

論文 曲げ破壊型連層耐震壁を有する RC 造架構の残存耐震性能評価

藤田 起章*1・田畑 佑*2・Hamood AlWashali*3・前田 匡樹*4

要旨：地震で被災した曲げ破壊型連層耐震壁付き RC ラーメン架構の残存耐震性能を簡易的に評価するために、破壊モードが部材によって異なることを考慮した略算評価法を新たに提案した。その後、既往の研究における保有耐震性能に基づく残存耐震性能の精算評価法との比較から、現行被災度区分判定基準の略算法と提案した略算評価法の妥当性を検証した。現行基準の略算法は、対象モデルの耐震性能残存率を安全側に推定できていることが確認されたが、過小評価する結果となった。対して、提案略算法では、耐震性能残存率を安全側に評価し、かつ現行基準の略算法より良い精度で推定できた。

キーワード：残存耐震性能評価, 連層耐震壁付きラーメン架構, 内力仕事, 部材寄与度

1. はじめに

地震被害を受けた建物の補修、補強の可否を判定し、合理的な復旧計画を立案するためには、被災後の耐震性能を適切に評価することが重要である。現在用いられている指標として、被災前に対する被災後の耐震性能の比を表す耐震性能残存率 R がある。解析の不要な簡易評価法として、(財)日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定基準」¹⁾(以下、現行基準)では耐震性能残存率 R の略算評価法が提案されている。この略算法は、仮想仕事の原理における架構の内力仕事の概念に基づき、同基準で提案されている耐震性能低減係数 η (表-1)を、部材の終局耐力(せん断力 Q_u あるいは曲げモーメント M_u)で重みづけ平均して建物の R を算出するものである(図-1)。しかし、連層耐震壁部材と柱梁部材が混在する架構において、耐力・変形能力・エネルギー吸収能は柱・梁部材と耐震壁部材で大きく異なるため、耐震性能残存率 R を略算する際の各部材の寄与度は部材の破壊モードや変形性能に影響されるが、上記の略算法は計算の簡略化のためすべての部材の変形が同一で同時に破壊することを前提としている。

そこで、本研究では曲げ破壊先行型連層耐震壁を有するラーメン架構の耐震性能残存率 R を簡易的に求める方法として、現行基準の評価法(以下、現行略算法)に対して、破壊モードごとの部材の寄与係数 β を用いる提案略算法1、寄与係数 β とさらに履歴吸収エネルギーを考慮した耐震性能低減係数 η_w を用いる提案略算法2を提示し(表-2)、その妥当性を検証する。このためにまず既往の研究による、荷重増分解析による被災架構の残存耐震性能評価法(以下、精算法)を示す。次に、提案略算法1、2の概要を示す。最後に、架構モデルを対象

表-1 現行基準の耐震性能低減係数 η

損傷度	RC造柱	RC造壁	RC造梁
破壊	曲げ	曲げ	曲げ
I	0.95	0.95	0.95
II	0.75	0.7	0.75
III	0.5	0.4	0.5
IV	0.2	0.1	0.2
V	0	0	0

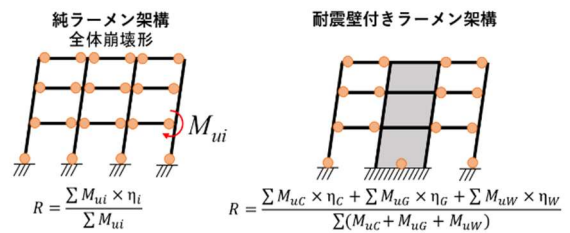


図-1 現行略算法の概念

表-2 各略算法の特徴

	現行略算法	提案略算法1	提案略算法2
部材寄与係数 β	×	○	○
履歴吸収エネルギーを考慮した低減係数 η_w	×	×	○

に、それぞれの略算法による結果と精算法による結果を比較し、現行略算法の妥当性を検証、提案略算法1、2による耐震性能残存率 R の推定精度の検証を行う。なお、提案略算法1では部材寄与係数 β 自身が耐震性能残存率 R の推定精度に及ぼす影響を検証し、提案略算法2ではさらに耐震性能低減係数 η_w の評価精度への影響について検討する。

