耐力性能低減係数 η_s を算出する。

図-4に結果を示すが、損傷度Ⅲ以前は耐力低下していないため $\eta_s=1.0$ となり、損傷度Ⅳで曲げ部材は $\eta_s=0.9\sim 0.6$ 、せん断部材では $\eta_s=0.8\sim 0.4$ であった。

2.3 変形性能低減係数 η_d

変形性能低減係数 η_d を算出するに当たり、変形性能の劣化とは損傷により終局限界変形の低下を指している。そこで、終局変形 δ_u 、最大応答変形 δ_M 及びエネルギー E' の関係から損傷度合いを評価するPark&Angの損傷指標 D^D (式(1))に基づいて変形性能低減係数を算定する。この算定法は図-5及び、式(1)~式(5)に示すように損傷指標 D において、終局変形 δ_u の劣化が繰り返し载荷によるエネルギー吸収に応じて求まるものとして考えたものであり、以下に概要を示す。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + E' \quad (E' = \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE) \quad (1)$$

ただし、 β は正の定数(曲げ:0.05,せん断:0.15)とする。ここで、無被害の部材が図-5赤点線のように、単調载荷で δ_M まで変形した時の D 値を D_1 とすれば、

$$D_1 = \frac{\delta_M}{\delta_u} + 0 \quad (2)$$

次に、繰り返し载荷を受けた後、再び δ_M まで変形した時の損傷指標 D を D_2 とすれば、

$$D_2 = \frac{\delta_M}{\delta_u} + E' \quad (3)$$

ここで式(3)の損傷状態の部材に対し、エネルギー吸収分

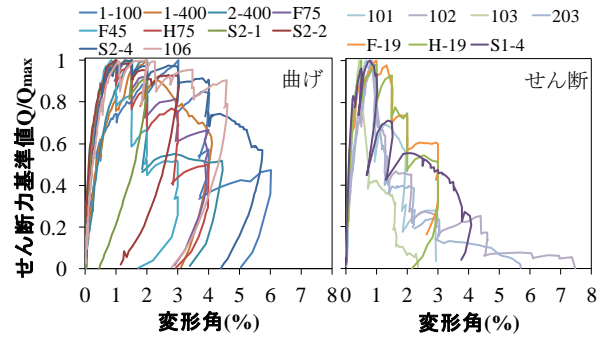


図-2 既往の実験結果

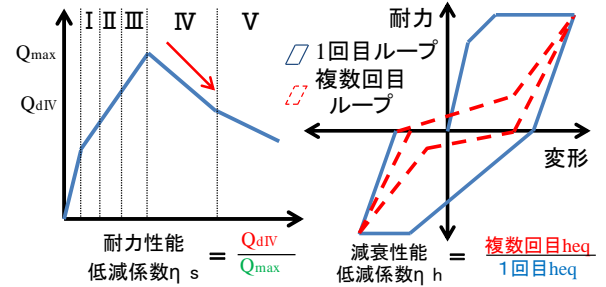


図-3 耐力性能

図-7 減衰性能

低減係数 η_s

低減係数 η_h

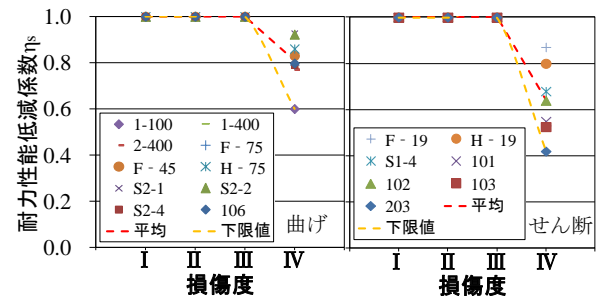


図-4 耐力性能低減係数 η_s 算定結果

の損傷 E' で終局変形 δ_u が $\delta_{u(劣化)}$ へ劣化したものと考え、単調载荷で δ_M まで変形した時の D 値を求めると

$$D_2 = \frac{\delta_M}{\delta_u} + E' = \frac{\delta_M}{\delta_{u(劣化)}} \quad (4)$$

従って、損傷指標 D を用いた終局変形の劣化は式(5)

