

論文 高強度鉄筋と高靱性セメントを用いた柱の変形性能評価

篠崎 正治^{*1}・幸左 賢二^{*2}・佐藤 崇^{*3}・小川 敦久^{*4}

要旨: 著者らが過年度に行った正負交番載荷実験では、高靱性セメント材料を柱の全断面に使用した供試体（以下 No.2-4）は、無補強 RC 柱より変形性能の向上を確認している。今年度は変形性能の向上に効果的な高靱性セメント材料と、耐力の向上に有効的な高強度鉄筋の組み合わせに着目した供試体（以下 No.2-6,2-7）の実験を行った。その結果、No.2-6, No.2-7 供試体の終局変位は No.2-4 供試体に比べ、それぞれ 23%, 3% 増加し、最大荷重も増加しており良好な結果を得た。また、No.2-7 の軸方向鉄筋の抜け出し量の解析の結果、橋脚柱に高靱性セメント材料と高強度鉄筋を使用しても特異な抜け出し性状が生じないことが確認された。

キーワード: 高靱性セメント材料, 高強度鉄筋, 柱部材, 正負交番載荷実験, 抜け出し

1. はじめに

RC 構造物の耐震設計において、構造物の靱性を上げることは変形性能の向上につながり、大規模地震時のエネルギーを効果的に吸収することができる。靱性の向上策の1つに高靱性セメント材料の使用が挙げられる。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、大きな靱性を有する材料であり RC 柱に使用する事で、塑性域周辺における変形性能の向上が期待できると考えられる。著者らが過年度実施した柱全断面を高靱性セメント材料で置き換えた RC 橋脚の実験結果¹⁾では、普通コンクリートを使用した RC 橋脚と比較すると、最大荷重は 5% 増加し、終局変位は 60% 増加する良好な結果が得られた。

一方、近年では、建設コスト削減や施工性向上の観点から、高強度鉄筋を用いた RC 橋脚の使用実績が増加し、技術的知見も蓄積されつつある。著者らが提案している高靱性セメント材料を用いた RC 橋脚に高強度鉄筋を用いることで、耐力上昇に伴う履歴吸収エネルギーの増加により、さらなる耐震性能の向上が期待できると考えられるが、橋脚柱に高靱性セメント材料と高強度鉄筋を組み合わせた研究は少なく、変形性能や損傷形態に関しては十分には分かっていない。そこで、本研究では高靱性

セメント材料と高強度鉄筋を用いた RC 橋脚の耐震性能を把握することを目的に、正負交番載荷実験から変形性能および柱基部付近の損傷形態に着目し、基部損傷がやや顕著であったことから、鉄筋抜け出し量の柱の変形性能への影響の検討を行った。

2. 実験概要

表-1に供試体諸元及び載荷方法、表-2に高靱性セメント材料の配合、図-1, 2に供試体の基本断面形状および配筋の比較を示す。供試体は全断面を高靱性セメント材料で打設しており、軸方向鉄筋にSD345を使用した供試体（以下No.2-4）、SD390を使用した供試体（以下No.2-6）、SD490を使用した供試体（以下No.2-7）を製作した。軸方向鉄筋径にはD19、帯鉄筋径にはD10を使用し、供試体形状は高さ1600mm、断面形状は、400mm×400mmの正方形断面で、水平荷重載荷点高さHを1400mmとした。

図-1に示すように高靱性セメント材料の使用範囲は柱基部より700mmまでの高さとし、それ以上の高さの範囲は普通コンクリートで打設している。700mmを補強範囲とした理由は、降伏曲げモーメント以上の断面力が発生する範囲は、基部からおおよそ0.3~0.4H（H：載荷高さ）

表-1 供試体諸元

供試体番号		No.2-4	No.2-6	No.2-7	供試体番号				
断面[mm]		400×400			主鉄筋	種類	SD345	SD390	SD490
かぶり厚[mm]		50				降伏強度[N/mm ²]	402	473	567
せん断スパン[mm]		1400				径	D19		
せん断スパン比		4.0				引張鉄筋比[%]	1.43		
コンクリート 強度[N/mm ²]	高靱性セメント	60.8	77.4	77.4	帯鉄筋 (SD345)	帯鉄筋強度[N/mm ²]	408	408	408
	普通コンクリート	32.7	41.4	41.4		径	D10		
軸圧縮応力[N/mm ²]		1.0				間隔[mm]	100	75	75

*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (学生会員)

*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 株式会社社長大, 福岡構造技術部 (正会員)

