

FEM-DEM 結合解析法を用いた地中スラストブロックの 地震時動的挙動に関する研究¹

Study on the Dynamic Behavior of Buried Thrust Blocks under Seismic Wave by Using FEM-DEM Combined Method

片桐 信² 摂南大学工学部 都市環境工学科

川口雄大 サンコーコンサルタント株式会社

KATAGIRI, Shin Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of
Science and Engineering, Setsunan University

KAWAGUCHI, Yuta Suncoh Consultant Co., Ltd.

Abstract

This study investigates the dynamic behavior of buried thrust blocks in water distribution pipelines under seismic waves. The FEM-DEM combined method is employed for the dynamic response analysis of the thrust blocks, and the surrounding ground is modeled as an elastic body. The separation between the blocks and the ground is treated by the appearance of distinct elements at the boundary. As a result, the relative lateral movement between two adjacent blocks is calculated, which is considered to be the cause of breakaway of a pipe joint connected to the blocks, as observed in the aftermath of the 2011 Great East Japan Earthquake.

キーワード: スラストブロック, 水道配水管路, 有限要素法, 個別要素法,
動的応答解析

Keywords : thrust block, water distribution pipeline, finite element method,
distinct element method, dynamic response analysis

1. はじめに

1-1 上水道の重要性

上水道, ガス, 電気などの水・エネルギー供給系ライフラインは, 地震時に施設の物理的被害が生じると広域ネットワークとしての機能的損傷に結びつき, 都市生活に重大な影

¹ 【原稿受付】 2018 年 8 月 1 日, 【掲載決定】 2018 年 9 月 25 日

² 【主著者連絡先】 片桐 信 摂南大学, 教授 e-mail: shin-k@civ.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8, 摂南大学工学部 都市環境工学科

響を与える。つまり、線的・面的な広がりを持つネットワークでサービスを提供することが大きな特徴であり、一カ所が損傷した場合でも、被害が甚大になる。

水道水の安定的な供給は、都市機能を支える上で欠くことのできないものであり、水道機能が停止した場合、多大な影響が予想される。すなわち、生活においては、飲料水や炊事用水のみならず、入浴、トイレの使用などにも支障を来し、衛生環境に悪影響を及ぼす。断水により消火用水の供給が滞れば、火災の発生時に初期消火が遅れ、地震時火災の影響は広範囲に及ぶ。そして、断水が長期にわたる場合、医療活動や避難所生活などにも影響を及ぼすなど、多くの人の生命が危険にさらされる恐れがある。また、漏水が生じると、地盤の陥没や流失によって周辺地域に大きな2次災害が生じることも懸念される。

本研究では、上記のような上水道ライフラインの耐震安全性について着目し、2011年3月の東北地方太平洋沖地震時に被害調査⁽¹⁾で発見された、スラストブロックに接続された管路継手の被害原因について、数値解析により考察する。

1-2 スラストブロックの概要

スラストブロックは、圧力の高い上水道管路の屈曲部や分岐部において、管路内の水圧により生じる不均衡力を土圧により支持し、管路を地盤に固定する事を目的に管路周辺に打設されるコンクリートの塊である。形状によってはブロックそのものの構造的な安全性の確認が必要な場合があり、圧力が高い場合には特に管路だけをコンクリートで防護するのではなく、ブロック自体が安定するようにコンクリートの補強配筋も含めて設計される⁽²⁾。スラストブロックの一例を図1⁽²⁾に示す。スラストブロックの損傷事例を図2⁽³⁾に示す。農業用管路の屈曲部にスラストブロックが打設されているが、赤丸が示すようにスラストブロックに亀裂が入り、管路の抜け出しが発生している。

スラストブロック周辺の管路に漏水が起きる原因として以下の可能性が考えられる。

① 地震時に、スラスト

ブロックが地盤と違う挙動を示す。挙動が違えば、地上に盛り上がり、不等沈下を起こしたりする恐れがある。その結果としてスラストブロックに接続されている管路に座屈や抜け出しが生じる。

