

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

粥川 幸司¹・新原 圭祐²・名倉 浩³・越田 健⁴

¹正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部（〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20）

E-mail:kayukawa.koji@ad-hzm.co.jp

²正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部（〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20）

E-mail:shimbara.keisuke@ad-hzm.co.jp

³正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部（〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20）

E-mail:nagura.hiroshi@ad-hzm.co.jp

⁴株式会社安藤・間 土木事業本部（〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20）

E-mail:koshida.takeshi@ad-hzm.co.jp

シールド工事の約75%を占める泥土圧シールドは、切羽で掘削した土砂をカッターチャンバーで塑性流動化(泥土化)し、推進力で泥土に圧力を発生させ、土圧や地下水圧とバランスさせるが、これを適正に保つには、掘削土砂の適正な塑性流動化が必要で、密閉化された“見えない“チャンバー内の塑性流動化をどのように確認するか、が課題である。そこで、掘削土砂の硬軟がチャンバーの隔壁等と接する力(せん断力)の大小と相関することに着目し、その力を測定するせん断力計を泥土圧シールド実機に実装して掘進実験を行った。本報では、実験結果について報告するとともに、実工事における掘削土の塑性流動化の判定方法について述べる。

Key Words : *shield tunneling method, muddy soil pressure, cutter chamber, plastic flow, contact force*

1. はじめに

シールド工法は、近年は泥水式、泥土圧式の密閉型がほとんどであり、切羽が見えないことが課題である。工事件数の約75%を占める泥土圧シールドは、切羽で掘削した土砂をカッターチャンバー(以下、チャンバーと称す)で泥土化(塑性流動化)し、シールドの推進力で泥土に圧力を発生させ、土圧や地下水圧とバランスさせるが、これを適正に保つためには、掘削土砂の適正な塑性流動化が必要で、“見えない“チャンバー内の塑性流動化の判定をどのように確認するか、が課題である。

そこで、チャンバー内の塑性流動化を測定する一つの方法として、掘削土の硬軟がチャンバーの構成部材(隔壁、攪拌翼、固定翼等)と接する力(せん断力)の大小と相関することに着目し、その力を測定するせん断力計を用いた要素実験を実施した¹⁾。その結果、特に砂質土においてはスランプで評価した土砂の硬軟と測定値に相関が見られた。一方、市販のせん断力計では目詰まり等が発生し実機使用に際して課題があることがわかった。そこ

で、新たにせん断力計を開発し泥土圧シールド実機に実装した上で、模擬地盤を掘進する実験を行うこととした。

本報では、要素実験、掘進実験について報告するとともに、実工事における掘削土の塑性流動化の判定方法について考察する。

2. 土砂の硬軟によるせん断抵抗の変化に着目した簡便な測定方法の提案と実証

(1) 土砂の硬軟によるせん断力測定の方法

シールドの掘削対象地盤において、砂質土、砂礫では、土粒子の粘着性は少ないものの、そのかみ合わせ効果やダイレイタンシーがあり、チャンバー内でのカッター回転の抵抗となる。また、粘性土では土粒子のかみ合わせ効果は少ないものの、粘着性、すなわち土粒子間の吸着やカッタースポーク、隔壁、フード部や攪拌翼、固定翼との吸着があり、これがカッター回転の抵抗となる。一般に、これらの抵抗の大きさは土砂の硬軟によって変化

すると考えられる．ここでいう土砂の硬軟とは，砂質土の場合はスランプの大きをいい，スランプが小さいものを硬，大きいものを軟としている．また，粘性土の場合は，たとえばベーンせん断試験²⁾等によるせん断強さで，これが大きいものを硬，小さいものを軟としている．逆に，これらの抵抗は土粒子が隔壁等に作用する圧力，せん断力であり，これらの大きさを測定することで，土砂の硬軟，すなわちその性状を判断する指標の一つになり得ると考えた．

(2) 塑性流動実験装置による要素実験

a) 塑性流動実験装置¹⁾

ここでは，実験装置として土砂や加泥材，あるいは攪拌の程度(カッター回転数を模擬した攪拌の速度や攪拌翼，固定翼の有無)について，室内レベルで実験を行うことができるよう，写真-1に示すチャンバーを模擬した実験装置を考案，製作した．

装置はチャンバーを鉛直にした形で，チャンバーの底面が隔壁，側壁がフード部に相当する．チャンバーの内寸法は直径600mm×高さ300mmである．これに一文字型のカッタースポークを想定した模擬カッタースポーク(以下，スポークと称す)を取り付け，切羽側からモーターで回転させるものである．攪拌装置としてスポークのチャンバー側に攪拌翼を計4本，隔壁に固定翼を2本設置した．これらは取外し可能である．なお，4本の攪拌翼の隔壁や回転軸に対向する面，ならびに外周側2本の攪拌翼のフード部に対向する面には，実験中の土砂の固着を防ぐためにブラシを設け，それがそれぞれの面に接する状態である．

測定について，隔壁の外周部，内周部に市販のせん断

力計³⁾(以下，せん断力計Sと称す)，ならびに新たに開発したせん断力計(以下，せん断力計Eと称す)を土圧計とともに設置した．また，実際のシールドでは通常取り付けないが，フード部に相当する側壁にも土圧計，せん断力計を設置している．

その他に，スポーク回転駆動部ではそのトルクを算出するために高精度ロードセル2台と，回転数を測定するためのエンコーダーを装備している．チャンバーの実質容量は約74ℓで，チャンバー内の耐圧は0.5MPaである．また，スポークの回転数は，0.5，1.0，1.5，ならびに2.0rpmとしている．

b) 要素実験の概要

当初の実験¹⁾では人工砂である珪砂を用いたが，せん断力計Eの測定の程度を実際の土砂で評価すること，また，実験時の材料の取扱いの容易さから，ここでは粒径の異なる鬼怒川砂(茨城県結城産)と利根川砂(千葉県野田産)を用い，加泥材には高分子系材料を用いることとした．鬼怒川砂は液状化実験の模型地盤作成でよく用いられる⁴⁾．また，鬼怒川砂と利根川砂を採用したのは，入手性の容易さとともに，これらを単独あるいは混合した材料において，粒径の大小で測定結果の相違を検討するためである．鬼怒川砂と利根川砂，ならびにこれらを質量比1:1で混合した材料の粒度分布を図-1に示す．

