

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

EVALUATION METHOD OF RESIDUAL SEISMIC CAPACITY FOR DAMAGED RC FRAMES CONSIDERING STRENGTH, DEFORMATION AND ENERGY DISSIPATION

伊藤淑紘 (性能制御システム学分野)
Yoshihiro ITO

Abstract

Main purpose of this paper is to investigate residual seismic capacity for RC frames. The residual seismic capacity index R can be calculated considering reduction of seismic capacity according to damage levels in structural members by using seismic capacity reduction factor η . η is affected by the strength, deformation and energy dissipation. Thus index η cannot be adapted for an evaluation of seismic capacity by equivalent linearization method, as damaged strength deformation curve is needed for this method. Based on this background, a new evaluation method of residual seismic capacity index R considering strength, deformation and energy dissipation independently is proposed in this report. Moreover, an approximation method was developed which obtained a satisfactory prediction.

Keywords :Residual seismic capacity, Post-earthquake damage evaluation, Damage mode, Strength, displacement capacity, Damping,

残存耐震性能, 被災度判定, 破壊モード, 耐力, 変形性能, 減衰性能,

1. はじめに

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 を乗じて集計することで求められる。しかしながら、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り、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。

本研究では損傷による耐震性能の低下について耐力、変形及び減衰の3性能を分離して評価し、応答スペクトル法を用いた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。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、変形性能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定量化した各性能の低減係数を考慮した被災後フレームモデルの増分解析結果(荷重-変形関係)を用いて、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増分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

本研究は1998年～2012年に実施された既往の部材実験^{2),3)}

及び架構実験⁴⁾から、曲げ部材10体、せん断部材7体、計17体の実験データを収集し、部材損傷度と各性能低下の関係を分析した。試験体諸元を表-1に、荷重-変形関係の包絡線を図-1に示す。本研究では定量化した各性能の低減係数を、それぞれ耐力性能低減係数 η_s 、変形性能低減係数 η_d 及び減衰性能低減係数 η_b とする。

2.2 耐力性能低減係数 η_s

図-2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、図-2を参照し、実験による荷重-変形関係(図-1)から各部材の損傷度を決定する。被災度区分判定基準の損傷度の定義では、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、その時の耐力を最大耐力で除して耐力性能低減係数 η_s を算出する。

図-3に結果を示すが損傷度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 は Park&Ang の損傷指標 $D^5)$ に基づいて算定する。この算定法は損傷指標 D において、図-4のように終局変形 δ_u 、最大応答変形 δ_M 及びエネルギー E' の関係から、繰り返し载荷のエネルギー吸収に応じて終局変形 δ_u が劣化するものとして、式(1)で算出される。

$$\delta_{u(\text{劣化})} = \frac{\delta_M}{D + E'} \quad (1)$$

各損傷度における $\delta_{u(\text{劣化})}$ を算定し、終局変形 δ_u で除して算定する。ここで、終局変形 δ_u は水平耐力や軸耐力の低下などを考慮して決まるが、詳細は既往の実験^{2),3)4)}を参照されたい。

変形性能低減係数 η_d の結果を図-5に示す。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

減衰性能の低下 (減衰性能低減係数 η_h) は図-6に示すように、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-7に結果を示す。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し、減衰性能低減係数 η_h は曲げ部材と比較して大きく減少する。

以上より、各性能の低減係数の算定結果を表-2にまとめる。ここで、表-2の値は図-3, 5, 7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-8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-2)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 の損傷前後の比を式(2)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。

$$\text{耐震性能残存率 } R(\%) = \frac{\text{損傷後の保有耐震性能指標 } \alpha'}{\text{損傷前の保有耐震性能指標 } \alpha} \quad (2)$$

図-8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(3)で算定する。

$$R_d = \frac{\sum_i (\eta_{di} \theta_i)}{\sum_i \theta_i} \quad (3)$$

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(4)。

$$R_h = \frac{\sum_i (\eta_{hi} E_i)}{\sum_i E_i}, \quad E = Q \cdot \delta, M \cdot \theta \quad (4)$$

