

論文 地震被災建物の復旧効率性評価に基づく復旧戦略の立案

秋谷 理穂*1・三浦 耕太*2・前田 匡樹*3・Lucas Hogan*4

要旨: 震害を受けた建物の補修のコスト削減や工期短縮を目的として、一部の部材を選択して補修する方法（選択補修）による復旧効率性の検討を行った。本論文では、エネルギー吸収量に着目して、簡易的に復旧建物の将来地震における応答や損失を予測し、復旧計画の効率性を定量的に評価する方法を提案した。建物モデルによる検討の結果、提案した方法を用いて、解析に基づく従来の方法と比較して、より効率の高い復旧計画の立案が可能であることが示された。

キーワード: 選択補修, 性能回復, 略算法

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が求められている。現在、日本の建物の復旧方法は損傷した全ての部材の補修または建て替えが一般的である。しかし、損傷が軽微な部材については補修を行わずとも建物の耐震性能は必要性能を満足する可能性があると考え（図-1）。筆者らは、補修の範囲を限定する復旧方法（以下、選択補修）を提案し、これにより建物が必要な耐震性能を満たす場合、図-2 に示すように他の復旧方法と比較し作業時間の短縮につながり、工期の短縮や補修コストの削減につながる可能性があることを検討してきた^{1)・2)}。また、選択補修を導入する場合、どの程度の範囲の補修・補強を行うべきなのか、またどの部材や部分を選んで行うべきなのかが十分には明らかになっていない。そこで、筆者らはこれら3つの要素を精細に評価する方法（以下、精算法）を提案し復旧の効率性を評価することで、必要な性能を満たした上で、最も効率的な計画を提案する枠組みについても検討を行ってきた。³⁾

しかしながら、文献3)の精算法では想定するすべての復旧方法についてそれぞれ構造解析をする必要があり、様々な計画の検討を行うには多大な労力を要し、多くのケースについての検討が難しいという課題があった。

そこで、本研究は新設建物の構造解析結果のみを用いて建物の復旧後の建物性能や将来地震による応答を略算し、

それに基づいて復旧に要するコスト・時間の算定を行う方法（以下、略算法）の提案を行う。

以上を踏まえ、本論文では、地震被害を受けた建物の復旧効率性の高い計画の簡易的な予測方法（以下、略算法）の提案とその妥当性の検証を行う。

2. 復旧効率性の評価方法

筆者らは、経済的に最も効率性の高い方法、すなわち復旧にかかるコストと復旧時間を最も削減できる復旧方法を最も復旧効率の高い方法と定義し、各復旧方法の建物性能・復旧コスト・復旧時間を考慮した評価フロー³⁾を提案した。（図-3）詳細は文献3)を参照されたい。

本検討は、評価フローを通して地震により初めて被災した建物の1度目の復旧（以降、復旧①）で将来の地震被害を含めたより効率的な補修を選択する方法（復旧戦略）の提案を目的とする。一般に、復旧①では、復旧量を少なく

