

論文 床版上面増厚に用いる超速硬型 UHPFRC の若材齢時の引張特性に関する研究

青木 峻二*1・富井 孝喜*2・佐々木 一成*3・玉滝 浩司*4

要旨：超高性能繊維補強セメント系複合材料（UHPFRC）は緻密な材料で透水係数が極めて低く、床版上面の補修材料としての適用が始まっている。床版上面増厚工法は、交通の早期開放を目的として、材齢 28 日より若材齢において供用される例がある。本論文では、超速硬型 UHPFRC の材齢 28 日より若材齢時の引張特性から、床版上面増厚工法の補修材料としての適用性の検討を行った。本配合の UHPFRC は、一軸引張試験などの結果、材齢 7 日目ではひび割れ発生強度、繊維架橋強度、および繊維架橋強度時のひずみが増加することが明らかとなり、材齢 7 日以降では安定した引張特性を有することが確認された。

キーワード：床版上面増厚, UHPFRC, 超速硬, 若材齢, 引張特性

1. はじめに

既設の床版は、輪荷重の繰り返し作用によるコンクリートの土砂化や鉄筋かぶり部の浮き・はく離、塩化物イオンの侵入による鋼材腐食が発生することがある。その対策として適用される床版上面増厚工法では、超速硬型の鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC）が使用されている。近年、耐久性の向上などを目的に、高強度かつ緻密な超高性能繊維補強セメント系複合材料（以下、UHPFRC）を床版上面増厚に用いることで既設床版の補修を行う検討が行われている。

UHPFRC は、超高強度の材料でひび割れ発生強度が高く、鋼繊維の多量混入により、ひび割れが発生してもその幅が大きくなりにくいひずみ硬化特性がある。そのため、従来の SFRC に比べて、ひび割れの進展による耐力低下や表層の土砂化などの劣化が生じにくい材料である。

床版上面増厚工法で補強した橋梁は、交通の早期開放を目的として、材齢 28 日より若材齢で供用される場合がある。このため、若材齢時の引張特性を明らかにすることは、ひび割れ発生リスクを検討する上で重要である。一方で、国内では UHPFRC の若材齢に注目した検討は少なく、超速硬性を有する UHPFRC では実施されていない。そこで、本論文では、材齢 3 時間から 28 日までの若材齢時の超速硬型 UHPFRC の引張特性を実験により確認した。

2. 検証対象とした UHPFRC

2.1 使用材料および配合

UHPFRC の使用材料を表-1 に、配合条件を表-2、目標値を表-3 に示す。本論文では高強度繊維補強セメン

表-1 使用材料

種類	記号	備考
練混ぜ水	W	上水道水
プレミックス材	P	高強度用プレミックス粉体
細骨材	S	珪砂
急硬材	HA	粉体系
補強用鋼繊維	SF	φ0.16×13mm
遅延剤	CR	粉体系
混和剤	SP	高性能減水剤

表-2 配合条件

W/(P+HA) (%)	単体量 (kg/m ³)					添加率(P×%)	
	W	P	S	HA	SF	CR	SP
15.8	210	1187	837	140	157	0.38	1.20

表-3 目標値

項目	試験規格	目標値
モルタルフロー (mm)	JIS R 5201 (落下なし)	210~250
空気量 (%)	JIS A 1128	4.0 以下
練上がり温度 (°C)	JIS A 1156	10.0 以上
圧縮強度 (N/mm ²)	JIS A 1108	120 以上
ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	一軸引張試験 ²⁾	6.0 以上
繊維架橋強度 (N/mm ²)	一軸引張試験 ²⁾	9.0 以上
繊維架橋強度時のひずみ (μ)	一軸引張試験 ²⁾	1500 以上

ト系複合材料の設計・施工指針（案）²⁾（以下、VFC 指針）にならって、最大引張応力度を繊維架橋強度と称する。

超速硬型 UHPFRC は、早期の強度発現性を実現するために急硬材を 140kg/m³ 混入する配合を選定している³⁾。急硬材は、エトリンガイト系のコンクリート用急硬性セメント混和材を用いた。補強用鋼繊維は、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）でも使用されている鋼繊維を使用し、2vol.% 添加した。流動性は、5% 程度の勾

