

# 発見的手法による鋼管杭の組み合わせ最適化 Optimal design of steel pipe piles by metaheuristic method

○森友 義弥\*1, 藤田 慎之輔\*2  
Yoshiya Morimoto\*1, Shinnosuke Fujita\*2

\*1 北九州市立大学 国際環境工学部 学士課程

Under Graduate School, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

\*2 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 講師 工博

Lecturer, Graduate School of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu, Dr. Eng.

**キーワード** : 構造最適化 メタヒューリスティクス 基礎杭  
**Keywords** : Structural optimization metaheuristics pile foundations

## 1. はじめに

一般に建築物の基礎杭は、杭位置に支点を設けた上部構造の解析から得られた反力により設計が行われる。従って上部構造の設計が終わらないと基礎杭の詳細な設計は行うことができない。一方で建設現場において最初に行われる躯体工事は杭工事である。このことは基礎杭に対して堅牢な設計を行うという要求を困難にしている。本研究ではこの問題を解決するために、設計の一助となるツールとして、実際に想定される地盤や建物条件に対して発見的手法を用いた基礎杭の最適設計手法を考案する。鋼管杭を対象として同手法を適用し、条件の違いによる結果を比較・検討する。実務で一般に使用される工法・断面種別に対して、杭本数が4本の場合と6本の場合について最適設計を行い、問題の規模の違いによる計算コストの大小や、得られる最適解の妥当性について検証を行い、最適化手法の有効性を明らかにする。

## 2. 基礎杭の構造設計

基礎杭の構造設計では、各杭に作用する長期/短期の設計軸力ならびに地震時に作用するせん断力を既知量として、以下の項目を満たすことを確認する。

1. 基礎杭の許容支持力  $\geq$  基礎杭に作用する軸力
2. 基礎杭の許容応力  $\geq$  基礎杭に作用する応力

1 について、杭体で決まる支持力と地盤で決まる支持力のいずれか小さい方の値が、長期および短期の設計軸力以下に設計する。2 について、地震時の曲げモーメントと軸力の合応力及びせん断力に対して許容応力度設計を行う。なお、地盤の塑性化は考慮しないものとする。本研究では、1, 2 をともに満足し、鋼材重量が最小となるような鋼管杭の断面の組み合わせを求めることを目的とする。

日本建築学会情報システム技術委員会

第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 256-259, 2019年12月, 東京

Proceedings of the 42nd Symposium on Computer Technology of Information,

Systems and Applications, AIJ, 256-259, Dec., 2019, Tokyo

## 2.1. 基礎杭の許容支持力

基礎杭の許容支持力は杭体で決まる支持力と地盤で決まる支持力のいずれか小さい方で決定される。基礎杭の種類や工法によって支持力の算定式は異なるが、鋼管杭の場合には次式によって支持力が算定される。

$$\begin{aligned} N_{aL} &= \min \{ N_{aL1}, N_{aL2} \} \\ N_{aS} &= \min \{ N_{aS1}, N_{aS2} \} \\ N_{aL1} &= \{ \alpha \bar{N} A_p + (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \psi \} / 3 \\ N_{aL2} &= \bar{F} \cdot A \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2) / 1.5 \\ N_{aS1} &= 2 N_{aL1} \\ N_{aS2} &= 1.5 N_{aL2} \\ \bar{F} &= \begin{cases} F \cdot \left( 0.8 + \frac{2.5t}{B/2} \right) \cdots & \text{if } \frac{t}{B/2} \leq 0.08 \\ F & \cdots \text{otherwise} \end{cases} \\ \alpha_1 &= \begin{cases} 0 & \cdots \text{if } l/B \leq 100 \\ \frac{l/B - 100}{100} & \cdots \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

