

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

EFFECTS OF LATERAL SPREADING DUE TO SOIL LIQUEFACTION ON BURIED PIPELINES

* **

北浦 勝 官島昌克

By Masaru KITAURA and Masakatsu Miyajima

The large lateral spreading due to soil liquefaction was caused by the 1983 Nipponkai-chubu Earthquake. The present paper firstly describes the relation between the lateral spreading and damage to the water supply pipelines in Noshiro. It is found that the earthquake damage to pipelines is strongly influenced by the lateral spreading. Secondly the pipe behavior subjected to the lateral spreading is investigated analytically. The analytical model for the pipelines used in the present study is a beam which is supported by a Winkler foundation. It is revealed that the soil spring constant of the ground around the pipe is one of the most important factors for the pipe failure. Therefore it is necessary to investigate the soil spring constant of liquefied ground in order to evaluate the pipe failure more accurately.

1. 緒言

地震により地盤が液状化すると、地上構造物のみならず地中埋設管をはじめとする地中構造物にも甚大な被害が生ずることは、過去の多くの震害が示すとおりである。液状化時の地中埋設管の破壊に關与している要因として、つぎのことが考えられる。(1) 不完全液状化時の地盤の動的な挙動、(2) 完全液状化時に地中埋設管に作用する浮力、浸透流による力、(3) 液状化地盤と非液状化地盤の境界部における地盤の相對運動、(4) 液状化に伴って生ずる地盤の永久変形。これらの各々が地中埋設管の挙動に及ぼす影響については様々な形で検討がなされつつある。(1)については、著者らが丸棒ゴムを用いた模型振動実験を実施し、不完全液状化時の地中埋設管の挙動を過剰間隙水圧との關係を把えている。その結果から、不完全液状化状態が長く継続すると、それに対応して大きな動ひずみが長く継続するので、継手が破壊に至る危険性が高くなることを指摘している¹⁾。片田・伯野は、塩ビパイプを模型地盤に埋設し液状化実験を行い、含水比の低い砂層地盤が不完全液状化状態にあるほうが、完全飽和地盤が液状化している時よりもパイプの曲げひずみが大きくなることを明らかにしている²⁾。(2)についてはKennedyらが、液状化時に単位長さの石油パイプラインに作用する浮力と液状化地盤がパイプの動きを妨げようとする力、およびパイプの慣性力から成る力のつりあい式をもとに、直径42インチの石油パイプラインは約0.9 m/sec の速度で液状化地盤中を浮上していくことを指摘している³⁾。また、著者らは完全液状化時に上水道用のダクタイル鋳鉄管に作用

* 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)

する浮力が、呼び径 500mm以上の管では自重の約 1.3倍の大きさであることを明らかにしている⁴⁾。(3)については、大石が地盤の液状化終了後に発生する地盤沈下(不等沈下)に注目し、解析的、実験的に考察している。その結果、地盤沈下対策として沈下防止板を提案し、その有効性を確認している⁵⁾。著者らは、地中埋設管模型を液状化する地盤としない地盤にわたって埋設し加振実験を行うことにより、地中埋設管の動的挙動特性を明らかにしている⁴⁾。このように、(1)～(3)については解析、実験の両面から研究が進められており、その成果が集積されつつある。

一方、(4)についてはアラスカ地震やサンフェルナンド地震による震害⁶⁾⁷⁾は報告されていたものの、我国においてはあまり注目されていなかった。近年、久保・浜田らが新潟地震の際に新潟市で生じた地盤の永久変形量と、日本海中部地震の際の能代市のそれを航空写真を用いて定量的に明らかにし、震害との関連について検討を行ったことにより⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾この要因の重要性が認識されるようになってきたが、この方面の研究はほとんどなさ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が地中埋設管に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、日本海中部地震の際に能代市で生じた地盤の永久変位と地中埋設管の被害との関係を明らかにした。さらに、永久変形による管路の挙動を解析的に検討し、地中埋設管の破壊に関与している要因を明らかにした。なお本研究では、液状化に伴って生ずる永久変形に対する研究が今後なされていくうえでの問題点を、地中埋設管の破壊という立場から予め明らかにしておこうという点に主眼がおかれている。

