

高含水比粘性土の粒状固化処理に適した中性改良剤の開発に関する研究

藤浩史¹, 藤龍一², 林 泰弘³

¹ワールド・リンク, ²九州産業大学

概要: 高含水比粘性土を粒状固化処理によって地盤材料として活用するための研究を行った。独自に開発した中性改良剤は粒状化に効果的であることが明らかにされた。第3種建設発生土程度に改良した場合、締固めによって団粒は破壊されるため、透水性は低く、強度定数は内部摩擦角が 6° 程度以下、粘着力が $15\sim 25\text{kN/m}^2$ 程度であることが明らかになった。

1. はじめに

港湾や河川などの浚渫工事等の建設工事により継続的に発生する浚渫土は高含水比で軟弱である。これらは、主に土砂処分場に投入されてきたが、処分場の確保などが困難になってきたことから有効活用が望まれている。浚渫土は、その粒度組成により砂質土と粘性土及び中間的なものに大別され、その性状によって利用用途も大きく異なる。砂質浚渫土砂は有用な土質材料として埋立材料や海砂として各用途に標準的な材料として使われている。しかし、粘性土や中間的なものは含水比が高く軟弱であり、埋立に使用した場合には地盤改良が必要となるなど、そのままで用途が少ない。そのため、軟弱な浚渫土を有効利用する場合には、事前に固化材の添加による混合処理を施したり、脱水処理をしたりなどの改良を行う必要がある¹⁾。浚渫土に限らず沿岸部では建設工事に伴って発生する軟弱な粘性土も同様の問題を抱えている。

筆者らは、軟弱な粘性土を粒状固化処理することによって盛土材料や埋戻し材料として活用することを目指している^{2), 3), 4), 5), 6)}。粒状固化処理とは、泥状の土を砂礫と同様の粒状にするものであり、砂質土と同様のハンドリング性を持つこと、保管時には乾燥が促進されるため含水比低下に伴う強度増加が期待できるなどの特徴を有する。処理にはセメントや石灰などの固化材を用いるが、固化材の種類や量によっては、粒状化しないまま固結してしまい、取り扱いが困難になる。そこで、筆者らが開発した中性改良材の適用を検討した。

本研究では底泥の種類に着目し、固化材を添加することで粒状固化処理し、粒状化の状況やコーン指数が目標値($q_c \geq 800\text{kN/m}^2$ または $q_c \geq 400\text{kN/m}^2$)を得るための配合を検討し、混合処理時に固化助剤を追加で添加することによっての粒状化への影響と固化への影響を検討した。さらに

透水試験や三軸圧縮試験を行い、盛土材料としての適用性も検討した。

2. 実験試料

2.1 原土

本研究では、博多湾底泥(IC底泥)、網走湖底泥(AB底泥)、有明粘土(原土A)、建設発生土(原土B)の4試料を使用した。博多湾底泥は、福岡市アイランドシティの沿岸からエクマンバージによって2012年9月に採取した底泥である。特徴として、非常に軟弱で海水を含んでいるので塩分を含有していること、初期含水比が高く非常に乾きにくいことが挙げられる。網走湖底泥は、網走湖から浚渫され、長時間放置されたのち、2013年度に採取された底泥である。博多湾底泥と比べると初期含水比も低く、乾きやすい。塩分をほとんど含有していない。有明粘土は2013年5月に佐賀県の六角川から浚渫した底泥である。特徴として、初期含水比が高いことがあげられる。建設発生土は久留米市で採取した建設発生土である。

対象試料の粒径加積曲線を図1に、物理・化学特性を表1に示す。化学特性は液性限界に調整した試料を用いて測定した。IC底泥と原土Aの粒度分布は類似しており、細粒分含有率が非常に高いが、原土Aのほうがより粘土分が多く、液性限界も高い。AB底泥は砂分が多く、均等係数が大きな粒度分布が良い土であった。しかし、活性度が高く、IC底泥、原土Bと同様に活性粘土と評価される。また、pHが非常に低いことから酸化が進んでいると考えられ、固化材が効きにくい試料であることが予想された。原土Bはシルト分が卓越し、4種類の中で最も液性限界が低くMLに分類された。また、活性度による区分でも非活性の粘土と区分されることから、固化材は効きやすいものと推察された。

