

報告 CCU 粉体を混入した低炭素型のコンクリートの実構造物への適用

田中 寛人*1・神代 泰道*2・並木 憲司*3・井上 裕太*1

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。高炉スラグ微粉末を高含有して CO₂ 排出量を削減した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、カーボンネガティブを実現できるコンクリートを開発し、長さ 40m の打放し仕上げの壁状部材に初適用した。高流動コンクリートとすることで、コンクリートポンプを用いて閉塞なく打ち込むことができた。また、セパレータ周りの沈降ひび割れは確認されず、仕上がりも良好だった。本適用により、同じ呼び強度の普通コンクリートを用いた場合に比べて、CO₂ 排出量を約 106%削減できた。

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, 適用事例, 力学特性, 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、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¹⁾。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 2)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。

カーボンニュートラル社会の実現に向け、筆者らは、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 (以下、CCN) を開発し、実構造物への適用に向け、コンクリートの品質や施工性などを実験的に検討してきた^(例えば 3),4)。

今回、カーボンネガティブを達成した CCN を、関東圏にある工場の建替工事にて適用した。適用部位は外構工事の一部として構築する長さ約 40m の打放し仕上げの壁状部材 (以下、壁状部材) (非構造部材) であり、コンクリートポンプを用いて打ち込む計画とした。本報では、供給予定のレディーミクストコンクリート工場 (以下、生コン工場) における試し練りの結果および CCN を適用した結果について報告する。

2. 試し練り

適用部位に求められる呼び強度 30 を満足する調査を検討するため、供給予定の生コン工場の試験室にて、CCN の試し練りを行った。今回使用した CCU 粉体 (以下、C

P) 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み、乾燥させて生成された軽質炭酸カルシウムである⁵⁾。CP の試験結果の一例を表-1 に示す。CO₂ 固定量は 390kg-CO₂/t と試算されている⁵⁾。

2.1 計画の概要

(1) 実験計画

実験計画の概要を表-2 に示す。本生コン工場は、結合材として普通ポルトランドセメントの 75% (質量比) を高炉スラグ微粉末に置換した低炭素型のコンクリート (CP 無混入, 以下 CC) の出荷実績を有しており、水結合材比 (以下、W/B) 48% は呼び強度 30 に相当する。CCN は CC に対して細骨材の容積置換 (以下、細骨材置換)

表-1 CP の試験結果の一例

項目		試験値
密度(g/cm ³)		2.52
ブレン比表面積(cm ² /g)		2,760
化学成分 (%)	炭酸カルシウム CaCO ₃	95.8
	酸化マグネシウム MgO	0.10
	二酸化ケイ素 SiO ₂	0.56
	酸化アルミニウム Al ₂ O ₃	0.17
	酸化第二鉄 Fe ₂ O ₃	0.09

表-2 実験計画の概要

項目	内容
コンクリートの種類	(1)W/B48-0 : W/B=48%, CP=0kg/m ³
	(2)W/B48-250 : W/B=48%, CP=250kg/m ³
	(3)W/B55-250 : W/B=55%, CP=250kg/m ³
	(4)W/B60-250 : W/B=60%, CP=250kg/m ³
	※C : BS=25 : 75 (質量比), CP は細骨材置換
コンクリートの品質	(1)フレッシュ性状 (スランプ, スランプフロー, 空気量, コンクリート温度, 単位容積質量)
	(2)力学的特性 (圧縮強度) 養生条件: 標準養生, 寸法: φ100×200mm

*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)

として CP を混入したものである。CP の混入量の増加に伴い圧縮強度が増大するため、結合材の減少により CO₂ 排出量の更なる削減に繋がることが期待できる³⁾ 4)。そこで、CCN の W/B は 48, 55, 60% の 3 水準とした。W/B=48% においても使用材料によるカーボンネガティブを達成できるよう、CP の混入量はいずれも 250kg/m³ とした。CP の混入量の増加に伴い粘性が高くなる³⁾ ため、CCN は目標スランプフロー 50±7.5cm とした。記号名は「W/B-CP の混入量」とし、CCN は W/B が小さい順に「W/B48-250」、「W/B55-250」、「W/B60-250」、ベースの CC は「W/B48-0」とした。

