

論文 被災 RC 建造物の残存耐震性能および修復性能の評価因子に関する研究

桑原 里紗^{*1}・高橋 典之^{*2}・中埜 良昭^{*3}

要旨：本論文では、被災 RC 建造物の耐震性能評価において、残存耐震性能および修復性能を表す因子について解析的な検討を行った。残存耐震性能を表す因子として最大応答変位および復元力特性から計算される耐震性能低減係数 η に着目した。また、修復性能に関する因子として地震応答終了時の残留変位に着目した。それぞれの因子について震源近傍の強震動を対象とした地震応答解析によるパラメトリックスタディを行い、被災後の建築物が有する残存耐震性能と修復性能について、要求される目標性能を共に満足する構造特性がどのように表わされるのか基礎的な検討を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート構造, 残存耐震性能, 修復性能, 地震応答解析

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、建築物が倒壊せず人命を確保するように設計され、その設計目標を満たしながら被災した建築物が数多く存在した。建築物の所有者が予期せぬ額の経済損失を被らなければならない例¹⁾も数多くみられた。これを機に、地震により被災した建築物の所有者の関心が、建築物の継続使用が可能であるか否かという安全性（残存耐震性能）だけでなく、建築物の復旧に直接的あるいは間接的にかかるコストなどの修復性に関する評価にまで及ぶようになった。

そこで本論文では、被災した RC 建造物を対象に、被災後の建築物の安全性に関する情報として、被災度区分判定基準²⁾で定義されている耐震性能低減係数 η を、修復にかかる費用などの修復性に関する情報として残留変位を採りあげ、震源近傍の強震動を対象とした地震応答解析によって、両目標性能を満足するクライテリアとなる構造特性について基礎的な検討を行った。

2. 対象とする耐震性能の評価因子

2.1 残存耐震性能の評価因子の選定

本論文では、被災後の RC 建造物に残存している安全性（残存耐震性能）を評価する因子として、建造物の履歴エネルギーに着目した耐震性能低減係数 η^2 を採用した。被災後の RC 造建築物の残存耐震性能を表す因子（または指標）には、耐震性能低減係数 η のほかにも、終局状態までの余裕度を表す様々な損傷指標（例えば Park & Ang³⁾の損傷指標など）が考えられる。本論文が残存耐震性能を表す因子として耐震性能低減係数 η を採用した理由は、被災現場で残留ひび割れ幅などをとに判断される損傷度と履歴消費エネルギーとの対応が統

計的に検討されており、被災建築物の復旧支援技術として実用化されていることを勘案してのことである。ちなみに筆者らは、文献⁴⁾において、RC 建造物を対象とした非線形地震応答解析をもとに、既往の研究において定義されている耐震性能低減係数 η に対して、非線形地震応答解析によって得られた残留変位から逆算される耐震性能低減係数 η^* がどのような因子を共有するのかについて調べ、耐震性能を表す他の指標（損傷指標³⁾）との関係について検討を行った。その結果、耐震性能低減係数 η が残存耐震性能を評価するのに適していること、また残留変位が小さい場合にあっては大変形を経験した建造物にあっては、その痕跡を見逃すことなく損傷度の評価に反映させることが重要であるという結論を得た。

2.2 修復性能の評価因子の選定

被災した建築物の修復の容易さが、「修復性能」であるとすれば、修復にかかる費用の大小で、修復性能を計ることが可能になると考えられる。特に RC 造建造物の場合、修復にかかる費用の大小は、部材に生じたひび割れの量に強く依存すると思われる。そこで、部材に生じるひび割れ量と対応する因子について検討を行った。

日本建築学会の「鉄筋コンクリート建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」⁵⁾では、部材の曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅と部材変形の関係について図-1に示す幾何学的なモデルを用いて説明している。

この幾何学的なモデルによれば、曲げ変形成分 R_f とせん断変形成分 R_s の合計で表される部材角 R は、

$$R = R_f + R_s = \frac{\sum W_f}{D - x} + \frac{\sum W_s \cdot \cos \theta}{L} \quad (1)$$

と記すことができる。ここに、 $\sum W_f$ ：曲げひび割れ幅の材軸方向への合計、 $\sum W_s$ ：せん断ひび割れ幅の合計、 D ：

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 助教 博(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

