

## 論文 炭酸カルシウム硬化体を使用した部材構築方法および性能評価

安江 歩夢\*1・中澤 春生\*2・兼松 学\*3・向井 智久\*4

**要旨** : CO<sub>2</sub>排出量の削減や廃材利用等の環境課題に対して、廃コンクリートを原材料として作製する、炭酸カルシウム硬化体(CCC)を提案している。本研究では、CCCの社会実装を最終目標とし、CCCの材料性能評価に加え、新たな構造形式を提案し、その部材性能評価を行った。実験結果より、CCCの圧縮強度のばらつきは小さく、提案した構造部材はCCCの圧縮強度と靱性に対応する構造性能を有していたことから、CCCが材料および構造の両面から、実用性を有する材料であることを確認した。また、本研究で提案した構造形式は、CCC以外の新材料にも活用可能な形式であり、新材料の構造化に関する方向性を示した。

**キーワード** : 炭酸カルシウム硬化体, CO<sub>2</sub>, サーキュラーエコノミー, クリープ, プレストレス, せん断耐力

## 1. はじめに

コンクリート分野においては、サステナブルな社会の実現に向け、材料製造に起因するCO<sub>2</sub>排出量の削減や、廃材の循環利用の確立等の課題を解決する必要がある<sup>1)</sup>。

筆者らのグループはこれらの課題に対し、廃コンクリートの破砕物(Concrete waste fines: CWF)を骨材とみなし、CWF間に炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)を析出することで、CWFを一体化する革新的な硬化体(Calcium Carbonate Concrete: CCC)を提案している<sup>2),3)</sup>。CCCは、セメントの未使用に加え、CO<sub>2</sub>を固定化することから、カーボンネガティブを達成できる硬化体である。また、廃コンクリートのみでなく、廃CCCも再度原材料として利用できるため、資源循環の観点からも優れた硬化体である。

一方でCCCの作製においては、加圧成型のプロセス(Cold Sintering Process: CSP)<sup>3)</sup>を経ることから、プレス機の容量により作製可能なCCCのサイズに限界が生じる。そのため、現時点では、実大サイズの部材を1つのCCCで作製することが困難であり、CCCを構造部材として利用するためには、新しい構造形式を提案する必要がある。

本研究では、CCCの社会実装を最終的な目標とした上で、まずは、CCCの強度特性を評価した。その後、外部プレストレスを導入することによりCCCを一体化した、新しい構造形式を提案し、その部材性能を評価した。

## 2. CCCの作製方法および強度特性

本章ではCCCの作製方法を概説するとともに、圧縮強度およびクリープ試験の結果から、強度特性を評価した。

## 2.1 CCCの原材料

## 2.1.1 CWF(Concrete Waste Fines)の作製

本研究では、実証実験の目的を鑑みて、排出現場が特

定された単一種類の廃コンクリートを原料とした。廃コンクリートは、当時の資料より、2019~2020年頃に打設された廃コンクリート(低熱ポルトランドセメント, W/C 45.5%)であることが特定されており、2023~2024年に破砕工場に持ち込まれた。破砕工場では、再生砕石を製造する設備において、廃コンクリートを40mm以下に破砕した。破砕後には小型破砕機により、5.0mm以下の粒径となるまで追加破砕を実施し、ふるいで粒径を選別することによりCWFを製造した。また、製造後のCWFは、気中環境において、適切に水分を供給することで、大気中のCO<sub>2</sub>との反応を促進した<sup>4)</sup>。

なお、最大粒径5.0mmのCWFのみでCCCを作製した場合には、CWFの充填率が悪く十分な強度のCCCを作製できないことが懸念される。したがって、一部のCWFは、最大粒径0.6mm以下まで追加粉砕を行った。以降では、5.0mm以下のCWFを5.0F、0.6mm以下のCWFを0.6Fと表記する。表-1には、それぞれのCWFの粒度を示す。

