

護岸腹付工に適用するカルシア改質土の特性把握および模型実験について

藤村 立行*・春日井 康夫**・片桐 雅明***・山崎 誓也*****・北原 政宏*****・西野 智之*****
 ・石田 道昭*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員
 ** (一財) 沿岸技術研究センター 代表理事・専務理事
 *** 株式会社 日建設計 都市・社会基盤部門 シビルグループ エンジニアリング設計部 アソシエイト
 ***** 前 株式会社 日建設計 都市・社会基盤部門 シビルグループ エンジニアリング設計部
 ***** 国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 所長
 ***** 前 国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第二工務課長
 ***** 国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第二工務課 工務係長

新門司沖で採取される浚渫土を対象として、その材料特性の把握と工事分野への利活用の研究が行われてきた。そのうち、浚渫土に転炉系製鋼スラグを混合して作られるカルシア改質土（以下：改質土）については、護岸背面の腹付け材料への適用が検討されている。

本稿では、これらの一連の研究において、特性把握や遠心模型実験を通して明らかになった事項を報告するとともに、今後の研究の方向性について整理する。

キーワード：カルシア改質土、新門司沖浚渫土、腹付け材料、特性把握実験、遠心模型実験

1. はじめに

港湾工事で発生する浚渫土砂と鉄鋼の生産過程で産出される転炉系製鋼スラグを混合した改質土の利活用のため、技術マニュアルが整備されてきた（表-1）。

このうち当センターより発刊されている「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」¹⁾（以下：マニュアル）によれば、改質土の適用用途は表-2のとおりであるが、浚渫土の利活用をさらに進めていくために、適用範囲の拡大が求められている。

表-1 改質土の技術マニュアル

年月	団体/研究会	内容
2008年9月	(一社)日本鉄鋼連盟	「転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法」発刊
2013年6月	カルシア改質土研究会	「カルシア改質土 設計施工マニュアル」発刊
2017年2月	カルシア改質土技術マニュアル委員会	「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」発刊
2017年3月	鉄鋼スラグ等の実海域適用に関する研究会	「浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合材の海域利用のための技術マニュアル(案)」発刊

表-2 改質土の適用用途

	適用用途
海域環境改善	底質改善用覆砂材
	浚渫産地埋戻し材
	浅場・干潟基盤材
	土留め潜堤材
港湾・空港工事	中仕切堤材、仮設道路材 埋立柱(腹付け裏埋材)

マニュアルでは、構成材料である浚渫土およびカルシア改質材（以下：改質材）の特徴に基づき、改質土の港湾工事への適用にあたり次のような留意点をあげている。

- (1) 浚渫土は採取される海域や場所、深度、浚渫工法などで性状が大きく異なり、改質土の強度などの特性に大きな影響を与える。
- (2) 改質材は鉄鋼メーカーが出荷する製品であり、これを海域における土木用材料として製造・利用するにあたっては、関係法規や環境保全に留意しなければならない。

また、マニュアルの参考資料では改質土の強度管理に関し、次のような特徴が紹介されている。

- (1) 改質材の容積混合率としては一般的に 30%程度が用いられ、これより混合率を増加させていくと一軸強度がある時点で頭打ちとなり、強度が低下する。
- (2) 浚渫土中の水分量(含水比)が高くなると強度が低下し、浚渫土の細粒分含有率が大きいほど、強度発現が大きくなる。
- (3) 養生温度が高くなると、水和反応が促進されて強度が著しく増加する。

