

論文 構造性能・修復費用・経済損失を考慮した RC 造建物への復旧計画の修復効率指標の提案

永井 智基*1・三浦 耕太*2・Alex Shegay*3・前田 匡樹*4

要旨：地震被害を受けた建物に対しては建物の被害箇所全てを補修するのではなく、構造性能を効果的に回復させる部材だけを選択して補修することで、補修にかかる費用の削減や工期短縮が可能になると考えられる。本研究では、補修にかかる費用と事業停止にかかる経済損失を考慮した、復旧計画の効率性を評価する修復効率指標を提案した。本指標により、将来に発生する地震での損失を考慮することで全部材を補修しなくとも費用を抑えた効率的な復旧計画が存在することを定量的に評価できた。

キーワード：RC 造建物, 補修, 補修費用, 経済損失, 復旧計画

1. はじめに

地震被害を受けた建物を補修や補強を施して復旧することは、事業の迅速な再開のためには合理的な復旧方法である。現在、構造部材への被害に対して補修が必要となった建物に対しては、構造部材全てを補修する（以降、全補修する）ことが一般的と考えられる。これは、補修によって建物の構造性能がどの程度回復するのかが不明瞭であることから安全側の判断である。

それに対し、構造性能を効果的に回復させる部材だけを選択し補修する（以降、選択補修する）場合、復旧工事のために建物の所有者が施工業者等へ支払う費用（以降、補修費用）や、事業停止に伴い失われる機能や利益（以降、経済損失）を補修箇所の省略と工期短縮によって抑えることができると考えられる。図-1 では、建物の耐震性能と復旧までの時間を全補修、選択補修、建替えでのイメージを示す。参川らの研究¹⁾では補修した部材の構造性能の回復度合いを定量的に分析し、補修した建物の性能の評価を試みた。補修費用や経済損失については、向井らの研究²⁾や森田らの研究³⁾では損傷と修復費のデータベースの枠組みとそれを用いた修復費用算定のプロセスが示されている。また、衣笠らの研究⁴⁾では修復費を基に部材の修復の難易度を評価する指標を提案しており、当指標により建物自体が持つ修復容易性を比較することができる。しかし、損傷と修復費を関連付け

る公開データは十分に多くなく、また、選択補修という概念に基づく復旧案（以降、補修計画）同士を比較し、どの部材を選択することが効果的なのかは検討されていない。また、将来の地震に対する損失を評価する研究も少ない。建物所有者が復旧計画を判断するためには、以上の複合的な効果を検証する必要がある。

そこで、本研究では、補修計画にかかる補修費用と経済損失を評価する修復効率指標(REI : Repair Effectiveness Index)を提案する。地震被害を受けたある建物に対し、複数の補修計画を立案し指標の試算を行い、復旧の要否の判断や効率的な補修計画の選択を定量的に判断できるような指標を定義する。

2. 修復効率指標の概要

本章では修復効率指標の概要を示す。図-2 に指標の概要を示す。指標は補修費用と経済損失の和（以降、総損失）によって計算される。同じ地震被害を受けた建物に対して、分子には補修を施した場合、分母には建替えた場合の総損失の値を入力する。つまり、本指標では以下2つのことを評価できる。1つ目は建替えと補修のどちらが経済的に合理的であるか、2つ目は様々な補修計画の中で総損失が最小なものはいずれか、である。よって本指標を比較することで意思決定者が容易かつ定量的に復旧計画を選択できる。また、この総損失は、(1)発生した地震（1回目の地震とする）による被害に対する補修工事に要する確定的な損失、(2)補修した後の将来の地震（2回目の地震とする）に対する損失の期待値の2つを足し合わせる。よって、供用期間を通して損失が小さくなる補修計画を判断できる。これは建設済みの建物に限らず、新築建物の設計時に考慮することで、ライフサイ

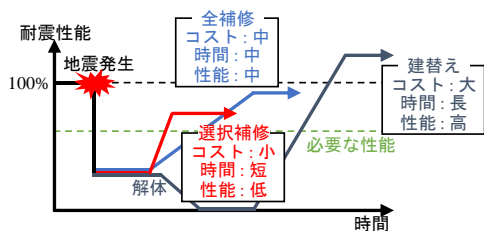


図-1 復旧計画と性能・費用の関係

*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 University of Auckland, Civil and Environmental Engineering, Lecturer, Ph.D. (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科 教授・博士 (工学) (正会員)