2. 地盤の永久変形による地中埋設管の震害

まず、久保・浜田らによって明らかにされた日本海中部地震の際に能代市で生じた地盤の永久変位の分布図⁹⁾を、能代市ガス水道局の調査による被害状況がプロットされた能代市上水道配水管平面図と対照した。その一例をFigs. 1, 2に示す。Fig. 1は、県道能代～丹波線の西側の青葉町における地盤の永久変位量と地中埋設管の被害状況を示している。Fig. 2は、永久変位量が最も大きかった能代市の南部に位置している前山周辺の状況である。なお、図中の被害箇所を示しているA, B, C, D, Eの記号は、Fig. 3に示す被災状況¹¹⁾に対応している。これらの図より、次の箇所で被害が多発していることがわかる。①永久変位量の大きい地域、②直線の管路に沿って2つの異なる方向を持つ地盤変位が生ずる地域、③管路に沿う地盤変位

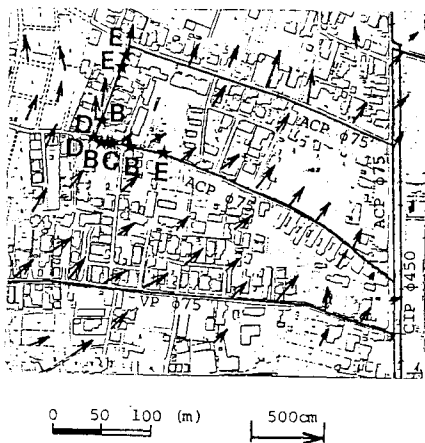


Fig. 1 Lateral spreading and pipe damage (Aoba-cho in Noshiro)

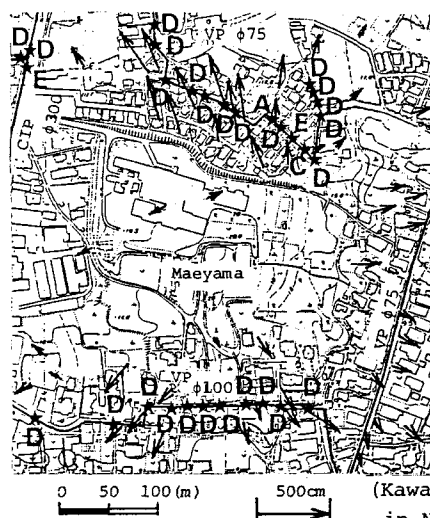


Fig. 2 Lateral spreading and pipe damage (Kawatogawa in Noshiro)

Kind of pipe		Failure mode					Total
		A	B	C	D	E	
ACP	(β)	4	7	37	1	38	87
	(α)	15	12	98	4	94	223
	(β)/(α)	0.27	0.58	0.38	0.25	0.40	0.39
VP	(β)	1	0	1	68	3	73
	(α)	4	6	1	189	10	210
	(β)/(α)	0.25	0	1.00	0.36	0.33	0.35
CIP	(β)	-	-	1	-	3	4
	(α)	-	-	1	-	22	23
	(β)/(α)	-	-	1.00	-	0.14	0.17
DCIP	(β)	-	-	0	-	1	1
	(α)	-	-	1	-	4	5
	(β)/(α)	-	-	0	-	0.25	0.20

(α): Total number of damage

(β): Number of damage due to lateral spreading

Table 1 Pipe damage due to lateral spreading

(in Noshiro)

の方向は等しくともその大きさが異なる地域、④直角に交わるそれぞれの直管路が、異なる方向の地盤変位を受ける場合の交点付近。一方、直線の管路に沿ってほぼ同じ大きさの地盤変位が管軸直角方向に作用している場合はほとんど被害が生じていない。以上より明らかかなことは、当然のことではあるが、地中埋設管の被害は地盤の絶対変位量よりはむしろ地盤の相対変位量と強い相関を持っているということである。

