

# 論文 構造性能低下を考慮した被災 RC 建造物の残存耐震性能評価法

HAO Linfei<sup>\*1</sup>・鈴木 裕介<sup>\*2</sup>・前田 匡樹<sup>\*3</sup>

**要旨:** 地震で被災した鉄筋コンクリート建造物の残存する耐震性能の定量評価に目指し、損傷した部材の耐力・変形能力・減衰という構造性能の低下に基づいて解析による残存耐震性能の精算評価法を示した。それを簡略化するために、異なる構造性能を部材のエネルギー吸収能力にまとめて、損傷前後の建物において架構の内力仕事に基づく略算評価法を示した。部材変形の違いが略算結果に及ぼす影響を検討して、それにより略算結果は精算結果より危険側になることがわかった。部材変形の違いを考慮できるように略算法を修正して、修正した略算法は安全側に精算結果を推定できることを示した。

**キーワード:** 残存耐震性能評価, 構造性能低下, 内力仕事, エネルギー吸収能力, 部材変形の違い

## 1. はじめに

地震で被災した鉄筋コンクリート建造物の残存耐震性能を定量的に評価するために、伊藤ら<sup>1)</sup>は損傷した部材の構造性能低下の度合い(残存率)を耐力・変形能力・減衰(履歴エネルギー吸収能力)に分けて実験データに基づいて求めた。これにより損傷が生じた建物の解析モデルを作成し、荷重増分解析(Push-over 解析)を用いて残存耐震性能を精密に評価することが可能になった。しかし、地震直後の被災調査において、解析の不要な簡易評価法も実用的には必要である。一方、包ら<sup>2)</sup>は、曲げ降伏型の全体崩壊機構を形成する建物を対象に、(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」<sup>3)</sup>で提案されている耐震性能低減係数  $\eta$  と各部材の曲げ終局耐力  $M_{ui}$  を用いて、建物の残存耐震性能を評価する方法を提案した。この方法は、仮想仕事の原理における架構の内力仕事 ( $\sum M_{ui}\theta_i$ ) を念頭に、各材端ヒンジの回転角  $\theta_i$  が一様であることを仮定している。低層の純フレーム架構であれば、この仮定に大きな問題はないが、層間変形角が著しく異なる架構、又は連層耐震壁や腰壁、垂れ壁、袖壁などが取り付く架構では、部材ごとに変形角が異なることから、部材変形の違いが評価結果に対する影響を明らかにすることが必要である。

本研究では、部材の耐力・変形能力・減衰という構造性能の低下を考慮した被災(損傷)後建物の解析モデルを用いた荷重増分解析による残存耐震性能評価法(精算法)を簡略化するために、包らの評価法<sup>2)</sup>に対し部材の様々な構造性能低下の影響を適用する手法(略算法)を示す。種々のフレームモデルに対してそれぞれの評価法を適用し、層間変形角と部材の内法長さによる部材変形の違いが略算結果に及ぼす影響を検討する。さらには、その影響を考慮できるように略算法を修正し、精算法と

の比較を通しその妥当性を検証する。

## 2. 耐震性能残存率の精算法及び略算法

### 2.1 保有耐震性能に基づく方法(精算法)

三浦ら<sup>4)</sup>は日本建築学会の「耐震性能評価指針」<sup>5)</sup>に提案されている保有耐震性能指標に基づいて、建物の残存耐震性能を評価する方法を提案している。その流れは図-1に示すように、被災前の建物に対して、無損傷部材の復元力モデルを決めて、無損傷建物の解析モデルを作成し、増分解析により無損傷建物の性能曲線を求めて、無損傷建物の保有耐震性能指標  $\alpha$  を算出する。

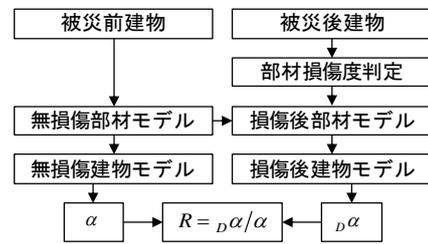


図-1 精算法の流れ

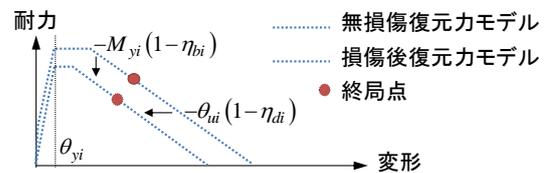


図-2 部材の損傷後復元力モデル

並びに、被災後の建物として、各部材の損傷度を決めて、文献1)に定められた損傷度に応じる耐力と変形能力の残存率(表-1)により、無損傷部材の降伏モーメントと終局変形をそれぞれ  $\eta_{bi}$ ,  $\eta_{di}$  で低減し、部材の損傷後復元力モデルを式(1), (2)によって求める。なお、部材の降伏変形は損傷前後で一定と仮定する(図-2)。

