

# 感度分析と設計値法による杭基礎における部分係数の評価

岐阜大学工学部

学生員 ○ 鈴木優輔

正員

本城勇介

清水建設

鈴木誠

## 1. はじめに

構造信頼性解析の分野はここ 10 年間に著しく発展してきた。杭基礎の設計においては、従来使用されてきた許容応力度設計法に基づくコードから、限界状態設計法（レベル 1 法）に基づくコードへと改訂作業が進行中である。この方法は、構造物と荷重に関する主な基本変数の特性値あるいは公称値にかかるいくつかの部分係数を用いて構造要素を基礎とし、それらに適当な構造信頼性を与える方法である。一方で、信頼性解析の方法として、破損領域の理想化、各確率変数の結合確率分布の単純化を行い、杭基礎の近似的な破損確率を得るためにある繰返し計算の手順を用いるレベル 2 法がある。

レベル 1 法で重要な要素となる部分係数を求める上でレベル 2 法は非常に大きな役割を果たす。そこで本研究では、杭基礎に焦点を当て、現行で設計された水平力を受ける杭基礎に関する部分について信頼性解析を行い、この設計法がどの程度の目標信頼性に基づいた信頼性を持っているか把握する。そして、レベル 2 法によって最適な部分係数を決定し、レベル 1 法のフォーマットに書き換えるを試みる。

## 2. 研究の方法

研究の方法としては次のようにして行う。まず、1). 「道路橋示方書・同解説」を用いて設計式の比較検討と、地震力の把握をし、性能マトリックスを用い構造物の重要度を考慮した限界状態の定義と提案を行う。2). 杭に作用する荷重の組合わせや地盤反力係数等の基本変数を決定し杭基礎の水平支持力に関する現行設計式の不確実性を決定する。3). 現行設計式で設計された杭基礎の水平支持力の信頼性を解析する。4). 3). の結果より目標破損確率を定め、レベル 2 法により部分係数を決定し現行の設計法をレベル 1 法のフォーマットに書き換える。5). このプロセスにおける問題点を検討する。

## 3. 設計値法

### 3.1 設計値法

設計値法は、信頼性指標に関して **calibration** を行うためによく適応した方法である。

設計値法の中では設計値  $x_d$  は直接に示されていない。確率変数はまず、代表値  $x_k$  で表される。さらに一連の部分係数と荷重組合せ係数がある。多くの場合、基本的な要求項目は次のように定式化できる。

$$g(x_d) = R_d - S_d \geq 0$$

ここで、

$$S_d = S(F_d, a_d, \theta_d, \dots)$$

$$R_d = R(f_d, a_d, \theta_d, \dots)$$

$S$  は作用荷重、 $R$  は対応する抵抗で、

$$F_d = \gamma_f F_k \quad : \text{荷重パラメータの設計値}$$

$$f_d = f_k / \gamma_m \quad : \text{材料特性の設計値}$$

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad : \text{幾何学的特性の設計値}$$

$$\theta_d \quad : \text{モデルパラメータの設計値}$$

$k$  は特性値を示す。

通常、設計値  $\theta$  は、一般には、全体モデルにおける部分係数  $\gamma_{sd}$  と  $\gamma_{Rd}$  によって次式のように表現される。

$$S_d = \gamma_{sd} S(F_d, a_d, \dots)$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(f_d, a_d, \dots)$$

部分係数は、最初に設計値を見つけ、そして次式を適用することにより導かれる。

$$\gamma_f = \frac{F_d}{F_k}, \quad \gamma_m = \frac{f_k}{f_d}$$

上記の方法は、実用面から見ると扱いにくいいため、次の簡略化がしばしば行われる。

$$S_d = S(\gamma_F F_k, a_{nom})$$

$$R_d = R\left(\frac{f_k}{\gamma_M}, a_{nom}\right)$$

この場合、 $\gamma_F$  と  $\gamma_M$  は元の式と同じ値になるような方法で **calibration** が行われている。一般に、基本変数  $X_i$  の設計値は、限界状態に対する目標信頼性指標  $\beta_i$  と 5. で述べる計算方法から算定される感度係数  $\alpha_i$  を用いて与えられる。

$$F(x_{id}) = \phi(-\alpha_i \beta_i)$$

$F(x_i)$  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、

$$x_{id} = \mu_i (1 - \alpha_i \beta_i V_i)$$

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

### 3.2 説明のための例題

図.1 のような標準正規空間を考える。この時、信頼性指標  $\beta$  は、基本変数  $X$  の関数で表される限界状態破損面と原点との最短距離で定義され、この時の破損面上の点が設計点と呼ばれる。

