

# 悬臂桩桩间有效卸荷区研究

董捷<sup>1</sup>, 张永兴<sup>1</sup>, 赵彦旭<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 中铁二十一局集团有限公司, 兰州 730000)

**摘要:**根据悬臂桩的传力特征,研究了其桩间土拱效应的形成机理。按其在空间坐标系的位置,将桩间土拱分为水平拱、竖向拱及临空面拱,指出水平拱效应对卸荷区分布规律起主控作用,继而定义了有效卸荷区范围。从分析桩间土拱效应破坏模式入手,结合岩土强度理论及土拱静力平衡原理,建立了考虑桩间土自重应力及滑坡推力的卸荷区计算模型。基于该模型对滑体强度与临界高度及卸荷区矢高的关系作了一定研究,探讨了几种典型桩背土压力分布模式对卸荷区分布范围的影响。最后采用一工程实例对该模型进行验证。

**关键词:**悬臂桩;临界高度;卸荷区;破坏模式;土压力

**中图分类号:**TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0027-06

## Effective Unloading Area between Cantilever Piles

DONG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Yong-xing<sup>1</sup>, ZHAO Yan-xu<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. China Railway No. 21 Engineering Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, P. R. China)

**Abstract:** The formation mechanism of the arching effect between cantilever piles is studied according to their stress characteristics. The soil arch is classified into three types based on its position in a space coordinate system, namely, a horizontal arch, a vertical arch and a free-face arch. The master factor for distribution of unloading area between piles is the horizontal arch effect. The range of effective unloading area is defined. Based on the failure pattern of soil arches and the relationship between soil strength theory and the static equilibrium principle of soil arches, a calculation model is established by considering the presence of geostatic stress and sliding thrust force. The relation between soil strength and critical height is studied by variation of cohesion and friction angle. In addition, the impact of canonical distributions of the earth pressure to the vector height of unloading area is also discussed. Finally, the calculation model is verified by an example from real engineering work.

**Key words:** cantilever pile; critical height; unloading area; failure pattern; earth pressure

在我国西南山区,悬臂桩作为一种实用的基坑、路堑边坡支挡结构而得到广泛应用。其工作机理是凭借桩间的土拱效应将土压力或滑坡推力传递到相对静止的桩体,并通过桩身将荷载传递到稳定地层内。“土拱效应”最初由 Terzaghi 提出,并采用活动

门试验对其进行验证<sup>[1]</sup>。随后,土拱理论在岩土工程界得到了越来越广泛地应用,因受到岩土性质复杂、支护结构多样性等因素制约,使得该领域仍存在一些值得探讨的问题<sup>[2]</sup>。目前悬臂桩一个急待解决的问题是桩前土的开挖造成桩间土体出现一定范围

收稿日期:2008-07-08

基金项目:国家自然科学基金“悬臂式抗滑桩三维土拱效应研究”(50878218);三峡办移民安置规划司三峡库区三期;地质灾害防治高切坡防护工程科研项目第二课题专题二“高切坡抗滑支挡结构研究”(2008SXG02-2)

作者简介:董捷(1980-),男,重庆大学博士研究生,主要从事支挡结构设计理论、岩土工程减灾等方面的研究。  
张永兴(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)cqyxzhang@163.com。

的卸荷区,卸荷区内土体稳定受卸荷拱自身的强度及影响范围控制,确定卸荷拱的形状有助于准确地计算桩间挡土板上的土压力。叶晓明等运用普氏理论建立了拱型的二次抛物线方程,推导了中间板土压力的计算式<sup>[3-4]</sup>,并与 Rankin 理论计算结果进行了对比。一些学者将拱型假定为合理拱轴线,结合 Mohr-Coulomb 强度理论建立了桩间土拱的平面力学模型,并研究了合理桩间距的取值<sup>[5-7]</sup>。据晓冬等运用数值方法建立了埋入式被动桩的二维模型<sup>[8-10]</sup>,李忠诚、陈福全等建立了埋入式被动桩的三维数值分析模型<sup>[11-12]</sup>,从不同程度上探讨了埋入式桩拱效应的分布范围及拱效应的影响因素。吴汉辉、杨明等对被动桩做了模型试验研究<sup>[13-14]</sup>,并阐述了各自的观点。

