

双対式土圧測定による泥土圧シールド掘削土の性状判定に関する室内模型実験

池上 浩樹¹・石井 裕泰²・志田 智之³・松井 秀岳⁴・藤原 斉郁⁵

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: ikghrk02@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: hiroyasu.ishii@sakura.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目 25-1)
E-mail: shida@ce.taisei.co.jp

⁴正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: mtihdt00@pub.taisei.co.jp

⁵正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: tadafumi.fujiwara@sakura.taisei.co.jp

近年、泥土圧シールドにおける掘削管理の改善や高度化の必要性が高まっており掘削土の性状判定に関する各種検討が進められている。著者らは、チャンバー内の掘削土性状を攪拌翼と固定翼それぞれの側面にて、周辺掘削土の相対的な流動方向に正対する面、並びにその背面に測定点を設ける「双対式土圧測定」の検討を進めており、その適用性、有用性の検討を目的とした室内模型実験装置を考案した。本装置を用いた実験では、試料の粒度と塑性流動状態、土槽内の拘束圧、攪拌翼模型の移動速度を実験パラメータとして土圧を測定した。その結果、相対関係にある土圧計の測定値の差分の絶対値と従来の掘削土性状の判定指標であるスランプ値に相関性が見られ、拘束圧の違いに依らず「双対式土圧測定」によって掘削土の塑性流動性を判定できる可能性が示唆された。

Key Words: earth pressure balance shield tunneling, pressure measurement, slump, model test

1. はじめに

地盤が比較的軟弱な我が国の都市部において、シールド工法は地下のライフラインとなる上下水道や道路、鉄道、雨水貯留管、地下河川などを構築する非開削工法として広く用いられている。シールドマシンの主な形式として泥水式と土圧式が挙げられ、地盤条件や設備ヤードの制約、工費等に基づき適否を判断するが、わが国では土圧式、特に泥土圧シールドの実績が秀でている。今後も国内外での活用が見込まれる本方式に関する近年の技術課題として、主に掘削断面の大型化、掘削延長の長距離化、適用箇所の大深度化などへの対応が進められている中、周辺地盤の変状を極力抑えるための掘削管理についても改善や高度化の必要性が高まっている。

図-1 に泥土圧シールドマシンの概要を示す。泥土圧シールドの施工では、掘削前面の地山を保持するために

シールド前面のカッターヘッドとバルクヘッドに挟まれた空間（チャンバー）内の掘削土を介して圧力を伝達する必要がある。安定した掘進には適度な流動性と分離抵抗性などを確保した「塑性流動状態」を保つことが不可欠である。チャンバー内の掘削土を塑性流動状態に保つためには、掘削する地盤に応じて添加材や水の添加量を

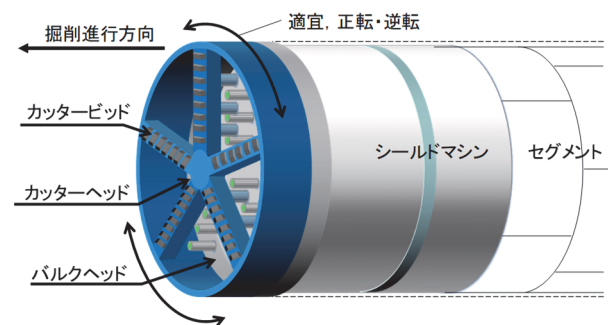


図-1 泥土圧シールドマシンの概要

調整する必要がある、この調整は、スクリーコンベアを介してバルクヘッド背面に排出された掘削土の手触りやスランプ値といった経験則や指標値によって判断されてきた。しかしながら、より論理的かつ正確な性状判定には、性状判定の指標が客観的であること、その指標が実際に塑性流動状態を保持すべき圧力条件を考慮していること、さらに指標値の取得と評価がリアルタイムであることが望ましく、塑性流動状態の評価方法、および、そのための指標値を得る測定方法の両面で検討の余地があると考えられる。

近年、掘削土の性状判定に関して様々な取組み^{1) 2) 3)}が見られるなか、著者らは、カッターヘッド背面の攪拌翼とバルクヘッド前面の固定翼それぞれの側面にて、周辺の掘削土の相対的な流動方向に正対する面、並びにその背面となる面に測定点を設ける「双対式土圧測定」を使用し、カッターヘッドの回転に伴って作用する土圧を測定することで、掘削土の性状を判定する手法を検討している。チャンバー内で掘削土に関する測定を行い、その性状を判定しようとする点は既往の取組みと共通するが、従来単体で用いられる土圧計を双対式に設置することで、カッターヘッドが正転・逆転のいずれの方向に回転しても測定が可能であること、カッターヘッドの回転

