

T-eConcrete[®]/セメント・ゼロ型, Carbon-Recycle の 建築物適用に向けた基礎物性評価

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 : ground granulated blast-furnace slag, calcium carbonate, mechanical properties, durability, CO₂ emissions
高炉スラグ微粉末, 炭酸カルシウム, 力学特性, 耐久性, CO₂ 排出量

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。セメントを使用した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基礎および主要構造部等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 (以下, CZ) 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刺激材を用いる。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 (以下, CR) は CO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウム粉末を CZ をベースにした調合に添加する。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。

CZ および CR については, これまでも二次製品等

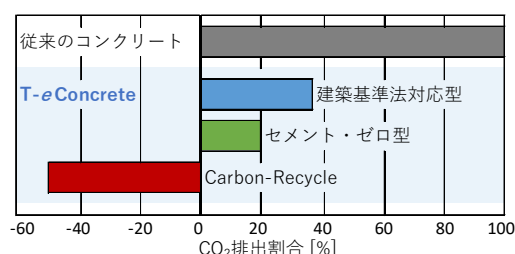


図-1 T-eConcrete の CO₂ 排出割合の例¹⁾
Fig.1 Example of CO₂ emissions rate on T-eConcrete

の非構造部材に適用した実績があり¹⁾, 今後も適用範囲を拡げることで, CO₂ 排出量削減に大きく貢献できると考えられる。ここで, 建築物の構造部材への適用を考えた場合, 力学物性や耐久性等を従来のコンクリートと比較し, 適切に建築物の設計・施工に反映する必要がある。土木構造物への適用については CZ を対象に設計・施工指針 (案) が用意されているが²⁾, 建築分野においてはセメントを使用しない CZ および CR については, 力学物性や耐久性等に関するデータが多いため, 試験によりデータを蓄積する必要がある。

本検討では, CZ および CR の建築物適用に必要な基礎的な力学物性, 耐久性等に関する資料を得ることを目的として, 室内実験を実施した。また, 近年の適用実績が増加しており, 「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 年発刊)」 (以下, JASS 5) に追記された高炉セメント C 種相当を使用したコンクリート (以下, BC) を用意し, セメントを使用しない CZ, CR と比較した。本検討では, 2つの実験 (実験 A, B) を行った。それぞれの実験での測定項目を表-1 に示す。実験 A ではコンクリート供試体を用い

*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

てヤング係数，ポアソン比，割裂引張強度，乾燥収縮ひずみ，促進試験による中性化深さ，線膨張係数を測定した。実験 B では，モルタル供試体を対象に加えて，ヤング係数，乾燥収縮ひずみを測定した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

使用材料を表-2 に示す。粉体には，普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末，カルシウム系刺激材，炭酸カルシウム粉末を使用した。高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 に規定される高炉スラグ微粉末 4000 に適合するものを使用した。カルシウム系刺激材は複数種の粉体で構成されており，本検討では構成比率の異なる St1 と St2 を使用した。炭酸カルシウム粉末の物性値を表-3 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。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。細骨材には山砂と砕砂（石灰岩）の混合砂，粗骨材には砕石 2005（硬質砂岩）を使用した。

調合表を表-4 に示す。水粉体比（以下，W/P）は BC では 35.0，55.0，65.0%，CZ は 30.9，35.9，40.9%，CR は 25.3，30.3，35.3%とした。なお，BC の W/P55.0%と CZ の W/P35.9%は設計基準強度 24N/mm² 程度，BC の W/P35.0%と CR の W/P30.3%は設計基準強度 36N/mm² 程度を想定している。CZ，CR の各調合の粉体の構成

表-1 測定項目

実験	試験項目	コンクリート	モルタル
A	凝結時間	○*1	—
	ヤング係数，ポアソン比	○*2	—
	割裂引張強度	○*3	—
	乾燥収縮ひずみ	○*1	—
	促進試験による中性化深さ	○*1	—
B	線膨張係数	○*1	—
	ヤング係数	○*4	○*5
	乾燥収縮ひずみ	—	○*1

