

場所打ち可能なUFCを用いた耐震補強工法の提案と 曲げ挙動に対する基礎的検討

岩本 拓也¹・小林 聖²・曾我部 直樹³・山野辺 慎一⁴

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 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）

³正会員 工博 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）

⁴正会員 工博 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）

1. はじめに

南海トラフ地震や首都直下地震などの切迫する巨大地震に対し、その被害を最小限に留めるために、重要度の高い橋梁の耐震補強が積極的に進められている。しかし、耐震補強が必要とされるRC橋脚の中には、様々な制約により既存の耐震補強工法が適用できないものが残されている。例えば、一般的な耐震補強工法の一つであるRC巻立て工法は、安価で適用実績が多い工法であるが、既設RC橋脚よりも断面寸法や自重が大きくなることで、河積阻害率や既設基礎への負担が増加することが制約となる場合がある。また、鋼板巻立て工法では、現場での鋼板の溶接作業が発生するため、その品質の確保や、補強後の維持管理が課題となることがある。既設RC橋脚への影響を考慮した工法としては、連続繊維シート巻立て工法があるが、連続繊維シートが高価であること、施工に必要な専門知識を有する技能者が限られていることから、予算や人材が不足する条件では採用が困難となるケースがあった。

以上のような背景から、既設RC橋脚の耐震補強では、断面寸法や自重を増やすことなく耐震性能を向上し、かつ狭隘な施工スペースにおいても容易に施工できる工法が求められていた。そこで筆者らは、既設RC橋脚において地震時に塑性化する部分のかぶりコンクリートを、ひび割れ誘発目地を含む場所打ち可能な超高強度繊維補強コンクリート（以下、場所打ちUFCと称する）で置き換えることで、RC橋脚全体の变形性能を向上させる耐震補強工法（以下、本工法と称する）を提案した。ここでは、本工法の概要と、場所打ち可能なUFCの施工の確実性に

ついて検証した施工試験、ならびに本工法で補強された部分の曲げ挙動の検証を目的として実施したRC梁部材の曲げ実験について報告する。

2. 耐震補強工法の概要

本工法は、超高強度繊維補強コンクリート製プレキャスト型枠を用いた高耐震性RC橋脚¹⁾²⁾（以下、UFC橋脚と称する）で得られた知見を、既設RC橋脚の耐震補強に応用したものである。ここでは、UFC橋脚および本工法の概要について述べる。

(1) UFC橋脚の構造

地震時に曲げと軸力が作用するRC橋脚では、引張側の軸方向鉄筋が降伏して橋脚基部に塑性ヒンジが形成された後に、同部分の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伸展することによって終局を迎える。すなわち、塑性ヒンジ部の性能が橋脚全体の变形挙動に対して支配的となるため、同部分の性能を改善することができれば、橋脚全体の耐震性能を向上できる可能性がある。これに対し、図-1に示すように、RC橋脚の新設時に塑性ヒンジ部に複数のUFC製プレキャスト型枠を積層することで、RC橋脚の塑性ヒンジ部のかぶりをUFCで構築するUFC橋脚が提案された¹⁾²⁾。同橋脚のUFC製プレキャスト型枠区間では、地震時の曲げ圧縮力に対して、UFCの高い圧縮強度によりかぶりコンクリートの圧壊を抑制し、コアコンクリートの損傷を抑制することが可能である。また、軸方向鉄筋が優れた曲げ靱性を有するUFCによって拘束されることで、座屈を遅延化することができる。さ

