

超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋RC橋脚の 二方向載荷実験とファイバーモデル解析

金光嘉久¹・山野辺慎一²・曾我部直樹³
川島一彦⁴・松崎裕⁵・佐々木智大⁶

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²正会員 博（工） 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

³正会員 博（工） 鹿島建設株式会社 北陸支店（〒959-4608 新潟県東蒲原郡阿賀町小花地萩原515-1）

⁴正会員 工博 東京工業大学教授 理工学研究科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

⁵正会員 博（工） 東京工業大学助教 理工学研究科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

⁶正会員 博（工） 東京工業大学 大学院理工学研究科（〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地）
（現（独）防災科学研究所 兵庫耐震工学研究センター（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋
1501-21）

1. はじめに

大規模な地震の直後において、主要な橋梁の使用性を担保することは、早期の救援、復旧体制の確立のために不可欠である。そのためには、桁、床版を支えるRC橋脚の損傷が大規模な地震に対しても、軽微な範囲となることが求められる。特に、RC橋脚のコンクリートが圧壊するような損傷となった場合、曲げ耐力や軸力を保持する機能が低下するため、地震直後の使用性が喪失してしまうケースが多い。

一方で、矩形RC橋脚が水平二方向および鉛直方向の地震力を受けると、損傷状況は一方向のみを考慮した場合と異なることが指摘されている^{1),2)}。特に、軸力が高い場合に斜め方向の曲げを受けると、隅角部の圧縮破壊が進行し、一方向の場合に比べてじん性が低下することが考えられる。このような複雑な損傷過程を示す水平二方向および鉛直方向の地震力に対しても、コンクリートの圧壊を防ぐことが、RC橋脚の地震直後における使用性を確保する上で重要となる。

これに対して、著者らは、高い圧縮強度と曲げ強度を有するコンクリート系材料である超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を、プレキャスト型枠として躯体基部に適用したRC橋脚（以下、UFC橋脚と称する）を提案している³⁾。この橋脚の基本的な考え方は、塑性ヒンジ区間のかぶりをUFCで高強度化し、地震時における曲げ圧縮応力のかぶり部分で負担させることにより、コアコンクリートを無損傷

として、橋脚全体の耐震性能、変形性能を確保することである。一方で、かぶりをUFCで構築することは、二方向からの外力に対しても有効に機能することが考えられる。例えば、UFCによる隅角部のかぶり厚を大きくすれば、二方向からの曲げによる隅角部の損傷の進展を抑制し、高い変形性能を実現できる可能性がある。

そこで、本研究では、UFC橋脚の二方向からの地震動に対する耐震性能を明らかにすることを目的として、同橋脚の縮小模型を用いた二方向載荷実験と、ファイバーモデルによる再現解析を行った。

2. UFCを用いたRC橋脚

(1) UFC製プレキャスト型枠とUFC橋脚

UFC橋脚は、図-1に示すようなUFC製プレキャスト型枠を塑性ヒンジ区間に適用することにより、同区間のかぶりをUFCとしたものである。本研究で対象としたUFCは、エトリンガイト生成系のコンクリート材料であり、180~200 N/mm²級の圧縮強度が得られ、また、直径0.2 mm、公称長さが20 mmと15 mmの鋼繊維を混合して体積比で1.75% 混入することにより、15 N/mm²程度の引張強度を得ることができる⁴⁾。養生方法は、20℃の気中養生を24時間実施し、その後、85℃の蒸気養生を24時間行うことを基本とする。表-1に本研究で用いたUFCの基本配合を示す。

RC橋脚のように地震時に曲げと軸力が作用する

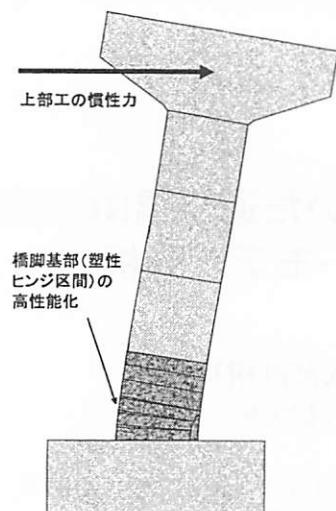


図-1 UFCを用いたRC橋脚

表-1 UFCの配合例

空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水*	プレミックス 結合材**	骨材	混和剤	
2	205	1,288	911	51.25	137.4

