

水道管の耐震検討において微地形分類を 考慮した地盤の不均一度係数の検討

七郎丸一孝¹・宮島昌克²

¹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@kokudo.co.jp

²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@t.kanazawa-u.ac.jp

過去の地震被害から不均一性が高い地盤において、地中構造物の被害が多いことがわかっており、埋設管の耐震検討には地盤の不均一性（地盤構成や硬軟の変化域）を考慮することが求められている。水道施設耐震工法指針・解説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、近年の地震である新潟県中越地震および中越沖地震による水道管の被害データと地盤データを用いた解析を行い検証を行った。また、微地形分類図における微地形境界部に管路被害が集中していることに着目し、境界部と境界以外との被害率を比較し、被害率が高くなる傾向を確認し、微地形境界部の不均一度係数を検討した。

Key Words : earthquake- resistant, water service pipeline, non-uniformity factor,
microtopography classification map

1. はじめに

上下水道、ガス、電力等のライフライン施設に対する都市機能の依存度が高いことから、地震によるライフラインの機能損失が我々の人間社会の生活に多大な影響を及ぼすこととなる。ライフラインの主要部をなす埋設管は、平面的に広く分布しネットワークを形成しているため、1995年の兵庫県南部地震のような都市直下型の地震が発生するとライフラインも壊滅的な被害が生じ、復旧には多くの時間とコストが必要となる。したがって、埋設管の耐震性を向上することは、生活や事業活動等のあらゆる面で不可欠なことであるといえる。近年、埋設管に関する研究や過去の地震被害等から、地盤の不均一性（地盤構成や硬軟の変化域）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。このことから、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。

表-1 は地中構造物の耐震設計における不均一地盤に対する考え方を比較したものであり、地中構造物

では各基準において不均一地盤の定義、対策が定められており、それぞれ異なっている。ここでは水道管について検討する。

水道施設耐震工法指針・解説2009年度版²⁾（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では、比較的容易な応答変位法等による静的解析に、不均一度係数を考慮した設計が時間およびコスト面からも重要視されているのが現状である。

水道施設における不均一度係数は、水道施設耐震工法指針において設定されている。これは1978年の宮城県沖地震のガス管被害を基に西尾の研究³⁾で設定されたものを用いており、近年の地震に対する適合性を検証する必要がある。また、水道施設耐震工法指針に示される不均一度係数は3段階にのみ分けられており、設計者による係数の選定によっては結果が大きく左右することになる。したがって、より具体的かつ容易に判断する方法を検討する必要がある。

表-1 各基準による地中構造物の不均一地盤に対する取り組み¹⁾

管路種類	基準名	発行者・基準年	不均一地盤に対する取り組み	
			地盤急変部の定義	特性値設定
水道管	水道施設耐震工法指針・解説	(社)日本水道協会・2009	地震動による地盤変位は、動的解析によって用いることを原則としている。水道指針に示される兵庫県南部地震の速度応答スペクトルを用いて、静的解析で地盤の変位、歪みを算定する場合は、地盤の不均一係数を乗じること地盤歪み増幅を考慮する。	不均一度係数を設定
共同溝	共同溝設計指針・同解説	(社)日本道路協会・1986	地盤の固有周期が単調に変化し、かつ200m以内で地盤の固有周期が0.3秒以上となる地盤	地盤条件急変部では割増係数 β によって断面力を割増す。 $\beta = 1.2\sqrt{\Delta T - 0.3 + 1.0}$ ΔT : 地盤の固有周期の差
下水道管	下水道施設の耐震対策指針と解説	(社)日本下水道協会・2006		ガス導管耐震設計指針からの引用。ただし、増加がわずかであり、地震時の抜け出し量が許容値に対して僅差となった場合のみ考慮する
ガス管	ガス導管耐震設計指針	(社)日本ガス協会・1983	基盤の傾斜角が5%以上の地盤	基盤傾斜地盤のひずみ算定式を導入した。ただし、この式は地盤の水平方向の連成効果は無視し、成層地盤を離散化して得たもの

