

# 損傷量に基づいた RC 造建築物の耐震修復性能評価法の構築に関する研究

## EVALUATION OF SEISMIC REPARABILITY LIMIT STATE OF R/C FRAME STRUCTURE BASED ON DAMAGE IN R/C MEMBERS

五十嵐 さやか (リハビリテーション工学分野)

Sayaka IGARASHI

### Abstract

The final goal of this study is to develop an estimation method of seismic reparability limit state of R/C buildings damaged due to earthquakes. Firstly, an analytical model for crack length in ductile column and beam was proposed. The analytical model of crack lengths consists of two parts: evaluation models in and outside the plastic hinge regions which correspond to flexural spring and shear spring, respectively, for the frame analysis under seismic loads. The proposed models can evaluate total crack length from the predicted number and average length of flexural and shear cracks. Secondly, proposed evaluation method was applied to R/C frame structures with different collapse mechanism and reparability limit state was discussed. From the analytical results, repair costs and economic loss of damaged structure were strongly affected by the type of collapse mechanism. Reparability of R/C buildings with total collapse mechanism was found to be inferior to that of buildings with story collapse mechanism.

**Keywords** : Damage evaluation, repair costs, economic loss, Seismic reparability

損傷量評価, 修復費用, 経済損失, 耐震修復性能

### 1. はじめに

建築物に必要とされる耐震性能のうち、「安全性」は人命保護の観点から最も重要視されるべき性能であるが、近年の地震被害では建物の倒壊は免れても躯体の甚大な損傷により最終的に建て替えを余儀なくされた事例や、建物を復旧するまでに事業継続が不可能となり多額の経済損失が生じた事例が報告されている。これより、災害時における建物の「安全性」を満足するだけでなく、災害時の建物損傷を抑え、経済的に許容できる範囲での修復ができる「修復性」も重要な耐震性能の一つとして考えられるようになった。しかしながら、建物全体の修復性能を定量的に評価する方法は十分には確立していないのが現状である。本研究は RC 造梁・柱部材に生じる損傷量（ひび割れ量やコンクリート剥落量）を定量的に評価するモデル式の構築及び損傷量から算出した修復費用より建物全体の修復限界状態を決定づける耐震修復性能評価法の確立を目的としている。

### 2. RC 造建築物の耐震修復性能評価の方針

本研究で想定する RC 造梁・柱部材の損傷量評価モデルは、現在の構造設計の実務で一般的に行われるフレームモデルの荷重増分解析に適用することを念頭に、部材を材端曲げバネとせん断バネを有する線材に置換した時の各バネモデルの変形成分と対応した損傷量の推移とした（図 1）。これより、荷重増分解析によって算出される各部材の各バネの変形成分に損傷量評価モデル（ひび割れ長さやひび割れ幅など）を適用し、建物全体で集計することで建築物全体に生じる損傷量が推定可能となる。建物に生じる残留ひび割れ幅や長さ、コンクリート圧壊など構造部材の損傷量の定量的評価が可能となれば、構造部材の修復費用や修復に要する時間などを見積もることができるようになり、建物新築段階における耐震修復性能及び被災時の復旧可能性や機能継続性の検討のための重要な資料となる。また、本研究では建物の修復性が「経済的に許容しうる範囲で修復可能である状態」で評価されることを考慮して、被災時における建築物の損害費用の程度を(1)式で示す「建物損害割合  $R_r$ 」で指標化し、建築物全体の修復限界状態が  $R_r$  での程度で決定されるか解析によって検討した。

