水文地质工程地质
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法

闫玉平，肖世国

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

YAN Yuping and XIAO Shiguo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009063

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析

Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction

张玲, 朱幸仁, 欧强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 72-80

大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究

A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide

向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 叶丹, 姜雷 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 125-131

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

双参数强度折减法研究中存在的问题分析

Analyses of the existing problems in the double parameters reduction method

陈子玉, 宋彦辉, 严豪, 陈康达 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 125-125

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

基于遗传算法-支持向量机的滑坡渗透系数反演

Estimation of hydraulic conductivity of landslides based on support vector machine method optimized with genetic algorithm

胡鹏, 文章, 胡新丽, 张玉明 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 160-168

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009063

双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法

闫玉平[1]，肖世国[2]
（1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院，四川 成都　610031；
2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室，四川 成都　610031）

摘要：为了在求解双排全长桩和后排沉埋-前排全长桩中前桩后侧坡体推力的同时也可得到其分布模式，以便更合理确定前排桩受力特征，针对双排桩加固的基岩-覆盖层式滑坡，采用斜条分法将排间滑体分割成若干斜向平行滑面的土条；对所形成的在不同深度位置的 4 类典型土条，根据静力平衡条件，推导了其作用于前桩受荷段后侧的推力计算公式，进而可确定出前排桩受荷段后侧坡体推力分布模式及其合力。实例分析表明，本文方法所确定的前桩后侧坡体推力呈不规则抛物线形分布，其峰值点接近于滑面；后排桩沉埋模式时前桩后侧坡体推力比后排桩全长模式时的值小 8.6% ~ 10.6%；本文方法比传递系数法的计算值偏大 10.6% ~ 13.4%，且相对更接近于 $FLAC^{3D}$ 模拟结果。

关键词：双排抗滑桩；滑坡推力；沉埋模式；斜条分法；排间滑体

中图分类号：P642.23　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-3665(2021)04-0055-09

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

YAN Yuping[1]， XIAO Shiguo[2]
(1. *Faculty of Geoscience and Environment Engineering*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610031, *China*; 2. *Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering*, *Ministry of Education*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610031, *China*)

Abstract: In order to better understand the thrust and its distribution pattern on the fore piles of double-row full-length piles and embedded rear-row piles combined with full-length fore-row ones used to reinforce landslides, an inclined slice method is provided in this article. The slide mass between the two pile-rows is divided into many oblique slices parallel to the local slip surface. These slices are involved in four basic types at various depths. Calculation formula of the thrust of each inclined slice on the loading segment of the fore pile can be derived based on the static equilibrium principle, and the distribution pattern of the thrust and its resultant force can be determined. The analysis results of the examples indicate that the thrust on the fore pile determined by the proposed method shows approximately parabolic distribution and its peak point is close to the slip surface. The calculated thrust on the fore piles under the embedded rear-row piles are 8.6% to 10.6% smaller than that under the full-length rear-row piles. The proposed thrusts are about 10.6% to 13.4% higher than those by the classical transfer coefficient method, and are relatively close to the numerical results via $FLAC^{3D}$.

Keywords: double-row stabilizing piles； landslide thrust； embedded rear-row piles layout； inclined slice method； slide mass between two pile-rows

收稿日期：2020-09-29；**修订日期：**2020-10-19

基金项目：国家自然科学基金项目（51578466）

第一作者：闫玉平（1989-），男，博士研究生，主要从事边坡稳定性分析与边坡加固研究。E-mail: 2420907827@qq.com

通讯作者：肖世国 (1973-)，男，博士，教授，主要从事边坡稳定性与支挡结构研究。E-mail: xiaoshiguo@swjtu.cn

双排全长桩或后排沉埋-前排全长桩越来越多应用于大型基覆式滑坡的治理工程[1－6]，如图 1 所示，d_0=0 与 d_0>0 分别表示前排全长与后排沉埋桩。对于此类问题，两排桩上推力大小及分布模式是工程设计中的关键因素之一。

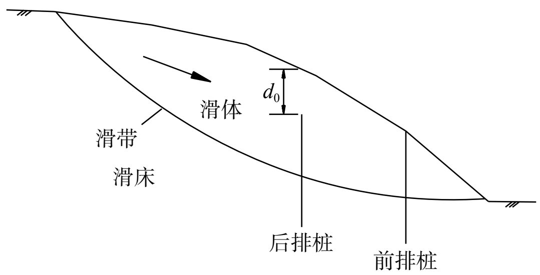

图 1　双排桩加固滑坡横截面示意图

Fig. 1　Sketch map of the cross section of a landslide reinforced with double-row piles

后排桩上推力求解类似于单排桩，以往已有较多计算方法[7－13]。中铁二院曾对单排桩上推力进行现场模型试验[14－16]，得到了其分布模式。也有学者通过室内模型试验对沉埋桩及后排沉埋-前排全长桩后侧推力进行研究[17－19]，确定了试验模型桩后推力作用特征。郑颖人等[20]、赵尚毅等[21]、宋雅坤等[22]则采用有限元方法得到了单排全长抗滑桩或沉埋桩的受力特征。