(2) 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。W/B48-250, W/B55-250, W/B60-250 の CO₂ 排出量を表-5 より算定した結果、W/B48-250 から順に、-6.7, -17.4, -23.0kg-CO₂/m³ であり、いずれも使用材料によるカーボンネガティブを達成していることを確認した。なお、各コンクリートの CO₂ 排出量の算出は各材料の単位量×CO₂ 排出量・固定量とした。

(3) 供試体の概要

二軸強制練り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。所要のフレッシュ性状であることを確認して供試体を作製した。養生は標準養生とし、脱型の材齢は 1 日とした。

(4) 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。W/B55-250 のみ、経時変化（注水完了からの経過時間 30, 60 分）を確認した。

2.2 実験結果・考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-7 に示す。いずれも所要のフレッシュ性状が得られ、材料分離も確認されず、ハンドリング性も良好であった。練混ぜ時間において、CP 無混入の W/B48-0 は 2 分であったが、CP を混入した場合、W/B48-250 では 10 分、W/B55-250 と W/B60-250 では 8 分と長い練混ぜ時間を要した。なお、練混ぜ時間は目視観察によって各材料が均一に分散したと考えられた時間とした。また、W/B55-250 において、経過時間 30 分までは、所要のフレッシュ性状を満足したが、60 分後では、スランプフローが大きく低下した。運搬時間が長く、フレッシュ性状を更に長時間保持する必要がある場合には、化学混和剤の保持成分の割合を高くするなどの検討が必要であることが分かった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度を図-1 に示す。CP を混入した場合、W/B に関わらず、いずれも材齢 28 日で圧縮強度が 30N/mm² を上回り、CP 無混入の W/B48-0 の 1.3 倍以上となる値を示した。

表-3 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類と備考
水	W	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/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 2.46g/cm ³ ）
細骨材	S1	砕砂（石灰砕砂，表乾密度 2.62g/cm ³ ）
	S2	砂（山砂，表乾密度 2.60g/cm ³ ）
粗骨材	G1	砕石 2005（石灰岩，表乾密度 2.69g/cm ³ ）
	G2	砕石 2005（硬質砂岩，表乾密度 2.64g/cm ³ ）
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤

表-4 コンクリートの調合（試し練り）

記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)								SP (B×%)
		W	B		CP	S1	S2	G1	G2	
			C	BS						
W/B48-0 ^{*1}	48.0	175	91	273	—	343	512	355	523	0.60
W/B48-250 ^{*2}	48.0	175	91	273	250	236	354	355	523	3.37
W/B55-250 ^{*2}	55.0	175	79	239	250	254	380	352	517	3.48
W/B60-250 ^{*2}	60.0	175	73	218	250	275	408	342	504	3.53

*1：目標スランプ：21±2cm，目標空気量：4.5±1.5%

*2：目標スランプフロー：50±7.5cm，目標空気量：4.5±1.5%

表-5 各材料の CO₂ 排出量・固定量^{5), 6)}

材料	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t)
水	0	—
普通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	—

表-6 試験項目と試験方法（試し練り）

試験・測定項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A 1101	—
スランプフロー	JIS A 1150	—
空気量	JIS A 1128	—
コンクリート温度	JIS A 1156	—
単位容積質量	JIS A 1116	—
圧縮強度	JIS A 1108	標準：材齢 1, 7, 28 日

表-7 フレッシュ性状（試し練り）

記号	経過時間 (分)	SL (cm)	SF (cm)	T1 (秒)	T2 (秒)	空気量 (%)	C.T. (°C)	単位容積質量 (kg/m ³)
W/B48-0	—	23.0	—	—	—	5.3	23	2256
W/B48-250	—	—	51.5	—	26.9	4.2	26	2277
	—	—	53.0	13.8	28.8	4.1	26	2278
W/B55-250	30	—	48.0	—	21.2	3.6	25	2287
	60	16.5	26.5	—	9.7	3.7	24	2285
W/B60-250	—	—	47.5	—	17.9	4.3	25	2268

