

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.138

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 桩拱组合式挡土墙及其简化设计方法研究

周航, 陈烨, 刘汉龙, 丁选明, 申航

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

**摘要:** 桩板式挡土墙是山区道路工程建设中经常采用的一种支挡结构, 由于抵抗水平荷载的需要, 传统桩板式挡土墙结构桩和板的尺寸通常做得较大, 桩体的布置较密, 不经济。基于此, 提出一种新的适用于山区道路的桩拱组合式挡土墙, 利用拱结构受压性能较好的特点, 采用拱板代替传统的平板, 拱板与桩基础的上部连接, 整体结构可以通过装配式或者现浇制作而成。基于土压力和桩基水平承载力理论, 分别建立拱板主动土压力计算模型和抗滑桩计算模型, 利用拱板荷载传递给桩基的基本原理, 建立桩拱挡土墙整体结构的力学平衡方程, 通过求解平衡方程获得桩拱挡土墙整体结构的极限承载力。通过参数分析, 分别讨论了不同的桩体几何尺寸、拱板几何尺寸以及土体参数对桩拱组合式挡土墙极限承载力的影响, 结果表明, 增加矩形截面的长宽比、桩体嵌入深度、土体摩擦角等可以有效提高桩拱组合式挡土墙的极限荷载。

**关键词:** 挡土墙; 理论模型; 土压力; 极限荷载

中图分类号: TU476 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)01-0001-08

## Simplified design method for combined pile-arching retaining wall

Zhou Hang, Chen Ye, Liu Hanlong, Ding Xuanming, Shen Hang

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

**Abstract:** Sheet-pile retaining wall is a very common retaining structure is widely used in construction of mountain road. However, in order to resist the lateral load, conventional sheet-pile retaining wall is of relatively large size, which is less economical. Under this condition, a new pile-arching retaining wall, which is suitable for mountain road construction, is proposed in this study. Considering that the arch structure is of good compression performance, the arching plate is used to replace the conventional plate structure, and the arch plate is connected with the pile foundation. The whole structure could be prefabricated or constructed in the way of cast-in-place. Based on the theories of earth pressure and lateral loaded pile, computational models were proposed for the active earth pressure of arch plate and the anti-slide pile. Then, the theoretical model was validated by comparing the predictions with the numerical results. Subsequently, parametric studies were conducted to investigate the influence of the geometric parameters of pile, geometric parameters of arch plate and the soil parameters on the limit load of the new pile-arching retaining wall structure. The results show that increase of ratio of length to width of the rectangular pile cross section, the embedded depth of pile as well as the friction angle of soil could

收稿日期: 2019-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(51420105013, 51708063)

作者简介: 周航(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事软土地基处理与基础工程研究, E-mail: zh4412517@163.com。

Received: 2019-05-30

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(No. 51420105013, 51708063)

Author brief: Zhou Hang (1987-), PhD, associate professor, main research interests: soft ground improvement and foundation engineering, E-mail: zh4412517@163.com.

effectively improve the limit load of pile-arching retaining wall structure.

**Keywords:** retaining wall; theoretical model; earth pressure; limit load

山区道路由于地形、地质复杂,不可避免地会形成高路堑、高路堤,其边坡稳定性直接影响道路的使用功能。此外,山区道路修建常会遇到结构松散岩土体,极易产生山体滑塌地质灾害,给交通安全留下隐患。挡土墙作为一种常用的支挡结构,广泛应用于山区道路工程中路堤、路堑边坡的加固。工程中常用的挡土墙有重力式挡土墙<sup>[1-2]</sup>、衡重式挡土墙<sup>[3-4]</sup>、悬臂式挡土墙<sup>[5]</sup>、扶壁式挡土墙<sup>[6-7]</sup>、锚杆式挡土墙<sup>[8]</sup>、锚定板式挡土墙<sup>[9-10]</sup>、加筋土挡土墙<sup>[11-14]</sup>、土钉式挡土墙<sup>[15-16]</sup>、桩板式挡土墙<sup>[17-20]</sup>等,另外,也有学者提出一些新颖的挡墙结构,如土-砌体组合挡土墙<sup>[21]</sup>、纤维增强塑料土工格栅挡土墙<sup>[22]</sup>、椅式桩板挡土墙<sup>[23]</sup>、树根桩挡土墙<sup>[24-25]</sup>、H形砌块挡土墙<sup>[26]</sup>等。

传统的重力式挡土墙、衡重式挡土墙、悬臂式挡土墙、扶壁式挡土墙、锚杆式挡土墙、锚定板式挡土墙只能适用于低路堑和路堤边坡的情况,对于高路堑和高路堤的边坡,不宜使用,而加筋挡土墙属于柔性支挡结构,墙体变形较大,而且对墙后填筑料的要求比较高,不经济。桩板式挡土墙适用范围较广,主要用于表层土及强风化层较薄的均匀岩石地基,挡土墙墙高可较大,因此,该支挡结构非常适合用于山区道路边坡加固。但是,传统的桩板式结构由于抵抗水平荷载的需要,桩和板的尺寸通常做得较大,桩体的布置较密,不经济。因此,笔者基于水利工程中常常采用的高拱坝结构原理,提出一种用于山区道路的桩拱组合式挡土墙结构(专利公开号:ZL201810122638.0)<sup>[27]</sup>,将传统的桩板挡土墙中的平板构件换成拱板构件,利用拱板受压的优势大大减小了板件的厚度,节省了造价,同时,挡土墙的承载力不会降低。

