

土運船から投入した粘性土の 堆積形状解析手法に関する研究

白 可¹・熊谷 隆宏²・佐々木 優³・田代 司³・琴浦 毅²・鶴見 文孝⁴

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Ka.Haku@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

³ 五洋建設(株) 国際土木本部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁴ 正会員 五洋建設(株) 国際土木本部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

良質な砂の入手が困難な地域において、航路や泊地等の浚渫などで発生する粘性土を使用して埋立地盤を造成する場合、埋立施工時の地盤の安定性や将来的な圧密沈下量に関する検討が行われる。検討に際しては、海中に投入された粘土の土層構成を含む堆積形状を事前に把握する必要がある。本研究では、遠心模型実験で土運船から投入した粘性土の堆積特性を評価し、土層構成を含む堆積形状を解析する手法を提案する。提案する手法には、土源情報、湿潤密度、写真等の情報から土質特性を推定する人工知能技術を導入する。実際の埋立における投入記録に基づき、提案する解析モデルを適用するとともに、深浅測量結果とコーン貫入試験結果を用いて堆積形状や埋立層内部の強度分布の評価精度を確認し、適用性を検証した。

Key Words : *sedimentary shape analysis, centrifuge test, soil property, AI, CPT*

1. はじめに

海域の埋立によって新たに土地を造成する場合、材料として一般的に砂質土が用いられているが、良質な砂資源の入手が困難な地域においては近隣海域における航路や泊地等の浚渫などで発生する粘性土が使用されることがある。今後、社会の持続的発展の観点から、貴重な砂資源の利用をなるべく抑制し、粘性土を有効利用することが重要になるものと考えられる。

砂や礫に比べて軟弱で圧縮性が高い粘性土を用いて埋立を行う場合、施工時には、偏差荷重による地盤のすべりや支持力破壊等に対する安定性の確保が求められる。また、埋立完了後には、粘性土の自重や将来的な土地利用による上載荷重により、有意な圧密沈下量が発生することが懸念される。ただし、破壊に対する安定性や将来沈下量の検討を行うために、地盤に対して詳細な原位置地盤調査を実施して土層構成や土質性状を把握することは多大な労力と時間がかかるため、現実的ではない。

本研究では、詳細な原位置地盤調査を実施することなく土運船から投入した土の堆積形状を推定する解析手法として、投入した土が正規確率分布に従って拡散することを仮定する松見・岸口¹⁾が提案する手法を援用する。この手法は、砂質土による埋立に適用されるだけでなく、例えば、熊谷ら²⁾のように、ブロックの投入による人工

マウンド礁の造成形状の解析にも適用されている。従来は砂やブロック、また石材に適用されていた手法に対し、本研究では遠心模型実験で土運船から投入した粘性土の堆積形状を評価し、粘性土の広がり程度が非排水せん断強さに依存する考え方を導入し、土層構成を含む堆積形状を解析する手法を提案する。

また、提案する手法には、土源情報、湿潤密度、写真等の情報から土質特性を推定する人工知能技術を導入した。人工知能技術を用いて、投入する粘土の強度定数や圧密定数を推定することにより、堆積形状解析モデルに入力する強度定数を設定できるとともに、各堆積土層に土質定数を紐付けることが可能となる。構築した堆積形状モデルに関し、実際の埋立を行った際の深浅測量結果(堆積形状)と、コーン貫入試験結果から推定される非排水せん断強さ(強度分布)を用いて妥当性を検証する。

2. 遠心模型実験

(1) 概要

土運船から投入した粘性土の海底面での堆積特性を調べるために、遠心模型実験を実施した。遠心模型実験の実施状況を写真-1に示す。

実験では、積載量 1,500 m³ を想定した土運船の 1/90 模

型(長さ466 mm×幅113 mm×高さ68 mm)を使用し、90 Gの遠心加速度を与えた。土運船模型に関しては、底開できる装置を用いることにより、実際の土運船による粘性土の投入方法を模擬できるようにしている。

また、想定される現場の水深条件に対し、実験での水深条件(底面からの投入高さ)を適切に設定することが重要である。土運船から投入される材料の落下挙動について、熊谷ら²⁾に示される支配方程式を式(1)のように鉛直一次元に簡略化した方程式で表現し、材料の着底時の速度が実スケールと一致するように、遠心加速度が作用する実験での投入高さを設定した。

$$(M + \rho_w k_m V) \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \rho_w C_D A v^2 + (M - \rho_w V)g \quad (1)$$

