

鋼管鉛直引上げ土槽実験によるFEM-SPH解析手法の精度検証

名古屋大学 正会員 ○北野 哲司

東京ガス株式会社 正会員 坂上 貴士

東京ガス株式会社 正会員 伊藤 文樹

1. 序論

既往地震において、盛土道路の斜面が崩落し、埋設管が露出する事例が報告されている¹⁾。そこで、北野ら^{2),3)}は、「FEM-SPH 解析手法」を用いて、盛土道路の斜面崩壊が埋設管に与える影響確認を試みている。その一例を、図 1 に示す。本稿では、実験土槽を用いた鋼管引上げ実験を行い、その実験結果と FEM-SPH 解析手法での解析結果を比較することにより解析精度の検証を行った結果を報告する。

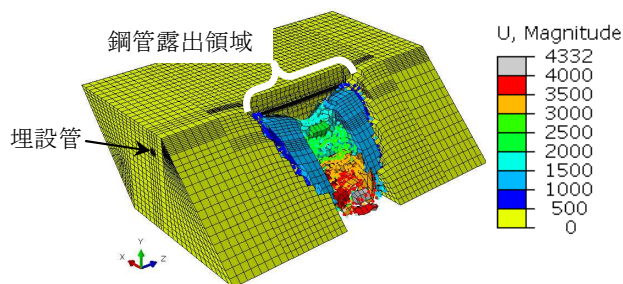


図 1 鋼管が埋設されている盛土道路の斜面崩壊解析

2. 鋼管引上げ実験

(1) 実験概要

図 2 に実験概要を示す。

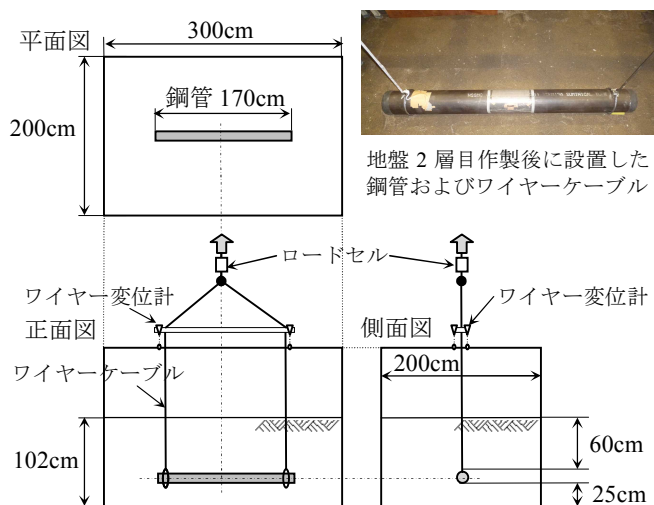


図 2 実験概要

実験では、実験土槽（横 3m×縦 2m×高さ 2m）に埋設土被り 60 cm の位置に鋼管（呼び径 150mm、長さ 170cm）を埋設し、鋼管両端部に取り付けたワイヤーケーブルを鉛直方向に 10cm/秒の速度で 70 cm 引き上げ、鋼管に作用する土圧をロードセルで逐次計測した。鋼管の引上げ変位は、図 2 に示す位置で 4 個のワイヤー変位計を用いて計測した。

図 2 の右上写真は、作製地盤 2 層目完了後に鋼管およびワイヤーケーブルを設置した状況である。ワイヤーケーブルは、鋼管両端部から内側に約 15cm の位置に取り付けた。なお、後述する数値解析においても、同位置に引上げ変位を与えた。

(2) 作製地盤の特性

作製地盤は、埋戻し材料に山砂（以下、埋戻し土と称す）を用いた 7 層構造とした。作製手順は、埋戻し土を厚さ約 15cm で撒き出した後に転圧するという作業を繰り返して作製した。

