

悬臂式钻孔灌注护坡桩计算方法

邬挺

(电子工业部综合勘察研究院, 西安 710054)

【摘要】通过分析基坑与护坡桩相互作用时土压力的特点,从力学角度出发,提出了悬臂式钻孔灌注护坡桩的计算、设计方法,并有工程实例。

【关键词】 基坑 土压力 悬臂式钻孔灌注护坡桩

【Abstract】 Based on the characteristics of earth pressure when foundation pit and protecting piles interact, the calculation and design method of cantilever retaining drilled hole cast-in pile is put forward in the view of mechanics, and the project examples are given.

【Key words】 foundation pit earth pressure cantilever retaining drilled hole cast-in pile

0 前言

当前城市建设工程受场地小与周围施工条件限制,许多基坑开挖放坡已不可能,需进行垂直开挖。钻孔灌注桩施工简便占地少,质量容易控制且造价相对较低,在基坑开挖支护中被普遍采用。根据西安地区施工经验,悬臂式钻孔灌注护坡桩不仅适用于开挖深度不大的基坑,也适用于深基坑开挖中,目前用于支护的最大开挖深度达 12.0m。

1 悬臂桩的受力特点

基坑支护在土力学中属土与构筑物互相作用的范畴,边坡稳定体系由桩土共同构成。

随着基坑的开挖,当开挖至设计标高时,由于受两侧土压力的作用,桩发生挠曲变形,其整体趋势向基坑内倾斜。为了保证其稳定性必须使其在土下某一处产生一个反弯点“O”,用其下部所受力抵消上部倾向基坑的土压力。处于稳定后的悬臂桩变形状况见图 1。由于产生主动土压力支护桩只须产生较小

的位移(位移量为桩长的 1/1 000 左右),不影响其稳定性,在工程中是允许的,这时 AO 段在桩后、OG 段在桩前将产生主动土压力 E_{a1} 、 E_{a3} ;而产生被动土压力所需要的位移较大(位移量为桩长的 1/50~1/100),工程中一般不允许支护桩产生太大变位,因此在实践中桩前 CO 段,桩后 CG 段将产生大于主

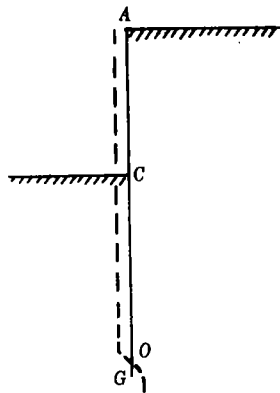


图 1 悬臂桩稳定后的变形

动土压力而小于被动土压力的土压力 E_2 、 E_4 。为了保证桩有足够的稳定安全系数,设计时通常控制 E_2 、 E_4 不超过按朗肯土压力理论计算的被动土压力 E_{p2} 、 E_{p4} 的 $1/2 \sim 2/3$ ^[1]。由于桩前 CO 段和桩后 OG 段中每一点的受力情况及其复杂程度也不尽相同,为了便于生产实践中的分析计算,我们假设其中每一点实际所受力与该点由朗肯土压力计算的被动土压力之比值为一常数 K 。悬臂式支护桩的土压力分布情况见图 2。

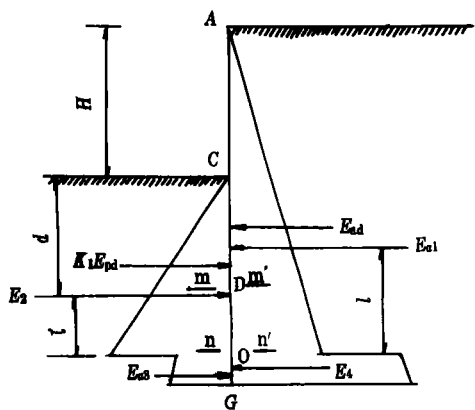


图 2 悬臂护坡桩土压力分布情况

2 悬臂式支护桩的计算原理及方法

了解了支护桩变形情况及其前后土压力的分布特征,就可以计算桩长和其最大弯距了。

悬臂式支护桩实质为在三角形、梯形分布的平面力系作用下处于平衡状态的构件。根据其受力后的变形情况可知只有 O 点处其挠度为零,可得:

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

式中: M —— O 点处的弯距, $kN \cdot m$ 。

当支护桩处于平衡状态时,其所受全部力合力为零,可得:

$$\sum F = 0 \quad (2)$$

式中: F ——护坡桩所受全部外力, kN 。

以(1)、(2)式做为基本条件,分别求 E_2 、 E_4 以及最大弯距及其所在位置,供进一步设计计算。

在 O 点处取一截面 $n-n'$, 取其上部桩为研究对象。根据弯距平衡方程式,可知 E_{a1} 、 E_2 在 O 点的弯距之和为零。 E_{a1} 可通过朗肯土压力理论求得,其大小等于对 AO 段上各点的主动土压力积分值,作用点位置可通过

$$二重积分 l = \frac{M_x}{M} = \frac{\iint_a^b y \rho(x, y) d\delta}{\iint_a^b \rho(x, y) d\delta} \text{ 求得。}$$

