

基于拱效应的边坡抗滑桩桩间距计算

赵明华, 廖彬彬, 刘思思

(湖南大学 岩土工程研究所, 长沙 410082)

摘要: 基于桩间土的斜拱效应, 考虑边坡的倾角对抗滑桩桩间距的影响, 并以此建立计算模型。首先在假定土拱的轴线为抛物线的基础上, 根据水平面、竖直面内的静力平衡条件和强度条件, 推导出桩间距的计算公式, 分别得到了相应的合理桩间距计算方法。其次通过具体工程实例, 阐述考虑边坡倾角情况下抗滑桩桩间距的计算过程, 得到了比较合理的计算结果, 并分析了桩间距与土体内摩擦角以及桩间距与坡面倾角之间的关系。分析结果表明, 在其他因素不变的情况下, 桩间距随桩后土体的内摩擦角增大而增大, 随边坡倾角增大先增大后减小。

关键词: 边坡工程; 抗滑桩; 土拱效应; 边坡倾角; 桩间距

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Calculation of anti-slide piles spacing based on soil arching effect

ZHAO Ming-hua, LIAO Bin-bin, LIU Si-si

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

Abstract: Considering the influence of the slope angle on the anti-slide piles spacing, a calculation model is established based on inclined soil-arch effect between piles. Firstly, on the basis of the assumption that arch axis is parabolic, according to the static equilibrium condition and strength condition inside horizontal plane and vertical plane, a calculation formula of piles spacing is derived; and corresponding rational calculation formulas for piles spacing are obtained respectively. Secondly, the calculated process of piles spacing is illustrated through the calculation of concrete engineering examples; and the result is rational; then the relationship between piles spacing and internal friction angle of soil, as well as the relationship between piles spacing and the angle of the slope are analyzed. The results show that the spacing is increasing with increase of internal friction angle of soil behind piles and first increasing then decreasing with increase of slope angle while other effective factors are not varying.

Key words: slope engineering; anti-slide piles; soil-arch effect; slope angle; pile spacing

1 引言

土拱效应是岩土工程中的一种普遍现象。它是由介质的不均匀变形所产生的一种应力转移与重分布现象。Terzaghi 最先通过活动门试验^[1], 验证了土体中存在拱的效应, 并把这种应力转移的现象称为“土拱效应”; Bosscher 等^[2]在分析了前人理论的基础上, 在砂性土边坡中做了水平向的活动门试验; Chen & Martin 等^[3]详细地研究了抗滑桩中土拱效应的产生机制; 蒋良滩等人^[4]对黏性土桩间土拱效应进行了分析; 夏元友^[5]对刚性桩加固软土路基竖向土拱效应进行了试验分析; 杨明等人^[6]通过离心模型试验及数值模拟对桩间土拱效应进行了研究。

充分利用土拱效应, 对经济合理确定抗滑桩桩间距具有重要意义。文献[7-8]根据抗滑桩两侧摩阻力之和并不小于桩间滑坡推力这一主导思想建立了桩间距计算公式; 文献[9]假定桩间土拱轴线为圆弧曲线, 根据大、小主应力理论建立了基坑支护中桩间距计算方法; 文献[10]则根据土拱的强度条件建立了桩间距计算方法; 文献[11-15]主要针对桩间水平土拱根据土拱的强度条件和静力平衡条件建立了桩间距计算公式。事实上, 边坡抗滑桩桩后土体往往并不是水平的, 在滑坡推力作用下考虑沿坡面的倾斜土拱对抗滑桩的作用应该更加符合工程实际情况。

鉴于此, 本文通过对边坡工程中抗滑桩之间形

成的斜拱进行分析,并综合考虑土拱强度条件和桩间静力平衡条件来建立桩间距的计算方法,以使其更加符合工程实际。

2 计算模型

由于桩后坡体在一定高度范围内自上而下均有土拱效应,但对于桩体作用最直接、且最有意义的则为桩体在滑面以上范围内的土拱,即土拱在桩顶及其以下部分应为主要研究对象,故本文就该部分土拱建立计算模型进行分析。设桩间斜拱效应如图 1 所示。