つぎに、管路の被害箇所における地盤の永久変位量を求めた。なお、Figs. 1, 2からも分るよう

に、被害箇所にも必ずしも永久変位の測定点があるとは限らないので、被害箇所付近のいくつかの測定量より推定できるものはそれらを推定した。まず、Table 1 に能代市で上水道管に生じた被害の箇所数と、その中で永久変形が生じていたと考えられる箇所数およびその割合を示した。この表には、永久変位量が測定されていないために永久変形が被害に関与しているにもかかわらず含まれていないものもありうるので、同表に示された割合はさらに大きくなる可能性を持っている。同表によれば、石綿セメント管（ACP）と塩化ビニル管（VP）では全体の被害箇所数の3割以上が、鋳鉄管（CIP）やダクタイル鋳鉄管（DCIP）では約2割が永久変形の生じている地域で破壊していることがわかる。このことから、地中埋設管の破壊を論ずるうえで地盤の永久変形という要因が非常に重要な位置を占めていることが明らかである。

Fig. 4 は、永久変位量と被害箇所数との関係を示している。航空写真測量より得られた永久変位量の精度は、水平方向で $\pm 25\text{cm}$ 、鉛直方向で $\pm 50\text{cm}$ 程度⁹⁾であるので、この図より詳細なことはいえないが、永久変

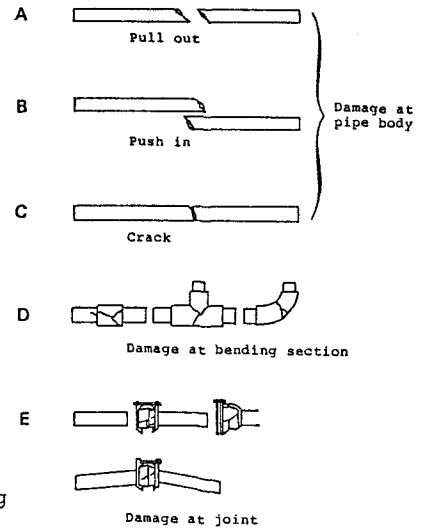


Fig. 3 Failure mode of pipe

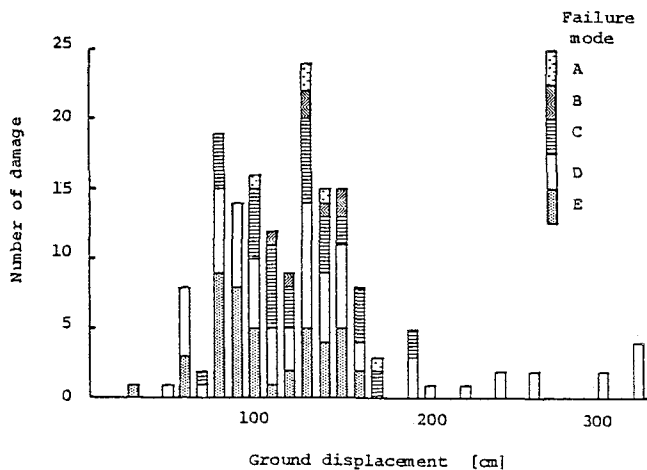


Fig. 4 Relationship between ground displacement and number of pipe damage

位置が約1 mに近づくあたりから急激に被害箇所が増えていることがわかる。

3. 永久変形による管路挙動の解析的検討

(1) 解析モデル

本研究では、管路挙動の特徴を簡便に把握するために、Fig. 5に示すような簡単なモデルを考えた。すなわち、管路を弾性床上の梁とみなし、正弦波で仮定された永久変位が地盤ばねを介して管路に作用するものとした。Fig. 5のつりあい方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 v_1}{dx^4} + k_y v_1 &= 0 & x \leq 0 \\ EI \frac{d^4 v_2}{dx^4} + k_y v_2 &= k_y \delta \sin \frac{\pi x}{l} & 0 < x \leq l \\ EI \frac{d^4 v_3}{dx^4} + k_y v_3 &= 0 & l < x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

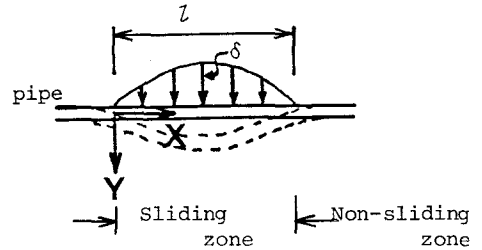


Fig. 5 Analytical model (Plane figure)

