

論文 CO₂ を固定したコンクリート破砕材を用いた TSC に関する検討

畑中 達郎*1・前原 聡*2・早川 健司*3・伊代田 岳史*4

要旨：筆者らは、型枠に予め粗骨材を敷き詰め、骨材間をグラウト充填することでコンクリートとする Two Stage Concrete の検討を進めている。本研究では、CO₂ を固定したコンクリート破砕材を TSC へ用いる際に、簡便に連続して CO₂ 固定量を把握するために破砕粒度の異なる試料を対象とし、質量法による CO₂ 固定量の評価方法について室内試験を行った。さらに、実大規模のコンクリート試験体から製造したコンクリート破砕材へ CO₂ を固定化させ、TSC 試験体を作製した。その結果、TOC 法の CO₂ 固定化量に対し、質量法は小さい値となった。また、TSC による CO₂ の削減量は、普通コンクリートと比較して 66%程度であった。

キーワード：Two Stage Concrete, カーボンニュートラル, CO₂ 固定, 質量変化, 圧縮強度, 曲げ強度

1. はじめに

2050 年までにカーボンニュートラルを達成することが目標とされ、さまざまな取り組みがコンクリート分野においても進められている。ここで、既設 RC 建造物の解体等で発生する建設廃棄物のコンクリート塊は、再資源化施設に搬入、処理し、再生砕石や再生骨材として再資源化（再資源化率：99%以上 2018 年時点）され、そのほとんどが路盤材として利用されている。ただし、再資源化後の在庫量は、2010 年には 1,034 千 t であったが、2019 年には 1,844 千 t と約 1.8 倍になっており、多くのコンクリート破砕材が再資源化工場等のストックヤードに集積され、余剰状態にある。これらのコンクリート破砕材に対して、CO₂ を積極的に固定化し、再利用範囲を拡大することができれば、脱炭素に貢献できると考える。ここで、筆者らは、骨材間をグラウト充填することでコンクリートとする Two Stage Concrete²⁾（以下「TSC」と称す）の検討を進めており、その骨材として、CO₂ を固定化させたコンクリート破砕材の利用について検討を進めている。

コンクリート破砕材への CO₂ 固定量や固定速度は、破砕材の粒度および原骨材の含有割合等の破砕程度や原コンクリートのセメント量および水セメント比等によって異なると想定されるため、本研究では、原コンクリートの配合および破砕粒度の異なる試料を対象として CO₂ 固定量の検討を行った。ここで、CO₂ 固定量を定量化する方法として熱化学分析等があるが、分析のためには微粉砕等の前処理や専用の分析機器が必要となり、精度よく把握できるものの費用が高価であり、労力も要する。そのため、ある程度の精度で簡便に CO₂ 固定量を求めたい場合には活用しづらい。そこで、本研究では簡便に連続して CO₂ 固定量を把握可能と考えられる質量法による

CO₂ 固定量の評価方法を室内試験にて検討した。さらに、実際の既設 RC 建造物の解体とコンクリート破砕材の処理方法を想定し、実大規模のコンクリート試験体からコンクリート破砕材を作製した。そのコンクリート破砕材を使用した TSC 試験体を作製し、その性能を確認するとともに CO₂ 排出量収支について試算を行い、TSC の優位性を検証した。

2. シリーズ 1 質量法による CO₂ 固定化量の把握に関する室内試験

2.1 試験方法

(1) 使用材料、配合および作製方法

表-1 に使用材料を、表-2 にコンクリートの配合を示す。水セメント比は 40%、55%および 70%とし、単位水量は 174kg/m³、細骨材率は 45%の一定として、各配合において骨材の含有割合を変化させた。コンクリート試験体は、φ100×200mm の円柱試験体とし、28 日間封緘養生した。その後、円柱試験体を載荷試験機、セットハンマーおよびジョークラッシャーを用いて 4 水準（a:0.075~0.3mm 未満, b:0.3~5mm 未満, c:5~20mm 未満, d:20~40mm 未満）に粉砕し、コンクリート破砕材の試料を作製した。なお、粒度 a については、粉砕時に得られる量が少なかったため、複数回にわたり破砕を行い、必要な試料量を確保した。