2. 保有耐震性能指標に基づく精算法

解析による精算法の流れを図-2に示す。三浦ら²⁾は損傷前後建物の安全限界における保有耐震性能指標³⁾

*1 東北大学 工学部建築社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 修士課程

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

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

を用い、耐震性能残存率 R を式(1)に示すように提案した。なお、保有耐震性能指標は、限界地震動の基準地震動に対する比であり、基準地震動は工学的基盤面で定義された一般的な地震動特性と表層地盤の増幅特性を考慮した地震動を減衰により低減した地震動、限界地震動は、構造物が終局限界状態に達するときの地震動とした。

$$R = {}_D\alpha / \alpha \quad (1)$$

ここで α と ${}_D\alpha$ はそれぞれ無損傷建物と損傷後建物の安全限界における保有耐震性能指標である。また、破壊モード混在型建物において、耐震壁の破壊により耐力低下が生じる場合の安全限界は松川ら⁴⁾が提案した保有耐震性能指標を用いる評価法により判定する。

2.1 支配破壊モードの判定

図-3に示すように松川らが提案した安全限界評価法では、性能曲線と接する応答点の中で、 α が最大となる点を安全限界と定義している。本研究では、耐震壁・柱梁部材が混在する無損傷架構の性能曲線を求めるにあたり、「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準同解説」⁵⁾の3次診断法の荷重増分解析を用いる扱いに基づき、破壊した耐震壁部材の壁脚をピン部材に置換し複数回の荷重増分解析を行うことで耐震壁破壊による耐力低下を考慮することとした。また、簡易化のため連層耐震壁と柱梁が最初に終局に達する解析ステップに対応する性能曲線の点をそれぞれ耐震壁破壊点 W と柱梁破壊点 F とする。点 W における保有耐震性能指標 α_W が、点 F における保有耐震性能指標 α_F より大きい場合、安全限界は点 W となり、耐震壁破壊が支配的となる。逆に α_F が α_W より大きい場合は、安全限界は点 F となり、柱梁破壊が支配的となる。 α を求める際の架構の等価減衰定数 h は式(2)、(3)により求める。

$$h = \sum W_{ei} h_i / \sum W_{ei} \quad (2)$$

$$h_i = 0.05 + 0.25(1 - 1/\sqrt{\mu_i}) \quad (3)$$

ここで、 W_{ei} ：部材の歪エネルギー、 h_i ：部材の等価減衰定数、 μ_i ：部材の塑性率とする。なお、点 F における α_F を求める際は、壁の寄与分は無視した。

2.2 耐震性能残存率の算定

被災後の建物における各部材の性能の低減はHAOら⁶⁾の研究に従い次のように行う。まず、各部材の損傷度を決め、解析結果から定められた損傷度に応じる耐力・変形能力・減衰の残存率(表-3)を準用し、簡易的に部材の終局耐力 μ_u と終局塑性率をそれぞれ η_{bi} 、 η_{di} で低減する(図-4)。その後、性能低下させた損傷後の部材の復元力モデルを用いて損傷後の架構の性能曲線を求める。この際に安全限界は、無損傷架構の支配破壊型に従うこととする。さらに、式(4)により損傷後の部材の等価減衰定数を η_{hi} で低減し、式(2)より損傷後の部材の

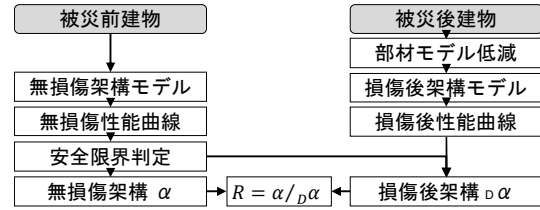


図-2 精算法の流れ

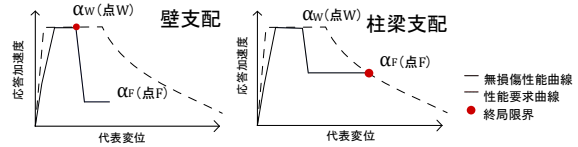


図-3 保有耐震性能指標による支配破壊型の判定

表-3 精算法における耐震性能低減係数 η

損傷度	耐力残存率 η_b	変形能力残存率 η_d	減衰残存率 η_h	履歴吸収エネルギー残存率 η_W
I	1	1	0.95	0.95
II	1	0.95	0.8	0.76
III	1	0.85	0.75	0.64
IV	0.6	0.75	0.7	0.32
V	0	0	0	0

