

2050年カーボンニュートラル実現に貢献する CUCO-SUICOM 型枠の開発と施工実績

Development and Application of CUCO-SUICOM Formwork and its Contribution to Achieving Carbon Neutrality by 2050

山 野 泰 明 取 違 剛 関 健 吾 坂 井 吾 郎

要 約

我が国では、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けてグリーンイノベーション基金が創設され、コンクリート分野においてもCO₂削減技術の研究開発が加速している。その一環として筆者らは、CO₂雰囲気下で炭酸化養生することによって強制的にCO₂をコンクリートに吸収させるCO₂-SUICOMと、CO₂を吸収させたCCU材料であるエコタンカル（軽質炭酸カルシウム）を組み合わせ、CO₂削減量を大きくしたコンクリートの研究開発を行っている。本研究では、同コンクリートの埋設型枠への適用に際し、所定の性能を確保しつつ炭酸化速度が最大となる製造方法・条件について検討し、製造過程における埋設型枠の実質CO₂排出量が-62kg/m³となることを確認した。さらに、開発した埋設型枠（CUCO-SUICOM型枠）を現場へ実装し、CO₂の削減と生産性の向上を同時に実現できることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. CUCO-SUICOM型枠の製造条件の検討
- III. CUCO-SUICOM型枠の施工実績
- IV. おわりに

I. はじめに

我が国では、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けた研究開発推進のためにグリーンイノベーション基金（以下、GI基金）が創設され、コンクリート分野においてもCO₂削減技術の研究開発が加速している¹⁾。筆者らは、CO₂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 \cdot SiO₂、以下 γ -C₂S）をコンクリートに練り混ぜ、高濃度のCO₂雰囲気下で炭酸化養生することによって大量のCO₂をコンクリートに吸収させる「CO₂-SUICOM」の研究開発を進めてきた²⁾。CO₂をコンクリートに短期間で大量に吸収させるためには、薄い部材が適している。そこで、筆者らはCO₂-SUICOMの適用先として、生産性の向上にも寄与する埋設型枠に着目し、割れ欠け防止用の鉄筋代替としてガラス繊維を添加した繊維補強モルタルの埋設型枠について研究を進めおり^{3), 4)}、2021年にはNETIS（新技術情報提供

システム）に登録している⁵⁾。

一方、コンクリートへのCO₂の固定方法として、コンクリートに直接CO₂を吸収させる技術のほかに、あらかじめCO₂を吸収させたCCU（Carbon Capture Utilization）材料をコンクリートに練り混ぜる技術がある⁶⁾。そのCCU材料として、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CO₂を吹き込むことで生成させるエコタンカル（軽質炭酸カルシウム）⁷⁾が注目されている。

当社はGI基金における「CO₂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」⁸⁾を結成し、これらの技術の高度化や組合せによって、CO₂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。その一環として、筆者らは埋設型枠を対象として、CO₂-SUICOMとエコタンカルの技術を組み合わせることでCO₂削減量を大きくしたコンクリート（以下、CUCO-SUICOM）について検討した。本報では、埋設型枠について、所定の性能を確保しつつ炭酸化速度が最大となる製造方法・条件を検討し、そのCO₂固定量を評価した結果を報告する。さらに、開発した埋設型枠を現場へ実装し、施工性について評価を行った。その結果、CO₂の削減と生産性の向上を同時に実現できることを確認した。

キーワード：環境配慮型コンクリート、炭酸化養生、軽質炭酸カルシウム、埋設型枠、CUCO

Keywords：sustainable concrete, carbonation curing, precipitated calcium carbonate, stay-in-place formwork, CUCO