3.2 略算法

Haoら⁷⁾の研究により、1質点系モデルに対して式(2)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(5)で評価出来ることを示した。

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

表-1 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)						
			(mm)												
曲げ	1998年	1-100	300	450	900	4-D19	SD345	4-D10@75	33						
		1-400						2-D10@100		37					
		2-400									39				
	2000年	F-75	400	500	1500	10-D19	SD345	2-12φ@75	24						
		F-45						2-12φ@125		25					
		H-75						2-6φ@37.5			24				
	2002年	S2-1	400	400	1600	10-D16	SD390	2-D6@160	30						
		S2-2						2-D6@80		29					
		S2-4									30				
	2010年	106	400	400	800	16-D22	SD345	2-D6@50	27						
2000年		F-19						400		500	1500	12-9φ	SD345	2-12φ@300	24
		H-19												2-25φ	
2002年	S1-4	400	400	800	10-D16	SD390	4-D6@80	30							
	2010年						101		400	400	800	16-D22	SD345	2-D6@150	27
102		12-D19	27												
103		12-D16		27											
2012年	103	300	300		600		SD345	2-D4@100	27						
	203			2-D4@40											

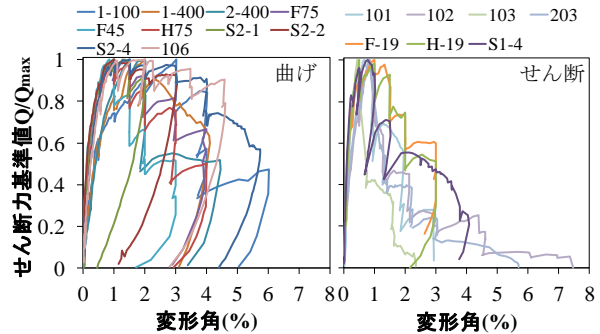


図-1 既往の実験結果

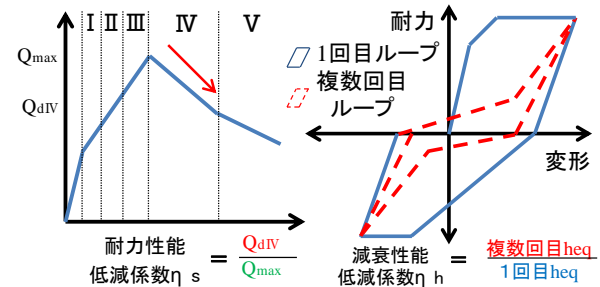


図-2 耐力性能

低減係数 η_s

図-6 減衰性能

低減係数 η_h

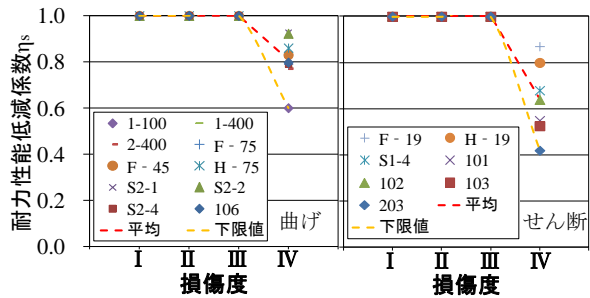


図-3 耐力性能低減係数 η_s 算定結果

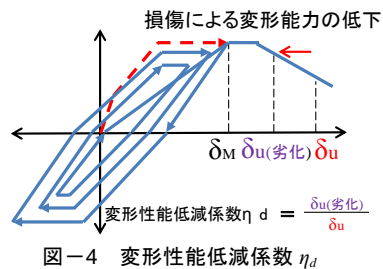


図-4 変形性能低減係数 η_d

ここで、 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(5)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-9や表-3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(5)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。

$$R_s = \frac{\sum_i (\eta_{si} Q_{ui})}{\sum_i Q_{ui}}, \frac{\sum_i (\eta_{si} M_{ui})}{\sum_i M_{ui}} \quad (5)$$

