

# 論文 全体崩壊機構を形成する鉄筋コンクリート造建物の被災度区分判定の判定合理化に関する検討

日比野 陽\*1・加藤 典\*2

**要旨：**全体崩壊機構を形成する鉄筋コンクリート造建物の被災度区分判定では、全梁部材の損傷度の調査を要するものの、調査時には上階の調査が困難な場合があり、実用上の問題がある。本研究では、全体崩壊機構を形成する建物の被災度区分判定を合理的に行う手法を検討・提案することを目的とし、柱梁耐力比が異なる建物の非線形地震応答解析を行った。解析より、全体崩壊機構を形成する一般的な柱梁耐力比を有する10階建て建物では、調査階までの損傷度の平均値を上階の部材の損傷度に用いて耐震性能残存率を推定する場合、部材の損傷度を3階まで調査すれば、耐震性能残存率を概ね精度良く評価できることを明らかにした。

**キーワード：**被災度区分判定, 全体崩壊機構, 損傷度, 柱梁耐力比, 地震応答解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の被災度区分判定<sup>1)</sup>は、被災後の鉄筋コンクリート造建物の損傷を定量化し、その被災度を示すことで、建物の継続使用の可能性を判断する上で、重要な指標として用いられている。近年では、層崩壊機構を形成する建物だけでなく、全体崩壊機構を形成する建物に対する判定手法も示される<sup>2,3)</sup>など、汎用性も向上してきた。全体崩壊機構を形成する建物においては、崩壊機構に基づき、建物全層の梁部材の損傷度から、建物の被災状態を推定するものである。一方で、災害調査時には必ずしも全ての部材が調査できない等の課題がある。例えば、全体崩壊機構を形成した建物でも、非構造壁等や階段等が崩落している場合には、上階への移動が困難なケースがあり得る。そのような場合には、梁の損傷度を調査することが困難となり、被災度判定を適用できないことも考えられる。あるいは、層崩壊機構と判断し、実際の被災度とは異なる被災度として判定せざるを得ないことも考えられる。したがって、有意義な判定方法であっても十分に生かせない可能性が考えられる。

そこで本研究では、上記で述べた、全体崩壊機構を形成する建物において、合理的に被災度区分判定を行う手法を検討・提案することを目的とする。提案手法では、現行では必須となっている全層の損傷度調査を行わずに、下階の損傷度のみを用いて、被災度を把握する場合の判定精度について考察を行う。

## 2. 全体崩壊機構を形成する建物の耐震性能残存率

全体崩壊機構を形成する建物では、仮想仕事法による内力仕事に基づいて被災前後の耐震性能を評価する手法<sup>1)</sup>が示されており、応急復旧の可否を判断する場合には、式(1)に基づいて耐震性能残存率を略算する。なお、本研

究では、鉄筋コンクリート造建物で曲げ部材のみを有するラーメン骨組を対象とするため、柱と梁部材のみにおいて損傷度を算出する。柱 $k_c$ と梁 $k_g$ の強度指標比は、被災度区分判定基準<sup>1)</sup>に従い、柱梁耐力比が異なる場合であっても、常に1:1を用いた。

$$R = \frac{\sum_{j=0}^5 B_j}{B_{org}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$B_j = k_c \sum_c \eta_j C_j + k_g \sum_g \eta_j G_j \quad (2)$$

$$B_{org} = k_c C_{sum} + k_g G_{sum} \quad (3)$$

ここで、 $k_c, k_g$ ：曲げ柱、曲げ梁の強度指標比( $k_c : k_g = 1:1$ )、 $C_j, G_j$ ：損傷度 $j$ の曲げ柱、曲げ梁の降伏ヒンジ箇所数、 $c\eta_j, g\eta_j$ ：損傷度 $j$ の曲げ柱、曲げ梁の耐震性能低減係数(表-1参照)、 $C_{sum}, G_{sum}$ ：曲げ柱、曲げ梁の降伏ヒンジ箇所数の合計

表-1 耐震性能低減係数

損傷度	I	II	III	IV	V
耐震性能低減係数	0.95	0.75	0.5	0.2	0

## 3. 解析概要

### 3.1 解析モデル

本研究では、全体崩壊機構を形成する鉄筋コンクリート造建物の地震応答解析を実施し、解析後の部材の塑性率で仮定した損傷度を用いて被災度区分判定時の耐震性能残存率を求める。ただし、耐震性能残存率は全層の梁の損傷度を用いるのではなく、特定階まで調査した結果を用いて、特定階以上の損傷度を推定した場合の耐震性能残存率を推定し、その精度を検証する。