② 地震時に周辺地盤がゆるんだ場合には、所定の土圧が作用しないために、ブロックが全体的に移動し、接続されている管路に座屈や抜け出しが生じる。

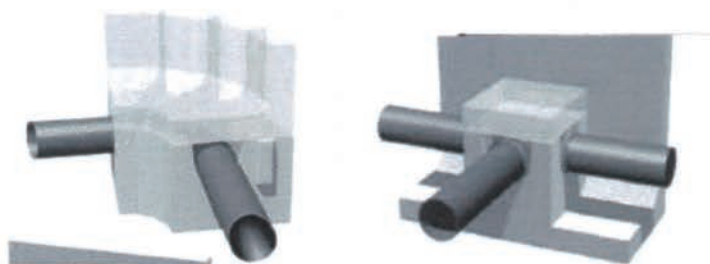


図1 スラストブロックの例⁽²⁾



図2 スラストブロック破壊事例⁽³⁾

2. 東北地方太平洋沖地震でのスラストブロック周辺管路の被害事例

図 3⁽¹⁾は東北自動車道白石 IC での送水管 $\phi 2400\text{mm}$ 鋼管の被害箇所を示している。曲がり部をもつ河川伏せ越し管路のコンクリート巻きたて部分（両側周辺）の管路が復旧工事のため露出している。図 4⁽¹⁾に示すように、コンクリート巻きたて部分と上流側の露出部分との間は約 12.5m あり、その間に 2 箇所の可撓継手が設置されていた。復旧後の管中心は下流側に向かって水平に約 70cm 左へ、鉛直方向に約 10cm 上へ変位し、地震動の影響によりスラストブロックが移動し、可撓継手の 2 箇所で屈曲による抜けが生じ、断水が起きている。管路は座屈したかのような変形である。しかし、周辺の高速道路の盛土や高速道路路面には地震による亀裂やすべりは確認できなかった。伏せ越し部の下流側の管路も上流側と同じようにコンクリートの固定部の間に可撓性継手が入っており、宮城県企業局の管路被害の調査によると下流側の継手では引張りによる抜けが生じていた。伏せ越しコンクリート帯が河川の右岸側に移動したものと考えられる。

低区系幹線では、本震の時に岩沼市で $\phi 800\text{mm}$ の送水管に 2, 3 箇所の被害が出たと報告されている。白石バイパスでは浄水場から上流側受水点の低区系幹鋼管管路 $\phi 1200\text{mm}$ の継手から漏水が発生された。漏水箇所は国道 4 号線白石バイパスを横断する手前で、図 5⁽¹⁾に示すように、管路両端がコンクリートで巻き立てた固定部になる。写真からも明らかなように継手を押し輪で固定するリングの幅約 20cm の管軸方向変位が生じている。しかし、周辺の歩道路面では、両側とも顕著な亀裂や沈下などの地盤変状は見られなかった。

一般に、地中管路に多大な被害を与える



図 3 白石 IC 付近の送水管被害箇所⁽¹⁾



図 4 白石 IC 付近の管路の屈曲
(継手補修後)⁽¹⁾



図 5 低区幹線 $\phi 1200$ 鋼管の漏水箇所
(継手離脱)⁽¹⁾

地震時外力としては、液状化地盤の側方流動、地盤沈下、地盤亀裂・開きなどの地盤変状であると考えられている。水道施設耐震工法指針・解説⁽⁴⁾でも、液状化地盤の側方流動を管路への入力と考えた耐震設計計算を行っている。しかしながら、上述の被害箇所においては、液状化痕跡は見られず、また管路周辺地盤にも地盤変状が見られなかった。スラストブロックは、常時の状態では背面土圧とスラスト力が釣り合うように設計されており、地盤に固定されていると考えているが、地震時には周辺地盤とは異なる変位が生じ、連結されている管路の継手部に離脱や屈曲の被害をもたらしていると推察する事ができる。

3. 数値解析手法とパラメータの設定

3-1 FEM-DEM 結合解析法の概要

本研究では、著者が開発した FEM-DEM 結合解析法⁽⁵⁾を用いた。図 6 は解析法の基本概念を示している。本法では、3つの個別要素は1つの正三角形定ひずみ有限要素で結合されている。従来の DEM (個別要素法)⁽⁶⁾では、個別要素間は法線方向と接線方向にそれぞれ独立したばねとダッシュポットで接続して、連続体を表現している。この場合、連続体の破壊はモールクーロンの破壊基準でのみ判定することができた。また、主応力が求められないため、せん断ばねに作用する応力とせん断強度との比較で破壊判定してきた。