ここに、 M :投入材料の質量、 ρ_w :流体密度、 k_m :付加質量係数、 V :物体の体積、 A :物体の投影面積、 v :物体の落下速度、 C_D :抗力係数である。

落下挙動の解析では、底開部から落下した粘性土は分離することなく一体の塊状に落下することを仮定し、 M は土運船に積載する粘性土の総質量とする。付加質量係数を0.5、抗力係数を1.0と標準的な値に設定した場合、実スケールにおける水中20 mの落下挙動は、90 Gの遠

心載荷実験における水中222 mmの落下挙動に相当する。また、気中実験条件では30 mmの落下挙動に相当すると評価され、実スケールで水中40 mの落下挙動は、90 Gの気中実験条件で50 mmの落下挙動に相当する。

実験ケースとして、水中と気中条件の挙動を比較するケースを設定した。また、4種類の粘性土を用いるとともに含水比を3条件に変化させるケースを設定した。

実験ケースの一覧を表-1に示す。実験中はビデオで撮影し、落下の挙動や着底した粘土の広がり挙動を観察した。実験後、レーザー変位計を使用して土運船の横断方向及び縦断方向の堆積高さを計測することにより、粘性土の堆積形状を評価した。

(2) 材料特性

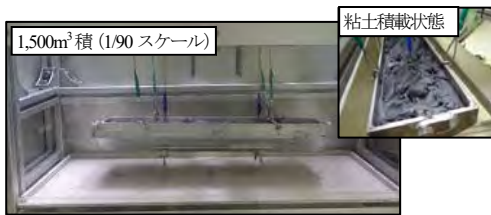
遠心模型実験で使用した粘土の含水比および液性限界の試験結果を表-2に示す。また、非排水せん断強さをベーンせん断試験によって調べ、非排水せん断強さと含水比 w を液性限界 w_L で除した正規化含水比 w/w_L との関係を図-1に示す。両者の相関は高く、この結果は、粘性土の液性限界の値が分かれば、湿潤密度から含水比を計算し、正規化含水比を用いて非排水せん断強さを推定することが可能であることを示唆している。

(3) 実験結果

粘性土の落下挙動について、水中投入条件では、投入とともに、直ちに濁りが発生するため、落下挙動を確認することは困難であった。気中投入条件では、粘性土の粘着力のため、粒子が分離することなく塊状で落下し、着底後は粘性土の強度にしたがって、周辺に広がっていく様子を確認することができた。

実験後、レーザー変位計を使用して土運船の横断方向及び縦断方向の堆積高さを計測することにより、最終的な堆積形状を評価した。

試料Aを対象に、含水比は同一で、気中と水中の投入条件が異なる場合の堆積形状の比較例を図-2に示す。実スケールで水深20 mを想定したこのケースにおいて、



(a) 使用した土運船模型



(b) 粘土投入後の状況

写真-1 遠心模型実験実施状況

表-1 実験ケース

試料名	気中				水中	
	投入高さ(mm)	自然含水比 w	$1.0w_L$	$1.5w_L$	模型水深(mm)	$1.0w_L$
A	30	Case1	Case2	Case3	222	Case4
	50	Case5	-	-	-	-
B	30	Case6	Case7	Case8	222	Case9
	50	Case10	-	-	-	-
C	30	Case11	Case12	Case13	222	Case14
	50	Case15	-	-	-	-
D	30	Case16	Case17	Case18	222	Case19
	50	Case20	-	-	-	-

表-2 投入材料の土質特性

試料名	土源	自然含水比 w (%)	液性限界 w_L (%)
A	陸上発生土	15 %	30 %
B	陸上発生土	17 %	38 %
C	浚渫粘土	57 %	57 %
D	浚渫粘土	43 %	50 %

