

横ずれ断層変位を受ける埋設管の 三次元個別要素法解析

小野 祐輔¹

¹正会員 鳥取大学教授 工学部社会システム土木系学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: ysk@tottori-u.ac.jp (Corresponding Author)

断層と交差する埋設管は、断層の運動により直接被害を受ける可能性がある。埋設管の損傷は社会活動に多大な影響を及ぼす懸念があるため、十分な対策が望まれる。本研究では、横ずれ断層変位に対する埋設管の応答を詳細に分析するため、三次元個別要素法解析を実施した。個別要素法は、粒状体の集合である地盤の特性を適切に扱うことができるため、地盤と管の間に生じる相互作用を詳細に検討することができる。断層面の法線方向と管軸の交差角を 30° とした解析モデルを設定した。緩い砂地盤と密な砂地盤の二種類の地盤モデルに対して、それぞれに左横ずれと右横ずれの断層変位を与えた解析を実施した。得られた管の変形と曲げモーメントの分布を観察することで、地盤の特性および断層変位の向きが管の応答に与える影響を整理した。

Key Words: *fault displacement, buried pipeline, soil-pipe-interaction, distinct element method*

1. はじめに

地震時の埋設管の被害は、地盤の変形が原因となって引き起こされることが多い。例えば、1971年サンフェルナンド地震では、地盤の変形により上水道管が約 1000 か所で破損した¹⁾。埋設管に被害をもたらす地盤変形は、液状化、斜面崩壊・地すべり、断層変位等に分類できる。断層変位により埋設管が破損した事例としては、1999年台湾集集地震 (Mw 7.6) がある。この地震では、台中市の浄水場内に埋設されていた鋼管がおよそ 90 度に曲げられていた²⁾。同じ年に発生した 1999年トルコ・コジャエリ地震 (Mw 7.4) では、外径 220 mm の鋼管が断層との交差部でおよそ 3m の横ずれ変位を受けることで大きく曲げられ、管体に局部座屈を生じた³⁾。近年では、2014年神城断層地震では地表面で上下方向に約 40cm のずれが生じ、埋設されていた水道管が破損した⁴⁾。さらに、2018年熊本地震でも断層変位による埋設管の損傷が発生した可能性が指摘されている⁵⁾。

本研究は、個別要素法⁶⁾を用いて鉛直な断層面の横ずれ変位に対する埋設管の応答の性質を詳細に調べることが目的として実施した。断層と管との交差角、埋設深さ、地盤の種類、断層の運動速度、管の種類等、断層変位と管の応答に影響を及ぼす要因は多数想定できる。しかし、これらのすべての要因に対して一度に検討を行うことは

できないため、今回は断層面の法線方向と管の軸の交差角は 30° で左横ずれと右横ずれ、地表から管の中心までの埋設深さ 60 cm、密または緩い砂地盤、断層の運動速度は 0.20 m/s で一定という条件を対象とした。また、曲げ剛性が小さいために変形が断層との交差部付近に集中し、解析領域を小さくできるという事情により、ポリエチレン管を想定して解析を実施した。

2. 既往の研究

断層変位に対する埋設管の応答について、これまでに多くの研究が実施されている。それらは解析解を求める研究、実験による研究、数値解析を適用した研究に分類できる。

解析解を求める研究の先駆けとして Newmark and Hall⁷⁾がある。彼らは管をケーブル、地盤からの作用を管軸方向に作用する摩擦力としてモデル化し、管の軸力を求める数式を導出した。Kennedy and Kincaid⁸⁾は、Newmark and Hall⁷⁾に対して断層との交差部付近の管の曲げと管軸に垂直な方向の地盤反力を考慮できるように拡張した。

さらに Wang and Yeh⁹⁾は管を曲げ剛性を考慮したはり理論を導入した。鈴木¹⁰⁾は、管をはり、地盤を弾性ばねにより反力を受ける区間と地盤が降伏し反力が一定になる

区間に分けて取り扱うことで、地盤変位に対して管に発生する断面力を簡易に求める方法を示した。最近では、Talebi and Kiyono¹¹⁾は、管と地盤の間の滑りと管の幾何学的非線形を考慮して、横ずれ変位を受けた管に生じる断面力を解析的に求める手法を提示している。