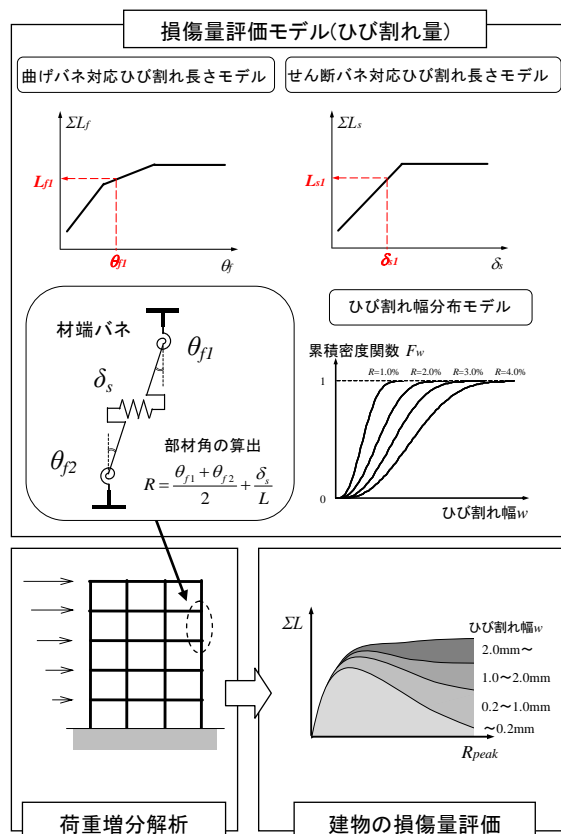


図1 損傷量評価の流れ

$$\text{建物損害割合 } R_r = \frac{C_r + L_r}{C_n + L_n} \quad (1)$$

ここに、 $R_r$ : 建物損害割合,  $C_r$ : 建物の修復費用,  $C_n$ : 建物の新築費用,  $L_r$ : 復旧日数に伴う経済損失,  $L_n$ : 新築日数に伴う経済損失, である。

躯体の修復費用や復旧日数に伴う経済損失が大きければ、建物損害割合  $R_r$  の値は大きくなるため、修復性の良い建物ほど、 $R_r$  は小さい値をとる。

### 3. RC 柱梁部材の損傷量評価モデルの提案

本研究では損傷量として部材表面に生じるひび割れ長さ、ひび割れ幅及びコンクリート圧壊による剥落面積についてモデル化の検討を行った。本報では紙面の制約上、ひび割れ長さ評価モデルについて詳細を報告する。

筆者らが提案している部材表面に生じるひび割れ長さの評価モデルの概要を以下に示す。ひび割れ長さ評価モデルでは、部材が正負交番載荷を受けた場合の図 2 に示すようなひび割れ発生状況を考慮している。図において濃い線で示したひび割れは、時計回り方向のせん断力で生じるひび割れを表している。このひび割れ長さ評価モデルは、骨組解析における材端曲げバネ及びせん断バネの変形を、それぞれ部材端付近のヒンジ領域及びそれ以外の領域（以下、非ヒンジ領域と呼ぶ。）の変形に対応させており、ヒンジ領域長さには曲げせん断ひび割れが、非ヒンジ領域には曲げひび割れとせん断ひび割れが生じるものと仮定している。曲げバネとせん断バネそれぞれに対応するひび割れ長さ  $\Sigma L_r$  および  $\Sigma L_s$  の推移の概念図を図 3 に示す。

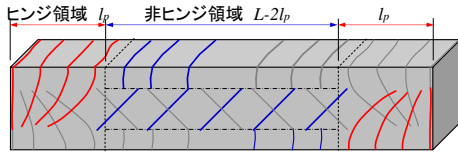
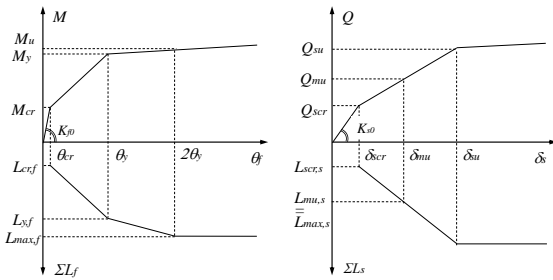


