

# 縦ずれ断層変位を受ける 鉄道構造物基礎の模型载荷実験

押田 直之\*      小野寺 周\*\*  
川西 智浩\*\*      室野 剛隆\*\*\*

Model Test on Dip Slip Fault Displacement affected by Railway Structure Foundations

Naoyuki OSHIDA      Meguru ONODERA  
Tomohiro KAWANISHI      Yoshitaka MURONO

When planning to construct structures, it is desirable to select an area not to be affected by fault-induced permanent ground deformation. But there are inevitable cases as far as railway structures are concerned, so it is necessary to consider the effect of fault induced permanent ground deformation on the structural behavior. Therefore, in this paper, the difference in the growing process of the shear zone with and without foundations was investigated through scaled static experiment. In the test, the bottom of the layered sand was partially dislocated using a hydraulic jack to simulate a dip slip fault. As a result, it was found that the shear zone tends to grow up to the ground surface while avoiding the foundation.

キーワード：鉄道構造物，縦ずれ断層変位，模型実験

## 1. はじめに

内陸活断層による地震では、活断層上部に断層運動によって地表断層変位が生じる場合があり、地表断層変位によって土木構造物に甚大な被害を受けることがある。代表的な被害事例として、海外では、1999年トルコ・コジャエリ地震において道路橋の落橋などが発生し、国内においては、北伊豆地震による丹那トンネル水抜坑の被害がある<sup>例え<sup>1)</sup></sup>。また、土木構造物の被害報告はないものの、2016年熊本地震の横ずれ断層による水平方向2.0m程度の地表断層変位などが確認されている。土木構造物を建設する場合、このような被害を避けるため、活断層が確認された場合には計画の段階から活断層を跨ぐ位置に構造物を建設しないことが望ましいが、鉄道のような線状構造物では、活断層との交差が避けられない場合がある。

地表断層変位は、その発生メカニズムや構造物との相互関係について未解明な部分が多い。そのため、鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）<sup>2)</sup>では、変位の量を作用としては定めず、構造計画等で配慮する地震随伴事象として扱っている。また、止むを得ず断層上に構造物を建設する場合には、土構造等の断層変位の影響が

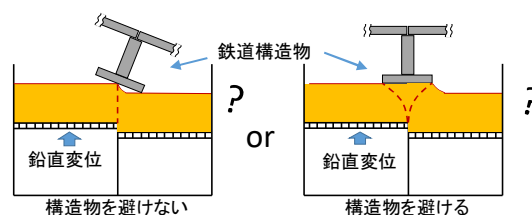


図1 構造物直下の縦ずれ断層変位のイメージ

小さい構造形式とすることが推奨されている。高架橋等を設置する場合において、横ずれ断層変位には、落橋防止対策の目安<sup>3)</sup>が示されているが、縦ずれ断層変位については示されていない。

一方で、構造物がない場合に比べて構造物直下の地盤応力が大きいため、地表断層変位発生箇所には構造物が存在する場合、地表面に向かって伝播するせん断帯が、構造物直下の地盤応力の大きい箇所を避けて地表面に到達する可能性がある<sup>4)</sup> (図1)。しかし、鉄道構造物程度の重量、及び鉄道構造を支持できる程度の地盤において、この現象が検討されたものは少ない。

以上より、断層変位が発生した際に、鉄道構造物基礎の応力や変位がどのように発生するかを確認することは、断層変位の影響が懸念される箇所での鉄道構造物の耐震設計の確立のために有益と考えられる。よって本研究では、縦ずれ断層に着目し、基礎層で発生した断層変位が表層地盤を介して地表面に到達する場合における、構造物基礎の有無によるせん断帯の発達過程の違いを実

\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室  
(現 東海旅客鉄道株式会社)  
\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室  
\*\*\* 鉄道地震工学研究センター

