個別要素法による

縦ずれ断層変位実験のシミュレーション

日野 篤志1・室野 剛隆2・押田 直之3・川西 智浩4・谷山 尚5

¹正会員 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング (〒186-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail:hino@jrseg.co.jp

> ²正会員 鉄道総合技術研究所 (〒186-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

> ³正会員 鉄道総合技術研究所 (〒186-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: oshida.naoyuki.78@rtri.or.jp

> ⁴正会員 鉄道総合技術研究所(〒186-8540東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: kawanishi.tomohiro.35@rtri.or.jp

⁵正会員 埼玉大学大学院(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255) E-mail: taniyama@mail.saitama-u.ac.jp

鉄道構造物のような線状構造物の場合には、断層上または断層近傍での構造物の建設が避けられないため、断層変位への体系立てた対策が必要不可欠な状況が押し迫っている.そこで本研究では、鉄道構造物 周辺でのせん断帯の発達過程や地表断層変位が構造物に作用する際の地盤と構造物の相互作用について明 らかにするために、縦ずれ断層を対象とした比較的大規模な模型実験を行い、試験結果について個別要素 法を用いた再現解析を実施した.

その結果,個別要素法による数値解析から,鉄道構造物の有無による地表面の変形状況の違いの再現が可能であったため,本手法の縦ずれ断層への適用性について確認することができた.したがって,今後本手法を用いて,縦ずれ断層に対する検討を深度化することが可能となった.

Key Words: fault displacemet, reverce fault, discrete element method, model test,

1. はじめに

大規模な地震が発生すると、構造物に対しては揺れに よる影響や液状化、津波、地表断層変位など様々な影響 が発生することとなる.このような地震作用の中で、地 表断層変位については、1999年のトルコ・コジャエリ 地震や台湾集集地震の際に発生した土木構造物への被害 が有名である¹⁾²⁾.地表断層変位は、地表面位置におけ る変位量の予測の難しさ、発生すると構造物に甚大な被 害を及ぼすことといった特徴を持つため、土木構造物と しては断層変位の影響を受けないような構造物の建設が 望ましいとされている³⁾.しかしながら、鉄道構造物の ような線状構造物の場合には、断層上または断層近傍で の構造物の建設が避けられない場合がある.そのような 状況に関して鉄道構造物の設計基準⁴⁾では、地表断層変 位を地震随伴事象と扱っており、個別の事例ごとに対策 を行っているのが現状である.

このような状況に対して、室野⁹らは模型実験によっ て断層交差角度に着目した橋梁の支承の破壊過程につい て明らかにしており、性能評価ノモグラムが提案してい る.また、著者らの一部は一般的な鉄道構造物であるラ ーメン高架橋を例として、縦ずれ断層に伴う鉛直方向の 地表断層変位が構造物に作用した際の挙動を評価し、構 造物の損傷を低減することが可能な構造形式について提 案を行ってきた⁹.

一方で地表断層変位は、せん断帯が震源から表層まで に進展していく過程おいて、表層地盤の塑性化の影響を 強く受け、せん断帯の進展する向きを変えたり、分岐し たりすることが知られている.

そこで、本研究では、鉄道構造物を支持する地盤にお いて、表層付近でのせん断帯の発達過程の評価やせん断 帯の発達過程が構造物の存在によってどのように影響を 受けるのかを検討することで、構造物に作用する地表断 層変位量の低減や今後の地表断層変位を考慮した設計法 の開発に向けた知見の蓄積を目的としている.

実施内容としては、土槽内に幅 4.0m、堆積層厚さ 1.0m と奥行 1.0m 程度の比較的大型な模型地盤を作成し、 表層に構造物模型の設置の有無をパラメータとした2パ ターンについて、鉛直方向の地表断層変位を模擬した静 的載荷試験を実施した.次に、試験結果に対して個別要 素法による再現解析を行い、入力した地表断層変位ごと に表層の変形状態の試算を行った.なお、本稿では、実 験結果の再現解析が主目的であるため、実験結果につい ては限られた項目のみについて整理を行った.実験結果 の詳細については、上記2ケースに加えて追加で実施し た堆積層 0.3m の結果とあわせて、今後改めて整理を行 う予定である.

