

論文 温水養生による超高強度コンクリートの圧縮強度の早期判定試験方法に関する基礎検討

加藤 優志*1・太田 貴士*2・渡邊 悟士*3・黒岩 秀介*4

要旨: 超高強度コンクリートの合理的な品質管理方法として、温水養生による圧縮強度の早期判定試験方法について基礎検討を行った。養生温度、試験材齢を水準としたモルタルの強度試験結果から、管理用供試体（温水 40 °C材齢 28 日）の圧縮強度を早期に判定する養生方法を選定した。選定した養生方法を用いたコンクリートの試験結果から、温水 60 °C, 80 °Cでは材齢 7 日以内に管理用供試体の 94 %から 98 %の強度を得ることが可能であり、早期に圧縮強度を安全側に評価できることがわかった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 温水養生, 早期判定試験方法, アレニウス則, 有効材齢

1. はじめに

超高強度コンクリートの圧縮強度を早期に判定することは合理的な品質管理を行う上で重要である。製造したコンクリートの圧縮強度を早期に判定できれば、工事期間中の使用材料の品質変動がコンクリートの品質に与える影響を早期に確認することが可能である。コンクリートの圧縮強度を早期に判定する方法としては、ケイ酸ナトリウム等の急結剤を用いて数時間で強度を判定する方法¹⁾や温水養生により水和を促進して早期に強度を判定する方法²⁾が検討されている。超高強度コンクリートの強度発現は水和熱による初期の高温履歴の影響を大きく受けることが明らかになっており³⁾、シリカフュームを混入した調合では高温履歴によるシリカフュームの活性化が強度発現に大きく寄与することが報告されている⁴⁾。実部材の水和熱の影響を考慮すると高温履歴を与える方法が実際の養生条件に近いと考えられるため、ここでは温水養生による圧縮強度の早期判定試験方法について検討を行うこととした。

JIS A 1805²⁾では温水 40 °C材齢 7 日で標準養生材齢 28 日の強度を早期に判定する方法が制定されており、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの強度推定式が提案されている。また、JCI-SE4³⁾では JIS よりも温度が高い温水 70 °C, 材齢 2 日で強度を判定する管理方法が規定されている。既報⁵⁾では 100 から 120 N/mm²の超高強度コンクリートにおいても温水養生による強度の早期判定方法が検討されており、温水 40 °C材齢 7 日で標準養生材齢 28 日強度の約 9 割が得られると報告している。上記のように温水養生による早期判定方法に関する検討は行われているが、圧縮強度 150 N/mm²を超える超高強度コンクリートについて検討したものはほとんどない。

本検討では既報の文献を参考に、超高強度コンクリートの管理用供試体の強度を早期に判定する試験方法について養生温度、材齢をパラメータとして基礎検討を行うこととした。なお、本検討における管理用供試体とは既報⁵⁾における温水 40 °C材齢 28 日の供試体を意味する。

2. 実験概要

本検討はモルタル実験とコンクリート実験で構成した。モルタル実験では複数の温水養生温度、材齢で圧縮強度試験を実施した。強度試験結果から各温度の温水養生方法による圧縮強度発現を予測し、管理用供試体のモルタルと同程度の強度が得られる養生温度、材齢の組合せを複数選定した。

コンクリート実験では、前述のモルタル実験で選定した養生方法を実施し、管理用供試体との強度比較を行った。

2.1 使用材料と調合

使用材料を表-1 に示す。結合材には中庸熟ポルトランドセメント、高強度用混和材を使用した。高強度用混和材は JASS 5 M-701 および JIS A 6207 にそれぞれ適合するスラグせっこう系混和材とシリカフュームをプレミ

表-1 使用材料

記号	材料種類	物性
M	中庸熟ポルトランドセメント	密度 3.21 g/cm ³
CP	高強度用混和材	密度 2.44 g/cm ³
S	安山岩砕砂 (山梨県産)	表乾密度 2.61 g/cm ³
LS	人工軽量細骨材	表乾密度 1.88 g/cm ³ 吸水率 16.0%
G	安山岩碎石 (山梨県産)	表乾密度 2.62 g/cm ³
SP	高性能減水剤	主成分: ポリカルボン酸 エーテル系化合物

*1 大成建設(株) 技術センター 研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター 構造研究室長 博士 (工学) (正会員)

