

論文 東京都島しょ部における再生骨材と再生微粉を併用したコンクリートの適用に向けた基礎的検討

正木 徹*1・谷口 修*2・川田 俊輔*3・山路 徹*4

要旨: 東京都島しょ部にはコンクリート塊や再生砕石 (RC-40) が蓄積されており, 消費が進んでいない状況である。これらを再生骨材として活用した場合, 再生微粉 (フィラー) の大量発生が懸念される。本検討では島しょ部工事への再生骨材コンクリート活用に向け, ブラスト処理による再生骨材の製造方法, フィラーを添加した再生骨材コンクリートのフレッシュ性状や強度, 耐久性の検討を実施した。W/C=60%一定として再生骨材コンクリートの配合を検討した結果, フィラーを外割置換したケースで僅かに強度が向上し, 耐久性については差異が認められなかった。なお, 地産地消効果や CO₂ 排出量が低減される可能性も示された。

キーワード: 島しょ部, RC-40, 再生骨材 M, フィラー, 地産地消, CO₂ 排出削減

1. はじめに

東京都の島しょ部では, 島内で発生した大量のコンクリート塊や再生砕石(以下: RC-40)の消費が進まず, 蓄積されていることが問題となっている(写真-1)。これを解決する手段としてコンクリート塊を再生骨材コンクリートとして使用して消費できることが期待される。再生骨材コンクリートは, 破碎処理や加熱処理などの特殊な処理を経て製造された骨材を適用したコンクリートとして低品質から高品質までの再生骨材 L, M, H として分類され, JIS 規格が既に整備されている。また, 島しょ部における骨材の地産地消や, 骨材の島しょ部への運搬に係る環境負荷低減の観点から有効と考えられる。

一方, 再生骨材の製造時には再生微粉(以下: フィラー)が発生する。フィラーは一般的に流動化処理土や路盤材などの建設材料へ混入がされているものの, 島しょ部ではそれらの建設材料が使用されていない。そのため, 蓄積しているコンクリート塊や RC-40 をすべて再生骨材として製造した場合, 大量のフィラーが発生することが懸念されるため, その処理方法も課題となる。また, 過去には海洋・港湾構造物への再生骨材コンクリートの適用性に関する研究が多く実施されてきたものの, 再生骨材とフィラーを併用したコンクリートの検討や適用された実績は限られており, 海洋環境下における検討がなされていない。

本検討では島しょ部の海洋環境下での工事を想定した上で, 再生骨材コンクリートの適用に向けて, 混和材料としてフィラーを添加した再生骨材コンクリートの性状や強度特性ならびに耐久性(中性化, 凍結融解など)をはじめとした基礎的検討を行った。



写真-1 RC-40 の蓄積状況

2. 使用する再生骨材の検討

2.1 再生骨材の製造

(1) 使用原材料

再生骨材の製造に使用する原材料は, 島しょ部に堆積してある RC-40 を使用し, その品質を表-1 に示す。RC-40 は島しょ部の産廃処分場に保管されており, 再生骨材製造前には RC-40 をフレコンパックに 32 袋分回収し, 密度と吸水率は 32 袋からそれぞれ 1 袋ずつ採取したものの平均値とした。採取した RC-40 は再生骨材 L 相当の品質であった。本検討ではこの原材料を基に再生骨材の製造を進めることとした。

表-1 原材料 (RC-40) の品質

項目	原材料 (RC-40)	
	25-5mm	5mm-0
測定サイズ	25-5mm	5mm-0
表乾密度 (g/cm ³)	2.44	2.27
絶乾密度 (g/cm ³)	2.30	2.01
吸水率 (%)	6.21	12.87
品質	L	L

*1 五洋建設(株)技術研究所 土木技術開発部 (正会員)

*2 五洋建設(株)技術研究所 土木技術開発部 専門部長 博士(工学) (正会員)

*3 五洋建設(株)東京土木支店 土木部 工事所長

*4(国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域長 博士(工学) (正会員)



