

液状化に伴う地盤の永久変形を受ける地中埋設管の挙動に関する研究

Study on Behavior of Buried Pipelines due to Lateral Spreading induced by Soil Liquefaction

\* \* \*

北浦 勝 官島昌克 野村吉範

By Masaru KITaura , Masakatsu MIYAJIMA and Yoshinori NOMURA

The present paper deals with the behavior of pipelines due to lateral spreading induced by soil liquefaction. Past severe earthquakes indicate that the lateral spreading is one of the most serious liquefaction hazards affecting the stability and operation of pipelines. The present paper firstly describes the characteristics of the liquefaction-induced lateral spreading based on the observation data of the 1983 Nipponkai-Chubu Earthquake. Secondly, a response analysis of the buried pipelines is carried out and the pipe behavior subjected to the lateral spreading is discussed. The results indicate that the maximum joint displacements of the pipelines due to lateral spreading are much greater than the allowable value for soft or liquefied surrounding soil.

1. はじめに

最近、液状化に伴う地盤の永久変形による震害が注目されつつある。地震の際の液状化によって地盤の永久変形が発生した地震としては、国外では1964年のアラスカ地震<sup>1)</sup>や1971年のサンフェルナンド地震<sup>2)</sup>があり、いずれもその発生規模は非常に大きなものであった。我国においても、1964年の新潟地震の際には新潟市内で液状化がいたるところで発生し、その結果信濃川の沿岸が河心方向にすべり、護岸や橋梁などに大きな被害が生じた<sup>3)</sup>。また、1983年の日本海中部地震の際にも能代市内において地盤の永久変形が広範囲にわたり発生し、家屋などの地上の構造物ばかりでなく上水道管、ガス管などの地中埋設管にも大きな被害が発生した<sup>4)</sup>。能代市において、永久変形は傾斜が1%前後の非常に緩やかな斜面においても発生しており、またその地域は液状化の発生した地域とよい対応が見られることから、これらの永久変形も液状化に伴って発生したものと思われる。このような地域における埋設管の被害が他の地域よりも大きなものであったことから、液状化に伴う地盤の永久変形も地中埋設管に被害をもたらす重要な一要因として位置づける必要がある。しかしながら、液状化に伴う地盤の永久変形による埋設管の挙動解析はほとんど行われていないのが現状である。そこで本研究では、液状化に伴って生ずる地盤の永久変形による埋設管の挙動を明らかにすることを

---

\* 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (☎ 920 金沢市小立野2丁目40-20)  
 \*\* 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (☎ 920 金沢市小立野2丁目40-20)  
 \*\*\* 金沢大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (☎ 920 金沢市小立野2丁目40-20)

目的としている。

本研究では、データが比較的良好にそろっている日本海中部地震の際の能代市内の一定地域を調査対象地域とし、久保・浜田らによる地盤の永久変形の分布図<sup>5)</sup>、陶野らによる液状化区域図<sup>6)</sup>、埋設管の被害状況がプロットされた能代市上水道配管図<sup>7)</sup>、地形図、ボーリング柱状図などを比較検討することにより、まず管路に被害をもたらす地盤の永久変形の諸特性を明らかにする。つぎに、ここで明らかとなった液状化、地形、地質と管路破壊との関係を数値解析に取り込むことにより、管路の挙動解析を実施し、液状化に伴って生ずる地盤の永久変形による埋設管の挙動を明らかにする。

## 2. 液状化に伴う地盤の永久変形の諸特性

### (1) 液状化の範囲と永久変形の範囲

1983年日本海中部地震の際の埋設管の被害は、永久変形量が約1m以上のとき多く発生していることが明らかになっている<sup>8)</sup>。したがって、ここでは1m以上の永久変形に注目して調査対象地域を次の4つに分類した。

$\alpha$  ; 液状化のみ発生した地域

$\beta$  ; 液状化および1m以上の永久変形が発生した地域

$\gamma$  ; 1m以上の永久変形のみ発生した地域

$\delta$  ; その他

Table 1 にこれらの地域ごとの被害箇所数、敷設延長距離および被害率を示す。同表は、文献5) 6) 7) のデータに基づいて算出されている。Table 1 より埋設管の被害は $\beta$ 、すなわち液状化および1m以上の永久変形が発生した地域に多く生じていることがわかる。

