

# 水道管の耐震検討における微地形分類の種類や境界条件を考慮した地盤の不均一度係数

七郎丸 一孝<sup>1</sup>・宮島 昌克<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科博士後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail:shichiroumaru\_kazutaka@kokudonet.co.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail:miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

埋設管の被害は微地形分類図における微地形境界部に多く、また、過去の研究等でも地盤の不均一性(地盤構成や硬軟の変化域)が高い位置で管路被害が集中することがわかっている。したがって、地盤の不均一性を考慮した埋設管の耐震検討を行うことが必要となっている。水道施設耐震工法指針・解析2009年度版においても不均一度係数が定められており、この不均一度係数について、平成16年新潟県中越地震および平成19年新潟県中越沖地震による水道管の被害データ、微地形の種類、境界条件を踏まえ、微地形分類図、地盤データを用いて、静的解析および動的解析による地盤歪み算定した。この結果を比較し、微地形の種類と境界条件を考慮した不均一度係数の検討を行った。

**Key Words :** *earthquake-resistant, water pipeline, non-uniformity coefficient, microtopography classification map, microtopography boundary*

## 1. はじめに

平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う東日本大震災によって、道路、上水道、下水道、電気、ガス等のライフラインにも未曾有の被害をもたらした。ライフライン施設のうち水道については、宮城県を中心に管路の破損等によりピーク時で約220万戸の断水が発生<sup>1)</sup>し、広範囲かつ多大な被害を与えた。2010年現在、日本における水道普及率は97.5%<sup>2)</sup>であり、突然の断水、減水の影響は計り知れないものとなっている。したがって、水道施設の耐震性を確保することは、生活用水、消火用水や病院等の事業活動等のあらゆる面で不可欠であり、今後新たに設置するものは耐震性を有し、現在埋設されているものは耐震性を高めるための優先順位を決定し、改修していく必要がある。

一方、平成23年東北地方太平洋沖地震に伴う仙台市における水道管路被害率は0.07件/kmであり、平成7年兵庫県南部地震における神戸市0.32件/kmよりも小さかった<sup>3)</sup>。この要因は地盤変状が少なかったためであり、水道管等の埋設管の地震被害は、神戸市等のような地盤変状の発生しやすい不均一(地盤構成や硬軟の変化域)な地盤で

多くなる。埋設管に関する研究や過去の地震被害等からも、地盤の不均一性が高い地域に管路被害が集中することがわかってきている。また、微地形分類図における微地形境界部(1つのメッシュに対して周囲8メッシュに種類の異なる微地形区分がある場合)で、管路被害率が高い<sup>3)</sup>こともわかってきていることから、地盤の不均一性を考慮した埋設管の耐震検討を行うことが重要であるといえる。

水道施設耐震工法指針・解説2009年度版<sup>4)</sup>(以下、水道施設耐震工法指針)の不均一地盤における設計方法は、原則として動的解析により地盤の変位を算定し検討することとしている。しかし、平面的に広くネットワークを形成している水道管路等において、比較的容易に計算可能な応答変位法によって求めた基準地盤歪みに、不均一度係数を乗じる設計方法が、時間およびコスト面からも重要である。水道施設耐震工法指針に示される不均一度係数は、1978年宮城県沖地震のガス管被害の被害率を基にした西尾の研究<sup>5)</sup>を参考とし、表-1に示すように設定されている。この不均一度係数は3段階にのみ分類され、設計者の選定によっては、検討結果が大きく左右することとなる。そのため、平成16年新潟県中越地震および平

表-1 不均一度係数<sup>4)</sup>

不均一の程度	不均一度係数 $\eta$	地盤条件
均一	1.0	洪積地盤, 均一な沖積地盤
不均一	1.4	層厚の変化がやや激しい沖積地盤, 普通の丘陵宅造地
極めて不均一	2.0	河川流域, おぼれ谷などの非常に不均一な沖積地盤, 大規模な切土・盛土の造成地

※洪積地盤であっても平坦でない地形の場合は, 不均一な地盤とみなす。

表-2 微地形の区分(「K形継手等を有するダクトイル鋳鉄管の耐震適合性地盤判定支援ハンドブック」<sup>6)</sup>に追記)

No	微地形分類	判定	検討区分
1	山地	耐震適合性あり	良い地盤
2	山麓地		
3	丘陵		
4	火山地		
5	火山山麓地		
6	火山性丘陵		
7	岩石台地		
8	砂礫質台地		
9	ローム台地		
10	谷底低地	耐震適合性なし	悪い地盤
11	扇状地		
12	自然堤防		
13	後背湿地		
14	旧河道		
15	三角州・海岸低地		
16	砂州・砂礫州		
17	砂丘		
18	砂州・砂丘間低地		
19	干拓地		
20	埋立地		
21	磯・岩礁		
22	河原		
23	河道		
24	湖沼		

成19年新潟県中越沖地震における管路被害と設計者が容易に入手できる微地形分類図を用いて, 管路被害が微地形境界部に集中することに着目し, 地盤の不均一性を検討した<sup>3)</sup>。表-2に示すように微地形区分を「K形継手等を有するダクトイル鋳鉄管の耐震適合性地盤判定支援ハンドブック」<sup>6)</sup>にあるK形継手等を有するダクトイル鋳鉄管の耐震適合性が有りだと判断される微地形区分を「良い地盤」, 耐震適合性が無を「悪い地盤」とし, 微地形分類を2種類に集約した。また, その良い地盤および悪い地盤について, 西尾の方法<sup>5)</sup>と同様に被害率を基に, 微地形境界部と境界部以外の不均一度係数を検討すると, 良い地盤の微地形境界部において不均一度係数が大きくなった<sup>3)</sup>。微地形境界部では, 地盤構成が不均一となることが多く, 固有周期等の地盤の動特性も変化している