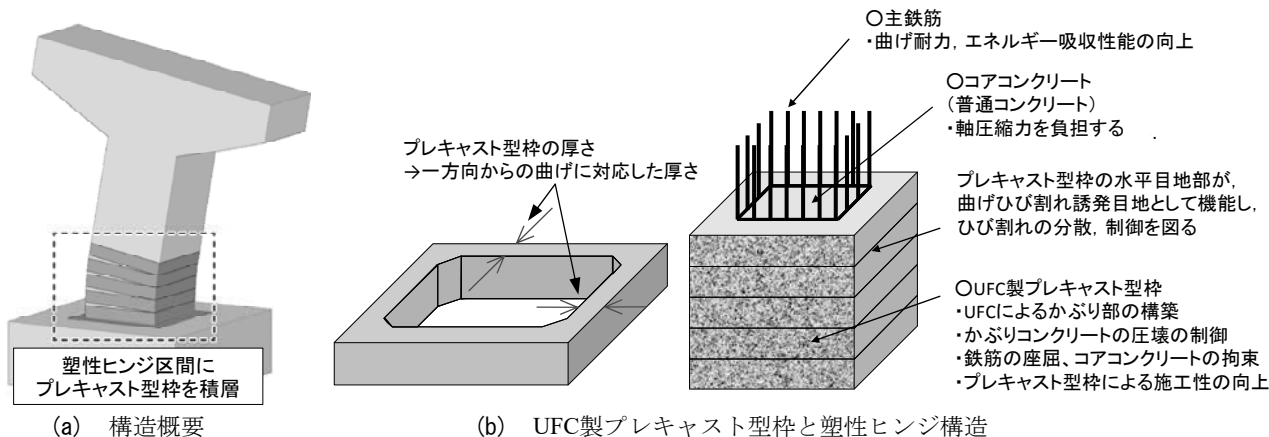


図-1 高耐震性RC橋脚（UFC橋脚）

らに、各型枠の水平目地がひび割れ誘発目地として機能することで、同区間における曲げひび割れの位置、間隔を制御でき、確実に塑性ヒンジを形成させることができる。こうした特徴から、図-2に示すように、UFC橋脚は従来のRC橋脚と同規模の断面寸法で優れた変形性能を実現できることが、これまでの検討で示されている¹⁾。

(2) 場所打ち可能なUFCによる耐震補強工法の概要

既設RC橋脚の塑性ヒンジ部分のかぶりコンクリートを除去した後に、同箇所をひび割れ誘発目地を含む場所打ち可能なUFCで置換することで、既設RC橋脚の変形性能を向上させる耐震補強工法を考案した。本工法の概念図を図-3に示す。本工法で補強された既設RC橋脚の構造は、UFC橋脚と同様の特長を有するため、断面寸法や自重を変えることなく、既設RC橋脚の変形性能を向上させることができる。また、UFCの場所打ちの方法として、こて塗り方法を採用することで、大規模な資機材や施工スペースを必要とせず、一般的な左官工による施工を可能とした。さらに、補強箇所が塑性ヒンジ部に限定されるため、少ない施工量で耐震補強を行うことが可能である。

本工法の施工手順としては、まず、既設RC橋脚のかぶりコンクリートをはつり、主鉄筋を半分程度露出させた後に、図-4に示すようなひび割れ誘発目地を設置する。目地材としては、例えばSUS製のL型板材を使用することで、曲げ圧縮力を伝達させつつ、目地部でUFCの鋼繊維を遮断して当該箇所の引張強度を下げることで、曲げ引張力を受けた際に目地部にひび割れを誘発させることが可能となる。また、ひび割れ誘発目地の配置間隔を、コンクリート標準示方書から算出される補強対象の曲げひび割れ間隔未満となるように設定することで、曲げひび割れの位置を制御できる。なお、目地材に

