

# 論文 梁および柱の軸方向鉄筋の定着仕様が接合部性能に及ぼす影響

吉武 謙二<sup>\*1</sup>・小川 晃<sup>\*2</sup>・小倉 大季<sup>\*3</sup>・前之園 司<sup>\*4</sup>

**要旨:**高架橋などの土木構造物の柱梁接合部は、柱や梁の高耐力化により相対的な弱点となる可能性がある。また、接合部では柱と梁の軸方向鉄筋が錯綜しており、配筋の施工性やコンクリートの充填性の向上が課題である。本報では、現状の柱梁接合部の性能把握と接合部配筋の簡略化を目的とした構造実験を実施した。その結果、直交梁がない場合、現状配筋では柱の変形角が1%程度から荷重が低下すること、梁軸方向鉄筋の曲げ内半径の接合部性能への影響は少ないと、柱や梁の軸方向鉄筋に機械式定着を用いた場合、適用方法により接合部性能が大きく異なること、などを明らかにした。

**キーワード:**柱梁接合部、定着、付着、曲げ内半径、機械式定着

## 1. はじめに

ラーメン高架橋など土木構造物の柱梁接合部は、柱や梁の軸方向鉄筋に関してはその定着長を基に、帯鉄筋に関する構造細目により設計されている<sup>1)</sup>。兵庫県南部地震以降の耐震基準の厳格化により、RC部材は高耐力化されており、鉄筋種類もSD390が標準的に用いられている。しかし、設計手法は昭和6年発行のコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>から更新されておらず、仕様規定を満足すればせん断強度の照査などを行わなくても剛域とされている。また、使用材料の高強度化による断面寸法の縮小やハンチ寸法の縮小により、接合部寸法が小さくなっている柱梁接合部が相対的な構造的弱点となっている可能性がある<sup>3)</sup>。接合部を想定した定着に関する研究は最近なされているが、現状の配筋を反映した柱梁接合部に関する実験は極めて少ない<sup>4), 5), 6), 7)</sup>。

現状の接合部は前述の構造性能のみならず、写真-1のように柱や梁の軸方向鉄筋が接合部において錯綜し、昭和6年以来変更のない10（は鉄筋の呼び径）という梁の軸方向鉄筋の大きな曲げ内半径のため、配筋が3次元的になり施工性が低下している。また、コンクリート打設用のホースなどの吐出口や締固め用の棒形振動機の配筋内部への挿入が困難となるためコンクリートの未充填リスクも高まっている。

配筋作業の簡略化のため、新しい機械式定着工法が数多く開発され、鉄筋定着・継手指針〔2007年版〕が発刊された<sup>8)</sup>。著者らも、写真-2に示す高周波誘導加熱により端部に拡径部を形成したTヘッド工法を開発してきたが<sup>9)</sup>、接合部に関しては適用範囲外であり使用できない<sup>10)</sup>。また、建築構造物では機械式定着を用いた場合の

設計指針<sup>11)</sup>が整備されているが、土木構造物では降伏部位に関する設計思想や柱や梁の断面寸法比などが異なるため直接適用できない。

本研究では、設計手法構築のための基礎データを得るため、現状の柱梁接合部をモデル化した実験を実施した。また、配筋作業の簡略化のため、梁の軸方向鉄筋を張出スラブに直線定着した場合や曲げ内半径を3とした場合、梁や柱の軸方向鉄筋の定着に機械式定着工法を用いた場合など新たな配筋仕様を用いた場合の構造実験を実施し、破壊メカニズムに及ぼす影響を把握した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体および結果一覧を表-1に、試験体形状および配筋を試験体No.1, No.3, No.5を例として図-1に示す。試験対象は横梁と柱の接合部である。接合部に直交する縦梁の効果は考慮していない。ここでは、梁上側軸方向鉄筋を梁負鉄筋、梁下側軸方向鉄筋を梁正鉄筋と称する。



写真-1 配筋状況

\*1 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 博(工)(正会員)

\*2 清水建設(株) 土木事業本部 設計第一部 課長

\*3 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター(正会員)

