

論文 UHPFRC 相互の打継ぎ目の強度に関する検討

入矢 桂史郎*1・伊佐治 優*2・石関 嘉一*3

要旨：床版補修などに使用される UHPFRC 相互の水平および鉛直の打継ぎ強度に関する検討を行った。水平打継ぎ目の付着強度は、湿潤状態にして表面目荒らし後に打ち継ぐことで材齢 3 日程度から 1.5N/mm^2 以上が得られた。鉛直打継ぎは曲げ強度で評価したが、水結合材比が 17%程度では湿潤状態にしても翌日脱型時に剥離した。鉛直打継ぎ目の強度を増すには水結合材比を大きくするか、かぎ型継ぎ手のように水平部分を設けることが効果的であることがわかった。

キーワード：RC 床版, UHPFRC, 打継ぎ目, 付着強度, 曲げ強度, 自己治癒

1. はじめに

高速道路等のコンクリート床版の補修・補強を目的としてスチールファイバーコンクリート（以下 SFRC）による上面増厚が行われている。SFRC による上面増厚では剥離やひび割れなどの早期劣化が指摘されており、特に鉛直打継ぎ部での充填不良や剥離が顕著と報告されている¹⁾。最近、SFRC に代わり高強度で緻密性とひび割れ幅の拘束効果を有する UHPFRC（Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete）を薄層で使用する試みが実施されている²⁾。この材料は緻密であることに加えクソ性を有し、充填性に優れ、付着強度が高いなど SFRC の問題点を解決する材料として期待される³⁾。

UHPFRC は骨材の最大粒径が 1 mm 程度で薄層での施工を可能にした材料で、かつ水結合材比が 20%以下として緻密であることから、薄層でも十分に外部からの有害因子の侵入を防ぐことができる⁴⁾。しかし、補修補強工事であることから施工条件に制限があり、打継ぎ目の発生は避けがたく、かつ薄層で発生応力も大きくなるためにその打継ぎ目に関しては慎重な検討が必要である。

水平打継ぎ目に関してはいくつかの論文が発表され、高い付着強度が発現することが報告されている⁵⁾。しかし、厳しい施工条件下で若材齢時に交通解放し、荷重をかけざるを得ない場合には、付着が完全であれば若材齢の UHPFRC の応力負担が増え、ひび割れが発生するのではないかなど懸念される。その観点で水平打継ぎ目の若材齢時の付着強度を論じている研究成果は少ない。

鉛直打継ぎ目に関する研究成果はさらに少なく、防水性を付与した UFC 複合床版の上面に使用する UFC の継ぎ手として、打継ぎ目のないものと同等の耐力および防水性を有する「鋸歯継ぎ手」⁶⁾や、簡易継ぎ手として「かぎ型継ぎ手」⁷⁾などが報告されている。ただし、既設床版の上面増厚となると UFC 複合床版のように工場製作が

できないため、防水性を犠牲にしても施工を簡略化できる鉛直打継ぎ目の方法が必要になる場合がある。

本研究ではコンクリート床版の増厚に使用する UHPFRC に関して、材齢 7 日までと 28 日の静弾性係数、圧縮強度および曲げひび割れ強度などの物性値を取得した。次に、先行打設部（以下既設部）の状況に影響されない付着強度の取得を目的として、UHPFRC と同等の水結合材比を有するモルタルを既設部として、水平打継ぎ目の付着強度を求めた。その際に既設部との打継ぎ目の状態をパラメータとし、建研式引張試験により付着強度を測定した。また、鉛直打継ぎ目の強度特性を把握することを目的として、打継ぎ目の状態、接着剤の有無および配合を変えて、直線の打継ぎ目（以下ストレート目地）での曲げ強度試験を行った。その後、水平打継ぎ目と鉛直打継ぎ目を融合させたかぎ型継ぎ手の曲げ試験により鉛直打継ぎ目の強度改善効果の評価を行うとともに、試験後 20°C 水中に 3 か月程度浸漬した場合の自己治癒剤による微細ひび割れの治癒効果について確認した。