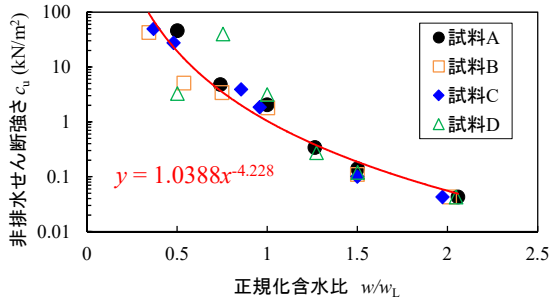


図-1 正規化含水比と非排水せん断強さの関係

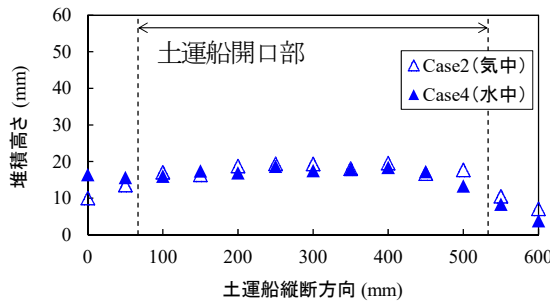


図-2 気中と水中条件における堆積形状の比較 (試料 A)

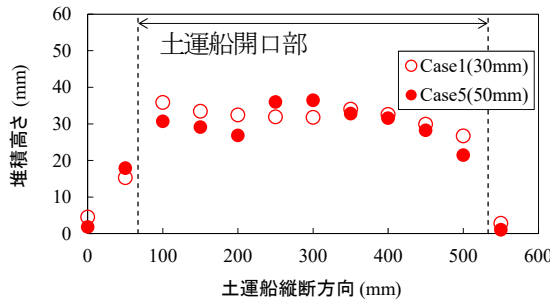


図-3 投入高さが異なるケースの堆積形状の比較 (試料 A)

水中条件と気中条件で、堆積形状が概ね一致することが確認された。同様の傾向は、試料 A のみでなく、試料 B ~ D の全てのケースで確認されている。水中投入時に粘土粒子が分離し、濁りが発生することが撮影したビデオにより確認されているが、そのような粒子の分離が堆積形状に与える影響は極めて小さいことがわかる。すなわち、水中においても気中と同様に、底開部から落下する粘性土は一体となって落下していることが推察される。

試料 A の気中投入条件において、投入高さが異なるケースの堆積形状の比較例を図-3 に示す。ここでは、水深が 20 m と 40 m の投入に相当する条件 (実験での投入高さは、それぞれ 30 mm と 50 mm) を抽出した。図-3 に

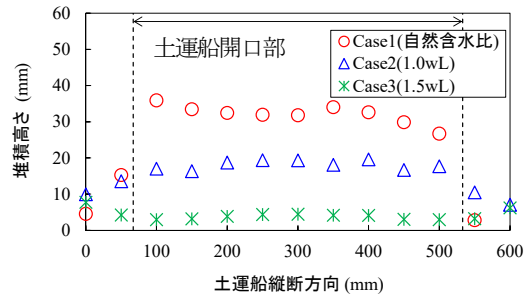


図-4 含水比が異なるケースの堆積形状の比較例 (試料 A)

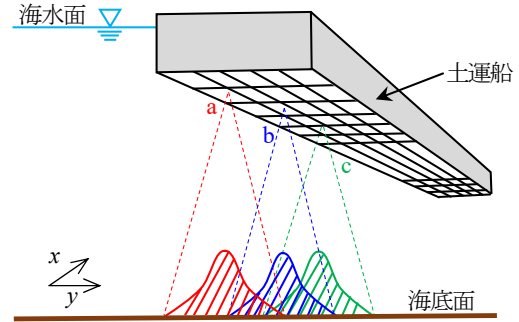


図-5 堆積形状解析のイメージ

示す試料 A のみでなく全てのケースで、投入高さが異なり、着底時の粘性土の速度が異なっても、堆積形状にほとんど影響しないことが確認された。

投入高さが同一で、含水比が異なる条件における堆積形状の比較例を図-4 に示す。堆積形状は、含水比または非排水せん断強さに大きく依存することが分かる。すなわち、投入された粘性土の堆積形状は、着定時の速度よりも、粘性土の強度に強く依存することを明らかにした。

3. 堆積形状解析手法

前章に示した遠心模型実験結果より、土運船から投入された粘性土の堆積形状は、水深 (落下距離) によって変化する着定時の速度でなく、粘性土の強度に一意に依存することが分かった。このような特性を踏まえ、本研究では、投入した土が正規確率分布に従って拡散することを仮定する松見・岸口¹⁾が提案する手法を導入する。