*4 株式会社クラレ, 繊維資材事業部, 産資開発部

であるが、塑性ヒンジ部を含み、かつその遷移領域も含んだ範囲を考慮したためである。本実験では、柱（高靱性セメント）とフーチング（普通コンクリート）の付着切れを改善するために、フーチング上面に柱部と同じ高靱性セメント材料を使用することとし、フーチングの鉄筋と十分に付着が取れるように100mmまでを柱部と同時打設することで打ち継ぎ目を無くした。

図-1より荷重方法は実建造物の死荷重を再現するため、供試体柱上面より 1.0N/mm^2 相当を荷重した一定軸力下で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、その時点での変位を δy と定義した。降伏後は δy の整数倍を変位制御により荷重した。ここで、試算は道路橋示方書の計算方法を参考とした断面計算を行い、高靱性セメント材料の応力ひずみモデルは10体のシリンダー試験結果より、応力ひずみ関係を直線で近似することで作成した。また、実験での終局の定義は降伏荷重を下回った時とし、この時の変位を終局変位とする。

1) No.2-4供試体

No.2-4は、上記の断面形状を用いて、軸方向鉄筋の材質にSD345を使用し、帯鉄筋間隔を100mmピッチとした供試体である。高靱性セメント材料の配合は、著者らの過年度の研究¹⁾により最も靱性性能が向上した繊維長12mm、繊維混入率を3.0 Vol.%とした。本論文ではこのNo.2-4を基本供試体とし、実験結果における考察を行う。

2) No.2-6, No.2-7供試体

No.2-6, No.2-7は橋脚高、断面形状はNo.2-4と同様の形状である。軸方向鉄筋は、表-1に示すようにNo.2-4より高強度である、No.2-6はSD390を、No.2-7はSD490を使用した。また、鉄筋を高強度にすることにより水平耐力が増加し、柱の損傷形態がせん断破壊先行となる可能性があるため、帯鉄筋間隔を100mmピッチから、75mmピッチに変更した。高靱性セメント材料はNo.2-4と同様の配合とした。No.2-4供試体施工時は高靱性セメント材料のワーカビリティが悪く、柱とフーチングの接合部近傍の過密配筋部で繊維塊が生じていたため、No.2-6, No.2-7供試体製作時には、より攪拌性の高い水平二軸強制練ミキサーを使用しワーカビリティの向上を図った。

3. 実験結果

3.1 正負交番荷重実験結果

図-3にNo.2-4、図-4にNo.2-6、図-5にNo.2-7の繰り返し荷重実験により得られた各供試体の荷重変位履歴曲線を示す。まず、No.2-4の降伏時における水平荷重は158kN、水平変位は8.2mmとなった。その後、 $9\delta y$ (74mm)において最大荷重(223kN)に達し、 $13\delta y$ (107mm)まで荷重を保持したまま変位が進展し、 $14\delta y$ 以降は柱基部のはらみ出しが

表-2 高靱性セメント材料配合表

PVA 繊維 Vol(%)	単体量(kg/m ³)						繊維長 (mm)
	W	C	FA	S	高性能AE 減水剤	PVA 繊維	
3.0	261	580	580	580	20	39	12

