報告　常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの打継部の透水性に関する研究

石関　嘉一*1・松田　武*2・山本　修一*3・

要旨　近年，超高強度かつ高じん性な常温硬化型 UFC は，構造部材の断面縮小，使用材料の減少，長期耐久性の向上など多くの合理化を図る次世代の建設材料として期待されている。これらの性能を活用し，水圧が作用する地下構造物の止水・バリア材料として検討されている。しかし，地下変動によるひび割れや打継部の透水性の検討はほとんどない。地下構造物を模擬した常温硬化型 UFC の微細ひび割れおよび打継部の透水係数を計測した結果，ひび割れ部や打継部において，著しく高いバリア性能を有していることが確認できた。

キーワード：常温硬化型，UFC，打継，乾燥収縮，ひび割れ，透水係数

1. はじめに

近年，超高強度かつ高じん性な超高強度繊維補強コンクリート（Ultra high strength Fiber reinforced Concrete：以下 UFC と表記）は，優れた材料特性を生かして構造部材に適用することにより，構造部材の断面縮小，使用材料の減少，長期耐久性の向上など多くの合理化が図られている次世代の建設材料として期待されている[1)]。

UFC は，超高強度モルタルと高強度鋼繊維で構成[2)]されており，150N/mm^2 以上の圧縮強度と 5N/mm^2 以上の引張強度を持つ材料と定義されている。2004 年には，土木学会より超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）[2)]（以下「指針」と表記）が発行されており，今後，これらの材料を使用した構造物は増加すると予想される。しかし，既存の UFC は給熱養生が必要なため，工場生産が基本であり，設計や施工に大きな制限を生じてしまう。また，給熱養生に必要な設備の建設コストや給熱養生のエネルギーコスト，運搬コスト等により通常のコンクリート構造物と比較してコストの増加となる。そこで，著者らは，設計や施工に影響が少なく，現場での施工が可能な常温で硬化する UFC 材料を開発した[3)]。常温硬化型 UFC は常温で高強度を発現するプレミックス材[4)]を使用するため，給熱養生が不要となり製造場所を選ばない。また，給熱養生のコストや運搬コストが削減されたことにより，大幅なコスト縮減に寄与している。さらに，常温硬化型の UFC はレディーミクストコンクリートと同様に，施工場所の近隣の生コンプラントで製造[5)]できるため，施工可能な地域が増大し，既存の UFC と比較して施工性が飛躍的に向上することが期待できる。UFC はマトリックスが緻密な構造のため，中性化，凍結融解抵抗性，塩分浸透性抵抗性等の耐久性が，普通コンクリートや高強度コンクリートと比較して著しく向上するため，設計耐用年数を 100 年に設定することが可能となった。これら高耐久性能を活用し，高水圧環境に建設される地下構造物の止水・バリア材料として常温硬化型 UFC の適用検討を行った。しかし，地下構造物は地殻変動や地震により構造物が変形しひび割れが発生することや，現場打設した場合，高水圧環境で目地部の付着部から漏水することが考えられる。

本報告は，常温硬化型の UFC の物質透過性を検証する目的で，ひび割れを模擬した試験体と打継部における常温硬化型の UFC の透水性能を評価した。なお，施工性を評価する目的で，底部平版打設及び壁部目地打設の状態について検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料の諸物性

(1) 構成材料

常温硬化型の UFC のモルタル部分は，セメント等の反応性微粉末と微粉細骨材を混合したプレミックス粉体，水，細骨材，および特殊高性能減水剤（SP）で構成されている。また，空気量は消泡剤を用いて，3.5%以下に調整した。配合を**表－1** に示す。なお，鋼繊維には一般建設用鋼繊維とは異なる高強度鋼繊維を使用した。使用した鋼繊維を**写真－1** に示す。高強度鋼繊維は，延伸製法

表－1　配合

W/B (%)	単位量（kg/m^3）				補強繊維 (kg)
	水	ﾌﾟﾚﾐｯｸｽ	細骨材	減水剤	
15.5	230	1830	330	32	157

*1　（株）大林組 技術研究所 生産技術研究部　主任研究員　博士（工）(正会員)
*2　（株）大林組 LLW プロジェクト　副部長
*3　（株）大林組 土木本部　生産技術本部 設計第 2 部　部長　博士（工）

