論文 レーザー変位計を使用した RC 橋脚の終局挙動評価

山之内 俊樹*1・幸左 賢二*2・佐藤 崇*3

要旨:著者らは,高靱性セメント材料を使用した RC 橋脚における帯鉄筋間隔の影響を評価するために,帯 鉄筋間隔を50,100 mmとした No.2-12,2-13 供試体を作成し,正負交番載荷実験を実施した。その結果,帯鉄 筋間隔を密にした No.2-12 の変形性能は No.2-12 に対して 13%向上した。棒型スキャナによる内部ひび割れ 計測より,かぶりコンクリートのはらみ出し発生直前に,鉄筋位置での内部ひび割れ密度は急上昇しており, 内部コンクリートの圧壊が鉄筋座屈より先に生じることが明らかとなった。また,レーザー変位計によるか ぶりコンクリートのはらみ出し形状計測より,内部の鉄筋座屈形状を推定できる可能性があると考えられる。 キーワード:高靱性セメント材料,正負交番載荷実験,棒型スキャナ,レーザー変位計

1. はじめに

著者らは高靭性セメントと高強度鉄筋を組み合わせた RC 橋脚を10 体作成し, 正負交番載荷実験を過年度^{1),} ²⁾に実施し, 普通コンクリートを使用した供試体より耐力・変形性能ともに向上する結果が得られている。今年度は新たに作成した2体の供試体を対象に高靱性セメント材料を使用した RC 橋脚における帯鉄筋間隔の影響の評価を行っている。この2 体の供試体は帯鉄筋間隔を50mmとした No.2-12 供試体および帯鉄筋間隔を100 mmとした No.2-13 供試体である。

ここに、一般的な RC 橋脚の曲げ破壊形態³は、ある 一定の曲げ塑性変形レベルまでは、帯鉄筋およびかぶり コンクリートの拘束により、主鉄筋の外側へのはらみ出 しは抑制される。しかし、大きな曲げ塑性変形を与える と、目標とする載荷変位に到達する前に主鉄筋の座屈に 伴ってかぶりコンクリートの剥離が生じる。さらに載荷 を続け、目標とする載荷変位にまで到達すると、剥離し たかぶりコンクリートが剥落すると言われている。

そこで、本研究では、高靱性セメント材料を使用した RC 橋脚の変形挙動を把握するために、かぶりコンクリ ートに着目して、棒型スキャナとレーザー変位計を用い た。具体的には、まず、かぶりコンクリートのはらみ出 しが発生前は、主鉄筋位置での内部コンクリートのひび 割れの挙動を把握すること目的に、棒型スキャナを用い た内部ひび割れ進展観察を行い、外観ひび割れとの比較 も行った。さらに、かぶりコンクリートのはらみ出し発 生後は、はらみ出し形状に着目し、かぶりコンクリート のはらみ出し形状の挙動を把握することを目的に、レー ザー変位計を用いた3次元計測によるはらみ出し量の計 測を行った。また、帯鉄筋間隔の違いによるかぶりコン クリートのはらみ出し量と耐力低下の関係を把握した。

*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (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 株式会社長大, 福岡構造技術部 (正会員)

2. 実験概要及び実験結果

2.1 実験概要

表-1に供試体諸元,図-1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靭性セメント 材料で打設しており,軸方向鉄筋にSD490を使用した No.2-12, 2-13供試体を作成した。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。同図に示すように高靭性セ 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,基部からおよ そ0.3~0.4H (H:載荷高さ)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

| 供試体名 | | No.2-12 | No.2-13 |
|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
| コンクリート強度 | 高靱性セメント | 68.6 | |
| $[N/mm^2]$ | 普通コン | 49.3 | |
| 高靱性セメント | 種類 | PVA | |
| | 繊維長 | 12 | |
| | 繊維配合[Vol.%] | 2.0 | |
| 軸圧縮応力[N/mm ²] | | 1.0 | |
| 主鉄筋 | 種類 | SD490 | |
| | 降伏強度[N/mm ²] | 567 | |
| | 径 | D19 | |
| | 引張鉄筋比[%] | 1.43 | |
| 帯鉄筋 | 種類 | SD345 | |
| | 帯鉄筋強度[N/mm ²] | 408 | |
| | 径 | D10 | |
| | 間隔[mm] | 50 | 100 |