\*1 東北大学 工学研究科 (学生会員)

\*2 東北大学 災害科学国際研究所助教 博士(工学) (正会員)

\*3 東北大学 工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

$${}_D M_i = M_i - M_{yi}(1 - \eta_{bi}) \quad \theta_i \geq \theta_{yi} \quad (1)$$

$${}_D \theta_i = \theta_i - \theta_{ui}(1 - \eta_{di}) \quad \theta_i \geq \theta_{yi} \quad (2)$$

ここに： $M_{yi}$ 及び $\theta_{ui}$ はそれぞれ無損傷部材の降伏モーメント及び終局変形， $\theta_{yi}$ は部材の降伏変形である。

次に、各部材の損傷度に応じて、降伏モーメント及び終局変形を低下させた損傷後の部材復元力モデルを用いて損傷後建物の解析モデルを作成し、静的荷重増分解析から損傷後建物の性能曲線を求める。部材の構造性能低下のため、損傷後性能曲線は無損傷の場合より低下することが考えられる（図-3）。損傷後建物の等価減衰は、各部材の損傷後等価減衰、塑性率、ポテンシャルエネルギーにより、式(3)のように評価できる。損傷後部材の等価減衰は式(4)から求める。

$${}_D h = \sum(W_{ei} \cdot {}_D h_i) / \sum W_{ei} \quad (3)$$

$${}_D h_i = 0.25 \eta_{hi} \cdot (1 - \mu_i^{-0.5}) \quad (4)$$

ここに、 ${}_D h$ 及び ${}_D h_i$ はそれぞれ建物及び部材の損傷後等価減衰定数、 $\mu_i$ 及び $W_{ei}$ はそれぞれ部材の塑性率及びポテンシャルエネルギー、 $\eta_h$ は表-1で示した部材の損傷度に応じる減衰残存率である。

以上から、損傷前後それぞれの建物の減衰を考慮し、安全限界における保有耐震性能指標を式(5)、(6)によりそれぞれ算出できる。そして、式(7)のように、無損傷建物に対する損傷後建物の耐震性能残存率 $R$ を求めることができる（図-3）。なお、安全限界は部材が最初に終局変形を超えた状態とする。

$$F_h = 1 / (1 + 10h) \quad (5)$$

$$\alpha = S_{au} / (S_{a0} F_h) \quad (6)$$

$$R = {}_D \alpha / \alpha \quad (7)$$

ここに、 $F_h$ は応答低減係数、 $h$ は建物の等価減衰定数、 $S_{au}$ は安全限界の加速度応答、 $S_{a0}$ は安全限界の等価周期における基準応答スペクトルの加速度応答、 $\alpha$ と ${}_D \alpha$ はそれぞれ損傷前後建物の保有耐震性能指標、 $R$ は耐震性能残存率である。

## 2.2 内力仕事に基づく方法（略算法）

式(8)に示すように、文献2)では被災前の建物における架構の内力仕事（ $\sum M_{ui} \theta_i$ ）を耐震性能低減係数で低減して損傷後の内力仕事（ $\sum \eta M_{ui} \theta_i$ ）を評価し、被災前に対する内力仕事の残存率を建物の耐震性能残存率とした。この手法は曲げ降伏型の全体崩壊機構を形成する建物を対象に、崩壊機構が形成した時の材端ヒンジの回転角 $\theta_i$ を一律に仮定して、部材の耐震性能低減係数を終局耐力で重み付け平均して耐震性能残存率を求めた。

