

論文 炭酸化した粒状化再生粗骨材および炭酸化スラッジ微粉末を用いた舗装用コンクリートの力学的特性に関する基礎検討

長沢 匠希*1・Lett Wai Nwe*2・鎌田 知久*3・上野 敦*4

要旨: 本研究では、戻りコンクリートから製造した粒状化再生粗骨材、模擬スラッジ水に CO₂を作用させて製造した粉末を用いて舗装用コンクリートを作製し、粒状化再生粗骨材の炭酸化および炭酸化スラッジ微粉末がコンクリートの力学的特性等に及ぼす影響を検討した。その結果、粒状化再生粗骨材の炭酸化により圧縮強度、曲げ強度および破壊エネルギーが改善した。しかし、曲げ強度および破壊エネルギーについては、結合材の内割で炭酸化スラッジ微粉末を用いた場合、粒状化再生粗骨材の炭酸化の有無に関わらず同等となることが示され、セメントペースト相の強度低下によるものと推察された。

キーワード: 粒状化再生粗骨材, 炭酸化, 炭酸化スラッジ微粉末, 舗装用コンクリート, 力学的特性

1. はじめに

2020年の全国生コンクリート工業組合連合会の調査委託報告書¹⁾では、戻りコンクリートの発生率は、生コンクリート総出荷量の2.1%とされている。また、生コンクリート工場では、製造設備およびトラックアジテータのドラムの洗浄によってスラッジ水が発生する。これらの戻りコンクリートやスラッジ水の再利用および処理方法の検討が望まれている。

戻りコンクリートの利用先の1つに粒状化再生骨材がある。粒状化再生骨材は、生コンクリートに吸水効果のある粒状化材料等を混合することで流動性を低下させ、粒状とした骨材である。通常、再生骨材とは、構造物の解体で生じたコンクリート塊を破砕して製造する骨材である。JIS A 5021~5023では、「運搬車から排出後1~3日で砂粒状に砕いたものは除く」と規定されている。そのため、材齢0日で破砕することなく、直接粒状化させた後に硬化させて製造する粒状再生骨材は、現在のコンクリート用再生骨材の規格には適合しない。

再生骨材をコンクリート材料として普及させるためには、材料特性の影響を受けにくい利用先を検討することが有効である。その利用先の1つに、舗装用コンクリートが考えられる。舗装用コンクリートは、単位水量が少ない硬練りコンクリートであるため、吸水率の大きい再生骨材を用いても材料特性の影響を受けにくい可能性があると考えられる。

近年、脱炭素社会に向けた様々な取り組みが進められている中、建設分野においては、セメントの製造段階におけるCO₂の排出量が問題視されている。しかし、セメントコンクリートはCO₂を固定するポテンシャルもあり、CO₂を吸収・固定化したCCU(Carbon dioxide Capture and

Utilization)材料としても注目されている。コンクリートの炭酸化は、コンクリート中の水和生成物である水酸化カルシウム(以下、CH)等がCO₂と反応し、炭酸カルシウム(以下、CC)等に変化する現象であり、組織が緻密になる場合が多い。再生骨材やスラッジ水には、カルシウムイオン、水和生成物や未水和セメント粒子が多く含まれているため、CCU材料として利用できる可能性が高い。

本研究では、粒状化再生粗骨材および水とセメントを用いて作製した模擬スラッジ水にCO₂を作用させて粉体とした炭酸化スラッジ微粉末(以下、CSP)を用いて舗装用コンクリートを作製し、粒状化再生粗骨材の炭酸化とCSPの使用がコンクリートの力学的特性等に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。また、粒状化再生粗骨材およびCSPを用いたことによる廃棄物減量と両材料が炭酸化によって固定したCO₂量を試算した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 結合材

本研究で使用した結合材の物性値を表-1に示す。セメントは、密度3.16g/cm³の普通ポルトランドセメント(OPC)を使用した。CSPは、OPCと水の懸濁液(懸濁液中のOPCの質量濃度20%)にCO₂をタンクの質量減量で1kg/minの条件で作用させ、スプレードライヤを用いて製造されたものを使用した。スプレードライヤによる製造は、懸濁液をチャンバー内に噴霧して乾燥させるため、チャンバー下で回収される粒子(表-1中の「チャンバー」と乾燥中に吹き飛ばされ、サイクロン下で回収される粒子(表-1中の「サイクロン」)がある。本研

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 特任助教 博士(工学)(正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 助教 博士(工学)(正会員)

