

論文 残存振動による残留変形抑制効果を発揮させる RC 柱の実験的研究

濱崎 哲也*1・塩屋 晋一*2・門田 基靖*3

要旨:鉄筋コンクリート造建物を対象に大地震時に大変形を経験しても、構造体の損傷を軽微に留め、残留変形角を使用上問題にならない程度に抑制する技術の開発を目指している。最下層の1階の柱を対象に、最大応答変形後の残存振動により残留変形抑制効果を発揮させるRC柱の準静的加力実験を行い、残存振動による残留変形の抑制効果と、残留変形角を抑制する主変数および残留変形角を1/400rad. 以内に抑制する条件を明らかにした。
キーワード: 鉄筋コンクリート, 柱, 残留変形角, 復元性, 制震構造, 損傷抑制

1. はじめに

本研究は鉄筋コンクリート造(以後, RC造)建物を対象にし、大地震時に大変形(層間変形角Rが1/50rad.程度の変形)を経験しても構造体の損傷程度を軽微に留め、残留する層間変形角を使用上問題にならない程度(1/400rad.以内)に抑制する技術と設計方法の開発を目指している。

図-1に想定する大地震時の架構の降伏機構を示す。塩屋らは1階の柱を対象にした加力破壊実験を行い、復元モーメントによる柱の残留変形角の抑制効果を明らかにしている¹⁾。そこでは、ある一定の復元モーメントが確保される場合には、柱の残留変形角の抑制を1/400rad.以内に抑制できることを確認している。梁端が曲げ降伏する2階以上の梁についても残留変形の抑制方法について検討を行っており、別報で報告する予定である。

本論文では、1階の柱を対象にして最大応答変形後の残存振動により残留変形抑制効果を発揮させるRC柱の準静的加力実験について述べて、残存振動による残留変形の抑制効果、損傷抑制状況および残留変形の収束状況を定量的に明らかにし、実験結果に基づき、残留変形を許容範囲内に抑制する条件を検討した結果を述べる。

2. 1階の柱の残留変形抑制機構

2.1 復元モーメントと復元モーメント比 γ

1階の柱には長期荷重により既に鉛直のプレストレスが存在する。図-2に示すように柱脚が曲げ降伏する時、長期荷重による軸力NのモーメントMn(以後、復元モーメント)が、引張降伏して塑性伸びを生じた主筋の圧縮抵

抗力により、塑性回転角を残留させようとする降伏モーメント成分sMyを上回ると、塑性回転角は急激に減少する。

本研究ではsMyに対するMnの比(Mn/sMy)を復元モーメント比 γ と定義している^{1),2)}。静力学的には γ が1より大きいと塑性回転角は大きく減少し、1以下であれば減少しない。実験と解析²⁾により、曲げ耐力時の γ を1.25以上にすると、降伏後の残留変形は急激に減少することを立証している。しかし、設計では柱に作用させる軸力と、確保すべき柱の水平耐力の関係により γ は0.5から1.3になり、1.25以上を確保するのは難しい。

2.2 残存振動と実験の準静的加力

最大応答変形直後の残存振動は、残存する地動(以後、残存地動)と自由振動の成分からなる。井上らは、鋼構造建物を対象にして、残存地動を無視して自由振動しながら、減衰エネルギーと塑性エネルギーにより振動が減衰して、残留変形が一定値に収束するとしている。これによる残留変形は、残留変形を抑制する目的であれば安全側の推定値となるとしている。建物の全ての部材の履歴特性を同形状にすることを前提とすると、部材の復元性は建物の復元性と等価になり、部材自体の履歴特性で振動を考えることができる。

部材だけで残留変形を抑制する性能を検証するのであれば、残存地動を無視してまず、自由振動だけにより最終的に決定する残留変形でその抑制性能を検証することは、安全側で検証することになる。文献1)の実験は、自由振動だけを考慮した残存振動の準静的加力を行っている。

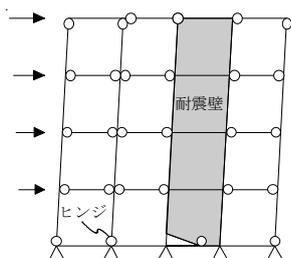
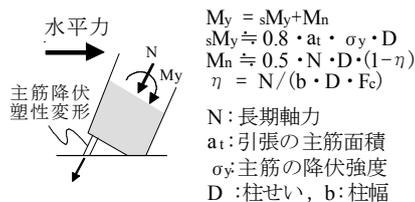


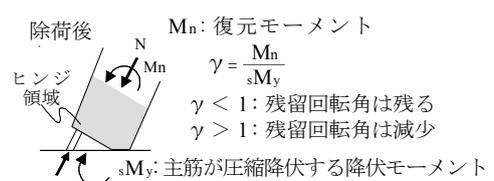
図-1 想定する降伏機構



(a) 水平力を受ける時のヒンジの抵抗モーメント

$$\begin{aligned}
 M_y &= sM_y + M_n \\
 sM_y &\doteq 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D \\
 M_n &\doteq 0.5 \cdot N \cdot D \cdot (1 - \eta) \\
 \eta &= N / (b \cdot D \cdot F_c)
 \end{aligned}$$