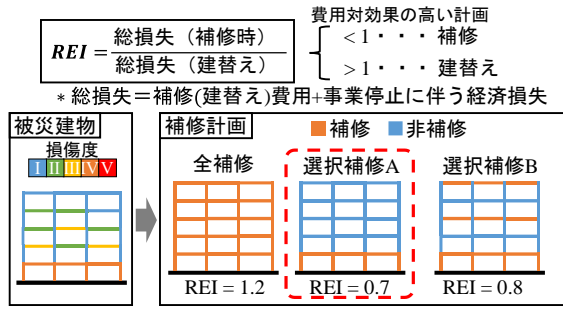


図-2 修復効率指標の式の概要と運用例

クル全体での損失を抑制する性能設計が可能となると考えられる。本研究での具体的な補修費用・経済損失の評価法は第4章で、修復効率指標の評価式の詳細については5.2節で述べる。

3. 補修した建物の性能評価

本章では、補修によって変化した建物の性能を定量的に評価する手法を説明する。構造解析では材端に曲げバネ、中央にせん断、軸バネを配し部材のモデル化を行ったフレームモデルを用いた。各部材の曲げバネ、せん断バネのトリリニア復元力特性に対し、図-3、4に示すように、補修の有無に合わせて文献1で提案されている係数を、補修を行う場合は回復係数 ϕ 、補修を行わない場合は低減係数 η により復元力特性を低減させ選択補修モデルを作成する。性能低減させるバネは曲げバネとせん断バネのみであり、両バネとも同じ ϕ 、 η の値を適用する。また、履歴モデルに対しては、図-5に示すように、履歴ループから計算される等価粘性減衰定数 h_{eq} に ϕ 、 η を乗じて低減し、低減後の h_{eq} の値となるように履歴モデルの形状を修正している。表-1に本検討で使用した、補修前の損傷度と回復係数 ϕ と低減係数 η の関係を示す。モデル化手法についての詳細は文献1を参照されたい。

選択補修された建物の構造性能を評価し安全性を満足しているか確認する必要がある。補修後の耐震性能を評価する数値として、本研究では保有耐震性能指標 α を用いる。図-6に算定法を示す。各選択補修モデルの増分解析結果において、建設省告示の応答スペクトルに対する、安全限界時の応答加速度の比率として計算する。安全限界点は、文献5のフレーム構造での限界状態変形角の設定を参考に、最大層間変形角 1/50 到達時とした。

4. 補修費用・経済損失の評価法

4.1 補修費用・補修時間

1章で述べたように補修費用や時間について、現状、国内では、データベースは十分に整備されていない。一方、米国のFEMAが示すP-58⁶⁾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費用、補修時間がデータ