*表-4 中の同じ添え字の調合で実施

表-2 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	密度 2.64g/cm ³
骨材	S	山砂と砕砂の混合砂	表乾密度 2.63g/cm ³
	G	砕石 2005（硬質砂岩）	表乾密度 2.65g/cm ³
化学混和剤	Ar	減水剤（遅延形，1種）	リグニンスルホン酸系とポリアクリル酸系の複合体
	Aa	硬化促進剤（1種）	主成分：亜硝酸塩，硝酸塩

表-3 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

表-4 調合表

Table 4 Mix proportions

調合	W/P [%]	スランブ (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		
						N	BFS	St1	St2	Cc				
BC35-360*3*4*5	35.0	18	4.5	360	165	306					716	952	—	—
BC55-360*1*2*3*4*5	55.0				105	195	—	—	—	868				
BC65-360*3	65.0				89	165			908					
CZ30-360*2*3*5	30.9	18	6.0	360		388	114			652	952	0.3	—	
CZ35-360*1*2*3*4*5	35.9				—	333	99	—	—	716				
CZ35-316*4*5	35.9									832				836
CZ40-360*2*3*5	40.9				292	87			764	952				
CR25-316*2*3*5	25.3	(55)	6.0	316		315		66	311	520	836	0.3	6.0	
CR30-316*1*2*3*4*5	30.3				—	263	—	55	260	628				
CR30-360*4*5	30.3									514				952
CR35-316*2*3*5	35.3				226		47	223	706	836				

* 表-1 中の同じ添え字の測定項目を実施

比率は W/P に因らず一定とした。目標スランプは、BC、CZで18cmとし、CR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BCとCZでは360 L/m³、CRでは316L/m³を基本とし、一部のCZ、CRでは316 L/m³、360 L/m³の調合も用意した。既往の文献²⁾では、CZにおいて空気量を6.0%とすることでJIS A 1148 A 法(水中凍結融解試験方法)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CZおよびCRの目標空気量は6.0%とした。また、CRの調合では初期の強度発現を向上させる目的で硬化促進剤を粉体×6.0%添加した。なお、目標のスランプ(フロー)、空気量が得られるように高性能AE減水剤、高性能減水剤およびAE剤の添加量を調整した。

2.2 試験項目

凝結時間の測定は、JIS A 1147 に準拠し、20℃環境下で実施した。

ヤング係数、ポアソン比、割裂引張強度の測定は、モルタル、コンクリートともにφ100×200mmの供試体を用いた。ヤング係数、ポアソン比の測定では、供試体の縦横方向にひずみゲージ(長さ60mm)を貼り付けた。ヤング係数の計算はJIS A 1149の計算方法に準拠し、応力-ひずみ曲線における最大荷重の1/3に相当する応力時と縦ひずみ50×10⁻⁶の時の応力を結ぶ接線の勾配である割線弾性係数として求めた。ポアソン比は、最大荷重の1/3の時の横ひずみと縦ひずみの比で算出した。割裂引張強度はJIS A 1113に準拠して測定した。なお、ヤング係数、ポアソン比、割裂引張強度の供試体は全て20℃水中養生、試験材齢28日とし、供試体数は3体である。

乾燥収縮ひずみの測定は、モルタル、コンクリートともに100×100×400mmの供試体を用いて、JIS A 1129-2 附属書 A(モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法)に準拠し、乾燥期間26週まで測定した。

中性化抵抗性はJIS A 1153(コンクリートの促進中性化試験方法)に準拠して測定した。

線膨張係数の測定は、中央に測温機能付きのひずみ計を埋設した100×100×400mmの試験体を用いた。試験体は20℃封かん養生とし、材齢26週以降に測定した。測定温度範囲は20℃から60℃の往復1サイクルとして、恒温槽を用いて温度履歴を与えた。試験体の中心と表面の温度差が極力生じないように昇温・降温速度は1℃/hourとして、5℃間隔で一定温度を5時間保持した。

