

## 越顶破坏模式下沉埋桩受荷段及沉埋段推力算法

闫玉平

### Calculation method of thrust force of the embedded stabilizing piles under the overtop-sliding failure mode

YAN Yuping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211007>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法

A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides

闫玉平, 肖世国 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 55-63

#### 斜坡浅埋水平条形锚板抗拔承载力的极限分析

A limit analysis of the ultimate pullout capacity of a shallow horizontal strip anchor plate embedded in slope

黄明华, 李盾, 李嘉成 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 116-116

#### 浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section

邱明明, 杨果林, 张沛然, 段君义 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 135-143

#### 郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172

#### 竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究

A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation

叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 刘干斌 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 103-103

#### 桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211007

闫玉平. 越顶破坏模式下沉埋桩受荷段及沉埋段推力算法 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 76-84.

YAN Yuping. Calculation method of thrust force of the embedded stabilizing piles under the overtop-sliding failure mode[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 76-84.

## 越顶破坏模式下沉埋桩受荷段及沉埋段推力算法

闫玉平

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 滑坡推力的确定对于抗滑桩设计极其重要, 沉埋桩作为对传统抗滑桩的优化, 其受荷段推力的研究目前主要借助于模型试验和数值模拟, 缺乏深入的理论分析。为了建立沉埋桩后侧受荷段及桩顶沉埋段滑坡推力计算方法, 针对沉埋桩加固的基岩-覆盖层式滑坡, 基于潜在越顶破坏模式, 由桩顶位置将越顶滑面分为顶部、底部两段, 其中, 顶部滑面上水平方向合力即为沉埋段推力, 可由积分求得, 底部滑面上各个方向的力求解方法与此类似; 在此基础上, 利用刚体极限平衡理论对底部滑面与桩受荷段所围滑体进行受力分析, 进而可得受荷段推力计算公式。实例分析表明: 理论算法所得沉埋段与受荷段推力值与 FLAC3D 结果非常接近, 其中, 受荷段推力、沉埋段推力、设桩位置处总推力随沉埋比的增大而分别非线性减小、增大、减小; 沉埋比位于 0~0.67 范围内时, 沉埋段与受荷段推力之比由 0 缓慢增大到 0.30~0.50, 随着沉埋比增大到 0.8, 该比值急剧增大到 1.47~2.12; 一般沉埋深度下, 沉埋段推力小于受荷段推力。沉埋桩推力的理论研究对于桩体内力优化、沉埋深度确定具有重要的现实意义, 将有助于该桩型的进一步推广应用。

**关键词:** 沉埋桩; 越顶破坏; 沉埋段推力; 受荷段推力; 极限平衡理论

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0076-09

## Calculation method of thrust force of the embedded stabilizing piles under the overtop-sliding failure mode

YAN Yuping

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

**Abstract:** Embedded piles act as an optimization structure compared with the traditional stabilizing pile. The determination of the thrust on the loading section is based mainly on the model test and numerical simulation, and there is a lack of in-depth theoretical analysis. For the bedrock-talus landslide reinforced by embedded piles, according to the potential overtop-sliding failure mode, the slide surface can be divided into top and bottom sections by the position of pile top, and the horizontal resultant force of the top section can be obtained by integration, which is the so-called thrust of the embedded section. Similarly, the force on the bottom section of the overtop-sliding surface can also be obtained. Based on the limit equilibrium theory, the force analysis of the sliding mass enclosed by the bottom sliding surface and the load section of the pile can be carried out, and the thrust on the loaded section can also be obtained. Example analyses show that the thrust of the embedded section and the loaded section obtained by the theoretical method are very consistent with the results of FLAC3D, the

收稿日期: 2022-11-02; 修订日期: 2022-12-03

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41831290)

作者简介: 闫玉平(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要从事铁路设计、边坡稳定性分析、边坡加固等方面的研究工作。

E-mail: [2420907827@qq.com](mailto:2420907827@qq.com)

resultant force of the loading section decreases nonlinearly with the increase of the ratio, while the resultant force of the embedded section presents an opposite trend. With the increase of the embedded ratio from 0 to 0.67, the thrust ratio of embedded section and loading section increases slowly from 0 to 0.3–0.5. With the increase of embedded ratio from 0.67 to 0.8, the ratio increases sharply to 1.47–2.12. Generally, the thrust of embedded section is less than that of loaded section. The theoretical research of the thrust of the embedded pile is of great practical significance for the optimization of the pile internal force and the determination of the pile embedded depth, which will promote the further application of this structure.

**Keywords:** embedded stabilizing piles; overtop-sliding failure; thrust of the embedded section; thrust of the loaded section; the limit equilibrium theory

抗滑桩至今已有 70 多年的实践历史,其中运用最多的结构形式是单排桩<sup>[1-3]</sup>。随着滑(边)坡治理规模的需要及设计理论的完善,抗滑桩逐渐朝着大直径<sup>[4-5]</sup>、多排桩<sup>[6-7]</sup>的方向发展,治理方案趋于综合化<sup>[8]</sup>,结构型式趋于多样化<sup>[9]</sup>,抗滑桩受力趋于更加合理<sup>[10-12]</sup>。