$$R = \sum(\eta_i M_{ui}) / \sum M_{ui} \quad (8)$$

ここに、 $\eta_i$ は耐震性能低減係数、 $M_{ui}$ は部材の終局耐力、 $R$ は耐震性能残存率である。

本節では、式(8)に対し損傷による耐力・変形能力・減

衰低下の影響を考慮して耐震性能残存率 $R$ を算定する手法について述べる。図-4に示すように、無損傷部材の等価減衰定数 $h_i$ は式(9)で表される。

$$h_i = W_i / (4\pi W_{ei}) \quad (9)$$

ここに、 $W_i$ 及び $W_{ei}$ はそれぞれ部材の履歴エネルギー吸収能力及びポテンシャルエネルギーである。部材の終局耐力を降伏モーメント $M_{yi}$ で近似すれば、終局時の $W_{ei}$ は、 $M_{yi}$ と終局変形 $\theta_{ui}$ により求められるので、終局時の $W_i$ は式(10)のように、 $M_{yi}$ 、 $\theta_{ui}$ 、 $h_i$ によって算出できる。

$$W_i = 4\pi W_{ei} \cdot h_i = 4\pi \cdot M_{yi} \theta_{ui} / 2 \cdot h_i \quad (10)$$

部材が損傷した後、図-5に示すように耐力・変形能力・減衰が低下するため、これら（ $\eta_{bi} M_{yi}$ 、 $\eta_{di} \theta_{ui}$ 、 $\eta_{hi} h_i$ ）を用いて、無損傷部材の履歴エネルギー $W_i$ と同様に損傷後部材の残存履歴エネルギー ${}_D W_i$ を得ることができる。従って、式(11)のように、無損傷時の $W_i$ と損傷後の ${}_D W_i$ の比をとることで耐力・変形能力・減衰の3つの構造性能残存率を考慮し、耐震性能低減係数 $\eta_w$ （履歴エネルギー吸収能力の残存率）を算出できる。

$$\eta_{wi} = \frac{{}_D W_i}{W_i} = \eta_{bi} \cdot \eta_{di} \cdot \eta_{hi} \quad (11)$$

最後に、式(8)中の $\eta_i$ を上記した $\eta_{wi}$ に置き換えることで、部材の各構造性能低下を考慮した耐震性能残存率 $R$ を式(12)のように略算的に求めることができる。

$$R = \sum(\eta_{wi} M_{yi}) / \sum M_{yi} \quad (12)$$

表-1 構造性能残存率

損傷度	耐力残存率 $\eta_b$	変形能力残存率 $\eta_d$	減衰残存率 $\eta_h$
I	1	1	0.95
II	1	0.95	0.8
III	1	0.85	0.75
IV	0.6	0.75	0.7

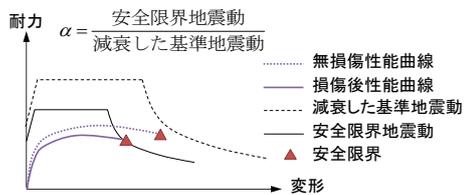


図-3 保有耐震性能による残存耐震性能評価

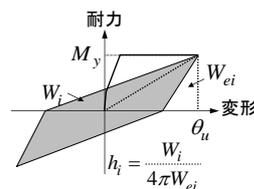


図-4 無損傷部材のエネルギー吸収能力

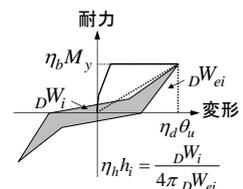


図-5 損傷後部材のエネルギー吸収能力

## 3. モデル建物による略算法と精算法の精度検討

耐震性能残存率 $R$ の略算法である式(12)において、材端ヒンジの変形角（回転角 $\theta$ ）が一律と仮定されている

が、実際には、建物の架構形状や、高さ方向の層間変形角分布により、部材の変形角は一律にならないことが考えられる。詳細として、図-6 に示すように、層間変形角の小さい層にある部材の変形角は比較的小さく、梁の内法長さが短くなると梁の変形角は柱より大きくなる。

このような略算法の仮定が、略算法の推定結果に及ぼす影響を調べるために、精算法と略算法を種々のフレームモデルに適用して、略算法の推定精度を検討する。

### 3.1 フレームモデルの設定

建物の層間変形角の影響を考慮するために、4層と12層の純フレームモデルを設定した。また、部材の内法長さの影響を考慮するために、梁の内法長さがスパン長さの0.3倍である4層の袖壁付フレームモデルと0.4倍である12層の袖壁付フレームモデルを設定した。各フレームモデルを図-7 に示す。