部材せい, x : 圧縮縁から中立軸までの距離, θ : セン断ひび割れと材軸のなす角度, L : 部材内法スパンである。このとき, 図 - 2 に示すように最大応答からの除荷時変位と地震終了時の残留変位とが異なっても, 最大残留ひび割れ幅がほぼ同じになることが実験的に確認されている⁶⁾。ここで最大残留ひび割れ幅が等しいまま部材変形角が異なる状態を考えると, 図 - 3 に示すように, 最大残留ひび割れ幅となるひび割れを除くその他のひび割れの幅が異なって(あるいは閉じて)いなければならない。これは, 平均残留ひび割れ幅が異なること, すなわち最大残留ひび割れ幅が等しい2つの構造物で, 一方の地震応答終了時の残留変位が小さい場合, その構造物の平均ひび割れ幅は, 他方より小さいことに相当する。ひび割れ幅に応じた補修工法の選択によって修復費用単価は異なり, 平均ひび割れ幅が小さい構造物, すなわち地震応答終了後の残留変位が小さい構造物の方が一般に修復にかかる費用が安くなると予想される。従って, 本論文では, 修復性能を表す因子として残留変位 δ_r を採用することとした。

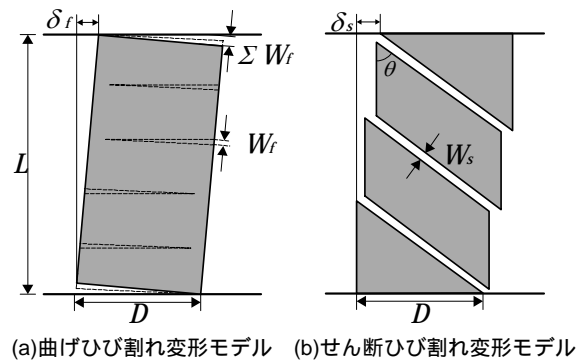


図 - 1 ひび割れによる部材変形のモデル化

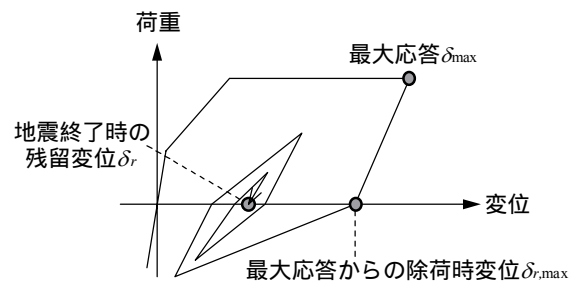


図 - 2 最大応答からの除荷時変位と残留変位の関係

3. 耐震性能の評価因子に影響を与える構造特性の分析

本章では, RC 構造物を想定した非線形地震応答解析によるパラメトリックスタディを行い, 前章で説明した被災建築物の耐震性能(残存耐震性能および修復性能)を表す因子に影響を与える構造特性(キーパラメータ)について分析を行った。

3.1 解析方法

対象とする RC 構造物を 1 自由度振動系に置換可能であると仮定し, 1 自由度振動系を解析対象とした。復元力特性は Tri-Linear 型とし, 履歴則には Takeda モデルを用いた。減衰は瞬間剛性比例型として, 減衰定数を 5% とした。系のベースシア係数 C_0 を 0.3, 終局塑性率を 5 と定め, 解析パラメータとして弾性固有周期 T は 0.3 秒, および 0.5 秒の 2 通り, Takeda モデルに用いる除荷剛性低下指数 α を 0.0 から 0.7 まで 0.1 刻みの 8 通り設定した。除荷剛性低下指数 α は, 除荷剛性 K_r の変数として,

$$K_r = \frac{Q_y + Q_c}{\delta_y + \delta_c} \cdot \left| \frac{\delta_p}{\delta_y} \right|^{-\alpha} \quad (2)$$

と表わされる。ここに, δ_p : 除荷直前の折り返し点変位である。

非線形地震応答解析に用いる入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震で観測された強震記録(JMA Kobe 1995(NS 波))を用いた。その際, 最大応答塑性率 μ が 1.5, 2, 3 および 4 となるように入力地震動に倍率を乗じて, 入力地震動レベルを調整して計算を行った。

