

# 論文 スパイラル鋼材で補強した軸方向鉄筋の重ね継手を塑性ヒンジ区間に集中配置した柱部材の交番載荷実験

渡部 太郎\*1・平山 武志\*2・山田 正人\*3

**要旨**：RC ラーメン高架橋のプレキャスト化を目指して、プレキャスト部材間の現場での接合作業を容易とするため、場所打ち接合部の軸方向鉄筋を重ね継手として、各々の重ね継手をスパイラル鋼材で補強する構造を考案した。ラーメン高架橋において塑性ヒンジが形成される部材端部への適用性を確認するため、柱基部の塑性ヒンジ区間において、スパイラル鋼材で補強した重ね継手を軸方向鉄筋全数に設けた柱部材の交番載荷実験を行った。交番載荷実験の結果、本実験で用いたスパイラル鋼材で重ね継手を補強した場合、重ね継手長を鉄筋径の15倍以上とすることで、じん性率11以上の変形性能を有していることが確認できた。

**キーワード**：プレキャスト高架橋、スパイラル鋼材、重ね継手、曲げ耐力、じん性率

## 1. はじめに

RC ラーメン高架橋にプレキャスト部材を適用する場合、各々のプレキャスト部材を現場で接合することが必要となる。プレキャスト部材の場所打ち接合部の軸方向鉄筋には継手を設ける必要があり、プレキャスト部材の製作精度と架設の施工精度を考慮した場合、機械継手を用いるとプレキャスト部材の製作と施工が難しくなる課題があった。

そこで筆者らは、プレキャスト部材の場所打ち接合部に、施工が容易で、かつ地震時の変形性能を確保できる継手構造として、軸方向鉄筋の重ね継手を重ね継手が収まる程度の小径のスパイラル鋼材で補強する継手構造を考案した。

図-1にこの継手構造を用いたプレキャスト梁部材の施工手順を示す。最初に(1)のように、プレキャスト柱部材から梁の軸方向鉄筋を突出させた状態で、軸方向鉄筋を突出させたプレキャスト梁部材をクレーンで落とし込んで、プレキャスト柱部材およびプレキャスト梁部材に固定された軸方向鉄筋を重ね継手の状態に配置する。次に(2)のように、あらかじめ柱部材または梁部材の突出させた鉄筋にくぐらせて仮置きしていた状態のスパイラル鋼材を横移動させて重ね継手を補強する位置に設置する。

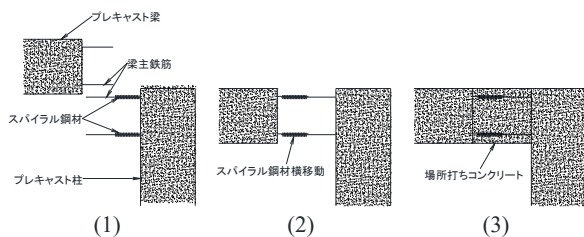


図-1 考案したプレキャスト部材接合構造の施工手順

最後に(3)のように、スターラップを配置し、型枠を組み立てて接合部のコンクリートを打込む。この方法によれば、鉄筋を重ねればよいので、施工誤差を吸収できる。鉄筋重ね継手はスパイラル鋼材で補強されているので、地震時に接合部が塑性ヒンジとなった後も鉄筋は一体で挙動するので、重ね継手部分が弱点にならない。

本文では、スパイラル鋼材で補強された軸方向鉄筋の重ね継手を柱基部に配置した柱試験体を用いて交番載荷実験を行い、考案した継手構造を有する柱部材の変形性能の確認を行ったので、その結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1に試験体諸元を示し、交番載荷実験に用いた試験体の寸法と配筋の例としてNo.1試験体の概要を図-2に示す。

柱の引張鉄筋はD19(SD345)を6本配置し、側鉄筋を含めた柱断面の全ての軸方向鉄筋を柱基部において重ね継手とした。重ね継手1組毎にスパイラル鋼材で重ね継手部分を囲って補強した。スパイラル鋼材は、JIS G 4314に適合するばね用ステンレス鋼線(SUS304WPB, 引張強さ1350~1600N/mm<sup>2</sup>)を用いた。スパイラル鋼材の量は、実際のRC高架橋で使用を想定している鋼材量を縮小した量として、径4mm、外径54mm、25mm程度のピッチでスパイラル加工された製品を重ね継手長の長さに切断して使用した。試験体に用いたコンクリートの粗骨材の最大寸法は20mmとして、スパイラル鋼材間にコンクリートが充填されるようにした。

