

令和元年6月13日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06488

研究課題名(和文) 造粒固化処理土の高耐久性化と長期繰返し疲労変形特性の解明

研究課題名(英文) Improvement of durability and long-term cyclic fatigue deformation characteristics of cement granulated soils

研究代表者

早野 公敏 (HAYANO, Kimitoshi)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授

研究者番号：40302632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：建設工事で発生する泥土は、細かい粒径の土砂で水分を多く含むため、そのままでは有効利用できない。そこで研究代表者は、有効利用技術の一つとして造粒による改良技術に着目した。本研究では固化材を効率よく混合するための泥土のほぐし材として吸水性材料(ペーパースラッジ灰系改良材)を利用し、最小限の加水によって改良土の高耐久性化を図った。具体的には液状泥土に最初に吸水性材料を加えて瞬時に性状を改質し、数時間～1日後にセメント系固化材を加えると飛躍的に強度を改善できる結果を得た。これにより盛土材としての必要な強度を確保でき、繰返し载荷による細泥化を抑制できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建設工事で発生する泥土の有効利用技術の一つとして造粒による固化技術に着目する場合、改良土の高耐久性化を図るうえで、泥土に吸水性材料を少量添加することが有益であることを示した。特にペーパースラッジ灰系改良材を泥土に添加すると、吸水性能は経時変化しないにも関わらず、養生にともない改良土がゆるやかに硬化するため、泥土のほぐれやすい状態を長時間保っていることが明らかとなり、ペーパースラッジ灰系改良材が吸水性材料として好適であった。製紙工場の廃棄物であるペーパースラッジ灰の有効利用促進にもつながり、異種産業界間のゼロエミッションを通して持続的社会的発展に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Mud generated by construction work cannot be effectively used as it is because it has fine particles and contains much water. Therefore, in this study granulation is focused as one of the effective utilization technologies. In this research, a water-absorbent material (paper sludge ash improver) was used for mud to efficiently mix the solidified material, and attempts were made to improve the durability of the granulated soil with minimal water addition. Specifically, the water absorbing material was first added to the liquid mud and the properties were instantly improved, and the results showed that the strength could be dramatically improved by adding a cement-based solidifying material several hours to one day later. It became clear that the required strength as an embankment material could be secured by this method, and particle crushing by repeated loading could be suppressed.

研究分野：地盤工学

キーワード：土質改良 リサイクル 有効利用 建設資源 地盤工学

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建設工事で発生する泥土は、細かい粒径の土砂で水分を多く含むため(図1)、そのままでは有効利用できない。そのため、脱水したりセメントを添加したりして泥土の性質を改善することにより利用されてきたが、他の建設副産物に比較して利用率が低い。具体的な状況として、脱水処理する場合には、脱水した泥土の強度や硬さが十分でないために、利用用途に限られることが多い。一方、セメント添加で処理する場合には、現場で必要となるまでセメントを添加できず、その間、周囲を囲えるヤードで泥土を保管する必要があり、容量の制約から、製造量の柔軟性に乏しい。



図1 高含水比の浚渫土砂

そこで有効利用技術の一つとして造粒固化処理技術に着目し、2007年から研究を始めた(図2)。泥土を造粒化することにより、トラックで運搬したり、更地でストックしたりすることが可能になる。そして山砂と同様に工事間の広域なネットワークの利用が可能となることが期待された。国内のみならず、建設用砂礫材料が不足しているシンガポールのような国においても造粒土に対する関心は高い。研究当初は主として埋戻し・埋立て材としての利用を目的に、造粒固化処理土(以下、造粒土)の耐震性や圧縮性を検証し、同時に材料配合を見直してコストの低減を図った。



図2 浚渫土砂の造粒化の様子

現在、造粒固化処理技術は広く知られ、複数のプラントが建設されて、地域の建設工事で発生する泥土の再資源化に貢献している。しかしながら、東日本大震災復興に関する工事を除けば、造粒土の利用量は当初に期待されたほど多くない。その理由として2点が考えられる。第1点は、製造にプラントが必要なことにある。この現況に対して、製造にプラントを必要としない「液状泥土のほぐし造粒技術」を考案した。ほぐし造粒は、特殊な装置、機械を必要とせず、バックホウや土質改良機あるいはトラクター等があれば現場において固化材のみで大量の液状泥土を処理して造粒土を製造できるものである。

