

論文 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

桐山 宏和^{*1}・丸屋 英二^{*2}・大西 利勝^{*3}・平田 隆祥^{*4}

要旨：超高強度繊維補強コンクリート（UFC）の強度発現は温度の影響を強く受けるため、積算温度による圧縮強度の予測が困難となる。本論文では、アレニウス則に基づく等価材齢を用いて UFC の圧縮強度の評価を試みるため、一定温度を与えた円柱供試体と、水和発熱による温度履歴を受けたコア供試体の圧縮強度の発現性を比較し、UFC におけるみかけの活性化エネルギーを推定した。その結果、等価材齢を用いることで、様々な温度履歴を受けた場合の圧縮強度を精度良く予測できることを明らかにした。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、圧縮強度、等価材齢、みかけの活性化エネルギー

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。この UFC は通常、蒸気養生等の熱養生を施し製造されるため、製造設備、運搬および寸法の制約が生じる。また、熱養生の際に多くのエネルギーが必要となる。これに対し、常温養生により早期に熱養生と同等の高強度が得られる UFC が実現されれば、設計や施工の自由度が増すとともに、UFC の適用範囲を拡大し、さらには熱養生に伴うコストを削減できると考えられる。

一般に超高強度コンクリートは多量のセメントと、シリカフュ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。シリカフュームを結合材として用いた場合、特に高温養生下でポゾラン反応が活性化されるため、圧縮強度発現性は温度の影響を強く受ける^{1,2)}。現場では様々な温度環境が存在するとともに、部材の条件により水和反応による発熱量が大きく変わる。したがって、基準温度からの温度変化量による強度増進の影響を一定と考える積算温度では、圧縮強度の評価が困難であると考えられる^{3,4)}。そこで、本論文では、圧縮強度に及ぼす温度の影響について、アレニウス則を基にした等価材齢により評価することを試みた。

本論文では、常温環境下においても早期に所定の圧縮強度が得られる鉱物組成を有するセメント⁵⁾からなるプレミックス材を用いて UFC を製造し、圧縮強度に及ぼす温度の影響を検討した。まず、一定温度条件下の円柱供試体の圧縮強度を等価材齢で評価することを試みた。次に、構造体を模擬した試験体を作製し養生条件を変えることにより様々な温度履歴を再現した。この試験体から採取したコア供試体の圧縮強度について、円柱供試体と同様に評価可能かを検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料は、水、セメントおよびポゾ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。表-1 に UFC の配合を示す。

2.2 練混ぜ方法

UFC の製造には、水平二軸形強制練りミキサ（容量：50L）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、鋼繊維を投入しさらに 2 分間練り混ぜた後排出した。1 回の練り量は、50L とした。

2.3 供試体概要

供試体は、恒温槽を用いて一定温度で養生を行う円柱供試体と、実部材を模擬した試験体を作製し、水和発熱による温度履歴を受けるコア供試体の 2 種類とした。

(1) 円柱供試体（一定温度養生）

表-2 に一定温度で養生を行う円柱供試体の水準を示す。養生温度は 10～80℃の 5 水準とした。UFC の練混ぜは気温 20℃の恒温室で行い、型枠に打込み後、シールし封緘した。圧縮強度の発現性のみに着目したため、鋼繊維は混入しなかった。供試体の養生には恒温槽を用いた。養生温度が 10、20、40℃の場合、各温度に設定した恒温槽内に直ちに供試体を移し保管した。養生温度が 60、

表-1 UFC の配合

水 ^{*1}	単位量(kg/m ³)			鋼繊維 (vol.%)
	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	32	2.0

*1: 高性能減水剤の水分を含む

*1 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 工修（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セメント開発部 主席研究員 工博（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 グループリーダー 工修（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 工博（正会員）

表-2 円柱供試体（一定温度養生）の水準（モルタル）

養生 温度	養生期間														
	1h	3h	6h	12h	1d	2d	3d	7d	14d	21d	28d	42d	56d	70d	91d
80℃	○	○	○	○			○	○			○				
60℃	○			○			○	○			○				
40℃					○	○	○	○	○	○	○				
20℃								○	○	○	○	○	○	○	○
10℃								○	○	○	○	○	○	○	○

