

RC 造梁降伏型全体崩壊形建物の残存耐震性能評価法  
AN EVALUATION METHOD OF RESIDUAL SEISMIC CAPACITY FOR  
R/C BUILDINGS WITH TOTAL COLLAPSE MECHANISM

包蘇榮<sup>1)</sup>、松川和人<sup>2)</sup>、前田匡樹<sup>3)</sup>

Surong BAO<sup>1</sup>, Kazuto MATUKAWA<sup>2</sup>, Masaki MAEDA<sup>3</sup>

1) 東北大学大学院工学研究科、大学院生

<sup>1</sup> Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University

e-mail : baosurong@sally.str.archi.tohoku.ac.jp

2) 東北大学大学院工学研究科、大学院生

<sup>2</sup> Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University

e-mail : matsukawa@sally.str.archi.tohoku.ac.jp

3) 東北大学大学院工学研究科、准教授 博士 (工学)

<sup>3</sup> Associate Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr.Eng.

e-mail: maeda@archi.tohoku.ac.jp

**ABSTRACT:** Structural damage to R/C buildings is evaluated by residual seismic capacity ratio  $R$  in the Japanese Seismic Damage Evaluation Guideline. At present, the residual seismic capacity index  $R$  of each story can be calculated from the story shear force and damage level of vertical structural members, considering that most damage is generally found on columns and shear walls in previous damage surveys. Thus, the current evaluation of  $R$  index can not be applied to evaluate the buildings with beam-yielding total collapse mechanism. Based on this background, a new evaluation method of residual seismic capacity index  $R$  according to internal work of frame is proposed in this report. Validity of proposed method of residual seismic capacity is examined through seismic response analysis of R/C frame structures. It is found that the proposed  $R$  index is an effective way to identify the safety of damaged structures against aftershocks.

**キーワード：** RC造建物, 地震被害, 残存耐震性能, 地震応答解析

## 1. はじめに

地震発生後、被害を受けた建物に補修、補強の可否を判定し、被災地の復興、復旧計画を立案するためには、被災前後の建物の耐震性能を正確に評価することが重要である。現在、被災後の建物の耐震性能を評価する指標としては、被災度判定基準<sup>1)</sup>に示された指標である、耐震性能残存率 $R$ がある。

しかし、現在の耐震性能残存率の評価法は従来の地震被害で多くみられる層崩壊形の建物を想定して開発されているため、現在の新築建物の設計で主流となっている梁降伏型全体崩壊形建物の残存耐震性能を適切に評価できないという問題がある。このような背景から、筆者らは、全体崩壊形建物に適用可能な耐震性能残存率 $R$ による評価法開発を目的に研究を行っており、本論文では、評価法の提案を行い、モデル建物を用いて地震応答解析による提案した評価法の妥当性検証を行った。

2. 現在の手法の問題点と新しい評価法の提案

現在、RC造建物の構造性能に関する耐震性能残存率Rの計算法としては、(財)日本建築防災協会の「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編)」<sup>1)</sup>がある。本基準では、以下に示す式(1)を用いて、地震被害を受けた建物について柱に損傷が集中する層崩壊が生じることを前提に、各層の柱せん断耐力と損傷度から、層ごとの耐震性能残存率Rを評価している。そして、各層各方向の耐震性能残存率のうち、最小の耐震性能残存率Rの値で建物全体の被災度を決定している。

$$R = \frac{\sum \eta Q_i}{\sum Q_i} \times 100(\%) \quad \text{式(1)}$$

ここに、 Q : 崩壊メカニズム時の柱のせん断力  
 η : 柱の耐震性能低減係数(表1)

表 1 部材の耐震性能低減係数 η

損傷度	せん断柱	曲げ柱
I	0.95	0.95
II	0.6	0.75
III	0.3	0.5
IV	0	0.1
V	0	0

しかしながら、各層ごとに柱の損傷から評価する式(1)では、新築建物で主流の梁に降伏ヒンジが発生して建物全体に損傷が分布する全体崩壊形建物の場合は、残存耐震性能を正しく評価できない。

