

液状化地盤を通過するパイプラインの耐震安全性照査

武蔵工業大学 学生会員 ○鈴木寛明

武蔵工業大学 正会員 小池 武

1. はじめに

液状化地盤に埋設される高圧ガス導管の耐震設計は、限界状態設計法に従って体系化されている。そこで指定されている部分安全係数により実現されるパイプラインの耐震安全性水準が破壊確率の形でいくらかであるかは、実務経験者にとっては必ずしも明確ではない。

本研究は、限界状態設計法で定式化された既往耐震設計式が想定している破壊確率を推定しようとするものである。

2. 検討方法

2.1 検討対象

液状化地盤を横断するパイプラインの耐震安全性評価は、設計変数である直管および異形管の強度（限界変位） R が荷重（地盤変位） S を比較検討する形で行われる。その結果、求める断面諸量は下記に示す限界状態設計法により算定することになる。

$$R(f_k / \gamma_m) / \gamma_b \geq \gamma_a \cdot S(\gamma_f \cdot F_k) \quad (1)$$

ここで、

γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

γ_f : 荷重係数

γ_m : 構造解析係数

表1 部分安全係数の標準値

部分安全係数	設計変数	設計変数	設計モード	標準値
荷重係数	地盤変位に対する係数 γ_s	設計変数	全モード	1.0
	地盤変位に対する係数 γ_s	設計変数	全モード	1.0
	地盤変位に対する係数 γ_s	設計変数	全モード	1.0
	地盤変位に対する係数 γ_s	設計変数	全モード	1.0
構造解析係数	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
材料係数	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0
	地盤の歪み計算に対する係数 γ_m	設計変数	全モード	1.0

式(1)と表1の部分安全係数を用いて実現できる耐震安全性水準を破壊確率の値で把握するためには、当該設計コード策定時に部分安全係数を決定する仮定で採用された設計破壊確率を逆算する必要がある。

設計変位 R, S には、自然現象や材料特性の持つ本質的なランダム性とコード設計者が採用した構造解析手法や荷重推定法などに含まれる不確実性の両方の不確定要因が存在する。この要因を区別して評価するため

に、設計変数を以下のように再定義する。

$$S_d = N_A \cdot G_s(N_f S_n), R_d = N_B \cdot G_R(N_m R_n) \quad (2)$$

ここで、 N_A, N_B, N_f, N_m は確率変数、 S_n, R_n は公称値（確定値）、 $G_s(\cdot), G_R(\cdot)$ は S, R に関する関数式である。

2.2 解析方法

(1) 破壊確率の算定

確率変数が対数正規分布に従うことが判明している場合には以下のように定式化できる。

$$p_f = P[Z < 0] = P\left[z < -\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right] = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) \quad (3)$$

ここで z は $z = \ln R_d - \ln S_d$ で定義される機能関数であり、

$$\mu_z = \mu_{\ln N_B} + \mu_{\ln G_R} - \mu_{\ln N_A} - \mu_{\ln G_s} \\ \sigma_z^2 = \sigma_{\ln N_B}^2 + \sigma_{\ln G_R}^2 + \sigma_{\ln N_A}^2 + \sigma_{\ln G_s}^2 \quad (4)$$

そして、対応する部分安全係数は、

$$\gamma_{N_A} = \mu_{N_A} \exp[\beta \alpha_{N_A} \sigma_{\ln N_A}] \\ \gamma_{G_s} = \mu_{G_s} \exp[\beta \alpha_{G_s} \sigma_{\ln G_s}] \\ \gamma_{N_B} = \mu_{N_B} \exp[-\beta \alpha_{N_B} \sigma_{\ln N_B}] \\ \gamma_{G_R} = \mu_{G_R} \exp[-\beta \alpha_{G_R} \sigma_{\ln G_R}] \quad (5)$$

ただし、

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = -\Phi^{-1}(p_f) \quad (6)$$

$$\alpha_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} \quad \text{for} \quad X = N_A, N_B, G_s, G_R$$

しかし、 N_A, N_B が任意の確率分布を持つ場合には、式(5)で得られる部分安全係数 $\gamma_{N_A}, \gamma_{N_B}$ が表1の

$\gamma_a, 1/\gamma_b$ と対応する必然性はない。このときは、それぞれの確率変数ごとに確率分布を仮定して破壊確率を算定する必要がある。

(2) 部分安全係数に関わるランダム変数の確率分布モデル

N_A, N_B, N_f, N_m の確率分布のうち、 N_f, N_m は前述の本質的なランダム特性に依存していることから正規分布に従うと仮定し、 N_A, N_B は人為的な不確実性に関係していることから、ここでは単純に三角形分布や矩形分布を仮定する。

キーワード 液状化地盤 部分安全係数 破壊確率 確率密度関数形状

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 武蔵工業大学工学部都市基盤工学科 TEL:03-3703-3111