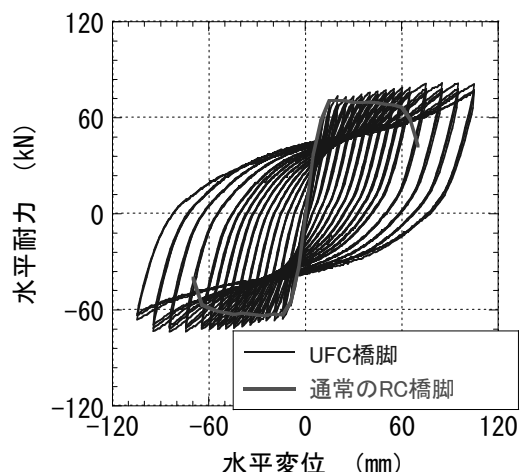


図-2 UFC橋脚の変形性能向上効果¹⁾

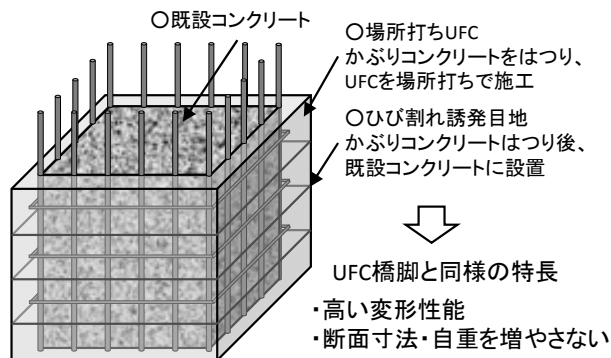


図-3 場所打ち可能なUFCを用いた耐震補強工法

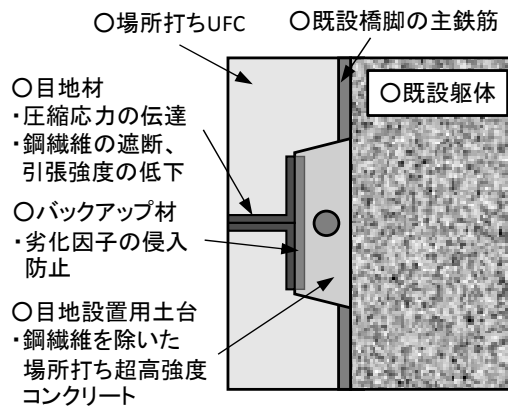


図-4 目地構造の一例

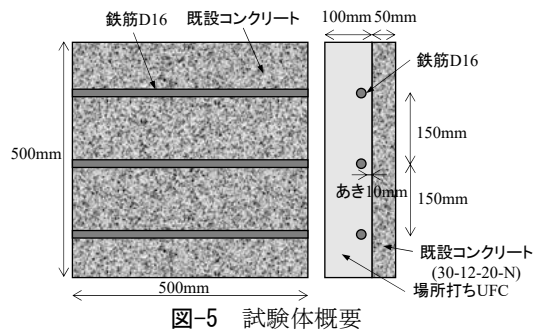


図-5 試験体概要



写真-1 こて塗り状況

写真-2 目粗し状況

は、目開きの変形に追従可能なバックアップ材を貼り付けることで、目地からの劣化因子の侵入を防止する。目地材の設置後、UFCを現地で練り混ぜ、こて塗りによって補強箇所にUFCを打ち込む。通常のUFCは高い流動性を有するため、場所打ちで施工するためには型枠を組立てる必要があるが、本工法では、左官工法に適するようにUFCに粘性を付与したもの³⁾を用いるため、型枠等の設備が不要である。

3. UFCの施工方法と材料強度の検証

本工法によって補強されたRC橋脚が、UFC橋脚と同様に高い変形性能を実現するためには、UFCが既設構造物と一体となるように密実に充填され、かつ所定の材料強度を満足する必要がある。一方で、本工法ではUFCを左官工法で施工するため、1回のこて塗の塗付け厚さが大きいと、施工中や硬化までにUFCにだれが生じ、既設躯体との界面や鉄筋周りに空隙が生じ、一体性が確保できない可能性がある。

そこで、既設RC橋脚のはつり後の表面を模擬した試験体を用い、実施工で想定される塗付け厚さ100mmのUFCを塗り付ける施工試験を実施し、UFCを密実に充填するための施工手順と、本工法で用いるUFCの材料強度の検証を行った。

(1) 試験概要

本検証で用いるUFCには、エトリンサイト生成系のものに、左官工法を可能とするため無機系増粘剤(VA)を適量混入したものを使用した³⁾。

試験体概要を図-5に示す。試験体は、既設RC橋脚のかぶりコンクリートをはつり出した際の、コンクリートと帯鉄筋を模擬している。型枠内に普通コ

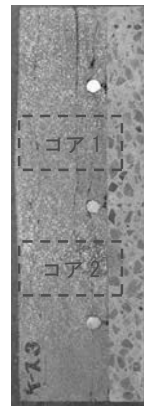


写真-3 切断面

表-1 建研式引張試験結果

試験体	破壊状況	付着強度
コア 1		2.4 N/mm ²
コア 2		2.3 N/mm ²

表-2 強度試験結果

配合	養生	圧縮強度(N/mm ²)	曲げ強度(N/mm ²)
VA 無	20℃封蔵	172.4	27.9
VA 有	材齢 91 日	167.3	22.7

ンクリートを打ち込み、表面を目粗した後に、帯鉄筋を模擬したD16を150mmピッチで配置した。コンクリート表面とD16のあきは10mmとした。

施工方法は、既往の検討³⁾や実施工を想定して、下記のように設定した。

1) はつり面へのプライマー塗布

2) 薄層(数mm)の塗付けと締固め(写真-1)

