

論文 高靱性セメント材料をパラメータとした橋脚柱の損傷分析

篠崎 正治*1・幸左 賢二*2・佐藤 崇*3・小川 敦久*4

要旨: 過年度の研究より高靱性セメント材料と高強度鉄筋 SD490 を柱の塑性ヒンジ領域の全断面に使用した供試体は、従来の柱供試体より耐力・変形性能ともに向上を確認している。本実験では施工性に着目し、ワーカビリティを改善する目的で繊維混入量を変更した供試体と、水セメント比を変更した供試体を作成し正負交番載荷試験を行った。その結果、過年度実施した供試体に比べ、終局変位が増加する良好な結果を得た。また、柱基部の高靱性セメント材料の圧縮損傷に違いが見られたことから、柱かぶり部の高靱性セメント材料を採取し分析を行った結果、過年度の供試体に比べ密実性が高く、施工性改善の効果を確認できた。

キーワード: 高靱性セメント材料, 高強度鉄筋, 正負交番載荷実験

1. はじめに

著者らは柱断面に高靱性セメント材料を使用する事で変形性能を向上させる研究¹⁾を行っており、更に効率的に大規模地震時のエネルギーを吸収させるために高強度鉄筋に着目した実験を過年度実施した。著者らが過年度実施²⁾した、全断面に高靱性セメント材料を用い、柱の軸方向鉄筋に高強度鉄筋である SD490 を使用した供試体 (No.2-7) の正負交番載荷実験では、軸方向鉄筋に普通鉄筋である SD345 を使用した供試体と比較しても、高い耐力を発揮しつつ変形性能も向上する良好な結果が得られた。

しかしながら、高靱性セメント材料には変形性能の向上を目的とした繊維配合量の増加に伴い、粘性が増加してワーカビリティが低下するという問題点が存在し、本実験における材料試験時においても粘性の増加が確認され、No.2-7 供試体でも、従来の供試体と比べて圧縮側の高靱性セメント材料の損傷形態が異なり、柱基部の損傷がやや早期に発生する傾向が見られた。

そこで、本研究では柱の限界状態から安全率を設定する際においても重要である、高靱性セメント材料および高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート橋脚における変形

性能の限界値を把握すること目的とし、高靱性セメント材料の施工性に着目して、過年度作成した供試体 (No.2-7) を基準に、繊維配合量を 3.0Vol.% から 2.0Vol.% へ変更した供試体 (No.2-9) と水セメント比を 45% から 50% へ変更した供試体 (No.2-10) を作成した。さらに、柱供試体の正負交番載荷実験結果から損傷形態や、高靱性セメント材料の密実性が変形性能に及ぼす影響について考察を行った。

2. 実験概要及び材料試験

2.1 実験概要

表-1, 2に供試体諸元および高靱性セメント材料の配合表、図-1, 2に供試体の基本形状および配筋の比較を示す。供試体は柱の全断面を高靱性セメント材料で打設しており、軸方向鉄筋に高強度鉄筋であるSD490を使用したNo.2-7, 2-9, 2-10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

表-1 供試体諸元

| 供試体番号 | | No.2-7 | No.2-9 | No.2-10 | 供試体番号 | | No.2-7 | No.2-9 | No.2-10 |
|------------|--------------------------|---------|--------|---------|-------|--------------------------|--------|--------|---------|
| 断面[mm] | | 400×400 | | | 軸方向鉄筋 | 種類 | SD490 | | |
| かぶり厚[mm] | | 50 | | | | 降伏強度[N/mm ²] | 567 | | |
| せん断スパン[mm] | | 1400 | | | | 径 | D19 | | |
| せん断スパン比 | | 4 | | | | 引張鉄筋比[%] | 1.43 | | |
| 高靱性セメント | 繊維配合[Vol.%] | 3.0 | 2.0 | 3.0 | 帯鉄筋 | 種類 | SD345 | | |
| | 圧縮強度[N/mm ²] | 93.5 | 95.2 | 54.9 | | 降伏強度[N/mm ²] | 408 | | |
| 普通コンクリート | 圧縮強度[N/mm ²] | 41.4 | 43.2 | 58.3 | | 径 | D10 | | |
| | 鉛直軸力[N/mm ²] | 1.0 | | | | 間隔[mm] | 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

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: 荷重高さ) 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る。

