

論文 カルシウムシリケート系硬化促進剤が高炉スラグを用いたモルタルの若材齢における圧縮強度に与える影響

丁 上^{*1}・河中 涼一^{*2}・藤井 隆史^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨：本論文は、カルシウムシリケート系硬化促進剤が高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの材齢 18 時間における圧縮強度に与える影響を調べたものである。硬化促進剤がモルタルの強度発現性に与える効果は、外気温がモルタルの強度発現性に与える効果とは異なる。硬化促進剤の使用量が同じ場合、高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材の使用量が多いほど、材齢 18 時間における圧縮強度は小さくなる。しかし、硬化促進剤の使用量が材齢 18 時間のモルタルの圧縮強度を増加させる効果は、高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材の使用量に関係なく同じである。

キーワード：高炉スラグ微粉末、高炉スラグ細骨材、硬化促進剤、積算温度、水和熱、保温材

1. はじめに

プレキャストコンクリート（以降、PCa）製品の製造のように、効率のよい製造を行うために早期に圧縮強度の発現が求められる場合がある。コンクリートの硬化を促進する混和剤には、塩化物、硝酸塩、亜硝酸塩などが知られている。塩化物や硝酸塩は、鋼材を腐食させることから、有筋のものには適用できないとされている。また、亜硝酸塩は、主に極寒地での凍結防止と初期強度増進に用いられるが、想定よりも気温が高い場合には、スランプロスが大きくなり、作業性が確保できなくなる。このような理由により、工場製品にこれらの混和剤が用いられることは稀で、打込みの翌朝に脱型、運搬等の作業が行える工程が可能な圧縮強度の発現は、蒸気養生によって行われているのが一般である。

2022 年および 2023 年制定土木学会コンクリート標準示方書より、蒸気養生は工期を短縮するために実施されるものであって、コンクリートの所要の品質を確保することを主目的としていないこと、示方書〔設計編〕に示される耐久性に関する特性値の予測式は、蒸気養生を行うコンクリートは適用外で、製品と同一養生を行った供試体を用いて確認する必要があることが示されている。また、蒸気養生に用いられる重油等の化石燃料が炭酸ガス排出の一因となっていること等により、蒸気を用いずに早期にコンクリートの圧縮強度を発現させる製造方法の確立が望まれている。

カルシウムシリケート系硬化促進剤（以降、硬化促進剤）は、C-S-H のナノ粒子が種結晶として作用することで強度発現を早める混和剤である²⁾。鋼材腐食の恐れのある物質は含んでおらず、プレストレストコンクリート

にも適用が可能な硬化促進剤とされている。本論文は、硬化促進剤と高炉スラグ微粉末（以降、GGBS）および高炉スラグ細骨材（以降、BFS）を用い、高い耐久性が求められるコンクリート部材を蒸気養生を行うことなく製造する技術を確立することを目的に、硬化促進剤が GGBS および BFS を用いたモルタルの材齢 18 時間における圧縮強度に与える影響を調べたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験に用いたモルタルの配合を表-1 に示す。水結合材比は 33%とし、高炉スラグ微粉末を用いる場合は、質量比で結合材の 50%用いた。配合は、単位水量を一定の条件で決定した。結合材には、早強ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm³、ブレン値：4,490cm²/g）（以降、HPC）および高炉スラグ微粉末 6000（密度：2.91g/cm³、ブレン値：5,670cm²/g、三酸化硫黄量：3.02%）を用いた。細骨材には、安山岩砕砂（表乾密度：2.63g/cm³、吸水率：1.34%、粗粒率：2.90）（以降、砕砂）および高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.69g/cm³、吸水率：1.51%、粗粒率：1.93）を用いた。高性能減水剤にはポリカルボン酸系のものを用い、作業ができる範囲の使用量を添加した。硬化促進剤は、カルシウムシリケート水和物を主成分とするものを、質量比で結合材の 0%、3%、6%および 8%を添加した。

2.2 試験方法

モルタルの練混ぜは、室温が 24±4℃の試験室内で行い、練混ぜ後、直ちにφ100×200mm の型枠に打ち込み、所定の環境で養生を行った。ただし、試験温度が 5℃お