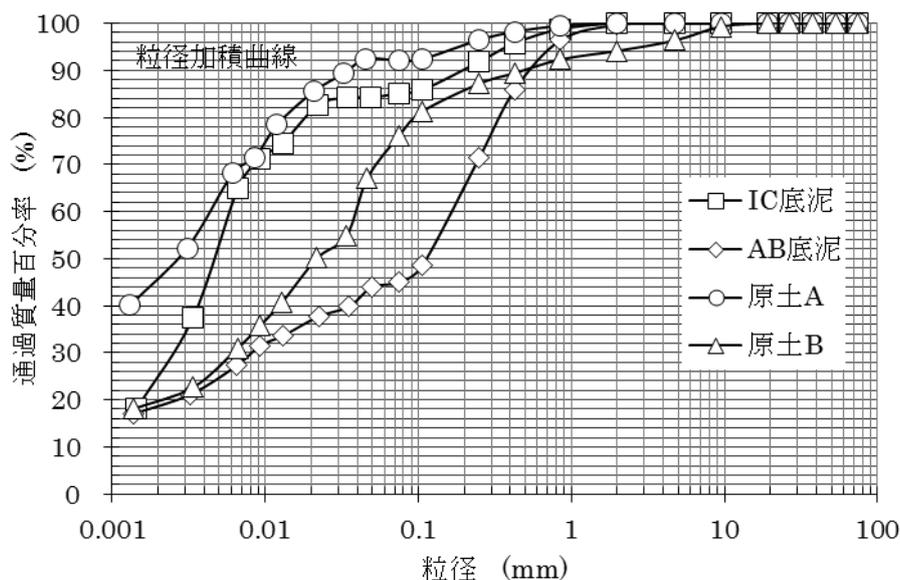


図1 試料の粒径加積曲線

表1 原土の物理・化学特性

	IC底泥	AB底泥	原土A	原土B
自然含水比 %	175.5	-	160.1	27.2
土粒子の密度 g/cm ³	2.732	2.553	2.570	2.639
砂分%	14.8	54.7	7.9	17.9
シルト分%	79.9	19.9	28.6	49.2
粘土分%	5.3	25.0	63.5	27.0
最大粒径 mm	2.00	9.5	2.00	19.0
均等係数 U _c	6.4	1620	44	391
曲率係数 U _{c'}	1.2	3.95	0.57	9.83
液性限界 w _L %	110.6	62.8	130.9	42.4
塑性限界 w _p %	43	34.4	52.4	29.9
塑性指数 I _p	67.6	28.5	78.5	12.5
活性度 A	2.7	1.5	1.7	0.6
強熱減量 %	12.9	5.4	14.3	-
pH	7.83	4.65	7.71	-
電気伝導率 EC mS/m	929	54	764	-
分類記号	MH	SF	MH	ML

2.2 固化材・固化助剤

固化材として位登産業社製の生石灰、トクヤマ社製の一般軟弱土用セメント系固化材ハードキープ P-430、麻生ラファージュセメント社の高炉セメントB種を用いた。

固化助剤としてワールド・リンク社製中性改良剤

デイサット⁷⁾およびDW①、北斗社製二水廃石膏を用いた。デイサットは写真1に示す外観である。ペーパーラッジやシラスバルーンなどを原料とし、焼成させて製造されている。従来セメントでは、固化しにくかった湖沼などにセメントと併用で少量添加することによって団粒化処理出来る。高含水泥



写真1 デイサット



写真2 DW①



写真3 二水廃石膏



(a) 泥状(未処理土)



(b) 改良不十分



(c) 固結(粒状化不良)



(d) 粒状化良好

写真4 粒状化の判定

土に添加することで凝集し簡素に安定処理することができる。もともとは建設工事で発生する泥水の凝集処理に用いられていた。浚渫砂質土や東日本大震災の復興における焼却灰の粒状固化処理の実績がある。DW①は写真2に示す外観である。デイサットと類似の原料で構成される改良版(試作品)である。デイサットほどの効果は期待されないが、焼成が不要であることなどのため安価で大量に製造できる見込みのものである。二水廃石膏は写真3に示す外観である。建築資材の石膏ボードを再利用(破碎)し精製されている。中性改良剤と同じく、高含水泥土の安定処理において固化材使用量の低減が期待できる。フッ素の溶出の問題があるので注意を要する。