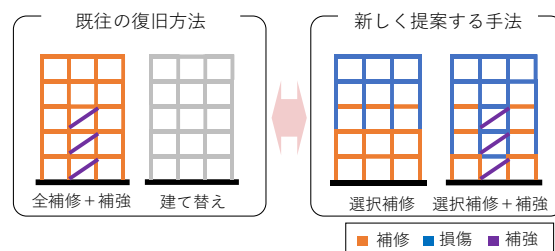


図-1 選択補修の提案

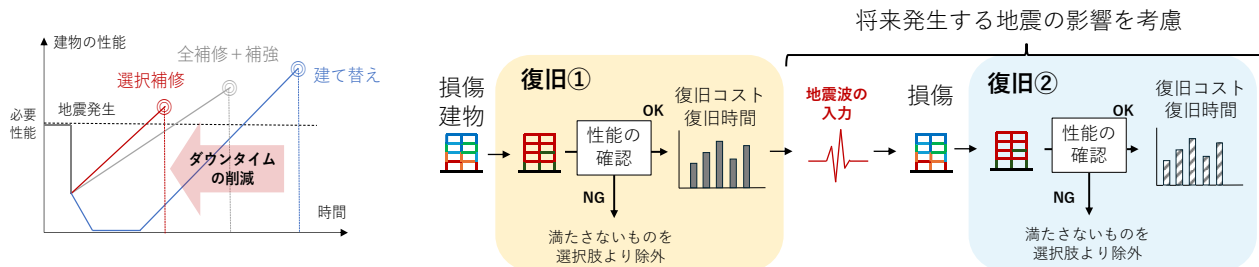


図-2 復旧方法別の性能-時間曲線

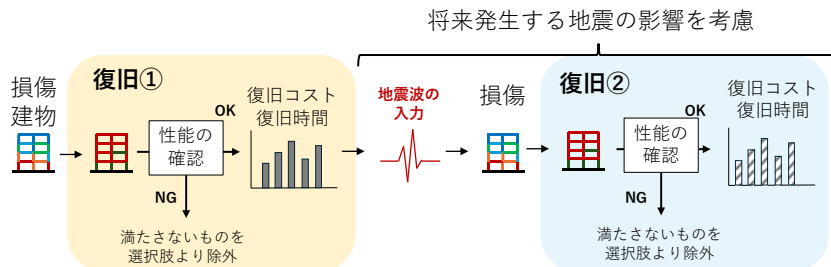


図-3 復旧効率性の評価フロー

*1 東北大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 大林組 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 教授・博士(工学) (正会員)

*4 オークランド大学, Ph. D

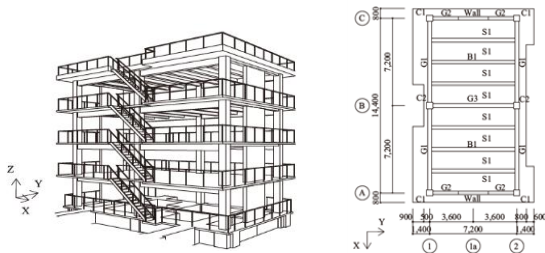


図-4 検討建物概要
(文献4)より図を引用)

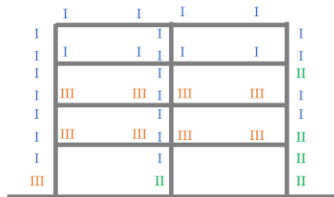


図-5 補修前の損傷状況

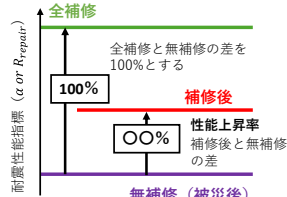


図-7 性能上昇率の定義

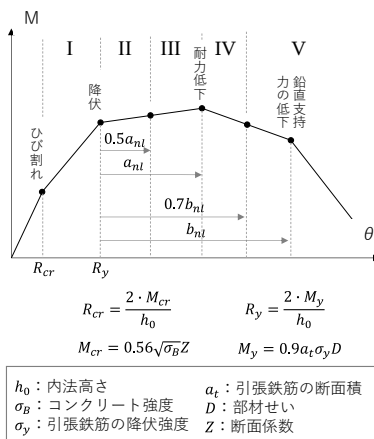


図-6 損傷度の決定方法

a_{nl} , b_{nl} の詳細な算定式は文献6)を参照されたい

すればコストを抑えることができるが、その場合、構造的な性能が不十分となり復旧後に発生する地震(将来発生する地震)で大きな損傷を受け、損失が大きくなる恐れがある。そこで、本検討では将来の地震による被災の影響も考慮した、復旧方法の提案を行う。復旧①の後に再び地震が発生し2度目の復旧(以降、復旧②)を行うまでの一連の流れを想定する。最終的には、復旧①と復旧②を通した復旧コストと復旧時間を算定する。また、復旧コストと時間を総合的に評価するため、復旧時間に単位時間当たりの経済ロスを掛けることで単位の次元を統合した後、補修コストと経済ロスの合計値を算出して復旧効率性を評価し、最も費用対効果の高い復旧方法を判定する。

3. 検討対象建物

略算法の提案にあたり、本検討では図-4に示す架構のモデルを利用する。本架構モデルは、長江らが行ったRC造実大架構の振動実験⁴⁾の試験体について、文献4)に記載された再現解析のモデルの設定から、梁の性能を評価する際のスラブ協力幅を全幅から梁のスパンの0.1倍に変更を