写真－1　高強度鋼繊維

写真－2　モルタルフロー

により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。表面は真ちゅうでメッキされている。一般的な建設用鋼繊維の引張強度 1,000N/mm^2 に対して，引張強度は 2,000N /㎜^{2} 以上で，形状はすべて直線である。

(2) フレッシュ性状および硬化物性

モルタルのフレッシュ性状は，鋼繊維 2%混入後モルタルフロー値が 260±30 ㎜で，鋼繊維 2%混入後スランプフロー値が 800±100 ㎜の範囲で流動性が良好であり，間隙が 30 ㎜以下の偏狭部においても閉塞することなく充填が可能である。モルタルフローを**写真－2** に示す。

常温硬化型の UFC は高じん性高強度であり，圧縮強度 180N/mm^2 以上，引張強度 8.8N/mm^2 以上の材料強度を有している。また，収縮ひずみは材齢 190 日において 660μ 程度である。

2.2 試験項目と試験方法

(1) ひずみ履歴を受けた常温硬化型 UFC の透水係数試験

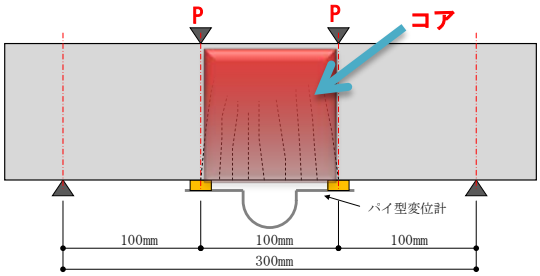
地殻変動等により発生が予想される残留ひずみを強制的に常温硬化型 UFC の試験体に発生させ，残留ひずみ部の透水試験を実施した。試験は**図－1** に示す 100×100×400mm 供試体中央にアムスラー式圧縮試験機を使用し，スパン 300mm の 3 等分点曲げにより曲げひび割れを発生させた。ひび割れ導入方法は，残留ひずみ 200μ 及び残留ひび割れ幅 0.1mm とした。ひび割れ導入後，**図－1** に示すようにひび割れを含む中央位置からコアを採取し，透水試験を実施した。なお，残留ひび割れ 0.1mm，残留ひずみ 200μ の 2 ケースとし，ひび割れの確認方法は下記に示す方法とした。

① 残留ひずみ 200μ

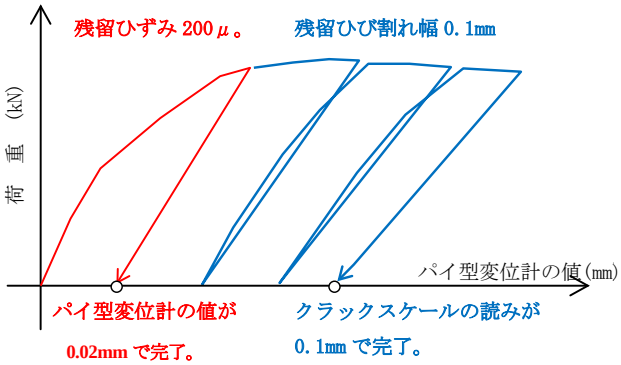
残留ひずみ 200μ の場合，標点間 100mm 内に発生したひび割れ幅の総和が 0.02mm とし，供試体中央下側にパイ型変位計を設置し，**図－2** に示す荷重と変位量を確認しながら，データロガーにより記録した。除荷後，残留ひずみが 200μ に満たない場合は再度曲げ載荷を行った。

② 残留ひび割れ幅 0.1mm

残留ひび割れ幅 0.1mm の場合，曲げ区間に発生したひび割れ 1 本の幅が 0.1mm とし，曲げ載荷後，供試体下側の曲げ区間にクラックスケールを当てて目視観察した。ひび割れは複数本発生することが予想さ