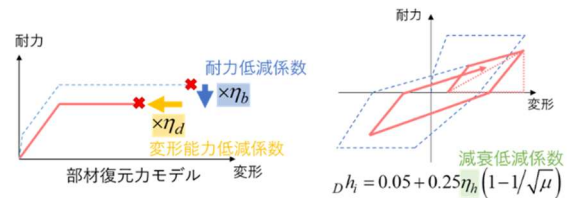


図-4 η による部材性能の低減

安全限界における等価減衰定数 ${}_D h_W$ 又は ${}_D h_F$ を算出する。その後、損傷前後の架構の安全限界点及び等価減衰定数により、保有耐震性能指標 α と ${}_D \alpha$ を求め式(1)より耐震性能残存率 R を算定する。

$${}_D h_i = 0.05 + 0.25\eta_{hi}(1 - 1/\sqrt{\mu_i}) \quad (4)$$

3. 残存耐震性能の略算評価法の提案

前述の精算法による結果を簡易的に推定するため、 R の略算評価法 1, 2 を提案する。先ず架構の支配破壊モードを判定し、その後耐震壁・柱梁破壊支配の架構に対してそれぞれ R の略算評価式を提案する。

3.1 支配破壊モードの判定

支配破壊モードの判定は、精算法と同じく各破壊モードの安全限界状態における保有耐震性能指標で評価することとする。簡単のため、破壊モード判定指標 M_d を式(5)のように定義する。つまり、 $M_d > 1$ の場合、耐震壁破壊が支配的、逆に $M_d < 1$ の場合、柱梁破壊が支配的ということになる。

$$M_d = \alpha_W / \alpha_F \quad (5)$$

3.2 提案略算法 1 による耐震性能残存率の算定

本研究では、現行基準との連続性のため、架構の耐震性能残存率 R を式(6)のように内力仕事の残存率と定義する。損傷後架構における内力仕事の低下は部材の曲

げ終局強度 M_u にそれぞれ耐震性能低減係数 η を乗じることによって考慮する。さらに、耐震壁、柱梁部材の変形能力の違いを考慮するための破壊モード部材寄与係数 β をつけ、連層耐震壁付きラーメン架構に対する R の略算式 1 を式(6)のように提案する。ここで、記号の添え字 W, C, G は壁、柱、梁を表す。

$$R = \frac{\Sigma(\beta_C M_{uc} \eta_C) + \Sigma(\beta_G M_{uc} \eta_G) + \Sigma(\beta_W M_{uw} \eta_W)}{\Sigma(\beta_C M_{uc}) + \Sigma(\beta_G M_{uc}) + \Sigma(\beta_W M_{uw})} \quad (6)$$

β の値は架構の支配破壊モードにより変わる。耐震壁破壊が支配的な場合の β の概念を図-5(a)に示す。耐震壁部材が破壊した際の破壊点では、部材の変形は耐震壁部材と柱梁部材で同程度とし、変形能力による寄与度は同程度とする。次に、耐力の寄与は、耐震診断基準⁹⁾の考え方「壁の終局変形時における柱の強度寄与係数は0.7にしてよい」を参考にして耐震壁部材が最大耐力になる時、柱梁部材は最大耐力の0.7倍程度であると仮定した。よって、耐震壁破壊が支配的な場合、 $\beta_W=1, \beta_C = \beta_G = 0.7$ とする。

柱梁破壊が支配的な場合の β の概念を図-5(b)に示す。この場合、変形能力の寄与係数には部材の終局変形角 θ_{uw} を用いる。この場合、終局変形角が小さい耐震壁部材は、変形能力が小さいと評価され部材の寄与度も小さくなる。対して、終局変形角が大きい柱梁部材は、変形能力が大きいと評価され部材の寄与度も大きくなる。つまり、変形能力の寄与係数の比は、(耐震壁部材):(柱梁部材) = $\theta_{uw} : (\theta_{uc} \text{ 又は } \theta_{ug})$ とする。次に耐力の寄与係数は、耐震壁部材、柱梁部材ともに最大耐力を発揮しているものと考えて、(耐震壁部材):(柱梁部材) = 1:1 とした。よって、柱梁破壊が支配的な場合、 $\beta_W = \theta_{uw}, \beta_C = \theta_{uc}, \beta_G = \theta_{ug}$ とする。