実験的な研究としては、地盤変位を受けた管に作用する水平方向の地盤反力を求めた Trautman and O'Rourke¹²⁾、鉛直下向きの地盤反力を求めた Trautman ら¹³⁾の研究がある。これらの研究は、地盤変位を受ける埋設管の設計に用いるガイドラインの根拠資料となっている。埋設管に断層変位を与えた実験は、実験装置が大型化する傾向があるため、実物大実験よりも縮小模型を用いた遠心载荷実験が多く行われている。Ha ら¹⁴⁻¹⁶⁾は、ポリエチレン管に横ずれ断層変位、正断層変位を与えた遠心载荷実験を実施した。Abdoun ら¹⁷⁾は、Ha ら¹⁴⁻¹⁵⁾の実験の結果と、追加で実施した実験の結果を用いて、断層変位を受けた埋設ポリエチレン管の応答に及ぼす地盤中の水分量、断層のずれの速さ、埋設深度の影響を整理した。

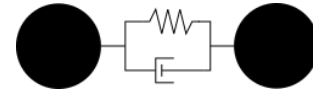
数値解析を用いた研究では有限要素法によるものが多い。ALAのガイドライン¹⁸⁾で示されているように、管体をはり要素、地盤をばね要素でモデル化した有限要素解析は、既に設計実務でも用いられている。より地盤と管の相互作用や管に生じる損傷を詳細に検討する必要がある場合には、管体をシェル要素、地盤をソリッド要素によってモデル化される^{3,19-21)}。

断層変位を受ける埋設管の応答は、地盤と管の相互作用によって支配される。Rahman and Taniyama²²⁾は、地盤を個別要素法、管をはり要素でモデル化し、断層変位を受けた際の管と地盤の相互作用の特性を詳細に調べた。個別要素法は、地盤が本質的に有する粒子の集合体としての振る舞いを自然に取り入れた解析が可能な数値解析手法であり、断層変位に対する管の応答を詳細に検討する際にきわめて有効なツールだと考えられる。しかしながら、この問題に対して個別要素法を活用した研究はこれまでにほとんど行われていない。これは、地盤と管の相互作用を適切にモデル化するためには、解析に用いる粒子の数が膨大（Rahman and Taniyama²²⁾では約 180 万個）とならざるを得ず、有限要素法と比べても計算コストが高いことが主な原因である。近年では、計算機の能力が飛躍的に向上したことから、標準的な演算能力を有する PC であっても、個別要素法を用いて断層変位に対する管の応答を解析することが現実的となりつつある。

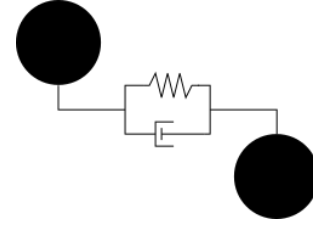
3. 解析方法

(1) 個別要素法

本研究の解析は個別要素法（Distinct Element Method,



(a) 法線方向



(b) 接線方向

図-1 粒子の接触モデル



図-2 円柱鎖モデル

DEM) のオープンソースソフトウェア Yade (<https://yade-dem.org/doc/index.html>) のバージョン 2020.01a を用いて実施した。Yade ではユーザが解析モデルと解析内容を記述するのに Python を用いる。計算のコアは C++ で実装されており高い演算効率が実現されている。

個別要素法は、粒子の集合体の運動を粒子間の相互作用に従って追跡する数値解析法である。1979年に Cundall and Strack⁹⁾によって初めて提示されて以降、個別要素法は地盤工学分野で広く活用されてきた。個別要素法では、個々の粒子の運動を粒子間の接触力を考慮して、運動方程式に従って時々刻々と追跡していく。一般に粒子間の接触力は、図-1 に示すように接触点の法線方向の成分 f_N と接線方向の成分 f_T に分解し、それぞれの方向に仮想的なばねとダッシュポットを想定して次式により求める。

$$f_N = k_N u_N + c_N \dot{u}_N \quad (1)$$

$$f_T = k_T u_T + c_T \dot{u}_T \quad (2)$$

ここで、 k_N 、 k_T は法線方向、接線方向のばね定数、 c_N 、 c_T は法線方向、接線方向のダッシュポットの粘性係数、 u_N 、 u_T は粒子が接触した時点からの法線方向、接線方向の相対変位、 $\dot{u}_N$ 、 $\dot{u}_T$ は法線方向、接線方向の相対速度である。ただし、接線方向の力はクーロン則にしたがって摩擦を考慮する。

$$f_T = \begin{cases} f_T^t \frac{|f_N| \tan \phi}{|f_T^t|} & \text{if } |f_T^t| > |f_N| \tan \phi \\ f_T^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ばね定数の設定法には様々なものが提案されている。

