

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建築物への適用に向けた基礎物性評価

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コンクリートとさらに炭酸カルシウム粉末を添加したコンクリートを対象に、力学物性試験、促進中性化試験および長さ変化試験を行い、高炉セメント C 種相当のコンクリートと比較した。力学物性については、圧縮強度と各物性との関係を比較した。中性化抵抗性については、促進中性化試験による中性化速度係数から鉄筋腐食抵抗性の確保に必要なかぶり厚さを試算した。乾燥収縮ひずみについては、コンクリートをモルタルと粗骨材の二相材料と考え、一般のコンクリートで適用されている既往の複合則による推定値と実験値を比較した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、炭酸カルシウム粉末、ヤング係数、割裂引張強度、中性化抵抗性、乾燥収縮

1. はじめに

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環境配慮コンクリートが開発されている。一般のセメントを使用した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。既往の検討¹⁾では、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消石灰などのカルシウム系化合物（以下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が検討されており、水粉体比 35.9%で約 30N/mm²（材齢 28 日）が得られることを報告している。一般のセメントを使用したコンクリートと比較すると、CO₂ 削減率は約 80%である。また、近年では大気中や排気ガスなどから回収した CO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウム粉末を使用することで、コンクリートの材料製造に起因する CO₂ 排出量収支をマイナスとしたコンクリートが開発され、プレキャスト部材やコンクリート舗装に適用されている²⁾。これらは建設分野の CO₂ 排出量削減に大きく貢献できる技術と考えられ、土木分野については設計・施工指針（案）³⁾が用意されている。一方、建築分野では関連する指針等が用意されていないため、これらのコンクリートと一般のセメントを使用したコンクリートとの力学物性や耐久性等の差異を把握し、建築物の設計に適切に反映する必要がある。

そこで、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）とさらに炭酸カルシウム粉末を添加したコンクリート（以下 CC）

表－1 測定項目

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

*表－4 中の同じ添え字の調合で実施

を対象に、力学物性試験、促進中性化試験および長さ変化試験を実施した。また、セメントを使用しない CZ、CC との比較用として、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）を用意した。本検討では、2 つの実験（実験 A、B）を実施した。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を測定した。実験 B では、モルタル供試体を加えて、ヤング係数、乾燥収縮ひずみを測定した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と調合

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

*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）

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%, CC は 25.3, 30.3, 35.3%とした。CZ, CC の粉体の構成比率は W/P に因らず一定とした。目標スランプは、BC, CZ で 18cm とし、CC 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, CC では 316 L/m³とした。既往の文献³⁾では、高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を用いた調合において、空気量を 6.0%とすることで JIS A 1148 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 CZ および CC の目標空気量は 6.0%とした。また、CC 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 供試体作製、試験方法

コンクリート、モルタルは容量 55L のパン型ミキサーを用いて作製した。供試体の寸法はコンクリート、モルタルともに φ100×200mm または 100×100×400mm とした。ヤング係数、ポアソン比は φ100×200mm の供試体の縦横方向にひずみゲージ（長さ 60mm）を貼り付けて測定した。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。乾燥収縮の測定は、JIS A 1129-2 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 に準拠して測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 力学的物性

粉体水比（以下 P/W）と材齢 28 日強度の関係を図－1 に示す。本検討の範囲では、CZ および CC の材齢 28 日強度は P/W と直線関係にあり、高炉セメント C 種相当を使用したコンクリートと同様に P/W で調合設計でき

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, I 種）	リグニンスルホン酸系と メチルポリリン酸系の複合体
	Aa	硬化促進剤（I 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

調合	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	Ar	Aa
						N	BFS	St1	St2	Cc				
BC35-360 ^{*1} 3*4*5	35.0	18	4.5	360	165	165	306	—	—	—	716	952	—	—
BC55-360 ^{*1} 2*3*4*5	55.0					105	195				868			
BC65-360 ^{*1}	65.0					89	165				908			
CZ30-360 ^{*1} 5	30.9	18	6.0	360	155	—	388	114	—	—	652	952	0.3	—
CZ35-360 ^{*1} 2*3*4*5	35.9						333	99			716			
CZ40-360 ^{*1} 5	40.9						292	87			764			
CC25-316 ^{*1} 5	25.3	(55)	6.0	316	175	—	315	—	66	311	520	836	0.3	6.0
CC30-316 ^{*1} 2*3*4*5	30.3						263		55	260	628			
CC35-316 ^{*1} 5	35.3						226		47	223	706			