表-3 コア供試体採取用の試験体の水準（UFC）

養生 温度	試験体の 寸法(mm)	試験 体数	養生 方法	コア供試体採取材齢(日)					
				7	28	56	91	120	182
20℃	350×700×100	7 体	湿潤	○	○	○	○		○
15℃		7 体	湿潤	○	○	○	○		○
		7 体	保温		○	○	○		○
10℃		7 体	湿潤		○	○	○	○	
		7 体	保温		○	○	○	○	○
外気温		700×700×100	3 体	シート	○	○	○	○	

80℃の場合、温度上昇による強度低下を防ぐため、凝結終結まで 20℃とし、その後 20℃/h の速度で各養生温度まで昇温し養生した。

(2) コア供試体

図-1 にコア供試体採取用に作製した試験体の概要を示す。試験体の厚さは 100mm とし、周囲を発泡ポリスチレンフォームで断熱することにより薄肉の平板を模擬した。表-3 に試験体の水準を示す。試験体の養生温度は 10、15、20℃および外気温とした。養生温度 10、15、20℃の場合、UFC の練混ぜは各養生温度と同一の温度に調整した恒温室内で行い、材料は前日から恒温室内に保管したものを使用した。外気温の場合、UFC の練混ぜは 10℃の恒温室内で行い、前日から屋外にて保管した材料を使用した。養生方法は、養生温度 10、15、20℃の場合、湿潤養生、保温養生とし、外気温で養生する場合、シート養生とした。湿潤養生は、UFC を打込み後、翌日から材齢 5 日まで養生マットを用いて打設面を湿潤にした。保温養生の場合、UFC を打込み後、発泡ポリウレタン（厚さ 12mm）を打設面および底面に貼付け保温した。シート養生は、UFC を打込み後、乾燥を防ぐため打込み面をシートで覆った。試験体は材齢 5 日で脱型しその後は気中保管した。試験体数は、養生温度 10、15、20℃の場合は 7 体とし、外気温の場合 3 体とした。所定材齢ごとに各試験体からコア供試体（φ50×100mm）を 3 本ずつ採取し、直ちに圧縮強度試験を実施した。

2.4 試験項目

表-4 に試験項目を示す。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、表-2 と表-3 に示す養生期間ごとに供試体を採取し、圧縮強度試験を実施した。また、円柱供試体の場合は養生槽内

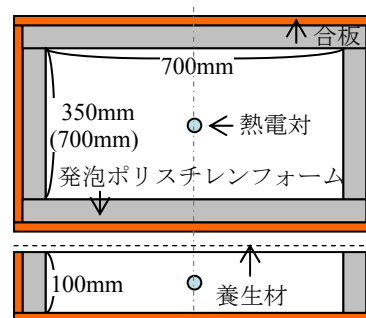


図-1 コア供試体採取用試験体概要

表-4 試験項目

フロー	JIS R 5201 を参考 (落下なし)
試料温度	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 JIS A 1107 および JIS A 1108 に準じる

表-5 モルタルのフレッシュ性状（円柱供試体用）

フロー (mm)	試料温度 (℃)	空気量 (%)
308	25.2	2.5

（鋼繊維無混入）

の温度を、コア供試体の場合は、コアを採取する試験体の中央の温度を測定し、強度発現性の検討に使用した。

3. 試験結果

3.1 円柱供試体（一定温度養生）の試験結果

表-5 に円柱供試体用に製造した UFC のフレッシュ試験結果を示す。

図-2 に圧縮強度試験結果を示す。温度が高くなるほど、圧縮強度が大きくなることが分かった。20℃環境の場合、材齢 28 日までに、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）³⁾における標準材料の圧縮強度の特性値である 180N/mm²を上回った。また、180N/mm²到達材齢をみると、養生温度 20℃で材齢 21 日に対して