(2) 試料の恒量化および CO₂ の固定化方法

表-3 に示すように CO₂ 固定化過程の質量変化を理論的に考えると大気中の 44g の CO₂ がコンクリート中に吸収され、74g の Ca(OH)₂ と結合すると、100g の CaCO₃ と 18g の H₂O が生成される。生成された H₂O が逸散しないと仮定すれば、コンクリート中の Ca(OH)₂ が CaCO₃ と H₂O に変化するものの炭酸化前後において変化した質量

*1 東急建設（株）技術研究所 社会基盤技術研究部 土木材料・地盤 G 博士(工学)（正会員）

*2 東急建設（株）技術研究所 社会基盤技術研究部 土木材料・地盤 G グループリーダー 博士(工学)（正会員）

*3 東急建設（株）技術研究所 副所長 兼社会基盤技術研究部 部長 博士(工学)（正会員）

*4 芝浦工業大学 工学部 教授 土木工学課程 担当 博士(工学)（正会員）

はすべて吸収し、結合した CO₂ と考えることができる³⁾。そこで、炭酸化反応以外の乾燥による水分逸散に伴う質量変化を無くすため、破砕材試料を CO₂ 固定化過程と同環境下に静置して恒量化する前処理を行った。

表-4 および図-1 に、事前検討として W/C55% と同等のレディーミクストコンクリートにて実施したコンクリート破砕材試料の恒量化方法を示す⁴⁾。事前検討では、調湿材料に NaBr 飽和溶液および NaBr 粉末、吸湿材料にシリカゲル、調湿吸湿環境として窒素ガスを充填したデシケータおよび真空デシケータを用いた 2 水準の方法を設定し、CO₂ 固定化時と同じ湿度 60%R.H. において恒量となる方法を検討した。具体的には、各デシケータ内に静置した粉砕試料 500g に対し、調湿として約 60%R.H. に保つことが可能な NaBr 飽和水溶液を 5g、NaBr 粉末を 18g、吸湿としてシリカゲル 50g を基本として設置した。また、デシケータ内での恒量化中に空気中の CO₂ と反応して、炭酸化が起きないようにデシケータ内に窒素ガスを充填し、空気と置換した。なお、方法 1 では恒量となるのに 1 カ月程度要したのに対し、方法 2 は、1 週間程度で恒量となった。真空乾燥をさせる方法では 60%R.H. で恒量となる質量以下となるが、3 日程度 60%R.H. の環境に静置することで同等の含水状態にできる結果となった。

本研究では、恒量化方法 2 の前処理として、試料は 3 日に 1 回、表層と内部が入れ替わるようにかき混ぜた。なお、窒素ガスを充填したデシケータ内には温湿度計、CO₂ 濃度計を設置し、温度 20±1℃、湿度 60±5%R.H.、CO₂ 濃度 50ppm 以下となるように、適宜 NaBr 飽和水溶液と粉末の入替えおよび窒素ガスの充填量を管理した。

前処理終了後、コンクリート破砕材試料は、炭酸化槽内（温度 20℃、60%R.H.、CO₂ 濃度 5%）に 14 日間にわたり静置し、随時、質量を計測した。

(3) 燃焼酸化赤外線式 TOC 法および骨材含有割合

炭酸化終了後の試料をボールミル等により微粉砕し、その試料にリン酸を滴下し、加熱により CO₂ をガス化さ

せる燃焼酸化赤外線式 TOC 法を用いて、遊離した CO₂ を赤外線ガス検知器により測定した⁵⁾。

次に、CO₂ 固定量は試料中のセメントペースト含有量により異なると予想されたため、各試料のセメントペーストを 20% 硝酸水溶液により溶解させ、試料中に含まれる骨材とセメントペーストの割合を把握した⁶⁾。具体的には、CO₂ 固定後の試料約 50g を微粉砕し、その中から 5g を採取し、20% 硝酸水溶液に 60 分浸漬、攪拌した。その後、吸引ろ過を行い、ろ紙にとどまった試料を炉乾燥させ、絶乾質量を測定し、骨材量とした。

