

# シールド掘進におけるジャーミング発生メカニズムの解明と検知・対策技術の開発

## Elucidation of Jamming Mechanism during Shield Tunnel Excavation and Development of Detection and Countermeasure Technology

久保田 光太郎 川野 健一  
永谷 英基 中島 悠介<sup>1)</sup>

### 要 約

シールド掘進におけるジャーミングとは、シールドマシンが周辺地盤の拘束を受けて、掘進不能となる現象である。これが発生すると、シールドマシン推力の増大によるセグメント損傷などのトラブルが生じて重大な問題となるが、その発生メカニズムについては十分に解明されていない。筆者らは、まずシールド掘進を模擬した回転貫入試験を考案・実施し、ジャーミングの発生メカニズムと、この対策手法として余掘りの効果について実験的に検討した。さらに、シールド周面と周辺地盤を模擬したせん断試験を実施し、せん断力の計測によるジャーミング検知方法と、この対策手法として滑材注入の効果について実験的に検討した。本報ではこれらの結果について報告する。

### 目 次

- I. はじめに
- II. ジャーミング発生メカニズム
- III. ジャーミング検知
- IV. おわりに

#### I. はじめに

シールドトンネル工事におけるトラブルとして、周辺地盤からの出水や過掘りによる沈下、スクリーコンベアからの掘削土砂の噴発、ジャーミングなどが挙げられる。このうち、ジャーミングとは、シールドマシンが周辺地盤の拘束を受けて掘進不能となる現象である。これが発生すると、シールドマシン推力の増大によるセグメントの損傷など重大な問題となる。ジャーミングは、Fig.1 に示すように、シールドマシン掘進によってせん断を受けた周辺地盤に正のダイレイタンス（体積膨張）が生じることによって、シールドマシン周面に作用する拘束圧が増大し、シールドマシンの周面摩擦抵抗が増大することが原因と考えられるが、その発生メカニズムは十分に解明されていない。

国内においては、大阪の「コス」や鹿児島島の「しらす」と呼ばれる地盤で、ジャーミングが発生し易いことが知られている<sup>1)</sup>。当社施工のトンネル工事においても、しらす地盤で

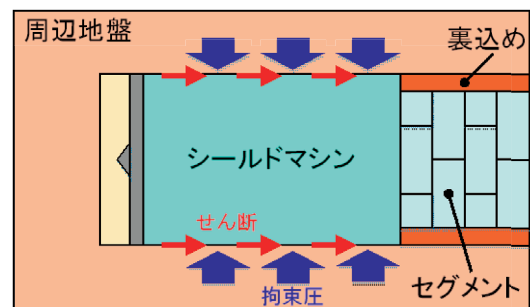


Fig.1 ジャーミングイメージ図  
(Jamming on Shield Tunnel Boring Machine)

のパイプルーフ工法（推進工法）の施工中に元押し推力が増大し、掘進不能となった事例<sup>2)</sup>がある。

以上の背景の下、筆者らは、ジャーミングが発生しやすい「しらす」を対象に、回転貫入試験を考案、実施し、ジャーミング発生メカニズムと、その対策手法として余掘りの効果について実験的に検討した。その結果、ジャーミング検知手法としてシールドマシン周面のせん断力計測が有効であることが分かった。そこで、シールドマシン周面と周辺地盤を模擬したせん断試験を実施し、せん断力の計測によるジャーミング検知手法の適用性と、その対策手法として滑材添加の効果について実験的に検討した。本報では、これらの結果について報告する。

1) 東京土木支店 Tokyo Civil Engineering Branch

**キーワード:** シールドトンネル, ジャーミング, せん断, 余掘り, 滑材  
**Keywords:** shield tunnel, jamming, shearing, over cutting, lubricant

II. ジャーミング発生メカニズム

1. 回転貫入試験

ジャーミング発生メカニズムは、シールドマシンの掘進によってせん断を受けた周辺地盤に正のダイレイタンス（体積膨張）が生じることによって、シールドマシン周面に作用する周辺地盤からの拘束圧が増大し、シールドマシンの周面摩擦抵抗が増大することで発生する現象であると推察されている。そこで、模型地盤にコアロッドを回転貫入させて強制的に地盤にせん断を与える回転貫入試験を考案、実施した。Fig.2 に試験装置概要を示す。

(1) 地盤材料

模型地盤の材料として、ジャーミングが発生しやすいしらすを使用した。しらすは、火砕流堆積物の非溶結あるいは弱溶結部である一次しらすと、その二次堆積物である二次しらすに分類される。なお、地盤工学及び土木工学の分野では、しらすを平仮名表記としているため、本報ではそれに従い、平仮名で表記している。本報における一連の試験には、鹿児島市内で掘削採取した一次しらすのうち、37.5mmふるいを通したものを使用した。以下、本報における「しらす」は、一次しらすを指す。Table 1 にしらすの物理試験結果を、Fig.3 にしらすの粒径加積曲線を示す。しらすは一般的に土粒子密

