

論文 超高強度繊維補強コンクリートを用いた鋼桁下フランジ補強

米丸 諒^{*1}・角掛 久雄^{*2}・野阪 克義^{*3}・松村 政秀^{*4}

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を小規模単純橋の鋼桁への引張補強材として適用した場合の効果を検討するため、80年供用した鋼I桁単純橋に対して下フランジへのUFCによる補強を行い、曲げ載荷実験を行った。さらに、UFCによる補強効果を検証するため、FEM解析により再現解析を行い、補強効果を検討した。その結果、本UFC補強方法は、剛性・耐荷力向上効果を得られることが確認できた。さらに、本対象においては、UFCの補強効果は部材の最大荷重に至るまで発揮されるが、降伏荷重以下の使用状態においてその効果がより発揮されることを明確にした。

キーワード: UFC, 引張補修・補強, 鋼桁, 単純橋, 使用状態

1. はじめに

近年、橋梁の老朽化が問題となっており、補修・補強や架け替えが必要とされている。しかし、大規模橋梁が優先的に対策され、小規模の橋梁については対処が遅れているのが現状である。また、鋼橋の損傷事例において腐食が主な劣化要因となることが多く、例えばI桁橋だと供用年数20年程度で腐食による断面減少などの劣化が生じる例が示されている¹⁾。

そこで、本研究では超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下UFCと呼ぶ)の高い組織緻密性に着目し、小規模単純橋に対する補修・補強手段として、UFC部材を引張補修・補強部材として適用することを見据えて検討を行った。鋼材をUFCで覆うことで水・塩分の侵入・堆積を防ぎ、さび発生を抑制することが期待できる。橋梁の補修・補強において、一般的なUFCによる補修・補強は、コンクリートに対して行われ、RC床版の増厚のように圧縮部材として多く利用されている。引張材としての利用においても圧縮材としての効果と合わせたせん断補強が主である。鋼桁への補修・補強に関する研究としては勝山ら²⁾がUFCパネルを下フランジの腐食減厚に対する補修のため適用した例などわずかである。そのため、比較的簡易的に補

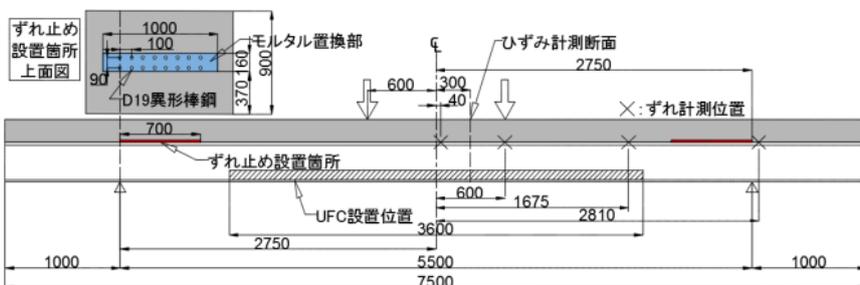
修・補強出来き、かつ鋼材の劣化進行を防ぐ役割を担え、橋梁全体としての剛性・耐荷力の向上も期待して、プレキャストUFCを既存の鋼桁下フランジに接着させて補強した場合の効果を検討することとした。

本研究においては、約80年間供用され、架け替え工事のため撤去した桁を対象に、曲げ載荷実験を行った³⁾。ただし、実験においては最大耐力を得るまで、またはUFCの補強効果が得られなくなるまで載荷をしていない。そこで、FEM解析による結果も踏まえて、UFCによる補強効果の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 概要

実験の対象は供用されていたコンクリート床版付きI形鋼単純桁の5主桁のうちの中桁3体である。I形鋼はH350×B150mm(ウェブ厚=12mm, フランジ厚=24mm)であり、切断された際の床版幅は約900mm, 床版厚は約200mm, 桁の長さは約7500mmであり、スラブアンカーが設置されていた。実験は図-1に示す様に4点曲げ載荷による曲げ試験として立命館大学にて実施した。供試体は、切り出したままの無補強供試体による残存耐力の確認1体と補強供試体として上フ



(a) 実験概略図

(b) 実験状況例

図-1 載荷実験概要

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (学生会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部准教授 Ph.D

*4 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻准教授 博(工)

