

# 開削トンネルの地震時せん断変形挙動における 函体表面力計測試験

西野 風雅<sup>1</sup>・伊野 将矢<sup>2</sup>・島田 貴文<sup>3</sup>・西岡 英俊<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: a17.dxsm@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: a18.b4e6@g.chuo-u.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 (株)HRC 研究所 東京事務所 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 2-5-4 第二亀谷ビル)  
E-mail: t-shimada@hrc-ri.co.jp

<sup>4</sup> 正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: nishioka@civil.chuo-u.ac.jp

開削トンネル等の地中構造物は耐震設計において構造物と地盤の関係性を適切に考慮する必要があるが、これまでの既往の研究の多くは解析的手法であり、特に地盤の非線形性に着目した実験的研究は少ない現状である。本研究では、函体がせん断変形するメカニズムを解明するため、アルミ棒模型地盤、2方向ロードセルを有する函体模型を用いて函体表面に作用する力を計測した。模型実験における計測結果より、函体剛性が高いケースでは、函体がせん断変形するメカニズムとして、せん断力由来の力が生じた後、偶力モーメントが変形を追うような動きを見せることが確認できた。また、函体表面の滑動においては全面同時に滑動するのではなく、1面ごとに滑動が生じ始める挙動を確認した。

**Key Words:** cut and cover tunnel, shear deformation behavior, shear soil tank, shear stiffness ratio

## 1. はじめに

開削トンネル等の地中構造物は、周囲を地盤で囲まれていることから、その耐震設計において構造物と地盤の関係性を適切に評価する必要がある。一般に耐震設計において考慮すべき地震作用には、主に慣性力に起因するものと周辺地盤のせん断変形に起因するものがある。開削トンネル等の地中構造物の多くは比較的大きな内空を有することから、これらのうち慣性力の影響は小さく、地盤変位の影響が支配的になる。開削トンネルに限らず基礎構造物等も含めて地中に人工的に建設された部材(以下、地中部材)の周辺地盤にせん断変形が生じると、地中部材近傍の地盤のひずみ・応力の状態が地中部材のない場合に比べて変化するとともに、地中部材と地盤との接触力(地盤反力)の状態が変化し、結果的に地中部材にも変形が生じることとなる。よって、地盤変位の影響が支配的となる開削トンネルの耐震設計においては、このような地盤との相互作用を詳細に把握することが重

要となっている。

地盤変位の影響が支配的となる地震時の開削トンネルと地盤の相互作用は、開削トンネルの躯体(以下、函体)の剛性と地盤の剛性の比率に大きく依存すると考えられる。これらの研究では、函体単独での単純せん断変形量から全体的なせん断弾性係数  $G_s$ (以下、函体剛性)を求め、地盤のせん断弾性係数  $G_g$ (以下、地盤剛性)との比(以下、せん断剛性比  $G_g/G_s$ )に着目して、解析的な検討を行っている。ただし、これらの解析的検討では、主に函体の非線形挙動に着目しており、地盤については等価線形剛性を用いた線形材料として扱われているため地盤の非線形挙動に着目した検討とはなっていない。

この相互作用に及ぼす地盤の非線形性の影響を検討するためには、地盤材料を用いた実験的な検討の蓄積が不可欠であり、重力場や遠心場でせん断土槽を用いた実験りは数多く実施されている。しかしながら、地盤材料を用いた実験的な検討では、模型の剛性を自由に設定することが難しいことなどもあり、このようなせん断剛性比

$G_g/G_s$ の違いにも着目した実験的な検討事例は原子力分野<sup>2)</sup>などでいくつか事例はあるものの、まだ少ない現状である。また、耐震設計法としても、このようなせん断剛性比 $G_g/G_s$ は直接的には取り扱われていない。

以上より、本研究グループではこれまで、特に両者の剛性比に着目した小型模型によるアルミ棒積層体地盤のせん断土槽実験<sup>3)</sup>を実施してきたが、小型模型実験では、函体模型に作用する表面力が計測出来ないという課題があった。

そこで新たに大型化したせん断土槽と剛性をより自由に設定でき、かつ2方向ロードセルにより表面力が測定可能なヒンジ型函体模型を用いた実験装置を開発・製作した。これらの装置を用いた測定結果例として、函体模型各面に作用する垂直合力 $N$ 、せん断合力 $S$ 、モーメント合力 $M$ の測定結果について報告した<sup>4)</sup>。この報告では、函体周面全面を地中に囲まれた状態を模擬したが、函体模型、模型地盤から生じる相互作用を詳細に把握することが非常に困難であった。

よって、本研究では、函体模型を土槽底面に設置することで、下床板回転角や函体模型の沈下傾向などの境界条件を取り除いた単純せん断試験を実施した。また、異なる剛性の函体を用いることで、函体剛性の変化が函体変形挙動に及ぼす影響も確認した。

## 2. 実験概要

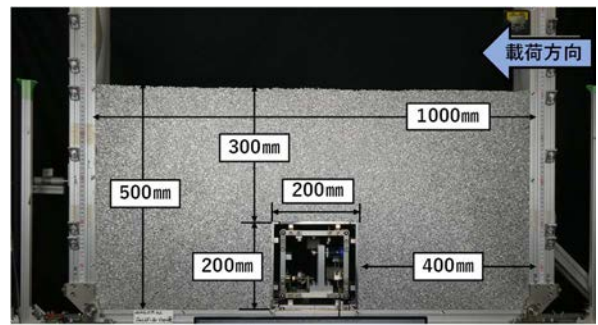
### (1) 模型地盤および実験装置

本実験に用いた実験装置の外観（せん断変形前後）を図-1に示す。せん断土槽は、内面間距離1000mmの左右の側壁（アルミフレーム製）の上端・下端にピンヒンジを有し、単純せん断変形が可能となっている。この土槽に高さ500mmまで模型地盤を構築した。

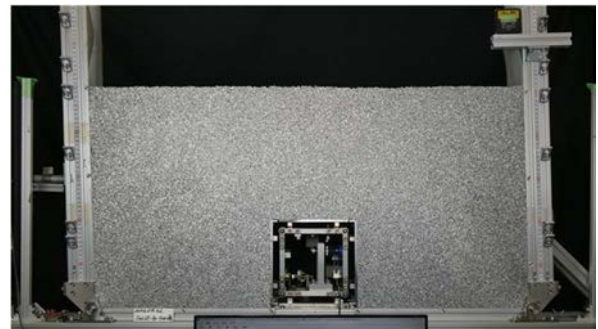
模型地盤は、長さが150mm、直径1.5mm、2mm、3mmの3種類のアルミ棒を重量比1:1:1で混合して積み上げたものである。アルミ棒積層体は、中密な砂に似た強度特性・変形特性を有している。本実験では、混合したアルミ棒約10kg分を1層として撒き出し、1層として撒き出し、突き固め板を用い、アルミ棒の幹を整えながら、模型地盤全体での単位体積重量が $21.7\text{kN/m}^3$ となるよう構築した。