チャンバーに投入する砂質土の管理として，スランプを用いることとし，目標のスランプを得るためにあらかじめ試験練りを行い，加泥量の目安を把握した．通常，砂質土地盤では10～15cmで管理されることが多く⁵⁾，ここでは，使用材料に対して10，15，20cmとなるよう加泥材を適量加泥することとした．なお，鬼怒川砂，利根川砂の含水比の管理は特に行っていない．

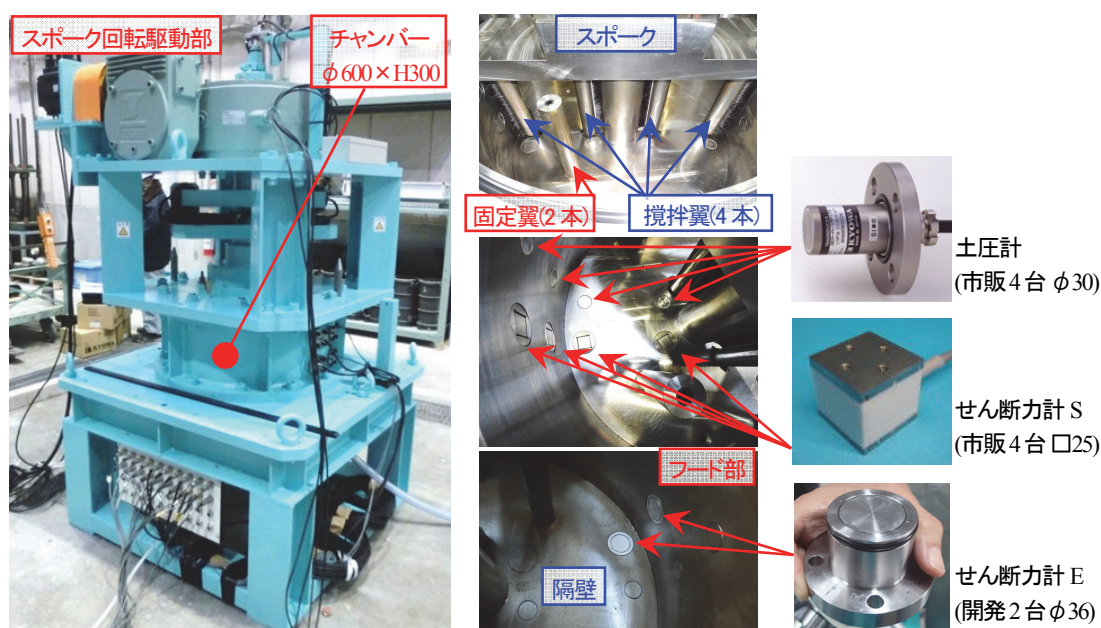


写真-1 塑性流動実験装置¹⁾

今回行った実験ケース、ならびにその際のスランプを表-1に示す。実験パラメータについては、材料の粒径の大小で3種類(鬼怒川砂(I), 利根川砂(III), これらを質量比1:1で混合した砂(II)), 材料の硬軟で3種類(スランプ10, 15, 20cm), スポーク回転数で3種類(0.5, 1.0, 2.0rpm)とした。それぞれの材料に対してスランプ10cm, スポーク回転数0.5rpmを基本とし、相互比較するものである。

c) 要素実験の結果

要素実験状況を写真-2に、実験結果を図-2~4に示す。図の横軸はスポーク回転の経過時間、右縦軸はスポークのトルクで、測定結果を(一)で示した。また、左縦軸はせん断力計Eの測定値で、写真-1で示した隔壁の測定値を(一), フード部の測定値を(一)で示した。なお、これらの測定値が瞬間的に大きくなっているのは、攪拌翼が測定器上を通過し、そのブラシが受圧面を擦ったものであり、トルクが振動しているのは、駆動部の芯ずれによるものであり、ここでは言及しない。

実験の結果、鬼怒川砂においてスポーク回転数の相違による比較(I-0, 3, 4)では、結果にほとんど相違はなかった。次に、図-2~4について(a)~(c)はそれぞれの材料に対して、その硬軟による変化を比較したものである。スポーク回転数は0.5rpmである。いずれの材料もスランプ10cmの隔壁のせん断力が0.3~0.4N程度であるのに対し、スランプが大きくなると小さくなった。特に、スランプ20cmでは0に近い値であった。また、トルクも同様な傾向であった。一方、図-2~4の相互比較で材料

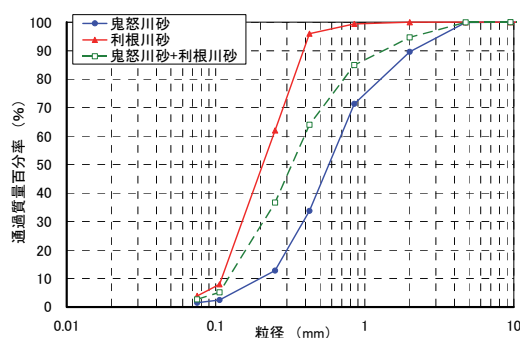


図-1 鬼怒川砂、利根川砂の粒度分布

の粒径の相違による比較を見ることができるが、せん断力、トルクともに大きな差は見られなかった。

以上より、砂質土の場合は土砂が流動し隔壁やフード部と接する際の力を検知できること、ならびにこれによって塑性流動の指標の一つである土砂の硬軟による相対的な数値の変化を測定できることがわかった。

なお、一部の実験後において加泥材が土砂と分離する場合が見受けられた。チャンバー内に圧力はないもの、攪拌によって部分的に土砂が圧縮され発生したものと考えられた。

d) 要素実験の課題

今回、塑性流動実験装置を製作し、砂質土を対象とした要素実験を実施した。その結果、スランプによって表現した土砂の硬軟でせん断力に相違が見られ、塑性流動の判定に利用できることがわかった。しかしながら、今回の実験方法と実機の状態では次の点で異なる。

・重力方向の相違

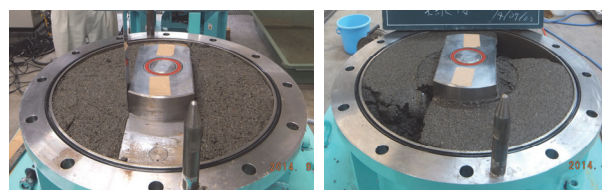
要素実験の攪拌と実際の泥土圧シールドでの攪拌は重力方向が異なるので、土砂の流動方向や攪拌の程度が異なる。

