

# 論文 繰り返し二軸曲げ载荷下で大きな損傷を受けた RC 柱の軸方向鉄筋の座屈性状および余剰耐力に関する研究

近藤 貴紀\*1・水野 英二\*2

**要旨:** 一般に、地震力などを受けて損傷した鉄筋コンクリート (RC) 柱の軸方向鉄筋の座屈性状および余剰耐力 (引張耐力) を評価することは、補修後の RC 柱の耐震性能を向上させるためにも重要である。本研究では、大きな損傷を受けた RC 柱の軸方向鉄筋の座屈性状およびその余剰耐力について実験データを基に検証した。ここでは、1) 「載荷形態」、「横拘束筋間隔」および「軸方向鉄筋の配置」の違いによる軸方向鉄筋の「座屈長さ」ならびに「座屈高さ」の検討、2) 損傷した軸方向鉄筋の「ライズ比 (座屈高さ/座屈長さ) - 余剰耐力」、「ライズ比 - 破断ひずみ」および「破断ひずみ - 余剰耐力」関係による「軸方向鉄筋の診断」の可能性の検討、などを通して多くの知見を得た。

**キーワード:** RC 橋脚, 軸方向鉄筋, 座屈性状, 余剰耐力, 破断ひずみ, 二方向載荷, 有限要素解析

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、日本国内においても中越地震、東北地方太平洋沖地震、熊本地震など大規模地震が多発しており、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の倒壊・損傷被害が発生している。それに伴い、多くの RC 構造物では、事前の「補強」の検討、損傷後の「補修・建て替え」の診断および判断が不可欠である。重要な課題の一つとして、損傷した RC 柱の性状を適切に診断し、損傷レベルに応じた補修法の確立が強く望まれる<sup>1, 2)</sup>。例えば、損傷レベルの異なる RC 柱の座屈した軸方向鉄筋の性状および引張耐力 (以下、余剰耐力と呼ぶ) を評価し、取り替え基準に基づく補修法の確立も強く望まれる<sup>2, 3)</sup>。これまでの研究によれば、損傷を受けた RC 柱の補修に関しては、座屈した軸方向鉄筋のはらみ出し部分を熱処理等によって変形を矯正した後に、または座屈したままの状態、損傷レベルに応じて 1) ひび割れ補修としてセメントグラウトまたはエポキシ樹脂を用いる、2) 断面修復として無収縮または樹脂モルタルで巻き立てる、さらには 3) 破壊部分のコンクリートをはつり、補修コンクリートで置換する、などの方法が検討されている<sup>1)</sup>。一方で、座屈した軸方向鉄筋の径とはらみ出し量との関係により軸方向鉄筋取り替えの基準を現場での作業マニュアルに採り入れる検討<sup>3)</sup>、損傷した RC 柱内部の軸方向鉄筋の残存ひずみの大きさを設定して軸方向鉄筋の取り替えの指標とする検討<sup>2)</sup>なども行われている。これらの検討に加え、損傷した RC 柱内部の座屈した軸方向鉄筋の余剰耐力を事前に適切に評価することは損傷レベルに応じた補修を施すことが可能となり、ひいては RC 柱の補修後の耐震性能を高めることが期待できる。

それゆえ、本研究では、異なる繰り返し二軸曲げ载荷下でコンクリートの破壊、軸方向鉄筋の座屈・破断が生ずるような大きな損傷 (例えば、図-1 に示す損傷レベ

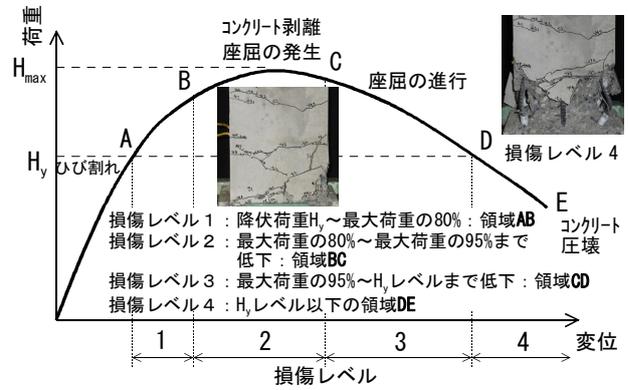


図-1 鉄筋コンクリート柱の損傷レベル(一例)

ル4) を受けた RC 柱<sup>4)</sup>の軸方向鉄筋の座屈性状およびその余剰耐力を実験データに基づいて考察するとともに、解析的な観点からも検討する。ここでは、座屈した部分の軸方向鉄筋を切り出した後に、その座屈形状を測定・考察し、さらには引張試験を実施することにより損傷後の余剰耐力を実験的ならびに解析的な観点より検討した。本研究では、以下の事項に主眼を置いて検討を行った。