3. 粒状固化処理土の作製

軟弱土を処理し盛土材料や埋戻し材料として活用する際に、運搬や保管のし易さの確保のための粒状化と共に、施工性の確保のため必要な強度を得ることを目標とする。

粒状固化処理土は以下の手順で作製した。

- ①原土を液性限界に調整する。
- ②固化助剤を添加し、ハンドミキサーで混合する。
- ③固化材を添加し、ハンドミキサーで混合する。
- ④処理土をバットに広げ、恒温庫(20±3℃)に入れ、1時間放置する。
- ⑤再度、ハンドミキサーで混合し、密閉容器に入

表 2 粒状化の判定結果(IC 底泥, AB 底泥)

試料土	固化材		固化助剤		粒状化判定
	種類	添加量 (kg/m ³)	種類	添加量(kg/m ³)	
IC 底泥	生石灰	80	-	-	改良不十分
IC 底泥	生石灰	120	-	-	改良不十分
IC 底泥	生石灰	160	-	-	粒状化良好
IC 底泥	生石灰	80	デイサット	5	粒状化良好
IC 底泥	生石灰	120	デイサット	5	粒状化良好
IC 底泥	高炉セメント B 種	80	-	-	改良不十分
IC 底泥	高炉セメント B 種	120	-	-	固結
IC 底泥	高炉セメント B 種	160	-	-	固結
IC 底泥	高炉セメント B 種	100	デイサット	5	粒状化良好
IC 底泥	高炉セメント B 種	120	デイサット	5	粒状化良好
IC 底泥	高炉セメント B 種	120	廃石膏	30	固結
AB 底泥	生石灰	80	-	-	改良不十分
AB 底泥	生石灰	120	-	-	粒状化良好
AB 底泥	生石灰	160	-	-	粒状化良好
AB 底泥	生石灰	80	デイサット	3	改良不十分
AB 底泥	生石灰	120	デイサット	3	改良不十分
AB 底泥	高炉セメント B 種	80	-	-	改良不十分
AB 底泥	高炉セメント B 種	120	-	-	固結
AB 底泥	高炉セメント B 種	160	-	-	固結
AB 底泥	高炉セメント B 種	120	デイサット	5	-
AB 底泥	高炉セメント B 種	120	廃石膏	30	-

れ, 恒温庫(20±3℃)で養生する。

粒状化の判定は, 養生後の使用の状態で行った。写真 4 に判定基準を示す。写真 4(a)は液性限界の原泥の状態を呈している。これに固化材等を少量添加すると, 写真 4(b)の状態になる。さらに固化材等を添加した場合に, 写真 4(c)または写真 4(d)の様相を呈する。強度は写真 4(c)のほうを得られるが, 目標とする処理土は後者である。

表 2, 3 に粒状化判定の結果を示す。固化材としては, 生石灰を使用したほうがセメント系固化材を使用するよりも粒状化が良好になることがわかる。また, デイサットを用いることで, 粒状化が良好になる場合が多くなり, セメント系固化材との併用にも効果が確認できた。

4. コーン指数

養生後の処理土を 9.5mm ふるいに通過するようになるときほぐした後, 「締固めた土のコーン指数試験の方法(JIS A 1228)」に従って締固め, コーン指数試験を行った。

図 2 に液性限界に調整した各原土に対する各種改良材添加量とコーン指数を示す。改良材添加量は固化材と固化助剤添加量の合計値である。凡例の IC, AB, A, B はそれぞれ IC 底泥, AB 底泥, 原土 A, 原土 B を示しており, D はデイサット, G は廃石膏, DW①は DW①, L は生石灰, BB は高炉セメント, HK はセメント系固化材を示している。なお, 固化助剤の添加量は各対象土で一定であり, 記号直後の数値(kg/m³)である。そのため, 改良材添加量の増加は固化材添加量の増加によるもので

ある。

表3 粒状化の判定結果(原土A, 原土B)

