

論文 CCU 粉体を混入した低炭素型のコンクリートの品質・施工性に関する検討

田中 寛人*1・神代 泰道*2・井上 裕太*1・並木 憲司*3

要旨: カーボンニュートラルの実現に向け、これまで以上に CO₂ 排出量を削減したコンクリートが求められる。本研究では、低炭素型のコンクリートに CO₂ を吸収・固定した CCU 粉体を混入することで、CO₂ 排出量を大幅に削減したコンクリートの開発を目的とし、プレキャスト製品工場にて、CO₂ 固定量が CO₂ 排出量を上回ったコンクリートの品質と施工性を検討した。その結果、実機ミキサで練混ぜができ、通常のコンクリート製品と同様に施工できることを確認した。また、CCU 粉体の混入の有無に関わらず、結合材水比と圧縮強度の関係は同程度の割合で変化し、中性化速度係数は無混入時の結果から評価できる可能性が示唆された。

キーワード: CCU 粉体, 低炭素型のコンクリート, カーボンネガティブ, 力学的特性, 耐久性

1. はじめに

近年、世界的に地球温暖化対策に関する取り組みが加速しており、地球温暖化に影響を及ぼす温室効果ガス、特に、CO₂ 排出量の削減は、全世界に課せられた重要課題である。我が国においては、2050 年までに温室効果ガスの排出量を全体としてゼロにする、すなわちカーボンニュートラルによる脱炭素社会の実現を目指すことが宣言された。こうした中、コンクリート分野においては、セメント量を大幅に削減した低炭素型のコンクリート^{例えば1)}が開発されているが、今後、これまで以上に CO₂ 排出量を削減したコンクリートが求められる。そこで、本研究では、CO₂ を吸収・固定した CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 粉体に着目し、低炭素型のコンクリートに CCU 粉体を混入することで、CO₂ 排出量をさらに削減するコンクリートの開発を目的とした。

昨年、筆者ら²⁾は既に CCU 粉体 (以下、CP) を低炭素型のコンクリートに細骨材の容積置換 (以下、細骨材置換) で最大 200kg/m³ まで混入し、CP の混入量がコンクリートの品質に及ぼす影響を報告した (以下、前報)。なお、CP は、遠心成形品の製造工場において排出されるスラッジ水に、同工場における蒸気養生の際に発生する排気ガスを吹き込んで生成させた軽質炭酸カルシウムである³⁾。CP の試験結果の一例を表-1 に示す。

本報では、前報より CP の混入量を更に増量し、CO₂ 固定量が CO₂ 排出量を上回る、いわゆるカーボンネガティブを達成した際の品質や施工性を検討した。ここでは、プレキャストコンクリート製品 (以下、コンクリート製品) への適用を考え、プレキャスト製品工場 (以下、工場) で実施した。シリーズ 1 では、室内試験でコンクリートの調合を検討し、シリーズ 2 では、実機試験でカー

テンウォール形状のモックアップ試験体を作製した。

2. シリーズ 1 : 室内試験

2.1 実験計画

室内試験にて CP を混入した低炭素型のコンクリートの調合を検討した。実験計画の概要を表-2 に示す。コンクリートの所要性能は、既に RC 外壁パネルに適用した実績のある低炭素型のコンクリート⁴⁾を参考とし、現場封かん養生の材齢 42~48h の圧縮強度 (以下、脱型時所要強度) を 15N/mm² 以上、設計基準強度を 30N/mm² と

表-1 CP の試験結果の一例

項目		試験値
密度(g/cm ³)		2.51
ブレン比表面積(cm ² /g)		3,240
化学成分 (%)	炭酸カルシウム CaCO ₃	94.1
	酸化マグネシウム MgO	0.16
	二酸化ケイ素 SiO ₂	1.05
	酸化アルミニウム Al ₂ O ₃	0.34
	酸化第二鉄 Fe ₂ O ₃	0.14

表-2 実験計画の概要 (シリーズ 1)