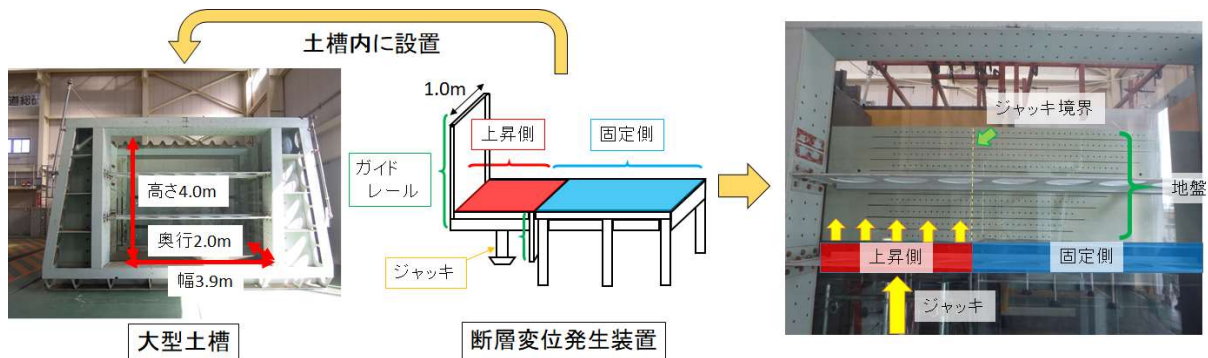


図2 実験装置の概要

験的に検証する。また、構造物基礎への断層変位の入力評価を行うための基礎データを得ることを目的とする。

## 2. 縦ずれ断層変位を模擬した静的載荷実験

### 2.1 実験概要

本実験は、重力場で行い、実験スケールは実構造物の1/25としている。せん断帯の発生に関する実験については、重力場と遠心力場での実験が考えられる。遠心力場の実験では、実物と同様の応力状態を再現することが可能であり、定量的な評価には適しているものの、実験の取扱いが容易ではない。一方、重力場の実験では、実物を想定した応力状態を再現することはできないが、実験実施や応答量の計測、現象の観察が容易であり、定性的な傾向を調べるための手段として有利である。本実験では、構造物基礎の有無によるせん断帯の発生状況を定性的に比較することを目的とし、重力場での実験を採用した。

### 2.2 実験装置

実験装置の全体概要を図2に示す。大型の固定土槽を使用し、土槽中に縦ずれ断層変位を発生させるための装置を設置した。装置の上に地盤を作成したのちに、鉛直変位を入力し、縦ずれ断層変位の発生を模擬した。

#### 2.2.1 大型土槽

実験で用いた土槽の寸法は、幅3.9m、高さ4.0m、奥行き2.0mの固定土槽であり、実験の際には、奥行き1.0mの箇所に仕切り板を設置した。

#### 2.2.2 断層変位発生装置

断層変位発生装置は鋼製で製作しており、上昇側と固定側で部材が分かれた構造となっている。上昇側の下部に油圧ジャッキを設置し、ジャッキが上昇側を持ち上げる仕組みである。なお、油圧ジャッキの最大ストロークは500mmである。

### 2.3 模型試験体の製作

#### 2.3.1 事前処理

土槽前面のガラス面および背面の仕切り板面と地盤との摩擦の影響を極力小さくするために、あらかじめこれらの表面に潤滑剤を吹き付けた。

#### 2.3.2 地盤

地盤の材料には、岐阜硅砂6号を使用し、幅約3.5m、層厚1.0m、奥行き約1.0mの地盤を構築した。なお、地盤の層厚については、事前解析で構造物基礎の自重の影響範囲を把握し、自重の影響を及ぼさない深さの位置からの断層変位の発生を想定して設定した。

地盤の剛性は、鉄道構造物における直接基礎の支持地盤として良質とみなされるN値30を目安<sup>5)</sup>とし、N値30相当の締固めとしてDr=80%を目標とし密度管理を行った。

