カーボンネガティブを実現した埋設型枠の開発と施工実績

鹿島建設(株)　正会員　○山野泰明　正会員　取違　剛
正会員　関　健吾　正会員　藤井広志
正会員　森本幸二
日本コンクリート工業(株)　正会員　八木利之　正会員　佐々木　猛

１．はじめに

日本は 2050 年に温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指しており，その実現に向けた技術開発を促進することを目的として，グリーンイノベーション基金（以下，GI 基金）が造成された．建設産業において主要建材であるコンクリートは，温室効果ガスの一種である CO_2 を固定化するポテンシャルが高く，その生成物が安定していることから，CO_2 削減に寄与する建材として期待され，GI 基金においてコンクリート・セメント分野におけるカーボンリサイクルに関する技術開発が進められている[1)]。当社は，この「CO_2 を用いたコンクリート等製造技術開発プロジェクト」のもと，コンソーシアム「CUCO」[2)]を結成し，コンクリートにおける CO_2 削減・固定技術の高度化や組合せによって CO_2 を大量に削減する革新的な技術の開発と早期の社会実装を目指している。筆者らは，CO_2 と反応して硬化する混和材（ダイカルシウムシリケート γ 相（γ-2CaO・SiO_2），以下 γ-C_2S，**写真-1 左**）をコンクリートに練り混ぜ，CO_2 雰囲気下で炭酸化養生することによって大量の CO_2 をコンクリートに固定させる「CO_2-SUICOM」の技術[3)]と，プレキャスト工場で排出される高アルカリのスラッジ水に CO_2 を吹き込んで CO_2 を固定させた軽質炭酸カルシウム「エコタンカル」（**写真-1 右**）の技術[4)]を有しており，GI 基金にて，これらの技術を組み合わせることで，CO_2 削減量のさらなる増大を試みた。本稿では埋設型枠を対象とし，「CO_2-SUICOM」と「エコタンカル」を組み合わせた埋設型枠「CUCO-SUICOM 型枠」の開発，ならびに現場への適用事例について報告する。

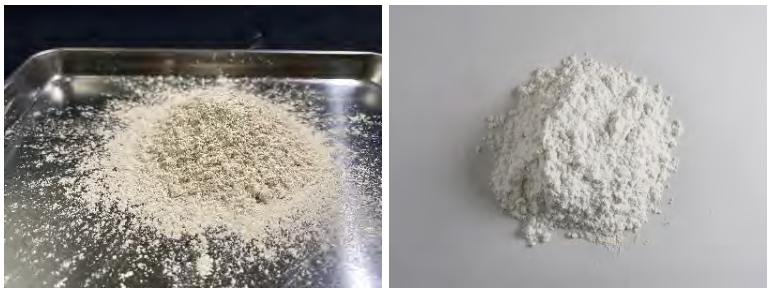


写真-1　γ-C_2S（左）とエコタンカル（右）

２．工事概要と適用箇所

CUCO-SUICOM 型枠の適用先としたのは，洪水対策として新たに 5.13km の放水路トンネル（本坑）を構築するもののうち，呑口側 2.85km を構築する工事である（**写真-2**）。同トンネルの構築に際し，本坑への資材運搬用として 227m の作業坑が設けられており，この作業坑は最終的に管理用通路として残置されることとなった。本坑と管理用通路の交差部は，管理用通路に水が浸入しないよう防水扉が設けられている（**図-1**）。放水時には，防水扉に水圧がかかるため，**図-1** の断面図に示すような反力壁が設けられている。当該管理



写真-2　工事位置図

キーワード　埋設型枠，環境配慮型コンクリート，炭酸化，γ-C_2S，軽質炭酸カルシウム
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設(株)技術研究所　TEL042-485-1111

用通路は一般の人が見学することもあることから建設業における環境配慮の取り組みの PR の一環として，当断面における内壁に CO_2 排出量がネガティブな CUCO-SUICOM 型枠を適用することとなった。

３．CUCO-SUICOM 型枠

(1) CUCO-SUICOM 型枠の緒元

CUCO-SUICOM 型枠の寸法は 1180×580×40mm とした（**写真-3**）。炭酸化養生において，短期間で型枠内部まで CO_2 を固定できるように厚さを 40mm とした。また，埋設型枠の大きさは，40mm の厚さで運搬時における割れ欠けやひび割れの防止と，2 名での人力作業が可能な重量約 50kg とするために 1180×580mm とした。

型枠背面に内部支保工と接続するためのインサートは，打上げ高さが約 1.8m の現場打ちコンクリートの側圧に対応するために約 260mm ピッチで配置した。埋設型枠の背面は，現場打ちコンクリートと埋設型枠の付着力を確保できるように洗出し処理（**写真-3 下**）を行って骨材を表面に現すこととした。