## 2.1.2 重炭酸カルシウム水溶液の作製

重炭酸カルシウム水溶液(溶液)は、外部密閉系冷却水循環装置により5°Cとした水道水に、5.0Fを浸漬し、ハンドミキサーで攪拌をすることにより作製した。ここで、5.0Fと水の混合割合は、質量比で1: 10とした。また、溶液へはCO<sub>2</sub>を溶解するため、空気導入量1.5L/minの市販のエアポンプで空気を導入した。

## 2.2 CCCの作製方法

CCCの作製は、千葉県野田市の実験施設にて、2024/7/1~7/19の期間で行った。作製日の正午頃に測定した室温は25.9(7/16)~37.5°C(7/9)の範囲にあり、作製期間の正午頃における平均の室温は31.1°Cであった。

図-1には、CCCの作製プロセスを示す。まず、CWFお

\*1 清水建設(株) 技術研究所建設基盤技術センター 工修 (正会員)

\*2 清水建設(株) 技術研究所建設基盤技術センター 工博 (正会員)

\*3 東京理科大学 創域理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*4 国土交通省 国土技術政策総合研究所室長 工博 (正会員)

表-1 CWF の粒度

Sieve size (mm)	Percentage passing	
	5.0F	0.6F
4.75	99.3	-
2.36	68.5	-
1.18	44.9	-
0.6	27.8	100
0.3	15.2	62
0.15	7.2	27
0.075	3.4	16

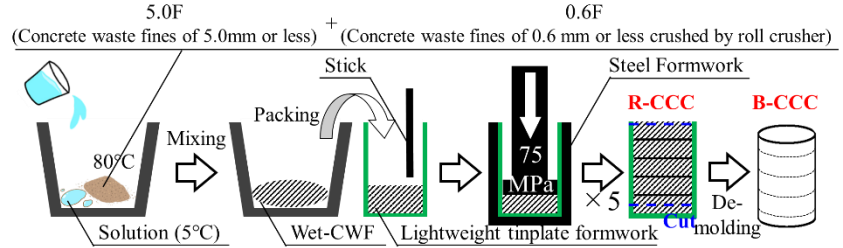


図-1 CCC の作製方法

および溶液をそれぞれ80°Cと5°Cで準備した。準備したCWFと溶液をそれぞれ、圧密工程の1層(圧密後における高さ約37mm)分計量し、モルタルミキサーで30秒間練混ぜた。この時、5.0Fと0.6Fの割合は1:1とした。練混ぜ後のCWF(以下、Wet-CWF)を鋼製型枠により拘束した軽量のブリキ製型枠(モールド缶:φ100×200mm,厚さ0.28mm)に詰め、突き棒で8回突いた。ここで、鋼製型枠は、圧密工程において、CCCが円周方向に変形することを防ぐために使用した。モールド缶内のWet-CWFを最大容量1000kNのプレス機で、最大加圧力75MPaで圧密した。この際、加圧速度は0.625MPa/sとし、75MPa到達後には150秒間加圧力を保持し、最後に60秒間で除荷した。圧密後には、CCC上面の水分をウェスで除去し、ワイヤブラシにより上面の目荒しを行った。以上の工程を、試験体が十分な高さ(約185mm, 5層)となるまで繰り返した。

CCCは鋼製型枠から取り出した後、送風定温恒温器により24時間の105°C乾燥を実施した。その後、常温の溶液への2時間の浸水と105°Cの22時間乾燥を3日間繰り返し、最終的なCCCとした。本研究においては、構造実験に使用する2体の構造部材の内の1体は、モールド缶を脱型していないCCCを組み上げることで構造部材とした。以降では、モールド缶から脱型したCCCをBare-CCC(B-CCC)、脱型しないCCCをReinforced-CCC(R-CCC)として表記する。なお、CCCの作製では圧密工程を経るため(図-1)、モールド缶とCCCの一体性は、モールド缶に打設したコンクリートとモールド缶との一体性と比べて高くなる。

## 2.3 試験方法

### 2.3.1 圧縮強度試験方法

本研究では、構造部材に使用するCCCの目標圧縮強度を12MPa以上に設定し、前述した方法でCCCを作製した。作製期間中においては、CCCの圧縮強度が12MPa以上であることを確認するための、圧縮強度試験を行った。

