

# 報告 冬期における常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートを用いた底の製造検討

吉田 浩一郎\*1・玉滝 浩司\*2・瀧田 安浩\*3・浅岡 泰彦\*4

**要旨：**常温硬化型と称される超高強度繊維補強コンクリートは、常温養生によって、早期に高い性能が得られる特長がある。一般に、超高強度繊維補強コンクリートは、所定の性能を得るために、高温での蒸気養生を行うことが知られているが、設備やコスト等から高温条件を長時間維持することは簡単ではない。そこで、早期に高い性能が得られる超高強度繊維補強コンクリートをプレキャスト製品に適用したところ、冬期での製造でも、60℃未満の加温養生により、短期間で180N/mm<sup>2</sup>以上の強度が得られることが明らかとなった。

**キーワード：**超高強度繊維補強コンクリート、鋼繊維、コンクリート製品、等価材齢、加温養生

## 1. はじめに

昨今、我が国においても実用化が進みつつある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、一般のコンクリートと比較して圧縮強度は約 7 倍の 200N/mm<sup>2</sup>程度と非常に高く、さらに、鋼繊維を添加することで高いじん性を付与しており、材料の組織も極めて緻密なことから、耐久性にも優れている。

UFC技術の適用事例としては、東京国際空港D滑走路の床版や、鉄道橋<sup>1)</sup>、軌道桁等があり、その多くはプレキャスト製品となっている。これは、一般にUFCが高温養生によって、高い性能が得られることによるものであるが、市中の製品工場での高温養生は、設備上の制約があることが知られている。

これまでに、UFC技術の更なる適用拡大として、常温養生で早期に高強度を実現できるUFC (以下、常温硬化型UFCと表記) を開発し、レディーミクストコンクリート工場での製造検討により、大量かつ長期に渡って、品質の安定した材料を供給することが可能であることを実証した<sup>2)</sup>。一方、常温硬化型UFCはその特性から、プレキャスト製品への適用でも、養生条件の緩和という点で、優れた性能が得られる可能性がある。特に高温養生を行わずとも所定の強度を得ることができれば、市中の製品工場において、広く技術の適用を図ることが可能となる。

本報告は、常温硬化型 UFC のプレキャスト製品への適用検討として、市中のコンクリート製品工場において、底の製造を行い、養生の実績と供給期間中における品質管理試験結果をとりまとめたものである。なお、製造は環境条件の厳しい冬期 (1, 2月) に行い、部材と同一条件で養生を行った試験体の耐力や強度の確認を行った。

## 2. 常温硬化型 UFC 製底の概要

### 2.1 形状

常温硬化型UFC製底は図-1に示す部材を1体として製造し、その3体をガスケットによって一体化する仕様となっている。部材は、鉄骨梁に固定するためのスタブ部分と底部分からなり、厚さはスタブ部分が 330mm に対して、底部分の根元は 165mm となっている。底部分は先端にかけて 50mm まで薄くなっており、先端部には水切り目地とシール目地を設けた。また、スタブ部分には、梁に固定するためのインサートを埋め込んだ。

なお、本部材にはPC鋼材や鉄筋を用いていないため、設置にあたっては、部材と同一条件で養生を行った試験体の構造試験によって耐力を確認することとした。

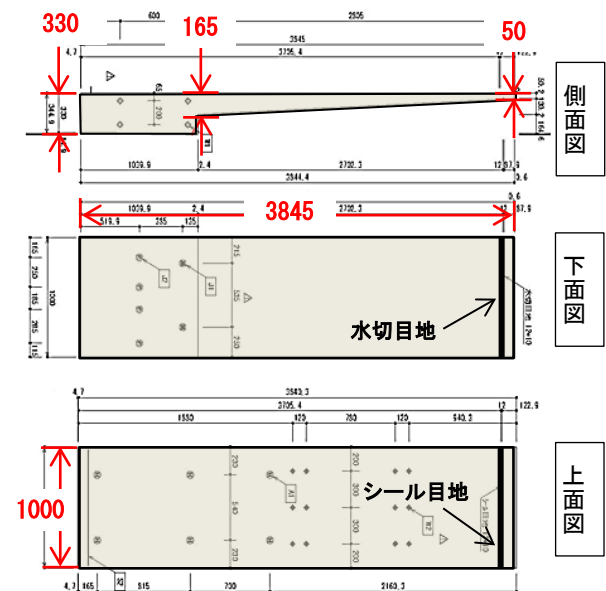


図-1 常温硬化型 UFC 製底の概略図 (単位: mm)

