論文 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

桑原 里紗*1·高橋 典之*2·中埜 良昭*3

要旨:本論文では,鉄筋コンクリート構造物の残存耐震性能評価手法について,内陸直下型地震動を対象とした非線形地震応答解析を行い,既往の研究で定義されている最大応答変位と復元力特性から計算され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相関関係にあるのかを調べるとともに,耐震性能を表す他の指標(損傷指標)との関係について検討した。

キーワード:鉄筋コンクリート構造,残存耐震性能,性能評価指標,地震応答解析

1. はじめに

地震により被災した建築物について,継続使 用や補修・補強の要否判定を下すには、建築物 が有する真の残存耐震性能を評価することが必 要である。被災度区分判定基準 ¹⁾では、被災し た建築物の鉛直力を支持する構造部材を5段階 の損傷度ごとに分類し、各損傷度に分類された 鉛直力支持部材数の全鉛直力支持部材総数に対 する割合に、各損傷度と対応する耐震性能低減 係数nを乗じて, 耐震性能残存率 R を算出し, これにより建築構造物の被災度を判定している。 このとき耐震性能低減係数ヵは、静的載荷時に 得られた部材の残留ひび割れから推定される残 留変位およびその載荷サイクルにおける最大変 位から求められる履歴エネルギーに基づき定義 されており、基準 ¹⁾に示されていない部材およ び架構については、耐震性能低減係数nと損傷 度との関係を実験的に検証する新たな取り組み も見られる²⁾。

しかし、曲げひび割れが卓越する部材のよう に、部材の残留変位と残留ひび割れ幅が概ね比 例する場合、静的載荷時において最大変位 *δ*_{max} とその同一載荷サイクルにおける除荷時残留変 位から推定される損傷度は、動的載荷時におい てこれと等しい最大変位δ_{max} を経験した場合に あってもその応答終了時の残留変位から推定さ れる損傷度とは一致しない可能性がある。その 場合,動的載荷時の残留変位から判断された損 傷度に基づいて,耐震性能低減係数として静的 載荷時の履歴から定まる耐震性能低減係数ηを 適用すると,残存耐震性能を適切に評価してい ないことになる恐れがある。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート構造物 の残存耐震性能を適切に評価する指標を検討す るために、構造物を簡単な1自由度系とみなし、 系の復元力特性、履歴則、固有周期を解析パラ メータに、内陸直下型地震動を対象とした非線 形地震応答解析を行った。さらに、最大変位か ら計算される耐震性能低減係数ηに対して、残 留応答変位から計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相関関係にあるか を調べるとともに、Park & Ang の損傷指標³⁾と の対応について検討を行った。

2. 本論文で対象とする残存耐震性能評価指標

2.1 耐震性能低減係数ηとη*

(1) 耐震性能低減係数ηの定義

被災度区分判定基準 ¹⁾で示されている耐震性

- *1 東京大学生産技術研究所 修士課程 (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)

-1027-

能低減係数 η は次のように求められる。まず, 単調載荷時の荷重 - 変形関係で履歴が表される ものとしたとき,終局変位 δ_u までの履歴面積を 全エネルギー吸収能力 E_{max} とし,最大応答変位 $\delta_{max,D}$ と最大応答と同一載荷サイクルにおける 除荷時残留変位 δ_{rs} とを結ぶ直線が囲む履歴面 積を消費エネルギー E_d とし,両者の差($E_r=E_{max}$ $-E_d$)を残存エネルギー吸収能力 E_r と定める。 各履歴エネルギーの分類を図-1に示す。

このとき、耐震性能低減係数 η は全エネルギー吸収能力 E_{max} に対する残存エネルギー吸収能力 E_r の割合として次式のように定義される。

$$\eta = \frac{E_r}{E_d + E_r} \tag{1}$$

本論文では、地震応答解析における最大変位 $\delta_{max,D}$ を図ー1および(1)式に当てはめて、耐震性 能低減係数 η を計算した。

(2) 耐震性能低減係数 η^{*}の定義

地震応答解析から得られる残留変位 $\delta_{r,D}$ に対応する除荷剛性を用いて最大変位 $\delta_{max,S}$ を逆算し、図-2に示すように、最大変位 $\delta_{max,S}$ と残留変位 $\delta_{r,D}$ とを結ぶ直線が囲む履歴面積を消費エネルギー E_d^* として、(1)式の $E_d \approx E_d^*$ に置換した値を耐震性能低減係数 η^* と定義した。

