

# チャンバー内塑性流動性可視化システムの 大断面シールド工事への適用と考察

杉山 博一<sup>1</sup>・磯部 哲<sup>2</sup>・塩出 健二<sup>3</sup>  
藤井 暁也<sup>4</sup>・副島 直史<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17）  
E-mail:sugiyama.h@shimz.co.jp

<sup>2</sup>正会員 清水・東急特定建設工事共同企業体（〒230-0076 神奈川県横浜市鶴見区馬場7-14-2）  
E-mail:isobe\_s@shimz.co.jp

<sup>3</sup>正会員 清水・東急特定建設工事共同企業体（〒230-0076 神奈川県横浜市鶴見区馬場7-14-2）  
E-mail:k.shiode@shimz.co.jp

<sup>4</sup>正会員 清水建設株式会社 土木事業本部（〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1）  
E-mail:f-takaya@shimz.co.jp

<sup>5</sup>正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局（〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4）  
E-mail:n.soejima107@shutoko.jp

泥土圧シールドの切羽安定性の向上，および，施工管理の合理化，省力化をめざし，チャンバー内掘削土の塑性流動状態を評価して可視化するシステムを開発し，大断面シールド工事に初めて適用した．本報告では，まず，システムの概要と塑性流動性の評価方法について述べるとともに，大断面シールドに適用する上で改善した点について述べる．次に，実施工時の塑性流動性評価結果の妥当性を検証するため，施工条件の異なる4か所での地盤条件や添加材の種類，カッタートルク等のデータと，本システムによる評価結果を比較した．その結果，土圧計の設置位置に改良の余地はあるものの，塑性流動性やその分布についてはほぼ妥当な評価結果であることが確認できた．

**Key Words :** earth pressure balanced shield, muddy soil pressure, muck fluidity, visualization system

## 1. はじめに

土圧式シールドにおいて切羽の安定を確保するためには，切羽土圧，掘削土量，および掘削土の塑性流動性等の管理が重要である．近年，大断面トンネルでも土圧式シールドが採用されているため，チャンバー内掘削土の塑性流動性（硬軟）や，その均一性を確認することの重要性が高まっており，そのための技術開発が盛んになっている<sup>1)</sup>．

筆者らは，チャンバー内土圧の変動状況が泥土の塑性流動状態と関連していることを見出し，その関係を利用してチャンバー全域の塑性流動状態を可視化表示するシステムを開発して現場で実証した<sup>2)</sup>．この現場は中口径（φ4.4m）のシールド工事であったが，今回，初めて大断面泥土圧シールド（φ10.83m）に適用した．本報告では，まず，現場の概要と塑性流動性可視化システム（以

下，本システムと記す）の概要，とくに，大断面シールド工事へ適用する上で改善した点について述べる．次に，シールド掘進時の運用結果とその検証を行い，最後に今後の課題について展望する．

## 2. 現場概要

本システムを適用した現場は，首都高速横浜環状北線の馬場出入口を築造する工事であり，4本のランプトンネルと開削トンネル，本線トンネルとの接続を含む換気所躯体，および街路築造工事を行っている．本報告では，最初の施工であるランプトンネル（Bランプ）のシールド工事に適用した本システムの概要を述べるとともに，運用結果とその検証を行う．

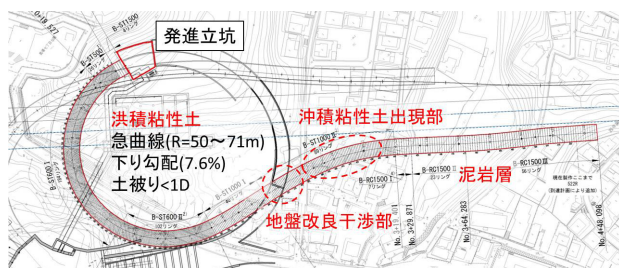


図-1 平面図 (Bランプ)

表-1 地層、地質名と主な土質性状

| 地層名  | 地質名 | 記号 | 粒度分布(%) |    |     |    | 含水比 (%) |
|------|-----|----|---------|----|-----|----|---------|
|      |     |    | 礫       | 砂  | シルト | 粘土 |         |
| 沖積層  | 粘性土 | Ac | 1       | 10 | 43  | 46 | 85      |
| ローム層 | ローム | Lm | 0       | 13 | 40  | 47 | 104     |
| 相模層群 | 粘性土 | Dc | 0       | 16 | 44  | 40 | 79      |
|      | 砂質土 | Ds | 1       | 72 | 17  | 10 | 27      |
| 上総層群 | 泥岩  | Km | 0       | 16 | 55  | 29 | 43      |
|      | 細砂  | Ks | 0       | 81 | 13  | 6  | 24      |

