

## 埋設パイプラインの耐震性評価における 地盤の永久変位分布のモデル化

IDEALIZATION OF LIQUEFACTION-INDUCED PERMANENT GROUND DEFORMATION  
FOR THE SAFETY ASSESSMENT OF BURIED PIPELINES

鈴木 信久\*

中根 宏行\*\*

By Nobuhisa SUZUKI and Hiroyuki NAKANE

Spatial extent of liquefaction-induced permanent large ground movement is presented on the basis of case history information of the 1964 Niigata earthquake and the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake. Idealization of the ground movement required for deformation analysis of buried pipelines was performed by applying a trapezoidal and a sinusoidal displacement. The trapezoidal displacement was provided for axial, lateral and vertical deformation, and the sinusoidal displacement for the lateral deformation. The dimensions of the displacement pattern were obtained from the case history information and will be of great help to the seismic design of the buried pipelines.

### 1 まえがき

液状化に伴って発生する地盤の永久変位量は、液状化層厚および斜面の勾配との間に相関があることが浜田らの研究<sup>1)</sup>によって明らかにされており、埋設管路や基礎杭などの地中構造物の安全性を検討するうえで重要な課題となっている<sup>2~6)</sup>。

深さ方向への地盤変位分布は杭の変形状況から推定が可能である。たとえば、1964年新潟地震によって折損したビルの基礎杭の調査結果<sup>7, 8)</sup>では、液状化層底部に変位分布の先端が位置し、地表面で最大変位が発生する三角形分布および台形分布が杭の折損パターンを良く説明できることが示されている。一方、埋設管のように平面的に展開している線状構造物の耐震設計では、地盤の永久変位の平面的な分布を推定する必要があり、地盤の平面的な分布を推定するための解析手法が盛んに検討されている。ところが、この平面的な地盤変位分布は基礎杭の場合とは異なり、対象が広範な領域に及ぶため、現在のところ確実な方法が得られていないようである。

そこで本論文は、埋設パイプラインの耐震設計で入力値となる永久変位分布をモデル化<sup>9~13)</sup>する試みとして、1964年新潟地震および1983年日本海中部地震で発生した地表面永久変位ベクトルの平面的な分布および地盤の流動パターンの特徴を調べ、代表的な変位分布の形状を定量的に表したものである。

\* NKK 応用技術研究所 川崎第一研究部 (〒210 神奈川県川崎市南渡田町 1-1)

\*\* 東京ガス株式会社 導管計画部 (〒105 東京都港区海岸 1-5-20)

## 2 地盤の永久変位ベクトルの解析概要

### 2.1 解析領域および実測永久変位ベクトル

図1に新潟市内における解析領域を示す。この領域は東西1000m、南北800mの長方形領域であり、新潟駅はその南部に位置している。また、地盤の永久変位量は航空写真測量によって得られたもので、測定地点を図に●で示す。また、本文中には図示していないが、能代市内では青葉町～昭南町を中心とした北部地域と、前山～長崎地区を含む南部地域に、それぞれ東西800m、南北1600mの長方形の解析領域を設定した。この3つの解析領域の永久変位ベクトルに関する情報が最も豊富に得られており、本論文では文献8)に示されているものデータを参照した。文献8)の能代市内両地域のデータは文献1)、3)のデータをかなり補強したものである。

図2は新潟市内における解析領域を50mメッシュに分割したもので、測定地点で得られた地盤の永久変位ベクトルを示している。図3は能代市北部地域と南部地域における変位ベクトルを図2と同様に示したものである。図の○は最大変位量(MAX)の発生位置を表している。これらの永久変位ベクトルは、マンホール、地籍境界の標石、電柱の足、さらに側溝などのように地表面に固定されている点を対象に測定したものであり、建物の屋根の角、フェンス、ガードレールのように、その変位ベクトルが地盤のベクトルと一致しない可能性があるものについては除外してある。また、図中格子線のない空白部分は本論文の解析から除外した領域である。これは、実測データがないことと、この空白部分では近傍の実測データを使って外挿しなければならないため、次に示す方法による予備解析の結果推定精度に疑問が認められたためである。

新潟市内における航空写真測量の精度は、水平方向で $\pm 72\text{cm}$ 、鉛直方向で $\pm 66\text{cm}$ と見積られている。また、能代市内の精度は新潟市内よりも良好で、北部地域の水平方向で $\pm 16\text{cm}$ 、鉛直方向で $\pm 20\text{cm}$ 、南部地域の水平方向で $\pm 17\text{cm}$ 、鉛直方向で $\pm 28\text{cm}$ と算定されている<sup>1)</sup>。

### 2.2 格子点における地盤変位ベクトルの解析方法

図2,3に示すように、実測地盤変位ベクトルは不規則に分布しているため、本論文では50m間隔に分割した格子点における地盤の水平変位ベクトルを以下のフローに従って算定し、規則的に配置されたデータを作成した。