3) 目粗しと塗付け面への給水(写真-2)

4) 本塗付けと締固め⇒所定厚さまで3),4)を繰返す
1層の塗付け厚さの上限値は、既往の検討結果³⁾に基づいて35mmと設定し、本検証では、4層に分けて100mmのUFCを塗り付けた。

試験項目は、UFCの充填状況の確認、コンクリートとUFC間ならびにUFC同士の一体性の確認を目的とした付着強度試験、VAの混入が材料強度に及ぼす影響を検討した各種強度試験である。圧縮強度試験と曲げ強度試験の試験方法は、UFC指針⁴⁾に記載された方法に準拠し、供試体は型枠内にUFCを流し込むことで作成した。

(2) 試験結果

写真-3に、試験体中央における試験体の切断面を示す。打重ね線が一部で確認されたものの、打重ね部や鉄筋の周りに空隙は確認されず、UFCが良好に充填されている様子が確認された。

表-1に、写真-3に示す位置で採取したコアを用いて実施した建研式引張試験の結果と、試験後の破壊状況を示す。いずれの位置において、既設コンクリート側で破壊することが確認され、付着強度は2.0N/mm²以上と高い値であることが確認された。

表-2に、VAを混入したUFCと通常のUFCの圧縮強度および曲げ強度試験の結果を示す。圧縮強度に

については、VAの混入が及ぼす影響は小さく、いずれもUFC指針⁴⁾の圧縮強度を満足した。曲げ強度は、VAの混入により若干低下したものの、20 N/mm²以上の高い曲げ強度を有していた。

以上より、実適用を想定した施工厚さに対し、提案する施工方法によってUFCを密実に充填することができ、各塗付け層の付着性状が良好である事を確認した。また、本工法に用いるUFCが、通常のUFCと同等の材料強度を有していることを確認した。

4. RC梁部材の曲げ実験による補強部の曲げ挙動の検証

本工法によって既設RC橋脚の耐震性能を向上させるためには、かぶりを構成する材料が曲げ圧縮に対して十分な強度を有し、かつ曲げ引張に対してはひび割れ誘発目地によりひび割れが分散することが必要である。そこで、UFCおよびひび割れ誘発目地により補強されたRC梁部材の曲げ試験を行い、100N/mm²相当の高い圧縮応力度に対する補強箇所の損傷の有無と、曲げひび割れ性状を確認することで、本工法で補強された部分の曲げ挙動について検証した。

(1) 試験体概要

図-6に試験体概要を示す。試験体は、中央部が凸型断面、両端部が長方形断面である長さ7000mmの

RC部材1体であり、引張側にφ36 総ネジPC鋼棒を6本配置した。凸型断面部は、引張鉄筋の応力度が約550N/mm²で圧縮側の補強部分に100N/mm²の曲げ圧縮応力が作用するように幅を300mm、高さを150mmとし、等曲げ区間内1050mmの区間を同断面の区間とした。凸型断面部を含む中央3000mmの区間は、表面から100mmまでのかぶり部において、ひび割れ誘発目地を全周に300mm間隔で配置した上で、UFCを塗り付けることで補強を行った。目地材にはバックアップ材としてシリコン製のシール材を貼り付けた2本のSUS製アングル材(50×50×3mm)を使用し、土台コンクリートの上で既設コンクリートに打ち込んだアンカーと固定することで設置した。UFCの基本的な施工方法は、前章で示した手順に準じたが、施工方向については試験体製作の都合から下向きとし、試験体の各面を1面ずつ施工した。UFCの施工状況を写真-4～7に示す。また、表-3に試験体に用いた材料の材料強度試験結果を示す。材料強度試験の方法と供試体の作成方法については、前章に記載した方法と同様とした。

(2) 載荷方法

図-7に載荷装置図を示す。門型加力フレームと3000kN用油圧ジャッキを使用し、載荷スパンを6000mm、等曲げ区間を1200mmとした。載荷ステップは表-4のとおりであり、各ステップで載荷－除荷を3回ずつ繰り返して行い、凸型断面部の補強部分