建物が全体崩壊形となるように、柱と梁の耐力比を2に設定した。また、ベースシア係数  $C_B$  が0.3になるように純フレームが設計された。純フレームの柱断面に基づいて袖壁の張出比と厚さにより、袖壁付柱の耐力を「技術基準解説書」<sup>6)</sup>の算定式から求めた。各部材の断面寸法を表-2 に示す。

部材は全部曲げ降伏すると仮定し、材端曲げバネモデルとした。降伏変形角は一律に  $1/150\text{rad}$ 、終局塑性率は一律に5とした。ひび割れモーメントは降伏モーメントの1/3とし、終局時の耐力は降伏耐力の80%とした。部材の損傷度は塑性率により定めた<sup>7)</sup>(図-8)。

### 3.2 精算法と略算法の適用

対象フレームの無損傷モデルに対して荷重増分解析を行った。各解析ステップにおいて、部材の塑性率から損傷度及び各限界状態点を決め、フレームモデル内の一つの部材が損傷度II(塑性率 $\mu=1$ )、損傷度III( $\mu=2$ )、損傷度IV( $\mu=3$ )及び損傷度V( $\mu=5$ )に達する直前のステップはフレームの性能限界(使用限界、修復限界I、修復限界II、安全限界)とし、これらのステップにおいて、耐震性能残存率  $R$  を算出した。

モデル4-Aを例に、無損傷時の一階の柱とすべての梁の復元力モデルを図-9に、各損傷度に応じて、耐力・変形能力はそれぞれの残存率により低減した損傷後の柱の復元力モデルを図-10に示す。

精算法による評価として、損傷前後の各部材復元力モデルを用いて各性能限界に達したフレームモデルをそれぞれ作成し、荷重増分解析によって、無損傷時及び各損傷後の性能曲線を算出した。各性能曲線を図-11に示す。これらを用いて2.1節で述べたように式(7)を用いて保有耐震性能指標に基づく耐震性能残存率  $R$  を算出した。