主要针对桩拱组合式挡土墙这一新型支挡结构,开展设计计算方法和结构优化的研究,通过理论推导,提出桩拱组合式挡土墙的简化设计计算方法,为桩拱组合式挡土墙在现场应用提供理论依据。

## 1 桩拱组合式挡土墙结构形式

如图 1 所示,桩拱组合式挡土墙主要有拱形挡板和抗滑桩组成,拱形挡板的弧线可以采用半圆,也可以采用圆弧,抗滑桩采用矩形截面桩。桩拱组合式挡土墙根据不同施工方法可以分为装配式桩拱组合式挡土墙和现浇式桩拱组合式挡土墙两种。对于装配式桩拱组合式挡土墙,拱形挡板和矩形截面桩可以预制,预制矩形桩通过静压或者其他方式打入地基,预制拱板通过螺栓与预制矩形桩连接,拱板稍

微嵌入土层即可。现浇式桩拱组合式挡土墙拱形挡板和矩形截面桩通过现场钻孔灌注现浇而成,前者的施工速度较快,后者的整体性能更好,可以视现场调节选择不同的形式。

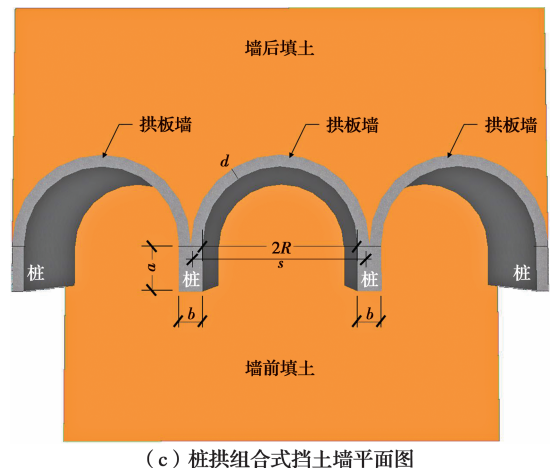
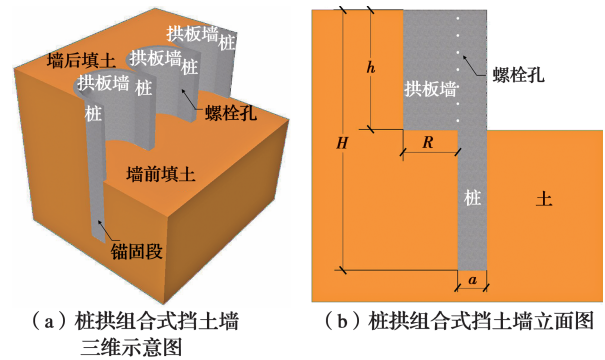


图 1 桩拱组合式挡土墙的结构形式

Fig.1 Structure of pile-arching retaining wall

为了方便分析,定义矩形桩桩长为  $H$ 、桩体悬臂长度为  $h$ ,矩形桩体截面长为  $a$ 、宽为  $b$ ,相邻两桩的间距为  $s$ ,拱板的厚度为  $d$ ,拱板的横跨为  $2R$ (净跨)。

## 2 理论模型

桩拱组合式挡土墙主要包含拱板和矩形截面抗滑桩两部分,拱板的作用是将土压力传递给抗滑桩,因此,理论模型需要分别考虑拱板的稳定性以及抗滑桩的稳定性。理论模型分为拱板主动土压力理论模型和抗滑桩受力理论模型。

### 2.1 拱板主动土压力计算模型

拱板主动土压力理论建立在以下基本假设的基础之上:

1) 拱板墙后土体为无黏性砂土,满足摩尔-库伦屈服准则。土体的摩擦角为  $\varphi$ ,土体的弹性模量为  $E_s$ ,土体的泊松比为  $\nu_s$ 。

2) 拱板墙后土体达到极限平衡状态时,土体的破坏面为直线形,并且破坏面和水平面之间的夹角为  $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$ 。

3) 拱板墙和土体接触面粗糙,且接触面摩擦角为  $\delta$ 。

4) 在拱板-土体接触面位置处,相比于土体竖向位移( $z$  方向)而言,土体的水平位移( $xy$  平面内)较小,因此,传统的挡土墙理论模型中的平面应变假定仍然成立。

5) 拱板环向应力始终为中主应力  $\sigma_2$ ,而  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  始终在  $xz$  平面以内,也即不考虑拱板-土体接触面位置处环向的土拱效应,土拱效应只发生在  $xz$  平面以内。

