

残存振動による残留変形角抑制効果を発揮させる RC 柱の実験的研究

正会員 ○濱崎哲也*1 同 塩屋晋一*2 同 門田基靖*1

2. 構造-8. 鉄筋コンクリート構造 建築構造

鉄筋コンクリート, 柱, 残留変形, 残存振動, 履歴特性

1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以後, RC 造)の耐震構造は, 地震時には構造体の損傷により振動エネルギーを吸収するため, 損傷や変形が残り, それらを軽減することが今後の重要課題である。

本研究では, 最大応答変形後の残存振動による残留変形抑制効果を発揮させる RC 柱の加力実験を行い, 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た。

2. 1 階の柱の残留変形抑制機構

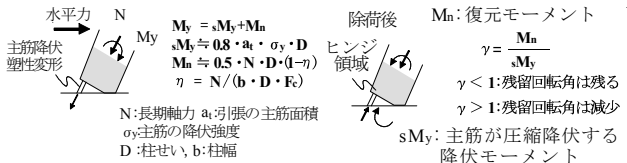
2.1 復元モーメントと復元モーメント比 γ

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-1 に示すように柱脚が曲げ降伏する場合, 長期荷重による軸力 N のモーメント M_n (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, 塑性回転は急激に減少する。

本研究では sMy に対する M_n の比 (M_n/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¹⁾により, 曲げ耐力時の γ を 1.25 以上にすると, 曲げ降伏する残留変形は急激に減少することを立証している。しかし, 一般の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で, γ は 0.5 から 1.3 の範囲になり, 1.25 以上を確保するのは難しい。プレストレストコンクリート部材では, 強制的に導入するプレストレス力で γ を 1.25 以上にし, 高復元性を確保している形になる。

2.2 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。実際の柱では, 引張降伏により塑性伸びを生じた主筋が圧縮抵抗するモーメント成分 sMy が存在して塑性回転角が残る。

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-2 (a) の実線の曲線の関係になる。しかし, コンクリートが弾性範囲を超えて塑性化することになると, 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¹⁾。

実際の柱では主筋も抵抗する。軸力が零で主筋だけが曲げ抵抗する場合は図-2 (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-2 (a), (b) の履歴特性を合成した形の履歴特性(図-2 (c))に近づく。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になり, 柱脚のモーメントの割合になる。これは, 前述の復元モーメント比 γ で表される。文献1)では復元モーメント比が異なる場合で, 残存振動による残留変形を決定する加力を一部行った。そこでは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, 復元モーメント比と最大変形角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た。

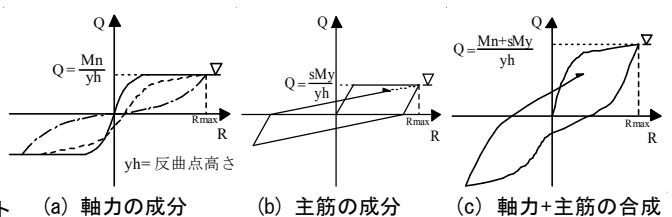
3. 残留変形抑制効果を発揮させる RC 柱の加力実験

前述の課題を解明するため, 残存振動を想定した RC 柱の準静的加力実験を行った。

3.1 実験概要

(a) 試験体

図-3 に試験体の形状・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。これまでの試験体^{1),2)}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。損傷抑制で用いる曲げひび割れ防止の補助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圧縮抵抗筋は用いなかった。

表-1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。

(b) 加力方法と加力履歴

加力状況を図-4に示す。加力は一定の軸力を作らせ、各目標の層間変形で残存振動加力を行い、残留変形を特定した。その後、軸力を低減して目標の最大変形角Rmaxで繰り返し行う。水平力の加力高さは反曲点高さ比y0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Rmaxに達した後は、図-5に示すように除荷時に排出される弾性エネルギーEeと、負側に载荷して消費される弾塑性歪みエネルギーEsが等しくなるまで変形を進め、この後、除荷した。この後の除荷時もEeが塑性エネ

表-1 使用材料の力学的特性 (単位:N/mm²)