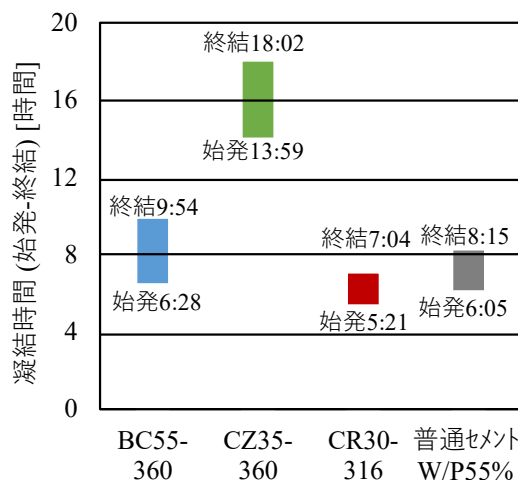


図-2 凝結時間試験の結果

Fig.2 Result of test for time of setting

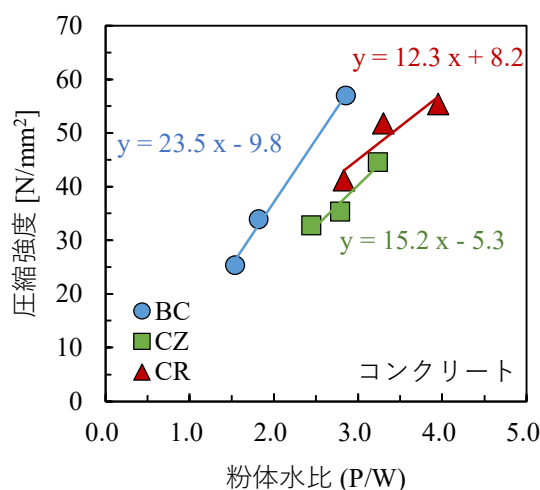


図-3 粉体水比と圧縮強度の関係

Fig.3 Relationship between powder water ratio and compressive strength

試験体中心の温度と槽内温度の差が最も小さいときのひずみと温度を用いて線膨張係数を算出した。なお、試験体数は3体とした。

3. 実験結果

3.1 凝結時間

各調合の始発、終結時間を図-2に示す。図中には参考として、文献³⁾に示される普通ポルトランドセメントを使用したW/P55%の凝結時間を示した。CZ35-360の始発はBC55-360よりも約7時間遅れ、施工するには打込み後の仕上げに要する時間を十分に確保する必要があると考えられる。また、CR30-316の始発はCZ35-360よりも約8時間早くなっており、硬化促進剤を添加した影響と考えられる。

