

懸濁液製造の合理化に資する密度測定装置の開発

松井 秀岳^{*1}・池上 浩樹^{*1}・石井 裕泰^{*2}

Keywords : suspension, muddy water, density, fluidized soil-cement mixture, ICT, DX

懸濁液, 泥水, 密度, 流動化処理土, ICT, DX

1. はじめに

建設工事に供する懸濁液の製造では、目的に応じた強度・施工性・材料分離抵抗性等の要求性能を確保するため、懸濁液の密度を管理・調整する必要がある。

例えば、建設発生土を有効利用するための一手段としても広く普及する流動化処理土の製造では、母材となる土に水を加えた泥水の密度が管理対象とされており、従来の製造管理では調泥用水槽から採取した泥水を対象に密度の測定が行われてきた¹⁾。この方法では泥水の採取や室内での密度測定に人手と時間を要するが、要求品質に比較的広い裕度がある条件や泥水製造を担う重機オペレータの習熟度が高い場合は、一日に数回程度の密度測定で品質を満足できたため、密度測定が製造効率に与える影響はわずかであった。

一方、埋戻し工事等での高い利便性を背景に流動化処理土が普及するにつれて、その要求品質は高度化する傾向^{2),3)}にあり、品質確保のための泥水密度の測定が高頻度化した結果、迅速性を欠く従来の密度測定手法が製造効率を低下させる場合があった⁴⁾。また、担い手不足を背景として熟練の重機オペレータが減少しており、今後は経験の浅い重機オペレータによる泥水製造も想定されることから、品質確保のための密度測定の高頻度化とそれによる製造効率の低下が懸念される。

このような背景に基づき著者らは、懸濁液の製造管理の合理化を目的として、泥水密度の自動測定を念頭に置いた装置を新たに開発した⁵⁾。本報では、まず一般的な流動化処理土の製造工程と従来の密度測定手法を示したうえで、人力による試料採取を必要としない新たな泥水密度測定装置を概説する。次に既存の流動

化処理土製造プラントに開発装置を適用した事例を示し、従来法と開発装置の双方で測定された泥水密度の比較を通して、開発装置の適用性・有効性を示す。

2. 流動化処理土の製造工程と品質管理

本報が検討対象とする流動化処理土は、土・水・固化材で構成される流動性材料（写真-1）で、狭隘部の埋戻し等に広く活用されている。強度・流動性・材料分離抵抗性などの要求品質を満足するためには、構成材料を計画量で精度よく計量・混合する必要がある。



写真-1 流動化処理土
Photo.1 Fluidized soil-cement mixture

流動化処理土の一般的な製造工程は、土に水を投入して均一に混合した調整泥水を製造する「泥水製造」工程と、泥水にセメント等の固化材（及び混和剤）を添加・混合する「流動化処理土製造」工程の2工程に大別される（図-1）。後者は計量機能を備えたプラント等で実施されることから、計画量の調整泥水と固化材が精度よく計量・混合される一方、前者の泥水製造は