この模型地盤の上面を解放した状態で、土槽側壁に設置したジャッキで水平方向に載荷し、模型地盤にせん断変形を生じさせた。なお、土槽の側壁内面はアルミフレームとアルミ棒間に生じる摩擦を低減させるため、摩擦低減シートを貼り付けている。

本実験で函体模型にバネを設置したものと、バネ無の2つのケースについて、せん断土槽に作用させたせん断応力 $\tau_g$ と土槽のせん断ひずみ $\gamma_g$ （側壁の傾斜角から算出）



(a)せん断変形前



(b)せん断変形後（せん断土槽3%程度の傾斜）

図-1 実験装置の外観

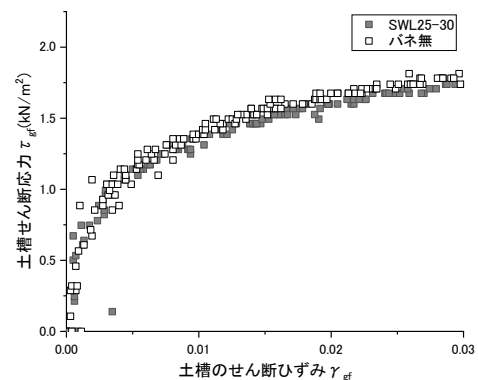


図-2 土槽のせん断ひずみと土槽のせん断応力の関係

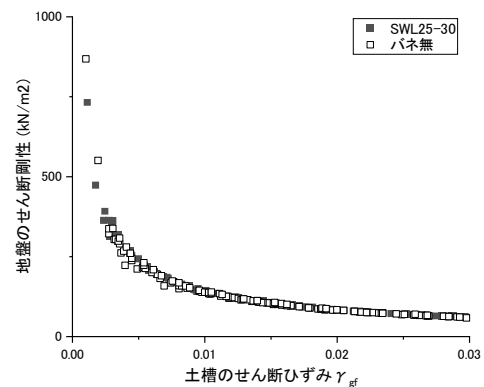


図-3 土槽せん断ひずみと土槽せん断弾性係数の関係

と、それらの割線勾配として求めた地盤のせん断剛性と土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}$  の関係をそれぞれ図-2,3に示す。なお、せん断応力  $\tau_{gf}$  は、ジャッキ荷重を地表面高さ位置に補正した値を土槽面積で除して算出している。図-2,3より、両者の値がほぼ同一の値を示していることから、再現性の高い実験が出来ているといえる。また、模型地盤は微小レベルからせん断剛性が低下していく明確な非線形性（ひずみレベル依存性）を示していることが確認できる。

## (2) ヒンジ型函体模型

今回の試験に用いた函体模型を図-4に示す。函体寸法は、一辺の長さが  $H=200\text{mm}$  の正方形断面で、奥行きは  $D=150\text{mm}$  である。また、函体重量は  $0.096\text{kN}$  である。上下床版と左右側壁がそれぞれヒンジで連結され、せん断変形を生じさせることができる構造となっており、函体内に設置したせん断変形を拘束するコイル型バネを付け替えることにより函体のせん断剛性  $G_s$  を任意に設定することができる。また、函体の4つの面には、それぞれ2組の2方向ロードセルを剛な受圧板を介して配置しており、各面に作用する表面力として、せん断力  $S$  と垂直力  $N$ 、および垂直力  $N$  の偏心量  $e$ （函体中心から垂直力作用位置までの距離）を計測することが出来る構造となっている。

なお、函体模型を設置する際には、摩擦角を確保するために、模型地盤に用いているアルミ棒を貼り付けた板を土槽底版と函体下床版との間に挟んで設置している。また、受圧板表面と模型地盤の摩擦係数計測試験を別途実施した結果、上床版、左右側壁受圧板と模型地盤の摩擦係数は  $0.2\sim 0.25$  であり、下床版のみ、 $0.4\sim 0.5$  であることを確認している。

この函体模型の周辺地盤から外力として函体各面に表面力が作用し、これによって函体模型の回転およびせん断変形を生じることとなるが、このうちせん断変形を生じさせる外力の総和は、式(1)に示す函体模型中心回りのモーメント  $M_c$  として表すことができる。

$$M_c = \sum_{i=1}^4 P_i e_i + \sum_{i=1}^4 S_i \frac{H}{2} \quad (1)$$

ここで  $S_i$ ,  $P_i$ ,  $e_i$  は、それぞれに図-5に示すように函体模型にそれぞれ正のせん断変形を生じさせる方向を正とする表面力（せん断力、垂直力およびその偏心量）である。函体模型中心回りのモーメント  $M_c$  は、函体模型体積  $V=HD$  を用いて、以下の式(2)で表すことができる。

$$M_c = \tau_s \cdot H \cdot D \times \frac{H}{2} \times 2 = \tau_s \cdot V \quad (2)$$

よって、函体模型のせん断剛性  $G_s$  と函体にせん断変形を生じさせる函体模型中心回りのモーメント  $M_c$  との関係は、単純せん断状態でのせん断応力  $\tau_s$  とせん断ひず

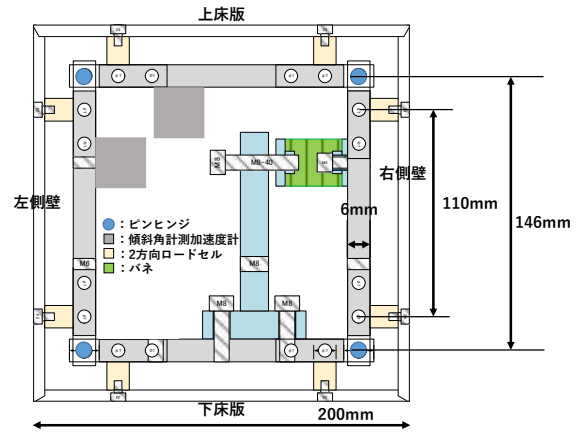


図-4 函体模型の構造

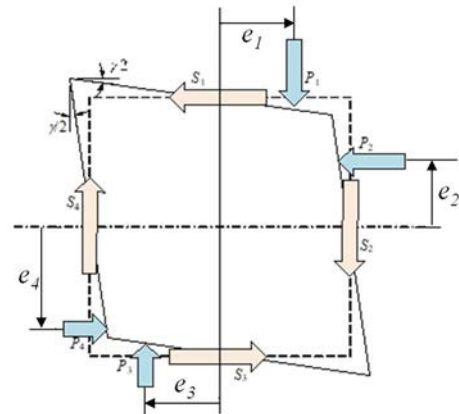


図-5 函体模型表面に作用する表面力

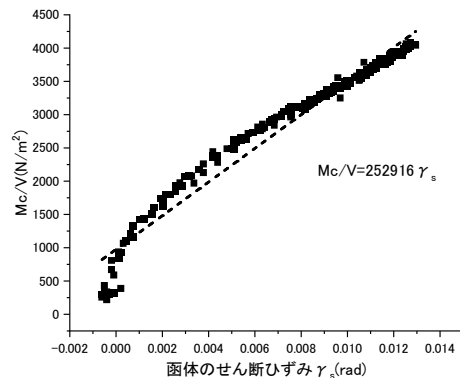


図-6 函体せん断ひずみ  $\gamma_s$  と  $M_c/V$  関係

み  $\gamma_s$  とせん断剛性  $G_s$  との関係から以下の式(3)で表すことができる。

$$G_s = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{M_c/V}{\gamma} \quad (3)$$