上述研究拓宽了拱效应的应用范围,进一步加深了对桩间拱效应的认识。但实际工程中横向受荷桩多以悬臂式存在,且由于悬臂高度较大,若将其假定为平面模型且忽略桩间土的自重,与实际情况不符,同时数值方法应用于实际工程,还有待推广。鉴于此,论文在考虑桩间土自重应力及推力荷载的基础上,建立了悬臂桩桩间有效卸荷区的三维力学模型,并对其空间分布规律及相关因素敏感性作了进一步地探讨。

## 1 桩间传力机制及卸荷区的形成

对于悬臂桩,其设计理论从早期的静力平衡法、Blum 法发展到目前常用的弹性地基梁法<sup>[15]</sup>,随着计算技术的不断改进,其内力计算方法也日趋成熟。同时,以悬臂桩为主体的复合支挡结构类型也逐渐丰富起来。为防止桩间土体发生过大变形,甚至绕流、垮塌现象,常在桩间加设挡土板或桩间墙,共同支挡坡体土。这也对悬臂式桩支挡体系的设计提出了更高的要求,即不仅仅要保证桩体本身不破坏,桩顶变形应控制在允许值内,同时也要求桩间板、墙的设计须合理。

目前,桩间板、墙设计荷载的确定多凭借经验,现有理论也相对匮乏,相关研究亦不多见<sup>[4,16]</sup>。因挡板面积较大,单凭构造处理等方法确定截面尺寸和配筋,势必造成较大的浪费或使结构产生不必要的破裂。桩间支挡结构设计是否合理,关键在于估算桩间土体传递的荷载是否可靠,其首要任务即确定桩间有效卸荷区的范围。悬臂桩因其桩前无剩余抗滑力,在桩间土不发生绕流的前提下,滑坡推力最终将传递给桩身,桩间挡板受力可分为下述两种情况:(1)当桩的平面布置满足合理桩间距要求时,拱

圈及后侧范围内的土体受到高度挤压,并将滑坡推力传递到拱脚,同时拱圈内侧土体由于受到桩前开挖的卸荷作用,而发生一定的侧移,挡板主要承受来自拱圈内临空一侧少量桩间土的压力;(2)若桩设计桩间距大于合理桩间距,桩间板还需承受一定的绕流阻力,并将其传递到两侧桩身。工程中为了减小挡板的设计荷载,常常将桩间距控制在最大桩间距的范围内,同时待开挖桩前土一定时间后,再施工挡板或桩间墙,以避免挡板过厚及钢筋用量增加。据此,该文主要研究第一种情况,即桩间距满足合理桩间距的要求,挡板主要承受来自拱圈内侧土体的水平抗力。桩间土拱具空间效应,可以大体分为水平拱、竖向拱和临空面拱 3 类,如图 1 所示。