*1 (株)大林組 生産技術本部リニューアル技術部 課長 修(工)(正会員)

*2 (株)大林組 生産技術本部リニューアル技術部 部長(正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所構造技術研究部 主任研究員 修(工)(正会員)

*4 UBE三菱セメント(株)研究所 コンクリート研究室 博(工)

表-4 試験項目一覧

項目	圧縮強度 静弾性係数	引張特性			
		一軸引張	割裂引張	切欠きはりの3点曲げ	曲げ強度
対象	圧縮強度 静弾性係数	ひび割れ発生強度 繊維架橋強度	ひび割れ発生強度	繊維架橋強度	ひび割れ発生強度 曲げ強度
試験規格	JIS A 1108 JIS A 1149	一軸引張試験案 ²⁾	JIS A 1113	JCI-S-002-2003	JIS A 1106
試験材齢 (養生)	時間	3,6,9,12,24,48,72 (封緘)	24,48,72 (封緘)	3,6,9,12,24,48,72 (封緘)	72 (封緘)
	日	7,14,28 (標準)	7,14,28 (封緘)	7,14,28 (標準)	7,14,28 (標準)
試験体寸法 (mm)	φ100×200	100×100×400 (ドッグボーン型)	φ100×120	100×100×400	100×100×400
試験本数 (本)	3	5	3	4	4

配においても仕上げが可能なモルタルフロー 210～250mm となるように高性能減水剤で調整した。また、可使時間を調整するために、遅延剤を使用した。

2.2 練混ぜ方法

練混ぜは、20℃の室内で行い、二軸強制練りミキサ(容量：100L)を用い、練混ぜ量は60L/バッチとした。練混ぜ手順は、プレミックス材と細骨材を投入後に空練り30秒を行い、水と混和剤を加えて3分間練り混ぜた。その後、遅延剤を投入し2分間、補強用鋼繊維を投入して1分間、急硬材を投入して1.5分間の練混ぜを行った。

2.3 フレッシュ性状

モルタルフローはフローテーブルを落下させない方法により各バッチで計測し211～248mm、空気量は3.0～3.3%、コンクリート温度は26.1～27.2℃であった。

3. 試験方法

3.1 概要

若材齢時の引張特性を把握するために実施した試験項目の一覧を表-4に示す。圧縮強度と静弾性係数は引張特性とも関係が深いので、すべての試験材齢で実施した。一方、引張特性を評価する試験は、その試験の特性を考慮して、表-4に示す試験材齢で実施した。養生は、一軸引張試験体のみ材齢1日で脱型後に気温20±3℃で封緘養生とした。他の試験体は、材齢3～72時間で試験した供試体は試験直前まで脱型せずに気温20±3℃で封緘養生、材齢7～28日で試験した供試体は材齢1日で脱型後に20℃標準水中養生とした。

VFC指針では、ひずみ硬化挙動を示すVFCに対して一軸引張試験により引張特性を確認する場合がある。UFCの設計・施工指針(案)⁴⁾(以下、UFC指針)およびVFC指針では、ひび割れ発生強度と繊維架橋強度を割裂引張試験と切欠きはりの3点曲げ試験(以下、切欠きはり曲げ試験)から求める方法が記載されている。また、UFC指針では、曲げ強度試験から引張特性を推定する方法も記載されている。