(3) 計算手順

求める破壊確率は、図1のフローチャートに従って算定する。

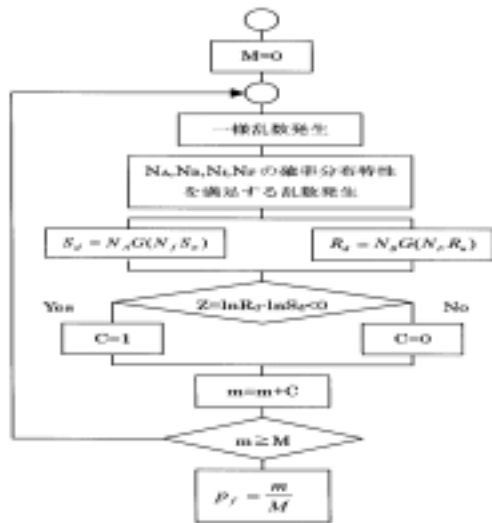


図1 破壊確率の算定手順

3. 解析結果と考察

3.1 数値解析条件

(1) 数値計算モデル

表2 計算条件

項目	記号	単位	数値
外径	D	cm	61
基準外径	D ₆₀₀	cm	61
最大地盤拘束力	σ_c	N/cm ²	14
曲管の公称管厚	t _b	cm	1.51
曲率半径	Radius	cm	183
曲管角度	ϕ		90
	η		0.93

表3 各 γ の統計量および確率密度関数形状

名称	記号	平均値	標準偏差	変動係数	分布形状
限界変位の定式化に対する部材係数	γ_b	1.0	0.15	0.15	
地盤変位に対する荷重係数	γ_δ	1.3 (護岸地盤)	0.39	0.3	
地盤拘束力に対する荷重係数	γ_k	1.2	0.24	0.2	
変形計算に対する構造解析係数	γ_a	1.1	0.11	0.1	

傾斜地盤の場合は $\gamma_\delta = 1.8$ とした。

(2) 部分安全係数の確率密度関数形状の影響

設計指針では荷重側（安全側）に値が出るよう、余裕を持たせて設計を行うため、 γ_a の平均値を 1.1 と定めている。この考えを、分布形状にも反映させ、分布形状を右上三角形と仮定した。

3.2 解析結果

たとえば、レベル2地震動に対する液状化地盤横断管路の曲管外曲げモード（護岸背後地盤）に対する機能関数は次式で表現できる。

$$Z = \ln(N_B \omega_R) - \ln(N_A \omega_s) \quad (7)$$

ただし、

$$\omega_s = \frac{180}{\pi} \frac{150}{L_{po1}} \frac{N_\delta N_k}{\left(0.81 \frac{D}{D_{600}} + 0.43\right)}$$

$$\omega_R = 2.24 \frac{\phi}{\sqrt{D/t_b} \cdot (\text{Radius}/D)^{0.25} \cdot \eta} \quad (8)$$

$$L_{po1} = \sqrt[4]{\frac{1200 E I_\delta N_k}{P_l}}$$

ここで、 N_δ, N_k は N_f の中身を細分したものでありそれぞれ地盤変位 δ 、地盤拘束力 k の予測法に関する不確実性を反映した確率変数を表している。また、 P_l は単位幅当たりの最大地盤拘束力（確定値）である。

式(7)(8)を図1の手順で計算するとともに様々な境界条件での破壊確率は以下のとおり。

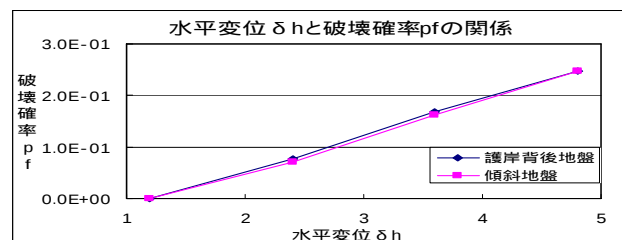


図2 傾斜地盤と護岸背後地盤の関係

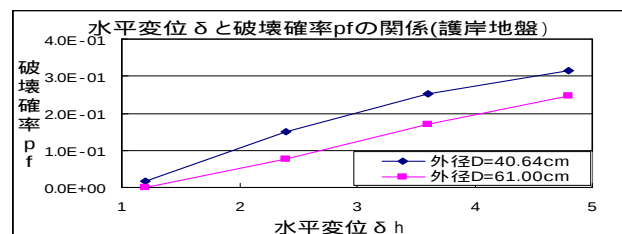


図3 外径 D=61cm(600A)と D=40.64cm(400A)の関係

4. 考察とまとめ

図2は地盤が各水平変位 δh (1.2m ~ 4.8m) で破壊確率にどのような影響を及ぼすかを表している。結果として護岸地盤、傾斜地盤とほぼ同じ値を示し地盤によって破壊確率にはあまり変化はないと判明した。

図3のように導管の外径を変化させると、破壊確率は大きく変化した。このことにより導管構造及び各 γ の分布形状等を変化させると結果は変わってくる可能性がある。より詳しく調べるため、様々な計算条件で結果を算出する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 日本ガス協会；高压ガス導管液状化耐震設計指針，2001
- 2) Ang, A.H.S and W.Tang; Probabilistic Concepts in Engineering, 2007