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

*2 技術センター 技術企画部 企画室

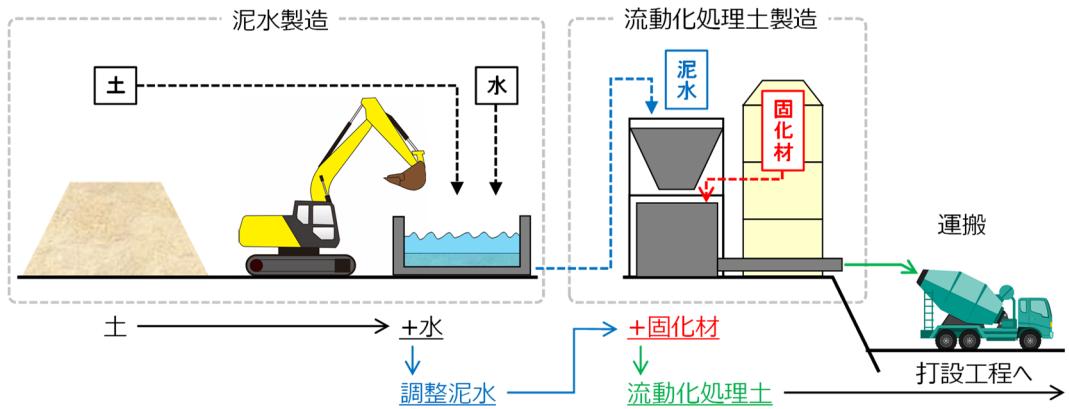


図-1 流動化処理土の製造工程
Fig.1 Manufacturing process of fluidized soil-cement mixture

バックホウ等の重機によって行われる場合が多く、計量過程を介さないことから、土と水が所定の割合で混合できるかは重機オペレータの習熟度によるところが大きい。そのため流動化処理土の製造では、調整泥水の密度を確認・調整することで計画量の土と水が混合されていることを担保し、それによって流動化処理土の所定品質を確保する、という製造管理がなされる。

3. 泥水密度の測定方法

流動化処理土の製造管理で重要な指標となる泥水の密度は、一般的に採取試料を用いる手法で測定されてきた。具体的には、「泥水製造」工程において重機オペレータが混合完了を判断したタイミングで人力によって泥水を採取し、容積が既知の容器に入れた採取泥水の質量から密度を算出する（写真-2）。この従来法は手順が簡易で測定原理も明快である一方、実施には人手と一定の時間を要するため、高頻度に実施する上では迅速性に課題を残すなど改善の余地があった。



写真-2 採取泥水を用いた従来の密度測定方法

Photo.2 Conventional density measurement of soil suspension

この課題に対して著者らは、人力による試料採取を必要とせず、連続的かつ自動でのデータ収集・評価が可能な密度測定手法を検討し、圧力センサを用いた密度測定装置を開発した（図-2）。具体的には、泥水製造を行う水槽内の複数深度に圧力センサを設置し、製造過程にある泥水の密度に応じて生じる深度ごとの圧力値を測定することで泥水密度を推定する。泥水密度が均一であると仮定すれば式(1)に示すように圧力値の深度勾配から平均密度を推定できるほか、泥水密度が均一でない場合でも式(2)に示すように最深部センサの圧力値と深度から平均密度を推定することができる。

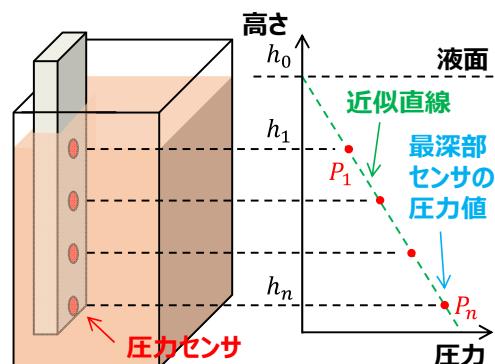


図-2 圧力値による密度測定手法の概念図
Fig.2 Schematic diagram of developed density measurement method using multiple pressure gauges

$$\bar{\rho} = \left| \frac{\sum_i^n (P_i - \bar{P})}{\sum_i^n (P_i - \bar{P})(h_i - \bar{h})} \right| \times \frac{1}{g} \quad (1)$$

$$\bar{\rho} = \left| \frac{P_n}{h_0 - h_n} \right| \times \frac{1}{g} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\rho}$ は泥水の平均密度、 n は圧力センサの数、 P_i は*i*番目の圧力センサの測定値、 P_n は最深部の圧力セン

サの測定値, \bar{P} は全センサの測定圧力の平均値, h_i は水槽底盤から i 番目の圧力センサまでの高さ, h_n は水槽底盤から最深部の圧力センサまでの高さ, \bar{h} は全センサの平均高さ, h_0 は水槽底盤から泥水液面までの高さ, g は重力加速度である。