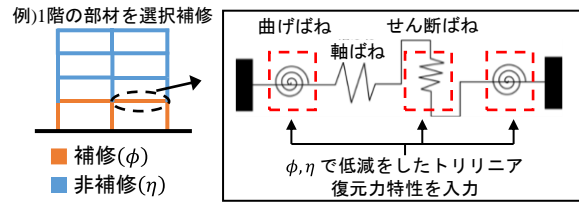


図-3 選択補修時の解析モデル概要

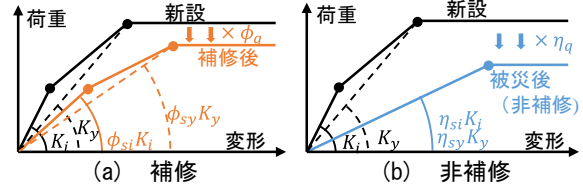


図-4 選択補修時の復元力特性

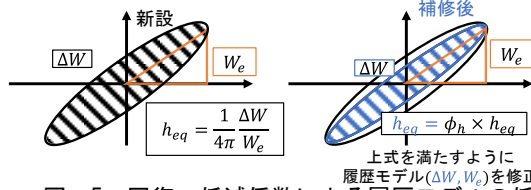


図-5 回復・低減係数による履歴モデルの低減

表-1 使用する回復係数 ϕ 、低減係数 η ¹⁾

柱・梁	回復係数 ϕ (補修)				低減係数 η (非補修)				
	初期剛性	降伏剛性	耐力	等価粘性減衰定数	初期剛性	降伏剛性	耐力	等価粘性減衰定数	
	ϕ_{si}	ϕ_{sy}	ϕ_a	ϕ_h	η_{si}	η_{sy}	η_a	η_h	
損傷度	I	0.46	1.00	1.05	1.00	0.40	1.00	1.00	0.95
	II	0.46	0.97	1.05	0.95	0.14	0.38	1.00	0.80
	III	0.49	0.92	1.21	0.80	0.08	0.21	1.00	0.75
	IV	0.49	0.92	1.21	0.70	0.06	0.17	1.00	0.70
	V	0.49	0.92	1.21	0.65	0.04	0.11	0.77	0.65

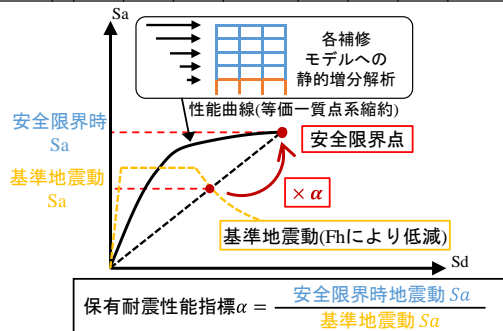


図-6 保有耐震性能指標 α の算定法

ースとして公開されている。他国のデータベースであるが、本研究では補修計画同士の効率性の比較を目的としているため、損傷部材の補修費用及び補修時間の算出にはFEMA P-58とその算定プログラムPACTを使用することとした。

PACTでの補修費用、補修時間の算定過程を図-7に示す。構造解析から得られた各階の最大応答値(層間変形角、床応答加速度)を入力し、その応答値に対してフラジリティ曲線から損傷度を判定し、損傷度毎に決定されている補修費用、補修時間を出力する。これは構造部材と非構造部材の一部は層間変形角で、非構造部材の一部と設備機器は加速度で損傷が定義されているためである。

建物の靱性に期待し大きめの塑性変形を許容する米国と、比較的変形制限の厳しい日本とで設計思想が異な

るため、日本の基準で設計した建物で PACT の標準的なフラジリティ曲線を用いて算定を行うと損傷が発生しにくい傾向になるなどが確認された。そこで、フラジリティ曲線を決定する中央値と補修費用を日本の評価例に変更した。具体的に、構造部材は文献 7 を、非構造部材は文献 8 を、設備機器については実験結果等不十分であったため文献 9 の耐震クラス B での水平震度の値を、フラジリティ曲線の中央値および補修費用として設定した。

建物全体の補修費用は、部材ごとの補修費用の総和とした。

4.2 経済損失

事業停止に伴う経済損失は、例えば、事業停止期間を示すダウンタイム、その建物を利用できなくなった人数など、複数考えられるが、本研究ではオフィスビルを検討対象とし、経済損失を事業者から得られる賃貸料とした。これは地震被害で建物が使用不可になった場合、賃貸人は本来受け取れる賃貸料収入を失うためである。

賃貸料は月ごとの賃料にダウンタイムを乗じたものと定義する。文献 10 では J-REIT 所有のオフィスの賃料推移を示しており、賃料としてその調査結果を使用する。ダウンタイムは、4.1 節で述べた補修時間から求める。ただし、PACT で得られる補修時間は各部材ごとの補修時間であるため、補修工事エリア全体のダウンタイムとしては直接使うことができない。よって、図-8 及び以下に示すように補修工事の工程を仮定し算出する。

- 1) 全部材を構造、非構造、設備機器の 3 種別に分類する。
- 2) 同じ階において、補修時間が最大となる部材の値が、その種別全てを補修するのに要する時間であると仮定し、3 種別それぞれで計算する。
- 3) 各階で補修工事が構造、非構造、設備機器の順に進行するとし、各種別の補修時間の和がその階のダウンタイム D_i とする。
- 4) 建物の補修は直列形式のように、下階から順に工事されるとする。各種別で下階の工事が完了するまでは休止期間とする。
- 5) 各階のダウンタイムに賃料と床面積（補修工事中は全面使用不可とする）を乗じたものを各階の経済損失 L_i とし、それを全階で足し合わせたものをその建物全体の経済損失とする。