変形性能残存率 R_d は図-9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)はほぼ同じであるため、式(6)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。

$$R_d = \frac{\sum_i \eta_{di}}{n} \quad (6)$$

減衰性能残存率 R_h は式(4)のエネルギー E を略算的に求めるが、式(6)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(7)のように耐力の重み付け平均で評価する。

$$R_h = \frac{\sum_i (\eta_{hi} Q_{ui})}{\sum_i Q_{ui}}, \frac{\sum_i (\eta_{hi} M_{ui})}{\sum_i M_{ui}} \quad (7)$$

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、曲げが先行して破壊する部材のみで構成される梁曲げ降伏全体崩壊形の靱性型モデル T1 である。建物モデルを図-9に諸元を表-3に示す。図-9は建物高さ、スパン長に加え、損傷度を示している。また、表-3のひび割れ強度 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⁸⁾により算出した。精算法の増分解析は、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。終局変形は層間変形角2.0%とした。

(2) 算定結果

両モデルの算定結果を図-10, 11に示す。図-10は精算法で用いる損傷前後の耐力曲線である。図-11は建物全体の耐力性能残存率 R_s , 変形性能残存率 R_d , 減衰性能残存率 R_h の精算法及び略算法の算定結果である。結果より略算法は精度良く精算法を推定しているだけでなく、安全側の評価となり略算法が妥当であると言える。

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。

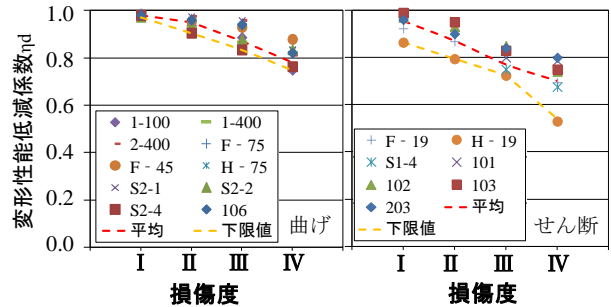


図-5 変形性能低減係数 η_d 算定結果

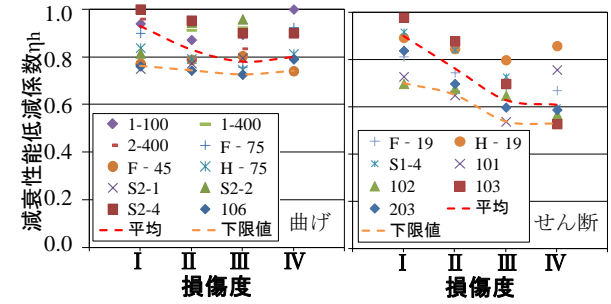


図-7 減衰性能低減係数 η_h 算定結果

表-2 耐力・変形・減衰の性能低減係数

損傷度		η_s	η_d	η_h		η_s	η_d	η_h
I	曲げ部材	1.00	1.00	0.95	せん断部材	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

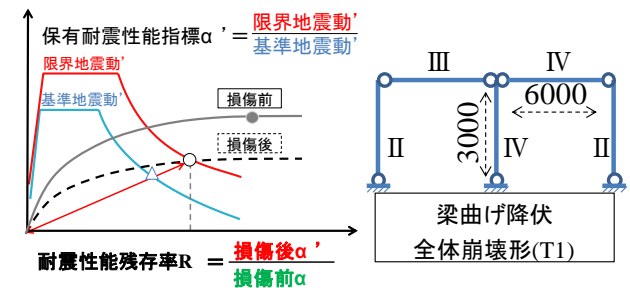


図-8 応答スペクトル法に基づく 図-9 建物モデル
残存率評価の概念

表-3 建物モデル諸元

T1	bxD (mm)	主筋	横補強筋	曲げ(KN・m)	せん断(KN)	せん断(KN)	Qu
側柱	600×600	16-D22	2-D10@150	138	415	135	404
中柱	600×600	16-D22	2-D10@150	158	475	132	396
梁	550×550	4-D19	2-D10@100	65	194	80	240