Table 1 しらす物理試験結果  
(Results of Tests for Physical Properties of Shirasu)

|                      |          |       |
|----------------------|----------|-------|
| 湿潤密度 $\rho_t$        | $g/cm^3$ | 1.370 |
| 乾燥密度 $\rho_d$        | $g/cm^3$ | 1.119 |
| 土粒子密度 $\rho_s$       | $g/cm^3$ | 2.327 |
| 自然含水比 $w_n$          | %        | 22.5  |
| 間隙比 $e$              | -        | 1.08  |
| 飽和度 $S_r$            | %        | 48.4  |
| 礫分 (2~75mm)          | %        | 18.7  |
| 砂分 (0.075~2mm)       | %        | 64.2  |
| シルト分 (0.005~0.075mm) | %        | 14.2  |
| 粘土分 (0.005mm未満)      | %        | 2.9   |
| 最大粒径                 | mm       | 53.0  |
| 均等係数 $U_c$           | -        | 17.2  |
| 液性限界 $W_L$           | %        | NP    |
| 塑性限界 $W_p$           | %        | NP    |
| 塑性指数 $I_p$           | -        | NP    |

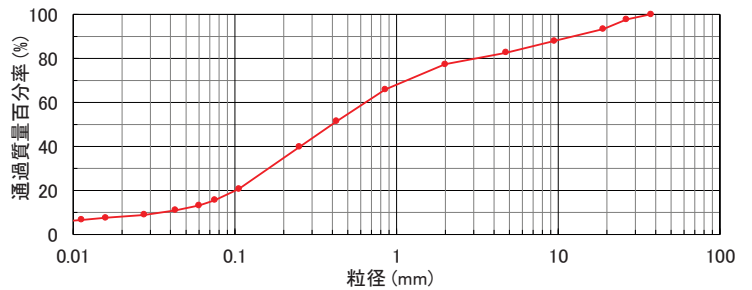


Fig.3 粒径加積曲線 (しらす)  
(Grain Size Distribution Curve of Shirasu)

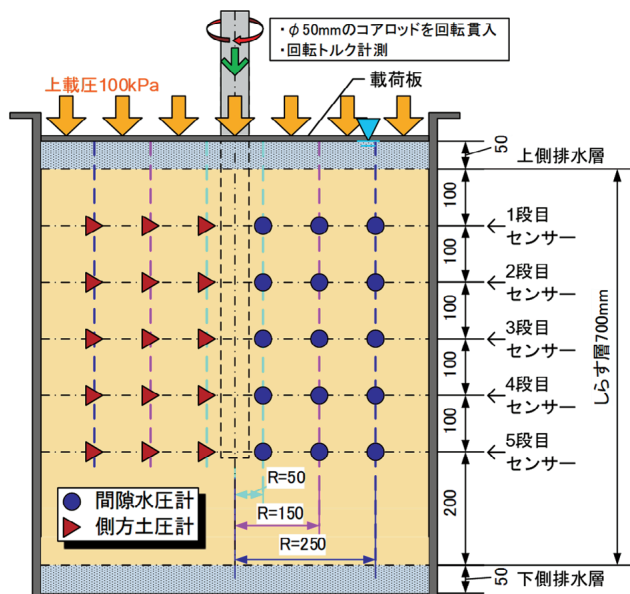
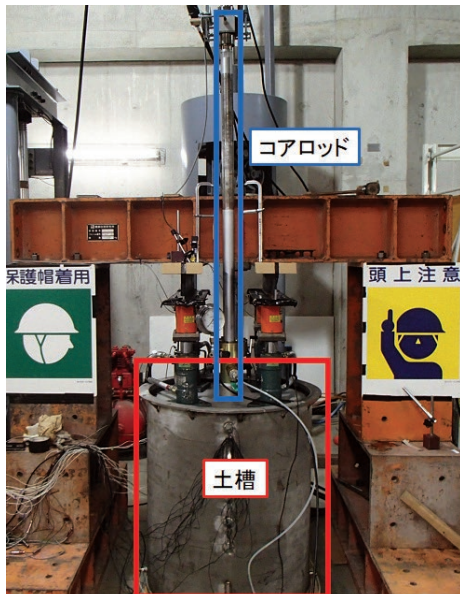


Fig.2 回転貫入試験装置  
(Rotational Penetration Test Apparatus)

度が小さく、粒子破碎を生じやすい<sup>3)</sup>とされる。Photo 1 に示すように、しらす土粒子を顕微鏡 (倍率 200 倍) で撮影すると、ガラスが割れたような角張った形状をしていることが確認できた。