写真-2 再生骨材製造プラントの外観

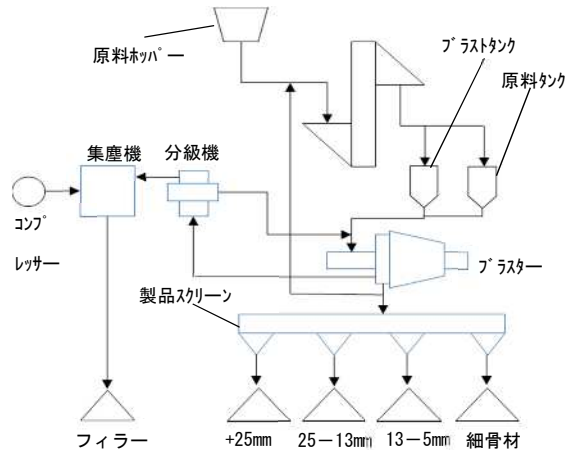


図-1 骨材の製造フローチャート

表-2 製造試験の内容

試験 No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
1 バッチ当たりの RC-40 使用量	307kg (4.9t/h)	290kg (4.1t/h)	243kg (3.4t/h)	241kg (4.0t/h)	251kg (3.5t/h)
プラスター仕様	ロータ周速: 50m/s プラスタ材サイズ: 8-0mm				
プラスト時間	80 秒	110 秒	70 秒	110 秒	110 秒
集塵風量	210m ³ /min		280m ³ /min		250m ³ /min

表-3 骨材の製造結果

試料	原料 RC-40	試験 No. 1		試験 No. 2		試験 No. 3		試験 No. 4		試験 No. 5	
粒径	+25mm	14.1%	12.4%	8.9%	5.7%	8.8%	7.6%				
	25-13mm	24.2%	24.9%	31.0%	25.4%	31.4%	26.4%				
	13-5mm	25.7%	5.9%	5.6%	5.2%	6.4%	4.2%				
	5mm-0	36.0%	29.0%	29.2%	32.5%	34.2%	26.6%				
フィラー	—	27.8%	25.3%	31.2%	19.2%	35.2%					
品質	—	L	M	M	M	M	M				

※数値は骨材の重量百分率

表-4 試験 No.1 と No.4 の骨材試験結果

試験 No.	No.1			No.4		
	+25mm	25-5mm	5-0mm	+25mm	25-5mm	5-0mm
測定サイズ						
表乾密度 (g/cm ³)	2.46	2.55	2.42	2.47	2.54	2.49
純乾密度 (g/cm ³)	2.35	2.45	2.24	2.37	2.45	2.33
吸水率(%)	4.51	3.76	8.37	4.33	3.60	6.49
品質	M	M	L	M	M	M

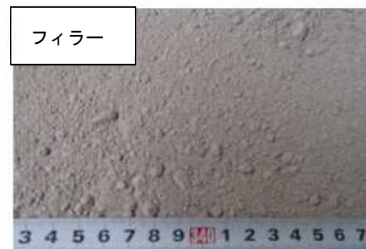
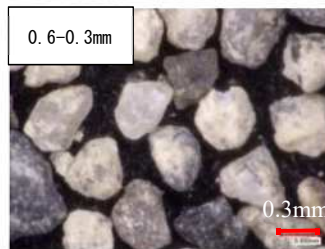


写真-3 再生骨材とフィラーの外観

(2) 製造方法

再生骨材の製造は写真-2 に示す再生骨材製造プラントで実施した。また、図-1 に製造フローチャートを示す。プラスト時間と集塵風量を調整した後に RC-40 を投入し、プラスター内で回転させながらプラスト処理を行うことで、所定の品質の再生骨材を製造できるだけでなく、粒径ごとに分類することも可能である。また、再生骨材製造時に発生する副産物のフィラーは分級機に回収され集塵機に集められる。プラスタ材は RC-40 中に含まれている細粒分を利用しており、これを循環させることプラスト処理を可能とするものである。ここでは、RC-40 の投入量とプラスト時間、集塵風量を調整して、表-2 に示す製造試験を実施し、最適な製造方法について確認を

行った。同時に再生骨材とフィラーの外観も確認することとした。なお、再生骨材の製造に先立ち RC-40 をばっ気乾燥させ、表乾状態にした。

(3) 再生骨材の品質の選定

再生骨材の品質は低品質から順に L, M, H の 3 段階に分けられている。高品質である再生骨材 H を製造した場合、製造時間が長くなることから CO₂ の排出量が多量となる事が懸念される。さらにフィラーの発生量が過大となるため、本検討では H に比べフィラーの発生量が低減でき、低品質である再生骨材 L と比べ品質のばらつきの小さい再生骨材 M を対象に検討を進めた。