抗滑桩加固坡体设计主要包括桩体受力分析与加固后坡体稳定性评价<sup>[13-16]</sup>。传统抗滑桩,桩顶一般位于坡面,所以桩体需要承担后侧滑体传来的全部滑坡推力,这样桩体前侧滑体抗力无法有效发挥且桩身受力偏大<sup>[6, 17-18]</sup>。沉埋桩是在桩位不变的情况下,将桩顶埋入坡面一定深度,已有研究表明,该桩结构可以有效克服全长桩的不足<sup>[17-18]</sup>。目前针对沉埋桩桩体受力的研究主要如下:熊治文<sup>[19]</sup>通过模型试验与数值模拟,对沉埋桩受力分布规律、沉埋深度做了探讨,得出沉埋桩较全长桩受力更小的结论;雷文杰等<sup>[20-21]</sup>利用模型试验与数值模拟分析了设桩位置不变时,不同桩顶埋深所对应设桩位置的滑坡总推力和桩身内力,发现沉埋深度增加可以有效降低后侧推力与桩身内力,且沉埋深度对设桩截面处总推力影响不大;雷文杰等<sup>[22]</sup>采用有限元法对沉埋桩加固后的实际滑坡做了分析,得到沉埋段土体推力随其深度增加而增大,桩顶土体自身可以承受一定的推力,沉埋桩桩身受力较全长桩明显降低,桩身内力和桩后推力分布随沉埋深度增加变得更为合理等结果;宋雅坤等<sup>[23]</sup>结合大型物理模型试验和数值方法分析了沉埋段和受荷段滑坡推力,初步得出加固后坡体稳定系数随沉埋段的增加而减小,受荷段与沉埋段推力随埋深变化趋势与雷文杰等<sup>[22]</sup>的结论一致。但是针对沉埋桩受力的理论研究,目前鲜有文献报道。

在加固后坡体稳定性评价方面, Xiao<sup>[17]</sup>在假定滑体为无黏性土的基础上,利用极限平衡理论和传递系数法得出了后排桩沉埋深度的计算方法,该方法可将桩顶埋深与坡体稳定系数建立关系,同样得出加固后

坡体稳定系数随着沉埋深度的增加而降低,同时桩身内力也在减小的结论。Yan 等<sup>[18]</sup>基于沉埋桩加固滑坡可能发生的越顶破坏模式,结合传递系数法与极限平衡理论框架下的变分法,推导了对黏性土和无黏性土都适用的后排桩顶沉埋深度的解析解,得出与 Xiao<sup>[17]</sup>一致的结论。

综上,目前针对加固后坡体稳定性分析已经有了较为系统全面的认识,而桩体受力特别是受荷段推力的研究主要借助于模型试验和数值模拟,缺乏深入的理论研究。鉴于此,本文在 Yan 等<sup>[18]</sup>所提越顶破坏模式的基础上,由桩顶位置将越顶滑面分为顶部、底部两段,通过积分求得两段滑面上合力,其中,顶部滑面上水平方向合力即为沉埋段推力;然后借助刚体极限平衡理论对底部段滑面与桩体受荷段所围滑体进行受力分析,求得受荷段推力。

## 1 计算方法

桩体后缘传来的滑坡推力,一部分作用在桩上,不妨称此部分桩体为受荷段(图 1);另一部分越过桩顶滑体继续向前传递,通过前侧滑体自身稳定性提供抗力<sup>[17]</sup>,桩顶距坡面深度部分不妨称之为沉埋段。

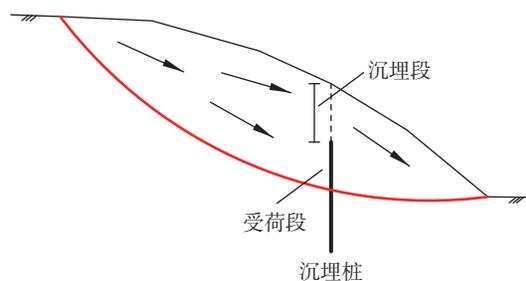


图 1 沉埋桩加固滑坡横截面示意图

Fig. 1 Sketch map of the cross section of a landslide reinforced with embedded pile

Yan 等<sup>[18]</sup>提出的越顶破坏模式如图 2 所示,其中,极坐标系下越顶滑面  $BDC$  方程  $\rho(\theta)$  及其正应力函数

$\sigma(\theta)$  分别如式(1)(2)所示<sup>[18]</sup>。

$$\rho(\theta) = Ae^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \quad (1)$$

$$\sigma(\theta) = \frac{A\gamma}{1+9\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right)^2} e^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \left( \sin\theta - 3\frac{\tan\varphi}{F_s} \cos\theta \right) + Be^{2\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} - \frac{c}{\tan\varphi} \quad (2)$$

