

ハンドガイド式泥土除去機械による 泥土の液性指数推定に関する室内模型実験

LABORATORY MODEL EXPERIMENT ON ESTIMATION OF LIQUIDITY INDEX OF SLUDGE USING HAND-GUIDED SLUDGE REMOVAL MACHINERY

里見 知昭¹・船木 陸²・高橋 弘³

Tomoaki SATOMI, Riku FUNAKI and Hiroshi TAKAHASHI

¹ 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

E-mail: tomoaki.satomi.c6@tohoku.ac.jp

² 元東北大学大学院環境科学研究科 (現株式会社 INPEX)

E-mail: funaki.riku.r2@alumni.tohoku.ac.jp

³ 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

E-mail: hiroshi.takahashi.b3@tohoku.ac.jp

Key Words: disaster sludge removal machinery, force sensing, liquidity index

1. はじめに

水害で発生した土砂(災害発生土)は、大量の水を含み軟弱な状態で災害現場に堆積することが多い。救援・復旧作業を早急に行うためには、災害発生土の除去および搬出が不可欠である。しかし、これらの作業には二つの問題がある。一つ目は、作業方法である。現状は、災害発生土をシャベル・スコップで除去することが多く、肉体的な負担が大きい。加えて、わが国は少子高齢化が進行しており、高齢者はボランティアに頼らざるを得ず、人手不足が懸念されている。二つ目は、災害発生土の状態である。災害発生土は軟弱で流動性が高いため、ハンドリング性が低い。ハンドリング性を即時に改善するために、高吸水性ポリマーが活用されている^{1), 2)}。しかし、高吸水性ポリマーの適した添加量は土の液性指数に依存するため^{3), 4)}、土の液性指数の把握が不可欠である。

以上二つの問題を解決するため、家庭用除雪機のような容易に操作できる泥土除去機械(図-1)を被災地に投入することを考えた。機械で泥土を除去しながら土の液性指数を推定し、除去した泥土に高吸水性ポリマーを添加してハンドリング性を改善でき

れば、迅速な救援・復旧につながる。そこで本研究では、泥土除去機械の泥土除去機構を模擬した室内模型実験を行い、泥土除去機構から得られる力覚情報を用いて土の液性指数を推定する手法について検討する。

2. 室内模型実験

模型実験装置を図-2に示す。本装置(図-2a)は、泥土除去機構(ブレード部およびベーン部)、土槽(長さ600mm、幅250mm、高さ70mm)、ローラー、モーター、モーターコントローラで構成される。本実験は、泥土除去機構を固定して土槽を移動させることで、

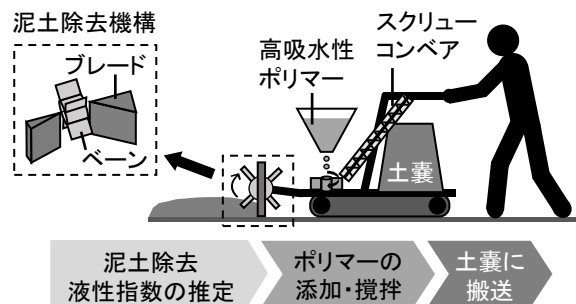
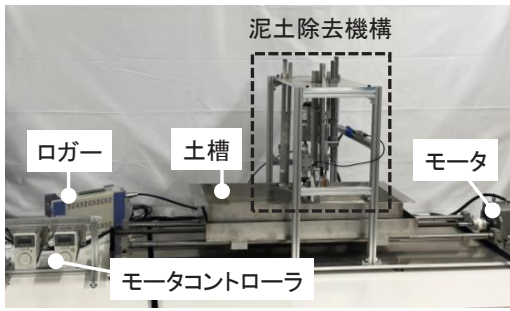
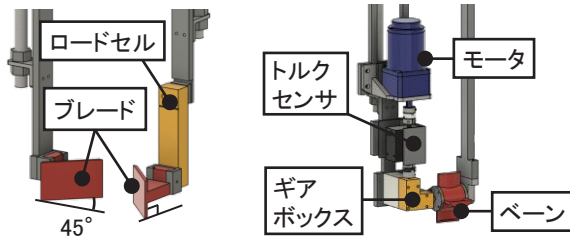


