

セメントを使用しない環境配慮コンクリートの 建築物適用に向けた検討

T-eConcrete®/セメント・ゼロ型, Carbon-Recycle の構造体コンクリート強度と中性化抵抗性

加藤 優志*¹・渡邊 悟士*^{1, 2}・山本 佳城*¹・今井 和正*¹・黒岩 秀介*^{1, 2}

Keywords : concrete, ground granulated blast-furnace slag, CO₂ emissions, strength of concrete in structure, carbonation resistance
コンクリート, 高炉スラグ微粉末, CO₂排出量, 構造体コンクリート強度, 中性化抵抗性

1. はじめに

近年, コンクリート製造時の CO₂ 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コンクリートが開発されている。従来のコンクリートの材料製造に起因する CO₂ 排出量は約 260~300kg/m³ であり, その約 90% はセメントの製造に起因する。そのため, セメントの使用量を低減することで CO₂ 排出量を削減することができる。

当社では, 材料製造に起因する CO₂ の排出量を削減する環境配慮コンクリート T-eConcrete を開発している。T-eConcrete の CO₂ 排出割合の例を図-1¹⁾に示す。建築基準法対応型は, 高炉セメント C 種 (JIS R 5211) に相当し, JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) に適合する材料を使用しているため, 大臣認定取得等の特別な手続きを必要とせず建築物の主要構造部に適用することができる。高炉スラグ微粉末の使用率が 65% の場合, CO₂ 削減率は約 60% である。セメント・ゼロ型は, ポルトランドセメント (JIS R 5210) を使用せず, 高炉スラグ微粉末とカルシウム系化合物を用いる。従来のコンクリートに対する CO₂ 削減率は 60~80% である。Carbon-Recycle は CO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウムをセメント・ゼロ型に添加する。大量の CO₂ の吸収・固定が可能であり, 「カーボンネガティブ」を達成したコンクリートである。従来のコンクリートに対する CO₂ 削減率は 118~149% である。

セメント・ゼロ型および Carbon-Recycle については, これまでにも二次製品等に適用した実績があり¹⁾, 今

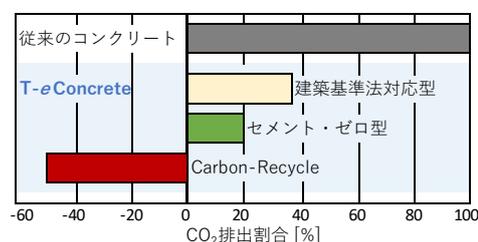


図-1 T-eConcrete の CO₂ 排出割合の例¹⁾
Fig.1 Example of CO₂ emmisions rate on T-eConcrete

後も適用範囲を広げることで, CO₂ 排出量削減に大きく貢献できると考えられる。ここで, 建築物への適用範囲拡大を考えた場合, 調合設計方法や構造体コンクリート強度の管理方法等が必要である。土木構造物への適用についてはセメント・ゼロ型を対象に設計・施工指針 (案) が用意されているが²⁾, 建築分野ではセメントを使用しないセメント・ゼロ型および Carbon-Recycle については, 力学物性や耐久性に関するデータが多くないため, 試験によりこれらのデータを蓄積し, 設計・製造マニュアルとして整理する必要がある。

本検討では, セメント・ゼロ型, Carbon-Recycle を建築物のプレキャストコンクリート (以下, PCa) 部材に適用するために, 構造体コンクリート強度および中性化抵抗性などの基礎物性を取得することを目的とした。具体的には, PCa 工場にて実機ミキサでの模擬部材製造を行い, 構造体コンクリート強度の発現および構造体強度補正值を確認した。さらに, 促進中性化試験によって得られた中性化速度係数をもとに, 実構造物で鉄筋腐食抵抗性を確保するために必要なかぶり厚さを試算した。本報ではそれらの検討結果について報告する。

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室

*2 技術センター T-eConcrete実装プロジェクトチーム

2. 実験概要

2.1 模擬部材実験

製造は千葉県成田市内の PCa 工場で実施した。製造は3回実施し、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。

