

DOI: 10.11779/CJGE2015S2004

考虑土拱作用抗滑桩合理桩间距确定方法研究

赵明华, 陈耀浩, 杨超炜

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 抗滑桩等非连续支挡结构在滑坡工程中依靠土拱效应安全经济地发挥支护功能, 而土拱的形成与破坏主要取决于桩间距的合理设置。首先基于抗滑桩桩间土拱已有研究成果, 综合分析了土拱的拱脚位置、土拱形状以及拱轴线方程, 建立了合理的土拱计算模型, 然后结合桩土接触界面抗剪强度条件和土体抗剪强度条件获得了圆形抗滑桩合理桩间距计算公式。最后, 结合某工程算例, 重点分析了土体内摩擦角、桩土界面参数以及桩径对桩间距的影响规律, 结果表明: 桩间距随上述参数的增大而增大, 但当滑坡推力增大时其对桩间距的影响均会减弱。

关键词: 抗滑桩; 土拱效应; 圆形桩; 合理桩间距

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0016-06

作者简介: 赵明华(1956-), 湖南洞口人, 博士生导师, 主要从事桩基础等研究。E-mail: mhzhaohd@21cn.com。

Methods for determining rational spacing between anti-slide piles considering soil arching effects

ZHAO Ming-hua, CHEN Yao-hao, YANG Chao-wei

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The soil arching effect is required to ensure the adjacent pertaining or anti-sliding piles to work safely and cost-efficiently in landslide engineering. However, the formation and destruction of soil arch is mainly determined by rational arrangement of pile spacing. Firstly, based on many studies on soil arching effects of piles, the skewback position, shape and axial equations of soil arch are analyzed to establish a rational soil arching model. Then, a formula for rational spacing between circular anti-slide piles is obtained combined with shear strength conditions on pile-soil interface and soil. Finally, based on an engineering project, the effects of several parameters on the rational pile spacing are analyzed, such as internal friction angle, parameters on the pile-soil interface and pile diameter. The result shows that the spacing increases with the increase of these parameters, whilst these effects will be weakened with the increasing landslide thrust.

Key words: anti-slide pile; soil arching effect; circular pile; rational pile spacing

0 引言

土拱是岩土工程中常见的受力现象。岩土体中的构筑物(如抗滑桩)为滑动土体提供了刚性支撑边界。由于支撑边界的约束作用, 周围局部土体与其它土体存在相对位移, 即滑动土体发生不均匀变形。由于土体内部存在粘聚力和内摩擦角, 土压力将由滑动土体向支撑边界周围的静止土体转移。这种由不均匀变形引起的土压力从滑动土体向静止土体转移的现象称为土拱效应。

早在 1943 年, Terzaghi^[1]通过活动门试验证实了土拱效应的存在并提出了存在条件。Bosscher^[2]通过模拟砂性土的土拱效应发现桩间距是影响土拱效应的最主要因素。嗣后, 很多学者针对桩间距的确定问题做出相应研究。其中周德培等^[3]、赵明华等^[4]根据抗滑桩侧的静力平衡条件和土拱强度条件确定了合理桩间

距。蒋良滩等^[5]以拱脚为最不利位置, 利用合理拱轴线与拱脚处受压极限破坏角以及 Mohr-Coulomb 准则得出桩间距的表达式。李邵军等^[6]基于土力学和弹性力学基本理论, 结合土拱内部土体极限平衡条件建立了最大桩间距控制方程。

抗滑桩的截面形状以矩形为主, 但滑坡推力方向难以确定时, 宜采用圆形桩。从已有研究来看, 国内外学者针对圆形桩的土拱研究较少, 在抗滑桩的设计过程中, 由于没有针对圆形桩的桩间距公式, 很多学者将圆形桩等效为内接方桩进行设计, 这显然是没有理论依据的。

鉴于此, 本文首先综合圆形桩及其土拱效应已有

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278187, 51408066)

收稿日期: 2015-03-26

研究, 建立了合理的桩间土拱计算模型, 然后结合土拱临界条件获得桩间距的计算公式, 使其更符合工程实际。

1 计算模型建立

抗滑桩施工完成后, 桩后土体在一定深度范围内自上而下均有土拱效应, 然而对桩体作用最直接且最有意义的是滑动面以上范围内的土拱。因此, 本文主要针对该部分土拱进行详细分析。

