

# 論文 高靱性セメント材料を使用した柱部材の変形性能

尾崎 奨太<sup>1</sup>・幸左 賢二<sup>2</sup>・清水 英樹<sup>3</sup>・小川 敦久<sup>4</sup>

**要旨:** ビニロン繊維を用いた高靱性セメント材料を単柱式橋脚を模擬した供試体の柱外周面とフーチング上部に施工し、柱部材の変形特性について正負交番載荷試験により評価した。その結果、柱部材圧縮側において、高靱性セメント材料が持つ高い応力架橋効果によって、主鉄筋のはらみ出しを拘束する効果があることを示した。一方、フーチングと柱基部との一体性向上については、フーチング上部にも高靱性セメント材料を用いることで、初期の段階で若干の効果が認められたが、大変形時では十分な改善が認められなかった。

**キーワード:** 高靱性セメント材料, 柱部材, フーチング, 正負交番載荷実験

## 1. はじめに

高靱性セメント材料は、繊維によるひび割れ間の応力架橋効果などから、圧縮・引張ともに非常に大きな靱性を有する材料である。この高靱性セメント材料を用いることで、RC柱の塑性域周辺における変形性能の向上が期待できるものと考えられる。

著者らが過年度実施した No.4-1 供試体の実験結果で、全断面に高靱性セメント材料で補強せずとも、柱の一般的な圧縮領域である断面幅の2割を高靱性セメント材料で置き換えるだけで、無補強供試体の1.9倍の変形性能が得られることを確認している。一方、以下に示す2点が過年度までの検討における改善点として認められた。

### 1) 引張側基部の付着切れによる柱浮き上がり抑制

柱とフーチング部の境界面は異種材料であるため、変形の進展に伴い付着切れが発生する。そこで、この付着切れを抑制できる補強を行う。

### 2) 高靱性セメント材料のさらなる高靱性化

No.4-1 供試体に使用している高靱性セメント材料をより靱性性能の高い配合とした材料を用いて補強を行う。

本研究では、以上2点を改善させた No.4-4 供試体を提案し No.4-1 供試体の実験結果を比較し、改善後の効果を確認する。図-1 に本研究でのフローを示した。

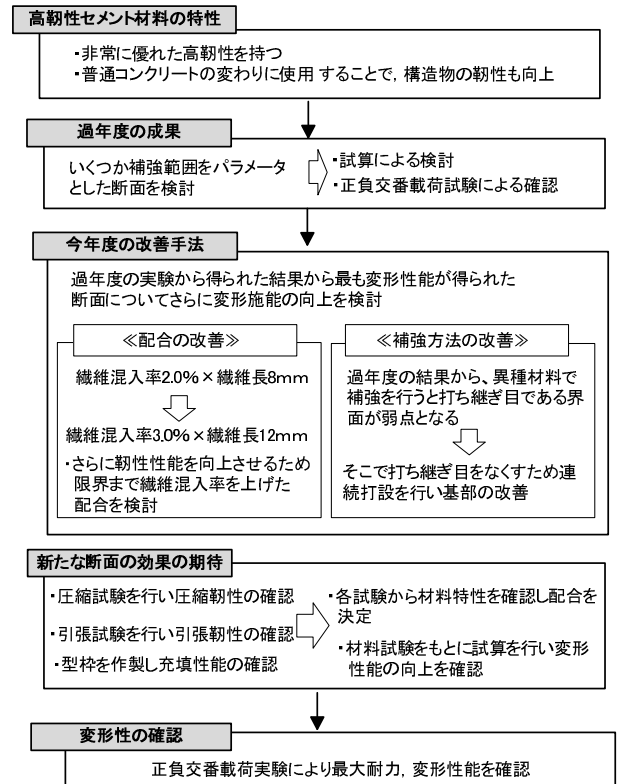


図-1 研究フロー

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

表-1に供試体諸元、図-2に供試体の基本断面および形状を示す。図-2に示すNo.1供試体が本検討の基準となる供試体であり、一般的なRC単柱式橋脚を想定している。主鉄筋にはSD345, D19, 帯鉄筋にはSD345, D10を使用しており、主鉄筋比および帯鉄筋比については、No.1供試体のような普通RC断面の破壊形態が曲げ破壊を呈するように、それぞれ1.43%, 0.63%に設定した。

図-2に示す通り、帯鉄筋を含む状態で柱の4側面を覆うように高靱性セメント材料を施工し、帯鉄筋のかぶり厚は50mm、高靱性セメント材料の総施工厚は80mmとした。また、補強高さに関しては、最大荷重時において降伏モーメント以上の断面力が発生する範囲が基部からおよそ0.3~0.4H (H: 載荷点高さ) であることから、接合面での破壊を防ぐ目的で、柱基部から700mmまでを補強の対象とした。

