

論文 セメント混合による高炉セメント A 種相当のコンクリートにおける調合設計および構造体コンクリートの養生に関する検討

金子 樹*1・大倉 真人*1・榎田 佳寛*2

要旨：環境配慮型コンクリートとして建築分野で用いられるものの多くは、混合セメント C 種に相当するものであり、地下構造物への適用に限定されることがほとんどである。本研究では、上部構造物への適用も可能で汎用的な環境配慮型コンクリートとして、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を混合して高炉セメント A 種相当としたコンクリートについて、実機実験からフレッシュコンクリート性状および各種養生条件における強度発現性を検討した。その結果、調合設計および構造体コンクリートの養生について、普通コンクリートと同様に扱うことができることを明らかにした。

キーワード：環境配慮型コンクリート, セメント混合, 高炉セメント A 種, 圧縮強度, 養生

1. はじめに

温暖化などの気候変動への対策が国際的な問題とされるなか、日本では 2015 年に COP21 で採択されたパリ協定への取組みのひとつとして、非エネルギー起源の二酸化炭素の削減のため、混合セメントの利用拡大を掲げている¹⁾。混合セメントは、セメントの一部として高炉スラグやフライアッシュなどの混和材を用いたものであり、この混和材の使用により普通ポルトランドセメントに比べてエネルギー起源による二酸化炭素の排出量が小さくなる。そのため、経済産業省では混合セメントの利用率について 2013 年度の 22.1% を 2030 年度には 25.7% へと拡大することを目標として、混合セメントの普及拡大に関する方策²⁾を示している。

一方、近年における環境配慮型コンクリートの多くは、高炉セメント C 種相当以上の量の高炉スラグ微粉末を混合したコンクリート^{例えば 3), 4)}である。このようなコンクリートでは、二酸化炭素排出量の削減効果は大きいですが、強度発現性の遅延などのコンクリートの性状から、建築分野では地下構造物への適用に限定されることが主である。そのため、前述の経済産業省の方策でも建築分野における混合セメントの将来推計値では、上部構造物への適用について、その可能性は示されているものの試算モデルではゼロと設定されている。

このような背景から、本研究では上部構造物への適用が可能な環境配慮型コンクリートの開発を目的とし、高炉セメント A 種相当のコンクリートの検討を行った。

高炉セメント A 種は、セメント中の高炉スラグ微粉末の量は少ないが、コンクリートの性能は普通ポルトランドセメントコンクリートと同程度を有するものである。しかし、高炉セメント A 種は、製造、流通がほとんどなく実現場への汎用的な適用は難しいのが実状である。

そこで本研究では、一般的なセメントである普通ポルトランドセメント(記号 NP)と高炉セメント B 種(記号 BB)をコンクリートの製造時に混合することで、高炉セメント A 種相当(記号 BA)としたコンクリートについて検討を行った。

筆者らは、これまでに BA コンクリートにおいてはコンクリート材料に由来する二酸化炭素を削減し、かつ NP と同様な諸性状を示すことから、建築物の上部躯体への適用の可能性を示してきた。⁵⁾

本報では、BA コンクリートにおける実機実験より、実際の生コン工場における製造、フレッシュコンクリートの経時変化、模擬試験体を含む各種養生条件における強度発現性について検討した結果を報告する。

実験は、表-1 に示す実験の要因と水準で行った。コンクリートの呼び強度は 27, 36 および 45 の 3 水準とし、セメントの混合率は、室内実験の結果⁵⁾から凝結時間や強度発現性が NP と類似する範囲である高炉スラグ混入率が約 20% となるよう NP : BB = 55 : 45 とした。また、

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
呼び強度 (W/C)	27 (57.1%), 36 (47.7%), 45 (40.9%)
セメントの混合率*	NP : BB = 55 : 45 (BF 混入率 : 約 20%)
季節区分	夏期 [H] (9 月中旬) 標準期 [S] (10 月下旬) 冬期 [C] (12 月中旬)
経時変化試験	経時 0, 30, 60, 90, 120 分
圧縮強度試験	標準養生, 簡易断熱養生, 現場水中養生 (材齢 7, 28, 56, 91 日) 現場封かん養生 (材齢 1, 2, 28, 56, 91 日) 柱模擬試験体, 床模擬試験体 (材齢 28, 91 日)