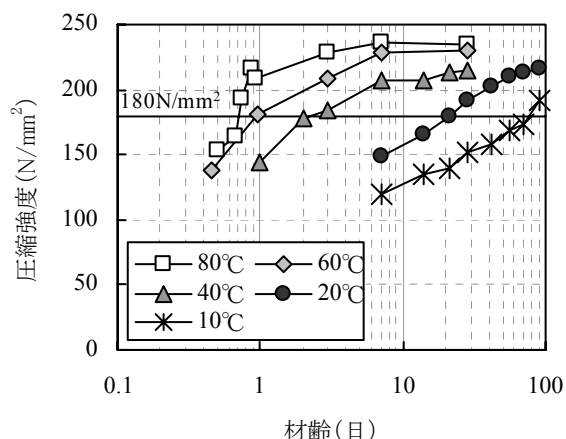


図-2 養生温度と圧縮強度（円柱供試体）

養生温度が 40℃以上の場合、3 日以内と短くなることが分かった。養生温度が 10℃と低い場合、約 90 日と長くなることが分かった。圧縮強度は、200N/mm² を超えた辺りで頭打ちとなり、最終到達強度は、240N/mm² 程度となると予想された。以上より、本検討にて使用した UFC についても圧縮強度に及ぼす養生温度の影響が大きいことが分かった。

3.2 コア供試体の試験結果

表-6 にコア供試体採取用試験体を作製する際に測定した UFC のフレッシュ性状を示す。

表-6 UFC のフレッシュ性状

(コア供試体採取用試験体用)

養生温度 (℃)	養生 条件	フロー (mm)	試料温度 (℃)	空気量 (%)
20	湿潤	295	24.4	1.8
15	湿潤	293	18.6	1.9
	保温	291	18.7	2.0
10	湿潤	286	14.9	2.0
	保温	284	15.5	2.1
外気温*	シート	265	14.1	2.9

*屋外(冬期)

図-3 に、コア供試体採取用試験体の代表的な温度履歴を示す。水和反応に伴い、大きな温度上昇が見られた。最高温度を見ると、30～70℃と比較的大きな範囲の温度履歴が得られた。保温養生すると湿潤養生に比べて最高温度が 30℃程度高くなり、厚さ 100mm と薄い部材にも関わらず最高温度は 60℃以上となった。打込み後、約 1 日で最高温度に達し、材齢 4 日程度までにほぼ雰囲気温度まで低下していることが分かった。外気温で養生した場合、打込み後の水和発熱は環境の影響を受け、外気温の上昇とともに UFC の温度も上昇する傾向が見られた。また、日射の影響により試験体中心の温度は、外気温よりも高くなることが分かった。

図-4 にコア供試体の圧縮強度を示す。初期の水和発熱時における最高温度が高いほど材齢初期の圧縮強度が大きくなる傾向を示した。材齢初期は、養生温度の影響よりも水和発熱による影響が大きいことが分かった。試験体温度が低下し、養生温度と同一になってからは、養生温度が高いほど材齢に伴う圧縮強度の増進が大きくなった。また、円柱供試体と同様に養生温度が高くなるほど、180N/mm² に到達する材齢が短くなる傾向であった。また、湿潤養生で初期の発熱量が少ない場合でも、長期的にみると、保温養生と同等まで強度が発現することが分かった。