\*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (正会員)

\*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D (正会員)

\*3 大日本コンサルタント株式会社 九州支社 技術部 (正会員)

\*4 (株)クラレ 繊維資材事業部 産資開発部 (正会員)

表-1 供試体諸元

供試体番号		No.1	No.4-1	No.4-4	主鉄筋	使用鋼材	SD345
断面[mm]		400×400	400×400	400×400		帯鉄筋	降伏強度[N/mm <sup>2</sup> ]
芯かぶり厚[mm]		50			径		D19
せん断スパン[mm]		1400			使用鋼材	SD345(295)	
コンクリート強度[N/mm <sup>2</sup> ]	高靱性セメント	—	69.1	70.3	降伏強度[N/mm <sup>2</sup> ]	362(310)	
	普通コンクリート	30.3	28.1	24.8	径	D10	
軸圧縮応力[N/mm <sup>2</sup> ]		1.0			間隔[mm]	150	
引張鉄筋比[%]		1.43			体積比[%]	0.63	

※()内はNo. 4-4

## 2.2 本検討における供試体構造の改善点

今回提案している No.4-4 の補強概要を過年度実施した No.4-1 供試体と併せて図-3 に示す。

No.4-1は、帯鉄筋を含む厚さ80mm（かぶり50mm）で高靱性セメント材料を施工することによって、主鉄筋と一体性が確保され、大変形時においても優れた拘束効果が得られていた。しかしながらNo.4-1では、柱基部におけるフーチングとの境界面が異種材料による接合面になることから十分な付着強度が得られず、引張側基部において付着切れによる浮き上がり現象が生じた。

したがって、今回提案するNo.4-4供試体では、柱からフーチングにかけ連続打設を行い、打ち継ぎ目をなくすことによる付着切れならびに浮き上がり現象の改善効果について検討を行った。ここで、フーチング上部における高靱性セメント材料の施工厚さについては、本実験の作業上の制約から100mmとした。打設手順次の通りである。①フーチング部に普通コンクリートを打設後、硬化初期において接合面となる部位をブラッシングすることによってレイタンス等の脆弱部を取り除いた、②帯鉄筋内部に型枠を設置し、柱コア部の普通コンクリートを打設した、③柱コア部コンクリートの硬化初期において、4側面をブラッシングによって研掃した、④浮き型枠を設置後、フーチング上層と柱基部からH700mmまでの部分に高靱性セメント材料を打設し、硬化初期において上面を研掃した、⑤その後、柱上部の700mmに普通コンクリートを施工した。

## 2.3 高靱性セメント材料のさらなる高靱性化の検討

大変形時には中立軸が圧縮側に移動するため、圧縮領域が狭まることによる応力の増大から、圧縮側において圧壊が生じる。このことから、高靱性材料を用い圧縮部材の靱性を向上させ、柱基部における応力分散を図ることにより柱部材の曲げ靱性が向上すると考えられる。

本研究では高靱性セメント材料のさらなる高靱性化を目的としているため繊維長、混入率に着目し検討を行った。高靱性セメント材料は繊維長を伸ばすことや繊維混入率を増やすことにより靱性の向上することが報告されているため、ビニロン繊維の繊維長や添加量をパラメータとし、最も靱性性能のある配合を検討した(表-2)。

