

超高強度繊維補強コンクリートを用いた ホワイトトッピングにおける界面付着改善効果

小幡浩之¹・西澤辰男²・佐々木巖³・國府勝郎⁴

¹正会員 工修 太平洋セメント株式会社 建材カンパニー（〒104-8518 東京都中央区明石町 8-1 聖路加タワー）

²正会員 工博 国立石川工業高等専門学校教授 環境都市工学科（〒929-0932 石川県河北郡津幡町北中條）

³正会員 工修 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）

⁴フェロー会員 工博 首都大学東京（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）

超高強度繊維補強コンクリート製の薄型 UFC パネルを用いた超薄層ホワイトトッピングにおいては UFC パネルとグラウトの界面における付着が重要である。そこで界面付着を改善する方法について、室内における要素試験ならびに実物大の走行試験によって検討した。界面処理の基本仕様を決定するために、室内における付着試験ならびに 2 面せん断試験を実施した。その結果に基づき設定した UFC パネルの凹凸やプライマなどの付着面仕様やパネル寸法が耐久性に与える影響について検討するために、実大の舗装走行試験を行った。その結果、界面に骨材テクスチャを与え、プライマ処理することによって、界面付着が改善されることを確認した。また、強度発現性の異なるグラウトを用い、早期交通開放性についても検討を行った。

Key Words : ultra high strength fiber reinforced concrete , precasted panel , whitetopping , bond strength test , shear strength test , full-scale pavement test , grout

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(Ultra high strength Fiber reinforced Concrete 以下、UFC)の設計・指針(案)¹⁾が刊行され、実構造物への適用が期待されている。UFCは非常に緻密なマトリックスからなり、短繊維を含む材料であるため、従来のコンクリートに比較して優れた力学特性、耐久性を有する。例えば²⁾、曲げ特性は従来のコンクリートよりも5~10倍程度の曲げ応力を示し、かつ、ピーク応力以降の優れた変形性能を有することが報告されている。このような力学特性を有するUFCを舗装材料に適用すると、従来よりも高耐久で薄型のコンクリート舗装が可能になると考えられる。

一方、わが国の道路舗装のほとんどを占めるアスファルトは、高温時に荷重によって流動する性質があり、特に重交通の場合はわだち掘れが生じやすい。このようなアスファルト舗装の損傷は表層に限られる場合が多く、アスファルト舗装の表面にコンクリートをオーバーレイして補修するホワイトトッピング工法が開発³⁾されている。しかしながら、従来のホワイトトッピング工法では、コンクリートの曲げ強度が小さいために薄層化に限界があること、コンクリートの養生期間のために交通開放が

遅れることなどの課題が残されている。

本研究では、このようなホワイトトッピング工法における問題の解決のために、コンクリート材料としてUFCを適用することとし、版厚の超薄型化、プレキャスト化による急速施工性を付加した超薄層ホワイトトッピング(High Strength Concrete-Whitetopping: 以下、HSC-WT)の開発を進めてきた。

HSC-WTは図-1に示すようにUFCパネル($t=30\text{mm}$)と接着層(以下、グラウト $t=20\text{mm}$)から構成され、UFCパネルを敷設した後にグラウトを注入し、既設舗装と一体化させることを想定している。

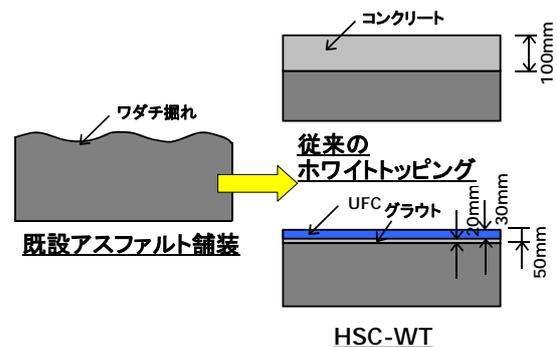


図-1 UFCパネルを用いたホワイトトッピング

数値解析による力学的検討^{4,5)}によって、本工法ではグラウトによるUFCパネルの界面接着技術の開発が重要であることが明らかとなった。そこで、本研究ではHSC-WTにおける界面処理の基本仕様を確立するために、既往の研究^{6,7)}に追加してUFCパネルとグラウトの接着性に関する要素試験を行い、付着強度が期待できる方法のいくつかを実大舗装走行試験に適用し、その効果の確認を行った。本論文は、これらの結果から、主にHSC-WTの挙動に及ぼす界面接着改善効果を検討したものである。

