

報告 オートクレーブ養生を行った常温硬化型 UFC の強度特性について

平田 隆祥^{*1}・桐山 宏和^{*2}・吉田浩一郎^{*3}石関 嘉一^{*4}

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は、その多くが工場生産による PCa 部材用の材料として用いられている。この材料は、セメントの水和の過程で、温度の影響を受けることが知られている。一方、現場施工を目指して開発された常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は、オートクレーブ養生を行うことで、PCa 部材の生産効率も高めることが期待できる。しかし、オートクレーブ養生を行った場合の強度特性は明確になっていない。本報告は、オートクレーブ養生を行った常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の基礎物性である圧縮強度、ひび割れ発生強度、引張強度を明らかにした。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, PCa, UFC, オートクレーブ, 圧縮強度, 等価材齢, 引張強度

1. はじめに

近年、極めて高い強度とじん性を有し、さらに高耐久性を併せ持つ超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下 UFC と称す) が実用化されている。UFC は、2004 年に土木学会から発刊された超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案) (以下、UFC 指針と称す)¹⁾において、超高強度モルタルと高強度鋼繊維で構成されており、150N/mm²以上の圧縮強度と 5N/mm²以上の引張強度を持つ材料と定義されている。この UFC は、内部に鋼材を用いる際にも、かぶりを 20mm 設けることで 100 年以上の耐久性を有するとされている。

従来の UFC は、その多くが高温の給熱養生を基本¹⁾とし、工場生産による PCa 部材用の材料として用いられている。一般に、超高強度コンクリートは多量のセメントと、シリカフェームを代表とするポゾラン反応性を有する混和材を用いて製造されることが多い。シリカフェームを結合材の一部として用いた場合、高温養生下でポゾラン反応が活性化されるため、圧縮強度の発現性は温度の影響を強く受けることが知られている²⁾。

一方、UFC の現場施工を目指して開発された常温硬化型の UFC³⁾は、10℃から 40℃の常温環境下で、給熱養生を行わなくても UFC の性能を満足することが確認されているが、工場生産で PCa 部材用の材料として用いる場合は、オートクレーブ養生を行うことで、PCa 部材の生産効率を高めることが期待できる。しかし、常温硬化型の UFC 材料について、オートクレーブ養生を行った場合の基礎的物性である強度特性は明確になっていない。

そこで、本報告は、オートクレーブ養生を行った常温硬化型 UFC の基礎物性を確認することを目的として、フ

レッシュ性状、圧縮強度、ひび割れ発生強度、引張強度を明らかにした。また、数種類の配合について、その物性を比較検討した。

2. 常温硬化型 UFC の概要

2.1 構成材料

常温硬化型 UFC のモルタル部分は、ポゾラン材を含むプレミックス材、水、細骨材、および高性能減水剤 (SP) で構成される。プレミックス材は、反応性の速いエーライト (C₃S) 量が多いセメントにより、常温養生において早期に緻密な組織を形成する。さらに、セメントの水和反応により生成した水酸化カルシウムと高い反応性を有するポゾラン材との反応によって、より緻密化が進み高強度・高耐久性を実現する。標準配合を表-1 に示す。

鋼繊維は、一般建設用鋼繊維とは異なる高強度鋼繊維を使用した。高強度鋼繊維を写真-1 に示す。この高強度鋼繊維は、延伸製法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、表面は真ちゅうでメッキされている。一般の建設用鋼繊維の引張強度 1,000N/mm²に比べて、引張強度は 2,000N/mm²以上で、形状は直線状である。

表-1 常温硬化型 UFC の標準配合

種類	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
標準	230 ^{*1}	1830	330 ^{*2}	32 ^{*3}	157

※1 水の単位量は高性能減水剤の水分を含む

※2 骨材は表乾状態の単位量

※3 性状により調整

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 宇部興産 (株) 建設資材カンパニー技術開発研究所コンクリート開発部 研究員 (正会員)

*3 宇部興産 (株) 建設資材カンパニー技術開発研究所コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)