この装置は, PLC (Programmable Logic Controller) に接続して使用することを前提としており, PLC によって圧力センサで得た測定値を記録したうえで, 前述の式によって泥水の平均密度を自動算出する。また PLC の WEB サーバ機能による遠隔地での測定結果の確認や取得データのクラウド転送など, 管理作業を合理化する複数の拡張機能も備えている⁶⁾。さらに, 本装置は土・水の投入と混合, 排出を繰り返し行う屋外の調泥水槽内で使用するため, ひずみゲージ式の圧力センサが外気と懸濁液に繰り返し曝されることで温度変化によるみかけのひずみが生じ, 測定精度を低下させる恐れがある。この課題に対して本装置では, 各圧力センサに熱電対を併設することで測定時の温度を記録し, 各センサの温度特性を用いて測定値の温度補正を行うという測定精度向上の工夫も備えている⁷⁾。

4. 泥水製造工程における現場検証測定

4.1 測定の概要

開発装置の適用性・有効性の検証を目的として, 既存の流動化処理土製造プラントに本装置を設置し, 同所で恒常に実施されている泥水製造作業において泥水密度の測定を行った。同プラントでは, 図-3 に示す寸法の水槽内に母材となる土と泥水を投入し, バックホウで混合することによって調整泥水を製造している。

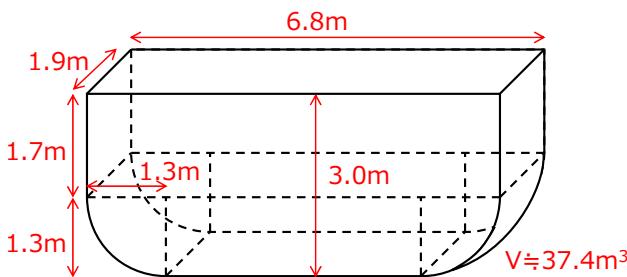


図-3 調泥用水槽の概略内寸法

Fig.3 Dimensions of soil suspension mixing tank

ここでは, 圧力センサを 0.25m 間隔で計 7 個設置した長さ約 2.2m のアルミフレームを密度測定装置として水槽側面内側に固定し, 泥水から作用する圧力を測定した(図-4)。また, アルミフレーム上端に設置した

レーザ距離計で水槽内の液面水位を別途測定することによって, 液面に対する各圧力センサの深度を特定している。図-4 には圧力センサ設置位置の詳細も示す。なお, 泥水の製造には砂分と細粒分を相応に含む建設発生土が使用されていたが, 実験上の都合により使用された土の物性値は確認できなかった。

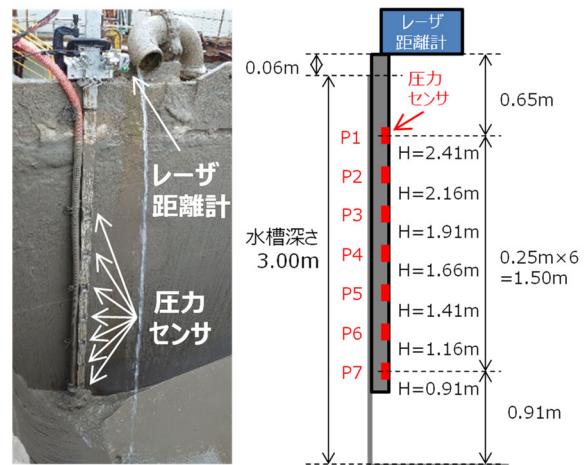


図-4 密度測定装置の設置状況と設置高さ

Fig.4 Installation of pressure gauges

4.2 泥水製造作業の詳細

測定結果の提示・考察に先立ち, ここでは泥水製造作業の一連の流れを詳述する。製造バッチごとの状況によって若干の差異はあるものの, 泥水製造作業は概ね以下の手順で実施された。

Step1 水および土の投入: 水はポンプ移送によって, 土はバックホウ (バケット容量 1.4m³) によって, いずれも水槽上部から投入される。それぞれの投入量はバックホウオペレータが泥水の状況を見ながら決定しており, 測定時の土の投入量は 4~10 回とバッチごとに差が見られた。投入順序には特に決まりがないものの, 水の投入を開始した後に土の投入を開始し, 水, 土の順で投入を停止する場合が多く見られた。

