

浄水発生土の造粒固化による 粒状土木材料の開発

佐々木 隆^{※)}
柚 木 応 介^{※※※)}

川 合 基^{※※)}

1. はじめに

浄水発生土のリサイクル有効利用は進められているものの、全体的には未だ発展途上にある。有効利用率は公表資料¹⁾によると、平成17年度で54%であり、現在も有効利用のための研究開発^{2) 3)}が進められている。

当開発は砕石微粉末の造粒固化技術『ロックビーズ』⁴⁾を活用して、浄水発生土を埋戻し材、路床材としてのリサイクル利用はもちろんのこと、さらに粒状土木材料として、再生路盤材などの補助材料としての活用を目的として、リサイクル有効路の拡大化のための基礎調査試験を行ったものである。この結果について報告する。

2. 浄水発生土の材料特性

試験に用いた浄水発生土の物性を表1に示す。浄水発生土の自然含水比には、季節変動がみられるが、試験に用いたものは試料1の含水比 $W_n=113.8\%$ である。

浄水発生土単体の強度は含水比に大きく左右され、含水比 $W_n=113.8\%$ の試料1ではCBR値 $=4.4\%$ 、 $W_n=175.4\%$ の試料2ではCBR値 $=1.9\%$ を示す。

3. 造粒化試験

浄水発生土を盛土材や埋戻し材として、単体で有効利用しようとした場合には、大幅に含水比を低下させる必要があり、自然含水比状態では強度が低いことと、過去の浄水発生土の造粒試験結果から造粒化するために砕石微粉末を混合することで、造粒化し易い事が判明していることから、砕石微粉末を利用して造粒化試験を実施した。

室内造粒化試験の概要を以下に示す。

表1 浄水発生土の物性など

試 験 項 目	用いた浄水発生土	
	試料—1	試料—2
自然含水比 W_n (%)	113.8	175.4
自然含水率 (%)	53.2	63.7
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.23	2.13
液性限界 WL (%)	137.2	163.6
塑性限界 WP (%)	90.4	99.7
塑性指数 PI	46.8	63.9
コーン指数 q_c (kN/m ²)	1500.9	625.3
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.632	0.429
CBR (%)	2.5 mm	4.4
	5 mm	1.9
		4.9
		1.8

1) 使用機械 外国製ミキサー (パッチ式)

2) 添加材 高炉セメントB種

添加量 湿潤試料重量に対して外割百分率
5%、10%

3) 混合割合

浄水発生土と砕石微粉末の混合割合は表2に示す。

表2 浄水発生土と砕石微粉末の混合割合

	試料1	試料2	試料3	試料4	試料4
浄水発生土	100%	85%	75%	65%	0%
砕石微粉末	0%	15%	25%	35%	100%

注) 混合割合は、自然状態での重割配分

※) 法人会員 第一石産運輸(株) 新規事業推進室長

※※) 法人会員 第一石産運輸(株) 生産統括部

※※※) 株式会社 日立製作所 電機グループ社会・産業システム事業部サービス事業推進部

4) 碎石微粉末の混合割合と設計CBR

室内造粒試験の結果から

- ・浄水発生土の解砕時間を長くとると水分が浮き、繰り返し現象が発生して良好な造粒化ができないことから短時間・高速解砕とした。
- ・セメント添加後の練り込みは、長時間低速回転で練り込むことで、若干の繰り返しはあるが、程良い粒径の造粒物が得られること。
- ・碎石微粉末の混合割合を増やすと練り込み時間を短縮できること。
- ・造粒時のセメント添加量の変化による造粒状態は、同一配合比ではセメント添加量の多い(10%)方が細くなる傾向がみられる。

などの知見が得られた。

造粒試験結果を、図1～図3に示す。

①碎石微粉末の混合割合の増加に伴い、造粒物の含水比は直線的に減少し、乾燥密度は直線的に増加する(図1、図2参照)。

②碎石微粉末の混合割合の増加に伴い、設計CBR値は直線的に増加する傾向が見られるが、混合割合が30%付近を境として、増加傾向が大幅に鈍化する傾向が見られる(図3参照)。

4. 造粒固化材料の物理・力学特性

造粒試験結果から浄水発生土への碎石微粉末の混合割合を25%として、固化材セメント添加量を5%、10%として、造粒固化材料の物理・力学特性を調査した。造粒固化材料のふるい分け試験結果を図4に示す。実施した造粒固化材料の物理特性試験結果を表3に示す。