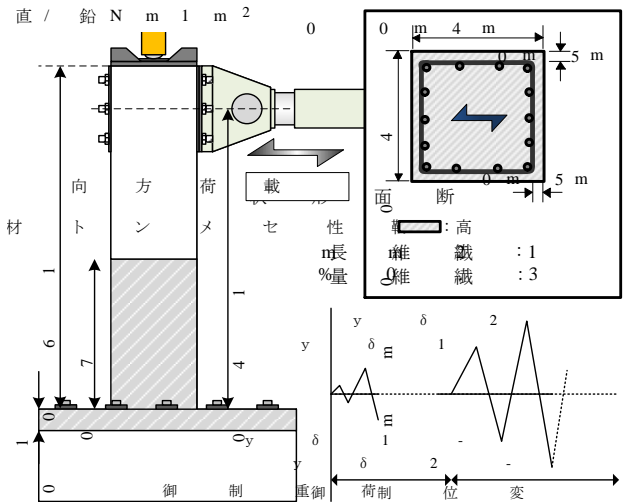


図-1 供試体形状及び荷重方法

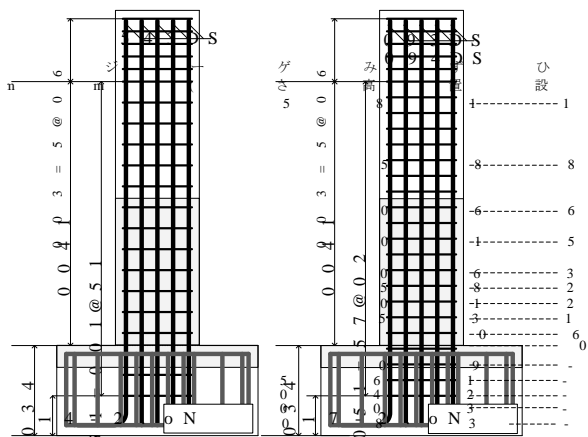


図-2 供試体形状と配筋の比較

進展することにより、かぶりコンクリートの圧壊が発生するとともに荷重が低下し、降伏荷重を下回った $17\delta y$ (139mm)で荷重を終了した。

次に、No.2-6の降伏時における水平荷重は184kN、水平変位は11mmとなった。その後、 $6\delta y$ (66mm)において最大荷重(260kN)に達し、 $11\delta y$ (121mm)まで荷重を保持したまま変位が進展し、 $13\delta y$ 以降は、No.2-4同様に柱基部のはらみ出しが進展することにより、かぶりコンクリートの圧壊が発生するとともに荷重が低下し、降伏荷重を下回った $15\delta y$ (165mm)で荷重を終了した。

同様に、No.2-7の降伏時における水平荷重は217kN、水平変位は13mmとなった。その後、 $5\delta y$ (80mm)において最大荷重(286kN)に達し、 $8\delta y$ 以降は柱基部のはらみ出しが進展することにより、かぶりコンクリートの圧壊が発生すると

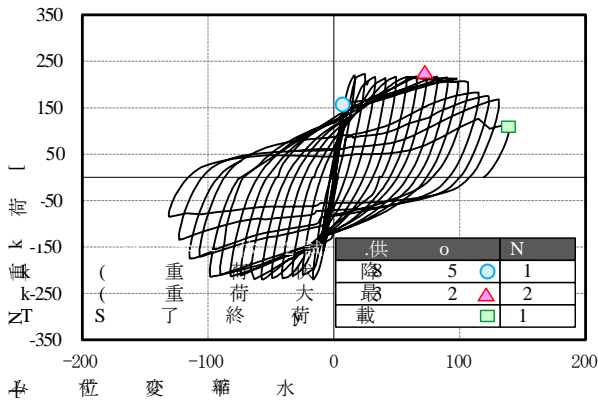


図-3 No. 2-4 荷重変位履歴曲線

ともに荷重が低下した。11δy へ向かう載荷途中で大きな衝撃音の発生により引張側軸方向鉄筋が破断したと考えられ、降伏荷重を下回った 11δy (142mm) で載荷を終了した。

図-6 に荷重変位関係の包絡線による各供試体の比較を示す。各プロット点の色塗り部が終局時である。各供試体の降伏荷重までの弾性域をみると、鉄筋のヤング係数は鉄筋の強度に関わらずほぼ同じであるため、全ての供試体で同様の挙動であることがわかる。最大荷重については軸方向鉄筋の強度上昇に伴い最大荷重も上昇し、No.2-7 が最も大きい結果となった。終局変位については No.2-6 が最も大きい変形性能を有していた。

3.2 基部損傷評価

本項では柱基部付近の損傷に着目した評価を行う。図-7 に No.2-4, No.2-6, No.2-7 のフーチング上面のひび割れ状況を示す。同図は、降伏変位前に生じたひび割れと、その後、水平変位 40mm, 100mm に達するまでに生じたひび割れをクラックスケールにて計測した結果である。

3 供試体を比較すると、No.2-4 の降伏変位前に生じたひび割れは他の供試体に比べ、柱とフーチングの接合部付近で多く見られたが、0.05mm 以下のひび割れ幅であった。その後、変位が進展することで、初期のひび割れ位置から進展するものの、ひび割れ幅は 3 供試体とも 0.3mm 以下の小さいひび割れであったことから、軸方向鉄筋の強度の違いがフーチングに及ぼす影響は小さいといえる。

4. 鉄筋の抜け出し解析

ここでは、普通コンクリートを対象とした既往の抜け出し特性と、本実験結果から得られた抜け出し特性を比較することで、高靱性セメント材料および高強度鉄筋を用いた場合のフーチング内部の損傷に及ぼす影響を評価する。高靱性セメント材料を使用した例として No.2-4, 高靱性セメント材料と高強度鉄筋を使用した例としてより軸方向鉄筋に強度差のある No.2-7 を解析的に評価する。

