

超高性能繊維補強コンクリートの 材料的小よび構造的な特性に関する研究

海部貴裕*・永松牧子*・岩本康平**・佐々木謙二***・
山口浩平***・今井隆****・松田浩***

Material and structural characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete

by

Takahiro KAIBE*, Makiko NAGAMATSU*, Kohei IWAMOTO**,
Kenji SASAKI***, Kohei YAMAGUCHI***, Takashi IMAI****, Hiroshi MATSUDA***

This paper discussed the results of various mechanical property tests, mass transfer resistance tests, adhesion shear tests and shrinkage tests in order to verify the material and structural characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete that can be constructed on site.

By clarifying the material and structural characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete, it is expected to be utilized for maintenance as existing repair / reinforcement material for existing structures.

Key words: UHPFRC, fiber-reinforced concrete, the deposition shear test, shrinkage test

1. はじめに

わが国のインフラ構造物は、1964年に開催された東京オリンピックや、1970年の大阪万博前後の高度成長期に集中的に建設や整備が進んだ。しかし、インフラ構造物の物理的な耐用年数は約50年といわれており、今後これらの構造物が一斉に老朽化することが予想される。さらに2012年12月に起きた中央自動車道笹子トンネルの天井崩落事故をきっかけに、インフラ構造物の老朽化問題への関心は高まっており、補修・補強、新材料等に関する技術等の開発、積極的な活用¹⁾が求められるようになった。

本研究では補修・補強または新材料として超高性能繊維補強コンクリート(以下、UHPFRC)に着目した。UHPFRCは圧縮強度130N/mm²以上の現場打設可能な高強度コンクリートであり、短繊維鋼材を一様に分散

させることにより、ひび割れに対する抵抗性、じん性を高めた複合材料である。さらに透気・透水性が普通コンクリートよりも優れた緻密なコンクリートで、道路橋RC床版の防水工の省略も考えられる。本研究では、まず、UHPFRCの材料的特性を把握するために直接引張強度試験を行い、引張軟化域でのじん性を確認した。続いて、高強度コンクリート特有の課題である収縮ひずみ量の計測を行い、収縮低減剤および膨張材を添加した時の収縮抑制効果について検証した。また、透気・透水試験を実施し施工打継目を含めた部位での水および空気に対する物質移動抵抗性について検証した。次にUHPFRCの構造的な特性を把握するためにUHPFRCを普通コンクリートの角柱試験体に上面増厚した試験体を製作し、曲げ試験を行うことによりUHPFRCの上面増厚補強効果を確認した。さらに、補

平成30年6月25日受理

* 大学院工学研究科総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

** JFEエンジニアリング株式会社 (JFE Engineering Corporation), 前長崎大学大学院博士前期課程学生

*** 大学院工学研究科システム科学部門 (Division of System Science)

**** 株式会社ビービーエム (BBM Co., Ltd)

修・補強工法においては新旧コンクリートの打継部が必ず存在するので、新旧コンクリートの付着性能を検証するために UHPFRC と普通コンクリートの付着せん断試験を実施した。その際、新旧コンクリートの表面粗度と破壊形態の関係を明確にするため、線形判別関数を用いた判別分析も実施し、有効性を確認した。

2. デジタル画像相関法 (DICM)

まず、本研究の多くの試験で使用したデジタル画像相関法 (以下、DICM) について本章で記述する。DICM は、測定対象物表面のランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面を CCD カメラや CMOS カメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる解析手法である。求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の 2 点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする。この解析手法の特徴として、水平、垂直、斜めと 3 軸のひずみゲージと同じ解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点間距離を変更可能なこと、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となることが挙げられる。また、2 台のカメラで撮影することで 3 次元計測が可能となる。さらに、レーザー光を照射するスペckルパターン計測法と異なり高温時の測定空間の揺らぎ等に比較的強いこともその特徴の一つと言える²⁾。DICM に用いる計測システムを Fig.1 に示す。



Fig.1 計測システム

3. 直接引張強度試験

(1) 試験概要

UHPFRC の引張特性および軟化域での性能を確認するため本試験を行った。10kN 万能試験機を使用し、載荷速度 0.5mm/min 変位制御とした。試験体数は 3 体、計測材齢は 28 日である。試験体の表面は DICM を用いて全視野ひずみ計測を実施し、また裏面にはひずみゲージを貼付した。試験体概要および計測状況を Fig.2 に示す。また、掴み治具で試験体を定着する際、直接

