

# 論文 曲げ柱とせん断柱が混在する RC 造建物の地震後の残存耐震性能評価

内田 崇彦\*1・小原 学\*2・前田 匡樹\*3

**要旨**：曲げ柱とせん断柱が混在する建物を対象として地震応答解析を行い、無損傷時と損傷を生じた後の建物の限界地震波倍率を比較することにより耐震性能残存率を求め、日本建築防災協会の被災度区分判定基準において提案されている耐震性能残存率の妥当性を検証する。また、地震応答解析の際に曲げ柱とせん断柱が混在する建物を評価するために、最大耐力後の耐力低下を考慮する復元力特性モデルを開発した。

**キーワード**：地震被害, 残存耐震性能, 被災度, 破壊モード, 耐力低下

## 1. はじめに

地震被害を受けた RC 造建物に残された耐震性能を評価する指標として、日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針 (2001 年)」<sup>1)</sup> (以下、被災度区分判定基準) で耐震性能残存率が提案されている。既往の研究<sup>2)</sup>では、解析対象となる構造物が層降伏型で全ての部材で同一の破壊性状である場合について、耐震性能残存率の妥当性が検討されているが、部材により破壊性状が異なる場合については検討されていない。

本研究では、部材による破壊性状の違いを考慮し、曲げ柱とせん断柱の降伏強度の比率、弾性周期をパラメータとした 1 質点系の地震応答解析を行い、被災度区分判定基準の耐震性能残存率と地震波の大きさで定義される耐震性能残存率を比較することにより被災度区分判定基準による評価の妥当性を検証する。

## 2. 地震応答解析

### 2.1 解析モデル

解析対象となる構造物は、ピロティを有する RC 造多層構造を想定し、2 階以上を完全に剛とした 1 質点系にモデル化した。また、復元力特

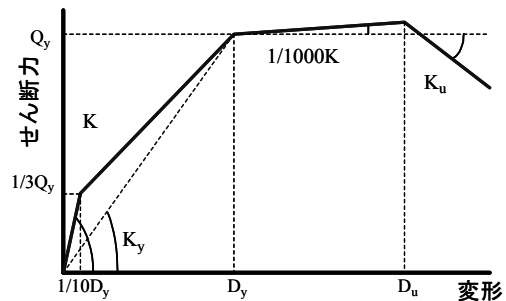


図-1 復元力特性

性については図-1のように設定し、弾性周期を 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 秒と変化させ、ベースシア係数を 0.3 に統一した。

履歴モデルは、図-2のような Takeda Slip モデルと、Takeda Slip モデルに最大耐力以降の耐力低下を考慮するための負剛性を取り入れた図-3のような耐力低下型モデルの 2 種類を用い

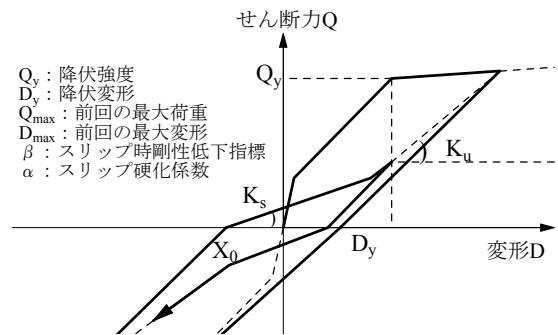


図-2 Takeda Slip モデル

\*1 東北大学 工学部建築学科 (正会員)

\*2 東北大学 工学部建築学科

\*3 東北大学 大学院工学研究科 助教授・博士 (工博) (正会員)

