

(I-34) 鋼管杭基礎の最適杭本数の決定に関する一考察

防衛大学校土木工学教室 学生員○田中孝昌 正員 香月 智 正員 石川信隆
清水建設㈱技術研究所 正員 田蔵 隆

1. 緒言 近年、上部構造物の巨大化が進むとともに杭基礎構造物の杭本数も増大化してきている。現在、杭本数の決定に関しては、一般に設計者が示方書と経験を基に試行錯誤(trial and error method)によって決めているが、果して合理的な決定であるか否か疑問である。そこで、本研究は、最適化の観点から杭本数の決定について一つの見直しを図ろうとしたものである。その手法は、まず橋軸方向の杭列を仮想壁モデルと想定し、道示¹⁾による設計基準を満足するように(安全性)、かつ杭基礎全体の費用が最小となるように(経済性)、仮想壁モデルの断面性能に関する各分担率を決定する。次に、この仮想壁モデルの分担率に応じて鋼管杭データベースの中から必要な杭径、肉厚および杭本数を決定する。さらに上記で得た杭本数に基づいて杭配置を決定し、変位法により応力および変位を求め、設計基準が満足されているか否かを照査するものである。なお、ここでは橋梁の鋼管杭基礎を取り扱い、群杭効果は考慮しないものとする。

2. 仮想壁モデル 現在の杭基礎構造物の設計は、一般に変位法が用いられているが、この方法の特色は、 n 本の杭があれば、1本の杭の反力を計算して n 倍したものとフーチング原点の外力とがつり合うという条件からフーチング原点の変位量を算定している点にある。ここでは、その特色に着目して、橋軸方向の杭列を考え、その列の挙動と全く同じ挙動を示すと考えられる仮想壁モデルを想定する。すなわち、図-1(a)の杭列に対応して図-1(b)のような仮想壁モデル(断面形状は図-1(c)のサンドイッチ中空壁となっている)を考え、各列ごとの杭反力、バネ定数、断面諸定数などすべて等価とする。したがって、変位法によって最終的に得られるフーチング原点の変位量がすべて等しくなるように、変位法の各係数を決める。

3. 最適杭本数の決定法 (1)第1段階：仮想壁モデルを用いた最適設計による各壁の分担率の決定 上記の仮想壁モデルを用いた最適設計は、各仮想壁モデルの断面性能に関する分担率を決める問題となり、表-1のように定式化される。すなわち、まず式(1)は杭基礎(仮想壁モデルおよび橋脚)の換算総費用が最小になることを示す。式(2a)、式(2b)はそれぞれ常時および地震時橋軸方向の荷重を受けるときの仮想壁モデルの鉛直支持力に関する条件を、式(2c)は仮想壁モデルの水平支持力に関する条件を、式(2d)は仮想壁モデルの内部応力度に関する条件を、式(2e)は水平変位量に関する条件を、式(2f)は仮想壁モデルの壁間隔に関する条件を示している。また、式(2g)～式(2j)は設計変数の上下限に関する条件を表している。以上の表-1の最適設計問題を解いて(ここではADS²⁾のSLPを用いた)、未知の a_j, b_j, t_j, d を求め、これより仮想壁モデルの分担率(A_j :純断面積、 I_j :断面2次モーメント、 Z_j :断面係数、 $A_{p,j}$:先端面積、 $L_{H,j}$:軸直角方向投影長さ、 U_j :周長)を決定する。(2)第2段階：仮想壁モデルの分担率から