#### 2.3.3 構造物基礎

構造物基礎は、鉄道構造物における標準的な直接基礎形式である単柱式RC橋脚<sup>6)</sup>の基礎部分を模擬した平板とし、重量としては基礎～上部工までの重量を再現することとした。本実験では、鉄道構造物程度の重量が存在する場合のせん断帯の発達過程に着目している。よって、単位面積当りの接地圧を実構造物と合わせて、構造物基礎の寸法・重量を計画した。寸法は、幅300mm、高さ100mm、奥行き1000mm、重量は200kgとし、鋼製部材で製作した。奥行き寸法を、仕切り材を設置した土槽の奥行きと同程度とすることで、奥行き方向への影響を無視した2次元想定の実験としている。

### 2.4 実験ケース

地盤のみの場合（構造物基礎がない場合）をCASE 1、構造物基礎を地盤上に設置した場合をCASE 2とする。また、CASE 2における構造物基礎の設置位置は、CASE 1の実験結果から得られたせん断帯の到達位置と構造物中心が概ね一致する位置とした。

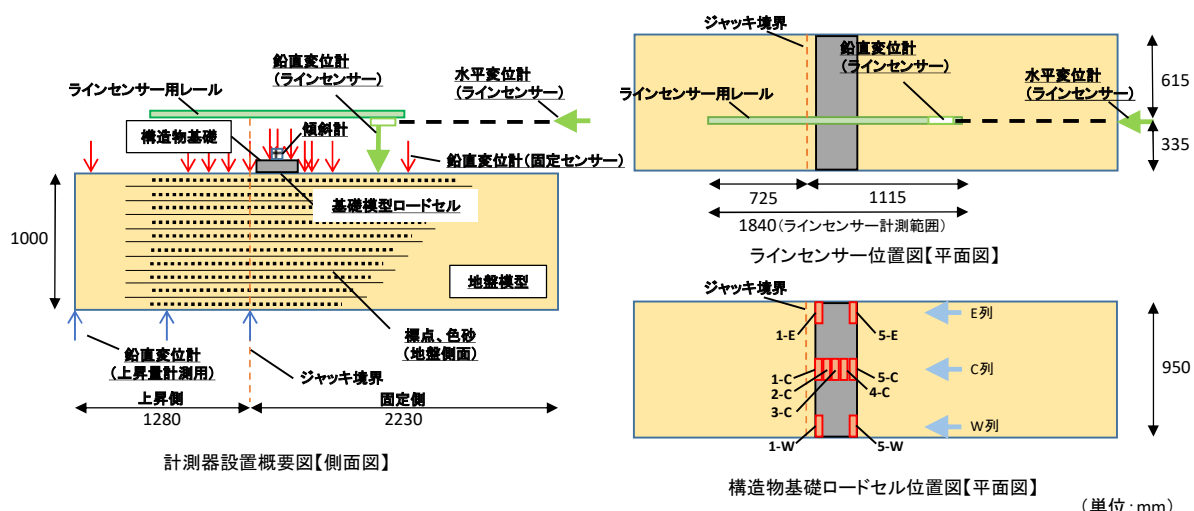


図3 計測方法の概要 (CASE2)