FEM-DEM 解析では、材料の破壊は有限要素の応力もしくはひずみで判定する。そのため、材料特性を反映した判定基準を採用することができる。質量は、有限要素の節点(個別要素の中心)に集中させており、従来の DEM と同様にそれぞれの質点の運動方程式を独立して差分法により解く。破壊後は、有限要素は個別要素を結合せず、有限要素の節点を中心とした個別要素が現れ、個別要素同士の間距離がその初期値を下回った場合に法線方向の接触力が求められる。そのため、図 2 のように連続体である部分は有限要素により構成され、亀裂の表面に個別要素が生成され、再接触の際には接触力を伝達する。

3-2 減衰の取り扱いについて

減衰は、連続体の動的挙動を求める上で重要な要素である。しかし、DEM は構造物の破壊に至るような大変形を対象としているので、減衰については個別要素の数値計算上の無用な震動を防ぐために使われてきた。本研究の解析では、解析モデルの大半の部分は連続体であり、レイリー減衰の考え方を導入した。レイリー減衰は、二つの要素に分けられる。ひとつは「粘性減衰」で質点の絶対速度に比例する減衰力が与えられる。もうひとつ

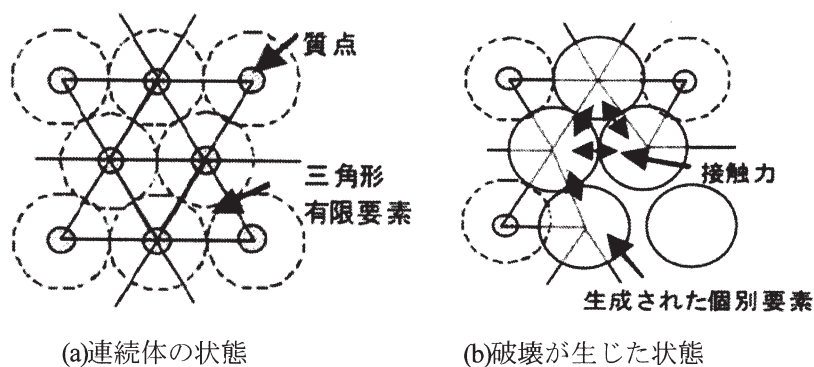


図 6 FEM-DEM 結合解析法の概念⁽⁵⁾

は「構造減衰」で、これは質点間の相対速度に比例する減衰力が与えられる。それぞれの個別要素（質点）の運動方程式は (1) 式ようになる。

$$m_d \cdot \ddot{u}_d + \alpha \cdot m_d \cdot \dot{u}_d = f_t \quad (1)$$

ここで、 m_d は質量、 $\alpha \cdot m_d$ が粘性減衰であり、 f_t には周辺の有限要素の剛性マトリクスと後述する構造減衰マトリクスを通じて与えられる力、隣り合う個別要素との間で作用する再接触力および重力が含まれている。

a) 粘性減衰 : 従来のDEMでは、差分法の計算を安定化させるために導入された。この減衰は、予期せぬ要素の震動を減少させるために使われ、粘性減衰係数 α は連続体の物性値との関連を考慮せずに解析の目的に応じて設定されてきた。本研究では、レイリー減衰として取り扱うために、(2)式により与えることとした。

$$\alpha = 4 \cdot \pi \cdot h \cdot f \quad (2)$$

ここで、 h : 減衰定数、 f : 表層地盤の固有周波数である。

b) 構造減衰 : 材料の粘弾性特性を Voigt タイプの減衰モデルで単純化した場合、材料の応力-ひずみ関係は下式で与えられる。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\eta = 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{m_d \cdot E} \quad (4)$$

ここで、 σ : 応力、 E : 弾性係数、 ε : ひずみ、 η : 粘性係数、 $\dot{\varepsilon} = (d\varepsilon/dt)$: ひずみ速度、 β : 構造減衰係数、 m_d : 質量である。そこで、それぞれの正三角形有限要素の構造減衰マトリクスは、剛性マトリクスの E を η に置き換えることで与え、節点（質点）の速度ベクトルを乗じることで構造減衰力を求めることとした。構造減衰係数 β は以下の式で表す。

$$\beta = h/(\pi \cdot f) \quad (5)$$

3-3 解析モデルとパラメータの設定

解析モデルを図7に示す。モデルは地盤の横断面を表しており、有限要素は平面ひずみ要素としている。モデルの下面は基盤面（ N 値50以上）と考え、この面の個別要素に強制変位入力として入力波を与えている。表層地盤厚を約29mとし、幅を100mとしている。赤○の個別要素は、運動方程式を差分法で解析する際の時間分割を決める代表要素である。

