

第 5 部門 A の研究活動に関する報告

(平成 20～平成 21 年度)

研究課題名：繰り返し力を受ける RC 部材の破壊進展性状の解明と高機能 RC 部材の開発に関する研究

水野 英二

Abstract: Since The Great Hanshin Earthquake, broken out 1995 in Japan, many research works had been performed to prevent a brittle collapse of many reinforced concrete (RC) members, such as, RC bridge piers and RC columns. However, few research works had been so far done on the confinement effect inside failure progressive zone of RC members, and on the development of the RC members with high-performance and quake-resistance. Under such a circumstance, the experimental studies had been carried out on the flexural deformation properties of reinforced concrete (RC) columns with the different lateral-hoop ratios and concrete strengths, under cyclic loadings.

Keywords : RC column, Cyclic deformation, Progressive failure behavior

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、我が国では構造物の震災対策に関する研究が数多く行なわれたが、本研究のように RC 構造部材の破壊進展領域における「拘束メカニズム」を解明することにより総合的な耐震補強対策ならびに高機能 RC 部材の開発に取り組む研究は少ない。

RC 構造部材の地震時における破壊進展領域における内部性状（とくに、拘束効果）を十分に吟味した上で、的確な「耐震補強対策」を講ずる研究、さらには高性能な RC 部材の開発研究が強く望まれる。よって、本研究の成果は、既設構造物の供用期間を延ばすことに繋がるとともに、学術的にも経済的にも大きく貢献することができる。このような状況の下、本研究（平成 20 年度～平成 21 年度）では、以下の研究課題を遂行した。

2. 研究目的

本研究は、繰り返し力等を受ける鉄筋コンクリート（RC）部材の破壊進展領域での内部性状に関する実験的ならびに解析的検討を通して、高性能化と同時に耐震補強化されたコンクリート部材を新たに設

計・開発することで、よりエネルギー吸収能に優れかつ環境負荷低減可能な高機能性 RC 部材の開発を目的とする。

本研究の特色・意義は、

- (1) 地震時など繰り返し外力を受ける場合に、RC 構造部材（内部損傷を有する RC 構造部材を含む）の破壊進展領域における内部コンクリートへの拘束効果を十分に発揮させるための最適な補強法について検討すると同時に、
- (2) その結果を基に、現在ある高性能化技術を組み合わせることによって、従来では考えられなかった新たな高性能（超高性能ともいえる）RC 部材を開発することにある。

3. 研究計画

本研究は、前述の特色・意義（2）の下、2 年間に亘って、以下の研究計画に沿って課題を遂行した。
平成 20 年度

研究題目 1：

【圧縮下で繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究】

本研究では、RC 柱モデル供試体（200×200×1000 mm：14 体）を用い、軸圧縮下での繰り返し曲げ実験を実施した。実験の要因として「横拘束筋間隔」ならびに「載荷パターン」を採用した。すなわち、横拘束筋間隔については、間隔 $s = 35 \sim 150$ mm の 7 水準を、載荷パターンについては、低変位レベルから大変位レベルにかけての繰り返し漸増載荷、および大変位レベルのみでの繰り返し漸増載荷の 2 水準を設定した。ここでは、載荷実験結果の考察を通じて、それら要因が軸圧縮下で繰り返し曲げを受ける RC 柱の変形性能に与える影響について、エネルギー吸収能および破壊進展の観点から検証した。

平成 21 年度

研究題目 2：

【一方向繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究】

本研究では、平成 20 年度の成果を基に、新たに RC 柱供試体（200×200×1000 mm：28 体）を作製し、軸圧縮下での一方向繰り返し曲げ載荷実験を実施した。本実験では、既往の研究で扱った「横拘束筋間隔」および「載荷パターン」に加え、「コンクリート強度」も要因とした。ここでは、上記の 3 要因のうち、「横拘束筋間隔」ならびに「コンクリート強度」の違いが RC 柱の変形特性に与える影響について、平成 20 年度の実験結果も含めてエネルギー吸収能および破壊進展の観点から検証した。また、横拘束筋からの内部コンクリートへの拘束効果を考慮したコンクリート構成モデル式において軟化特性を設定するために用いられる「力学的鉄筋パラメータ」を指標として、実験結果の整理および考察も行った。

4. 研究成果

年度ごとの研究成果は、以下のようである。

平成 20 年度

研究題目 1：

【圧縮下で繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究】

平成 7（1995）年に発生した兵庫県南部地震では、多数の鉄筋コンクリート（RC）橋脚が倒壊した。震災後に実施された被害分析から、横拘束筋の配筋量およびその定着状態が RC 構造物のポストピーク領域における変形性能に大きな影響を与えることが分かった。これ以降、RC 構造物の耐震性能の向上ならびにポストピーク領域での力学的挙動の解明を目的とした実験的ならびに解析的研究が精力的に行われてきている。

筆者らは、これまでの研究において、軸圧縮下で曲げ変形を受ける RC 柱の力学特性を把握するため実験的ならびに解析的な検証を行った。ここでは、「載荷軸力」ならびに「横拘束筋間隔」を要因とした

