

文章编号: 1000-7598-(2006) 03-0445-06

黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析

蒋良潍¹, 黄润秋¹, 蒋忠信²

(1.成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059; 2.铁道第二勘察设计院, 成都 610031)

摘 要: 土拱效应是安全经济地发挥抗滑桩等非连续支挡结构的支护功能的重要前提, 桩间距与成拱作用密切相关。利用合理拱轴线几何特征与受压破裂角方位, 通过力学概念分析, 将黏性土土拱计算的平衡条件和强度条件综合简化为以拱脚处拱圈轴向压应力表达的形式。继而从最少且最易获得的土工材料参数 (内聚力 c 、内摩擦角 ϕ) 出发, 根据轴向压应力与矢跨比函数关系, 利用摩尔-库仑强度准则, 推导了拱曲线与桩间距上下限的简便计算式, 再以此进一步探讨了考虑土拱效应三维稳定的桩间距校核, 并以工程实例验证, 以对土拱效应的估算提供简便清晰的计算方法。

关 键 词: 黏性土; 土拱效应; 桩间距; 矢跨比

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Analysis of soil arching effect between adjacent piles and their spacing in cohesive soils

JIANG Liang-wei¹, HUANG Run-qiu¹, JIANG Zhong-xin²

(1.College of Environmental & Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2.The No.2 Railway Surveying and Designing Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: Soil arching effect is an important precondition of adjacent pertaining or anti-sliding piles working safely and cost-efficiently. In cohesive soils, the spacing between adjacent piles is related to arching effect. By means of the analysis of mechanical concepts, taking geometrical characteristic of arch line and the fracturing face direction angle of Mohr-Coulomb failure to account, the force-balancing condition and strength condition are integrated and simplified to a uniform expression, which is only presented by the normal stress on the cross section plane of arch foot. Based on Mohr-Coulomb failure criterion, the least handy soil strength parameters which only including cohesion c and internal friction angle ϕ according to the relationship between the normal stress and arrow-span ratio, the arch line and spacing between piles are obtained. Furthermore, the depth stable condition of soil arch is discussed, pile spacing can be emended more rationally. The application consists with practice projects to a certain extent. A concise estimate method to soil arch effect may be put forward.

Key words: cohesive soil; soil arching effect; pile spacing; arrow-span ratio of arch

1 引 言

成拱效应广泛存在于土木工程之中, 系由介质的不均匀变形所产生的一种应力转移与重分布现象, 如洞穴坑道顶部自然形成的压力拱、堤坝填土工程的坝壳效应等^[1, 2]。

在基坑工程、边坡工程及地质灾害防治工程中, 可观察到明显的水平土拱效应。护壁桩或抗滑桩对桩身后侧、斜后侧一定范围的岩土体有明显刚性约束作用, 而桩间岩土体却因缺乏足够约束, 在卸荷

作用下变形较大甚至发生坍塌。坍塌线后部区域, 岩土体有明显应力集中现象, 产生弧形承载拱(俯视即“拱圈”), 将岩土体施加的满布型推力转化为仅对相邻两桩(拱脚)的集中推力作用, 此效应也是如抗滑桩等类型的非连续支挡结构能够产生连续性支护效果的前提。

充分利用土拱效应, 对经济合理设置抗滑桩的排列间距具有重要意义。最大跨度的土拱成拱作用可以充分发挥土体的自承载能力, 并成为确定桩间距的合理经济参考^[3-8]。

收稿日期: 2004-07-19

修改稿收到日期: 2004-11-20

基金项目: 国家自然科学基金“西部生态与环境”重大研究计划项目资助 (No.90102002)。

作者简介: 蒋良潍, 男, 1974 年生, 博士研究生, 主要从事地质工程、岩土工程方面的研究。E-mail: jiangliangwei@vip.163.com。

对非黏性土,土拱效应的计算借用地下工程中散粒体成拱作用的普氏理论进行分析是较为适合的。而对于黏性土,由于存在凝聚力,目前对土拱效应与桩间距的理论分析,因研究的一些出发点不同而有较大差异。