*1 岡山大学大学院 環境生命自然科学研究科先進理工科学学位プログラム 修(工) (学生会員)

*2 ピーエス・コンストラクション(株) 大阪支店土木技術部設計グループ 博(工) (正会員)

*3 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域准教授 博(工) (正会員)

*4 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域教授 博(工) (正会員)

表-1 モルタルの配合

No.	W/B (%)	GGBS/B (%)	BFS/S (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 (B×%)			
					W	B		S				
						C	GGBS	砕砂		BFS		
1	33.0	0.0	0.0	2.0	272	824	0	1,172	0.4			
2		50.0				412	412	1,144				
3		0.0	100.0			824	0	0		1,198		
4		50.0				412	412	1,170				

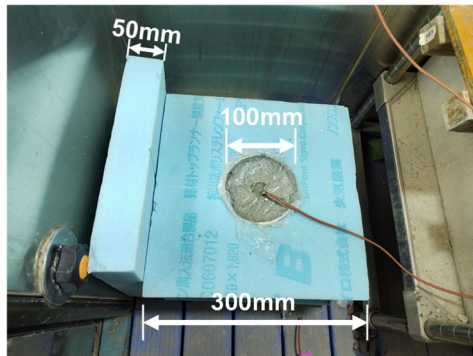


図-1 疑似断熱容器



図-2 保温材による水和熱の放熱抑制

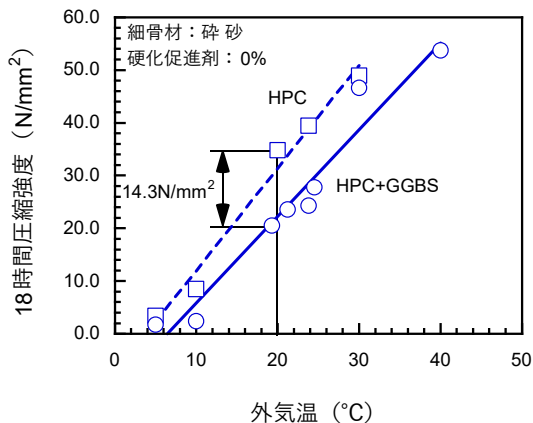


図-3 GGBS がモルタルの圧縮強度に与える影響

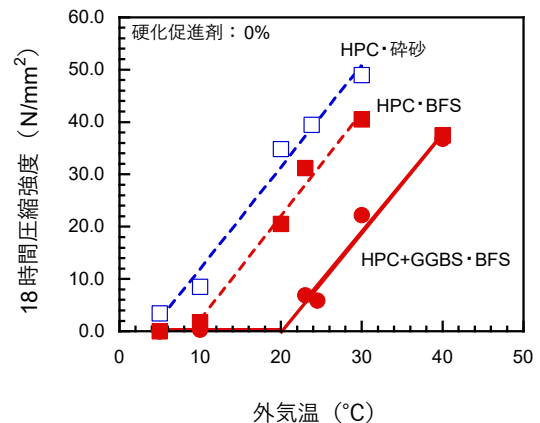


図-4 BFS がモルタルの圧縮強度に与える影響

よび 10℃の場合には、材料を 18 時間以上、試験温度に静置した後、直ちに練混ぜを行った。モルタルの温度測定には、銅コンスタンタン熱電対を用いた。疑似断熱容器は、図-1 に示す中心をくりぬいた 1 辺が 300mm の押出成形ポリスチレンの容器に、使い捨て型枠を入れ、モルタルを打ち込んだ。保温材による水和熱の放熱抑制は、片面にアルミ蒸着がされた発泡ポリエチレンシート（厚さ：7mm）を用い、図-2 に示すように、使い捨て型枠の側面に、1 重、2 重または 3 重で巻きつけ、上下面には厚さ 50mm の押出成形ポリスチレン板を置いた。