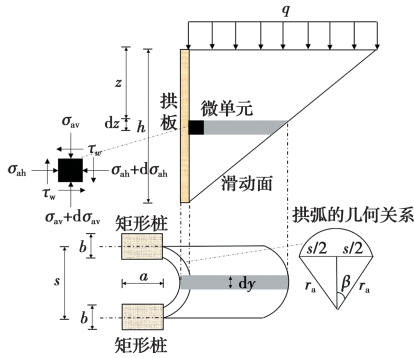


图 2 拱板力学模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of mechanics model of arch plate

基于以上假定推导拱板主动土压力的计算表达式。拱板的主动土压力系数可以定义为

$$K_{aw} = \frac{\sigma_{ahw}}{\sigma_v} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{ahw}$  为拱板-土体接触面处土体的水平主动土压力,  $\sigma_v$  为图 2 中的土条薄层上表面的平均竖向应力。需要注意的是,此处采用的是平均的竖向应力  $\sigma_v$ ,这是由于在土条薄层上表面不同位置处的竖向应力不一样(主应力旋转)。根据 Paik 等<sup>[28]</sup>的研究,平均竖向应力  $\sigma_v$  的表达式可以写成

$$\sigma_v = \sigma_1 \left( 1 - \frac{N-1}{3N} \cos \theta \right) \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{(N-1) \pm \sqrt{(N-1)^2 - 4N \tan^2 \delta}}{2 \tan \delta} \right] \quad (3)$$

式中:  $N = \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$ 。

将式(2)代入式(1),可以得到主动土压力系数的表达式为(具体推导参考文献[28])

$$K_{aw} = \frac{3(N \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}{3N - (N-1) \cos^2 \theta} \quad (4)$$

基于式(2)、式(3)、式(4),另外根据土条薄层在竖向的力平衡条件,可以得到平均竖向应力  $\sigma_v$  的最终表达式

$$\sigma_v = \frac{\gamma h}{1 - K_{aw} \tan \delta \tan \alpha} \times \quad (5)$$

$$\left[ \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{K_{aw} \tan \delta \tan \alpha} - \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \right] + q$$

将式(5)代入式(1),拱板挡土墙的主动土压力可以表示为

$$\sigma_{ahw} = \frac{\gamma h K_{aw}}{1 - K_{aw} \tan \delta \tan \alpha} \times \quad (6)$$

$$\left[ \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{K_{aw} \tan \delta \tan \alpha} - \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \right] + K_{aw} q$$

当拱板墙和土体接触面光滑,即接触面摩擦角  $\delta = 0$  时,式(6)退化为

$$\sigma_{ahw} = \gamma z K_{aw} + K_{aw} q \quad (7)$$

式(7)即为经典的无黏性土中朗肯土压力解答。

## 2.2 抗滑桩计算模型

图 3 给出了抗滑桩计算模型,该模型建立在以下基本假设的基础之上:

- 1) 桩体为线弹性体。
- 2) 拱板主动土压力全部传递到桩的悬臂端。
- 3) 桩体和土体接触面粗糙,且接触面摩擦角为  $\delta_p$ 。

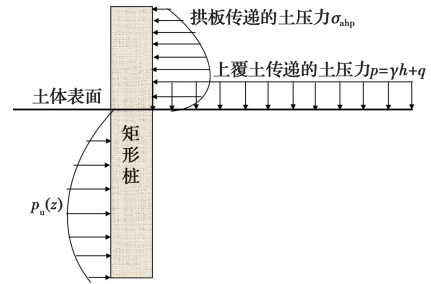


图 3 抗滑桩模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of anti-slide pile model

基于拱板主动土压力的计算模型,利用拱板墙后土压力等于拱板墙作用在桩上的土压力原理,可以得到单根矩形截面桩悬臂部分所承担的土压力为

$$\sigma_{ahq} = \frac{\sigma_{ahw} h C_{拱弧}}{2dh} = \frac{\sigma_{ahw} C_{拱弧}}{2d} = \frac{\sigma_{ahw} r_a \beta}{d} \quad (8)$$

式中:  $C_{拱弧}$  为拱板横截面外弧的周长;  $d$  为拱板板厚。

将式(6)代入式(8),可以得到单根矩形截面桩悬臂部分所承担的土压力计算公式

$$\sigma_{ahq} = \frac{\gamma h K_{aw} r_a \beta}{(1 - K_{aw} \tan \delta \tan \alpha) d} \times \quad (9)$$

$$\left[ \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{K_{aw} \tan \delta \tan \alpha} - \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \right] + K_{aw} q \frac{r_a \beta}{d}$$

为了方便,在抗滑桩模型中选取桩基悬臂端的底部作为坐标原点,如图 4。因此,式(9)中的变量  $z$  需要用  $z+h$  来代替,可以得到

$$\sigma_{\text{ahq}} = \frac{\gamma h K_{\text{aw}} r_a \beta}{(1 - K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha) d} \times \left[ \left( -\frac{z}{h} \right)^{K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha} + \frac{z}{h} \right] + K_{\text{aw}} q \frac{r_a \beta}{d} \quad (10)$$