図 2 ひび割れ状況の概念図



a) ヒンジ領域 b) 非ヒンジ領域

図 3 曲げバネ・せん断バネに対応したひび割れ長さの推移

筆者らが行った柱部材実験のひび割れ長さの進展に関する検討の傾向<sup>2)</sup>より、曲げひび割れが卓越するヒンジ領域の総ひび割れ長さ  $\Sigma L_r$  は、曲げひび割れモーメント  $M_{cr}$  でひび割れが発生し、曲げ降伏モーメント  $M_f$ （この時の回転角  $\theta_f$ ）時及び曲げ終局時を想定した  $2\theta_f$  時に折点を有する曲線とし（図 3 a）、せん断ひび割れが卓越する非ヒンジ領域の総ひび割れ長さ  $\Sigma L_s$  は、せん断ひび割れ強度  $Q_{scr}$  でひび割れが発生し、せん断終局強度  $Q_{su}$  時に折点を有する曲線とした。ひび割れ長さ評価モデルの詳細については、紙面の制約上割愛するが、一例としてヒンジ領域のひび割れ長さ上限値  $L_{max,f}$  及び、非ヒンジ領域のひび割れ長さ上限値  $L_{max,s}$  のモデル式をそれぞれ (2) 式、(3) 式に示す。それぞれの式はひび割れ本数、ひび割れ 1 本当たり平均ひび割れ長さ及び正負交番載荷時を考慮した係数を掛け合わせた構成となっている。

$$L_{max,f} = \frac{l_p}{S_{av,f}} \{ 2\alpha(D - x_n) + \beta b \} \times 2 \quad (2)$$

$$L_{max,s} = \left[ \frac{l_{cr} - l_p}{S_{av,s,b}} \{ 2(2c + \phi) + b \} \times 2 + \frac{\{ D - 2(2c + \phi) \} \cos \theta + (L - l_p) \sin \theta}{S_{av,s,D}} \cdot \frac{D - 2(2c + \phi)}{\sin \theta} \right] \times 2 \quad (3)$$

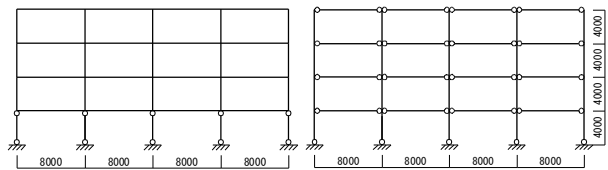
ここに、 $D$ : 部材せい、 $b$ : 部材幅、 $l_p$ : ヒンジ領域長さ、 $S_{av,f}$ : ヒンジ領域に生じる平均曲げひび割れ間隔、 $\alpha$ ,  $\beta$ : ひび割れ長さの補正係数で  $\alpha=1.4$ ,  $\beta=1.2$ ,  $x_n$ : 中立軸位置、 $l_{cr}$ : 曲げひび割れ発生領域長さ、 $S_{av,s,b}$ : 非ヒンジ領域に生じる平均ひび割れ間隔、 $S_{av,s,D}$ : 非ヒンジ領域に生じる平均せん断ひび割れ間隔、 $c$ : コンクリート最外縁から主筋表面までの距離、 $\phi$ : 主筋径、 $\theta$ : せん断ひび割れと材軸のなす方向、 $L$ : 部材長さ、である。

### 4. モデルを用いた RC 造骨組の損傷量評価

前述の損傷量評価モデルを用いて、建物全体の修復性能を把握することを目的として、想定建物について損傷量評価及び「建物損害割合  $R_r$ 」の評価を行った。

#### 4.1 解析対象建物概要

解析対象建物は 4 層 4 スパンの RC 造平面骨組である。建物の各層質量は単位床質量  $1.2t/m^2$  を想定した  $307.2t$  である。図 4 に解析対象建物を、図 5、表 1 に損傷量及び T03 の部材断面及び配筋、材料強度の詳細を示す。解析は崩壊メカニズム（層崩壊: Story collapse, 全体崩壊: Total collapse）、及びメカニズム時ベースシア係数  $C_B$  ( $C_B=0.3, 0.6$ ) をパラメータとした計 3 パターン (S03, S06, T03) の建物で行った。



a) 層崩壊型(S03,S06) b) 全体崩壊型(T03)