* 混和剤の水分を含む。

** ポルトランドセメント、およびポゾラン材、エトリンガイド生成系混和材からなる。

RC部材では、引張側の軸方向鉄筋の降伏後に最外縁となる圧縮側のかぶりコンクリートが圧壊し、その損傷がコアコンクリートに進展することにより終局を迎える。この時、高強度を有するUFCでかぶりが構築されていれば、同部分の圧壊を抑制できる。また、軸方向鉄筋が鋼繊維を有するUFCで拘束されることにより、その座屈についても遅延化できる。さらに、UFC製プレキャスト型枠には、鋼繊維の不連続部分を基部から一定の間隔で設けておき、同部分がひび割れ誘発目地として機能することにより、UFC製プレキャスト型枠の適用区間に複数の曲げひび割れを発生させる。これにより、UFC製プレキャスト型枠を適用した区間では、通常のRC部材よりも高い変形性能が期待できる。

UFC橋脚はこのように、UFC製プレキャスト型枠を用いて、塑性ヒンジ部のみの変形性能を向上させることで、比較的高価であるUFCの使用量を抑えつつ、橋脚全体の耐震性、変形性能を高めることができる⁴⁾。

(2) 二方向からの曲げに対するUFC製プレキャスト型枠

一方向からの曲げが矩形断面に作用した場合、図-3のように断面の中立軸に対して平行に圧縮縁と引張縁が形成され、同位置にあるコンクリート、軸方向鉄筋により曲げ特性が決まる。これに対し、二

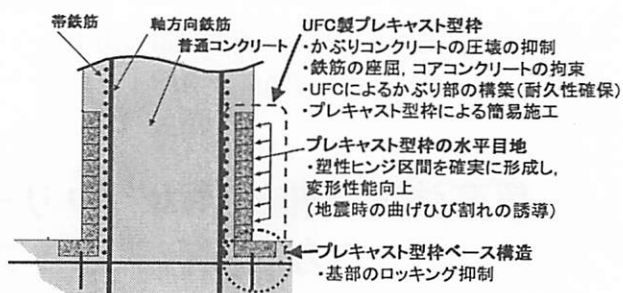
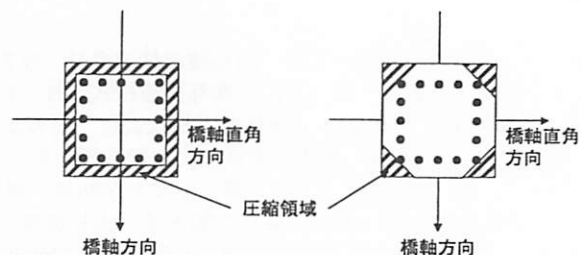


図-2 UFC製プレキャスト型枠による塑性ヒンジ構造



各方向への曲げによる圧縮領域 二方向からの曲げによる圧縮領域

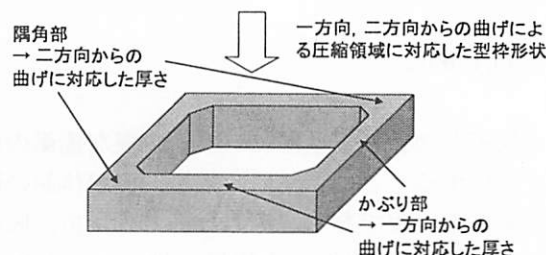


図-3 二方向の曲げに対応した UFC 型枠

方向から曲げが作用する場合には、橋軸方向、橋軸直角方向の各軸に対する曲げモーメントによる応力が重なることにより、隅角部が圧縮縁、引張縁となるような応力分布となる。そのため、二方向からの曲げに対しては、隅角部におけるコンクリートや鉄筋から圧壊や座屈が始まり、それが断面の内部に進展していくという破壊過程となり、一方向からの曲げが作用した状態に比べて変形性能が小さくなる。また、隅角部からコンクリートが圧壊した場合、同方向の曲げ耐力、剛性が低下するために、応答が一方向に片流れして、最大応答変位、残留変位が大きくなる可能性がある。

逆に言えば、二方向からの地震動、曲げに対して、RC橋脚の変形性能を確保するためには、最外縁の隅角部の損傷を抑制することが必要であり、UFC製プレキャスト型枠を適用することによって、同部分をUFCで構築することは有効な手段の一つとして考えられる。例えば、UFC製プレキャスト型枠を図-3に示すように、内面の形状を八角形とすることにより、隅角部の厚さを二方向からの曲げに対応した大きさに設定できる。

3. 二方向載荷実験の概要

(1) 試験体

試験体は、道路橋のRC橋脚を想定して試設計したUFC橋脚の1/4.25模型である。断面は400×400 mmの正方形断面であり、軸方向鉄筋としてSD345-D13、D10鉄筋を配置している。帯鉄筋については、曲げ破壊が先行するようにSD345相当-D6鉄筋を40 mm間隔で配置した。試験体高さは、橋脚基部から荷重点までを1,680 mmとして、UFC製型枠を基部から1.25D区間（500 mm）に適用した。なお、UFC製プレキャスト型枠の適用区間については、中間帯鉄筋は配置していない（図-4）。