(2) 模型地盤作製

自然状態の密度 (乾燥密度  $1.2\text{g/cm}^3$ ) を目標として、しらすを内径 700mm の円筒形土槽内にランマーで締め固めて密詰めの模型地盤を作製した。このとき、50mm/層で模型地盤の密度を管理し、層境では目粗しを行った。その後、土槽底部より通水して飽和させ、水位は上側排水層の天端と一致させた。コアロッドを土槽中心に据えてから、載荷版を介して油圧ジャッキで  $100\text{kPa}$  の上載圧を載荷し、試験中も上載圧  $100\text{kPa}$  を保持した。Photo 2 にコアロッド設置後の模型地盤を示す。

(3) 試験方法

回転貫入装置には、コンクリート用コアドリルを流用し、機械的に貫入可能な自動降下装置を用いた。コアロッドは直径 50mm の汎用品を用い、刃口先端には段差 1mm のコアビットを使用した。

まず、土槽境界である底部の影響を排除するために、模型地盤中心に到達する深さ 300mm を目標として回転貫入させた後、30分静置してから再度回転貫入させた。試験はコアドリルモーターの電流値出力 30% から開始し、コアロッドの回転が止まるごとに電流値を 10% ずつ上げていき、電流値 100% においてそれ以上の回転貫入が不能となった時点で終了とした。試験中は、Fig.2 に示す模型地盤内に配置したセンサで側方土圧と間隙水圧を計測した。また、コアロッドの回転トルクと貫入深さを計測した。

(4) 試験結果と考察

Fig.4 に貫入量とトルク、3 段目計測ライン (Fig. 2 参照) の間隙水圧及び水平有効土圧の増分の時系列データを示す。ここで、各増分は上載圧載荷による排水が完了し、コアロッドを貫入させる直前の状態を基準としており、水平有効土圧の増分は、側方土圧計と間隙水圧計の計測値の差分である。コアロッドの接近に伴い、最も内側 (土槽中心から 50mm) で計測した間隙水圧増分と水平有効土圧増分が徐々に上昇しており、コアロッド先端の回転貫入による応力伝搬が確認できる。300mm 貫入し、30 分間停止した後に回転貫入を再開したところ、トルク及び周辺地盤の水平有効土圧が急激に上昇し、回転不能となった。筆者らは、これがジャミングの発生であると判断した。その後、回転が止まるごとに電流値出力を上げていったが、400mm 貫入した時点でそれ以上の回転貫入が不



Photo 1 しらす土粒子 (顕微鏡 200 倍)  
(Scanning Electron Microscope Image of Shirasu Soil Particle, 200x)

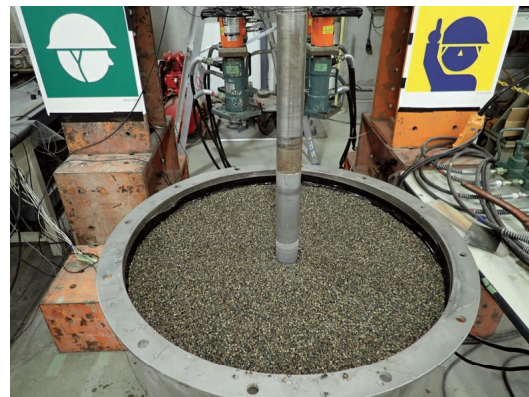


Photo 2 模型地盤  
(Model Ground for Rotational Penetration Test)

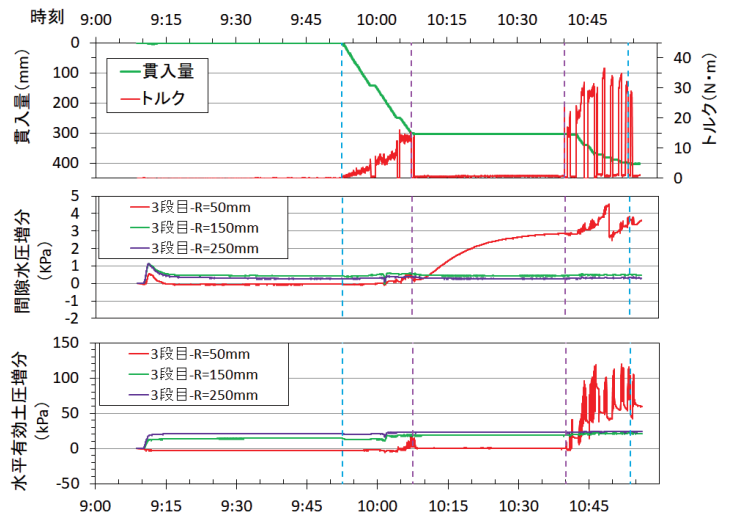


Fig.4 時系列データ (貫入量, トルク, 間隙水圧, 水平有効土圧)

(Time Series Data (Penetration amount, Torque, Increase of Excess Pore Water Pressure, Increase of Horizontal Effective Earth Pressure))