SL：スランプ，SF：スランプフロー，T1：50cm フロー到達時間

T2：フローの流動停止時間，C.T.：コンクリート温度

結合材水比と圧縮強度の関係を図-2 に示す。なお、図には、既往の研究⁷⁾ の CC（本試し練りと同様の結合材の混

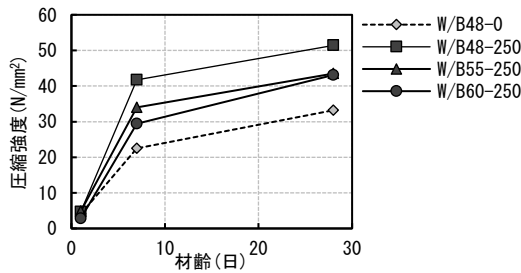


図-1 圧縮強度（試し練り）

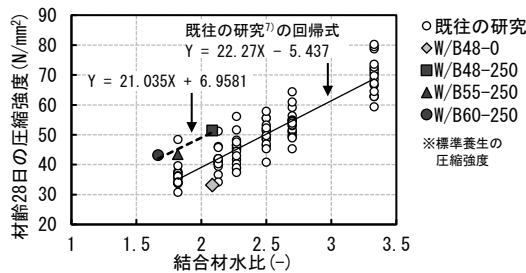


図-2 結合材水比と圧縮強度の関係

合割合（C：BS=25：75）の結果も併せて示す。図-2より、CPを250kg/m³混入した際の結合材水比と圧縮強度の関係は、同じ結合材水比であれば、無混入時よりも圧縮強度は10N/mm²程度大きくなり、CPの混入量に合わせてW/Bを大きくできる可能性が示唆された。

2.3 調合の決定

試し練りの結果より、CPを混入した場合、練混ぜ時間は長くなるものの、いずれも所要のフレッシュ性状を満足し、ハンドリングも良好であった。また、圧縮強度は目標値である呼び強度の強度値30N/mm²を満足した。以上より、CO₂排出量抑制や施工性の観点から実適用のCCNの調合は、W/Bを55%、CP混入量を250kg/m³とした。本調合におけるCO₂排出量は-17.4kg-CO₂/m³となり、呼び強度30の結合材として普通ポルトランドセメントを100%使用するスランプ管理のコンクリート（CO₂排出量：261.5kg-CO₂/m³）に比べて、CO₂排出量を約106%削減できる。

3. 壁状部材への打込み

2023年3月、カーボンネガティブを達成したCCNを長さ約40mの壁状部材に適用した。コンクリートの調合を表-8に示す。打込みに併せて、モックアップ試験体（以下、壁試験体）や供試体も作製し、コンクリートの品質を確認した。

3.1 壁状部材および壁試験体の概要

壁状部材の概要を表-9に示す。寸法は厚さ180mm×長さ39,600mm×高さ1,500mm、配筋は縦筋D13@200、横筋D10@150（シングル）、最小かぶり厚さは60mmである。CPを混入した場合、自己収縮ひずみが大きくなる⁸⁾ことを考慮し、全長約40mに対し、約3m間隔で誘発目地を設

表-8 コンクリートの調合（壁状部材への打込み）

W/B (%)	単位量(kg/m ³)							SP ^{*1} (B×%)	
	W	B		CP	S1	S2	G1		G2
		C	BS						
55.0	175	79	239	250	259	385	352	517	3.75

目標スランプフロー：50±7.5cm、目標空気量：4.5±1.5%
 使用材料は表-3と同じ。なお、CPの密度を2.55g/cm³に変更。

*1：7バッチ分の平均値

表-9 適用部位の概要

項目	内容
適用部位	外構工事の一部として構築する壁状部材（非構造部材）
規模	寸法：厚さ180mm×長さ39,600mm×高さ1,500mm 打込み量：約11m ³ （出荷量：14m ³ ） 約3m間隔で誘発目地、中央部に伸縮目地を設置 シングル配筋（縦筋 D13@200、横筋 D10@150） 最小かぶり厚さ60mm
打込み時期	2023年3月