圧縮強度試験は、JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法(2018)」に準じて実施した。圧縮強度試験の際には、JISA 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法(2017)」に従いCCCの静弾性係数を算出した。R-CCCの静弾性係数は、モールド缶に直接コンプレッソメーターを取り付ける、またはモールド缶表面にひずみゲージを貼付する

表-2 CCC の強度特性

	$\sigma_c$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$\nu$	$\epsilon_{max}$ ( $\mu$ )	$\sigma_t$ (MPa)
B-CCC (MN)	13.5 [13.7]	13.5	0.22	1757	0.98
R-CCC (MN)	26.4 [27.3]	13.4	0.22	6683	-
B-CCC (EX)	17.1 [17.7]	15.9	0.26	1758	-
R-CCC (EX)	25.1 [26.0]	15.5	0.23	5235	-

**MN**: Compressive strength test conducted after CCC manufacturing, **EX**: Compressive strength test conducted the day before the structural test,  $\sigma_c$ : Compressive strength,  $E_c$ : Static modulus of elasticity,  $\nu$ : Poisson's ratio,  $\epsilon_{max}$ : Strain at compressive strength,  $\sigma_t$ : Splitting tensile strength.

ことで測定した。また、円周方向に貼付したひずみゲージにより横ひずみを測定した。本研究では、静弾性係数と同様の基準により横弾性係数を算出することで、CCCのポアソン比を算出した。

試験結果は、6体の試験体の相加平均値とした。ここで、構造実験に使用するCCCの高さは160mmであることから、強度試験のCCCも高さを約160mmとした。この時、R-CCCは底面側も切断をすることで、モールド缶の底板が強度試験に影響を及ぼさないようにした。圧縮強度算出の際には、JISA 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法(2012)」を参考に、高さと同様の比に関する補正係数を乗じた。なお、表-2中の角括弧内には、補正係数を乗じていない結果も示す。

### 2.3.2 圧縮クリープ試験方法

圧縮クリープ試験は、JISA 1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法(2010)」に準拠して実施した。この時の載荷応力は、表-2の(MN)の結果を参考に、圧縮強度の1/3の値として設定した。クリープ試験に用いたCCCの高さは160mmとし、ひずみはひずみゲージにより計測した。また、無載荷供試体の数は2体とした。圧縮クリープ試験に使用するCCCは、2.2節の手順により作製および養生をした後に、2024/8/7まで図-1中のR-CCCの状態において気中環境で置置した。その後、2024/8/7にCCCを、2.3.1節の強度試験体と同様の状態に加工し、4章で後述する構造実験日の前日(2024/8/21)に試験を開始した。

## 2.4 実験結果

### 2.4.1 圧縮強度試験

表-2にはB-CCCおよびR-CCCの圧縮強度試験の結果

を示す(表中の(MN))であり、(EX)は4章の構造実験の前日の試験結果である。)。表-2中には、JISA 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法(2018)」に準じて取得した、3体のB-CCCの割裂引張強度の相加平均値も示す。

圧縮強度試験において、R-CCCはCCCが円周方向に膨張し、モールド缶を破壊することで試験が終了した。また、表-2から分かるように、モールド缶による拘束効果により、R-CCCの圧縮強度はB-CCCの2倍程度の値を示している。ただし、低強度のモルタル( $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ )において同じモールド缶による拘束効果を検討したところ、モールド缶から脱型した場合の圧縮強度は9.81MPaであり、脱型しない場合の強度は11.6MPaであった。CCCにおいて、モルタルと比較して拘束効果の影響が大きく現れたことには、作製方法が影響していると推察されることから、作製過程におけるコンファインドの増大については、今後詳細に検討する必要がある。