作製地盤の特性は、表 1 の通りである。作製地盤の内部摩擦角および粘着力は、図 3 に示す埋戻し土の三軸圧縮試験結果等から設定した。

表 1 作製地盤の特性

湿潤密度(ρ_t)	1.51(g/cm ³)	全 7 層での測定値の平均値
乾燥密度(ρ_d)	1.38(g/cm ³)	同上
内部摩擦角(ϕ)	33(°)	三軸圧縮試験結果と平均乾燥密度から算出
粘着力(c)	3.7(kN/m ²)	三軸圧縮試験結果から設定

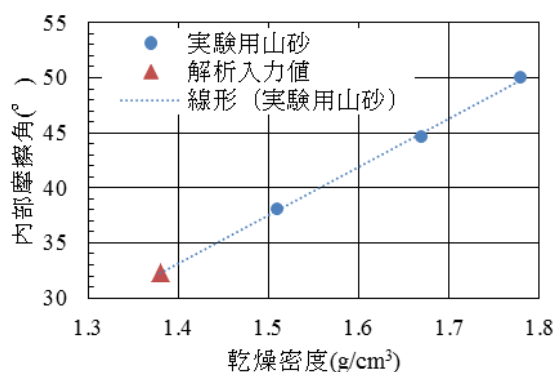


図 3 埋戻し土の三軸圧縮試験結果

キーワード 埋設管, 土槽実験, 地盤拘束力・土圧, SPH 粒子法, ハイブリッド解析

連絡先 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学減災連携研究センター TEL. 052-789-4829 E-mail : kitano.tetsuji@nagoya-u.jp

(3) 実験結果

鋼管引上げ実験で得られた鋼管引上げ変位と引上げ荷重の関係は図 11 に示してある。なお、実験データの引上げ変位量には実験中のワイヤーケーブルの伸びも含まれている。

図 4 に実験実施前後の土槽地表面の状況を、図 5 に引上げ完了時における鋼管の露出状況および地表面の隆起・陥没状況を示す。

これらの写真から、地表面には鋼管を中心として楕円状に隆起領域が存在すると共に、その内側には陥没領域が存在していることが読み取れる。その範囲と位置関係を図 6 に示す。

また、図 5 から露出した鋼管の上部には、埋戻し土が山形形状で載っていることが確認できる。



(a) 実験前の状況

(b) 実験後の状況

図 4 土槽地表面の状況

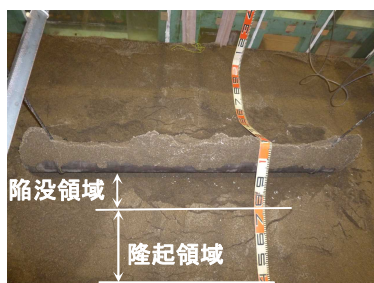


図 5 引上げ完了時点の露出鋼管の状況

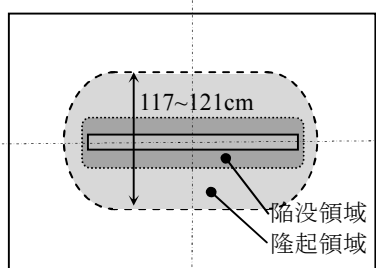


図 6 実験後の地表面の隆起・陥没領域 (灰色網掛け部)

3. 鋼管引上げ実験の再現解析

(1) FEM-SPH解析手法

FEM-SPH 解析手法は、解析開始時点では地盤モデルは Solid 要素でモデル化しておく。鋼管が引上げ

られると共に徐々に地盤ひずみが増大する。この解析手法では、地盤 Solid 要素に発生する主ひずみの値が 20%[参考文献 2)で SPH 粒子への変換主ひずみ閾値については検討済み]を超過すると Solid 要素から SPH 粒子に変換して解析を継続することが可能である。

(2) 再現解析の解析条件

解析手順は、重力解析を実施した後、鋼管両端部のワイヤーケーブル設置位置を鉛直方向に 70cm 引上げることで鋼管を上方に移動させる。表 2、図 7 に各解析 Case における地盤および鋼管の使用要素とメッシュサイズを示す。

表 2 地盤・鋼管の使用要素とメッシュサイズ

	地盤	鋼管
使用要素	Solid要素、SPH粒子	Shell要素
Case-MF1	縦2cm×横3cm×高さ5cm	2cm×2cm
Case-MF4	縦・横・高さ：約1.5cm	1cm×1cm
Case-MF5	同上	同上