ここに、 δ はFig. 5に示すように、永久変形が生じている部分での最大永久変位量、 k_y は管軸直角方向の単位長さ当りの地盤ばね定数、 EI は管路の曲げ剛性、 v_1, v_2, v_3 はそれぞれの範囲における管軸直角方向の曲げ変位、 l は永久変位の生ずる範囲である。

境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} x &= v_1 = 0, v_1' = 0 \\ x = 0 & v_1 = v_2, v_1' = v_2', v_1'' = v_2'', v_1''' = v_2''' \\ x = l & v_2 = v_3, v_2' = v_3', v_2'' = v_3'', v_2''' = v_3''' \\ x &= v_3 = 0, v_3' = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。式(2)の条件のもとで式(1)を解くと、次式のように変位が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} v_1(x) &= \frac{1}{4} e^{\beta_1(x-L)} \left\{ a \cos \beta_1(x-L) + b \sin \beta_1(x-L) \right\} + \frac{1}{4} e^{\beta_1 x} (a \cos \beta_1 x + b \sin \beta_1 x) & x \leq 0 \\ v_2(x) &= \frac{1}{4} e^{\beta_1(x-L)} \left\{ a \cos \beta_1(x-L) + b \sin \beta_1(x-L) \right\} + \frac{1}{4} e^{-\beta_1 x} (a \cos \beta_1 x - b \sin \beta_1 x) + v_0(x) & 0 < x \leq l \\ v_3(x) &= \frac{1}{4} e^{-\beta_1(x-L)} \left\{ a \cos \beta_1(x-L) - b \sin \beta_1(x-L) \right\} + \frac{1}{4} e^{-\beta_1 x} (a \cos \beta_1 x - b \sin \beta_1 x) & l < x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、

$$a = \frac{1}{\beta_1 l} \frac{\delta (\frac{\pi}{l})}{1 + \frac{EI (\frac{\pi}{l})^4}{k_y}} \left\{ 1 + \frac{1}{2\beta_1^2 (\frac{\pi}{l})^2} \right\}, \quad b = \frac{1}{\beta_1 l} \frac{\delta (\frac{\pi}{l})}{1 + \frac{EI (\frac{\pi}{l})^4}{k_y}} \left\{ 1 - \frac{1}{2\beta_1^2 (\frac{\pi}{l})^2} \right\}$$

$$v_0(x) = \frac{\delta}{1 + \frac{EI (\frac{\pi}{l})^4}{k_y}} \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right), \quad \beta_1 = \sqrt[4]{\frac{k_y}{4EI}}$$

である。一方、管軸方向に地盤の永久変形が生ずる場合についても、管軸に沿った地盤の変位を正弦波として仮定すると、このときに管に生ずる管軸方向変位も同様に考えることができ、つりあい方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} -EA \frac{d^2 u_1}{dx^2} + k_x u_1 &= 0 & x \leq 0 \\ -EA \frac{d^2 u_2}{dx^2} + k_x u_2 &= k_x \delta \sin \frac{\pi x}{L} & 0 < x \leq L \\ -EA \frac{d^2 u_3}{dx^2} + k_x u_3 &= 0 & L < x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

それぞれの範囲における管軸方向変位 u_1, u_2, u_3 は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u_1(x) &= \frac{1}{2\beta_2} c \left\{ e^{-\beta_2(x-L)} + e^{\beta_2 x} \right\} \\ u_2(x) &= \frac{1}{2\beta_2} c \left\{ e^{\beta_2(x-L)} + e^{-\beta_2 x} \right\} + u_0(x) \\ u_3(x) &= \frac{1}{2\beta_2} c \left\{ e^{-\beta_2(x-L)} + e^{-\beta_2 x} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$$c = \frac{\delta \left(\frac{\pi}{L}\right)}{1 + \frac{EA}{K} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}, \quad u_0(x) = \frac{\delta}{1 + \frac{EA}{K} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2} \sin \frac{\pi x}{L}, \quad \beta_2 = \sqrt{\frac{k_x}{EA}}$$