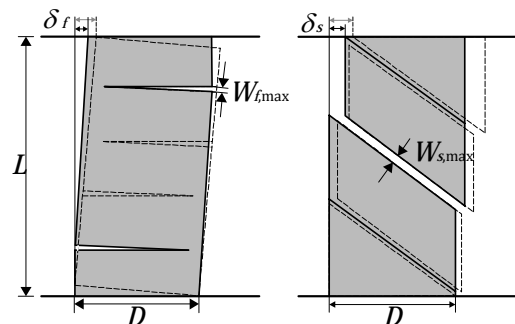


図 - 3 幾何学的なひび割れ-部材変形モデルと残留変位

3.2 残存耐震性能を表す因子に影響を与えるキーパラメータの検討

被災度区分判定基準²⁾では, 耐震性能低減係数 η は次のように定義される。

$$\eta = \frac{E_{\max} - E_d}{E_{\max}} = \frac{E_r}{E_{\max}} \quad (3)$$

ここに, E_{\max} : 部材の全エネルギー吸収能力, E_d : 消費エネルギー, E_r : 残存エネルギー吸収能力である。履歴エネルギーの分類を図 - 4 に示す。

耐震性能低減係数 η の算定には, 図 - 4 に示した履歴を特徴づけるパラメータ(ひび割れ点荷重 Q_c , ひび割れ点変位 δ_c , 降伏点荷重 Q_y , 降伏点変位 δ_y , 最大応答変位 δ_{\max} , 終局変位 δ_u , 最大応答変位からの除荷時残留変位 $\delta_{r,\max}$)を定める必要がある。このうち, 骨格曲線に関するパラメータ $K_c(Q_c/\delta_c)$, $K_y(Q_y/\delta_y)$, δ_y を既知とすれば, 耐震

性能低減係数 η の算定に必要なパラメータは、終局塑性率 μ_u (δ_u/δ_y)、最大応答塑性率 μ (δ_{max}/δ_y)、最大応答変位からの除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ の3つになる。ここで、最大応答変位 δ_{max} からの除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ はTakedaモデルでは除荷剛性低下指数 α を介して次のように与えられる。

$$\delta_{r,max} = \left\{ \mu - \left(1 + \frac{K}{K_y} (\mu - 1) \right) \cdot \mu^\alpha \right\} \delta_y \quad (4)$$

ここに、 μ ：応答塑性率、 K ：降伏後剛性 ($0.001K_c$)、 K_y ：降伏点剛性、 α ：除荷剛性低下指数、 δ_y ：降伏点変位である。このとき除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ は、式(4)より最大応答塑性率 μ および除荷剛性低下指数 α によって一意に定めることができる。すなわち本検討において、耐震性能低減係数 η の算定に影響を及ぼすパラメータは、終局塑性率 μ_u 、最大応答塑性率 μ 、除荷剛性低下指数 α である。

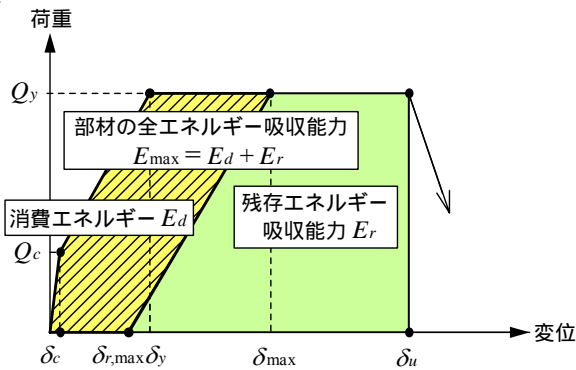


図 - 4 履歴エネルギーの分類と名称の定義²⁾

3.3 修復性能を表す因子に影響を与えるキーパラメータの検討と分析

(1) 修復性能を表す因子に影響を与えるキーパラメータの検討

2.2で修復性能を表す因子として地震応答終了時の残留変位 δ_r を選定した。地震応答終了時の残留変位 δ_r と式(4)で求められる最大応答変位 δ_{max} 、経験直後の除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ は一般に異なる値となり、通常は、残留変位 δ_r が除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ よりも小さい。そこで本論文では、次式のように残留変位 δ_r を最大応答からの除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ で正規化してこれを残留変位比 γ_r と呼び、これに最大応答塑性率 μ と除荷剛性低下指数 α が与える影響について検討した。その結果を図-5および図-6に示す。