試料土	固化材		固化助剤		粒状化判定
	種類	添加量 (kg/m ³)	種類	添加量(kg/m ³)	
原土A	生石灰	80	-	-	改良不十分
原土A	生石灰	120	-	-	固結
原土A	生石灰	160	-	-	固結
原土A	生石灰	80	デイサット	3	粒状化良好
原土A	生石灰	120	デイサット	3	粒状化良好
原土A	生石灰	160	デイサット	3	粒状化良好
原土A	セメント系固化材	40	-	-	改良不十分
原土A	生石灰	80	廃石膏	30	-
原土A	生石灰	120	廃石膏	30	-
原土A	生石灰	160	廃石膏	30	-
原土A	セメント系固化材	80	-	-	固結
原土A	セメント系固化材	120	-	-	固結
原土A	セメント系固化材	40	デイサット	3	-
原土A	セメント系固化材	80	デイサット	3	固結
原土A	セメント系固化材	120	デイサット	3	固結
原土A	セメント系固化材	80	廃石膏	30	-
原土A	セメント系固化材	80	廃石膏	30	-
原土A	セメント系固化材	80	廃石膏	30	-
原土B	生石灰	20	-	-	粒状化良好
原土B	生石灰	40	-	-	粒状化良好
原土B	生石灰	60	-	-	粒状化良好
原土B	生石灰	20	デイサット	3	粒状化良好
原土B	生石灰	40	デイサット	3	粒状化良好
原土B	生石灰	60	デイサット	3	粒状化良好
原土B	生石灰	20	廃石膏	30	粒状化良好
原土B	生石灰	40	廃石膏	30	-
原土B	生石灰	60	廃石膏	30	-
原土B	セメント系固化材	20	-	-	改良不十分
原土B	セメント系固化材	40	-	-	粒状化良好
原土B	セメント系固化材	60	-	-	粒状化良好
原土B	セメント系固化材	20	デイサット		粒状化良好
原土B	セメント系固化材	40	デイサット		粒状化良好
原土B	セメント系固化材	60	デイサット		粒状化良好
原土B	セメント系固化材	20	廃石膏		粒状化良好

