

群桩水平承载力的实用计算

韩理安

(长沙交通学院)

提 要

本文根据现场资料和模型试验,对群桩在水平力作用下的工作性能和破坏机理进行了分析,并在群桩效率的基础上引入了便于工程应用的群桩综合效率的概念,给出了群桩综合效率的计算式。用本文推荐的方法所得到的计算结果接近于试验值。最后,本文提出了群桩水平承载力的实用计算式。

一、引 言

桩基不仅能承受垂直荷载,而且可用于承受水平荷载及上拔力。此外,实际工程中的桩基一般采用群桩的形式。因此,群桩水平承载力的研究受到了国内外的普遍重视。目前已提出了一些计算群桩水平承载力的方法。笔者认为,从应用上来讲,根据单群关系来推求群桩水平承载力应是一个简便有效的方法。其关键是找到能较充分反映实际情况的单群关系。笔者通过现场资料和模型试验,对影响群桩水平承载力的各种主要因素进行了分析,由此提出了一个计算群桩水平承载力的实用计算公式。

二、群桩在水平力作用下的荷载-位移关系

由于工作条件不同,群桩与单桩相比,荷载-位移关系也因各种因素的影响而变得复杂。众所周知,由于群桩中桩与桩之间的相互影响,产生了土中应力重叠现象,从而引起群桩水平承载力的群桩效应。它使群桩的水平位移增大,水平承载力降低。群桩效应的主要影响因素有桩距、桩数、桩的排列方法和土质等。笔者在“桩基水平承载力的群桩效率”一文中已有叙述^[1]。此外,实际工程中,群桩一般具有较大的承台,而且在使用时期一般总还承受垂直荷载。这些也将影响群桩的荷载-位移关系,现分述如下:

(一)桩顶嵌固的影响

一般的原型单桩试验,其桩顶多是自由端。而群桩的桩顶由于承台的作用,一般可看成是嵌固端。其抗弯能力大大提高,水平承载力也相应提高,而水平位移则减小。

(二)承台着地的影响

桩顶自由的单桩即使承台是着地的,如无特殊装置,当水平力增大时,桩顶会发生侧

倾, 桩被逐渐向上拔起。但群桩由于承台着地的作用, 对荷载-位移关系的影响较大。可以分两种情况来考虑: ①伏地承台, 由于承台底面与地基土的摩擦力作用, 群桩水平承载力提高, 水平位移减小; ②入土承台, 除承台底摩擦力的作用外, 承台的侧向土抗力作用(承台两侧的摩擦力一般可略去)也将使水平承载力随水平位移的增大而增大。

浙江炼油厂的试桩表明了承台的底摩擦力和侧向土抗力对荷载-位移关系的不同影响^[2](见图1、表1)。群桩I的承台底部填了道渣, 其底摩擦力比群桩II大。因此, 当水平位移不大时, 群桩I的水平承载能力比群桩II高。但当桩顶水平位移超过8 mm时, 群桩II的侧向土抗力越来越大, 以致其水平承载能力反而越来越比群桩I高。