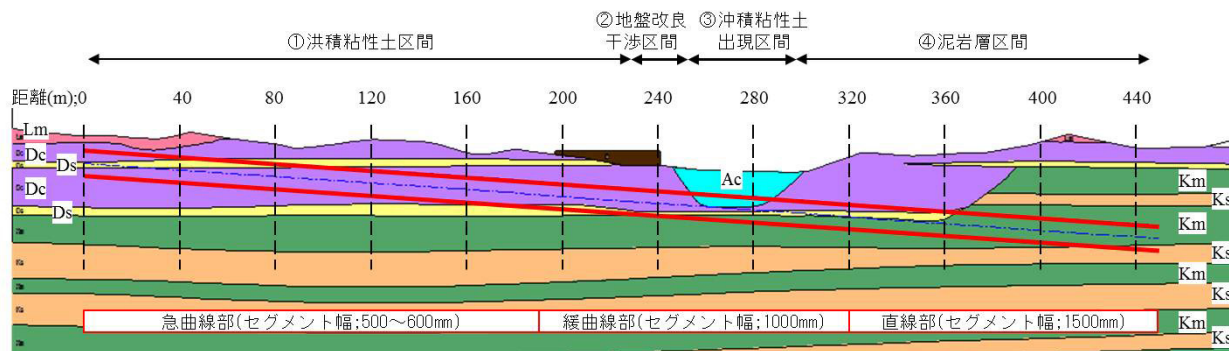
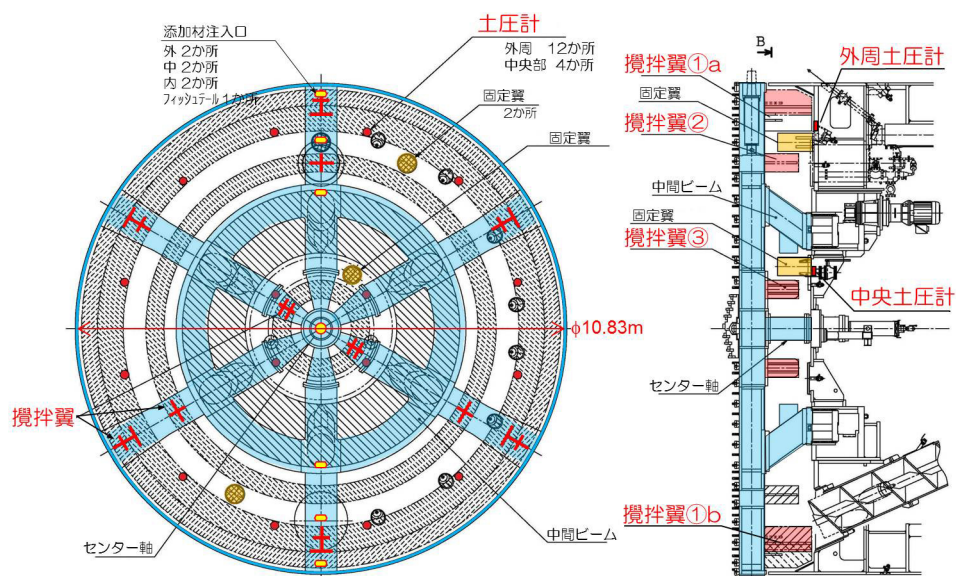


図-2 トンネル縦断面図 (Bランプ)



※注) 坑内側からみた図

図-3 シールドマシン (φ10.83m) の概要図

## (1) 施工条件

図-1にBランプの平面図、図-2にトンネル縦断面図を示す。また、表-1に地層ごとの主な土質性状として、粒度分布と含水比を示す。

発進直後は、①洪積粘性土が主体の地盤を小土被り(坑口で127m)、急曲線施工(R=50m)、下り急勾配(7.6%)の条件で掘進を行った。急曲線施工終了後は土被りが1D程度となり、掘進距離で240m付近に②地上に新設する道路盛土の圧密沈下対策を目的とした地盤改良部(深層混合処理工法)が切羽に干渉する区間がある。