一方で、静弾性係数およびポアソン比に着目をする、R-CCCおよびB-CCCの静弾性係数およびポアソン比は同程度の値であった。図-2には、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には、単位容積質量が $2.02 \text{g/cm}^3$ (B-CCC(MN))および $2.14 \text{g/cm}^3$ (B-CCC(EX))の圧縮強度と静弾性係数の関係<sup>5)</sup>も示す。図から分かるように、B-CCCの静弾性係数は同じ密度のコンクリートと比較して6.6%小さい。本研究で使用したCWFは2.1.1節で述べた通り、作製の過程において破碎およびスクリーニングの処理を経ている。このことから、CWFの骨材量はJASS 5式が想定する標準的なコンクリートよりも少なく、弾性係数に支配的な骨材の影響により、CCCの静弾性係数がコンクリートの値よりも小さくなったと推察される。

また、R-CCCは、静弾性係数が拘束効果により増大しないことから、B-CCCよりもさらに、強度に対する静弾性係数の比は小さくなる。したがって、CCCの実構造物への適用においては、強度増進に比して剛性が増加しないR-CCCの取り扱いに注意する必要がある。

また、本試験で実施したB-CCCの圧縮強度の平均値は13.5MPa、標準偏差は0.86MPaであった。さらに、R-CCCにおいても、圧縮強度の平均値は26.4MPa、標準偏差は

0.39MPaであった。JASS 5<sup>5)</sup>の調合強度の決定において標準偏差は、実績がない場合は普通コンクリートで2.5MPa、高強度コンクリートで $0.1F_m$ (ここで $F_m$ は調合管理強度)と定められており、本実験のB-CCCおよびR-CCCの標準偏差はいずれの基準よりも小さい。したがって、CCCはコンクリートと同程度または、コンクリートよりも強度のばらつきが小さい材料とみなせる可能性がある。さらに、6体のB-CCCのいずれにおいても、CCCの圧縮強度は目標圧縮強度である12MPaより大きい値を示した。このことから、CCCの作製においては、目標の圧縮強度および目標強度に適した作製方法を確立することで、安定的な硬化体を作製可能であると考えられる。

#### 2.4.2 クリープ試験

図-3には、JIS A 1157に準拠して算出した、材齢91日までのB-CCCおよびR-CCCの全ひずみおよび無載荷ひずみを、図-4には単位クリープひずみを示す。図-4中には、文献<sup>9)</sup>の推定式から算出した、各水結合材比(W/B)の単位クリープひずみも示す。算出において載荷開始材齢は40日、相対湿度は60%、試験体寸法は $\phi 100 \times 160 \text{mm}$ 、単位粗骨材量は2.1.1節で述べた廃コンクリートの単位粗骨材量である $975 \text{kg/m}^3$ とした。

図-3に着目をする、R-CCCはモールド缶により表面から水分が逸散しないことから、無載荷ひずみはほとんど生じていない。ただし、R-CCCの全ひずみおよび単位クリープひずみに着目すると、R-CCCのひずみは載荷材齢1日までに著しく増加している。これには、R-CCCは圧縮強度に比して静弾性係数が小さいことから(表-2)、載荷材齢初期におけるひずみが大きくなったことが影響を及ぼしたと推察される。また、図-4より、B-CCCの単位クリープひずみは、W/B 70%のコンクリートと同程度であることが分かる。この値は、実用的なコンクリート(W/B 60%以下)と比較してやや大きいものの、将来的には、CCCの組織の緻密化により解決可能な課題であると考えられる。さらに、R-CCCの単位クリープひずみは、載荷応力がB-CCCよりも約2倍大きいことから、B-CCCと比較して小さく、W/B 40%のコンクリートよりも小さい。このことからR-CCCは、本試験のような密閉状