る。中越地震および中越沖地震における管路被害位置について、微地形分類図と被害位置を重ねると、微地形境界部付近に管路被害が集中していることがわかる。そこで、より具体的に不均一度合いを判断するための方法のひとつとして、設計者が容易に入手できる微地形分類図等を用いて、微地形区分の境界部と境界以外の不均一度係数を検討する。

2. 不均一度係数

(1) 水道管路の耐震設計

水道施設耐震工法指針において水道管路の耐震設計計算が記載されている。その中で不均一度係数は管路方向の基準地盤歪みを求める際に用いられる。

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)を地震波が伝播することを想定しているが、実際に一様地盤はほとんど存在せず、多くは地層が変化している不均一な地盤である。このような場合は、動的解析等による高度解析を行い、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、比較的口径も小さく、延長が長いため、全ての不均一地盤において動的解析を行うことは合理的ではない。そのため、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必要がある。具体的には式(1)にあるように、管路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する。

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

ここで、 ε_G : 基準地盤歪み(管軸方向)

η : 地盤の不均一度係数

表-2 不均一度係数

不均一の程度	不均一度係数	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

表-3 地盤分類の例³⁾に η を追記

不均一さの程度	σ_{275} (mm)	概 要	例: ()内は σ_{275} の推定値	不均一度係数 η
非常に均一	≤ 5	堅固な洪積層地盤、岩盤		1.0
均一	5~6	普通の洪積層地盤、均一な沖積層地盤	仙台旧市街地(5.5)、仙台市東方の沖積平野(〜6)	1.0~1.2
やや不均一	6~8	層厚の変化がやや激しい沖積層地盤、沖積扇状地、普通の丘陵宅造地	長町・郡山(〜7)	1.2~1.6
非常に不均一	8~10	河川流域、おぼれ谷などの非常に不均一な沖積層、大規模な切土、盛土の造成地	塩釜港南地区(8~9)、南光台(〜10)	1.6~2.0
極度に不均一	10 $\leq$	地盤の流動化が予想される場所、広い範囲にわたるがけ崩れ等が予想される場所	1964年当時の新潟市低地、1923年当時の横浜市街地	2.0~

U_K : 管軸上の地盤の水平変位振幅(m)

L : 波長(m)

(2) 現在の不均一度係数について

表-2の不均一度係数は水道施設耐震工法指針において設定されており、水道管の耐震設計時に管軸方向の地盤の不均一性を反映させるため、地盤条件に応じて地盤歪みを修正することが目的である。また、地盤の不均一度係数は2009年度版の水道施設耐震

工法指針から初めて設定された値で、西尾の表-3の地盤分類の例³⁾を参考としており、近年の地震による管路被害との適合性を確認する必要がある。また、不均一度係数は3段階に分類され、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。したがって、近年の地震による水道管の被害データと地盤データを用いた解析を行い、現在の不均一度係数に関する検討を行う。

なお、西尾の研究³⁾では、以下のように被害率と標準偏差 σ の関係を設定している。

- ①一定の地質構造、地形からなる地域内では地表の地震応答変位 u 、平均値 $\bar{u}$ 、標準偏差 σ の正規分布にしたがって分布する。

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

- ②ある距離 L だけ離れた地表上の2点は、それぞれ独立に正規分布に従って変位する。
 ③上記②の独立な2点間の変位差 Δu が、その間を結んでいる埋設管の許容値の許容変位量を超えると管が破損する。
 ④2点間の相対変位の確率分布として、隣接する2点間の相対変位 Δu の確率分布は、地点Ⅰの変位を u_1 、地点Ⅱの変位を u_2 とすれば、

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

になる関係があり、 u_1 と u_2 が同一母集団 $N(\bar{u}, \sigma)$ に属し互いに独立であるとの仮定により、 Δu は、

$$\bar{\Delta u} = \bar{u}_2 - \bar{u}_1 = 0$$

および

$$\sigma_{\Delta u} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2} = \sqrt{2}\sigma$$

であるような正規分布 $N(0, \sqrt{2}\sigma)$ に属するランダムな変数となり、以下の式で表わされる。

$$P(\Delta u) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta u^2}{4\sigma^2}\right) \quad (3)$$