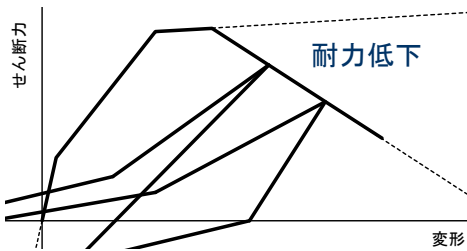


図-3 耐力低下型履歴モデル

で解析を行った。Takeda Slip モデルにおけるスリップによる剛性変化は式(1)，(2)に従い，それぞれの係数については既往の研究<sup>2)</sup>を参考にし，スリップ時剛性低下指標  $\beta=0.8$ ，スリップ硬化係数  $\alpha=1.0$  とした。

$$K_s = \frac{Q_{\max}}{D_{\max} - X_0} \left| \frac{D_y}{D_{\max}} \right|^\beta \quad (1)$$

$$K_u = \frac{Q_{\max}}{D_{\max}} \alpha \quad (2)$$

解析モデルの変形性能については，まず既往の実験結果<sup>3)</sup>を参考にし異なる復元力特性を持つ2種類の1階柱を図-4のように設定し，それぞれせん断柱(終局塑性率2.75)，曲げ柱(終局塑性率8)とした。さらに，それぞれの弾性周期の解析モデルについて，構成するせん断柱と曲げ柱の降伏強度  $Q_y$  の比率が 0 : 100，25 : 75，50 : 50，75 : 25，100 : 0 となるように設定し，それぞれの周期で5種類の変形能力の異なる解析モデルについて解析を行った。ただし本研究では，せん断柱と曲げ柱それぞれの変形は同じものとして解析を行った。

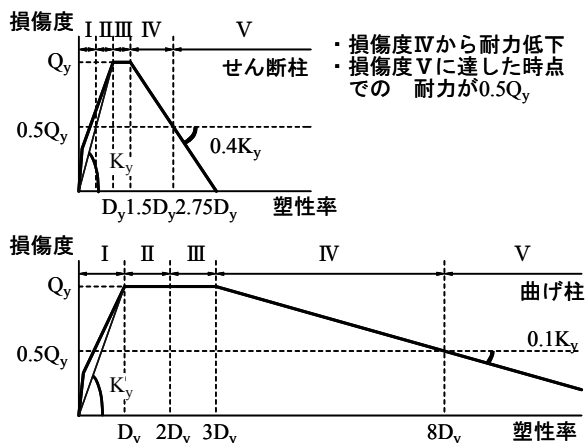


図-4 柱の荷重-変形と損傷度の関係

せん断柱と曲げ柱それぞれの，荷重-変形包絡線と損傷度との関係については，解析結果と被災度区分判定基準<sup>1)</sup>をもとに図-4のように設定し，それぞれの柱において損傷度IVから耐力低下が始まり，損傷度Vに達した時点での耐力が降伏強度の50%に低下するようにした。

## 2.2 入力地震波

解析の際には観測波4波と模擬波2波の計6波の入力地震波を用いた。観測波は El Centro NS (1940年 Imperial Valley 地震，略称 El Centro)，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)，大阪ガス葺合供給所 NS (1995年 兵庫県南部地震，略称 Fki) の4波である。模擬波については建築基準法の限界耐力計算法<sup>4)</sup>を参考に目標加速度スペクトルを設定し，そのスペクトルに近似するような加速度応答スペクトルを持つように作成した。また，主要動の長さとして異なる2種類を設定し，それぞれS波(主要動5秒，継続時間40秒)，L波(主要動40秒，継続時間120秒)として作成した。S波及びL波の加速度応答スペクトルを図-5に，加速度時刻歴を図-6に示す。