2.2 試験結果

(1) 質量法による質量変化率

図-2 に質量法による質量変化率を示す。これによると、何れの W/C においても質量変化が認められた。水セメント比毎の経時変化は W/C55 および W/C70% においては炭酸化 7 日程度で変化が小さくなっており、W/C40% は炭酸化 7 日から 14 日においても変化があった。粒度別の質量変化率は、いずれの W/C においても、細粒の a が大きく、b~d はほぼ同程度であった。

(2) 骨材割合試験

表-5 に骨材割合試験の結果を示す。骨材割合は、約 63~86% であった。粒度 a~d の平均値は、配合上と同程度であり、粒度ごとの骨材割合の違いを示すことができていることから試験方法は妥当であったと考えている。

粒度 b~d は概ね配合から推定される値より若干、大きな結果であった。一方、粒度 a においては、配合から推定される値より小さくセメントペーストが約 1.5~1.7 倍多く含まれていた。

表-3 炭酸化反応による質量変化

項目	反応前		反応後	
化学式	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃	H ₂ O
モル質量(g/mol)	74	44	100	18

表-4 恒量化方法⁴⁾

期間	0~28 日目	29 日目以降
方法 1	デシケータ (窒素ガス充填) (吸湿：シリカゲル)	デシケータ (窒素ガス充填)(調湿：NaBr 飽和溶液/粉末)
期間	0~3 日目	4 日目以降
方法 2	真空デシケータ (吸湿：シリカゲル)	デシケータ (窒素ガス充填) (調湿：NaBr 飽和溶液/粉末)

表-1 使用材料

種類	記号	物性等
水	W	上水道水(密度 1.00g/cm ³)
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³)
細骨材	S1	八王子産砕砂(表乾密度 2.63g/cm ³ 、粗粒率 3.01)
	S2	富津産山砂(表乾密度 2.61g/cm ³ 、粗粒率 1.57)
粗骨材	G	大月産砕石 2005(表乾密度 2.62g/cm ³ 、粗粒率 6.75)
化学混和剤	Ad1	AE 減水剤(リグニンスルホン酸系)
	Ad2	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)
	AE	AE 剤(アルギルエーテル系陰イオン界面活性剤)

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2	AE
40	45	174	435	570	190	927	-	2.61	0.87
55			316	603	201	981	1.42	-	0.63
70			249	622	207	1012	0.75	-	0.99

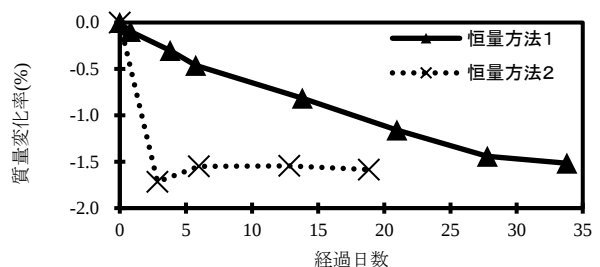


図-1 恒量化結果（粒度 b）⁴⁾

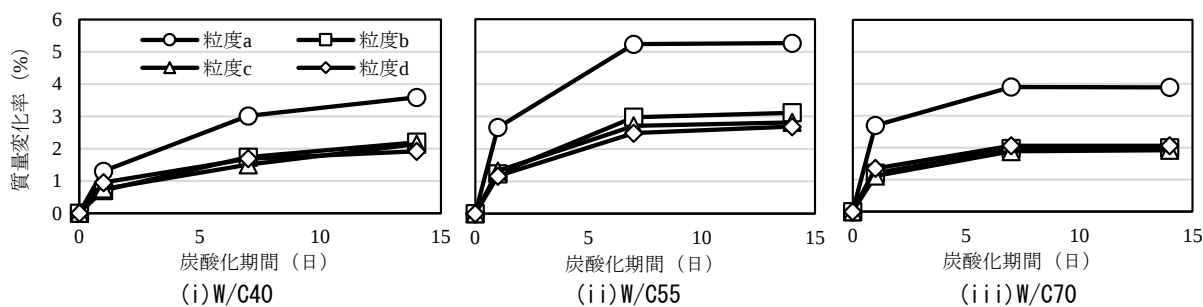


図-2 質量法による質量変化率

表-5 骨材割合試験

(i)骨材							(ii)セメントペースト						
W/C (%)	粒度 a	粒度 b	粒度 c	粒度 d	平均 (%)	配合上 (%)	W/C (%)	粒度 a	粒度 b	粒度 c	粒度 d	平均 (%)	配合上 (%)
40	63.1	78.3	75.9	75.5	73.2	73.4	40	36.9	21.7	24.1	24.5	26.8	26.6
55	64.5	80.5	86.0	77.8	77.2	78.5	55	35.5	19.5	14.0	22.2	22.8	21.5
70	69.5	80.3	85.4	84.6	80.0	81.3	70	30.5	19.7	14.6	15.4	20.1	18.7

