# 論文 鉄筋定着部補強を考慮した UFC パネル接着による RC はり部材の せん断補強効果

河野 史弥\*1·王 健\*2·森川 英典\*3·川口 哲生\*4

要旨:本研究では,せん断破壊先行型の RC はり部材に対し,せん断補強と鉄筋定着部補強を行うため,超高強度繊維補強コンクリート(UFC)パネルの接着を行い,せん断耐荷機構に及ぼす影響について検討を行った。その結果,UFC パネル接着を行うことで,RC はり部材の耐荷力が向上し,破壊性状に変化が見られた。また,パネル補強供試体の耐荷力を計算するための計算式について検討を行った。その結果,UFC パネル接着により耐荷機構が変化する場合,採用する計算式を選定する必要があることや,UFC パネルの耐荷力について,低減係数を考慮する必要があることが判明した。

キーワード: せん断補強, 超高強度繊維補強コンクリート(UFC), RC はり部材, 鉄筋定着部補強

# 1. はじめに

既設 RCT 桁橋においては,当時の設計荷重が低いこと に加えて,車両の大型化,交通量増大により,特に桁端 部でせん断ひび割れが生じる損傷事例がある。また,施 工時の初期欠陥や供用期間中の著しい劣化を有する構造 物も存在し,せん断破壊の先行が懸念されている。その ような構造物に対しては,せん断補強を行う必要がある。

そこで,新たなせん断補強工法として高強度,高靱性, 高耐久性といった特徴を有した超高強度繊維補強コンク  $\mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{F}^{(1),2)}$  (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete : 以下, UFC)を用いたせん断補強工法の研究が進められて いる。これは、UFC をパネル状に成型し、RC 部材側面 に接着することでせん断補強を行う方法である。この UFC パネルを接着することによるせん断補強効果の検 討を行うことで,既往の工法の欠点を補う新しいせん断 補強工法の確立が期待されている。過去の研究<sup>3),4),5)</sup>より, 低強度 RC はり部材を対象とすると、高い補強効果が得 られることが確認された。しかし、これらの研究では、 RC 部材の施工時の初期欠陥や供用期間中の劣化を模擬 した供試体を用いており, 普通強度のせん断破壊先行型 のRC部材に対するUFCパネル接着による補強効果に関 する知見は得られていない。そこで、本研究では、既設 RC 橋を想定して、せん断破壊先行型の供試体を作製し て補強を行った。

また,過去の研究<sup>の</sup>では,既設 RCT 桁橋で多用されて いた丸鋼を引張鉄筋に使用したせん断スパン比1.5の RC はりに対して,せん断スパン全体にパネル補強を行った ところ,アーチ機構が形成されるが,アーチ機構を形成 するための引張鉄筋の十分な定着耐力が得られず,鉄筋 定着部のひび割れが伸展し、定着部破壊に至った。この ことから、丸鋼を用いたせん断スパン比の低い構造物に 対して補強を行う場合は、補強効果を十分に発揮させる ために鉄筋定着部の補強も行う必要があると考えられる。 そこで、本研究では、鉄筋定着部も補強できるように UFC パネルを延長して接着することによるせん断補強 について検討した。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体概要

本研究で使用した供試体一覧を表-1に示す。また,供 試体の寸法および UFC パネルの貼付位置を図-1に示す。 各供試体の UFC パネルの貼付位置は,それぞれのせん断 スパンと定着部全体であり,4枚のパネルを貼り付ける。

補強対象とした供試体の寸法は幅 150mm,高さ 240mm, 有効高さ 200mm の矩形断面を持つ全長 1500mm,載荷ス パン 1200mm の RC 部材とした。引張鉄筋には  $\phi$  16 を 3 本,圧縮鉄筋には D13 を 2 本配置した。引張鉄筋に丸鋼 を用いている理由は,主鉄筋に丸鋼が使用されていた既 存 RC 橋を想定したためである。端部での定着を確保す るため支点の外側には密なせん断補強を行い,引張鉄筋 は支点端部で 180 度フックにより定着した。コンクリー トの配合を表-2 に示す。セメントは早強ポルトランドセ