2.1.1 使用材料および割合

使用材料および割合を表-1 および表-2 に示す。骨材は同 PCa 工場通常使用されているものである。セメント・ゼロ型は水粉体比 35.9% (以下, CZ-35), Carbon-Recycle は水粉体比 30.3% (以下, CR-30) とした。文献²⁾において、セメント・ゼロ型については空気量を 6.0% とすることで、JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法) A 法による耐久性指数が 90 を上回ることが報告されている。本検討では耐凍害性に配慮し、目標空気量を 6.0% に設定した。CR-30 では硬化促

表-1 使用材料

Table 1 Materials used for concrete

材料	記号	種類	物性
粉体	BFS	高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.89 g/cm ³
	St	刺激剤 (カルシウム系化合物混合物)	—
	Cc	炭酸カルシウム	密度 2.64 g/cm ³
細骨材	S1	陸砂	表乾密度 2.59 g/cm ³ 吸水率 1.88%
	S2	砕砂	表乾密度 2.68 g/cm ³ 吸水率 0.95%
粗骨材	G	碎石 2005 (石灰岩)	表乾密度 2.72 g/cm ³ 吸水率 0.82%
化学混和剤	Aw	高性能 AE 減水剤 ^{*1}	ポリカルボン酸エーテル系
		高性能減水剤 ^{*2}	ポリカルボン酸エーテル系
	Ar	減水剤	リグニンスルホン酸系と メチルカルボン酸系の複合体
Aa	硬化促進剤	—	

*1 CZ-35 で使用, *2 CR-30 で使用

表-2 割合表

Table 2 Mix proportions

割合	目標スランプ (フロー) (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)					混和割合* (P×%)			
					水 W	粉体P		S1	S2	G	Aw	Ar	Aa
						BFS+St	BFS+St+Cc						
CZ-35	18±2.5	6.0±1.5	43.0	35.9	155	432	—	358	358	980	表-4を参照	0.30	—
CR-30	55±10	6.0±1.5	43.0	30.3	175	—	578	314	314	860	参照	0.30	6.0

*混和剤種類は表-1を参照

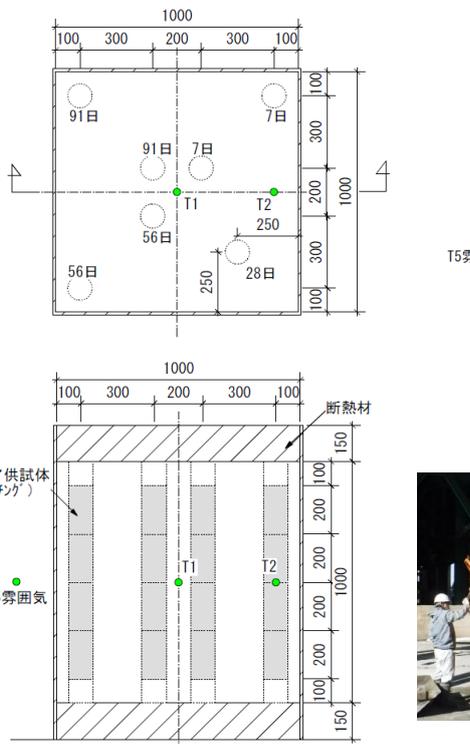


図-2 模擬部材の形状と寸法 (1×1×1m)
Fig.2 Shape and dimension of mock-up specimen

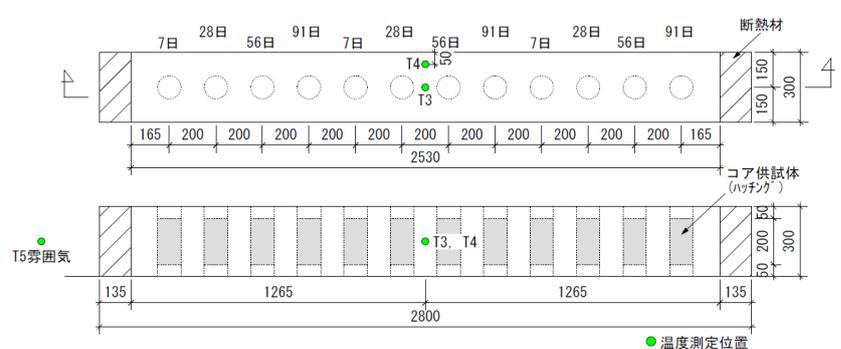


図-3 模擬部材の形状と寸法 (0.3×0.3×2.5m)