(3) CO₂ 固定化量

質量法による質量変化率は、全て CO₂ が固定化されたことによる変化として考え、ここでは、試料中のセメント量 100kg に対しての固定量について検討した。水セメント比と粒度毎の CO₂ 固定量の関係を図-3 に示す。ここで、セメント量 100kg あたりの CO₂ 固定化量は、式(1)にて算出した。

$$\text{CO}_2\text{固定量} = \frac{A}{B \times D} \times 100 \quad (1)$$

ここで、CO₂ 固定量: (CO₂-kg/セメント 100kg あたり), A: 炭酸化期間 14 日における試料の質量変化率(%), B: 表-5(ii) 試料中のセメントペースト割合(%), D = C / (W+C): 配合上のセメントペースト中のセメント割合(%), W: 単位水量(kg), C: 単位セメント量(kg)

これによると、セメント量あたりの CO₂ 固定量は、粒度の違いによる関係は認められず、粒度 a の質量変化が大きくなったことは、コンクリート破砕材試料に含まれるセメントペースト量に依存していると考えられ、粒度を小さくすることが必ずしも CO₂ 固定量の増加につながらない結果となった。また、W/C55、70%と比較し、W/C40%では、セメント量あたりの CO₂ 固定量が小さいこと、および、炭酸化 7 日から 14 日の質量変化率が増加

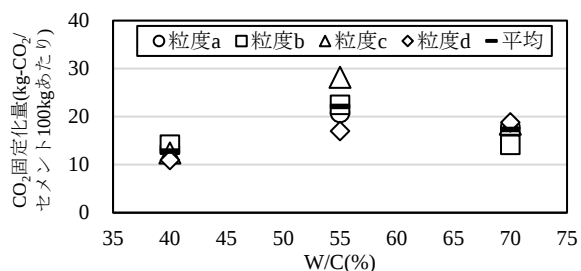


図-3 水セメント比と粒度毎の CO₂ 固定量の関係

傾向にあることから、CO₂ 固定量を増加させる余地があると考えられる。

(4) 質量法と TOC 法の関係

質量法による質量変化率は、全て CO₂ が固定化されたことによる変化として考え、試料 1t に対して質量変化率を乗じることで、試料 1t あたりの CO₂ 固定量を算出した。図-4 に質量法と TOC 法の関係を示す。これによると、質量法による CO₂ 固定化量が増加すると TOC 法による CO₂ 固定化量も増加しており、概ね相関関係にあることが確認できた。しかしながら、質量法による CO₂ 固定化量は TOC 法よりも小さい値となり、質量法による評価方法では CO₂ 固定化量を少なく評価することが示唆された。ここで、既往の研究 7)において、質量増加率を密度・吸水試験に際して測定した炭酸化前後の絶乾質量から算出し、CO₂ 吸収量を TG-DTA (熱重量示差熱分析) から定量し、その結果、質量増加率と CO₂ 吸収量は、概ね 1 : 1 の関係になるとされている。本研究で質量法による CO₂ 固定化量が小さくなった要因としては、試料の CO₂ 固定化過程で生成された水分の逸散やコンクリート破砕材試料の作製時、前処理時に炭酸化が進行していること、また、TOC 法による測定は結晶 CaCO₃ 以外で結合した CO₂ を捉えていること等が影響している可能性があり、今後より詳細な検討が必要と考える。