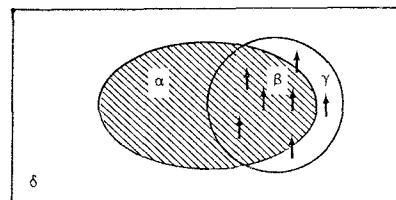
Fig. 1は、上記の4つの地域の概略および調査地域におけるその面積を示している。同図によれば、 $\beta$ と $\gamma$ の面積の比は2:1となっているが、 $\gamma$ の地域のほとんどが $\beta$ の地域の周辺に分布しているので、永久変形が発生する範囲は液状化が発生する範囲とほぼ一致していたといえる。一方、高田らは、能代市における液状化発生範囲を等価な円に置き換えると、直径約10~40mの規模のものが数多くあったと報告している<sup>9)</sup>。しかし、そこで用いられている資料は液状化地域を比較的小さいめにとらえたものであるため、実際にはこれよりも多少大きな規模であったのであろう。本解析においては、永久変形が発生する範囲では液状化が発生しており、その範囲は液状化発生範囲と等しいと仮

Table 1 Earthquake damage to pipeline.

Pipe type		Number of total damage	Pipe length (m)	Number of pipe damage per 100 m
ACP	$\alpha$	65	5400	1.20
	$\beta$	73	3700	1.97
	$\gamma$	5	900	0.56
	$\delta$	4	13700	0.03
	Total	147	23700	0.62
VP	$\alpha$	29	2150	1.35
	$\beta$	67	1950	3.43
	$\gamma$	13	450	2.88
	$\delta$	24	3550	0.68
	Total	133	8100	1.64
CIP	$\alpha$	23	1300	1.77
	$\beta$	—	550	0.0
	$\gamma$	—	150	0.0
	$\delta$	2	3750	0.05
	Total	25	5750	0.43

$\alpha$  ; Liquefied area  
 $\beta$  ; Liquefied area with ground displacement (more than 1 m)  
 $\gamma$  ; Area with ground displacement (more than 1 m)  
 $\delta$  ; Others

ACP ; Asbestos cement pipe  
 VP ; Vinyl pipe  
 CIP ; Cast iron pipe



$\alpha$  ; Liquefied area 0.931 km<sup>2</sup>  
 $\beta$  ; Liquefied area with ground displacement (more than 1 m) 0.665 km<sup>2</sup>  
 $\gamma$  ; Area with ground displacement (more than 1 m) 0.333 km<sup>2</sup>  
 $\delta$  ; Others 6.240 km<sup>2</sup>

Fig.1 Relationship between liquefaction and lateral spreading.

定し、その大きさを、高田らの報告の値よりも多少大きいめに設定し、約20~80mであるとした。

(2) 液状化の程度、地盤の傾斜と最大変形量の関係

地盤の永久変形が測定されている地点を次の3つに分類し、永久変形量と傾斜の関係を調べた。

- (a) ; 液状化が発生しなかった地域
- (b) ; 液状化が発生した地域
- (c) ; 液状化が発生し、かつ噴砂現象が顕著に見られた地域

地表面の傾斜は、緩傾斜地においては約200m離れた地点の標高差から求め、急傾斜地においては妥当と思われる2地点間の標高差から求めた。また、噴砂現象が顕著に見られたという基準としては、文献6)をもとに、対象としている地点から半径50m以内に噴砂箇所が5つ以上あるということにした。この分類にしたがい、地表面の傾斜と永久変形量との関係をFig.2にプロットした。また、原点を通るような回帰直線を図中に示した。地表面が傾斜していない所では、永久変形がほとんど生じていないので、ここでは回帰直線は原点を通るものとした。

Fig. 2からわかることは、回帰線の傾きは (a), (b), (c) の順に大きくなっており、たとえば地表面の傾斜1%に対する永久変形量を比較するとそれぞれ約0.5m, 2.0m, 4.0mとなる。噴砂現象が顕著に見られた地域を液状化の程度が大きかったと仮定するならば、永久変形の発生量は液状化が生じ、かつその程度が大きいほど大きくなるといえる。そこで本研究においては、Fig. 2に基づき、管路に作用する地盤の永久変形の最大値を地表面の傾斜およびその地域で予想される液状化の程度から決定することとした。一般に液状化に伴う地盤の永久変形量は、その発生する規模と強い相関があると予想されるが、これに対する十分な資料が得られていないことから、本解析においては液状化に伴う地盤の最大永久変形量はその発生規模に影響されず傾斜および液状化程度から求められるものとした。

