

DOI: 10.11779/CJGE201605006

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

赵晓彦¹, 吴 兵^{1, 2}, 李登峰¹, 蒋楚生³, 李玉龙⁴, 肖世国¹

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都 610031; 2. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017;
3. 中铁二院土建三院, 四川 成都 610031; 4. 中铁七局, 陕西 西安 753200)

摘 要: 抗滑桩间水平土拱效应目前主要用于确定桩间距, 在桩间组合结构的受力计算中应用较少。如桩间墙, 设计者多按设桩处的剩余下滑力计算桩上荷载, 采取将土压力或剩余下滑力折减, 或将土体参数提高的方法估算墙上荷载, 未充分考虑桩间水平土拱的影响。首先理论分析了桩间水平土拱对桩间墙组合结构受力的影响, 认为在桩间水平土拱影响下, 抗滑桩的受力应为土拱拱顶处的剩余下滑力; 挡土墙的受力应为拱前土体产生的主动土压力或剩余下滑力。在此基础上, 推导了考虑土拱效应时该组合结构中抗滑桩和挡土墙的受力计算方法。以某实际铁路堑坡为例, 通过计算考虑桩间水平土拱效应的桩间墙受力分配, 说明了桩间水平土拱效应对桩间墙组合结构受力的影响。

关键词: 抗滑桩; 水平土拱效应; 挡土墙; 受力计算方法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0811-07

作者简介: 赵晓彦(1977-), 男, 副教授, 博士, 博士后, 主要从事边坡稳定性及边坡加固方面的研究。E-mail: xyzhao2@swjtu.cn。

Load calculation method for retaining wall between piles considering horizontal soil arching effects

ZHAO Xiao-yan¹, WU Bing^{1, 2}, LI Deng-feng¹, JIANG Chu-sheng³, LI Yu-long⁴, XIAO Shi-guo¹

(1. Department of Geology Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China; 3. Railway Eryuan Engineering Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 4. China Railway 7th Engineering Group Co., Ltd., Xi'an 753200, China)

Abstract: The horizontal soil arching effects between stabilizing piles are mainly used for determining the spacing of the piles, while they are rarely employed to calculate the load on the retaining wall between piles. In the current calculation methods, the load applying on the retaining wall is usually roughly evaluated by reducing the driving force acting on its nearby piles or increasing the value of shearing strength indices. These methods do not sufficiently consider the horizontal soil arching effects. To improve the calculation, the effects of horizontal soil arching on the loads acting on the retaining wall between piles are theoretically analyzed. The results show that the driving force at the apex of the soil arch should be taken as the load on the piles, and the load on the retaining wall is the active earth pressure induced by the soil in front of the arch. Based on the results, a new method for calculating the load is deduced by considering the horizontal soil arching effects. A railway cut slope stabilized by the retaining wall between piles is taken as an example to show the effects of the soil arching by calculating the load on the structures using the proposed method.

Key words: stabilizing pile; horizontal soil arching effect; retaining wall; load calculation method

0 引 言

中国云、贵、川等地的黏土岩地区, 岩土体易崩解、风化, 工程实践中多采用抗滑桩+桩间措施(挡土墙、板、土钉)的方式进行高边坡加固, 形成桩间墙、桩板墙、桩间土钉墙等。其中, 挡土墙施工工艺相对较简单、施工质量更易于保证, 在实践中的应用

尤其广泛。桩间水平土拱对这种组合结构的受力影响显著, 如 Lawrence^[1]通过小型推桩试验, 明确指出水平土拱的存在会影响土压力的分布; 黄治云等^[2]通过现场测试及室内模型试验, 认为桩间水平土拱效应显

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278530, 41541022)

收稿日期: 2015-03-31

著影响土压力的传递特性。然而,以往桩间水平土拱的应用研究主要集中在桩间距的确定,如杨明等^[3]采用离心模型试验及数值模拟方法,提出了桩间距的优化方法;王成等^[4]通过离心模型试验,给出了黏土中桩间净距的取值建议;周应华等^[5]、赵明华等^[6]根据土拱的强度条件和静力平衡条件提出了基于桩后土拱效应的桩间距计算模型。这些研究成果,通过优化桩间距,在客观上使桩及桩间措施上的受力分配更合理。

