

# 考虑三维土拱效应的桩间挡板土压力计算

刘杰<sup>1,2</sup>, 吴昭云<sup>1\*</sup>, 路利民<sup>1</sup>, 杨超<sup>2,3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室;  
3. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室)

**摘要:** 桩间挡板土压力计算是悬臂式抗滑桩工程中至关重要的问题。考虑桩后三维土拱效应, 假设土拱形状为抛物线, 根据土拱效应沿土体深度逐渐减弱的特点, 建立桩间挡板土压力计算模型。基于水平层分法, 得到挡板土压力的表达式, 并将理论分析结果与试验数据进行对比; 作用在挡板上的土压力沿土体深度的增加先增大后减小, 且土压力值约在  $0.67H$  ( $H$  为抗滑桩悬臂段高度) 位置处达到峰值, 与试验结果吻合良好。参数分析表明: 挡板土压力和桩间净距呈正相关关系, 和土体内摩擦角、挡板与土体间界面摩擦角呈负相关关系。

**关键词:** 桩间挡板; 土压力; 悬臂式抗滑桩; 三维土拱效应

悬臂式抗滑桩被广泛应用在边坡工程中, 为防止桩后填土在外荷载和自重应力作用下发生滑塌或绕流, 通常在桩间设置挡板。在整个桩—板—支挡结构中, 抗滑桩桩间挡板面积巨大且占据相当一部分工程量, 为避免资源浪费, 降低工程造价, 合理计算挡板土压力对于悬臂式抗滑桩工程至关重要。

在一定桩间距条件下, 桩后填土存在土拱效应。土拱效应是由于抗滑桩的横向位移小于桩后填土的横向位移, 致使桩后局部范围内的土体产生不均匀位移, 引起土颗粒间的相互“楔紧”作用, 从而形成土拱。

国内外学者通常基于土拱效应理论, 计算挡板土压力。例如, 叶晓明依据卸荷拱法, 假定桩后土拱效应沿土体深度不发生改变, 推导了挡板土压力表达式。刘力生等假定土拱形状为抛物线, 依据静力平衡条件得到了土拱的极限拱高, 并通过微分方程计算了挡板土压力; 张四平等基于水平层分法, 计算了地震作用下挡板土压力; 梁瑶等通过物理模型试验研究, 证明了由于桩后土拱的存在, 作用在挡土构件上的土压力会大大减小; 董捷等、黄治云等在人工开挖的边坡上进行试验研究, 通过监测布置在挡板上土压力计的数据, 得到了挡板土压力的分布规律。

在计算挡板土压力时, 目前研究通常假设土拱效

应不随土体深度发生改变。然而也有一些学者认为, 桩后土拱效应沿土体深度方向是发生变化的, 若忽略此变化, 则会导致挡板土压力计算结果偏于保守。

该文对抗滑桩桩后设置挡板的工况进行研究, 充分考虑三维土拱效应, 即考虑土拱沿土体深度逐渐减弱的趋势, 结合水平层分法, 提出一种桩间挡板土压力计算新方法。最后将该文算法、叶晓明算法和董捷原位试验结果进行对比, 验证新方法的合理性。

## 1 计算模型

梁瑶等进行物理模型试验研究, 证实了桩后存在土拱效应。桩间土失稳时, 拱前土体发生滑塌(图1)。

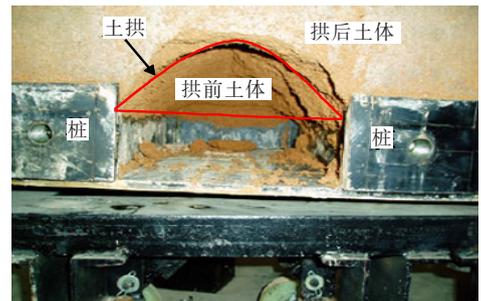


图1 拱前土体滑塌试验

收稿日期: 2019-04-10(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号:41602301); 河北省博士后科研项目择优资助(编号:B2017003015); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(编号:1721205053)