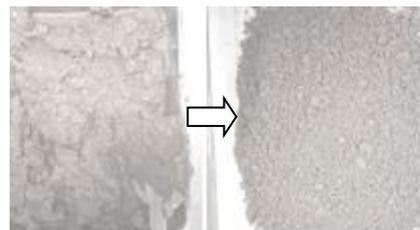


図3 PS 灰系改良材を添加した粘性土

利用量が多くない理由の第2点は、造粒土の耐久性に対する懸念である。現在、造粒土の品質はコーン指数、修正 CBR あるいは粘着力やせん断抵抗角によって評価されており、軽量という特徴を有することもあり、用途の多くが盛土材あるいは埋戻し材である。しかしながら、新しい材料であるために品質が長期的に安定しているかどうかという実績はなく、東日本大震災の復興工事でもしばしば心配された。特に粒子の破碎の進行が懸念されるため、適用に躊躇する発注者も多い。このように造粒土の長期耐久性への懸念がネックとなっていることから、造粒土の利用拡大を図り泥土の再資源化を向上させるためには、造粒土の高耐久性化が必要であると考えられることができる。

2. 研究の目的

泥土にセメント系固化材を添加すると、しばしば、泥土の表面のみに固化材が付着し、土の内部まで回り込まず、固化材を均一に混合することが困難である。そのため造粒土の製造現場では、泥土に多量に加水して粘着力を低減し、固化材が混ざりやすい状態にする工夫(加水解泥混合)がなされている。考案した「液状泥土のほぐし造粒技術」においても同じである。しかし、造粒土が必要以上に水分を抱え込むことになり耐久性の観点から好ましくない。陶器や瓦用に用いられる粘土粉末のように粘性土を乾燥した上で粉碎し、その後固化材を混合する方法も原理的には考えられる。しかしながら泥土の乾燥に膨大なコストや手間がかかることから通常採用されない。

一方、従来から吸水性材料を加えて粘性土に含まれる水分を物理・化学的に脱水して改質処理し、改良土として利用する技術は広く普及している。吸水性材料としては、石炭灰系、石膏系、PS 灰系改良材などが知られている。図3は、PS 灰系改良材を添加して粘性土を改質処理したものである。わらび餅状の粘土塊が、吸水効果によってほぐれて細かくなっている。この性状変化に既存の混合方法の問題点を解決できる可能性を見出し、本研究では吸水性材料を泥土のほぐしに利用する吸水混合法によって、固化材の水硬反応に必要な最小限の加水量で均質かつ高耐久の造粒土の作製を試みる。そのために好適な吸水性材料を選定し、さらに固化材を効率よく混合するための泥土のほぐし材として吸水性材料を利用し、最小限の加水によって造粒土の高耐久性化を図る。

3. 研究の方法

初めに、先行研究で固化材をうまく混合処理できなかった粘性の高い泥土を準備し、それに数種類の吸水性材料をそれぞれ添加・混合させる。そして吸水による泥土のほぐれ効果の定量的評価から、吸水混合法に好適な吸水性材料を選定した。次に好適として選定した吸水性材料を泥土に添加して改良土を作製し、養生が改良土の強度特性に及ぼす影響を調べるとともに、養生にともなう物性変化の要因を検討した。最後にセメント系固化材の水和反応を効率的に引き出し、初期強度の発現を速め、かつより少ないセメント系固化材の添加量で高強度を確保する検討を行った。

4. 研究成果

1) 吸水混合法に好適な吸水性材料の選定

液性限界 79.6%，塑性限界 42.8%，塑性指数 36.8 の粘性土（建設発生土）の含水比を 50, 60, 70, 80, 90, 100% に調整した 6 種類の試料を各 500g 用意し、それぞれに炭酸カルシウム粉末を 50g（質量比 10% 添加し、キッチンミキサーで 1 分間低速で攪拌した。同試料の任意の 5 箇所から試料を分取し、絶乾後蛍光 X 線装置を用いてカルシウム含有量を測定した。その結果を表 1 に示す。

上記のように、含水比が 60~80% の間では粘性土が塑性状態（粘土塊）で存在するため、粘土塊中に炭酸カルシウムのような粉末を均等に混合するのが困難である。

続いて同じ粘性土（自然含水比 71.3%）を用いて以下の試験を実施した。

- ① 土の湿潤質量 1000g に対して、吸水材を 5, 10 質量% 添加。
- ② 吸水性材料は、PS 灰系改良材、生石灰、石膏系改良材、早強セメントの 4 種類。
- ③ 添加直後、2, 4, 8 時間、1 日、7 日後にキッチンミキサーで 1 分間低速攪拌してほぐす。
- ④ ③の各ほぐし作業直後に 4.75mm メッシュでふるい、ふるい通過量を測定する。ふるい通過分の質量を全質量で除した値（パーセント表示）を「ほぐれ率」と定義した。