No.2-9, 2-10では、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、柱基部の高靱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、高靱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。No.2-7では、柱とフーチング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図-2に示すように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。養生方法については、脱型後に供試体全体を十分散水し、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。

1) No.2-7供試体

No.2-7は、上記の断面形状を用いて高靱性セメント材料の配合は、表-2に示す繊維混入率を3.0 Vol.%, 繊維長12mmの配合を使用した。ここで繊維配合量を3.0 Vol.%に設定した理由は繊維混入率の上限を検討するためである。またフーチングの上面と柱を高靱性セメント材料で一体打設している供試体である。

2) No.2-9供試体

No.2-9は、施工性改善のため高靱性セメント材料の繊維添加量に着目し、流動性を増加させるために混入率を下げた表-2に示す繊維混入率2.0 Vol.%, 繊維長12mmの配合の高靱性セメント材料を使用した。

3) No.2-10供試体

No.2-10は、施工性改善のため水セメント比に着目し、表-2に示すように繊維混入率を3.0 Vol.%, 繊維長12mmはNo.2-7と同じであるが、水セメント比を45%から50%に変更した配合を使用した。

No.2-7, No.2-9, No.2-10の高靱性セメント材料のスランプフロー値はそれぞれ45cm×46cm, 65cm×65cm, 48cm×48cmであり、繊維量が少ない配合においてワーカビリティの向上が確認できた。

荷重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相当を荷重した一定軸力下で正負交番水平荷重を行った。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荷重し、その時点での変位を δ_y と定義した。降伏以後は δ_y の整数倍を変位制御により荷重した。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荷重を終了した。

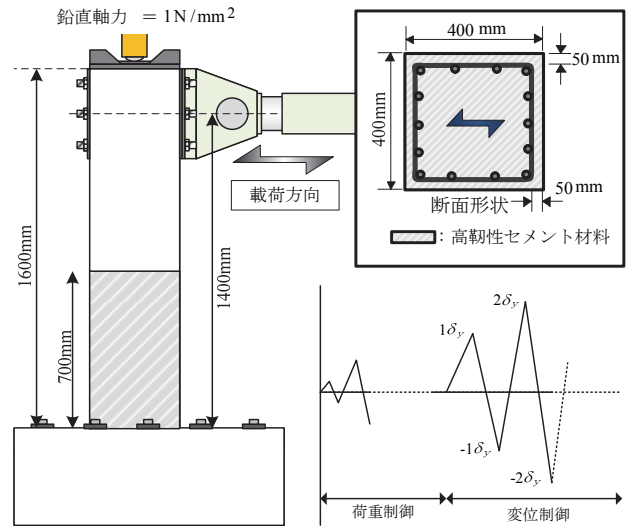


図-1 供試体形状及び荷重方法

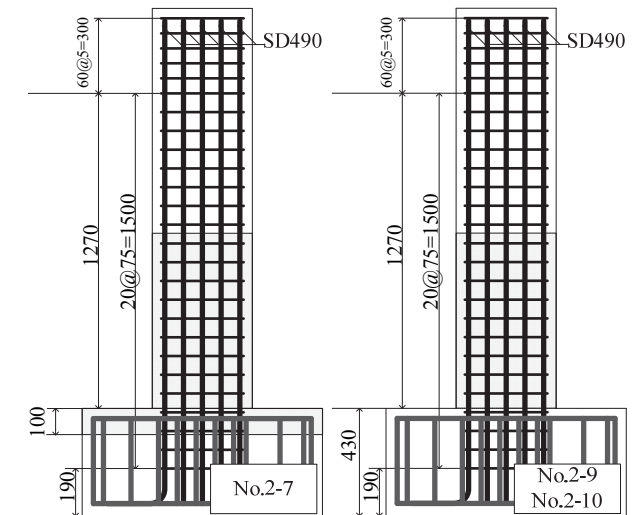


図-2 供試体形状と配筋の比較

表-2 高靱性セメント材料の配合

| 供試体 | PVA繊維 | | 水セメント比[%] | 単位量[kg/m ³] | | | | | |
|---------|-------------|----------|-----------|-------------------------|-----|-----|-----|----|--------|
| | 繊維量 [Vol.%] | 繊維長 [mm] | | W/C | W | C | FA | S | AE 減水剤 |
| No.2-7 | 3 | 12 | 45 | 261 | 580 | 580 | 580 | 20 | 39 |
| No.2-9 | 2 | 12 | 45 | 261 | 580 | 580 | 580 | 20 | 26 |
| No.2-10 | 3 | 12 | 50 | 282 | 564 | 564 | 564 | 19 | 38 |