在前排桩后侧推力的解析计算方面，刘鸿[23]、李明康[24]采用弹性理论对双排抗滑桩排间岩土体的传力机制进行了分析，得出了前排桩后侧推力的表达式，但对排间岩土体，其采用弹性分析模型偏于理想化；肖世国等[25]基于后排桩推力向前传递的地基系数“k”法以及排间岩土体推力传递的传递系数法，提出了一种计算前排桩后侧推力的方法，但不能给出前排桩上推力分布模式，且采用滑体侧向抗力系数沿深度不变的模式也尚需优化；杨磊[26]将弹性理论与条分法相结合，以此可近似得到前排桩上推力，但该法关于条块间正应力分布模式呈抛物线形或直线型的假设仍存在不合理性。总之，上述这些求解前排桩上推力的方法有下面两个明显缺陷：（1）模型过于理想化；（2）无法兼顾推力大小与分布模式。

针对既有方法的不足，为了在求解前排桩后侧坡体推力的同时也可得到其分布模式，以便更合理确定前排桩受力特征，本文采取如下基本思路：首先，考虑滑体侧向抗力系数随深度变化的实际情况，采用地基系数“m”法求得后排桩受荷段前侧滑体抗力；然后，考虑双排桩排间滑面特征，采用平行于滑面的斜条分法对排间土体进行分析，将排间土体分割为若干斜条，根据各条块应满足的静力平衡条件，同时确定作用于前排桩受荷段后侧的推力大小及其分布模式。

1　计算方法

对于双排桩加固滑坡的排间滑体，其基本分析模型如图 2 所示，将其后边界 OC 与前边界 DE 之间的滑体以平行排间滑面方向分割成 n+1 条，边界 OC 与 DE 自上而下的分割点分别依次标为点 A_0, A_1, ⋯, A_{n-1} 和点 D_1, D_2, ⋯, D_{n-1}。图 2 中，d_0 为后排桩沉埋深度，当 d_0=0 时，表示全长桩；d 为后排桩受荷段长度；s 为前后排间距；s_0 为排间滑面折点 F 距后排桩距离；q_1、q_1+q_2 分别为边界 OC 顶、底端的水平压力；α_1、α_2 分别为排间滑面段 CF、FE 的水平倾角；e_1、i、n 为条块编号。

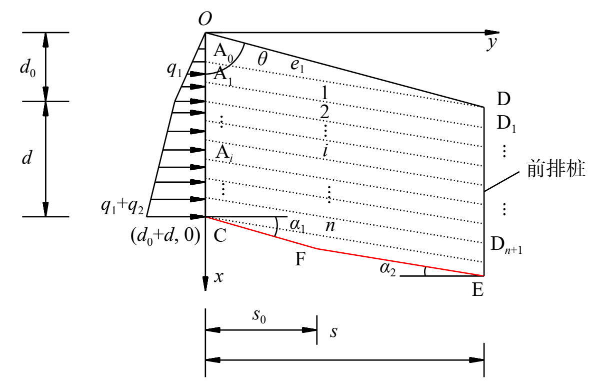

图 2　排间滑体基本分析模型

Fig. 2　Basic analytical model of slide mass between two rows of piles

对于排间滑面 CE，这里考虑存在一个折点 F 的情况。当 α_1=α_2 时，退化为直线型滑面；对于排间滑面多折点的情况，求解方法类似于一个折点情况，不再赘述。为简化分析，作如下假定：

（1）后排桩受荷段前侧土体的抗力在后排桩全长与沉埋时，分别为三角形、两段折线形分布。

（2）各斜条块假设为刚体，且条块之间相互作用力、前排桩作用于各条块的力、滑床对最下面一个条块的作用力均位于相应作用面的中点，由此可得各典型条块受力分析模型如图 3 所示。