コンクリート		E _C (×10 ⁴)	σ _B	cε _B (%)
		3.39	39.1	0.26
鉄筋	種類	E _S (×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, cε_B:圧縮強度のひずみ度
E_S:鉄筋のヤング係数, σ_y:圧縮強度, σ_u:破断強度

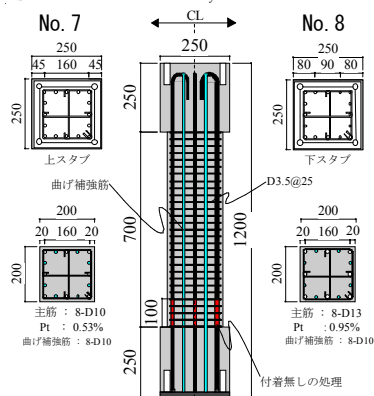


図-3 試験体の形状・寸法

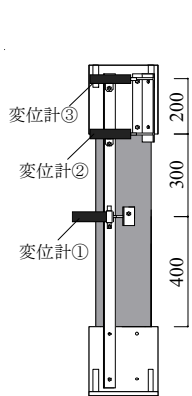


図-8 変形の測定状況

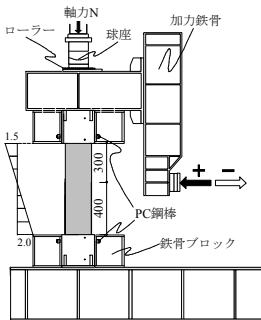


図-4 加力状況

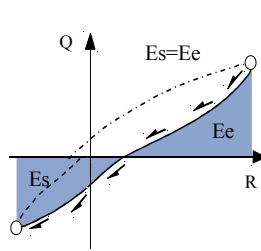


図-5 残存振動による履歴ループ

ルギーで消費されるまでこれを繰り返し、最終残留変形角rReを特定した。そして、目標を次のRmaxへ移行させた。Rmaxは1/200, 1/100, 3/200, 1/50, 1/33rad.とした。まずRmax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った。ηの変化によりγを変化させた。

Rmaxは図-6に示すように正、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するが、この影響は解析で検討する。

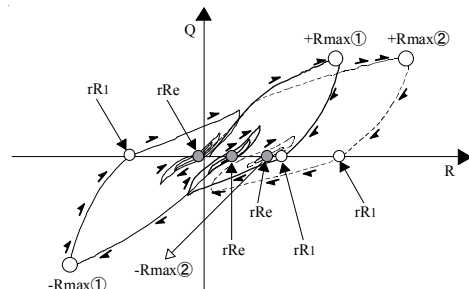
大地震時の本震の後は相応の余震が生じる。本実験では、余震での残留変形の抑制効果を検証するため、図-7に示すように、Rmaxを1/33rad.から1/100rad.と1/50rad.に戻して加力を行う。

図-8に変形の測定状況を示す。変位計①は反曲点より下側の柱部分曲げせん断変形を、変位計②は層間変形を測定した。反曲点より上側の柱の曲げせん断変形は、変位計②と③から求められる上スタブの回転角による水平変形と変位計①の変形を、変位計②の変形から差し引いて推定した。

4. 実験結果

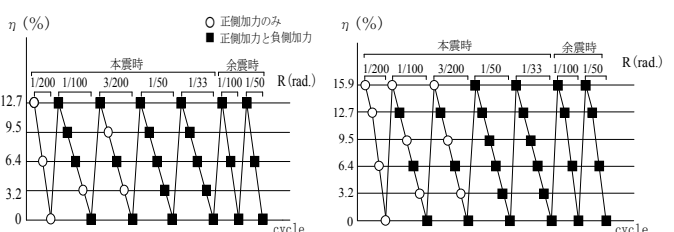
4.1 損傷抑制

図-9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-9中の番号はひび割れが発生した順番を示している。損傷抑制を行った柱脚では、3/200rad.で圧縮破壊が生じたが、柱表面が若干の剥離程度でとどまった。1/33rad.を経験してもわずかな圧縮破壊でとどまり、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以上のひび割れで見れば、ひび割れは抑制されている。