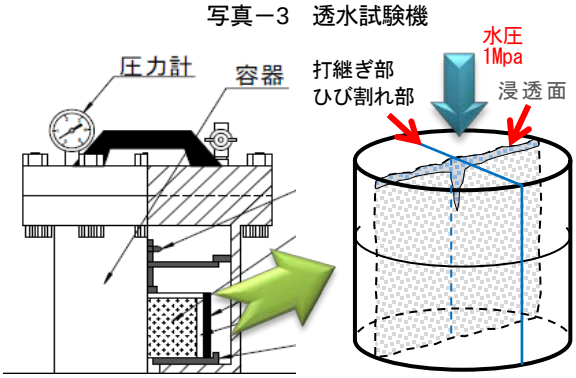


図－1　試験方法及びコア採取位置



図－2　ひずみ導入時の荷重とひずみの関係

写真－3　透水試験機



図－3　透水試験方法概要図

れる代表的なひび割れを決めて梁下側のひび割れ幅 3 点測定し平均値を求めた。除荷後，残留ひび割れ幅が 0.1mm に満たない場合は再度曲げ載荷を行った。

(2) 透水試験方法

透水試験は，インプット法 [6]を参考に実施した。コン

クリート試料の乾燥は，室温 20℃，湿度 60%の室内に 7 日間静置した。

透水試験(インプット法)は，コンクリート試料上面からのみ水圧が加わるよう塩ビ管及びエポキシ樹脂を用いて側面を完全に塞ぎ，鋼製冶具を試料底面に接着した。**写真－3** の試験器に設置後，水槽を水で満たし，水圧 1MPa で 48 時間加圧した。

透水評価に用いる水の浸透深さは，コンクリート試料を JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」の手法に従って打継ぎ部若しくはひび割れ部に直交するように割裂し，破断面における水の浸透状況を速やかに写し取り，写真で記録した。平均浸透深さは，画像処理ソフトで水の浸透面積を測定し，これを直径で除した値とした。また，透水係数 k は**式(1) (2)**より算出した。

$$\beta^2 = \alpha \frac{D_m^{\ 2}}{4t\xi^2} \qquad \text{式(1)}$$

β^2 ：拡散係数(mm²/sec)　，

D_m：平均浸透深さ（mm）

t　：水圧を加えた時間（sec）

α　：補正係数　($\alpha=t^{3/7}$，加圧時間 48 時間→ α=175.7)

ξ　：水圧に関する係数（水圧 1MPa→ξ=1.018）

$$k = \beta^2 \frac{\rho g}{E} \qquad \text{式(2)}$$

k：透水係数(m/sec)

E：ヤング係数(N/ mm²)

ρ：水の密度(1.0×10^3 kg/m³)

g：重力加速度（9.8m/sec²）

(3) 底部現場打設における施工確認試験

常温硬化型 UFC を用いた地下構造物の底部打設を模擬して状況を確認した。確認方法として，底版コンクリート上部に直接常温硬化型 UFC を打設し，施工性や変状の有無を目視にて確認した。常温硬化型 UFC の形状は**図－4** に示すように縦，横 6m，厚さ 50mm とした。

材齢 28 日後常温硬化型 UFC の表面を観察し，変状の有無を確認する。なお，養生は乾燥や急激な温度変化を与えないため，表面をシートおよび保温等で養生を行った。

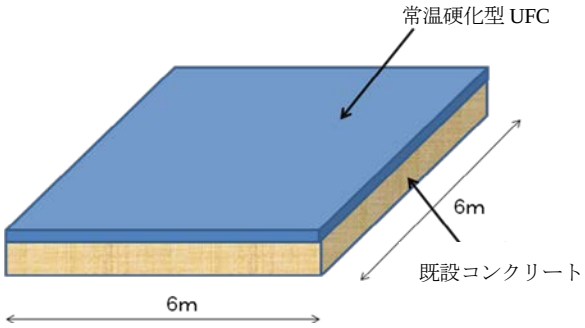
その後，目視にて変状が確認された場合，変状部を直径としたφ100mm のコアを採取し，透水試験を実施した。なお，透水試験はひずみ履歴を受けた常温硬化型 UFC の透水試験と同一とした。