能となったため試験終了とした。

Fig.5 は、水平有効土圧増分を側方土圧計の位置（土槽中心からの距離）に対してプロットした図である。水平有効土圧増分は、貫入量 300mm, 350mm, 400mm 時点の値を用いた。貫入量 300mm では、中心から 50mm の側方土圧計の水平有効土圧増分がわずかに大きい程度であるが、貫入量が 350mm, 400mm と大きくなると、中心から 50mm の側方土圧計の水平有効土圧増分が大きくなった。一方で、中心から 150mm, 250mm の側方土圧計の水平有効土圧増分はほとんど変わらなかった。

このことから、回転貫入に伴うせん断の作用によって、コアロッド近傍の周辺地盤は正のダイレイタンス（体積膨張）が生じて、水平有効土圧が増加するとともに、コアロッドが拘束されたものと推察される。また、このコアロッド回転貫入によるせん断の影響範囲は、コアロッド周面から 25mm（コアロッド半径に等しい）程度であると考えられる。

以上のように、新たに考案し、実施した回転貫入試験により

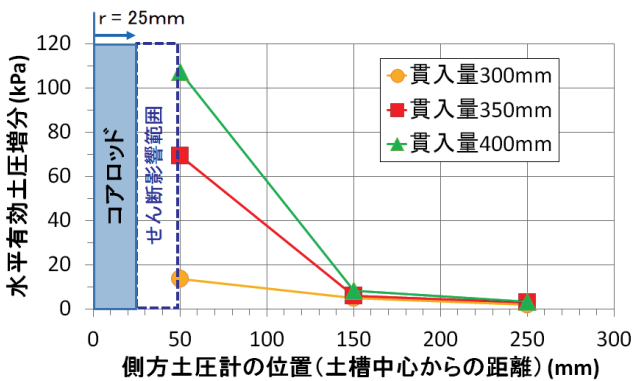


Fig.5 コアロッドのせん断によるダイレイタンスの影響範囲  
(Range of Influence of Dilatancy of due to Shearing of Core Rod Penetration)

って、ジャーミングを再現することができ、ジャーミング発生には、コアロッド周辺地盤からの拘束圧増加による影響が大きいことを確認した。この拘束圧の増加がコアロッド貫入時のせん断に伴う正のダイレイタンス（体積膨張）によるものと考えられることから、実施工においてはシールドマシン周面のせん断力を計測することで、ジャーミング発生の予兆を捉えることができると考えられる。

## 2. 対策手法「余掘り」の検討

ジャーミングの対策手法として、余掘りが挙げられる。これは、Fig.6 に示すように、カッター面盤外周のコピーカッターで、シールドマシン周辺地盤を余掘りし、拘束圧を低減させる手法である。そこで、回転貫入試験を実施し、余掘りによる拘束圧低減効果について検討した。

### (1) 試験方法

地盤材料及び試験手順は前述のとおりである。余掘りを再現し、その効果を確認するために、Fig.7 に示す二種類のコアロッド先端を使用した。Table 2 に試験条件を示す。余掘りあり (Case1) の先端は市販されている一般的なコアビットであり、余掘り段差は 1mm である。余掘りなし (Case2) の先端は継足し用コアチューブを切断して作製した。なお、回転貫入試験においては基本的に余掘りありのコアビットを使用した。

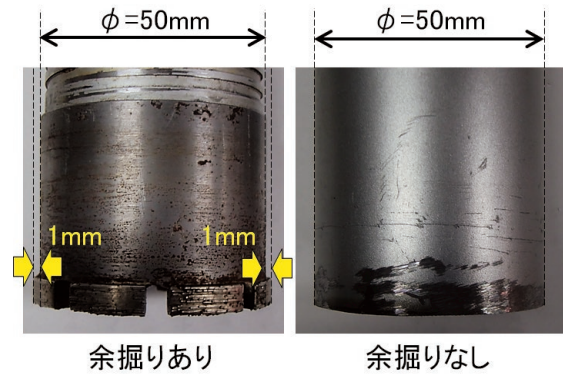


Fig.7 コアロッド先端形状  
(Cutting Edge of Core Rods for Overcut)