図 4 解析対象建物(単位 mm)

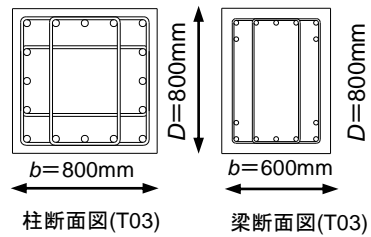


図 5 部材断面

表 1  
T03 断面詳細

T03		
柱	主筋	16-D38 (SD490)
	横補筋	4-D16@60 (SD590)
梁	主筋	5-2-D25 (SD390)
	横補筋	4-D10@80 (SD390)
	Fc(N/mm <sup>2</sup> )	24

#### 4.2 荷重増分解析

前述の解析建物に対して、外力分布を  $A_i$  分布とした静的荷重増分解析を行った。解析は剛床を仮定し、各柱・梁部材はせん断バネが挿入された曲げ回転バネを有する線材に置換した。T03 の復元力特性は図 5、表 1 に示す部材断面及び材料強度より算出した強度を折点としたトリリニア型の曲線とし、S03 及び S06 の復元力特性は T03 を基準に設定した。柱部材については、S06 は T03 と同様の復元力特性とし、S03 は降伏強度のみを  $C_B$  に基づき低減した。また、S06 の梁部材は各強度時の変形成分が T03 と等しくなるように剛性を強度比倍し、設定した。層崩壊型の 2 層以上の柱については降伏しないよう降伏強度を十分大きく設定した。全体崩壊型の柱部材の復元力特性は、1 層の柱部材の復元力特性を他層の柱部材にも適用し、軸力が柱強度に及ぼす影響は考慮せずに解析した。また、各バネのひび割れ後及び降伏後の剛性低下率については、曲げバネはそれぞれ 0.300, 0.001, せん断バネはそれぞれ 0.500, 0.001 と仮定した。

#### 4.3 解析建物の耐震性能

図 6 に一例として層崩壊型 S06 と全体崩壊型 T03 の層せん断力係数一層間変形関係を示す。層崩壊型の S03, S06 は 1 層の柱頭柱脚の降伏により層崩壊メカニズムに至り、図に示すように 1 層に変形が集中した。一方、全体崩壊型の T03 は全層の梁に降伏ヒンジが発生し、各層で変形が生じた。日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説」(以下、性能評価指針と呼ぶ。)<sup>3)</sup>に基づいて算出した第 2 種地

盤の告示の応答スペクトルに対する保有耐震性能指標は S03, S06, T03 の順に、使用限界時においては 0.25, 0.48, 0.22, 安全限界時においては 0.59, 0.74, 0.86 であり、使用限界時においては S03 と T03 が、安全限界時においては S06 と T03 がほぼ同等の耐震性能を有する骨組である。

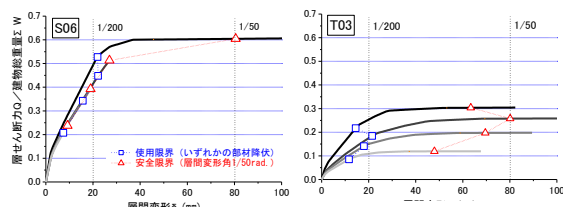


図6 層せん断力係数—層間変形関係

#### 4.4 損傷量・修復費用解析結果

##### (1) 総ひび割れ長さ・剥落面積の推移

図7に限界耐力計算により各建物を等価一質点系に縮約したときの代表変位—荷重増分解析の各部材パネの変形から3章のモデルで求めた建物総ひび割れ長さの推移を示す。代表変位が同じ場合、使用限界以前のごく変形の小さい範囲を除いて、全体的に総ひび割れ長さは層崩壊型の建物よりも全体崩壊型の T03 のほうが長い傾向が見られた。これは、全体崩壊型の建物のほうが部材の損傷個所が多いことが理由として挙げられる。また、代表変位が比較的大きくなると、変形が1層に集中する層崩壊型の S03, S06 にはひび割れ幅が 5.0mm 以上の大きいひび割れが生じる傾向が見られた。なお、解析でのひび割れ幅は最大変形を Takeda モデルの除荷剛性を用いて低減することにより残留変形に換算し、残留ひび割れ幅に換算している。

