

カルシア改質土を用いた土構造物の変形挙動及び安定性評価に関する遠心模型実験

渡部 耕平*・春日井 康夫**・片桐 雅明***・樋口 晃****・根木 貴史*****

* (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 日建設計シビル

**** 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

***** 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 所長

現在、関門航路周辺の航路・泊地の整備のため、浚渫工事が進められている。これまで発生した浚渫土砂を受け入れてきた新門司沖土砂処分場(3工区)の次の処分場として、新規処分場の施工が始まっているが、新たな処分場も受け入れる容量には限界があり、浚渫土砂の有効活用による土砂処分方法を確立することは今後の港湾行政に欠かせない課題である。本業務は、浚渫土砂と製鋼スラグ系改質材を混合して製造した改質土(以下:改質土)について、新門司沖における浚渫土砂を使用した場合の適用性を検討するものである。

キーワード: 遠心模型実験 カルシア改質土 浚渫土砂

1. はじめに

浚渫土砂は、護岸の材料として利活用することが期待されているが、浚渫土砂そのものは軟弱で護岸を構築する材料として適していない。一方で、鉄鋼の生産過程で副産物として発生する転炉系製鋼スラグもリサイクル材としての活用が進められており、転炉系製鋼スラグを成分管理・粒度調整したカルシアを改質材(写真-1)として浚渫土に添加することで改質土とし、その活用が検討されている。

そこで本研究では、腹付け部での利用を想定(図-1)し、設計に必要な安定性を確認するための評価式の検討、改質土が時間とともに特性が変化する際の破壊メカニズム(崩壊形態)の把握を目的とした遠心模型実験を実施した。この実験により、改質土で構築した腹付け部がどのように崩壊するかを確認することができ、最終的には、把握した崩壊挙動を基に、破壊メカニズムを設定し、安定性を評価するための評価式と施工基準値を策定することを目的とした。



写真-1 浚渫土、転炉系製鋼スラグ、混合材

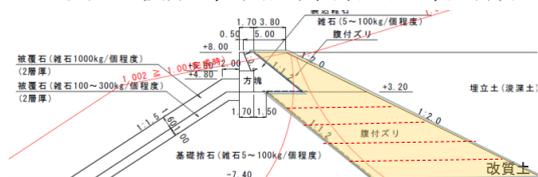


図-1 想定する腹付け部と改質土を盛り立てる際の分割施工案

2. 実験方法

図-2に実験システム図を示す。本研究では実験土槽(内寸:幅450mm×高さ350mm×奥行145mm)内に、所定の模型盛土を構築し、練混ぜ直後の3ケースと練混ぜ完了後24時間養生した条件の3ケースの計6ケースを実施した。これに継続的に付与する遠心加速度を増加させていき、明確なすべり破壊が確認できたところで、実験終了とする。また、本研究の実験ケースは表-1に示すとおりで、浚渫土は初期含水比で改質材の混合率を変えて合計6ケースで実験を行った。

カルシア改質土は、人工海水を用いて加水調整し、初期含水比200%とした浚渫土に、所定のカルシア改質材を投入し、容量20Lのミキサーで2分間、底部に堆積した改質材を混ぜ返した後、再び3分間、合計5分間攪拌することで作製した。また、その作製量は、模型のみならず、各種のせん断試験を様々なタイミングで実施できるように十分な量を確保した。

模型盛土の寸法は全長400mm、天端長さ100mm、高さ150mm、幅145mm、その法面勾配は1:2である(図-2参照)。作製方法に関して、一層目は30mm厚の台形型枠を、二層目以降は20mm厚の台形型枠を設置し、所定量のカルシア改質土を流し込み、締固めて整形する。これを既定の高さになるまで繰り返すことで作製した。

盛土の変形挙動を確認するために、法肩及び法面中央にレーザー変位計、土槽のガラス面に乾麺、天端及び法面にまち針を設置した。また、練混ぜ直後の初期含水比、遠心実験直前の前含水比、実験終了後の含水比を測定した。実験終了後の含水比に関しては、遠心加速度の自重