Fig.3 Shape and dimension of mock-up specimen



(a) 荷卸し

(b) 打込み

(c) 締め

写真-1 模擬部材の製造状況

Photo.1 State of manufacturing mock-up specimen

表-3 試験項目の一覧

Table 3 List of measurement contents

調査	製造時期	圧縮強度												ヤング係数		乾燥収縮
		標準養生				部材同一養生				コア供試体				標準養生		
		試験材齢 [日]														
		7	28	56	91	1	2	3	7	7	28	56	91	28	91	
CZ-35	夏期	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	標準期	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	冬期	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CR-30	夏期	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	標準期	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	冬期	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

進剤 (JIS A 6204) を粉体に対して 6.0% 添加した。

2.1.2 模擬部材の形状と寸法

模擬部材の形状と寸法を図-2 および図-3 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 1×1×1m (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 0.3×0.3×2.5m (以下, 0.3m 厚部材) の 2 種類とした。模擬部材は各材齢で図-2, 図-3 中に示す箇所から φ100×200mm のコア供試体を採取した。また, 各模擬部材は部材表面からの深さが異なる 2 点の温度計測を行った。

2.1.3 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, 各調査で 2 バッチ練り混ぜた。練混ぜ方法は, CZ-35 では粉体, 細骨材, 粗骨材を一括で投入し, CR-30 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。模擬部材の製造状況を写真-1 に示す。練り混ぜたコンクリートはホップで受け, 試験室でフレッシュ試験を行った。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型枠内に打ち込んだ。締固めは内部振動機を用いて行った。

試験項目の一覧を表-3 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ラップで封かんを行い, 模擬部材と同一環境に静置して養生した。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端部から各 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, ヤング係数の測定は JIS A 1149 (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 JIS A 1129-2 (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。

2.2 室内実験 (促進中性化試験)

使用材料は細骨材, 粗骨材以外は表-1 と同じである。細骨材は山砂 (表乾密度 2.60g/cm³) と砕砂 (表乾密度 2.67g/cm³) の混合砂, 粗骨材は産地の異なる砕石 2005 (表乾密度 2.64g/cm³) とした。調査は細骨材, 粗骨材の単位量以外は表-2 と同じとし, 細骨材, 粗骨材の絶対容積 (L/m³) が表-2 の調査と同じとなるように単位量を調整した。

コンクリートは容量 50L のパン型ミキサで練り混ぜた。練混ぜ後, 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型枠内に打ち込んだ。試験体寸法は 100×100×400mm とし, 型枠側面の 2 面を試験面とした。試験方法は JIS A 1153 (コンクリートの促進中性化試験方法) に準拠し, 促進試験開始材齢は 56 日とした。

3. 実験結果

3.1 模擬部材実験

3.1.1 フレッシュ試験結果

製造時のフレッシュ試験結果を表-4 に示す。スランプ (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 CZ-35 は製造時期によらず同じであり, CR-30 は夏期, 標準期, 冬期の順に長くなる傾向があった。

3.1.2 模擬部材の温度計測結果

CZ-35 および CR-30 の各模擬部材の中央部の温度履歴を図-4 に示す。脱型時期は夏期, 冬期は材齢 5 日, 標準期は材齢 3 日であった。各調査の温度上昇量を比較すると, 製造時期によらず CZ-35 よりも CR-30 の方が大きかった。また, 1m 角部材と 0.3m 厚部材の温度上昇量を比較すると, 1m 角部材の方が約 10~15℃大きかった。