表-1 地盤のパラメータ

半径 (m)	密度 (kg/m ³)	ヤング係数 (MN/m ²)	ポアソン比	摩擦角
0.020	2.4×10 ³	3.0×10 ⁷	0.15	35.0°

表-2 管のパラメータ

外径 (mm)	厚さ (mm)	長さ (m)	分割数	密度 (kg/m ³)	ヤング係数 (MN/m ²)	ポアソン比	摩擦角
125.0	11.4	6.0	40	1.0×10 ³	1.0×10 ⁸	0.46	35.0°

表-3 解析ケース

解析ケース名	地盤モデル	断層タイプ	最大断層変位量 (m)	断層移動速度 (m/s)
L01	01	左横ずれ	0.40	0.20
L02	02	左横ずれ	0.40	0.20
R01	01	右横ずれ	0.40	0.20
R02	02	右横ずれ	0.40	0.20

本研究では、Yade で標準的な手法である調和平均に基づく方法を採用した。二つの球体粒子 1, 2 が接触するとき、このとき、法線方向のばね定数 k_N 、接線方向のばね定数 k_T は、それぞれ

$$k_N = \frac{E_1 r_1 E_2 r_2}{E_1 r_1 + E_2 r_2} \quad (4)$$

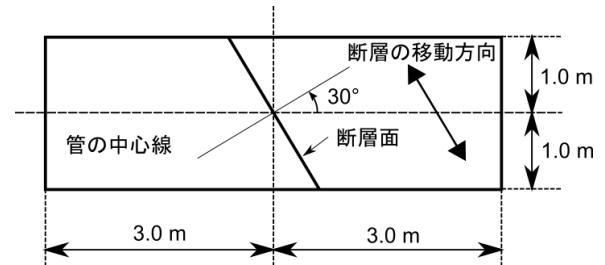
$$k_T = \frac{v_1 v_2}{v_1 + v_2} k_N \quad (5)$$

と与えられる。ここで E_1 、 E_2 はそれぞれの粒子のヤング係数、 r_1 、 r_2 は半径、 v_1 、 v_2 はポアソン比である。

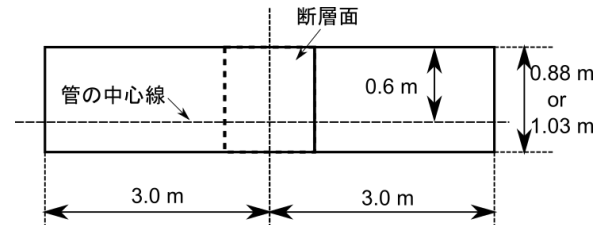
本研究では、地盤には球体粒子を用いた。一方、管には円柱鎖モデルを用いた。円柱鎖モデルは剛な円柱を鎖状に連結したモデルで、連結部のみで変形を生じる（図-2）。円柱内の軸力、曲げモーメント、ねじりモーメントは、はり理論に基づいて計算される。円柱と粒子の接触力は、粒子間の接触モデルに準じて計算される。なお、Yade で実装されていない中空の円柱を利用するため、ソースコードの一部を改変した。

(2) 解析モデルと解析ケース

図-3 のように長さ 6.0 m、幅 2.0 m の大きさで密な砂地盤と緩い砂地盤に相当する二種類の地盤モデルを作成した。地盤モデルの高さは密な砂地盤で 0.88 m、緩い砂地盤で 1.03 m である。地盤は剛な箱の中に設置されている。この剛な箱は地盤モデルに断層変位を与えるために断層面の位置で二分割されている。図-3(a)において左側の箱は固定し、右側の箱に対して強制変位を与えることで断層の運動を模擬できる。これらの地盤モデルの幅方向の中央で地表から管の中心までの深さが 0.60 m の位置に外径 125 mm の高密度ポリエチレン管を想定した管モデルを設置した。断層の法線方向と管の交差角は 30° とした。その他、解析モデルの作成にあたって設定が必要なパラメータを表-1 及び表-2 にまとめて示した。



