

DOI: 10.11779/CJGE2015S2030

基于土拱效应的悬臂式抗滑桩桩间挡板土压力计算

刘力生^{1, 2}, 吴曙光^{1, 2*}

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 土拱效应在抗滑桩发挥其支护功能中起到重要作用, 通过对悬臂式抗滑桩桩后土拱的合理拱轴线的假定, 建立土体平衡方程计算了土拱的极限高度; 同时通过建立微分方程对挡板的土压力进行了计算; 并将计算结果与重庆市地方标准的公式及主动土压力公式进行比较, 得出的土压力的值的大小位于重庆市地方规范与主动土压力之间, 并与模型试验的结果相验证, 得到了比较吻合的结果。研究可为西南地区的抗滑桩桩间挡板的设计提供依据。

关键词: 土拱; 抗滑桩; 挡板; 土压力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0153-05

作者简介: 刘力生(1990-), 男, 重庆大足人, 硕士研究生, 主要从事边坡支挡结构研究。E-mail: 317892444@qq.com。

Calculation of earth pressure on baffle of cantilever anti-slide piles based on soil arching effects

LIU Li-sheng^{1, 2}, WU Shu-guang^{1, 2}

(1.Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The soil arching effect plays an important role in cantilever anti-slide piles. By assuming the reasonable arching axis behind the anti-slide piles, a soil equilibrium equation is established to get the maximum height of the soil arching. Then an differential equation is deduced to calculate the earth pressure on baffle of the cantilever anti-slide piles. The results are compared with those by the formula of local regulations in Chongqing and Coulomb's earth pressure. They are checked using the model tests and good agreement is achieved. The results may provide a basis for the design of baffle of cantilever anti-slide piles in Southwest China.

Key words: soil arching; anti-slide pile; baffle; earth pressure

0 引言

在中国西南地区, 悬臂式抗滑桩被广泛应用于边坡支护、地灾治理、地基加固等工程中。对于悬臂式抗滑桩而言, 其自身的强度、刚度远大于周围的岩土体, 土压力传递至距桩背侧一定范围时, 凭借桩结构自身的遮拦效应迫使该范围土颗粒间的楔紧效应不断增加, 在土颗粒楔紧效应增加的区域逐渐形成了一种类似于拱形且具有一定厚度和一定强度的土质传力结构, 并借此将绝大部分土压力传递至桩上。土拱效应是土体充分发挥自身强度, 调整内部应力分布的一种力学现象。土拱的存在改变了土体中原有的应力状态, 引起了应力重分布, 把作用于土拱上的土压力传递到抗滑桩上。自 Terzaghi 首次提出土拱效应, 并采用活动门试验对其作了初步验证之后, 工程技术人员已逐渐意识到土拱效应在岩土工程领域是广泛存在的^[1]。

由于桩间土拱效应的存在, 作用在挡土板上的土

压力相比采用经典理论计算出的数值要小很多。在对抗滑桩桩间挡板进行设计时, 如果仍然采用传统的挡墙理论进行计算, 将造成较大的浪费^[2]。在整个抗滑桩支护体系中, 桩间挡土板的造价占了总造价的较大部分, 因此从机理上推导桩间挡板的土压力公式具有较大的工程实际意义。

1 土拱的合理拱轴线

拱在给定的荷载下拱内部只产生轴力而没有弯矩和剪力, 满足这一条件的拱轴线称为该荷载作用下的合理拱轴线。针对桩间土拱的拱迹线的形状表达式, 已有许多学者研究过, 其中有代表性分别为: ①Handy

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(106112015CDJXY200006);

国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ22806-04)

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

等提出的悬链线形拱轴线^[3]; ②Shubhral 等提出的抛物线形拱轴线^[4]; ③Paik 等提出的圆弧形拱轴线^[5]。其方程与适用条件如表 1 所示。

表 1 合理拱轴线表

Table 1 Reasonable arching axes

拱轴线	方程	适用条件
悬链线形	$y = \frac{a}{2}(\text{e}^{\frac{x}{a}} + \text{e}^{-\frac{x}{a}}) + c$	荷载均匀作用于拱上, 常作为实腹拱桥的合理拱轴线 ^[6]
抛物线形	$y = ax^2 + c$	荷载均匀作用于拱上, 常作为空腹拱桥的合理拱轴线
圆弧形	$y = \sqrt{c - x^2}$	荷载均匀垂直于轴线作用于拱上