N: 長期軸力
 a_t : 引張の主筋面積
 σ_y : 主筋の降伏強度
D: 柱せい, b: 柱幅



(b) 除荷時の復元モーメントと塑性回転角を残すモーメント

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \frac{M_n}{sM_y} \\
 \gamma < 1: & \text{残留回転角は残る} \\
 \gamma > 1: & \text{残留回転角は減少}
 \end{aligned}$$

sM_y : 主筋が圧縮降伏する降伏モーメント

図-2 ヒンジの塑性回転角の抑制メカニズム

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)
 *2 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 博士(工学) (正会員)
 *3 株式会社大林組 元鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生

2.3 残存振動による残留変形抑制と残された課題

柱脚に曲げひび割れが発生し、主筋は抵抗せずに軸力だけによるモーメントで、水平力のモーメントに抵抗する場合を考える。コンクリートは柱脚の曲げひび割れ位置以外は弾性範囲にあり、水平力は曲げ圧縮域の摩擦で十分に伝達されるものとする。正負の水平力が加力されると、柱のせん断力-変形角関係は図-3(a)の実線の曲線の関係になる。しかし、コンクリートに損傷が生じて塑性ひずみが大きく生じると、減力時に点線のような曲線になる。更に最大経験変形角が大きくなると一点鎖線の曲線になる²⁾。一方、柱では軸力が零に近づくとその場合の履歴特性は主筋だけで曲げ抵抗する梁の履歴特性に近づく。軸力が零の場合は梁と同じになり図-3(b)のような最大経験点を目指す履歴になる。軸力と主筋が同時に抵抗する場合は図-3(a)、(b)の履歴特性を合成した形の履歴特性(図-3(c))に近づくと思なせる。変形履歴は同じになるので、それらを合わせる割合は、それぞれの水平耐力の割合で近似でき、柱脚の負担モーメントにおける割合に近くなる。これは前述の γ で近似できる。

文献1)では復元モーメント比 γ が異なる場合で、残存振動による残留変形を決定する加力を一部行っている。静的加力により決定する残留変形に対し、残存振動により決定する残留変形は極めて小さくなることを実証している。課題として、復元モーメント比 γ と最大経験変形角 R_{max} を系統的に変化させた場合の実験データの収集と、

残留変形を許容範囲に抑制する条件の解明が残されている。

3. 残留変形抑制効果を発揮させるRC柱の加力実験

上述の課題を解明するため柱の準静的加力実験を行った。

3.1 実験概要

(1) 試験体

図-4に試験体の形状と寸法を示す。試験体の縮尺は実大の約1/4とした。No.7は $pt=0.53\%$ 、No.8は $pt=0.95\%$ である。表-1に試験体の一覧を示す。これまでの試験体¹⁾と異なり、残存振動の加力により残留変形を特定している。No.7とNo.8は柱脚側のヒンジ領域では損傷抑制を行っている。損傷の抑制方法は平石ら³⁾の方法に従った。曲げ危険断面から柱せいDの1/2の区間(100mm)の付着を無くした。その処理は鉄筋にグリースを塗り、筒状に整形した厚さ0.2mmの塩ビシートを巻く方法とした。またヒンジ領域の曲げひび割れを防止するために用いる補筋筋を上スタブまで延長して、柱頭の曲げ補強も行った。これらの試験体では下のスタブ内にヒンジ領域の圧縮力を負担させる圧縮抵抗筋は配筋しなかった。

表-2に使用材料の力学的特性を示す。粗骨材の最大寸法は13mmとした。打設は縦打ちとして、下スタブとそれより上方部分を2回に分けて打ち継いだ。

(2) 加力方法と加力履歴

加力状況を図-5に示す。加力は一定の軸力を作用させ、各目標の最大経験変形角 R_{max} で残存振動加力を行い、図-8のように残留変形角 r_{Re} を特定した。その後、軸力を低減して同じ R_{max} で繰り返す。水平力の加力高さは反曲点高さ比 y_0 が0.57となる位置とした。柱の反曲点より下側のせん断スパン比は2.0で上側は1.5となる。

残存振動時の加力履歴は、各目標の最大変形角 R_{max} に達した後は、図-6に示すように除荷時に排出される弾性エネルギー E_e と、負側に載荷して消費される弾塑性歪

表-1 試験体一覧

試験体名(2011)	コンクリート	柱断面	付着無し の処理	曲げ補筋筋
	圧縮強度 F_c (N/mm^2)	$B \times D$ 設計寸法 (mm)		
No.7	39.1	200×200	有	有
No.8				