W: 水, C: セメント, FA: フライアッシュ, S: 珪砂(6号)

3. 実験結果

3.1 荷重変位関係

1) No.2-7供試体

図-3に、水平ジャッキの荷重およびその荷重点での変位より得られたNo.2-7の荷重変位履歴曲線を示す。まず、No.2-7は水平変位13mmで降伏荷重に達し、その後、5 δ_y (65mm) において最大荷重 (286kN) に達し、8 δ_y 以降は柱基部のはらみ出しが進展し、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た。その後 $11\delta_y$ 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 $11\delta_y$ (142mm) で載荷を終了した。

2) No.2-9供試体

図-4にNo.2-9の荷重変位履歴曲線を示す。まず、No.2-9は水平変位15mmで降伏荷重に達し、その後、 $5\delta_y$ (75mm) において最大荷重 (308kN) に達し、 $6\delta_y$ よりフーチングの圧縮側の損傷が進展し荷重が徐々に低下し始め、 $9\delta_y$ 以降は柱基部のはらみ出しが進展し、かぶりコンクリートの圧壊が発生するとともに荷重が大きく低下した。降伏荷重を下回った $11\delta_y$ (165mm) で載荷を終了した。

3)No.2-10供試体

図-5にNo.2-10の荷重変位履歴曲線を示す。まず、No.2-10は水平変位15mmで降伏荷重に達し、その後、 $5\delta_y$ (75mm) において最大荷重 (316kN) に達し、 $9\delta_y$ 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、更にかぶりコンクリートの圧壊が発生するとともに荷重が大きく低下した。正載荷側は $10\delta_y$ (150mm) において降伏荷重を下回ったが、負載荷側は終局条件に達しておらず、降伏荷重を下回った $-11\delta_y$ (-165mm) で載荷を終了した。

図-6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。各供試体の最大荷重に着目するとNo.2-7とNo.2-10は294kN,295kNであり、コンクリート強度が違うものの、本供試体は軸方向鉄筋比が比較的高いため、軸方向鉄筋の強度の影響が大きいことからほぼ同様の値であるが、No.2-9では309kNとやや差が生じた。終局変位についてはNo.2-9が最も大きい変形性能を有しており、159mmであった。No.2-7とNo.2-10はそれぞれ127mm, 142mmでありやや小さい値を示した。