2. UFCパネルの接着層の仕様に関する検討

UFCパネルとグラウトの界面接着強度を上げるために、パネル表面の凹凸形状とプライマによる表面処理の効果を、室内の要素試験により検討した。

(1) 試験概要

a) 使用材料

UFCは、水 180kg/m^3 、UFCプレミックス 2254kg/m^3 (原料：高ビーライト系セメント、シリカヒューム、珪石微粉末等)および鋼繊維 $2\text{vol}\%$ をパン型ミキサ(容量 100L)で練混ぜ、JIS R 5201によるフロー値(0打)が $260 \pm 10\text{mm}$ となるように高性能減水剤で流動性の調整を行なった。養生方法として、打設後20の環境下で24時間養生し、脱型した後、48時間90の蒸気養生を行なった。

グラウトは、強度レベルの異なる2つの速硬型グラウト(アウイン系セメント)およびセメントグラウト(普通セメント)を使用した。ペール缶にプレミックスと所定量の水を加えハンドミキサによって練混ぜを行なった。JSCE-F-531によるJ14ロートのフロー値は $7.4 \sim 8.1$ 秒であった。また、各グラウト材のJSCE-G-505による圧縮強度は20の環境下において図-2に示すような結果となった。この図より、7日間で付着強度は安定すると考えられる。このことから、付着およびせん断試験は、打設してから20の環境で7日間の養生を行ない試験に供した。

プライマは、固形分濃度50%のSBRエマルジョンを使用し、はけ塗りによってUFC供試体の表面に塗布した。SBRの塗布量は、凹凸がある場合には 150g/m^2 、平滑な場合には 300g/m^2 とした。

b) 供試体

UFCパネルは付着強度とせん断強度の改善を図るため裏面に凹凸を設けた。既報⁷⁾を参考に凸成形タイプ($d=19\text{mm}$, $h=5\text{mm}$)と骨材散布タイプ(単粒度碎石1310を 7kg/m^2 を散布)の2種類を用いた(図-3)。UFCの養生は、20の湿潤養生を24時間行い脱型し、90の蒸気養生を48時間行った。

付着試験に供する供試体は、上述した所定の養生を行った $400 \times 400 \times 50\text{mm}$ のUFC基板に厚さ 20mm のグラ

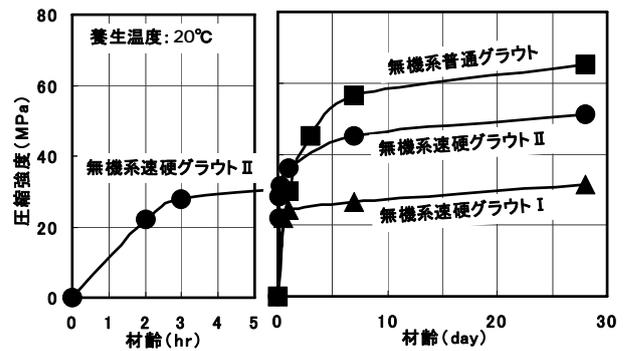


図-2 グラウト材の強度発現性(養生条件 20)

