

論文 既設 RC 床版上面増厚工法への現場打ち UFC の適用性の検討

島崎 利孝*1・橋本 理*2・小栗 直幸*3・石田 征男*4

要旨：UHPFRC(超高性能繊維補強コンクリート)を、既設鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)の上面増厚工法に適用するにあたって、UHPFRCの材料特性に応じた施工方法の確立が必要であり、その一つにRC床版の打継面処理方法がある。本研究では、RC床版を模擬したコンクリート床版(以下、Co床版)の上面に、UHPFRCを薄層で打継ぐ施工実験を行い、コンクリートフィニッシャーによるUHPFRCの施工性やUFCとCo床版の一体性の検討を行った。その結果、本検討の範囲ではCo床版上面の打継面処理方法として湿潤面処理あるいは全面接着剤塗布処理を施すことで良好な付着性能が確保されると考えられた。

キーワード：超高性能繊維補強コンクリート、床版上面増厚、付着、接着剤、コンクリートフィニッシャー

1. はじめに

現在、供用から数十年経ったRC床版の劣化現象として疲労による土砂化が深刻な問題となっている。補修対策後に再劣化が生じた事例も報告されている。疲労による土砂化に対する影響度の大きい要因として、舗装とRC床版界面への水の侵入が指摘されている^{1),2)}。そこで、RC床版の上面増厚工法に用いる補強材料として、高耐久性で透水性の低いUHPFRCが有効と考えた。UHPFRCは超高強度・高緻密といった材料特性を有しており、材料単体の性能としては凍害、塩害、中性化等の劣化作用に対しても非常に高い耐久性を示す。上面増厚工法への適用においては、UHPFRCの施工が可能で、施工後に構造体としての一体性が確保されれば、床版の補修・補強に資するとともに、ライフサイクルコストの低減が期待できる。海外においては、すでにUHPFRCを用いた床版上面増厚工法の適用事例が報告されている^{例え3)}。

本論文は、現場打ちUHPFRCのRC床版上面増厚工法による補修への適用性を施工実験により検討したものである。施工面では、UHPFRCの勾配面施工への適用性を検証し、構造面では、UHPFRCと既設コンクリート床版との一体性について、打継面の付着性状により検討した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および配合

(1) 模擬 Co 床版

模擬 Co 床版のコンクリートは、レディーミクストコンクリート 30-8-20N を用いた。配合および各種材料試験結果を表-1、表-2 にそれぞれ示す。

(2) UHPFRC

類似の材料である超高強度繊維補強コンクリート(UFC)では、フロー値は、230~270mm (JIS R 5201, 落

表-1 模擬 Co 床版の配合

水セメント比	細骨材率	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	Ad
50	43.6	166	332	778	1019	3.984

表-2 模擬 Co 床版の試験結果

コンシステンシー測定結果			強度試験結果(材齢28日, 20℃水中養生)		
スランブ (JIS A 1101)	空気量 (JIS A 1128)	Co温度	圧縮強度 (JIS A 1108)	引張強度 (JIS A 1113)	曲げ強度 (JIS A 1106)
(cm)	(%)	(℃)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
10	6.0	29	36.2	2.92	4.99

※表中の JIS は試験方法を示す。

表-3 UHPFRC の配合

水	単位量(kg/m ³)			添加量(kg/m ³)	
	プレミックス粉体 (A材)	プレミックス粉体 (B材)	鋼繊維	硬化促進剤	高性能減水剤
200	1278	883	157	15	13

※硬化促進剤の水分量(55%)および高性能減水剤は単位水量に含む

表-4 使用材料

使用材料	概要
プレミックス粉体 (A材, B材)	市販のプレミックス粉体
鋼繊維	長さ:15mm, 直径:0.2mm, アスペクト比:75, 引張強度2700N/mm ² 以上
硬化促進剤	JIS A 6204 に適合する市販の硬化促進剤
高性能減水剤	専用減水剤

下なし)が適当とされている⁴⁾が、勾配を有する道路の上面増厚では従来のセルフレベリング性を有するUHPFRCでは勾配仕上げが困難と考えられた。また、一般的なUFCの養生では熱養生が行われる⁴⁾が、本工法では熱養生を行わないため、強度発現に長時間を要することが想定された。そこで本研究では、勾配仕上げを考慮してUHPFRCのフロー管理値を小さく設定(15打フ

