

部分係数を導入した矢板式係船岸の設計法の検討

鈴木 誠¹・辻岡 信也²・菊池 喜昭³・山本 修司⁴・石井 清⁵

- ¹正会員 工博 清水建設(株) 和泉研究室 (〒100-0011 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)
²正会員 工修 清水建設(株) 土木本部設計部 (〒105-8007 港区芝浦 1-2-3 シーバンス S 館)
³正会員 工修 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
⁴正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
⁵正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

我が国では構造物の設計基準を、性能規定や ISO による国際標準に整合するように見直すことが必要となってきた。特に、従来の安全率から信頼性にに基づく設計形式として部分係数法へ変更することが要求されている。部分係数法は、理論的には構築されているものの、実際の適用に関しては課題も多い。そこで本研究では、矢板式係船岸の設計を対象とし、荷重側と抵抗側に作用する地盤特有の課題を有した部分係数法の適用性を検討した。地盤パラメータの不確定性を考慮した信頼性評価を実施し、感度係数を用いて部分係数の設定した。その結果、設定された部分係数を用いて設計された断面は、目標信頼性指標に近い信頼性を有し、信頼性のばらつきが小さくすることが確認できた。

Key Words : reliability, design, partial factor, anchored sheet pile wall, sensitivity

1. はじめに

近年、欧州ではサービスの国際交換を容易にするため、構造物の設計基準についても性能規定化や照査方法の標準化が進められている。また、米国を中心として大きな地震災害の反省に基づき、耐震設計上複数の性能に対して設計することが提案されてきた¹⁾。そのような状況の下で、我が国でも構造物の設計基準を、国際化の観点から性能規定や ISO²⁾ による国際標準に整合するような見直しが必要となってきた。特に、このような設計体系では、従来の許容応力度に基づく安全率法から信頼性の原則に基づく設計法へ変更することが要求されている。信頼性の原則に基づく設計法の 1 つの形式として、Eurocodes³⁾ が採用している部分係数法や AASHTO⁴⁾ をはじめ北米での標準となっている荷重抵抗係数設計法 (LRFD) がある。これらの設計法は、理論的には構築されているものの、実際の適用に関しては課題も多い。

そこで本研究では、矢板式係船岸の設計⁵⁾ を対象とし、部分係数の設定とその有効性を検討することを目的とした。特に地盤特有の課題として、同じ地盤パラメータが荷重側にも抵抗側にも作用するため、部分係数の設定には工夫が必要である。実施する内容は次のとおりである。まず、不確定性が大きい地盤パラメータの不確定性を考慮して、既設の矢

板式係船岸を対象とした信頼性評価を実施し、現行設計基準が有する信頼性水準を把握するとともに、同時に地盤パラメータの感度も算定する。これらの結果を考慮して、部分係数形式の検討および感度を用いた設計値に基づく方法により部分係数の設定を行う。最後に、設定された部分係数を用いて設計された断面を、従来の方法で設計された断面と比較することにより、新しく設定した部分係数法の適用性を検討する。

2. 設計で考慮する限界状態

対象とする矢板式係船岸は図-1 のように、海底面に打込まれた矢板の上部にタイロッドを連結し、その背後に控えを設置する構造である。ここでは、矢板式係船岸の設計で考慮する限界状態として、常時と地震時で次に示す 3 つの終局限界状態を扱う。

- 矢板の海底面への根入れ深さに関する安定性
- タイロッドに生じる張力に関する安全性
- 矢板に生じる最大発生曲げモーメントに関する安全性

ここで、性能関数は仮想ばり法に基づいて作成した。なお、土圧の算定は、以下に示すような常時はクーロン⁶⁾の式、地震時は物部・岡部の式を用いた。また地震時の検討では、海底面 10m 以深の粘性土に関

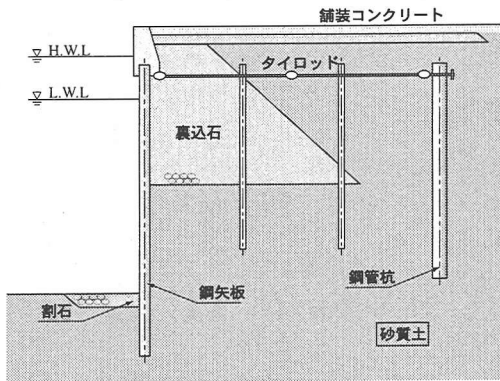


図-1 矢板式係船岸

しては震度を0として土圧の算定を行う。ここでは、阪神などの大地震においても液状化を除くと設計震度の見直しが特に必要とならなかったことから、現行設計法の水平震度を用いることとする。また、設計震度を非常に大きくすると地震時土圧など設計の枠組みの見直しも必要であることから、今回の検討では設計震度の見直しまで踏み込んでいない。