4.1 鉄筋の抜け出し解析方法

解析方法は石橋ら²⁾の研究を参考に行った。軸方向の鉄筋

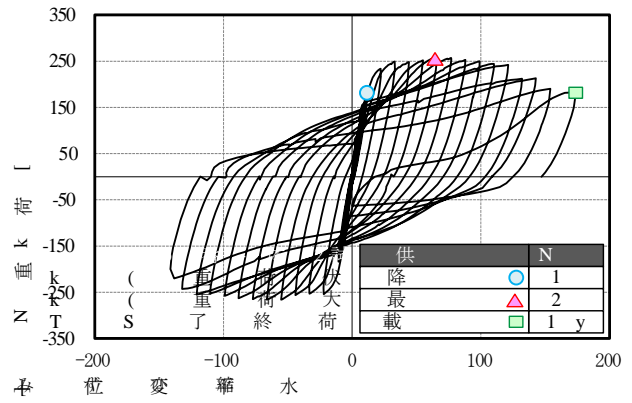


図-4 No. 2-6 荷重変位履歴曲線

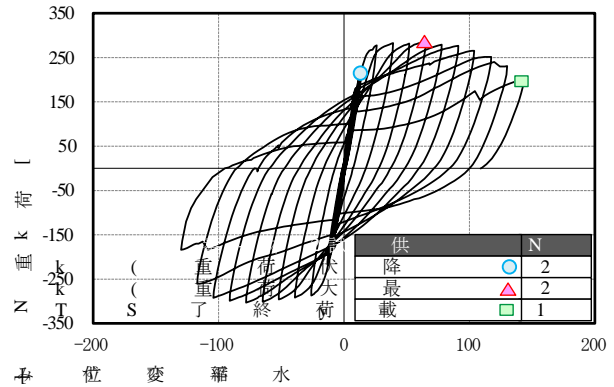


図-5 No. 2-7 荷重変位履歴曲線

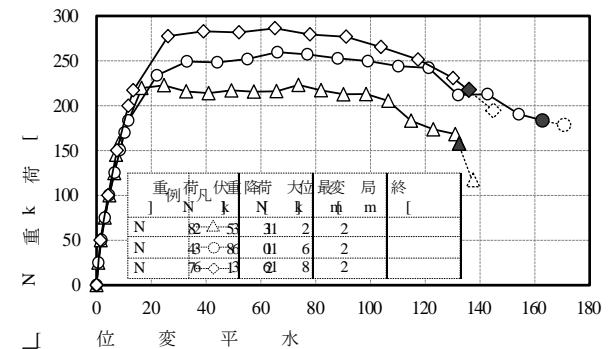


図-6 荷重変位関係比較

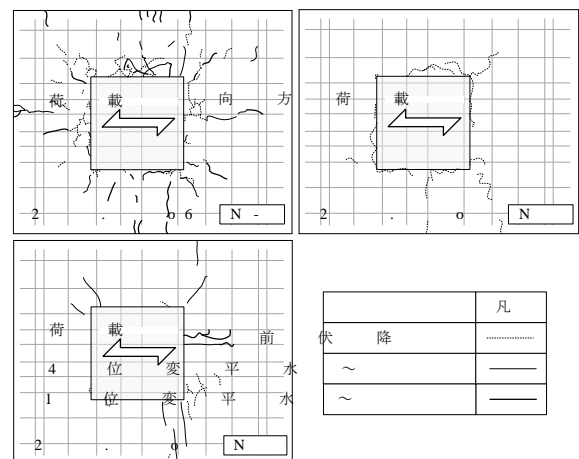


図-7 フーチング損傷比較

抜け出し量は図-8に示す手法で解析的に求めることが出来る。まず、柱基部での抜け出し量を仮定し、基部からフーチング内部に向かって、付着応力、鉄筋応力減少量、鉄筋ひずみを計算する。次に、鉄筋ひずみの積分値を仮定した抜け出し量から減じて行き定着長先端の抜け出し量が0に近似するまで基部の抜け出し量の仮定を修正することで解析的に鉄筋抜け出し量を求めることが出来る。ここで、解析ではフーチング内部のひずみ分布形状に既往の抜け出し特性と比較して特異性が見られないか確認するために、フーチング上端の鉄筋ひずみを実験値と同一にした。

