

文章编号: 1008—2786(2000)增—0025—05

山区斜坡填土地地桩基础设计计算的有关问题

邓荣贵, 付小敏

(地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 根据填土地地的实际情况, 首先对山区斜坡上的填土边坡边缘附近, 建筑物桩基础设计计算的有关问题进行了分析, 建立了相关的计算式, 然后以某水电站库区移民新集镇信用社综合楼桩基础设计计算为例, 阐述了其应用效果。

关键词: 桩基础; 山区建筑; 斜坡填土地基

中图分类号: TU312.1, TU473.12 文献标识码: A

有关建筑桩基技术规范仅规定了桩顶竖向、水平集中力和沿桩身竖向负摩擦力作用下, 桩基础设计应满足的条件^[1~4]。山区斜坡填土内桩身受水平向分布力作用时, 桩体设计应满足的条件未予以规定。随着山区经济的发展, 在半挖半填的填土地地上修建多层甚至高层建筑的情况愈来愈普遍, 如三峡、宝珠寺、二滩等大型水电站移民建筑场地, 以及山区新开发区的建筑场地, 都不同程度的存在上述问题。在这些场地上修建建筑物, 相关规范均规定宜用桩基础, 由于场地条件各不相同、平时采取的技术措施各异、结构人员与地质人员的衔接配合等问题, 桩基的设计计算及相关参数的选取普遍参照传统的方法选用而欠佳; 许多半挖半填的填土地地上修建建筑物即使采用了桩基础, 但因填土固结过程中对桩基产生的水平向分布力, 未予以足够重视, 使桩基础产生过大变形或断裂, 导致建筑物开裂甚至破坏的情况时有发生。针对这一问题, 本文就山区填土地地上建筑物桩基础的设计计算、相关参数的选择和验算等有关问题进行分析, 并将其分析结果应用于某大型水库移民新集镇信用社综合楼桩基础的设计计算, 效果良好。

1 斜坡填土地地桩基受力分析

山区建筑往往采用半挖半填方式自然堆填平场, 未予以碾压。平场形成的场地剖面可用图 1 来概化。对于平地上的填土地地, 填土的竖向沉降会对置于其中的桩基产生负摩擦力 q_v 作用。远腾和毕杰隆(Bjerrum)利用有效应力方法给出了负摩擦力的理论计算式

$$q_v = k \operatorname{tg} \phi \times \sigma_z'$$

(1)

$$\sigma_z' = p_0 + \gamma z$$

(2)

式中 σ_z' 为深度 Z 处桩侧土的竖向有效应力; P_0 为桩顶以上的堆载 (KPa), k 为水平有效应力与竖向有效应力之比, $\operatorname{tg} \phi$ 为桩土摩擦系数, γ 为土体平均重度 (KN/m³)。

由土力学原理可知, 对于图 1 所示的斜坡上的填土地地, 填土固结变形时, 桩基除受竖向负摩擦力作用外, 还受水平向填土的作用力。桩基上任意点所受水平向填土单位作用力 q_h 的大小, 应与原来地面斜坡倾角 α 、填土边坡倾角 β 、桩基与老土层斜坡坡缘的距离 x 、该点距桩顶的深度 z 和填土的等效内

摩擦角 ϕ_f 等因素有关(如图 1 所示)。若用函数表达,则可写为:

$$q_h = f(\alpha, \beta, x, z, \phi_f) \quad (3)$$

下面根据土力学原理及土坡变形破坏特征,对(3)式的具体型式进行分析(分析时仅考虑了老土斜坡已固结变形稳定,填土边坡只变形不失稳的情况): 1. α 的影响: 我们考虑两种极端情况,一是 $\alpha = 0$ 时,即填土不是在斜坡上而在平地上,此时置于其中的桩基仅受竖向负摩擦力作用, $q_h = 0$; 二是 $\alpha = 90^\circ$ 时, q_h 趋于最大(接近于静止土压力)。这种变化特征可写为 $\sin 2\alpha$; 2. β 的影响: 当 $\beta = \alpha$ 时, $q_h = 0$; 当 $\beta = \pi/2$ 时,桩基受到的填土压力最大,这种变化特征可以写为 $[2(\beta - \alpha)]/(\pi - 2\alpha)$; 3. x 的影响: 由图 1 可知,当桩基位于老土内($x \leq 0$), q_h 应为 0 桩基距填土边坡边缘愈近, q_h 应愈大,但桩基位于填土边坡面内时, q_h 应随距填土坡缘的距离变大而变大,并且桩基位于填土边坡脚时, q_h 应为 0 这样,其变化可以写为 x/h_0 (当 $0 \leq x \leq h_0$), $(h-x)/(h-h_0)$ ($h_0 < x \leq h$); 4. z 的影响: 据文献[6],随 z 的变化,桩基负摩擦与正摩擦交界点(中性点)的深度 l_n , 为 $(0.6 \sim 0.9l_s)$ (l_s 为持力层以上的填土厚度)。斜坡上填土中的桩基,因老土(持力层)坡面对填土变形的阻滞作用,可以认为该坡面点的 q_h 为零,而中性点的 q_h 最大,中性点上、下 q_h 呈三角形分布,则可写为 $\zeta_1 \gamma z$ ($0 \leq z \leq l_n$) $\gamma \zeta l_n (z - l_s)/(l_n - l_s)$ ($l_n \leq z \leq l_s$) 式中, γ 为填土的平均重度(KN/m^3), ζ_1 为待定系数, l_s 为填土厚度(m)。5. ϕ_f 的影响: ϕ_f 的影响实际是通过 ζ_1 反映的,当桩基位于场地老土与填土界面时,桩基所受水平力为零,当桩基位于填土边坡边缘时,其所受水平作用力极大(相同 z 值)。该极大值应随填土边坡角大小变化,当 β 趋于 90° 时,该极大值变为最大,即为主动土压力 $\gamma z \text{tg}^2(45^\circ - \phi_f/2)$, 此时 $\zeta_1 = Ka = \text{tg}^2(45^\circ - \phi_f/2)$ 。设该值与 β 值呈线性变化,即可以写为

$$\zeta_1 = 2k_a \beta / \pi \quad (0 \leq \beta \leq \pi/2) \quad (4)$$

$$\phi_f = \arctan(\text{tg} \phi + \frac{2c}{\gamma z}) \quad (5)$$

这样就可以用乘积的形式,使(3)式显化,即

$$\left. \begin{aligned} q_h &= \sin 2\alpha \times \frac{2(\beta - \alpha)}{\pi - 2\alpha} \times \frac{x}{h_0} \times \frac{2k_a}{\pi} \times \beta \times \gamma \times z \\ 0 \leq x \leq h_0 \text{ 和 } 0 \leq z \leq l_n \\ q_h &= \sin 2\alpha \times \frac{2(\beta - \alpha)}{\pi - 2\alpha} \times \frac{x}{h_0} \times \frac{2k_a}{\pi} \times \beta \times \frac{\gamma l_n}{l_n - l_s} (z - l_s) \\ \text{当 } 0 \leq x \leq h_0 \text{ 和 } l_n \leq z \leq l_s \\ q_h &= \sin 2\alpha \times \frac{2(\beta - \alpha)}{\pi - 2\alpha} \times \left(\frac{h-x}{h-h_0} \right) \times \frac{2k_a}{\pi} \times \beta \times \gamma \times (z - (x-h_0) \times \text{tg} \beta) \\ \text{当 } h_0 \leq x \leq h \text{ 和 } (x-h_0) \text{tg} \beta \leq z \leq l_n + (x-h_0) \text{tg} \beta \\ q_h &= \sin 2\alpha \times \frac{2(\beta - \alpha)}{\pi - 2\alpha} \times \frac{2k_a}{\pi} \times \frac{h-x}{h-h_0} \times \beta \times \frac{\gamma l_n}{l_n - l_s} \times (z - l_s - (x-h_0) \text{tg} \beta) \\ \text{当 } h_0 \leq x \leq h \text{ 和 } (x-h_0) \text{tg} \beta + l_n \leq z \leq l_s + (x-h_0) \text{tg} \beta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6)式即为斜坡上填土边坡内,桩基所受填土水平作用力的分布形式。