と考えられる。そこで, 本研究では, 微地形区分の種類, 微地形境界条件を考慮し, 応答変位法による静的解析と2次元の動的解析による管軸方向の地盤歪みを算定し比較することで, 微地形の種類や境界条件等の特徴を踏まえた不均一度係数を検討する。

## 2. 不均一度係数

本研究における不均一度係数は, 水道管路における軸方向の基準地盤歪みを求める際に用いられ, 現行の不均一度係数は水道施設耐震工法指針に記載されている。

基準地盤歪みは, 一様地盤(水平方向に地層の変化がない地盤)を地震波動が伝播することを想定しているが, 実際は一様地盤はほとんど存在せず, 地層が変化している不均一な地盤が多い。このような場合は, 動的解析等による高度な解析を行い, 動的変形特性を明らかにし耐震解析を行う必要がある。しかし, 水道や下水道等のライフライン施設は, 比較的口径が小さく, 延長が長いいため, 全ての不均一地盤において動的解析を行うことはコストおよび時間の面から合理的ではない。そのため, 静的解析時に設計位置における地盤の不均一さを考慮し, 基準地盤歪みを補正することとしている。具体的には式(1)にあるように, 管軸方向の基準地盤歪みに地盤の不均一度係数を乗ずることで, 地盤の不均一さを考慮し, 基準地盤歪みを求めている。このため, 動的解析における地盤歪みと静的解析における地盤歪みを比較することで, 不均一度係数に関する特性を把握することが可能と考えている。

$$\varepsilon_G = \eta \times \frac{\pi U_k}{L} \quad (1)$$

ここで,  $\varepsilon_G$  : 基準地盤歪み(管軸方向)

$\eta$  : 地盤の不均一度係数(表-1参照)

$U_k$  : 管軸上の地盤の水平変位振幅(m)

$L$  : 波長(m)

## 3. 検討概要と解析位置

### (1) 検討概要

管路被害率を基に, 微地形区分における良い地盤と悪い地盤の境界部と境界部以外の不均一性の検討を行った結果, 良い地盤の微地形境界部で地盤の不均一性が高いことがわかっている<sup>3)</sup>。不均一度係数は静的解析による地盤歪みに乗じて実際の地盤歪みを推定するため, 動的解析による地盤歪みと静的解析による地盤歪みを比較し, 微地形の種類や境界条件による違いを確認することとし

表-3 解析位置一覧

case	微地形区分	境界条件	地域名	微地形名称	解析ボーリングデータ
1-1	悪い地盤	境界	柏崎	後背湿地	56380436003
1-2			刈羽	谷底低地	56381542001
1-3			刈羽	砂丘	E-h-3
2-1	良い地盤	境界	小千谷	砂礫質台地	Y-a-17
2-2			長岡	砂礫質台地	V-c-17
2-3			柏崎	砂礫質台地	柏崎NO3
3-1	悪い地盤	境界以外	柏崎	三角州・海岸低地	No123+05
3-2			柏崎	扇状地	F-H-26
3-3			刈羽	後背湿地	D-I-80
4-1	良い地盤	境界以外	小千谷	砂礫質台地	Y-a-6
4-2			小千谷	砂礫質台地	55387653001
4-3			小千谷	砂礫質台地	Y-a-21

た. ここでは, 近年の地震で多くの管路被害が発生した平成16年新潟県中越地震における小千谷市, 長岡市と平成19年新潟県中越沖地震における柏崎市, 刈羽村を対象とし, ダクタイル鋳鉄管の被害位置において地盤モデルを構築し, 水道施設耐震工法指針と同方法で1次元の応答変位法による解析と2次元動的解析を行う.

解析位置は, 微地形区分と管路被害位置を考慮し抽出し, 微地形分類図は防災科学技術研究所 J-SHIS 表層地盤<sup>7)</sup>を使用した. 本データは微地形分類図のなかで最も小さいメッシュサイズで整理されており, ホームページからダウンロード可能であり汎用性が高く, 全国的に統一の指標で評価でき, 設計者も容易に入手することが可能である. また, 管路被害データは(財)水道技術研究センターが厚生労働科学研究費補金「施設更新の優先度を考慮した地震による被害管路の予測等」で収集, 整理したものである.

(2) 解析位置

解析位置は小千谷市(図-1), 長岡市(図-2), 柏崎市(図-3, 図-4)および刈羽村(図-4)において, 管路被害があり周辺に基盤面が明確であるボーリングデータがある箇所とし, 微地形の種類, 境界条件を踏まえ表-3のとおり12ケース抽出した.

なお, ボーリングデータは, ほくりく地盤情報システム<sup>8)</sup>を用いて抽出した.

4. 静的解析による検討

(1) 解析概要

水道施設耐震工法指針の応答変位法による解析では, 表層地盤の変位量から地盤歪みを式(1)のとおり求める. 静的解析によって既設埋設管の耐震性照査や, 新設の埋設管の耐震設計を行う場合は, 設計位置近傍のボーリン