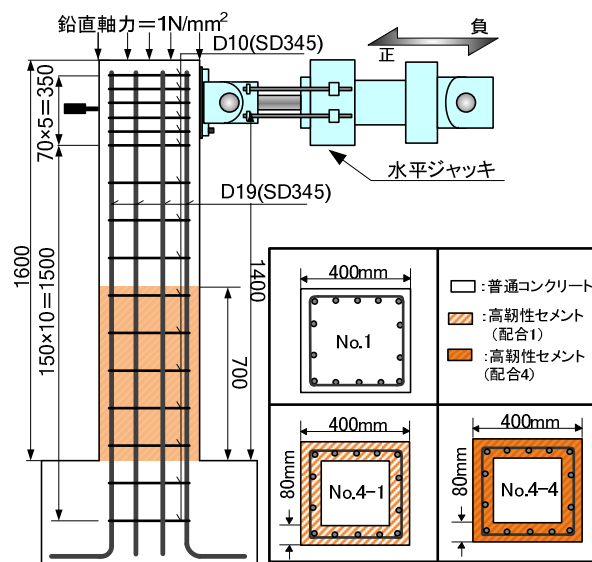


図-2 供試体概要

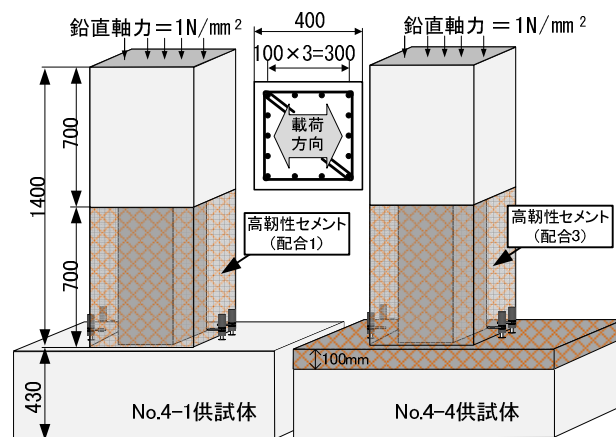


図-3 No. 4-1・No. 4-1 補強範囲

表-2 配合諸元

配合	Vol (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								繊維長(mm)
		W	C	SF	FA	S	SP	増粘剤	PVA	
1	2.0	323	804	100	0	795	18	0.9	26	8
2	2.0	323	804	100	0	795	18	0.9	26	12
3	3.0	261	580	0	580	580	20	0	39	12

配合-1はNo.4-1で使用した配合であり、繊維長8mmの繊維を分散性、施工性などの観点から2.0Vol%で混入させたものである。本研究においては、この配合-1を基準

として繊維長，ならびに繊維混入率を変えることによって圧縮・引張靱性の向上を図ることとした。配合-2では，繊維混入率を同一とし繊維長を8mmから12mmに変更した。配合-3では，繊維長の変更(8mm→12mm)に加え，施工可能な範囲で繊維混入率を最大限に増加させることを目的に，高靱性セメント材料の配合を検討した結果，表に示すような繊維混入率が3.0Vol%の配合となった。

### 3. 材料試験結果

#### 3.1 圧縮試験

圧縮部材の靱性性能は柱の変形性能に大きく影響することから，圧縮試験では，最大圧縮応力後の下降域における挙動に着目した。圧縮試験において，最大応力以降にひび割れが発生するとともにひずみが進展すると，上載荷盤が傾斜するため，ひずみ計測が困難となる。そこで，4本の変位計を対角線状に配置し，その平均値から圧縮ひずみを求めた。また，荷重は変位制御とし下降域を精度良く計測するため荷重速度を装置の下限値0.5mm/minとした。図-4に圧縮試験結果を示す。本研究では，高靱性セメント材料によるかぶり部分が終局付近まで断面力を受け持つことを想定している。そこで，これまでの研究成果<sup>1)</sup>や他の研究結果<sup>2)</sup>から高靱性セメント材料が最大圧縮応力の25%相当まで断面力を受け持つと想定し，そのときのひずみを圧縮終局ひずみとした。圧縮終局ひずみを各配合で比較すると配合1が18000 $\mu$ 程度であったのに対し，配合2では30000 $\mu$ ，配合3では40000 $\mu$ を超える結果となった。また，圧縮強度は，配合1では71.4N/mm<sup>2</sup>，配合2で62.7N/mm<sup>2</sup>，配合3で69.2N/mm<sup>2</sup>となり，各配合の圧縮強度は±5N/mm<sup>2</sup>程度の誤差であった。これらの圧縮試験結果から，配合2のように繊維長を伸ばすことで靱性の向上が確認でき，さらに配合3のように混入率を増やすことによって，さらなる靱性の向上が確認された。よって，本研究ではNo.4-4の配合として配合-3を使用するものとした。また，高靱性セメント材料の引張強度は，文献<sup>1)</sup>と同様に無視した。

#### 4. 実験結果

荷重方法は実構造物の上部工死荷重を再現するため，柱供試体の上面より1.0N/mm<sup>2</sup>相当の一定軸力を荷重して正負交番水平荷重を行った。試算で求めた降伏荷重までは荷重制御で荷重し，引張側主鉄筋の降伏を確認した時点での変位を $\delta_y$ と定義し，降伏以後は $\delta_y$ の整数倍を変位制御により荷重した。また，終局は降伏荷重を下回った点を終局と定義した。

図-5に各供試体のP- $\delta$ 履歴曲線を示す。No.1では約150kNで主鉄筋が降伏ひずみを超え，3 $\delta_y$ (26.6mm)で最大荷重(201kN)に達した。また，7 $\delta_y$ (62.1mm)までは荷重