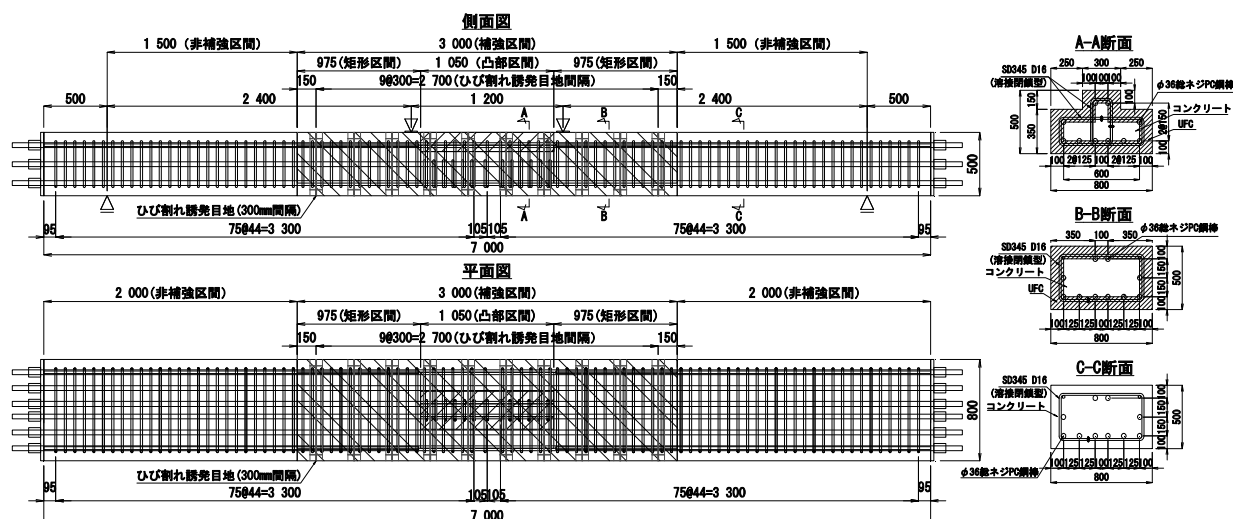


図-6 試験体概要

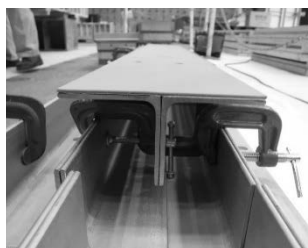


写真-4 目地



写真-5 目地の設置



写真-6 UFC のこて塗り



写真-7 UFC の締固め

表-3 材料試験結果

材料	各種強度(N/mm ²)
コンクリート (圧縮強度)	34.4
UFC (圧縮 / 曲げ強度)	166.4 / 24.7
軸方向鉄筋 (0.2%耐力)	1079

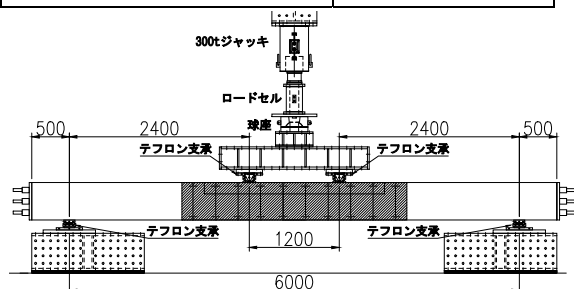


図-7 載荷装置

に100N/mm²相当の曲げ圧縮応力度が作用する荷重まで載荷を行った。各ステップの載荷荷重は、かぶり部にUFCの材料特性を与えたファイバーモデル解析に基づいて設定した。

(3) 計測項目

補強区間における計測位置図を図-8に示す。載荷点およびスパン中央の変位、ならびに引張鉄筋のひずみ分布をそれぞれ変位計、ひずみゲージで計測した。また、補強部分の圧縮縁におけるひずみを計測するために、補強部分の表面にひずみゲージを設置した。目地部の目開き量については、試験体下面の各ひび割れ誘発目地部に設置したπ型変位計により計測した。なお、載荷荷重については、油圧ジャッキに設置したロードセルで計測した。試験体のひび割れ性状については、同一荷重における3回目の繰返し載荷が終了した後、目視による観察を行った。