2.2 残留変位比

前節に示した耐震性能低減係数 $\eta \ge \eta^*$ の違い は、耐震性能低減係数を計算する際に、地震応 答解析で得られた最大変位 $\delta_{max,D}$ を用いるか残 留変位 $\delta_{r,D}$ を用いるかの違いである。最大変位 $\delta_{max,D}$ については、非線形地震応答解析を用いる 以外にも様々な推定手法が提案されている⁴⁾が、 残留変位 $\delta_{r,D}$ については、非線形地震応答解析 以外の推定手法は確立されていない。そのため、 残留変位 $\delta_{r,D}$ を対象とした研究では、最大変位 $\delta_{max,D}$ に対する定性的あるいは定量的な傾向を 残留変位比 γ を用いて説明することが多い。こ こに残留変位比 γ は、最大応答変位に対する残 留変位の比($\delta_{r,D}/\delta_{max,D}$)として表される。鉄筋 コンクリート構造部材を対象とした残留変位比が0~



図-1 履歴エネルギーの分類と名称の定義¹⁾



図-2 消費エネルギーE_d*の定義

0.5の区間にばらつき⁵⁾, そのばらつき具合は除 荷剛性に依存する可能性が指摘されている⁶⁾。

残留変位比_ル 自体は建物の残存耐震性能を直 接測る指標ではないが,耐震性能低減係数ηと η^{*}の関係を検討する上で重要な指標であると考 え,本論文の検討対象指標に含めた。

2.3 Park & Ang の損傷指標

残存耐震性能という表現は用いられていない が,提案されている損傷指標の多くは,残存耐 震性能を[0,1]区間に基準化して表現したもの であると言い換えられる。本論文では,鉄筋コ ンクリート部材の損傷指標として,(2)式で表さ れる,最大応答変位と履歴エネルギーの吸収を 考慮した Park & Ang の損傷指標³⁾を用いた。

$$D = \frac{\delta_{\max}}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE$$
 (2)

ここに、D:損傷指標、 δ_{max} :最大変位、 δ_{u} :終局 塑性変位、 Q_{y} :降伏強度、 β :正の定数 (0.15)、 dE:履歴エネルギーの吸収増分である。Dが1 を超えると崩壊状態になるものとして定められた指標である。

本論文では、耐震性能低減係数 nおよび n^{*}と 損傷度との対応を検討する際に、連続量で表示 可能な Park & Ang の損傷指標が損傷度(5 段階 表示)を代用する指標と考え検討対象とした。

3. 地震応答解析

3.1 解析モデル

対象とするRC構造物が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。系の復元力特性は、降伏荷重を Q_y 、 降伏時変位を δ_y とおくと、ひび割れ強度 Q_c が降 伏荷重の 1/3 (= Q_y /3)、ひび割れ強度時の変位& が降伏時変位の 1/10 (= δ_y /10)であるとした。 降伏後剛性は弾性剛性の 1/1000 とした。履歴則 には Takeda Model を用いた。減衰は瞬間剛性比 例型とし、減衰定数を 5%とした。

3.2 解析パラメータ

系のベースシア係数 $C_0 \ge 0.3$,終局塑性率 μ_u を6と定め、解析パラメータとして、弾性固有 周期 T は 0.2 秒, 0.3 秒, 0.4 秒および 0.5 秒の 4 通り、Takeda Model に用いる除荷剛性低減指数 $\alpha \ge 0.0$ から 0.7 まで 0.1 刻みの 8 通り設定した。 ちなみに除荷剛性低減指数 α は、除荷剛性 K_r の 変数として、

$$K_r = \frac{Q_y + Q_c}{\delta_y + \delta_c} \cdot \left| \frac{\delta_p}{\delta_y} \right|^{-\alpha}$$
(3)

と表される。ここに、δ_ρ:除荷直前の折り返し 点変位である。

3.3 解析手法

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))とした。その際, 目標塑性率 μ r 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,最大塑性率が目標 塑性率 μ r に対して 4%以内になるまで繰返し計 算を行った。なお, μ =2 以下を設定したのは, 比較的軽微な損傷を受けた構造物の残存耐震性 能を検討するためである。