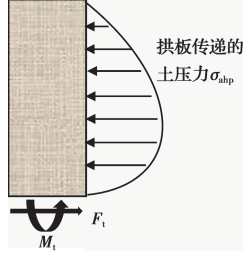


图 4 桩基悬臂端受力分析

Fig.4 Force analysis of cantilevered part of pile

悬臂端下部的剪力和弯矩的表达式

$$F_t = 2 \int_{-h}^0 \sigma_{\text{ahq}} dz = \frac{2\gamma h K_{\text{aw}} r_a \beta}{(1 - K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha)} \times \int_{-h}^0 \left[ \left( -\frac{z}{h} \right)^{K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha} + \frac{z}{h} \right] dz + 2K_{\text{aw}} q r_a \beta h = \quad (11)$$

$$\frac{2\gamma h^2 K_{\text{aw}} r_a \beta}{(1 - K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha)} \times \left( \frac{1}{1 + K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha} - \frac{1}{2} \right) + 2K_{\text{aw}} q r_a \beta h$$

$$M_t = 2 \int_{-h}^0 \sigma_{\text{ahq}} (-z) dz = \frac{2\gamma h K_{\text{aw}} r_a \beta}{(1 - K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha)} \times \int_{-h}^0 \left[ -z \left( -\frac{z}{h} \right)^{K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha} - \frac{z^2}{h} \right] dz + K_{\text{aw}} q r_a \beta h^2 = \quad (12)$$

$$\frac{2\gamma h^3 K_{\text{aw}} r_a \beta}{(1 - K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha)} \times \left( \frac{1}{2 + K_{\text{aw}} \tan \delta \tan \alpha} - \frac{1}{3} \right) + K_{\text{aw}} q r_a \beta h^2$$

当拱板墙和土体接触面摩擦角  $\delta=0$  的时候,式(11)和式(12)退化为

$$F_t = \gamma h^2 K_{\text{aw}} r_a \beta + 2qh K_{\text{aw}} r_a \beta \quad (13)$$

$$M_t = \frac{1}{3} \gamma h^3 K_{\text{aw}} r_a \beta + qK_{\text{aw}} r_a \beta h^2 \quad (14)$$

此外注意到,桩体悬臂端右侧有上覆土体以及荷载传递的土压力  $p = \gamma h + q$ ,其中, $\gamma$  为土体的重度, $h$  为拱板墙的高度。该土压力在桩身产生的附加应力可以通过式(6)近似获得。

$$\sigma_{\text{ahp}} = \frac{\gamma h K_{\text{aw}}}{1 - K_{\text{aw}} \tan \delta_p \tan \alpha} \times \left[ \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{K_{\text{aw}} \tan \delta_p \tan \alpha} - \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \right] + K_{\text{aw}} (q + \gamma h) \quad (15)$$

根据 API 规范<sup>[29]</sup>可知,砂土中水平受荷单桩极

限水平抗力  $p_u$  可以表示为

$$p_u = \min \{ (C_1 z + C_2 D) \gamma z, C_3 D \gamma z \} \quad (16)$$

式中: $\gamma$  为土体的重度; $D$  为桩体的等效直径,对于矩形桩而言, $D = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}$ , $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为经验系数,取决于砂土的摩擦角,该参数可以通过查表得到,为了方便我们对 API 规范中关于这 3 个参数的曲线进行拟合,得到经验公式

$$C_1 = 0.19e^{\varphi/12} - 0.24 \quad (17)$$

$$C_2 = 0.18e^{\varphi/12} - 0.21 \quad (18)$$

$$C_3 = 0.50e^{\varphi/7.46} + 0.43 \quad (19)$$

式中:摩擦角  $\varphi$  的单位为( $^\circ$ )。

为了获得桩体的极限水平荷载,进行桩体抗倾覆的力矩平衡计算。假设桩端为桩体的转动点,对于极限水平抗力  $p_u$  产生的抗滑力矩可以表示为

$$M_u = \min \{ M_{u1}, M_{u2} \} \quad (20)$$

式中:

$$M_{u1} = \int_0^{H-h} p_u (H-h-z) b dz = \int_0^{H-h} \gamma b z (C_1 z + C_2 D) (H-h-z) dz = \quad (21)$$