* 表－1 中の同じ添え字の測定項目を実施

ると考えられた。また、BC と比較すると、同じ P/W の時の強度は CZ, CC の方が小さかった。

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-2 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、CC 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-2 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-3 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-3 中には図-2 と同様に γ を調査によらず同一とした計算値 (凡例：白抜き) と、 γ を調査計算上の値とした計算値 (凡例：白抜き以外)

を示した。なお、単位容積質量は調査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。CC に着目すると、 γ を調査計算上の値とした計算値の方が実験値に近づいており、CC のヤング係数を圧縮強度から推定する際には γ を調査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た。また、いずれの調査でもヤング係数の実験値は、JASS5 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。

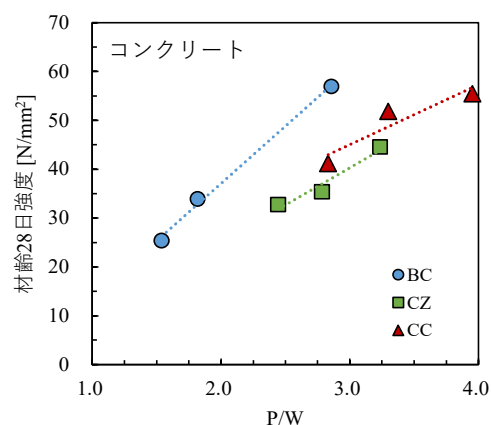


図-1 粉体水比 (P/W) と材齢 28 日強度の関係

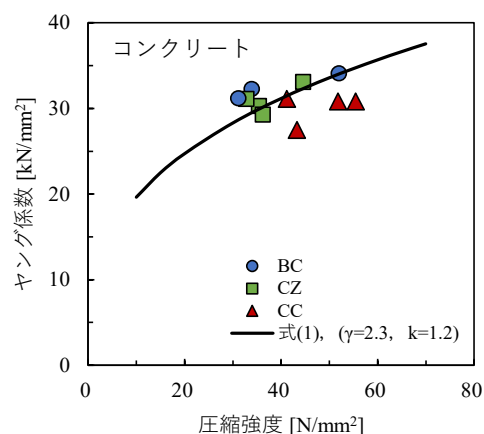
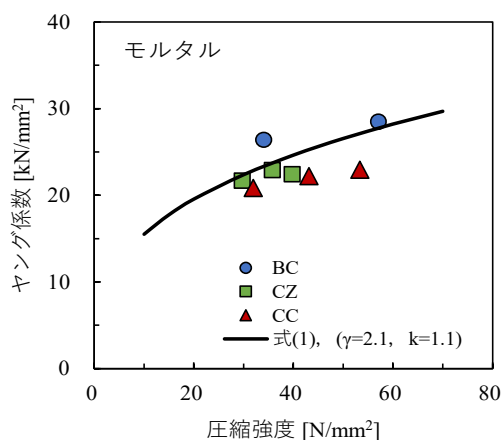


図-2 圧縮強度とヤング係数の関係 (左 : モルタル, 右 : コンクリート)

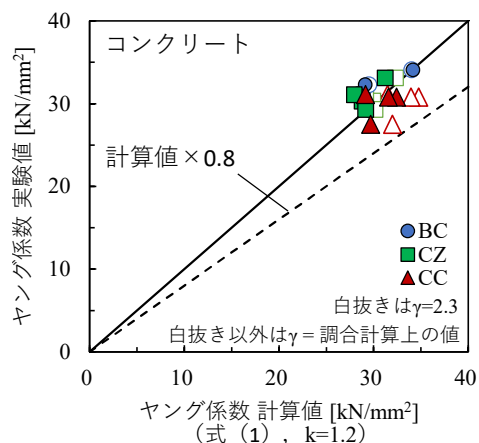
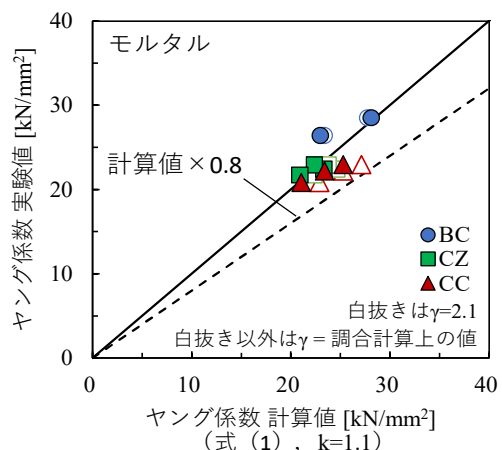