RC 柱供試体に対して、軸圧縮下での一方向載荷実験ならびにファイバーモデルによる二次元有限要素解析を実施した。本実験結果と解析結果との比較・検討を通じて、RC 柱のポストピーク領域での力学特性に与える「載荷軸力」ならびに「横拘束筋間隔」の影響、また、これら要因による RC 柱のコアコンクリートの材料特性（応力-ひずみ関係）に与える影響について実験的かつ解析的に検証した。

一方、繰り返し曲げ変形を受ける RC 柱に関する各種研究は、数多く実施されている。しかし、横拘束筋配筋量の多少が RC 柱の変形性能に大きな影響を与えることが指摘されている中で、既往の研究で用いられる供試体の多くが、横拘束筋体積比が 1.0 %以下という比較的低い水準にある。近年、耐震性能の向上を目的とした RC 構造物の過密配筋が散見されるような状況において、比較的高い横拘束筋体積比（1.8 %前後）を有する RC 柱部材の変形性能について詳細な検討を行う余地がある。

本研究では、RC 柱モデル供試体（200×200×1000 mm：14 体）を用い、軸圧縮下での繰り返し曲げ実験を実施した。実験の要因として「横拘束筋間隔」ならびに「載荷パターン」を採用した。すなわち、横拘束筋間隔については、間隔 $s = 35 \sim 150$ mm の 7 水準を、載荷パターンについては、低変位レベルから大变位レベルにかけての繰り返し漸増載荷、および大变位レベルのみでの繰り返し漸増載荷の 2 水準を設定した。ここでは、載荷実験結果の考察を通じて、それら要因が軸圧縮下で繰り返し曲げを受ける RC 柱の変形性能に与える影響について、エネルギー吸収能および破壊進展の観点から検証した。

以下の知見を得た。

- 1) $\pm 4 \delta_y$ までの低変位レベルでの繰り返し載荷では、供試体の降伏変位、降伏耐力および最大耐力などに顕著な差が認められないことから、横拘束筋間隔ならびに載荷パターンが与える影響は少ない。
- 2) $\pm 8 \delta_y$ 以降の大变位レベルでの供試体の耐力低下および劣化には、横拘束筋間隔が大きい場合における軸方向筋のはらみ出しおよび載荷パターンが影響している。
- 3) 履歴吸収エネルギー： $E/E_y = 40$ 付近までは、横拘束筋間隔の違いが耐力に与える影響は少ない。しかし、 $E/E_y = 40$ 以降では、横拘束筋間隔が大きくなるに従い、耐力および履歴吸収エネルギーはともに低下する傾向にあることを確認した。
- 4) 履歴吸収エネルギー量が同量であっても、横拘束筋間隔および載荷パターンの違いにより、ひび割れ進展および破壊形態にその差異が認められた。

平成 21 年度

研究題目 3：

【一方向繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究】

平成 7 年に発生した兵庫県南部地震では、多数の鉄筋コンクリート（RC）橋脚が倒壊した。震災後に実施された被害分析から、横拘束筋の配筋量およびその定着状態が RC 構造物のポストピーク領域における変形性能に大きな影響を及ぼすことが分かった¹⁾。

一般に、RC 柱のポストピーク領域での変形性能を向上させるためには、面積横拘束筋比（以下、面積鉄筋比）および打設コンクリートの圧縮強度（以下、コンクリート強度）を高く設定することにより、柱基部における拘束（コンファインド）効果を十分に確保する手法が有効であると言われている。星隈らならびに秋山らは、面積鉄筋比およびコンクリート強度をパラメトリックに変化させることにより、矩形および円形断面を有する RC 柱への単調一軸圧縮載荷実験を実施して、上述の手法の有効性に対する評価を行い、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係を提案している。

一方、繰り返し曲げが作用する RC 柱の変形挙動を対象とした研究も数多く実施されている。しかし、内部コンクリートへの拘束効果などに代表される材料レベルの力学特性と部材レベルの変形特性との関連性に着目した研究事例に限れば、さほど多くないのが現状である。また、上述のように、横拘束筋配筋量の多少が RC 柱の変形特性に大きな影響を及ぼすことが指摘されている中で、既往の研究で用いられた供試体の多くが、面積鉄筋比が 0.5 %以下という比較的低い水準で設定されており、面積鉄筋比の高い RC 柱の変形特性については、未だ解明されていない部分が多い。

これまで、筆者らは、「軸圧縮力」および「横拘束筋間隔」、「横拘束筋間隔」および「載荷パターン」

を要因として、一方向曲げまたは繰り返し曲げを受ける RC 柱供試体の載荷実験をそれぞれ実施してきた。

本研究では、平成 20 年度の成果を基に、新たに RC 柱供試体 ($200 \times 200 \times 1000$ mm : 28 体) を作製し、軸圧縮下での一方向繰り返し曲げ載荷実験を実施した。本実験では、既往の研究で扱った「横拘束筋間隔」および「載荷パターン」に加え、「コンクリート強度」も要因とした。ここでは、上記の 3 要因のうち、「横拘束筋間隔」ならびに「コンクリート強度」の違いが RC 柱の変形特性に与える影響について、平成 20 年度の実験結果も含めてエネルギー吸収能および破壊進展の観点から検証した。また、横拘束筋からの内部コンクリートへの拘束効果を考慮したコンクリート構成モデル式において軟化特性を設定するために用いられる「力学的鉄筋パラメータ」を指標として、実験結果の整理および考察も行った。