\*4 第一高周波工業(株) 技術統括部 部長

表 - 1 試験体および結果一覧

試験体名	梁軸方向鉄筋の定着仕様		柱軸方向鉄筋の定着仕様	最大荷重		合計吸収エネルギー(J)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
	上側	下側		正側(kN)	負側(kN)				
No.1	曲げ内半径10φ	曲げ内半径10φ	半円形フック	48.9	-76.9	5,980	22.5	2.2	27.1
No.2	曲げ内半径3φ	曲げ内半径3φ	半円形フック	50.8 (1.04)*	-77.0 (1.00)	5,674 (0.95)	24.3	2.4	26.9
No.3	直筋(機械式定着)	曲げ内半径10φ	半円形フック	49.5 (1.01)	-80.2 (1.04)	6,679 (1.12)	24.0	2.4	26.6
No.4	直筋(機械式定着)	機械式定着	半円形フック	54.4 (1.11)	-75.7 (0.98)	8,462 (1.42)	22.2	2.2	27.2
No.5	曲げ内半径10φ	曲げ内半径10φ	機械式定着	45.9 (0.94)	-54.3 (0.71)	4,265 (0.71)	23.7	2.2	26.2

\*) 括弧内は試験体No.1との比率

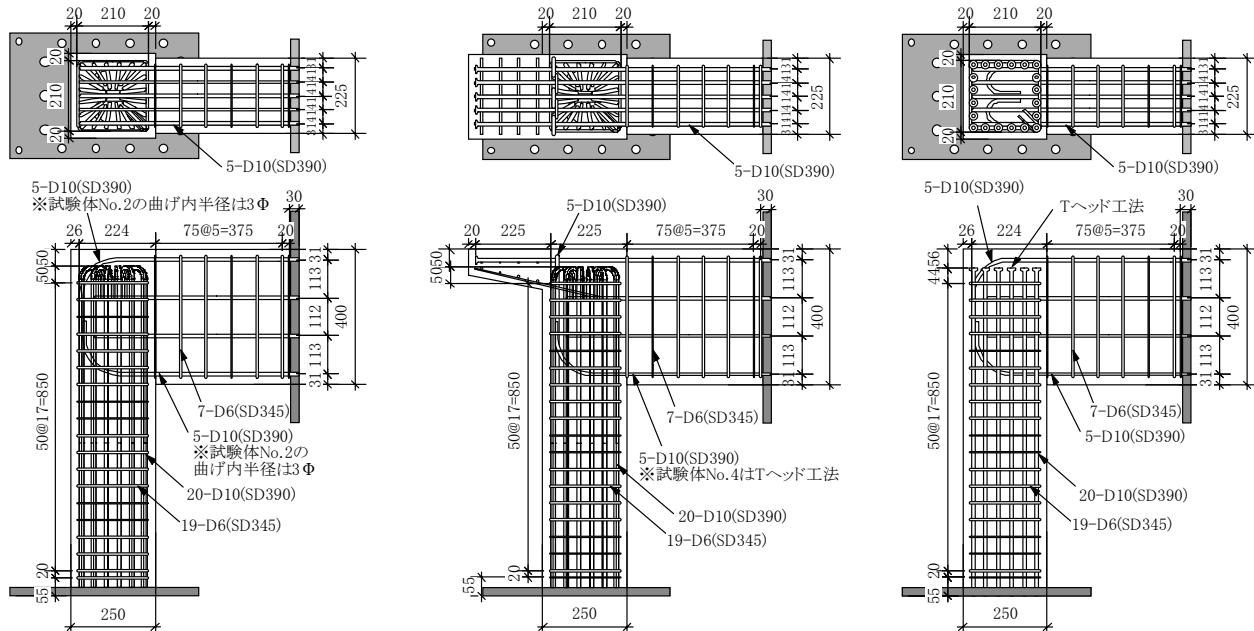


図 - 1 試験体の形状・寸法(左 : No.1 , 中央 : No.3 , 右 : No.5)