写真-1 高強度鋼繊維



写真-2 モルタルフロー試験の状況

表-2 フレッシュ試験項目および判定基準

試験項目	判定基準
モルタルフロー(mm)	260 mm ± 30 mm (落下なし)
空気量(%)	3.5%以下

表-3 常温硬化型 UFC の特性値

試験項目	特性値	試験方法
圧縮強度	180N/mm ²	JIS A 1108
ひび割れ発生強度	8.0 N/mm ²	JIS A 1113
引張強度	8.8 N/mm ²	JSCE127-3.2.3
ヤング係数	4.6 × 10 ⁴ N/mm ²	JIS A 1149
ポアソン比	0.2	ゲージ貼り付けにより測定
熱膨張係数	10.7 × 10 ⁻⁶ /°C	JCI「マスコングリートのひび割れ制御指針 2008」に準拠
クリープ係数	0.7	指針に準拠

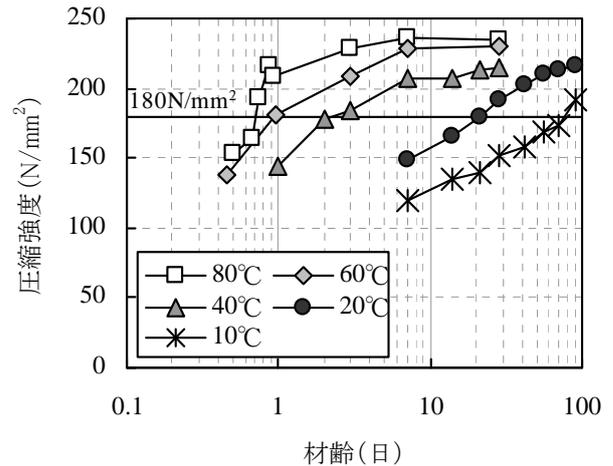


図-1 養生温度と圧縮強度 (円柱供試体) 4)

表-4 実験配合

No.	W/P※1 (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
		W	P※1	S	SP	
1	12.6	230	1830	330	20.8	157
2	12.6	230	1830	330	20.8	0
3	12.4	230	1830 + 20EX※2	330	23.0	157
4	8.9	180	2015	319	49.1	157

※1 Pはプレミックス材

※2 EXは膨張剤。外割添加

2.2 使用材料フレッシュ性状と品質管理項目

常温硬化型 UFC のモルタルのフロー値は 260 ± 30mm で、スランプフローは 800 ± 100mm と流動性や間隙充填性に優れる。フレッシュ試験の品質管理項目および判定基準を表-2に、モルタルフローの状況を写真-2に示す。

2.3 硬化特性と温度依存性

常温硬化型UFCは高強度かつ高じん性で、圧縮強度 180N/mm²以上、引張強度8.8N/mm²以上の材料強度を有している³⁾。常温硬化型UFCの特性値を表-3に、養生温度の違いによる圧縮強度⁴⁾の試験結果を図-1に示す。

養生温度が一定で80°C以下の場合、図-1に示すように養生温度が高くなるほど、同一材齢の圧縮強度も高くなる傾向にある。20°C環境の場合、材齢28日までに200N/mm²程度の圧縮強度が得られる。また、180N/mm²に到達する材齢は、養生温度20°Cの場合が材齢21日となるのに対して、養生温度が40°C以上の場合、3日以内と短くなる。一方、養生温度が10°Cと低い場合は、約90日と長くなる。

圧縮強度は、200N/mm²を超えた辺りで頭打ち現象が見られ、最終到達強度は 235N/mm²程度と推測できる。

3. オートクレーブ養生実験の概要

オートクレーブ養生は、コンクリート製品の製造過程で行う促進方法の一種類である。鋼製で大型の円筒状の蒸気釜 (オートクレーブ) の中にコンクリート製品を入れて、高温・高圧の飽和蒸気を通して促進養生を行う。