3.3 提案略算法 2 による耐震性能残存率の算定

現行基準の耐震性能低減係数 η に代わる新たな低減係数としてハオらは⁷⁾内力仕事に基づく略算法に損傷後部材の耐力・変形能力・減衰の低下を考慮するために、部材の耐力・変形能力・減衰($M_u \cdot \theta_u \cdot h$)により推定できる履歴吸収エネルギー W_i に基づき、部材の耐震性能低減係数 η_w を W_i の残存率と定義した。式(7)に示すように表-3の耐力・変形能力・減衰の残存率 η_b, η_d, η_h を η_w にまとめた。

$$\eta_w = {}_D W_i / W_i = \eta_b \times \eta_d \times \eta_h \quad (7)$$

損傷後の部材の残存性能を現行基準の η で低減して耐震性能残存率 R を求める提案略算法 1 の式(6)に対し、提案略算法 2 では、損傷後の部材の残存性能を先に述べた η_w で低減することとして、耐震性能残存率 R を式(8)で定める。

$$R = \frac{\Sigma(\beta_C M_{uc} \eta_w C) + \Sigma(\beta_G M_{uc} \eta_w G) + \Sigma(\beta_W M_{uw} \eta_w W)}{\Sigma(\beta_C M_{uc}) + \Sigma(\beta_G M_{uc}) + \Sigma(\beta_W M_{uw})} \quad (8)$$

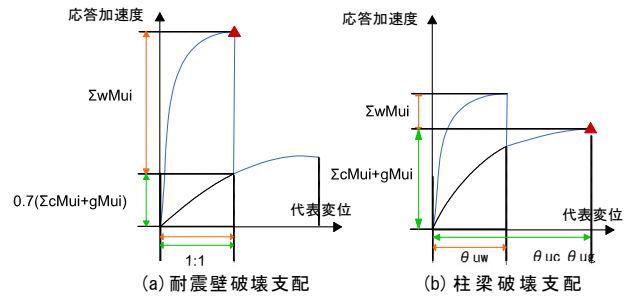


図-5 部材寄与係数 β の概念

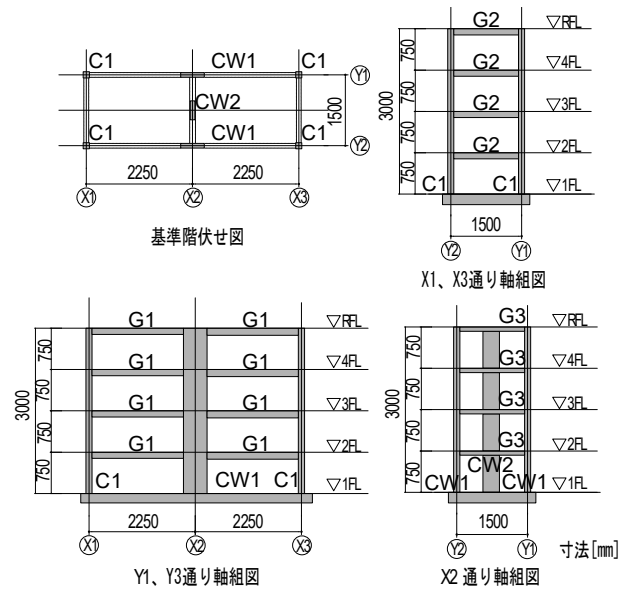


図-6 試験体の概要

記号	C1	G1	G2	G3
断面形状				
bxD	130x130	100x130	100x140	120x90
主筋	4-D10	上下端2-D10	上下端2-D10	上下端2-D6
帯筋	□-D4@60	□-D4@100	□-D4@70	□-D6@30
記号	CW1		CW2	
断面形状				
bxD	100x500		80x400	
主筋	20-D13		14-D10	
帯筋	D4@60		D4@140	

図-7 試験体の断面詳細 寸法 [mm]

4. 振動台実験計画

本研究の精・略算法を適用する解析モデルは、2019 年度実施予定の東北大学、大林組共同振動台実験の縮小試験体とする。基準階伏図と各構成面の概要を図-6に示す。設計条件として、架構に占める連層耐震壁と柱梁の耐力比を X 方向と Y 方向で変化させることとし、各方向でそれぞれ支配破壊モードが異なるようにした。架構は 4 階建てとし、振動台の性能に基づいて試験体質量を $3.0 \times 10^4 \text{kg}$ 、各階の質量は均等で層せん断力は A_i 分布に比例するものとした。スケールは 1/4 スケールとし、フレーム部分が確実に梁降伏型の全体崩壊形を形成するように、節点での柱と梁の曲げ耐力比をスラブ寄与