II. CUCO-SUICOM 型枠の製造条件の検討

1. 埋設型枠の緒元と目標性能

本検討にて対象とした埋設型枠の寸法は 1180×580×40mm であり、埋設型枠に用いるモルタルの材料、配合は既往の検討⁹⁾の配合を参考に、材料起因の CO₂ 量より製造時に固定する CO₂ 量の方が大きい、いわゆるカーボンネガティブなモルタルとした。埋設型枠は、その製造過程において材齢 1 日で脱型して吊り上げる必要がある。吊上げや運搬時にひび割れや破損を生じない程度の強度として 10~12N/mm² 程度必要¹⁰⁾ となることから、材齢 1 日における目標圧縮強度を 12N/mm² とした。また、プレキャスト製品は材齢 14 日を管理材齢とすることが多いことから、材齢 14 日における強度を確認することとし、材齢 14 日における目標圧縮強度は、埋設型枠を現場で固定する際に内部支保工を接続するインサートの引抜き耐力の観点から 60N/mm² とした。また、埋設型枠は場所打ちコンクリートとの一体性が重要となることから、断面修復材の要求性能を参考¹¹⁾ に後打ちコンクリートと埋設型枠との目標付着力を 1.5N/mm² とした。

2. 実験概要

本研究では 3 つ実験を実施した。実験 1 では、打設後の初期養生条件について、温度条件を変えて蒸気養生を行い、脱型時強度 12N/mm² を確保しつつ、炭酸化速度が最大となる条件を検討した。また、材料起因の CO₂ 排出量を加味しつつ、炭酸化した供試体の CO₂ 固定量を測定し、使用した配合の実質 CO₂ 排出量を評価した。実験 2 ではガラス繊維が、繊維補強モルタルのひび割れ発生強度へ及ぼす影響について評価した。実験 3 では蒸気養生を伴うガラス繊維補強モルタルについて、打継目処理剤の散布量が処理深さに及ぼす影響および後打ちコンクリートとの一体性について評価した。

3. 使用材料および配合

使用材料を Table 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-C₂S 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。

配合を Table 2 に示す。W/B=35%、空気量 7% のモルタルで、C : BFS : γ は重量比で 3 : 4 : 3、膨張材は粉体量の 5% をセメントと置換した。CCU 材料のエコタンカルは、フレッシュ性状に影響がない範囲の量として 5kg/m³ とした。

4. 供試体作成および試験項目

実験 1 では Table 2 に示す配合のモルタルを練り混ぜ、φ50×100mm の型枠に詰めて 2 時間以上静置した。静置した供試体を Fig.1 に示す温度条件で初期養生を行った。常時 20°C、40°C を 1 時間保持 (40°C_1h)、60°C を 1 時間保持 (60°C_1h)、60°C を 3 時間保持 (60°C_3h) の 4 つの条件とした。20°C 以

外の条件については昇温速度 20°C/時間とし、降温は自然冷却として 20°C 環境まで冷却した。材齢 1 日における圧縮強度を JIS A 1108 に準じて取得した。初期養生終了後 (材齢 1 日)、供試体を脱型し、温度 50°C、相対湿度 50%、CO₂ 濃度 80% 雰囲気の中で炭酸化養生を行い、各材齢で圧縮強度試験を実施した。

炭酸化深さおよび CO₂ 固定量測定用の供試体は、40×40×160mm の供試体を作製して、それぞれの条件で初期養生を行ったうえ、脱型後、同環境にて炭酸化養生を行った。なお、供試体の 40×160mm の 2 面 (対面) から炭酸化が進む

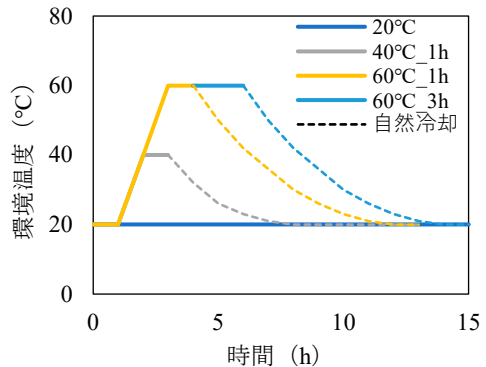


Fig.1 養生温度条件 (Curing Conditions)

Table 1 使用材料 (Materials)