由于拱脚位置和土拱形状对桩间距的确定具有决定性作用, 本节首先针对这两方面进行深入讨论, 再推导得出相应的拱轴线方程, 以建立合理计算模型。

1.1 拱脚位置的确定

抗滑桩一般嵌固于坚硬岩土体中, 在滑坡推力的作用下, 其变形远小于滑坡体变形。因此土拱形成与破坏的过程中, 抗滑桩常起到拱脚的作用。

已有数值模拟结果^[7]表明, 桩土相对位移使土体的大、小主应力方向均发生偏转, 其中拱脚土体大主应力指向并垂直于桩表面, 即大主应力面与圆柱表面相切。如图 1 所示, 土拱形成后, 圆柱表面存在 A 点, 该点满足大主应力垂直指向桩表面, A 点两侧的大主应力可分为法向应力 σ_n 和切向应力 τ 。LIANG^[8]研究表明土拱轴线应是土体中最大主压应力的轨迹线, 因此经过 A、D 点连成的合理曲线可视为桩间土拱的拱轴线。此外, 边缘点满足一定临界条件, 该临界条件与土体性质及桩土界面环境有关, 因此各边缘点的受力状态是相同的, 即 B、C 点关于 OA 线对称, E、F 点关于 O₁D 对称, BC、EF 亦可视为土拱正截面。

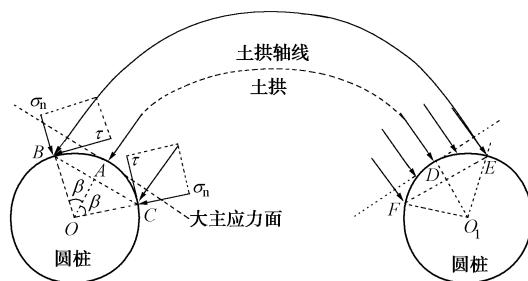


图 1 桩土界面应力分析图

Fig. 1 Stress analysis on pile-soil interface

1.2 土拱形状的确定

贾海莉等^[9]认为土拱是在土体产生不均匀位移后自发形成的, 必然能最大限度的发挥作用, 因此土拱的形状及结构一定是最合理的, 结构力学中称这种拱形为“合理拱轴线”。由于“合理拱轴线”上的每个截面上仅存在压力, 而没有拉力和弯矩, 适合土体抗压不抗拉的材料特性, 目前很多学者都支持这一观点,

在桩间距的推导过程中做出“合理拱轴线”的拱形假定。

1.3 拱轴线几何方程的确定

土拱濒临破坏时拱脚与拱顶的塑性应变均达到最大值且具有塑性铰的特征, 因此桩间土拱可抽象为三铰拱^[10]。假定滑坡推力等值均匀分布于土拱背部, 则可得如图 2 所示的桩间土拱计算简图, 根据结构力学分析可得拱轴线方程为

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2} \quad (1)$$

其中拱脚水平推力 $F_x = ql^2/8f$, 拱脚竖向推力 $F_y = ql/2$, 且越靠近拱顶竖向推力越小。由于土拱轴线为合理拱轴线, 拱脚处的轴向压力应为 $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = ql\sqrt{l^2 + 16f^2}/8f$, 且此轴向压力最大。因此, 在土拱截面不变的情况下拱脚应为土拱的最不利截面位置。

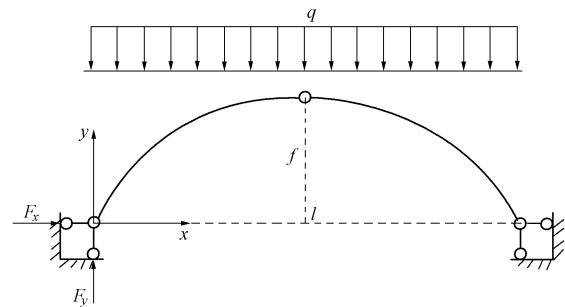


图 2 桩间土拱计算简图

Fig. 2 Calculation of soil arch between piles

2 桩间距的确定

经分析前人成果^[1, 9], 笔者得出抗滑桩桩间土拱破坏的可能条件: ①桩身断裂或大幅度偏移; ②桩土接触界面的切向剪应力大于极限剪应力; ③土拱内部的剪应力大于抗剪强度。由于抗滑桩的截面积较大, 其强度和刚度足以抵抗土拱传递的滑坡推力, 且桩身嵌固于足够深度的坚硬岩土体中, 可忽略桩身断裂或偏移的情况。因此, 土拱破坏主要由桩土接触界面和土拱内部剪切破坏引起的。本节从上述破坏条件着手, 结合土拱几何特征推导出圆形桩的桩间距计算方法。