$$\frac{\gamma b C_1}{12} (H-h)^4 + \frac{\gamma b D C_2}{6} (H-h)^3$$

$$M_{u2} = \int_0^{H-h} p_u (H-h-z) b dz =$$

$$\int_0^{H-h} C_3 D \gamma b z (H-h-z) dz = \quad (22)$$

$$\frac{\gamma b D C_3}{6} (H-h)^3$$

由拱板传递的土压力产生的滑动力矩  $M_s$  可以表示为

$$M_s = M_t + F_t (H-h) \quad (23)$$

由上覆压力  $p$  产生的滑动力矩  $M_p$  可以表示为

$$M_p = \int_0^{H-h} \sigma_{\text{ahp}} (H-h-z) b dz \quad (24)$$

式中: $\sigma_{\text{ahp}}$  可以由式(15)获得,此处直接采用 Matlab 进行数值积分。

根据滑动力矩等于抗滑力矩的原理可知

$$M_u = M_s + M_p \quad (25)$$

将滑动和抗滑力矩的表达式代入式(25),可得极限荷载  $q_u$  (墙后土体表面荷载),从而获得桩拱组合式挡土墙的极限荷载。

### 3 参数分析

从前述分析可以看出,影响极限荷载  $q_u$  的因素主要包括桩体截面尺寸  $a$  和  $b$ 、桩长  $H$ 、桩的悬臂长度  $h$ 、拱板的厚度  $d$ 、拱弧的半径  $r_a$ 、拱弧的弧度  $\beta$ 、相邻两桩的间距  $s = 2r_a \sin \beta$ 、拱板墙后土体摩擦角  $\varphi$ 、拱板墙与土体接触面接触面摩擦角  $\delta$ 、桩土接触面摩擦角  $\delta_p$ 。对极限荷载  $q_u$  进行归一化处理  $q_u/\gamma h$ , 以下讨论归一化的极限荷载  $q_u/\gamma h$  与这 10 个参数的关系。根据前述理论推导可以发现,拱板的厚度  $d$  没有出现在最终的极限荷载计算公式里,说明拱板的厚度  $d$  并不影响极限荷载,实际上,从物理角度也可以理解,拱板只是起到了荷载传递的作用,在保证拱结构本身稳定的前提下,其厚度并不会影响到结构的极限荷载。

#### 3.1 矩形桩几何参数的影响

为了方便分析,将矩形桩的 4 个参数  $a$ 、 $b$ 、 $H$ 、 $h$  换为  $a/b$ 、 $b$ 、 $H/h$ 、 $h$  等 4 个参数,计算选取的参数如图 5~图 8 所示。

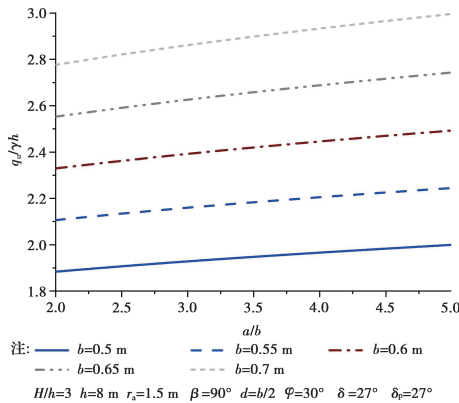


图 5 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与矩形桩截面长宽比  $a/b$  变化关系  
 Fig.5 Variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with the ratio of  $a/b$  of rectangular pile

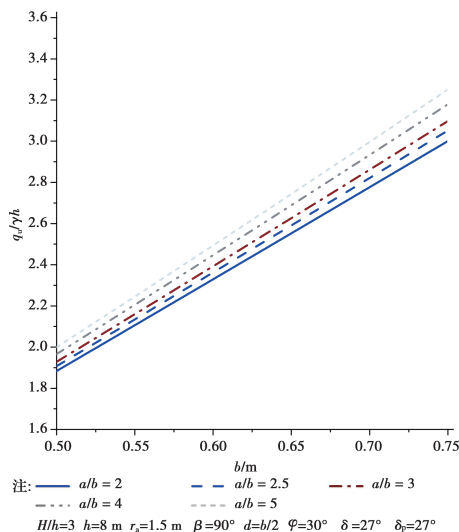


图 6 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与矩形桩截面宽  $b$  变化关系  
 Fig.6 Variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with the width  $b$  of rectangular pile

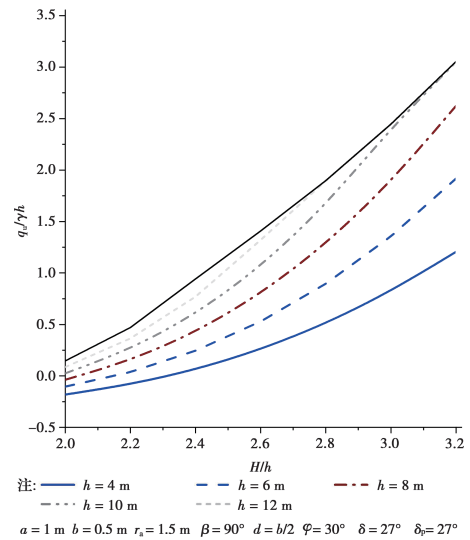


图 7 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与矩形桩  $H/h$  变化关系  
 Fig.7 Variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with the ratio of  $H/h$  of rectangular pile

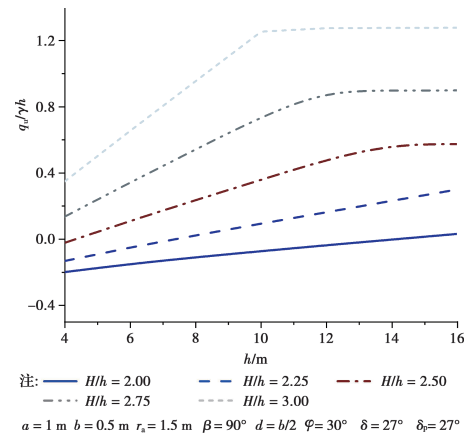


图 8 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与矩形桩悬臂端长  $h$  变化关系  
 Fig.8 Variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with the length  $h$  of cantilevered part of pile