4. 解析結果

4.1 分析用因子の抽出

はじめに、本論文で対象としている耐農性能 低減係数ηおよびη[•]の算定に必要な変数を整理 する。耐震性能低減係数ηおよびη[•]の算定には 履歴特性を示す様々な変数が必要となるが、そ の中でも最大変位δ_{max} と残留変位&が重要な変 数であると仮定し、それ以外の様々な変数(履 歴特性を表す変数,入力地震動を表す確率変数、 非線形地震応答解析の計算精度を表す誤差変数 など)を*X*および誤差項*s*としてまとめると、(4) 式のような確率関数で表される。

$$\eta^{*} = f_{1}(\delta_{\max,S}, \delta_{r,D}, X) + \varepsilon$$

$$\eta = f_{1}(\delta_{\max,D}, \delta_{r,S}, X) + \varepsilon$$
(4)

ここでを用いると、地震応答解析で得られた最 大変位 $\delta_{max,D}$ と同一載荷サイクルにおける残留 変位 δ_{s} 、および、地震応答解析で得られた残留 変位 δ_{D} と最大応答変位 $\delta_{max,S}$ との関係は(3)式か ら確定的に定式化され、

$$\delta_{r,s} = g(\alpha, \delta_{\max,D})$$

$$\delta_{\max,s} = g^{-1}(\alpha, \delta_{rD})$$
(5)

と表される。(5)式より(4)式に含まれる変数を整 理すると、

$$\eta^{\bullet} = f_2(\alpha, \delta_{r,D}, X) + \varepsilon$$

$$\eta = f_2(\alpha, \delta_{\max,D}, X) + \varepsilon$$
(6)

となる。ここで残留変位比ルが渡邉ら5)により,

$$\gamma_p = \frac{\delta_{r,D}}{\delta_{\max,D}}$$
(7)

で定義されていることを踏まえると(6)式は、

$$\eta^* = f_2(\alpha, \gamma_p, \delta_{\max,D}, X) + \varepsilon$$

$$\eta = f_2(\alpha, \delta_{\max,D}, X) + \varepsilon$$
(8)

のようにまとめることができる。(8)式の最大変 位 $\delta_{max,D}$ は降伏変位 δ_i で除すことで目標塑性率 μ_T に置換可能である。また、3.2節のパラメー タ設定において降伏変位 δ_i は弾性固有周期Tで 一意に決まることから、(8)式は、

$$\eta^* = f_3(\alpha, \gamma_p, T, \mu_T, X) + \varepsilon$$

$$\eta = f_3(\alpha, T, \mu_T, X) + \varepsilon$$
(9)

のように表すことができる。(9)式は、耐震性能 低減係数ηとη[•]との関係を分析するのにあたり、



図-6 Tと γ_o の関係

図-7 $\alpha \geq \gamma_0$ の関係

図-8 μ_{τ} と γ_{s} の関係

3.2 節に示した解析パラメータ(固有周期 T,除 荷剛性低減指数 α,目標塑性率 μT)と残留変位 比_pが,分析対象因子となり得ることを示して いる。以上より次節では,固有周期 T,除荷剛 性低減指数 α,目標塑性率 μT および残留変位比 p_pが,耐震性能低減係数 η と η^{*} との関係にどのよ うに影響しているのかを分析する。

4.2 η^*/η および γ_p に与える T, α , μ_T の影響

耐震性能低減係数ηとη^{*}の間に比例関係が認 められる場合,地震後の建物の残留変位から推 定される損傷度とそれに応じた耐震性能低減係 数η^{*}に補正係数を乗じるだけで,静的載荷時の 結果と整合性を持たせた耐震性能低減係数ηに 換算することができるはずである。そこで,耐 震性能低減係数ηに対する耐震性能低減係数η^{*} の比η^{*}/ηに着目し,(9)式においてηとη^{*}の共通 因子となっている固有周期 T,除荷剛性低減指 数αおよび目標塑性率μτ がη^{*}/ηの分布にどのよ うな影響を与えているかを検討した結果を,図 -3~図-5に示す。また,(9)式においてη^{*}にの み変数として含まれている残留変位比₇ が, η^{*}/ηとどのような関係にあるのかを調べるため に,その予備解析として,残留変位比_βの分布 とその他の共通因子(固有周期 *T*,除荷剛性低 減指数αおよび目標塑性率μ_T)の関係を,**図**-6 ~**図**-8に示す。