* 各セメント中の BF 混入量は NP:2%, BB : 42% とした。

*1 (株)長谷工コーポレーション 技術研究所 (正会員)

*2 宇都宮大学 名誉教授 (正会員)

表-2 使用材料, コンクリートの計画調査およびフレッシュコンクリートの試験結果

コンクリートの計画調査										フレッシュコンクリート 試験結果*2			
呼び 強度	目標 スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単体量(kg/m ³)					SP 使用量*1 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリ ート温度 (°C)
					W	NP	BB	S	G				
27	18	57.1	50.8	0.555	174	168	137	917	894	1.10	20.5	5.0	20
36	18	47.7	49.7	0.557	170	196	161	879	896	1.10	20.5	3.8	21
45	18	40.9	47.6	0.564	170	229	187	817	907	0.80	19.5	4.0	21

【使用材料】*1

- ・セメント [C] 普通ポルトランドセメント [NP] (密度 3.16g/cm³, 比表面積 3230cm²/g)
高炉セメント B 種 [BB] (密度 3.04g/cm³, 比表面積 3760cm²/g)
- ・細骨材 [S] 硬質砂岩砕砂 (青梅) : 硬質砂岩砕砂 (八王子) : 石灰砕砂 (秩父) : 山砂 (富津) = 30 : 30 : 22 : 18
(絶乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.51%, 粗粒率 2.71)
- ・粗骨材 [G] 硬質砂岩砕石 20005 (八王子) (絶乾密度 2.64g/cm³, 吸水率 0.81%, 粒形判定実積率 59.7%)
- ・練混ぜ水 [W] 工業用水
- ・化学混和剤 高性能 AE 減水剤 [SP]

*1 SP 使用量および使用材料の品質は標準期の値を示す。

*2 フレッシュコンクリートの試験結果は標準期における経時 60 分の値を示す。

実験は夏期, 標準期および冬期の 3 シーズンについて同一の生コン工場の実機プラントで行った。なお, 本実験における BA コンクリートでは, 一般のコンクリートに比べて約 19%の二酸化炭素排出量の削減となる。

2. 実験の概要

2.1 コンクリートの使用材料および調査

実験に用いたコンクリートの使用材料および調査を表-2 に示す。セメントは同一メーカー製の NP および BB を使用し, 細骨材は 4 種類の混合砂, 粗骨材は硬質砂岩砕石 2005 を使用した。また, 化学混和剤は高性能 AE 減水剤とし, 標準期および冬期では標準形を, 夏期では遅延形を所定のスランブを満足する添加量で使用した。

コンクリートの調査はコンクリートの練上りからトラックアジテータ内による経時 60 分で, 目標スランブ 18 ± 2.5cm, 目標空気量 4.5 ± 1.5% とした。各呼び強度に応じた水セメント比は, 生コン工場が定める NP および BB の強度算定式の間接値で設定した。なお, 表-2 に示すコンクリートの計画調査は通期で同一の調査とし, 化学混和剤の使用量は標準期の値を示す。

2.2 コンクリートの製造および試験方法

コンクリートは, 実機プラントで各調査につき 1 バッチ 1.5m³ を材料一括投入として, 呼び強度 27 および 36 では 30 秒, 呼び強度 45 では 40 秒間練り混ぜた。これを 2 バッチ行い, 計 3m³ のコンクリートを製造し, 所定の時間までトラックアジテータ内で攪拌し, 実験に供した。

フレッシュコンクリートは, スランブ (JIS A 1101), 空気量 (JIS A 1128) およびコンクリート温度 (JIS A 1156) を練上りから 0, 30, 60, 90 および 120 分で試験し, 経時変化試験とした。