図-7に履歴吸収エネルギーの比較を示す。同図は、各

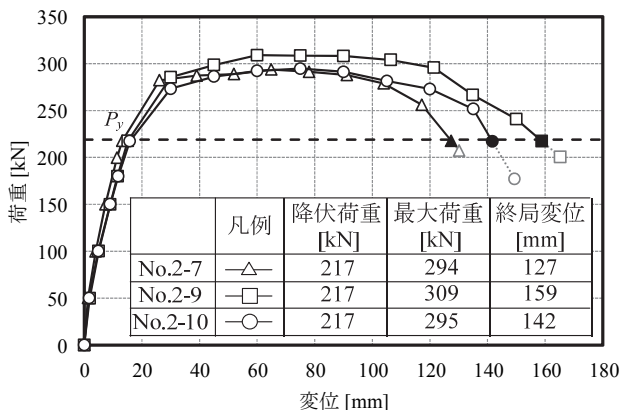


図-6 荷重変位包絡線比較

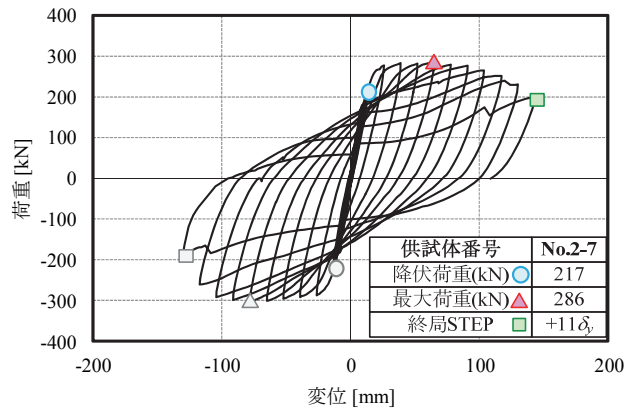


図-3 No.2-7 荷重変位履歴曲線

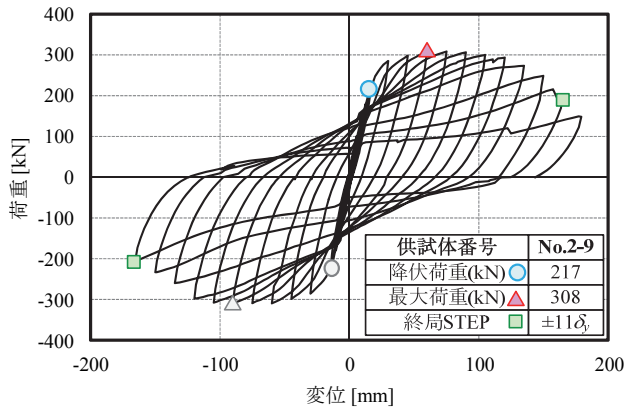


図-4 No.2-9 荷重変位履歴曲線

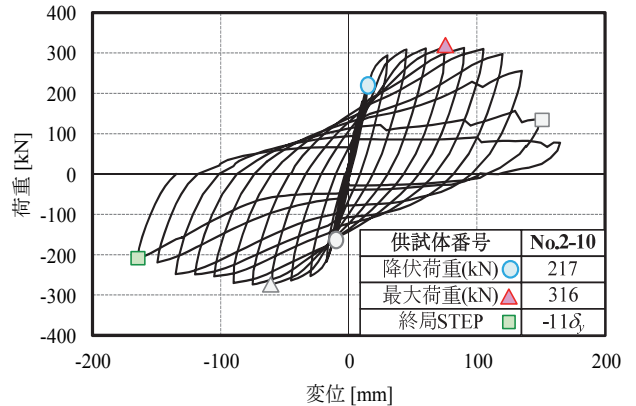


図-5 No.2-10 荷重変位履歴曲線

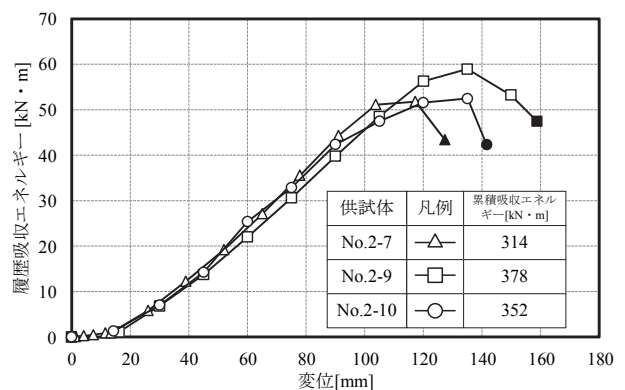


図-7 履歴吸収エネルギー

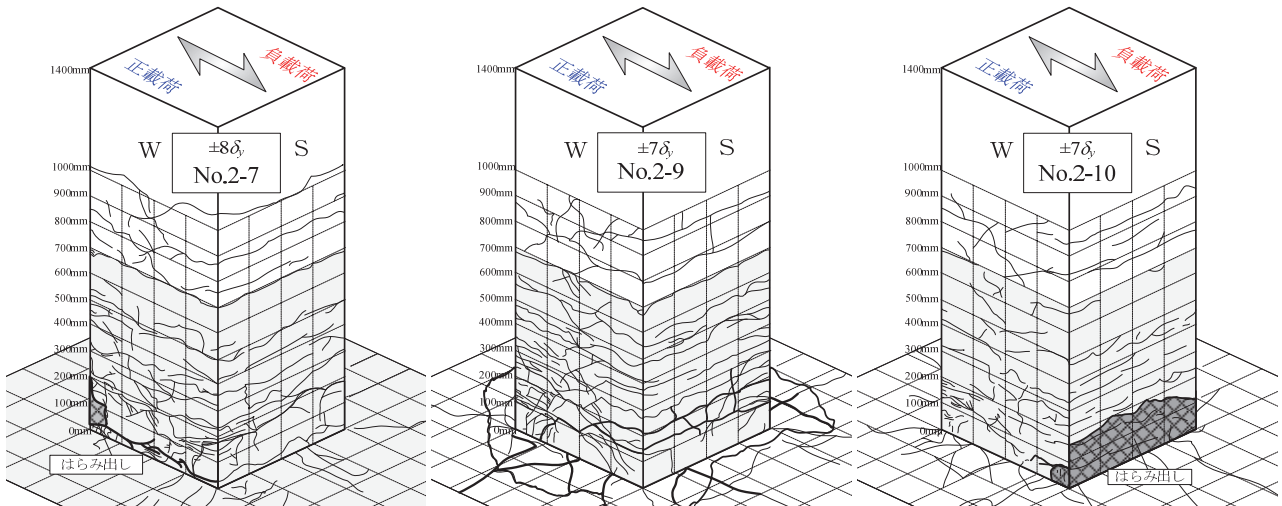


図-8 水平変位 $\delta=100\text{mm}$ における柱の損傷状態

供試体の荷重終了STEPまでの荷重と変位で囲まれる面積をエネルギー吸収量とし、変位毎にプロットした図である。No.2-7に着目すると、荷重が低下し始める $8\delta_y$ の変位(104mm)までは、他と比較して大きな履歴吸収エネルギーが算出された。ただし、No.2-7の降伏変位 δ_y は他の供試体と比較してやや小さく、塑性率 (δ_u/δ_y) は全供試体で11であり、累積履歴吸収エネルギー量を算出すると、図中の表に示すように、 $314\text{kN}\cdot\text{m}$ と最も小さい結果となった。