

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

重村 洋平*・春日井 康夫**・片桐 雅明***・瀬賀 康浩****・西野 智之*****

* (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 設計部 参事

**** (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

***** 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

近年、浚渫土砂の有効利用を図るために、鉄鋼製造の副産物である転炉系製鋼スラグと浚渫土砂を混合して製造したカルシア改質土（以下：改質土）の研究が進められている。本研究では、混合直後は流動性が高く、時間経過とともに強度が増加する特性がある改質土を、所定の勾配を持つ護岸背面の裏込め部に適用可能であるか検討するために、遠心模型実験による解析を行った。その結果、段階盛立施工が可能であること、その評価手法として円弧すべり解析が適用できることが確認できた。

キーワード：浚渫土砂，改質土，遠心模型実験，段階盛立施工，円弧すべり解析

1. はじめに

関門航路周辺では、近年の船舶大型化による物流の効率化、港湾機能の拡充等で、航路の増深、拡幅といった浚渫工事が進められ、その際に発生する大量の浚渫土砂の処分が大きな課題となっている。そこで、浚渫土砂の有効活用を図るために、浚渫工事で発生する浚渫土砂とリサイクル材としての活用が望まれる鉄鋼の生産過程で発生する転炉系製鋼スラグを混合した改質土の研究開発が進められている(写真-1)。

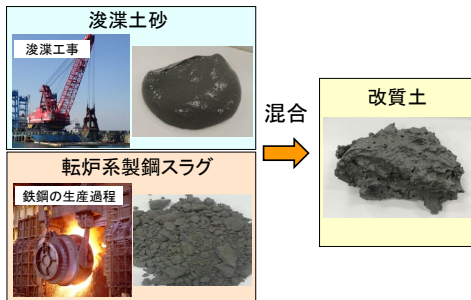


写真-1 浚渫土砂，転炉系製鋼スラグ，改質土

改質土の実海域での適用事例としては、浅場造成材、窪地の埋戻し材、護岸背面の裏込め材等があり、様々な分野での利用が始まっている¹⁾。

本研究では、護岸背面の裏込め部（腹付工）の材料として改質土を利用することが可能であるか検討した。

改質土は、混合直後は流動性が高く、時間経過とともに強度が増加する特性を持つ材料である。このような特性を持つ改質土を急速に盛り立てると所定勾配を確保できない可能性がある。

そのため、図-1 に示す段階的に改質土を盛り立てていく段階盛立施工に着目し、遠心模型実験によってこの盛土による安定性を確認した。実験後に改質土盛土の変形挙動の観測、上載荷重と改質土盛土の地盤強度

の関係性を解析することで、段階盛立施工の妥当性を検討した。

さらに、実験に用いた改質土盛土を対象に円弧すべり解析を実施し、実験後の盛土形状と比較することで、盛土載荷時の安定性評価手法として、円弧すべり解析の適用性についても検討した。

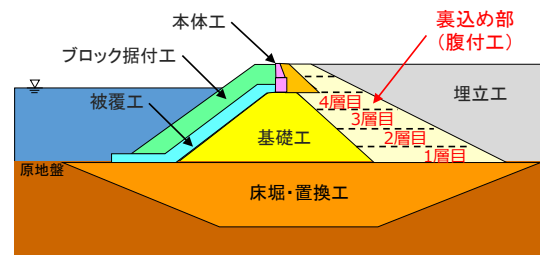


図-1 段階盛立施工の概略図

2. 実験概要

2.1 事前解析

遠心模型実験に先立ち、事前に円弧すべり解析を実施した。盛土条件は、40G 場において、盛土高 100mm、法面勾配 1:2 の改質土盛土（盛土模型）に、60kN/m² の上載圧が作用した場合とし、すべり破壊が生じる可能性の高いせん断強さを求めた。事前解析の結果、円弧すべり安全率が 1.0 を下回るせん断強さは 18kN/m² であった。この結果を踏まえ、配合条件の選定を行った。