（3）前排桩作用于第 i 条块的切向力 T_{pi} 和法向力 N_{pi} 之间满足 T_{pi}=k_pN_{pi}，其中 k_p 为桩土界面综合参数。

（4）两排桩之间的滑面处于极限状态且满足 Coulomb 强度准则。

记排间滑体重度、内摩擦角、黏聚力分别为 γ、

φ、c，对图 3 所示的不同深度处典型条块分别进行受力分析。

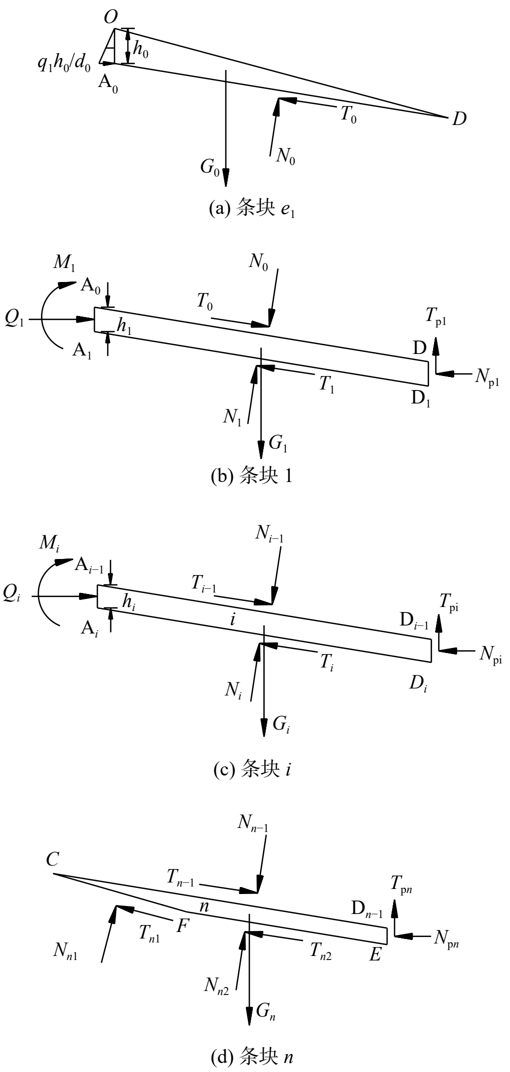

图 3　各典型斜条块受力分析模型

Fig. 3　Mechanical analysis model of each typical oblique slice

1.1　顶部条块 e_1

对于三角形条块 e_1，只包含其下表面上的切向力 T_0 和法向力 N_0 共 2 个未知力，需满足水平和竖向静力平衡方程，即：

$$\begin{cases} \dfrac{q_1 h_0^{2}}{2d_0} + N_0\sin\alpha_2 - T_0\cos\alpha_2 = 0 \\ G_{e1} - N_0\cos\alpha_2 - T_0\sin\alpha_2 = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：h_0——条块左侧长度；

G_0——条块 e_1 的重力，$G_0=\gamma s h_0/2$；

l_0——条块 e_1 底面长度。

根据 Coulomb 强度准则，还应满足：

$$T_0 \leqslant N_0\tan\varphi + c l_0 \tag{2}$$

求解方程(1)可得：

$$\begin{cases} N_0 = \dfrac{\gamma s h_0}{2}\cos\alpha_2 - \dfrac{q_1 h_0^{2}}{2d_0}\sin\alpha_2 \\ T_0 = \dfrac{\gamma s h_0}{2}\sin\alpha_2 + \dfrac{q_1 h_0^{2}}{2d_0}\cos\alpha_2 \end{cases} \tag{3}$$

1.2　位于 d_0 范围的平行四边形条块

此范围内各条块分析方法相同，以条块 1 为例具体阐述。以条块 1 下表面上的切向力 N_1 和法向力 T_1 作用点位置为矩心，由静力平衡条件及假定(3)可得：

$$\begin{cases} G_1 - T_1\sin\alpha_2 - N_1\cos\alpha_2 + T_0\sin\alpha_2 + N_0\cos\alpha_2 - T_{p1} = 0 \\ Q_1 + N_1\sin\alpha_2 - T_1\cos\alpha_2 - N_0\sin\alpha_2 + T_0\cos\alpha_2 - N_{p1} = 0 \\ M_1 - N_0 h_1\sin\alpha_2 + T_0 h_1\cos\alpha_2 + \dfrac{1}{2}N_{p1}(s\tan\alpha_2 - h_1) \\ \qquad -\dfrac{1}{2}T_{p1}s = 0 \\ T_{p1} = k_p N_{p1} \end{cases} \tag{4}$$

式中：Q_1——条块 1 左侧水平方向合力；

M_1——左侧作用力产生的力矩；

G_1——条块 1 的重力。

可分别表示为：

$$\begin{cases} Q_1 = \dfrac{q_1(2h_0 + h_1)h_1}{2d_0} \\ M_1 = \displaystyle\int_{x_{A0}}^{x_{A1}} \frac{q_1 x}{d_0}\left(h_0 + h_1 + \frac{s\tan\alpha_2}{2} - x\right)\mathrm{d}x \\ G_1 = \gamma h_1 s \end{cases} \tag{5}$$