*4 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 准教授 博士(工学)(正会員)

究では、両箇所でも回収された CSP を全量用いることとし、回収される量に基づいて「チャンパー」:「サイクロン」を質量比 3:1 で使用した。使用した CSP の SEM 画像を写真-1 に示す。スプレードライヤの機構を考慮すると、粒子径は「チャンパー」で大きく、「サイクロン」で小さくなる。写真-1 での両 CSP はこの傾向を明確に示しているが、表-1 中の比表面積は「チャンパー」の方が「サイクロン」と比較して大きい。また、別途実施したレーザ回折による粒度分布の測定結果からは、両 CSP がピーク径および体積平均径ともにほぼ同等の粒度分布を示していた。これらの結果を考慮すると、「チャンパー」の CSP は「サイクロン」の CSP と同等の微細粒子のゆるい集合体となっている可能性が考えられる。

(2) 細骨材および粗骨材

本研究で使用した細骨材および粗骨材の物性値を表-2 に示す。細骨材には大井川水系の陸砂を使用し、普通粗骨材として青梅産硬質砂岩碎石を使用した。粒状化再生粗骨材については、炭酸化の有無により特性が異なるため、炭酸化前後について記載した。

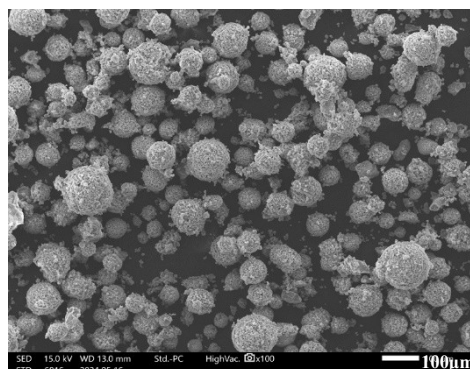
粒状化再生粗骨材は、OPC、硬質砂岩碎石および砕砂を用いた W/C : 57%, スランプ : 18cm のコンクリートに古紙由来のセルロース系の粒状化材料を添加して、トラックアジテータのドラムの回転によって粒状化して製造した(写真-2)。粒状化後約 10 ヶ月間、実験室内に保管されたものを炭酸化前の状態とした。この粒状化再生粗骨材に対して、粒子内部への CO₂ の運搬媒体として水の吸収を利用する観点で、既往の研究²⁾を参考に、水道水と CO₂ を用いて作製した飽和炭酸水を炭酸化前の吸水率に相当する 50mL/kg をスプレーで噴霧し、攪拌後に 20°C、60%R.H.、CO₂ 濃度 5% の促進中性化槽内に 1 週間保管し、強制的に炭酸化させた。

2.2 舗装用コンクリートの配合

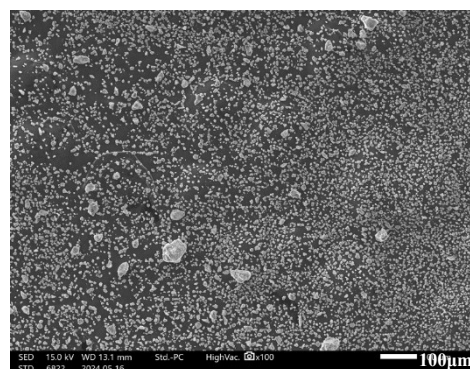
舗装用コンクリートの計画配合を表-3 に示す。配合名は、粒状化再生粗骨材を「RG」、これを炭酸化したものを「CRG」、両再生粗骨材による置換率を数字で表している。目標スランプは 3±1cm、目標空気量は 4.5±1.5% とし、W/B を 50%、単位水量を 140kg/m³、単位粗骨材かさ容積を 0.743m³/m³ の一定とした。粒状化再生粗骨材による普通粗骨材の置換率は 0, 50, 100vol.% の 3 水準、CSP

表-1 結合材の物性値

種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	CC量(%)	CH量(%)
OPC	3.16	3190	—	—
CSP	チャンパー	2.48	48.0	5.2
	サイクロン	2.49	50.3	5.7



(a) チャンパー



(b) サイクロン

写真-1 CSP の SEM 画像



写真-2 粒状化再生粗骨材の外観

表-2 細骨材および粗骨材の物性値

種別	記号	最大寸法 (mm)	密度(g/cm ³)		吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	粗粒率 F.M.	CC量 (%)	CH量 (%)
			表乾	絶乾						
砕砂	S	—	2.59	2.54	1.94	1.78	70.1	2.65	—	—
碎石2005	G	20	2.65	2.64	0.53	1.64	62.2	6.64	—	—
粒状化(炭酸化前)	RG	20	2.42	2.29	5.78	1.33	58.1	7.08	3.3	3.2
粒状化(炭酸化後)	CRG	20	2.52	2.42	3.83	1.41	58.2	—	13.2	5.5