表-2 使用材料の力学的特性

コンクリート		$E_c(\times 10^4)$	σ_B	$c \epsilon_B(\%)$
		3.39	39.1	0.26
鉄筋	種類	$E_s(\times 10^5)$	σ_y	σ_u
	D10	1.81	379	532
	D13	1.83	350	487

E_c :材料のヤング係数, σ_B :圧縮強度, $c \epsilon_B$:圧縮強度のひずみ度
 E_s :鉄筋のヤング係数, σ_y :降伏強度, σ_u :破断強度

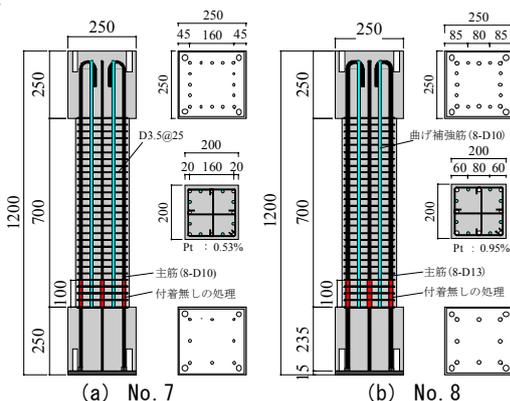


図-4 試験体の形状と寸法

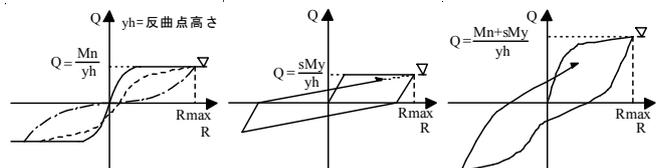


図-3 柱のせん断力-変形角関係の成分と合成

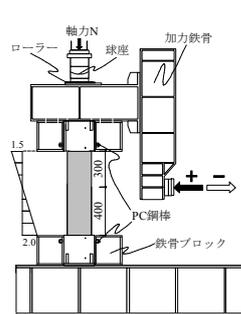


図-5 加力状況

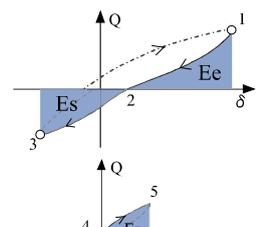


図-6 残存振動による履歴ループ

みエネルギー E_s が等しくなるまで変形を進め、除荷した。この後の除荷時も E_e が塑性エネルギーで消費されるまでこれを繰り返し、 rRe を特定した。そして、目標を次の R_{max} へ移行させた。 R_{max} は1/200, 1/100, 3/200, 1/50, 1/33rad.とした。まず R_{max} で軸力比 η を図-7のように12.7% (No.8は15.9%)から加力を行い、次に η を段階的に下げ、各段階で残存振動の加力を行い、 η の変化により γ を変化させた。 R_{max} は図-8のように正、負の順で目標値とした。減衰による消費エネルギーは無視した。

大地震時の本震の後は相応の余震が生じる。本実験では余震での残留変形の抑制効果を検証するため、図-7に示すように、 R_{max} を1/33rad.から1/100rad.に戻して再び残存振動加力を行った。図-9に変形の測定状況を示す。

4. 実験結果

4.1 損傷抑制

図-10に実験終了時まで確認されたひび割れとひび割れ幅が0.05mm以上のひび割れを示す。図中の番号はひび割れの発生順である。損傷抑制を行った柱脚は3/200rad.で曲げ圧縮縁の柱表面のコンクリートが若干剥離する程度であった。1/33rad.を経験してもわずかな圧縮破壊で留まり、ヒンジ領域の損傷は抑制された。No.8はNo.7より主筋量が多いため柱頭に多数、曲げひび割れが生じたが、0.05mm以上のひび割れは殆ど生じなかった。

4.2 水平荷重-層間変形角関係

図-11にNo.7とNo.8の全履歴の水平荷重-変形角関係の例を示す。余震を想定した加力の履歴は除いている。変形角は層間変形を柱内法長さ700mmで除した。加力は最大経験変形角 R_{max} を正側に設定した場合と負側に設定した場合に分けて残存振動を想定した準静的加力を行っている。図-12, 13に復元モーメント比 γ ごとに正加力側と負加力側に分けて水平荷重-変形角関係を示す。