本実験の実験ケースは、比較的剛性の高いバネ（以下、SWL25-30）とバネ無（すなわち  $G_s$  がゼロ）を加えた計2ケースとした。

本実験で扱う函体剛性  $G_s$  については、函体のせん断

ひずみ  $\gamma_s$  (=加速度計で計測した函体側壁の傾斜角) と式(3)を用いて算出した  $M/V$  の関係 (図-6) から、線形近似曲線の傾きを算出し、 $G_s$  として取り扱っている。

( $G_s=253\text{kN/m}^2$ )。これは、別途実施した函体単独単純せん断試験<sup>9)</sup>で得られた値とほぼ同一の値を示している。

また、図-3 に示す地盤のせん断剛性と比べると、土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}=0.003$  程度を超えると、地盤のせん断剛性よりも函体のせん断剛性  $G_s$  が高くなることがわかる。

ここで、図-6 の線形近似直線が原点を通らない理由としては、実験時に函体模型が変形している途中からバネが噛み合い、剛性が変化してしまうことを防ぐために、载荷直前にバネを負方向に押し込み、バネを完全に作用させてから実験を行っており、その際の初期拘束力分の影響である。すなわち、バネ本来の変形が生じ始める前に、この初期拘束力を解放するだけの外力 ( $M$ ) が作用するまでは、非常に高い剛性を示しており、その後にバネ本来の変形が生じているということである。そのため、別途バネにクリップゲージを取り付けバネの変位量と函体側壁傾斜角により、函体負方向への押し込み量を管理した。

### (3) 模型地盤内のひずみ分布

模型地盤内のひずみ分布を確認するため、函体模型を埋設しない模型地盤単独での単純せん断試験を行い、これを DIC 法による画像解析 (10mm 角メッシュ) を行って求めたせん断ひずみ分布の一例を図-7,8 に示す。図-7,8 より模型地盤内でのせん断ひずみは、一様ではなく、ひずみレベルが大きくなるほど一部に集中し、底面付近および地表面付近にはせん断ひずみが生じにくい傾向を有していることがわかる。

本実験では、函体近傍の地盤のせん断ひずみと函体のせん断ひずみ  $\gamma_s$  との関係性を考察することを目的とすることから、土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}$  から函体設置範囲 (中央の 200mm×200mm の四角形領域) の地盤のせん断ひずみの関係を検討した。ここでは函体設置範囲の地盤のせん断ひずみとして、2 つの測定値を検討した。1 つは、DIC 法による画像解析 (図-7,8) から求めた函体設置範囲の全メッシュのせん断ひずみの平均値 (以下、 $\gamma_{gave}$ ) である。もう 1 つは、函体設置範囲の隅角部 4 点について、相関追尾方式による画像解析により変位を測定し、その四角形領域を左下と右下の三角形に 2 分割し、それぞれを定ひずみ要素と仮定してせん断ひずみを算出し、両者を平均した値 (以下、 $\gamma_{gconst}$ ) である。

土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}$  とこれらの函体設置範囲の地盤のせん断ひずみ ( $\gamma_{gave}$  および  $\gamma_{gconst}$ ) の関係を図-9 に示す。

図-9 より函体設置範囲の  $\gamma_{gave}$  は、 $\gamma_{gf}=0.003$  付近で勾配が

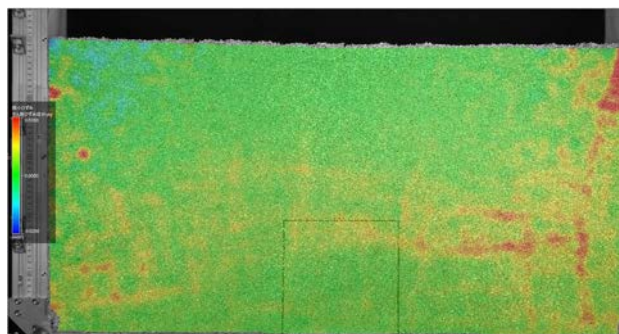


図-7 模型地盤単独のせん断ひずみ分布 ( $\gamma_{gf}=0.003$  時)

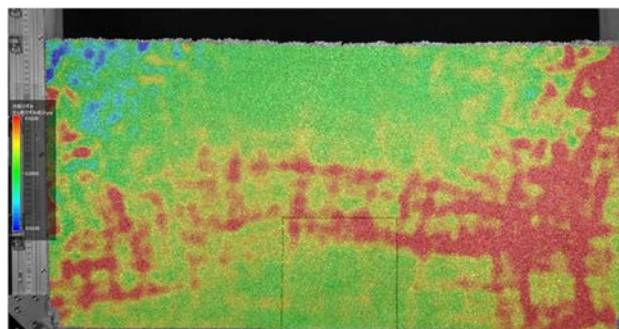


図-8 模型地盤単独のせん断ひずみ分布 ( $\gamma_{gf}=0.02$  時)

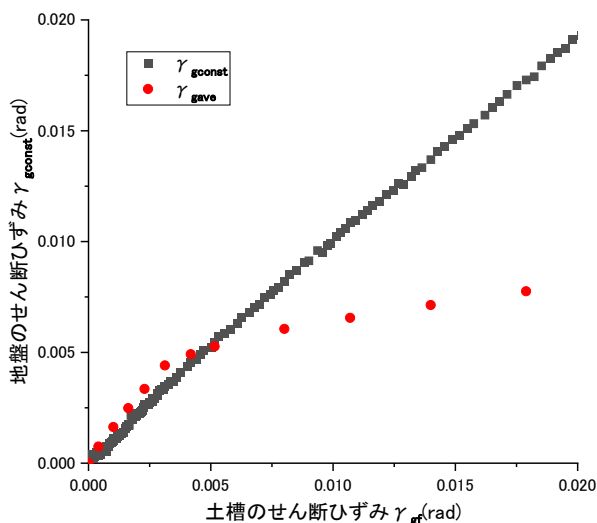
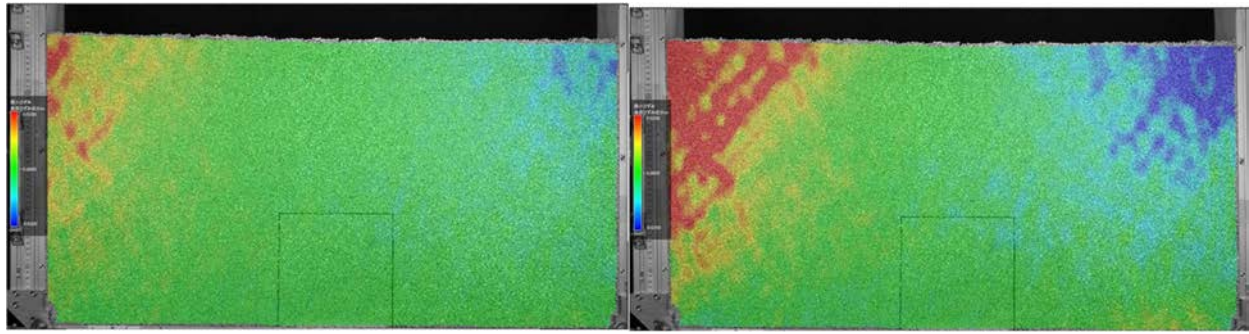