假定土拱模型如图 1 所示, 挡土板上的土压力均匀作用与桩间挡板上, 拱后土体视为均匀无限体, 土压力均匀作用于土拱上, 通过土拱传递至抗滑桩上, 同时假定相邻两桩即为土拱的拱脚, 拱脚保持稳定不产生移动。

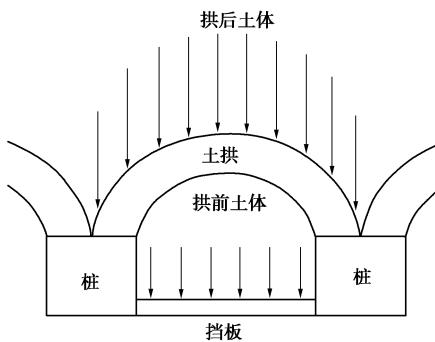


图 1 抗滑桩土拱模型

Fig. 1 Soil arching model for anti-slide piles

于是根据表 1, 将拱后土体视为无限体的情况下, 可以将土拱的合理拱轴线当做抛物线, 其方程为

$$y = ax^2 + c \quad (1)$$

因此可以建立计算模型如图 2 所示 (为方便计算, 将坐标原点定在土拱顶点)。

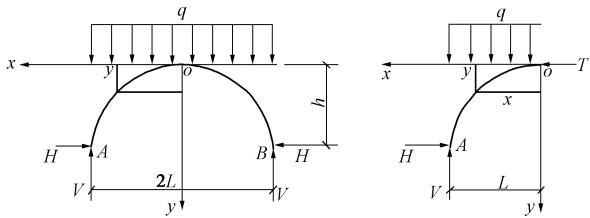


图 2 土拱计算模型

Fig. 2 Computational model for soil arching

根据结构力学知识, 合理拱轴线内土拱任意一点无弯矩, 因此对拱上任意一点取矩, 有

$$Ty - qx^2 / 2 = 0 \quad (2)$$

代入拱脚坐标 (L, h), 于是有拱轴线方程为:

$$y = hx^2 / 2 \quad (3)$$

合理拱轴线的任意截面只受与之垂直的压力作用, 方向与水平线的夹角为 θ , 则有关系:

$$\tan \theta = y' = dy/dx \quad (4)$$

又根据静力平衡条件, 有:

$$\left. \begin{aligned} T &= H = qL^2 / 2h \\ V &= qL \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由莫尔-库仑理论, 当桩后滑体处于极限平衡状态时, 土拱单元也处于极限平衡状态, 在均布推力 q 的作用下, 土拱拱脚处受力最大, 此时拱脚 A 点应力达到极限状态, 其大主应力 σ_1 沿着拱轴线在 A 点的切线方向, 与水平线夹角为 θ , 小主应力 σ_3 垂直拱轴在 A 点的切线。如前所述, 桩后土体将沿着与 σ_1 方向夹角 $45^\circ - \varphi/2$ 的截面破坏^[7-8], 于是有:

$$\tan \theta = \frac{2h}{L} = \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad , \quad (6)$$

故有:

$$h = L \tan(45^\circ - \varphi/2)/2 \quad . \quad (7)$$

2 挡板的土压力计算

在对挡板进行应力计算前, 作如下假定^[9-11]: ①假定坡顶水平, 均布荷载为 q_0 ; ②墙背垂直, 墙背与填土间的内摩擦角为 δ ; ③墙背后土体黏聚力 $c=0$; ④将挡板看做土体计算土压力。

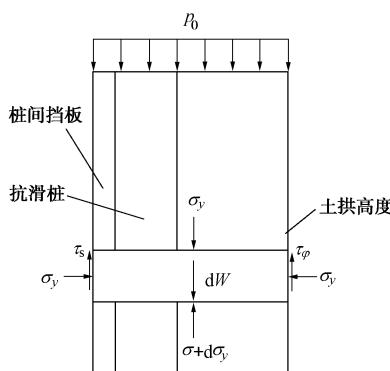


图 3 微元体计算简图

Fig. 3 Simplified sketch for calculation of soil element

取微元体进行分析 (计算简图见图 3), 有:

(1) 土体的自重 $dW = \gamma Adz$ 。

(2) 作用于微分体侧面的摩阻力 $T_\phi = 2L\tau_\phi dz = 2L\sigma_y \tan \varphi dz = 2L\lambda\sigma_z \tan \varphi dz$, 式中, 取 $\sigma_y = \lambda\sigma_z$, $\lambda = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$ 为侧压力系数; 于是有作用于土拱内的土体与挡板间的摩阻力为 $T_\delta = 2L\tau_\delta dz = 2L\sigma_y \tan \delta dz = 2L\lambda\sigma_z \tan \delta dz$ 。