有限要素による解析では解析領域に限界があるため、モデルの側面に地盤の無限性を考慮した境界条件が必要である。本解析では、粘性境界を採用している。この条件は無限地盤への地震波をダッシュポットによる粘性減衰で近似的に再現する。粘性境界では境界面

を波が通過することを想定し、境界に粘性による応力を発生させ、反射波の影響を軽減する。(6)式に減衰力を示す。

$$f_{dx} = \rho \cdot t_d \cdot V_p \cdot \dot{u} \cdot D_d, \quad f_{dy} = \rho \cdot t_d \cdot V_s \cdot \dot{v} \cdot D_d \quad (6)$$

ここで、 f_{dx} , f_{dy} はそれぞれ側面質点の x , y 方向に作用させる減衰力、 ρ は地震の密度、 t_d は厚さ(1m とする)、 V_p , V_s はそれぞれ地盤の P 波速度、S 波速度、 \dot{u} , \dot{v} はそれぞれ質点の x , y 方向速度、 D_d は個別要素の直径である。

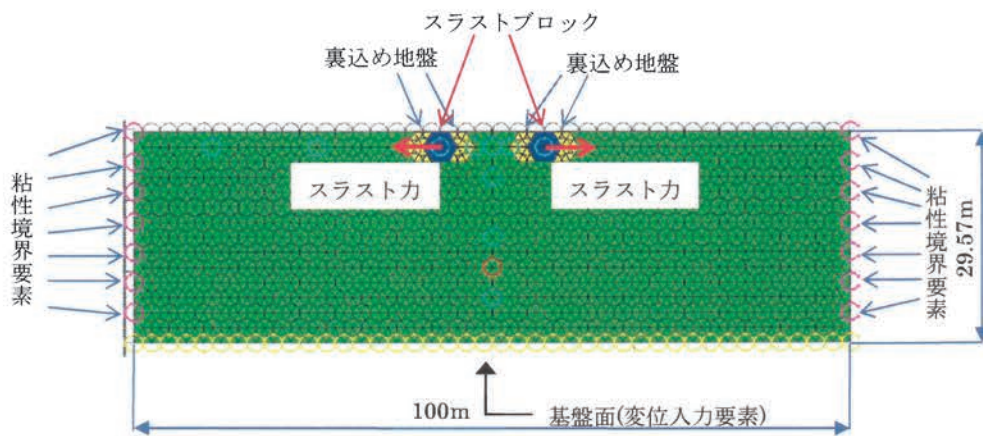


図 7 解析モデル

解析モデルの緑色は表層地盤要素、紺色はスラストブロック要素である。また、スラストブロックの施工時には、矢板施工が施されるため、スラストブロック裏込め地盤の N 値は周辺地盤よりも低くなる。そこで、黄色で示す裏込め地盤要素の N 値を周辺地盤よりも低く設定している。 N 値をもとにした地盤パラメータの設定方法は以下のとおりである。

$$V_s = 80 \cdot N^{1/3} \quad (7)$$

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (8)$$

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (10)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (11)$$

$$T_1 = \frac{4H}{V_s} \quad (12)$$

ここで、 V_s : S波速度、 ρ : 密度、 G : せん断弾性係数、 ν : ポアソン比、 E : 弾性係数、 λ : ラーメの定数、 V_p : P波速度および T_1 : 表層地盤の1次固有周期である。

入力波を図8に示す。まず、モデル全体を1G場に置き、全要素が静止するまで3秒間の自重解析を行う。この際の α は高い値に設定している。その後、20秒間sin波を入力波として基盤要素に与える。振動解析が終了後、全要素が静止するまで17秒間静止解析を行った。

地盤の破壊判定は、水道施設耐震工法指針・解説⁽⁴⁾、高圧ガス導管耐震設計指針⁽⁷⁾での地震波動が伝播する最大の地盤ひずみ値を参考に、スラストブロック周辺地盤の引張りひずみが0.41%以上となった時点で、その有限要素を消滅させ、個別要素を生成して、スラストブロックと周辺地盤との剥離を表すこととした。