図-3 式 (1) によるヤング係数の計算値と実験値の比較 (左 : モルタル, 右 : コンクリート)

圧縮強度とポアソン比の関係を図-4 に示す。本検討では CZ, CC 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。

圧縮強度と割裂引張強度との関係を図-5 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, CC 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 $\alpha = 4.4$ 、CC では $\alpha = 3.8$ と算出され、CC の割裂引張強度は約 1 割小さくなる傾向が見られた。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。

3.2 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-6 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、CC30-316 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、CC30-316 の中性化速度係数は同じ強度の BC (図-6 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に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(床スラブ、屋根スラブ)で計画供用期間 65 年の場合の設計かぶり厚さを 40mm としている。本検討のコンクリートでは CZ35-360 で約 50mm、CC30-316 で約 40mm のかぶり厚さを確保することで、

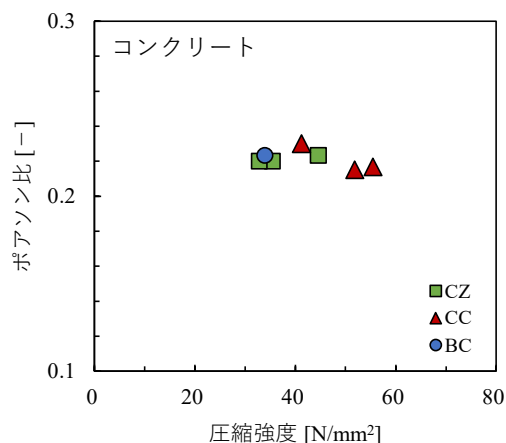


図-4 圧縮強度とポアソン比の関係

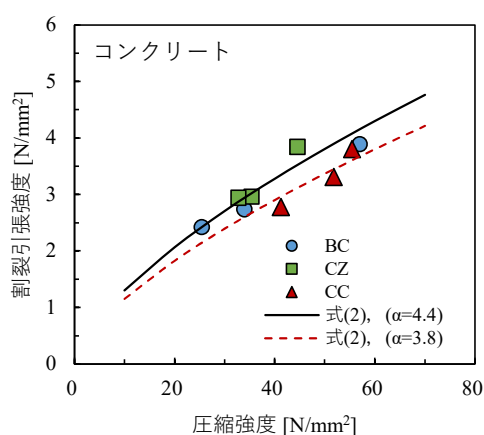


図-5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

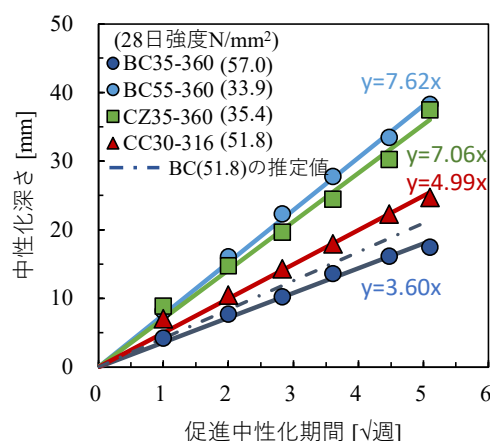


図-6 促進中性化試験結果

表-5 必要なかぶり厚さの試算結果

項目	BC55-360	CZ35-360	BC35-360	CC30-316
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

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、CZ35-360 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が確認されている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考えられる。