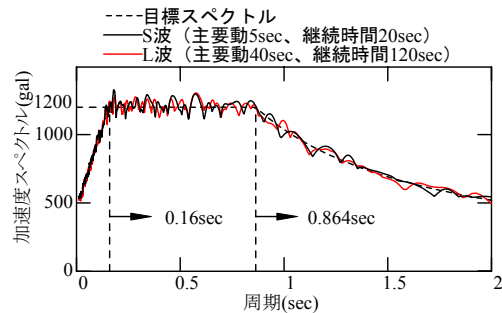


図-5 模擬地震波と加速度応答スペクトル

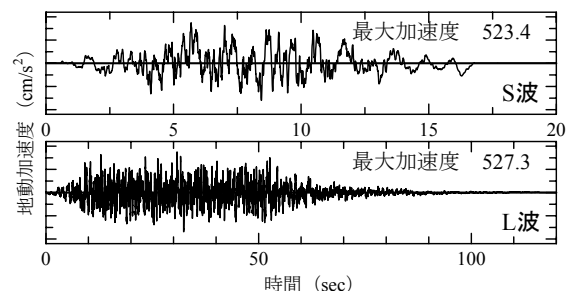


図-6 加速度時刻歴

### 2.3 残存耐震性能の評価方法

既往の研究<sup>5)・6)</sup>では、RC柱部材を想定した荷重-変形関係の包絡線において、全エネルギー吸収能力に対する、残存するエネルギー吸収能力の割合を耐震性能低減係数  $\eta$  と定義し、曲げ、せん断の両部材について、耐震性能低減係数  $\eta$  の値を部材実験の荷重-変形関係の面積（エネルギー）から表-1のように定量化<sup>6)</sup>し、この数値が被災度区分判定基準<sup>1)</sup>に採用されている。

表-1 耐震性能低減係数  $\eta$

損傷度	曲げ柱(%)	せん断柱(%)
無損傷	100	100
I	95	95
II	75	60
III	50	30
IV	10	0

ここで、せん断柱と曲げ柱から構成される解析モデルの耐震性能残存率  $R$ <sup>1)</sup>は、曲げ柱とせん断柱の  $\eta$  をそれらの強度比で重み付け平均し、式(3)から求めることができる。

$$R = \frac{Q_{ys}}{Q_y} \times \eta_s(\mu) + \frac{Q_{ym}}{Q_y} \times \eta_m(\mu) \quad (3)$$

$Q_{ys}$ : せん断柱の降伏強度  $Q_{ym}$ : 曲げ柱の降伏強度  
 $Q_y$ : 解析モデルの降伏強度 ( $Q_y = Q_{ys} + Q_{ym}$ )  
 $\eta_s(\mu)$ : せん断柱の  $\eta$   $\eta_m(\mu)$ : 曲げ柱の  $\eta$

ただし  $\eta_s(\mu)$ 、 $\eta_m(\mu)$  については、図-4からそれぞれの柱の塑性率  $\mu$  における損傷度を読み取り、表-1の損傷度と  $\eta$  との関係から求めた。

以上の手順から、それぞれ変形能力の異なる5種の解析モデルについて塑性率  $\mu$  と耐震性能残存率  $R$  との関係を求めたグラフを図-7に示す。なお、耐震性能残存率  $R$  による被災度区分は次のように定義されている。

- 【軽微】  $R \geq 95$  (%)
- 【小破】  $95 > R \geq 80$  (%)
- 【中破】  $80 > R \geq 60$  (%)
- 【大破】  $60 > R$  (%)
- 【倒壊】  $R = 0$  (%)

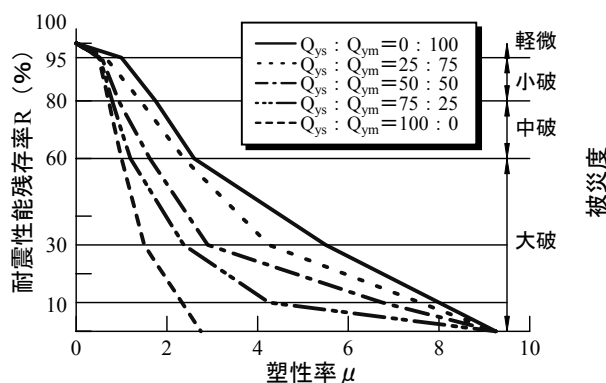


図-7 塑性率  $\mu$  と耐震性能残存率  $R$  の関係

また、地震応答解析による解析モデルの残存耐震性能を評価する手段として、既往の研究<sup>7)・8)</sup>において入力地震波倍率を用いた方法が提案されている。この方法により求められる耐震性能残存率を  $R_{dyn}$  とすると、この  $R_{dyn}$  は無損傷時における限界地震波倍率に対する、損傷を生じてある被災度に区分された際の限界地震波倍率の割合として式(4)で定義される。