フーチング内の鉄筋抜け出し量は鉄筋の先端(直角フック位置)から柱基部までの鉄筋ひずみを積分した値となり式(1)より算出できる。

$$S = \int \epsilon dx \quad (1)$$

フーチング内の軸方向鉄筋ひずみは鉄筋とコンクリートの付着応力によりフーチング内部へと減少し、区間 Δx 内の応力減少量 $\Delta\sigma$ は式(2)より算出できる。

$$\Delta\sigma = \pi \cdot \phi \cdot \Delta x \cdot \tau / A_s \quad (2)$$

ここに、 Δx :区間、 ϕ :鉄筋径、 τ :鉄筋とコンクリートの付着応力、 A_s :鉄筋の断面積

ここで必要となる付着応力の特性式であるが、島ら³⁾が単調引張の片引き試験結果より付着応力-ひずみ-抜け出し量の関係式を式(3)のように提案している。また、石橋らにより島らの提案式を、付着応力の劣化領域を設けることで正負交番荷重実験に適用できることが確認されている。

$$\tau / f'_{ck} = 0.73 (\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \epsilon \times 10^5) \quad (3)$$

ここに、 $s = 1000 \cdot S/D$ 、 f'_{ck} :コンクリート強度、 S :抜け出し量、 ϵ :鉄筋ひずみ、 D :軸方向鉄筋径

石橋ら²⁾の研究では、付着劣化範囲を基部より3D区間を仮定した場合が実験結果の抜け出しを最も精度よく再現できており、本解析でも付着劣化範囲に3Dを用いることとした。鉄筋の応力ひずみ関係には図-9に示すバイリニアモデルを使用し、降伏強度にはミルシートより参照し、弾性係数は $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。また、高靱性セメント材料の付着特性については圧縮強度のみ考慮した。ここで、付着割裂ひび割れに対して繊維の架橋効果が機能するので高靱性セメント材料の付着強度は増加すると考えられるが、付着劣化区間では付着特性の差が生じにくくなるので付着応力-ひずみ-抜け出し量の関係式には式(3)を使用した。

4.2 No. 2-4 供試体の抜け出し特性

図-10は代表結果としてNo.2-4の $3\delta y$ 時のフーチング内の軸方向鉄筋のひずみをプロットし、解析結果と実験結果を比較したものである。なお、図中の高さ0mm位置が柱基部であり、基部から380mmでフーチング下面の鉄筋に軸方向鉄筋を定着させている。実験結果はひずみゲージによる測定間隔の問題で正確な軸方向鉄筋の降伏点の位置が判定できないため、測定区間内の弾性域のひずみの上から2つの値を