然而,桩及桩间措施上的受力分配该如何量化水平土拱效应的影响,尚无良好的解决方法。目前多数研究成果仍属于理论探讨或现象分析,尚不能直接用于设计计算。如刘钦等^[7]通过三维数值模拟,认为随着桩间距增大,桩的荷载分担比减小;蒋楚生等^[8]通过现场实测土压力,讨论了考虑水平土拱效应时桩及桩间措施上土压力的计算理论;梁瑶等^[9]通过物理模型试验讨论了土拱形状及其对组合结构受力的影响。

Paik 等^[10]、应宏伟等^[11]、涂兵雄等^[12]、王梅等^[13]等学者研究了挡土墙平移时墙后填土考虑土拱效应下的主动土压力计算方法;Nian 等^[14]研究了边坡稳定性及抗滑桩加固效应的极限分析上限方法及挡土结构物(墙和桩)的地震主动土压力解析解,但这些学者们研究的是单墙后的竖向土拱对主动土压力的影响,并非桩间水平土拱,或未考虑土拱效应,也不涉及桩和桩间措施的组合应用。

可见,目前桩及桩间挡土墙上的荷载计算,尚未能有效考虑桩间水平土拱效应的影响。现行规范^[15]仅规定可按库仑主动土压力进行计算,但未明确水平土拱的考虑方法。现有设计方法中,设计人员常依据单位或个人经验按下述方法粗略估算桩间挡土墙上的荷载:①直接按库仑主动土压力进行计算,不考虑土拱效应;②按库仑主动土压力进行计算,并提高岩土体综合内摩擦角,以降低土压力值,如有些铁路设计单位将综合内摩擦角提高 5° 左右^[15];③借鉴前苏联学者克列因模型试验的结果^[16],将计算出的库仑主动土压力乘以 $0.7\sim 0.8$ 的折减系数。抗滑桩上荷载计算则不考虑桩间土拱效应的影响,多按传递系数法计算设桩处的剩余下滑力^[15],并将其作为桩上的荷载。这些计算方法未能良好地体现桩间墙组合结构的实际受力状态,限制了桩间水平土拱效应在工程实践中的应用。

基于此,本文在分析桩间水平土拱对抗滑桩及桩间挡土墙受力影响方式的基础上,提出简单可行的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。

1 考虑水平土拱效应时桩间墙荷载计算方法

1.1 桩间水平土拱形状和大小

土拱形状及大小的影响因素很多,如土体本身性质、结构物形状等。学者们采用理论分析、模型试验及数值模拟等手段进行了深入研究,如 Handy^[17]、Kingsley^[18]提出了悬链线形、抛物线形、圆顶形、半球形、三角形等多种假设。而在土拱效应的应用方面,以规范或规程形式进行定量规定的较少,重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)中设定桩间土拱为一等腰直角三角形(图1(a))。

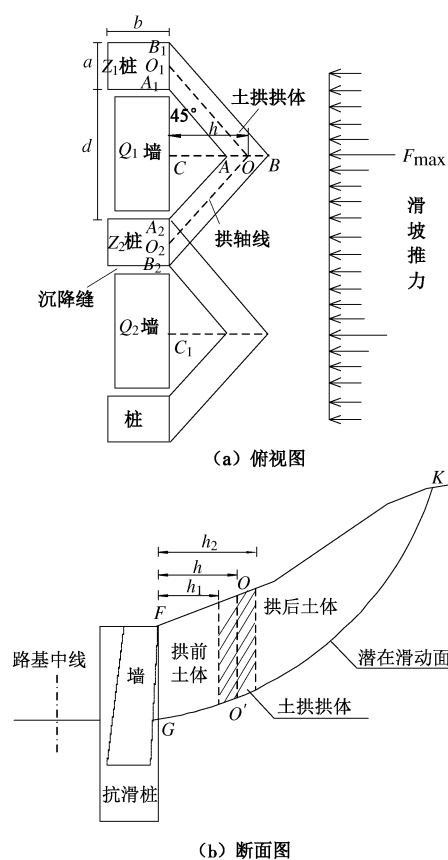


图1 桩间墙组合及桩间水平土拱示意图

Fig. 1 Sketches of combination of stabilizing piles and retaining walls and soil arching

该规范未考虑桩间土体的性质,直接规定桩间土拱拱轴线与水平布桩方向(边坡走向)间的夹角为 45° ,虽较为粗略,但由于难以在其他规范中找到更精确的描述,故本文仍采用该规范的建议,即桩间土拱形状为一等腰直角三角形,由此并参考现有成果^[2-6, 8, 19-21],可认为土拱拱体厚度沿深度方向(桩长方向)不变,如图1(b)。