作者简介: 刘杰, 男, 博士(后), E-mail: jieluocqu@cqu.edu.cn

\* 通信作者: 吴昭云, 女, 硕士研究生, E-mail: 979543872@qq.com

在抗滑桩桩后设置挡板,拱后土体压力通过土拱传递至桩身;而拱前土体压力完全由挡板承担。现有研究成果表明:拱前土体存在两个空间几何特征:①土拱形状为抛物线;②土拱效应沿土体深度逐渐减小。该文以拱前土体为受力分析对象,考虑其空间几何特征,对挡板土压力沿深度的变化规律进行研究,建立悬臂式抗滑桩桩间挡板土压力计算模型(图 2)。

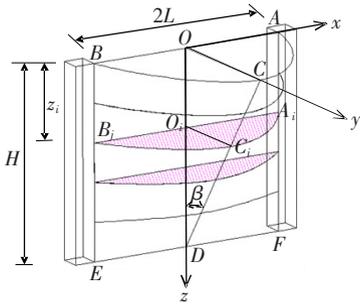


图 2 悬臂式抗滑桩桩间挡板土压力计算模型

如图 2 所示,桩后三维土拱由一系列关于  $yOz$  平面对称的抛物线(例如抛物线  $ACB$ 、抛物线  $A_iC_iB_i$ ,且同一抛物线上各点的  $z$  轴坐标一致)进行描述;拱前土体由一系列抛物线与挡板围成的区域表示,即空间几何体  $EDFABC$ 。

为表述方便,将一系列抛物线构成的空间曲面定义为潜在塌落面,即图 2 所示的曲面  $EDFABC$ ;将所有抛物线顶点的连线定义为塌落面中心线,简称中心线,即图 2 中直线  $CD$ 。中心线  $CD$  与竖直方向的夹角为  $\beta$ ,抗滑桩桩间净距为  $2L$ ,桩的悬臂段高度为  $H$ ,如图 2 所示。

图 3 为深度  $z_i$  处的抛物线  $A_iC_iB_i$ ,其方程式为:

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

式中: $a$ 、 $b$  为抛物线  $A_iC_iB_i$  方程式的待定系数。

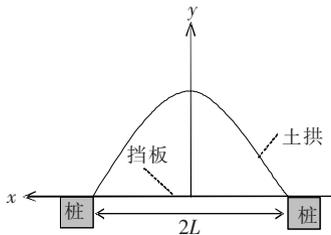


图 3 深度  $z_i$  处的抛物线土拱

如图 2 所示, $OD = H$ ,  $\angle ODC = \beta$ ,  $O_iD = H - z_i$ ,三角形  $O_iC_iD$  为直角三角形,则:

$$O_iC_i = O_iD \tan \beta = (H - z_i) \tan \beta \quad (2)$$

由式(2)可知:在  $z = z_i$  平面内, $C_i$  点的坐标为  $[0,$

$(H - z_i) \tan \beta]$ ;又因  $A_iB_i = 2L$ ,可知  $A_i$ 、 $B_i$  两点的坐标分别为  $(-L, 0)$  和  $(L, 0)$ 。将  $A_i$ 、 $B_i$  和  $C_i$  点坐标代入式(1),可得到抛物线  $A_iC_iB_i$  的表达式:

$$y(x) = (H - z_i) \left( 1 - \frac{x^2}{L^2} \right) \tan \beta = - \frac{(H - z_i) \tan \beta}{L^2} x^2 + (H - z_i) \tan \beta \quad (3)$$

由式(3)可求得抛物线  $A_iC_iB_i$  与挡板围成的面积  $A$  为:

$$A = \int_{-L}^L y(x) dx = \frac{4L(H - z_i) \tan \beta}{3} \quad (4)$$

抛物线  $A_iC_iB_i$  的弧长  $S$  为:

$$S = \int_{-L}^L \sqrt{1 + (y')^2} dx = \int_{-L}^L \sqrt{1 + \left[ -\frac{2(H - z_i) \tan \beta}{L^2} x \right]^2} dx = \sqrt{Q^2 + L^2} + \frac{L^2}{Q} \ln \left( \frac{Q + \sqrt{Q^2 + L^2}}{L} \right) \quad (5)$$