柱基部のスパイラル補強された重ね継手部分の変形性能を確認するため、確実に柱基部の重ね継手範囲で柱

\*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 主幹研究員 博(工) (正会員)  
 \*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 工修 (正会員)  
 \*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 上席研究員 博(工) (正会員)

部材を損傷させるようにした。具体的には、曲げせん断耐力比が2程度となるように定めた帯鉄筋量として、D10 (SD345) を 52mm 間隔で基部から 2D (D:柱の断面高さ 400mm) の範囲に配置した。重ね継手範囲の帯鉄筋はスパイラル鋼材に支障するため、コの字状の帯鉄筋を柱側面においてフレア溶接して配置した。

プレキャスト高架橋の施工においては、プレキャスト部材を架設した後に接合部を場所打ちする手順を想定している。本実験では、現場でプレキャスト部材と場所打ち接合部の打継目を適切に施工することを前提に、柱部材のコンクリートを一体で打込んで製作し、打継目の無い部材を用いて接合部の構造性能を確認することとした。

試験体のパラメータは、重ね継手長(No.3 試験体:15φ, No.1 試験体:20φ)と重ね継手区間の帯鉄筋の有無(No.2 試験体:重ね継手区間の帯鉄筋を省略)とした。

試験体に用いた材料の試験結果を表-2 に示す。コンクリート強度は一般的なプレキャスト部材のコンクリート強度に合わせて、40N/mm<sup>2</sup> を目標の強度とした。

## 2.2 実験方法及び計測項目

柱天端に一定の鉛直力(軸圧縮応力度 1.0N/mm<sup>2</sup>)を載荷した状態で、せん断スパン 1550mm となる柱頭部付近を静的に正負水平方向(水平ジャッキの押し引き方向)に交番載荷した。本文中で考案した継手構造は、柱部材の接合にも適用する可能性があるため、今回の実験では軸圧縮応力を載荷した状態で交番載荷実験を行った。一般に、RC 部材の変形性能は軸圧縮応力度が大きい方が小さくなると考えられるので、軸圧縮応力を載荷して実験を行った。

交番載荷は、試験体基部の軸方向鉄筋が材料試験から求めた降伏ひずみに達するまで正負方向に1回載荷し、以後は降伏したときの柱頭部変位を1δ<sub>y</sub>として、変位制御にて降伏変位の整数倍の変位(2δ<sub>y</sub>, 3δ<sub>y</sub>...)を1回ずつ引き側(正側)、押し側(負側)に試験体が破壊するまで交番載荷を行った。

実験では、柱頭部の水平荷重と水平変位を計測するとともに、各試験体の軸方向鉄筋と帯鉄筋に貼り付けたひずみゲージで鉄筋ひずみを計測した。各変位段階毎にひび割れ発生状況と部材の損傷状況を観察した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 試験体の破壊性状

各試験体の載荷初期の2δ<sub>y</sub>、最大荷重時付近、降伏荷重を下回らない最大変位で定義される終局変位付近および実験終了時の損傷状況をそれぞれ図-3~5 に示す。

No.1 試験体は重ね継手長を 20φ として、重ね継手区間も含めた柱基部から 2D の範囲を曲げせん断耐力比 2.0 程度とした試験体である。図-3 より、2δ<sub>y</sub>において、

表-1 試験体諸元

試験体 No.	柱断面 (mm)	引張鉄筋	側鉄筋	重ね継手長(nφ)	帯鉄筋	
					重ね継手区間	重ね継手~2D区間
1	400×400	D19×6本	D19×3本 / 片側	20φ	D10ctc52mm	
2					無し	D10ctc52mm
3					D10ctc52mm	

