

高耐力マイクロパイルの押し込み支持力の信頼性解析

大谷 義則¹・浅倉 佳²・星谷 勝³

¹ 正会員 ヒロセ株式会社 補強土事業本部 (〒550-0015 大阪府大阪市西区南堀江 1-12-19)

² 学生会員 武蔵工業大学大学院 土木工学専攻 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

³ 正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

高耐力マイクロパイルは場所打ち杭のため、施工依存性が高く、地盤特性の影響を強く受ける。したがって、支持力に対して不確定要因が様々に関与するため、設計における安全性の確保において十分な配慮が必要である。本論では、押し込み支持力として、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3つの限界状態を対象とし、各限界状態の性能関数を設定している。そして、それらの構成要素の不確定性を確率論的に検討した上で、部分係数設計法を高耐力マイクロパイルの押し込み支持力の設計に適用することを検討している。

Key Words: *high capacity micro pile, partial factor design, uncertainty, reliability theory*

1. はじめに

マイクロパイル(Micro Pile, 以下MP)は、口径 300 mm 以下の小口径場所打ち杭の総称であり、1952 年にイタリアで F. Lizzi によって開発されたルートパイルをその起源としている¹⁾。Lizzi は、口径 150mm 以下の小径で異形棒鋼とグラウトで構成される MP を考案し、主として地盤補強や構造物のアンダーピニングに用いた。

MP は、現在では世界各地に広まり、イギリス、ドイツ、フランス、アメリカ、またアジアの一部でも用いられており^{2),3)}、我が国においては 1979 年に導入され 1980 年に東京都飛鳥山展望台⁴⁾での最初の施工事例を皮切りに現在まで 700 件の施工実績を数えている。アメリカ合衆国カリフォルニア州では、1971 年、1989 年、1994 年に大地震に見舞われ、道路橋に多くの被害が生じ、それ以来橋脚基礎の補強、落橋防止補強等に用いられている⁵⁾。

一方、本論で対象とする高耐力マイクロパイル(High-Capacity Micro Pile, 以下HMP)は、特に 1989 年のロマブリエタ地震以後、橋梁基礎補強として適用されている⁶⁾。日本でも、1995 年に発生した兵庫県南部地震以後、新設構造物、既設構造物に対する耐震性の向上を図る新技術の1つとしてHMP工法が認知され^{7),8)}、差海橋の橋脚の耐震補強に採用された⁹⁾。

HMP は、図-1 に示すように異形鉄筋と鋼管(表-1)の両方を組み合わせ、小口径でも高耐力・高支持力の発現を可能にした杭である¹⁰⁾。この杭は、橋梁基礎部の耐震補強を目的とする増杭工法として適用した場合、細径で高耐力のため増しフーチング面積が小さくてすむことと、小型の施工機械を用いて空頭 3.5m の制約条件下で施工可能であることにより既設構造物補強に適した特長がある¹¹⁾。

一方、HMP は場所打ち杭のために、支持力に対する施工依存性が高く、地盤特性の影響を強く受ける。この結果、支持力に対して不確定要因がさまざまに関与するため、鉛直支持力、水平力、沈下量等の照査という設計段階における安全性の確保において、不確定要素に対する十分な配慮が必要となる。

しかし、高耐力マイクロパイル設計・施工マニュアル(案)¹¹⁾の中で示されている許容応力度設計法によるHMP工法の現行設計指針(案)において、代表的な支持力である許容押し込み支持力の設定は、荷重・強度に対して1つに集約された安全率を用いて安全性を照査する設計法となっている。

HMP の杭耐力は、杭本体の強度、地盤との周面摩擦係数等から構成されていて、それぞれの特性に起因する不確定要素が存在する。個々の不確定要素を定量的に評価するためには、それぞれの要因の変動性に応じ

表-1 形状規格¹⁰⁾

種類	規格	寸法	強度・品質
補強鋼管	油井管 API 5CT,N-80 f_{sy} : 80~110ksi (560~760 N/mm ²)	外径 178mm 肉厚 12.7mm	$f_c=703\text{N/mm}^2$
補強鉄筋	ねじ筋 異形棒鋼 SD490 D51	公称径 51mm 断面積 20.3cm ²	$f_b=490\text{ N/mm}^2$
グラウト	セメント ペースト W/C = 45 % $F_c \geq 35\text{ N/mm}^2$		$\sigma_{28}=44\sim 58\text{ N/mm}^2$ (平均 $\sigma_{28}=53\text{ N/mm}^2$)

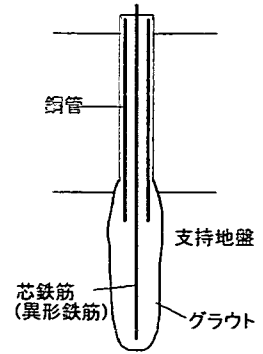


図-1 高耐力マイクロパイル

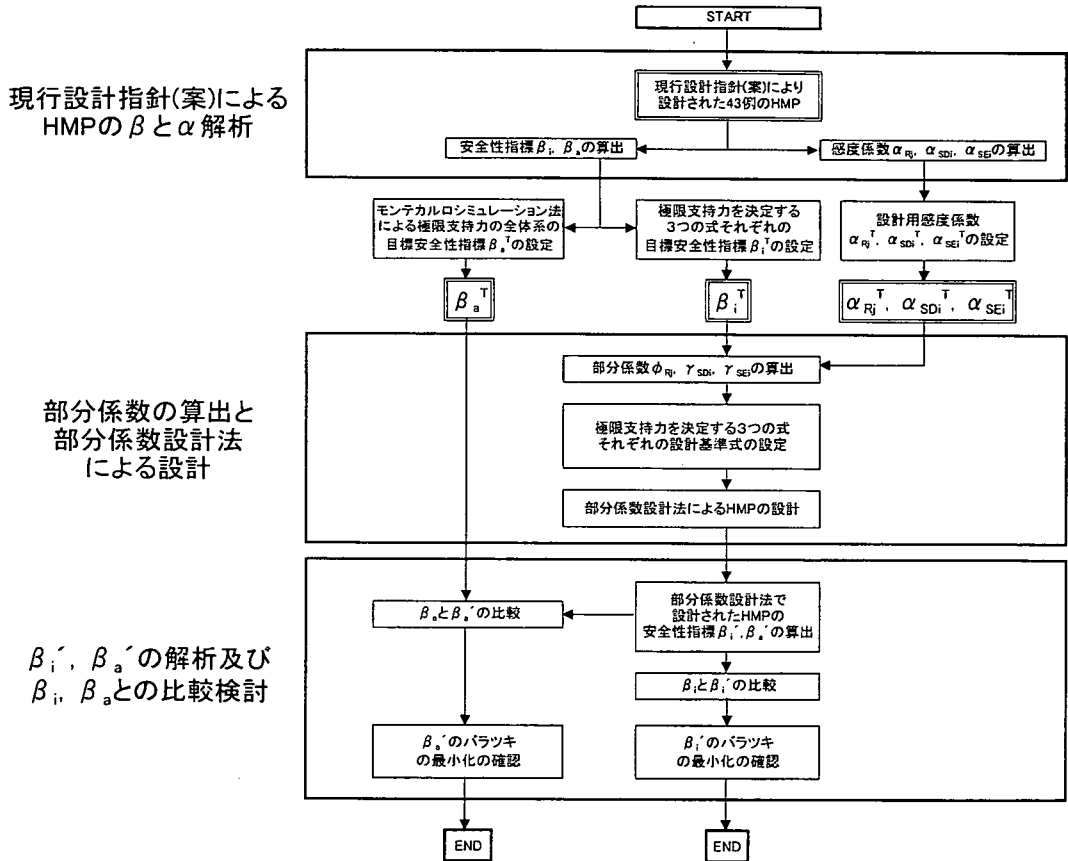


図-2 HMPの押し込み支持力に対する信頼性解析のフロー

て安全率を導入する必要がある。

本論では、部分係数設計法 (Partial Factor Design)^{12),13),14)}を HMP の押し込み支持力の設計照査へ適用することを確率論手法により検討する。

