

副産物を大量に使用し収縮と発熱を抑制した 50MPa 級 コンクリートの強度発現に与える温度の影響

The Influence of Temperature on the Strength Development of Low-heat and Low-shrinkage 50MPa Class Concrete Using High-volume By-products

R&D センター 基 哲義 AKIYOSHI DAI
R&D センター 小宮 克仁 KATSUHITO KOMIYA
R&D センター 佐々木 亘 WATARU SASAKI
R&D センター 松田 拓 TAKU MATSUDA

CO₂ 排出量削減に関する取り組みとして産業副産物由来の混和材を大量に使用したコンクリートが提案されている。筆者らは、混和材だけでなく細骨材にも産業副産物を使用した圧縮強度の特性値が 50 MPa 程度の低収縮低発熱コンクリートを開発した。このコンクリートについて、本稿では、初期の強度発現に与える温度の影響を実験的に検討した。その結果、このコンクリートは通常のセメントコンクリートに比べて強度発現に与える温度の影響が大きいこと、圧縮強度の温度依存性を有効材齢により統一的に表現するためには、有効材齢を計算する際に用いる見かけの活性化エネルギーを通常のセメントコンクリートで用いられる値より大きくする必要があるので分かった。

キーワード： 混和材、フェロニッケルスラグ細骨材、低収縮、低発熱

Concrete that uses a large amount of admixture derived from industrial by-products has been proposed as an effort to reduce CO₂ emissions. The authors have developed low-heat and low-shrinkage concrete with characteristic value of compressive strength of around 50 MPa, using not only supplementary cementitious materials but also by-products as fine aggregates. In this paper, we experimentally investigated the effect of temperature on the initial strength development of this concrete. As a result, the followings were obtained; 1) In this concrete, the effect of temperature on strength development is larger than that of ordinary cement concrete. 2) In order to uniformly express the effect of temperature on compressive strength by effective age, it is necessary to use larger apparent activation energy than the value for ordinary cement concrete when calculating the effective age.

Key Words: Supplementary cementitious materials, Ferronickel slag sand, Low shrinkage, Low heat generation

1. はじめに

CO₂ 排出量削減に関する取り組みが盛んに行われており、CO₂ 排出量の削減効果が得られる方法のひとつとして、産業副産物由来の混和材を大量に使用しポルトランドセメントの使用量を低減したコンクリートの検討も多く行われている。筆者らは、結合材だけでなく細骨材にも産業副産物を使用することで、高い強度と低収縮性が同時に得られる環境負荷低減型コンクリートを開発して

いる¹⁾。このコンクリートの基本的な条件では、水結合材比が非常に小さく、強度が高いだけでなくフレッシュ時の粘性が大きい。そこで、このコンクリートをベースとして、フレッシュ性状をスランプで管理し、圧縮強度の特性値が 50MPa 程度の配合についても検討を行なっている²⁾。一方で、結合材中の混和材量を高めると初期の強度発現性が緩慢となる傾向にあり、適用に当たっては、さらに、強度発現性に与える温度の影響についても検討しておく必要がある。本稿は、開発したコンクリー

表-1 使用材料

材料	種類	密度 [g/cm ³]	記号
結合材	早強ポルトランドセメント	3.14	H
	膨張材 (石灰系, 早強タイプ)	3.17	E
	高炉スラグ微粉末 4000 (セッコウ入り)	2.89	BF
	フライアッシュ, JIS I 種	2.34	FA
	シリカフェーム	2.27	SF
細骨材	フェロニッケルスラグ細骨材 (含水率 0.5%以下)	2.83	S
粗骨材	硬質砂岩碎石 2005	2.62	G
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)	-	SP
	AE 剤 (ノニオン系特殊界面活性剤とカルボン酸系活性剤)	-	AE
	消泡剤 (ポリオキシアルキレンアルキルエーテル系)	-	DF

