

論文 補修した RC 部材の性能回復に基づく復旧戦略の立案

秋谷 理穂*1・参川 朗*2・永井 智基*2・前田 匡樹*3

要旨：地震被害を受けた建物における補修計画の策定を目的として、建物内の一部を選択して補修した場合の性能回復及び補修コストについて検討した。一部の階のみを選択補修した場合、各限界状態の性能は、耐力の大きい層を補修することで大幅に回復し、安全限界においては特にその傾向が強いことがわかった。また、補修による性能回復率から、階別の寄与度を算出する手法を提案した。寄与度に基づいて補修順序を決定することで、適切な補修計画を策定可能であることがわかった。

キーワード：選択補修、寄与度、性能回復、補修コスト、補修計画

1. はじめに

持続可能な社会の実現のため、建物の長寿命化や地震時の補修による早期の復旧性が求められている。地震被害を受けた建物の復旧計画を立案する際には、復旧後の耐震性能と補修コストの2つの要素を考慮する必要がある。しかし、現在の建物補修ではどの部材に対して、どの程度の補修を行えば必要耐震性能を満たすかが不明瞭であることから、一般的には補修コストに関わらず、全ての損傷に対して補修が行われる。しかし、建物を完全補修した場合と一部の部材を選択的に補修（以下、選択補修）した場合では、補修後の建物性能に大きな差が生じない可能性がある（図1）。従って、選択補修時の建物性能や補修コストが明瞭となれば、対象建物の用途や施主の希望に応じた様々な補修計画の提案が可能となり、建物の長寿命化に繋がると考えられる。

そこで本研究では、個々の部材補修が建物全体の性能回復に与える影響や選択補修を行った場合に必要とされる補修コストの情報から、より低コストで目標とする建物性能を満足する部材の補修順序（以下、補修計画）の

提案を行う補修優先度指標の作成を最終目的とする。今回はその第一段階として、2020年度に実施した東北大学-大林組共同研究の縮小4層RC造補修試験体の振動台実験¹⁾を対象に検討を行った。建物の耐震性能（新築、被災後、補修後のいずれも）は、各層を構成する部材の剛性・耐力・変形及びエネルギー吸収能力に支配され、層せん断力や層間変形角の分布など様々な要因に影響されると考えられることから、その影響度を定量的に示すことが本研究の最終的な目標である。

2. 補修優先度指標の定義

本研究では、補修による建物全体の性能回復度が高く、かつ、その補修コストが低い部材を補修優先度の高い部材と定義する。部材の補修優先度に影響を与えるパラメータとして、対象部材のある階、損傷度、部材種（柱、壁、梁）の3つを検討対象とする。図2に示すように少ない補修コストで性能回復率が高い補修計画①の方が平均的に回復する補修計画②や、後半で回復する補修計画③より、補修の効率が良いと考えられる。従って、本検討では部材単位で建物内の補修優先度の高さを数値化し性能回復速度の速い補修順序を決定することが最終目標である。本論文では、補修による性能回復率か

