

抗滑桩合理桩间距分析

孙承吉¹, 刘明朋^{2*}, 于建泉¹, 江建宏³, 刘远强⁴

¹山东高速股份有限公司, 山东 济南

²山东大学, 山东 济南

³山东省交通规划设计院有限公司, 山东 济南

⁴烟台市水利建筑勘察设计院, 山东 烟台

Email: sunchengji_sd@163.com, *1398404100@qq.com

收稿日期: 2020年12月12日; 录用日期: 2021年1月4日; 发布日期: 2021年1月13日

摘要

土拱效应是抗滑桩发挥支挡作用的前提。而桩间距与桩的土拱效应是密切相关的。然而, 前人的研究对桩侧摩擦土拱的考虑不够充分且大多将土拱的轴应力视为均匀分布的。考虑桩端直接土拱和桩侧摩擦土拱同时作用, 本文提出了一种计算合理桩间距的新方法。本方法考虑了两种土拱的整体剪切破坏与屈服条件并使用Moho-Coulomb准则分别推导了直接土拱拱脚的内缘点与外缘点的屈服应力。基于极限平衡理论, 提出了合理桩间距的控制方程。案例研究表明, 本文的计算结果更符合工程实际。最后根据本文的公式推导了两种土拱的极限承载力之比。

关键词

抗滑桩, 土拱效应, 合理桩间距, 极限平衡理论, 极限承载力

Analysis of Pile Space of Anti-Slide Piles

Chengji Sun¹, Mingpeng Liu^{2*}, Jianquan Yu¹, Jianhong Jiang³, Yuanqiang Liu⁴

¹Shandong High-Speed Group Co.Ltd., Jinan Shandong

²Shandong University, Jinan Shandong

³Jinan Jinqi Highway Survey & Design Co., Ltd., Jinan Shandong

⁴Yantai Institute of Water Conservancy Architectural Survey and Design, Yantai Shandong

Email: sunchengji_sd@163.com, *1398404100@qq.com

Received: Dec. 12th, 2020; accepted: Jan. 4th, 2021; published: Jan. 13th, 2021

Abstract

The soil arching effect is the prerequisite for the anti-slide pile to play the supporting role. Pile space is closely related to the soil arching behind piles. However, previous studies rarely consi-

*通讯作者。

dered the friction soil arching effect between piles and regarded the axis stress uniformly distributed. Considering end-bearing soil arching and friction soil arching simultaneously, a new method was proposed to calculate the reasonable pile spacing. The said method considered the general shear failure and the yielding failure of these two soil arching. The yielding stress of inner-edge point and outer-edge point at arch-foot of the end-bearing soil arching were taken into consideration respectively. Based on the ultimate balance theory, the controlling equations of pile spacing were established. The case study showed that the method in this research conforms better to practice compared to previous researches. Finally, the ratio of the ultimate bearing capacity of the two soil arches was deduced according to the formulas in this research.

Keywords

Anti-Slide Pile, Soil Arching Effect, Reasonable Pile Spacing, Ultimate Balance Theory, Ultimate Bearing Capacity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

1. 引言

抗滑桩由于其占地面积小, 造价低, 支护作用显著而广泛应用于边坡或基坑工程中。土拱效应作为桩-土相互作用的主要部分, 对抗滑桩的支护效应起着重要作用[1]。土拱效应本质是由于不均匀位移引起的应力转移现象, 土拱效应可以将滑坡推力转移至桩身, 进而传递至深层地基中。而在抗滑桩的土拱效应各影响因素中, 桩间距已经被证实为最关键的影响因素[2]。桩间距过大可能造成抗滑作用失效, 桩间距过小又难以充分利用土体自身强度, 容易造成浪费。为了揭示土拱效应和桩间距的关系, 首先介绍土拱效应。

土拱效应广泛存在于岩土工程领域。Terzaghi [3]通过活动门试验证实了土拱效应的存在并将其定义为由静止土体向屈服土体的应力转移现象。随后 Liang *et al.* [4]、Şahin [5]、Yamin [6]通过研究发现, 桩间距与土拱效应的形成是密切相关的。若桩间距过大, 抗滑桩便不能充分发挥土拱效应并会降低其控制土体滑移的能力。