*1 大成建設(株) 技術センター 生産技術開発部 都市再生技術開発室 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 生産技術開発部 都市再生技術開発室 課長 修(工) (正会員)

*3 大成ロテック(株) 生産技術本部 技術研究所 第一研究室 課長代理 修(工)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 主任研究員 博(工) (正会員)

ロー値 130~180mm) するとともに、早期の強度発現性を高めた配合を選定した(材齢1日で40N/mm², 28日で140N/mm²)。施工実験に使用したUHPFRCの配合を表-3に、使用材料を表-4に示す。

2.2 施工実験の概要

(1) 試験施工ヤードの形状・寸法

試験施工ヤードの平面形状および寸法を図-1に示す。模擬Co床版は、幅員4m×延長23m×厚さ200mm、増厚UHPFRCは幅員3m×延長18m×厚さ40mmとし、勾配は縦断方向および横断方向の勾配をそれぞれ2%および0%とした。模擬Co床版、増厚UHPFRCはともに無筋である。UHPFRC増厚施工実験時の模擬Co床版の材齢は335日である。

(2) 模擬Co床版上面の打継面処理条件

模擬Co床版の上面(UHPFRC打継面)は、上面から約10mmを路面切削機により切削し、その後、ショットブラスト処理(150kg/m²)により打継面の脆弱部の除去および吸引清掃を行った。

ショットブラスト処理後の打継面の処理方法として表-5に示す4種の方法を設定して比較検討した。増厚UHPFRCはこの打継面処理方法別に4つのエリアに分けて、打継施工を行った(図-1のエリアA~D)。表-5に示した湿潤面においては、湿潤状態を十分確保するため、凹部への多少の水の残留は可とした。接着剤にはエポキシ樹脂系接着剤(可使用時間:30min, 打設有効時間:90min, 環境温度:30°C)を用いた。この接着剤は上面増厚工法に使用された実績があるものである。表-6にエポキシ系接着剤の物性を示す。

(3) 施工機械

施工機械は通常の舗装施工に用いられているコンクリートフィニッシャを用いることが望ましい。しかしながら、事前検討の結果、UHPFRCの粘性が大きいため、従来の施工機械をそのまま使用すると、荒均し・締め固めが困難であること、仕上げに際して表面に引きずりが生じることが分かった。そこで本研究では、バイブレータを高周波の仕様に変更し、最終仕上げを担うフィニッシングスクリードとUHPFRC仕上げ面の接触面積の低減を図った。写真-1に使用したコンクリートフィニッシャを示す。

(4) UHPFRCの練混ぜ方法

UHPFRCの練混ぜには、オムニミキサとパン型強制練りミキサを併用した。練混ぜ方法は、プレミックス粉体(A材, B材)をミキサに投入して空練りを行った後、高性能減水剤および水を投入して所定の時間練り混ぜを行い、その後、鋼繊維と硬化促進剤を投入して練り混ぜた。

(5) UHPFRCの運搬および打設方法

UHPFRCの運搬にはホイールローダを用いた。ホイールローダからUHPFRCをコンクリートフィニッシャ前面へ下した後、ショベル、コンクリートレーキなどを用

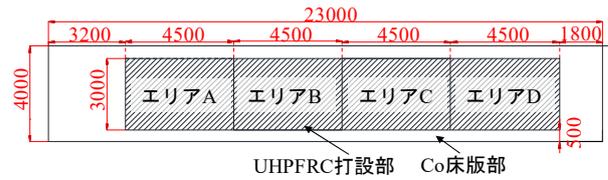


図-1 試験施工ヤードの平面形状および寸法

表-5 打設面の処理方法

エリアA 乾燥面	施工前に湿った箇所があればプロアやバーナーで乾燥させ、全面を乾燥状態とした。全面乾燥としたこのケースは実施工では現実的ではないが、比較検討のため実施。
エリアB 湿潤面	施工前日から養生マットを用いて、打継面に水を吸収させて表面部の湿潤状態を保つとともに、UHPFRCの打設直前にスプレー等にて散水し、エリア全体が湿潤かつ切削凹部に若干水分が溜まるように保持した。
エリアC 端部接着剤塗布面	接着剤をハンドミキサで混合し、塗布量1L/m ² で縦断および横断方向端部に50cm幅でブラシ・刷毛等を用いて塗布した。接着剤無塗布面はエリアAと同様な乾燥状態とした。なお、エリアDを含め接着剤塗布面の事前処理は、ショットブラスト後に吸引清掃を行い、十分に乾燥した。その他プライマー処理等は行わなかった。
エリアD 全面接着剤塗布面	エリアC同様に接着剤をハンドミキサで混合後、塗布量1L/m ² で全面へ塗布を行った。