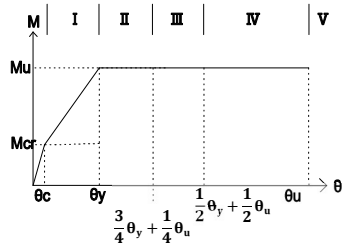


図-8 部材の復元力特性

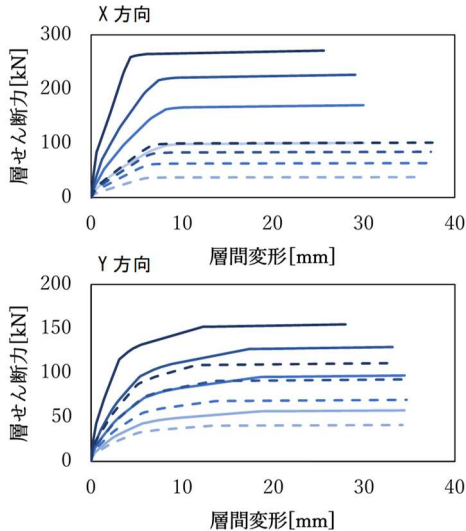


図-9 層せん断力-層間変形

なしで1.5以上とした。また、試験体の連層耐震壁は1/4スケールで両側柱付き壁の形で作るのは配筋や型枠作成上やや煩雑であるため、剛性・耐力が同等となる矩形の壁柱とした。各部材の断面詳細を図-7に示す。

試験体の解析は、弾塑性解析ソフトSNAPver7を用いて静的増分解析を行った。解析して得られた層せん断力-層間変形関係から一質点系モデルに縮約して性能曲線を求めた。また、一質点系に縮約する際、解析結果の変形を4倍、荷重を16倍にし、1/4スケールで解析したモデルを1/1スケールに補正した。

各部材をモデル化する際は単軸ばねモデルを用いた。ただし、試験体は曲げ降伏型の全体崩壊形であるために、せん断ばねと軸ばねは弾性として設定した。各部材の曲げばねにおける復元力特性は図-8のように定める。なお、剛性、曲げひび割れ耐力、曲げ降伏耐力、降伏変形、終局変形は「靱性保証型設計指針」⁸⁾により求めた。剛域長さや危険断面位置は部材のフェイス位置とし、梁におけるスラブの影響は無視した。また、各部材の損傷度は各部材の変形角に応じて図-8のように定めることとし、損傷度と変形角の関係は比較的靱性のある部材を想定し、文献3)を参考にして決定した。さらに、建物全体の終局状態は、いずれかの部材が終局状態に至ったステップとする。