以上より、本検討では、一軸引張試験に加えて、割裂

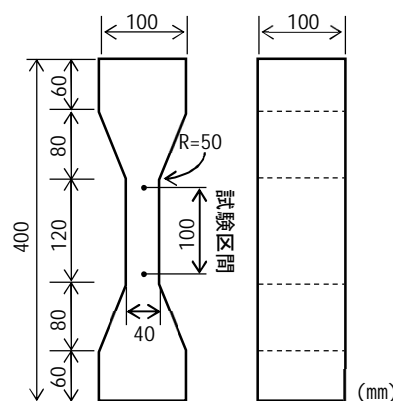


図-1 一軸引張供試体

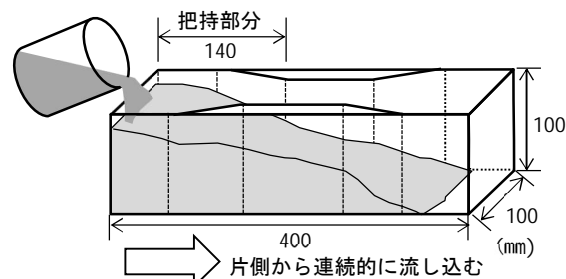


図-2 一軸引張試験体製作方法

引張試験、切欠きはり曲げ試験、曲げ強度試験を行うことで、超速硬型UHPFRCの引張特性を把握してそれらの比較を行った。

3.2 圧縮強度・静弾性係数

圧縮試験はJIS A 1108、静弾性係数はJIS A 1149に従い、供試体寸法はφ100×200mmとした。試験本数は各材齢で3本とした。

3.3 一軸引張試験

供試体形状はVFC指針の一軸引張試験方法(案)に例示されているドッグボーン型で、JIS A 1132に準じた曲げ強度試験用の供試体型枠(100×100×400mm)に専用のスペーサーを入れることで、端部60mmの断面100×100mmに対して、中間部100mmの断面100×40mmとした(図-1)。供試体の製作は、端部60mmの片側から

UHPFRCを1層で連続的に流し込む方法とした(図-2)。一軸引張試験は、図-3、写真-1に示す装置を用いて実施した。試験区間は中央100mmとし、試験本数は各材齢で5本とした。ひび割れ発生強度は、打込み面と型枠面の両方にひずみゲージを貼り付け、荷重とひずみの関係が線形でなくなった荷重から算出した。

3.4 割裂引張試験

割裂引張試験はJISA 1113に従い、供試体寸法はφ100×120mmとした。ひび割れ発生強度は、供試体の両端面にひずみゲージを荷重方向と直角方向に貼り付け、荷重とひずみの関係が線形でなくなった荷重から算出した(図-4)。試験本数は各材齢で3本とした。

3.5 切欠きはりの3点曲げ試験

切欠きはり曲げ試験は、JCI-S-002-2003「切欠きはりを有した繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」に従い、供試体は100×100×400mmとし、中央部に切欠き(深さ30mm)をいれた。試験本数は各材齢で4本とし、得られた4本の試験結果を平均化した荷重-CMOD関係の逆解析により引張軟化曲線を求めた。繊維架橋強度は、ひび割れ発生後に一定のひび割れ幅において保持される引張応力の最大値とした。

3.6 曲げ強度試験

曲げ試験はJISA 1106に従い、供試体寸法は100×100×400mmとした。ひび割れ発生強度は、供試体に貼り付けたひずみゲージから得られた曲げ引張ひずみと曲げ応力の関係が線形でなくなった荷重から算出した。試験本数は各材齢で4本とした。

4. 試験結果

4.1 圧縮強度・静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の試験結果を図-5、6に示す。

圧縮強度は、材齢3時間で30N/mm²以上となったあと、材齢6~9時間は強度の伸びが小さく15N/mm²程度の増加にとどまったが、材齢12~24時間にかけて、強度増加が大きくなり、材齢24時間では86.5N/mm²まで増加した。材齢24~72時間までも継続して強度は増加し、材齢72時間で110N/mm²まで増加した。その後、強度は増加を続け、材齢7日で目標強度120N/mm²以上の125N/mm²となり、材齢28日で154N/mm²となった。

材齢6~9時間までの強度増加が緩やかになった理由は、急硬材による強度増加が材齢6時間までに起こったあとに、材齢9時間以降に起こる水和反応による強度増加まで時間がかかったためであると推察できる。