ただし、工事開始までの期間はどの補修計画において同等なものであると仮定し、本検討では無視した。

5. 修復効率指標の試算

5.1 検討建物モデル

AIJ 耐震性能評価指針⁵⁾の評価例に記載の 12 階建て柱梁フレーム構造の長辺方向を 3 スパンに縮小した建物とした。梁降伏型全体崩壊系であり、スパン方向で損傷に

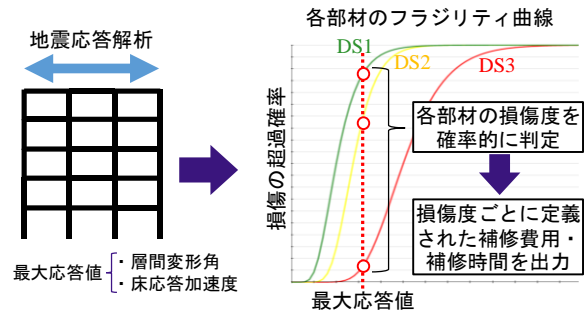


図-7 PACT による補修費用・補修時間の算出方法

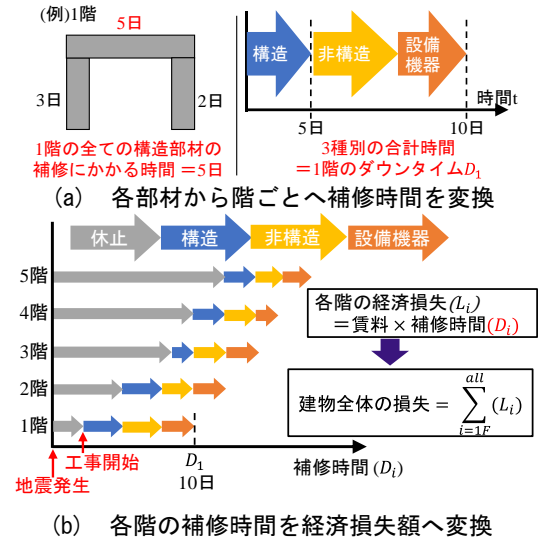


図-8 経済損失の算定方針

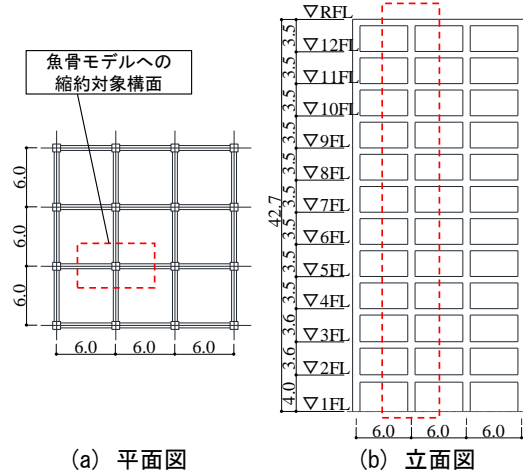


図-9 検討建物図面 (m)

大きな差はないため、X2 構面の柱梁（指針中の C2, G7）を取り出し、梁中央をローラー支持とした縮約魚骨モデルにて構造解析は行った。履歴モデルは曲げばねは武田モデル、せん断ばねは原点指向型モデルとした。図-9 にモデルの図面を示す。建設地は東京都心部とし、用途はオフィスビルとした。また、総損失の算定において必要となる非構造部材、設備機器は表-2 のように設定した。これは FEMA P-58 で提供されている Normative Quantity Estimation ツールにて推奨された部材を設定している。