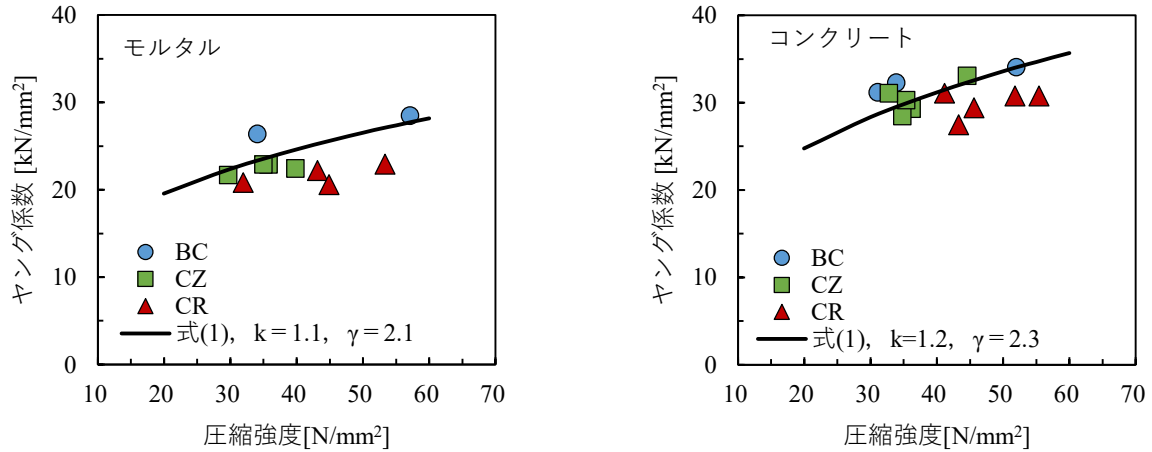


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係 (左：モルタル，右：コンクリート)

Fig.4 Relationship between compressive strength and Young's modulus

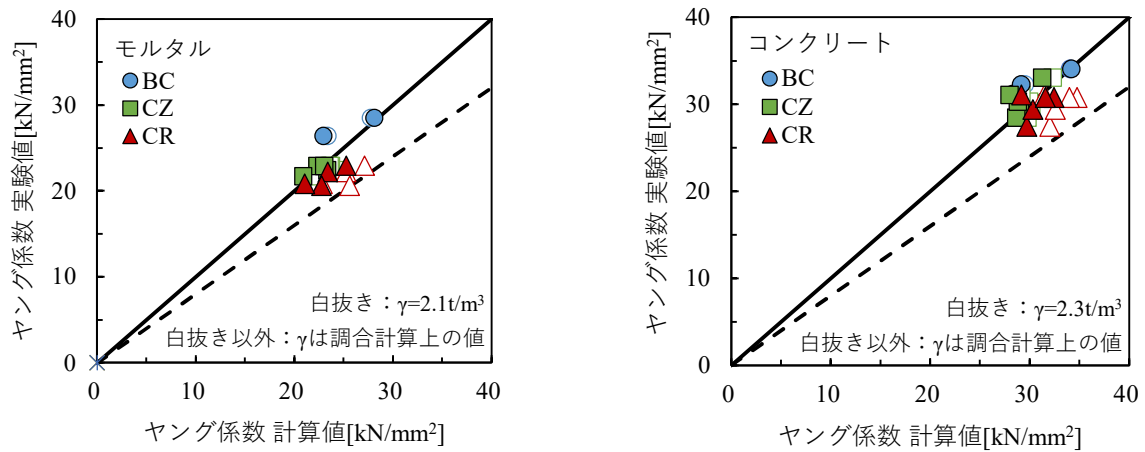


図-5 ヤング係数の計算値と実験値の比較 (左：モルタル，右：コンクリート)

Fig.5 Comparison of calculated and experimental values of Young's modulus

3.2 力学物性

3.2.1 水粉体比と強度の関係

粉体水比 (以下、P/W) と材齢 28 日圧縮強度の関係を図-3 に示す。本検討の範囲では、CZ および CR の材齢 28 日強度は P/W と直線関係にあり、セメントを使用したコンクリートと同様に P/W で調合設計できると考えられる。また、BC と比較すると、同じ P/W の時の強度は CZ, CR の方が小さかった。

3.2.2 ヤング係数、ポアソン比

モルタル、コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を図-4 に示す。図中には式(1) (New RC 式⁴⁾ による計算値を併記した。

$$E = k \times 3.35 \times 10 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_c}{60}\right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 E : ヤング係数[kN/mm²], k : 粗骨材と混和材

の種類により定まる修正係数[-], γ : 単位容積質量 [t/m³], f_c : 圧縮強度[N/mm²]である。

モルタル、コンクリートのヤング係数は同じ強度で比較すると、BC と CZ では同程度、CR ではわずかに小さくなる傾向が見られた。ここでは、セメントを使用した BC を基準と考え、図-4 中の式(1)における k は BC と CZ の計算値と実験値の二乗誤差が最小になるように、0.1 単位で変化させて決定した。なお、 k を算出する際の γ は、本検討で用いた BC の平均値としてモルタルで 2.1、コンクリートで 2.3 とした。図-5 に式(1) によるヤング係数の計算値と実験値の比較を示す。図-5 中には図-4 と同様に γ を調合によらず同一とした計算値 (凡例：白抜き) と、 γ を調合計算上の値とした計算値 (凡例：白抜き以外) を示した。なお、単位容積質量は調合計算上の値よりも実測値の方が大きく、その差は 0.01~0.05t/m³ 程度であった。CR に着目すると、 γ を調合計算上の値とした計算値の方が実験値に近づいて