式中: $Q = 2(H - z_i) \tan \beta$

## 2 挡板土压力计算

在计算挡板土压力时,做如下假定:①抗滑桩桩后填土水平,且满足 Mohr-Coulomb 准则;②同一水平高处,挡板上的土压力值相同;③填土为砂土,即土体黏聚力  $c = 0$ ;④挡板与填土界面摩擦角为  $\delta$ 。

采用水平层分法分析作用在挡板上的土压力。拱前土体被  $z = z_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots; 0 \leq z_i \leq H$ ) 平面划分为一系列厚度为  $dz$  的抛物线薄片,则图 2 所示的挡板土压力计算模型便可转化为如图 4 所示的抛物线形薄片模型。取深度  $z_i$  处的抛物线薄片(如图 4 中浅色区域)进行受力分析,受力状态示意图如图 5 所示。

深度  $z_i$  处的抛物线薄片竖直方向力的平衡方程为:

$$2L\tau_\delta dz + S\tau_\varphi dz + A(\sigma_z + d\sigma_z) = dW + A\sigma_z \quad (6)$$

式中: $dW$  为抛物线薄片的重力; $\sigma_z$ 、 $\sigma_z + d\sigma_z$  分别为作用在抛物线薄片顶部和底部的力; $\tau_\delta$  为挡板与土体间的摩擦力; $\tau_\varphi$  为作用在抛物线土拱的摩阻力; $A$  为抛物线与挡板围成的面积; $S$  为抛物线的弧长。

设填土的侧压力系数为  $K$ ,则挡板上土压力  $\sigma_y$  为:

$$\sigma_y = K\sigma_z \quad (7)$$

又因:

$$dW = \gamma A dz \quad (8)$$

$$\tau_\delta = \sigma_y \tan \delta \quad (9)$$

$$\tau_\varphi = \sigma_\varphi \tan\varphi = \sigma_y \tan\varphi \quad (10)$$

式中: $\sigma_\varphi$ 为作用在抛物线土拱的水平应力,方向为 $y$ 轴负方向,如图5所示。

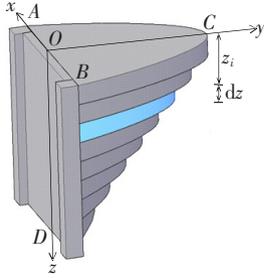


图4 桩间挡板土压力抛物线薄片模型

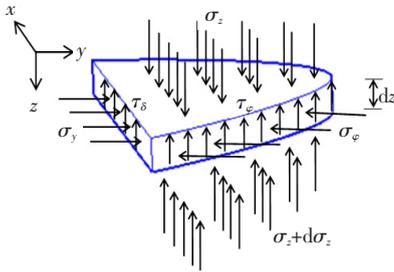


图5 深度 $z_i$ 处抛物线薄片的受力分析

联立式(4)~(10),并化简,可得:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{K(2L \tan\delta + S \tan\varphi)}{A} \sigma_z = \gamma \quad (11)$$

$$\text{令: } m = \frac{K(2L \tan\delta + S \tan\varphi)}{A}$$

则式(11)转化为:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + m\sigma_z = \gamma \quad (12)$$

式(12)的通解为:

$$\sigma_z = \frac{\gamma}{m} + C_0 e^{-mz} \quad (13)$$

由边界条件, $z=0, \sigma_z=0$ 可知:

$$C_0 = -\frac{\gamma}{m} \quad (14)$$

联立式(13)、(14),可得:

$$\sigma_z = \frac{\gamma}{m} (1 - e^{-mz}) \quad (15)$$

将式(15)代入式(7),可求得:

$$\sigma_y = K\sigma_z = K \frac{\gamma}{m} (1 - e^{-mz}) \quad (16)$$

侧向压力系数 $K$ 由和挡板接触土体的应力状态确定。由Mohr-Coulomb准则可知:当黏聚力 $c=0$

时,强度包络线为一条过原点的直线,则:

$$\frac{\sqrt{\tau_\delta^2 + \frac{(\sigma_z - \sigma_y)^2}{2}}}{\frac{\sigma_z + \sigma_y}{2}} = \sin\varphi \quad (17)$$