式中：h_1——条块 1 左侧长度，条块 2～n-1 标记以此类推；下文中 N_i、T_i 的含义同条块 1。

由式(4)可推导得到：

$$\begin{cases} T_1 = T_0 + \dfrac{\dfrac{G_1 - k_p\dfrac{2M_1 + 2T_0h_1\cos\alpha_2 - 2N_0h_1\sin\alpha_2}{k_p s - s\tan\alpha_2 + h_1}}{\cos\alpha_2} + \dfrac{Q_1 - \dfrac{2M_1 + 2T_0h_1\cos\alpha_2 - 2N_0h_1\sin\alpha_2}{k_p s - s\tan\alpha_2 + h_1}}{\sin\alpha_2}}{\tan\alpha_2 + \cot\alpha_2} \\ N_1 = N_0 - \dfrac{Q_1}{\sin\alpha_2} - T_0\cot\alpha_2 + \dfrac{2M_1 + 2T_0h_1\cos\alpha_2 - 2N_0h_1\sin\alpha_2}{(k_p s - s\tan\alpha_2 + h_1)\sin\alpha_2} + \\ \left[T_0 + \dfrac{\dfrac{G_1 - k_p\dfrac{2M_1 + 2T_0h_1\cos\alpha_2 - 2N_0h_1\sin\alpha_2}{k_p s - s\tan\alpha_2 + h_1}}{\cos\alpha_2} + \dfrac{Q_1 - \dfrac{2M_1 + 2T_0h_1\cos\alpha_2 - 2N_0h_1\sin\alpha_2}{k_p s - s\tan\alpha_2 + h_1}}{\sin\alpha_2}}{\tan\alpha_2 + \cot\alpha_2}\right]\cot\alpha_2 \end{cases} \tag{6}$$

对位于 d_0 范围内的其他条块 k, 只需要将方程(6)中的下标 1 换为 k, 将 0 换为 k-1 即可, 而其中的 Q_k、M_k、G_k 则按方程(7)求解:

$$\begin{cases} Q_k=\int_{x_{\mathrm{A}k-1}}^{x_{\mathrm{A}k}} \dfrac{q_1 x}{d_0}\mathrm{d}x \\ M_k=\int_{x_{\mathrm{A}k-1}}^{x_{\mathrm{A}k}} \dfrac{q_1 x}{d_0}\left(x_{\mathrm{A}k}+\dfrac{s\tan\alpha_2}{2}-x\right)\mathrm{d}x \\ G_k=\gamma h_k s \end{cases} \tag{7}$$

1.3 位于 d 范围内的平行四边形条块

对位于 d 范围内的条块 i, 其受力分析模式同条块 1, 因此只需将方程(6)中下标 1 换为 i, 将 0 换为 i-1 即可。但该范围内 Q_i、M_i 解法因左边界荷载不同而与 d_0 范围内情况略有不同, 其求解方程为:

$$\begin{cases} Q_i=\int_{x_{\mathrm{A}i-1}}^{x_{\mathrm{A}i}} \left[\dfrac{q_2-q_1}{d_0}(x-d_0)+q_1\right]\mathrm{d}x \\ M_i=\int_{x_{\mathrm{A}i-1}}^{x_{\mathrm{A}i}} \left[\dfrac{q_2-q_1}{d_0}(x-d_0)+q_1\right]\left(x_{\mathrm{A}i}+\dfrac{s\tan\alpha_2}{2}-x\right)\mathrm{d}x \end{cases} \tag{8}$$

1.4 底部条块 n

设该条块面积为 S_n, 则其重力为 $G_n=\gamma S_n$; 以 $T_{\mathrm{p}n}$ 和 $N_{\mathrm{p}n}$ 作用点位置为矩心, 由静力平衡条件及假定(4)可得:

$$\begin{cases} N_{n1}\sin\alpha_1-T_{n1}\cos\alpha_1+N_{n2}\sin\alpha_2-T_{n2}\cos\alpha_2-N_{n-1}\sin\alpha_2+T_{n-1}\cos\alpha_2-N_{\mathrm{p}n}=0 \\ -N_{n1}\cos\alpha_1-T_{n1}\sin\alpha_1-N_{n2}\cos\alpha_2-T_{n2}\sin\alpha_2+N_{n-1}\cos\alpha_2+T_{n-1}\sin\alpha_2+G_n-T_{\mathrm{p}n}=0 \\ N_{n1}\left\{\dfrac{\left(s-\dfrac{s_0}{2}\right)}{\cos\alpha_1}-\left[\dfrac{(s-s_0)\sin(\alpha_1-\alpha_2)}{\cos\alpha_2\sin(90^\circ-\alpha_1)}+\dfrac{h_n}{2}\right]\sin\alpha_1\right\}+T_{n1}\left[\dfrac{(s-s_0)\sin(\alpha_1-\alpha_2)}{\cos\alpha_2\sin(90^\circ-\alpha_1)}+\dfrac{h_n}{2}\right]\cos\alpha_1+ \\ N_{n2}\left[\dfrac{(s-s_0)}{2\cos\alpha_2}-\dfrac{h_n}{2}\sin\alpha_2\right]+T_{n2}\dfrac{h_n}{2}\cos\alpha_2-N_{n-1}\left[\dfrac{s}{2\cos\alpha_2}+\dfrac{h_n}{2}\sin\alpha_2\right]+T_{n-1}\dfrac{h_n}{2}\cos\alpha_2-G_n s_{\mathrm{G}}=0 \\ T_{n1}=N_{n1}\tan\varphi+cl_{\mathrm{CF}} \\ T_{n2}=N_{n2}\tan\varphi+cl_{\mathrm{FE}} \end{cases} \tag{9}$$