ここで、部分係数設計法は、複数の設計荷重、強度に対して各々に安全係数を付与する方式の設計法であり、主に性能設計の技術基準の国際化を目指して整備

が進んでいる欧米で採用されている。

本論は、図-2 に示すように、(1)現行設計指針(案)に基づいて設計された HMP の設計事例に対して信頼性解析を行い、これらの HMP が有する信頼性レベルの変動特性を検討している。(2)部分係数設計法の設計基準を導入し、(1)の信頼性レベルに整合するように、部分係数を決定している。次に、(3)現行設計指針(案)で設計さ

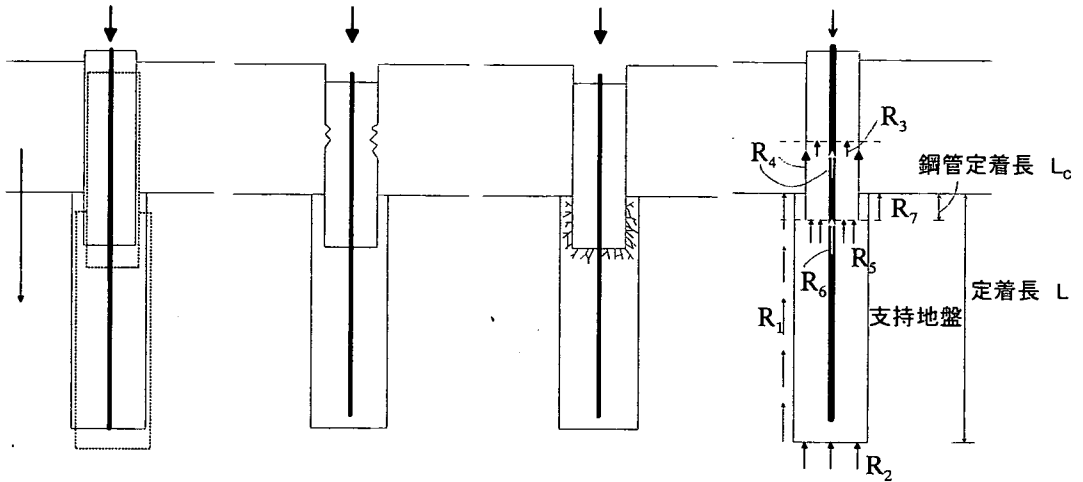


図-3 限界状態1
の概念図

図-4 限界状態2
の概念図

図-5 限界状態3
の概念図

図-6 HMPの各抵抗力
の概略図

れた HMP と部分係数設計法による HMP に対して、安全性指標を比較検討し、部分係数設計法の優位性を示している。

2. HMP の現行設計指針(案)と問題点

(1)押し込み支持力の現行設計指針(案)と限界状態

高耐力マイクロパイル設計・施工マニュアル(案)の中で示されている現行設計指針(案)によれば、1本の HMP の許容押し込み支持力 R_{ca} は、式(1)で与えられる。ここで、極限押し込み支持力 R_{cu} は、式(2)に示すように3つの限界状態に対応する耐荷力のうちの最小値により与えられる。

$$R_{ca} = \frac{rR_{cu}}{n} \quad (1)$$

r: 極限支持力推定法の相違による安全率の補正係数
n: 安全率

$$R_{cu} = \min[R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}] \quad (2)$$

R_{C1} : 極限摩擦支持力

R_{C2} : 鋼管部圧縮強度

R_{C3} : 非鋼管定着部極限圧縮強度と鋼管定着部極限摩擦抵抗力の和

$R_{C1} \sim R_{C3}$ のそれぞれに対応する限界状態 1($Z_1 \leq 0$), 限界状態 2($Z_2 \leq 0$), 限界状態 3($Z_3 \leq 0$)の概念図を図-3, 図-4, 図-5 に示す。ここで $Z_i (i=1 \sim 3)$ は、後述の式(14), 式(15), 式(16)の性能関数であり、 $Z_i \leq 0$ は限界状態 i の発生を意味する。

図-6 には、押し込み支持力に対する HMP の各抵抗力 $R_1 \sim R_7$ を示している。

限界状態 1 は、地盤の支持力不足による沈下である。それに対する HMP の抵抗力は、式(3)の定着部周面摩擦力 R_1 と式(4)の先端支持力 R_2 である。したがって、限界状態 1 に対する耐荷力として R_{C1} は、 R_1 と R_2 の和として式(5)のように表される。

$$R_1 = \pi a D_0 \sum \tau_i L_i \quad (3)$$

$$R_2 = q\pi \frac{D_0^2}{4} \quad (4)$$

$$R_{C1} = R_1 + R_2 \quad (5)$$

a: グラウトの加圧効果に関する補正係数

D_0 : 削孔径

τ_i : 定着部の周面摩擦力を考慮する層 (i 層) の周面摩擦強度

L_i : 定着部の周面摩擦力を考慮する層 (i 層) の層厚

q: 地盤から決まる単位面積当たりの極限支持応力度

HMP 現行設計指針(案)における極限摩擦支持力 R_{C1} の算出式は、道路橋示方書¹⁹⁾における摩擦杭の極限押し込み支持力算出式と同様の式である。HMP 現行設計指針(案)では、小口径摩擦杭の先端支持力は大きな効果が期待できないため考慮せず、安全側になるため定着部周面摩擦力 R_1 のみを極限支持力としている。しかし、本論では式(3)に示すように先端支持力 R_2 の働きを見るうえでも極限摩擦支持力 R_{C1} に付加している。

限界状態 2 は、鋼管部の圧縮破壊であり、それに対する HMP の抵抗力として、鋼管部グラウト極限圧縮強

度 R_3 と鉄筋・鋼管極限圧縮強度 R_3 がある。よって、 R_{C2} は式(8)のように表される。

$$R_3 = 0.85f_G A_{G1} \quad (6)$$

$$R_4 = F_{BorC}(A_B + A_C) \quad (7)$$

$$R_{C2} = R_3 + R_4 \quad (8)$$

f_G : グラウトの 28 日圧縮強度

A_{G1} : 鋼管部のグラウトの設計有効断面積

F_{BorC} : 芯鉄筋と鋼管の降伏点強度の小さい方の値

A_B : 芯鉄筋の断面積

A_C : 鋼管の断面積

ここで、式(6)の 0.85 は標準供試体の圧縮強度 f_c に対するコンクリートの最大応力比である。後述の式(9)の 0.85 も同様である。

限界状態 3 は、非鋼管部の圧縮破壊である。これに対して HMP は、非鋼管部グラウト極限圧縮強度 R_5 、鉄筋極限圧縮強度 R_6 と鋼管定着部周面摩擦力 R_7 を抵抗力としている。したがって、 R_{C3} は式(12)のように表すことができる。

$$R_5 = 0.85f_G A_{G2} \quad (9)$$

$$R_6 = f_B A_B \quad (10)$$

$$R_7 = \pi a D_0 \sum \tau_i L_{Ci} \quad (11)$$

$$R_{C3} = R_5 + R_6 + R_7 \quad (12)$$

A_{G2} : 非鋼管部のグラウトの設計有効断面積

f_B : 芯鉄筋の降伏点強度

τ_i : 鋼管定着部周面摩擦力を考慮する層 (i 層) の周面摩擦強度

L_{Ci} : 鋼管定着部周面摩擦力を考慮する層 (i 層) の層厚

実際には限界状態 1 により極限押し込み支持力が決定されることが多いが、式(1)によれば許容押し込み支持力 R_{ca} は、極限押し込み支持力 R_{ca} が R_{C1} 、 R_{C2} 、 R_{C3} のいずれになっても同一の安全率 n を用いて処理していることが分かる。