そこで、今回新しく提案する手法では、建物架構の崩壊メカニズムを梁降伏型全体崩壊形メカニズム想定し、被災前後の内力による仕事量に着目する。建物が外力 P を受ける時の層の変位を δ、塑性ヒンジ回転角を θ、曲げ終局モーメントを Mu と設定すると、外力仕事 ΣP × δ と内力仕事 ΣMu × θ は等しくなる。これより、被災前後の内力による仕事量 ΣMu × θ、Σ η Mu × θ から、梁降伏型全体崩壊形建物の耐震性能残存率計算式(2)を提案する。

$$R = \frac{\sum \eta M_{u柱} + \sum \eta M_{u梁}}{\sum (M_{u柱} + M_{u梁})} \times 100(\%) \quad \text{式(2)}$$

ここに、 Mu : 塑性ヒンジが生じる梁と柱の曲げ終局モーメント      η : 耐震性能低減係数<sup>1)</sup>

3. 荷重増分解析による代表変位ごとの R の評価

2章で提案した式(2)による残存耐震性能評価の具体例として、4層4スパンの全体崩壊形と層降伏形の建物をモデル化して、荷重増分解析を行った。そして、それぞれの部材の変形角より損傷度を推定、その後式(2)を用いて耐震性能残存率 R の計算を行った。

3.1 耐震性能残存率の算出方法

耐震性能残存率 R の算出方法について以下に示す。

- (1) 増分解析の各ステップにおいて、各部材の変形を求め、図1に示すようなモデルに基づいて部材の損傷度を決定する。
- (2) 損傷度から耐震性能低減係数 η を求める。
- (3) 2章で提案した式(2)に基づき、層崩壊形建物と全体崩壊形建物の耐震性能残存率を求める。ちなみに、層崩壊形建物では、降伏する1階柱の柱頭・柱脚の和 Σ Mu とメカニズム時の柱せん断力 Qu は、Qu = Σ Mu/h (h : 柱内法高さ) の関係にあるので、既往の(1)式と提案する(2)式による R は等しい値となる。

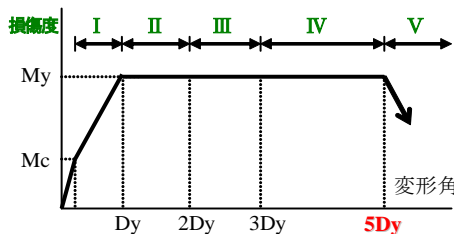


図 1 部材の復元力モデルと損傷度

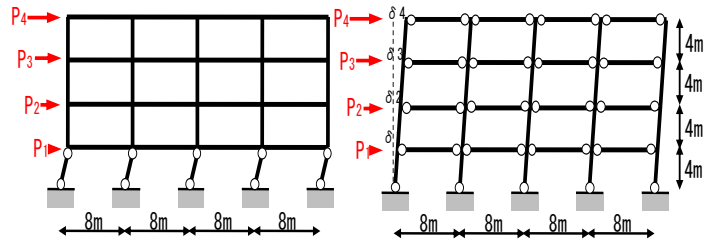


図 2 解析対象建物 (単位 m)

3.2 解析対象建物概要

解析対象建物は、図2に示すような鉄筋コンクリート造4層4スパンのRC造平面骨組で層崩壊形、全体崩壊形のフレームモデルとした、降伏メカニズム形成時のベースシア係数CBは0.30となるように各部材の復元力特性を設定した、表2に示す<sup>2)</sup>。層崩壊形建物では簡単のため2階以上を弾性にモデル化した。

部材の曲げバネのスケルトンカーブは、ひび割れモーメント Mcr、曲げ降伏モーメント My をそれぞれ

第1折点、第2折点としたトリリニア型図3とし、ひび割れモーメント $M_{cr}$ は曲げ降伏モーメント $M_y$ の1/3とした。 $D_y$ は部材の降伏変形角であり、これを1/200radに決定した。

解析モデルの部材の変形と損傷度の関係は鄭<sup>3)</sup>の研究を参考に図1のように比較靱性に優れた架構を想定したモデルとした。すなわちひび割れ点から降伏点までを損傷度Ⅰ、塑性率2までを損傷度Ⅱ、塑性率3までを損傷度Ⅲ、塑性率5までを損傷度Ⅳと設定した。