に伴う土圧計の深度変化で生じる静止土圧の変化を背面側の土圧計で測定できる可能性があること、等の新規性を有する。

本報では、この新たな土圧測定方式に関して実施した模型実験の結果について報告する。

2. 室内模型実験による双対式土圧測定

新たに考案した「双対式土圧測定」で測定される土圧の傾向把握を目的に、室内模型実験を実施した。実験では、双対式に土圧計を設置した攪拌翼模型を用い泥土圧シールドのチャンバー内を模擬し、土槽内の試料中を移動させた際に作用する土圧を測定した。また、複数の試料で測定した土圧と塑性流動状態の判断指標であるスランプ値の関係を整理し、双対式土圧測定による従来指標を用いた塑性流動状態の判定可否についても検討した。なお、実験では土圧の拘束圧依存性や速度依存性を確認するため、土槽内の拘束圧と攪拌翼模型の移動速度を実験パラメータとしている。以降に、使用した実験装置、実験条件、実験手順について詳述し、得られた結果を示し考察する。

(1) 実験装置

図-2 に模型実験の概要、図-3 に攪拌翼模型を示す。加压可能な土槽内に試料を密閉し、双対式に土圧計を設置した攪拌翼模型を土槽内で上下に移動させ、土圧を測定した。

土槽は上端に蓋、下端にゴム板と底板を取付けることで試料を密閉する機構となっている。底板とゴム板の間に空気を供給することで土槽内部の試料を加压することができ、蓋の内側に設置した圧力計で試料に作用する圧力を直接確認できるようになっている。土槽の寸法は、内寸で幅 476mm、奥行き 100mm、高さ 500mm である。

攪拌翼模型は、直径 30mm、長さ 50mm の円筒形で、土槽内を移動させるために、土槽外部で昇降可能な試験機に接続されたシャフトの先端に取り付けた。また、攪拌翼模型に付随する土圧計は、礫や砂との衝突による故障を回避するため、移動方向に対して 20 度回転した向きに設置した。

(2) 実験条件

図-4 に実験に使用した試料の粒径加積曲線を示す。同図中に示す泥土化境界線は、泥土圧シールド工法の技術資料⁴⁾に示されているものであり、この線を基準に添加する加泥材が調整される。具体的には、対象地盤の粒度をもとに式(1)、(2)を用いて加泥材の濃度と添加量を算定する。今回の実験では、泥土化境界線の下方（試料