履歴の順番: +Rmax① → -Rmax① → +Rmax② → -Rmax②

図-6 残留変形の抑制量を特定するための加力履歴



(a) No. 7

(b) No. 8

図-7 加力履歴

4.2 水平荷重一層間変形角関係

図-10, 11 に水平荷重一層間変形角関係を示す。No.7 は γ が1.01, 0.54, 0.00の場合を, No.8は γ が0.74, 0.61, 0.00の場合である。変形角は層間変形を柱内法長さ700mmで除した。図中に主筋の降伏の時点 Y で, 圧縮破壊の時点 C で, 負側加力の包絡線で破線で示す。また最大変形角 R_{max} に達した除加後の残留変形角 rR_1 を●, 最終の残留変形角 rRe を○と◎で示す。No.7とNo.8ともに γ が大きくなると, rRe は抑制できることが確認できる。 γ が大きいと R_{max} が $1/33\text{rad.}$ においても, 残存振動の効果によって rRe を零に近づいている。

図-12 に各サイクルの残留変形角-最大変形角関係を示す。図中の水平の一点鎖線は rRe を $1/400\text{rad.}$ とした線である。この変形角は実験中に, 視覚的に許容できる視覚許容限界値(以後, 限界値)と判断したものである。最大変形角 R_{max} が大きいと残留変形角 rRe

は大きくなり, 復元モーメント比 γ が大きいと, rRe は小さくなることを確認できる。また, 負側加力の方が正側加力よりも rRe は抑制できている。

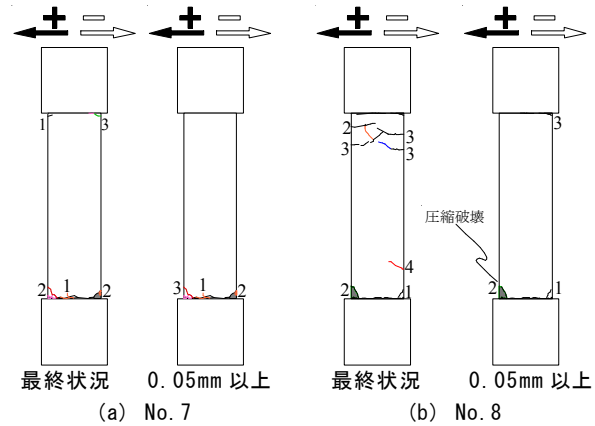
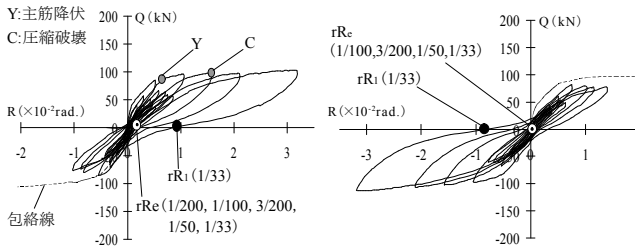
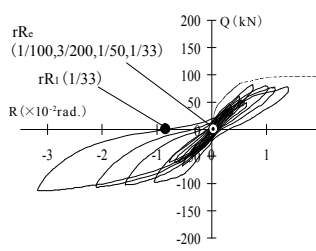