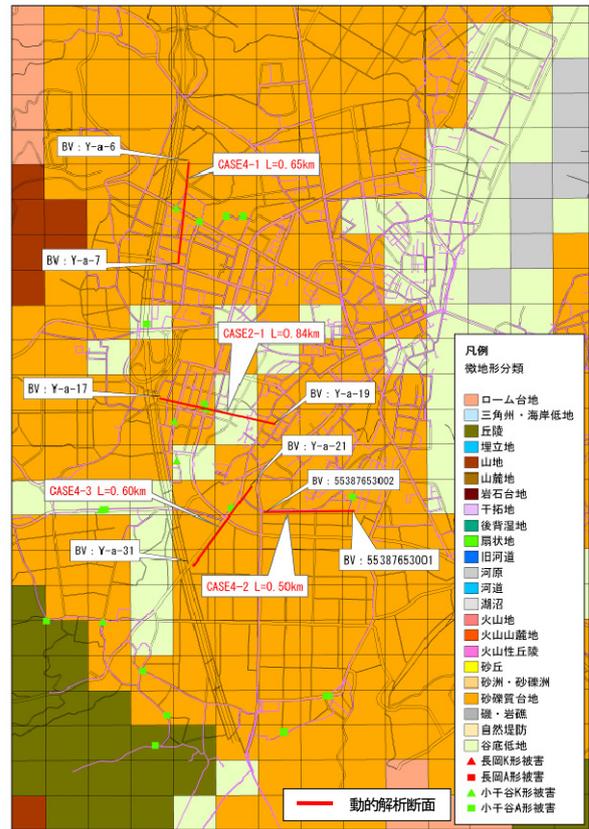


図-1 小千谷市の被害位置と解析位置

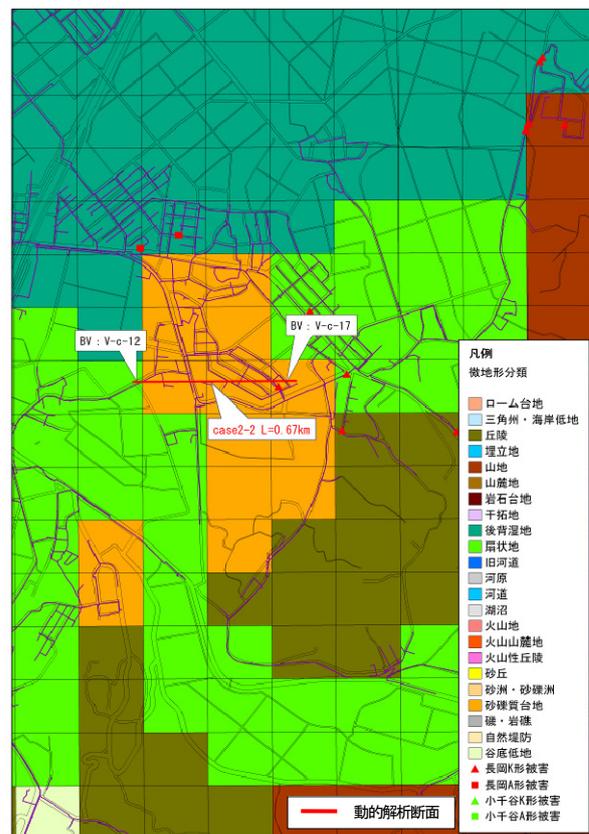


図-2 長岡市の被害位置と解析位置

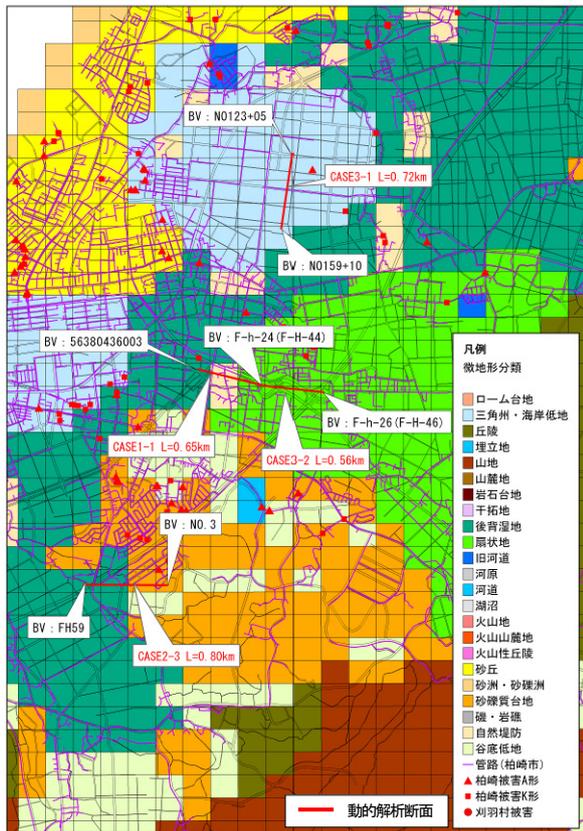


図-3 柏崎市市街地の被害位置と解析位置

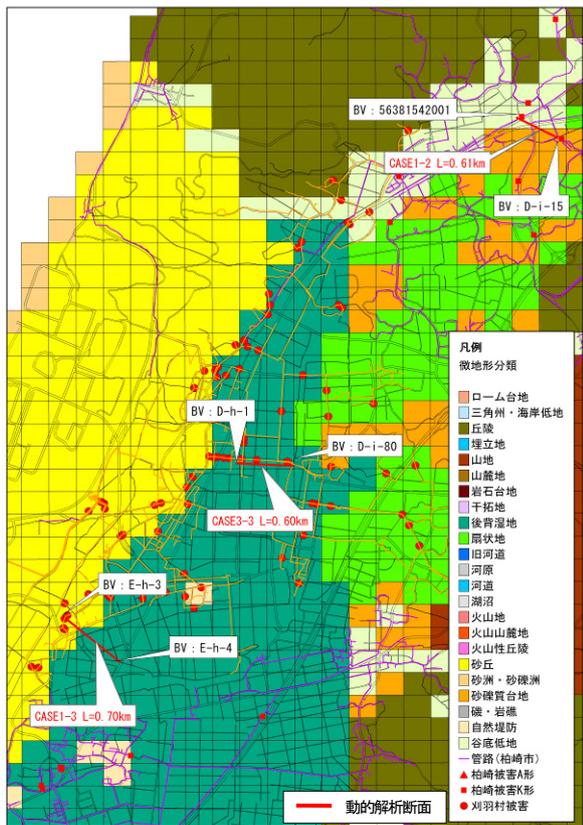


図-4 柏崎市北部および刈羽村の被害位置と解析位置

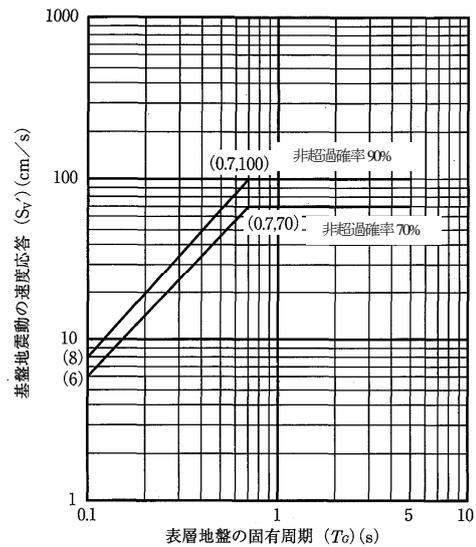


図-5 水道施設耐震工法指針における設計用速度応答スペクトル (地震動レベル2)<sup>4)</sup>

グデータをを用いて、応答変位法によって基準地盤歪みを算定する。本研究においても、管路被害位置の近傍で同じ種類の微地形区分にあるボーリングデータを用いて、基準地盤歪みを算定する。

(2) 応答変位法による地盤歪み算定時の解析条件

- ①解析位置は、図-1から図-4における管路被害近傍のボーリング位置で、表-3に示すように管路被害位置と同じ種類の微地形区分にあるものとした。境界条件が境界以外の場合においては、管路被害位置に近く基盤面が明確なボーリングデータを選定した。
- ②ボーリングデータを用いて、水道施設耐震工法指針に示される方法でN値よりせん断波速度Vsを推定し、固有周期を算定した。
- ③管路の設置深さは1.5mとした。
- ④耐震計算手法は、水道施設耐震工法指針の基準地盤歪みの算定方法と同様であり、速度応答スペクトルも図-5の水道施設耐震工法指針に示されるものを用いた。

(3) 解析結果

表-4にボーリングデータから算定した固有周期と応答変位法により求めた基準地盤歪みの解析結果を示す。実際の設計には、これらの値に不均一度係数を乗じて、設計上の基準地盤歪みとする。

これらの結果より、CASE4-Iのように良い地盤の微地形区分内であってもⅢ種地盤となり、当然ではあるが微地形区分だけで地盤構成や固有周期を特定することができないことを示している。しかし、その他の多くでは、悪い地盤ではⅢ種地盤となり、良い地盤ではⅠ種地盤ま