種別	記号	種類	物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ フレン: 3240cm ² /g
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末	密度: 2.92g/cm ³ フレン: 4340cm ² /g
	γ-C ₂ S	γ-カルシウムシリケート γ 相	密度: 2.85g/cm ³ フレン: 2010cm ² /g
	EX	石灰系膨張材	密度: 3.14g/cm ³ フレン: 3760cm ² /g
	PCC	軽質炭酸カルシウム (エコタンカル)	密度: 2.60g/cm ³ BET: 6690cm ² /g
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	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
繊維	FB	AR ガラス	繊維長: 13mm フィラメント径: 18μm

Table 2 配合表 (Mix Design)

単位量 (kg/m ³)									
W	B				PCC	S1	S2	SP (B*1×%)	FB (vol%)
	C	BFS	γ-C ₂ S	EX					
258	184	295	221	37	5	972	133	0.2/0.4	0.0/1.0

ように打込み面、底面、稜面の4面をアルミテープで覆った。供試体を割裂し、JIS A 1152を参考にして、炭酸化深さを5mm間隔毎に測定した。全面炭酸化した供試体について、CO₂固定量を無機炭素分析にて測定した。供試体を5mm程度に粉碎後、アセトンにより水和停止を行い、メノウ乳鉢で粉碎して試料を作製した。全炭酸濃度測定装置にて、硬化体中のCO₂含有率を定量した¹²⁾。

実験2では40×40×160mmの供試体を作製し、材齢1日で脱型した後、実験1と同環境で、総材齢が14日となるように13日間炭酸化養生を行った。養生終了後、JIS A 1106に準じて三等分点載荷試験を実施し、ひび割れ発生強度を測定した。

実験3では100×100×400mmの型枠に、高さが50mmとなるようにモルタルを打ち込んで2時間程度静置し、表面の水が引いた後に打継目処理剤(標準散布量は300g/m²)を300, 450, 600g/m²となるように散布した。散布後2時間静置して打継目処理剤を浸透させ、蒸気養生(昇温速度20°C/h, 60°Cで1時間保持, その後自然冷却)を行った。蒸気養生後、脱型して表面を高压洗浄機(7MPa)により洗出し処理を行った。洗出し処理の前後で、供試体の厚さをノギスにて10点測定し、処理深さを計測した。その後、実験1と同じ環境で13日炭酸化養生後、表面を十分湿潤させ、後打ちコンクリート(普通ポルトランドセメント, W/C=50%, スランプ12cm, 空気量4.5%)を打ち込んだ。なお、後打ちコンクリートの圧縮強度は材齢14日(標準養生)で49.8N/mm²であった。

後打ちコンクリートの打込みから14日後に、埋設型枠側からコアカッターでφ75mm, 深さ70mmの切込みを3箇所入れ鋼製引張治具をエポキシ系接着剤で接着した。接着剤が硬化後、建研式接着力試験器を用いて載荷速度0.3kN/sで載荷して破断時の荷重を求め、断面積から付着力を算出した。

5. 試験結果

(1) 圧縮強度と炭酸化速度

Fig.2に材齢と圧縮強度の関係を示す。材齢1日強度について、20°C養生は5.8N/mm², 40°C_1hは18.6N/mm²となり、40°C_1hより高い温度履歴を与えると目標強度である12N/mm²を満たすことが分かった。また、材齢14日における強度は、初期養生条件によらず、いずれの供試体も90N/mm²程度となり、60N/mm²を大きく上回った。

次に、材齢と炭酸化深さの関係から炭酸化速度係数を算出し、炭酸化開始時の強度との関係を整理した結果をFig.3に示す。炭酸化養生開始時の圧縮強度が20N/mm²を超えると炭酸化速度係数は急激に小さくなる結果が得られた。また、既往の研究¹³⁾と同様に、初期強度が大きいほど炭酸化速度が小さくなる傾向が得られた。これは、初期強度が大きいほどコンクリートが緻密化し、CO₂が内部まで拡散しにくくなるためと考えられる。したがって、深部まで炭酸化させるた

めの炭酸化養生期間を短縮するためには、埋設型枠の取回しに必要な強度を満足しつつ、できるだけ炭酸化養生開始時の強度を小さくする必要があり、本研究の範囲では、40°Cで1時間の蒸気養生を行うのが最適であると考えられた。

