

I-1 地盤永久変位に伴う埋設管路損傷箇所の検知方法に関する研究

A Study on Method to Detect Damage Location of Buried Pipelines
Subjected to Permanent Ground Displacement片桐 信¹・小原昇吾²

Shin KATAGIRI and Shogo KOHARA

抄録:地震時における埋設管路被害の主要因は、液状化地盤などで見られる地盤永久変位である。しかしながら、地盤永久変位および永久ひずみの分布を地震後に短期間で計測することは難しく、その結果として埋設管路の被害位置の特定に時間を要している。本研究では、著者らが開発した PE 管光ファイバセンサを管路に平行して埋設し、地震後にその変形を計測することで地盤変位分布を逆推定し、得られた地盤変位分布を入力とした数値解析により管路損傷箇所を推定する方法について検討を行った。その結果、地盤ばね特性の非線形性を考慮しない影響係数マトリクスを用いる解析法でも、十分な精度で地盤変位を逆推定可能であることが明らかとなった。

Abstract: One of the main causes of pipeline damage during an earthquake is permanent ground displacement. However, it is difficult to gauge the ground displacement within a short time, and a long time is required to detect the locations of pipeline damage after an earthquake. In this study, the locations of pipeline damage are estimated by using a numerical simulation. The simulation utilizes permanent ground displacement data obtained by reverse analysis of the strain distribution on a polyethylene (PE)-pipe optical fiber sensor that is buried parallel to pipeline's longitudinal axis. As a result, it is clarified that an influence coefficient matrix without using non-linear soil spring can be used to estimate ground displacement within sufficient accuracy.

キーワード: 光ファイバセンサ, PE 管, 地盤変位, 埋設管路, 逆解析

Keywords: optical fiber sensor, PE-pipe, ground displacement, buried pipeline, reverse analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震時に神戸市の上水道施設で応急復旧に要した期間は4月17日までの91日間(13週間)であった。当時は建物倒壊などにより宅地内などでの漏水発見が遅れ、そのため配水管内水圧が低下し、漏水箇所の確認が困難となり、復旧工事を遅らせることとなった。ガス管については、阪神間では六甲山と海に挟まれた坂の多い街並みが続き、高台で入った水がガス管内を流れ低所に滞留した。このため、顧客のガスメーターを外すと水が勢いよく出てくる現象や1トン以上の水を抜いてもまだ水が出続ける現場もあった。液状化現象が発生している現場では、管内に土砂が流入しガス管を塞いでいる場合もあった¹⁾。こうした水道管やガス管などライフラインの損傷ならびに復旧の遅延は、管路の先にある病院や避難所などにおける人命や生活に影響を及ぼす。したがって、管路の損傷を防ぐハード面での対策と同時に、早期に復旧するためのソフト面での対策が重要であり、ライフラインの損傷箇所を地震後の早期に検知する技術が求められている。

地震後のライフライン損傷箇所の検知方法として

は、例えば水道管路では地表面に現われる噴水位置から推測する方法がとられている。実際に、地表面の地割れ箇所と管路の損傷箇所が一致しているという報告²⁾もあるが、水道では管路表面に沿って水が流れ、土圧の弱い箇所で地表面に噴出するという現象が生じることがあり、その確実性は低いと考えられる。このような場合、損傷箇所の発見に膨大な時間を要し、結果として復旧を遅延させることが、兵庫県南部地震でも経験されている。

そこで本研究では、現在までに技術開発が進められて来た「光ファイバセンサ」を用いた、埋設ライフラインの損傷箇所検知技術に関して、基礎的な検討を行った。本法は、例えば水道においては基幹管路(導水管、送水管、配水本管)などの重要度の高い既設埋設ライフラインに沿って、平行に PE 管(ポリエチレン管)光ファイバセンサ³⁾をガス用 PE 管路の非開削工法として現在適用されているものと同様の推進工法により設置し、地震後にそのひずみ分布を検出することで、地盤永久変位の分布を逆推定し、その推定結果を入力とした既存ライフラインの応答解析から損傷箇所を推定するものである。

すなわち、地震後に表層地盤内に残留する永久変

1 : 正会員 博(工学) 摂南大学 准教授 理工学部都市環境工学科
(〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17番8号, Tel :072-839-9118, E-mail : shin-k@civ.setsunan.ac.jp)

2 : 非会員 株式会社ピーエス三菱 総務人事部

位により、設置した PE 管光ファイバセンサに軸ひずみと曲げひずみが生じる。これらを光ファイバセンシング技術により検出する。検出されたひずみを積分することで、PE 管光ファイバセンサの変位分布が得られる。次に、当該 PE 管を対象としてパルス状地盤変位を逐次入力した数値解析によって形成される「影響係数行列」の逆行列を用い、PE 管光ファイバセンサの計測変位から表層地盤の永久変位の分布を求める。得られた表層地盤の変位を数値解析の入力として既設ライフラインの応答を計算し、損傷箇所を検知するものである。

2. PE 管光ファイバセンサの概要

PE 管光ファイバセンサは、写真-1³⁾に示すように高密度 PE 管の表面に溝加工を施し、その中にポリエチレン被服を有する光ファイバを設置した後に、光ファイバの表面と管表面とを溶融したポリエチレン樹脂により融着した構造となっている。PE 管は柔軟性があり、地盤変形への追従性が高いため、PE 管と地盤間の相対変位が少なくなり、管-地盤間の相互作用を表す地盤ばねが非線形性を示す領域が少なくなる。その結果として微小な地盤変位の領域で良好な変位検出性能を有することが実験で確認されている³⁾。



写真-1 PE 管光ファイバセンサの概観³⁾

一方、光ファイバセンシング技術には種々の方式がある。リアルタイムセンシング技術である FGB 方式は、光ファイバ途中の特定部分のコア部に、グレーティングと呼ばれる屈折率が異なる部分を等間隔で格子状に並べ、この部分をひずみセンサとして利用するものであり、土木分野でも利用が試みられている。しかし、本方式では光ファイバの素線そのものを扱う必要があり、現場での取り扱いと PE 管への融着が難しい。そこで、本研究では、光ファイバ中に光パルスを入射し、入射端側に帰ってくるブリルアン散乱光の周波数特性が光ファイバのひずみに比例して変化することを利用した、BOTDR 方式⁴⁾、もしくは BOCDA 方式⁵⁾に着目した。これらの方式であれば、PE 被服を有するファイバを用いることができる。とくに、BOCDA 方式は、光源の発振周波数を変調すると任意の位置で誘導ブリルアン散乱を局所的に発生させることができるため、その位置のひずみを選択的に計