No.2-9、No.2-10の累積履歴吸収エネルギー量はそれぞれ $378\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $352\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、No.2-10の $6\delta_y$ (90mm)まではNo.2-9よりも大きな履歴吸収エネルギーを示しているが、負荷側でははらみ出しが進展し、更に $8\delta_y$ (120mm)以降で鉄筋破断が生じたことによって、荷重低下域の履歴吸収エネルギー量がNo.2-9よりも小さくなり、No.2-9の累積履歴吸収エネルギー量が最も大きい結果となった。

3.2 損傷状態

図-8に各供試体の水平変位 $\delta=100\text{mm}$ における損傷状態の比較を示す。No.2-7の高靱性セメント材料打設部分はひび割れが分散しており、荷重低下開始している $+8\delta_y$ では正載荷側の柱基部がはらみ出ししておりかぶりコンクリートの圧壊が生じていることが確認できる。No.2-9の高靱性セメント材料打設部分は、供試体の断面四隅から生じたひび割れ本数が、No.2-7およびNo.2-9でそれぞれ20本、27本、その最大ひび割れ幅はそれぞれ20mmと15mmであり、No.2-9は細かいひび割れが複数発生しておりNo.2-7と比較して分散性に優れていることが確認できる。また、同図からではNo.2-9の柱基部に大きな損傷は確認できないが、荷重低下が発生している $9\delta_y$ (145mm)ではNo.2-7と同様に柱基部がはらみ出してかぶりコンクリートの圧壊が生じる損傷に至った。また、No.2-9はフーチング表面の損傷が全供試体中最も多く、フーチング表面の損傷は圧縮時に損傷が進展していた。これは、他の供試体に比べてフーチング上面の普通コンクリートと