本研究ではこのような留意点をふまえて、港湾工事における護岸背面の腹付け材に改質土を適用することを想定し、施工上の課題に関する検討を進めてきた。

最新の研究では、劣化により吸い出しが起きる可能性のある防砂シートを一部省略した断面を想定し（図-1）、均し作業の簡略化等による工期・コストの改善を目指している。

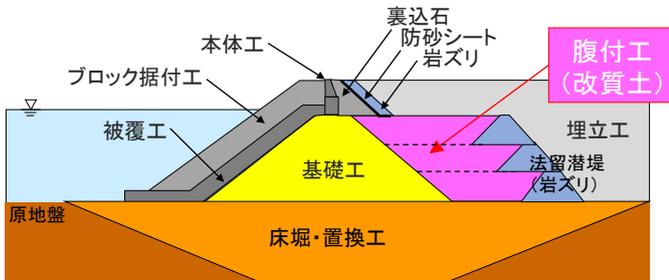


図-1 想定断面

構成材料としての浚渫土砂は軟弱で、強度改善に関する影響因子が複雑であることから、模型実験と並行して、改質土の特性把握実験も、同時に行ってきた。

2. 腹付け材への適用に向けた特性把握実験

実構造物への適用に向けては、実際の利用が想定される新門司沖の浚渫土を用いた改質土を材料として、特性把握実験を行ってきた。ここでは、主な内容について概説する。

2.1 設計定数に関する実験

改質材混合率を変えて三軸圧縮試験を行った結果、過圧密状態または正規圧密状態にある改質土供試体の破壊線の勾配は狭い領域に収束した²⁾（図-2）。

一軸圧縮強さを超える拘束状態にある改質土地盤は、単純な一軸状態にある一軸圧縮強さの1.4倍程度の最大軸差応力が見込まれることを示している。

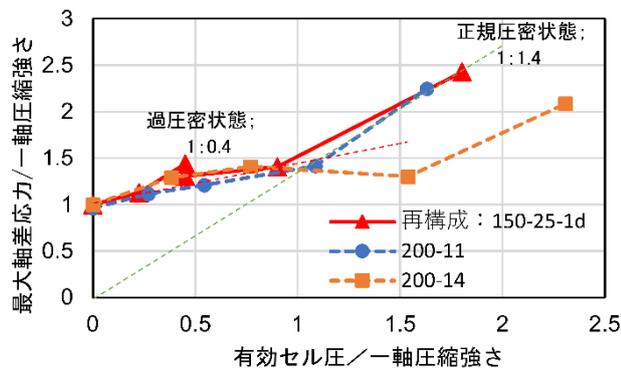


図-2 破壊状態の無時限化

三軸状態の改質土地盤の非排水せん断強度を、一軸圧縮強さから推定することが可能であることを確認した。

2.2 現場での強度確認に関する実験

軟弱粘性土地盤の設計定数の設定に用いられているベーンせん断試験とコーン貫入抵抗との関係を調べたところ、高い相関性があることが確認できた³⁾（図-3）。

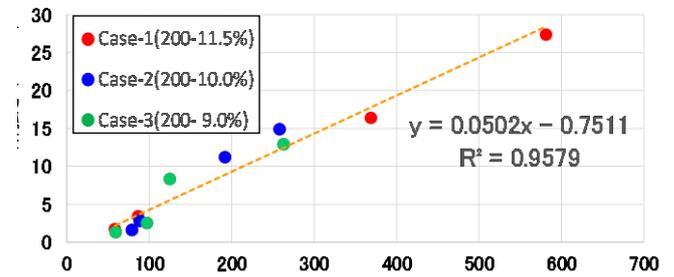


図-3 ベーンせん断強度とコーン指数の関係

固化しはじめた改質土地盤に対して、現場で簡易に強度を確認する方法としてコーン貫入試験が有効であることを示している。

2.3 材料特性に関する実験

変水位透水試験および圧密試験から改質土の透水係数を求めた結果、 10^{-9} m/s オーダーであることが確認できた（図-4）。

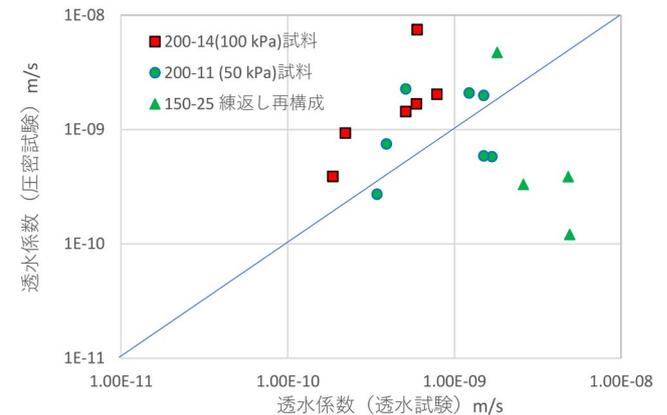


図-4 透水試験, 圧密試験で求めた透水係数の関係

改質土が難透水材料であることから、腹付工に適用するさいは、施工位置や範囲に留意する必要があることがわかった。

また、浚渫土および改質材を混合した直後の状態に対してフロー試験を行っており、その結果を図-5に示す。