ランジの支点位置に高さ 150mm の異形棒鋼(D19)を図-1(a)左上のように 90mm 間隔で直角方向に 2 本配置し、さらに橋軸方向内側に 100mm 間隔で 8 列を溶接し、無収縮モルタル (5 日圧縮強度 53N/mm², 弾性係数 19kN/mm²) で一体化させずれ止め補強供試体を 2 体用意した。その内 1 体については、ずれ止めに加え、大阪市立大学にて下フランジ上面に鋼桁形状に合わせて成型して作製した UFC 部材を、下フランジ上面とウェブ面を研磨後にエポキシ系接着剤を塗布して接合した UFC 補強供試体とした。ただし、鋼材の材料特性が実験前に不明だったこともあり、SS400 相当 (降伏強度 235N/mm²) とし、合成桁と仮定したうえで UFC 補強前から補強後に降伏耐力が 5% 程度増加するものとして補強断面を決定した。さらに UFC の補強範囲は曲げモーメントが最大から 1/2 以下になる範囲までとし、中央部 3600mm の区間とした。なお、下フランジ上面のみに補強したのは対象橋梁が渡河橋であったことから、桁下空間の障害をせずに適用することを踏まえて決定した。

実験では中央変位、鋼桁と床版のずれおよび純曲げ区間のひずみを計測した (図-1, 2 参照)。なお、図-2 において下面から 65mm の位置のウェブひずみは UFC 補強が無い場合のみ計測している。実験の説明について文献(3)も併せて参照頂きたい。鋼桁および床板コンクリートの材料特性は次章解析条件にて示す。

2.2 結果

実験時の荷重と中央変位の結果を図-3 に示す。図中には降伏点として計測ひずみより判断した降伏荷重を示す、無補

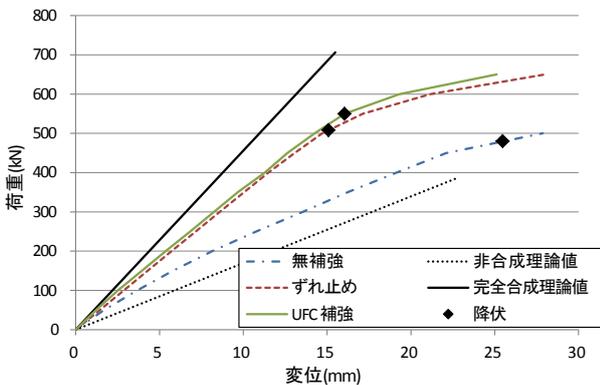


図-3 実験時荷重-変位曲線

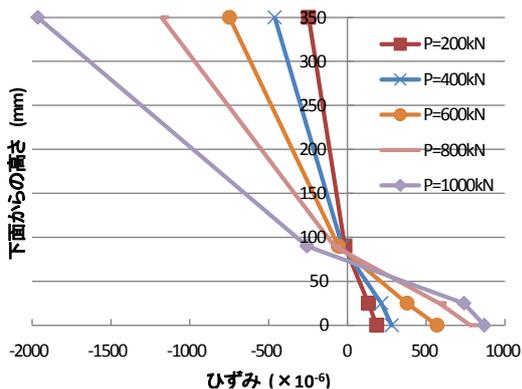


図-5 プレ試験中央部ひずみ分布

強供試体において非合成の理論値より剛性は大きく、スラブアンカーによるずれ止め効果があることがわかる。ずれ止め補強をすることで、無補強供試体より剛性ならびに耐力が大きく向上した。UFC をさらに配置することで、剛性も耐力もわずかに向上する結果となった。しかし、ずれ止めのみで補強した場合において完全合成と仮定した理論上の剛性よりも低く、算定上の降伏耐力 (700kN 程度) よりも 500kN 程度と低くなった。また、UFC のひび割れは完全合成として仮定した場合は理論上 110kN 程度で発生するが、600kN 程度まで目視によるひび割れは確認できず、600kN 以降で分散されたひび割れが発生した。プレ試験として図-4 に示すような本試験と同サイズの I 形鋼単体に同様の UFC 補強を行い、一体性を確認するため、3 点曲げ (スパン長 1100mm) により上フランジの降伏程度まで载荷した時の中央断面 (载荷点断面) のひずみ分布を図-5 に示す。下面 (0mm) は下フランジを示し、以降の 100mm 程度までが UFC 補強部に当たるが、I 形鋼と一体性が確保できていることがわかる。中立軸が UFC 補強部内にあるため、本実験での全引張とは異なり、UFC 単体の曲げ試験同様の挙動をするはずだが、計測点で、740μまでひずみが発生しても、本実験同様に目視による UFC のひび割れは確認できず、接着剤で接合することで、ひび割れ抑制