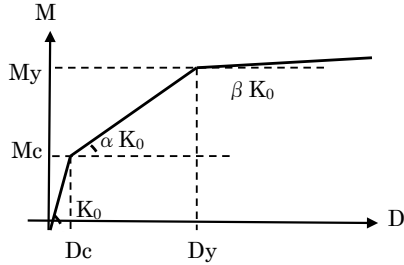


図3 部材の復元力モデル

図4に荷重増分解析で得られた各骨組モデルの層せん断力係数-層間変形角関係を示す。層崩壊型の骨組は1層に変形が集中し、メカニズム形成後も1層の変形のみが進行する。一方、全体崩壊型は全層で変形が生じている。

表2 解析建物の復元力特性一覧

	1階柱		2~4階柱		梁	
	層崩壊形	全体崩壊形	層崩壊形	全体崩壊形	層崩壊形	全体崩壊形
$M_c$ [kN]	1327.37	1990.65	弾性	1990.65	弾性	880.1
$M_r$ [kN]	442.37	663.55	弾性	663.55	弾性	293.37
$\alpha$	0.15	0.25	弾性	0.25	弾性	0.35

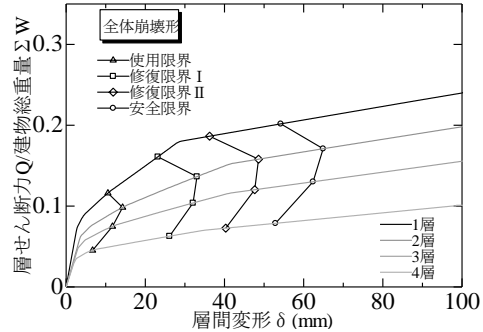
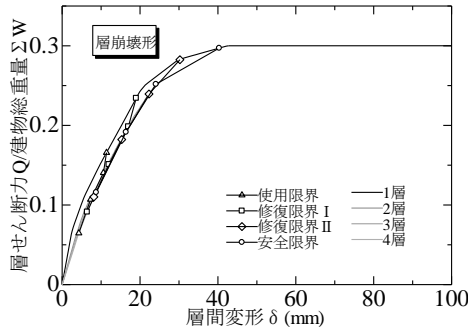


図4 層せん断力係数-層間変形

### 3.3 耐震性能残存率Rの評価

3.1節の耐震性能残存率の算出方法に従い、全体崩壊形建物と層崩壊形建物の耐震性能残存率を図5に示す。建物の限界状態は、震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針の被災度区分を参考に使用限界を $R=95\%$ 、修復限界Ⅰを $R=80\%$ 、修復限界Ⅱを $R=60\%$ 、安全限界を $R=30\%$ として評価した。尚、横軸は荷重増分解析結果(図4)を等価一自由度系に縮約したときの代表変位で示している。図5より、層崩壊型の建物は、全体崩壊型建物に比べて、各限界状態に至る変形が小さいことが分かる。

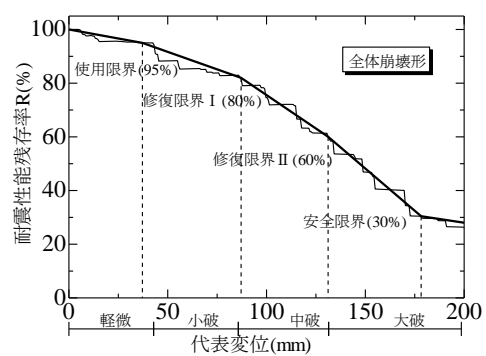
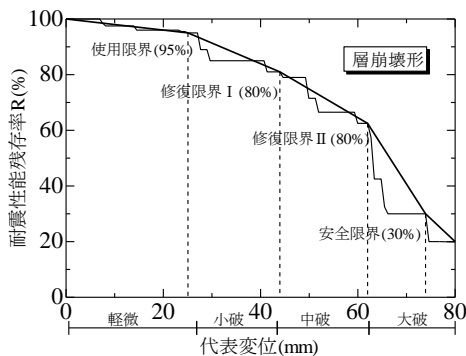


図5 代表変位と耐震性能残存率の関係

### 4. 地震応答解析による被災建物の残存耐震性能の評価

4章ではこれまで述べてきた残存耐震性能提案式の妥当性を検討する。ここでは既往の研究<sup>2)</sup>を参考とし、地震応答解析より本震で損傷を受けた建物がある後の程度の余震に耐えられるかを評価し、提案式の妥当性について検討を行った。