文献[3,4]假设桩身侧面宽度为拱圈厚度,以该侧面的摩阻力抵抗岩土体推力,但却未计及拱圈材料强度及拱形的影响;文献[5]引入桩土界面摩擦系数,以拱脚产生水平滑动为临界条件确定拱曲线,考察拱脚拱圈的最大斜截面剪应力;文献[6]以土拱跨中为最不利截面,联立拱脚拱圈斜截面强度,确定拱曲线及拱圈厚度;文献[7]假设土拱在滑体内呈“叠瓦”式层层重叠,以跨中为危险截面,数值迭代求解;文献[9~11]引入土体综合(或等值)摩擦系数 ϕ_k ,以拱脚的水平滑动临界条件确定拱曲线,甚至该条件中不计土体凝聚力^[10,11]。这些方法,或引入参数较多,较难取得,或计算较为复杂,有时拱圈厚度、矢跨比等计算要素难以体现,对最不利截面的选取也值得探讨。

本文分析了压力拱的内力特征,明确了最不利截面的位置,简化表达出拱圈斜截面的内力。并力图从最少的土工参数(内聚力 c 、内摩擦角 ϕ)出发,利用土体的受压极限破裂方位及强度条件,推导了拱曲线与桩间距的简便计算式,并以此探索了考虑土拱效应三维现象的桩间距校核,以期对土拱效应的估算提供简便清晰的计算方法。

2 合理拱轴线与最不利截面位置

土拱由土体不均匀变形的应力传递和调整而自发形成,是调动自身抗剪强度以抵抗外力的结果,所产生的拱形必然使土体介质能最大限度地发挥其强度作用,土体中沿最大主应力方向的迹线就是“合理拱轴线”^[10]。

考虑土体的材料特性(即基本不能承受拉应力)及计算模型的简化,可建立如下假设条件:

- (1) 拱后岩土体推力为沿拱跨度方向均匀分布的,拱前为临空面;
- (2) 拱轴线横截面上处处均不出现拉应力;
- (3) 相邻两桩视为拱脚,无转动约束,为铰支承。

根据以上假设,由结构力学三铰拱原理推得,合理拱轴线形式是抛物线^[4,7](受力简图见图1):

$$y = 4fx^2/l^2 \quad 0 \leq x \leq l/2 \quad (1)$$

式中 l , f 分别为土拱净跨度(即桩间净距)、矢高;

x , y 为坐标系,示于图1。

在均布荷载下,抛物线拱的力学特点是拱轴线上处处横截面均无弯矩和剪力。拱圈沿轴线切线方向也处处仅受轴向压力(即最大主应力),为单向受压应力状态。

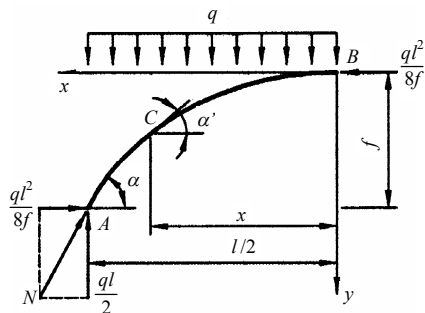


图1 拱轴线受力分析简图

Fig. 1 The analysis sketch of force along the arch line

由图1按静力平衡可得,拱轴线上任意点C处水平推力均为 $ql^2/8f$,垂直支承力为 qx ,合力 N 为

$$N = (q\sqrt{l^4 + 64x^2f^2})/8f \quad (2)$$

式中 q 为拱后岩土体的均布推力。

$$\text{其方位角为 } \alpha' = \tan^{-1} \left[\frac{qx}{(ql^2/8f)} \right] = \tan^{-1} \left(\frac{8fx}{l^2} \right) =$$

$\tan^{-1}(dy/dx)$, 即处处均指向拱轴线切线方向,可见合力 N 为轴向压力。

由式(2)可知,轴向压力 N 为 x 的增函数。拱脚A处轴向压力最大,为 $(ql\sqrt{l^2 + 16f^2})/8f$;跨中B处轴向压力最小,为 $ql^2/8f$ 。

根据单向受压条件和等横截面拱圈假设,拱脚横截面正应力大于跨中处,因此应以拱脚为土拱的最不利截面位置。

3 拱脚内力表达式

设抗滑桩设置为单排,并形成连续对称土拱。同一桩体后侧局部区域内,相邻两侧土拱在此处形成三角形受压区(图2)^[5-7]。三角形两腰是拱脚最不利的破坏面,拱圈土体在破坏时向临空面剪出。

建立如下假设:

- (1) 拱圈受力状态为俯视图的平面应变问题;
- (2) 三角形破坏面长度 b' 由方位角 θ 和桩身宽度 B' 决定;
- (3) 破坏面上的应力为均匀分布的;
- (4) 强度准则采用莫尔-库仑公式。

由图2,有以下几何关系:

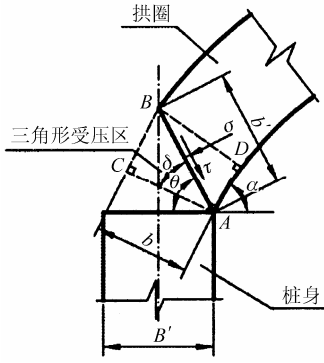


图2 拱脚受力分析简图

Fig.2 The analysis sketch of force in arch foot

$$b' = \frac{B'}{2\cos\theta}; \quad b = \frac{B'\cos\delta}{2\cos\theta}; \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{4f}{l}\right) \quad (3)$$

式中 b 为土拱拱圈宽度; δ 为破坏面与轴向压力法平面的交角。

对拱脚受力分析, 文献[5~7]均提出分别建立破坏面在 x, y 方向上的静力平衡方程(两个方程)。但经分析, 由于压力拱的特殊几何、力学性质, 可以仅用轴向压力一个方程来简化表示平衡条件。

设作用于破坏面上的均布正应力为 σ , 均布剪应力为 τ , 方向如图2所示, 建立 x, y 向的静力平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} ql &= 2(\tau b' \sin\theta + \sigma b' \cos\theta) \\ ql^2/8f &= \sigma b' \sin\theta - \tau b' \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

联立求解得:

$$\sigma = ql(4f + l \tan\theta) \cos^2\theta / 4B'f \quad (5)$$

$$\tau = ql(4f \tan\theta - l) \cos^2\theta / 4B'f \quad (6)$$

下面再按轴向压力进行分析。记作用在拱脚处拱圈横截面 AC (见图2) 上的轴向压应力为 σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{N}{b} = \frac{ql\sqrt{l^2 + 16f^2} \cos\theta}{4B'f \cos\delta} \quad (7)$$

则由单向受压状态斜截面应力公式可得

$$\sigma = \sigma_0 \cos^2\delta = \frac{ql\sqrt{l^2 + 16f^2} \cos\theta \cos\delta}{4B'f} \quad (8)$$

$$\tau = \sigma_0 \sin\delta \cos\delta = \frac{ql\sqrt{l^2 + 16f^2} \cos\theta \sin\delta}{4B'f} \quad (9)$$

注意到三角关系 $\tan\alpha = 4f/l$, 且由图2, $\delta = \theta + \alpha - 90^\circ$, 经三角代换有:

$$\sin\delta = (4f \sin\theta - l \cos\theta) / \sqrt{l^2 + 16f^2} \quad (10)$$

$$\cos\delta = (4f \cos\theta + l \sin\theta) / \sqrt{l^2 + 16f^2} \quad (11)$$

于是可证得式(5)与式(8), 式(6)与式(9)等价。即可由拱脚轴向压应力式(7)一个方程来表示两个平衡条件式(5)、式(6)。其优越之处还在于可清晰方便地用莫尔圆表示正应力、剪应力的关系(图3), 利于分析强度条件。

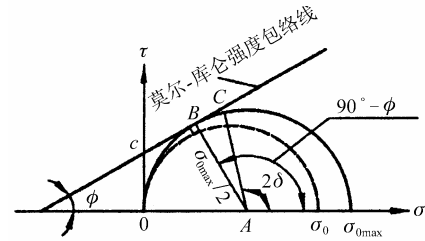


图3 单向受压莫尔圆与强度准则

Fig.3 The Mohr-Coulomb failure criterion

特别指出, 拱脚发生强度破坏时, 破坏面上剪应力并非已达到最大值。破坏的关键是剪应力与正应力的比例关系已超过强度允许条件。如图3中, 虽圆上 C 点所代表的斜截面上的剪应力大于 B 点代表的斜截面, 但 B 点斜截面却为破坏面。

因此, 土拱强度判断可以简化为仅对拱圈轴向压应力 σ_0 的分析。

4 桩间距分析

由莫尔-库仑强度理论, 具内摩擦强度的材料如岩土体的破坏破裂面与大主应力面成 $45^\circ + \phi/2$ 的夹角^[12]。因此拱脚破坏时, $\delta = 45^\circ + \phi/2$, $\theta = 135^\circ + \phi/2 - \alpha$ 。