コンクリート製品の製造では、型枠の使用効率や回転効率を上げ、製品を早期に出荷するために、促進養生が広く行われる。

3.1 使用材料と配合

オートクレーブ養生実験に用いた材料は、常温硬化型

表-5 試験項目

試験項目	試験方法
モルタルフロー	JIS R 5201 を参考(落下なし)
温度	JIS A 1156 に準じる
空気量	JIS A 1128 に準じる
圧縮強度	供試体寸法：φ50×100mm, n=4 JIS A 1107 および JIS A 1108 に準じる
ひび割れ発生強度	JIS A 1113 および JSCE113-5.3 の ひずみゲージによる計測方法に準じる n=3
引張強度	JIS A 1113 に準じる, n=3

表-6 養生の条件

種類	目的	内容
一次養生	フレッシュ材料を型枠に打ち込んだ後に、脱型強度が得られるまでの養生。	最高温度 65℃で4時間等温蒸気養生。終了後9日間存置。 (温度履歴は図-2 参照)
二次養生	一次養生を完了し、脱型した製品を行う2回目の養生で、品質管理強度を得ることを目的とした養生。	最高温度 180℃, 最高蒸気圧力 10.7 気圧で9時間等温等圧養生 (温度および蒸気圧力の履歴は図-3 参照)

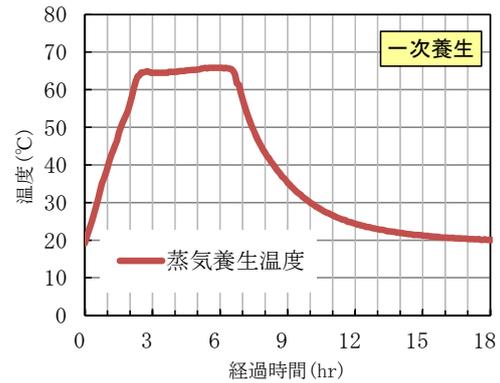


図-2 一次養生 (蒸気養生)

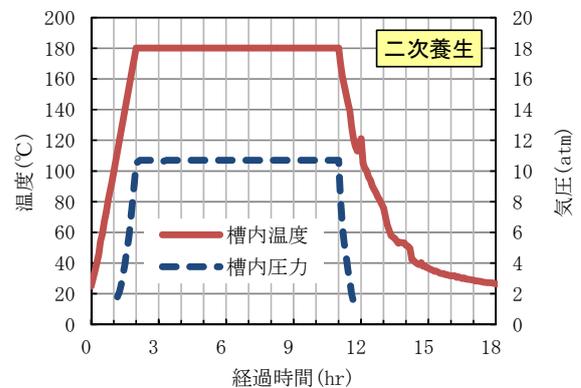


図-3 二次養生 (オートクレーブ養生)

UFC と同等とし、水、セメントおよび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、および鋼繊維（直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2000N/mm² 以上）とした。実験の配合を表-4 に示す。

配合 No. 1 は常温硬化型 UFC の標準配合。配合 No. 2 は常温硬化型 UFC から補強繊維を除いた配合。配合 No. 3 は常温硬化型 UFC の配合に、外割りで 20kg/m³ の膨張材を添加した。配合 No. 4 は W/P を標準の 12.6% から 8.9% に低減した配合とし、各配合を比較検討した。

3.2 練混ぜ方法

各配合の練混ぜは、ホバートミキサ（容量 5L）を使用した。プレミックス材および細骨材を投入後、30 秒間空練りし、高性能減水剤を含む水を投入して7分間練り混ぜた後、掻き落としを行ってから、さらに3分間練り混ぜた。その後、鋼繊維を投入してさらに2分間練り混ぜた後に排出した。配合 No.4 は、モルタルの軟化までに時間を要したため、20分間追加して練混ぜた。

3.3 試験項目

試験項目を表-5 に示す。各供試体を作製する際に、製造した UFC のフレッシュ性状を測定した。また、オートクレーブ養生の完了後に、硬化物性について試験を行った。