造粒固化材料の均等係数 $U_c = D_{60} / D_{10} \approx 2.2 \sim 2.6$ を示し、粒径2mm～9.5mmで80%を占め、均一な粒状材料となっている。固化材の添加量差による粒度組成の違いについては、製造時の目視による判断では造粒状態は、添加量10%の方がややよいと判断された。

造粒固化材料の吸水率は、36%前後を示し、固化材の添加量の増加に伴い小さくなる傾向を示す。また、造粒直後の塑性指数PIは、20～23を示す。塑性指数も固化材の添加量の増加に伴い減少する傾向を示し養生7日後

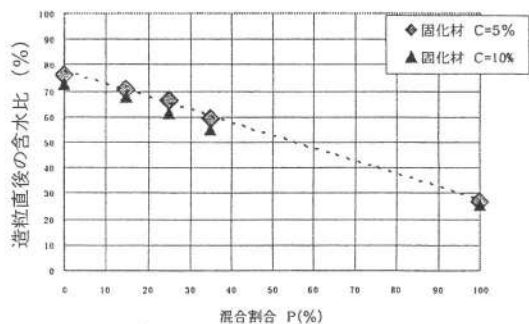


図1 碎石微粉末の混合割合と造粒直後の含水比

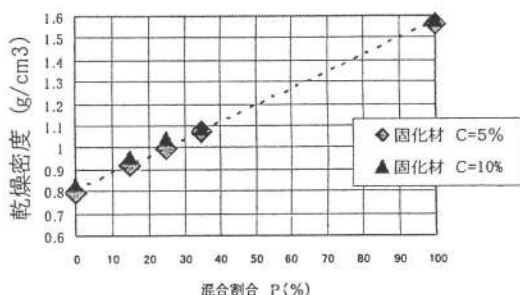


図2 碎石微粉末の混合割合と乾燥密度

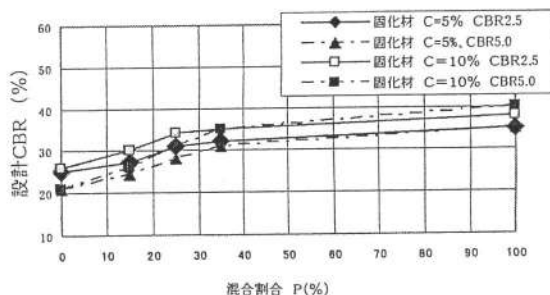


図3 碎石微粉末の混合割合と設計CBR

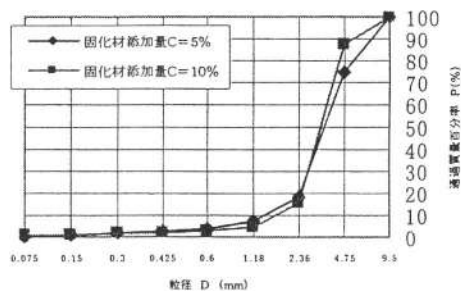


図4 造粒固化材料の粒度曲線

表3 造粒固化材料の物理特性試験結果

試験項目		C = 5 %	C = 10 %
比重・吸水試験	表乾密度(g/cm ³)	1.70	1.71
	絶乾密度(g/cm ³)	1.24	1.26
	吸水率 (%)	36.6	35.7
単位容積質量試験	単位容積質量 (g/cm ³)	0.73	0.75
	実積率 (%)	59.2	59.3
微粒分厘試験	微粒分厘 (%)	2.0	2.1
*土の液性・塑性限界試験	液性限界 (%)	54.6	45.8
	塑性限界 (%)	31.3	25.6
	塑性指数	23.3	20.2
土粒子の密度試験	(g/cm ³)	2.27	2.29
スレーキング試験	スレーキング率 (%)	8.7	8.4
透水試験 定水位	透水係数 (cm/sec)	6.72×10^{-4}	8.19×10^{-4}

*土の液性・塑性限界試験、造粒直後に実施

表4 造流固化材料の力学特性試験結果

試験項目		C = 5 %	C = 10 %
コーン指数試験	q _c (kN/m ²)	貫入不能	貫入不能
締固め試験	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.033	1.095
	W _{opt} (%)	35.4	33.8
設計 C B R 試験	2.5 mm	33	36
	5 mm	30	33

