

論文 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮コンクリートの構造体コンクリート強度に関する実験的検討

加藤 優志*1・渡邊 悟士*2・山本 佳城*2・黒岩 秀介*3

要旨: 高炉スラグ微粉末にカルシウム系刺激材を添加することで硬化させた環境配慮コンクリートと、さらに炭酸カルシウム粉末を添加した環境配慮コンクリートを対象に 3 シーズンの模擬部材製造を行い、コア供試体の強度発現、構造体強度補正值等を確認した。コア供試体の強度発現は、練上り温度や部材寸法による温度履歴の違いに関わらず、有効材齢を用いた一つの式で評価可能であることを確認した。また、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、セメントを使用したコンクリートと大きな差はなく、通期で 6N/mm^2 または 3N/mm^2 とすることで構造体コンクリート強度を安全側に調合設計できると考えられた。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 炭酸カルシウム粉末, 構造体コンクリート強度, 強度発現, 有効材齢

1. はじめに

コンクリートの材料起因の CO_2 排出量削減を目的として、セメントを産業副産物の混和材で置換した環境配慮コンクリートが開発されている。材料起因の CO_2 排出量の約 9 割はセメントの製造に起因しているため、混和材に置換することで CO_2 排出量を削減することができる。

著者らは、JIS R 5210 などに規定されるセメントを使用せずに高炉スラグ微粉末にカルシウム系刺激材を添加することで硬化させた環境配慮コンクリートを開発し、建築物の非構造部材へ適用している^{1,2)}。今後は、構造部材にも適用範囲を広げることで、さらなる CO_2 排出量削減に貢献できると考えられる。ここで、適用範囲拡大のためには材料としての力学物性や耐久性等の基礎物性の把握と、構造体コンクリート強度と管理用供試体強度を関連付けた調合設計方法と品質管理方法の構築等が必要である。環境配慮コンクリートの力学物性や耐久性については、既報³⁾にて室内実験を行い、建築物にも適用可能な性能を有していることを確認している。

本検討では、環境配慮コンクリートの調合設計方法と品質管理方法の構築に必要なデータを得るために、プレキャストコンクリート（以下、PCa）工場で 3 シーズンの模擬部材製造を行い、模擬部材から採取したコア供試体の強度発現、構造体強度補正值等を確認した。なお、本検討では高炉スラグ微粉末にカルシウム系刺激材を添加することで硬化させたコンクリート（以下、CZ）と CZ をベースにした調合に CO_2 を吸収して製造された炭酸カルシウム粉末を添加したコンクリート（以下、CR）を対象とした。

2. 実験概要

製造は千葉県成田市内の PCa 工場で実施した。製造時期は夏期（8 月）、標準期（11 月）、冬期（1 月）の 3 シーズンとした。

2.1 使用材料および調合

使用材料を表-1 に示す。本検討で使用した粉体は既報³⁾と同じであり、高炉スラグ微粉末 4000 とカルシウム系刺激材、炭酸カルシウム粉末を使用した。カルシウム

表-1 使用材料

種類	記号	種類	物性等
粉体	BFS	高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.89g/cm^3
	St1	カルシウム系刺激材	密度 2.63g/cm^3
	St2		密度 2.64g/cm^3
	Cc		炭酸カルシウム粉末
骨材	S	陸砂と砕砂の混合砂	表乾密度 2.63g/cm^3
	G	碎石 2005 (石灰岩)	表乾密度 2.72g/cm^3
化学混和剤	Aw*	高性能 AE 減水剤, 高性能減水剤	ポリカルボン酸エステル系
	Ae	AE 剤	—
	Ar	減水剤 (遅延形, I 種)	リゲニンスルホン酸系と
	Aa	硬化促進剤 (I 種)	ナリソルボン酸系の複合体

*CZ35 では高性能 AE 減水剤, CR30 では高性能減水剤を使用

表-2 炭酸カルシウム粉末の物性値

項目	物性値
比表面積 [cm^2/g]	3560
炭酸カルシウム量 [%]	97.7

*1 大成建設株式会社 技術センター 主任 工修 (正会員)