図-1 泥土除去機械のイメージ図



(a) 外観



(b) ブレード部

(c) ペーン部

図-2 模型実験装置

泥土除去を再現した。ブレード部（図-2b）は、ブレード（幅 80 mm、高さ 50 mm、地表面との角度 90 度、進行方向に対する角度 45 度）、ロードセル（定格容量：60 N）から成る。ペーン部（図-2c）は、ペーン（幅 40 mm、高さ 20 mm）、モータ、トルクセンサ（定格容量： $\pm 1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ）、ギアボックスで構成される。泥土除去機構の寸法および速度は、想定する実機を模型で再現するため、相似則⁵⁾にもとづいて 1/8 スケールに設定した。具体的には、ブレードおよびペーンの寸法は先述したとおりであり、ブレードの移動速度は 10 mm/s、ペーンの回転速度は 25 rpm に設定した。土の掘削深さ（泥土除去深さ）は、過去の災害の堆積土砂厚さを参考に^{6), 7), 8)}、5 mm とした。

地盤条件を表-1 に、使用した土試料の粒径加積曲線を図-3 に示す。細粒分含有率 F_c は過去の災害調査^{9), 10)} を参考にした。細粒分含有率は便宜上、硅砂 6 号に対するシルトおよび粘土（笠岡粘土、トククレ）の混合質量百分率とした。飽和度 S_r は比較的高い領域を対象にし、均質な地盤を作製するために乾燥密度は 1.4 Mg/m^3 で統一した。

供試地盤の作製方法は、次のとおりである。飽和度 60% の供試地盤は、設定した含水比になるように土試料に加水し、所定の乾燥密度になるように締め固めた。飽和度 100% の供試地盤は、はじめに含水比 5% の土試料を所定の乾燥密度になるように締め固めたのち、土槽下部から給水させて供試地盤を飽和させた。飽和度 80% の供試地盤は、はじめに飽和度 100% の供試地盤を作製し、土槽下部から所定の量を排水させた。設定した飽和度に達したことを確認す

表-1 地盤条件

土試料	細粒分含有率 F_c (%)	飽和度 S_r (%)
硅砂 6 号	0	60, 80, 100
硅砂 6 号 + シルト	10, 20, 30, 40	60, 80, 100
硅砂 6 号 + 笠岡粘土	10, 20, 30	60, 80, 100
	40	80, 100
硅砂 6 号 + トククレ	20, 40	60, 80, 100

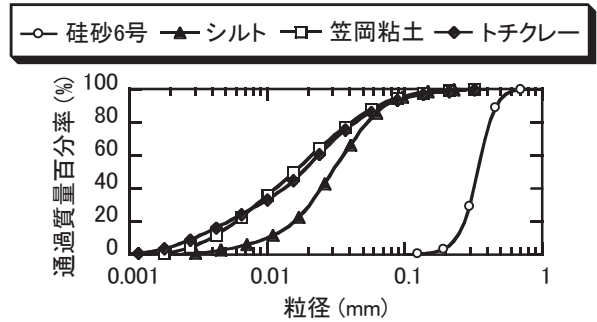


図-3 土試料の粒径加積曲線

るため、供試地盤の土を採取して含水比を測定した。ただし、硅砂と笠岡粘土の混合土 ($F_c=40\%$, $S_r=60\%$) では供試地盤を均質に作製できなかったため、地盤条件から除いた。本実験は同一の地盤条件下で 3 回実施した。ただし、飽和度 80% の供試地盤は、各実験の飽和度が異なったため、実験結果は平均せずに 3 回の実験結果をそのまま用いた。