1. 「載荷形態」、「横拘束筋間隔」および「軸方向鉄筋の配置」の違いによる軸方向鉄筋の「座屈長さ」、「座屈高さ」ならびに「座屈位置」を検討する。
2. 「横拘束筋間隔」の違いによる軸方向鉄筋の「座屈形状」を考察することにより、座屈した軸方向鉄筋の上下端部の拘束条件 (境界条件) を検討する。
3. 座屈した軸方向鉄筋の引張試験結果 (余剰耐力 - ひずみ特性) と計測された座屈形状を採り入れた有限要素解析結果とを比較し、「座屈長さ」、「最大座屈高さ」と「余剰耐力」との関係を検討する。
4. 軸方向鉄筋の取り替え基準策定の可能性を検討する。本研究での成果が、座屈した軸方向鉄筋の取り替えの「要・不要」の指標となる余剰耐力などの「評価」およびそれに基づく「適切な補修法」の構築に繋がると考える。

\*1 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修士 (工学) (学生会員)

\*2 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

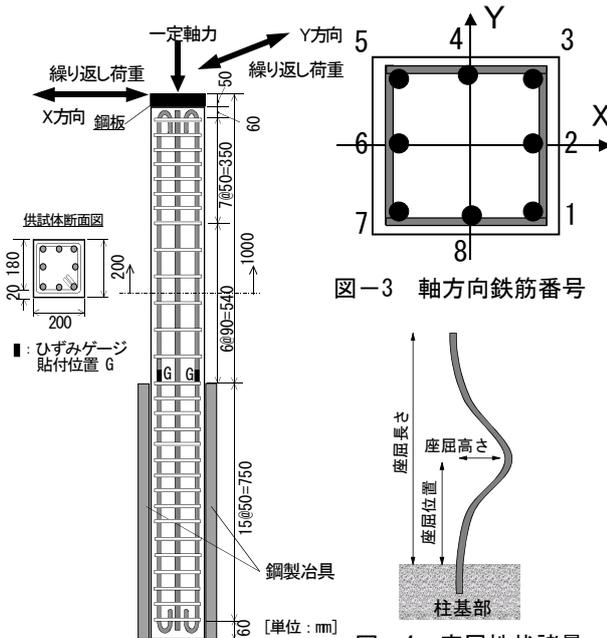


図-3 軸方向鉄筋番号



図-4 座屈性状諸量

図-2 RC柱配筋図

2. 実験供試体、材料定数および実験概要

対象となった供試体は、「繰り返し二軸曲げを受けるRC柱の耐荷特性に関する実験」<sup>4)</sup>で大きな損傷を受けたRC柱である。その形状ならびに配筋の一例を図-2に示す。供試体は、断面寸法200×200mm、有効高さ1000mmとし、曲げ破壊先行型となるようにせん断スパン比を5に設定した。ここで、軸方向鉄筋にはD10(SD295A)を8本、横拘束筋にはD6(SD295A)をそれぞれ間隔s=65, 90, 105, 120mmで配筋した。後述する二種類の繰り返し荷重下での供試体の材料定数を表-1に示す。なお、第3章以降の実験的および解析的な考察が必要となる、軸方向鉄筋の配置および配筋番号を図-3、さらに柱基部での軸方向鉄筋の座屈性状諸量の定義を図-4に示す。

実験では、RC柱(図-2)を鋼製治具に固定し、鉛直ジャッキにより軸力を柱頂部に作用させると同時に、写真-1に示す二方向荷重装置を用いて二方向(X方向およびY方向)からの水平変位を柱頂部に与えることにより、繰り返し二方向荷重実験を実施した。鉛直軸力の大きさは累加軸耐力の5%(105kN~107kN)とし、以下に説明する荷重経路に基づいて変位制御により水平荷



写真-1 二方向荷重装置

表-1 材料定数一覧<sup>4)</sup>

載荷履歴	横拘束筋間隔 s [mm]	コンクリート圧縮強度 (引張強度) [MPa]	軸方向鉄筋 D10 (SD295A)		横拘束筋 D6 (SD295A)	
			降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]
斜め荷重	65, 90, 105, 120	49.3 (5.5)	401	598	443	591
矩形荷重	65, 90, 105, 120	48.0 (3.9)				