*2 大成建設株式会社 技術センター 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 大成建設株式会社 技術センター 構造研究室長 博士 (工学) (正会員)

系刺激材は複数種の粉体で構成されており、種類、質量比の異なる St1 と St2 を使用した。炭酸カルシウム粉末の物性値を表-2 に示す。本検討で使用した炭酸カルシウム粉末は JIS R 5210 の普通ポルトランドセメントと同等の比表面積であった。また、X 線回折の結果、本検討で使用した粉末中の炭酸カルシウムは主にカルサイトとして存在していることを確認した。細骨材には陸砂と砕砂（石灰岩）の混合砂、粗骨材には碎石 2005（石灰岩）を使用した。

調合表を表-3 に示す。水粉体比（以下、W/P）は、CZ では設計基準強度 24N/mm^2 を想定し 35.9%（以下、CZ35）、CR では設計基準強度 36N/mm^2 を想定し 30.3%（以下、CR30）とした。目標スランプは、CZ35 で 18cm とし、CR30 では粉体量が多いため十分なワーカビリティを確保する目的で目標スランプフローを 55cm とした。また、粗骨材の絶対容積は CZ35 では 360L/m^3 、CR30 では 316L/m^3 とした。目標空気量は、室内実験³⁾を行った調合

と同様に 6.0% とした。また、CR30 では初期の強度発現を向上させる目的で、亜硝酸塩と硝酸塩を主成分とする硬化促進剤（JIS A 6204）を粉体×6.0% 添加した。なお、高性能 AE 減水剤、高性能減水剤および AE 剤の添加量は目標のスランプ（フロー）、空気量が得られるように調整した。

2.2 模擬部材の形状と寸法

模擬部材の形状と寸法を図-1、図-2 に示す。模擬部材の寸法は柱などの断面の大きい部材を模擬した $1 \times 1 \times 1\text{m}$ （以下、1m 角部材）と、梁などの比較的断面の小さい部材を模擬した $0.3 \times 0.3 \times 2.53\text{m}$ （以下、0.3m 厚部材）の 2 種類とした（写真-1）。各材齢で図-1、図-2 中に示す箇所から $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のコア供試体を採取した。また、各模擬部材では部材表面からの深さが異なる 4 点（凡例：T1～T4）の温度と雰囲気温度（凡例：T5）の計測を行った。

表-3 調合表

調合 記号	W/P [%]	スランプ (フロー) [cm]	空気量 [%]	粗骨材の 絶対容積 [L/m ³]	単位量 [kg/m ³]						添加率 [P×%]			
					W	粉体 P				S	G	Aw	Ar	Aa
						BFS	St1	St2	Cc					
CZ35	35.9	18±2.5	6.0±1.5	360	155	333	99	—	—	716	980	表-5	0.3	—
CR30	30.3	(55±10)	6.0±1.5	316	175	263	—	55	260	628	860	参照	0.3	6.0

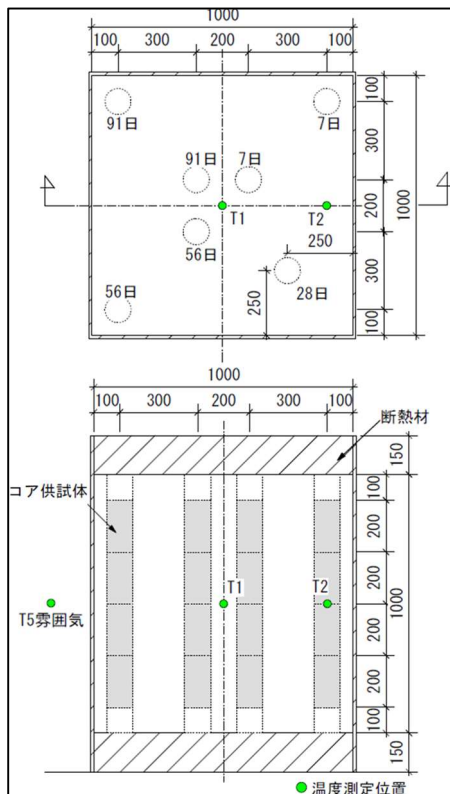


図-1 模擬部材の形状と寸法 ($1 \times 1 \times 1\text{m}$)