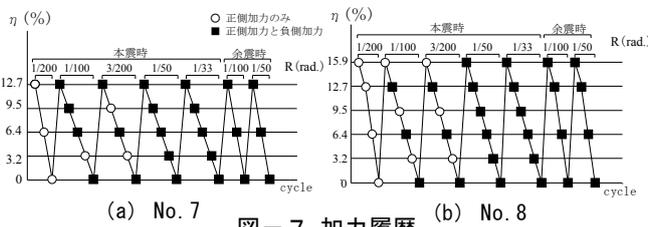


図-7 加力履歴

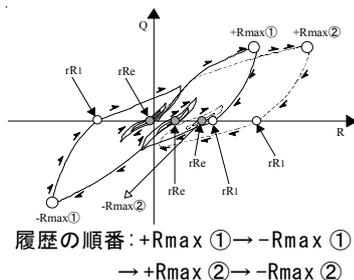


図-8 残留変形の抑制量を特定するための加力履歴

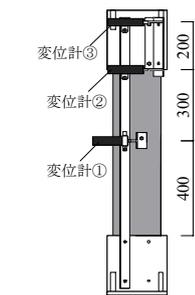


図-9 変形の測定状況

図中に主筋の降伏の時点 Y で、圧縮破壊の時点 C で、包絡線を破線で示す。最大変形角 R_{max} に達した直後の除荷の残留変形角 $rR1$ を●, 最終の残留変形角 rRe を○で示す。●は R_{max} が $\pm 1/33rad.$ の場合しか示していない。

No.7とNo.8とも γ が大きくなると、○が原点近傍に集中し、残存振動により最終的な残留変形角 rRe が抑制できることが確認できる。特に γ が大きいと R_{max} が1/33rad.の場合でも零に近づいている。

図-12(c)や図-13(c)で確認できるように正加力側に比べて負加力側の方が○が原点に集中しており、負加力側の方が残留変形が抑制される傾向が確認できる。これは図-8の R_{max} の履歴で正加力側を先行させて加力を進めるため、負加力側の残存振動時の剛性が正加力側に比べて低下することによる。

図-14に各サイクルの残留変形角-最大経験変形角関係を示す。水平の一点鎖線は1/400rad.とした線である。

この変形角は文献2)の実験中に20名の被験者の全員が視覚的に残留変形が生じていないと判断した限界の変形角で、本研究では視覚的な許容限界値としている。

R_{max} が大きいと残留変形角 rRe は大きくなり、 γ が大きいと rRe は小さく抑制されている。

4.3 残留変形を抑制する条件と変数

図-15に復元モーメント比 γ ごとに rRe と R_{max} の関係を3次元空間で示す。正加力側と負加力側に分けて示している。No.8の正加力側を除くと、 γ が0.5以下の場合、 R_{max} が大きいと rRe は大きくなる。しかし、 γ が0.6以上の場合、 rRe は小さくなり、 R_{max} が大きくても抑制されている。No.8の正加力側は γ が0.6以上の場合でも、 R_{max} が大きくなると rRe も増加している。図-16

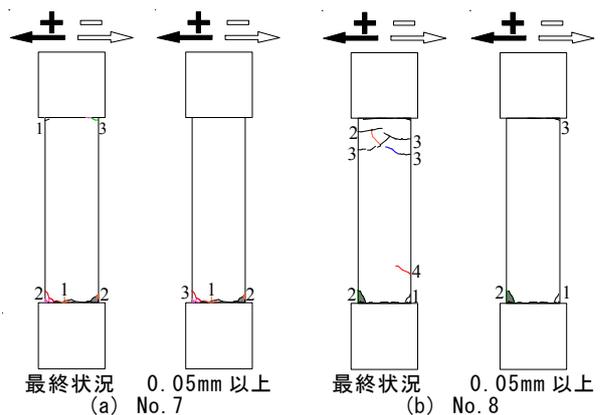


図-10 加力終了後のひび割れ状況

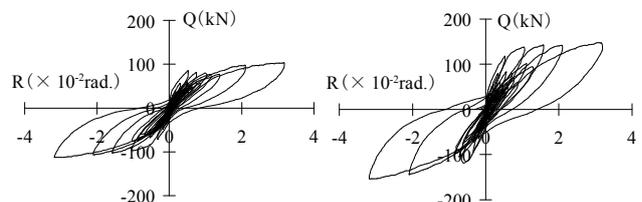


図-11 水平荷重-層間変形角関係

に等高線図を示す。各図中に γ が0.6の線を太線の一点鎖線で示す。いずれの図においてもRmaxが最大の1/33rad.でも残留変形角を許容範囲内の1/400rad.以下に抑制できる結果になっている。今回の試験体は引張鉄筋比が0.53~0.95%で一般的な柱である。このような柱では、 γ を0.6以上にすることが残留変形角を許容範囲内の1/400rad.以内に抑制する条件になる。

図-17に γ に伴う残留変形角rReの関係をRmaxごとに示す。正加力側を示している。灰色の記号は除荷直後の残留変形角rR1で白塗りの記号はrReである。白塗りのrR1に対して灰色のrReは残存振動により抑制されている。その効果はRmaxが大きいくほど大きくなっている。