2.2 再生骨材の製造結果

再生骨材とフィラーの外観、1 バッチ当たりの RC-40

表-5 使用材料

材料名	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度:3.16(g/cm ³) 比表面積 3340(cm ² /g)
フィラー	F	表乾密度:2.11(g/cm ³) 絶乾密度 1.92 (g/cm ³) 吸水率 16.4% 含水率 7.10(%) 微粒分量 30.1(%)
標準砂	S	絶乾密度 2.64(g/cm ³) 吸水率 0.42(%) 単位容積質量 1.76(kg/L) 実積率 66.7(%)
水	W	上水道水

表-6 モルタルの配合

種類	W/(C+F) (%)	単位量 (g)			
		W	C	F	S
試験モルタル	30	289	868	96	1350
基準モルタル		289	964	0	1350

表-7 試験項目

試験項目	試験方法	測定時期
スランブフロー	JIS A 6207 に準拠	練混ぜ直後, 15 打フロー
空気量		練混ぜ直後
圧縮強度		材齢 7, 23 日

表-8 試験結果

種類	モルタルフロー(mm)		空気量 (%)	7 日 強度 (N/mm ²)	23 日 強度 (N/mm ²)
	練混ぜ 直後	15 打 フロー			
試験モルタル	101	122	3.4	78.8	84.5
基準モルタル	101	121	3.4	84.1	87.8

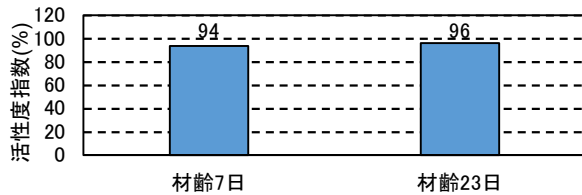


図-2 フィラーの活性度結果

使用量に対する再生骨材の歩留まり結果を写真-3 と表-3 に、試験 No.1 と 4 の骨材試験結果を表-4 に示す。試験 No.1 の粒径 5mm-0 で再生骨材 M 規格から外れたものの、それ以外はブラスト時間と集塵時間を調整することで再生骨材 M の製造が可能であることを確認した。試験 No.4 においてはフィラーの発生量が最も少ないため、本検討では試験 No.4 の内容で製造を実施した。製造後の再生骨材の外観について、細骨材にはモルタルの付着が目立っており、フィラーはセメントに似通った微粉末である。

3. フィラーの活性について

3.1 試験概要

フィラーの活性度指数を確認するために簡易的な実験として JIS A 6207(コンクリート用シリカフューム)を参考に実験を行った。使用材料は表-5、配合は表-6 ならびに試験項目を表-7 に示す。ここでは材齢 7 日

表-9 コンクリートの検討ケース

No.	W/C (%)	骨材 種類	フィラー置換方法		スランブ (cm)	空気量 (%)
			置換材料	置換率・量		
0	60	普通 再生	—	—	12± 2.5	4.5± 1.5
1			—	—		
2			セメント	10%		
3			セメント	20%		
4			細骨材	100kg/m ³		
5			細骨材・ セメント	100kg/m ³ ・ 10%		
6			細骨材・ セメント	100kg/m ³ ・ 20%		
7			50	セメント		
8	65	セメント	10%			

表-10 使用材料

材料名	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度:3.16(g/cm ³) 比表面積 3230(cm ² /g)
フィラー	F	表乾密度:2.11(g/cm ³) 絶乾密度 1.92 (g/cm ³) 吸水率 16.4% 含水率 7.10(%) 微粒分量 30.1(%)
普通 細骨材	S1	山口県山口市産海砂 表乾密度:2.58(g/cm ³) 吸水率 2.69(%)
	S2	山口県山口市産砕砂 表乾密度:2.67(g/cm ³) 吸水率 2.49(%)
再生 細骨材 M	RS	表乾密度:2.54(g/cm ³) 吸水率 6.15(%)
普通 粗骨材	G	山口県山口市産砕石 最大粒径 20mm 表乾密度:2.70(g/cm ³) 吸水率 0.73(%)
再生 粗骨材 M	RG	最大粒径 25mm 表乾密度:2.52(g/cm ³) 吸水率 3.42(%)
AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸系
AE 剤	AE	アルキルエーテル系活性剤
水	W	上水道水

降のフィラーの活性度を確認するために、材齢 23 日時点での活性度も確認することとした。活性度指数の算出は以下の式(1)にて行った。

$$As = \frac{C_1}{C_2} \times 100 \quad \dots (1)$$

As:活性度指数(%)

