

(146) 液状化の発生範囲と地盤ばね定数が地中埋設管の破壊に及ぼす影響

金沢大学工学部 宮島 昌克
 金沢大学工学部 北浦 勝
 金沢大学大学院 木村 哲雄

1 はじめに

1964年の新潟地震や1983年の日本海中部地震においては地盤の液状化により上下水道管、ガス管などのパイプラインが大きな被害を被った。しかも、その被害の多くは、液状化領域と非液状化領域の境界部付近に集中して発生していた。新潟地震を契機として液状化に関する研究が精力的に行われ、多くの成果が得られているが、液状化の発生範囲の推定法や液状化に伴う地盤ばね定数の低減率などに関しては未だ十分に明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では、液状化の発生範囲や地盤ばね定数が管路に及ぼす影響を、管路の挙動解析シミュレーションを通して明らかにしようとした。

2 解析方法

液状化領域を通る管路の破壊に影響を与える要因としては、地盤変位、地盤振動、浮力による上向きの力など種々考えられるが、浮力による上向きの力により管路が破壊した例はあまり見あたらないので、今回は液状化に伴って生ずる地盤変位と地盤振動が管路に与える影響について解析し、考察を行った。すなわち、Fig. 1に示すように地盤変位について2ケース、地盤振動について1ケースの合計3ケースのモデルについて解析を行った。ここで、Case 1は一定の範囲にわたり地盤が液状化し、地盤の正弦波状の変位を受ける管路、Case 2は一定の範囲にわたり地盤が液状化し、地盤の一様変位を受ける管路、Case 3は液状化層の上の非液状化層が液状化する過程において、管路が大きな地盤振動の影響を受ける場合をそれぞれ示している。なお、Case 1は水平方向の永久変形を、Case 2は垂直方向の沈下を念頭においているが、変形方向にかかわらず地盤が比較的硬いときにはCase 2のように変形し、十分に軟らかいときにはCase 1のように変形すると考えられる。

(1) Case 1

Case 1, 2は弾性床の上のはりの理論により定式化し解析した。つり合い方程式は次式で示される。

$0 \leq x < l$ に対して

$$EI \frac{d^4 v_1}{dx^4} + K_{v1} v_1 = K_{v1} \delta (1 - \sin \frac{\pi x}{2l}) \quad (1)$$

$l \leq x$ に対して

$$EI \frac{d^4 v_2}{dx^4} + K_{v2} v_2 = 0 \quad (2)$$

Case 1の境界条件は次のように示される。

$$x=0 : v_1' = 0, v_1''' = 0 \quad (3)$$

$$x=l : v_1 = v_2, v_1' = v_2', v_1''' = v_2''' \quad (4)$$

$$x \rightarrow \infty : v_2 = 0, v_2' = 0 \quad (5)$$

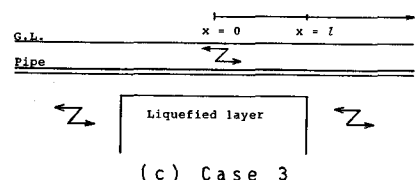
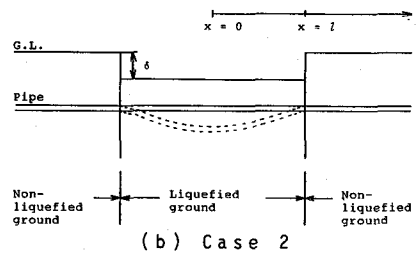
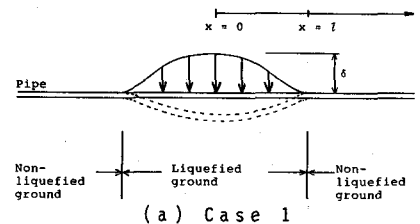


Fig. 1 Analytical models.