コンクリートを掴むと、載荷試験中に滑ってしまう場合があるので、掴み治具を定着する部分に厚さ 1mm のステンレス板を貼り、滑りにくくなるように配慮して試験体を製作した。

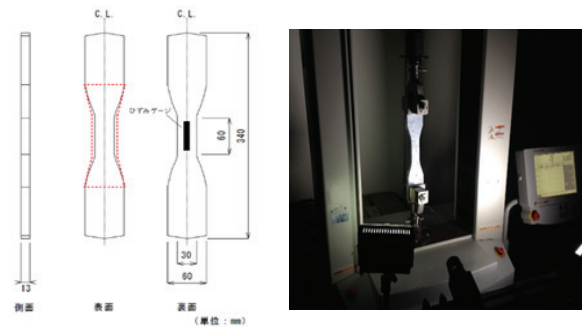


Fig.2 試験体概要 Fig.および計測状況

(2) 試験結果

Fig.3 に試験結果を示す。引張強度は圧縮強度の約 1/10 程度であるものの、鋼繊維の架橋効果によりひび割れが分散され、すぐには破断に至らず靱性が非常に優れていることが確認できる。

DICM より計測した試験結果を Fig.4 に載せているが、ひずみゲージとほぼ一致していることが確認できる。また、主ひずみ分布ではひずみが試験体全体に広がっている様子も確認でき、ひずみ、き裂等の進展過程を非接触による手法で可視化することができた。

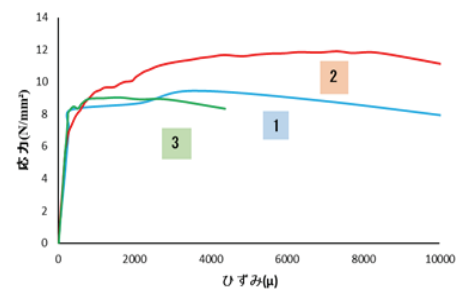


Fig.3 応力-ひずみ関係

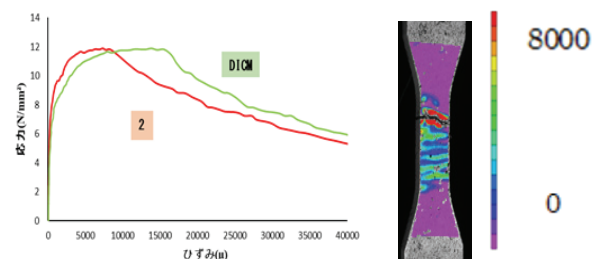


Fig.4 DICM による応力-ひずみ関係, 主ひずみ分布

4. 収縮量試験

(1) 試験目的

UHPFRC は高強度コンクリートであり、セメント量が普通コンクリートよりも多く、水結合材比が小さくなり、自己収縮が大きいという高強度コンクリート特有の問題点がある。本試験では、UHPFRC の収縮特性、収縮低減剤添加時および収縮低減剤と膨張材を併用した時の収縮特性を明らかにすることを目的とする。

(2) 試験概要

本試験は、JSCE-K 561-2010「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法（案）」³⁾に準拠して実施した。寸法 100×100×400mm の試験体を製作、埋込み歪ゲージを埋設し、時刻、収縮量を計測した。計測材齢は 360 日である。また収縮低減剤、膨張材添加による強度への影響を検証するために圧縮強度試験も実施した。

(3) 試験結果

収縮量試験結果を Fig.5 に示す。各配合とも材齢初期の段階では膨張し、その後収縮している。基本配合の 360 日時点での収縮ひずみは約 300 μ であり、基本配合と比較して、収縮低減剤、膨張材の添加は収縮量の低減につながる事がわかる。収縮低減剤のみの配合と収縮低減剤、膨張材を併用した配合では、収縮ひずみが約 200 μ 違うことから収縮低減剤と膨張材を併用することでより一層の収縮量低減効果を期待できる。

