

論文 修復性評価指標・総修復時間・修復費用係数を用いた RC 造建物の修復難易度評価

衣笠 秀行^{*1}・泉 洪介^{*2}・向井 智久^{*3}・大西 直毅^{*4}

要旨：修復性を，修復費用・修復時間・必要技術レベルの面から評価する指標（修復性評価指標，総修復時間，修復費用係数）の試算を行い崩壊形の違いなどが及ぼす影響を考察した。また，これにより次の知見を得た。①本修復性評価指標は新設費用の異なる建物の修復性評価において，既往の財産消失割合(=修復費用/建物新設費用)と比較し有効な指標となり得る。②修復難易度の適切な評価のために修復性評価指標だけでなく総修復時間に基づく検討が必要である。③修復費用係数が大きくなる設備の修復では，専門性の高い材料や作業員の確保など，修復費用や修復時間では計れない必要技術レベルに起因する修復困難が発生する。

キーワード：修復性評価，修復性評価指標，総修復時間，修復費用係数，RC 構造

1. はじめに

最近の国内の地震被害において，大地震後の建築物全体の損傷が大きく，修復のために過大な費用や時間を要し，生活困窮や業務停止といった建築物の機能回復が困難となる事例が見られるようになってきている。今後の建築物の設計において建築物の耐震安全性だけでなく，建築主の関心の高い指標の一つとして，地震後の建築物の修復性を視野に入れた設計体系の導入が求められる。このようなことを背景に，文献 1)~4)は修復性の観点から建築物の性能を考える新しい評価体系が提案されている。本研究ではそこで使用されている修復性評価指標 I（以下，指標 I），総修復時間，及び修復費用係数 α^2 の一つ特徴や有効性について，特性の異なる建物に対する試算を通して論じる。

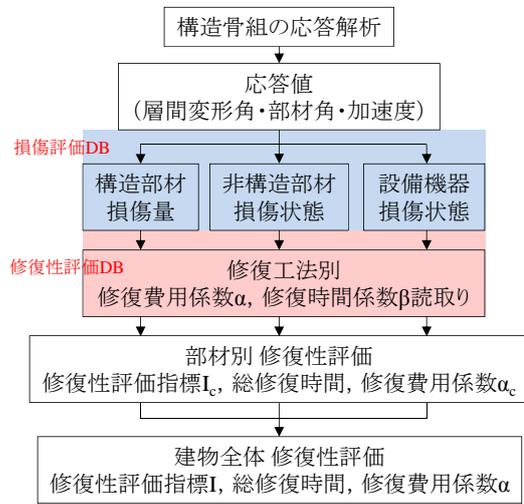


図-1 修復性評価のためのフロー

2. 評価手法概要

本研究における評価手法を図-1 に示す¹⁾。本評価手法では，構造解析により得られた各部材の応答値から，損傷量や損傷状態を得る損傷評価データベース（以下，損傷評価 DB）と，その情報から修復難易度評価を行う修復性評価データベース（以下，修復性評価 DB）の二つの DB を用いる³⁾。評価対象部位には構造体だけでなく非構造部材や設備機器も含まれ，それぞれ約 20~30 種類に細分化され部位毎に情報が格納されている。

2.1 修復性評価のための各指標の特徴²⁾

指標 I は発生した損傷の深刻度を修復性の観点から評価する指標で，式(1)で算出される。

$$\text{指標 } I = \sum I_c \quad (1)$$

ここに， I_c は部材別の修復性評価指標であり式(2)より

算出する。なお，式(1)の Σ は部材についての総和である。

$$I_c = \alpha \times \beta \times \text{損傷量} \quad (2)$$

ここに α は修復費用係数， β は修復時間係数でありどちらの係数も修復性評価 DB から損傷程度に応じた値を読み取ることができる³⁾。また，損傷量は損傷を受けた柱や梁の本数，表面積などを単位として表される損傷の量である。指標 I は普通作業員労務単価を乗じることで修復費用に換算でき，費用の観点からの相対的な修復難易度の指標としての意味を持つ。

総修復時間は修復に要する時間の大きさを表す指標である。実際の復旧では修復費用とならび修復時間も重要な検討項目であることが知られている。式(2)の「 $\beta \times$ 損傷量」の部分の，部材についての総和は総修復時間であり，修復を 1 人の作業員で行う場合に必要の日数を意味して