C₁: 各材齢における試験モルタルの圧縮強度(N/mm²)

C₂: 各材齢における基準モルタルの圧縮強度(N/mm²)

3.2 試験結果

試験結果を表-8、各材齢の活性度指数を図-2 に示す。活性度指数は材齢 7 日時点で JIS 規格にて規定された値を下回り、活性度の増大は確認されなかった。フィラー中のセメント分が殆ど水和していたものと推測される。なお、フレッシュ性状には差異が認められなかった。

4. コンクリートの検討

4.1 配合検討

(1) 検討ケース

検討したケースを表-9 に示す。目標スランブ値は 12cm、空気量は 4.5%として、目標スランブ値と空気量が得られるよう、混和剤量と単位水量、細骨材率を調整し

表-11 試験項目

試験項目	試験方法	測定時期	対象 No.
スランブ	JIS A 1101	練混ぜ直後	全て
空気量	JIS A 1128	練混ぜ直後	
コンクリート温度	JIS A 1156	練混ぜ直後	
ブリーディング試験	JIS A 1123	練混ぜ直後	No. 0, 1, 2, 4, 5
凝結時間	JIS A 1147	練り混ぜ直後～終結	
圧縮強度	JIS A 1108	材齢 7, 28, 56, 91 日	全て
静弾性係数	JIS A 1149	材齢 7, 28, 56, 91 日	
長さ変化試験(乾燥収縮)	JIS A1129-2	試験開始後 1, 4, 8, 13, 26 週	No. 1, 2, 4, 5
促進中性化試験	JIS A 1153	促進期間 4, 13, 26 週	
凍結融解試験	JIS A 1149	—	

表-12 フレッシュ試験の結果

No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位体積重量 (kg/m ³)	コンクリート温度 (°C)
0	11.0	5.0	2291	20
1	12.0	4.8	2188	19
2	11.0	4.9	2172	19
3	11.5	4.7	2171	19
4	11.5	5.0	2202	19
5	12.5	5.0	2187	19
6	12.5	4.5	2171	19
7	12.5	5.0	2201	19
8	11.5	4.9	2181	19

表-13 コンクリートの配合結果

No.	骨材種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										フィラーの置換方法
				W	C	F	S1	S2	RS	G	RG	Ad	AE	
0	普通	60	49	170	283	—	439	457	—	956	—	1.98	0.28	
1	再生	60	48	156	260	—	—	—	867	—	942	1.82	0.65	
2		60	47	156	234	26	—	—	842	—	952	1.82	0.65	セメント10%置換
3		60	46	160	213	53	—	—	811	—	954	1.86	0.67	セメント20%置換
4		60	45	162	270	100	—	—	673	—	982	2.70	0.68	細骨材100kg
5		60	44	164	246	127	—	—	645	—	987	2.73	0.82	細骨材100kg, セメント10%
6		60	43	168	224	156	—	—	612	—	989	2.80	0.70	細骨材100kg, セメント20%
7		50	45	156	281	31	—	—	786	—	964	2.18	0.78	セメント10%
8		65	49	158	219	24	—	—	882	—	921	1.70	0.73	セメント10%

た。また、防波堤の上部工や消波ブロックをはじめとした無筋コンクリートの適用を想定して W/C=60%を基本とし、フィラーの置換方法は内割と外割のケースで検討した。強度の比較用として普通骨材のみを使用した No.0 と、水セメント比を変えた配合 No.7, 8 を作製した。なお、No.0 以外は細・粗骨材全て再生骨材を使用した。

(2) 使用材料

使用した材料を表-10 に示す。再生骨材は骨材製造試験に基づいた方法(前項：試験 No.4)で製造を行ったものを使用した。フィラーは内割では絶乾状態、外割では表乾状態として取扱った。その他の材料は普通骨材を除いて島しょ部で使用されている材料を基に検討を進めた。

(3) コンクリートの練混ぜおよび各種試験

コンクリートの練混ぜは、容量 55L の水平二軸型強制練りミキサを使用し、1バッチの練混ぜ量は 30L とした。練混ぜは、粗骨材、細骨材、セメント(フィラー含む)の順にミキサへ投入し、30 秒間の空練り後、水と混和剤を加え、90 秒間練り混ぜた。また、試験項目を表-11 に示す。フレッシュ試験の一部は No.0, 1, 2, 4, 5 を、耐久性試験は W/C=60%の No.1, 2, 4, 5 を対象に実施した。