$N_{aL}, N_{aS}$  : 長期/短期許容支持力

$B, t, l, D_w, \psi$  : 杭の軸径, 板厚, 全長, 先端径, 軸部周長

$A, A_p$  : 杭の軸断面積, 先端部面積

$\bar{N}$  : 先端から上下  $1D_w$  の平均 N 値

$\bar{N}_s$  : 基礎杭周囲の地盤のうち砂質地盤の平均 N 値

$L_s$  : 基礎杭周囲の地盤のうち砂質地盤に接する

有効長さの合計

$\bar{q}_u$  : 基礎杭周囲の地盤のうち粘土質地盤の

一軸圧縮強度の平均値

$L_c$  : 基礎杭周囲の地盤のうち粘土質地盤に接する

有効長さの合計

$F, \bar{F}, \alpha_1$  : 鋼材 F 値, 低減 F 値, 長さ/径比による低減率

$\alpha$  : 杭先端支持力係数

$\beta$  : 砂質地盤における杭周面摩擦係数

$\gamma$  : 粘土質地盤における杭周面摩擦係数

長期及び短期の軸力に対し次式を満足する必要がある。

$$\begin{aligned} N_L &\leq N_{aL}, \quad N_L + |N_E| \leq N_{aS} \\ N_L, N_E &: \text{長期荷重時/地震時の軸力} \end{aligned} \quad (2)$$

本研究では、先端翼付回転貫入鋼管杭を想定し、実務で使用されている工法の中で、 $\alpha = 150$ (砂質) or  $184$ (粘土

質),  $\beta = 0, \gamma = 0$  となる工法を対象とする.

## 2.2. 基礎杭の許容応力

地震時の応力に対しては通常の鉄骨造の断面算定の場合と同様に次式を満足する必要がある.

$$\frac{M_{S \max}}{Z} + \frac{N_L + |N_E|}{A} \leq \bar{F} \quad (3)$$

$$\frac{2Q_{S \max}}{A} \leq f_s \quad (4)$$

$M_{S \max}$  : 杭体の短期荷重時曲げモーメントの最大値  
 $Q_{S \max}$  : 杭体の短期荷重時せん断力の最大値  
 $Z$  : 杭体の断面係数  
 $f_s$  : 鋼材の短期許容せん断応力度で  $F/\sqrt{3}$  とする

後述の最適化問題の定式化の簡略化のために (3),(4) 式を次式に変形する.

$$M_{aS} \leq M_{aS} \quad (5)$$

$$M_{aS} = \left( \bar{F} - \frac{N_L + |N_E|}{A} \right) \cdot Z \quad (6)$$

$$Q_{aS} \leq Q_{aS} \quad (6)$$

$$Q_{aS} = \frac{A \cdot f_s}{2}$$

片土圧を受けるような建物を除き, せん断力及び曲げモーメントは地震荷重に対してのみ発生するので, 短期許容応力度設計のみがおこなわれる. 鋼管杭の長さはある程度規格化されており, 杭長が現場に運搬可能なサイズよりも長い場合は継手が必要となる. 上杭と下杭は施工性を考慮して径をそろえるのが原則であるが, 板厚に関しては上杭よりも杭体曲げモーメントが小さい下杭を薄くすることがある. 従って, (5), (6) 式は各杭について継手の数 + 1 個存在する (鋼材の断面ごとに分けた領域で立式される).

## 3. 最適化問題の定式化

最大継手数を  $n_j$  とし, 各基礎杭の断面を上杭から順に  $1, \dots, n_{j+1}$  とする. 基礎杭の番号を左下添字, 各杭の断面を上杭から順に数えた番号を左上添字とする. 例えば,  ${}^j_i Z$  は  $i$  番目の基礎杭の上から  $j$  番目の杭の断面係数となる. また, 杭長はあらかじめ与えられたリストから選択するものとし, 杭断面の種類数を  $n_p$ , 杭長の種類数を  $n_L$  とする. ベクトル  $\mathbf{x} \in [1, \dots, n_p]$  とベクトル  $\mathbf{y} \in [1, \dots, n_L]$  を次のように定義する.