このように HMP 現行設計指針(案)では、杭本体の強度、地盤との周面摩擦力、及び作用荷重などのそれぞれで異なる不確定要素の変動性の程度を区別せず、1つの安全率で処理しているが、各変動性に応じた安全係数を付与することにより安定した安全性を確保できると思われる。

本論では、このような観点から各荷重、強度の特性値

に対して安全係数を付与する部分係数設計法の適用を試みる。

(2)部分係数設計法

全体系および各限界状態に対応した性能関数 Z 、 Z_i をそれぞれ式(13)、式(14)、式(15)、式(16)のように定義する。

$$Z = \min[R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}] - S_D - S_E \quad (13)$$

$$Z_1 = R_1 + R_2 - S_D - S_E \quad (14)$$

$$Z_2 = R_3 + R_4 - S_D - S_E \quad (15)$$

$$Z_3 = R_5 + R_6 + R_7 - S_D - S_E \quad (16)$$

$Z, Z_i > 0$ 安全

$Z, Z_i \leq 0$ 破壊

S_D : 死荷重 S_E : 地震荷重

この性能関数 Z_i に対して、部分係数を用いると設計基準式は式(17)、式(18)、式(19)のように設定できる。

$$\phi_{R1} R_1^* + \phi_{R2} R_2^* \geq \gamma_{SD1} S_D^* + \gamma_{SE1} S_E^* \quad (17)$$

$$\phi_{R3} R_3^* + \phi_{R4} R_4^* \geq \gamma_{SD2} S_D^* + \gamma_{SE2} S_E^* \quad (18)$$

$$\phi_{R5} R_5^* + \phi_{R6} R_6^* + \phi_{R7} R_7^* \geq \gamma_{SD3} S_D^* + \gamma_{SE3} S_E^* \quad (19)$$

R_j^* : 各抵抗力の特性値 ($j=1 \sim 7$)

S_D^* : 死荷重の特性値

S_E^* : 地震荷重の特性値

ここで、性能関数の式(14)、式(15)、式(16)と設計基準式の式(17)、式(18)、式(19)がそれぞれ等価となるように、信頼性設計水準¹²⁾に準拠して部分係数 ϕ_{Rj} 、 γ_{SDi} 、 γ_{SEi} を正規確率変数のもとで誘導すると、式(20)、式(21)、式(22)で与えることができる。なお、部分係数の誘導の詳細は付録に示している。

$$\phi_{Rj} = \frac{1 - \alpha_{Rj}^T \beta_i^T V_{Rj}}{1 - k_{Rj} V_{Rj}} \quad (20)$$

$$\gamma_{SDi} = \frac{1 + \alpha_{SDi}^T \beta_i^T V_{SD}}{1 + k_{SDi} V_{SD}} \quad (21)$$

$$\gamma_{SEi} = \frac{1 + \alpha_{SEi}^T \beta_i^T V_{SE}}{1 + k_{SEi} V_{SE}} \quad (22)$$

α_{Rj}^T : 各抵抗力の設計用感度係数

$\beta_i^T Z_i$: 目標安全性指標

k_{Rj} :各抵抗力の平均値と特性値に関する係数

V_{Rj} :各抵抗力の変動係数

α_{SDi}^T :死荷重の設計用感度係数

V_{SD} :死荷重の変動係数

k_{SEi} :死荷重の平均値と特性値に関する係数

α_{SEi}^T :地震荷重の設計用感度係数

V_{SE} :地震荷重の変動係数

k_{SEi} :地震荷重の平均値と特性値に関する係数

設計用感度係数 α_{Rj}^T , α_{SDi}^T , α_{SEi}^T は、感度係数 α_{Rj} , α_{SDi} , α_{SEi} の分布から一律に設定しうる係数である¹⁶⁾。
 α_{Rj} , α_{SDi} , α_{SEi} は、性能関数 Z_i の標準偏差の大きさに寄与する各確率変数の標準偏差の占める割合を表す係数であり、式(23)、式(24)、式(25)で与えられる。

$$\alpha_{Rj} = \frac{\sigma_{Rj}}{\sigma_{Zi}} \quad (23)$$

ここで、式(14)、式(15)、式(16)を参照して、 $i=1$ の場合、 $j=1,2$ となる。同様に、 $i=2$ に対しては $j=3,4$ 、 $i=3$ に対しては $j=5,6,7$ となる。

$$\alpha_{SDi} = \frac{\sigma_{SDi}}{\sigma_{Zi}} \quad (24)$$

$$\alpha_{SEi} = \frac{\sigma_{SEi}}{\sigma_{Zi}} \quad (25)$$

目標安全性指標 β_i^T は、安全性を確保するために設定する β_i の目標値であり、 β_i は次式で与えられる。

$$\beta_i = \frac{\mu_{Zi}}{\sigma_{Zi}} \quad (26)$$

ここで、 μ_{Zi} は Z_i の期待値すなわち平均値である。
 部分係数設計法では、部分係数を算出する際に用いる目標安全性指標と設計用感度係数、変動係数の適切な設定が必要である。

3. 押し込み支持力の特性

押し込み支持力の確率論的特性を調べるために、各限界状態における感度係数の値を通して、地盤種類、杭長等の変化が押し込み支持力に与える影響を検討する。

ここでは、不確定性の大きい τ_i , q , f_c , f_b , f_c , S_D , S_E を確率変数としている。表-2には、採用した確率変数を示している。 τ_i の変動係数は層によらず、 N 値の変動

表-2 確率変数の性質

確率変数	平均値/特性値	変動係数 V	分布形	参考文献
τ_i	1.0	0.45	正規	17
q	1.0	0.45	正規	
f_G	1.0	0.30	正規	18,19
f_B	1.0	0.03	正規	20
f_C	1.0	0.03	正規	
S_D	1.0	0.10	正規	
S_E	1.0	0.66	正規	21

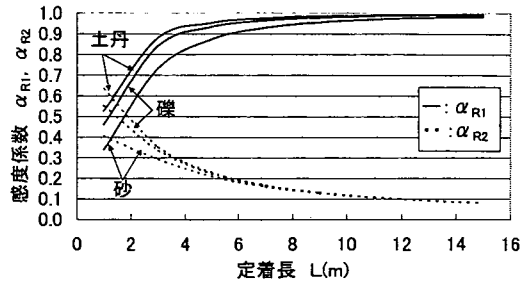


図-7 異なる地盤における感度係数に対する定着長 L の影響

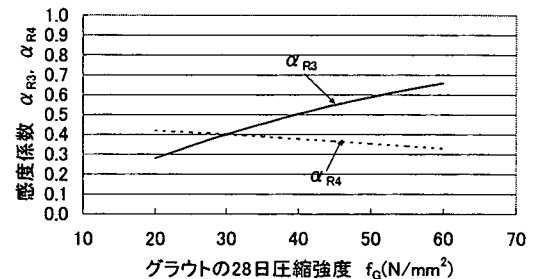


図-8 感度係数に対するグラウト28日圧縮強度の影響

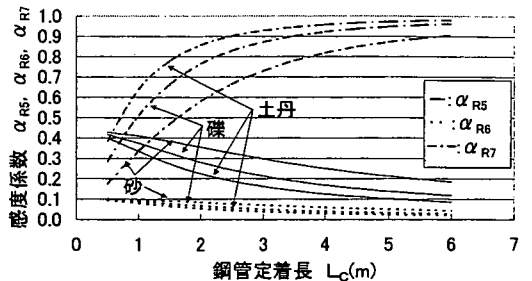


図-9 異なる地盤における感度係数に対する鋼管定着長 L_C の影響

係数の関係¹⁷⁾を参照して0.45として与えている。したがって、式(3)の R_1 が τ_i の線形式であり、 τ_i は通常サウンディング試験値に基づき設定されることから、 R_1 の変動係数には N 値の設定における変動係数 0.45 を採用した。 R_2 もまた、 q の線形式であり、 q は通常サウンディング試験値に基づき設定されることから、変動係数には 0.45