(2) Case 2

つり合い方程式は次式で示される。

$0 \leq x < l$ に対して

$$EI \frac{d^4 v_1}{dx^4} + K_{v1} v_1 = K_{v1} \delta \quad (6)$$

$l \leq x$ に対して

$$EI \frac{d^4 v_2}{dx^4} + K_{v2} v_2 = 0 \quad (7)$$

Case 2の境界条件はCase 1の(3)~(5)と同様である。

(2) Case 3

西尾らの方法¹⁾と同様にして解析を行った。しかし、本研究では液状化層の上の地盤が液状化により軟化する場合を考慮している。

つり合い方程式は次式で示される。

$0 \leq x < l$ に対して

$$EA \frac{d^2 u_1}{dx^2} - K_{u1} u_1 = -K_{u1} U_1 \quad (8)$$

$l \leq x$ に対して

$$EA \frac{d^2 u_2}{dx^2} - K_{u2} u_2 = -K_{u2} U_2 \quad (9)$$

式(8)の U_1 は次のようである。

$$U_1 = \frac{\cos\left(\frac{2\pi x}{cT}\right)}{\cos\left(\frac{2\pi l}{cT}\right)} U_2 \quad (10)$$

$$c = \sqrt{Es/\rho} \quad (11)$$

境界条件は次のように示される。

$$x=0 : u_1' = 0 \quad (12)$$

$$x=l : u_1 = u_2, u_1' = u_2' \quad (13)$$

$$x=l : u_2' = 0 \quad (14)$$

ここに、 v 、 u : 管路の管軸直角方向と管軸方向の変位、 K_v 、 K_u : 管軸直角方向と管軸方向の地盤ばね定数、 E : 管路のヤング率、 I : 管路の断面2次モーメント、 δ 、 U : 地盤変位置量、 A : 管路の断面積、 c : 表層地盤の弾性波速度、 Es : 地盤のヤング率、 ρ : 密度であり、添字の1は液状化側を、2は非液状化側を示している。

3 解析結果及び考察

日本海中部地震などの被害報告に基づいて、本研究では地盤の変位置量を20cmとした。これは10 m

Table 1 Physical properties of steel pipe.

Outer diameter (mm)	406.4
Thickness (mm)	6.0
Young's modulus (kgf/cm ²)	2.1x10 ⁶
Specific gravity (1kgf/cm ² =98kPa)	7.85

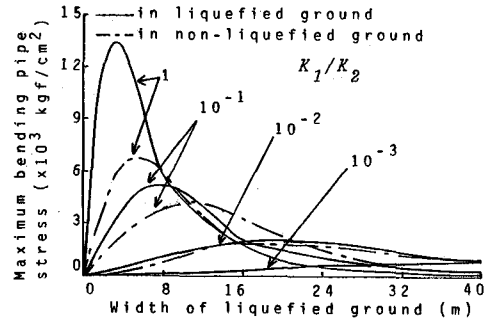


Fig. 2 Relationship between maximum bending pipe stress and width of liquefied ground.

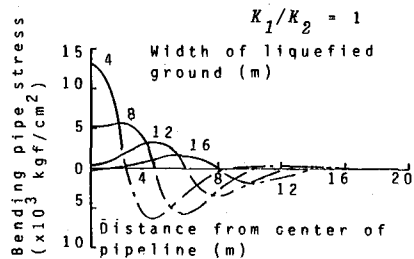


Fig. 3 Distribution of bending pipe stress.

の液化化層において2%の沈下が生ずることに相当する。また、液化化層の地盤ばね定数(K_1)と非液化化地盤の地盤ばね定数(K_2)の比 K_1/K_2 を1、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} と低減させることにより液化化現象に伴う地盤の軟化を解析にとり込んだ。本研究では Table 1に示す鋼管を例として解析を行った。