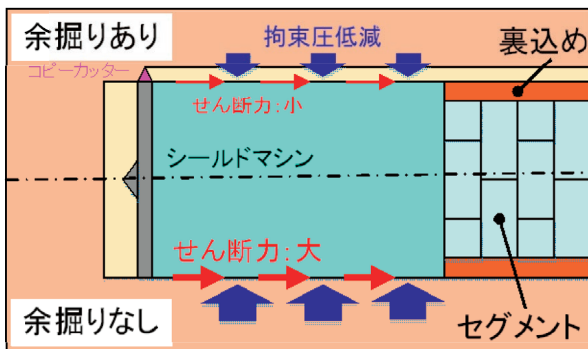
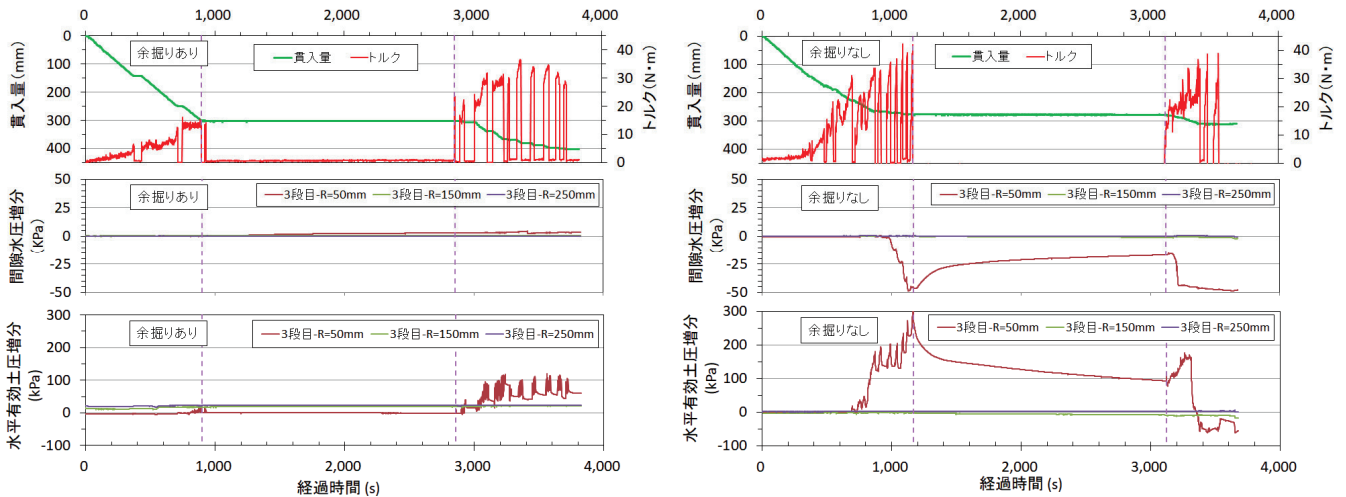


Fig.6 余掘りイメージ図  
(Overcut on Shield Tunnel Excavation)

Table 2 余掘り試験ケース  
(Overcut Test Case)

| ケース   | 乾燥密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 上載圧<br>kPa | 余掘り |
|-------|---------------------------|------------|-----|
| Case1 | 1.176                     | 100        | あり  |
| Case2 | 1.205                     | 100        | なし  |



Case1：余掘りあり

Case2：余掘りなし

Fig.8 余掘り効果の確認，時系列データ（貫入量，トルク，間隙水圧，水平有効土圧）

(Verification of Overcut Effect, Time Series Data (Penetration Amount, Torque, Increase of Excess Pore Water Pressure, Increase of Horizontal Effective Earth Pressure))

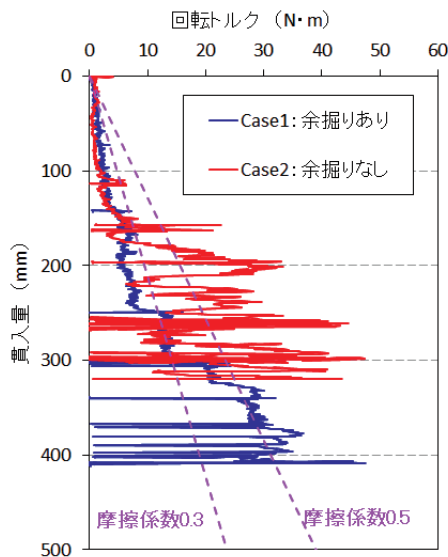


Fig.9 余掘り効果の確認，貫入量とトルクの関係 (Verification of Overcut Effect, Relationship between Penetration Amount and Torque)

(2) 試験結果と考察

Fig.8 に貫入量とトルク，3 段階計測ラインの間隙水圧及び水平有効土圧増分の時刻歴データを示す。水平有効土圧増分の求め方は前述のとおりである。

余掘りなしの Case2 では，貫入量 280mm 付近から，最も内側に設置（土槽中心から 50mm）した間隙水圧計の計測値が急激に低下している。これは，コアロッドの回転によって，コアロッド周辺地盤がせん断を受け，正のダイレイタンス（体積膨張）が生じたことによって，負圧が発生したためと考えられる。一方，余掘りありの Case1 では間隙水圧が微増

している。Case1 では，コアロッド周辺地盤がせん断を受けても，余掘りにより周辺地盤との接触が少なくなり，Case2 ほどせん断力が大きくなり，正のダイレイタンス（体積膨張）が小さかったためと考えられる。水平有効土圧増分に着目すると，コアロッド回転時に増大していることから，せん断を受けた時に大きな拘束圧が生じたことが分かる。これは，特に余掘りなしの Case2 で顕著である。