管の被害率は、式(3)を $|\Delta u| > \delta$ について積分して次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \phi(\delta) &= 2C \int_{\delta}^{\infty} P(\Delta u) d\Delta u \\ &= \frac{C}{\sqrt{\pi}\sigma} \int_{\delta}^{\infty} \exp\left(-\frac{\Delta u^2}{4\sigma^2}\right) d\Delta u \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 C は被害の確率を適当な被害率の単位に換算するための係数で、被害率を(件/km)という単位で表わすためのものであり、 $\Delta u / \sqrt{2}\sigma = t$ と変数を変換すれば、式(4)は次式で示される。

$$\phi(\delta) = \frac{2C}{\sqrt{2\pi}} \int_{\delta/\sqrt{2}\sigma}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

以上より、被害率と許容変位量 δ が与えられれば、正規分布から σ を算定できるとしており、均一地盤と不均一地盤との σ の比を不均一度係数としている。

3. 応答変位法による解析

(1) 解析対象地域

本研究では解析の対象地域を平成16年新潟県中越地震における新潟県小千谷市、長岡市、また同様に平成19年新潟県中越沖地震の新潟県柏崎市、刈羽村とする。

これらの4つの地域は、近年の地震である2つの地震によって、ライフライン等の水道管の被害が多く発生したことから、本解析の対象地域とした。

(2) 地震被害データ

本研究に用いた地震被害データは(財)水道技術研究センターが厚生労働科学研究費「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、整理したものであり、本解析においては、平成16年新潟県中越地震における長岡市、小千谷市および平成19年中越沖地震の柏崎市、刈羽村を対象に、継手形式を考慮したものである。

(3) 応答変位法による地盤ひずみ

a) 検討対象管路および計算条件

- ①対象管路は平成16年新潟県中越地震および平成19年中越沖地震によって被害があった管路のうちダクタイル鋳鉄管A形継手(以下、DCIP-A形)とする。

- ②地盤条件は、ほくりく地盤情報システム⁴⁾に登録されたボーリングデータを使用する。

- ③耐震計算手法は、水道施設耐震工法指針の地盤ひずみの算定方法と同様である。

b) 地盤ひずみ算定結果

図-1に被害のあった位置においてボーリングデータから求めた表層地盤の固有周期と表層地盤の変位量から式(1)を用いて地盤ひずみを算定した結果を示す。

水道施設耐震工法指針に示されている速度応答スペクトルを用いて不均一度係数を $\eta = 1.0$ とし、地盤ひずみを算定した結果、全箇所ですべて許容ひずみ0.4%⁵⁾以下となり、被害が発生しない結果となった。不均一度係数1.4を選択したと仮定すれば、固有周期0.6秒以上の地域では許容ひずみを超える。不均一度係数2.0を選定したと仮定すれば、固有周期

0.5 秒以上では許容ひずみを超え被害が発生するが、それ以下の固有周期では、許容ひずみ以下で被害が発生しないこととなり、現地における被害と差が生じている。

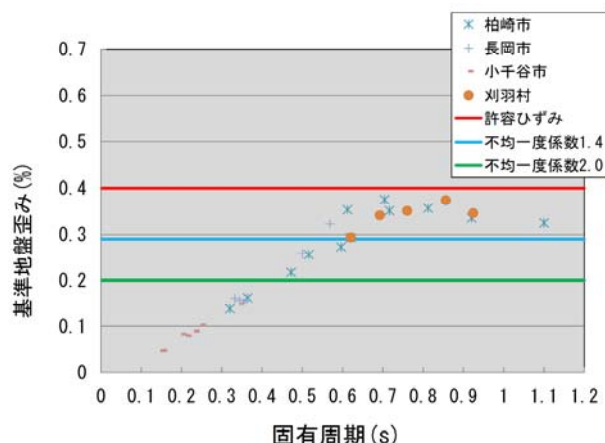


図-1 被害位置における固有周期と歪みの関係

4. 微地形区分を考慮した検討

(1) 微地形区分による検討

地震による水道管路等の継手被害は、地盤の不均一性等、地盤条件との関係が深いため、設計者が容易に入手できる微地形分類図に用いて微地形区分ごとの不均一性を検討した。平成 18 年「管路の耐震化に関する検討会報告書」⁶⁾においても、微地形分類図を耐震性の判断材料にしており、GIS 等でも利用可能で活用範囲は広い。