(3) 作用于微分体顶部与底部的力顶部力 $A\sigma_z$,

底部力: $A(\sigma_z + d\sigma_z)$ 。式中, $A = \frac{2}{3} \cdot 2L \cdot h + b \cdot 2L =$

$\frac{2L^2 \tan(45^\circ - \varphi/2)}{3} + 2bL$ 为土拱与桩围成的面积, b 为桩的高度。

对微元体建立竖向平衡方程, 有:

$$T_\delta + T_\varphi + A(\sigma_z + d\sigma_z) = A\sigma_z + dW , \quad (8)$$

即

$$2L\lambda\sigma_z \tan\delta dz + 2L\lambda\sigma_z \tan\varphi dz + Ad\sigma_z = \gamma Adz ,$$

令 $B = \frac{2L\lambda(\tan\varphi + \tan\delta)}{A}$ 化简有

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + B\sigma_z = \gamma , \quad (9)$$

解此微分方程, 其通解为

$$\sigma_z = e^{-Bz} \left(\frac{\gamma}{B} e^{Bz} + C \right) , \quad (10)$$

式中, C 为常数。

代入边界条件 ($z=0, \sigma_z=q_0$), 有

$$C = q_0 - \frac{\lambda}{B} ,$$

于是有

$$\sigma_z = \frac{\gamma}{B} + \left(q_0 - \frac{\lambda}{B} \right) e^{-Bz} .$$

又由 $\sigma_y = \lambda\sigma_z$, 代入有

$$\sigma_y = \frac{\lambda\gamma}{B} + \lambda \left(q_0 - \frac{\lambda}{B} \right) e^{-Bz} . \quad (11)$$

然而, 对于桩间土体, 在 y 方向除了土体的应力 σ_y 以外, 还有抗滑桩对桩间土体的摩阻力, 其值大小为 $\tau = \mu\sigma_x = \mu\sigma_y$, 式中, μ 为桩侧与土体之间的静摩擦系数, 且有: $\mu = \tan\varphi$, φ 为桩侧与土体之间的摩擦角, 可取为土体的内摩擦角。

偏于安全的考虑, 仅考虑桩对土体的摩阻力, 不考虑桩后土拱对土体的摩阻力, 因此有土体最终作用于挡板上的合力为

$$\begin{aligned} \sigma'_y &= \frac{2L\sigma_y - 2b\mu\sigma_x}{2L} \\ &= \sigma_y \left(1 - \frac{\mu b}{L} \right) \\ &= \left[\frac{\lambda\gamma}{B} + \lambda \left(q_0 - \frac{\lambda}{B} \right) e^{-Bz} \right] \left(1 - \frac{\mu b}{L} \right) . \end{aligned} \quad (12)$$

观察式 (12), 可以发现其存在一条渐进线, 有:

$$\sigma'_{y0} = \frac{\lambda\gamma}{B} \left(1 - \frac{\mu b}{L} \right) . \quad (13)$$

即随着深度的不断增大, 土压力最终趋近于一个常数, 与文献[2]中实验得到的数据相符合。

3 推导的公式与规范采用的公式的对比

重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)对桩间挡板采用拟化筒仓法进行计算^[12], 计算简图见图 4, 公式为

$$q_x = \frac{A}{P} \cdot \frac{\gamma}{\tan\varphi} \left(1 - e^{-\frac{P}{A}kz} \right) , \quad (14)$$

式中, $A = l_0 \left(a + \frac{l_0}{4} \right)$, $k = k_a \cdot \tan\varphi$, $k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$, $P = 2a + 2.414l_0$, γ 为滑体土的重度; φ 为土的内摩擦角, z 为计算点至桩顶面深度。