表-6 エポキシ系接着剤の物性

項目	規格値
比重	1.30±0.10 (JIS K 7112)
圧縮降伏強さ	50 N/mm ² 以上 (JIS K 7208)
圧縮弾性率	(2.0~4.5)×10 ³ N/mm ² (JIS K 7208)
曲げ強さ	40 N/mm ² 以上 (JIS K 7203)
引張強さ	20 N/mm ² 以上 (JIS K 7113)
引張せん断接着強さ	13 N/mm ² 以上 (JIS K 6850)

※メーカー技術資料より抜粋。表中のJISは試験方法を示す。



写真-1 コンクリートフィニッシャ

いて、UHPFRCがコンクリートフィニッシャ前面に均一になるよう敷均しを行った。コンクリートフィニッシャの進行方向は、縦断勾配の下り方向とした。実際の施工

では、上り方向での使用もあり得るが、本実験では施工条件の厳しい下り方向を採用した。

(6) UHPFRC の養生方法

UHPFRC 施工後は各エリアともに、速やかにビニールシートを敷設し、翌日さらに上からブルーシートで養生した。これは実際の床版増厚施工において増厚コンクリートの打設後、表層にアスファルト舗装を行うことから、封緘養生に近い環境となっていると考えられるためである。なお、ビニールシート、ブルーシートは施工後材齢一か月後で撤去し、その後は特別な養生を行わなかった。

2.3 調査項目および計測項目

表-7 に計測項目を示す。UHPFRC のフロー試験は、オムニミキサ、強制練りパン型ミキサの両方で行った。圧縮強度試験用供試体（寸法：φ50×100mm）は20℃環境下(以下、20℃養生)および現場において封緘養生(以下、現場養生)を行った供試体を対象とした。

割裂引張強度試験用供試体（寸法：φ100×200mm）は20℃養生とした。静弾性係数試験用供試体（寸法：φ58×120mm）は各材齢時に採取したコンクリートコアを用いた。

打音検査にはハンマーを用いた。打音検査は材齢 166 日まで経時的に行い、浮きの進行をスケッチにより記録した。

直接引張試験は NEXCO 試験方法 434-2010⁵⁾ に準じて、現場で行うこととし、各材齢において、各エリアの端部 2 か所、中央部 2 か所で試験を行った。なお、NEXCO 構造物施工管理要領（以下、NEXCO 要領）による新旧コンクリートの付着強度は 1.0N/mm²以上である⁶⁾。

また、コンクリートフィニッシャーによる UHPFRC の施工性に関しては、仕上げ面の平滑さや仕上がり具合、また UHPFRC の勾配下流方向への流動状況などを目視で確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 UHPFRC の諸性状

(1) UHPFRC のフレッシュ性状

写真-2、写真-3 に、0 打フローおよび 15 打フローの試験状況を示す。本施工実験に用いた UHPFRC は UFC とは異なり、セルフレベリング性状は示さない。そのため、UFC で検討されているような繊維の配向性については検討していない。次に、15 打フロー試験結果の一例を図-2 に示す。練り上り直後におけるフロー値は 15 打フローで 130~180mm の範囲で調整し、練り上り後 60 分が経過してもフロー値は保持されていることがわかる。

(2) 圧縮強度、ひび割れ発生強度、静弾性係数

図-3 に UHPFRC の材齢と圧縮強度の関係を示す。28 日強度は 20℃養生、現場養生ともに 140N/mm²以上であった。一般的な UFC では熱養生を行い、反応を促進させ

