

鋼管杭基礎構造の離散的な最小費用設計法

九州共立大学工学部 正員 三原 徹治
 アルファコンサルタント(株) 正員 千々岩 浩巳
 九州共立大学工学部 学生員 〇中 尾 義弘

1. 緒言 土木・建築構造物の基礎形式として多用される鋼管杭基礎の設計には従来より経験的な方法が用いられており、最適化の導入余地が大きい分野のひとつである。しかし、鋼管杭は鋼管杭断面性能一覧表にあるとおり杭径および肉厚とも離散変数となっているので、通常の連続変数を対象とする最適設計法の適用が困難である。このため、現行の道路橋示方書の設計規準を満足し橋脚および杭の総費用を最小にする杭の断面形状および杭間隔を決定することができる分枝限定法を拡張した離散型非線形計画法による最小費用設計法¹⁾が提案されているが、非線形最適化計算を行うため非常に多くの構造解析を必要とするという数値計算上の弱点を有する。

この弱点を克服するため、鋼管杭基礎の最小費用設計をより効率的に行うことができるよう限定列挙法²⁾を適用した解法アルゴリズムを提案し、その妥当性と計算効率について検討することが本研究の目的である。

2. 用いる仮定と設計問題の定式化 本研究では、得られる設計結果の比較を容易にするため、用いる仮定や設計問題の定式化などは表-1に示すように文献1)にしたがう。ここに、式(1)は換算杭重量 W を最小にする目的関数を表し、式(2a)~(2c)は杭の鉛直支持力に関する制約条件を、式(2d), (2e)は杭の水平支持力に関する制約条件を、式(2f), (2g)は内部応力度に関する制約条件を、式(2h)は杭を弾性体基礎とみなすための条件を、式(2i)は杭間隔に関する条件を、式(2j)は杭の断面寸法の幾何学的関係に関する制約条件をそれぞれ表す。さらに、式(2k)~(2m)は設計変数の上下限に関する制約条件を表す。ただし、設計変数として杭径 D 、肉厚 t 、杭間隔 d を選定しており、 $C=C_c/C_s$ 、 C_s 、 C_c は鋼管杭および鉄筋コンクリート橋脚の施工費を含めた単位重量当たりの建設費用、 ρ_s 、 ρ_c は鋼管杭および鉄筋コンクリートの単位体積あたりの重量、 n は杭本数、 A_p は一本の杭の純断面積、 L は杭長、 V_f は橋脚の体積、 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、 L は杭長、 β

表-1 用いた仮定、設計基本式、目的関数値の関係、および限定列挙法による離散最適探索アルゴリズム

用いた仮定	
①橋梁基礎を取り扱い、上部工および橋梁の構造形式、鋼管杭基礎の構造形式、杭の配置および杭の本数は既定条件として与えられる。	
②杭の設計規準は道路橋示方書に従う。	
③各杭は等形状鉛直杭で、杭配置は対称とする。	
④地盤は標準貫入による N 値を用いて評価する。	
⑤杭間隔は杭径の2.5倍以上とし、群杭効果は考慮しない。	
設計基本式	
目的関数: $W = n \rho_s A_p L + C \rho_c V_f \rightarrow \min.$	--- (1)
制約条件: $V_i(D, d)^{\text{①}} - V_a(D, t)^{\text{②}} \leq 0$	--- (2a)
$V_i(D, t, d)^{\text{②}} - V_a(D, t)^{\text{②}} \leq 0$	--- (2b)
$V_i(D, t, d)^{\text{③}} - V_a(D, t)^{\text{③}} \leq 0$	--- (2c)
$H(D, d)^{\text{④}} - H_a(D, t)^{\text{④}} \leq 0$	--- (2d)
$H(D, d)^{\text{⑤}} - H_a(D, t)^{\text{⑤}} \leq 0$	--- (2e)
$\sigma_i(D, t, d)^{\text{⑥}} - \sigma_y \leq 0$	--- (2f)
$\sigma_i(D, t, d)^{\text{⑦}} - \sigma_y \leq 0$	--- (2g)
$1 - L \beta(D, t) \leq 0$	--- (2h)
$2.5D - d \leq 0$	--- (2i)
$2t - D \leq 0$	--- (2j)
$D^L \leq D \leq D^U$	--- (2k)
$t^L \leq t \leq t^U$	--- (2l)
$d^L \leq d \leq d^U$	--- (2m)
目的関数値の関係	
$W^c \leq W^D \leq W^U$	--- (3)
限定列挙法による離散最適探索アルゴリズム	
①まず、すべての設計変数を連続変数としてNLP問題を解き、連続最適解とその目的関数値 W^c を得る。	
②次に、得られた連続最適解から1ランクアップ設計とその目的関数値 W^D を算出する。	
③離散値データリストからある組合せを選び出し、その目的関数値 W を式(1)から算定する。	
④上記で得た目的関数値 W が式(3)を満足しないときにはこの組合せは離散最適解の候補となり得ないので③へ戻り、新たな組合せについて検討する。そうでないとき、この組合せは離散最適解の候補であるので⑤へ進む。	
⑤式(2)によりこの組合せが可能離散解であるか否かを判定する。式(2)のいずれかの条件を犯すとき、可能離散解ではないのでそのまま③へ戻る。そうでないとき、この組合せは離散最適解の有力な候補であり、その目的関数値 W は W^D より小さい(より良い解である)ので、 $W^U \leftarrow W$ と置換えて③へ戻る。	
⑥以上を離散値データリストすべての組合せについて繰り返す。最終的に、目的関数を最小にする可能離散解を離散最適解と判定する。	