表-2 試験体パラメータ

部材種	実施年	試験体名称	B	D	L	主筋		せん断補強筋		σ_B (N/mm ²)	軸力 (kN)
			(mm)								
曲げ	1998年	1-100			900	4-D19	SD345	4-D10@75	SD345	33	100× δ_h
		1-400	300	450				2-D10@100		37	400× δ_h
		2-400			1800					39	400× δ_h
	2000年	F-75	400	500	1500	10-D19	SD345	2-12φ@75	SR235	24	953
		F-45						2-12φ@125		25	953
		H-75	200	250	750	10-D10		2-6φ@37.5		24	243
	2002年	S2-1				10-D16	SD390	2-D6@160	SD390	30	900
		S2-2	400	400	1600					29	900
S2-4					2-D6@80			30		900	
2010年	106	400	400	800	16-D22	SD345	2-D6@50	SD295	27	850	
せん断	2000年	F-19	400	500	1500	12-9φ	SD345	2-12φ@300	SR235	24	953
		H-19	200	250	750			2-6φ@300		27	243
	2002年	S1-4	400	400	800	10-D16	SD390	4-D6@80	SD390	30	900
	2010年	101	400	400	800	16-D22	SD345	2-D6@150	SD295	27	250
		102				12-D19	SD345	2-D4@100	SD295	27	250
		103	300	300	600	12-D16		300		300	
2012年	203					2-D4@40				300	300

(δ_h : 軸変位 mm)

で算出される。

$$\delta_{u(\text{劣化})} = \frac{\delta_M}{D_I + E'} \quad (5)$$

このように、各損傷度における $\delta_{u(\text{劣化})}$ を算定し、 δ_u で除して変形性能低減係数 η_d を算定する。

変形性能低減係数 η_d の結果を図-6 に示す。限られた試験体から求めた値ではあるが、曲げ部材は損傷度 I ~ IV の間で 1.0 ~ 0.75 程度、せん断部材は 1.0 ~ 0.5 程度となり、せん断部材の性能低下が著しい。

2.4 減衰性能低減係数 η_h

保有耐震性能指標の算出に用いる応答低減率 F_h は等価粘性減衰定数 h_{eq} を用いて算定している。そこで本研究では応答スペクトル法に準じた残存耐震性能評価を念頭に置いているため、 F_h の算出法に伴い図-7 に示すように、減衰性能の低下（減衰性能低減係数 η_h ）は各載荷サイクルの1回目と複数回目(2もしくは3サイクル目)の等価粘性減衰定数 h_{eq} を算定し、その比率で評価した。

図-8、9 に結果を示す。ただし図-8 には参考のため係数 $\alpha=1/\pi$ とした平均等価減衰の値を実線で併記した。せん断部材は履歴面積がスリップ形状となるため、初回サイクルに対して複数回サイクル時の履歴面積が大きく減少する。そのため減衰性能低減係数 η_h は曲げ部材と比較して、せん断部材が大きく低下する。

以上より、各性能の低減係数の算定結果を表-3 にまとめる。ここで、表-3 の値は図-4、6、9 を基に決定したが、損傷度 I ~ III は実被害において安全性に直接結びつくことが少ないため算定結果の平均値を採用し、損傷度 IV においては安全側を期して、下限値とした。

3. 応答スペクトル法による耐震性能残存率評価法

3.1 精算法

本章では、部材に損傷が生じた架構の残存性能評価を応答スペクトル法に基づいて行うが、図-10 のような被災前後の荷重-変形関係が必要となる。そこで、対象モデルの構成部材に各性能の低減係数（表-3）を考慮した被災後フレームモデルの漸増載荷解析結果（荷重-変形関係）を用い、「耐震性能評価指針」⁸⁾ で定義される保有耐震性能指標 α を被災前後の架構に対して算定する。 α の低下割合を式(6)で評価することで、耐力、変形、減衰性能の低下を分離して考慮した耐震性能残存率 R の算定を行う。これを本論文では精算法と呼ぶ。

$$\text{耐震性能残存率 } R(\%) = \frac{\text{損傷後の保有耐震性能指標 } \alpha'}{\text{損傷前の保有耐震性能指標 } \alpha} \quad (6)$$

図-10 のように 1 質点系に縮約する際、各部材の性能低下も縮約する必要がある。漸増載荷解析では耐力性能の低下を架構全体として直接求めているが、変形性能及び減衰性能の低下は各部材の応答量を定めないと架構