項目	内容
所要性能	脱型時所要強度*1: 15N/mm ² 設計基準強度: 30N/mm ²
コンクリートの種類	(1)W/B40-200: W/B=40%, CP=200kg/m ³ (2)W/B40-250: W/B=40%, CP=250kg/m ³ (3)W/B45-200: W/B=45%, CP=200kg/m ³ (4)W/B45-250: W/B=45%, CP=250kg/m ³ (5)W/B50-200: W/B=50%, CP=200kg/m ³ (6)W/B50-250: W/B=50%, CP=250kg/m ³ ※C: BS=25: 75 (質量比), CP は細骨材置換 C: 早強ポルトランドセメント
コンクリートの品質	(1)フレッシュ性 (2)力学的特性 (圧縮強度) 養生条件: 標準養生, 封かん養生, 簡易断熱養生

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

*3 (株)大林組 東京本店建築事業部 修士(工学) (正会員)

した。なお、脱型時所要強度は、一般的に脱型時に必要とされる圧縮強度⁵⁾12N/mm²に対して安全側に設定した。本工場において、所要性能を満たす低炭素型のコンクリート(C:BS=25:75)は、水結合材比(以下、W/B)が40%、セメントが早強ポルトランドセメントであり、これをベースとしてCPを混入した。なお、早強ポルトランドセメントは蒸気養生を使用せず初期強度を確保するために用いた。また、ベースの標準養生の材齢28日の圧縮強度は、脱型時所要強度を満たす調合設計をしているため、約53N/mm²である。前報²⁾より、CPの混入量に応じて結合材量を低減できる可能性を考慮し、W/Bは40、45、50%の3水準、CPの混入量(細骨材置換)は200、250kg/m³の2水準とした。記号名は「W/B-CPの混入量」とした。また、力学的特性の確認として、養生条件は、「標準養生」(以下、標準)、「封かん養生」(以下、封かん)、「簡易断熱養生」(以下、簡易断熱)の3水準とした。

2.2 実験方法

(1) コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-3に、調合を表-4に示す。各調合のCO₂排出量を表-5より算定した結果、W/B40-200、W/B40-250、W/B45-200、W/B45-250、W/B50-

表-3 コンクリートの使用材料(シリーズ1)

材料	記号	種類と備考
水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm ³)
混和材	BS	高炉スラグ微粉末4000(密度2.89g/cm ³)
	CP	CCU粉体(密度2.51g/cm ³)
細骨材	S	砕砂(表乾密度2.67g/cm ³)
粗骨材	G	砕石2005(硬質砂岩、表乾密度2.68g/cm ³)
化学混和剤	SP	高性能AE減水剤

表-4 コンクリートの調合(シリーズ1)

記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						SP (B×%)
		W	B		CP	S	G	
			C	BS				
W/B40-200	40.0	167	104	314	200	601	915	3.03
W/B40-250	40.0	167	104	314	250	548	915	3.76
W/B45-200	45.0	167	93	279	200	637	915	3.00
W/B45-250	45.0	167	93	279	250	588	915	3.89
W/B50-200	50.0	167	84	251	200	671	915	3.19
W/B50-250	50.0	167	84	251	250	622	915	3.93

目標スランブフロー: 65±10cm, 目標空気量: 4.5±1.5%

表-5 各材料のCO₂排出量・固定量^{3), 6)}

材料	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t)
水	0	-
早強ポルトランドセメント	7.72×10 ²	-
高炉スラグ微粉末	35.6	-
CCU粉体	-	3.90×10 ²
砂・砂利	4.90	-
砕石・砕砂	3.90	-
混和剤	3.50×10 ²	-

200, W/B50-250の順に、23.8, 5.2, 13.7, -4.8, 5.7, -13.1kg-CO₂/m³であり、W/B45-250およびW/B50-250はカーボンネガティブを達成している。