を保持していたが，その後かぶりコンクリートの剥落と共に急激に荷重が低下し，8 $\delta_y$ (71.4mm)で $P_y$ を下回った。No.4-1では，約136kNで主鉄筋が降伏ひずみを超え，5 $\delta_y$ (44.5mm)で最大荷重(222kN)に達した。その後，13 $\delta_y$ (115.2mm)まで荷重を保持したまま変位が進展したが，柱基部のはらみ出しの発生とともに荷重が低下し，

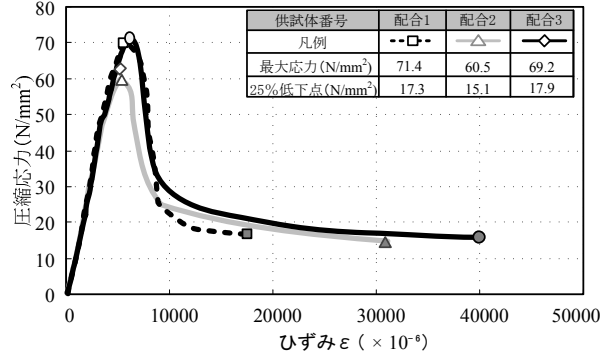
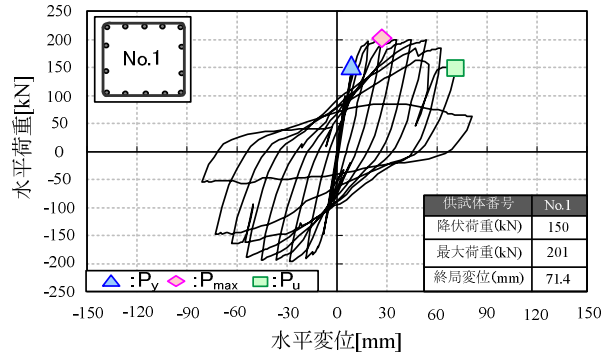
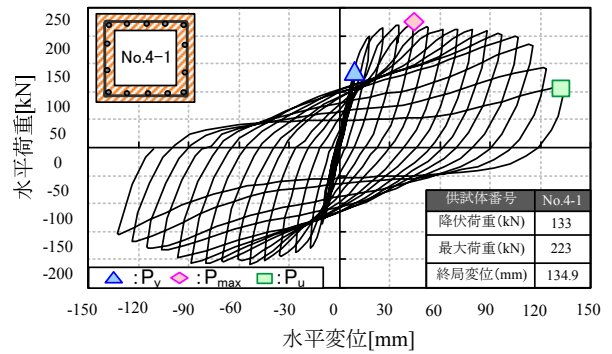


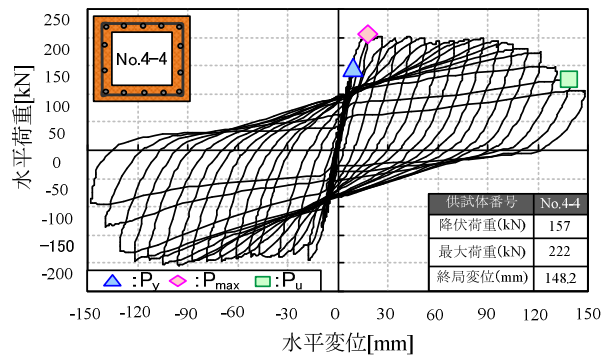
図-4 圧縮試験結果



A) No. 1 供試体



B) No. 4-1 供試体



C) No. 4-4 供試体

図-5 P- $\delta$ 履歴曲線

15 $\delta_y$ (134.9mm)で  $P_y$  を下回った。No.4-4 では、約 157kN で主鉄筋が降伏ひずみを超え、2 $\delta_y$  (17.6mm) で最大荷重 (222kN) に達した。その後、14 $\delta_y$  (121.7mm) まで荷重を保持したまま変位が進展したが、柱基部のはらみ出ししかぶり部の圧壊の発生とともに荷重が低下し、16 $\delta_y$ (148.2mm)で  $P_y$  を下回った。

図-6 に P- $\delta$  包絡線における No.1・No.4-1・No.4-4 供試体の比較を示す。No.4-1 と No.4-4 供試体では最大荷重は 223kN・222kN と同程度であるが、終局変位に着目すると 134.9mm から 148.2mm と 14mm 程度伸びていることが分かる。No.1 供試体と終局変位を比較すると、No.4-1 では 1.9 倍であったのに対し、No.4-4 では 2.1 倍に向上した。また、最大荷重に着目しても、No.4-1 では 5 $\delta_y$  で最大荷重になっているのに対して、No.4-4 では 2 $\delta_y$  で最大荷重を迎えている。