\*1 宇部興産 (株) 技術開発研究所 コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)

\*2 宇部興産 (株) 技術開発研究所 コンクリート開発部 工修 (正会員)

\*3 (株) 大林組 技術研究所 技術ソリューション部 主任研究員 工修 (正会員)

\*4 (株) 大林組 設計本部 構造設計部 課長 工修 (非会員)

## 2.2 常温硬化型 UFC の構成材料と調合

製造した常温硬化型UFCの調合を表-1に示す。常温硬化型UFCは、ポズラン材等を含むプレミックス材、高強度コンクリートに適した粒径5mm以下の細骨材、ポリカルボン酸系の高性能減水剤、および補強用鋼繊維で構成されている。鋼繊維を除くマトリックス部分は、C<sub>3</sub>A量が少なく、かつ硬化時に反応速度の早いC<sub>3</sub>S量が多いセメントをベースとした結合材により、低水結合材比を実現し、常温環境においても早期に高強度が得られるように調合を最適化している<sup>3)</sup>。補強用繊維には、引張強度が2000N/mm<sup>2</sup>を超える鋼繊維を使用し、混入率は2.0vol.%とした。なお、細骨材については、工場近隣で採取される砕砂が常温硬化型UFCへの適用に問題がないことを事前に確認し、本製造に用いることとした。

## 3. 製造概要

### 3.1 製造工場の概要

常温硬化型UFCを用いた底は関東地区にあるプレキャスト製品工場において製造した。練混ぜに使用したミキサは水平二軸型ミキサ（強制練り）で、練混ぜ容量は1.67m<sup>3</sup>であった。プレミックス材はジェットパック車で輸送を行い、セメント保管用のサイロ内にて貯蔵した。また、細骨材もサイロ内にて保管した。製造工場の外観を写真-1に示す。

### 3.2 練混ぜ条件

1バッチの練混ぜ量は、これまでの実績からミキサ容量の50~70%が適切と推察されることから、練混ぜ量を0.9m<sup>3</sup>として事前の試験練りを行い、練混ぜ時間やミキサ

表-1 常温硬化型 UFC の調合

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	24	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む。



写真-1 製造工場の外観

サから排出された試料状態を確認した。

練混ぜ時間とミキサの負荷電力の関係を図-2に示す。ミキサ負荷が最大となるのは注水から3分程度であった。鋼繊維は、負荷電力が最大値から低下し始める時間を目安として、投入を行った。なお、鋼繊維は、ミキサ上部の投入口から、1箱(15.7kg/箱)ずつ手投入した。鋼繊維投入後に負荷電力が概ね収束したことを確認し、練混ぜ完了とした。1バッチの製造に要した時間はおよそ15分であった。

事前確認の結果、練混ぜ量が0.9m<sup>3</sup>の場合、ミキサ負荷はミキサ能力の半分程度となり、攪拌停止後に再起動した場合の過剰な負荷の発生や、投入材料の嵩積等を考慮しても、問題ないと判断した。また、ミキサ排出後の試料にファイバボールは認められなかった。

### 3.3 計量および品質管理項目

部材製造時の計量および品質管理項目を表-2に示す。プレミックス材は、セメントの計量装置を用いて計量を行ったが、1回で全量計量することが不可能であったため、数回に分けて計量を行った。高性能減水剤は使用総量が僅かであったため、練混ぜ水の計量槽に手投入した。鋼繊維はミキサ上部の投入口から手投入するため、投入した鋼繊維の箱数で投入量を確認した。