(2) 供試体の概要

二軸強制攪拌型コンクリートミキサ(公称容量60L)を用いて、1調合40Lとして、コンクリートを練り混ぜた。フレッシュ性状を確認して供試体を作製し、各養生方法にて養生した。

(3) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-6に示す。温度履歴はW/B45-200およびW/B45-250のみを対象とし、熱電対を用いて簡易断熱の供試体の中央部で測定した。

2.3 実験結果・考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の結果を表-7に示す。一部所要のスランブフローを満足しなかったが、圧縮強度に及ぼす影響が大きいとされる空気量は目標値を満足していたため、供試体を採取した。スランブフローが70cmを超えた場合、写真-1のように周辺部にペーストが偏在し、材料

表-6 試験項目および試験方法(シリーズ1)

試験・測定項目	試験方法	備考
スランブフロー	JIS A 1150	-
空気量	JIS A 1128	-
コンクリート温度	JIS A 1156	-
圧縮強度	JIS A 1108	標準: 試験材齢7, 28, 91日(n=3) 封かん: 試験材齢24, 48時間, 7, 28日(n=3) 簡易断熱 ¹⁾ : 試験材齢28, 91日(n=3)
温度履歴 ¹⁾	熱電対	簡易断熱(材齢7日まで測定。測定箇所: 供試体の中央部。n=1)

*1: W/B45-200とW/B45-250のみ実施

表-7 フレッシュ性状(シリーズ1)

記号	スランブフロー (cm)	500mmフロー到達時間 (秒)	フローの流動停止時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
W/B40-200	68.0	11.8	64.3	5.0	26
W/B40-250	57.0	52.4	105.2	5.7	27
W/B45-200	69.0	14.6	56.7	5.4	27
W/B45-250	75.0	26.2	300秒超	6.0	26
W/B50-200	75.5	11.7	82.0	4.7	25
W/B50-250	73.0	38.9	174.9	5.5	26

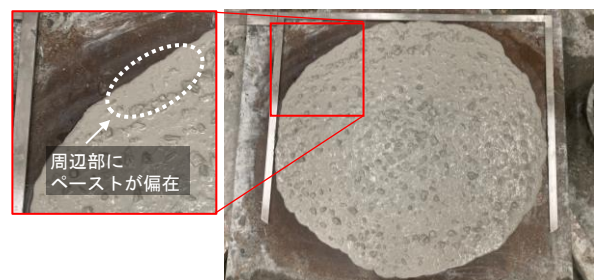


写真-1 スランブフロー (W/B50-250: 73.0cm)

分離気味であることが確認された。また、CPの混入量が増加するほど、粘性が増加し、ハンドリング性が低下することが確認された。

(2) 温度履歴

簡易断熱の温度履歴を図-1に示す。最高温度はW/B45-200が47.2℃、W/B45-250が45.2℃であった。それぞれの温度上昇量は、約20℃、約19℃であり、CPの混入量に関わらず、概ね同程度であった。

(3) 圧縮強度

圧縮強度の結果を図-2に示す。W/BおよびCPの混入量に関わらず、いずれも脱型時所要強度を満足し、標準の材齢28日の圧縮強度が設計基準強度を上回った。また、同じ条件での比較ではないが、W/B40-200および