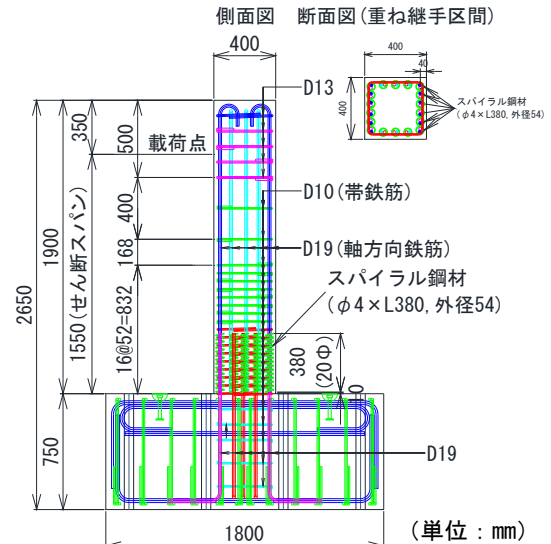


図-2 試験体概要 (No. 1 試験体)

表-2 材料試験結果

試験体 No.	柱	フーチング	軸方向鉄筋(D19)		スターラップ(D10)	
			コンクリート圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	降伏強度 $f_{sy}$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	降伏強度 $f_{sy}$ (MPa)
1	39.7	37.8	355	178	380	168
2	44.7	44.2	368	178	377	182
3	44.4	43.0	356	180	367	180

曲げひび割れが 100mm 程度の間隔で発生しているが、柱基部の重ね継手区間の曲げひび割れの数が少ないことが確認できる。

正側(引き側)で最大荷重となった9δ<sub>y</sub>においては、柱基部(フーチングとの境界部)の曲げひび割れが大きく開いているほか、重ね継手区間の上端側(柱基部より390mmの位置)のひび割れ幅がやや大きいことが確認できる。側面の斜めひび割れは特に重ね継手の範囲において少し進展している程度であり、柱部材の損傷はあまり見られない。

終局変位を少し超えた15δ<sub>y</sub>(正側載荷)においても、柱基部近傍のコンクリートの剥落が見られる程度でそれよりも上部に顕著な損傷は見られない。16δ<sub>y</sub>(正側載荷)において、柱基部の引張鉄筋が2本破断(負側載荷でさらに1本破断)して荷重がやや低下し、16δ<sub>y</sub>で実験を終了した。実験終了時においても、スパイラル鋼材のフーチング側の端部においてコンクリートの剥落と鉄筋の局部的な座屈が生じたことを除いてかぶりコンクリートのはらみ出しは見られず、柱断面はひび割れ発生程度の損傷状態を保ったまま実験を終了した。

No.1 試験体は、重ね継手区間の鉄筋が正負水平交番載



(a) 載荷初期 ( $2\delta_y$ )



(b) 最大荷重付近 ( $9\delta_y$ )



(c) 終局変位付近 ( $15\delta_y$ )

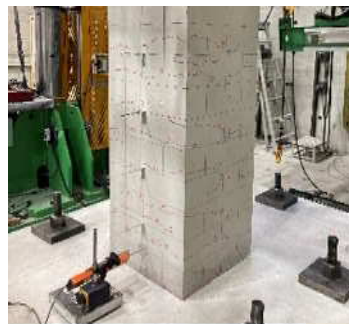


(d) 実験終了付近 ( $16\delta_y$ )

図-3 No.1 試験体の損傷状況

荷でもはらみ出しは見られず柱断面は健全であり、フーチング天端と柱境界部の 100mm 程度の狭い範囲で損傷が進行した結果、引張鉄筋の破断で曲げ破壊した。柱基部から 50~100mm より上部はスパイラル鋼材内部のコンクリートも詰まった状態で重ね継手の定着強度は健全な状態であったと思われる。

No.2 試験体は、重ね継手長を  $20\phi$  として、重ね継手区間の帯鉄筋を配置していない試験体である。  $2\delta_y$  におい



(a) 載荷初期 ( $2\delta_y$ )



(b) 最大荷重付近 ( $6\delta_y$ )



(c) 終局変位付近 ( $9\delta_y$ )

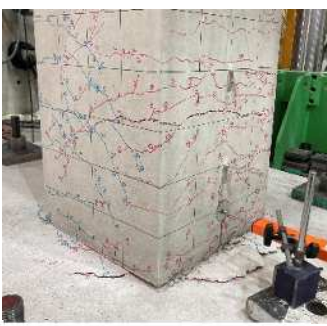


(d) 実験終了後(載荷面・側面側)