表-4 応答変位法による地盤歪み

CASE	微地形分類	表層地盤の固有周期(s)	固有周期に対応する地盤種別	基礎地震動の速度応答スペクトル(cm/s)	管軸位置の地盤の水平振幅(mm)	波長(m)	基準地盤歪み(レベル2)(%)
1-1	後背湿地	1.056	III	100	213.6	210.5	0.319
1-2	谷底低地	1.032	III	100	208.7	200.3	0.327
1-3	砂丘	1.688	III	100	341.8	332.7	0.536
2-1	砂礫質台地	0.268	II	28	14.7	52.6	0.088
2-2	砂礫質台地	0.304	II	32	19.3	60.8	0.099
2-3	砂礫質台地	0.340	II	45	30.4	65.9	0.157
3-1	三角州・海岸低地	1.944	III	100	393.7	385.1	0.321
3-2	扇状地	1.500	III	100	303.7	310.2	0.308
3-3	後背湿地	1.044	III	100	211.1	200.6	0.331
4-1	砂礫質台地	0.836	III	100	168.6	141.1	0.375
4-2	砂礫質台地	0.176	I	18	5.9	33.8	0.055
4-3	砂礫質台地	0.092	I	8	1.1	18.1	0.019

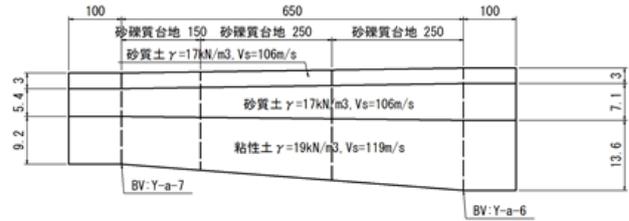


図-9 CASE4-1の解析断面図(単位:m)

たはII種地盤となっている。したがって、悪い地盤の地盤歪みは、地盤が軟らかく固有周期も大きいことから、地盤歪みは大きく、良い地盤では固有周期も小さく、地盤歪みも小さくなる結果となった。

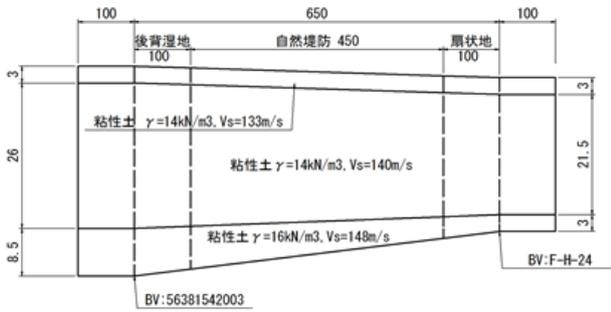


図-6 CASE1-1の解析断面図(単位:m)

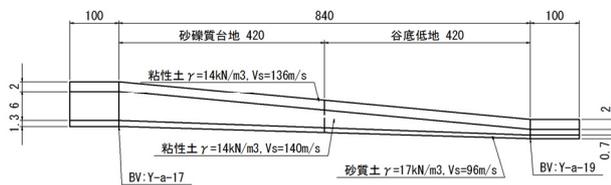


図-7 CASE2-1の解析断面図(単位:m)