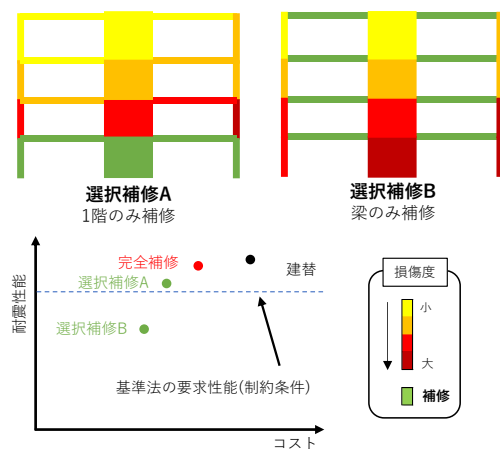


図1 選択補修概念

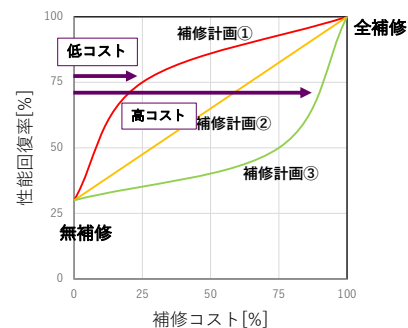


図2 性能回復率—コスト関係

*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 （学生会員）

*3 東北大学大学院 工学研究科 教授・博士（工学） （正会員）

ら階ごとの補修優先度への影響度（以下、寄与度）の検討を行い、寄与度に基づいた最適な補修計画の策定方法を提案する。

3. 選択補修した建物の性能検討

3.1 検討対象の実験概要

本研究では2020年度に行われた縮小4層RC架構の振動実験¹⁾を対象とする。文献1)に詳細が報告されているが、試験体の概要を以下に示す。新設時試験体は図に示すような1/4スケールのRC造4層の連層耐震壁

（矩形の壁柱）付き架構である。X,Y方向共に1階の壁と柱の脚部及び各階の梁端に曲げ降伏ヒンジを生じ、曲げ降伏型全体崩壊形のメカニズムを形成するよう設計された。なお、文献2)に記載されている通り、壁の耐力負担率（ヒンジ発生位置の曲げモーメントの負担割合）は約60%になるよう設計をしている。

新設時試験体の加振後、X方向は、既存の部材に対して、エポキシ樹脂やポリマーセメントモルタルを用いたひび割れ、剥落補修が行われた。鉄筋が座屈した箇所については鉄筋の交換やコンクリートの再打設により補修が行われた。また、Y方向は損傷した壁を一部撤去し新たに補強ブロックを新設する補強が行われた。本論文では、X方向を検討対象とする。

3.2 選択補修モデル作成方針

本検討では弾塑性解析ソフトSNAPver8を用いた。新設試験体のモデルは、耐震壁及び柱梁を材端に曲げバネ、中央にせん断バネと軸バネを持つ線材に置換したフレームモデルとし、長期荷重は梁の分布荷重として加えた。また、壁・柱共に基礎固定の条件としている。詳細は文献2)を参照されたい。部分補修架構モデルは、新設試験体のモデルに対して、無補修部材は性能低減係数 η （表1）、補修部材は性能回復係数 ϕ （表2）を用い

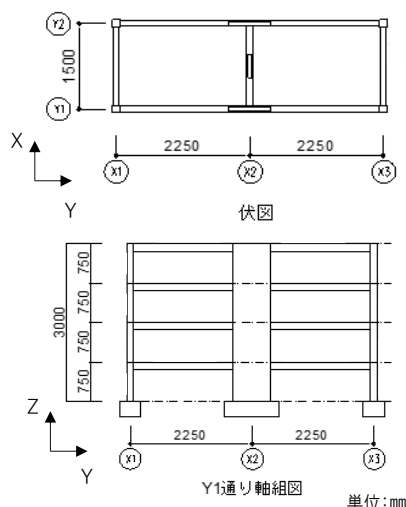


図3 縮小4層RC架構試験体

て各性能を低減し作成した（図4）。新設時の部材性能を1とした場合に性能低減係数 η は損傷後の、性能回復係数 ϕ は補修後の部材性能を表す値である。損傷度は文献3)の曲げ部材の損傷度を参考とし、ひび割れ発生点から主筋降伏点までを損傷度I、主筋降伏点から最大耐力点までの範囲において、前半を損傷度II、後半を損傷度III、最大耐力点から終局点までを損傷度IV、終局点以降を損傷度Vとした。なお、部材の性能低減方法を図5に示す。

性能低減係数 η は、初期剛性、降伏剛性については既往の補修部材実験⁴⁾の結果を基に定め、耐力については、文献5)の値を用いた。性能回復係数 ϕ は、文献6)を参考に定めた。