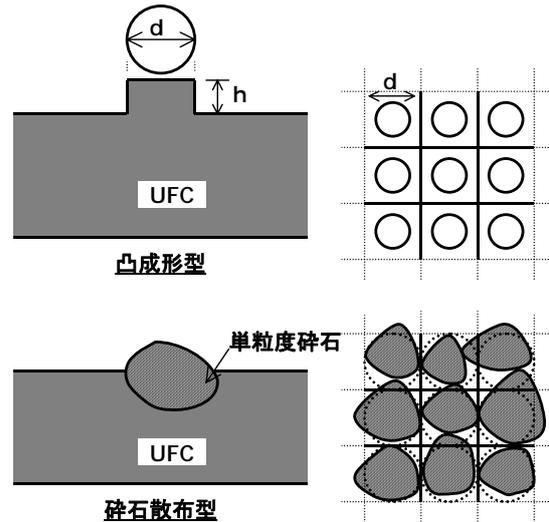


図-3 UFC基板に設けた凹凸

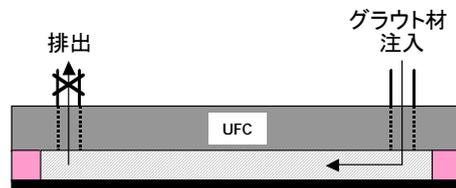


図-4 逆打ちによるグラウト材の打設

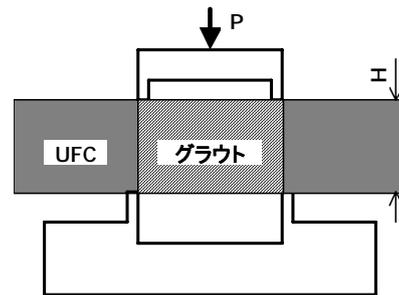


図-5 2面せん断試験

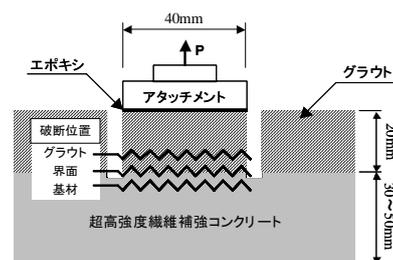


図-6 付着試験

ウト材を打設したものである。グラウトの打設方法は、実施工を模擬して UFC 基板に 32mm の注入孔を設け、グラウトポンプを用いてグラウトを逆打ちした(図-4)。

2面せん断試験に供する供試体は、所定の養生を行った2個の UFC 供試体(100×100×100mm)を間隔が100mmとなるように型枠にセットし、その間にグラウトを打設した(図-6)。グラウトの打込みから20の温度条件下で7日間の気中養生を行った後に試験に供した。

c) 試験方法

付着試験は、供試体に接着させた鋼製アタッチメントを介して、建研式接着試験機(容量30kN)によって、鉛直方向に引張载荷した時の最大引張荷重を求め、これを接着面積で除して付着強度とした。試験個数は9箇所/水準とし、鋼製アタッチメントを図-5に示すように配置した。2面せん断試験は、鋼繊維補強コンクリートのせん断試験方法(JSCE-G 553-1999)に準じて図-6に示すように行った。

試験水準は、凹凸の仕様、プライマの有無およびグラウト材の種類の組合せによって設定した。

(2) 試験結果

凹凸パターン、プライマ処理の有無およびグラウト材の組合せを変化させた、全12水準の付着・せん断試験結果を図-7に示す。試験時のグラウト材の圧縮強度は、速硬グラウトで28.6 N/mm²、速硬グラウトで57.2 N/mm²および普通グラウトで63.3 N/mm²であった。本研究では、既往の研究⁸⁾で示されている解析結果を参考に、付着・せん断強度の管理目標値を1N/mm²以上とした。

a) プライマの影響

図-7より、いずれの水準でもプライマを用いることで付着・せん断強度が大きくなる傾向が認められた。プライマの効果は付着強度に与える影響が大きいが、特に図-7より、凹凸なし(平滑面)の試験水準への効果が顕著に認められた。プライマの効果のメカニズムについて十分に解明されていないが、プライマの微視的な