注) 細骨材の密度は絶対密度, 粗骨材の密度は表乾密度。化学混和剤は水の一部として計量。

表-2 コンクリートの配合

水結合材比 W/B	細骨材率 [%]	空気量 [%]	単位量 [kg/m ³]								化学混和剤の使用量			
			W	B						S	G	SP [B×%]	AE [B×%]	DF [B×%]
				計	H	E	BF	FA	SF					
0.30	46.5	6.0	127	424	86	20	127	127	64	860	917	1.10	0.007	0.007

表-3 養生温度と圧縮強度の測定材齢

養生温度 [°C]	測定材齢 [日]						
	1	3	6	9	14	28	55
5	-	○	○	-	-	○	○
10	-	○	○	-	-	○	○
20	-	○	○	-	○	○	○
40	○	○	○	○	○	-	○

表-4 フレッシュ試験結果

供試体の条件	スランブ [cm]	空気量 [%]	練上り温度 [°C]
5°C	21.5	5.0	10.9
10°C	21.5	5.1	11.1
20°C	21.0	5.0	10.9
40°C	21.5	5.7	11.1

トに関して、比較的初期の材齢における強度発現性に与える温度の影響について調べた結果を報告するものである。

ンクリートの材齢 3~7 日で同程度の強度発現性を確保し、さらに収縮ひずみと水和に伴う発熱量を低減できるものである²⁾。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

表-1 に使用材料, 表-2 にコンクリートの配合を示す。配合の条件は水結合材比 0.30, 単位水量 127 kg/m³, 単位粗骨材絶対容積 0.350 m³/m³, 結合材の構成は(H+E):BF:FA:SF = 25:30:30:15 (質量比) かつ E = 20 kg/m³ である。細骨材は空隙構造が粗大で吸水率の大きいフェロニッケルスラグ³⁾である。このフェロニッケルスラグ細骨材は気乾状態 (含水率 0.5%以下) で使用し, 配合計算上は絶対状態として取り扱った。このコンクリートは結合材の 75%と細骨材に産業副産物を使用しており, 標準的な温度条件では, 早強ポルトランドを用いた 50MPa 級コ

(2) 実験方法および要因

本実験では, 圧縮強度発現に与える温度の影響について検討した。すなわち, コンクリートを練り混ぜ, フレッシュ性状を確認して φ100×200 mm 円柱供試体を作製したのち, 直ちに 5°C, 10°C, 20°C, 40°C の恒温槽内に封緘状態で静置させ, 圧縮強度と材齢の関係を調べた。また, 併せて中央部に熱電対を埋め込んだ円柱供試体も作製し, 養生中の温度を測定した。表-3 に養生温度と測定材齢の組合せを示す。

コンクリートの練混ぜは公称容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いた。練混ぜ手順は, 結合材および細骨材を投入して 30 秒, その後化学混和剤を含む水と粗骨材を投入して 180 秒とした。なお, 低温度の影響を中心

に検討する目的で、練混ぜを含む供試体の製作は、雰囲気温度 9~10℃程度の環境で行なった。

3. 実験結果

(1) フレッシュ性状

表-4 に供試体の養生温度条件とそれぞれのコンクリートのフレッシュ試験結果を示す。各温度条件に供した供試体は、それぞれ同じ日の異なるバッチとして練り混ぜて製作したが、40℃の供試体を採取したバッチの試料で若干空気量が大きかったことを除けば、ほぼ同様のフレッシュ性状を呈する試料を製作できている。

(2) 材齢と圧縮強度の関係

図-1 に材齢と圧縮強度の関係を示す。20℃条件の圧縮強度は、材齢 3 日で 31.4 MPa、材齢 6 日で 47.5 MPa、材齢 28 日で 79.7 MPa、材齢 55 日で 89.8 MPa であった。また、材齢 3 日、6 日、55 日の範囲では温度が高いほど圧縮強度も大きい。図-2 に 20℃条件の圧縮強度に対する各温度条件での圧縮強度の比率（百分率）と材齢の関係を示す。この図より、いずれの温度条件でも材齢の経過に伴い圧縮強度比は 100%に近づくことがわかる。材齢 55 日における各温度条件での圧縮強度比は、5℃では 80.1%、10℃では 84.0%、40℃では 108.3%であった。一方、若材齢ほど、温度の影響が大きいことも明らかである。材齢 3 日での圧縮強度比は、5℃では 37.7%、10℃では 56.2%、40℃では 208%であり、温度による差異が大きいことがわかる。