図-9 地盤のせん断ひずみ  $\gamma_{gconst}$ 、 $\gamma_{gave}$  と土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}$  の関係

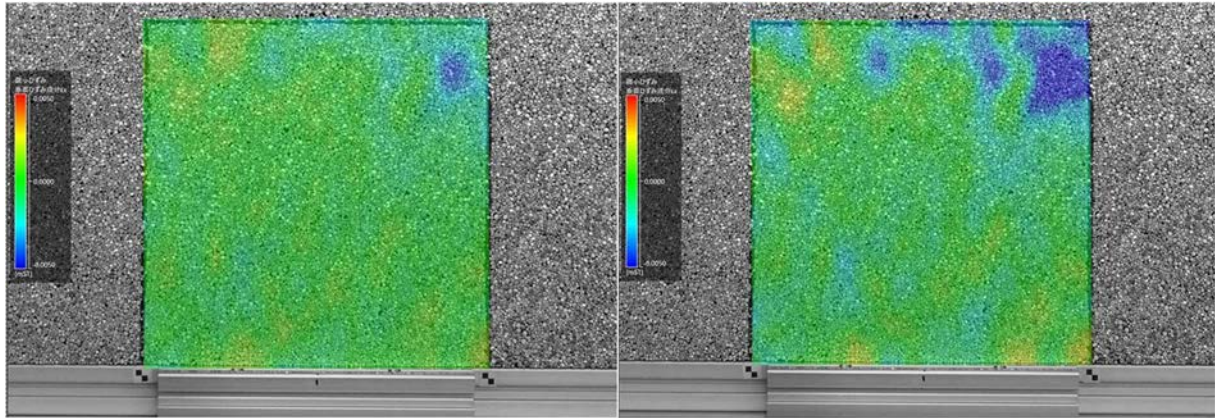
大きく低下し、土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}$  に追随しなくなっていることがわかる。一方、函体設置範囲を定ひずみ要素と仮定して求めた  $\gamma_{gconst}$  は土槽のせん断ひずみ  $\gamma_{gf}$  にほぼ追随しており、両者の線形近似直線の勾配から式(4)の関係で推定することができる。

$$\gamma_{gconst} = 0.962 \gamma_{gf} \quad (4)$$

次に、模型地盤の変形特性に関する詳細な情報を把握するべく、図-7,8 同様に、水平方向および鉛直方向の伸

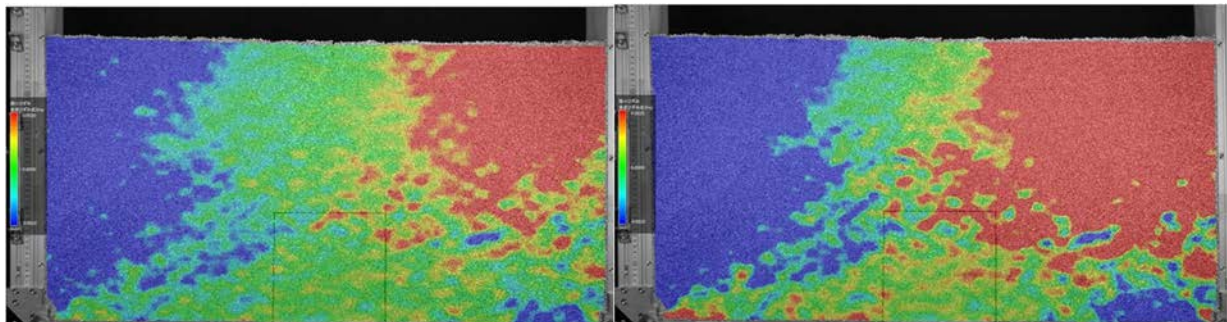


(a)土槽全体  $\varepsilon_x$  ( $\gamma_g=0.003$  時) (カラーバー $\pm 0.002$ ) (b) 土槽全体  $\varepsilon_x$  ( $\gamma_g=0.02$  時) (カラーバー $\pm 0.002$ )

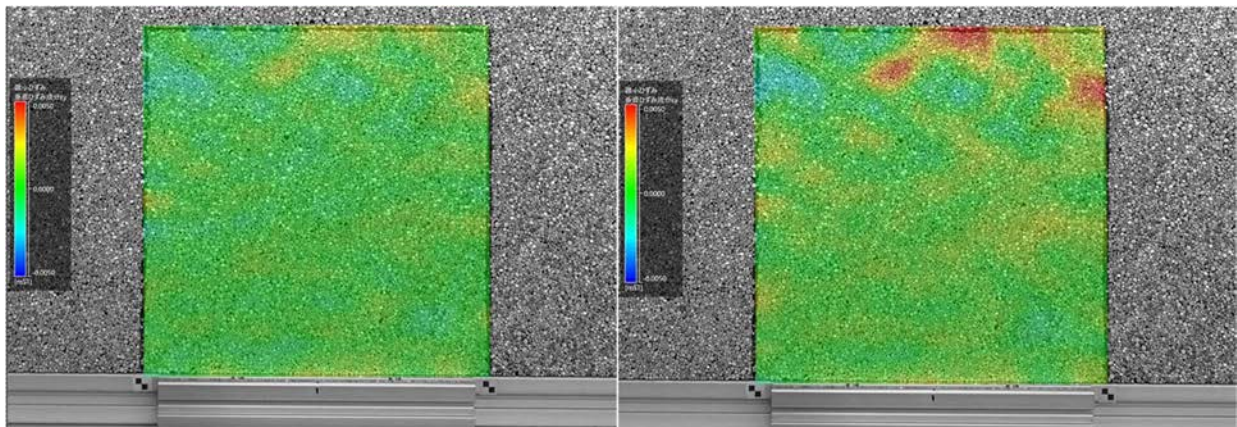


(c)函体近傍  $\varepsilon_x$  ( $\gamma_g=0.003$  時) (カラーバー $\pm 0.005$ ) (d)函体近傍  $\varepsilon_x$  ( $\gamma_g=0.02$  時) (カラーバー $\pm 0.005$ )