4.1 解析方法

本研究で提案した式(2)による耐震性能残存率Rの有効性を検討するために、地震応答解析により耐震性能残存率R<sub>dyn</sub>を求め提案した方法との比較を行う。地震応答解析は2段階に分けて行い、1段階目では、倍率を変動させた地震波を複数入力し1回の地震入力で建物が無損傷時から大破に至る地震波倍率A<sub>0</sub>を求める。2段階目では、倍率の異なる地震波を2回入力し、1回目の地震波によって被災した建物が、どの程度の余震に耐えられるかを、大破に至るために必要な地震波倍率A<sub>i</sub>として求める。ここで図6を用いて具体的な例を示す。無被害の建物が1回目の地震波で小破に至るために必要な地震波倍率A<sub>1小破</sub>と大破に至るために必要地震波倍率A<sub>0</sub>を求める。次に、小破になった建物を連続して2回目地震波を入力する。2回目の入力によって損傷が1回目小破から2回目大破に至る時の地震波倍率A<sub>2小破</sub>を求める。従って、この時の建物の耐震性能残存率はA<sub>2小破</sub>/A<sub>0</sub>で求めることができる。このように求めたA<sub>i</sub>(A<sub>2軽微</sub>、A<sub>2小破</sub>、A<sub>2中破</sub>、A<sub>2大破</sub>)、A<sub>0</sub>は、建物が上記の各被災度の時点と無損傷の場合に、それぞれ耐えられる限界地震動の倍率を示している。この比率であるA<sub>i</sub>/A<sub>0</sub>を、地震応答解析による各被災度での耐震性能残存率R<sub>dyn</sub>と定義し、地震応答解析結果から求めた耐震性能残存率Rと比較することによって、提案式の妥当性検証を行う。

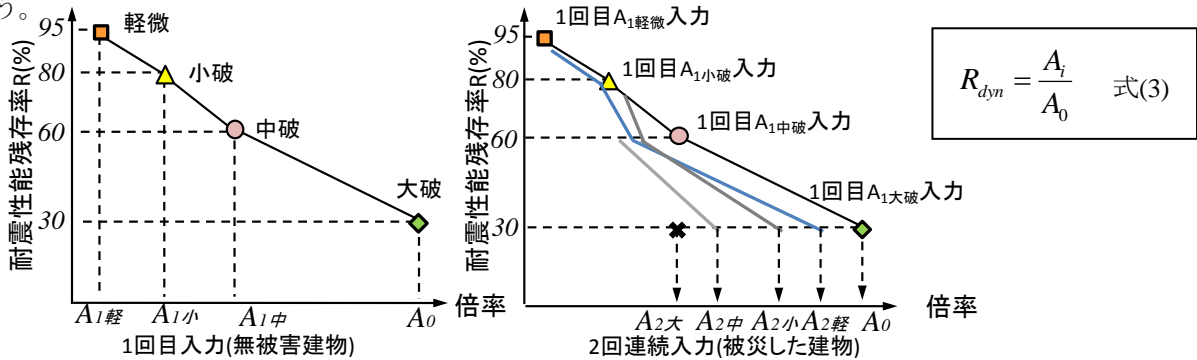


図6 耐震性能残存率 R<sub>dyn</sub> 計算方法概念図

4.2 解析モデル

解析対象構造物の崩壊形式は全体崩壊形と層崩壊形である。建物高さの影響を検討するために、4階建てと12階建て二つの建物について地震応答解析を行った。第3章と同様の鉄筋コンクリート造4階の平面骨組と、12階の平面骨組を対象とした。層崩壊形骨組は簡単のため2階以上を完全に弾性とする簡略したモデル化を行った。部材の履歴モデルは、塑性化してヒンジを生じる部材に関してはTakedaモデル<sup>4)</sup>を使用した。

建物変形性能の影響を検討するために、塑性率変形性能の異なる2種類のモデルを設定した。すなわち、曲げ部材で十分な変形能力を持つ終局塑性率を5としたモデル(図1)と、曲げせん断部材として終局塑性率3の変形能力をもつモデル(図7)である。後者のモデルは降伏点まで損傷度Ⅰ、塑性率1.5まで損傷度Ⅱ、塑性率2まで損傷度Ⅲ、終局塑性率3で損傷度Ⅳとした。解析ケースを表3にまとめる。

