

# カルシア改質土地盤の盛土施工管理手法の提案

重村 洋平\*・春日井 康夫\*\*・片桐 雅明\*\*\*・林 和司\*\*\*\*・西野 智之\*\*\*\*\*

\* (前) (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 参与

\*\*\*\* (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

本研究では、実現場に構築したカルシア改質土地盤の盛土施工管理手法として重錘貫入試験を提案し、遠心模型実験により地盤の盛立時の安定性を判断できる管理値を検討した。具体的には、遠心模型実験装置内に構築した異なる強度の改質土盛土の天端に異なる質量の重錘を設置し、遠心加速度上昇時の載荷圧と重錘の沈下量の関係性を求め、改質土のせん断強度を踏まえて、その関係性を評価した。

その結果、正規化した載荷圧と沈下量の関係から管理値を求めることができ、ある沈下量が生じた載荷圧を不安定荷重と定義することにより、沈下量から地盤の盛立時の安定性を判断できることが分かった。

キーワード：カルシア改質土地盤、盛土施工管理手法、遠心模型実験、重錘貫入試験

## 1. はじめに

近年、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）の実海域適用事例として、浅場造成材、窪地の埋戻し材等、様々な分野での利用が進められている<sup>1)</sup>。本研究では、改質土の更なる利用可能用途の拡大を目的とし、防砂シートに代わる吸出し防止工として、護岸背面部の裏込め材料（以下：護岸腹付材）に利用可能であるか検討を進めてきた。

これまでの研究<sup>2)</sup>では、1) 護岸腹付材として改質土を利用する場合、段階的に盛り立てること（以下：段階盛立施工）によって、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改質土を、所定勾配を確保しながら盛り立てることができる、2) すべり破壊が生じることなく段階盛立施工が可能となる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求めた。その結果、載荷時の安定性を評価する手法として、円弧すべり解析が適用可能である、3) 安全に、もしくは破壊させずに次層の盛立を行う場合は、下層が必要地盤強度以上を有しているかを確認することが重要である等の知見が得られた。

今年度の研究では、段階盛立施工時の施工管理基準として重要な指標となり得る、「下層の強度が必要地盤強度以上を有していることを確認した後に、次層の盛り立てを行うこと」(図-1 参照)に着目し、この必要地盤強度を、実現場で簡易に確認できる盛土施工管理手法として、重錘貫入試験を提案した。また、地盤の盛立時の安定性を判断できる管理値を求めるために、遠心模型実験を行い載荷圧と重錘の沈下量の関係性を評価した。

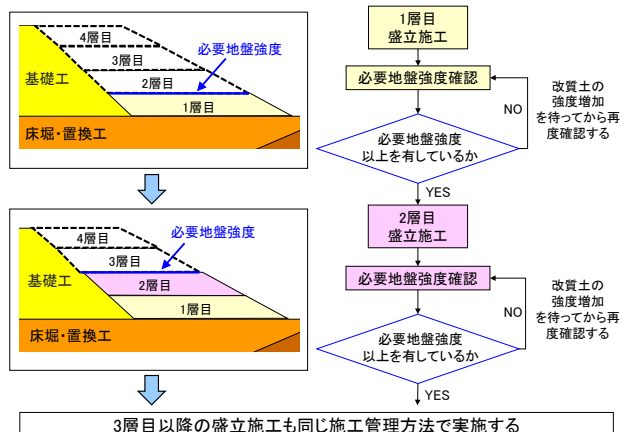


図-1 改質土の段階盛立施工の盛土施工管理概念図

## 2. 重錘沈下実験

### 2.1 実験計画

遠心模型実験による「重錘沈下実験」に先立ち、実験ケース（配合条件）の選定を行った。

昨年度の実験結果から、改質土を護岸腹付材として段階盛立施工する場合、3m 毎に盛り立てる時に必要となる下層の地盤強度は  $16\text{kN/m}^2$  以上であることが分かった。そのため、今年度の実験ケースは、地盤強度が  $16\text{kN/m}^2$  以上と  $16\text{kN/m}^2$  以下の場合となる条件とし、24 時間後のベーンせん断試験を行い、その条件となるカルシア改質材の配合率を求めた。

この結果、遠心模型実験の実験ケースは表-1 に示す Case-1 [200-17.0%], Case-2 [200-14.0%], Case-3 [200-10.0%] の3条件とした。