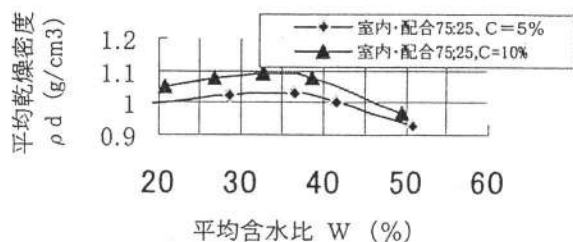


図5 造粒固化材の締固め曲線

の塑性指数は、N、Pであった。

造粒固化材料の力学特性試験として実施した締固め試験結果を、表4、図5に示す。長期水浸 C B R 試験結果を図6に示す。

締固め試験結果から、締固め曲線は比較的なだらかな曲線を示し、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.0 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ と比較的軽い材料となっている。最適含水比で締固められた状態のコーン指数 q_c は貫入不能であった。

造粒固化材料の締固め曲線に見られる通り、固化材の添加量が増加すると最適含水比は乾燥側に移行し、最大乾燥密度が大きくなる傾向が見られる。この傾向は、一般的な改良材料における締固め特性と同様である。

造粒固化材料の設計 C B R は、30～33を示し、固化材の添加量の増加に伴い増加する傾向が見られる。長期水浸 C B R 試験については、4日、2週、3週、4週経過時点で設計 C B R 試験を実施した。この結果を見ると、固化材添加量 5 %、10 % いずれも時間経過に伴い C B R 値の増加傾向が見られ、水硬性があることを窺わせる。4週後の C B R 値では、4日後のおおよそ、1.2～1.3倍程度になっており、固化材添加量 5 %、10 % いずれの試料でも 5 mm 貫入時の C B R 値が 2.5 mm 貫入値を逆転していることから、水浸日数をさらに経過させると大幅に C B R 値が上昇することが推測される。

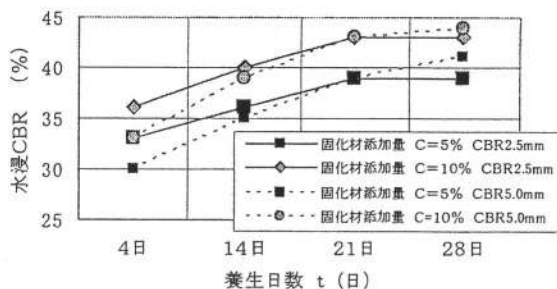


図6 造粒固化材料の長期水浸 C B R

5. 造粒固化材料を混合した再生路盤材の物理・力学特性

浄水発生土の砕石微粉末との混合による造粒固化材料は粒状材料の性質を持つことから、リサイクル利用方法として再生路盤材などへの補助材・増量材として利用できる可能性があると判断した。市販されている再生路盤材に混合して、再生路盤材の物理・力学特性への影響について調査・試験を実施した。

再生路盤材は、第一石産運輸(株)花園工場で製造されている再生クラッシャーランを用いた。浄水発生土に砕石微粉末を混合して製造した造粒固化材料の混合割合は、発生土75%：砕石微粉末25%である。

5. 1 合成粒度

再生路盤材への造粒固化材料の混合比率は、RC-40:造粒固化材料=95:5、90:10とした。

合成粒度を図7に示す。

RC-40と造粒固化材料の固化材添加量5%、10%別に造粒材料を95:5、90:10の比率で混合して見た結果、いずれも再生クラッシャーランRC-40の範囲にはいっており、粒度に関しては問題のないことが判った。

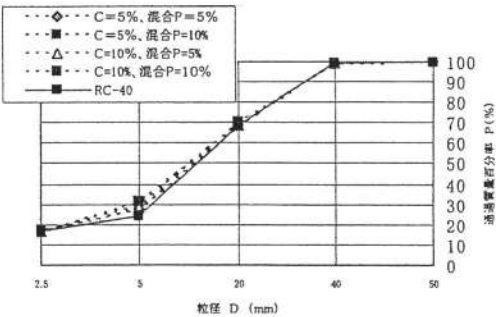


図7 混合・再生路盤材 RC-40の粒度曲線 (RC-40も並記)

粒度的にみると造粒固化材料の混合割合を10%以上に増加させると、粒度上限により近くなることが予想され、造粒固化材料の混合割合は、10%が限界であると判断される。

5. 2 混合・再生路盤材 RC-40の物理・力学特性

造粒固化材料を混合した再生路盤材（以下、混合・再生路盤材と称す）について、以下5項目について試験を実施した。

- a) 比重・吸水試験
- b) すりへり減量試験

表5 (1) 5項目比較試験結果 (RC-40と混合・再生路盤材 RC-40)