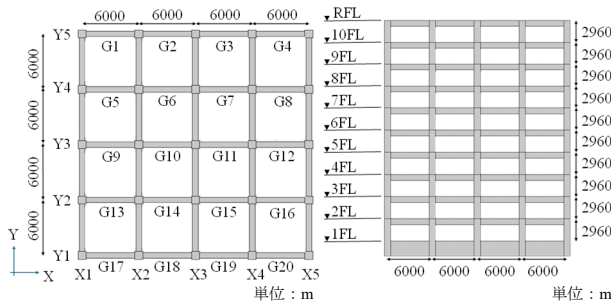
解析のモデルは、文献4)に記載されるスパン6m、10階建て鉄筋コンクリート造建物を基準(Sモデル)として、基準モデルの梁部材の主筋径と梁せいを变化させたモデ

\*1 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授 博士(工学)(正会員)

\*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 元大学院生 修士(工学)

ルを作成した。さらに、地震時の損傷が各階で均等となることを想定した建物として、Sモデルと同様のスパンと階高で耐力分布がAi分布に従って設計されたモデル（Aモデル）を作成した。主筋断面積と梁せいが異なるモデルは、いずれも柱梁耐力比を変化させ、建物の崩壊機構の違いによる判定結果を考察するために、作成しており、梁せいが異なるモデルでは耐力と共に剛性が異なるモデルとなっている。SモデルおよびAモデルの1次固有周期はそれぞれ0.592秒、0.593秒である。

図-1に基準モデルの梁伏図と立面図を、表-2に基準モデルの部材リストを、表-3に材料リストを示す。なお、解析モデル名は、梁の主筋断面積を基準モデルの0.5~1.4倍とした場合は、S-s0.5~S-s1.4とし、梁せいを0.5~0.9倍とした場合はS-d0.5~S-d0.9とした。



(a) 梁伏図 (b) 立面図  
図-1 解析モデルの架構

表-2 Sモデルの部材リスト

梁	
断面	550×750 (8~RF) 600×800 (2~7F) 750×2000 (基礎)
上端筋	4-D25, 5-D25 (RF) 4-D25, 5-D25, 6-D25, 7-D25 (10F) 6-D29, 7-D29 (8~9F) 5-D32, 6-D32, 7-D32 (6~7F) 6-D35, 8-D35 (2~5F) 12-D35 (基礎)
下端筋	3-D25 (RF) 4-D25 (10F) 4-D29, 5-D29 (8~9F) 5-D32, 6-D32, 7-D32 (6~7F) 5-D35, 6-D35, 7-D35 (2~5F) 12-D35 (基礎)
せん断補強筋	2-D13@150 (RF) 3-D13@200 (10F) 3-S13@200 (8~9F) 3-S13@150 (2~7F) 3-S13@200 (基礎)
柱	
断面	850×850 (1~10F)
主筋	12-D29, 16-D29, 20-D29 (9~10F) 12-D29, 16-D29, 20-D29 (6~8F) 12-D32, 16-D32, 20-D32 (3~5F) 16-D35, 20-D35, 24-D35 (1~2F)
せん断補強筋	4-D13@100 (9~10F) 4-S13@100, 5-S13@100 (6~8F) 6-S13@100, 7-S13@100, 7-S13@100, 8-S13@100 (1~5F)

解析モデルの柱梁耐力比の分布を図-2に示す。柱梁耐力比は、各層の柱梁耐力比を平均して層ごとに求めたものである。線種の違いは各モデルを表す。Sモデルの梁耐力を変化させたモデルでは、柱梁耐力比が1~5程度に変化していることが分かる。また、Aモデルでは、7階以下において、柱梁耐力比が1.8程度となり、Sモデルよりも耐力分布が一樣であることが分かる。

図-3にSモデル、S-s1.4モデルの静的解析結果を示す。いずれも明快な全体崩壊機構を形成しているが、柱梁耐力比が小さくなるS-s1.4モデルでは、柱の損傷が生じるために、Sモデルよりも、各層の変形角が一樣でなくなる傾向が見られる。

解析は非線形地震応答解析ソフトウェアSTERA\_3D<sup>5)</sup>を用い、後述する地震波をX方向のみに入力した。柱梁部材の骨格曲線には、弾性要素と非線形曲げばねを足し合わせた3折れ線モデルを用い、復元力特性には武田モデルを参考にしたDegrading Trilinear Slipモデル<sup>5)</sup>を用いた。減衰は初期剛性比例型とし、減衰定数は0.05とした。