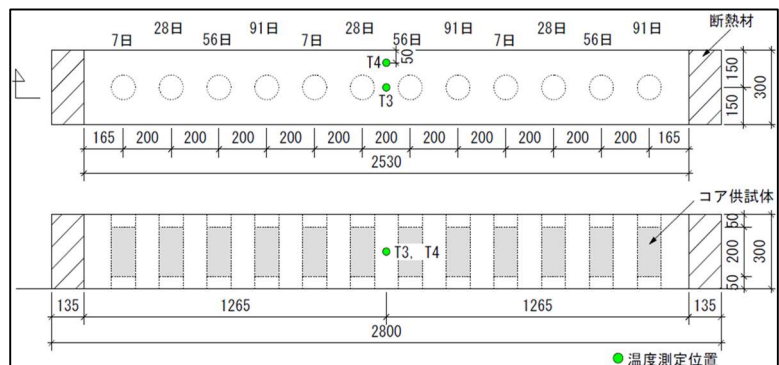


図-2 模擬部材の形状と寸法 ($0.3 \times 0.3 \times 2.53\text{m}$)



写真-1 製造した模擬部材

表-4 試験項目の一覧

調合	製造時期	圧縮強度試験												ヤング係数		乾燥収縮
		標準養生				部材同一養生				コア				標準養生		
		試験材齢 [日]														
		7	28	56	91	1	2	3	7	7	28	56	91	28	91	
CZ35	夏期 (8月)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	標準期 (11月)	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	—	—	—
	冬期 (1月)	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○	○	○	—	—	—
CR30	夏期 (8月)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	標準期 (11月)	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	—	—	—
	冬期 (1月)	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○	○	○	—	—	—

2.3 コンクリートの製造、試験項目

練混ぜは容量 1.5m³ の二軸強制練りミキサで実施した。練混ぜ量は1バッチ 0.75m³ とし、各調合で2バッチ練り混ぜ、各バッチでスランブ(フロー)、空気量を測定した。練混ぜ方法について、CZ35では粉体、細骨材、粗骨材を一括で投入した。CR30では粉体、細骨材を投入し、モルタルを先練りしてから粗骨材を投入した。練り混ぜたコンクリートはホップで受け、試験室でスランブ(フロー)試験、空気量試験を行った。目標のスランブ(フロー)、空気量を満足することを確認した後に型枠内に打ち込んだ。締めは内部振動機を用いて行った。試験項目の一覧を表-4に示す。供試体は模擬部材から採取したφ100×200mmのコア供試体と、φ100×200mmの標準養生供試体および部材同一養生供試体とした。部材同一養生供試体は模擬部材と同一環境に静置し、試験材齢までラップで封かん養生した。標準養生供試体およびコア供試体の強度試験材齢は7、28、56、91日とし、コア供試体のうち1m角部材では中央部と外周部から各4個の合計8個(ただし、28日は中間部4個のみ)、0.3m厚部材では各材齢3個採取した。また、夏期の製造時には、ヤング係数と乾燥収縮ひずみ測定用の供試体を採取した。なお、模擬部材は工場の屋内で打ち込んだ後は、材齢7日のコア供試体を採取する前に屋外へ移動し、以降はそのまま屋外で暴露した。ヤング係数の測定はJISA1149(コンクリートの静弾性係数試験方法)、乾燥収縮ひずみの測定はJISA1129-2(モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法)附属書Aに準拠した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ試験結果