表-3 コンクリートの計画配合

配合名	RG置換率 (vol.%)	CSP置換率 (wt.%)	W/C (%)	W/B (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SP (B×%)	AE助剤 (B×%)	
							W	OPC	CSP	S	G	RG			CRG
N	0	0	50	50	0.743	36.4	140	280	0	684	1225	0	0	1.3	0.008
N-CSP	0	20	63			35.9		224	56	671	1225	0	0	1.4	0.012
RG50	50	0	50			38.4		280	0	723	612	523	0	0.9	0.007
RG100						100				40.6	764	0	1043	0	0.8
RG50-CSP	50	20	63			38.0		224	56	710	612	523	0	1.7	0.012
RG100-CSP						100				40.2	751	0	1043	0	1.8
CRG50	50	0	50			38.4		280	0	723	612	0	540	0.8	0.007
CRG100						100				40.6	764	0	0	1078	0.6
CRG50-CSP	50	20	63			38.0		224	56	710	612	0	540	2.0	0.012
CRG100-CSP						100				40.2	751	0	0	1078	0.7

による OPC の置換率は 0 および 20wt.% の 2 水準とし、計 10 配合で試験した。なお、単位水量が少ないため、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤 (SP) と空気連行助剤 (AE) を使用した。各配合のコンクリートは、材齢 1 日後に脱型し、20℃ の水中で 28 日間養生した。

2.3 試験項目と方法

(1) 粒状化再生粗骨材と CSP の CH および CC 量

表-2 に示す炭酸化前後の粒状化再生粗骨材および CSP の CH 量と CC 量は、示差熱重量分析 (TG-DTA) により測定した。CH 量は 400~500℃ の質量減少量から求め、CC 量は 600~850℃ の質量減少量から求めた。炭酸化前および炭酸化後の粒状化再生粗骨材は、それぞれ 300g 採取し、100g の試料 3 個に縮分し、縮分後の試料を全量粉砕して、付着モルタル、付着セメントペーストおよび原骨材を全量含む粉末試料を試験に供した。

(2) コンクリートの試験

フレッシュコンクリートのスランブおよび空気量は、それぞれ JIS A 1101 および JIS A 1116 に従って測定した。

硬化コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度は、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1149 および JIS A 1106 に従って試験した。破壊エネルギーは、JCI-S-001-2003 に準拠し、変位制御 (0.1mm/min) として载荷中の開口変位を測定することにより求めた。

3. 結果および考察

3.1 粒状化再生粗骨材中の CH, CC 量と骨材の物性

表-2 に示したとおり、炭酸化前の粒状化再生粗骨材の CC 量は 3.3%, CH 量は 3.2% であり、炭酸化後は、それぞれ 13.2%, 5.5% となり、炭酸化処理により、CC 量は約 10% 程度、CH 量は約 2% 程度増加している。CH 量の増加は、既往の研究³⁾でも示されているとおり、バテライトやアラゴナイトの脱炭酸が測定に含まれたと考えられる。炭酸化前後で絶乾密度および吸水率を比較すると、絶乾密度は炭酸化により若干大きくなり、吸水率は 1.95% 小さくなっている。これは、既往の研究⁴⁾でも示さ

表-4 フレッシュ性状

配合名	スランブ(cm)	空気量(%)
N	2.0	4.1
N-CSP	1.0	3.4
RG50	2.0	4.5
RG100	3.0	6.0
RG50-CSP	2.5	5.1
RG100-CSP	3.5	5.6
CRG50	3.0	4.6
CRG100	2.0	3.2
CRG50-CSP	3.0	3.9
CRG100-CSP	0.0	3.1

れているとおり、炭酸化によって付着セメントペースト相が緻密になっていることや、炭酸水の供給によって粒状化再生粗骨材中の未水和セメント粒子が再水和したためと考えられる。

