論文　場所打ち可能な UFC を用いた RC 橋脚の耐震補強工法の基礎的検討

岩本　拓也[*1]・小林　聖[*2]・曽我部　直樹[*3]・山野辺　慎一[*4]

要旨：既設の RC 橋脚において地震時に塑性化する部分のかぶりを，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（UFC）で置換することで，断面寸法や自重の増加を伴うことなく変形性能を向上させる耐震補強工法の開発を進めている。場所打ち可能な UFC を用いた施工試験で施工方法と施工の確実性を確認した後に，梁部材の曲げ実験によって本工法で補強された部分の曲げ挙動について検証した。その結果，100N/mm^2 以上の曲げ圧縮力が作用した状態においても補強箇所は無損傷であり，曲げモーメントに対して安定した変形性能が期待できることを確認した。

キーワード：耐震補強，超高強度繊維補強コンクリート，場所打ち，RC 橋脚

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以降，重要度の高い橋梁について，耐震補強が積極的に進められており，2011 年東北地方太平洋沖地震等の大規模地震に対してはその効果も確認されている。一方，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，鋼板を現場で溶接する作業が生じ，その品質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 橋脚への影響や現場での人力作業を可能とする方法としては，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が向上でき，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きた。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 橋脚全体の変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 UFC の施工方法および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。

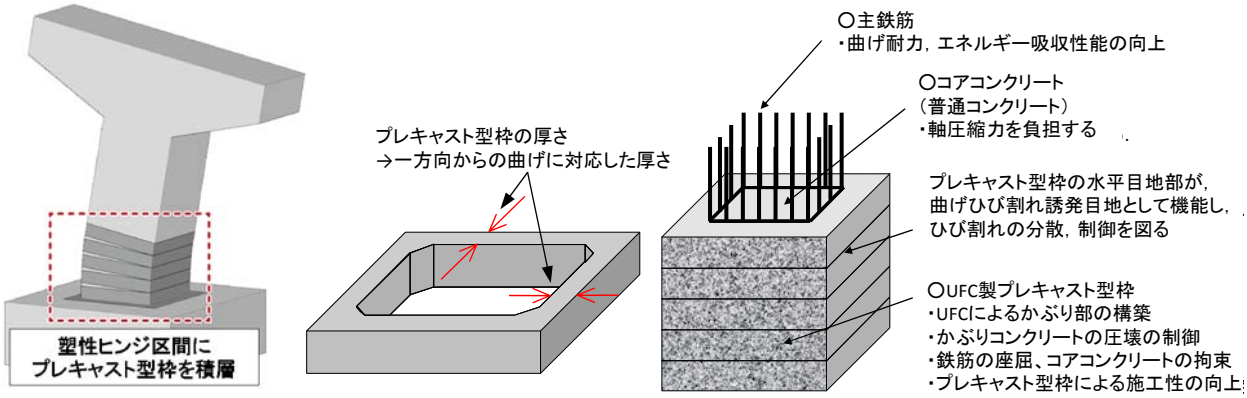
2.1 UFC 橋脚の構造

地震時に上部構造の慣性力が RC 橋脚に作用すると，橋脚基部に塑性ヒンジが形成され，同部分の性能が橋脚全体の挙動の大部分に対して支配的となる。したがって，塑性ヒンジ部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，UFC の高い圧縮強度と曲げ靭性により，地震で橋脚が曲げ変形した際のかぶりコンクリートの圧壊や，座屈した鉄筋のはらみ出しを抑制することが可能である。また，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，間隔が制御でき，確実に塑性ヒンジを形成できる。こうした特徴から，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，かつ比較的高価である UFC の使用量が最小限に抑えられるため経済的にも優れていることがこれまでの検討で示されている。

2.2 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

*1 鹿島建設（株）　技術研究所　土木構造グループ　研究員　工修（正会員）
*2 鹿島建設（株）　技術研究所　土木材料グループ　研究員　工修（正会員）
*3 鹿島建設（株）　技術研究所　土木構造グループ　上席研究員　工博（正会員）
*4 鹿島建設（株）　技術研究所　土木構造グループ　担当部長　工博（正会員）