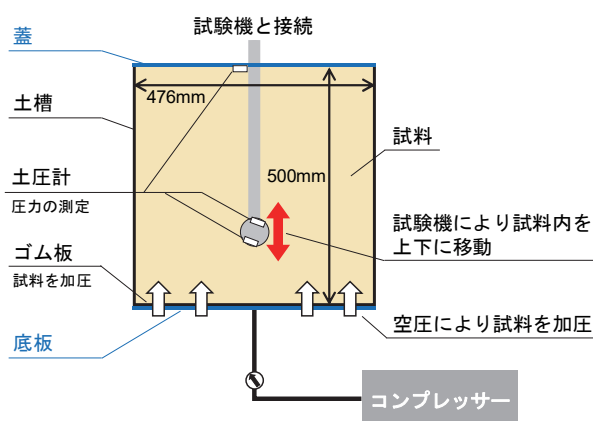


図-2 模型実験の概要（断面図）

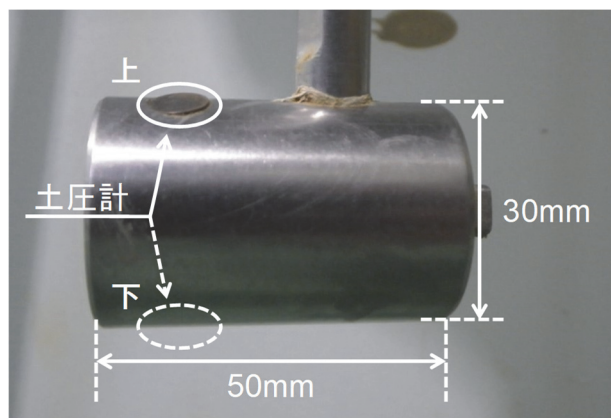


図-3 攪拌翼模型（側面外観）

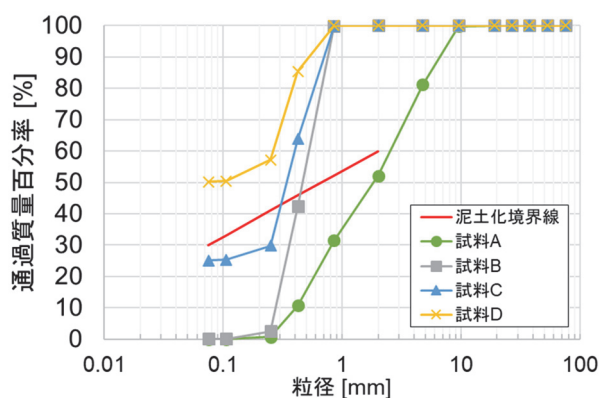


図4 試料の粒径加積曲線

表-1 実験条件

No.	試料	加泥材		スランプ値 [cm]	圧力 [kPa]	移動速度 [mm/分]
		濃度 [%]	混合量 [l/m³]			
1	A	80	480	0.9	0 100 200 500	50 250
2	A	90	540	5.2		
3	B	90	540	1.2		
4	B	80	480	0.6		
5	C	15	540	8.1		
6	C	90	540	3.7		
7	C	水	285	測定不可		
8	D	水	285	8.3		
9	D	15	540	15.5		

A) と上方 (試料D) およびそれを跨ぐ (試料B, C) 粒度となるように珪砂とトチクレーを混合して作製した 4 種類の試料を試験に用いた。

$$D = 2a(30 - P_{0.075}) + 0.5(40 - P_{0.25}) + 0.2(60 - P_{2.0}) \quad (1)$$

$$Q = 6 \times D \quad (2)$$

ここで、

D : 加泥材の濃度(%)

a : 均等係数による係数

均等係数 $U \geq 4$

$$a = 1.0$$

$$4 > U \geq 3$$

$$a = 1.1$$

$$3 > U > 1$$

$$a = 1.2$$

$P_{0.075}$: 0.075mm 通過質量百分率 30%以上は 30

$P_{0.25}$: 0.25mm 通過質量百分率 40%以上は 40

$P_{2.0}$: 2.0mm 通過質量百分率 60%以上は 60

Q : 加泥材の添加量(l/m³)

表-1 に実験条件の一覧を示す。試料 A, B に対して式 (1), (2) により算定された加泥材条件の配合はそれぞれ No.1, No.3 である。試料 C は、算定された濃度を基に式 (2) で算定される混合量では流動しなかったため、目視で流動性が確認できるまで加泥材を加えた配合 (No.5) とした。また、粒度が隣り合う試料 B および試料 C の条件を採用した配合 (No.6, 7) を設定した。試料 D では加泥材濃度・添加量ともにゼロとなるため、試料 D と同様に目視で流動性が確認できるまで水を加えた配合 (No.8), および、粒度の隣り合う試料 C の加泥材条件を採用した配合 (No.9) を設定した。さらに試料 A・B では、塑性流動性を変えた条件として、加泥材条件を相互に入れ替えた配合 (No.2, 3) を設定した。これらの試料について、従来の塑性流動状態の判定指標であるスランプ値を測定した。なお、No.7 はスランプ試験の際に、試料がスランプコーンに付着したため、スランプ値が得られなかった。

これら 9 条件の試料に対して、圧力条件 4 水準、移動速度 2 水準で実験を行い、計 72 ケースの測定を行った。

(3) 実験手順

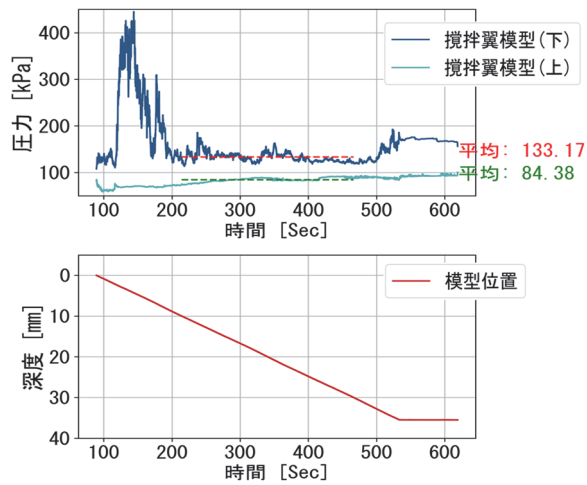
実験は、①攪拌翼模型の上端が蓋から 50mm の位置となるように攪拌翼模型を設置する、②土槽上端まで試料を満たす、③蓋を取付けて試料を密閉する、④底板とゴム板の間に圧力を作用させ、蓋で測定される圧力が所定の圧力になったことを確認する、という手順で準備を行い、その上で、攪拌翼模型の押下げと引上げそれぞれ 370mm を 1 サイクルとして 2~3 サイクルの測定を行った。