本解析では、地盤を完全弾性体としてモデル化している。入力地震動のレベルが高くなると、せん断ひずみの高い要素にせん断応力-せん断ひずみ関係の非線形性が現れる。これは、通常Ramberg-Osgood (R-O) モデルやHardin-Drnevich (H-D) モデルで表現されるが、本解析ではこの点が考慮されていない。そこで、入力波の振幅は水道施設耐震工法指針・解説⁽⁴⁾のレベル1地震動を基本に、基盤震度0.15として下記のように設定した。入力波の卓越周期は推定できないために、表層地盤の1次固有周期に適合させている。

$$y = a \cdot \sin(\omega \cdot t) , \quad a\omega^2 = 0.15g \quad (13)$$

ここで、 ω : 1次モードの角速度、 a : 入力波の変位振幅、 g : 重力加速度である。本モデルでは、 $T_1 = 0.6863s$ 、 $a = 0.04988m$ となった。

設定した地盤パラメータを表1に整理する。

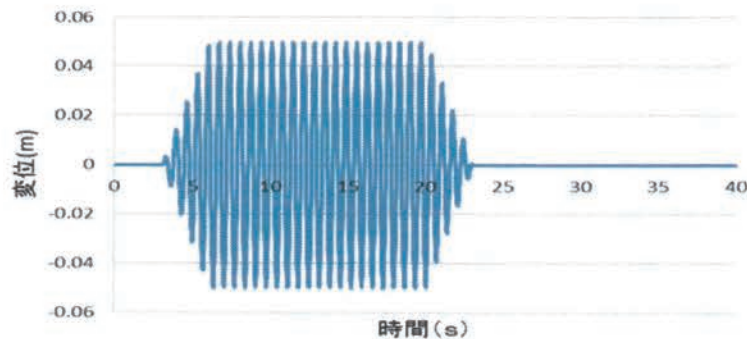


図8 入力波

表 1 地盤パラメータ

| N 値 | $E(\text{MN/m}^2)$ | ν | $\rho(\text{kg/m}^3)$ | $V_s(\text{m/s})$ | h |
|-------|--------------------|-------|-----------------------|-------------------|-------|
| 10 | 149.72 | 0.4 | 1800 | 172.35 | 0.075 |

スラストブロック単位奥行き当りのスラスト荷重は以下の式を用いて求める⁽⁸⁾。
スラスト荷重 W を求める式は式(14)で与えられる。

$$W = \frac{R}{S} \quad (14)$$

ここで、 R :ブロックの抵抗力、 S :安全率(=1.5)、 W :スラスト力である。
ブロックの抵抗力 R は下式で与えられる。

$$R = R_1 + R_2 \quad (15)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot B(H_2^2 - H_1^2) \cdot \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (16)$$

$$R_2 = \mu \cdot Q \cdot g \quad (17)$$

ここで、 R_1 :ブロック背面の受動土圧による抵抗力、 R_2 :ブロック底面の摩擦抵抗力、 γ_s :土の単位体積重量(=1800 kg/m³)、 B :ブロックの奥行き(1m)、 H_2 :ブロック底面までの深さ(m)、 H_1 :ブロック上面までの深さ(=0m)、 ϕ :土の内部摩擦角(=35°)、 μ :コンクリートと地盤の摩擦係数(=0.5)、 Q :ブロックの質量、 g :重力加速度である。

本解析では図 9 のモデル (有限要素) でスラストブロックを表すため、上記の式より以下のようにスラスト荷重と管口径 (内径) が算定される。

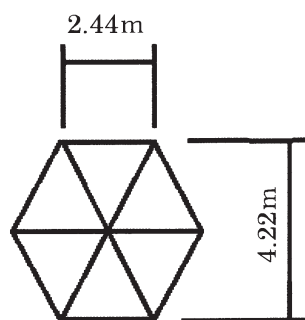


図 9 スラストブロックのモデル

$$R_1 = \frac{1800}{2} \cdot 1 \cdot 4.22^2 \cdot \tan^2\left(\frac{57.5}{180} \cdot \pi\right) \cdot g = 3.873 \times 10^5 \text{ N}$$

$$V = 6 \times 2.439 \times 2.11 \times 0.5 \times 1 = 15.44 \text{ m}^3, \quad \gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$R_2 = 2400 \times 15.44 \times 9.80665 \times 0.5 = 1.817 \times 10^5 N$$