*1 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*2 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 修士 (正会員)

*3 独立行政法人 建築研究所 博士 (工学) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 助教 博士 (工学) (正会員)

いる。実際の修復時間は同時投入できる修復作業員数や同時進行できる工事数など、修復工事の組織体制や施工計画の違いの影響を受けて変化し、一般に総修復時間より小さなものとなる。しかし、これらをほぼ同じと仮定すれば、総修復時間は実際の修復時間の大きさを表す相対指標として使用することができる。総修復時間が倍になることは相対的に実際の修復時間が倍になる損傷が生じていると考えることができる。

修復費用係数 α は修復に必要な技術レベルの大きさを示す指標であり、式(3)で算出される。修復費用係数 α は、修復費用や修復時間では計ることのできない必要技術レベルの面からの修復難易度の大きさを評価する。具体的には修復工事において特に高価な材料を使わず、また、普通作業員で可能な簡単な作業である場合に小さくなり、高価な材料やレンタル料の高い重機、また、労務単価の高い作業員を必要とする専門性の高い工事の場合に大きな値となる。

$$\text{修復費用係数 } \alpha = \text{指標 I} / \text{総修復時間} \quad (3)$$

3. 解析概要

3.1 解析モデル

解析対象を図-2に、解析パラメータを表-1に示す。本研究では4層のRC造構造物の同図(b)に示すY2構面を解析対象とする。また、パラメータとしてベースシア係数(以下、 C_B)及び崩壊形(崩壊層数1~4)を取り上げる(4章以降では表-1の解析モデル名で論じる)。

3.2 解析手法

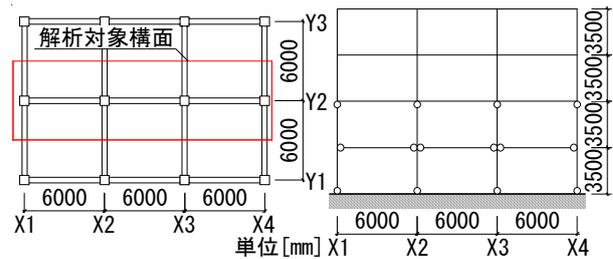
解析には(株)構造システムのSNAPを使用した。各階の単位床面積当たり重量は 13kN/m^2 とした。柱・梁部材は材端バネモデルとした。復元力特性モデルは曲げバネはDegrading tri-linear型とし、せん断バネはせん断破壊なしを仮定し弾性バネで設定した。本建物は比較的低層であることから軸バネは圧縮破壊なしとし圧縮側の剛性を弾性剛性、引張側の剛性を圧縮側の1/10とした。非降伏層ではヒンジを発生しないよう部材耐力を十分大きくした。入力地震動は目標スペクトルを建設省告示の加速度スペクトルに第2種地盤の地盤増幅率 G_s を乗じた乱数位相告示波とした。なお、各指標の算出は、作成した5波による各部材の応答の平均値をもとに行った。

3.3 非構造部材

文献5)を参考に単位面積当たりの非構造部材量を表-2のように設定した。また、非構造部材の損傷を支配する工学量は層間変形角で評価を行う。

3.4 設備

文献4)を参考に表-3に示すように設備を機械設備、電気設備、輸送設備の3つに大別し設備量を設定した。設備の損傷を支配する工学量は加速度で評価する。また、



(a) 平面図 (b) Y2 通り立面図
(2層崩壊モデル例)

図-2 解析対象構造物

表-1 解析パラメータ

モデル	C_B	崩壊層
0.3-1	0.3	1
0.3-2		1-2
0.3-3		1-3
0.3-4		1-4
0.4-1	0.4	1
0.4-2		1-2
0.4-3		1-3
0.4-4		1-4
0.5-1	0.5	1
0.5-2		1-2
0.5-3		1-3
0.5-4		1-4