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]	浚渫土 含水比 (%)	カルシウム改質材 容積混合率 (%)	盛土模型 地盤強度 (kN/m <sup>2</sup> )
Case-1 [200-17.0%]	200	17.0	23.2
Case-2 [200-14.0%]	200	14.0	5.7
Case-3 [200-10.0%]	200	10.0	4.9

## 2.2 実験試料及び盛土模型寸法

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。

盛土模型の寸法は、長さ 450mm、高さ 150mm、幅 145mm とした。実験は、遠心模型実験装置内で改質土を 24 時間養生した後に開始した。

## 2.3 実験方法

重錘沈下実験は、遠心加速度上昇時の重錘による載荷圧と重錘の沈下量の関係性を確認するために実施した。実験手順は次のとおりである。図-2 に重錘沈下実験モデルを示す。

- ① 直径 50mm、高さ 70mm の円柱形状の質量の異なる 2 種類の重錘【重錘黒(重) : 757g、重錘赤(軽) : 494g】を盛土模型の天端面に設置する。
- ② 実験状況をリアルタイムに確認できるように、正面とそれぞれの重錘の上面にデジタルHDビデオカメラレコーダーを取り付ける。
- ③ 遠心加速度は、1 分間隔で所定の G ずつ増加する。
- ④ 遠心加速度を段階的に増加し、実験時は重錘の沈下及び変形挙動等を確認する。
- ⑤ 重錘の沈下量は、実験模型フレームに固定したレーザー変位計を用いて測定する。

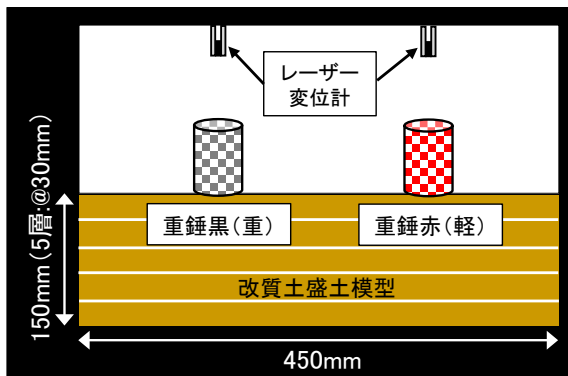


図-2 重錘沈下実験モデル

## 2.4 重錘の変形挙動及び沈下量

重錘沈下実験を実施し、各ケースで確認できた重錘の変形挙動及び沈下量を以下に示す。

### (1) Case-1 [地盤強度 23.2kN/m<sup>2</sup>]

Case-1 では加速度を 5G 毎に 50G まで増加させた。

#### 【重錘黒(重)】

20G に到達した時点で重錘が傾き始め、25G に到達した時点で完全に転倒した。重錘が転倒したため、50G 到達までの沈下量を測定できなかった。重錘が転倒した時点での沈下量は 3.5mm であった。

#### 【重錘赤(軽)】

50G 到達後、3 分間継続させて装置を停止したが、重錘は最後まで転倒せずに沈下量は増加し続け、実験後の最大沈下量は 10.3mm であった。

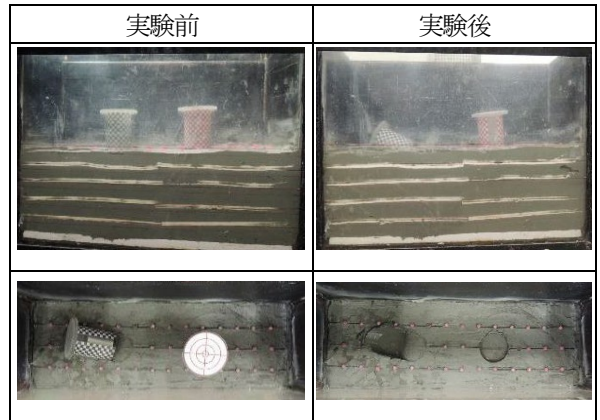


図-3 実験前後の模型 (Case-1 [地盤強度 23.2kN/m<sup>2</sup>])