(a) 構造概要　　(b) UFC 製プレキャスト型枠と塑性ヒンジ構造

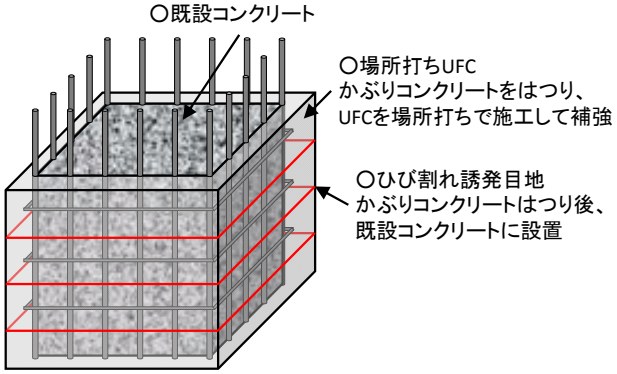
図－1　高耐震性 RC 橋脚

を除去した後に，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－2 に示す。本工法で補強された橋脚の構造は，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，変形性能を高めることができる。また，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。

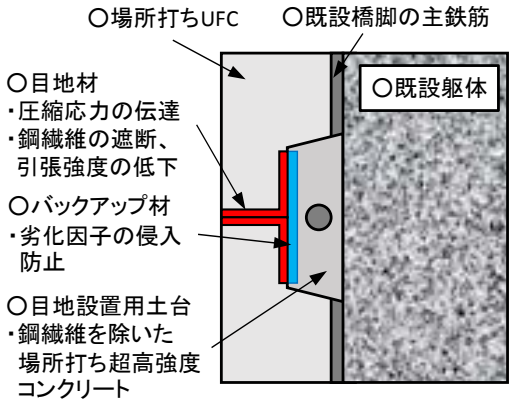
本工法の施工手順としては，まず，既設 RC 橋脚のかぶりをはつり，主鉄筋を半分程度露出させた後に，図－3 に示すようなひび割れ誘発目地を設置する。目地材としては，例えば SUS 製の L 型板材を使用し，目地部で UFC の鋼繊維を遮断し，当該箇所の引張強度を下げることで，曲げ引張力を受けた際に目地部にひび割れを誘発させることができる。また，目地材には目開きの変形に追従可能なバックアップ材を貼り付けることで，目地からの劣化因子の侵入を防止する。目地材の設置後，UFC を現地で練り混ぜ，こて塗りによって補強箇所に UFC を打込む。通常の UFC は流動性が高いため，場所打ちで施工するためには型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。また，こて仕上げ用の専用機器[3)]を用いて施工することで，作業者の技量の影響を受けず安定した品質の施工が可能である。UFC や打込み方法の詳細については次章にて述べる。

3. UFC の塗付け方法の検証

前述のとおり，本工法では UFC を左官工法によって施工するため，1 回のこて塗りの塗付け厚さが大きいと，施工中や硬化までに UFC にだれが生じて，既設 RC 橋脚との界面や鉄筋の周りに空隙が生じる可能性がある。一



図－2　場所打ち可能な UFC を用いた耐震補強工法



図－3　目地構造の一例

方，既設 RC 橋脚には約 100mm のかぶりを有するものがあるため，施工時には複数の層に分けて UFC を塗り付ける必要がある。既往の検討では，1 層の適切な塗付け厚さや，1 日に 1 層ずつを打ち継ぎながら塗り付ける施工方法について検討を行ってきたが[3)]，実際の施工においては，同一日に複数層の UFC を打ち重ねることで 1 日当たりの施工量を増加させることが望まれる。

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 を打ち重ねて塗り付ける施工試験を実施した。

3.1 試験概要

本検証で用いる UFC には，エトリンガイト生成系（AFt

系 UFC）のものに，左官工法を可能とするため無機系増粘剤(VA)を適切量，混入したものを適用した。なお，既往の検討により，VA 混入後のモルタルフロー（15 打）が 110±10mm であれば，UFC を左官工法で施工可能であることを確認している [3] ことから，VA 混入量についてはモルタルフローが上記範囲内になるように決定した。配合を**表－1** に示す。

試験体概要を**図－4** に示す。試験体は，既設 RC 橋脚の主鉄筋の半分まで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。500×500×厚さ 150mm の型枠に普通コンクリート(30-12-20-N)を厚さ 50mmm まで打ち込み，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。コンクリート表面に対する D16 のあきは 10mm とした。