<砂質土>

・主働土圧

$$p_{ai} = K_{ai} \left[\sum \gamma_i h_i + \frac{w \cos \psi}{\cos(\psi - \beta)} \right] \cos \psi \quad (1)$$

$$K_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i - \psi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \psi \cos(\delta + \psi + \theta)} \times \frac{1}{\left[1 + \frac{\sin(\phi_i + \delta) \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \psi + \theta) \cos(\psi - \beta)} \right]^2} \quad (2)$$

・受働土圧

$$p_{pi} = K_{pi} \left[\sum \gamma_i h_i + \frac{w \cos \psi}{\cos(\psi - \beta)} \right] \cos \psi \quad (3)$$

$$K_{pi} = \frac{\cos^2(\phi_i + \psi + \theta)}{\cos \theta \cos^2 \psi \cos(\delta + \psi - \theta)} \times \frac{1}{\left[1 - \frac{\sin(\phi_i - \delta) \sin(\phi + \beta - \theta)}{\cos(\delta + \psi - \theta) \cos(\psi - \beta)} \right]^2} \quad (4)$$

<粘性土>

・主働土圧

$$P_a = \frac{(\sum \gamma_i h_i + w) \sin(\zeta_a + \theta)}{\cos \theta \sin \zeta_a} - \frac{c}{\cos \zeta_a \sin \zeta_a} \quad (5)$$

$$\zeta_a = \tan^{-1} \sqrt{1 - \left(\frac{\sum \gamma_i h_i + 2w}{2c} \right) \tan \theta} \quad (6)$$

・受働土圧

$$P_p = \sum \gamma_i h_i + w + 2c \quad (7)$$

ここに、

- p_{ai} : i 層下面に働く主働土圧強度 (kN/m^2),
- p_{pi} : i 層下面に働く受働土圧強度 (kN/m^2),
- ϕ_i : i 層の内部摩擦角 ($^\circ$),
- c_i : 土の粘着力 (kN/m^2),
- γ_i : i 層の土の単位体積重量 (kN/m^3),
- h_i : i 層の深さ (m),
- K_{ai} : i 層の主働土圧係数,
- K_{pi} : i 層の受働土圧係数,
- ζ_a : 壁面が鉛直となす角度 ($^\circ$),
- β : 地表面が水平となす角度 ($^\circ$),
- δ : 壁面摩擦角 ($^\circ$),
- ψ : 崩壊面が水平となす角度 ($^\circ$),
- w : 地表面単位面積あたり載荷重 (kN/m^2),
- θ : 地震合成角 ($^\circ$),
- $\theta = \tan^{-1} k$ または $\theta = \tan^{-1} k'$,
- k : 震度,
- k' : 見かけの震度 (地下水位以下に適用)⁵⁾

a) 矢板の海底面への根入れ深さに関する安定性

フリーアースサポート法の考え方に従い、タイロッド周りの主働側と受働側の土水圧によるモーメントのつりあいを考える。主働側のモーメントが受働側のモーメントを超えるとき、終局限界状態が生じるとした。信頼性評価のための性能関数は次式のようにになる。

$$g_1 = M_p(\tan \phi, c, \gamma_t, \delta_p) - M_a(\tan \phi, c, \gamma_t, \delta_a) \quad (8)$$

ここで、 M_p :受働側の土水圧によるタイロッド周りのモーメント、 M_a :主働側の土水圧によるタイロッド周りのモーメントである。また、土のせん断強度 ($\tan \phi, c$), 単位体積重量 (γ_t), 主働側と受働側の壁面摩擦角 (δ_a, δ_p) を基本変数とする。

b) タイロッドの張力に関する安全性

矢板が海底面とタイロッド取り付け点の2点で支持された単純ばり形で求められるタイロッド取り付け点の支点反力によって生じるタイロッド張力が、タイロッド降伏応力を超えると、終局限界状態が生じるとした。すなわち、降伏応力度まではタイロッドに発生する応力度は主働側の土水圧に線形関係があると仮定した。信頼性評価のための性能関数は次式のようにになる。

