

浸透固化処理したケーソン式岸壁の地震時水平変位挙動

九州大学大学院 学生会員 ○末宗 利隆 フェロー会員 善 功
正会員 陳 光齊 正会員 笠間 清伸

1. 背景および目的

地震時において港湾、空港、道路等の土木施設や建築施設等に多大なる被害を与える原因の一つに液状化がある。現在、様々な液状化対策工法が考案、実用化され、そのうちの一つに浸透固化処理工法がある。浸透固化処理工法をケーソン式岸壁背後地盤に施工するさいの改良範囲は、静的な設計法である震度法により計算されるセメント系固化処理工法の改良範囲を適用しているのが現状である。

そこで、本文では、既往の振動台模型実験結果¹⁾より、従来の震度法を修正した、新たな改良範囲設定法を提案した。また、性能設計への展開を意識して、地震時におけるケーソンの水平変位量の簡易推定法を提案することを目的とし、数値計算を行った。

2. 内容

2.1. 震度法の修正の提案

震度法におけるケーソンの滑動安全率 F_s を計算するための模式図とパラメータを図-1 と表-1 に示す。滑動安全率 F_s は次式により計算される²⁾。

$$F_s = (R_1 + R_2 + P_{w1}) / (H_1 + H_2 + P_h + P_{w2}) \quad (1)$$

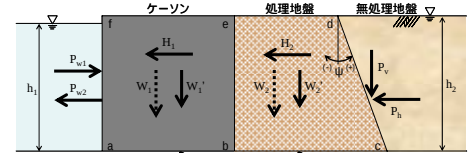
模型実験におけるケーソンの被災変形率を図-2 に、図-2 における入力加速度を震度法により滑動安全率 F_s に変換したものを図-3 に示す。ここに、被災変形率は、ケーソンの水平変位量をケーソンの高さ $H=390\text{mm}$ で除したものである。図-2 に示した被災変形率 0.019 のラインは「供用可能」の基準線である^{1), 2)}。Case3 および Case6 では、150Gal のとき、安全率上は滑動が発生することになるが、図-2 より、実験では水平変位は生じていない。また、安全率の観点からみると、 $F_s=0.8$ 付近でも水平変位が生じていない。これらのことは、現行の設計法が安全側であることを示唆する。また、現行の設計法では、改良体の強度に関するパラメータは不使用であるが²⁾、模型実験では改良体の強度の増加により、被災変形率が減少したことから、安全率の決定のさいに改良体の強度に関するパラメータを取り入れる必要がある。

そこで、適切な改良範囲を設定するために、図-1 に示す処理地盤底面での摩擦抵抗力 $R_2(\text{kN/m})$ を以下のように変更した。

$$\text{現行: } R_2 = f_2 \left[W_2' + \left\{ P_v - (1/2) \gamma h_2^2 \tan \phi \right\} \right] \quad (2)$$

$$\text{提案: } R_2 = \tan \phi_d \left[W_2' + \left\{ P_v - (1/2) \gamma h_2^2 \tan \phi \right\} \right] + \kappa c_d l_{bc} \quad (3)$$

ここに、 ϕ_d は改良体のせん断抵抗角、 ϕ ; 処理地盤背面が鉛直方向となす角度(°)(反時計回りを正とする。)、 κc_d は改良体の付着力(kN/m^2)(κ : 係数、 c_d : 改良体の粘着力(kN/m^2))、 l_{bc} は改良幅(m)である。 κ の意味するところは、改良体の下の物質(本実験では碎石)との相互作用を考慮して、改良体の粘着力を低減したものである。ここで、 $\phi_d=30^\circ$ と仮定すると $\tan \phi_d=0.58$ 、式(4)³⁾より薬液濃度のとき $c_d=9.2(\text{kN/m}^2)$ 、薬液濃度 8% のとき $c_d=13.9(\text{kN/m}^2)$ となる。



H_1 : 構造物(abe)に作用する慣性力(kN/m)
 H_2 : 処理地盤(bcd)に作用する慣性力(kN/m)
 P_{w1} : 構造物前面(aef)に作用する静水圧の合力(kN/m)
 P_{w2} : 構造物前面(aef)に作用する動水圧の合力(kN/m)
 P_h : 処理地盤背面(cdf)に作用する液状化地盤からの静的圧力と動的圧力の合力の水平分力(kN/m)
 P_v : 処理地盤背面(cdf)に作用する液状化地盤からの静的圧力と動的圧力の合力の鉛直分力(kN/m)
 W_2', W_2'' : 構造物(abe), 処理地盤(bcd)の有効重量(静水圧による浮力を考慮する) (kN/m)
 R_1 : 構造物底面(ab)での摩擦抵抗力(kN/m)
 R_2 : 処理地盤底面(bc)での摩擦抵抗力(kN/m)