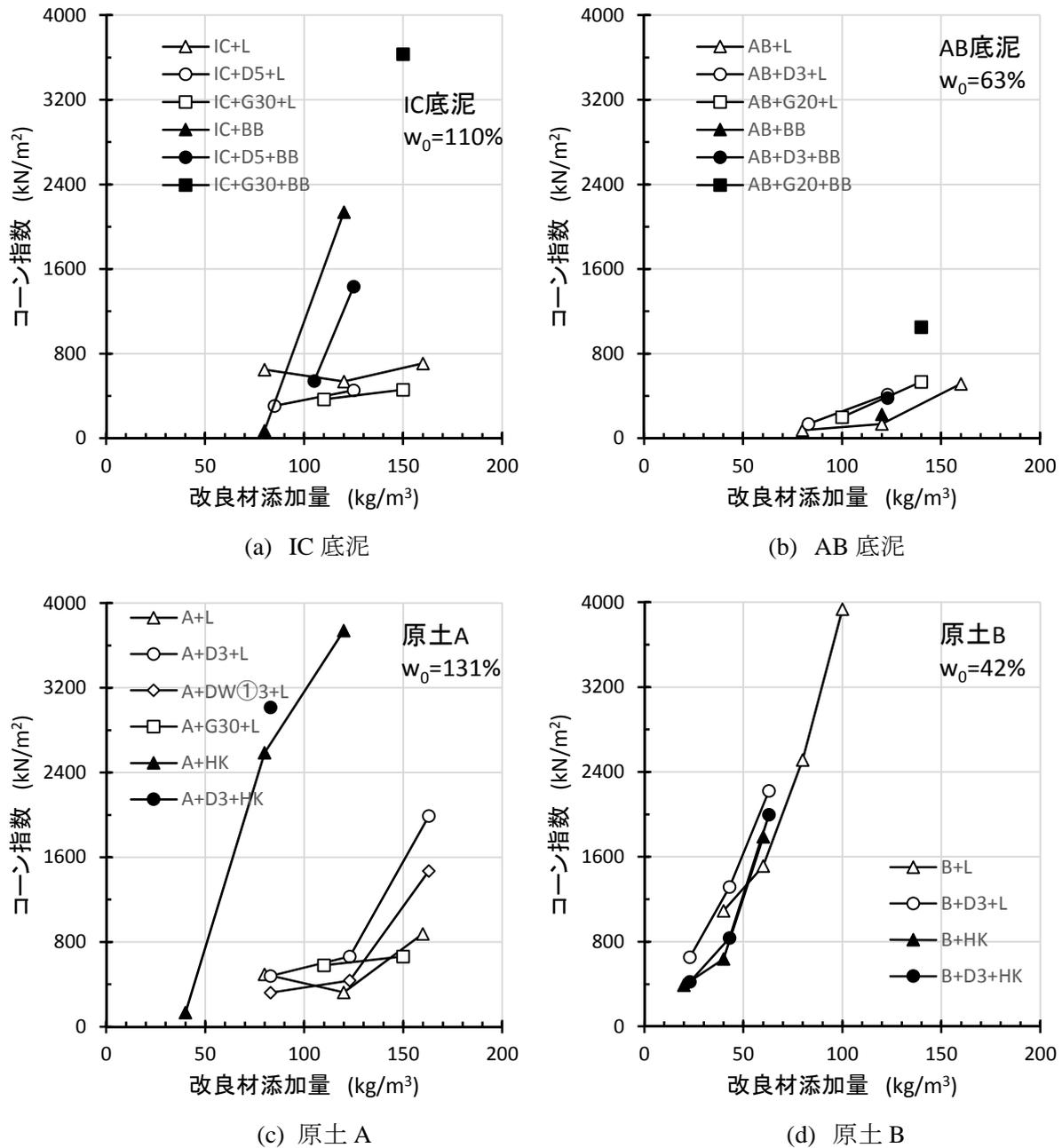


図2 改良材添加量とコーン指数の関係

IC底泥(図2(a))については、添加量 80kg/m^3 程度では生石灰を固化材とした場合の改良効果が大いだが、生石灰の添加量を増やしてもコーン指数

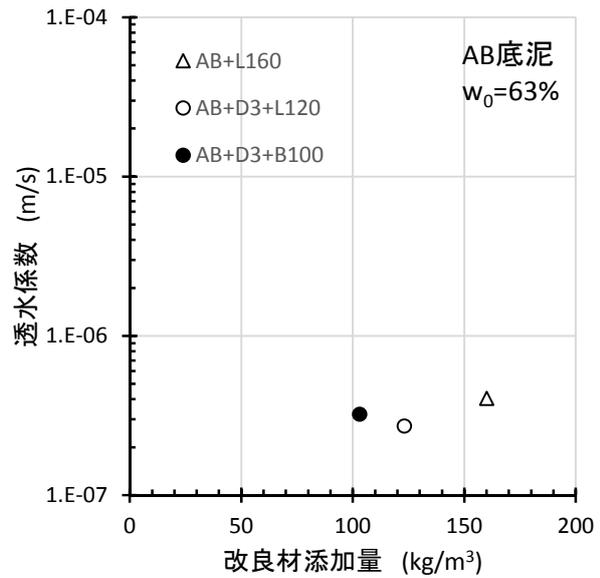
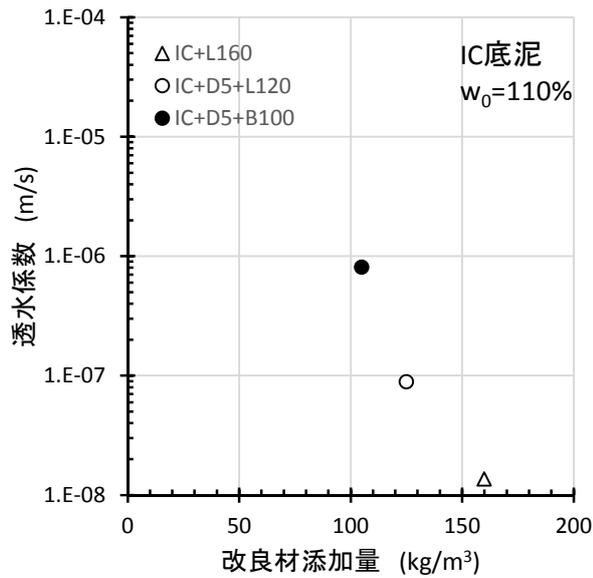
の変化は少ない。一方、高炉セメントを用いた場合にはある程度以上の添加量で急激にコーン指数が増加している。また、固化材によらず固化助材の添加によって、コーン指数が低下している。

AB底泥(図2(b))については、試験した範囲内であまり大きなコーン指数は得られていない。しかし、生石灰を用いた場合には固化助剤の添加でコ

ーン指数の増加がみられた。高炉セメントを用いた場合には実験データが少ないため、明確な結果は得られていない。

原土A(図2(c))については、固化材として生石灰を用いた場合に比べ、セメント系固化材を用いた場合に改良効果が非常に高い。しかし、表2に示したように固結してしまうため、本研究で目指している