如图1(a)所示, Z_1 桩和 Z_2 桩间形成水平土拱拱体 $B_1BB_2O_2A_2AA_1O_1B_1$,其中 B_1BB_2 为拱体外边线,

A_1A_2 为拱体内边线, O_1O_2 为拱轴线。如前所述, B_1B_2 和 A_1A_2 均为等腰直角三角形。计桩截面宽度、高度分别为 a 、 b , 桩间净距为 d , 则土拱拱体的外边线拱高 h_2 、内边线拱高 h_1 、中心拱高 h (轴线拱高, 对应于图 1 (b) 中的 OO') 计算式为

$$\begin{cases} h_2 = a + \frac{d}{2}, \\ h_1 = \frac{d}{2}, \\ h = \frac{a+d}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

1.2 基本假设

(1) 桩间水平土拱拱体未发生变形破坏

本文研究的核心在于考虑桩间水平土拱效应时的桩间墙结构受力计算, 故土拱拱体的完整存在是本文研究的基础。土拱为一压密拱, 拱体相对于其周围的土体可认为处于弹性状态, 在该假设条件下, 由于不考虑土拱的变形, 拱间土体与拱体间的力学边界为自由边界, 土拱不传力至拱前土体, 拱后土体的剩余下滑力由土拱完全传递至土拱的拱脚——抗滑桩上。若桩间土体软弱 (如软土), 不具有形成土拱的物理力学条件, 则不适用本文方法。

(2) 水平土拱拱高以拱轴线拱高 h 计算

如前所述, 桩间水平土拱为一实体拱, 如图 1 (a) 所示, 但拱体实际厚度较难精确计算。如图 1 (a), 若抗滑桩截面宽度 a 为 2 m, 则拱体厚度约为 1.4 m, 与整个边坡潜在不稳定土体长度相比很小 (如图 1 (b)), 为简化计算, 采用拱轴线拱高 h 进行拱前土体和拱后土体的划分, 如图 1 (b)。而且这种假设, 增大了拱前土体范围, 可能使墙上土压力增大, 使设计偏于安全; 而拱后潜在不稳定土体长度远远大于简化掉的土体长度 $h_2 - h = a/2$, 对抗滑桩受力几乎无影响。故该假设是可行的。当然, 当可较精确计算拱体厚度时, 也可采用拱体内边界和外边界分别计算墙和桩上的受力, 并不影响本文计算方法的可行性。

(3) 计算截面为抗滑桩跨中截面, 将该截面上的力学计算简化为平面问题

按现行规范的设计理念, 一根抗滑桩所承担的计算荷载为其左右各一半桩间距范围内的剩余下滑力或土压力。如图 1 (a) 中, 桩 Z_2 承担 CC_1 范围内的荷载, 布桩时, 也多将最大下滑力 F_{\max} 由其左右两根抗滑桩承担 (图 1 (a) 中的 Z_1 桩和 Z_2 桩), 从而使整体设计更优化。基于此, 可计算各跨中截面的荷载, 以确定桩及墙上的受力, 而且以跨中截面确定墙上的受力可使墙的设计偏于保守, 利于边坡的稳定。

现行规范及研究结果均认为水平土拱形状关于跨

中截面对称, 在不考虑土拱沿桩长方向 (深度方向) 形状改变的情况下, 可简化为平面问题。土拱沿桩长方向 (深度方向) 形状改变可进一步研究, 本文暂不讨论。

1.3 考虑水平土拱效应的抗滑桩荷载

由于桩间水平土拱的存在, 抗滑桩上的荷载应为水平土拱传递给抗滑桩的力, 即应为拱后土体的剩余下滑力, 而非不考虑土拱效应时设桩处的剩余下滑力。如图 1 (b), 计算抗滑桩荷载时, 应计算至图中的 OO' 处, 即计算土体 KOO' 的剩余下滑力, 而非土体 KFG 的剩余下滑力。计算方法仍采用目前规范中常采用的传递系数法。

另外值得说明的是, 由于桩+桩间挡土墙组合结构中, 墙与桩间设置有沉降缝 (图 1 (a)), 墙上的荷载不会传递到桩上, 故 OO' (图 1 (b)) 处的剩余下滑力即为桩上的最终荷载。