図-10 垂直ひずみ成分  $\varepsilon_x$



(a)土槽全体  $\varepsilon_y$  ( $\gamma_g=0.003$  時) (カラーバー $\pm 0.002$ ) (b) 土槽全体  $\varepsilon_y$  ( $\gamma_g=0.02$  時) (カラーバー $\pm 0.002$ )



(c)函体近傍  $\varepsilon_y$  ( $\gamma_g=0.003$  時) (カラーバー $\pm 0.005$ ) (d)函体近傍  $\varepsilon_y$  ( $\gamma_g=0.02$  時) (カラーバー $\pm 0.005$ )

図-11 垂直ひずみ成分  $\varepsilon_y$

びひずみ成分  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  を図-10,11 それぞれに示す. なお, 微小ひずみ状態と定常状態を比較するために, 図-9における地盤のせん断ひずみ  $\gamma_{gene}$  の勾配変化点となる  $\gamma_g=0.003$  と, 比較的ひずみレベルが大きい状態の代表として  $\gamma_g=0.02$  の2つの状態を取り上げた. また, 土槽全体の各ひずみのほかに函体設置範囲を拡大した結果も示している.

水平方向の伸びひずみ成分  $\varepsilon_x$  (図-10(a)(b)) では, 土槽左上隅角部に正の値, 右上隅角部には負の値が現れている. 函体近傍でもこの傾向は同じく右上隅角部にひずみが集中していることが確認できる.

次に鉛直方向の伸びひずみ成分  $\varepsilon_y$  (図-11(a)(b)) では, 函体模型に右側が正の値, 左側が負の値を示している. また, 緑色の部分が左上斜めの方向に伸びていることから模型地盤全体として左斜め上方向に持ち上がっている傾向が確認できる.

### 3. 実験結果

#### (1) ひずみ伝達率の関係

式(4)を用いて推定した函体設置範囲の地盤を定ひずみ要素と仮定して求めたせん断ひずみ  $\gamma_{gconst}$  と函体のせん断ひずみ  $\gamma_s$  の関係を図-13 に示す. 土槽のせん断弾性係数  $G_g$  は図-4 に示すように土槽のせん断ひずみが非常に微小レベルから明確な非線形性を有しているにも関わらず, ひずみ伝達率  $\gamma/\gamma_g$  の関係は  $\gamma_{gconst}=0.005$  までは概ね線形的な関係を示す結果となった. また, バネのあるケース(SWL-25-30)では,  $\gamma_g=0.005$  を超えたあたりから地盤のせん断ひずみの増加に伴い, ひずみ伝達率が低下する傾向を示していることがわかる.

#### (2) 各表面に働く垂直合力, せん断合力の関係

バネ無, SWL25-30の2ケースでの函体せん断ひずみ  $\gamma_s$  に対する函体各表面に働く垂直合力とせん断合力の関係を図-14 に示す. これらの合力は, 各面に設置している2つの2方向ロードセルの合計値であり, 模型地盤構築時の初期土圧も含んでいる. 各面においてバネ無, SWL25-30ともに概ね同じ値を示しており, せん断剛性  $G_s$  の違いは垂直合力  $N$ , せん断合力  $S$  には影響を及ぼさないことが確認できる.

垂直合力  $N$  に着目すると, 上床版, 下床版は緩やかな減少傾向を示し, 左右側壁は増加傾向を示していた.

次にせん断合力  $S$  に着目すると, 全体的に初期段階で急激に増加しほぼ一定の値に収束する傾向が見られ, 摩擦が切れて滑動が生じていることがわかる. その中でも上床版, 右側壁では函体のせん断ひずみ  $\gamma_s=0.001$  程度までの比較的小さいひずみレベルで滑動が生じるが, 下床版, 左側壁は比較的緩やかに増加していることから, 受圧板と模型地盤の滑動挙動にも違いがあることが確認で

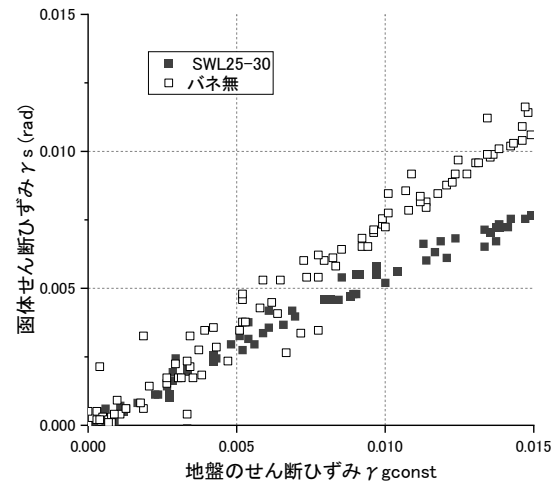


図-13 地盤のせん断ひずみ  $\gamma_{gconst}$  と函体のせん断ひずみ  $\gamma_s$  の関係

きる.

#### (3) 各表面に働くせん断変形に寄与するモーメントの関係

ここでは, 各表面に作用する垂直合力の偏心によって函体にせん断変形を生じさせるモーメント (以下, 偶力モーメント)  $M_{or}$  と, 函体にせん断変形を生じさせる各表面のせん断力に函体中心からの距離を乗じて求めたモーメント (以下, せん断力由来のモーメント)  $M_{os}$ , および各面でのそれらの和  $M_d (=M_{or}+M_{os})$  に着目し, 特に, バネ無, SWL25-30の2ケースでのこれらの差異に着目する. これらのモーメントと函体せん断ひずみ  $\gamma_s$  の関係対を図-15 に示す.

せん断力由来のモーメント  $M_{os}$  に着目すると, 図-14でのせん断合力と同様に, 2ケースともほぼ同じ傾向を示していることがわかる.

次に偶力モーメント  $M_{or}$  に着目すると, 図-14では, 実験ケースが概ね同じ値を示していたにも関わらず, 図-15では, 初期段階からバネの有無で値が乖離していることが確認できる.

次に各面での偶力モーメントとせん断力由来のモーメントの和  $M_d (=M_{or}+M_{os})$  に着目すると, 左右側壁が増加傾向で, 下床版に大きな反力モーメントが確認できる. これは, 岩着状態を模擬した実験の為, 反時計回りに回転しようとする函体模型に対し, 土槽底面で大きな反力モーメントが発現するためと考えられる.