3.2 コンクリートのフレッシュ性状

表-4 に各配合のフレッシュ時の試験の結果を示す。ほとんどの配合で目標スランブおよび目標空気量を満足しているが、CRG100-CSP でスランブの目標値を満足できず、低スランブとなった。CRG100-CSP では、試し練り 15L で決定した SP 量で、70L の本練りを行った。しかし、結果として非常に低スランブとなった。練混ぜ時の様子では、ここまで極端な低スランブになるとは考えられなかったが、ミキサから排出後に急速にスランブが低下した。このため、以降 CSP を用いた配合では、試し練りよりも SP 量を増加した。これは、写真-1 のように、CSP が微細な CC 結晶の集合体の形態を持っているためと推察され、乾燥状態の CSP が混和剤を吸着することや練混ぜ水を拘束することによるものと考えられる。フレッシュコンクリートの品質安定の面からは、CSP 使用時の急速なスランブ低下の傾向の課題が確認できた。

3.3 圧縮強度と静弾性係数

図-1 に粒状化再生粗骨材置換率 (RG 置換率) とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。CSP を含まない配合

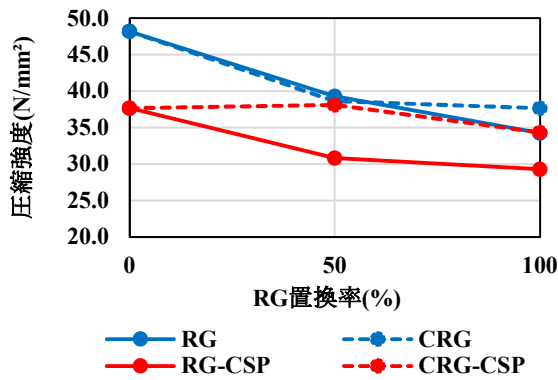


図-1 圧縮強度

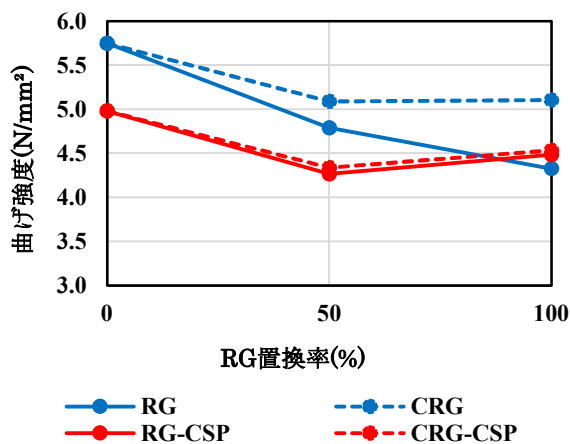


図-3 曲げ強度

(図中青実線)では、RG 置換率が高くなると圧縮強度は低下するが、粒状化再生粗骨材を炭酸化した場合(CRG: 青破線)は、この強度低下が若干抑制された。

CSP を用いた場合(図中赤実線)は、CSP を用いない場合と比較して強度が低くなっている。これは、CSP を結合材の内割で 20wt.% 使用したことによる W/C の増大と、既往の研究⁹⁾で示したとおり、CSP の活性度指数が 90% 程度となることによる反応性の低下によるものと考えられる。CSP を用いて炭酸化した粒状化再生粗骨材を用いた場合(図中赤点線)、RG 置換率の増加による圧縮強度の低下が顕著に抑制されている。

図-2 にコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の実線は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の関係式⁹⁾を示している。いずれの配合でも、両者の関係は、設計規準に近く、既存の設計体系を用いた設計が可能と考えられる。

3.4 曲げ強度

図-3 に RG 置換率と曲げ強度の関係を示す。CSP を含まない配合(図中青)では、炭酸化前のもの(図中青実線)は RG 置換率が高くなると曲げ強度が直線的に低下するが、炭酸化したものは、RG 置換率 50% と 100% でほぼ同等となっている。一方、CSP を用いた配合(図中

