

GAによる鋼管杭基礎構造の最適配置決定法に関する研究

千々岩浩巳¹・三原徹治²・太田俊昭³

¹正会員 第一復建(株) 技術開発室 (〒812 福岡市博多区博多駅南3-5-28)

²正会員 工博 九州共立大学助教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

³正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

鋼管杭基礎構造の設計は多くの場合試行錯誤的に行われており、最適化手法の導入余地が大きいと考えられる。しかし、鋼管杭の配置と断面形状を表す諸量のほとんどが離散量であるため、配置までも直接設計変数として取扱えば組合せ総数が膨大となり、従来の解法では解くことが困難となる。本研究は、遺伝的アルゴリズム(GA)による鋼管杭基礎構造の最適配置を求める一手法を提案するものである。すなわち、橋脚基礎の杭配置を対象とした最適設計問題の設定とGA適用のための線列のコーディングを示し、交配個体選択GAを適用した計算結果から本法の妥当性を検証する。さらに、計算の効率化のために交配個体数がランダムに変化する手法を提示し、地盤条件が杭配置におよぼす影響についても検討を行う。

Key Words : steel pipe pile foundation, genetic algorithm, optimal location

1. はじめに

鋼管杭基礎構造は支持層が比較的地盤条件での橋脚基礎などに多用されるが、通常、その設計は試行錯誤的に行われている。著者のひとりも仮定した杭配置(杭列数 M 、各列本数 N_i ($i=1..M$)、杭間隔 d ： d は連続量、他は整数値で離散量)と杭断面形状(杭径 D 、肉厚 t ：いずれも鋼管杭断面性能一覧表¹⁾にある離散量)に対する構造解析結果から、安全性・経済性を判断しながら仮定値を順次修正する繰返し手法により実設計を行っている。その際、設計仮定値の修正は経験と勘に頼る面が多く、特に杭の合理的な配置の決定は容易ではない。

鋼管杭基礎構造を対象とした離散的最適設計法に関する従来の研究は、あらかじめ杭配置を与えるものとそうでないものとに大別される。前者に属する研究としては石川・千々岩ら²⁾の分枝限定法を拡張した離散型非線形計画法や三原・千々岩ら³⁾の解特性を利用して列挙法の効率化を図る方法などがある。いずれも与えられた M 、 N_i に対して最適な d 、 D 、 t を確実にかつ効率的に求めることに力点が置かれている。一方、杭配置をも設計変数とする研究は少なく、わずかに近田らの研究⁴⁾と石川・田中らの研究⁵⁾があるに過ぎない。近田ら⁴⁾は、斜杭角度の決定も含めた最適化システムをSpreadsheet上に構築しているが、杭配置はあ

らかじめ用意された複数の候補から選択されるため、任意の配置の可能性が考慮されていない。また石川・田中らの研究⁵⁾では、仮想壁モデルを用いた3段階的手法により、 N_i を合理的に決定する手法が提案されているが、 M の与え方によっては必ずしも最適配置の解が得られない場合も考えられる。

本研究は、このような鋼管杭基礎構造の離散的最適設計法に関する従来の研究の進展を踏まえ、最適な杭配置を決定する最適配置問題の解法として、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)⁶⁾を拡張・適用した一手法を提案するものである。GAは生物進化の過程を簡単な数理モデルに置換え、離散的最適化問題の準最適解(真の最適解の場合もある)を単純明解なアルゴリズムによって効率的に求める手法であり、その最適解探索能力や計算効率の向上のため種々の工夫がなされ、近年、最適構造設計問題へも適用されつつある^{7)・8)}。

本研究では、杭配置を含めた橋脚基礎の混合型の最適設計問題を組合せ最適問題へ変換してGAへの適用化を図り、組合せ総数を減らすための線列のコーディングを示す。ついで交配個体選択GA^{9)・10)}を適用した計算結果から本法の妥当性を検証する。さらに計算のより効率化のために交配個体数がランダムに変化する手法を提示するとともに地盤条件が杭配置におよぼす影響についても検討を行う。

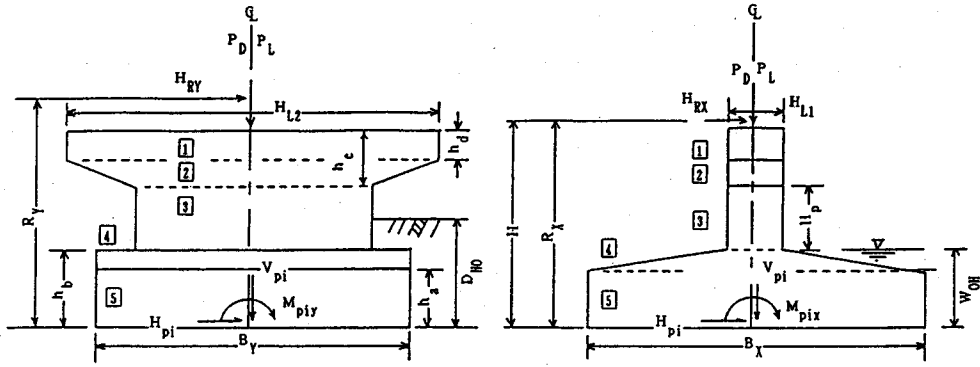


図-1 橋脚寸法・設計荷重

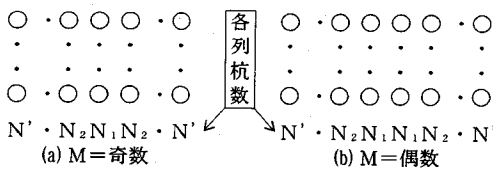


図-2 杭配置の模式図

なお、本研究で用いた仮定は次のとおりである。

- ①対称な杭配置の鉛直杭による橋脚基礎を対象とし、上部工および橋脚の構造形式は既知とする。
- ②杭基礎構造の設計基準は道路橋示方書¹¹⁾に従う。
- ③地盤条件はN値により評価する。
- ④杭のネガティブフリクションおよび群杭効果は考慮しない。