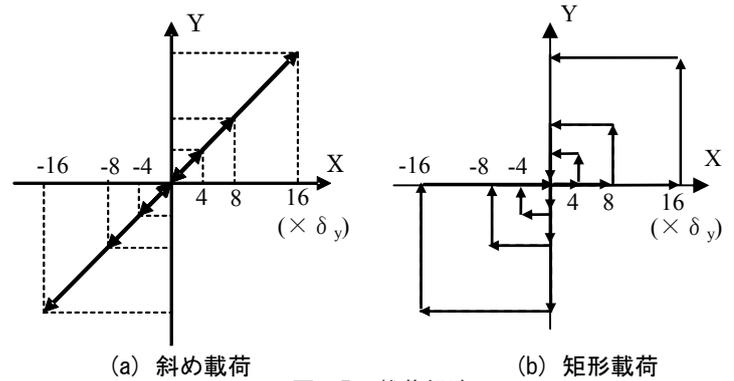
重を作用させた。荷重経路として、図-5に示す、2種類の荷重経路、1) 45°斜め荷重経路および2) 矩形荷重経路を設定した。図-5(a)に示すように、斜め荷重では、X方向およびY方向に同時に同一変位(0 → +4δ<sub>y</sub> → -4δ<sub>y</sub> → +8δ<sub>y</sub> → -8δ<sub>y</sub> → +8δ<sub>y</sub> → -16δ<sub>y</sub> → +16δ<sub>y</sub>)の順に柱頂部に与えた。一方、矩形荷重(図-5(b))では、第1象限と第3象限にて順に大きき4δ<sub>y</sub>, 8δ<sub>y</sub> および16δ<sub>y</sub>の矩形(正方形)により8の字を描くようにX方向およびY方向の変位を変化させて実験を実施した。ここで、図中の「δ<sub>y</sub>」とは、一方向荷重下での降伏変位であり、ここでは、斜め荷重でδ<sub>y</sub>=5.35mm、矩形荷重ではδ<sub>y</sub>=6.0mmを採用した<sup>4)</sup>。

3. 座屈性状に関する考察

写真-2に示すように損傷したRC柱の基部をはつることにより、軸方向鉄筋の座屈性状を考察する。ここでは、「荷重形態」、「横拘束筋間隔」および「軸方向鉄筋位置」を要因として、柱基部に生ずる軸方向鉄筋の座屈性状(図-4に示す座屈領域での座屈長さ、最大の座屈高さ、その座屈位置および座屈形状)について考察する。

3.1 座屈長さ

軸方向鉄筋の配筋位置(図-3に示す配筋番号1~8)と座屈長さとの関係を、横拘束筋間隔ごとに整理した結果を図-6(斜め荷重)および図-7(矩形荷重)に示す。両荷重ともに、横拘束筋間隔が広くなれば座屈長さは長くなる傾向にある。隅角部に位置する軸方向鉄筋(1, 3, 5および7)では横拘束筋間で、中間に位置する軸方向鉄筋(2, 4, 6および8)では、矩形荷重下での横拘束筋間隔120mmのRC柱を除き座屈が横拘束筋を越えて生ずる。中間軸方向鉄筋の座屈長さは矩形荷重の方が斜め荷重の場合よりも概ね長くなる傾向にあるが、横拘束筋間