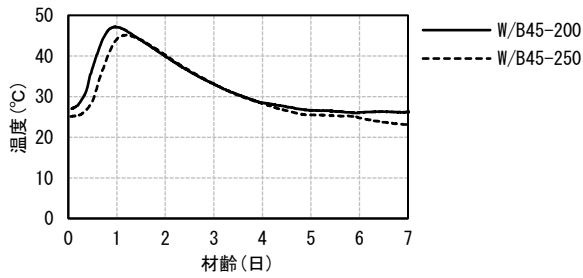
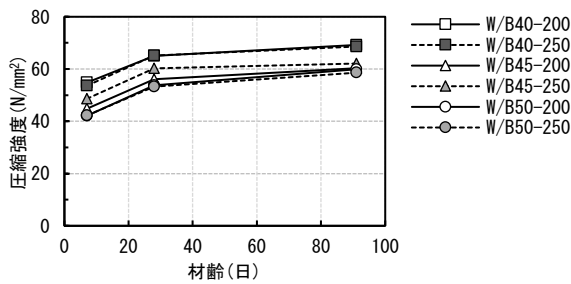
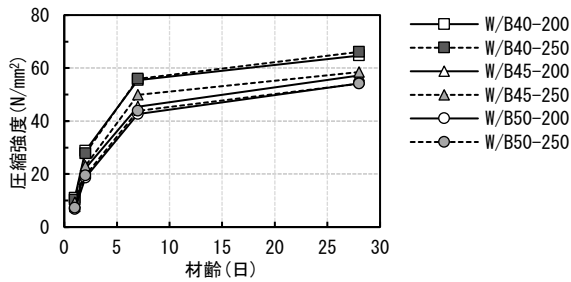


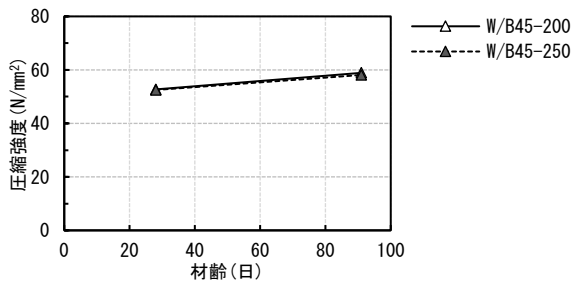
図-1 温度履歴 (シリーズ1)



(1) 標準養生



(2) 封かん養生



(3) 簡易断熱養生

図-2 圧縮強度 (シリーズ1)

W/B40-250の標準の材齢28日の圧縮強度は、ベースより大きくなり、CPの混入による強度増進効果が見込まれた。一方、養生方法に関わらず、CPの混入量の差が各W/Bの圧縮強度に及ぼす影響は確認されなかった。ここで、CPの混入量と圧縮強度比の関係を図-3に示す。図には前報²⁾の結果も示す。なお、本実験のCP無混入時の圧縮強度は、既往の研究⁷⁾の低炭素型のコンクリート(C:普通ポルトランドセメント, C:BS=25:75)の回帰式より得られた値とした。図より、CPの混入量が200kg/m³までの場合は混入量の増加に伴い圧縮強度が増加する傾向を示したが、混入量が200kg/m³を超える場合は強度増進が停滞する傾向があると推察された。なお、セメントや骨材の種別などによる影響も考えられるため、今後も検討が必要である。また、結合材水比と圧縮強度の関係を図-4に示す。図には、既往の研究⁷⁾の低炭素型のコンクリート(C:普通ポルトランドセメント, C:BS=25:75)の結果も示す。CPを混入した際の結合材水比と圧縮強度の関係は、CP無混入時と同程度の割合で変化した。これは、前述のように、CPの混入量が200kg/m³を超えると、W/Bに関わらず、無混入時に比べて概ね同程度の強度増進が生じたためと考えられる。

2.4 調査の検討

実験結果よりモックアップ試験体の調査を検討した。CPの混入量に伴う強度増進効果を考慮し、W/Bは50%とした。これにより、更なるCO₂排出量の削減を図れる。CPの混入量はハンドリング性を考慮し、カーボンネガティブを達成できる最小限の220kg/m³とした。また、材料分離抵抗性の観点から、目標スランプフローは65±10cmから60±10cmに変更した。