表-7 計測項目

試験項目	試験法	対象材料	試験頻度
フロー試験	JIS R 5201	UHPFRC	練り上り直後,30,60(min)
圧縮強度試験	JIS A 1108	UHPFRC	材齢1,3,7,28(day)
割裂強度試験	JIS A 1113	UHPFRC	材齢1,3,7,28(day)
圧縮静弾性試験	JIS A 1149	UHPFRC	材齢1,3,7,28(day)
打音検査	ハンマーによる浮きの調査	UHPFRC	材齢6,14,28,60,166(day)
直接引張試験	NEXCO試験法434-2010	UHPFRC, Co床版	材齢1,3,7,28(day)



写真-2 UHPFRC のフロー試験 (0 打フロー)



写真-3 UHPFRC のフロー試験 (15 打フロー)

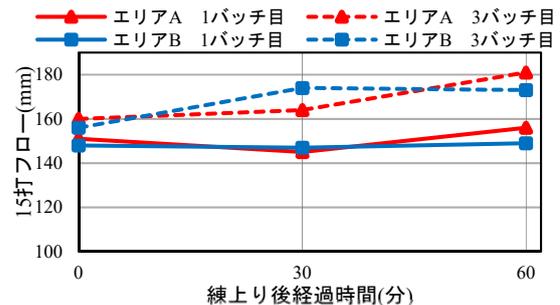


図-2 フロー試験結果 (オムニミキサ)

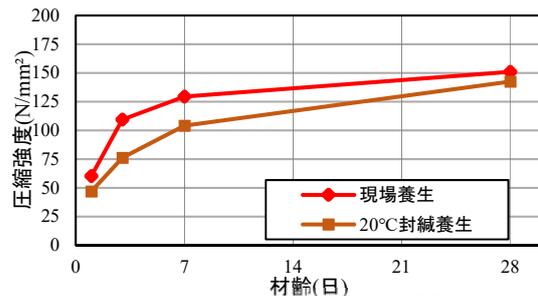


図-3 圧縮強度と材齢の関係

ることで、200N/mm²もの強度を発現するが、ここで用いた UHPFRC は、現場養生において材齢 28 日で 140N/mm² 以上の圧縮強度が発現することが確認された。標準養生に比べ、現場養生における圧縮強度が材齢初期から高い傾向を示しているが、これは、外気温 30℃を超える真夏日が続いたことによりセメントの水和反応が促進されたためと考えられる。

図-4 に割裂引張強度試験による材齢とひび割れ発生強度の関係を示す。28 日で 8N/mm²に達した。ひび割れ発生強度の高さは緻密なマトリクスを有する UHPFRC の特徴である。

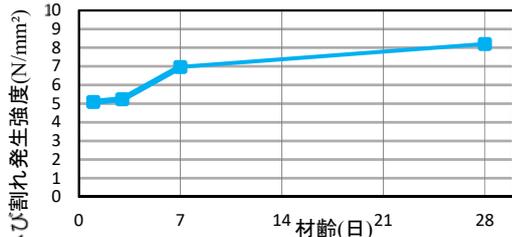


図-4 ひび割れ発生強度と材齢の関係

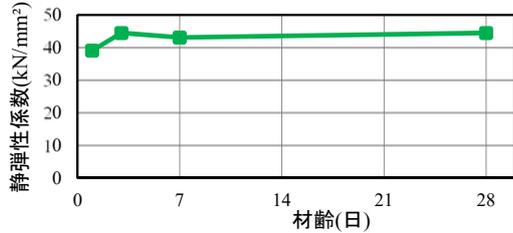


図-5 静弾性係数と材齢の関係 (現場コア抜き)



写真-4 施工実験状況



写真-5 施工後状況(シート養生後)