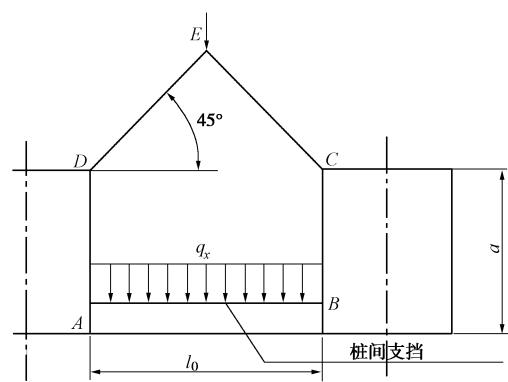


图 4 拟化筒仓法计算简图

Fig. 4 Simplified sketch for calculation of the silo method

为方便对公式进行比较, 每次仅改变一个外界条件, 计算出土压力, 并作图 5~8。

图 5~8 中其中计算模型参数取值如下: 土体重度 $\gamma = 20.8 \text{ kN/m}^3$, 方桩 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 外荷载 $q = 0 \text{ kN/m}^3$, 桩净间距为 4 m , 滑体土内摩擦角为 20° , 计算点高度为 20 m 。

在桩间距大于 $5 \sim 7$ 倍的桩宽时, 桩间无法形成有效土拱^[14], 此时桩间土体将直接作用于挡板, 此时应该直接以常用库仑土压力计算公式来计算挡板上的土压力。由图 5, 随着桩间距的增大, 本文推导的公式的得出的土压力值已经开始逼近由库仑土压力计算得到的值, 而由重庆市地方规范得到的土压力值却只有主动土压力值的一半左右, 由此可以证明本文公式的合理性。

由图 6, 7 发现, 本文的公式与规范采用的公式中, 桩截面的高度与计算点深度对土压力的影响并不大。

由图 8 可知, 土的内摩擦角大小才是影响挡板土压力大小的关键, 这是因为随着土体内摩擦角的减小, 土压力减小的同时, 土体与桩之间的摩擦力也在增大, 因此挡板土压力减小非常明显。随着土体内摩

擦角逐渐加大, 最后本文公式与规范公式的土压力几近重合。

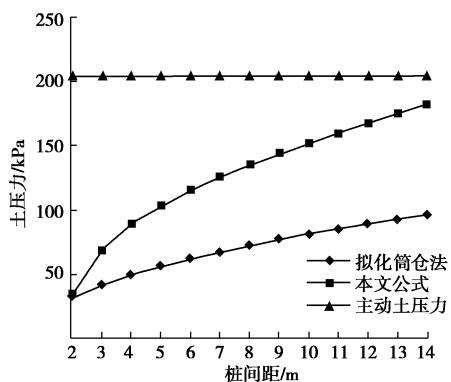


图 5 不同桩间距时的土压力大小

Fig. 5 Values of earth pressure under different pile spacings

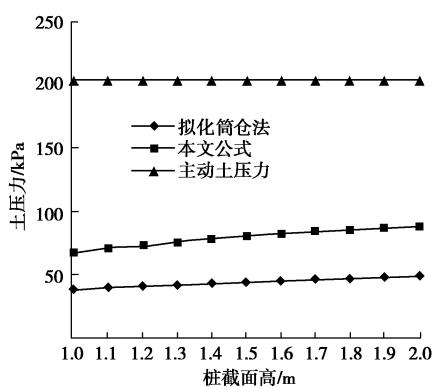


图 6 不同桩截面高度时的土压力大小

Fig. 6 Values of earth pressure under different heights of cross section of piles

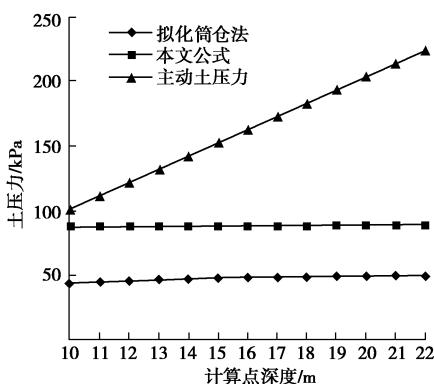


图 7 不同计算点深度时的土压力大小

Fig. 7 Values of earth pressure under different calculation depths

在桩锚支挡结构体系挡板土压力试验研究一文中^[2], 通过试验得到的结论有: 挡板最大土压力为相同高度朗金主动土压力的 1/3-1/2。采用本文的公式, 取相似比 10, 在土体重度 $\gamma = 14.2 \text{ kN/m}^3$, 桩高度 2 m, 外荷载 $q = 0 \text{ kN/m}^3$, 桩净间距为 8 m, 滑体土内摩擦