2. UHPFRC の基本物性

2.1 使用材料および配合

本研究では特殊セメントは使用せず、ダム等で使用されている中庸熟ポルトランドセメント（以下 MP）を用いた。混和材としてシリカフェューム（密度 2.3kg/m^3 、比表面積 $200,000\text{cm}^2/\text{g}$ ）を 120kg/m^3 と膨張材を 20kg/m^3 使用し、これらを合わせて結合材（以下 B）とした。膨張材はエトリンガイト系（密度 3.2kg/m^3 、粉末度 $2900\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ）を使用し、細骨材として 6 号珪砂、不活性シリカ微粉末、石灰石細砂を使用した。また、混和剤として高強度用のポリカルボン酸系高性能減水剤（以下 SP）および消泡剤を使用した。鋼繊維（以下 SF）は高強度用を使用し、密度 7850kg/m^3 、 $\phi 0.16\text{mm}$ 、長さ 13mm 、引張強度 2000N/mm^2

*1 博士（工学）（フェロー会員）

*2 (株) 大林組 技術研究所 生産技術研究部 修士（工学）（正会員）

*3 (株) 大林組 技術研究所 生産技術研究部 博士（工学）（正会員）

以上のものを使用した。また、微細ひび割れの自己治癒を促進するためにバチルス菌を用いた自己治癒剤⁸⁾を1.2 kg/m³用いた。実験に使用した UHPFRC の配合を表-1 に示す。表中の SI は珪砂の単位量を示し、P は珪砂以外の総粉体量を示す。高性能減水剤は総粉体量 P に対して 1.8%，SF は体積比で 3vol% 混入した。フレッシュ性状はモルタルのフロー試験で打撃しない 0 打フローで 160 mm 程度を目標とした。

2.2 静弾性係数、圧縮強度および曲げ強度

供試体は全て 20℃水中養生とした。圧縮強度と静弾性係数の経時変化を図-1 に示す。圧縮強度および静弾性係数は JISA1149 に従い、供試体は φ100×h200 の円柱供試体を用いた。曲げ強度および曲げひび割れ強度の経時変化を図-2 に示す。曲げ強度は JISA1106 に基づいて 3 等分点載荷法とし、供試体は実際の床版増厚の厚さに近い厚さ 30 mm×幅 100 mm×長さ 400 mm とした。曲げひび割れ強度は曲げ試験における応力ひずみ曲線の変化点から求めた。各物性値の材齢 28 日の試験結果を表-2 に示す。参考までに材齢 28 日において、φ50 mm×h 100 mm の円柱供試体の圧縮試験も実施した。φ100 mm と φ50 mm の試験結果はほぼ同等で、その差はばらつき範囲と考えられる。

各強度と静弾性係数の発現状況を比較するために材齢 28 日の物性値に対する各材齢の物性値の比を求めて図-3 に示す。静弾性係数の材齢 28 日の値に対する材齢 1 日の比は圧縮強度に比べ大きく、両物性値の経時変化は異なる結果であった。上面増厚に UHPFRC を使用した場合、付着強度が十分であれば静弾性係数が大きいほど補強効果が大きくなるが、応力負担も大きくなり発生応力も大きくなる。強度と静弾性係数の発現曲線が異なり材齢 1 日の静弾性係数の値が大きい結果は、ひび割れの発生などのリスクが高まる傾向を示している。

3. 水平打継ぎ目の付着強度

3.1 試験方法

UHPFRC の水平打継ぎ目の強度は、打継ぎ目（以下界

表-1 UHPFRC の配合

セメントの種類	W/B (%)	W/P (%)	W, B, P, SI (kg/m ³)				SF (vol%)	SP (対P%)
			W	B	P	SI		
MP	17.4	15.2	200	1150	1311	810	3.0	1.8

表-2 UHPFRC の材齢 28 日の特性値

種別	材齢	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (KN/mm ²)	曲げひび割れ強度 (N/mm ²)	
		φ50	φ100		曲げひび割れ強度	曲げ強度
UHPFRC	28日	157.1	153.3	49.2	7.7	25.0
既設部		120.0	135.5	47.2	8.1*	10.0

*割裂ひび割れ強度

面)の状態に影響を受ける。本研究では界面の状態(サンダー処理(湿潤), 無処理(湿潤, 乾燥))をパラメータとして、材齢 1~9 日の若材齢に着目して付着強度の経時変化を調べた。供試体は 2 層に打継いでサンダー処理および無処理(乾燥)は各 2 枚作製し、無処理(湿潤)は 4 枚作製した。サンダー処理と無処理の比較は材齢 1 日と 2 日で行い、それ以降の経時変化は無処理の供試体で 9 日まで測定した。付着強度は建研式の引張試験機により測定した。