図-3は、耐震性能低減係数 η に対する η ^{*}の比 η ^{*}/ η と固有周期 T との関係を示したグラフであ る。 η ^{*}/ η の分布が正規分布に従うものと仮定す ると、T=0.2 秒で η ^{*}/ η の平均 μ = 1.248 および標 準偏差 σ =0.231、T=0.3 秒で μ = 1.462 および σ =0.316、T=0.4 秒で μ = 1.411 および σ =0.222、 T=0.5 秒で μ = 1.360 および σ =0.318 となる。固 有周期 T に関わらず、 η ^{*}/ η は 1~1.8 の領域に分 布している。

図-4は、 η'/η と除荷剛性低減指数 α との関係 を示したグラフである。図-3 同様に η'/η の分 布が正規分布に従うものと仮定すると、 α =0.0 で η'/η の平均 μ =1.408 および標準偏差 σ =0.304, α =0.7 で μ =1.317 および σ =0.268 である。 α が 大きくなると η'/η の平均値 μ および標準偏差 σ が 僅かに小さくなるが、 η'/η 分布に α が強く影響し ているとは言えない。

図-5は、 η'/η と目標塑性率 μ との関係を示

したグラフである。これまで 同様 η' / η の分布が正規分布に 従うものと仮定すると、 μ_T = 1.5 で η' / η の平均 μ =1.080 お よび標準偏差 σ =0.023、 μ_T =2 で μ =1.153 および σ =0.026、 μ_T =3 で μ =1.358 および σ =0.064、 μ_T =4 で μ =1.794 および σ =0.109 である。 μ_T が 大きくなるにつれ、 η' / η の平 均 μ および標準偏差 σ ともに 大きくなるが、 μ_T が2以下の 場合と、 μ_T が3以上の場合と で、 η' / η の分布の形状が大き く異なっている。すなわち、



図-9 各 μ_T における $\eta^*/\eta \ge \gamma_B$ の関係

 μ_{T} が2以下では、 η^{*}/η が殆どばらつきなく分布 しているが、 μ_{T} が3以上では、 η^{*}/η が大きくば らついて分布している。

図-6は、残留変位比かと固有周期 T との関 係を示したグラフである。残留変位比かの分布 が正規分布に従うものと仮定すると、T=0.2 秒 でかの平均 µ =0.191 および標準偏差σ=0.077、T =0.3 秒で µ =0.124 およびσ=0.063、T=0.4 秒で µ=0.152 およびσ=0.102、T=0.5 秒で µ=0.162 およびσ=0.068 である。固有周期 T に関わらず、 % は 0~0.35 の領域に分布している 。

図-7 は、残留変位比かと除荷剛性低減指数 α との関係を示したグラフである。 図-6 同様に γ_p の分布が正規分布に従うものと仮定すると、 $\alpha = 0.0$ で γ_p の平均 $\mu = 0.217$ および標準偏差 $\sigma = 0.095$, $\alpha = 0.7$ で $\mu = 0.096$ および $\sigma = 0.053$ で ある。 α が大きくなるにつれ γ_p の平均 μ および標 準偏差のが小さくなる傾向にある。

図-8は、残留変位比 γ_{p} と目標塑性率 μ_{T} との 関係を示したグラフである。これまで同様 γ_{p} の 分布が正規分布に従うものと仮定すると、 μ_{T} = 1.5 $\sigma_{\gamma_{p}}$ の平均 μ =0.096および標準偏差 σ =0.052、 μ_{T} =2 σ_{μ} =0.159および σ =0.068、 μ_{T} =3 σ_{μ} = 0.196および σ =0.081、 μ_{T} =4 σ_{μ} =0.177および σ =0.089 である。 μ_{T} が大きくなるにつれ、 γ_{p} の 平均μおよび標準偏差σはともに大きくなる傾向にある。