在考虑土拱效应的基础上, 许多学者都发展了计算合理桩间距的理论。周德培等[7]、蒋良淮等[8]及 Chen *et al.* [9]假设桩端直接土拱承担所有的滑坡推力并认为土拱形状为抛物线形, 因此根据 Moho-Coulomb 准则推导了合理桩间距的求法。一些研究[10] [11] [12]则假设桩侧摩擦土拱承担所有承担所有的滑坡推力。但上述研究仅考虑了一种土拱存在的情况, Li *et al.* [2]通过数值模拟指出直接土拱与摩擦土拱对抵抗滑坡推力均有贡献。Wu *et al.* [13]分析了两种两种土拱效应同时存在的情况并推导了桩间距的表达式。邱子义等[15]假设桩端直接土拱与桩侧摩擦土拱同时抵抗滑坡推力, 以土拱的整体滑裂为控制条件推导了合理桩间距。但是根据力学原理, 桩侧摩擦土拱并不直接承受滑坡推力。赵明华等[15]将桩间土分为直接土拱、拱间受压区和摩擦土拱, 将两种土拱的形状视为抛物线, 进而通过极限平衡理论给出了合理桩间距的求法。但 Zhang *et al.* [16]指出受桩后静止土体作用, 直接土拱形状应为椭圆形。且土拱轴力不应为均匀分布, 因为直接土拱内外缘点的屈服状态是不同的。以上研究证明, 对于合理桩间距的求法仍然有所不足。

本文同时考虑桩端直接土拱和桩侧摩擦土拱同时作用, 进而提出了一种计算合理桩间距的新方法。本方法考虑了两种土拱的整体剪切破坏与屈服条件并使用 Moho-Coulomb 准则分别推导了直接土拱拱脚

的内缘点与外缘点的屈服应力。基于极限平衡理论，提出了合理桩间距的控制方程。由于方程的复杂性，采用 Matlab 软件求得了其数值解。案例研究表明，本文的计算结果更符合工程实际。最后根据本文的公式推导了两种土拱的极限承载力之比。

2. 理论分析

2.1. 基本假设

在实际工程中，矩形桩应用非常广泛，本文选择矩形桩为基本的研究对象。其他截面形式的桩可以等效为矩形桩。当桩截面的长度与宽度相差不大时，可认为桩端直接土拱与桩侧摩擦土拱共同存在，如图 1 所示。桩截面的宽度与长度分别为 b 和 a ，桩间净距为 l 。在直接土拱与摩擦土拱之间存在一个稳定受压区。现作出如下假设：

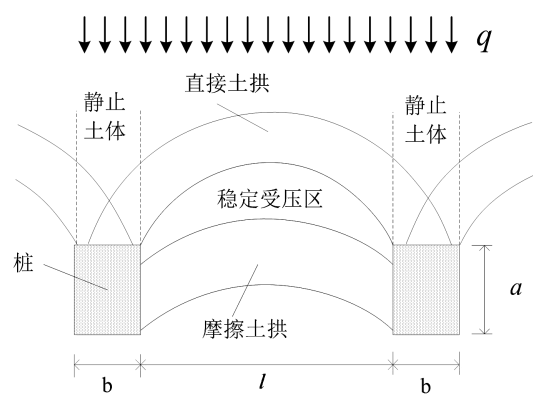


Figure 1. Diagram of soil arching effect
图 1. 土拱效应图示

- 1) 直接土拱承受全部的滑坡推力，摩擦土拱主要承受稳定受压区传递来的荷载而不直接承受滑坡推力。
- 2) 土拱效应形成后的大主应力轨迹线为合理拱轴线，在合理拱轴线截面上仅存在轴向应力而无剪应力与拉应力。
- 3) 对于土拱的破坏，认为土体屈服即破坏。

对于稳定受压区，其实际受力可认为是垂直于拱轴线分布的，如图 2(a)所示。根据对称性原理，其 X 方向(即布桩方向)的受力相互平衡。因此仅需考虑其 Y 方向的受力即可，简化受力如图 2(b)所示。直接土拱施加于稳定区的力为 p_1 ，摩擦土拱施加于稳定区的力为 p_2 ，则易知 $p_1 = p_2 = p$ 。