$$R_{dyn} = \frac{A_{dR}}{A_0} \quad (4)$$

ここで限界地震波倍率とは、終局変形に至る地震波の大きさ、つまり入力地震波倍率である。また、本研究では耐震性能残存率がほぼ失われる変形を終局変形としている。終局変形は、厳密には  $R=0$  となる変形とするのが正しいが、応答解析結果の発散を防ぐため、ほぼ倒壊とみなして  $R=10\%$  となる変形とした。評価の手順は、まず解析モデルに倍率を変化させた地震波を入力し、無損傷時から各被災度に区分される変形に達する地震波倍率  $A_R$  と ( $R=95, 80, 60, 30, 10$  (%): 各被災度区分の下限に相当する耐震性能残存率) と限界地震波倍率  $A_0$  を得る。ここで本研究では、大破の被災度について耐震性能残存率の範囲が広いため、便宜的に  $R=30, 10\%$  の2つに範囲を分けた。次に、各被災度に対応する変形を生じた解析モデルに対し、連続して2回目の地震波を入力し、限界地震波倍率  $A_{dR}$  を求める。そして、式(4)によって  $R_{dyn}$  が算出される。

### 3. 解析結果

#### 3.1 周期が耐震性能残存率に及ぼす影響

建物の周期が耐震性能残存率に及ぼす影響を検討するため、例としてせん断柱と曲げ柱の降伏強度の比率が 50 : 50 の解析モデルに対して計 6 波の地震波を入力して得られた、耐力低下型モデルによる耐震性能残存率を、周期ごとに表わしたものを図-8 に示す。ここで、解析結果により得られた耐震性能残存率について解析上は 2 回目入力での倍率が 1 回目を上回り、 $R > 1$  となる場合も幾つか見られたが、これは地震波入力による解析モデルの周期の変化が原因と考えられるが、これらは 1 とみなして解析結果の検討を行った。また、図中の実線は各被災度の耐震性能残存率の平均値  $\bar{X}$  を表わす。周期ごとに比較してみると、平均値が周期 0.2, 0.3 秒において最も低く、それ以降の周期では大きな差は見られず、また全ての周期で被災度が大きくなるに連れて、耐震性能残存率のばらつきが大きくなっていることが分かる。

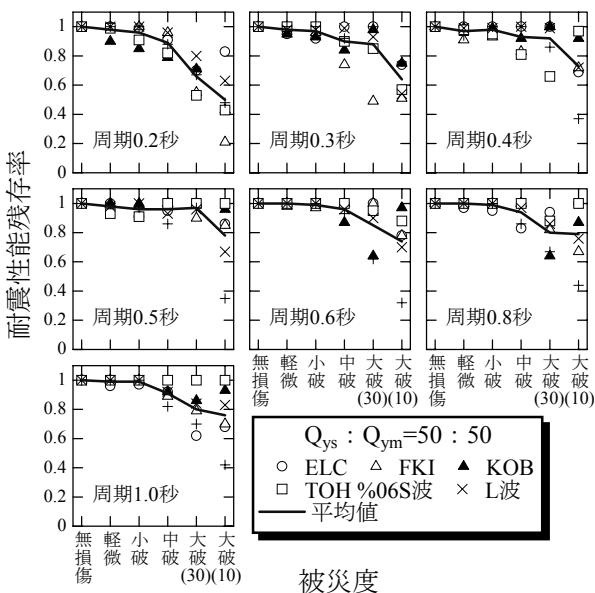


図-8 耐震性能残存率と被災度の関係

次に、Tohoku 波の変位応答スペクトル（減衰定数 20%）を図-9 に、せん断柱と曲げ柱の降伏強度の比が 50 : 50 の解析モデルの耐震性能残存率と周期の関係を例として図-10 にそれぞれ示す。ここで図-9 中の  $T_u$  は、括弧内の弾性周

