

パイプライン曲管部の耐震設計の考え方 Earthquake Resistant Design Method for Buried Pipeline

毛利栄征*・デュッティン アントワン**・矢崎澄雄**・藤田信夫***
Yoshiyuki MOHRI, Antoine DUTTINE, Sumio YAZAKI, Nobuo FUJITA

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震などの大規模地震では、地中に埋設されるパイプラインが大きな被害を受ける事例が後を絶たない。地震時のパイプラインの被害の主な特徴としては、①構造物周辺での継ぎ手部の抜出しや屈曲が挙げられる。曲管部のスラストブロック（以後スラストブロック）周辺（パイプ継ぎ手部）は、大きく抜け出すなどの地震時の最大のウィークポイントであるが、レベル2地震に対応する耐震設計手法は見当たらない。

本報告では、地震時に基礎地盤の強度や剛性が低下する現象を導入したパイプライン屈曲部の耐震設計方法を示し、レベル2地震に適用可能であることを紹介する。

2. レベル2地震に対応する耐震設計の考え方

曲管背面地盤に仮想すべり面（土楔）を設定し、対象入力地震動による応答加速度を考慮したせん断応力比を時刻歴にて算定する。次に累積損傷理論に基づくひずみ振幅の増加に伴う地盤の強度・剛性低下を逐次計算する。これをもとに受働土圧と水平方向地盤バネ定数の地震動による低下度合を求め、受働土圧が最小となる臨界すべり面の状態を確定して水平変位を計算する。背面地盤の強度・剛性低下とともに地震動の大きさや継続時間を考慮したスラストブロックの移動量を算定することが可能となる。水平変位算定の基本的な流れを図1に示す。

2.1 受働土圧・底面摩擦力の算定

スラストブロック背面の土楔の作用力から地盤の受働土圧力 P_p （試行楔法、図2）を求める。

$$P_p = \frac{W' \tan(\alpha + \phi) - k_h W + u + c_b L + (c_a H + c_b L \cos \alpha) \tan(\alpha + \phi)}{\cos \delta + \sin \delta \tan(\alpha + \phi)} \quad (式 1)$$

- H : 土楔正面の高さ (m)
- L : 土楔底面の長さ (m) $W, (W')$: 土楔の(有効)重量 (kN)
- α : 土楔底面角 (deg) u : 静水圧合力 (kN)
- c_a, δ : 土楔正面に使用する非排水粘着力、摩擦角 (kN/m², deg)
- c_b, ϕ : 土楔底面に使用する非排水粘着力、摩擦角 (kN/m², deg)

2.2 動員応力の算定

地盤の損傷度を推定するために、土楔のすべりに動員されるせん断応力比 SR を、図3から以下のように求める。

$$SR = \frac{\Delta T}{N_0} = \frac{T - T_0}{N_0} = \frac{k_h W \cos \alpha}{(F + P_0) \sin \alpha + W' \cos \alpha} \quad (式 2)$$

- k_h : 水平震度 (=入力加速度/重力加速度)
- $W, (W')$: 土楔の(有効)重量 (kN) α : 土楔底面角(deg)
- F : スラスト力 (kN) P_0 : 静止土圧合力 (kN)

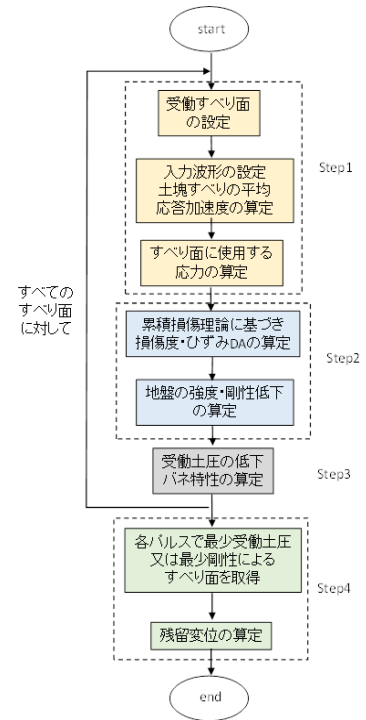


図1 解析の流れ

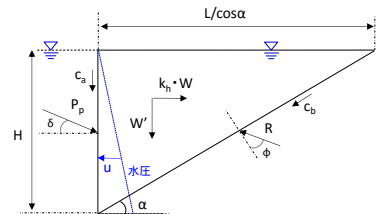


図2 土楔の力の極限つり合い

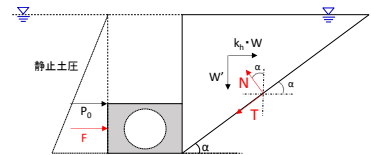


図3 土楔底面に動員される力

茨城大学* Ibaraki University, 複合技術研究所** Integrated Geotechnology Institute, (株)クボタ***KUBOTA Co.,Ltd キーワード：構造物の設計手法, パイプライン, 耐震設計, 強度低下