Fig.6 に材齢 28 日の圧縮強度試験結果を示す。収縮低減剤と膨張材の有無による圧縮強度および弾性係数に与える影響は小さいことが確認できた。

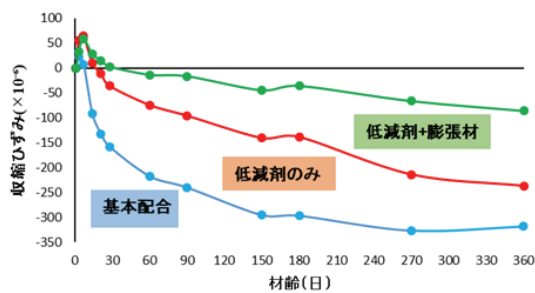


Fig.5 収縮量試験結果

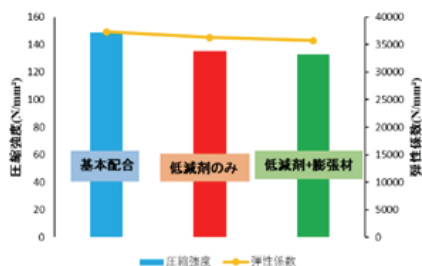


Fig.6 圧縮強度試験結果

5. 物質移動抵抗性試験

(1) 試験目的

雨水の侵入によるコンクリート床版の早期劣化事例が多く報告されている⁴⁾。そこで、道路橋床版の上面増厚補強材かつ床版防水層としての UHPFRC の有用性、有効性を検討するために、物質移動抵抗性試験を実施した。試験項目は UHPFRC の空気、水に対する抵抗性とした。なお、比較のために、普通コンクリートおよび普通モルタルの物質移動抵抗性と比較し、UHPFRC の表面保護効果について実験的な検討を行った。

5.1 透気試験

(1) 試験概要

試験体寸法は、450×200×20mm とし、長手方向の両端部から 100mm の部分に打継目を設けた。床版補修において、打継目の問題は避けられないためである。打継目口は階段型とし、口には傾斜型をつけた。口の大きさは 10+10mm とする。試験体の概要および試験体を Fig.7 に示す。計測は材齢 14、70 日に試験体の型枠面で行った。計測場所を Fig.7 の赤○に示す 3 箇所とした。試験体は計測日まで標準養生し、計測の 2、3 時間前に水中から取り出し、試験体表面が乾燥している状態で行った。それらの値を普通コンクリートと比較した。

試験ではトレント透過率試験機（以下、TPT と表記）を用いて透気係数を測定した。装置はチャンバー、計測器、計測センサーおよび真空ポンプから構成されている。Fig.8 に示すように、試験では内側と外側に隔てられているチャンバーを測定したい箇所にあて、真空ポンプにより吸引しチャンバー内の圧力を下げる。その後、吸引を止めるとコンクリート内から内側チャンバーに空気が流入し内側チャンバー内の圧力が回復するが、外側チャンバーの働きにより内側チャンバーに流入する一次元化された空気の流れを用いて透気係数が算定される。

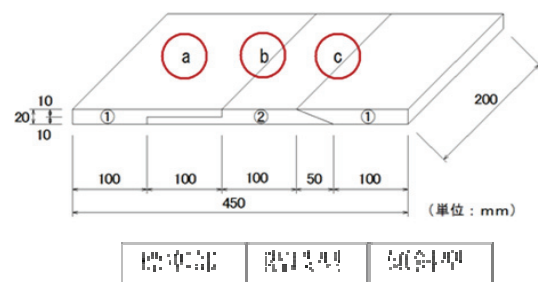


Fig.7 試験体概要

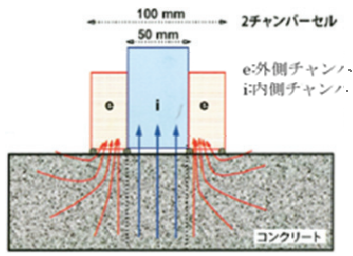


Fig. 8 チャンバースセルの仕組み

(2) 試験結果

透気試験結果を Fig.9 に示す。材齢 14, 70 日を比較すると材齢 70 日の方が、UHPFRC において透気係数の値が小さくなった。このことから、打設後、時間の経過とともに気体の移動抵抗性が好転していくことが考えられる。Table1 に透気係数の評価指標を示す。透気係数評価指標と照らし合わせてみると UHPFRC の透気係数は、14 日、70 日ともに標準部では、Very Low で非常に良く、両打ち継ぎ目では、14 日で High, 70 日で Low という結果になった。普通コンクリート(標準部, 材齢 147 日)の透気係数と比較すると約 $10(10^{-16}m^2)$ 小さくなっていることから UHPFRC の透気性の方が優れていることが確認された。