3. 実験結果

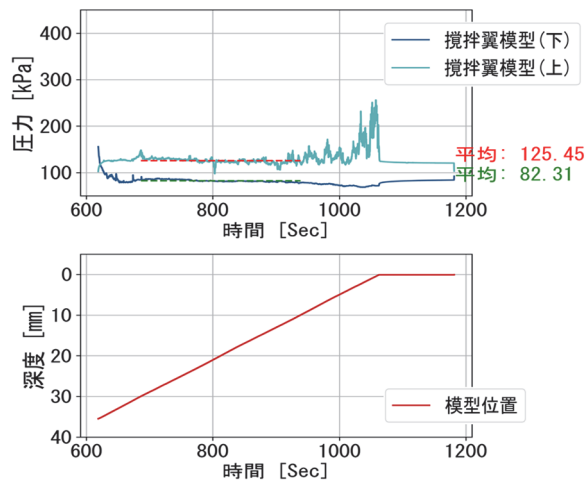
図-5 に実験結果の一例として、No.1 の圧力 100kPa、移動速度 50mm/分の条件で得られた結果を示す。押下げでは、図-5 (a) と (c) のように移動方向前面に位置する攪拌翼模型 (下) の土圧計の値が移動方向背面に位置する攪拌翼模型 (上) よりも大きな値を示し、引上げでは、図-5 (b) のように逆に攪拌翼模型 (上) が攪拌翼模型 (下) よりも大きな値を示した。このように、双対式に設置した土圧計で測定される土圧の大小関係は攪拌翼の移動方向に応じて入れ替わることを確認した。

次に、移動方向前面の土圧に着目すると、1 サイクル目の押下げで移動初期に顕著に増加すること、サイクル数および移動方向によらず移動終盤に増加すること、の 2 点の特徴的な傾向が確認できた。前者については、土槽内の試料が初期状態にあり、塑性状態に至るまでの降伏力のような抵抗が作用した可能性が考えられるが、正確な要因の特定には至っていない。後者については、蓋や底板といった装置上の境界に土圧計が接近したことで土圧が増加したものと考えられる。

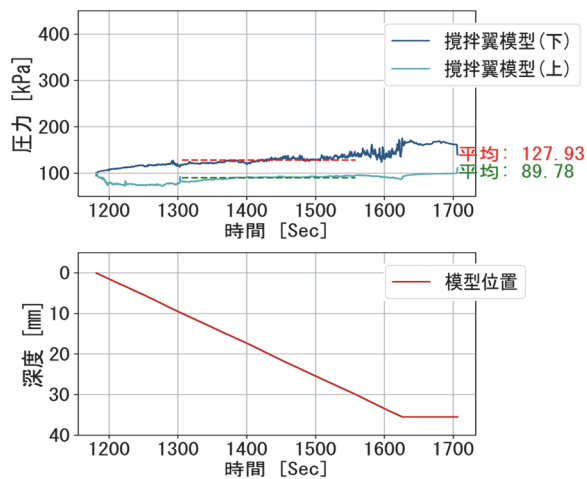
これらの実験事実に対して、本報では塑性流動状態にある試料を対象とした結果の整理を意図することから、ここでは上記 2 点の影響が比較的小さいと考えられる移動中盤 (0~370mm の移動に対して 100~300mm の区間) の土圧を抽出し、その平均値と塑性流動性の従来指標で