UFC製プレキャスト型枠は、二方向の曲げを想定して、8角形の中空部を有する形状とした。直線部の厚さについては、一方向の曲げと軸力による圧縮応力度をかぶりのみで負担できる大きさである42 mmとした。また、隅角部の厚さについては、二方向からの曲げと軸力による圧縮応力度を、同部分で負担できる大きさとして97 mmとした（図-5）。なお、既往の実験³⁾では、UFC製プレキャスト型枠のひび割れ誘発目地をドライジョイントとしていたが、今回の実験では、基部から50 mm間隔で金網を設置して、鋼繊維の不連続部を設けてひび割れ誘発目地とした。

表-2～表-4に、試験体に用いた各材料の材料試験結果を示す。

(2) 載荷方法

試験体への加力は、東京工業大学の耐震実験施設内の3軸載荷装置を用いて行った（写真-1）。本装置は、水平直角X-Y方向、鉛直Z方向の3本の押引型アクチュエータからなるものである。アクチュエータと試験体は、ユニバーサルジョイントで接続されているため、水平2軸、鉛直1軸の組み合わせ載荷が可能である。

軸力については、断面における面圧が 1.0 N/mm^2 となるように、160 kNをZ軸方向のアクチュエータにより、水平方向の荷重中の荷重値が一定になるように制御した。一方、水平方向については、荷重点変位とせん断スパン(1,680 mm)の比からなるドリフトを基準とした、同一振幅における繰返し回数を3回とした、円形振幅漸増型載荷を行った。図-6に荷重点変位の履歴（X-Y）を示す。振幅の漸増の基準となる変位は、ドリフト0.5%に相当する8.4 mmの荷重点変位とした。

実験は、試験体の耐力が最大値の8割程度以下に

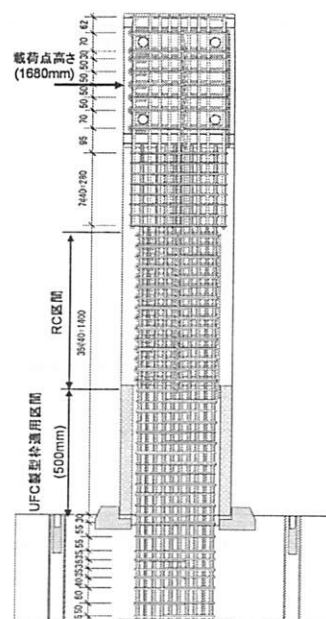


図-4 UFCを用いたRC橋脚

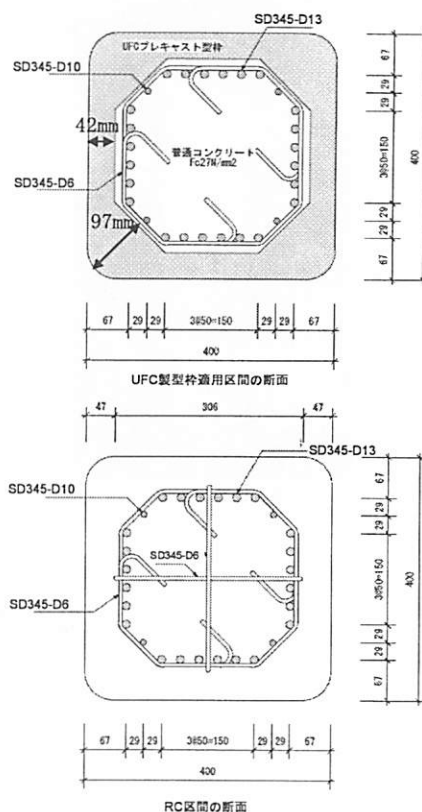


図-5 二方向の曲げに対応した UFC 型枠

まで低下し、基部に顕著な損傷が確認できた時点で終了した。

(3) 計測項目

8角形の隅角部に配置される軸方向鉄筋に、基部から80～120 mm間隔でひずみゲージを設置することにより、基部から0.5D区間（300 mm）における軸

表-2 鋼材の材料試験結果

鋼材の種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
軸方向鉄筋 SD345 D13	376	561	187
軸方向鉄筋 SD345 D10	361	540	183
帯鉄筋, 中間帯鉄筋 SD345相当 D6	368	569	183

表-3 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	備考
28.5	材齢：16日

表-4 UFC の材料試験結果

圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)	曲げ引張強度(N/mm ²)
196.2	44.9	28.5