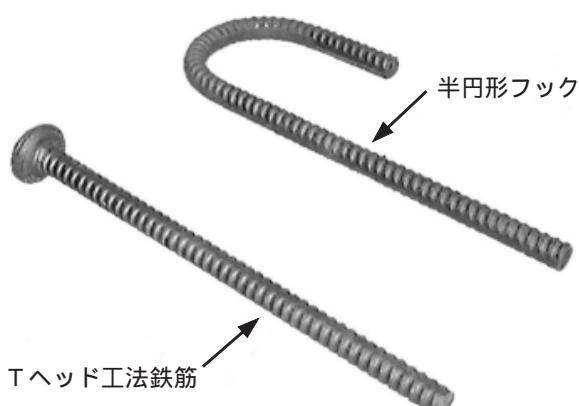


写真 - 2 Tヘッド工法鉄筋と半円形フック

試験体No.1は現行設計基準<sup>2)</sup>に基づく配筋を想定したもので、柱および梁の軸方向鉄筋の定着長は基準値を満足している。柱軸方向鉄筋については曲げ内半径3φの半円形フックを設けることにより定着長を10φ減じている。梁の軸方向鉄筋の曲げ内半径は10φである。試験体は柱の曲げ降伏モードで設計した。

写真 - 1 のように、配筋の施工性低下は曲げ内半径の大きさに起因しているため、試験体No.2では曲げ内半径を3φとした。

曲げ内半径10φで曲げられた梁の正側、負側の軸方向鉄筋は柱の軸方向鉄筋間に配置されるため、接合部内の鉄筋のあきが小さくなり、コンクリート充填性の低下を

表 - 2 鉄筋材料試験結果

鉄筋種類	適用箇所	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D10	柱軸方向鉄筋 (No.1~4)	417	179	588
	梁軸方向鉄筋 (No.1~4)	429	183	633
	柱, 梁軸方向鉄筋 (No.5)	416	178	565
D6	帶鉄筋 (No.1~4)	348	174	558
	帶鉄筋 (No.5)	378	182	538

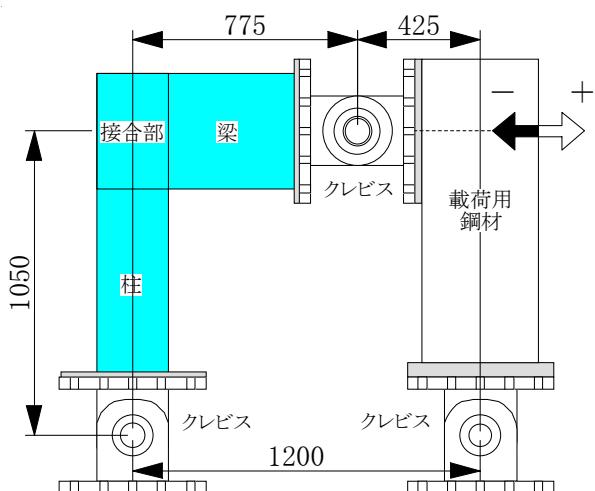
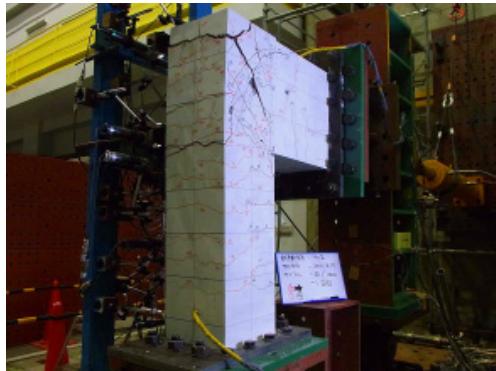