測することができる。連続光の利用により動的計測が可能で、ファイバ全長にわたって数 cm レベルでの高い位置分解能で計測することが可能である⁵⁾。

3. 地盤変位の逆解析方法

(1) 提案法の概要

本研究で提案する管路損傷箇所検出方法の概要を図-1に示す。まず、既設管路に平行して PE 管光ファイバセンサを推進工法などにより埋設する。地震後の地盤永久変位により、当該 PE 管路に生じる軸ひずみと曲げひずみの分布を光ファイバセンサ技術により計測し、計測ひずみから PE 管の軸方向変位と軸直角方向変位の分布を算出する。次に、後述する「影響係数マトリクス」を用いて、PE 管の変位から地盤永久変位を逆推定する。得られた地盤変位分布を入力として、弾性床の上のはり理論にもとづく管路の応答解析等により、既設管路の変形をシミュレートし、その損傷箇所を推定するものである。

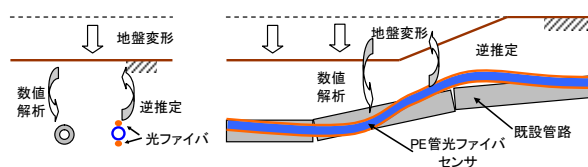


図-1 既設管損傷箇所の検出方法概要

(2) 逆解析の非適切性について

上述のように、本提案法では、光ファイバセンシングにより計測・計算された PE 管の変位分布から、地盤変位分布を逆推定する必要がある。逆問題の非適切性としては、①解の存在性(観測値から推定される原因がない)、②解の一意性(観測値から推定される原因が多数ある)および③解の連続性(観測値が少し変わった場合に、推定される原因が大きく変わる)があり⁶⁾、これらにより逆問題の解が保証されない。

前項で述べた提案法の場合、PE 管材料の応力-ひずみ関係の非線形性と PE 管-地盤間の相互作用特性(地盤ばね特性)の非線形性から、③の非適切性が生じる可能性がある。しかし、PE 管材料の応力-ひずみ関係は、引張り・圧縮ひずみともに 2.0%以内であれば近似的に線形関係と考えることが可能である⁷⁾。水道施設耐震工法指針・解説(以下「水道耐震指針」)⁸⁾では、護岸近傍域の液状化地盤における地盤永久ひずみを 1.2~2.0%としていることから、大規模な地割れや段差沈下を含まない場合には PE 管材料の高い非線形性は生じないと考えられる。

一方、地盤ばね特性に関しては、地盤条件の不確実性により、その特性値は管路に沿って不均一に分布することが考えられる。さらに、管路-地盤間の相対変位が大きくなれば非線形性を示すため、観測値である PE 管の変位

分布が少し変化すれば、逆推定する地盤変位の分布が変わることも予測される。しかし、PE 管の場合、その柔軟性から地盤変形への追従性が高いために、PE 管の変形と地盤の変形間に大きな差が生じないことを前提とすれば、③の非適切性が顕著に生じる事はないと考え、以下に示すように基準となる線形の地盤ばね特性を用いた影響係数マトリクスを構築して、その逆マトリクスにより地盤変位分布を推定するという簡単な方法を提案し、地盤ばね特性が非線形性を有する場合の推定精度を検証することとした。

(3) PE 管変位分布の算定法

PE 管光ファイバセンサのひずみを測定して、そのひずみを軸ひずみと曲げひずみに分解し、それぞれを積分することで、PE 管光ファイバセンサの軸方向変位、軸直角方向変位に変換する必要がある。

軸方向変位量については、計測軸ひずみ ε_a に光ファイバセンサの測点間隔を乗じることで、その間の変位増分が求められる。これを計測始点から累加することで、変位分布に変換することができる。

軸直角方向変位量については、計測曲げひずみ ε_b をもとに、以下に示す中心差分の考え方をを用いて、変位量に変換する。計測曲げひずみを ε_b とすると、その点の曲げモーメント: M は①式となる。

$$M = \frac{2EI}{D} \cdot \varepsilon_b \dots\dots\dots ①$$

一方、弾性曲線の微分方程式より②式が成り立つ。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{di}{dx} = -\frac{M}{EI} = -\frac{2}{D} \cdot \varepsilon_b \dots\dots\dots ②$$

ここで、 E : PE 管の弾性係数、 I : PE 管の断面2次モーメント、 D : PE 管の外径、 y : たわみおよび i : たわみ角である。

また、 $\frac{d^2y}{dx^2} = y''$, $\frac{dy}{dx} = y'$ と表す。

PE 管光ファイバセンサによる計測ひずみは、計測間隔 Δ の離散化したデータである。中心差分の考え方をを用いると、図-2 と③～⑤式に示すように長手方向に逐次積分して、変位を求めることができる。

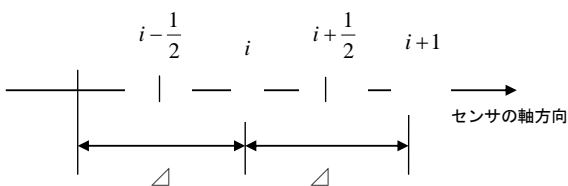


図-2 中心差分

$$y'_{i+1/2} = \frac{1}{\Delta} \cdot (y_{i+1} - y_i) \dots\dots\dots ③$$

$$y''_i = \frac{1}{\Delta} \cdot (y'_{i+1/2} - y'_{i-1/2}) \dots\dots\dots ④$$

$$y'_{i+1/2} = \Delta \cdot y''_i + y'_{i-1/2} \dots\dots\dots ⑤$$

すなわち、 $y'_{i-1/2} = 0$ として、⑤式により順次 $y'_{i+1/2}$ が求まる。ここで $y''_i = -2/D \cdot \varepsilon_b$ で (1/mm) の次元を持ち、 $y'_{i+1/2}$ は y'_i に Δ (mm) を乗じるので (rad) の次元を持つ。③式より⑥式が得られる。 $y'_{i+1/2}$ が求まっているので、本式により順次変位量 y_i が求まる。

$$y_{i+1} = \Delta \cdot y'_{i+1/2} + y_i \dots\dots\dots ⑥$$

矩形形状地盤変位と 1/2 正弦波状地盤変位を対象として、本計算法の精度を検証した。地盤変位を与えた数値解析による PE 管曲げひずみ分布を図-3、図-4 に、曲げひずみ分布から算出した軸直角方向変位分布を図-5、図-6 に示す。

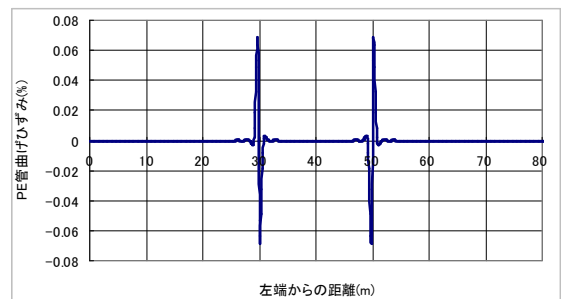


図-3 PE 管の曲げひずみ分布 (矩形変位入力)