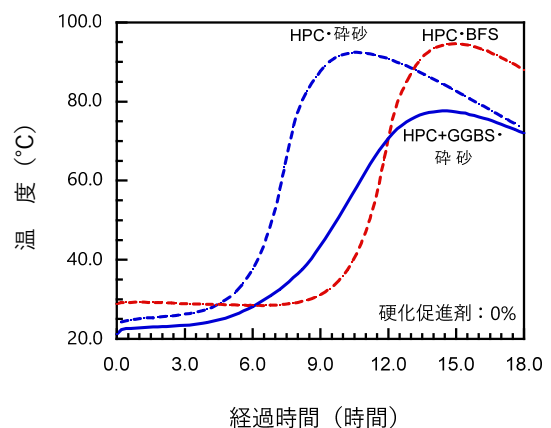


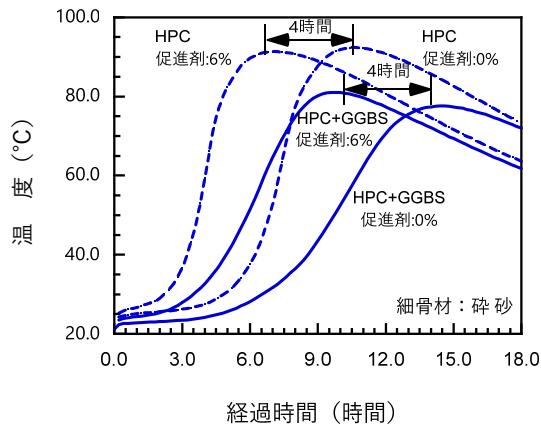
図-5 モルタルの温度変化

3. 実験結果および考察

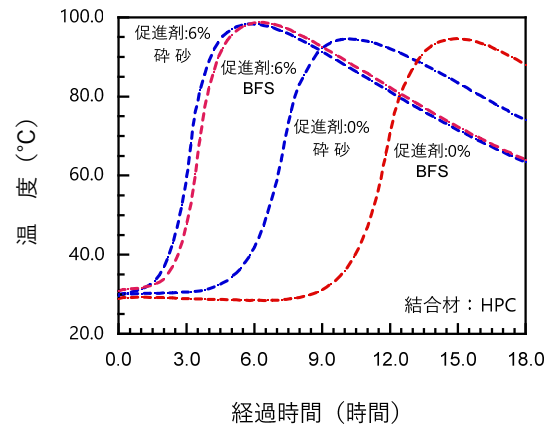
3.1 硬化促進剤が GGBS および BFS を用いたモルタルの水和反応に与える影響

図-3 は、細骨材に砕砂を用いたモルタルの材齢 18 時間における圧縮強度と養生時の外気温の関係を示したものである。HPC のみを用いたモルタルに比べて、GGBS

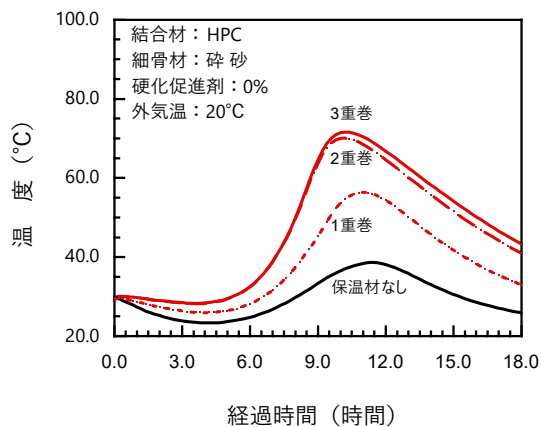
を結合材の 50%用いたモルタルの材齢 18 時間における圧縮強度は小さくなっており、外気温が 20℃での差は 14.3N/mm²である。図-4 は、BFS がモルタルの材齢 18 時間における圧縮強度に与える影響を示したものである。高炉スラグ細骨材には固結防止剤として凝結遅延剤が散



