

防衛大学校 正員 石川信隆 正員 香月 智 学生員 田中孝昌
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^①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^①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^①の分担率に応じて鋼管杭^②リストの中から必要な杭径、肉厚および杭本数を決定するものである。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 n 倍したものと T - F 点^③の外力とがつり合うという条件から T - F 点^③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^①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^①（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、 n 本定数、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 T - F 点^③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^①を用いた最適設計による各壁の分担率の決定 ここでの最適設計は、各仮想壁^①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。ここに式(1)は杭基礎（仮想壁^①および橋脚）の換算総費用が最小になることを示し、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^①の鉛直支持力に関する条件を、式(2c)は仮想壁^①の水平支持力に関する条件を、式(2d)は仮想壁^①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^①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^①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_{pj} ：先端面積、 L_{Hj} ：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^①の分担率から杭本数の決定 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^①の断面性能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けだすと不経済になる。そこで、第1段階の仮想壁^①の設計でアクティブに

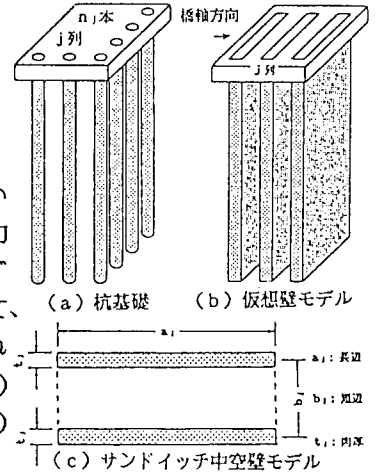


図-1 仮想壁モデル
表-1 第1段階の設計基本式

未知数： a_j, b_j, c_j, d ($j=1, 2, \dots, J$)	
目的関数： $W = \rho_s \sum_{j=1}^J A_j L + c \rho_c V_r \rightarrow \min$ (1)	
制約条件： $V_j^{(1)} \leq V_{sj}^{(1)}$ (2a)	
$V_j^{(2)} \leq V_{sj}^{(2)}$ (2b)	
$H_j^{(2)} \leq H_{sj}^{(2)}$ (2c)	
$\sigma_j^{(2)} \leq \sigma_y$ (2d)	
$\delta_j^{(2)} \leq \delta_s$ (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

$n_j A \geq A_j$ (3a)	
$n_j I \geq I_j$ (3b)	
$n_j Z \geq Z_j$ (3c)	
$n_j A_p \geq A_{pj}$ (3d)	
$n_j L_H \geq L_{Hj}$ (3e)	
$n_j U \geq U_j$ (3f)	

なった制約条件 g_i に着目し、ある杭群を選択した場合でもアクティブな制約条件を常に満足するように配慮する。す

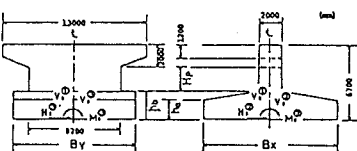


图-2 P₁ 桥脚

なわち鋼管杭一列の中から表-2の式(3a)のみを満足し、かつ最小断面積の杭群を選び、その杭本数と断面性能が次の「Active」な制約条件を満足するように考慮した。

$$g_i = g_i^0 + \sum_k^6 \frac{\partial g_i}{\partial z_k} \Delta z_k \leq g_{ai} \quad (i=1,2,\dots)(4)$$

ここに、 g_i^0 は第1段階で得られた g_i の値、 $\partial g_i / \partial z_k$ は各断面性能定数に関する感度係数であり、数値微分を用いて求める。 Δz_k は k 番目の断面性能定数についての第1段階設計値と選択した杭列との差であり、さらに g_{i1} は、 g_i における許容値である。よって、第2段階においては、式(4)を満足する杭群の中で、 $\min n_j A$ となる杭群を選択する。