3.1.3 圧縮強度発現, 構造体強度補正值

標準養生供試体と模擬部材から採取したコア供試体の圧縮強度発現を図-5に示す。ここで、1m角部材のコア強度は、中央部と端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、中央部と端部から採取したコア供試体の強度は、冬期の材齢7日では中央部の方が約5N/mm²大きかったが、56日以降の強度差は3シーズン通じて最大4N/mm²と小さかった。

表-4 フレッシュ試験結果

Table 4 Fresh properties of concrete

調合	製造時期	バッチ	Aw [P×%]	練混ぜ時間 [s]	スランプ (フロー) [cm]	空気量 [%]	コンクリート温度 [°C]
CZ-35	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
CR-30	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

— T1(1m角部材 夏期) - - - T3(0.3m厚部材 夏期)
 — T1(1m角部材 標準期) - - - T3(0.3m厚部材 標準期)
 — T1(1m角部材 冬期) - - - T3(0.3m厚部材 冬期)

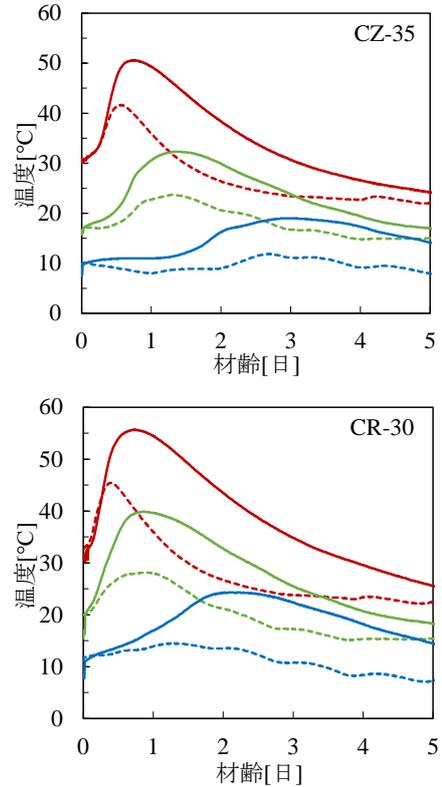


図-4 模擬部材の温度履歴

Fig.4 Time-related changes in temperature of mock-up specimen

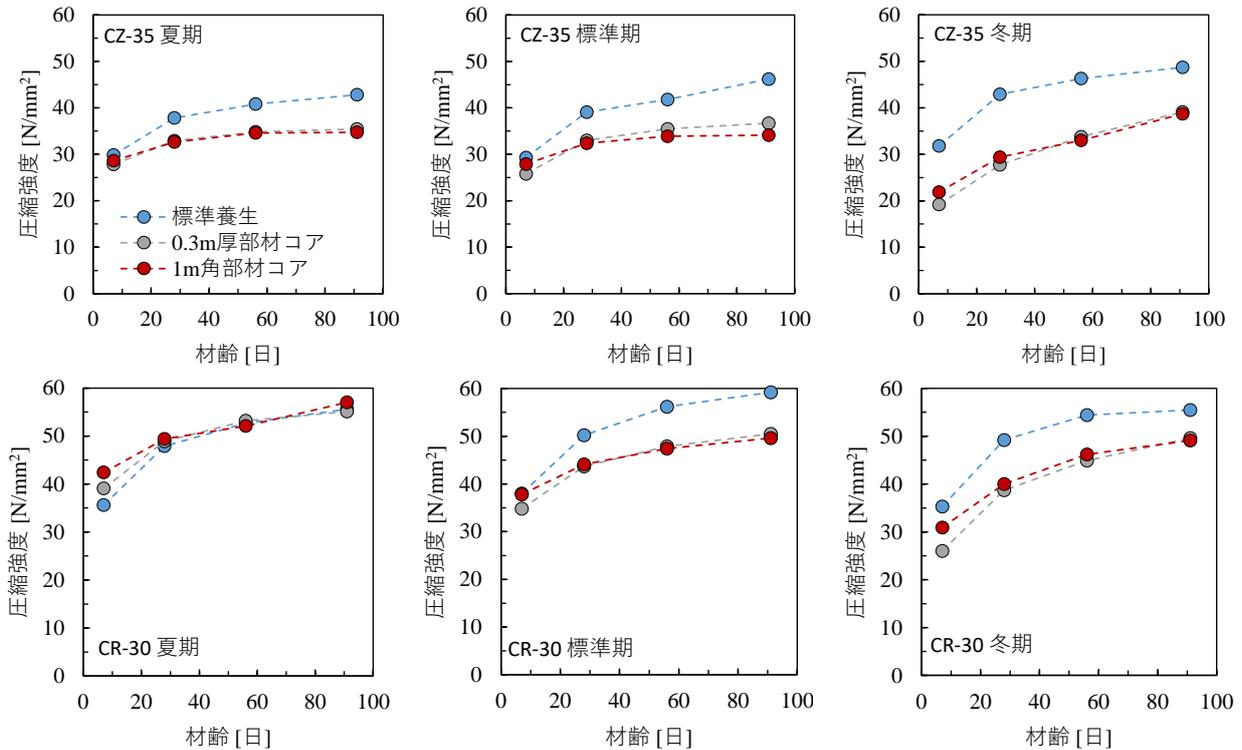


図-5 圧縮強度発現 (標準養生およびコア供試体)

Fig.5 Development of compressive strength (standard-cured and core specimen)