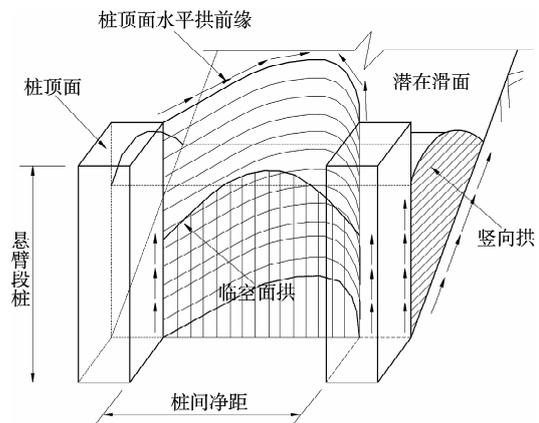


图 1 桩间拱效应示意图

水平拱是依靠相对静止的桩体作为拱脚,将桩间范围内的滑坡推力荷载转化至拱脚处轴力,其效应直接影响桩的侧移量;竖向拱主要因开挖卸荷,桩间土产生应力重分布而形成,拱脚一端位于支挡结构背侧,另一端位于相对不动的破裂面上,其效应主要影响被动桩后侧坡面的沉降,同时对支护结构背侧产生向下的摩擦力;临空面拱主要是因桩前土的开挖,临空面附近土体在自重应力作用下有向临空面下方滑动的趋势,而位于桩身附近的土体由于受到来自被动桩向上摩阻力的作用,处于相对静止状态,起到等效拱脚的作用,抑制临空面附近土体的下滑趋势。工程实际表明,桩间土主要表现为水平卸荷变形,水平拱效应是影响挡板设计荷载的主导因素,当土体强度不满足要求或悬臂高度过高,桩间滑体易发生滑塌现象。所以分析桩间卸荷区的大小,须先确定水平土拱的有效作用高度以及该范围内各水平截面上的矢高。

## 2 桩间卸荷区计算方法

### 2.1 模型的建立

目前,桩间土拱效应的力学模型研究多采用平面应变假定<sup>[5-7]</sup>,并结合 Mohr-Coulomb 准则<sup>[5-7]</sup>,认为主应力空间破坏面是与  $\sigma_2$  作用方向平行,即忽略桩间滑体自重应力的影响,不考虑  $\sigma_2$  对土拱屈服破坏的影响。为了充分考虑自重应力对桩间滑体稳定性及土拱卸荷区的影响,对模型作如下假设:

1)因桩间土拱多属水平拱,可假定桩后土压力或滑坡推力沿桩间跨度方向均匀分布,将极限状态时临空面附近不受桩间水平拱效应约束的区域视为桩间有效卸荷区;

2)将桩间净距视为土拱前缘对应的拱跨,临空面一侧拱圈内土体提供抗滑力较小,土拱临界破坏时可忽略,即土拱前缘任一点  $\sigma_3$  为零;

3)极限状态时悬臂段任意高度水平面上的拱圈满足合理拱轴线的假设,即任意垂直拱轴线的截面剪力可视为零,水平面上拱轴线的切线方向仅受均匀分布的轴向应力  $\sigma$  作用;

4)考虑中间主应力  $\sigma_2$  的影响,其值取决于桩间土的自重应力  $\sigma_z$  与轴向应力  $\sigma$  的大小关系;在计算桩间滑体应力状态时采用 Drucker-Prager 破坏条件;