行い作成した。なお、初期状態として、図-5に示す損傷状態を仮定する。部材上に示すローマ数字は各部材の損傷度⁵⁾を表す。

本検討において各損傷度に対応する塑性率はACI基準(ACI 318-08)⁶⁾に定められている算定式を基に部材ごとに算出を行った。(図-6)また、耐震性能を評価する際の基準地震動には、国土交通省・限界耐力計算法告示の終局限界検討用の基準地震動の80%の大きさの地震応答スペクトルを用いた。

4. 建物耐震性能と地震応答の簡易評価方法

本節では、補修コストと復旧時間の算定に必要なもの、建物の耐震性能と地震応答の簡易評価法(略算法)を提案する。

4.1 保有耐震性能指標 α の略算法

精算法では、建物の骨組解析モデルを作成し荷重増分解析を行い、建築学会・耐震性能評価指針⁷⁾の保有耐震性能指標 α を算出する。略算法では、荷重増分解析を行わずに省略し、補修した建物の保有耐震性能指標 α を補修後耐震性能残存率 R_{repair} を用いて推定する。補修後耐震性能残存率 R_{repair} (式(1))は、筆者らが文献8)で提案したもので、建物のエネルギー吸収能力と部材の回復係数・性能低減係数に基づき、選択補修を行った場合の性能上昇率(全補修と無補修の建物の性能の差に対する、該当補修計画と無補修の差の比)を評価することが出来る。(図-7)

$$\text{補修後耐震性能残存率 } R_{repair} = \frac{\sum \eta M \theta + \sum \phi M \theta}{\sum M \theta} \quad (1)$$

ここで、新設建物の荷重増分解析結果における目標変位到達時の M :材端曲げモーメント、 θ :材端曲げ回転角

本論文では、 R_{repair} を用い、解析モデルの荷重増分解析結果より算出した無補修時と全補修時の建物の保有耐震性能指標 α から性能上昇率を用いて選択補修後の建物の性能の略算を行った。図-8に示す選択補修を行う計画(1F, 2F, 3F, full)を想定した場合について略算法の算出結果と精算法により算出した結果の関係を図-8に示す。

結果より、精算法と略算法の結果は概ね一致することが分かった。また、復旧効率性の評価フローの中で、建物の必要性能は保有耐震性能指標 α が1以上と定めているが、必要性能を満たすか否かについては十分に予測することが可能と考えられる。

4.2 将来地震動による建物の応答変形量の予測方法の提案

将来地震動による建物の層間変形角は、まず将来地震動による各部材の変形量 θ を算定した後、その結果を用いて予測した。なお、本節では将来の地震動として、BCJ-L1波⁹⁾(図-9)について小規模の損傷を想定した倍率40%, 80%, 大規模の損傷を想定した倍率200%の波の3種類を想定し、

復旧①での復旧計画は全補修を想定して検討を行った。なお、小規模の損傷については誤差が発生しやすいと考えられるため2ケースの地震波で検討を行っている。

(1) 将来地震動による部材の変形量の予測

将来地震動による部材の変位は、新設建物と補修後の建物について将来地震動として想定する地震動を経験した場合に各部材が吸収するエネルギー量が等しいと仮定することで算定した(図-10)。

以上の方法による算出結果と精算法(時刻歴応答解析)による結果の関係を図-11に示す。結果より、どちらの大きさの地震動の場合についても各部材の変形量は精度よく予測できている。

(2) 将来地震動による層間変形量の予測

最下層の層間変形量は、鉛直部材(柱・壁)の水平変形の平均値で求めることが可能であるが、2層よりも上の層については下層の変形が層間変形量に影響を与えるため、図-11に示す通り、1つ下層の層間変形角 δ_i - 1つ下層の柱頭回転角 $\theta_{i,t}$ + 該当層の柱脚回転角 $\theta_{i+1,b}$ を該当層の層間変形角とし算定を行った。

以上の方法で予測した層間変形を図-12に示す。入力倍率が40%、80%の場合は全層の平均誤差率が15%以下と概ね精度よく予測できている。100%の場合についても1・2層では同様の結果であったが、上部の3・4層では解析結果に対する誤差の値が20%を超える結果となった。これは、提案で層の軸方向の変形を考慮しておらず、下層部の軸方向の変形が上層部の層間変形角に与える影響を考慮できていない点が原因と考えられる。