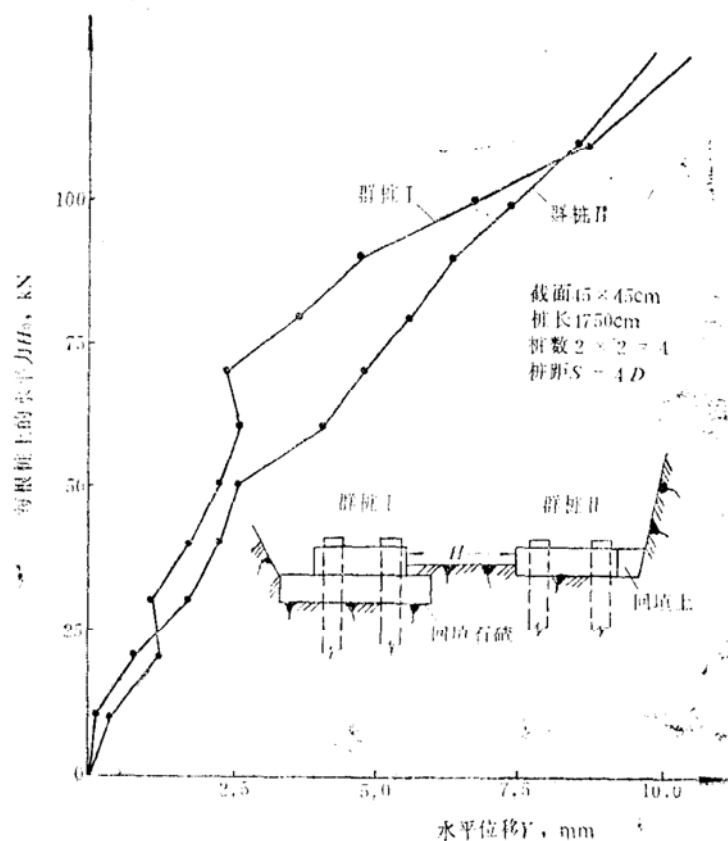


图1

表1

位 移(mm)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
水 平 承 载 力 (kN)	群桩Ⅰ	42.2	65.7	80.9	89.2	94.1	99.0	103.5	108.4	113.3	117.7
	群桩Ⅱ	30.4	40.2	56.9	69.6	80.9	93.7	103.0	110.9	117.7	127.5

(三) 呆重的影响

呆重的影响使桩基的水平承载力提高。提高的原因与桩的破坏机理有关。

1. 水平承载力由桩身强度控制时(如混凝土灌注桩)呆重产生的压应力可抵消一部分桩身受弯时产生的拉应力, 因此混凝土不易开裂, 从而提高了桩基水平承载力。北京桩基研究小组的试验表明, 呆重为容许垂直承载力的60%时, 水平承载力提高40%^[8]。

2. 当桩身具有足够的强度时(如钢管桩), 呆重仅起抗拔作用, 水平承载力的提高有限。笔

者曾在亚粘土中进行了桩基水平荷载模型试验。对比了两组高桩, 其中一组桩上加上904.66 N的呆重(为垂直极限承载力的一半), 水平极限荷载由470.7 N提高到549.2 N, 即提高16%。相应的水平位移也由原来的2.63 mm增加到3.49 mm^[4](见图2)。

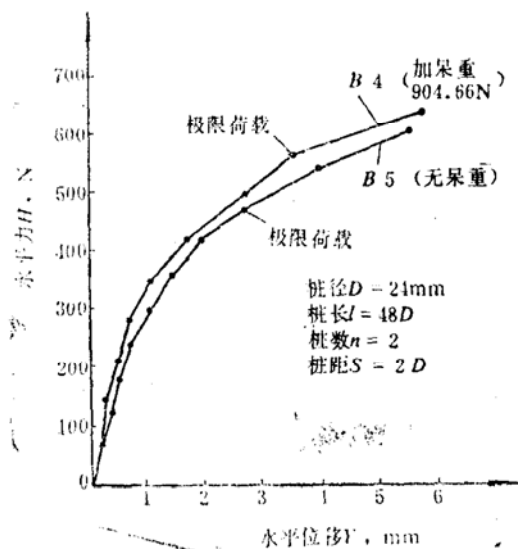


图2

三、桩基的群桩综合效率

一般用群桩效率来表示桩基的单群关系。但对于群桩效率的概念, 各人的理解却不一致。笔者在参考文献[1]中曾指出, 为避免概念上的混淆, 群桩效率宜只考虑桩与桩之间的相互影响, 并由此提出了下述桩基水平承载力的群桩效率计算式:

$$\eta = \frac{H_g}{mnH_0} = K_1 K_2 = \frac{1-q}{1-q^m + a + b} \left(\alpha \lg \frac{S}{D} + \beta \right) \quad (m \leq 4) \quad (1)$$

式中 η ——群桩效率;

H_g 、 H_0 ——分别为群桩和单桩的水平承载力;

m 、 n ——分别为群桩的纵向(荷载作用方向)和横向桩数;

K_1 ——桩与桩之间的相互影响系数;

K_2 ——不均匀分配系数;

S ——桩距;

D ——桩径;