$$\gamma_r = \frac{\delta_r}{\delta_{r,max}} \quad (5)$$

図-5は、残留変位比 γ_r と最大応答塑性率 μ との関係を正規分布近似して示したグラフである。図-5より、 μ が2以上となる γ_r の分布は0~0.4の領域にあり、それらに大きな違いはみられない。

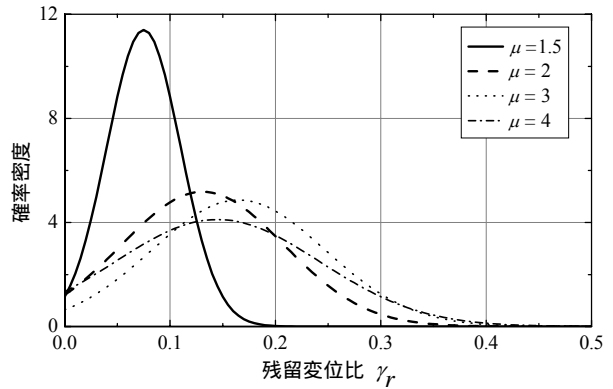


図 - 5 残留変位比 γ_r と最大応答塑性率 μ の関係

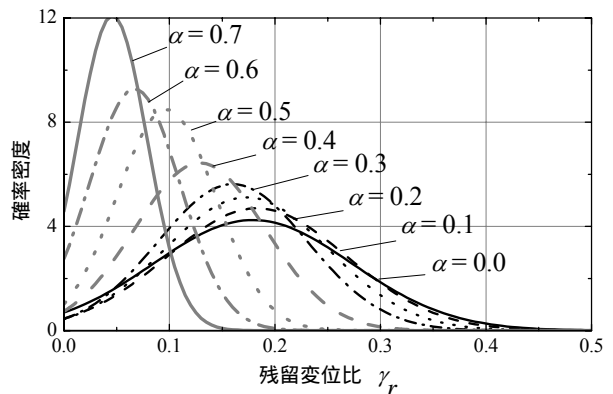


図 - 6 残留変位比 γ_r と α の関係

図-6は、図-5と同様に残留変位比 γ_r と除荷剛性低下指数 α との関係を正規分布近似して示したグラフである。図-6より、 $\alpha=0.0$ の場合を除いて、 α の増大に伴い γ_r の平均 m および標準偏差 σ は減少する。

以上より、修復性能を表す因子（残留変位比 γ_r ）に強く影響を与えるキーパラメータは、除荷剛性低下指数 α であると判断した。

(2) 修復性能を表す因子に影響を与えるキーパラメータの分析

前項(1)の結果から修復性能を表す因子（残留変位比 γ_r ）に影響を与えるキーパラメータが除荷剛性低下指数 α であると判断したが、除荷剛性低下指数 α が残留変位比 γ_r に影響を与える原因について、弾性固有周期 T が0.3秒および0.5秒の場合と目標塑性率 μ_T が3の場合に解析パラメータを限定して、詳細な検討を行った。

図-7は、上述した解析パラメータのときの残留変位比 γ_r と除荷剛性低下指数 α の関係をプロットしたグラフである。 $T=0.3$ 秒では α が0.2以上、 $T=0.5$ 秒では α が0.1以上の区間において、 α の増大に伴い γ_r が減少する傾向にある。

また、最大応答からの除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ および地震応答終了後の残留変位 δ_r と除荷剛性低下指数 α の関係（図-8）より、 α の増大に伴い $\delta_{r,max}$ および δ_r はそれぞれ減