ステップ(1)：格子点Aを中心として、半径Rの円内にN個の実測変位ベクトルが入るように小領域を図4のように定義する。

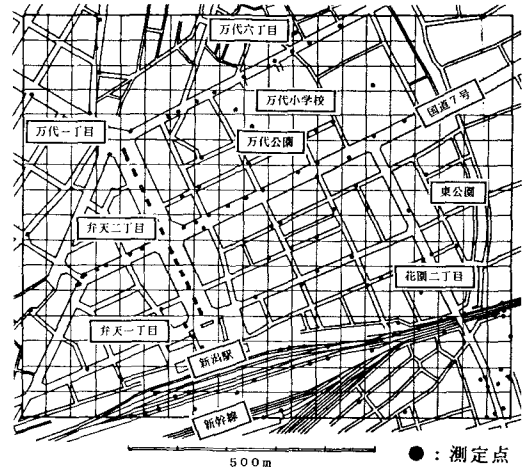


図1 新潟市内の解析領域

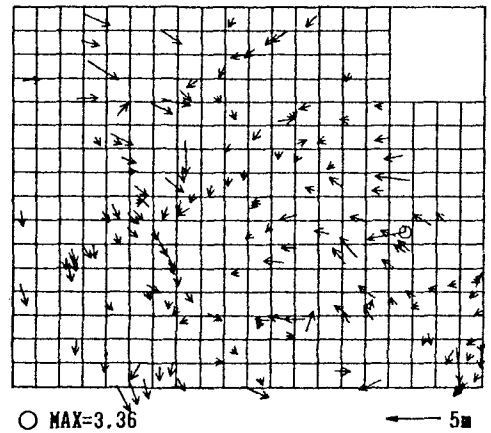
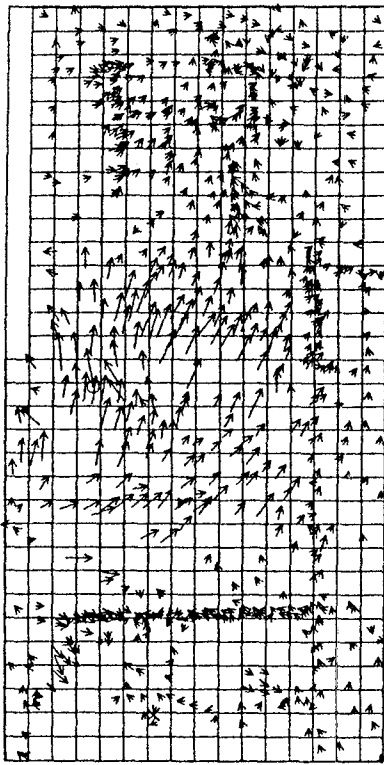
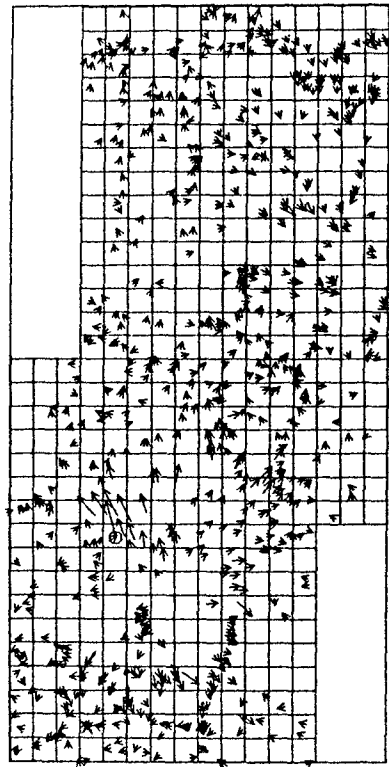


図2 新潟市内における実測変位ベクトル



北部地域 ○ MAX=2.97 ← 5m



南部地域 ○ MAX=5.04 ← 5m

図3 能代市における実測変位ベクトル

ステップ°(2) : 半径Rの小領域に含まれるN個の実測変位ベクトルを東西方向成分  $u_1, u_2, \dots, u_N$ 、南北方向成分  $v_1, v_2, \dots, v_N$  に分離する。

ステップ°(3) : 小領域内で東西方向変位ベクトルを二次多項式

$$u = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (1)$$

で定義し、格子点Aにおける東西方向変位ベクトル  $u_A$  を最小二乗法で求める。ここに、各変位ベクトルにはA点からの距離  $r_i$  ( $i=1 \sim N$ ) に反比例する重み係数を持たせ、格子点上に既知ベクトルがある場合にはベクトル値が変化しないようにする。また、変位関数を二次多項式で表しているため、 $6 \leq N$  となる制約条件が必要である。

ステップ°(4) : 格子点Aにおける南北方向への変位ベクトル  $v_A$  も  $u_A$  と同様に次式により求める。

$$v = gx^2 + hxy + iy^2 + jx + ky + l \quad (2)$$

ステップ°(5) : A点における推定変位ベクトル  $u_A, v_A$  が求まったら、B点に移動してステップ°(1)~(4)の解析を繰返す。この時既に格子点で求まっている推定変位ベクトルも回帰分析に使用する。

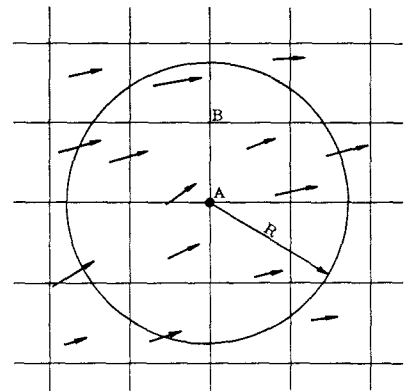


図4 格子点を中心とした小領域の定義

ステップ(6)：ステップ(1)～(5)の解析を全格子点について繰返すことによって解析領域内における全格子点のベクトルが求められる。

以上が格子点における水平変位ベクトルの解析方法であるが、実際の解析では、データ密度が高い領域から開始し、データ密度が低い領域へと順次移動した。当然のことであるがこの方法は、格子点に限らず任意点の変位ベクトルを求めることができる。また、地盤の隆起、沈下を表す鉛直方向変位ベクトルも同じ手法で解析した。