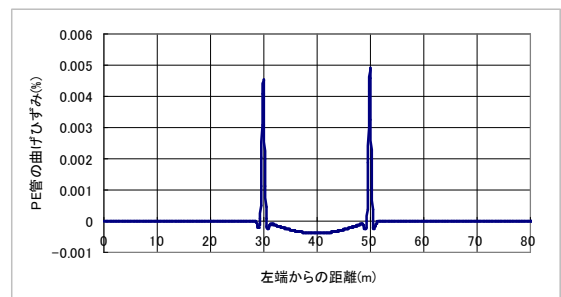


図-4 PE 管の曲げひずみ分布 (正弦波変位入力)

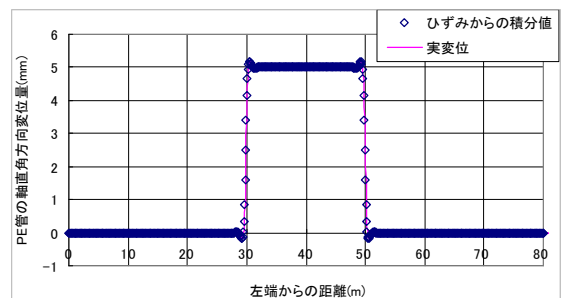


図-5 PE 管の軸直角方向変位換算 (矩形変位入力)

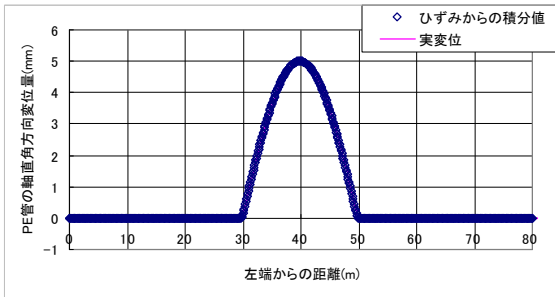


図-6 PE 管の軸直角方向変位換算（正弦波変位入力）

BOCDA では、0.1m間隔でのひずみ計測が可能であり、また BOTDR でも 1.0 間隔の平均ひずみを計測して、これを 0.1m ずつ移動させながらひずみデータを得ていることから、 $\Delta=0.1m$ としている。図-5、図-6 に示すように、上記の方法により精度良く変位分布を算定することができる。

(4) 影響係数マトリクスと逆解析

影響係数マトリクスの作成にあたっては、弾性床の上のはり理論に基づく地中管路の応答解析プログラム ERAUL⁹⁾を用いた。また、対象とした PE 管の諸元は表-1 に示すとおりである。本提案法で対象とする光ファイバセンサの方式としては、BOCDA 方式と BOTDR 方式があり、ひずみの検出間隔は BOCDA が 0.1m、BOCDA が 1.0m である。したがって、BOCDA 方式の方が精度の良い逆推定が可能と考えられるが、BOTDR 方式が現時点で実用化されていることから、以降の検討では BOTDR 方式を対象として本提案法の適用可能性を検証することとした。検証モデルでは、光ファイバセンサの全長を 100m とし、数値解析における、要素長を BOTDR 方式によるひずみ検出間隔に合わせて 1m とした。節点数は 101 である。PE 管路両端の境界条件は地盤に固定としている。

表-1. PE 管の諸元

外径: $D(mm)$	肉厚: $t(mm)$	弾性係数: $E(N/mm^2)$
63	5.8	1000

管路—地盤間の相互作用特性が、地盤変位を受ける地中管路の挙動において重要なパラメータである。弾性床上のはり理論では、この相互作用特性は図-7⁹⁾に示すような「地盤ばね」として表現され、地盤変位の方向に応じて、管軸方向、管軸直角方向ばね定数を与える。

この地盤ばね特性については、管路の耐震設計指針によって種々の値や計算式が示されている。高圧ガス導管耐震設計指針¹⁰⁾では、図-8 に示すバイリニア特性としている。そこで本研究では、図-8 に示す初期ばね定数: k の線形ばねを「基準地盤ばね」として用い、入力としての地盤変位と出力である PE 管の変位が完全に線形関係となる条件で影響係数マトリクスを求めた。

影響係数マトリクスは、以下のように求められる。まず、地盤変位ベクトル $\{d\}$ 、PE 管光ファイバセンサの変位ベクトル $\{\delta\}$ と影響係数マトリクス $[M]$ の関係は、⑦式ようになる。

$$\{\delta\} = [M] \cdot \{d\} \dots \dots \dots \text{⑦}$$

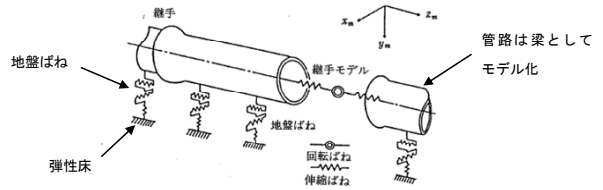


図-7 弾性床上のはり理論による解析モデル⁹⁾

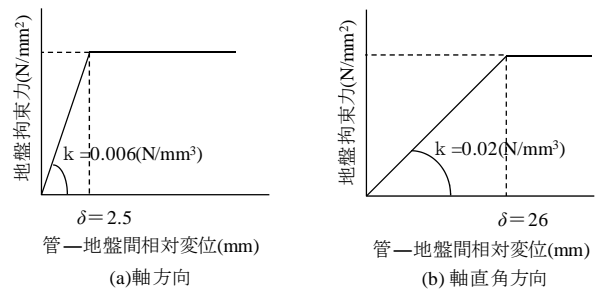


図-8 高圧ガス導管耐震設計指針の地盤ばね特性¹⁰⁾

PE 管光ファイバセンサの任意節点(j)位置の地盤変位 (= 1mm) を作用させた数値解析により得られる $\{\delta\}$ は、 $[M]$ の j 列となる。すなわち、 M_{ij} は、 $\{d\}$ の j 行の値による $\{\delta\}$ の i 行の値への影響を表している。したがって、PE 管光ファイバセンサの節点 1 から節点 101 の位置まで、順次単位の地盤変位を入力することで、影響係数マトリクス $[M]$ を得ることが出来る。軸直角方向についても同様の手順で影響係数マトリクスを求めることができる。

⑦式を簡略化して表すと⑧式となる。ここで、 M : 影響係数マトリクス、 δ : PE 管の変位、 d : 地盤表面の永久変位である。⑧式の両辺に左側から M^{-1} (影響係数マトリクスの逆行列) を乗じることで、⑨式のように PE 管光ファイバセンサの変位ベクトル δ から地盤変位ベクトル d を逆算することができる。