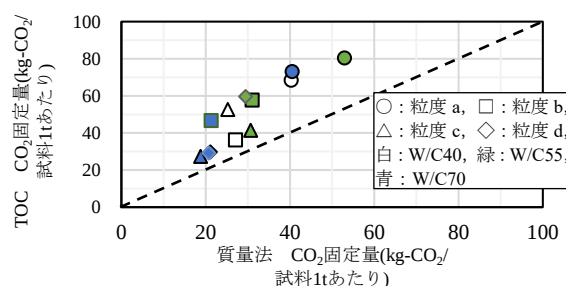


図-4 質量法と TOC 法の関係

3. シリーズ 2 実大規模の破碎により作製したコンクリート破砕材による CO₂ 固定化量の評価試験

3.1 試験方法

(1) 使用材料、配合および作製方法

表-6 に実大規模のコンクリート試験体の構造形式と材齢を、表-7 にコンクリートの配合を示す。使用セメントは早強と普通ポルトランドセメントで、それぞれ水セメント比が 46%, 63%である。細骨材は、陸砂、山砂、砕砂、粗骨材は砕石が用いられている。実大規模の破碎を想定して、表-8 に示す機械を用いてコンクリート破砕材を作製した。シリーズ 2 においては、破碎に必要なエネルギーを少なくするために破碎機による破碎は RC40mm 相当を想定し、1 回のみ実施した。

作製したコンクリート破砕材は、2 章と同様に粒度 4 水準 (a:0.075~0.3mm 未満, b:0.3~5mm 未満, c:5~20mm 未満, d:20~40mm 未満) の骨材割合を把握した。

(2) 試料の CO₂ 固定化方法

4 章での TSC の検討に使用する破砕材は、既往の研究²⁾を参考にグラウト材の充填性を考慮して粒径を 10mm 以上とした。粒度 c, d のコンクリート破砕材を粒径 10~20mm 未満, 20~25mm 未満, 25~40mm 未満に再分級し、室内試験で測定可能な量 300g 程度を採取した。試料の恒量化および CO₂ 固定化方法は、2 章と同様の方法とし、質量法による CO₂ 固定化量を測定した。また、4 章で使用した破砕材については炭酸化処理のみを行った。具体的には、破碎後 4 カ月程度屋外、6 カ月程度室内で気中保管し、その後、炭酸化槽内 (温度 20℃, 60%R.H., CO₂ 濃度=5%) に 3 日間静置して炭酸化処理を行った。

3.2 試験結果

(1) 骨材割合試験

表-9 に骨材割合試験結果を示す。骨材割合は、約 50~78%であり、粒度 a~d の平均値は、配合上より小さい

表-6 実大規模コンクリート試験体の構造形式と材齢

試験体	構造形式/寸法(m)	解体時材齢
A	基礎/1.5×2.5×0.7	約 2 ヶ月
B	L 型擁壁/2.1×6.0×3.0	約 6 カ月

表-7 コンクリートの配合

コンクリート 破砕材	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
A(呼び強度 30)	46	40.7	188	410	668	1007	4.10
B(呼び強度 21)	63	47.9	167	265	886	976	3.18

表-8 使用機械

機械	仕様
バックホウ クローラ型	バケット容量 0.8m ³ , 機関出力 123kW, 燃料消費率 0.124l/kW-h, バケット, ニブラ, ブレーカー
自走式破砕機	30t 級, 機関出力 140kW, 燃料消費率 0.191 l/kW-h, ジョークラッシャー

表-9 骨材割合試験の結果

W/C (%)	粒度 a	粒度 b	粒度 c	粒度 d	平均 (%)	配合上(%)
46	58.4	69.2	77.6	76.0	70.3	73.7
63	50.9	65.4	78.5	78.0	68.2	81.2

値となった。粒度 a はシリーズ 1 と同様に骨材が少なくセメントペーストが多く含まれていた。配合上に対する平均値がシリーズ 1 と違った要因としては破碎機械の規模の違いが影響していると考えられた。

(2) コンクリート破砕材の CO₂ 固定量

図-5 にコンクリート破砕材による CO₂ 固定量を示す。これによると、セメント量あたりの CO₂ 固定量は、シリーズ 1 と同様に粒度の違いによる関係は認められず、シリーズ 1 の W/C55%および 70%と同程度となった。よって、本章での使用したコンクリート試験体と破碎方法の範囲内では、室内試験と比較し、破碎機械の規模および骨材含有割合の違いがセメント量あたりの CO₂ 固定化量に及ぼす影響は小さいと考える。