(4) 小型試験体による目地の透水試験

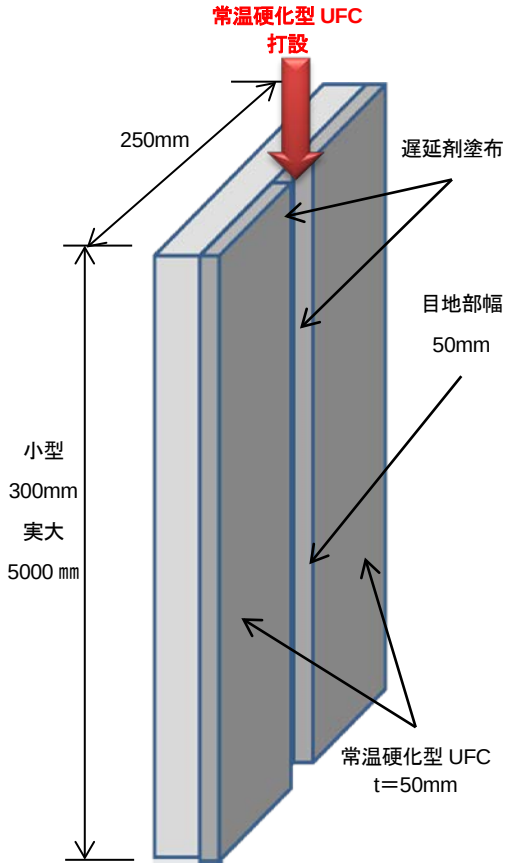
縦壁の常温硬化型 UFC を打ち継ぐ目地の透水性を確認する目的で，小型の常温硬化型 UFC の目地を作製し，目地部に常温硬化型 UFC を打設する。目地部は事前に打設した常温硬化型 UFC と同一材料とした。

目地部の作製はコンクリートパネル上に厚さ 50mm の常温硬化型 UFC を打設する。また，目地を作製するため中央に幅 50mm のスリットを作製した。なお，硬化した常温硬化型 UFC と目地部の付着を向上させるため，スリット部に遅延剤を塗布し，型枠脱型後洗い出しを行い，常温硬化型 UFC の骨材および鋼繊維を目地表面に露出させた。常温硬化型 UFC 目地部打設形状を**図－5** に示す。

縦壁を模擬する目的で打設した常温硬化型 UFC を，鉛直方向に立ち上げ目地部に型枠を設置し，常温硬化型 UFC を打設する。打設は目地上部から流し込み，目地側面を這わせながら落下させた。



図－4　現場打設形状



図－5　目地部打設形状

目地部打設後材齢 28 日において，目地部の透水試験を実施した。なお，透水試験はインプット法によって実施した。コア試験体採取位置概念図を**図－6** に示す。

(5) 実大試験体による目地の透水試験

常温硬化型 UFC を用いた縦壁の目地の施工性を確認する目的で，実大の目地を模擬した試験体を作製し，試験体の目地を打設する。

目地部の打設は「(4)小型試験体による目地の透水係数試験」と同様に基盤となる常温硬化型 UFC の縦壁を作製する。縦壁を模擬する目的で打設した常温硬化型 UFC を，鉛直方向に立ち上げ目地部に型枠を設置し，常温硬化型 UFC を打設する。なお，縦壁は H 鋼の架台に設置し，転倒を防止する。縦壁の鉛直方向の寸法は**図－5** に示すように高さを 5000mm とする。

目地部打設後材齢 28 日において，目地部の透水試験を実施する。なお，透水試験は「(4)小型試験体による目地の透水試験」と同様とする。

3. 試験結果

3.1 ひび割れにおける透水試験結果

(1) ひずみ履歴を受けた常温硬化型 UFC の透水試験

図－7 および 8 に残留ひずみ 200μおよびひび割れ幅 1mm におけるひずみと荷重の関係を示す。どちらの残留ひび割れにおいても目標のひび割れが発生していることを確認した。

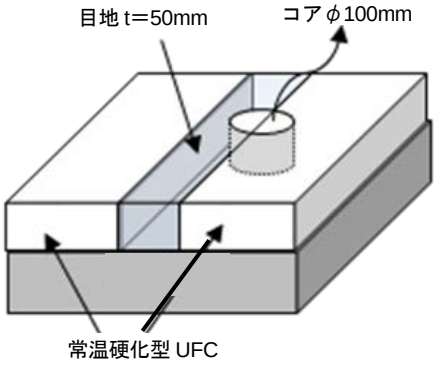
表－2 にひび割れ幅別透水試験結果を示す。また，**写真－4** に割裂試験体断面の透水状況を示す。初期透水係数は，「残留ひずみ 200μ」が 2.5×10^{-13} m/sec，「残留ひび割れ幅 0.1mm」が 7.5×10^{-11} m/sec であった。また，浸透先端までの距離は「残留ひずみ 200μ」が 58.2 ㎜，「残留ひび割れ幅 0.1mm」が試験体高さ下端まで到達した。