3. 実験結果および考察

ブレードに作用する掘削抵抗力およびペーンに作用するトルクの計測結果の例を図-4 に示す。計測データのノイズ除去のため、計測データを平滑化した。全ての計測結果は紙面の都合により割愛するが、掘削抵抗力およびトルクの変動傾向は図-4 と同様であった。トルクのグラフは、細粒分含有率の違いによるトルクの変動を見やすくするため、グラフの途中を省略した (b, c)。なお、省略したトルク変動の傾向は、表示したトルク変動の傾向とおおむね同じである。トルクが一定の周期で増減を繰り返したのは、ペーンの回転に伴う土との接触の有無が影響した。図-4 の硅砂のみの結果 (a) より、飽和度が高くなるにつれて掘削抵抗力およびトルクは小さくなった。一方、シルトや粘土が含まれると (b, c, d)、硅砂のみの場合と比べて掘削抵抗力およびトルクが

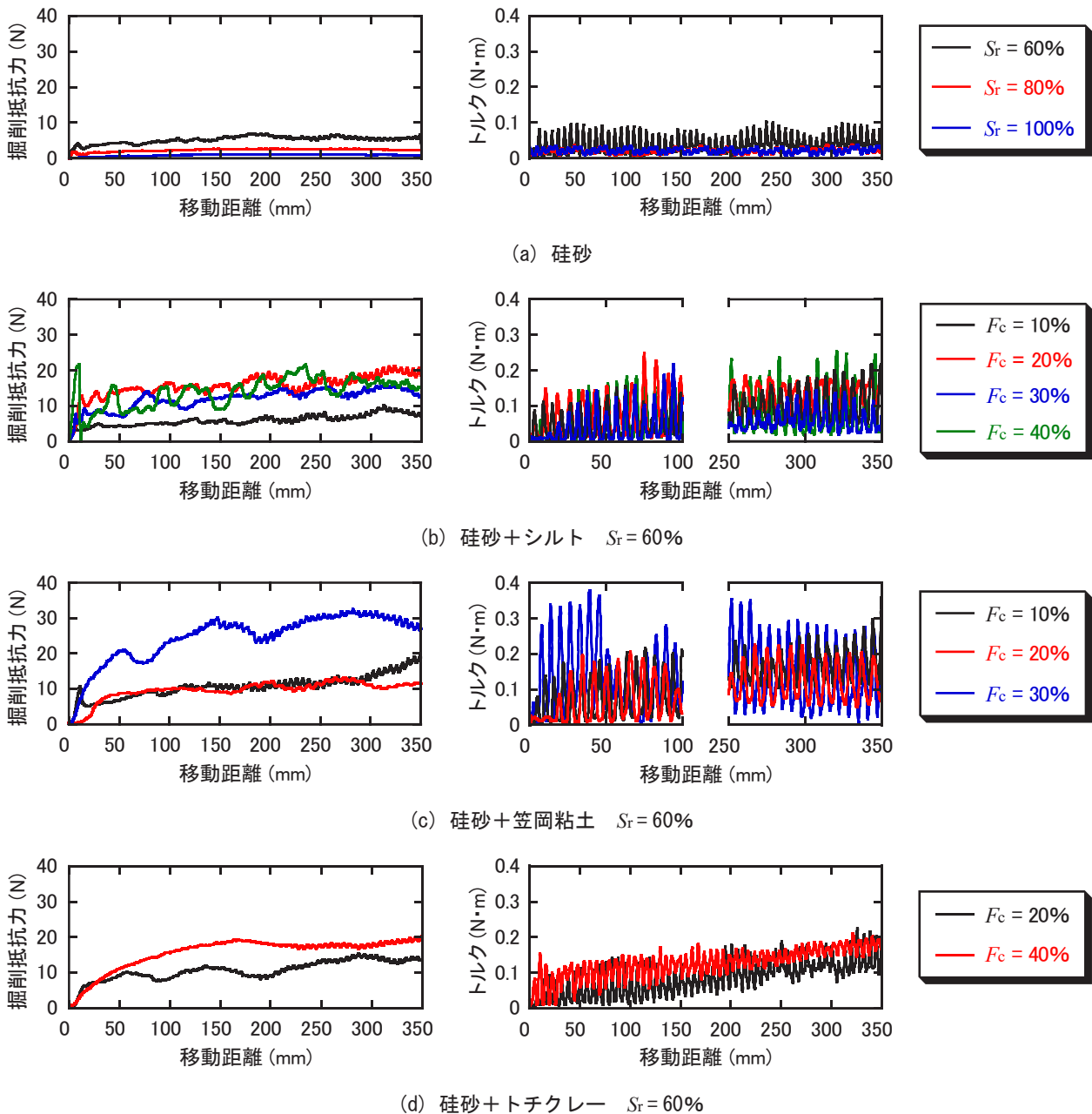


図-4 掘削抵抗力（左）およびトルク（右）の計測結果の例

大きくなることが確認された。

ブレード前方に土が堆積する様子を図-5 に示す。図-5 より、飽和度の増加に伴い土の流動性が高まり、堆積土の量が少なくなっている。この挙動が掘削抵抗力およびトルクの変動に影響を及ぼしたと推察される。

ブレードに作用する掘削抵抗力およびベーンに作用するトルクの計測結果から、力覚パラメータ（平均掘削抵抗力 F_a 、平均トルク振幅 T_a ）を取得した。実験開始直後はブレードとベーンの動き出しによってデータが不安定であったため、泥土除去機構の移動距離が 50 mm から 350 mm までのデータを用いた。平均掘削抵抗力 F_a は計測データの平均値である。