・チャンバー内圧力の有無

要素実験では圧力がほとんど作用していない状態であるので、測定されるせん断力が非常に小さいものとなっている可能性がある。

・土砂の流動の有無

実際の泥土圧シールドではカッターで切削された土砂がチャンバー内で攪拌されスクリーコンベヤーで排出されるという一連の流動が存在するが、要素実験ではこの流動がない。

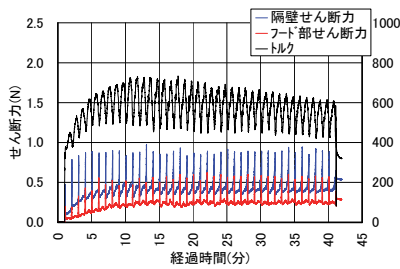


(a) 実験前 (b) 実験後

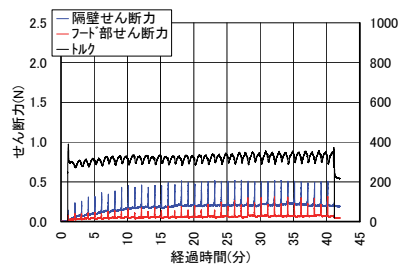
写真-2 要素実験状況(I-0)

表-1 要素実験ケース、スランプ一覧

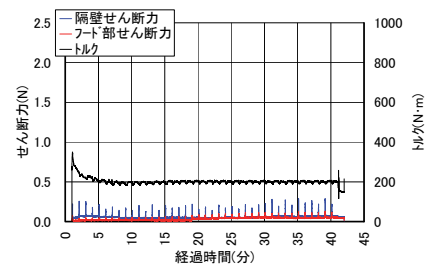
実験 ケース		実験条件					加泥材				スランプ結果	
		スランプ cm	スポーク 回転数 rpm	鬼怒川 砂 kg	利根川 砂 kg	合計 質量 kg	実験前実績		注入時実績		実スランプ	
							質量 kg	質量比 %	質量 kg	質量比 %	実験前 cm	実験後 cm
I-0	基本(単粒)	10	0.5	120	0	120	24.1	20.1%	—	—	10.7	7.7
I-1	スランプ比較	15	0.5	120	0	120	26.5	22.1%	—	—	15.0	10.8
I-2		20	0.5	124	0	124	28.1	22.6%	—	—	21.8	18.8
I-3	回転数比較	10	1.0	150	0	150	23.9	15.9%	—	—	9.3	9.6
I-4		10	2.0	125	0	125	23.0	18.4%	—	—	9.2	8.8
II-0	基本(複粒)	10	0.5	68	68	136	30.0	22.1%	—	—	9.2	8.2
II-1	スランプ比較	15	0.5	65	65	130	30.0	23.1%	—	—	14.7	12.8
II-2		20	0.5	65	65	130	31.9	24.5%	—	—	19.7	16.9
III-0	基本(複粒)	10	0.5	0	120	120	30.0	25.0%	—	—	9.0	8.2
III-1	スランプ比較	15	0.5	0	120	120	35.2	29.3%	—	—	14.7	12.9
III-2		20	0.5	0	120	120	36.5	30.4%	—	—	19.0	15.0



(a) I-0 スランプ 10cm

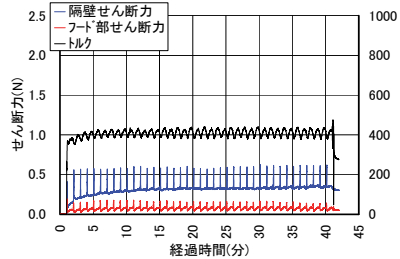


(b) I-1 スランプ 15cm

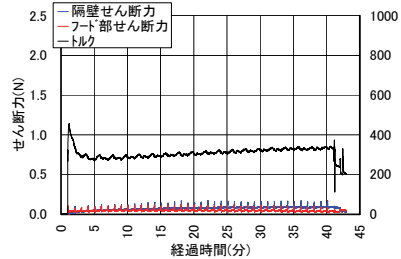


(c) I-2 スランプ 20cm

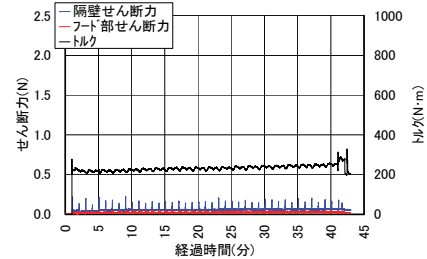
図-2 鬼怒川砂実験結果(回転数 0.5rpm)



(a) II-0 スランプ 10cm

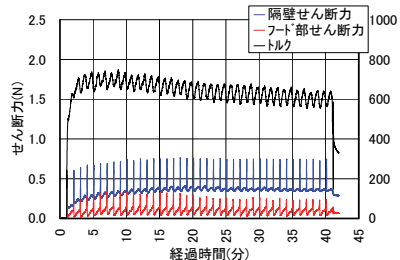


(b) II-1 スランプ 15cm

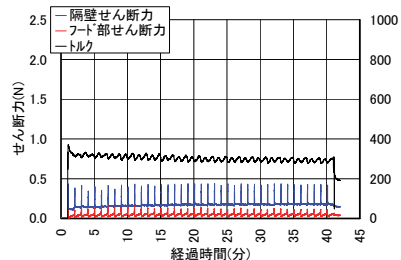


(c) II-2 スランプ 20cm

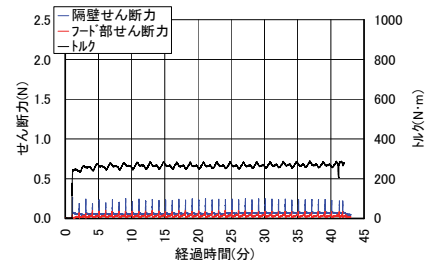
図-3 鬼怒川砂+利根川砂実験結果(回転数 0.5rpm)



(a) III-0 スランプ 10cm



(b) III-1 スランプ 15cm



(c) III-2 スランプ 20cm

図-4 利根川砂実験結果(回転数 0.5rpm)