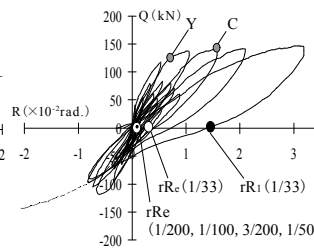
図-9 加力終了後のひび割れ状況



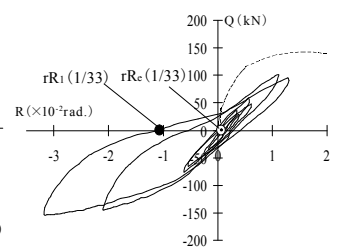
(a) $\gamma=1.01$ $\eta=12.7\%$ 正側加力



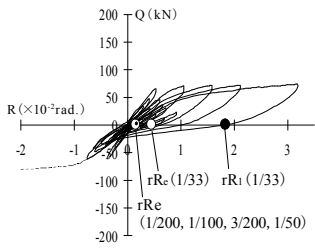
(b) $\gamma=1.01$ $\eta=12.7\%$ 負側加力



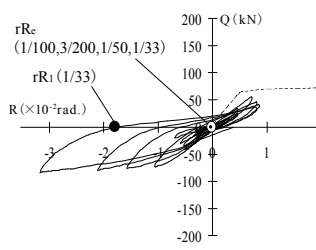
(c) $\gamma=0.74$ $\eta=15.9\%$ 正側加力



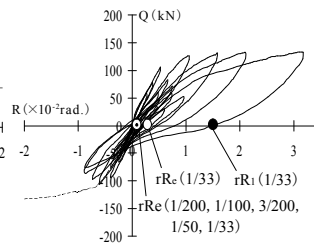
(d) $\gamma=0.74$ $\eta=15.9\%$ 負側加力



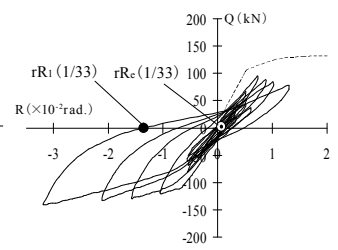
(e) $\gamma=0.54$ $\eta=6.4\%$ 正側加力



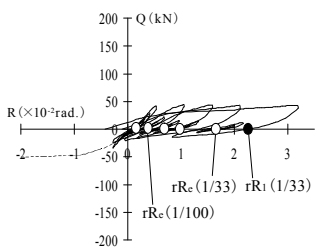
(f) $\gamma=0.54$ $\eta=6.4\%$ 負側加力



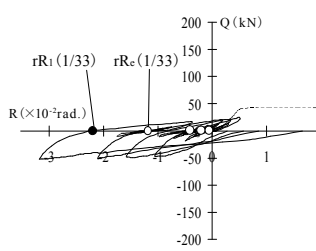
(g) $\gamma=0.61$ $\eta=12.7\%$ 正側加力



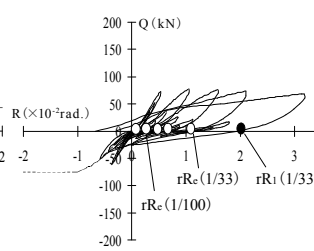
(h) $\gamma=0.61$ $\eta=12.7\%$ 負側加力



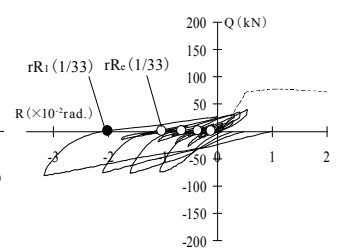
(i) $\gamma=0.00$ $\eta=0.0\%$ 正側加力



(j) $\gamma=0.00$ $\eta=0.0\%$ 負側加力