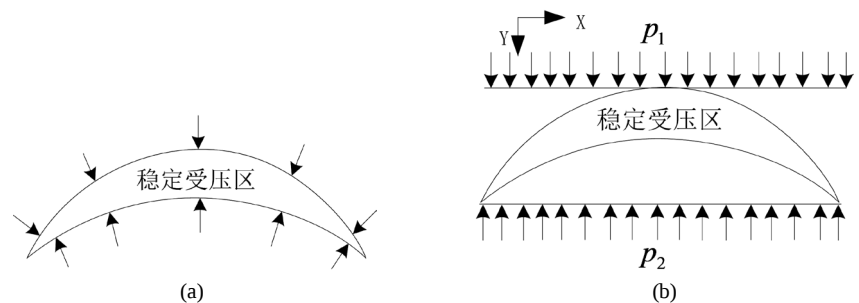


Figure 2. Diagram of force in stable compression zone. (a) Actual force in stable zone; (b) Simplified force in stable zone
图 2. 稳定受压区受力图示。(a) 稳定区实际受力；(b) 稳定区简化受力

2.2. 桩侧摩擦土拱

对于摩擦土拱, 忽略重力的影响, 则土拱模型可简化为平面应变模型。假设土拱后所受土压力 p_2 均匀分布于土拱上, 取单位桩长的土拱进行受力分析, 摩擦土拱模型如图 3 所示。其中摩擦土拱矢高为 f_2 , X 向及 Y 向拱脚反力分别为 X_2 与 Y_2 , 假设合理拱轴线为抛物线[15], 土拱轴线方程为:

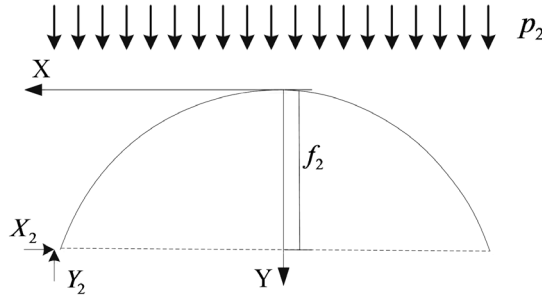


Figure 3. Force analysis of friction soil arching
图 3. 摩擦土拱受力分析

$$y = \frac{4f_2x^2}{l^2} \quad (1)$$

由静力平衡条件可知:

$$X_2 = \frac{pl^2}{8f_2} \quad (2)$$

$$Y_2 = \frac{pl}{2} \quad (3)$$

由拱的力学知识可知, 其拱顶处的轴应力小于拱脚处。对于桩侧摩擦土拱, 以拱脚处的破坏为控制条件, 易知其最不利截面为桩 - 土接触面, 故以桩 - 土接触面为滑裂面, 如图 4 所示。由滑裂面上的静力平衡可得:

$$X_2 \tan \delta + ca = Y_2 \quad (4)$$

其中 δ 为桩 - 土接触面的摩擦角, 可参照土体内摩擦角 φ 按经验取值。将方程(2)和方程(3)代入到方程(4)中, 可得:

$$\frac{pl^2}{8f_2} \tan \delta + ca = \frac{pl}{2} \quad (5)$$

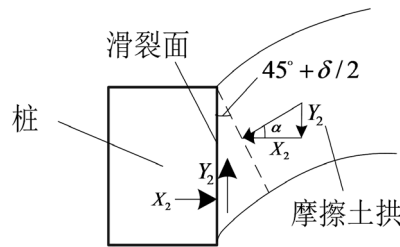


Figure 4. Force of friction soil arch foot
图 4. 摩擦土拱拱脚受力

由极限平衡理论, 滑裂面与大主应力面的夹角为 $45^\circ + \delta/2$, 则由图 4 可得:

$$\tan \alpha = \frac{Y_2}{X_2} = \frac{4f_2}{l} = \tan \left(45^\circ + \frac{\delta}{2} \right) \quad (6)$$

联立方程(5)、(6)可得:

$$p = \frac{2ca}{l \left[1 - \tan \left(45^\circ - \frac{\delta}{2} \right) \tan \delta \right]} \quad (7)$$

2.3. 桩端直接土拱

对于桩端直接土拱,其承受全部的滑坡推力,并受到稳定受压区土体的反作用力。同时根据 Terzaghi 土拱效应原理,应当考虑桩后静止土体的影响,故考虑桩后土体对土拱产生侧向的静止土压力。记直接土拱承受的滑坡推力为 q ,则土拱受到的侧向土压力大小为 $K_0 q$,其中 K_0 为静止土压力系数 $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$, ν 为泊松比,也可按 $K_0 \approx 1 - \sin \varphi$ 近似计算。受到被稳定区土体的作用力为 p_2 ,拱脚处的 X 方向与 Y 方向的拱脚反力分别为 X_1 和 Y_1 。直接土拱的受力图如图 5 所示,在受到侧向土压力作用时,土拱的拱轴线方程为椭圆线[16]:

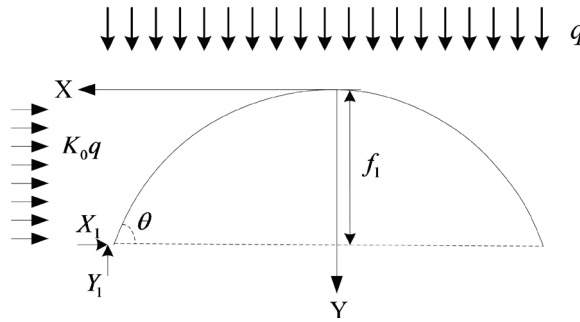


Figure 5. Force analysis of end-bearing soil arching
图 5. 直接土拱受力图示

$$\frac{x^2}{(B\sqrt{K_0})^2} + \frac{(y-B)^2}{B^2} = 1 \quad (8)$$

其中,

$$B = \frac{f_1}{2} + \frac{l^2}{8f_1K_0} \quad (9)$$

方程(8)显示,在考虑侧向土压力作用时,合理拱轴线形状为椭圆线的一部分。同样以拱脚处的破坏为控制条件,记拱脚处拱轴线与水平方向的夹角为 θ ,轴力为 F_N ,由静力平衡可知:

$$Y_1 = \frac{ql}{2} \quad (10)$$

$$\tan \theta = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\frac{l}{2}, y=f_1} = - \left. \frac{x}{K_0(y-B)} \right|_{x=\frac{l}{2}, y=f_1} = \frac{4f_1l}{l^2 - 4K_0f_1^2} \quad (11)$$

$$F_N \Big|_{x=\frac{l}{2}} = \frac{Y_1}{\sin \theta} = \frac{ql}{2} \sqrt{1 + \left[\frac{l^2 - 4K_0f_1^2}{4f_1l} \right]^2} \quad (12)$$

对于直接土拱，其土拱区域内的土体均达到屈服状态。记直接土拱拱脚处内缘点为点 A ，其轴应力为 σ_A ；直接土拱拱脚处外缘点为 B ，其轴应力为 σ_B 。为了便于计算，假设轴应力从 A 点至 B 点为线性分布的，如图 6(a)所示。

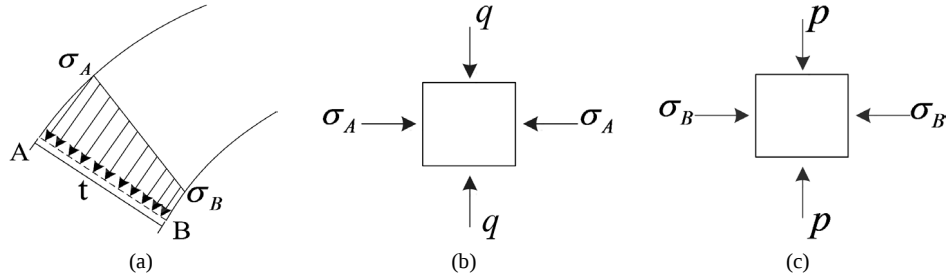


Figure 6. Stress state at the arch foot. (a) Axial stress distribution at the arch foot; (b) Stress state of point A; (c) Stress state of point B

图 6. 拱脚处的应力状态。(a) 拱脚处的轴应力分布；(b) A 点的应力状态；(c) B 点的应力状态

对于点 A ，其屈服主要源于承受滑坡推力，滑坡推力为小主应力，轴应力为大主应力，应力状态如图 6(b)所示，由摩尔 - 库伦屈服准则可得：

$$\sigma_A = q \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (13)$$

对于 B 点，其轴应力为大主应力，稳定区作用力 p 为小主应力，应力状态如图 6(c)所示，由摩尔 - 库伦屈服准则可得：

$$\sigma_B = p \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (14)$$

轴力可以看作轴应力沿土拱厚度的积分，则可以得到：

$$\frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} t = \sigma_N t = F_N \quad (15)$$