4. 考察

図-1 に示した材齢と圧縮強度の関係に対して、 E_a/R を 4000 とした以下の式(1)、すなわちコンクリート標準示方書に示される有効材齢⁴⁾で整理した結果を図-3 に示す。

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

ここに、 t : 有効材齢 [日]

E_a : 見かけの活性化エネルギー [J/mol]

R : 気体定数 [= 8.314 J/(mol·K)]

T : 温度 [℃]

Δt_i : 温度が T である日数 [日]

有効材齢の計算における温度は基本的に実測値を用いた。熱電対による温度測定開始時の温度は概ね練上り温度と同程度であったことから、有効材齢の起点は各試料の注水時刻とし、その時の温度は練上り温度と仮定して計算を行なった。

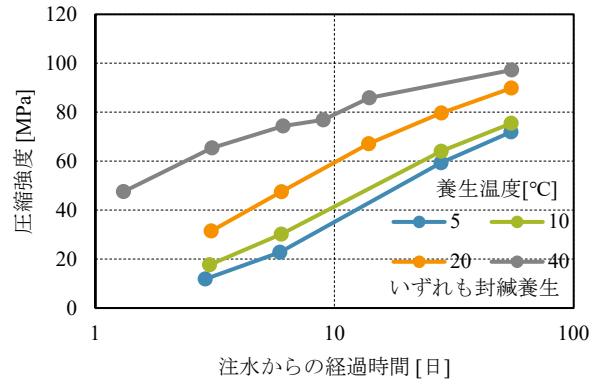


図-1 材齢と圧縮強度の関係

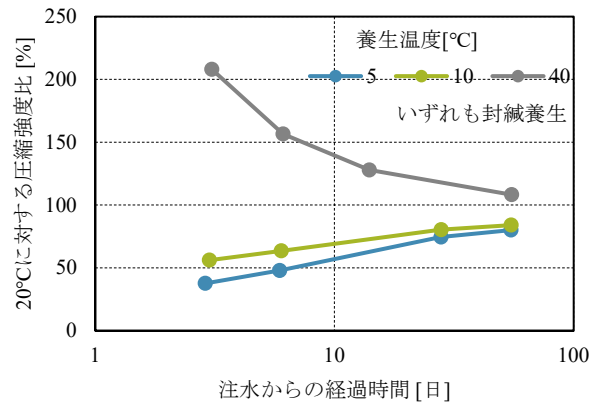


図-2 材齢と圧縮強度比の関係

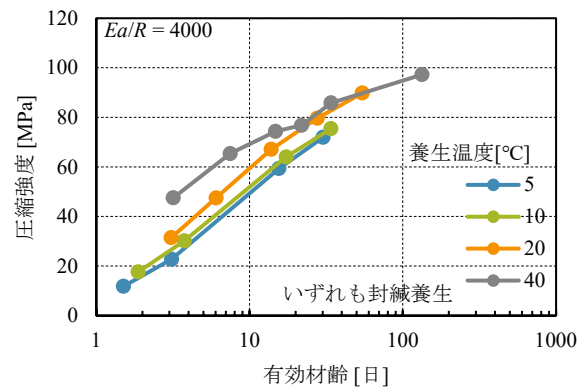


図-3 有効材齢と圧縮強度の関係

E_a/R を 4000、すなわち、見かけの活性化エネルギーを 33.26×10^3 J/mol として有効材齢による整理をすると、各温度での圧縮強度の値には乖離があることがわかる。そこで、シリカフェーム等のボゾラン質微粉末を用いた超高強度モルタル・コンクリートでの検討事例^{5),6)}を参考に、見かけの活性化エネルギーを変化させた有効材齢について検討を行なった。特に、初期の強度発現を推定する目的で、本検討で得たデータの内、有効材齢が 28 日までの範囲で整理した際に、有効材齢と圧縮強度の関係が直線関係で一意に表すことが出来る見かけの活性化エネ