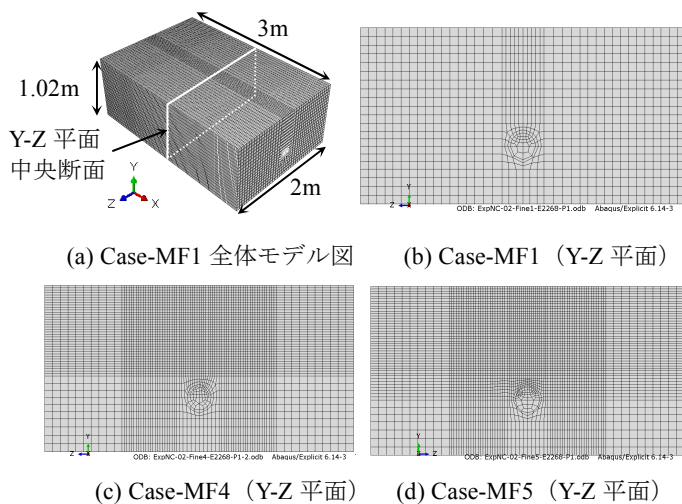


図 7 解析モデル寸法・各モデル Y-Z 平面メッシュ分割

Case-MF4 と Case-MF5 との違いは、鋼管埋設位置のメッシュ高さ寸法が異なるのみである。

表 3 に、地盤モデルの入力パラメータおよび地盤と鋼管表面との摩擦係数を示す。また、地盤の破壊基準は、モールクーロン破壊基準を適用した。

表 4 に、鋼管 (圧力配管用炭素鋼鋼管(STPG370)) の特性値を示す。実験時における管軸・管周方向の撓みを排除するために厚板管 (Sch80) を採用した。

なお、FEM 陰解法（地盤：Solid 要素、鋼管：Shell 要素）も参考までに実施した。また、解析ソルバーは Abaqus6.14-3 を使用した。

表 3 地盤の入力パラメータおよび鋼管表面との摩擦係数

ヤング率(E)	22.68MN/m ²	建築基礎構造設計指針 ⁴⁾ より $\varphi = \sqrt{20 \cdot N} + 15^\circ$ $E = 1.4 \cdot N$
ポアソン比(ν)	0.35	トンネル標準示方書 ⁵⁾ より
地盤と鋼管表面との摩擦係数(μ)	0.3	藤田ら ⁶⁾ の既往研究

表 4 鋼管の入力パラメータ

外径	165.2mm	
管厚	11mm(Sch80)	
ヤング率(E_p)	206,000N/mm ²	
ポアソン比(ν_p)	0.3	
最小0.2%耐力(σ_y)	215N/mm ²	
最小引張強さ(σ_t)	370N/mm ²	

(3) 解析結果

FEM-SPH 解析結果を以下に示す。ここで掲載する断面図は、Case-MF4 における解析モデルの中央断面（図 7 (a)参照、Y-Z 平面）である。

図 8 に、鋼管引上げ変位 60mm 時の地盤変位分布を示す。鋼管上方に逆釣鐘状の変位領域が形成されている。また、鋼管直上部および鋼管が直上地盤を持ち上げることにより発生する滑り線上では、Solid 要素から SPH 粒子への変換が進展している。この滑り線を延長した場合の地表面隆起幅は 40cm であった。この範囲が、図 5 および図 6 に示す陥没領域にほぼ匹敵する。