4. コンクリート破砕材による TSC の性能評価

4.1 試験方法

(1) 使用材料と試験ケース

TSC の充填材として用いるグラウト材の使用材料を表-10 に、グラウト材の配合とフレッシュ性状を表-11 に示す。ここで、グラウト材の必要性能は、既往の研究⁸⁾では、JP 漏斗を通過すること (流下時間制限なし)、ミニスランプフローが 400mm 以上、流動時間が 75 秒以上の 3 つを満たすことが条件としている。本研究では、グラウト材の配合は、既往の研究⁸⁾をもとに細骨材を山砂から珪砂に変えたものについて検討し、その配合は必要性能を満足した。

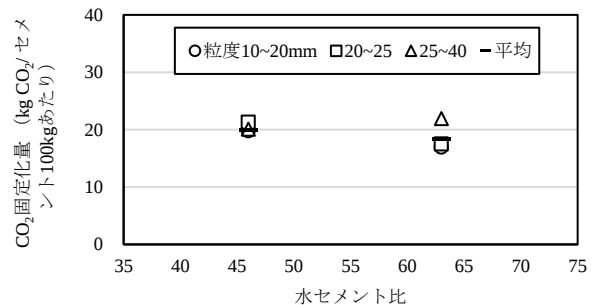


図-5 CO₂ 固定化量

表-10 グラウト材の使用材料

種類	記号	使用材料
水	W	上水道水
結合材	B	OPC 普通ポルトランドセメント
		GGBS 高炉スラグ微粉末 4000
細骨材	S1	珪砂 5 号(粒径 1.12~0.1mm)
	S2	珪砂 7 号(粒径 0.425~0.075mm)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)
	ASK	水中不分離剤(セルロース系)
混和材	CSA	膨張材(石灰系)

表-11 グラウト材の配合とフレッシュ性状

W/B (%)	単位量(kg/m ³)							フレッシュ性状		
	W		B		S1	S2	ASK	SP	CSA	JP 漏斗 通過
			C	GGBS						
55	443	242	564	443	363	2.02	8.06	20	415	126

表－12 に TSC 試験体の試験ケースを示す。コンクリート破砕材の粒度は、グラウト材の充填性を確保するために 10mm 以上とし、10-20mm 未満、10-25 mm 未満、10-40 mm 未満の 3 水準を設定し、コンクリート破砕材の粒度の違いが TSC の強度に及ぼす影響を検討した。なお、破砕材は粗骨材の粒度分布内 (JIS A 5023) に収まるように分級した試料をそれぞれ混合した。

(2) 試験方法

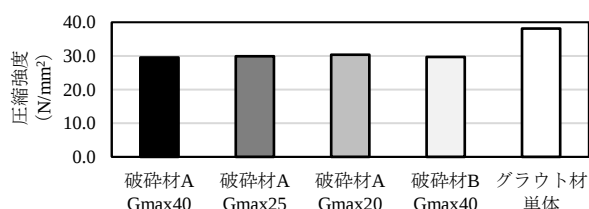
TSC 試験体は、シリーズ 2 で作製した CO₂ 固定化後 (気乾状態) のコンクリート破砕材を型枠にあらかじめ敷き詰め、質量を測定して型枠容積に対する破砕材容積を求めた。グラウト材は、ハンドミキサーにより作製後、型枠の上面から充填した。試験体は、φ150×300mm の圧縮強度試験用、150×150×530mm の曲げ強度試験用について各 3 体を作製し、28 日間にわたり実験室屋内において封緘養生を行い、その後、圧縮強度および曲げ強度試験を行った。

4.2 試験結果

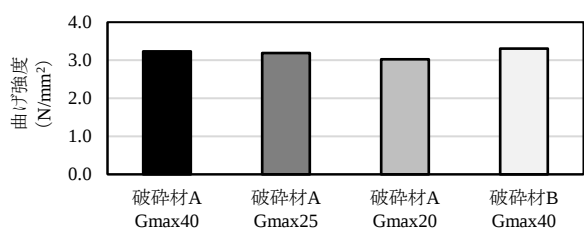
図－6 に圧縮強度、図－7 に曲げ強度の結果を示す。これによると、圧縮強度および曲げ強度は、破砕材の種類や粒度に関係なく、概ね同等の値を示した。ここで、既往の研究⁹⁾によると、粗骨材の種類 (砕石、バラスト、再生骨材) における圧縮強度差は小さく、TSC は粗骨材の影響を受けにくいとされている。また、グラウト材単体の硬化体と比較して、TSC の圧縮強度は 60～90%程度となる⁹⁾が、本研究では 80%程度となり、同様の傾向を示した。