5)为研究桩间卸荷区的大小,假定被动桩相对静止,截面暂按矩形考虑。

依据以上假设,建立分析简图,如图 2 所示。

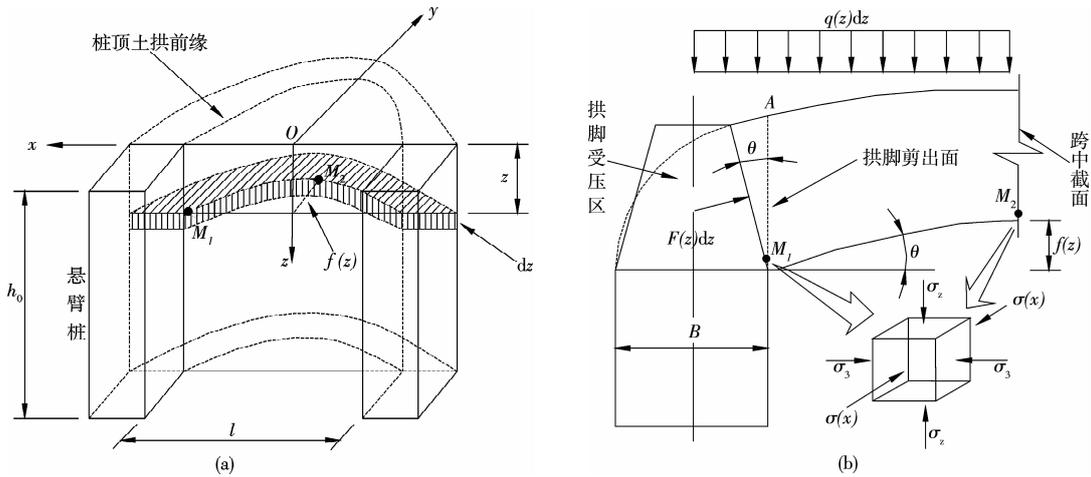


图 2 悬臂桩三维计算模型

### 2.2 拱脚及跨中的内力分析

根据上述假定,取  $yo z$  面为桩间卸荷区对称轴面,悬臂段任一水平面距桩顶的距离为  $z$ ,设其厚度为  $dz$ ,土拱上作用单位面积的土压力为  $q(z)$  (kPa),拱脚处单位高度作用的轴力为  $F(z)$  (kN/m),桩间净距为  $l$ ,矢高  $f$  为  $z$  的函数。文献[14]研究发现,土拱效应随桩宽呈现非线性变化规律,据此,可假定拱圈厚度沿跨度方向呈不均匀分布,拱脚处厚度相对跨中截面略大,设拱脚处拱圈厚度为  $t$ ,跨中厚度为  $t'$ ,拱脚处拱轴线的切线与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ 。根据合理拱轴线方程建立桩间土拱前缘的几何方程,可得到:

$$y = \frac{4f}{l^2} \left( \frac{l}{2} + x \right) \left( \frac{l}{2} - x \right) \quad (1)$$

$$\tan \theta = y' \Big|_{x=-\frac{l}{2}} = -\frac{8f}{l^2} x \Big|_{x=-\frac{l}{2}} = \frac{4f}{l} \quad (2)$$

任意悬臂高度上,单位高度上拱圈拱脚及跨中的轴力可分别表示为:

$$F(z) \Big|_{x=\pm \frac{l}{2}} = \frac{q(z)l \sqrt{1 + \frac{l^2}{(4f)^2}}}{2} = t\sigma \Big|_{x=\pm \frac{l}{2}} \quad (3)$$

$$F(z) \Big|_{x=0} = \frac{q(z)l^2}{8f} = t'\sigma \Big|_{x=0} \quad (4)$$

通常,对于拱型结构,最不利截面通常发生在拱脚或跨中截面,同时对于岩土材料,可推断最不利点的位置位于土拱前缘,即  $M_1$  与  $M_2$  两点。文献[6]、[7]研究表明,在任一深度的拱平面上,拱脚  $M_1$  处一般先于拱顶  $M_2$  处发生应力屈服现象。据此,对于桩间土拱结构,可认为拱脚的临空面一侧  $M_1$  处相对跨中  $M_2$  处更为危险,即满足  $\sigma(x)(x = \pm \frac{l}{2}) \geq \sigma(x)(x = 0)$ ,即关系式:

$$1 \leq \frac{t}{t'} \leq \sqrt{1 + \frac{16f^2}{l^2}} \quad (5)$$

### 2.3 模型控制条件

悬臂桩桩间拱效应丧失,即临界状态时模型应满足以下条件:

1)对于桩间土拱结构,考虑土体的自重应力 $\sigma_z$ ,同时考虑土拱破坏的临界条件(拱圈前缘临空面的少量土体抗力 $\sigma_3$ 为零),同一高度上拱截面上最不利点为 $M_1$ ,考虑该截面(合理拱轴线上)无剪应力作用,可将轴向应力 $\sigma$ 视为第一主应力 $\sigma_1$ , $\sigma_z$ 为第二主应力 $\sigma_2$ 。

2)最不利控制点处土体须满足 Drucker-Prager 强度条件,临界状态时,有如下关系:

$$\sqrt{J_2} + \alpha I_1 = K \quad (6)$$

式中, $I_1$ 为应力张量第一不变量, $J_2$ 为应力偏量第二不变量,它们表示如下:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6} \end{aligned} \right\} (7)$$