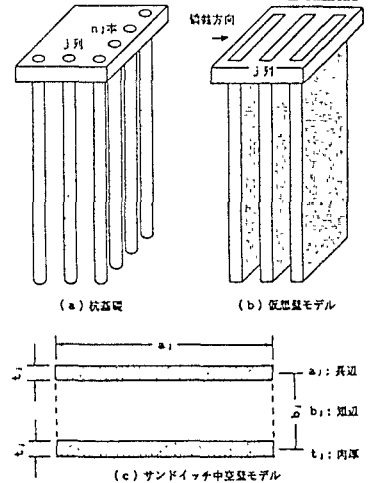


図-1 仮想壁モデル

表-1 第1段階の設計基本式

未知数 : a_j, b_j, c_j, d ($j=1, 2, \dots, J$)	
目的関数: $W = \rho_s \sum_{j=1}^J A_j L + \rho_c \sum_{j=1}^J V_j \rightarrow \min$ (1)	
制約条件: $V_j \leq V_{s,j}^{(1)}$	(2a)
$V_j \leq V_{s,j}^{(2)}$	(2b)
$H_j \leq H_{s,j}^{(2)}$	(2c)
$\sigma_j \leq \sigma_v^{(2)}$	(2d)
$\delta_j \leq \delta_s^{(2)}$	(2e)
$2.5 \max b_j \leq d$	(2f)
$a^L \leq a_j \leq a^U$	(2g)
$b^L \leq b_j \leq b^U$	(2h)
$t^L \leq t_j \leq t^U$	(2i)
$d^L \leq d \leq d^U$	(2j)

表-2 第2段階

$n_j A_j \geq A_j$	(3a)
$n_j I_j \geq I_j$	(3b)
$n_j Z_j \geq Z_j$	(3c)
$n_j A_{p,j} \geq A_{p,j}$	(3d)
$n_j L_{H,j} \geq L_{H,j}$	(3e)
$n_j U_j \geq U_j$	(3f)

表-3 制約条件と断面諸定数

アクティブな制約条件	満足しなければならない断面諸定数
(2a), (2b) 鉛直支持力	$A, I, A_{p,j}, U$
(2c) 水平支持力	$A, I, L_{H,j}$
(2d) 内部応力度	A, I, Z
(2e) 水平変位	A, I

杭本数の決定

いま単杭(杭径D, 肉厚t)の断面定数をA, I, Z, A_p, L_H, Uとし、j列の杭本数をn_jとすると、あるj列の杭の断面性能は、一般に表-2のように第1段階で得た仮想壁モデルの断面性能

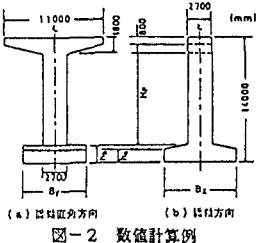


図-2 数値計算例

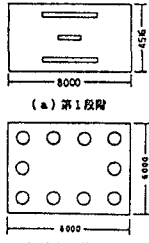


図-3 計算結果

以上であれば安全である。しかし、式(3)のすべての断面性能に関する条件を満足する鋼管杭を見つげだすと不経済になるので、式(3)の6個の条件のうち第1段階の最適設計でアクティブな制約条件になったものを選び(表-3参照)、それらに関する断面性能のみを満足させることにする。よって、市販されている鋼管杭リストを作成しておき、その中から式(3)および表-3を満足するうちでmin・AとなるD, t, nの組をピックアップすることにより、杭本数n_jが決定され、これに基づき杭配置も決定される。(3)第3段階: 既知の杭本数・杭配置に対する設計基準の照査 第2段階で得た杭本数・杭配置ならば杭径, 肉厚に対し、設計基準を満足しているか否かを変位法を用いて照査する。基準を満足していれば設計を終了するが、もし満足していなければ、橋軸直角方向をも同時に考慮した最適設計³⁾を行い、修正する。