静弾性係数は、圧縮強度の増加に伴って増加を続けたが、材齢7日以降の増加幅は圧縮強度と比べると小さい結果となった。

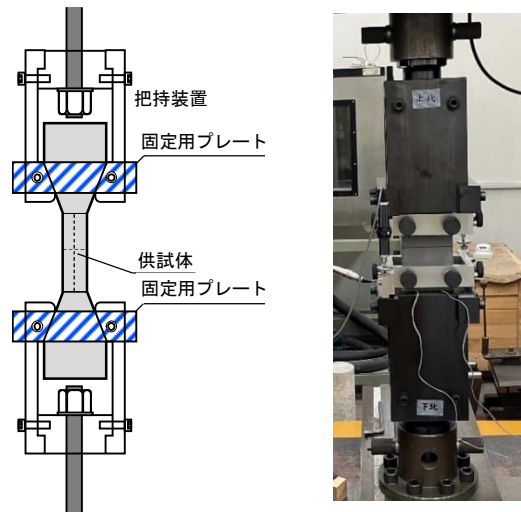


図-3 一軸張試験 写真-1 一軸引張試験状況

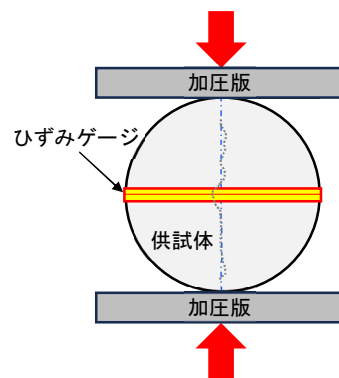


図-4 割裂引張試験

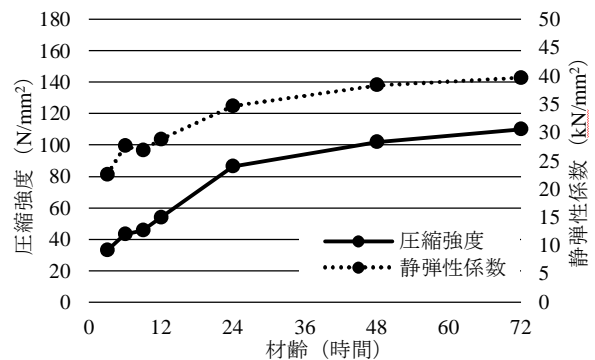


図-5 圧縮強度と静弾性係数 (材齢72時間まで)