図-4 No.2 試験体の損傷状況



(a) 載荷初期 ( $2\delta_y$ )



(b) 最大荷重付近 ( $7\delta_y$ )



(c) 終局変位付近 ( $12\delta_y$ )



(d) 実験終了後(載荷面側)

図-5 No.3 試験体の損傷状況

ては No.1 と同様に重ね継手区間の曲げひび割れ本数が少ない状態であった。

正側で最大荷重となった  $6\delta_y$  においては、柱基部から 0.5~1.0D 付近の柱側面の斜めひび割れが多いことが確認できる。また、柱基部の曲げひび割れ幅が大きい一方で柱基部から 1.0D 付近の曲げひび割れとそのひび割れが側面で斜めひび割れに進展しているひび割れの幅が大きくなっていることが観察できる。

荷重が大きく低下した終局変位付近の  $9\delta_y$  においては、柱基部から 1.5D 程度からの斜めひび割れが大きく開き、圧縮側の面のかぶりコンクリートを押し出している状況が確認でき、せん断破壊の性状を示している。これは 1D 区間において帯鉄筋が配置されていないため、斜めひび割れ幅の増大を防げなかったためであると思われる。実験終了後にかぶりコンクリートを取り除いて柱内部を確認したところ、スパイラル補強された重ね継手周囲のコンクリートは、せん断ひび割れが引張鉄筋と交差した重ね継手区間の上部を除いてかなり詰まっている状態であることが確認できたが、柱く体内部に X 字状の斜め方向の破壊面が形成されていることが観察できた。

No.3 試験体は No.1 試験体に比べて重ね継手長を  $15\phi$  と短くした試験体である。柱基部から 10~295mm の範囲で重ね継手となっている。 $2\delta_y$  においては、No.1,2 試験体と同様に、基部から重ね継手上端部までの区間の曲げひび割れの本数が少ないことが分かる。

最大荷重となった  $7\delta_y$  においては、基部の曲げひび割れ幅が大きいほか、柱基部から 300mm 付近の曲げひび割れ幅が大きくなっていることが確認できる。引張側の面の鉛直斜め方向のひび割れも進展している。

正側で終局変位（降伏荷重を下回らない最大変位）となった  $12\delta_y$  においては、最大荷重時に幅が大きかった基部と基部から 300mm 程度のひび割れ幅が顕著になるとともに、引張側の載荷面の柱基部から 1D 区間の鉛直斜め方向のひび割れの数が非常に多くなっている状況が確認できる。

実験終了後に柱基部から 1D 程度の範囲のかぶりコンクリートを取り除いたところ、重ね継手全長にわたってスパイラル鋼材内部のコンクリートが損傷して、所々欠落している状況が確認された。

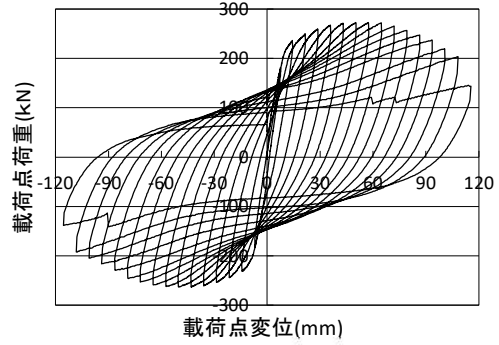
### 3.2 荷重－変位関係と曲げ耐力、変形性能

各試験体の載荷点荷重と載荷点変位の関係について、**図－6～8** に示す。

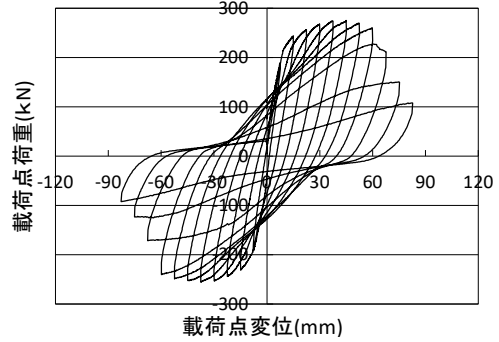
No.1 試験体は、鉄筋が破断して実験を終了した  $16\delta_y$  まで履歴吸収エネルギーの大きな荷重－変位関係を示している。スパイラル鋼材内部のコンクリートは、拘束により強度及び靱性が向上するので、その影響により最大荷重以降の耐力を保持する効果があったと考えられる。