ここに、 EA は管路の断面剛性、 k_x は単位長さ当りの管軸方向の地盤ばね定数である。これらの式をもとに、呼び径 400mm の鋼管路について解析を行った。

(2) 解析結果および考察

液状化によって生ずる永久変形は一般に傾斜地に生ずるが、それには Fig. 6 に示すようにつぎの 2 つのケースが考えられる。すなわち、①深いところにある地層が液状化し、それより上の液状化していない層がその境界部ですべることによる変形、②地表面付近の液状化した地層がすべることによる変形、である。これらに共通する特徴は、比較的ゆるやかな傾斜地でも永久変形が生ずること、その変位量が大きいことである。一方、前者の方が後者に比べ地盤が管を拘束する力、すなわち地盤ばね定数が大きいという相違点を有している。そこでまず、前者のケースについて永久変形が管路に及ぼす影響を検討する。Fig. 7 は、永久変形を受ける部分の管路の長ささと管路に生ずる最大曲げ応力との関係を示している。このとき管路の周辺地盤は液状化していないので、その地盤ばね定数として、たとえばガス導管耐震設計指針に示されている、管軸方向が 0.6 kgf/cm^2 (5880 kN/m^2)、管軸直角方向が 1.8 kgf/cm^2 (17640 kN/m^2) という値を用いた。ただし、 k_x はこの値に単位長さ当りの管路の表面積を、 k_y は管軸直角

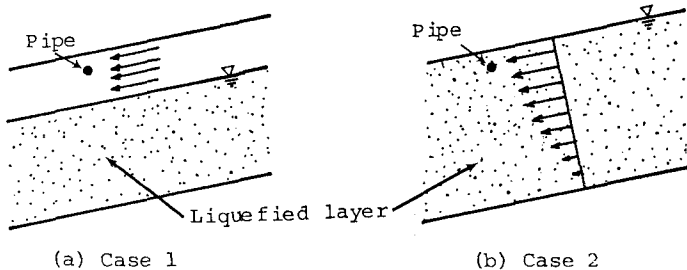


Fig. 6 Types of lateral spreading

方向の単位長さ当りの管路の見付面積をそれぞれ乗ずることにより求められている。同図は、永久変形の最大値が一定であるとき永久変形の生ずる範囲が狭いほど管路に生ずる曲げ応力が大きくなることを示している。配管用アーク溶接炭素鋼鋼管の許容曲げ応力度が 1400 kgf/cm^2 (137200 kN/m^2)であることを考えあわせると、1 m以上の永久変形が50m以下の狭い範囲で生ずる場合には管路が破壊に至る可能性も十分考えられる。Fig. 8は、管軸方向に永久変形が生じた場合の永久変形を受ける部分の管路の長さ l と管路に生ずる軸ひずみの関係を示している。同図においてもFig. 7と同様に、永久変形の生ずる範囲が狭いほど軸ひずみが大きくなっていることがわかる。鋼管の場合、管軸方向の引っ張りに対しては10%以上の伸びが期待できるといわれているが、それでも非液状化地盤が極めて狭い範囲で永久変形を生じた場合には管路が破壊することも予想される。すなわち、管路の周辺地盤が飽和していないにもかかわらず、それより深い地層の液状化により管路が破壊する危険性もあるので、十分な注意が必要である。

つぎに、後者のケースについて検討する。この場合は管路の周辺地盤が液状化しているので、液状化の程度によって地盤ばね定数が異なってくる。液状化過程における地盤ばね定数についてはいくつかの検討がなされているものの¹²⁾いまだ明確にされていないので、ここではこれをパラメタとして解析を行った。Fig. 10は、地盤ばね定数と管路に生ずる最大曲げ応力との関係を示している。このときの永久変形の最大変位量は1 mである。同図によれば、地盤ばね定数が非液状化地盤のそれの $1/1000$ 以下であると、曲げ応力が急激に低下することがわかる。このことは、地盤が完全に液状化していると曲げ応力は小さくなり管路にとっては安全であること、また、不完全液状化の状態（ここでは、地盤ばね定数が非液状化地盤のそれの $1/1000$ 以上のとき）では、地盤ばね定数の多少の変化によって管路の曲げ応力が大きく変化することはないということを示している。しかし、このケースにおいては、地盤ばね定数の低下に伴って地盤の永久変位量が増加することが容易に予想できる。そこで、地盤ばね定数と永久変位量との間につきのような簡単な関係を仮定して解析を行ない、管路の応答の大略を把握しようとした。すなわち、地盤ばね定数の低下と永久変位量の