微地形分類図については、全防災科学技術研究所 J-SHIS 表層地盤⁷⁾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る。

(2) 近年の地震と不均一度係数

a) 検討対象管路および計算条件

- ①対象管路は平成 19 年中越沖地震によって被害があった柏崎市の管路のうち DCIP-A 形とする。
- ②地盤のばらつき指標である標準偏差 σ を式(5)により算定する。
- ④管径は、傾向を把握するためのものであることから、本地区の代表値として $\phi 150\text{mm}$ を選定した。DCIP-A 形 $\phi 150\text{mm}$ の許容変位量は $\delta = 25\text{mm}$ である。

b) 標準偏差 σ の算定結果

柏崎市の微地形ごとの被害率から σ を算定した結果、図-2 で示すように表-2 による“均一”から不均一“地盤と想定される砂礫質台地に対して”不均一から極めて不均一“地盤と想定される扇状地の方が σ が小さく、不均一度係数も小さくなることが判断さ

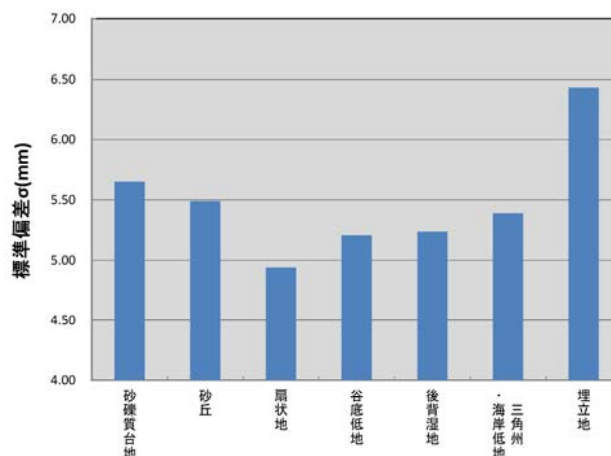


図-2 微地形区分ごとの σ

れる。これらは、斜面崩壊や旧地形による影響等、他の要因もあると想定されるが、隣接する周辺地盤の微地形や基盤の不整形性等による影響も要因であると考えられる。したがって、微地形等の地盤条件のみでなく、管路位置と隣接する微地形との関係や地盤の固有周期等を踏まえて検討することが望ましいと考えられる。

5. 微地形境界部の被害率とその傾向

(1) 微地形境界部の設定

新潟県中越地震および中越沖地震における管路被害位置について、図-4に示すように微地形分類図と管路被害位置を重ねると微地形境界付近に集中していることがわかる。このため、微地形境界部を図-3に示すように、1つのメッシュに対してその周囲8メッシュのうち、1メッシュでも異なる微地形の場合、そのメッシュを微地形境界部として設定した。

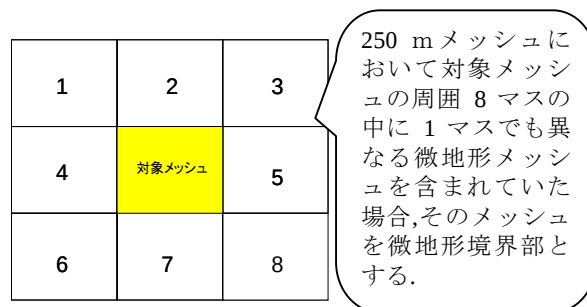
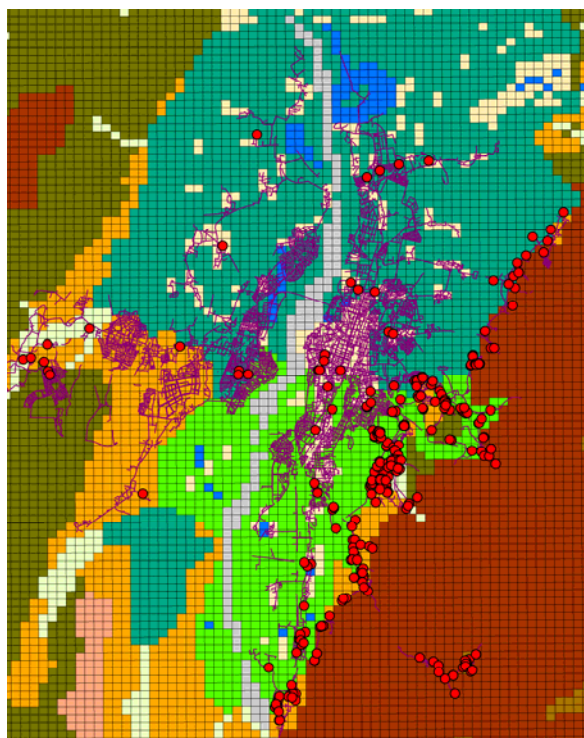