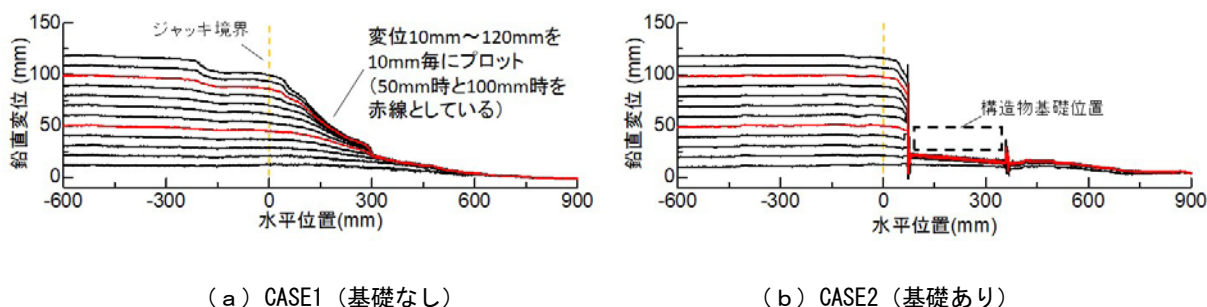


図4 計測した地表面変位

## 2.5 上昇側の変位量の設定

入力する変位は鉛直方向とし、変位量は、底面変位において120mm (実寸法 3.0m) とした。これは、過去の大規模地震観測記録を統計的に整理した翠川ら<sup>7)</sup>による結果を参考とし、Mw7.0時 (L2地震動スペクトルⅡ<sup>2)</sup>を想定)で発生する可能性がある最大鉛直変位を3.0mとし、設定した値である。

底面変位の入力速度については、準静的荷荷とした。変位量0～50mm (実寸法 0.0～1.25m) では1mm/分、変位量50～120mm (実寸法 1.25～3.0m) では2mm/分として入力した。入力にあたっては、変位を1分間で入力した後に、2分間のインターバルを設けることとした。

## 2.6 計測項目

計測方法の概要を図3に示す。計測の目的は、地表面の挙動把握、上昇側の上昇量の把握、地盤内部の挙動把握及び構造物基礎の挙動把握である。

地表面の挙動を把握するため、レーザー式変位センサーを使用して、地表面の鉛直変位を計測した。水平方向に基準となるレールを設置し、レール上に取り付けた変位計で地表面の鉛直変位を測定する。レールに沿っ

て移動させることで、鉛直方向の変位を連続的に計測する。レール方向の測定位置は、別に設けたレーザー変位計で計測する仕組みとし、2つの変位計の出力から、レール下の地盤の地表面変位を2次的に計測した (以降では、この計測システムを「ラインセンサー」と表記する)。ジャッキの変位量は、レーザー式変位センサーをジャッキ下から上方に照射して計測した。地盤内部の挙動を把握するため、地盤ガラス面側に色砂及び標点を設置した。色砂及び標点は、縦方向にそれぞれ100mm間隔、標点については横方向に50mm間隔で設置した。色砂と標点の変化について、目視による観察及び画像解析を行った。構造物基礎の挙動を把握するため、下面に2方向ロードセル (鉛直・水平)、上面に傾斜計を設置した。