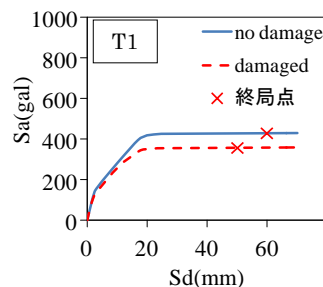


図-10 増分解析結果

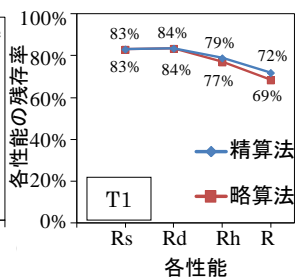


図-11 各性能の
残存率評価結果

破壊モードが混在する場合、精算法における架構の終局変形は、構成部材中の脆性部材及び靱性部材のいずれかが支配的になるため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、3.2節で述べた略算法においても、各構成部材の性質の影響を評価するため補正略算法を提案する。本研究では架構の耐震性能にいずれかの部材影響が支配的であるかによって脆性型建物、靱性型建物の2パターンを試算する。

脆性型建物（終局変形角 1.0%時）では、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⁸⁾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_d 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。

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-12)とし、その諸元を表-4に示す。解析条件として、検討モデルを脆性型または靱性型建物に設定し、それぞれを精算法及び補正略算法で算出するものとした。ここで、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。また、脆性型建物及び靱性型建物の終局変形は、層間変形角 1.0%と 2.0%時とした。

(2) 算定結果

算定結果を図-13、14に示す。なお、図-14内には3.2節で記した略算法による結果も併記する。図-13は損傷前後の耐力曲線であり、靱性型、脆性型建物それぞれを想定した場合の終局変形を示した。図-14より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、補正略算法は精算法との精度が良く、かつ概ね安全側の評価となる

5. まとめ

(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、略算法では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 R_s 、 R_d 及び 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。

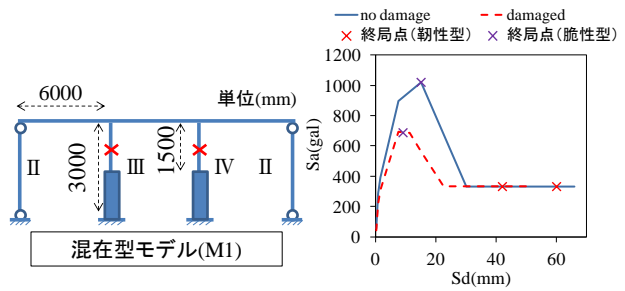


図-12 建物モデル（混在型）

図-13 増分解析結果（混在型）

表-4 各性能の残存率評価結果（混在型）

	b×D	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	12-D22	2-D10@150	105 316	107	321
中柱	550×550	12-D22	2-D10@150	123 369	113	455
梁	400×600	6-D22	2-D10@100	143 428	100	300

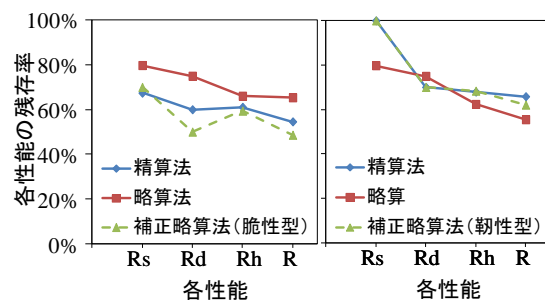


図-14 各性能の残存率評価結果（混在型）

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) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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 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
- 8) 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