図 - 2 載荷装置

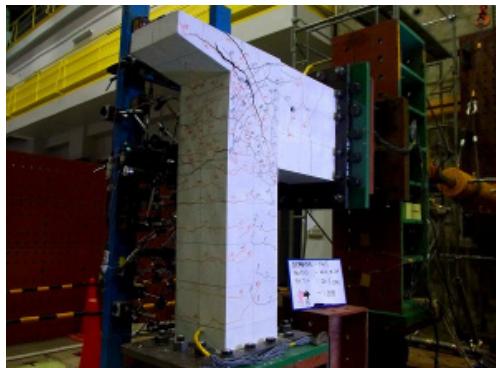
招く可能性がある。そのため、試験体No.3,4では、梁負鉄筋を曲げ下げることなく張出スラブに直線定着する場合を想定した。今回の実験では張出部の寸法を低減するため梁負鉄筋の定着に機械式定着具を用いた。梁負鉄筋の張出部における定着長は、マッシブなコンクリートに埋め込まれたTヘッド工法鉄筋に引抜き力が作用した場合、鉄筋の付着を除去した場合でも8の定着長で降伏強度が確保できるという実験データ<sup>12)</sup>を参考に安全側に10とした。

また、配筋の施工性向上のため、試験体No.4の梁正鉄筋と試験体No.5の柱の軸方向鉄筋には機械式定着工法を用いた。柱の軸方向鉄筋にSD390を用いる場合、標準フック部の曲げ内半径が3と大きくなるため機械式定着工法を用いることで施工性の改善が図れる。機械式定着具にはTヘッド工法鉄筋<sup>10)</sup>を用いた。Tヘッド工法鉄筋の拡径部径 $D_o$ は $2.5d$   $D_o = 2.8d$ 、拡径部厚さ $t$ は $0.8d$   $t = 1.2d$  ( $d$ は鉄筋の公称直径)である。

梁および柱の軸方向鉄筋はD10(SD390)、帯鉄筋はD6(SD345)、純かぶりは20mmとした。最大粗骨材寸法は13mmとした。試験時のコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果をそれぞれ表-1、表-2に示す。



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.3



(c) 試験体 No.5

写真 - 3 破壊状況 (-2%の1サイクル目終了後)

## 2.2 加力および計測方法

実験では実構造物で反曲点となる柱と梁の長手方向中央部に図-2のようにピンを設置し、梁側のピンと連結した載荷用鋼材を介して3ヒンジラーメンの梁高さ中央を載荷することにより接合部の応力状態を再現した。載荷は柱の変形角(0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3%)を制御変位として正負交番繰り返しで実施した。繰返し回数は1.5, 2で3回、それ以外では1回とした。正側は接合部を開く方向、負側は閉じる方向である。