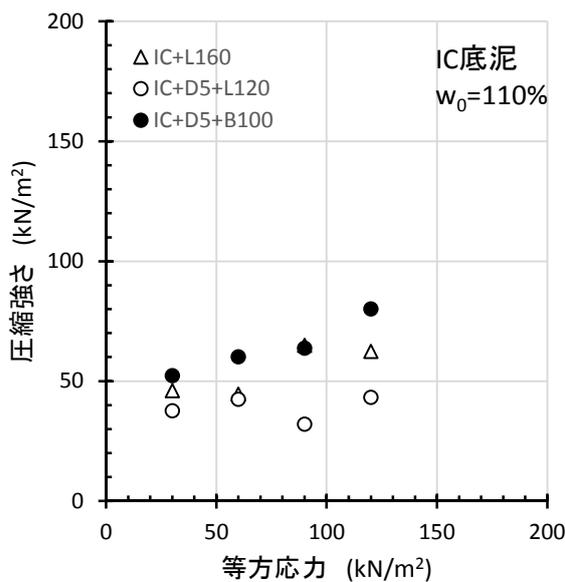
粒状固化処理土としてはふさわしくない。生石灰を使用した場合には生石灰の添加量が増加すると、デイサットやDW①の添加によりコーン指数が改善



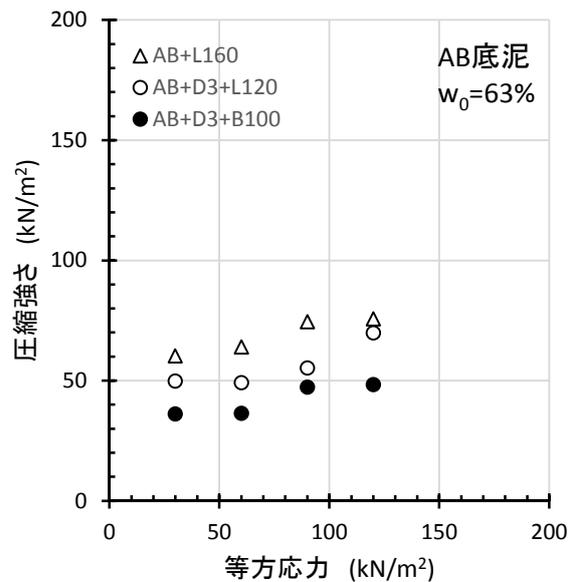
(a) IC 底泥

(b) AB 底泥

図3 改良材添加量と透水係数の関係



(a) IC 底泥



(b) AB 底泥

図4 改良材添加量と透水係数の関係

されることがわかる。

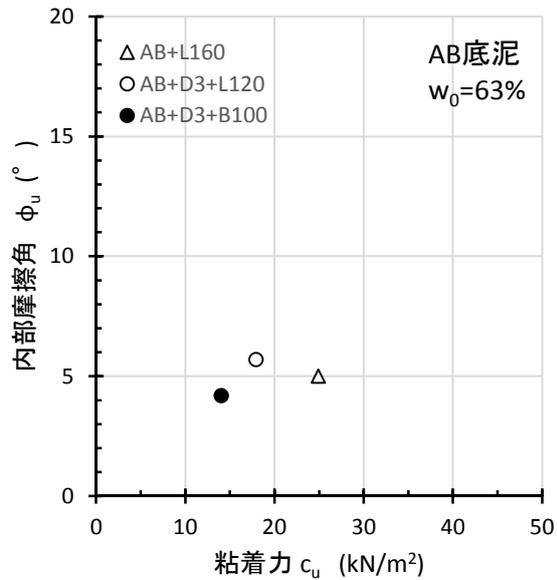
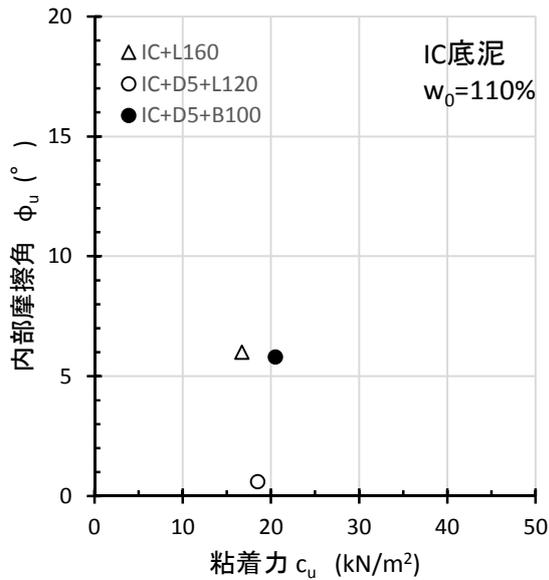
原土 B (図 2(d)) については、固化材として生石灰を用いた場合は添加量が少ない範囲でセメント系固化材を用いた場合よりも改良効果が高い。また、デイサットの添加によりコーン指数が改善されることがわかる。