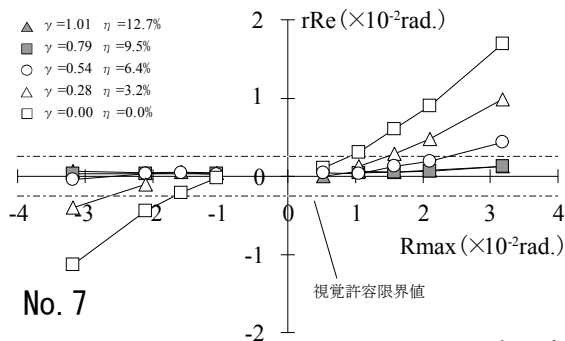
(k) $\gamma=0.00$ $\eta=0.0\%$ 正側加力



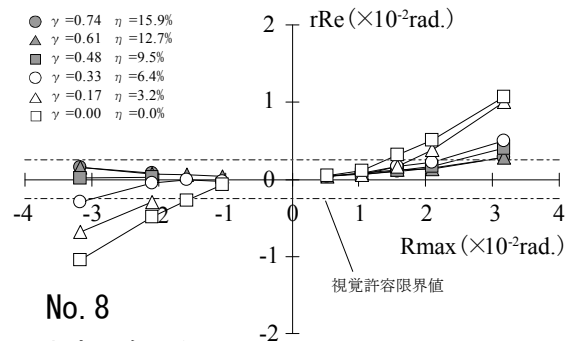
(l) $\gamma=0.00$ $\eta=0.0\%$ 負側加力

図-10 No. 7 の水平荷重一層間変形角関係

図-11 No. 8 の水平荷重一層間変形角関係



No. 7



No. 8

図-12 残留変形角-最大変形角関係

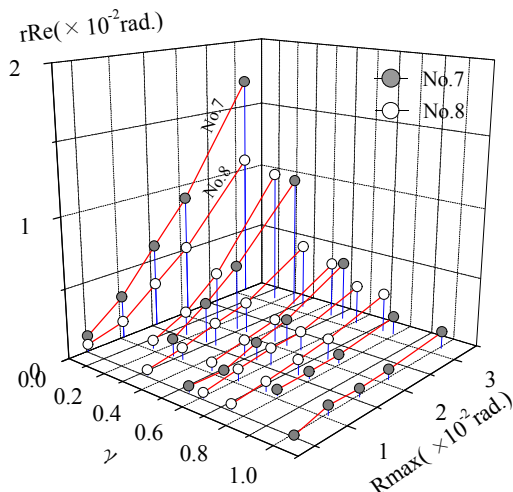
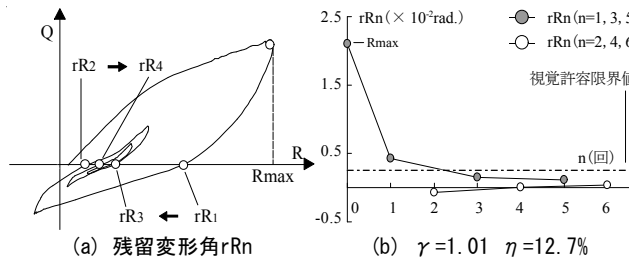
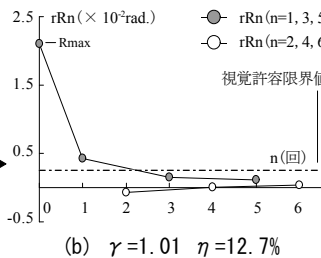


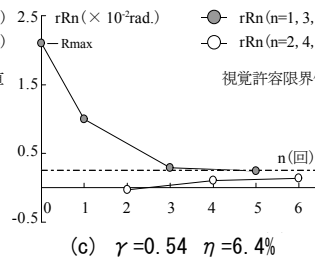
図-13 復元モーメント比と最大変形角が変化する場合の残留変形角



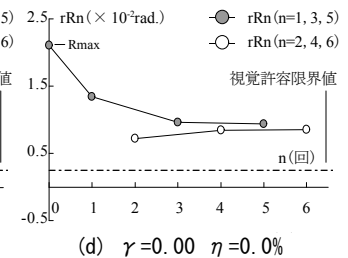
(a) 残留変形角 rRe



(b) $\gamma=1.01$ $\eta=12.7\%$



(c) $\gamma=0.54$ $\eta=6.4\%$



(d) $\gamma=0.00$ $\eta=0.0\%$

図-16 No.7の残留変形角-サイクル回数関係

4.3 最終残留変形角 rRe

図-13に各復元モーメント比 γ ごとに rRe と $Rmax$ の関係を3次元空間で示す。 γ が0.5以下の場合、 $Rmax$ が大きいと rRe は大きくなる。 γ が0.6以上の場合、 rRe は小さくなり、 $Rmax$ が大きくても抑制できていることが確認できる。