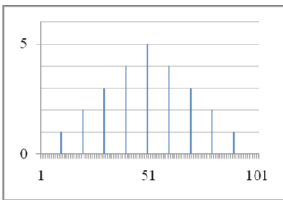
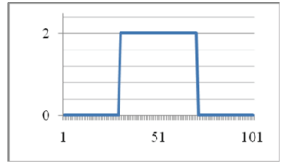
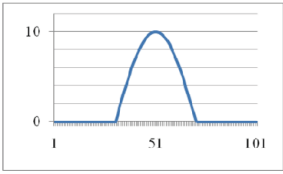
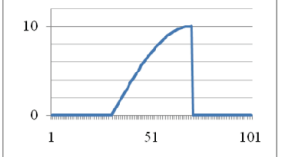
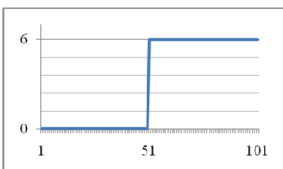
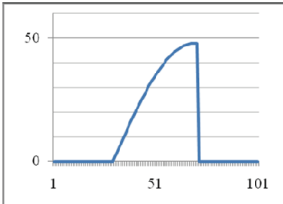
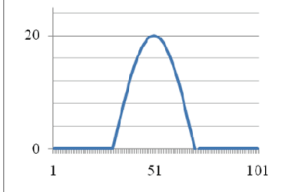
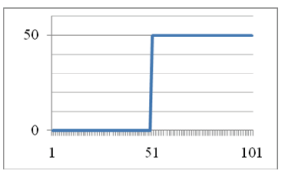
$$\delta = M \cdot d \dots \dots \dots \text{⑧}$$

$$M^{-1}\delta = d \dots \dots \dots \text{⑨}$$

4. 数値解析による提案法の精度検証

前節で記述しているように、実地盤における地盤ばね特性は不確定であり、またバイリニアで近似されるような非線形を有している。したがって実際には、PE 管光ファイバ

表-2. 想定する地盤変位と地盤ばね特性

	地盤変位の形	軸方向	軸直角方向	地盤ばね
CASE1	 パルス	節点番号 10に1mm 以降10m ごとに 1mm増や し、節点番 号50から は減らして いく。	節点番号 10に1mm 以降10m ごとに 1mm増や し、節点番 号50から は減らして いく。	基準 ばね
CASE2	 矩形状	節点番号 31から71 に2mm	節点番号 31から71 に2mm	基準 ばね
CASE3	 正弦波状	節点番号 31から71 最大値 10mm	節点番号 31から71 最大値 10mm	基準 ばね
CASE4	 三角波状	節点番号 31から71 最大値 10mm	節点番号 31から71 最大値 10mm	基準 ばね
CASE5	 相対変位	節点番号 51以降す べてに 6mm	節点番号 51以降す べてに 6mm	基準 ばね
CASE6	 三角波状	節点番号 31から71 最大値 48mm 最大値 80mm の2種類。		等価 線形 ばね
CASE7	 正弦波状	節点番号 31から71 最大値 20mm 最大値 30mm の2種類。		等価 線形 ばね
CASE8	 相対変位	節点番号 51以降に 50mm 90mm の2種類。	節点番号 51以降に 25mm 45mm の2種類。	非線 形 ばね

センサに沿って、不均一な地盤ばねの分布となるが、本研究では均一な線形地盤ばねとして求めた影響係数マトリクス: M を用いて、非線形問題への適用性を検討した。

(1) 想定する地盤永久変位

表-2に、想定する地盤永久変位と地盤ばねを示す。

CASE1~CASE5は、基礎的な評価として、影響係数マトリクス: M を求めた際と同じ基準地盤ばね(表-3)を用いた場合である。すなわち、数値解析により求めたPE管の変位分布: δ に M^{-1} を左から乗じて得られる地盤変位分布: d と入力として与えた変位分布とを比較する。

CASE6, CASE7は水道耐震指針で想定されている液化化地盤での地盤永久変位を模擬している。これらの場合、液化化地盤であることを考慮して基準線形ばねの1/10に低下させた等価線形地盤ばね(表-4)を用いてPE管の変位: δ を求め、これに基準地盤ばねを用いて算出した M^{-1} を乗じて地盤変位 d を逆推定する。

CASE8は中低圧ガス導管耐震設計指針¹¹⁾(以下「中低圧ガス耐震指針」)に示される地盤相対変位を模擬している。表-5に示す非線形地盤ばねを用いた数値解析によりPE管の変位: δ を求め、基準地盤ばねにより算出した M^{-1} から地盤変位 d を逆推定する。

表-3. 基準地盤ばねの特性

	軸方向	軸直角方向
$k(N/mm^3)$	0.006	0.02
$k'(N/mm^3)$	0.006	0.02
すべり限界 $\delta(mm)$	—	—

表-4. 等価線形地盤ばねの特性

	軸方向	軸直角方向
$k(N/mm^3)$	0.0006	0.002
$k'(N/mm^3)$	0.0006	0.002
すべり限界 $\delta(mm)$	—	—

表-5. 非線形地盤ばねの特性

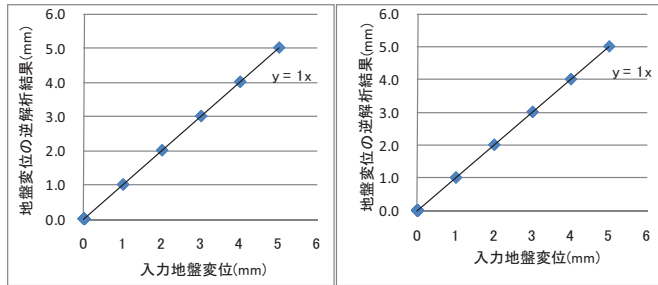
	軸方向	軸直角方向
$k(N/mm^3)$	0.006	0.02
$k'(N/mm^3)$	0.00006	0.0002
すべり限界 $\delta(mm)$	2.5	26.0

(2) 基準地盤ばねの場合の精度検証

本検証は、提案する影響係数マトリクスの逆行列を用いた逆解析手法そのものの精度を確認することを目的としている。入力地盤変位と逆推定した地盤変位の相関係数および線形回帰の勾配により、精度を評価する。

a) CASE1

CASE1 は基準ばねを用いパルス状の地盤変位を与えた場合である。節点番号 10 に 1mm, 20 に 2mm, 30 に 3mm, 40 に 4mm, 50 に 5mm, 60 に 4mm, 70 に 3mm, 80 に 2mm, 90 に 1mm とパルス状に地盤変位を与えて計算する。逆解析により、地盤変位を逆算し入力値との比較を行った結果、図-9 に示すように軸方向、軸直角方向ともに相関係数は 1.0, 線形回帰の勾配も 1.0 となっており、本手法の基本的な妥当性が検証された。