図-3 微地形境界部の定義

(2) 微地形境界部と境界以外の被害率の比較

小千谷市、長岡市、柏崎市および刈谷村における管路被害のうち、DCIP-A形とダクトイル鉄管K形継手（以下、DCIP-K形）について、GISを用いて微地形境界および境界以外に仕分けし、図-5に示すように被害率を算定した。



● 管路被害位置

図-4 長岡市の被害位置と微地形分類図

この結果、小千谷市の被害率は、境界部0.26(件/km)に対して、境界以外は0.30(件/km)とほぼ同等であるが、それ以外の地域では境界部の被害率が高く、境界部での被害率が高くなる傾向があることが明らかとなった。

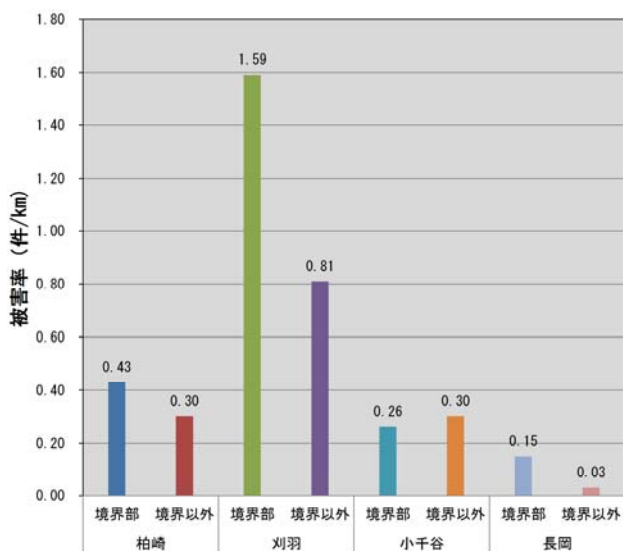


図-5 地域別微地形境界と境界以外の被害率比較

(3) 微地形ごとの境界部と境界以外の被害率

前述の地域別の他、微地形ごとに特徴がないか確認した。被害率の比較に対して、管路延長が短いと被害率の信頼性に欠けることとなるため、対象とした地域は、表-4に示すように中越地震、中越沖地震

表-4 地域別管路延長

対象地震	地域名	管路延長(km)			
		DCIP-A		DCIP-K	
		境界部	境界以外	境界部	境界以外
中越地震	小千谷	150.699	57.330	7.473	2.878
	長岡	153.225	80.686	232.725	111.911
中越沖地震	柏崎	107.571	26.820	187.743	37.490
	刈羽	3.705	0.877	26.544	10.196

表-5 長岡市における微地形分類ごとの境界部と境界以外の被害率

微地形名称	被害率 (件/km)					
	DCIP-A形		DCIP-K形		総計	
	境界	境界以外	境界	境界以外	境界	境界以外
河原	0.000	—	—	—	0.000	—
丘陵	0.110	0.000	0.657	0.000	0.384	0.000
旧河道	0.000	—	0.000	—	0.000	—
後背湿地	0.022	0.000	0.012	0.000	0.016	0.000
砂礫質台地	0.081	0.000	0.073	0.000	0.077	0.000
山地	0.556	0.000	0.804	0.762	0.770	0.715
山麓地	—	—	2.161	—	2.161	—
自然堤防	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
扇状地	0.113	0.000	0.086	0.059	0.096	0.034
谷底低地	0.000	0.000	0.000	—	0.000	0.000