(3)第3段階：第2段階設計結果に対する照査 第2段階で得た杭本数・杭配置ならび杭径、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 本法の妥当性と適用性を検証するために、図-2に示すような既に設計されている首都高のP1橋脚基礎（杭本数 $6 \times 8 = 48$ 本）に対して、本設計法を適用してみた。まず第1段階では既存設計と同じ橋軸方向に8列を仮定したうえで壁7列に対する最適設計を行った。結果は表-3のようになり、これより中央付近の $j=4, 5$ 列の壁は両端の $j=1, 8$ 列の壁に比し少ない壁分担率（断面積で約70%）になっている。次に第2段階では、第1段階でアクティブになった制約条件

(水平変位, 水平支持力, $j=1$ 列の内部応力度の条件)に着目し、これより式(4)と表-2の式(3a)を満足し、かつ最小断面積の杭群を選択した。第2段階の設計結果を表-4に示す。第3段階の照査ではすべて許容値以下となったので設計を終了する。表-5に本法と従来の設計結果を、図-3(a), (b)に杭配置の模式図を比較して示した。従来の設計に比べ、本法による設計結果は本数にして4本の軽減となり、その経済的な設計となっている。以上のことから、本法は鋼管杭基にもかなり有用であると考えられる。

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行集, 昭和62年12月

表-3 第1段階の結果

		J = 1.8	J = 2.7	J = 3.6	J = 4.5	total
目的関数 W (t _j)		265.6				
設計変数	a ₁ (ca)	360.0	360.0	275.7	242.5	
	b ₁ (ca)	30.0	30.0	30.0	30.0	
	t ₁ (ca)	1.07	1.07	1.07	1.07	
	d (ca)	108.0				
設計変数	A ₁ (ca ³)	770.4	770.4	589.9	518.8	5299.0
	I ₁ (ca ⁴)	173376.	173376.	132760.	116764.	1192552.
	Z ₁ (ca ³)	7972.	7972.	6104.	5369.	54834.
	A ₂ (ca ³)	12291.	12291.	9412.	8278.	84544.
	U ₁ (ca)	1048.	1048.	822.	734.	7304.
	L _{h1} (ca)	360.	360.	276.	243.	2478.

表-4 第2段階の結果

		j = 1, 8	j = 2, 7	j = 3, 6	j = 4, 5	total
目的関数 W (t)		307.6				
収	D (ca)	60.0				
計	t (ca)	0.9				
入	d (ca)	150.0				
取	n (本)	6	6	5	5	
既 面 積 定 数	A _j (ca ²)	777.2	777.2	647.6	647.6	5699.2
	I _j (ca ³)	337068.	337068.	280890.	280890.	2471832.
	Z _j (ca ⁴)	11236.	11236.	9363.	9363.	82396.
	A _{pj} (ca ⁴)	16852.	16852.	14043.	14043.	123580.
	U _j (ca)	1127.	1127.	939.	939.	8164.
	L h _j (ca)	359.	359.	299.	299.	2632.

表-5 計算結果の比較

		従来の方法	本 法	
			第 1 段階	第 2 段階
目 的 関 数 (t)		474.0	265.6	307.6
設 計	状 状 D (cm)	60.0		60.0
	内 厚 t (cm)	1.2		0.9
実 験	状 内 厚 d (cm)	159.0	108.0	150.0
	状 本 数 n (本)	48		44
体 積	状 V ₁ (m ³)	45.1	27.0	29.1
	状 厚 V ₂ (m ³)	322.7	232.5	345.2
重 量	状 W ₁ (t)	353.8	217.2	228.2
	状 厚 W ₂ (t)	806.8	581.3	863.1
	状 a W ₃ (t)	74.2	53.5	79.4
フーチングの大きさ (cm)		900×1200	900×864	900×1200

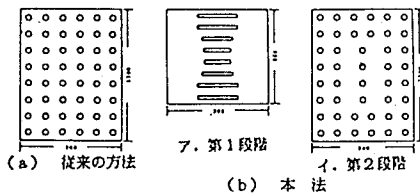


圖-3 模式圖