本研究では、検討の第一段階として、補修をする階をパラメータとして、検討を行うこととする。

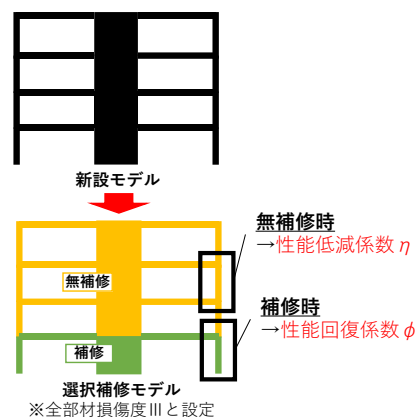


図4 選択補修モデル作成イメージ

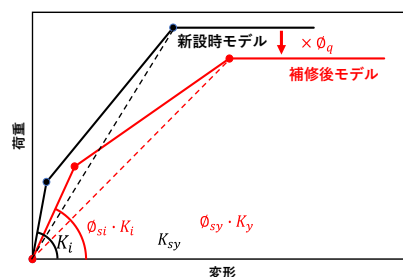


図5 部材の性能低減方法

表1 性能低減係数 η

性能低減定数 η							
損傷度	初期剛性		降伏剛性		耐力		減衰
	柱・梁	壁	柱・梁	壁	柱・梁	壁	
I	0.40	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95
II	0.14	0.34	0.38	0.57	1.00	1.00	0.8
III	0.08	0.23	0.21	0.39	1.00	1.00	0.75
IV	0.06	0.17	0.17	0.29	1.00	0.99	0.7
V	0.04	0.11	0.11	0.19	0.77	0.65	0.65

表2 性能回復係数 ϕ

回復係数 ϕ							
損傷度	初期剛性		降伏剛性		耐力		減衰
	柱・梁	壁	柱・梁	壁	柱・梁	壁	
I	0.46	0.55	1	1	1.05	1.03	1
II	0.46	0.55	0.97	0.86	1.05	1.03	0.95
III	0.49	0.55	0.92	0.74	1.21	1.09	0.8
IV	0.49	0.55	0.92	0.74	1.21	1.09	0.7
V	0.49	0.55	0.92	0.74	1.21	1.48	0.65

新設モデルに加え8つの補修計画モデル（無補修，1階のみ補修，2階のみ補修，3階のみ補修，4階のみ補修，1，2階補修，1～3階補修，全補修）を作成した。また，階の違いによる差のみを評価するため，損傷後の試験体部材はすべて等しく損傷度Ⅲであると仮定し低減を行う。なお，実験時は損傷度Ⅲの部材についてエポキシ樹脂注入によるひび割れ補修またはエポキシ樹脂モルタルによる剥落補修が行われている。

建物全体の等価粘性減衰定数 h は，(1)式で算出し，本検討では損傷や補修による低減（履歴面性の変化）は考慮しないこととした。ただし，降伏点剛性の変化に起因する塑性率 μ の変化によるエネルギー吸収量（減衰）の増減は，間接的に考慮されることとなる。