振動台実験の縮小試験体を静的増分解析して得られ

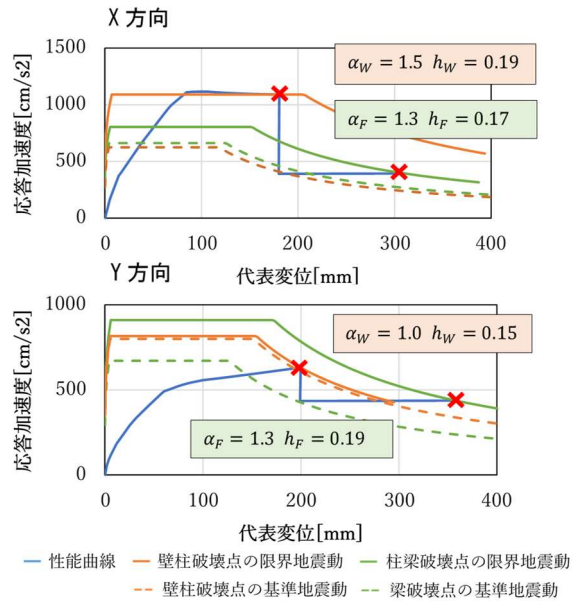


図-10 性能曲線

● 塑性ヒンジの位置

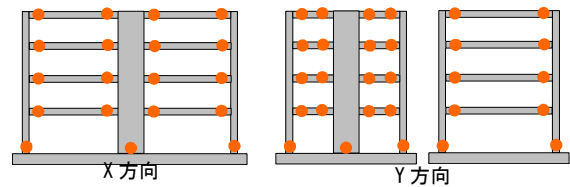


図-11 降伏メカニズム

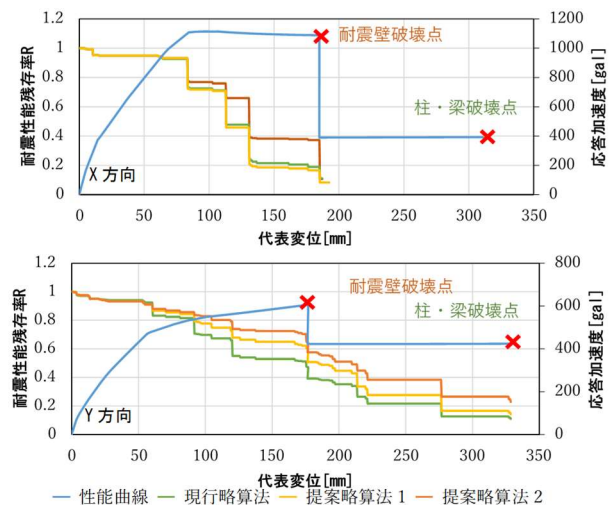


図-12 略算法による耐震性能残存率

た層せん断力-層間変形関係と、壁破壊後を仮定しモデルの壁脚をピンに設定してもう一度解析した層せん断力-層間変形関係を図-9に示す。また、性能曲線と各破壊モードにおける安全限界状態の保有耐震性能指標と基準、限界応答スペクトル、及び点F、Wにおける等価粘性減衰 h_W 、 h_F を図-10に示す。ここで、地震動には告示の安全限界検討用の応答スペクトルを用い、地盤は第二種地盤を想定した。さらに、各構面の降伏メカニズム図を図-11に示す。

5. 略算評価法の妥当性検証

5.1 現行略算法と提案略算法の適用

1章に示した現行基準法を、解析結果の各ステップに適用した。次に、3章に示した提案略算法1, 2を適用する。まず、支配破壊モードを判定する。図-10における各破壊モードの安全限界点の保有耐震性能指標の値から、X方向は $M_d > 1$ となり耐震壁破壊支配型、Y方向は $M_d < 1$ となり柱梁破壊支配型となる。その後、提案略算法1, 2を用いて各支配破壊モードに応じて、解析結果の各ステップで耐震性能残存率Rを求めたものを図-12に示す。

5.2 精算法による耐震性能残存率

2章に示した精算法を適用する。対象架構において耐震壁部材が最初に損傷度II, III, IVに達するステップ(以下、損傷状態WII, 損傷状態WIII, 損傷状態WIV)と、柱梁部材が最初に損傷度II, III, IVに達するステップ(以下、損傷状態FII, 損傷状態FIII, 損傷状態FIV)における耐震性能残存率を算出した。各損傷状態における各部材の損傷度を図-13に示す。なお、X方向は耐震壁破壊が支配的のため精算法の適用は耐震壁の損傷度に着目した損傷状態WII, WIII, WIVのみ行った。

次に、各部材の損傷度に応じて部材の耐力・変形能力・減衰能力を低減させる。その後、損傷後モデルを無損傷モデルと同じ条件で荷重増分解析を行い、一質点系に縮約して性能曲線を求めた。性能曲線の形が無損傷状態と大きく異なる損傷状態における性能曲線と安全限界状態における保有耐震性能指標を図-14に示す。なお、先に述べた通り、無損傷建物と損傷後の建物で、破壊モードは同じと仮定した。無損傷、損傷後建物の性能曲線をそれぞれ比較すると、損傷後建物の性能曲線は、壁の剛性、耐力、安全限界状態における変形がそれぞれ低下していることが確認できる。また、減衰能力が低下したことにより基準地震動が大きくなったことも確認できる。

5.3 各評価法による耐震性能残存率の比較

各損傷状態に対する各評価法による耐震性能残存率の算定結果をまとめたものを図-15に示す。

まず、精算結果と現行略算法による推定結果を比較する。現行基準法による略算値は精算値を安全側に推定できていることが確認できる。ただし、損傷が小さい状態においては精算結果精度よく推定できているが、損傷が大きいY方向の損傷状態WIVと損傷状態FIVにおいて、精算結果では中破と判定されるのに対して、現行の略算法では大破と判定され、建物の実際の残存耐震性能を過小評価する結果となった。つまり、現行基準による耐震性能残存率Rの評価法は、変形性能の異なる部材の寄与度を均一と仮定することで安全側ではあるが、評価精度は低い結果となった。