図-7 に履歴吸収エネルギーの No.1・No.4-1・No.4-4 供試体の比較を示す。No.1 では最大値が 19kN・m 程度であったのに対し、No.4-1 では 35kN・m 程度、No.4-4 では 44kN・m となり、No.4-4 が最も高いエネルギー吸収量を示す結果となった。このことから、主鉄筋より内側まで高靱性セメント材料を使用した No.4-1 と No.4-4 では、エネルギー吸収能力が大幅に向上した。

図-8 に示すような柱基部から 60mm および 210mm の位置で帯鉄筋ひずみの進展状況を確認した。No.4-1 と No.4-4 を比較すると帯鉄筋ひずみは 7 $\delta_y$  と 11 $\delta_y$  で進展傾向に差が見られた。7 $\delta_y$  の 60mm 位置に着目すると、No.4-1 では 1000 $\mu$ 、No.4-4 では 500 $\mu$  となり、ひずみ量の差が 2 倍程度認められた。その後は、どちらの供試体でも徐々にひずみが進展していくが、No.4-1 供試体では 11 $\delta_y$  で急激に帯鉄筋ひずみが増加した。このことから No.4-1 では、11 $\delta_y$  以降に高靱性セメント材料のかぶり部分における拘束力が限界を迎えたことによって、帯鉄筋がはらみ出しを生じていることが分る。また、図-8 を見ても No.4-1 は 12 $\delta_y$  から履歴吸収エネルギーが低下する結果となった。

図-9 に  $\pm 9\delta_y$  載荷終了時における各供試体の西面・南面のひび割れ状況を示す。No.4-1 と No.4-4 の南面を比較すると、No.4-1 では縦方向のひび割れが多く見られ、No.4-4 でも縦方向のひび割れは認められるものの、その発生量は明らかに少ない。これは、配合の変更が高靱性セメント材料による内部拘束効果を高め、9 $\delta_y$  時において、主鉄筋の伸びに追随することによる二次ひび割れの抑制効果が表れたものと考えられる。また、No.4-1、No.4-4 とも高靱性セメント材料の特徴である、応力の架橋効果によるひび割れの分散効果が見られたが、No.4-4 では微細なひび割れが数多く発生しており No.4-1 よりもひび割れ本数が多いため繊維の応力架橋による効果がより顕著に確認できた。