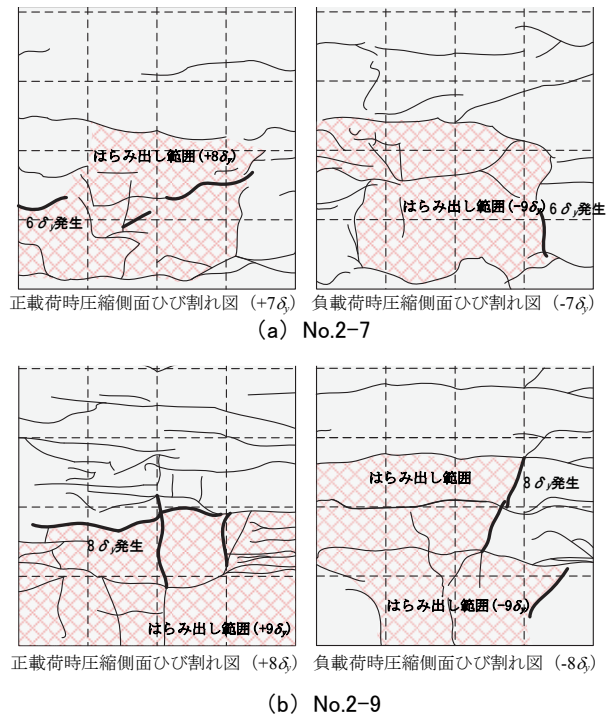


図-9 はらみ出し発生状況の比較

柱の高靱性セメント材料の圧縮強度差が大きかったため、強度の小さいフーチング側表面のコンクリートが損傷したと考えられる。但し、フーチングの損傷箇所は上面鉄筋のかぶり部50mmでの損傷であり、柱の主要な損傷箇所は柱で生じていることから、この損傷は変形性能に大きく影響していないと考えられる。No.2-10でも同様に荷重低下が発生している荷重STEPの $-7\delta_y$ で負荷側柱基部がはらみ出ししておりかぶりコンクリートの圧壊が生じていることが確認できる。

全ての供試体ではらみ出しに伴うかぶりコンクリートの圧壊損傷時に荷重低下が発生していることが確認され、高靱性セメント材料の圧縮側の損傷が変形性能に大きく影響し

ていることが確認できた。それぞれの供試体ではらみ出しが
発生した水平変位は No.2-7 の正載荷側は+103mm, 負載荷
側は-117mm であり, No.2-9 は±135mm, No.2-10 の正載荷
側は 135mm, 負載荷側は-105mm であるため, 平均的にみ
るとそれぞれの供試体のはらみ出し発生変位は No.2-7 が
110mm, No.2-9 が 135mm, No.2-10 が 120mm となり,
No.2-9 が最も大きな変位ではらみ出しが発生していること
が分かった。

図-9 にはらみ出し発生変位の差が最も大きい No.2-
7,2-9 のはらみ出しの発生状況の比較を示す。No.2-7 は正
負載荷面における $7\delta_y$ のひび割れ図とその後に発生した
はらみ出し発生範囲を示し, No.2-9 は正負載荷面におけ
る $8\delta_y$ 時のひび割れ図とその後に発生したはらみ出し発
生範囲を示す。併せてそれぞれのはらみ出し範囲のひび
割れの内, はらみ出し直前に発生したひび割れを示す。
同図より, No.2-7 は正負共にひび割れ箇所よりその後の
はらみ出しが発生しており No.2-9 も同様にひび割れ箇
所がはらみ出し範囲となっている。

以上より, はらみ出し発生前に生じたひび割れが進展
することで軸方向鉄筋の座屈を拘束する効果が失われ,
はらみ出しが生じたと考えられる。そのため主要なひび
割れが形成される載荷 STEP が最も遅い, No.2-9 の変形
性能が増加したと考えられる。

4. 高靱性セメント材料の内部状況の評価

4.1 高靱性セメントの密実性の確認

前章より, 各供試体の高靱性セメント材料の特にかぶり
部のひび割れを伴う損傷の発生時期の違いが変形性能
に影響していることがわかる。高靱性セメント材料は繊
維混入により流動性が低下し巻き込み空気を有すること
が問題点として挙げられ^{4),5)}, 本実験前に行った材料試
験でも気泡の存在は確認できている。本章では高靱性セ
メント材料の内部の密実性を確認するため, 繊維配合量
2.0Vol.%の高靱性セメント材料を用いた No.2-9 と,
3.0Vol.%の高靱性セメント材料を用いた供試体で変形性
能が最も小さい No.2-7 を対象に柱下部のかぶり部の高
靱性セメント部を切り出し, 気泡状態の比較を行った。

(1) 計測方法

図-10 に高靱性セメント材料の切断範囲と, 気泡状態
の確認方法を示す。切り取りの範囲は損傷の少ない側面
(西面)と, はらみ出しが発生し損傷が大きい載荷面(南
面)より基部から高さ 400mm, 断面幅 20mm×25mm の状
態で切り出しを行った。切り取った角柱から任意に西面
より 2 本, 南面より 1 本選出しそれぞれ 10mm 間隔で切
断し高さ方向の気泡状態を確認した。気泡状態の確認方
法は, まず, 角柱の切断後, 切断面を研磨しデジタルカ
メラで撮影を行い, 画像より断面内の気泡は直径 1mm 以