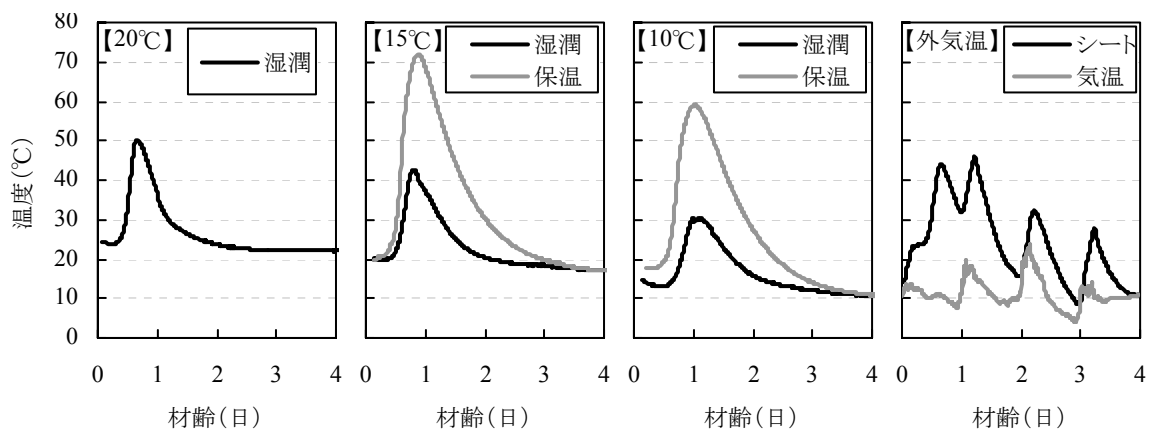


図-3 コア供試体採取用試験体の温度（代表値）

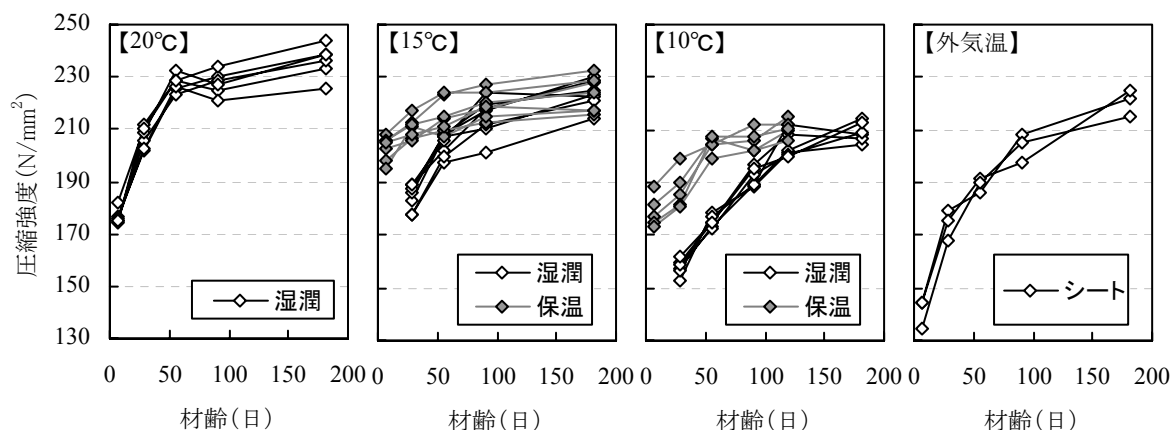


図-4 コア供試体の圧縮強度

4. 等価材齢を用いた圧縮強度の評価

一般に任意の温度履歴を受けたコンクリートの圧縮強度を評価する場合、積算温度が用いられることが多い。積算温度による圧縮強度の評価は、 -10°C を基準とし、温度変化による圧縮強度増進の割合を一定と考える。既往の研究^{3,4)}では、シリカフェームのようなポゾラン反応性を有する混和材を用いると、ある温度を境に強度増進が促進することが報告されている。そのため、このような材料の圧縮強度の推定に積算温度を使用する場合には、基準温度を水和の段階によって使い分けることなどの工夫が必要となる。図-5に本論文における円柱供試体の圧縮強度を積算温度で整理した結果を示す。養生温度によって関係線が異なるため、今回使用したUFCについても積算温度の適用が難しいことが分かる。

一方、マチュリティを考慮した物性予測には等価材齢（有効材齢）の適用例⁶⁾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⁷⁾。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、基準温度の材齢に換算するものである。本論文においてもこの等価材齢の考えに基づき、UFCの圧縮強度に及ぼす温度の影響の評価を試みた。

等価材齢は以下の式(1)に示される。

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

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。

4.1 円柱供試体の圧縮強度への等価材齢の適用

一定温度で養生した円柱供試体の圧縮強度について等価材齢の適用を試みた。まず、得られた圧縮強度試験結果が一つの等価材齢と圧縮強度の曲線で表されると仮定し、式(1)における E_a/R を最小二乗法により求めた。その際に、等価材齢と圧縮強度との関係は、式(2)に示すゴンペルツ曲線を用い、当該曲線の実測値との残差が最小となるよう E_a/R および実験定数を推定した。

$$F = F_{\text{inf}} \cdot \exp(a \cdot t_e^b) \quad (2)$$

ここに、 F ：等価材齢 t_e における圧縮強度(N/mm²)、 F_{inf} ：最終到達強度(N/mm²)、 a および b ：実験定数である。なお、 F_{inf} は養生温度 80°C における到達強度 235N/mm^2 を用いた。