$$g_2 = \sigma_y - \sigma(\tan \phi, c, \gamma_t, \delta_a) \quad (9)$$

ここで、 σ_y :タイロッドの降伏応力度、 σ :主働側の土水圧によりタイロッドに発生する応力度である。

c) 矢板の最大曲げモーメントに関する安全性

矢板が海底面とタイロッド取り付け点の2点で支持された単純ばりとして、主働側の土水圧により発生する最大曲げモーメントによって、矢板が曲げ降伏するとき、終局限界状態が生じるとした。ここで最大曲げモーメントは縁応力度が降伏した時の値であり、塑性域は考慮しないものとした。すなわち、

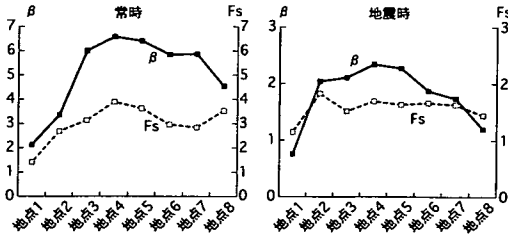


図-2 根入れ深さに関する信頼性指標 β と安全率

降伏応力度までは矢板に発生する縁応力度は主働側の土水圧に線形関係があると仮定した。信頼性評価のための性能関数は次式のようになる。

$$g_3 = M_u - M_{\max}(\tan \phi, c, \gamma_t, \delta_a) \quad (10)$$

ここで、 M_u : 矢板の降伏曲げモーメント、 M_{\max} : 主働側の土水圧などにより矢板に発生する最大曲げモーメントである。

3. 既設構造物の信頼性評価

(1) 基本変数の変動特性

基本変数である土のせん断強度（内部摩擦角 $(\tan \phi)$ 、粘着力 (c) ）、単位体積重量 (γ_t) 、主働側と受働側の壁面摩擦角 (δ_a, δ_p) の5つの変動特性はすべて正規分布と仮定し、すべて各地点でのそれぞれの土層で同一の値を用いる。ここで、実地盤での一般的な変動を念頭に置き⁶⁾、比較的均質な港湾の土質を対象として $\tan \phi$ と c の変動係数を10%、 γ_t の変動係数を5%とする。さらに、 δ_a には主働側 15° 、 δ_p には受働側 -15° を平均値として与え、10%の変動係数とする。その他のパラメータは確定値とする。また、地震時に考慮する水平震度は既往の設計値を使用する。

(2) 信頼性指標

既設の8個所の矢板式係船岸を対象に、破壊点まわりのテーラー展開に基づく一次近似信頼性法 (First-order Reliability Method: FORM)⁹⁾ を用いて、信頼性指標 β による評価を行う。ここでは、限界状態別に各地点の β の値と許容応力度設計の際の安全率との関係を検討する。

a) 根入れ深さに関する信頼性評価

矢板の根入れ深さに関する信頼性指標 β と安全率の関係を図-2 に示す。

根入れ深さに関しての信頼性指標 β は概ね常時で5.0~6.0、地震時で1.5~2.0となった。しかし、地

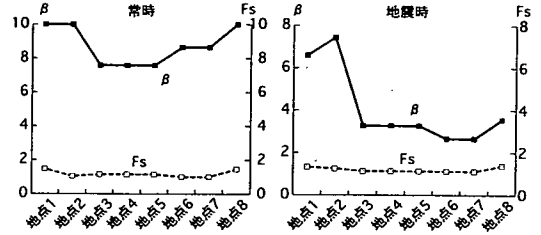


図-3 タイロッドに関する信頼性指標 β と安全率

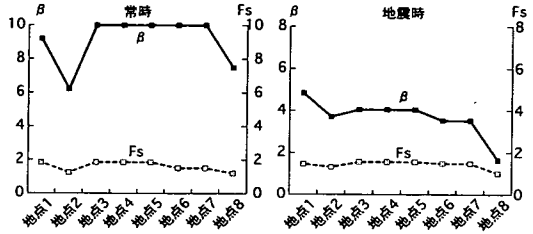


図-4 矢板断面に関する信頼性指標 β と安全率

点1, 2では常時に低い値を示している。また、安全率を見ても、信頼性指標の大小と比較的關係しているが、必ずしも比例した結果ではないことがわかった。

b) タイロッドに関する信頼性評価

タイロッドに関する信頼性指標 β と安全率の関係を図-3 に示す。

タイロッドの場合は根入れに関する信頼性指標 β とは逆に、地点1, 2に関しては大きな信頼性指標 β となったが、概ね常時で8.0~10.0、地震時で3.0~4.0である。また、タイロッドの設計の安全率は比較的一定であるが、信頼性指標で見ると異なっていることがわかる。これは、安全率が入力パラメータの不確定性を定量的に扱うことができない指標のためである。