### (2) Case-2 [地盤強度 5.7kN/m<sup>2</sup>]

Case-2 では加速度を 4G まで上昇させ、その後 2G 毎に 22G まで増加させた。

#### 【重錘黒(重)】

16G に到達した時点で重錘が傾き始め、18G に到達後は、重錘の傾斜を保ちながら沈下した。22G 到達後の最大沈下量は 35.2mm であった。

#### 【重錘赤(軽)】

遠心加速度の上昇に伴い、重錘はほぼ垂直に沈下した。重錘の傾斜は生じず、22G 到達後の最大沈下量は 28.3mm であった。

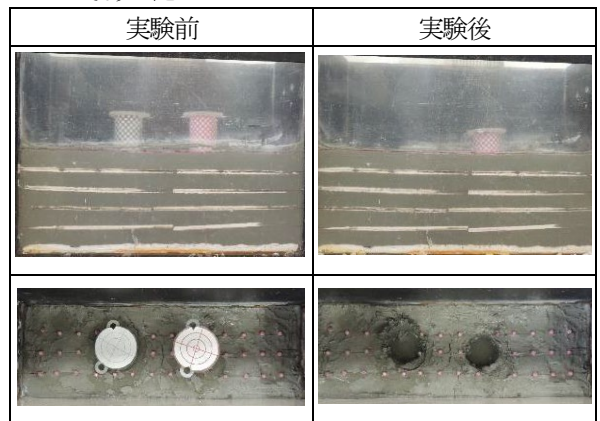


図-4 実験前後の模型 (Case-2 [地盤強度 5.7kN/m<sup>2</sup>])

### (3) Case-3 [地盤強度 4.9kN/m<sup>2</sup>]

Case-3 では、加速度を 4G まで上昇させ、その後 2G 毎に 14G まで増加させた。

#### 【重錘黒(重)】

8G に到達した時点で重錘が傾き始め、その後、完全

に転倒した。重錘が転倒したため、14G 到達までの沈下量を測定できなかった。重錘が転倒した時点での沈下量は 13.7mm であった。

【重錘赤（軽）】

14G 到達後、3 分間継続させて装置を停止したが、重錘は最後まで転倒せずに、加速度の上昇に伴い、沈下量の増加は止まらなかった。実験後の最大沈下量は、20.5mm であった。

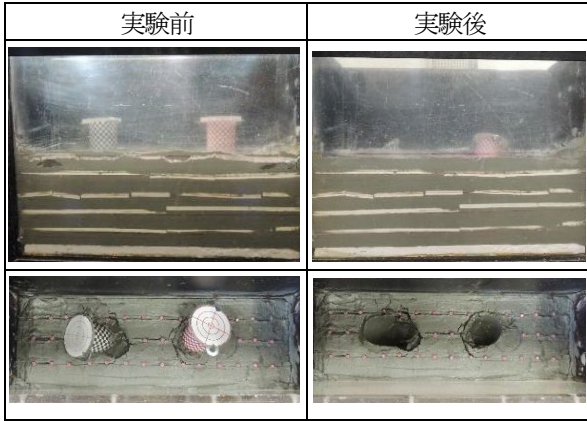


図-5 実験前後の模型 (Case-3 [地盤強度 4.9kN/m<sup>2</sup>])

2.5 重錘沈下実験の評価

(1) 模型天端面の比較

実験終了後、重錘を取り除いた各ケースの模型天端面の写真を図-6 に示す。上側が重錘赤（軽）、下側が重錘黒（重）の重錘を模型盛土に設置した箇所である。質量の同じ重錘同士を各ケースで比較すると、模型天端面の変形は同じような挙動をしていた。地盤強度が高い Case-1 は、地盤強度が低い Case-2, Case-3 に比べて沈下量が少なく、天端面にクラックは発生しなかった。一方で、地盤強度の低い Case-2, Case-3 では、模型天端面や重錘設置箇所の周辺部にクラックが発生した。