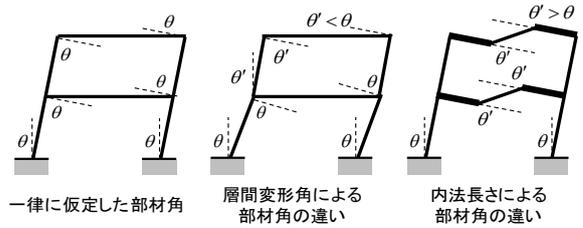


図-6 部材変形角の違い

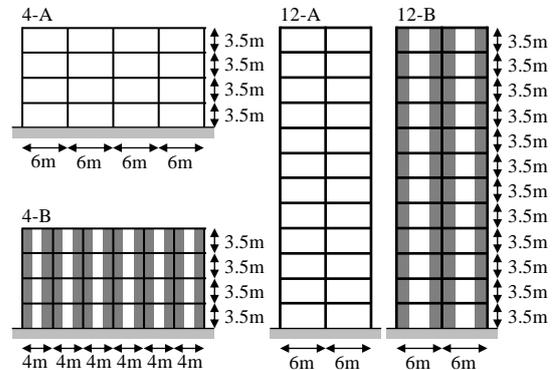


図-7 解析モデル

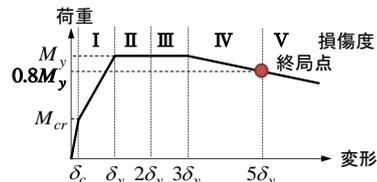


図-8 柱・梁無損傷時の復元力モデル

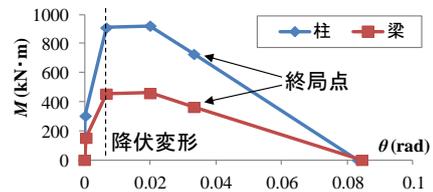


図-9 柱・梁無損傷時の復元力モデル

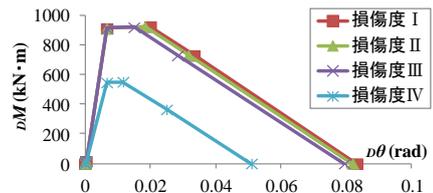


図-10 柱の損傷後復元力モデル

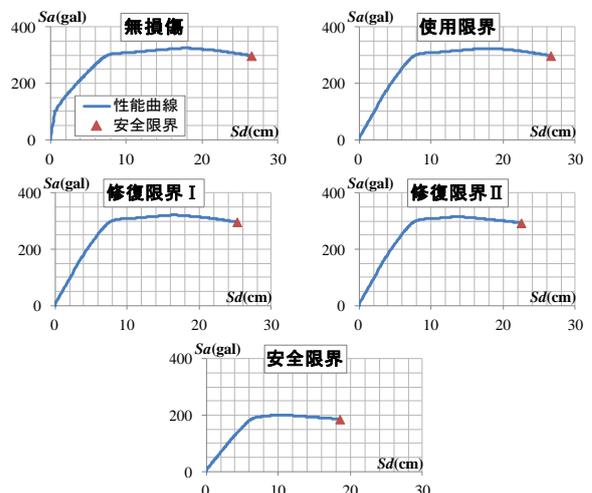


図-11 各性能限界における損傷後性能曲線

表-2 部材の断面寸法

モデル	柱 B×D (cm)	梁 B×D (cm)	袖壁 t×D (cm)
4-A	70×70	40×70	—
4-B	70×70	35×50	20×105
12-A	100×100	60×100 (1~4 層) 55×95 (5~8 層) 50×85 (9~12 層)	—
12-B	100×100	60×90 (1~4 層) 55×85 (5~8 層) 50×80 (9~12 層)	20×130

一方、略算法による評価として、各部材の塑性率から損傷度を決めて、損傷度に応じた  $\eta_w$  を用いて式(12)から耐震性能残存率  $R$  を算出した。各モデルにおける精算法と略算法の評価結果を図-12 に示す。

精算結果と略算法の誤差を図-13 に示す。モデル 4-A において、略算結果は精算結果を安全側に推定できる。しかし、モデル 4-B、12-A、12-B の場合に、略算法による評価が精算法より危険側になる場合がある結果であった。モデル 12-A と 12-B の安全限界時において、残存耐震性能を 10% 以上に過大評価していることが見られた。

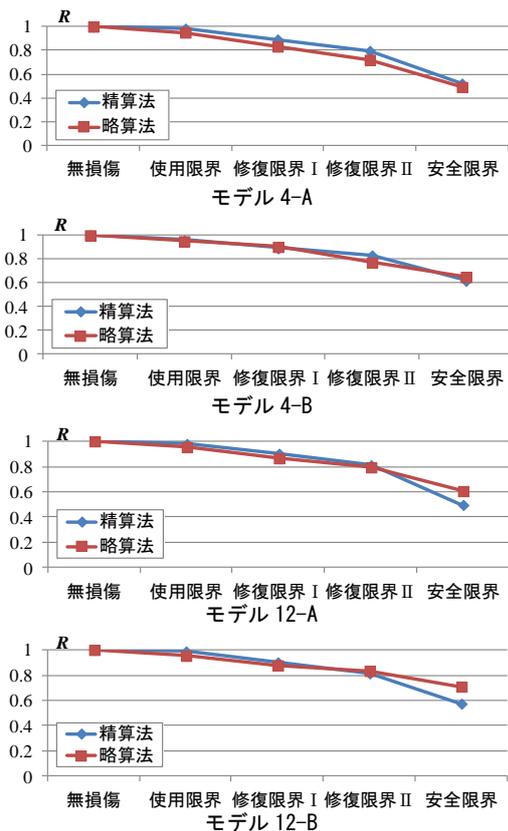


図-12 精算法と略算法の評価結果

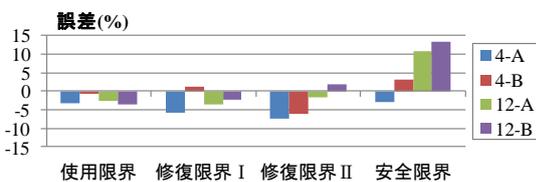


図-13 略算結果の誤差

### 3.3 異なる部材変形の影響

略算法は式(12)のように部材の  $\eta_w$  を部材のエネルギー吸収能力 ( $M_y \theta_i$ ) で重み付け平均して、架構の内力仕事の残存率により耐震性能残存率を評価している。この時、全部材の変形角を一律と仮定している。しかし、高さ方向の層間変形角分布や袖壁が取り付くことにより部材ごとに変形角は一律にならず、各部材のエネルギー吸収能力を適切に評価できていないと考えられる。