付着強度は既設部の強度や劣化状態に影響されるため、できるだけ界面で破壊させて UHPFRC の付着強度を

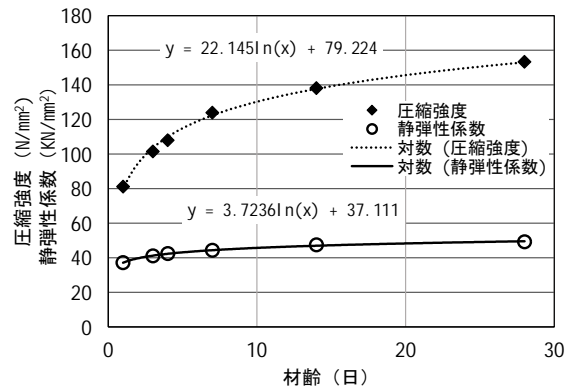


図-1 圧縮強度と静弾性係数の経時変化

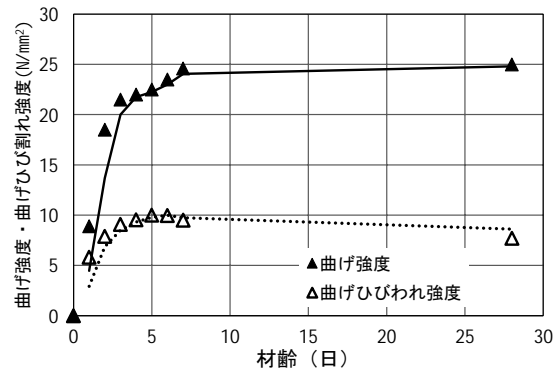


図-2 曲げひび割れ強度と曲げ強度

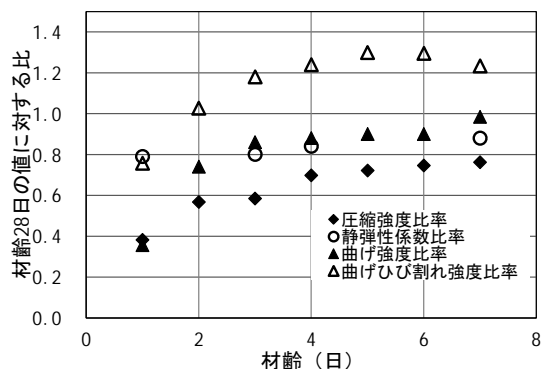


図-3 材齢 28 日に対する発現比率

求める目的で、既設部はUHPFRCの配合からSFを除いた超高強度モルタルを使用した。打継ぎ間隔は、既設部を打ち込み28日経過後にUHPFRCを打継いだ。

試験治具は材齢1日および2日では接着剤強度が発現しないことを懸念してφ75mmのアンカー式を使用し、材齢3日以降は1辺が4cmの四角形の治具を接着剤で貼り付けて用いた。供試体の養生方法はすべて20°C気中養生とした。打継ぎ目の湿潤状態を写真-1に示す。

3.2 試験結果

(1) 材齢2日までの付着強度

付着試験では界面の強度が既設部の引張強度より大きければ既設部で破断し、その逆であれば界面で破断する。本実験では付着強度の発現に応じて、界面で破壊するケースと既設部で破壊するケースが混在した。材齢1日と2日については全て界面で破断した。全て界面破断であったので、供試体毎に3個の試験値の平均を求め図-4に示す。サンダーで既設部表面を削り取り湿潤状態として打ち継いだ場合の付着強度は、無処理で湿潤状態としたケースに比べやや大きい結果となった。水平打継ぎ目に関しては、湿潤状態にすれば無処理でも付着強度は得られるが、材齢2日程度で付着強度を高めるには表面処理したほうが効果的であるといえる。

(2) 材齢3日以降の付着強度

湿潤状態で打ち継いだ無処理の供試体の材齢3日以降の試験値は界面破断と既設部破断が混在した。2枚の供試体の試験値を材齢ごとに界面破断と既設部破断ごとにまとめて平均し、図-5に示す。界面での破断数は試験値が各材齢6個の内、材齢3日が3個、材齢7日が2個、材齢8日が2個であった。無処理の打継ぎ面を湿潤状態で打ち継いだものは、材齢3日以降では既設部で破断することが多くなったが、その時の付着強度は既設部の引張強度に依存しており概ね3.0N/mm²以上であった。材齢9日ではすべて既設部で破断した。