2. 鋼管杭基礎構造の最適配置問題

本節では、図-1に示す橋脚の鋼管杭基礎の最適配置設計基本式について設計変数の選定、設計荷重の算定について述べ、それらを用いて定式化した原設計基本式と組合せ最適化問題への変換を示す。

(1) 設計変数の選定

断面形状に関する設計変数として杭径D、肉厚tを選ぶ。非常に多くの杭数を必要とする場合など各杭の断面形状を変化させる方が有利になることも考えられるが、ここでは施工性の観点からすべて同一の断面形状とする。

配置に関する設計変数には離散化した座標値など種々考えられるが、ここでは実際の杭配置が多くの場合対称配置であることから次のように配置の枠組みと各列本数に分けて設計変数を選定する。図-2に示す対称性を考慮した杭配置の模式図を参照して、杭列数M、最外縁列本数N'および杭間隔dにより配置の枠組みを表し、各列本数N_i (i=1..M')により杭の具体的な配置を表す。N_iの個数M'はMに応じて次式で算定

される。

$$M' = \begin{cases} (M+1)/2 - 1 & (M \text{ が 奇 数}) \\ M/2 - 1 & (M \text{ が 偶 数}) \end{cases} \quad (1a)$$

(2) 設計荷重算定および原設計基本式⁵⁾

設計荷重V₀, H₀, M₀は図-1を参照して上部工および橋脚の構造形式から次のように算定される。

$$V_0^{(0)} = V_{pi} + P_D + P_L + D_{ON} - H_{UN} \quad (2a)$$

$$V_0^{(2)} = V_0^{(0)} = V_{pi} + P_D + D_{ON} - H_{UN} \quad (2b)$$

$$H_0^{(2)} = H_{pi} + H_{RX} \quad (2c)$$

$$H_0^{(3)} = H_{pi} + H_{RY} \quad (2d)$$

$$M_0^{(2)} = M_{pix} + H_{RX} R_X \quad (2e)$$

$$M_0^{(3)} = M_{piy} + H_{RY} R_Y \quad (2f)$$

ここに、V₀はフーチングの中央に作用する鉛直荷重、H₀は水平荷重、M₀はモーメント荷重、肩字①、②、③はそれぞれ常時、地震時橋軸方向、地震時橋軸直角方向を示す。ただし、V_{pi}は橋脚による鉛直荷重、P_Dは上部工の死荷重、P_Lは活荷重、D_{ON}はフーチング底面より上の部分の土の有効重量、H_{UN}はフーチングに作用する揚圧力、H_{pi}は橋脚による水平力、H_{RX}は上部工橋軸方向水平力、H_{RY}は上部工橋軸直角方向水平力、M_{pix}は橋脚による橋軸方向モーメント、R_Xは橋軸方向上部工水平力のアーム長、M_{piy}は橋脚による橋軸直角方向モーメント、R_Yは橋軸直角方向上部工水平力のアーム長を示す。

設計変数値が変わると必要なフーチング大きさが変わり、式(2)中のV_{pi}, H_{pi}, M_{pix}, M_{piy}, D_{ON}, H_{UN}も変化するため設計荷重も一定ではない。

フーチングは道路橋示方書(8.5.3)の剛体の条件を満足するためその応力度照査は省略でき、橋脚の転倒の照査も道路橋示方書(5.3)に従い杭基礎の深い基礎であるため行わなくともよく、またフーチング部の大きさ(図-1の底面B_X, B_Yおよび高さh_a, h_b)は道路橋示方書(8.3.2)および(4.5.2)の条件を満足す

るものとすれば、鋼管杭基礎構造の最適設計基本式は次式のように定式化される。

設計変数： $d, D, t, M, N', N_i (i=1..M')$

目的関数： $W = n \rho_s A_p L + C \rho_c V_f$

$$= W_s + C W_c \rightarrow \min. \quad (3a)$$

$$\text{制約条件：} \quad G_1 = V_i^{(1)} - V_a^{(1)} \leq 0 \quad (3b)$$

$$G_2 = V_i^{(2)} - V_a^{(2)} \leq 0 \quad (3c)$$

$$G_3 = V_i^{(3)} - V_a^{(3)} \leq 0 \quad (3d)$$

$$G_4 = H^{(2)} - H_a^{(2)} \leq 0 \quad (3e)$$

$$G_5 = H^{(3)} - H_a^{(3)} \leq 0 \quad (3f)$$

$$G_6 = \sigma_i^{(2)} - \sigma_y \leq 0 \quad (3g)$$

$$G_7 = \sigma_i^{(3)} - \sigma_y \leq 0 \quad (3h)$$

$$G_8 = 1 - L \beta \leq 0 \quad (3i)$$

$$G_9 = 2.5D - d \leq 0 \quad (3j)$$

$$G_{10} = D - h_a \leq 0 \quad (3k)$$

$$G_{11} = Bx/5 - (h_a + h_b)/2 \leq 0 \quad (3l)$$

ただし：

$$V_f = V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} + V_{f4} + V_{f5},$$

$$V_{f1} = H L_1 H L_2 h_d,$$

$$V_{f2} = H L_1 \{(D_p + H L_2)/2\} (h_c - h_d),$$

$$V_{f3} = A_f H_p = H L_1 D_p,$$

$$V_{f4} = \{(Bx + H L_1)/2\} (h_b - h_a) B_y,$$

$$V_{f5} = B_x B_y h_a,$$

$$B_x = M d,$$

$$B_y = N' d.$$

ここに、式(3b)～(3d)は杭の鉛直支持力に関する条件、式(3e)、(3f)は杭の水平支持力に関する条件、式(3g)、(3h)は内部応力度に関する条件、式(3i)は杭を弾性体基礎とみなすための条件、式(3j)は杭間隔に関する条件、式(3k)フーチングの厚さが杭径以上である条件、式(3l)はフーチングを剛体として取扱える条件を制約条件として表したものである。式(3)はこれら制約条件を満足しながら式(3a)の換算杭重量 W を最小にするような設計変数値を求める問題を意味している。設計変数 d が連続変数で、他の設計変数がすべて離散変数であるので混合型最適化問題である。