##### (2) 建物の躯体修復費用の推移

修復費用は本多らの研究<sup>2)</sup>を参考に、表2に示す RC 造学校建築のひび割れ等の各損傷量の修復費用単価(①~⑥)及び損傷度Ⅳ, Ⅴでは損傷度に応じた追加費用単価(⑦, ⑧)を用いて算出した。ここで、損傷度に応じた追加費用とは損傷度が大きく鉄筋の取替や部材打替、それに伴うサポート、型枠等の架設工事など大規模な補修が必要になる場合の付加費用である。解析における各部材の損傷度は表3に示す基準で決定し、修復費用を算定した。また、一般的なひび割れ補修工事においてはひび割れ幅が 0.2mm 未満であれば、特に補修を必要としない場合も多いことから、0.2mm 以上のひび割れが部材せい以上生じた時点までをひび割れ補修開始時点として修復費用を算出した。図8に各建物の躯体修復費用の推移を示す。躯体の修復費用は特に安全限界時程度まで変形が進むと、個々の部材の損傷程度が小さく損傷個所の多い全体崩壊型の建物のほうが、特定数の部材の損傷程度が大きく損傷個所の少ない層崩壊型の建物よりも修復費用が2倍以上となることもあり、修復費用としては高額になる可能性がある。

表2 各損傷量に対する修復工法及び費用単価

損傷レベル	修復工法	修復費用比率	修復費用単価
① 0.2mm未満	エポキシ樹脂塗込	0.22	¥2,000 (円/m <sup>2</sup> )
② 0.2~1.0mm	エポキシ樹脂注入	0.81	¥7,300 (円/m)
③ 1.0~3.0mm	エポキシ樹脂注入	1.00	¥9,000 (円/m)
④ 3.0~5.0mm	エポキシ樹脂注入	1.44	¥13,000 (円/m)
⑤ 5.0mm以上	エポキシ樹脂注入	1.67	¥15,000 (円/m)
⑥ コンクリート剥落	コンクリート剥離補修	7.44	¥67,000 (円/m <sup>2</sup> )
⑦ 損傷度Ⅳ個別補修	フープ筋取替等	75.31	¥677,818 (円/本)
⑧ 損傷度Ⅴ個別補修	部材打替等	273.33	¥2,460,000 (円/本)

表3 解析における各部材の損傷度の決定要因と補修項目

損傷度	決定要因	補修費用
I	ひび割れが発生(ひび割れ幅0.2mm未満)	クラック補修
II	幅0.2mm以上のひび割れが発生	クラック補修
III	幅1.0mm以上のひび割れが発生	クラック補修
IV	幅2.0mm以上のひび割れ又はコンクリート剥落が発生	クラック補修+コンクリート剥離修復+損傷度Ⅳ個別補修
V	コアコンクリートが終局歪ε <sub>cu</sub> =0.003に到達	損傷度Ⅴ個別補修