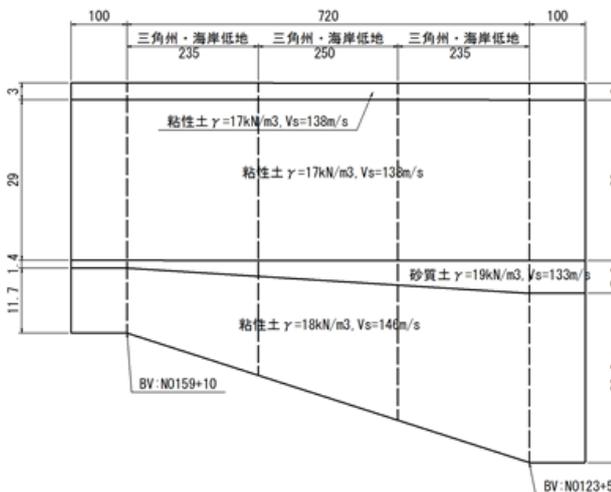


図-8 CASE3-1の解析断面図(単位:m)

## 5. 動的解析による検討

### (1) 解析概要

微地形境界部で管路被害率が高くなる<sup>3)</sup>ことに着目し、250mメッシュの微地形分類図を活用することを前提とし、微地形の種類、境界条件を踏まえ、図-1から図-4におけるCASE1-1からCASE4-3の位置において、微地形区分内のボーリングと隣接する微地形区分のボーリングによる2地点の標高、地層から土質断面図を作成しモデル化した。土質断面図は、2点のボーリングから同地層を直線で補間しており、2点のボーリング間における地層の変化は考慮していない。

モデル例として、CASE1-1、CASE2-1、CASE3-1、CASE4-1における断面図を図-6から図-9に示す。モデル幅は傾斜部およびその周辺に境界の影響がなく極力大きな幅を確保し、ボーリング間距離に水平な100mの幅を両側に加えた。物性値における単位体積重量は設計要領「道路編」<sup>9)</sup>を参照し、ポアソン比は0.45とした。せん断波速度Vsは、N値から水道施設耐震工法指針を参考に推定した。

なお、このモデル図は2地点のボーリングデータから同じ地層を直線で結んだモデルであり、実際の地盤ではより複雑な地形、地層となる可能性があることから、実際よりも小さな地盤歪みを考えていることになる。

### (2) 解析条件

- ①解析手法は2次元線形有限要素法とした。
- ②数値解析法はNewmarkβ法 (β=1/4) による直接積分法とした。
- ③解析時間0.005sec, 応答解析時間30sec, 計6000ステップとした。
- ④境界条件として、側方境界は鉛直方向を固定、水平方向を自由とし、底面境界(工学的基盤面)は固定とした。

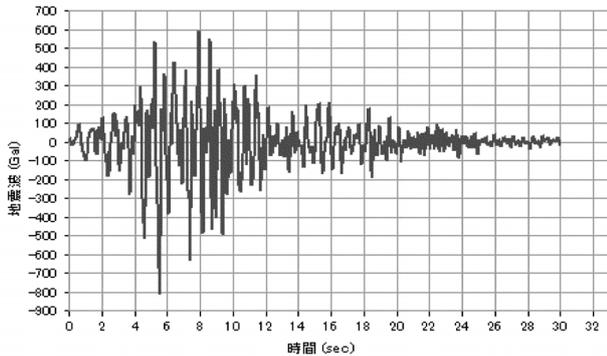


図-10 加速度波形

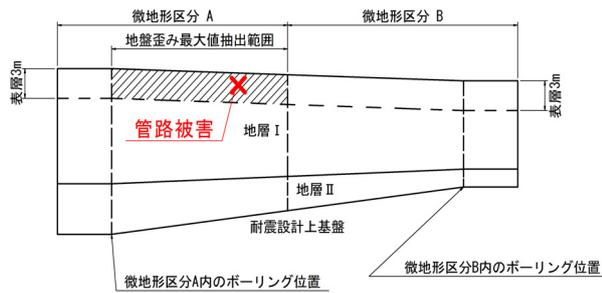


図-11 動的解析地盤歪み抽出範囲

- ⑤入力地震動は道路橋示方書耐震設計編<sup>10)</sup>に示されるType211(図-10参照)とした。
- ⑥メッシュ幅は水平方向2mまたは3m, 鉛直方向を1mまたは2mを標準とした。
- ⑦解析プログラムは, 汎用ソフトであるSoilPlus<sup>11)</sup>を用いた。

(3) 解析結果

CASE1-1からCASE4-3の12とおりの地盤, 境界条件に対して動的解析を行い, 管路被害に影響を及ぼす軸方向の地盤歪みを解析した。軸方向の地盤歪み分布図のうち, 結果の例としてCASE1-1, CASE2-1, CASE3-1, CASE4-1の歪み分布を図-12から図-15に示す。この結果より, ボーリング位置付近で歪みが大きくなっているのは, 2点のボーリング間は傾斜地盤であるが, ボーリング位置からは両端は, 地形を水平にモデル化しており, ボーリング位置で地形に変化があるためである。

応答変位法で算定した地盤歪みは, 例えば図-11に示される微地形区分A内のボーリングデータで地盤歪みを算定した場合は, 微地形区分A内における地盤歪みの代表値を示していることとなる。応答変位法で求めた地盤歪みと動的解析の結果を比較するため, 動的解析による地盤歪みは, 微地形区分A内における地盤歪みの最大値を抽出した。また, 一般的に水道管路の埋設深さは3m以浅程度であることから, 地表から3m以内の最大値とした。