による盛土下部での含水比の変化を想定して、天端において3点から柱状に採取し、採取した試料から鉛直方向に5等分し、計15点で計測した。

表-1 実験ケース

実験ケース	浚渫土初期含水比 (%)	改質材容積混合率 (%)	備考 養生条件
A-1	200	25	直後
A-2	150	25	直後
A-3	150	30	直後
B-1	200	25	1日養生
B-2	200	20	1日養生
B-3	200	15	1日養生

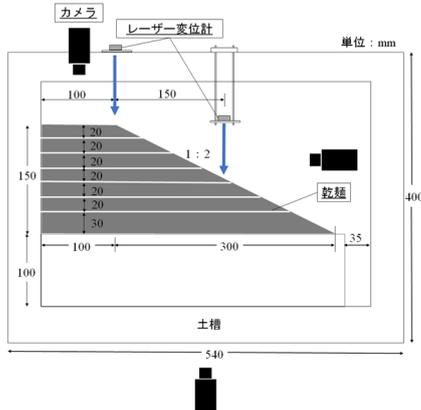


図-2 実験システム図

3. 実験結果及び考察

室内配合試験結果から、改質土は初期強度の発現にばらつきが少なからずあり、混合から6時間以降の強度増加が著しいことが確認できた(図-3)。遠心実験開始時(練混ぜ後24時間)のベーンせん断強度は、改質材の混合率が高いほど強度が大きくなる傾向が認められた。また、遠心実験時に相当する1日後の一軸圧縮試験結果からは、B-1(200%-25%)とB-2(200%-20%)のせん断強さが、それぞれ、10.69kN/m²、10.32kN/m²とB-1が若干大きい値を示しているものの、大きな差は見られなかった。この要因としては、使用した改質材の細粒分にバラつきが生じた可能性があることや空調はあるものの激しい寒暖差による室温の変化が挙げられる。

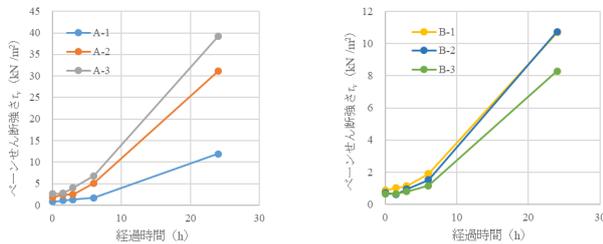


図-3 ベーンせん断試験結果(24h)

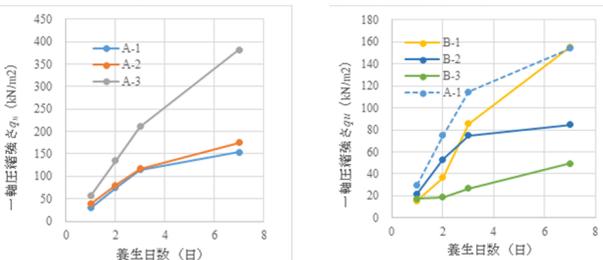


図-4 1軸圧縮試験結果(7日)

3.1 深度方向の含水比の比較及び崩壊時の排水状況について

遠心加速度の付与による盛土上部での脱水及び自重の増加に伴う盛土下部での圧密による含水比の変化を危惧していたが、測定する深さによって実験直後の含水比にばらつきはあるものの大差ないと評価できる(図-5)。また、深度方向の含水比は、初期含水比付近に位置している。したがって、実験中の短時間で水は排水されておらず、盛土は非排水状態で破壊に至ったと評価してよいと考えられる。

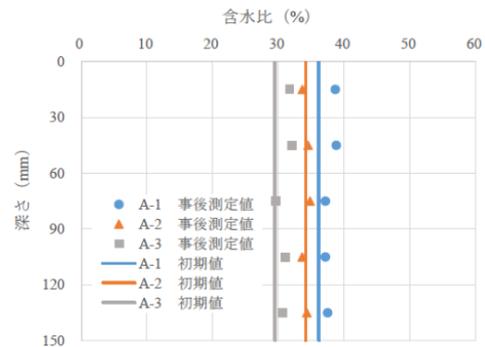


図-5 実験前後の含水比

3.2 模型盛土の破壊メカニズムについて

図-6にAシリーズの法肩、法面中央における加速度に対する鉛直変位を示す。遠心加速度の増加に伴い、法肩は沈下し、法面中央ではその位置が隆起していることが観測された。図-6に示すように急激に勾配が変化するとみられる点を降伏と定義した。この降伏点については、実験中に観測したクラック発生時点と対応している。