#### (4) 函体表面に作用する合力比と偏心比の関係

函体せん断ひずみ  $\gamma_s$  に対する函体各表面に働くせん断合力  $S$  と垂直合力  $N$  の比 (以下, 合力比  $S/N$ ) および垂直合力の偏心量  $e$  を函体模型受圧板長さ  $B=200\text{mm}$  で除

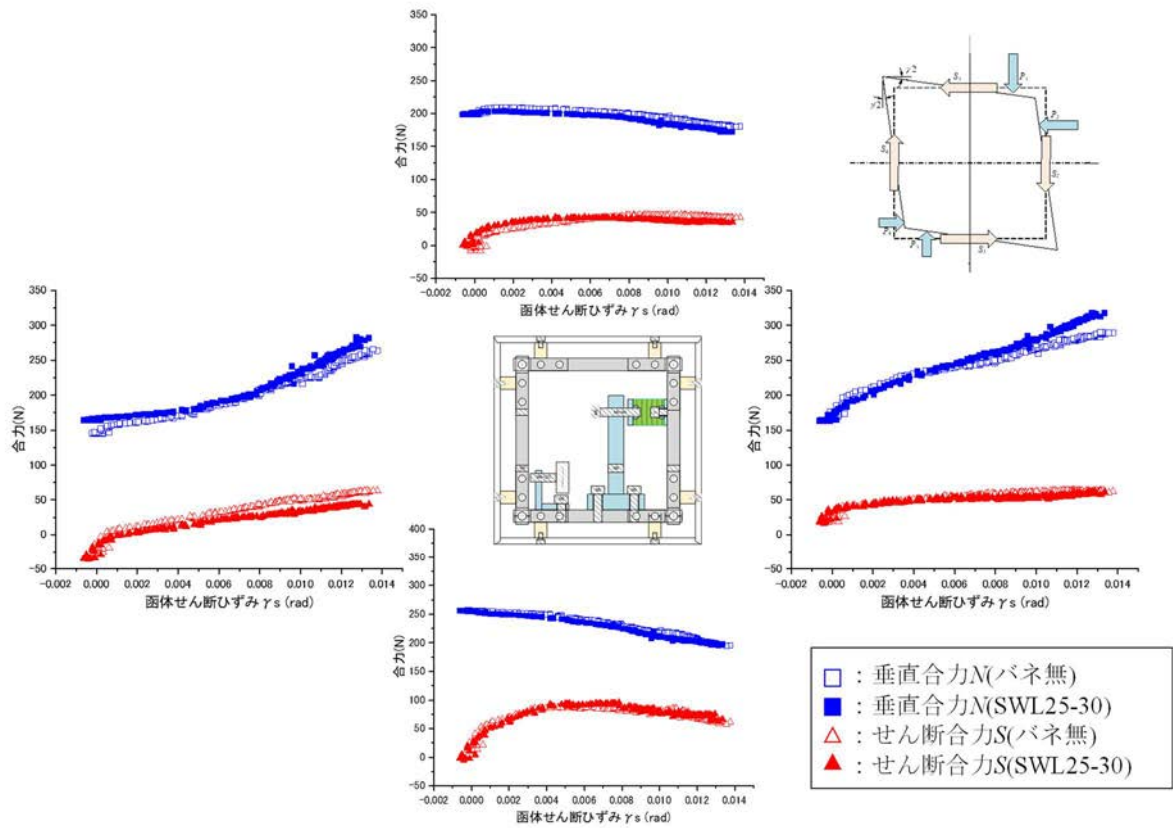


図-14 函体表面に作用する垂直合力  $N$ 、せん断合力の関係  $S$

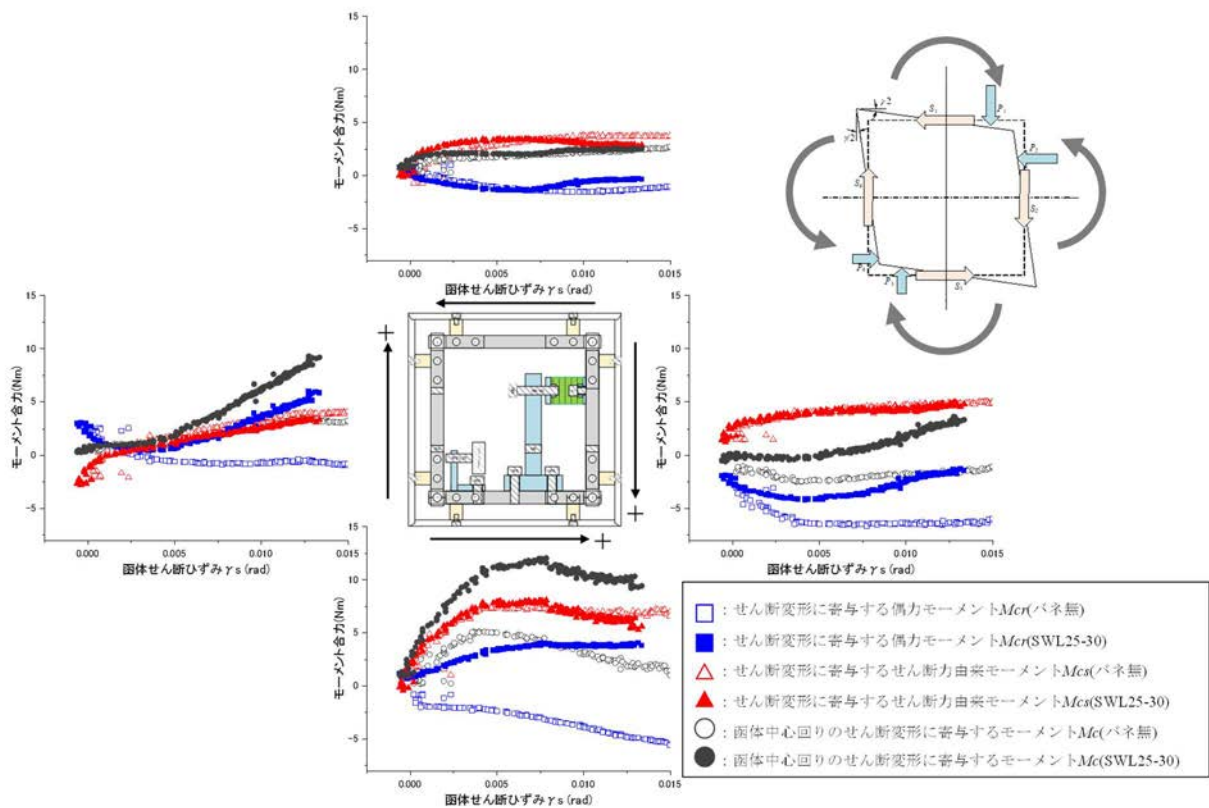


図-15 函体表面に作用するせん断変形に寄与するモーメントの関係

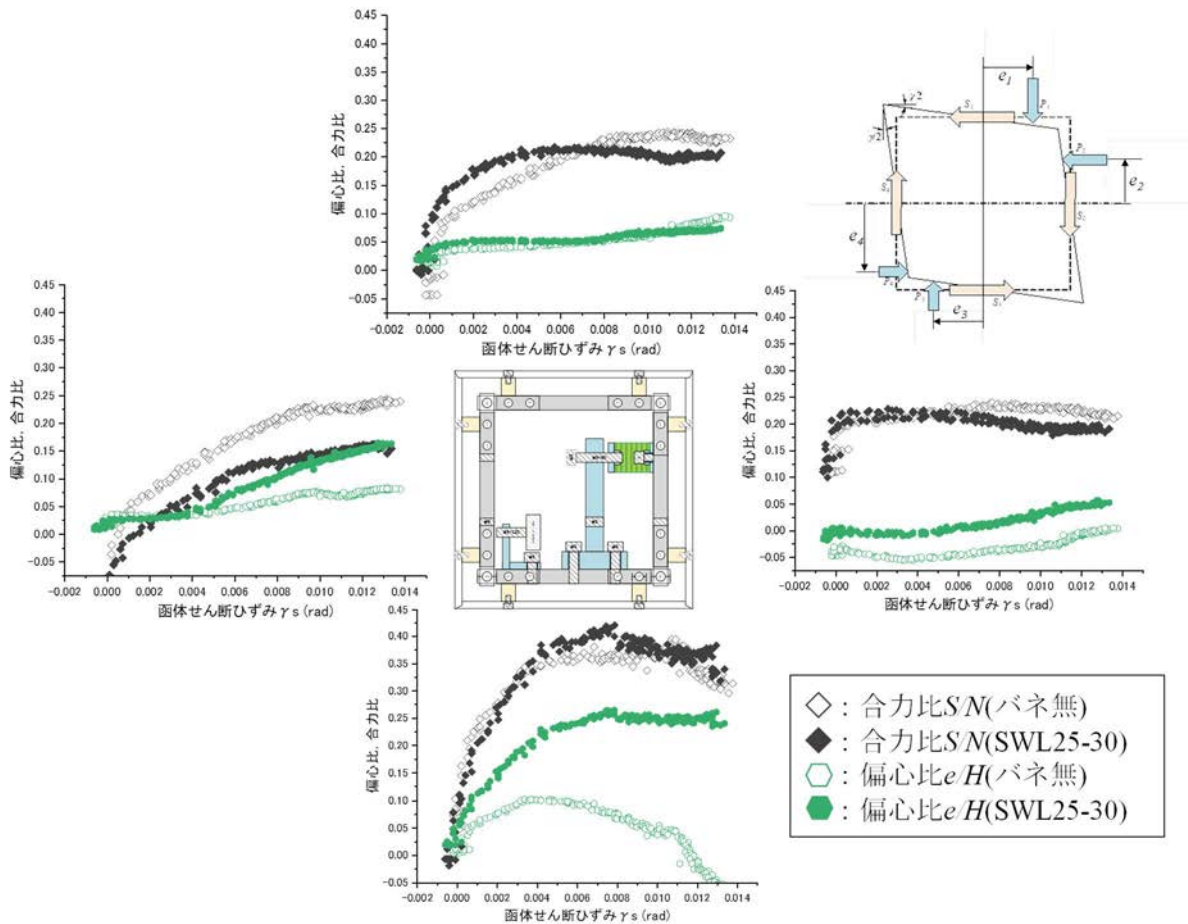


図-17 函体表面に作用する合力比と偏心比の関係

した値（以下、偏心比  $eH$ ）の関係を図-17に示す。

せん断合力による滑動の有無を摩擦係数との比較で詳細に考察するため、まず合力比  $SN$  について考察する。実験ケースを比較すると上床版、左側壁に若干の差異はあるが概ね同様の傾向を示している。

各面とも最終的には合力比は摩擦係数（下床版以外では概ね 0.2~0.25、下床版は概ね 0.4~0.5）と同程度の値で頭打ちとなっており、全ての面で滑動が生じていると考えられる。ただし、合力比  $SN$  が摩擦係数に達するまでには違いがあり、まず右側壁から合力比  $SN$  が頭打ちになり、その後、下床版、上床版、左側壁と順に頭打ちになっていく。このことから、函体模型はせん断変形する際に全ての面で同時に滑動を生じるのではなく、右側壁、下床版、上床版、左側壁と順番に滑動が生じることがわかった。