この手法では、図-5 に示すように土運船の船倉を小区画に分割した後、式(2)に示される確率密度関数 $f(x, y)$ を用いて、各区画から投入された土の移動量 (堆積形状) を評価する。そして、土運船から投入された土の全体堆積形状は、各区画から投入された土の堆積形状の総和で表現される。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

ここに、 x, y : 投入中心から x, y 軸方向の距離、 σ は標準偏差 (拡散係数) である。

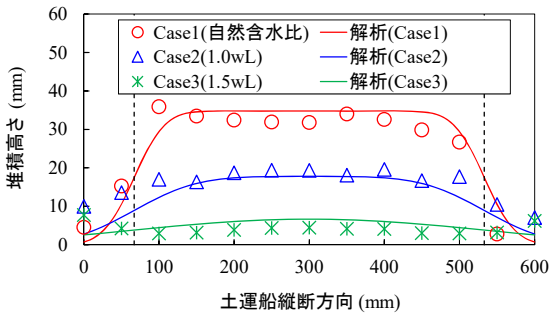


図-6 堆積形状解析モデルによる再現解析結果例 (試料A)

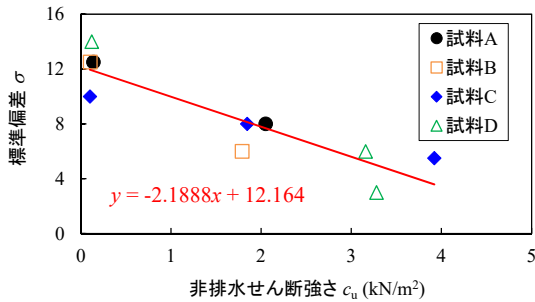


図-7 非排水せん断強さと標準偏差の関係

前章に示した実験結果を踏まえ、本研究では、先述のように広がり程度の指標となる標準偏差が粘土の非排水せん断強さに依存する考え方を導入し、粘土に対しても適用できるよう拡張させる。

式(2)において、堆積の広がり程度を支配する標準偏差(拡散係数)が未知パラメータであるため、実験で得られた堆積形状を解析で再現できる適切な標準偏差の値を試行錯誤的に検討した。標準偏差の値を適切に設定することにより、図-6に示すように粘土の含水比(粘土の非排水せん断強さ)を変えたケースに対し、実験で得られた堆積形状を解析で概ね再現できることが分かった。また、標準偏差の値は、図-7のように非排水せん断強さを用いて推定することができることが分かった。

図-1に示したように、含水比と液性限界の比である正規化含水比の値が分かれば、非排水せん断強さを推定することができるため、堆積形状解析モデルに標準偏差の

値を入力し、解析を実施することができる。

4. 土質推定 AI の導入及び現地適用性の検討

堆積形状解析モデルの適用にあたり、投入される全ての粘土に対して、液性限界試験を実施して液性限界の値を調べることは困難なため、土運船上で容易に入手できる粘土の土源情報、湿潤密度、写真等の情報より、土質定数を推定できる人工知能技術を導入する。

(1) 土質推定 AI

モデルの詳細については熊谷ら³⁾に示されるように、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN)⁴⁾の手法により、構築されている。モデル構造を図-8に示すように、土の土源情報、湿潤密度、撮影画像および触感による硬・軟情報を入力データとし、圧縮指数、膨潤指数、圧密係数、液性限界等の土質定数を出力データとして、相関を機械学習させたモデルである。画像特徴量の抽出する際に学習済みの既存のモデルVGG⁵⁾を使用した。なお、入力する土の画像については、収納容器や背景などの不要な情報をトリミングして取り除いて加工したデータを用いる。

機械学習にあたっては、教師データのうちのランダムに抽出した80%をパラメータ最適化のための学習用、残りの20%をモデルの検証用に用いた。

図-9に、代表的な土質定数として液性限界に着目したAIによる推定結果と真値の比較を示す。検証データで評価した平均誤差は、画像を使用する場合には3.7%と評価され、高い精度で土質定数を推定できることが分かった。一方、入力データにおいて、画像を省き、土源情報や湿潤密度等の説明変数のみで推定した結果、23.4%で推定精度は低く、土質の推定にあたっては画像情報の寄与が大きいことが分かる。