5.2 修復効率指標の式の詳細と実際の計算過程

図-10 及び以下に計算過程を示す。

- 1) 無損傷の新設のモデルに対し1回目の地震波（建設省告示応答スペクトルに適合する人工地震波、位相は兵庫県南部地震におけるJMA神戸波。以降、告示波と呼び、告示応答スペクトル適合時を入力倍率100%とする）で地震応答解析を行う。図-11に示す関係に従い、部材端の曲げばね最大塑性率から損傷度を決め、最大応答値（層間変形角、床応答加速度）を出力する。
- 2) 1回目の地震で発生した部材の損傷度に対応する回復係数、低減係数から補修後モデルを作成し、各補修後モデルに対し、将来の地震（2回目の地震）として小～大規模の5つの入力倍率の告示波で地震応答解析を行う（これは、将来に起こりうる複数の地震での損失から全ての地震に対する期待値として2回目の総損失を算定するため）
- 3) 1), 2)で得られた応答値をPACTに入力し、補修費用、補修時間を出力する。1回目の補修では各補修計画に合わせて補修する構造部材を選択し費用を算出する。2回目の補修では、すべての補修計画を同じ条件で比較するため、全補修した際の費用を算出する。なお、本検討では選択補修は構造部材に対してのみであり、非構造部材、設備機器は補修の際に全て必ず補修される（補修費用・補修時間が発生する）こととした。
- 4) 3)で得られた2回目の補修時の損失を期待値化するために、J-SHIS¹¹⁾に公開されている50年超過確率から、

表-2 検討モデルに設定する建築部材

種別	項目	設置階	種別	項目	設置階
非構造	カーテンウォール	全階	設備機器	エレベーター	全階
	間仕切り壁	全階		配管パイプ	全階
	階段	全階		チラーユニット	屋上階
	フリーアクセスフロア	全階		冷却塔	屋上階
	吊天井	全階		空調ダクト	全階
	照明	全階		空調吹き出し口	全階
				VAVユニット	全階
				換気扇	全階
				エアハンドリングユニット	1階
				消火スプリンクラー	全階
				変圧器	屋上階
				低圧開閉器	1階
				配電盤	1階

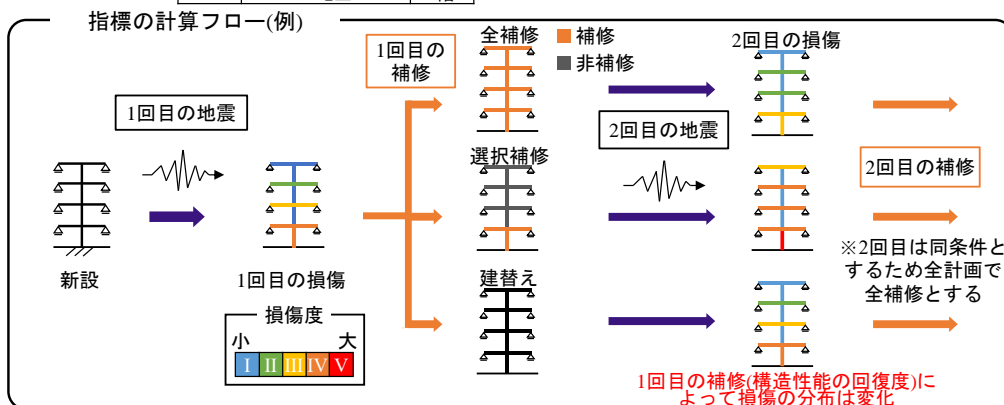


図-10 修復効率指標算定の流れ

図-12(a)のように各地震波の最大速度に合わせて地震発生確率を求め、それを2回目の地震での各補修費用、経済損失それぞれに乘じ、その和を取りハザード全体としての期待値とする（図-12(b)）。

以上の仮定で算出した補修費用、経済損失を図-13に示す式(1)に代入し修復効率指標REIを計算する。なお、建替え時の指標算出に当たって、建替えは同じ建物で再建するとした。新設費用は2012年の国交省建築着工統計調査¹²⁾から24万円/m²とし、解体費用については1.5万円/m²と仮定した。為替レートはデータベース作成当時の2011年を参考に110円/\$とした。本検討では、1回目の地震時の損傷の大きさの影響を比較するため、検討ケースを2種用意し、耐震性能残存率R¹³⁾で小破と中破になるよう設定した。1回目と2回目の入力倍率は表-3のように設定し、それぞれのケースでの部材の損傷度の分布を図-14に示す。