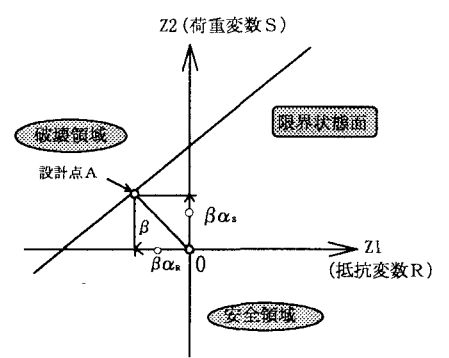


図.1 信頼性指標 β

設計点 A の座標は、感度ベクトル  $\alpha_R$ 、 $\alpha_S$  を用いて  $(-\beta \alpha_R, \beta \alpha_S)$  と表される。実際の設計では、 $R-S > 0$  であれば、構造物の安全性は確保される。ここで、

$$A_R = -\beta \alpha_R = \frac{X_R - \mu_R}{\sigma_R}, \quad A_S = \beta \alpha_S = \frac{X_S - \mu_S}{\sigma_S}$$

であるから、 $X_R - X_S > 0$ 、つまり、  
 $\mu_R - \beta_T \alpha_R \sigma_R \geq \mu_S + \beta_T \alpha_S \sigma_S$   
のとき、安全性が確保されるわけである。この式を部分安全係数形式に書き換えたときの係数項、

$$\frac{\mu_R}{R_n} (1 - \beta_T \alpha_R V_R), \quad \frac{\mu_S}{S_n} (1 + \beta_T \alpha_S V_S)$$

が抵抗、荷重のそれぞれの部分係数となる。

4. 計算例

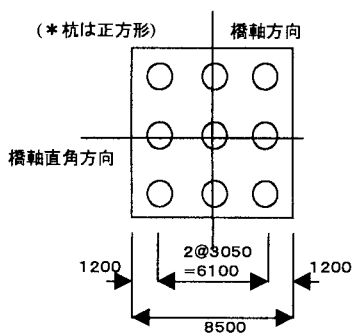
4.1 例題の概要と計算方法

「道路橋の耐震設計に関する資料」より、試算データ②を例題として示す。概要は以下のとおりである。

| データ名 | 試算データ②   |
|------|----------|
| 地盤種別 | Ⅱ種地盤     |
| 杭種   | 場所打ち杭    |
| 杭径   | D=1.2m   |
| 杭本数  | N=9本     |
| 杭長   | L=15.0m  |
| 杭自重  | W=25tf/本 |

地震作用外力による杭1本に作用する杭反力の増加分(tf)

| 橋軸方向  | 橋軸直角  |
|-------|-------|
| △ 161 | △ 147 |



フーチング底面中央における作用外力

|             |     | 常時   | 地震時  |      |
|-------------|-----|------|------|------|
|             |     |      | 橋軸方向 | 橋軸直角 |
| 鉛直力(tf)     | 死荷重 | 1510 | 1510 | 1510 |
|             | 活荷重 | 260  | 0    | 0    |
|             | 合計  | 1770 | 1510 | 1510 |
| 水平力(tf)     |     | 0    | 350  | 305  |
| モーメント(tf・m) |     | 0    | 2770 | 2550 |