$$\mathbf{x} = [x_{11}, \dots, x_{1n_j+1}, x_{21}, \dots, x_{mn_j+1}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{y} = [y_{11}, \dots, y_{1n_j+1}, y_{21}, \dots, y_{mn_j+1}]^T \quad (8)$$

杭断面は  $\mathbf{x}$  によって選択されるものとする. 例えば, 杭断面リストにおける杭の軸径の値を  $\bar{B}_1, \dots, \bar{B}_{n_p}$  とすると,  $i$  番目の基礎杭の上から  $j$  番目の杭の軸径は次式で与えられる.

$${}^j_e B = \begin{cases} \bar{B}_1 & \cdots & \text{if } x_{ej} = 1 \\ \vdots & & \\ \bar{B}_{n_p} & \cdots & \text{if } x_{ej} = n_p \end{cases} \quad (9)$$

その他の断面性能も同様に与えられる. 一方で杭長は  $\mathbf{y}$  によって選択される. 例えば, 杭長のリストを  $\bar{L}_1, \dots, \bar{L}_{n_L}$  とすると,  $i$  番目の基礎杭の上から  $j$  番目の杭の杭長は次式で与えられる.

$${}^j_e L = \begin{cases} \bar{L}_1 & \cdots & \text{if } x_{ej} = 1 \\ \vdots & & \\ \bar{L}_{n_L} & \cdots & \text{if } x_{ej} = n_p \end{cases} \quad (10)$$

以上のルールを踏まえ, 以上のルールより基礎杭に対し,  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  を設計変数とする以下の最適化問題を考える.

$$\text{minimize} \quad \sum_{e=1}^m \sum_{j=1}^{n_j+1} {}^j_e A \cdot {}^j_e L \quad (11a)$$

$$\text{subject to} \quad {}^j_e N_L \leq {}^j_e N_{aL} \quad \begin{matrix} e = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n_j + 1 \end{matrix} \quad (11b)$$

$${}^j_e N_S \leq {}^j_e N_{aS} \quad \begin{matrix} e = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n_j + 1 \end{matrix} \quad (11c)$$

$${}^j_e M_S \leq {}^j_e M_{aS} \quad \begin{matrix} e = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n_j + 1 \end{matrix} \quad (11d)$$

$${}^j_e Q_S \leq {}^j_e Q_{aS} \quad \begin{matrix} e = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n_j + 1 \end{matrix} \quad (11e)$$

$${}^i_e B = {}^{i+1}_e B \quad \begin{matrix} e = 1, \dots, m \\ i = 1, \dots, n_j \end{matrix} \quad (11f)$$

$$\frac{{}^e_l}{{}^j_e B} \leq 130 \quad (11g)$$

ここで,  ${}^j_e L$  は  $i$  番目の基礎杭の上から  $j$  番目の杭体の杭長であり, 基礎杭の全長  $l$  とは  ${}_i l = \sum_{j=1}^{n_j} {}^j_e L$  の関係にある. また短期軸力  ${}^j_e N_S$ , 長期軸力  ${}^j_e N_L$ , 短期曲げモーメント  ${}^j_e M_S$ , 短期せん断力  ${}^j_e Q_S$  は伝達マトリクス法を用いた多層地盤解析によって求める<sup>1)</sup>. この最適化問題は, 杭断面と杭長の組み合わせを設計変数とし支持力及び応力の制約条件下で, 基礎杭の総体積を最小化する問題である. またこの最適化では施工上の制約として継手が存在する場合は上杭と下杭の径が同一となるように (11f) 式を課している.

## 4. 数値解析

基礎杭が 4 本の場合と 6 本の場合を比較するための数値解析を行う. 基礎杭の本数による比較を行うため, 本数以外の共通条件を以下のように定める.