Step2 水と土の混合: まず底部に堆積した土塊をバケットでくい, バケット内の攪拌翼で繰り返し土塊をほぐす。バケットに土塊が留まらなくなった後は, 水槽内でバケットを上下前後させて攪拌する。泥水の状況によっては, この混合作業中に水や土を追加投入する場合も見られたほか, 土が多いと判断されたバッチではバケットで土を除去する場合もあった。

Step3 採取泥水による密度確認: 土と水が十分に混合されたとオペレータが判断したタイミングで測定者に指示を出し, 測定者が柄杓を用いて泥水を採取し隣接する試験室内で泥水の密度を測定する。目視観察に

よれば、泥水は液面から30cm程度の比較的浅い深度において採取され、採取量は1.5L程度であった。なお、ここで測定された泥水密度を従来手法による測定結果とし、後述の開発装置の測定結果との比較に用いた。

Step4 磯の除去と泥水の排出：泥水密度が目標範囲内にあることが確認された後、底部に堆積した磯をバケットで除去して泥水の製造を完了し、製造した泥水は水槽底部から貯留槽に排出される。磯の除去回数は3～6回程度とやはりバッチごとに差が見られ、ここでもオペレータの経験に基づく判断がなされていた。

このような手順で実施された泥水製造作業について、ここでは計8バッチで圧力値の測定と泥水密度の推定を実施し、測定値の傾向を詳細に分析するとともに、

開発装置による推定密度の妥当性を検証した。

4.3 測定結果

図-5に測定結果の一例として、特定の1バッチで測定された水槽水位、センサ圧力値、前述の2式で推定した密度の経時変化を示す。今回の測定では、120回/分の頻度で水槽水位と圧力値を測定し、泥水の密度を推定している。なお、例示したバッチでは経過時間0秒とした時点までに大半の水とバケット1杯分の土が先行投入されていた都合から、図中の記録はその後の4回の土の投入、バケット1杯分の土の除去、約60秒間の水の投入、試料採取、3回の磯の除去、泥水の排出という作業において測定されたデータとなっている。以下に作業手順に沿って測定結果を詳述する。