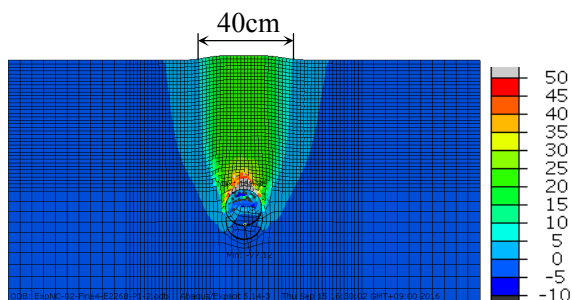
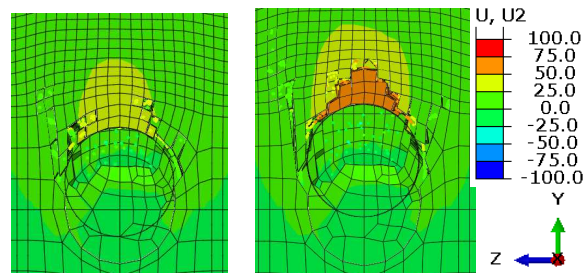


図 8 鋼管引上げ変位 60mm 時の地盤変位分布(単位:mm)

図 9 には、鋼管近傍における地盤変位状況を示す。本図から、地表面まで繋がる滑り線の発展過程（Solid 要素から SPH 粒子への移行）を確認することができる。また、同図 (b)においては、図 5 で確

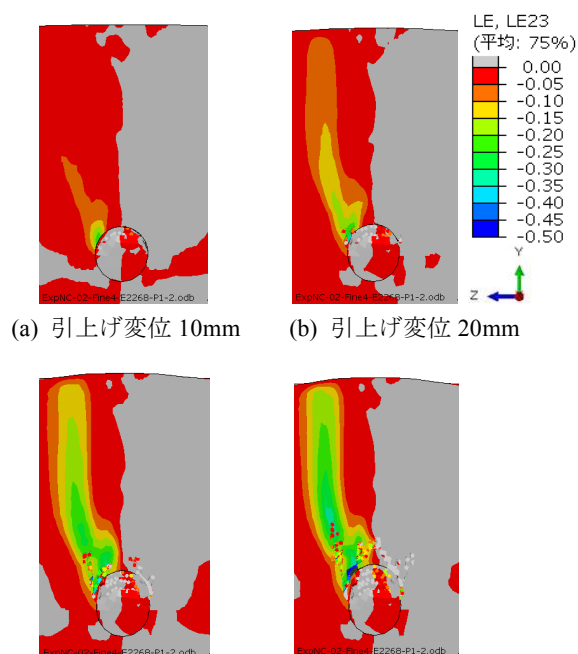
認した露出鋼管の上部表面に残存した山形土塊が既に形成されており、その山形土塊の頂点から両側斜め方向に滑り線が存在していることが確認できる。



(a) 引上げ変位 39mm (b) 引上げ変位 67mm

図 9 鋼管近傍の地盤変位分布(単位:mm)

図 10 に、各引上げ変位における地盤のせん断ひずみ(ϵ_{yz})コンター図を示す。鋼管の引上げ量の増大と共に、地盤のせん断ひずみも上方に発展していく様子がわかる。一方、同図 (c)、(d)から、鋼管近傍の地盤せん断ひずみは、徐々に同程度のせん断ひずみに収まってきており、大きく増大していない。これは、地盤ひずみが増大すると Solid 要素から SPH 粒子に変換されることによるものであり、地盤の管下への移動・落下等の実現象とも合致している。



(a) 引上げ変位 10mm

(b) 引上げ変位 20mm

(c) 引上げ変位 40mm

(d) 引上げ変位 60mm

図 10 各引上げ変位におけるせん断ひずみ(ϵ_{yz})コンター図

4. 鋼管引上げ実験と数値解析との比較検証

図 11 に、鋼管鉛直引上げ変位量と引上げ荷重（鋼

管に作用する土圧) の関係を示す。また、表 5 に、地表面に発生した隆起・陥没領域の短軸方向長さを示す。

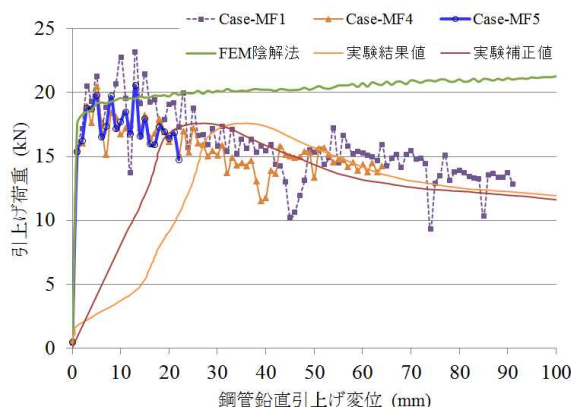
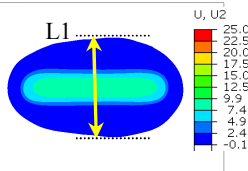