α 、 β ——与桩距、土质有关的常数;

q 、 a 、 b 分别按下式计算:

$$q = \frac{\frac{S}{D} \lg \varphi + \frac{1}{4}}{\left(\frac{S}{D} \lg \varphi + \frac{1}{2} \right)^2} \quad (2)$$

$$a = \frac{i}{2} \cdot \frac{2(2\operatorname{tg}\varphi - 1)\frac{S}{D} + 1}{\left(2\frac{S}{D}\operatorname{tg}\varphi + \frac{1}{2}\right)^2} \left(\frac{\frac{S}{D}\operatorname{tg}\varphi}{\frac{S}{D}\operatorname{tg}\varphi + \frac{1}{2}}\right)^2 \quad (3)$$

$$b = \frac{i}{2} \cdot \frac{2(3\operatorname{tg}\varphi - 1)\frac{S}{D} + 1}{\left(3\frac{S}{D}\operatorname{tg}\varphi + \frac{1}{2}\right)^2} \left(\frac{\frac{S}{D}\operatorname{tg}\varphi}{\frac{S}{D}\operatorname{tg}\varphi + \frac{1}{2}}\right)^2 \quad (4)$$

式中 φ ——土的内摩擦角;

i ——考虑桩之间横向影响的系数, 当 $n \geq 3$ 时, $i = 2$; $n = 2$ 时, $i = 1$; $n = 1$ 时, $i = 0$ 。

实际工程中还应考虑承台、呆重的作用。笔者认为, 此时可在群桩效率的基础上引入新的概念——群桩综合效率。群桩综合效率为群桩中每根桩的平均极限水平承载力与相应单桩的极限水平承载力之比, 它既考虑桩与桩之间的相互影响, 也包括了其他因素(如承台、呆重等)引起的作用。这样更便于实际应用。

(一)反映单群关系的群桩综合效率

承台和呆重的作用包括好几方面, 现分述如下:

1. 桩顶嵌固增长系数 K_3

K_3 为桩顶嵌固时的单桩水平承载力 H_F 与桩顶自由时的单桩水平承载力 H_0 之比。为便于分析, 这里仅考虑自由长度为零的行列式竖直群桩, 并在地面位移相等的条件下求得 K_3 。今以常数法为例求 K_3 ,

桩顶自由时, 地面水平位移

$$y_0 = -\frac{2eH_0}{kD}$$

桩顶嵌固时, 地面水平位移

$$y_F = \frac{eH_F}{kD}$$

式中 k ——土的水平地基系数;

e ——桩的相对柔度系数。

当 $y_0 = y_F$

时, 得 $K_3 = \frac{H_F}{H_0} = 2$

同样可求得水平地基系数为其他分布图式时的 K_3 (见表 2)。

表 2

方 法	常数法	m 法	K 法	C 值法
K_3	2.0	2.6	1.56	2.32

在极限荷载作用下, 单桩与群桩的地面水平位移并不相同。但在实际工程中, 桩基的容许水平承载力常由桩顶容许水平位移所控制, 此时能充分满足等位移条件。

2. 底摩擦作用增长系数 K_4

对于伏地承台, 由于承台底土壤的切向力作用, 将使群桩的水平承载力提高 $\Delta H_g'$, 故

$$K_4 = \frac{\Delta H_g'}{mnH_0} \quad (5)$$

对于不同的土, 其作用是不同的。

(1) 对较软的土而言, 剪切面一般发生在邻近承台底面的土内, 此切向力就是土的抗剪强度。因为土的抗剪强度 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$, 所以

$$\Delta H_g' = \tau A = N \lambda \tan \varphi + cA \quad (6)$$

式中 N ——呆重;

λ ——垂直荷载作用下, 桩土共同作用时土体的分担系数;

c ——土的凝聚力;

A ——承台底与土接触面积。

(2) 对于较硬的土, 剪切面可能发生在承台底与土的接触面上。此时, 切向力就是承台底与土的摩擦力。所以

$$\Delta H_g' = fN\lambda \quad (7)$$

式中 f ——承台底与土之间的摩擦系数。

为安全起见, 可按上两种情况分别考虑, 而取较小值进行计算。

3. 侧土抗力作用增长系数 K_5

对于入土承台, 除底摩擦作用外, 由于承台侧的土抗力作用, 水平承载力还将提高 $\Delta H_g''$, 故

$$K_5 = \frac{\Delta H_g''}{mnH_0} \quad (8)$$

由于桩顶的容许水平位移较小, 被动土压力一般不能得到充分发挥。为简化计算, 可采用静止土压力计算, 同时略去主动土压力的作用, 故

$$\Delta H_g'' = \frac{1}{2} K_0 \gamma B Z^2 \quad (9)$$

式中 K_0 ——静止土压力系数;

γ ——土的容重;

B ——承台宽度;