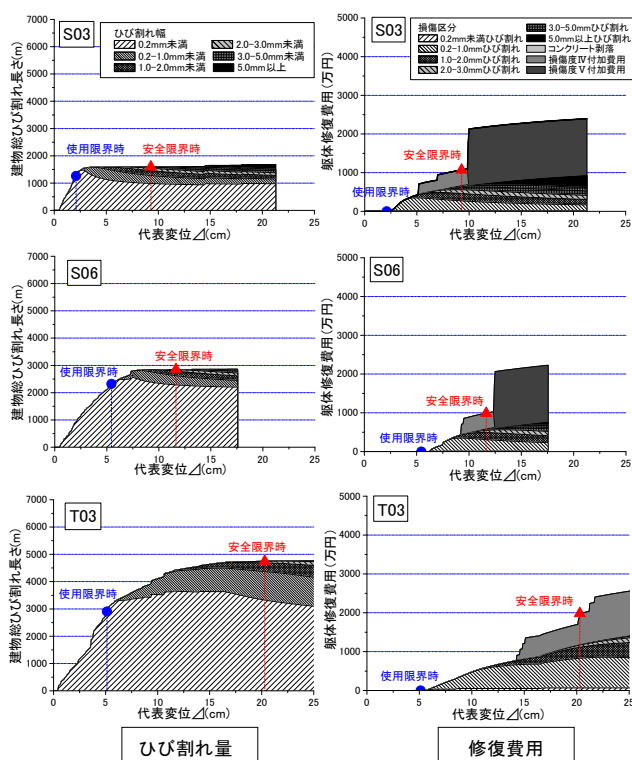


図7 建物総コンクリート剥落面積—代表変位Δ関係

図8 躯体修復費用—代表変位Δ関係

#### 4.5 解析建物の修復性能評価の条件設定

建物用途として「集合住宅」及び「事務所」を想定し、各解析建物について、「建物損害割合  $R_r$ 」を比較する。以下に  $R_r$  の算出に必要な条件の設定方法について説明する。

##### (1) 建物の修復費用 $C_r$ の設定

4.4(3)で躯体修復費用が算出されるが、これを仕上げや設備等の修復費用を含んだ建物全体の修復費用に換算する。ここでは、図9に示す建物全体に占める躯体の資産割合(建物建設費用に占める躯体建設費用)の値を用いて、(4)式によって建物の修復費用に換算した。

$$\text{建物の修復費用} = \frac{\text{躯体の修復費用}}{\text{躯体の資産割合}} \quad (4)$$

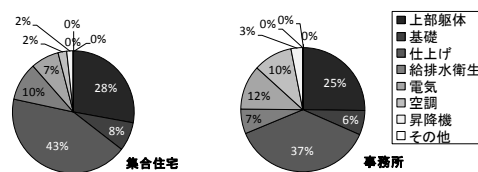


図9 各建物用途の資産割合

##### (2) 建物の新築費用 $C_n$ の設定

建物の新築費用は、建物の地震リスク評価において一般的に用いられている建物の新築費用単価を参考に、集合住宅は 30 万円/m<sup>2</sup>、事務所は 24 万円/m<sup>2</sup> として設定した。これらの値から、解析建物の新築費用は集合住宅で、38,400 万円、事務所で、30,720 万円と算出された。

##### (3) 建物の新築日数の設定

新築日数は、加藤らが提案した<sup>4)</sup>帰式、(5)式、(6)式より算出した新築時工期及び設計・申請日数3か月の合計値として算出した。これより算出された集合住宅、事務所の新築日数はそれぞれ 335 日、378 日である。

$$\text{集合住宅} \quad Z = 39.764 X^{0.2160} (Y_1 + 2)^{0.0684} (Y_2 + 1)^{0.1392} \quad (5)$$

$$\text{事務所} \quad Z = 77.035 X^{0.1504} (Y_1 + 2)^{0.1365} (Y_2 + 1)^{0.0909} \quad (6)$$