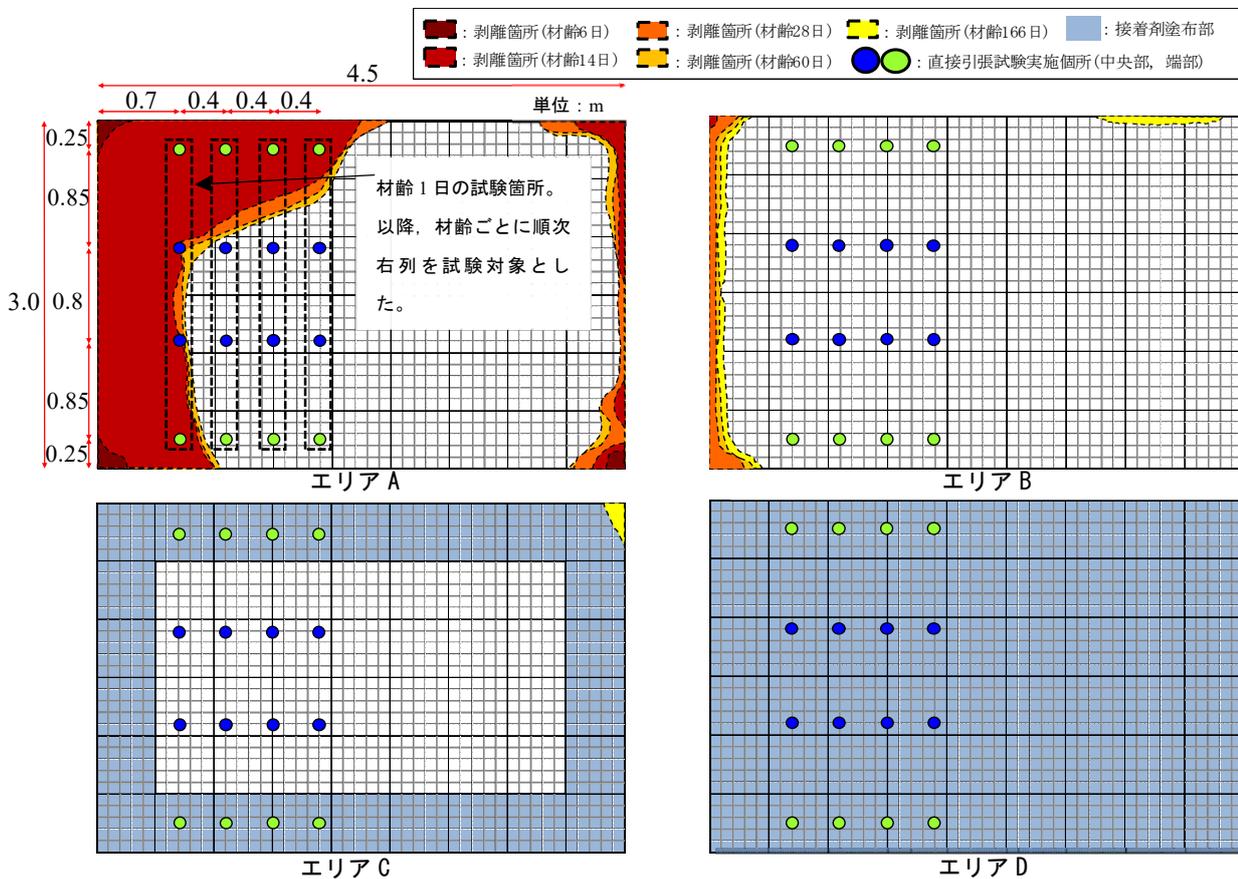


図-6 各エリアの打音検査結果

図-5 に静弾性係数と材齢の関係を示す。材齢3日までに44.5kN/mm²を記録した後は、ほぼ一定の計測結果となった。

3.2 UHPFRCの施工性

写真-4 に施工試験状況、写真-5 に増厚UHPFRCのシート養生後の状況を示す。

目視による施工性の検証の結果、コンクリートフィニッシャの一部改良により、平滑な表面仕上げとすることができ、良好な施工が行えることが確認された。また、

セルフレベリング性が低いUHPFRCを用いたことで、2%の下り勾配での仕上げ面の流動は観察されず、下り勾配方向へのUHPFRCの薄層施工が可能であることが確認できた。

3.3 UHPFRCの付着性状

(1) 打音検査結果

各エリアの打音検査結果を図-6にそれぞれ示す。エリアAでは縦断方向端部の全域に浮きが確認され、経時的にその範囲は大きくなり、場所によっては数メートル

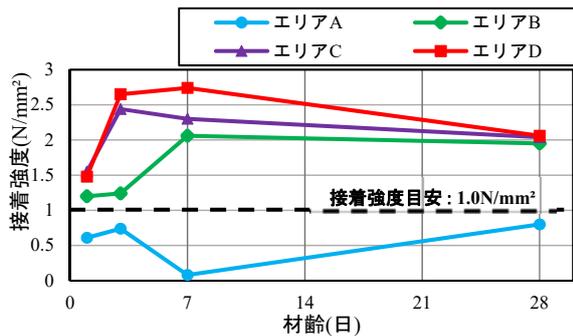


図-7 直接引張強度試験結果 (端部)