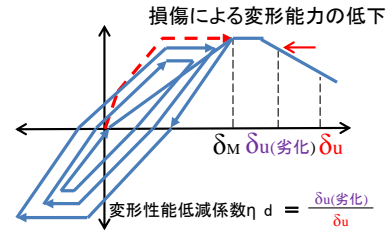


図-5 変形性能低減係数 η_d

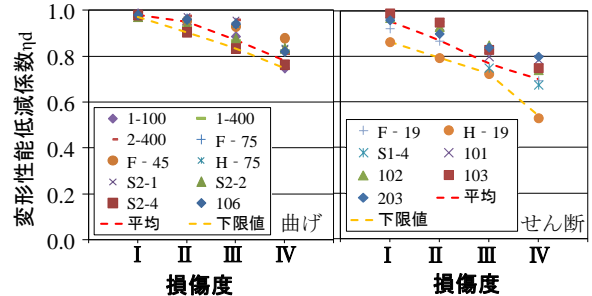


図-6 変形性能低減係数 η_d 算定結果

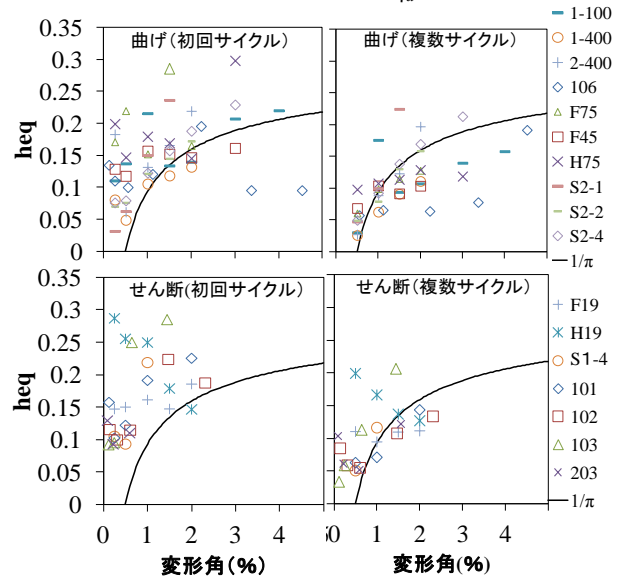


図-8 等価粘性減衰定数 h_{eq}

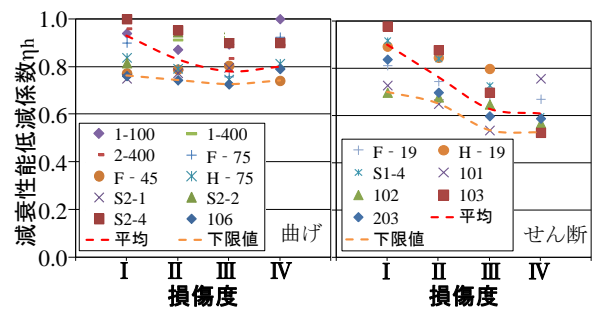


図-9 減衰性能低減係数 η_h 算定結果

表-3 耐力・変形・減衰の性能低減係数

損傷度	曲げ部材			せん断部材		
	η_s	η_d	η_h	η_s	η_d	η_h
I	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00	0.90
II	1.00	0.95	0.80	1.00	0.85	0.70
III	1.00	0.85	0.75	1.00	0.70	0.60
IV	0.60	0.75	0.70	0.40	0.50	0.50

全体への性能低下を求めることが出来ない。そこで本論文では変形性能残存率 R_d を、終局変形時の各部材の

実変形 θ を重み付け平均する式(7)で算定する。

$$R_d = \frac{\sum_i (\eta_{di} \theta_i)}{\sum_i \theta_i} \quad (7)$$

また、減衰性能の低下（減衰性能残存率 R_h ）も同様に、各部材の終局時におけるエネルギー E を評価し重み付け平均する(式(8))。

$$R_h = \frac{\sum_i (\eta_{hi} E_i)}{\sum_i E_i}, \quad E = Q \cdot \delta \cdot M \cdot \theta \quad (8)$$