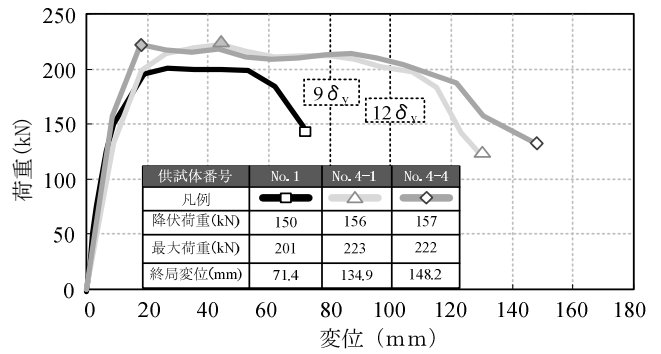


図-6 P- $\delta$  包絡線

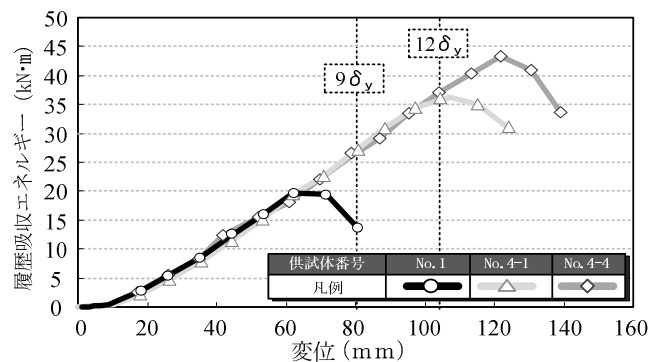


図-7 履歴吸収エネルギー

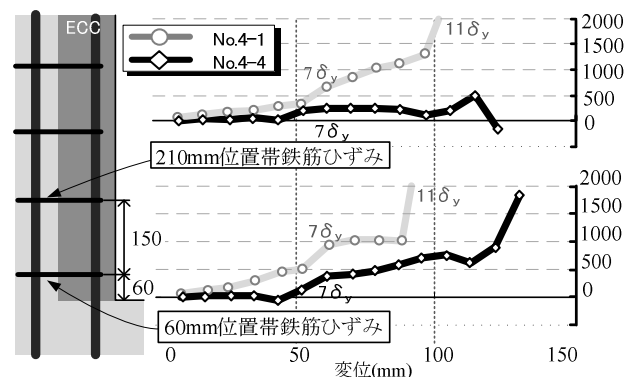


図-8 帯鉄筋ひずみの進展

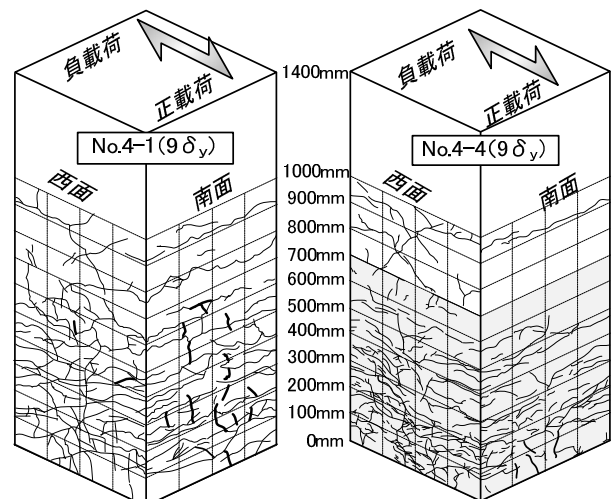


図-9 ひび割れ状況 (9 $\delta_y$ )

## 5. 実験結果の考察

本章では、高靱性セメント材料を柱外周面に施工した本研究の柱部材について、主鉄筋に対する拘束効果、およびフーチングと柱部材の一体性の改善効果について考察する。

### 5.1 主鉄筋に対する拘束効果

柱外周面への高靱性セメント材料の使用が主鉄筋のはらみ出しを抑制する効果について確認するため、柱部材圧縮側における破壊性状ならびに圧縮側主鉄筋のひずみ測定の結果から考察を行う。図-10 に $-12\delta_y$ 時の損傷状況を示し、図-11 は横軸を圧縮側主鉄筋で計測された直前の荷重  $0\text{ kN}$  からその後の各荷重ステップにおける極大変位時までのひずみ変化量の最大値を示し、縦軸に柱基部からの高さを示す。

荷重ステップごとに柱部材の損傷状況を観察しひび割れ発生状況を確認した結果、No.4-1 供試体と No.4-4 供試体とでは、 $-12\delta_y$  で明らかな損傷状況の差異が生じた。圧縮側のかぶりコンクリートに着目すると、No.4-1 では、 $-12\delta_y$  時にかぶり部分でかぶりコンクリートの剥離が生じていたのに対し、No.4-4 の同一サイクルでは剥離が確認されなかった。つぎに、圧縮側の変形挙動に着目するため $-5\delta_y$ ・ $-9\delta_y$ ・ $-12\delta_y$  時における圧縮側主鉄筋ひずみの分布を整理した(図-11)。図より、No.4-1 では $-5\delta_y$  からひずみが進展し、 $-12\delta_y$  時で  $25000\mu$  を超えるような大きな圧縮ひずみが発生したのに対し、No.4-4 の同段階における主鉄筋ひずみでは、No.4-1 よりも比較的ひずみの発生量が小さくなっていた。また、塑性域における供試体ごとのひずみ絶対量を見ても、No.4-4 の方が比較的小さな値を示している。なお、前述の図-6 (P- $\delta$  包絡線) や図-7 (履歴吸収エネルギー) においても同様に、 $12\delta_y$  付近で両者の間に特徴的な変化が見られている。

以上のことから、高靱性セメント材料による主鉄筋の拘束効果について考察する。前述の図-4 で示したように、圧縮応力の最大値を超えた下降域において配合-1 (No.4-1) と配合-3 (No.4-4) の変形特性を比べると、配合-3の方が靱性能力の高い材料であると判断できる。柱部材主鉄筋方向のひずみがNo.4-4で相対的に小さかったことと併せて考えると、柱部材においても、より大きな変形領域まで高靱性セメント材料自体の靱性性能の差が主鉄筋のはらみ出しを抑制する効果の差として現れたものと推察される。

次に、 $-12\delta_y$  時点における損傷メカニズムについて図-12 に示す。No.4-1 では、 $-12\delta_y$  時で圧縮側のかぶりコンクリートが剥離したことで、高靱性セメント材料による主鉄筋の拘束効果が低下したことから、主鉄筋のはらみ出しが生じたものと考えられる。また、圧縮応力を負担していた接合部分に位置するかぶりコンクリートが剥