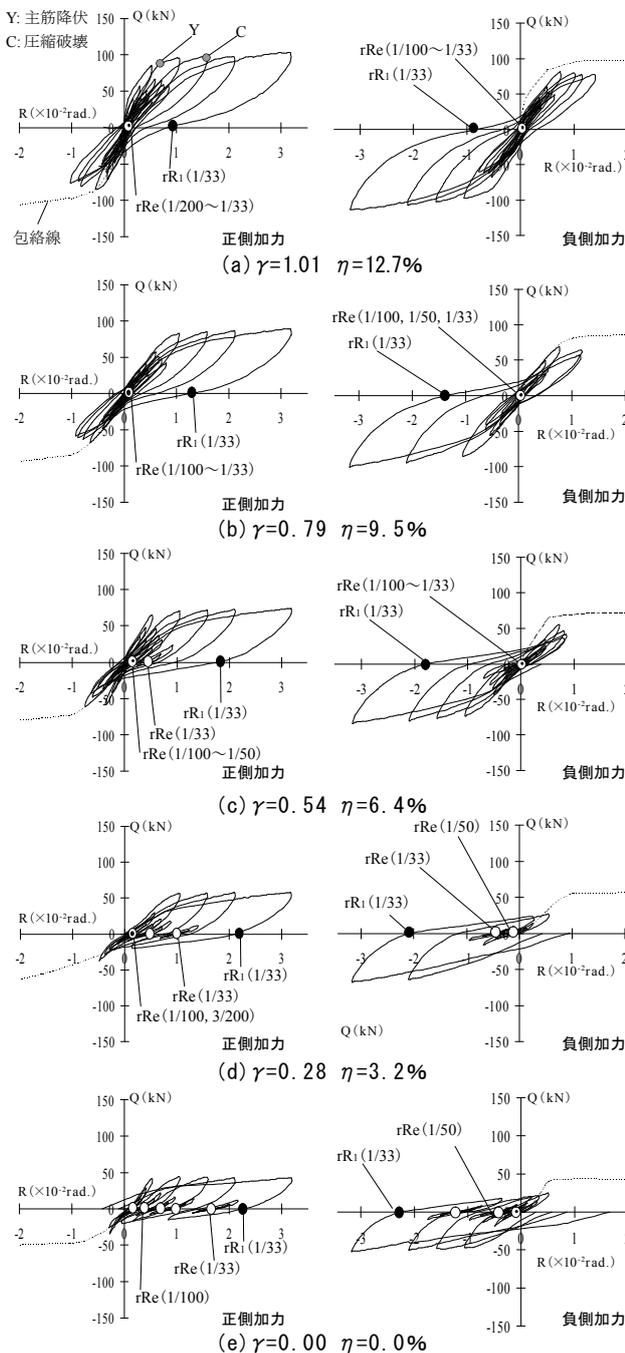


図-12 No. 7の水平荷重一層間変形角関係

γ が0.6より小さいとNo.7とNo.8ではrReに明確に差があるが、0.6より大きいと殆ど差がない。

これらのことから、前節で述べたように残留変形を許容範囲に抑制するために γ を0.6以上にする範囲においては、柱の復元モーメント比 γ を、残留変形を制御する主たる変数として良いと判断できる。