表-6 柏崎市における微地形分類ごとの境界部と境界以外の被害率

微地形名称	被害率 (件/km)					
	DCIP-A形		DCIP-K形		総計	
	境界	境界以外	境界	境界以外	境界	境界以外
丘陵	0.000	0.000	0.223	0.188	0.178	0.175
旧河道	0.000	—	1.579	—	1.013	—
後背湿地	0.521	0.000	0.459	0.157	0.483	0.089
砂丘	0.472	1.004	1.005	1.066	0.631	1.027
砂洲・砂礫洲	0.000	—	0.000	—	0.000	—
砂礫質台地	0.883	0.000	0.377	0.000	0.575	0.000
三角洲・海岸低地	0.561	0.371	0.622	0.000	0.596	0.193
山地	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
山麓地	—	—	0.000	—	0.000	—
自然堤防	0.000	—	0.499	—	0.360	—
扇状地	0.147	0.302	0.312	0.212	0.269	0.236
谷底低地	0.463	0.000	0.345	0.000	0.379	0.000
埋立地	2.288	—	0.000	—	1.499	—

において DCIP-A 形および DCIP-K 形の管路延長が長い長岡市と柏崎市とした。

長岡市および柏崎市の境界および境界以外の被害率を DCIP-A 形および DCIP-K 形に分けて、微地形ごとに算定した。その結果、長岡市では表-5 に示すように DCIP-A 形、DCIP-K 形ともに微地形に関係なく境界部での被害率が高いことがわかる。一方、柏崎市でも表-6 に示すように「砂丘」と「扇状地」

を除き、微地形境界部での被害率が高くなり、境界部で被害率が高くなる傾向があることが明らかである。「砂丘」等では境界部の方が被害率が低くなったが、柏崎市では平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震水道施設被害等調査報告書(平成 20 年 3 月)⁸⁾より、砂丘、谷底平野等で液状化に伴う被害が発生しているとの報告があり、微地形境界以外の「砂丘」等で被害率が高くなった要因であると考えられる。

(4) 微地形境界と境界以外の不均一度係数

a) 微地形の区分

地域別および微地形分類ごとに被害率を比較しても微地形境界部が高くなる傾向があることから、微地形境界部と境界以外の不均一度係数を検討した。

不均一度係数の検討にあたっては、丘陵、砂礫質台地および山地等の比較的良好な地盤では、被害率が小さくなり、また、柏崎市では管路延長が1.0km未満と短い微地形もある。したがって、良好な地盤「区分①」と悪い地盤「区分②」にわけて、検討することで、地盤の良い悪いによる違いを明確にし、管路延長による被害率の影響を小さくするものとした。

区分方法は、表-7に示すように「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」⁹⁾に示される耐震適合性の有無と同様に、耐震適合性がある微地形を良好な地盤「区分①」、耐震適合性がない微地形を悪い地盤「区分②」とした。

b) 検討条件

①不均一度係数の算定にあたっては、西尾の方法³⁾と同様に地域および継手別に標準偏差 σ を算定することとした。ただし、西尾の検討では、継手の抜け出しに対する検討であることから、被害率は継ぎ手の抜け出しのみを対象とした。

②管径は一律 $\phi 150\text{mm}$ 、1本当りの長さは5.0m/本とした。許容変位量は $\phi 150\text{mm}$ の許容値であり、DCIP-A形では $\delta = 23\text{mm}$ 、DCIP-K形では $\delta = 25\text{mm}$ である。

表-7 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」⁹⁾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	区分①
2	山麓地	耐震適合性あり	区分①
3	丘陵	耐震適合性あり	区分①
4	火山地	耐震適合性あり	区分①
5	火山山麓地	耐震適合性あり	区分①
6	火山性丘陵	耐震適合性あり	区分①
7	岩石台地	耐震適合性あり	区分①
8	砂礫質台地	耐震適合性あり	区分①
9	ローム台地	耐震適合性あり	区分①
10	谷底低地	耐震適合性なし	区分②
11	扇状地	耐震適合性なし	区分②
12	自然堤防	耐震適合性なし	区分②
13	後背湿地	耐震適合性なし	区分②
14	旧河道	耐震適合性なし	区分②
15	三角洲・海岸低地	耐震適合性なし	区分②
16	砂州・砂礫州	耐震適合性なし	区分②
17	砂丘	耐震適合性なし	区分②
18	砂州・砂丘間低地	耐震適合性なし	区分②
19	干拓地	耐震適合性なし	区分②
20	埋立地	耐震適合性なし	区分②
21	礫・岩礫	耐震適合性なし	区分②
22	河原	耐震適合性なし	区分②
23	河道	耐震適合性なし	区分②
24	湖沼	耐震適合性なし	区分②