(3) 液状化の程度と地盤ばね定数との関係

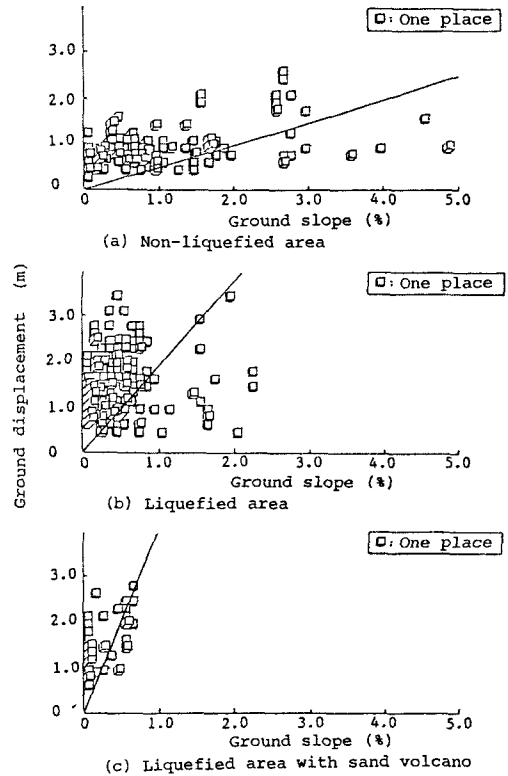


Fig.2 Relationship between ground displacement and ground slope.

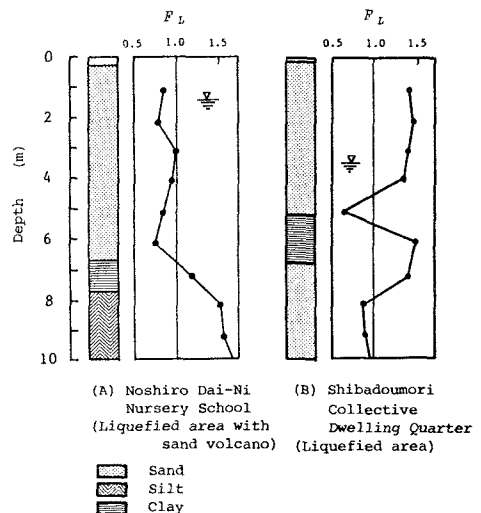


Fig.3 Soil profiles and distributions of  $F_L$  in Noshiro city.

地表面付近の液状化した地層がすべることによる永久変形が管に及ぼす影響を解析する場合、液状化地盤における地盤ばね定数が必要となるが、現在のところまだ明確な結論は出ていない<sup>10)11)</sup>。

Fig.3 に能代市内におけるボーリング柱状図および液状化安全率 $F_L$ の分布図の一例を示す。同図(A)は噴砂を伴う液状化が発生し、かつ1m以上の永久変形が発生した地点、(B)は液状化のみが発生した地点である。同図から液状化が発生するような地点では浅い所で $F_L$ が1.0以下と小さくかつ地下水位が高いことがわかる。しかし、噴砂現象を伴わなかった(B)においては、液状化が発生した地点とされているにもかかわらず、管の埋設位置においては周辺地盤が完全に液状化していなかったとも考えられ、管周辺部の地盤ばね定数は、噴砂現象が見られた(A)ほどに低下していないことも予想される。そこで本解析では、噴砂現象の見られるような地盤は管の周辺地盤が完全に液状化しているものと考え、地盤ばね定数が初期のその1/1000にまで低下するものと仮定した。また、液状化は生じるが噴砂現象の生じない地域は、管周辺地盤は軟化することとすると考え、地盤ばね定数を初期のその1/10あるいは1/2として解析に取り込んだ。

### 3. 地盤永久変形を受ける管路の挙動解析

#### (1) 解析手法および解析モデル

本研究では、永久変形をFig.4に示すような調和波形で近似し、管路を非弾性床土上の梁としてモデル化した。地盤ばね定数をFig.5のように仮定し<sup>12)</sup>、以下のような値を用いた。

管軸方向： $k_1 = 0.6 \text{ kgf/cm}^2 (=5880 \text{ kN/m}^2)$ ，  
 $d_1 = 0.3 \text{ cm}$