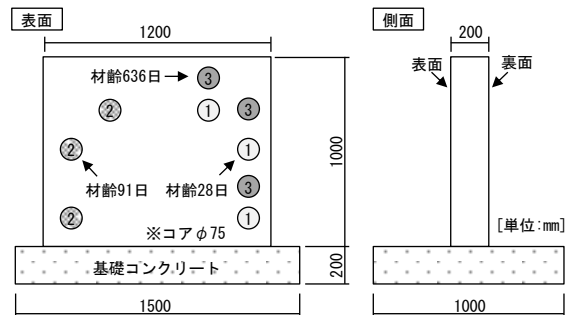


図-3 壁試験体の概要図

表-10 試験項目と試験方法（壁状部材への打込み）

試験・測定項目	試験方法	備考
スランプフロー	JIS A 1150	—
空気量	JIS A 1128	—
コンクリート温度	JIS A 1156	—
単位容積質量	JIS A 1116	—
圧縮強度	JIS A 1108	標準：材齢7, 28, 91日 現場封かん：材齢3, 7, 28, 91日 簡易断熱：材齢7, 28, 91日 コア供試体：材齢28, 91, 636日
ヤング係数	JIS A 1149	標準：材齢28, 91日 現場封かん：材齢28, 91日 簡易断熱：材齢28, 91日 コア供試体：材齢28, 91, 636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	JIS A 1153	促進期間：1, 2, 4, 8, 13, 26週
中性化深さ	JIS A 1152	コア供試体：材齢28, 636日

けた。誘発目地は、塩ビパイプを内蔵し、断面欠損部を有したものとした。

壁試験体の概要を図-3に示す。寸法は厚さ200mm×長さ1,200mm×高さ1,000mmである。所定の材齢時に、壁試験体から3箇所コア抜きし、φ75mmのコア供試体を作製した。また、打込み時に供試体も併せて作製し、力学

特性（圧縮強度とヤング係数）と耐久性（中性化）を確認した。力学特性の養生条件は、「標準養生」（以下、標準）、「現場封かん養生」（以下、現場封かん）、「簡易断熱養生」（以下、簡易断熱）の計3水準とした。

試験項目および試験方法を表-10に示す。壁試験体から採取したコア供試体の圧縮強度試験は、 $\phi 75 \times 150\text{mm}$ に整形して実施し、中性化深さは、整形時にカットされる両端部（ $\phi 75 \times 25\text{mm}$ が2箇所）を割裂して測定した。

3.2 練混ぜ状況および打込み状況

生コン工場の実機ミキサ（二軸強制練りミキサ、公称容量 3.25m^3 ）にて、練混ぜ量は1バッチ 2m^3 とし、合計7バッチ練り混ぜた。モニタにてミキサの負荷電流およびミキサの内部状況を確認し、練混ぜ時間は8分程度とした。なお、実機ミキサの方が練混ぜ性能が高いため、試し練り（室内試験）より練混ぜ時間が短くなることを想定し

たが、粉体量が多いことから、各材料が均一に混ぜるために必要な時間は室内試験と同程度の練混ぜ時間が必要と判断した。トラックアジテータに 2m^3 ごと積み込み、打込み場所へ運搬し、1車ごとにフレッシュ性状を確認した。なお、運搬時間は30分以内であった。受入れ時のコンクリートのフレッシュ性状を表-11および写真-1に示す。いずれ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。

壁試験体への打込みは1台目のトラックアジテータのシュートにて行い、層ごとに内部振動機を用いて締め固めた。打込みは問題なく行うことができた。壁状部材への打込みはコンクリートポンプにて行った（写真-2）。コンクリートの側圧を考慮し、打込みは4層の回し打ちとした。層ごとに内部振動機を用いて締め固めた。粘性が比較的高い高流動コンクリートであることを考慮し、締め固め時間は10秒間を目安とした。目視上のコンクリートの粘性は比較的高かったが、閉塞も生じず、打込みできた。天端の仕上げ処理は、通常の高強度コンクリートと同様の作業性であった。

3.3 仕上がり状況

壁状部材および壁試験体のせき板の解体は材齢7日とした。なお、材齢7日の現場封かんの供試体の圧縮強度は 34.4N/mm^2 であった。また、材齢28日の標準の圧縮強度は 54.9N/mm^2 であり、呼び強度30を十分に満足した。なお、試し練り時より圧縮強度が大きくなったのは、実機ミキ