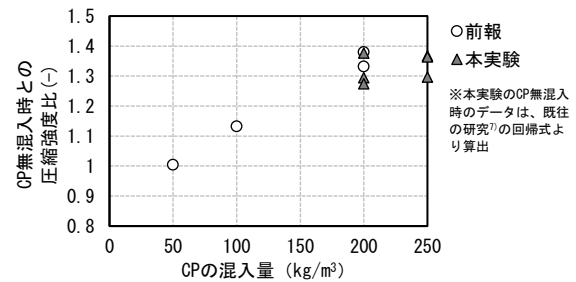


図-3 CPの混入量と圧縮強度比の関係

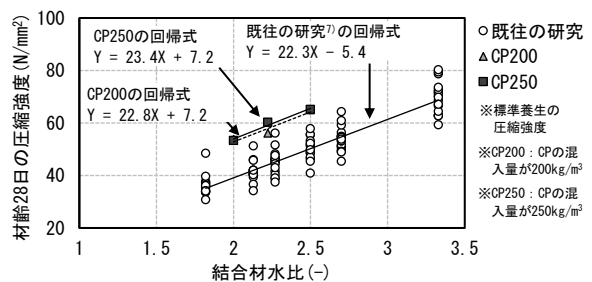


図-4 結合材水比と圧縮強度の関係

3. シリーズ2：実機試験

3.1 実験計画

実機試験にてモックアップ試験体を作製し、品質および施工性について検討した。実験計画の概要を表-8に示す。コンクリートはシリーズ1の検討より、W/Bを50%、CPの混入量を220kg/m³とし、1,800×4,050×厚さ200mmのモックアップ試験体を作製した。力学的特性の確認として、養生条件は「標準」と「現場封かん養生」（以下、現場封かん）、「簡易断熱」の3水準とした。また、耐久性として、中性化と乾燥収縮率を検討した。

3.2 実験方法

(1) コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの調合を表-9に示す。CO₂排出量を表-5より算定した結果、-4.3kg-CO₂/m³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。

(2) モックアップ試験体の概要

モックアップ試験体の概要を図-5に示す。水平に寝かせた状態で打ち込み、打ち込み後は打ち込み面を養生して材齢2日に脱型し、建て起こした状態で養生した。

(3) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-10に示す。各試験の供試体は1バッチ目から採取した。なお、バッチ間の標準の材齢28日の圧縮強度を比較するため、2バッチ目からも標準の材齢28日用の供試体を採取した。

3.3 実験結果・考察

(1) モックアップ試験体の作製

工場の実機ミキサ（二軸強制練りミキサ、公称容量1.67m³）にて2バッチ（1バッチあたり0.9m³）に分けてコンクリートを練り混ぜた。2バッチとも、材料を一括投入して約6分間練り混ぜた後、ミキサ内のカメラにて流動性を

確認し、再び1分間練り混ぜた。CPの混入により、一般的なコンクリートに比べて練混ぜ時間が長くなったが、問題なく練り混ぜることができた。また、粘性は高いものの、ミキサからバケットへの排出等には問題はなかった。

コンクリートのフレッシュ性状を表-11と写真-2に示す。2バッチとも所要のフレッシュ性状が得られ、材料分離は確認されなかった。

モックアップ試験体への打込みはバケットにて行った。打込みは、1バッチ毎に行い、層ごとに内部振動機を用いて締め固めた。打込みに要した時間は1バッチあたり約4分であり、フレッシュ性状の測定時からの変化は確認されなかった。コンクリートは大きな粘性を有していたが、バケットからスムーズに落ち、自己充填性を十分に発揮した（写真-3）。また、締め固め作業においては気泡