2.1 基本假定

由于桩体与土体材料以及桩土相互作用复杂, 为简化计算, 本文做出以下假定:

- (1) 视桩间土拱为平面问题^[11], 将滑坡简化为单位厚度的土层;
- (2) 抗滑桩的刚度极大, 且具有足够嵌固深度, 外力作用时其变形量相对周围土体而言极小, 故可视抗滑桩为刚体, 并假定其水平位移为零;
- (3) 土拱内部破坏面上的应力均匀分布;

(4) 土拱内部和桩土接触界面均应遵循 Mohr-Coulomb 理论。

2.2 桩土接触界面的剪切破坏

取图 1 中的左侧圆柱分析, 假定大主应力值为 σ_0 , 接触界面对应的圆心角为 2β , 可得出 B、C 两点的正应力和切应力与大主应力的关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_0 \cos \beta, \\ \tau &= \sigma_0 \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为使桩土接触界面不会发生破坏, B、C 点应满足 $\tau < \sigma_n \tan \varphi_i + c_i$, 取临界状态分析可得

$$\tau = \sigma_0 \tan \varphi_i + c_i, \quad (3)$$

式中, φ_i 、 c_i 为接触界面外摩擦角和黏结力, 其与土体参数的关系用界限强度折减因子 R_{inter} ^[12] 表示为

$$R_{\text{inter}} = \frac{c_i}{c} = \frac{\tan \varphi_i}{\tan \varphi}. \quad (4)$$

联立式 (2) ~ (4) 整理得出基于桩土界面剪切破坏条件的大主应力表达式如下:

$$\sigma_0 = \frac{R_{\text{inter}} c}{\sin \beta - R_{\text{inter}} \tan \varphi \cos \beta}. \quad (5)$$

2.3 桩间土拱的剪切破坏

土拱内部发生剪切破坏时, 由于岩土体具有剪切强度, 其破坏面与大主应力面的夹角^[13]为 $45^\circ + \varphi/2$ 。当桩间距设置合理时, 土拱稳定存在并发挥最大传力作用, 将大部分荷载转移至桩身及周围土体。因此, 土拱前缘土体仅靠自身强度维持稳定性^[14]。出于安全考虑, 在分析土拱效应时可忽略其对土拱的支承作用。此时土拱近似于单向受力状态, 可根据图 3 所示的单向受压莫尔圆分析剪切面处的应力情况。

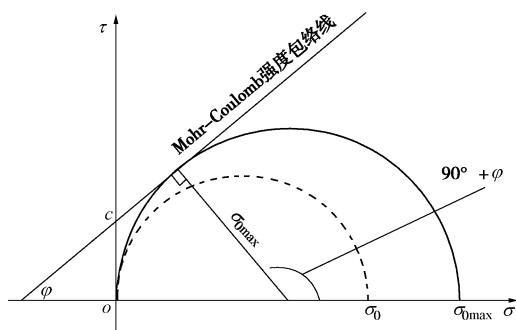


图 3 单向受压莫尔圆与强度准则

Fig. 3 Mohr-Coulomb failure criterion

根据图 3 中的几何关系推得

$$\frac{\sigma_{0\max}}{2} = \left(\frac{\sigma_{0\max}}{2} + \frac{c}{\tan \varphi} \right) \sin \varphi. \quad (6)$$

整理得出基于土拱内部剪切破坏条件的大主应力表达式如下:

$$\sigma_0 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (7)$$

2.4 土拱几何特征分析

笔者通过分析总结出土拱内部存在一定几何特征, 由于篇幅所限, 本文提供的图 4 所示的土拱几何特征图仅能展示桩间土拱及桩土接触界面等重要部分。

根据图中所示几何关系可设土拱跨度 $AD=MM'=NN'=l$, 则桩间距 $OO_1=L=l+2ON$ 。设拱轴线起始角即 OA 与 OO_1 的夹角为 α , OC 与 OO_1 的夹角为 γ , AD 与 MD 的夹角为 δ , MD 与 ND 的夹角为 ω , $AN=a$, $AM=x$, 再过 C 点作 OO_1 的垂线 CG , 则 $MN=CG=a-x$, 故知角度 δ 、 ω 应满足

$$\left. \begin{aligned} \tan \delta &= \frac{AM}{AD} = \frac{x}{l}, \\ \tan(\delta + \omega) &= \frac{AN}{AD} = \frac{a}{l}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