4.3 将来地震動による応答加速度の略算法

将来地震動を入力した場合の各層の応答加速度は、はじめに、復旧建物の性能曲線に基づいて、応答スペクトル法により等価1自由度系の応答加速度 S_A を算定した後、 A_i 分布に基づいて各階の外力を計算することで求める。

復旧建物の性能曲線は、新設建物の性能曲線をエネルギー一等価になるようトリリニア化し、復旧前の部材の損傷度を重みづけ平均した回復係数 φ' (式(2))で低減させたもの

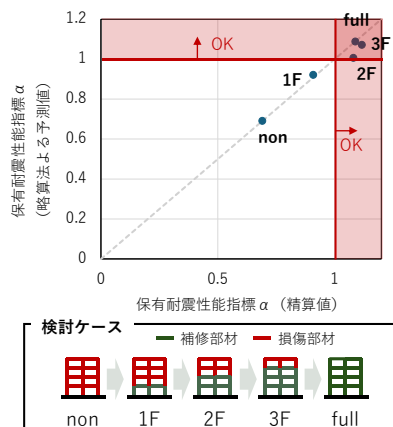


図-8 略算による建物性能の予測結果

を利用した。なお、回復係数は初期剛性、降伏剛性、耐力の3つの要素を図-13に示すように低減させている。

$$\varphi' = \frac{\sum E_i \cdot \varphi_i}{\sum E_i} \quad (2)$$

E_i : 各部材の保有エネルギー

φ_i : 各部材の回復係数(性能低減係数)

また、各階への応答を再分配は以下の手順で行った。

- ① 等価1自由度系の応答加速度 S_A より、1層の層せん断力を算定
- ② 1層の層せん断力から、 A_i 分布に基づいて建物の各層に作用する外力を算定
- ③ ②で算出した外力を、各階の質量 m_i で除し各層の応答加速度を算定

なお、有効質量 M の算出には4.2節で求めた層間変形を利用した。

各層の応答加速度の予測結果を図-14に示す。

結果より、入力地震動が大きい場合(200%入力)は応答解析による結果と比較し、提案方法の結果は応答加速度が過小に評価される結果となるものの、入力地震動が小さい場合は概ね精度よく予測することが可能と分かった。

200%入力時は中間階で大きな差が見られるが、これは検討対象建物が層崩壊型であるため、実際の加速度分布と A_i 分布を用いた想定にずれが生じるためと考えられる。

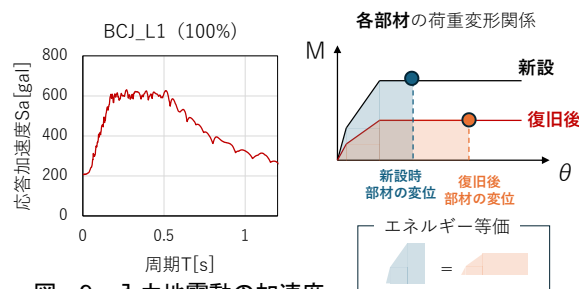


図-9 入力地震動の加速度
応答スペクトル

図-10 部材の変形
算定方法

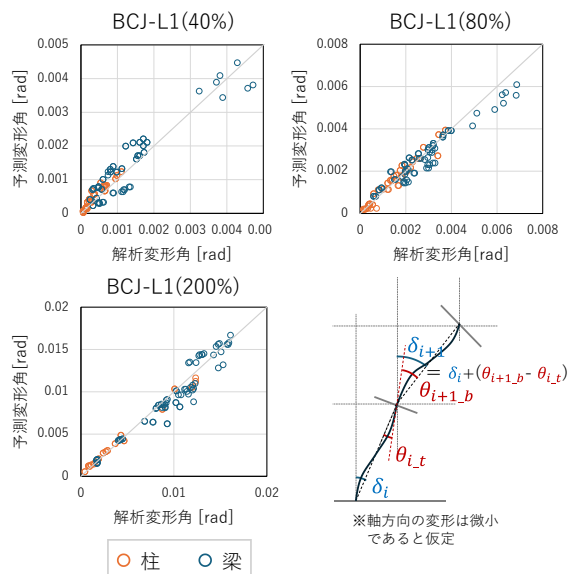


図-11 部材変位の予測結果

5 復旧コストと時間の簡易評価方法

現在、国内では地震被害後の補修時間や補修コストに関するデータベースが十分に整備されていない。これに対し、米国の耐震性能評価指針FEMAP-58¹⁰⁾では構造部材や非構造部材など部材ごとの損傷評価のためのフラジリティ曲線と、その損傷度に対する補修コスト、補修時間がデータベースとして公開されている。従って、精算法では、損傷