写真-3 蒸気養生の状況



写真-4 オートクレーブ養生の状況

3.4 養生条件

養生条件は表-6 に示すように、一次養生と二次養生の二段階とした。また、養生過程の温度履歴の測定を行った。各養生の温度履歴の計測結果を図-2、図-3 に示す。また、養生状況を写真-3、写真-4 に示す。

4. 実験結果

4.1 フレッシュ性状の比較

フレッシュ性状の試験結果を表-7 に示す。標準配合である No.1 のフレッシュ性状は、表-2 に示す判定基準を満足した。繊維を無添加とした配合 No.2 は、繊維の拘束が無くなり、モルタルフロー値が 28 mm 増加し、空気量は 1.1% 減少した。次に、膨張材を外割りで添加した配合 No.3 は、モルタルフロー値が 15 mm 減少し、空気量は 0.5% 増加したが、判定基準は満足した。これは、単位水量が一定で、粉体量が増加した影響によるものと考えられる。W/P が小さい配合 No.4 は、配合 No.1 に比べてモルタルフロー値が 60 mm 減少し、空気量は 1.9% 増加した。これは W/P を 8.9% とすることにより、モルタルの粘性が増加したこと、練混ぜ時間を延長した影響と考える。表-2 に示す判定基準値は満足しなかった。

4.2 圧縮強度

(1) 圧縮強度の比較

オートクレーブ養生した標準配合 No.1 の圧縮強度は、図-4 に示すように UFC 指針の規定値 150N/mm^2 を満足し 167N/mm^2 となった。オートクレーブ養生は、 180°C の高温・高圧条件下のセメントの水和反応により、常温・常圧では生成しにくいトバモライトの強度の高い安定した水和生成物により、強度増進の効果を期待する養生方法である。今回の実験結果は、これまでに集積した標準養生の圧縮強度 196N/mm^2 ($n=149$) と比べて 29N/mm^2 小さかった。文献⁵⁾によると、オートクレーブの養生条件によっては、やや圧縮強度が低下する場合もあることが指摘されている。オートクレーブの養生は、短期に高強度が得られるものの、物性値が変化する場合もあるので事前の確認が必要となる。

次に、配合 No.1 と、配合 No.2、配合 No.3、配合 No.4 を比較すると、繊維を無添加とした場合はバラツキが小さく圧縮強度が 15N/mm^2 増加し、膨張材を外割りに添加すると圧縮強度が 40N/mm^2 増加した。また、W/P の低下で、圧縮強度は 96N/mm^2 増加して 263N/mm^2 となった。鋼繊維有りの供試体の見掛け密度と強度を指数式で近似すると図-5 となる。標準養生の結果も考慮すると、オートクレーブ養生よりも W/P 低減で密度が 0.1g/cm^3 増加した効果が圧縮強度に与える影響が大きいと考える。

(2) マチュリティを考慮した強度推定

マチュリティを考慮した物性予測には等価材齢（有効

表-7 フレッシュ試験の結果

No.	条件	モルタルフロー(mm)	練上り温度(°C)	空気量(%)	単位容積質量(g/cm^3)
1	標準	275	24.2	2.6	2.51
2	繊維無	303	22.5	1.5	2.43
3	膨張材	260	29.5	3.1	2.50
4	低W/P	215	35.5	4.5	2.56