(a) 斜め荷重 (b) 矩形荷重

図-5 荷重経路

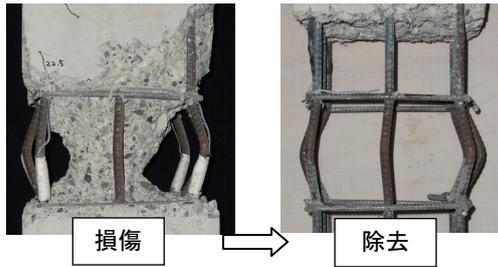


写真-2 損傷したRC柱基部のはつり

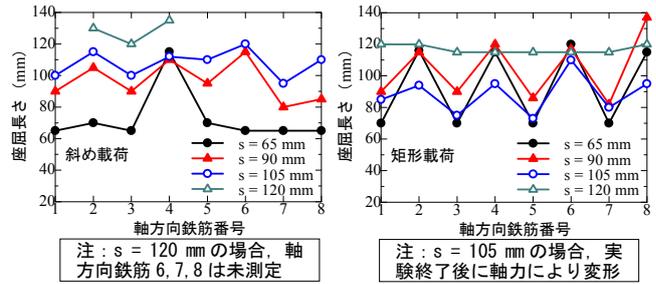


図-6 座屈長さ（斜め載荷） 図-7 座屈長さ（矩形載荷）

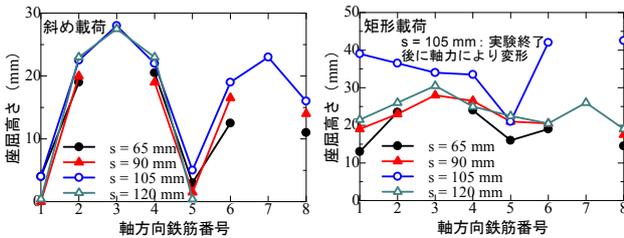


図-8 座屈高さ（斜め載荷） 図-9 座屈高さ（矩形載荷）

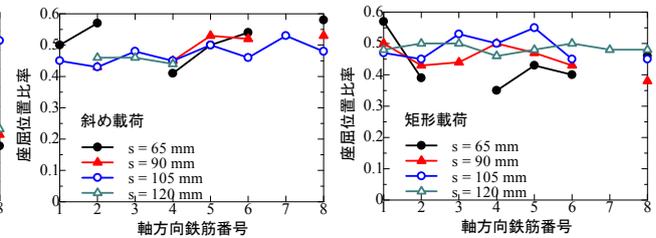


図-10 座屈位置（斜め載荷） 図-11 座屈位置（矩形載荷）

隔が 120 mm になると、その傾向はなくなる。

### 3.2 座屈高さおよび座屈位置

軸方向鉄筋位置（1~8）と座屈高さとの関係を、横拘束筋間隔ごとに整理した結果を図-8（斜め載荷）および図-9（矩形載荷）に示す。載荷軸上の隅角部の軸方向鉄筋（3および7）で、斜め載荷の場合、23 mm~28 mm、矩形載荷の場合、25 mm~30 mmの大きなはらみ出しを生ずる。なお、斜め載荷の場合には、隅角部の軸方向鉄筋（1および5）には大きなはらみ出しは生じない。一方、座屈長さに対する座屈位置の比率関係を、横拘束筋間隔ごとに整理した結果を図-10（斜め載荷）および図-11（矩形載荷）に示す。多くの軸方向鉄筋において、柱基部からの座屈位置は座屈長さの0.4倍~0.5倍の領域にあり、3.3節で説明するように座屈形状は対称形になっていないことが分かる。

### 3.3 座屈形状

一例として、斜め載荷後の横拘束筋間隔 65 mm および 105 mm を有する RC 柱の軸方向鉄筋（1~8）の座屈形状

を図-12 および図-13 に示す。また、矩形載荷後の横拘束筋間隔 65 mm および 120 mm を有する RC 柱の軸方向鉄筋の座屈形状を図-14 および図-15 に示す。図中、測定値を実線（突起部分は横拘束筋箇所）で、柱基部がヒンジ上部端が固定と仮定した境界条件下での座屈形状（最大値が基部から座屈長さの0.4倍の位置）を破線で示す。両載荷とも繰り返し載荷下で中立軸からの距離が長くなる隅角部の軸方向鉄筋3および7が破断しており、横拘束筋間隔が広がるに従い破断数は減少する。

ヒンジ固定の境界条件下での座屈形状と概ね傾向は一致しているが、基部から最大位置までは両端ヒンジの境界条件下での形状、最大位置から上端まではヒンジ固定の境界条件下での形状に近い非対称形状を呈する。