(2) CO₂排出量

CUCO-SUICOM型枠のCO₂排出量を算出した。Table 3に示す各材料のCO₂排出量原単位を用いて、Table 2に示す配合の材料起因のCO₂排出量を算出すると206kg/m³となる。一方、炭酸化養生によって固定されたCO₂固定量を無機炭素分析にて測定した結果、CO₂含有率は11.8%であった。単位容積質量にCO₂含有率を乗じてCO₂固定量を算出するとCO₂

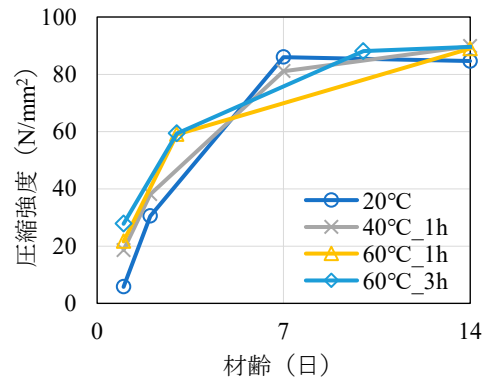


Fig.2 材齢と圧縮強度の関係 (Compressive Strength Results)

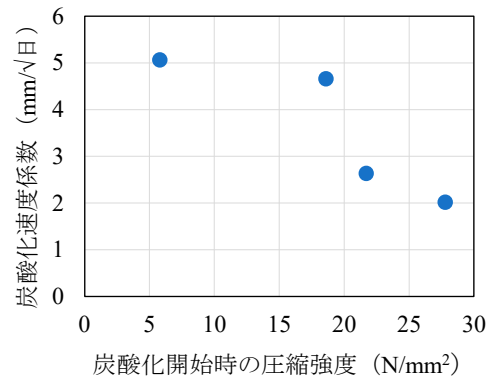


Fig.3 炭酸化開始強度と炭酸化速度係数の関係 (Relationship between Compressive Strength at Initiation of Carbonation Curing and Speed of Carbonation)

Table 3 各材料のCO₂排出量 (CO₂ Emissions Associated with Materials)

材料	CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t)
普通ポルトランドセメント ¹⁴⁾ , 膨張材 ^{**}	762.7
高炉スラグ微粉末 ¹⁵⁾	26.5
γ-C ₂ S ¹⁶⁾	124.5
軽質炭酸カルシウム ⁷⁾	-390
細骨材 ¹⁷⁾	3.5

*膨張材はデータがないため普通ポルトランドセメントと同値とした

固定量は 268kg/m³ となった。以上から、材料起因の CO₂ 排出量 206kg/m³ と CO₂ 固定量 268kg/m³ を差し引くと、CUCO-SUICOM 型枠の CO₂ 収支は-62kg/m³ となった (Fig.4)。

(3) ひび割れ発生強度

材齢 14 日 (炭酸化日数 13 日) におけるひび割れ発生強度について、ガラス繊維を添加していない供試体は 12.1N/mm²、1vol%添加した供試体は 12.8N/mm² であった。ガラス繊維を 1vol%添加することで 0.7N/mm² と少量ながら強度増加が得られるとともに、ひび割れ発生後も試験体が破断しないことを確認した。運搬時の割れ欠け防止の観点からも、繊維は必要と考えられ、本検討においてはガラス繊維を 1vol%用いることとした。

(4) 後打ちコンクリートとの付着力

打継目処理剤の散布量における処理深さと建研式接着力試験による試験結果を Fig. 5 に示す。処理深さについて、散布量 300g/m² と 450g/m² の供試体では 1.2mm 程度で同等であったが、600g/m² では 1.78mm となり、処理深さが大きくなった。また、処理深さが最大骨材寸法 5mm の半分である 2.5mm を超えた箇所もあった。