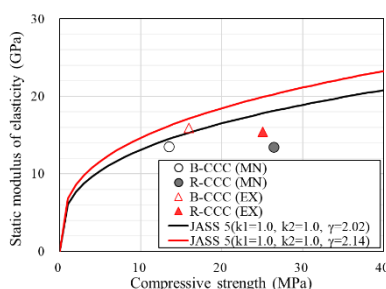


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

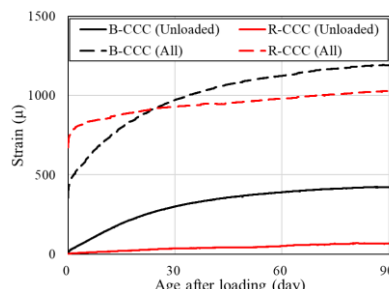


図-3 全ひずみおよび無載荷ひずみ

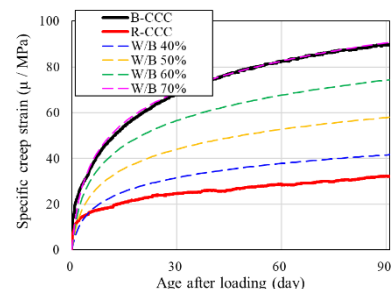


図-4 単位クリープひずみ

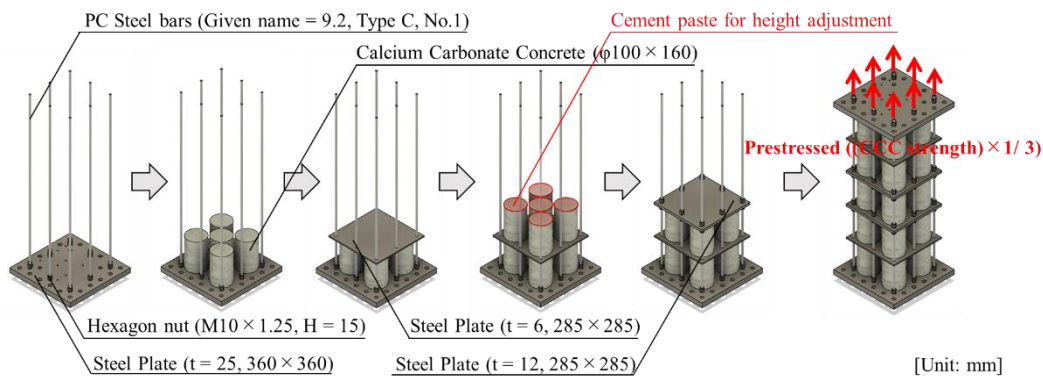


図-5 CCCの組み上げと外部プレストレスの導入による構造部材化

態の使用環境においては、構造物で許容可能な程度の耐クリープ性を有していると推察される。以上より、圧縮クリープ試験の結果からも、CCCの構造部材への適用可能性が示された。なお、B-CCCおよびR-CCCのクリープ挙動には、105℃乾燥を含む作製時の養生<sup>7)</sup>や作製後および試験期間中の水分状態の変化など複雑な要因が影響を及ぼしている。したがって、これらの影響を考慮したCCCのクリープ特性の検討については今後の検討課題とする。

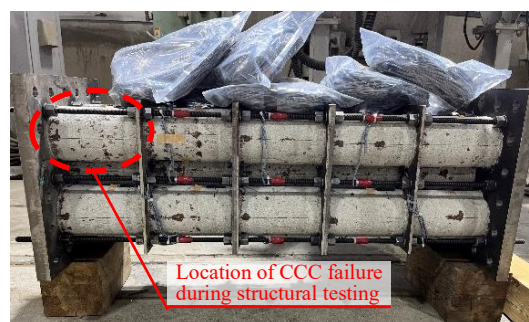


写真-1 作製した構造部材

### 3. CCCを用いた構造部材の作製方法

本章では、2章の方法で作製したCCCの構造部材化に関して、そのコンセプトと作製方法を概説する。

#### 3.1 部材化のコンセプト

2.2節で説明した通り、CCCの作製においては、圧密工程を要する。したがって、作製可能なCCCの断面積には加圧装置に起因する限界があり、本研究では、現在の加圧装置(最大容量1000kN)の都合上、CCCの直径は100mmとした。一方、低層のRC構造物の柱梁部材では、400mm角以上の部材断面積が使用されることが多い。また、高さ方向の観点からは、作製したCCCの整形後の高さは160mmであり、一般的な構造物の階高を満たすためには、CCCを高さ方向に組み上げる必要がある。このような、部材作製の制約の中で、本研究では、外部プレストレスにより、各CCCを平面および高さ方向に一体化することで構造部材の作製を試みた。本研究で試みる外部プレストレスによる一体化手法は、一体化のプロセスにおいて接着剤をほとんど使用しない。そのため、部材全体におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減や分解容易性の観点からも有効な手法であると考えられる。