一方、偏心比  $eH$  に着目すると、上床版、右側壁においてはほぼ一定の値を示しているが、下床版、左側壁は 2 ケースで値が乖離している。特に下床版においては、初期段階化から乖離し始め函体せん断ひずみ  $\gamma_s=0.004$  付

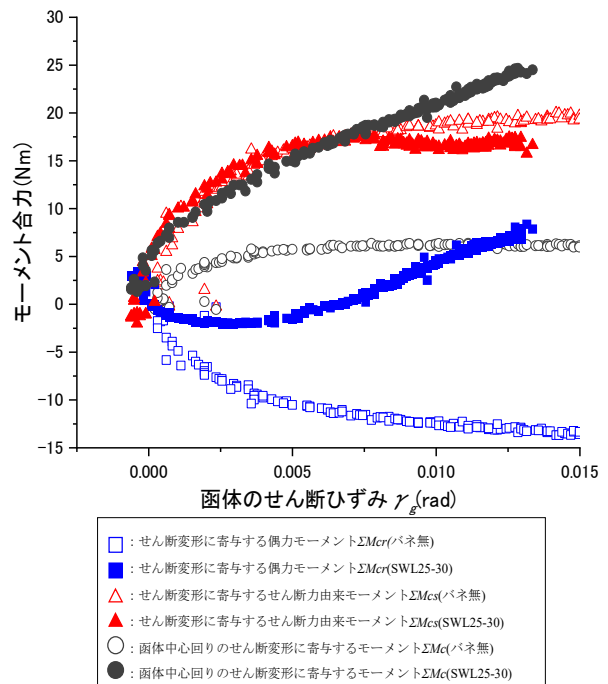


図-18 函体表面に作用するせん断変形に寄与する函体全体のモーメント合力関係

近でバネ無が偏心比  $eH=0.1$  を示し、そこから減少している。一方 SWL25-30 では、偏心比  $eH$  が増加し続け  $\gamma_s=0.008$  付近で  $eH=0.25$  を示し、頭打ちとなっている。ここで、下床板においては  $eH=1/6 \approx 0.167$  に達していることから、端部に模型地盤と受圧板の剥離（下床版を直接基礎と考えた場合の回転に伴う浮き上がり）が生じていることが確認できる。

#### (5) 函体表面に作用する函体模型中心回りに作用するせん断変形に寄与する函体全体モーメント合力の関係

函体せん断ひずみ  $\gamma_s$  に対する バネ無, SWL25-30 の 2 ケースでの函体各表面に働くせん断変形に寄与する函体全体の偶力モーメント合力  $\Sigma M_{oi}$ , せん断変形に寄与する函体全体のせん断力由来のモーメント合力  $\Sigma M_{si}$ , 函体中心回りのせん断変形に寄与する函体全体のモーメント  $\Sigma M_d (\Sigma M_{oi} + \Sigma M_{si})$  の関係を図-18 に示す。

まず、せん断力由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  に着目すると、これまでと同様に、実験ケースでモーメント合力の乖離は見られず、函体剛性  $G_s$  の違いによる影響は小さいことがわかる。