其中， σ_N 为平均轴应力，

$$\sigma_N = (\sigma_A + \sigma_B)/2 \quad (16)$$

假定直接土拱厚度等于桩截面宽度，即 $t = b$ ，将方程(15)代入到方程(12)可得：

$$f_1 = \frac{l}{2K_0} \left\{ \left[-\sqrt{\left(\frac{2\sigma_N b}{ql} \right)^2 - 1} + \sqrt{\left(\frac{2\sigma_N b}{ql} \right)^2 - 1 + K_0} \right] \right\} \quad (17)$$

式(17)即为土拱效应充分发挥时土拱矢高的表达式。由式(17)可见，对于某一特定工况，直接土拱的矢高与滑坡推力与桩间距有关。这一结论也符合工程实际。考虑直接土拱的破坏，根据极限平衡理论，滑裂面与大主应力面的夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ ，假定桩后稳定区为梯形受压区，如图 7 所示。则根据滑裂面上的静力平衡有：

$$\begin{aligned} & 2ct \cdot \csc(45^\circ - \varphi/2) + [2F_N \sin(45^\circ - \varphi/2) - ql \sin \beta - K_0 qt \csc(45^\circ - \varphi/2) \cos \beta] \tan \varphi \\ & = 2F_N \cos(45^\circ - \varphi/2) + ql \cos \beta \end{aligned} \quad (18)$$

其中，

$$\beta = 45^\circ - \theta + \varphi/2 \quad (19)$$

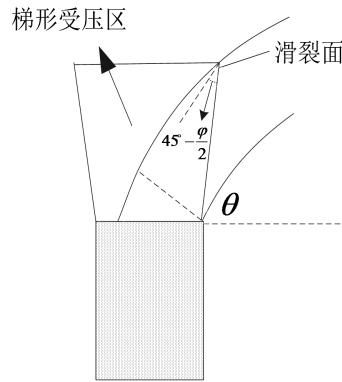


Figure 7. Compression zone of end-bearing soil arch foot
图 7. 直接土拱拱脚受压区

2.4. 合理桩间距的确定

对于合理桩间距的确定，需要同时满足桩间摩擦土拱与桩端直接土拱的极限平衡条件，即方程(7)与方程(18)需要同时满足，可得：

$$\begin{cases} 2ct \cdot \csc(45^\circ - \varphi/2) + [2F_N \sin(45^\circ - \varphi/2) - ql \sin \beta - K_0 qt \csc(45^\circ - \varphi/2) \cos \beta] \tan \varphi \\ = 2F_N \cos(45^\circ - \varphi/2) + ql \cos \beta \\ F_N = \frac{b}{2} [(q + p_2) \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 4c \tan(45^\circ + \varphi/2)] \\ p = \frac{2ca}{l [1 - \tan(45^\circ - \delta/2) \tan \delta]} \end{cases} \quad (20)$$

满足方程组(20)的桩间距 l 可以同时满足摩擦土拱与直接土拱的极限状态下的静力平衡，因此由方程组(20)求得的桩间距即为合理桩间距。但是方程组(20)非常复杂，为 l 的隐函数，故采用 Matlab 工具进行求解。对于方程(18)，等号左边可视为滑裂面上的抗滑力，右边为滑裂面上的下滑力，令：

$$\begin{aligned} F = & 2ct \cdot \csc(45^\circ - \varphi/2) + [2F_N \sin(45^\circ - \varphi/2) - ql \sin \beta - K_0 qt \csc(45^\circ - \varphi/2) \cos \beta] \tan \varphi \\ & - 2F_N \cos(45^\circ - \varphi/2) + ql \cos \beta \end{aligned} \quad (21)$$

若视 F_N 和 p_2 为参数，则合理桩间距的求解便转化为对方程(21)的解，即满足 $F \geq 0$ 时的方程的最小值解 l ，其数值方法为：给定一个较小的 l_1 ，代入方程(21)，若 $F < 0$ ，则迭代 $l_{i+1} = l_i + \Delta l$ ，将迭代后的 l_{i+1} 重新代入方程(21)，直至 l_{i+1} 满足 $F > 0$ ，然后输出 l_i ，则合理桩间距为：

$$L = b + l_i \quad (22)$$

3. 结果与讨论

3.1. 案例分析

马噶滑坡位于六盘水枢纽马噶车战 K253 + 539~K254 + 173 段。测段上覆第四系坡残积层(Q^{dl+el})黏土，下伏基岩为石炭系中统黄龙群(C_{zhm})灰岩夹白云岩。滑坡上部已形成滑动面，下部沿基岩滑动，测量可得滑坡推力为 $Q = 1023.3 \text{ kN/m}$ 。经室内土工试验，滑坡土体的强度指标为：粘聚力 $c = 44.3 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$ ，土体重度 $\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$ 。本工程采用抗滑桩进行支护，桩截面宽度 $b = 2 \text{ m}$ ，长度 $a = 2.5 \text{ m}$ ，桩身长度为 10 m ，则抗滑桩所受的单位滑坡推力为 $q = 102.3 \text{ kPa}$ 。取桩 - 土接触面的摩擦角为