このような状況を要素実験レベルで行うことは困難である。そこで、今回の成果を元に泥土圧シールド実機を用いて模擬地盤を掘進する実験を行うこととした。

3. 泥土圧シールド実機を用いた掘進実験

(1) 実験の目的

2. (d)で示した課題を克服し、チャンバー内掘削土の塑性流動判定に資する情報を得ることを目的として、 $\phi 2\text{m}$ 級の泥土圧シールドを用いて模擬地盤を掘進する実験を行うこととした。

(2) 実験の装置

実験装置の概要を図-5に示す。装置の構成は、掘削外径 $\phi 2\text{m}$ の泥土圧シールド、これを押し引きする推進ジャッキとその反力架台、模擬地盤を構成する土槽である。シールドの掘進距離については、シールドのカッターヘッド部500mmを土槽に貫入した状態から推進ジャッキで押し引きできる長さを考慮し、1.5mとした。これに対して土槽の内寸法は、高さで土被り1D(D:シールド外径

2m)を確保するよう、シールド下部500mmを考慮し、合計4.5mとした。また、奥行きでは掘進後の切羽位置から前方1D以上を確保するよう4.5mとした。なお、幅は3mとした。

(3) 測定

チャンバー内の測定について、写真-3に示す。切羽圧測定は既存の土圧計を利用することとし、隔壁上部のマノホール、ならびにスプリングライン(以下、SLと称す)左の2箇所である。せん断力計について、2.で示したせん断力計は外径 $\phi 50\text{mm}$ 、受圧板 $\phi 36\text{mm}$ であったが、今後の製作性や実機への適用を考慮し、既存土圧計と同レベルの大きさ(外径 $\phi 90\text{mm}$ 、受圧板 $\phi 73\text{mm}$)で試作、使用することとした。その概要を図-6に示す。チャンバーには、隔壁上部のマノホールと右SLに(a) $\phi 73$ を、左SLの土圧計直上に(b) $\phi 36$ を設置し、3箇所で測定することとした。なお、隔壁上部のせん断力計、土圧計の位置はSLから上へ約500mmである。また、測定間隔は掘進中の1秒毎とした。

(4) 土層作製、材料

土層の作製について、土槽底盤にシールドの受け架台をH鋼で作製、敷設し、実験場の表土(以下、現地土と称

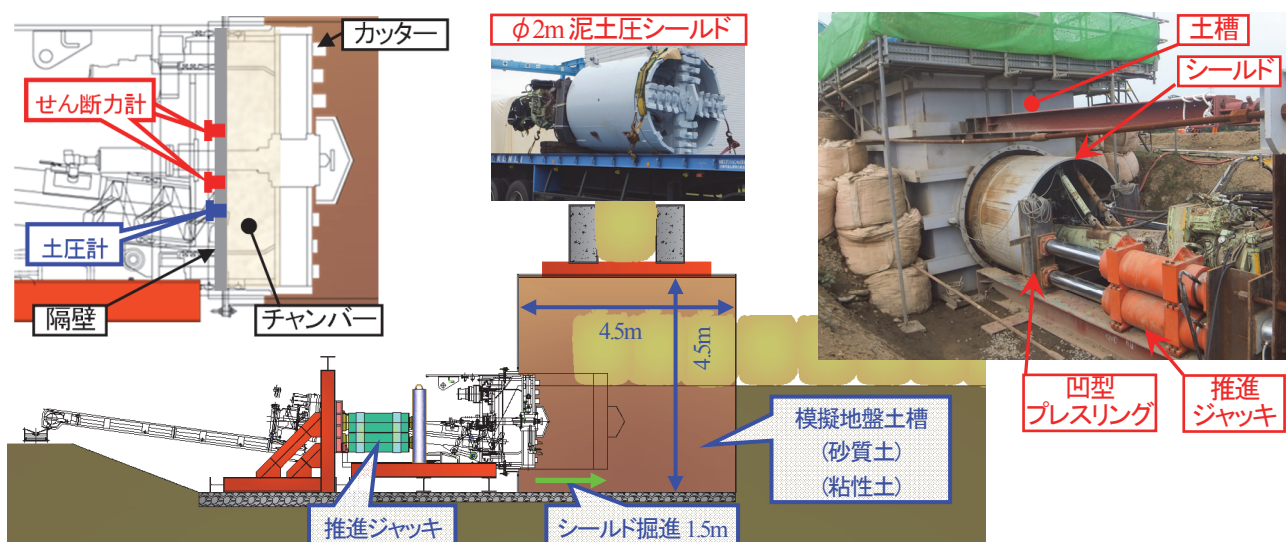
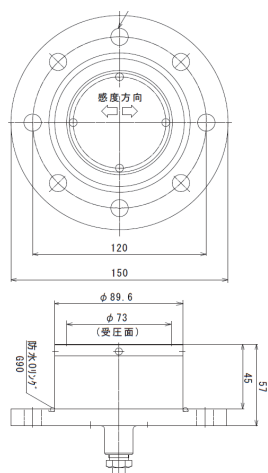


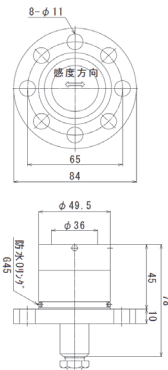
図-5 泥土圧シールド実験 概要



写真-3 セン断力計, 土圧計 設置状況



(a) φ73(外径φ90 受圧板φ73)



(b) φ36(外径φ50 受圧板φ36)

図-6 セン断力計詳細

す)で埋め戻した。シールドを500mm貫入させた後、次の手順で砂質土層、粘性土層を作製した。

a) 砂質土層

写真-4に砂質土層の作製状況を示す。砂質土には、2.で用いた鬼怒川砂を用いることとした。これを水を張った土槽内に投入し、シールド天端から1mまでの層厚3mの砂質土層を作製した。その後、砂質土天端まで水位を下げ、その表面を仕切り用のシートで覆った後、土槽天端まで覆土(層厚1m)し、復水させた。さらに、別途準備した上載荷重用の土嚢(トンパック)を載せた(10kN/m²)。

実験の実施について、土層作製の後、砂質土の飽和を

できるだけ確保するため、翌日以降で実施することとした。なお、シールド掘進に影響のない壁面沿いに観測用、リチャージ用の井戸2本を設け、掘進中に漏水等により水位が下がらないよう必要に応じてリチャージを行った。

b) 粘性土層

写真-5に粘性土層の作製状況を示す。材料には、現地土と人工粘土(トククレイ)を用いることとした。シールド下端から天端1mまでの層厚3mの粘性土層の作製手順について、30cm撤出し11層締固めで計画した。具体的には、1層あたりで人工粘土2.5m³(トンパック5体)と現地土1.65m³(バックホウバケット11杯)を混合し、水500ℓで