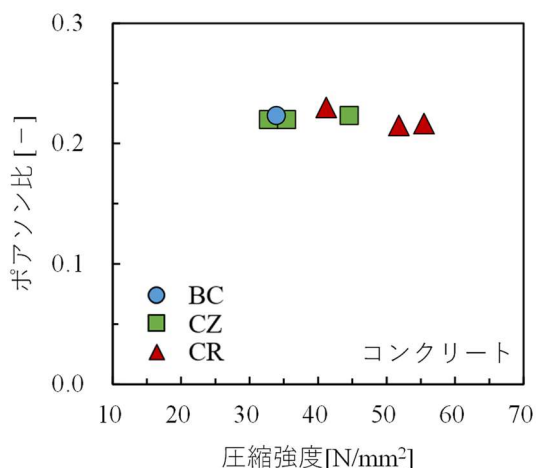


図-6 圧縮強度とポアソン比の関係

Fig.6 Relationship between compressive strength and Poisson's ratio

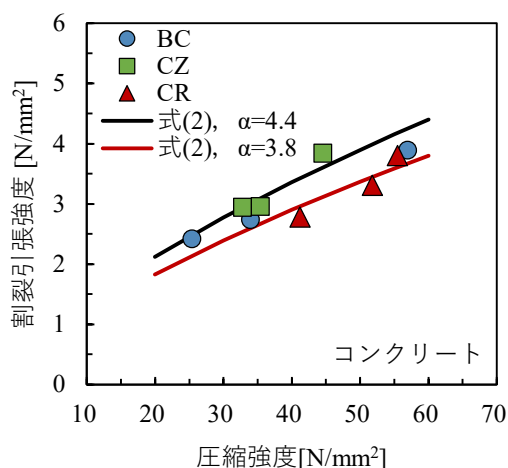


図-7 圧縮強度と割裂引張強度の関係

Fig.7 Relationship between compressive strength and splitting tensile strength

おり、CR のヤング係数を圧縮強度から推定する際には γ を調合計算上の値とすることで、BC、CZ と同じ修正係数 k を用いた式(1)で評価できると考えられる。また、いずれの調合でもヤング係数の実験値は、JASS 5 に示されるヤング係数の目安である式 (1) の計算値の 80% 以上となることを確認した。

圧縮強度とポアソン比の関係を図-6 に示す。本検討では CZ、CR のポアソン比は概ね 0.2 程度であり、BC とほぼ同じであった。また、本検討の範囲では圧縮強度による違いは見られなかった。

3.2.3 割裂引張強度

圧縮強度と割裂引張強度との関係を図-7 に示す。図中には野口ら⁵⁾が提案している圧縮強度と割裂引張強度との関係式である式(2)による計算値を併記した。

$$f_t = \alpha \times \left\{ \frac{f_c}{60} \right\}^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

ここで、 f_t : 割裂引張強度 [N/mm²], f_c : 圧縮強度 [N/mm²], α : 補正係数 [-]

野口ら⁵⁾は、圧縮強度 20~120N/mm² 程度のコンクリートの実験結果に基づき式(2)中の α として 4.0 を提案しているが、ここでの α は BC と CZ、CR でそれぞれ最小二乗法により近似して算出した。近似の結果、BC と CZ では $\alpha = 4.4$ 、CR では $\alpha = 3.8$ と算出され、CR の割裂引張強度は約 1 割小さくなる傾向が見られたが、CZ と CR の圧縮強度と割裂引張強度には正の相関が確認でき、セメントを使用したコンクリートと同様に式(2)で評価できると考えられる。石灰石微粉末を使用したコンクリートに関する既往の検討について、古屋ら⁶⁾は