#### 3.2 構造部材の作製方法

図-5には、構造部材の作製方法を示す。はじめに、CCCの高さが160mmとなるよう、CCCを切断および研磨した。この時、CCCの下面は20mm切断した後に研磨、上面は研磨のみで整形した。次に、厚さ25mmの鋼板にPC

鋼棒を通し、ナットでPC鋼棒を固定した。その後、鋼板の上にCCCを設置し、CCCの上には厚さ6mmの鋼板を設置した。この際、CCCと鋼板の間にはセメントペーストを薄く塗ることで、各層の高さを調整した。以降のCCCと鋼板の間においても同様の処理を行った。厚さ6mmの鋼板の上にもCCCおよび厚さ12mmの鋼板を設置し、厚さ12mmの鋼板はナットでPC鋼棒と固定した。この厚さ12mmの鋼板の上に設置したCCCが構造部材長手方向の中心となるCCCであり、このCCCの1/2の高さを中心点として対称となるよう部材を組み上げた。

最後に5層に組み上げた構造部材にプレストレスをかけることで、最終的な構造部材とした。プレストレスの導入は構造実験の前日に行った。プレストレスは、後述する4.1節のB-CCCおよびR-CCCの圧縮強度を参考に、それぞれの圧縮強度の1/3の応力に対応する荷重を加えた。この際、プレストレスは、PC鋼棒に貼付したひずみゲージにより管理した。写真-1には、B-CCCを組み上げることで作製した構造部材を示す。写真から分かる通り、CCCが一体化し1体の部材となっていることが分かる。本手法による部材化は、CCCのみでなく、CCC以外的大型化が困難な新材料<sup>(例えば8)</sup>にも適用可能である。また、養生中や硬化後に強制炭酸化を実施したい硬化体<sup>(例えば9)</sup>においても、小ブロックを組み上げる本構造形式は、硬化体表面積の増大に寄与するのみでなく、内部に鉄筋を配置しないため有効な部材化手法となる。ただし、本研究

で提案する構造部材は、鋼材の使用量は多い。したがって、部材全体でのCO<sub>2</sub>排出量の削減のためには、今後、鋼材使用量の適正化が必要となる。4章では、本部材を対象に構造実験を実施し、部材性能を評価した。

#### 4. CCCを使用した構造部材の部材実験

##### 4.1 実験前日のCCCの圧縮強度

R-CCCの構造実験は2024/8/22に、B-CCCは2024/8/27に実施した。構造実験の前日には、B-CCCおよびR-CCCを対象に、圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験の手順は、2.3.1節に示した通りである。なお、試験体数は3体とし、試験結果は3体の結果の相加平均値とした。

表-2には、各試験の結果を示す(表中の(EX))。また、圧縮強度試験の応力-ひずみ関係を図-7に示す。表から分かるように、B-CCCの圧縮強度は17.1MPaであることから、材齢経過後においても目標圧縮強度(12MPa)に対して十分な性能を有している。また、表-2の静弾性係数の結果および図-7からも分かるように、B-CCCとR-CCCの初期剛性は同程度である。ここで、B-CCCの圧縮強度が作製後(2.4.1節)から増大した理由は不明であり、水和や乾燥状態の影響を含め今後の検討課題とする。一方で単位容積質量に着目すると、B-CCCの単位容積質量は、作製後(2章)においては2.02g/cm<sup>3</sup>、構造実験前日(本章)においては2.14g/cm<sup>3</sup>であった。作製後の強度試験体(2章)は、105℃で機械乾燥を実施した直後のものであり、構造実験前日の強度試験体(本章)は、運搬および一時

保管の期間を除き、空調設備が整った雨がかりのない作業用テント内で保管されたものである。このことから、静弾性係数の増大には、気中存置の期間における再吸湿が影響を及ぼしたと推察される。