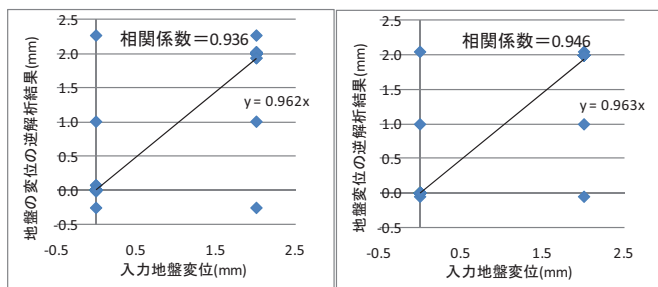


(a) 軸方向 (b) 軸直角方向

図-9 パルス状地盤変位の逆推定 (基準地盤ばね)

b) CASE2

CASE2 は基準地盤ばねを用い矩形状の地盤変位を与えた場合である。節点番号 31 から 71 までの間に、長方形の最大値 2mm の地盤変位を与えて計算する。逆解析を行った結果、図-10 に示すように軸方向、軸直角方向の相関係数は 0.936, 0.946, 線形回帰の勾配はそれぞれ 0.962, 0.963 となった。矩形状の地盤永久変位の逆解析は良好な精度を有している。



(a) 軸方向 (b) 軸直角方向

図-10 矩形状地盤変位の逆推定 (基準地盤ばね)

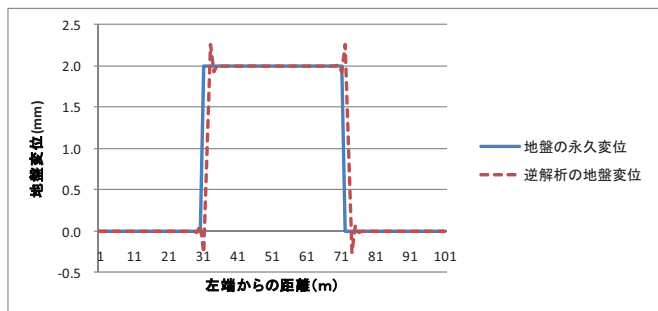


図-11 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (矩形状地盤変位, 軸方向, 基準地盤ばね)

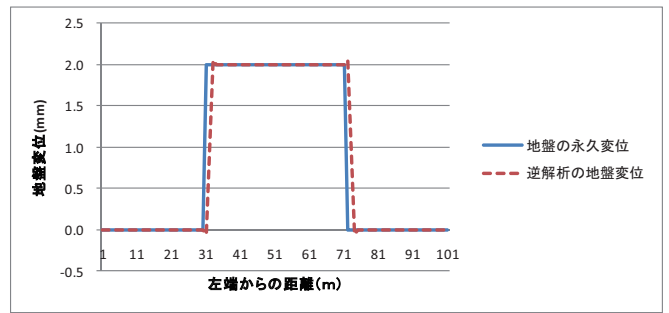


図-12 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (矩形状地盤変位, 軸直角方向, 基準地盤ばね)

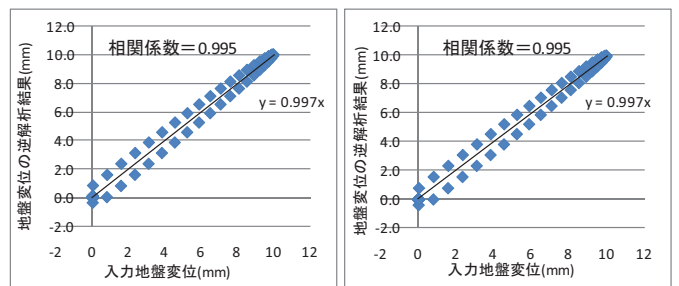
図-11, 図-12 に示すように、地盤変位が急変にする節点位置で推定値が不安定になっている。今回の計算では、PE 管光ファイバセンサのひずみ計測が長手方向 1m 間隔と仮定しているが、BOCDA 方式のように 0.1m 間隔で検出できれば、逆推定の精度も向上すると考える。

c) CASE3

CASE3 は基準地盤ばねを用い 1/2 正弦波状の地盤変位を与えた場合である。節点番号 31 から 71 までの間に、最大値 10mm の地盤変位を与えて計算する。

逆解析を行った結果、図-13 に示すように軸方向、軸直角方向の相関係数はいずれも 0.995, 線形回帰の勾配はいずれも 0.997 という結果になった。1/2 正弦波状の永久変位の逆解析は精度が高いことが分かる。

図-14, 図-15 に示すように、地盤変位が急変する節点位置で推定値が若干不安定になっている。



(a) 軸方向 (b) 軸直角方向

図-13 正弦波状地盤変位の逆推定 (基準地盤ばね)

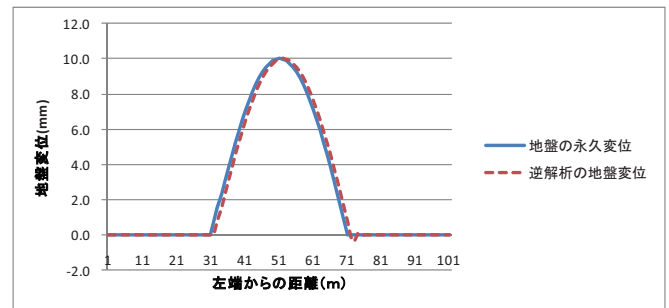


図-14 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (1/2 正弦波状地盤変位, 軸方向, 基準地盤ばね)

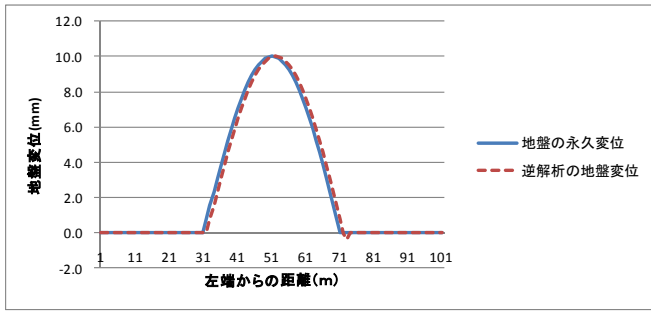


図-15 入力地盤変位と逆推定結果の比較
(1/2 正弦波状地盤変位, 軸直角方向, 基準地盤ばね)