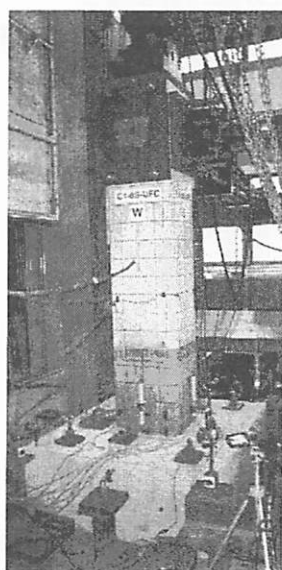


写真-1 載荷装置

方向鉄筋のひずみを計測した。また、フーチング内部については、各鉄筋のフーチングと躯体の境界から下方に290 mmの位置に、ひずみゲージを設置した。

試験体の基部における隅角部付近には、基部から50, 100mmの位置にコンクリートゲージを設置し、実験時における UFC 製プレキャスト型枠の圧縮ひずみを計測した。また、UFC 製プレキャスト型枠とRC 部の境界の近傍となる基部から 770 mm の位置にも、コンクリートゲージを設置し、同部分のかぶりコンクリートの圧縮ひずみを計測した。試験体への載荷荷重、載荷点変位については、X,Y,Z 方向の各アクチュエータに内蔵されたロードセル、変位計によって計測した。

4. 実験結果と考察

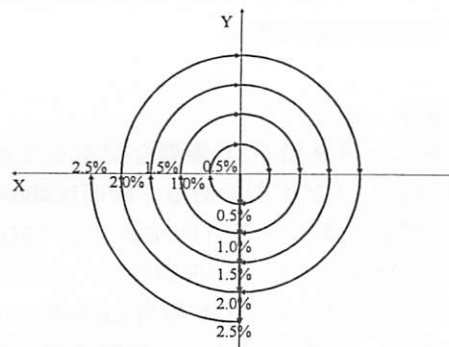


図-6 載荷変位のオービット図

(1) 荷重-変位関係と破壊性状

図-7に水平荷重と載荷点変位の関係を示す。なお、水平荷重、載荷点変位については、P- δ 効果とフーチングの移動量を補正している。荷重-変位関係では、X,Y方向共に、ドリフトが1.0~1.5%程度まで各方向の水平荷重が増加している。ドリフト1.5%以降については、水平荷重は増加することなく、最大耐力を保持したまま、曲げ変形が進んでいる。その後、ドリフト5.5%の繰返しにおいて、隅角部に配置された軸方向鉄筋が破断した後、ドリフト6.0%までの載荷で複数の軸方向鉄筋の破断が確認され、水平荷重が低下した。曲げひび割れは、ドリフト1.0%時にフーチングと躯体の境界付近の目地部、および基部から200 mmのUFC製プレキャスト型枠の目地部に発生した。曲げひび割れの数は、載荷が進んでも増加せず、ドリフト1.0%時に発生したひび割れの幅、特に、フーチングと躯体の境界におけるひび割れ幅が大きく拡大する傾向が確認された。曲げひび割れを誘導するための目地については、前述のように基部から50 mm間隔で設置したが、UFC 製プレキャスト型枠の適用区間に発生した曲げひび割れは2~3本程度であった。

圧縮側のUFCについては、軸方向鉄筋の破断が確認されたドリフト5.5%時においても、圧壊や軸方向鉄筋の座屈に伴うはらみ出し等の損傷は、確認されなかった(写真-2)。

(2) UFC製型枠の圧縮ひずみ

図-8にUFC製プレキャスト型枠の圧縮ひずみについて、変形ごとの変化を示す。なお、同図に示した圧縮ひずみは、ドリフト5.5%時に基部のひずみが、最も大きな値を示した隅角部での計測値である。

UFCのひずみの大きさについては、ドリフトが4.5~5.0%時において基部から50 mmの位置で計測された約 $4,000 \times 10^{-6}$ が最大である。材料試験におけるUFCの最大圧縮強度時のひずみは、概ね $5,000 \times 10^{-6}$