Z ——承台埋深。

如前所述, 对于水平承载力由桩身强度控制的桩基来说, 呆重能有效地提高桩基的水平承载力。但对于水平承载力由水平位移控制的桩基来说, 这种作用就很有限。因此在推导群桩综合效率的计算式时, 忽略垂直荷载的有利作用, 将它作为设计时的安全储备。

将上述几种作用与群桩效率一起考虑, 则可得到反映单群关系的群桩综合效率

$$\xi_{\text{单群}} = K_1 K_2 K_3 + K_4 + K_5 \quad (10)$$

将式(1)、(5)、(8)代入式(10), 得

$$\xi_{\text{单群}} = \frac{1-q}{1-q^m+a+b} (\alpha \lg \frac{S}{D} + \beta) K_3 + \frac{\Delta H_g' + \Delta H_g''}{mnH_0} \quad (11)$$

将按式(11)算得的群桩综合效率与模型试验结果相比较。模型土 ($\varphi = 23^\circ$, $c = 29.4 \text{ kPa}$,

$\gamma = 18.3 \text{ kN/m}^3$ 的水平地基系数较符合常数法的分布规律, 故 $K_3 = 2.0$; 双桩 ($D = 24 \text{ mm}$) 的 $K_2 = 0.4481g \frac{S}{D} + 0.595$; 纵向桩数大于 3 时, $K_2 = 0.6211g \frac{S}{D} + 0.439$ 。比较结果表明, 计算值与实测值比较接近 (见图 3)。

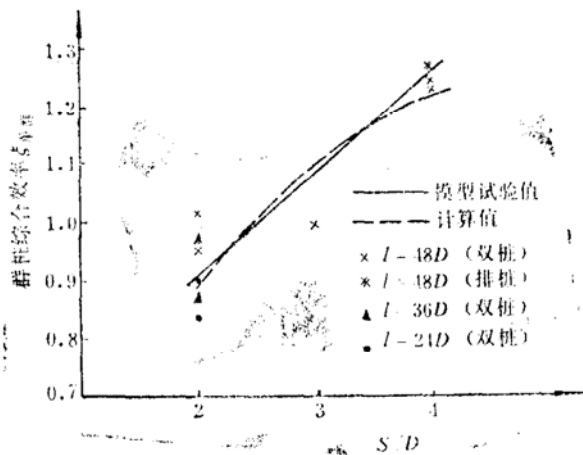


图 3

(二) 反映双群关系的群桩综合效率

双桩有桩头嵌固作用, 并能反映桩距的影响, 其工作条件与群桩相似。因此, 黄委会山东河务局提出, 对于桩数较多的重要工程, 宜进行双桩试验, 并由此来推求群桩水平承载力, 这是有道理的。笔者也对反映双群关系的群桩综合效率 $\xi_{\text{双群}}$ 进行了推求。

$$1. \quad K_1 = \left(\frac{1-q}{1-q^m + a + b} \right) \left(\frac{1-q}{1+q^2} \right) = \frac{1-q^2}{1-q^m + a + b} \quad (12)$$

2. 当群桩与相同桩距的双桩对比时, 若忽略桩数的影响, 则 $K_2 = 1$ 。

3. 双桩与群桩的桩顶均可看成是嵌固端, 故 $K_3 = 1$ 。

$$4. \quad K_4 = \left(\frac{\Delta H_g'}{mn} \right) / \left(\frac{H_b}{2} \right) - \left(\frac{\Delta H_b'}{2} \right) / \left(\frac{H_b}{2} \right) \\ = \frac{2\Delta H_g' - mn\Delta H_b'}{mnH_b} \quad (13)$$

式中 H_b ——双桩水平承载力;

$\Delta H_b'$ ——双桩承台底摩擦力所提高的水平承载力。

$$5. \quad K_5 = \left[\left(\frac{K_0}{2} \gamma B Z^2 \right) / (mn) \right] / \left(\frac{H_b}{2} \right) = \frac{K_0 \gamma B Z^2}{mnH_b} \quad (14)$$

故

$$\xi_{\text{双群}} = K_1 + K_4 + K_5 \\ = \frac{1-q^2}{1-q^m + a + b} + \frac{2\Delta H_g' - mn\Delta H_b' + K_0 \gamma B Z^2}{mnH_b} \quad (15)$$