(a) 平面図



(b) 側面図

図-3 解析モデルの概要図

解析は二種類の地盤モデル、二種類の断層変位の向きを組み合わせることで 4 ケースを実施した。地盤モデルは密な砂地盤と緩い砂地盤で前者を地盤モデル 01、後者を地盤モデル 02 と呼ぶ。断層変位の向きは左横ずれと右横ずれである。図-3(a)のように断層と管の交差角を設定したため、左横ずれの場合には管には圧縮力が作用する。一方、右横ずれを与えた場合には、管に引張力が作用することになる。与える断層変位量の最大値を 0.40 m、断層の変位速度は一定で 0.20 m とした。解析ケースの一覧を表-3 にまとめた。

(3) 解析モデルの生成

解析モデルの生成は次の手順で行った。まず、地盤モデルと長さと同幅が等しく、高さが 2.0 m の直方体の内部

表-4 生成した地盤モデルの特性

地盤モデル	粒子総数	厚さ (m)	間隙比
01	188,178	0.88	0.73
02	192,185	1.03	0.96

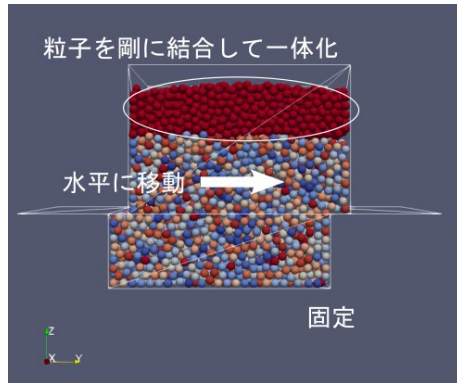


図-4 一面せん断試験の概要

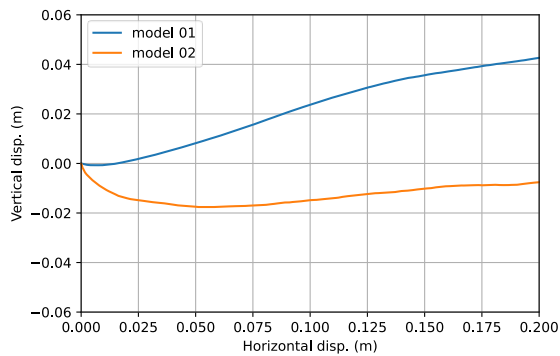


図-5 一面せん断試験による鉛直変位と水平変位の関係

に重ならないようにランダムな位置に粒子を生成する。次に生成した粒子に重力 (9.81 m/s^2) を作用させて堆積させる。堆積した粒子の振動が十分に収まったのを確認し、管を設置する際に重なる位置にある粒子を削除し、円筒鎖モデルによる管を設置する。

密な砂地盤に相当する地盤モデル 01 を作成する際には、重力に対して堆積させる過程において一時的に摩擦角をゼロとした。一方、緩い砂地盤に相当する地盤モデル 02 を生成する際には、重力に対して堆積させる際にも摩擦角は 35° とした。