練混ぜ、土層内に5回に分けて撒出し、タンピングランマーにて締固めすることとした。その後、砂質土の場合と同様に、粘性土表面を仕切り用のシートで覆った上で表土で土槽天端まで覆土し、上載荷重用の土嚢を載せた。実験は、土層作製の翌日以降で実施することとした。なお、粘性土層では井戸を設けていない。

(4) 実験ケース

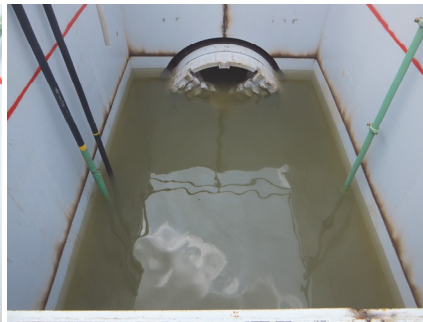
実験ケースを表-2に示す。砂質土実験では、実験パラメータとして加泥材の有無と種類、攪拌機構(固定翼2本

の有無、写真-3)とした。なお、全てのケースではないものの、掘進延長1.5mの間でカッター回転数、掘進速度を変化させることとした。

粘性土実験では、加泥材を水のみとし、固定翼の有無をパラメータとした。また、砂質土実験の場合と同様に掘進延長1.5mの間で掘進速度を変化させた。なお、表右欄に実験順と実験日、ならびに掘進延長1.5mのうちの評価対象とした掘進区間を示した。また、2. で懸念したせん断力計の可動部分の目詰まり等による測定の可否に



(a) シールド通過架台、底盤作製



(b) 水張り



(c) 砂質土投入(水中落下)



(d) 砂質土、覆土の仕切りシート



(e) 覆土



(f) 上載荷重載荷

写真-4 砂質土層作製状況



(a) シールド通過架台、底盤作製



(b) 現地土、人工粘土混合



(c) 水分調整



(d) 撒出し、転圧



(e) 覆土



(f) 上載荷重載荷

写真-5 粘性土層作製状況

ついて検証するため、今回の一連の実験中ではせん断力計の清掃を行わないこととした。

(5) 実験結果

a) 塑性流動の指標(せん断力/土水圧力)

2. では、土圧がほとんどない状態であったので、せん断力のみに着目した。一方、実際のシールド工事においては、掘進対象土質が変化するだけでなく、シールド路線上の土被り厚や地下水位が変化する場合や、路線上の地表や地中に重量物がある場合等、地山の土圧、水圧が変化し、切羽圧が変化する。このような場合、チャンバー内で測定されるせん断力が土砂の性状によって変化するだけでなく、それが同じ場合でも周辺環境によって変化することとなり、せん断力だけでは評価できないことが考えられた。そこで、塑性流動の指標として、ここではせん断力を土水圧力で除した値を用い、これによって掘削土の性状を評価することとした。せん断力を土水圧力で除して無次元化することで、土被り厚や地下水位、ならびに重量物等による土圧の変化に影響されることなく、チャンバー内の掘削土砂の性状を相対的に評価できるものとする。

b) 実験状況とせん断力の測定位置

実験結果を実験ケース毎に図-7～14に示した。図の横軸は掘進距離(ジャッキストローク)、縦軸はそれぞれのパラメータである。

(a) はせん断力/土水圧力で表される塑性流動の指標で、(b)、(c) はそれぞれせん断力計、土圧計の測定値である。せん断力/土水圧力について、隔壁上部のせん断力、左右SLのせん断力をそれぞれの位置の土水圧力で除した(右SLについては左SLの土圧計測定値を代用した)。なお、(a) せん断力/土水圧力のみ、過去10秒分の移動平均で示した。また、(b) せん断力では、チャンバー左SLのせん断力計は受圧板がφ36であるので、φ73相当に換算して示している。さらに、せん断力測定は極性があるので、ここではカッターを右回転(時計回り)した際を正值、左

回転(反時計回り)した際を負値で表した。

実験状況として、掘進速度、カッター回転数を変更した場合を除き、それぞれほぼ20mm/分、1.8rpmであった。また、加泥材の注入量もIV-1～3の加泥材Aで最終約600ℓ(掘削土量約4.7m³に対して13%)、VII-4、5の加泥材Bで200ℓ弱、粘性土では注水量がV-1で約1200ℓ、V-2で約1000ℓと若干異なるものの、加泥材毎で大きな相違はなかった。(c) に示した土水圧について、実験ケースIV-0～3でSLで30kPa前後、加泥材Bを用いたIV-4、5で40kPa前後であった。したがって、各ケースのせん断力の相対的に比較することができる。

ここで、(b) せん断力計の測定について、左右SLを比較すると、カッターが右回転であるIV-0、1、4、5、ならびに粘性土のV-2では受圧板がφ36である左SLの測定値(—で示す)の方が大きく測定されているように見える。逆に、左回転のIV-2、3、ならびにV-1では小さく測定されている。特に、カッター左回転時にはチャンバー内の土砂が上から下に動く方向であり、この時のせん断力が0に近くなっている。これに対して、受圧板がφ73である右SLでは右回転、左回転ともにある程度の測定値(—で示す)を示した。各実験の終了後にシールドを引き土砂を撤去してチャンバー内の掘削土の充填状況を確認したが、未充填は認められなかった。このことから、左SLのせん断力計は受圧板が小さいので、それが大きい右SLのせん断力計よりも局所的な事象を測定してしまうことが考えられ、土砂の性状の評価には受圧板の大きい方がよいものと考えられた。

次に、隔壁上部のマンホールに設置した受圧板がφ73であるせん断力計では、右SLと比べてせん断力の値、ならびに土水圧力で除した値(—で示す)ともに概ね小さいといえる。特に加泥材BのIV-4、5の場合、粘性土のV-1、2の場合ではほとんど0に近く、さらにV-2の掘進距離700mm以降では、カッターが右回転なので正值を示すべきところ、負値を示す結果であった。これについて