表3 解析ケース

建物崩壊形式	全体崩壊形	層崩壊形
建物高さ	4階(16m)	12階(48m)
部材損傷度モデル	終局塑性率5	終局塑性率3

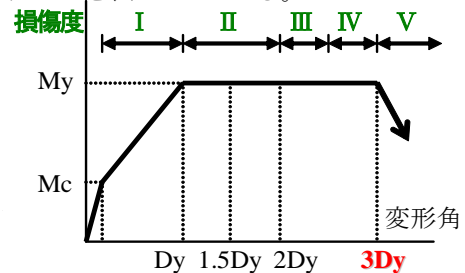


図7 解析モデル(終局塑性率3)

4.3 入力地震動

入力地震波の加速度時刻歴を図8に示す。観測波はEl Centro NS (1940年, Imperial Valley地震), 東北大学NS (1978年, 宮城県沖地震, 略称, Tohoku), 神戸海洋気象台NS (1995年, 兵庫県南部地震, 略称, Kobe), および日本建築センターレベル2 (略称, BCJ) の4波で、継続時間は40秒である。2回連続地震波入力による地震波時刻歴の一例を図9に示す。図9に示すように、地震波を2回連続して入力するときには、1回目の地震波入力後に振動を減衰させるために20秒間の加速度0を入力してから2回目の地震波を入力した。