2 桩基内力

2.1 桩身在 q_h 作用下的内力

设桩顶竖向合力为 N , 水平向合力为 H 。填土范围内,桩身竖向负摩擦分布力为 kz (k 为系数), 填土水平向分布力为 q_h , 由(6)式确定。桩在 q_h 作用下,按悬臂桩法计算桩身剪力及弯矩,对于填土段 ($0 \leq Z \leq l$), 当 $0 \leq x \leq h_0$ 和 $0 \leq Z \leq l_n$ 时

$$\left. \begin{aligned} Q_h(x, z) &= A_1 x z^2 \\ M_h(x, z) &= \frac{1}{3} A_1 x z^3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当 $0 \leq x \leq h_0$ 和 $l_n \leq Z \leq l_s$ 时

$$\left. \begin{aligned} Q_h(x, z) &= A_2 \left(\frac{1}{2} z^2 - l_s^2 \right) + \frac{1}{2} A_2 l_n l_s \\ M_h(x, z) &= A_2 \left(\frac{1}{6} z^3 - \frac{1}{2} l_s z^2 \right) + \frac{1}{2} A_2 l_n l_s z + \frac{1}{6} A_1 l_n l_s (2l_s - l_n) + \frac{1}{3} A_2 l_s^3 - \frac{1}{2} A_2 l_n l_s^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当 $h_0 \leq x \leq h$ 和 $(x - h_0) \operatorname{tg} \beta \leq z \leq (x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_n$

$$\left. \begin{aligned} Q_h(x, z) &= A_3(h - x) \left(\frac{1}{2} z^2 - z(x - h_0) \operatorname{tg} \beta \right) - \frac{1}{2} A_3(h - x)(x - h_0) \operatorname{tg} \beta \\ &\quad + \frac{1}{2} A_3(h - x)(x - h_0)^2 \operatorname{tg}^2 \beta \\ M_h(x, z) &= A_3(h - x) \left\{ \frac{1}{6} z^3 - \frac{1}{2} z^2(x - h_0) \operatorname{tg} \beta \right\} + \frac{1}{2} A_3 z(h - x)(x - h_0)^2 \operatorname{tg}^2 \beta \\ &\quad - \frac{1}{6} A_3 z(h - x)(x - h_0)^3 \operatorname{tg}^3 \beta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

当 $h_0 \leq x \leq h$ 和 $(x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_n \leq z \leq (x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_s$

$$\left. \begin{aligned} Q_h(x, z) &= A_4(h - x) \left\{ \left(\frac{1}{2} z^2 - z(l_s + (x - h_0) \operatorname{tg} \beta) \right) + \frac{1}{2} A_4(h - x) l_n l_s \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} A_3(h - x) \{ (x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_s \}^2 \right\} \\ M_h(x, z) &= A_4(h - x) \left\{ \frac{1}{6} z^3 - \frac{1}{2} z^2(l_s + (x - h_0) \operatorname{tg} \beta) + \frac{1}{2} A_4 l_n l_s \times z(h - x) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} A_4(h - x) \{ (x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_s \}^2 z - A_4(h - x) \left\{ \frac{1}{6} [(x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_s]^3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{2} A_4 [l_s + (x - h_0) \operatorname{tg} \beta]^3 (h - x) \right\} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $A_1 = \sin 2\alpha \frac{2(\beta - \alpha) 2k_d \beta \gamma}{\pi - 2\alpha} b_p$, $A_2 = \sin 2\alpha \frac{2(\beta - \alpha) 2k_d \beta \gamma}{\pi - 2\alpha} \frac{l_n}{l_n - l_s} b_p$

$A_3 = b_p \sin 2\alpha \times \frac{2(\beta - \alpha)}{\pi - 2\alpha} \times \frac{2K_d \beta \gamma}{\pi(h - h_0)}$, $A_4 = b_p \sin 2\alpha \times \frac{2(\beta - \alpha)}{\pi - 2\alpha} \times \frac{2k_d \beta \gamma}{\pi(h - h_0)} \times \frac{l_n}{l_n - l_s}$

在(7)~(10)式中, 令 $Z = l_s$ 或 $(x - h_0) \operatorname{tg} \beta + l_s$, 就可以得到原斜坡面点桩截面的剪力 Q_A 和弯矩 M_A , 同时可计算该点的位移 y_A 和转角 ϕ_A , 再按文献[5]介绍的方法计算下段桩身 $l_s \leq z \leq l$ (l 为桩体总长)的剪力 Q 和弯矩 M 。