5.3 補修計画

補修計画は2つのシナリオに従って無補修から全補修へ補修箇所を増やしていく計画を作成する。1つ目は階の順番（1階→12階へ増やしていくなど）、2つ目は損傷度の順番（高→低に増やしていくなど）とする。

5.4 試算結果

図-15, 16では、横軸に保有耐震性能指標 α を、縦軸に補修費用と経済損失を足した単位面積当たりの総損失を示したものであり、(a)が1回目、(b)が2回目、(c)が1回目と2回目の総損失を足し合わせたものである。横軸の α は補修後モデルの値であり、(a)~(c)で補修した箇所を表す各プロットの横軸の値は共通である。つまりこれらのグラフは、1回目の補修でどれ程の部材を補修し性能を回復させたかに対応して総損失がどのように変化するかを示すグラフである。(a)では補修する箇所を増やせば右上がり、つまり性能の上昇とともに総損失が上昇するが、高損傷度順であると同じ総損失でも上昇する性能は高いことがわかる。(b)では、右下がり、つまり1回目にかけた総損失の分、2回目の総損失が低下している傾向である。(c)では、低損傷度順、上階順は補修箇所を

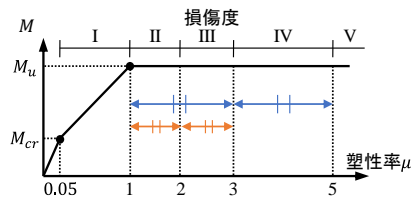
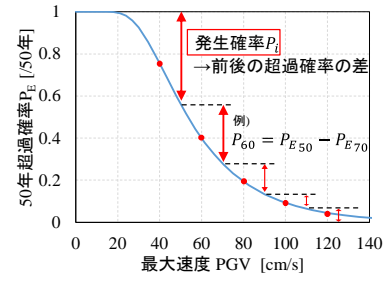


図-11 曲げばねの塑性率と損傷度の関係

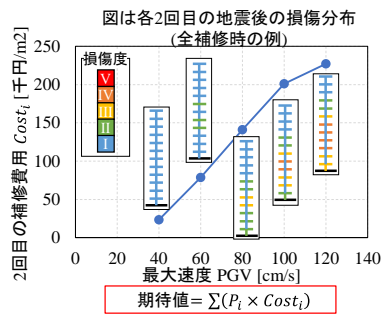
$$REI = \frac{(Cost_{1st} + Loss_{1st})}{(Cost_{\text{建替え}} + Loss_{\text{建替え}})} + \frac{(Cost_{2nd} + Loss_{2nd})}{(Cost_{\text{建替え}2nd} + Loss_{\text{建替え}2nd})} \quad \text{式(1)}$$

1回目の補修時の損失 2回目の補修時の損失
(期待値)

* Cost : 補修工事費用 Loss : 事業停止に伴う経済損失
 図-13 修復効率指標の式詳細



(a) 超過確率から発生確率への変換



(b) 各入力倍率での補修費用と期待値の算出式

図-12 2回目の期待値の算出方法

増やしても性能は上昇せず総損失が上昇するだけだが、高損傷度順、下階順は、補修箇所を増やすごとに性能が上昇し、総損失は1回目と2回目の和を取ること無補修、全補修よりも低減できている。下階に損傷が集中する本建物では下階周辺から補修していくと効率的であると考えられる。下階順と高損傷度順の2つでは、高損傷度順の方が同じαを低損失で確保できている。両者の違いは主に、損傷度Iの柱を補修したか否かである。部材の補修費用データベースによると、構造部材の補修費用は仮設費や仕上げ材の解体・復旧に要する費用等、損傷度と無関係な費用が大部分を占めており、損傷度Iを補修することが全体の損失に与える影響は他の損傷度の部材と同等に大きい。損傷度Iの柱は補修せずとも性能に大きな差はないことがαの比較によりわかるため、損傷の小さな部材を非補修とすることは、安全性には大きな影響を与えず、補修費用を抑えることができる。また、2つのケースを(c)グラフで比較すると、Case1は補修箇所を増やすとそれに伴い総損失も増えるが、Case2では特に高損傷度シナリオにおいて補修箇所を増やしても総損失が上昇しない傾向が確認された。中破程度の損傷を受けた際は構造躯体を全体的に補修しても総損失に変化はなく、性能を上昇させることができることがわかる。