$$h = 0.05 + 0.25(1 - \frac{1}{\mu}) \quad (1)$$

μ ：塑性率

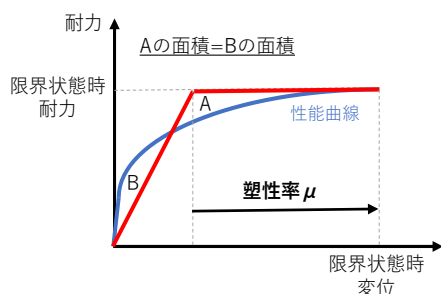


図6 塑性率算出方法

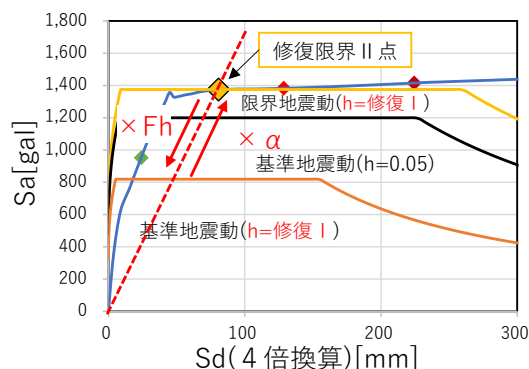


図7 保有耐震性能指標概念

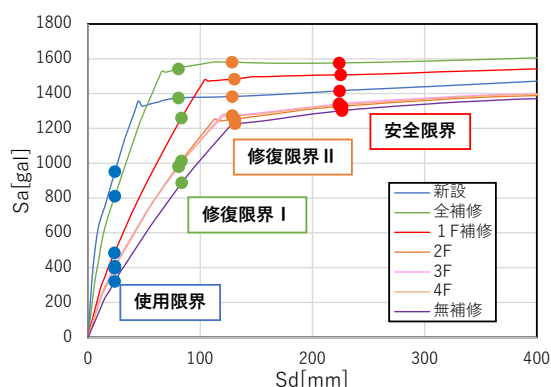
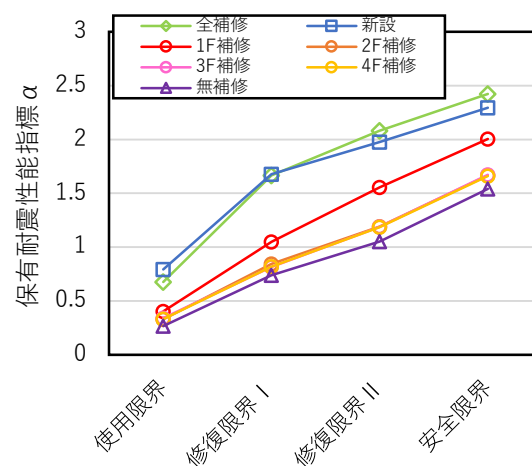
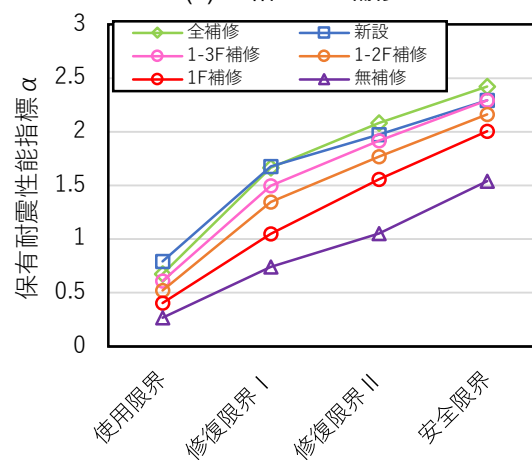


図8 選択補修したモデルのPush Over 解析



(a) 階ごとの補修



(b) 組み合わせ補修

図9 選択補修による保有耐震性能指標

塑性率は，性能曲線を図6に示すAとBの面積が等しくなるバイリニアモデルより算出した。

3.3 建物性能の評価方針

建物の性能評価は，各モデルについて使用限界，損傷限界Ⅰ，損傷限界Ⅱ，安全限界の4境界状態別に保有耐震性能指標 α を算出し行った。保有耐震性能指標の定義を以下に示す。この値が大きいくほど建物がより大きな地震動に耐えられることを表す。

$$\text{保有耐震性能指標} = \frac{\text{境界地震動の強さ}}{\text{基準地震動の強さ}} \quad 2)$$

境界地震動を建物の応答が4つの境界状態に達するときの地震動，基準地震動を表層地盤（第二種地盤とする）による増幅特性を考慮した再現期間数百年の地震動（建築基準法施行令82条，地域係数 $Z=1.0$ ）とする。本検討では図7に示す通り，基準地震動の大きさを各境界状態の減衰定数を用いて低減した値で境界地震動の大きさを除することで指標の算出を行った。なお，代表変形は，実建物のスケールに合わせて，変形を4倍にした。各境界状態は，新設振動台実験のフレームモデルの荷重増分解析結果²⁾を等価1質点系に縮約した応答加速