式中: s_{G}—— 条块 n 的形心位置距右侧的水平距离,

$$s_{\mathrm{G}}=\frac{s_0{}^2-3ss_0+3s^2}{3(2s-s_0)};$$

N_{n1}、T_{n1}——条块 n 底面 CF 上的法向力和切向力;

N_{n2}、T_{n2}——条块 n 底面 FE 上的法向力和切向力;

h_n——条块 n 右侧长度;

l_{CF}、l_{FE}——底面 CF、FE 的长度。

由式(9)可得关于 N_{n2}、$N_{\mathrm{p}n}$ 的二元一次方程组为:

$$\begin{cases} N_{n2}\left(\dfrac{\eta_3}{\eta_1}-\eta_2\right)+\eta_4+\dfrac{T_{n-1}\sin\alpha_2+N_{n-1}\cos\alpha_2}{(\cos\alpha_1+\tan\varphi\sin\alpha_1)}+\dfrac{G_n-k_{\mathrm{p}}N_{\mathrm{p}n}}{(\cos\alpha_1+\tan\varphi\sin\alpha_1)}+ \\ \dfrac{T_{n-1}\dfrac{h_n}{2}\cos\alpha_2-N_{n-1}\left[\dfrac{s}{2\cos\alpha_2}+\dfrac{h_n}{2}\sin\alpha_2\right]-G_n s_{\mathrm{G}}}{\eta_1}=0 \\ N_{n2}-\chi_2 N_{\mathrm{p}n}-\chi_3+\dfrac{T_{n-1}\cos\alpha_2-N_{n-1}\sin\alpha_2}{(\sin\alpha_1-\tan\varphi\cos\alpha_1)\chi_1}+ \\ \dfrac{T_{n-1}\sin\alpha_2+N_{n-1}\cos\alpha_2}{(\cos\alpha_1+\tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1}+\dfrac{G_n}{(\cos\alpha_1+\tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1}=0 \end{cases} \tag{10}$$

式中中间变量 η_1、η_2、η_3、η_4 和 χ_1、χ_2、χ_3、χ_4 表达式分别为:

$$\begin{cases} \eta_1=\left\{\dfrac{\left(s-\dfrac{s_0}{2}\right)}{\cos\alpha_1}-\left[\dfrac{(s-s_0)\sin(\alpha_1-\alpha_2)}{\cos\alpha_2\sin(90^\circ-\alpha_1)}+\dfrac{h_n}{2}\right]\sin\alpha_1\right\}+\left[\dfrac{(s-s_0)\sin(\alpha_1-\alpha_2)}{\cos\alpha_2\sin(90^\circ-\alpha_1)}+\dfrac{h_n}{2}\right]\tan\varphi\cos\alpha_1 \\ \eta_2=\dfrac{\cos\alpha_2+\tan\varphi\sin\alpha_2}{\cos\alpha_1+\tan\varphi\sin\alpha_1} \\ \eta_3=\left[\dfrac{(s-s_0)}{2\cos\alpha_2}-\dfrac{h_n}{2}\sin\alpha_2\right]+\dfrac{h_n}{2}\tan\varphi\cos\alpha_2 \\ \eta_4=\dfrac{cl_{\mathrm{CF}}\left[\dfrac{(s-s_0)\sin(\alpha_1-\alpha_2)}{\cos\alpha_2\sin(90^\circ-\alpha_1)}+\dfrac{h_n}{2}\right]\cos\alpha_1+cl_{\mathrm{FE}}\dfrac{h_n}{2}\cos\alpha_2}{\eta_1}-\dfrac{cl_{\mathrm{CF}}\sin\alpha_1+cl_{\mathrm{FE}}\sin\alpha_2}{\cos\alpha_1+\tan\varphi\sin\alpha_1} \end{cases} \tag{11}$$

$$
\begin{cases}
\chi_1 = \dfrac{\sin\alpha_2 - \tan\varphi\cos\alpha_2}{\sin\alpha_1 - \tan\varphi\cos\alpha_1} - \dfrac{\cos\alpha_2 + \tan\varphi\sin\alpha_2}{\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1} \\
\chi_2 = \dfrac{\dfrac{1}{\sin\alpha_1 - \tan\varphi\cos\alpha_1} + \dfrac{k_{\mathrm{p}}}{\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1}}{\chi_1} \\
\chi_3 = \dfrac{\dfrac{cl_{\mathrm{CF}}\cos\alpha_1 + cl_{\mathrm{FE}}\cos\alpha_2}{\sin\alpha_1 - \tan\varphi\cos\alpha_1} + \dfrac{cl_{\mathrm{CF}}\sin\alpha_1 + cl_{\mathrm{FE}}\sin\alpha_2}{\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1}}{\chi_1} \\
\chi_4 = \dfrac{1}{\chi_2 - \dfrac{\eta_1 k_{\mathrm{p}}}{(\eta_3 - \eta_1\eta_2)(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)}}
\end{cases}
\tag{12}
$$