表-2 調合表

調合名	目標フロー (cm)	目標空気量 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	B		S	LS	G
					M	CP			
M15	30±3* ¹	2.2±1.4* ³	15.0	217	1159	290	367	264	—
C15	65±10* ²	1.5±1.0		150	800	200	253	182	815

*¹ 0 打フロー, *² スランプフロー,

*³ C15 から粗骨材を除いた時の単位体積あたりの空気量

*⁴ 高性能減水剤の使用量 M15 : B×1.8%, C15 : B×1.4%

ックスした混和材である。細骨材には安山岩砕砂と、内部養生効果による自己収縮ひずみ低減⁸⁾を目的として人工軽量細骨材を用いた。粗骨材には安山岩砕石（最大寸法 20 mm）を使用した。

調合表を表-2 に示す。モルタルの調合（以下、M15）はコンクリートの調合（以下、C15）から粗骨材分を差し引いたものとした。0 打フローの目標値は、事前の試し練りにおけるモルタルの 0 打フローとコンクリートのスランプフローの関係から、粗骨材を加えた時のコンクリートのスランプフロー65±10 cm に相当するものとして 30±3 cm とした。ここで 0 打フローは JASS 5 M-701 の試験方法により測定した。コンクリートの調合は水結合材比を 15.0 %，単位水量は 150 kg/m³ とした。結合材中のセメントと高強度用混和材の質量割合は 8 : 2 とした。人工軽量細骨材は事前の試し練りの結果から有効に自己収縮ひずみが低減できる置換率を設定し、細骨材の単位体積に対して 50%となるようにした。

2.2 供試体の作製

(1) モルタル

モルタルは容量 10 L のホバートミキサーを用いて、1 バッチあたり 7.5 L，合計 2 バッチで練混ぜを行った。まず結合材と細骨材を投入し空練りを行い、その後、水、混和剤を投入し、0 打フローが目標の範囲にあることを確認して練混ぜ終了とした。練り上がった後に 2 バッチ（合計 15.0 L）を練り舟で合わせ練り返し、再度 0 打フローおよび空気量の測定を行った後に φ5×10cm の軽量型枠に打ち込んだ。モルタルの空気量は直径 8cm，高さ 8cm の鋼製容器を用いて単位容積質量を測定し、JIS A 1116 に記載されている計算式（質量法）によって算出した。算出された空気量は 2.3%と調合上の値とほぼ変わらないことを確認した。作製した供試体は打設面にラップをかけて封かん養生を行い、20 °C の恒温室に静置した。脱型は 1 バッチ目の注水時刻を基準として、24 時間後に実施した。なお、1, 2 バッチ目の注水時刻の差は約 30 分であった。



(モルタル) (コンクリート)

写真-1 温水養生状況

表-3 温水養生容器の詳細

調合名	温水養生容器の寸法(mm)	容積 (L)	供試体数 (本)
M15	295×443×159	13 L	15
C15	295×443×259	24 L	6

(2) コンクリート

コンクリートは容量 60 L の水平二軸形強制練りミキサーを用いて 1 バッチあたり 25 L で練混ぜを行った。まず、結合材と細骨材を投入し空練りを行い、その後、水、混和剤を投入した。モルタルで十分な流動性が得られたことを目視で確認した後に、粗骨材を投入し練り混ぜた。練り上がったコンクリートが目標のスランプフロー、空気量を満足することを確認した後に φ10×20 cm の軽量型枠に打ち込んだ。作製した供試体は打設面にラップをかけて封かん養生を行い、20 °C の恒温室に静置した。脱型は注水時刻を基準として、24 時間後に実施した。

2.3 温水養生方法と圧縮強度試験

温水養生状況を写真-1 に示す。本検討でのモルタル、コンクリートの温水養生は、注水から 24 時間で脱型後に、予め恒温槽で所定の温度まで温めた水（上水道水）が入ったプラスチック製の温水養生容器（蓋付き）に直接供試体を入れる方法とした。温水養生容器はモルタルとコンクリートで異なる寸法のものを使用した。温水養生容器の詳細を表-3 に示す。養生温度は 20, 40, 60, 80 °C の 4 水準を設定した。なお、養生前および養生中は容器内の温水の温度を測定し、養生前の温度が目標温度 ±2 °C 以内にあることを確認してから供試体を入れ、蓋をして養生した。供試体は後述するそれぞれの圧縮強度試験材齢で温水から取り出し、常温でしばらく静置させた後に両端研磨を行い、圧縮強度試験を行った。なお、圧縮強度試験を行うために供試体を取り出した後は、同じ恒温槽に保管しておいた温水で温水養生容器内の水位をもとの位置まで戻している。