付着力は 3.1~3.7N/mm² であった。散布量 600g/m² では過剰な処理であることが懸念されたが、付着力の低下などは確認されなかった。したがって、300~600g/m² (標準添加量の 1~2 倍) の範囲であれば付着力に影響はないと考えられる。次に、破壊位置について Table 4 に示す。埋設型枠と後打ちコンクリートの界面で破壊が起きたのは 1 試験体だけであり、そのほかの 8 試験体は全て埋設型枠または後打ちコンクリートで破壊が起きていた。界面で破壊が起きたものも含め 1.5N/mm² 以上の付着力があることからいずれのケースでも一体性が確保できているものと考えられる。

III. CUCO-SUICOM 型枠の施工実績

1. 適用箇所と構造

CUCO-SUICOM 型枠をトンネルにおける高さ約 3m、延

長約 12m の内壁に適用した。適用箇所における断面図と正面図 (割付図) を Fig.6 に示す。埋設型枠背面の場所打ちコンクリートは 2 層で打ち込む計画とし、打上がり高さを約

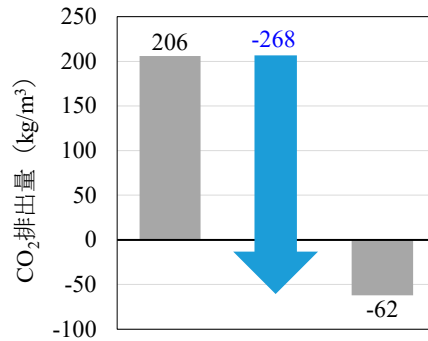


Fig.4 CUCO-SUICOM型枠のCO₂収支 (CO₂ Balance of CUCO-SUICOM Formwork)

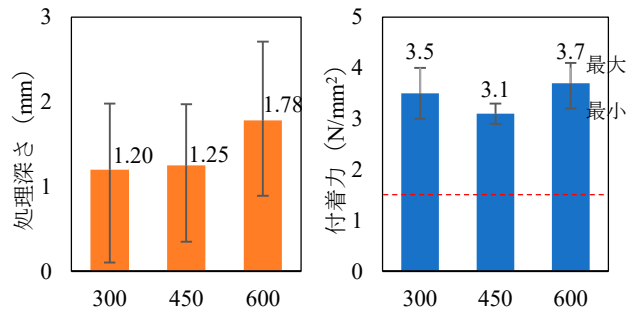


Fig.5 打継目処理剤散布量と処理深さおよび付着力 (Effect of Amount of Roughening Agent on Roughening Depth and Bond between Old and New Concrete)

Table 4 建研式接着力試験 (Fracture Position in Specimen)

散布量	破壊位置		
	埋設型枠	埋設型枠	後打ち
300g/m ²	界面	埋設型枠	後打ち
450g/m ²	埋設型枠	埋設型枠	埋設型枠
600g/m ²	埋設型枠	埋設型枠	後打ち

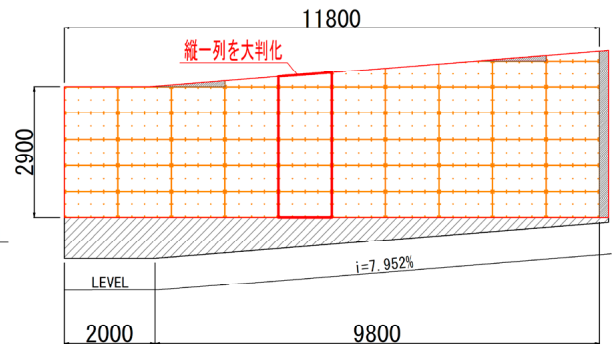
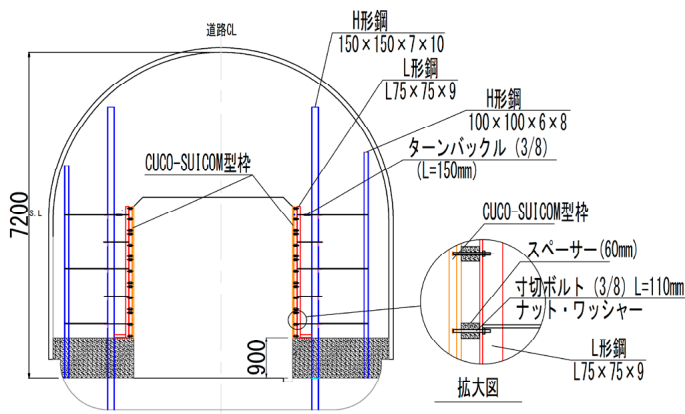