表-5に示すように, 動的解析により, 管路被害があっ

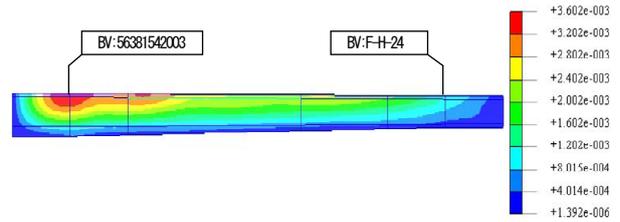


図-12 CASE1-1 軸方向地盤歪み分布

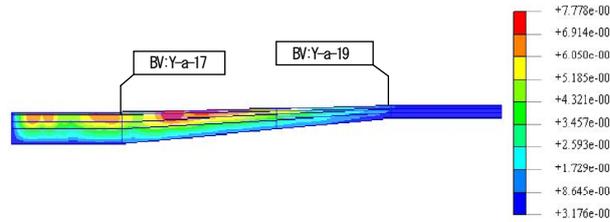


図-13 CASE2-1 軸方向地盤歪み分布

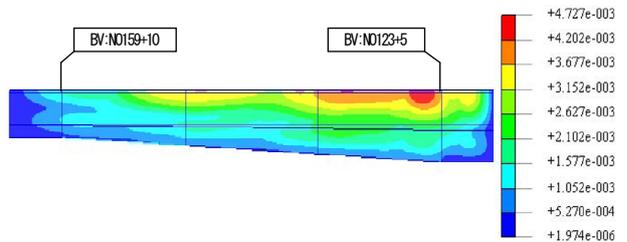


図-14 CASE3-1 軸方向地盤歪み分布

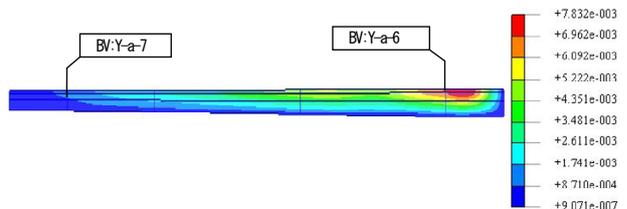


図-15 CASE4-1 軸方向地盤歪み分布

表-5 動的解析による軸方向地盤歪み

case	微地形区分	境界条件	微地形名称	表層3m以浅微地形内の軸方向地盤歪み最大値(%)	軸方向地盤歪み最大値の算術平均値(%)
1-1	悪い地盤	境界	後背湿地	0.360	0.468
1-2			谷底低地	0.776	
1-3			砂丘	0.269	
2-1	良い地盤	境界	砂礫質台地	0.121	0.346
2-2			砂礫質台地	0.343	
2-3			砂礫質台地	0.574	
3-1	悪い地盤	境界	三角州・海岸低地	0.473	0.460
3-2			扇状地	0.595	
3-3			後背湿地	0.311	
4-1	良い地盤	境界以外	砂礫質台地	0.705	0.273
4-2			砂礫質台地	0.075	
4-3			砂礫質台地	0.038	

た微地形区分における表層3m以浅の最大軸方向歪みを抽出した結果, 最大軸方向地盤歪みの平均値が示すように悪い地盤の方が地盤歪みは大きくなり, また, 境界部の方が地盤歪みは大きくなる傾向はあった. しかし, 各CASEによっては異なる傾向もあり, 微地形の種類や境界条件だけでなく, 地形, 地盤の急変の度合いが地盤歪みに影響を及ぼしていると考えられる.

## 6. 静的解析と動的解析の対比

### (1) 地盤歪みの対比

水道施設耐震工法指針では, 静的解析時には応答変位法で求めた地盤歪みに不均一度係数を乗じることで基準地盤歪みとしていることから, 表-6に示すように各CASEごとに静的解析による地盤歪みと動的解析による地盤歪みの比Cを式(2)のとおり設定した. なお, 地盤歪み比Cは, 微地形の種類や境界条件等による違いの傾向を定性的に把握することを目的とし, 水道施設耐震工法指針等に示される設計時に用いられる速度応答スペクトルと地震波による地盤歪みを対比しているため, 不均一度係数としての定量的な評価はできない.

$$C = \frac{\epsilon_G'}{\epsilon_G} \quad (2)$$

ここで, C: 地盤歪み比

- $\epsilon_G'$ : 被害地点近傍のボーリングデータがある微地形区分内の最大地盤歪み (動的解析)
- $\epsilon_G$ : 被害地点近傍のボーリングデータを用いた地盤歪み (静的解析)

各CASEの解析結果を基に, 良い地盤および悪い地盤等の地盤条件と境界条件ごとに地盤歪み比Cを整理した. その結果, 地盤歪み比Cの平均値は, 表-6に示すように悪い地盤に比べ良い地盤の方が大きくなり, 良い地盤の微地形境界部が最も大きくなった. 良い地盤における動的解析による地盤歪みは, 悪い地盤より小さいが, 地盤歪み比Cは, 大きくなる傾向があることがわかった. また, 境界条件による違いについて, 良い地盤では境界部の方が地盤歪み比Cは大きくなったが, 悪い地盤では境界以外の方が大きく, 境界条件による違いは明確ではない. 図-8, 図-9に示すCASE3-1, CASE4-1の断面図でわかるように, 微地形境界以外でも隣接する微地形との基盤までの深さは異なり不均一な地盤であるといえる. したがって, 地盤の固有周期等の動特性の変化を踏まえた検討が必要と考えられる.

### (2) 地盤の固有周期の変化と地盤歪み比 C

動的解析の土質断面図に用いた隣接した微地形区分にある2地点のボーリングデータより, 表層地盤の固有周期を算定した. 算定の方法は, 水道施設耐震工法指針に示される方法とし, N値からせん断波速度Vsを推定し, 固有周期を求めた. また, 地盤の動特性の変化が不均一度係数に影響を与えるものと考えられるため, 固有周期の距離当たりの変化を求め, その結果を表-7に示す. これらより, 固有周期の変化と地盤歪み比Cの関係について, 良い地盤と悪い地盤にわけて整理した結果が図-16である.