製造時のフレッシュ試験結果を表-5に示す。スランブ(フロー)、空気量は目標の範囲内で製造することができた。練混ぜ時間については、CZ35は製造時期によらず同じであり、CR30は夏期、標準期、冬期の順に長くなる傾向があった。練上がり時のコンクリート温度は、冬期で10~11℃、標準期で17~19℃、夏期で29~31℃であった。

表-5 フレッシュ試験結果

調合	製造時期	バッチ	Aw [P×%]	練混ぜ時間 [s]	スランブ(フロー) [cm]	空気量 [%]	コンクリート温度 [°C]
CZ35	夏期	1	0.70	120	15.5	7.0	29
		2	0.75	120	17.0	6.4	29
	標準期	1	0.70	120	16.5	5.9	17
		2	0.70	120	15.5	6.0	17
	冬期	1	0.70	120	20.5	6.5	10
		2	0.70	120	19.5	6.5	10
CR30	夏期	1	0.90	540	59.0	7.2	31
		2	0.95	510	63.0	6.9	31
	標準期	1	0.98	600	45.5	5.9	18
		2	0.98	570	49.0	5.4	19
	冬期	1	0.88	660	56.0	5.5	11
		2	0.88	600	64.5	5.6	11

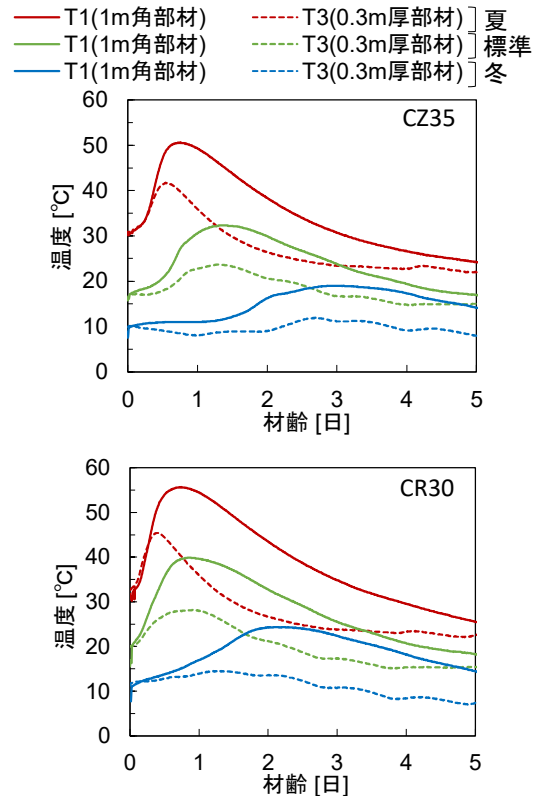


図-3 模擬部材の温度履歴

3.2 模擬部材の温度計測結果

CZ35 および CR30 の各模擬部材の中央部 (図-1 中の T1, 図-2 中の T3) の温度履歴を図-3 に示す。各調査の温度上昇量を比較すると、製造時期によらず CZ35 よりも CR30 の方が大きかった。CZ35 よりも CR30 の方が高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材の単位量は少ないが、硬化促進剤を使用した影響で温度上昇量が大きくなったと推察された。温度上昇量が最も大きい夏期の 1m 角部材は、CZ35 で 22°C, CR30 で 25°C の温度上昇が確認され、同じ粉体量の普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりも温度上昇量は小さいことを確認した。また、寸法の異なる 1m 角部材と 0.3m 厚部材の温度上昇量の差は約 10°C であった。

3.3 強度発現、構造体強度補正值

部材同一養生供試体の強度発現を図-4 に示す。図中には PCa 部材の脱型時所要強度の目安として、JASS 10⁴ に示される 12N/mm² の線を併記した。12N/mm² 以上の強度が得られるのは、製造時期が夏期の場合で材齢 1 日、標準期の場合は材齢 2 日、冬期の場合は材齢 4 日程度となり、練上り温度や雰囲気温度が低いほど、強度発現が遅延する傾向が見られた。