空隙への浸透によるアンカー効果によることが大きいと考えられる。

b) 凹凸の影響

凸成形および骨材散布の凹凸を設けることで、付着・せん断強度のうち、せん断強度を向上させることができた。また、図-7より、プライマ処理と凹凸を組み合わせることで、付着・せん断強度を効果的に改善できることが明らかとなった。

c) グラウト材の影響

いずれのグラウト材を用いた場合でも、プライマおよび凹凸の組合せによって管理値の1N/mm²を満足する仕様を見出すことができた。

3. 実大舗装走行試験

これまでに室内の要素試験から、UFCパネルとグラウトの接着強度を上げるための方法が明らかとなった。そこで、これらの方法が実際の舗装の挙動下で有効に機能するかどうかを、実物大の走行試験によって検証した。

(1) 試験舗装

図-8に示すように舗装耐久性試験施設((独)土木研究所)の試験走行路に約48m²の試験舗装を施工し、実大舗装走行試験を行った。試験舗装はAからF工区まで6水準とし、先に行った付着・せん断試験結果から管理値を1N/mm²以上を満足する組合せを選び、付着面の仕様の影響を検討するとともに、強度レベルの異なるグラウト材を用いることで早期の交通開放性やUFCパネルの寸法の影響について検討した。具体的には、早期開放性について時間強度(速硬グラウト)と長期強度(速硬グラウト)が同程度(図-2)であることを利用して、速硬グラウトをA工区、速硬グラウトをB工区に用いること、付着面の仕様についてC工区に凸成形、D工区に骨材散布、F工区にプライマ無を用いること、パネルの寸法についてE工区に寸法の異なるUFCパネルを用い