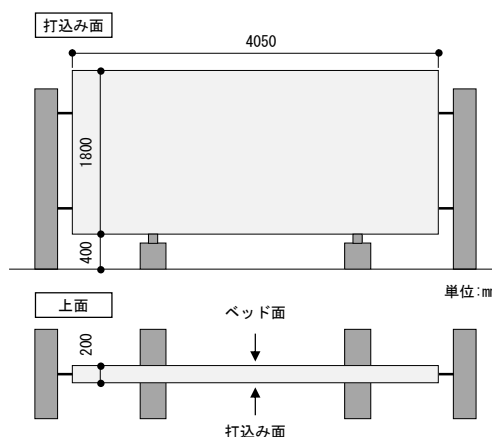


図-5 モックアップ試験体の概要図

表-8 実験計画の概要（シリーズ2）

項目	内容
モックアップ試験体	寸法：1,800×4,050×厚さ200mm 配筋：D10@200（ダブル）、かぶり厚さ：40mm
コンクリートの種類	W/B=50%、C：BS=25：75（質量比） 脱型時所要強度：15N/mm ² 設計基準強度：30N/mm ² CPの混入量（細骨材置換）：220kg/m ³
コンクリートの品質	(1)フレッシュ性状 (2)力学的特性（圧縮強度、ヤング係数） 養生条件：標準養生、現場封かん養生、簡易断熱養生 (3)耐久性（中性化、乾燥収縮率）

表-9 コンクリートの調合（シリーズ2）

W/B (%)	単位量(kg/m ³)						SP ^{*1} (B×%)
	W	C	BS	CP	S	G	
50.0	163	82	245	220	668	915	2.89

目標スランブフロー：60±10cm、目標空気量：4.5±1.5%
使用材料は表-2と同じ。なお、CPの密度を2.46g/cm³に変更（シリーズ1とは異なるロットを使用したことに伴う試験値の変更）。

*1：SPの添加量は2バッチの平均値

表-10 試験項目および試験方法（シリーズ2）

試験・測定項目	試験方法	備考
スランブフロー	JIS A 1150	—
空気量	JIS A 1128	—
コンクリート温度	JIS A 1156	—
圧縮強度 ^{*1}	JIS A 1108	標準：試験材齢7, 28, 91日 現場封かん：試験材齢24, 48時間, 7, 28, 91日 簡易断熱：試験材齢28, 56, 91日
ヤング係数 ^{*1}	JIS A 1149	標準：試験材齢28 ^{*2} , 91日 現場封かん：試験材齢28, 91日 簡易断熱：試験材齢28, 91日
温度履歴	熱電対	簡易断熱（材齢7日まで測定。測定箇所：供試体の中央部。n=1）
促進中性化試験 ^{*1}	JIS A 1153	促進期間：1, 2, 4, 8, 14, 26週
乾燥収縮率 ^{*1}	JIS A 1129-2	乾燥期間：1, 4, 8, 13, 26週

*1：n=3

*2：2バッチ分測定

表-11 フレッシュ性状（シリーズ2）

バッチ	スランブフロー (cm)	500mmフロー到達時間 (秒)	フローの流動停止時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
1	66.5	14.1	76.3	4.2	23
2	55.0	22.5	54.3	3.6	23

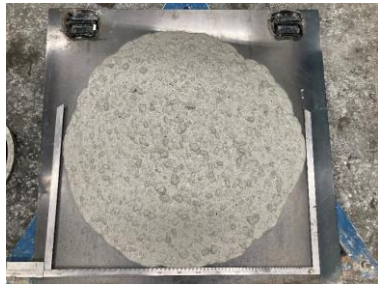


写真-2 スランプフロー
(1 バッチ目)



写真-3 打込み状況

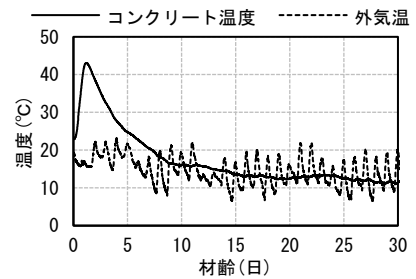


図-6 温度履歴 (シリーズ 2)



(1) 打込み面



(2) ベッド面

写真-4 建て起こした後のモックアップ試験体の外観

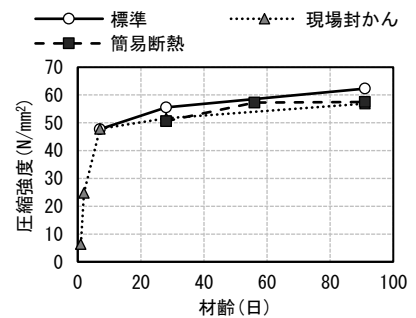


図-7 圧縮強度 (シリーズ 2)