## 3. 実験結果

### 3.1 地盤の挙動

#### 3.1.1 地表面変位

ラインセンサーを用いて、ジャッキ上昇量10mm毎に計測した地表面変位を図4に示す。また、ジャッキ境界を水平位置0mmとし、固定側を正、上昇側を負の値

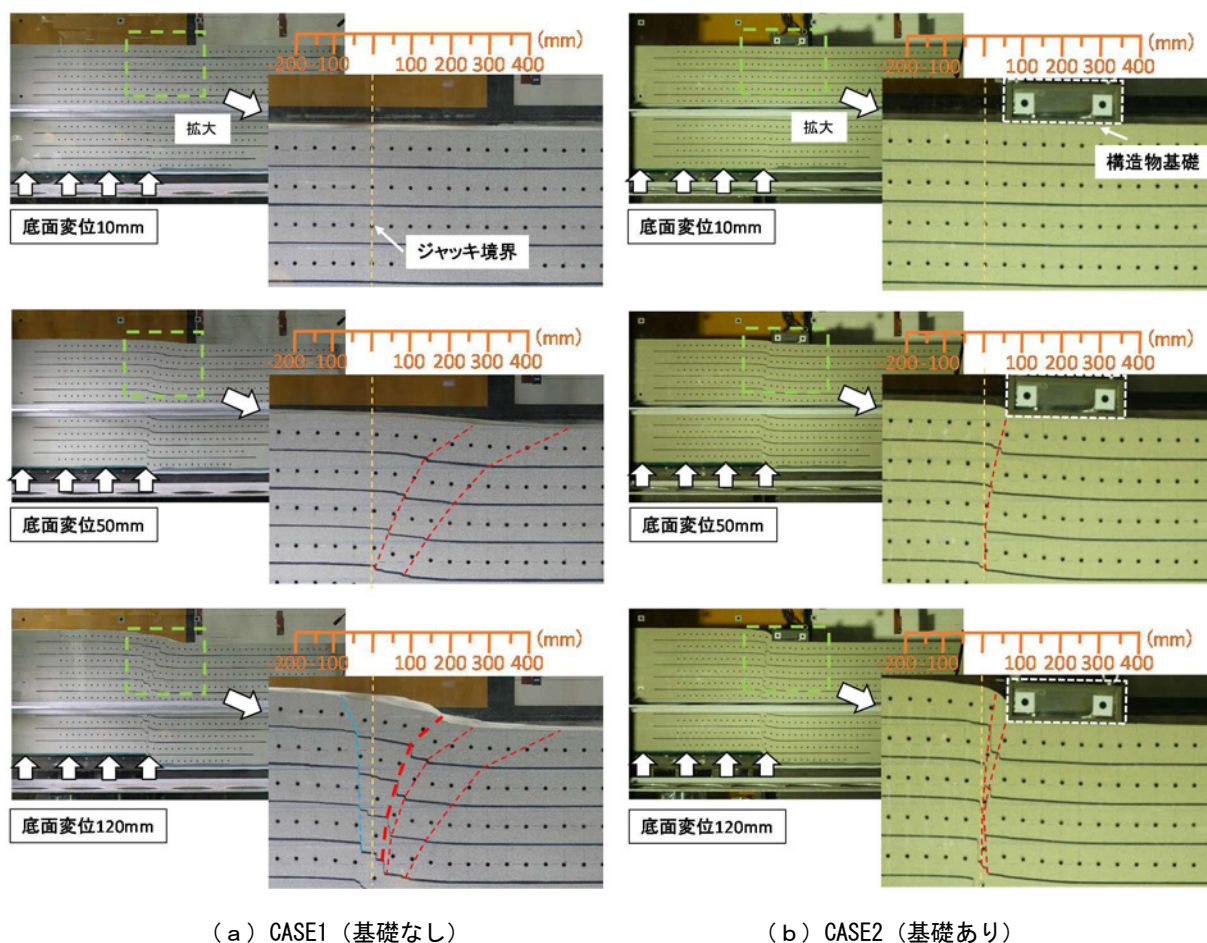


図5 せん断帯の発達状況

で示している。なお、ラインセンサーによる測定は、図3に示すレール上の測線を2往復させて地表面の変形を測定している。そのため、水平変位1.0mm毎に対して鉛直変位の測定結果の平均値を算出し、地表面変位として描いた。また、CASE2については、ラインセンサーの鉛直変位データから構造物基礎の高さを差し引いている。

図4より、構造物基礎を設置したCASE2は、底面変位20～30mm程度まではCASE1と同様の傾向を示すが、それ以降は上昇側の地盤のみがほぼ一様に上昇していくことがわかる。

### 3.1.2 せん断帯の発達状況(その1 目視による観察)

両ケースの底面変位10mm時、50mm時、120mm時のせん断帯の発達状況写真を図5に示す。図5ではせん断帯とみられる線について固定側は赤点線、上昇側は青点線でつないでいる。なお、地表面変位に大きく影響を与えている主要なせん断帯は、線を太く描いている。また、ジャッキ境界を黄破線で示し、ジャッキ境界からの水平距離は固定側を正、上昇側を負として示している。