表-3 HMP43 例の杭長及び地盤条件

sample NO.	杭形状(m)		定着地盤層厚 L_s (m)		摩擦強度(N/mm ²)		材料強度及び補正係数		外力(kN)	
	L	Lc	L ₁	L ₂	τ_1	τ_2	a	f_c (N/mm ²)	S _D	S _E
1	9.0	1.2	4.9	4.1	3.5	4.4	1.50	32.0	343.6	351.3
2	8.0	1.3	4.4	3.6	3.9	5.1	1.50	35.5	310.7	430.4
3	10.0	1.1	8.0	-	5.9	-	1.50	32.1	411.9	361.6
4	9.0	1.2	7.5	1.5	3.9	4.9	1.50	36.0	468.8	382.0
5	7.4	1.0	7.4	-	4.4	-	1.00	38.1	483.7	415.9
6	7.7	1.5	7.7	-	5.5	-	1.25	40.0	331.2	397.9
7	7.5	1.7	3.5	4.0	4.4	5.4	1.25	32.0	394.9	422.3
8	7.1	1.1	4.0	3.1	3.9	6.4	1.00	31.4	372.0	393.1
9	7.0	1.4	4.0	3.0	4.4	6.9	1.25	38.1	345.5	440.5
10	7.1	1.2	5.0	2.1	4.4	6.4	1.00	31.8	439.7	437.7
11	7.6	2.0	7.6	-	4.4	-	1.00	37.1	311.6	384.8
12	7.6	1.9	3.6	4.0	3.9	5.9	1.00	32.4	403.8	407.0
13	7.1	1.7	5.9	1.2	3.7	5.9	1.00	31.2	408.1	437.2
14	9.0	1.6	6.2	2.8	3.5	4.9	1.50	31.5	452.7	427.1
15	8.5	1.3	4.5	4.0	4.4	5.6	1.25	41.4	410.0	371.8
16	9.0	1.6	6.4	2.6	3.9	4.4	1.25	36.6	394.3	383.6
17	7.9	1.3	5.6	2.3	4.4	4.9	1.25	35.6	465.8	393.5
18	8.0	1.3	5.0	3.0	3.7	4.9	1.00	32.5	489.0	420.4
19	7.1	1.1	7.1	-	3.9	-	1.25	37.3	436.3	396.3
20	6.9	1.6	1.4	5.5	4.2	5.8	1.00	32.9	483.5	352.2
21	7.6	1.2	4.0	3.6	4.0	5.9	1.00	32.1	352.2	385.4
22	7.9	1.9	4.7	3.2	4.9	5.7	1.00	34.7	377.5	425.8
23	8.1	1.0	8.1	-	4.1	-	1.25	39.0	470.3	418.7
24	7.6	1.7	4.6	3.0	4.7	5.3	1.50	39.9	422.0	361.8
25	7.0	1.5	3.4	3.6	4.9	5.9	1.00	31.8	470.7	419.5
26	7.4	1.2	2.7	4.7	3.9	4.9	1.00	41.4	482.5	360.8
27	8.6	1.6	8.6	-	3.9	-	1.25	39.5	326.3	399.8
28	7.1	1.6	1.2	5.9	4.0	4.4	1.25	31.8	462.2	373.8
29	7.4	1.7	7.4	-	5.5	-	1.25	33.5	471.7	383.4
30	7.3	1.7	2.8	4.5	4.4	5.3	1.25	40.2	351.6	440.2
31	7.3	1.5	7.3	-	2.9	-	1.50	40.2	365.3	401.6
32	10.6	3.7	7.7	2.9	1.3	3.4	1.50	30.0	310.7	411.9
33	11.1	3.9	10.0	1.1	1.4	6.8	1.50	38.9	483.7	331.2
34	12.9	3.1	5.0	7.9	2.5	2.5	1.50	35.1	372.0	345.5
35	9.9	1.5	6.0	3.9	1.8	2.6	1.50	37.4	311.6	403.8
36	10.2	1.9	1.9	8.3	3.1	3.1	1.50	35.8	452.7	410.0
37	11.6	3.3	6.0	5.6	2.0	2.6	1.50	37.3	483.5	352.2
38	11.1	4.7	15.0	-	2.6	-	1.50	34.3	470.3	422.0
39	18.0	5.0	5.0	13.0	2.1	2.1	1.50	39.0	482.5	326.3
40	7.5	1.2	2.0	5.5	2.2	3.4	1.50	39.4	375.3	354.5
41	6.9	1.6	4.0	2.9	1.2	6.7	1.50	35.1	371.5	448.8
42	9.1	2.8	7.5	1.6	2.1	6.1	1.50	36.9	400.7	410.1
43	4.8	1.5	1.1	3.7	6.5	6.5	1.50	30.9	413.5	378.7

を採用している。同様に、 f_c , f_b , f_c , S_D , S_E の変動係数を文献^{18),19),20),21)}を参照して設定し、 $R_3 \sim R_6$ の変動係数を求めている。なお、厳密な検討はしなかったが、これらの文献から近似的にすべての確率変数を正規確率変数と仮定している。

現行設計指針(案)において、グラウトの加圧効果に関する補正係数 a には、グラウトの注入方式により 1.00, 1.25, 1.50 という値が用いられるが、ここでは平均値の 1.25 を用いた。杭に作用する死荷重 S_D と地震荷重 S_E は、地震時許容押し込み支持力が 1000(kN) 程度であることから¹⁾、これよりも小さい値として各荷重の平均値を 400(kN) とした。

このように実際に想定される条件下で、まず限界状態 1 の特性を検討する。限界状態 1 では、定着長 l と地盤種類が押し込み支持力に強い影響を与える要因として考えられる。そこで、HMP が主に用いられる砂

($\tau_i=3\text{N/mm}^2$), 礫($\tau_i=5\text{N/mm}^2$), 土丹($\tau_i=7\text{N/mm}^2$)の 3 種類を考え、 N 値が 50 の一様な地盤において、定着長 l を変数とした場合の感度係数 α_{R1} , α_{R2} の変化を検討している。図-7 は、横軸に l , 縦軸に α_{R1} , α_{R2} をとり、両者の関係を示した結果である。

図-7 を見ると、地盤種類、定着長に関わらず、 α_{R1} が常に支配的であることがわかる。つまり、限界状態 1 では、 R_1 が押し込み支持力に対して強い影響力を持つ要素であるといえる。

次に限界状態 2 の特性について検討する。HMP に使用する鋼管と異形鉄筋は、現行設計指針(案)ではそれぞれ表-1 に示す形状規格を用いるように定められている。そこで、限界状態 2 の特性は、グラウトの 28 日圧縮強度 f_c のみに注目し、感度係数 α_{R3} , α_{R4} との関係について検討する。図-8 に f_c と α_{R3} , α_{R4} との関係を示す。