以下の知見を得た。

- 1) コンクリート強度が 20 MPa かつ横拘束筋間隔が 65 mm 以上の供試体を除いては、変位レベル $-8 \delta_y$ までの繰り返し変形特性は同じ傾向を示すことを確認した。しかし、 $-8 \delta_y$ 以降の変位レベルでは、ピンチング部での耐力、その後のピーク耐力に対して横拘束筋間隔およびコンクリート強度の違いが影響していることを確認した。
- 2) コンクリート強度 20 MPa, 40 MPa および 60 MPa の場合、エネルギー吸収能は、横拘束筋間隔に関係なく、それぞれ累積変位 $D = 75 \delta_y$, $100 \delta_y$ および $110 \delta_y$ 程度までは概ね同じ傾向を示した。
- 3) 上記 2) ならびに同値の力学的鉄筋パラメータを有する供試体の実験結果より、少なくとも累積変位 $D = 75 \delta_y$ (変位レベル $-8 \delta_y$) までの RC 柱のエネルギー吸収特性については、力学的鉄筋パラメータに関係なく同様な傾向を示した。
- 4) 力学的鉄筋パラメータが同値であっても、「横拘束筋間隔」および「コンクリート強度」の違いにより、累積変位 $D = 75 \delta_y$ (変位レベル $-8 \delta_y$) 以降では、履歴特性、吸収エネルギーおよび破壊進展などの変形特性に差異が生じることを確認した。コンクリート強度に関係するが、面積鉄筋比が大きな供試体は高いエネルギー吸収能を示した。
- 5) 供試体の破壊進展状況については、力学的鉄筋パラメータが同値であっても、横拘束筋間隔およびコンクリート強度に関連して異なったひび割れ進展および破壊形態を示した。

5. 研究発表

年度ごとの研究発表は、以下のようである。

平成 20 年度

(査読付)

- 1) 松村寿男, 水野英二: 曲げ変形を受けるコンクリート充填鋼管柱の合成作用の有無を考慮した内部性状に関する三次元有限要素解析 (査読有り), 応用力学論文集, Vol.11, pp.307-318, 2008 年 8 月。
- 2) 亀田好洋, 伊藤 睦, 梅原秀哲, 水野英二: 圧縮下で繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究 (査読有り), コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.145-150, 2008 年 7 月。

(口頭発表)

- 3) 水野英二, 亀田好洋, 伊藤 睦, 梅原秀哲: 鉄筋コンクリート柱の繰り返し曲げ特性に関する実験的研究, 中部大学総合工学研究所紀要, Vol.21, pp.79 - 84, 2009 年 3 月。
- 4) 水野英二, 平澤征夫: 第 5 部門の研究活動に関する報告: 繰り返し力を受ける RC 部材の破壊進展性状の解明と高機能 RC 部材の開発に関する研究, 中部大学総合工学研究所紀要, Vol.21, pp.127 - 129, 2009 年 3 月。
- 5) 亀田好洋, 鈴木森晶, 梅原秀哲, 水野英二: 繰り返し曲げを受ける RC 柱のエネルギー吸収特性に関する実験的研究, 平成 20 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, V-005, pp. 449-450, 2009 年 3

月.

- 6) 亀田好洋, 水野英二, 梅原秀哲, 軸圧縮下で繰返し曲げを受ける RC 柱の変形挙動およびエネルギー吸収能に関する一考察, 平成 20 年度第 63 回土木学会全国大会講演概要集, pp.1105-1106, 2008 年 9 月. .

平成 21 年度

(査読付)

- 7) 亀田好洋, 水野英二, 鈴木森晶, 梅原秀哲: 一方向繰返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究 (査読有り), コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.139 - 144, 2009 年 7 月.

(口頭発表)

- 8) 水野英二, 鈴木森晶, 亀田好洋: 繰返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の破壊領域における変形特性に関する実験的研究, 中部大学総合工学研究所紀要, Vol.22, 2010 年 3 月.
- 9) 東野翔太, 亀田好洋, 鈴木森晶, 水野英二: 繰返し力を受ける RC 柱の主鉄筋座屈性状に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2010 年 3 月.
- 10) 武井啓晃, 亀田好洋, 鈴木森晶, 水野英二: 繰返し力を受ける RC 柱の破壊領域での変形特性に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2010 年 3 月.
- 11) 浜田貴司, 亀田好洋, 鈴木森晶, 水野英二: 繰返し力を受ける RC 柱の破壊領域での座屈発生機構に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2010 年 3 月.
- 12) 亀田好洋, 水野英二, 鈴木森晶: 繰返し曲げを受ける RC 柱部材の曲げ変形特性に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会第 64 回年次学術講演会概要集 I -590, 2009 年.