いずれの供試体も加圧面表層付近の浸透跡がないことから，コア採取を行った角柱供試体型枠側面付近の「常温硬化型 UFC」の水密性は高く，ひび割れ部から水が浸透し内部の微細クラックを通じて拡散したものと考えられる。

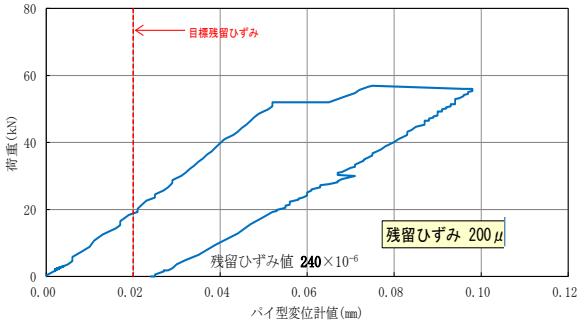
(2) 底部現場打設における施工性確認試験

写真－5 に示すように 6,000mm×6,000mm のコンクリート上部に常温硬化型 UFC を 50mm 打設した。練り混ぜは近郊の生コンプランを用いて実施し，アジテータ車を用いて運搬した。打設はホッパーを用いて実施した。常温硬化型 UFC は流動性が良好なため，底部打設において，施工上の問題点は認められなかった。

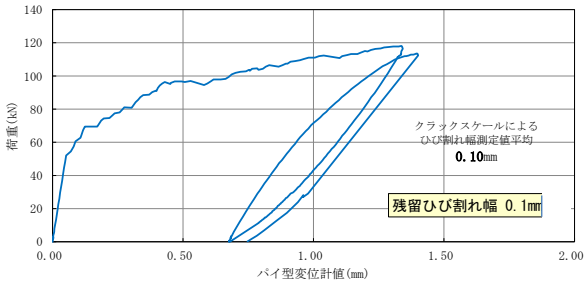
7 日間の養生後，常温硬化型 UFC 表面の変状を確認した。その結果，**図－9** に示す座標（A5B1, A5B2,A2B4,A5B5）の位置に 0.1mm～0.04mm 程度の軽微なひび割れの発生



図－6　コア採取位置概念図



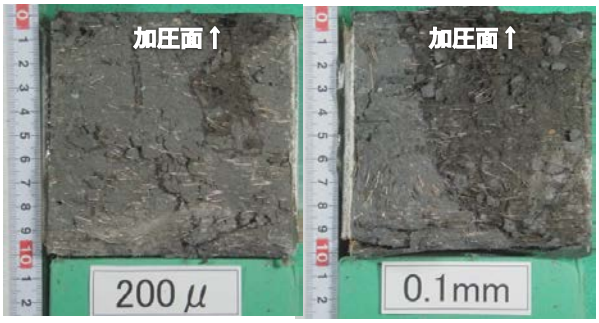
図－7　残留ひずみ200μにおけるひずみと荷重の関係



図－8　ひび割れ幅1mmにおけるひずみと荷重の関係

表－2　ひび割れ別透水試験結果

種　別	水　圧 加圧時間	透水係数 (m/sec)	浸透先端 までの距離 (mm)
残留ひずみ 200μ	1MPa 48 時間	2.5×10^{-13}	58.4
残留ひび割れ 幅 0.1mm		7.5×10^{-11}	試験体高さ 下端まで到達



写真－4　ひび割れ幅別試験体割裂断面透水状況

が確認された。原因として，今回の施工は屋外で行われ強風が吹いていたため，常温硬化型 UFC の表面に風が直接当たり，乾燥による初期のプラスチックひび割れが発生したと考える。通常屋外の施工の場合，打設中表面の風による乾燥対策を行っていないため，今回も同様に対策を行っていなかった。今後は，屋外で施工する場合，直接風を防止する対策を検討する必要がある。さらに，表面養生剤等の検討も行い，プラスチックひび割れの発生を低減する必要がある。