式中： $\theta$ ——极角/(°)；

$F_s$ ——与越顶破坏模式对应的稳定系数；

$\gamma$ ——滑体重度/(kN·m<sup>-3</sup>)；

$c$ 、 $\varphi$ ——黏聚力/kPa、内摩擦角/(°)；

$A$ 、 $B$ ——积分常数。

越顶滑面段  $BD$ 、 $DC$ ，受荷段  $BDH$ 、 $HDE$  块的受力分析如图 3 所示。做如下假定：

(1)越顶滑面与桩体受荷段之间的初始滑面  $BHE$  处于极限状态且满足库仑强度准则。

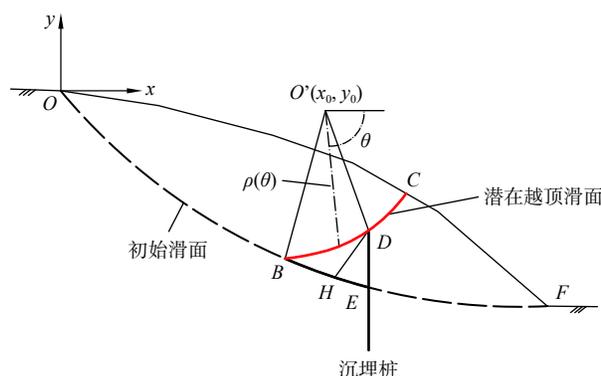


图 2 沉埋桩越顶破坏模式

Fig. 2 Overtop-sliding failure mode of the embedded piles

(2)初始滑面  $BHE$  上只有一个折点  $H$ ，无折点情况为其特解，多折点求解方法类似一个折点。

(3) $BDH$  和  $HDE$  块都为刚体，除越顶滑面段  $BD$  外其他边界上力作用点都位于相应作用面中点。

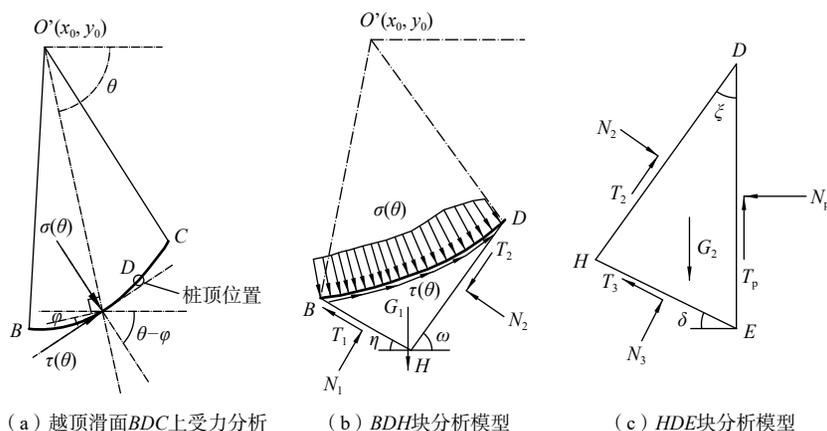


图 3 各块体受力分析模型

Fig. 3 Mechanical analysis model of each typical rigid block

下面对图 3 所示的越顶滑面  $BDC$ 、刚性块体  $BDH$  和  $HDE$  分别进行受力分析。

1)越顶滑面  $BD$  段上合力求解

图 3(a)中越顶滑面  $BDC$  上各点处的正应力函数如式(2)所示，根据摩尔-库仑强度理论，切向应力函数  $\tau(\theta)$  可表示为式(3)。滑面  $BDC$  上长度增量记为  $dl$ ，任意一点切向力和法向力增量分别记为  $dT$  和  $dN$ ，则  $dl$ 、 $dT$  和  $dN$  可分别表示为式(4)、式(5)、式(6)。

$$\tau(\theta) = \sigma(\theta) \tan\varphi + c = \frac{A\gamma}{1+9\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right)^2} e^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \left( \sin\theta - 3\frac{\tan\varphi}{F_s} \cos\theta \right) + B\frac{\tan\varphi}{F_s} e^{2\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \quad (3)$$

$$dl = \frac{\rho(\theta)}{\cos\varphi} d\theta = \frac{Ae^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta}}{\cos\varphi} d\theta \quad (4)$$

$$dT = \tau(\theta) dl = \left[ \frac{A\gamma}{1+9\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right)^2} e^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \left( \sin\theta - 3\frac{\tan\varphi}{F_s} \cos\theta \right) + B\frac{\tan\varphi}{F_s} e^{2\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \right] \frac{Ae^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta}}{\cos\varphi} d\theta \quad (5)$$

$$dN = \sigma(\theta)dl = \left[ \frac{Ay}{1 + 9\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right)^2} e^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} \left( \sin\theta - 3\frac{\tan\varphi}{F_s} \cos\theta \right) + Be^2 \frac{\tan\varphi}{F_s} - \frac{c}{\tan\varphi} \right] \frac{Ae^{-\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta}}{\cos\varphi} d\theta \quad (6)$$

令滑面  $BDC$  上  $x$  和  $y$  方向上力的增量分别为  $dF_x$  和  $dF_y$ , 则有:

$$\begin{cases} dF_x = dN \cos(\theta - \varphi) + dT \sin(\theta - \varphi) \\ dF_y = dN \sin(\theta - \varphi) - dT \cos(\theta - \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

以  $O'$  点为矩心, 可求得滑面  $BD$  段上的水平向合力  $F_{xBD}$ 、竖向合力  $F_{yBD}$  及对  $O'$  点的力矩  $M_{BD}$ , 即:

$$\begin{cases} F_{xBD} = \int_{\theta_B}^{\theta_D} dF_x = \int_{\theta_B}^{\theta_D} \frac{[\sigma(\theta) \cos(\theta - \varphi) + \tau(\theta) \sin(\theta - \varphi)] \rho(\theta)}{\cos\varphi} d\theta \\ F_{yBD} = \int_{\theta_B}^{\theta_D} dF_y = \int_{\theta_B}^{\theta_D} \frac{[\sigma(\theta) \sin(\theta - \varphi) - \tau(\theta) \cos(\theta - \varphi)] \rho(\theta)}{\cos\varphi} d\theta \\ M_{BD} = cA^2 \int_{\theta_B}^{\theta_D} e^{-2\frac{\tan\varphi}{F_s}\theta} d\theta \end{cases} \quad (8)$$

## 2) 块体 $BDH$ 受力分析

$BDH$  块受力分析模型如图 3(b) 所示,  $B$ 、 $D$ 、 $H$  各点坐标分别记为  $(x_B, y_B)$ 、 $(x_D, y_D)$ 、 $(x_H, y_H)$ , 同时令  $BH$  中点坐标为  $(x_1, y_1)$ ,  $HD$  中点坐标为  $(x_2, y_2)$ ,  $BH$  和  $HD$  长度记为  $l_{BH}$  和  $b$ 。由静力平衡条件(以  $O'$  为矩心)及假定(1)可得:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_{O'} = 0 \\ T_1 = N_1 \frac{\tan\varphi_m}{F_s} + \frac{c_m}{F_s} l_{BH} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $c_m$ 、 $\varphi_m$ ——原滑面  $BHE$  上的黏聚力、内摩擦角;