また、図-7にBシリーズの変化を示す。法肩、法面中央ともに沈下しており、遠心加速度の増加に伴い、両測定点での沈下増分が大きくなるのがわかる。また、クラック発生時の遠心加速度付近でグラフの傾きが大きくなると考えられる。実験終了(盛土崩壊)時の法肩の沈下量に着目すると、5.2mmであり、実験前の盛土高に対して沈下量はわずか4%程度であることがわかった。

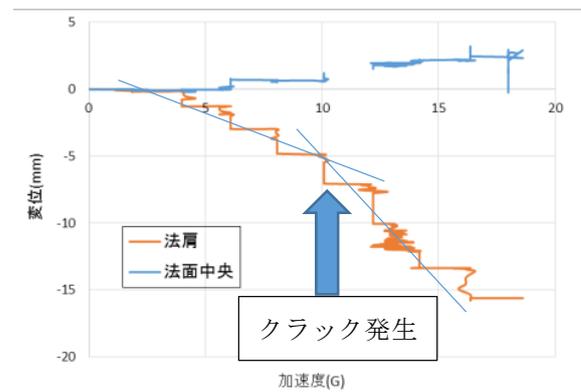


図-6 加速度に対する鉛直変位(A-3)

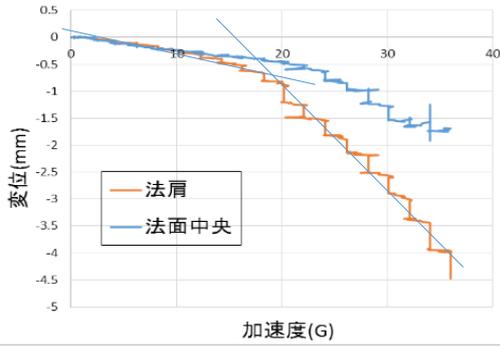


図-7 加速度に対する鉛直変位(B-3)

図-8 に A シリーズの実験前後の盛土の形状を示す(矢印は地表面に設置したピンを基に求めた移動量, 数字は水平変位). A シリーズにおいては, 法肩部が沈下し, 法尻が隆起するという形状が観測され, すべり面は法面に沿う大きな円弧であることが確認された(写真-2, 図-10).

一方, B シリーズ(図-9)全てのケースにおいてすべり破壊後の形状に大きな差は見られなかった. また, 天端では変化量は少なく, 法肩から法面中央にかけては法面に沿った挙動であり, 法尻では水平に移動し, はらみ出すような形状になっていることがわかる. したがって, 法面下部では膨れ上がり, 法面上部の沈下と併せて, 剛体の円弧がすべるというメカニズムであると判断できる.

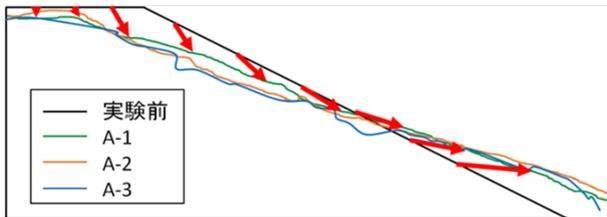


図-8 実験前後の法面形状(A シリーズ)

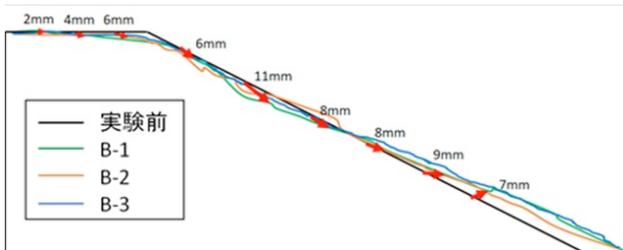


図-9 実験前後の法面形状(B シリーズ)