また、圧縮強度試験は、部材の強度確認のため、標準養生に加え、部材と同一環境で養生した供試体についても行った。

### 3.4 打込み条件

部材の打込み方法を図-3に示す。ミキサで練混ぜた常温硬化型UFCは、打込み用のホッパーに受け、工場ヤード内において2バッチ分をまとめて打込むこととした。スタブ部分までを一旦打込んでから、型枠取付パイプレーターによる巻き込みエアの除去を行った後、底部分の打込みを行った。底部分の打込みは、取付け部から先端部に向けて材料が流動するように行い、打込み量に応じてホッパーを先端に向けて移動させた。なお、底部分の

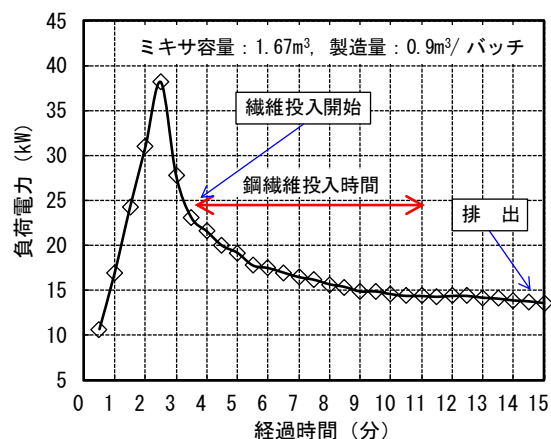


図-2 練混ぜ時間とミキサの負荷電力

表-2 計量および品質管理項目

管理項目	管理値	頻度	管理・試験方法等
計量	計量記録	—	全バッチ 計量モニタにより確認
	計量誤差	プレミックス材：1%以内 細骨材：3%以内 高性能減水剤：2%以内 練混ぜ水：1%以内	全バッチ JIS A 5308 における計量値の許容差を参考
鋼繊維投入量	—	全バッチ	空箱の数量により確認
フロー値	260±30mm	1回/製造日	JIS R 5201（落下なし）
空気量	3.5%以下		JIS A 1128 に準拠
コンクリート温度	10℃以上		JIS A 1156 に準拠
圧縮強度※1	180N/mm <sup>2</sup> 以上		JIS A 1108 を参考 試験体寸法：φ50×100mm

※1：標準養生（材齢 28 日）と部材と同一条件で養生した場合について確認

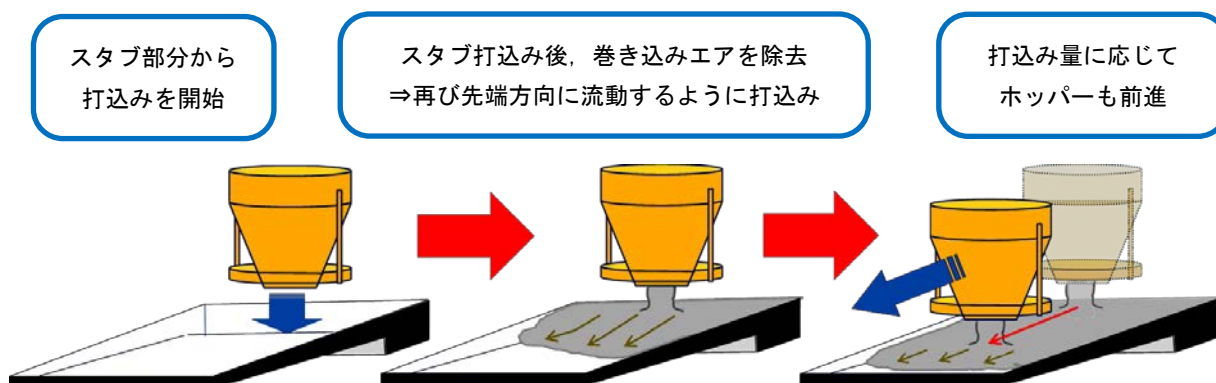


図-3 部材の打込み方法

打込みの際には、スタブ部分との一体化を図るため、打込み箇所を突き棒によって攪乱した。

### 3.5 養生

常温硬化型UFCは、10℃程度の環境でも長期にわたる強度発現が確かめられており、180N/mm<sup>2</sup>以上の強度が得られることが知られている<sup>4)</sup>。しかしながら、プレキャスト製品への適用の場合、製造から出荷までの期間を考慮すると、養生期間を短縮することが望ましいため、本製造ではテント内での加温養生を行うこととした。ただし、養生を屋外ヤードにて行うため、冬期では高温を保持することが困難であり、工場設備でも温度管理に無理が生じない条件の設定が必要であった。