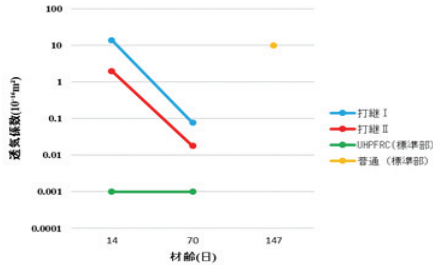


Fig.9 試験結果

Table1 透気係数評価指標

透気係数 $kT (10^{-16}m^2)$	Permeability
$< 1.0 \times 10^{-2}$	Very Low
$1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-1}$	Low
$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0$	Moderate
$1.0 \sim 1.0 \times 10$	High
$1.0 \times 10 \sim 1.0 \times 10^2$	Very High
$> 1.0 \times 10^2$	Ultra High

5.2 透水試験

(1) 試験概要

本試験で使用した配合, 試験体概要, 計測材齢は, 透気試験と同様とした。Fig.10 に使用した透水試験体

概要を示す。試験は JIS A 6909⁵⁾「建築用仕上塗材」中の透水試験 B 法に準拠して実施した。試験には、メスピペット (容量 5ml), 口径 75mm 漏斗, ゴムチューブを用いた。漏斗を試験体に固定する際、試験体と漏斗の境界面から水漏れを防ぐためエポキシ樹脂のシーリング材を塗布した。また、蒸発を防ぐためラップと輪ゴムでメスピペット上部に封をした。

初期水頭高さが試験体表面から 250mm となるよう水量を調整し、24 時間後の水頭変化量を求めた。計測は、透水量が定常状態となるまで試験を継続し、回帰直線より単位時間透水量 (ml/day) を求めた。本試験においても普通コンクリートと比較した。

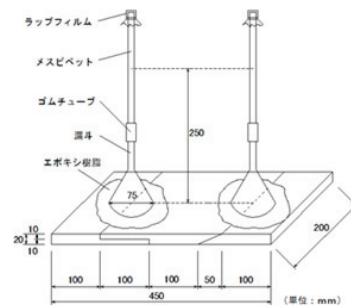


Fig.10 透水試験体概要

(2) 試験結果

透水試験結果を Fig.11 に示す。材齢 14, 70 日を比較すると、材齢 70 日の方が、UHPFRC の全ての計測位置で単位時間透水量の値が小さくなっていることから、打設後、水の移動抵抗性も時間の経過とともに好転していくことが考えられる。普通コンクリート (標準部, 材齢 70 日) と比較しても UHPFRC の全計測位置における単位時間透水量の方が非常に小さく、普通コンクリート (標準部, 材齢 70 日) の単位時間透水量の 1/5~1/15 程度の値となった。打継目□と□を比較すると、□の単位時間透水量が小さく、水の移動抵抗性が良いと考えられる。

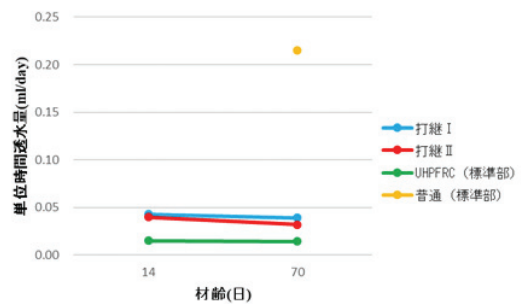


Fig.11 透水試験結果

6. 上面増厚補強試験

(1) 試験目的

本試験は、母材となる普通コンクリートを打設し、その後 UHPFRC を上面増厚補強材として打設した試験体を作成し、曲げ試験を実施することにより、UHPFRC の上面増厚補強材としての構造的効果を確認することを目的とする。比較として、普通コンクリートのみの RC 供試体も製作し、比較を行った。

(2) 試験概要

本試験は JIS A 1106⁵⁾を参考に実施した。試験体は寸法 100×100×400mm の RC 角柱試験体である。普通コンクリートのみの試験体と普通コンクリートの上面に UHPFRC を増厚した試験体をそれぞれ製作した。上面増厚補強試験体の高さ寸法の詳細は UHPFRC(20mm)+普通コンクリート(80mm)である。上面増厚補強試験体の打設手順は、まず母材となる RC 角柱を打設し、7 日後に UHPFRC を上面増厚補強材として打設した。界面処理は金たわしを用いて、RC 角柱打設面のレイタンスを取り除く程度削り、粗面処理を施した。締固めは行わず、養生方法は室温 20℃平均の温度制御養生とした。曲げ試験は UHPFRC を打設後 28 日とした。鉄筋には D6 SD295 を使用し、引張側にもみ 2 本配置した。計測にはひずみゲージ、変位計、デジタル画像相関法（以下、DICM）による光学的計測も実施した。試験体寸法、ひずみゲージの貼付位置、変位計の計測位置、DICM の解析範囲を Fig.12 に示す。