3.2 略算法

Hao ら⁹⁾の研究により、1 質点系モデルに対して式(6)を基準地震動の応答スペクトルと荷重-変形関係を数学的に定式化することで、応答スペクトル法に基づく耐震性能残存率 R が式(9)で評価出来ることを示した。

$$R = \sqrt{R_s} \frac{\sqrt{R_d + 3R_h} \sqrt{R_d - 5R_h} / 2}{4 - 5R_h / 2} \quad (9)$$

R_s : 耐力性能残存率 R_d : 変形性能残存率

R_h : 減衰性能残存率

本研究では式(9)をフレームモデルに対して適用出来るよう簡略的な手法を提案する。ここで、フレームモデルでは図-11 や表-4 のように各部材の損傷度や耐震性能が異なるため R_s , R_d , R_h への影響が異なる。そこで、以下のように各部材の性能を架構の性能に集約する略算法を提案する。

耐力性能残存率 R_s は式(10)のように各部材の損傷度から決められる耐力性能低減係数 η_s に対して、各部材の終局耐力 Q_u , M_u を重み付け平均し算定する。

$$R_s = \frac{\sum_i (\eta_{si} Q_{ui})}{\sum_i Q_{ui}}, \quad \frac{\sum_i (\eta_{si} M_{ui})}{\sum_i M_{ui}} \quad (10)$$

変形性能残存率 R_d は図-11 のような、同一な破壊モードの部材で構成される単純フレームでは各部材の変形性能(変形割合)はほぼ同じと考えられるため、式(11)のように各部材の損傷度から決まる変形性能低減係数 η_d を部材数 n で平均し算定する。

$$R_d = \frac{\sum_i \eta_{di}}{n} \quad (11)$$

減衰性能残存率 R_h は式(8)のエネルギー E を略算的に求めるが、式(11)と同様、部材種が同じ場合は変形量も同程度であるため式(12)のように耐力の重み付け平均で評価する。

$$R_h = \frac{\sum_i (\eta_{hi} Q_{ui})}{\sum_i Q_{ui}}, \quad \frac{\sum_i (\eta_{hi} M_{ui})}{\sum_i M_{ui}} \quad (12)$$

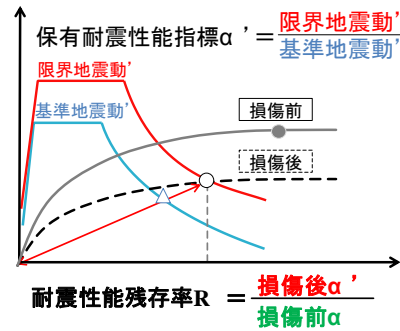


図-10 応答スペクトル法に基づく残存率評価の概念

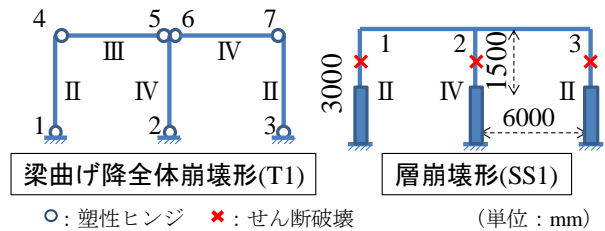


図-11 建物モデル

表-4 建物モデル諸元

	b×D (mm)	クリアスパン (mm)	主筋 SD345	横補強筋 SD295	曲げ(kN・m)		せん断(kN)	
					Mcr	Mu	Qcr	Qu
側柱	600×600	2450	16-D22	2-D10@150	138	415	135	404
中柱	600×600	2450	16-D22	2-D10@150	158	475	132	396
梁	550×550	5400	4-D19	2-D10@100	65	194	80	240

	b×D (mm)	クリアスパン (mm)	主筋 SD345	横補強筋 SD295	曲げ(kN・m)		せん断(kN)	
					Mcr	Mu	Qcr	Qu
側柱	550×550	900	12-D22	2-D10@150	105	316	107	436
中柱	550×550	900	12-D22	2-D10@150	123	369	113	455
梁	400×600	5450	6-D22	2-D10@100	143	428	100	300