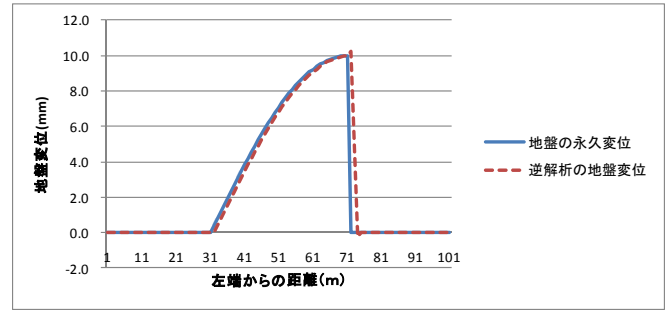


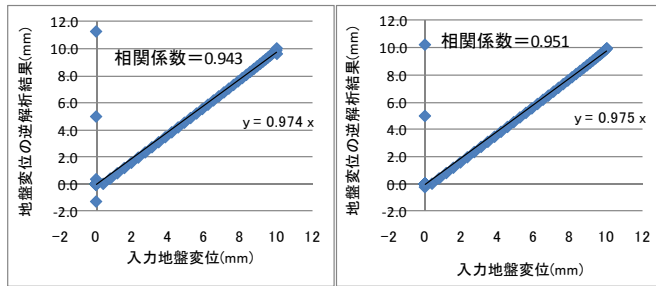
図-18 入力地盤変位と逆推定結果の比較
(三角形地盤変位, 軸直角方向, 基準地盤ばね)

d) CASE4

CASE4 は基準線形ばねを用い三角波状 (1/4 正弦波状) の地盤変位を与えた場合である。使用した解析法の特長により、三角形の変位は正弦波の一部として表わされる。節点番号 31 から 71 までの間に、最大変位量 10mm の地盤変位を与えて計算している。

逆解析を行った結果、図-16 に示すように軸方向、軸直角方向の相関係数はそれぞれ 0.943、0.951 であり、線形回帰の勾配は 0.974、0.975 という結果になった。三角状永久変位の逆解析は良好な精度であることが分かる。

図-17、図-18 に示すように、地盤変位が急変する節点位置 (71m 位置) で推定値が不安定になっている。この点についても、CASE-2 と同様にセンサのひずみ計測間隔が短くなれば、改善されるものと考えられる。



(a) 軸方向 (b) 軸直角方向
図-16 三角形地盤変位の逆推定 (基準地盤ばね)

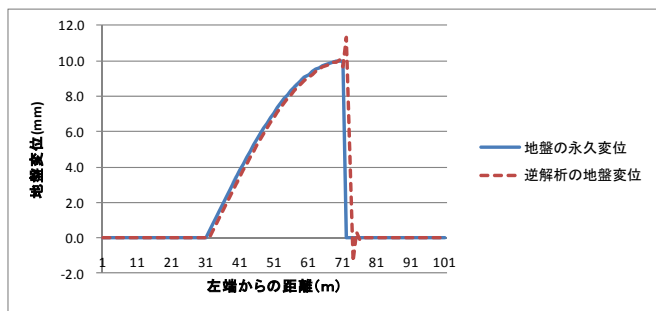


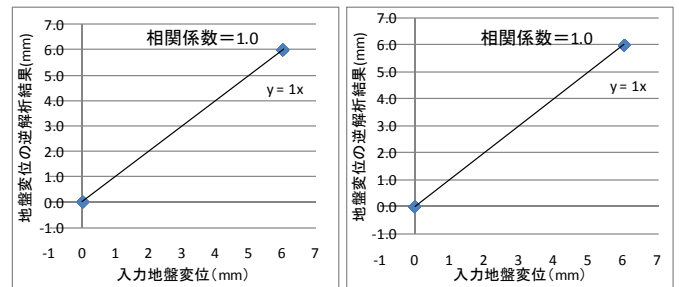
図-17 入力地盤変位と逆推定結果の比較
(三角形地盤変位, 軸方向, 基準地盤ばね)

上記のように、CASE2~CASE4 は、いずれも地盤変位の急変個所で地盤変位の推定値が若干不安定になっている。線形計算において、このような現象が生じる原因としては、本提案法が不連続な分布を連続な関数の重ね合わせで表現するのと類似した計算法となっているためである。したがって、BOTDR 方式により実用化するには、このような基本特性を有することを十分に理解しておく必要があると考える。

e) CASE5

CASE5 は基準線形ばねを用い相対変位状の地盤変位を与えた場合である。この相対変位は軸方向の変位は地割れになり、軸直角方向の変位は段差沈下となる。節点番号 51 以降すべてに 6mm の地盤変位を与えている。

逆解析を行った結果、図-19 に示すように軸方向、軸直角方向ともに相関係数は 1.0、線形回帰の勾配も 1.0 となり、段差状相対変位の逆解析は良好な精度が得られることが分かった。これは、PE 管の柔軟性から、地盤変位追従性が高いためであると考えられる。



(a) 軸方向 (b) 軸直角方向
図-19 地盤相対変位の逆推定 (基準地盤ばね)

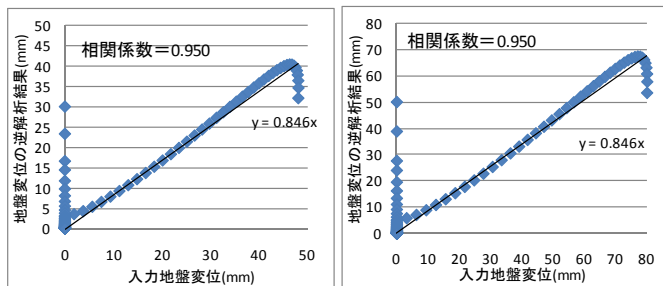
(3) 等価線形地盤ばねの場合の精度検証

本節では、水道耐震指針⁸⁾で想定されている地盤永久変位を対象として、液状化地盤を模擬するために基準地盤ばねの 1/10 に低下させた等価線形地盤ばね (表-4) を用いて PE 管の変位 δ を求める。これに基準地盤ばね (表-3) により算出した M^{-1} を乗じて地盤変位 d を逆推定した際の精度を検討している。

a) CASE6

水道耐震指針⁸⁾では、埋立地で液状化が生じ護岸が大きく移動する可能性がある場合には、その背後地盤の護岸の法線方向に 1.2~2.0%の地盤引張りひずみを考慮し、これを管軸方向に与えて耐震設計を行うこととしている。そこで、CASE-6では、節点番号 31~71 の距離:40m 間で、地盤ひずみ 1.2%と 2.0%に対応した 48mmと 80mm の最大変位を有する三角形の地盤変位分布を軸方向に与えた。

図-20 に、1.2%地盤ひずみ、2.0%地盤ひずみの際の逆解析結果を示す。相関係数は、いずれも 0.950、線形回帰の勾配はいずれも 0.846 である。PE 管光ファイバセンサのひずみ分布は、影響係数マトリクスを算定した際の基準地盤ばねの 1/10 の地盤剛性から求められているものの、良い精度での逆解析が可能であることが分かる。図-21、図-22 に示すように、地盤変位が急変する節点位置(71m 位置)では、推定値が不安定になっているが、全体的な変形は概ね再現できている。