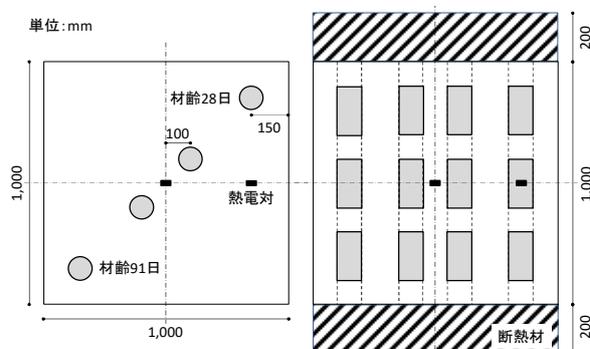


図-1 柱模擬試験体の概要

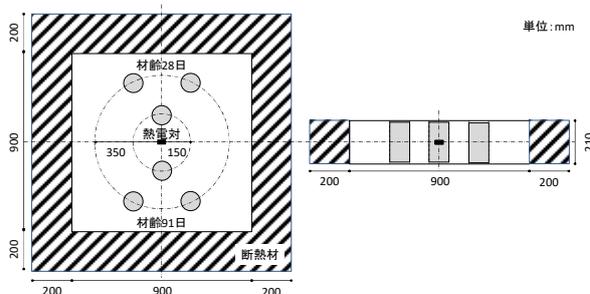


図-2 床模擬試験体の概要

また, 経時 60 分において, 図-1 に示す 1000×1000×1000mm の柱模擬試験体および図-2 に示す 900×900×210mm の床模擬試験体および圧縮強度試験用の供試体を作製した。コンクリートの打込み後, 床模擬試験体では上面が乾燥しないように養生し, 柱模擬試験体と共に材齢 1 週間程度で型枠を取り外し, 所定の材齢で圧縮強度試験用のコアを採取した。また, 各模擬試験体においては, 図-1 および図-2 に中に示す熱電対位置で, 打込み後のコンクリートの温度を測定した。

圧縮強度試験 (JIS A 1108) は寸法 φ 100×200mm とし, 標準養生, 現場水中養生, 現場封かん養生, 簡易断熱養生

生の供試体および柱、床の模擬試験体コアを用いてそれぞれ表-1 に示した材齢で実施した。

3. 試験結果

3.1 フレッシュコンクリート

図-3 にフレッシュコンクリートの経時変化を示す。フレッシュコンクリート試験の結果では、経過時間 60 分ではいずれの季節区分におけるコンクリートもスランプ、空気量は目標範囲内であった。また、夏期の呼び強度 27 (27H: 記号は、数字は呼び強度を、H/S/C は季節区分を示す) でスランプのロスが見られたものの、その他においては、スランプ、空気量ともにおおむね安定しており 120 分においても大きなロスは見られなかった。

図-4 に模擬試験体の最高温度を示す。いずれの季節

区分でも、模擬試験体の最高温度は、柱の中心部で高く、床では柱よりも低かった。また、呼び強度が大きいほど最高温度は高く、最高温度がもっとも高い夏期の呼び強度 45 では約 70℃であった。

3.2 圧縮強度

呼び強度 36 のコンクリートについて、各種養生における材齢と圧縮強度の関係を図-5 に示す。いずれの季節区分においても材齢 28 日の標準養生では呼び強度の強度値以上の圧縮強度を示した。また、現場封かん養生や、簡易断熱養生、模擬部材といったコンクリートの打込み後に水分の供給が少ない養生条件でも、材齢 28 日以降の強度増進が見られ、91 日ではいずれの養生条件においても呼び強度の強度値以上の圧縮強度であり、これらの傾向は呼び強度 27 および 45 でも同様であった。