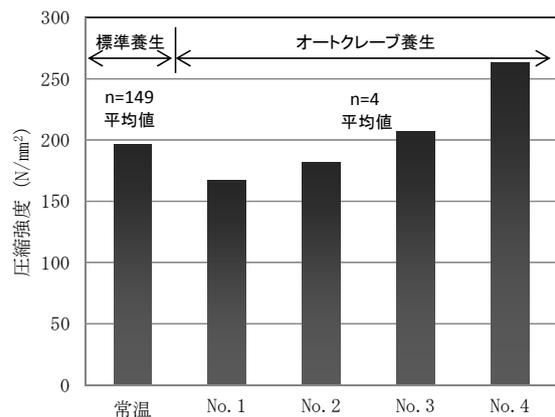


図-4 圧縮強度試験結果

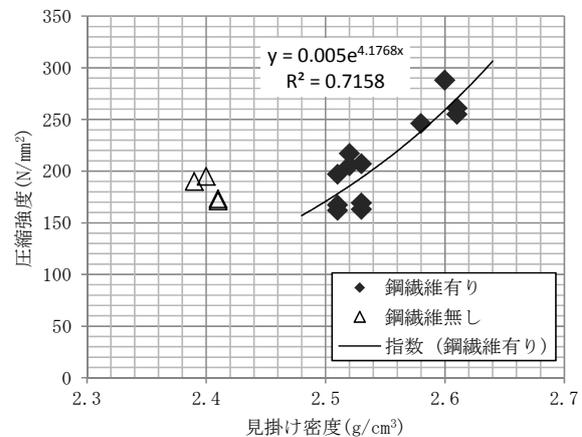


図-5 見掛け密度と圧縮強度

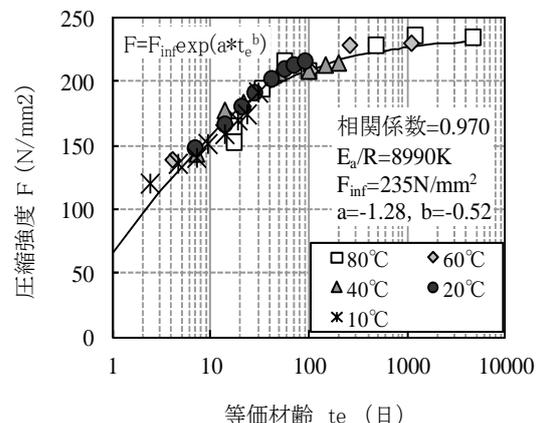


図-6 等価材齢と圧縮強度の推定値⁴⁾

材齢) の適用例⁸⁾も多く、近年では超高強度コンクリートの収縮特性を評価した報告がある⁹⁾。これは、セメント(結合材)の水和反応速度がアレニウス則に従うとし、様々な温度履歴を受けた材齢を、基準温度 20°C(293K)の材齢に換算するものである。養生温度の範囲が 10°Cから 80°Cの範囲における常温硬化型 UFC の標準配合の等価材齢と圧縮強度の関係を図-6 に示す⁴⁾。等価材齢は以下の式(1)で示される。

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

ここに、 t_e ：等価材齢(日)、 E_a ：見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)、 Δt ：温度 T_k を維持する時間(日)である。等価材齢中の E/R を 8990K とすることで、100N/mm² 以上の圧縮強度を精度良く推定できることが分かる。

養生中の温度履歴を用いて等価材齢から推定した配合 No.1 の圧縮強度を図-7 に示す。なお、等価材齢と圧縮強度の関係は、図-6 と同一とした。

推定した圧縮強度は、一次養生終了後に 176N/mm² ($t_e=17.5$ 日)、オートクレーブ養生終了後は 233N/mm² ($t_e=20158$ 日)となった。オートクレーブ養生後には、等温養生 80°C以下における最終到達強度に達していると推定された。しかし実験結果は、配合 No.1 のオートクレーブ養生後の圧縮強度が 167N/mm² であり、推定値より小さい。従って、等温養生 80°C以下の場合の最終到達強度 235N/mm² に達していないことから、オートクレーブ養生を行った常温硬化型 UFC の水和組織は、等温養生 80°C以下の場合の水和組織と異なった状態になっている可能性が高いと判断する。

一方、配合 No.1 と比較し、配合 No.2、配合 No.3 のように繊維を無添加としたり、膨張材を外割添加とすることで、オートクレーブ養生の水和組織への影響を低減でき、強度が増加傾向となることが確認できた。