表-3 Sモデルの材料リスト

コンクリートの設計基準強度	
24 N/mm <sup>2</sup> (9~RF), 27 N/mm <sup>2</sup> (6~8F), 30 N/mm <sup>2</sup> (3~5F), 33 N/mm <sup>2</sup> (基礎~2F)	
鉄筋種別と強度	
S13	KSS785
D13	SD295
D25~D29	SD345
D32~D35	SD390

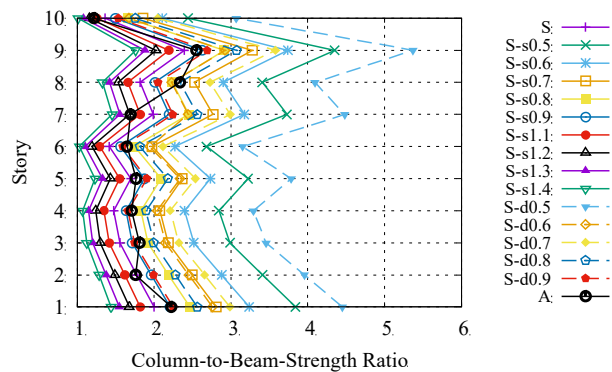
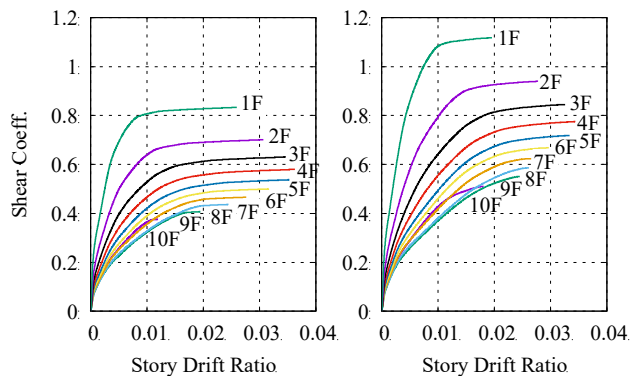


図-2 柱梁耐力比分布



(a) Sモデル (b) S-s1.4モデル

図-3 静的解析結果

### 3.2 入力地震波

解析モデルに入力する地震波には、文献6)に示される地震波のうち、最大加速度(PGA)が $5 \text{ m/s}^2$ 以上かつ、最大速度が $0.1 \text{ m/s}$ 以上となる97波を用いた。図-4に入力地震波の加速度応答スペクトルを示す。灰色線は各地震波のスペクトルであり、黒線はすべての地震波の平均値である。加速度応答は、最大で $50 \text{ m/s}^2$ 程度であるが、平均値の最大は $15 \text{ m/s}^2$ 程度となっている。

### 4. 解析手順

本研究で求める耐震性能残存率の算定手法を以下に示す。なお、上層階の部材の損傷度の推定では、特定階までの塑性率あるいは損傷度を仮定した場合の2通りを想定した。塑性率の仮定は、本研究で提案する特定階以下の部材変形が、上層階でも同等になることの検証と精度を考察するために設定した。損傷度の仮定は、実際の目視による被災調査において損傷度のみが把握できること、仮定の段階で塑性率を損傷度に置き換えることにより、塑性率を直接仮定するよりも評価精度が低下し、耐震性能残存率が変化することを考察するために設定した。また、部材の損傷度は、文献3)に基づいて部材の塑性率から求める。損傷度と塑性率の関係を図-5に示す。図は曲げ降伏する部材の曲げモーメント $M$ と変形角 $\delta$ の関係を簡略化して表しており、被災度区分判定の損傷度の判定を参考に、曲げひび割れ強度 $M_c$ に達する前の曲げひび割れ発生未満までの変形角では損傷度を0、曲げひび割れ発生以降から曲げ終局強度 $M_y$ に達し、塑性率が1となる変形角までを損傷度I、以降は塑性率が2までの変形角で損傷度II、塑性率2から3までの変形角で損傷度III、塑性率3から5までの変形角で損傷度をIV、塑性率5以上の変形角で損傷度Vと定義した。