少する傾向にあるが、 α の増大に対する δ_r の減少程度は $\delta_{r,max}$ よりも大きい。

固有周期 T が0.3秒の場合の $\alpha=0.4$ および $\alpha=0.7$ における変位応答時刻歴を図-9に、履歴形状を図-10に示す。 α の増大に伴い γ_r が減少する傾向を示したパラメータの変位応答時刻歴(0秒~50秒まで)を分析したところ、最大応答変位の符号を正側と定めると、残留変位も正側に生じていた。また、最大応答変位経験後に負側で生じた変位の最大値 δ_{max}^- は、最大応答変位 δ_{max} と同程度の振幅になるほど、残留変位 δ_r の値が減少していた。そこで、最大応答変位 δ_{max} と最大応答変位経験後に負側で生じた変位の最大値 δ_{max}^- との比を振幅比 ζ_{max} として式(6)に定義し、 α が振幅比 ζ_{max} に及ぼす影響を図-11に示す。

$$\zeta_{max} = \frac{\delta_{max}^-}{\delta_{max}} \quad (6)$$

図-11より、 α が増大するにつれ ζ_{max} が1に近づく。最大応答変位経験後に負側で生じた変位の最大値 δ_{max}^- が、最大応答変位 δ_{max} と同程度の振幅になるほど残留変位 δ_r の値が減少するメカニズムを、負側の変位の最大値 δ_{max}^- による変位の「引き戻し効果」と呼ぶことにする。 α の増大に伴い γ_r が減少する傾向を示したパラメータにおいては、 α が増大するほど「引き戻し効果」が強くなり現れたものと考えられる。

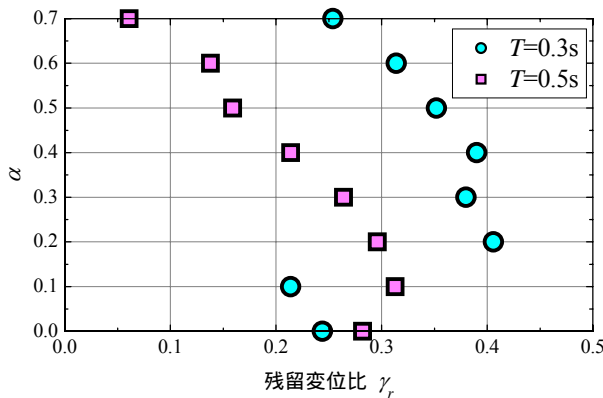


図-7 残留変位比 γ_r と α の関係

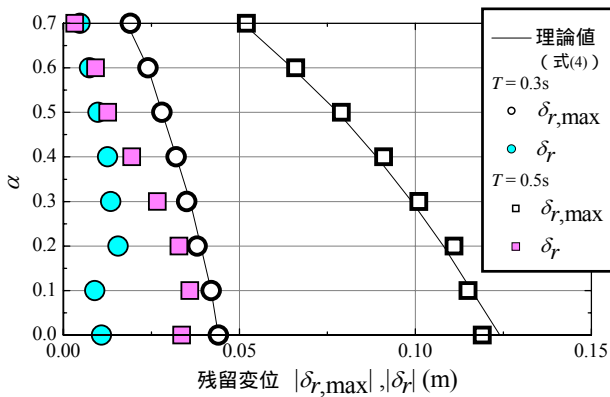


図-8 残留変位 $\delta_{r,max}$ 、 δ_r と α の関係

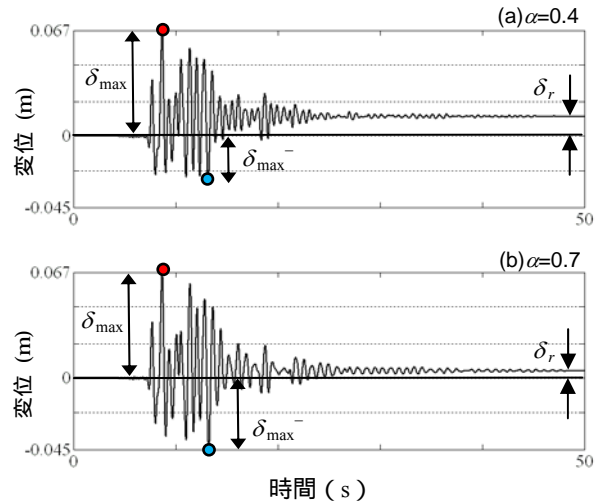


図-9 変位応答時刻歴 ($T=0.3$ 秒, $\alpha=0.4, 0.7$)