計測は柱および梁の軸方向鉄筋および帯鉄筋のひずみや柱、梁および柱梁接合部など試験体各所の変位を計測した。

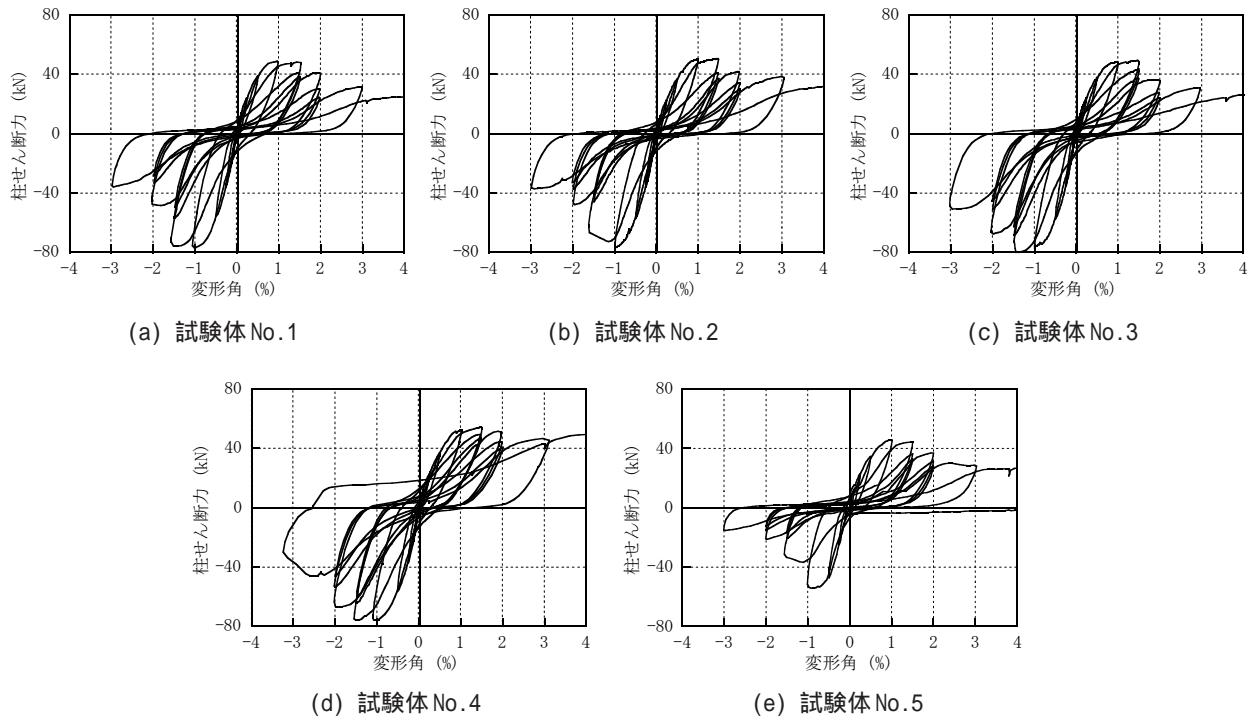


図 - 3 柱せん断力 - 変形角関係

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 試験体の破壊進展状況比較

-2%の1サイクル目終了後の試験体No.1, 3, 5の破壊状況を写真-3に、各試験体の柱のせん断力と柱の変形角の関係を図-3に示す。柱のせん断力と変形角の包絡線を図-4に、試験結果一覧を表-1に示す。試験体No.1の材料試験結果を用いて、コンクリートの材料係数cを1.0とした場合の柱曲げ耐力は正側で56.9kN、負側で73.9kNである。

各試験体とともに $\pm 0.1\%$ の1サイクル目で柱に $0.5\%$ のサイクルまでに梁上下にひび割れが発生した。試験体No.5の負側を除き、 $\pm 1\%$ のサイクルで柱の軸方向鉄筋が降伏した。いずれの試験体も正側で引張軸力、負側で圧縮軸力が柱に作用するため、正側と比較して負側の最大荷重が大きくなかった。

試験体No.1, 2では正側の荷重低下は $+1\%$ のサイクルで生じた接合部内の梁負鉄筋の曲げ下げ部に沿ったひび割れが、 $+1.5\%$ のサイクルで拡大・進展した時点で生じた。負側では $-1\%$ のサイクルで生じた接合部対角線上のせん断ひび割れが、 $-1.5\%$ のサイクルの繰り返し時に拡大・進展し、繰り返しとともに荷重が低下した。正側と比較して負側の荷重低下は急激であった。直交梁を考慮しない場合、現状の接合部構造は柱の変形角が $1\%$ 程度から荷重低下が始まること、試験体No.1, 2では最大荷重や破壊性状はほぼ同等であり、曲げ内半径の接合部性能に及ぼす影響は少ないことが確認できた。

試験体No.3では正側は試験体No.1と同様の破壊挙動

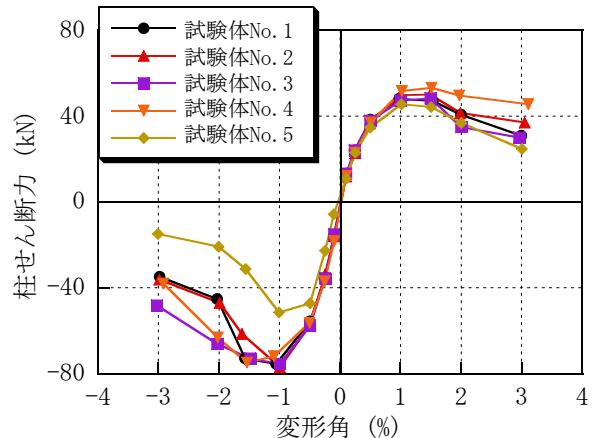


図 - 4 包絡線比較

であった。負側ではせん断ひび割れが $-1\%$ のサイクルで生じたが、ひび割れの拡大・進展が遅く、試験体No.1と比較して荷重低下が小さい。梁正鉄筋に機械式定着を用いた試験体No.4では試験体No.3と比較して正側の耐力が高かった。