一方、無処理で乾燥状態で打ち継いだものは材齢2日、3日および7日で建研式の引張治具に合わせて切り込みを入れたが、その際に界面が剥離して測定できなかった。

(3) 水平打継ぎの付着強度のまとめ

水平打継ぎ目の付着強度に関して、本実験では湿潤状態で打ち継ぐことで材齢9日ではすべて既設部で破断しており、3.0N/mm²以上の付着強度が得られた。

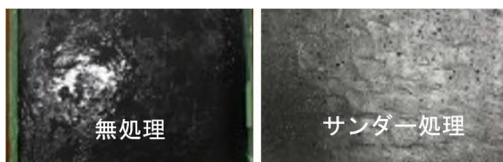


写真-1 打継ぎ目の湿潤状況

NEXCOの構造物管理施工要領⁹⁾では付着強度の規格値を1.0N/mm²以上と定めている。本実験では材齢3日以降で1.5N/mm²が得られており、材齢3日程度で上記の規格値は満足できると考えられる。

4. 鉛直打継ぎ目の曲げ強度

4.1 試験方法および試験ケース

鉛直打継ぎ目の付着に関しては、ストレート目地を挟んだ供試体の曲げ強度による評価を行った。曲げ供試体(100mm×100mm×400mm)の1/2を先行打設し、打継ぎ面をブラシで清掃した後、翌日残り半分を打ち込んで28日間20°Cで水中養生した後に曲げ試験を実施した。

試験ケースは①UHPFRC相互の打継ぎ(打継ぎ面を乾燥、湿潤、水滴状態としたもので配合としてSFの有無

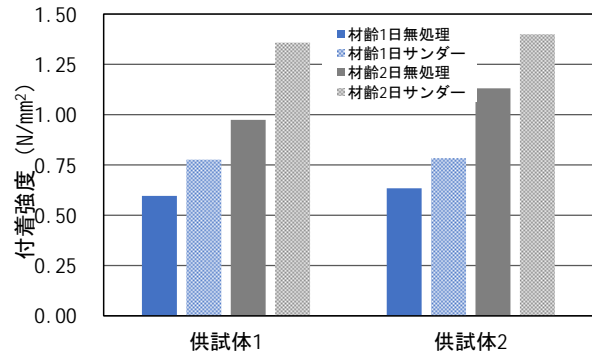


図-4 付着強度試験結果 (材齢1日～2日)

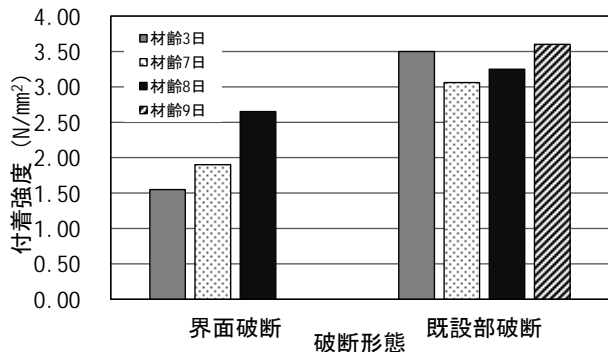


図-5 付着試験結果 (材齢3日～9日)

打継ぎ方法

無処理



先行打設後、ワイヤーブラシにてけれん後、打継ぎ。打継ぎ面、乾燥、湿潤、水滴の3種類。打継ぎ後28日材齢にて試験。

硬化後接着



材齢28日以上経過した2つのピースをエポキシ系接着剤にて接合。打継ぎ後材齢28日にて試験。

接着剤塗布後打継ぎ



先行打設後、ワイヤーブラシにてけれん後、エポキシ系接着剤を塗布。打継ぎ後28日材齢にて試験。

曲げ試験方法

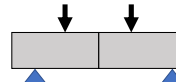


図-6 鉛直打継ぎ試験方法

を含む)②UHPFRCで水結合材比を22%に増加させた打継ぎ③エポキシ系接着剤を使用した打継ぎ(硬化したものを接着,塗布後打継ぎの2種類)④一般の床版増厚工事で使用されるW/C=40%のSFRC相互の打継ぎ,の大きく4種類とした。試験方法を図-6に示す。