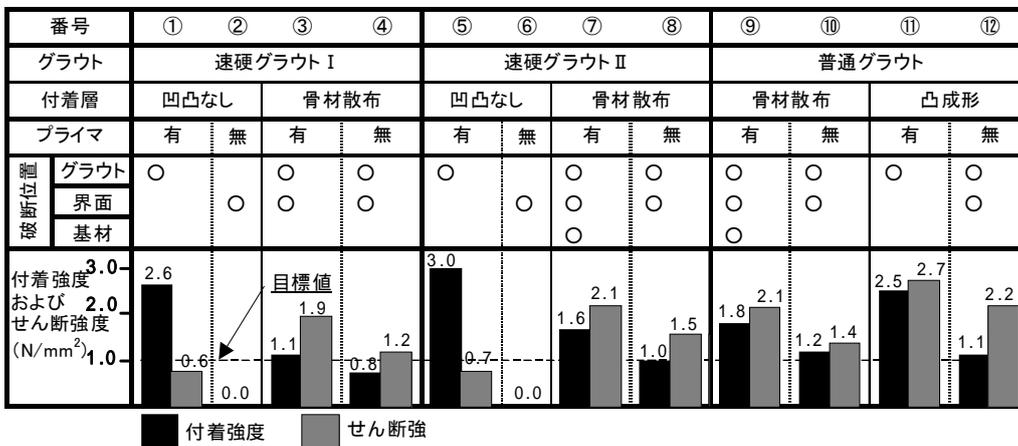


図-7 付着および2面せん断試験の結果

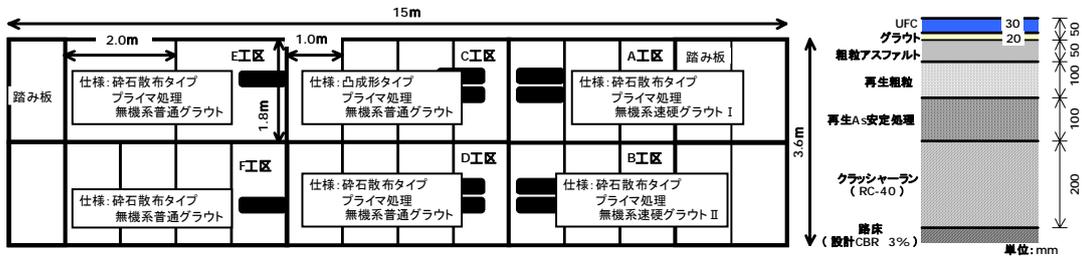


図 - 8 試験舗装の概要

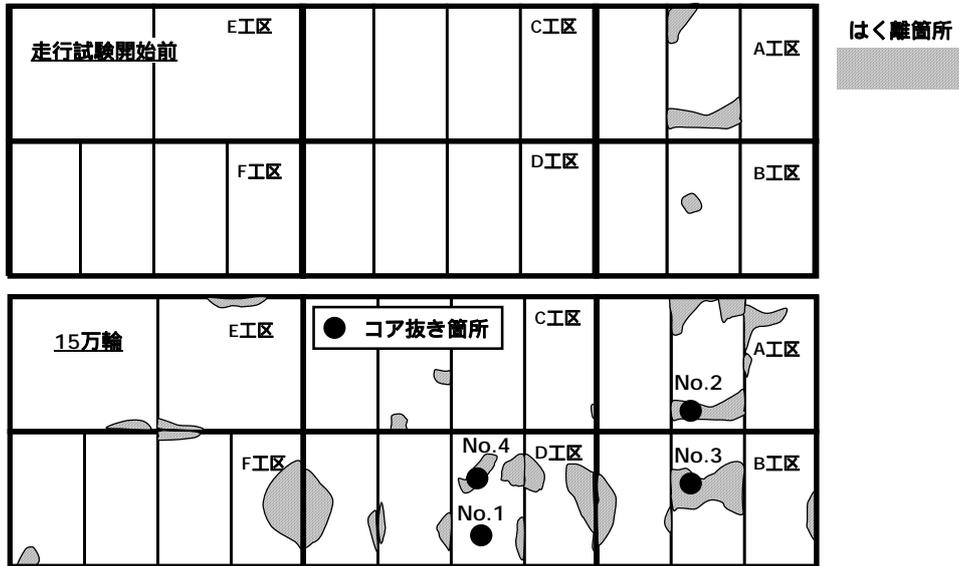


図 - 9 ひび割れ・はく離の観察結果

ることで検討した。

(2) 施工の手順

試験舗装の施工の手順は次の通りである。まず、アスファルト舗装の 50mm 切削を行った。ただし、既設の試験路の表層仕様が一樣ではなかったため、50mm 切削を模擬して表層 100mm 切削した後、50mm のアスファルトをオーバーレイした。次に、UFC パネルの敷設および不陸調整を行い、モルタルポンプでグラウト材の注入を行った。最後に、弾性タイプの材料で目地処理を行い、試験舗装を完成させた。

(3) 走行試験

走行試験は、試験台車(輪荷重 50kN)の速度を 10km/hr として累積輪数が 15 万輪に達するまで行った。試験舗装の施工が終了してから 2 週間後に試験を開始させた。走行試験は開始から終了までに 6 ヶ月間の期間を要した。

(4) 挙動調査の方法

走行試験の経過に伴う試験舗装の挙動を観察するために、累積輪数が 0~150000 輪時点において、目視および打音検査によって UFC パネルのひび割れ・はく離観察を行なった。また、走行試験終了してから舗装構造の損傷の状況を詳細に把握するため、試験舗装の各工区のコア(100mm、深さ 200mm)採取し概観観察を行うとともに、コア供試体の付着試験を行った。付着試験では、コア供試体のアスファルト層をカットし、UFC とグラウト

の試験を行った。試験方法は上述の方法と同様にコア供試体にダイヤモンドカッターで切込みを入れ、40×40mm の鋼製アタッチメントを接着させ、建研式引張試験機で行った。コア供試体 1 個について、各層 1 回の付着試験を行った。

(5) 調査結果

a) ひび割れ・はく離

走行試験開始および 15 万輪終了時のひび割れ・はく離の観察結果を図 - 9 に示す。打音検査によって UFC パネル下に空洞が存在すると判断された箇所をはく離箇所としハッチで図示した。

15 万輪の走行までに、UFC パネルのひび割れは認められなかったが、はく離は進展・拡大する傾向にあった。走行試験前のはく離箇所は、施工時にグラウトの充てんが不十分であったために生じたものであり(図 - 9 走行試験開始前)、この位置からはく離が拡大する傾向が認められた。また、パネル間の目地から新たにはく離が生じる傾向も認められ、目地の段差による影響が大きいと考えられた。