c) 検討結果

微地形境界部と境界以外の比（境界部/境界以外）を検討した結果、表-8に示すように良好な地盤の「区分①」では、柏崎市、長岡市の地域別平均値が1.1～1.25の範囲で、個別の範囲は1.1～1.4であった。悪い地盤「区分②」では、地域別平均値が1.0～1.1の範囲で個別の範囲も1.0～1.1であった。これより、微地形境界部と境界以外の不均一度合いの傾向を把握することができ、良好な地盤「区分①」の方が悪い地盤「区分②」より境界と境界以外の比が大きく、地盤の不均一性による影響度合いが大きいことを示している。

表-8 微地形境界と境界以外の比（地盤ごと）

微地形区分	地域名	継手	被害率（件/km）		標準偏差 σ		境界/境界以外 (①/②)	境界/境界以外	
			境界	境界以外	①境界	②境界以外		地域別 平均値	範囲
良い地盤 「区分①」	柏崎	A形	0.060	0.010	5.480	4.010	1.367	1.221	1.1～1.4
		K形	0.225	0.092	5.430	5.050	1.075		
	長岡	A形	0.112	0.010	4.710	4.010	1.175	1.155	
		K形	0.407	0.094	5.730	5.050	1.135		
悪い地盤 「区分②」	柏崎	A形	0.387	0.387	5.250	5.250	1.000	1.011	1.0～1.1
		K形	0.380	0.301	5.690	5.570	1.022		
	長岡	A形	0.034	0.010	4.330	4.010	1.080	1.060	
		K形	0.027	0.014	4.630	4.450	1.040		

表-9 『良い地盤「区分①」境界以外』に対する不均一度係数

地域名	継手	標準偏差 σ				不均一度係数 η			
		悪い地盤「区分②」		良い地盤「区分①」		悪い地盤「区分②」		良い地盤「区分①」	
		A : 境界	B : 境界以外	C : 境界	D : 境界以外	A : 境界 (A/D)	B : 境界以外 (B/D)	C : 境界 (C/D)	D : 境界以外 (D/D)
柏崎	A形	5.250	5.250	5.480	4.010	1.309	1.309	1.367	1.000
	K形	5.690	5.570	5.430	5.050	1.127	1.103	1.075	1.000
長岡	A形	4.330	4.010	4.710	4.010	1.080	1.000	1.175	1.000
	K形	4.630	4.450	5.730	5.050	0.917	0.881	1.135	1.000
平均値		—	—	—	—	1.110	1.070	1.190	1.000
範囲		—	—	—	—	0.90～1.35	0.85～1.35	1.05～1.40	1.000

また、柏崎市および長岡市において表-8のDCIP-A形およびDCIP-K形ごとの σ から、最も地盤が良い『良い地盤「区分①」境界以外』に対する不均一度係数 η を式(6)を用いて算定した。

$$\eta = \frac{\text{標準偏差 } \sigma}{\text{良い地盤「区分①」境界以外 } \sigma} \quad (6)$$

各地域の継手別に不均一度係数を算定し、平均した結果、表-9に示すように『良い地盤「区分①」境界』における不均一度係数が $\eta=1.05\sim1.40$ の範囲で、平均値が1.19と最も大きくなった。良い地盤の微地形境界部の方が周辺微地形との固有周期等の変化が大きいため、不均一度合いが大きくなっているものと考えられる。また、長岡市では、DCIP-K形における『良い地盤「区分①」境界以外』の「山地」の被害率が0.76(件/km)であり、他の悪い地盤「区分②」の微地形の被害率(0.20(件/km)未満)より高いため、不均一度係数が1.0未満になっている。したがって、不均一度係数の数値の大小については、今後も多くのデータの収集、解析が必要である。しかし、微地形の種類と境界か境界以外かを確認すれば、境界部での不均一度合いを判断することが可能で、設計時にも注視することができる。