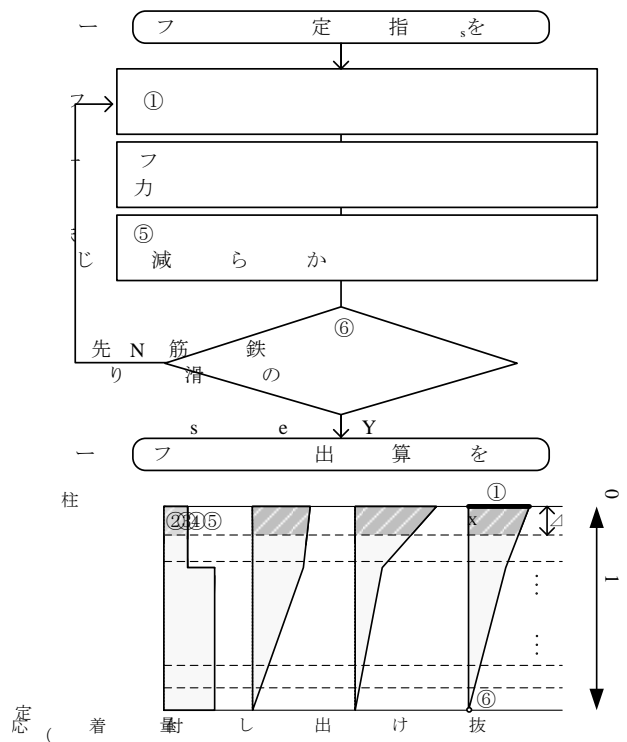


図-8 解析フロー

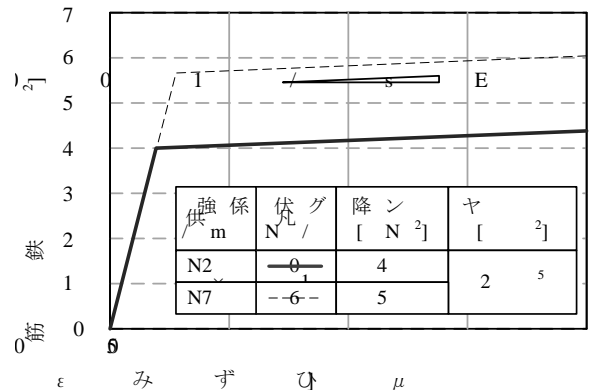


図-9 鉄筋の応力ひずみモデル

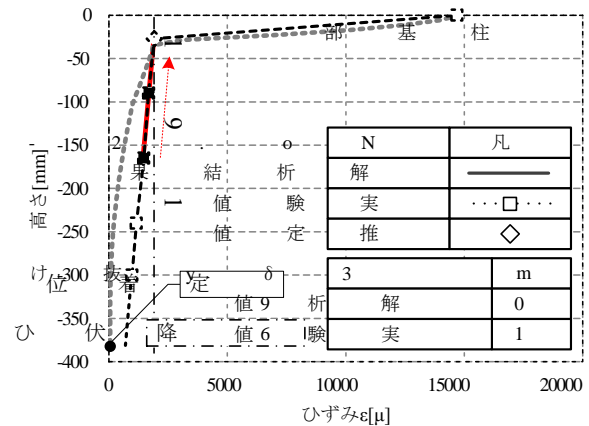


図-10 No. 2-4 $3\delta y$ 抜け出し解析結果比較

直線で近似勾配を作成し上方に延長して、降伏ひずみとの交点を鉄筋の降伏高さと推定した。解析結果は実験結果より得られた柱基部でのひずみを用いて図-8のフローの手順で鉄

筋抜け出し量を算出した際の鉄筋ひずみの分布である。同図より実験値と解析値のひずみ分布を比較すると、No.2-4では降伏高さは概ね一致しているが、弾性範囲のひずみ勾配が実験値と解析値で異なる傾向を示し、弾性範囲のひずみは実験値の方が大きくなる結果となった。

図-11は横軸に上記の方法で実験結果より得られたNo.2-4の±1~4δy時の柱基部のひずみから算出した抜け出し量を、縦軸に実験より得られたフーチング内の軸方向鉄筋のひずみ分布を積分して得られた抜け出し量をプロットした図である。図中には各プロットの近似直線を合わせて示す。実験値と解析値を比較すると、軸方向鉄筋の抜け出し量が小さい段階では、実験値に比べ解析値が小さく算出されているが、抜け出し量が増加すると、ある一定の差を維持したまま、抜け出し量が増加して行き、抜け出し量に対して実験値と解析値の誤差は相対的に小さくなっていく。これは、柱基部の鉄筋ひずみが小さい時は、図-10に示すように、実験値と解析値の誤差が大きいフーチング深部の弾性範囲が、柱基部付近の塑性化している箇所と比べ大きいためである。その後、鉄筋の塑性化範囲がフーチング内部に進展していくと、誤差の大きい弾性範囲が減少して行き、精度よく実験のひずみ分布を再現できている塑性化範囲が増加するため、ひずみ分布を積分した抜け出し量は基部のひずみの増加に伴い解析値は実験値に近似していくためであると考えられる。

4.3 No. 2-7 供試体の抜け出し特性

図-12にNo.2-4と同様に算出したNo.2-7の3δy時のフーチング内ひずみ分布の解析結果と実験結果を示す。推定した実験値の軸方向鉄筋のひずみ分布を比較すると、弾性範囲及び塑性範囲は既往の実験式とほぼ一致している。

図-13は横軸に上記の方法で実験結果より得られたNo.2-7の±1~3δy時の柱基部のひずみから算出した抜け出し量を、縦軸に実験より得られたフーチング内の軸方向鉄筋のひずみ分布を積分して得られた抜け出し量をプロットした図である。No.2-7では解析値は実験値の傾向を比較的再現できており、No.2-4と同様に抜け出し量の進展に伴い実験値と解析値の差は小さくなる。

よって、No.2-4、No.2-7 供試体の抜け出し特性は、材料定数から得られる既往の抜け出し特性で評価が可能であり抜け出し方の進展が同傾向であったことから、ひずみ測定ができていない大変形時において柱に高靱性セメント材料と高強度鉄筋を使用してもフーチング内部の損傷に及ぼす影響は小さく、柱の変形性能に悪影響を与えるような抜け出し方は生じなかったと考えられる。

5. No. 2-4, 2-7 鉄筋抜け出し量比較

図-14にNo.2-4、No.2-7の鉄筋抜け出し量の実験結果を示す。同図の縦軸は軸方向鉄筋のひずみ分布より算出した鉄筋抜け出し量を、横軸は水平変位を示す。No.2-4、No.2-7を