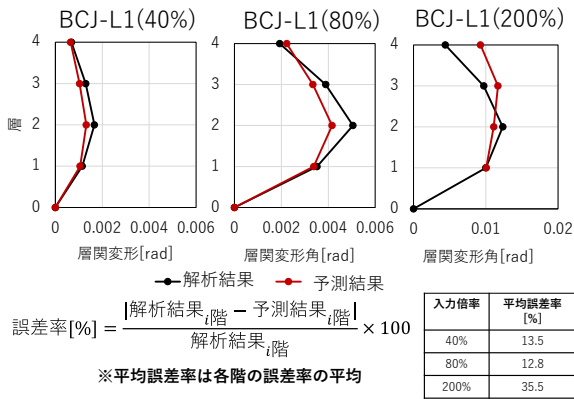


図-12 層間変形角の予測結果

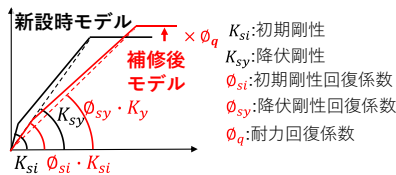


図-13 回復係数による性能の低減

(なお、新設時と補修時のひび割れ耐力は等しいと仮定する)

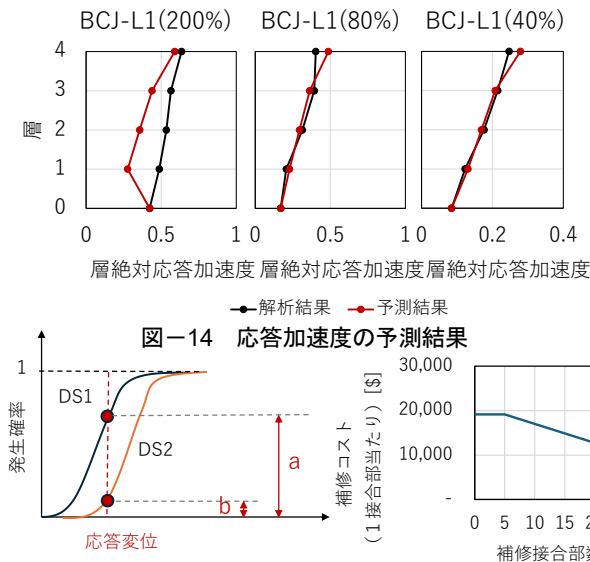


図-14 応答加速度の予測結果

図-15 フラジリティによる 図-16 接合部の補修コスト
損傷判定イメージ (DS1)

表-1 フラジリティによる損傷判定イメージ

分類	名称	分類	名称
構造	接合部	設備機器	冷温水配管
非構造(変位)	コンクリートスラブ		サニタリー配管
	外壁、PCコンクリートパネル		空調ダクト
	カーテンウォール		空調吹き出し口
	LGS間仕切り壁		VAVユニット
	鉄製階段		スプリンクラー配管
非構造(加速度)	吊天井		変圧器
	吊り照明		エアハンドリングユニット

部材の補修コスト及び補修時間の算出に FEMA P-58 とその算定プログラム PACT を使用していた。PACT では、損傷度の情報は用いず、層間変形角または層応答加速度の値を基に各部材の DS 値を判定し補修コスト・時間を算定する。算定にはモンテカルロシミュレーションが用いられるが、本検討ではこれに対する略算法として、FEMAP-58 が公開しているフラジリティ情報を用いた算定を行う。

フラジリティとは、横軸に損傷量、縦軸に発生確率を取ったものであり、図-15 における a% で DS1 (Damage State 1) 以上、b% で DS2 の損傷が発生することを意味する。補修コスト・時間はそれぞれの DS ごとに値が定められているため、本検討では全部材(構造・非構造部材、設備機器)の補修コスト・時間を式(3)の通りに算定する。また、補修コストや時間の値は部材ごとに定められており、例えば、構造部材の補修コストは接合部の数に応じて図-16 に示す通りに定められている。なお、ここで接合部はその上下の柱中央までと左右の梁の中央までを含む範囲を指している。

$$Repair_{Cost(Loss)} = Cost(Loss)_{DS1} \times (a - b) + Cost(Loss)_{DS2} \times (b) \quad (3)$$