图 5 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  随矩形桩截面长宽比  $a/b$  的变化关系。从图 5 可以看出,随着  $a/b$  的增加,  $q_u/\gamma h$  近似线性增加。进一步分析可以发现,矩形截面宽  $b$  越大,极限荷载  $q_u/\gamma h$  越大,而且极限荷载  $q_u/\gamma h$  随着长宽比  $a/b$  的增长率也有所增加。图 6 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  随矩形桩截面宽  $b$  的变化规律。由图 6 可以看出,  $q_u/\gamma h$  随矩形桩截面宽  $b$  的增加呈现曲线形的增加。图 5 和图 6 实际上表明了增加矩形截面的长宽比可以有效提高桩拱组合式挡土墙的极限荷载。

图 7 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  随矩形桩  $H/h$  的变化关系。从图 7 可以看出,随着  $H/h$  的增加,极限荷载先缓慢增加,当  $H/h$  大于一定数值的时候(拐点),极限荷载  $q_u/\gamma h$  随着  $H/h$  的增加而快速增加。极限荷载  $q_u/\gamma h$  与矩形桩  $H/h$  的变化关系存在明显的拐点,拐点的位置取决于桩的悬臂端长度  $h$ ,  $h$  越大,拐点的位置对应的  $H/h$  数值就越小。另外,悬臂端长度  $h$  越大,极限荷载随着  $H/h$  的增长趋势就越来越大,这表明,提高桩的嵌入深度,可以



显著提高桩拱组合式挡土墙的极限荷载。图 8 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  随矩形桩悬臂端长  $h$  的变化关系。从图 8 可以发现,当  $H/h$  小于 2.5 时,极限荷载  $q_u/\gamma h$  随着矩形桩悬臂端长  $h$  的增加而线性增加,而当  $H/h$  大于 2.5 时,极限荷载先是随着的增加而线性增加,当悬臂端长度  $h$  大于某一个数值时(该计算条件下约为 10 m),增加悬臂端长  $h$  并不影响桩拱组合式挡土墙的极限荷载。

### 3.2 拱板几何参数的影响

图 9 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  与拱板拱弧半径  $r_a$  的变化关系。从图 9 可以看出,  $q_u/\gamma h$  随着  $r_a$  的增加不断减小,并且减小的速率逐渐变缓。通过该关系可知,在设计时可以合理地增加拱的跨度(即桩间距),在不影响安全系数的情况下,可以大大节省材料。图 10 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  与拱板拱弧角度  $\beta$  的变化关系。从图 10 可以看出,随着拱板拱弧角度  $\beta$  的增大,极限荷载  $q_u/\gamma h$  减小,减小速率逐渐变缓。

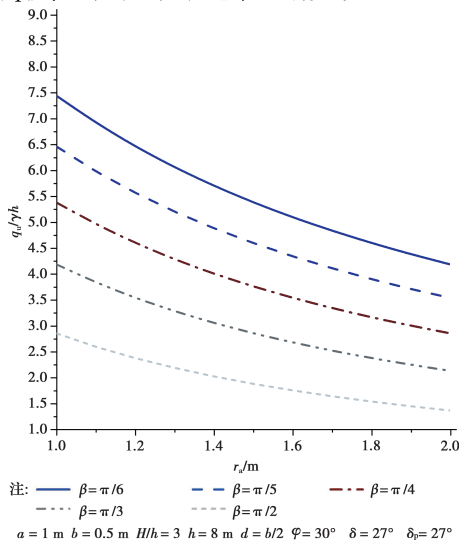


图 9 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与拱板拱弧半径  $r_a$  变化关系  
Fig.9 Variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with radius  $r_a$  of arch plate

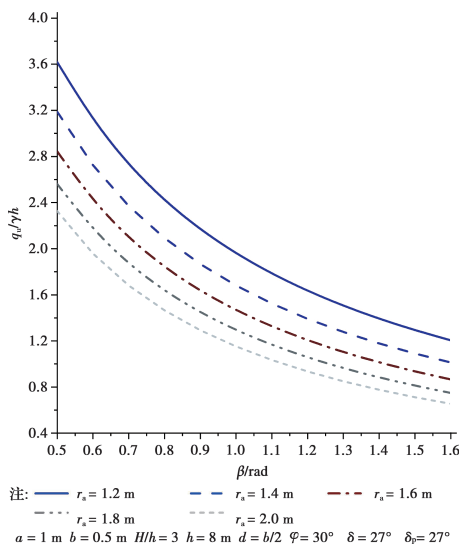


图 10 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与拱板拱弧角度  $\beta$  变化关系  
Fig.10 Variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with angle  $\beta$  of arch plate