ただし、 n は杭総本数、 ρ_s は鋼管杭の単位体積重量、 A_p は杭1本の純断面積、 L は杭長、 C は施工費を含めた単位重量あたりの鋼管杭の費用 C_s に対する同様な鉄筋コンクリートの費用 C_c の比(= C_c/C_s)、 ρ_c は鉄筋コンクリートの単位体積重量、 V_f は橋脚体積、 V_i は各杭頭の鉛直反力、 V_a は杭の軸力方向押し込み許容支持力、 H は杭頭の水平反力、 H_a は杭の軸直角方向許容支持力、 σ_i は最大曲げモーメントを生じる位置における杭の内部応力度、 σ_y は杭の降

伏応力度、 β (= $\sqrt[4]{k D^3 / 4 E I}$)は杭およびケーソンの特性値、 k は杭の横方向地盤反力係数、 E は鋼材のヤング率、 I は杭の断面2次モーメントを示す。

(3) 設計基本式の組合せ最適化問題への変換

フーチング部の大きさが大きくなると式(3a)第2項の V_f 値が大きくなるばかりでなく、式(2)で算定される設計荷重も大きくなるため式(3a)第1項も増大する。すなわち式(3)による最適化を実行する場合、フーチング部の大きさは制約条件が許す範囲内で最小化されると考えられる。具体的には式(3k)から $h_a = D$ 、式(3l)から $h_b = 2 Bx/5 - D$ とすることになり、さらに式(3j)から $d = 2.5D$ と仮定することになる。よって式(3j)～(3l)を制約条件とする必要がなくなると同時に d を設計変数から除外することができる。

結局、式(3)は次式のようなすべての設計変数が離散変数である組合せ最適化問題に変換される。

既知数： N 値、 $k_H, D_{H0}, W_{OH}, t_0, \rho_t, \rho_s, \rho_c, C, L, \sigma_y, E, P_D, P_L, H_{RX}, H_{RY}, R_X, R_Y$

設計変数： $D, t, M, N', N_i (i=1..M')$

目的関数： $W = W_s + C W_c \rightarrow \min. \quad (4a)$

制約条件： $G_j \leq 0 (j=1..8) \quad (4b)$

ここに、 k_H は設計震度、 D_{H0} は上載土砂高さ、 W_{OH} は浮力水位高さ、 t_0 は腐食見込み厚、 ρ_t は土の単位体積重量である。

3. 交配個体選択GAの適用のための定式化

(1) 線列のコーディング

式(4)に示す最適設計問題の解法としてGAを用いる場合、まず線列のコーディングを行う必要がある。ここに線列は、設計変数の離散値データをすべて2進数(0または1)で表すことにより、1つの組合せた事例の設計に対応するもので、進化に関するGAオペレーションの対象である。

断面形状に関する設計変数 D, t には、それぞれ独立な離散値データを割当てすることもできるが、鋼管杭性能表¹⁾から、ある D 値に対して存在する t 値は2～4種類しかないので、 D と t を対として表-1に示すような63種(線列ビット数は6)の離散値データを設定した。その対応は、例えば線列が011011のとき10進数に変換した値が27であるから $D = 71.12\text{cm}$ 、 $t = 1.6\text{cm}$ となる。

配置に関する設計変数のうち、杭列数 M と最外縁列本数 N' は対として表-2に示す56種(線列ビット数

表-1 鋼管杭径D (cm) および肉厚 t (cm) の離散値データ

	D	t	D	t	D	t	D	t			
1	40.00	0.9	17	60.96	1.2	33	81.28	1.4	49	101.60	1.4
2	40.00	1.2	18	60.96	1.4	34	81.28	1.6	50	101.60	1.6
3	40.64	0.9	19	60.96	1.6	35	81.28	1.9	51	101.60	1.9
4	40.64	1.2	20	70.00	0.9	36	90.00	1.2	52	110.00	1.2
5	40.64	1.4	21	70.00	1.2	37	90.00	1.4	53	110.00	1.4
6	50.00	0.9	22	70.00	1.4	38	90.00	1.6	54	110.00	1.6
7	50.00	1.2	23	70.00	1.6	39	90.00	1.9	55	110.00	1.9
8	50.00	1.4	24	71.12	0.9	40	91.14	1.2	56	111.70	1.2
9	50.80	0.9	25	71.12	1.2	41	91.14	1.4	57	111.70	1.4
10	50.80	1.2	26	71.12	1.4	42	91.14	1.6	58	111.70	1.6
11	50.80	1.4	27	71.12	1.6	43	91.14	1.9	59	111.70	1.9
12	60.00	0.9	28	80.00	0.9	44	100.00	1.2	60	120.00	1.4
13	60.00	1.2	29	80.00	1.2	45	100.00	1.4	61	120.00	1.6
14	60.00	1.4	30	80.00	1.4	46	100.00	1.6	62	120.00	1.9
15	60.00	1.6	31	80.00	1.6	47	100.00	1.9	63	120.00	2.2
16	60.96	0.9	32	81.28	1.2	48	101.60	1.2	64	ダミ	ー

表-2 杭列数M~最外縁列本数N'の離散値データ

データ	データ	データ	データ	データ	データ						
1	2~2	11	3~5	21	4~8	31	6~4	41	7~7	51	9~3
2	2~3	12	3~6	22	5~2	32	6~5	42	7~8	52	9~4
3	2~4	13	3~7	23	5~3	33	6~6	43	8~2	53	9~5
4	2~5	14	3~8	24	5~4	34	6~7	44	8~3	54	9~6
5	2~6	15	4~2	25	5~5	35	6~8	45	8~4	55	9~7
6	2~7	16	4~3	26	5~6	36	7~2	46	8~5	56	9~8
7	2~8	17	4~4	27	5~7	37	7~3	47	8~6	57	ダミ
8	3~2	18	4~5	28	5~8	38	7~4	48	8~7	?	?
9	3~3	19	4~6	29	6~2	39	7~5	49	8~8	64	?
10	3~4	20	4~7	30	6~3	40	7~6	50	9~2		