なお、本検討では、標準偏差を正規分布を用いて被害率から逆算しているため、管路被害がない0.00(件/km)については、管路被害率の最も小さくなった長岡市のDCIP-K形における境界以外の被害率0.014(件/km)より小さい0.01(件/km)として検討した。

6. 結論

(1) 本論文は、埋設管のひとつである水道管を対象に耐震検討を行ううえ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、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被害事例から、微地形区分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。

a) 現行の水道施設耐震工法指針における不均一度係数では、不均一度係数の選択によっては、計算結果が許容ひずみ以下となり、現地における被害と

の適合性に差異があることもある。また、微地形分類ごとに不均一度係数を検討した結果、微地形分類だけでは不均一度係数の設定が困難であることがわかった。

b) 微地形分類図を用いて、1つのメッシュに対して周囲8メッシュに異なる微地形がある場合を微地形境界部とした場合、境界部と境界以外の被害率を比較した結果、微地形境界部の被害率が高くなる傾向があることがわかった。そのため、微地形の境界部であるか、境界以外であるを把握することで、地盤の不均一性を判断するひとつの指標となることがわかった。

c) 微地形境界部と境界以外の比を算定した結果、良い地盤「区分①」では1.1～1.4程度で、悪い地盤「区分②」では1.0～1.1程度であった。いずれも、良い地盤の比の方が大きくなることがわかった。また、『良い地盤「区分①」境界以外』に対する不均一度係数について、長岡市および柏崎市で算定し、平均した結果、『良い地盤「区分①」境界』の不均一度係数が最も大きくなり、良い地盤の境界部が不均一度合いが最も大きいことがわかる。以上より、GIS等のデータ上で微地形の種類と境界か境界以外かを判断することで、境界部に対しての不均一度合いを判断することが可能である。しかし、不均一度係数としての数値を議論するためには、他地区等のより多くのデータを踏まえた検証が必要であると考えられる。

(2) これまで、埋設管の不均一度係数について微地計分類図および微地形の境界部と境界以外に着目した研究はなく、ひとつの指標が得られたと考えている。

今後は、他地区の被害事例を用いた検証と微地形境界部では地盤の固有周期等の変化も大きくなる傾向もあるため、固有周期等に着目した検討を行い、より具体的に不均一度係数に対する指標を明らかにしていく予定である。

参考文献

1) 鈴木猛康：ローカルサイトエフェクトを考慮した設計

- の現状と今後の方向性，第26回地震工学研究発表会論文集，パネルディスカッション，pp.71-74, 2001.
- 2) 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，p.75，2009.
 - 3) 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第316号，pp.1-9，1981.
 - 4) ほくりく地盤情報システム，
<http://www.jiban.usr.wakwak.ne.jp/>(平成22年12月現在).
 - 5) 社団法人日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，pp.170-174，1996.
 - 6) 厚生労働省：平成18年管路の耐震化に関する検討会報告書，2007.
 - 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月現在).
 - 8) 厚生労働省：平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震水道施設被害等調査報告書，p.37，2007.
 - 9) 財団法人水道技術センター：K 形継手等を有するダクタイル鋳鉄管の耐震適合性地盤判定支援ハンドブック，p.5-11，2011.

STUDY Of NON-UNIFORMITY FACTOR CONSIDERING GEOMORPHOLOGIC FOR SEISMIC DESIGN OF WATER PIPES

Kazutaka SHICHIROUMARU and Masakatsu MIYAJIMA

Earthquake damage of underground structures, which occurs in a non-uniform ground. Seismic study of buried pipe, it is necessary to consider the heterogeneity of the ground. Non-uniformity coefficient has been set to guidelines described in the 2009 edition has been issued from the waterworks of Japan Water Works Association, was verified by the recent earthquake. Since the pipe damage is concentrated at the boundary of microtopography classification map were calculated non-uniformity factor other than the border and border