由于 $\xi_{\text{双群}}$ 的计算式中, K_3 是定值, 所以对于桩的自由长度就没有限制, 这就提高了计算式的通用性。

四、群桩水平承载力的实用计算

(一) 群桩水平承载力计算公式

实际工程中, 在进行了单桩原型试验后, 就可根据实测的单桩水平承载力和计算所得的 $\xi_{\text{单群}}$ 来推算群桩水平承载力

$$H_g = mnH_0\xi_{\text{单群}} \quad (16)$$

将式(11)代入式(16), 得

$$H_g = mnH_0K_3 \frac{1-q}{1-q^m+a+b} (\alpha \lg \frac{S}{D} + \beta) + \Delta H_g' + \Delta H_g'' \quad (17)$$

可根据群桩的实际情况(如对于高桩, $\Delta H_g' = \Delta H_g'' = 0$)直接求得群桩水平承载力。

如进行了双桩原型试验, 同样可得到

$$H_g = \frac{mnH_b}{2} \frac{1-q^2}{1-q^m+a+b} + \Delta H_g' + \Delta H_g'' - \frac{mn\Delta H_b'}{2} \quad (18)$$

(二) 计算式的适用条件

上述计算式基本上是在土体达极限平衡状态时导得的。但对于由桩顶水平位移控制的桩基来说, 同样可以适用。其原因是: ①桩顶水平位移达容许值时, 土体一般早已进入塑性状态; ②无论水平承载力由哪种条件控制, 单桩(或双桩)和群桩的水平承载力都是在相同的标准下确定的, 因此其比值不会有显著的差别。

但由推导过程可知, 本计算式在使用时受到下列条件的限制: ①本计算式只适用于桩基水平承载力由水平位移控制的竖直群桩计算; ②在利用单群关系计算时, 仅适用于自由长度近似为零的群桩; 但当利用双群关系计算时, 则不受此限制; ③当桩距较小时, 群桩可能发生整体破坏, 此时对计算式应慎重使用。

(三) 计算式的简化

K_1 、 K_2 的计算比较复杂, 在应用上述计算式时感到不便。为此, 笔者根据不同的内摩擦角 φ 和 S/D , 制备了 q 、 a 、 b 的计算图(见图4、5、6); 也根据不同的水平地基系数分布规律、不同的桩数和 S/D , 制备了 K_2 的计算图(见图7)。实际的 K_1 、 K_2 值可根据土体和桩基布置的实际情况按图4、5、6、7用插入法求得。当地基分层时, 取地面下影响桩侧土抗力的某一深度 h_m 内的 φ 角计算, h_m 是桩径 D 的函数, 一般取 $h_m = 2(D+1)$ 。

承台的底摩擦作用并不十分可靠。国内外对此问题的看法也不一致。比较一致的意见是: 当桩尖土层较好或基底下土体可能产生自重固结沉降、湿陷、震陷时, 承台与土之间会脱空, 不应考虑桩间土的作用; 当桩基的下沉量较大时, 则应予以考虑。但垂直荷载下桩土共