同时,为了使得计算结果偏安全,系数 $\alpha$ 、 $k$ 取 Mohr-Coulomb 屈服面的内接锥面,设 $c$ 、 $\varphi$ 为桩间滑体的凝聚力和内摩擦角,应力以受拉为正。

3)通过对模型试验结果<sup>[13-14]</sup>及工程实际研究发现,桩间土在较大的滑坡推力的作用下易发生从桩间整体挤出现象,如图 2(b)中虚线 $AM_1$ 所示。可近似认为桩间作用在单位深度土拱上的滑坡推力不应超过两侧拱脚处单位深度的抗滑力之和<sup>[6]</sup>,据此,可建立土拱绕流的极限平衡关系式:

$$2F(z)dz \cos \theta \tan \varphi + 2ct\delta dz = q(z)ldz \quad (8)$$

将式(2)、(3)代入式(8),得到:

$$\frac{q(z)l^2 \tan \varphi}{4f} - q(z)l + 2ct\delta = 0 \quad (9)$$

式中, $\delta$ 为拱脚形状系数, $\delta \approx 1/\cos \theta = \frac{\sqrt{16f^2 + l^2}}{l}$ 。

## 2.4 桩间卸荷区的计算

确定桩间卸荷区的范围,关键是计算矢高 $f$ ,桩间滑体重量为 $\gamma$ (kN/m<sup>3</sup>),自重应力 $\sigma_z = \gamma z$ 。将 $\sigma$ 、 $\sigma_z$ 代入式(6)、(7),整理可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_z + 6\alpha^2 \sigma_z + 6\alpha K + \sqrt{-3\xi(z)}}{2(1 - 3\alpha^2)} \\ \xi(z) &= (\gamma^2 - 12\alpha^2 \gamma^2)z^2 - 12\alpha K \gamma z - 4K^2 \end{aligned} \right\} (10)$$

将 $\xi(z)$ 定义为破坏类型函数,则 $\xi(z) \leq 0$ 时, $M_1$ 处强度满足,即可形成土拱;当 $\xi(z) > 0$ 时, $M_1$ 处强度不满足要求,若桩间不设支挡,即土拱在自重应力作用下拱脚处将发生屈服破坏。经分析,若悬臂高度 $h_0$ 小于某一深度,桩间土的破坏以绕流为主;当 $h_0$ 大于该深度时,自重应力对拱脚的破坏起主导作用,将该深度定义为临界高度 $z_0$ ,有:

$$z_0 = \frac{(6\alpha + 2\sqrt{1 - 3\alpha^2})K}{(1 - 12\alpha^2)\gamma} \quad (11)$$

研究卸荷区的大小主要是确定土拱产生作用时临空面附近卸荷土体的范围,故当悬臂高度不超过临界高度,作用于桩间板的土压力主要来自卸荷区的桩间土;当悬臂高度大于临界高度时,部分挡板还需承受一定的绕流阻力。笔者主要考察有效卸荷区的范围,即满足 $h_0 \leq z_0$ ,转化(9)式,有:

$$8ctf(z) \sqrt{16f^2(z) + l^2} - 4q(z)l^2 f(z) + q(z)l^3 \tan \varphi = 0 \quad (12)$$

不难看出,上式直接求解计算 $f(z)$ 较复杂,若已知 $l$ 可采用迭代法求解。实际工程中,设桩处最不利工况下土压力或滑坡推力是特定的,设计所采用的桩间净距 $l$ 未必使得任意高度水平土拱均发挥最大效应。倘若考虑使得所有高度的水平拱均发挥极限作用,此时产生最大拱效应对应的跨度 $s(z)$ 未必等于设计桩间净距 $l$ ,但利用该跨度 $s(z)$ 计算矢高 $f(z)$ 对于确定有效卸荷区的大小显得更加可靠,联立式(3)、(9)和(10),求解得到:

$$f(z) = \frac{(c\delta + \tan \varphi \sqrt{\sigma^2 \sec^2 \varphi - c^2 \delta^2})^2 t}{2(\sqrt{\sigma^2 \sec^2 \varphi - c^2 \delta^2} - c\delta \tan \varphi)q(z) \sec^2 \varphi} \quad (13)$$

$$s(z) = \frac{2\delta ct + 2t \tan \varphi \sqrt{\sigma^2 \sec^2 \varphi - \delta^2 c^2}}{q(z) \sec^2 \varphi} \quad (14)$$

计算时,一般取 $\delta = 1.1 \sim 1.5$ ,并给定误差 $\epsilon$ ,运用迭代法求解,当满足(15)式要求时,终止迭代。

$$\frac{\sqrt{16f(z)^2 + s(z)^2}}{s(z)} - \delta \leq \epsilon \quad (15)$$

单位面积的土压力或滑坡推力在 $z$ 方向呈线性分布,可假定:

$$q(z) = q_0 + mz \quad (16)$$

式中, $q_0$ 为桩顶处单位面积的土压力(kPa), $m$ 为线性梯度,当滑坡推力呈矩形分布时, $m = 0$ 。

## 3 卸荷区影响范围的敏感性分析

### 3.1 土体强度对临界高度及矢高的影响

悬臂桩桩间土拱效应一般在 $h_0 \leq z_0$ 这一范围才能够有效发挥,假定桩间土重度 $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>,临界高度随桩间土强度变化规律如图 3 所示。

计算发现,临界高度 $z_0$ 受桩间土的凝聚力 $c$ 及内摩擦角 $\varphi$ 影响较为敏感。当 $\varphi$ 不变时,临界高度的取值随凝聚力近 $c$ 似呈线性增长关系;若 $c$ 保持不变且小于 10 kPa 时,随 $\varphi$ 的增加, $z_0$ 变化并不明显,若 $c$ 大于 30 kPa,随 $\varphi$ 的增加, $z_0$ 急剧增大,这一现象与工程实际较为吻合。

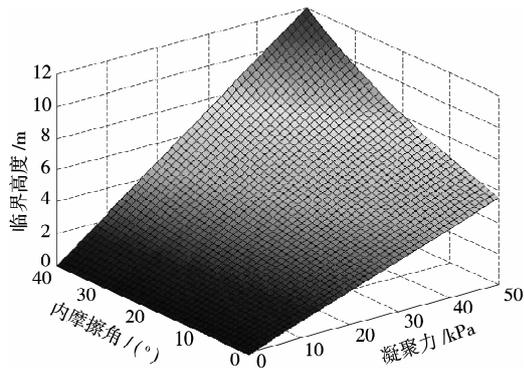


图 3 土体强度与  $z_0$  的关系

为了研究土体强度对卸荷区空间分布的影响,计算时取  $q_0$  为 20 kPa,  $m$  为 2 kN/m<sup>3</sup>, 设拱脚处拱圈厚度等于桩正截面宽度  $B$ , 设为 1 m, 并假定桩后土压力为矩形分布, 分别改变凝聚力  $c$  ( $\varphi = 25^\circ$ ) 及内摩擦角  $\varphi$  ( $c = 25$  kPa) 来分析  $f(z)$  对土体强度敏感度, 如图 4、5 所示。

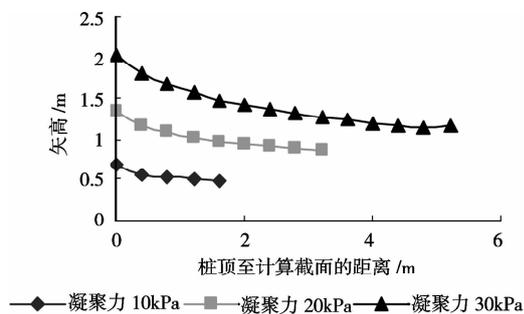


图 4 桩间土凝聚力与卸荷区分布的关系

分析发现, 自桩顶向下同一深度的平面上, 随着桩间土凝聚力、内摩擦角的增加, 发生拱效应的矢高在不断增长, 即桩间土的卸荷区范围随着土体强度的增加而扩大。同时, 对于同一工况, 卸荷区的矢高自桩顶向下逐渐变小, 梯形分布时卸荷区顶部的矢高  $f(z = 0)$  与悬臂段下端矢高  $f(z = h_0)$  的比值约为 1.5。