6. 略算法による復旧効率性の評価例

本章では、5 章までに示した略算法を検討建物⁴⁾に適用して復旧効率性を評価した結果を示し、最も復旧効率の高いと考えられる復旧方法の検討を行う。なお、検討建物が新設の場合の保有耐震性能指標 α は 1.10 である。

(1) 復旧-1

検討対象建物を 1 部材ずつ順次補修した時の耐震性能の回復の様子を図-17 に示す。保有耐震性能指標 α は 4.1 節にて提案した略算法を用いた。

また、補修する部材の順番は、補修の順序を総当たりに検討した中から、最も建物の性能が早く回復する部材補修の順序を用いている。(図-17) 検討結果のうち保有耐震性能指標 $\alpha \geq 1$ を満たす補修部材数(部材数 36~68)の 33 種類の補修計画を以降の検討対象とし補修コストと復旧時間の算定を行った。

補修コストの結果を図-18 に示す。なお、本研究では選択的補修を行うのは構造部材のみとし、建物の使用性の観点から、非構造部材・設備機器はいずれの検討ケースでもすべて補修を行うこととした。従って、復旧①では非構造部材・設備機器に起因する補修コストはすべて等しく、補修コストの差はすべて構造部材に起因する。

なお、復旧-1 において非構造部材・設備機器の補修コストは構造部材をすべて補修した際の構造部材の約 2.5 倍となった。

また、補修コストと復旧時間の統合にあたり、単位時間当たりの経済ロスとして、本検討では商業施設の単位月当

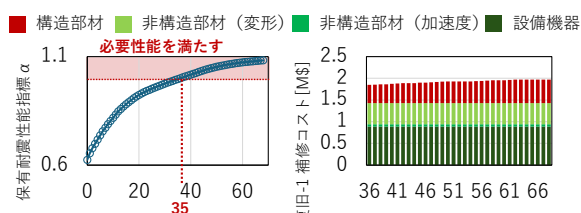


図-17 検討する復旧計画の算定

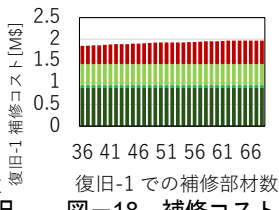


図-18 補修コスト (復旧①)

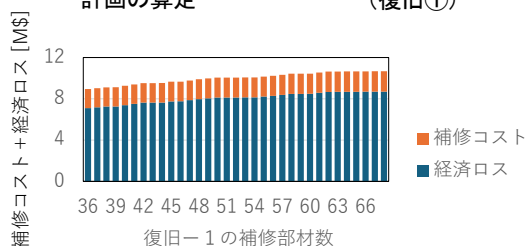


図-19 復旧①での補修コスト+経済ロス

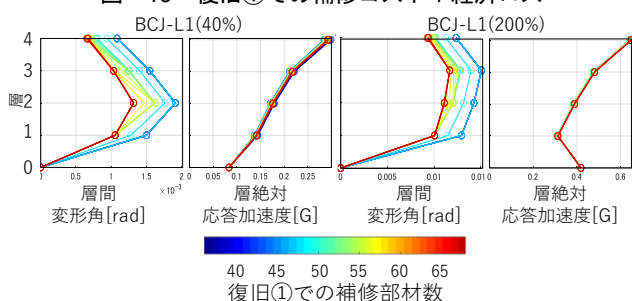


図-20 計画別の応答加速度と層間変形角

の売上¹⁾ (116, 700[円/m²])を想定し復旧時間中の経済ロスを得た。算出結果を図-19に示す。補修コスト同様、補修時間も補修部材数が多いほど長くなることから、補修部材数が増えると補修コスト+経済ロスの値も大きくなることが分かる。また、本検討では経済ロスが補修コストよりも大きくなるよう設定しているが、この値は建物の用途により左右される。