- (1) 解析モデルに地震波を入力し、基礎梁以外の全ての梁の両端及び1階柱脚の塑性率を求める。
- (2) 塑性率の平均を基準として求める場合：特定階以下の梁の塑性率を基準とし、調査階以上の部材の塑性率が調査階以下の平面上で同位置の梁の塑性率の平均と一致すると仮定して調査階以上の階の梁の塑性

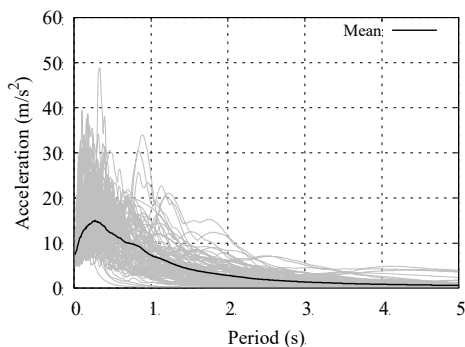


図-4 加速度応答スペクトル

率を仮定し、損傷度を求める。

損傷度の平均を基準として求める場合：特定階以下の梁の損傷度を基準とし、調査階以上の部材の損傷度が調査階以下の平面上で同位置の梁の損傷度の平均と一致すると仮定して調査階以上の階の梁の損傷度を求める。

- (3) 式(1)に基づき、部材の損傷度から建物の構面ごとの耐震性能残存率を全体崩壊機構の略算法で求め、その最小値を建物の耐震性能残存率とする。

なお、本解析では、柱梁耐力比が1に近く、層崩壊機構に近い崩壊機構を形成するモデルも含め、すべてに対して上記の全体崩壊機構形成時の耐震性能残存率を算出し、柱の損傷は無視する。実際の被災調査時には、全体崩壊機構の形成を判断することが困難な状況もあることから、明快な全体崩壊機構を形成しない場合の適用性も

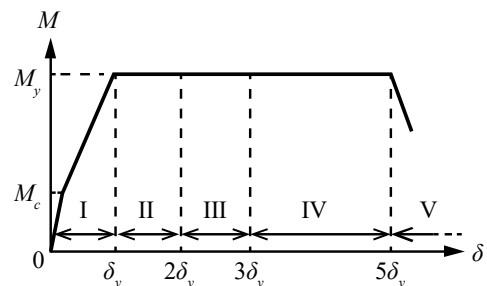
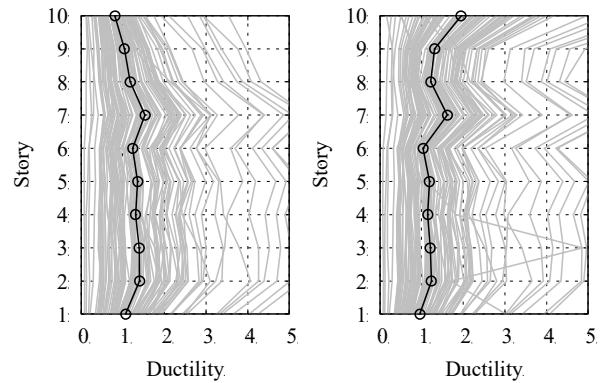
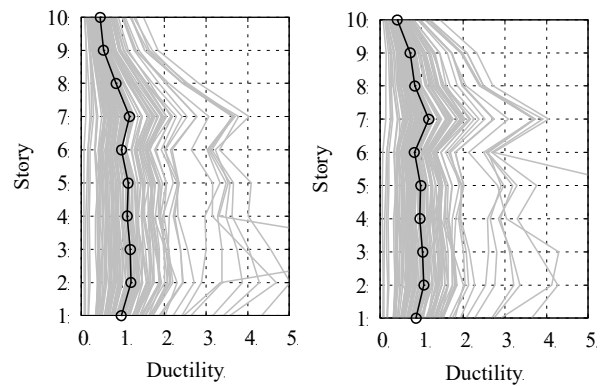


図-5 損傷度と塑性率の関係



(a) 梁G1 (b) 梁G10

図-6 塑性率分布 (Sモデル)



(a) 梁G1 (b) 梁G10

図-7 塑性率分布 (Aモデル)

検証する。さらに、全体崩壊機構に基づく判定が適切でない場合もあることから、実際の調査で判断に迷う場合は層崩壊機構に基づく判定も行い、いずれか被災度の大きい方を採用することが妥当と考えられる。