(2) 配合と製造

埋設型枠に用いた材料を**表-1** に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し，混和材はセメント量の低減を目的として高炉スラグ微粉末および γ-C_2S を使用した。さらに，乾燥・自己収縮によるひび割れを防ぐために膨張材を用いるとともに，エコタンカルを使用した。また，繊維補強材として繊維長 13mm，フィラメント径 18μm のガラス繊維を用いた。

これらの材料を用いて**表-2** に示す配合のモルタルを供した。水結合材比を 35%とし，空気量は埋設型枠の軽量化を目的として 7%とした。エコタンカルは 5kg/m^3 添加した。

CUCO-SUICOM 型枠の製造においては，当配合のモルタルをミキサで練り混ぜ，鋳物製の型枠に打ち込んだ。蒸気養生を行って初期強度を発現させたのちに脱

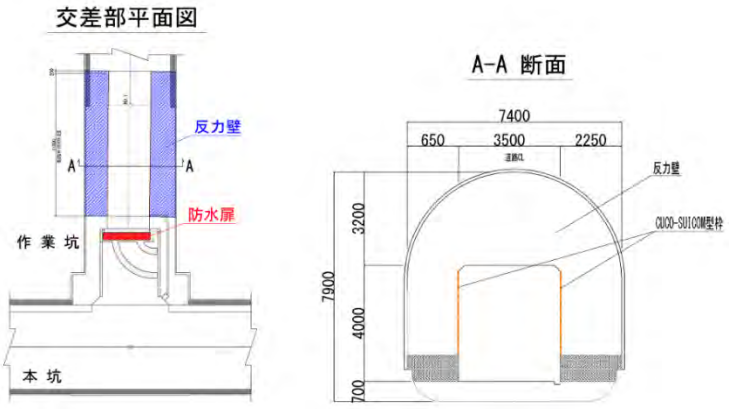


図-1　適用箇所詳細図

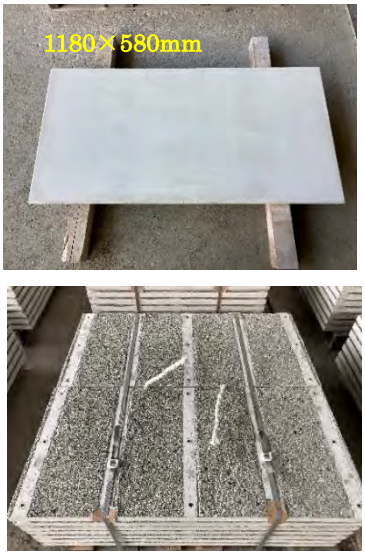


写真-3　CUCO-SUICOM 型枠　仕上げ面（上）背面（下）

表-1 使用材料

種別	記号	種類	物性
ｾﾒﾝﾄ	*N*	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度：3.16g/cm^3
混和材	*BFS*	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末	密度：2.92g/cm^3
	γ-C$_2$S	ﾀﾞｲｶﾙｼｳﾑｼﾘｹｰﾄγ相	密度：2.85g/cm^3
	EX	石灰系膨張材	密度：3.14g/cm^3
	PCC	軽質炭酸ｶﾙｼｳﾑ（ｴｺﾀﾝｶﾙ）	密度：2.60g/cm^3
水	*W*	水（水道水）	
細骨材	*S1*	砕砂（粗目）	表乾密度：2.64g/cm^3 FM：3.17
	S2	山砂（細目）	表乾密度：2.63g/cm^3 FM：1.65
混和剤	*SP*	高性能減水剤	ｶﾙﾎﾞｷｼﾙ基含有ﾎﾟﾘｴｰﾃﾙ系化合物
繊維	*FB*	AR ｶﾞﾗｽ	繊維長：13mm ﾌｨﾗﾒﾝﾄ径：18μm

表-2　モルタル配合

実験	W/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)									
			W	*B*				*PCC*	*S1*	*S2*	*FB* (vol%)	*SP* (*B*※1×%)
				C	*BFS*	*γ-C$_2$S*	*EX*					
配合	35	7	258	184	295	221	37	5	972	133	1.0	0.4

※1 B= C＋BFS＋γ-C_2S+EX

型し，CO_2 濃度 80%の雰囲気下で炭酸化養生を行った。

(3) CUCO-SUICOM 型枠の CO_2 収支

モルタルに用いた各材料の CO_2 排出量原単位を**表-3** に示す。**表-2** に示した配合の材料の単位量と CO_2 排出量原単位から材料由来の CO_2 排出量は 206kg/m^3 となった。CO_2 固定量は，炭酸化させたモルタルを粉砕した試料を用い，全炭酸濃度測定装置にて硬化体中の CO_2 含有率を定量し[9]て算出した。その結果，268kg/m^3 の CO_2 を固定していることが分かった。材料由来の CO_2 排出量 206kg/m^3 から固定した CO_2 量 268 kg/m^3 を差し引くと-62kg/m^3 となり，CUCO-SUICOM 型枠の実質 CO_2 排出量は-62kg/m^3 のカーボンネガティブであることを確認した（**図-2**）。