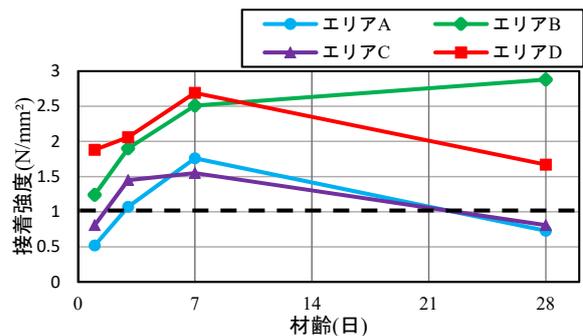


図-8 直接引張強度試験結果 (中央部)

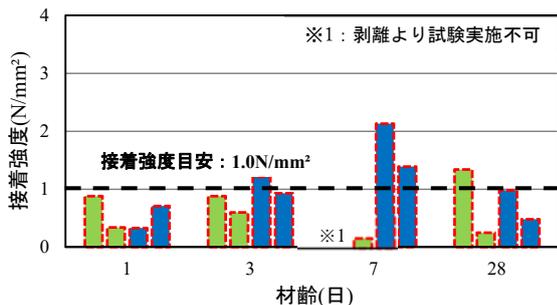


図-9 直接引張強度試験結果 (エリア A)

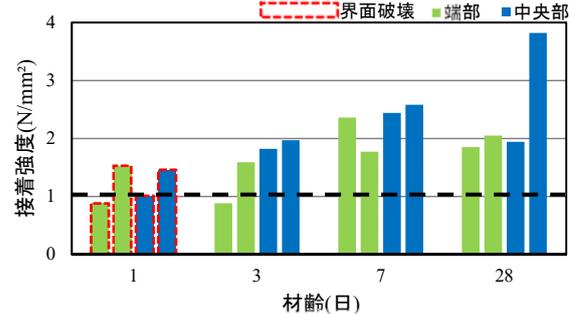


図-10 直接引張強度試験結果 (エリア B)

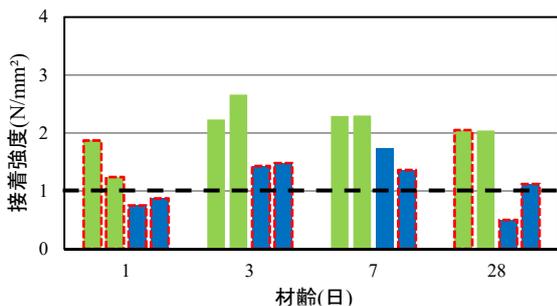


図-11 直接引張強度試験結果 (エリア C)

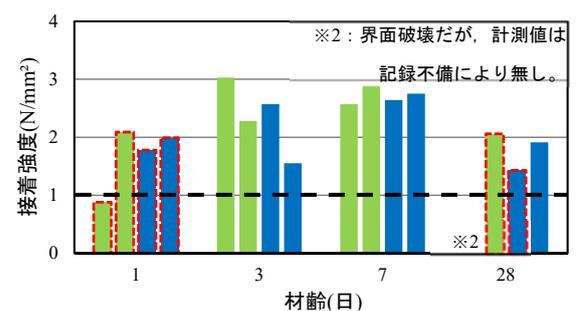


図-12 直接引張強度試験結果 (エリア D)

の範囲にまで広がった。これは、UHPFRC と模擬 Co 床版の界面でドライアウトが生じ、一体性が確保されない環境下で UHPFRC の自己収縮により、反りが生じたためと考えられる。一方で、エリア B, C, D では大きな浮きは確認されなかった。ただし、エリア B にはエリア A 側の打ち継ぎ部に浮きが確認された。これはエリア A の浮きに誘発されたものと考えられる。

また、エリア C の中央部はエリア A の打継面処理と同じく乾燥状態としたが浮きは確認されなかった。これは、エリア A の浮きが端部から進行しているように、増厚部の経時的な反りが影響していると考えられ、上面増厚の反りの影響による浮きは端部が弱点となると考えられる。