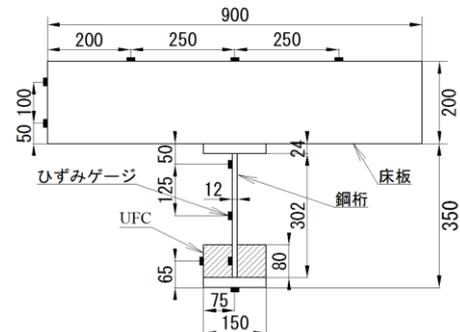


図-2 断面概念図



図-4 プレ試験供試体

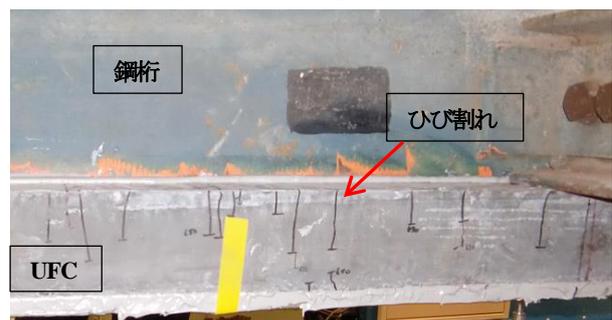


図-6 実験後 UFC 補強部のひび割れ発生状況例

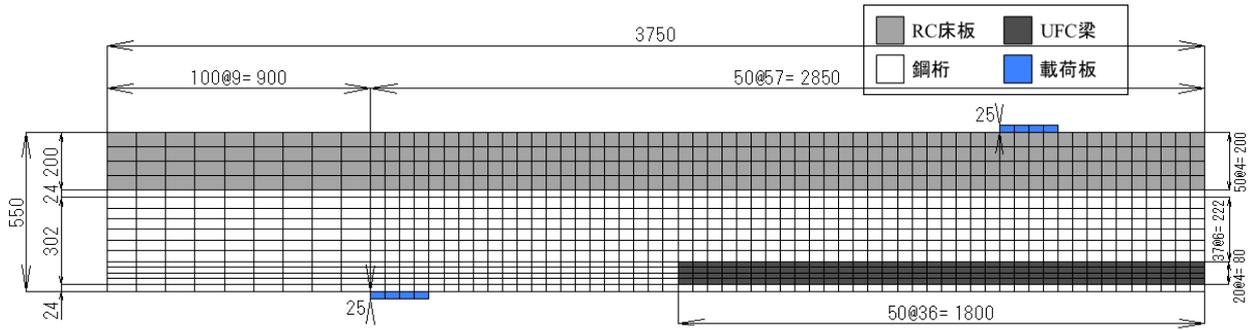


図-7 解析モデル例 (UFC 補強モデル)

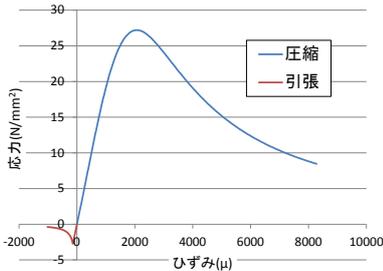


図-8 コンクリートの材料構成則

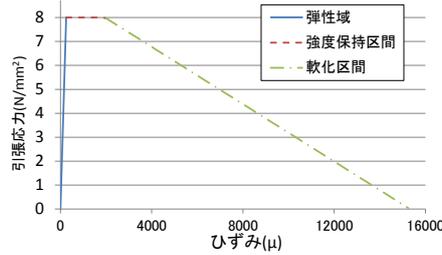


図-9 UFC の引張構成則

表-1 材料定数

鋼桁	降伏点	333 MPa
	弾性係数	204 GPa
	ひずみ硬化率	2.04 GPa
床板	圧縮強度	27.2 MPa
	引張強度	2.72 MPa
UFC	弾性係数	19.2 GPa
	引張強度	8 MPa
	弾性係数	46 GPa
	保持ひずみ	1955 μ
	終局ひずみ	15320 μ