表-1 供試体諸元

る。まず,普通コンクリート部であるフーチングを打設 し,次に,柱基部の高靭性セメント材料部を打設した。 異種材料である普通コンクリートと,高靭性セメント材 料の接合面は,レイタンスを取り除き,目荒らし処理を 施す処理を行った。養生方法については,脱型後に供試 体全体を十分散水その上から表面に密着するよう養生シ ートで覆うことで保湿養生を行った。

載荷方法は実構造物の死荷重を再現するため,供試体 柱上面より1.0N/mm²相当を載荷した一定軸力下で正負 交番水平載荷を行った。道路橋示方書³⁾に則って行った 試算で求めた降伏荷重までは荷重制御で載荷し,その時 点での変位をδyと定義した。降伏以後はδyの整数倍を変 位制御により載荷した。また,実験での終局の定義は降 伏荷重を下回った時とし,降伏荷重より低下したループ で載荷を終了した。

2.2 実験結果

(1) No. 2-12供試体

図-2にNo.2-12の荷重変位履歴曲線を示す。まず, No.2-12は水平変位15mmで降伏荷重に達し, その後, 6δy (90mm)において最大荷重(290kN)に達し, 8δyに向か う載荷途中で柱基部のはらみ出しが進展し, かぶりコン クリートの剥離が発生するとともに荷重が徐々に低下し た。その後, 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(165mm)で載荷を終了した。

(2) No. 2-13供試体

図-3にNo.2-13の荷重変位履歴曲線を示す。まず, No.2-13は水平変位15mmで降伏荷重に達し, その後, 5δy (75mm)において最大荷重(301kN)に達し, 8δyに向か う載荷途中で柱基部のはらみ出しが進展し, かぶりコン クリートの剥離が発生するとともに荷重が徐々に低下し た。その後, 10δy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10δy(150mm)で載荷を終了した。

(3) 荷重包絡線の比較

図-4に荷重変位包絡線の比較を示す。終局条件は荷重 変位包絡線において降伏荷重に達した点とし、各プロッ ト点の色塗り部が終局変位である。また、荷重変位包絡 線は正載荷と負載荷時の荷重の平均値を示している。 No.2-12とNo.2-13は帯鉄筋間隔が異なり、それぞれの帯 鉄筋間隔は50mm、100mmである。各供試体の最大荷重に 着目するとNo.2-12とNo.2-13は290kN,301kNとほぼ同様 の値であった。また、はらみ出し発生位置についても、 どちらの供試体においても86yで同じであった。終局変位 はNo.2-12とNo.2-13はそれぞれ158mm、140mmとなり、 No.2-13に比べてNo.2-12の終局変位は13%向上する結果 となった。帯鉄筋間隔を密にしたNo.2-12供試体の方がは



らみ出し発生後の荷重低下が緩やかであったことから, 終局変位が伸びたと考えられる。荷重低下勾配の違いに ついては4章ではらみ出し挙動の違いから考察を行う。

3. 棒型スキャナによる内部観察

棒型スキャナは既往の研究では、付着切れ、剥離、中 性化深さの判断などに適用されている⁵⁾。本実験では、 はらみ出しが発生する前の主鉄筋位置での内部コンクリ ートのひび割れの挙動を確認するために No.2-13 供試体 を対象に棒型スキャナを使用して、計測用に作成した穴 の側面の展開画像解析によるひび割れ進展観察を行った。

3.1 計測箇所および方法

図-5 に外観ひび割れの計測範囲を示す。同図に示すように南面の柱基部から高さ 200 mm,柱幅全域(400 mm)の範囲に生じたひび割れ長さを計測した。また,図-1 および図-5 中の[A]に柱基部付近に設置した棒型スキャナ計測位置を示す。図-5 に示すように,柱供試体南面(負載荷時圧縮面)の基部から 80 mm,柱面の端(西側)から160 mmの位置に φ26 mmの塩ビ管を柱供試体打設前にあらかじめ設置し,コンクリートが固まったあとに塩ビ管を引き抜くことで,棒型スキャナの計測用の穴を作成した。

図-6 に棒型スキャナを用いた内部ひび割れの撮影方 法を示す。具体的には、図中(a)のように計測用の穴の 中に棒型スキャナを挿入する。次いで、図中(b)のよう にセンサを回転させることで穴の側面の展開画像を得る ことができる。なお、センサの測定深さは170 mmである。 計測は、各載荷ステップにおける負載荷の最大変位時に 行った。同図に示す展開画像は実際に撮影した-7δy時の である.内部ひび割れは、圧縮域(南側から100 mmと仮 定)内に生じた目視確認できるひび割れを対象にひび割 れ長さを計測した。穴の南北に平行に伸びる横ひび割れ [1]は主に引張時に生じ、穴の東西に平行に伸びる縦ひび 割れ[2]は主に圧縮時に生じたものである。