標準養生供試体と模擬部材から採取したコア供試体の強度発現を図-5 に示す。ここで、1m 角部材のコア強度は、中央部と外周部から採取したそれぞれ 4 個のコア強度の平均値 (ただし、材齢 28 日は中間部 4 個の平均

値) とした。なお、材齢 91 日での中央部と外周部から採取したコア供試体の強度差は、3 シーズンを通して最大 4N/mm² と小さかった。

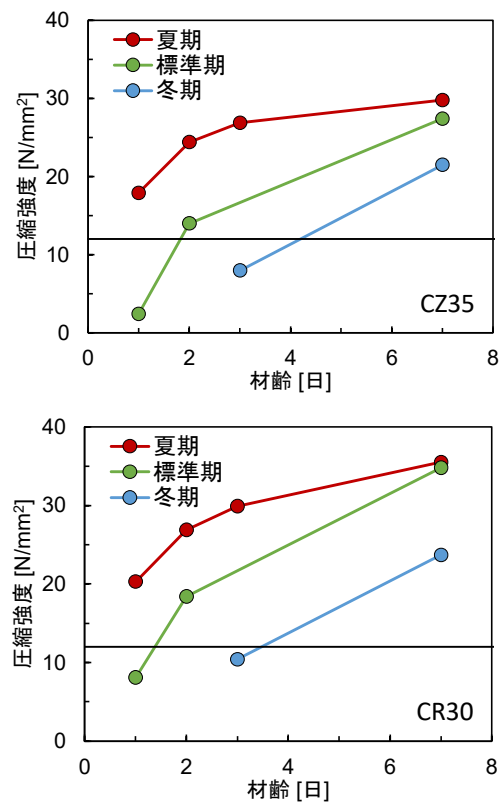


図-4 部材同一養生供試体の強度発現

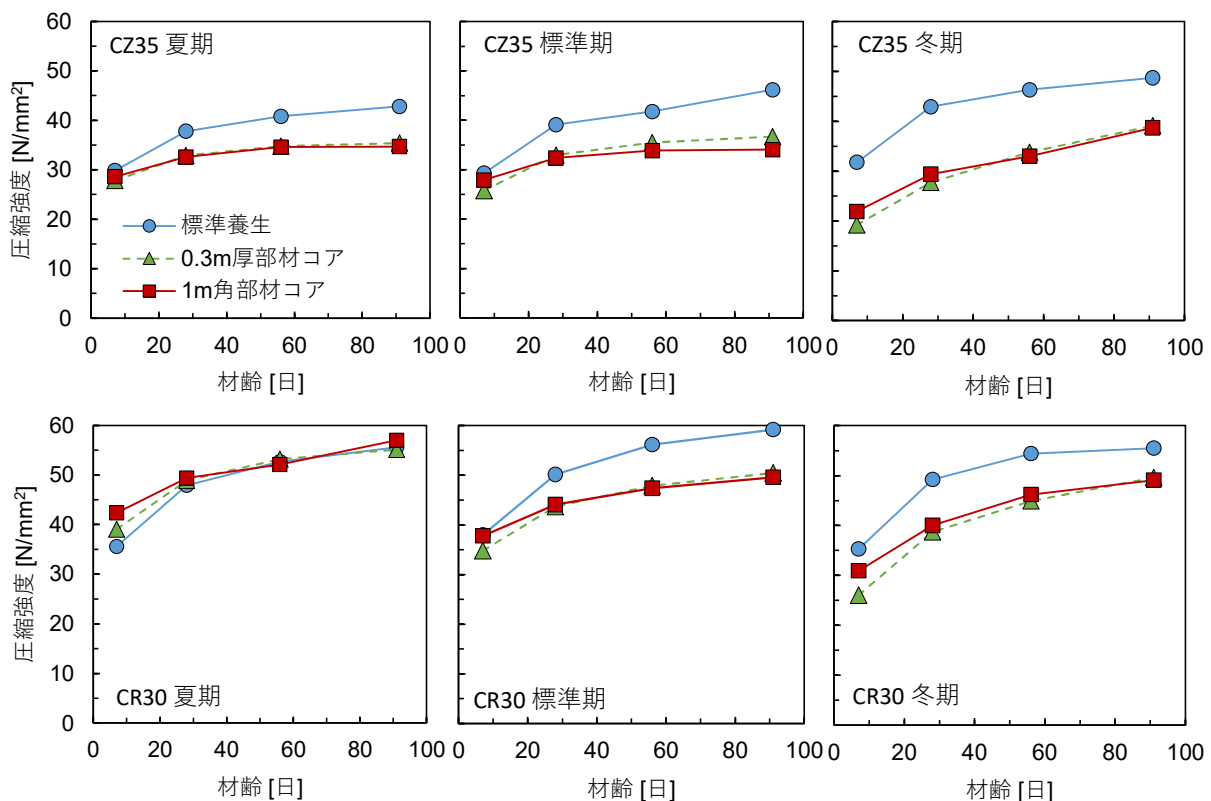


図-5 標準養生供試体およびコア供試体の強度発現