の発生が多く見られ、巻込み空気を適切に排除できたと考える。材料分離もなく、打込み作業はいずれも通常のコンクリート製品通り実施できた。天端面の仕上げ作業完了までには1バッチ目の注水から約9時間を要したが、これは使用した化学混和剤と表面養生剤の作用と考えられる。

(2) 仕上がり状況

現場封かんの材齢 48 時間の圧縮強度が 24.8N/mm² であり、脱型時所要強度を満足したため、脱型を行った。脱型、吊上げの作業は通常のコンクリート製品と同様に行えた。目視できる欠けなどの破損は発生せず、両面とも充填不良や目立ったピンホールなどは確認されなかった。建て起こした状態でのモックアップ試験体の外観を写真-4 に示す。鋼製型枠と接していた面（ベッド面）では高炉スラグ微粉末を多量に混入したコンクリート特有の緑色を呈したが、材齢 9 日程度で白っぽい灰色に色むらなく変化した。建て起こした状態で約 1 年間の経過観察を行ったが、目立ったひび割れはなく、反りなども確認されなかった。

(3) 温度履歴

簡易断熱の温度履歴を図-6 に示す。おおよそ材齢 30h で最高温度 43.1℃に達した。

(4) 圧縮強度

圧縮強度の結果を図-7 に示す。標準の材齢 28 日の圧縮強度は 55.5N/mm² であり、設計基準強度 30N/mm² を満足した。また、本結果はシリーズ 1 の W/B=50% (CP の混入量=200~250kg/m³) の同材齢の結果と同程度であっ

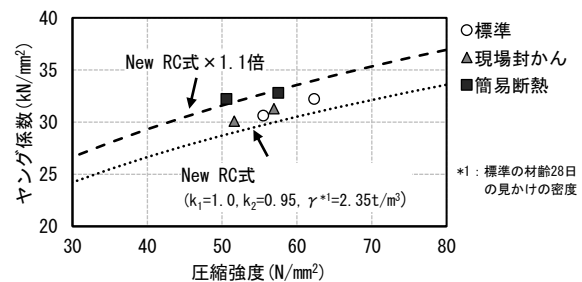


図-8 圧縮強度とヤング係数の関係

た。バッチ間の標準の材齢 28 日の圧縮強度は、1 バッチ目から順に、55.5, 55.1N/mm² となり、両者の差はほとんどなかった。また、標準の材齢 28 日と簡易断熱の材齢 91 日の圧縮強度の差は-2.0N/mm² となった。

(5) ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-8 に示す。図には、New RC 式の推定値も示した。前報²⁾と同様、カーボンネガティブを達成した場合でも、養生方法に関わらず、ヤング係数は圧縮強度の増加に伴い増加する傾向を示した。

(6) 中性化

促進中性化試験の結果を図-9 に示す。促進環境下における中性化速度係数は 3.35mm/√週であり、濃度補正 (CO₂濃度 (大気中) : 0.05%, CO₂濃度 (促進環境下) : 5%) した際は 0.33 mm/√週 (2.41mm/√年) であった。√t 則によって 100 年後の中性化深さを予想すると 30mm 以下となるため、適切なかぶり厚さを確保することで中性化による劣化を防止できることが確認された。また、圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-10 に示す。なお、図には、既往の研究¹⁾の低炭素型のコンクリート (結合