3.3 乾燥収縮ひずみ

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果（凡例：砂岩）を図-7 に示す。図中には文献¹⁰⁾に示される石灰岩碎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、石灰岩碎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 CZ, CC の乾燥期間 26 週の乾燥収縮ひずみは粗骨材種類によらず JASS 5 に示される乾燥収縮率の目安 8×10^{-4} よりも小さくなった。硬質砂岩碎石を使用したコンクリートでは乾燥期間 26 週の乾燥収縮ひずみは BC55-360 と CZ35-360 ではほぼ同じであり、CC30-316 では約 150×10^{-6} 大きくなった。また、石灰岩碎石を使用した CZ35-360, CC30-316 の乾燥期間 26 週の乾燥収縮ひずみは、同じ W/P の硬質砂岩碎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、本検討のセメントを使用していないコンクリートでも石灰岩碎石を使用する収縮低減対策は有効であった。

モルタルの乾燥収縮ひずみを図-8 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、CC30-316 では約 200×10^{-6} 大きくなった。コンクリートにおいて、CC30-316 の乾燥収縮ひずみが他の調査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たが、モルタルマトリクスの影響の方が大きいと推察される。

さらに、本検討では、セメントを使用しないコンクリート (CZ, CC) の乾燥収縮ひずみを予測する方法として、馬場¹¹⁾が提案する式(3)の複合則により算出される推定

値と実験値を比較した。本検討ではコンクリートをモルタルと粗骨材の二相材料として評価した。

$$\varepsilon_c = \frac{(1 - (1 - mn)V_g)(n + 1 - V_g(n - 1))}{1 + n + V_g(n - 1)} \varepsilon_m \quad (3)$$

ここで、 ε ：乾燥収縮ひずみ [$\times 10^{-6}$]、 V_g ：骨材体積 [m^3/m^3]、 $n:K_g/K_m$ 、 $m:\varepsilon_g/\varepsilon_m$ 、 K ：体積弾性係数 [kN/mm^2] ($K = E/3(1 - 2\nu)$)、 E ：ヤング係数 [kN/mm^2]、 ν ：ポアソン比（本検討では 0.20）、各記号の下付き文字は c：コンクリート、m：モルタル、g：粗骨材を表す。

式(3)において、粗骨材のヤング係数は文献¹²⁾より表乾密度から算出し、乾燥収縮ひずみは既往の文献^{13),14)}を参考に、石灰岩碎石は 100×10^{-6} 、硬質砂岩碎石は 200×10^{-6} で乾燥期間に因らず一定とした。モルタルのヤング係数