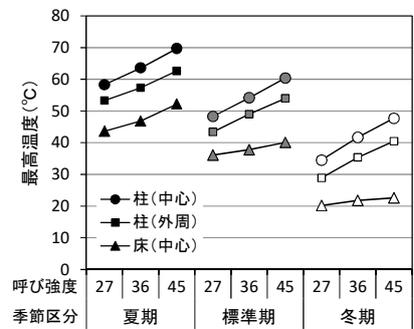
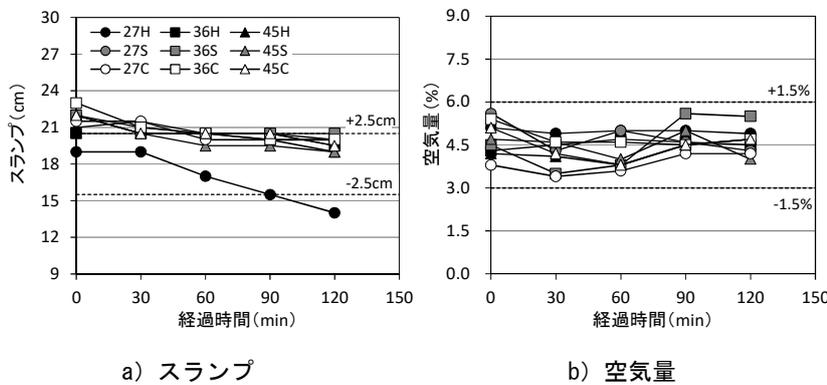


図-4 模擬試験体の最高温度

図-3 フレッシュコンクリートの経時変化

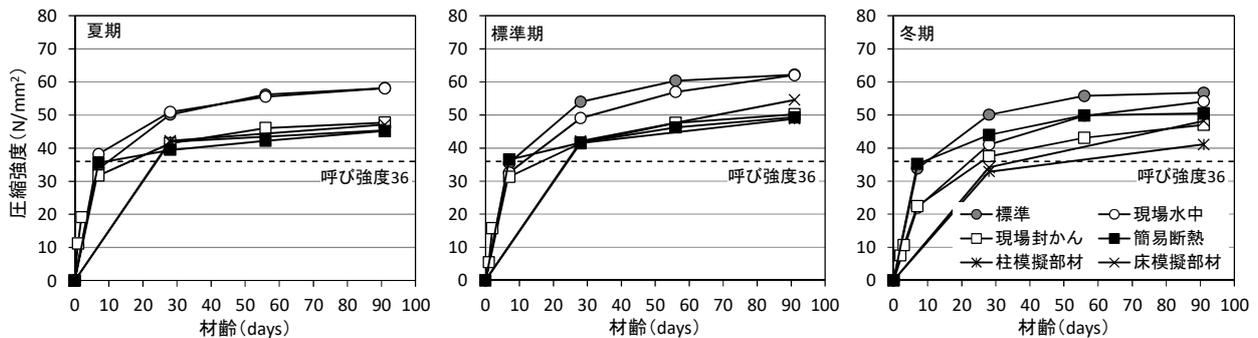


図-5 各種養生における材齢と圧縮強度の関係 (呼び強度 36)

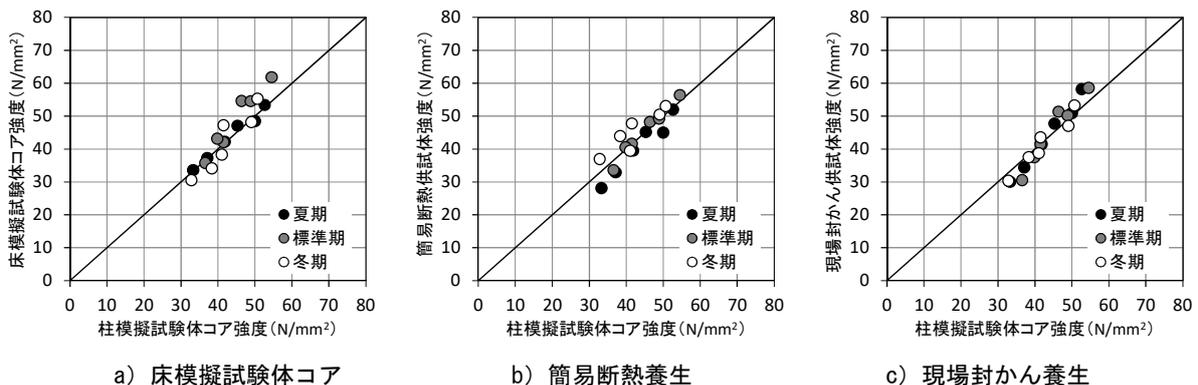


図-6 柱模擬試験体コア強度との関係

図-6 に柱模擬試験体コア強度と床模擬試験体コア、簡易断熱養生供試体、現場封かん養生供試体の各強度との関係を示す。柱模擬試験体と床模擬試験体のコア強度は同程度であり、床版のような薄く乾燥の影響を受けやすい部材においても十分な強度発現性が見られた。