$T_1$ 、 $N_1$ —— $BH$  面上的切向力、法向力/kN。

为简化计算, 曲线  $BD$  按直线边计算, 则其重力 ( $G_1$ ) 可表示为如下形式:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{[F_{xBD} \sin\omega + (F_{yBD} + G_1) \cos\omega] (l_3 \cos\omega + l_4 \sin\omega) + [l_3 \sin\eta + l_1 \sin\omega - (l_3 \cos\omega + l_4 \sin\omega) \sin(\omega + \eta)] \frac{c_m}{F_s} l_{BH} - (M_{BD} - G_1 d_1) \sin\omega + (F_{yBD} + G_1) l_3}{l_2 \sin\omega - l_3 \cos\eta + (l_3 \cos\omega + l_4 \sin\omega) \left[ \cos(\omega + \eta) + \sin(\omega + \eta) \frac{\tan\varphi_m}{F_s} \right]} \\ T_1 = N_1 \frac{\tan\varphi_m}{F_s} + \frac{c_m}{F_s} l_{BH} \\ N_2 = F_{xBD} \sin\omega + (F_{yBD} + G_1) \cos\omega - \frac{c_m}{F_s} l_{BH} \sin(\omega + \eta) - \left[ \cos(\omega + \eta) + \sin(\omega + \eta) \frac{\tan\varphi_m}{F_s} \right] N_1 \\ T_2 = F_{xBD} \cos\omega - (F_{yBD} + G_1) \sin\omega - \frac{c_m}{F_s} l_{BH} \cos(\omega + \eta) + \left[ \sin(\omega + \eta) - \cos(\omega + \eta) \frac{\tan\varphi_m}{F_s} \right] N_1 \end{cases} \quad (14)$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \gamma l_{BH} b \sin(\pi - \eta - \omega) \quad (10)$$

令  $BDH$  重心到  $O'$  点的水平距离为  $d_1$ , 则可求得如下  $BH$  线方程以及经过  $BH$  中点的垂线方程:

$$\begin{cases} \frac{y_H - y_B}{x_H - x_B} x - y + \frac{x_H y_B - x_B y_H}{x_H - x_B} = 0 \\ \frac{x_H - x_B}{y_H - y_B} x + y - y_1 - \frac{x_H - x_B}{y_H - y_B} x_1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$O'$  到线段  $BH$  及其过中点垂线的距离分别记为  $l_1$  和  $l_2$ , 其表达式如式 (12) 所示:

$$\begin{cases} l_1 = \frac{\left| \frac{y_H - y_B}{x_H - x_B} x_0 - y_0 + \frac{x_H y_B - x_B y_H}{x_H - x_B} \right|}{\sqrt{\left( \frac{y_H - y_B}{x_H - x_B} \right)^2 + 1}} \\ l_2 = \frac{\left| \frac{x_H - x_B}{y_H - y_B} (x_0 - x_1) + y_0 - y_1 \right|}{\sqrt{\left( \frac{x_H - x_B}{y_H - y_B} \right)^2 + 1}} \end{cases} \quad (12)$$

同理, 可得  $DH$  线方程及经过  $DH$  中点的垂线方程(为了节省篇幅, 在此不再给出), 记  $O'$  到线段  $DH$  及其过中点垂线的距离分别记为  $l_3$  和  $l_4$ , 将式 (10) — (12) 代入式 (9), 则有:

$$\begin{cases} F_{xBD} + N_1 \sin\eta - T_1 \cos\eta - T_2 \cos\omega - N_2 \sin\omega = 0 \\ F_{yBD} + G_1 - N_1 \cos\eta - T_1 \sin\eta + T_2 \sin\omega - N_2 \cos\omega = 0 \\ M_{BD} - G_1 d_1 + N_1 l_2 - T_1 l_1 - T_2 l_2 - N_2 l_4 = 0 \\ T_1 = N_1 \frac{\tan\varphi_m}{F_s} + \frac{c_m}{F_s} l_{BH} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\eta$ 、 $\omega$ —— $BH$  边、 $DH$  边与水平面的夹角/(°);

$T_2$ 、 $N_2$ —— $DH$  面上的切向力、法向力/kN。

求解方程组 (13), 可解得各个边界上的力如式 (14) 所示:

3) 块体 HDE 受力分析

HDE 块受力分析模型如图 3(c) 所示, 记 HE 和 DE 长度分别为 j 和 k。由静力平衡条件(以 DE 中点为矩

心)及假定(1)可得式(15)。求解式(15), 则可解得边界 HE 和 DE 上的力如式(16)(17)所示。

$$\begin{cases} N_2 \cos \xi + T_2 \sin \xi + N_3 \sin \delta - T_3 \cos \delta - N_p = 0 \\ N_2 \sin \xi - T_2 \cos \xi - N_3 \cos \delta - T_3 \sin \delta - T_p + G_2 = 0 \\ (N_3 \sin \delta - T_3 \cos \delta) \frac{b}{2} \cos \xi - (N_3 \cos \delta + T_3 \sin \delta) \frac{b}{2} \sin \xi + (N_2 \sin \xi - T_2 \cos \xi) \frac{j}{2} \cos \delta - \\ (N_2 \cos \xi + T_2 \sin \xi) \frac{j}{2} \sin \delta + \frac{j}{3} G_2 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \delta \right) = 0 \\ T_3 = N_3 \frac{\tan \varphi_m}{F_s} + \frac{c_m}{F_s} j \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} N_3 = \frac{s \frac{c_m}{F_s} j + N_2 j \tan(\delta - \xi) + T_2 j - \frac{2G_2 j \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{3 \cos(\delta - \xi)}}{b \left[ \tan(\delta - \xi) - \frac{\tan \varphi_m}{F_s} \right]} \\ T_3 = \frac{\left[ N_2 j \tan(\delta - \xi) + T_2 j - \frac{2G_2 j \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{3 \cos(\delta - \xi)} \right] \frac{\tan \varphi_m}{F_s} + b \frac{c_m}{F_s} j \tan(\delta - \omega)}{b \left[ \tan(\delta - \omega) - \frac{\tan \varphi_m}{F_s} \right]} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} N_p = N_2 \cos \xi + T_2 \sin \xi + \frac{b \frac{c_m}{F_s} + N_2 \tan(\delta - \xi) + T_2 - \frac{2G_2 \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{3 \cos(\delta - \xi)}}{b \left[ \tan(\delta - \xi) - \frac{\tan \varphi_m}{F_s} \right]} j \sin \delta \\ - \frac{\left[ N_2 \tan(\delta - \xi) + T_2 - \frac{2G_2 \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{3 \cos(\delta - \xi)} \right] \frac{\tan \varphi_m}{F_s} + b \frac{c_m}{F_s} \tan(\delta - \xi)}{b \left[ \tan(\delta - \xi) - \frac{\tan \varphi_m}{F_s} \right]} j \cos \delta \\ T_p = N_2 \sin \xi - T_2 \cos \xi - \frac{b \frac{c_m}{F_s} + N_2 \tan(\delta - \xi) + T_2 - \frac{2G_2 \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{3 \cos(\delta - \xi)}}{b \left[ \tan(\delta - \xi) - \frac{\tan \varphi_m}{F_s} \right]} j \cos \delta \\ - \frac{\left[ N_2 \tan(\delta - \xi) + T_2 - \frac{2G_2 \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{3 \cos(\delta - \xi)} \right] \frac{\tan \varphi_m}{F_s} + b \frac{c_m}{F_s} \tan(\delta - \xi)}{b \left[ \tan(\delta - \xi) - \frac{\tan \varphi_m}{F_s} \right]} j \sin \delta + G_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $T_3$ 、 $N_3$ ——HE 面上切向力、法向力/kN;

$T_p$ 、 $N_p$ ——DE 面上切向力、受荷段推力/kN;

$\delta$ ——HE 边与水平面的夹角/ $^\circ$ ;

$\xi$ ——HD 边与竖向的夹角/ $^\circ$ ;

$G_2$ ——块体 HDE 的重力/kN。

4) 沉埋段推力求解

图 3(a)中越顶滑面 DC 段水平方向合力即为沉埋

段推力, 记为  $F_{xDC}$ , 求解方法同滑面 BD 段, 表达式如下:

$$F_{xDC} = \int_{\theta_b}^{\theta_c} dF_x = \int_{\theta_b}^{\theta_c} \frac{[\sigma(\theta) \cos(\theta - \varphi) + \tau(\theta) \sin(\theta - \varphi)] \rho(\theta)}{\cos \varphi} d\theta \quad (18)$$

上述求解过程给出了越顶破坏模式下, 沉埋段与受荷段推力的严格解答, 该求解过程可以借助 MATLAB 完成<sup>[24]</sup>。

## 2 实例分析

四川境内宝成铁路沿线某中风化大理岩上覆碎石土的基覆式滑坡主横断面如图 4 所示, 通过现场地质勘查与室内试验, 坡体主要物理力学参数如表 1 所示。利用传递系数法<sup>[25-26]</sup>求得自然坡体稳定系数为 1.06。设计安全系数为 1.20, 拟采用沉埋桩对该坡体加固, 桩体截面尺寸为 2 m×3 m, 平面外桩间距为 5 m, 设桩位置见图 4, 该位置滑体厚度为 15.1 m。

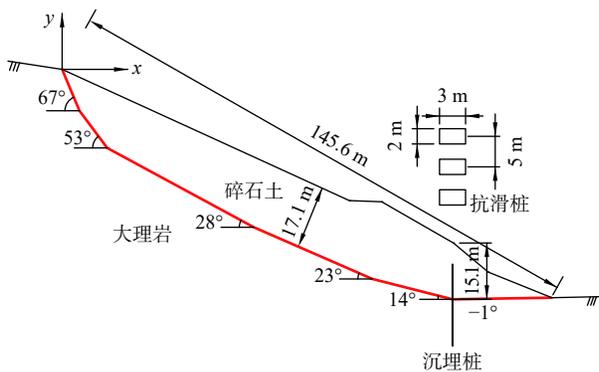


图 4 沉埋桩加固宝成铁路沿线某滑坡横断面图

Fig. 4 Cross section of a practical landslide reinforced with embedded stabilizing piles

表 1 抗滑桩及坡体主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of the landslide and piles

材料类型	土体重量 / (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	弹性模量 / MPa	泊松比
碎石土	22	11	20.6	50	0.33
大理岩	23	450	37.0	600	0.25
抗滑桩	25			30 000	0.22