施工方法は，既往の検討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（**写真－1**）
2) 薄層（数 mm）の塗付けと締固め（**写真－2**）
3) 1 時間後，こてによる目粗しと塗付け面への給水（**写真－3**）
4) 給水直後に薄層（数 mm）を塗付け
5) 所定厚さの塗付けと締固め（**写真－4**）
6) 以後，所定厚さまで 3)から 5)を繰り返す

ここで，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，1 層目 20mm，2 層目 20mm，3 層目 30mm，4 層目 30mm の割合で 100mm の UFC を塗り付けた。UFC 塗付け後の締固めには，電動ドリルに専用治具を設置した施工機器を用いた [3]。

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，および 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。試験項目一覧を**表－2** に示す。圧縮強度試験および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。

3.2 試験結果

写真－5 に，試験体中央にて試験体を切断した切断面を示す。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－3 に，**写真－5** 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，さらに付着強度も 2.0N/mm² 以上と非常に高い値であることが確認された。

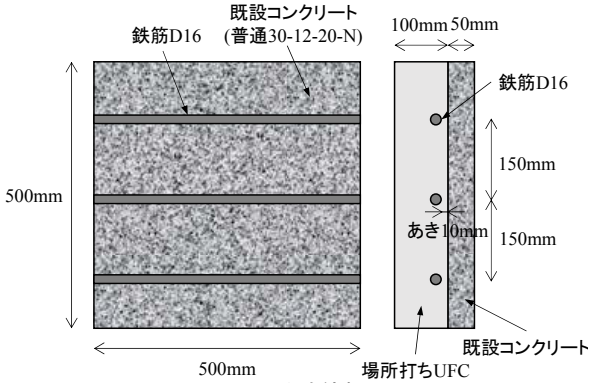
表－4 に，VA を混入した UFC と通常の UFC の圧縮強度および曲げ強度試験の結果を示す。圧縮強度については，VA の混入が強度発現性に及ぼす影響は小さく，いずれも UFC 指針 [4] の圧縮強度を満足した。曲げ強度は，VA の混入により粘性が付与され，繊維配向が失われるため若干曲げ強度が低下するものの，20 N/mm² 以上の高い曲げ強度を有していた。

以上より，実適用時に想定される施工厚さに対し，提案する施工方法によって UFC を密実に充填することが

表－1　場所打ち可能な UFC の配合

W/B (%)	Air (%)	単位量(kg/m³) W	B	S	SP (kg)	VA (kg)	SF (vol%)
15.2	2.0	195	1287	898	29.6	16	2.5

B：特殊結合材，密度 2.98g/cm³
S：専用骨材，表乾密度 2.98g/cm³
SP：特殊高性能減水剤，VA：無機系増粘材
SF：専用鋼繊維，密度 7.85g/cm³（直径 0.2mm，繊維長 10mm）



図－4　試験体概要

写真－1　プライマー塗布

写真－2 薄層の塗付け

写真－3　目粗し

写真－4　締固め

表－2　試験項目一覧

試験項目	試験方法
充填状況	試験体を切断し、目視で確認
付着強度	切断後試験体からコアを採取し、建研式引張試験を実施
圧縮強度	VA 混入有無　φ50×100mm 各 3 本 JIS A 1106 に準拠
曲げ強度	VA 混入有無　□40×160mm 各 3 本 JSCE-G552 に準拠

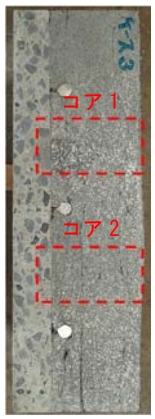
でき，各塗付け層の付着性状が良好である事を確認した。また，本施工に適するよう改良した UFC が，通常の UFC と同等の材料強度を有していることを確認した。

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/mm^2 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。

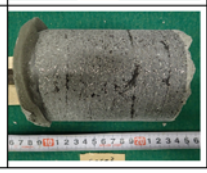
4.1 試験体概要

図－5 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/mm^2 で圧縮側の補強部分に 100N/mm^2 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 の配合や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 1 面ずつ施工した。UFC の施工状況を**写真－6～9** に示す。また，**表－5** 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。