上記に加え、原土のままのケースおよび早強セメントを添加し、添加直後のみ攪拌し 1 日養生したケースについても比較検討ケースとして実施した。結果を表 2 に示す。同表のように、無添加および石膏系改良材ではほぐれず、PS 灰系改良材や生石灰では時間経過とともにほぐれ率が増加した。一方、早強セメントを添加したケースでは、5% 添加したケースではほぐれは不十分であり、10% 添加したケースでは一部固結が認められるもののほぐれることを確認した。ただし、途中でほぐし作業をしないケースでは 1 日経過で固結してしまった。

表 2 吸水ほぐし試験の結果（その 1）

吸水性材料	添加率 (%)	養生時間に伴うふるい通過率「ほぐれ率」 (%)						評価	
		直後	2時間後	4時間後	8時間後	1日後	7日後		
無添加	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	ほぐれず
PS 灰系改良材	5	3.8	3.6	4.8	3.1	7.8	57.4	◎	ほぐれやすい
	10	34.2	49.1	50.8	51.5	52.5	55.9	◎	ほぐれやすい
生石灰	5	20.0	24.7	46.1	56.9	60.8	61.7	◎	ほぐれやすい
	10	46.3	57.2	60.3	64.0	65.9	66.2	○	一部固結
石膏系改良材	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	ほぐれず
	10	5.0	5.0	0.0	0.0	0.2	0.0	×	ほぐれず
早強セメント	5	0.0	13.8	9.5	9.9	9.7	16.9	×	ほぐれにくい
	10	9.0	38.5	46.0	50.5	51.8	52.9	○	一部固結
	10	-	-	-	-	-	-	×	1日で固結

次に吸水性材料の添加率を 15 質量% としたケースについて同様の吸水ほぐし試験を実施した。その結果を表 3 に示す。

PS 灰系改良材を添加したケースでは、添加率 15% としても、ほぐれやすい状態を長時間保っている。それに対して、生石灰を添加したケースでは、固化強度の増加が著しく、養生期間を

表 1 含水比別のカルシウム含有量

(mg/kg) のばらつき

含水比	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数
50%	111274	125200	83470	16168	0.145
60%	98088	214700	48500	71584	0.730
70%	92392	161400	50460	54989	0.595
80%	103164	200200	57370	55727	0.540
90%	114174	132600	95160	16053	0.141
100%	103814	122600	90490	12693	0.122

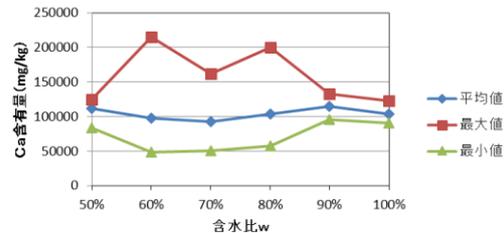


図 4 カルシウム含有量の最大値・最小値・平均値

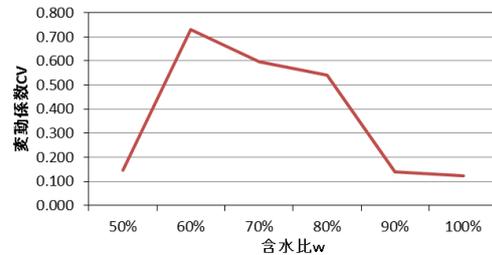


図 5 カルシウム含有量の変動係数

長くしてもほぐれ率の増加は少ない。また石膏系改良材では、15%添加でもほぐれやすさの著しい改善は認められなかった。さらに早強セメントを添加したケースでは、1日の養生で完全に固結してしまった。

以上の結果から、吸水性材料としては、PS 灰系改良材が好適であることがわかる。

表 3 吸水ほぐし試験の結果 (その 2)

吸水性材料	添加率 (%)	ほぐれ率 (%)			評価	
		直後	1日後	7日後		
PS系改質材	15	51.2	58.7	66.0	◎	ほぐれやすい
生石灰	15	45.6	54.1	55.0	△	1日で半固結
石膏系改良材	15	9.2	28.7	29.8	×	ほぐれにくい
早強セメント	15	15.3	固結	固結	×	1日で固結