### 2.3 地盤変位分布の解析結果

前項の方法によって得られた新潟市内における地盤変位分布の解析結果を図5, 6, 7に示す。図5は50m間隔の格子点で得られた水平変位ベクトル、図6の実線はこの変位ベクトルの頂点を連ねて描いた地表面の変形図を表している。また、図7の等高線では実線が隆起を、破線が沈下を表しており、等高線の間隔は30cmとしてある。図中、○は最大値(MAX)の発生位置で、×は最小値(MIN)の発生位置を表している。図5の格子点変位ベクトル図および図6の地表面変形図によって、図2に示した離散的な水平変位ベクトル(実測値)が規則的に表され、地表面全体の挙動が明瞭に視覚化されている。また、図7の鉛直永久変位量の等高線によって、解析領域全体の隆起、沈下部分が明確に識別される。さらに、図8～10、図11～13にはそれぞれ能代市北部地域および南部地域における変位分布の解析結果を、新潟市内の解析結果と同様の形式で示す。

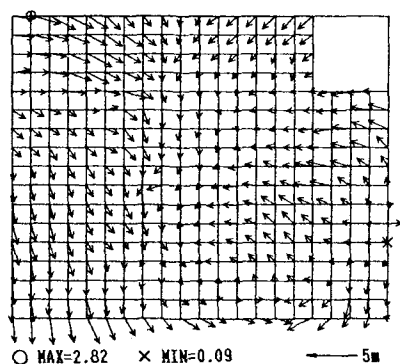


図5 新潟市内の水平変位ベクトル

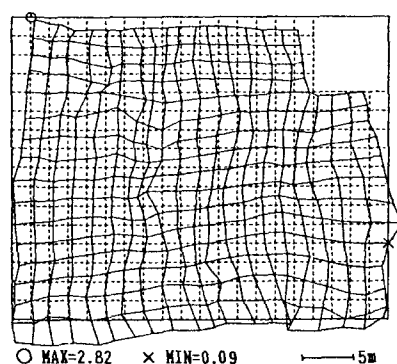


図6 新潟市内の地表面変形図

## 3 埋設パイプラインに対する永久変位分布のモデル化

### 3.1 永久変位分布のモデル化

特定のパイプラインの震害事例解析あるいは安全性検討の場合には、パイプラインに沿った変位ベクトルを個別に求める必要がある。パイプライン上の任意点における地盤の変位ベクトルは、2.2に示した解析方法によって求めることができるが、複雑なネットワークを構成する都市のパイプラインネットワークを解析対象とする場合には非常に煩雑な作業となる。

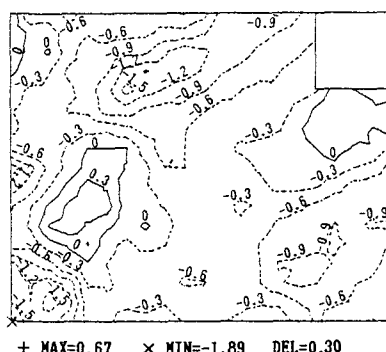
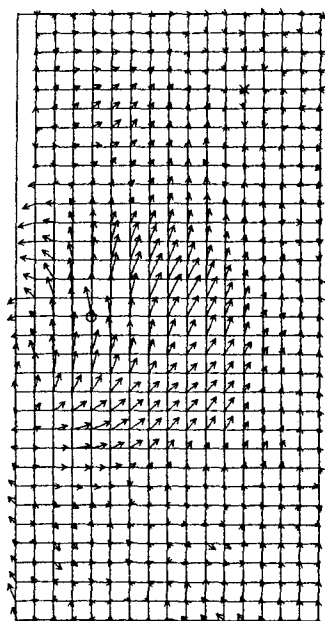
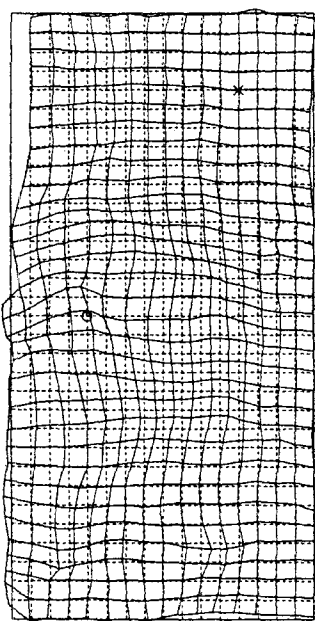