石灰石微粉末を外割で 150kg/m³ 添加した高流動コンクリートと、普通コンクリートを比較し、高流動コンクリートの方が圧縮強度に対する引張強度の比率が小さくなることを確認している。また、浜田ら⁷⁾の石灰石微粉末を 250kg/m³ 外割で添加した高流動コンクリートによる検討では、同じ水セメント比の普通コンクリートよりも圧縮強度に対する引張強度の比率は小さくなっている。本検討でもこれらの石灰石微粉末を用いた検討と同様に、炭酸カルシウム粉末を使用した影響で圧縮強度に対する割裂引張強度の比率が小さくなったと推察される。

3.3 中性化抵抗性

促進中性化試験による中性化深さの測定結果を図-8 に示す。BC と CZ の中性化深さを比較すると、本検討では同程度の圧縮強度の BC55-360 と CZ35-360 の中性化速度係数はほぼ同じとなった。また、CR30-316 の中性化速度係数は BC35-360 よりも大きくなったが、中性化速度係数が圧縮強度の逆数に比例すると仮定すると、CR30-316 の中性化速度係数は同じ強度の BC (図-8 中の一点鎖線) と同程度と考えられる。ここで、促進中性化試験結果から得られた中性化速度係数から、耐久設計施工指針⁸⁾に示される性能検証型一般設計法に基づいて、鉄筋腐食抵抗性を確保するための耐久性上必要なかぶり厚さを試算した。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。なお、かぶり厚さの標準偏差は 10mm、中性化深さの変動係数は 10% とした。試算の結果を表-5 に示す。JASS 5 では、腐食環境の構造部材で計画供用期間 65 年の場合の設計かぶり厚さを 40mm 以上としている。本検討のコンクリートでは CZ35-360 (設計基

準強度 24N/mm²程度) で約 50mm, CR30-316 設計基準強度 36N/mm²程度) で約 40mm のかぶり厚さを確保することで, 必要な鉄筋腐食抵抗性を確保できると考えられ, この値は BC で試算した結果と同程度であった。なお, CZ においては屋外暴露試験における中性化速度係数が促進中性化試験により得られる値よりも小さくなることを確認されている⁹⁾ため, 実際の構造物での中性化深さは試算結果よりも小さくなると思われる。

3.4 乾燥収縮ひずみ

モルタルの乾燥収縮ひずみを図-9 に示す。モルタルの乾燥期間 26 週における乾燥収縮ひずみは BC55-360 と CZ35-360 は同程度であったが, CR30-316 では約 200×10^{-6} 大きくなった。

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果(凡例: 硬質砂岩)を図-10 に示す。図中には文献¹⁰⁾に示される石灰岩砕石を使用したコンクリートのデータ(凡例: 石灰岩)を併記した。なお, 石灰岩砕石を使用したコンクリートは, 細骨材, 粗骨材の種類が本検討とは異なるが, 単位量は細骨材, 粗骨材以外は同じとし, 粗骨材の絶対容積が本検討と同じになるように調整している。本検討の CZ35-360, CR30-316 (凡例: 硬質砂岩)の乾燥期間 26 週での乾燥収縮ひずみは粗骨材種類によらず, JASS 5 における計画供用期間の級が長期以上の場合の上限値 800×10^{-6} よりも小さくなった。また, 硬質砂岩砕石を使用した BC55-360 と CZ35-360 の乾燥期間 26 週の乾燥収縮ひずみはほぼ同じであり, CR30-316 では約 150×10^{-6} 大きくなった。CR30-316 の乾燥収縮ひずみが他の調合よりも大きくなった要因として, 粗骨材の絶対容積が小さいことも考えられるが, 図-9 に示すようにモルタルマトリクスの影響の方が大きいと推察される。また, 石灰岩砕石を使用した CZ35-360, CR30-316 の乾燥期間 26 週の乾燥収縮ひずみは, 同じ W/P の硬質砂岩砕石を使用したコンクリートよりも $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ 小さくなり, CZ と CR でも石灰岩砕石を使用する収縮低減対策は有効であった。