この結果, 良い地盤, 悪い地盤とも周辺地盤に対して固有周期の距離当たりの変化が大きくなるほど地盤歪み比Cが大きくなることが明らかとなった. また, 固有周期が同程度変化した場合, 良い地盤の方が, 悪い地盤より地盤歪み比Cが大きくなることがわかった.

表-6 静的解析と動的解析による地盤歪みの対比

CASE	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
	後背湿地	谷底低地	砂丘	砂礫質台地	砂礫質台地	砂礫質台地	三角州・海岸低地	扇状地	後背湿地	砂礫質台地	砂礫質台地	砂礫質台地
微地形分類	悪い地盤 境界部			良い地盤 境界部			悪い地盤 境界以外		良い地盤 境界以外			
表層地盤の固有周期 (s)	1.056	1.032	1.688	0.268	0.304	0.340	1.944	1.500	1.044	0.836	0.176	0.092
地盤の固有周期に対応する地盤種別	III	III	III	II	II	II	III	III	III	III	I	I
基盤地震動の速度応答スペクトル (cm/s)	100	100	100	28	32	45	100	100	100	100	18	8
管軸位置の地盤の水平振幅 (レベル2) (mm)	213.6	208.7	341.8	14.7	19.3	30.4	393.7	303.7	211.1	168.6	5.9	1.1
波長 (m)	210.5	200.3	332.7	52.6	60.8	65.9	385.1	310.2	200.6	141.1	33.8	18.1
①基準地盤歪み $\epsilon_G$ (レベル2) (%)	0.319	0.327	0.536	0.088	0.099	0.157	0.321	0.308	0.331	0.375	0.055	0.019
動的 ②表層3.0m以浅 同微地形内最大ひずみ $\epsilon_G'$ (%)	0.360	0.776	0.269	0.121	0.343	0.574	0.473	0.595	0.311	0.705	0.075	0.038
地盤歪み比 (②動的 $\epsilon_G'$ / ①静的 $\epsilon_G$ ) C	1.13	2.37	0.50	1.38	3.46	3.66	1.47	1.93	0.94	1.88	1.36	2.00
地盤歪み比C範囲	0.50~1.13			1.00~3.66			0.94~1.93		1.36~2.00			
地盤歪み比C平均値	1.33			2.83			1.45		1.75			

表-7 固有周期の変化と静的解析, 動的解析による地盤歪み比

CASE	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	
微地形分類	後背湿地	谷底低地	砂丘	砂礫質台地	砂礫質台地	砂礫質台地	三角洲・海岸低地	扇状地	後背湿地	砂礫質台地	砂礫質台地	砂礫質台地	
	悪い地盤 境界部			良い地盤 境界部			悪い地盤 境界以外		良い地盤 境界以外				
①表層地盤の固有周期 (s)	1.056	1.032	1.688	0.268	0.304	0.340	1.944	1.500	1.044	0.836	0.176	0.092	
地盤歪み比 (動的 $\varepsilon_g$ / 静的 $\varepsilon_g$ ) C	1.13	2.37	0.50	1.38	3.46	3.66	1.47	1.93	0.94	1.88	1.36	2.00	
隣接微地形	ボーリング間距離 (m)	650	610	700	840	670	800	720	500	600	650	500	
	ボーリング名称	F-h-24	D-l-1	E-h-4	56381542001	V-c-12	F-h-59	N0159+10	F-H-26 (F-H-46)	D-h-1	Y-a-7	55387653002	Y-a-31
	微地形分類	自然堤防	砂礫質台地	後背湿地	谷底低地	扇状地	後背湿地	三角洲・海岸低地	扇状地	後背湿地	砂礫質台地	砂礫質台地	砂礫質台地
	②表層地盤の固有周期 (s)	0.780	0.412	1.292	0.112	0.804	1.268	1.296	0.760	0.808	0.628	0.296	0.284
	地盤の固有周期に対応する地盤種別	III	II	III	I	III	III	III	III	III	III	II	II
固有周期差 (①-②) (s)	0.276	0.620	0.396	0.156	0.500	0.928	0.648	0.740	0.236	0.208	0.120	0.192	
固有周期変化率 (1km当たり固有周期差) (s/km)	0.425	1.016	0.566	0.186	0.746	1.160	0.900	1.480	0.393	0.320	0.240	0.384	

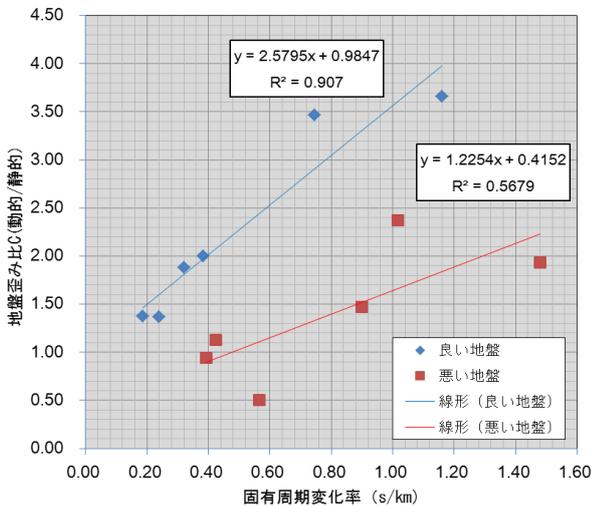


図-16 固有周期の変化と地盤歪み比Cの関係

静的解析時には図-5の水道施設耐震工法指針に示される速度応答スペクトルを用いており, 良い地盤の場合は基準地盤歪みが小さくなり, 動的解析による歪みとの比が大きくなったものと思われる. 通常の設計においても水道施設耐震工法指針による速度応答スペクトルを用いるため, 同様の結果となることが想定される.