4.2 試験結果

試験結果を表-3に示す。通常の施工で行うように先行部の打継ぎ面を湿潤状態として打継いだものは翌日の脱型時にすべて剥離した。この結果, W/Bが17%程度のUHPFRC相互の鉛直打継ぎは,先行部を湿潤状態にしても曲げ強度は期待できないことがわかった。また,この傾向はSFの混入の有無には関係なく同じであった。

一方,水滴が残るほど打継ぎ面を濡らした場合では,一部の供試体では剥離することなく試験できたが,その割合は低く,また曲げ強度も小さかった。しかし, W/Bを約4%大きくした配合(W/B=22%)での打継ぎでは試験までに剥離しない供試体の割合が増えるとともに曲げ強度も大きくなった。ただし,打継ぎの信頼性としては不確実といえる。W/Cが40%で早強ポルトランドセメントを用いた一般に床版の上面増厚に用いられるSFRCは,確実に接合し,接着剤を使用しなくともほぼUHPFRCの曲げひび割れ強度に匹敵する打継ぎ面の曲げ強度が得られた。鉛直打継ぎ目の付着が不確実である現象は,本実験の範囲ではW/Bが22%以下のUHPFRCで認められた。

また床版の増厚に使用されるエポキシ系の接着剤を使用すると確実に接着できることもわかった。ただし,硬化したUHPFRC同士を接合する場合は,曲げひび割れ強度以上の曲げ強度を得られるが,接着剤塗布後にフレッシュコンクリートを打ち込む打継ぎにおいては,曲げひび割れ強度以下の低い強度となった。

本実験から,水結合材比17%程度のUHPFRC相互のストレート目地では,接着剤で接合する場合を除いて,曲げ強度が期待できない結果であった。強度を期待する場合には機械的な接合法(例えば鉄筋や鋸歯継ぎ手など)が必要であると考えられる。

5. 鉛直打継ぎ目の曲げ強度の改善

5.1 かぎ型継ぎ手とコッター

水平打継ぎ目の付着強度が湿潤状態にすれば確実に接着できることに着目して,ストレート目地に水平部分を加えた「かぎ型継ぎ手」について検討した。また,一般の打継ぎ目に使用される角型コッターを打継ぎ目に配置して,かみ合わせによる強度増加について検討した

5.2 試験方法

かぎ型継ぎ手の供試体の概要を図-7に示す。供試体の大きさは幅100mm×長さ400mm×厚さ50mmとし,先行部を打設後24時間経過した後に後行部を打設した。供

試体は20°Cの恒温室で翌日まで養生し,脱型後,材齢28日まで20°C水中養生を行った。

試験ケースは①かぎ型継ぎ手②かぎ型継ぎ手+エポキシ系接着剤③かぎ型継ぎ手+コッター④かぎ型継ぎ手+コッター+エポキシ系接着剤の4ケースとした。比較のために打継ぎのない供試体(以下一体打ち)も作製した。測定項目は,荷重のほかに下縁のひずみとπゲージによる継ぎ手を挟んだ側面部の開きの2種類とした。各試験ケースの打継ぎ面の状況を写真-2に示す。

5.3 試験結果

(1) 打継ぎ目の曲げ強度

試験結果をまとめて表-4に示す。曲げひび割れ強度

表-3 鉛直打継ぎ目(ストレート目地)の試験結果

ケース	配合	接着剤の有無	鉛直打継ぎ面の状況	コンクリートの種類	SF混入量	曲げ強度(N/mm ²)	脱型時に破損した割合
①	MP (W/B=17.4) 基本配合	なし	湿潤	UHPFRC	0%	0	6本中6本
		なし	湿潤	UHPFRC	3%	0	6本中6本
		なし	水滴	UHPFRC	0%	3.8	3本中1本
		なし	水滴	UHPFRC	3%	1.2	3本中2本
②	W/B=22%に単位水量増加	なし	水滴過多	UHPFRC(W/B+4%)	3%	10.5	3本中1本
③	MP 基本配合	あり	両端硬化後接着	UHPFRC	3%	12.5	3本中0本
		あり	乾燥	UHPFRC	0%	3.6	3本中0本
		あり	乾燥	UHPFRC	3%	4.4	3本中0本
④	W/C=40% HP	なし	湿潤	SFRC	1.50%	8.7	3本中0本
		あり	乾燥	SFRC	1.50%	3.0	3本中0本