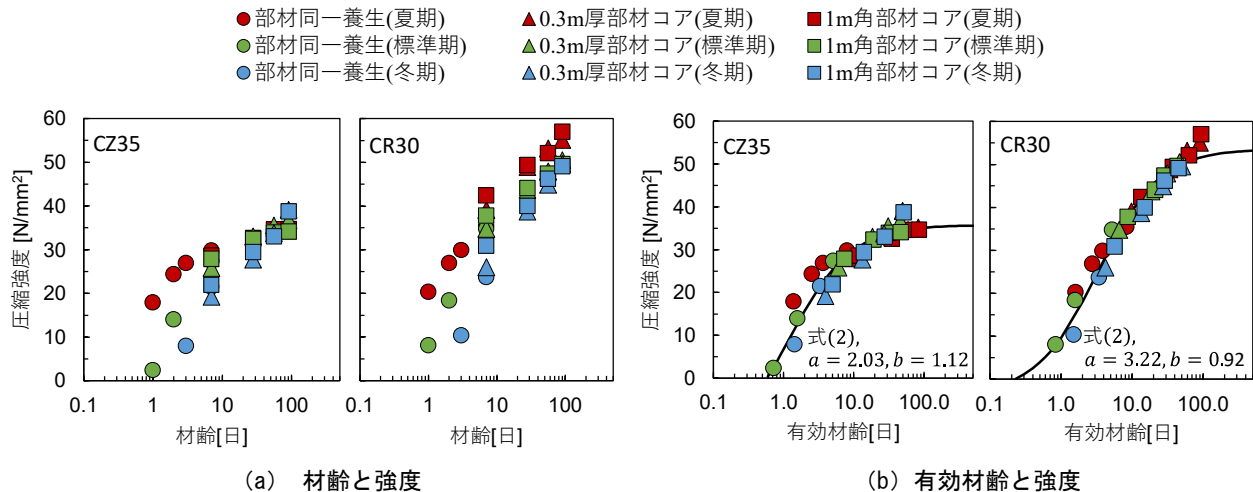


図-6 コア供試体および部材同一養生供試体の強度発現

部材寸法が異なる 1m 角部材と 0.3m 厚部材のコア強度において、材齢 7 日では製造時期によらず 1m 角部材の方が高く、その差は冬期で比較的顕著であった。これは図-4 の部材同一養生供試体のデータに見られるように、部材寸法が小さく、練上り温度等が低い場合には、初期の温度履歴の影響で強度発現が遅延していると考えられた。また、材齢が経つにつれて 0.3m 厚部材のコア強度は 1m 角部材のコア強度に近づき、材齢 91 日では部材寸法の違いによるコア供試体の強度差は小さいことを確認した。