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 日強度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 に示すように、初期の温度履歴の影響と考えられた。一方で、材齢 28, 56, 91 日のコア強度には、部材寸法の違いによる明確な傾向は確認されず、ほぼ同等の強度となった。

部材同一養生供試体の圧縮強度発現を図-6 に示す。図中には PCa 部材の脱型時所要強度の目安として、J ASS 10³)に示される 8 N/mm²の線を併記した。8 N/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 CZ-35 は材齢 2 日、CR-30 は材齢 1 日であった。また、冬期の場合は CZ-35 および CR-30 とともに 8 N/mm²以上の強度を得るためには材齢 3 日以上が必要であり、初期の温度履歴の影響が大きかった。

コンクリートの温度履歴が圧縮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。材齢と圧縮強度の関係を図-7 (a) に示す。打設時期に着目すると、外気温が高い時期ほど圧縮強度の発現が早いことが確認でき、温度履歴の影響と考えられる。ここでは、式 (1) ⁴⁾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圧縮強度発現を整理した。

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

ここで、 t_e : 有効材齢[日]、 Δt_i : 材齢 t_i において温度 θ_i が継続する期間[日]、 θ_i : 材齢 t_i における期間 Δt の間継続するコンクリート温度[°C]、 T_n : 温度を無次元化する値で 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-2 に示す「凡例：T1」「凡例：T2」の実測値の平均を、