表-2 泥土圧シールド実験機実験ケース一覧

実験ケース		土質	加泥材			攪拌機構		カッター回転数		掘進速度		実験順序 実験月日	評価対象 掘進区間 (mm)
			加泥材 A	加泥材 B	水	固定翼(2箇所)		低 (1.8rpm)	高 (3.7rpm)	低 (20mm/分)	高 (30～ 40mm/分)		
						なし	あり						
IV-0	加泥材なし	砂質土 (鬼怒川砂)					○	○		○		2 7月31日	600～1500
IV-1	基本ケース (加泥材A)		○				○	○		○		1 7月27日	100～1400
IV-2	カッター回転数、掘進速度 変更		○				○	○	○	○	○	5 8月21日	700～1500
IV-3	攪拌機構変更 (固定翼なし)		○				○	○	○	○		8 9月9日	0～1500
IV-4	加泥材変更 (加泥材B)			○			○	○	○	○		3 8月6日	0～1500
IV-5	加泥材変更(加泥材B) 掘進速度変更			○			○	○	○	○	○	4 8月19日	0～1500
V-1	基本ケース (砂質土 比較)	粘性土 (現地土+トチクレイ)			○		○	○		○	○	6 8月28日	700～1500
V-2	攪拌機構変更 (固定翼なし)				○	○		○		○	○	7 9月4日	300～1500

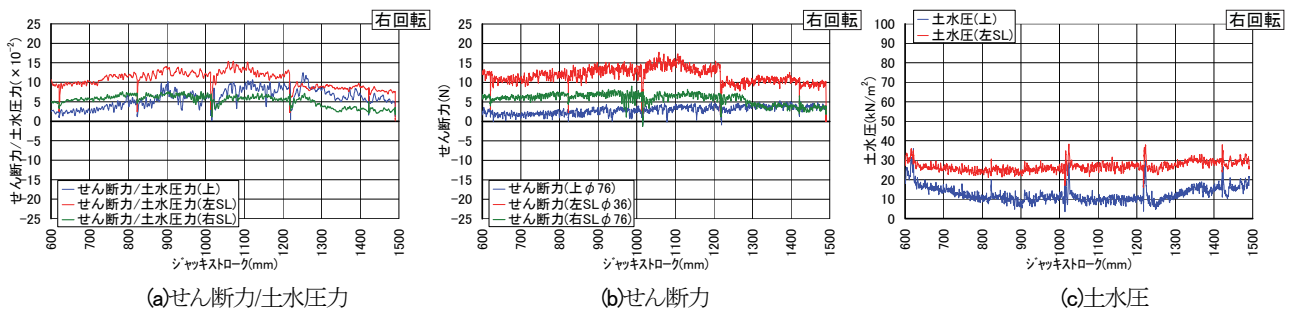


図-7 IV-0 砂質土(加泥材なし)

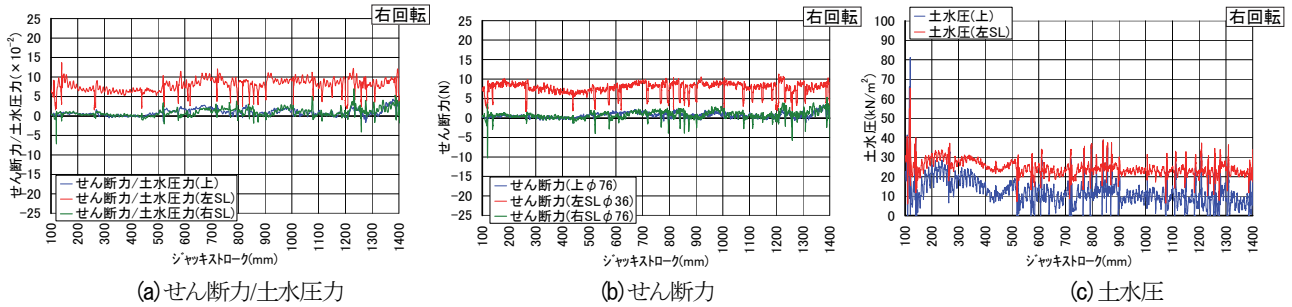


図-8 IV-1 砂質土(加泥材 A, 基本ケース)

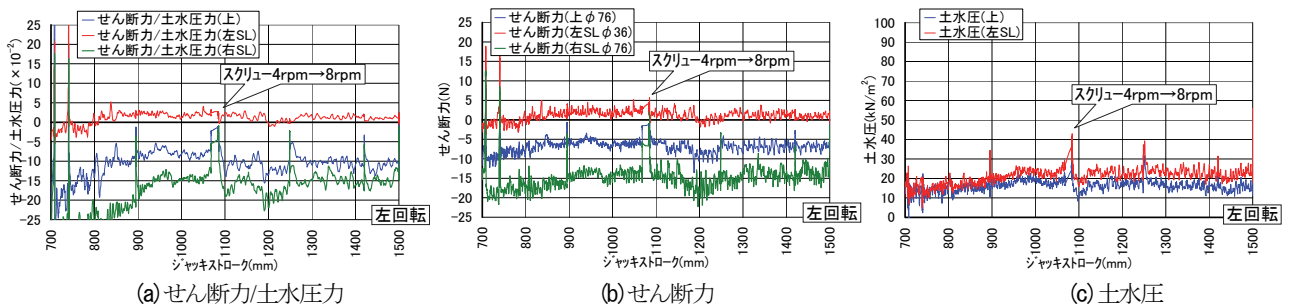


図-9 IV-2 砂質土(加泥材 A, カッター回転数, 掘進速度変更)

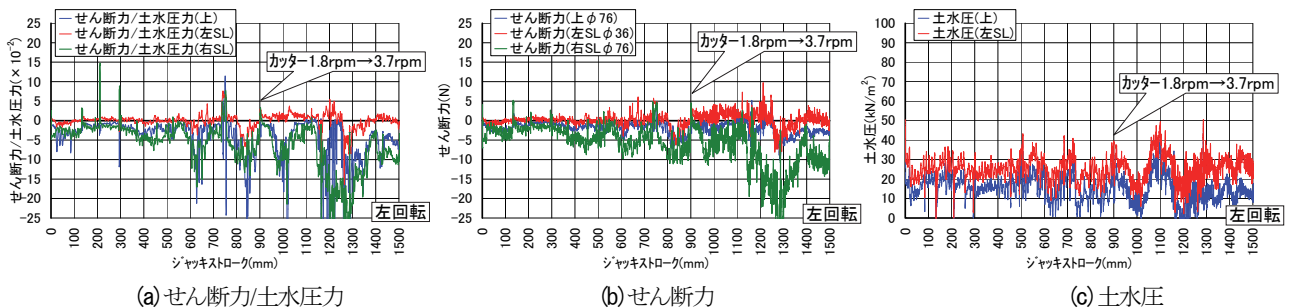


図-10 IV-3 砂質土(加泥材 A, 固定翼なし)