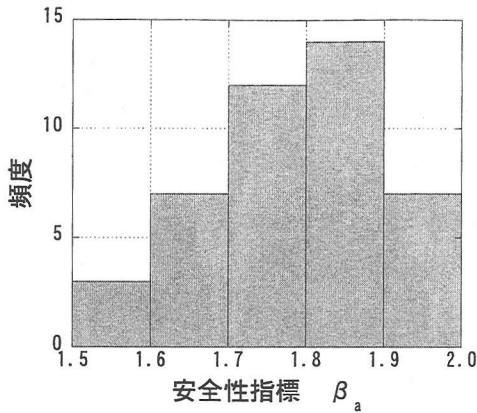


図-10 全体系の安全性指標 β_a のヒストグラム

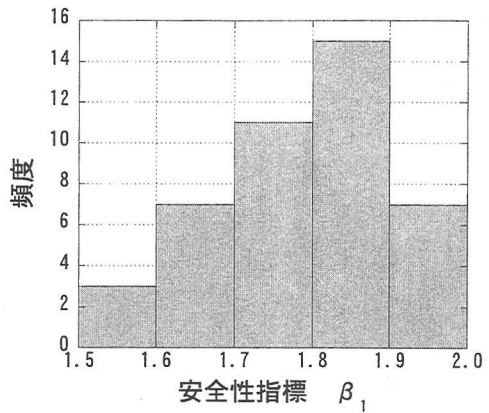


図-11 限界状態 1 の安全性指標 β_1 のヒストグラム

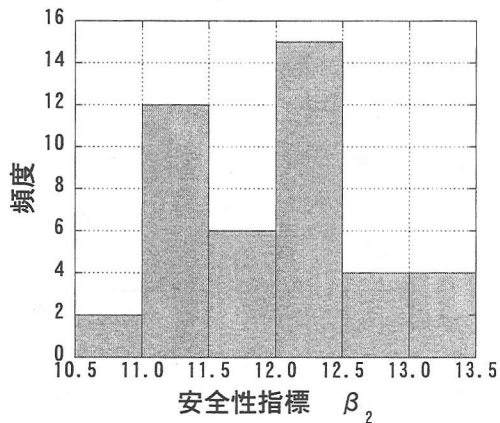


図-12 限界状態 2 の安全性指標 β_2 のヒストグラム

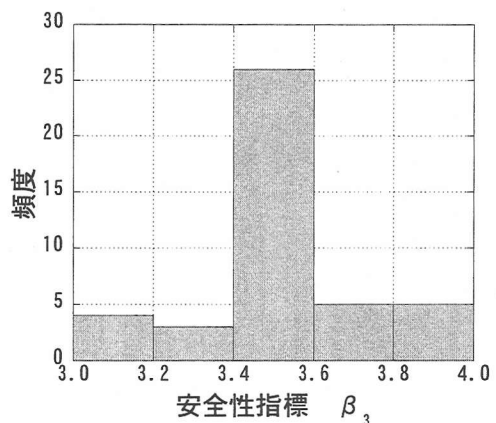


図-13 限界状態 3 の安全性指標 β_3 のヒストグラム

現行設計指針(案)によると、芯鉄筋の性能を十分活用するために、 f_c には $30(\text{N}/\text{mm}^2)$ 以上のセメントミルク、あるいはモルタルの使用を推奨している。そこで、 f_c が $30(\text{N}/\text{mm}^2)$ 以上の領域に注目すると α_{R3} が支配的となっていることから、限界状態 2 では R_3 が押し込み支持力への強い影響力を有しているといえる。

限界状態 3 の特性の検討は、限界状態 1 の検討と同様の 3 種類の地盤種類を対象としている。ここで、式(12)を見ると、 R_7 のみが地盤特性により影響を受けることがわかる。そこで、3 種類の地盤における R_7 の構成要素である鋼管定着長 L_c と感度係数 α_{R5} 、 α_{R6} 、 α_{R7} の関係を検討する。図-9 は、 L_c と α_{R5} 、 α_{R6} 、 α_{R7} の関係を示している。

図-9 によれば、地盤種類に関係なく L_c の増加に伴い、 α_{R7} が増加している。現行設計指針(案)¹¹⁾では、鋼管の軸力をグラウトへ確実に伝達するために、 L_c に必要な長さを 1m 以上と定めている。そこで、 L_c が 1m 以上となる場合について着目すると、砂地盤以外では常に

α_{R7} が最大の感度係数となっている。砂地盤についても、1.2m 付近からは α_{R7} が最大の感度係数となっている。したがって、限界状態 3 では α_{R7} が最も押し込み支持力への影響力を持つといえる。

4. 目標安全性指標と設計用感度係数の設定

目標安全性指標 β_a^T 、 β_1^T 及び設計用感度係数 α_{Rj}^T 、 α_{SDi}^T 、 α_{SEi}^T の設定は、次のようにしている。まず、一般的な杭の設計事例が示されている文献^{14),21),22),23),24),25),26),27),28),29),30)31),32),33),34),35)}を参照して、それらの杭の地盤情報から地盤条件を設定し、表-3 に示す 43 例の HMP を現行設計指針(案)を用いて設計した。定着地盤の種類は、大きくは砂、礫、土丹である。そして、これらの 43 例の HMP に対して信頼性解析を行って、信頼性の分布状況を調べている。

ここでは、確率変数は、前章と同様に τ_i 、 q 、 f_c 、 f_b 、 f_c 、

表-4 目標安全性指標

β_a^T	1.85
β_1^T	1.85
β_3^T	3.62

S_D, S_E とし、変動係数も前章と同じ数値を仮定している。
以上より安全性指標の分布を検討し、妥当な目標安全性指標を設定している。

(1)目標安全性指標 β_a^T, β_1^T の設定

全体系の目標安全性指標 β_a^T を設定するために、HMP43 例の安全性指標 β_a の分布を調べる。先ず、HMP43 例についてモンテカルロシミュレーション法 (Monte Carlo simulation method)¹²⁾により全体系の破壊確率 P_f を算出する。モンテカルロシミュレーション法は、乱数を用いて数多くの試行を繰り返すこと破壊確率を求める数値実験手法の一つである。モンテカルロシミュレーション法は、試行回数を300000回として、破壊回数を試行回数で除した値を破壊確率 P_f としている。ここで、破壊回数は限界状態 1, 2, 3 のいずれかにより破壊した回数である。次に、式(27)に示した P_f と β の関係から β_a を求め、図-10 に示す β_a のヒストグラムを得た。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (27)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は平均値 0, 標準偏差 1 の標準正規確率分布関数である。

図-10 のヒストグラムについて、 β_a の平均値 μ_{β_a} , 標準偏差 σ_{β_a} を算出すると、それぞれ 1.79, 0.12 であった。そこで、本論では目標値を高めに設定し、かつ現行設計指針(案)で設計した HMP の安全性と整合させるために、特別な根拠は無いが μ_{β_a} に $\sigma_{\beta}/2$ を加算した値である 1.85 を β_a^T として設定した。

次に、式(26)から HMP43 例の安全性指標 β_1 を算出し、 β_1 のヒストグラムを作成すると、それぞれ図-11, 図-12, 図-13 の様に分布していることが分かる。

図-11 を図-10 と比較すると、限界状態 1 により全体系の β_a が決定されていることが読み取れる。しかし、モンテカルロシミュレーション法と理論式という算出方法の違いや、 β_a に対する限界状態 3 の影響で β_a と β_1 の値には差がある。

β_2 の分布に注目すると、 β_1, β_3 に比べて、 β_2 が極端に大きく、十分な安全性が確保されていることがわかる。そこで、限界状態 2 は、押し込み支持力としては支配的ではないことから、照査を行う必要はないと考え、以降では無視することとした。また、 β_3 も β_1 に比べて大きい、ヨーロッパで許容安全性指標を 5.0 としているこ

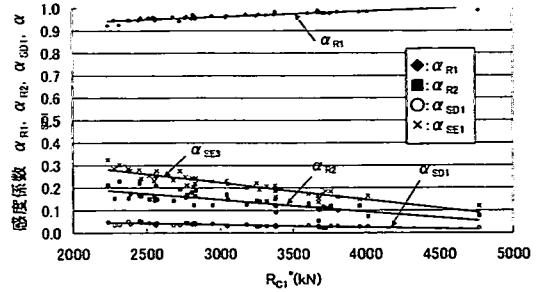


図-14 感度係数と R_{C1}^* の関係

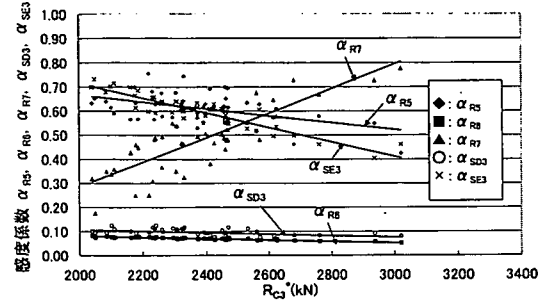


図-15 感度係数と R_{C3}^* の関係

表-5 設計用感度係数

α_{R1}	α_{R2}	α_{SD1}	α_{SE1}
0.963	0.142	0.034	0.240

R_{C3}^* (kN)	α_{R5}	α_{R6}	α_{R7}	α_{SD3}	α_{SE3}
~2600	0.610	0.069	0.267	0.094	0.740
2600~			0.567		0.545