1.4 考虑水平土拱效应的挡墙荷载

如前所述, 由于挡墙与桩间设有沉降缝, 桩与桩间墙之间可认为是未联结的, 桩与墙的受力是相互独立的, 桩上的荷载也同样不会传递至墙上 (本文不考虑桩间土体与桩体间的摩擦力, 现行规范设计时也未考虑)。墙背荷载为桩间土拱拱前土体产生的土压力或剩余下滑力 (二者之中的大者)。

采用库仑土压力理论进行墙背土压力 (此处只分析主动土压力) 的计算, 依据库仑理论墙后滑动土楔处于极限平衡状态时的静力平衡条件, 求解土压力。如图 2 所示, 当不考虑土拱效应时 (或无土拱存在时), 墙前移或绕墙趾外转会引起墙后土体沿破裂面 BH 破坏, 土楔 FBH 将沿墙背 FB (本文不考虑第二破裂面的情况) 和通过墙踵的破裂面 BH 向下滑动, 从而产生作用于墙背 FB 的主动土压力, 在破坏的瞬间, 楔体 FBH 处于极限平衡状态, 通过分析该楔体的静力平衡, 即可求解作用于墙背的主动土压力。

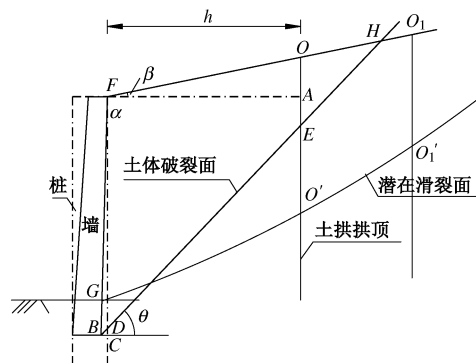


图2 桩间挡墙受力模型

Fig. 2 Model for load applying on retaining wall between piles

可见, 主动土压力的大小与土楔 FBH 的重量有重要关系。当考虑土拱效应时, 由于桩对拱及拱后土体

的支撑作用,依据前述基本假设,此时滑动楔体为 $FBEO$,而非传统计算中的 FBH 。墙背主动土压力是由于土体 $FBEO$ 向下滑动而产生的,此时,应通过土体 $FBEO$ 的静力极限平衡求解墙背主动土压力。

选择挡墙中心截面为计算断面(如图1(a)中的 CAB),如前所述,该截面处水平拱高为 h 。如图2所示,墙上的荷载 F ,若不考虑土拱效应,应为土楔 FBH 产生的土压力 P_{FB} 和沿原潜在滑裂面产生的 FG 处剩余下滑力 E_{FG} 中的大者,即 $F=\max(P_{FB}, E_{FG})$ 。考虑土拱效应时,根据上述分析,可分为两种情况:①拱顶位于墙后土体破裂面之后(如图2中的 $O_1O'_1$),此时土压力仍为土楔 FBH 产生的 P_{FB} ,但剩余下滑力为土体 $FGO_1O'_1$ 沿滑面 $G_1O'_1$ 在 FG 处产生的剩余下滑力 E_{1FG} ,此时 $F=\max(P_{FB}, E_{1FG})$ 。②拱顶位于墙后土体破裂面之前(如图2中的 OO'),此时土压力为土楔 $FBEO$ 产生土压力 P_{2FB} ,剩余下滑力应为土体 $FGOO'$ 滑面 GO' 在 FG 处产生的剩余下滑力 E_{2FG} ,此时 $F=\max(P_{2FB}, E_{2FG})$ 。

两种情况均不考虑原滑面的变化,包括滑面形状及滑面位置。

在上述考虑土拱效应时的第②种情况中,由前述1.2节基本假设,土拱与拱前土体间的力学边界为自由边界,基于此,墙后破裂土楔受力分析如图3所示。图3中 W 为土楔自重; R 为土楔受到的下部土体的作用力; δ, φ, θ 分别为墙后土体与墙背间的摩擦角、墙后土体内摩擦角、墙后土体的破裂角;墙体对破裂土楔的力为主动土压力的反作用力,其大小等于 E_{2FB} ,在图中仍以 E_{2FB} 表示; α, β 分别为墙背与竖向夹角及墙后土体表面与水平面的夹角。

