

高耐力マイクロパイル水平支持力の信頼性解析

武蔵工業大学 学生員 佐丸雄一郎
 武蔵工業大学 正会員 丸山 収
 ヒロセ(株) 正会員 大谷 義則

1. はじめに

高耐力マイクロパイル(HMP)の設計では、押し込み支持力および水平支持力に関して規定された限界状態に対して安全であることを照査する。すなわち押し込み支持力に関して、地盤の支持力不足による沈下、鋼管部の圧縮破壊、非鋼管部の圧縮破壊の限界状態に関する照査を行う。一方水平支持力に関しては、杭頭水平変位、杭体の最大曲げ応力（杭頭位置）の2つの限界状態を照査する。

本研究では水平支持力の限界状態を対象として、現行の許容応力度設計法により設計された杭体の安全性指標を求めることで、現行許容応力度設計法と信頼性設計法の Code Calibration を行っている。次に、水平支持力を照査する2つの限界状態照査式に部分安全係数を考慮し、部分安全係数は、目標安全性指標を満足するように設定するという設計水準レベル1による信頼性設計法の事例を示している。

2. 性能関数の設定と安全性指標の算出

本研究では、予め水平支持力に関して現行設計基準により、2つの限界状態式の照査を行い、異なる地盤条件における43本のHMPの設計を行う。次に設計された杭の安全性指標を算出する。その際、限界状態式をもとに性能関数 Z_1 および Z_2 を与え、性能関数が負となる状態を破壊と見なすこととする。

杭頭水平変位に関して性能関数 Z_1 を式(1)のように設定する。¹⁾

$$z_1 = \delta_a - \frac{H}{4EI_{HMP}\eta_1^3} \quad (1), \quad \eta_1 = \sqrt[4]{\frac{K_H d}{4EI_{HMP}}} \quad (2)$$

ここで、 δ_a ：許容水平変位(m)、 H ：杭頭水平荷重(KN)、 EI_{HMP} ：HMPの曲げ剛性(KN・m²)、 η_1 ：杭の水平変位特性値(m⁻¹)、 K_H ：水平方向地盤反力係数(KN/m³)、 d ：杭の直径(m)である。

次に杭体の曲げ応力に関して性能関数 Z_2 を式(3)のように設定する。

$$Z_2 = \sigma_a - \frac{N}{A} - \frac{HR}{2\eta_2 I_s} \quad (3), \quad \eta_2 = \sqrt[4]{\frac{K_H d}{4EI_s}} \quad (4)$$

ここで、 σ_a ：許容曲げ応力(KN/m²)、 A ：杭の断面積(m²)、 N 作用軸力(KN)、 H ：杭頭水平荷重(KN)、 η_2 ：杭の曲げ特性値(m⁻¹)、 I_s ：鋼管部の断面2次モーメント(m⁴)、 R ：杭の半径(m)である。

安全性指標は、AFOSM法を用いて算出するが、式(1)および式(3)に示した性能関数において、不確定性の大きい H 、 K_H 、 σ_a および N を確率変数とし、各パラメーターの分布特性は、既往の研究・調査を参考にし、表-1に示した値を用いることとする。また、地盤条件、荷重条件等の詳細なデータは省略するが、現行設計基準によるHMPの設計は、標準的に用いられている油井用継目無鋼管（外径：17.8(cm)、肉厚：1.265(cm)）を共通に用いて行った。

表 1 確率変数の諸元

確率変数	平均値 / 公称値	変動係数	分布形
H	1.0	0.66	正規
K_H	1.0	0.45	正規
N	1.0	0.1	正規
σ_a	1.0	0.2	正規

現行設計基準をもとに設計された、異なる地盤条件の43本のHMPに、表-1の不確定性を与え、安全性指標を求めた。性能関数の違いにより分布形状は異なるが、性能関数 Z_1 において、安全性指標の平均値 $\bar{\beta}_1 = 1.56$ 、標準偏差 $\sigma_{\beta_1} = 0.337$ 、性能関数 Z_2 に対しては、安全性指標の平均値 $\bar{\beta}_2 = 1.04$ 、標準偏差 $\sigma_{\beta_2} = 0.373$ であった。

3. 部分安全係数の算出

部分安全係数設計では、設計強度および設計荷重の公称値に対して部分安全係数を定め、それらの係数を有する設計基準式に基づいて決定論的手法で設計を行う。本研究では、目標または要求性能を目標安全性指標に表現し、信頼性設計法の設計水準レベル1により

キーワード 高耐力マイクロパイル、信頼性設計、部分安全係数

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

部分安全係数を求める．ここでは特に理由はないが，目標安全性指標の設定は，先に求めた安全性指標を用いることとした．すなわち，各限界状態に対して， $\beta_i^T = \bar{\beta}_i + 0.5\sigma_{\beta_i}$ ($i=1, 2$) として， $\beta_1^T = 1.73$ ， $\beta_2^T = 1.223$ とした．これらの目標信頼性指標を満足するように部分安全係数を求める．