### 4. 余剰耐力および破断ひずみなどに関する考察

ここでは、引張試験結果を考察するとともに、「座屈長さ」に対する「座屈高さ」の比（以下、ライズ比と呼ぶ）を用いて、損傷した RC 柱基部の軸方向鉄筋の余剰

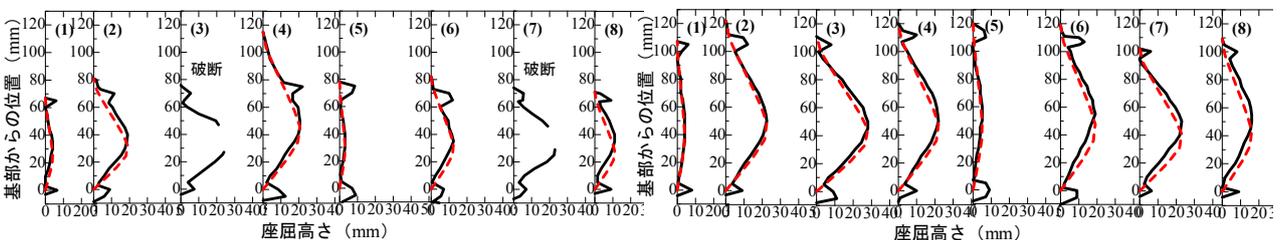


図-12 座屈形状（斜め載荷：s = 65 mm）

図-13 座屈形状（斜め載荷：s = 105 mm）

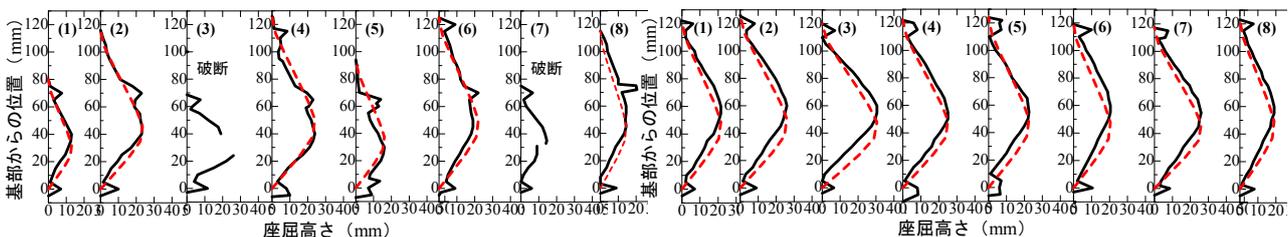


図-14 座屈形状（矩形載荷：s = 65 mm）

図-15 座屈形状（矩形載荷：s = 120 mm）

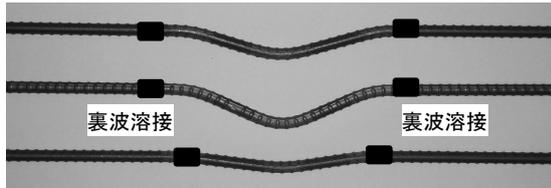


写真-3 座屈した軸方向鉄筋の引張試験片

耐力について実験的かつ解析的な観点より考察する。

#### 4.1 座屈した軸方向鉄筋の引張試験結果と考察

##### (1) 引張荷重-ひずみ関係

載荷実験後のRC柱8体<sup>4)</sup>の軸方向鉄筋より、座屈した軸方向鉄筋部分(写真-2)を切断し、上下端に同種類の鉄筋を裏波溶接することにより引張試験片55本を製作した(写真-3参照)。試験片に対する引張試験データ(引張荷重-ひずみ関係)を横拘束筋間隔ごとに整理した結果を図-16(斜め載荷)および図-17(矩形載荷)に示す。なお、塑性ひずみゲージ(2mm)を座屈位置に軸方向に貼付した。図中の番号は軸方向鉄筋を、さらに太字番号(赤色)は座屈部で破断した軸方向鉄筋を示す。

斜め載荷下で損傷を受けた軸方向鉄筋の引張荷重-ひずみ関係(図-16)から分かるように、隅角部の軸方向鉄筋1および5の余剰耐力が引張強度を保持して一番高く、中間軸方向鉄筋6および8、2および4、3および7の順で耐力が低くなる。一方、矩形載荷下で損傷を受けた軸方向鉄筋の引張荷重-ひずみ関係(図-17)では、

中間軸方向鉄筋6および8、2および4の余剰耐力は引張強度を保持するが、隅角部の軸方向鉄筋1および5、3および7の順で余剰耐力が低くなる。本研究のRC矩形断面柱では隅角部での軸方向鉄筋の損傷が大きくなる傾向にあるため、余剰耐力も低くなると考えられる。

##### (2) ライズ比-余剰耐力、ライズ比-破断ひずみおよび破断ひずみ-余剰耐力関係

引張試験片55本の引張試験結果をライズ比で整理した結果を図-18に示す。ここでは、斜め載荷実験と矩形載荷実験後の軸方向鉄筋のライズ比-余剰耐力関係を比較するため、結果をシンボル●(斜め載荷)および○(矩形載荷)で区別して示してある。ただし、矩形載荷下の横拘束筋間隔105mmを有するRC柱は実験終了後に鉛直軸力により変形を生じたため、データ処理から外した。結果としては、載荷形態に関係なく、ライズ比が0.2前後から大きくなるに従い余剰耐力が低下していることが分かる。これは、本実験でレベル4の損傷を受けたRC柱内部の軸方向鉄筋の余剰耐力の低下傾向であり、他の載荷履歴下で損傷を受けたRC柱ではこれとは異なった余剰耐力の低下傾向を呈すると考えられる。

引張試験片55本の引張試験結果のうち、座屈部にて破断した20本のデータを用いて、ライズ比と破断ひずみとの関係を整理した結果を図-19に示す。ライズ比-余剰耐力関係と同様に、ライズ比が0.2前後から大きくな

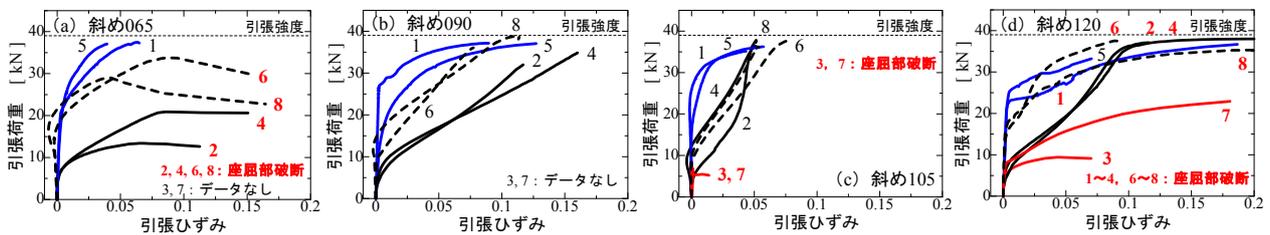


図-16 引張荷重-ひずみ関係 (斜め載荷)

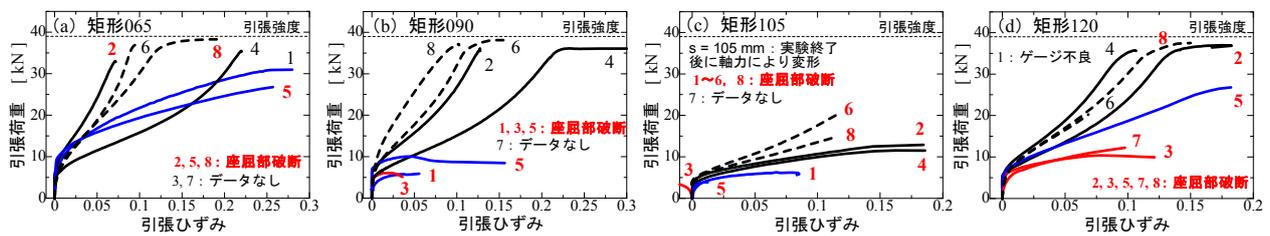


図-17 引張荷重-ひずみ関係 (矩形載荷)