2.2 配合条件の選定

配合条件の選定は、下記事項を前提条件とした。
 ・混合した改質土により斜面を有する改質土盛土を構築し、24 時間後に遠心模型実験を行う。

・遠心場において上載荷重作用時にすべり破壊が生じる可能性の高いせん断強度を実現する配合（事前解析結果の18kN/m²付近）と前後の配合とする。

上記条件を満たす配合を求めるために、各種配合の改質土で、24時間後のベーンせん断試験を行った。

その結果を図-2に示す。図の赤破線○で示すとおり、試験ケースNo. 5 [200-10.0%] の24時間後のベーンせん断強度が18kN/m²付近であることが確認できた。

この結果を基に、[200-10.0%]を基本の配合条件に選定し、高強度側を[200-11.5%]、低強度側を[200-9.0%]とした。遠心模型実験の実験ケース（配合条件）は、表-1に示す3条件とした。

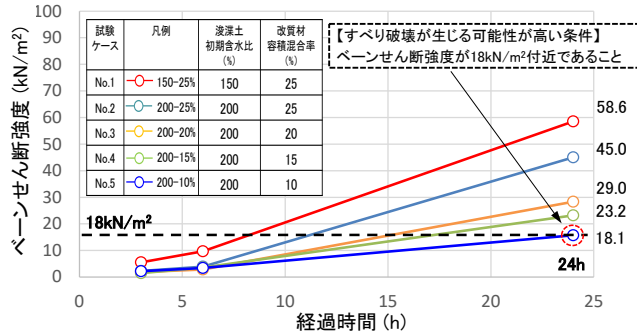


図-2 24時間後のベーンせん断試験結果

表-1 遠心模型実験の実験ケース（配合条件）

実験ケース [配合条件]	目標強度	浚渫土初期含水比 (%)	改質材容積混合率 (%)
Case-1 [200-11.5%]	高強度側	200	11.5
Case-2 [200-10.0%]	基本	200	10.0
Case-3 [200-9.0%]	低強度側	200	9.0

2.3 遠心模型実験

(1) 実験試料

浚渫土砂は、新門司沖から採取した土砂を網目の大きさが2mmのふるいで裏ごしを行い、貝殻等の不純物を除去し、人工海水を用いて初期含水比を200%に調整したものを母材とした。

改質材は、5×8mmふるいを通過した転炉系製鋼スラグを材料として用いた。

実験に用いた試料は、以下の手順で作製した。

- 1) 所定の容積混合率となるように改質材の必要量を算出し、母材（浚渫土砂）と混合する。
- 2) 容量20Lのミキサーを用いて、試料を2分間攪拌した後、底部に堆積した改質材を混ぜ返し、再度3分間攪拌する。
- 3) 2)の作業を3回に分けて繰り返し行った後、それらを別の容器に移し、全体が均質になるまで手で混合する。なお、作製した試料が均質であることを確認するために、密度測定を行う。

(2) 実験方法

改質土盛土（盛土模型）は、全長440mm、天端長240mm、天端幅150mm、高さ100mm、法面勾配1:2で構築した。

遠心加速度は、実規模盛土で高さ4mの盛土に相当する40Gまでの増加を前提条件とした。改質土盛土への載荷は、降砂装置から模型用粒状体（ジルコン砂）を段階的に降砂させる方法で上載荷重を付与した（図-3）。

遠心模型実験は、次の手順で実施した。

- ① 改質土盛土を各層20mmの5層に分けて作製する。作製後24時間放置した後に、実験を行う。
- ② 加速度は2分毎に10Gずつ上げていき、40Gまで加速する。40G到達後は、ジルコン砂を20mmずつ降砂し、改質土盛土にすべり破壊が確認できるまで段階的に荷重を加えていく。
- ③ 全てのジルコン砂を降砂しても改質土盛土に破壊が見られない場合は、遠心加速度をさらに2Gずつ上げて載荷圧を増加させ、盛土の挙動を観測する。

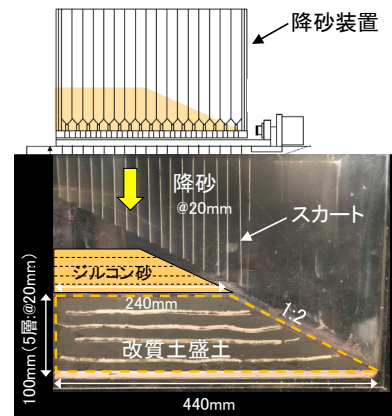


図-3 遠心模型実験の概要図

3. 実験結果及び考察

3.1 改質土盛土の変形挙動

遠心模型実験を実施し、各ケースで確認できた改質土盛土の変形挙動（破壊状況等）の概要を以下に示す。

(1) 【高強度側】Case-1[200-11.5%]