2.2 桩顶水平力 H 作用时的内力

利用弹性地基反力的 m 法, 即利用(11)式, 求得桩基在桩顶水平力 H 作用下的剪力 Q_H 、弯矩 M_H 。

$$\left. \begin{aligned} M_H(x, z) &= \alpha_1 EI (\alpha_1 y_0 A_8 + \phi_0 B_8) + \frac{H}{\alpha_1} D_8 \\ Q_H(x, z) &= \alpha_1^2 EI (\alpha_1 y_0 A_7 + \phi_0 B_7) + H \times D_7 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, $\alpha_1 = \left(\frac{mb_p}{EI} \right)^{1/5}$, $m = m_0 \left(1 - \frac{2\beta}{h_0 \pi} x \right)$, 当桩径 $d \leq 1.0$ m 时, 计算宽度 $b_p = 0.9 \times (1.5d + 0.5)$, 当 $d > 1.0$ m 时, $b_p = 0.9 \times (d + 1.0)$, H 为作用于桩顶的水平荷载(向填土坡下), y_0 及 ϕ_0 为桩顶的水平位移和转角, 可通过桩底的边界条件(①)式求得。 A_5 、 A_6 、 A_7 、 A_8 、 \dots 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 为无量纲系数, 为 α 和 z 的函数。 m_0 为原斜坡地面和填土地面都为水平时的地基土水平反力系数随 z 的增长率,

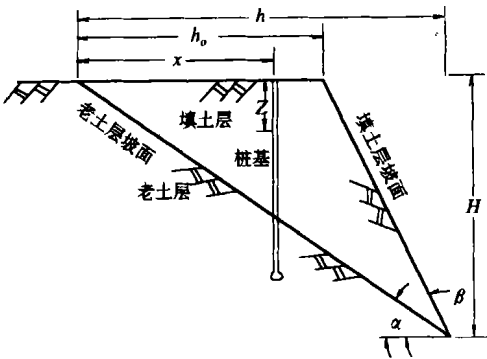


图 1 斜坡上的填土边坡和填土地基
Fig. 1 Earth fill side slope and foundation on slope

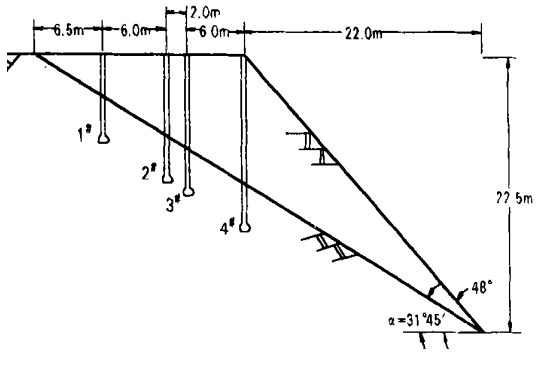


图 2 斜坡上的填土边坡和桩基
Fig. 2 Earth-fill side slope and pile foundation

EI 为桩体抗弯刚度($\text{KN} \cdot \text{m}^2$), 由试验或经验确定。

$$\left. \begin{aligned} y &= y_0 A_5 + \frac{\phi_0}{\alpha_1} B_5 + \frac{H}{\alpha_1^3 EI} D_5 \\ \phi &= \alpha_1 y_0 A_6 + \phi_0 B_6 + \frac{H}{\alpha_1^3 EI} D_6 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 y 和 ϕ 为桩身任意点的水平位移及转角。桩基在 $0 \leq z \leq L_s$ 段的总剪力 Q_{zx} 和总弯矩 M_{zx} 为(10)和(11)式计算出的结果之和, 桩基在 $l_s \leq z \leq l$ 段总的剪力 Q_{zx} 和总弯矩 M_{zx} 由文献[5] (3~5)至(3~9)式或者(3~13)至(3~16)式求出的结果与本文(11)式之和, 即

$$\left. \begin{aligned} Q_{zx} &= Q_H(x, z) + Q_h(x, z) Q_k(x, z) \\ M_{zx} &= M_h(x, z) + M_H(x, z) M_k(x, z) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2.3 桩基竖向力作用下的内力

桩基竖向力由桩顶竖向合力 N 、桩身上部负摩擦力、桩身下部正摩擦力和桩底阻力构成。

当 $0 \leq z \leq l_n$ 时, 桩身总竖向力 N_z 为

$$N_z = N + K \tan \phi' \gamma z \cdot \pi dz \quad (18)$$

式中 K 为静止土压力系数, $\tan \phi'$ 为桩土摩擦系数, γ 为土体平均重度, d 为桩径, z 为桩顶至任意点的距离。当 $l_n \leq z \leq l$ 时, 桩身总竖向力 N_z 为

$$N_z = N + K \tan \phi' \gamma l_p \pi d - \pi dq_{sr} \cdot (z - l_n) \quad (15)$$