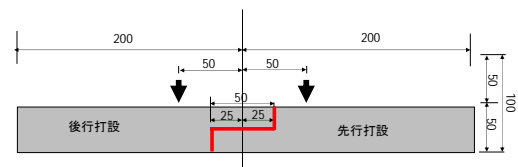


図-7 かぎ型継ぎ手の供試体概要



写真-2 かぎ型継ぎ手の試験ケース

表-4 かぎ型継ぎ手の試験結果

打継ぎ方法	打ち継ぎ曲げ強度(N/mm ²)		最大強度時の継ぎ目の開き(mm)
	ひび割れ強度	最大強度	
打ち継ぎなし	15.5	28.8	
無処理	4.0	8.1	0.96
無処理+接着剤	6.2	9.9	1.07
コッター	8.0	12.0	0.40
コッター+接着剤	8.2	12.2	0.29

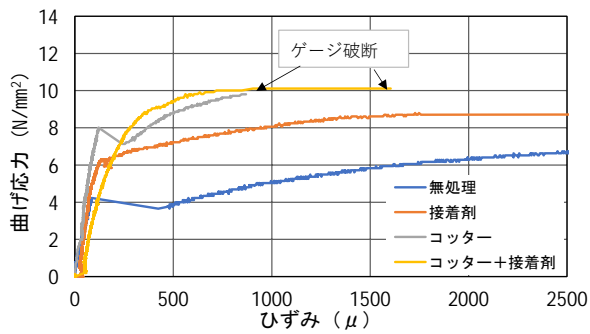


図-8 下縁ひずみと応力の関係

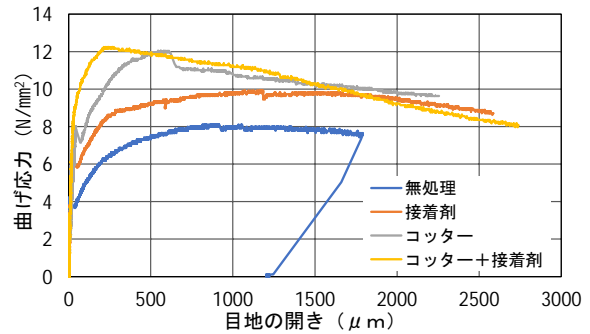


図-9 継ぎ目の開きと応力の関係

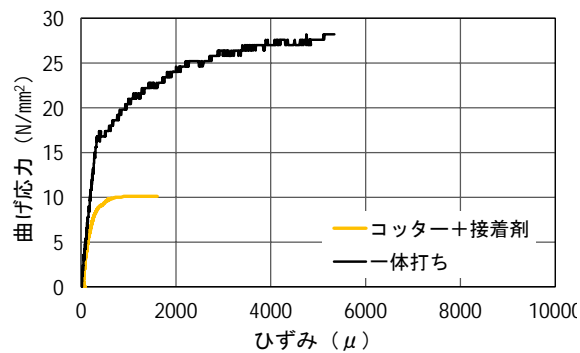


図-10 一体打ちとかぎ型継ぎ手の比較(下縁ひずみ)

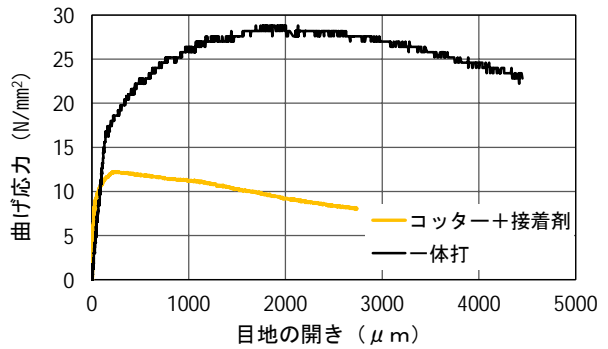


図-11 一体打ちとかぎ型継ぎ手の比較(継ぎ目の開き)

は応力・ひずみ曲線の変化点から求めた強度で、下面の打継ぎ目が開くことにより応力ひずみ曲線が非線形となる点である。曲げ応力は全断面有効として次式により算出した。

$$\sigma = P\ell / bh^2 \quad (1)$$

σ : 曲げ応力(N/mm²), P : 荷重(KN),
 h : 厚さ(50mm), ℓ : 支間長 (400mm),
 b : 幅(100mm)