3.5 線膨張係数

線膨張係数の測定結果を図-11 に示す。BC55-360, CZ35-360 および CR30-316 の線膨張係数は同程度であった。一般に BC55-360 のような高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの線膨張係数は, セメントのみを使用した従来のコンクリートよりも約 2 割大きくなる¹¹⁾ことが知られている。したがって, BC55-360 と同様に CZ35-360 と CR30-316 の線膨張係数は従来のコンクリートよりも大きいと考えられる。

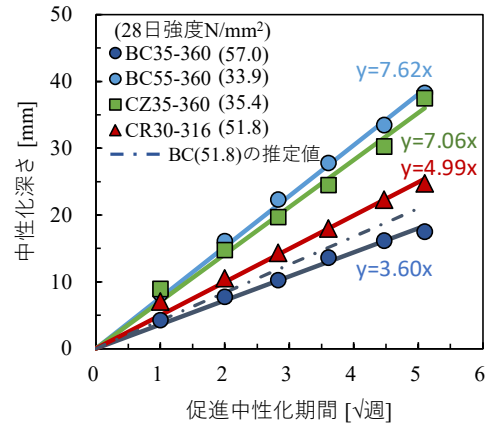


図-8 促進中性化試験による中性化深さ
Fig.8 Carbonation depth obtained from accelerated carbonation test

表-5 耐久性上必要なかぶり厚さの試算

項目	BC55-360	CZ35-360	BC35-360	CR30-316
計画供用期間[年]	65			
中性化速度係数 [mm/√年]	5.50	5.10	2.60	3.60
中性化深さの平均値[mm]	44	41	21	29
かぶり厚さの下限値[mm]	54	50	30	38

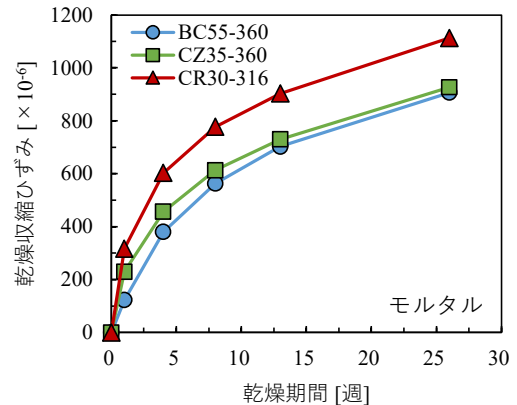


図-9 モルタルの乾燥収縮ひずみ
Fig.9 Drying shrinkage strain of mortar

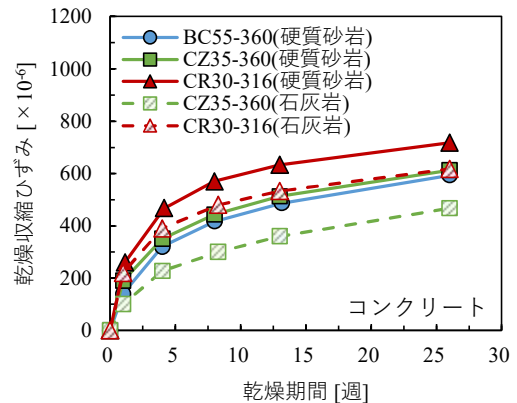


図-10 コンクリートの乾燥収縮ひずみ
Fig.10 Drying shrinkage strain of concrete

4. まとめ

本検討では、T-eConcrete/セメント・ゼロ型（以下、CZ）、Carbon-Recycle（以下、CR）を対象に、建築物適用に必要な基礎的な力学物性、耐久性等に関する資料を得ることを目的として、室内実験を実施した。また、得られたデータを高炉セメント C 種相当を使用したコンクリート（以下、BC）と比較した。