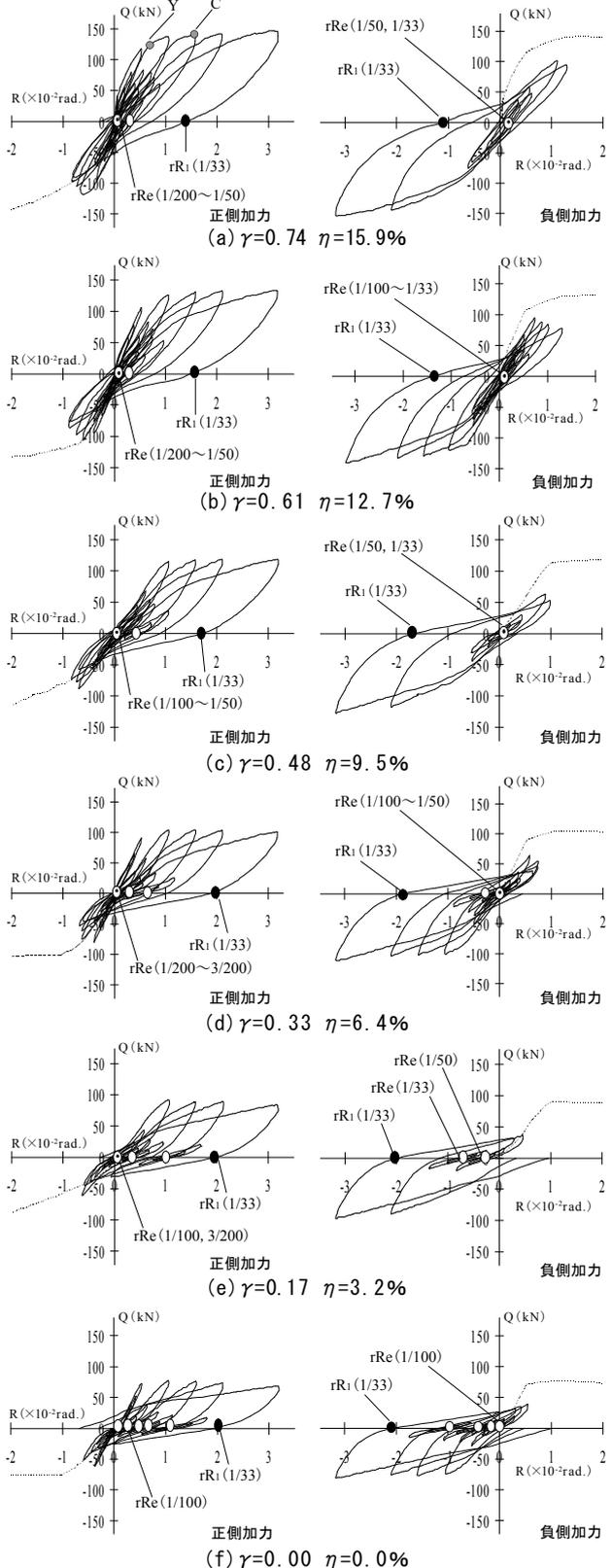


図-13 No. 8の水平荷重一層間変形角関係

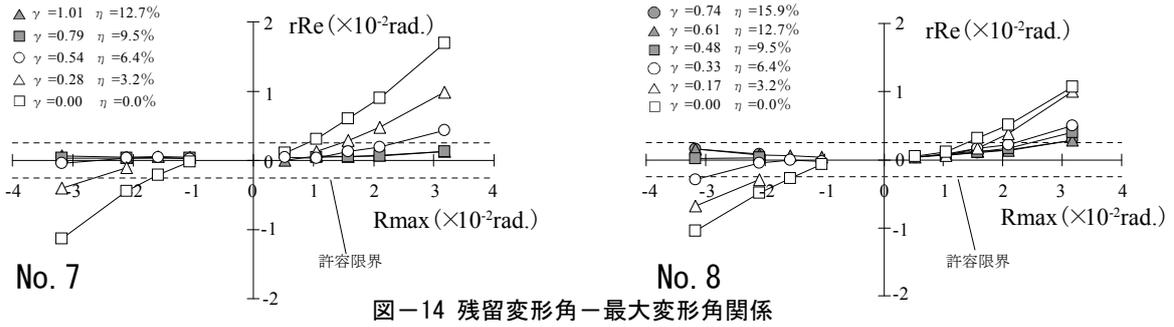


図-14 残留変形角-最大変形角関係

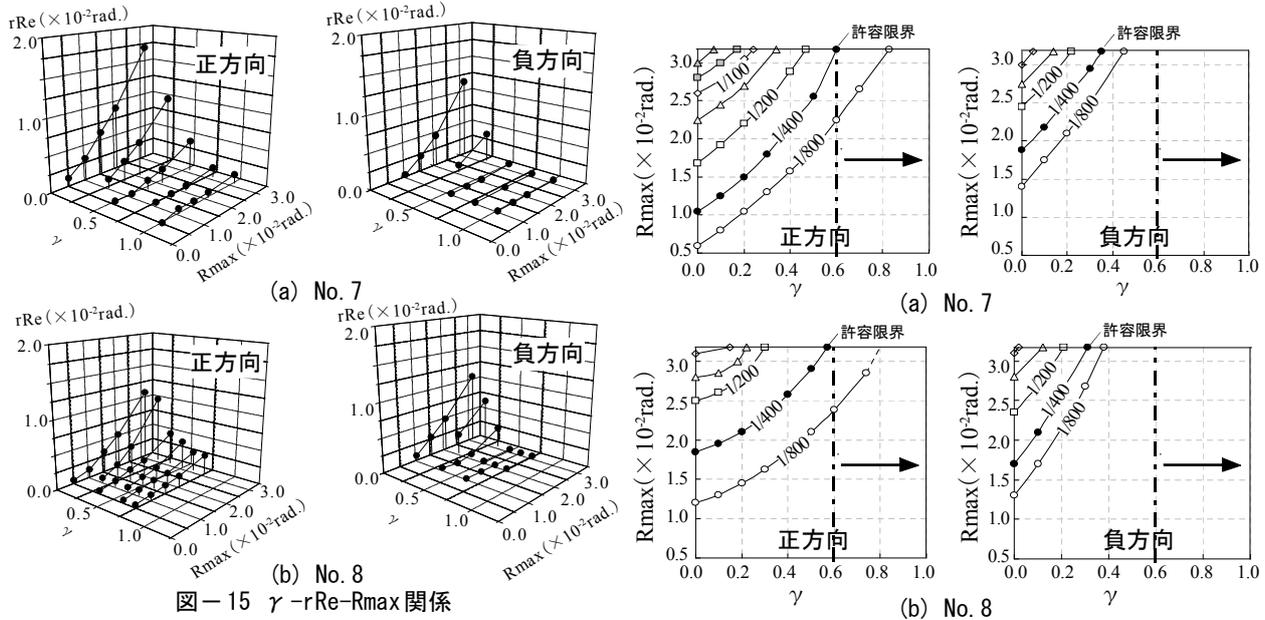


図-15 γ - rRe - $Rmax$ 関係

図-16 残留変形角 rRe の等高線図

4.4 残存振動による残留変形の収束状況

図-18に残留変形角と残存振動時のサイクル数の関係を示す。図-18(a)のように除荷後の残留変形角を $rR1, rR2 \dots rRn$ とする。 γ が大きいほど rRe は早く収束する傾向はあるが、 $rR3$ と $rR4$ の平均で rRe は推定できそうである。