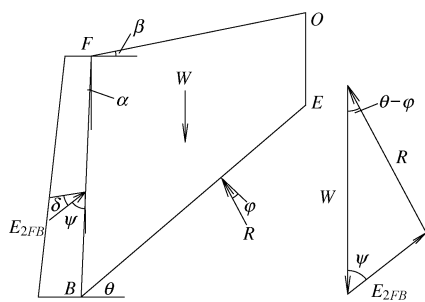


图3 考虑水平土拱效应的墙后土楔受力示意图

Fig. 3 Forces on soil wedge behind retaining wall by considering horizontal soil arching effects

土楔 $FBEO$ 在 W, R, E_{2FB} 三个力的作用下处于静力极限平衡状态,这3个力必构成一闭合的力矢三角形,如图3所示,图中 $\psi=90^\circ+\alpha-\delta$ 。

欲求解 E_{2FB} ,必须求解出 W 的表达式,下面先结合图2求解 W ,记 S 为面积符号, γ 为土体重度, h_0

为墙高,有

$$\begin{aligned} S_{FBEO} &= S_{FDEO} + S_{FBC} - S_{BCD} \\ &= \frac{h}{2}(h_0 - h_0 \tan \alpha \tan \theta + h_0 - h \tan \theta - h_0 \tan \alpha \tan \theta + \\ &\quad h \tan \beta) + \frac{h_0^2}{2} \tan \alpha - \frac{h_0^2}{2} \tan^2 \alpha + \tan \theta \\ &= h_0 \left(h + \frac{h_0}{2} \tan \alpha \right) (1 - \tan \alpha \tan \theta) + \frac{h^2}{2} (\tan \beta - \tan \theta), \end{aligned} \quad (2)$$

$$W = S_{FBEO} \cdot \gamma \quad (3)$$

由图3中的力三角形可知:

$$\frac{E_{2FB}}{W} = \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta - \varphi + \psi)} \Rightarrow E_{2FB} = W \cdot \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta - \varphi + \psi)} \quad (4)$$

令 $\frac{dE_{2FB}}{d\theta} = 0$,求得 E_{2FB} 为最大值时的 θ 值,将其代入式(2)~(4)即可求得主动土压力 E_{2FB} 。

2 工程实例

2.1 边坡工程概况

实例边坡位于巴(中)达(州)铁路白衣至石桥区间DK70+432.83—DK70+334右侧,长44.76m;由于该段路堑紧接隧道出口,受线型限制,放坡空间小,故边坡较陡,采用桩间墙组合结构加固,如图5所示,在坡脚施做抗滑桩,在抗滑桩之间采用重力式路堑挡土墙。

边坡属剥蚀低中山缓坡地貌,由侏罗系上统蓬莱镇组(J_{3p})泥岩及其风化残积层构成。残积层及全风化层最大厚度达15m,呈松散碎块状。边坡坡面产状为 $330^\circ \angle 12^\circ$ (P),强风化层主要有两组节理: $102^\circ \angle 74^\circ$ (L1),间距20~40cm; $343^\circ \angle 75^\circ$ (L2),间距0.5m左右,边坡赤平投影如图4所示,由图可见强风化岩体不会发生顺层滑动。

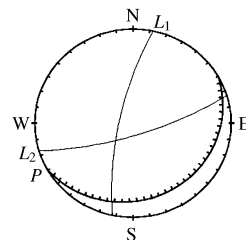


图4 实例边坡赤平投影图

Fig. 4 Stereographic projection of slope

按圆弧滑动进行滑动面搜索,最终搜索的滑面如图5所示,以该滑动面进行边坡的稳定性和剩余下滑力计算。边坡岩土体物理力学参数如表1所示。

该边坡加固工程中,桩间距为6m,桩截面尺寸为2m×2.5m。由式(1)可知,桩间墙中心截面处的水平土拱高度为3m。为便于计算,潜在滑体条块

划分时, 可在水平土拱拱顶处设一划分线, 如图5所示。

表1 实例边坡岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil constituting the example slope

岩土层	天然重度	黏聚力	内摩擦角
	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
①	18.5	12	30
②	23.0	—	40