対象フレームは全体崩壊形であるため、エネルギーはほとんど一階の柱脚と各階の梁に吸収される。よって、各フレームの荷重増分解析結果から、建物が安全限界に達した時の一階柱脚及び各階梁における部材変形角の平均値の割合を算出し(図-14)、部材変形角を一様に仮定した略算法と比較した。

図-14 に示すように、上層にある梁の部材変形角が下層より小さく、その差は建物高さによって当然大きくなる。また、モデル 4-B と 12-B において、袖壁によって梁の内法長さは袖壁により短くなったので、梁と柱の変形角の違いは大きくなった。

続いて、荷重増分解析結果から、建物が安全限界に達するまで一階の柱脚と各階の梁に吸収されたエネルギーの割合を算出し、これを実際の部材のエネルギー吸収能力として、略算法の仮定と比較した結果を図-15 に示す。略算法の場合に、各部材に吸収されたエネルギーの割合は部材耐力の割合とした。

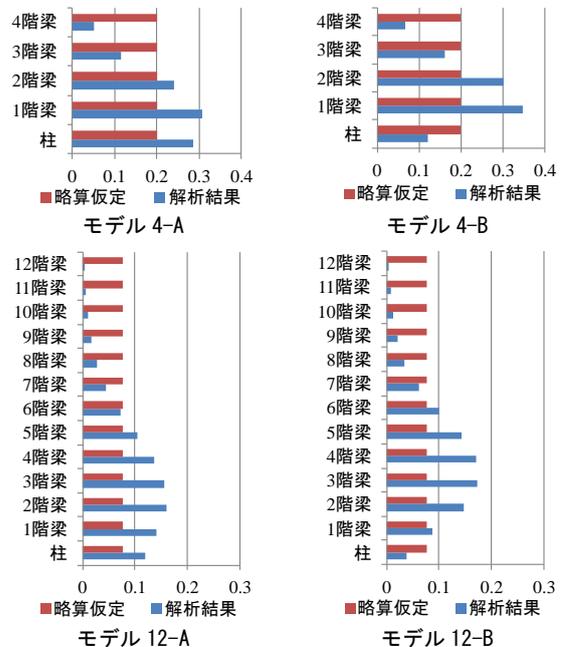


図-14 部材変形角の割合

図-15 より、上部にある梁の変形は小さいため、エネルギー吸収能力は下層より小さくなった。しかし、略算法は部材変形の違いを考慮できないため、梁のエネルギー

一吸収能力は上層で過大に考慮し、下層で過小に考慮している。建物が高くなると、層間変形角による梁の変形の違いは大きくなり、略算の仮定と解析結果の誤差も大きくなることが見られた。