圧縮強度試験はモルタル、コンクリートともに圧縮応力度の増加が毎秒 0.6±0.4 N/mm² となるように制御した。供試体数はそれぞれの水準で 3 体ずつとし、平均値をその水準の圧縮強度とした。

3. モルタル実験

3.1 圧縮強度試験材齢

モルタル供試体は脱型後、2.3 節に示した温水養生方法で養生を行い、各材齢で圧縮強度試験を行った。表-4 に作製したモルタル供試体の養生温度と圧縮強度試験材齢を示す。試験材齢は1 バッチ目の注水時刻を基準とした。各養生温度での試験材齢は材齢7 日までに加え、ポテンシャル強度を確認する目的で材齢28 日または91 日を設定した。なお、温水養生開始前の供試体強度を把握することを目的として、脱型直後（表-4 中、20°C材齢24 時間）にも圧縮強度試験を実施した。

3.2 試験結果

モルタル供試体養生中の温水養生容器内の温度変化を図-1 に示す。なお、図-1 は供試体を温水内に入れる直前を起点として整理している。養生水の温度は供試体を入れた時点で一旦低下しているが、どの温度水準についても2 時間以内に目標温度± 2°Cの範囲にあることを確認した。

本節では既報の桐山ら⁹⁾の手法を参考に、異なる温度で養生したモルタル供試体の圧縮強度発現について整理を行った。モルタル供試体の圧縮強度試験結果を図-2 に示す。図-2 内には材齢と圧縮強度を下記の式(1)を用いて最小二乗近似して得られた近似曲線を併記する。

$$f(t) = f_{\infty} \exp(at^b) \quad (1)$$

ここで、 $f(t)$: 材齢時点の圧縮強度 [N/mm²]

f_{∞} : 最終到達強度 [N/mm²]

t : 材齢 [日]

a, b : 各養生温度による係数 である。

式(1)中の最終到達強度は養生温度毎に異なると考えられるが、本検討中では温水80°C材齢28 日の強度試験結果(=229 N/mm²)で一定として近似した。それぞれの実験値と推定式は概ねよく近似できており、圧縮強度発現を予測する上で推定式の精度には大きな影響はないと考えている。温水養生を行う際には、硬化前に供試体に急激な温度変化を与えると圧縮強度の低下が懸念される¹⁰⁾が、本検討で用いたモルタルは温水養生前(脱型直後)で約50 N/mm²が得られており、上記の懸念は小さいと考えられた。図-2 を見ると温水養生を行った供試体は温水の温度が高くなるほど、圧縮強度の発現が速い傾向が確認でき、温水80°Cで養生した場合は注水から24 時間で脱型後、2 時間で約120 N/mm²の強度が得られた。

図-2 の材齢と圧縮強度の関係に対して、見かけの活性化エネルギーを33.5 kJ/mol とした式(2)の従来の有効材齢¹¹⁾で整理した結果を図-3 に示す。有効材齢を算出する際の養生日数は1 バッチ目の注水時刻を基準とし、養生温度は温水養生前においては20°C一定、温水養生後は温水の温度を用いた。

表-4 モルタルの圧縮強度試験材齢

養生温度	試験材齢(時間)			試験材齢(日)					
	24	26	30	2	3	4	7	28	91
20°C	○	—	—	—	○	—	○	○	○
40°C	—	—	○	○	○	○	○	○	○
60°C	—	○	○	○	○	○	○	○	—
80°C	—	○	○	○	—	○	○	○	—

*注水から脱型までの時間(24 時間)を含む

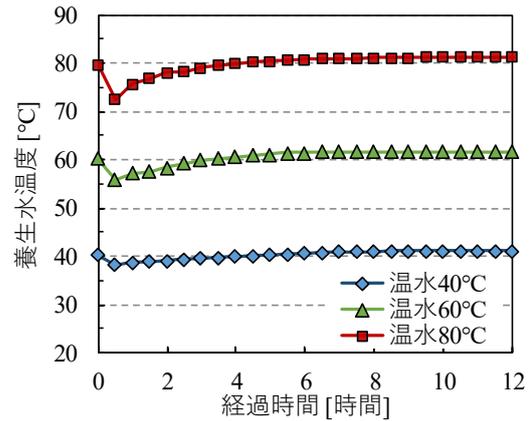


図-1 養生容器内の温水の温度計測結果(モルタル)