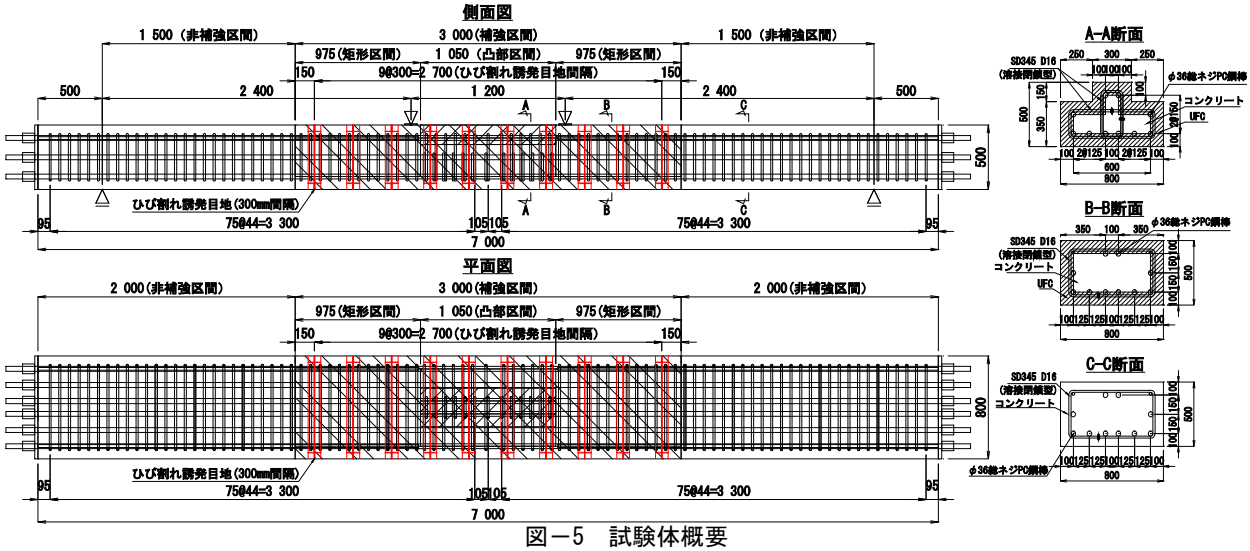
写真－5 切断面

表－3　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－4　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℃封緘	172.4	27.9
VA 有	材齢 91 日	167.3	22.7



図－5　試験体概要

写真－6　目地

写真－7　目地の設置

写真－8　UFC のこて塗り

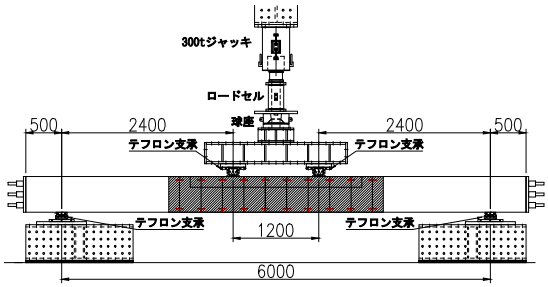
写真－9　UFC の締固め

表－5　材料試験結果

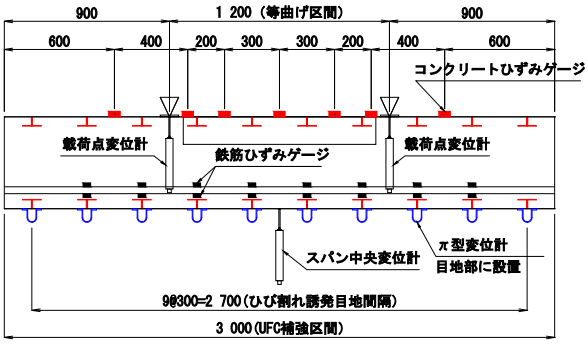
材料	各種強度(N/mm²)
コンクリート（圧縮強度）	34.4
UFC（圧縮 / 曲げ強度）	166.4 / 24.7
軸方向鉄筋（0.2%耐力）	1079

表－6　載荷ステップ

ステップ	制御値
STEP1	鉄筋の引張応力が 100N/mm² 相当の荷重～除荷
STEP2	鉄筋の引張応力が 200N/mm² 相当の荷重～除荷
STEP3	鉄筋の引張応力が 345N/mm² 相当の荷重～除荷
STEP4	補強部の圧縮応力が 100N/mm² 相当の荷重～除荷



図－6　載荷装置



図－7　補強区間における計測位置図

4.2 載荷方法

図－6 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－6 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。なお，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き設定した。