于是，由式(10)可得 N_{pn}、N_{n2} 的表达式分别为：

$$
N_{pn} = \chi_4 \left\{
\begin{aligned}
&\frac{T_{n-1}\cos\alpha_2 - N_{n-1}\sin\alpha_2}{(\sin\alpha_1 - \tan\varphi\cos\alpha_1)\chi_1} + \frac{T_{n-1}\sin\alpha_2 + N_{n-1}\cos\alpha_2}{(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1} + \\
&\frac{G_n}{(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1} - \frac{\eta_1\eta_4}{\eta_3 - \eta_1\eta_2} - \chi_3 - \\
&\frac{\eta_1}{\eta_3 - \eta_1\eta_2}\,\frac{T_{n-1}\sin\alpha_2 + N_{n-1}\cos\alpha_2 + G_n}{\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1} - \\
&\frac{T_{n-1}\dfrac{h_n}{2}\cos\alpha_2 - N_{n-1}\left(\dfrac{s}{2\cos\alpha_2} + \dfrac{h_n}{2}\sin\alpha_2\right) - G_n s_{\mathrm{G}}}{\eta_3 - \eta_1\eta_2}
\end{aligned}
\right\}
\tag{13}
$$

$$
\begin{aligned}
N_{n2} = {} & \chi_2\chi_4 \left\{
\begin{aligned}
&\frac{T_{n-1}\cos\alpha_2 - N_{n-1}\sin\alpha_2}{(\sin\alpha_1 - \tan\varphi\cos\alpha_1)\chi_1} + \frac{T_{n-1}\sin\alpha_2 + N_{n-1}\cos\alpha_2}{(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1} + \\
&\frac{G_n}{(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1} - \frac{\eta_1\eta_4}{\eta_3 - \eta_1\eta_2} - \chi_3 - \\
&\frac{\eta_1}{\eta_3 - \eta_1\eta_2}\,\frac{T_{n-1}\sin\alpha_2 + N_{n-1}\cos\alpha_2 + G_n}{\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1} - \\
&\frac{T_{n-1}\dfrac{h_n}{2}\cos\alpha_2 - N_{n-1}\left(\dfrac{s}{2\cos\alpha_2} + \dfrac{h_n}{2}\sin\alpha_2\right) - G_n s_{\mathrm{G}}}{\eta_3 - \eta_1\eta_2}
\end{aligned}
\right\} + \\
& \chi_3 - \frac{T_{n-1}\cos\alpha_2 - N_{n-1}\sin\alpha_2}{(\sin\alpha_1 - \tan\varphi\cos\alpha_1)\chi_1} - \frac{T_{n-1}\sin\alpha_2 + N_{n-1}\cos\alpha_2}{(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1} - \\
& \frac{G_n}{(\cos\alpha_1 + \tan\varphi\sin\alpha_1)\chi_1}
\end{aligned}
\tag{14}
$$

将式(13)(14)代入式(9)，可确定 T_{n1}、T_{n2}、N_{n1} 及 T_{pn}。

通过上述求解方法，可得各条块对前排桩的作用力(局部作用力)，因此将其叠加可得前排桩所受的合推力，即：

$$
N_{\mathrm{p}} = \sum_{i=1}^{n} N_{\mathrm{p}i}
\tag{15}
$$

2　实例分析

西南地区某铁路工程沿线存在一中风化大理岩上覆碎石土堆积体的潜在滑坡，滑坡主轴横断面示意图如图 4 所示，通过现场勘查与试验，确定坡体主要物理力学参数如表 1 所示。利用传递系数法[27]求得天然工况下该坡体稳定系数为 1.128。拟采用双排抗滑桩加固，桩体采用 C30 混凝土浇筑，截面尺寸为 2 m×3 m，桩间距(平面外)为 5 m。前排桩拟设于距坡脚水平距离约 30 m 的滑面平缓地段，后排桩则分别考虑距前排桩水平距离 25 m 和 45 m 2 个位置，同时也考虑后排桩顶沉埋情况，故拟定 4 种设桩方案。

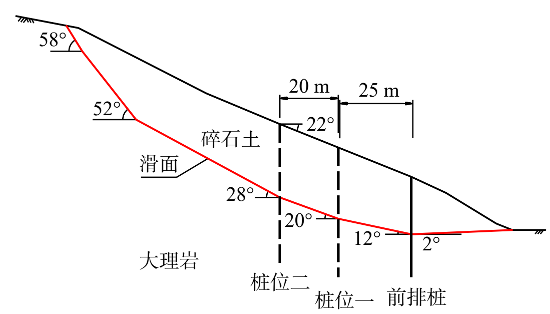

图 4　双排抗滑桩加固滑坡实例横截面图

Fig. 4　Cross section of a practical landslide reinforced with double-row stabilizing piles