表-2 非構造部材量

項目	単位床面積 当たり部材量 (m^2/m^2)
外壁	0.83
外扉	0.04
外窓	0.05
内壁	1.34
内扉	0.08
天井	1.00

外壁:RC 壁(打ち放し)
内壁:軽鉄間仕切(塗装仕上げ)
天井:システム天井
内外扉:スチールドア

表-3 考慮する設備と個数

大分類	分類	小項目	個数	設置階
機械設備	給水設備	受水槽	1	屋上階
		直結増圧ポンプ	1	1階
		加圧給水ポンプ	1	屋上階
	消火設備	消火用補給ポンプ	1	屋上階
		スプリンクラーヘッド	25	各階
		泡消火ヘッド	2	各階
	排水設備	排水ポンプ	5	1階
		雨水利用ポンプ	3	1階
	空調設備	床置形空調機	1	1階
		天井吊形空調機	6	各階
		屋外機	2	屋上階
		ベースボードヒーター	4	1階
		換気設備	給排気ファン	3
	ダクト設備	排煙ファン	2	屋上階
縦ダクト		1	1階	
制気口設備	横ダクト	4	各階	
	排煙口, 排煙ダンパー	3	各階	
電気設備	受変電設備	天井用制気口	31	各階
		キュービクル	1	屋上階
	自家発電設備	自家発電機	1	屋上階
		動力制御設備	動力制御盤	1
	避雷針設備	分電盤	1	各階
監視制御盤		1	1階	
輸送設備	昇降機設備	避雷針設備	2	屋上階
	エレベータ	エレベータ	1	1階

表-4 設備の加速度範囲と被害発生率

加速度範囲 (gal)			修復分類	被害発生率 (%)
設備耐震ランク				
B	A	S		
400	670	1000	軽微補修	17.6
600	1000	1500	部分補修	50.0
800	1330	2000	全取替	52.4

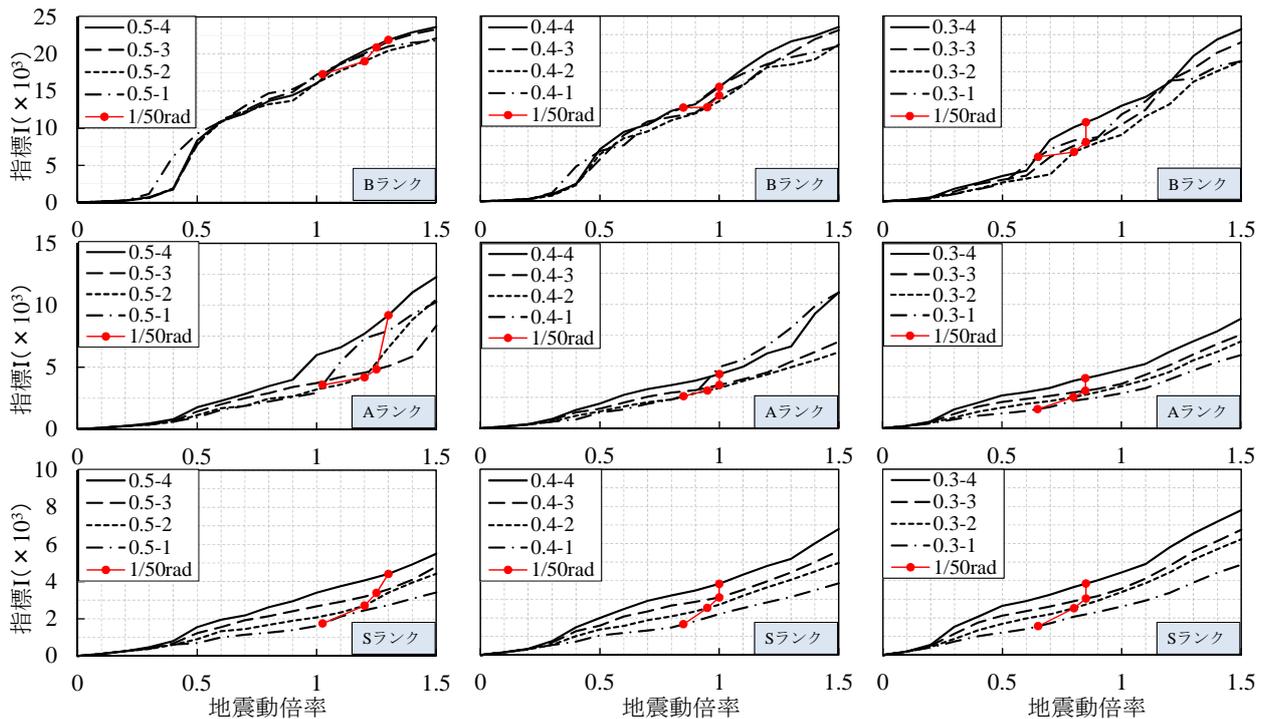


図-3 指標 I と耐震性能

応答値に対する設備の損傷程度と被害発生率を、文献4)を参考に表-4のように設定した。同表の通り、本研究では応答値の違いにより設備の耐震ランクをS, A, Bの3種類とした。