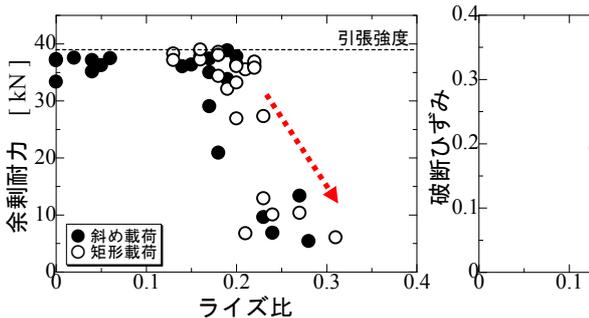


図-18 ライズ比-余剰耐力関係

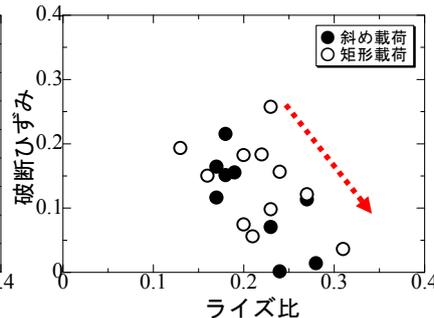


図-19 ライズ比-破断ひずみ関係

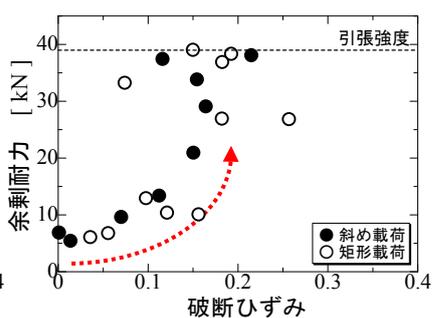


図-20 破断ひずみ-余剰耐力関係

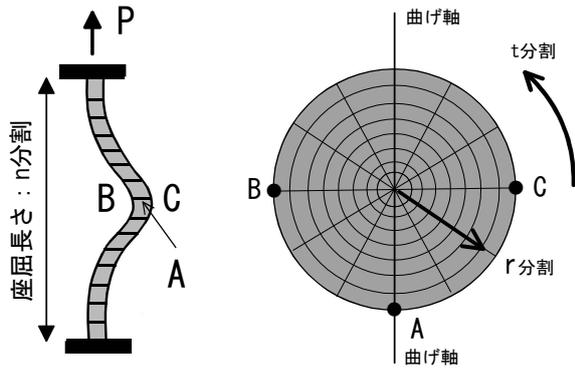


図-21 軸方向分割モデル 図-22 断面分割モデル（一例）

るに従い、破断ひずみが低下していることが分かる。また、破断ひずみ-余剰耐力関係を図-20に示す。余剰耐力が引張強度に近づくに従い、少なくとも12%~22%の破断ひずみが見込めることが分かる。

#### 4.2 座屈した軸方向鉄筋の引張解析結果と考察

ここでは、ファイバー解析手法に基づいたはりの弾塑性有限変形解析<sup>5)</sup>から求めた、引張試験片(写真-3)に対する解析結果(引張荷重-座屈部ひずみ関係)を基に「ライズ比-破断ひずみ関係」および「破断ひずみ-余剰耐力関係」を求め、それらを試験結果(4.1節)と比較・考察し、本研究の適用性について論ずる。

##### (1) 解析モデル

座屈した軸方向鉄筋(55本)の引張試験に対して以下の解析モデル(図-21および図-22)を設定した。

- ・境界条件：引張試験機のチャック部をモデル化するため両端部の拘束条件は固定-固定と仮定した。
- ・軸方向鉄筋の形状：3.3節で説明した、実測した軸方向鉄筋D10(SD295A)の座屈形状を用いた。
- ・分割：鉄筋を5mmの要素にn分割し、断面は円形断面(直径：9.5mm)を仮定し、半径方向にr分割、円周方向にt分割した。ここでは、 $r=8$ 、 $t=16$ とした。
- ・構成モデル：降伏棚あり・なしを考慮できる複合硬化

則に基づいた修正二曲面モデル<sup>5)</sup>を採用した。モデルパラメータは文献5)を参照のこと。

- ・軸方向鉄筋の材料定数：表-1に示す材料定数および基本的な材料定数として、ヤング係数：187GPa、硬化係数：4.67GPaを使用した。ただし、軸方向鉄筋は繰り返し荷重により塑性変形を受けているため、座屈部周辺の初期状態は、降伏棚が消失した弾塑性硬化材料と仮定して修正二曲面モデル<sup>5)</sup>に採り入れた。