また、掘進距離250~300m付近では、③沖積粘性土が天端に出現する区間がある。その後、④インバートから上総層の泥岩が出現し、最終的に本線トンネルに接続する付近では切羽全体が泥岩となっている。

## (2) シールドマシン

図-3にシールドマシンの概要図を示す。なお、正面図は、本システムの画面と同じになるように、坑内側からみた図になっている。シールドマシンの外径は10.83mであり、カッターヘッドは6本のスポークがある中間支持

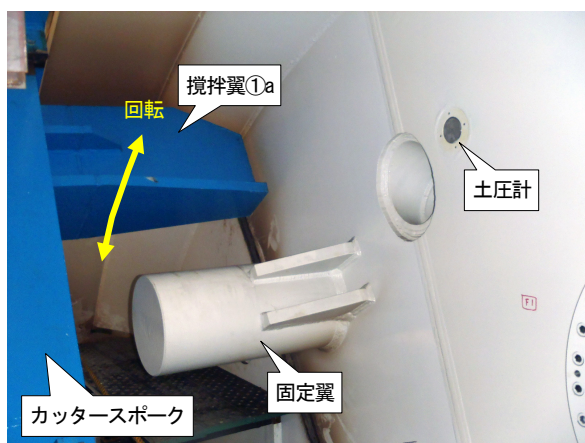


図-4 土圧計の設置状況（チャンバー内）

方式のものである。また、カッターの回転数は0.5rpmである。

攪拌翼は設置半径で分類して3種類ある。最外周側の攪拌翼①は全てのスポークに設置されているが、設置位置がスポークごとに若干異なっている（図-3の①aと①b）。攪拌翼②は3か所、攪拌翼③は2か所、図に示されている位置に設置されている。また固定翼は、外周側に2か所、中央付近に1か所設置されている。

### (3) 土圧計

チャンバー内の土圧分布を均等に計測できるようにするため、図-3に示した位置に計16個の土圧計を配置した。設置半径は2種類あり、外周側の半径4.45m上に12個、中央付近の半径1.25m上に4個設置されている。

図-4に土圧計の設置状況を示す。土圧計は直径85mmで1MPa仕様のものであるが、計測範囲は0～0.5MPaに設定して計測した。

ちなみに、土圧計と攪拌翼の最短離隔は、外周土圧計と①aとは約260mm、①bとは約50mmである。一方、中央土圧計と攪拌翼③の最短離隔は約325mmである。

## 3. 塑性流動性可視化システムの概要

本システムは、チャンバー内の土圧変動幅と掘削土の塑性流動性が関連することを利用したものである。本章では、チャンバー内土圧の計測方法と、それに続く塑性流動性の評価方法、および、可視化表示方法について述べる。

### (1) 土圧計測の概要

前述のように、土圧計は計16個を設置した。計測間隔は10Hz（0.1秒間隔）である。これは、攪拌翼①が土圧計の直上を通過する時間が約0.37秒（＝直径85mm÷通

過速度0.23 m/s）であり、この間に5点程度計測すれば1波形分の変動が捉えられると考えた。なお、実際の攪拌翼による土圧変動は、攪拌翼が土圧計直上を通過する前後も変動しており、かなり余裕をもった計測間隔となっている。

### (2) 塑性流動性の評価方法

得られた土圧データから塑性流動性を評価するまでの流れについて、1リング掘進分の土圧計測データを例に図-5で説明する。

#### a) 土圧計測

前述のとおり、土圧は0.1秒間隔で計測した。ちなみに、図中の1000～2700秒付近は掘進を一時停止しているところである。

#### b) 平均土圧

チャンバー内の土圧は、ジャッキ操作や排土に応じて全体的な変動が生じる。そこで、計測時ごとに（0.1秒間隔で）16個の土圧データの平均値を求め、これをチャンバー全体の平均土圧と考えた。

#### c) 偏差土圧

計測された土圧データ(a)から平均土圧(b)を差し引くことで、攪拌翼の接近、通過に伴う土圧変動として抽出した。土圧の平均値からの偏差ということで、偏差土圧と称している。

#### d) 標準偏差

偏差土圧の変動状態を数値化するため、標準偏差を算定する。具体的には、直近1分間の偏差土圧データを対象に標準偏差を計算し、これを塑性流動性の評価値のひとつと考えた。