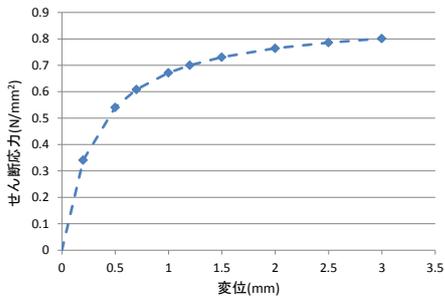


図-10 スラブアンカーのせん断-すべり関係

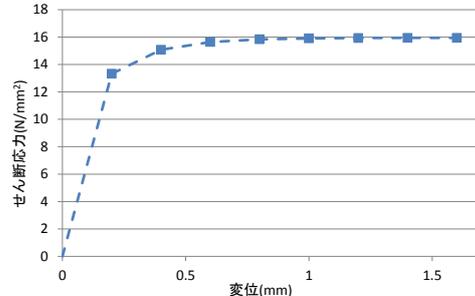


図-11 ずれ止めのせん断-すべり関係

効果もしくはひび割れ分散性が高くなることが考えられる。本試験のひび割れ状況例として図-6に試験後の純曲げ区間のひび割れ状況の写真を示す。写真上の黒線がひび割れであるが、桁と接合（拘束）されていない上側（自由端）で多くひび割れが発生した。これは上述した接着剤の効果による影響と考えられる。この結果から、使用状態において UFC のひび割れによる UFC 本体並びに接着部の鋼筋の劣化に対する抑制効果も得られるものと考えられる。

3. 解析条件

FEM 解析には非線形解析プログラム FINAL を用いた。メッシュ図を図-7に示す。試験条件は左右対称であるので、ハーフモデルとしており、要素は4節点平面応力で作成した2次元モデルである。実供試体には、床版内に鉄筋が配置されていたが、モデルでは省略している。また、床板と桁の間には、スラブアンカーによる不完全な合成を模擬するため接合要素を配置し、せん断応力-すべり関係を与えることで表している。ずれ止めを設置したモデルについても、ずれ止め位置の接合要素に別途、せん断応力-すべり関係を与えることで表している。UFC 補強したものは UFC 下面と下フランジ上面を剛接合としている。以後、それぞれ無補強モデル、

ずれ止めモデル、UFC 補強モデルと呼ぶ。

解析時のコンクリートの構成則には圧縮側を修正 ahmad モデル⁴⁾、引張側は出雲モデル⁵⁾を用いている(図-8参照)。鋼の構成則は圧縮引張ともにバイリニアモデルとしており、ひずみ硬化率は 1/100 を与えている。UFC の引張構成則は UFC 指針⁶⁾に準拠して設定した(図-9参照)。スラブアンカーのせん断力-すべり関係は中島ら⁷⁾の提案を参考にし(図-10参照)、ずれ止めのせん断力-すべり関係は複合構造標準示方書⁸⁾のスタッドボルトに準拠して適用している(図-11参照)。それぞれの材料定数について表-1に示す。コンクリートの圧縮強度、弾性係数は床板から抜き出したコアの実験値、鋼の降伏強度、弾性係数は実験後に鋼桁から切り出した引張供試体の実験値、UFC の引張強度は補強部材と同バッチで作成した曲げ試験より UFC 指針⁶⁾に準拠して算定した。

4. 解析結果

4.1 実験結果との比較

実験および解析により得られた、荷重-中央変位関係、荷重-床版と鋼桁のずれ関係および荷重-純曲げ区間のひずみ関係を図-12~14に示す。変位、ひずみ、ずれの計測位置は図-1、2に示す実験と同様な位置である。

図-12を見ると無補強供試体に対しては解析結果と実験結果が非常に近似する結果が得られた。ずれ止めを設置した供試体においては、荷重 500kN 程度までは近似しているが、実験結果と異なり、荷重 700kN 程度まで降伏しない結果となった。しかし、降伏点が異なるものの降伏後の剛性においても解析結果と実験結果は類似した傾向を示した。解析においては完全合成とし仮定した算定降伏耐力程度まで降伏荷重が上昇した。