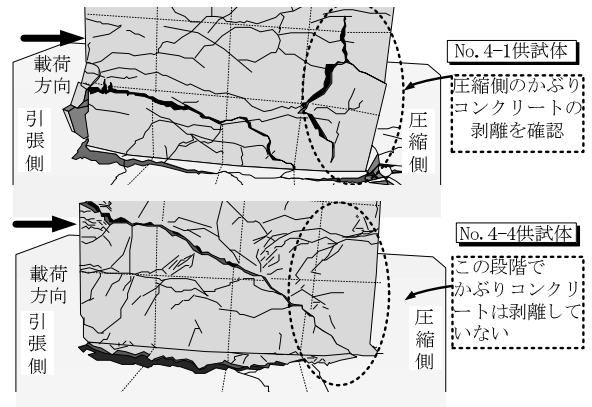


図-10  $-12\delta_y$  時損傷状況

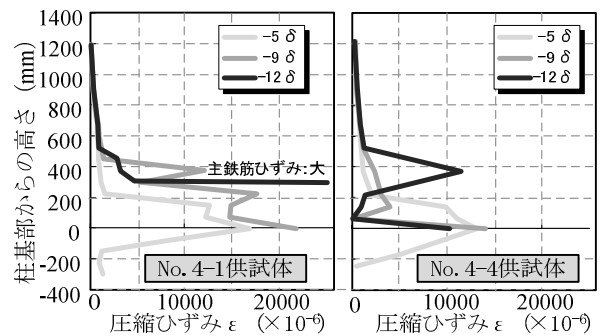


図-11 圧縮側主鉄筋ひずみ ( $-5\sim-12\delta_y$ )

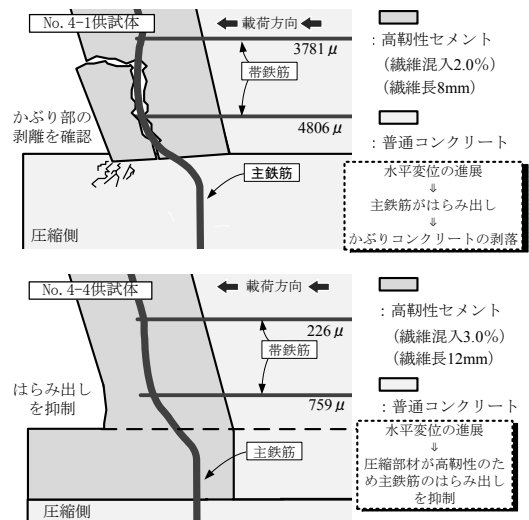


図-12  $-12\delta_y$  時損傷メカニズム

離したことによってさらに応力が集中したことも主鉄筋の座屈につながった原因と考えられる。これに対して No.4-4 では、 $-12\delta_y$  時の  $60\text{ mm} \cdot 210\text{ mm}$  における帯鉄筋ひずみが  $226\mu \cdot 759\mu$  と小さいことから、この時点において、かぶりコンクリートは剥離しておらず、拘束効果が機能することで曲げ圧縮力に対する十分な抵抗力を有していたと考えられる。

### 5.2 フーチングと柱部材の一体性改善効果

本項では、フーチング部と柱部材を一体成型することによる境界部分の一体性改善効果について考察する。

図-13・図-14 に No.4-1・No.4-4 の  $3\delta_y$  時における引

張側基部の損傷状況を示す。No.4-1 では、 $1\delta_y$  から柱基部とフーチング部の境界面で亀裂が生じ、亀裂の開口とともに  $3\delta_y$  の時点において 3.67mm の浮き上がりが計測された (図-13)。これに対し No.4-4 では、 $2\delta_y$  時に基部周辺でひび割れが確認され、 $3\delta_y$  になると基部におけるひび割れ進展とともに柱の浮き上がり現象が生じた (図-14)。この時の浮き上がり量は 3.45mm であり、No.4-1 と同程度であった。

続いて、引張側主鉄筋のひずみ分布を確認した。図-15 に引張側主鉄筋の  $1\delta_y \cdot 2\delta_y \cdot 3\delta_y$  におけるひずみ分布を示す。柱基部 (図中高さ  $H=0\text{mm}$ ) に着目し No.4-1 と No.4-4 の引張ひずみを比較すると、 $1\delta_y$  では両者とも柱部材軸方向にほぼ同様な分布を示している。 $2\delta_y$  時について着目すると、No.4-1 では、浮き上がり現象に伴う主鉄筋の引張ひずみが認められた。次に、 $3\delta_y$  時に着目すると、両者とも  $18000\mu$  程度の過大なひずみ量が計測されていることから、図-13・図-14 で図示する浮き上がり現象に対応した傾向が主鉄筋ひずみからも確認されたものと考えられる。