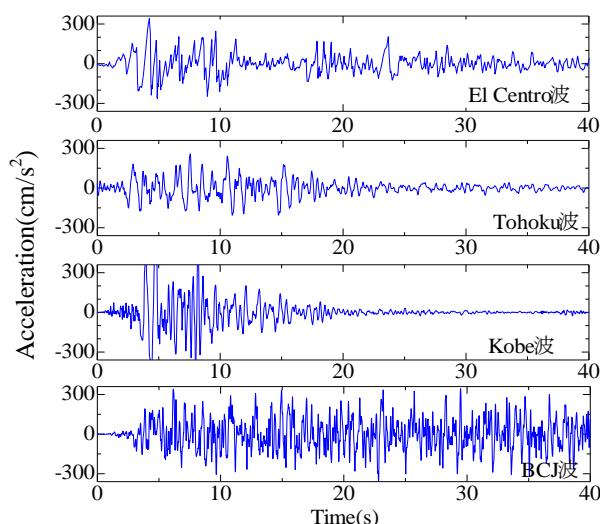


図 8 入力地震動時刻歴

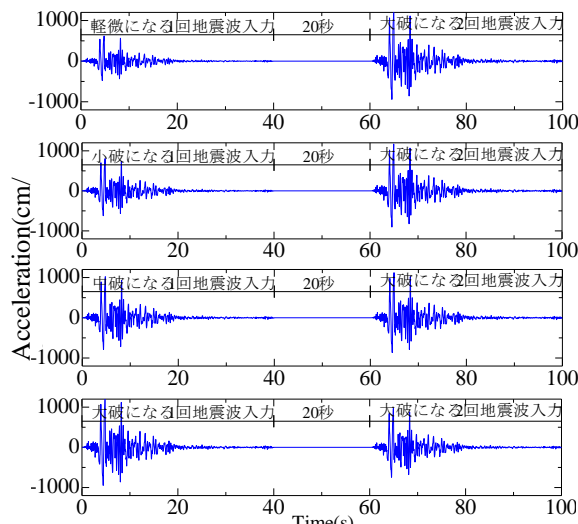


図 9 kobe 地震波 2 回入力時刻歴

#### 4.4 解析結果

提案式(2)により地震波倍率の割合から地震応答解析による耐震性能残存率 $R_{dyn}$ をもとめた、各限界状態と耐震性能残存率の関係を図10に示す。図中の記号は全体崩壊建物、sは層崩壊形建物、4は4階建物、12は12階建建物、5は塑性率5、3は塑性率3を表す。地震応答解析から得られた各地震波ごとの耐震性能残存率 $R_{dyn}$ を比較すると、4階と12階建物はKobe地震波の塑性率5の時安全限界に至る地震波はあまり差がなかった、塑性率3の時は他の地震波に比べて、大きな差があった。全体崩壊形と層崩壊形の結果を比較すると、全体的にはばらつきが大きいものの、平均的には12階建物では概ね層崩壊形建物の方が $R_{dyn}$ が大きくなっているのに対し、4階建物ではそのような傾向は特に見られない。12階建物で、全体崩壊形建物よりも層崩壊形建物の $R_{dyn}$ が大きくなったことの原因としては、12階建物では表4に示すように、4階建物に比べて全体崩壊形と層崩壊形のヒンジ数の比率が大きく、層崩壊形ではこれらのヒンジが一度塑性化した後であれば、地震波倍率にそれほど大きな差が無くても変形が大きく進むため、損傷度に大きな差が出たと考えられる。これはつまり、地震波倍率の割合で定義される $R_{dyn}$ では、やや大きめに評価されるということである。このように、崩壊形式によっては、ヒンジ数の比率の大小が $R_{dyn}$ の大小に大きな影響を与える可能性がある。一方、4階建物は、層崩壊形・全体崩壊形ともにヒンジ数は多く、差(比率)がそれほど大きくはないことから、崩壊形式の違いによる差異がほとんど出なかったと考えられる。またもう一つの原因としては、4階建物は周期が短いため、応答加速度が卓越する領域で最大応答値となるのに対し、12階建物の方は周期が長いため、応答加速度が低減される領域で最大応答値となることが挙げられる。

表 4 建物のヒンジ数

	4階建物		12階建物	
	層崩壊形	全体崩壊形	層崩壊形	全体崩壊形
柱	10	5	4	2
梁	0	32	0	24
合計	10	37	4	26

続いて、 $R$ と $R_{dyn}$ の比率を「安全率」と定義し、各ケース、各限界状態毎に、具体的にどの程度の精度で評価できているか検討する。図11に、各限界状態の安全率を示す。図11より、全体崩壊形及び層崩壊形の両方で、使用限界から安全限界へと近づくにつれて、安全率が大きくなる傾向が見られる。また、修復限界Ⅱの時点までは、全体崩壊形・層崩壊形双方ともほぼ同じ値で推移していることが分かる。具体的には、使用限界で1.0倍程度、修復限界Ⅰで1.2倍程度、修復限界Ⅱで1.5倍程度となっている。

安全限界時では、全体崩壊形では概ね3.0倍以下の安全率となっているのに対し、層崩壊形では3.0倍を超えるものも多く、過度に安全側に評価している傾向が見られた。この安全率は、今回のようにほとんどの値が1.0を超えている場合には、精度と読み替えることが可能であるため、本研究で提案した全体崩壊形建物の耐震性能残存率評価法は、既存の層崩壊形建物よりも良い精度で推定出来ていると言える。

これらのことから、現在の新築建物の設計で主流となっている梁降伏型全体崩壊形建物の残存耐震性能を評価する際に提案式(2)が、精度の面で有効な方法であると考えられる。しかしながら、実際には復元力特性のスリップとともに繰返し载荷による耐力低下も生じるが、本解析の復元力モデルではそうした影響を考慮していないため、解析結果は実際の構造物の耐震性能残存率 $R_{dyn}$ を過大評価している可能

性もあることには留意が必要である。

5. まとめ

全体崩壊形建物にも適用可能な可能な耐震性能残存率の評価方法を提案した。建物モデルの荷重増分解析と地震応答解析を行い、それぞれの結果を用いて提案した評価法の妥当性を検証した。その結果、提案した評価法は地震応答解析の結果の概ね下限値に対応しており、 $R_{dyn}$  を十分に安全側に評価していることから、全体崩壊形にも適用可能な評価法と考えられる。しかしながら、本解析の復元力モデルでは耐力低下の影響は考慮していないので、解析結果は実際の建物の耐震性能残存率  $R_{dyn}$  を過大評価している可能性もある。