表-1 供試体一覧

供試体名	UFC接着	UFCパネル厚 (mm)
N	×	-
U7	0	7
U14	0	14

\*1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士前期課程 (学生会員)
\*2 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士後期課程 (学生会員)
\*3 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 教授 博(工) (正会員)
\*4 太平洋セメント(株)中央研究所第2研究部建設技術チーム 副主任研究員 修(工) (正会員)



図-1 供試体寸法および UFC パネル貼付位置

表-2 コンクリートの配合 単位量(kg/m<sup>3</sup>) 粗骨材の W/C 細骨材率 AE減水剤 AE助剤 最大寸法 水 セメント 細骨材 粗骨材 (%) (%)  $(ml/m^3)$  $(ml/m^3)$ (mm) W С S G 175 100 20 55 175 1006 830 875 438

メントを使用した。また,混和剤には流動性と空気量を 調整するために AE 減水剤と AE 剤を用いた。コンクリ ート打設後は、2週間の湿布養生を行った。コンクリー トの材料特性を表-3に示す。

#### 2.2 UFC パネル

UFC パネルの材料特性を表-4 に示す。UFC とは, 圧 縮強度の特性値 150N/mm<sup>2</sup> 以上, ひび割れ発生の強度特 性値 4N/mm<sup>2</sup> 以上, 引張強度の特性値 5N/mm<sup>2</sup> 以上の繊 維補強を行ったセメント質複合材である。マトリクスは 粒径 2.5mm 以下の骨材, セメント, ポゾラン材から構成 され, 水セメント比は 0.24 以下で, 引張強度 2×10<sup>3</sup> N/mm<sup>2</sup> 以上の直径 0.2mm, 長さ 15mm の補強繊維を 2vol.% 混入したものである。写真-1 に本研究で用いた UFC パネルを示す。本研究では、接着方法として注入方 式を採用した。アンカー施工前に、母材コンクリートお よび UFC パネル接着面をディスクグラインダーにより 研磨し、目荒らしを施した。その後、母材コンクリート に穴をあけてアンカーを打ち込み、母材コンクリートと パネル間に座金を用いて 3mm の隙間をあけてボルトで 固定した。その後、エポキシ樹脂接着剤を充填し、UFC パネルとRCの一体化を図った。接着剤の材料特性を表 -5に示す。

# 2.3 測定項目および載荷試験方法

測定項目は、荷重、中央点および支点の変位、コンク リートおよび UFC パネル表面の主ひずみ、各鉄筋のひ ずみ、剥離性状、ひび割れ性状である。2000kN 万能試験 機により単純支持された供試体に対して2点に線荷重を 静的に載荷した。ひび割れについては載荷中に伸展状況 を目視観察し随時記録を行った。 表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	25
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.3
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	23

#### 表-4 UFCの材料特性

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	210
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	10.8
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	54
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.55

#### 表-5 エポキシ樹脂接着剤の材料特性

	70
圧縮弾性率(kN/mm <sup>2</sup> )	1.5
引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	35
引張せん断接着強さ(N/mm <sup>2</sup> )	14



写真-1 UFC パネル

# 表-6 載荷試験結果

	ł			
供試体名	P <sub>max</sub> (kN)	基準供試体Nに 対する補強効果	破壊形式	
N	173.5	-	せん断圧縮	
U7	242.9	1.40	定着部破壊	
U14	247.8	1.43	定着部破壊	



図−2 荷重−たわみ関係

#### 3. 実験結果および考察

# 3.1 載荷試験結果

載荷試験結果を表-6 に示す。基準供試体 N に対して, 厚さ 7mm のパネルを接着した供試体 U7 は最大荷重で 1.40 倍の補強効果を得られた。厚さ 14mm のパネルを接 着した供試体 U14 は 1.43 倍の補強効果となった。また, 破壊形式に変化が見られ,基準供試体の破壊形式がせん 断圧縮破壊に対して,補強供試体は両者ともに,定着部 破壊となった。U7 と U14 を比較すると,最大荷重がほ とんど変わらない値であり,破壊形式も同じであるため, パネル厚の違いによる補強効果の違いはあまり見られな いと考えられる。

## 3.2 荷重-たわみ関係

図-2に各供試体の荷重とたわみの関係を示す。基準供 試体Nは最大荷重到達後,急激に荷重が低下する脆性的 な破壊であるが,補強供試体は両者ともに似た挙動を示 しており,最大荷重到達後の荷重低下が緩やかになって いる。また,供試体U7は170kN付近まで荷重が低下す ると,その荷重段階付近で耐荷を続けたが,供試体U14 は定着部のひび割れの伸展が早く,安全上の理由から途 中で載荷を終了している。