ここでは抵抗側の基本変数として、N値の変動係数を一律 0.3 の正規分布とする。荷重側の基本変数は以下のように設定する。

|      | 平均値/基本値 | 変動係数  | 分布形  |
|------|---------|-------|------|
| 死荷重  | 1.00    | 0.015 | 正規   |
| 活荷重  | 0.50    | 0.200 | 対数正規 |
| 地震荷重 | 1.05    | 0.666 | 対数正規 |

R これらのデータをもとに杭 1 本あたりの作用荷重と抵抗の統計量を求めると以下ようになる。

作用荷重の統計量(杭1本あたり)

|         | 基本値   | 平均値   | 標準偏差  | 分布系   |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| Sd (tf) | 167.8 | 167.8 | 2.5   | 正規    |
| SI (tf) | 28.9  | 14.4  | 2.9   | 対数正規  |
| Se (tf) | 橋軸    | 161.0 | 169.1 | 111.6 |
|         | 橋軸直角  | 147.0 | 154.4 | 101.9 |

抵抗の統計量(杭1本あたり)

|          | 平均値 | 標準偏差  | 分布系 |
|----------|-----|-------|-----|
| Rpu (tf) | 339 | 101.7 | 正規  |
| Rsu (tf) | 393 | 117.9 | 正規  |
| W (tf)   | 25  | —     | —   |
| Ru (tf)  | 707 | 212.1 | 正規  |
| R'u (tf) | 418 | 125.4 | 正規  |

ここで、 $S_d$ :死荷重  $R_{pu}$ :先端支持力  
 $S_l$ :活荷重  $R_{su}$ :周面摩擦力  
 $S_e$ :地震荷重  $R_u$ :極限支持力  
 $R'_u$ :極限引抜き力

5.2 感度分析の結果

信頼性指標  $\beta$  とそれぞれの感度係数の計算結果を以下に示す。

信頼性指標と感度係数の値

|     |      | $\beta$ | $\alpha_{Rpu}$ | $\alpha_{Rsu}$ | $\alpha_{Sd}$ | $\alpha_{Sl}$ | $\alpha_{Se}$ |
|-----|------|---------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| 常時  | 橋軸   | 1.94    | 0.653          | 0.757          | -0.016        | -0.018        | —             |
|     | 橋軸直角 | 2.06    | 0.391          | 0.453          | -0.01         | —             | -0.801        |
| 地震時 | 橋軸   | 2.22    | —              | 0.373          | -0.008        | —             | -0.928        |
|     | 橋軸直角 | 2.36    | —              | 0.378          | -0.008        | —             | -0.926        |

5.3 部分係数の算定

試算データ②のようなデータをこの他に6ケース用意し、同じように計算を行った。その結果をもとに計算された目標信頼性指標  $\beta_t$  と感度係数  $\alpha_i$  から算定された各部分係数を以下に示す。

$\beta_t$  と部分係数の値

| Case | $\beta_t$ | $\gamma_{Rpu}$ | $\gamma_{Rsu}$ | $\gamma_{Sd}$ | $\gamma_{Sl}$ | $\gamma_{Se}$ |
|------|-----------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| 常時   | 3.28      | 0.44           | 0.33           | 1.00          | 0.50          | -             |
| 地震時  | 2.25      | 0.77           | 0.63           | 1.00          | -             | 1.70          |
| 押込み  | 2.24      | 0.77           | 0.64           | 1.00          | -             | 1.68          |
| 地震時  | 1.83      | -              | 0.82           | 0.97          | -             | 1.61          |
| 引抜き  | 1.83      | -              | 0.82           | 0.97          | -             | 1.62          |

6. むすび

感度分析の結果については、各データによって感度係数の値が変化するわけであるが、それらの値が統計量のどの値に依存しているのか(例えば、杭長など)検討していく必要がある。

今後、より最適な部分係数を決定していくうえで、杭基礎の信頼性解析、感度分析の結果の考察、そして、部分係数の評価と検討を行っていく予定である。詳しい結果、考察については講演時に譲る。

参考文献

- 1) 道路橋示法書
- 2) Ditlevsen, o, and Madsen, H. O. (1996)  
Soruuctural Reliabilie, Methods, PP.303-316, Wiley