Fig.9 に貫入量とトルクの関係を示す。余掘りありと余掘りなしのいずれも貫入量が大きくなるにつれてトルクが増加（すなわち，コアロッド周面と周辺地盤の境界に作用するせん断力が増加）している。また，コアロッドと周辺地盤との摩擦係数を 0.3 及び 0.5 と仮定した場合の想定トルクを Fig.9 の図中に示す。トルク T は，(1) 式で表される。

$$T = \sigma_H \cdot \pi D \cdot L \cdot D/2 \cdot \mu \cdot \dots \cdot (1)$$

ここに，

- T：トルク (N・m)
- $\sigma_H$ ：水平全土圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- D：コアロッド径 (m)
- L：貫入量 (m)
- $\mu$ ：摩擦係数

なお，水平全土圧  $\sigma_H$  は，しらすの内部摩擦角を 40 度と仮定して<sup>4)</sup> 求めた静止土圧係数 ( $K_0=0.36$ ) を用いて算出した。余掘りありの Case1 では概ね摩擦係数 0.3~0.5 に対応する想定トルクの範囲内であるが，余掘りなしの Case2 では貫入量 200mm を超えた付近からトルクが急激に大きくなり，摩擦係数 0.3~0.5 に対応する想定トルクの範囲を超えている。通常，

シールドマシンで想定される周辺地盤との摩擦係数は0.3~0.5である<sup>5)</sup>。

以上のことから、余掘りによって、シールドマシンが受ける水平有効土圧（拘束圧）を低減できることを確認できた。

### Ⅲ. ジャーミング検知

#### シールドマシン周面と周辺地盤を模擬したせん断試験

回転貫入試験の結果から、ジャーミングの発生時には、シールドマシン掘進時に周辺地盤がせん断を受けて正のダイレイタンス（体積膨張）が生じて、拘束圧が増加していることが確認できた。そこで、シールドマシン周面でせん断力を計測すれば、ジャーミング発生の予兆を検知できるのではないかと考えた。ジャーミングの発生の予兆を検知することができれば、ジャーミング対策手法である余掘りや滑剤添加をより合理的に行うことができ、結果として、余掘りを大きくし過ぎることによるシールドマシンの沈下防止や、滑材コストの低減が可能になると考えられる。シールドマシン周面でのせん断力計測を再現するために、大型一面せん断試験装

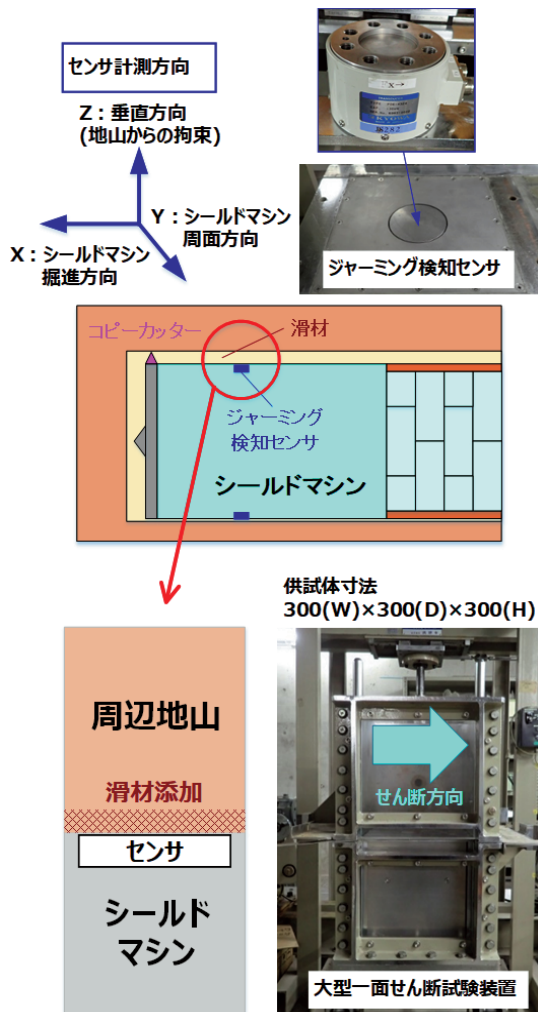


Fig.10 せん断試験装置とジャーミング検知センサ (Direct Shear Test Apparatus and Jamming Detection Sensor)

置を用いて、シールドマシン周面と周辺地盤を模擬したせん断試験を考案、実施した。Fig.10 に試験概要を示す。

#### (1) 地盤材料

地盤材料として、回転貫入試験と同様に、ジャーミングが発生しやすいしらすを用いた。また、粒度の良いしらすとの比較として、粒度の悪い東北珪砂7号を用いた。Fig.11 に使用した材料の粒径加積曲線を示す。