角为 42° , 计算点高度为 20 m, 得到的土压力大小为 22.0 kPa, 朗金土压力大小为 56.3 kPa, 比值为 39%, 与实验数据相吻合。

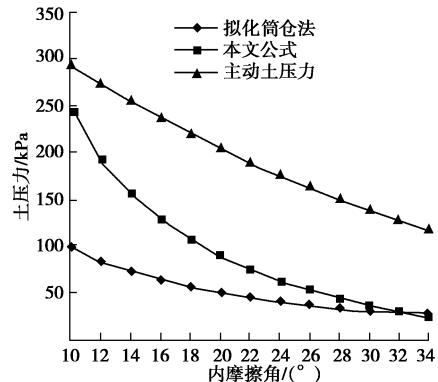


图 8 不同土的内摩擦角时的土压力大小

Fig. 8 Values of earth pressure under different internal friction angles of soil

4 结语及展望

本文从抗滑桩桩间土体的土拱效应出发, 通过对合理拱轴线的推导以及微元体受力分析, 得出抗滑桩桩间挡土板土压力的计算方法, 并与重庆市地方规范进行比较, 得出的结果与试验所得结果情况相近, 有较大的工程应用价值。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]// Proceedings of 1st Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Boston, 1936: 307 - 316.
- [2] 代军, 胡岱文, 吴曙光. 桩锚支挡结构体系挡板土压力试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(4): 48 - 54. (DAI Jun, HU Dai-wen, WU Shu-guang. Experimental study of soil stress on the holding sheet of pile-anchor holding-block structure system[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(4): 48 - 54.(in Chinese))
- [3] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302 - 318.
- [4] SHUBHRA G, PATRA N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode[J]. Int J Geomech, 2008(2): 123 - 133.
- [5] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 643 - 645.
- [6] 刘孝平, 周义武, 钟圣斌. 关于空腹式无铰拱桥的合理拱轴线问题[J]. 湖南大学学报, 1983, 10(4): 48 - 55. (LIU

- Xiao-ping, ZHOU Yi-wu, ZHONG Sheng-bin. On the rational curve for the axis of spandrel arches[J]. Journal of Hunan University, 1983, **10**(4): 48 - 55.(in Chinese)
- [7] 魏业清, 张林洪. 考虑土拱效应的桩板墙挡板设计[J]. 科学技术与工程, 2008, **8**(21): 5964 - 5967. (WEI Ye-qing, ZHANG Lin-hong. Design of sheet-pile wall breast boards on arching effect[J]. Science Technology and Engineering, 2008, **8**(21): 5964 - 5967. (in Chinese))
- [8] 王杰. 考虑土拱效应的挡墙土压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (WANG Jie. Study of earth pressure on retaining walls on the basis of soil arching effect[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [9] 叶晓明. 柱板结构挡土墙板上的土压力计算方法[J]. 地下空间, 1999, **19**(2): 142 - 146. (YE Xiao-ming. The calculation method of retaining wall plate in column-slab structure[J]. Junderground, 1999, **19**(2): 142 - 146. (in Chinese))
- [10] 杨明辉, 汪罗成, 赵明华. 考虑土拱效应的双排抗滑桩桩侧土压力计算[J]. 公路交通科技, 2011, **28**(10): 12 - 39. (YANG Ming-hui, WANG Luo-cheng, ZHAO Minghua. Calculation of soil pressure against double-row anti-slide piles considering soil arching effect[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, **28**(10): 12 - 39. (in Chinese))
- [11] 吴明, 彭建兵, 徐平, 等. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究[J]. 工程力学, 2011, **28**(11): 89 - 95. (WU Ming, PENG Jian-bing, XU Ping, et al. Study on earth pressure against rigid retaining walls considering soil arching effects[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(11): 89 - 95. (in Chinese))
- [12] DB50/5029—2004 地质灾害防治工程设计规范[S]. 2004. (DB50/5029—2004 Code for design of geological disaster prevention project[S]. 2004. (in Chinese))
- [13] 叶代成. 抗滑桩桩间土拱效应及合理桩间距的研究[J]. 土工基础, 2008, **22**(4): 75 - 79. (YE Dai-cheng. The research of the soil arching effective between anti-sliding piles and suitable pile spacing[J]. Soil Eng. and Foundation, 2008, **22**(4): 75 - 79. (in Chinese))
- [14] 张永兴, 董捷, 黄治云. 合理间距条件悬臂式抗滑桩三维土拱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 76 - 83. (ZHANG Yong-xing, DONG Jie, HUANG Zhi-yun. Experimental investigation on three-dimensional soil arching effect between adjacent cantilever anti-slide piles with rational spacing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 76 - 83. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)