c) 矢板断面に関する信頼性評価

矢板断面に関する信頼性指標 β と安全率の関係を図-4 に示す。

矢板断面に関して、信頼性指標 β は概ね常時で8.0~10.0、地震時で3.0~4.0となった。これは、多くの場合、許容応力度に対しても安全性余裕を考慮して設計されたためと考えられる。なお、地点8は従来の設計法においても地震時の安全率が低く、このため信頼性指標も他の地点と比べてかなり小さくなった。

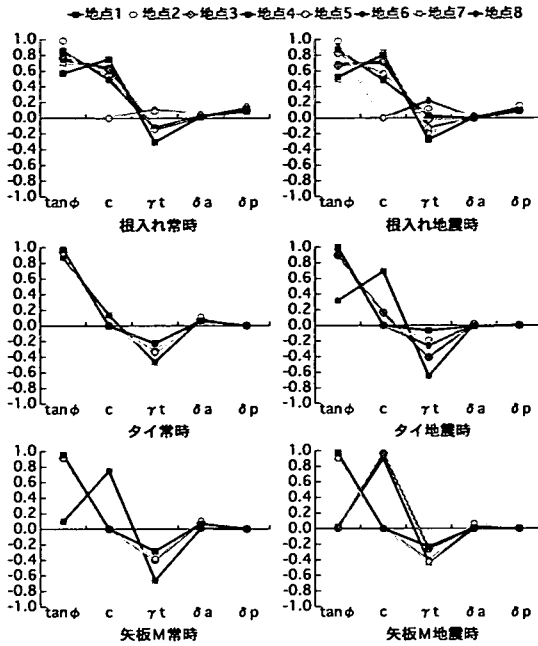


図-5 各パラメータの感度解析結果

(3) 入力パラメータの感度解析

感度解析では、入力パラメータが限界状態を表す性能関数に与える影響を感度係数で評価する。ここで用いる感度係数は、FORM から算出される標準正規空間上での破壊点までの方向余弦である単位ベクトルであり、 α_i と表現される⁹⁾。この感度係数は、変動特性を考慮すべき入力パラメータの選択と、部分係数法へのコードキャリブレーションに利用できる。まず、各限界状態別の感度係数 α_i を図-5 に示す。

根入れ深さに関する感度係数は、比較的パラメータごとに一定の値となっているものの、地震時で単位体積重量が正負に渡ってばらついている。これは、各地点での土層構成により、影響がかなり異なっているためである。図中の折れ線は地点ごとに区別して表していないが、解析の結果以下のことがわかっている。地点2は砂質土層のみのため、粘着力の感度係数が0となっている。また、タイロッドの張力に関しては、地点6,7の内部摩擦角の感度係数が小さく、粘着力の感度係数が大きい。これは、考慮されている主働土圧の対象領域に粘性土層が多いためである。さらに、矢板の曲げモーメントに関しても同様の傾向が現れているだけでなく、地震時には地点3~5もこの傾向が現れた。