表－12 TSC 試験体の試験ケース

破砕材 粒度(mm)	10-20	10-25	10-40
A(密度 2.38g/cm ³)	破砕材容積 0.49m ³ /m ³	破砕材容積 0.49m ³ /m ³	破砕材容積 0.50m ³ /m ³
B(密度 2.45g/cm ³)	—	—	破砕材容積 0.49m ³ /m ³



図－6 圧縮強度結果



図－7 曲げ強度結果

5. CO₂ を固定したコンクリート破砕材を用いた TSC の CO₂ 削減効果の試算

5.1 試算概要と条件

CO₂ を固定した破砕材を用いた TSC の CO₂ 削減の効果について試算した。ここでは、TSC 試験体と同等の強度レベルとなる普通および高炉 B 種コンクリート (W/C55%) の配合とし、それらを 1m³ 作製すると仮定し、比較した。表－13 に CO₂ 排出量原単位¹⁰⁾を示す。CO₂ 排出量の算定は、製造に関わる CO₂ 排出量のみを検討し、表－14 に示す配合の使用材料に対して、排出量原単位を乗じて、その総和とした。

普通および高炉 B 種コンクリートでは、用いた骨材を砕石および砕砂とし、CO₂ 排出量原単位はそれぞれの数値を採用した。

TSC では、グラウト材に用いた珪砂の CO₂ 排出量原単位は砕砂を、膨張材の CO₂ 排出量原単位は普通ポルトランドセメントの数値を採用した。また、TSC のグラウト材と破砕材の容積割合は、TSC 試験体の破砕材容積より、50 : 50 とした。コンクリート破砕材製造時の CO₂ 排出量は、破砕 1 回あたりの施工サイクルおよび使用機械の機関出力等をもとに式(2)にて算定した。

$$\text{コンクリート破砕材の CO}_2 \text{ 排出量} = \frac{A \times B \times C \times D}{E} \quad (2)$$

ここで、コンクリート破砕材の CO₂ 排出量 : (CO₂—kg/t), A : 施工機械の機関出力(kw), B : 施工機械の燃料消費率(L/kw-h), C : 運転時間(h), D : 燃料(軽油)1L あたりの CO₂ 排出量(2.62 kg-CO₂/L), E : 運転時間におけるコンクリート破砕材の製造量(t)

次に表－15 にコンクリート破砕材による CO₂ 固定化量について示す。粒度 10-40mm の破砕材について、4 章での質量法による質量変化率から試料 1t あたりの CO₂ 固定量を算出した。さらに型枠に詰めた破砕材容積をもとに 1m³ に必要な破砕材量を求め、それに対して試料 1t あたりの CO₂ 固定量を乗じ、破砕材による CO₂ 固定量とした。

表－13 CO₂ 排出量原単位 (kg-CO₂/t)¹⁰⁾ に※追記

OPC	BB	GGBS	砕砂	砕石	※破砕材
807	471	40.2	7.09	7.09	3.1

※(バックホウ 2.0+自走式破砕機 1.1)=合計 3.1(kg-CO₂/t)

表－14 コンクリートおよび TSC の配合
(i) コンクリート

種類	W	C	S	G
普通コンクリート	174	316	804	981
高炉 B 種コンクリート	170	309	846	976

(ii) TSC

材料	W	C	GGBS	S	CSA	G	容積割合
グラウト材	221	121	282	403	1	—	50
破砕材	—	—	—	—	—	1172	50

5.2 試算結果

表-16 に CO₂ 収支を示す。普通コンクリートと比較して、高炉 B 種コンクリートは 42%程度の削減となり、TSC によるものでは 66%程度の排出量削減が見込まれた。なお、今回の検討では、破砕材の運搬、グラウト材製造などの TSC の施工時の CO₂ 排出量は含まれていないが、解体で発生した破砕材を現地で使用することによる再生工場への運搬量削減やグラウト注入による施工機械の小型化などにより、CO₂ 排出量の低減がより図れると考えられる。さらには、利用可能な破砕材粒径を 10mm 以上と設定していることから 10mm 以上の破砕材を採取しやすい破砕方法の検討および 10mm 以下の破砕材について、グラウト材への利用などを検討することで、さらなる CO₂ 排出量の削減が期待できると考える。