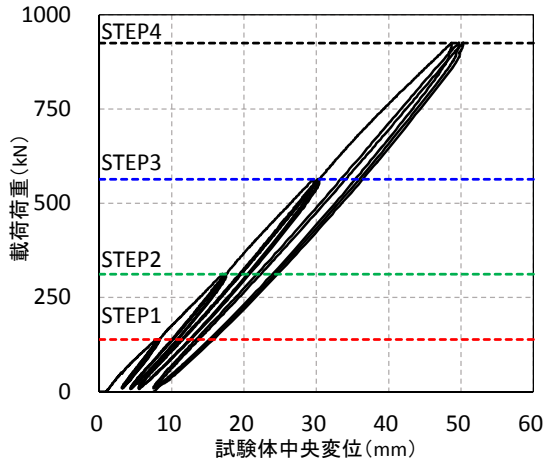
4.3 計測項目

補強区間における計測位置図を図－7 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に，目視による観察を行った。

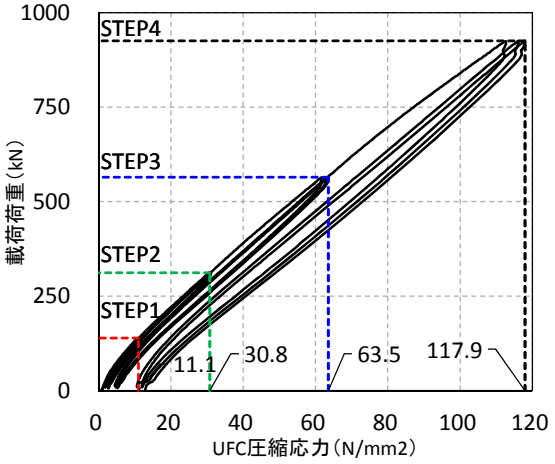
4.4 実験結果と考察

図－8 に，実験で得られた荷重－スパン中央変位関係図を示す。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－9 に，荷重－UFC 圧縮応力関係図を示す。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して算出した。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は写真－10 に示すとおり，圧縮縁に損傷は確認されてお



図－8　荷重－スパン中央変位関係

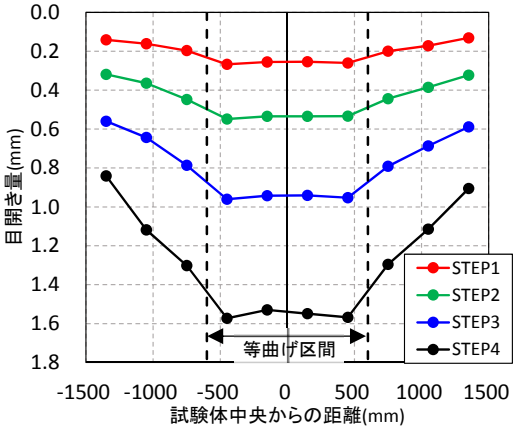


図－9　荷重－UFC 圧縮応力関係

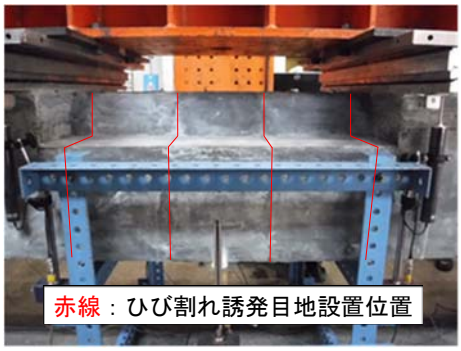
らず，100N/mm² 以上の高い曲げ圧縮応力に対して，補強部が健全性を保持できていることが分かる。

図－10 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。なお，図中の破線は載荷点を示し，破線と破線で囲まれた領域

写真－10　圧縮側補強部の状況(STEP4)



図－10　目開き量分布



写真－11　等曲げ区間のひび割れ状況(STEP4)

が等曲げ区間である。目開き量の分布形状は，ばらつきが少なく，曲げモーメント分布に則していることが分かる。また，各載荷ステップにおけるひび割れ発生状況は，**写真－11** 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ひび割れは観察されなかった。以上より，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こて塗り可能な 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載荷試験を行い、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。

なお，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，曽我部直樹，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，桝本恵太，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，曽我部直樹，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