遠心加速度を上げ始めてから40G到達するまでの間では変化が見られなかった。その後、20mmずつ段階的にジルコン砂を降砂し、全て降砂（降砂量117mm）した場合においても盛土の破壊に至らなかった。その後、遠心加速度を40Gから60Gまで2Gずつ段階的に増加させたところ、図-4に示すとおり、盛土沈下（沈下量12mm）は確認されたが、すべり面は生じず、破壊には至らなかった。

また、上載圧の増加による圧密が促進されたことで、盛土の法尻部に170g程度の排水も確認された。

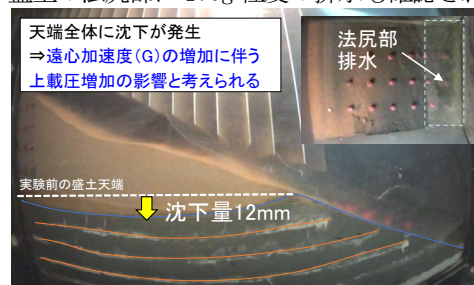


図-4 実験終了後の変形挙動側面部 [200-11.5%]

(2) 【基本】 Case-2[200-10.0%]

遠心加速度を上げ始めてから 40G 到達するまでに盛土沈下が少し確認されたが、大きな変化は見られなかった。その後、20mm ずつ段階的にジルコン砂を降砂し、40mm 降砂後に盛土天端中央付近にクラックが発生した。その後、さらに 20mm 降砂後(60mm 降砂時点)から 図-5 の赤破線円で示す部分のクラックが発達し、この部分を起点に円弧状のすべり面が発生し、盛土の破壊に至った。また、図-6 に示すとおり、法面部に多数のクラックが確認された。これは円弧すべり破壊による盛土の変形で、盛土が法面方向に押し出され、引張クラックが生じたと考えられる。

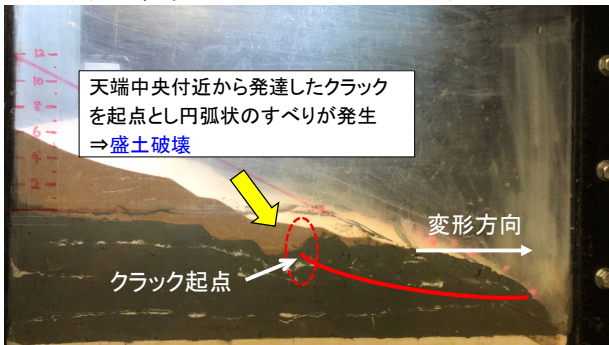


図-5 実験終了後の変形挙動側面部 [200-10.0%]



図-6 実験終了後の変形挙動法面部 [200-10.0%]

(3) 【低強度側】 Case-3[200-9.0%]

遠心加速度を上げ始めてから 40G に到達した時点で、天端中央付近にクラックが発生した。20mm ずつ段階的にジルコン砂を降砂し、40mm まで降砂した時点で、図-7 の赤破線円で示す部分のクラックを起点に円弧状のすべり面が発生し、盛土の破壊に至った。また、Case-2 同様、盛土が法面方向に押し出されたことにより、法面部に多数のクラック発生、盛土の割れが確認された。

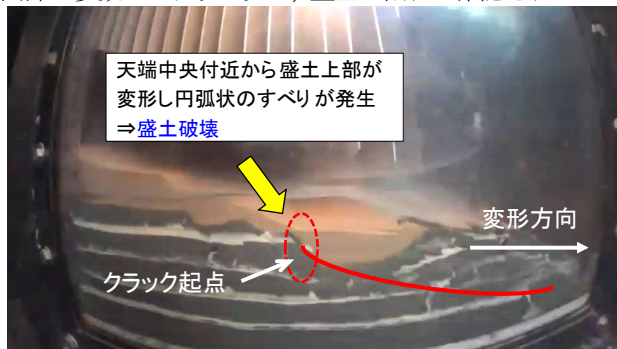


図-7 実験終了後の変形挙動側面部 [200-9.0%]