$$R = R_1 + R_2 = 3.873 \times 10^5 + 1.817 \times 10^5 = 5.690 \times 10^5 N$$

これによりスラスト荷重 W は以下のような値となる。

$$W = \frac{R}{S} = \frac{5.690 \times 10^5}{1.5} = 3.793 \times 10^5 N$$

また、このスラスト荷重に対応する仮想管内径は (18) 式のように求められる。

$$W = P \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \tag{18}$$

ここで、 P :内水圧(0.75MPa)、 D :管内径(mm)である。よって単位奥行当りの管内径 D は以下ようになる。一般的な送水管・配水本管の管内径が $\phi 800$ であり、スラストブロックの大きさの想定として、妥当であるとする。

$$D = \sqrt{\frac{4 \times W}{P \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 3.793 \times 10^5}{0.75 \cdot \pi}} = 802.4 mm$$

4. 解析結果

4-1 地表面均一の場合

解析は、周辺地盤と裏込め地盤の N 値を種々変化させて比較を行った。本論では、スラストブロック間の相対変位が最大となった、周辺地盤 N 値=10、裏込め地盤 N 値=3 の場合について代表として論じる。

時刻歴応答の観測点を図 10 に示す。res1~res10 までの位置で水平方向変位を観測した。図 11 は、各観測点の水平変位の時刻歴応答を、図 12 はスラストブロック間での水平方向相対変位を表している。

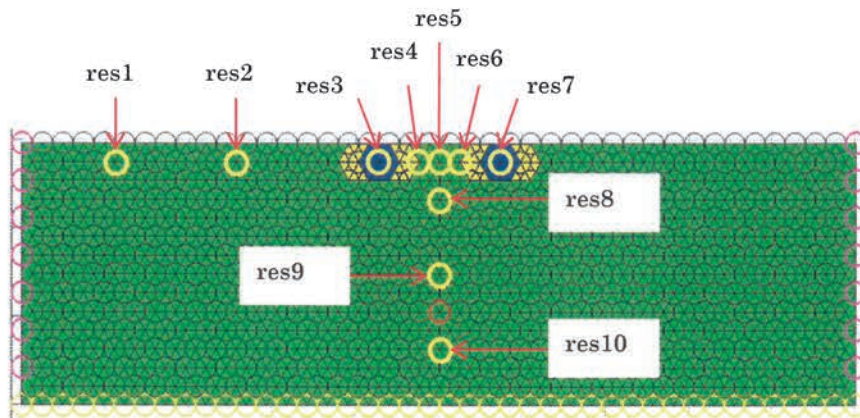


図 10 時刻歴応答の観測点

表層地盤を共振させる周波数の地震波を入力しているので、地表面の最大変位振幅はレベル1地震動であっても0.6m程度となっている。

図12に示すように、スラストブロック間の相対変位は、17s付近から動的変位成分と開く方向への等速度変位成分が現れ始めている。これは、17s時点でスラストブロックの裏込め地盤に剥離が生じ、個別要素が生成されているためである。等速度成分は、スラスト圧とブロック背面の土圧の均衡が裏込め地盤の剥離により失われ、左右に押し広げられていることに起因すると考えられた。そこで、振動終了後管路は離脱したものと考え、振動終了後にはスラスト力がかからないものとして再度検討を行った。

振動終了後にスラスト力をゼロとした場合の、スラスト間相対変位を図13に示す。図12と比較して、若干の相対変位の減少は見られるものの大差は無かった。したがって、裏込め地盤に剥離が生じ、スラストブロックの背面土圧が不安定にな