ひび割れ発生個所からコアを採取し，透水試験を実施した。水の浸透深さは，ひび割れ程度 0.1mm（A2B4）が 0～12.2mm で透水係数 9.4×10^{-15}m/sec，ひび割れ程度 0.06mm（A5B1, A5B2）が 0 mm で透水係数 7.4×10^{-19}m/sec，ひび割れ程度 0.04mm（A5B4）が 0 から 3.46mm で透水係数 3.9×10^{-15}m/sec，であった。コアを確認したところ，いずれの試験体もセメント水和物の水酸化カルシウムでひび割れ部が充填していたことから，未反応成分による自己治癒が行われたものと考える。W/C が 60%程度のコンクリートの透水係数 k は 1.0×10^{-9}m/sec 程度[7] であることを考慮すれば，ひび割れが発生した場合においても極めて低い透水性が担保されることを確認された。

水が浸透した試験体（A2B4）及び（A5B4）は，加圧面全域に亘って水の浸透は無く（**写真－6** 参照），常温硬化型 UFC 本体の水密性は，極めて低い透水性が担保されることを確認された。水は表面に存在すると思われるひび割れ部から浸透して，拡散したものと推測される。なお，水の浸透が確認できなかった試験体については，浸透深さを目視可能な最小値を 0.1mm として透水係数を算出すれば，7.4×10^{-19}m/sec ときわめて低い透水性と評価される。

3.2 目地部の透水試験結果

(1) 小型試験体による目地の透水試験

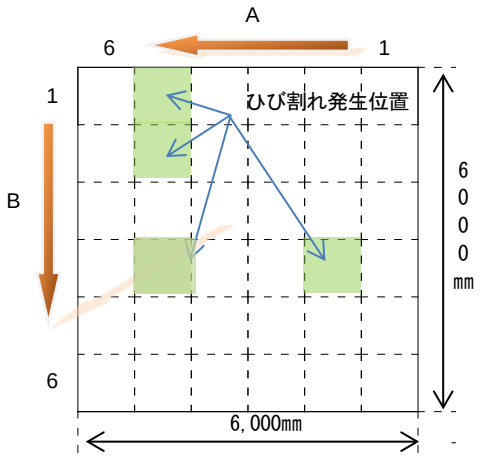
図－10 に試験体採取位置を示す。目地部に用いる常温硬化型 UFC について，物質透過性の確認を行ったところ，いずれも水の浸透跡は確認できなかった。

透水試験終了後，速やかに割裂破断面の観察を行い，目視による水の浸透状況を確認した。その結果，目地部の漏水はないものと判断した。**写真－7** に割裂試験体透水状況を示す。なお，水の浸透が確認できなかった試験体は「**3.1(2) 底部現場打設における施工性確認試験**」と同様に透水係数 7.4×10^{-19}m/sec と著しく低い値となった。

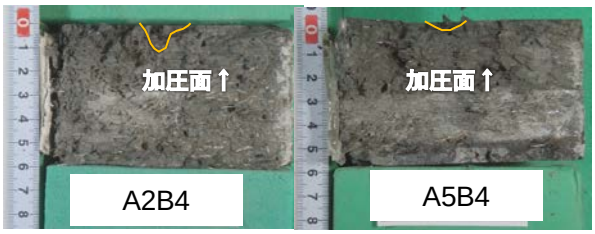
(2) 実大試験体による目地の透水試験

両端に常温硬化型 UFC を打設した目地部を模擬した試験体を作製し，**写真－8** に示すように足場を組み立て，試験体を設置した。目地部の充填性を確認する目的で，目地の型枠部にアクリルを設置し，充填性を確認した。