図7 新潟市内の鉛直方向等変位線図



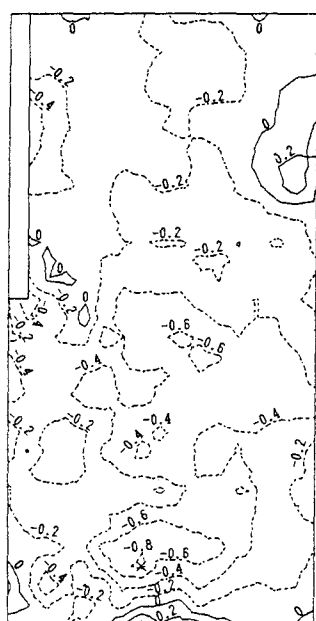
○ MAX=2.61 × MIN=0.01 ← 5m

図8 能代市北部地域の水平変位ベクトル



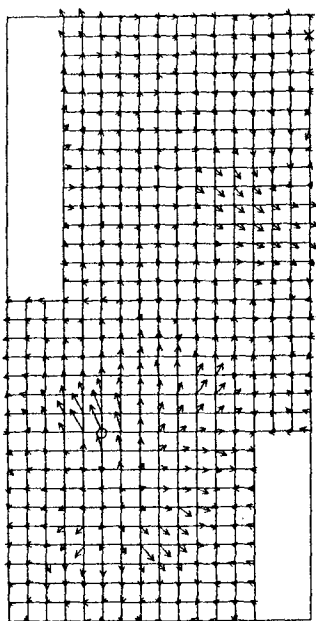
○ MAX=2.61 × MIN=0.01 ← 5m

図9 能代市北部地域の地表面変形図



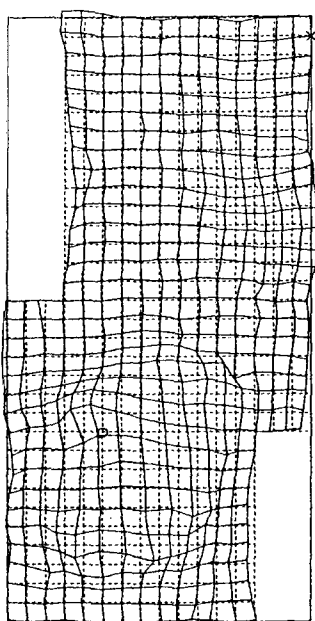
+ MAX=0.44 × MIN=-0.86 DEL=0.20

図10 能代市北部地域の鉛直方向等変位線図



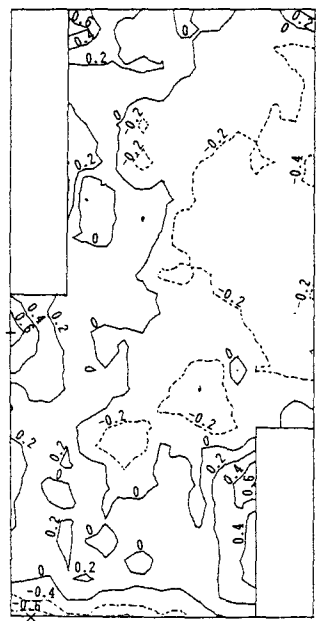
○ MAX=3.12 × MIN=0.02 ← 5m

図11 能代市南部地域の水平変位ベクトル



○ MAX=3.12 × MIN=0.02 ← 5m

図12 能代市南部地域の地表面変形図



+ MAX=0.75 × MIN=-0.54 DEL=0.20

図13 能代市南部地域の鉛直方向等変位線図

そこで、本論文では埋設パイプラインと地盤の永久変位ベクトルの分布形状の関係を理想化して表すため、図2および図3の格子線をパイプラインと見なし、それらに沿った永久変位ベクトルの分布特性を調べることにする。

格子線によってモデル化されるパイプラインを変形させる地盤の永久変位分布として、ここでは図14～16を基本的なパターンとして定義する<sup>9)~13)</sup>。図中、パイプラインはX軸に一致しており、Y軸は管軸直角方向、Z軸の(+)は隆起、(-)は沈下を表している。図14は管軸方向地盤変位モデルで、地盤の変位ベクトルは管軸方向を向き、パイプラインには圧縮変形と引張変形を発生させる。この変位モデルは、遷移区間の長さLと地盤の相対変位量Dで表される。図15は管軸直角方向地盤水平変位モデル、図16は軸直角方向地盤鉛直変位モデルをそれぞれ表している。この二つの地盤変位モデルは、地盤の変位方向が異なるのみで、永久変位パターンは全く同一のものである。この管軸直角方向の地盤変位モデルでは、部分変位モデルとせん断変位モデルを考慮する。図のように、部分変位モデルは変位幅Wと最大地盤変位量D、せん断変位モデルは遷移区間長さLと相対変位量Dをパラメータとして表される。

また、部分変位モデルにおける永久変位分布形状は一般的にDとWの関数で、

$$D(x) = D \cdot \cos^n(\pi x/W) \quad (3)$$

のように表すことができる。ここに、nは変位分布の形状を決定するパラメータで、nの値によって矩形変位分布から変位幅の中央部の変位が卓越する変位分布(1 ≪ n)まで表すことができる。このように様々な変位分布を正規化して図17に示す。