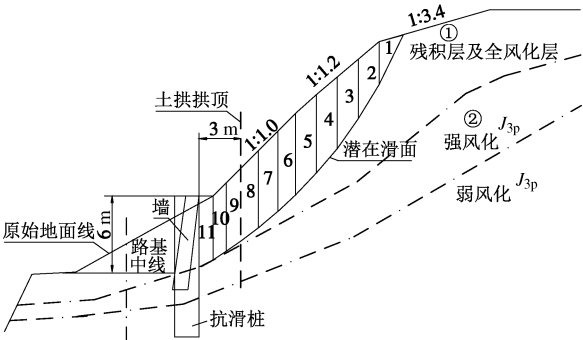


图5 实例边坡桩墙组合加固代表断面

Fig. 5 Profile of slope reinforced by retaining walls between piles

2.2 桩间墙组合结构荷载计算

(1) 不考虑土拱效应时桩上荷载计算

考虑工程安全, 根据《铁路路基支挡结构设计规范》^[15]的要求和边坡实际情况, 取安全系数 $k_0=1.2$ 。按图5所示的条块划分, 采用传递系数法进行设桩处剩余下滑力的计算。不考虑土拱效应时, 抗滑桩上的荷载应为条块11的剩余下滑力, 计算结果如表2, 剩余下滑力为297.4 kN/m。

表2 断面剩余下滑力计算

Table 2 Calculation of driving force

条块编号	重力 W_i $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	条块宽度 L_i $/\text{m}$	滑面倾角 α_i $/(^{\circ})$	传递系数 Ψ_i	下滑力 T_i $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	抗滑力 R_i $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	剩余下滑力 E_i $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
1	50.1	1.7	64	0.0000	54.0	33.6	20.5
2	104.3	1.5	59	0.9459	107.3	49.0	77.6
3	130.3	1.5	54	0.9459	126.5	62.2	137.7
4	148.4	1.5	50	0.9573	136.4	73.1	195.1
5	159.6	1.5	46	0.9573	137.7	82.0	242.6
6	138.0	1.3	43	0.9684	113.0	73.9	274.0
7	147.4	1.4	40	0.9684	113.7	82.0	297.0
8	130.3	1.3	37	0.9684	94.1	75.7	306.1
9	94.5	1.0	35	0.9792	65.0	56.7	308.0
10	88.3	1.0	33	0.9792	57.7	54.7	304.6
11	90.6	1.0	31	0.9792	56.0	56.8	297.4

注: $T_i = W_i k_0 \sin \alpha_i$, $R_i = W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + C_i L_i$, $E_i = \Psi_i E_{i-1} + T_i - R_i$

(2) 考虑水平土拱效应时桩上荷载计算

考虑土拱效应时, 抗滑桩上的荷载应为土拱传递到桩上的剩余下滑力。如图5所示, 拱顶处荷载为第8条块的剩余下滑力, 即此时抗滑桩上的荷载应为第8条块的剩余下滑力。由表2可知, 该剩余下滑力为306.1 kN/m。可见, 该工程算例中, 由于土拱的存在, 抗滑桩的荷载较常规算法略有增加, 按土拱效应方法计算的荷载更利于设计安全。

该算例由于无明显抗滑段, 即最后几个条块的滑面倾角仍较大, 故考虑土拱效应与不考虑土拱效应计算的结果差别不大。但当有明显抗滑段时, 荷载增大的效果将会很明显, 如图6(a)所示。当然, 当滑面为直线形, 如沿覆盖层与基岩接触面的滑动, 考虑土拱效应时的抗滑桩上荷载反而会有明显减小, 如图6(b)所示。

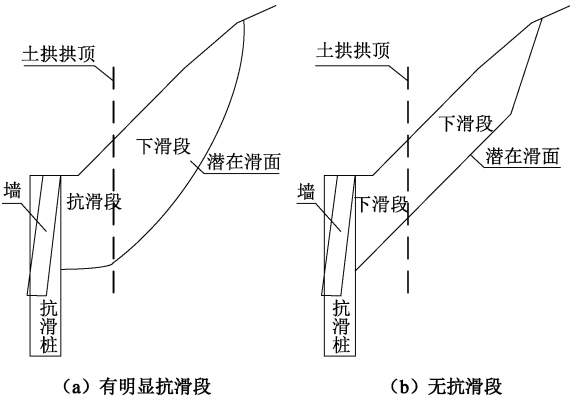


图6 不同滑面形状时的土拱效应示意图

Fig. 6 Sketches for soil arching effects under different sliding surfaces

(3) 墙上荷载计算

该实例中, 墙背及墙胸与竖直面夹角均为 15° , 如前所述, 桩间水平土拱拱高为3 m, 依据式(2)~(4), 可求得土体与墙背间的摩擦角为 $\delta=15^{\circ}$, 墙后土体破裂角为 $\theta=44^{\circ}$, 其余计算参数如图7及表1所示。