図-6に上述の方法により得られた回帰曲線の結果を示す。等価材齢を用いることで、各養生条件における全ての結果が一つの曲線に重なることが分かった。相関係

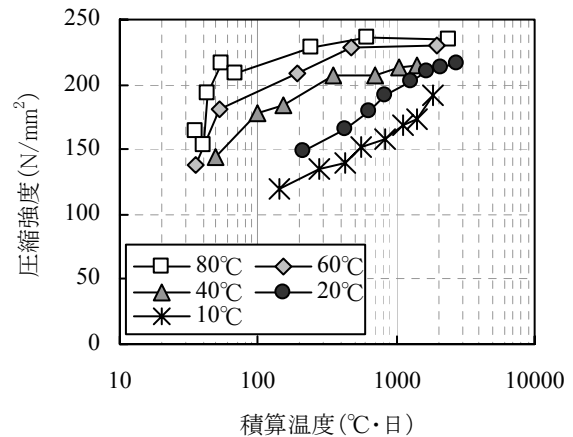


図-5 積算温度と圧縮強度（円柱供試体）

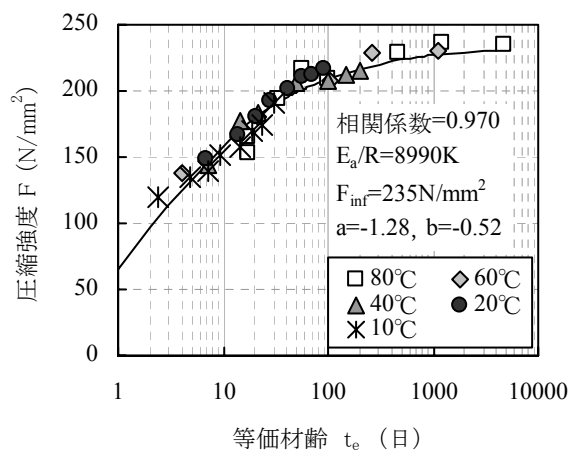


図-6 回帰結果（円柱供試体）

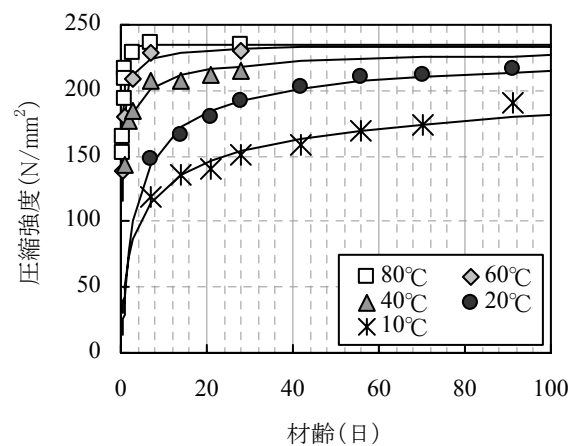


図-7 各養生温度における回帰結果

表-7 最小二乗法による回帰結果

養生温度	式(2)に実験定数			相関係数
	F_{inf}	a	b	
80°C	235	-0.11	-2.11	0.962
60°C		-0.26	-0.88	0.996
40°C		-0.46	-0.56	0.985
20°C		-1.72	-0.65	0.989
10°C		-1.52	-0.38	0.968

数は、0.970 と非常に高かった。また、推定された E_a/R は 8990K となり、一般的なコンクリート⁸⁾よりも 2 倍程度大きな値を示し、今回使用した UFC の強度に及ぼす養生温度の影響が大きいことが示された。

次に得られた結果の妥当性について検証する。等価材齢を圧縮強度の推定に適用するには、前述の式(1)および(2)において、①最終到達強度 F_{inf} が一定であること、②強度増進速度の温度依存性がアレニウス則にしたがうこと、③見かけの活性化エネルギーが一定であること、以上三つの条件を満たすことを確かめる必要がある。

まず、養生条件ごとに式(2)を適用し、それぞれについて材齢と圧縮強度関係における実験定数を最小二乗法により求めた。図-7 および表-7 に結果を示す。なお、 F_{inf} は、養生温度が低い場合、最終到達強度に達していないと考えられるため、ここでは養生温度 80℃における強度 (235N/mm²) に到達すると仮定した。表より、いずれの養生条件においても相関係数が 0.9 以上あり高い相関が得られた。本論文の範囲では、 F_{inf} を養生温度 80℃における到達強度として問題ないと考えられる。