せん断変位モデルの遷移区間における地盤の変位分布を単純に台形分布で表すと、

$$D(x) = D \{X/L + 1/2\} \quad (4)$$

となり、三角関数で表すと次式ようになる。

$$D(x) = D/2 \{ \text{sign}(x) (|\sin(\pi x/L)|)^n + 1 \} \quad (5)$$

ただし、(3)、(5)式の形状パラメータnの値に関しては本論文では言及せず、現時点における目的はW ~ D、L ~ D の関係を求めることである。

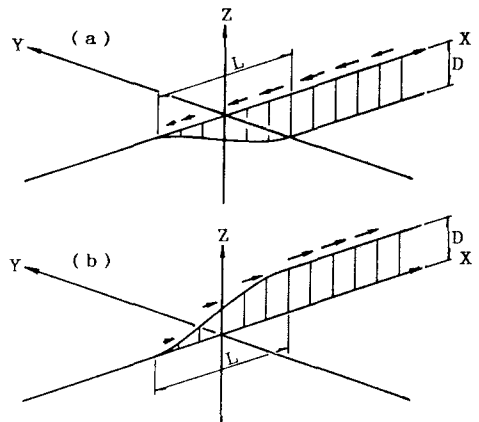


図14 管軸方向地盤変位モデル

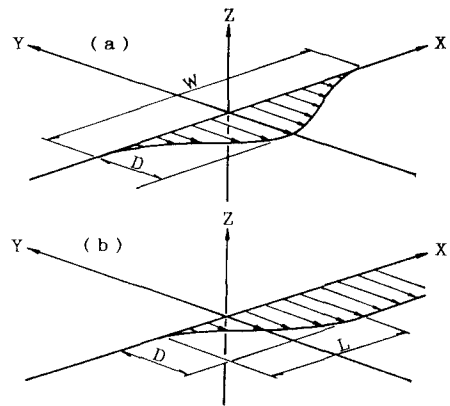


図15 管軸直角方向地盤水平変位モデル

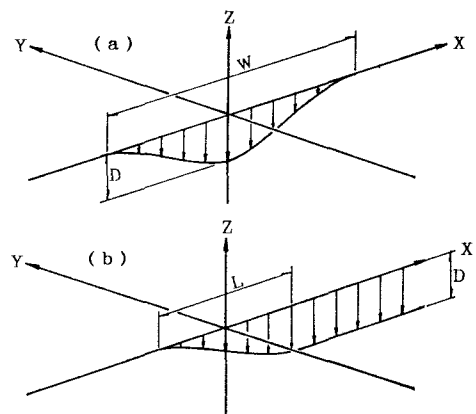


図16 管軸直角方向地盤鉛直変位モデル

### 3.2 モデル化した永久変位分布形状

図14～15のようにモデル化した永久変位分布のLあるいはWおよびDを地表面の変形図から直接読み取るのは困難なため、格子点における変位の3成分(東西、南北、上下)を各々独立に抽出し、図18のように書き直したうえでモデル化した変位分布形状を探し、その分布形状を測定した。

図6, 9, 12に示す地表面変形図と、図7, 10, 13に示す鉛直方向等変位線図から、図14～16でモデル化した地盤の永久変位分布を読み取った値を図19～23に示す。図中、新潟市内の実測値を○●、能代市北部地域を△▲、能代市南部地域を□■で表す。また○△□は東西方向、●▲■は南北方向への格子線に沿った測定値である。また各図の横軸は遷移区間長さLあるいは変位幅Wを表している。さらに、図19の縦軸の(+)は引張変形、(-)は圧縮変形モードをそれぞれ表し、図22の(+)は隆起、(-)は沈下をそれぞれ表している。ただし、ここで言う隆起および沈下は絶対的な現象ではなく、該当する変位モデルを含む小領域で定義される局所座標系における幾何学的な形状を表しており、隆起は上に凸、沈下は下に凸と考えれば良い。

解析領域の相違によるデータを比較するため、表1に線形回帰係数を示す。軸方向水平変位モデルの回帰係数を見ると、新潟市内の方が能代市内よりも大きな値を示し、新潟市内と能代市南部地域では圧縮モードが卓越し、能代市北部地域では引張モードが卓越している。また、軸直角方向水平変位モデル(部分変位モデル、せん断変位モデル)では新潟市内における回帰係数が能代市両地域よりもやや大きくなっている。さらに、同様な傾向が軸直角方向鉛直変位モデル(部分変位モデル、せん断変位モデル)についても見られるが、新潟市内の回帰係数は能代市内の

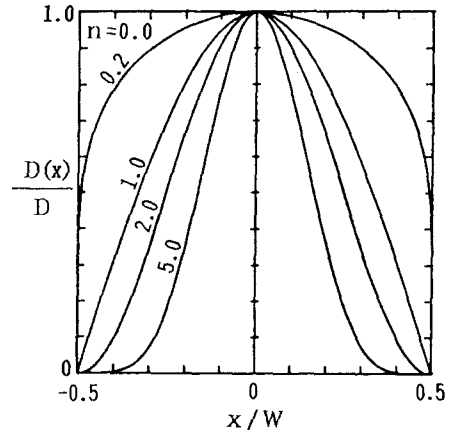


図17 部分変位モデルの正規化した地盤変位分布

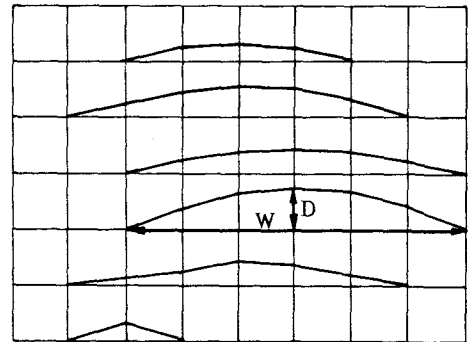


図18 変位成分からの変位分布形状の読み取

表1 線形回帰分析の結果

解析地域	新潟市内		能代市北部		能代市南部		全体	
	回帰係数	相関係数	回帰係数	相関係数	回帰係数	相関係数	回帰係数	相関係数
軸方向 (引張, 圧縮)	0.00791	0.37	0.00639	0.64	0.00786	0.65	0.00716	0.61
	-0.00921	-0.57	-0.00538	-0.62	-0.00862	-0.65	-0.00752	-0.52
軸直角水平 (部分変位)	0.00343	0.60	0.00249	0.65	0.00290	0.70	0.00287	0.62
軸直角水平 (せん断変位)	0.00714	0.62	0.00680	0.75	0.00661	0.49	0.00685	0.61
軸直角鉛直 (部分変位)	0.00214	0.37	0.00101	0.51	0.00131	0.12	0.00146	0.55
	-0.00166	-0.62	-0.00066	-0.28	-0.00117	-0.42	-0.00109	-0.44
軸直角鉛直 (せん断変位)	0.00566	0.66	0.00194	0.49	0.00247	0.53	0.00323	0.49

約2~2.5倍になっている。これらを総合すると、同じW、Lに対するDの値は新潟市内の方が能代市内よりも大きな値を示すことになる。

さらに、全データの線形回帰係数を比較して次のことが言える。軸方向変位分布モデルでは、引張、圧縮ともほぼ同程度の値になっており、さらに軸直角方向水平変位モデル(せん断変位モデル)もこれらに近い値を示している。軸方向変位分布モデルについては、引張、圧縮とも、ほぼ同程度の値になっており、軸直角方向水平変位モデル(せん断変位モデル)もこれらに近い値を示している。また、軸直角方向水平変位モデル(部分変位モデル)と軸直角方向鉛直変位モデル(せん断変位モデル)はほぼ同程度の値であり、前述の3モデルの1/2程度になっているが、軸直角方向鉛直変位モデル(部分変位モデル)はさらに小さく、上に凸の形状が1/2程度、下に凸の形状は1/3程度になっている。また図19~23には、線形回帰の結果および包絡線を合わせて示す。包絡線の適用範囲は二つに分けられている。まず、LまたはWの大きな値に適用する包絡線の勾配は、線形回帰で得られた勾配を丸めたもので、縦軸上の切片はこの包絡線が読み取り最大値を下回らないように定義した。一方、原点から伸びる包絡線は読み取り値を上回り、かつ、上述の包絡線との交点が分かり易い値になるように定めた。この包絡線を表2にまとめて示す。