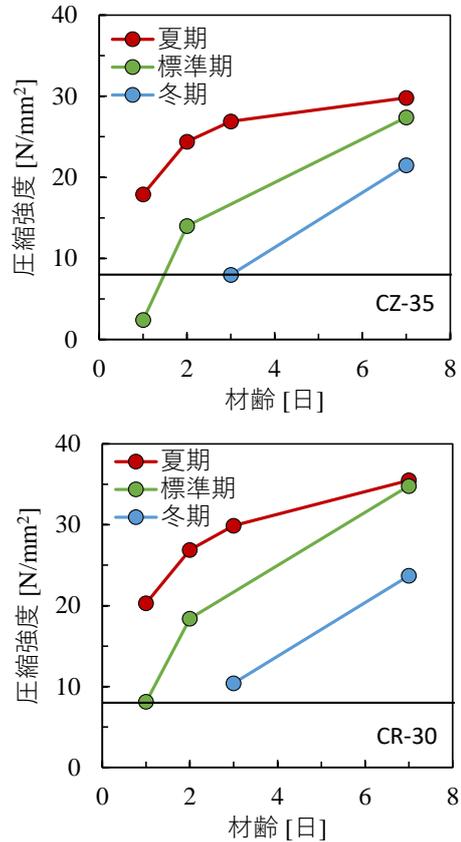
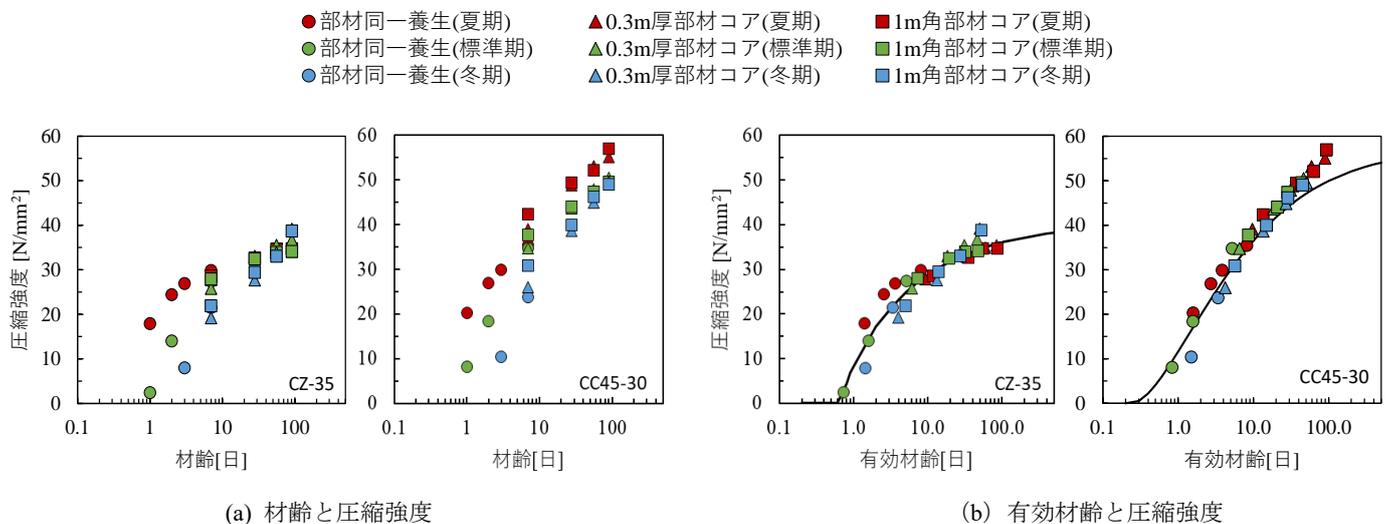


図-6 圧縮強度発現 (部材同一養生供試体)
Fig.6 Development of compressive strength (specimen seal-cured on site)



(a) 材齢と圧縮強度 (b) 有効材齢と圧縮強度

図-7 圧縮強度発現 (コア供試体および部材同一養生供試体)

Fig.7 Development of compressive strength (core specimen and specimen seal-cured on site)

0.3m厚部材の場合には図-3に示す「凡例: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。有効材齢と圧縮強度の関係を図-7(b)に示す。本検討では有効材齢と圧縮強度の関係を式(2)⁴⁾を用いて最小二乗法で近似した。

$$f_c(t_e) = \exp \left\{ S \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - S_f)/T_0} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{c28} \quad (2)$$

ここで、 $f_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e 日での圧縮強度 [N/mm²]、 S ：コンクリート種類に関わる定数 [-]、 S_f ：硬化原点のための補正項 [日]、 T_0 ：材齢を無次元化するための定数 = 1.0 [日]、 f_{c28} ：材齢28日圧縮強度 [N/mm²]である。

式(2)中の f_{c28} は標準期の材齢28日のコア供試体の強度の平均値としてCZ-35で33N/mm²、CR-30では44N/mm²と設定し、 S_f はCZ-35で0.6日、CR-30では0.2日とした。近似の結果、CZ-35では $S=0.19$ 、CR-30では $S=0.27$ の場合に最も近似精度がよくなった。得られた近似曲線を図-7(b)に併記する。本検討から、図-7(b)に示す近似曲線を用いることで、材齢91日までの範囲で異なる温度履歴を受けた場合の圧縮強度発現を推定することが可能になった。また、CR-30の圧縮強度は材齢91日以降も増加する傾向にあった。