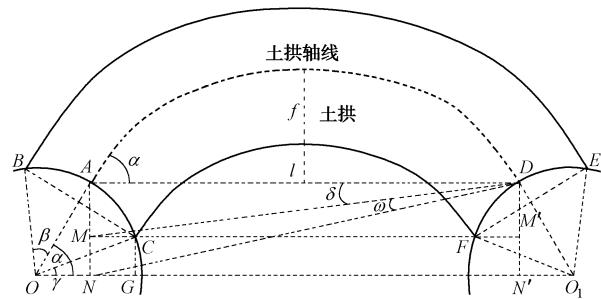


图 4 土拱几何特征图

Fig. 4 Geometric characteristics of soil arch

由于实际工程中桩间距取值一般为 3~5 倍的桩径, 且 $MN < AN < OA$, 则 $MN \ll l < DN$, 故知 ω 为极小角度, 还应满足

$$\tan \omega = \frac{MN}{DN} = \frac{a-x}{\sqrt{a^2+l^2}}. \quad (9)$$

联立式 (8)、(9) 解得关于 x 的表达式如下:

$$x = \frac{-l^2 + l\sqrt{l^2 + a^2}}{a}. \quad (10)$$

由于 $a^2 \ll l^2$, 则 $a^2/2 + l^2 \approx l\sqrt{l^2 + a^2}$, 联立式 (10) 代入 $\tan \gamma = CG/OG$, 经简化处理可知角度 γ 应满足

$$\tan \gamma = \frac{a}{\sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4}}} = \frac{a}{\sqrt{4r^2 - a^2}}, \quad (11)$$

式中, r 为桩身半径。

由图 4 又知

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{4f}{l} = \frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}. \quad (12)$$

联立 $\alpha = \beta + \gamma$ 及式(11)、(12)整理可知 β 应满足

$$\tan \beta = \frac{\frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}} - \frac{a}{\sqrt{4r^2 - a^2}}}{1 + \frac{a^2}{\sqrt{(r^2 - a^2)(4r^2 - a^2)}}} \quad (13)$$

拱脚为土拱内部最不利截面, 由拱脚轴向压力与土拱厚度 t 的关系得出大主应力 σ_0 的另一表达式:

$$\sigma_0 = \frac{F}{t} = \frac{ql\sqrt{l^2 + 16f^2}}{16fr \sin \beta} \quad (14)$$

联立式(7)、(12)、(14), 则土拱跨度 l 的表达式如下:

$$l = \frac{8ac \sin \beta \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)q} \quad (15)$$

根据已知桩土参数 R_{inter} 、 φ , 首先联立式(5)、(7)解得角度 β , 将 β 代入到式(13)中解出 a , 再将 a 代入式(15)中, 即可得出土拱跨度 l , 最后根据 $L=l+2ON$ 可求解最终桩间距。

3 工程实例

安徽淠史杭灌区淠河总干东郢滑坡, 采用抗滑桩加固处理, 由勘探测得桩周黏性土的黏聚力 $c=30 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=9^\circ$, 拟采用圆桩, 桩径 $d=1.8 \text{ m}$, 桩全长 $h=7.5 \text{ m}$, 悬臂段长度 $h_1=5.5 \text{ m}$ 。用传递系数法算得滑坡推力 $P=56.1 \text{ kN/m}$ ^[15]。

3.1 桩间距的确定

查阅文献[13]可知, 外摩擦角 φ_i 根据桩表面粗糙程度及排水情况一般取 $(0.5 \sim 0.67)\varphi$ 。出于安全角度考虑, 本文取 $\varphi_i=0.5\varphi=4.5^\circ$, 即 $R_{\text{inter}}=0.5$, $c_i=0.5c=15 \text{ kPa}$ 。另外, 经过计算易知土拱背部所承担的均布荷载 $q=56.1 \times 1/5.5=10.2 \text{ kN/m}$ 。将相关参数 φ_i 、 φ 、 c_i 、 c 、 d 、 q 及 R_{inter} 代入文献[15]算法与本文算法中, 得出相应的桩间距取值, 并与实际工程取值做出对比如表 1。