固化材添加量	C = 5 %	RC - 4 0	混合・再生路盤材 RC-40	
混合比率	RC-40	100%	95%	90%
	造粒固化材料	0%	5%	10%
a)表乾比重	(g/cm ³)	2.48	2.46	2.43
b)すりへり減量	(%)	22.6	23.1	25.4
c)液性限界	(%)	N.P	N.P	N.P
	塑性限界	(%)	N.P	N.P
	塑性指数		N.P	N.P
d) P dmax	(g/cm ³)	2.056	2.008	1.943
	Wopt	(%)	8.3	10.3
e)2.5mm	(%)	163	146	105
	5mm	(%)	198	172

表5 (2) 5項目比較試験結果 (RC-40と混合・再生路盤材 RC-40)

固化材添加量	C = 10 %	RC - 4 0	混合・再生路盤材 RC-40	
混合比率	RC-40	100 %	95 %	90 %
	造粒固化材料	0 %	5 %	10 %
a) 表乾比重	(g/cm ³)	2.48	2.46	2.43
b) すりへり減量	(%)	22.6	22.9	24.5
c) 液性限界	(%)	N.P	N.P	N.P
	塑性限界	(%)	N.P	N.P
	塑性限界		N.P	N.P
d) P _{dmax}	(g/cm ³)	2.056	2.024	1.967
	W _{opt}	(%)	8.3	9.4
e) 2.5mm	(%)	163	156	120
	5mm	(%)	198	183

c) 土の液性限界試験・塑性限界試験

d) 締固め試験

e) CBR試験

5項目の試験結果を表5(1)、表5(2)に示す。同表には併せて再生路盤材 RC-40 (造粒固化材料の混合割合 0%) の試験結果も示した。

試験結果については、造粒固化材料の混合比率と表乾比重の関係を図8に、混合比率とすりへり減量の関係を図9に、混合比率とすりへり減量の関係を図9に示す。

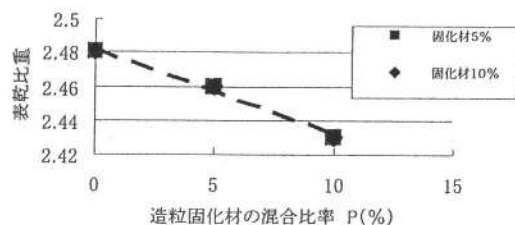


図8 混合・再生路盤材 RC-40の表乾比重

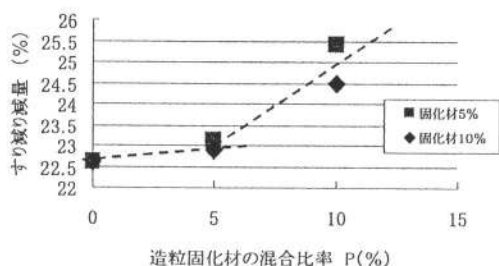


図9 混合・再生路盤材 RC-40のすり減り減量

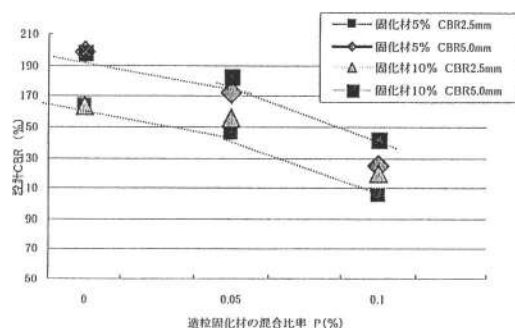


図11 混合・再生路盤材 RC-40材料の設計CBR

図9に示す。

混合・再生路盤材の物理試験結果からは、

- ①混合・再生路盤材 RC-40の液性限界、塑性限界試験は N.P.であり、塑性指数 PI は N.P.である。
- ②混合・再生路盤材 RC-40の表乾比重は、混合比率の増加に伴い直線的に減少する傾向を示す。混合割合 1%増に対する表乾比重の減少量は、大略0.005である。
- ③すりへり減量は、造粒固化材料の混合比率の増加に伴い増加する傾向を示す。混合比率が5%を超えると増加勾配が大きくなる傾向を示す。
- ④造粒固化材料の混合比率については、表乾比重、すりへり減量の試験結果からは、混合比率5%の方が良好な結果となっている。