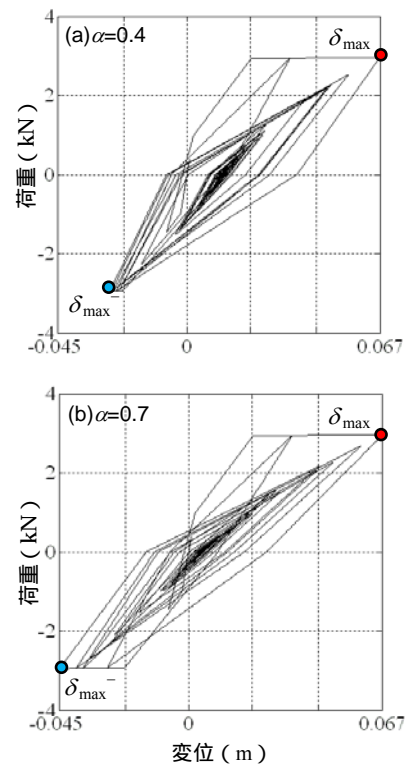


図-10 履歴形状 ($T=0.3$ 秒, $\alpha=0.4, 0.7$)

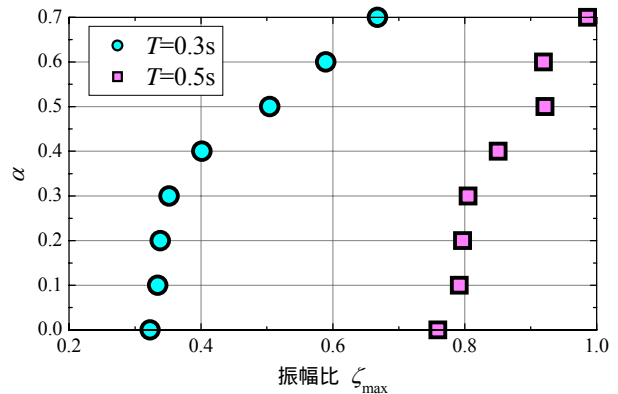


図-11 振幅比 ζ_{max} と α の関係

4. 残存耐震性能と修復性能の関係

前章の検討結果より被災した建築物の残存耐震性能を表す耐震性能低減係数 η と被災した建築物の修復性能を表す残留変位比 γ_r に共通のキーパラメータが除荷剛性低下指数 α であることが分かった。そこで、前章と同様の1自由度振動系を対象に、弾性固有周期 T を0.5秒、Takedaモデルに用いる除荷剛性低下指数 α を0.0から0.7まで0.1刻みの8通りとする地震応答解析によるパラメトリックスタディを行い、建築物の震後安全性能および修復性能について要求される性能レベルを共に満足する構造特性がどのように表わされるのか基礎的な検討をした。入力地震動は、前章と同じ強震記録(JMA Kobe 1995(NS波))に、除荷剛性低下指数 α が0.0のときの最大応答塑性率 μ が3となる倍率を乗じ、全てのパラメータに対して同じ大きさの地震動が入力されるものとした。表-1に最大応答塑性率 μ が3となる倍率を乗じた地震動の最大加速度を示す。

表-1 $\mu=3$ となるとき地震動の最大加速度

地震	最大加速度 (gal)	
	原波	T=0.5
Kobe	804.6	738.3

図-12は除荷剛性低下指数 α と応答塑性率 μ との関係を示したグラフである。Takedaモデルでは除荷剛性低下指数 α の値が増大するのに伴い、最大応答塑性率 μ が増大すると考えられるように、固有周期 $T=0.5$ 秒では α が増大するのに伴い μ が増大する傾向がみられた。

図-13は除荷剛性低下指数 α と残留変位比 γ_r および耐震性能低減係数 η との関係を表したグラフである。なお、残存耐震性能と修復性能の善し悪しを同じ向きに表現するため、図-13の縦軸を $1-\eta$ で示した。 α が増大すると応答塑性率 μ が増大するのに伴い $1-\eta$ が増大し、残存耐震性能が低下する。一方、 $\alpha=0.2$ から $\alpha=0.6$ の区間において α が増大すると γ_r は減少し修復性能が向上する。