主働側と受働側の土圧は、いわば荷重側と抵抗側と

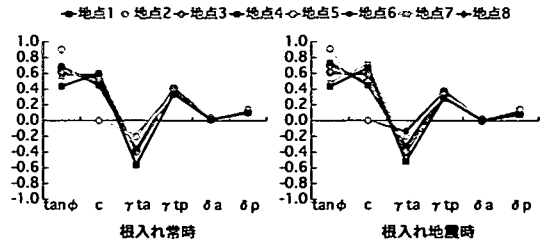


図-6 矢板の根入れ深さに対する感度解析

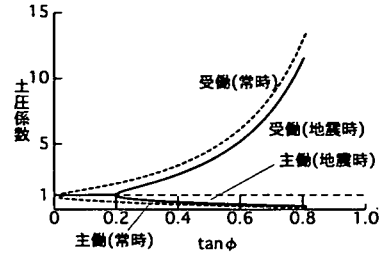


図-7 内部摩擦角と土圧係数

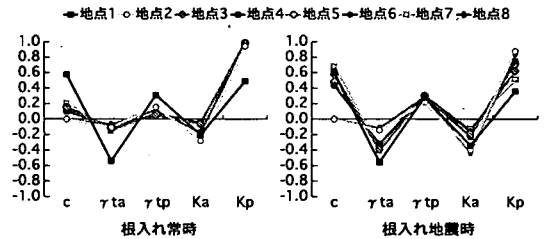


図-8 土圧係数の感度解析

みなすことができる。Eurocodes³⁾では、このような場合、単位体積重量の部分係数を安全側 (favourable) と危険側 (unfavourable) で区別されていることから、別パラメータとして検討した。図-6 に主働側と受働側の単位体積重量を γ_{ta} , γ_{tp} としたときの感度解析結果を示す。これらの結果、 γ_{ta} と γ_{tp} の感度係数は、荷重側と抵抗側の相反する傾向を表しており、別の部分係数として設定した方がよいことがわかる。

(4) 各パラメータと土圧係数の感度の関係

材料物性値に部分係数を作用させるか、それを用いて計算された抵抗値に部分係数を作用させるかは、それらの非線形関係に依存すべきであるとの考え方がある⁸⁾。一般的には大きく変化する方に部分係数を作用させること、特にせん断抵抗を照査する摩擦

材料については材料物性値に作用させることが提案されている。ここでは、内部摩擦角 $\tan\phi$ と主動側および受働側の土圧係数 K_a, K_p のどちらに部分係数を作用させた方が適しているかを検討する。ただし、港湾の現行設計基準では粘性土は直接に土圧を算定するため、ここでは対象外とする。

図-7に内部摩擦角 $\tan\phi$ と土圧係数 K_a, K_p の関係を示す。図中の地震時の水平震度は0.2としたものである。砂質土の場合、主動側の常時・地震時の土圧係数は内部摩擦角である $\tan\phi$ の増加に伴って減少し、逆に受働側の常時・地震時の土圧係数は急激に増加することがわかる。

図-8に矢板の根入れ深さに関する感度として、 $\tan\phi$ の代わりに K_a と K_p を用いたときの感度解析結果を示す。 $\tan\phi$ の感度係数に比べ、 K_a は小さく、 K_p は同様の値となった。これは、図-7からもわかるように、 K_a は K_p に比べ、 $\tan\phi$ と線形性が強いが、 $\tan\phi$ の影響は小さい。これに対し、 K_p は $\tan\phi = 0.58 \sim 0.84$ ($\phi = 30^\circ \sim 40^\circ$) の間では、弱い非線形性もあらわれるが影響は大きく、 $\tan\phi$ と同様の感度係数となった。そこで、設計照査式の使用性といった意味から $\tan\phi$ に部分係数を作用させる形式を採用する。

4. 部分係数の設定

(1) 部分係数形式

今回の検討では、設計照査式を各限界状態に対応するように以下のように設定する。

a) 矢板の海底面への根入れ深さに関する安定性

$$M_p(\tan\phi, c, \gamma_{tp}, \delta_p; \gamma_{\tan\phi}, \gamma_c, \gamma_{\gamma_{tp}}, \gamma_{\delta_p}) - M_a(\tan\phi, c, \gamma_{ta}, \delta_a; \gamma_{\tan\phi}, \gamma_c, \gamma_{\gamma_{ta}}, \gamma_{\delta_a}) \geq 0 \quad (11)$$

b) タイロッドの張力に関する安全性

$$\sigma_y - \sigma(\tan\phi, c, \gamma_{ta}, \delta_a; \gamma_{\tan\phi}, \gamma_c, \gamma_{\gamma_{ta}}, \gamma_{\delta_a}) \geq 0 \quad (12)$$

c) 矢板の最大曲げモーメントに関する安全性

$$M_u - M_{\max}(\tan\phi, c, \gamma_{ta}, \delta_a; \gamma_{\tan\phi}, \gamma_c, \gamma_{\gamma_{ta}}, \gamma_{\delta_a}) \geq 0 \quad (13)$$

一般的な部分係数法による設計照査式は、以下に示すように荷重や材料特性に部分係数を作用させる形式である。

$$R(f_k/\gamma_m) - S(\gamma_f \cdot F_k) \geq 0 \quad (14)$$

ここで、 R は抵抗関数、 S は荷重効果関数を表し、 f_k : 材料特性の特性値、 γ_m : 材料係数、 F_k : 荷重の特性値、 γ_f : 荷重係数である。