4. 結果と考察

(1) 生成した地盤モデルの確認

生成した二種類の地盤モデルの粒子総数、厚さ、間隙比を表-4に示した。管を設置するために粒子を削除したため、地盤モデルによって粒子数が異なっている。さら

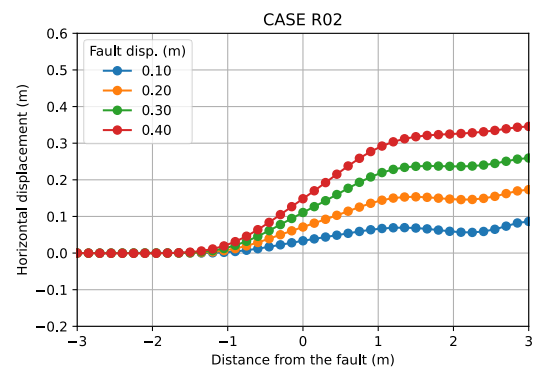
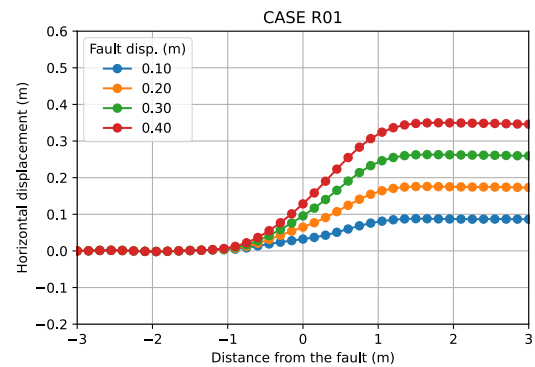
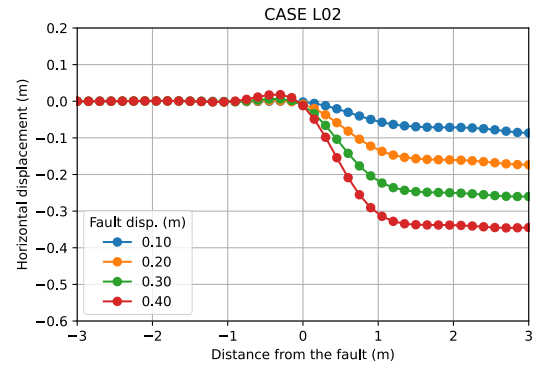
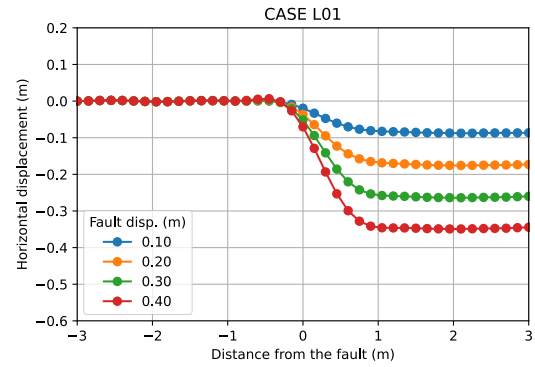


図-6 断層変位に対する管の変形

に二つの地盤モデルの性質の違いを明らかにするため、擬似一面せん断試験を実施した。まず、擬似一面せん断試験を行うための地盤モデルを、地盤モデル 01 と 02 と同じ粒子、同じ手順で縦 1.0 m、横 1.0 m の大きさで作成

した。次に、図-4に示すように作成した地盤モデルの地表から粒子6個分の深さにある粒子を剛的に結合したブロックを作成した。このブロックは、四方を剛な壁に囲まれているため、上下方向の並進運動のみが生じるように拘束されている。さらに容器を地表から粒子6個分より深い位置から底面までの高さの半分の位置で分割した。最後に、下側の容器を固定した状態で上側の容器を水平に移動させ、ブロックの上下方向の変位量を求めた。なお、これらの操作は、すべて下向きに重力加速度 9.81 m/s^2 を与えた状態で行った。また、側壁、底面と地盤粒子の間の摩擦はゼロとした。

得られた上下方向の変位量と水平方向の変位量の関係が図-5である。地盤モデル 01 では、せん断変位に対して上部のブロックが上昇しており、生成した地盤が正のダイレイタンスを示している。一方、地盤モデル 02 では、せん断変位に対して上部のブロックが沈下しており、負のダイレイタンスが現れていると解釈できる。これらの結果に基づき、地盤モデル 01 は密な砂地盤、地盤モデル 02 は緩い砂地盤と呼ぶことにした。

(2) 管の変形

表-3に示した4つの解析ケースごとに、与えた断層変位量に対する管の変形（管軸直角方向の変位量）を図-6に示した。図の横軸は、断層変位を与える以前の状態における断層面と管の交差点からの距離を示しており、正の値は移動側、負の値は固定側に相当する。断層変位量は断層面に沿った値であるため、図中に示した断層変位量と移動側の管の端部の変位量は一致しない。

密な砂地盤に相当する L01 と R01 では、管の変形は断層近傍で生じており、管の両端部では地盤の変形が生じていない。一方、緩い砂地盤に相当する L02 と R02 では、管の変形が断層の近傍だけでなく、移動した側の管の端部付近まで生じている。これは、緩い砂地盤に相当する地盤モデルでは、断層の運動に伴い地盤に振動が発生し揺すり込み沈下が生じたためである。また、ケース R02 では、右横ずれに伴い移動側の管の端部にある壁は断層面から遠ざかるように動くことになる。この壁と地盤との間では引張力が伝達されないため、壁と地盤の間に隙間が生じ、その隙間を埋めるように地盤粒子が崩れるため、管に変形が生じた。管に引張を与えるような横ずれ断層変位を適切に地盤に与えるには、壁を断層面に平行に設置するなどの対応が考えられる。