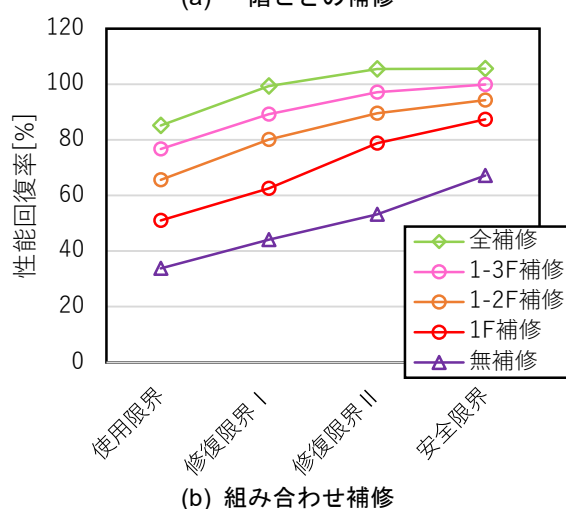
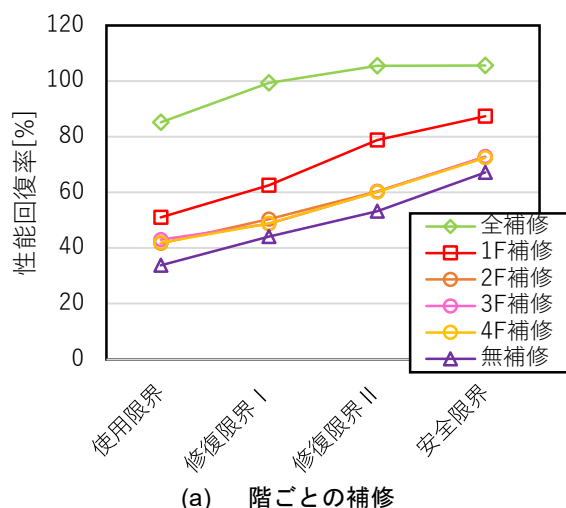


図 10 部材選択補修による性能回復率

度 S_a -代表変位 S_d 曲線上で、使用限界は最初の部材が降伏するステップの変位、安全限界状態は、振動実験で連層耐震壁が曲げ破壊した加振の最大応答変形とし、修復限界Ⅱは、これらの中間点、修復限界Ⅰは、使用限界と修復限界Ⅱの中間点とした。

4. 選択補修による性能回復率

4.1 保有耐震性能指標の回復率

各補修モデル別に、各層ごとの解析結果を1質点系に縮約した応答加速度-代表変位関係と各限界状態時の値を図8に示す。前述の通り代表変形は、実建物のスケールに合わせて、変形の値を4倍にしている。選択補修のモデルでは、1階を補修した場合に剛性及び耐力が最も大きくなっていることがわかる。

保有耐震性能算出結果を図9に示す。保有耐震性能指標の値について、新設時を100%として結果を換算した値（以下、性能回復率）を図10に示す。図中の(a)は各階のみを補修した場合について、(b)は下階から順に補修を進めた場合についての値を比較している。使用限界では全補修モデルの性能が新設モデルの100%を下回

るが、修復限界・安全限界では全補修モデルの性能回復率が100%より大きくなる。これは初期剛性の回復係数が0.5程なのに対し、耐力の回復係数 ϕ が1よりも大きい値であるためである。したがって、架構全体において補修により初期剛性は完全には回復しないが、耐力については新設時を上回る程回復することが分かる。また図6では、新設モデルに比べて1階補修モデルの応答加速度の値が大きい、保有耐震性能指標の値は安全限界時においても新設の方が大きくなる。これは、補修モデルでは、降伏剛性の低減によって減衰が小さくなるためである。