#### (2) 試験方法

大型一面せん断試験機の下側土槽には、シールドマシン周面（スキンプレート）を模擬して上端面に金属板を設置し、その中心には X（シールドマシン掘進方向）、Y（シールドマシン周面方向）、Z（周辺地盤からシールドマシン周面への垂直方向）の三方向（Fig.10 参照）の荷重を計測可能なジャーミング検知センサを設置した。なお、今回の試験モデルは二次元（X, Z）であるため、試験結果の評価には X 方向と Z 方向の荷重のみを使用した。上側土槽には、周辺地盤を模擬するためにランマーで締め固めて密詰め地盤を作製した（50mm/層）。模型地盤作製後、上載圧 100kPa で載荷し、試験中もこれを保持した。上載圧載荷後、シールドマシンの低速掘進時を想定したせん断速度 0.7mm/min でせん断を行い、試験中の垂直土圧とせん断応力を計測することでジャーミング検知を試みた。さらに、ジャーミング対策として行われている滑材注入を模擬した試験を行った。Table 3 に試験ケースを示す。

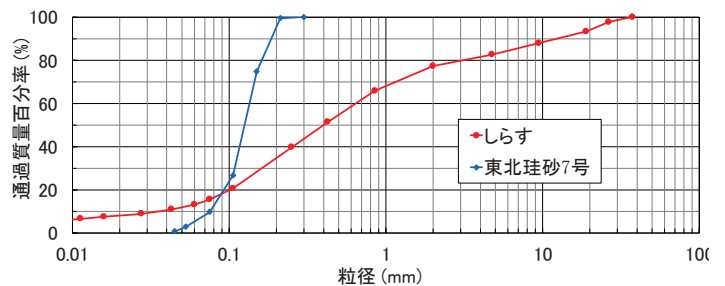


Fig.11 粒径加積曲線（しらす，東北珪砂7号） (Particle Size Accumulation Curve of Shirasu and Tohoku Silica Sand No.7)

Table 3 せん断試験ケース (Direct Shear Test Case)

| ケース     | 材料  | 乾燥密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 上載圧<br>kPa | 試験条件    |
|---------|-----|---------------------------|------------|---------|
| Case1   | しらす | 1.212                     | 100        | 滑材なし    |
| Case2   | 珪砂  | 1.572                     |            |         |
| Case3-1 | しらす | 1.221                     |            | 滑材注入30% |
| Case3-2 |     | 1.228                     |            | 滑材注入40% |
| Case3-3 |     | 1.220                     |            | 滑材注入50% |

(3) 試験結果と考察

シールドマシン周囲のせん断応力（試験で計測したせん断応力  $\sigma_x$ ）を、周辺地盤からの拘束圧（試験で計測した垂直土圧  $\sigma_z$ ）で除した値を摩擦係数とし、これをジャーミング発生判断のための指標とした。Fig.12 に摩擦係数とせん断変位の関係を示す。しらすと東北珪砂7号のいずれも、せん断が進むにつれて摩擦係数が増加する傾向にある。東北珪砂7号は値の振れ幅が小さく、摩擦係数は最大0.5程度で安定している。一方で、しらすは値の振れ幅が大きく、計測終了まで摩擦係数が増加し続けており、最終的に0.7を超えた。しらすの値の振れ幅が大きい理由として、しらすの土粒子形状が扁平で角張っていることが考えられる（Photo 1 参照）。また、シールドマシン周囲の摩擦係数は一般に0.3~0.5を採用することが多いが、今回の試験結果では0.7を超えており、ジャーミングが発生しやすいしらすの特徴が表れている。以上のことから、ジャーミング検知センサによって、ジャーミングの発生が検知できると判断した。

(4) 滑材注入による摩擦低減効果

シールド工法におけるジャーミング対策として、前述した余掘りと、これに加えて余掘り部への滑材注入が行われている。そこで、前述したせん断試験において、金属面と模型地盤の境界部分に、余掘り部を模擬して、滑材（Fig.13）を混合した地盤を作製し、滑材による摩擦低減効果をジャーミング検知センサで確認した。滑材の混合量は余掘り部の体積に対する混合率で表した。Fig.14 に、滑材を用いた場合のせん断試験の結果を示す。いずれのケースにおいても、せん断が進むにつれて摩擦係数は増加しているが、滑材の混合率を増やすほど摩擦係数の最大値は0.7超から0.5程度まで減少しており、滑材による摩擦低減効果が確認できた。このことから、ジャーミング検知センサを使用することで、シールドマシン周囲が受ける摩擦抵抗を定量的に把握できるとともに、ジャーミング対策の効果をモニタリングできることが示唆された。以上の技術を実装することで、ジャーミング発生リスクを低減でき、シールドの安定掘進に資することができる。