図19の軸方向変位モデルの分析結果を見ると、測定地域および測定方向によらずほぼ同様な分布をしている。またデータが(+)(-)ほぼ対称にプロットされていることから、圧縮モード、引張モードともほぼ同数、同規模で発生していると考えられる。

図15で定義した軸直角方向地盤水平変位モデルのうち、図20には部分変位モデル、図21にはせん断変位モデルの分析結果を示す。部分変位モデルのW~Dおよびせん断変位モデルのL~Dとも、図19の軸方向変位モデルの場合と同様に、解析領域および測定方向によらず、変位パターンは一定の分布傾向を示している。

図22, 23は図16で定義した鉛直方向地盤変位モードに対する結果であるが、ここでは東西方向のデータのみを測定対象としている。これによると、部分変位モデルでは隆起と沈下がほぼ対称に発生しているが、線形回帰の結果では、隆起の方が約50%大きな値を示している。また、部分変位モデル、せん断変位モデルとも、新潟市内

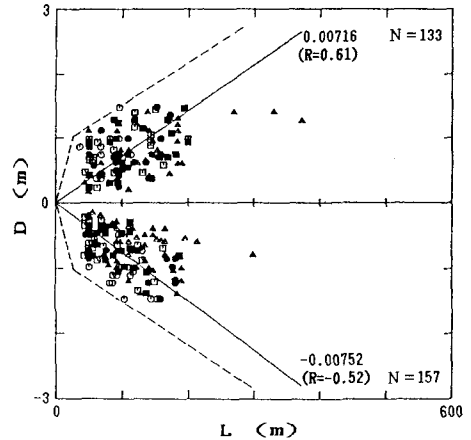


図19 管軸方向地盤変位モデル

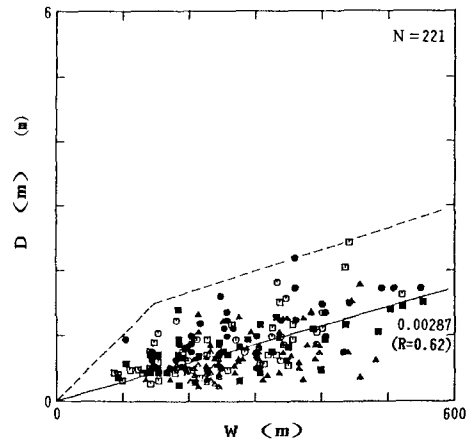


図20 管軸直角方向地盤水平変位モデル (部分変位)

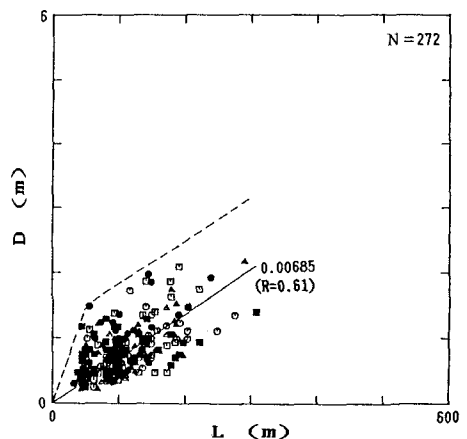


図21 管軸直角方向地盤水平変位モデル (せん断変位)



のほうが能代市内よりもW、LおよびDとも卓越している。

表2に永久変位量の包絡線を示す。各包絡線は前述の定義にしたがって求めたもので、それぞれ適用範囲が異なっている。ここでL、Wが大きな適用範囲における勾配は、線形回帰係数にほぼ等しくしてある。そこで比較のため、包絡線の折れ点における変位量を見ると、軸方向変位分布モデルではL=25mでD=1m、軸直角方向水平変位分布(部分変位)ではW=150mでD=1.5m、軸直角方向水平変位分布(せん断変位)ではL=50mでD=1.5m、軸直角方向鉛直変位分布(部分変位)ではW=100mでD=0.67m、軸直角方向鉛直変位分布(せん断変位)ではL=75mでD=1.5mとなっている。また、適用範囲の上限値は各永久変位分布の実測データが包絡線と対応する範囲内という意味で示した。これは主に、図19の管軸方向地盤変位モデル、図22の管軸直角方向地盤水平変位モデル(せん断変位)および図23の管軸直角方向地盤鉛直変位モデル(せん断変位)で、Lが実測値として大きな範囲まで得られていないことと、適用範囲の上限値を設定しておかないとLが大きなところでDが非現実的な値となるためである。

#### 4 埋設パイプラインの耐震性評価例

##### 4.1 解析の前提条件

地盤の液状化によって発生する地盤の永久変位に対する埋設パイプラインの耐震性評価の例として、300A鋼管(外径318.5mm,管厚8.4mm)および600A鋼管(609.6mm,12.7mm)の変形解析を行った。地盤の入力変位分布は図15に示す管軸直角方向水平変位モデル(部分変位モデル)に限定し、その永久変位分布D(x)は(1)式でn=2とし、次式で表した<sup>21)</sup>。この分布を図の表示では単に側方流動と呼び、式中の地盤の最大変位量Dおよび変位幅Wは表2の値を参照した。

$$D(x) = D \cdot \cos^2(\pi x / W) \quad (6)$$

管の材質は、いずれもSGP(JIS G 3452)(図24参照)とし、地盤のばね特性はガス導管耐震設計指針<sup>14)</sup>のデータを参照して、管軸方向および管軸直角方向について図25のように仮定した。ただし、液状化による地盤ばね特性の低減については考慮していない。