注: 抗滑桩视为弹性体, 故不考虑其黏聚力和内摩擦角。

为了便于表述, 引入 Yan 等<sup>[18]</sup>对沉埋比( $\eta$ )的定义, 即:  $\eta$ =桩顶埋深/设桩点滑体厚度。通过 Yan 等<sup>[18]</sup>的方法可得, 设计安全系数为 1.20 时,  $\eta=0.364$ , 即桩顶最大沉埋深度为 5.5 m。利用本文方法可得此沉埋深度下沉埋段推力及受荷段推力分别为 439.9 kN/m 和 2 949.6 kN/m, 其比值为 0.149。

为了进一步验证本文方法的合理性, 利用 FLAC3D 进行数值模拟。数值模型含 47 436 个 8 节点六面体单元(图 5), 坡体采用服从摩尔-库仑屈服准则和关联流动法则的理想弹塑性本构模型, 桩体视为弹性材料, 利用结构单元模拟。模型前后左右 4 个边界采用水平位移约束, 底面采用水平和竖向位移约束。采用强度折减法进行数值模拟, 得到沉埋深度为 5.5 m 时, 该滑坡的稳定系数为 1.21, 此时临界滑动面如图 6

所示, 该结果与 Yan 等<sup>[18]</sup>的计算结果非常相近, 在此不再赘述。

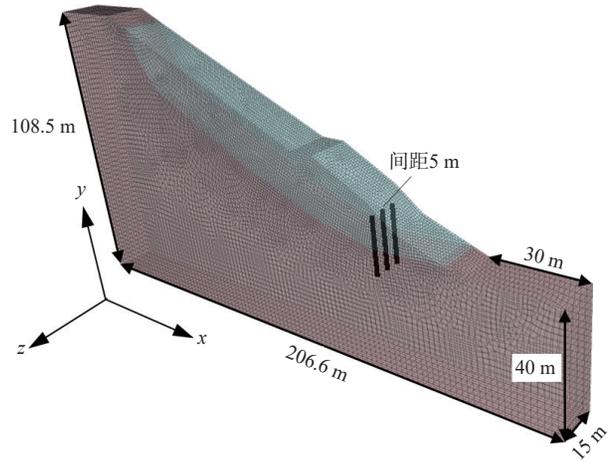


图 5 沉埋桩加固滑坡数值模型

Fig. 5 Numerical model of the practical landslide reinforced with embedded pile

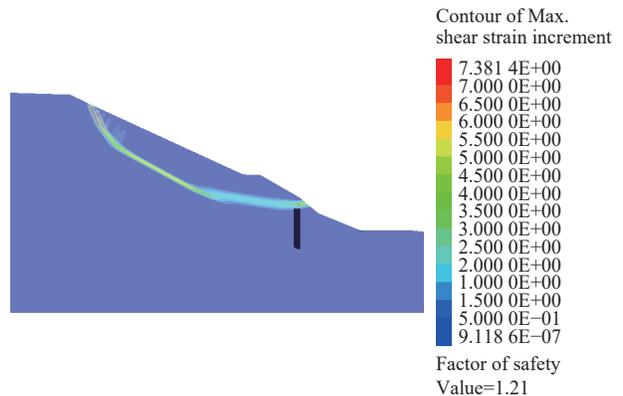


图 6 数值模拟得到的临界滑动面

Fig. 6 Critical slip surface obtained with the shear strength reduction method

图 7 所示为数值模拟得到的越顶破坏模式下滑坡的水平应力分布云图, 由此易得沉埋段与受荷段推力

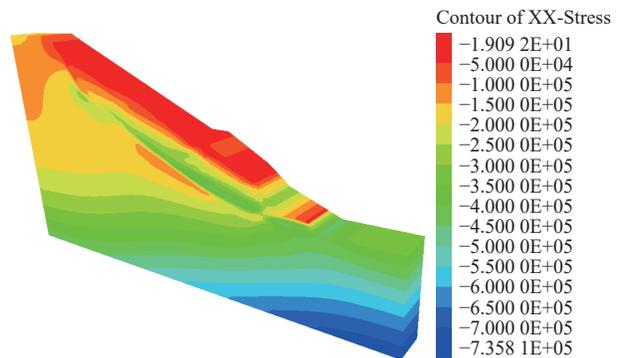


图 7 沉埋桩加固滑坡的水平应力云图

Fig. 7 Contour of horizontal stress of the reinforced landslide using the embedded pile

分别为 428.9 kN/m 和 2 788.9 kN/m, 其比值为 0.154。可见, 数值结果与理论计算结果非常吻合, 这说明了本文方法的合理性。

### 3 讨论

下面对受荷段推力、沉埋段推力、设桩位置处总推力与沉埋比的关系逐一讨论。不同沉埋比对应不同的越顶滑面与稳定系数, 为了论述的完整性, 首先利用文献 [18] 与 FLAC3D 分别获得加固后坡体稳定系数( $F_s$ )随沉埋深度的变化情况, 如图 8 所示, 可见沉埋比( $\eta$ )越大, 坡体稳定系数越小。

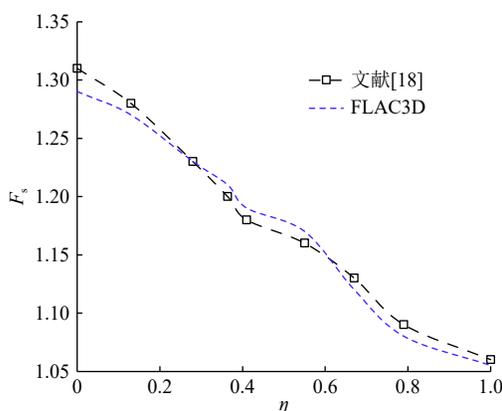


图 8 加固后坡体稳定系数随  $\eta$  的变化情况

Fig. 8 Variation of stability coefficient of reinforced landslide with the embedded ratio