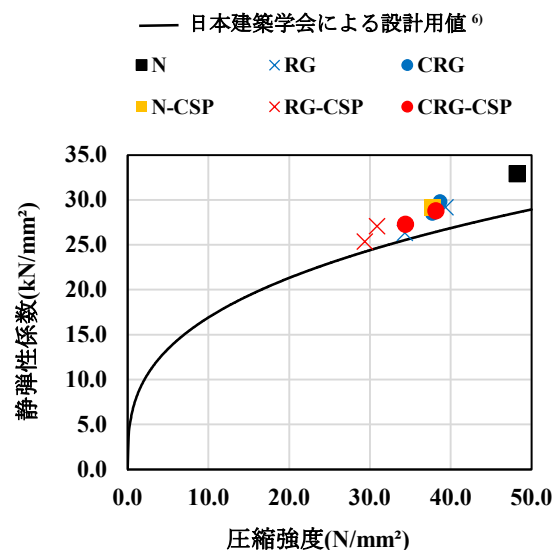


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

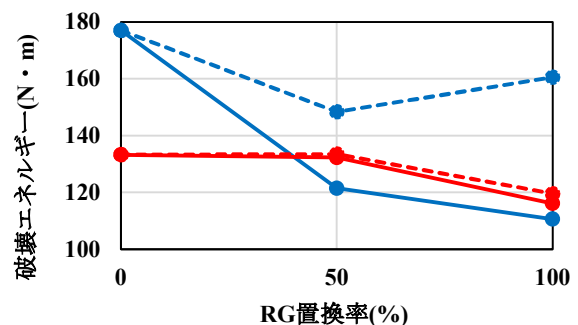


図-4 破壊エネルギー

赤)では、炭酸化による曲げ強度の変化は明確ではない。これは、CSP を結合材の内割で 20wt.% 使用したことによる W/C の増大によって弱点部分となったセメントペースト相へ曲げ荷重が集中したためと考えられる。

なお、W/B が 50% であっても、全配合において、一般的な舗装用コンクリートの設計基準強度である 4.5 N/mm² (JIS A 5308) を概ね満足していることもわかる。

3.5 破壊エネルギー

図-4 に RG 置換率と破壊エネルギーの関係を示す。CSP を用いない場合(図中青)では、RG 置換率の増加に伴い、破壊エネルギーが減少するが、粒状化再生骨材を炭酸化した場合(CRG)は、この破壊エネルギーの低下が顕著に抑制されることがわかる。配合 N、RG100 および CRG100 の破壊エネルギー試験終了時の破断面の様子を写真-3 に示す。配合 N では、破断面に割裂された粗骨材が多く観察され、RG100 では付着モルタル部分で剥離しているものも多く、割裂された原粗骨材粒子が極めて少ない。そして、CRG100 の場合は、RG100 と比較し



(a) N



(a) N-CSP



(b) RG100



(b) RG100-CSP



(c) CRG100



(c) CRG100-CSP

写真-3 破断面の様子 (CSP 未使用)

写真-4 破断面の様子 (CSP 使用)



(a) RG100



(b) CRG100

写真-5 フェノールフタレイン溶液噴霧後の破断面の様子

で割裂されている原粗骨材粒子が多く確認できる。このことから、粒状化再生粗骨材の炭酸化によって、粒状化再生粗骨材粒子と新モルタル相の付着または原骨材と付着モルタルの付着が良好となっている可能性があると考えられるが、再生骨材の炭酸化による強度などの力学的特性の改善のメカニズムに関する検討が必要と思われる。

一方、CSP を使用した場合 (図-4 中の赤のシリーズ) では、上述の CSP を用いない場合と比較して、粒状化再生粗骨材の炭酸化による破壊エネルギーの増加の効果はほぼなく、RG 置換率の増加による破壊エネルギーの低下も緩やかになることがわかる。配合 N-CSP, RG100-CSP および CRG100-CSP の破断面の様子を写真-4 に示す。3つの配合中で破壊エネルギーが大きい配合 N-CSP では、

破断面に割裂された粗骨材粒子が観察できる。しかし、RG100-CSP および CRG100-CSP では、割裂された原粗骨材はほとんど観察できない。これらのことから、CSP を結合材の内割で 20wt.% 用いた場合のセメントペースト相の強度低下により、粒状化再生粗骨材の炭酸化の有無に関わらず、破壊の進行が新セメントペースト相に集中していることが考えられる。

3.6 破断面の粒状化再生粗骨材炭酸化の確認

本検討では、2.1(2)の方法で粒状化再生粗骨材を炭酸化したが、破壊エネルギー試験終了後の破断面にフェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し、炭酸化の程度を確認した。この時の呈色状態を写真-5 に示す。RG100 では破断面全体が赤紫に呈色するのに対して、炭