### 5. 地震応答解析結果

図-6、図-7に梁 G1 左端、梁 G10 右端の塑性率分布を示す。S モデルでは、屋上の塑性率が9階よりも小さい一方で梁 G10 では、屋上の塑性率が9階よりも大きくなっている。7階は他の階と比較して、梁の塑性率が大きい。部材位置で塑性率分布が異なることがわかる。A モデルでは、S モデルとは異なり、6階の塑性率が最大となったが、屋上および9階の梁の塑性率に大きな違いが見られなかった。塑性率の分布は、建物の耐力分布で異なり、被災度区分判定にも影響すると考えられる。

図-8にSモデルの耐震性能残存率とすべての地震波の最大加速度(PGA)との関係を示す。耐震性能残存率は地震応答解析結果の部材の塑性率によって求めており、前章の手順(2)の調査階を設定せず、すべての部材の解析結果より得られた塑性率を用いて求めたものである。図より、最大加速度によって、耐震性能残存率にバラつきがあり、地震波の最大加速度と耐震性能残存率との相関が小さいことがわかる。

### 6. 耐震性能残存率の推定

4章の手順により、調査階を7階とした場合の耐震性能残存率を検討する。図-9、図-10にSモデルおよびSモデルを基準とした各モデルとAモデルにおいて、塑性率および損傷度の平均を仮定した場合の耐震性能残存率を示す。縦軸の推定値は、調査階を7階(すなわち8階の梁の調査)とし、7階以上の階の部材の塑性率および損傷度が下階の塑性率および損傷度の平均と等しくなると仮定して求めた耐震性能残存率であり、横軸の解析値は、調査階を仮定せず、地震応答解析結果によって得られたすべての部材の塑性率から式(1)で求めた耐震性能残存率である。図中には決定係数  $R^2$  も示す。

塑性率を仮定した場合である図-9において、SモデルやS-s0.5モデルでは、推定値と解析値は比較的一致する

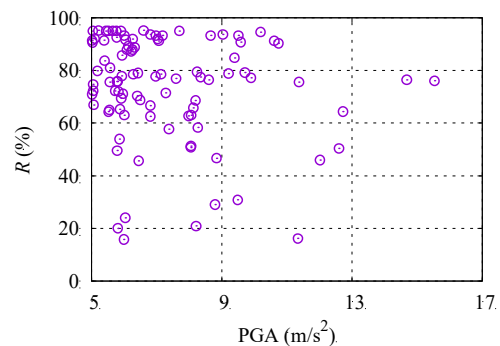


図-8 耐震性能残存率-最大加速度関係 (Sモデル)