进行简单的三角运算, 式(7)化为

$$\sigma_0 = \frac{ql[4f \tan(45^\circ - \phi/2) - l] \cos(45^\circ - \phi/2)}{4B'f \cos(45^\circ + \phi/2)} \quad (12)$$

式中 ϕ 为土体内摩擦角。

求最大桩间距, 实际就是求 σ_0 对净跨径 l 的最大值。将式(12)对 l 求偏导, 令 $\partial\sigma_0/\partial l = 0$, 得 σ_0 驻点的对应矢跨比:

$$\frac{f}{l} = \frac{1}{2 \tan(45^\circ - \phi/2)} \quad (13)$$

注意三角关系 $\sin(45^\circ - \phi/2) = \cos(45^\circ + \phi/2)$, 将式(13)代入式(12), 驻值 $\sigma_{0z} = ql/2B'$ 。

因 $\frac{\partial^2 \sigma_0}{\partial l^2} = -\frac{q \cos(45^\circ - \phi/2)}{2B'f \cos(45^\circ + \phi/2)} < 0$, 驻值 σ_{0z} 为极大值, 即

$$\sigma_{0 \max} = \sigma_{0z} = ql/2B' \quad (14)$$

由单向受压状态的莫尔-库仑准则(图3):

$$\frac{\sigma_{0\max}}{2} = \left(\frac{\sigma_{0\max}}{2} + \frac{c}{\tan\phi} \right) \sin\phi \quad (15)$$

$$\text{得} \quad \sigma_{0\max} = \frac{2c\cos\phi}{1-\sin\phi} \quad (16)$$

式中 c 为土体凝聚力。

将式 (14) 代入式 (16), 得最大允许净跨径:

$$l_{\max} = \frac{4B'c\cos\phi}{q(1-\sin\phi)} \quad (17)$$

可见, 最大允许净跨径与桩宽 B' 、土体凝聚力 c 成线性正比关系; 与拱后均布推力 q 成反比关系; 与 ϕ 成上翘增函数关系, 斜率为 $1/(1-\sin\phi)$, ϕ 越大, 斜率亦越大。因此, 土体质量越好, 允许跨径越大。

若桩间净距大于 $l_{\max}$, 土拱必将破坏, 抗滑支护失效。

又由式 (12) 分析, 轴向压应力 σ_0 为矢高 f 的增函数。因此, $f/l > 1/[2\tan(45^\circ - \phi/2)]$ 下, 随矢跨比的增加, σ_0 将增大。在深拱即 $f \gg l$ 时, 式 (12) 渐近趋近极大值 $\sigma'_{0\max} = ql/B'$ 。在这种情况下若不发生强度破坏, 土拱的净跨径应处于最下限情况:

$$l'_{\max} = \frac{2B'c\cos\phi}{q(1-\sin\phi)} \quad (18)$$

若取桩间净距小于 $l'_{\max}$, 则土拱效应不能得到任何发挥, 造成工程浪费。因此, 可取桩间净距的下限为式 (18), 上限为式 (17)。两者数值相差一倍, 系数学推导的理想极限化而致。实际工程中, 设定桩间净距界于两者之间, 可使土拱稳固而兼具一定经济合理性。

5 考虑土拱三维现象的桩间距校核

工程实际表明, 土拱是从桩顶向下逐渐减小的^[5], 即具有三维现象: 桩顶土拱的矢高大(深拱), 但后部推力小; 悬臂根处矢高小(较平坦), 但后部推力大。由于土拱的破坏与推力、矢高均有关, 因此土拱效应在深度上的受力行为亦值得分析。