2) 吸水性材料を添加した改良土の養生にともなう物性変化とその要因

養生がペーパーセラッジ (PS) 灰系改良土の強度特性に及ぼす影響を調べるとともに、養生にともなう物性変化の要因を検討した。泥土を模擬するものとして市販の青粘土を用いた。液性限界 w_L は 40.7%、塑性限界 w_p は 23.7%、塑性指数 I_p は 17.0 で、CL(粘土(低液性限界))に区分される。PS 灰系改良材としては、フッ素などの不溶化処理のために PS 灰に薬剤を混合して水和処理したものを用いた。なお、PS 灰系改良材は NP(非塑性)である。

まず、PS 灰系改良材の吸水性能の経時変化を吸水性試験で調べたところ、図 6 の結果になった。すなわち、供水性能は経時変化しないことが明らかになった。

つぎに吸水性材料を添加した改良土の養生にともない物性変化を調べたところ、図 7, 8, 9 の結果が得られた。すなわち、液性指数が低下し PS 灰系改良土が硬化すること、またコーン指数はゆるやかに増加し液性指数と一義的な関係があることが明らかになった。一方、PS 灰系改良材の成分組成は普通ポルトランドセメントのものに定性的に類似し、養生にともない PS 灰系改良土にエトリンガイトが生成することが確認された。このエトリンガイト生成などによる PS 灰系改良土中の拘束水量の経時変化を、40°C加熱の含水比試験結果により評価した結果、液性指数の変化とよい相関が認められ、さらに拘束水量に基づいて評価したコーン指数は実測値に比較的一致した。

3) 高強度を確保する検討

泥土の固化処理を実施する際に吸水性材料であるペーパーセラッジ灰系改良材を適切な手順で適量を添加することにより、初期強度の発現を速め、かつより少ない固化材の添加量で高強度を確保する検討を行った。

具体的には液状泥土に最初に吸水性材料を加えて瞬時に性状を改質し、1日後にセメント系固化材を加えてコーン指数の確認を行った。比較として吸水性材料とセメント系固化材を同時に添加する

ケースも実施した。その結果、表 4 に示すように、同じ添加率でも、液状泥土に最初に吸水性材料を加えて瞬時に性状を改質し、数時間~1 日後にセメント系固化材を加えると飛躍的に強度を改善できる結果を得た。これにより盛土材としての必要な強度を確保でき、繰返し載荷による細泥化を抑制できるとともに、セメント添加量抑制により改良土の中性化の促進が図られた。さらに泥土の含水比に応じて、セメント系固化材の水和反応に必要な水量を担保できるように吸水性材料の添加量を調整する必要があることも明らかになった。