4.2 コンクリート実験の結果

(1) 配合試験結果

フレッシュ試験結果を表-12、配合結果を表-13 に

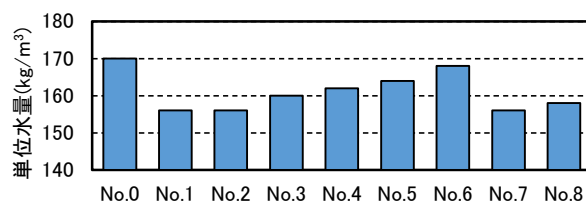


図-3 各配合の単位水量

示す。各配合の単位水量を示したグラフを図-3 示す。いずれの配合も単位水量や混和剤量を調整したことによって、目標スランブ値、空気量を達成している。

また、再生骨材およびフィラーを併用した配合は細骨材率を小さくしたにも関わらず、普通骨材のみを使用した No.0 よりも単位水量が低減される傾向が見られた。再生骨材の粗骨材粒径が普通骨材と比べて大きいものを使用したことや、ブラスト処理によって再生骨材の形状が丸みを帯びて、単位水量が削減されたと推察される。

フィラーの単位量が多くなるほど単位水量が大きくなる傾向が確認された。これは、フィラーの吸水率が 16%程度と高く、所要の性状を確保するために必要な単位水量が多くなったためと考えられる。