假定拱前土体全部坍塌掉, 悬臂根处土体坍塌小, 而桩顶处坍塌深度(矢高)可利用 Rankine 主动极限平衡状态下的破坏面近似计算(图 4)。

由图 4 可得

$$f = f_0 + (h-z)\tan(45^\circ - \phi/2) \quad (19)$$

式中 h 为桩身悬臂长度, 即悬臂根处深度; z 为计算处深度坐标; f 为计算处土拱矢高; f_0 为悬臂根处土拱矢高。

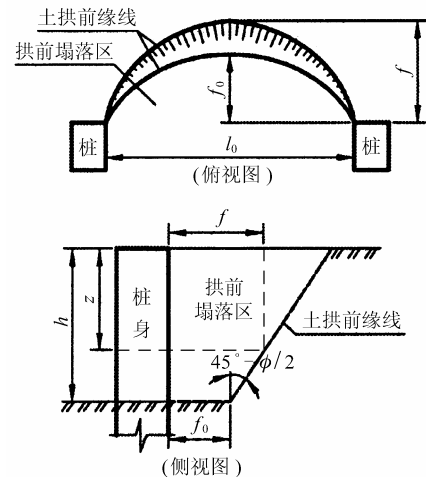


图 4 拱前塌落区示意图

Fig.4 The collapse area in front of the soil arch

抗滑桩的悬臂段推力, 在坡体有一定胶结具有凝聚力的情况下, 为上小下大的梯形分布^[13], 土拱除受坡体推力(近似均布)外, 还受土体自重主动土压。与深度对应的土压力, 用 Rankine 主动土压公式可表示为

$$q = q_0 + \tan^2(45^\circ - \phi/2)\gamma z \quad (20)$$

式中 q_0 为坡体均布推力; γ 为土体重度。

由于轴向压应力 σ_0 为矢高 f 及推力 q 的增函数, 而 q, f 又均与深度 z 有关。分析认为, 只有随 z 减小, σ_0 也减小情况下, 才能保证在最下层土拱稳固时, 其上方各层的土拱都稳定, 即必须 $\partial\sigma_0/\partial z \geq 0$ 。否则即使下层土拱稳固, 上层也将破坏而坍塌, 容易造成支护失效。

将式 (19)、式 (20) 代入式 (12), 取 $l=l_0$, 再对 z 求偏导:

$$\frac{\partial\sigma_0}{\partial z} = \frac{l_0\cos(45^\circ - \phi/2)}{4B'\cos(45^\circ + \phi/2)} \left\{ 4\gamma\tan^3(45^\circ - \phi/2) - \frac{\gamma l_0\tan^2(45^\circ - \phi/2)}{f_0 + (h-z)\tan(45^\circ - \phi/2)} - \frac{l_0\tan(45^\circ - \phi/2)[q_0 + \tan^2(45^\circ - \phi/2)\gamma z]}{[f_0 + (h-z)\tan(45^\circ - \phi/2)]^2} \right\} \quad (21)$$

大括号中的表达式, 是 z 的减函数, 当 $z=h$ 时, 该表达式须非负, 则解出:

$$f_0 \geq \frac{l_0}{8\tan(45^\circ - \phi/2)} + \frac{1}{8\gamma\tan(45^\circ - \phi/2)} \cdot \sqrt{[\gamma^2 l_0^2 + 16\gamma^2 l_0 h \tan^2(45^\circ - \phi/2) + 16q_0 \gamma l_0]} \quad (22)$$

取等号便于分析, 令根号内表达式为 A' , 与式

(20) 均代入式 (12), 联立 (16) 得等式:

$$\frac{2B'cc\cos\phi}{[q_0+\tan^2(45^\circ-\phi/2)\gamma h](1-\sin\phi)}=\frac{\sqrt{A'}l_0-\gamma l_0^2}{\sqrt{A'}+\gamma l_0} \quad (23)$$

该式不易解析求解, 可用逐步试解方法求出 l_0 。若 $l_0 \geq l_{\max}$, 则桩间净距取值在上下限 ($l'_{\max}, l_{\max}$) 内, 能保证土拱在深度方向的稳定, 以悬臂根处的荷载作为计算参数是合理的; 而若 $l_0 \in (l'_{\max}, l_{\max})$, 为维持土拱三维稳定, 桩间净距取值就应在区间 ($l'_{\max}, l_0$) 之内。

工程实际中, 为安全起见, 以取值区间的中值作为桩间净距最优值, 最为安全经济。

6 工程实例

6.1 实例 1

某支挡工程立柱, 有关参数为: $c=30$ kPa, $\phi=25^\circ$, 柱宽 $B'=1.2$ m, 悬臂段长度 $h=5$ m, 拱后土压力在悬臂根处的深度上的值由 Rankine 主动土压公式计算为 $q=40$ kPa (此支护结构 $q_0=0$), 土体重度近似按 $\gamma=20$ kN/m³ [4]。