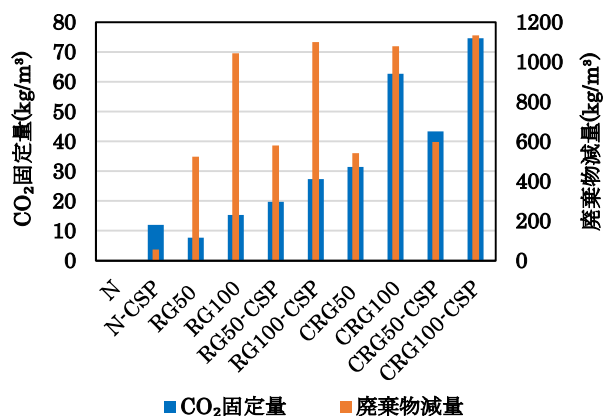


図-5 CO₂固定量および廃棄物減量

炭酸化した粒状化再生粗骨材を用いた CRG100 では、粒状化再生粗骨材の付着モルタルが呈色しないことがわかる。フェノールフタレイン 1%アルコール溶液での呈色域の観察は、pH10 程度の閾値を判別しており、粒状化再生粗骨材の付着セメントペースト相がどの程度炭酸化しているのかは明確にはならないが、少なくとも「中性化」の領域までは粒状化再生粗骨材の付着モルタルを炭酸化していることが確認できた。

3.7 CO₂ 固定量と廃棄物減量の比較

各配合のコンクリート中の CO₂ 固定量を、炭酸化した粒状化再生骨材と CSP のみが CO₂ を固定しているとして試算した。計算では、表-1 で示した CSP の CC 量から算出した CO₂ 固定量 (%), 表-2 に示した炭酸化した粒状化再生粗骨材 (CRG) の CC 量から算出した CO₂ 固定量 (%) を使用し、これらの各 CO₂ 固定量に配合中の単位 CSP 量または単位粗骨材量を乗じて各配合の CO₂ 固定量とした。本検討では、3.1 に示したバテライト、アナゴナイトの生成による CO₂ 固定量を定量していないため、安全側の評価の観点で CC 量に基づいた CO₂ 固定量を算出している。また、粒状化再生粗骨材と CSP は、コンクリートに循環使用しない場合、廃棄されると仮定して、両材料の単位量を合計して廃棄物減量とした。これらの前提条件に基づいて試算した結果を、配合ごとに比較すると、図-5 のようになる。当然の試算結果ではあるが、CO₂ 固定量は CRG100-CSP が最も高く、廃棄物減量では RG100 と CRG100 が同等で、これらよりも若干大きくなるのが RG100-CSP と CRG100-CSP である。本質的には、粒状化再生粗骨材や CSP に限らず、全材料の製造工程で排出する CO₂ や廃棄物減量等を用いた精緻な計算が必要となるので注意が必要である。

4. まとめ

本研究では、炭酸化した粒状化再生粗骨材および CSP を用いて舗装用コンクリートを作製し、力学的特性に関

する基礎的な検討を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) RG 置換率の増加に伴い圧縮強度は低下するが、粒状化再生粗骨材を炭酸化した場合は、この強度低下が若干抑制される。一方、CSP を用いた配合では、炭酸化した粒状化再生粗骨材を用いた場合、RG 置換率の増加による圧縮強度の低下が顕著に抑制される。
- (2) 曲げ強度および破壊エネルギーは、CSP を含まない配合では、粒状化再生粗骨材の炭酸化により改善された。一方、CSP を用いた配合では、骨材の種類および炭酸化の有無に関わらず同等となり、粒状化再生粗骨材の炭酸化による効果がなくなった。
- (3) CSP を結合材の内割 20wt.% で用いた場合、セメントペースト相の強度低下により、粒状化再生粗骨材の炭酸化の有無に関わらず、破壊の進行が新セメントペースト相に集中する可能性がある。

謝辞

本成果は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託業務 (JPNP21023) の結果得られたものです。また、東京都立大学 大野健太郎准教授に貴重な助言を頂くとともに、研究室メンバーに実験の協力を得た。なお、株式会社安藤・間の鈴木好幸氏より写真-1 の提供を受けた。

参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会: 生コンクリートスラッジの実態に関する調査報告書, 2020.3
- 2) 安部弘康, 山内和宏, 白岩誠史, 鈴木好幸: 生コンクリート由来の粒状化再生骨材への CO₂ 固定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp16-21, 2023
- 3) 扇嘉史, 細川佳史: 炭酸化した C-A-S-H およびその加熱による脱炭酸挙動に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.77, pp71-79, 2023
- 4) 松田信広, 伊代田岳史: 炭酸化による低質再生骨材の改質技術の提案と改質再生骨材がコンクリートに与える影響, コンクリート工学論文集, Vol.30, pp65-76, 2019
- 5) 清水成, Lett Wai Nwe, 上野敦, 鎌田知久: CO₂ を作用させた模擬スラッジ水由来粉体の基礎的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, pp1495-1500, No.1, 2024
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-, 1999