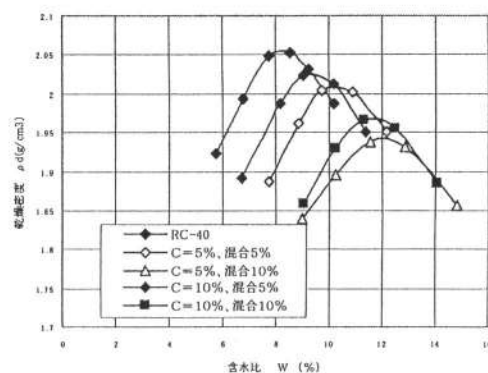


図10 混合・再生路盤材 RC-40の締固め曲線 (RC-40も並記)

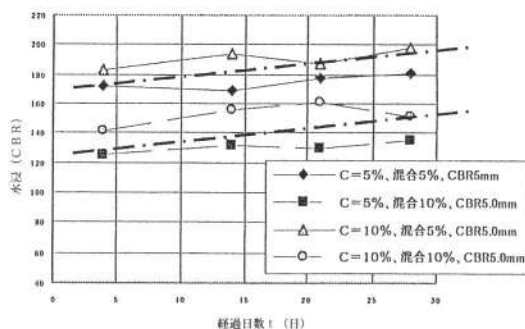


図12 混合・再生路盤材 RC-40の長期水浸CBR

⑤造粒固化材の固化材添加量については、いずれも添加量10%の方が良好な結果となっている。

混合・再生路盤材 RC-40の締固め試験結果を図10に、設計C B R試験結果を図11に、長期水浸C B R試験結果を図12に示す。

この混合・再生路盤材の力学特性試験結果からは、

- ①混合・再生路盤材 RC-40の締固め特性として、混合比率の増加に伴い最大乾燥密度は直線的に減少し、最適含水比は混合比率の増加に伴い湿潤側に移行している。
- ②混合比率が同じであれば固化材添加量の大きい材料(C=10%)の最大乾燥密度が大きく、最適含水比は、やや乾燥側にある。
- ③混合・再生路盤材の室内締固め試験における締固め状態の目視観察からは、現場施工で問題となるような事象は観察されなかった。
- ④混合・再生路盤材 RC-40の設計C B Rは、混合比率が増加すると減少する傾向があり、混合比率が5%を超えると、C B R値の減少が増大する傾向が見られる。修正C B R試験は実施していないが、過去の経験上、設計C B Rの80%程度が予想される。
- ⑤長期水浸C B R値(4週まで)の結果を見ると、C B R値に若干ながら上昇傾向が見られる。

今回実施した混合・再生路盤材 RC-40の物理・力学特性試験結果は、参考表に示す再生路盤材の品質規格値に十分合致しており、浄水発生土に碎石微粉末を混合して造粒固化した材料の有効利用について目安が得られたものと考えている。

参考表 再生クラッシャーラン RC-40品質規格

準拠規格	東京都建設局 土木材料仕様 書(H15)	埼玉県土木工 事実務要覧	舗装再生便覧 (社)日本道路 協会
表乾比重	・・・	2.35 以上	・・・
すりへり減量	40%以下	50%以下	50%以下
塑性指数	6%以下	6%以下	6%以下
修正C B R	40%以上	30%以上	20%以上

6. まとめ

浄水発生土の土木材料としてのリサイクル有効利用を考慮して、碎石微粉末を混合して造粒固化し、粒状新材料の開発を意図した基礎的調査試験を実施した。この結果、粒状固化材料を再生路盤材に一定率以下の混合比率で混合することで、再生路盤材の補助材・増量材としての有効利用方法があるものと考えられる。

浄水発生土に碎石微粉末を混合し、造粒固化した粒状材料単体において造粒直後の塑性指数に課題がみられた。しかし、養生7日を経過した造粒固化材料の塑性指数はN.Pであった。このことから、今回の造粒固化材料は、7日以上養生期間をとることが必要であると考えられる。なお、品質及び経済性についてさらに調査・試験を詰めていく予定である。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課；水道ビジョンの主要施策と今後の課題、第2回水道ビジョンフォローアップ検討会資料、2007.5.
- 2) 古河幸雄外；浄水汚泥の地盤材料への利用に関する研究、土木学会論文集、vol.62No1, 2006.3.
- 3) 小峰秀雄、安原一哉外；力学特性による浄水汚泥の道路構成材料への利用に関する評価、第42回地盤工学研究発表会、2007.7.
- 4) [財] 土木研究センター；技審証第1202号、碎石微粉末を固化・造粒した路床材及び埋め戻し材〔ロックビーズ〕、審査証明依頼者：第一石産運輸㈱、平成12年5月.