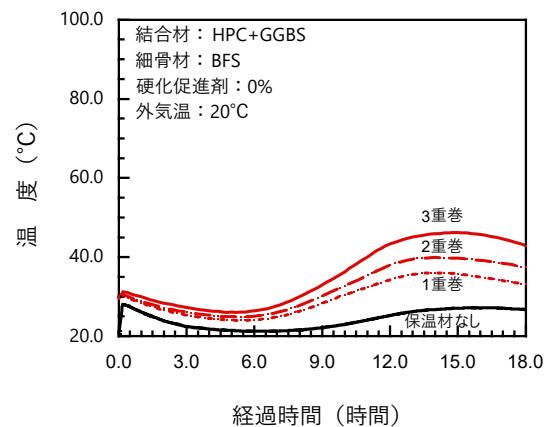
図－6 硬化促進剤が GGBS を用いたモルタルの温度変化に与える影響



図－7 硬化促進剤が BFS を用いたモルタルの温度変化



図－8 保温材が HPC と砕砂を用いたモルタルの温度変化に与える影響



図－9 保温材が GGBS と BFS を用いたモルタルの温度変化に与える影響

布されているため、砕砂を用いたモルタルより、材齢 18 時間における圧縮強度は小さくなる傾向がある。結合材に GGBS を用い、細骨材に BFS を用いた場合は、外気温が 20℃以下では、材齢 18 時間で圧縮強度が発現しないことが分かる。図－5 は、図－1 に示す疑似断熱容器内で養生したモルタルの温度変化を調べたものである。GGBS や BFS を用いると、最高温度に到達する時間が遅くなることが分かる。とくに、GGBS を用いると、最高温度も低くなることが分かる。

図－6 は、疑似断熱容器内で養生したモルタルの温度変化をもとに、硬化促進剤が HPC および GGBS を用いたモルタルの水和反応の速さに与える影響を調べた結果である。GGBS の使用に関係なく、硬化促進剤を用いても最高温度が変わることはないが、最高温度に到達する時間は 4 時間程度速くなっている。図－7 は、疑似断熱容器内で養生したモルタルの温度変化をもとに、硬化促進剤が BFS を用いたモルタルの水和反応の速さに与える影響を調べた結果である。硬化促進剤を用いることにより、BFS を用いたモルタルの最高温度および最高温度に到達する時間は、砕砂を用いたモルタルと同じ程度に

なっている。硬化促進剤を用いれば、BFS に散布された固結防止剤がモルタルの強度発現性に与える影響を小さくできることが分かる。

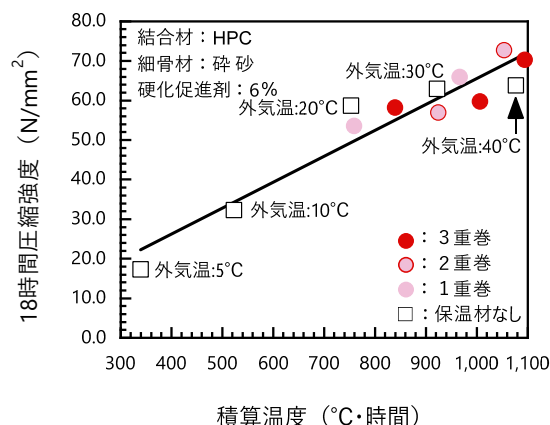
3.2 積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係

図－8 は、図－2 に示す保温材が HPC と砕砂を用いたモルタルの水和熱の発現に与える影響を調べたものである。保温材の枚数が増えることで最高温度に到達する時間は速くなり、最高温度も高くなっている。図－9 は、GGBS および BFS を用いたモルタルの水和発熱に保温材が与える影響を調べたものである。GGBS および BFS を用いたモルタルでも、保温材の枚数が増えるにつれ、最高温度は高くなるが、GGBS を用いない場合に比べると、その大きさは小さい。