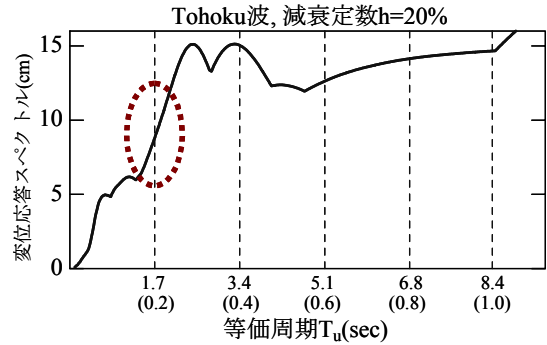


図-9 変位応答スペクトル

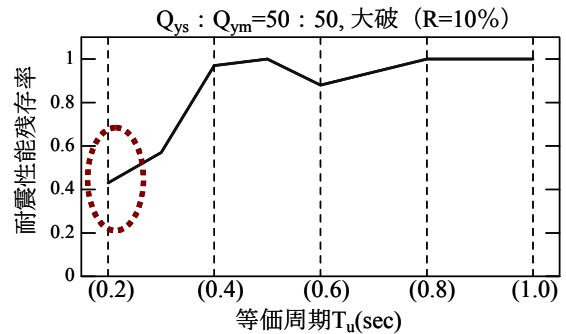


図-10 耐震性能残存率と周期の関係

期を持つ解析モデルにおける、終局変形に達した際の等価周期（最大応答点と原点との割線周期と定義）を表わす。また図-10 に関しては、終局変形時である大破 ( $R=10\%$ ) についてのみ表わす。周期 0.2 秒に相当する等価周期での変位応答スペクトルは、応答変位の勾配が大きく、耐震性能残存率は低い。また、周期 0.6 秒以降に相当する等価周期での応答スペクトルは、変位応答の勾配が小さく、耐震性能残存率はほとんど低下していない。これにより、地震波の特性である変位応答スペクトルの勾配と周期との関係が耐震性能残存率に影響すると考えられる。これらの傾向は、他の地震波、降伏強度比の異なる解析モデルについても同様の傾向が見られた。また、被災度が大きくなるに連れて耐震性能残存率のばらつきが大きくなる特徴から、被災度ごとに耐震性能残存率の標準偏差  $\sigma$  を求め、 $(\text{平均値} - 2 \times \text{標準偏差})$  を本研究では解析結果の下限値と考えて扱うこととした。

#### 3.2 履歴モデルが耐震性能残存率に及ぼす影響

履歴モデルが耐震性能残存率に及ぼす影響を検討するために、計 6 波の地震波を入力して得

られた耐震性能残存率の平均値  $\bar{X}$  と標準偏差  $\sigma$  を損傷度ごとに求め、解析結果の平均値と下限値を解析モデルの変形性能ごとに表わしたものを図-11 に示す。平均値について比較すると、被災度が大きくなるに連れて耐力低下型モデルの方が、耐震性能残存率が低下している。また、下限値についても耐力低下型モデルの方が低く、被災度区分判定基準に近い。これにより、破壊性状の異なる部材が混在する解析モデルに対する、履歴モデルにおいて最大耐力以降の耐力低下を考慮する必要性が確認された。従って、以降の解析結果の検討では、耐力低下型モデルの解析結果を用いて行うこととする。また、解析結果と被災度区分判定基準との比較・検討については後程改めて行う。