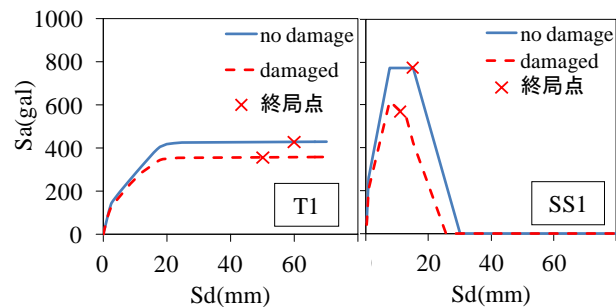


図-12 増分解析結果

3.3 例題建物モデルにおける算定例

(1) 建物モデル及び解析条件

検討モデルは、曲げ部材のみで構成される靱性型モデル T1 と、せん断部材のみで構成される脆性型モデル SS1 を用いた。建物モデルを図-11 に諸元を表-4 に示す。ひび割れ強度 M_{cr} , Q_{cr} 、及び降伏強度 M_u , Q_u は部材断面に基づき、略算式¹⁰⁾により算出した。精算法の増分解析では、柱と梁の材端に曲げバネとせん断バネ、中央に軸バネ（弾性）を持つ線材とした。復元力特性は、曲げ部材ではトリリニア型モデルを用いて、ひび割れ、降伏後の剛性低下率を、0.2 及び 0.001 と定めた。一方、せん断部材は最大耐力後部材角 2.0% で耐力 0 となるように負勾配を定めた。ここで、終局限界変形は、T1 モデル

で層間変形角 2.0%時とし、SS1 モデルで 1.0%時とした。

(2) 算定結果

両モデルの算定結果を図-12~14 に示す。図-12 は精算法で用いる損傷前後の耐力曲線であり、損傷後の終局変形は損傷前の終局変形に R_d を乗じたものとなる。図-13 は各部材が持つ建物全体の R_s , R_d , R_h への影響度を表したものであり、両モデルで略算法は精算法にほぼ近い値が得られた。また、図-14 は精算法、略算法それぞれで評価した R_s , R_d , R_h の値及び耐震性能残存率 R である。図-13 と同様、精算法と略算法でほぼ近い値が得られた。

4. 破壊モードが混在する建物への拡張

4.1 終局変形位置による各性能補正

3 章では同一な破壊モードで構成されるモデルについて略算法の精度検証を行った。本章では、脆性（せん断）部材と靱性（曲げ）部材で構成される混在型モデルで検討を行う。

破壊モードが混在する場合、図-15 に示すように精算法の終局変形は、脆性部材の優位な架構か靱性部材の優位な架構かで異なる設定となるため、各部材の耐力性能残存率や変形性能残存率などへの影響が異なる。従って、3 章の略算法では十分な精度で推定が出来ないため補正略算法を提案する。

脆性型建物（架構の終局変形角 1.0%時）では、架構内に残されている靱性部材は終局耐力に達することは殆ど無い。そこで補正略算法（脆性型）では耐震診断基準¹⁰⁾で採用されている耐力寄与係数 0.7 を準用する。また、変形性能残存率 R_d は安全側を期すため、脆性型建物を構成するせん断部材の中でも一番大きな被害を受けた部材の変形性能低減係数 η_s を用いて算定する。

靱性型建物（終局変形角 2.0%時）内の、脆性部材は耐力低下により架構全体への耐力寄与が減少する。また、腰壁等で周辺の靱性部材より内法スパンが短くなる場合は大きな変形角となる。そこで、補正略算法（靱性型）はせん断部材の耐力寄与を 0 とし、変形性能残存率 R_d は各部材の高さと内法スパンの比を重み付け平均する。