将式(7)、(9)代入式(17),可得:

$$K^2(4 \tan^2\delta + \cos^2\varphi) - 2K(1 + \sin^2\varphi) + \cos^2\varphi = 0 \quad (18)$$

式(18)为关于 $K$ 的一元二次方程,有两个实数解:

$$K = \frac{1 + \sin^2\varphi \pm 2\sqrt{\sin^2\varphi - \tan^2\delta \cos^2\varphi}}{4 \tan^2\delta + \cos^2\varphi} \quad (19)$$

式中: $\varphi$ 为土体内摩擦角; $\delta$ 为挡板与填土界面的摩擦角。

又因 $K < 1$ ,则:

$$K = \frac{1 + \sin^2\varphi - 2\sqrt{\sin^2\varphi - \tan^2\delta \cos^2\varphi}}{4 \tan^2\delta + \cos^2\varphi} \quad (20)$$

### 3 参数分析

#### 3.1 挡板土压力 $\sigma_y$ 沿深度 $z$ 的分布规律

董捷等通过原位试验,得到了挡板上土压力沿深度的变化规律。将该文算法、董捷试验结果、叶晓明算法三者得到的挡板土压力进行对比,如图6所示。

董捷等试验参数为: $2L=0.7\text{ m}; \varphi=28^\circ; \delta=10^\circ; \gamma=16\text{ kN/m}^3$ 。

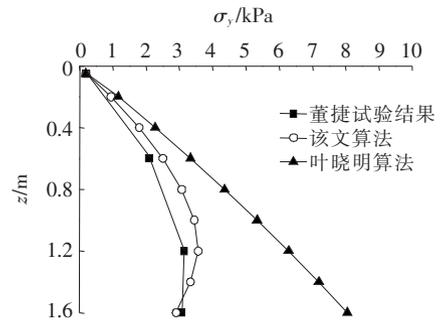


图6  $\sigma_y - z$ 关系图

由图6可知:该文算法得到的挡板土压力 $\sigma_y$ 与试验结果较吻合; $\sigma_y$ 随着 $z$ 的增大先增加后减小, $\sigma_y$ 值在 $z=1.3\text{ m}$ 处(约 $0.67H$ 位置处, $H$ 为抗滑桩悬臂段高度)达到最大值;而叶晓明算法得到的挡板土压力 $\sigma_y$ 随着土体深度 $z$ 的增大而增大,与试验结果差距较大。

### 3.2 桩间净距 $2L$ 对挡板土压力 $\sigma_y$ 的影响

取以下参数进行分析:  $z=5\text{ m}$ ;  $H=8\text{ m}$ ;  $\varphi=30^\circ$ ;  $\delta=10^\circ$ ;  $\gamma=16\text{ kN/m}^3$ 。得到  $\sigma_y$  与  $2L$  的关系如图 7 所示。

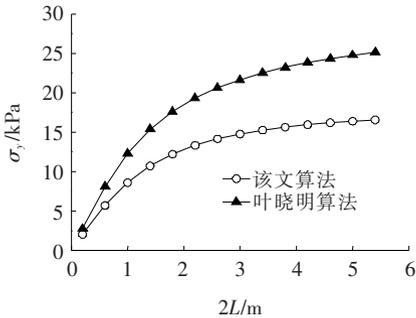


图 7  $\sigma_y-2L$  关系图

由图 7 可知:该算法和叶晓明算法得到的挡板土压力  $\sigma_y$  值均随着桩间净距  $2L$  的增大而增大,且都逐渐趋于一个稳定值。

### 3.3 填土内摩擦角 $\varphi$ 对挡板土压力 $\sigma_y$ 的影响

取以下参数进行分析:  $z=5\text{ m}$ ;  $H=8\text{ m}$ ;  $2L=6\text{ m}$ ;  $\delta=10^\circ$ ;  $\gamma=16\text{ kN/m}^3$ 。得到  $\sigma_y$  与  $\varphi$  的关系如图 8 所示。