##### (2) 引張荷重-ひずみ関係

一例として、両荷重の場合とも、横拘束筋間隔90mmおよび120mmで配筋したRC柱の軸方向鉄筋(8本)のうち隅角部軸方向鉄筋1本(鉄筋番号1, 3, 5または7)および中間軸方向鉄筋1本(鉄筋番号2, 4, 6または8)の計2本分の解析結果(引張荷重-ひずみ関係)をそれぞれ試験結果と比較して、図-23~図-26に示す。図中、座屈部の軸方向鉄筋軸線部分(図-21および図-22の点A)の引張荷重-ひずみ関係を太実線(以下、曲線Aと呼ぶ)、引張初期時に引張ひずみが生ずる最外縁部分(図-22の点B)の引張荷重-ひずみ関係を細実線(以下、曲線Bと呼ぶ)および試験結果を赤破線で示す。本解析では軸方向鉄筋が破断する限界ひずみを設定した解析モデルを採用していないため、引張試験で破断が生じた以降の引張荷重-ひずみ関係も図中に示してある。

引張強度と同程度の余剰耐力を有しかつ曲線A付近に位置する試験結果(図-24(a)などの赤破線)は、ひずみゲージが軸線に沿って貼付された結果と考えるが、曲線Aと曲線Bとの間(図-25(a))、または曲線Aの外側に位置するもの(図-23(b))も見受けられる。この原因として、ひずみゲージが引張側の点B寄りに、または圧縮側の点C寄りに貼付されたことも考えられる。一方、引張強度よりも低い余剰耐力を有する試験結果(図-25(b)などの赤破線)は、引張時初期の段階では曲線Aに沿った挙動を呈するが、点B部分のひずみが先ず破断ひずみ

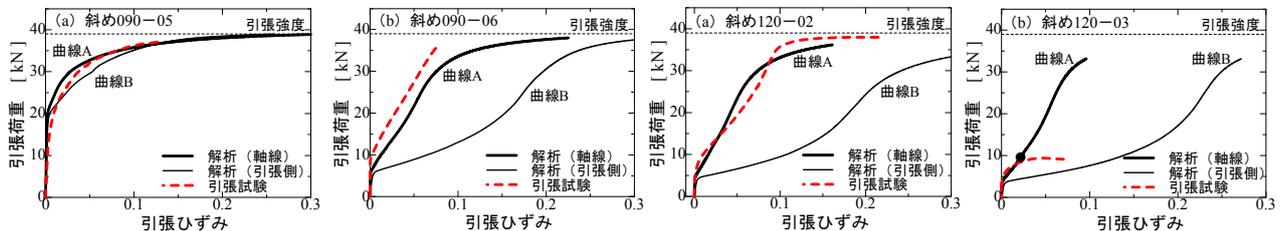


図-23 解析・試験結果の比較(斜め荷重：s = 90 mm) 図-24 解析・試験結果の比較(斜め荷重：s = 120 mm)

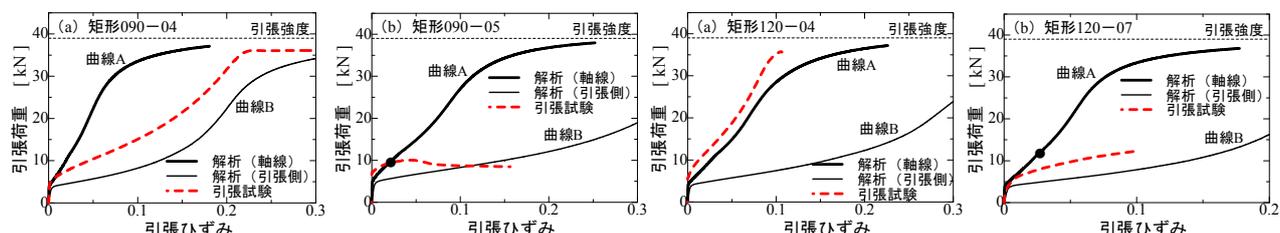
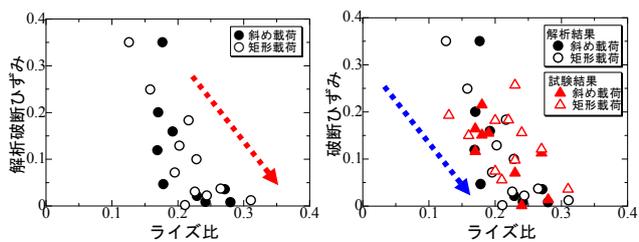


図-25 解析・試験結果の比較(矩形荷重：s = 90 mm) 図-26 解析・試験結果の比較(矩形荷重：s = 120 mm)