由式 (17)、式 (18)、式 (23), 算得

$$l_{\max}=5.65 \text{ m}, l'_{\max}=2.83 \text{ m}, l_0=6.89 \text{ m}.$$

则桩间距(中心距)上下限为 4.03~6.85 m, 最优值取 5.5 m。该工程实际采用桩间距 6 m, 与本文计算最优值接近。

6.2 实例 2

某碎石土边坡工程抗滑桩, 有关参数为: $c=80$ kPa, $\phi=30^\circ$, $B'=2$ m, $h=8$ m, 桩体单宽推力为 560 kN/m^[5]。

拱后均布坡体推力为 $q_0=560/8=70$ kPa, 土自重产生的侧压采用 Rankine 主动土压公式近似计算, 土体重度近似取 $\gamma=20$ kN/m³:

$$q=q_0+\tan^2(45^\circ-\phi/2)\gamma h=123.33 \text{ kPa}$$

代入式 (17)、式 (18)、式 (23), 分别算得

$$l_{\max}=8.99 \text{ m}, l'_{\max}=4.50 \text{ m}, l_0=7.84 \text{ m}.$$

则桩间中距的上下限为 6.50~9.84 m, 最优值取 8.1 m。文献[5]计算值为净距 6.9 m, 与本文计算最优净距 6.1 m 接近。

出于对土拱三维现象的考虑, 该工程按安全系数 1.5 折减, 取桩间距为 6 m, 则小于本文计算的桩间中距下限 6.5 m, 桩间土体将非常稳定。桩间距也远小于校核最优值, 因此土拱在深度方向也是非常稳定的, 文献[5]描述的三维现象可得到解释。

相对而言, 基坑工程由于桩柱悬臂段上部的土

压力很小, 其实际采用的桩间距更靠近上限值。

6.3 实例 3

某高速公路因开挖而复活的松散古滑坡, 坡体由松散坡积层构成, 滑面平均埋深为 20 m, 坡长约 95 m, 宽度为 110 m, 滑面平直, 倾角约 50° 。坡脚设置 2 m×3 m 锚索抗滑桩, 桩长平均为 17 m, 桩间距为 7 m。坡中部设置每索预应力约 950 kN 的 3 索预应力锚锭板, 间距 6 m。工程施工完毕后, 滑坡推力使土体自桩间剪切挤出, 而抗滑桩稳固, 未发生位移和倾斜。工程失败原因是桩间距过大, 使桩间土拱承受推力过大, 造成土拱的强度破坏^[14]。

下面对桩间距进行校验, 土体重度近似取 $\gamma=20$ kN/m³。除去嵌固段约 3 m, 锚索桩悬臂长度平均为 14 m。

桩后土拱上的均布滑坡剩余水平推力(计及预应力锚锭板的抗滑作用):

$$q_0=[(95 \times 110 \times 20 \times \cos 50^\circ \times 20) \times (\sin 50^\circ - \cos 50^\circ \cdot \tan \phi) - 95 \times 110 \times c - 950 \times 3 \times 110 / 6] \times$$

$$\cos 50^\circ / (110 \times 14) = 837.3 - 720.9 \tan \phi - 4.36c$$

$$q = q_0 + \tan^2(45^\circ - \phi/2) \times 20 \times 14 =$$

$$837.3 - 720.9 \tan \phi - 4.36c + 280 \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

桩间净距上限代表最大允许值, 对岩土性质参数要求最低。 $l_{\max}=5$ m, $B'=2$ m, 据式 (17) 得等式:

$$cc\cos\phi/(1-\sin\phi)=523.3-450.6\tan\phi-2.73c+$$

$$175\tan^2(45^\circ-\phi/2)$$

若 $\phi=40^\circ$, 反算出至少 $c=38$ kPa, 土拱才能基本稳固。若 $\phi=35^\circ$, 则至少 $c=55$ kPa; $\phi=30^\circ$, 至少 $c=72$ kPa。而坡体土质为松散坡积层, 其 c, ϕ 值均不会很大, 显然在桩间距 7 m 时, 土拱会发生强度破坏。加之该工程的预应力锚锭板亦未发挥预计阻滑作用^[14], 更促使了土拱的失效。