4.5 本震後の余震時の残留変形抑制効果

本震後には相応の余震が生じる。この時、多少の損傷を受けて剛性低下が生じているので、残留変形の抑制が低下している可能性がある。必ず起きる余震でも残留変形が許容範囲に抑制される必要がある。本実験では図-7で示したように $1/33rad.$ を経験した後に再度 $1/100rad.$ と $1/50rad.$ で残存振動加力を行っている。

図-19に本震に該当する最初の $1/50rad.$ の残留変形角 rRe と余震に該当する2回目の $1/50rad.$ の rRe を比較して示す。白塗りが1回目のもので、灰色塗りが2回目のものである。正加力側と負加力側をそれぞれ示している。

正加力側では γ が 0.6 以上でも余震の灰色塗りのデータが、許容範囲の $1/400rad.$ を超えて増加して抑制性能が低下している。図中の太実線は文献1)の実験データである。それは $1/33rad.$ の余震のものである。本実験のデータより小さくなり、許容範囲内に納まっている。また本実験の負加力側は γ が 0.6 以上であれば抑制性能は殆ど低下して

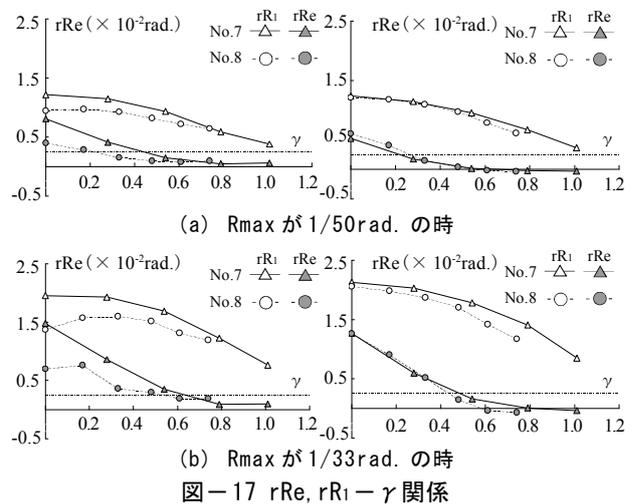


図-17 $rRe, rR1 - \gamma$ 関係

いない。

4.6 履歴ループの成分分解

図-3で示したように軸力による水平抵抗成分の占める割合が復元モーメント比 γ に伴って変化する。これにより、履歴ループの形状が変化して残存振動により残留変形が抑制される。

図-20にNo.7の $1/50rad.$ の正加力側の残存振動時の履歴ループを示す。 \circ が $Rmax$ 時で、それ以降が残存振動時

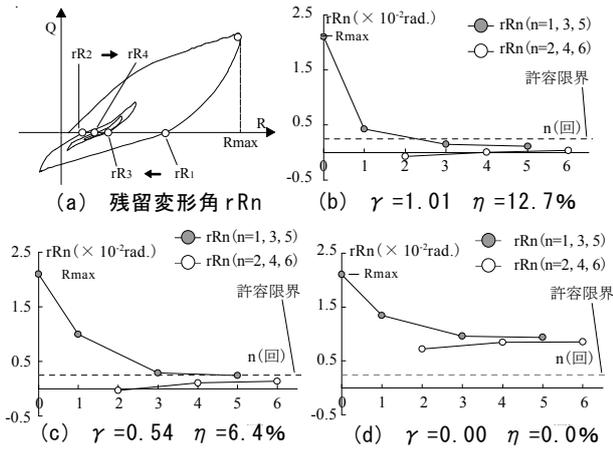


図-18 No. 7の残留変形角-サイクル回数関係

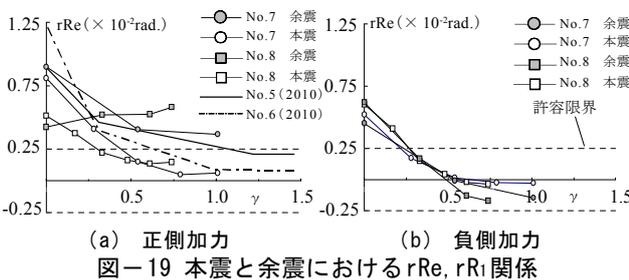


図-19 本震と余震における rRe , rRi 関係

のループになる。図-20 (a), (b) では原点を通過する一点鎖線の関係上で振動する履歴になるが、図-20 (c), (d) では一点鎖線が原点を通過する状況にない。