管軸直角方向： $k_2^1 = 0.6\pi \text{ kgf/cm}^2 (=5880\pi \text{ kN/m}^2)$ ，  
 $k_2^2 = 0.25 \text{ kgf/cm}^2 (=2450 \text{ kN/m}^2)$ ，  
 $d_2 = 0.65 \text{ cm}$

液状化が発生した地域と永久変形が発生した地域とはよい対応が見られたことから、永久変形の発生する範囲と液状化の発生する範囲は一致するとし、地盤の永久変形が管に作用する区間において地盤ばね定数を低下させることにより、液状化現象を解析上に取り込んだ。

解析の対象として呼び径400mmのダクタイル鋳鉄管を採用し、管体は変形後も弾性範囲内にあるとした。Table

2に、ダクタイル鋳鉄管の諸元を示す。また、継手部にはGM-II継手を用い、継手の引き抜けおよび回転に対する非線形性を考慮した<sup>13)</sup>。調和波形として近似した永久変形モデルの発生範囲 $l$ は20m, 40m, 60m, 80mの4通りとし、その最大値 $\delta$ は、地表面の傾斜および液状化の有無、噴砂現象によるその程度の大きさ

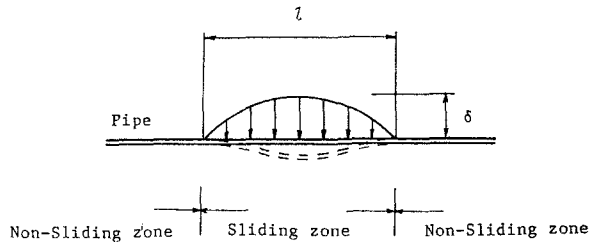


Fig.4 Analytical model (Plane figure).

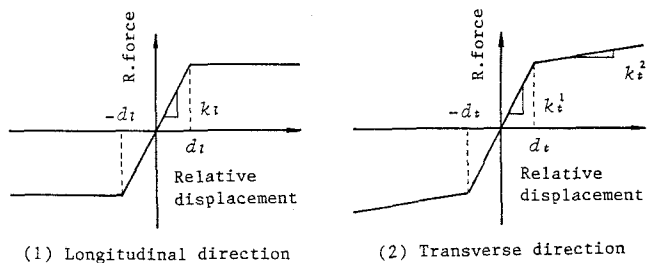


Fig.5 Characteristic curves of soil spring constant.

などから、Fig.2 の回帰直線から与えられるものとした。解析の対象とするモデル地盤の傾斜としては 1%、2%、3%の3通りとした。Table 3 は 2. (2) で分類した液状化の程度ごとの地盤ばね定数の低減係数および対象とする地盤の液状化の程度と傾斜によって与えられる地盤の最大変形量を示す。能代市で見られた地盤の最大変形量は約 5 m であり<sup>5)</sup>、それ以上の最大変形量はあまりあり得ないと予想されるが、参考のためそれらについても解析を行なった (表中△印)。なお本解析には、中村によって提案された数値誤差の改善を考慮した修正伝達マトリックス法<sup>14)</sup>を用いた。

Table 2 Dimensions of pipe.

Outer diameter (mm)	425.6
Inner diameter (mm)	408.6
Young's modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.6 x10
Length (cm)	500

(1 kgf/cm<sup>2</sup>=98kPa)

Table 3 Input data.

	Case number	Decreasing rate for soil spring constant	Ground slope									
			1 %		2 %		3 %					
			Maximum ground displacement (m)									
			0.5	2.0	4.0	1.0	4.0	8.0	1.5	6.0	12.0	
(a) Non-liquefied area	1	1/1	○	-	-	○	-	-	○	-	-	-
(b) Liquefied area	2	1/2	-	○	-	-	○	-	-	-	△	-
	3	1/10	-	○	-	-	○	-	-	-	△	-
(c) Liquefied area with sand volcano	4	1/1000	-	-	○	-	-	△	-	-	△	-

\* Calculations are carried out in the marked zones.

\*\* The maximum displacements with sign (△) are extrapolated from Fig. 2.