そこで、図-13において床版と鋼桁のずれを確認する。なお、凡例は中央からの距離を示している。無補強供試体、ずれ止め供試体ともに、実験値と比べて大きく異なっていないが、解析結果の方がやや大きく、合成効果が小さいことが伺える。特に、ずれ止めを設置した供試体は2体ともにせん断スパン内である 1675mm 位置 (○印) を除いて解析結果の方が実験値に対して大きくなっており、合成効果が低くなるため、曲げ剛性は小さくなるはずであるが、結果として、実験時より大きくなっている。これは、桁の実寸法との相違や鋼桁の劣化を考慮していないので、解析では剛性が過大となったと考えられる。

次に、図-14において降伏前までの純曲げ区間の断面のひずみを確認するとすべてにおいて、床版と鋼桁は非合成となるひずみ分布であり、解析結果においても同様な傾向が得られている。さらに解析によるひずみ値は実験結果をよく表現している。ただし、図(c)においては下フランジ下面から 65mm 位置のひずみは UFC のひずみを示しているが、桁と剛接合となる挙動を確認できなかった。上述した I 形鋼単体のプレ試験においては、ほぼ一体となるひずみ分布が得られていたことから、何らかの不備があった可能性も否めない。解析においては桁と UFC 部材は剛接合としているが、UFC 部以外は解析結果と実験結果は類似している。図-12を見ても実験における UFC 補強と UFC 補強の無い場合の相関性と解析における相関性は非常に類似しており、UFC 部材と鋼桁の接合方法の影響は小さいものと考ええる。以上より降伏までの挙動については近似しており、実在の寸法や強度などの違いによる影響のため、差異が生じているものと推察できる。しかし、解析により実験時挙動を十分に再現しており、本解析モデルにより UFC による補強効果について検討を行うものとする。

4.2 UFC による補強効果

各モデルにおいて最大荷重を得るまで解析を行い、その挙動について検討を行った。図-15に解析により得られた荷重-変位関係を示す。ただし、実験では行っていない無補強モデルに対してずれ止めモデル同様に UFC を補強した場合について (無補強+UFC モデル) の解析を行い、UFC の補強効果の検討を行った。併せて、完全非合成とした場合および完全合成とした場合について UFC 補強の有無による解析も行った。なお、完全非合成やずれ止めを設置していない無補

強タイプに関しては、合成効果が低く、鋼桁が降伏後も床版が圧壊せず、ひずみ硬化の影響で荷重が緩やかに上昇するた

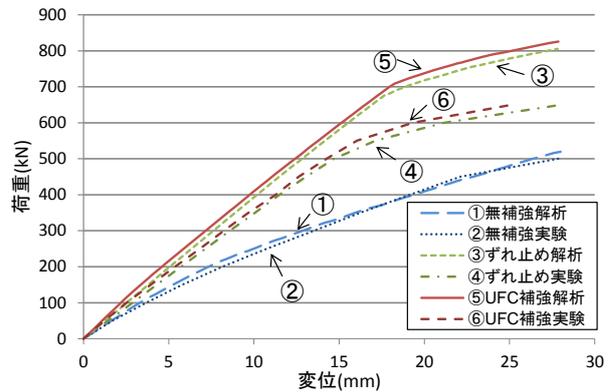
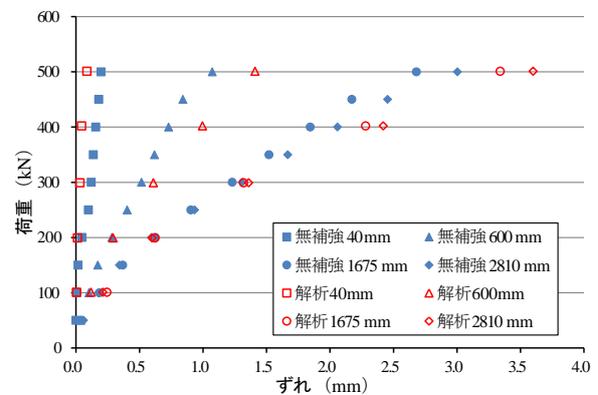
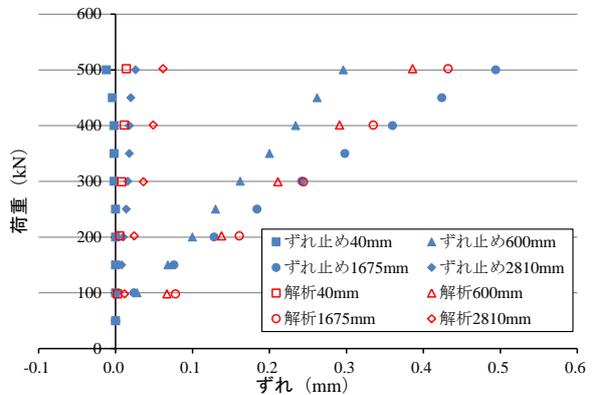