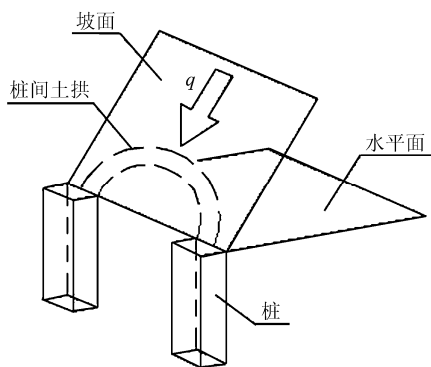


图 1 桩间斜拱效应示意简图

Fig.1 Sketch of the inclined soil arching effect between piles

2.1 基本假定

(1) 土体为各向同性的黏性土,且不计土拱自重作用;(2) 相邻两桩间土拱形状为对称于跨中的抛物线形;(3) 不计桩后土拱效应沿桩长自上而下逐渐减弱的影响,假定桩后坡体压力沿桩间均匀分布作用于土拱上。

2.2 受力分析

根据上述假定,取单位桩长土拱进行分析。其简化计算模型如图 2 所示。土拱跨度为 s ,拱高为 f ,拱厚为 t ,作用于单位高度土拱上的桩后坡体线分布压力为 q ,坡面与水平面的夹角为 α ,土拱的轴线方程为抛物线。

根据上述条件,在坡面所在的平面内,建立 xow 直角坐标系,土拱受力分析如图 3 所示。所以易得拱轴的抛物线方程为

$$w = \frac{4f}{s^2}(sx - x^2) \quad (1)$$

令 $A = f/s$, 则 (1) 式变为

$$w = \frac{4A}{s}(sx - x^2) \quad (2)$$

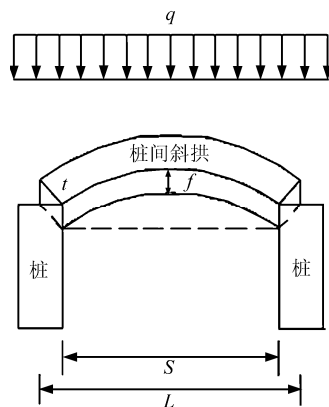


图 2 计算模型简图

Fig.2 Sketch of calculation model

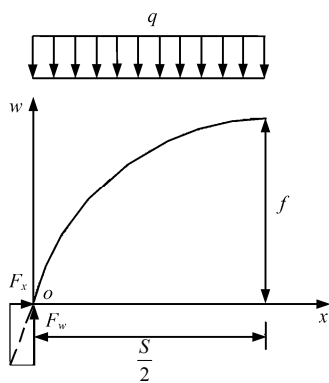


图 3 斜拱受力分析

Fig.3 Mechanical analysis of inclined soil arch

由于土拱处于平衡状态,实际上土拱可以认为是三角静定拱,根据结构力学易得拱脚支座反力:

$$F_w = \frac{qs}{2} \quad (3)$$

$$F_x = \frac{qs}{8A} \quad (4)$$

把 F_w 在竖直面 ZOY 平面内分解得:

$$F_y = F_w \cos \alpha = \frac{qs}{2} \cos \alpha \quad (5)$$

$$F_z = F_w \sin \alpha = \frac{qs}{2} \sin \alpha \quad (6)$$

3 桩间距的计算

3.1 水平方向桩间距确定

要保证相邻两桩间土拱正常发挥作用,就需要满足桩间的静力平衡条件,即桩侧面的摩阻力不小于坡体推力在水平面上的分力 F_y 。为便于分析取极限状态,则其表达式可以写为

$$ct + F_x \tan \varphi = \frac{qs}{2} \cos \alpha \quad (7)$$

式中: c 为桩间后侧土体的黏聚力; φ 为桩间后侧

土体的内摩擦角。

将(4)式代入(7)式得:

$$c + \frac{qs}{8At} \tan \varphi = \frac{qs}{2t} \cos \alpha \quad (8)$$

令 $B = t/s$

则(8)式变为

$$c + \frac{q}{8AB} \tan \varphi = \frac{q}{2B} \cos \alpha \quad (9)$$

跨中即拱顶截面处的前缘点 B 为最不利受力点(如图4所示), 所以在此处要满足强度条件, 在这里采用摩尔-库仑强度准则。所以点 B 的应力 σ_B 为

$$\sigma_B = \frac{F_x}{t} = \frac{q}{8AB} \quad (10)$$

由于桩前土体已被开挖, 所以水平面内 B 点处于单向应力状态, 因而根据摩尔-库仑强度准则可得:

$$\sigma_B = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

把(10)式代入(11)式得:

$$\frac{q}{8AB} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

在桩间距设置合理的情况下, 在同一桩体后侧的局部区域内, 相邻两桩的土拱会在此处形成三角形受压区, 如图4所示。因此, 应该保证该三角形受压区能正常发挥效应而不被破坏, 因而要满足摩尔-库仑强度准则。

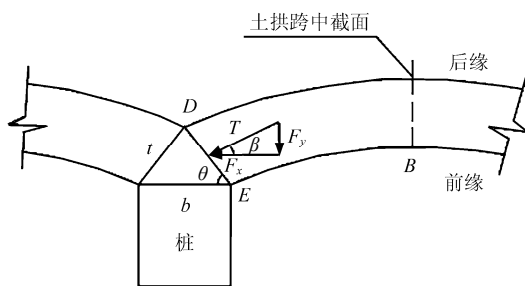


图4 两侧土拱交汇处的三角形受压区

Fig.4 The triangular compressive zone in intersectional region of adjacent soil arch

所以在截面 DE 上有:

$$T \cos(\theta + \beta) = ct + T \sin(\theta + \beta) \tan \varphi \quad (13)$$

式中: T 为作用于截面 DE 上的合力, $T = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$; θ 为截面 DE 与水平方向的夹角; β 为合力 T 与水平方向的夹角。

这样, 在水平面内, 根据上述3个主要控制条件, 就可以确定桩的间距。

首先, 将式(12)代入式(9), 经整理后得:

$$c + \frac{2c \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{q}{2B} \cos \alpha \quad (14)$$

由(14)式得:

$$B = \frac{(1 - \sin \varphi)q}{2c(1 + \sin \varphi)} \cos \alpha \quad (15)$$

把式(15)代入式(12), 整理后得:

$$A = \frac{1 + \sin \varphi}{8 \cos \alpha \cos \varphi} \quad (16)$$

其次, 将(4), (5), (15), (16)式代入式(13), 经整理后得:

$$\cos(\theta + \beta) - \sin(\theta + \beta) \tan \varphi = \frac{1 - \sin \varphi}{\sqrt{(2 \cos \varphi)^2 + (1 + \sin \varphi)^2}} \quad (17)$$

再次, 如图4可得:

$$\tan \beta = \frac{F_y}{F_x} = 4A \cos \alpha = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (18)$$

$$\cos \theta = \frac{b}{2t} \quad (19)$$

于是由式(17)~(19), 可以解出拱圈的厚度 t , 最后根据 $s = t/B$, 得出土拱跨度 s_1 的表达式为

$$s_1 = \frac{cb(1 + \sin \varphi)(5 - 3 \sin \varphi)}{4q \cos \alpha \cos \varphi(1 - \sin \varphi)} \quad (20)$$

于是相邻两桩的中心距 $L_1 = s_1 + b$ 。

3.2 竖直方向桩间距确定

为了防止抗滑桩在竖直方向变形过大, 则在拱角处竖直方向上的分力 F_z 应小于拱角处土体与桩侧之间的最大摩擦力, 所以有:

$$F_z \leq \mu(F_x + F_y) \quad (21)$$

为便于分析, 取极限状态有:

$$F_z = \mu(F_x + F_y) \quad (22)$$

式中: μ 为桩侧与土体之间的静摩擦系数, 且有 $\mu = \tan \delta$; δ 为桩侧与土体之间的摩擦角。

如果 δ 大于土体等值内摩擦角 φ_s , 则取 $\mu = \tan \varphi_s$ 。 φ_s 的取值可按式确定:

$$\varphi_s = \arctan \frac{\tau}{\sigma} = \arctan \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\sigma} \quad (23)$$