次に、精算結果と提案略算法1による結果を比較す

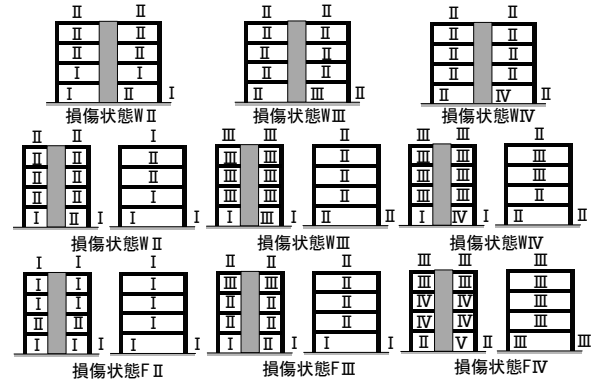


図-13 各部材の損傷度

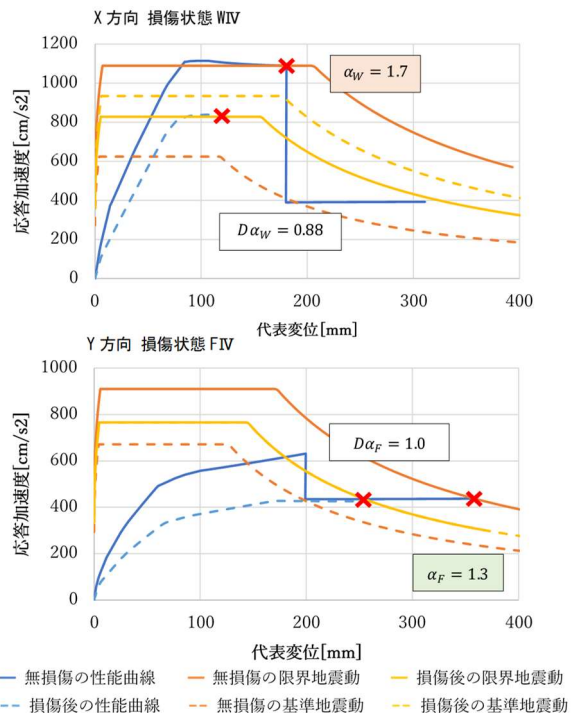


図-14 精算法による保有耐震性能指標

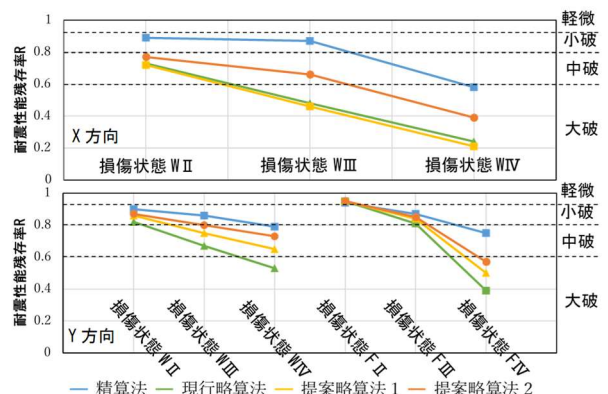


図-15 各評価法の比較

る。各破壊モードにおける、部材寄与係数 β を図-16に示す。壁破壊支配型と判定されたX方向において、提案略算法1による結果は現行略算法のRと大きく変わることはなかった。一方、柱梁支配型と判定されたY方向は耐震壁部材と柱梁部材の寄与係数 β に大きく差

が生じ、柱梁部材の寄与度が相対的に大きくなるため、各損傷状態において耐震性能残存率の推定精度が向上している。特に、図-15において損傷状態 WIVの場合に、精算結果では中破となった結果を、同じく中破と推定できている。

最後に、精算結果と提案略算法 2 による結果を比較する。一例として、Y 方向の損傷状態 WIV の η と η_w の値を比較したものを図-17 に示す。HAO らの提案した η_w は、現行基準の η よりも耐震性能の低減の程度を小さく評価するため、提案略算法 2 では耐震性能残存率 R の値が現行基準や提案略算法 1 よりも大きくなり、精算法に近づいていると考えられる。つまり、破壊モードによる部材寄与度 β と履歴吸収エネルギーの低減を考慮する η_w の両方を略算法に用いることで、耐震性能残存率 R の推定精度が向上するという結果になった。