表-3　各材料のCO_2排出量原単位

材料	CO_2 排出量原単位 (kg-CO_2/t)
普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ[5]，膨張材※	762.7
高炉ｽﾗｸﾞ微粉末[6]	26.5
γ-C_2S[7]	124.5
ｴｺﾀﾝｶﾙ（軽質炭酸ｶﾙｼｳﾑ）[4]	-390
細骨材[8]	3.5

※膨張材はﾃﾞｰﾀがないため普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄと同様とした

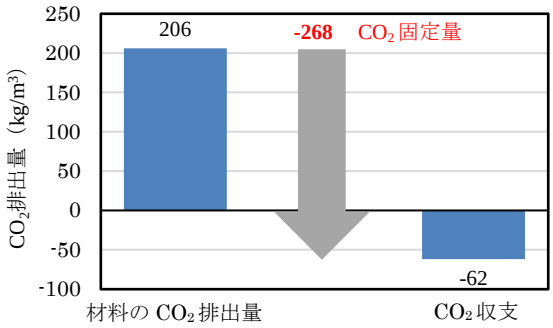


図-2　CUCO-SUICOM 型枠の CO_2 収支

4．適用と施工

(1) 構造と割付

図-3 に CUCO-SUICOM 型枠を使用したトンネル断面図と割付図を示す。トンネル坑内は狭隘であり，他作業との交錯があることから，坑内での作業を最小限とすることが求められた。そこで，トンネル坑外に仮組ヤードを設けて埋設型枠同士を L 形鋼でつなぎ合わせて大判化し，坑内に運搬・設置することで，坑内での作業を最小限とした。また，L 形鋼とのかぶりを考慮し，L 形鋼と埋設型枠の間に 60mm 高さのコンクリートスペーサを設置した。また，大判化した埋設型枠を固定するために支保工部材として H 形鋼を背面に設置した。



写真-4　大判化施工状況

(2) 施工

仮組ヤードにて，搬入した CUCO-SUICOM 型枠を割付図における縦一列分をコンクリートスペーサを介してボルトとナットで固定して大判化した（**写真-4**）。大判化した埋設型枠をトラックに積載し，トンネル坑内に運搬したのち，2.9t 吊りクローラークレーンにて現場に建て込んだ（**写真-5**）。建て込んだ埋設型枠はあらかじめ設置していた H 形鋼とターンバックルで接続し，仕上がり面の通りを調整して固定した。内部支保工を設置して，背面にコンクリートを打設した後，頂版部分を打設して反力壁を