$\delta = \varphi/2 = 11^\circ$ ，采用本文 2.4 节中的方法计算可得合理桩间净距为 5.92 m，本工程的实际桩间净距的取值为 6 m。为了便于对比，将本文及一些桩间距计算方法的结果列于表 1。

Table 1. Calculation results of pile spacing for some studies
表 1. 一些研究的桩间距计算结果

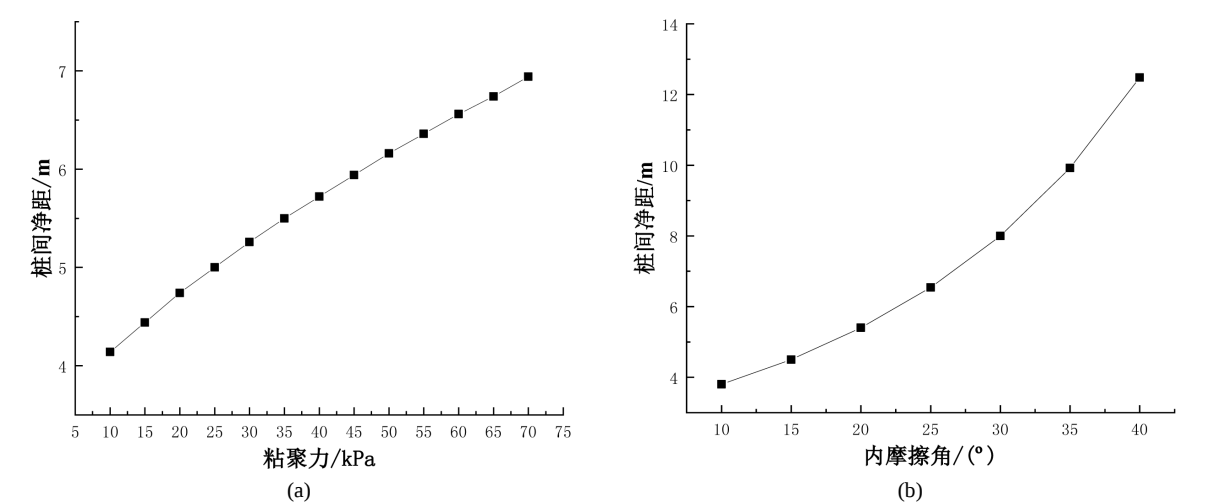
文献	桩间净距 l (m)
Chen <i>et al.</i> [9]	3.56
蒋良潍等[8]	3.84
周德培等[7]	3.20
王成华等[10]	8.73
赵明华等[15]	6.35
Wu <i>et al.</i> [13]	6.15
邱子义等[14]	9.25
本文	5.92

由表 1 可以看出，不同的桩间距计算方法所得的结果差异很大。文献[7] [8] [9] [10]均为仅考虑一种土拱效应作用。文献[13] [14] [15]考虑了桩侧摩擦土拱与桩端直接土拱的联合作用，但文献[13] [14]假定桩侧土拱也承担滑坡推力，故其计算结果偏大。文献[13]为考虑土体的屈服条件，其计算结果略大。本工程经过多年运营后仍未出现破坏，由此可见，本文的计算结果较为符合工程实际。

3.2. 参数分析

分析式(18)可知，合理桩间净距与土体的性质(粘聚力 c 、内摩擦角 φ)以及设计参数(桩截面宽度 b 、桩截面长度 a 及滑坡推力 q)密切相关。为考察各影响因素对桩间距的影响，仍选 3.1 节的工程案例进行参数分析。

图 8 显示了桩间距与各参数之间的关系。由图 8(a)和图 8(b)可知，随着土体粘聚力与内摩擦角的增大，合理桩间距的长度不断变大。但是桩间距随着粘聚力呈线性增大的趋势，而桩间距随着内摩擦角呈非线性增大且增长率逐渐变大。这种变化曲线说明，内摩擦角对桩间距的影响程度要大于土体的粘聚力。土体的强度指标越高，则设计中可采用的桩间距越大。