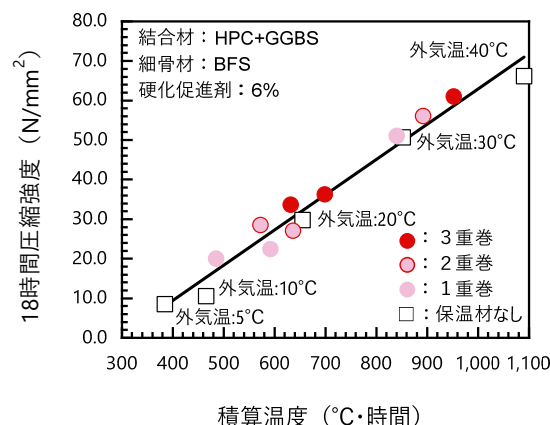
図－10 は、HPC および砕砂を用いたモルタルの練混ぜから 18 時間までの積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係を示したものである。なお、積算温度は、次式によって算出している。

$$M = \sum (\theta + 10) \cdot t \quad (1)$$

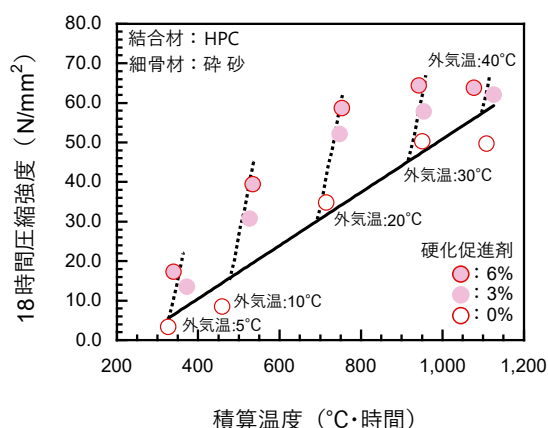
ここに、 M は積算温度(℃・時間)、 θ はモルタル温度(℃)、 t は時間(時間)である。



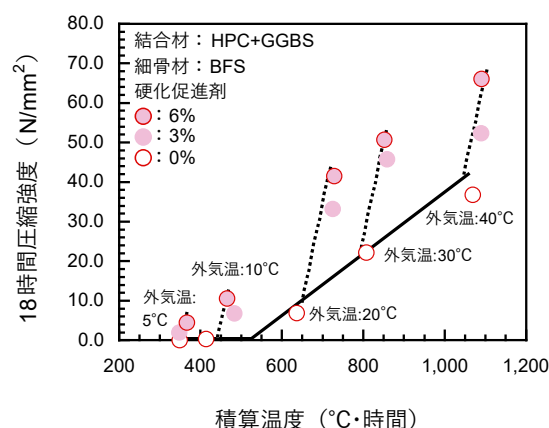
図一10 保温材が HPC および砕砂を用いたモルタルの積算温度と圧縮強度の関係に与える影響



図一11 保温材が HPC と GGBS および砕砂を用いたモルタルの積算温度と圧縮強度の関係に与える影響



図一12 硬化促進剤が HPC と砕砂を用いたモルタルの積算温度と圧縮強度の関係に与える影響



図一13 硬化促進剤が GGBS と BFS を用いたモルタルの積算温度と圧縮強度の関係に与える影響

図中の直線は、保温材なしの結果の傾向を示したものであるが、保温材を用いたものの結果も同じ直線状にあり、保温材が積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係に与える影響は、外気温が積算温度と圧縮強度の関係に与える影響と同じであることが分かる。すなわち、保温材によって水和熱の発散が抑制されたことによって圧縮強度が増加するのは、外気温が高くなることによる効果と同じであるといえる。

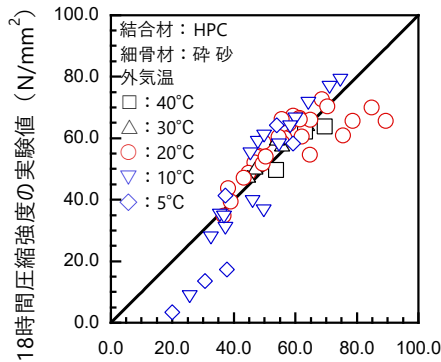
図一11 は、GGBS および BFS を用いたモルタルの積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係を調べたものである。GGBS および BFS を用いたモルタルにおいても、積算温度と圧縮強度の関係は、保温材を用いたものと用いないもので同じであることが分かる。また、図一10 に示される GGBS を用いない場合と比べると、GGBS を用いることで材齢 18 時間における圧縮強度は、積算温度が同じ場合に 10N/mm² 程度低くなることが分かる。