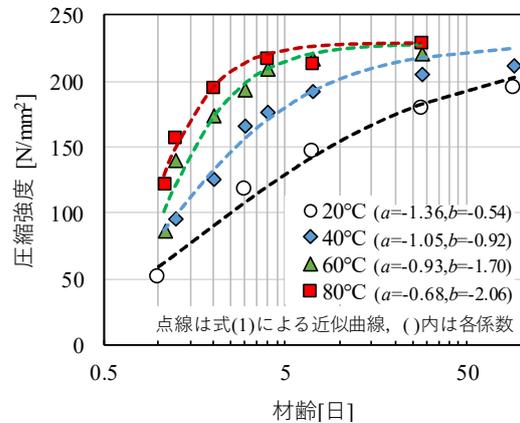


図-2 圧縮強度試験結果(モルタル)

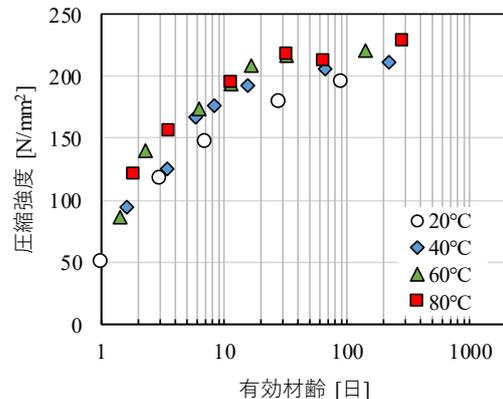


図-3 従来の有効材齢と圧縮強度の関係

$$t_e = \sum_{i=1}^n \left\{ \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \cdot \Delta t_i \right\} \quad (2)$$

ここで、 t_e : 有効材齢 [日]

E_a : 見かけの活性化エネルギー [=33.5kJ/mol]

R : 気体定数 [=8.314J/(mol・K)]

T : 養生温度 [°C]

t_i : 養生温度 T での養生日数 [日] である。

見かけの活性化エネルギーを 33.5 kJ/mol として整理すると、20 °C と比較して温水養生をした供試体の強度が有効材齢約 50 日以下で大きく乖離する傾向が確認でき、圧縮強度発現に及ぼす温水養生の影響を十分に評価できていない。既報¹²⁾ではシリカフェームを用いた超高強度コンクリートの圧縮強度発現を従来の見かけの活性化エネルギーで評価することは困難であり、初期高温履歴が一定温度よりも高い場合は圧縮強度発現が異なることが報告されている。本検討でも同様の傾向が確認でき、ポズラン質微粉末であるシリカフェームのポズラン反応が温水養生により促進され、強度発現速度に影響を及ぼしていると推察された。

ここで式 (2) の有効材齢 ($E_a = 33.5$ kJ/mol) に対して、高温での強度発現の活性化を大きく評価するために、 $E_a = 55.0$ kJ/mol として整理した結果 ($f(t_e')$: 修正有効材齢時点の圧縮強度、 t_e' : 修正有効材齢) を図-4 に示す。 E_a の値は既報⁹⁾の超高強度モルタルを複数の温度で養生した時の圧縮強度結果から算出される見かけの活性化エネルギーの範囲を参考に、圧縮強度発現を最も精度よく近似できる値を 1 kJ/mol 単位で設定した。図-3 と比較して、図-4 は高温での活性化を大きく評価することで温水養生の影響を概ね評価できている。したがって、本調査では適切な見かけの活性化エネルギーを設定することで、異なる養生温度における強度発現を一つの近似曲線で概ね評価可能であることがわかった。

本検討では温水養生の各温度が圧縮強度発現に与える影響について把握するために、既報⁹⁾を参考に式 (3) のようにモルタルの強度発現を評価指標として反応率 (最終到達強度に対する圧縮強度の割合) を定義した。反応率を材齢に対して微分することで得られる式 (4) の反応速度を用いてアレニウスプロットを作成した。ここで式 (3)、(4) 中の係数 a 、 b は図-2 で得た圧縮強度発現の近似曲線の値とした。