ここで、コンクリートの温度履歴が強度発現に及ぼす影響を把握するために、3 シーズンの部材同一養生供試体、コア供試体の強度試験結果の整理を行った。材齢と強度の関係を図-6 (a) に示す。気温が高い製造時期ほど初期の強度が大きく、長期になるにつれて製造時期の違いによる強度差が小さくなることが確認でき、温度履歴の影響と考えられる。ここでは、式 (1) ⁹⁾ に示す有効材齢を用いて温度の影響を等価な材齢に換算して温度履歴が異なる場合の強度発現を整理した。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \left\{ \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \right\} \quad (1)$$

ここで、 t_e : 有効材齢[日], Δt_i : 一定のコンクリート温度が継続する期間[日], $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度[°C], T_0 : 1[°C] である。

なお、材齢 7 日までの温度は 1m 角部材の場合には図-1 に示す T1, T2 の実測値の平均を、0.3m 厚部材の場合には図-2 に示す T3 の実測値を用い、材齢 7 日以降は気象庁から入手した千葉県成田市の日平均気温を用いた。なお、材齢 28 日までの平均気温は夏期で 22°C、標準期で 9°C、冬期で 4°C であった。有効材齢と強度の関係を図-6 (b) に示す。図-6 (b) 中には有効材齢と強度の関係を式 (2) ⁹⁾ を用いて近似した結果を併記した。

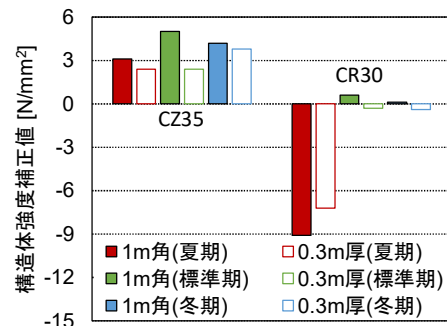


図-7 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$

$$f_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} \cdot f_{c28} \quad (2)$$

ここで、 $f_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における強度 [N/mm²], a, b : 粉体の種類に応じた圧縮強度の発現を表す係数, S_f : 粉体の種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢 [日], f_{c28} : 標準養生供試体の材齢 28 日強度 [N/mm²] である。

式 (2) 中の f_{c28} は夏期、標準期、冬期の供試体強度の平均値 (CZ35 で 39.9N/mm², CR30 で 49.1N/mm²) とし、 S_f は 20°C 環境の室内実験で実施した凝結時間試験 (JIS A 1147) の始発として、CZ35 で 0.58 日 (約 14 時間)、CR30 で 0.22 日 (約 5 時間) とした。材齢 91 日までの範囲において、CZ35 と CR30 の有効材齢と強度の関係は、練上り温度や部材寸法による温度履歴の違いに関わらず調合ごとに一つの式で表現できると考えられ、式 (2) と図-6 (b) 中に示す係数で強度発現を概ね評価することができた。また、標準期や冬期と比較すると夏期の場合の CZ35 のコア強度は、初期材齢では大きくなるが、長期材齢における強度増進は小さく、セメントを使用したコンクリートと同様に初期の温度履歴が比較的高いためと考えられた。

構造体強度補正值 (以下、 $_{28}S_{91}$) を図-7 に示す。 $_{28}S_{91}$ は材齢 28 日の標準養生供試体と材齢 91 日のコア強度の差で表記した。本検討の結果、CZ35 および CR30 の

28S91はJASS 5⁶⁾に示されるセメントを使用したコンクリートと大きな差はなく、CZ35においては通期で6N/mm²、CR30においては通期で3N/mm²とすることで構造体コンクリート強度を安全側に調合設計できると考えられた。

3.4 ヤング係数、乾燥収縮ひずみ

夏期に採取した供試体のヤング係数を図-8に、乾燥収縮ひずみを図-9に示す。図-8の横軸はJASS 5⁶⁾に示される式(3)によるヤング係数の計算値であり、単位容積質量には、調合計算上の値を用いた。なお、ここでは $k_1=1.2$ (石灰岩を使用)、 $k_2=1.0$ とした。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left\{ \frac{\gamma}{2.4} \right\}^2 \times \left\{ \frac{f_c}{60} \right\}^3 \quad (3)$$