常温硬化型UFCは、任意の温度履歴を受けた場合の圧縮強度評価式として、式(1)に示す、アレニウス則に基づく等価材齢 ( $t_e$ ) がある<sup>5)</sup>。これは、強度発現速度がアレニウス則に従うとして、基準温度の材齢に換算するものである。これまでの知見から、100N/mm<sup>2</sup>以上の範囲において、みかけの活性化エネルギー ( $E_a$ ) と気体定数 ( $R$ )

の比 ( $E_a/R$ ) を常温硬化型UFC固有の値とすることで、高い精度で強度発現を推定できることがわかっている。

加温養生によって 200N/mm<sup>2</sup>以上が得られた事例<sup>6)</sup>を参考として、養生温度を 40℃、養生期間を 5 日として等価材齢による事前評価を行ったところ、推定圧縮強度は 190N/mm<sup>2</sup>であった。このため、工場とも協議の上、養生条件としてこれを採用した。なお、養生期間中はテント内温度と外気温を測定し、部材と同一環境で養生した試験体の強度を養生期間 2、3 および 5 日で確認した。

$$t_e = \sum \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \Delta t \quad (1)$$

ここで、 $t_e$ ：等価材齢(日)

$E_a$ ：みかけの活性化エネルギー(kJ/mol)

$R$ ：気体定数(8.31J/mol/K)

$T_0$ ：基準温度(293K)

$T_k$ ：供試体温度(K)

$\Delta t$ ： $T_k$ を維持する期間(日)

#### 4. 製造・品質管理

##### 4.1 実機製造結果

1日の製造量は、練混ぜ量 $0.9\text{m}^3$ を1または2バッチとし、製造には0.5~1時間程度を要した。製造は4日間行い、累計製造量は $5.4\text{m}^3$ とした。いずれの材料も製造時の計量誤差は、全バッチで許容範囲内であった。本製造における細骨材の表面水率は3.6~5.3%であり、練混ぜ水はこれを考慮して計量した。なお、練混ぜに要した時間は、事前確認時とほぼ同等であった。

##### 4.2 品質確認および品質管理

###### (1) フロー値、空気量およびコンクリート温度

製造バッチ毎のフロー値と空気量を図-4に示す。製造直後のフロー値は $269\sim 282\text{mm}$ となった。本製造における細骨材の表面水率の変動は小さかったため、フロー値に及ぼした影響は小さいと考えられる。なお、製造直後の空気量は1.7~2.1%であった。

製造時の外気温は $8\sim 10^\circ\text{C}$ であったため、練混ぜ後のコンクリート温度が著しく低下しないように、練混ぜ水として $30^\circ\text{C}$ の温水を使用した。その結果、コンクリート温度は $17\sim 18^\circ\text{C}$ となり、外気温より $8\sim 9^\circ\text{C}$ 高くなった。

###### (2) 圧縮強度

標準養生を行った場合の圧縮強度を図-5に示す。材齢28日における圧縮強度の平均値は $191\text{N}/\text{mm}^2$ となり、管理下限値である $180\text{N}/\text{mm}^2$ を満足した。また、長期材齢でも強度増進が認められ、材齢56日では $200\text{N}/\text{mm}^2$ を超えた。

###### (3) 養生

養生期間中の槽内および外気の温度履歴を図-6に示す。部材は、打込み直後に表面仕上げを行い、凝結始発を確認してから、加温養生を開始した。養生期間中の平均外気温は $2.7^\circ\text{C}$ であり、最低気温は $-4.5^\circ\text{C}$ であった。テント内に設置された部材位置に相当する高さの最高温度は $55^\circ\text{C}$ 、最低温度は $11^\circ\text{C}$ となり、平均温度は $31^\circ\text{C}$ であった。これは養生温度の目安として設定した $40^\circ\text{C}$ を下