CASE1について、底面変位10mm時では、目立ったせん断帯は確認できず、上昇側の色砂線が若干上昇しているのが確認できる程度である。50mm時になる

と、固定側の地盤にせん断帯が発生し、120mm時では、50mm時までに発生していた固定側のせん断帯が発達すると共に、上昇側にもせん断帯が発生している。結果として地表面の勾配が急峻になり、特にジャッキ境界から固定側200mm付近の勾配の変化が大きいことがわかる。このようなCASE1のせん断帯の発達過程の状況は、既往の研究<sup>8)</sup>とも類似している。

CASE2について、底面変位10mm時では、上昇側の色砂線が若干上昇しているのが確認できる程度である。50mm時になると、せん断帯が構造物基礎の左側を抜けていく様な方向で発生し、基礎直下及びそれより右側にはせん断帯は発生していない。120mm時では、50mm時に発生したせん断帯が発達・分岐していくことがわかる。構造物基礎を設置したことにより、基礎より左側の地盤が一体の土塊となり上昇する変形モードとなった。

### 3.1.3 せん断帯の発達状況(その2 縦せん断ひずみ)

両ケースの底面変位10mm時、50mm時、120mm時の縦方向せん断ひずみ分布の算出結果を図6に示す。ひずみの算出は、画像解析によって求めた座標の値を用いて、時計回りの変形を正、反時計回りの変形を負とし、各辺に対応するひずみを、その中点における値としてい