同作用时,土体的分担系数 λ 的确定也还存在问题。因此,考虑 K_4 的影响时应慎重。

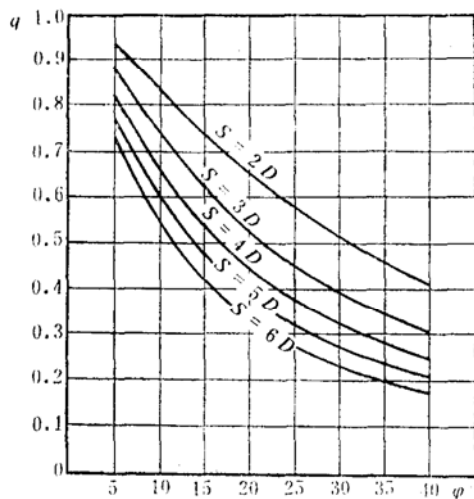


图 4

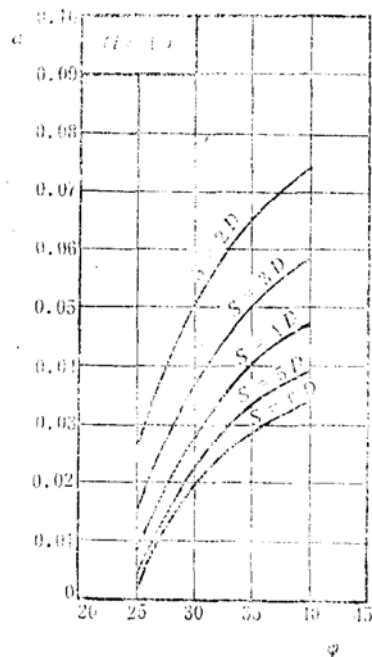


图 5

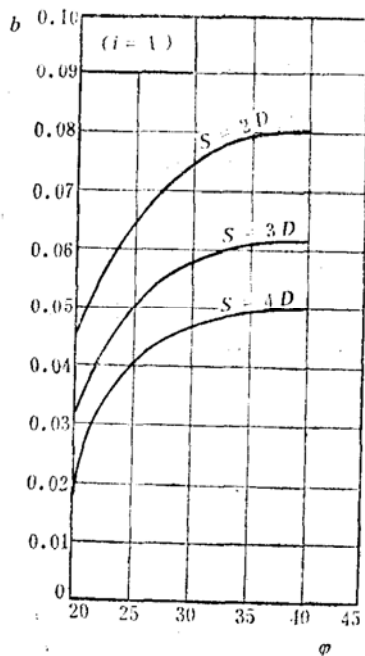


图 6

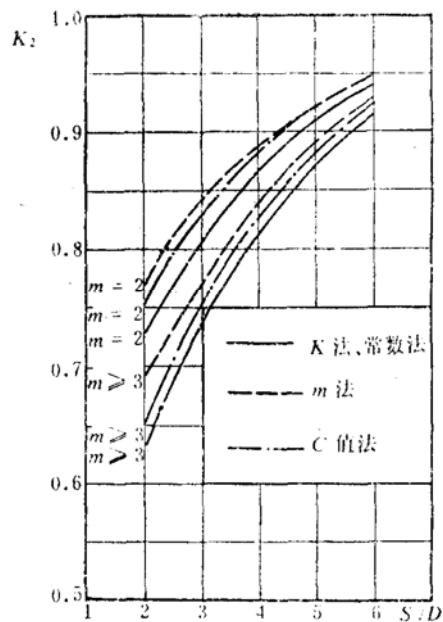


图 7

【算例】

天津新港大坞建于软粘土上,坞口底板采用 $50 \times 50 \times 1350\text{cm}$ 的钢筋混凝土桩基(60根),

其前后分别设置一排宽度为32.88m的钢板桩,如图8所示。作用于坞口的主要荷载有:

水压力 $H = 35010\text{kN}$;

两侧坞墩外壁静土压摩擦力 $E_f = 1432\text{kN}$;

坞口结构自重 $W = 48641\text{kN}$;

坞底浮托力 $W_d = 35304\text{kN}$;

试验算坞口桩基的水平承载能力。

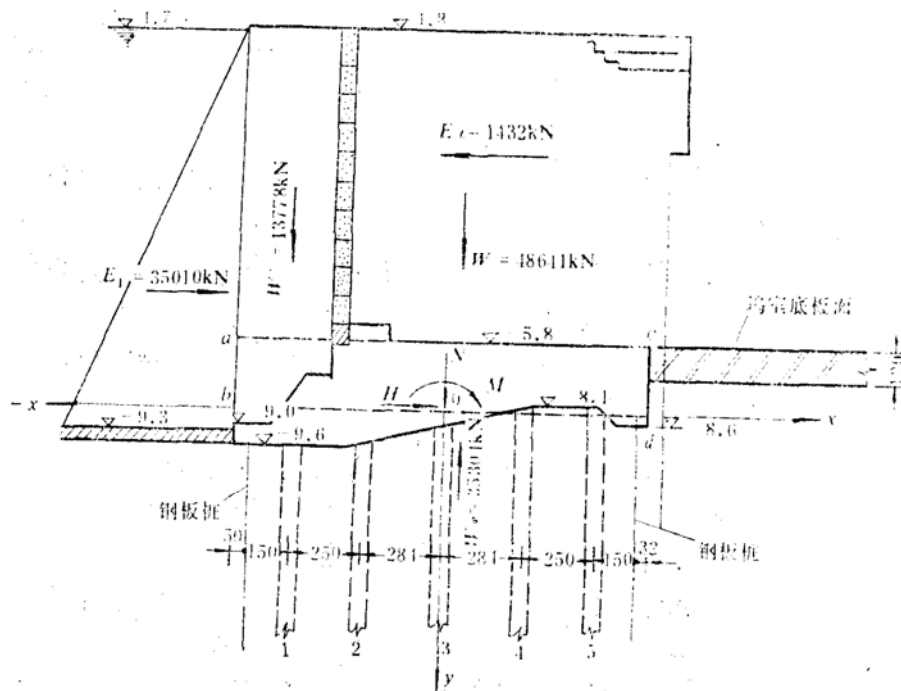


图8

【解】

根据现场单桩原型试验资料,当水平力 $H = 98\text{kN}$ 时,桩顶水平位移 $Y = 10.3\text{mm}$,可按式(17)计算坞口桩基的水平承载力。