以上より,耐震性能低減係数 η に対する耐震 性能低減係数 η ^{*}の比 η ^{*}/ η は,固有周期Tおよび 除荷剛性低減指数 α による影響は小さく,目標 塑性率 μ r の影響を強く受けることが分かった。 一方,残留変位比 β は,固有周期Tによる影響 は小さいが,除荷剛性低減指数 α および目標塑 性率 μ r の影響を受けることが分かった。すなわ ち, η ^{*}/ η と β がともに強く従属している変数は 目標塑性率 μ r であるということが分かった。そ こで次節では,目標塑性率 μ r の値を固定して η ^{*}/ η と β との関係を調べることとする。

4.3 $\eta'/\eta \geq \gamma_p \geq 0$ 関係

図-9 は、各目標塑性率 μ に対して、 η'/η と 残留変位比 β との関係を示したグラフである。 回帰分析を行った結果、 μ が大きくなるにつれ η'/η と残留変位比 β との相関係数は小さくなる が、相関係数が最も大きい場合でも r=0.59 であ ることから、 η'/η と残留変位比 β との間に強い 相関は見られないということが分かった。

さらに図-9より,目標塑性率 μ_T が 1.5 および 2 の場合を「中小変形構造物」,目標塑性率 μ_T が 3 および 4 のときを「大変形構造物」と仮 定したとき,中小変形構造物では η^2/η は 1.1 程



図-10 各 η*, η と D の 関係

度で殆どばらつかないが、大変形構造物では η'/η は 1.5~2 にばらつくことが分かった。すな わち、大きな変位を経験した建物ほど、残留変 位から推定される耐震性能低減係数 η *を基準¹⁾ で定められている耐震性能低減係数 η に補正す るのが難しいことを示している。

4.4 耐震性能低減係数と損傷指標の関係

基準¹⁾では損傷度に対する耐震性能低減係数 ηの目安が示されているが,損傷度が5 段階区 分表示であるため、損傷度と耐震性能低減係数 ηの関係を定量的に分析するのは難しい。そこ で,損傷度を連続量である Park の損傷指標 D に置換できると仮定すると、耐震性能低減係数 ηと損傷指標 Dの関係は図-10 左端のグラフで 表され, ηとDは相関係数 r=0.97 という高い相 関を示した。一方,本論文で検討した耐震性能 低減係数n*と損傷指標 Dの関係を、中小変形構 造物と大変形構造物とに分けて図-10 中央お よび右端のグラフに示すと、どちらのグラフに おいても n と D に高い相関は見られなかった。 ただし、D-η回帰直線の傾きをη*/ηの平均値 (中小変形構造物で 1.112, 大変形構造物で 1.572) で除した換算回帰直線を, D-ŋ回帰直 線の切片 (n^{*}=0, D=1.6) を通るように D-n^{*} グラフ上に併記したところ,中小変形構造物で は換算回帰直線と D-n 関係が概ね対応してい るが、大変形構造物では換算回帰直線と D-n* 関係が対応していなかった。

5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の残存耐震性能評価 手法について、内陸直下型地震動を対象とした 非線形地震応答解析を行い、基準¹⁾で定義され 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 を提案し、 $\eta \ge \eta$ の関 係および影響因子について検討した。その結果、 目標塑性率 μ_T が2以下では、小さいばらつきで η を η に換算できると考えられるが、目標塑性 率 μ_T が3以上になると、ばらつきが大きく、 η を η に換算できないと考えられる。

参考文献

- 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
- 2) 崔琥:無補強コンクリート造壁を有する鉄筋コンク リート造建物の残存耐震性能に関する研究,東京大 学博士論文,2006.2
- Park, Y. J. and Ang, A. HS.: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Str. Engng., ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, Apr. 1985.
- 4) 例えば Shibata, A. and Sozen, M.A.: Substitute Structure Method for Seismic Design in R/C, Journal of the Str. Div., ASCE, Vol. 102, No.1, pp.1-18, Jan. 1976.
- 5) 渡辺学歩,川島一彦:断層近傍地震動に対する残留 変位応答の推定に関する検討,日本地震工学会大会 2005 梗概集, pp.478-479, 2005.11
- Ruiz-Garcia, J. & Miranda, E.: Direct Estimation of Residual Displacement from Displacement Spectral Ordinates, Proc. of 8NCEE, Paper No.1101, Apr. 2006.