式中: τ 为接触面上的剪应力; σ 为接触面上的正应力; c 为土体的黏聚力; φ 为土体的摩擦角。

偏于安全的原因, 此处通常亦可认为 $c=0$, 即土体等值内摩擦角 φ_s 等于土体内摩擦角 φ 。

对于桩侧土体应该保证不被破坏, 因而要满足摩尔-库仑强度准则。

所以对于桩侧土截面有:

$$\frac{F_z}{bl} = c + \frac{F_y}{bl} \tan \varphi \quad (24)$$

式中: b 为桩正面宽度, 如图 4 所示。

这样, 在竖直平面内, 根据这两个控制条件, 也能确定一个桩的间距。

首先把式 (4) ~ (6) 代入式 (22), 并整理得:

$$A = \frac{\tan \delta}{4(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \delta)} \quad (25)$$

其次把式 (5), (6) 代入式 (24), 整理后得:

$$s_2 = \frac{2cb}{q(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi)} \quad (26)$$

再次把式 (26), 及 $A=f/s$ 代入式 (25), 可得拱高 f :

$$f = As = \frac{cb \tan \delta}{2q(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \delta)(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi)} \quad (27)$$

所以相邻两桩的中心距 $L_2 = s_2 + b$

3.3 最终桩间距的确定

根据水平面竖直面内的强度控制条件, 通过理论计算, 分别求出桩间距计算公式 L_1 和 L_2 。从两个桩间距的计算公式可知, 存在一个临界角度 α_0 , 当坡面角 $\alpha > \alpha_0$ 时, 竖直面内的强度破坏为主要控制条件, 这时取 L_2 为抗滑桩的桩间距; 当 $\alpha < \alpha_0$ 时, 水平面内土拱截面的强度破坏为主要控制条件, 这时则取 L_1 为抗滑桩的桩间距。在具体的抗滑桩桩间距设计中, 根据实际情况, 应分别计算桩间距 L_1 和 L_2 , 若 $L_1 > L_2$, 取 L_2 为抗滑桩桩间距; 若 $L_1 < L_2$, 则取 L_1 为抗滑桩桩间距, 即取两者之间的较小者为最后合理桩间距。

4 工程实例

紫阳滑坡位于湖北省紫阳县城汉江北岸的 I 级阶地上, 其自然地面倾向汉江, 倾角为 20° 左右, 滑动区可分为东西两个滑坡体, 两滑坡体东西宽分别为 $90 \sim 100$ m, 南北长为 $100 \sim 130$ m, 剪出口均

在江岸基岩出露边界处, 滑坡体主要组成物质为全新系堆积物, 以黏土和粉质黏土为主间杂有碎石, 下伏基岩为千枚岩。勘测表明, 滑坡体上缘的第四系堆积物中已形成滑动面, 而滑坡体下部将沿基岩面滑动。室内试验给出接触面上的强度指标为黏聚力 $c=130$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=15^\circ$ 。按照不平衡荷载传递系数法可计算出桩位处的设计滑坡推力为 $1\,076.6$ kN/m。初步拟定桩截面为 2.0 m $\times$ 3.0 m, 桩受荷段长为 10.5 m。考虑到滑坡体的土质情况, 通常认为, 推力沿桩长均匀分布, 即作用在单位厚度土拱上的滑坡推力为: $q = 1\,076.6/10.5 = 102.5$ kPa。

按本文的计算方法可得 $s_1=5.0$ m; $s_2=56.4$ m。则根据本文的讨论取桩间净距 $s=5.0$ m。

4.1 桩间距影响参数分析

由于桩间距 L 与桩间净距 s 只相差一个桩宽 b , 为了讨论方便, 这里只对桩间净距 s 做详细讨论。首先讨论 s 与几个参数的函数关系, 则式 (20) 和式 (26) 的函数关系式可写为

$$s = g(q, b, c, \varphi, \alpha) \quad (28)$$

而对于某一具体工程, 通常滑坡推力 q 在设计之前就可确定, 可视为常量。即:

$$s = g(b, c, \varphi, \alpha) \quad (29)$$

由于桩间净距由式 (20) 和式 (26) 共同确定, 从此可以看出, 桩间净距 s 分别与截面尺寸 b 和黏聚力 c 成简单的正比关系, 其曲线是一条过原点的直线。所以这里不讨论 s 与 b 和 c 的关系, 只讨论 s 与 φ 和 α 的关系。由于各个参数对最终结果的影响不同, 所以需要分别分析。