Fig.6 CUCO-SUICOM型枠適用箇所の断面図と正面図 (割付図) (Schematic Illustration of CUCO-SUICOM Formwork)

1.8mとして計画した。

埋設型枠の図を Fig.7 に示す。埋設型枠の強度と現場打ちコンクリートの施工時に作用する側圧を考慮して、内部支保工のためのインサートの間隔は 275mm とした。

埋設型枠は加工や運搬時のハンドリングを良くするために大きさを 580×1180×40mm としているが、1枚ずつ現場で建て込んだ場合、時間がかかる。そこで、縦一列の埋設型枠を大判化し、設置作業の時間短縮を図った。ここで、大判化するための補強鋼材として L 型钢を用いるが、目地部からの水の侵入による腐食が懸念されたため、埋設型枠と L 型钢の間に 60mm のコンクリートスペーサを介して全ねじボルトとナットで固定し、かぶりを 60mm 確保する構造とした (Fig.6)。

2. 作業手順

トンネル坑内は狭隘かつ他工種との錯綜があることから、坑内での作業を最小限とするため、大判化は坑外の組立てヤードにて実施した (Photo 1)。

大判化した埋設型枠をトラックに積載して、トンネル坑内に運搬したのち、2.9t 吊りクローラクレーンを用いて建て込んだ。建て込んだ埋設型枠はあらかじめ設置していた鋼材とターンバックルで接続、固定し、仕上り面の通りを調整した。さらにセパレータを溶接し、内部支保工を設置し終わったのち、背面にコンクリートを打設した。坑内での別作業を進めながら仮組みヤードで埋設型枠の大判化作業を並行して進めたことで、設置作業は合板型枠と同等以上の歩掛であったこと、脱型作業が省略されたことから、1日以上 of 工程短縮効果があったと考えられる。小規模構造物であったことから、本研究の範囲では工程短縮効果は小さかったが、面積の大きな構造物や養生日数がクリティカルとなる構造物であれば、大きな工程短縮効果があると考えられる。

3. 施工結果

当工事では、CUCO-SUICOM 型枠を約 80m²、116 枚、計 3.2m³ 使用したため (Photo 2)、埋設型枠の CO₂ 総排出量は -197kg となった。つまり、建設作業を行いながらも CO₂ を 197kg 削減することができた。

IV. おわりに

本研究では、CO₂-SUICOM と CCU 材料のエコタンカルを組み合わせた埋設型枠について、所定の性能を有し、炭酸化速度が最大となる製造方法・条件を検討した。さらに、現場に適用し、施工性の評価を行った。その結果、本研究の範囲において、以下の知見を得た。

① 炭酸化速度は、炭酸化養生開始時の強度が小さくなるにつれて増加した。本研究の配合条件において、40°C で 1 時間保持の蒸気養生を行うことで初期強度 12N/mm² 以上を確保しつつ、炭酸化速度を大きくすることができた。

- ② CUCO-SUICOM 型枠の材料起因の CO₂ 排出量と CO₂ 固定量の収支を計算した結果、実質 CO₂ 排出量は -62kg/m³ となった。
- ③ ガラス繊維を添加することで、ひび割れ発生強度が向上し、補強効果が得られた。
- ④ 蒸気養生下でも打継目処理剤により洗出し処理が可能で、1.5N/mm² 以上の付着力を確保できた。処理深さを考慮すると、打継目処理剤の使用量は標準使用量の 1~2 倍の範囲が良いことを確認した。
- ⑤ CUCO-SUICOM 型枠を現場に適用し、CO₂ 削減と生産性向上を同時に実現することができた。