##### 4.2 実験方法

構造部材実験の試験体形状を図-6に示す。実験では、3.2節の方法で組み立てた試験部材の両外側に鋼製スタブを取り付けた試験体セットアップとし、試験部材に逆対称曲げモーメントを作用させる載荷形式(大野式載荷方式)にて、一方向単調載荷を行った。試験部材は、内法スパンが874mm、シリンダーの外寸は250mmである。したがって、シリンダーの外寸を部材せいと仮定した場合のスパンと部材せいの比は3.5となる。実験要因は、モールド缶の有無(B-CCCおよびR-CCC)の2水準とした。また、スタブに固定した片持ちアングルに変位計を取付けて部材端間の相対変位を計測し、部材角を算出した。

##### 4.3 実験結果

図-8に、せん断力-部材角関係を示す。はじめに初期剛性に着目すると、B-CCCおよびR-CCCのいずれの試験体においても、載荷初期の傾きは同程度である。これには、それぞれのCCCの静弾性係数が同程度であることが影響を及ぼしていると推察される。また、モールド缶のないB-CCCは、せん断力が30kNを超えたあたりから、モールド缶付きのR-CCCに比べて徐々に剛性低下が大きくなり、せん断力が60kNで耐力低下を伴って破壊した。一方で、モールド缶付きのR-CCCは耐力および変形性能

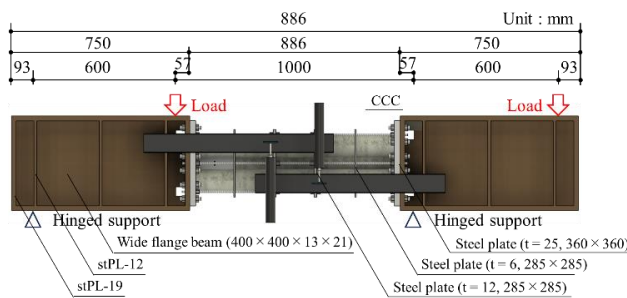


図-6 構造部材の形状

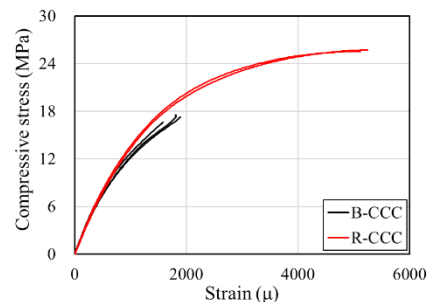


図-7 CCCの応力-ひずみ関係

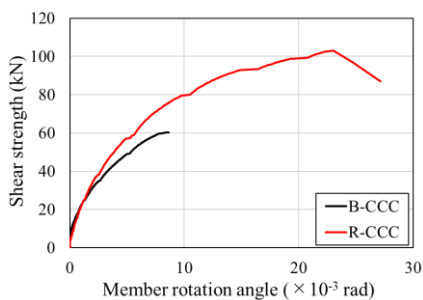


図-8 構造実験のせん断力-部材角関係



写真-2 構造部材におけるB-CCCの破壊状況



写真-3 実験終了後に脱型したR-CCCの破壊状況

ともに向上が見られ、最大せん断力は100kNに達し、部材角は $20 \times 10^{-3}$ radを上回った。各試験体の最大荷重をCCCシリンダー断面積で除した平均せん断応力度は、B-CCC試験体で1.53MPa、R-CCC試験体で2.55MPaであり、それぞれの圧縮強度との比は0.09および0.10と、ほぼ同等の値であった。したがって、提案する構造形式は、層間の鉄板やPC鋼棒と比較して、組上げに使用する材料(本研究においてはCCC)の影響を大きく受けることが推察される。特に、構造試験体の最大荷重には鋼管拘束によるCCCの圧縮強度の増大が、構造試験体の靱性には鋼管拘束によるCCCの靱性の増大が影響を及ぼしたと推察される。