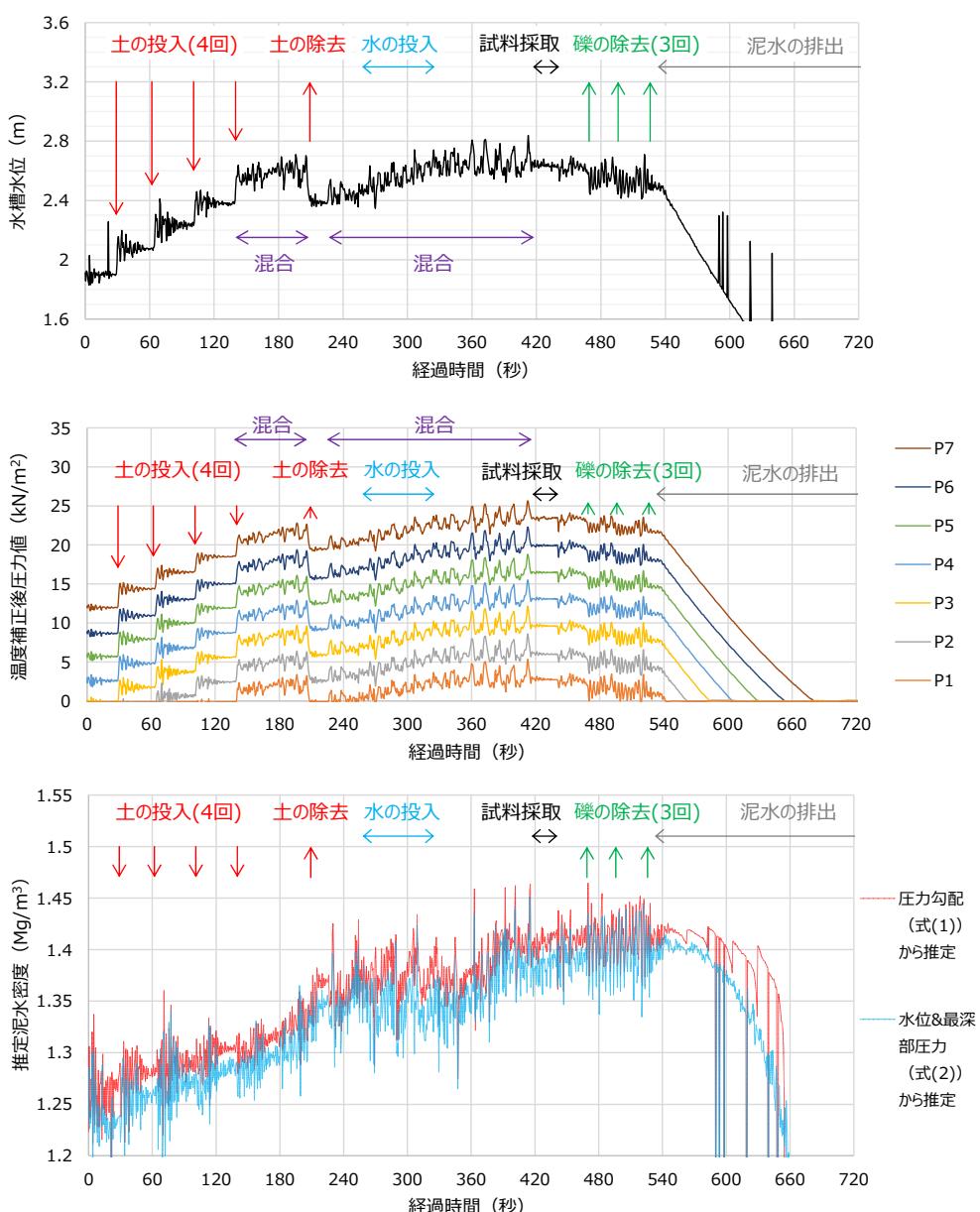


図-5 泥水製造作業における水槽水位・センサ圧力値・推定泥水密度の経時変化

Fig.5 An example of the time history of measured values and estimated soil suspension densities during the manufacturing process

土投入時：土の投入によって水槽水位が段階的に増加し、これに連動して圧力値も段階的に増加しているが、泥水密度の増加程度はその後の混合区間に比べて低調である。即ち、ここで生じた圧力値の増加は土の投入による水位増加が主な要因と解釈され、投入された土は混合されずに底部に堆積するなどした結果、泥水密度の増加が限定的になったものと考えられる。

混合区間：土の投入がないため水槽水位はほぼ一定であるが、圧力値・泥水密度ともに顕著に増加している。即ち、ここで生じた圧力値の増加は混合に伴う土の分散によるものと解釈され、堆積していた土の分散が進むことで泥水密度が増加したと考えられる。

土除去時：オペレータが余分と判断した土を除去することで水槽水位が減少し、これに連動して圧力値も明確に減少しているが、一方で泥水密度は引き続き増加傾向にある。即ち、ここで生じた圧力値の減少は土の除去による水位減少が主な要因と解釈され、混合が進むことによる泥水密度の増加は引き続き継続しているものと考えられる。

水投入時：土除去後の混合作業においてオペレータの判断で水を追加投入したため、その間の水槽水位は増加傾向にある。ここでは圧力値も増加傾向にある一方、泥水密度はほぼ横ばいで推移している。即ち、ここで生じた圧力値の増加は水の投入による水位増加と混合による土の分散の両者に起因していると解釈され、水の投入による密度低下と混合による密度増加が同時に生じた結果、ここでは両者がバランスして密度変化が生じなかつたものと推察される。その後試料採取まで混合作業を継続した区間では、土・水の投入がないため水槽水位はほぼ一定ながら圧力値・泥水密度は増加しており、ここでも混合によって土の分散が進んだものと理解される。