ここで、 E :コンクリートのヤング係数 [kN/mm²]、 k_1 :粗骨材の種類により定まる修正係数、 k_2 :混和材の種類により定まる修正係数、 γ :単位容積質量[t/m³]、 f_c :コンクリートの圧縮強度 [N/mm²]である。

CZ35とCR30のヤング係数はJASS 5に示される式(3)により計算できることを確認した。また、CZ35とCR30の乾燥収縮率(乾燥期間26週の乾燥収縮ひずみ)はJASS 5⁶⁾における計画供用期間の級が長期以上の場合の上限値 8×10^{-4} より小さくなった。

4. まとめ

本検討ではセメントを使用せずに高炉スラグ微粉末をカルシウム系刺激材で硬化したCZと、さらにCZをベースにした調合に炭酸カルシウム粉末を添加したCRの模擬部材製造を行い、コア供試体の強度発現、構造体強度補正值等を確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 温度上昇量は、夏期の1m角部材において、CZ35(W/P35.9%)で22°C、CR30(W/P30.3%)で25°Cであり、同じ粉体量の普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりも小さいことを確認した。また、寸法の異なる1m角部材と0.3m厚部材の温度上昇量の差は約10°Cであった。
- 2) 部材同一養生供試体とコア供試体の強度発現は、練上り温度や部材寸法による温度履歴の違いに関わらず、有効材齢を用いた一つの式で評価できることを確認した。本検討から得られた推定式により、異なる温度履歴を受けた場合の強度発現を概ね評価することができた。
- 3) 構造体強度補正值 $_{28S91}$ は、JASS 5に示されるセメントを使用したコンクリートと大きな差はなく、CZ35においては通期で6N/mm²、CR30においては通期で3N/mm²とすることで構造体コンクリート強度を安全側に調合設計できると考えられた。
- 4) CZ35とCR30のヤング係数はJASS 5に示される計算式(式(3))で評価できる。また、本検討での乾

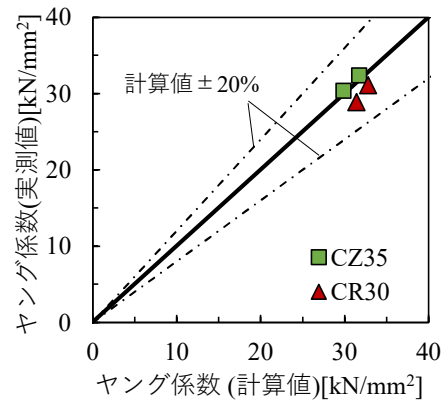


図-8 ヤング係数の計算値(式(3))と実測値の比較

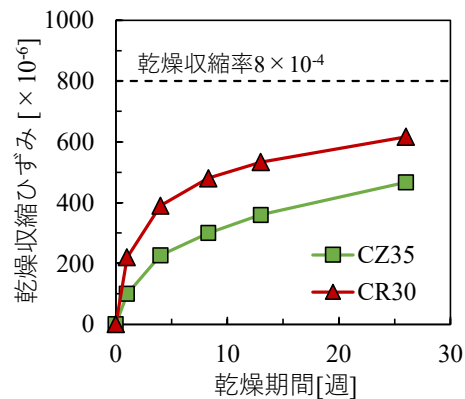


図-9 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮率はJASS 5で目安としている 8×10^{-4} よりも小さくなった。

今後は本検討のデータをもとに、調合設計方法、品質管理方法を構築し、環境配慮コンクリートの構造部材への適用拡大を進めていく。

参考文献

- 1) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 丸屋剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1969-1974, 2013
- 2) 今井和正ほか: CO₂排出量がマイナスとなる環境配慮コンクリートの建築物への適用(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.627-632, 2023
- 3) 加藤優志, 渡邊悟士, 山本佳城, 黒岩秀介: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮コンクリートの建築物への適用に向けた基礎物性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1108-1113, 2023
- 4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事, 2013
- 5) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針, 2016
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022