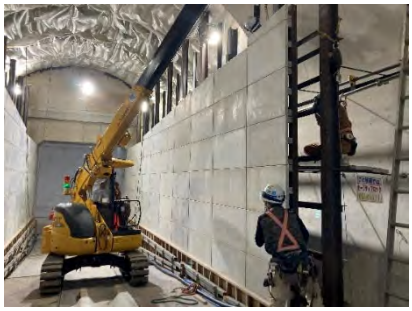


写真-5　建込み状況

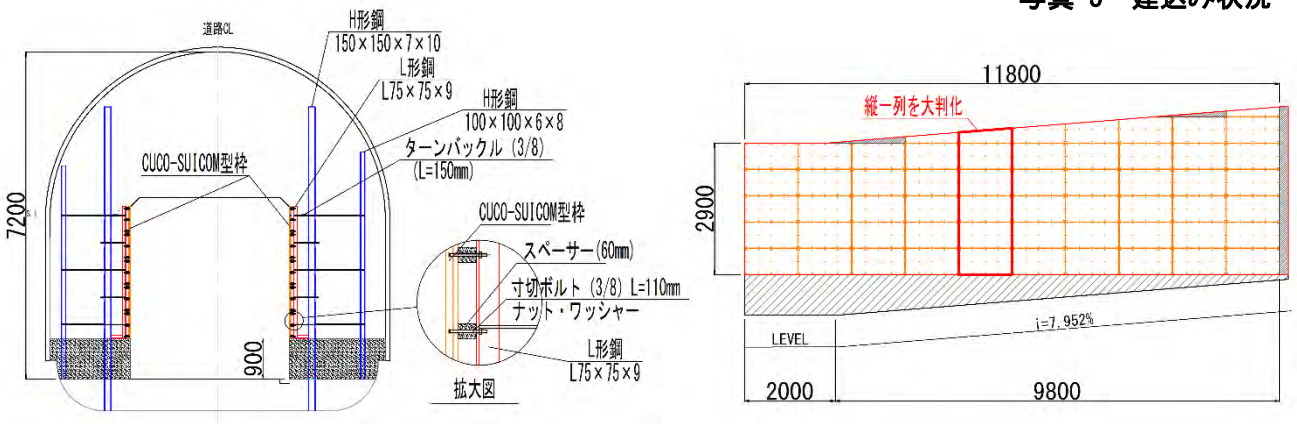


図-3　施工断面図（左），割付図（右）

完成させた（**写真-6**）。

(3) 品質評価

設置した埋設型枠の表層品質を評価するため，現場で埋設型枠を対象に透気係数と吸水速度を計測した。透気係数は表層透気試験（トレント法）により，吸水速度は表面吸水試験（SWAT）を用いて計測した。その結果，透気係数は $0.0395\times10^{-16}m^2$，吸水速度は $0.35ml/m^2/s$ であった。トンネル覆工コンクリートの品質確保の手引き（案）[10] によると，コンクリートの緻密度を示す指標として透気係数は $1\times10^{-16}m^2$ 以下，透水係数は $0.5 ml/m^2/s$ 以下であることが推奨されている。CUCO-SUICOM 型枠は，その指標を満足する結果であった。

５．本工事における CUCO-SUICOM 型枠の効果

本工事では CUCO-SUICOM 型枠を約 $3.2m^3$（$80m^2$）使用した。現場打ちコンクリートの表面近傍 40mm を CUCO-SUICOM 型枠に置き換えたため，高炉セメント B 種を使用した現場打ちコンクリートの CO_2 排出量 $110kg/m^3$ を削減したことに加え，埋設型枠自体の実質 CO_2 排出量-$62kg/m^3$ 分の CO_2 を削減した。したがって，当構造物において $172kg/m^3\times3.2m^3=550kg$ の CO_2 を削減した。

工程の短縮効果については，坑外での大判化作業によって，坑内での作業を最小化したことで，設置作業は合板型枠と同等以上の歩掛であったこと，および埋設型枠により脱型作業が省略されたことから，1 日以上の短縮効果があった。当該箇所は脱型までの待機時間がクリティカルではなかったことから，本工事における工程短縮効果は小さかった。コンクリートの脱型までの待機時間がクリティカルな工種に適用すれば，さらなる生産性の向上が期待できると考える。

６．おわりに

本稿では，CUCO-SUICOM 型枠を開発し，現場への適用とその効果について報告した。本工事にカーボンネガティブな埋設型枠を適用し，生産性向上が図ることができたとともにコンクリート工事における CO_2 排出量を大きく削減することができた。

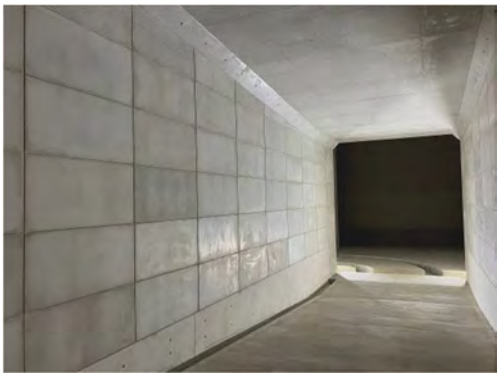


写真-6　完成状況

謝辞

本成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21014）を受け，革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果を国土交通省事業に適用したものである。

参考文献

1） 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業で組成するプロジェクト「CO_2 を用いたコンクリート等製造技術開発」https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/pdf/gif_09_summary2.pdf

2） コンソーシアム CUCO：https://www.cuco-2030.jp/

3） 取違剛ほか：CO_2 排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリート「CO_2-SUICOM（スイコム）」，セメント・コンクリート, 2012, No.786, pp.26-31.

4） 佐々木猛ほか：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, 2022, pp.58-62.

5） セメント協会：セメントの LCI データの概要 2021.4.12 公表,https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1i_01.pdf

6） 河合研至：コンクリートの環境負荷評価　①コンクリートに関わる環境負荷，コンクリート工学 Vol.50 , No. 6, pp. 554-561, 2012

7） 庄司慎ほか：副生の水酸化カルシウムを用いた C_2S の製造と CO_2 排出量原単位,セメント・コンクリート論文集,Vol.67,No.1,pp.553-558,2013

8） 河合研至：コンクリートの環境負荷評価　②コンクリートに関わる環境負荷，コンクリート工学 Vol.50 , No.7, pp.635-639, 2012

9） 安田僚介ほか：炭酸化を受けたセメント系材料中の CO_2 含有率評価に向けた分析方法の検討，セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.442-447, 2021

１０）国土交通省四国地方整備局 四国技術事務所：トンネル覆工コンクリートの品質確保の手引き（案），2020