試験舗装内部の状況を詳細に観察するために、100mm、深さ 150mm 程度のコアを採取した。これらのコアのうち、代表的な箇所である、健全な箇所(No.1)、施工中のはく離箇所(No.2,3)、試験中にはく離が生じた箇所(No.4)の 4 地点の写真を図 - 10 に示す。こ



(a) 健全な箇所



(b) 施工中にはく離が生じた箇所



(c) グラウトの充てん不良箇所



(d) 走行試験中にはく離が生じた箇所

写真 - 1 ひび割れ・はく離の状況

これらのコア供試体の概観観察から、はく離層はUFCパネルとグラウト界面であること(No.2,3,4)、施工中にはく離箇所はグラウトが充てん後はく離した箇所、充てん不良の箇所があったこと(No.2,3)、また、施工直後に打音検査で検知されない小さなグラウト充てん不良箇所から、走行に伴いはく離が進展する箇所もあったこと(No.4)などが明らかとなった。施工中にはく離の生じたうちNo.2は、曲げ剛性の小さいUFCパネル上での施工作業による肌分かれによって生じた推定され、速硬グラウトを使用する場合には施工時に配慮すること、グラウト材の充てんを確実にすることで、更にHSC-WTの耐久性を向上できると考えられた。

b) 早期の交通開放

早期交通開放性の可能性について、時間強度と長期強度が同程度のグラウト材(A工区 速硬グラウト, B工区 速硬グラウト)を用いて検討した。現場養生を行った材齢28日のグラウト材の圧縮強度は、速硬グラウトで 30.2N/mm^2 、速硬グラウトで 59.8N/mm^2 であったことから、図-2に示した時間強度と長期強度の関係をフィールドで再現することに成功した。

A, B工区は施工時にグラウトの充てん不良箇所からはく離が拡大する傾向にあったが、はく離が他のパネルに進展することがなく、また、パネルのひび割れも認められなかった。この結果から、施工2~3時間後のB工区の仕様で一定の耐久性を有することが間接的に示唆された。

c) 付着面の仕様

UFCパネルの付着面の仕様が耐久性に与える影響を検

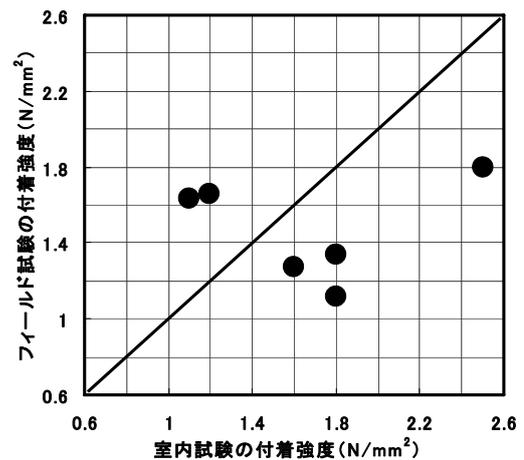


図 - 10 室内試験とフィールド試験の付着強度の関係

討するため、C工区に凸成形、D工区に骨材散布、F工区にプライマ無の仕様を適用した。C工区がD, F工区よりもはく離が少なくなる傾向にあるが、いずれの工区でもUFCパネルのひび割れは認められず、各工区の耐久性の差異は大きく異なる結果となった。各工区の仕様は、付着・せん断強度が 1N/mm^2 以上となる仕様を選定したものであり、この仕様内での差異は大きく現れなかったことによると考えられた。

d) パネル寸法の影響

UFCパネルの寸法の影響を検討するため、E工区のパネル面積を2倍にした。走行試験の結果、他工区よりもはく離の発生が少なく、UFCパネルのひび割れも認められなかった。この結果より、本研究で設定したパネル寸