試験体No.5では $-1\%$ のサイクルで接合部対角線上にせん断ひび割れが生じた。このひび割れが機械式定着具付近に進展し、機械式定着の定着力が大きく損なわれ、柱の軸方向鉄筋が降伏せずに負側の耐力が大きく低下した。

#### 3.2 接合部内ひずみ分布比較

試験体No.1, 2および試験体No.1, 3の $-0.5\%$ ,  $-1.5\%$ ,  $-3.0\%$ における接合部内での梁負鉄筋のひずみ分布比較をそれぞれ図-5, 図-6に示す。グラフでは梁および柱の接合部との境界面を起点としている。

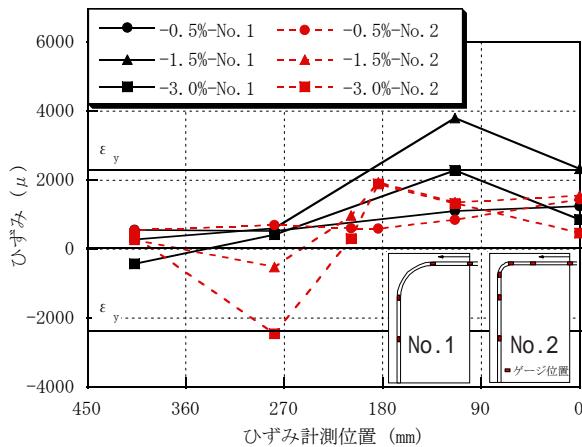


図-5 試験体No.1とNo.2の梁負鉄筋ひずみ分布

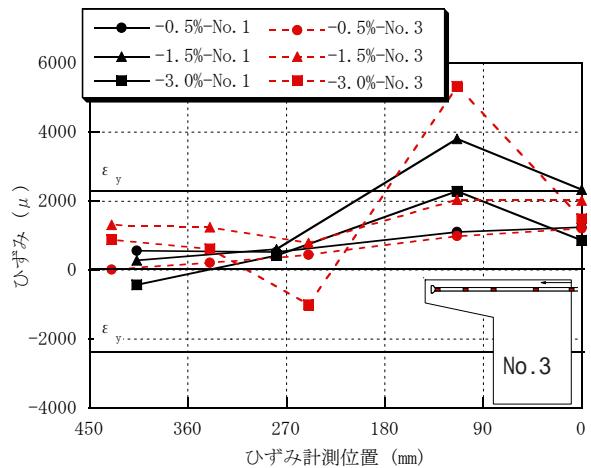


図-6 試験体No.1とNo.3の梁負鉄筋ひずみ分布

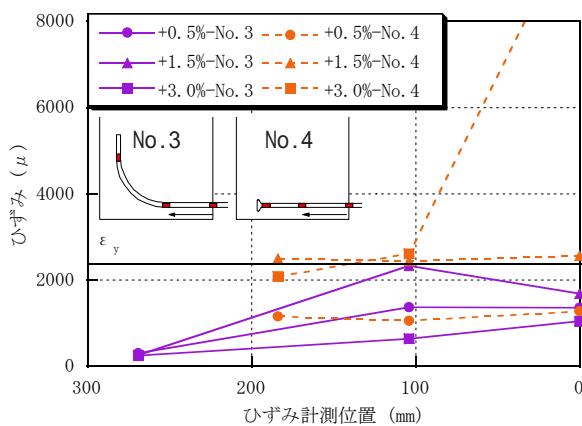


図-7 試験体No.3とNo.4の梁正鉄筋ひずみ分布

曲げ内半径が10, 3 の試験体No.1, 2ともに曲げ下げ開始点付近のひずみが大きくなっている。曲げ内半径3 の場合は、曲げ下げ終了後の直線部において鉄筋に圧縮力が作用しており、曲げ内半径の大きさにより鉄筋への作用力分布が異なっている。