4. 指標 I の分析

4.1 解析パラメータが及ぼす影響

基準地震動に対する入力地震動の倍率（以下、地震動倍率）を変化させたときの指標 I の推移を図-3（上段から設備耐震ランク B, A, S）に示す。なお、同図に文献6)の安全限界状態時 (=1/50rad.) の点も示す。

(1) 設備耐震ランクの影響

設備耐震ランク B では特に $C_B=0.5$ のモデルで地震動倍率が小さいうちから指標 I の増加が顕著であることが分かる。これは、比較的小さい応答加速度で指標 I への影響が大きい設備が損傷し、修復性が劣るためである。0.5-4 モデルの地震動倍率毎の指標 I の部材別占有割合を図-4に示す。図より、地震動倍率が0.3のときに耐震ランク B のみで設備の指標 I が発生し、その占有割合が30%を超える。各耐震ランクにおける安全限界時の設備の占有割合は S ランクで4.7%、A ランクで54.3%、B ランクで80.8%となり、B ランクが最も多くの割合を占める。この傾向は他の解析モデルでも同様である。

(2) 崩壊層数の影響

指標 I において構造部材や非構造部材の占有割合が大きくなる S ランクのモデルでは、小さい地震動倍率のときはモデル間で大きな違いはないが、地震動倍率が0.3

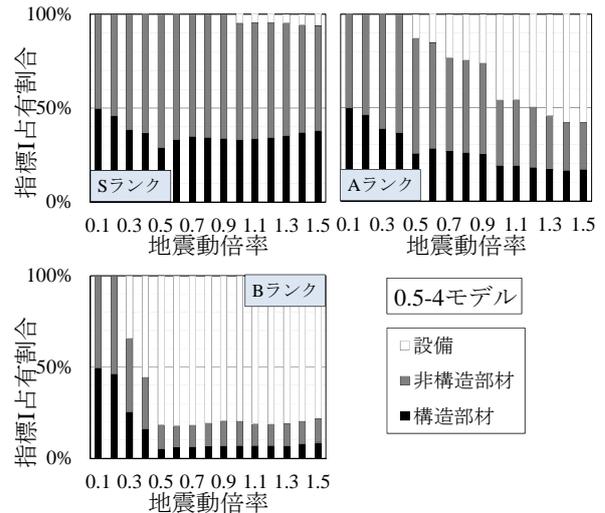


図-4 指標 I の部材別占有割合

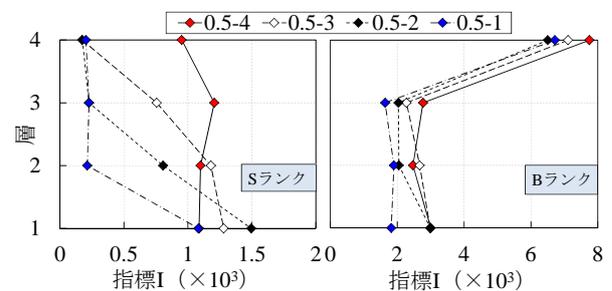


図-5 安全限界時の各層の指標 I 分布

を超えると、崩壊層数が多くなるに従い同一地震動に対する修復性が劣る結果となった。また、安全限界時での0.5-4モデルと0.5-1モデルを比較すると、0.5-4モデルの方が2.54倍程度大きい。同様に0.4-4モデルは0.4-1モデル

ルに対して 2.32 倍、0.3-4 モデルは 0.3-1 モデルに対して 2.48 倍程度大きく、各モデルとも 1 層崩壊と 4 層崩壊で 2 倍以上の差がある。これは、安全限界時の各層の指標 I を比較した図-5 に見るように、降伏層での指標 I の値は大きくは変わらず、また非降伏層では部材の損傷がほとんど発生しないためである。一方、設備ランク B では崩壊形の違いの影響は大きくない。これは設備の損傷が加速度支配であり、崩壊形の差に関わらず階方向でほぼ同じ分布で発生するためと考えられる (図-5 参照)。