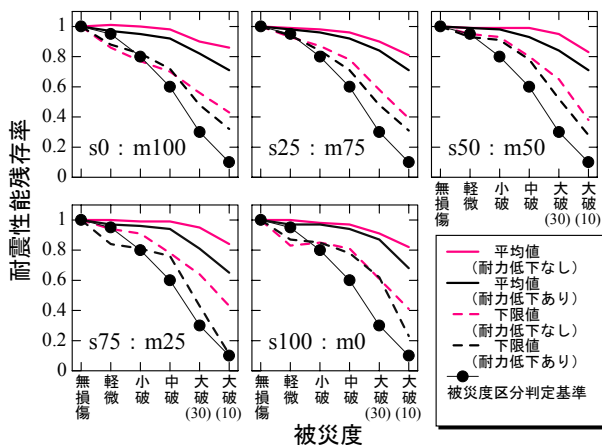


図-11 耐震性能残存率と被災度の関係

### 3.3 強度比が耐震性能残存率に及ぼす影響

解析モデルの、曲げ柱とせん断柱の強度比率が耐震性能残存率に及ぼす影響を検討するために、図-11 のせん断柱と曲げ柱が混在する解析モデルの下限値を一つのグラフにまとめたものを図-12 に示す。5つの解析モデルの耐震性能残存率を比較すると軽微と大破において、二点鎖線で表わされる75:25の解析モデルが他の4つよりもやや低下しているが、耐震性能残存率と被災度の関係については、解析モデルによる大きな傾向の違いは見られない。従って、せん断柱と曲げ柱が混在する解析モデルについては、強度比の違いによる多少の差異はあるものの、

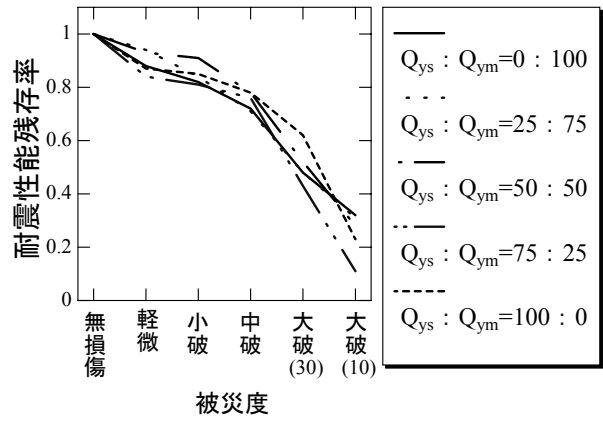


図-12 耐震性能残存率と被災度の関係

耐震性能残存率と被災度の関係に顕著な違いはないと考えられる。

### 3.4 被災度区分判定基準との比較

被災度区分判定基準<sup>1)</sup>の耐震性能低減係数  $\eta$  は、損傷を受けた部材に残存する耐震性能を評価する指標として提案されている。本研究における地震応答解析では、対象となる構造物の破壊は1階の柱にのみ起こるという条件の下で1質点系にモデル化を行い解析した。また、ある解析モデルに対して地震応答解析から得られた耐震性能残存率よりも、被災度区分判定基準により求められる耐震性能残存率  $R$  が低い場合、被災度区分判定基準が解析結果を安全側に評価していると考え、被災度区分判定基準による残存耐震性能評価の安全性を検討する。図-11において、耐力低下型モデルの解析結果と被災度区分判定基準を比較してみると、平均値については被災度区分判定基準が解析結果を下回り、安全側に評価している。また下限値については、軽微、小破の一部において解析結果を上回っている場合が見られるが、人命に関わると考えられる大破においては安全側に評価している。

ここで、地震により被災した建築物の機能の維持や復旧の可否に最も関わると考えられる小破、中破、及び人命に関わる大破 ( $R=30\%$ ) について検討するため、計6波の地震波を入力することにより得られた耐震性能残存率の平均値と標準偏差を求め、耐震性能残存率の下限値と周期との関係を、解析モデルの変形性能ごとに