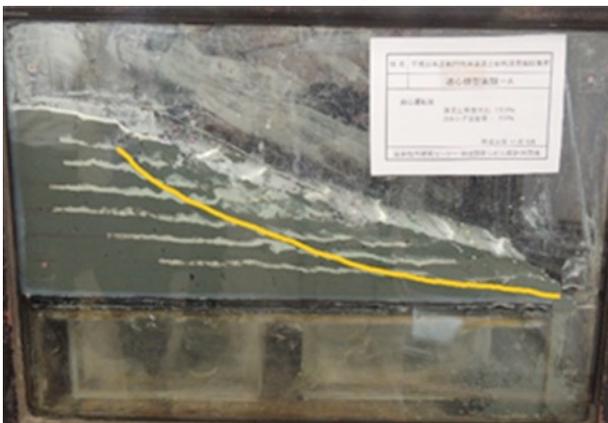


写真-2 実験後側面図(A-3)

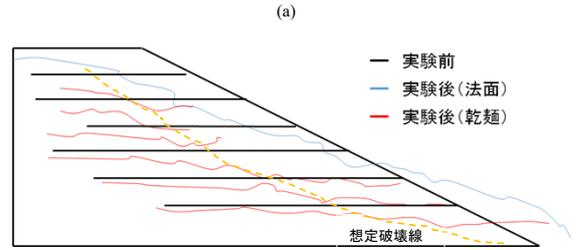


図-10 実験後側面図(A-3)

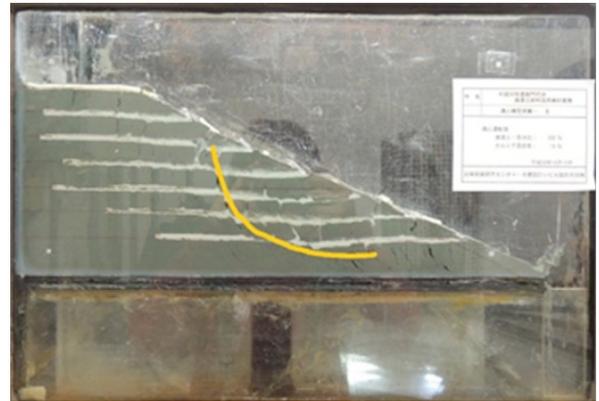


写真-3 実験後側面図(B-3)

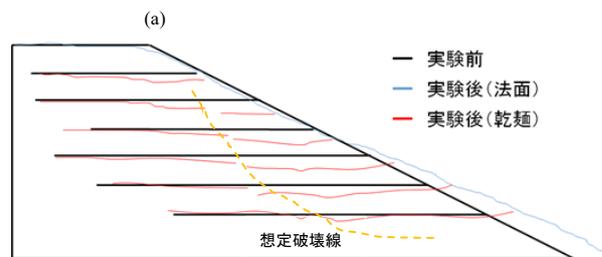


図-11 実験後側面図(B-3)

B シリーズ実験後の写真(写真-3)を確認すると, 盛土内部において法尻付近で斜めに, それ以外の箇所では鉛直方向に細かいクラックが多く発生しており, 最終的にそれらが繋がることで円弧すべり面が生じたと考えられる.(図-11).

3.3 テイラーの安定図表による安定性評価

テイラーは摩擦円法の解析で, 非排水せん断強さ s_u , せん断抵抗角をゼロとして, 均質な飽和粘土斜面の非排水すべり破壊に対する安定図表を図-12 のように提案した. 縦軸の N_s は安定係数と呼ばれる量で, 湿潤単位体積重量と盛土高さ, 非排水せん断強さから決定される.

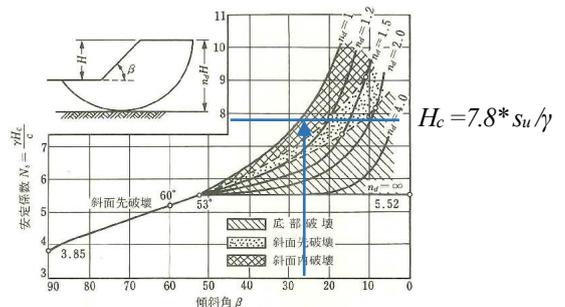


図 12-15 粘土斜面の安定係数図表(テルツァギとベック, 1967)

図-12 テイラーの安定図表

これにより、今回想定する腹付け斜面の勾配は、1:2であるから β は26.6度となる。また、斜面底部は置換え砂であるので盛土高さの補正值 nd は1となる。したがって、テイラー図表から推測される安定係数は7.8となる。