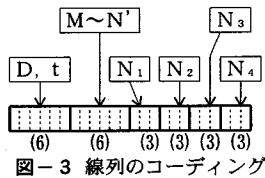


図-3 線列のコーディング

は6)の離散値データを設定した。この場合はM=2~9, N'=2~8のすべての組合せを対象としたものであるが、MとN'の範囲を変更することでさらに大規模な杭基礎構造の場合への適用も容易である。また、M~N'の組合せを任意に設定することにより、あらかじめ不適当と考えられる組合せを除外する場合などへの対処も容易で、収束性の向上も期待できる。杭の配置を具体的に表す各列本数Ni (i=1..M')は2 ≤ Ni ≤ N'の整数であり、N'の最大が8であるから線列ビット数は3である。また、Mの最大値が9であることから式(1a)よりM'も最大4である。

したがって1個の線列は図-3に示すような24ビット構造となる。

(2) 交配個体選択GA

一般に、離散的最適化問題の最適解がGAによって必ずしも得られるとは限らない⁶⁾。特に単純GAと呼ばれるGAの最も基本的な手法を最適構造設計問題に適用すると、良好な解が安定的には得られない場合が

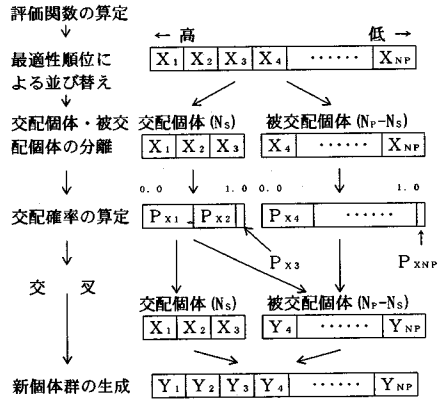


図-4 交配個体選択GAのアルゴリズム

多く、その対策として設計値と最適解の関係(ローカルルール)の活用などが提案されている⁷⁾。しかし、本研究で対象とする問題は、ローカルルールを容易に得ることできないので、この種の問題に対して比較的良好な解を安定的に得ることができる交配個体選択GA^{9), 10)}を解法として用いる。その流れは図-4のように表すことができ、具体的な手順は以下のようになる。

- ①人口サイズN_P, 交配個体数N_S, 突然変異確率P_m, 進化世代の最大数N_Gの設定。
- ②N_P個の初期世代線列をランダムに生成。
- ③適応関数f_k値の算出: 生成された線列(設計)を評価するための適応関数の選択もGAの重要な要素のひとつであり、種々の方法が提案されている⁶⁾。本研究では、このうち妥当な評価を与える文献⁷⁾の方法、すなわち式(5)で算定される外点ペナルティ関数値を用いた式(6)に示す適応関数を採用する。

$$\Phi_k = W_k + \gamma \sum_{j=1}^8 \max[G_j, 0]_k \quad (k=1..N_P) \quad (5)$$

$$f_k = \frac{\Phi_0(1-C_f)}{\Phi_0 - \Phi'} \Phi_k + \frac{\Phi_0(C_f\Phi_0 - \Phi')}{\Phi_0 - \Phi'} \quad (k=1..N_P) \quad (6)$$

ただし、Φ_kはk番目線列の外点ペナルティ関数値、γはペナルティ係数、G_jは式(4b)に示される制約条件式の値、Φ₀, Φ'は各世代におけるペナルティ関数の平均値と最小値、C_fは平滑化係数(本論文の数値計算例ではC_f=1.5を用いる)である。

- ④交配個体の選択と交配選択確率: 交配個体選択GAでは、全N_P個の線列のうち良好な適応関数値をもつ少数(N_S個)の線列を交配個体として選択し、他を被交配個体として類別する。N_Sは著者らの別の研究^{9), 10)}で得られた知見より全体の20%程度以下とし、交配個体と同じ線列が重複して選択されな

表-3 計算に用いたN値分布

深度 (m)	1~26	27	28~31	32~34	35~49	50, 51
N 値	2	14	5.6	32	13	40

表-4 設計計算に用いた諸値

変数	単位	値	変数	単位	値
P _D	tf	580.9	ρ _s	t/m ³	7.85
P _L	tf	159.0	ρ _c	t/m ³	2.5
H _{RX}	tf	428.6	C	-	0.092
H _{RY}	tf	139.4	L	m	51.0
R _X	m	6.70	σ _y	kgf/cm ²	1400
R _Y	m	8.50	E	kgf/cm ²	2.1×10 ⁶
k _H	-	0.24	D _{HO}	m	3.5
t ₀	mm	2.0	W _{OH}	m	2.5
ρ _t	t/m ³	1.8			

いよう配慮する。

ある個体 n は、その適応関数値 f_n に応じた交配選択確率 P_n = f_n / f_t を有し、P_n 値は線列の配列 (性質) の次世代への伝わりやすさを示す。ここに f_t は N_s 個の交配個体が全 N_P 個の線列の第 1 ~ N_s 番目となるように並替えられているとして次のように算定される。

$$f_t = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_s} f_i & (\text{個体 } n \text{ が交配個体の場合}) \\ \sum_{i=1+N_s}^{N_P} f_i & (\text{個体 } n \text{ が被交配個体の場合}) \end{cases} \quad (7a)$$

$$(7b)$$

- ⑤単純交叉による次世代線列の生成：親線列として交配個体と被交配個体が1個ずつ交配選択確率 P_n によるルーレットゲームで選ばれる。これらの中で「確実な」ビット交換がランダムに決定された交叉位置で行われ、新たな子 (次世代) 線列が形成されて1対の交叉オペレーションが完了する。この交叉オペレーションは子線列の数が (N_P - N_s) 個になるまで繰返され、N_s 個については交配個体がそのまま次世代個体として残存する。
- ⑥突然変異と繰返し：N_P 個の次世代線列に対して突然変異確率により突然変異の発生を判定する。突然変異を行う場合には、ランダムに決定された1つのビット値のみを 0 → 1 もしくは 1 → 0 に変更する。この突然変異オペレーションが終了し、次世代線列が確定した後③へ戻る。
- ⑦最良解の判定：以上の一連のオペレーションを N_G 回実行し、全世代における最小のペナルティ関数値を有する線列 (設計) を最良解とする。