とから、本論でも安全性指標 5.0 を照査の分岐点とした。したがって、以降でも限界状態 3 について検討している。

β_1, β_3 の目標安全性指標 β_1^T, β_3^T は、 β_a^T の設定と同様の方法で設定した。表-4 に、設定した目標安全性指標 $\beta^T, \beta_1^T, \beta_3^T$ を示す。

(2)設計用感度係数 $\alpha_{R1}^T, \alpha_{SD1}^T, \alpha_{SE1}^T$ の設定

式(23), 式(24), 式(25)を用いて HMP43 例の限界状態 1 の感度係数 $\alpha_{R1}, \alpha_{R2}, \alpha_{SD1}, \alpha_{SE1}$ を算出し、極限支持力の特性値 R_{C1}^* と感度係数の関係を調べると、図-14 を得た。同図には、傾向を示す直線を挿入している。ここで、各直線に注目すると、いずれの直線も傾きが小さく、 R_{C1}^* の大きさによる感度係数の変化は小さいといえる。したがって、本論では設計用感度係数 $\alpha_{R1}^T, \alpha_{R2}^T, \alpha_{SD1}^T, \alpha_{SE1}^T$ は、HMP43 例から算出した感度係数 $\alpha_{R1}, \alpha_{R2}, \alpha_{SD1}, \alpha_{SE1}$ のそれぞれの平均値と設定した。ただし、 α_{SE1}^T は $\alpha_{R1}^T, \alpha_{R2}^T, \alpha_{SD1}^T, \alpha_{SE1}^T$ の平方和が理論上の 1 になるように設定している。これは、感度係数の平方和が 1 を上回ると、安全性指標が多く見積もられるという特性があるためである。

限界状態 3 に対して、感度係数 α_{R5} , α_{R6} , α_{R7} , α_{SD3} , α_{SE3} と非鋼管定着部極限圧縮強度と鋼管定着部極限摩擦抵抗力の和の特性値 R_{C3}^* の関係を調べ、図-15 を得た。ここで、 α_{R7} と α_{SE3} の傾向に注目すると、傾きが顕著であることがわかる。つまり、 α_{R7} と α_{SE3} は、 R_{C3}^* の大きさに左右される感度係数といえる。したがって、設計用感度係数 α_{R7}^T , α_{SE3}^T は、 R_{C3}^* の変化に応じて設定する必要があるため、 R_{C3}^* の大きさで場合分けして設定した。なお、感度係数 α_{R5} , α_{R6} , α_{SD3} の直線の傾きは小さいため、設計用感度係数 α_{R5}^T , α_{R6}^T , α_{SD3}^T は、HMP43 例から算出したそれぞれの平均値とした。 α_{SD3}^T は、 α_{SE1}^T と同様に調整して設定している。

設定した設計用感度係数を、表-5 に示す。

5. 部分係数設計法による HMP の設計

(1) 部分係数設計法による HMP の設計

ここでは、部分係数 ϕ_{Rj} , γ_{SDi} , γ_{SEi} を算出し、前章で示した現行設計指針(案)で設計された HMP43 例を部分係数設計法に基づいて設計している。

3 章で設定した変動係数 V_{Rj} , V_{SD} , V_{SE} と前章で設定した目標安全性指標 β_1^T , 設計用感度係数 α_j^T , α_{SDi}^T , α_{SEi}^T を用いて、式(20)、式(21)、式(22)から部分係数 ϕ_{Rj} , γ_{SDi} , γ_{SEi} を算出した結果が、表-6 である。ただし、特性値には平均値を用いている。

ここで、現行設計指針(案)の安全率と部分係数を比較して見ると、耐力側の安全率が一律 0.5 であるのに対し、限界状態 1 の主たる耐力である R_1^* の部分係数 ϕ_{R1} は 0.198 と現行設計指針(案)の安全率に比べ小さくなり、強い制約を与えている。また、限界状態 3 でも R_{C3}^* が 2600kN 以下の場合には ϕ_{R7} は安全率と差異は無いが、2600kN 以上の場合では、強い制約を与える等の安全率と部分係数との差が見られる。

次に、これらの部分係数 ϕ_{Rj} , γ_{SDi} , γ_{SEi} と式(17)、式(19)の設計基準式を用いて、前出の HMP43 例を部分係数設計法で設計する。設計変数は、限界状態 1 では定着長 L 、限界状態 3 では鋼管定着長 L_c とした。

定着長 L の設計では、まず式(17)の設計基準式へ L 以外の各要素の特性値すなわち平均値を代入して、設計基準式を L の不等式とする。次に、 L を初期値 0.1m として支持地盤から 0.1m 刻みで伸ばしていき、不等式を満たす最短の L を求めて、その L を部分係数設計法で設計した定着長 L^T とする方法で行っている。

同様に、 L_c の設計も、式(19)の設計基準式へ L_c 以外の各要素の特性値を代入して、 L_c の不等式とする。そして、 L_c を初期値 0.1m として支持地盤から 0.1m 刻みで伸ばしていき、不等式を満たす最短の L_c を求めて、そ

表-6 部分係数

ϕ_{R1}	ϕ_{R2}	γ_{SD1}	γ_{SE1}
0.198	0.882	1.006	1.293

R_{C3}^* (kN)	ϕ_{R5}	ϕ_{R6}	ϕ_{R7}	γ_{SD3}	γ_{SE3}
~2600	0.338	0.992	0.566	1.034	2.768
2600~			0.076		2.302

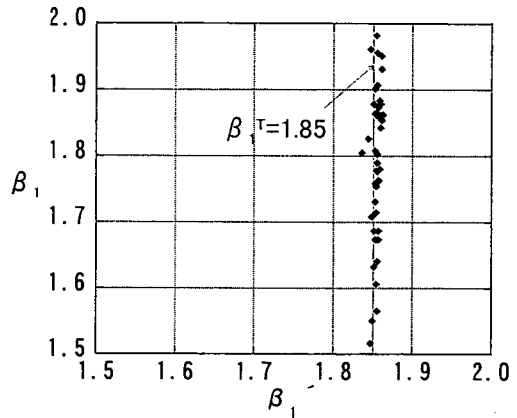


図-16 β_1 と β_1^T の比較

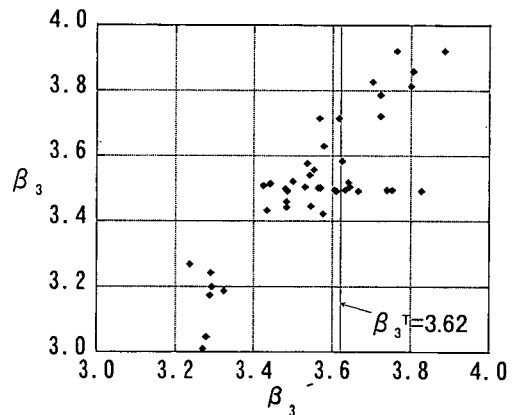


図-17 β_3 と β_3^T の比較

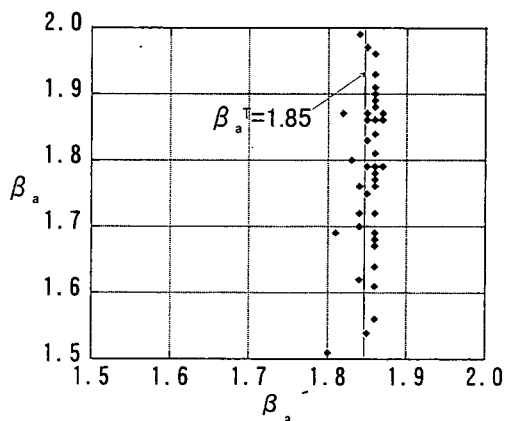


図-18 β_a と β_a^T の比較

の L を部分係数設計法で設計した鋼管定着長 L_c^T とす

る方法で行っている。ただし、3章で述べたように現行設計指針(案)では、鋼管の軸力をグラウトへ確実に伝達するために、 L_c に必要な長さを1m以上と定めているため、 L_c が1m以下となる場合には、 L_c を1mとしている。