考虑土拱效应时, 分别按破裂面和滑面进行挡土墙上荷载计算, 并取二者中的大值。破裂面应为图7中的DEACF, 此时挡土墙上的主动土压力按文献[22]及式(2)~(4)计算, 结果为 $E_{a1}=53.7$ kN/m。按图5所示滑面求解, 由于土拱效应, 作用在墙上的剩余下滑力应为条块9~11产生的剩余下滑力, 并不计拱后土体的作用力, 计算结果如表3, 剩余下滑力仅为10 kN/m。可见, 考虑土拱效应时挡土墙上的荷载应取土压力, 即53.7 kN/m。

不考虑土拱效应时, 挡土墙上的主动土压力应为土体DEBF沿破裂面FB和墙背下滑产生的主动土压力

(图7), 同样按文献[22]及式(2)~(4)计算, 结果为 $E_{a2}=69\text{ kN/m}$ 。

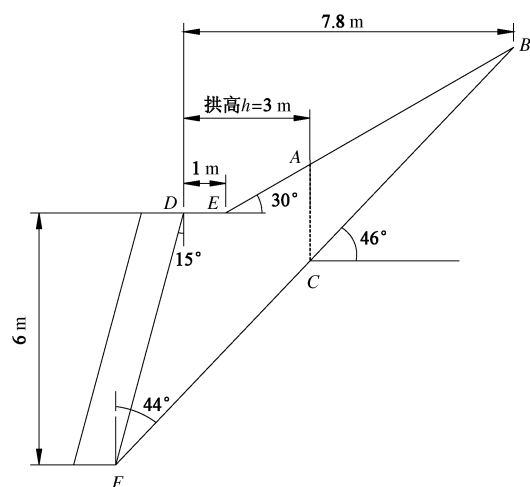


图7 桩间挡土墙土压力计算示意图

Fig. 7 Illustration for calculation of earth pressure on retaining wall considering soil arching effects

表3 拱前土体前单宽断面挡土墙上剩余下滑力计算

Table 3 Calculation of driving force on retaining wall considering soil arching effects

条块 编号	重力 W $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	条块 宽度 L/m	滑面 倾角 $\alpha(^{\circ})$	传递 系数 Ψ	下滑力 T $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	抗滑力 R $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	剩余下 滑力 E $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
9	94.5	1.0	35	0	65.0	56.7	8.3
10	88.3	1.0	33	0.9792	57.7	54.7	11.1
11	90.6	1.0	31	0.9792	56.0	56.8	10.0

将上述算例的计算结果总结于表4, 由该表可知, 桩间土拱效应确实会影响桩间墙组合结构的受力分配, 特别是挡土墙上的荷载受桩间水平土拱效应的影响更大, 差值率达到了22%。如前所述, 由于该算例滑面形状的原因, 桩上荷载差值率较小。

表4 算例计算结果

Table 4 Calculated results

荷载类型	不考虑土拱 效应 P_1	考虑土拱效 应 P_2	差值率 $\frac{ P_2 - P_1 }{P_1}/\%$
桩上荷载	297.4	306.1	3.0
墙上荷载	69.0	53.7	22.2

限于篇幅限制, 该实例中, 只是用一个截面的计算说明本文计算方法, 未进行所有截面的计算, 整个边坡的设计可以根据1.2节中的假设条件(3)完成。

3 结 论

(1)本文分析了桩间水平土拱对桩间墙组合结构荷载的影响, 认为挡土墙仅承受拱前土体的土压力或剩余下滑力; 抗滑桩上的荷载为拱高处条块(而不是

以往计算方法中设桩处条块)的剩余下滑力。

(2)以巴达铁路某实际边坡加固工程为例进行了实例计算, 表明考虑土拱效应时, 桩及墙上的荷载较以往不考虑土拱效应时明显不同, 特别是墙上的土压力有明显减小, 甚至达到20%以上, 这将对桩间挡土墙的设计有较大影响。

(3)本文未考虑土拱沿桩长方向的形状及尺寸变化。实际上沿桩长方向滑坡推力(或土压力)及土体物理力学性质均可能发生改变, 故土拱几何参数也可能发生变化, 这种变化对桩间墙组合结构受力的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] LAWRENCE. The mechanism of load transfer in granular materials utilizing tactile pressure sensor[D]. Massachusetts: University of Massachusetts Lowell, 2002.