- 1) 凝結の始発は、BC よりも CZ の方が約 7 時間遅れ、施工するには打込み後の仕上げに要する時間を十分に確保する必要がある。また、本検討の CR の始発は CZ よりも約 8 時間早くなっており、硬化促進剤の影響と考えられる。
- 2) 粉体水比（以下、P/W）と材齢 28 日強度は、CZ、CR においても直線関係にあり、セメントを使用したコンクリートと同様に P/W で調合設計できる。
- 3) 圧縮強度とヤング係数の関係については、CZ と BC はほぼ同じであったが、CR では約 1 割小さくなった。また、New RC 式によるヤング係数の評価においては、単位容積質量を調合計算上の値とすることで BC、CZ、CR とともに同じ修正係数 k を用いた式で評価できる。
- 4) 圧縮強度と割裂引張強度の関係については、CR では BC と CZ と比較して約 1 割小さくなる傾向が見られたが、圧縮強度と割裂引張強度には相関が見られ、セメントを使用したコンクリートと同様の式で評価できる。
- 5) 促進中性化試験結果をもとに、計画供用期間 65 年の場合に耐久性上必要なかぶり厚さを試算した。試算の結果、水粉体比（以下、W/P）35.9%の CZ（設計基準強度 24N/mm² 程度）で約 50mm、W/P30.3%の CR（設計基準強度 36N/mm² 程度）で約 40mm のかぶり厚さが必要と算出され、同じ強度の BC と同程度であった。
- 6) 乾燥収縮ひずみは、CZ と CR においても JASS 5 における計画供用期間の級が長期以上の場合の上限値 800×10^{-6} よりも小さくなった。また、CZ と CR においても石灰岩砕石を使用する収縮低減対策は有効であった。
- 7) 線膨張係数は、BC、CZ、CR で同程度であり、CZ と CR の線膨張係数はセメントのみを使用したコンクリートよりも約 2 割大きいと考えられる。

本検討の結果等をもとに T-eConcrete/セメント・ゼロ型、Carbon-Recycle をプレキャスト部材に用いた場合の

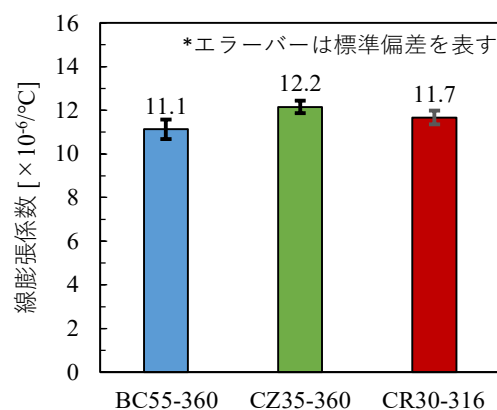


図-11 線膨張係数

Fig.11 Coefficient of thermal expansion

材料特性や構造性能についての技術資料を作成し、一般財団法人日本建築センターの特別工法評定（BCJ 評定-SS0053-01）を 2022 年 11 月に取得した。今後は建築物の構造部材への適用も進め、脱炭素社会の実現に貢献していく。

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.70-75，2022.
- 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) 太平洋セメント株式会社：セメント総合技術資料（第 2 版），2016.
- 4) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係，日本建築学会構造系論文集，No.474，pp.1-10，1995.
- 5) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.
- 6) 古屋信明，齊藤哲男，近松竜一，十河茂幸：石灰石微粉末を多量に用いたマスコンクリート用低発熱型高流動コンクリート，土木学会論文集，pp.51-60，Vol.19，No.466，1993.
- 7) 浜田二郎，加藤英昭，横須賀誠一，渡部嗣道：石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの品質に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.135-138，1995.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 加藤優志ら：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，大成建設技術センター報，Vol.55，2022.
- 11) 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 2016，2016.