図-10に、堆積形状解析を実施するフローを示す。AI

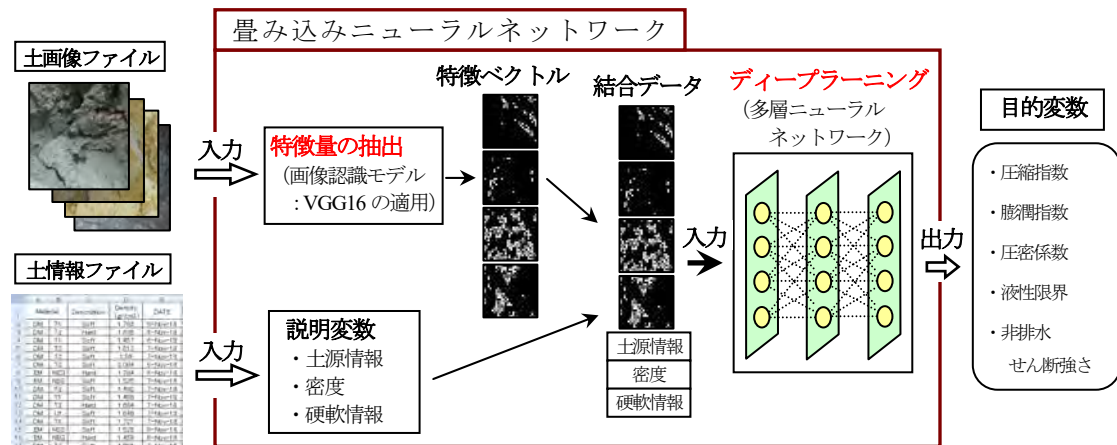
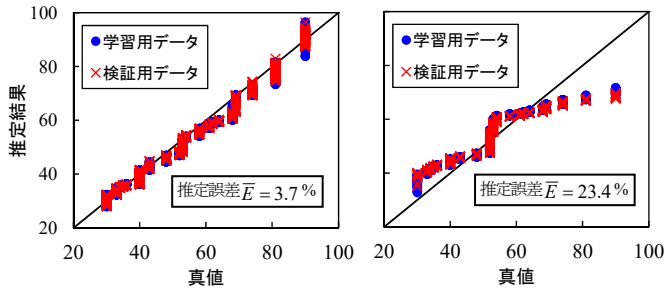


図-8 土質特性に関する機械学習のモデル構造



(a) 画像を使用 (b) 画像を不使用
図-9 土質推定 AI による推定結果と真値の比較例

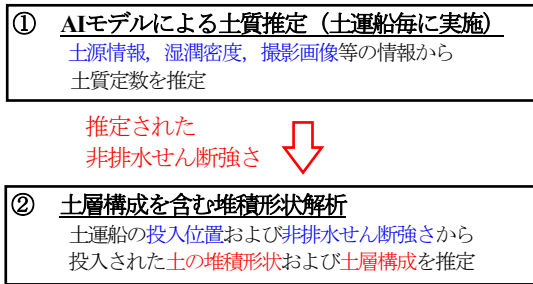


図-10 堆積形状解析の実施フロー

によって推定された液性限界の値と、土運船上で簡易に計測した湿潤密度から換算した含水比より、正規化含水比を用いて非排水せん断強さを推定することができる。

図-7 の関係から入力パラメータの標準偏差 (拡散係数) を求め、堆積形状解析を実施する流れとなる。

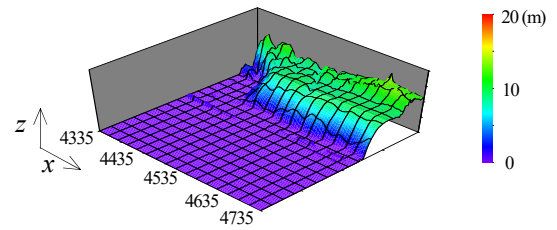
(2) 現地適用性の検証

400 m × 600 m の埋立範囲において実際に粘性土を用いて埋立を行った 6 ヶ月間の施工実績があり、その際の投入管理データに基づいて本研究で提案した手法で再現解析を実施した。積載容量が 1,000 m³ と 1,500 m³ の土運船を使用し、1,000 回程度の投入により 125 万 m³ (浚渫粘土: 50 万 m³, 陸上発生土: 75 万 m³) の埋立を行ったものである。投入管理データとしては、土運船の投入座標と船首方向、粘性土の土源情報、撮影画像、計測した湿潤密度、硬・軟の触感情報が記録されている。