4.3 ひび割れ発生強度および引張強度

割裂によるひび割れ発生強度と引張強度の試験の状況を写真-5 に、試験結果を図-8、図-9 に示す。

オートクレーブ養生を行った配合 No.1 のひび割れ発生強度と引張強度は、UFC 指針の規定値である 4.0 N/mm² と 5.0 N/mm² をそれぞれ満足し、7.8 N/mm² と 19.3N/mm² であった。一方、繊維を無添加とした配合 No.2 のひび割れ発生強度・引張強度は、2.5 N/mm² と低下した。高強度のモルタルの場合、繊維の添加による補強効果により、ひび割れ発生強度や引張強度は大きく改善されることが確認できた。

次に、膨張材を外割り添加した配合 No.3 は、配合 No.1

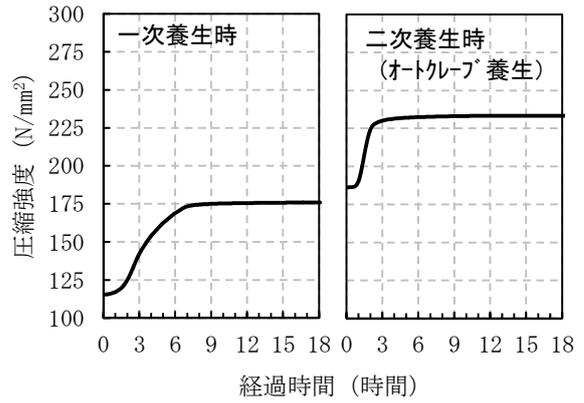


図-7 圧縮強度の推定値と経過時間

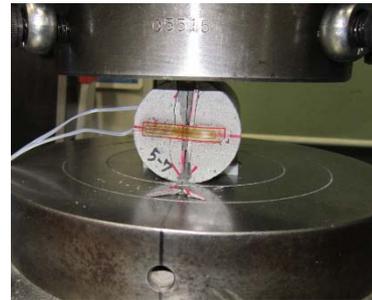


写真-5 ひび割れ発生強度の測定状況

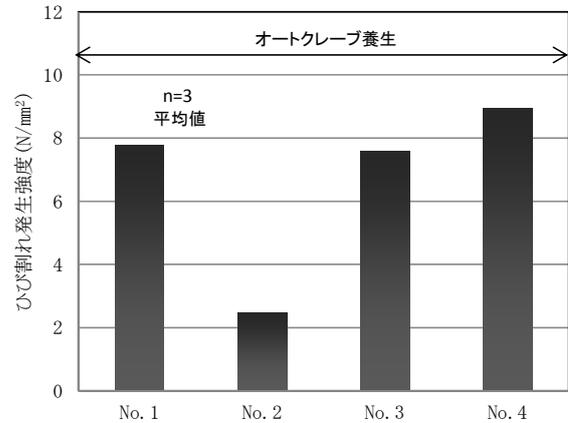


図-8 ひび割れ発生強度試験結果

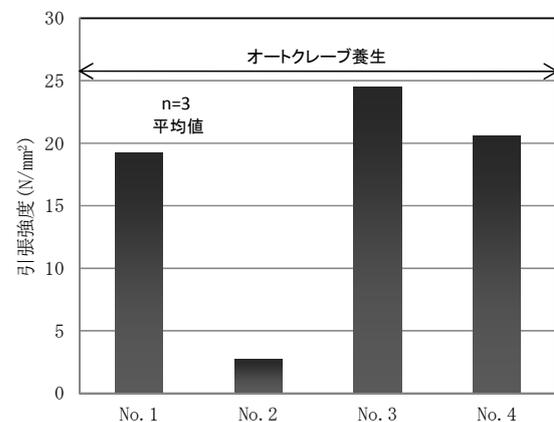


図-9 引張強度試験結果

と比べてひび割れ発生強度がほぼ同等，引張強度が 5.3 N/mm²増加した。これは，膨張材を外割り添加したことで，W/P が若干低下したこと，および膨張材の膨張力がモルタルに付与されて，ケミカルプレストレスの効果で引張強度が増加したと考える。