なお、B-CCCおよびR-CCCのいずれの構造部材においても、写真-1に示した位置のCCC(写真手前側のCCCのみではなく、奥のCCCも含む)が破壊し、荷重が低下することで試験が終了した。ここで写真-2には、構造部材におけるB-CCCの破壊の様子を、写真-3には、実験終了後にモールド缶から脱型をしたR-CCCの様子を示す。いずれもCCCシリンダーを斜めに貫通するひび割れが認められたが、R-CCCではモールド缶の拘束によってひび割れの拡大が抑えられたと推測される。

## 5. まとめ

本研究では、CCCの社会実装を最終的な目標とした上で、CCCの力学特性、構造部材化方法、および構造性能を評価した。本研究の成果を以下に示す。

- 1) 圧縮強度試験の結果から、CCC間の強度のばらつきはJASS 5の基準値より小さく、いずれのB-CCCも目標圧縮強度以上の値を示した。
- 2) 本研究のB-CCCはW/B 70%のコンクリートと同程度の単位クリープひずみであった。またR-CCCの単位クリープひずみはW/B 40%のコンクリートよりも小さい値を示した。
- 3) CCCを組み上げ、外部プレストレスを導入することで、構造部材を作製する方法を提案した。
- 4) 部材実験の結果から、CCCを使用した構造部材に関して、提案する部材構成におけるCCC破壊時のせん断強度に関する目安が得られた。また、提案部材は組上げ材料の影響を大きく受けることから、靱性を確保するためには鋼管拘束を含め、CCCの靱性の向上が必要であることが示された。

以上の実験結果から、CCCの構造部材への適用可能性が示された。特に、本研究で提案した構造形式は、その他の新材料にも適用可能な手法であり、将来的な新材料の構造化の1つの方向性を示すものである。

なお、本研究で提案した部材は、加圧装置に起因する作製可能サイズの制限やむき出しのPC鋼棒の配置によ

る耐火性等の面で課題を残している。今後は、本研究の成果を基に、より実用的なCCC部材の提案を目指す。

## 謝辞

本研究は、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)のムーンショット型事業である「C4S(Calcium Carbonate Circulation System in Construction)研究開発プロジェクト(PM:野口貴文)」の支援を受けたものである。本研究の実施にあたっては、東京大学 野口貴文教授、勅使川原正臣教授、丸山一平教授、東京理科大学 衣笠秀行教授、東京理科大学学生の皆様をはじめ、大変多くの皆様にご指導、ご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Habert, G. et al.: Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries, Nat. Rev. Earth & Environ., Vol.1, No.11, pp.559-573, 2020.11
- 2) Maruyama, I. et al.: A New Concept of Calcium Carbonate Concrete using Demolished Concrete and CO<sub>2</sub>, J. Adv. Concr. Technol., Vol.19, Issue 10, pp.1052-1060, 2021.10
- 3) Maruyama, I. et al.: Cold-sintered Carbonated Concrete Waste Fines: A Calcium Carbonate Concrete Block, J. Adv. Concr. Technol., Vol.22, Issue 7, pp.406-418, 2024.7
- 4) Oh, D. et al.: Natural carbonation boost for hardened cement fines by dripping technique, Cem. Concr. Compos., Vol.153, 105731, 2024.10
- 5) 日本建築学会: 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, 日本建築学会, pp.212-283, 2022.11
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針・同解説, 日本建築学会, pp.70-72, 2023.2
- 7) 浅本晋吾, 石田哲也: 微細空隙中の液体特性に着目したコンクリートの時間依存変形機構の検討, 土木学会論文集, Vol.63, No.760, pp.159-172, 2004.5
- 8) Sakai, Y., Tarekegne, B.T., Kishi, T.: Recycling of hardened cementitious material by pressure and control of volumetric change, J. Adv. Concr. Technol., Vol. 14, Issue 2, pp.47-54, 2016.2
- 9) Higuchi, T. et al.: Development of a new ecological concrete with CO<sub>2</sub> emissions below zero, Constr. Build. Mater., Vol.67, Part C, pp.338-343, 2014.9