(a) 1.2%地盤ひずみ (b) 2.0%地盤ひずみ

図-20 三角形地盤変位の逆推定 (等価線形地盤ばね)

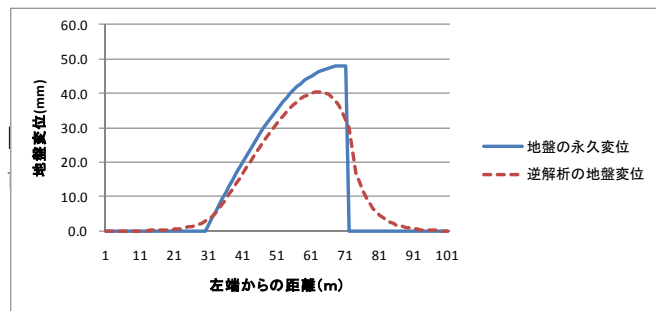


図-21 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (三角形地盤変位 1.2%, 等価線形地盤ばね)

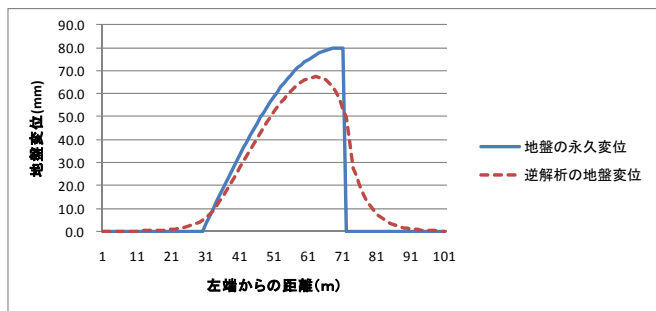
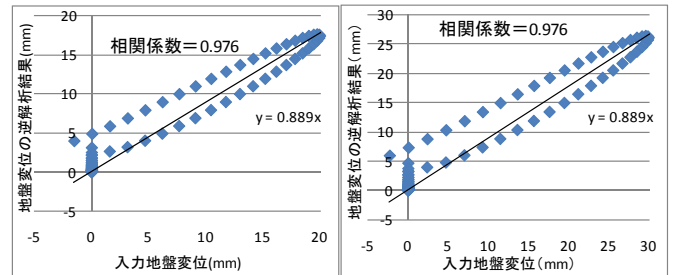


図-22 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (三角形地盤変位 2.0%, 等価線形地盤ばね)

b) CASE7

CASE7 は等価線形ばねを用い正弦波状の地盤変位を与えた場合であり、モデルの節点番号 31 から 71 までの間に永久変位を与える。CASE6と同じく最大値を定めるにあたって、水道耐震指針⁸⁾に準拠した。埋立地などにおいて護岸線より 100m 以上離れた領域における地盤の引張りひずみを 1.0~1.5%の範囲として、二等辺三角形の地盤変位を管軸方向に与えて耐震設計を行っている。本解析法では、三角形の変位分布は正弦波状に近似される。そこで、解析モデルの節点番号 31~71 の距離:40m 間で最大地盤変位が 20mmと 30mm となる 1/2 正弦波状の変位分布を入力とした。

図-23 に、1.0%地盤ひずみ、1.5%地盤ひずみの際の逆解析結果を示す。相関係数は、いずれも 0.976、線形回帰の勾配はいずれも 0.889 であり、CASE-6と同様に良好な精度での逆解析結果が得られた。図-24、図-25 に示すように、地盤変位が急変する節点位置(31m, 71m 位置)では、推定値が不安定になっている。



(a) 1.0%地盤ひずみ (b) 1.5%地盤ひずみ

図-23 正弦波状地盤変位の逆推定 (等価線形地盤ばね)

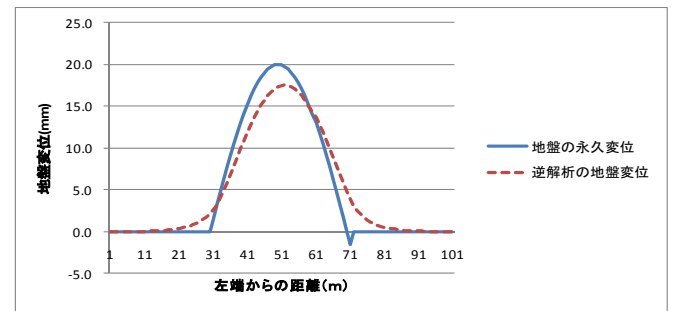


図-24 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (正弦波状地盤変位 1.0%, 等価線形地盤ばね)

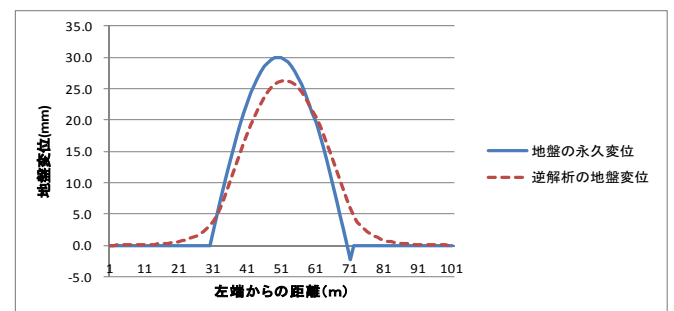


図-25 入力地盤変位と逆推定結果の比較 (正弦波状地盤変位 1.5%, 等価線形地盤ばね)

CASE-2~CASE-4 の場合と同様に、センサのひずみ検出間隔を 1mと仮定しているが、この検出間隔が短くなれば推定値の不安定度は改善されるものとする。

(4) 非線形ばねの場合の精度検証

本節では、中低圧ガス耐震指針¹¹⁾で想定されている段差状の地盤相対変位を対象とし、表-5 に示した非線形地盤ばねを用いて PE 管光ファイバセンサのひずみ分布を算出し、基準地盤ばねで作成した影響係数マトリクスを用いた逆解析で地盤変位分布を逆推定した際の精度を検証する。

a) CASE8

中低圧ガス耐震指針¹¹⁾では、管軸方向と管軸直角方向への地盤相対変位を考慮しており、その値は軸方向： $U = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot U_0$ 、軸水平方向： $V = 1/2U$ として、定めている。ここで、 U_0 は標準設計地盤変位で 5.0cm であり、 α_1 は地域別補正係数、 α_2 は管種と埋設条件の組み合わせにより定まる管種・埋設条件別補正係数で、それぞれの最大値は $\alpha_1 = 1.0$ 、 $\alpha_2 = 1.8$ である。そこで、本解析では、管軸方向変位の基準値を 5cm、最大値 9cm として、管軸直角方向ではその 1/2 とした。