图 9 为理论方法与 FLAC3D 得出的受荷段推力及沉埋段推力随  $\eta$  的变化情况。可见, FLAC3D 结果与理论计算结果非常接近, 随着  $\eta$  由 0 增大到 1, 沉埋段推力由 0 非线性增大到 2 000 kN/m 左右, 受荷段推力则由 4 300 kN/m 非线性减小到 0, 同时,  $\eta$  位于 0.7 ~ 0.8 区间时, 受荷段与沉埋段推力分别急剧减小与增加。

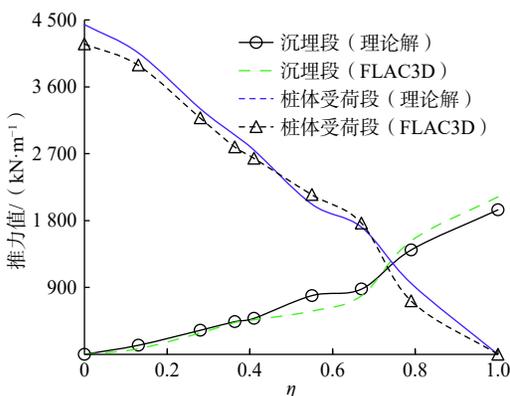


图 9 受荷段及沉埋段推力随  $\eta$  的变化情况

Fig. 9 Variation of the thrust behind the pile and the thrust in the submerged section with the embedded ratio

将沉埋段推力与受荷段推力叠加可得不同沉埋比时设桩位置处总推力的变化曲线(图 10), 可见 2 种方法求得的设桩位置处总推力非常接近, 且变化趋势一致。 $\eta$  为 0 时, 桩位处总滑坡推力明显大于  $\eta$  为 1 时的情况, 前者为 4 350 kN/m, 后者为 2 040 kN/m, 两者比值为 2.13, 这可由图 8 解释, 全长桩时, 加固后坡体稳定系数最大, 而无桩情况下, 坡体稳定系数最小。

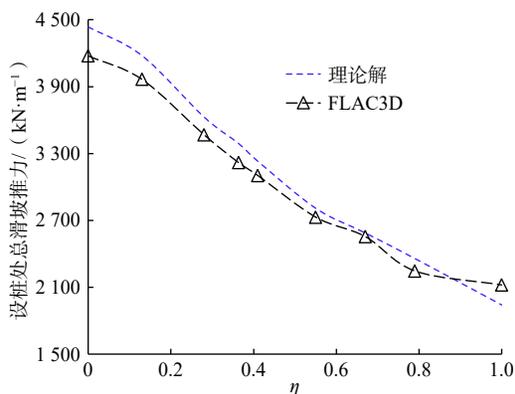


图 10 设桩处总滑坡推力随  $\eta$  的变化情况

Fig. 10 Variation of the total thrust at the section of pile position with the embedded ratio

进一步将 2 种方法得到的沉埋段与受荷段推力之比随  $\eta$  的变化情况绘于图 11, 可见 2 种方法求得的比值随  $\eta$  非线性增大, 且变化趋势非常一致。当  $\eta$  位于 0 ~ 0.67 时, 沉埋段推力与桩后受荷段推力之比由 0 缓慢增大到 0.30 ~ 0.50, 当  $\eta$  在 0.67 ~ 0.80 范围内时, 该比值急剧增大到 1.47 ~ 2.12, 此时抗滑桩作用效果已经非常小, 说明了该沉埋深度在工程上需要避免。此外, 图 11 中也标出了沉埋段推力与桩后受荷段推力之比为 1 时,  $\eta$  为 0.72 ~ 0.74。综合分析可得, 沉埋深度合理时, 沉埋段推力小于受荷段推力。

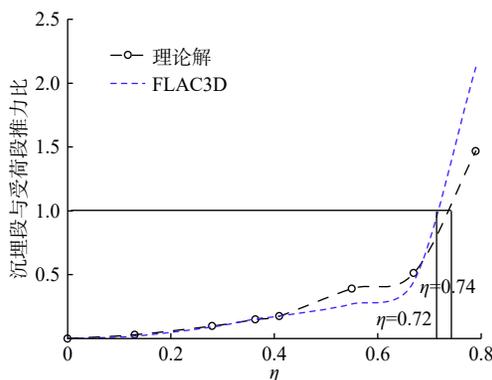


图 11 沉埋段、受荷段推力之比与  $\eta$  的关系曲线

Fig. 11 Variation curve of thrust ratio of the submerged section and the loading section with the embedded ratio

## 4 结论

(1) 针对沉埋桩加固基覆式滑坡, 基于潜在越顶破坏模式, 由桩顶位置将越顶滑面分为顶部、底部两段。对顶部滑面上的力进行积分可得沉埋段推力, 利用刚体极限平衡理论对底部滑面与受荷段所围滑体进行受力分析可得受荷段推力, 进而可得受荷段与沉埋段推力随桩顶埋深的变化规律、不同沉埋深度下设桩位置处滑坡推力、受荷段与沉埋段推力比值等。

(2) 理论计算所得沉埋段与受荷段推力值与 FLAC3D 结果非常接近, 其中, 受荷段推力、沉埋段推力、设桩位置处总推力随沉埋比的增大而分别非线性减小、增大、减小。