式中 d 为桩径(m), q_{sr} 为桩周极限单位面积摩擦力(KPa)。

3 内力分析结果比较及工程应用

以四川省某大型水电站库区移民新集镇信用社综合楼设计计算为例, 说明上述方法应用的效果。该综合楼填土场地特征如图 2 所示, 其长轴平行于老土斜坡和填土边坡, 内走廊箱式底框砖混结构, 其中 1# 及 4# 桩顶竖向设计荷载为 1 053KN, 2# 及 3# (图 2) 桩顶竖向设计荷载为 1 404KN, 地震和风荷载单桩设计值为 103.84 KN。填土平均重度, $\gamma = 19.10 \text{KN/m}^3$, $I_L = 0.28$, $c = 30 \text{KPa}$, $\phi = 14^\circ$, 桩端承载力 $q_p = 800 \text{KPa}$; 老土: $\gamma = 20.5 \text{KN/m}^3$, $I_L = 0.20$, $c = 40 \text{KPa}$, $\phi = 25^\circ$, $q_p = 1500 \text{KPa}$ 。

桩基直径 0.8 m, 嵌入老土平均为 4 m。根据有关规范和资料确定相关参数(其中 $l_n = 0.7 l_s$)后, 分析具有代表性的 4# 桩基时, 分别不考虑和考虑斜坡上填土固结变形对桩基的水平作用力两种情况, 计

算桩基弯矩分布特征。结果表明, 单有桩身水平分布力 q_h 作用时, 最大弯矩出现在老土与填土界面以下 $0.2\text{ m} \sim 1.0\text{ m}$ 范围内; 单有桩顶水平集中力 H 作用时, 最大弯矩出现地面以下 $2\text{ m} \sim 4\text{ m}$ 范围内; 既有桩顶水平集中力 H 和桩身填土水平分布力 q_h 联合作用时, 桩基出现两个弯矩极大值点。桩基剪力分布与弯矩分布趋势接近, 两种荷载作用时, 多了一个剪力极大值点。同样, 用上述理论式计算的 1[#]至 3[#]桩基剪力和弯矩分布, 其分布趋势与 4[#]桩相似, 只是数据大小不同而已。经验算, 各桩安全系数符合有关规范要求。

4 结 论

1 山区建设, 不可避免地在斜坡填土地地上修建建筑物。由于技术和投资等因素, 填土常常未予以按规范要求进行放台分层压实, 填土还未固结移定, 就其在上修建建筑, 甚至有的在斜坡上先作好桩基或修好上部建筑后再回填。在此情况下, 桩基设计时, 不能按传统的分析方法, 只重视桩顶的竖向和水平荷载。

2 斜坡填土中的桩基础, 既要承受桩顶集中竖向和水平向荷载作用, 还要承受填土固结变形对桩基的水平分布荷载作用。此时的桩基, 既有传统建筑物桩基作用, 又有阻滞填土边坡固结变形或滑移产生的水平作用, 既抗滑桩或抗水平变形的作用。

3 利用本文提出的分析理论, 可以计算不同倾角的老土(岩石)边坡和填土边坡中, 不同位置桩基的内力。只要根据场地的岩土工程条件选择合理的参数, 利用上述方法的计算结果是符合实际的。

4 将上述理论, 应用于四川省某水库移民新集镇民用建筑设计计算, 既达到了有关规范要求, 又充分利用了有限的场地, 并获得良好经济和社会效益。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院.《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995, 25~38
- [2] 中华人民共和国区域城乡建设和环境保护部.《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)[M]. 北京, 中国建筑工业出版社, 1989, 72~79
- [3] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京, 中国建筑工业出版社, 1990, 175~247
- [4] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘探规范(GB50021—94)[M]. 北京, 中国建筑工业出版社, 1995, 67~72
- [5] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京, 中国铁道出版社, 1983, 42~43

ON THE RELATED PROBLEMS AND DESIGN OF PILE FOUNDATION IN FILLING SOIL ON SLOPE

DENG Rong-gui, FU Xiao-min

(National Laboratory of Geological Hazard Prevention, Chengdu 610059)

Abstract: The related problems design of pile foundation of construction, in the filling soil field with slope on natural slope, were been analyzed. The theory formula were been put and successfully applied to the pile foundation computation and design of the bank house in the new town. It may be used to design for pile foundation in similar field and foundation of construction.

Key words: pile foundation, construction in mountain, filling soil foundation