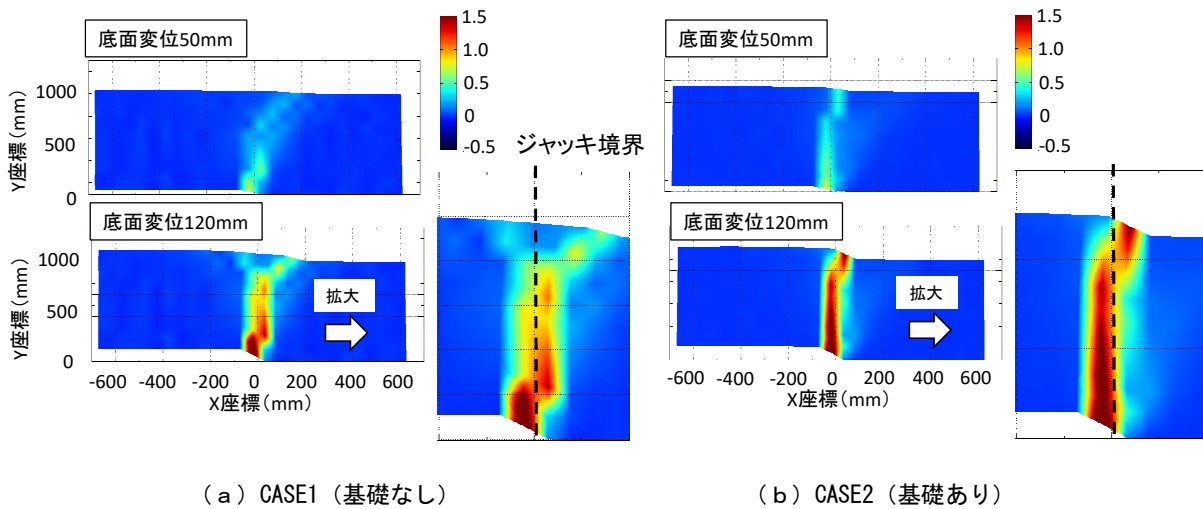


図6 縦方向せん断ひずみ分布

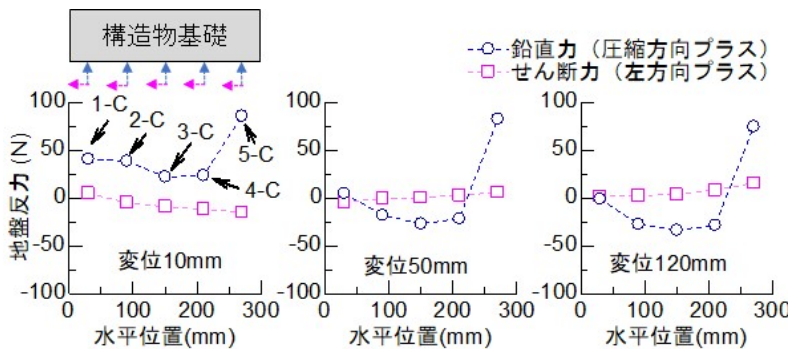


図7 各底面変位の基礎の地盤反力

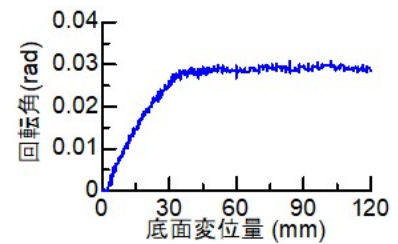


図8 構造物基礎の回転角

る。なお、図6のCASE2のひずみ分布は、構造物基礎の自重が作用した状態を初期状態としている。CASE1では、底面変位50mm時では地盤底面付近ではジャッキ境界から直上にひずみが発生し、地表面付近でひずみが固定側に斜め方向に進んでいく。底面変位120mm時には地盤底面付近のひずみが大きくなり、地表面付近ではジャッキ境界中心では発生せず、境界から固定側、上昇側にそれぞれ200mm程度離れた位置に向かってひずみが進行している。

CASE2においては、底面変位50mm時では、地盤底面からジャッキ境界直上に発生したひずみが、地表面下300mm付近で、固定側に100mm程度ずれた箇所ではひずみが発生している。底面変位120mm時でも傾向は同じであり、ひずみは大きくなっている。

両ケースにおいて、大きな縦せん断ひずみが発生している箇所は、図5で示したせん断帯の発生箇所と概ね一致していることがわかり、目視で観察したせん断帯の発達状況を、画像解析により定量的に確認した。

### 3.1.4 地盤の挙動のまとめ

自由地盤であるCASE1の地盤に断層変位を発生させ

た場合、底面変位の進行により、複数のせん断帯が固定側に発生したが、ジャッキ境界からみて、遠い方から近い方へと段階的に発生した。底面変位120mm到達時には、上昇側においてもせん断帯の発生が確認された。構造物基礎を設置したCASE2の地盤に断層変位を発生させた場合、底面変位50mm程度でせん断帯が基礎よりも左側の固定側の狭い範囲で発生し、底面変位120mm到達時には、上記のせん断帯が発達・分岐をした。また、基礎直下及び基礎より右側にはせん断帯は発生しなかった。全体的に基礎より左側（上昇側）の地盤が一体の土塊となる様な変形モードとなった。

両者の結果より、CASE1とCASE2では、せん断帯の発達過程に明らかな違いが生じた。CASE1とCASE2を比較することにより、構造物基礎の存在によって、地表面まで発達するせん断帯が構造物直下には入り込まない傾向が確認できた。

## 3.2 構造物基礎の挙動 (CASE2)

### 3.2.1 構造物基礎下の地盤反力

構造物基礎下の地盤反力として、底面変位ごとの鉛直

## 特集：防災技術

力、せん断力の結果について図7に示す。なお、図7の値は、構造物基礎による荷重を原点とし底面変位による増減分のみを示している。ロードセルについては図3の通り、基礎中央に5箇所（C列）と基礎の4隅に1箇所ずつ4箇所（E列及びW列）の計9箇所設置している。4隅に置いたロードセルは実験の2次元再現性の確認のために設置したが、C列に設置したロードセルとE、W列に設置したロードセルでは、発生する地盤反力の傾向が異なった。これは、E、W列付近の地盤が前面のガラス面又は背面の壁面により影響を受けたものと考えられる。そこで、図7ではC列に設置したロードセルの結果のみを用いている。