ここに、 $Z$ : 建設工期(日),  $X$ : 延床面積( $m^2$ ),  $Y_1$ : 地下階数,  $Y_2$ : 地上階数, である。

(4) 建物の復旧日数の設定

建物の復旧日数は、新築日数を低減させることで算出する。新築日数に対する復旧日数の割合を  $w$  とし、 $w$  を部材の各損傷度  $i$  ( $i=0$ [無被害]~ $V$ [大破]) の復旧日数への影響係数  $D_i$  及び各損傷度の部材が全部材数に占める割合  $r_i$  を掛け合わせた係数として(7)式で表すと、復旧日数は(8)式で表すことができる。被災建物の復旧日数については実被害データが乏しく、損傷度ごとの影響係数を精度よく決めることは難しいが、表4のように  $D_i$  を設定し試算を行った。表5に安全限界時を例に復旧日数を示す。復旧日数は損傷個所の多い全体崩壊型の建物のほうが、層崩壊型の建物より復旧日数が長くなる傾向が見られた。

$$w = \sum (D_i \times r_i) \quad (7)$$

$$\text{復旧日数} = w \times \text{新築日数} \quad (8)$$

表4 損傷度ごとの復旧日数への影響係数  $D_i$

各損傷度の復旧日数への影響係数 $D_i$	部材の損傷度					
	O	I	II	III	IV	V
	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8	1.0

表5 各建物用途の復旧日数

安全限界	全部材数		部材の損傷度						$w$	復旧日数 (住宅)	復旧日数 (事務所)
			O	I	II	III	IV	V			
S03	36	部材数	8	23	0	0	5	0	0.11	37	42
		割合	22.2	63.9	0.0	0.0	13.9	0.0			
S06	36	部材数	4	27	0	0	5	0	0.11	37	42
		割合	11.1	75.0	0.0	0.0	13.9	0.0			
T03	36	部材数	0	20	4	0	12	0	0.28	93	105
		割合	0.0	55.6	11.1	0.0	33.3	0.0			

(5) 復旧日数・新築日数に伴う経済損失  $L_r$ ,  $L_n$  の設定

集合住宅は賃貸を考慮し、月、平米当たりの賃料を 3,500 円/ $m^2$ ・月、事務所の年間利益を 1,500 万円と仮定し、復旧日数及び新築日数との掛け合わせより、経済損失を求めた。

4.6 解析建物の修復性能評価

以上の設定より、解析建物について「建物損害割合  $R_r$ 」を算出し、基準地震動に対する入力地震動の比との関係を求めた。結果を図10に示す。「建物損害割合  $R_r$ 」の値は、強度が低い S03 は大きい傾向があり、安全限界時で同等の性能を持つ S06 と T03 を比較すると、地震動の比が 0.8 付近のごく一部を除き、集合住宅、事務所共に全体崩壊型の建物が層崩壊型の建物よりも大きい値となった。これより、基準地震動と入力地震動の比が同じ建物でも、崩壊型の違いにより修復性能には大きな差が現れ、現在の構造設計で奨励されている全体崩壊型の建物は層崩壊型の建物よりも修復性能の点では低く評価される可能性があることが判った。

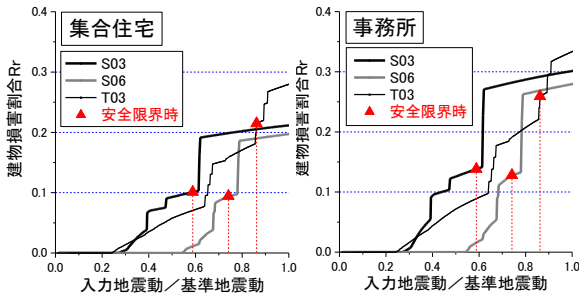


図10 各建物の建物損害割合  $R_r$  の関係

5. 建物全体における修復限界状態の検討

「性能評価指針」<sup>1)</sup>で示されている各限界状態の決定法の一つとして、層の部材の損傷度の割合からある層が限界状態に至る時点とする方法がある。建物倒壊の危険性を評価するための安全限界状態については、最も損傷の大きい層

の限界状態が建物全体の限界状態となり得る。一方で、修復限界状態については、建物全体に生じる損傷量や修復費用を考慮して決定するのが合理的と考えられる。そこで、建物全体の修復限界状態については、建物全体の損傷度を考慮し、部材全体に占める各損傷度の部材数の割合から決定することを考えた。ここでは、修復限界状態 I を損傷度 III の部材が生じない限界点、修復限界状態 II を損傷度 IV の部材が生じない限界点と定義した。