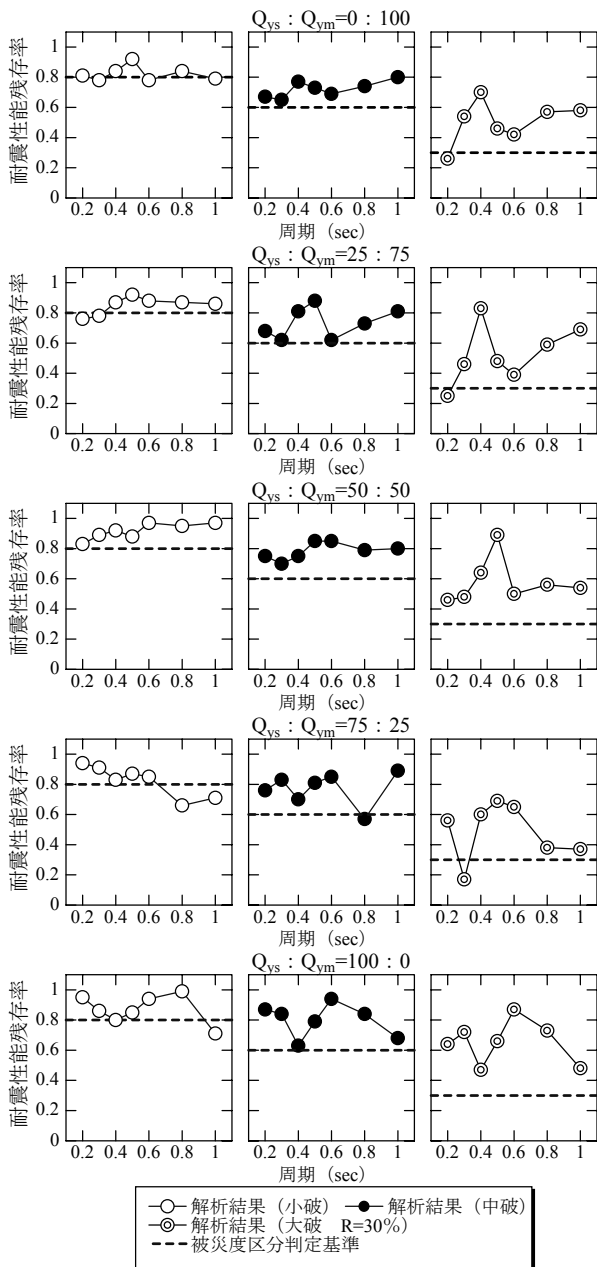


図-13 耐震性能残存率と周期の関係

表わしたものを図-13 に示す。小破について見ると、被災度区分判定基準が解析結果を上回る場合も一部見られるが、被災度区分判定基準と解析結果に大きな差は無く、概ね安全側に評価している。中破でも、僅かに解析結果を下回る場合が見られるものの、小破同様に安全側に評価している。大破では、0.2、0.3秒の短周期で一部解析結果を上回る場合が見られるが、それ以外の周期では安全側に評価している。これは3.1で述べたように、解析モデルの周期による耐震性能残存率への影響のためであると考えられる。

これにより、解析結果に対して被災度区分判定基準は、一部解析結果を上回る場合も見られたが、全ての周期及び強度比の異なる解析モデルに対して、概ね安全側に評価していることが確認され、残存耐震性能の評価指標として妥当であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の結論として、履歴モデルにおいて最大耐力以降の耐力低下を考慮する必要があること、異なる破壊性状及び変形性能を持つ部材が混在する建物についても、単一の部材から構成される建物と同様に、被災度区分判定基準により残存耐震性を概ね安全側に評価できることが確認された。

#### 参考文献

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度判定基準及び復旧技術指針，2001
- 2) 康大彦：地震被害を受けた鉄筋コンクリート造建築物の残存耐震性能評価，平成15年度東北大学博士学位論文，2004
- 3) 鄭文淑，文野正裕，前田匡樹他：柱部材の損傷状態に基づく残余耐震性評価（その1）実験概要および結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.451～452，Sep.2001
- 4) 日本建築センター：2001年版建築物の構造関係技術基準解説書（講習会テキスト），工学図書株式会社，Mar.2001
- 5) 文野正裕，幸村信行，前田匡樹，壁谷澤寿梅：軸方向変形拘束を受けるRC柱部材の挙動に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.517～522，1999
- 6) 文野正裕，前田匡樹，長田正至：部材の残余耐震性能に基づいた震災RC造建築物の被災度評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1447～1452，2000
- 7) 鄭文淑，前田匡樹他：地震被害を受けたRC造建築物の残存耐震性能の評価，構造工學論文集，Vol.48.B，Mar.2002
- 8) 田中康介，康大彦，前田匡樹，堀則男：模擬地震波を用いた地震応答解析による震災RC造建築物の残存耐震性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.211～212，Aug.2002