ここで、図-13, 14 に各シリーズのテイラーの安定図表を示す。ここでは、 H_c : 限界高さ(模型盛土高 \times すべり破壊時の遠心加速度 G)、 N_s : 安定係数、 c_u : 土の粘着力(ここでは24時間後のペーンせん断強さ)、 γ : 土の単位体積重量を用いた。

A シリーズ(図-13)については、クラックが発生した(降伏に相当)ときの安定係数は、 $nd=1$ の赤線よりも下方に位置している。一方、大崩壊したとみなす沈下15mm(盛土高さの10%の沈下量)の安定係数は、 $nd=1$ よりも上方に位置した。これらのことから、クラック発生時と10%沈下の間でテイラーが仮定する円弧すべりが発生したと判断できる。

一方、Bシリーズ(図-14)については、クラックが多数内部にも発生するので、加速度と変位の関係図より急激に沈下増分が大きくなるところを降伏時(盛土高15cm)としてプロットし、最終崩壊状況が天端からの崩壊ではなく、法面の途中から発生していることを踏まえて安定検討に用いる模型盛土高さを13cmとした場合も想定した。この崩壊形状を考慮し、13cmの盛土とした場合の実験終了時の加速度の安定係数は、 $nd=1$ 線よりも上位に位置した。一方、降伏時の安定係数は $nd=1$ 線より下方に位置した。したがって、テイラーの安定係数は、剛塑性体の円弧すべりが基本となっていることから、改質土を用いた盛土の安定検討には、円弧すべり手法で評価できるのではないかと考えられる。また、実験終了時において、全てのケースで鉛直変位が4.5mm以上の変状であったが、このとき安定性が $nd=1$ の値よりも上回った理由として、一定間隔で遠心加速度を増加させたため、低い遠心加速度での変形が十分発揮する前に遠心加速度を増加させたことがあげられる。

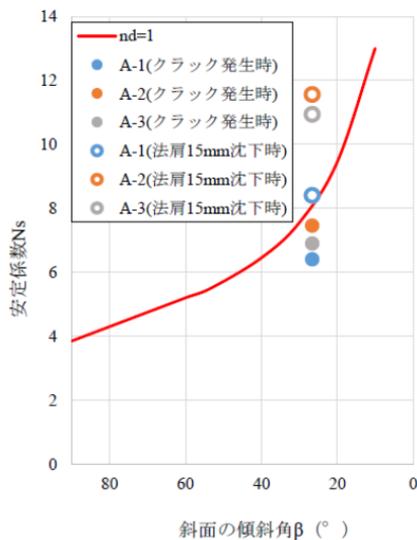


図-13 テイラーの安定図表(Aシリーズ)

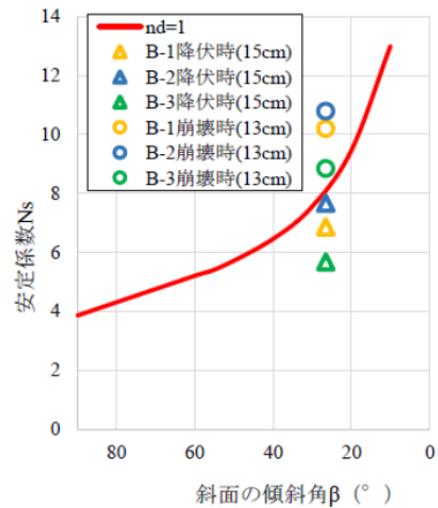


図-14 テイラーの安定図表(Bシリーズ)

4. まとめ

本研究では、改質土からなる土構造物の破壊メカニズムの検討及び安定性を評価するための諸量を求めることを目的とし、遠心模型実験を行った。実験の結果として、改質土を用いた盛土は、固が進んだ状態では、ブロック的に崩壊する。ここで、テイラーの安定図表にてその安定度を説明できることから、安定性を円弧すべり計算で評価できるものと考えられる。

今後は、一定の遠心加速度において、変形が収束した模型に載荷重等を別途付与して変形挙動を確認することが課題となる。

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局発注の「平成30年度 新門司沖土砂利活用検討業務」で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、九州工業大学廣岡教授、整備局関係者には、貴重なご意見・ご指導をいただいた。ここに、記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所：平成30年度新門司沖浚渫土砂利活用検討業務。
- 2) 国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所：平成29年度新門司沖浚渫土砂利活用検討業務。