(3) C_B の影響

B ランクのモデルでは同一地震動に対する指標 I は C_B が大きいほど大きい。これは、C_B を増加させることで応答加速度が大きくなり、設備の損傷が大きくなるためである。一方、S ランクでは同一地震動に対する修復性は、すべてのモデルで C_B が大きいほど優れる結果となる。これは、設備の損傷が安全限界付近まで発生せず、また、C_B を上げることで構造部材や非構造部材の損傷を引き起こす応答変形量を抑えることができるためである。

4.2 相対的な修復難易度の指標としての指標 I

本節では、地震後の修復性を判断する指標として広く用いられている財産消失割合 (式(4)) と、本評価手法における指標 I の比較を通して、修復性評価の指標として財産消失割合を使用した場合の問題点や指標 I の有効性を検証する。

$$\text{財産消失割合} = \frac{\text{修復費用}}{\text{建物新設費用}} \quad (4)$$

式(4)の建物新設費用を文献 7) に基づき表-5 のように設定した。ここで、構造部材のみで構成される建物(新設費用=同表躯体 13.03 万円/m²) と、これに非構造部材を加えた建物(新設費用=同表総計 22.12 万円/m²) の 2 つを考える。また、修復費用は式(5)より算出する。なお、本節では簡単化のため設備の存在を無視した。

$$\text{修復費用} = \text{指標 I} \times \text{普通作業員労務単価} \quad (5)$$

ここでは、式(5)の普通作業員労務単価を 14,000 円と仮定して修復費用を算出する。図-6 に 0.5-4 モデルの安全限界時における各指標の比率 (構造部材のみの建物の指標の数値を基準値 1.0) を示す。図より指標 I での構造部材のみの建物に対する構造部材と非構造部材の建物 (図中構造+非構造) の比率が 2.69 倍であるのに対し、財産消失割合でのそれは 1.59 倍と小さい。

両指標の性質の差をさらに明らかにする目的で仮に特別な技術の導入により新設費用は当初のままで、同じ応答を受けたときの非構造部材の修復費用を 3 割にまで削減できるケースを考える (以下、ケース A)。このときの安全限界時における各指標の比率を図-7 に示す。図より、指標 I の場合の比率は 1.51 倍であるのに対し、財産消失割合では 0.89 倍となり構造+非構造のものが構造部材のみの場合を下回る。これは構造部材のみの修復よ

表-5 新設費用の基準コスト

科目	基準コスト (万円/m ²)	科目	基準コスト (万円/m ²)
仮設工事	2.15	外部仕上げ	3.80
土工事	1.18	内部仕上げ	4.10
コンクリート工事	5.19	上記計	7.90
鉄筋工事	1.76	諸経費(15%)	1.19
杭地業	1.05	非構造計	9.09
上記計	11.33		
諸経費(15%)	1.70		
躯体計	13.03	総計	22.12

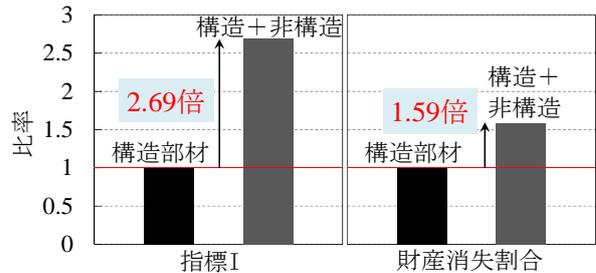


図-6 各指標比率

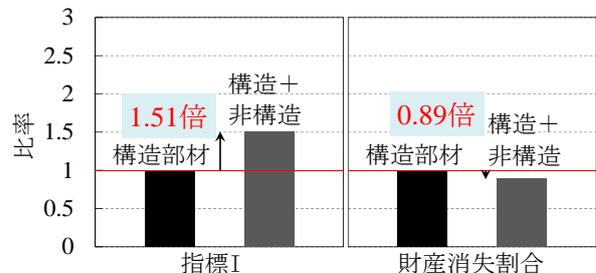


図-7 ケース A の各指標比率

りも構造部材と非構造部材を足した修復の方が容易であるということ、明らかに誤りである。このようなことは、修復費用削減のために新設費用が上昇する場合に特に顕著となる。財産消失割合は、財産の損失割合を表す指標としては有効であるが、定義式(4)の分子の絶対量で決まる修復難易度を評価する指標としては適切ではない。一方、本指標は式(4)の分子 (修復費用の大小) を直接評価する形となっており、修復難易度を示す指標として有効であると考えられる。