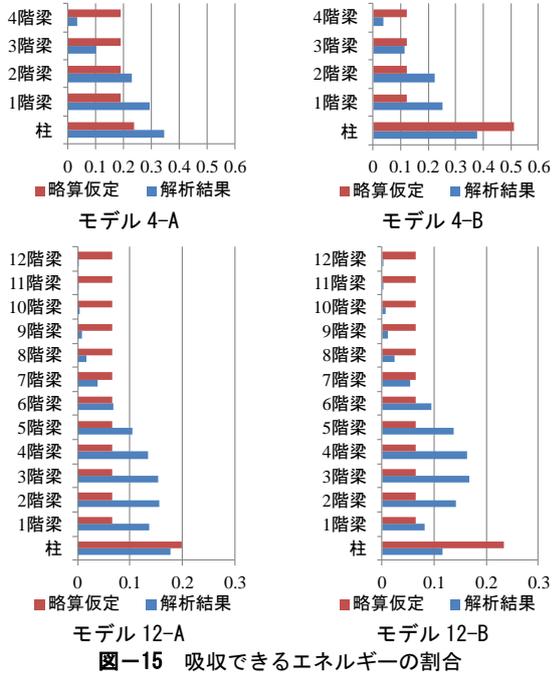


図-15 吸収できるエネルギーの割合

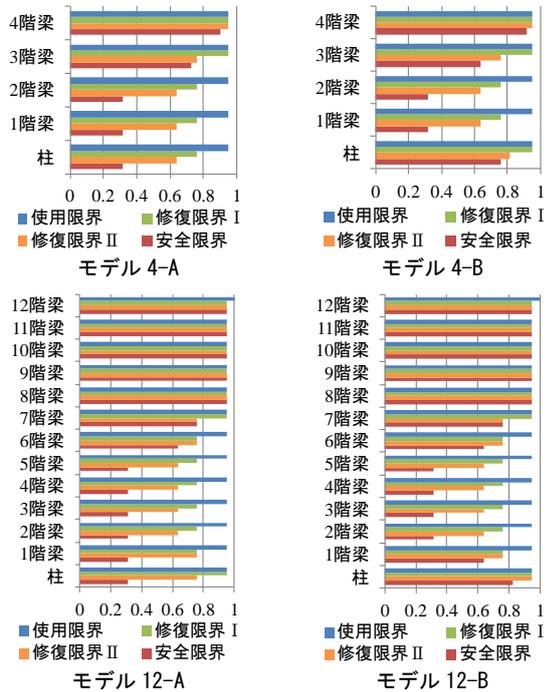


図-16  $\eta_w$  の平均値分布

また、モデル 4-B と 12-B において、梁の変形は柱より大きくなった。建物が安全限界に達するまで柱の変形は相対的に小さくて、エネルギー吸収能力も小さくなった。しかし、略算法は柱のエネルギー吸収能力を過大に考慮している。

フレームが各性能限界に達した時、一階の柱と各階の

梁における  $\eta_w$  の平均値を図-16 に示す。上層では、層間変形角の違いにより梁の変形が小さいため、損傷は小さく、 $\eta_w$  は大きくなった。また、袖壁が付いたモデル 4-B と 12-B において、柱の変形と損傷は小さく、 $\eta_w$  は大きくなった。

略算法は部材ごとの  $\eta_w$  を部材のエネルギー吸収能力で重み付け平均する時、部材変形の違いを考慮できないため、梁のエネルギー吸収能力は上層で過大に考慮し、下層で過小に考慮している。また梁の  $\eta_w$  は上層で大きく、下層で小さいため、略算法の推定結果は大きめになったと考えられる。

また、袖壁が付いた場合に、柱のエネルギー吸収能力は略算法で過大に考慮されて、同時に柱の  $\eta_w$  は大きいため、略算法の推定結果は大きめになったと考えられる。

モデル 4-A と 4-B において、部材変形による誤差はそんなに大きくなかったため、略算結果はだいたい安全側になった。モデル 12-A と 12-B において、層間変形角と梁の内法長さによる誤差は大きいため、略算結果は危険側になった。

#### 4. 解析モデルにおける略算法の検討

##### 4.1 略算法の修正

前章までに記した略算法を修正するには、建物モデルの各部材変形角を一樣とせず、モデルに応じて部材ごとの変形の影響を考慮する必要がある。本研究の解析モデルは曲げ降伏型の全体崩壊形の建物を対象としている。そのため、ひび割れ幅などの損傷量と部材変形角（塑性率）は正の相関関係にあると判断できる。よって、各部材変形の大きさをそれぞれの損傷度から概ね見積もることができると考えられる。図-8 に示した部材の損傷度と塑性率の関係から、各損傷度に達した部材の平均的な塑性率（代表塑性率  $\mu_r$ ）を表-3 のように定めた<sup>8)</sup>。これを部材変形角による影響係数として略算式(12)を式(13)のように修正した。

$$R = \frac{\sum(\eta_{wi}\mu_{ri}M_{yi})}{\sum(\mu_{ri}M_{yi})} \quad (13)$$

ここに、 $M_{yi}$  及び  $\mu_{ri}$  はそれぞれ部材の降伏曲げモーメント及び代表塑性率、 $\eta_{wi}$  は式(11)で提案した耐震性能低減係数である。