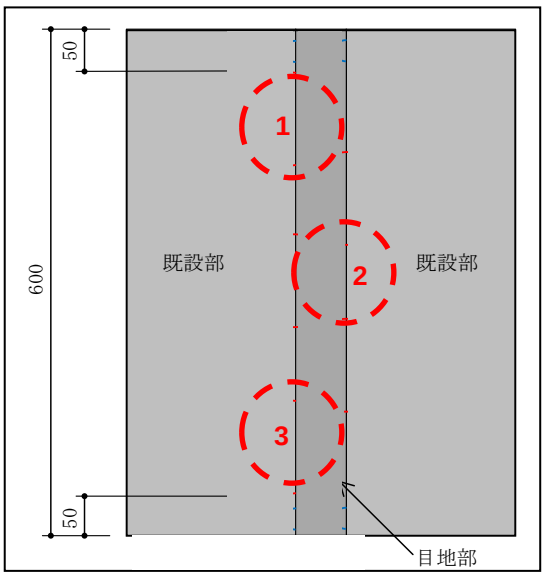
写真－5　施工状況



図－9　ひび割れ発生位置



写真－6　ひび割れ発生位置における透水状況



図－10　目地部コア採取位置

その結果，上部 5m の位置より壁面に沿うように打設したにもかかわらず，空隙もなく密実に充填していることが確認できた。

目地部に用いた常温硬化型 UFC の高さ方向の影響を確認するために**写真－9** に示す高さ方向「上部」「中部」「下部」の三か所から既設常温硬化型 UFC と目地部のコア試験体を採取し，透水試験を実施した。各試験位置における透水試験結果は，いずれの部位についても水の浸透は確認されなかった。

透水試験終了後，速やかに割裂を行い，破断面の観察を行った。その結果，目視による水の浸透はないものと判断できた。なお，水の浸透が確認できなかったため，「小型試験体による目地の透水試験」と同様に透水係数を算出した結果，透水係数は 7.4×10^{-19}m/sec となり，他の試験と同様に一般的なコンクリートの透水係数 K の 1.0×10^{-9}m/sec 程度と比較して極めて低い値となった。よって，常温硬化型 UFC は目地など後施工を実施する場合でも，打継部に適切な処理を施すことにより，付着性能が向上し高いバリア性能を有することが確認できた。

4. まとめ

（1）ひずみ履歴を受けた常温硬化型UFCの透水試験において，いずれの試験体も加圧面表層付近の浸透跡がないことから，コア採取を行った角柱供試体型枠側面付近の常温硬化型UFCの水密性は高いと考えられる。

（2）底部ひび割れ発生個所からコアを採取し，透水試験を実施した結果では，加圧面全域に亘る水の浸透は無く，常温硬化型 UFC 本体の水密性は非常に高いことが確認された。なお，底部表面に 0.1mm～0.04mm のひび割れが確認されたが，ひび割れは表面のみに留まっていることから，乾燥による初期のプラスチックひび割れが発生したと考える。屋外で施工する場合，直接風を防止する対策を検討する必要がある。さらに，表面養生剤等の検討も行い，プラスチックひび割れの発生を低減する必要がある。

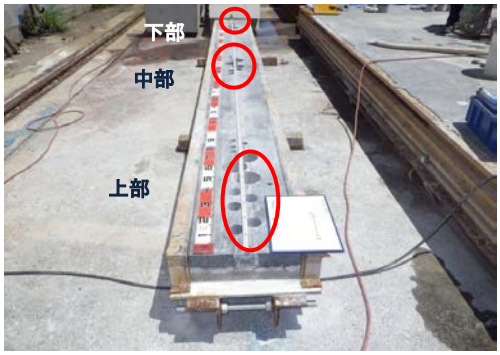
（3）小型試験体による目地の透水試験において，目視による水の浸透状況を確認した。その結果，目地部の透水はないことが確認できた。

（4）実大試験体による目地の透水試験において，目視による水の浸透状況を確認した。その結果，目地部の透水はないことが確認できた。また，打設高さ方向による違いも無いことが確認できた。

（5）小型および実大試験体による目地部の透水試験より，常温硬化型 UFC は目地など後施工を実施しする場合でも，打継部に適切な処理を施すことにより，付着が向上し止水・バリア性能を有することが確認できた。

写真－7　割裂試験体透水状況

写真－8　型枠設置状況



写真－9　目地部コア採取位置

参考文献

1) 武田篤史，他：常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート®」の屋内ブリッジへの適用，大林組技術研究所報 ，No.74，　2010 年

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)，コンクリートライブラリー113，(2004)

3) 石関嘉一，他：鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集, vol31, No.1, 2010 年 9 月, pp.215-pp.220

4) 玉滝浩司，他：超高強度繊維補強コンクリートによる大型部材製造（その 1　製造方法の検討），土木学会第 66 回年次学術講演会，2011 年 9 月，pp.413-pp.414

5) 石関嘉一，他：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性に関する研究，コンクリート工学年次論文集, vol34, No.1, 2012 年 9 月，pp.214-pp.219

6) 村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計 ，第 3 章コンクリートの透水試験方法，3.3 インプット法，技報堂出版，2002 年，pp.40

7) 岡田清編：コンクリートの耐久性，朝倉書店，1986 年 1 月