しかし、ここでは材料特性のみ基本変数としていることから、設計値を f_d とすると、それぞれの部分係数は次式で算定できる。

$$\gamma_m = f_k/f_d \quad (15)$$

(2) 設計値による方法

部分係数 γ_{m_i} を決定する方法には主に2つ提案されている⁹⁾。設計値に基づく方法とコード最適化に基づく方法である。どちらも、目標信頼性指標 β_t をもとに設定する方法である。ここでは、比較的算定容易な設計値による方法を用いる。

基本変数 X_i の抵抗側の設計値は、限界状態に対する目標信頼性指標 β_t と FORM から算定される感度係数 α_i を用いて与えられる。

$$F(x_{d_i}) = \Phi(-\alpha_i\beta_t) \quad (16)$$

$F(x_{d_i})$ は X_i の確率分布関数である。もし、 X_i が正規分布とすれば、

$$x_{d_i} = \mu_i(1 - \alpha_i\beta_t V_i) \quad (17)$$

となる。ここで、 μ_i と V_i は X_i の平均値と変動係数である。

よって、設計に用いる特性値や公称値を x_{k_i} とすると、部分係数 γ_{m_i} は、

$$\gamma_{m_i} = \frac{\mu_i}{x_{k_i}} \frac{1}{(1 - \alpha_i\beta_t V_i)} \quad (18)$$

となる。

(3) 目標信頼性指標 β_t と部分係数の設定

目標信頼性指標 β_t は、既往構造物が有する信頼性指標 β を参考に設定することが望ましいが、あまりにも幅が広い⁷⁾。そこで、常時と地震時に各3種類の目標信頼性を設定し、それぞれに部分係数を設定した。すなわち、常時の目標信頼性指標 $\beta_t = 2.0, 3.0, 4.0$ 、地震時の目標信頼性指標 $\beta_t = 1.5, 2.0, 2.5$ とした。

また、部分係数を求めるために用いる感度係数は、既往構造物における感度解析の結果を用いるが、常時・地震時や対象とする破壊モードである限界状態によって感度係数がばらつく。本来、これらを区別して設定する方が理想であるが、ここでは設計照査式を複雑にすることにより設計ミスを避けるため、平均的な値を1種類設定した。設定した感度係数を表-1に示す。ここで、 $\tan\phi$ と c の感度係数が相互に大きく設定しているのは、砂質土層または粘性土層では、限界状態にはどちらか一方の感度係数しか影響しないためである。また、受働側の単位体積

表-1 感度係数

パラメータ	$\alpha_{\tan \phi}$	α_c	$\alpha_{\gamma_{ta}}$	$\alpha_{\gamma_{tp}}$	α_{δ_a}	α_{δ_p}
感度係数	0.9	0.7	-0.6	0.1	0.0	0.1

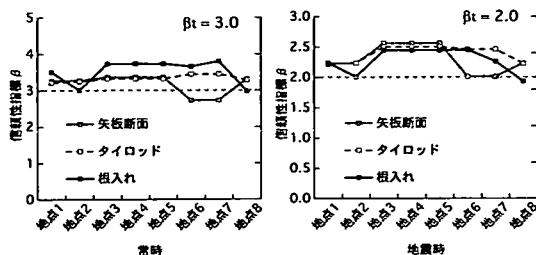


図-9 試設計による信頼性指標 β_{new}

重量の $\alpha_{\gamma_{tp}}$ は、図-6 に示した感度解析結果では 0.4 程度となっているが、感度係数が本来単位ベクトルであるという性格上、これを大きくすることは安全性余裕が大きくなりすぎることから、ここでは 0.1 とした。

感度係数を 1 種類としているため、常時と地震時の部分係数は目標信頼性指標 β_t の差のみとなる。そこで、式 (18) に従って計算された部分係数をまとめて表-2 に示す。表中の特性値 f_k は平均値としている。 β_t が大きいほど、また感度係数と変動係数が大きいほど部分係数は 1.0 から離れる。さらに、主働側の単位体積重量 γ_{ta} のように感度係数が負になると部分係数が 1.0 より小さくなり、設計値は特性値 (平均値) より大きくなるのがわかる。