3.2 実験後の盛土形状と円弧すべり解析の比較

実験後のベーンせん断強度と上載荷重を用いて、改質土盛土を対象とした円弧すべり解析を、実規模換算した地盤モデルで実施し、実験後の盛土形状と比較した。

(1) 解析条件

- ・盛土の強度は、実験後のベーンせん断強度とした。
- ・上載荷重は各実験後の降砂量から算出した。
- ・ジルコン砂の密度は 3.46g/cm^3 とした。
- ・改質土の単位体積重量は 16kN/m^3 とした。

(2) 解析結果

遠心模型実験で盛土のすべり破壊が確認されなかった Case-1 では、円弧すべり解析の結果、安全率が 1.285 となり、1.0 を上回る値となった。

一方で、盛土のすべり破壊が確認された Case-2 と Case-3 では、安全率が 0.926, 0.914 となり、1.0 を下回る値となった。

この結果から、円弧すべり解析で得られた安全率が 1.0 を下回った 2 ケースについては、盛土のすべり破壊が発生しており、実験結果と解析結果が対応していることが確認できた。表-2 に盛土形状と解析結果の比較表を示す。

表-2 盛土形状と解析結果の比較表

実験ケース [配合条件]	盛土形状 (すべり破壊の有無)	安全率	ベーンせん断強度 (kN/m^2) ※実験後の盛土天端	上載荷重 (kN/m^2)
Case-1 [200-11.5%]	無し	1.285	36.4	158.8
Case-2 [200-10.0%]	有り	0.926	18.7	81.4
Case-3 [200-9.0%]	有り	0.914	11.4	27.1

すべり破壊が発生した Case-2 を例に、実験後の盛土形状と円弧すべり解析結果を比較した(図-8)。

解析上で最小安全率となるすべり面を実験結果と比較すると、実験で確認されたすべり面は解析結果より浅い傾向にはあるが、円弧すべり解析結果と遠心模型実験の結果は対応していると判断することができた。

以上により、改質土盛土の載荷時の安定性評価手法として、円弧すべり解析による評価が可能であることが確認できた。

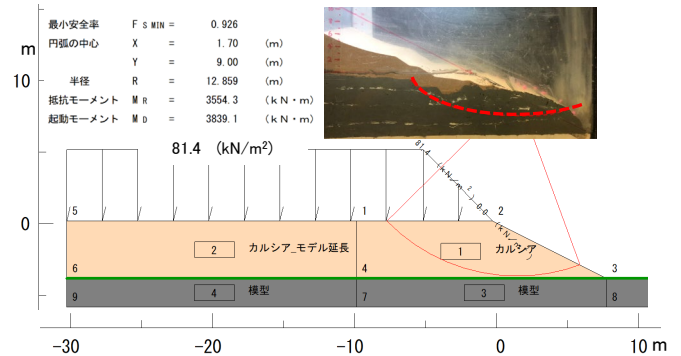


図-8 実験後の盛土形状と円弧すべり解析結果の比較図

3.3 上載荷重と改質土盛土の地盤強度の関係

すべり破壊を生じさせることなく、段階盛立可能な盛土厚を推定するために、上載荷重と改質土盛土の地盤強度の関係性を検討した。

検討に先立ち、遠心模型実験で盛土のすべり破壊が確認された Case-2 と Case-3 について、安全率が 1.0 程度となる場合の上載荷重を円弧すべり解析から推定する事後解析を行った。表-3 に示すとおり、Case-2 と Case-3 で安全率が 1.0 程度となる場合の上載荷重は、それぞれ 67.9kN/m² と 20.4kN/m² であった。

表-3 安全率F=1 となる場合の上載荷重

実験ケース [配合条件]	ベーンせん断強度 (kN/m ²) ※実験後の盛土天端	すべり破壊時		事後解析	
		安全率	上載荷重 (kN/m ²)	安全率	上載荷重 (kN/m ²)
Case-2 [200-10.0%]	18.7	0.926	81.4	0.99	67.9
Case-3 [200-9.0%]	11.4	0.914	27.1	0.99	20.4