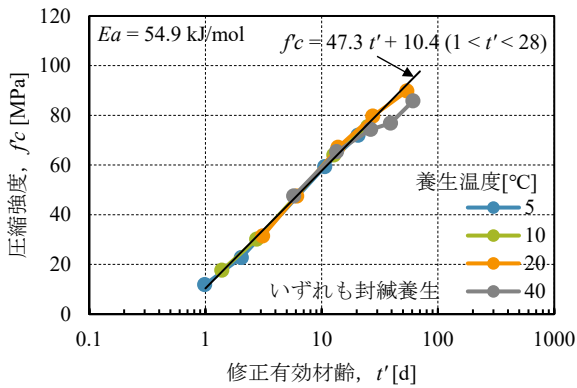


図-4 修正有効材齢と圧縮強度の関係

ルギーを最小二乗法により求めた。この結果得られた見かけの活性化エネルギーは $54.9 \times 10^3 \text{ J/mol}$ であった。この見かけの活性化エネルギーを式(1)に代入して得られる有効材齢を修正有効材齢とし、圧縮強度の関係をプロットしたのが図-4である。見かけの活性化エネルギーを大きくする必要があるということは、高炉スラグ微粉末等の混和材を大量に使用したこのコンクリートにおいて、少なくとも比較的初期材齢の強度発現性に与える温度の影響が通常のセメントコンクリートに比べて大きいことを意味している。本検討の結果からは、このコンクリートでは、見かけの活性化エネルギーを $54.9 \times 10^3 \text{ J/mol}$ とした修正有効材齢と、図-4中に示した式(2)を用いることで、実環境で多く想定される温度(5~40°C)条件での初期の強度発現について、比較的精度よく、推定が可能であるものとする。

$$f'_c = 47.3 \cdot t' + 10.4 \quad (2)$$

ここに、 f'_c : 圧縮強度 [MPa]

t' : 活性化エネルギーを $54.9 \times 10^3 \text{ J/mol}$ とした修正有効材齢 [日] ($1 < t' < 28$)

5. まとめ

産業副産物を大量に使用し、収縮と発熱を抑制した 50 MPa 級のコンクリートについて、材齢 55 日までの強度

発現と温度の影響について調べ、有効材齢による整理について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ① このコンクリートは通常のセメントコンクリートに比べて強度発現に与える温度の影響が大きい。
- ② このコンクリートの圧縮強度に与える温度の影響を有効材齢により統一的に表現するためには、有効材齢を計算する際に用いる見かけの活性化エネルギーを通常のセメントコンクリートで用いられる値より大きくする必要がある。
- ③ 見かけの活性化エネルギーを $54.9 \times 10^3 \text{ J/mol}$ とした修正有効材齢を用いることで、このコンクリートの材齢初期における強度発現は式(2)で評価できる。

参考文献

- 1) T. Matsuda, T. Noguchi, M. Kanematsu, R. Mine: Ultralow Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement, Proceedings of the fib congress 2018
- 2) 葛哲義, 佐々木亘, 恩田陽介, 松田拓: 超低収縮・低発熱型設計基準強度 50MPa 級コンクリートの開発, 三井住友建設技術研究開発報告, 第 20 号, pp.45-48, 2022.
- 3) 松田拓, 蓮尾孝一, 野口貴文: 細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp.1117-1122, 2015. 7
- 4) 土木学会: 2022 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2023. 3
- 5) 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 E2, Vol. 75, No. 3, pp.157-168, 2019.
- 6) 加藤優志, 太田貴士, 渡邊悟士, 黒岩秀介: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp.845-850, 2021. 7