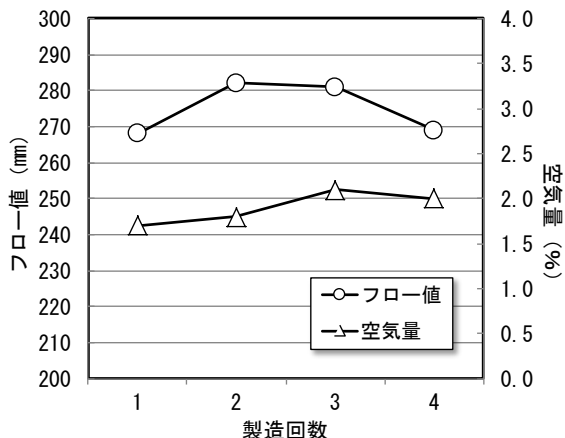


図-4 フロー値と空気量

回ったが、この原因として、養生期間中の夜間から朝方にかけての冷え込みが著しく、氷点下にまで及んだことが影響したと考えられる。部材の加温養生状況を写真-2に示す。

###### (4) 強度推定結果と試験結果の比較

図-6に示すテント内の部材位置に相当する高さの温度履歴から、前述の等価材齢による評価方法を用いて圧縮強度の発現を推定し、部材と同一環境で養生した供

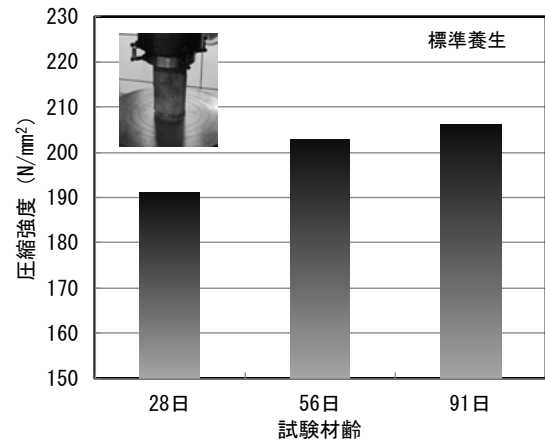


図-5 圧縮強度 (標準養生)

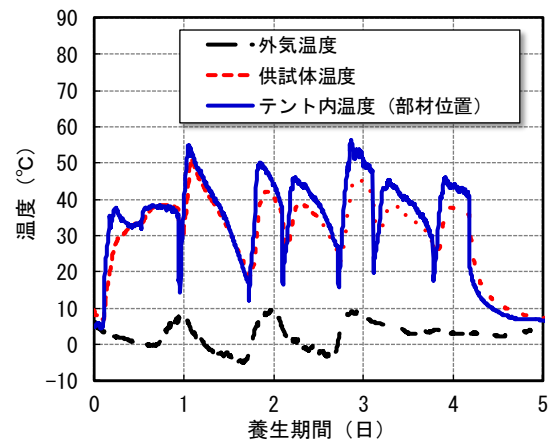


図-6 テント内および外気温の履歴



写真-2 底部材の養生状況

試体の強度と比較を行った。等価材齢による強度推定結果と部材と同一環境で養生した供試体の強度試験結果の比較を図-7に示す。

養生温度の履歴を用いた等価材齢による評価によれば、推定圧縮強度は、養生期間2日で168N/mm<sup>2</sup>、3日で183N/mm<sup>2</sup>、また5日で190N/mm<sup>2</sup>であった。これに対して、供試体強度は、養生期間2日で175N/mm<sup>2</sup>、3日で187N/mm<sup>2</sup>、また5日で198N/mm<sup>2</sup>となり、等価材齢による評価の精度が高く、かつ安全側であることが確認された。養生温度の履歴によれば、最高温度は55℃まで上昇しており、一時的に高温履歴を受けたことから、養生が短期間であっても180N/mm<sup>2</sup>に至ったと考えられる。