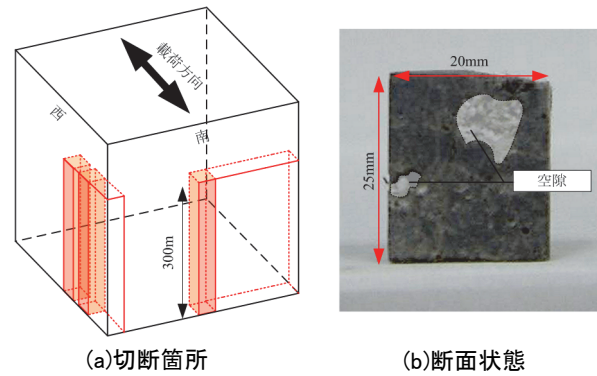


図-10 気泡の測定方法

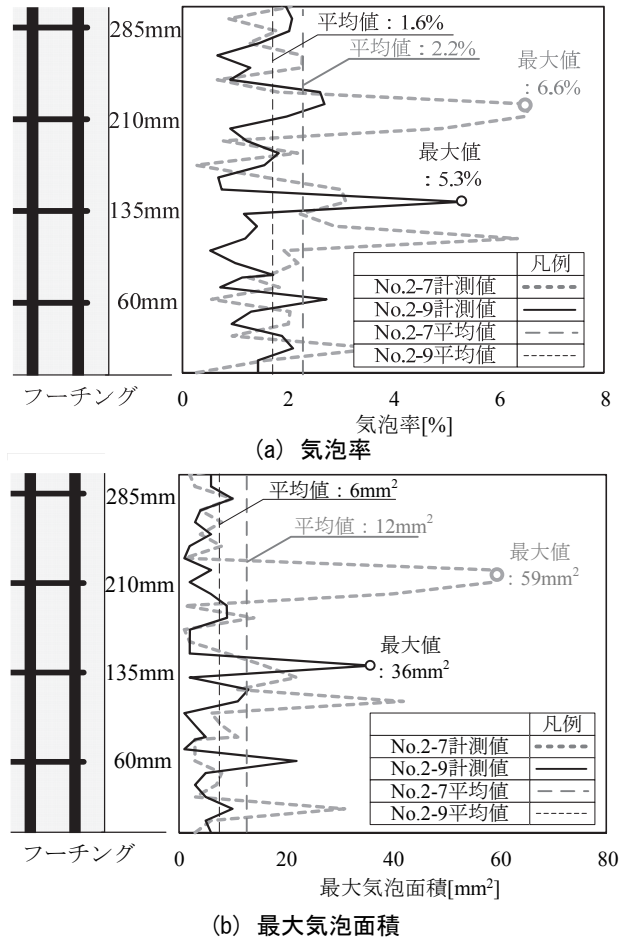


図-11 No.2-7, 2-9 気泡率測定結果

上の気泡を対象として気泡面積を計測し, 断面積で除す
ことによって気泡率を計算した。

(2) 測定結果

図-11 に No.2-7,2-9 の気泡状態の測定結果として, 同
図(a)に気泡率, 同図(b)に最大気泡面積の高さ方向の分布
を示し, それぞれに帯鉄筋の配筋高さを併せて示す。気
泡率はそれぞれの同じ高さにおける平均値を示し, 最大
気泡面積はそれぞれの同じ高さにおける気泡面積の最大
値を示し, 更に各供試体の測定結果の平均値を示した。
No.2-7 の気泡率の平均値は 2.2%, No.2-9 の平均値は 1.6%
であり, No.2-7 の方がやや大きい傾向にあった。次に,
最大気泡面積を比較すると No.2-7 の最大気泡面積の平

均値は 12mm² に対して No.2-9 の最大気泡面積の平均値は 6mm² であり、2 倍の差が生じた。また、同図(a), (b)より、両供試体とも帯鉄筋周辺で気泡率と最大気泡面積が大きくなる傾向があることが確認できる。角柱の切り取り後の柱の断面を確認しても同様に両供試体の帯鉄筋位置で大きな繊維塊と気泡の存在を視認することができた。

供試体の切断により確認した高靱性セメント材料の気泡は、主に繊維塊と同じ箇所が発生していたため、断面内がかぶり幅が狭く、配筋を固定する番線などで繊維塊が定着しやすい帯鉄筋位置で気泡が形成されやすかったと考えられる。また、繊維配合量が 2.0Vol.% の No.2-9 に比べて繊維配合量が 3.0Vol.% の No.2-7 の方が単位体積当たりの繊維量が多くセメントと繊維の分散が十分でない箇所が生じやすかったことから、より大きな気泡が形成されて密実性が低下したと考えられる。