表-3 1回目・2回目の地震大きさ

1回目の地震		
Case	入力倍率	耐震性能残存率
Case 1	70%	R=84% (小破)
Case 2	100%	R=71% (中破)

2回目の地震			
Case	入力倍率	最大速度 (cm/s)	発生確率 (東京都)
Case 1	40%	40	43.7%
	60%	60	28.3%
Case 2 (共通)	80%	80	14.5%
	100%	100	6.9%
	120%	120	6.5%

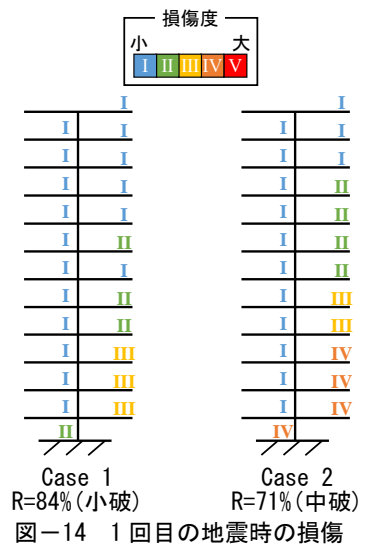


図-14 1回目の地震時の損傷

ここで、安全限界時にαが1以上であることは、告示スペクトルでの応答が最大層間変形角 1/50 以下であることを意味している。この数値を構造性能の安全性の制限値として、図-15、16の(c)に赤線で示した。最も効率的な補修計画はこの制限値を超えるか否か総損失が最小のものである。図-17に修復効率指標 REI を計算した結果を示す。図の斜線のハッチはαが1に満たないものを示す。この結果より、両ケースとも建替えより補修による復旧の方が損失を低減でき、特に高損傷度順に補修する計画 (Case 1 : III, Case 2 : IV-III) が安全性を確保しつつ、費用対効果的に最も効率が良いことを示すことができた。

6. まとめ

本研究では、地震被害を受けた建物への合理的、効率的な復旧計画の立案を可能とする修復効率指標を提案した。補修費用、経済損失の算出方法を示し、実際に適用し補修計画の効率性を評価した。以下に結論を示す。

- 1) 本提案手法では損傷を受けた建物に対する補修方法が性能や損失に及ぼす影響を定量的に評価できた。
- 2) 選択補修の概念を用いて検討した結果、全補修や建替えよりも総損失を低減できることが分かった。
- 3) 補修費用や経済損失の算定には仮定した個所があるため、今後はさらなる評価精度の向上、補強を含めたより広範囲な補修計画の提案等に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・国際共同研究強化(B)・