($=\sqrt{kD/4EI}$)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、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の荷重を受けるときの値、肩字 L 、 U はそれぞれ設計変数の下限値および上限値を示す。

3. 限定列挙法を適用した離散最適解探索アルゴリズム 限定列挙法は列挙法に基づく解法であるが、最小費用設計や最小重量設計と呼ばれる設計問題が複雑な(多くの計算量を必要とする)制約条件と簡単な(わずかな計算量で算定できる)目的関数で構成されることに着目し、式(3)で示される目的関数値の関係を導入することにより最適離散解探索に要する計算量の縮小を図ることができる。ここに、 W^c は連続最適解の目的関数値、 W^p は求めようとする離散最適解の目的関数値、 W^u は1ランクアップ設計(連続最適解の設計変数値のすべてを、その値より小さくはないが最も近い離散値データリスト上の値に置換した設計)の目的関数値である。式(1)、(2)で示される離散的最適設計問題に限定列挙法を適用した解法アルゴリズムを表-1に示す。

4. 数値計算例 図-1に示す円柱式橋脚の鋼管杭基礎の設計を行った。なお、図-1においてフーチング寸法等は道路橋示方書に示される条件より $B_x = n_x d$, $B_y = n_y d$, $h_a = D$, $h_b = 2B_x/5 - D$ (ただし、 n_x は杭列数、 n_y は1列の杭本数)に決定される。計算にあたって、図-2に示す土質柱状図と表-2に示す離散値データ(本法ではすべての設計変数を離散値とするため、杭間隔 d の離散値データは100.0~400.0(0.1刻み)とした)並びに表-3に示す上部荷重値を用いた。本法による計算結果を表-4に示す。最初に連続最適解を、次に1ランクアップ設計を求める。以後、先述したアルゴリズムに沿って改良を行うと、改良離散解[1]、[2]が得られ、結果的に改良離散解[2]が離散最適解と判定された。この解は、離散型非線形計画法による解法を用いた離散最適解と一致し本法の妥当性を確かめることができた。さらに、本例では連続最適解を求める際に48回の構造解析を、改良離散解が得られるときに各1回の構造解析を行っており、離散型非線形計画法による解法で必要とした構造解析回数268回と比較して約19%程度の計算量に縮小されており、本法の効率性が確認された。

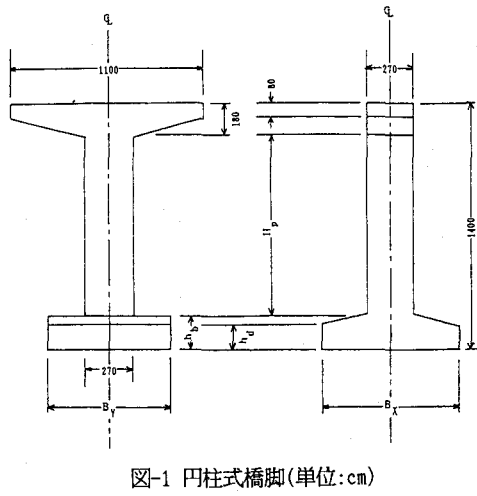


図-1 円柱式橋脚(単位:cm)

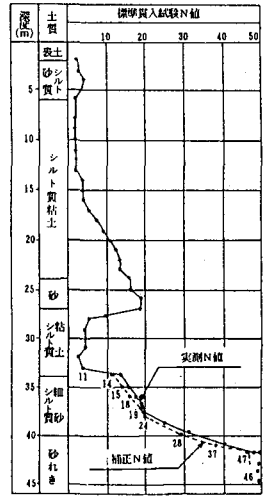


図-2 土質柱状図

表-2 離散値データリスト

杭直径 D (cm)	杭 肉 厚 t (cm)			
	0.9	1.2	1.4	1.6
40.00	0.9	1.2		
40.64	0.9	1.2	1.4	
50.00	0.9	1.2	1.4	
50.80	0.9	1.2	1.4	
60.00	0.9	1.2	1.4	1.6
60.96	0.9	1.2	1.4	1.6
70.00	0.9	1.2	1.4	1.6
71.12	0.9	1.2	1.4	1.6
80.00	0.9	1.2	1.4	1.6
81.28	0.9	1.2	1.4	1.6
90.00		1.2	1.4	1.6
91.14		1.2	1.4	1.6
100.00		1.2	1.4	1.6
101.60		1.2	1.4	1.6
110.00		1.2	1.4	1.6
111.70		1.2	1.4	1.6
120.00			1.4	1.6

表-3 計算に用いた上部工荷重

	方 向	7-8長(m)		
		鉛直力(tf)	水平力(tf)	
常 時	橋 軸 方 向	483.6	0.0	14.13
	橋軸直角方向	483.6	0.0	15.48
地震時	橋 軸 方 向	369.4	101.6	14.13
	橋軸直角方向	369.4	73.9	15.48

表-4 限定列挙法による設計結果

	D (cm)	t (cm)	d (cm)	W
連 続 最 適 解	67.12	0.946	167.8	91.50
離 1 ランクアップ設計	70.00	1.2	175.0	115.54
散 改良離散解 [1]	50.00	1.4	125.0	97.23
解 改良離散解 [2]	71.12	0.9	177.8	92.81

参考文献 1) 石川, 千々岩ほか: 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, pp. 115~120, 第12巻, 1988. 7. 2) 三原, 千々岩ほか: 離散変数による最小重量設計の一解法, 平成3年度土木学会西部支部研究発表会講演要集, pp. 60~61, 1992. 3.