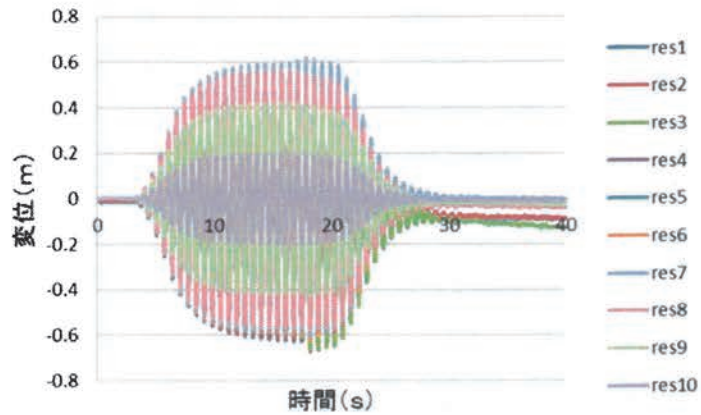


図 11 各観測点での水平方向変位の時刻歴応答

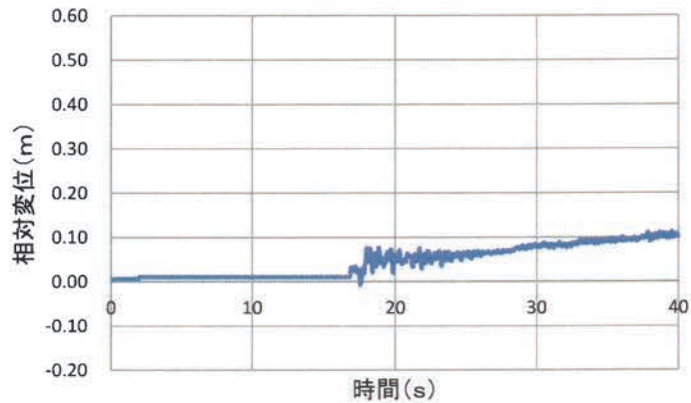


図 12 スラストブロック間の相対変位の時刻歴応答-1

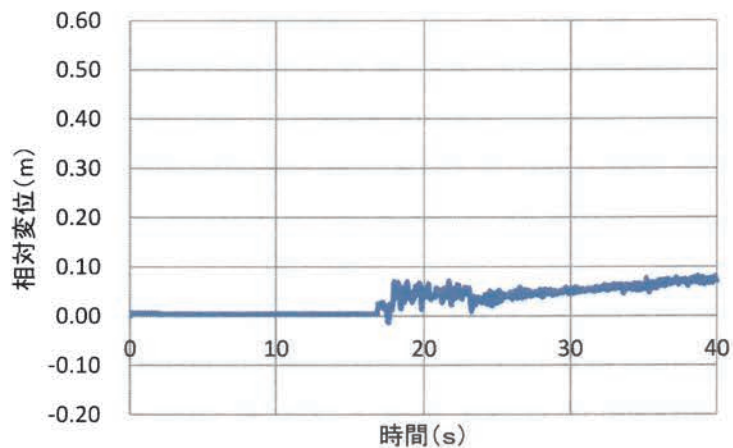


図 13 スラストブロック間の相対変位の時刻歴応答-2
(振動終了後スラスト圧をゼロに設定)

る事により、動的な影響からスラストブロック間に相対変位が生じる可能性があるものと考えられる。

4-2 地表面不均一の場合

2011年の東北地方太平洋沖地震で見られた、スラストブロックに接続された管路被害の地点では、地表面が平坦では無く不均一であったという特徴がある。4-1節の解析結果からは、スラストブロック間が開く方向への相対変位は生じているが、図5に示した東北自動車道白金IC付近での管路の屈曲変形については、動的な現象が生じるのか説明できない。そこで、地表面を不均一にした場合の解析を行った。解析モデルを図14に示す。