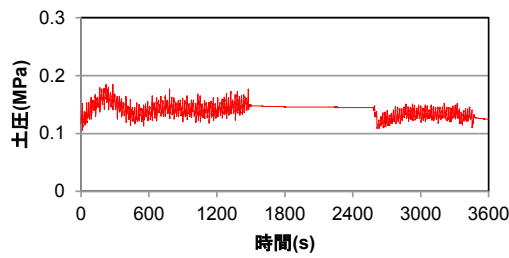
#### e) フーリエ振幅

前記、標準偏差と同様に、直近10分間の偏差土圧データを対象にフーリエ解析を行った。外周の土圧計では攪拌翼①が20秒ごとに通過することから、周期20秒付近の波の振幅値（ピーク値）を塑性流動性の評価値として用いた。ただし、土圧変動は攪拌翼が土圧計近傍を通過する前後に生じるため、厳密には波長は20秒ではないが、これまでの実績でこの値が塑性流動性と関連することが分かっており<sup>2)</sup>、可視化するデータとして用いた。

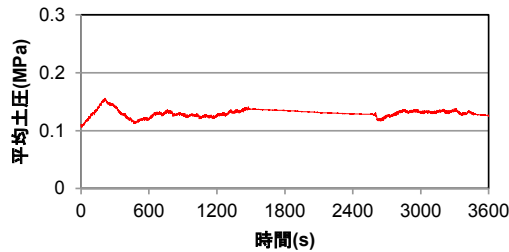
### (3) 可視化方法

#### a) チャンバー全体の推定方法

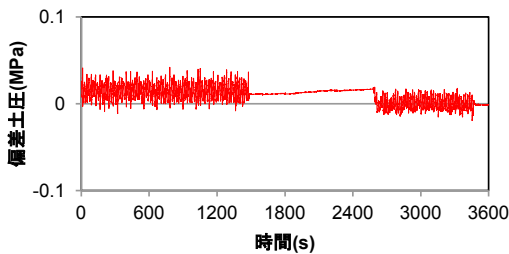
前報<sup>2)</sup>の現場では土圧計の設置半径が同一であったことや、土圧計の設置数も少なかった（6個）ため、任意の点から土圧計までの距離に応じた重み係数を算定する式を作成し、任意の点の塑性流動性評価値を計算した。しかし、本シールドでは16個の土圧計が均等に配置された状態であり、前報のような手法で推定することは適当でないと考えた。



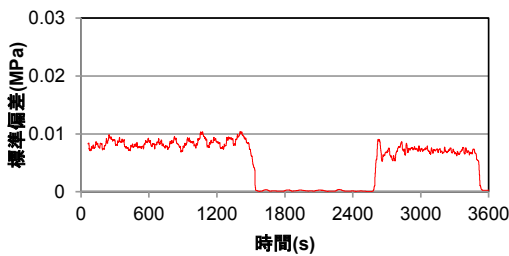
a) 生の土圧データ



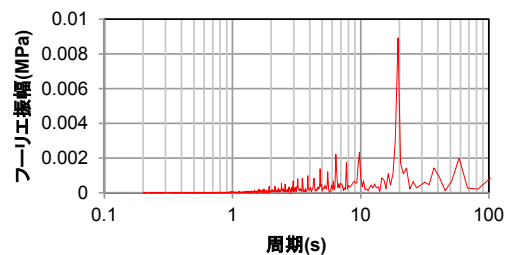
b) 平均土圧 (16個の土圧データの平均値)



c) 偏差土圧 (=生土圧データ-平均土圧)



d) 標準偏差 (直近 60 秒間の偏差土圧データから算定)



e) フーリエ振幅 (時刻 1200 秒時点での評価結果)

図-5 塑性流動性の評価の流れ (例)

そこで本シールドでは、重み係数の算定にクリギングを用いた。クリギングは離散的に得られているデータから領域全体を推定する手法として用いられている。具体的には図-6に示すように、任意の点Pに対する各土圧計の重み係数 $\alpha_i$  ( $\sum \alpha_i = 1$ ) をクリギングによりあらかじめ求めておき、各土圧計で評価された塑性流動性の評価値