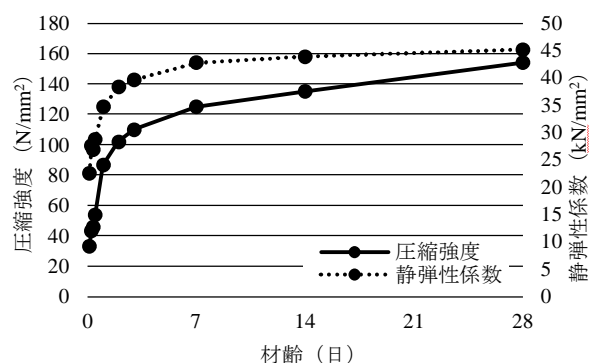


図-6 圧縮強度と静弾性係数

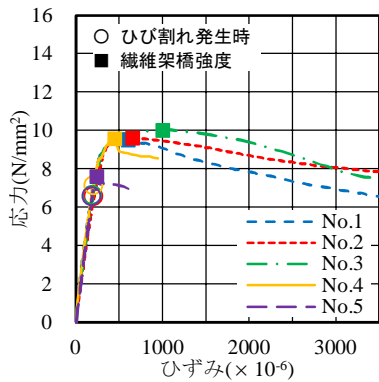


図-7 一軸引張試験（材齢 24 時間）

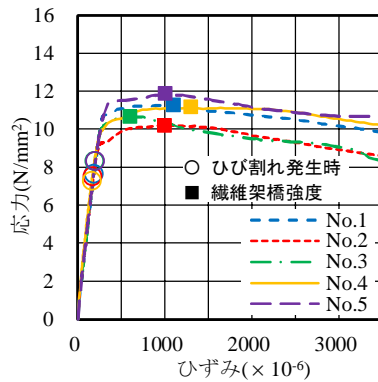


図-8 一軸引張試験（材齢 48 時間）

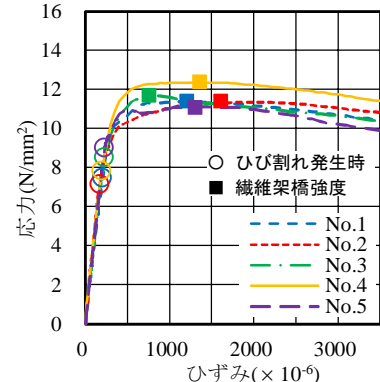


図-9 一軸引張試験（材齢 72 時間）

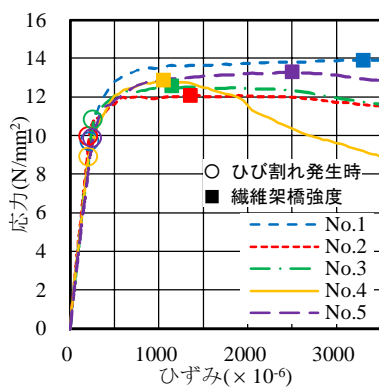


図-10 一軸引張試験（材齢 7 日）

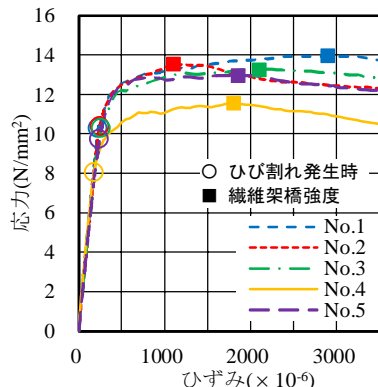


図-11 一軸引張試験（材齢 14 日）

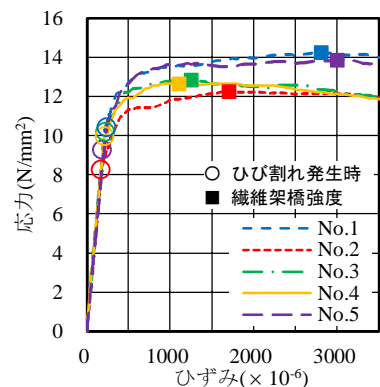


図-12 一軸引張試験（材齢 28 日）

4.2 一軸引張特性

一軸引張試験の各材齢のひずみと応力の関係を図-7～12、ひび割れ発生強度、繊維架橋強度、および繊維架橋強度時のひずみを表-5 に示す。なお、図に示すひずみは、試験区間の平均ひずみとしている。表-5 に示す平均値は、試験区間外で破壊した供試体を除いた供試体の平均値とした。

ひび割れ発生強度、繊維架橋強度、繊維架橋強度時のひずみの各平均値は、材齢 7 日まで増加傾向を確認できるが、それ以降は明確な増加傾向は確認できなかった。

試験区間外破壊となった供試体を除けば、材齢 24 時間でひび割れ発生強度は 6.0N/mm^2 以上、繊維架橋強度は 9.0N/mm^2 以上となった。ひび割れ発生強度は圧縮強度に関係するため、圧縮強度が増加傾向を示した材齢 7 日以降も増加することが予想されたが、本試験の範囲では材齢 7 日以降の増加傾向は確認できなかった。ひび割れ発生強度は、鋼繊維の影響があることや個別の試験結果のばらつきが大きいこともあり、高強度領域では圧縮強度との関係が明確とならなかった可能性がある。

また、繊維架橋強度と繊維架橋強度時のひずみは、繊維の影響が大きいいため、繊維の効果が十分に発揮される強度（本試験では圧縮強度 120N/mm^2 程度）に達した材齢以降は増加傾向を示さなかった可能性がある。

ひび割れ発生強度、繊維架橋強度、繊維架橋強度時のひずみの関係は明確ではないが、本試験の範囲では材齢 7 日以降ですべての試験結果が明確な増加傾向を示さなくなり、十分なひずみ硬化特性を得られた。また、試験区間外破壊となった供試体数は材齢による差は明確ではなく、1～2 体は試験区間外破壊となる可能性があることから 1 水準あたり試験体数が 5 体以上は必要と考える。なお、繊維架橋強度時のひずみの目標値と設定した 1500μ については、今後もデータを収集して、その妥当性を検証したいと考える。

4.3 ひび割れ発生強度

ひび割れ発生強度の試験結果を図-13、14 に示す。なお、ひび割れ発生強度と圧縮強度の関係を示すため、第二縦軸の値をひび割れ発生強度の 15 倍として圧縮強度も合わせて示した。