6. まとめ

- 本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。
- (1)コンクリート破砕材について、質量法および TOC 法から求められる CO₂ 固定量は、概ね相関関係が確認できた。しかしながら、TOC 法の CO₂ 固定化量に対して質量法から求まる CO₂ 固定化量は小さくなり、今後より詳細な検討が必要と考える。
 - (2)実大規模と室内試験により作製したコンクリート破砕材を比較すると、骨材含有割合に違いがあるものの破砕機械の規模がセメント量あたりの CO₂ 固定化量に及ぼす影響は小さかった。
 - (3)TSC 試験体の圧縮強度、曲げ強度は、破砕材粒径の違いに関わらず、同程度となった。また、TSC 試験体の圧縮強度はグラウト材単体の圧縮強度の 80%程度となり既往の研究と同様の傾向となった。
 - (4) CO₂ を固定したコンクリート破砕材を用いた TSC による CO₂ 削減効果は、普通コンクリートと比較して、66%程度であった。

謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所、東京理科大学、芝浦工業大学、飛島建設株式会社との共同研究による成果の一部です。ここに関係者への謝意を示します。

参考文献

- 1) 経済産業省製造産業局素材産業課：平成 31 年・令和元年 砕石等統計年報，2019
- 2) 野口優理香，興水理咲，伊代田岳史：環境配慮型 TSC の検討～環境負荷を低減したグラウト材の開発に

表-15 コンクリート破砕材の CO₂ 固定量

項目	破砕材	破砕材粒度(mm)			合計
		10-20	20-25	25-40	
試料 1t あたりの CO ₂ 固定化量(CO ₂ -kg/t)	A	28	34	34	—
	B	20	23	31	—
破砕材量(t/m ³)	A	0.481	0.152	0.539	1.172
	B				
破砕材による CO ₂ 固定量(kg)	A	13.4	5.1	18.5	37.0
	B	9.6	3.5	16.9	30.0

表-16 コンクリート 1m³ (W/C55%) 製造時の CO₂ 収支

種類	CO ₂ (kg)			削減率(%)
	排出	固定	収支	
普通コンクリート	268	0	268	—
高炉 B 種コンクリート	155	0	155	42
TSC (破砕材 A)	126	37	89	67
TSC (破砕材 B)	126	30	96	64

- 向けて～，第 77 回セメント技術大会講演要旨，pp.286-287，2023
- 3) 荒渡光貴，関健吾，取違剛，渡邊賢三，向俊成ほか：炭酸化養生前後における質量変化に基づく炭酸化の進行評価に関する基礎的検討，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，V-450，2022
 - 4) 畑中達郎，鈴木将充，前原聡，早川健司，伊代田岳史：コンクリート破砕材への CO₂ 固定化に関する検討，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，V-40，2024
 - 5) 安田僚介，島崎大樹，七澤章，森泰一郎：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，pp.442-447，2021
 - 6) 栗原哲彦，溝本優介，小川智彦：酸溶解により得られた再生粗骨材の物性値，セメント・コンクリート論文集 Vol.73，pp.379-386，2019
 - 7) 松田信広，井上優作，伊代田岳史：強制炭酸化を行った低品質再生細骨材の CO₂ 吸収量と改質効果の定量化に関する検討，第 77 回セメント技術大会講演要旨，pp.274-275，2023
 - 8) 内藤雄也，八尋瑠奈，伊代田岳史，白石真由奈：コンクリートスラッジを活用したグラウト材を用いた TSC に関する研究，第 78 回セメント技術大会講演要旨，pp.170-171，2024
 - 9) 野口優理香，内藤雄也，伊代田岳史：環境配慮型 Two Stage Concrete の実現に向けたグラウト材と骨材の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No1，pp.1153-1158，2024
 - 10) 日本コンクリート工学会：セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，2024.9