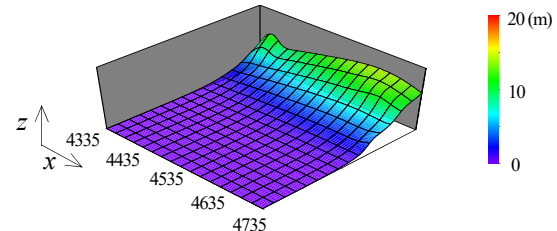
土運船による各投入土に対し、土質推定 AI により液性限界や非排水せん断強さを推定した上で、入力する標準偏差 (拡散係数) を定め、投入座標や船の姿勢を反映した堆積形状解析を行った。3 ヶ月後と 6 ヶ月後の実測の深浅測量結果と解析結果の比較を図-11 と図-12 に示す。また、最大堆積高さを示す断面での堆積高さの比較例を図-13 に示すように、提案する堆積形状解析手法により高い精度で堆積形状を推定できることが分かった。

また、埋立後にコーン貫入試験 (CPT) を 10 箇所程度実施し、コーン先端抵抗 q_t と鉛直全応力 σ_{v0} より、換算式 (3)⁹ を用いて非排水せん断強さ c_u を換算する。

$$c_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt} \quad (3)$$

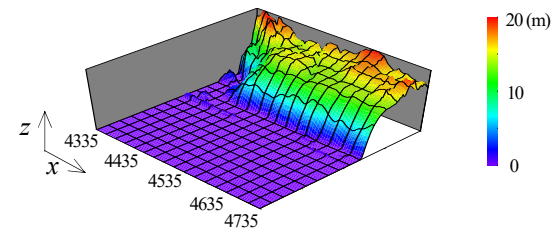


(a) 深浅測量結果の実測値

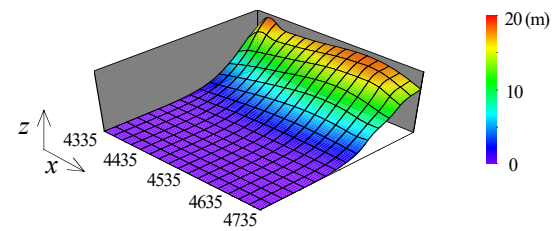


(b) 解析結果

図-11 堆積形状に関する解析結果と実測値の比較 (3 ヶ月後)



(a) 深浅測量結果の実測値



(b) 解析結果

図-12 堆積形状に関する解析結果と実測値の比較 (6 ヶ月後)

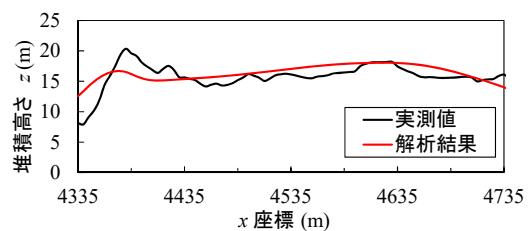


図-13 堆積高さに関する解析結果と実測値の比較

ここに、 N_{kt} : コーン係数 (15 に設定) である。

非排水せん断強さの深度分布について、コーン貫入試験結果の換算結果と解析結果の比較を図-14 に示す。また、深度 1.5 m 間隔での平均値に関する比較を図-15 に示す。ばらつきはあるものの埋立層内部の強度分布を含めて概ね実測値と整合し、提案する解析手法の妥当性が確認された。ばらつきの原因としては、埋立層内の土質性状に空間的な変化が大きく、調査地点の微小なずれが評価のばらつきをもたらしやすいことや、AI の推定精度に課題があること等が考えられる。AI の推定精度について