## 3.3 引張鉄筋ひずみ分布

図-3 に各供試体の引張鉄筋のひずみ分布を示す。基準 供試体 N では約 90kN で急激に引張鉄筋端部の付着すべ りが生じた。しかし、補強供試体は、パネル補強によっ て引張鉄筋端部のひずみが抑制され、付着破壊の発生す る荷重が大きくなった。また、図-4 に引張鉄筋の定着部 のひずみと荷重の関係を示す。括弧の中のL は供試体左











図-3 引張鉄筋ひずみ分布

側の定着部, R は右側の定着部を示している。基準供試体 N のひずみの急激な増加は,70kN~100kN 付近で発生しているが,補強供試体は,両者ともパネルの接着により,ひずみが急激に増大する荷重段階が高くなっている。



このことから、定着部の付着の補強効果が得られたこと が考えられる。また、ひずみが増大する荷重段階は供試 体 U7 の方が高い傾向にあることから、供試体 U14 はパ ネルによる鉄筋付着補強効果が供試体 U7 よりも低いこ とが考えられる。

## 3.4 ひび割れ性状

図-5 に各供試体の終局時のひび割れ性状を示す。なお、 赤い線で示したひび割れは破壊において支配的となっ たひび割れである。また、図-5(b)と図-5(c)の中央の図 は供試体底面のひび割れ図である。無補強供試体に関し ては、底面に軸方向のひび割れが発生しなかったので、 底面のひび割れ図は省略している。

基準供試体Nにおいては,斜めひび割れの発達により, 圧縮域の減少に伴うせん断圧縮破壊によって終局してい る。それに対して,補強供試体は両者ともにせん断ひび 割れを抑えることができている。しかし,底面にひび割 れが発生しており,支配的なひび割れとなった定着部の ひび割れから,パネル沿いにもひび割れが伸びている。 また,供試体 U7 では定着部にひび割れが入っているこ とから,定着部への負担をパネルが受け持っていること が考えられる。

供試体 U7 と供試体 U14 のパネル界面のひび割れ性状 の違いについて比較すると,供試体 U7 の方は母材への ひび割れが分散しているが,供試体 U14 の方は母材とパ ネルの界面に顕著なひび割れが発生している。また,写 真-2 は供試体 U7,供試体 U14 の供試体端部面における 定着部のひび割れである。供試体 U7 の方のパネル界面 のひび割れは母材も巻き込んだものであるが,供試体 U14 の方は母材をあまり巻き込まずパネル界面にひび割 れが発生しており,供試体上部の界面ひび割れも見られ る。このことから,パネル厚 14mm であると,母材とパ ネルの一体性が低くなることが考えられる。供試体 U14 の方はパネルの除去を容易に行うことができたが,供試 体 U7 では,母材方向にもひび割れが分散しており,パ ネルの除去に手間がかかったことからも供試体 U14の一





(a) U7(b) U14写真-2 定着部のひび割れ

体性の低さが伺える。一体性の低さの原因としては、母 材とパネルの間の剛性の差が大きいことが考えられ、パ ネル厚 14mm であると、パネルの抵抗力が過剰となり、 比較的抵抗力の低いパネル接着部でのひび割れが発生し やすくなることが考えられる。そのため、パネルの厚さ には、最適な厚さが存在することが考えられる。また、 パネル除去後のひび割れに関しては、供試体 U7 では、

表-7 耐荷力計算結果

	実験値	直(kN)				計算値(kN	)		
供試体名	最大荷重	パネル		母材せん断	耐荷力	パネル	耐荷力合計 P <sub>cal</sub>		
	P <sub>max</sub>	耐荷力	二羽式	ディープビーム式	ストラットータイモデル	耐荷力	二羽式	ディープビーム式	ストラットータイモデル
Ν	173.5	-				-	110.8	164.1	224.2
U7	242.9	69.3	110.8	164.1	224.2	51.4	162.2	215.5	275.6
U14	247.8	74.3				102.7	213.6	266.9	327.0