上記の基準で修復限界状態 I, II 時及び荷重増分解析における安全限界状態時の「建物損害割合  $R_r$ 」と各損傷度の部材割合の関係を求めた。図11に集合住宅の結果を示す。その結果、層崩壊型の S03, S06 については、建物損害割合  $R_r$  は、修復限界状態 I で  $R_r=3\%$  程度、修復限界状態 II で  $R_r=5\%$  程度であった。

一方、全体崩壊型の T03 については、建物損害割合  $R_r$  は修復限界状態 I で  $R_r=4.5\%$ 、修復限界状態 II で  $R_r=9\%$  程度となった。これより、建物の修復費用及び復旧日数に伴う経済損失を考慮して算出した建物の修復性能の良し悪しは、建物の最終崩壊形が大きく影響することが考えられ、修復性能としては損傷個所が少ない層崩壊型の建物のほうが、損傷個所の多い全体崩壊型の建物よりも建物損害割合  $R_r$  は小さく評価され、現在の構造設計で推奨されている全体崩壊型の建物は修復性の観点では不利になる可能性があることが判った。しかしながら、安全限界時においても  $R_r$  の値は 10%~25% 程度であり、今回の方法では一般的な感覚よりもやや損害額が小さく評価される傾向が見られた。今後、評価に関する諸条件の精度を向上させることで、より実状に沿った修復性能評価が可能になると考えられる。

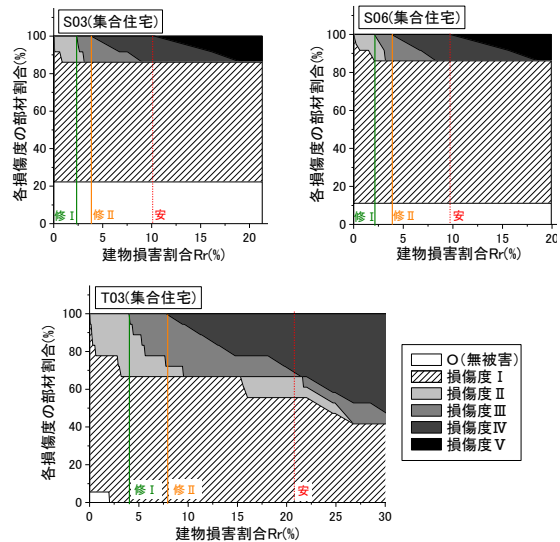


図11 建物損害割合  $R_r$  と各損傷度の部材割合 (集合住宅)

6. まとめ

損傷量に基づいた RC 造建築物の修復性能評価法及び柱梁部材の損傷量評価モデルを提案し、骨組解析に適用することで建物全体に生じる損傷量に基づいた修復性能評価を行った。その結果、特定層に変形が集中する層崩壊型は損傷度の大きい部材が発生するものの、修復費用や復旧日数に伴う経済損失に換算すると損傷個所の多い全体崩壊型の建物が層崩壊型の建物よりも大きくなる傾向が見られた。評価精度の点で課題は残るものの、建物の崩壊型を考慮することで、本研究で提案する損傷量に伴う修復費用や経済損失に基づいた建物全体の耐震修復性能評価が可能となると考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004
- 2) 滝本和志ほか：ひび割れデータを用いた RC 部材の損傷度評価に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.135-145, 2004.5
- 3) 前田匡樹, 本多祐子ほか：地震被害を受けた鉄筋コンクリート造学校建物の被災度と修復コスト, 第11回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, No.388, 2002.11
- 4) 加藤辰彦ほか：単位工期概算式の定式化 建設工期の算定法に関する研究 (その3), 日本建築学会計画系論文集 第584号, pp.115-120, 2004.10