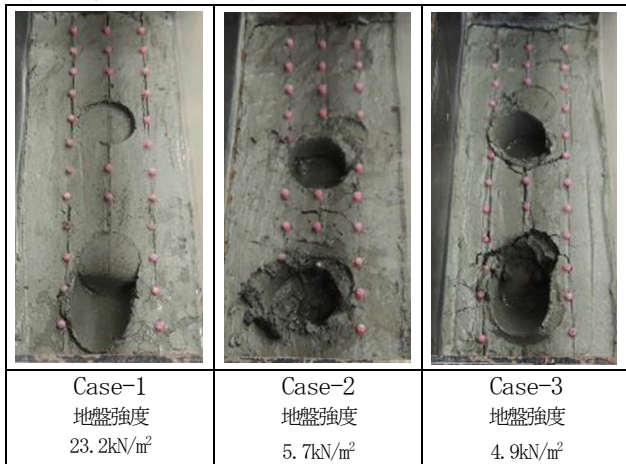


図-6 各実験ケースの模型天端面

(2) 重錘の圧力と沈下量の関係

各ケースにおける重錘の圧力と沈下量の関係を図-7 に示す。地盤強度が同じ場合、重錘の重さに関わらず、重錘の圧力と沈下量の関係は、概ね同様の挙動を示していた。

同じ重錘の圧力 30kN/m<sup>2</sup> の場合で比較すると、赤線で示すとおり、地盤強度が低いと沈下量は大きく、地盤強度が

高いと沈下量は小さくなることが確認できた。地盤強度が低い Case-2, Case-3 は、地盤強度が高い Case-1 と比較するとグラフの勾配が緩やかであることから、重錘の圧力と沈下量には関係性があることが分かった。

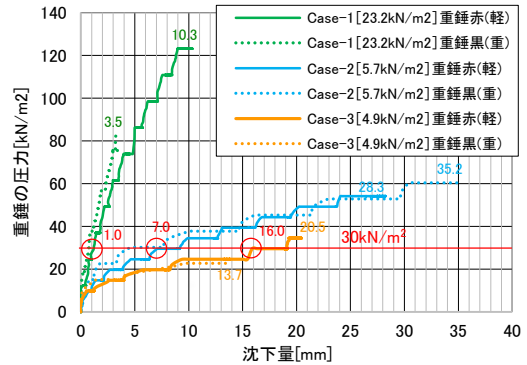


図-7 重錘の圧力と沈下量の関係

(3) 重錘の圧力と沈下量の正規化

重錘沈下実験で得られた重錘の圧力と沈下量の関係性を無次元化して解析した。各ケース概ね同様の挙動を示すグラフであることから、重錘の圧力/地盤強度と沈下量/重錘の直径に相関性があることが分かった。また、各ケースのグラフが狭い領域内に位置することから、所定の質量の重錘の沈下量から、改質土地盤の強度を評価することが可能であることが確認できた。図-8 に示すとおり、赤色の太線が正規化した沈下量と重錘の圧力の上限值、青色の太線が正規化した沈下量と重錘の圧力の下限値を示し、改質土地盤の盛土施工管理手法の検討は、安全側である下限値を用いて行った。

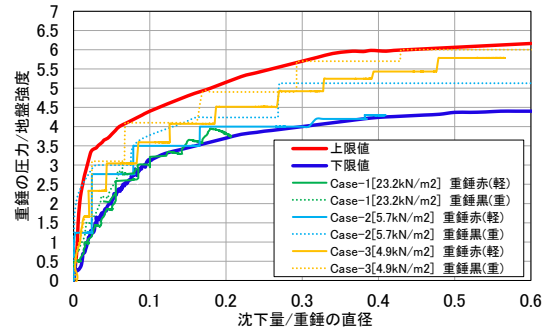


図-8 重錘の圧力と沈下量の正規化

4. 改質土地盤の盛土施工管理手法

改質土地盤の盛土施工管理手法は、実現場で簡易にできる方法に着目し、重錘の沈下量から改質土地盤を評価する重錘貫入試験を提案した。

4.1 重錘の仕様設定に必要な条件整理

重錘貫入試験は、重錘の仕様を決めることが重要であるため、重錘の仕様設定に必要な条件整理を行った。

(1) 必要地盤強度

段階盛立施工時の施工管理基準として、重要な指標となる必要地盤強度を設定する。昨年度の実験結果から、次層に 3m 盛り立てる場合を想定し、必要地盤強度を 16.0kN/m<sup>2</sup> とした。



(2) 重錘の重さ

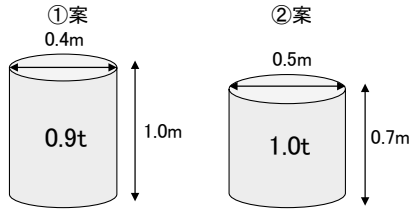
小型の作業船を使用した場合でも重錘を設置できるように、重錘の重さは水中重量で1t程度とした。