写真-3 に示すように、付着ひび割れや定着部から伸びる 斜めひび割れが見られたものの、供試体 U14 の方は、目 立ったひび割れが見られなかった。このことから、供試 体 U7 において、アーチ機構が形成されたことが考えら れる。

ここで、図-2より供試体 U7,供試体 U14 について見 ていくと、前述の通り、U7 は 170kN 付近まで荷重が低 下すると、その荷重段階付近で耐荷を続けたが、U14 は 荷重低下の途中で終局している。この理由としては、前 述の通り供試体 U14 はパネルと母材の一体性が低いため に、パネルの剥離によって早期に終局したことが考えら れる。また、供試体 U7 の方は、パネルと母材の一体性 が良好であったため、荷重低下後はしばらくパネルと母 材の付着で耐荷したと考えられる。

### 3.5 耐荷力評価

次に,耐力算定式を用いて,本供試体の耐荷力評価に ついて検討した。表-7 に安全係数を考慮しない場合の耐 荷力計算の結果を示す。実験値の UFC パネル耐荷力は, 補強供試体の最大荷重から,無補強供試体の最大荷重を 差し引いた値としている。計算値の算出に用いた式は, 二羽式,コンクリート標準示方書によるディープビーム 式<sup>7)</sup>,コンクリート標準示方書によるストラットータイ モデル<sup>8)</sup>としている。また,補強供試体の計算値は,無 補強供試体のせん断力に UFC パネルの耐荷力を足した 値としている。UFC パネル耐荷力の計算値 V,は,土木 学会指針<sup>9)</sup>で示された式(1)を用いた。

$$V_y = V_{rpc} + V_f \tag{1}$$

ここで, **V**<sub>rpc</sub>は UFC のコンクリート部材のみでのせん断 耐力で,式(2)で表される。

$$V_{rpc} = 0.18 \int f'_{cd} \cdot b_w d \tag{2}$$

ここで、 $f'_{cd}$ は UFC の設計圧縮強度、 $b_w$ は幅、dは有効 高さを示しており、係数  $\gamma_b$ は一般に 1.3 としてよいとさ れている。また、 $V_f$ は補強繊維により受け持たれるせん 断耐力で、式(3)で表される。

 $V_f = (f_{vd} / tan \beta_u) \cdot b_w z$  (3) ここで、 $f_{vd}$ は UFC の設計平均引張強度、 $\beta_u$ は軸方向と 斜めひび割れ面のなす角度、zは圧縮応力の合力の作用 位置から引張鋼材の図芯までの距離を示している。 $\beta_u$ 



写真-3 パネル除去後(U7,上下反転)

については、斜めひび割れが支点から載荷点にかけて発 生すると想定し、 $\beta_u = tan^{-1}(a/h)$ とした.ここで、aはせ ん断スパン長、hははりの高さを示している.

まず,無補強供試体Nについて,実験値173.5kNに最 も近い値を算出できた式はディープビーム式であり, 164.1kNとなっている。せん断スパン比が1.5であること を考慮すると,この結果は妥当と考えられる。また,無 補強供試体においては,アーチ機構は発生していないの で,ストラットータイモデルによる計算値は過大となっ ている。

UFC パネルの耐荷力に関しては,供試体 U7 では計算 値は実験値よりも低くなっており,供試体 U14 では計算 値の方が高くなっている。供試体 U7 において計算値が 実験値よりも低くなった理由としては,パネル接着によ って耐荷機構の変化が発生したことが考えられる。前述 の通り,供試体 U7 ではアーチ機構が形成したことが考 えられ,それにより,母材分のせん断耐力が基準供試体 Nよりも高くなっている。そのため,実験値のパネル耐 荷力が実際よりも高く算出されていることが考えられる。 また,供試体 U14 に関しては,パネルの剥離によって早 期に終局しているので,パネルの補強効果を十分に得ら れていないことが考えられ,パネル耐荷力の実験値が計 算式よりも低くなっていることが考えられる。