2.3 損傷度・ひずみ DA の算定

累積損傷理論¹⁾に基づいて累積損傷度 D を以下の式によって算定する。その損傷度に相当するひずみ振幅 DA を再帰的に二分法などによる試行錯誤によって逆算する。

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{c,i}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{SR_i - C(DA)}{\alpha(DA)} \right)^{1/\beta(DA)} \quad (式 3)$$

n : 不規則荷重の総パルス数
 N_{c,i} : 損傷度=1 状態と定義した所定ひずみ振幅 DA (一般 5%) が生じるまでのパルス番号 i の振幅 SR_i の規則繰返し載荷荷重での繰返し回数 (図 4)、SR_i : パルス番号 i のせん断応力比振幅

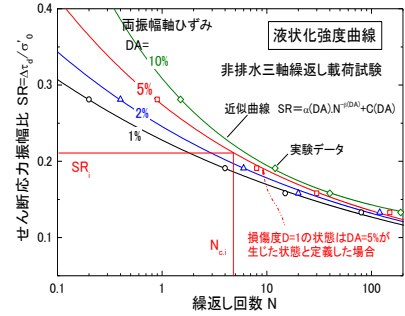


図 4 損傷度 D の定義

2.4 強度・剛性の低下 (図 5)

非排水繰返し載荷後の単調載荷試験結果から、ピーク強度・剛性の低下とひずみ DA の関係を式 4, 5 の関数により近似する。

$$\begin{cases} \phi_u(DA) = A_1 \exp\left[-(DA/t_1)^{d_1}\right] + A_2 \exp\left[-(DA/t_2)^{d_2}\right] \\ c_u/c_{u0} = \tan \phi_u / \tan \phi_{u0} \end{cases} \quad (式 4)$$

$$G/G_0 = \exp\left[-(DA/A)^B\right] + C \quad (式 5)$$

C_u, Φ_u : 非排水状態による低下していく見掛けの粘着力 (kN/m²), 内部摩擦角 (°)、 G : 低下していくせん断剛性 (kN/m²)
 A₁, t₁, d₁, A₂, t₂, d₂, A, B, C は係数。「0」の添字は初期 (低下前) の値

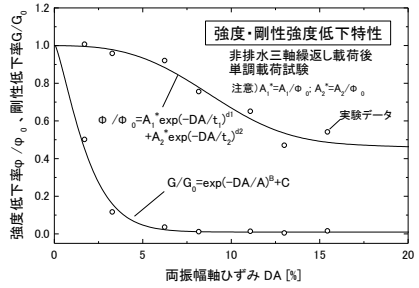


図 5 強度・剛性低下とひずみ DA の関係

2.5 バネ特性 (図 6, 7)

バネ係数に用いる地盤反力係数は、式 6²⁾で表す。ただし、水平力の上限は受働土圧 P_p である。

$$K_s = k_s \cdot A_s ; k_s = E_h / B_{med} \quad (式 6)$$

K_s : バネ係数 (kN/m), k_s : 水平地盤反力係数 (kN/m³)
 E_h = 2(1+0.5)G : 低下していく地盤のヤング率 (kN/m²) (G は式 5 より)
 B_{med} : スラストブロックの半高さに対する楔の幅 (m)
 A_s : スラストブロック側面の面積 = 高さ × 奥行 (m²)

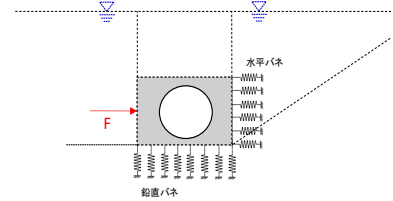


図 6 スラストブロックと地盤のバネ

2.6 残留変位の算定 (図 8)

スラストブロックの残留水平変位は次式で求める。

$$\delta_x(t) = \frac{F}{K_s(t) + K_t(t)} - \frac{F}{K_s(0) + K_t(0)} \quad (式 7)$$

δ_x(t) : 時刻 t での水平変位 (m), F : スラスト力 (kN)
 K_s(t), K_t(t) : 低下していく水平バネ係数 (kN/m) (式 6)
 K_s(0), K_t(0) : 初期 (低下前) の水平バネ係数 (kN/m)

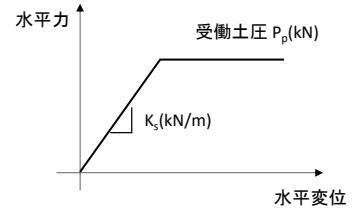


図 7 スラストブロックと地盤のバネ特性

3. 解析結果

大口径パイプラインのスラストブロックの解析で 図 8 スラストブロックの残留水平変位は、現地盤が液状化しない条件とした場合は、弾性的な変位量であるが、現地盤とパイプ周辺の基礎砂の強度低下を考慮すると継ぎ手が完全に抜出すような変位 (300mm 以上) を示す結果が得られている。なお、曲管の大変位への対策例としては、官民連携事業による管路屈曲部の耐震工法が提案されている。

参考文献: 1) Donovan, N.C. (1971). A stochastic approach to the liquefaction problem, *Proc. Int. Conf. On Application of Statistics and Probability to Soil and Struct. Eng.*, HongKong, pp.513-535. 2) 「鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物・抗土圧構造物)」: 平成 12 年 6 月

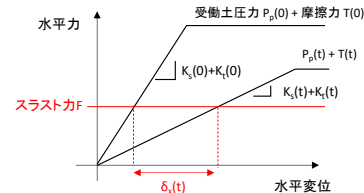


図 8 スラストブロックの残留水平変位