表 1 两种算法计算结果对照表

Table 1 Comparison of calculated results by two kinds of algorithms

取值方法	文献[15]算法	本文算法	工程取值
桩间净距	5.12 m	3.83 m	—
桩中心距	6.92 m	5.35 m	6 m
实际误差	15.3%	10.8%	—

文献[15]利用安全系数最终使桩间距计算结果接近工程取值, 然而安全系数的取值仍存在不确定性。而本文算法预先做出一系列保守假定, 如不考虑土拱前缘自由区土体的微弱支承作用等, 计算结果更接近工程取值, 且避免了安全系数的确定。因此可得出结

论: 依靠等效为方桩的计算方法并不能合理解决圆形桩的桩间距问题, 而本文基于 Mohr–Coulomb 理论和相关合理假定的计算方法在桩间距的确定问题上具有一定的实用价值。

3.2 影响因素分析

桩间距取值的确定受诸多因素的影响, 由前述推导过程可得出桩间距与相关影响因素的关系式如下:

$$L = g(q, c, \varphi, R_{\text{inter}}, d) = g(q, c, \varphi, c_i, \varphi_i, d) \quad (16)$$

由式(15)可知桩间距与滑坡推力 q 、黏聚力 c 成简单比例关系, 因此本文基于工程实例仅讨论内摩擦角 φ 、桩土界面参数 R_{inter} 及桩径 d 对桩间距的影响。

(1) 内摩擦角的影响

如图5所示, q 较小时, L 与 φ 呈曲线递增关系, 且增加幅度随 φ 不断变大。然而 $q=20 \text{ kN/m}$ 时, 二者近似直线关系, 且直线斜率较小, 在 φ 变化过程中 L 的增加量仅为 $q=5 \text{ kN/m}$ 时的 24%。因此, 当滑坡推力增大时, 内摩擦角对桩间距的影响逐渐减弱。

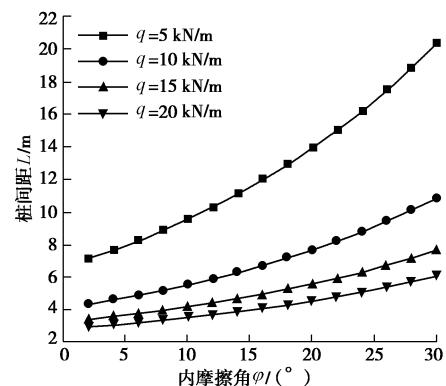


图 5 $L - \varphi$ 关系曲线

Fig. 5 Curves of $L - \varphi$

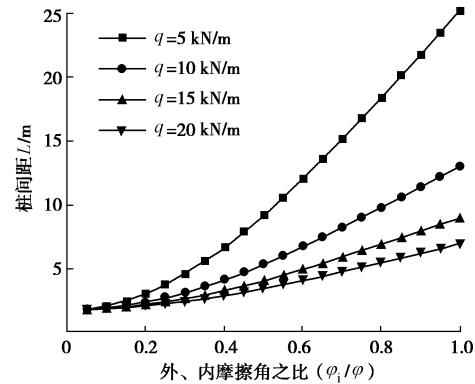


图 6 $L - \varphi_i/\varphi$ 关系曲线

Fig. 6 Curves of $L - \varphi_i/\varphi$

(2) 桩土界面参数的影响

由文献[13]可知外、内摩擦角比值 φ_i/φ 可更直观表述桩土界面的真实环境, 因此本文将用 φ_i/φ 代替 R_{inter} 分析桩土界面参数对桩间距的影响。

如图6所示, φ_i/φ 从0增至0.4时, L 小幅度递增, 且增长斜率不断变大; 而从0.4增至1.0的过程中, L 随 φ_i/φ 线性增加。此外, 在 φ_i/φ 变化过程中, $q=20 \text{ kN/m}$ 时 L 的增加量仅为 $q=5 \text{ kN/m}$ 时的20%, 因此桩土界面参数对桩间距的影响也会随滑坡推力的增大而不断减弱。

(3) 桩径的影响

如图7所示, L 与 d 成正比关系。通过计算得出在 d 变化过程中, $q=20 \text{ kN/m}$ 时 L 的增加量仅为 $q=5 \text{ kN/m}$ 时的37%。因此滑坡推力增大时, 桩径对桩间距的影响也会出现一定程度的减弱。