図10(a)の単一階のみを補修した場合の値を比較すると、1階のみ補修した場合の値が大幅に大きく、他の階のみについてはほぼ同じ値となった。これは、1層の部材が建物全体の耐力やエネルギー吸収量に占める割合が大きいためである。また、無補修モデルとの性能差に着目すると、限界状態が上がるにつれて他モデルに対する1階補修モデルの値は大きくなる傾向があり、概ねメカニズムに到達する（各部材が降伏耐力に達する）修復限界以降では、補修による建物全体の耐力やエネルギー吸収性能の上昇が他の階を補修した場合に比べ大きくなることが原因と考えられる。

図10(b)では、下層階から順に補修階を増やすほど建物性能が上昇することが分かる。使用限界と安全限界で性能の上り方を比較すると、前者に比べ後者では1階の上り幅が大きくなる。ここから、使用限界時の性能については、より架構全体の補修が有効である。また、修復限界Ⅱ、安全限界については、1階から3階までを補修した時点で建物性能は新設時とほぼ変わらない水準まで回復するため、選択補修が有効であると考えられる。

4.2 階別の補修の寄与度

図10の耐震性能回復率に基づいて、各階の性能回復率（寄与度）を以下の式(3)で求め、図11に示す。

$$\text{寄与度} = \frac{\text{補修後性能} - \text{無補修時性能}}{\text{全補修時性能} - \text{無補修時性能}} \times 100[\%] \quad (3)$$

図中(a)は、単一階の寄与率の合計、(b)は1階から順に補修階を増やした場合の寄与率である。図(a)の単一階の寄与率の合計は、修復限界Ⅰを除くと概ね100%になっており、各階ごとの寄与率の比は、(a)の単一階補修モデルから算出した場合と、(b)の複数階補修モデルから算出した場合で概ね一致している。

また、図12に示す層間変形分布では上層ほど変形量が大きいが、寄与度の算出結果では1階の補修が効果的であるという結果となった。これは、本モデルにおいては、変形量よりも耐力の方が建物性能に与える影響が大きいと考える。