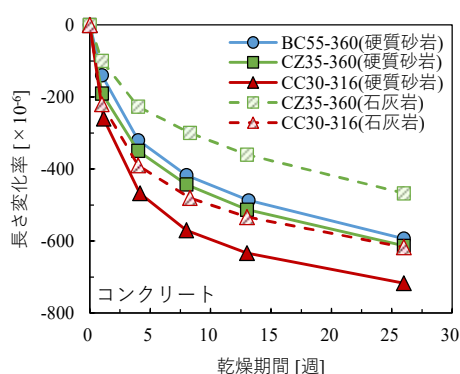


図-7 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

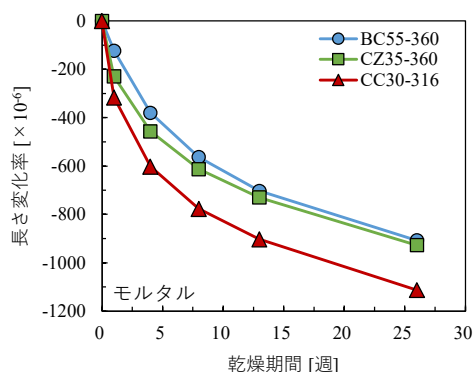


図-8 モルタルの乾燥収縮ひずみ

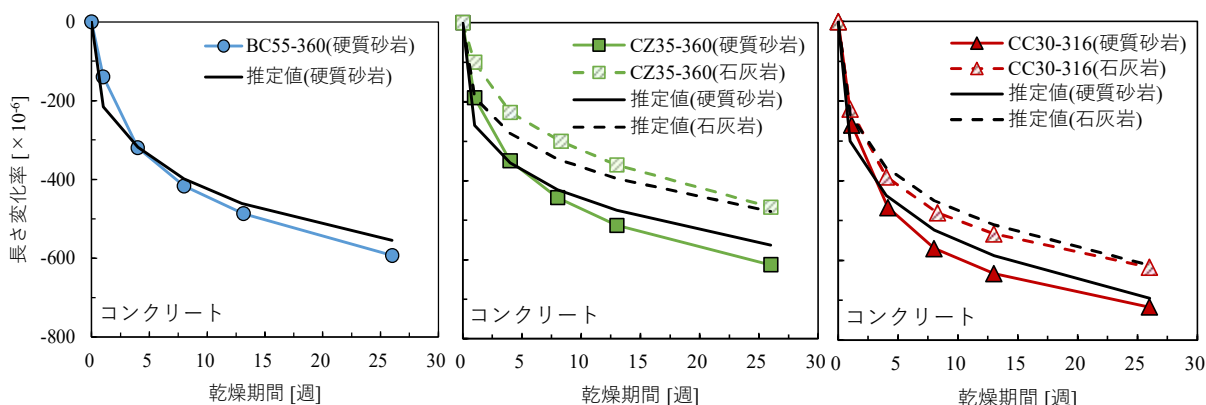


図-9 式 (3) による乾燥収縮ひずみの推定値と実験値の比較

は、文献¹⁰⁾に示す模擬部材コアから得られた強度発現式と図-3に示す式(1)により算出し、乾燥収縮ひずみは図-8の実験値を用いた。それぞれの調合の乾燥収縮ひずみの推定値と実験値を図-9に示す。推定値は実験値を概ね予測できており、本検討のセメントを使用しないコンクリートにおいても式(3)で乾燥収縮ひずみを予測できることが確認された。したがって、調合計画の段階において、目標の乾燥収縮ひずみを満足するための粗骨材種類や粗骨材量を選定するには式(3)を用いた予測が有効であると考えられる。なお、本検討ではコンクリートをモルタルと粗骨材の二相材料として評価したが、粗骨材の絶対容積が変化すると、同じワーカビリティを得るための単位水量や細骨材率は異なるため、汎用性を高めるためには、コンクリートをセメントペースト、細骨材、粗骨材の三相材料として評価できるようデータを整理する必要がある。

4. まとめ

本研究では、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）とさらに炭酸カルシウム粉末を添加したコンクリート（以下 CC）を対象に、力学物性試験、促進中性化試験および長さ変化試験を実施し、高炉セメント C 種相当のコンクリート（以下 BC）と比較した。

- 1) CZ および CC の材齢 28 日強度は粉体水比（以下 P/W）と直線関係にあり、高炉セメント C 種相当のコンクリートと同様に P/W で調合設計できる。
- 2) 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、CC 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、CC ともに同じ修正係数 k を用いた式で評価できる。
- 3) 圧縮強度と割裂引張強度の関係については、CZ と BC はほぼ同じであったが、CC では約 1 割小さくなった。
- 4) 促進中性化試験から得られた中性化速度係数をもとに計画供用期間 65 年の場合に必要なかぶり厚さを試算した。本検討の試算の結果、水粉体比（以下 W/P）が 35.9% の CZ で約 50mm、W/P が 30.3% の CC で約 40mm のかぶり厚さが必要と算出された。
- 5) 石灰岩碎石を使用した CZ、CC の乾燥収縮ひずみは、同じ W/P の硬質砂岩碎石の使用した調合よりも約 $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ 小さくなった。
- 6) 複合則による推定式を用いることで、CZ、CC においても乾燥収縮ひずみを概ね予測でき、調合計画の段階における目標の乾燥収縮ひずみを満足するための粗骨材種類、量の選定に有効であると考えられる。

本検討の CZ、CC の物性を適切に設計に反映することで、建築物にも適用できると考えられる。今後は得られたデータをもとに調合設計マニュアル等を作成し、建築物への適用を進めていく。

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) 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 TeConcrete/Carbon-Recycle の開発，セメント・コンクリート，No.900，pp.70-75，2022.2
- 3) 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
- 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.1-10，1995.8
- 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
- 6) 古屋信明，斉藤哲男，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.466，1993.5
- 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.55，06-pp.1-7，2022
- 11) 馬場明生：コンクリートの乾燥収縮の複合機構，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.409-412，1976
- 12) 永松静也：骨材の性質・性能－力学的性質－，コンクリート工学，Vol.16，No.9，pp.18-24，1978
- 13) 田中博一，橋田浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.553-558，2009
- 14) 立松和彦ら：関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.549，pp.1-6，2001.11