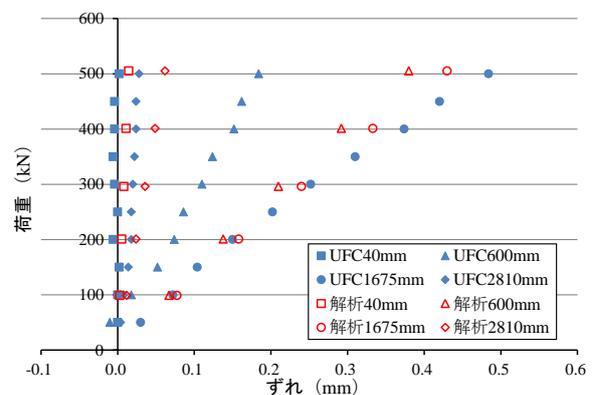
図-12 荷重-変位関係



(a) 無補強

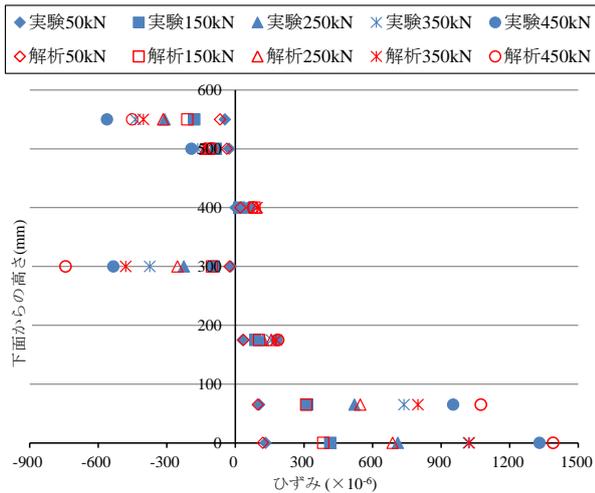


(b) ずれ止め

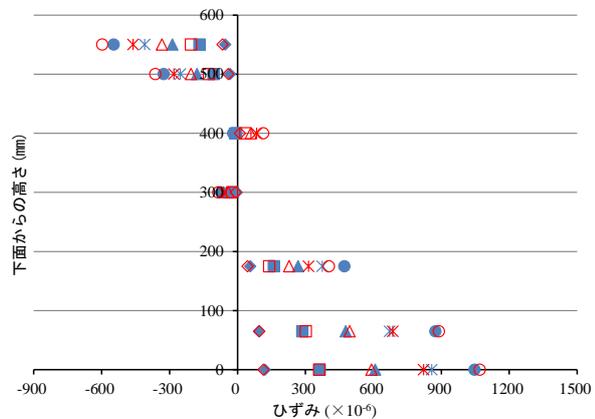


(c) UFC 補強

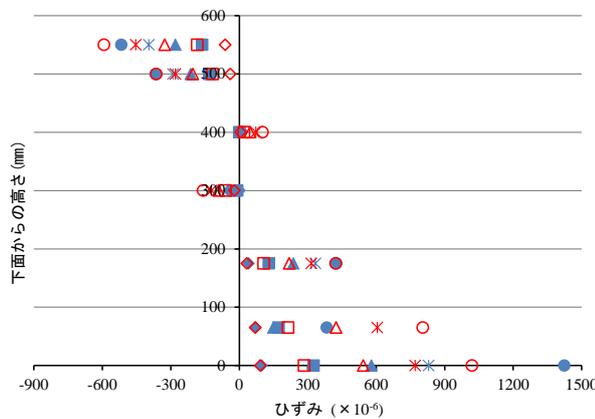
図-13 荷重-ずれ関係



(a) 無補強



(b) ずれ止め



(c) UFC 補強

図-14 荷重-ひずみ関係

め、ずれ止めタイプの最大荷重時の変位付近までを表記している。

無補強タイプや完全非合成タイプに関しては下フランジ降伏後に上フランジの圧縮降伏の発生により荷重の増加が小さくなるなど、鋼に作用する圧縮力が挙動に影響を与えているが、座屈現象については考慮していない。ずれ止めタイプや完全合成タイプに関しては無補強タイプに比べ合成効果が高いため、当然の事ながら上フランジの降伏は発生せず、かつ床版の圧壊が生じた。UFCの補強により、補強前より初期剛

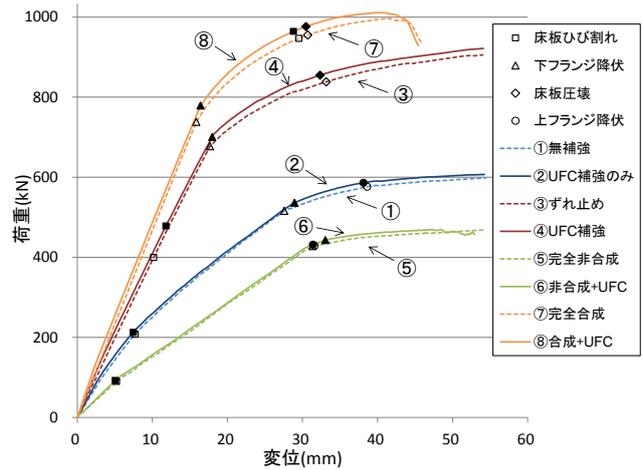


図-15 最大荷重までの荷重-変位関係

性や床版のひび割れや鋼桁の降伏のような各イベント時の荷重は増加することが確認できた。具体的な数字を表-2にまとめて示す。完全合成の場合が最もUFCによる補強効果があり、合成効果の低減とともに、UFCによる補強効果も低減している。具体的には初期剛性において、完全非合成タイプを除いてUFC補強により10%以上の剛性アップが確認できた。