6. まとめ

曲げ破壊型連層耐震壁付き RC ラーメン架構に対する残存耐震性能評価を高い精度で簡略化するために、破壊モードごとの部材の寄与度を考慮した略算法 1、加えて履歴吸収エネルギーに基づいて耐震性能を低減する略算法 2 を提案した。また、解析モデルを対象に、既往の精算法との比較により、現行基準法および提案略算法 1、2 の耐震性能残存率評価の妥当性を検証した。現行基準では部材の寄与度は耐力のみが考慮されているため耐震性能残存率の推定精度が低い。それに対して、提案略算法 1、2 は破壊モードによる変形能力の違いも考慮して部材の寄与度を決めたため、精算結果をより高い精度で推定することができた。さらに、履歴吸収エネルギーを考慮して耐震性能を低減する提案略算法 2 は、耐震性能残存率の推定精度がさらに上がることを確認した。

しかし、連層耐震壁部材と柱梁部材では、破壊モードによって変形能力だけでなく減衰性能も異なるため、破壊モードによる減衰性能の変化も考慮して部材の寄与度を決定する必要がある。今後の展望として、提案略算法の部材の寄与度を表す指標 β に、耐力・変形能力・減衰性能のすべてを考慮した係数を設定すれば、より高い精度の略算評価方法になると考えられる。

謝辞

本研究で検討対象とした縮小試験体の振動台実験は、(株)大林組との共同研究の一環として計画しているものです。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

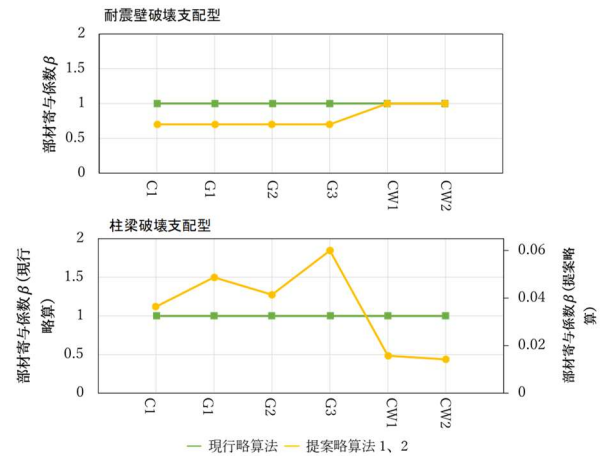


図-16 部材ごとの部材寄与度 β

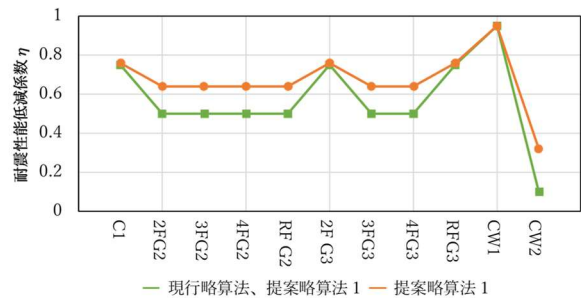


図-17 Y 方向の損傷状態 WIV

参考文献

- 1) 日本防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針 2016.3
- 2) 三浦 耕太他：架構耐震性能に及ぼす部材の影響度に基づいた被災建物の残存耐震性能評価と破壊モード混在型への拡張 コンクリート工学年次論文集 vol.32, No2, pp901-906, 2011, 7
- 3) 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 2004.7
- 4) 松川 和人他：地震応答スペクトルに基づく鉄筋コンクリート造建物の倒壊限界評価法 日本建築学会構造系論文集 vol.78, No693, pp1913-1921, 2013, 11
- 5) 日本建築防災協会：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
- 6) HAO LINFEI 他：破壊モード混在型被災 RC 造架構における構造性能低下を考慮した残存耐震性能評価法 コンクリート工学年次論文集 vol.39, No2, pp721-726, 2017, 7
- 7) HAO LNFEI 他：構造性能低下を考慮した被災 RC 造建物の残存耐震性能評価法 コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No2, pp943-948, 2016, 7
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説 1999, 8