また、簡易断熱養生や現場封かん養生供試体の圧縮強度においても柱模擬部材のコア強度と同程度あり、これらの養生ではコアに類する強度発現性を有するものと考えられる。

4. 調合設計および構造体の養生に関する検討

4.1 調合強度の設定

図-7 に実機実験により得られた標準養生における呼び強度と標準偏差の関係を示す。材齢 28 日における標準偏差は、図中に併記する実験の実施工場で規格値として JIS コンクリートの製造に用いる値よりも小さかった。

また、標準養生 28 日におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図-8 に示す。この関係は直線的であり、標準養生 28 日の圧縮強度は、工場が保有する NP の JIS 強度算定式よりも大きく、安全側であった。

これらから、BA コンクリートにおいても、一般のコンクリートと同様な標準偏差を用いて調合強度を求め、また、NP と同様な強度算定式により、必要な強度を発現させるための水セメント比（セメント水比）を求めるといった調合設計が可能であると考えられる。

4.2 構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$)

構造体強度補正值 mS_n は、標準養生した材齢 m 日の供試体と材齢 n 日の構造体コンクリート強度の差を意味する補正值であり、 m を 28 日、 n を 91 日とした $_{28}S_{91}$ は、建設省告示第 1102 号および日本建築学会標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5 と略記）で、それぞれセメントの種類により示されているが、高炉セメント A 種についてはいずれも規定がない。

図-9 に 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ （標準養生 28 日強度 - 91 日コア強度）の関係を示す。いずれの季節区分においても、図中に併記した本研究と同様に柱や床の模擬部材

について行った実機実験の結果⁶⁾と同様であり、また、普通コンクリートとなる設計基準強度 (F_c) 18~36N/mm² に強度のばらつきを考慮した範囲では、JASS 5 示される $_{28}S_{91}$ の標準値の 3 または 6N/mm² 以下であったことから、BA コンクリートでも同様の構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ を用いることができると考えられる。

4.3 型枠の存置期間

BA コンクリートの強度発現性について、筆者らは既報⁵⁾で、標準養生の圧縮強度は材齢 28 日では NP と同程度であるが、初期の材齢 7 日においては高炉スラグ微粉末の混入量が多くなるに伴い小さくなることを示した。これは、BA の初期強度の発現性が NP よりも小さく、これによりコンクリートの打込み後の初期養生への配慮についての注意が必要であると考えられる。