IV. おわりに

シールド掘進におけるジャーミング発生メカニズムの解明とその検知、並びに対策効果の検証を目的として筆者らが考案、実施した試験方法と、有効性について述べた。また、ジャーミング発生の予兆を検知するジャーミング検知センサの開発は、より効率的なシールド掘進の実現に向けて、大変意義があると考えられる。今後、ジャーミング検知センサをシールドマシン実機に搭載し、シールドの安定掘進に活用していきたい。

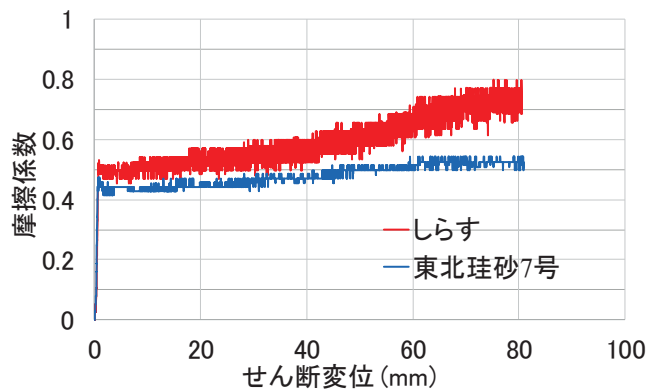


Fig.12 摩擦係数とせん断変位の関係  
(Difference in Coefficient on Friction between Shirasu and Tohoku Silica Sand No.7)



・主剤(高分子系)と助剤(ベントナイト)の二液混合タイプ  
・低流動性で弾力がある  
※写真は攪拌混合後

Fig.13 滑材  
(Lubricant used on Direct Shear Test)

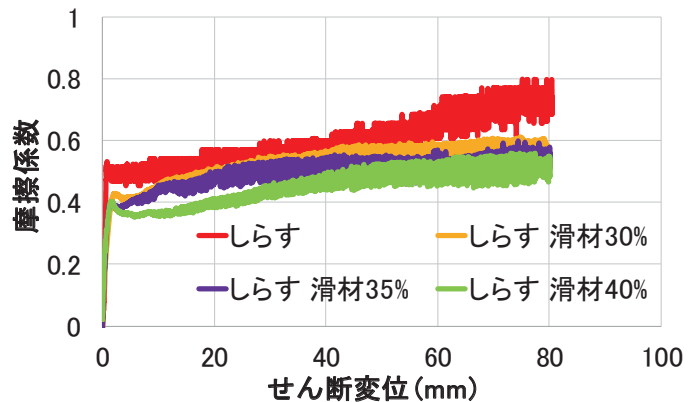


Fig.14 滑材による摩擦低減効果の確認  
(Verification of Friction Reduction Effect of Lubricant)



## 参考文献

- 1) 三村ほか；トラブルの発生しやすい地盤の特徴と特性について（地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性と対応技術），地盤工学会誌，Vol.62 No.8 No.679，2014.8，pp.53-60.
- 2) 松本ほか；シラス盛土を新しい先受け工法で克服 九州新幹線 薩摩田上トンネル，トンネルと地下，31 巻 12号，2000.12，pp.1115-1123.
- 3) 北村ほか；しらす地盤の特性と設計・施工上の留意点，基礎工，2014.12，pp.23-28.
- 4) 春山元寿；c と  $\phi$  を考える 7.シラス，土と基礎，vol.23 No.6，1975.6，pp.67-74.
- 5) 土圧式シールド工法－その理論と応用－，鹿島出版会，2009.

## Elucidation of Jamming Mechanism during Shield Tunnel Excavation and Development of Detection and Countermeasure Technology

*Kotaro Kubota, Kenichi Kawano, Hideki Nagatani, and Yusuke Nakajima<sup>1)</sup>*

When a shield tunnel boring machine becomes jammed, excavation becomes impossible due to the restraint of the surrounding ground. Once this occurs, the damage to segments caused by the increased thrust of the machine is a serious problem. However, the mechanism of occurrence has not been elucidated. In Japan, this issue occurs particularly in problematic soils such as *Kosu* in Osaka and *Shirasu* in Kagoshima. Therefore, we devised a rotational penetration model experiment using *Shirasu*, and verified the jamming mechanism and overcut which is used as a countermeasure for jamming. As a result, we confirmed that the increase of the surrounding earth pressure caused the jamming when a shear force was acting on the ground and the overcut had the effect of reducing the pressure. Additionally, based on the findings of these experiments, we devised a direct shear model experiment simulating the ground surrounding a shield machine, and installed a sensor for promptly detecting the jamming. We also verified the applicability of jamming detection by the sensor, and of a lubricant as a countermeasure for jamming. As a result, we confirmed that the measurement of friction coefficient by the sensor is effective for detecting jamming.