事後解析結果で推定した安全率が 1.0 程度となる場合の上載荷重とベーンせん断強度の関係を図-9 の破線で示し、表-2 に示す各実験ケースの結果と比較した。

すべり破壊が確認された Case-2 (青丸) と Case-3 (緑丸) は破線よりも上に位置し、すべり破壊が見られなかった Case-1 (赤丸) は破線よりも下に位置し、各実験結果と事後解析結果の関係性が一致していることが確認できた。

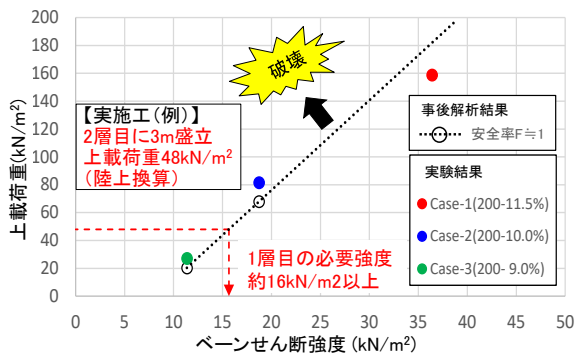


図-9 上載荷重とベーンせん断強度の関係図

実施工を例に挙げて、この関係性を説明する。

単位体積重量 16kN/m³ の改質土を 2 層目に 3m 盛立てる場合を例とすると、1 層目の盛土天端に作用する上載荷重は 48kN/m² (陸上換算) となる。この場合、上載荷重とベーンせん断強度の関係から、すべり破壊の発生を防止するためには、図-9 の赤矢印破線で示すとおり、1 層目の強度は 16kN/m² 以上が必要であると算出できる。すなわち、1 層目の改質土盛土が 16kN/m² 以上の地盤強度を有していることを確認できれば、次の層 (2 層目) の段階盛立施工が可能であると評価できる。

このことから、すべり破壊を防止するためには、下層 (次の層を盛立てる地盤) の必要な地盤強度を確認することが重要であることが分かった。

この関係図を参考にすると、段階盛立施工時の層厚管理 (投入可能な盛土厚) の計画に利用できるものと考え、段階盛立施工の妥当性を確認することができた。

4. 改質土の地盤強度の確認手法

改質土の地盤強度の確認は、室内実験ではベーンせん断試験で行った。しかし、実現場の場合は、構築した改質土に対して、室内試験と同様の方法で実施することは困難であると考えられる。そのため、比較的容易に実施できるコーン貫入試験手法に着目し、遠心模型実験と同様の配合条件で、ベーンせん断試験とコーン貫入試験を実施 (作製後の養生時間 3h, 6h, 24h, 48h) し相関性を確認した。データ数が少ないため、参考値とはなるが、図-10 に示すとおり、ほぼ線形の関係であり、相関性が高いことが確認できた。

この結果から、実現場で改質土の地盤強度を確認する手法として、容易に実施できる方法を検討する必要があるが、コーン貫入試験も適用できると考える。

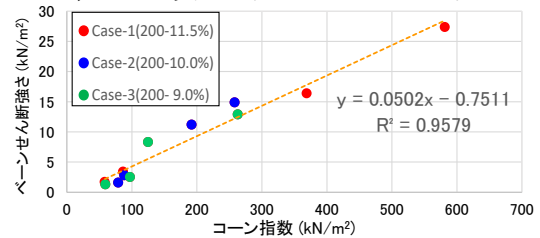


図-10 ベーンせん断強度とコーン指数の相関性

5. まとめ

本研究では、護岸背面の裏込め部 (腹付工) の材料で、改質土を利用する場合の施工方法として、段階盛立施工に着目し、改質土盛土の遠心模型実験を行った。

その結果、段階盛立施工が可能であること、その評価手法として円弧すべり解析が適用できることが確認できた。また、ベーンせん断強度と上載荷重の比較検討結果については、段階盛立施工時の層厚管理 (投入可能な盛土厚) の計画に利用できるものとする。

今回、データ数は少ないが、ベーンせん断強度とコーン指数の高い相関性も確認できた。今後は、実現場で構築した改質土に対して、容易にコーン貫入試験ができる方法を検討することが必要であると考えられる。

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2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、九州工業大学の廣岡教授、北九州港湾・空港整備事務所の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただいた。日本製鉄の赤司有三氏には改質材をご提供いただいた。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 (平成29年2月): 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, pp. 参-36~参-54