(2) コンクリートの性状

ブリーディング試験結果を図-4、凝結試験結果を図-5 に示す。再生骨材コンクリートの配合に着目すると

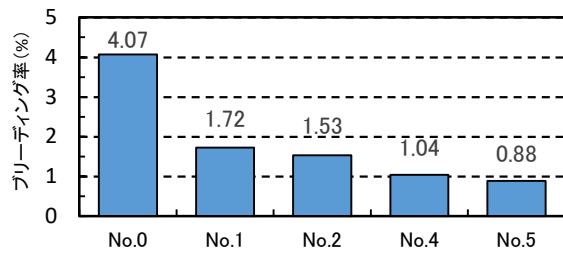


図-4 ブリーディング試験結果

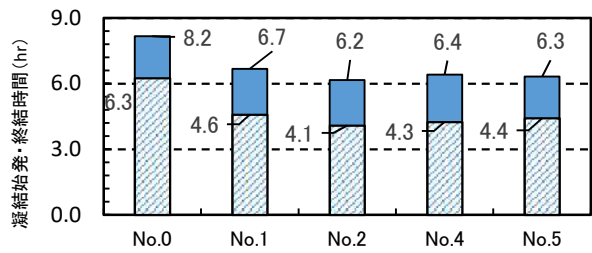


図-5 凝結試験結果

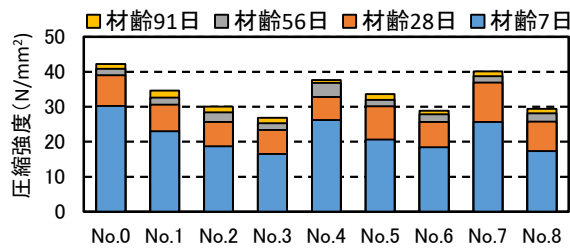


図-6 圧縮強度試験結果

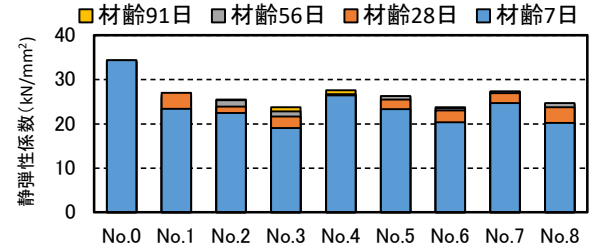


図-7 静弾性係数結果

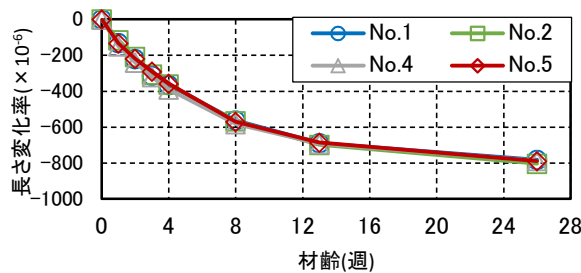


図-8 長さ変化試験結果

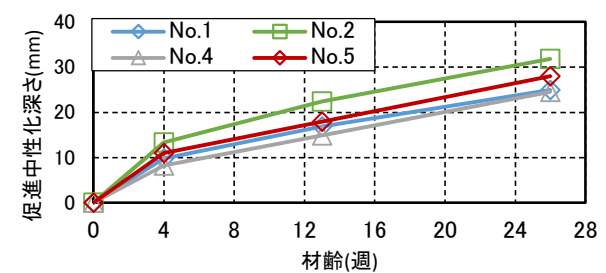


図-9 促進中性化試験結果

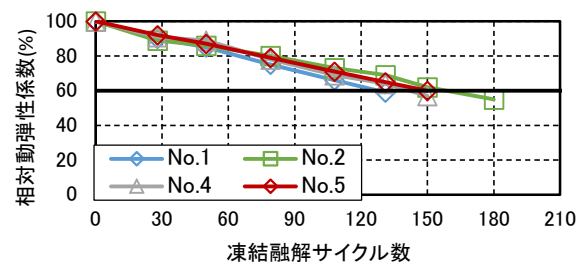


図-10 凍結融解試験結果

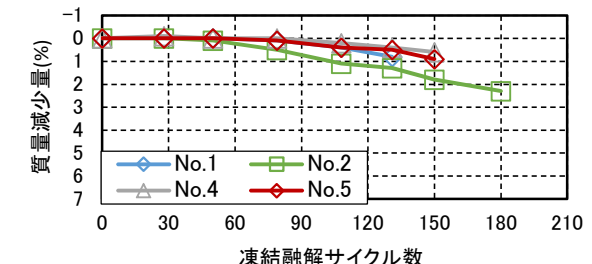


図-11 質量減少量結果

骨材に全て再生骨材を使用した配合 No.1 では普通骨材を使用した No.0 よりもブリーディング率が大幅に低減しており、フィラーを多く添加するほどブリーディング率がさらに低減されている。これは、再生骨材に付着しているモルタルの影響や、コンクリート中の微粒分量、粉体量自体多くなったことが影響していると考えられる。また、ブリーディング率の低減とともに凝結時間が早まる傾向も確認された。

(3) 強度特性

圧縮強度試験結果を図-6、静弾性係数結果を図-7に示す。再生骨材の配合 No.1~6 に着目すると、フィラー

を内割で置換した場合は強度が低下し、外割では、再生骨材のみを使用したコンクリートよりも強度が大きくなる傾向が見られた。内割で置換するとセメント量自体が削減されるため、強度が低下したとみられる。また、外割置換では微粒分の割合が多くなったことにより、強度が増加したものと考えられる。静弾性係数についても圧縮強度の増減と同様の傾向が見られる。

(4) 耐久性試験の結果

a) 長さ変化試験

図-8に長さ変化試験の結果を示す。今回の配合では156~164kg/m³と単位水量が過大とならなかったこと

から、ほぼ同一となったものと考えられる。

b) 促進中性化試験

図-9 に中性化深さの結果を示す。内割では僅かに大きくなる結果となった。これは、セメント量が削減されるため、コンクリート内部の硬化体組織が粗になったことによって、中性化深さが大きくなったとみられる。

c) 凍結融解試験

図-10 に凍結融解試験結果、図-11 に質量減少率結果を示す。一般的なAEコンクリートであればW/C=60%でも相対動弾性係数 60%程度を確保されることが多いと考えられる。耐凍害性は粗骨材の吸水率に依存するとされており、再生粗骨材 M は普通骨材と比較して吸水率が高いため、耐凍害性に劣る結果になったとみられる。耐凍害性の観点から、これらの配合を実施工で適用するにあたっては、温暖な地域や海水中に設置される根固めブロックなどへの適用が望ましいと考える。