## 5. 構造試験

### 5.1 試験概要

構造試験は、取付け部分の健全性、曲げひび割れ余裕を確認することを目的とした。荷重条件は、吹き下ろしの風荷重を想定した4.4kNを、試験体の2箇所に同時に載荷し、これを10サイクル行った。その後、曲げひび割れ発生まで静的単調載荷を行った。ただし、載荷荷重は、自重も含んでいる。

試験体は幅1.0m×全長3.84mで、実大の底を幅1.0mとしたものを用いた。試験体の製造は底と同一の型枠を用いて製作し、養生も同一条件とした。

試験体への載荷は、写真-3に示すように反力ブロックに固定したH型鋼(2本)に試験体をボルトで固定し、危険断面から900mmおよび1800mmの位置に上方から下方へ荷重を加える1方向載荷とした。また、圧縮力が試験体の幅方向に等分布荷重となるように、H型鋼を試験体に固定した。

加力点での載荷前には、自重による曲げ応力が発生しないように試験体下部にたわみ防止用ジャッキを設置した。たわみ防止用ジャッキの除荷後、自重による荷重がゼロとなる時点から加力点による載荷を開始した。

### 5.2 試験結果

#### (1) 耐力性状

図-8に、試験体端部で測定したせん断力と鉛直変位の関係を示す。加力点1は先端部、加力点2は根元部を示す。風荷重を想定した4.4kNのサイクル載荷では弾性的挙動を示し、ひずみの蓄積は認められなかった。

#### (2) ひび割れ・損傷状況

ひび割れ発生強度の確認を行ったところ、11.9kN載荷時にひび割れが観察された。ひび割れは、加力点2と固定部の純曲げ区間となる上面に集中して発生した。ひび割れ発生の状況を図-9に示す。