1. 杭に作用する地震時せん断力は  $Q = 195\text{kN}$  とする.
2. 継手は 1 箇所 ( $n_j = 1$ ) とする.
3. 杭長 (全長ではない) は 0.0m, 1.5m, 3.0m, 4.5m, 6.0m のいずれかとする.



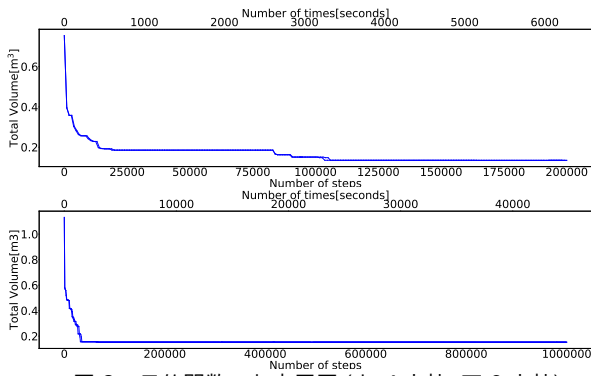


図2 目的関数の収束履歴 (上:4本杭, 下:6本杭)

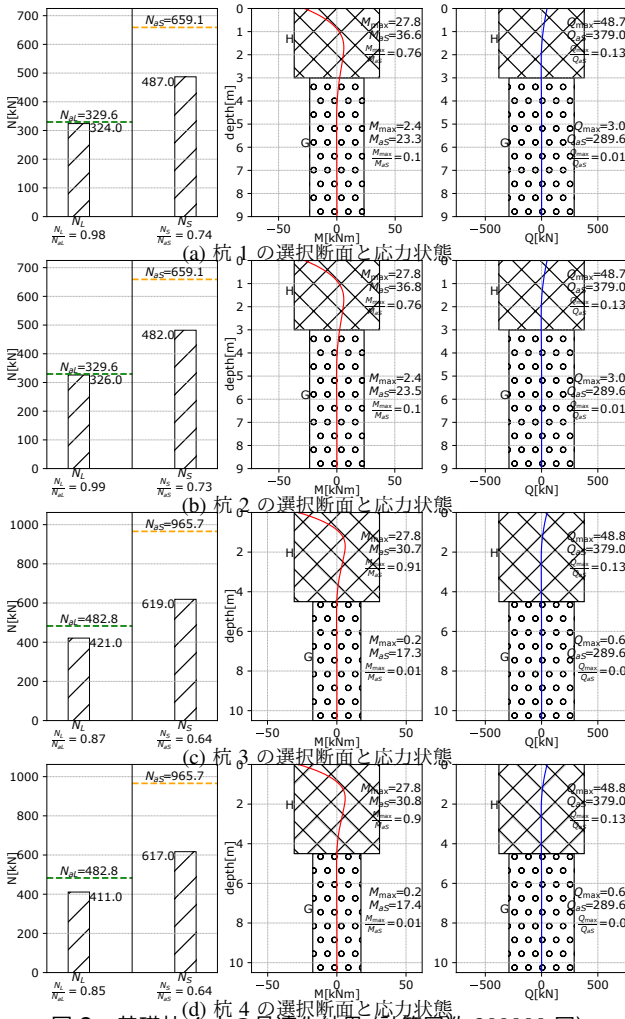


図3 基礎杭4本の最適化結果 (計算回数 20000 回)

たが、計算回数が 1976987 回で計算時間の上限に達し、その時点で繰り返し計算回数 820000 回時点での解を上回る優良解が獲得できなかった。杭6本ではすべての杭の上杭と下杭が同じであり使用する鋼管は同断面のうち一番板厚が薄いものが選ばれていることから、軸力によって杭の種類が選択された可能性が高い。曲げモーメントで杭種が決定される場合、上杭は杭1から杭6まで 1.5 m としたほうが経済的であるが、制約条件より上杭と下杭の長さの上限はそれぞれ 6 m であるため今回の解析結果になったと考えられる。