(4) 実験結果と考察

図-9に、実験で得られた荷重とスパン中央変位の関係図を示す。最終ステップまで荷重とスパン中央変位は線形的に増加しており、同一の荷重による繰返しで変位が大きく増加するような傾向は確認されなかった。

図-10に、荷重とUFC圧縮応力の関係図を示す。UFCの圧縮応力は、等曲げ区間の補強部分の圧縮縁で得られたひずみの平均値を、材料強度試験で得られた応力-ひずみ関係に基づいて応力に換算することで算出した。載荷STEP4では、約118N/mm²の曲げ圧縮応力が補強部分の圧縮縁に作用していることが分かる。この時の補強部分の状況を写真-8に示す。圧縮縁に損傷は確認されず、100N/mm²以上の高い曲げ圧縮応力に対して、補強部が健全性を保持できていることが分かる。

表-4 載荷ステップ

ステップ	制御値
STEP1	鉄筋の引張応力が 100N/mm ² 相当の荷重～除荷
STEP2	鉄筋の引張応力が 200N/mm ² 相当の荷重～除荷
STEP3	鉄筋の引張応力が 345N/mm ² 相当の荷重～除荷
STEP4	補強部の圧縮応力が 100N/mm ² 相当の荷重～除荷

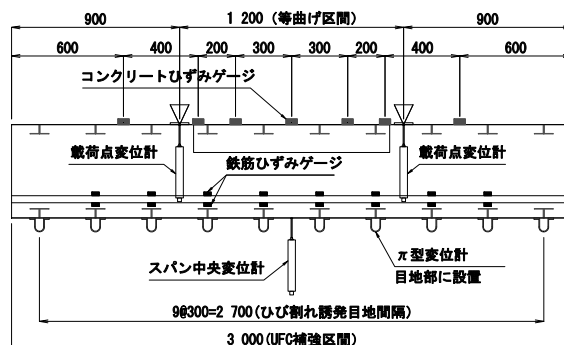


図-8 補強区間における計測位置図

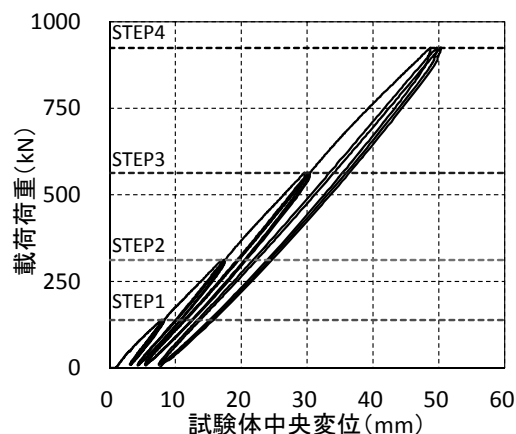


図-9 荷重-スパン中央変位関係

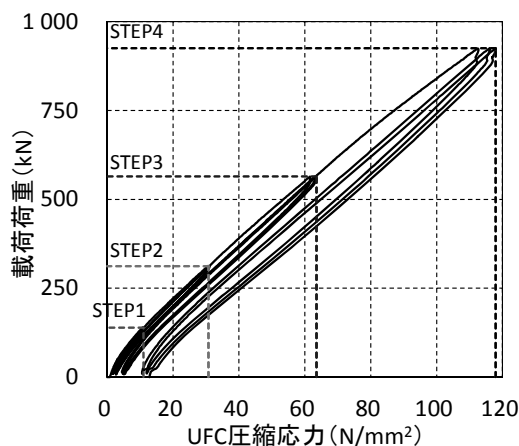


図-10 荷重-UFC圧縮応力関係

図-11に各載荷ステップ3回目の目標荷重到達時におけるひび割れ誘発目地の目開き量の分布を示す。図中の破線は載荷点を示し、破線で囲まれた領域が等曲げ区間である。目開き量は、等曲げ区間で一定であり、等曲げ区間から離れるに従って小さくなっている。すなわち、目開き量の分布形状が曲げモーメント分布の形状に則していることが分かる。また、