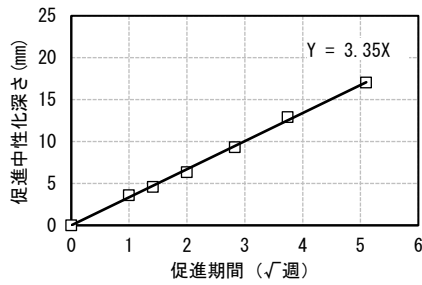


図-9 中性化促進試験の結果

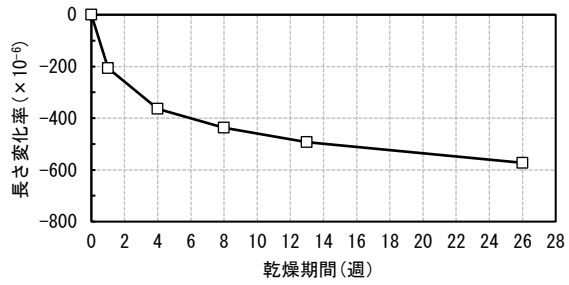


図-11 乾燥収縮率

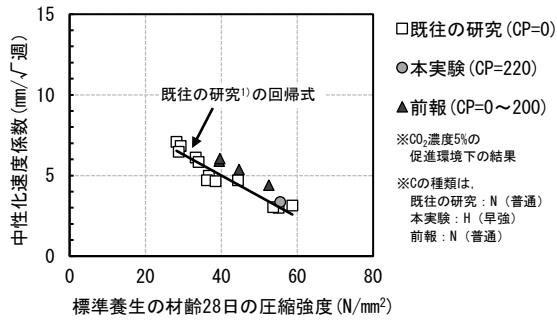


図-10 圧縮強度と中性化速度係数の関係

材中のCの混合割合が25%)と前報²⁾の結果も示す。図より、CPを混入した場合においても、結合材中のCの混合割合が同じであれば、セメントの種類に関わらず、概ね同程度の値を示すことが確認された。これより、CPを混入した場合の中性化速度係数は、CP無混入時の結果から評価できる可能性が示唆された。

(7) 乾燥収縮率

長さ変化率の結果を図-11に示す。長さ変化率は、乾燥期間26週(182日)で 573×10^{-6} となり、一般的に有害なひび割れが発生しない指標とされる 800×10^{-6} 以下を満足した。

4. まとめ

低炭素型のコンクリートへのCCU粉体(CP)の混入量を更に増量し、CO₂固定量がCO₂排出量を上回る、いわゆるカーボンネガティブを達成したコンクリートの品質や施工性などを確認した。本実験で得られた結果を以下に示す。

- (1) CPの混入量が0~200kg/m³の場合は混入量の増加に伴い圧縮強度が増加し、200~250kg/m³の場合は増加しない傾向を示した。また、CPを混入した際の結合材水比と圧縮強度の関係は、CP無混入時と同程度の割合で変化する可能性が示唆された。
- (2) CPを混入した場合の中性化速度係数は、結合材中のセメントの混合割合が同じであれば、セメントの

種類に関わらず、CP無混入時の結果から評価できる可能性が示唆された。

- (3) カーボンネガティブを達成したコンクリートでも、通常のコンクリート製品と同様に、実機ミキサでの練混ぜや施工が可能であり、コンクリート製品への適用も問題ないと確認された。

謝辞

本実験の実施にあたり、シーカ・ジャパン(株)、工場の関係者各位に多大なるご協力を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小林利充, 溝渕麻子, 近松竜一, 一瀬賢一: 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
- 2) 田中寛人, 神代泰道, 井上裕太, 並木憲司: 低炭素型のコンクリートにCCU粉体を混入した際の品質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1228-1233, 2023
- 3) 佐々木猛, 八木利之: エコタンカル(軽質炭酸カルシウム)とその可能性, セメント・コンクリート, No.900, pp.58-62, 2022.2
- 4) 神代泰道, 小林利充, 都築正則, 松永成雄: 大林組技術研究所新実験棟に適用したコンクリート技術, コンクリート工学, Vol.52, No.8, pp.666-671, 2014.8
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説10プレキャスト鉄筋コンクリート工事, p.81, 2013
- 6) 日本建築学会: 高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造の設計・施工指針(案)・同解説, p.165, 2017
- 7) 小林利充, 並木憲司, 溝渕麻子: 混和材を高含有したコンクリートの強度性状に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.83-88, 2019