No.2 試験体においては、 $8\delta_y$  までは No.1 試験体と同様の荷重－変位関係を示していたが、斜めひび割れが開いた  $9\delta_y$  において大きく荷重が低下した。

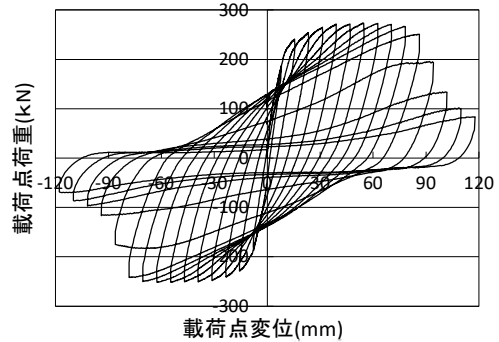
No.3 試験体においても荷重低下が顕著となった  $11\delta_y$  の負側載荷時までは、No.1 と同様の荷重－変位関係を示した。No.2 試験体と同様、荷重が低下し始めた後の荷重低下度合いは大きかった。



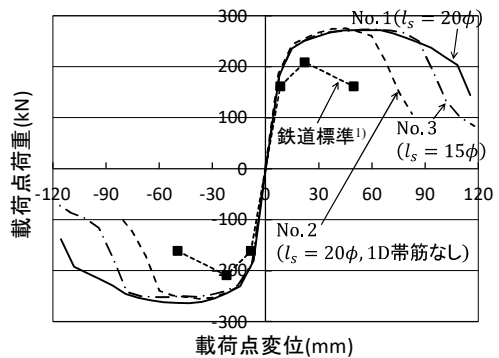
図－6 荷重－変位関係 (No.1 試験体)



図－7 荷重－変位関係 (No.2 試験体)



図－8 荷重－変位関係 (No.3 試験体)



図－9 荷重－変位包絡線の比較

各試験体の荷重－変位関係の包絡線を比較して示したものを**図－9**に示す。なお、**図－6～9**においては、軸力による P- $\delta$  効果の補正は行っていない。**図－9**より、No.2,3 試験体は荷重の低下が顕著となる変位段階までは No.1 試験体と同等の荷重を維持していることが確認できる。**図－9**には、No.1 試験体について鉄道構造物等設計標準<sup>1)</sup>により算定した荷重と変位の骨格曲線を

表-3 曲げ耐力とじん性率

試験体 No.	降伏曲げ耐力			終局曲げ耐力			じん性率 $\mu$ (実験値)		
	実験値 $P_{yexp}$ (kN)	計算値 $P_{ycal}$ (kN)	$P_{yexp}/P_{ycal}$	実験値 $P_{uexp}$ (kN)	計算値 $P_{ucal}$ (kN)	$P_{uexp}/P_{ucal}$	$\mu$ (正側)	$\mu$ (負側)	$\mu$ (平均)
1	181.0	161.3	1.12	268.3	209.2	1.28	14.75	16.14	15.45
2	185.4	166.8	1.11	265.3	217.8	1.22	9.76	9.30	9.53
3	186.0	161.5	1.15	262.8	211.5	1.24	12.00	10.83	11.41

併せて示している。スパイラル鋼材で補強された重ね継手を配置した柱基部で曲げ損傷した No.1 試験体においては、耐力及び変形性能ともに鉄道標準から算定される骨格曲線よりも大きくなっていることが確認できる。

降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力の実験値と計算値を比較した結果を表-3 に示す。降伏曲げ耐力の実験値は計算値の 1.11~1.15 倍、終局曲げ耐力の実験値は計算値の 1.22~1.28 倍程度となり、スパイラル補強した重ね継手を塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋に設けた柱部材は、計算値を上回る曲げ耐力を有していることが確認できた。

図-9 に示した荷重-変位包絡線をもとにじん性率 $\mu$ の実験値を算定した結果を表-3 に示す。実験終了まで柱基部から 50~100mm 程度の範囲でのみ顕著な損傷が見られた No.1 試験体のじん性率 $\mu$ は 15.45 となり、大きな変形性能を有していることが分かった。これに対して重ね継手長を 15 $\phi$ とした No.3 試験体は、終局変位付近の荷重低下度合いは比較的大きかったものの、じん性率 $\mu$ としては 11.41 と比較的大きな値を示した。