一方、平均トルク振幅 T_a は計測トルクの各ピーク値とボトム値の差を算出し、それらを平均した値である。計測トルクそのものを平均しなかったのは、次の理由による。ベーン前方に堆積する土の量が増加するに従って、ベーンに作用するトルクが大きくなる場合があったからである。よって、ベーンに作用するトルクはベーンの回転による土のせん断抵抗だけでなく、堆積土砂の影響を受けると推察し、トルクの変動量であるトルク振幅で整理した。

力覚パラメータ（平均掘削抵抗力、平均トルク振幅）と飽和度との関係を図-6 に示す。図-6 より、飽和度が増加するにつれて平均掘削抵抗力および平均トルク振幅が減少した。飽和度 60% の場合は、細粒



(a) 珪砂 $S_r = 60\%$



(b) 珪砂 $S_r = 80\%$



(c) 珪砂 $S_r = 100\%$



(d) 珪砂+シルト (20%) $S_r = 60\%$

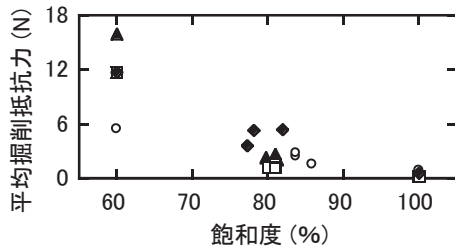


(e) 珪砂+笠岡粘土 (20%) $S_r = 60\%$

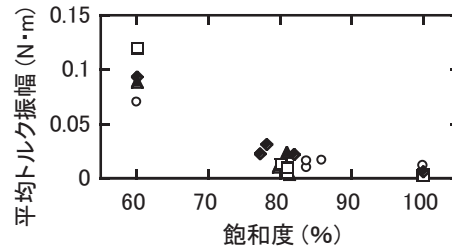


(f) 珪砂+トチクレー (20%) $S_r = 60\%$

図-5 ブレード前方に土が堆積する様子



(a) 平均掘削抵抗力



(b) 平均トルク振幅

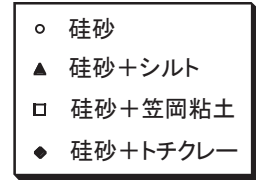


図-6 力覚パラメータと飽和度との関係 ($F_c = 20\%$ を例に)

分が平均掘削抵抗力および平均トルク振幅に影響を及ぼしていることが確認された。一方、飽和度が80%より高くなると、細粒分によらず力覚パラメータはおおむね同じ値であった。これは、土粒子間に形成されたメニスカス水によって生じるサクシオンが力覚パラメータに影響を及ぼしたためである。