(1) 有効材齢におけるセメント係数

建設省告示第 110 号では、せき板を所定の存置日数以下

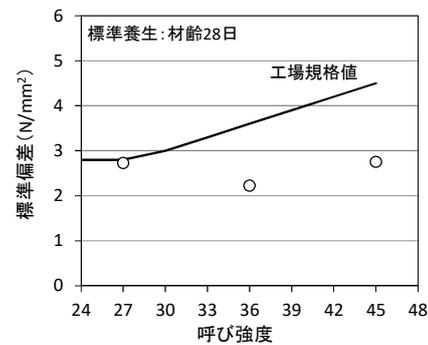


図-7 呼び強度と標準偏差

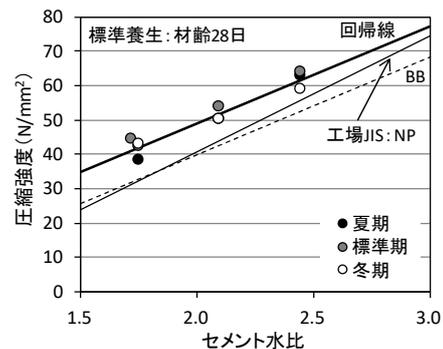


図-8 セメント水比と圧縮強度

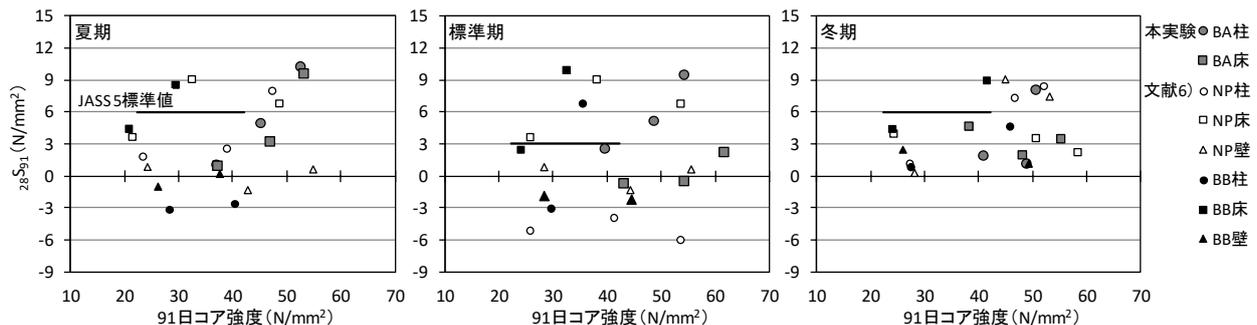


図-9 材齢 91 日の模擬試験体コア強度と構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$) の関係

上経過する前に取り外しを行う場合には、強度試験または式 (1) に示す有効材齢により所定の強度以上であることを確認することとしている。ここでは、BA コンクリートを用いた場合の式 (1) におけるセメントの種類に応じた係数 (s) (NP : 0.31, BB : 0.54) の検討を行った。なお、有効材齢によりせき板の取り外しを行う場合には、コンクリートの温度 (Ti) を用いるが、本検討においては外気温を用いて行った。

$$f_{c_{te}} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{(te-0.5)/t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \cdot f_{c_{28}} \quad (1)$$

ここに、 $f_{c_{te}}$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、s : セメントの種類に応じた係数 (N : 0.31, BB : 0.54)、te : 式 (2) によって計算したコンクリートの有効材齢 (days)、 $f_{c_{28}}$: 呼び強度

$$t_e = \frac{1}{24} \sum \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \quad (2)$$

ここに、 Δt_i : (i-1) 回目のコンクリートの温度の測定から i 回目までの期間 (h)、 T_i : i 回目の測定により得られたコンクリートの温度 (°C)、 T_0 : 1 (°C)、

図-10 に有効材齢と呼び強度 (Fm=Fc+S) に対する現場封かん強度の強度比 (F/Fm) の関係を示す。図中にはセメントの種類に応じた係数 (s) を NP の 0.31 および BB の 0.54 として式 (1) から求めた強度の推移を併記した。s=0.31 (NP) とした有効材齢による圧縮強度は、有効材齢 7 日未済までの推定値は実験値と同程度であった。この関係は s=0.54 (BB) とした場合よりも BA コンクリートの実験値に近い推移を示し、かつ、安全側である。そのため、BA コンクリートについて、有効材齢によりせき板の取り外しのための圧縮強度を推定する場合には、NP と同様の s=0.31 を用いることができると考えられる。

(2) 積算温度による型枠存置期間の検討

建設省告示第 110 号および JASS 5 では、対応する部位について、せき板および支柱 (支保工) における必要な所定の日数および圧縮強度を示しており、このうちのどちらかを確認した後に取外しを行うこととしている。

ここでは、積算温度と現場封かん養生における圧縮強度との関係から、BA コンクリートにおける所定の強度が発現する材齢の検討を行った。なお、検討においては図-11 に示すように、積算温度は式 (3) により求め、現場封かん養生における呼び強度に対する強度比との関係は、図-10 に示した有効材齢との関係よりも長期の材齢までを精度よく近似することから検討に用いた。