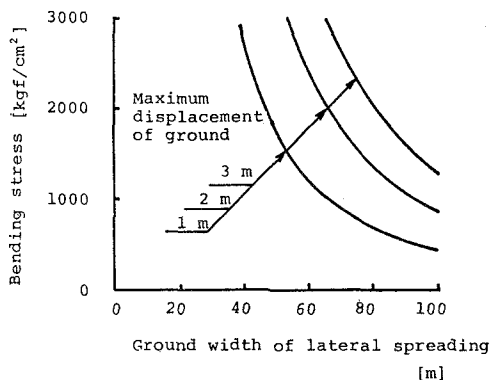


Fig. 7 Relationship between bending stress and ground width of lateral spreading

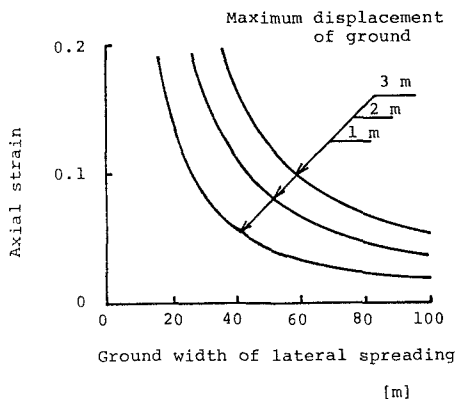


Fig. 8 Relationship between axial strain and ground width of lateral spreading

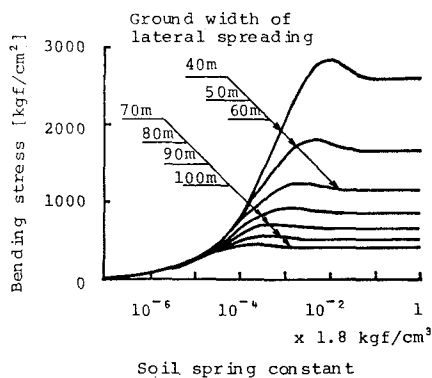


Fig. 9 Relationship between bending stress and soil spring constant

増加の間にFig. 10 に示すような線形関係を仮定した。Fig. 11 は、このような仮定のもとで地盤ばね定数と管路に生ずる最大曲げ応力との関係を求めたものである。なおここでは、Fig. 10 における δ_{max} を1mとしている。前述したように、地盤ばね定数が非液化化地盤のその1 /1000以上であれば、永久変位の最大値が一定のときは地盤ばね定数の変化が曲げ応力に与える影響が小さい。しかしながら、同図におけるそのような範囲においては、地盤ばね定数の増加に伴い永久変位の最大値を低下させているので、地盤ばね定数の増加とともに曲げ応力が低下している。また地盤ばね定数が非液化化地盤ばね定数のその1 /1000以下になるとFig. 9 と同様に曲げ応力は急激に低下しているが、これはFig. 10 に示すような仮定のもとではこの範囲で永久変位の最大値がほとんど増加しないためである。また、曲げ応力の最大値に注目すると、Fig. 11 のそれはFig. 9 に比べ大きく低下することはない。 Fig. 10 が液化化の進行に伴う地盤変位の増大を表していると解釈すると、完全液化化に至るまでの過程において管路はFig.11に示される最大応答値を経験することになるので、管路の周辺地盤が完全液化化に至る場合も管路が安全であるというわけでは決してない。なお、これらのことは管軸方向に永久変形が作用する場合も同様であった。地盤ばね定数の低下に伴い永久変位量がどのように増大するかは周辺の地形によるところも大きく、今後検討を要する課題である。

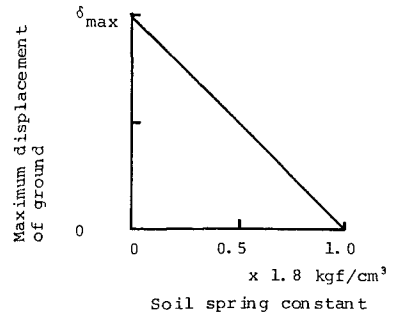


Fig. 10 Relationship between maximum displacement of ground and soil spring constant