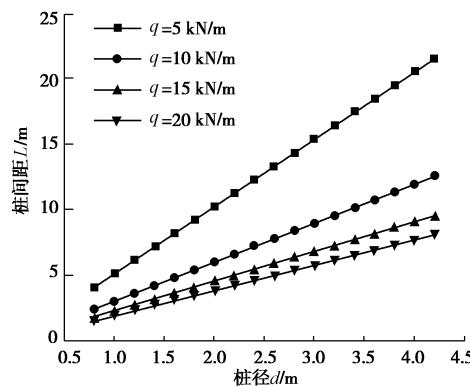


图 7 $L - d$ 关系曲线

Fig. 7 Curves of $L - d$

4 结论与建议

(1) 以拱脚土体大主应力垂直指向桩表面为主要特征, 引入合理拱轴线土拱形状, 建立圆形桩的土拱模型, 结合桩土界面、土体内部剪切破坏条件及土拱几何特征提出了合理桩间距的计算公式, 并通过工程实例验证了公式的合理性。

(2) 重点分析了土体内摩擦角、桩土界面参数及桩径对桩间距的影响, 结果表明: 桩间距与桩径成正比, 且随内摩擦角和桩土界面参数大幅增加。此外, 滑坡推力增大时, 所有参数对桩间距的影响均减弱。

(3) 在建立土拱模型时, 本文为简化研究做出了土拱空间问题平面化、抗滑桩为不可移动刚体等假定。然而, 实际工程中桩土作用环境十分复杂, 上述假定均会导致计算结果出现不同程度的误差。因此, 将土拱研究环境真实化是笔者今后研究工作的重点。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[J]. New York: John Wiley&Son, 1943.
- [2] BOSSCHER J, CRAY H. Soil arching in sandy slopes[J].

Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112**(6): 626 – 645.

- [3] 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. (ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo, XIA Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 132 – 135. (in Chinese))
- [4] 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): 1212 – 1216. (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): 1212 – 1216. (in Chinese))
- [5] 蒋良潍, 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. (JIANG Liang-wei, HUANG Run-qiu, JIANG Zhong-xin. Analysis of soil arching effect between adjacent piles and their spacing in cohesive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(3): 445 – 450. (in Chinese))
- [6] 李邵军, 陈 静, 练 操. 边坡桩–土相互作用的土拱力学模型与桩间距问题[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1352 – 1358. (LI Shao-jun, CHEN Jing, LIAN Cao. Mechanical model of soil arch for interaction of piles and slope and problem of pile spacing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1352 – 1358. (in Chinese))
- [7] 刘 静. 基于桩土共同作用下的抗滑桩的计算与应用研究 [J]. 长沙: 中南大学, 2007: 93 – 95. (LIU Jing. Study on calculation and application of anti-sliding piles under pile-soil interaction [D]. Changsha: Central South University, 2007: 93 – 95. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 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, **38**(4): 398 – 402. (JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, **38**(4): 398 – 402. (in Chinese))
- [10] 吕 庆. 边坡工程灾害防治技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 97 – 124. (LÜ Qing. Study on prevention and treatment technology of slope engineering disasters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 97 – 124. (in Chinese))
- [11] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil–structure interaction for

- landslide stabilizing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2002, **29**(5): 363 – 386.
- [12] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005: 79 – 90. (GU Wei-ci. Soil pressure manual of retaining wall[M]. Beijing: China Building Materials Press 2005: 79 – 90. (in Chinese))
- [13] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003: 132 – 134. (ZHAO Ming-hua. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003: 132 – 134. (in Chinese))
- [14] 贾海莉, 王成华. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J]. 工程地质学报, 2004, **12**(1): 98 – 103. (JIA Hai-li, WANG Cheng-hua. Analysis of pile spacing between anti-sliding piles and retaining piles in accordance with soil arching effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(1): 98 – 103. (in Chinese))
- [15] 胡晓军, 王建国. 边坡加固工程中抗滑桩间距的确定[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(3): 330 – 333. (HU Xiao-jun, WANG Jian-guo. Determination of anti-slide pile spacing inside slope consolidation projects[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, **35**(3): 330 – 333. (in Chinese))

(本文责编 明经平)