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta z + 10) \quad (3)$$

ここに、M : 積算温度 (° D · D)、z : 材齢 (日)、 θz : 材齢 z 日における平均気温 (°C)

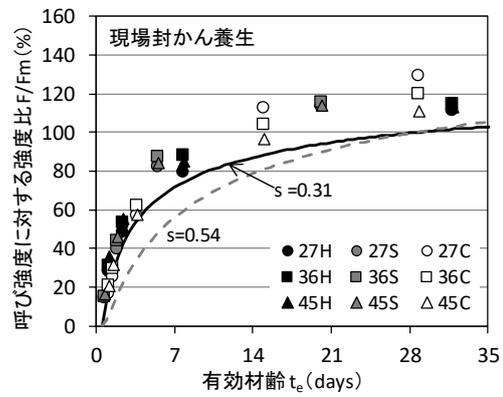


図-10 有効材齢と呼び強度に対する強度比

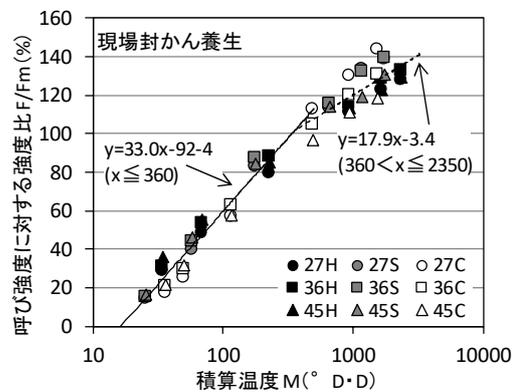


図-11 積算温度と呼び強度に対する強度比

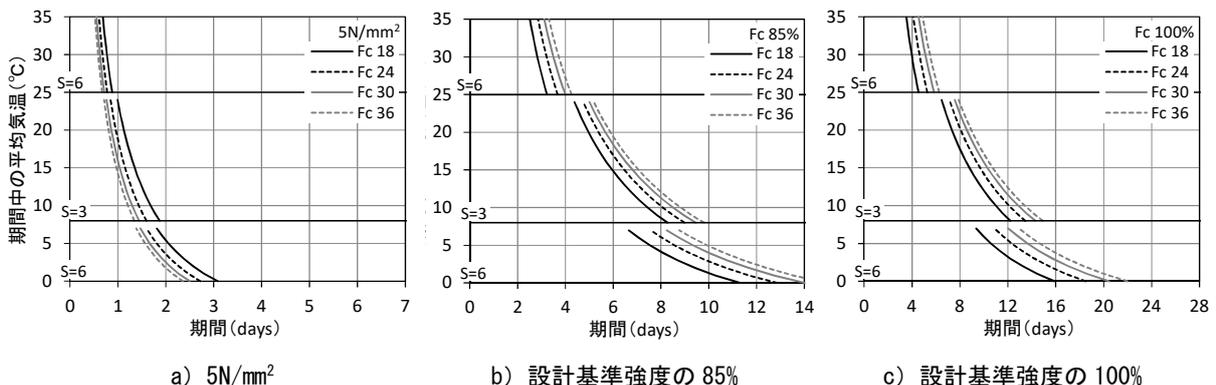


図-12 所定の強度が発現する型枠の存置期間と期間中の平均気温の例

表-3 型枠の存置期間の目安(日)

Fc (N/mm ²)	基礎、梁側、柱、壁のせき板								スラブ下、梁下の せき板 Fc 50%				スラブ下の支保工 Fc 85%				梁下の支保工 Fc 100%			
	5N/mm ²				10N/mm ²				5℃	10℃	20℃	30℃	5℃	10℃	20℃	30℃	5℃	10℃	20℃	30℃
	5℃	10℃	20℃	30℃	5℃	10℃	20℃	30℃												
18	2.5	2.0	1.5	1.0	—	—	—	—	3.5	3.0	2.0	1.5	7.5	7.5	5.0	3.0	11.0	11.0	7.5	4.0
24	2.0	1.5	1.0	1.0	—	—	—	—	4.0	3.5	2.5	1.5	9.0	8.5	5.5	3.5	12.5	12.5	8.5	5.0
30	2.0	1.5	1.0	1.0	2.5	2.5	1.5	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	9.5	8.5	6.0	3.5	14.0	13.0	9.0	5.5
36	2.0	1.5	1.0	1.0	2.5	2.0	1.5	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	10.0	9.0	6.0	4.0	15.0	13.5	9.0	5.5