5. 環境への影響度

5.1 CO₂の排出量の算出について

既往の文献¹²⁾を参考にコンクリート製造 1m³ あたりに使用する骨材のCO₂ 排出量を試算した。CO₂ 排出量の原単位については表-14 に示す値を採用した。また、再生骨材と普通骨材に係るCO₂ 排出フローを図-12 に示す。RC-40の製造量は再生細・粗骨材の歩留まりや、25mm以上の粗骨材とフィルターの残渣の関係から、コンクリート 1m³ に使用する骨材を製造するにあたっては RC-40を2.65t製造する必要があるものと統一した。ここで、骨材の輸送距離については表-15 に示した距離を仮定しCO₂ 排出量を考慮した。なお、島しょ部の島内での輸送距離は5.4kmに統一した。再生骨材の製造におけるCO₂ 排出量の原単位は再生骨材製造プラント稼働時の電力消費量から算出した。試算ケースは普通骨材のみを適用した配合No.0と再生骨材の使用およびフィルターを外割、外割したNo.1, 2, 4, 5を対象として骨材使用に係るCO₂ 排出量を比較した。

5.2 骨材に係るCO₂ 排出量の算出結果

試算結果を図-13 に示す。No.0を基準とした場合、いずれも30%程度のCO₂の削減が見込まれる結果となった。本州にて骨材の運搬に係るCO₂ 排出が解消されるだけでなく、島しょ部で再生骨材を活用することが地産地消に繋がるものと期待される。なお、No.4, 5の排出量が僅かに少ない理由として、フィルターを外割で置換しているためであり、今回の試算ではフィルターのCO₂ 排出量は、再生骨材と同時に排出されることから考慮していないためである。

6. まとめ

(1) 再生骨材の製造において、ブラスト処理により RC

表-14 CO₂の排出量原単位¹⁾²⁾

項目	原単位
10t ダンプによる陸上輸送	0.117 (kg/km・t)
船舶 500t 級による海上輸送	0.162 (kg/km・t)
普通粗骨材	2.9 (kg/t)
普通細骨材	3.7 (kg/t)
再生粗骨材 M	27.5 (kg/t)
再生細骨材 M	27.5 (kg/t)
RC-40 製造	4.4 (kg/t)

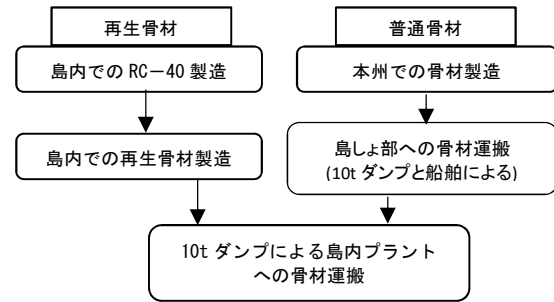


図-12 骨材に係るCO₂ 排出フロー

表-15 本州での普通骨材輸送過程

骨材種別	種類	骨材の輸送距離の内訳
本州骨材 (細骨材)	砕砂	ダンプ輸送: 山梨県南巨摩郡南部町~静岡県・清水港, 島しょ部島内・合計 30km
		船舶輸送: 清水港~島しょ部・合計 144km
本州骨材 (粗骨材)	砂利	ダンプ運送: 福島県いわき市~小名浜港, 島しょ部島内・合計 25.4km
		船舶輸送: 小名浜港~島しょ部・合計 360km

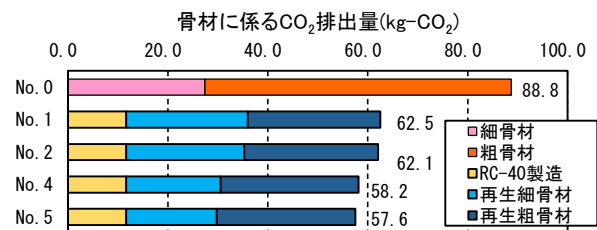


図-13 コンクリート 1m³ に要する骨材のCO₂ 排出量

-40 から再生骨材 M の品質を確保することができた。

- (2) ブラスト処理を施した再生骨材を適用した場合、今回の実験の範囲では単位水量が低減された。
- (3) フィルターを添加したコンクリートは、ブリーディングが低減され、凝結時間が早まる傾向が見られた。
- (4) フィルターを外割置換すると圧縮強度が僅かに増加した。これは、微粒分量が増加したためと推察される。
- (5) 耐久性に関しては、再生骨材の配合のみではあるがフィルターの添加による悪影響は顕著でなかった。
- (6) 島しょ部で再生骨材を活用することで、骨材の地産地消やCO₂ 排出量を削減できる可能性が示された。

参考文献

- 1)コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針(案), 土木学会, 2005.11
- 2)社会資本のライフサイクルをとおした二酸化炭素排出量の算出の手引き(案), 国土技術政策総合研究所, pp.2-31 2019.3