図7より、鉛直力は底面変位10mmの段階で基礎右端である5-Cに大きな圧縮力が生じ、最後まで同等の値を保ち続けている。その他の点は、変位が進むにつれて基礎中央の値がマイナスに転じ、全体としては基礎中央を最低値とした下凸形を描き、両端で鉛直支持をする状態になっていることがわかる。これは、構造物基礎がつま先立ちする形になることで、両端の鉛直支持の割合が増えていると考えられる。

せん断力は全体としては変位が進んでも大きな変化はないが、模型右側の5-C、4-Cのせん断力は変位が進むにつれてマイナスからプラスに転じている。これは、構造物基礎が傾いて右側に滑ろうとするのを抑えるために生じたものと考えられる。

### 3.2.2 構造物基礎の回転角

構造物基礎の回転角履歴を図8に示す。図8より、回転角は底面変位35mm程度まではほぼ線形に上昇していき回転角は約0.03radとなる。その後、実験終了まで回転角は約0.03radの一定値で推移していることから、底面変位35mm以降では、せん断帯の発達による影響が伝播しにくくなっていることがわかる。

## 4. まとめ

本研究では、縦ずれ断層に着目し、基盤層で発生した断層変位が地盤を介して地表面に到達した場合の、構造物基礎の有無によるせん断帯の発達過程の違いの検証、および、構造物基礎への断層変位の入力評価を行うための基礎データを得ることを目的とし、模型実験を行いその結果を考察した。

実験を考察した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 自由地盤であるCASE1と構造物基礎を設置したCASE2では、縦ずれ断層変位を発生させた際のせん断帯の発達過程に明らかな違いが生じた。また、CASE1とCASE2を比較することにより、構造物基礎の存在によって、地表面まで発達するせん断帯が構造物直下には入り込まない傾向が確認できた。

これは、構造物基礎の重量により基礎直下の地盤応力が大きくなることが原因と考えられる。

- (2) 構造物基礎下の地盤反力として、鉛直力は底面変位が進行すると、基礎両端で支持力を受け持つ割合が大きくなった。せん断力は底面変位が進行し構造物基礎が傾くことによる右側への滑りを抑える力が、主に基礎の右側に大きく作用した。構造物基礎の回転挙動について、底面変位を入力すると基礎が回転し、基礎の回転角はほぼ線形的に上昇するが、底面変位35mm付近で約0.03radに到達した後は回転挙動が止まり、せん断帯の発達の影響が構造物基礎に伝播しにくくなった。

なお、本実験の前提条件については、先述した通り、重力場の実験であり必ずしも応力状態が再現出来ていないという課題がある。よって、今後は、断層変位の数値解析に適すとされている<sup>9)</sup>個別要素法（DEM）等の手法を用い、再現解析及び実構造規模の解析を行う。その中で、構造物基礎の寸法や重量、地盤の厚さや物性等をパラメータとし、解析的に検証することで、本研究の検討を深めていきたいと考えている。

## 文献

- 1) 川島一彦, 橋本隆雄, 鈴木猛康: トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要, 第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.409-416, 1999
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 2012
- 3) 室野剛隆, 弥勒綾子, 紺野克昭: 断層交差角に着目した橋梁挙動に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, 2003
- 4) M.F.Bransby, M.C.R.Davies, A.El.Nahas: Centrifuge modelling of normal fault-foundation, Bull Earthquake Eng., 6: pp.585-605, 2008.
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 2012
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 設計計算例 RC橋脚(直接基礎), 2015
- 7) 翠川三郎, 三浦弘之: 内陸地震による地表での断層変位分布, 日本建築学会 構造工学論文集, Vol.50B, 2004
- 8) 上田圭一, 谷和夫: 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討(その2) - 正断層, 逆断層模型実験 -, 電力中央研究所研究報告, U98048, 1999
- 9) 谷山尚: 横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯 - DEMによる解析 -, 土木学会論文集C, Vol.64, No.3, pp.485-494, 2008