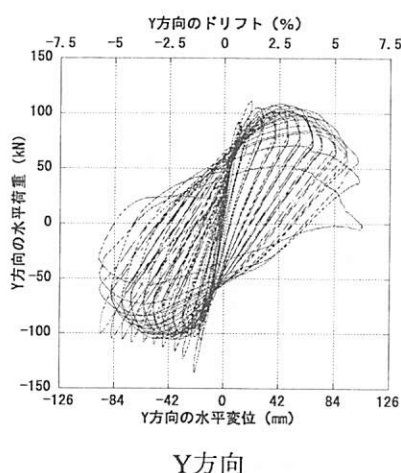
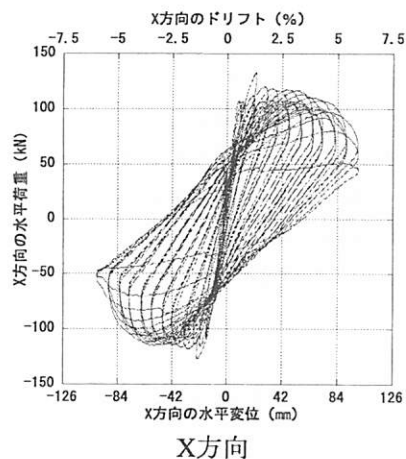
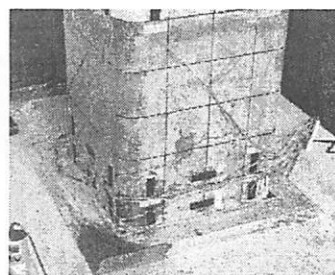
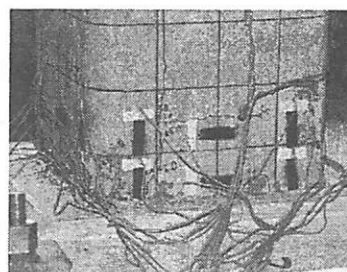


図-7 水平荷重－載荷点変位関係



ドリフト 1.0%時



ドリフト 5.5%時

写真-2 UFC 製型枠部の損傷状況

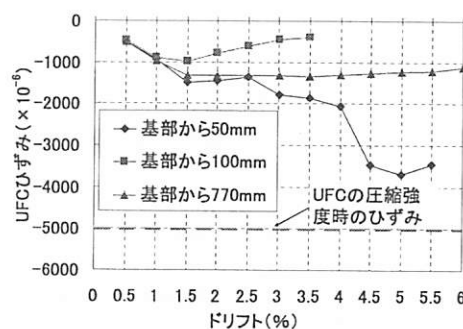


図-8 UFC の圧縮ひずみの変化

程度であったことを考慮すると、軸方向鉄筋の破断までUFCは健全性を保っていたことが分かる。また、UFCのひずみの高さ方向での比較では、基部から100 mmの方が、基部から50mmに比べ、ひずみが小さくなる傾向が確認できる。これに対し、計測位置が基部から770mmであるかぶりコンクリートのひずみについては、計測位置が100 mmのUFCのひずみよりも大きくなっている。これは、UFCに比べ、普通コンクリートの弾性係数が小さいことが原因であると考えられる。ただし、同部分のひずみについても、最大値は $2,000 \times 10^{-6}$ 以内であり、かぶりコンクリートが圧壊するような損傷は発生していないことが分かる。

(3) 軸方向鉄筋のひずみ分布

図-9に、隅角部における軸方向鉄筋のひずみ分布を、変形状態ごとに比較したものを示す。なお、実線は引張側を、点線は圧縮側を示しており、計測位置については、断面幅Dで正規化してる。

引張側については、同図よりドリフト1.5%の時点で、基部から $\pm 0.5D$ 区間のひずみが増加しており、

同部分で軸方向鉄筋が塑性化していることが分かる。また、ドリフト1.5%以降は、フーチングと躯体の境界部の引張ひずみが局所的に増加している。すなわち、軸方向鉄筋のひずみ分布からも、UFC製プレキャスト型枠の適用区間における曲げ変形が、フーチングと躯体の境界部に集中していたことが確認できる。

今回の実験では、前述のように、ひび割れ誘導目地としてUFC製プレキャスト型枠に、50mm間隔で金網による鋼繊維の不連続部を設けた。別途、実施した要素試験から、同部分のひび割れ発生強度は、 1.9 N/mm^2 であり、目地を設けないUFCのひび割れ発生強度である 9.0 N/mm^2 よりも小さく、普通コンクリートの引張強度相当であることを確認している。しかしながら、今回の実験では、全てのひび割れ誘導目地に曲げひび割れが生じず、曲げひび割れや軸方向鉄筋のひずみが、フーチングと躯体の境界に集中した。そこで、ひび割れ誘導目地の条件が、UFC