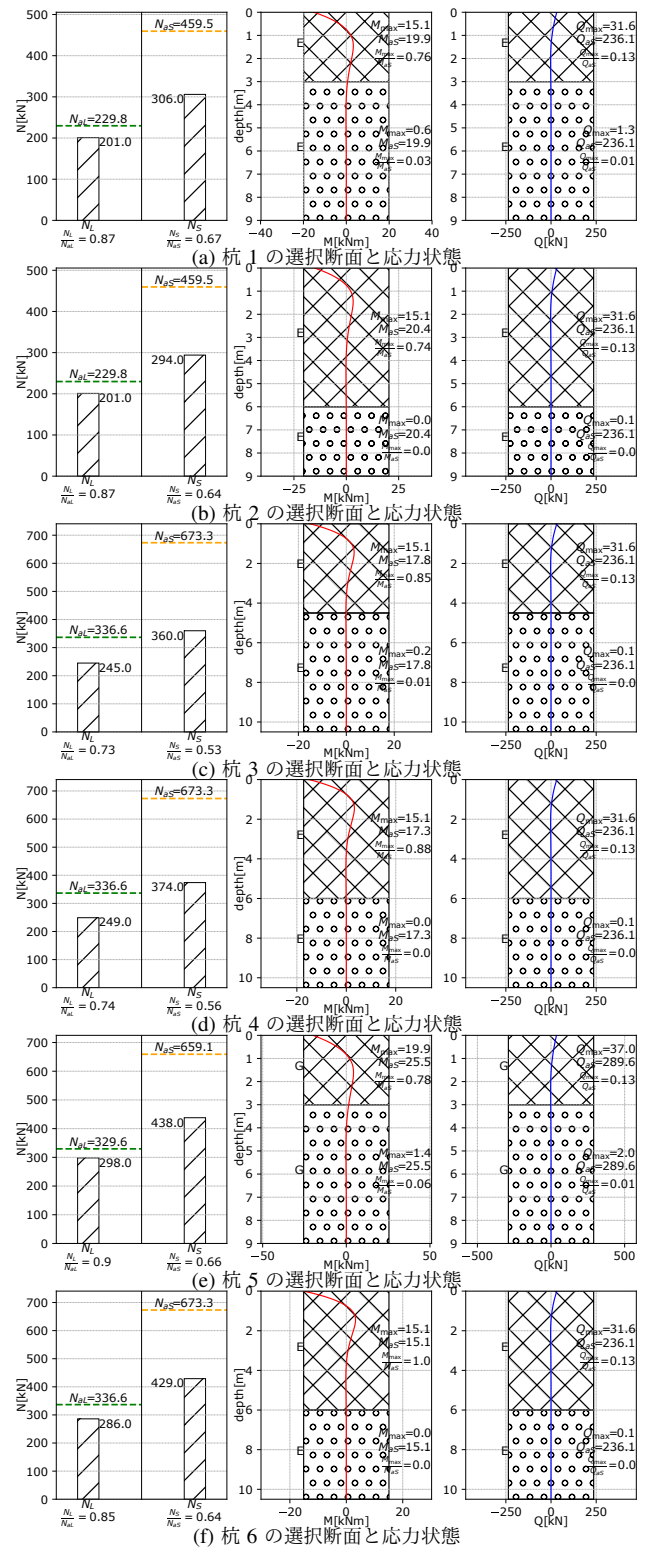


図4 基礎杭6本の最適化結果 (計算回数 1000000 回)

【参考文献】

- 1) 藤田慎之輔. 混合整数計画問題として定式化された基礎杭の最適設計法. 第 58 回日本建築学会九州支部研究発表会, 2019.3.
- 2) M. Schlueter, J. A. Egea, and J. R. Banga. Extended ant colony optimization for non-convex mixed integer nonlinear programming. *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 2217–2229, 2008.8.