図-1 滑動安全率 F_s を計算するための模式図

表-1 設計および解析に用いたパラメータ

模型ケーソンの単位体積重量	25.0	kN/m^3
無処理地盤の単位体積重量 γ	18.0	kN/m^3
海水の単位体積重量 γ_w	10.0	kN/m^3
ケーソン底面の摩擦係数 f_1	0.55	
(固化処理地盤の内部摩擦角)	30.0	°
(付着力を決定するさいの係数 κ)	0.20	
(ばね定数 k)	0.0	

() 内は解析に用いたパラメータ

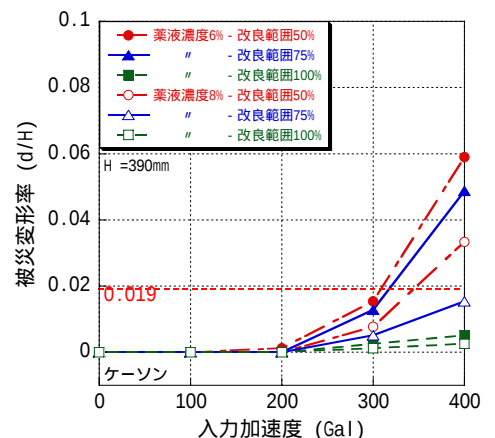


図-2 ケーソンの被災変形率(実験値)

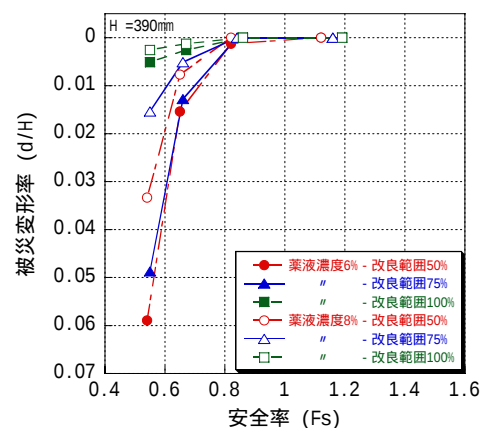


図-3 滑動安全率 F_s と被災変形率の関係

$$c_d = \{q_{uck}/2 \cdot \tan(45^\circ + \phi_d/2)\} \quad (4)$$

ここで $\kappa=0.2$ と仮定し, 滑動安全率 F_s を再計算すると図-4 を得る。図-4 より, 滑動安全率 F_s が 1.0 を下回ると変位が生じており, 安全率の概念と一致する。また, 粘着力の項を入れることで, セメント系固化処理土と浸透固化処理土の違いも上手く表現できているのではないかと考える。

従来の震度法と本提案手法による, ケーソン幅と改良幅の関係を図-5 に示す。図-5 より, 摩擦抵抗力 R_2 に付着力を加えた本提案手法では, 改良幅が, 従来の震度法で設定する改良幅に対し, 薬液濃度 6% で 68%, 薬液濃度 8% では 77%ほど低減されることが確認できる。

2.2. 解析概要

本節では, 地震時におけるケーソンの水平変位量を計算することを目的とする。解析では, 物理的な解釈に基づく応答計算法の一つである Newmark の β 法⁴⁾を用いた。Newmark の β 法における時刻 t_{m+1} における対象物の変位 y_{m+1} , 速度 $\dot{y}_{m+1}$ および加速度 $\ddot{y}_{m+1}$ は次式により表される。

$$y_{m+1} = y_m + \dot{y}_m \cdot \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{y}_m \cdot (\Delta t)^2 + \beta \ddot{y}_{m+1} \cdot (\Delta t)^2 \quad (5)$$

$$\dot{y}_{m+1} = \dot{y}_m + \frac{1}{2} (\ddot{y}_m + \ddot{y}_{m+1}) \Delta t \quad (6)$$

$$\ddot{y}_{m+1} = p_{m+1} - 2h n \dot{y}_{m+1} - n^2 y_{m+1} \quad (7)$$

$$\text{ここに, } p_{m+1} = \frac{P_{m+1}}{m}, \quad n^2 = \frac{k}{m}, \quad h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

解析に用いたパラメータを表-1 に示す。また, 解析には, 図-1 に示す滑動安全率 F_s を計算するさいに用いた力のつり合い関係を用いた。

2.3. 解析結果および実験値との比較

薬液濃度 6%-改良範囲 100%のケースの最大入力加速度 400Gal における入力加速度および被災変形率の時刻歴を図-6(正方向は海向き)に示す。図-6 より, ケーソンは, 加速度が負のときに前面の変位が生じ, 加速度が正のときには若干陸側に戻るという挙動を繰り返していることが分かる。