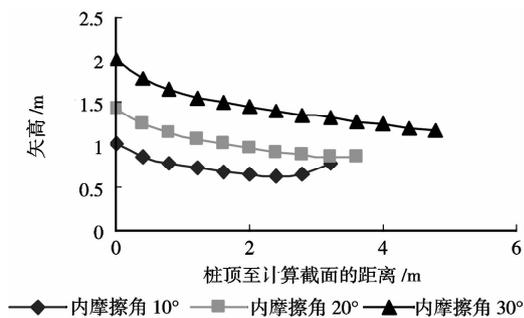


图 5 桩间土内摩擦角与卸荷区分布的关系

### 3.2 土压力分布形式对矢高的影响

由式(13)可知, 矢高的分布形式还受自重应力

及土压力分布形式制约, 为了深入研究桩后土压力分布形式对卸荷区分布范围的影响, 可假定单位宽度土压力大小保持不变, 即  $\int_0^{h_0} q(z) dz \equiv 100$  kN/m, 设  $c = 25$  kPa,  $\varphi = 25^\circ$ ,  $h_0 = 4$  m (小于  $z_0 = 4.3$  m)。文献[15]、[17]研究表明桩后土压力或滑坡推力分布形式依据桩间滑体的性质可分为矩形、三角形、梯形和类抛物线形(折线形)。据此, 笔者重点针对上述 4 种分布形式进行研究, 保持总压力不变, 经计算矩形分布  $q_0 = 25$  kPa, 三角形分布  $m = 12.5$  kN/m<sup>3</sup>, 梯形分布  $q_0 = 20$  kPa,  $m = 2.5$  kN/m<sup>3</sup>, 折线形分布  $m = 16.67$  kN/m<sup>3</sup>,  $q_{h_0} = 33.33$  kPa, 经计算, 卸荷区大小如图 6 所示。

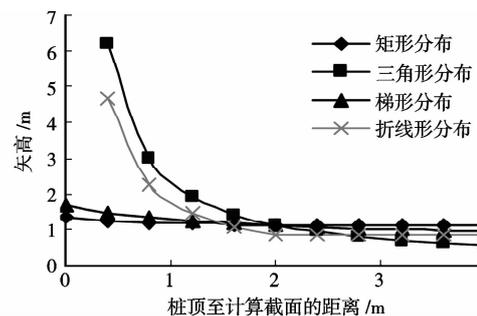


图 6 土压力分布形式对矢高的影响

对比发现, 卸荷区大小受土压力分布形式影响较敏感。在上述 4 种土压力分布形式作用下, 卸荷区矢高均呈现桩顶大、悬臂段根部小的分布规律。同时, 三角形分布荷载作用时, 桩顶卸荷区范围最大, 但由于桩顶附近荷载较小, 计算引起的误差相对较大。据此, 当土压力分布形式不确定时, 采用三角形分布荷载计算卸荷区范围对桩间挡板内力计算偏安全。经数值模拟对比分析, 二者所得结果较吻合, 受篇幅所限, 不再详述。