構造体強度補正值（以下、 $_{28}S_{91}$ ）を図-8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。CZ-35の $_{28}S_{91}$ は夏期で3.1N/mm²、標準期で5.0N/mm²、冬期で4.2N/mm²となった。CR-30の $_{28}S_{91}$ は夏期で-7.2N/mm²、標準期で0.6N/mm²、冬期で0.1N/mm²となった。本実験結果から、 $_{28}S_{91}$ はCZ-35においては通期で6N/mm²、CR-30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ことがわかった。

3.1.4 ヤング係数、乾燥収縮ひずみ

夏期の模擬部材実験で採取した供試体のヤング係数を図-9に示す。図-9の横軸はJASS5⁵⁾に示される式(3)によるヤング係数の計算値であり、圧縮強度、単位容積質量の実測値を用いて算出した。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

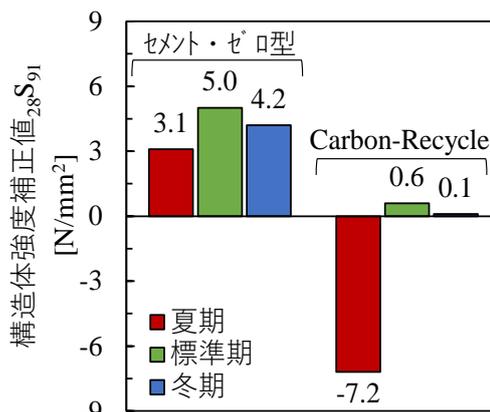


図-8 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$
Fig.8 Strength correction factor $_{28}S_{91}$

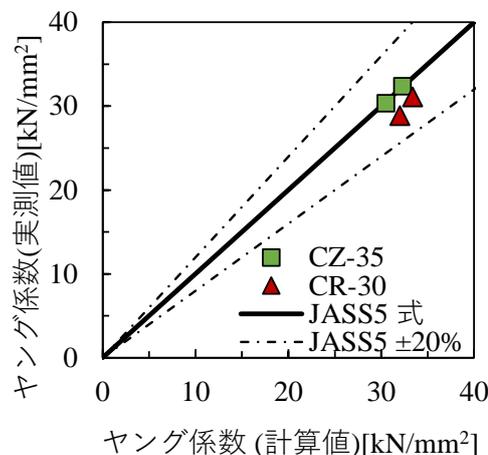


図-9 ヤング係数
Fig.9 Young's modulus

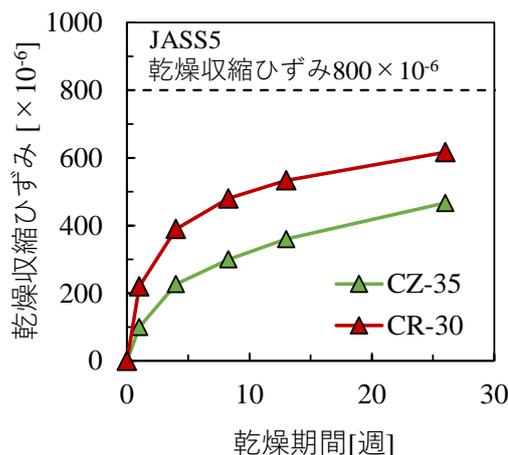


図-10 乾燥収縮ひずみ
Fig.10 Drying shrinkage strain

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。

本検討で実施したCZ-35とCR-30のヤング係数の実測値は計算値の±20%以内であることを確認した。

乾燥収縮ひずみの測定結果を図-10 に示す。乾燥材齢 26 週での乾燥収縮ひずみは JASS 5⁵⁾ に示される乾燥収縮ひずみの目安 800×10^{-6} より小さくなることを確認した。