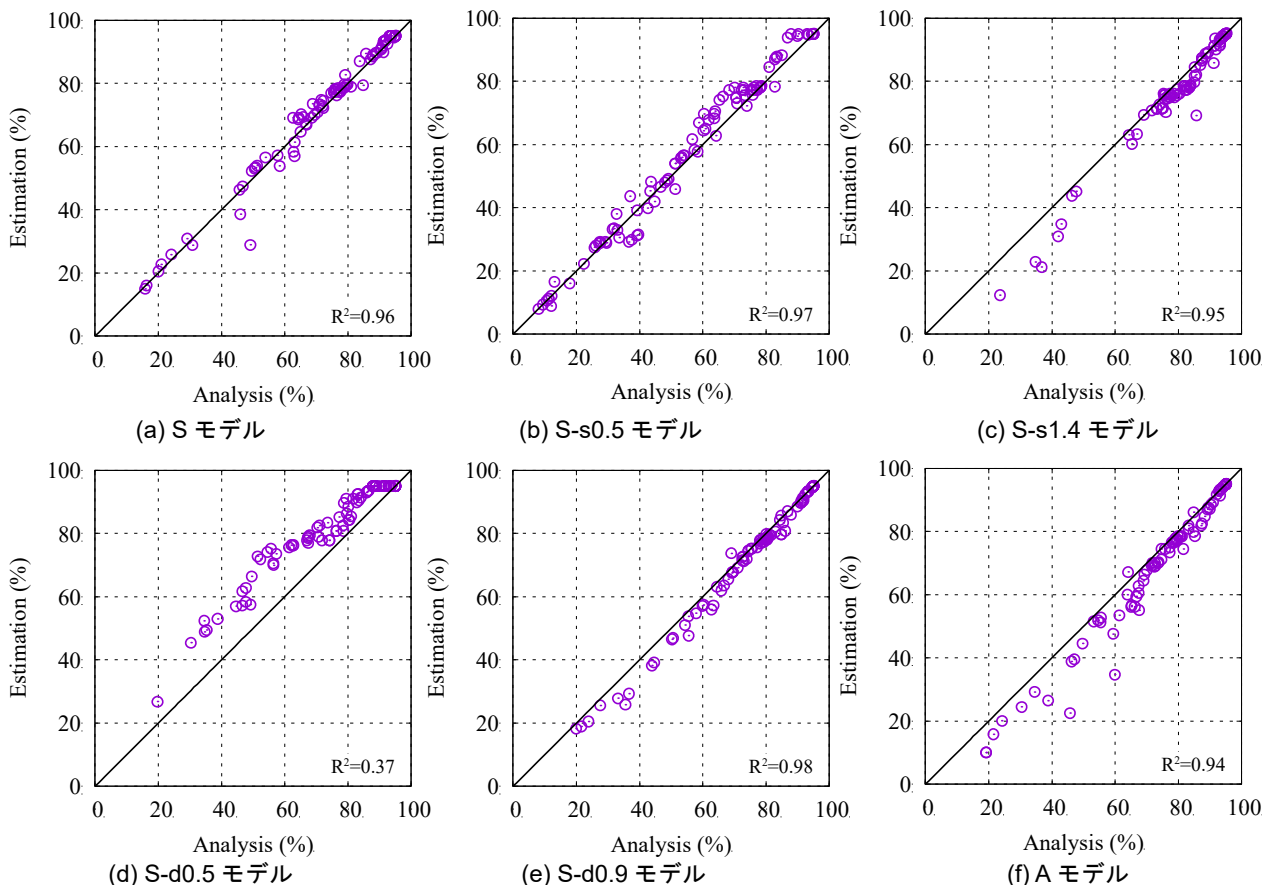


図-9 耐震性能残存率の推定結果 (塑性率を仮定した場合)