表 1　坡体及抗滑桩主要物理力学参数

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

材料类型	土体重度/(kN·m^{-3})	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
碎石土	22	12	21	50	0.33
大理岩	23	500	40	600	0.25
抗滑桩	25	–	–	–	0.22

方案一：后排桩位于桩位一，桩顶位于坡面；

方案二：后排桩位于桩位二，桩顶位于坡面；

方案三：后排桩位于桩位一，桩顶埋深 7.4 m；

方案四：后排桩位于桩位二，桩顶埋深 7.0 m。

在设计安全系数为 1.20 的情况下，利用传递系数法及地基系数“*m*”法[27]求得各方案时后排桩对其前侧滑体的推力分布如图 5 所示。

采用前述斜条分法，求解作用于前排桩受荷段后侧的坡体推力。各设桩方案相应的排间土体条分模式见图 6，前排桩土界面综合参数 k_{p} 取为 $\tan\varphi$[28]。

表 2 给出了各方案时相应各土条对前排桩的局部推力 $N_{\mathrm{p}i}$ 及其合推力值。可见，对于后排全长桩的方案一和方案二，其前排桩推力计算值比较接近，方案一(排间直线型滑面)较方案二(排间折线型滑面)的推力值偏大约 5%。同时，当排间滑面为直线型时(方

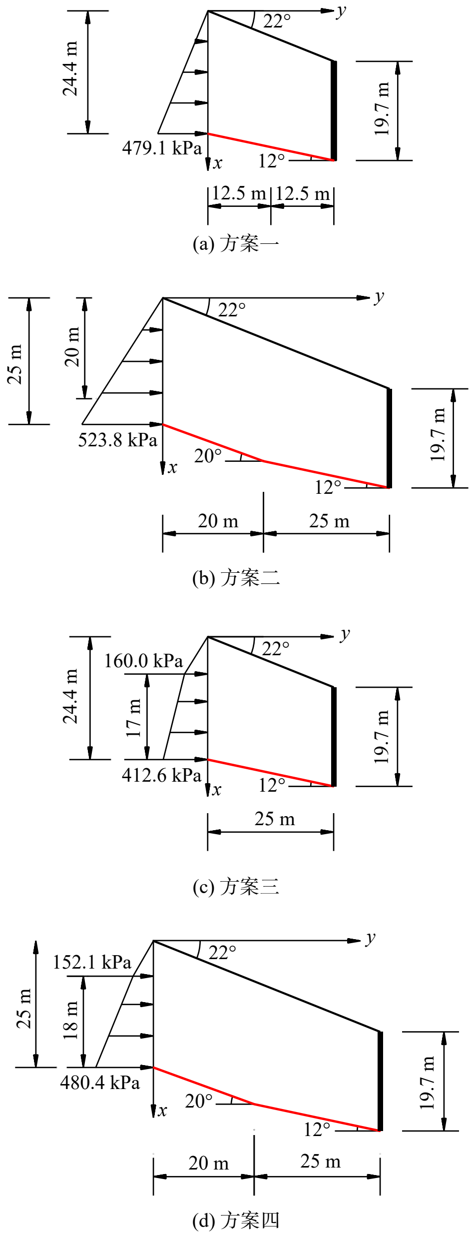

图 5　4 种设桩方案对应的排间滑体计算模型

Fig. 5　Calculation models of slide mass between two piles corresponding to four design plans in the example

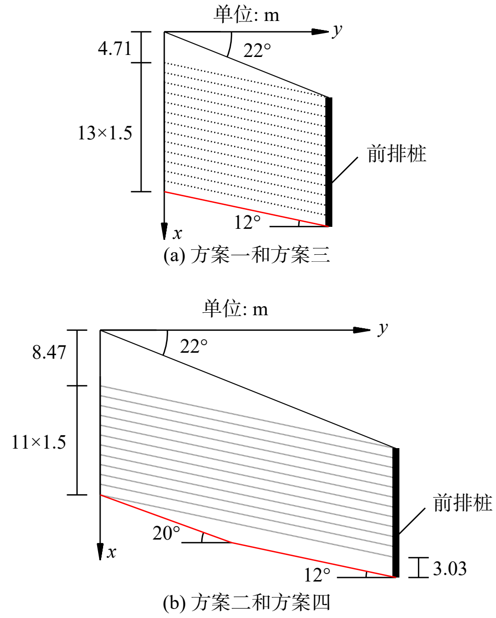

图 6　4 种设桩方案对应的条分模式

Fig. 6　Slice modes of slide mass between two piles corresponding to four design plans in the example