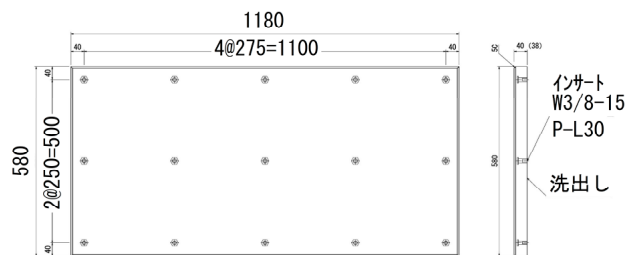


Fig.7 CUCO-SUICOM型枠 (CUCO-SUICOM Formwork)



Photo 1 仮組みヤードでの大判化の様子 (Assembling of CUCO-SUICOM Formwork at Site)

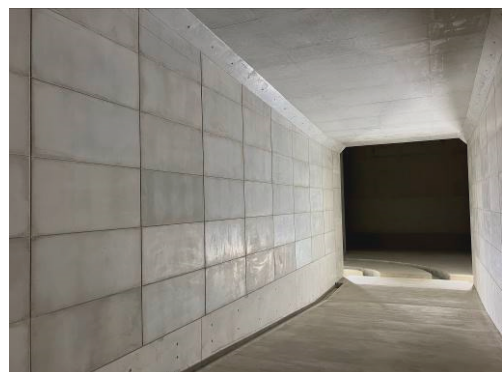


Photo 2 完成状況 (Finished Tunnel)

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である。

参考文献

- 1) NEDO CO₂ を用いたコンクリート等製造技術開発 ;
https://www.nedo.go.jp/koubo/EV2_100241.html
- 2) 取達剛ほか ; CO₂ 排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリート「CO₂-SUICOM (スイコム)」, セメント・コンクリート, 2012, No.786, pp.26-31.
- 3) 関健吾ほか ; 炭酸化した環境負荷低減型ガラス繊維補強モルタルの耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 2016, pp.2367-2372.
- 4) 取達剛ほか ; 炭酸化させたガラス補強モルタルの施工性および曲げ強度に関する検討, 平成 29 年度土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会, V-536, 2017.
- 5) NETIS 新技術情報提供システム (CO₂-SUICOM を用いたガラス繊維補強埋設型枠) ;
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=CG-210004>
- 6) 坂井吾郎ほか ; CCU 材料の炭酸カルシウム微粉末を用いたコンクリートの CO₂ 固定量, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, V-519, 2022.
- 7) 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.
- 8) コンソーシアム CUCO ; <https://www.cuco-2030.jp/>
- 9) 関健吾ほか ; 強制炭酸化したガラス繊維補強モルタルの収縮特性, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, 2021, V-350.
- 10) 日本建築学会 ; 建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事, 2013, p.75.
- 11) 土木学会 ; 吹付けコンクリート指針 (案) 補修・補強編, 2005.
- 12) 安田僚介ほか ; 炭酸化を受けたセメント系材料中の CO₂ 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, 2021, pp.442-447.
- 13) Torichigai, et al. ; Physical properties and manufacturing method of the concrete extremely reducing CO₂ emissions by using C₂S and carbonation curing, CO2STO2019, 2019, pp.204-212.
- 14) 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
- 15) 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, 2012, pp. 554-561.
- 16) 庄司慎ほか ; 副生の水酸化カルシウムを用いた C₂S の製造と CO₂ 排出量原単位, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, 2013, pp.553-558.
- 17) 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, 2012, pp.635-639.

Development and Application of CUCO-SUICOM Formwork and Its Contribution to Achieving Carbon Neutrality by 2050

Hiroaki Yamano, Takeshi Torichigai, Kengo Seki, and Goro Sakai

In Japan, research and development on technology for reducing CO₂ emissions in the field of concrete is accelerating to achieve carbon neutrality by 2050. In this study, concrete that combines CO₂-SUICOM and Ecotankal, a CCU material produced by absorbing CO₂, to greatly reduce the amount of CO₂ emissions was examined. The manufacturing method and conditions that ensure the required performance while maximizing the rate of carbonation when applying this concrete to formwork was investigated. It was confirmed that the effective CO₂ emitted in the manufacturing of the formwork was -62 kg/m³. Furthermore, the developed formwork was used on-site, both reducing CO₂ and improving productivity. This study contributes to the development of concrete technology for a sustainable future.