为简化计算,参考文献[5]将坞口底板视为虚线所示的均匀断面($abcd$)的桩台,厚度2.5m。作用于坐标原点 O 的 $H = 33578\text{kN}$; $M = 97559\text{kN}\cdot\text{m}$; $N = 27115\text{kN}$ 。按钢板桩的刚度 EI 值折算为相应钢筋混凝土方桩。钢板桩1m宽时的断面惯性矩 $I_a = 0.386 \times 10^5\text{cm}^4$,故

$$2 \times 32.88 \times \frac{2 \times 10^6 \times 0.386 \times 10^5}{0.125 \times 10^{12}} = 40.6$$

即前后排钢板桩相当于40根钢筋混凝土方桩^[5]。

由图4、5、6分别查得 $\varphi = 20^\circ$, $S = 5D$ 时的 $q = 0.385$, $a = 0$, $b = 0$, 故

$$K_1 = \frac{1 - 0.385}{1 - 0.385^4} = 0.63$$

由图7查得 $S = 5D$ 、 $m > 3$ 及水平地基系数符合 m 法分布规律时的 $K_2 = 0.875$

$$K_3 = 2.6$$

对于软粘土一般不考虑承台底摩擦作用,取 $\Delta H_g' = 0$ 。

$$\Delta H_g'' = 0.5 \times 0.5 \times 17.6 \times 32.88 \times 2.5^2 = 902\text{kN}$$

故 $H_g = 98 \times 100 \times 0.63 \times 0.875 \times 2.6 + 902 = 14955 \text{ kN}$
 $35010 \text{ kN (水平荷载)} - 6237 \text{ kN (坞墩水平抵抗力)} = 28773 \text{ kN}$
 比较 $14955 \text{ kN} < 28773 \text{ kN}$
 即桩数不足, 不平衡力后传。

五、结论和建议

1. 群桩中桩与桩之间的相互影响可用群桩效率来表示。实际工程中的群桩通常还有承台、承台与桩的连接、呆重等作用。此时, 可在群桩效率的基础上引入群桩综合效率的概念, 以便于应用到实际工程中去。

2. 群桩综合效率建议按本文的式(11)或式(15)计算。黄委会山东河务局曾建议, 对于桩数较多的重要工程宜进行双桩试验。从理论上分析, 是合理的。

3. 也可直接根据本文的式(17)或式(18)来计算群桩的水平承载力。此时根据承台、土质等实际情况, 考虑将计算式中的某些项取为零。

4. 本文的计算式基本上是在土体达极限平衡状态时导得的。由推导过程可知, 此计算式仅适用于水平承载力由桩顶水平位移控制的情况。

本文得到华东水利学院杨克己副教授、王庆辉副教授的指教, 在此谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] 韩理安, 桩基水平承载力的群桩效率, 岩土工程学报, 第6卷, 第3期, 1984。
- [2] 浙江炼油厂, 试桩资料汇编, 1978—24。
- [3] 北京桩基研究小组, 带承台的钻孔灌注桩水平承载力的研究, 科研情报, 1980年第4期。
- [4] 韩理安, 桩基水平承载力的研究, 华东水利学院研究生毕业论文, 1981年10月。
- [5] 毛柏清, 船坞规范专题报告之三——关于群桩水平承载力及其应用的讨论, 1982年3月。

Horizontal Bearing Capacity Calculation of Pile Groups

Han Lian

(Changsha Communication College)

Abstract

On the basis of a model test, the response of pile groups under horizontal forces and the mechanism of failure were analyzed. concerning pile group efficiency, a concept of overall efficiency was introduced, and associated calculation method was proposed. It is shown calculation result are comparable to the measured are from model tests. Finally, an expression for calculating horizontal bearing Capacity of pile groups is presented, in this paper.