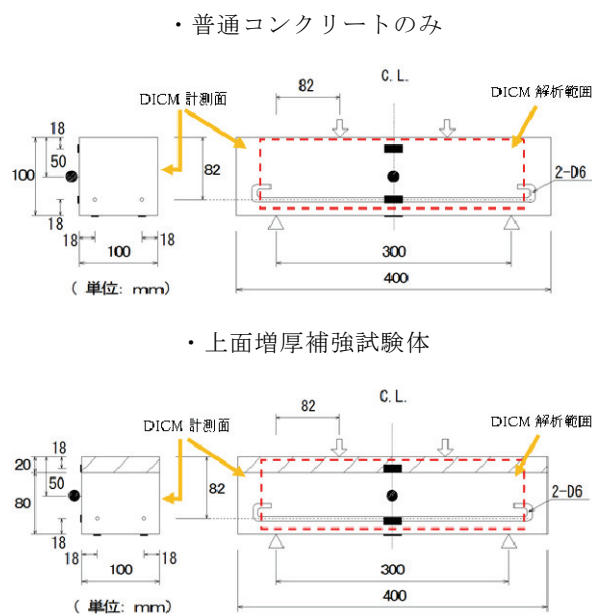


Fig.12 試験体寸法および計測位置

(3) 試験結果

Fig.13 に曲げ強度試験結果を示す。最大荷重は、普通コンクリートのみが 63.8 kN、上面増厚補強試験体が 71.34 kN であり、UHPFRC で上面増厚補強を行うことにより最大荷重が大きくなっている。また、最大荷重に達した後の挙動が上面増厚補強試験体の方が緩やかな挙動を示しており、じん性が優れていることがわかる。このことから、UHPFRC の上面増厚補強材としての有効性を確認できる。

Fig.14 に変位計および DICM から得られた変位を示す。どちらも概ね一致していることが確認できる。Fig.15 に DICM により計測したそれぞれの試験体の主ひずみ分布を示す。普通コンクリートのみの試験体ではせん断ひび割れが進展し破壊していることがわかる。上面増厚補強試験体も同様にせん断ひび割れが進展し、破壊している。上面増厚補強試験体に関しては、せん断ひび割れが打継目の部分までひび割れが進展し、破壊している。打継目は、構造上、弱点になることが多いため、性能を向上させるために適切な処理を行うことが必要である。そこで、次の章では、UHPFRC と普通コンクリートの表面処理と付着性能についての検証を実施した。

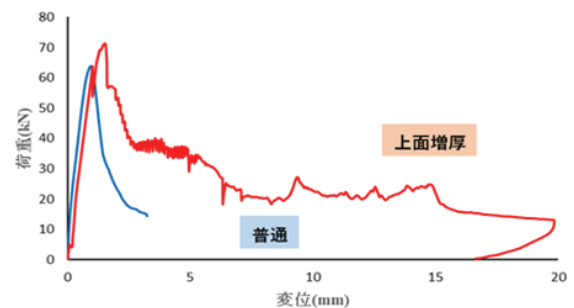


Fig.13 曲げ強度試験結果

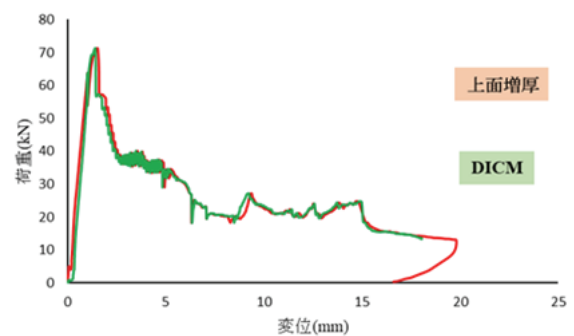
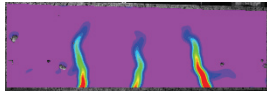
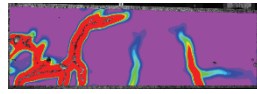