(2) 解析結果および考察

Figs. 6, 7, 8 に解析結果を示す。ここでは最大継手引き抜け量に注目した。これらの結果は地盤の永久変形が管軸直角方向に作用する場合であり、各ケースとも、応答の最大値は境界部付近で生じていた。本解析においては、管軸直角方向の曲げに関する基礎方程式を用いて管路の管軸直角方向変形を求め、管体部の管の伸びはないものとして近似的に継手引き抜け量を算出した。また、永久変形が生ずる地盤と生じない地盤との境界部は管路の継手部と一致していたとした。なお、●印は管体部における最大曲げ応力が許容曲げ応力を上まわっている場合であり、この場合、管路は管体部で破壊する可能性がある。図中の破線のグラフ (Ground slope= 3% in Fig.7, Ground slope= 2, 3 % in Fig.8) は最大変形量が5 mを越えている場合であり、能代市において生じなかった大きさの最大変形量を与えた場合の結果である。

Fig. 6は液状化が発生しない地域における継手引き抜け量を永久変形の発生範囲との関係で示している。同図より各永久変形発生範囲において地盤の傾斜が大きいほど、最大継手引き抜け量が大きくなることわかる。また、地盤の傾斜が一定であると、永久変形発

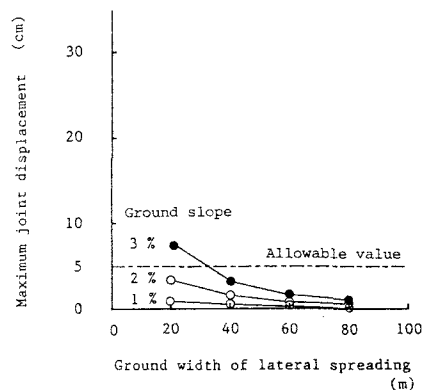


Fig.6 Relationship between joint displacement and ground width of lateral spreading (CASE 1).

生範囲が広いほど、最大継手引き抜け量は小さくなっている。これは、液状化が発生しない地域においては、管路は地盤の変形に追従して変形するので、管路の最大変形量は地盤のそれと等しく、しかも前述した仮定により、地盤の傾斜が等しければ地盤の最大変形量は永久変形の発生範囲によらず等しい。したがって、変形の生ずる管路の長さが大きいほど管路の平均的なひずみが小さいこと、また変形を生ずる管路が長いほどこの間に存在する継手の数が多くなるため、継手1個当たりが受け持つ引き抜け量の負担が小さくなるためである。GM-II継手の許容継手引き抜け量は5cm程度と言われているので、そのように考えると、3%の傾斜の地域において20mの範囲にわたり永久変形が生じた場合に、管路が継手部で引き抜け破壊する可能性がある。また、一般に最大永久変形量が大い場合、管路管体部において曲げ応力による破壊の生ずる危険性がある。

Fig. 7は液状化が発生する地域における応答を示している。前述したように、同図には地盤ばね定数の低減率が1/10の場合と1/2の場合についての結果をそれぞれ示している。低減率が1/2の結果は、Fig. 6よりも応答量が大いもののその傾向は似ている。一方、低減率が1/10の場合には永久変形発生範囲が20mの場合に極端に応答値が小さくなっている。これは、本解析例においては、永久変形の発生範囲が40m以上のときには管路は地盤と等しく変形しているが、20mの場合には管路と地盤の間にすべりが生じ、2m（地表面の傾斜1%に相当）、4m（2%）、6m（3%）の最大永久変形量に対し、管路の最大応答変位量がそれぞれ87cm、127cm、169cmとなっているためである。このように、地盤ばね定数が低下すると地盤の拘束が小さくなり、永久変形発生範囲に対する最大永久変形量の比が大い場合には地盤の変形に管路が追従せず、すべりを生ずるようになる。以上のことより、液状化が発生し地盤が軟化している場合には、地盤ばね定数の違いにより永久変形発生範囲に対する管路の応答の傾向が大きく変わることが明らかとなった。また、液状化が発生しない場合に比べて管路の継手引き抜け量は大きくなっており、継手引き抜け破壊の可能性はより大きいといえる。

Fig. 8は噴砂の生ずるほどの液状化地域における応答を示している。同図ではFigs. 6, 7と異なり、各地盤の傾斜において、永久変形発生範囲が広いほど継手引き抜け量は大きくなっている。管路は地盤の永久変形による荷重を受けるが、Fig. 8の場合には、地盤ばね定数が小さいのでFigs. 6, 7の場合ほどには地盤からの抵抗を受けず、ほぼ荷重に応じたたわみが管に生じている。したがって、永久変形発生範囲が大いほど管路の最大変形量が大きくなり、継手引き抜け量も大きくなっている。また、管体に生ずる最大曲げ応力