改質土については、この初期流動性をふまえ、現地施工への適用性を検討していく必要がある。

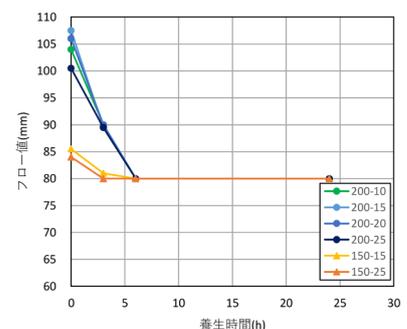


図-5 フロー試験結果

3. 実施工に向けた模型実験

3.1 実施工に向けた課題と対応

腹付け工に改質土を適用するにあたっては、前述の初期流動性があるなかで、盛土施工をどのように行えばよいか、模型実験等によってその対応策を検討し、一定の方向性を確立した(表-3)。

令和4年度は、捨石マウンドの背面に改質土を盛り立てたさいに、捨石層にどの程度貫入するか、条件確認のための遠心模型実験を行った。

表-3 実施工に向けた課題と対応

実施工に向けた課題/着目点		対応/確認状況	備考
初期流動性を考慮した盛土施工管理手法の確立	盛土方法の設定	段階盛土とする	参考文献4)
	必要強度の事前確認	円弧すべり解析で確認	参考文献5)
	現地での強度確認方法	重錘貫入試験で確認	参考文献6)
腹付け工への適用性の確認	非排水せん断強度の設定	一軸圧縮試験より推定	参考文献2)
	透水性	難透水材料であることを確認	-
	捨石マウンドへの貫入	遠心模型実験で確認(本稿にて紹介)	-

3.2 捨石層への貫入に関する模型実験

3.2.1 実験条件

本実験は、静止重力状態から遠心加速度を徐々に増加させていった時の、捨石マウンド上にある改質土の貫入量の変化について、改質材の混合率および捨石層の均等係数等を変えて行った。

【実験概要】

模型地盤は1/20スケールとし、図-6に示すとおり、捨石マウンドおよび改質土の2層とし、レーザー変位計、間隙水圧計を設置した。

遠心加速度を5Gずつ2分間隔で20Gまで増加させて、表面沈下量や間隙水圧等を計測した。

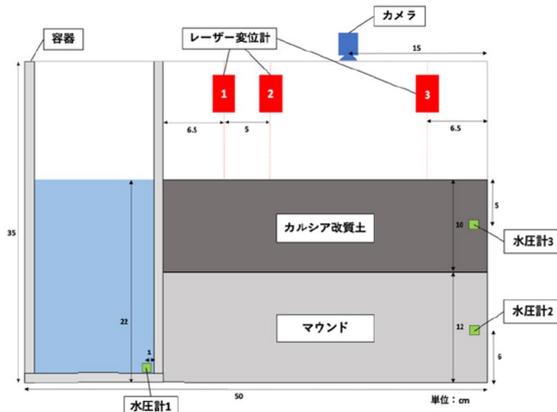


図-6 模型実験概要

【マウンド地盤の設定】

マウンド地盤は、門司港の捨石材の粒度⁷⁾を参考とし、通過重量百分率を1/20にしたケース($U_c=2.86$)と D_{max} を一定にしたケース($U_c=1.45$)の2通りの条件とした(図-7, 図-8)。

表-8 捨石材の均等係数 U_c

調査場所	60%粒径 D_{60} (cm)	10%粒径 D_{10} (cm)	均等係数 U_c
鼠ヶ関	67.0	49.5	1.35
いわき	54.0	26.0	2.08
家島	26.8	14.8	1.81
門司	36.7	14.5	2.53