(2) 将来地震動による応答

本検討では将来地震動としてBCJ-L1波の40%, 200%の地震動を想定し損傷量の算定を行った。復旧-1での復旧計画別の層間変形角と層絶対応答加速度の結果を図-20に示す。結果より、変形量は復旧-1での補修部材数が多いほど抑えられる結果となった。また応答加速度は、40%入力時は復旧①での補修部材数が多いほど大きく、200%入力時は補修計画により大きな差が見られない結果となった。これは、入力倍率40%の場合は建物が弾性範囲にとどまるため、剛性が高いほど応答加速度が大きく、入力倍率200%の場合はいずれの補修計画も降伏点を超過して降伏メカニズムが形成され、概ね保有水平耐力に達しているため、応答加速度の値に大きな差が生じなくなるためと考えられる。

(3) 復旧-2

将来地震動による損傷に基づき、復旧-1の際と同様の手法で、それぞれ最も建物の性能が早く回復する部材の補修の順序を算定した。復旧-2においては保有耐震性能 α が1

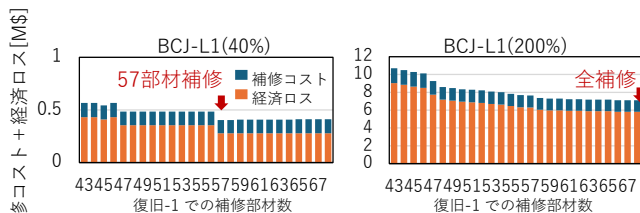


図-21 復旧②での補修コスト+経済ロス

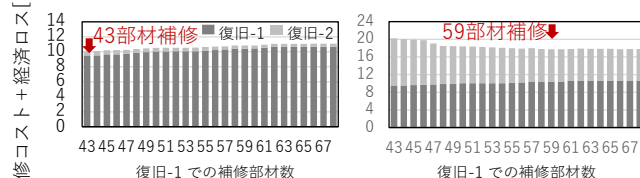


図-22 復旧効率性の評価

を超える計画の中で補修部材数が最も少ない計画を最小補修計画とし、これらについて、補修コスト・時間の算定を行った。なお、補修部材数が36-42の復旧計画についてはすべての部材を補修しても復旧後に必要性能を満たさない($\alpha < 1$)ため検討から除外した。結果を図-21に示す。復旧-1, 復旧-2でどちらも全補修を行った場合の構造部材の補修コストは、入力倍率40%で全体の1.3%, 200%で24%という結果となった。入力倍率がどちらの場合も、復旧-1での補修量が多いほど将来地震動による変形は抑えられるため、変形によりDSが決定される部材(構造・非構造(変形))の補修コストや時間は小さくなる結果となった。対して、加速度によりDSが決定される部材(非構造(加速度)・設備機器)は入力倍率40%の小地震の場合、補修部材数が多いほど、応答加速度が大きくなり復旧効率が低下するのに対し、入力倍率200%の場合は補修部材数によらずほぼ一定となる。結果として、入力倍率40%と200%の地震動で最も復旧効率性の良い計画はそれぞれ復旧-1で57部材を補修した場合と全補修を行った場合となった。以上より、復旧-2では将来地震動の大きさが大きい際は、復旧-1でより多くの部材を補修することにより損傷を抑えることが出来ることがわかる。

(4) 復旧効率性の最も高い方法の検討

以上の算定結果より、復旧-1と復旧-2のコストの合計を算出した結果を図-22に示す。将来地震動の入力倍率が40%の場合は初期状態として想定した損傷が将来地震動による損傷より大きく、復旧-1の結果が支配的となり、復旧効率の高い計画は復旧-1で補修量が最も少ない計画となった。これに対し、入力倍率が200%の場合は、最終結果に将来地震動による損失の影響が反映され、最も復旧効率性の高い補修方法は復旧-1にて59部材を補修した場合となった。以上より、将来地震動を考慮した場合においても選択補修により復旧効率性が向上することが分かり、特に発生確率の高いと考えられる小規模の地震を想定する場合には全補修を行った場合と比較し大幅に復旧効率を