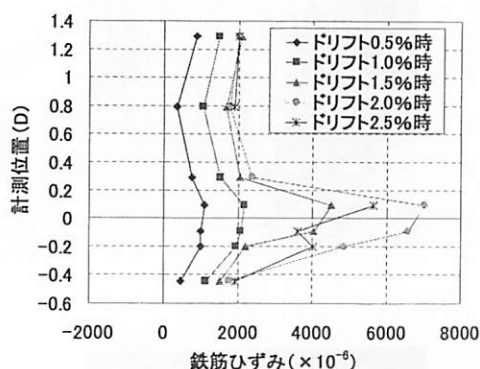
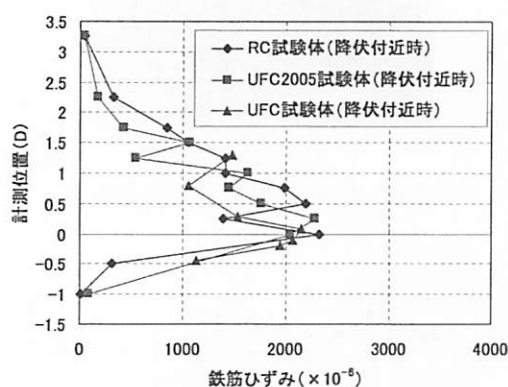
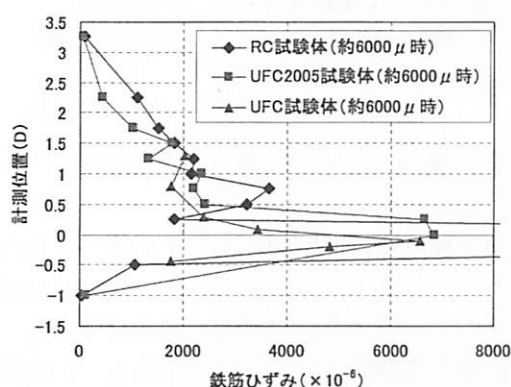


図-9 軸方向鉄筋のひずみ分布の変化



最大ひずみが降伏付近時



最大ひずみが 6.000×10^{-6} 時

図-10 目地の相違によるひずみ分布の比較



写真-3 UFC2005 試験体の基部の状況

製プレキャスト型枠のひび割れ性状、軸方向鉄筋のひずみ分布に与える影響を考察するために、ひび割れ誘導目地が異なる試験体について、軸方向鉄筋の

ひずみ分布の比較を行った。対象とした試験体は、本実験におけるUFC試験体とひび割れ誘導目地をドライジョイントとして引張強度をゼロとしたUFC橋脚の試験体（以下、UFC2005試験体と称する）と、RC橋脚の試験体（以下、RC試験体と称する）である。軸方向鉄筋のひずみ分布は、最大ひずみが降伏付近時および、 $6,000 \times 10^{-6}$ を超えた時点の分布を図-10のように比較した。なお、UFC2005試験体、RC試験体の結果は、既往の実験⁴⁾において、一方向曲げを想定した正負交番荷重実験で得られたものである。

図-10より、いずれの試験体においても、基部から0.5 D区間のひずみが先行して降伏していることが分かる。RC試験体とUFC2005試験体では、基部から0.5 D区間のひずみが一様に降伏ひずみ相当に達している。また、最大ひずみが $6,000 \times 10^{-6}$ を超えた時点でも、RC試験体とUFC2005試験体では、同様に基部から0.5Dの範囲までのひずみが降伏ひずみを大きく超え、塑性ヒンジが同区間に形成されていることが分かる。UFC2005試験体のひずみ分布が、RC試験体と同様であったのは、UFC2005試験体のUFC製プレキャスト型枠の目地部がドライジョイントであり、曲げひび割れが型枠の積層ごとに分散して発生したためである（写真-3）。

一方、UFC試験体では、曲げひび割れがUFC2005試験体やRC試験体のように分散せず、曲げ変形がフーチングと躯体の境界に集中したことにより、0.5 D区間に塑性ヒンジが形成されながらも、軸方向鉄筋のひずみが境界において局所的に大きくなるような分布を示している。すなわち、UFC橋脚では、UFC製プレキャスト型枠のひび割れ誘導目地部の強度が 1.9 N/mm^2 程度であっても、通常のRC橋脚のようにひび割れが分散されず、軸方向鉄筋の損傷が局所化する傾向があることが確認された。

以上より、UFC製プレキャスト型枠の目地部の条件が、軸方向鉄筋のひずみ分布や、曲げひび割れの分散性に大きな影響を与えることが明らかとなった。UFC製プレキャスト型枠の適用区間において、通常のRC橋脚と同様な曲げひび割れ、曲げ変形の分散性を実現させるための目地構造、適切な目地強度の設定については、今後の課題であると考えられる。