以上のことから、フーチングと柱部材との境界面における一体性の改善が期待された No.4-4 供試体であったが、 $2\delta_y$  で No.4-1 と若干の差が認められたものの、 $3\delta_y$  時には同様な浮き上がり現象が確認されたことから、本研究において良好な改善効果を確認することはできなかった。

## 6. まとめ

高靱性セメント材料による主鉄筋の拘束効果、ならびにフーチングと柱基部の境界面における一体性の向上を目的に、単柱式橋脚を模擬した柱部材の柱外周面およびフーチング上部に高靱性セメント材料を施工した供試体を作成した。正負交番載荷試験により改善効果の確認を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 高靱性セメント材料における繊維の応力架橋効果により、柱部材圧縮側において主鉄筋のはらみ出しや座屈を遅延させることが可能である。また、高靱性セメント材料に使用する繊維長や繊維混入量を増加させ、高靱性セメント材料自体の靱性性能を高めることで、さらに良好な主鉄筋の拘束効果が得られることを明らかにした。
- 2) 柱のみに高靱性セメント材料を使用した場合、水平応力が加わった際にフーチングとの境界面において附着切れが生じることから、フーチング上部と柱外周面を高靱性セメント材料によって一体成型した。その結果、正負交番載荷試験の初期における  $2\delta_y$  までは浮き上がりを抑制する改善効果が認められたが、 $5\delta_y$  以降、変形が大きくなるに従い基部のひび割れが開口し十分な改善が認められなかった。

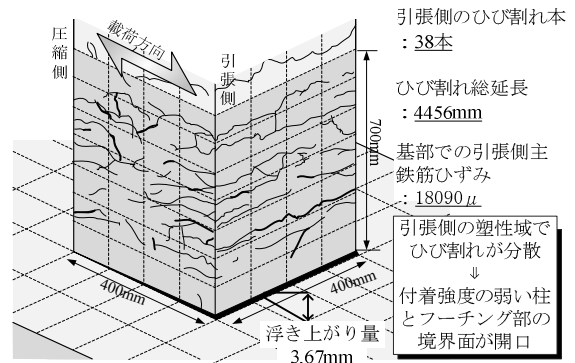


図-13  $+3\delta_y$  時損傷状況 (No. 4-1 供試体)

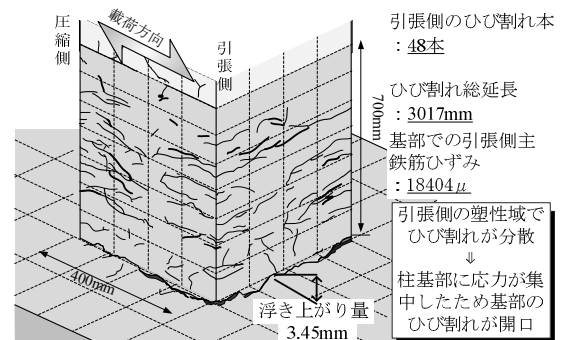


図-14  $+3\delta_y$  時損傷状況 (No. 4-4 供試体)

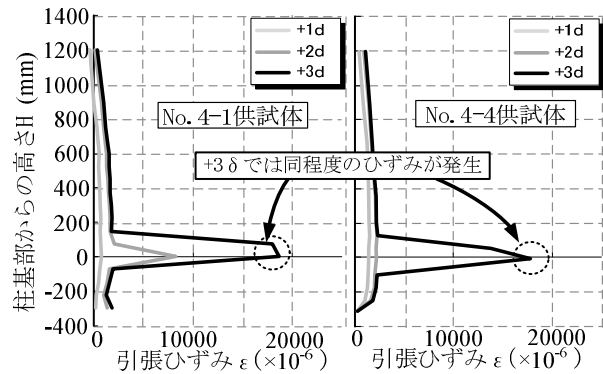


図-15 引張側主鉄筋ひずみ ( $+1 \sim +3\delta_y$ )

## 参考文献

- 1) 幸左賢二, 小川敦久, 合田寛基, 脇田和也: 高靱性セメント巻き立て厚に着目した耐震補強実験, 構造工学論文集 Vol. 55A, 2009.3
- 2) 藤井学, 小林和夫, 宮川豊章, 井上晋, 松本利彦: 横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の適用に関する検討, セメント技術年報, Vol.42, pp.311-314, 1988
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.3
- 4) 曾我部直樹・山野辺真一・宗村浩一・高橋良和: 超高強度繊維補強コンクリート製型枠を適用した RC 橋脚の正負交番載荷実験, 第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.85-90, 2007