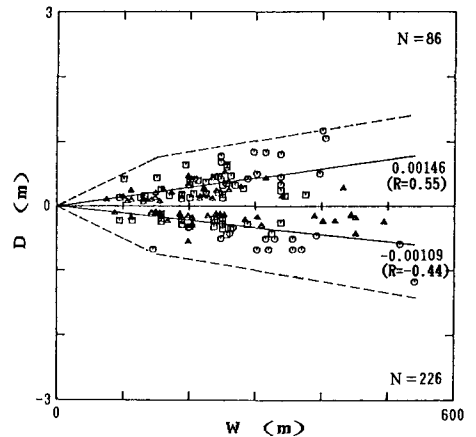


図22 管軸直角方向地盤鉛直変位モデル(部分変位)

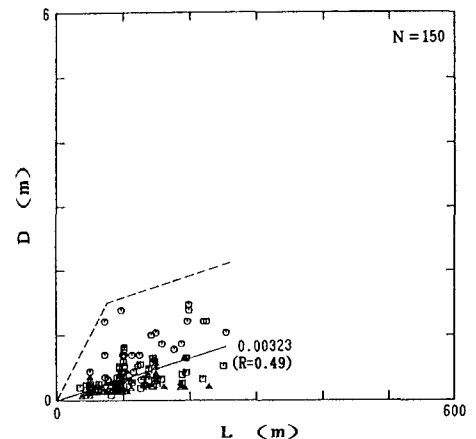


図23 管軸直角方向地盤鉛直変位モデル(せん断変位)

表2 永久変位量の包絡線

変位分布モデル	適用範囲	最大変位量(D)
軸方向 (引張,圧縮)	$L \leq 25$ $25 < L < 100$	$1/25 \times L$ $1/150 \times L + 5/6$
軸直角水平 (部分変位)	$W \leq 150$ $150 < W < 500$	$1/100 \times W$ $1/300 \times W + 1$
軸直角水平 (せん断変位)	$L \leq 50$ $50 < L < 200$	$3/100 \times L$ $1/150 \times L + 7/6$
軸直角鉛直 (部分変位)	$W \leq 100$ $100 < W < 400$	$1/150 \times W$ $1/600 \times W + 1/2$
軸直角鉛直 (せん断変位)	$L \leq 75$ $75 < L < 200$	$1/50 \times L$ $1/300 \times L + 5/4$
単位	m	m

#### 4.2 解析結果および安全性検討

地盤の変位幅 $W$ を最大600mmまで変化させ、中央断面で鋼管に発生する最大および最小ひずみの変化を比較した結果を図26に示す。図中、(+)は引張ひずみ、(-)が圧縮ひずみを表している。鋼管ひずみは $W$ の増加に従って始めのうちは急激に増加するが、 $W$ が10~20mという非常に小さなところでピークを示し、その後 $W=50$ m程度まで増加する間に急減し、 $W=100\sim 200$ mになるとかなり小さなひずみになっている。このピーク点における最大圧縮ひずみは300Aで0.21%、600Aで0.38%となっており、それぞれの管が持つ局部座屈強度<sup>14)</sup>0.97%(300A),0.73%(600A)と比較して十分小さな値となっており、局部座屈に関して十分安全であることが分かる。また当然のことであるが、引張側最大ひずみも300Aで0.22%、600Aで0.39%となっており、材料の許容ひずみに対して十分小さい値となっている。

また参考のため、図27および図28には、 $W=50, 150, 600$ mの場合について $D$ の増加に対する管体ひずみの変化状況を示す。 $W=50$ mの場合、 $W=150, 600$ mと比較して管体ひずみは300A、600Aとも $D$ の増加に連れて増加するが、 $W=50$ mの場合 $D=1$ mが上限値となるのでひずみは小さな値で飽和している。

#### 5 あとがき

本論文では、新潟市内および能代市内を対象に、離散的な測定データであった地盤の永久変位ベクトルを連続的なデータとして表し、埋設パイプラインのような線状構造物への入力条件として代表的な変位パターンを選定し、その形状を定量的に表した。

地盤変位ベクトルの解析では、解析対象領域を50mのメッシュに分割して検討を進めたため、数10mあるいはそれ以下の範囲で発生する局所的な地盤変位は個別には把握されていない。局所的な地盤変位は絶対値としては小さいが、剛性の小さな埋設管にとっては大きな影響を与えることがあるため、無視できない地盤変位である。局所的な地盤変位量については、高田ら<sup>15)</sup>の詳細な研究を参照して、今後さらに詳細な調査を進める予定である。

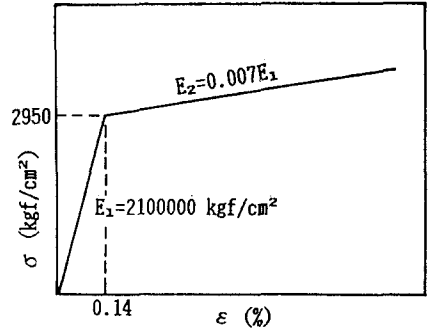


図24 管材料の応力~ひずみ線図

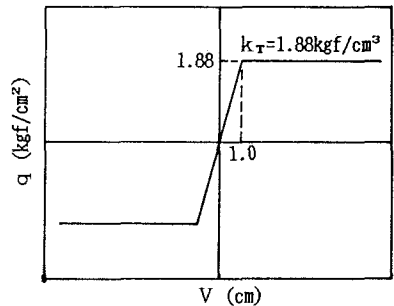
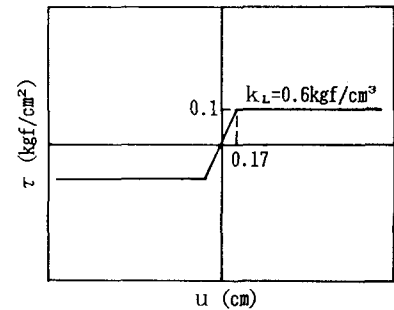