5. ファイバーモデルによる再現解析

ここでは、ファイバーモデルによる二方向繰り返し荷重実験の再現解析を行い、実験結果と解析結果の整合性について考察する。

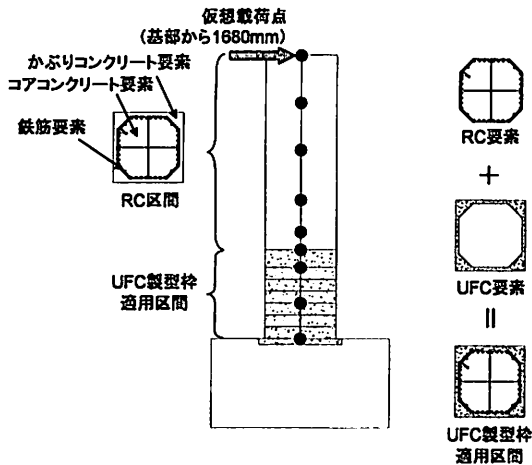
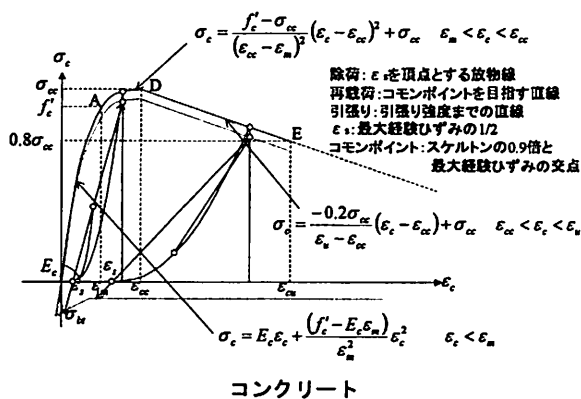
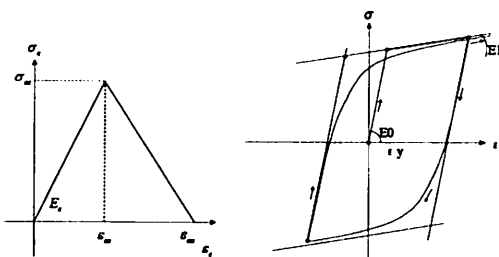


図-11 解析モデル



コンクリート



超高強度繊維補強コンクリート

鉄筋

図-12 解析で用いた材料の応力-ひずみ関係

(1) 解析の概要

解析モデルは、図-11に示すファイバーモデルを基本とするものである。RC区間の断面については、かぶりコンクリート、コアコンクリート、主鉄筋をファイバー要素でモデル化する。一方、UFC製プレキャスト型枠の適用区間については、かぶりコンクリート要素の応力-ひずみ関係に、UFCの材料特性を適用している。

材料特性は、普通コンクリート（材料試験値に基づく圧縮強度：28.5 N/mm²）については修正六車一渡部モデルを適用した。なお、コアコンクリートについては道路橋示方書⁹⁾に基づいて横拘束鉄筋による拘束効果を考慮した物性値としている（図-12）。UFCについては、超高強度繊維補強コンクリートの

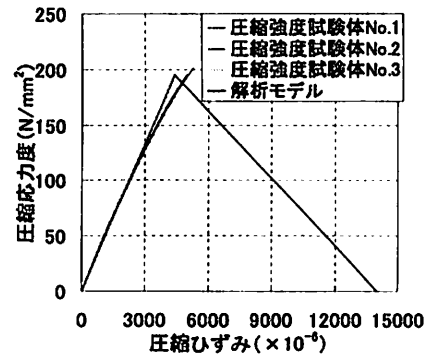


図-13 UFCの材料特性

設計・施工指針(案)⁶⁾に基づき、最大圧縮強度（材料試験値に基づく圧縮強度：196.2 N/mm²）までは弾性とし、ポストピークについては、ひずみが14,000×10⁻⁶で応力がゼロになるような下降勾配を設定している。ただし、UFC区間では、ひび割れ誘発目地を設けているため、鋼繊維が不連続となっており、曲げひび割れの発生を誘導することから、解析における材料特性でも引張応力を受け持たないように、引張側の剛性は常にゼロとしている。なお、図-13に材料試験で得られたUFCの圧縮応力-圧縮ひずみの関係と、解析モデルとの比較を示す。

軸方向鉄筋（降伏強度：370 N/mm²）については、GMP（Giuffre-Menegotto-Pinto）モデルを採用した（図-12）。なお、鉄筋の応力-ひずみ曲線の紡錓性に関わるバウジンガー係数は、実験結果の荷重-変位関係の履歴形状から15.0とし、座屈や破断の影響については考慮していない。

解析方法は、変位制御による二方向繰返し荷重で行い、各試験体の実験結果における荷重点位置の水平変位を、同一振幅における繰返し回数を3回として入力した。主鉄筋のフーチングからの伸出しによる影響については、伸出しによる回転変形を解析結果に加算することにより考慮した。伸出しによる影響は、コンクリート標準示方書【設計編】⁷⁾に基づき、鉄筋降伏時までの伸び出しによる回転変形の割合を8.3%、鉄筋降伏後から最大耐力経験時までの、伸び出しによる回転変形の割合を15.7%と設定した。

(2) 解析結果と考察

図-14より、初期剛性には若干の相違は見られるが、曲げ耐力や履歴形状について、実験結果と良く一致していることが確認できる。特に、UFC試験体の実験では、軸方向鉄筋の降伏後の変形の増加に伴い、中立軸がかぶり側へ移動することにより曲げ耐力が徐々に増加する傾向が確認されているが、解析結果でも同様な傾向が再現できている。また、二方