表-3 代表塑性率  $\mu_r$

損傷度	I	II	III	IV
$\mu_r$	0.5	1.5	2.5	4

##### 4.2 修正した略算法の検証

各フレームに修正した略算法をそれぞれ適用して、図-17 に精算法に結果との比較を示す。修正した略算法はすべての精算結果を安全側に推定できることがわかった。

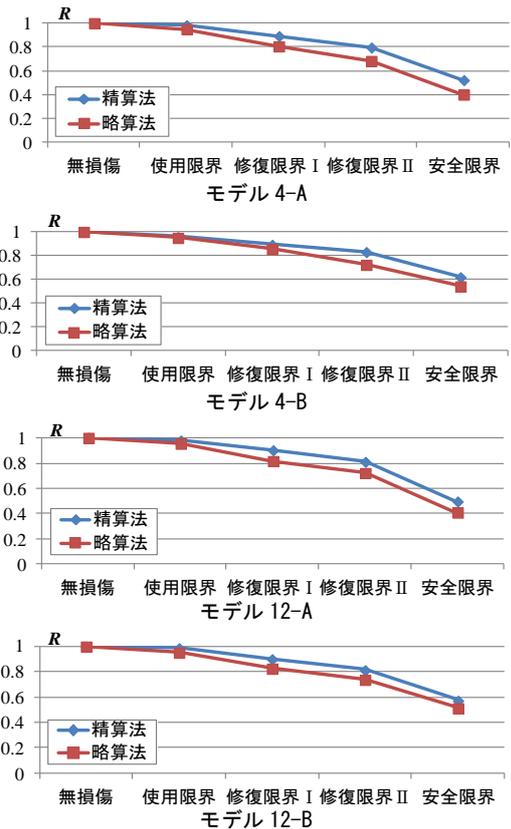


図-17 精算法と修正した略算法の評価結果

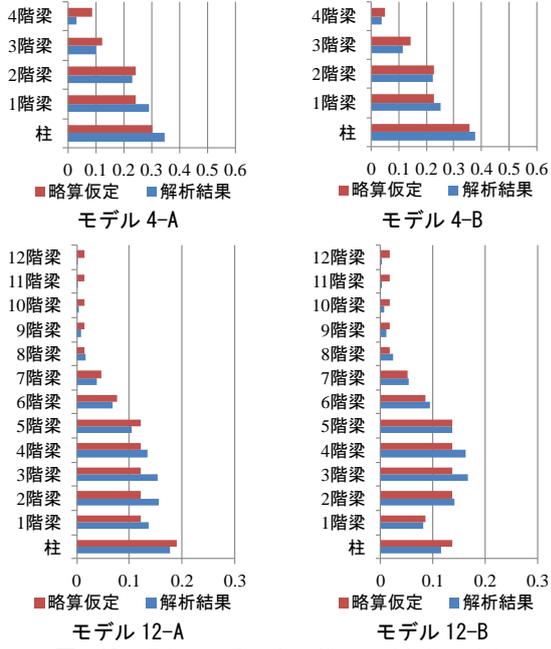


図-18 吸収できるエネルギーの割合(修正後)

精算法(荷重増分解析)及び修正した略算法それぞれにおける部材のエネルギー吸収能力を図-18に示す。図-15と比べて、係数 $\mu_r$ で部材の変形を考慮したことで、各部材が吸収できるエネルギーの割合が荷重増分解析による結果と近くなるのがわかった。よって、架構の内力仕事に基づく手法といった略算法を用いた場合でも、

より実現に近い評価が可能であることを示した。

### 5. まとめ

部材の構造性能低下に基づく残存耐震性能評価法を簡略化するために、損傷前後の建物において架構の内力仕事に基づく略算法を示した。種々の解析モデルに対して本評価法を適用し、層間変形角と部材の内法長さが推定結果に及ぼす影響を検討した。その結果、層間変形角の違いが大きい高い建物、及び梁の内法長さが短い袖壁付建物において、略算法の推定結果は高くなり、危険側になるおそれがある。これを改善するために、部材の異なる変形を考慮できるように略算法を修正した。修正略算法は簡単な計算で構造性能低下に基づく残存耐震性能を安全側に推定できた。

### 参考文献

- 1) 伊藤 淑紘, 鈴木 裕介, 前田 匡樹: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.787-792, 2015.7
- 2) 包 蘇栄, 松川 和人, 前田 匡樹: RC 造梁降伏型全体崩壊形建物の残存耐震性能評価法, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3255-3260, 2010.11
- 3) 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, 2001.9
- 4) 三浦 耕太, 松川 和人, 前田 匡樹: 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法と破壊モード混在型建物への拡張, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.901-906, 2011.7
- 5) 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, 2004.1
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015
- 7) Maeda, M. and Kang, D. E.: Post-earthquake Damage Evaluation of Reinforced Concrete Buildings, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.7, No.3, pp.327-335, Oct.2009
- 8) 三浦 耕太, 前田 美里, 松川 和人, 前田 匡樹: 架構耐震性能に及ぼす各部位の影響度に基づいた RC 造被災建物の残存耐震性能評価法の高層建物への拡張, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.847-852, 2012.