一方，W/P を低下させた配合 No.4 は，圧縮強度が配合 No.1 より 1.6 倍に増加したにも関わらず，ひび割れ発生強度は 1.2 倍，引張強度は 1.1 倍に留まった。密度の増加が，ひび割れ発生強度や引張強度の増加に与える影響は圧縮強度と比べて小さいと言える。

4.4 ぜい性

高強度モルタル材料のぜい性を比較するため，ぜい度係数（圧縮強度/引張強度）を算定した結果を，図-10 に示す。

ぜい度係数を比較した結果，配合 No.1 の 8.7 に比べて，繊維を無添加とした配合 No.2 は極端に大きい 66.4 となり，脆い性質であることが分かる。

一方，W/P を低下させた配合 No.4 は 12.8 で，圧縮強度が増加したが，ぜい度係数も増加しているのに対して，膨張材を外割り添加した配合 No.3 は，強度が増加してもぜい度係数が 8.5 とやや低下している。このことから，繊維を添加した高強度モルタルに膨張材を添加することは，強度特性を改善でき，部材のじん性を確保する観点から有効であると考ええる。

5. まとめ

オートクレーブ養生を行った常温硬化型の UFC の基礎物性について実験を行った結果，本実験条件の範囲で以下の知見が得られた。

- (1) オートクレーブ養生を行った常温硬化型 UFC は，UFC 指針の規定値を満足するものの，標準養生に比べて圧縮強度は若干低下する。
- (2) オートクレーブ養生を行った常温硬化型 UFC でも，膨張材の添加や，W/P を小さくすることで，強度特性を向上することができる。
- (3) オートクレーブ養生を行った常温硬化型 UFC の水和組織は，等温養生 80℃以下で生成される水和組織と異なっている可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) 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，土木学会，2004.10
- 2) 三谷裕二，番地成朋，谷村充，丸山一平：高温度履歴を受けた低水結合材比シリカフェーム混和セメントの強度および水和反応特性，コンクリート工学

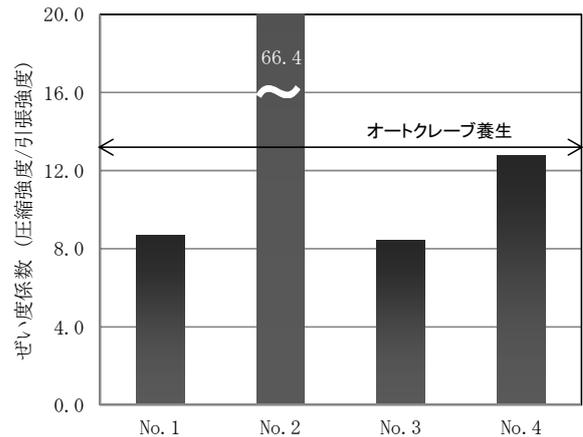


図-10 ぜい度係数（圧縮強度/引張強度）

年次論文集，Vol.31, No.1, pp.1495-1500, 2009

- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.10，土木学会，2012.3
- 4) 桐山宏和，丸屋英二，大西利勝，平田隆祥：等価材齢を用いた超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.238-234, 2012
- 5) 西 晴哉：オートクレーブ養生と超高強度コンクリート，コンクリート工学，Vol.18, No.5, pp.9-18, May 1980
- 6) 渡邊有寿，柳井修司，坂本真，大野俊夫：超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.243-248, 2008
- 7) 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，第 66 回年次学術講演会講演概要集，vol.66, V-497, pp.993-994, 2011
- 8) M. Kaszynska : Early age properties of high-strength / high-performance concrete, Cement & Concrete Composites, Vol.24, pp.253-261, 2002
- 9) 寺本篤史，丸山一平，三谷裕二，谷村充：低水結合材比シリカフェームセメントペーストの自己収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.601-606, 2009
- 10) 谷口円，桂修，佐川孝広，濱幸雄：強度増進の温度依存性に及ぼすセメント鉱物組成の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.76, No.661, pp.443-448, 2011.3