ずれ止めタイプにおいては床版のひび割れ発生まではUFC補強の効果が高く、以降で効果が小さくなった。ずれ止め無しタイプは全てにおいて、増分比率が4%以下と小さくなった。すべてにおいて最大荷重付近になるほど、UFC補強モデルの荷重とUFC無補強モデルの荷重が近似してきており、UFC補強効果が小さくなった。

そこで、UFC補強を行ったモデルに着目し、最大荷重までのUFCの補強効果について検討する。UFC補強モデルの荷重-変位関係において、UFCの応力-ひずみの状態がわかるように図-16に示す。図はUFCの効果を確認するため、最大主ひずみの値より弾性区間(ひび割れまで)、強度保持区間およびひずみ軟化区間のどの領域であるか、図中の線の色を変化させて示している。図より、UFCによる補強効果は、最大荷重まで軟化域に入りながらも発揮されていることがわかる。しかし、下フランジ降伏付近まではUFCの応力の強度保持区間となるため、補強効果が大きくなるが、それ以降は軟化域に入るため、徐々に補強効果が低下する傾向となり、表-2の結果が説明できる。また、解析ではUFC部材へのひび割れは鋼桁と剛接合としているため、降伏荷重に対し低い荷重で発生する結果となるが、上述しているように実験においては降伏付近まで目視でのひび割れは確認できなかったため、UFCのひび割れに対する更なる検討をするためには接着剤の剛性を考慮したモデルも必要になると考えられる。

以上より本実験モデルに対してはUFC単体での補強は使用状態での補修・補強には効果が得られる。しかし、鋼桁降伏以降の効果は小さいものとなる。ただし、対象である小規模橋梁においては降伏までの補強効果があれば、十分であるため、補強手法の一つとしては有用であると考えられる。降伏以