(3) 沈下量

沈下量は、実現現場での施工管理の容易さ(沈下量の確認し易さ)を考慮して0.20m程度とした。

4.2 重錘の仕様計画

4.1で整理した条件を基に、重錘の仕様計画を行った(図-9参照)。図-10に示す正規化した沈下量と重錘の圧力の関係図の下限值(青色の太線)を用いて、重錘の圧力/地盤強度と沈下量/重錘の直径の関係から、計画した重錘の沈下量を算出した。その結果、①案の沈下量は、条件として設定した0.20m程度であったため、重錘の仕様として採用した。②案の沈下量は0.05mと微小であったため、施工管理の容易さを考慮し重錘の仕様として採用しなかった。今回は材質が鉄の場合の円柱形状としているが、必要となる地盤強度や重錘製作の容易さ等に応じて、重錘の材質および形状を変更することは可能である。



重錘の仕様	重錘の直径 (m)	重錘の高さ (m)	重錘の重さ (t)	重錘の圧力 (kN/m <sup>2</sup> )	必要地盤強度 (kN/m <sup>2</sup> )	重錘の圧力 / 地盤強度	沈下量 / 重錘の直径	沈下量 (m)	重錘の採用
①案	0.4	1.0	0.9	67.9	16.0	4.3	0.5	0.20	OK
②案	0.5	0.7	1.0	47.5	16.0	3.0	0.1	0.05	NG

図-9 重錘の仕様計画

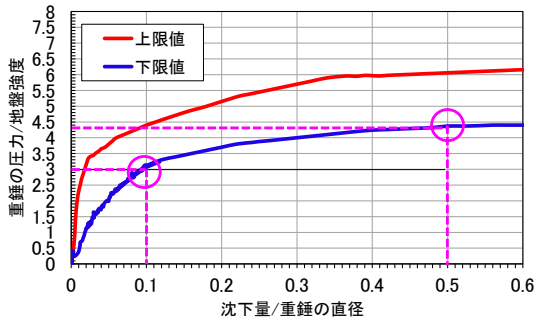


図-10 正規化した沈下量と重錘の圧力の関係図

5. 実現現場での重錘貫入試験の実施案

実現現場で改質土を護岸腹付材として利用する場合、段階盛立施工を実施することで、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改質土を、所定勾配を確保しながら盛り立てることができる。この施工方法は、段階的に盛り立てるため、下層の必要地盤強度を確認しながら施工することが重要である。

本研究で盛土施工管理手法として提案した重錘貫入試験を適用することで、「下層が必要地盤強度を有しているか」を現場で確認しながら安全に段階盛立施工を実施できると考える。実現現場での重錘貫入試験の実施案として、実施手順案および施工管理基準案を示す。

(1) 実施手順案

重錘貫入試験は次の手順で実施する。①重錘を潜水士船のクレーンで吊り下げる、②1層目の改質土天端面の不陸の少ない平坦な場所にゆっくりと設置する、③潜水士により沈下量を確認する。図-11に実施概要を示す。



図-11 実現現場での重錘貫入試験の実施概要図

(2) 施工管理基準案

重錘貫入試験の施工管理基準案を図-12に示す。【重錘の沈下量が0.20m以下の場合】は、下層が必要地盤強度を有しているため次層の施工を行う。【沈下量が0.20mより大きい場合】は、必要地盤強度以上を有していないため、改質土の強度増加を待ってから再度測定する。

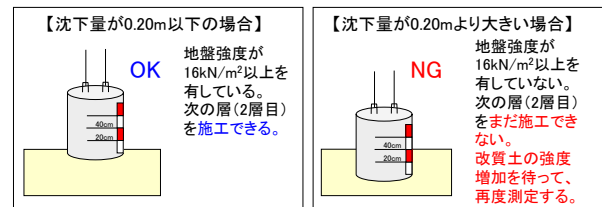


図-12 重錘貫入試験の施工管理基準案

6. まとめ

本研究では、実現現場に構築したカルシア改質土地盤の盛土施工管理手法として重錘貫入試験を提案し、遠心模型実験により地盤の盛立時の安定性を判断できる管理値を検討した。その結果、正規化した載荷圧と沈下量の関係から管理値を設定することができ、沈下量から地盤の盛立時の安定性を判断できることが分かった。また、盛土施工管理手法として重錘貫入試験を適用することで、盛土を安定して盛り立て施工することが可能であることも確認できた。今後は、実際に現場で重錘貫入試験を実施し、重錘の沈下量がどの程度正確に測定できるかを確認する必要がある。また、本研究では、一定の条件下で重錘の仕様を設定したため、違う条件でも検証する必要がある。

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3年度新門司沖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(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
- 2) 一般財団法人 沿岸技術研究センター: 沿岸技術研究センター論文集No. 21 (2021), pp. 39~42