法の範囲内においてパネル面積を大きくして目地を少なくすることが、耐久性を向上させる有効な手法となることが確認された。

e) 試験舗装の付着強度

室内試験で得られた付着強度(図-7)とコア供試体から得られたフィールド試験での付着強度の関係を図-10に示す。試験条件が異なるため直接の比較はできないが、フィールド試験各工区の付着強度は、付着・せん断強度の管理値 $1\text{N}/\text{mm}^2$ を満足しており、室内試験で確立した仕様をフィールド試験で十分に満足することを確認できた。

4. まとめ

HSC-WTの挙動において重要なUFCパネルとグラウトの界面接着面改善のための仕様検討、ならびにその舗装全体の挙動に及ぼす効果についての実大走行試験を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) プライマ処理することで付着強度を、凹凸を設けることでせん断強度を効果的に改善することができた。凹凸やプライマ処理など付着面仕様の組合せによって、付着・せん断強度の管理値 ($1\text{N}/\text{mm}^2$) を満足する仕様を見出すことができた。

(2) はく離の原因の一つにパネル間の段差やグラウトの充てん不良箇所があるので、パネルの敷設精度やグラウト施工を改善することでさらに耐久性を向上できる。

(3) 高強度の速硬性グラウトを用いることで、早期の交通開放が可能である。

(4) 付着・せん断強度の管理値 ($1\text{N}/\text{mm}^2$) 以上において、凹凸パターンやプライマの有無などの付着面仕様が耐久性に与える影響は小さい。

(5) UFCパネル寸法を大きくすることで、耐久性を向上させることができる。

(6) 室内試験で確立した付着面仕様をフィールド試験で

再現できるとともに、150000輪までの走行試験でUFCパネルのひび割れは認められず、HSC-WTの耐久性が確認された。

謝辞：本研究は平成18年度学術振興会科学研究費補助金(研究代表者：国立石川工業高等専門学校教授 西澤辰男)の助成を受けました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会編：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113，2004.9
- 2) 下山善秀，鶴澤正美：ダクトル(Ductal®)の特性と応用分野，太平洋セメント研究報告，第142号，pp55-62，2002
- 3) 野田悦郎：ホワイトトッピングについて，道路建設，No.576，1996
- 4) Tatsuo Nishizawa, Hiroyuki Obata, Iwao Sasaki, Katsuro Kokubu：Dynamic Behavior of Ultra-thin Whitetopping Structure with High Strength Concrete Under Traffic Load，International Conference on Best Practices for ULTRATHIN and THIN Whitetoppings，2005.5
- 5) 竹津ひとみ，西澤辰男，小幡浩之，佐々木 徹，國府勝郎：高強度コンクリートを用いたホワイトトッピング舗装の動的挙動，舗装工学論文集，第11巻，pp123-130，2006.12
- 6) 小幡浩之，西澤辰男，佐々木 徹，國府勝郎：UFRC-コンクリート複合部材の界面におけるせん断特性，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集，5-109，pp.217-218，2005.9
- 7) 小幡浩之，西澤辰男，佐々木 徹，國府勝郎：超高強度繊維補強コンクリートと無機系グラウト材の付着特性，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，5-117，pp.233-234，2006.9
- 8) 西澤辰男，小幡浩之，佐々木 徹，國府勝郎：高強度繊維補強コンクリートを用いた超薄層ホワイトトッピングの粘弾性的挙動，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集，5-107，pp.213-214，2005.9

EFFECT OF IMPROVED INTERFACIAL BOND ON WHITE TOPPING USING ULTRA HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE

Hiroyuki OBATA, Tatsuo NISHIZAWA, Iwao SASAKI, and Katsuro KOKUBU

This study looks into methods to improve bonding strength between UFC panel and grout that is very important to ensure good performance of Ultra-thin White Topping with High Strength Concrete(HSC-WT). For that, several methods with combinations of forming macro textures on the panel surface and special surface treatment with chemical ingredients on the interface were examined by shear tests and direct tension tests in a laboratory. After the examinations, some of candidate methods were selected and applied to full scale pavement loading tests and their effects on the pavement behavior were investigated. Positive effects of the methods were confirmed from the test. Also, possibility of early opening to traffic of the pavement was examined by increasing early age of strength of grout.