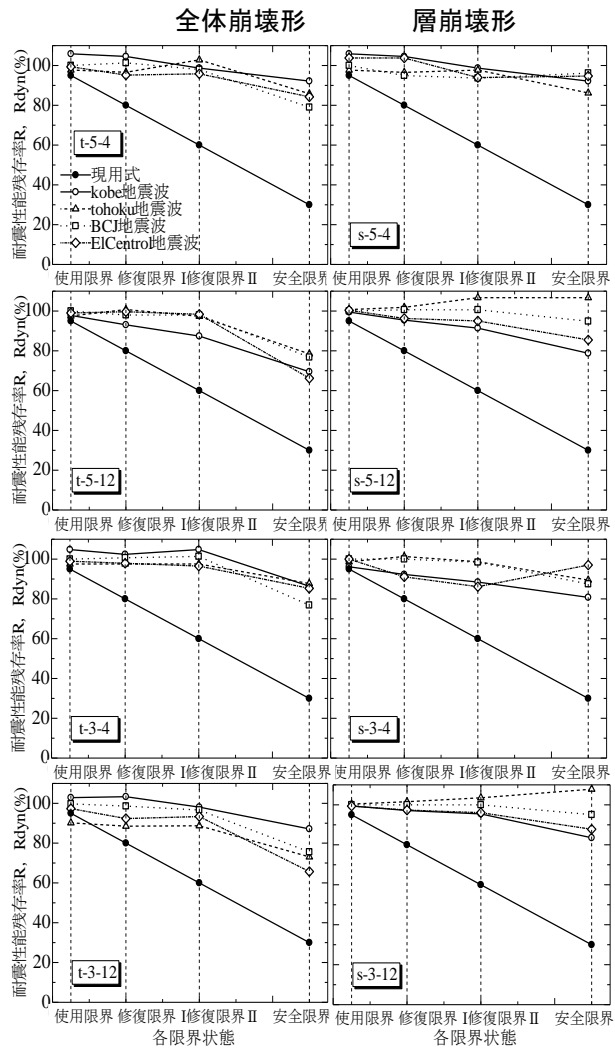


図 10 各限界状態と耐震性能残存

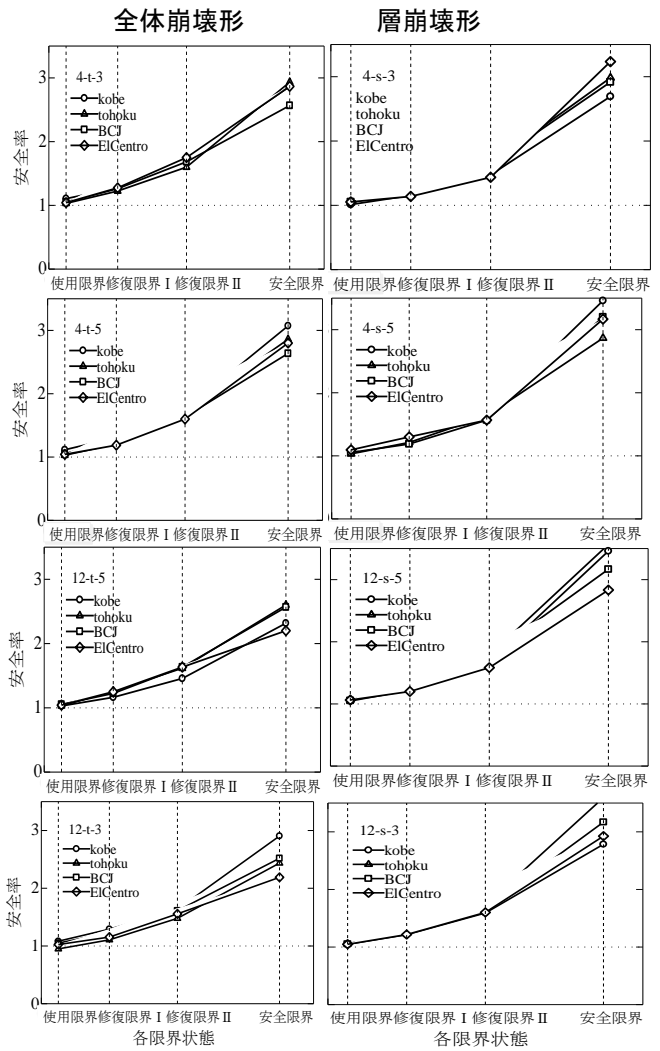


図 11 各限界状態における安全率

【参考文献】

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針（鉄筋コンクリート造編），1991年．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
- 2) 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
- 3) 鄭 文淑，前田匡樹，田才 晃，長田正至：RC造建築物の地震応答解析による残存耐震性能の評価，コンクリート工学年次論文報告集，第22号，第3巻，pp.1219-1224，2000.
- 4) Takeda, T. et al. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, Dec. 1970