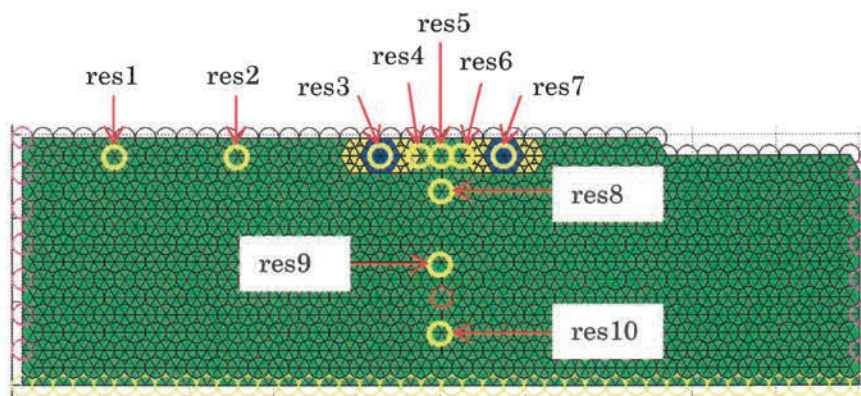


図14 地表面不均一の解析モデルと時刻歴応答の観測点

スラストブロック間の相対変位を図15に示す。地表面均一の場合と同様に、振動終了時点で、スラスト圧をゼロに設定している。8sの時点で裏込め地盤に剥離が生じている。

この条件では、一旦スラストブロック間が開く方向に動的変位が生じた後、スラストブロック間が閉じる方向

(マイナス方向)に動的変位が生じている。接続されていた鋼管継手の構造から、押し込み方向には余裕長が無く、圧縮軸力が作用すると座屈・屈曲のような変形が生じるものと考えられる。本解析結果は、白石IC付近で見られた管路の変形に合致するものである。

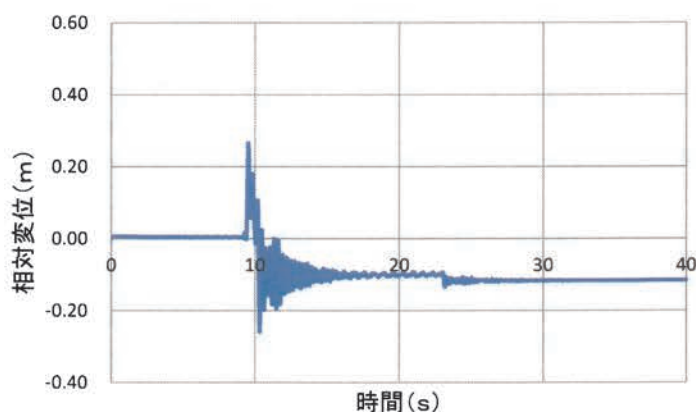


図15 スラストブロック間の相対変位
(地表面不均一)

5. まとめ

本研究では、地中埋設管路の曲部に埋まったスラストブロックとその周辺地盤を対象とし、スラストブロックの動的大変形解析からその挙動把握を試みたものである。得られた結果から、東北地方太平洋沖地震時に見られた管路の破壊原因を考察した。

解析結果から得られた知見は以下に要約する。

- 1) 今回の解析では、裏込め地盤の有限要素が破壊・消滅し個別要素生成され、裏込め地盤に剥離が生じた。このとき、スラストブロックは周辺地盤とは異なる動的挙動を示し、その結果として2つのスラストブロック間に動的および残留相対変位が生じた。これは、連結された管路継手の被災原因となりうる。
- 2) 地表面均一条件では、振動終了後もスラストブロック間の相対変位が増加傾向を示し、スラストブロック間が開く方向での永久変位が計算された。これは、接続される管路継手の離脱をまねくものであり、管路被害の要因となる。
- 3) 地表面不均一条件では、地表面均一条件よりも、剥離が早く生じた。また、振動途中からスラストブロック間が閉じる方向への相対変位が生じている。これは、東北自動車道白金IC付近で見られた管路の座屈モードでの屈曲被害と合致している。地表面不均一の場合はスラストブロックと裏込め地盤に剥離が生じると、継手管路が損傷する可能性が高いと考えられる。

今後は、スラストブロック間に設置される管路に対する損傷・漏水対策として、離脱阻止機能を有する継手の適用について、本論で得られた結果を管路の数値解析へと拡張し、要求される離脱阻止力や継手の伸縮性能の検討を進める所存である。

参考文献

- (1) 鍛田 泰子, 片桐 信, 「土木学会東日本大震災被害調査団 緊急地震被害調査報告書, 10 章水道施設の被害」, <http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter10.0>, (2013) .
- (2) KI スラストブロック, <https://www.infratec.co.jp/products/44-17/167-198.html> , (2013) .
- (3) 毛利 栄征, 「農業用水路の変状とウィークポイント」, 管路更生 No.3, pp.20-25
- (4) 日本水道協会, 「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版」 .
- (5) 片桐 信, 高田 至郎, 「連続体破壊解析のための FEM-DEM 結合解析法の提案」, 土木学会論文集, No.780/I -70, (2005), pp.15-25.
- (6) 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)
- (7) 日本ガス協会, 「高圧ガス導管耐震設計指針」, (2004) .
- (8) 株式会社クボタ合成管営業部, 「クボタビニルパイプ設計施工ハンドブック」, (1994), pp.94-99.