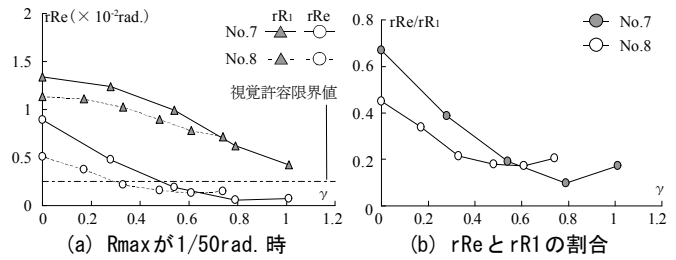
図-14(a)に残留変形角-復元モーメント比の関係を示す。 $Rmax$ が $1/50rad$ の場合である。No.7とNo.8ともに $rR1$ に対して rRe は小さい。 $Rmax$ が $1/50rad$ 時においてNo.7, No.8はともに、 γ が0.6以上であれば rRe は限界値を下回り、柱の場合も残存振動効果により残留変形角を許容範囲に抑制できていることが確認できる。

図-14(b)に $rRe/rR1$ -復元モーメント比の関係を示す。 γ が大きいと、 $rRe/rR1$ は小さくなっている。

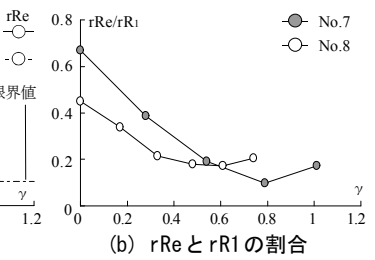
図-15においてNo.7の $Rmax$ が $1/50rad$ 時の本震と余震の rRe を比較した。本震後の余震では多少、残留変形抑制効果が衰える傾向になっている。

4.4 各サイクルにおける残留変形角 rRe の収束状況

図-16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-16(a)のように除荷後の残留変形角を $rR1, rR2 \dots rRn$ とする。 γ の値が大きいかほど rRe は早く収束する傾向はあるが、 $rR3$ と $rR4$ の値の平均で rRe は推定できそうである。

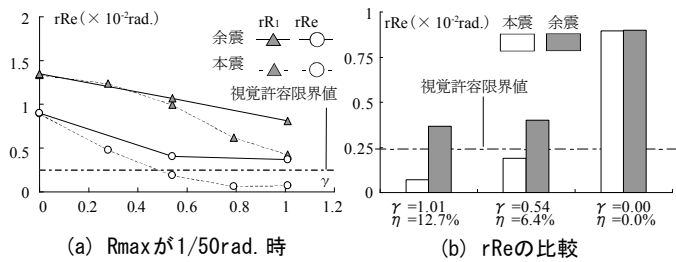


(a) $Rmax$ が $1/50rad$ 時

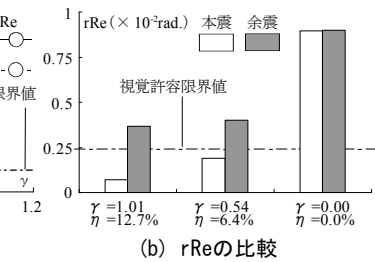


(b) rRe と $rR1$ の割合

図-14 $rRe, rR1$ -復元モーメント比関係



(a) $Rmax$ が $1/50rad$ 時



(b) rRe の比較

図-15 No.7の本震と余震における $rRe, rR1$ 関係

5. まとめ

(1)特にプレストレスを導入しなくても、柱の長期の軸力が存在すると、軸力の抵抗による履歴特性に、軸力が零の梁の履歴特性が合成される履歴特性になり、残存振動の効果により残留変形が抑制された。復元モーメント 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 $1/400rad$ 以内に抑制できた。

(2)復元モーメント比0.6以上は、Fc39で引張鉄筋比 pt が0.53%が塑性エネルギーで消費されるまで繰り返し、以下であれば軸力比 η が9.5%以上で実現でき、 pt が0.95%以下であれば η が12.7%以上で実現できる。

実験結果に基づいて、残留変形角と γ および最大経験変形の関係を明らかにした。今後は解析による検証を行う予定である。

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) 佐々木泉, 塩屋晋一:柱断面内の応力分布性状を考慮したRC柱の曲げ解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, 2008, pp.151-156
- 2) 門田基晴, 塩屋晋一, 濱崎哲也: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
- 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

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻

*2 鹿児島大学大学院理工学研究科教授・博士(工学)

*1 Graduate School, Kagoshima University

*2 Professor, Kagoshima University Dr.Eng.