図-6より試験体No.1では接合部の損傷が大きくなつた1.5%以降に定着力が減少し、ひずみが減少した。一方、張出部に負側鉄筋を直線定着した場合はせん断ひび割れ発生後においても、ひずみが増加しており定着力の減少が少ない。このため、試験体No.3は試験体No.1と比較して負側の荷重低下が小さかったと考えられる。

試験体No.3, 4の接合部内での梁正鉄筋のひずみ分布比較を図-7に示す。梁正鉄筋を曲げ内半径10 で定着した試験体No.3は、+1.5%以降のサイクルでひずみが減少しているのに対して、機械式定着を用いた試験体No.4ではひずみの減少が見られない。接合部のせん断ひび割れが生じた後も、曲げ上げて定着した軸方向鉄筋よりも、機械式定着を用いた方が定着性能の損失が少ないため、試験体No.4の正側の耐力は試験体No.3と比較して高かったと推測される。

試験体No.1, 5の接合部内での柱外側の軸方向鉄筋の

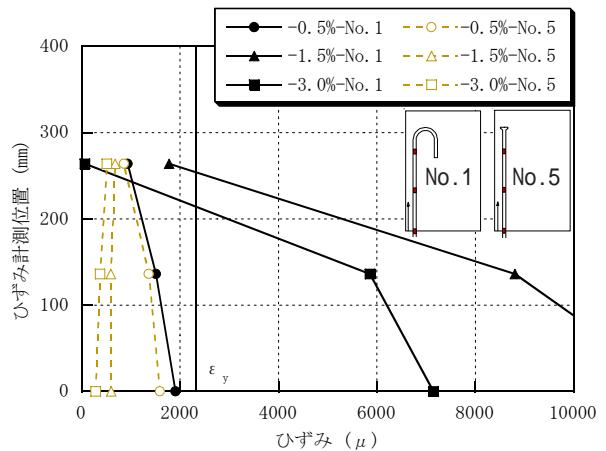


図-8 試験体No.1とNo.5の柱軸方向鉄筋ひずみ分布

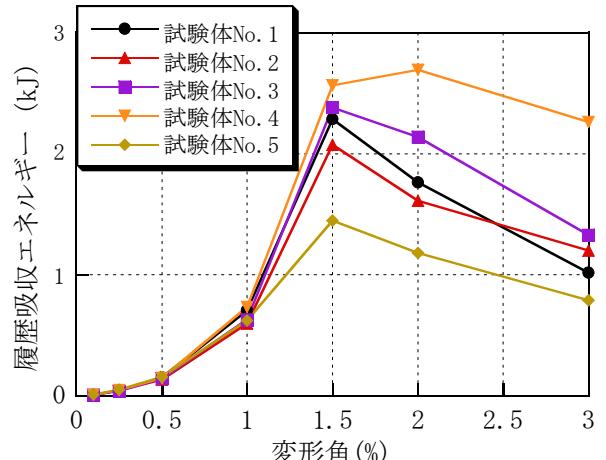


図-9 履歴吸収エネルギー

ひずみ分布比較を図-8に示す。柱の軸方向鉄筋のひずみ分布はせん断ひび割れが発生する前の-0.5%のサイクルでは同等である。軸方向鉄筋に機械式定着を用いた試験体No.5では、接合部のせん断ひび割れが生じた1%以降のサイクルで定着力が大きく減少し、梁負鉄筋への作用力を軸方向鉄筋に伝達できず耐力が低下した様子が確認できる。

### 3.3 履歴吸収エネルギー量比較

履歴吸収エネルギーと変形角の関係を図-9に、履歴吸収エネルギーの総和を表-1に示す。履歴吸収エネルギーは各変形角での柱せん断力・変位関係の面積であり、変形角が1.5, 2%の場合は全てのサイクルの和とした。

曲げ内半径を3とした試験体No.2は試験体No.1と比較して正側、負側ともに最大荷重、吸収エネルギーともにほぼ同程度であり、曲げ内半径による顕著な差異は見られなかった。