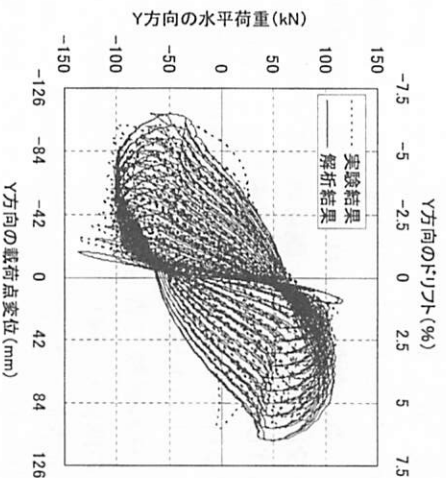
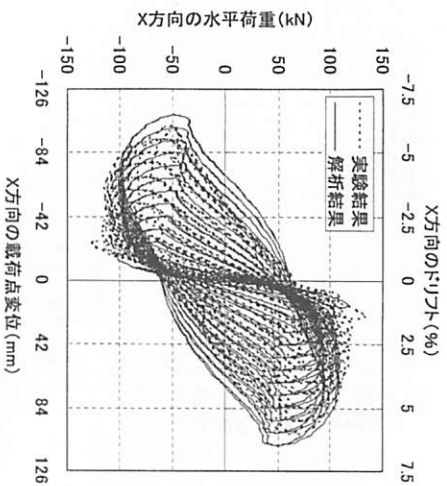


図-14 解析結果と実験結果の比較

向の耐力の相互作用についても、X方向、Y方向の両方の荷重－変位関係において、実験結果に近似している。ただし、今回の解析では、鉄筋の破断や座屈については考慮していないため、最大耐力経過後の曲げ耐力の低下については、再現できていないことに留意する必要がある。

6. 結論

本研究では、UFC製プレキャスト型枠を基部に適したUFC橋脚に対して、二方向からの載荷に対する構造特性を明らかにすることを目的として、円形繰返しによる二方向載荷実験とファイバーモデルによる再現解析を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

1. UFC 橋脚では、二方向からの円形繰返し載荷に対しても、ドリフト 5.0%時まで曲げ耐力は安定していた。また、UFC 製プレキャスト型枠の適用区間の外観についても、かぶりが大きく剥落したり、軸方向鉄筋が座屈したりするような損

傷は確認されなかった。

2. 軸方向鉄筋の座屈後の曲げ戻しによる破断によって終局を迎えたドリフト 5.5%時においても、UFC の圧縮ひずみの最大値は最大圧縮強度時のひずみ値以下であり、UFC による隅角部が健全性を保っていたことを確認した。

3. UFC 製プレキャスト型枠の目地部がドライジョイントで、同部分の引張強度がゼロである場合、軸方向鉄筋のひずみ分布は、RC 橋脚と同様に塑性ヒンジ区間内で分散する傾向がある。一方、目地強度が 1.9 N/mm^2 であった今回の実験では、基部から 0.5 D 区間に塑性ヒンジが形成されるものの、塑性後のひずみの増加や曲げ変形についてはフーチングとの境界に集中する傾向があった。曲げ変形がフーチングと躯体の境界に集中することは、軸方向鉄筋の破断を早めることが考えられる。

4. ファイバーモデルによる二方向繰り返し載荷の再現解析の結果が、実験結果と同様の傾向を示すことを確認した。

今回の実験では、軸方向鉄筋の座屈後の破断によって終局状態に至ったが、UFC製プレキャスト型枠の適用区間に複数の曲げひび割れが発生して、同部分の軸方向鉄筋のひずみや曲げ変形を分散させることが、さらなる変形性能の向上、損傷の低減に繋がるものと思われる。

参考文献

- 1) 早川涼二，川島一彦，渡邊学歩：水平二方向地震力を受ける単柱式RC橋脚の耐震性，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.79-98，2004.
 - 2) 荻本英典，川島一彦，渡邊学歩，永田聖二：水平2方向地震力の同時作用がRC単柱式橋脚の耐震性に及ぼす影響，土木学会論文集，No.801/I-73，33-50，2005.
 - 3) 山野辺慎一，曾我部直樹，家村浩和，高橋良和：高性能塑性ヒンジ構造を適用した高耐震性RC橋脚の開発，土木学会論文集，Vol.64，No.2，pp.317-332，2008.
 - 4) 例えば，本田智昭，一宮利通，曾我部直樹，日紫喜剛 啓：超高強度繊維補強コンクリートの構造性能に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，2006.
 - 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.
 - 6) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 113，2004.
- 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2007.