2. 断層変位を模擬した静的載荷試験

(1) 実験概要

本実験は、土槽中に断層変位を模擬するための試験装置を設置し、試験装置上に層厚 1.0m の地盤を乾燥砂で 構築した.構築した地盤上に構造物模型の有無をパラメ ータした2ケースの地盤について、鉛直方向の変位を入 力する2次元を想定した試験である.なお、試験規模と しては、実構造物のスケール比1/25を想定している.

今回の実験では、lg 場での実験としたが構造物の有 無による地盤中の応力状態の変化再現が非常に重要であ ることから、遠心載荷装置を用いた実験のほうが本来は 望ましいのかもしれない.この点に関しては、今後、シ ミュレーション等により検討を深めることとする.

a) 土槽

土槽の寸法は、内側の幅が 39m, 高さ 40m, 奥行 20m である.前面ガラスと地盤との摩擦の影響を小さ くするために、前面ガラスおよび背面壁には入念にテフ ロンスプレーを照射し、摩擦の影響を小さくするように 試みた.

b) 試験装置

試験装置は,高さがおよそ 3.4m で図中の左側の上昇 部が油圧ジャッキと連動して上昇する設計となっている. 油圧ジャッキは最大ストロークが 500mm である.

c) 地盤

地盤は、岐阜硅砂 6 号を用いて層厚 1.0m となるよう に砂を降らせて構築した.使用した岐阜硅砂は、乾燥密 度 1.412(g/cm³)であった.地盤の剛性の目安としては、実 構造物として N 値 30 を目安としており、これを再現す るために、降らせた砂の密度管理を行った.なお、地盤 中には画像解析用の色砂と標点をそれぞれ 10cm 間隔で



図1 試験前の状況



図2 試験装置の概要

設置した.

d) 構造物模型

構造物模型は、対象とする構造物として一般的な鉄道 構造物である直接基礎形式の単柱式 RC 橋脚^つとした. 本実験では、鉄道構造物程度の重量の構造物が存在した 場合にせん断帯の発達過程への影響を確認する.そのた め、使用する模型は、構造物直下において構造物が地盤 に作用させる鉛直応力が等しくなるように幅 300mm, 奥行 1000mm、厚さ 100mmのフーチングのみを取り出し たモデルを鋼材で作製し、重量が 200kg となるようにボ リュームの調整を行った.

e) 計測項目

計測項目は、レーザー式変位センサーを用いてジャッ キとジャッキが接する床の鉛直方向の上昇量、地表面位 置における地盤の上昇量を計測した.あわせて、2台の センサーを組み合わせた計測装置を作成し、レール上に 設置した.これをレール上で移動させることで、水平方 向のセンサーにより計測装置の位置を、鉛直方向のセン サーにより地表面の変形状態を計測することで、地表面 の変形について線状の計測を行った(計測位置を図2中



(a) 10mm

図3 入力した地表断層変位ごとの変形形状(Case1 地盤のみ)



(a) 10mm



(c) 120mm

(c) 120mm



にあわせて示す).使用したセンサーは、キーエンス社 製の IL-600(基準距離 600mm), IL-2000(基準距離 2000mm) である.

f) 地表断層変位量

試験において地盤に入力する地表断層変位の値は、過 去の観測記録を統計的に整理した結果 8を参考にし、 Mw7.0 時の限りなく最大の値として鉛直方向に 3.0m の 値を考慮することとし,試験では相似則を考慮した結果 120mmの変位を入力することとした.

なお、地表断層変位の入力ピッチについては、変位が 小さい領域 (50mm まで) は 1mm/分, 変位が大きくな る領域(50mm以降)では 2mm/分として静的に入力す ることとした.

(2) 実験結果

構築した模型地盤の下端に対して、断層変位を想定し た強制変位を与え、各種計測を行った. 試験では、地盤 のみのケースを Casel,構造物を設置したケースを Case2 とした.構造物の設置位置については、先行して 実施した地盤のみのケース(Casel)の結果より、地表 面の傾斜が最も厳しくなった箇所(上昇側と固定側の境 界から固定側に 300mm 移動した位置) に基礎の中心が くるように設置した.

図3および図4にそれぞれのケースの変形形状を示し た. 地盤のみのケースでは、すべり線が複数見られ、写







真右側に緩やかに弧を描きながら発達していることがわ かる. その結果, 表面が徐々に撓曲(傾斜) していって いることがわかる.一方,構造物模型を設置したケース

では、すべり線はほぼ真上に上がっており、その結果、 構造物の左側(上昇部側)のみに地盤の損傷が集中す る結果となった.