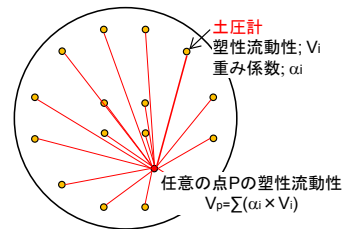


図-6 チャンバー全体の推定方法の概念図

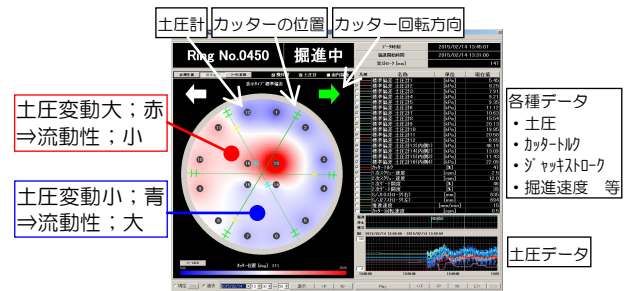


図-7 塑性流動性可視化システムの画面

$V_i$ に $\alpha_i$ を乗じ、その総和 ( $V_P = \sum \alpha_i \times V_i$ ) を求めた。

#### b) 演算、および描画方法

本システムの画面例を図-7に示す。チャンバーを表示している部分では、生の土圧値のほか、塑性流動性の評価値である標準偏差とフーリエ振幅のいずれかを選択して表示することができる。

チャンバー内を描画している点は100mmピッチであり、直径上で105点、チャンバー内全体は8,634点で描画している。また、画面の更新間隔は0.5～0.7秒である。

塑性流動性の評価値 (標準偏差) の色分け表示については、これまでの実績を踏まえて、0MPa (青色; 軟らかい) ～0.015MPa (白色; 適切) ～0.03MPa (赤色; 硬い) のグラデーション表示を行った。

## 4. 塑性流動性評価結果の検証

本章では、4か所の特徴的な箇所 (リング) に着目し、本システムによる評価結果を検証する。

着目した箇所は、前述の①急曲線部の洪積粘性土が主体の地盤で、気泡を使用していた箇所、②地盤改良区間が干渉し、安定剤を使用していた箇所、③沖積粘性土が天端付近に出現するため分散剤を使用していた箇所、④上総層の泥岩を掘進していた箇所である。表-2に上記4か所 (リング) のジャッキストローク200mmごとの本システムの評価結果を示す。

### (1) 洪積粘性土区間

この区間は低土被り、急曲線、急下り勾配施工部でもあり、周辺地盤への影響を最小限にするため、塑性流動

表-2 塑性流動性可視化システムによる評価結果の例

| 区間, 施工条件                                                               | JS,0mm | 200mm | 400mm | 600mm | 800mm | 1000mm | 1200mm | 1400mm |
|------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1) 洪積粘性土区間(244R)<br>・ 気泡<br>・ カッタートルク; 10%前後<br>・ 掘進速度; 20mm/min       |        |       |       |       |       |        |        |        |
| 2) 地盤改良干渉区間(360R)<br>・ 水+安定剤<br>・ カッタートルク; 30~40%<br>・ 掘進速度; 15mm/min  |        |       |       |       |       |        |        |        |
| 3) 沖積粘性土出現区間(401R)<br>・ 水+分散剤<br>・ カッタートルク; 30~40%<br>・ 掘進速度; 18mm/min |        |       |       |       |       |        |        |        |
| 4) 泥岩層(451R)<br>・ 気泡+水<br>・ カッタートルク; 40~50%<br>・ 掘進速度; 15mm/min        |        |       |       |       |       |        |        |        |

状態にも注意を払い、土圧変動を抑えるとともに、切羽土圧を均等に切羽面に作用させることが重要であった。この区間では排土状態をもとに、気泡の注入率を10～30%の範囲で管理していた。排土された土は比較的軟らかい状態であったが、施工上特に問題は生じなかった。本システムでも、全体的に青い分布となっていることが多く、評価結果も妥当であったと考えられる。

## (2) 地盤改良干渉区間

この区間では、セメント分の再固結を防止するため、基本的に水と安定剤を混合したものを注入して塑性流動化を図った。洪積粘性土の区間よりも若干カッタートルクが上昇したことが示すように、本システムが示す塑性流動状態も少し白色に近い表示となっている。また、塑性流動性の分布も均一で、良好な状態であったことが確認できた。