次に式(2)を微分することによって圧縮強度増進速度 (単位: N/mm²/日) を求めた。そして、式(3)に示した圧縮強度増進速度と $1/T$ との関係からアレニウスプロットを求めた。

$$\ln r_T = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln A \quad (3)$$

ここに、 r_T : 温度 $T(K)$ における圧縮強度増進速度(N/mm²/日)、 $\ln A$: 実験定数である。

得られた圧縮強度の範囲から、到達圧縮強度 150, 170, 190, 210N/mm² 時点での圧縮強度増進速度をプロットの対象とした。なお、縦軸は温度 20℃における強度増進速度を基準とした。図-8 にアレニウスプロットを示す。図より、いずれの到達圧縮強度における圧縮強度増進速度と $1/T$ との関係は直線関係であり、さらに同一の傾きを示すことが分かった。そこで、この直線の傾きから E_a/R を算出した。最小二乗法により求めた E_a/R は 8872K と、図-6 に示した結果とほぼ同等の E_a/R が得られた。

以上より各養生温度において、強度増進の温度依存性がアレニウス則に従い、見掛けの活性化エネルギーが一定であることが確認できた。今回使用した UFC の圧縮強度の温度依存性に等価材齢を適用するに十分な条件を満たしていると判断した。

4.2 コア供試体の圧縮強度への等価材齢の適用

これまでの検討で、一定温度にて養生した円柱供試体の圧縮強度が、等価材齢により評価できることが分かった。次に、水和反応により温度履歴を受けるコア供試体の圧縮強度が等価材齢により評価可能であるか検討する。

まず、図-9 に図-6 で円柱供試体から得られた E_a/R

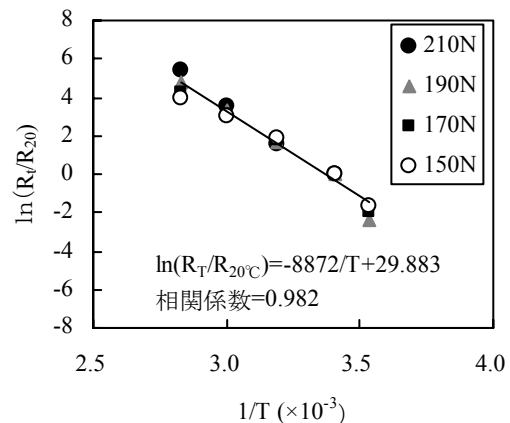


図-8 各到達圧縮強度におけるアレニウスプロット

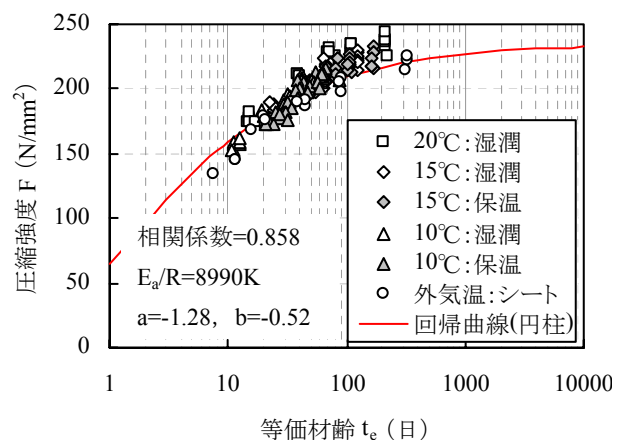


図-9 コア供試体の圧縮強度

(円柱供試体から求めた E_a/R , a , b を使用)

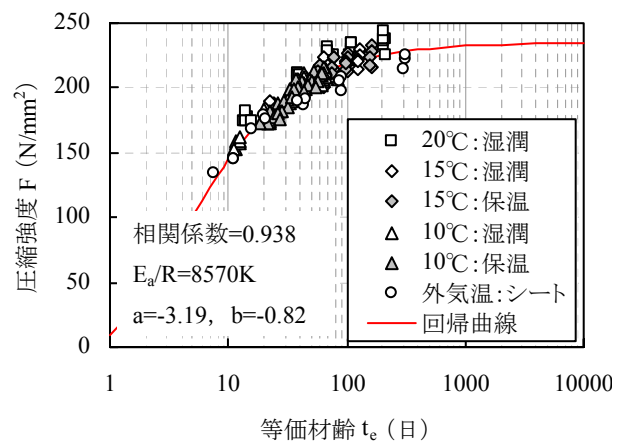


図-10 コア供試体の圧縮強度

(コア供試体のみでの回帰結果)