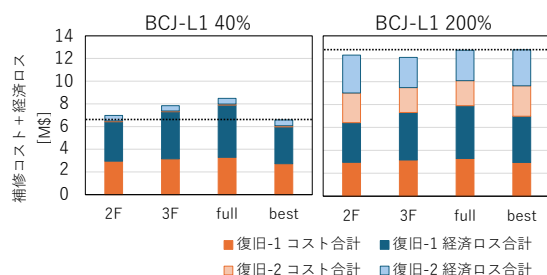


図-23 復旧効率性の評価

向上させる可能性を示すことが出来た。

7. 提案した復旧計画の妥当性の検証

6章での検討で、最も復旧効率性が高いと推定された補修計画（以下、best）の妥当性について、精算法により復旧効率性を評価した階単位の補修計画と比較を行い検討する。精算法での検討は、図-8に示す補修計画のうち2F, 3F, fullを選択した場合とした。ここで、階単位の補修計画との比較検討のため、bestにおいても補修コストとロスの算定には精算法を用いたが、復旧-2における最小補修計画（保有性能指標 $\alpha \geq 1$ を満たす中で補修部材数が最も少ない計画）の選定における α の算出においては、計算負荷の都合により、略算法を用いた。

地震波ごとの検討結果を図-23に示す。入力倍率40%の場合では、略算法を用いて提案した復旧計画（best）の補修コスト+経済ロスが最も小さくなっており、提案した簡易評価法によって、より復旧効率性の高い復旧計画を提案できることがわかった。一方、入力倍率200%の場合には、略算法を用いて提案した復旧計画（best）の補修コスト+経済ロスが、3Fまでを補修する計画よりも高い結果となっている。図-8に示す通り、略算法では保有耐震性能指標 α を実際よりも小さく評価する傾向があるため、復旧-2の最小補修計画における補修部材数が、実際よりも多くなっている可能性がある。即ち、復旧-2における補修コストと経済ロスの合計値が過大評価となっており、入力倍率が200%の場合は40%の場合と比較して復旧-2の影響が大きいために、精算法に基づいて復旧-2の計画を定めた階単位の復旧計画と比較して、補修コストと経済ロスが大きくなってしまったと考えられる。略算法における復旧-2の最小補修計画並びにそれに基づく補修コストと経済ロスの評価精度については、今後の検討課題である。

8. まとめ

被災建物の補修のコスト削減や工期短縮を目的として、コストと時間に基づいた復旧計画の効率性評価を行った。

エネルギー吸収量に基づいて、復旧後の建物の将来地震における変形量や応答加速度、及び、それらに基づく補修コストと時間（予想損失）を推定し、復旧計画性の効率性

を簡易的に評価する手法を示した。

建物モデルによる検討の結果、計算負荷が高く復旧計画を数種類に限定せざるを得ない従来手法と比較し、提案手法でより効率的な復旧計画を立案可能であるとわかった。

今後は、複数の大きさの地震動及び発生確率を考慮し、総合的に復旧効率性の高い計画を提案する枠組みの構築を目指す予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・国際共同研究強化(B)・「構造成能・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）の助成を受けました。

研究を進めるにあたり、建築研究所・関松太郎氏、オークランド大学・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) 秋谷理穂, 参川朗, 永井智基, 前田匡樹: 補修したRC部材の性能回復に基づく復旧戦略の立案, 日本コンクリート工学会年次論文集, 第45巻, 第2号, 2023年, pp.325-330.
- 2) Miura, K., Hogan, L.S., Shegay, A.V., Henry, R., Elwood, K., Maeda, M., Nagai, T., & Akiya, R.: Shake-table test of flexural RC beams subjected to different levels of repair, NZSEE annual technical conference 2024
- 3) 秋谷理穂, Lucas Hogan, 他: 震害を受けたRC建物の復旧効率性評価法の立案, 日本地震工学会・大会, 2024年, Paper No. 20240092
- 4) 長江拓也, 田原健一, 他: 4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第669号, 2011年, pp.1961-1970.
- 5) 日本建築防災協会: 2015年改訂版 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針, 2016年
- 6) ACI: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08), 2008年
- 7) 日本建築学会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針・解説, 2004年
- 8) 秋谷理穂, 三浦耕太, 永井智基, 前田匡樹: 損傷部材の選択補修によるRC建築物の構造性能回復の評価方法の提案, 日本コンクリート工学会年次論文集, 第46巻, 第2号, 2024年, pp.241-246.
- 9) 日本建築センター: 日本建築センター模擬波(基盤波)
- 10) FEMA: Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1~Volume 3, FEMA P-58, <https://femap58.atcouncil.org/reports>
- 11) 総務省・経済産業省: 令和3年経済センサス-活動調査産業別集計(卸売業, 小売業に関する集計) 結果の概要, 2023年