Fig.14 変位比較（変位計, DICM）

・普通コンクリートのみ

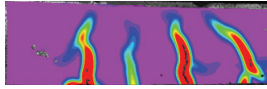


P=60 k N

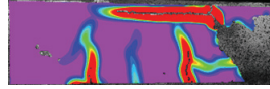


破壊後

・上面増厚補強試験体



P=70 k N



破壊後



Fig.15 主ひずみ分布 (range 統一)

7. 付着せん断試験

7.1 UHPFRC の付着性能

(1) 試験目的

コンクリート構造物の打継目は、一体として施工した場合のコンクリートに比べ、曲げ耐力が低く、有害物質が侵入しやすいため、構造物の耐力及び耐久性に影響を及ぼし、構造物の弱点となるケースが多い⁶⁾。UHPFRC の付着性能を検証するため、新コンクリートにUHPFRC、旧コンクリートに普通コンクリートを用いた試験体を作成し、付着せん断試験を実施した。比較として、新旧どちらも普通コンクリートのみの試験体も製作した。

(2) 試験概要

試験体中央部に傾斜角度 45°の打継ぎ目を設け、新旧コンクリートを打ち継いだ角柱試験体（寸法：100×100×400 mm）を 12 体製作した。また、打継面での破壊を誘発するために、打継面の端部に 10×10mm の切り欠きを設けた。新旧ともに普通コンクリートの試験体も製作し、比較検討を行った。

本実験では、一軸圧縮試験機を用いて、圧縮力をかけることで打継面に圧縮応力とせん断応力を作用させる傾斜せん断試験法を採用した。表面粗度は DICM より計測した座標データを用いて算術平均粗さ（以下、Ra）として評価した。Ra とは粗さ曲線から、その平均線方向に基準長さ L だけ抜き取り、この抜き取り部分の平均線から測定曲線までの偏差の絶対値を合計し、平均した値である。また、上面増厚補強試験と同様、Fig.16 に示す範囲において DICM による光学的計測も実施した。



Fig.16 試験体概要および計測状況

(3) 試験結果

Table2 に試験結果を示す。破壊形態の C は圧縮破壊を S はせん断破壊を表す。また、破壊時応力度は、圧縮破壊した試験体は圧縮応力 σ をせん断破壊した試験体は、せん断応力 τ を使用した。 σ 及び τ は、式 1 のように導出した。

$$\sigma = \frac{P}{A \cos \alpha} \quad \tau = P \sin \alpha \cdot \cos \alpha / A \quad (1)$$

P は最大荷重 (kN)、A は打継面面積(mm²)、 α は傾斜角度(°)を表す。

Table2 試験結果

No.	fullRa	dRa	破壊時 応力度	破壊 形態	No.	fullRa	dRa	破壊時 応力度	破壊 形態
1	78.7	19.4	19.0	S	2	89.1	10.0	21.8	S
3	51.0	51.9	6.1	S	4	67.0	53.7	7.7	S
5	105.6	71.1	7.0	S	6	160.9	183.4	154.1	S
7	99.2	36.1	91.5	S	8	80.2	9.0	222.3	S
9	90.4	25.2	4.6	S	10	136.4	91.9	6.7	S
11	287.3	340.9	17.1	S	12	183.7	125.0	25.2	S
13	330.3	177.3	46.0	C	14	301.2	40.8	7.9	S
15	368.2	118.2	30.4	C	16	426.2	73.9	29.0	C
17	331.6	69.3	28.7	C	18	316.7	54.5	32.0	C
19	337.3	66.9	33.5	C	20	411.5	51.9	30.2	C
21	240.4	55.9	41.0	C	22	196.2	82.8	47.7	C
23	286.4	343.5	45.3	C	24	248.0	209.1	23.3	S
25	317.0	76.9	43.9	C	26	307.5	28.0	45.0	C
27	197.4	33.9	28.1	C	28	175.5	94.0	13.8	S
29	244.2	159.8	30.1	C	30	157.2	34.9	17.8	S
31	144.3	74.3	22.8	S	32	150.4	39.7	17.8	S
33	88.8	18.4	42.7	C	34	78.5	20.7	46.3	C
35	147.3	129.8	43.1	C	36	108.2	37.7	51.8	C
37	155.1	58.3	32.6	C	38	219.0	187.8	51.3	C
39	285.1	274.1	45.0	C	40	144.8	171.9	9.8	S
41	54.9	56.6	6.7	S	42	83.9	62.4	9.7	S
43	103.5	56.8	17.9	S	44	117.7	180.3	12.2	S
45	97.5	27.8	17.2	S					