ここで、部分係数設計法で設計されたHMPがどの程度の安全性を有しているかを調べるため、このHMPの安全性指標 β_1 、 β_2 を4章と同じ方法で算出した。

(2)部分係数設計法で設計されたHMPの安全性の検討

現行設計指針(案)と部分係数設計法により設計されたHMPの安全性を検討するために、限界状態ごとに β_1 と β_1 の分布を比較した。ただし、 β は現行設計指針(案)により算出された個々のHMPが持っている値であるから当然バラツキている。一方、 β は目標安全性指標 β^T に対して各々の荷重・強度に部分係数を用いて設計されたものであるからバラツキは小さくなる。図-16は β_1 と β_1 、図-17は β_3 と β_3 の比較結果を示している。

図-16を見てみると、 β_1 は、 β_1 に比べて限界状態1の目標安全性指標 β_1^T 付近で集中して分布していることがわかる。

一方、図-17から β_3 はバラツキが非常に大きく、 β_3 と比較すると安全性指標の大きさに違いがないことが分かる。 β_3 の分布のバラツキが大きくなった原因として、限界状態3がクリティカルではなく、限界状態3ではHMPの諸元は決定されないからと考えられる。

図-18は、部分係数設計法で設計されたHMPについて、4章と同じ方法で算出した全体系の安全性指標 β_2 と β_2 の比較を示している。図-18からわかるように、 β_2 は β_2 よりもバラツキが小さく、かつ β_2^T 付近に集中して分布していることから、部分係数設計法で設計されたHMPは、押し込み支持力に対して十分な安全性を確保しているといえる。

6. 結論

本論では、HMPの押し込み支持力の3つの限界状態に対して、それらの構成要素の不確定性を確率論的に検討した上で、部分係数設計法を適用することを検討し、以下の結論を得た。

- (1) 現行設計指針(案)で設計されたHMPの押し込み支持力の安全性指標 β_2 、 β_1 と感度係数 α_{R1} 、 α_{SD1} 、 α_{SE1} を算出し、分布状況を明らかにした。さらに、HMPに対して限界状態2がクリティカルでは無いため、照査の必要が無いことを明らかにした。
- (2) (1)の結果を用いて目標安全性指標 β^T 、 β_1^T 、および設計用感度係数 α_{R1}^T 、 α_{SD1}^T 、 α_{SE1}^T を設定し、部分係数設計法を用いてHMPを設計した。安全性指標

β_2 、 β_1 を算出し、分布を比較すると、 β_3 を除く β_2 、 β_1 はそれぞれ β_2^T 、 β_1^T 付近で集中して分布していることを確認した。また、 β_3 と β_3 の分布の比較から限界状態3はクリティカルでは無いため、照査の必要が無いことを明らかにした。

- (3) HMPの押し込み支持力では、限界状態2と限界状態3の照査は不要であり、限界状態1の照査のみで十分であることを明らかにした。つまり、図-16に示すように β_1 が β_1^T 付近で集中して分布していることから、部分係数設計法を用いることで、個々の不確定性を考慮した上で安定した安全性を確保できるといえる。
- (4) 3章以降の事例解析では、図-2の解析フローを実行して、部分係数設計法を行っている。本論で使用したHMP43例の荷重、地盤特性、HMPが適用される範囲は注意深く選んだが、厳密には本論で示した部分係数設計法は、限定された枠内で適用されるのは当然である。したがって、本論で示した部分係数設計法は、使用データを逸脱したHMPへの適用はできない。

付録

ここでは、限界状態1についての部分係数の誘導方法を示している。

部分係数 ϕ_{R1} 、 ϕ_{R2} 、 γ_{S1} 、 γ_{S2} の値は、限界状態1の設計基準式である式(17)が、限界状態1の性能関数である式(14)と整合するように決定する必要がある。

$$\mu_{Z1} = \mu_{R1} + \mu_{R2} - \mu_{SD} - \mu_{SE} \quad (A \cdot 1)$$

$$\sigma_{Z1}^2 = \sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2 + \sigma_{SE}^2 + \sigma_{SE}^2 \quad (A \cdot 2)$$

$$\beta_1 = \frac{\mu_{R1} + \mu_{R2} - \mu_{SD} - \mu_{SE}}{\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2 + \sigma_{SD}^2 + \sigma_{SE}^2}} = \frac{\mu_{Z1}}{\sigma_{Z1}} \quad (A \cdot 3)$$

設計では、

$$\beta_1 \geq \beta_1^T \quad (A \cdot 4)$$

となる条件を満足することが要求されることから、式(A・4)に式(A・3)を代入し整理すると、式(A・5)ようになる。

$$\begin{aligned} \mu_{R1} + \mu_{R2} - \mu_{SD} - \mu_{SE} \\ \geq \beta_1^T \sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2 + \sigma_{SD}^2 + \sigma_{SE}^2} \end{aligned} \quad (A \cdot 5)$$

ここで、

$$\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2 + \sigma_{SD1}^2 + \sigma_{SE1}^2} \quad (A \cdot 6)$$

$$\equiv \alpha_{R1}\sigma_{R1} + \alpha_{R2}\sigma_{R2} + \alpha_{SD1}\sigma_{SD} + \alpha_{SE1}\sigma_{SE}$$

と近似すると、式(A・5)は式(A・7)のように表せる。

$$\begin{aligned} & \mu_{R1} + \mu_{R2} - \mu_{SD1} - \mu_{SE1} \\ & \geq \beta_1^T \left(\begin{array}{c} \alpha_{R1} \sigma_{R1} + \alpha_{R2} \sigma_{R2} \\ + \alpha_{SD1} \sigma_{SD} + \alpha_{SE1} \sigma_{SE} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (A \cdot 7)$$

式(A・7)に変動係数を用いると、

$$\begin{aligned} & \mu_{R1} + \mu_{R2} - \mu_{SD} - \mu_{SE} \\ & \geq \beta_1^T \left(\begin{array}{c} \alpha_{R1} V_{R1} \mu_{R1} + \alpha_{R2} V_{R2} \mu_{R2} \\ + \alpha_{SD1} V_{SD} \mu_{SD} + \alpha_{SE1} V_{SE} \mu_{SE} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (A \cdot 8)$$

$$\begin{aligned} & (1 - \alpha_{R1} \beta_1^T V_{R1}) \mu_{R1} + (1 - \alpha_{R2} \beta_1^T V_{R2}) \mu_{R2} \\ & \geq (1 + \alpha_{SD1} \beta_1^T V_{SD}) \mu_{SD} + (1 + \alpha_{SE1} \beta_1^T V_{SE}) \mu_{SE} \end{aligned} \quad (A \cdot 9)$$

ここで、公称値として特性値を用いる。例えば、 R_1^* 、 S_{D1}^* はそれぞれ式(A・10)、式(A・11)のように表せる。

$$R_1^* = (1 - k_{R1} V_{R1}) \mu_{R1} \quad (A \cdot 10)$$

$$S_{SD}^* = (1 + k_{SD1} V_{SD}) \mu_{SD} \quad (A \cdot 11)$$

式(A・9)に特性値を用いると、式(A・12)のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{1 - \alpha_{R1} \beta_1^T V_{R1}}{1 - k_{R1} V_{R1}} R_1^* + \frac{1 - \alpha_{R2} \beta_1^T V_{R2}}{1 - k_{R2} V_{R2}} R_2^* \\ & \geq \frac{1 + \alpha_{SD1} \beta_1^T V_{SD}}{1 + k_{SD1} V_{SD}} S_{SD}^* + \frac{1 + \alpha_{SE1} \beta_1^T V_{SE}}{1 + k_{SE1} V_{SE}} S_{SE}^* \end{aligned} \quad (A \cdot 12)$$