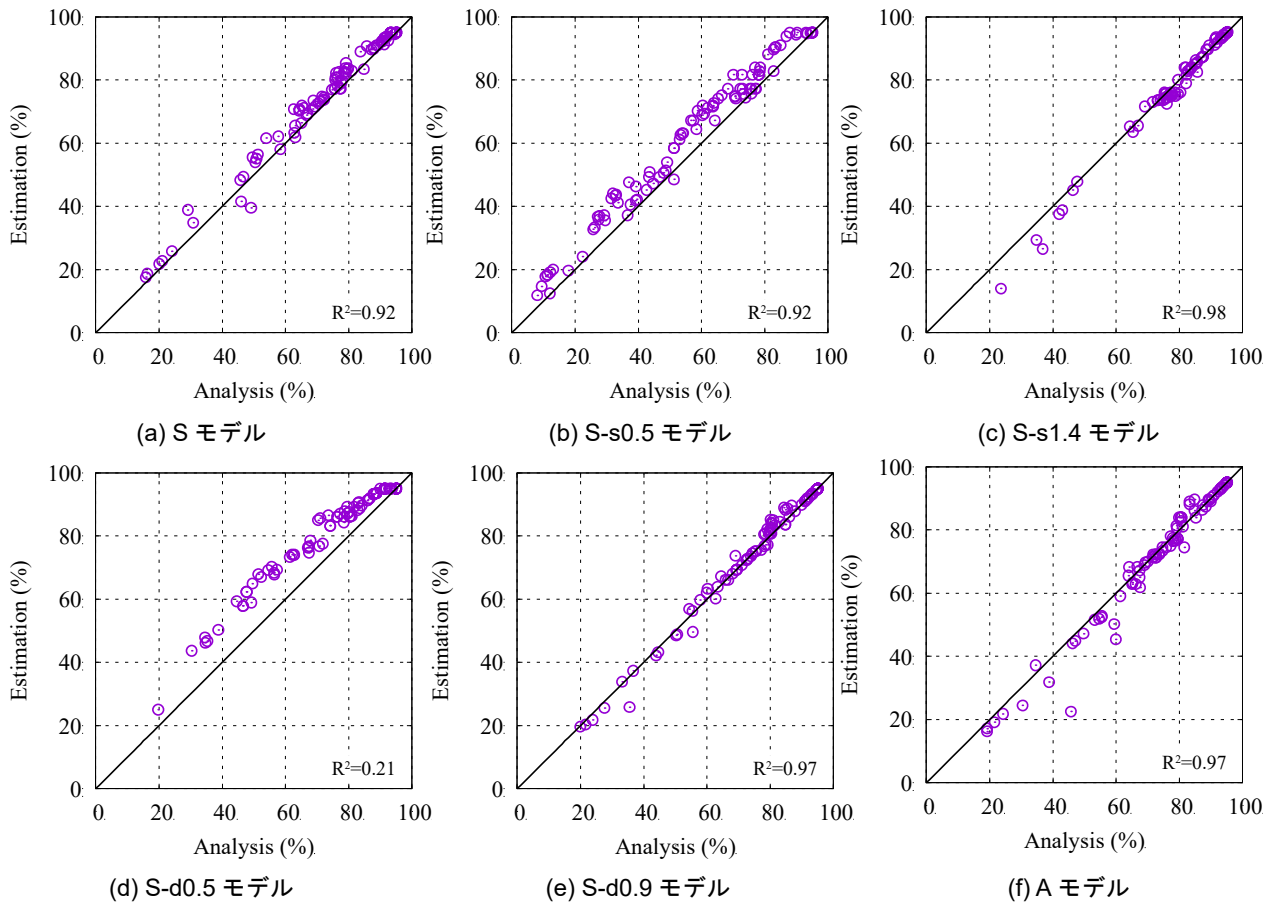


図-10 耐震性能残存率の推定結果（損傷度を仮定した場合）

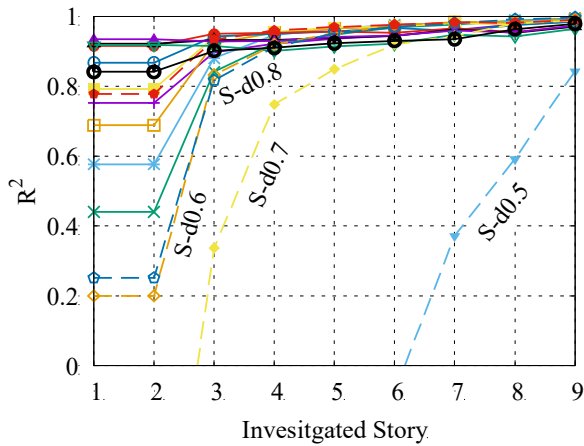
傾向にあるが、図-9(d)の柱梁耐力比が大きく、梁の剛性が柱梁耐力比に依存して小さくなる場合（S-d0.5モデル）では、他のモデルと比較して、耐震性能残存率が80%以下となる場合で危険側に判定する傾向にある。これは剛性が低下するのに伴い、上階の塑性率が調査階以下の塑性率の平均よりも大きくなるためである。柱梁耐力比が1に近い、梁の耐力が大きく層崩壊機構に近くなるS-s1.4モデルでは、耐震性能残存率が大きくなるケースが多く、推定値と解析値は概ね一致する。これは柱に損傷が生じ、上層階の梁の塑性率が下層階の平均よりも実際には小さいためである。ただし、耐震性能残存率が小さくなり、 $R=60\%$ 以下の大破となる場合においては、解析値と推定値との差が大きくなり、やや安全側に評価する。Aモデルでは、耐震性能残存率が小さくなる場合には耐震性能残存率を大きめに推定し、安全側に予測する傾向がみられる。決定係数によれば、Sモデルよりもやや推定精度が低く、耐力分布がAi分布に近いことが影響していると考えられる。

損傷度の平均を仮定した場合である図-10でも、塑性率を仮定する場合（図-9）と同様の傾向であるが、塑性率を仮定する場合よりも精度が低下し、わずかに危険側に評価が変化する傾向にある。これは、損傷度の6段階

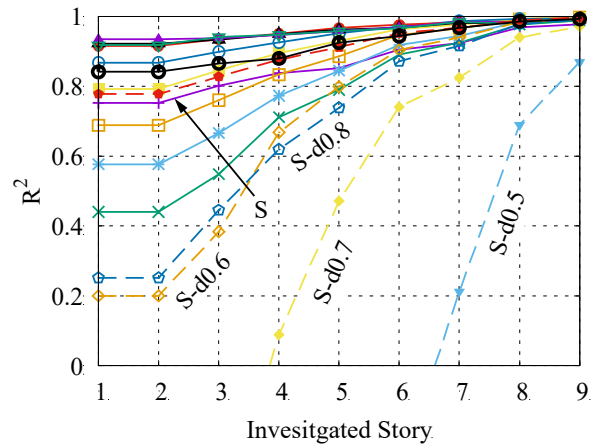
で評価されるために、誤差が大きくなったことによる。

図-11に各モデルにおいて、調査階を変動させた場合の推定精度の決定係数 $R^2$ を示す。横軸は調査階であり、縦軸が当該の調査階を仮定したときの耐震性能残存率の推定値から求めた決定係数 $R^2$ である。図中の線種が各モデルに対応しており、図-2と同様である。決定係数を用いた理由は、解析値と予測値の適合度を定量的に評価するためであり、予測値が安全側か危険側かの判断には用いることができないが、実用上の精度が確保できる調査階の特定が可能であると判断し採用した。