表-2 解析結果一覧

	初期剛性	床板ひび割れ		下フランジ降伏		床板圧壊		最大荷重時	
	(100kN時勾配)	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重
	kN/mm	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN
完全合成	46.5	29.5	947	15.9	738	30.7	955	41.4	996
合成+UFC	54.8	28.8	964	16.4	779	30.5	976	40.6	1011
比率	1.18	0.98	1.02	1.03	1.06	0.99	1.02	0.98	1.01
ずれ止め	39.4	10.2	400	17.7	677	33.2	838	56.9	914
UFC補強	45.6	11.8	478	18.0	701	32.3	855	57.0	923
比率	1.16	1.16	1.20	1.02	1.03	0.98	1.02	1.00	1.01
	初期剛性	床板ひび割れ	下フランジ降伏	上フランジ降伏	同等変位時				
無補強	30.2	7.7	208	27.6	516	38.6	576	56.9	600
無補強+UFC	33.9	7.5	213	28.9	537	38.1	586	57.1	609
比率	1.12	0.97	1.02	1.05	1.04	0.99	1.02	1.00	1.01
完全非合成	17.2	5.2	90.0	31.4	428	31.6	429	57.0	471
非合成+UFC	18.1	5.1	92.6	33.1	443	31.4	432	57.3	465
比率	1.06	0.96	1.03	1.05	1.04	0.99	1.01	1.00	0.99

降の耐力をアップも含めて適用する場合には UFC 部材と FRP ロッドなどの材料を組み合わせた、超高強度の圧縮強度を有することからプレストレスの導入などを考えることで、より有用な補強材となると考えられる。

5. まとめ

撤去した既設橋の鋼I桁を利用して UFC 部材を下フランジに接着剤により補強した場合の効果を実験および解析により検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 実験より、ずれ止め補強した供試体に UFC を補強することで、更なる剛性および耐力の向上確認できた。
- (2) 実験より、降伏荷重までは目視レベルでのひび割れは確認できず、桁と接着剤で接合されていない上側（自由端）が多くひび割れを発生した。接着剤で接合することによりひび割れ抑制効果が得られることが考えられる。
- (3) 本解析において、適切な床版と鋼桁のずれ挙動を考慮することで、本実験を再現することが出来た。
- (4) 本解析において、床版と鋼桁の挙動において合成効果が得られる場合は本 UFC 補強量により初期剛性の 10% 以上の上昇が得られた。
- (5) 本対象モデルの場合は床版と鋼桁との合成が高い方が、UFC 補強の効果が上昇した。
- (6) UFC 補強は使用状態での補修・補強に特に効果が得られるが、鋼桁降伏以降の効果は小さい。ただし、本対象となる小規模橋梁においては使用状態が重要であるから、補修・補強材としては有用であると考えられる。

謝辞

本実験において貴重な UFC の材料は(株)大林組様および宇部興産(株)様、接着剤についてはショーボンド建設(株)様にご提供頂きました。また、UFC 補強供試体作製には大阪市立大学大学院(製作時)仙波歩氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

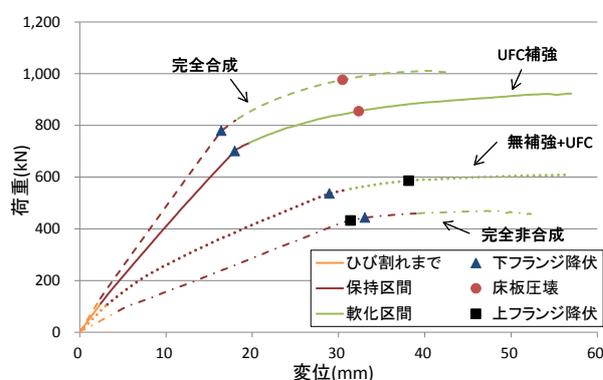


図-16 UFC 補強モデルの挙動

参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No.668, pp.299-311, 2001
- 2) 勝山真規, 下里哲弘, 江里口玲: UFC パネルを用いた腐食鋼部材の性能回復特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.564-574, 2014
- 3) 野阪克義, 川崎佑磨, 田中賢太郎, 角掛久雄, 松村政秀: RC 床版を有する鋼桁の曲げ剛性評価および補強効果に関する検討, 鋼構造年次論文報告集 Vol.22, pp.856-863, 2014
- 4) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995
- 5) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987
- 6) 土木学会: C. L. 113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), pp.18-19, 2004
- 7) 中島章典, 溝江慶久: 活荷重レベルにおける連続非合成桁橋の挙動における一考察, 土木学会論文集, Vol.626/I-48, pp.163-172, 1999
- 8) 土木学会: 複合構造標準示方書, pp.60-63, 2009