S=せん断破壊 C=圧縮破壊

せん断破壊した試験体の応力と算術平均粗さとの関係を Fig.17 に示す。新コンクリートに UHPFRC、普通コンクリートを用いた試験体のどちらもせん断応力と Ra との間にある程度の相関性を確認できる。また、新コンクリートとして UHPFRC を用いることで、普通コンクリートを用いる場合よりも、付着性能が向上し、凸凹形状を持たせることで十分な付着性能を有することが可能であると考えられる。

Fig.18 は DICM により撮影したせん断破壊した試験体の主ひずみ分布 Fig.である。本試験でも上面増厚補強試験同様、ひずみ、き裂等の進展過程を非接触による手法で可視化することができた。

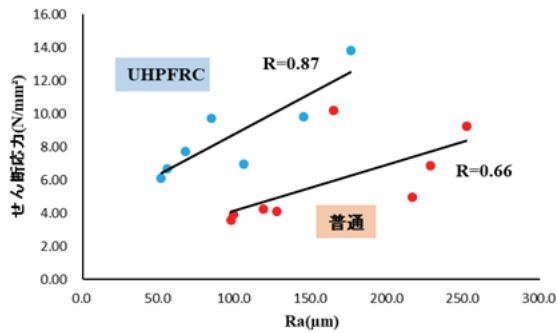


Fig.17 せん断応力と Ra の関係

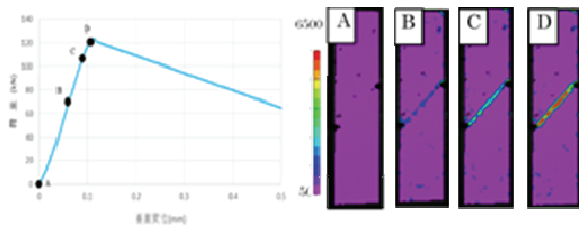


Fig.18 主ひずみ分布

7.2 線形判別関数を用いた打継目の付着特性評価

(1) 試験目的

コンクリート打継処理方法については定量的な指標がないため、施工者によって打継処理に差異がある。そこで打継面の表面粗度と付着の関係を明確にする手法の1つとして線形判別関数による判別分析をここで提案する。判別分析は、目的変数と説明変数との関係を調べ、関係式を作成し、その関係式を用いて説明変数の重要度ランキングと判別（予測）を明らかにする手法であり、その手法の1つに線形判別関数法がある。線形判別関数とは、例えば説明変数が2変数の場合、2群の境界となる直線 $ax+by+c=0$ を求めれば、式 $ax+by+c$ の値の正負によりどちらの群に属するかを判別することができるという分析法の1つである。つまり、2群が正負に分かれるような係数 a, b, c を求めればよく、簡便に評価できる手法である⁷⁾。

(2) 表面粗度の算出

評価手法に用いた試験体数は45体である。旧コンクリートの表面粗度は、Raとして評価した。線形判別関数に用いる2変数として、Fig.19の赤枠に示すような表面全体の高さ方向(z軸方向)の座標データと共に、

青枠で示すような4つの範囲での座標データを計測し、そこからRaを求めた。それぞれ呼び名をfullRa, dRaとする。今回、fullRaとdRaを説明変数とし、試験体が圧縮破壊したかせん断破壊したかの破壊形態の違いを目的変数とした。Fig.20に圧縮破壊、せん断破壊した試験体の写真および最大荷重時の主ひずみ分布を示す。圧縮破壊した試験体は主ひずみが試験体全体に分布している。一方せん断破壊した試験体は、主ひずみが打継目に集中している。この結果より圧縮破壊した試験体は付着が充分取れており、せん断破壊した試験体は付着が充分でないことがわかる。