表-3と表-4を比較してかぎ型継ぎ手の曲げ強度は、すべてのケースでストレート目地を接着剤で接合したケースの値を上回った。また、かぎ型継ぎ手にコッターやコッター+接着剤を適用することで単独に比べて曲げ強度、曲げひび割れ強度ともに大きくなった。

(2) 打継ぎ部のひずみおよび継ぎ目の開き

曲げひずみはひずみゲージ、継ぎ目の開きは π ゲージで測定した。下縁の曲げひずみと応力関係を図-8に、継ぎ目の開きと応力関係を図-9に示す。

継ぎ目の開きが2mmとなった時点で除荷し、継ぎ目の状態を確認した。その状況として、コッターを使用した場合とかぎ型継ぎ手単独の場合(以下無処理)とを写真-3に示す。コッター+接着剤のケースを除いて載荷後直線状に応力が上昇し、下側の鉛直継ぎ目部が開くことにより応力が一旦低下するが、その後また上昇した。無処理の場合のみ、最終的には写真-3に示すように水平面の剥離が生じた。すべてのケースにおいて、下側の鉛直継ぎ目が開いた後も応力は増加し、下側の鉛直継ぎ目

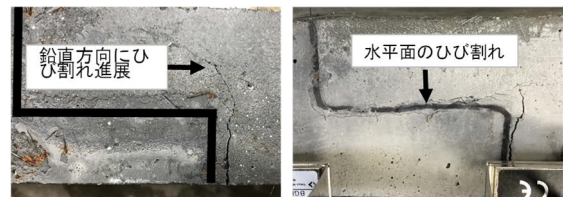


写真-3 かぎ型継ぎ手のひび割れ状況

部の開きの延長上にひび割れが伸び、最大強度に至るといった経過をたどった。すなわち、かぎ型継ぎ手の曲げ強度には下側の継ぎ目が開いた後、SFがつながっている上側の1/2断面の寄与が大きい。接着剤を使用すると同じ応力レベルでは無処理に比べ下側の継ぎ目の開きが抑えられるとともに水平面の剥離も見られなかった。またコッターを配置すると最大荷重時の下面の開きがさらに小さくなるとともに、曲げ強度が大きくなること、またコッター+接着剤とすると、下側の鉛直継ぎ目が開くことによる応力の低下も認められず最も高い曲げ強度を示した。

(3) 一体打ちとかぎ型継ぎ手の比較

コッター+接着剤と一体打ちのひずみおよび継ぎ目の開きを比較して図-10および図-11に示す。コッター+接着剤のかぎ型継ぎ手の曲げひび割れ強度は8.2N/mm²で一体打ちの曲げひび割れ強度の約53%、その際の継ぎ目の開きは0.03mmであった。また、曲げ強度は12.2N/mm²で一体打ちの約42%であった。コッターを使用すること打継ぎ目のSFがつながっていないにも

かかわらず、継ぎ目の開きを小さくできかつ曲げ強度も一体打ちの曲げひび割れ強度の約 80%が得られた。

(4) かぎ型継ぎ手のまとめ

かぎ型継ぎ手にコッター単独あるいはコッターに接着剤を使用することで、継ぎ目の曲げ強度を一体打ちの曲げひび割れ強度と同程度となるとともに、最大荷重時の打継ぎ目の開きを 0.3~0.4 mmに抑えることができた。

6. かぎ型継ぎ手の自己治癒の検討

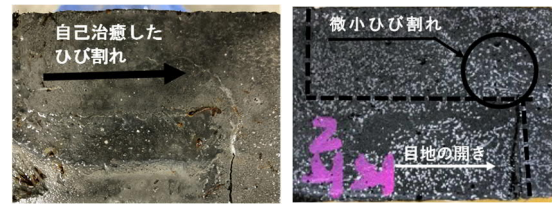
曲げ試験の終わったコッターを有するかぎ型継ぎ手(前項 5. の③のケース)を試験後 20℃の水中に浸漬し、自己治癒の状況を確認した。写真-4 に写真-3 に示したコッター付き継ぎ手の浸漬 3 か月後の側面状態を示す。下側の打継ぎ目が開いた部分は自己治癒できていないが、上部に進展した微細ひび割れは治癒していることが確認できる。かぎ型継ぎ手に対して直角方向に切断した供試体内部を写真-4 右に示す。また、その断面の顕微鏡写真を写真-5 に示す。曲げ試験の後にもかかわらず水平面の打継ぎ箇所ははっきりとは判別できず、また打継ぎ面にひび割れも見られない。また、鉛直方向に伸びたひび割れは 0.1 mm以下の微細なものに関しては自己治癒していることが認められる。