写真-8 圧縮側補強部の状況 (STEP4)

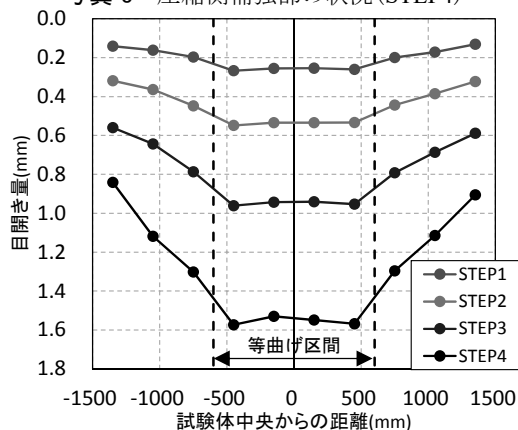


図-11 目開き量分布

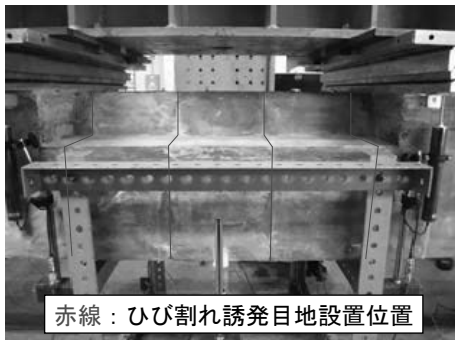


写真-9 等曲げ区間のひび割れ状況 (STEP4)

写真-9に示すとおり、STEP4においても図中赤線で示すひび割れ誘発目地以外の箇所からは、曲げひび割れの発生は認められなかった。以上より、提案するひび割れ誘発目地によって曲げひび割れの発生位置を制御でき、補強部で安定した曲げ変形を期待できることが確認された。

5. まとめ

本研究では、新設のRC橋脚を対象として開発されたUFC橋脚での知見を応用し、既設RC橋脚の塑性ヒンジ部のかぶりを、ひび割れ誘発目地を含む場所打ち可能なUFCで置換することで、耐震性能を向上させる耐震補強工法を提案した。そして、既設RC橋脚を模擬した試験体を用い、UFCを打ち重ねながらこて塗りで施工する施工試験を実施し、施工手順や施工の確実性について検討した。さらに、施

工試験で検討した方法により補強したRC梁部材の曲げ実験を行い、補強部分の曲げ挙動について検証した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) こて塗り可能なUFCの施工試験では、提案する施工方法によってUFCを打ち重ねながら塗り付けることが可能であり、UFCが密実に充填されていることと、既設コンクリートやUFC層間での良好な一体性を確認した。また、材料強度試験より、本工法で用いるVAを混入したUFCは、UFC指針を満足する圧縮強度と 20N/mm^2 以上の高い曲げ強度を有していることを確認した。
- 2) 本工法で補強されたRC梁部材の曲げ実験では、補強部分に 100N/mm^2 以上の高い圧縮応力が作用した状態において当該箇所が無損傷であることと、ひび割れ誘発目地以外の箇所に曲げひび割れは発生せず、目地によって曲げひび割れ発生位置を制御できることを確認した。

今後は、本工法で補強された橋脚模型試験体の正負交番荷重試験を行い、本工法による既設RC橋脚の変形性能の向上効果や、繰返し荷重に対する補強部分の挙動について検証を行う予定である。

謝辞：本研究は国立研究開発法人土木研究所と鹿島建設株式会社の共同研究として実施した「既設部材への影響軽減等に配慮した耐震補強技術に関する共同研究」の一環として実施したものであり、御指導頂いた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 山野辺慎一，河野哲也，齋藤公生，榎本恵太，茂呂拓実，楯岡衛：超高強度繊維補強コンクリート製型枠を用いた高耐震性橋脚の適用-阪神高速大和川線三宝ジャンクション-，橋梁と基礎 Vol.46，No.5，pp.19-24，2012.5。
- 3) 小林聖，高木智子，渡邊有寿，曾我部直樹，柳井修司，山野辺慎一，白木浩，松本隆：超高強度繊維補強コンクリートの左官工法への展開に関する実験的検討，土木学会第73回年次学術講演会，V-104，2018。
- 4) 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