(3) 改良アルゴリズム

上記交配個体選択GAでは、単純GAと共通なGAのパラメータ (人口サイズ N_P, 突然変異確率 P_m, 進化世代の最大数 N_G) のほかに交配個体数 N_s を設定する必要がある。得られる解がGAのパラメータの

表-5 N_s固定の計算結果 (N_P=100, N_G=100)

P _m	0.10	0.20	0.30	
区分	W (G ₀)	W (G ₀)	W (G ₀)	N _A
1	290.28 (23)	269.00 (96)	264.69 (29)	2900
2	282.94 (4)	262.25 (3)	255.56 (58)	5800
3	282.94 (98)	247.89 (56)	262.25 (3)	300
4	262.25 (3)	268.29 (3)	262.25 (3)	300
5	262.25 (8)	264.69 (9)	269.00 (76)	7600
6	269.00 (61)	268.29 (43)	255.56 (85)	8500
7	303.64 (2)	302.62 (4)	262.25 (3)	300
8	262.25 (4)	255.56 (8)	247.89 (7)	700
9	302.62 (3)	262.25 (4)	262.25 (6)	600
10	258.54 (9)	258.54 (6)	254.31 (11)	1100
11	262.02 (5)	258.54 (7)	258.54 (4)	400
12	264.69 (19)	262.25 (4)	262.25 (5)	500
13	262.02 (9)	258.54 (7)	258.54 (8)	800
14	247.89 (17)	262.25 (4)	255.56 (15)	1500
15	291.47 (10)	262.25 (5)	262.25 (6)	600
16	262.25 (7)	268.29 (45)	254.31 (76)	7600
17	262.25 (5)	268.29 (9)	255.56 (97)	9700
18	258.54 (4)	279.16 (92)	258.54 (10)	1000
19	262.25 (7)	262.25 (7)	258.54 (13)	1300
20	264.69 (8)	262.25 (6)	257.25 (8)	800
[I]	1/20	1/20	1/20	平均
[II]	3/20	5/20	1 2/20	2615

影響をかなり受けることが経験的に知られており、良好な解を得るためには、交配個体数 N_s も種々の設定値について計算する必要がある。従来の研究⁹⁾ から比較的良好な解が得られる N_s 値は人口サイズ N_P の 10 ~ 20% 程度であるが、それでもかなりの数のケースについての計算が必要となる。

本研究では計算ケースの縮小を図るため、N_s 値を次のようにランダムに与える方法をとる。

$$N_s = \text{INT}[(R_u - R_l) R_s + R_l] N_P \quad (8)$$

ここに、R_s は 0.0 ~ 1.0 の一様乱数値、R_u および R_l は人口数 N_P に対する交配個体数 N_s の比率の上下限值、INT[·] は小数点以下の切捨てを示し、例えば N_P = 100, R_u = 0.2, R_l = 0.1 のとき N_s は 10 ~ 20 の任意の値をとる。以下 N_s = (R_l ~ R_u) N_P と表現する。このとき、ある一定世代では同じ N_s 値を用いることが解の改良を促進することも予想されるので、同じ N_s 値を用いる世代数を世代間隔 I_G (I_G = 1 とすれば毎世代ごとに N_s 値を変化させることになる) と定義し、この世代間隔 I_G を GA のパラメータのひとつとする。

4. 数値計算

(1) 妥当性の検証

提案法の妥当性を検討するため文献⁵⁾ で用いられた数値計算例 (計算に用いた N 値分布を表-3 に、その他の既知数値を表-4 に、それぞれ示す) への適用を試みる。

表-6 N_s固定の計算結果 (P_m=0.3)

N _F [N _G]	300 [33]		200 [50]		
	W (G ₀)	N _A	W (G ₀)	N _A	
N _s	1	257.25 (3)	900	262.02 (3)	600
	2	258.54 (2)	600	255.93 (8)	1600
	3	258.54 (2)	600	258.54 (16)	3200
	4	258.54 (2)	600	262.25 (3)	600
	5	258.54 (4)	1200	259.86 (13)	2600
	6	251.73 (4)	1200	268.29 (8)	1600
	7	254.31 (5)	1500	255.56 (15)	3000
	8	258.54 (4)	1200	274.86 (15)	3000
	9	254.31 (6)	1800	258.54 (11)	2200
	10	258.54 (3)	900	255.56 (12)	2400
	11	254.31 (5)	1500	252.35 (10)	2000
	12	257.25 (5)	1500	274.86 (9)	1800
	13	254.31 (24)	7200	268.29 (11)	2200
	14	257.25 (6)	1800	268.29 (11)	2200
	15	252.35 (6)	1800	262.25 (5)	1000
	16	257.25 (8)	2400	268.29 (9)	1800
	17	247.89 (8)	2400	258.54 (8)	1600
	18	247.89 (10)	3000	255.56 (8)	1600
	19	258.54 (4)	1200	262.25 (4)	800
	20	251.73 (5)	1500	262.25 (6)	1200
	21	258.54 (4)	1200	262.25 (6)	1200
	22	257.25 (11)	3300	268.29 (20)	4000
	23	254.31 (6)	1800	256.21 (6)	1200
	24	254.31 (9)	2700	247.89 (14)	2800
	25	257.25 (6)	1800	268.29 (25)	5000
	26	258.54 (6)	1800	255.56 (12)	2400
	27	257.25 (10)	3000	247.89 (12)	2400
	28	257.79 (22)	6600	264.17 (48)	9600
	29	247.89 (14)	4200	262.25 (4)	800
	30	251.73 (10)	3000	247.89 (21)	4200
	31	254.31 (9)	2700	262.25 (7)	1400
	32	258.54 (3)	900	258.54 (8)	1600
	33	254.31 (8)	2400	255.56 (35)	7000
	34	257.25 (6)	1800	255.56 (10)	2000
	35	253.20 (17)	5100	257.25 (13)	2600
	36	251.73 (9)	2700	262.25 (6)	1200
	37	253.20 (9)	2700	255.56 (11)	2200
	38	247.89 (7)	2100	255.56 (42)	8400
	39	258.54 (4)	1200	262.25 (16)	3200
	40	258.54 (7)	2100	268.29 (19)	3800
	41	253.20 (12)	3600		
	42	255.56 (12)	3600		
	43	254.31 (13)	3900		
	44	258.54 (10)	3000		
	45	258.54 (12)	3600		
	46	247.89 (9)	2700		
	47	258.54 (28)	8400		
	48	258.54 (12)	3600		
	49	254.31 (15)	4500		
	50	258.54 (11)	3300		
	51	254.31 (19)	5700		
	52	254.31 (8)	2400		
	53	247.89 (7)	2100		
	54	257.25 (11)	3300		
	55	247.89 (17)	5100		
	56	247.89 (7)	2100		
	57	254.31 (15)	4500		
	58	254.31 (15)	4500		
	59	257.25 (13)	3900		
	60	247.89 (11)	3300		
[I]	9/60	平均	3/40	平均	
[II]	60/60	2655	20/40	2610	