表-11 フレッシュ性状（壁状部材と壁試験体）

車両番号	SF (cm)	T1 (秒)	T2 (秒)	空気量 (%)	C.T. (°C)	単位容積質量 (kg/m^3)
1	54.5	7.1	20.6	4.5	19	2282
2	52.0	10.6	22.3	5.1	18	2263
3	51.0	9.3	18.8	4.5	18	2269
4	57.5	9.3	31.3	5.5	16	2242
5	55.5	7.9	25.6	5.8	19	2239
6	53.5	9.2	21.6	3.7	19	2281
7	55.0	9.8	21.2	4.5	20	2265

SF：スランプフロー、T1：50cmフロー到達時間
T2：フローの流動停止時間、C.T.：コンクリート温度



写真-1 スランプフロー（1車両目）



写真-3 壁状部材の外観



写真-2 打込み状況

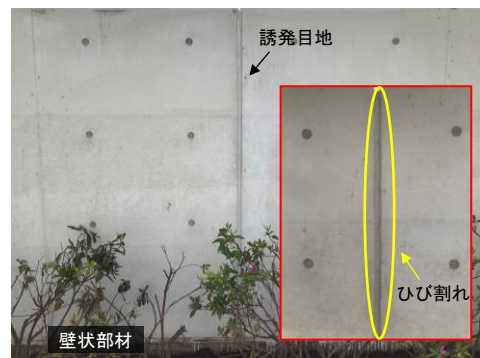


写真-4 誘発目地におけるひび割れ発生状況

サによる練混ぜ性能の向上などが考えられる。壁状部材の外観を写真-3に示す。ひび割れは誘発目地に集中しており(写真-4)、豆板やセパレータ周りの沈降ひび割れは確認されず、仕上がりも良好であった。

3.4 硬化性状

(1) 温度履歴

簡易断熱の温度履歴および外気温を図-4に示す。簡易断熱において、材齢38hで最高温度37.4°Cに達した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図-5に示す。材齢28日以降、養生方法に関わらず、いずれも同程度の圧縮強度を示した。壁試験体から所定の材齢に採取したコア供試体は、材齢28日で50.7N/mm²、材齢91日で57.4N/mm²、材齢636日で64.1N/mm²となり、構造体コンクリート強度も問題ないことが確認された。また、標準の材齢28日とコア供試体の材齢91日の圧縮強度の差は-2.5N/mm²、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-0.6N/mm²であった。

(3) ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-6に示す。なお、図にはNew RC式による推定値を示した。CCNにおいても、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。この傾向は、既往の実験結果^{3) 4)}と同様であった。

(4) 中性化

促進中性化試験の結果を図-7に示す。促進環境下における中性化速度係数は4.25mm/√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0.43mm/√週であった。また、コア供試体より得られた中性化速度係数(実環境下)は0.71mm/√週であり(図-8)、促進環境下より大きくなった。これは、壁試験体のせき板の解体は材齢7日であり、JIS A 1153に規定される供試体の養生条件と比較して短期間であるため、乾燥の影響によって表層部分に比較的連結性の高い空隙構造が形成されたことなどが考えられる。なお、本実験の曝露期間は約2年と短いことから、今後も継続して試験結果を蓄積する。また、現段階における実環境下の中性化速度係数を用いて、√t則より100年後の中性化深さを予想すると50mm程度となり、壁状部材のかぶり厚さより十分に小さいことから、打放し仕上げとしても、中性化による劣化を防止できることが確認された。

3.5 CO₂排出量

今回のコンクリートのCO₂排出量は-17.3kg-CO₂/m³であり、呼び強度30の普通コンクリート(CO₂排出量:261.5kg-CO₂/m³)に比べて、CO₂排出量を約106%削減した。今回の出荷量14m³に対して、普通コンクリートに対するCO₂排出量の削減効果は、約3.8tであった。