本構造実験の結果によれば、底にかかる風荷重相当の載荷を行っても、弾性変形の範囲であり、有害なひび割

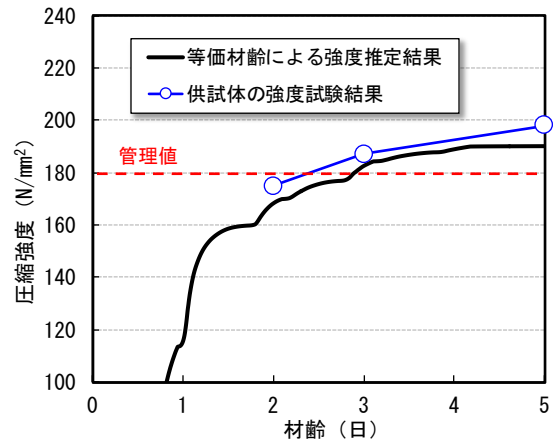


図-7 等価材齢による強度推定結果と供試体の強度試験結果の比較

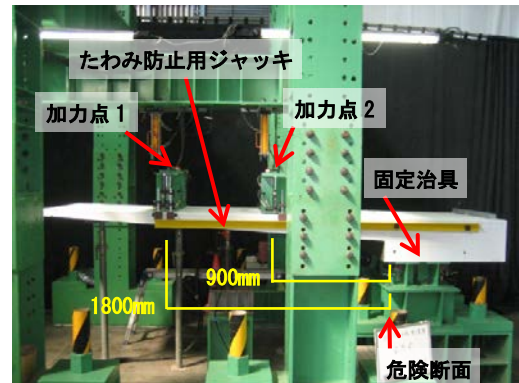


写真-3 試験体の構造試験状況

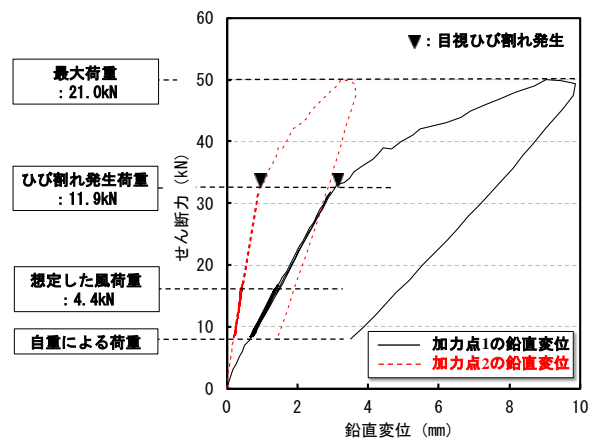
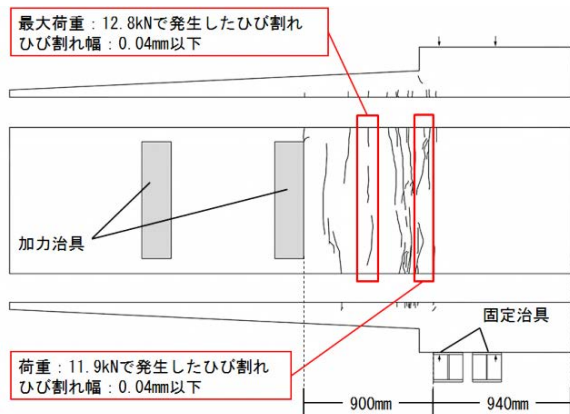


図-8 せん断力-鉛直変位関係

れが発生しないことが確認された。

### 5.3 試験体から採取したコア強度

実際に取り付けを行う底の強度を確認するため、構造試験に用いた試験体からコアを採取し、圧縮強度の確認を行った。コアの採取状況を写真-4に示す。スタブ部分から直径が100mmのコアを縦方向に5本、横方向に3本採取した。いずれのコアも、打継ぎ目やひび割れは確



図－9 ひび割れ発生状況



写真－4 試験体からのコア採取状況



写真－5 庇の取付け状況

認されておらず、部材としての一体性が確保されていた。コアは長さ 200mm に切断し、強度試験を行った。

縦方向に採取したコアは、5 本を試験し、圧縮強度は平均 197 N/mm<sup>2</sup> (189～201N/mm<sup>2</sup>) であった。また、横方向に採取したコアは、8 本を試験し、平均 198 N/mm<sup>2</sup> (193～204N/mm<sup>2</sup>) であった。コアの採取位置や方向が異なる場合でも、強度に大きなばらつきは認められず、実際に取り付けられる庇は 200N/mm<sup>2</sup>程度の強度が得られていると考えられる。なお、試験体と同様の製造・品質

管理を行って製造した庇の部材は、写真－5 に示すように供用中である。

## 6. まとめ

常温養生で早期に高強度が得られる超高強度繊維補強コンクリートについて、冬期におけるプレキャスト製品への適用を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 常温硬化型UFCのプレキャスト製品への適用においては、夏期相当の環境を 5 日間程度保持することで 180N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を得ることができる。
- (2) 常温硬化型 UFC 固有の等価材齢による圧縮強度評価式は、実部材の製造においても適用が可能である。
- (3) PC 鋼材を配しない部材であっても、風相当荷重であれば、弾性変形範囲にあり、有害なひび割れが発生しない。

謝辞：常温硬化型 UFC 製庇の製造にあたり、大木建設株式会社 PC テクノセンター美野里の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 森川陽平, 谷村幸裕, 神尾正, 大熊光：三岐鉄道「萱生川橋梁」の設計と施工－世界初の UFC 鉄道橋－, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.39-45, 2011.4
- 2) 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥：レディーミクストコンクリート工場における超高強度繊維補強コンクリートの大量製造, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.316-321, 2014.6
- 3) 丸屋英二, 歳谷一雄, 高橋俊之, 平田隆祥：超高強度繊維補強コンクリートの流動性及び強度に及ぼすセメントの鉱物組成の影響, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)要旨, V-497, pp.993-994, 2011.6
- 4) 桐山宏和, 玉滝浩司, 大西利勝, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥：低温環境下の常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性, 土木学会第 67 回年次学術講演会(平成 24 年度)要旨, V-194, pp.387-388, 2012.6
- 5) 桐山宏和, 玉滝浩司, 吉田浩一郎：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの強度発現について, 土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年度)要旨, V-248, pp.495-496, 2014.6
- 6) 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 桐山宏和, 石関嘉一, 平田隆祥, 佐々木一成：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートを熱養生した場合の強度特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会(平成 24 年度)要旨, V-195, pp.389-390, 2012.6