5. 総修復時間と修復費用係数 α の分析

5.1 総修復時間の分析

地震動倍率を変化させたときの総修復時間の推移を図-3 と同様の形で図-8 に示す。

(1) 設備耐震ランク及び崩壊層数の影響

設備耐震ランク B では、崩壊層数や C_B によらず総修復時間の増加が他の耐震ランクのモデルよりも大きい。

設備の耐震ランクが B でかつ C_B=0.5 モデルでは、崩壊層数の違いによる総修復時間の差はほとんどない。一方、設備耐震ランクが高くなるほど、また、C_B が小さくなるほど崩壊層数の影響は大きく、同一地震動倍率に対

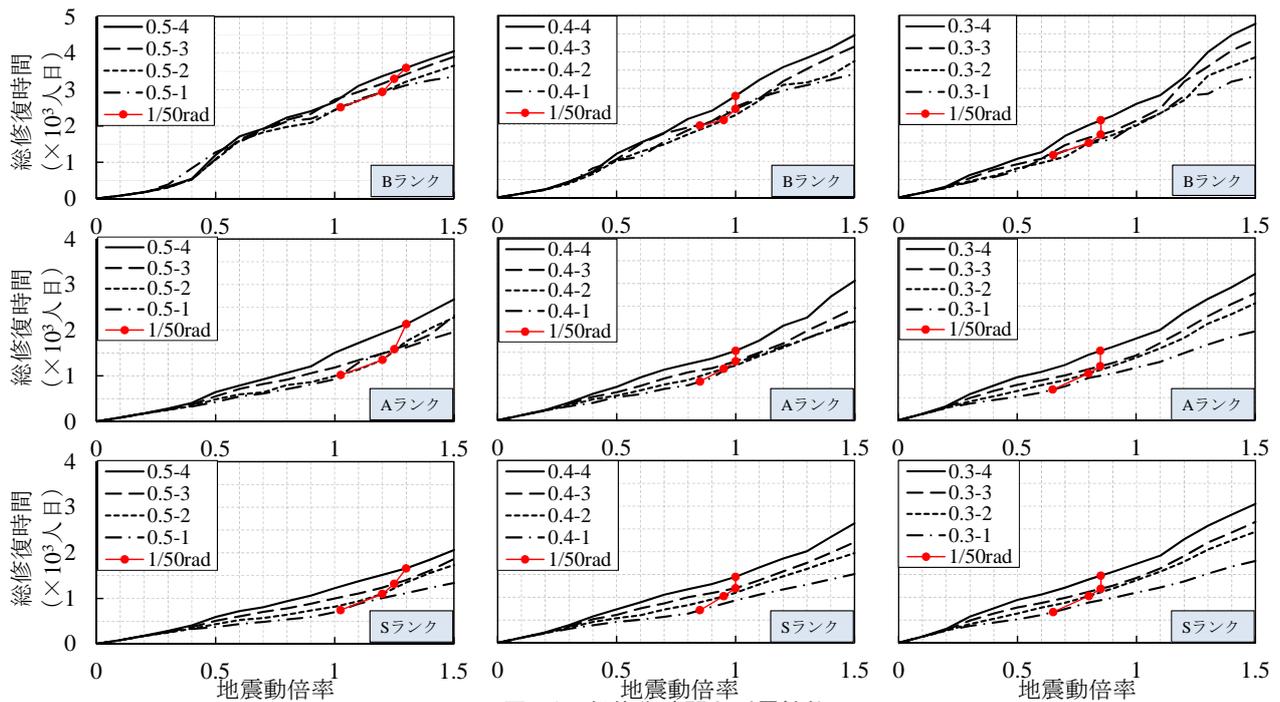


図-8 総修復時間と耐震性能

する総修復時間は崩壊層数が多いほど大きい結果となった。崩壊層数の影響が最も大きくなる設備ランク S, $C_B=0.3$ のモデルでは、1層崩壊に対して4層崩壊の総修復時間は安全限界時において約2倍となっている。