E_2 由于其各深度处所受力等于 K_1 与该处由朗肯土压力理论计算出的被动土压力的乘积,根据二重积分计算出 E_{p2} 的合力作用点 l' 处即为 E_2 的合力作用点所在。根据(1)式可列出:

$$E_{a1} \cdot l = E_2 \cdot l' \quad (3)$$

式中: E_{a1} —— O 点上段护坡桩所受总主动土压力, kN ;

E_2 —— O 点上段护坡桩所受总土压力, kN ;

l ——总主动土压力作用点位置到 O 点距离, m ;

l' ——总土压力作用点位置到 O 点距离, m 。

即可求得 E_2 。然后验算 E_2 , 当 $E_2/E_{p2} = K_1$ 介于 $1/2 \sim 2/3$ 之间, E_2 满足要求, 否则不然。 E_2 求出, E_{a3} 可按 E_{a1} 方法求得, 通过(2)式可列出:

$$E_{a1} + E_4 = E_2 + E_{a3} \quad (4)$$

式中: E_{a1} 、 E_2 ——同前;

E_{a3} —— O 点下段护坡桩所受总主动土压力, kN ;

E_4 —— O 点下段护坡桩所受总土压力, kN 。

即可求出 E_4 。与 E_2 一样需进行验算 E_4 , $E_4/E_{p4} = K_2$ 是否介于 $1/2 \sim 1/3$ 之间。

当 E_2 、 E_4 求出之后, 支护桩的受力情况已经很清楚, 进一步求其最大弯距 $|M_{max}|$ 及所处位置。护坡桩所受荷载为平面分布荷载, 弯距为二次曲线。当剪力 Q 为零时, 弯距 M 为极值。所以只要求出剪力 Q 为零的位置, 即可根据该点弯距平衡方程式求出最大弯距。从图 2 可以看出, 桩内剪力为零处, 必

定处于CO段。设在基坑下部D处剪力为零其距基底距离为d,在D处取截面m—m',取其上部桩为研究对象。根据力的平衡方程式知m—m'上部桩前后所受土压力合力为零。如前所述桩后侧主动土压力可由朗肯土压力求出,总主动土压力E_{ad}可对d+H段积分求得。桩前土压力E_d等于K₁与该段按朗肯土压力理论求出的总被动土压力E_{pd}的乘积,通过前述可得出:

$$K_1 \cdot E_{pd} = E_{ad} \quad (5)$$

式中:K₁——比例系数介于1/2~2/3;

E_{pd}——D点上段护坡桩所受总被动土压力,kN;

E_{ad}——D点上段护坡桩所受总主动土

压力,kN。

求出d,从而确定了剪力为零的位置。列出d点处的弯距平衡方程式,即可求出最大弯距|M_{max}|。

3 配筋计算

当确定了所采用混凝土的强度等级,钢筋的种类后即可进行配筋计算,这里仅分析其中的主筋计算。

在主筋计算中,有按等惯性矩公式将圆截面换算成正方形截面的单筋正方形截面弯构件计算公式和按等面积换算成正方形截面的计算公式,均不甚合理,建议采用现行《GBJ10-89 混凝土结构设计规范》第4.1.19条进行计算,即可得:

$$\left. \begin{aligned} N &\leq \alpha f_{cm} A \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha} + (\alpha - \alpha_t) f_y \cdot A_s \right) \\ M &\leq \frac{2}{3} f_{cm} A \gamma \frac{\sin \pi\alpha}{\pi} + f_y A_s \gamma_s \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} \\ \alpha_t &= 1.25 \sim 2\alpha \\ M &= K |M_{max}| \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:N——轴向力设计值,kN;

A——构件截面面积,m²;

A_s——全部纵向钢筋的截面面积,m²;

γ——圆形截面的半径,m;

γ_s——纵向钢筋所在圆周的半径,m;

α——对应于受压区混凝土截面面积的圆心角rad与2π的比值;

α_t——纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值;当α>0.625时,取α_t=0;

f_{cm}——混凝土弯曲抗压强度设计值,N/m²;

f_y——普通钢筋的抗拉强度设计值,N/m²;

M——弯距设计值,kN·m;