日本建築防災協会の「被災度区分判定基準」³⁾では、梁降伏型の全体崩壊形を形成する被災建物の耐震性能残存率 R を、式(4)で算定できることとしている。

$$R = \frac{\sum \eta \cdot M_u}{\sum M_u} \quad (4)$$

ここで、 η ：耐震性能低減係数、 M_u ：降伏ヒンジの終局曲げモーメント

これと同様に、補修による耐震性能の回復率 RF が、式(4)の耐震性能低減係数 η を性能回復係数 ϕ に置き換えることで評価可能と仮定すると、式(5)となる。

$$RF = \frac{\sum \phi \cdot M_u}{\sum M_u} \quad (5)$$

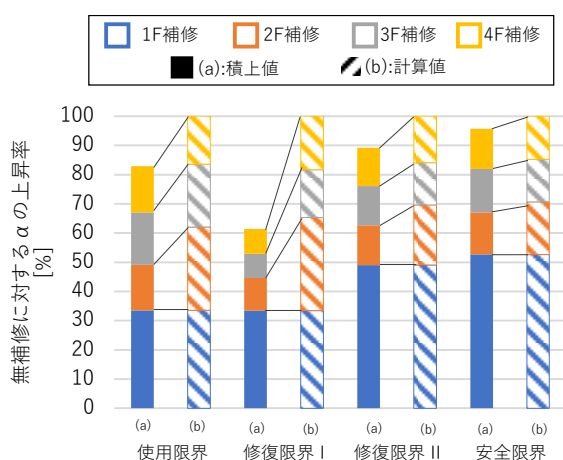


図 11 階ごとの寄与度

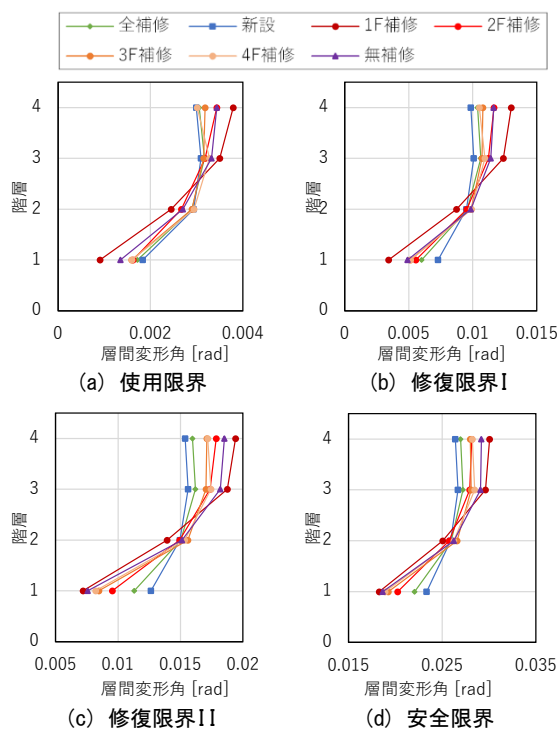


図 12 層間変形角

表 3 RF に対する寄与度計算

階	ヒンジ数			$\sum M_u$ [kN・m]	寄与度 [%]
	柱脚	壁脚	梁端		
2-4	0	0	4	28	9
1	2	1	4	222	73

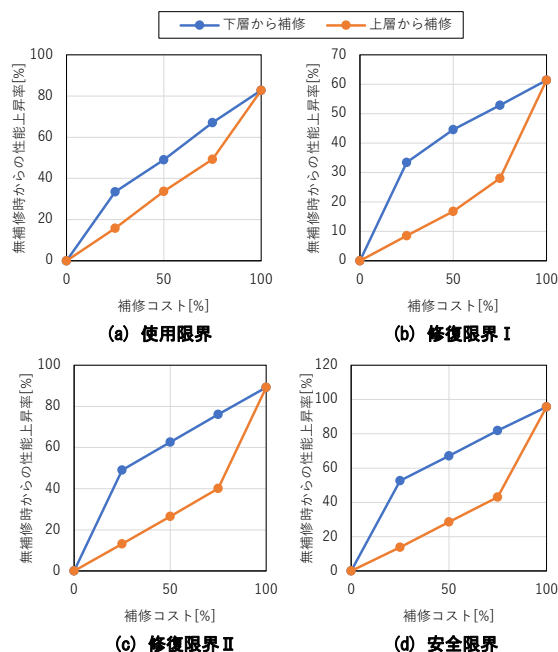


図 13 階別補修時コスト-性能回復率関係

検討対象架構では、崩壊メカニズム時の降伏ヒンジは、1階柱脚が2か所 ($M_u \approx 7 \text{ kN} \cdot \text{m}$)、1階壁脚に1か所 ($M_u \approx 180 \text{ kN} \cdot \text{m}$)、各階梁端に16か所 ($M_u \approx 7 \text{ kN} \cdot \text{m}$)であり、これから、RFに対する各階ごとの寄与度は、1階(柱2, 壁1, 梁4)と2~4階(それぞれ梁4)の寄与度の比は、73%:9%となり、解析結果よりやや1階の寄与度を過大評価するが、大まかな傾向は一致する結果となった(表3)。

4.3 複数階を補修した場合の性能回復率の推定

実際の建物においては、複数階の補修を行うことが通例と考えられるが、その場合、補修を行う階の組み合わせが無数に存在し、その全てについて解析を行った上で性能の回復率を算定するとなると、計算負荷が非常に大きい。そこで、単一階の補修を行った場合の性能回復率を累加することで、複数階の補修を行った場合の性能回復率の推定可能かどうか検討した。

1階から順番に複数階を補修した場合の保有耐震性能の回復率を、解析結果から算出した場合(解析値)と各階の寄与度を累加した場合推定値)で比較を行った結果を図に示す。修復、安全限界状態時に関しては、限界状態が上がるにつれ差は小さくなり安全限界では差があまり生じない結果となった。単一層を補修した場合、当該層の変形が減少し、その他の層の変形が増加するため、