このように、力覚パラメータは飽和度との間に負の相関関係を持つことが明らかとなった。飽和度は液性指数と調和的であることから、力覚パラメータから液性指数を推定できる可能性がある。

4. 液性指数の推定

(1) 液性指数

液性指数 I_L は式(1)で定義される。

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1)$$

ここで、 w_L は液性限界、 w_p は塑性限界、 w は含水比である。液性限界 w_L および塑性限界 w_p は、それぞれ液性限界試験（地盤工学会 JGS0142：フォールコ

ーンを用いた土の液性限界試験方法）、塑性限界試験（JIS A 1205）から求めた。液性限界試験は JIS A 1205 で基準化されているが、塑性が低い土では溝切りが困難であったため、フォールコーンを用いた方法を採用した。塑性限界 w_p が NP (Non plastic : 非塑性) になった場合は、土の液性指数を算出するため便宜上 $w_p = 0\%$ とした。

(2) 推定精度の評価指標および目標設定

構築した推定式の精度を評価する指標に、平均平方二乗誤差率 (Root Mean Squared Percentage Error : RMSPE, 式(2)) を用いた。

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i - m_i}{m_i} \right)^2} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 n はデータ数、 m_i は条件 i における液性指数の実測値、 e_i は条件 i における液性指数の推定値である。RMSPE は、推定値と実測値との差を実測値で除しているため、数値の桁 (スケール) が異なる