### 3.3 土体参数的影响

考虑到拱板与桩体所用材料均为混凝土,因此,认为拱板-土接触面摩擦角  $\delta$  等于桩土接触面摩擦角  $\delta_0$ 。图 11 所示为极限荷载  $q_u/\gamma h$  与土体摩擦角  $\varphi$  变化关系。从图 11 可以发现,极限荷载随着土体摩擦角的增加而迅速增加,说明增大土体的摩擦角能够显著提高桩拱组合式挡土墙的承载力。从图 12 中可以看出,增加拱板-土接触面摩擦角  $\delta$  同样也能增大极限荷载,但是拱板-土接触面摩擦角  $\delta$  对极限荷载的影响相对较小,因此,提高接触面的摩擦角并不能显著提高桩拱组合式挡土墙的极限承载力。

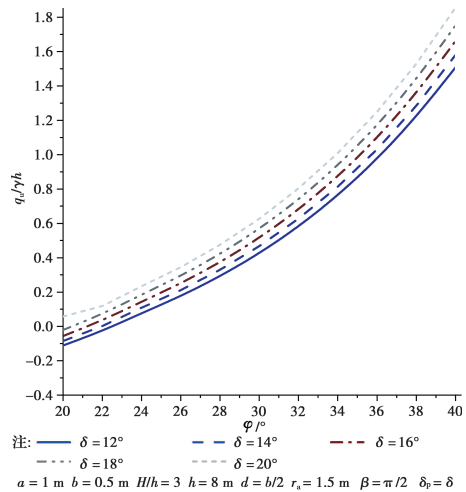


图 11 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与土体摩擦角  $\varphi$  变化关系  
Fig.11 variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with friction angle  $\varphi$  of soil

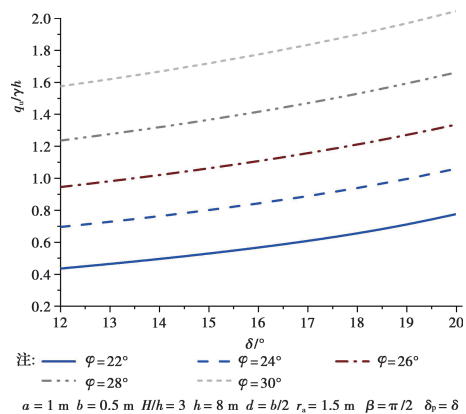


图 2 极限荷载  $q_u/\gamma h$  与接触面摩擦角  $\delta$  变化关系  
Fig.12 variation of normalized limit load  $q_u/\gamma h$  with interface friction angle  $\delta$

## 4 结论与建议

提出一种适用于山区道路的新型桩拱组合式挡土墙结构形式,并给出简化的设计计算方法,得到以下主要结论:

1)基于土压力和桩基水平承载力理论,分别建立拱板主动土压力计算模型和抗滑桩计算模型,利用拱板荷载传递给桩基的基本原理,建立桩拱挡土墙整体结构的力学平衡方程,通过求解平衡方程获得桩拱挡土墙整体结构的极限承载力计算公式。

2)通过参数分析,分别讨论了不同的桩体几何尺寸、拱板几何尺寸以及土体参数对桩拱组合式挡土墙的极限承载力的影响,结果表明,增加矩形截面的长宽比、桩体嵌入深度、土体摩擦角等可以有效提高桩拱组合式挡土墙的极限荷载。

3)未来可以考虑在以下几个方面继续开展研究:开展大比例模型试验或者现场试验研究,进一步检验并细化本文的设计方法;开展粘性土中桩拱组合式挡土墙结构稳定理论设计方法研究;开展水流侵蚀(水毁)以及地震动力荷载等条件下桩拱组合式挡土墙的稳定研究;开展地震作用下桩拱连接处抗震性能设计研究(针对装配式桩拱组合式挡土墙结构)。