3.2 外観ひび割れ計測結果

図-7に外観ひび割れ密度変化を示す。ひび割れ密度の 算出方法は、ひび割れ総延長を求め、対象面積(内部:圧 縮域=0.1m×0.079m,外部:計測範囲=0.2m×0.4m)で除す ことにより算出した。外観のひび割れ密度は、-3δy まで は進展したが、その後は、かぶりコンクリートのはらみ 出し発生直前の-7δy まではひび割れ密度に大きな変化は なく一定であった。最終的に-8δy 時にはらみ出しが発生 することで最終ひび割れ密度は 26m/m² という結果とな った。これは、外観ひび割れのほとんどは、計測面が引張 時(正載荷)に生じたものであり、圧縮時(負載荷)に発 生したひび割れが少なかったためである。

3.3 内部ひび割れ計測結果







図-7に示す内部ひび割れ密度変化をみると,-3δyまで はひび割れは確認できなかったため,ひび割れ密度は 0m/m²であった。-4δyからひび割れ密度の進展を確認で きた。その後,載荷ステップの進展に比例してひび割れ 密度が上昇し,最終的にひび割れ密度は220m/m²という 結果となった。図-8 に内部ひび割れの詳細分析を示す。 同図は,圧縮域を4分割したひび割れの詳細分析であり, ひび割れが生じた-4δyから-7δyのひび割れ密度の変化を 示す。また,南側から0~50 mmがかぶりコンクリート, 50~100 mmの範囲がコアコンクリートである。同図に示 すように,かぶり部では-5δyから-6δyにかけては,ひび 割れ密度が約2倍になっている。また,-66yから-76yに かけては,約1.7倍となっており,かぶり部のひび割れ 密度がはらみ出し発生直前に急上昇していることがわか る。

以上より,はらみ出し発生前までの外観のひび割れ密 度に大きな変化はみられなかったが,内部コンクリート の主鉄筋位置ではひび割れ密度が徐々に進展した。つま り,主鉄筋の座屈前に,内部コンクリートの圧縮ひずみ が進展することでコンクリートが圧壊したことが明らか となった。

4. レーザー変位計によるはらみ出し計測

ここでは、高靱性セメント材料を使用した RC 橋脚の 変形に伴うかぶりコンクリートのはらみ出し形状に着目 し、かぶりコンクリートのはらみ出しの詳細な形状およ び挙動を把握するために、レーザー変位計(超高速イン ラインプロファイル測定器 LJ-V7300)を用いて計測を行 った。

4.1 計測概要

(1) 3 次元計測

3 次元計測は、400 mm×400 mmの範囲について、はらみ 出し全体の変化を立体的に把握するために計測した。図 -9 にレーザー変位計の計測装置の概要を示す。同図中の [A]に示すように、レーザー変位計を2台用いて、柱基部 から高さ方向に400 mmまでの範囲を計測した。計測面は、 棒型スキャナの計測面と反対の北面とした。また、この 計測では、レーザー変位計を同図中[B]の箇所からX方 向に400mm移動させて、柱幅全面におけるかぶり形状 の計測を行った。計測タイミングは、同図の左上の荷重 変位履歴曲線上の黒丸の箇所で示す最大変位時および0 mm変位時2点の合計3点であり、載荷を止めた状態で計 測を行った。はらみ出しが発生した86yから計測を行っ たが、同図の荷重変位履歴曲線上には、代表として、106y 時の計測点を示す。

(2) 時系列計測

時系列計測は、RC橋脚の載荷変位毎のはらみ出し量の 変化を把握するために計測した。計測高さ、計測面は3 次元計測と同様である。時系列計測では、レーザー変位 計を図-9のX=200mm位置に固定させて、柱供試体中央 におけるはらみ出し形状の計測を行った。また、計測タ イミングは、同図の荷重変位履歴曲線上の白丸の箇所で あり、図中(a)の0mm変位時から図中(b)の最大変位時を、 さらに図中(c)の0mm変位時までを水平変位15mm間隔で 計測を行った。