試料採取：品質確認用の泥水採取のために混合作業を24秒程度停止したことから、水槽水位の変動が収束するとともに圧力値も一様になる様子が確認できる。その間、泥水密度もほぼ変化なく推移している。ここで図-6には、試料採取開始時（経過時間417秒）と採取終了時（経過時間441秒）、および、その中間時点（経過時間429秒）に測定された泥水圧力の深度分布を示す。同図に示す通り、いずれの時点においても圧力値の深度分布は直線で精度よく近似されていることから、試料採取中の水槽内の泥水密度は少なくとも最深部センサより浅い範囲では一様であったものと判断される。この結果は、液面から30cm程度の比較的浅い深度において採取された泥水の密度（従来手法により

測定）と、液面から最大1.5m程度の深度範囲にある泥水を対象として開発装置で推定される密度とを比較することの妥当性を示している。

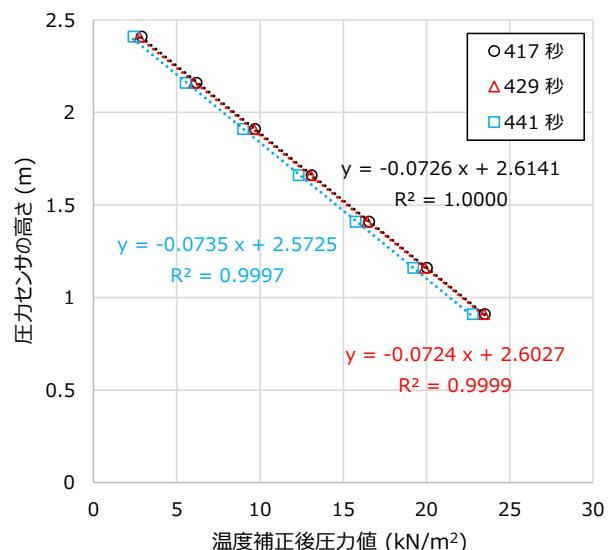


図-6 密度確認用泥水採取中の泥水圧力の深度分布

Fig.6 Depth distributions of measured pressure values during collecting sample in the example batch

礫除去時：礫分の除去に伴って水槽水位・圧力値が若干低下しているものの、泥水密度はほぼ一定で推移している。即ち、ここで生じた圧力値の減少は礫の除去による水位減少が主な要因と解釈され、泥水密度は変化しなかつたものと考えられる。なお、礫除去時は水槽内でバケットが移動するため、泥水には混合作業に類似した作用が加わっているが、これによる密度増加が見られないことから、水槽内の泥水は礫除去までに十分に混合されていたものと推察できる。

上記したように、測定された液面水位や圧力値の変化は泥水製造作業に連動していることから、開発装置は単に泥水の密度を連続的かつ自動で推定するだけではなく、従来はオペレータが主観的に確認・判断してきた泥水の製造状況の可視化も可能としている。また、推定密度の増減も泥水製造作業に則した傾向となっており、製造過程の泥水密度の変化傾向が正しく推定されているものと考えられる。

4.4 従来手法の測定密度と推定密度の比較

図-7には採取泥水を用いて従来の密度測定手法で得られた測定密度と開発装置によって得られた推定密度の比較結果を、測定・推定を実施した計8バッチ分について示す。推定密度は前述した2つの式を用いてそれぞれ求めており、ここでは各バッチの試料採取中の推定密度（約25秒間、50データ程度）を平均して測定