式(17)、式(A・12)より、部分係数は式(A・13)～式(A・16)で表される。

$$\phi_{R1} = \frac{1 - \alpha_{R1} \beta_1^T V_{R1}}{1 - k_{R1} V_{R1}} \quad (A \cdot 13)$$

$$\phi_{R2} = \frac{1 - \alpha_{R2} \beta_1^T V_{R2}}{1 - k_{R2} V_{R2}} \quad (A \cdot 14)$$

$$\gamma_{SD1} = \frac{1 + \alpha_{SD1} \beta_1^T V_{SD}}{1 + k_{SD1} V_{SD}} \quad (A \cdot 15)$$

$$\gamma_{SE1} = \frac{1 + \alpha_{SE1} \beta_1^T V_{SE}}{1 + k_{SE1} V_{SE}} \quad (A \cdot 16)$$

しかし、このまま部分係数を算出して設計照査に適用するとなると、その都度感度係数を算出しなければならないため、使用者は確率の基礎を理解していることが必須となり、不便である。

そこで、本論では使用者の利便性を考慮して部分係数を基本的に1つにするために、感度係数を設計用感度係数として統一して、部分係数を算出する。したがって、部分係数は式(A・17)～式(A・20)で表される。

$$\phi_{R1} = \frac{1 - \alpha_{R1}^T \beta_1^T V_{R1}}{1 - k_{R1} V_{R1}} \quad (A \cdot 17)$$

$$\phi_{R2} = \frac{1 - \alpha_{R2}^T \beta_1^T V_{R2}}{1 - k_{R2} V_{R2}} \quad (A \cdot 18)$$

$$\gamma_{SD1} = \frac{1 + \alpha_{SD1}^T \beta_1^T V_{SD}}{1 + k_{SD1} V_{SD}} \quad (A \cdot 19)$$

$$\gamma_{SE1} = \frac{1 + \alpha_{SE1}^T \beta_1^T V_{SE}}{1 + k_{SE1} V_{SE}} \quad (A \cdot 20)$$

参考文献

- 1) Federal Highway Administration, U.S.Department of Transportation: *Drilled and Grouted Micropiles: State of Practice Review, Volume I : Background, Classifications, Cost*, Pub. No. FHWA-RD-96-016, July, 1997.
- 2) Federal Highway Administration, U.S.Department of Transportation: *Drilled and Grouted Micropiles: State of Practice Review Volume IV : Case Histories*, Pub.No.FHWA-RD-96-019, July, 1997.
- 3) Muhra,H.: *Micropiles in Northern and Middle Europe*, Pub.No.39, Geotechnical Laboratory, Tampere University of Technology, 1997.
- 4) Lizzi,F.: *The static restoration of monuments*, Sadep Publisher, pp.70,1982.
- 5) *Proc. of First International Workshop on Micropiles*, Doubletree Inn, Seattle, Washington, September, 1997.
- 6) *Proc. of 3rd IWM2000*, Geotechnical Laboratory, Tampere University of Technology, Finland, June, 2000.
- 7) 岸下崇裕, 斎藤悦郎, 山根隆志, 大谷義則, 三浦房紀, 谷藤正樹: 高耐力マイクロパイルによる既設構造物基礎の耐震補強, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp161-166, 1998.11.
- 8) 大谷義則, 妻鹿誠, 浜塚政治: マイクロパイルの施工事例, 基礎工, Vol.26, No.7, pp.56-61, 1998.7.
- 9) 岡邦彦, 若槻幹穂, 畑野俊久: 橋脚基礎の耐震補強—高耐力マイクロパイル工法, 土木技術, 55巻, 5号, pp.23-32, 2000.5.
- 10) 平成10年度高耐力マイクロパイル工法検討業務報告書<資料編>, 財団法人 先端建設技術センター, 1999.
- 11) 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), 1999.
- 12) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 13) *Eurocode 1-Basis of design and actions on structure Part 1: Basis of design*, 1994.

- 14) 鈴木誠:杭の鉛直支持力を対象とした例題, 構造工学委員会構造設計国際標準研究小委員会 例題 WG, 1999.
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, 丸善, 1999.
- 16) ISO2394: *General principles on reliability for structures*, Reference No. ISO/FDIS 2394, 1998.
- 17) 松井謙二: 地盤の不確実性を考慮した場所打ち摩擦杭の支持力評価に関する研究, 九州大学学位論文, p67, 1992.
- 18) 梶田佳寛: 実際の RC 建築物におけるコンクリートの品質, 日本建築学会構造系論文報告集, 1982.
- 19) 中埜良昭: 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 1989.
- 20) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987.
- 21) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 丸善, 1997.
- 22) 福井次郎, 石田雅博, 加藤秀章, 三木健男: マイクロパイルによる橋梁基礎の補強に関する検討, 第 3 回耐震補強, 耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集, pp87-94, 1999.
- 23) Fukui, j., Nishitani, M., Umebara, T. and Miki, T. : Study on the Retrofitting of Bridge Foundations with Micropiles, *Second International Workshop on Micropiles Proceeding*, pp73-pp82, '99 IWM Executive Committee, Yamaguchi University, October , 1999.
- 24) Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation: *Drilled and Grouted Micropiles: State of Practice Review Volume II : Design* , Pub.No. FHWA-RD-96-017, July, 1997.
- 25) 吉田巖, 矢作樞: 基礎工の設計実技下・杭基礎編, 建設図書, 1996.
- 26) 鹿島建設土木設計部: 基礎構造物/地中構造物, 鹿島出版会, 1993.
- 27) 吉田巖: 杭基礎の設計実技とその解説, 建設図書, 1974.
- 28) 平成 9 年度高耐力マイクロパイル工法検討業務報告書, 財団法人先端建設技術センター, 1998.
- 29) 浅間達雄: ④くいおよびケーソン基礎の設計計算例, 山海堂, 1973.6.
- 30) 矢作樞, 五十嵐功: よくわかる杭基礎の設計, 山海堂, 1996.8.
- 31) 浅間達雄: 新版くいおよびケーソン基礎の設計計算例, 土木技術全書 4, 山海堂, 1982.3.
- 32) 浅沼秀弥: 道路橋示方書 IV 下部構造編による橋梁下部構造の設計法と設計例, 近代図書, 1995.1.
- 33) 杭基礎の調査・設計から施工まで改訂委員会: 現場施工技術者のための土と基礎シリーズ 1, 社団法人土質工学会, 1993.
- 34) 基礎設計・施工ハンドブック委員会: 最新基礎設計・施工ハンドブック, 建設産業調査会, 1977.
- 35) 設計における強度係数 C, ϕ, N 値編集委員会: 土木基礎工学ライブラリー 32 設計における強度係数 C, ϕ, N 値, 社団法人土質工学会, 1988.

(2001.9.12 受付)

PROBABILITY STUDY FOR A HIGH-CAPACITY MICROPILE BEARING MECHANISM

Yoshinori OTANI, Kei ASAKURA and Masaru HOSHIYA

High capacity micro piles are cast in place and heavily depend on construction technique and soil properties. As such, uncertainties regarding the bearing capacity of the piles are involved. Therefore, utmost care must be taken in designing piles to ensure safety. This paper determines the performance function of a pile's push-in bearing capacity under three separate critical conditions: ground subsidence due to the insufficient bearing capacity of a pile, steel-pipe fractures due to compression, and fractures in non-steel-pipe areas due to compression. We examine these uncertainties in terms of probability and study how to use partial factor design in programming the push-in bearing capacity of high capacity micro piles.