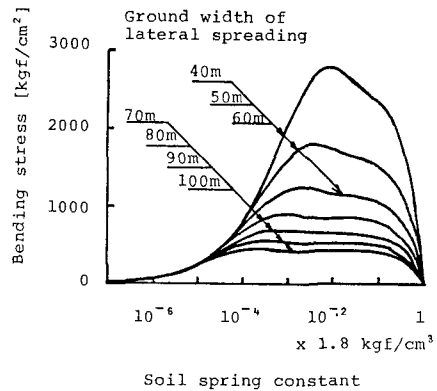


Fig. 11 Relationship between bending stress and soil spring constant

4. 結 論

本研究は、液化化に伴って生ずる地盤の永久変形が地中埋設管に及ぼす影響を明らかにしようとしたものである。日本海中部地震の際の能代市の震害資料の検討と永久変形を受ける管路の挙動の解析的検討を通して以下のことが明らかとなった。

- (1) 能代市における日本海中部地震による上水道の被害箇所のうち、少なくとも2～3割は地盤の永久変形の生じた箇所であり、地盤の永久変形が管路の破壊に大きく関与していることが予想される。
- (2) 震害資料によれば、管路に沿ったある範囲内で地盤の変位量あるいは変位の方向が大きく異なる地域で管路の被害が多く発生している。
- (3) 解析的検討によれば、永久変位量の最大値が一定であれば、地盤の永久変形の生ずる範囲が狭いほど管路の応答は大きくなる。
- (4) 管路の周辺地盤が飽和していなくとも、それより深い地層が液化化することにより地盤の永久変形が生ずると、管路が破壊に至る危険性がある。
- (5) 管路の周辺地盤が液化化している場合には、液化化地盤の地盤ばね定数が非液化化地盤のその1 /1000以下になると管路の応答は急激に小さくなるが、それ以上では地盤ばね定数の低下による永久変位量の増加によって管路の応答は増加し、管路の破壊も十分に予想される。

以上の結果よりいえることは、地中埋設管の破壊という点から液化に伴う地盤の永久変形を捉えると、永久変形の生ずる範囲、永久変位量とその方向の分布が重要な要因であるということである。なかでも永久変形が生ずる地盤ばね定数がいくらかということと、地盤ばね定数の低下に伴う永久変位量の増大のメカニズムを明らかにすることが重要である。この量を定量的に取り扱えなければ、地中埋設管の応答を定量的に評価することはできないので、この方面の研究を精力的に行う必要がある。

最後に、本研究を遂行するにあたり、地中埋設管の動的挙動に関する議論を通じて種々のご教示を賜った小堀為雄教授に感謝の意を表します。また、本研究が、文部省科学研究費自然災害特別研究(2)(No. 60 025017) および奨励研究A (No. 60750417) の補助によって行われたことを記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 北浦 勝・宮島昌克：不完全液化化時における地中埋設管模型の動的挙動，構造工学論文集，Vol. 31A，pp. 421～426，1985.
- 2) 片田敏行・伯野元彦：液化化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 306号，pp. 1～10，1981.
- 3) Kennedy, R.P., Darrow, A.C. and Short, S.A. : General Considerations for Seismic Design of Oil Pipeline Systems, Proc. of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Specialty Conference, pp. 2～17, 1977.
- 4) 北浦 勝・宮島昌克：一端を固定された地中埋設管模型の液化化時の挙動，土木学会論文報告集，第 336号，pp. 31～38，1983.
- 5) 大石 博：地盤沈下を受ける埋設管路の挙動に関する二、三の考察，土木学会論文集，第 356号／I—3，pp. 379～386，1985.
- 6) Seed, H.B. and Wilson, S.D. : The Turnagain Heights Landslide, Anchorage, Alaska, Proc. of ASCE, No. SM4, pp. 325～353, 1976.
- 7) O'Rourke, T.D. and Tawfif, 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 能代市ガス水道局：日本海中部地震水道災害状況について，1983.
- 12) 吉田常松・植松幹夫：液化化砂中の杭の動的挙動の研究，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 657～663，1978.

(1985年10月18日受付)