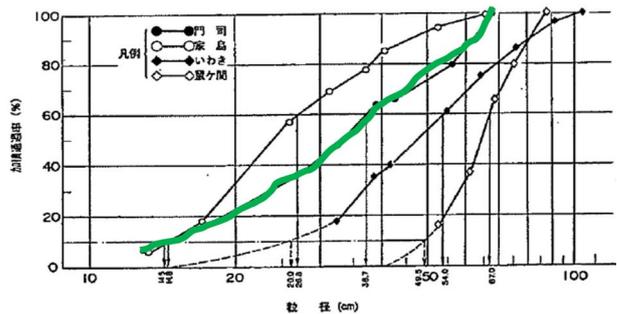


図-10 捨石材の推定粒径加積曲線

図-7 門司港の捨石材の粒度⁷⁾

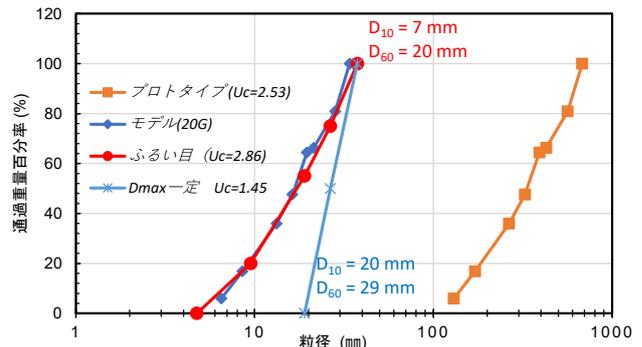


図-8 実験に用いた粒度

【実験ケースの設定】

実験ケースは表-4に示すとおり、改質土の条件(浚渫粘土の初期含水比、改質材混合率)およびマウンドの条件(均等係数 U_c)の組合せとした。

表-4 実験ケース

実験ケース	改質土条件		マウンド条件	ベーンせん断強さ	
	含水比 (%)	混合率 (%)	均等係数 U_c (-)	実験前 (kN/m^2)	実験後 (kN/m^2)
Case-1	200	15	2.86	0.65	0.84
Case-2	150	15	2.86	2.16	2.70
Case-3	150	25	2.86	3.04	3.05
Case-4	200	15	1.45	0.76	0.98
Case-5	150	15	1.45	2.40	2.92
Case-6	150	25	1.45	3.68	3.91

3.2.2 実験結果

ここでは、代表例として case-1 の実験結果について説明する。

写真-1 の赤点線枠に示すとおり、遠心模型実験により改質土がマウンド内に貫入したことを確認した。

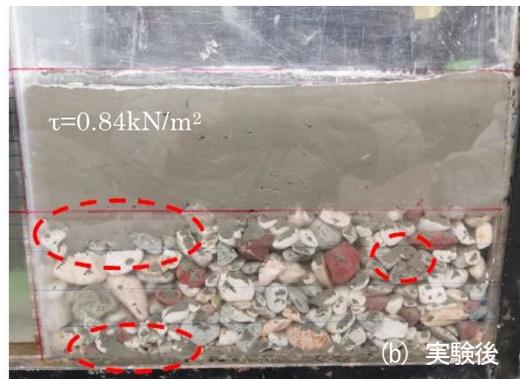


写真-1 Case-1 模型地盤側面

表面沈下量の最大値は 11mm 程度、間隙水圧は水圧計 1 で 40kPa、水圧計 2, 3 で 10kPa 程度となった。

また、水圧計 3 の挙動に着目すると、遠心加速度の上昇とともに緩やかに上昇し、20G 到達後(600s 後)はほぼ一定の値を示すことから、改質土自身は圧密していないことを確認した。