(1) s 与 φ 的关系

考虑到 s 与 φ 的关系比较复杂, 根据上例取 $\varphi=0 \sim 60^\circ$, 利用式 (20) 和式 (26), 分别计算出相应的 s_1 和 s_2 , 其值列于表 1, 由于 $\varphi=20^\circ$ 时, s_2 已趋于无穷, 所以后面的 s_2 不予列出。并做出 s 与 φ 的关系曲线如图 5 所示。

从图可以看出, 不论是 s_1 还是 s_2 , 都随着 φ 的增大而增大, 且 s_2 恒大于 s_1 , 此时取 s_1 作为最后的桩间净距。

(2) s 与 α 的关系

根据上面实例的数据, 取 $\alpha=0 \sim 90^\circ$, 分别计算相应的 s_1 和 s_2 , 其值列于表 2。并做出 s 与 α 的关系曲线如图 6 所示。

从图中可以看出, s_1 随着 α 的增大而增大, 而 s_2 随着 α 的增大而减小, 且 s_2 与 s_1 交于 α_1 。当

$\alpha < \alpha_1$ 时, 取 s_1 作为最后的桩间净距; 当 $\alpha > \alpha_1$ 时, 取 s_2 作为最后的桩间净距。

4.2 几种计算方法比较

采用同样的工程实例分别用文献[7-15]中的方法进行计算, 结果列于表 3。

从表中可以看出, 不同计算方法得到的桩间距差别很大。对于截面为 $2.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ 的抗滑桩, 在

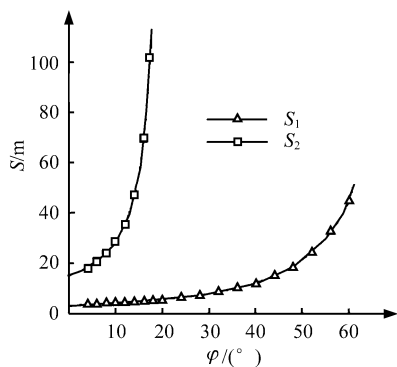


图 5 s 与 φ 的关系

Fig.5 Relationship between s and φ

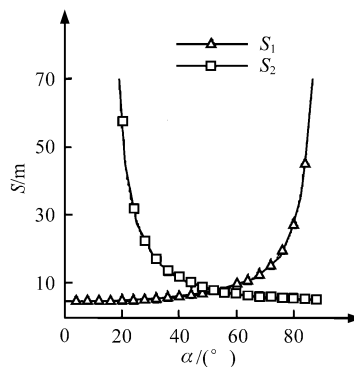


图 6 s 与 α 的关系

Fig.6 Relationship between s and α

滑坡推力为 $1\,076.6 \text{ kN/m}$ 作用下, 其桩间距按 1、2 两种方法计算所得的结果偏于保守, 而采用 4~7 几种方法计算所得的结果又似乎过于偏大, 3、8 两种计算方法比较接近, 桩间距计算值也比较符合实际工程情况, 因此, 本文的计算方法对抗滑桩桩间距的确定有一定的实用价值。

表 1 桩间净距与内摩擦角的关系

Table 1 Relationship between piles spacing and soil friction angle

$\varphi /(^{\circ})$	0	4	6	8	10	12	14	16	18	20
S_1/m	3.35	3.7	3.89	4.1	4.33	4.57	4.83	5.12	5.44	5.78
S_2/m	14.82	18.35	20.84	24.15	28.76	35.64	47.07	69.89	138.25	
$\varphi /(^{\circ})$	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
S_1/m	6.57	7.55	8.77	10.34	12.36	15.08	18.82	24.19	32.2	44.82

表 2 桩间净距与坡面倾角的关系

Table 2 Relationship between piles spacing and slope angle

$\alpha /(^{\circ})$	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44
S_1/m	4.71	4.72	4.76	4.82	4.9	5.01	5.16	5.33	5.55	5.82	6.15	6.55
S_2/m					316.9	57.43	31.68	21.94	16.85	13.73	11.63	10.13
$\alpha /(^{\circ})$	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88	90
S_1/m	7.04	7.65	8.42	9.42	10.74	12.57	15.24	19.47	27.12	45.06	134.9	
S_2/m	9.01	8.15	7.48	6.94	6.5	6.14	5.84	5.6	5.41	5.25	5.12	5.07