この結果をライン状センサーによって計測した地表 面の変形形状と合わせて確認すうることでについて整 理を行い,後に実施する解析の結果と比較することと する.

ラインセンサーによる測定では、センサーを図2に 示す測線を2往復させて地表面の変形を測定している. そのため、測定結果を水平変位0.5mm ピッチに対して 鉛直方向の変位の平均値を求め地表面の変位とするこ ととした(例として Casel 50mmの結果を図5に示 す).

図 6 の結果より,基礎模型を設置した Case2 では 30mm 程度までは Case1 と同様の傾向を示すものの,そ の後、基礎の外側のみに変形が生じる結果となった. その際に基礎は上昇していないこともわかった.

なお,実験結果については,別途,詳細に報告予定 である.

3. 解析モデルの構築

個別要素法^{910 11など}は、解析の対象体を粒子の集合体 としてモデル化し、ここの粒子の動きを粒子間の接触 力に基づいて求めていく解析手法で、地盤材料に対し て多く用いられてきている.

本検討に用いるモデルは,図7に示すような左右を 側壁に囲まれたモデルであり,前背面に周期境界を用 いて奥行の影響を無視した2次元のモデルである.使 用した粒子の数は5万程度であった.地盤を構築する 際には,模型地盤に使用した岐阜硅砂6号の粒径分布

(図 8) を参考にし、2.1cm~3.5cm の粒子分布を持つ球 形粒子を各方向に並べることでモデルの大きさを定めて いる.

粒子間の接触点において,法線・接線方向の力に加え てモーメントも伝達するものとし,1つの接触点に作用 するモーメントの上限値(Mmax)を以下のように与え た.

$M_{max} = \alpha B f_n$

ここで、 f_n は粒子間の法線方向の接触力、Bは接触面の長さで、aは伝達されるモーメントの大きさ(転がり抵抗の大きさ)を規定する係数である.時間積分を 5.0 × 10⁵ (s)として加速度を積分することで粒子の動きを求めた.

地盤作成時には、重力を粒子に作用させて堆積させた. この際に、粒子間の摩擦係数を 0.2 と小さく設定し、密 な地盤となるようにした.





図8 岐阜硅砂6号の粒径加積曲線

粒子数	50160
粒子半径	2.1 - 3.5
ばね定数(接線方向)	1.2×10^{9} N/m
ばね定数(法線方向)	4.0×10^8 N/m
粘性減衰係数(法線方向)	2.4×10^{5} N/m
粘性減衰係数(接線方向)	1.6×10^{5} N/m
摩擦係数	0.3
転がり抵抗の係数	0.5

表1 解析に用いたパラメータ

2章の Case2 のような構造物が地表面に設置している 状況を解析にて再現する場合には、粒子と隣り合う粒子 とを固定した状態で板状に敷き詰めて重量が 200kg とな るように鉛直力を与えた状態で、地表面位置に設置した.

これらのモデルに対して、断層変位を作用させる際に は、上昇部として設定した粒子に対して 0.5m/sの速度で 下から上に動かすことで断層変位を表現した解析を実施 した.解析に持ちいたパラメータの値を表1に示す.ば ね定数などのパラメータの値はせん断弾性波速度に依存 するため⁹、模型地盤のせん断弾性波速度を 100m/s と仮 定してパラメータの算定を行った.なお、本モデルにお いて設定する Vs の値を 15 倍と 0.5 倍とした検討を実施 したが、断層変位作用時の地表面に発生する変形の形状 に大きな差異はなかったことを確認している.

本検討に用いる手法は、既往の検討¹¹⁾¹²において同様 の設定法によって横ずれ断層によるせん断帯の発達過程





(a) 50mm 入力時

(b) 120mm 入力時





(a) 50mm 入力時

図 10 地表面の変形状況(Case2)

を再現できていることから、縦ずれ断層への適用も可 能と考え、模型実験の再現解析を行うにあたって妥当 な手法と考えている.

4. 解析結果および試験結果との比較

構築した地盤モデルに対して, 断層変位を作用させ た解析を行い、地表面における変形の形状について確 認を行った.