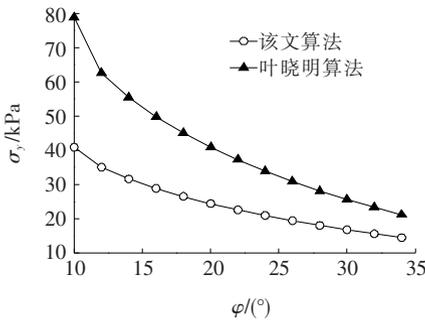


图 8  $\sigma_y-\varphi$  关系图

由图 8 可知:该算法和叶晓明算法得到的挡板土压力  $\sigma_y$  值均随着土体内摩擦角  $\varphi$  的增大而减小,且减小趋势都逐渐变缓。该算法得到的  $\sigma_y$  值小于叶晓明算法得到的  $\sigma_y$  值。

### 3.4 挡板与填土界面摩擦角 $\delta$ 对挡板土压力 $\sigma_y$ 的影响

取以下参数进行分析:  $z=5\text{ m}$ ;  $H=8\text{ m}$ ;  $2L=6\text{ m}$ ;  $\varphi=10^\circ$ ;  $\gamma=16\text{ kN/m}^3$ , 得到  $\sigma_y$  与  $\delta$  的关系见图 9。

由图 9 可知:随着挡板与填土界面摩擦角  $\delta$  的增大,该算法和叶晓明算法得到的挡板土压力  $\sigma_y$  值均略有减小,说明  $\delta$  的变化对挡板土压力  $\sigma_y$  的影响不大。

由图 6~9 可知:该算法得到的挡板土压力  $\sigma_y$

值小于叶晓明算法得到的  $\sigma_y$  值。这是由于叶晓明算法忽略了桩后土拱效应沿深度逐渐减小的规律,导致得到的  $\sigma_y$  值与实测数值存在一定偏差。

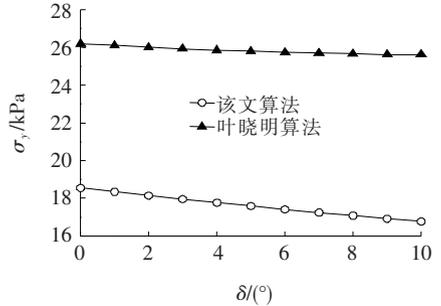


图 9  $\sigma_y-\delta$  关系图

## 4 结论

(1) 通过考虑抗滑桩桩后三维土拱效应,建立了桩间挡板土压力计算模型,得到挡板土压力表达式。并将理论结果与试验结果进行对比分析,验证了该方法的合理性。

(2) 对比了该算法与叶晓明算法分析结果,结果表明:相同参数条件下,该算法得到的挡板土压力值小于叶晓明算法得到的挡板土压力值。其原因在于:该文在建立挡板土压力计算模型时,考虑的是桩后三维土拱效应,与实际工程更接近。

(3) 抗滑桩桩间净距、土体内摩擦角的变化对挡板土压力有较大的影响,而挡板与填土界面摩擦角的变化对土压力值的影响较小。

### 参考文献:

- [1] LAI H J, ZHENG J J, ZHANG J, et al. DEM Analysis of "Soil"—Arching within Geogrid—Reinforced and Unreinforced Pile—Supported Embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 13—23.
- [2] RUI R, VAN TOL F, XIA X L, et al. Evolution of Soil Arching; 2D DEM Simulations[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 73: 199—209.
- [3] 金林, 胡新丽, 谭福林, 等. 基于红外热成像技术的抗滑桩土拱效应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016(8).
- [4] 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(4).
- [5] 叶晓明. 柱板结构挡土墙上的土压力计算方法[J]. 地下空间, 1999(2).
- [6] 刘力生, 吴曙光. 基于土拱效应的悬臂式抗滑桩桩间挡板土压力计算[J]. 岩土工程学报, 2015(增刊 2).