4.2 柱の損傷状態の関係

図-12 に No.2-7, 2-9 の南面の最大気泡面積分布とその測定位置、帯鉄筋高さを示し、平均的な気泡面積の位置の断面状態を併せて示す。同図より、両供試体とも最大気泡面積が大きい高さでひび割れが発生していることが確認でき、断面状態よりひび割れ箇所に大きな気泡が存在していることが確認できた。前項で述べたように、No.2-7 は大きな気泡が発生している箇所が帯鉄筋位置以外にも多く存在し、図-12 に示すようにひび割れの発生個所には気泡が存在している事より、No.2-7 では気泡が多いためかぶりの高靱性セメント材料の靱性が不均一になり、大きな気泡にひび割れ発生個所が誘導された可能性が考えられる。よって、高靱性セメント材料の密実性が圧縮靱性に影響を与えて、No.2-7, 2-9 の損傷形態に違いが生じたと考えられる。

5. まとめ

高靱性セメント材料と高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート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 SD490 を使用した橋脚柱供試体 No.2-7 の最大荷重は 294kN、終局変位は 129mm であった。一方、施工性を向上するために、高靱性セメント材料の繊維配合量を 3.0Vol.% から 2.0Vol.% へ変更した供試体 No.2-9 と水セメント比を 45% から 50% へ変更した供試体 No.2-10 のそれぞれの最大荷重は 309kN, 295kN であり、終局変位は 159mm, 142mm であったことから、No.2-9, 2-10 の変形性能は No.2-7 に対してそれぞれ 25%, 12% 向上し良好な結果が得られた。
- (2) No.2-7, 2-9 を対象に柱基部の損傷状態を比較すると、荷重低下を及ぼした圧縮時のはらみ出しはひび割れ

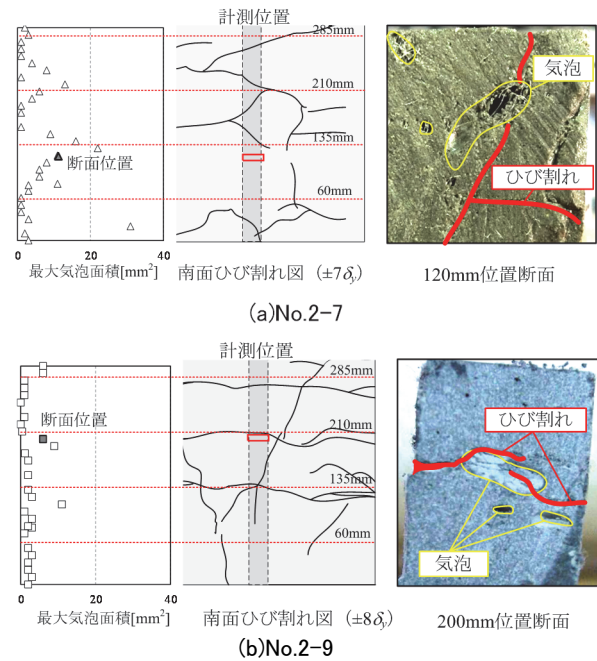


図-12 ひび割れ箇所の断面状態

箇所を起点に発生しており、No.2-9 ではひび割れ発生自体が No.2-7 よりも遅い載荷 STEP で生じているため、No.2-9 は No.2-7 よりはらみ出し発生が 1 ループだけ遅くなり変形性能がやや向上したと考えられる。

- (3) 柱の高靱性セメントの圧縮靱性を調べるために、No.2-7, 2-9 を対象に実験後の柱のかぶり部を切り出して断面を観察した結果、3.0Vol.% 配合の No.2-7 に比べ 2.0Vol.% 配合の No.2-9 は密実性が増加し、施工性の改善が確認された。このため、No.2-9 の圧縮靱性に影響を与え、損傷が遅延化された可能性が考えられる。

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) 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
- 3) 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, 2012.3
- 4) 小川敦久, 末森寿志, 斉藤忠, Victor C. Li: ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の流動性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, 2001
- 5) 稲岡和彦, 上田隆雄, 水口裕之: 配合条件が高じん性セメント複合材料の基礎的物性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006