K——安全系数取1.2~1.5。

对圆形截面受弯构件的正截面受弯承载力,取轴向力设计值N为零,解(6)式可得其最小配筋公式:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1.25 f_y A_s + f_{cm} A / 2\pi \cdot \sin 2\pi\alpha}{f_{cm} A + 3 f_y A_s} \\ A_s &= \frac{M - \frac{2}{3} f_{cm} A \gamma \frac{\sin 3\pi\alpha}{\pi}}{f_y \frac{\gamma_s}{\pi} (\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:符号同前。

按式(7)进行计算,求得稳定的α和A_s,即可设计出截面主筋配置。

主筋配置设计出后,按下式对混凝土进行抗裂验算:

$$\delta < f_{cm}, \quad \delta = \frac{|M_{max}|}{W_0} \quad (8)$$

式中:δ——抗裂验算边缘的混凝土法向应力,N/m²;

W₀——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩,m³;

$$W_0 = \frac{\pi d}{32} [d^2 + 2(\alpha_E - 1)\rho_g d_0^2]$$

α_E——钢筋弹性模量E_s与混凝土弹性模量的比值;

ρ_g ——主筋配筋率；
 d, d_0 ——桩径和纵向钢筋圆环直径。

4 工程实例

4.1 工程概况

西安市某工程,北、西紧靠主要交通道路,东、南临繁华小巷。地下室两层,基础埋深

10.0米。基坑放坡条件不成立。垂直开挖需进行支护,由于基坑上部为湿陷性黄土和饱和黄土不宜采用锚杆支护。根据西安地区施工经验决定采取悬臂式钻孔灌注护坡桩。场地内地层平均情况见图3,各土层的主要参数见表1。

表1 各土层主要参数

层号	厚度 m/m	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/kPa	主动土侧压力系数 K_a	被动土侧压力系数 K_p
①	6.0	17.0	23	31	0.438	2.283
②	4.0	18.4	20.2	17	0.487	2.055
③	4.5	19.0	21.4	33	0.465	2.149
④	8.0	20.3	19.2	22	0.505	1.980
⑤	7.3	20.6	17.7	33	0.534	1.874

注 地下水容重取 $10kN/m^3$

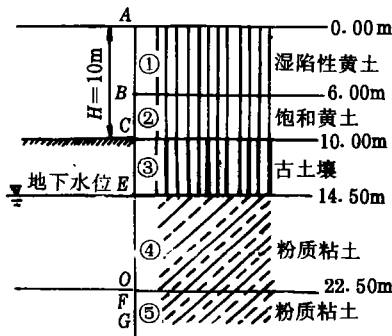


图3 基坑和地层剖面图

4.2 土压力的计算

首先要确定反弯点O及桩底G的位置。参照图1设 $CO = 1.2H = 12.0m$, $OG = 0.15H = 1.5m$ 。考虑到基坑外建筑材料和设备的放置,均布荷载 q 按 $10kPa$ 考虑。主动土

压力 E_a , 被动土压力 E_p 按以下公式求得:

$$E_a = \gamma h K_a - 2c \sqrt{K_a}$$

$$E_p = \gamma h' K_p + 2c K_p$$

式中: E_a, E_p —— 主动、被动土压力, kN;

γ —— 土的重度, kN/m^3 ;

h, h' —— 土层厚度, m;

K_a, K_p —— 主动、被动土侧压力系数。

均布荷载强度视为等效增高进行计算,成层地基土按重度换算成相同等效的土层厚度进行计算。地下水位以下土层取浮容重。各特征深度从地表或基底算起的土压力计算结果及AO段内各层的总土压力及其作用点列于表2,各特征点的主动土压力表示于图4。

4.2.1 E_2 的确定

用二重积分求 E_2 的作用点 l' , 可得:

表2 土压力主要计算结果

点位	深度 H/m	各点主动土压力 e_a/kPa	各段总主动土压力 E_a/kPa	各段总主动土压力作用点位置 L/m	AO段内总主动土压力作用点位置 l/m	各点被动土压力 e_p/kPa	CO段被动土压力作用点位置 l'/m
A	0.0	4.380				/	
B	6.0	8.102	37.178	2.707		/	
C	10.0	66.655	149.334	1.476	6.447	(0.000)	
E	14.5	81.050	332.366	2.177		(278.318)	(4.647)
O	22.0	144.633 (50.905)	846.311	3.398		(384.153) 751.641	
F	22.5	(53.506)	(76.392)			761.838	
G	23.5	(47.073)				772.677	