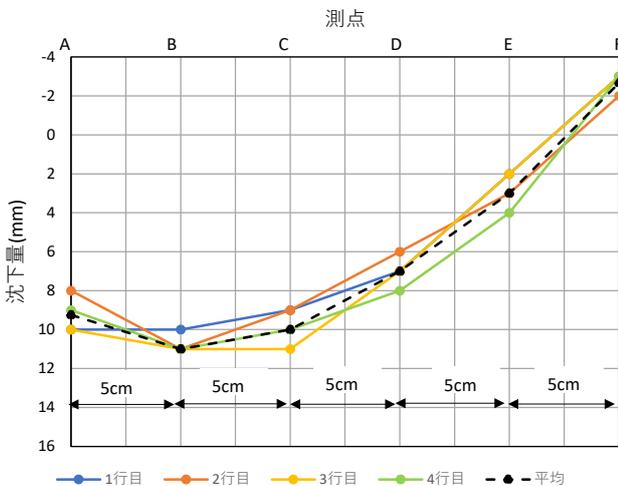


図-9 Case-1 実験後の表面沈下量

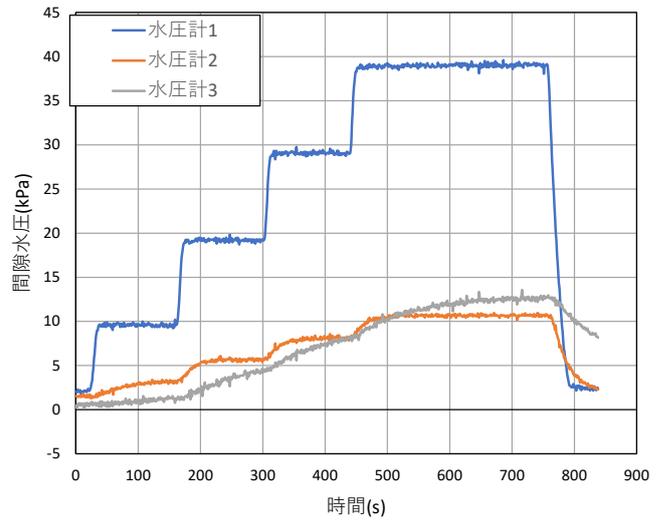


図-10 Case-1 間隙水圧時系列

その他のケースにおいても case-1 と同様に、改質土がマウンド内に貫入すること、20G 到達後は改質土の水圧計がほぼ一定となることを確認した。

3.2.3 結果の評価

【表面沈下量】

各実験ケースの表面沈下量を図-11 に示す。

この図より、改質土の強度が高く、マウンドの均等係数が大きいほど、改質土のマウンドへの貫入量が軽減される傾向にあると考えられる。

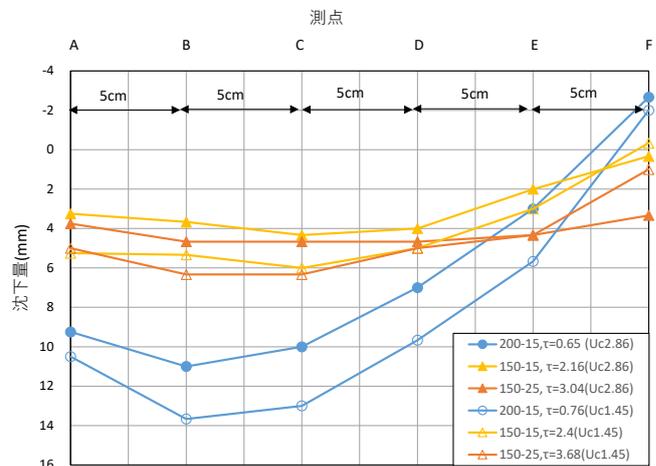


図-11 表面沈下量

【改質土強度による差異】

均等係数の等しい実験ケースごとに、改質土地盤の相似則から算定した換算地盤高さおよび換算沈下量を、遠心加速度から算定した(図-12)。

前述のとおり、改質土の強度が高いほど、マウンドへの貫入量が軽減される傾向がわかる。

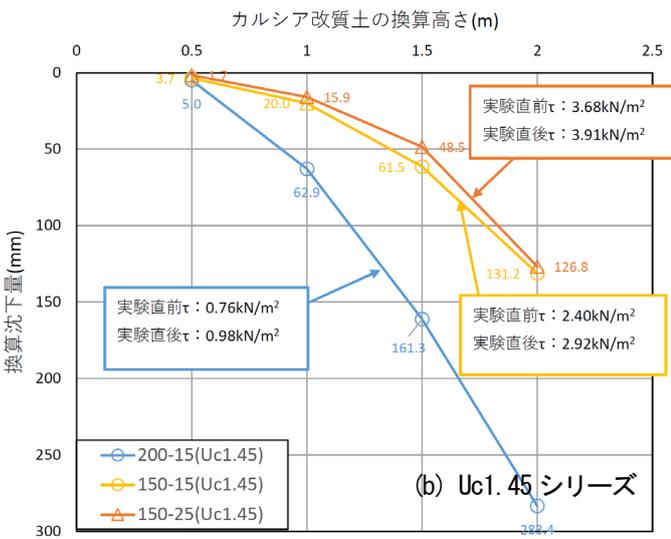
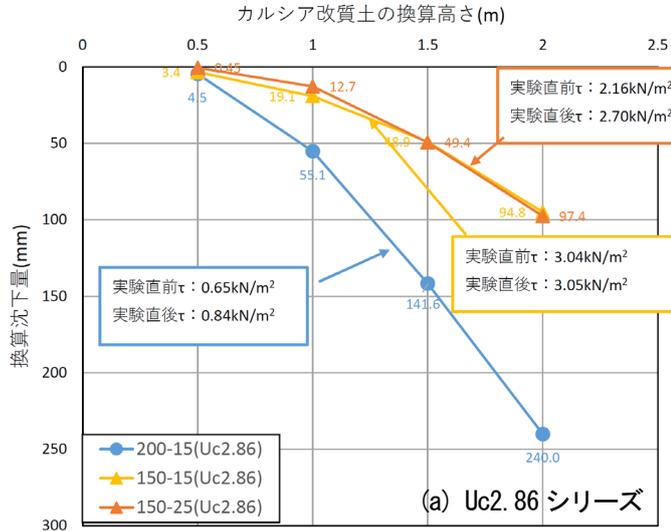