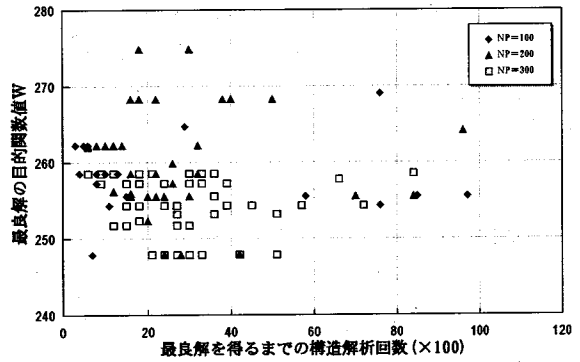


図-5 最良解のN_A~W関係

a) N_sを固定する方法

人口数 N_P=100, 計算世代数 N_G=100とし, 固定する交配個体数 N_s=1~20, 突然変異発生確率 P_m=0.1, 0.2, 0.3とした計60ケースの最良解を表-5に示す. 併記した()数字は最良解の出現世代 G₀, [I], [II]はそれぞれ最適解および準最適解(目的関数値において最適解との差が5%以内の解)の出現割合である. また, 本計算例では特別な終了条件を設定していないので計算効率の検討に資するため, P_m=0.3の場合のみ最良解が得られるまでに必要とした構造解析回数 N_Aとその平均値を併記した. ここに, N_Aは計算効率を示す目安として N_A=N_P×G₀で算出し, 同じ組合せの解析を行わないなどの処置を採用する場合の実構造解析回数よりは, 当然大きな値として得られる.

全ケースを通じて最良の目的関数値は247.89であるが, これが最適解であるかの検討は解法の妥当性を検証するうえでも必要である. ここでは限定列挙法³⁾を用いた検討を行った. すなわち, 16,777,216組のすべての組合せについて比較的容易に算出できる目的関数値だけを求め, 本法による最良値247.89未満の場合だけ構造解析を行って, その制約条件値を算出した. その結果, 構造解析を行った組合せの中に実行可能なものは存在せず, 本法により最適解が得られたことが判明した. ちなみに限定列挙法による最適解の検証に要した構造解析回数は約20万回であった.

表-5から, いずれの P_mにおいても最適解が得られたのは各1ケースだけであるが, 最適解との差が5%以内の解(260.00以下の準最適解)が得られたケースは P_m=0.3のとき最多(=12ケース)であり, 過半数のケースで準最適解が得られていることがわかる. しかも最良解が最適解か準最適解であるほとんどのケースでは, 最良解が得られた世代数が20以下であり, 収束性もかなり良好と判断できる.

そこで P_m=0.3と固定し, N_P=200, 300における計算結果を表-5と同様に表-6に示す. ただし, 構

表-7 計算過程に表れた比較的良好な設計値

順位	W	D (cm)	t (cm)	M	N'	各列杭数					総数
						N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	
①	247.89	50.00	0.9	6	8	8	7	8	—	—	46
②	251.73	40.00	0.9	8	8	8	6	8	8	—	60
③	252.35	50.80	0.9	6	8	8	7	8	—	—	46
④	253.20	40.00	0.9	9	7	4	7	7	7	7	60
⑤	254.31	40.64	0.9	9	7	7	6	7	6	7	59
⑥	255.56	50.00	0.9	7	7	5	7	7	7	—	47
⑦	255.93	50.80	0.9	7	7	4	7	7	7	—	46
⑧	256.21	40.64	0.9	8	8	8	6	8	8	—	60
⑨	257.25	40.00	0.9	9	8	8	3	7	8	8	60
⑩	258.54	40.64	0.9	9	8	5	3	8	8	8	59
⑪	259.86	50.00	0.9	7	7	6	7	7	7	—	48
*	307.6	60.00	0.9	8	6	6	6	5	5	—	44

表-9 地盤条件A, BのN値分布

深度(m)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N値	A	6	10	7	4	5	6	12	11	11	24	14	16	18
	B	7	6	34	22	5	5	8	13	12	10	9	13	10
深度(m)		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
N値	A	19	20	19	18	17	16	19	17	30	21	31	40	40
	B	11	9	10	13	40	40	20	20	32	26	23	40	40

表-11 地盤条件Bにおける比較的良好な設計値

順位	W [比率]	W _s [比率]	W _c [比率]	D (cm)	t (cm)	M	N'	各列杭数					総数
								N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	
①	150.81 [100.0]	100.96 [100.0]	541.85 [100.0]	50.00	0.9	6	8	8	7	8	—	—	46
②	151.00 [100.1]	104.76 [103.8]	502.60 [92.8]	40.00	0.9	8	8	6	8	8	8	—	60
③	152.47 [101.3]	104.76 [103.8]	518.60 [95.7]	40.00	0.9	9	7	6	6	7	7	7	60