(1) Case 1について

Fig. 2は液化化地盤の正弦波状の変位による最大曲げ応力と液化化の発生範囲の関係を示したものである。同図より K_1/K_2 の値が小さいほど、すなわち液化化層の液化化の程度が大きいほど最大曲げ応力は小さくなること分かる。これは液化化することにより地盤の拘束力が弱まり、地盤変位が十分に管路に伝わらなくなるためである。また、同図より液化化の範囲が広がると最大曲げ応力の値はしだいに減少していく傾向があるが、液化化の範囲の狭いところで最大値を示している。しかもこの傾向は液化化の程度が小さいほど顕著である。これは液化化の発生範囲が狭いほど地盤に生ずるひずみが相対的に大きくなり、しかも液化化層の液化化の程度が小さいときには地盤の拘束力が強く管路と地盤が一体となって変化するために、管路に生ずるひずみも大きくなるためである。同図によれば K_1/K_2 の値が 10^{-1} 以上の比較的硬い地盤においては範囲が4~8 mのときに液化化層の管路の最大曲げ応力が許容応力度(4200 kgf/cm^2)以上となり、管路が破壊する危険性が高くなる。Fig. 3は管路の曲げ応力の分布図である。同図より K_1/K_2 の値が1の場合、液化化層では液化化の発生範囲が8 m程度と狭いときには管路の中央で最大曲げ応力が発生しているが、範囲が8 m以上では液化化層と非液化化層の境界部付近で発生している。また非液化化層では液化化の範囲に関係なく境界部付近で最大曲げ応力が発生している。 K_1/K_2 の値が 10^{-1} の場合には、液化化の範囲が12 m程度までは管路の中央で最大曲げ応力が発生し、16 m以上では境界部付近で発生している。液化化が進行して K_1/K_2 の値がさらに小さくなくても同様の結果が得られる。すなわち、範囲が比較的狭いときには管路の中央で最大曲げ応力が発生し、範囲が広がると液化化地盤と非液化化地盤の境界部に応力が集中することが分かる。日本海中部地震では管路の被害は液化化領域と非液化化領域の境界部付近に発生しているが、本解析結果においても液化化の範囲が広くなれば最大曲げ応力は境界部付近で発生していて、日本海中部地震とよい対応を示している。なお、日本海中部地震では最大5 mもの地盤変位が発生しているが、そのような場合を解析すると K_1/K_2 の値が 10^{-3} にまで低下したとしても管路が破壊する危険性のあることが示された。

(2) Case 2について

Fig. 4は液化化地盤の一樣変位による最大曲げ応力と液化化の発生範囲の関係を示したものである。同図によれば液化化層の範囲が20 m以上のときに最大曲げ応力の値が一定値になっている。また、 K_1/K_2 の値が 10^{-1} 以上の比較的硬い地盤においては範囲が4~8 mのときに液化化層の最大曲げ応力の値は最大値を示している。このほかはCase 1のFig. 2と同様の傾向がある。ここでは地盤変位がFig. 1のように一樣であるので、液化化の範囲が20 m以上では最大曲げ応力の発生位置が液化化の範囲にかかわらずいつも液化化領域と非液化化領域の境界部付近となるので、変位量が一定であれば管路の曲げ応力が一定となる。このケースをCase 1のFig. 2と比較すると、液化化の範囲が狭いときには管路の曲げ応力の値はほぼ等しいが、 K_1/K_2 の値が 10^{-3} の軟らかい地盤で液化化の範囲が40 mと広がると、Case 2の最大曲げ応力の値はCase 1の約8倍程度となっている。このケースは沈下を念頭においているが、20cm程度の沈下でも管路の周辺の地盤において液化化があまり進行していない状態では管路が破壊する危険性があるといえる。

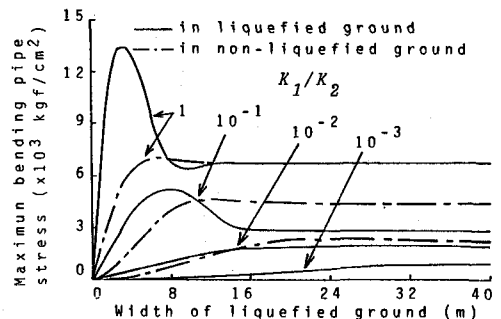


Fig. 4 Relationship between maximum bending pipe stress and width of liquefied ground.