断層の近傍において、断層変位の向きと大きさが等しい L01 と R01、L02 と R02 をそれぞれ比較すると、密な砂地盤に相当する L01、R01 の方が、緩い砂地盤に相当する L02、R02 よりも管が変形する範囲が広がる傾向が観察できる。すなわち、密な砂地盤では、管に作用する地盤拘束力が大きくなり、緩い砂地盤では小さくなる

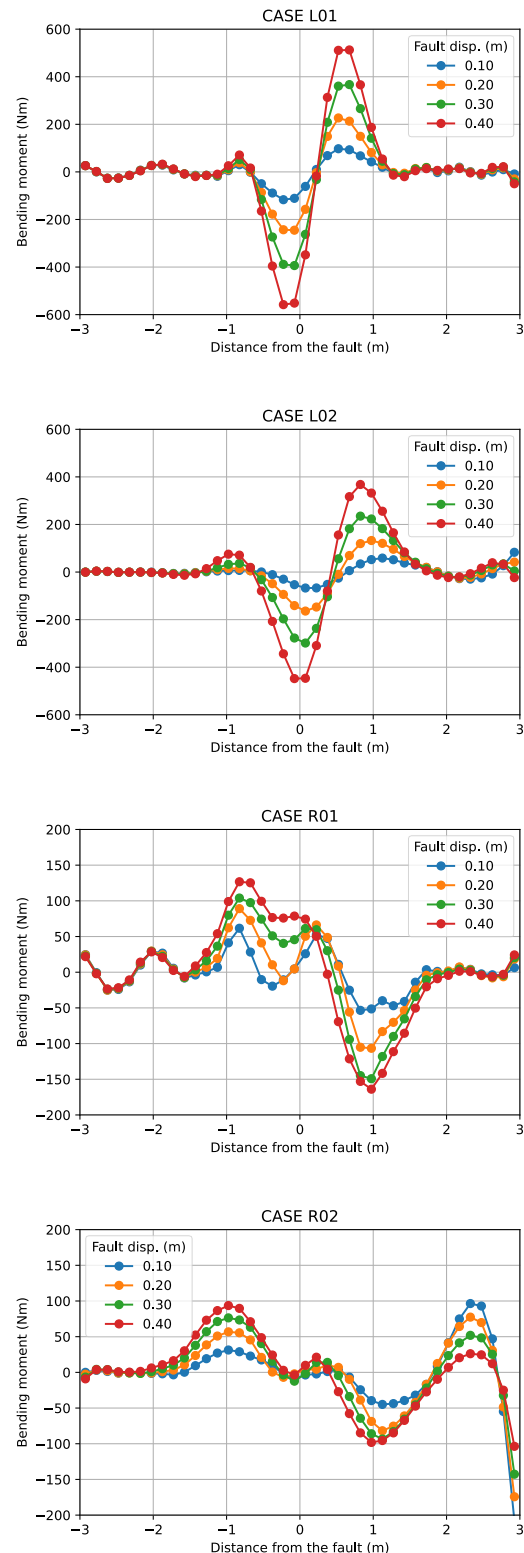


図-7 断層変位に対する管の曲げモーメント

という現象が再現されている。

横ずれ断層変位を静的に与えた場合、管の変形は断層との交差点に対して点対称になるはずである。しかし、本研究で実施した個別要素法解析の結果では、図-6に示

したように管の変形が生じた範囲は、移動させた地盤側に偏って生じている。これは、外力が与えられることで地盤を構成する粒子の再配置が起こること、さらに粒子と管体それぞれに慣性力が働くためであると考えられる。既往の研究では、断層変位を静的に与えるものが多く、動的な効果についてはこれまでに十分な検討がなされていない。また、断層変位を動的に与える際に、どのような時刻歴で与えるのが適切かについても知見は得られていない。