供試体 U7 について,実験値とディープビーム式の計 算値(耐荷力合計)を比較すると,計算値は実験値よりも 約 30kN 低くなっている。これは,パネル接着による耐 荷機構の変化が考えられ,母材分のせん断耐力が向上し たことによるものと考えられる。そのため,耐荷機構が 変わると,無補強供試体と同様の計算式で評価できない ことがあると言える。また,実験値とストラットータイ モデルの計算値(耐荷力合計)を比較すると,計算値の方 が高くなっている。これは,補強供試体の耐荷力の合計 を計算するにあたって,無補強供試体の耐荷力の合計 を計算するにあたって,無補強供試体のせん断力に UFC パネルの耐荷力を足した値とはならないことが考えられ る。荷重段階が上がってくると,UFCパネル界面にひび 割れが入り始め,パネル自体にひび割れが入ることもあ るため,終局までパネルが補強効果を完全に発揮できる わけではない。そのため,補強供試体の耐荷力をストラ ットータイモデルによる母材のせん断耐力に UFC パネ ルの耐荷力を加算して算出する際は,パネルの補強効果 の低下を考慮し,UFCパネルの耐荷力に,低減係数を考 慮する必要があると考えられる。

供試体 U14 について,実験値 247.8kN に近い計算値は, 二羽式の 213.6kN と、ディープビーム式の 266.9kN であ る。ただし、供試体 U14 については、破壊形式が定着部 破壊であり、また、パネルの剥離により早期に終局した ため、パネルの補強効果が十分に得られていないと考え られる。計算値はパネルの補強効果が完全に得られてい ると仮定しているため、正確な計算値を出すためには、 前述の通り、UFC パネルの耐荷力に低減係数を考慮する 必要があると考えられる。そのため、ディープビーム式 の計算値は、実際の耐荷力よりも低くなる可能性があり、 二羽式の計算値はさらに安全側の計算結果となる。スト ラットータイモデルの計算値は、実験値よりも約 80kN 高く、かなり大きい計算結果となっている。この計算値 に対して UFC パネル耐荷力の低減係数を考慮すると,実 験値に対応する値を示すには、低減係数を約 0.2 とかな り小さくする必要がある。

実構造物における補強方針としては、曲げ耐力を十分 に上回るように、せん断耐力を向上させることが望まし いと考えられるため、低減係数を含めた安全係数の設定 については、さらに検討する必要がある.

## 4. まとめ

本研究では, RC はり部材に対して UFC パネルの接 着によりせん断補強と定着部補強を行い,載荷試験を実 施した。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) せん断スパンと鉄筋定着部両方の補強を行う UFC パネルの接着により、耐荷力の増加が見られ、せん 断ひび割れを抑制した。また、破壊形式が変化し、 無補強供試体における脆性的な挙動を改善した。

- (2) UFC パネル補強を行うにあたって、母材と UFC パネルの一体性を確保するための、最適なパネル厚さが存在することが推察された。
- (3) UFC パネル補強を行った部材の耐荷力を計算する 場合,部材と UFC パネルの組み合わせによって, 計算式の選定や,パネル耐荷力算定に低減係数を考 慮する必要がある。

#### 謝辞

UFC パネル接着施工に関してコニシ(株)の堀井久一氏 にご協力を頂きました.ここに謝意を表します.

#### 参考文献

- Shah SP, Rangan VB : Fiber reinforced concrete properties, ACI, vol.68, pp.126–135, 1971
- Habel K, Viviani M, Denarie E, Bruhwiler E: Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, Cem Concr Res, vol.36(7), pp.1362–1370, 2006
- 友村圭祐,森川英典,笠松大輔,川口哲生:UFCパ ネル接着による RC 部材のせん断補強効果,コンク リート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1465-1470, 2009.7
- 4) 瀬戸亮太,森川英典,藤永亜里沙,友村圭祐,川口 哲生:UFCパネル接着およびCFRPシート接着によ る RC 部材のせん断補強効果,コンクリート構造物 の補修,補強,アップグレード論文報告集,Vol.10, pp.371-378,2010.10
- 5) 王健,森川英典,川口哲生:低強度 RC 部材に対する UFC パネル接着せん断補強の性能評価解析,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.1-8, 2012.11
- 6) 王健,河野史弥,森川英典,川口哲生:低せん断ス パン比を有する RC はりに対する UFC パネル接着補 強に関する研究,コンクリート構造物の補修,補強, アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.389-396, 2013.11
- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[構造性能照査 編],土木学会,pp.190-191,2002
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編],土木 学会,pp.495-501,2012
- 2) 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),土木学会, p.31, 2004