(a) 1サイクル目押下げ



(b) 1サイクル目引上げ

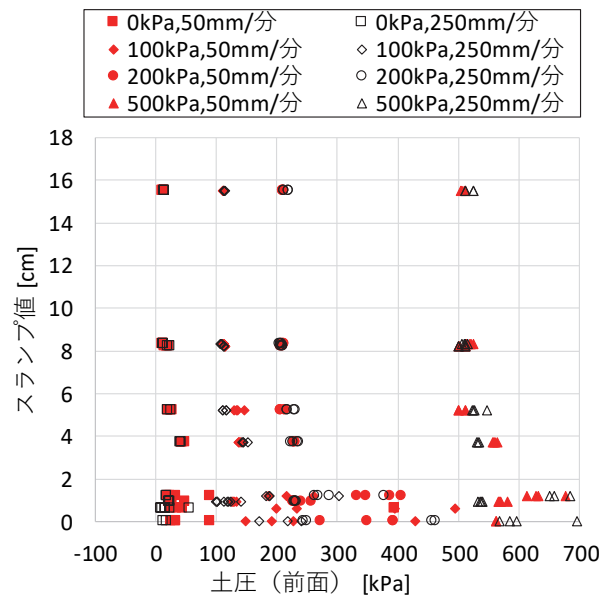


(c) 2サイクル目押下げ

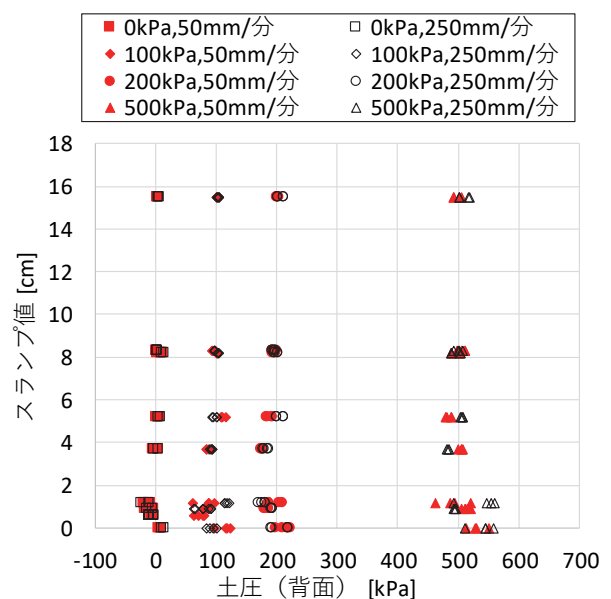
図-5 攪拌翼模型の土圧計の測定値と移動距離の時刻歴変化
(No.1 100kPa 50mm/分)

あるスランプ値との関係を整理した。

図-6 にスランプ値と各ケース移動中盤の平均土圧の関係を示す。なお、スランプ値の測定が出来なかったNo.7については、スランプ値を0として結果を整理した。前面・背面の土圧はどちらも付与した拘束圧に応じて値が変化しており、いずれも拘束圧近傍の値が得られた。前面の土圧は、スランプ値が小さくなるほど拘束圧程度の値から大きくなる傾向がみられた。一方、背面の土圧は、スランプ値に依らず拘束圧程度の値を示した。前面では拘束圧に加えて移動に伴う試料からの抵抗を受けるのに対して、背面ではその影響が小さかったことが上記結果の差につながったものと考えられる。



(a) 移動方向前面側



(b) 移動方向背面側

図-6 スランプ値と土圧の関係

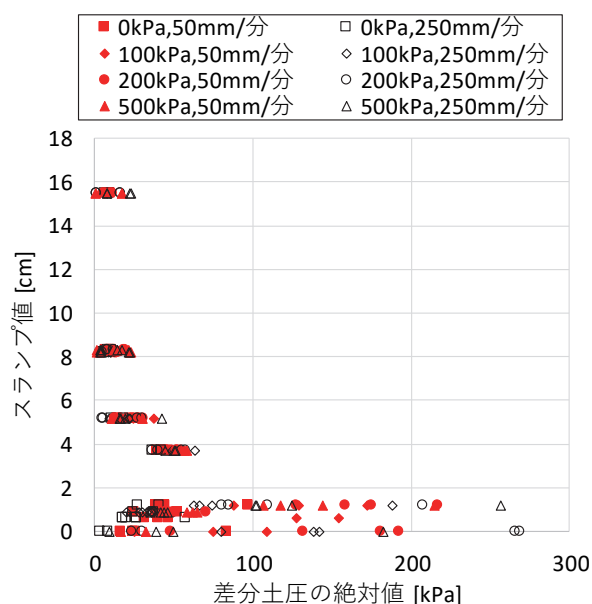


図-7 スランプ値と差分土圧の関係

背面の土圧がほぼ拘束圧相当であることが確認できたことから、次に拘束圧の影響を排除するため、前面の土圧と背面の土圧の差の絶対値である差分土圧を算出して、スランプ値との関係を整理した。図-7 にスランプ値と差分土圧の関係を示す。スランプ値2cm以下の低スランプ領域ではばらつきが見られるものの、スランプ値が小さくなるほど差分土圧が大きくなるような相関関係が見られた。この結果から、低スランプ領域を除けば、双対式土圧測定で求まる差分土圧によって、拘束圧によらず従来の塑性流動状態の判定指標であるスランプ値を評価できる可能性が示唆された。