4. 数値計算例

本法の妥当性を検証するために、図-2に示す円柱式橋脚の杭基礎^{4), 5)}(これは既に12本の杭として設計されている)を例にとり、本法との比較検討を行った。

ここでは、まず12本の杭を3列の仮想壁モデルに置き換え第1段階の計算を行ってみると、断面諸定数の分担率は表-4のようになる。これよりj=2列の面積はj=1, 3列の約41%となっていることが分る。またアクティブな制約条件は、式(2d)の内部応力度に関する条件と、式(2e)の水平変位に関する条件であったので、表-3より満足すべき断面性能はA, I, Zになる。よって、第2段階の検索から最小の断面積となるようなD, t, nの組を選べと表-5のようになり、杭本数は合計10本となる。なお杭間隔はd_x=d_y=2.5Dを用い、またフーチングの奥行きはB_x=3d_x, 幅はB_y=4d_yとして求められる。すなわち、第1段階の仮想壁モデルの分担率(図-3(a))を杭基礎に置き換えると図-3(b)のようになる。さらに、第3段階(安全性の照査)の変位法による計算を行った結果、道示の設計基準をすべて満足していることがわかったので、これで設計を終了する。

以上、設計結果をまとめると表-6のようになり、本法は従来の方法に比べ、杭重量で約5%、橋脚重量で約14%減少した設計となっており、総費用で約9%節約することができる。すなわち、今まで12本の杭が使用されていた杭基礎も肉厚を増せば(t=0.9→1.0cm)、10本で十分安全であることが認められた。

参考文献

1) 日本道路協会;「道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編」, 昭和55年5月,
2) Vanderplaats, G. N. and Sugimoto, H.; "A General-Purpose Optimization Program for Engineering Design, Journal of Computers and Structures, Vol. 24, No.1, 1986,
3) 田中孝昌, 石川信隆, 田蔵 隆, 香月 智;「鋼管杭基礎の最適杭間隔位置の決定に関する一考察」, pp.195~196, 第37回応用力学連合講演会予稿集, 昭和62年12月,
4) 鋼管杭協会;「鋼管杭」, pp.342~351, 1986. 10,
5) 岩松幸雄, 工藤真之助, 山口允朗;「橋台及び橋脚の設計と考え方」, pp.200~207, 鹿島出版社, 昭和52年10月

表-4 第1段階の結果

		j = 1, 3	j = 2
目的関数 W (t)		94.2	
設計変数	a _j (cm)	364.7	150.0
	b _j (cm)	31.4	30.0
	t _j (cm)	1.09	1.07
	d (cm)	150.5	
断面諸定数	A _j (cm ²)	791 (100%)	321 (41%)
	I _j (cm ⁴)	195493	72255
	Z _j (cm ³)	8604	3322
	A _{pj} (cm ²)	13011	5121
	U _j (cm)	1065	485
	L _{Hj} (cm)	365	150

表-5 第2段階の結果

		j = 1, 3	j = 2	total
目的関数 W (t)		101.1		
設計変数	D (cm)	80.0	80.0	
	t (cm)	1.0	1.0	
	n (本)	4	2	10
	d _x (cm)	200.0		
断面諸定数	d _y (cm)	200.0		
	A (cm ²)	792.2	396.1	1980.5
	I (cm ⁴)	614942	307471	
	Z (cm ³)	15374	7687	
	A _p (cm ²)	20005	10002	
	U (cm)	1003	501	
断面諸定数	L _H (cm)	319	160	

表-6 設計結果の比較

		従来の方法	本 法
目的関数 W (t)		110.6	101.1
設計変数	杭 径 D (cm)	80.0	80.0
	肉 厚 t (cm)	0.9	1.0
	杭間隔 橋軸 d _x (cm)	200.0	200.0
	橋軸直角 d _y (cm)	200.0	200.0
断面諸定数	杭 本 数 n (本)	12	10
	杭 重 V _p (m ³)	8.3	7.9
体 積	橋 脚 V _f (m ³)	196.7	169.2
	杭 重 W _p (t)	65.4	62.2
重 量	橋 脚 W _f (t)	491.6	423.0
	c W _f (t)	45.2	38.9
フーチングの大きさ (cm)		800×600	800×600

注) cはRC橋脚の重量を鋼材の重量に換算するための係数である。