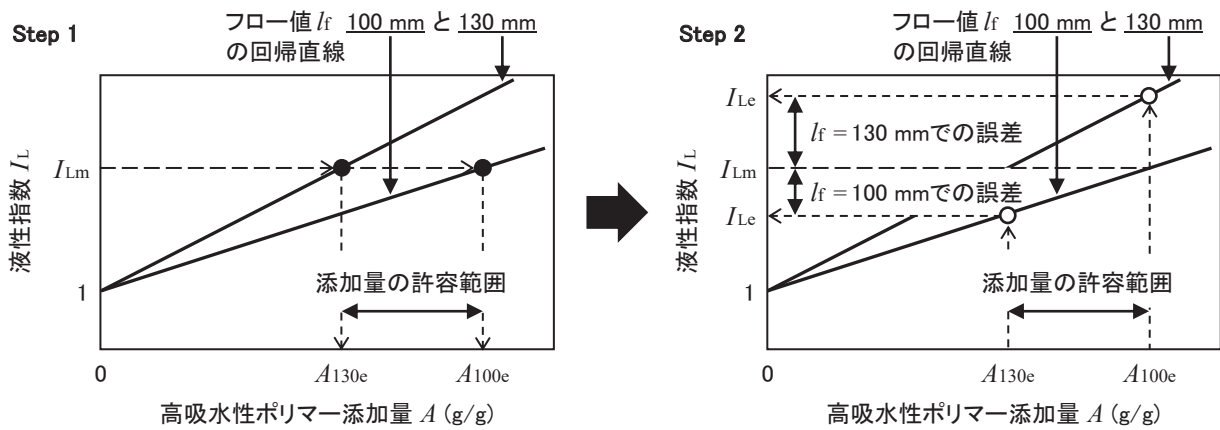


図-7 推定精度の目標設定の概要（記号の下付き文字 m は実測値，e は推定値を意味する）

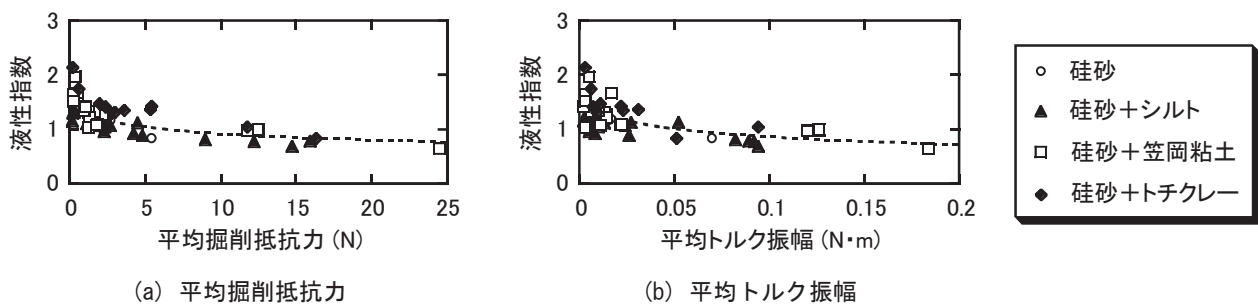


図-8 液性指数と力覚パラメータとの関係

場合に適した指標とされている。

推定精度の目標設定の概要を図-7に示す。目標設定は2つのステップから成り、液性指数と高吸水性ポリマー添加量(以降では、ポリマー添加量と記す)との回帰直線^{3), 4)}を用いる。ここで、回帰直線におけるモルタルフロー試験のフロー値 l_f の最小値と最大値は、それぞれ100 mm(流動性を持たない泥土)、130 mm(泥土を運搬することができる最大値¹¹⁾)を採用した。

Step 1では、フロー値が100 mmと130 mmに対する回帰直線に液性指数の実測値を代入すると、それぞれのフロー値に対するポリマー添加量が推定され、添加量の許容範囲が設定される。次のStep 2では、推定されたポリマー添加量を回帰直線に代入すると、液性指数の推定値が得られる。以上2つのステップを上野らの試験結果^{3), 4)}に基づいて行い、フロー値が100 mmと130 mmでの誤差率の二乗(式(2)の平方根内に相当)を求め、式(2)と同じように整理すると18.5%と得られた。そこで、推定精度の目標は「 $RMSPE \leq 18.5\%$ 」と設定した。

(3) 推定結果

液性指数と力覚パラメータとの関係を図-8に示す。その関係をもとに、液性指数の推定式を式(3)の

ように導出した。

$$I_L = k_1(f + k_2)^{-k_3} \quad (3)$$

ここで、 I_L は液性指数、 f は力覚パラメータ(平均掘削抵抗力 F_a 、平均トルク振幅 T_a)、 k_i ($i=1, 2, 3$)は回帰係数である。図-8に液性指数と力覚パラメータとの関係から求めた回帰曲線を示しており、その曲線は式(3)に基づいている。

平均掘削抵抗力を用いた場合のRMSPEは15.4%であり、平均トルク振幅を用いた場合のRMSPEは17.9%であった。両方とも推定精度の目標値は満足したものの、平均トルク振幅よりも平均掘削抵抗力を用いたほうが液性指数の推定に適していることがわかった。そのような結果が得られた要因について考察する。泥土除去時は、ブレードのほうがベーンよりも先に前方の泥土に接触する。そのため、ブレードに作用する力は泥土のせん断によって生じた抵抗力が主である。一方、ベーンの場合は、泥土のせん断によって生じた抵抗力だけでなく、ブレードでせん断された泥土の影響も受ける。よって、ベーンに比べて、泥土を純粋にせん断するブレードのほうが土の液性指数の推定に適していると考えられる。

平均掘削抵抗力を用いた場合の液性指数の推定値と実測値との比較結果を図-9に示す。図-9より、液

性指数が約 1.5 以上の推定値と実測値にばらつきが見られる。これは、平均掘削抵抗力そのもののばらつき（図-8）が推定に影響したと推察される。しかしながら、泥土除去時の力覚情報を用いて土の液性指数を推定し、本研究成果と上野らの成果^{3), 4)}を組み合わせることで泥土除去から吸水性ポリマーの添加量を推定できる可能性を見いだしたことは意義深い成果である。

5. むすび

本研究では、泥土除去機械の泥土除去機構（ブレードおよびベーン）を模擬した室内模型実験を行い、泥土除去機構から得られる力覚情報を用いて土の液性指数を推定する手法について検討した。得られた成果は次のとおりである。