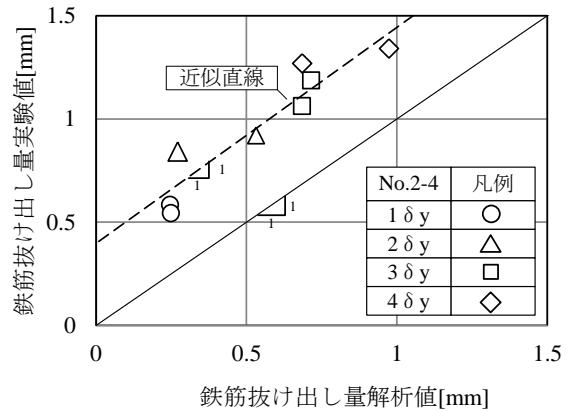


図-11 No. 2-4 鉄筋抜け出し量比較

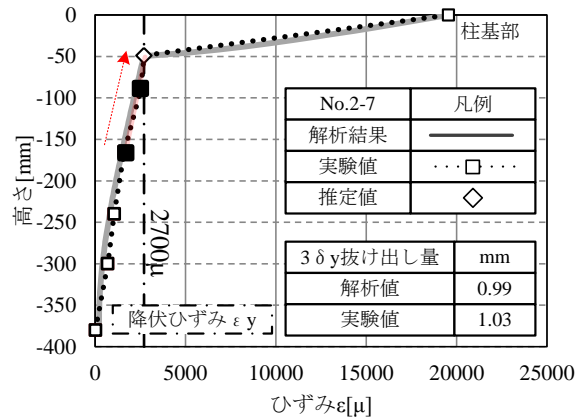


図-12 No. 2-7 3 δ y 鉄筋ひずみ比較

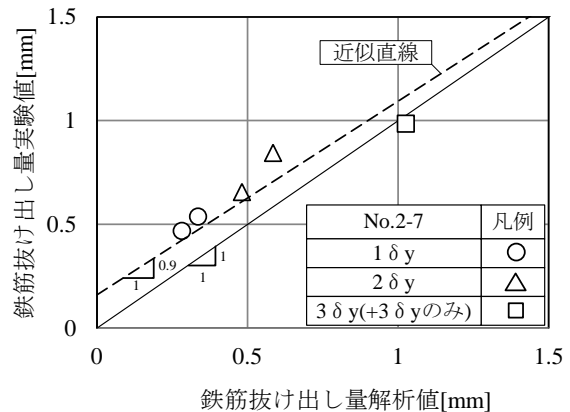


図-13 No. 2-7 鉄筋抜け出し量比較

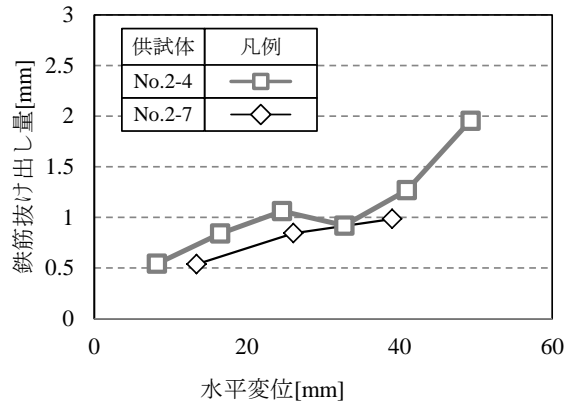


図-14 No. 2-4, 2-7 鉄筋抜け出し実験結果比較

比較すると全体的に No.2-4 の抜け出し量が多い傾向がみられる。ここでは、No.2-4 と No.2-7 の抜け出し量の違いを解析結果を用いて考察する。なお、No.2-4 と No.2-7 では、同一変位時の柱基部のひずみがほぼ同じであったため、柱基部のひずみを基準にして抜け出し量の評価を行う。

図-15 に No.2-4 と No.2-7 の抜け出し量の比較を示す。図-15 は横軸に柱とフーチングの接合部である柱基部のひずみを、縦軸に 4.1 に示す方法で算出したフーチングからの軸方向鉄筋の抜け出し量をプロットした図である。No.2-4 の解析結果と No.2-7 の解析結果を比較すると No.2-4 の鉄筋抜け出し量の方が抜け出し量の増加量が多いことがわかる。この差異はフーチングと鉄筋の付着特性の違いから生じるものである。付着特性に影響する材料強度の違いは表-1 より、No.2-4 供試体の鉄筋強度は 402kN/mm²、フーチングのコンクリート強度は 32.7kN/mm² であり、No.2-7 の鉄筋強度は 567kN/mm²、フーチングのコンクリート強度は 41.4kN/mm² である。更に高靱性セメント材料の圧縮強度も異なるので、各解析条件の抜け出し量への影響の割合を確認するため、鉄筋とコンクリート強度をパラメータとした解析を行った。