7 结 语

本文以各文献广泛采用的均布荷载作用下抛物线土拱简化模型出发, 利用合理拱轴线与受压极限破裂方位等几何特性, 通过力学概念分析, 将土拱的平衡条件和强度条件综合, 统一化为以拱脚处拱圈轴向压应力 σ_0 表达的简洁形式, 明确了拱脚为最不利截面位置; 以常用且易得到的土工参数 c, ϕ , 根据拱圈轴向压应力对矢跨比的函数关系式 (12), 推出合理矢跨比式 (13), 由莫尔-库仑强度准则得到桩间距上下限的计算式 (17)、式 (18);

并根据推导式,进一步探索了考虑土拱效应三维现象的桩间距校核式(23)。最后进行工程实例验证,基本符合实际。

由于岩土工程的复杂性和简化模型的粗糙,本文的探索较为定性,但试图从思路清晰力学概念,以尽可能少的参数和简洁的表达式,对土拱效应的估算提供简便清晰的计算方法。

参考文献

- [1] 杨雪强,何世秀,庄心善. 土木工程中的成拱效应[J]. 湖北工学院学报, 1994, 9(1): 1—7.
YANG Xue-qiang, HE Shi-xiu, ZHUANG Xin-shan. On arch effect in civil engineering[J]. **Journal of Hubei Institute of Technology**, 1994, 9(1): 1—7.
- [2] 吴子树,张利民,胡定. 土拱的形成机理及存在条件的探讨[J]. 成都科技大学学报, 1995, (2): 15—19.
WU Zi-shu, ZHANG Li-min, HU Ding. Studies on the mechanism of arching action in loess[J]. **Journal of Chengdu University of Science and Technology**, 1995, (2): 15—19.
- [3] 王成华,陈永波,林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556—559.
WANG Cheng-hua, CHEN Yong-bo, LIN Li-xiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile[J]. **Journal of Mountain Science**, 2001, 19(6): 556—559.
- [4] 冯君,吕和林,王成华. 普氏理论在确定抗滑桩间距中的应用[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 79—81.
FENG Jun, LU He-lin, WANG Cheng-hua. Application of M. M. Promojyifakonov theory to solution of distance between anti-slide piles[J]. **China Railway Science**, 2003, 24(6): 79—81.
- [5] 叶晓明,孟凡涛,许年春. 土层水平卸荷拱的形成条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 745—748.
YE Xiao-ming, MENG Fan-tao, XU Nian-chun. Formation condition of horizontal unloading arch in soil layer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(5): 745—748.
- [6] 周德培,肖世国,夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132—135.
ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo, XIA Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 132—135.
- [7] 常保平. 抗滑桩的桩间土拱和临界间距问题探讨[A]. 滑坡文集(第十三集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1998, 73—78.
CHANG Bao-ping. A study on soil arch between stabilizing piles and critical span[A]. **Proceedings of landslides(Volume thirteen)**[C]. Beijing: China Railway Press, 1998, 73—78.
- [8] 张建勋,陈福全,简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 174—178, 184.
ZHANG Jian-xun, CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu. Numerical analysis of soil arching effects in passive piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 174—178, 184.
- [9] 朱碧堂,温国炫,刘一亮. 基坑开挖和支护中土层拱效应的理论分析[J]. 建筑技术, 2002, 33(2): 97—98.
ZHU Bi-tang, WEN Guo-xuan, LIU Yi-liang. Theoretical analysis on arching effect of soil in excavation and retaining works[J]. **Architecture Technology**, 2002, 33(2): 97—98.
- [10] 贾海莉,王成华,李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4): 398—402.
JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2003, 38(4): 398—402.
- [11] 贾海莉,王成华,李江洪. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 98—103.
JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Analysis of pile spacing between anti-sliding piles and pertaining piles in accordance with soil arching effect[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(1): 98—103.
- [12] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994, 164, 202.
- [13] 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向[A]. 滑坡文集(第十三集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1998, 60—64.
WANG Gong-xian. The developmental trend of anti-sliding retaining structures[A]. **Proceedings of landslides(Volume thirteen)**[C]. Beijing: China Railway Press, 1998, 60—64.
- [14] 骆银辉,何建华,胡斌. 松散滑坡治理中坡体结构与强度的重要性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 233—1 236.
LUO Yin-hui, HE Jian-hua, HU Bin. Significance of strength and structure of sliding body in treatment of landslides of soil and loose material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(7): 1 233—1 236.