図-12 改質土強度による差異

【均等係数による差異】

改質土条件の等しい実験ケースごとに、改質土地盤の換算地盤高さおよび換算沈下量を整理した(図-13)。

均等係数が Uc1.45 の場合, Uc2.86 の場合に比べ、マウンドへの貫入量は実質量換算で30~40mm程度多くなる傾向になると考えられる。

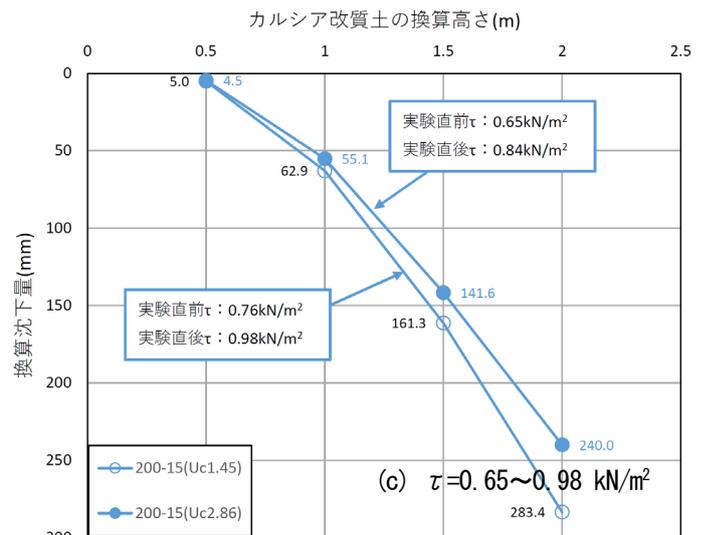
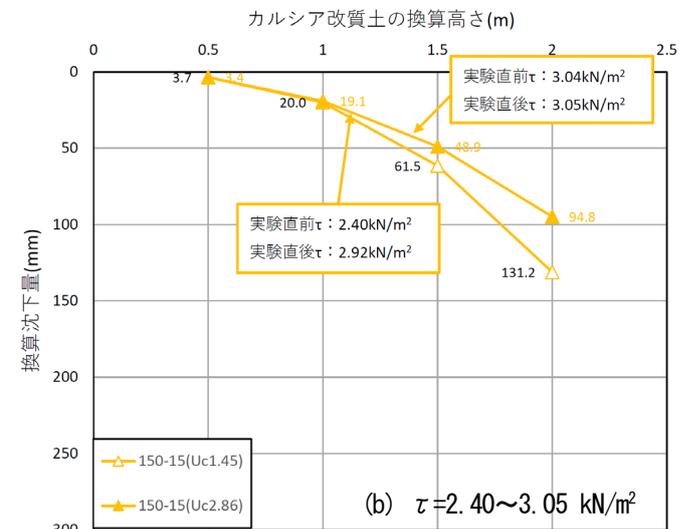
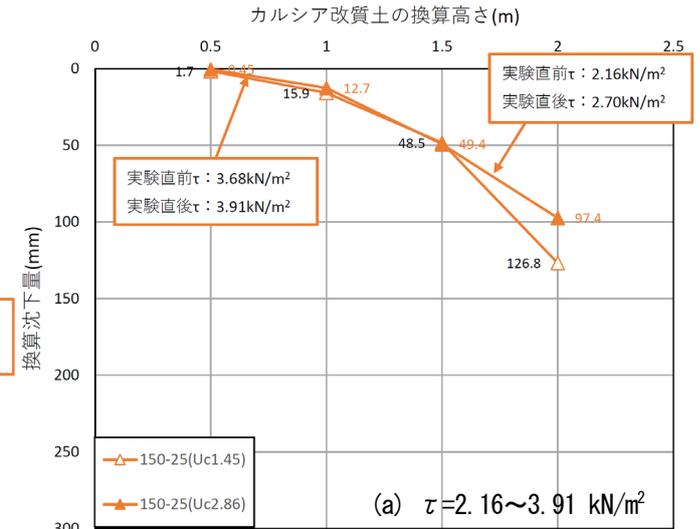