ここで、補正略算法及び、精算法を含めた残存率算定法を表-5 にまとめる。

4.2 混在型モデルにおける算定例

(1) 建物モデル及び解析条件

検討モデルは、曲げ部材とせん断部材で構成される混在型建物モデル(図-16)を用いるが、諸元を表-6 に示す。解析条件は 3 章に示す通りである。

(2) 算定結果

算定結果を図-17, 18 に示す。図-17 は損傷前後の耐力曲線であるが、靱性型、脆性型それぞれの終局変形

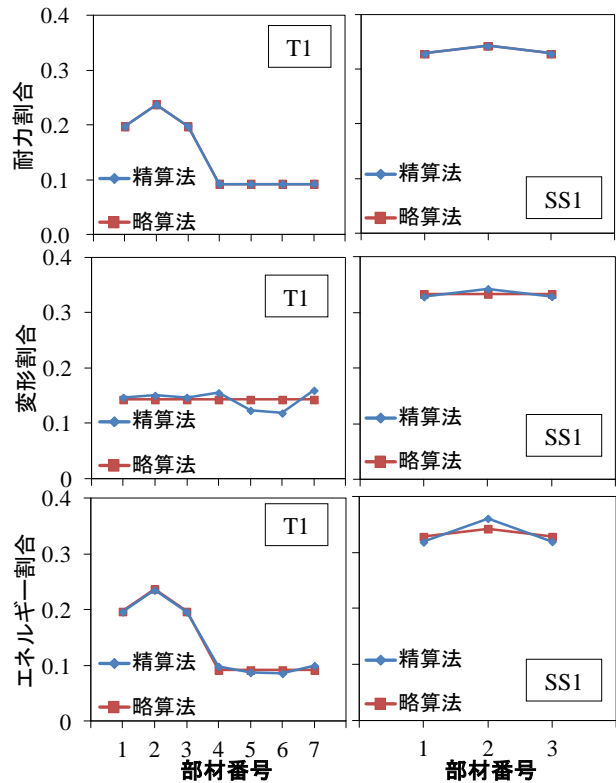


図-13 各性能割合の算定結果

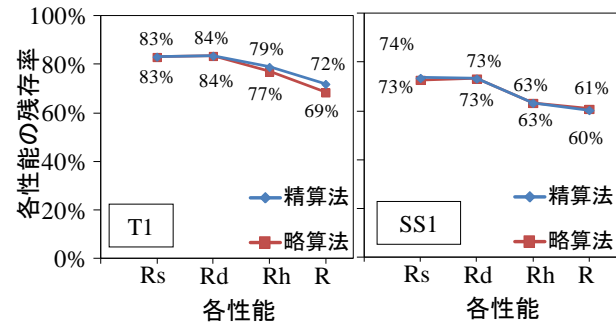


図-14 各性能の残存率評価結果

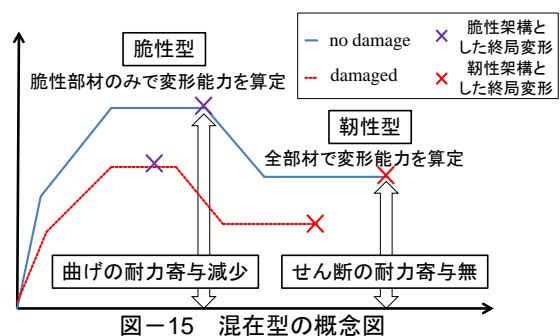


図-15 混在型の概念図

位置を示した。図-18 は精算法と略算法及び補正略算法である。略算法は耐力寄与や変形割合の推定において実際の破壊モードを反映していない部分があるため、精算法を近似していないが、補正略算法は総じて安全側の評価となるだけでなく、略算法と比較して概ね精度も良い。

5. まとめ

本研究では応答スペクトル法に基づく耐震性能残存率評価法の実建物適用を目標として、損傷部材における

耐力, 変形, 減衰性能の低減係数の算定及び, フレームモデルへの簡略的な手法の提案を行うことで, 以下の知見が得られた。

(1) 各損傷度における部材性能の低減係数の算定は, 既往の部材実験結果を用いて耐力, 変形, 減衰性能の低減評価を行った。結果として, 既往の耐震性能低減係数 η 同様, せん断部材の各性能低下が顕著であった。