3.3 硬化促進剤の効果

図一12 は、HPC と砕砂を用いたモルタルの積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係を、硬化促進剤が与える影響を示したものである。図中の実線は、硬化促

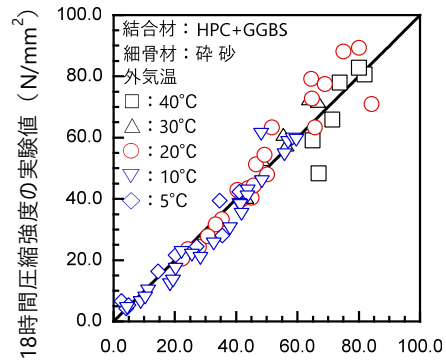
進剤が 0%の結果の傾向を示したもので、点線はそれぞれの外気温で硬化促進剤を 3%および 6%添加した場合の傾向を示したものであるが、点線の傾きは実線の傾きに比べて大きいことが分かる。すなわち、養生中の外気温の上昇によって生じる積算温度の増加による圧縮強度の増加に比べて、硬化促進剤が与える影響の方が、より大きいと言える。また、図一13 は、結合材に HPC と GGBS を用い、細骨材には BFS を用いたモルタルの積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係を、硬化促進剤が与える影響を示したものである。GGBS および BFS を用いた場合でも、外気温の上昇によって生じる積算温度の増加による強度増進に比べて、硬化促進剤が与える影響の方が大きいことが分かる。また、図一12 と図一13 を比較すると、GGBS および BFS を用いると、同じ積算温度で圧縮強度の大きさは、GGBS および BFS を用いていない場合よりも小さくなるが、積算温度と圧縮強度の関係を表す実線および点線の傾きは、いずれも、ほぼ同じであることが分かる。

目的変数を材齢 18 時間における圧縮強度とし、説明変数を積算温度と硬化促進剤の使用量として、HPC と砕



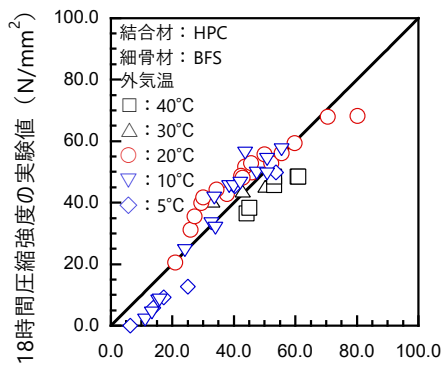
式(2)による圧縮強度の回帰値 (N/mm²)

図-14 HPC と砕砂を用いた場合



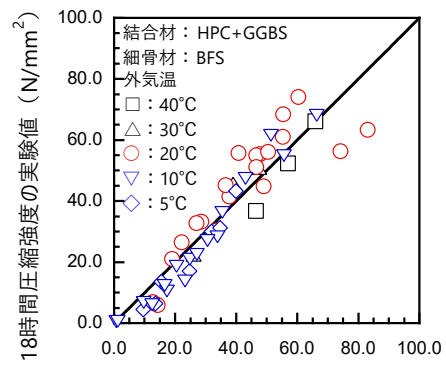
式(3)による圧縮強度の回帰値 (N/mm²)

図-15 GGBS と砕砂を用いた場合



式(4)による圧縮強度の回帰値 (N/mm²)

図-16 HPC と BFS を用いた場合



式(5)による圧縮強度の回帰値 (N/mm²)