4.2 3次元計測結果

図-10(a)に3次元計測によって得られたかぶりコン





図-11 鉄筋座屈とかぶりのはらみ出し量の関係

クリートのはらみ出し形状の計測結果(No.2-13+106y時) を示し、図-10(b)に写真によるかぶりコンクリートのは らみ出し形状を示す。同図(a)に示す3次元図は、高さ 方向、横方向にそれぞれ1mm間隔で、400×400の範囲に おけるはらみ出し量の値を計測した。3次元計測により、 目視および写真からの計測では困難なかぶりコンクリー トのはらみ出し全体の形状を詳細に数値化することが可 能であることがわかる。

図-11 に鉄筋座屈とかぶりのはらみ出し量の関係を示 す。同図に示すはらみ出し量は、図-10(a)中の高さ165mm 付近の柱幅方向断面(実線[1])のかぶりのはらみ出し形 状の変化であり、各載荷ステップにおける最大変位時の はらみ出し量の変化と載荷終了後に変位を戻した時の最 終のかぶり形状すなわち残留はらみ出し量を表した図で ある。同図に示すように、各載荷ステップにおける柱幅 方向断面のはらみ出し形状は、中央のはらみ出し量が 54 mmで最大となり、中央から端に向けてほぼ均等にはらみ 出し量が小さくなるような形状であった。

また,図-11中に示す主鉄筋の座屈量は、図-12中の高 さ165mm位置での座屈量である。図-12にNo.2-13供試 体の北面の詳細な鉄筋座屈形状を示す。なお、座屈状況 の観察は、載荷試験終了後に供試体の水平変位を原点に 復帰させ行った。ここでは、座屈長を柱基部からの高さ 方向の座屈範囲、座屈量を軸方向鉄筋の元位置から載荷 方向への最大変形量、座屈頂点を柱基部から高さ方向に 最もはらみ出している箇所までの高さとそれぞれ定義し た。同図に示すように、No.2-13供試体の平均座屈長は322 mm,平均座屈量は27 mm,平均座屈頂点は153 mmであった。

ここで,柱幅方向断面のかぶりの最終はらみ出し量と 鉄筋の最終座屈量を比較する。図-11より,主鉄筋の座屈 状況から帯鉄筋の拘束が強い柱側面側の鉄筋(番号1,5) に比べ中央部の鉄筋(番号2,3,4)が少し大きく変形し ている。また,かぶりコンクリートの残留はらみ出し量 と比較すると,鉄筋座屈とほぼ同じ形状であることが確 認できた。よって,柱幅方向断面での,かぶりコンクリー トのはらみ出し形状と主鉄筋の座屈形状を比較すると, 中央の鉄筋が最も座屈変形するのと同様に中央のかぶり コンクリートが最もはらみ出しが大きくなる損傷形態と なった。

4.3 時系列計測結果

図-13 に No.2-13 のはらみ出し量の時系列変化を示す。 同図は、はらみ出しが発生した 8δy から 10δy までに生じ た柱中央位置での最大はらみ出し量の時系列変化を示し、 0 mm変位と最大変位時のみプロット点で示している。同 図の 8 δ y 時の載荷を例に示すと、はらみ出し量の変化は、 0 mm変位時でははらみ出しが生じていないものの、目標 変位 120 mmに向かうにつれてはらみ出し量は増加し、120



m変位では35mmのはらみ出しが生じた。また、0mm変位 に向かうにつれてはらみ出し量は減少し、0 mm変位では 16㎜のはらみ出し量が残留するようなはらみ出し挙動が 確認できた。この挙動は、他の載荷ステップにおいても 同様の傾向であった。さらに、はらみ出し量変化の上昇 勾配、下降勾配ともにほぼ同じ傾きであるため、各載荷 ステップの最大はらみ出し量は比例関係にある。ここで, 0mm変位時の残留はらみ出し量(黒塗りのプロット点)と 次の載荷ステップの 0 mm変位時のはらみ出し量(白塗り のプロット)に10mm程度の差が生じた。これは、負載荷 (計測面が引張時)の際に生じたためであり、繰返し載 荷の影響を受けていると考えられ、10δy時の最大はら み出し量にも同様の差が生じた。以上より、はらみ出し 量は水平変位に比例し、8 δ y 時における残留はらみ出し 量に各繰返し載荷の影響を受けたはらみ出し量を加えた 値となる。