表 3 各种算法计算结果对照表 (单位: m)

Table 3 Comparison between several methods of calculation (unit: m)

计算方法	周培德法	胡敏云法	赵明华法	王成华法	胡晓军法	郑磊算法	贾海莉法	本文算法
编号	1	2	3	4	5	6	7	8
桩间净距	2	4.1	5.6	6.9	8.6	9.7	35.9	5
桩中心距	4	6.1	7.6	8.9	10.6	11.7	37.9	7

5 结 语

(1) 通过考虑倾斜坡面上的土拱效应, 使得经过计算最终确定的桩间距更符合工程实际。

(2) 桩间土拱受桩间距的影响, 临界桩间距受桩间土拱应力强度条件、土拱体整体稳定性的综合控制, 在其他因素不变的情况下, 临界桩间距随土

体的内摩擦角增大而增大, 随坡面与水平面的夹角增大先增大后减小。

(3) 本文考虑的土拱沿桩长均匀分布, 实际上土拱效应沿桩长是逐渐变弱的, 应该是一个空间问题, 本文所求出的桩间距计算公式, 应该结合具体工程实际, 对计算模型中各项参数加以修正, 并结合实践经验来综合考虑桩间距的大小。

参考文献

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: JohnWiley&Sons, 1943.
- [2] OSSCHER B, PETER J, GRAY, DONALD H. Soil arching in sandy slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 112(6): 626—645
- [3] CHEN C Y, MARTIN G K. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, (29): 363—386.
- [4] 蒋良淮, 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.
- [5] 夏元友, 芮瑞. 刚性桩加固软土路基竖向土拱效应的试验分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 327—331.
XIA Yuan-you, RUI Rui. Experimental analysis of vertical soil arching effect of embankment reinforced by rigid[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 327—331.
- [6] 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.
- [7] 王士川. 抗滑桩间距的下限解[J]. 工业建筑, 1997, 27(10): 32—36.
WANG Shi-chuan. Anti-slide pile spacing of the lower limit equation[J]. **Industrial Construction**, 1997, 27(10): 32—36.
- [8] 王成华, 陈永波. 抗滑桩间土拱特性及最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556—559.
WANG Cheng-hua, CHEN Yong-bo. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile[J]. **Journal of Mountain Science**, 2001, 19(6): 556—559.
- [9] 胡敏云. 深基坑护壁桩桩间距确定方法探讨[J]. 中国公路学报, 2000, 14(2): 27—29.
- HU Min-yun. Estimation of the spacing between retaining piles for excavation[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2000, 14(2): 27—29.
- [10] 常保平. 抗滑桩的桩间土拱和临界间距问题探讨[C]//. 滑坡文集(第十三集). 北京: 中国铁道出版社, 1998, 73—78.
CHANG Bao-ping. A study on soil arch between stabilizing piles and critical span[C]//Proceeding of landslides (Volume thirteen). Beijing: China Railway Press, 1998, 73—78.
- [11] 周德培, 肖世国. 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. 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.
- [12] 赵明华, 陈炳初, 刘建华. 考虑土拱效应的抗滑桩合理桩间距分析[J]. 中南公路工程, 2006, 31(2): 1—3.
ZHAO Ming-hua, CHEN Bing-chu, LIU Jian-hua. Analysis of the spacing between anti-slide piles considering soil-arch effect[J]. **Central South Highway Engineering**, 2006, 31(2): 1—3.
- [13] 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, et al. 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.
- [14] 郑磊, 殷坤龙, 简文星, 等. 抗滑桩设计中关于确定桩间距问题的分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, (6): 71—74.
ZHENG Lei, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Analysis on spacing between piles in the design of anti-slide pile[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2005, (6): 71—74.
- [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, 2007, 35(3): 330—333.
HU Xiao-jun, WANG Jian-guo. Determination of anti-slide pile spacing in side slope consolidation projects[J]. **Journal of Hohai University**, 2007, 35(3): 330—333.