は、写真-3に示したようにせん断力計の設置位置が隔壁と同一面ではなく、土砂撤去後にチャンバーを確認すると、マンホールと隔壁の段差に土砂が固着した状態であった。このため、土砂が流動し難く、せん断力を適切に測定できなかったものと思われる。したがって、このような設置方法は適切でなく、せん断力計の受圧面が隔壁と同一面になるように設置することが必要といえる。

以上から、以降、右SLで測定したせん断力、ならびにせん断力/土水圧力(—で示す)を中心に考察する。

c) 砂質土実験結果(図-7～12, 写真-6)

図-7に示したIV-0では、加泥材を注入しない掘進で、チャンバーに取り込まれるのは砂のみであるので、加泥材を注入した場合よりも土粒子のかみ合わせの抵抗が大

きく、測定されるせん断力も最も大きいと想定される。これに対して、加泥材Aを用いたIV-1、ならびに加泥材Bを用いたIV-4, 5は、これらの値が全般に小さくなっている。排土された土砂を触指確認すると、いずれの時点でも加泥材が良く攪拌された土砂(写真-6)であり、良好な掘進であったといえる。さらに、加泥材Aよりも加泥材Bの方がせん断力の変動が小さい傾向にあった。このことから、加泥材Bの方が土粒子のかみ合わせを分断し塑性流動化を促進する効果が高いと考えられた。

なお、加泥材Bを用いたIV-4, 5にて掘進距離900mmでカッター回転数を3.7rpmに変更、また、IV-5にて掘進距離300mmで掘進速度を30mm/分としたが、土水圧やせん断力の変動は大きくなったものの、全体には変化がない

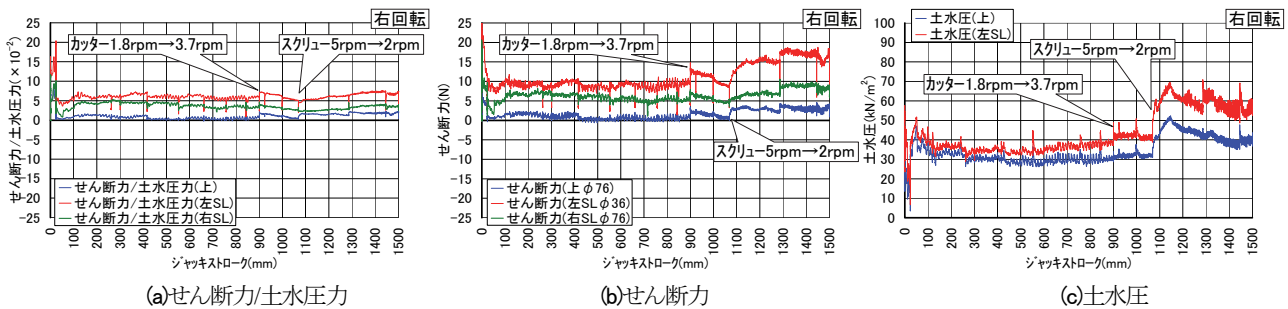


図-11 IV-4 砂質土(加泥材 B, 基本ケース)

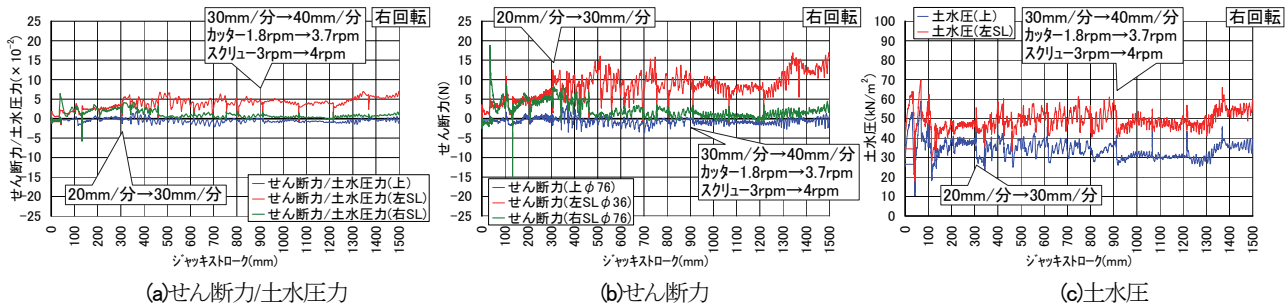


図-12 IV-5 砂質土(加泥材 B, 掘進速度変更)

状況であった。さらに、IV-4にて掘進距離1070mmでスクリーコンベヤー回転数を減じ切羽圧を大きくしたが、これに伴ってせん断力は大きくなったものの、せん断力/土水圧力はほぼ変化のない状況であった。これらのことから、掘削土砂の塑性流動性の評価や土水圧が変化した場合の評価も良好に行えると考えられた。

ところで、これらの結果に対して加泥材Aを用いたIV-2, 3では、測定値が大きくばらついた状態であった。これらのケースは一連の実験の後半に実施しており、せん断力計の目詰まり等も考えられたが、この間に実施した粘性土実験で比較的良好な結果が得られているので、目詰まりによる測定不良の可能性は少ないものと考えられた。一方、これらの実験中の排土性状を触指確認すると、攪拌の程度にばらつきが見られ、チャンバーで適切に攪拌されなかったことが想定された。特に、VII-3では固定翼を撤去した状態であり、チャンバー内で土砂が供回りした可能性が考えられた。したがって、せん断力の測定値やせん断力/土水圧力の値が大きくばらつく場合は、チャンバー内で土砂と加泥材の攪拌が十分になされていないものと考えられる。

d) 粘性土実験結果 (図-13, 14, 写真-7)

図-13, 14に粘性土実験結果を示した。V-1はカッターが左回転、V-2が右回転で固定翼がない場合である。また、これらの実験の後半では掘進速度を変更している。

V-1, 2の比較では、せん断力、ならびにせん断力/土水圧力の大きさについてV-1の方が大きくなっている。一方で変動はV-2の方が大きい。V-2では固定翼がない状態であり、V-1の場合よりはチャンバーで適切に攪拌されなかったことが想定される。なお、排土性状を触指確認したが、砂質土の場合ほどの顕著な差は認められな