割裂引張試験から得られたひび割れ発生強度は材齢 3 時間から 7 日で継続的に増加し、材齢 7 日以降は緩やかに増加した。ひび割れ発生強度は圧縮強度の $1/13\sim 1/15$ 程度となり、圧縮強度との相関関係が示された。割裂引張試験と一軸引張試験のひび割れ発生強度は相関があると考えられるが、材齢 7 日以降で異なる傾向を示した。

圧縮強度 $30\sim 60\text{N/mm}^2$ の範囲ではコンクリート標準示方書⁵⁾に示された圧縮強度と割裂ひび割れ発生強度の

表-5 一軸引張試験結果一覧

材齢	No.	ひび割れ発生強度(N/mm ²)		繊維架橋強度(N/mm ²)		繊維架橋強度時ひずみε _u (×10 ⁻⁶)	
		各値	平均値	各値	平均値	各値	平均値
24 時間	1	6.56	6.58	9.50	9.71	599	749
	2	6.55		9.62		650	
	3	6.62		10.0		999	
	4*	7.13		9.59		449	
	5*	6.56		7.62		240	
48 時間	1	7.64	7.81	11.3	11.06	1098	998
	2	7.49		10.2		999	
	3	8.31		10.7		597	
	4	7.28		11.2		1294	
	5	8.32		11.9		1000	
72 時間	1	7.45	7.99	11.4	11.60	1192	1233
	2	7.14		11.4		1594	
	3	8.52		11.7		743	
	4	7.84		12.4		1343	
	5	9.00		11.1		1294	
7 日	1	9.68	10.07	13.9	12.98	3300	2073
	2	9.95		12.1		1349	
	3	10.8		12.6		1144	
	4*	8.89		12.9		1049	
	5	9.85		13.3		2497	
14 日	1	10.3	9.60	14.0	12.98	2893	2158
	2*	10.4		13.6		1098	
	3	10.3		13.3		2094	
	4	8.04		11.6		1796	
	5	9.75		13.0		1849	
28 日	1	9.26	9.46	14.3	13.30	2799	2146
	2	8.24		12.3		1694	
	3*	10.2		12.9		1240	
	4	10.0		12.7		1098	
	5	10.4		13.9		2994	

*試験区間外破壊

関係式 (1) と同等の傾向を示した。また、鋼繊維補強コンクリートや高強度コンクリートは異なる力学特性を示すことを考慮して適用を検討した UFC から関係係数を変更した既往の文献式 (2) ⁶⁾ と比べても、圧縮強度が 120N/mm²以上の範囲では、圧縮強度に対する割裂ひび割れ発生強度が高い傾向を示した (図-15)。これは、急硬材が膨張傾向を示す材料 ⁷⁾ であることから、部材内で発生した膨張応力が鋼繊維で拘束されることによって部材内にプレストレスが発生したことが考えられる。

$$f_{cr} = 0.23f_c^{2/3} \quad (1)$$

$$f_{cr} = 0.32f_c^{2/3} \quad (2)$$

f_{cr} : 割裂ひび割れ発生強度(N/mm²)

f_c : 圧縮強度 (N/mm²)

曲げ強度試験から得られたひび割れ発生強度と割裂ひび割れ発生強度の試験結果を図-16 に示す。UFC 指針に示されている曲げと割裂引張試験から得られたひび割れ発生強度の関係式と同等の傾向は示しているものの、材齢が 14 日以降の結果では曲げひび割れ発生強度に比べて割裂ひび割れ発生強度が小さい値となった。

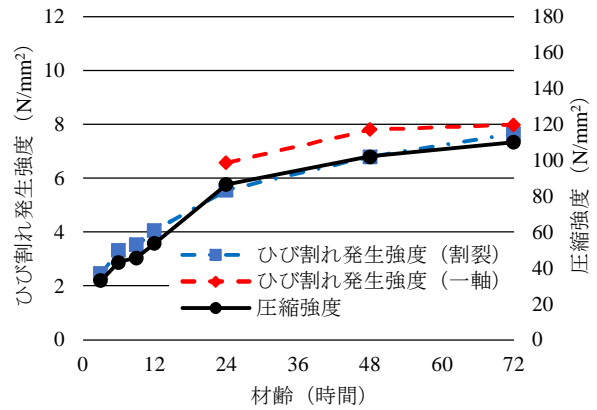


図-13 ひび割れ発生強度 (材齢 72 時間まで)