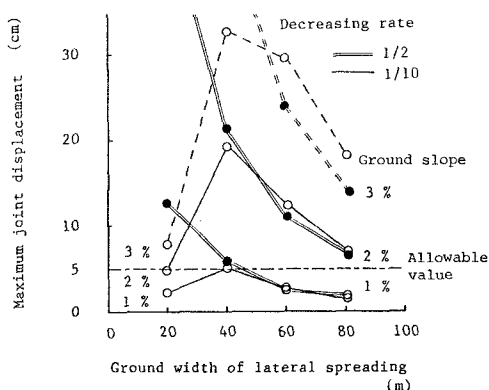


Fig. 7 Relationship between joint displacement and ground width of lateral spreading (CASES 2,3).

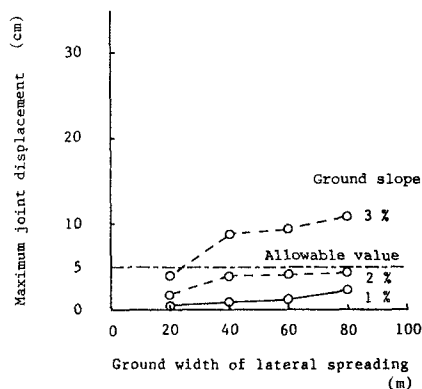


Fig. 8 Relationship between joint displacement and ground width of lateral spreading (CASE 4).

以上のことより、永久変形が生ずると、液状化の発生する地域のほうが発生しない地域に比べ、最大永久変形量が大きくなり、地盤ばね定数が低下するにもかかわらず管路の継手引き抜け量は非常に大きくなる。したがって、破壊に至る危険性が十分に大きいことが明らかとなった。しかし、噴砂現象が顕著にみられるような液状化の程度の大きい場合の管路の応答は、噴砂の生じない場合に比べてむしろ小さな値となっている。この点について日本海中部地震の際の能代市における震害例と比較した。すなわち、液状化および永久変形1 m以上が発生した地域を、噴砂現象の有無により分けて、両地域における管路100 m当りの被害率を比較した。その結果は、噴砂有りの地域で2.23個/100 m、噴砂無しの地域で2.20個/100 mであり、両者に大差はなかった。この点を説明するためには永久変形の発生メカニズムをさらに解明し、液状化の進行に伴う永久変形量の増大の過程を明確にする必要がある。一方、液状化に伴って永久変形が生じた場合、継手引き抜け量が許容値の数倍にも達するという事は、以下のことを示唆していると言えよう。すなわち、液状化に伴う永久変形による管路の破壊を最小限に食い止めるためには、管路の変形吸収能力を増すといった管路への対策ばかりでなく、地盤への対策も同時に考えていかなければいけないということである。なお、ここでは継手引き抜け量に注目したが、継手回転角についても同様の傾向がみられた。ところで、地盤の永久変形発生範囲が大きいほど、実際の現象としては永久変形の最大値が大きくなるものと予想されるが、本研究においては、これについての詳細な資料が得られなかったことから、両者を独立として扱っている。このことを考慮すると、地盤ばね定数の大きい場合（Cases 1,2）には永久変形発生範囲が大きくなるにしたがって継手変位が大きくなることが考えられる。また、地盤ばね定数が小さい場合（Cases 3,4）には、管路にすべりが生ずることが考えられるが、本解析結果から得られた値よりもさらに大きな値をとる可能性がある。したがって、両者の関係についてはさらに検討を要する。

#### 4. 結 論

本研究は、日本海中部地震の際に能代市で広範囲にわたり発生した液状化に伴う地盤の永久変形の諸特性を震害調査資料をもとに検討し、これより得られた成果をもとに、液状化に伴う地盤の永久変形が地中埋設管に及ぼす影響を数値解析を通じて明らかにしようとしたものである。本研究より以下のことが明らかになった。