- 1) ブレードに作用する平均掘削抵抗力およびベーンに作用する平均トルク振幅は、飽和度の増加に伴い減少することが確認された。
- 2) 平均掘削抵抗力あるいは平均トルク振幅を用いて液性指数を推定する式を構築した。その結果、平均トルク振幅よりも平均掘削抵抗力を用いたほうが推定精度は高く、目標精度を満足する推定式を構築することができた。

今後は、液性指数が約 1.5 以上の推定精度を向上させるため、掘削抵抗力波形の詳細な検討が課題である。また、実際の災害発生土に即した検討が必要である。具体的には、泥土の種類（有機物および礫が含有する場合）や状態が不均質な場合、泥土の堆積厚さが一定でない場合におけるブレードおよびベーンに作用する力波形の解析と、その解析結果および泥土の状態・状態の把握に基づく泥土の液性指数推定手法の構築が課題である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP22H01733 の助成を受けたものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 渡邊勉, 小宮一仁, 清水英治: 建設汚泥の改良に関する基礎的研究, 廃棄物学会論文誌, 12 巻, 1 号, pp.10-16, 2001.
- 2) 井出一貴, 三浦俊彦, 山田祐樹, 高田尚哉, 光本純, 稲積真哉: 土壌の分級選別処理における速効型中性系土質改良材の開発, 材料, 69 巻, 1 号, pp.69-74, 2020.
- 3) Ueno, K., Ryuo, K., Satomi, T., Takahashi, H.: Experimental Investigation on Flow Suppression and

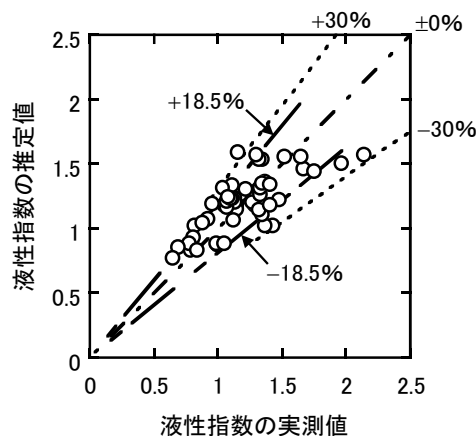


図-9 液性指数の推定値と実測値との比較

Modification of High Water Content Soil Using Water Absorbent Polymer and Fiber Cement Stabilization, *Advanced Experimental Mechanics*, 6, pp.99-103, 2021.

- 4) 上野耕平: 高吸水性ポリマーを用いた災害発生土の搬出および再資源化に関する研究, 東北大学博士論文, 2023.
- 5) Baek, S. H., Kim, J.: Applicability of the 1g similitude law to the physical modeling of soil-track interaction. *Journal of Terramechanics*, 85, pp.27-37, 2019.
- 6) 一般社団法人 廃棄物資源循環学会: 津波堆積物処理指針 (案), p.4, 2011.
- 7) 松富英夫, 鎌滝孝信: 2018 年 7 月西日本豪雨による真備町氾濫域における土砂堆積の実態と氾濫水密度の概算, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75 巻, 2 号, pp. I_1477-I_1482, 2019.
- 8) 山下啓, 菅原大助, 門廻充侍, 有川太郎, 高橋智幸, 今村文彦, 高知県における最大クラスの津波による地形変化と潜在的影響の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75 巻, 2 号, pp. I_685-I_690, 2019.
- 9) 里見知昭, 佐藤優樹, 高橋弘: 平成 25 年山形・新潟豪雨に伴う土砂災害調査, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.91-96, 2014.
- 10) 高井敦史, 川島光博, 勝見武, 乾徹, 岩下信一, 大河原正文: 東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土砂の品質とその変化, 土木学会論文集 C (地圏工学), 72 巻, 3 号, pp. 252-264, 2016.
- 11) 高橋弘, 森雅人, 山崎淳: 繊維質固化処理土の可搬性の観点からみた古紙および薬剤の最適添加量について, 日本建設機械化協会東北支部, 平成 18 年度新技術情報交換会論文集, p.4, 2006.

(2024. 5. 31 受付)