(a) IV-0(加泥材なし) (b) IV-1(加泥材 A)
写真-6 砂質土排土状況

かった(写真-7)。

次に、砂質土の場合と比較するとV-1, 2とも大きい結果となった。これは、土粒子のかみ合せ効果よりも、粘着性、すなわち土粒子とせん断力計の受圧板との吸着の効果によるものと考えられた。今回、実験ケースが少なかったので一概には言えないが、今後、現場適用時に情報収集、分析を行っていく必要がある。

4. おわりに

今回、チャンバー内の掘削土の塑性流動判定に資する情報を得ることを目的に、φ2mの泥土圧シールド実機を用いて掘進実験を行った。実験では、実機レベルでの使用に耐えうるようせん断力計を改良するとともに、塑性流動判定を行う指標として、せん断力計を当該位置の土水圧力で除した値を用いることを提案した。

実験の結果、当該の指標が切羽圧や掘進速度、カッター回転数の変動に影響されないこと、その値の大小や振幅が触指確認による排土性状の傾向と概ね一致したことから、チャンバー内の掘削土塑性流動の評価に適用できるものと思われた。さらに、粘性土地盤ではこれらの

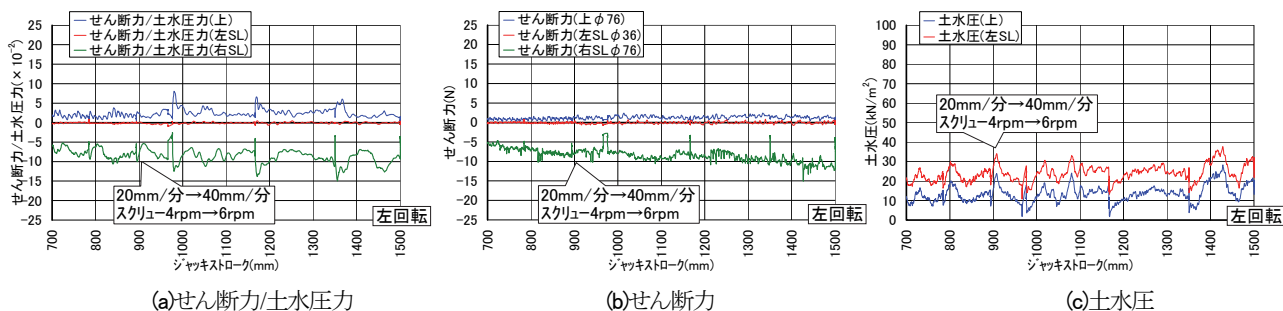


図-13 V-1 粘性土(基本ケース)

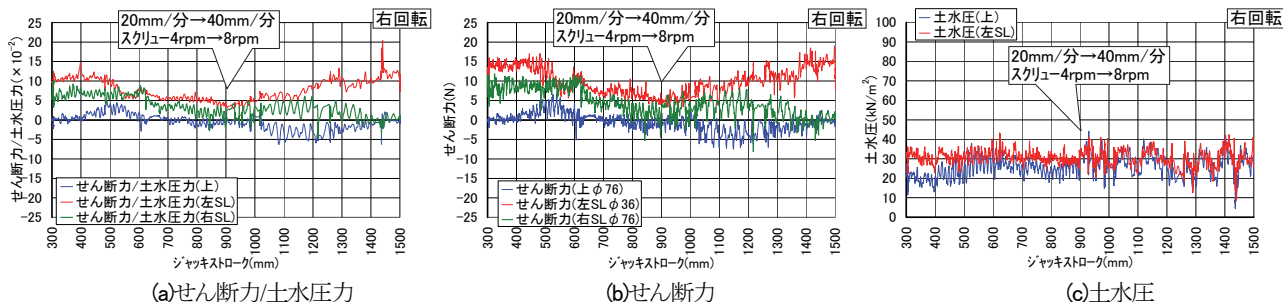


図-14 V-2 粘性土(固定翼なし)

値が砂質土の場合よりも大きくなることがわかった。

一方で、今回の実験ではせん断力の値が数Nレベルと土水圧荷重のレベルと比べて非常に小さかった。模擬地盤であったので、土被り圧を実工事レベルまで確保できなかったことや、模擬地盤の締固めの程度が小さく、実地盤よりも硬くなかったことによると考えている。今後、実工事に展開し、実荷重レベルでさらなる検証、データの蓄積を行っていくことが必要と考える。また、併行してチャンバーからスクリーコンベヤーまでの土砂流動を個別要素法で表現するシミュレーション解析も進めており、これらの可視化を含めて泥土圧シールドのさらなる高度化を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 粥川幸司, 新原圭祐, 名倉浩, 越田健: 泥土圧シールドのチャンバーを模擬した塑性流動実験, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集第 6 部, pp.1271-1272, 2014.



(a) V-1(固定翼あり) (b) V-2(固定翼なし)

写真-7 粘性土排土状況

- 2) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, pp.404-409, 2013.
- 3) 株式会社エス・エス・ケイ: 剪断ひずみ計(剪断力計)S10 型・S25 型 ホームページ資料, 2016 (<http://www.ssk-co.jp/S10・S25.pdf>).
- 4) 平間邦興, 鳥井原誠, 松本伸: 間隙水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析について(その 2), 大林組技術研究所報, No.33, pp.7-11, 1986.
- 5) 地盤工学会: シールド工法, p.177, 2012.

(2016.8.5 受付)

A METHOD FOR DETERMINING THE PLASTIC FLOW OF MUDDY SOILS DURING EXCAVATION EXPERIMENT USING THE MUDDY SOILS PRESSURE SHIELD

Koji KAYUKAWA, Keisuke SHIMBARA, Hiroshi NAGURA and Takeshi KOSHIDA

During excavation of soils with shield machine, the plastic flow soils must be appropriately controlled to stabilize the tunnel face. The problem is how to confirm the plastic flow in the closed-chamber as this flow can't be measured directly. As a solution, we focused on the interrelation between plastic flow and the contact force between soil and bulkhead. The project includes a pilot test under actual conditions using shear sensors attached to the shield machine. This paper presents the results of the experiment and a method for determining the plastic flow of soils in the actual construction work.