次に偶力モーメント合力  $\Sigma M_{oi}$  に着目すると、バネ無の場合には、せん断力由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  を相殺するような傾向を示すことが確認できる。

一方で、バネ有 (SWL25-30) では、バネ無のようなせん断力由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  を相殺するような力を発揮せず、特に函体せん断ひずみ  $\gamma_s=0.005$  付近以降で函体のせん断変形を生じさせる方向の偶力モーメント合力  $\Sigma M_{oi}$  が増加していくことが分かる。

また、函体中心回りのせん断変形に寄与する函体全体のモーメント  $\Sigma M_d (\Sigma M_{oi} + \Sigma M_{si})$  (以下、函体中心回りのせん断変形モーメント  $\Sigma M_d$ ) に着目すると、バネ無では、函体中心回りのせん断変形モーメント  $\Sigma M_d=5\text{Nm}$  の状態のまま函体のせん断ひずみ  $\gamma_s$  が増加している。この時の  $\Sigma M_d=5\text{Nm}$  については、別途実施した実験においてもこの値に収束していたことから、せん断土槽 (図-1) 隅角部のピンヒンジが噛み合うまでの初期拘束力であると考えている。一方 SWL25-30 では、函体中心回りのせん断変形モーメント  $\Sigma M_d$  は概ね線形的に増加している。

これらより、函体剛性  $G_s$  が地盤より高い場合、せん断変形するメカニズムとして、载荷初期は、せん断力由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  が函体をせん断変形させており、頭打ちになった以降は、偶力モーメント  $\Sigma M_{oi}$  が函体にせん断変形を生じさせようとする傾向があることが確認できた。

## 5. まとめ

本研究では、中密な砂に似た強度特性・変形特性を有する模型地盤中に設置した 2 方向ロードセルを有した函

体模型で函体模型の各面の表面力を測定する模型実験を実施した。本実験ではバネ無とバネ有 (SWL25-30) の 2 つの実験ケースを実施し、函体剛性  $G_s$  の違いによる表面力の変化について比較した。

本研究で得られた知見について、以下にまとめる。

- 1) 地盤のせん断弾性係数  $G_g$  が明確な非線形性 (ひずみレベル依存性) を有しているにも関わらず、函体のせん断ひずみ  $\gamma_s$  と地盤のせん断ひずみ  $\gamma_g$  の比率は、地盤のせん断ひずみ 0.5% 程度までのひずみレベルで概ね線形的な関係を示し、その比率が函体剛性に依りて異なることが実験的に確認された。
  - 2) 函体周面に作用する垂直合力  $N$ , せん断合力  $S$  は、函体剛性  $G_s$  の違いによる影響が少ないことが確認できた。
  - 3) 函体周面に作用する函体変形に寄与するモーメントを偶力モーメント  $M_{oi}$ , せん断力由来のモーメント  $M_{si}$  に分離して考察したところ、偶力モーメント  $M_{oi}$  は 2) の結果にも関わらず、函体剛性  $G_s$  の違いに伴い、値が乖離することがわかった。
  - 4) 合力比  $SN$  と偏心比  $eH$  について考察した結果、函体全面が同時に滑動するのではなく、右側壁→下床版→上床版→左側壁と 1 面ずつ順番に滑動する傾向が確認できた。
  - 5) せん断変形に寄与する函体全体の偶力モーメント合力  $\Sigma M_{oi}$ , せん断変形に寄与する函体全体のせん断力由来のモーメント合力  $\Sigma M_{si}$ , 函体中心回りのせん断変形に寄与する函体全体のモーメント  $\Sigma M_d (\Sigma M_{oi} + \Sigma M_{si})$  の関係から、函体剛性  $G_s$  が低いケースでは、せん断由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  と偶力モーメントが相殺する傾向を示し、函体剛性  $G_s$  が高いケースでは、バネ無のようなせん断力由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  を相殺するような力を発揮せず、特に函体せん断ひずみ  $\gamma_s=0.005$  付近以降で函体のせん断変形を生じさせる方向の偶力モーメント合力  $\Sigma M_{oi}$  が増加していくことが分かった。
  - 6) 函体剛性  $G_s$  が地盤より高い場合、せん断変形するメカニズムとして、载荷初期は、せん断力由来のモーメント  $\Sigma M_{si}$  が函体をせん断変形させており、頭打ちになった以降は、偶力モーメント  $\Sigma M_{oi}$  が函体にせん断変形を生じさせようとする傾向があることが確認できた。
- 今後は、本報告と同ケースの実験を実施しバラツキがないか確認するほか、異なる函体剛性での単純せん断試験を実施し、函体剛性の違いによる影響を確認していく。

謝辞：本研究の実験の実施には、中央大学理工学部都市環境学科 4 年生の七里蒼氏、山門風音氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 津野究, 鎌田和孝, 佐名川太亮, 小西真治, 大塚努, 今村俊毅, 前川宏一: 異高型複断面トンネルの横断方向地震時挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 72, No. 3 (特集号), pp. I\_150-I\_158, 2016.
- 2) 土木学会: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針〈技術資料〉, pp. 73-103, 2005.
- 3) 西野風雅, 島田貴文, 西岡英俊: 地震時の開削トンネルと周辺地盤の相互作用に関する実験的検討, 第 76 回土木学会全国大会学術講演会, 2021.
- 4) 島田貴文, 西野風雅, 西岡英俊: 開削トンネルの地震時せん断変形挙動に及ぼす周辺地盤との相互作用に関する基礎的検討, 第 41 回地震工学研究発表会講演論文集, B15-2359, 2021.
- 5) 西野風雅, 伊野将矢, 島田貴文, 西岡英俊: 開削トンネルの地震時相互作用に関するアルミ棒積層体地盤のせん断土槽実験~2 方向ロードセルを用いた表面力の測定~, 土木学会全国大会第 77 回学術講演会, 2022.
- 6) 伊野将矢, 西野風雅, 西岡英俊, 島田貴文: 開削トンネルと地盤の剛性比に着目した地震時の函体変形特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 F1, 第 32 回トンネル工学研究発表会, 2022. (投稿中)

## SURFACE FORCE MEASUREMENT TESTS ON SEISMIC SHEAR DEFORMATION BEHAVIOR OF CUT AND COVER TUNNEL

Fuga NISHINO, Masaya INO Takafumi SHIMADA and Hidetoshi NISHIOKA

In the seismic design of underground structures such as cut and cover tunnel, the relationship between the structure and the ground must be properly considered. However, most of the previous studies have been based on analytical methods, and few experimental studies have focused on nonlinearities in the ground. In this study, we measured forces acting on the tunnel box surface with a two-directional load cell to elucidate the mechanism of shear deformation of a tunnel box in aluminum rods model ground. The results of the model tests showed that in the case of high rigidity of the box, the shear deformation of the box was caused by the shear force, followed by the movement of an even moment that followed the deformation. In addition, it was confirmed that the sliding of the box surface did not occur simultaneously on all surfaces, but that the sliding began to occur on one surface at a time.