図-13 均等係数による差異

3.2.4 まとめ

ベーンせん断強さとマウンドへの貫入量の関係性をまとめたところ、図-14 のとおり高い相関性があることが確認できた。

この図から、実施工における改質土の盛土施工時の割増数量を推定することが可能であると考えられる。

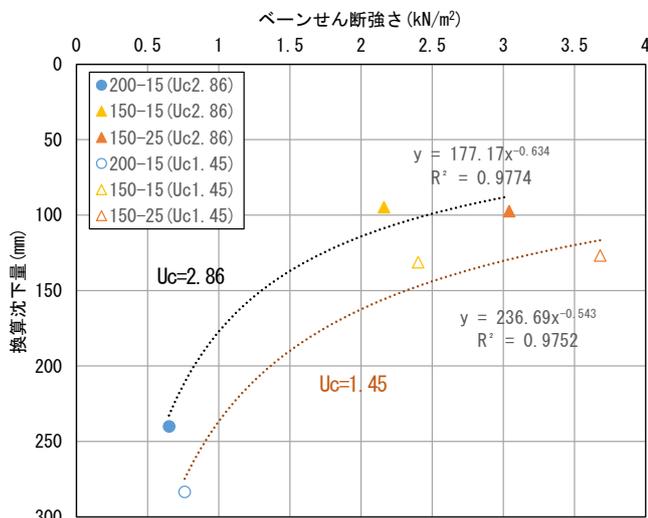


図-14 ベーンせん断強さと沈下量の関係

4. 今後の研究の方向性

本稿では、改質土の腹付けとしての実現場への適用性に関し、設計・施工上の施工管理手法が確立されつつあることを紹介した。

一方で、これらのベースとなる実験結果はあくまでも室内実験における理想状態で行われていることから、マニュアルの留意点にある浚渫土や改質材の履歴、設計や現地施工での不確実性について考慮されていないため、試験施工等によって施工管理手法の妥当性を検証していく必要がある。

また、今回紹介したマウンドへの貫入量については、潮位変動等の影響を考慮した状態での模型実験を行うことを予定している。

謝辞

本研究は、国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所発注の「令和4年度新門司沖浚渫土砂利活用検討業務」の成果の一部をまとめたものである。本業務の検討にあたり、北九州港湾・空港整備事務所の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター(2017): 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル
- 2) 片桐ら(2022): 低添加率のスラグ混合処理土の圧密非排水三軸圧縮特性, 海洋開発シンポジウム論文集 B-3, Vol. 78, No. 2, No. 87
- 3) 重村ら(2021): 遠心模型実験によるカルシア改質土の段階盛立施工の妥当性検討, 沿岸技術研究センター論文集 No. 21, pp. 42
- 4) 下村ら(2022): 盛土施工時のカルシア改質土地盤の支持力評価手法に関する遠心模型実験, 土木学会西部支部研究発表会, III-036, pp. 341~342
- 5) 南野ら(2020): スラグ混合浚渫土で構築した盛土の破壊メカニズムと円弧すべり解析の適用検討, 第14回地盤改良シンポジウム論文集, No. 8-3, pp. 321~326
- 6) 重村ら(2022): カルシア改質土地盤の盛土施工管理手法の提案, 沿岸技術研究センター論文集 No. 22, pp. 39~42
- 7) 荘治ら(1983): 大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察, 港湾技術研究所報告 22-4, pp. 59~120