図-17 GGBS と BFS を用いた場合

砂, HPC と GGBS と砕砂, HPC と BFS, HPC と GGBS と BFS を用いたモルタルについて重回帰分析を行った結果を式(2)～式(5)に示す。

$$f'_c = 2.87A + 0.043M + 5.9 \quad (2)$$

$$f'_c = 2.75A + 0.108M - 48.1 \quad (3)$$

$$f'_c = 2.82A + 0.048M - 9.7 \quad (4)$$

$$f'_c = 2.98A + 0.078M - 36.9 \quad (5)$$

ここに, f'_c は材齢 18 時間における圧縮強度 (N/mm²), M は積算温度 (°C・時間), A は硬化促進剤の使用量 (B ×%) である。

図-14～図-17 に, これらの重回帰分析で計算した材齢 18 時間における圧縮強度の回帰値と実験によって得られた圧縮強度を示す。いずれの結合材および細骨材を用いたモルタルも回帰値と実験値がよく一致しており, 式(2)～式(5)は, 実験結果の傾向をよく表していると言える。式(2)～式(5)に含まれる硬化促進剤の使用量 A にかかる定数は, 2.75～2.98 とほぼ同じである。本実験の範囲では, 硬化促進剤が材齢 18 時間における圧縮強度に与える効果は, 結合材の種類や細骨材の種類に関係なく, ほぼ同じと言える。

図-18, 図-19, 図-20 および図-21 は, それぞれ, 硬化促進剤を質量比で結合材の 0%, 3%, 6%および 8%

添加したモルタルの積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係を示したものである。なお, 結合材には HPC と GGBS を用い, 細骨材に BFS を用いている。外気温が 5°C, 10°Cおよび 20°Cの結果には, 保温材を 1～3 重で巻きつけたものの結果も含まれている。

プレテンション方式の PC 部材を製造することを例に材齢 18 時間において求められる圧縮強度の目標値 f'_{cr} を定めると式(6)となる。

$$f'_{cr} = \frac{1}{1-3V} \cdot 35 = 44.3(\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

プレテンション方式の PC 部材では, プレストレスを導入する材齢において 35N/mm² を下回らない圧縮強度が要求されるため, 不良率を 0.13%, 変動係数 V を 0.07 と想定すれば, 材齢 18 時間における圧縮強度の目標値 f'_{cr} は, 44.3N/mm² となる。

図-18, 図-19, 図-20 および図-21 の図中の直線は, 積算温度と材齢 18 時間における圧縮強度の関係を回帰したものである。いずれの図においても, 決定係数は 0.81 以上あり, 積算温度と圧縮強度の関係には高い相関関係があることが分かる。それぞれの図において, 材齢 18 時間において 44.3N/mm² の圧縮強度を発現するのに必要な積算温度を回帰直線から求め, その値と硬化促