5. 試設計とその信頼性評価

(1) 試設計による信頼性指標 β_{new}

実務的な設計照査式を作成するときには、部分係数をもう少し定める必要がある。しかし、ここでは感度係数の設定におけるばらつきを部分係数に直接に反映させて、その影響を検討するため、表-2 の値を用いて既設構造物の試設計を行った。試設計の結果決定された断面の信頼性指標 β_{new} の一部 (常時 $\beta_t = 3.0$ 、地震時 $\beta_t = 2.0$) を図-9 に示す。

この結果から、どの信頼性指標 β_{new} も、多少ばらつきはあるものの目標信頼性指標 β_t に近いことから、ほぼ一定の信頼性をもつ断面が設定されていることがわかった。しかし、根入れ深さについては、地点 2, 8 が比較的目標値に近く、他は常時で 1.0、地

表-2 部分係数

入力パラメータの種類	変動係数 V	感度係数 α	目標信頼性 β_t	部分係数設定値 γ_m	
tan ϕ	10%	0.90	1.50	1.16	
	c	10%		0.70	1.12
	γ_{ta}	5%		-0.60	0.96
	γ_{tp}	5%		0.10	1.01
	δ_a	10%		0.00	1.00
	δ_p	10%		0.10	1.02
tan ϕ	10%	0.90	2.00	1.22	
	c	10%		0.70	1.16
	γ_{ta}	5%		-0.60	0.94
	γ_{tp}	5%		0.10	1.01
	δ_a	10%		0.00	1.00
	δ_p	10%		0.10	1.02
tan ϕ	10%	0.90	2.50	1.29	
	c	10%		0.70	1.21
	γ_{ta}	5%		-0.60	0.93
	γ_{tp}	5%		0.10	1.01
	δ_a	10%		0.00	1.00
	δ_p	10%		0.10	1.03
tan ϕ	10%	0.90	3.00	1.37	
	c	10%		0.70	1.27
	γ_{ta}	5%		-0.60	0.92
	γ_{tp}	5%		0.10	1.02
	δ_a	10%		0.00	1.00
	δ_p	10%		0.10	1.03
tan ϕ	10%	0.90	4.00	1.56	
	c	10%		0.70	1.39
	γ_{ta}	5%		-0.60	0.89
	γ_{tp}	5%		0.10	1.02
	δ_a	10%		0.00	1.00
	δ_p	10%		0.10	1.04

震時で 0.5 程度上回ってしまった。また矢板断面では、粘性土層が主体である地点 6, 7 では常時で目標値を下回り、地震時では他の地点よりは小さく、目標値となっている。このように、部分係数を比較的細かく設定したが、砂質土層・粘性土層、常時・地震時、また 3 種類の限界状態に対して同一の部分係数で設計照査式を設定したため、このようにばらつきが生じたものである。

(2) 信頼性指標 β_{old} と β_{new} の比較

既設断面の各限界状態の信頼性指標 β について、従来と今回の試設計の結果を比較した結果を図-10 に示す。

これらより、従来ではばらつきを有していた信頼性が、今回のように設定した部分係数法によれば、ある程度目標とした信頼性に近づける設計が可能となることがわかった。矢板の根入れ深さとタイロッドは目標値を上回るように設定できているが、矢板

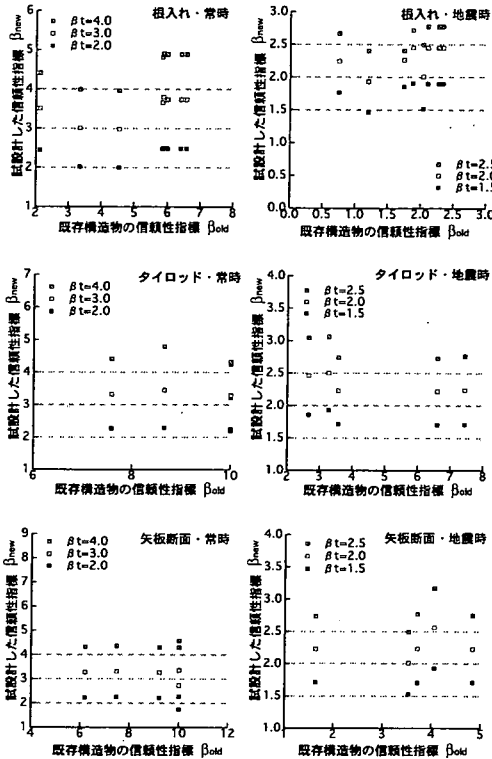


図-10 β_{old} と β_{new}

断面については常時で目標値を下回ることがあることが明らかになった。これは、各限界状態と同じ部分係数を用いるという簡便化の短所であると考えられる。この点については、実際の矢板やタイロッドの断面は離散化された製品を使用するため、少し高い信頼性指標になることが想定されるが、検討を継続していく必要があると考えている。