(3) 管の曲げモーメント

管に生じた曲げモーメントの分布を図-7に示す。緩い砂地盤に相当するケース L02 と R02 では、前節で述べた原因により、移動した側の端部で断層変位とは直接関係しない管の変形が生じ、曲げモーメントが発生している。ケース L02 では、断層からの距離が 2 m から 2.7 m の範囲で断層の変位量によらず曲げモーメントがゼロになっているので、この点よりも断層に近い範囲は、端部の影響を受けず断層変位による影響のみが作用していると判断できる。一方、R02 では断層からの距離がおよそ 1.7 m と 2.7 m の地点において、それぞれ曲げモーメントが一定の値に留まっている。しかし、その 2 点の間では曲げモーメントが断層変位量によって変動しており、この変動は断層変位が直接影響しているのか、あるいは管の端部の地盤の乱れによるのかは区別できない。そのため、R02 については少なくとも移動側の断層からの距離が 2.7 m よりも大きい範囲は注意して扱う必要がある。

左横ずれ断層変位によって管に生じる曲げモーメントの形状は L01 と L02 で互いに良く似ている。断層と管が交差する点近傍で曲げモーメントは負のピークを示している。一方、曲げモーメントの正のピークは、L01 では断層からおよそ 0.5 m の地点、L02 ではおよそ 0.5 m から 1.0 m の範囲に現れている。L01 では曲げモーメントの正負のピークが出現する位置は、断層変位量が増加してもほとんど変わっていない。これに対し、L02 では断層変位量が大きくなるに従い曲げモーメントのピークが現れる位置が移動している。これは、断層付近の地盤の特性が断層運動に伴うせん断変形を受けて変化することが原因と考えられる。管の曲げモーメントの正負のピークの大きさは、いずれも L02 よりも L01 の方が大きい。これは密な地盤の方が緩い地盤よりも管が地盤から受ける拘束力が大きいと考えることで理解できる。

右横ずれ断層変位を受けた管のモーメントの分布は、左横ずれを受けた場合よりも複雑な形状をしている。特に、R01 では断層変位量の増加に対して、-0.50 m の地点から断層までの範囲で曲げモーメントの分布形状が大きく変化している。この変化が現れた原因は、断層変位を受けた地盤の変形であると推察できるものの、現時点で

は明らかにできていない。R02 は、R01 と比較して断層変位量の増加に伴う曲げモーメントの分布形状の変化は少ない。曲げモーメントの正のピークは、断層変位量によらず 1.0 m 付近に現れている。ただし、曲げモーメントの負のピークは、断層変位量が大きくなるに伴い、断層面に近づくように移動している。この現象については、管の端部近くの地盤の乱れが影響している可能性も排除できず、詳細に確認する必要がある。

等しい断層変位量に対して管に発生する曲げモーメントのピーク値は、右横ずれ断層のケース (R01 と R02) を左横ずれ断層のケース (L01 と L02) が大きく上回っている。これは、本研究で解析を行ったモデルにおいては、左横ずれ断層では管に圧縮力が作用し、曲げモーメントの大きさを増大させる効果を持つためである。なお、断層変位によって管に圧縮力が作用するのか引張力が作用するのかは、断層と管の交差角度によって異なる。すなわち、断層との交差角が最適になるように管を設置することで、管に生じる曲げモーメントを抑制することが可能であることがわかる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、三次元個別要素法を用いて横ずれ断層変位を受ける埋設管に発生する変形及び曲げモーメントを求める数値解析を実施した。解析で得られた結果は以下のようにまとめることができる。

- ・ 密な砂地盤における管の変形は、緩い砂地盤と比較してより断層近傍の狭い範囲で発生した。
- ・ 密な砂地盤において管に生じる曲げモーメントは、緩い砂地盤よりも大きくなった。
- ・ 断層面に対して片側を固定、もう一方を移動させることで断層変位を与えて解析を行った。移動側の地盤と管には慣性力が作用し、固定側の地盤には作用しないため、管の変形及び曲げモーメントは断層と管の交差点に対して点対称にはならなかった。
- ・ 断層と管の交差角度が同じでも、断層変位の向きによって管に生じる軸力の向きが異なる。管に圧縮が作用する向きに断層が変位する場合、管に引張が作用する場合よりも管に生じる曲げモーメントは大きくなる。

これらの結果は、本研究で実施した限られた 4 つの解析ケースによるものである。今後は解析モデルの形状や生成方法、断層変位の与え方について検討を進める必要がある。また、断層変位に対する埋設管の応答に影響する因子は、個別要素法に特有のパラメータを含めて多数存在する。これらについて検討を進めることで、断層変位を受ける埋設管の耐震性能の向上への貢献が果たされ