## 4 工程实例

遵义市红花岗区某道路边坡防护工程, 经勘察桩间滑体主要为强风化泥岩夹粘土, 相关计算参数为:  $\gamma = 21$  kN/m<sup>3</sup>,  $c = 23$  kPa,  $\varphi = 18^\circ$ 。采用悬臂桩进行支护(图 7)。经勘察, A5~A14 桩背侧土压力按梯形荷载分布,  $q_0 = 50$  kPa,  $m = 5$  kN/m<sup>3</sup>, 第一排桩桩长 13 m, 桩间距取 4 m, 正截面宽 1.2 m, 截面高 1.5 m。由式(11)、(12), 算得: 拱效应有效发挥的临界高度  $z_0 = 3.01$  m, 桩顶卸荷区矢高  $f(z = 0) = 0.59$  m,  $f(z = 3.0) = 0.39$  m。



- Mechanics, ASCE, 1991, 117(4): 789-797.
- [6] POULOS HG. The behavior of a rigid circular plate resting on a finite elastic layer [J]. Australia Civil Engineering Transactions, 1968: 213-219.
- [7] MILOVIC D. Stresses and displacements in an anisotropic layer due to a rigid circular foundation[J]. Geotechnique, 1972, 22(1):169-174.
- [8] MILOVIC D, DIOGO, M. Settlement of circular foundation of any rigidity[C]. Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Firenze, Italy, 1991, 2: 497-500.
- [9] DESAI CS, REESE, LC. Analysis of circular footings on layered soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1970, 96(4): 1289-1310.
- [10] WANG YH, THAM LG, TSUI Y, et al. Plate on layered foundation analyzed by a semi-analytical and semi-numerical method[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 409-418.
- [11] 袁聚云, 孙洋波, 王美云, 等. 传递矩阵法分析中心荷载下对称刚性板地基沉降及反力[J]. 力学季刊, 2005, 26(2): 316-321.  
YUAN JY, SUN YB, WANG MY, et al. Analysis of settlement and contact pressure of symmetric rigid plate on subgrade under central concentrated load with method of transferring matrix[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(2): 316-321.
- [12] 艾智勇, 吴超. 分层地基上矩形刚性基础的基底反力、沉降和倾斜计算[J]. 力学季刊, 2008, 29(1):113-119  
AI ZY, WU C. Calculation of reaction forces of base, settlement and inclination of rectangular rigid plate on multi-layered soils[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(1):113-119
- [13] 艾智勇, 梅阿敏. 多层地基上轴对称受荷刚性圆板问题[J]. 力学季刊, 2008, 29(3):424-429.  
AI ZY, MEI AM. Axisymmetric loaded rigid circular plate on multi-layered soil[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(3):424-429.
- [14] AI ZY, Yue ZQ, THAM, LG, et al. Extended Sneddon and Muki solutions for multilayered elastic materials [J]. International Journal of Engineering Science, 2002, 40: 1453-1483.
- [15] SNEDDON IN. The Use of Integral Transform[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.

(编辑 胡 玲)

(上接第 32 页)

- [10] 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.  
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.
- [11] 李忠诚, 杨敏. 被动受荷桩成拱效应及三维数值分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 114-117.  
LI ZHONG-CHENG, YANG MIN. Soil arching effect on passive piles and 3-D numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3):114-117.
- [12] 陈福全, 侯永峰, 刘毓旻. 考虑桩土侧移的被动桩中土拱效应数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1333-1337.  
CHEN FU-QUAN, HOU YONG-FENG, LIU YU-CHUAN. Numerical analysis of soil arching effects in displaced passive piles considering lateral soil movements [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1333-1337.
- [13] 吴汉辉. 埋入式抗滑桩模型试验及其工作机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [14] 杨明, 姚令侃, 王广军. 抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1477-1482.  
YANG MING, YAO LING-KAN, WANG GUANG-JUN. Study on effect of width and space of anti-slide piles on soil arching between piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1477-1482.
- [15] 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.
- [16] 钟小春. 基坑支护桩间土体拱效应理论及有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(Supp. 11): 1501-1504.  
ZHONG XIAO-CHUN. Soil arching between protecting piles of foundation pits and FEM analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp. 11): 1501-1504.
- [17] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517-521.  
DAI ZI-HANG. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass arching on antislides piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517-521.

(编辑 王秀玲)