6. おわりに

我が国では、構造物設計の分野でも国際整合性を図るため、信頼性に基づいた限界状態設計法への移行が検討されている。その1つの性能照査の形式に部分係数法がある。部分係数法は、理論的には構築されているものの、実際の適用に関しては検討課題も多い。

そこで本研究では、部分係数法の適用性を目的として、矢板式係船岸の設計を対象とした部分係数の設定に関する検討を行った。特に不確定性が大きい地盤パラメータの不確定性を考慮して、既設の矢板係船岸を対象とした信頼性評価を実施し、同時にこ

れらのパラメータの感度係数を検討した。信頼性指標 β で評価された信頼性は、従来の安全率より不確定性の影響を定量的に表現でき、従来の設計法で同じ安全率を用いて設計されても異なることがわかった。また、パラメータの感度のうち、内部摩擦角と粘着力は砂質土層と粘性土層の割合によって異なり、その影響は常時と地震時でも異なることがわかった。さらに、地震時において受働側と主働側の影響を受ける矢板の根入れ深さに関しては、単位体積重量が危険側にも安全側にも作用する場合があるため、これらを分離した方がよいことがわかった。さらに砂質土層のみの土圧係数に部分係数を乗じる形式も検討し、 $\tan \phi$ に部分係数を作用させても同様の結果になることを考察した。

これらの結果を考慮して、感度係数を用いた設計値に基づく方法により部分係数の設定を行った。設定された部分係数を用いて設計された断面は、目標信頼性指標 β_t に近い信頼性を有し、信頼性のばらつきが小さいことが確認できた。

しかしながら課題も多い。特に根入れ深さに関する安定性は他のケースと限界状態のメカニズムが少々異なる。現行では簡便さからフリーアースサポート法が用いられていることが多いことから、今回はこの方法を用いた。しかし実際にはロウの方法が現象をより精度よく表現していると考えられていることから、性能関数を見直すことが重要である。これと平行して、多数の既存設計例を集め、統計的に信頼性の高い検討を行っていくことや、まるめの値を用いながら最適な部分係数を設定するなど必要と考えている。今後は、このような課題を解決すると共に、さらに他の構造物に本研究で示した信頼性解析手法を適用して部分係数を設定していくなどの展開を図りたい。

参考文献

- 1) SEAOC: Vision 2000 - Performance based seismic engineering of buildings, Vision 2000 committee Final report, 4 Volumes, Sacramento, CA, 1995.
- 2) ISO: ISO2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998.
- 3) CEN: Eurocode: Basis of Structural Design, Draft prEN 1990, 2000.
- 4) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, SI Unit, 2nd edition, 1998.
- 5) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 6) 土質工学会編: 土質基礎の信頼性設計, 土質基礎ライブラリー 28, 土質工学会, 1985.
- 7) Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J.: Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, 1982.
- 8) Simpson, B.: Partial factors: where to apply

them?, Proc. Int. Workshop on Limit State Design
in Geotechnical Engineering, ISSMGE, pp.145-
154, 2000.

9) Ditlevsen, O. and Madsen, H.O.: Structural Reli-

ability Methods, John Wiley & Sons, 1996.

(2001. 6. 20 受付)

A STUDY ON THE DESIGN CODE USING PARTIAL FACTORS FOR ANCHORED SHEET PILE WALLS

Makoto SUZUKI, Shinya TSUJIOKA, Yoshiaki KIKUCHI, Shuji YAMAMOTO and Kiyoshi ISHII

It is an urgent task in Japan to revise structural design codes in order to meet the performance-based criteria and the international code harmonization. To do this, a new design code based on the reliability principles has to be developed. This study aims at establishing the partial factor design format for harbor structures. Reliability assessment of existing anchored sheet pile walls is firstly performed in terms of overall stability and failures of the anchors and the wall, taking account of uncertainty of soil parameters. The first-order reliability method (FORM) is utilized to evaluate the reliability as well as sensitivity of random variables involved. Based on the result thus obtained, partial factors are set within the framework of design value method. Finally, the structure designed based on the proposed partial factors is found to have the same degree of reliability as specified.