$$\alpha_T = \frac{f(t)}{f_\infty} = \exp(at^b) \quad (3)$$

$$K_T = \frac{d\alpha_T}{dt} = ab \cdot \exp(at^b) \cdot t^{b-1} \quad (4)$$

ここで、 α_T : 反応率

K_T : 反応速度 [1/日] である。

得られたアレニウスプロットを反応率毎に整理した

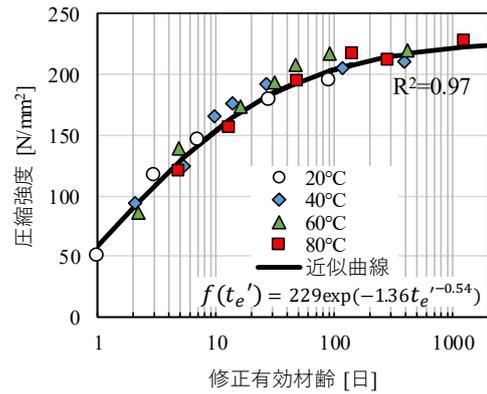


図-4 修正有効材齢と圧縮強度の関係

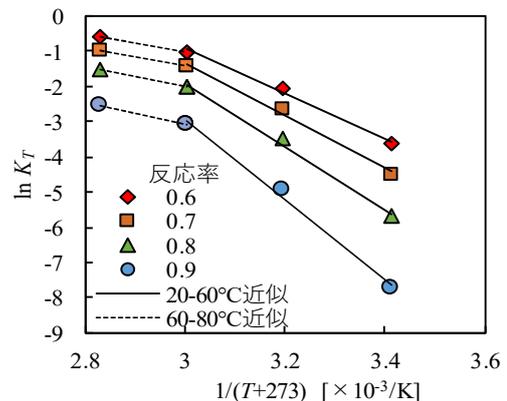


図-5 アレニウスプロット

結果を図-5 に示す。本検討で用いたデータでは温水 80 °C 材齢 26 時間で反応率は 0.53 であった。したがって、その反応率以下の範囲は外挿となるため、反応率 0.6 から 0.9 の範囲で整理を行った。図-5 のアレニウスプロットの傾きに注目すると、20 °C から 60 °C の範囲では反応率ごとに概ね一つの直線で近似できることが確認できる。一方、60 °C から 80 °C の範囲は 20 °C から 60 °C に比べプロットの傾きが小さくなっていることが明確に確認できる。アレニウスプロットの傾きは見かけの活性化エネルギーの大小を表しており、このことは 20 °C から 60 °C の範囲よりも、60 °C から 80 °C の見かけの活性化エネルギーが小さく、圧縮強度発現における温度依存性が小さいことを示している。既報⁹⁾ではシリカフェームを使用した低水結合材比の超高強度モルタルについて、養生温度が 30 °C を超える範囲で見かけの活性化エネルギーがそれ以下の養生温度よりも小さくなることを報告している。松田ら¹²⁾はシリカフェームを使用した超高強度コンクリートの圧縮強度について、初期の最高温度履歴が 45 °C から 60 °C を境として圧縮強度の発現速度が速くなることを報告している。本検討では温度範囲は異なるものの、これらの既報と同様にシリカフェームのポズラン反応が温水養生により活性化し、強度発現速度に影響を及ぼしていると推察され、異なる養生温度における圧縮強度発現の推定精度を向上させるためには、60 °C を境

とする見かけの活性化エネルギーの変化を考慮する必要があったと考えられた。

4. コンクリート実験

4.1 圧縮強度試験材齢

コンクリート供試体は脱型後、2.3 節に示す温水養生方法で養生を行い、各材齢で圧縮強度試験を行った。伊藤ら¹³⁾は異なる温度で養生した時の圧縮強度発現をアレニウスプロットで表現し、同じ結合材を用いたモルタルとコンクリートの圧縮強度発現は同一の見かけの活性化エネルギーで表せることを示している。本検討でもコンクリートの見かけの活性化エネルギーは、モルタルで用いた値と同じで表せると考え、各温水養生での試験材齢を設定した。設定したコンクリートの圧縮強度の試験材齢を表-5 に示す。表中には各養生温度、材齢における修正有効材齢を併記する。前章で示した見かけの活性化エネルギー55.0 kJ/mol の時の修正有効材齢で整理すると、モルタル供試体の温水 40 °C材齢 28 日の修正有効材齢(115 日)と同程度になるためには、温水 60 °Cでは材齢 7.5 日、温水 80 °Cでは材齢 3.5 日であった。本検討では、温水 60 °C、80 °Cともに材齢 4 日、7 日で試験を行うこととし、加えて温水養生を行うコンクリートのポテンシャル強度を確認する目的で材齢 14 日の試験材齢を設定した。なお、比較のために管理用供試体である温水 40 °C材齢 28 日についても試験を行った。