以上のように、対象土によって、あるいは目標のコーン指数によって適切な固化材、固化助剤の種類が異なることがわかる。特に、IC 底泥と原土 A は

物性が比較的類似しているにもかかわらず、結果には大きな違いがみられた。今後、その要因を明らかにする必要があるが、開発した改良材が効果を発揮する対象土があることは明らかである。

5. 透水特性

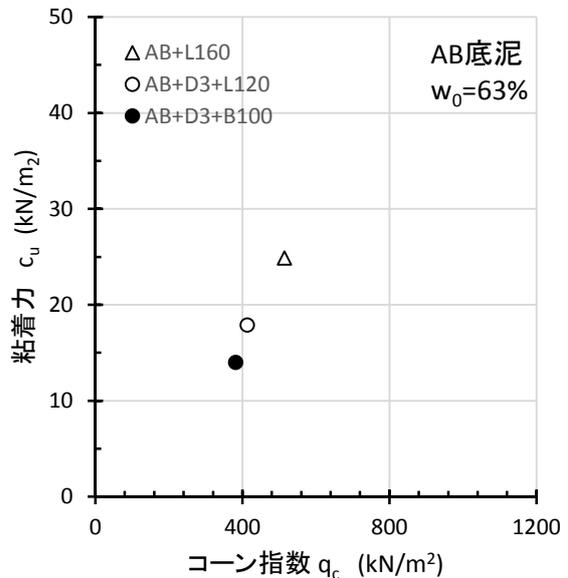
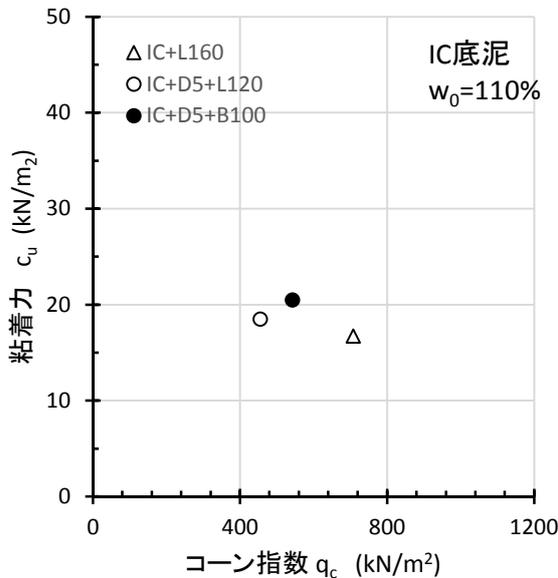
目標のコーン指数を第3種建設発生土⁸⁾に相当する $qc=400\sim 800\text{kN/m}^2$ とし、IC 底泥、AB 底泥を原泥とした改良土の透水性を検討した。



(a) IC 底泥

(b) AB 底泥

図 5 内部摩擦角と粘着力の関係



(a) IC 底泥

(b) AB 底泥

図 6 粘着力とコーン指数の関係

JIS A 1218:2009⁹⁾に基づいて標準プロクター ($E_c=500\text{kJ/m}^3$)で締め固めた供試体を用い、変水位透水試験で求めた透水係数を図 3 に示す。IC 底泥(図 3(a))については、改良材の種類は異なるものの、改良材添加量の増加に従って透水係数は低下した。AB 底泥(図 3(b))については、改良材の種類や改良材添加量の違いによらず透水係数はほぼ一定であった。いずれにせよ透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-7}(\text{m/s})$ のオーダーであり、砂-シルト-粘土混合土と同程度の透水係数であった。粒状固化処理を

行っているが、突固めによって粒子が破碎され、よく締固まることによって透水係数が低くなったと考えられる。

6. 非圧密非排水せん断強さ

透水試験と同じ配合の処理土を標準プロクター ($E_c=500\text{kJ/m}^3$)で締め固めた供試体を用い、JGS 0523-2009¹⁰⁾に基づいて非圧密非排水条件でせん断試験を行った。なお、供試体の飽和度は 92~97%程度であり完全には飽和していない。