水道施設耐震工法指針において, 静的解析により基準地盤歪みを求める際は, 表-1に示すように平坦ではない地形を除き, 洪積地盤における不均一度係数は1.0としている. しかし, 洪積地盤等の良い地盤では固有周期等の地盤の動特性の変化に対して, 地盤歪み比Cが大きくなる. したがって, 水道管路の埋設位置における地盤だけで判断するのではなく, 微地形分類図における微地形境界部および既往のボーリングデータ等から固有周期の変化が大きい位置等では, 「不均一」または「極めて不均一」の係数を採用する必要がある. また, 悪い地盤に

おいても固有周期が大きく変化するほど, 地盤歪み比Cが大きくなっているため, 定性的であるが不均一度係数が大きくなるといえる. 表-7より微地形境界部の場合, 固有周期の変化が大きいとは言いがたいが, 一般に微地形境界部は地形等が変化していることが多いため, 固有周期等の変化も大きくなり, 微地形境界部での管路被害も多くなるものと思われる.

## 7. 結論

(1) 本論文は, 水道管を対象に, 耐震検討を行う上での地盤の不均一度係数について検討することを目的として, 近年の地震である平成16年新潟県中越地震と平成19年新潟県中越沖地震における管路被害位置における情報を基に, 静的解析と動的解析によって微地形区分およびその境界部に着目した検討を行った. この結果, 次の事項が明らかになった.

- 良い地盤, 悪い地盤の微地形境界部および境界以外における地盤歪み比Cの平均値では, 良い地盤の境界部が最も大きくなり, 良い地盤の境界部で不均一度係数が大きくなる傾向があることが明らかとなった.
- 地盤の急変度合いを示す固有周期の変化率と地盤歪み比Cとの関係を検討した結果, 固有周期の変化が大きい場合は地盤歪み比Cが大きくなることが明らかとなった.
- 良い地盤と悪い地盤の地盤歪み比Cを比較した結果, 固有周期が同程度変化した場合, 良い地盤の方が地盤歪み比Cが大きくなることがわかった. したがって, 静的解析で求まる地盤歪みについて, 良い地盤では地盤の不均一に伴い固有周期が変化すると, 地盤歪みが大きく変化するといえる.
- 洪積地盤等の良い地盤では, 固有周期等の地盤の動

特性の変化に対して地盤歪み比 $C$ が大きくなるため、微地形分類図による微地形境界部や固有周期の変化が大きい位置では、不均一または極めて不均一の係数を採用する必要がある。

- e) 悪い地盤においても固有周期が大きく変化するほど、地盤歪み比 $C$ が大きくなり、定性的であるが不均一度係数も大きくなる。

(2) これまで地形分類図および微地形分類図の境界条件に着目して不均一度係数を検討した研究はないが、本研究において、微地形の種類に応じて固有周期の変化と地盤歪み比 $C$ の関係を示すことで、不均一度係数を設定する際のひとつの指標が得られたと考えている。

しかしながら、本研究では静的解析の速度応答スペクトルおよび動的解析における地震波は、設計時に用いられる一般的に公開されているものであり、また、動的解析における地盤断面図も2地点のボーリングデータを基に地層線を直線的に推定しているため、不均一度係数として定量的に評価されていない。そのため、今後は、現地に対応した地盤モデルを構築し、定量的に不均一度係数を明らかにしていく必要があると考えている。

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 23 年（2011 年）東日本大震災水道施設被害等調査報告書，2011.
- 2) 厚生労働省 HP：水道普及率の推移，<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/database/kihon/suui.html>，(2012 年 8 月 25 日閲覧).
- 3) 七郎丸一孝・宮島昌克：水道管の耐震検討における微地形分類を考慮した地盤の不均一度係数の検討，土木学会論文集(構造・地震工学)，Vol.68(2012)No.4，pp. L790-L799，2012.
- 4) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009 年度版，I 総論，2009.
- 5) 西尾宣明：埋設管の地震時被害率予測法に関する一提案，土木学会論文報告集，No.316，pp.1-9，1981.
- 6) 財団法人水道技術センター：K 形継手等を有するダクトイル鉄管の耐震適合性判断支援ハンドブック，pp.5-11，2011.
- 7) 防災科学技術研究所 HP：J-SHIS 表層地盤微地形区分，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2009年7月20日閲覧).
- 8) ほくりく地盤情報システム，<http://www.jiban.usr.wakwak.ne.jp/>(2011年5月20日閲覧).
- 9) 国土交通省北陸地方整備局：設計要領[道路編]，2006.
- 10) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.
- 11) 地盤・浸透・耐震統合解析システムSoilPlus，伊藤忠テクノソリューションズ株式会社，2007.

(2012.11.15 受付, 2013.2.13 修正, 2013.2.23 受理)

## STUDY ON NON-UNIFORMITY COEFFICIENT OF GROUNDS FOR EXAMINING SEISMIC PERFORMANCE OF WATER PIPES IN CONSIDERATION OF THE BOUNDARY CONDITIONS IN MICROTOPOGRAPHY CLASSIFICATIONS

Kazutaka SHICHIROUMARU and Masakatsu MIYAJIMA

High damage ratios of embedded pipes are seen in microtopography boundaries in a microtopography classification map. Moreover, the past studies have revealed that ground with high non-uniformity is vulnerable to earthquakes. Therefore, it has become necessary to examine earthquake-proofing performance of embedded pipes for which non-uniformity (area where ground constitutions and hardness and softness vary) of ground is considered. The non-uniformity coefficient is defined in "the seismic methods 2009 edition guideline description waterworks". For this non-uniformity coefficient, the authors calculated ground strain by static and dynamic analyses based on types and boundary conditions of microtopography using data of water pipes damaged by Niigata Chuetsu Earthquake in 2004 and Niigata Chuetsu Offshore Earthquake in 2007, a microtopography classification map and ground data. Their results were compared and the non-uniformity coefficient for which types and boundary conditions of microtopography were considered was examined.