(3) Case 3について

本解析に用いた地盤と地震の諸元を Table 2 に示す。液状化の過程において管路の応答は表層地盤の弾性波速度 c の影響を受ける。また、弾性波速度 c は $(1-r)$ の4乗根に比例する。ここで r は過剰間隙水圧比である。なぜならば、地盤のせん断弾性係数 G は一般に有効応力の平方根に比例するといわれているので、 $(1-r)$ の平方根に比例し、 G は地盤のヤング率 E_s に比例し、 c は E_s の平方根に比例するからである。Fig. 5は液状化層の範囲が20 mのときの管路の軸ひずみの分布図を示し、Fig. 6は液状化層の範囲が20 mのときの管路の最大軸ひずみと過剰間隙水圧比の関係を示している。以上の2つの図より、過剰間隙水圧比が0.1、0.2、0.3のときには、0.0のときに比べて液状化が進行して地盤の拘束力が小さくなっていくにもかかわらず軸ひずみが大きくなっている。特に過剰間隙水圧比が0.2のときには0.0のときと比べて約10倍にもなっている。Fig. 7は応答倍率を示しているが、液状化が進行し過剰間隙水圧比が大きくなると弾性波速度 c は小さくなり、横軸の $2l/(cT/2)$ は過剰間隙水圧比の増加に伴い増える。今回行った解析例では過剰間隙水圧比が0.2のときには $2l/(cT/2)$ の値がほぼ1となっており、極めて共振に近い状態となっていることがわかる。

4 まとめ

幹線に多く用いられる呼び径 400mmの管路について解析を行ない、日本海中部地震の震害と比較して次のようなことが分かった。

- (1) 永久変形については、液状化が進行して K_1/K_2 の値が 10^{-3} にまで低下しても、地盤変位量が大いだと破壊する危険性がある。
- (2) 地盤沈下については、20cm程度の沈下でも管路の周辺の地盤があまり液状化しないで地盤の拘束力が強ければ管路が破壊する危険性がある。
- (3) 地盤振動については、過剰間隙水圧比の値により管路は共振する場合があります、そのときに軸ひずみ著しくは増大する。

参考文献

1) 西尾宣明、塚本克良、羽村 淳：部分的に液状化した地盤中の埋設管の挙動に関する実験的研究、土木学会論文集、第 380号、pp.449~457、1987。

Table 2 Conditions of ground and magnitude of earthquake.

Longitudinal wave velocity c	170(m/s)
Period of shaking T	0.5(s)
Acceleration in superficial layer a	200(gal)
Displacement amplitude of non-liquefied superficial layer	$U_2=(T/2\pi)^2 a$

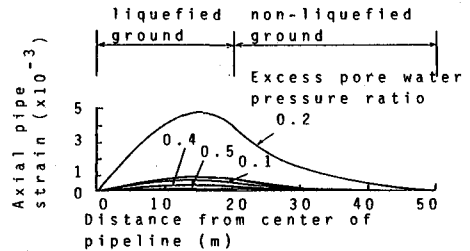


Fig. 5 Relationship between axial pipe strain and distance from center of pipeline.

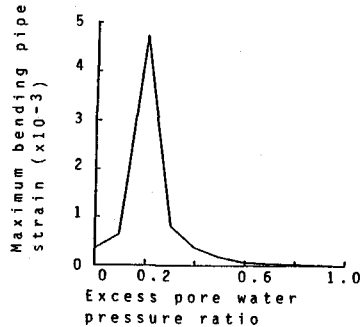


Fig. 6 Relationship between maximum axial pipe strain and excess pore water pressure ratio.

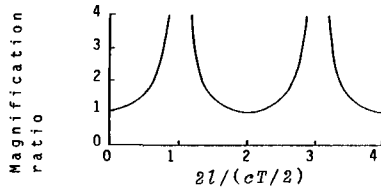


Fig. 7 Relationship between $2l/(cT/2)$ and magnification ratio.