図-26 は管軸方向変位を与えた場合の入力地盤変位と逆推定地盤変位の相関を、図-27 は管軸直角方向変位の場合の相関を示している。いずれの場合も、相関係数は

1.0、線形回帰の勾配も 1.0 であり、非線形地盤ばねを用いた場合でも、CASE-5 と同様に段差状の地盤相対変位の推定精度が高いことが確認された。

図-6 に示すように、地盤ばね特性の非線形性は、管と地盤との相対変位が滑り限界変位を上回った際に生じる。表-5 のように、管軸方向には 2.5mm、管軸直角方向には 26mm の相対変位で非線形性が生じる設定となっている。しかし中野ら³⁾による管軸直角方向への段差沈下を与える実験では、50mm の段差沈下を与えた状態でも管路と地盤との相対変位は 10mm 以下であった。このことから、PE 管の柔軟な変形特性により、CASE8 で想定するような地盤相対変位を与えた場合には、地盤ばねの非線形領域が比較的狭くなり、その結果として良好な精度での逆推定が可能となっているものとする。

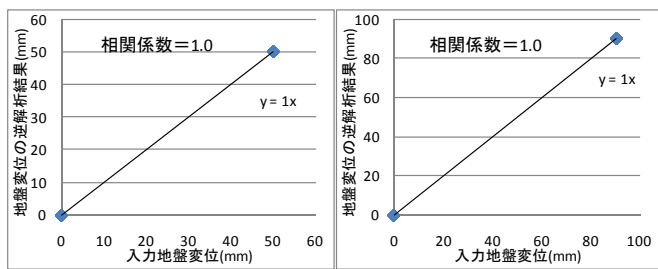
5. 結論

本研究では、地震後の被害の拡大を防ぐために、水道管やガス管などライフラインの損傷箇所の早期発見を目的として、PE 管光ファイバセンサを用いた埋設管路の地震時損傷箇所検知方法に関する研究を行った。

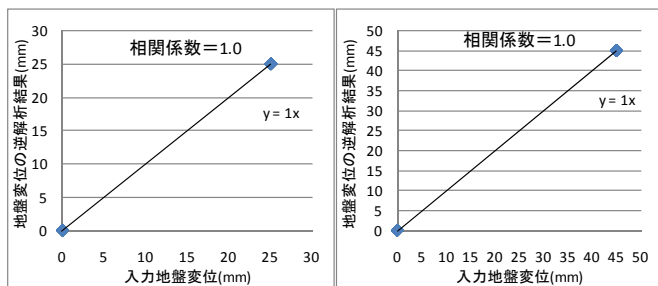
すなわち、パルス状の単位地盤変位を与えた数値解析により、逐次 PE 管光ファイバセンサの変位ベクトル $\{d\}$ を算出することで影響係数マトリクス $[M]$ を構築する。その逆マトリクスを求め、これらから $\{d\} = [M]^{-1} \{\delta\}$ として地盤変位分布を表すベクトル $\{d\}$ を逆解析する簡便な方法である。本法により、地盤永久変位にともなって生じる PE 管光ファイバセンサのひずみが計測されれば、地盤変位ベクトル $\{d\}$ が推定され、これを入力とした数値解析により、既設管の応答と損傷箇所を検知しようとする技術である。

本研究では、その基礎的段階として、PE 管-地盤間の相互作用特性(地盤ばね特性)を線形として算定した影響係数マトリクス $[M]$ を使い、地盤ばね特性が異なる場合や非線形性を有する場合での本法の適用妥当性を検証した。得られた知見を以下に要約する。

- ① 基準線形ばねとした場合、同じ基準線形ばねで作成した影響係数マトリクスで逆解析を行っているため、矩形状、正弦波状や三角波状などの地盤変位の急変部では推定値が若干不安定になるものの、良好な精度で逆推定が可能である。したがって、提案法の基本的な妥当性が確認された。
- ② 液状化地盤を想定した等価線形地盤ばねを用いた逆解析では、地盤変位の急変部では推定値が不安定になり、その結果最大変位をやや小さく推定する。



(a) 相対変位 50mm (b) 相対変位 90mm
図-26 軸方向地盤相対変位の逆推定 (非線形地盤ばね)



(a) 相対変位 25mm (b) 相対変位 45mm
図-27 軸直角方向地盤相対変位の逆推定 (非線形地盤ばね)

しかし、全体的な地盤変位は良好に再現することができている。

- ③ 非線形地盤ばねを用いて、軸方向・軸直角方向への地盤相対変位を想定した解析の結果、いずれも相関係数が 1.0、線形回帰の勾配が 1.0 であり、正確に逆解析が行われている。本研究で提案する影響係数マトリクスは、相対変位状の地盤変位に対して良好な精度を有すると考えられる。

提案法は、複雑な逆解析の手法を適用せず、単純な影響係数マトリクスの逆行列を用いるため、簡便で実用的であると考えられる。今後の研究課題としては、以下のような事項が考えられ、引き続き検討を進める所存である。

- a) 管路に沿って複数の地盤ばね特性を有する不均一地盤での逆解析に適用した場合の、精度検証。
- b) 曲線状管路への本法の適用性の検証
- c) 地盤変位を受ける埋設管路の挙動観測実験による、本提案法の実用性検証

参考文献

- 1) 関西ライフライン研究会：ライフライン地震防災シンポジウム 阪神淡路大震災に学ぶ，1997年6月。
- 2) 高田至郎，鳥居宣之，片桐 信，下田潤一，田中博文，ラダン・イワノフ：2003年7月26日宮城県北部地震被害調査報告，建設技術研究所論文報告集，第45号，pp.245-264，2003年11月。
- 3) 中野雅弘，片桐 信，奥野正富：地盤変形観測のためのPE管光ファイバセンサの開発，土木情報利用技術論文集，Vol.17，pp.83-90，2008年11月。
- 4) 高橋貴蔵，呉 智深，須藤佳一：光ファイバセンサによるひび割れモニタリングに関する実験的研究，土木学会第56回年次学術講演会，pp.862-863，2001年10月。
- 5) 中野龍児，三浦 悟，今井道男，一宮利通，河野哲也，牟禮勝仁：BOCDA方式光ファイバセンサによるコンクリートのひび割れ検知，土木学会第63回年次学術講演会，pp.117-118，2008年9月。
- 6) 村上 章，登坂宜好，堀 宗朗，鈴木 誠：有限要素法・境界要素法による逆問題解析，コロナ社，pp.1-3，2000年4月。
- 7) (財)土木技術センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書，第1221号，「POLITEC PEパイプ」，pp.32-33，2000年12月。
- 8) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009年版，pp.78-79，2009年7月。
- 9) 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版株式会社，pp.48-62，1991年9月。
- 10) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，JGA技-206-03，pp.26-27，2004年3月。
- 11) (社)日本ガス協会：中低圧ガス導管耐震設計指針，JGA技-209-03，pp.6-13，2004年3月。

(2010.5.28 受付)