4.2 試験結果

コンクリート供試体養生中の温水養生容器内の温度変化を図-6 に示す。なお、図-6 は供試体を温水に入れる直前を起点として整理している。供試体を入れてからの温度上昇は図-1 のモルタルの場合よりも遅く、目標温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ に達するまでの時間は 40 °Cでは約 2 時間、60 °Cでは約 4 時間、80 °Cでは約 9 時間であった。それ以降の時間は目標温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内であった。

コンクリートの圧縮強度試験結果を図-7 に示す。モルタルの修正有効材齢の算出結果から管理用供試体と同程度の圧縮強度に達するのは 60 °Cで材齢 7 日、80 °Cで材齢 4 日程度と考えられたが、どちらの水準も管理用供試体の強度に対して約 10 N/mm² 小さい結果であった。それぞれの温度で材齢を長くすると、60 °Cで材齢 14 日、80 °Cで材齢 7 日の時点で管理用供試体と同程度の強度を得ることができた。これはモルタルとコンクリートの供試体寸法の違いにより、寸法の大きいコンクリート供試体ではモルタル供試体よりも中心部の温度履歴が低かったこと、供試体中心部の養生水の不足等の影響が考えられるが、これについては今後の検討課題とする。

図-8 に同じ温水養生方法を実施した時のモルタルの強度(以下 F_m)に対するコンクリートの強度(以下 F_c)の割合を示す。なお、ここでの F_m は図-4 中の修正有

表-5 コンクリートの圧縮強度試験材齢

養生温度	試験材齢 (日)			
	4	7	14	28
40°C	—	—	—	○ [115 日]
60°C	○ [60 日]	○ [106 日]	○ [211 日]	—
80°C	○ [140 日]	○ [279 日]	○ [604 日]	—

[]内は修正有効材齢を表す

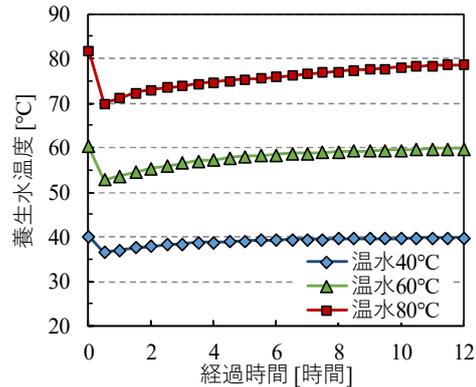


図-6 養生容器内の温水の温度計測結果 (コンクリート)

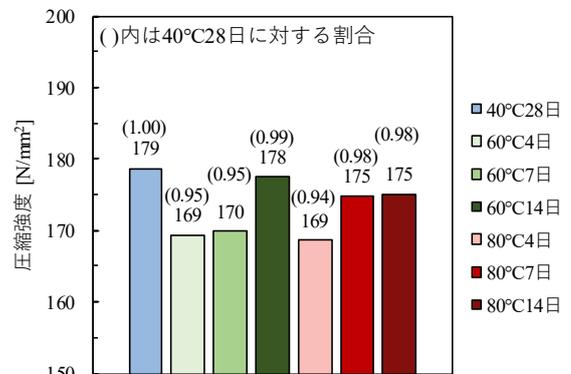


図-7 圧縮強度試験結果 (コンクリート)

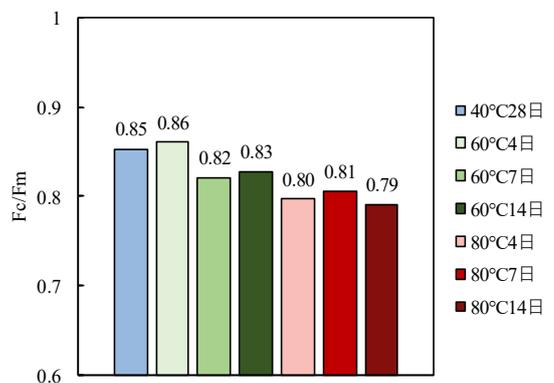


図-8 F_c/F_m の比較

効材齢と圧縮強度の近似曲線で推定した値を用いている。既往¹⁴⁾の150 N/mm²以上のベースモルタル(供試体寸法φ10×20 cm)と安山岩砕石を用いたコンクリート(供試体寸法φ10×20 cm)の検討ではFc/Fmは0.9から1.0の範囲にある。それに対して、図-8を見るとFc/Fmは概ね0.8から0.9の範囲にあり、既往の同一寸法の供試体を用いたFc/Fmの検討結果よりも小さい傾向が見られた。このことから、温水養生を行った本実験の範囲においては、モルタルとコンクリートの供試体寸法の違いも圧縮強度発現に影響を及ぼしていることが推察された。