図 11 引上げ変位と荷重

表 5 地表面隆起・陥没領域 (L1 のみ実験時測定)

	短軸方向(L1)長さ
実験測定値	117~121cm
Case- MF1	135cm(11mm引上げ時)
Case-MF4	115cm(17mm引上げ時)
Case-MF5	110cm(19mm引上げ時)



以下に、比較検証結果について考察する。

(1) 引上げピーク荷重と変位

ピーク荷重(地盤拘束力)については、FEM-SPH 解析と実験では、ほぼ同程度である。次に、ピーク荷重の出現変位については、FEM-SPH 解析では解析直後から引上げ変位量 15mm 程度までの間で出現している。一方、実験では引上げ変位量 20~30mm でピーク荷重が出現しているが、これは鋼管を吊り下げたワイヤーの伸びに起因している。

(2) ピーク荷重後の荷重減少推移

ピーク荷重後の荷重(土圧)の減少推移については、FEM-SPH 解析は荷重値が振動するものの、巨視的な減少傾向としては再現できている。

(3) FEM-SPH 解析のメッシュサイズ

FEM-SPH 解析の引上げ荷重は、メッシュサイズを細かくすれば、応答値(荷重)の振れ幅は小さくなり安定する傾向にある。しかし、ある程度の細かさ確保すれば差異は無い。なお、メッシュサイズを細かくすると、その分、解析時間は長くなる。

(4) FEM陰解法の大変形解析への適用性

図 11 から明らかであるが、通常の FEM 陰解法では引上げ荷重の減少は表現できない。

(5) 地表面の隆起領域および隆起領域の経時変化

表 5 の通り、鋼管引上げに伴い出現する地表面の隆起領域については、メッシュサイズが粗いと実験測定値より大きくなり、メッシュサイズを細かくすると実験測定値より小さくなった。

地表面の隆起領域の経時変化については、ピーク荷重前後までに表 5 に示す最大領域となり、その後、徐々に隆起領域は縮小し、図 5、図 6 に示す隆起・陥没領域に移行していくことが実験および数値解析の過程から確認された。

5. 結論

鋼管鉛直引上げ実験結果と FEM-SPH 解析手法を用いた解析結果とを比較検証した。以下に結果を総括する。

FEM-SPH 解析は、地表面の隆起領域、その領域の経時変化、ピーク荷重値およびピーク荷重以降の減少推移はほぼ再現できている。

また、鋼管周りの土砂の管下空間への移動・落下、引上げ時における鋼管上部表面に残存する山形状土塊をシミュレートすることが出来たことは非常に有益であった。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15K12489 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 北野：東日本大震災における都市ガスの被害・復旧状況と地震対策の課題，予防時報，252 号，pp.20-27，2013.
- 2) Tetsuji Kitano et.al: Analyses of the Failure of an Embankment Slope and Its Influence on the Pipeline Installed in that Embankment Slope, ASCE Pipelines 2016, pp.1454-1463.
- 3) T. Kitano et.al: Numerical Studies of the Effect of Slope Failure on a Buried Pipeline by a Hybrid Analysis Using SPH and FEM, No.614, 16WCEE 2017, Chile, January 9th 2017.
- 4) 一般社団法人 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2011 年 12 月 20 日発行，p.113・p.146.
- 5) 公益社団法人 土木学会：トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説、平成 8 年度版、p.266.
- 6) 藤田、小倉、北野、野中：地盤変状を受ける埋設鋼管のソリッド要素・シェル要素による変形解析手法に関する検討、第 14 回日本地震工学シンポジウム，pp.3767-3772，2014.

(2016.12.20 受付)