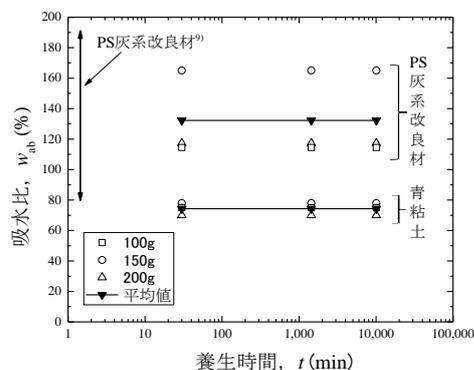


図 6 PS 灰系改良材の吸水比の経時変化

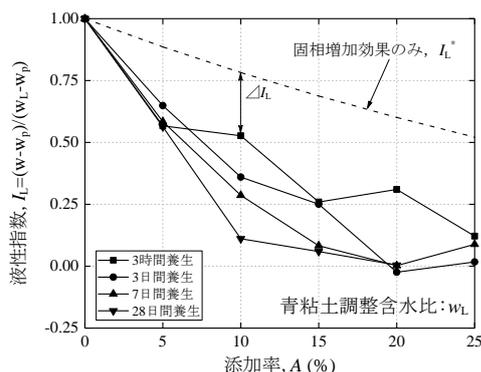


図 7 添加率・養生にともなう液性指数の変化

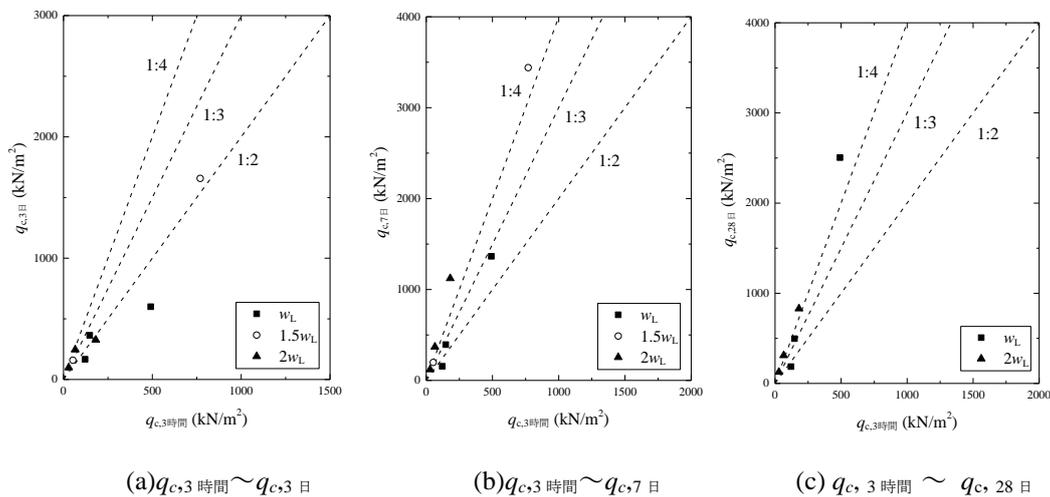


図 8 $q_{c,3時間}$ と $q_{c,3日}$, $q_{c,7日}$, $q_{c,28日}$ の比較

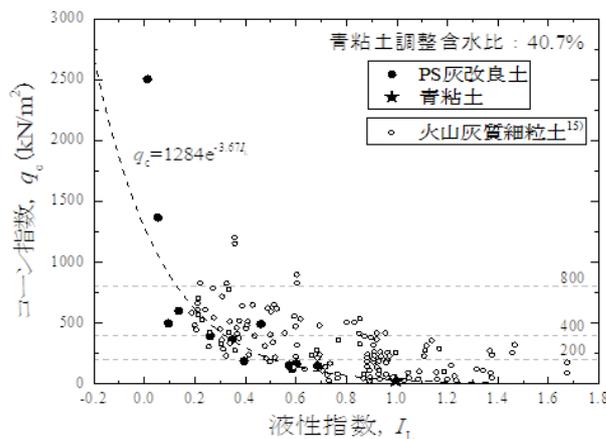


図 9 液性指数とコーン指数の対応

表 4 セメント系固化材と吸水性改質材を併用した試験結果

液状泥土 (m^3)	1	1	1	1	1	1	
改良材添加量 計 (kg)	200	200	200	250	250	250	
内訳	①吸水性材料 (PS灰系) (kg)	200	150	150	250	200	200
	②セメント系固化材 (kg)	0	50	50	0	50	50
配合手順	①+② 同時	①+② 同時	①→② 翌日	①+② 同時	①+② 同時	①→② 翌日	
7日後のコーン指数 (kN/m^2)	62	79	468	166	184	845	

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

(1) 川合彩加, 早野公敏, 山内裕元, PS 灰系改良土の強度特性に及ぼす養生効果とその要因に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 74, No. 3, 306-317, 2018. (査読有)

〔学会発表〕 (計 6 件)

(1) Hayano, K., Yamauchi, H., Wakuri, N. and Tomiyoshi, S., A New Granulation Method with the Process of Crumbling Partially-cemented Liquid Muds and its Application to a Motocross Track. Procedia Engineering, Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), 143, 98-103, 2016.

- (2) 川合彩加, 山内裕元, 早野公敏, 低温乾燥による PS 灰系改良材混合土の物理特性経時変化の評価, 第 52 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 475-476, 2017 年, 7 月
- (3) 川合彩加, 山内裕元, 早野公敏, 養生効果を考慮した PS 灰系改良土の強度予測方法に関する基礎的検討, 第 14 回地盤工学会関東支部発表会講演集 (GeoKanto2017), pp. 178-181, 2017.
- (4) 佐伯拓哉, 早野公敏, 山内裕元, アルカリ建設汚泥の中性化に関する基礎研究, 第 53 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 559-560, 2018 年, 7 月
- (5) 渡邊悠樹, 早野公敏, 山内裕元, 藤原斉郁, PS 灰系改質材を利用した発生土の盛土材への適用性に関する基礎的検討, 第 54 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 559-560, 2019 年, 7 月
- (6) 今井健太郎, 早野公敏, 山内裕元, PS 灰系改良材の添加が中性化速度に及ぼす影響に関する基礎的検討, 第 54 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 559-560, 2019 年, 7 月

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 <http://hayano2.wixsite.com/website-8>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：早野 公敏

ローマ字氏名：(HAYANO, Kimitoshi)

所属研究機関名：横浜国立大学

部局名：大学院都市イノベーション研究院

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：40302632

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。