部分安全係数を考慮して，限界状態1の設計基準式 Z_1' を式(5)とする．

$$Z_1' = \delta_a - \frac{\gamma_H H_n}{\phi_G G_n} \quad (5), \quad G_n = \{G_n\} = \left\{ 4EI_{HMP} \eta_1^3 \right\}_n \quad (6)$$

ここで， γ_H ：水平荷重 H の部分安全係数， H_n ：水平荷重 H の公称値， G_n ：水平地盤反力係数 K_H を含む関数 G の公称値， ϕ_G ：関数 G の部分安全係数である．

限界状態2の設計基準式 Z_2' を式(7)とする．

$$Z_2' = \phi_{\sigma a} \sigma_a - \frac{\gamma_N N_n}{A} - \frac{\gamma_H H_n R}{\phi_J J_n} \quad (7)$$

$$J_n = \{J\}_n = \left\{ 2\eta_2 I_S \right\}_n = \left\{ 2I_S^4 \sqrt{\frac{K_H d}{4EI_S}} \right\}_n \quad (8)$$

ここで， $\phi_{\sigma a}$ ：許容曲げ応力の部分安全係数， γ_N ：作用軸力（死荷重） N の部分安全係数， N_n ：作用軸力（死荷重） N の公称値， ϕ_J ：水平地盤反力係数 K_H を含む関数 J の部分安全係数， J_n ：水平地盤反力係数 K_H を含む関数 J の公称値である．

信頼性設計法の水準レベル1による部分安全係数の算出方法については，文献(2)に委ねることとし，計算結果を表-3に示す．表-3に示した値は，43本のHMPから算出された部分安全係数の平均値である．

表-3 部分安全係数の計算結果

Z_1'		Z_2'			
γ_H	ϕ_G	γ_N	γ_H	$\phi_{\sigma a}$	ϕ_J
1.56	0.44	1.004	1.611	0.888	0.866

4. 信頼性設計水準レベル1に基づく杭体の設計

表-3に示した部分安全係数を式(5)および式(7)に用い，設計変数は限界状態1および限界状態2ともに管径 d として部分安全係数法により設計を行った．各杭体ごとの管系 d を設計変数として鋼管の肉厚に関しては，1.265(cm)として固定した．

図-1および図-2に，本研究で行った安全性指標の計算結果を示している．図において DESIGN#1 は現行設計基準で設計された杭体，DESIGN#2 は式(5)

または式(7)を満足するように管径 d を設計変数とした場合である．

ここでは，管系を任意の値に調整できることとしているので，目標安全性指標と非常によく対応をしていることがわかる．

次に，HMP の設計では，経済面，施工性を考慮して規格品を用いることが一般的である．HMP の構成材料，管径は多岐にわたるが，油井用継手無鋼管の管径17.8(cm)，肉厚：1.265(cm) - 杭体1と管径21.9(cm)，肉厚：1.143(cm) - 杭体2の規格品のいずれかを用いることとした．ここでは，仮に部分安全係数法により再設計された杭体の管径 d について，20.0(cm)以下の場合には杭体1，20.0(cm)を超えるものは，杭体2を用いることとして安全性指標の計算を行った．

図-1および図-2において DESIGN#3 は標準的な2種類のうちいずれかの管径を採用した場合である．

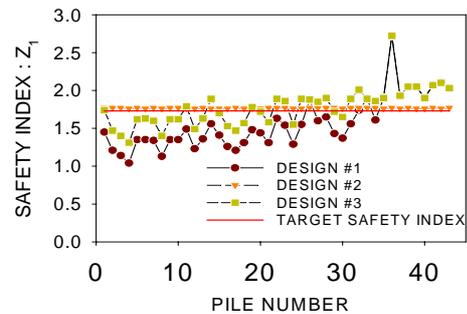


図-1. 限界状態1に対する安全性指標

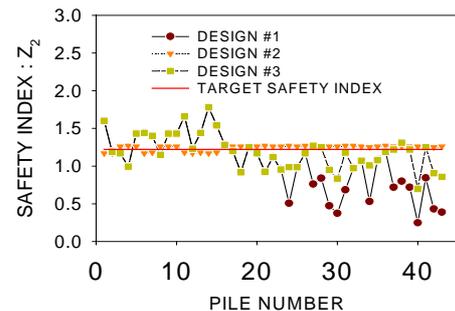


図-2. 限界状態2に対する安全性指標

DESIGN#3 については，DESIGN#1と比較して，値のばらつきが小さく，目標安全指標に近づいていることがわかる．ただし，単一の杭体では，非常に安全性が低いことが確認されたので，群杭としての設計法について検討していくことを考えている．

参考文献：1)高耐力マイクロパイル研究会：高耐力マイクロパイル設計・施工マニュアル(案)，2002.9.，2)星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986．