(a) 解析結果 (b) 解析結果と試験結果

図-27 ライズ比—破断ひずみ関係

に達し、局所的な亀裂が徐々に広がることによりひずみゲージ貼付位置での荷重—ひずみ関係は曲線Bに近づく様相を呈し、最終的に引張試験片の破断に至ると考える。

### (3) ライズ比—破断ひずみ関係および破断ひずみ—余剰耐力関係

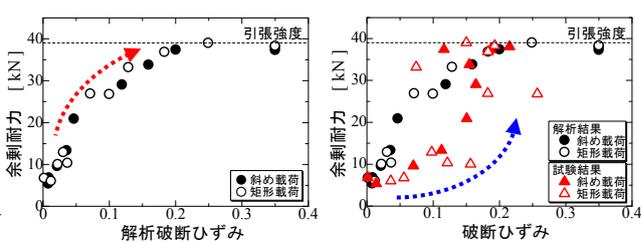
引張試験において座屈部にて破断した軸方向鉄筋に対する解析結果（曲線A）を用いて、余剰耐力に対する解析破断ひずみ（図-24(b)～図-26(b)中の●で示す箇所のひずみ）を求め、ライズ比—解析破断ひずみ関係を両載荷に対して整理した結果を図-27(a)に示す。この関係は試験結果から得られた関係よりも安全側の評価（小さな破断ひずみ）を与えている。試験および解析から得られたライズ比—破断ひずみ関係を比較した結果を図-27(b)に示す。概ね同様の低下傾向を呈していることが分かる。解析破断ひずみ—余剰耐力関係を図-28(a)に示す。試験結果から得られた破断ひずみ—余剰耐力関係と同様に、余剰耐力が引張強度を保持できれば20%程度の破断ひずみが見込めるが、それ以下の余剰耐力では図-27で考察したように解析結果による破断ひずみは試験結果からのそれよりも小さく、安全側の値となる。試験結果による破断ひずみ—余剰耐力関係が下側に凸状であるのに対し、解析破断ひずみ—余剰耐力関係は上側に凸状となる（図-28(b)参照）。

### 4.3 適用性

実験的ならびに解析的観点から得られた本研究の知見を以下のように他の損傷したRC柱内部の軸方向鉄筋の損傷評価に適用することが出来ると考える。すなわち、任意の繰り返し荷重を受けて損傷したRC柱内部の異なるライズ比の軸方向鉄筋をサンプリングし、その余剰耐力を引張試験により特定することでそのRC柱内部の軸方向鉄筋のライズ比—余剰耐力関係（図-18）を推定することが出来る。この関係を基に有限要素解析を実施して安全側のライズ比—破断ひずみ関係（図-27）、破断ひずみ—余剰耐力関係（図-28）を求めて、軸方向鉄筋取り替えの参考データとすることが可能となる。

### 5. まとめ

1) 隅角部の軸方向鉄筋では横拘束筋間隔で座屈が生ずるが、中間軸方向鉄筋では、横拘束筋間隔が狭い場合に



(a) 解析結果 (b) 解析結果と試験結果

図-28 破断ひずみ—余剰耐力関係

は横拘束筋を越えて座屈が生ずる。座屈高さは、荷重軸上にある隅角部の軸方向鉄筋で大きくなる。

- 2) 基部から最大位置までは両端ヒンジ、最大位置から上端まではヒンジ固定の条件下での座屈形状に近い。
- 3) 本研究では、載荷形態に関係なく、ライズ比が0.2前後から大きくなるに従い余剰耐力が低下していることが分かった。このことは、一般的に損傷を受けたRC柱の軸方向鉄筋にも類似した「ライズ比—余剰耐力」の関係が存在することを示唆している。
- 4) 座屈した軸方向鉄筋の有限要素引張解析を実施することにより引張荷重—ひずみ関係を検証し、ひずみゲージ貼付位置の影響および劣化した軸方向鉄筋の破断ひずみ—余剰耐力関係などを考察することが出来た。
- 5) 一般に、損傷したRC柱内部の軸方向鉄筋をサンプリングすることにより、ライズ比—余剰耐力関係を特定し、さらに有限要素解析を実施してライズ比—破断ひずみ関係、破断ひずみ—余剰耐力関係を求め、RC柱内の軸方向鉄筋を診断することが可能となる。

謝辞：本研究を遂行するに際し、平成28年度中部大学特別研究費Aを得た。ここに謝意を表す。

### 参考文献：

- 1) 仁平達也：地震により損傷を受け修復した鉄道RC構造物の性能評価に関する研究，博士学位論文，長岡技術科学大学，2014。
- 2) 中村敏晴，松田好史，垣尾徹ら：大きな変形履歴を受けた耐震補強柱の再補強後の変形性能に関する研究，土木学会論文集E，Vol.64 No.4，580-594，2008。
- 3) 加藤祥久ら：阪神高速3号神戸線RC橋脚復旧下部工事施工管理要領について，「耐震補強・補修技術，耐震診断技術に関するシンポジウム」講演論文集，土木学会土木施工研究委員会，土木学会 pp.1-8，1997。
- 4) 亀田好洋，水野英二：軸方向鉄筋の破断防止に主眼を置いた鉄筋コンクリート柱の繰り返し二軸曲げ耐荷特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.36，No.2，pp.121-126，2014。
- 5) 鈴木森晶，水野英二：繰り返し曲げを受けるRC柱の鉄筋座屈特性に関する実験的ならびに解析的研究，応用力学論文集，Vol.13，pp.331-342，2010.8。