ると考えている。

参考文献

- 1) Jennings, P. C. and Housner, G. W.: The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, *Proc. of 5th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.16-25, 1973.
- 2) EERI: The Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999, EERI Special Earthquake Report, 2021.
- 3) Kaya, E. S., Uckan, E., O'Rourke, M. J., Karamanos, S. A., Akbas, B., Cakir, F. and Cheng, Y.: Failure analysis of a welded steel pipe at Kullar fault crossing, *Engineering Failure Analysis*, Vol.71, pp.43-62, 2017.
- 4) 後藤浩之, 土井一生.: 2014 年長野県北部の地震とその被害調査, 京都大学防災研究所年報, Vol.58, pp.8-15, 2015.
- 5) 畠山大治, 庄司学, 永田茂, 吉見雅行.: 2016 年熊本地震における下水道埋設管路の地表断層変位による被災メカニズムの考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, p. I_441-I_453, 2020.
- 6) Cundall, P. A. and Strack, O. D.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 7) Newmark, N. M. and Hall, W. J.: Pipeline design to resist large fault displacement, *Proc. of US national conference on earthquake engineering*, pp.416-425, 1975.
- 8) Kennedy, R. P. and Kincaid, R. H.: Fault crossing design for buried gas and oil pipelines, *PVP*, Vol.98, No.4. ASME, pp. 3-10, 1985.
- 9) Wang, L. R. L. and Yeh, Y. A.: A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 13, No.1, pp.75-96, 1985.
- 10) 鈴木崇伸: 非線形なバネで支持されたはりの金冶解析法, 土木学会論文集, No.689/ I, pp.109-116, 2001.
- 11) Talebi, F. and Kiyono, J.: A refined nonlinear analytical method for buried pipelines crossing strike-slip faults, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp.1-24, 2021.
- 12) Trautmann, C. H. and O'Rourke, T. D.: Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipes, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.9, pp.1077-1092, 1985.
- 13) Trautmann, C. H., O'Rourke, T. D. and Kulhawy, F. H.: Uplift Force Displacement Response of Buried Pipe, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.9, pp.1061-1076, 1985.
- 14) Ha, D., Abdoun, T. H., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., & Stewart, H. E.: Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.134, No.10, pp.1501-1515, 2008.
- 15) Ha, D., Abdoun, T. H., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., & Stewart, H. E.: Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting - A centrifuge investigation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.45, No.12, pp.1733-1742, 2008.
- 16) Ha, D., Abdoun, T. H., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., & Stewart, H. E.: Earthquake faulting effects on buried pipelines—case history and centrifuge study, *Journal of earthquake engineering*, Vol.14, No.5, pp.646-669, 2010.
- 17) Abdoun, T. H., Ha, D., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., Stewart, H. E.: Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.29, No.3, pp.415-427, 2009.
- 18) American Lifelines Alliance: Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, 2005.
- 19) Vazouras, P., Karamanos, S. A. and Dakoulas, P.: Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.11, pp.1361-1376, 2010.
- 20) Vazouras, P., Karamanos, S. A. and Dakoulas, P.: Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.41, pp.164-180, 2012.
- 21) Far, M. S., Hassani, N. and Muho, E. V.: Empirical expressions for the maximum induced strain on buried steel pipelines crossing strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.116, pp.490-494, 2019.
- 22) Rahman M. A. and Taniyama, H.: Analysis of a buried pipeline subjected to fault displacement: A DEM and FEM study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.71, pp.49-62, 2015.

THREE-DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT ANALYSIS OF BURIED PIPELINES SUBJECTED TO STRIKE-SLIP FAULT DISPLACEMENT

Yusuke ONO

Buried pipelines that intersect an active fault may be directly damaged by the movement of the fault. Since damage to buried pipes may have a significant impact on social activities, adequate countermeasures are desirable. This study conducted a distinct element method analysis to investigate the response of buried pipelines to lateral fault displacement. The distinct element method can handle the characteristics of the ground, which is a collection of granular materials, appropriately. An analytical model was set up with the intersection angle between the normal direction of the fault plane and the pipe axis set at 30 degrees. Two

types of ground models were generated and analyzed for left and right lateral fault displacements. By observing the deformation and bending moment distributions of the pipes, the effects of the ground characteristics and the direction of the fault displacement on the response of buried pipes were examined.