(2) C_B の影響

設備耐震ランクが S や A の場合においては、同一地震動倍率に対する総修復時間は C_B が小さいものほど大きくなる結果となった。一方、設備耐震ランクが B の場合、地震動倍率が小さいうちは同一地震動倍率に対する総修復時間は C_B が大きいものほど大きくなるが、地震動倍率が大きくなると総修復時間は同程度あるいは C_B の大きいものの方が小さくなる結果となった。

(3) 指標 I との関係性

図-9に安全限界時における0.5-4モデルの設備耐震ランク別の指標 I と総修復時間の比率関係を示す (S ランクの指標 I, 総修復時間の値をそれぞれ基準値 1.0 としている)。図より、S ランクに対する B ランクの比率は、指標 I では 4.96 倍であるのに対し、総修復時間では 2.17 倍となり、設備の損傷が抑えられる S ランクにおいて B ランクと比べ、指標 I の減少の割に総修復時間は小さくはならないことが分かる。すなわち、S ランクのモデルは B ランクのモデルと比べ、修復費用 (指標 I) は約 1/5 倍となるが、修復時間は約 1/2 倍にしかならないことを意味している。これらのことは、指標 I からだけでは修復難易度の適切な評価は難しく、総修復時間に基づく検討が必要であることを示している。

5.2 修復費用係数 α の分析

基準地震動に対する入力地震動の倍率を変化させたと

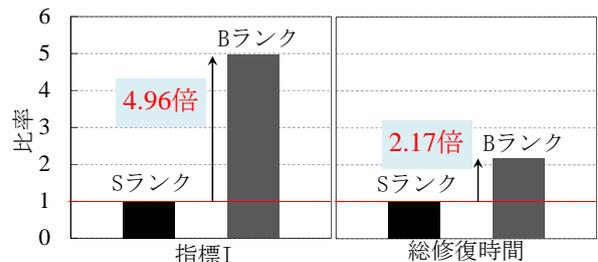


図-9 設備耐震ランク別の指標 I と総修復時間

きの修復費用係数 α の推移を図-3 と同様の形で図-10 に示す。

設備の修復では、構造部材や非構造部材の修復と比べ修復する際により高価な材料や高い技術レベルを持った作業員を必要とするため、修復費用係数 α は大きくなる。 $C_B=0.4$ や 0.5 で耐震ランク B のモデルでは、地震動倍率が 0.3 から 0.5 付近で修復費用係数 α が急激に増加している。これは、比較的小さい地震動で応答加速度が表-4 で示した加速度範囲に達し、設備の修復が発生するためである。それ以降の地震動倍率では修復費用係数 α は概ね 6.0 から 7.0 程度を推移する。一方、耐震ランク A や S の修復費用係数 α は設備の損傷がほとんど発生しないため大きく増加することはない。耐震ランク B と比較すると、概ね 2~3 倍程度 B ランクの方が大きい。

修復費用係数 α が大きくなるものは、高度な技術レベルの必要な修復であり、この値が高い場合、材料の入手や専門性の高い作業員の確保など、指標 I や総修復時間の大きさだけでは計れない修復困難が発生することが予想される。修復費用係数 α の急増を引き起こす設備の損傷には十分な注意が必要である。