図9では、地盤のみのモデル(Casel)に断層変位変 位が作用した場合の変形の状況を示す.入力変位が 50mm の際には上昇側から固定側にかけて緩やかな勾配 を有する変形分布となっており、入力変位が 120mm に 増加すると上昇側から可動側にかけての勾配は若干急 になっていってはいるものの、断層変位によって影響 を受けいている範囲は、50mmの時点とおおよそ同範囲 となっている.

図 10 には地表面に構造物を設置した場合の変形の状 況を示す.入力変位が 50mm の時点で構造物端部左側 を境に地表面の変形が止まっていることがわかる. そ の後変位が 120mm に到達した時点でも構造物位置にお おきな変形は確認されず、構造物より左側の一部の範 囲のみで、上昇側から固定側への地盤の傾斜が発生し ていることがわかる.

また、これらの地表面における鉛直変位の状況を試





験結果と比較した結果を図11および図12に示す.これ

らの図から、傾斜面の角度や発生位置を厳密に再現でき てはいないものの、地盤のみの Casel では断層変位が作 用した際に、上昇側から固定側にかけて緩やかな傾斜を 形成することや、構造物模型を設置した Case2 では、構 造物は持ち上がらず、上昇側から構造物までの間で地表 面の傾斜が発生するといった、2 つの試験の特徴につい て再現することができた.

5. まとめ

本論文では、比較的大規模な縦ずれによる断層変位実 験を行い、地表面の変形の形状について個別要素法によ る再現解析を実施した.その結果、以下の知見が得られ た.

- 模型実験において構造物の有無では、地表面の傾斜の発生位置に明確な差を示すことがわかった
- 個別要素法による検討において、2ケースの試験の
 特徴は再現することが可能であったため、今回の解
 析手法の縦ずれ断層への適用性を確認することがで
 きた

個別要素法を用いた今回の検討では、本手法の縦ずれ 断層への適用性を家訓ンするための速報的な内容となっ ているが、今後は、試験結果の再現性を高めるために入 カパラメータの高度化を目指していきたい.

謝辞:本研究のために,東京大学地震研究所地震火山情報センターの計算機システムを利用しました.

参考文献

 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, pp409-416, 1999

- 川島一彦,家村浩和,庄司学,岩田秀治:1999 年集 集地震(台湾)における道路橋の被害,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,pp425-432,1999
- 常田賢一:土木構造物における地震断層変位の工学 的対応に関する考察,土木学会論文集,No.752/I-66,63-77,2004
- 国土交通省鉄道局監修,鉄道総研編:鉄道構造物等 設計標準・同解説(耐震設計),2012
- 5) 室野剛隆,弥勒綾子,紺野克昭:断層交差角度に着 目した橋梁の挙動に関する基礎的研究,土木学会地 震工学論文集,2003.6
- 6) 日野篤志、室野剛隆:縦ずれ断層の影響を受けにく いラーメン高架橋形式の提案、鉄道総研報告 Vol.31,No.7 pp47-52,2017
- 7) 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.
- 9) 伯野元彦;破壊のシミュレーション-拡張個別要素 法で破壊を追う-」,森北出版, 1997
- 10) 岩下和義,小田匡宏:粒子接点での転がり抵抗を考 慮した個別要素法によるせん断帯の微視的変形機構, 応用力学論文集,2,401-411,1999
- 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 Vol64 No.3,485-494.2008.7
- 12) 谷山尚:斜めずれ正断層によう未固結表層地盤の変 形に関する個別要素法解析,活断層研究 No.42, 2015

(2009.7.1 受付)

SIMULATION OF VERTICAL SLIP FAULT EXPERIMENT BY DISCRETE ELEMENT METHOD

Atsushi HINO, Yoshitaka MURONO, Naoyuki OSHIDA, Tomohiro KAWANISHI and Hisashi Taniyama

In the case of a linear structure such as a railway structure, construction of a structure on a fault or in the vicinity of a fault is inevitable, so a systematic approach to fault displacement is indispensable. The purpose of this research is to clarify the development process of the shear zone around the railway structure and the interaction between the ground and the structure when the surface fault displacement acts on the structure. Therefore, relatively large scale model experiments were conducted on vertical slip faults, and the test results were reproduced and analyzed using the discrete element method.

As a result, from the numerical analysis by the DEM, it was possible to reproduce the difference of the deformation situation of the ground surface due to the presence or absence of the railway structure. We could confirm the applicability of this method to slip fault. Therefore, it becomes possible to deepen the study on slip fault by using this method in the future.