変形分布が変化する（図 12）。この変形分布の変化が、性能回復率の値に影響を与え、推定値と解析値の差の要因になっているものと推測される。図 12 からわかるように、安全限界時の方が、変形分布の変化が小さく、そのため、推定値の誤差が小さくなったと考えられる。

以上の結果から、安全限界時のように、変形の大きい領域においては、単一階を補修した場合の性能回復率（各階の寄与度）から、複数階を補修した場合の性能回復率を精度良く推定可能であるといえる。

4.4 補修コストと性能回復の関係

(1) 補修コストの算出方法

本検討では、各階における部材の損傷度及び断面が同一である。従って、4.1 に示した階別の選択補修においては、各階の補修コストが等しいと仮定した。

(2) 補修コストと性能回復の関係

補修コストと性能回復の関係を算出した結果を図 13 に示す。図中には、4.3 に示した方法（単一層を補修した場合の性能回復率を累加する方法）で算定した、4 階から順に補修した場合の結果を合わせて示している。安全限界時について、コスト 75%時点での性能を比較すると、下層から補修した場合の建物性能は上階から補修した場合の倍となる。また、使用限界、修復限界についても同様の傾向が確認できる。よって、本検討範囲内においては、1 階からの補修が最適な補修計画であり、寄与度に基づいて補修順序を決定することで適切な補修計画を提案可能であると言える。また、グラフの傾きは補修効率の良さを表しており、どの限界状態についても 1 階の補修による傾きが大きく、その他については概ね等しくなる。従って、特に 2 階から 4 階の部材については、損傷度、部材種等の複数の寄与度を組み合わせることで、より適切な補修計画を提案することが可能と考えられるが、今後の検討課題である。

5. まとめ

- (1) 地震被害を受けた建物における補修計画の策定を目的として、建物内の一部を選択して補修した場合の性能回復及び補修コストについて検討した
- (2) 一部の階のみを選択補修した場合、すべての階を補修した場合について、使用限界、損傷限界、安全限界時の性能の算出を行った。各限界状態の性能は、耐力の大きい層を補修することで大きく上昇することがわかった。

また、安全限界時においては、単一階を補修した場合の性能回復率から、複数階を補修した場合の性能回復率を推定可能であることがわかった。

- (3) 補修による性能回復から、階別の寄与度を算出する方法を提案した。寄与度に基づいて補修順序を決定することで、適切な補修計画を策定可能であることがわかった。

謝辞

本研究は、東北大学前田研究室と大林組技術研究所の共同研究として実施された。また、科学研究費補助金・国際共同研究強化(B)・「構造性能・修復費用・経済損失を統合した修復指標の開発と次世代耐震性能設計への展開」（課題番号・JP21KK0074, 研究代表者・前田匡樹）の助成を受けた。

研究を進めるにあたり、三浦耕太氏、穴吹拓也氏、水越一晃氏、米澤健次氏、増田安彦氏、諏訪仁氏、栗田康平氏、中村充氏を始めとする大林組技術研究所の方々及び、建築研究所・関松太郎氏、東京工業大学助教・Alex Shegay 氏に多大なるご支援、ご協力を賜りました。

ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 参川朗, Alex Shegay, 三浦耕太, 前田匡樹: 縮小 4 層 RC 造架構の振動台実験による補修効果の評価, コンクリート工学会年次論文集, 第 43 巻, 第 2 号, pp.829-834, 2021.5
- 2) 三浦耕太ほか: 連層耐震壁を有する RC 造 4 層建物縮小試験体の振動台実験による破壊形式と安全限界の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 780 号, pp247-257, 2021.2
- 3) 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, 2016.3
- 4) 三浦耕太, 他: RC 造曲げ降伏型部材の補修後の構造性能と損傷性状に関する静的載荷実験 その 1~その 5, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 IV, pp. 425-434, 2022.9
- 5) 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
- 6) 参川朗ほか: 震害を受けた鉄筋コンクリート造部材実験のデータベースによる剛性・耐力・履歴減衰の補修による回復度評価, 日本地震工学会第 17 回年次大会梗概集, 2022.1
- 7) 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