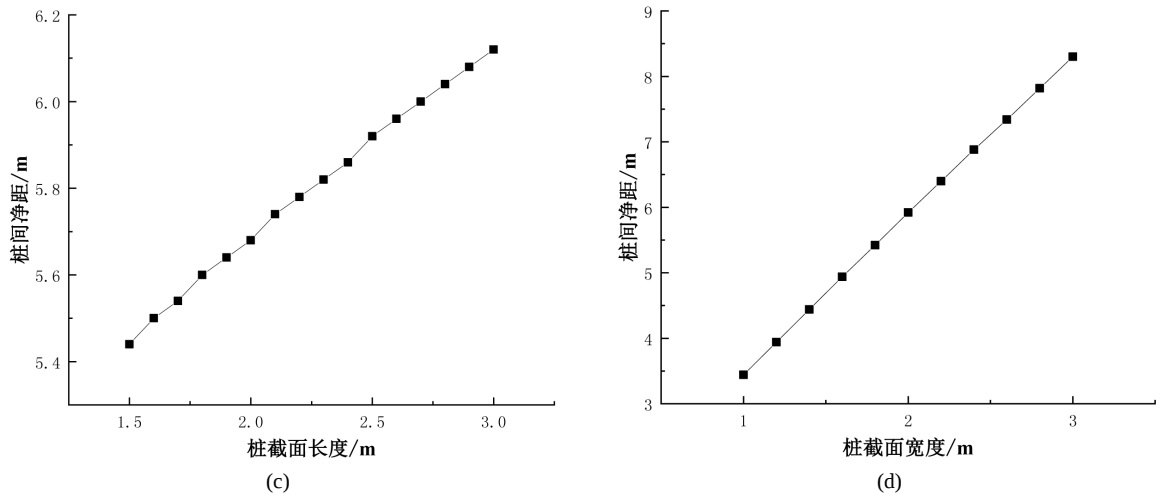


Figure 8. The relationship between pile space and various parameters

图 8. 桩间距与各影响因素的关系

图 8(c)与图 8(d)反应了桩身截面尺寸与桩间距的关系。由图可知,随着桩截面宽度与长度的增大,合理桩间净距呈线性增大。但是桩间距随桩截面宽度的变化幅度更大。这说明桩截面宽度的参数敏感性更强。究其原因是因为桩端直接土拱在土拱效应中起主导作用。

3.3. 两种土拱极限承载力

本文假设桩端直接土拱承担全部的滑坡推力,而桩侧摩擦土拱则承受稳定受压区的土压力,本节主要通过上文推导的公式来研究两种土拱的极限承载力。对于桩侧摩擦土拱,其极限状态下的承载力可由式(7)确定:

$$p = \frac{2ca}{l \left[1 - \tan \left(45^\circ - \delta/2 \right) \tan \delta \right]} \quad (7)$$

对于桩端直接土拱,其在滑坡推力的作用下产生土拱效应,而土拱效应存在的表现可视为土拱矢高存在,即方程(17)有解,则可以得到:

$$\left(\frac{2\sigma_N b}{ql} \right)^2 - 1 \geq 0 \quad (23)$$

联立式(13)、(14)、(16)和(23)可以得到:

$$q \leq \frac{b \left[p \tan^2 \left(45^\circ + \varphi/2 \right) + 4c \tan \left(45^\circ + \varphi/2 \right) \right]}{l - b \tan^2 \left(45^\circ + \varphi/2 \right)} \quad (24)$$

方程(24)取等号时的 q 即为直接土拱可承担的最大滑坡推力,则直接土拱与摩擦土拱的极限承载力之比为:

$$n = \frac{q}{p} \quad (25)$$

经计算可得,3.1 节中的工程案例中 $n=10.8$,这说明在本案例中,桩侧摩擦土拱的极限承载力约为桩端土拱的 1/10,而同时考虑两种土拱效应时此设计可承担的最大滑坡推力为 468.9kPa,故可采用式(24)判断某种设计工况是否满足最大滑坡推力要求。

4. 结论

通过研究桩端直接土拱与桩侧摩擦土拱共同作用时桩间土的极限平衡条件, 获得了合理桩间距的计算方法, 主要结论如下:

- 1) 若考虑桩后静止土体的侧土压力, 则桩端土拱的形状为椭圆线。桩侧摩擦土拱的形状可视为抛物线。
- 2) 桩间土可分别直接土拱, 稳定受压区和摩擦土拱三部分, 其中滑坡推力是直接土拱形成的原因。直接土拱的内外缘点需同时满足摩尔-库伦准则。摩擦土拱主要承受来自稳定受压区的作用力。
- 3) 合理桩间距的确定以直接土拱和摩擦土拱同时满足滑裂面上的静力平衡以及直接土拱轴应力达到屈服应力为控制条件。并采用了 matlab 编程的方式推导了合理桩间距的求法。
- 4) 在影响桩间距的各因素中, 土体内摩擦角与桩截面宽度的参数敏感性更强。
- 5) 分析了两种土拱的极限承载力大小与本土拱模型所能承担的最大滑坡推力, 其计算结果表明, 桩端直接土拱在土拱效应中起主要作用。

参考文献

- [1] Keawsawasvong, S. and Ukritchon, B. (2017) Undrained Limiting Pressure behind Soil Gaps in Contiguous Pile Walls. *Computers and Geotechnics*, **83**, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.11.007>
- [2] Li, C.D., Tang, H.M., Hu, X.L. and Wang, L.Q. (2013) Numerical Modelling Study of the Load Sharing Law of Anti-Sliding Piles Based on the Soil Arching Effect for Erliban Landslide, China. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **17**, 1251-1262. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0074->
- [3] Terzaghi, K. (1936) Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand Above a Yielding Trap-Door. *Proceeding of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, Harvard University, Cambridge, June 1936, 307-311.
- [4] Liang, R.Y. and Yamin, M. (2010) Three-Dimensional Finite Element Study of Arching Behavior in Slope/Drilled shafts System. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, **34**, 1157-1168. <https://doi.org/10.1002/nag.851>
- [5] Şahin, A. (2011) Mathematical Models and Solution Algorithms for Computational Design of RC Piles under Structural Effects. *Applied Mathematical Modeling*, **35**, 3611-3638. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.01.037>
- [6] Yamin, M. (2007) Landslide Stabilization Using a Single Row of Rock-Socketed Drilled Shafts and Analysis of Laterally Loaded Drilled Shafts Using Shaft Deflection Data. PhD Thesis, The University of Akron, Akron.
- [7] 周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132-135. <http://dx.chinadot.cn/10.3321/j.issn:1000-4548.2004.01.025>
- [8] 蒋良滩, 黄润秋, 蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 445-450. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1000-7598.2006.03.021>
- [9] Chen, G.F., Zou, L.C., Wang, Q. and Zhang, G.D. (2020) Pile-Spacing Calculation of Anti-Slide Pile Based on Soil Arching Effect. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article ID: 7149379. <https://doi.org/10.1155/2020/7149379>
- [10] 王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556-559. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1008-2786.2001.06.013>
- [11] 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): 1211-1216. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1000-7598.2010.04.036>
- [12] 邓先华, 简文星. 基于摩擦拱的抗滑桩间距计算模型研究[J]. 路基工程, 2014(3): 31-36. <http://dx.chinadot.cn/10.13379/j.issn.1003-8825.2014.03.07>
- [13] Wu, J.J., Li, C.D., Liu, Q.T. and Fan, F.S. (2017) Optimal Isosceles Trapezoid Cross Section of Laterally Loaded Piles Based on Friction Soil Arching. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **21**, 2655-2664. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1311-5>
- [14] 邱子义, 韩同春, 豆红强, 李智宁. 桩后及桩侧土拱共同作用的抗滑桩桩间距分析[J]. 浙江大学学报(工学版),

-
- 2016, 50(3): 559-565. <http://dx.chinadot.cn/10.3785/j.issn.1008-973X.2016.03.021>
- [15] 赵明华, 彭文哲, 杨超伟, 肖尧. 考虑桩侧及桩后土拱联合作用的抗滑桩桩间距研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(3): 87-94+116. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1002-0268.2019.03.013>
- [16] Zhang, H.Q., Chen, J.G., Ma, H.J., Yang, Z.J. and Li, H. (2019) A New Method to Determine a Reasonable Pile Spacing of Stabilizing Piles and Earth Pressure on Sheet Piles. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 12, 37-44. <https://doi.org/10.25103/jestr.121.05>