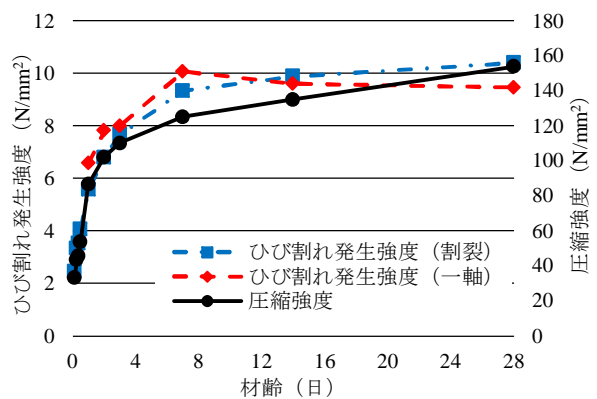


図-14 ひび割れ発生強度

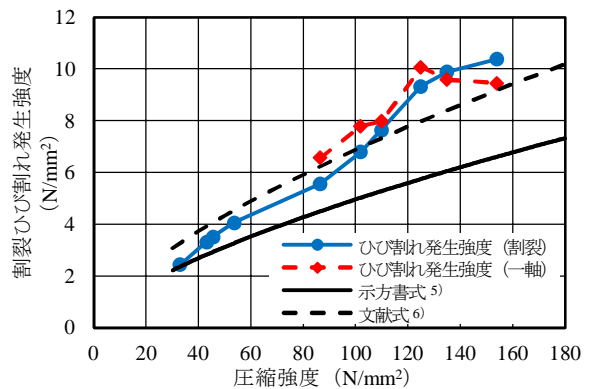


図-15 圧縮強度とひび割れ発生強度の関係

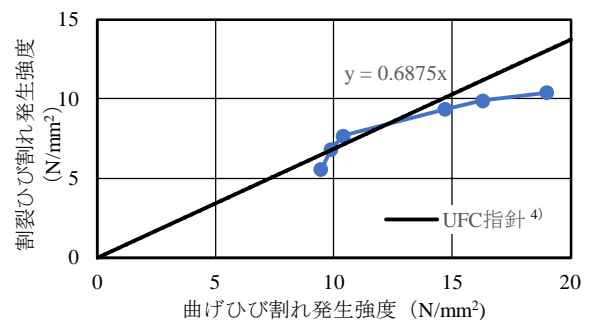


図-16 曲げひび割れ・割裂ひび割れ発生強度の関係

4.4 引張軟化特性

切欠きはり曲げ試験から得られた引張軟化曲線を図-17に示し、引張軟化曲線から得られた繊維架橋強度と合わせて一軸引張試験の繊維架橋強度の試験結果を図-18に示す。切欠きはり曲げ試験の繊維架橋強度は、材齢3～28日まで継続して増加傾向を示し、圧縮強度の1/15程度の値となり相関関係があった。一方で、本検討の範囲では、一軸引張試験と引張軟化曲線から得られた繊維架橋強度では、前者がすべての材齢において大きいことから、繊維架橋強度の試験による差は今後の検討が必要であると考えられる。また、引張軟化曲線での繊維架橋強度と曲げ強度の関係は、超速硬型UHPFRCについてもUFC指針⁴⁾の関係式を適用できる可能性が示された(図-19)。

5. まとめ

本配合のUHPFRCに関する検討から以下が示された。

- (1) 一軸引張試験から得られたひび割れ発生強度、繊維架橋強度と繊維架橋強度時のひずみは、材齢7日までは増加傾向を示すが、材齢7日以降の明確な増加傾向を確認できなかった。
- (2) 一軸引張試験と割裂引張試験から得られたひび割れ発生強度は相関関係が強く、圧縮強度の1/13～1/15程度であった。
- (3) 繊維架橋強度は、一軸引張試験が切欠きはりの3点曲げ試験の値と比べて1.3～1.7倍大きくなった。
- (4) 切欠きはりの3点曲げ試験から得られた引張強度と曲げ試験から得られた曲げ強度の関係はUFC指針に示されるような線形関係となった。