(3) 沉埋比为 0 和 1 时, 桩位处总设计滑坡推力分别为 4 350 kN/m 与 2 040 kN/m, 前者与后者比值为 2.13; 沉埋比为 0.7~0.8 时, 受荷段与沉埋段推力分别急剧减小与增加。沉埋比为 0~0.67 时, 沉埋段与受荷段推力之比由 0 缓慢增大到约 0.3~0.5, 沉埋比由 0.67 增大到 0.80 时, 该比值急剧增大到 1.47~2.12。

(4) 为了充分发挥沉埋桩加固效果, 一般沉埋深度下, 沉埋段推力应小于受荷段推力。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Design method for stabilizing piles against landslide: One row of piles[J]. *Soils and Foundations*, 1981, 21(1): 21 - 37.
- [ 2 ] RANDOLPH M F. The response of flexible piles to lateral loading[J]. *Géotechnique*, 1981, 31(2): 247 - 259.
- [ 3 ] 常晓军, 葛伟亚, 于洋, 等. 福建省永泰县东门旗山滑坡诱发机理与防治措施[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(4): 1063 - 1072. [ CHANG Xiaojun, GE Weiya, YU Yang, et al. Mechanism and mitigation measures of Qishan landslide of Yongtai in Fujian Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(4): 1063 - 1072. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] CHOW Y K. Analysis of piles used for slope stabilization[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20(9): 635 - 646.
- [ 5 ] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(4): 314 - 323.
- [ 6 ] 郑颖人, 雷文杰, 赵尚毅, 等. 抗滑桩设计中的两个问题[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(增刊1): 45 - 51. [ ZHENG Yingren, LEI Wenjie, ZHAO Shangyi, et al. Two problems in design methods of anti-slide piles[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(Sup 1): 45 - 51. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 55 - 63. [ YAN Yuping, XIAO Shiguo. A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 55 - 63. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 王文沛, 殷跃平, 王立朝, 等. 排水抗滑桩技术研究现状及展望[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 73 - 83. [ WANG Wenpei, YIN Yueping, WANG Lichao, et al. Status and prospects of studies on anti-slide shaft technology[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 73 - 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 等. 大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 125 - 131. [ XIANG Lirong, CHEN Weizhi, GUO Zaixu, et al. A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 125 - 131. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 邓时容, 肖世国. 嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 84 - 91. [ DENG Shirong, XIAO Shiguo. Calculation method of stabilizing piles with broadened top at the built-in section[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 84 - 91. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 陶波, 仵磊, 伍法权, 等. 论静止侧压力对抗滑桩的作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(5): 837 - 840. [ TAO Bo, WU Lei, WU Faquan, et al. The effect imposed on anti-slide pile by the static lateral pressure[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(5): 837 - 840. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 肖世国. 考虑桩间土体抗滑作用的单排抗滑桩受力计算方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(1): 89 - 94. [ XIAO Shiguo. A calculation method for one row stabilizing piles considering resistance of soil between adjacent piles[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(1): 89 - 94. (in Chinese

- with English abstract) ]
- [13] POULOS H G. Design of reinforcing piles to increase slope stability[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(5): 808 – 818.
- [14] 钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 等. 基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 100 – 107. [ ZHONG Changmao, QIU Enxi, WEI Yongxing, et al. Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 100 – 107. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 等. 抗滑桩应变特征与内力非线性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 114 – 124. [ REN Qingyang, ZHAO Mengyuan, XIE Zhongwei, et al. A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 114 – 124. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 李宁, 刘冠麟, 许建聪, 等. 降雨条件下抗滑桩边坡三维稳定性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(3): 38 – 46. [ LI Ning, LIU Guanlin, XU Jiancong, et al. 3D numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles under rainfall conditions[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(3): 38 – 46. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] XIAO Shiguo. A simplified approach for stability analysis of slopes reinforced with one row of embedded stabilizing piles[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(4): 1371 – 1382.
- [18] YAN Yuping, XIAO Shiguo. A calculation method for the embedded depth of stabilizing piles in reinforced slopes[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2020, 44(7): 1077 – 1092.
- [19] 熊治文. 深埋式抗滑桩的受力分布规律[J]. *中国铁道科学*, 2000, 21(1): 48 – 56. [ XIONG Zhiwen. Force distribution rule of deeply buried anti slide pile[J]. *China Railway Science*, 2000, 21(1): 48 – 56. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 沉埋桩的有限元设计方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增刊1): 2924 – 2929. [ LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Study on finite element design methods of slope stabilized by deeply buried anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup 1): 2924 – 2929. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 雷文杰, 郑颖人, 王恭先, 等. 沉埋桩加固滑坡体模型试验的机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1347 – 1355. [ LEI Wenjie, ZHENG Yingren, WANG Gongxian, et al. Mechanism analysis of slope reinforcement with deeply buried piles with model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1347 – 1355. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡加固系统中沉埋桩的有限元极限分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 27 – 33. [ LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Limit analysis of slope stabilized by deeply buried piles with finite element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 27 – 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 宋雅坤, 郑颖人, 雷文杰. 沉埋式抗滑桩机制模型试验数值分析研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(增刊1): 63 – 68. [ SONG Yakun, ZHENG Yingren, LEI Wenjie. Analysis of the experimental mechanism of deeply buried anti-slide pile by FEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Sup1): 63 – 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] The MathWorks Inc. Global optimization toolbox: User's guide (R2018b)[M/OL]. (2018-09-01)[2022-11-10]. [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/gads/gads\\_tb.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/gads/gads_tb.pdf).
- [25] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. [ XU Bangdong. *Landslide analysis and prevention*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese) ]
- [26] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983. [ The Second Survey and Design Institute of Ministry of Railways. *Design and calculation of anti-slide pile*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983. (in Chinese) ]

编辑: 刘真真