図 4 に等方応力と圧縮強さの関係を示す。ばらつきは大きいものの、それぞれの近似線を引き、その切片 f_0 と傾き m から以下の式(1), (2)¹¹⁾を用いて求めた内部摩擦角 ϕ_u と粘着力 c_u を図 5 に示す。

$$\phi_u = \sin^{-1} \frac{m_0}{2 + m_0} \quad (1)$$

$$c_u = \frac{f_0}{2\sqrt{1 + m_0}} \quad (2)$$

内部摩擦角は 6° 程度以下であり、粘着力は $15 \sim 25 \text{ kN/m}^2$ 程度であった。内部摩擦角が非常に小さいこと、実際に利用が想定される現場は大きな土被り圧が想定されないことから、粘着力が主要な強度定数となる。そこで、配合設計の指標であるコーン指数と粘着力の関係を示したものが図 6 である。IC 底泥の改良土は両者に関連がみられないが、AB 底泥の改良土はコーン指数が大きいほど粘着力が大きくなった。

5. まとめ

液性限界に調整した軟弱な粘性土に固化材と独自の固化助剤を混合することにより、粒状で適度な強度を有する改良土を得ることができることを確認した。ただし、その配合量と対象土の関係は明確にできなかった。

第 3 種建設発生土に相当するコーン指数 $q_u = 400 \sim 800 \text{ kN/m}^2$ の処理土を締め固めたところ、透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-7} (\text{m/s})$ のオーダーであり、非圧密非排水条件での内部摩擦角が非常に小さいことがわかった。この結果より判断すると粘性土としての扱いが必要であり、今後、圧密試験や圧密非排水せん断試験を行い、さらに詳細な力学特性を検討する必要があると思われる。

謝辞

本研究成果は(社)九州建設技術管理協会研究開発助成の援助を受けた成果である。改良剤開発においては、株式会社ワールド・リンク中村斗志也氏のもご協力をいただいた。また、実験には九州産業大学工学部都市基盤デザイン工学科松尾雄治助手、九州産業大学大学院工学研究科松丸沙織氏、九州産業大学工学部都市基盤デザイン工学科諏訪日和氏の協力をいただいた。ここに、謝意を表す。なお、研究成果は土木学会西部支部研究発表会

^{12), 13)}で発表済みであり、地盤改良シンポジウム¹⁴⁾で発表予定である。

参考文献

- 1) 中出浩靖: 港湾工事における浚渫土砂の有効利用について
- 2) 太田健之・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治・松丸沙織: 底泥の粒状固化処理における細粒分の影響, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.449-450, 2013.3.
- 3) 松丸沙織・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治・太田健之: 粒状固化処理した底泥の塩分溶出について, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.463-464, 2013.3.
- 4) 松丸沙織・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治: 粒状固化処理した底泥の塩分溶出実験, 第 48 回地盤工学研究発表会平成 25 年度発表講演集, pp.671-672, 2013.7.
- 5) 松丸沙織・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治: 粒状固化処理した底泥の塩分溶出について, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, pp.149-150, 2013.9.
- 6) 林泰弘・松丸沙織・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治: 塩分を含有した底泥の粒状固化処理による有効利用に関する検討, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, pp.227-232, 2013.9.
- 7) 建設発生土の改良剤及び工法、水質浄化凝集剤、有害物質減溶化剤の販売: <http://www.fvm-support.com/toudansha/show/1967>
- 8) 建設省大臣官房技術調査室 監修: 建設発生土利用技術マニュアル(第 2 版), 財団法人土木研究センター, 1997.10.
- 9) 日本工業規格 JIS A 1218 : 2009 土の透水試験方法: 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, pp.449-453, 2009
- 10) 地盤工学会基準「土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験方法」(JGS 0523-2009): 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, pp.570-572, 2009
- 11) 土の三軸試験: 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, pp.594, 2009
- 12) 諏訪日和・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治・藤浩史: 軟弱な土の粒状固化処理による盛土材料への活用, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.393-394, 2014.3.

13) 松丸沙織・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・松尾雄治・藤浩史:締固めた粒状固化処理底泥の力学特性, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.392-392, 2014.3.

14) 松丸沙織・林泰弘・藤龍一・山岡礼三・中村斗志也・松尾雄治:締固めた粒状固化処理底泥の特性, 第 11 回地盤改良シンポジウム論文集, 投稿中, 2014.11.