梁負鉄筋を張出部に直線定着した場合は、試験体No.1と比較して負側の耐荷性能が高く、1割程度吸収エネルギーが高くなった。梁正鉄筋に機械式定着を用いた場合は正側の耐荷性能が高かったため、4割程度吸収エネルギーが増加した。

柱主筋に機械式定着を用いた試験体No.5では変形角が1%程度から大きく低下し、試験体No.1と比較して合計履歴吸収エネルギーが71%となった。このように機械式定着の適用部位により接合部性能が大きく異なった。

### 4.まとめ

実験データの極めて少ない現状のラーメン高架橋の柱梁接合部の性能把握と接合部配筋の簡略化を目的として、柱や梁の軸方向鉄筋の定着方法や梁の曲げ内半径を実験要因とした柱梁接合部の構造実験を実施した。

今回の実験の範囲で、得られた知見を以下に示す。

- (1) 直交梁を考慮しない場合 現状の接合部構造は柱の変形角が1%程度から荷重低下が始まる。
- (2) 梁の軸方向鉄筋の曲げ内半径が3と10の場合、鉄筋への作用力分布は異なるが、最大荷重や破壊性状、吸収エネルギーはほぼ同等であり、曲げ内半径の接合部性能に及ぼす影響は少ない。
- (3) 張出部に梁負鉄筋を直線定着した場合、せん断ひび割れ発生後においても定着力の減少が少なく、負側の耐荷性能が向上する。
- (4) 梁正鉄筋を機械式定着した場合、接合部のせん断ひび割れが生じた後も、曲げ上げて定着した軸方向鉄筋よりも定着性能の損失が少なく正側の耐荷性能が向上する。
- (5) 柱の外側軸方向鉄筋を機械式定着した場合、せん断ひび割れが機械式定着具付近に進展し、機械式定着の定着力が大きく損なわれ、接合部性能が大きく低下する。

今回の実験は実大構造物の1/5程度の縮小モデルで実施した。このため、寸法効果や直交梁効果の検証や、数値解析を用いた破壊メカニズムの更なる解明が今後の課題である。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善、2004.4
- 2) 土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書、1931.9
- 3) 渡辺忠朋・松本信之・三島徹也：鉄道ラーメン式高架橋における柱・はり接合部が部材じん性に及ぼす影響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.13、No.2、pp.525-530、1991.
- 4) 吉住陽行・内田康一・矢野栄二郎・服部尚道・黒岩俊之・北沢宏和・谷村幸裕・田所敏弥・徳永光宏：RCラーメン高架橋の柱梁接合部における柱軸方向鉄筋の定着性能に関する実験的検討、第64回土木学会年次学術講演会、V-500、pp.997-998、2009.9
- 5) 田所敏弥・谷村幸裕・徳永光宏・米田大樹：高架橋接合部における機械式定着を用いた定着部の静的引張特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.2、pp.691-696、2009.
- 6) 吉武謙二・小倉大季・小川晃：高架橋接合部の柱および梁主鉄筋の鉛直・水平あきが付着特性に及ぼす影響、第65回土木学会年次学術講演会、V-555、pp.1109-1110、2010.9
- 7) 長井宏平・大胡賢一：機械式定着具を用いた定着部の損傷時における静的定着性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.2、pp.601-606、2010.
- 8) 土木学会：鉄筋定着・継手指針[2007年版]、コンクリートライブラリー128、2007.
- 9) 吉武謙二・小川晃・木村克彦・出羽克之：Tヘッド鉄筋工法の鉄道高架橋への適用に関する取組み、コンクリート工学、Vol.45、No.3、pp.23-29、2007.3
- 10) (財)土木研究センター：拡径部による機械式定着筋「Tヘッドバー」建設技術審査証明報告書、2008.11
- 11) (財)日本建築総合試験所：機械式鉄筋定着工法設計指針、2006.1
- 12) 木村克彦・小川晃・出羽克之・吉武謙二・前之園司：Tヘッド鉄筋の拡径部径および埋込長さが定着性能に及ぼす影響、第61回土木学会年次学術講演会、V-574、pp.1143-1144、2006.9