図-14 に 10δy 時の高さ方向の断面形状の変化を示す。 同図は、図-13 中の[A], [B], [C]点におけるはらみ出し形 状を示す。同図に示すように、No.2-13 供試体の北面のか ぶりコンクリートのはらみ出し形状は、10δy 時の最大変 位時において、最大はらみ出し量が 54 mmであり、0 mm変 位時において、高さ 165 mm位置で、残留するはらみ出し 量は 29 mmというはらみ出し形状であった。この最終状態 のはらみ出し形状は図-12 に示す中央鉄筋(番号③)の座 屈形状とほぼ等しくなった。このことから、前述した柱 幅方向の鉄筋座屈形状を踏まえると、かぶりコンクリー トのはらみ出し形状は主鉄筋のはらみ出し挙動と同様で あったことが推定でき、10δy 時の最大変位時において、 鉄筋の最大座屈量は 54 mm程度であったことが考えられ る。

図-15 に荷重低下とはらみ出し量の関係を示す。同図 は、はらみ出し発生以降に荷重低下勾配に差が生じたこ とに着目して、No.2-12、2-13 の 7δy から 11δy までの荷 重変位包絡線とかぶりコンクリートのはらみ出し量の変 化の関係を示し、7δy、8δy および最終載荷ステップの点 をプロットで示す。ここで、8δy 時に着目して、はらみ出 し量を比較すると、No.2-12 は 16mm、No.2-13 は 35mm であった。次に、はらみ出し発生直前の 7δy からの荷重 の変化をみると、No.2-12 は約 20kN 低下、No.2-13 では 約 40kN 低下しており、はらみ出し量の進展の大きさに 比例して、荷重の低下も大きくなっている。最終的に、 No.2-12 は、11δy 時にはらみ出し量が 56 mmとなり、降伏 荷重(217kN)を下回り終局を迎えた。また、No.2-13 は 10δy 時に、はらみ出し量が 52mm となり終局を迎えた。

以上より,両供試体ともに終局時の座屈量は50m程度 であるが,帯鉄筋間隔が密なNo.2-12の方が,No.2-13と 比べてはらみ出し量の変化の傾きが小さくなることから, 終局変位に1δy程度の差が生じたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、帯鉄筋間隔をパラメータにして高靱性セ メント材料を使用した RC 橋脚の正負交番載荷実験およ び、棒型スキャナによる内部ひび割れ観察およびレーザ 一変位計によるはらみ出し形状の 3 次元計測より得られ た知見を以下に示す。

- 帯鉄筋間隔が 50 mmの No.2-12 の最大荷重は 290kN, 終局変位は 158mm であった。一方,帯鉄筋間隔が 100 mmの No.2-13 の最大荷重は 301kN,終局変位は 140mm となり,帯鉄筋間隔を密にして帯鉄筋比を増加させた No.2-12 の変形性能は No.2-13 に対して 13%向上する 結果となった。
- 2)外観のひび割れ密度進展を計測した結果,はらみ出し発生まで圧縮に伴うひび割れ進展は無く,ひび割れ密度は一定であった。しかし,棒型スキャナを使用して内部コンクリートのひび割れ密度進展を計測した結果,主鉄筋位置におけるひび割れ密度の変化は,はらみ出し発生直前の-7δy時には直前の載荷ステップより,ひび割れ密度が1.7倍になることが確認できた。すなわち,鉄筋座屈直前に内部コンクリートの圧壊が先に生じることが明らかとなった。
- 3)レーザー変位計を使用してかぶりコンクリートのはらみ出し形状を計測した結果,No.2-13のはらみ出し量は水平変位に比例し、8δy時における残留はらみ出し量に各繰返し載荷の影響を受けたはらみ出し量を加えた値になると考えられる。

参考文献

- 佐藤崇,幸左賢二,篠崎正治,小川敦久:高強度鉄筋 と高靱性セメント材料を使用したRC 橋脚の変形性 能に関する研究,構造工学論文集, Vol.60A, pp.769 -807, 2014.3
- 2) 篠崎正治,幸左賢二,佐藤崇,小川敦久:高靱性セメント材料をパラメータとした柱橋脚の損傷分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1123 -1128, 2015
- 3) 星隈順一,運上茂樹,長屋和宏,塩島亮彦:軸方向 鉄筋の配置方法に基づくRC橋脚の耐震性能の向上 に関する実験的研究,土木学会論文集,No.745/I-65,1-14,2003,10
- 社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説IV下 部構造編, pp.165-166, 2012.
- 5) 伊藤幸広,高橋洋一,宮本則幸:コンクリート構造物 検査用棒型スキャナの開発,建設の施工企画,pp.19-24, 2007.10