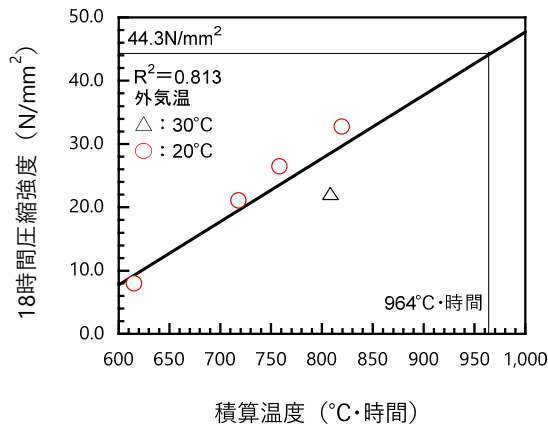


図-18 硬化促進剤が0%の場合

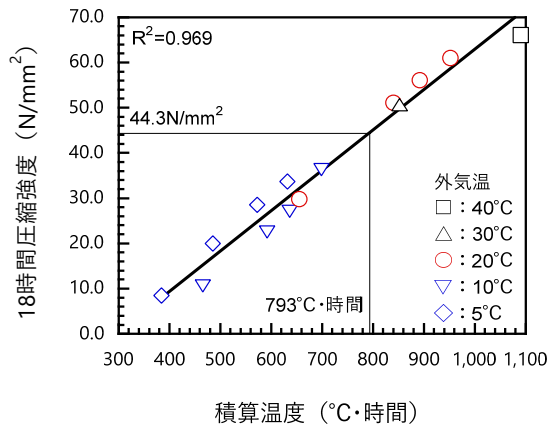


図-20 硬化促進剤が6%の場合

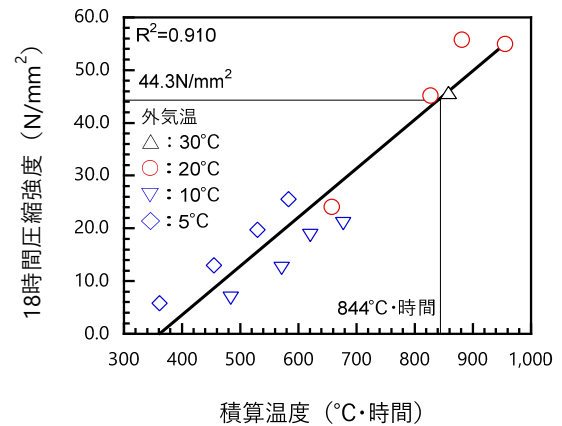


図-19 硬化促進剤が3%の場合

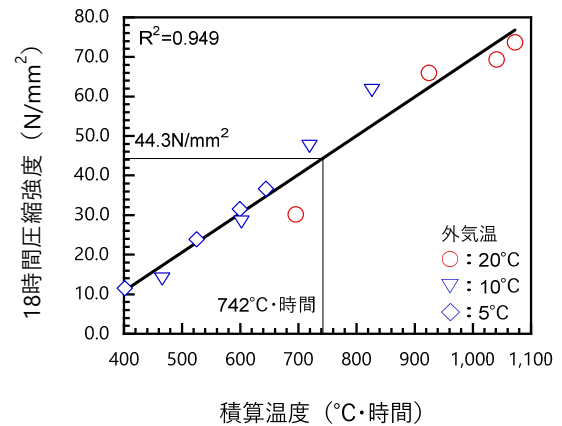


図-21 硬化促進剤が8%の場合

進剤の使用量との関係を示したものが図-22 である。図-22 より、硬化促進剤の使用量が増えるにつれ、材齢 18 時間で 44.3N/mm²の圧縮強度を発現するために必要な積算温度は直線的に低くなることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- GGBS を用いると、積算温度が同じ場合、GGBS を用いない場合に比べて材齢 18 時間における圧縮強度が低くなる。
- 硬化促進剤を用いたモルタルの積算温度と圧縮強度の関係を表す直線の傾きは、硬化促進剤を用いないものよりも大きくなる。
- GGBS および BFS を用いる場合でも、用いない場合でも、硬化促進剤を用いる効果は同等である。
- 硬化促進剤の使用量に伴い、材齢 18 時間で所定の圧縮強度を得るのに必要な積算温度は直線的に低くなる。

謝辞

本研究は、NEXCO 東日本「技術研究助成」によって実施した。ここに謝意を表する。

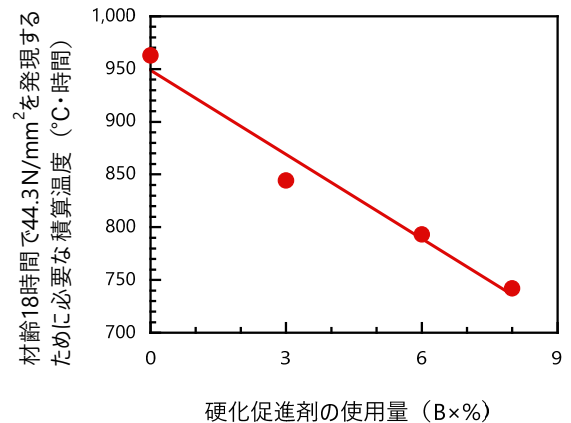


図-22 硬化促進剤の使用量と強度発現に必要な積算温度の関係

参考文献

- 1) 浜幸雄, 鎌田栄治: 耐寒促進剤を用いたコンクリートの特性, コンクリート工学, Vol.37, No.11, pp.3-8, 1999.11
- 2) 小泉信一, 井元晴丈, 馬場勇介, 山崎遥平: C-S-H 系早強剤を用いたコンクリートの強度発現性および耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.154-159, 2014.6