造解析回数を $N_P=100$ と同等にするため、最大計算世代数 N_G をそれぞれ50および33、 N_S の上限を N_P の2割とし、最良解が得られるまでに必要とした構造解析回数 N_A とその平均値を併記する。 $N_P=200$ では3ケースで最適解が、20ケース(=50%、最適解のケースを含む)で準最適解が得られた。 $N_P=300$ ではすべてのケースで準最適解が得られ、そのうち9ケースでは最適解である。 N_P を大きくすれば良好な解が安定的に得られる傾向が認められ、本例の場合にも $N_P=200$ 以上が望ましいと判断される。

表-5, 6において最良解が得られるまでに必要とした構造解析回数 N_A を併記した場合、すなわち $P_m=0.3$ のときの N_A と最良解の目的関数値 W との関係を図-5に示す。単純に人口数を大きくすれば比較的良好な解が得られやすく、しかも計算世代数に応じて解が順調に改良されるのであれば、 N_A が大きくなると W 値が小さくなることが予想される。図-5からはその傾向はさほど強くないことがわかる。 $N_P=300$ で最適解が得られたほとんどのケースでは N_A は3000以下であり、 N_A が7000以上でも $N_P=100, 200$ ではかなり大きい W 値が得られている。ただし、表-5, 6の N_A の平均値は $N_P=100, 200, 300$ に対して、それぞれ2615, 2610, 2655と差異がない。したがって、本法において少ない N_P で N_G を大きく設定する場合と大きな N_P で N_G を小さく設定する場合とでは、平均的な計算効率は同程度であるが、後者の方がより良

表-8 N_S 変化の計算結果($N_P=200, N_G=50, P_m=0.3$)

I_G	Case I	Case II	Case III
1	255.56 (6)	247.89 (12)	247.89 (12)
2	262.25 (6)	247.89 (12)	247.89 (12)
3	255.56 (44)	255.26 (14)	255.56 (14)
4	255.56 (38)	247.89 (10)	247.89 (10)
5	262.25 (6)	255.56 (38)	255.56 (38)
6	247.89 (29)	247.89 (11)	247.89 (11)
7	262.25 (6)	255.56 (29)	255.56 (29)
8	247.89 (21)	262.25 (5)	262.25 (5)
9	262.25 (6)	262.25 (5)	262.25 (5)
10	262.25 (6)	262.25 (5)	262.25 (5)

Case I: $N_S = (0.05 \sim 0.2) N_P$, Case II: $N_S = (0.10 \sim 0.2) N_P$, Case III: $N_S = (0.15 \sim 0.2) N_P$.

表-10 $I_G=1\sim5$ による最良解の目的関数値(出現世代)

I_G	地盤条件A	地盤条件B
1	158.26 (31)	159.63 (1)
2	156.37 (10)	151.00 (18)
3	158.26 (8)	150.81 (14)
4	152.47 (18)	151.00 (10)
5	156.52 (12)	156.52 (11)

$N_P=200, N_G=50, P_m=0.3, N_S=(0.15\sim0.20)N_P$.

好な解が得られやすいことがわかる。

計算過程で得られた解を含め、最適解および準最適解と判定される解を表-7に示す。本計算例では真の最適解以外に多くの準最適解が存在する。いずれも肉厚 t の最適値は離散値データの最小値(=0.9cm)であるが、杭径 D や杭総数を含む配置には特定の規則性は認められず、様々な組合せが出現している。本手法を用いれば、それらが最良解として、もしくは最適化の過程において容易に求められることがわかる。

表-7の順位覧に*印がある設計は文献5)で杭列数 $M=8$ として求められた解である。その解と比較して本法による最適解は約19.4%、順位⑪の解でも約15.5%小さく、杭列数を仮定せず任意の杭配置を許す本法では探索の自由度が大きいために、より良い解が得られていることがわかる。

b) N_S を変化させる方法

次に N_S をランダムに変化させる方法による効果を検討するため、 $N_P=200, N_G=50, P_m=0.3$ と固定し計算を行った。表欄外に示すように R_U および R_L 値によりCase I~III, $I_G=1\sim10$ とした全30ケースの最良解を表-5と同じ形式で表-8に示す。

準最適解が得られたケースはCase Iで5ケース(内最適解が2ケース)、Case IIとCase IIIで7ケース(内最適解が4ケース)であり、表-6に示す $N_P=200$ の結果と比較しても、全般に同等もしくはより良い解が得られていることから、 N_S を変化させる方法が有

効であることがわかる。

ここにCase IIとCase IIIは全く同じ結果である。 $I_G \leq 7$ のとき最適解が3ケース、他の4ケースも準最適解と良好な解が得られ、 $I_G \geq 8$ ではそうではないことから、良好な解を得るためには I_G を大きく設定しない方がよいことがわかる。一方、 N_s の変化幅が大きいCase Iの解は、最適解は $I_G = 6$ のときだけであり、総じて他のCaseより解の精度が劣る。つまり本法を用いる際には、適当な N_s の変化幅を設定する必要があるが、 I_G をGA的パラメータとして変化させてもその値は小さい方がよいため、 N_s を固定する方法よりも計算ケース数が少なくすむことが認められる。

なお最良解が得られるまでに必要とした構造解析回数 N_A の平均値はCase I～IIIの順に3360, 2980, 2980で、 N_s を固定する方法よりも20%程度増加している。

(2) 地盤条件が異なる場合への適用性の検討

表-9に示す地盤条件A, Bに対する最適杭配置を N_s を変化させる方法によって求める。いずれの条件も先の計算例よりはるかに良好な地盤であるが、中でもBの方がAより若干良好である。計算パラメータとして $N_P = 200$, $P_m = 0.3$, $N_G = 50$, $N_s = (0.15 \sim 0.20) N_P$ を用い、 $I_G = 1 \sim 5$ と変化させた。なお、計算に用いた既知数値は、 $L = 26.0\text{m}$ を除き表-4と同一とした。計算結果を表-10に示す。