#### 参考文献:

- [1] 王丽艳,刘汉龙. 回填砂土重力式挡土墙地震土压力研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 26-33.  
WANG L Y, LIU H L. Study of seismic active earth pressure acted on gravity wall in backfill sand [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 26-33.(in Chinese)
- [2] 陈栋梁,党进谦. 重力式挡土墙的截面优化设计研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1969-1973.  
CHEN D L, DANG J Q. Study on optimum cross-section of gravity retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1969-1973.(in Chinese)
- [3] 张家国. 衡重式挡土墙受力及变形特性离心模型实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.  
ZHANG J G. Centrifugal model test study on the soil pressure and deformation of retaining wall with equilibratior [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.(in Chinese)
- [4] 蒋鑫,耿建宇,曾诚,等. 山区公路拓宽路基与衡重式挡土墙动态相互作用的数值模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(Sup1): 443-450.  
JIANG X, GENG J Y, ZENG C. Numerical simulation of dynamic interaction between widening embankment and balance weight retaining wall in mountain region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup1): 443-450.(in Chinese)
- [5] 曹頔. 悬臂式挡土墙离心试验与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
CAO D. Centrifugal test and analysis of cantilever retaining structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.(in Chinese)
- [6] 杨雪强,何世秀. 对扶壁式挡土墙上主动土压力的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(Sup1): 996-999.  
YANG X Q, HE S X. Research on active soil pressure of counterfort retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup1): 996-999.(in Chinese)
- [7] 魏元友. 扶壁式及L式挡土墙模型土压力试验[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 20-27.  
WEI Y Y. Research on calculating methods of soil pressures on counterfort walls and L-shaped walls [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(1): 20-27.(in Chinese)
- [8] 周恒宇. 锚杆挡土墙在边坡防护中力学机理的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
ZHOU H Y. The research on mechanical mechanism of the slope protection on anchored wall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.(in Chinese)
- [9] 张续莹,魏殿兴. 锚定板挡土结构的实测土压力及其分析研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 73-79.  
ZHANG X X, WEI D X. Neasurement and analysis of earth pressure in anchor slab retaining structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 73-79.(in Chinese)
- [10] 范永丰. 公路挡土墙的设计方法及优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- [11] 杨广庆,周敏娟,张保健. 加筋土挡土墙水平位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1248-1252.  
YANG G Q, ZHOU M J, ZHANG B J. Study on the horizontal deformation of reinforced retaining walls of soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1248-1252.(in Chinese)
- [12] 李镜培,马原,饶平平. 考虑位移的柔性挡墙上土压力计算[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2937-2941.  
LI J P, MA Y, RAO P P. Calculation of earth pressure against flexible retaining wall considering displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2937-2941.(in Chinese)
- [13] 李海深,杨果林,邹银生. 加筋土挡土墙动力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 28-31, 49.  
LI H S, YANG G L, ZOU Y S. Analysis of dynamic character of reinforced earth retaining wall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 28-31, 49.(in Chinese)
- [14] PINTO M I M, COUSENS T W. Effect of the foundation quality on a geotextile-reinforced, brick-faced soil retaining wall [J]. Geosynthetics International, 2000, 7(3): 217-242.
- [15] 杨育文. 土钉墙计算方法的适用性[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3357-3364.  
YANG Y W. Applicability of computational methods for soil-nailing walls [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3357-3364.(in Chinese)
- [16] SRINIVASA MURTHY B R, SIVAKUMAR BABU G L,

- SRINIVAS A. Analysis of prototype soil-nailed retaining wall[J]. *Ground Improvement*, 2002, 6(3): 129-136.
- [17] YOUNG D K, HO E W L. The observational approach to design of a sheet-piled retaining wall [J]. *Géotechnique*, 1994, 44(4): 637-654.
- [18] GAUDIN C, GARNIER J, THOREL L. Physical modelling of a cantilever wall[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2004, 4(2): 13-26.
- [19] 曲宏略, 张建经. 桩板式抗滑挡墙地震响应的振动台试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 743-750.
- QU H L, ZHANG J J. Research on seismic response of anti-sliding sheet pile wall by shaking table test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 743-750.(in Chinese)
- [20] 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 Z Y, ZHANG Y X, DONG J. 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)
- [21] 邱红胜, 郑俊杰. 一种新型挡土墙设计方法[J]. *岩土力学*, 2002, 23(Sup1): 165-168.
- QIU H S, ZHENG J J. Design method of a new kind of retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(Sup1): 165-168.(in Chinese)
- [22] MIYATA K. Walls reinforced with fiber reinforced plastic geogrids in Japan[J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(1): 1-11.
- [23] 姚裕春, 李安洪, 苏谦. 陡坡椅式桩板结构受力模式及计算方法分析[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(8): 71-76.
- YAO Y C, LI A H, SU Q. Analysis of force model and calculation method of chair-shaped sheet-pile structure constructed on steep slope [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(8): 71-76.(in Chinese)
- [24] 周雪峰, 吕江新, 魏伟. 套打树根桩的重力式挡土墙设计[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(Sup2): 1426-1428.
- ZHOU X F, LU J X, WEI W. Design of gravity parapet with striking tree - root pile [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(Sup2): 1426-1428.(in Chinese)
- [25] 龙淑芝. 树根桩技术在重力式挡墙地基加固中的应用[J]. *公路工程*, 2011, 36(4): 136-138.
- LONG S Z. Application of root piles in the foundation treatment of gravity retaining walls [J]. *Highway Engineering*, 2011, 36(4): 136-138.(in Chinese)
- [26] 赵明华, 罗宏, 邹新军. 公路轻型砌块式挡土墙受力特性及设计计算方法研究[J]. *中南公路工程*, 2005, 30(1): 5-27.
- ZHAO M H, LUO H, ZOU X J. Analysis and design of light duty concrete block highway retaining wall[J]. *Central South Highway Engineering*, 2005, 30(1): 5-27.(in Chinese)
- [27] 周航, 刘汉龙, 董瑞琨, 等. 一种装配式桩拱组合挡土墙及其施工方法: 201810122638. 0[P]. 2018-02-07.
- [28] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 643-653.
- [29] Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-Working stress design: RP2A-WSD[R]. 21st ed. API, 2000.

(编辑 王秀玲)