3.2 促進中性化試験結果

促進中性化試験の結果を図-11 に示す。ここで、促進中性化試験結果によって得られた中性化速度係数から耐久設計施工指針⁶⁾に示される性能検証型一般設計法に基づいて、実構造物で鉄筋腐食抵抗性を確保するために必要なかぶり厚さを試算した。試算結果を表-5 に示す。ここでの鉄筋腐食確率は、計画供用期間内に設計限界状態に到達しない目標値として 20%とした⁶⁾。計画供用期間を 65 年（計画供用期間の級：標準）と設定すると、必要なかぶり厚さは CZ-35 で約 50mm，CR-30 で約 40mm 以上という結果となった。なお、セメント・ゼロ型については、促進中性化試験によって得られる中性化速度係数は、屋外曝露期間約 7 年の試験体から得られる値よりも大きいことが確認されており⁷⁾、表-5 の試算結果よりも実構造物での中性化深さは小さく考えられる。

4. まとめ

本検討では T-eConcrete/セメント・ゼロ型、Carbon-Recycle を建築物のプレキャストコンクリート部材として適用するために、構造体コンクリート強度および中性化抵抗性などの基礎物性に関するデータを取得した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 材齢 7 日での構造体コンクリート強度は部材寸法の大きい方が高くなる傾向が見られた。一方で、材齢 28~91 日においては部材寸法による影響は確認されず、ほぼ同等の強度となった。
- 2) 温度履歴による強度発現の差異は有効材齢を用いて 1 つの近似曲線で評価可能であることを確認した。本検討から得られた近似曲線により、異なる温度履歴を受けた場合の圧縮強度発現を推定することが可能となった。
- 3) 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、セメント・ゼロ型（水粉体比 35.9%）においては通期で 6 N/mm^2 ，Carbon-Recycle（水粉体比 30.3%）においては通期で 3 N/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ことがわかった。
- 4) 促進中性化試験による中性化速度係数から、必要なかぶり厚さを試算した。計画供用期間 65 年と設定した場合、必要なかぶり厚さは CZ-35 で約 50mm，CR-30 で約 40mm 以上という結果となった。

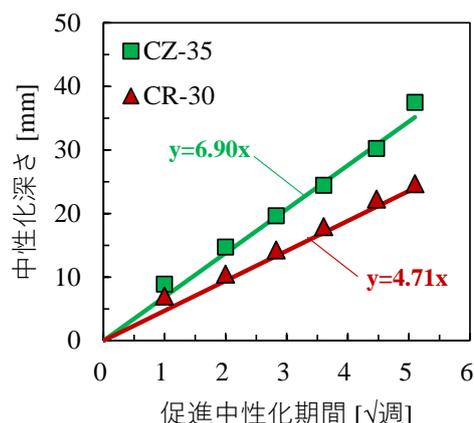


図-11 促進中性化試験による中性化深さ
Fig.11 Carbonation depth obtained by accelerated carbonation test

表-5 かぶり厚さの試算結果
Table 5 Estimation of cover depth

項目	CZ-35	CR-30
計画供用期間[年]	65	
鉄筋腐食確率[%]	20	
中性化速度係数[mm/√年]	4.98	3.40
中性化深さの平均値[mm]	40.2	27.4
かぶり厚さの下限[mm]	49.3	36.1

- *1 かぶり厚さの標準偏差 10mm，
中性化深さの変動係数 10%で試算
*2 JASS 5⁵⁾ における最小かぶり厚さ：30，40mm 以上
(計画供用期間 65 年の条件で，屋外で使用する構造部材)

本検討により得られた構造体コンクリート強度および中性化抵抗性に関するデータをもとに、セメント・ゼロ型、Carbon-Recycle の調合設計マニュアルを作成し、建築物への適用を進めていく。

参考文献

- 1) 大脇英司，荻野正貴：カーボンリサイクル材料を用いてカーボンネガティブを実現した T-eConcrete®/Carbon-Recycle の開発，セメント・コンクリート，No.900，pp.70-74，2022
- 2) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），2018
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事，2013
- 4) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説，2019
- 5) 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，2018
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016
- 7) 荻野正貴，大脇英司，宮原茂禎，櫻庭浩樹：約 7 年間曝露した環境配慮コンクリートの耐久性，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，V-24，2021