密度との比較に用いた。図-6 でも言及した通り、今回 の測定条件では泥水の密度が深度方向にほぼ一様であつたこともあり、推定式の違いによる差は限定的であった。そのうえで比較結果を考察すると、推定密度は推定の方法によらず測定密度を下回り、密度をやや小さく推定する結果となった。ただし、測定密度と推定密度の差は圧力分布の近似による手法（式(1)）で-0.04～-0.07Mg/m³（平均では-0.05Mg/m³），水位と最深部圧力値による手法（式(2)）では-0.06～-0.08Mg/m³（平均では-0.07Mg/m³）となり、採取泥水の密度を正とした場合の誤差割合は、前者で-2.6～-4.6%，後者では-3.9～-5.1%と、比較的小さい値となった。わずかながら生じたこの差の原因については今回の現場検証測定では特定に至らなかつたが、実務上の推定精度を向上させるという観点では、測定値と推定値の誤差が泥水密度の水準によらずほぼ同等であることを利用し、平均誤差で一律に推定密度を補正することが対応の一手段となる。

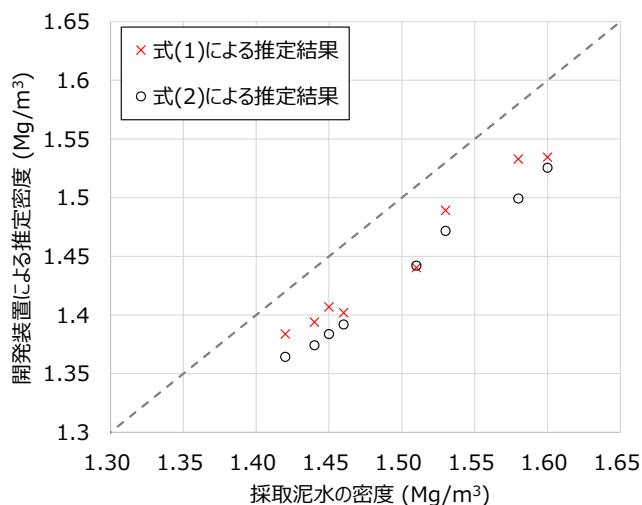


図-7 密度確認用泥水採取中の泥水圧力の深度分布
Fig.7 Comparison of the manually collected sample densities with the estimated densities

5. おわりに

懸濁液の製造過程における密度測定を自動化する装置を開発し、流動化処理土の泥水製造工程においてその適用性を検証した。その結果、1) 従来はオペレータが主観的に確認・判断してきた泥水の製造状況が可視化され、2) わずかな差はあるものの開発装置で推定された泥水密度は従来手法の測定密度と比較的良い一致を示した。今後は、本報で取り扱った泥水に限らず様々な懸濁液の密度管理に開発装置を活用することで、懸濁液製造の合理化を実現していきたい。

参考文献

- 1) 土木研究所, 流動化処理工法総合監理：流動化処理土利用技術マニュアル, 第2版, 技報堂出版, 2008.
- 2) 古川園健朗, 安田浩二, 近藤浩二郎：東京電力（株）鹿島火力発電所7号系列増設工事における石炭灰（原粉）を活用した気泡モルタル系流動化処理土の適用, コンクリート工学, 54巻, 2号, pp.176-182, 2016.
- 3) 西山綾香, 堀知明, 石井裕泰：鹿島火力発電所7号系列増設工事に伴う土木工事の設計・施工の概要～フライアッシュを活用した気泡モルタル系流動化処理土の適用～, 電力土木, No.366, pp.39～43, 2013.
- 4) Hidetake, M., Hiroyasu I., Tomotaka, O. and Toshihiro, O. : Backfilling using fluidized soil-cement mixture made with excavated soil containing old fly ash, Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, pp. 599-604, 2018.
- 5) 松井秀岳：ICT技術を活用した注入薬液・流動化処理土の現場製造管理の自動化に関する研究, 博士論文, 九州大学, 2023.
- 6) 松井秀岳, 藤原齊郁, 池上浩樹：懸濁液製造における密度・粘性統合管理システムの開発, 第15回地盤改良シンポジウム論文集, pp.569-572, 2022.
- 7) 松井秀岳, 藤原齊郁, 池上浩樹：懸濁液製造における密度・粘性統合管理に向けた実験的検討 その4：密度推定に用いる圧力計の温度依存性, 第58回地盤工学研究発表会, 13-5-2-05, 2023.