以上から、打継面処理を施さない乾燥面 (エリア A) の場合は、比較的規模の大きな浮きが発生したため、打継面処理方法としては不適切であるといえる。一方で、湿潤処理、端部接着剤塗布処理、全面接着剤塗布処理は浮きに対する抵抗性を有していると考えられた。

(2) 直接引張試験結果

図-6 に直接引張試験の位置を示す。また、図-7、図-8 に各エリアの横断方向端部、横断方向中央部で行った直接引張試験結果を示す。同図には接着強度と材齢の関係を示し、各エリアの比較を行っている。なお、図中には接着強度の目安として 1.0N/mm^2 を点線で示した。

端部における接着強度はエリア A が極端に低く、いずれの材齢においても 1.0N/mm^2 より低かった。また、中央部においても、エリア A の接着強度は各材齢で低い傾向を示し、材齢 28 日においても目安を下回る接着強度となった。また、エリア C の中央部もエリア A の中央部と同様の傾向を示した。いずれも処理方法が乾燥面であったために、接着強度が低い傾向を示したと考えられる。一方、エリア B, エリア D では各材齢で目安とした接着強度より高い接着強度が確認された。

図-9~図-12 に各エリアの直接引張試験結果の全ケースの強度ならびに破壊モードをそれぞれ示す。直接引張試験での破壊モードは Co 床版母材もしくは UHPFRC で破壊が生じる「部材破壊」と UHPFRC と Co 床版母材

の打継面で破壊が生じる「界面破壊」に分類した。写真-6, 7に界面破壊と部材破壊の1例を示す。

図に示したように、界面破壊を生じたケースは部材破壊に比べて接着強度が小さい傾向がある。エリアAでは材齢1日から28日に至るまで、すべての試験で界面破壊となった。また、エリアCの中央部もエリアAと同様の傾向を示し、ほとんどの試験で界面破壊となった。

エリアBは、材齢1日では界面破壊となったが、材齢7日以降は全て部材破壊となった。エリアBでは打継面が湿潤面処理であることにより、材齢とともにCo床版とUFCとの一体性が良好になったと考えられる。

また、接着剤塗布により打継面処理を行ったエリアCの端部、エリアDの端部および中央部は材齢1日では全ケースで界面破壊となったが、材齢3日以降は部材破壊が多く確認された。一方で、エリアCの端部、エリアDの端部および中央部は材齢3, 7日の試験では全て部材破壊を示したが、材齢28日では界面破壊の試験ケースが確認された。接着強度においても材齢7日以降28日までに低下傾向が見られる。この原因については十分に明らかでなく、今後検討を行う予定である。

以上の結果により、本検討の範囲では打継面処理方法として湿潤面処理がCo床版とUHPFRCの一体性に対し、最も良好な付着性状を示すことが確認された。接着剤全面塗布処理も湿潤面処理に次ぐ良好な打継面処理方法であると評価された。剛性が大きく異なる模擬Co床版とUHPFRCの打継においても、適切な打継面処理を行うことにより十分な一体性が得られると考えられる。

4. まとめ

実大規模の施工実験を行い、上面増厚工法への現場打ちUHPFRCの適用性を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) フロー値が130~180mmのUHPFRCは、勾配2%の斜面への施工に対しても静的流動は生じず、下り勾配方向へ施工が可能であった。
- (2) 一部改良したコンクリートフィニッシャーにより、UHPFRCを平滑に施工することができた。
- (3) Co床版とUFCとの一体性を打音検査および直接引



写真-6 直接引張試験状況(界面破壊)



写真-7 直接引張試験状況(部材破壊)

張試験により確認した結果、本施工実験の条件下では打継面処理方法として「湿潤面」が最も適していると考えられた。また、「全面接着剤塗布面」も適用可能と考えられた。

参考文献

- 1)長谷俊彦, 和田圭仙, 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, pp245-253, 2012.
- 2)進化を遂げる既設床版対策, 日経コンストラクション, 第613号, pp34-39, 2015.
- 3)T. Bastien-Masse, E. Bruhwiler :Ultra high performance fiber reinforced concrete for strengthening and protecting bridge deck slabs, Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Life Extension- Chen,Frangopol & Ruan (Eds), pp.2176-2182, 2014.
- 4)土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー第113号, 2004.
- 5)東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社: NEXCO 試験法 第4編 構造関係試験方法, pp66-69, 2013.
- 6)東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領, 2013.