以上の結果から、本配合のUHPFRCは、材齢7日以降では安定したひずみ硬化特性を有していると考えられる。材齢7日より若材齢の範囲では、適用箇所に応じてひび割れ発生強度と発生応力の関係を確認するなど、十分な検討が必要である。床版上面増厚工法に適用して材齢7日より若材齢で早期開放を行う場合には配慮が必要となる。

今後は、若材齢時のひび割れ発生強度と収縮特性などと合わせて、疑似拘束試験を行うことなどで、発生応力との関係を明確にして、現場打設後のひび割れ発生に対する抵抗性などを検討していきたい。

参考文献

- 1) 渡邊有寿: 超高性能繊維補強セメント系複合材料の品質および耐久性確保に向けた研究, 宇都宮大学博士論文, 2022.3
- 2) 土木学会: 高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針(案), 2024.9
- 3) 富井孝喜, 青木峻二, 玉滝浩司, 藤野由隆: 床版上面増厚工法用超速硬型高性能繊維補強コンクリー

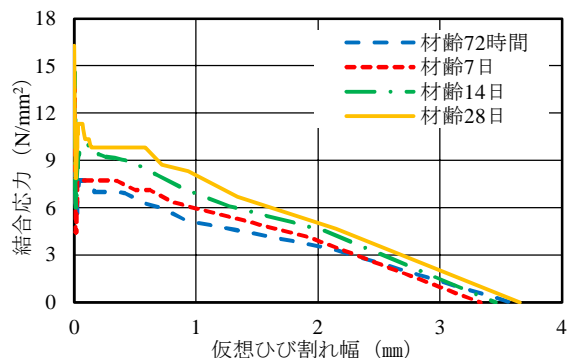


図-17 引張軟化曲線

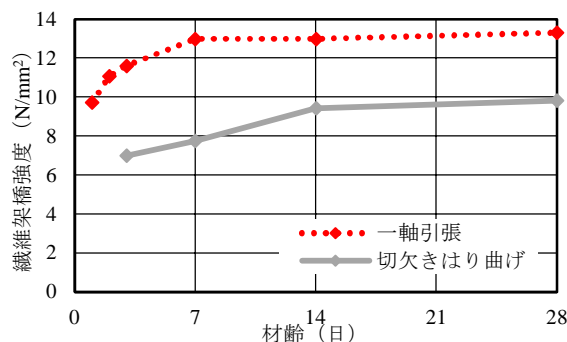


図-18 繊維架橋強度

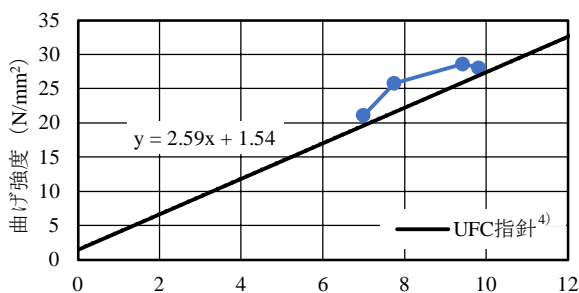


図-19 引張軟化曲線での繊維架橋強度と曲げ強度の関係

トの配合設定, 土木学会, 第77回年次学術講演会, V-233, 2022.9

- 4) 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), 2004
- 5) 土木学会: 2022年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2022.12
- 6) 伊藤隆紘, 藤野由隆, 玉滝浩司, 伊藤智章, 川西貴士, 佐々木一成: 供試体寸法が異なるUFCの強度試験に関する検討, 土木学会, 第77回年次学術講演会, V-580, 2022.9
- 7) 青木峻二, 富井孝喜, 佐々木一成, 玉滝浩司: 床版上面増厚に用いる超速硬型UHPFRCの収縮特性および引張特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1927-1932, 2024