各ケースにおける残留被災変形率の解析値と実験値の比較を図-7 に示す。解析値と実験値を比較すると, 最初の変位が生じる 200Gal まではよく一致するが, 300Gal および 400Gal では, 薬液濃度 6%-改良範囲 50%および 100%の 400Gal 加振時を除いて, 解析値の方が, より大きな変位量を示している。これは, 本解析では, 土圧低減率を考慮していないことによると考えられる¹⁾。また, 薬液濃度 6%-改良範囲 50%および 100%の 400Gal 加振時においては, 実験上, ケーソンと背後地盤の位相差が大きかったために, 実験値の方が, より大きな変位量を示したと考えられるが, この点については今後の課題としたい。

3. まとめ

(1) 従来の震度法を修正し, 改良体の付着力を考慮した新たな改良範囲設定法を提案した。(2) 数値解析では, ケーソンと背後地盤の位相差, および土圧低減率を考慮していないため, 実験値と多少の差異が生じた。

<参考文献> 1)末宗利隆ら：浸透固化処理工法を適用したケーソン式岸壁背後地盤の改良範囲に関する実験的考察, 第7回地盤改良シンポジウム論文集, pp117-120, 2006.10. 2)社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999. 3)財団法人 沿岸開発技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル, 2003. 4)渡邊潤平ら：質点・パネ・スライダモデルによる坑土圧構造物の地震時滑動量推定法, 第41回地盤工学研究発表会, pp1957-1958, 2006.7.

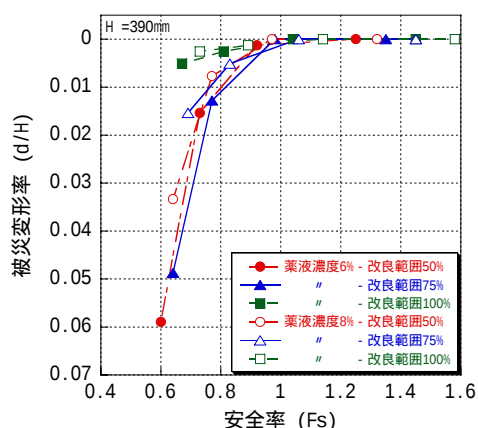


図-4 提案手法を用いた滑動安全率 F_s と被災変形率の関係

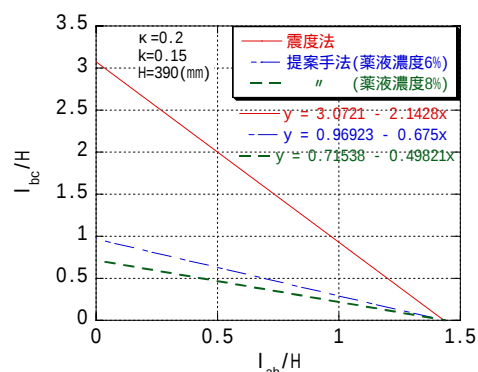


図-5 ケーソン幅と改良幅の関係

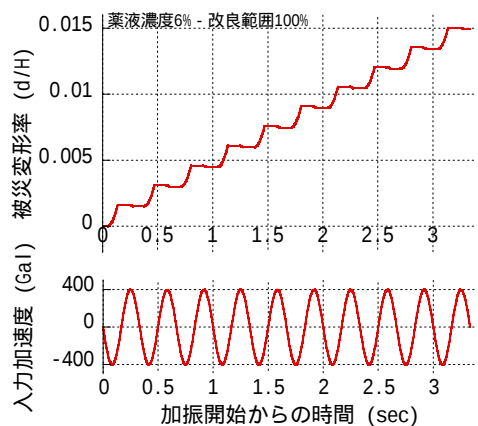


図-6 ケーソンの挙動

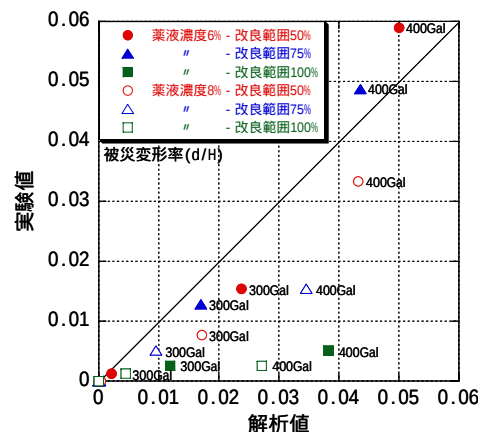


図-7 解析値と実験値の比較(被災変形率)