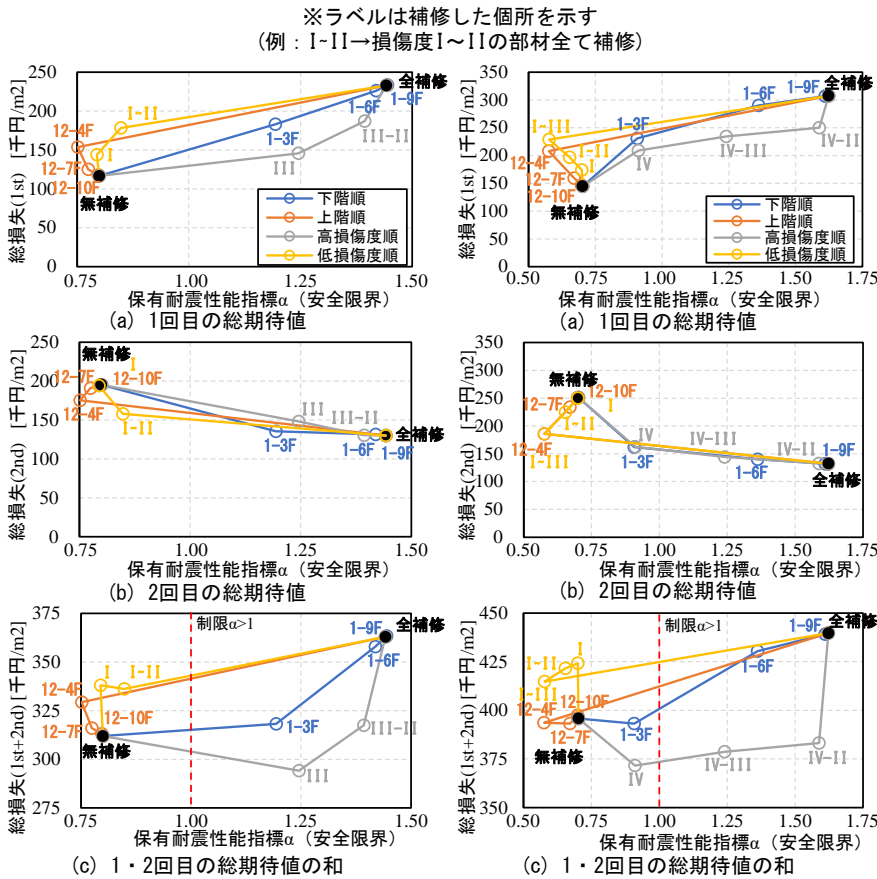


図-15 構造性能と総損失額の推移
Case 1

図-16 構造性能と総損失額の推移
Case 2

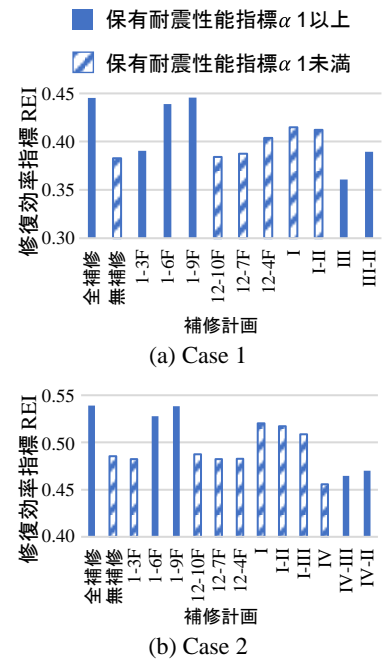


図-17 修復効率指標の試算結果

「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)の助成を受けました。また、建築研究所・関松太郎氏には多大なるご助言を賜りました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 参川朗, 他: 損傷部材の選択補修によるRC造建物の構造性能回復と各部材の影響の評価 その1~3, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.419-424, 2023.7
- 2) 向井智久, 他: 建築物の災害後の機能維持/早期回復を目指した構造性能評価システムの開発 その7, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造I, pp.63-64, 2010.7
- 3) 森田高市, 他: 災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発, 建築研究所, 2011
- 4) 衣笠秀行, 他: 修復費用の工学的増加要因に基づく修復性評価指標の提案, 日本建築学会技術報告集, 17巻, 36号, pp.531-536, 2011.6
- 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, 2004.7
- 6) FEMA: Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1~Volume 3, FEMA P-58, <https://femap58.atcouncil.org/reports>, (閲覧日: 2023年12月21日)

- 7) 白井和貴, 他: RC建物の大振幅地震動に対する応答と損傷・修復費評価, 日本建築学会シンポジウム「大振幅地震動に対する耐震性能評価」, pp.83-106, 2021.12
- 8) 岡野創, 梅田尚子, 貞許美和: 地震時の建物被害と経済的損失, 日本建築学会大会(北陸)PD「プレート境界地震による大振幅地震動の予測と耐震設計」, pp.43-58, 2019.9
- 9) 寺本隆幸: 建築設備耐震設計・施工指針と建築電気設備の耐震設計・施工マニュアルの基本的考え方, 電気設備学会誌, 26巻, 4号, pp.248-251, 2006.4
- 10) 党姚澤, 陳佳樟, 田辺新一: J-REIT所有オフィスにおける経年変化による環境認証が不動産価値への影響 その1, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学I, pp.1101-1102, 2019.7
- 11) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <https://www.j-shis.bosai.go.jp/>, (閲覧日: 2023年12月21日)
- 12) 政府統計の総合窓口(e-Stat): 建築着工統計調査一用途別, 構造別/建築物の数, 床面積, 工事費予定額, 2012
- 13) 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および復旧技術指針, 2016.3