継ぎ手部の開きは 0.4 mm程度ありそれをすべて自己治癒することは困難であったが、SFのひび割れ拘束効果などで上部一体部のひび割れ幅を小さくすることができれば、自己治癒剤によりひび割れを修復し水や塩分の侵入を防ぎ、接手部の耐久性を高めることが可能となるのではないかと考えられる。

7. まとめ

本研究を通じて以下のことが分かった。

- (1) UHPFRC では静弾性係数の材齢 28 日の値に対する材齢 1 日の比は圧縮強度の値より大きい。増厚した場合、UHPFRC の補強効果は材齢 1 日程度の若材齢から期待できるが、発生応力も大きいことが予想される。
- (2) UHPFRC 相互の水平打継ぎ目では、打継ぎ面を湿潤状態として打ち継ぐことで付着強度が発現する。また強度の発現は早く、材齢 3 日程度で 1.5N/mm²、材齢 9 日程度で 3N/mm² 以上が得られた。
- (3) 水結合材比 17%程度の鉛直のストレート目地は湿潤状態で打ち継いでも付着を期待できなかった。水滴が残るあるいは水結合材比をやや大きくすることで改善したが不確実であった。
- (4) 鉛直打継ぎ目は、かぎ型継ぎ手とすることで付着強度や継ぎ目の開きを改善できた。接着剤の併用やコッターをなどにより、一体打ちの曲げひび割れ強度の 80%程度の曲げ強度が期待できる。



コッター継ぎ手側面 内部の状況
写真-4 6 か月後の自己治癒の状況

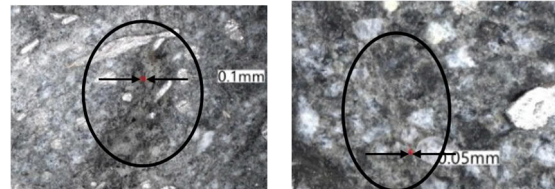


写真-5 内部微細ひび割れの治癒状況

- (5) 自己治癒剤によって、かぎ型継ぎ手の下部の開きを治癒することはできなかったが、ひび割れが進展した上部の微細ひび割れは治癒できる可能性がある。

参考文献

- 1) 長谷俊彦, 和田圭一, 後藤昭彦: 上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp.245~253, 2012.3
- 2) 例えば渡辺有寿他: UHPFRC による橋梁床版の補修補強工法における目地構造に関する検討, 第 75 回年次学術講演会概要集, V部門, 補修・補強(材料), 2020.9
- 3) 渡辺有寿: 超高性能線補強セメント系複合材料(UHPFRC)を用いた各種補修, 補強技術の最新動向, コンクリート工学 Vol.59, No.5, pp.446~451, 2021.5
- 4) 牧田通: 超高性能繊維補強コンクリート(UHPFRC)の研究動向・利用状況-スイスの事例を中心として, コンクリート工学, Vol.50, No.5, pp.494~499, 2012.5
- 5) 例えば松本悠河, 越川喜高, 橋本理, 石井祐輔: 超高性能繊維補強セメント系複合材料とコンクリート床版との付着性に関する一考察, 第 76 回年次学術講演会概要集, V-449, セメント系舗装, 2021.9
- 6) 佐々木一成, 川西貴士, 大場誠道: 防止性能を付与したプレキャスト床板「スリムトップ」, (株)大林組技術研究所報 No.85, 2021
- 7) 渡辺有寿, 向俊成, 牧田通, 服部雅史: UHPFRC を用いた橋梁床版の補修補強工法における目地部の耐久性, プレストレスコンクリート工学会, 第 29 回シンポジウム論文集, pp.693~698, 2020.10
- 8) 劉宏涛: バクテリアを活用した自己治癒コンクリート技術, コンクリート工学, VOL.59, No.11, pp.933~936, 2021.11
- 9) 構造物施工管理要領: 東日本高速道路株式会社他, III 保全編, pp.84, 2020