地盤条件Bの $I_G = 1$ のように最良解が初期段階から全く改良されないケースもあったが、他のケースでは順調に解が改良され、かなり早い世代で最良解が出現している。地盤条件Aの $I_G = 4$ の解と地盤条件Bの $I_G = 3$ の解は先の計算例と同様の方法によって最適解であることが確認された。

表-11に地盤条件Bにおける上位3つの解をその順位順に W_s , W_c 値や最適解との比率を含め整理した。最適解に比較し順位が下がると W_s は大きく W_c は小さくなる傾向が認められるが、 W_c が大きくなっても W_s を小さくすることが全体の目的関数 W の最小化に有効であることから同一条件下での解の傾向としては納得できる。ところで順位③の設計は、地盤条件Aの最適解でもある。地盤条件が悪化すれば W_s とともに当然 W_c も大きくなると考えられがちだが、本計算例のようにわずかに地盤条件が異なる場合の最適な設計間では、地盤条件の優劣が全体の目的関数 W および W_s には直接的に影響するが W_c に対する影響は必ずしも直接的ではないことがわかる。

またGAによる最適化では、単に1組の最良解が得られるだけでなく数多くの可能解がその最適化過程に出現する。この現象は設計者が数学的表現が難しい条件を考慮する場合などに好都合である。例えば、本研

究で用いた地盤条件AとBは、実際にはある橋の橋脚基礎の設計のため近接地点で計測されたデータを基にしている。このため地盤条件Bに対して目的関数値ではわずかに真の最適解より大きい、配置を除く設計変数値が条件Aの最適解と多くの共通点を有する最適性順位第2位の解を実用的な解と判断することも考えられる。このような選択は、それぞれの条件に対してただ1組の最良解を求める手法を用いる限り不可能である。

5. おわりに

本研究は鋼管杭基礎構造の杭配置を含めた最適な設計を行うため、遺伝的アルゴリズムを用いた一手法を提案したものである。本研究で得られた成果は以下のようにまとめることができる。

(1) 橋脚杭基礎を対象とし、杭配置に関する設計変数として杭列数、最外縁杭本数、各列本数を選び、かつ杭間隔 $d = 2.5D$ と仮定することにより、杭配置を含めた最適設計問題を組合せ最適化問題として定式化することができた。

(2) 上記問題の交配個体選択GAによる解法を確立するとともに、計算のより効率性を高めるため交配個体数をランダムに変化させるアルゴリズム変更の手法も別途提示した。

(3) 従来の研究⁵⁾ で用いられた数値計算例へ適用した結果、任意の杭配置を許す本法では、従来の解と比較してより精度の良い解が得られ、本法の妥当性を確認することができた。同時に最適性順位の高い設計間には杭径や杭総数を含む配置に関して一定の規則性は認められず、様々の組合せが出現することがわかった。

また本研究によって、少ない人口数で計算世代数を大きく設定する場合と多くの人口数で計算世代数を少なく設定する場合とを比較すれば、平均的な計算効率率は同程度であるが、後者の方がより良好な解が得られ易いことがわかった。

(4) 交配個体数をランダムに変化させる方法を、地盤条件が若干異なる場合へ適用した結果、いずれの場合にも本法は少ない計算ケースで最適解を求めることができた。それら最適解の目的関数値の差はわずか1.3%程度しかないが、設計変数の組合せは大きく異なっており、このことから本法がこのような微妙な問題にも適用可能であることがわかった。

(5) 本研究で用いた交配個体選択GAを含み、GAによる最適化計算法は、単に1組の最良解を得るだけでなく、数多くの可能解がその最適化過程に出現するために、その数学的表現が難しい条件を設計者が考慮しなければならない場合にも優れた適用性を有している

ことが確かめられた。

参考文献

- 1) 鋼管杭協会: 鋼管杭, pp. 342-351, 1986. 10.
- 2) 石川信隆, 千々岩浩巳, 田中孝昌, 香月智: 離散型非線形計画法による鋼管杭基礎の最適設計, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第12巻, pp. 115-120, 1988. 7.
- 3) 三原徹治, 千々岩浩巳: 鋼管杭基礎構造の離散的な最小費用設計法に関する一研究, 土木構造・材料論文集, 第9号, pp. 73-81, 1993. 11.
- 4) 近田康夫, 岡林秀勝, 吉田進, 小堀為雄: Spreadsheet上での鋼管杭基礎の最適設計, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 467-474, 1993. 3.
- 5) 石川信隆, 田中孝昌, 香月智, 田蔵隆: 鋼管杭基礎の最適杭本数の決定に関する一考察, 土木学会論文集, No. 404/I-11, pp. 341-349, 1989. 4.
- 6) 北野宏明編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書出版, 1993.
- 7) 杉本博之, LU Bian Li, 山本洋敬: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No. 471/I-24, pp. 67-76, 1993. 7.
- 8) 須藤敦史, 星谷勝, 宮沢和樹: 遺伝的要素を考慮したインポートランス・サンプリングによる離散型変数を有するシステムの最適化, 土木学会論文集, No. 519/I-32, pp. 223-232, 1995. 7.
- 9) 千々岩浩巳, 三原徹治, 太田俊昭: GAによる離散的最適化における淘汰・交配オペレーション方式の影響, 第4回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 55-60, 1995. 12.
- 10) 千々岩浩巳, 三原徹治, 太田俊昭: 離散的最適構造設計への交配個体選択GAの適用に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 381-388, 1996. 3.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, IV下部工編, 1970. 5.

(1996. 1. 9 受付)

AN OPTIMAL LOCATION DESIGN METHOD OF STEEL PIPE PILE FOUNDATION USING GENETIC ALGORITHM

Hiromi CHIJIWA, Tetsuji MIHARA and Toshiaki OHTA

This paper presents an optimal location design of steel pipe pile foundation by using the genetic algorithm (GA). The pile diameter and thickness, the distance between each pile, number of pile column and number of each pile column are selected as the design variables, and the minimum cost is selected as the object function. The optimal design problem is formulated as the discrete optimization problem by erasing the distance between each pile from the design variables on the characteristics of the optimal solution. The GA with selecting the crossing strings is used to solve it with the specific coding for GA strings.