备注:1. 土压力作用点位置指作用点对该段下界的距离

2. “()”内数值表示从基坑底部算起

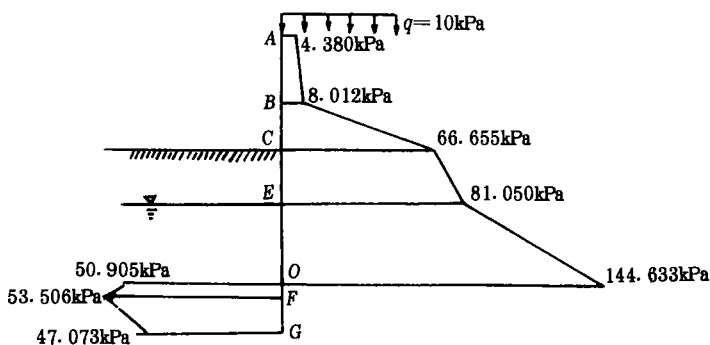


图4 主动土压力分布图

$$l' = 4.647\text{m}$$

积分求得 E_{a1} 为 1 365.155kPa, 根据(3)式可求得:

$$E_2 = 1\,893.691\text{kPa}$$

按朗肯土压力理论求出 CO 段总被动土压力得:

$$E_{p2} = 3\,110.482\text{kPa}$$

验算 E_2 : $K_1 = E_2/E_{p2} = 0.609$, 符合要求。 E_2 求毕。

4.2.2 P_4 的确定

桩前从基底算起 OG 段内总主动土压力 E_{a3} 为 76.392kPa, 桩后从地表算起 OG 段内总被动土压力 E_{p4} 为 1 145.627kPa。由于 E_{a1} 、 E_{a3} 、 E_2 已知代入(4)式可得:

$$E_4 = 604.928\text{kPa}.$$

验算 E_4 : $K_2 = E_4/E_{p4} = 0.528$, 符合要求。 E_4 求毕。

4.3 确定剪力 Q 为零的位置求 $|M_{max}|$

设在土层④中 D 处剪力为零, 距土层③层底(即点 E)距离为 d' 。桩后 AD 段总主动土压力为 $518.84B + 93.336d' + 2.601d'^2$, 桩前 CD 段总被动土压力为 $626.216 + 254.260d' + 0.99d'^2$ 。根据(5)式可以列出:

$$K_2(626.216 + 254.260d' + 0.990d'^2) = 518.848 + 93.336d' + 2.601d'^2 \text{ 解得: } d' = 2.428\text{m}, \text{ 符合实际情况。即基底下 } 6.928\text{m} \text{ 处剪力为零。}$$

d' 求出即可求 D 点处主动土压力和实际所受土压力产生的弯矩, 求得分别为 3565.497kN·m、1972.593kN·m。则 $|M_{max}|$ 为两者之差 1 595.092kN·m。剪力

为零所在位置及最大弯矩求毕。

4.4 配筋计算

当桩径为 1.0m, 混凝土强度采用 C25, 主筋用 $\phi 30$ 时, 按《GBJ10—89 混凝土结构设计规范》参数 f_{cm} 取 13.5N/mm², f_y 取 310N/mm², γ_s 取 0.45m, M 取 2 000kN·m。将以上数值代入(7)式中得:

$$\alpha = 0.31 \quad A_s = 0.017\,6\text{m}^2$$

可知当主筋采用 25 $\phi 30$ 时可以满足弯矩设计值要求。

按(8)式进行抗裂验算求得:

$$W_o = 0.12\text{m}^3 \text{ 则 } \delta = \frac{|M_{max}|}{W_o} = 13.3\text{N/mm}^2 < f_{cm} (13.5\text{N/mm}^2) \text{ 通过验算说明混凝土强度及配筋满足抗裂要求。}$$

至此整个护坡桩的设计完毕。桩径 R 为 1.0m, 桩长 23.5m, 最大弯矩为 1595.092kN·m, 弯矩设计值取 2 000kN·m。主筋配置采用 25 $\phi 30$ 。桩间距可按 1.5R 考虑。

5 结论与说明

(1) 设 CD 段桩前和 OG 段桩后每一点实际产生的土压力与该点由朗肯土压力计算所得的被动土压力之比 K_1 、 K_2 分别为常数, 是本文所有计算的前提。

(2) 关于反弯点 O 和桩底 G 的确定, 结合以往工程的计算, 一般情况下 CO 取 (1.1~1.4)H, OG 取 (0.1~0.15)H, 可符合要求。故在勘察中直剪试验做至基坑下 1.5H 深度为宜。

(3) 由于 CO、OG 是一个范围值, 所以对一个特定的工程其护坡桩的桩长、最大弯矩, 并非唯一。可根据实际情况, 结合工程的重要性, 选择不同的 K_1 、 K_2 值, 从而确定适合本工程的护坡桩。

(4) 本文所举工程实例, 由于桩的两侧不存在水位差, 故在计算中设考虑静水压力 $\gamma_w h$ 。

参 考 文 献

- 1 林宗元. 岩土工程治理手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993. 609~612

收稿日期: 1995-04-06