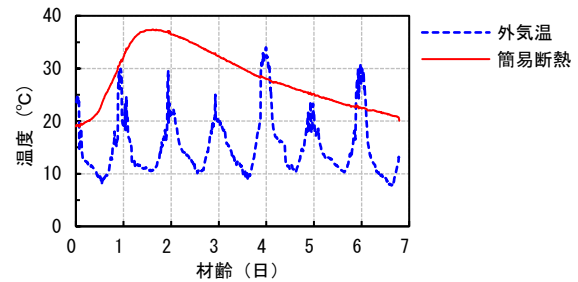


図-4 簡易断熱の温度履歴および外気温

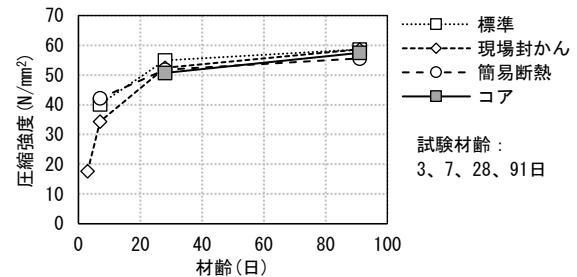


図-5 圧縮強度(壁状部材と壁試験体)

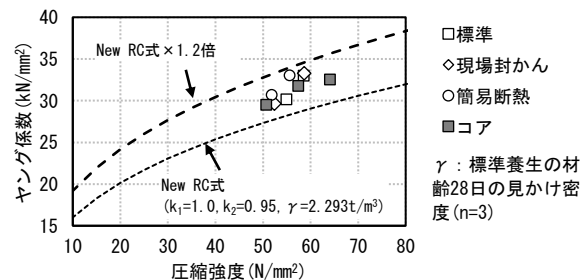


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

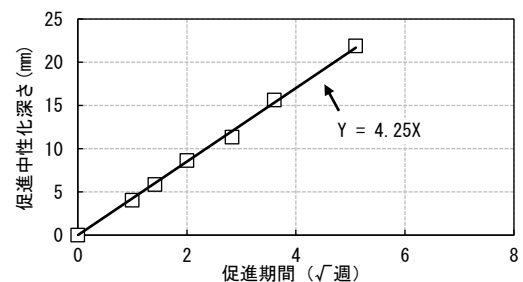


図-7 促進中性化試験の結果

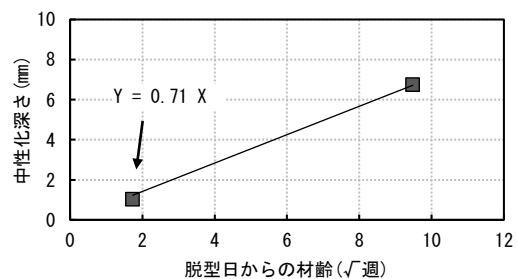


図-8 コア供試体の中性化深さ

4. まとめ

本報では、カーボンネガティブを達成した低炭素型の

コンクリートをコンクリート打放し仕上げの壁状部材へ適用した結果を示した。得られた結果を以下に示す。

- (1) W/B=48～60%においても、CPの混入による強度増進効果が確認された。この結果を基に、結合材量を減じて、実適用のCCNの調合を決定した。
- (2) コンクリートポンプを用いてカーボンネガティブを達成した低炭素型のコンクリートを打ち込むことが可能であった。また、セパレータ周りの沈降ひび割れは確認されず、仕上がりも良好であった。
- (3) コンクリートは所定の強度を十分に満足し、中性化も所要の耐久性を有していることを確認した。
- (4) 適用したコンクリートのCO₂排出量を算出した結果、同じ呼び強度の普通コンクリートに対して、約106%のCO₂排出量を削減できた。

謝辞

本実験の実施にあたり、生コン工場、シーカ・ジャパン（株）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) 総理官邸：第203回国会・菅内閣総理大臣所信表明演説，2020.10

- 2) 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
- 3) 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
- 4) 田中寛人，神代泰道，井上裕太，並木憲司：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1393-1398，2024
- 5) 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
- 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
- 8) 神代泰道，田中寛人，井上裕太，並木憲司：CCU粉体を用いた低炭素型のコンクリートに関する実験的研究 その4，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.529-530，2024