* 型枠の存置期間の目安は0.5日刻みで繰上げとした。

表-4 湿潤養生期間の目安(日)

Fc (N/mm ²)	短期・標準 10N/mm ²				長期・超長期 15N/mm ²			
	5℃	10℃	20℃	30℃	5℃	10℃	20℃	30℃
18	4.0	3.5	2.5	1.5	—	—	—	—
24	3.0	2.5	2.0	1.5	—	—	—	—
30	—	—	—	—	4.0	3.5	2.5	1.5
36	—	—	—	—	3.5	3.0	2.0	1.5

* 湿潤養生期間の目安は0.5日刻みで繰上げとした。

図-11 の関係式および式(3)から、各種の型枠の存置期間となる所定の強度が発現する材齢について、期間中の平均気温との関係を設計基準強度毎に図-12 および表-3のように整理した。これより、BAコンクリートの施工において、型枠を所定の日数よりも短い期間で取り外す場合には、表-3の日数を目安に現場封かん養生または現場水中養生の供試体で強度確認を行えばよいこととなる。また、これらの日数はいずれも告示第110号およびJASS5で規定されるNPと同一の高炉セメントA種の存置日数よりも短いことから、BAにおいてもNPと同様の管理方法が可能と考えられる。

4.4 湿潤養生

湿潤養生の期間については、JASS5では供用期間の級に応じて、型枠の存置期間と同様に日数および所定の強度が定められているが、高炉セメントA種については規定がない。しかし、前報⁵⁾および本報の検討からBAにおいてはNPと同様な強度発現性や耐久性状を示すこと、JASS5において高炉セメントA種はNPと同様の性質を示し、同様に用いられるとの解説があることから、NPと同様な所定の強度で湿潤養生を打ち切ることができる。

そこで、4.3と同じく、図-11の関係から所定の強度が得られる材齢について表-4のように整理し、強度確認を行う材齢の目安を示した。また、JASS5では日数により湿潤養生の打ち切りを判断する場合には、計画供用期間の級が短期および標準では5日以上、長期および超長期では7日以上としている。表-4に示す日数はこれらよりも短く、BAにおいてもNPと同様に湿潤養生期間の管理が可能であるとされる。

5. まとめ

普通ポルトランドセメントに高炉セメントB種を混合した高炉セメントA種相当のコンクリートについてまとめると以下のとおりとなる。

- 1) 夏期、標準期および冬期のいずれにおいてもフレッシュコンクリートの経時変化はおおむね安定していた。
- 2) 各種養生条件において材齢91日までの強度増進が見られ、床模擬試験体においても柱模擬試験体と同様の強度発現性を示した。
- 3) コンクリートの調合設計に用いる、コンクリートの標準偏差、調合強度式および構造体強度補正值 $28S_{91}$ はいずれも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同様に設定することが可能である。
- 4) 施工時の構造体コンクリートの初期養生では、型枠の存置期間および湿潤養生期間は普通コンクリートと同様の管理が可能である。

謝辞

本研究の実施にあたり、関東宇部コンクリート工業(株)に多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画，2016.5.13
- 2) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書，2016.3
- 3) 小林利允ほか：低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」の開発，大林組技術研究所報，No.75，pp.1-8，2011
- 4) 和地正浩ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.485-490，2010
- 5) 金子樹ほか：セメント混合による高炉セメントA種相当のコンクリートに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.201-206，2018
- 6) 棚野博之ほか：型枠の取り外しに関する管理基準の検討，建築研究資料，No.168，2016.3