曲げ降伏後にせん断破壊した No.2 試験体は、じん性率 $\mu$ が 9.53 と少し 10 を下回る値となった。柱基部の曲げモーメントが最大となる区間にスパイラル補強した重ね継手を配置する場合、せん断ひび割れが顕著となる破壊性状やじん性率の値から、重ね継手区間の帯鉄筋は省略しない方がよいことが示唆される結果となった。

### 3.3 鉄筋ひずみ分布

#### (1) 軸方向鉄筋の柱高さ方向のひずみ分布

各試験体の引張側に 6 本配置した引張鉄筋のうち中央付近の引張鉄筋の柱高さ方向のひずみ分布を各変位段階 ( $n\delta_y$ ) について、図-10~12 に示す。

No.1 試験体においては、柱基部の引張鉄筋のひずみが変位の増加とともに順次進展し、10 $\delta_y$ において 90000 $\mu$ 程度の値を示した。重ね継手上端部(基部から 390mm 上部の位置)においてもひずみの値が 20000 $\mu$ 程度となった。No.1 試験体では、重ね継手中央部(重ね継手長の端部から 190mm の位置)のひずみを計測しているが、この箇所のひずみの値は、重ね継手の鉄筋 2 本分のひずみの合計値を示している。12 $\delta_y$ において、フーチングに定着している鉄筋が降伏ひずみに達したものの、鉄筋 2 本分でも 3200 $\mu$ 程度と重ね継手上端と下端それぞれに比べてひずみの値は小さくなった。これは、柱基部を除いて

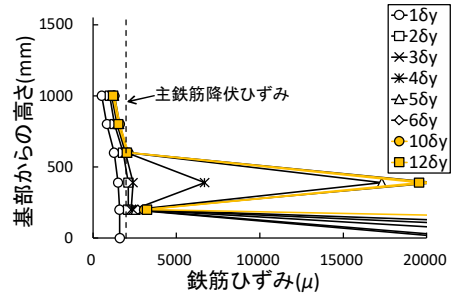


図-10 引張鉄筋のひずみ分布 (No. 1 試験体)

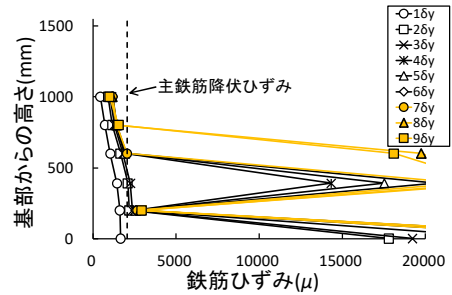


図-11 引張鉄筋のひずみ分布 (No. 2 試験体)

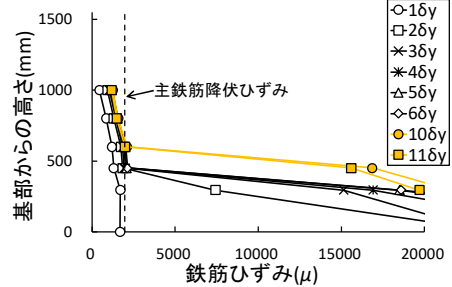


図-12 引張鉄筋のひずみ分布 (No. 3 試験体)

損傷が小さく、重ね継手範囲のひび割れ幅は大きくならず、柱コンクリートの損傷も進展しなかったためと考えられる。

No.2 試験体においては、斜めひび割れ幅が顕著となる変位段階において、柱 1D 区間から上部のひずみが大きく進展した。

No.3 試験体においては、No.1 試験体と同様のひずみ分布の傾向となり、柱基部で一番大きく、次いで重ね継手上端部におけるひずみが大きくなった。No.3 試験体のひずみ分布の特徴としては、10 $\delta_y$ から 11 $\delta_y$ にかけて柱基部の鉄筋ひずみが小さくなっている。No.2 試験体は柱基部から 1D 程度の範囲でかぶりコンクリートの浮きと剥落が観察され、重ね継手のスパイラル鋼材内部のコンクリートの欠落も観察された。荷重-変位関係の荷重低下