[2] 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, 34(7): 1887 - 1892. (HUANG Zhi-yun, ZHANG Yong-xing, DONG Jie. Experimental study of soil arching and transfer behavior of earth pressure about sheet-pile walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1887 - 1892. (in Chinese))

[3] 杨明, 姚令侃, 王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 817 - 822. (YANG Ming, YAO Ling-kan, WANG Guang-jun. Study of centrifuge model tests and numerical simulation on soil arching in space of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 817 - 822. (in Chinese))

[4] 王成, 王东, 陈夏雨, 等. 桩间土拱效应离心模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 33 - 36. (WANG Cheng, WANG Dong, CHEN Xia-yu, et al. Study on centrifuge model tests of soil arching effect between piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 33 - 36. (in Chinese))

[5] 周应华, 周德培, 冯君. 推力桩桩间土拱几何力学特性及桩间距的确定[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 454 - 457. (ZHOU Ying-hua, ZHOU De-pei, FENG Jun. Geometrically mechanical characters of soil arch between two adjacent laterally loaded piles and determination of suitable pile spacing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 454 - 457. (in Chinese))

[6] 赵明华, 廖彬彬, 刘思思. 基于拱效应的边坡抗滑桩桩间距计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1211 - 1214. (ZHAO Ming-hua, LIAO Bin-bin, LIU Si-si. Calculation of anti-slide piles spacing based on soil arching effect[J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2010, **31**(4): 1211 - 1214. (in Chinese))
- [7] 刘 钦, 李地元, 刘志祥, 等. 水平推力作用下抗滑桩间土拱效应影响因素的数值分析[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, **42**(7): 2071 - 2077. (LIU Qin, LI Di-yuan, LIU Zhi-xiang, et al. Numerical analysis of influence factors on soil arching effect between anti-sliding piles under horizontal pushing loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(7): 2071 - 2077. (in Chinese))
- [8] 蒋楚生, 赵晓彦, 李庆海, 等. 桩与土钉或挡土墙联合使用时设计理论探讨[J]. 铁道工程学报, 2010, **139**(4): 35 - 39. (JIANG Chu-sheng, ZHAO Xiao-yan, LI Qing-hai, et al. Discussion on design theory on joint use of pile and soil-nailing or retaining walls[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, **139**(4): 35 - 39. (in Chinese))
- [9] 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, **33**(增刊2): 3825 - 3828. (LIANG Yao, JIANG Chu-sheng, LI Qing-hai, et al. Analysis of stress mechanism of pile composite structure based on soil arch test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 3825 - 3828. (in Chinese))
- [10] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 643 - 653.
- [11] 应宏伟, 蒋 波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 717 - 722. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 717 - 722. (in Chinese))
- [12] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 1064 - 1070. (TU Bing-xiong, JIA Jin-qing. Research on active earth pressure behind rigid retaining wall from clayey backfill considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5): 1064 - 1070. (in Chinese))
- [13] 王 梅, 李镜培. 考虑土拱效应的刚性挡土墙主动土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 865 - 870. (WANG Mei, LI Jing-pi. New method for active earth pressure of rigid retaining walls considering arching effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 865 - 870. (in Chinese))
- [14] NIAN T K, CHEN G Q, LUAN M T, et al. Limit analysis of stability of slopes reinforced with piles against landslide in non-homogeneous and anisotropic soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(8): 1092 - 1103.
- [15] TB 10026—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 2006. (TB 10026—2006 Railway embankment design of retaining structures[S]. 2006. (in Chinese))
- [16] 可列因. 散粒体结构力学[M]. 陈万佳, 译. 北京: 人民交通出版社, 1983. (KREIN M G. Structural mechanics of grain material[M]. CHEN Wan-jia, tran. Beijing: China Communications Press 1983. (in Chinese))
- [17] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 318.
- [18] KINGSLEY H W. Arch in arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(3): 415 - 419.
- [19] 向先超, 张 华, 蒋国盛, 等. 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 386 - 391. (XIANG Xian-chao, ZHANG Hua, JIANG Guo-sheng, et al. Soil arching effect of anti-slide piles based on particle flow method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 386 - 391. (in Chinese))
- [20] CHEN Chien-yuan. Numerical analysis of slope stabilization concepts using piles[D]. Los Angeles: University of Southern California, 2001.
- [21] LIANG R, ZENG S. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(2): 83 - 92.
- [22] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992. (First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Railway engineering technical manual[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992. (in Chinese))