日本海中部地震の震害調査資料より、

- (1) 1 m以上もの永久変形が発生した地域においては、そのほとんどで液状化が発生しており、このような地域において管路の被害率が大きくなっている。
- (2) 震害資料から得られた回帰直線によれば、地表面の傾斜が一定ならば、そこに生ずる永久変形量は液状化が発生した場合の方が発生しない場合よりも大きくなる。また、液状化発生地域でも、生ずる永久変形量は噴砂現象が顕著に見られる地域の方が見られない地域よりも大きくなる。

数値解析より、

- (3) 液状化の発生する地域では、液状化の発生しない地域に比べて永久変形量が大きくなるために、地盤ばね定数が低下するにもかかわらず管路の継手引き抜け量は非常に大きくなり、破壊にいたる危険性が十分に考えられる。
- (4) 管路の周辺地盤が軟化している場合は、地盤ばね定数の違いにより永久変形発生範囲に対する管路の応答の傾向が大きく変わる。
- (5) 噴砂現象が顕著に見られるような液状化の程度の大きい場合、永久変形が作用する管路の継手引き抜け量は、永久変形の発生する範囲が広いほど大きくなる。

本研究においては、永久変形を調和波形とし、日本海中部地震の震害資料より得られた成果をもとにいく

つかの仮定を設けて数値解析を行っている。今後は、液状化に伴う地盤の永久変形の発生メカニズムや液状化の進行に伴う地盤ばね定数の変化を明らかにすることによって、本解析で用いた仮定の妥当性をさらに検討する必要がある。また、本解析によれば、液状化に伴って永久変形が生じた場合、許容値の数倍にも達する継手引き抜き量となっている。このような永久変形に対処するためには、管路へ対策を講ずるだけではなく、地盤への対策も必要であるということはこのことは示唆しているといえる。地盤への対策については別途検討中であるので、つぎの機会に発表したい。

最後に、本研究における数値計算は、金沢大学情報処理センターのFACOM M-360AP を使用して行ったことを付記する。

#### 参考文献

- 1) Seed, H.B. and Nilson, S.D. : The Turnagain Heights Landslide, Alaska, Proc. of ASCE, No. SM4, pp.325-353, 1976.
- 2) O'Rourke, T.D. and Tawfik, M.S. : Effects of Lateral Spreading on Buried Pipelines during the 1971 San Fernando Earthquake, Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-Vol.77, ASME, pp.124-132, 1983.
- 3) 浜田政則・安田 進：新潟地震における地盤の永久変位量の測定，第18回地震工学研究発表会講演概要 pp.345-348, 1985.
- 4) 浜田政則・恵本克利・磯山龍二・安田 進：地盤の永久変位と地震被害について，第18回地震工学研究発表会講演概要，pp.349-352, 1985.
- 5) 久保慶三郎・浜田政則・磯山龍二：日本海中部地震における地盤の永久変位の測定，第18回地震工学研究発表会講演概要，pp.353-356, 1985.
- 6) Tohno, I. and Shamoto, Y. : Liquefaction Damage to the Ground during the 1983 Nihonkai-chubu (Japan sea) Earthquake in Akita Prefecture, Tohoku, Japan, Natural Disaster Science, Vol. 7, No.2, pp.67-93, 1985.
- 7) 能代市ガス水道局：日本海中部地震水道被害状況について，1983.
- 8) 北浦 勝・宮島 昌克：液状化に伴う地盤の永久変形が地中埋設管に与える影響，構造工学論文集，Vol.32A, pp.857-864, 1985.
- 9) 高田至郎・永井淳一・田邊揮司良：塩化ビニル管の地震被害と耐震解析，建設工学研究所報告，No.27, pp.95-110, 1985.
- 10) 北島 孝・北浦 勝・宮島 昌克：液状化過程における埋設管-地盤系の復元力特性に関する実験，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第I集，pp.381-382, 1985.
- 11) 高田至郎・田邊揮司良・永井淳一・伊藤武廣・山篠和明・入岡博明・片桐 信：マンホール・管路系の液状化挙動実験，昭和61年度関西支部年次学術講演会講演概要，pp. I-97-1~I-97-2, 1986.
- 12) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針，pp.177-182, 1982.
- 13) 大阪ガス株式会社供給管理部技術センター：都市ガス中圧用ダクタイル鑄鉄管継手（GM-II継手）について，ダクタイル鉄管，1980.
- 14) 中村秀治：数値誤差の改善を考慮した伝達マトリックス法の提案，土木学会論文報告集，No.289, pp. 43-53, 1979.

(1986年10月17日受付)