ここで、設計時に満たすべき要件として、 γ_r および $1-\eta$ の満たすべき条件が与えられたとき、与条件を同時に満たす構造特性パラメータ(ここでは除荷剛性低減係数 α)を求めることで、安全性能(残存耐震性能)および修復性能に関する要求性能を満たす設計が可能になると考えられる。たとえば、図-13において $1-\eta=0.6$ となることを目標残存耐震性能とし、 $\gamma_r=0.3$ となることを目標修復性能とする場合、両目標性能を同時に満たす構造特性(ここでは除荷剛性低減係数 α に相当)をグラフより求めることができる。すなわち、 $\alpha=0.4$ であれば目標残存耐震性能を満足し、 $\alpha=0.3$ であれば目標修復性能を満足する。このとき、両目標性能を同時に満たす構造特性

は $\alpha=0.3$ かつ $\alpha=0.4$ であることが読み取れる。

上記の方法は、複数の目標性能を満足する構造特性パラメータの最適解を求める極めて基本的かつ簡単な方法であるが、今後、この基本的な概念を、実際の構造物を設計する際に必要となる構造特性パラメータの最適解を得る設計支援技術へと拡張すべく、検討を進める予定である。

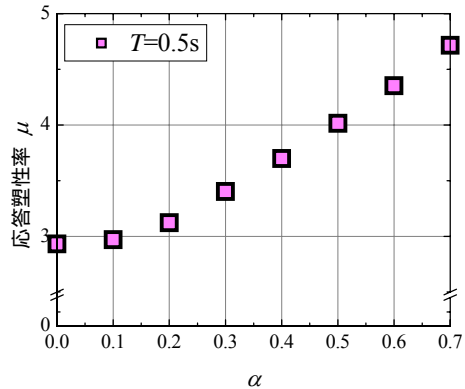


図-12 応答塑性率 μ と α の関係

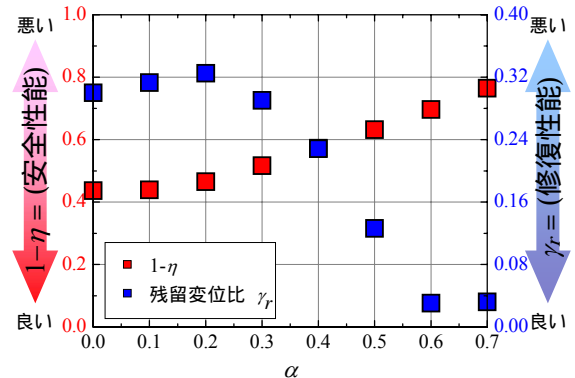


図-13 残存耐震性能および修復性能と α の関係

5. まとめ

本論文では、被災RC構造物の耐震性能評価において、残存耐震性能および修復性能を表す因子について解析的な検討を行った。残存耐震性能を表す因子として最大応答変位および復元力特性から計算される耐震性能低減係数 η に着目した。また、修復性能に関する因子として地震応答終了時の残留変位に着目した。それぞれの因子について震源近傍の強震動を対象とした地震応答解析によるパラメトリックスタディを行い、残存耐震性能と修復性能を求めるための検討を行った結果、2つの目標性能を満足する構造特性パラメータの最適解を求める基礎的な構造特性を得ることができた。今後、詳細な検討を用いて、設計の最適解を算出することができると考えられる。

参考文献

- 1) たとえば 新井組技術研究部ほか：「特集：平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震被災調査報告， - ジュネス六甲 - 」，新井組技術研究報告集，第 8 号，1995.10
- 2) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2001.9
- 3) Park, Y. J. and Ang, A. HS.: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, Apr. 1985.
- 4) 桑原里紗，高橋典之，中埜良昭：RC 構造物の非線形地震応答解析に基づく残存耐震性能評価の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1027-1032，2007.7
- 5) 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，日本建築学会，2004.1
- 6) 康大彦，田中康介，前田匡樹，井上範夫：サブストラクチャー擬似動的実験による震災 RC 造建築物の残存耐震性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1093-1098，2002.