## (3) 沖積粘性土出現区間

この区間では、切羽上部に出現する沖積粘性土から添加材（気泡）が噴発する懸念があったことから、水と分散剤を混ぜたものを注入し、塑性流動化を図った。

本システムの評価結果から分かるように、外周部で土圧変動が大きく生じ、塑性流動性としては硬い状態として評価されている。一方、中央部では土圧変動が小さく、軟らかい状態として評価されている。この原因として、分散剤を使用した場合、気泡を使用した場合に比べて粘着性の高い泥土となり、隔壁や土圧計に泥土が付着し、

それが土圧計と攪拌翼の間で挟まれて大きな土圧変動が生じた可能性がある。一方で、中央付近の土圧計に大きな変動がなかったのは、攪拌翼と土圧計の離隔が大きく、攪拌による圧力変動が土圧計に及ばなかった可能性もある。この点については今後の課題である。

## (4) 泥岩層区間

最後に泥岩層の区間では、基本的にスポークの3か所から気泡を、フィッシュテールから水を注入した。この区間での平均的な注入率は30～50%の範囲であった。本システムによる評価結果を見ると、外周部では流動性が高い（軟らかい）と評価され、一方、中央付近では土圧変動が大きく、塑性流動性が低い（硬い）と評価されている。この評価結果は、中心軸付近は粘土が固着しやすいという傾向とも合致するものである。

また、この区間での評価結果の特徴として、中央右上の土圧計のみ土圧変動が大きく表れることが多かった。この原因としては、土圧計のすぐ左上に固定翼が設置されており、土砂流れの急変によって土圧変動が大きくなったのではないかと考えている。今後は、固定翼の近傍には土圧計を設置しないなどの対応が必要と考えられる。

## 5. まとめ

チャンバー内に設置した土圧計の圧力変動から塑性流動性を評価するシステムを大断面シールド工事に適用し、

運用した。塑性流動状態の評価結果を施工条件を考慮して検証したところ、概ね良好な結果であったと考えている。ただし、土圧計の設置位置によっては、塑性流動性と関係のない局所的な土圧変動を受け、評価結果に影響が出ることも判明したので、今後の計画時に反映していきたいと考えている。

一方で、今回は外周土圧計と中央土圧計とでは攪拌翼との離隔や、攪拌翼の通過速度が異なる影響を考慮できていない。この点については現在、攪拌条件を考慮した評価方法を検討しているところであり<sup>3),4)</sup>、現場等で検証していきたいと考えている。

今後は、この評価結果を参考にし、塑性流動状態が悪い場合の改善方法についても検討する予定である。

**謝辞：**本システムを構築するにあたり、協立電機株式会社の鍋田氏に多大なるご協力をいただいた。この場をお借りして御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) たとえば、土橋浩，松田満，松原健太，山本彰，近藤由也，日野義嗣，今田徹：泥土圧シールドにおけるチャンバー内の土砂流動管理技術の開発，土木学会論文集 F, Vol.66, No.2, pp.289-300, 2010 年 6 月.
- 2) 杉山博一，島厚夫，原忠，小瀧伸也，渡邊洋輔：チャンバー内掘削土の塑性流動性評価と可視化ツールの開発，トンネル工学報告集第 22 巻，pp.309-315, 2012 年.
- 3) 中谷篤史，杉山博一，原忠，前田俊宏，佐々木博昭，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 1），土木学会第 70 回年次学術講演会，VI-60，2015 年
- 4) 杉山博一，岩井俊之，原忠，前田俊宏，佐々木博昭，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），土木学会第 70 回年次学術講演会，VI-61，2015 年

(2015.8.7 受付)

## SYSTEM FOR EVALUATING AND VISUALIZING MUCK FLUIDITY AND ITS DISTRIBUTION IN THE CHAMBER OF A LARGE DIAMETER EPB SHIELD

Hirokazu SUGIYAMA, Satoru ISOBE, Kenji SHIODE,  
Takaya FUJII and Naofumi SOEJIMA

A system for evaluating and visualizing muck fluidity and its distribution in the chamber of an Earth Pressure Balanced (EPB) Shield had been developed. In the system, muck fluidity is evaluated indirectly by analyzing earth pressure fluctuation when mixing blades on the cutter head pass by each earth pressure gauge installed in the bulkhead, and the distribution of muck fluidity is estimated using the Kriging method. This system was applied to a large diameter EPB Shield under actual shield driving for the first time. The results verified that by using this system, muck fluidity and its distribution were appropriately evaluated and visualized in accordance with geological and construction conditions such as additive type, additive-injection rate, and cutter torque.