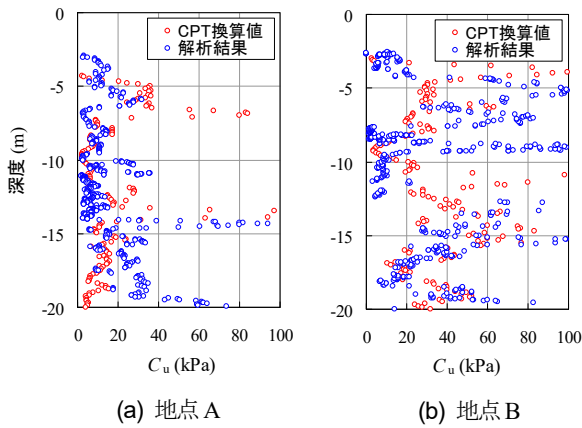


図-14 強度の深度分布に関する実測値と解析結果の比較

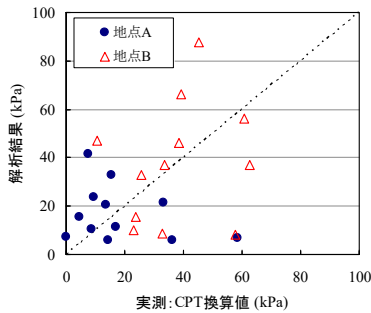


図-15 深度 1.5 m 間隔の平均値に関する実測値と解析の比較

は、教師データの拡充によりさらなる向上を期待できる。

このような解析手法を用いることにより、投入した粘土に対して、投入毎にラベルを付けて記録し、堆積形状のみでなく、人工知能技術で推定した土質定数の情報が紐付けられた土層構成を同時に出力でき、埋立領域の情報を綿密に把握することが可能となる。

5. おわりに

本研究では、粘性土を用いて埋立地盤を造成することを想定し、土運船から粘性土を投入した場合の堆積特性を遠心模型実験により把握した上で、粘性土の広がり程

度が非排水せん断強さに依存する考え方を導入し、土層構成を含む堆積形状を解析する手法を提案した。実際の埋立時の施工データを用いて、土質推定 AI を組み合わせた堆積形状手法の適用性を検討し、堆積形状および埋立層内のせん断強さを詳細に評価できることを示した。

提案する解析手法により、土質定数を紐付けながら土層構成を把握し、埋立施工時の安定性の検討や、将来沈下量の予測を行い、埋立の最適施工高さ（高上高）や地盤改良方法の設計等に活用することが期待される。

参考文献

- 1) 松見吉晴, 岸口孝文: 捨石マウンド築造時のバージ船の配線位置について, 海岸工学論文集, 37 巻, pp.769-773, 1990.
- 2) 熊谷隆宏, 山本省吾, 平山達也, 真鍋匠, 清水英久, 川口毅, 平田賢治, 小宮一成, 小林一美: ブロック直投方式を用いた人工海底山脈築造に関するブロックの落下挙動および拡散特性に関する研究, 海岸工学論文集, 51 巻, pp.801-805, 2004.
- 3) 熊谷隆宏, 白可, 佐々木優, 田代司, 琴浦毅, 鶴見文孝: 人工知能技術による土質推定に基づく埋立管理システムの開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.76, No.2, 2020 (印刷中).
- 4) 斎藤康毅: ゼロから作るディープラーニング—Python で学ぶディープラーニングの理論と実装—, pp.165-273, オライリー・ジャパン, 2016.
- 5) Simonyan, K. and Zisserman, A.: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, In 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), pp.1-14, 2015.
- 6) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, pp.366-403, 2013.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

PROPOSAL OF SEDIMENTARY SHAPE ANALYSIS METHOD FOR RECLAMATION PROJECT USING CLAY

Ke BAI, Takahiro KUMAGAI, Yu SASAKI, Tsukasa TASHIRO, Tsuyoshi KOTOURA and Fumitaka TSURUMI

In use of clayey soil as reclamation material, the stability during construction and future consolidation settlement should be examined, and it is important to understand the sedimentary shape for each layer. In this study, we conduct centrifuge tests to evaluate the sedimentary shape and propose an analysis method which can get the composition of soil layers simultaneously. We also introduce artificial intelligence technology to estimate soil properties such as the liquid limit based on information such as soil source, wet density, and picture. It is confirmed that the proposed analysis model can reproduce the sedimentary shape accurately by comparing with the on-site data. The distribution of soil property based on artificial intelligence also showed high accuracy compared with the cone penetration test result.