の度合いが大きかったことも併せて考慮すると、重ね継手の付着が失われたため、軸方向鉄筋のひずみが小さくなったものと考えられる。

### (2) 帯鉄筋の柱高さ方向のひずみ分布

各試験体の柱の側面側（せん断力を受ける方向）の帯鉄筋ひずみの柱高さ方向の分布を各変位段階（ $n\delta_y$ ）について、図-13～15に示す。

No.1 試験体においては、 $10\delta_y$ 以降、柱基部の帯鉄筋のみ、ひずみの値が大きく進展しており、柱基部より上側の鉄筋ひずみは降伏に達しなかった。柱基部付近でのみ損傷した状況と対応した高さ方向のひずみ分布となっている。

No.2 試験体においては、斜めひび割れ幅が顕著に大きくなった $8\delta_y$ 以降、重ね継手上端位置の帯鉄筋ひずみの値が大きくなっている。

No.3 試験体においては、 $12\delta_y$ まで帯鉄筋は降伏していないが、基部から重ね継手上端付近にかけての帯鉄筋ひずみが他より相対的に大きくなっている。No.3 試験体は、かぶりコンクリートの浮きや剥落が見られており、それにより重ね継手区間の軸方向鉄筋のはらみ出しが若干発生したため、それにより帯鉄筋のひずみがNo.1 試験体よりも大きくなったものと推定される。

## 4. まとめ

スパイラル鋼材で補強した一断面集中重ね継手を塑性ヒンジ区間に配置した柱部材の交番載荷実験を行った結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 重ね継手長を  $20\phi$  として帯鉄筋を配置した No.1 試験体は、柱基部付近に損傷が集中し、スパイラル補強された重ね継手の定着は実験終了時まで保たれた。エネルギー吸収の大きな安定した荷重-変位関係を示し、じん性率  $\mu$  は 15.5 程度と大きな変形性能を有していることが確認できた。
- (2) 重ね継手長を  $20\phi$  として重ね継手区間の帯鉄筋を無くした No.2 試験体は、曲げ降伏後にせん断破壊した。柱基部に重ね継手を設ける場合には、ある程度の帯鉄筋は配置する必要があることが示唆される結果となった。
- (3) 重ね継手長を  $15\phi$  として帯鉄筋を配置した No.3 試験体は、重ね継手区間の柱部材の損傷が観察され、重ね継手の付着が失われて荷重低下が顕著になっ

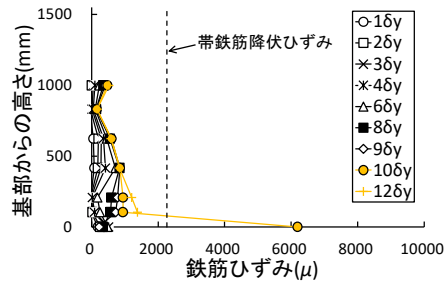


図-13 帯鉄筋のひずみ分布 (No. 1 試験体)

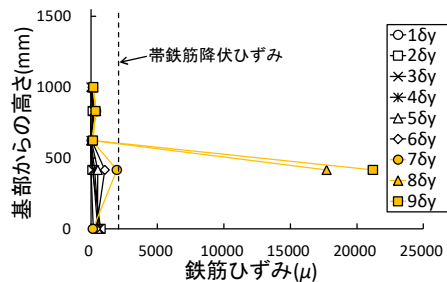


図-14 帯鉄筋のひずみ分布 (No. 2 試験体)

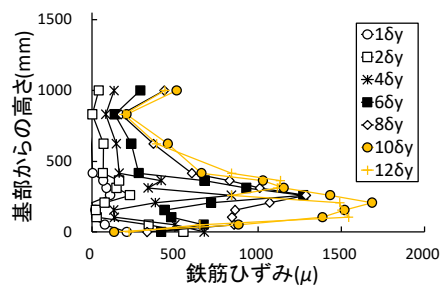


図-15 帯鉄筋のひずみ分布 (No. 3 試験体)

たものと推定される。しかしながら、じん性率  $\mu$  は 11.4 程度となり、部材としての変形性能は有していることが確認できた。

今回の実験において、スパイラル補強された重ね継手を有する部材の変形性能を確認することができた。プレキャスト部材の場所打ち接合部の施工性をさらに向上させるため、重ね継手長や帯鉄筋量の低減を図ることが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：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。