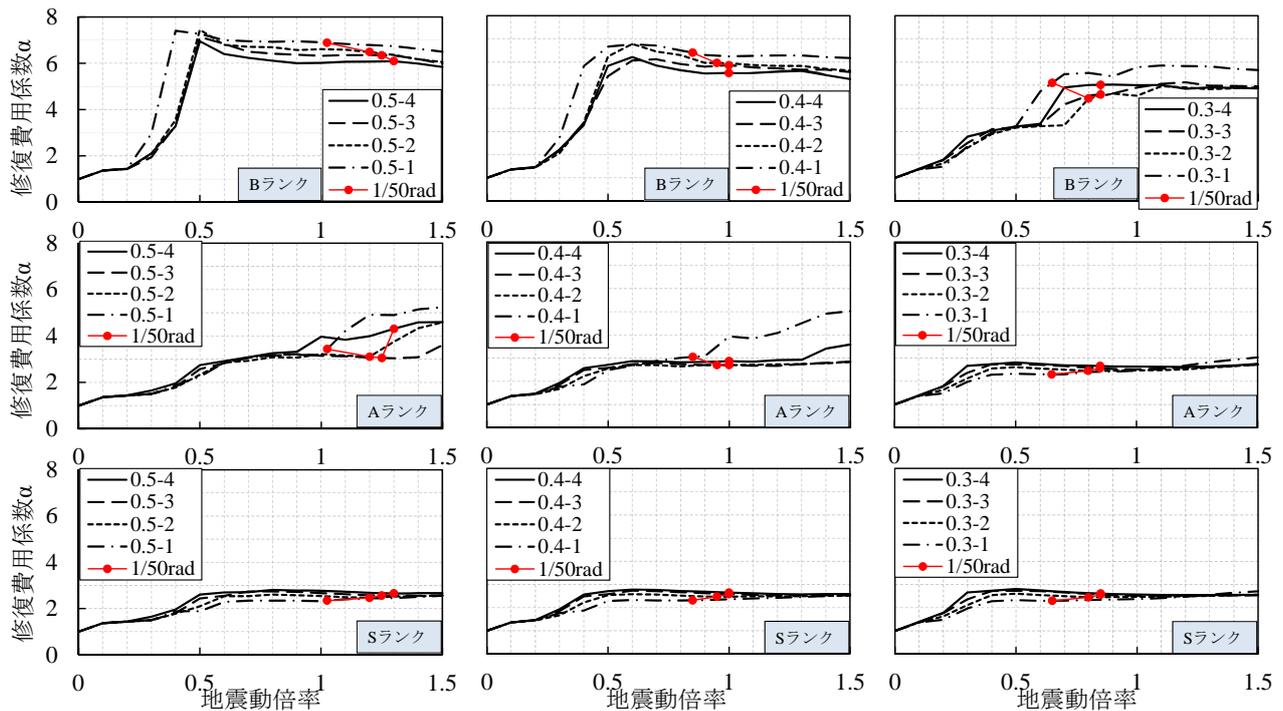


図-10 修復費用係数 α －耐震性能

6. まとめ

修復難易度を、修復費用・修復時間・必要技術レベルの面から評価する指標（修復性評価指標、総修復時間、修復費用係数）の試算を行い次のような知見を得た。

- (1) 構造部材・非構造部材の被害が支配的となる設備耐震ランクの高い建物の修復性評価指標は、全層崩壊のものは1層崩壊と比べ2.5倍程度大きな値となった。一方、設備の被害が支配的となる設備耐震ランクの低い建物の修復性評価指標の増加はより急であるが、崩壊形の違いによる差は小さかった。
- (2) 修復性を判断する指標として広く用いられている財産消失割合(=修復費用/建物新設費用)は、建物新設費用の異なる建物間の修復難易度評価において矛盾を生じる場合があり、修復難易度を評価する指標としては、建物新設費用と関係なく修復費用の大きさを直接評価する本指標（修復性評価指標）がより有効であると考えられた。
- (3) 設備耐震ランクを低いものから高いものへと変更した場合、修復性評価指標の減少割合と比べ総修復時間の減少割合は小さく、修復難易度の適切な評価のために総修復時間に基づく検討が必要であることが示された。
- (4) 必要技術レベルの高さを示す修復費用係数は、設備耐震ランクの低い建物において設備の損傷進行に伴い急激に増加する。設備の損傷が生じる場合には、特殊な材料や専門性の高い作業員の確保など、修復費用や修復時間の大きさだけでは計れない修復困難の発生に注意が必要

である。

参考文献

- 1) 福山洋ほか：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1 研究開発プロジェクトの全体概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.123-124，2008.7
- 2) 衣笠秀行ほか：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，Vol.17，No.36，pp.531-536，2011.6
- 3) 向井智久ほか：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 損傷評価・修復性評価・機能性評価に資するデータベースの構築）、日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.63-64，2010.7
- 4) 向井智久ほか：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 成果報告書，建築研究所，2011.1
- 5) 赤堀弘：基準にもとづく建築積算入門新訂第四版，彰国社，2009.1
- 6) 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
- 7) 富谷豪：最新建築コスト算定技法，財団法人経済調査会，1993.8