図25 地盤のばね特性

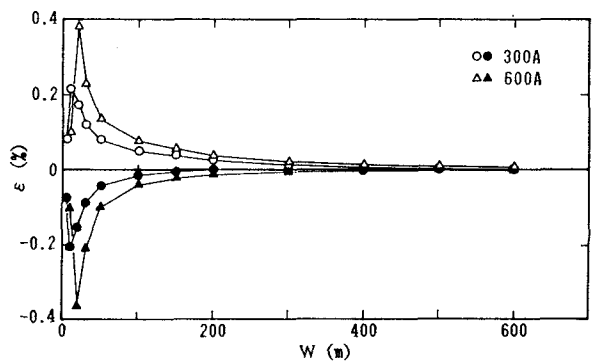


図26 側方流動幅をパラメータとした鋼管のひずみ

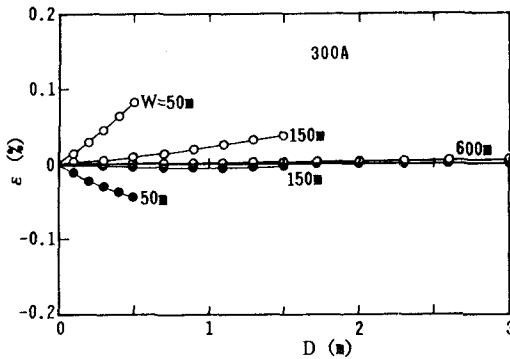


図27 側方流動に対する300A鋼管のひずみの変化

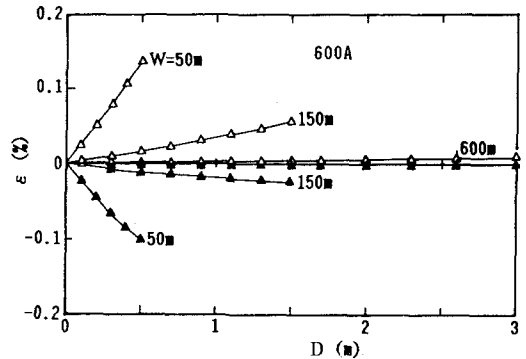


図28 側方流動に対する600A鋼管のひずみの変化

なお本研究は、日米共同研究「地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究」(委員長:久保慶三郎 東京大学名誉教授、事務局:(財)地震予知総合研究振興会)の一環として行ったものである。また、東海大学浜田政則教授、建設省土木研究所川島一彦研究室長には貴重なご助言をいただきました。末筆ながらここに付記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1 浜田政則, 安田 進, 磯山龍二, 恵本克利 : '液状化による地盤の永久変位の測定と考察', 土木学会論文集Ⅲ, No. 376, p. 211~220, 1986.
- 2 浜田政則, 安田 進, 磯山龍二, 恵本克利 : '液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究', 土木学会論文集Ⅲ, No. 376, p. 221~229, 1986.
- 3 Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. : Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements, ADEP, 87p., 1986.
- 4 佐武正雄, 西尾宜明, 佐藤絃志 編 : 地中埋設管の液状化による被害の実体とその対策, 日本科学技術協会, 449p., 1988.
- 5 河村壮一, 西沢敏明, 田尻貞夫 : '液状化で破損した杭の調査', 基礎工, Vol. 12, No. 7, 1984.
- 6 河村壮一, 西沢敏明, 和田曄暎 : '20年後の発掘で分った液状化による杭の被害', NIKKEI ARCHITECTURE, Vol. 7/29, p. 130~134, 1985.
- 7 森 伸一郎, 清水勝美, 鈴木信久, 高木正美, 中村 晋 : '液状化による地盤の永久変位に起因する杭基礎の被害と解析', 第20回地震工学研究発表会講演概要集, 1989.
- 8 (財)地震予知総合研究振興会 : '-日米共同研究- 地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究', 昭和63年度調査・研究報告書, 821p., 1989.
- 9 Suzuki, N., Kobayashi, T., Nakane, H. and Ishikawa, M. : 'Modeling of Permanent Ground Deformation for Buried Pipelines', Proc. of 2nd Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, NCEER, p. 110~123, 1989.

- 10 Kobayashi, T. : 'Recommended Practice for Earthquake Resistant Design of Gas Pipeline Considering Liquefaction', Proc. of 1st Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, ADEP, p.212~221, 1988.
- 11 Suzuki, N., Arata, O. and Suzuki, I. : 'Parametric Study on Deformation Analysis of Welded Pipeline Subject to Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacement', Proc. of 1st Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, ADEP, p.155~162, 1988.
- 12 O'Rourke, T. : 'Critical Aspects of Soil-Pipeline Interaction for Large Ground Deformation', Proc. of 1st Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, ADEP, p.118~126, 1988.
- 12 O'Rourke, M. : 'Approximate Analysis Procedure for Permanent Ground Deformation Effects on Buried Pipelines', Proc. of 2nd U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Vol.5~8. 1989.
- 14 (社)日本ガス協会 : ガス導管耐震設計指針, 1983.
- 15 高田 至郎, 田邊揮司良 : 'ライフライン解析のための地震時地盤沈下量の推定', 第18回地震工学研究発表会講演概要集, p.521~524, 1987.

(1989年10月2日受付)