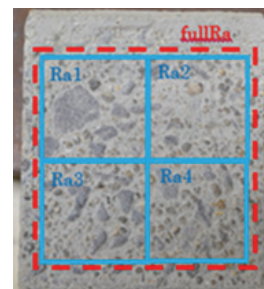
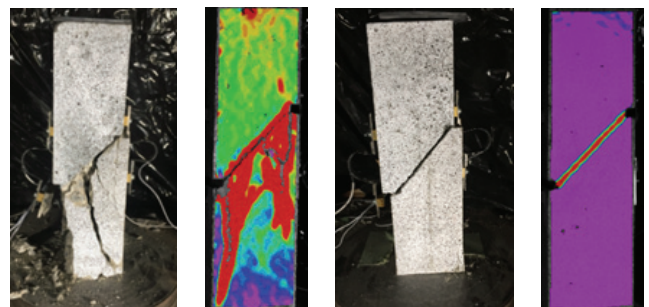


Fig.19 Raの算出範囲



圧縮破壊

せん断破壊

Fig.20 破壊形態の違い

(3) 付着破壊形態の判別

付着破壊形態の判別を行う際、45体の試験体No.の偶数番目の22体のfullRa, dRa, 破壊形態を既知のデータとして線形判別式を導出し、試験体No.の奇数番目の23体を未知のデータとして付着破壊形態の判別を行った。22体の試験体データから導出した式を以下に示す。

$$L = 0.0145 \text{fullRa} + 0.004 \text{dRa} - 2.264 \quad (2)$$

式(2)にfullRaとdRaを代入した時の値が正となれば圧縮破壊に、負となればせん断破壊になる。残りの23体の試験体を式(1)に反映させた結果をFig.21に示す。破壊形態の判別の中率は、81.8%であった。このこと

から、この線形判別式を使用することで、試験体が圧縮破壊するかせん断破壊するかを約 80%の精度で予測することができる。つまり、実際の現場で新コンクリートとして UHPFRC を使用する場合、旧コンクリート打継面の fullRa と dRa を確認することで、付着が充分に取れるかどうかを判断することが出来る。判別の中率を高めるためにも付着せん断試験結果のデータを増やす必要がある。

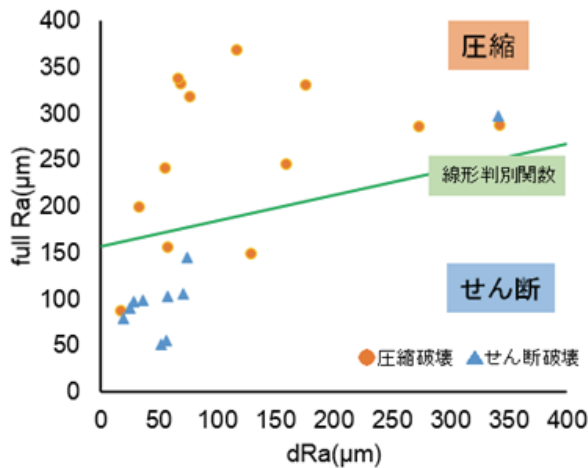


Fig.21 判別結果

8. まとめ

本研究で得られた結果を要約する。

- 1) UHPFRC は鋼繊維の架橋効果によって、優れた引張特性を有しており、高靱性である。
- 2) UHPFRC は収縮低減剤や膨張材を添加しても高強度であり、収縮ひずみを低減でき、収縮低減剤と膨張剤を併用すると、さらなる低減効果を期待できる。
- 3) UHPFRC (標準部) の透気性、透水性は普通コンクリートより優れており、抵抗性は時間の経過とともに増加する。
- 4) UHPFRC を上面増厚補強材として使用することで、最大荷重の増加および優れたじん性を示すことが確認できた。
- 5) 新コンクリートとして UHPFRC を用いることで、普通コンクリートを用いる場合よりも付着性能が向上する。
- 6) 表面粗度と破壊形態から線形判別関数を導出することができ、実際に判別を行うと 81.8%の精度で破壊形態を推測することができた。
- 7) デジタル画像相関法を用いることによってコンクリート表面のひずみの可視化、変位の計測を行うことができた。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ長寿命化基本計画，2013.11
- 2) 出水享，松田浩，伊藤幸広，木村喜富：デジタル画像相関法を用いた撤去 PCT 桁橋の載荷試験時における変位，ひずみ，ひび割れ計測
- 3) 社団法人 土木学会(2013) 「コンクリート標準示方書[規準編] 土木学会規準および関連規
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2013
- 5) 社団法人 土木学会(2005) 「コンクリート標準示方書[規準編] JIS 規格集」
- 6) 俵 道和：新旧コンクリートの打継ぎ特性に及ぼす打継目処理方法の影響に関する研究
- 7) 管 民郎：らくらく図解統計分析教室