と実験定数を用いてコア供試体の圧縮強度を整理した。図より、コア供試体の圧縮強度は、養生条件によらず円柱供試体から求めた E_a/R を用いた等価材齢と高い相関を示すことがわかった。

図-10 に、コア供試体のみの圧縮強度試験結果を用いて最小二乗法により E_a/R と実験定数を求めた結果を示す。等価材齢と圧縮強度との関係がやや急勾配となるが、

これは材齢初期の結果が少ないためと考えられる。また、回帰により得られた Ea/R は円柱供試体の試験結果から得られたものとはほぼ同定であることが確認された。

以上より、コア供試体のように水和発熱による高い温度履歴を受けた供試体の圧縮強度についても等価材齢によって評価できることが分かった。さらに、外気温のような環境温度が変化する場合についても試験体の温度を用いることで等価材齢を用いて圧縮強度を評価できることが分かった。

このことから、一定温度の履歴を与えた円柱供試体から得られた等価材齢の係数を用いて、実際の構造物のような温度履歴を受けた UFC の圧縮強度を評価できる可能性が考えられた。今後は、 100N/mm^2 程度以下の若材齢での検証が必要と考えられる。

また、図-10 をみると、コア供試体の等価材齢と圧縮強度との関係は、養生条件によらずほぼ同等の値を示した。超高強度コンクリートのような水和初期に急激に強度発現するような材料の場合、材齢初期に組織が密になるため、材齢初期に曝された水分の影響を受けにくいことが考えられた。また、外気温の場合には若干強度が低く推移しているが、これは空気量がやや高めになったためと考えられた。

図-11 に圧縮強度の実測値と、図-10 で得られた等価材齢を用いて圧縮強度を推定した結果を示した。両者は良く一致しており、残差の標準偏差は 7.3N/mm^2 であった。これは、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）³⁾に示された標準材料の圧縮強度の標準偏差とほぼ同等であり、等価材齢を用いて UFC の圧縮強度を評価する方法は実務的にも有効であると考えられた。

5. まとめ

UFC の圧縮強度に及ぼす温度の影響について、円柱供試体とコア供試体の圧縮強度の結果から得られた等価材齢と圧縮強度との関係を整理した結果、以下のことが分かった。

- (1) 今回使用した UFC についても、既往の材料と同様に積算温度による評価が困難であった。
- (2) UFC の圧縮強度は、等価材齢を用いて評価できることが分かった。また、圧縮強度に及ぼす温度の影響は、アレニウス則に従うことが確認できた。
- (3) 円柱供試体を用いて室内で推定した等価材齢と圧縮強度との関係を用いて、部材から採取したコア供試体の圧縮強度を評価できる可能性が示された。
- (4) 以上の方法により求められた等価材齢と圧縮強度との関係式を用いて評価した圧縮強度は、実務的にも十分な精度を有することが分かった。

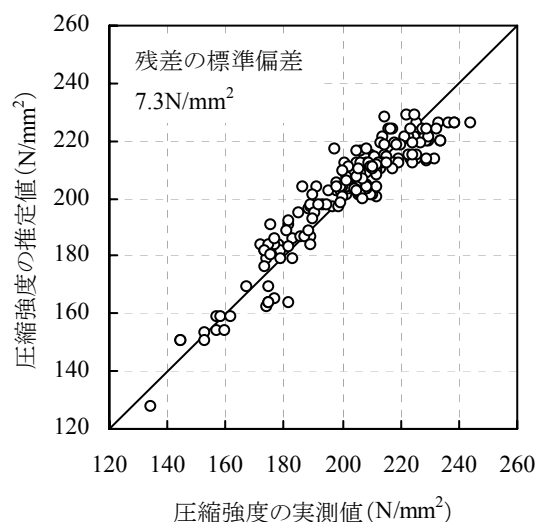


図-11 圧縮強度の推定値

参考文献

- 1) 石中正人, 中山英明, 鳴瀬浩康: シリカフェーム混合セメントにおける加熱養生時の強度発現性に及ぼす最高温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.91-96, 2008
- 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の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, pp.67, 2004.9
- 4) 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
- 5) 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
- 6) M. Kaszynska: Early age properties of high-strength / high-performance concrete, Cement & Concrete Composites, Vol.24, pp.253-261, 2002
- 7) 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
- 8) 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