(2) 破壊モードが同一な部材で構成されたフレームモデルへの検討では, 解析的な手法である精算法と, 略算法でほぼ同じ値を得ることが出来た。

(3) 曲げ部材とせん断部材で構成される破壊モード混在モデルでは設定する終局変形位置によって, 各部材の耐力性能残存率 R_s , 変形性能残存率 R_d 及び減衰性能残存率 R_h への影響が異なるため, 補正略算法を提案することで, 概ね精度の良い結果が得られた。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針, 2002.8
- 2) 姚倩倩, 前田匡樹ほか: 応答スペクトルに基づく震災RC造建物の残存耐震性能評価 その1 評価法の基本概念と架構の性能低下の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp195-196, 2014.8
- 3) 文野正裕, 前田匡樹ほか: 部材の残余耐震性能に基づいた震災RC造建物の被災度評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1447-1452, 2000
- 4) 文野正裕, 前田匡樹ほか: RC柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.259-264, 2001
- 5) 田中康介, 前田匡樹ほか: 震災鉄筋コンクリート造建築物の残存耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1225-1230, 2003
- 6) Kazuto Matsukawa, Xiu Liu & Masaki Maeda :Process of Collapse for RC Frame Including Shear Column, Proceedings of the 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.817-824, 2013,3
- 7) Park, Y.-J and Ang, A.H.-S: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE Vol.111, No.4, pp.722-739, 1985.4
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, 2006
- 9) Hao linfei, Maeda Masaki : Residual Seismic Capacity Assessment of Damaged RC Buildings Based on Response Spectrum Part 2. Assessment of residual seismic capacity ratio based on ideal model and

表-5 各評価法概要

		耐力	変形	減衰
被災度区分判定基準		$\frac{\sum \eta \cdot Q_u}{\sum Q_u}$	低減無	低減無
精算法	靱性型	損傷モデルによる増分解析	実変形(解析)による重み付け(部材全て)	増分解析の荷重-変形関係から評価
	脆性型		脆性部材の実変形(解析)による重み付け	
略算法		$\frac{\sum \eta_i \cdot Q_{ui}}{\sum Q_{ui}}$	$\frac{\sum \eta_d}{n}$	$\frac{\sum \eta_h \cdot Q_{ui}}{\sum Q_{ui}}$
補正略算法	靱性型	$\frac{\sum \eta_i \cdot Q_{ui}}{\sum Q_{ui}(\text{せん断0})}$	$\frac{\sum \eta_i \cdot l / h_i}{\sum l / h_i}$ (内法長さ h_i)	$\frac{\sum \eta_h \cdot Q_{ui} \cdot \delta_{ui}}{\sum Q_{ui} \cdot \delta_{ui}}$
	脆性型	$\frac{\sum \eta_i \cdot Q_{ui}}{\sum Q_{ui}(\text{曲げ0.7})}$	$\min(\eta_d)$	同上

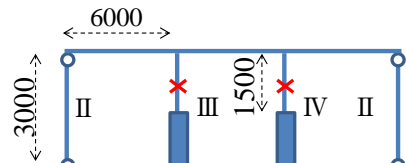


図-16 建物モデル (混在型)

表-6 建物モデル (混在型) 諸元

	bxD	主筋	横補強筋	曲げ(KN・m)		せん断(KN)	
	(mm)	SD345	SD295	Mcr	Mu	Qcr	Qu
側柱	550×550	I2-D22	2-D10@150	105	316	107	321
中柱	550×550	I2-D22	2-D10@150	123	369	113	455
梁	400×600	6-D22	2-D10@100	143	428	100	300

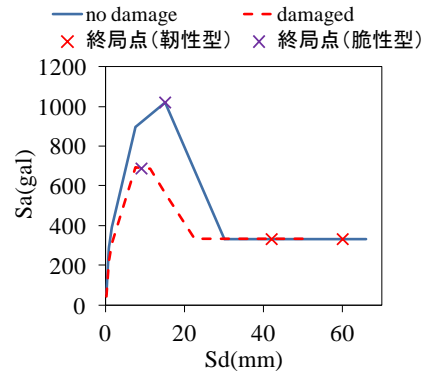


図-17 増分解析結果 (混在型)

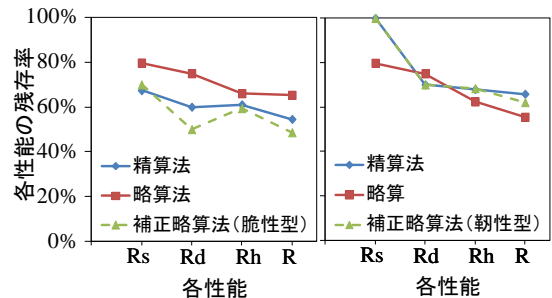


図-18 各性能の残存率評価結果 (混在型)

comparison with seismic capacity reduction factor, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp197-198, 2014.8

- 10) 日本建築防災協会: 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001.10