# 不同结构类型的全透水沥青路面长期性能分析

封雅宏<sup>1</sup>, 袁博<sup>1</sup>, 许斌<sup>2,3\*</sup>, 白子玉<sup>2,3</sup>, 石鑫<sup>4</sup>

(1. 石家庄市交建高速公路建设管理有限公司, 河北 石家庄 050000; 2. 公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心; 3. 中路高科(北京)公路技术有限公司; 4. 河北交通职业技术学院)

**摘要:**为了分析不同结构类型的全透水沥青路面的长期性能, 该文结合石家庄市市政道路中全透水沥青路面的应用实例, 分析了两种不同类型的全透水沥青路面结构及其混合料配合比进行设计。通过在路面结构中埋设传感器对其进行长期实时监测与数据采集, 得到路面各结构层的温度与湿度数据; 通过对路面相同位置进行渗水试验, 得到不同年份路面的渗水系数。对所采集的数据进行分析, 发现结构 2 相比结构 1, 面层最高温度可降低 3~5 ℃, 最低温度可提高约 3 ℃, 说明其受外界气温影响较小; 降雨后, 两种路面各层位湿度均有明显提高, 但在几天后便能下降到原先的水平, 说明两种结构均能有效排出降雨带来的积水; 结构 2 的底基层与基层的湿度相比结构 1 分别降低了约 47% 和 22%, 说明结构 2 的基层渗水、排水性能优于结构 1; 使用两年后, 两种结构的渗水性能虽略有下降, 但仍远大于技术规范的要求, 满足长期使用的需要。

**关键词:** 全透水路面; 渗水性能; 性能监测; 温度; 湿度

## 1 研究现状

德国于 20 世纪 50 年代首次铺筑透水路面以解决林荫道上树木灌溉问题。20 世纪 60 年代起德国开始铺筑大孔隙透水沥青路面, 并观测其实用性, 最终形成“透水性沥青混合料施工技术指南”。70 年代, 一些欧洲国家在部分轻交通道路上开始使用透水路面。

20 世纪 60 年代, 美国的 The Franklin Institute

Research Laboratories 开始研究透水性路面, 并首先将其应用于停车场。从 70 年代起, 美国开始在各大城市陆续修筑透水路面。2000 年, 美国国家沥青路面技术中心(NCAT)提出了一套透水路面配合比设计方法。在欧洲, 荷兰与丹麦对双层透水性沥青路面进行了一系列研究, 研究出一套双层透水路面结构, 这种结构在保持透水性能良好的同时, 还起到改善路面孔隙堵塞的作用。日本于 20 世纪 80 年代开始推行“雨水渗透计划”。日本的透水路面主要应用于公园、广

\*\*\*\*\*

[7] 张四平, 黄亚飞, 吴曙光, 等. 地震作用下考虑土拱效应的桩间挡板土压力计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018(4).

[8] 梁瑶, 蒋楚生, 李庆海, 等. 桩间复合结构土拱效应试验与受力机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(增刊 2).

[9] 董捷, 张永兴, 黄治云. 柔性板桩板墙加固斜坡填方地基的土压力分配问题研究[J]. 岩土力学, 2010(8).

[10] 黄治云, 张永兴, 董捷. 桩板墙土拱效应及土压力传递特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013(7).

[11] 赵晓彦, 吴兵, 李登峰, 等. 考虑桩间水平土拱效应的边坡桩间墙组合结构受力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2016(5).

[12] 李长冬. 抗滑桩与滑坡体相互作用机理及其优化研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2009.

[13] 杨雪强, 吉小明, 张新涛. 抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J]. 中国公路学报, 2014(1).

[14] CHEN T, GUO K X, YANG M, et al. Calculation Method of Anti-Slide Piles Spacing Considering the Soil Arching Effect[C]. Mechanics and Architectural Design: Proceedings of 2016 International Conference, 2017: 461-466.

收稿日期: 2020-06-28(修改稿)

基金项目: 河北省交通运输厅科技项目(编号: XF2018-10)

作者简介: 封雅宏, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: fyh6723@126.com

\* 通信作者: 许斌, 男, 博士, 副研究员. E-mail: xubin819@126.com