なお、スランプ値が大きい場合には、試料は流体に近い状態と考えることができ測定値のばらつきは小さいが、スランプ値が小さい場合には、測定値のばらつきが大きく、上記の相関関係を不明瞭にした可能性が考えられる。また、今回の試験における低スランプ領域には、自重ではほぼ変形しない流動性の低い試料（No.1, 3, 4）、スランプコーンに付着して測定値が得られなかった試料（No.7）の4試料が含まれる。これらの試料は、スランプ値で粘性特性を評価することが適切でないと考えられ、差分土圧との相関にばらつきが見られたものと推察される。このような結果から、例えばベーンせん断抵抗などスランプ値とは異なる指標値を用いた粘性特性の評価・塑性流動状態の判定についても検討の余地があると考えられる。

4. まとめ

泥土圧シールドにおける、チャンバー内掘削土の塑性流動性を判定する方法として、チャンバー内の固定翼・攪拌翼それぞれの2側面に双対式に土圧計を設置し、カッターヘッドの回転に伴い作用する土圧を測定する「双対式土圧測定」を採用した方法を考案し、この方法に関して、加圧機構を有する土槽と攪拌翼模型を用いて、塑性流動性と土圧の関係把握のための模型実験を実施した。

その結果、双対式に設置した土圧計で測定される土圧の大小関係は、移動方向に応じて入れ替わることが確認できた。また、スランプ値と移動中盤の土圧平均値との関係から、スランプ値が小さくなるほど移動方向に対して前面側の土圧は大きくなるのに対して、背面側の土圧はスランプ値に依らず拘束圧程度の値を示した。さらに、2つの土圧計で測定された土圧の差の絶対値である差分土圧とスランプ値の関係については、両者に相関性が見られ、差分土圧を用いることで掘削土の塑性流動性を判定できる可能性が示唆された。一方で、低スランプ領域ではスランプ値と土圧の相関関係が不明瞭であったことから、この取扱いについてはさらに検討を進める予定である。

また今後は、スランプ値とは異なる指標値を用いた粘性特性の評価方法・塑性流動状態の判定等について検討を進めるほか、新たな指標値と差分土圧との関係についても調査を進め、泥土圧シールドの掘削管理の改善・高度化に資する知見の蓄積・技術の開発を目指す。

参考文献

- 1) 杉山博一, 岩井俊之, 原忠, 前田俊宏, 佐々木博明, 塚田裕史: 攪拌条件を考慮したチャンバー内塑性流動性評価方法(その2) - 実機での評価方法に関する検討 -, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-061, 2015.9.
- 2) 香川敦, 菅野静, 阿部靖, 日高基裕, 木村志照: チャンバー内土砂流動性可視化システムの開発, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.73, No.3 (特集号), I_61-I_74, 2017.
- 3) 粥川幸司, 新原圭祐, 名倉浩, 越田健: 泥土圧シールド実機を用いた掘進実験によるチャンバー内掘削土の塑性流動判定, トンネル工学報告集, 第26巻, II-3, 2016.11.
- 4) シールド工法技術協会: 泥土加圧シールド工法-技術資料, 2011.8

(2021. 8. 6 受付)

MODEL TEST ON BIDIRECTIONAL PRESSURE MEASUREMENT FOR EVALUATING MUD PROPERTY IN SHIELD CHAMBER

Hiroki IKEGAMI, Hiroyasu ISHII, Tomoyuki SHIDA, Hidetake MATSUI
and Tadafumi FUJIWARA

In recent years, necessity to improve excavation management on Earth Pressure Balance shield tunneling has been increasing, and examinations on evaluating mud property in shield chamber has been conducted by research and practionery. We have proposed “Bidirecrional pressure measurement” that measure pressure by gauges set at two locations on each of stirring blade and fixed blade. This paper firstly shows the measurement aparatus, and secondarily explains the model test to investigate pressure acting on blade in condition with various confined pressure, moving speed of blade and soil property. Test results showed that there was a correlation between slumps and pressure differences measured by the two gauges, and implied a possibility to evaluate mud property by this method.