図-16 は柱基部でのひずみが 30000 μ (両供試体とも水平変位約 60mm 時) となった際の軸方向鉄筋の抜け出し量を比較したものである。ケース①は No.2-4 で使用した材料強度から算出した抜け出し量、ケース②は No.2-4 のコンクリート強度で鉄筋の降伏強度を No.2-7 と同一の降伏強度と仮定した場合の抜け出し量、ケース③はコンクリート強度を No.2-7 で使用した材料強度とし、鉄筋の降伏強度を No.2-4 の降伏強度と仮定した場合の抜け出し量、ケース④は No.2-7 で使用した材料強度から算出した抜け出し量である。まず、コンクリートの圧縮強度の違いによる抜け出し量を比較すると (例えばケース①と③)、コンクリート強度が高い場合、軸方向鉄筋の抜け出し量は 16%程度低下する。一方、軸方向鉄筋強度の違いによる抜け出し量を比較すると (例えばケース③と④)、鉄筋強度が高い場合、軸方向鉄筋の抜け出し量は 3%程度増加するもののその増加量は小さい値であり、解析結果から No.2-4 と No.2-7 の抜け出し量の違いは主としてコンクリート強度の違いによる影響が大きいと考えられる。

以上より、主としてコンクリート強度の違いによる影響で No.2-4 と No.2-7 の抜け出し量の実験結果に相違が生じると考えられる。

6. まとめ

高靱性セメント材料と高強度鉄筋を用いた RC 橋脚の正負交番載荷実験より得られた知見を以下に示す。

- (1) 高靱性セメント材料と高強度鉄筋 SD390, SD490 を用いた No. 2-6, 2-7 は、普通鉄筋 SD345 を用いた No. 2-4 に比べ、高い耐力を保ちつつも大変形時に対して安定した変形性能を有することを確認した。

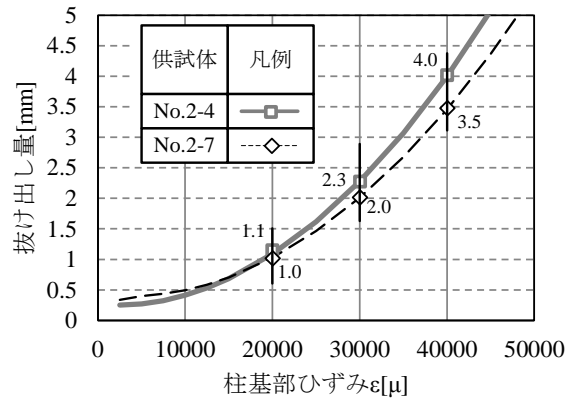


図-15 No. 2-4, 2-7 鉄筋抜け出し解析結果比較

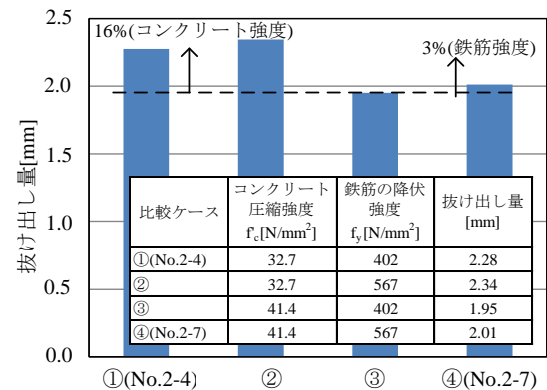


図-16 鉄筋の抜け出し量に与える要因

- (2) 軸方向鉄筋の材質が異なる 3 供試体のフーチング上面のひび割れ状況を比較すると、3 供試体で大きな違いは見られず、ひび割れ幅も 0.3mm 以下の小さいひび割れであったことから、軸方向鉄筋の強度の違いが柱とフーチングの接合部付近の損傷に及ぼす影響は小さいといえる。
- (3) 既往の抜け出し特性を用いて軸方向鉄筋の抜け出し解析を行った結果、No.2-4 および No.2-7 において解析値は実験値を概ね再現できた。また、抜け出し特性に特異性は見られなかったことから、柱に高靱性セメント材料と高強度鉄筋を使用しても、柱の変形性能に悪影響を与えるような抜け出し方は生じないと考えられる。

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, pp.1024-1035, 2009.3
- 2) 石橋忠良, 小林薫, 海原卓也: 大変形領域の交番荷重を受ける RC 橋脚のフーチングからの鉄筋抜け出し量算定法に関する研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.43-54, 2000.5
- 3) 島弘, 周礼良, 岡村甫: 異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.213-220, 1987.2