本検討の温水60℃、80℃材齢7日以内では管理用供試体の強度よりも低い結果となったが、管理用供試体に対して94%から98%の強度が得られた。したがって、本調査においては本検討の温水養生方法で材齢7日以内に管理用供試体の強度を安全側に評価できると考えられる。今後、データ蓄積により、本早期判定試験方法の再現性を確認していく予定である。

5. まとめ

超高強度コンクリートの圧縮強度の早期判定試験方法について養生温度、材齢をパラメータとして基礎検討を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- 異なる温度で温水養生したモルタルの強度試験結果から、圧縮強度発現は養生温度が高いほど速くなった。温水養生による圧縮強度発現の促進は見かけの活性化エネルギーを大きくすることで概ね評価可能であった。
- モルタルの強度試験結果からアレニウスプロットを作成すると、見かけの活性化エネルギーは20℃から60℃よりも60℃から80℃で小さかった。このことから、本調査の圧縮強度発現の推定精度を向上させるためには、60℃を境とする見かけの活性化エネルギーの変化を考慮する必要があると考えられた。
- コンクリートの強度試験結果では温水60℃、80℃材齢7日以内で管理用供試体(温水40℃材齢28日)の94%から98%の強度を得ることができ、管理用供試体の強度を安全側に評価可能と考えられた。
- 同じ養生温度、材齢のコンクリートとモルタルの強度の比(Fc/Fm)で評価すると、Fc/Fmは概ね0.8から0.9の範囲にあり、既往の検討よりも小さい結果であった。このことからモルタルとコンクリート供試体の寸法の違いも圧縮強度発現に影響を及ぼしていることが推察された。

参考文献

- 立山創一、安部弘康、石川伸介：高強度コンクリートの圧縮強度早期判定法、日本建築学会大会学術講

演梗概集, pp.369-370, 2006.9

- JISA 1805: コンクリート生産工程管理用試験方法—温水養生法によるコンクリート強度の早期判定試験方法, 2009
- 日本コンクリート工学協会: JCI-SE4, 温水法(70℃)によるコンクリートの促進強度試験方法, JCI 規準集, 2004.4
- 陣内浩、榊田佳寛、早川光敬: 初期に高温履歴を受けた構造体コンクリートの簡易的な圧縮強度推定方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.579, pp.7-14, 2004.5
- 小泉信一、井元晴丈、菅俣匠、太田晃: 超高強度コンクリートの潜在的な強度発現性および水和反応に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.115-120, 2008
- 大塚秀三、中田善久、飛坂基夫、毛見虎雄: 温水養生法による100N/mm²を超える高強度コンクリートの圧縮強度の早期判定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1241-1246, 2006
- 寺内利恵子、早川光敬、陣内浩、渡邊悟士: 高強度コンクリートの製造管理に用いる供試体の試験材齢と養生方法に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.633, pp.1899-1906, 2008.11
- 黒岩秀介、並木哲、名和豊春: 人工軽量骨材および高吸水性樹脂による高強度コンクリートの自己収縮低減, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.103-104, 2013.8
- 桐山宏和ほか: C₃S系セメントとポゾラン質微粉末を用いた超高強度モルタルの圧縮強度の温度依存性とその評価方法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.75, No.3, pp.157-168, 2019
- 山本明雄、瀬戸謙一郎、片桐冬樹、大友忠典: 高強度コンクリートの粗骨材品質判定法に用いる基準モルタルの検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.1, No.1, pp.1019-1025, 1995
- CEB-FIP Model Code 1990, Comite Euro-international du Beton, 1990
- 松田拓、西本好克、鈴木康範、小出貴夫: 初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの強度発現特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.73-78, 2008
- 伊藤憲雄、三橋博三、桐越一紀: 養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.1, pp.103-112, 2004.1
- 渡邊悟士、黒岩秀介、陣内浩、並木哲: 高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.588, pp.21-27, 2005.2