図-3のように柱のせん断力を軸力による成分と軸力のない梁の成分に分解して、軸力によるせん断力の成分の履歴特性の特徴を調べた。結果の例を図-21に示す。

No.7の正側加力で R_{max} が $1/50rad$ で γ が 1.01 と 0.54 の場合である。図-21 (a), (b) の破線は図-20の水平荷重の履歴ループに該当し、図-21 (a), (b) の太実線は図-3 (b)の主筋だけにより負担されるせん断力の履歴ループに該当する。同じ変形角でのせん断力の差が、図-3 (a)の軸力だけが負担するせん断力の成分と見なせる。そのせん断力の成分の履歴特性を同図 (c), (d) に示す。同図においても原点を通過する一点鎖線上で振動するループになっている。これは、柱脚のヒンジ領域においてコンクリートの損傷が抑制されて、長期軸力による復元力が維持されることによる。原点を通過する線上で振動している限り、収束する最終の残留変形は零になる。

当然、復元モーメント比 γ が大きくなるとその成分が柱全体の履歴ループに占める割合は大きくなるので、残存振動時は図-20 (a), (b) のように一点鎖線上の履歴特性になり、残留変形が零に近づく。今後は、軸力の成分の履歴ループのモデル化を検討する必要がある。

5. まとめ

(1) プレストレスを導入しなくても、柱に長期軸力が存在すると残存振動の効果により残留変形が抑制された。

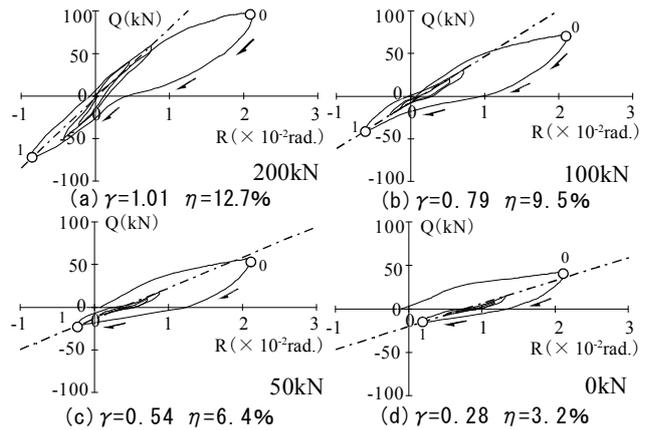


図-20 No. 7の水平荷重-層間変形角関係

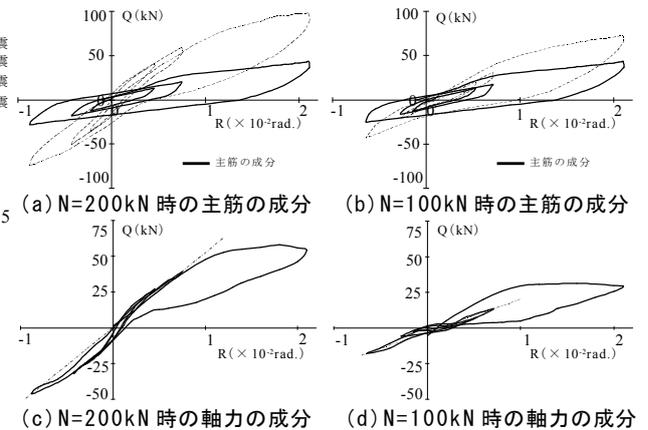


図-21 No. 7の $R_{max}=1/50rad$ の軸力の成分

残留変形を許容範囲内に抑制する範囲においては、残留変形を制御する主変数は復元モーメント比 γ となる。引張鉄筋比が $0.53\% \sim 1.0\%$ の柱で γ が 0.6 以上であれば、最大経験変形角が $1/33rad$ に達しても残留変形角 rRe を許容範囲の $1/400rad$ 以内に抑制できる。

(2) 最大経験変形後の残存振動時の柱の履歴ループにおける、軸力の抵抗成分の履歴ループの特徴と、残留変形が零に近づくメカニズムを明らかにした。

今後は、軸力の抵抗成分の履歴ループをモデル化して残留変形角 rRe の評価方法を整備する予定である。

本研究は平成23年度科学研究費補助費(基盤研究C, 代表者: 塩屋晋一)によるものである。

参考文献

- 1) 門田基靖, 塩屋晋一ほか: 復元力によるモーメントに着目したRC柱の地震後の残留変形抑制に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.193-196, 2011
- 2) 山田直樹, 塩屋晋一, 佐々木泉: 損傷と残留変形を抑制するRC柱の残留変形角の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.127-132, 2010
- 3) 平石久廣: 降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.89-90, 2003.9