図より、いずれの仮定条件においても、決定係数 $R^2$ は、梁の耐力が大きく柱梁耐力比が小さいモデルほど高くなり、推定の精度が高くなる傾向にある。これは、前述の予測結果で述べたように、推定される上層階の塑性率や損傷度が平均値と近くなるためであり、梁の耐力が小さい場合には、上階の塑性率が増大し、決定係数が低下する。上階の塑性率の推定に必要な調査階は、極端に精度が低下するS-d0.5モデルを除けば、おおよそ5階までで決定係数が0.8を上回る精度が確保できる。また、損傷度の平均を仮定する場合にも、同様にS-d0.5モデルを除けば、7階まで調査すれば、高い精度を確保できるといえる。ただし、一般的な全体崩壊機構を形成する建物の柱



(a) 塑性率の平均を仮定した場合



(b) 損傷度の平均を仮定した場合

図-11 推定値の決定係数  $R^2$

梁耐力比が基準モデルの S モデル程度であるとすれば、損傷度の平均を用いる場合であっても、10 階建て建物においては 3 階まで調査すれば被災度を同等に推定できると考えられる。

以上から、本研究の解析によれば、建物の耐力分布が異なる場合には、全体崩壊機構を形成する建物で被災度区分判定を実施する場合においては、誤差が生じるものの、10 階建て建物であれば、その 3 分の 1 である、3 階まで調査することで、被災度区分が概ね判定可能であることが分かった。なお、実際の調査時における取り扱いは今後の検討課題であるが、本結果を踏まえて、全階の調査をしない（できない）と判断した場合には、許容できる精度に応じて調査階を省略できる可能性がある。一方で、解析で確認したように、耐力の分布は精度に小さくない影響を与える可能性があることから、建物が形成している崩壊機構については、事前に慎重に判断する必要がある。

## 7. まとめ

本研究では、全体崩壊機構を形成する鉄筋コンクリート造建物の被災度区分判定を合理化するための検討として、耐力分布が異なる建物モデルの地震応答解析を実施し、耐震性能残存率の推定方法とその精度を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 塑性率の平均を用いた耐震性能残存率の推定では、柱梁耐力比の違いによって推定精度が異なるが、耐震性能残存率が大きくなる比較的被害の小さい場合において、耐震性能残存率を概ね評価できた。耐震性能残存率が小さくなる場合には、耐震性能残存率の推定精度が低下し、柱梁耐力比が小さくなるモデルでは安全側に、柱梁耐力比が大きくなるモデルでは、危険側に評価する傾向が見られた。
- (2) 損傷度の平均を用いた耐震性能残存率の推定では、

塑性率の平均を用いた場合と同様の傾向を示したが、損傷度への換算により発生する誤差の影響により、塑性率を仮定する場合よりも精度が低下し、わずかに危険側に評価が変化する傾向が見られた。

- (3) 10 階建てで一般的な柱梁耐力比を有する建物においては、梁の損傷度を 3 階まで調査し、上階の部材の損傷度を推定すれば、概ね耐震性能残存率を精度良く評価できる。ただし、梁の剛性が柱に対して極端に小さい場合には、柱の影響を受けて上階ほど変形が大きくなるため、適切な評価が困難であった。

## 参考文献

- 1) 一般財団法人日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針, 2016
- 2) 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多層建物への拡張, コンクリート工学会年次論文集, Vol.34, No.2, pp.847-852, 2012
- 3) 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, pp.3255-3260, 2010
- 4) 一般財団法人日本建築防災協会: 構造設計・部材断面事例集, 2007
- 5) 建築物の立体地震応答解析プログラム STERA\_3D: 国立大学法人豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系地震災害工学研究室, <https://rc.ace.tut.ac.jp/saito/software.html> (アクセス: 2025.1.10)
- 6) PEER Strong Ground Motion Databases: Pacific Earthquake Engineering Research Center, <https://peer.berkeley.edu/research/databases> (アクセス: 2012.12.4)