案一和方案三)，方案三(后桩埋深 7.4 m)较方案一(后桩全长)的前排桩推力值偏小约 10.6%；当排间为折线型滑面时(方案二和方案四)，方案四(后桩埋深 7.0 m)较方案二(后桩全长)的前排桩推力值偏小约 8.6%。此外，所拟定的 4 种方案中，方案四时作用于前排桩后侧的推力最小。方案一和方案二的前排桩推力值均大于后排沉埋桩的方案三和方案四，这也反映出后排桩沉埋有利于减小前排桩后侧推力。其原因在于后排桩沉埋时作用于排间滑体后侧的推力有所减小(图 5)。

对表 2 中所示的各土条对前排桩的局部推力值除以其相应作用面积，可近似得到该条处前排桩后侧的压应力，进而可得前排桩受荷段后侧推力分布模式如图 7 所示。

由图 7 可见，各设桩方案时前排桩后侧推力分布模式较为相似，均呈不规则的抛物线型分布。桩顶局部范围内桩后压应力有先减小再增大的特征，最大压应力位于距受荷段底端高 0.11 ~ 0.17 倍受荷段高度，其下至滑面处桩后压应力急剧减小至近于零。

表 2　在 4 种设桩方案下各土条对前排桩局部推力及其合推力

Table 2　Local thrusts by each slice and their resultants on the fore piles under four design plans　/ (kN·m^{-1})

设桩方案	条块编号													总推力
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
方案一	195.10	179.20	193.60	156.20	216.80	269.00	317.20	363.20	408.30	452.90	497.30	541.50	0	3 790.40
方案二	316.60	286.60	284.40	182.20	226.00	270.90	316.50	362.50	409.00	455.60	502.40	0	–	3 612.60
方案三	213.50	196.10	198.20	146.90	198.70	241.10	279.00	314.70	349.20	383.20	416.90	450.40	0	3 387.90
方案四	334.20	289.10	271.30	166.10	202.60	240.50	279.40	319.00	359.10	399.40	440.00	0	–	3 300.70

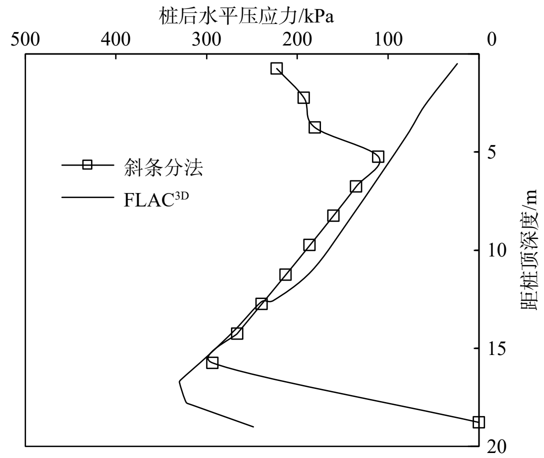

图 7　4 种设桩方案下前排桩受荷段推力分布曲线

Fig. 7　Distribution curves of thrust on the fore piles under four design plans in the example

3　对比验证

为了进一步说明本文方法的合理性, 以前述实例中的设桩方案四为例, 采用 FLAC^{3D} 进行数值模拟分析, 与理论计算结果予以比较。所建数值模型如图 8 所示, 模型含 72 198 个 8 节点 6 面体单元, 坡体采用服从 Mohr-Coulomb 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。模型前后左右四个边界进行水平位移约束, 底面同时进行水平和竖向位移约束。采用强度折减法进行数值模拟分析, 得到该滑坡模型的稳定系数为 1.12, 与前述的传递系数法计算结果基本一致, 说明数值模型有一定的合理性。

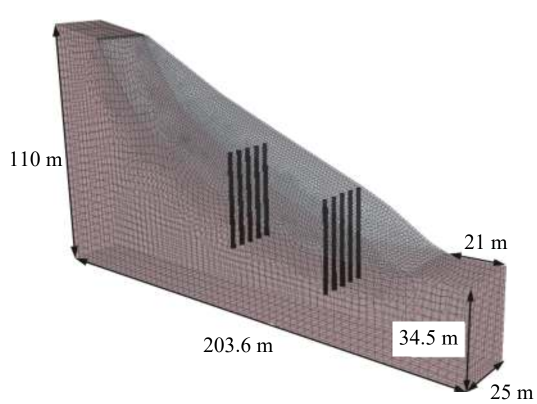

图 8　实例方案四的双排抗滑桩加固滑坡数值模型

Fig. 8　Numerical model of the practical landslide reinforced with double-row piles under the fourth design plan

图 9 为数值模拟得到的加固后滑坡的水平应力分布云图, 由此可得前排桩后压应力分布图, 如图 10 所示。可见, 在桩顶以下局部约 0.25 倍受荷段高度范围以内, 理论计算与 FLAC^{3D} 模拟所得的桩后压应力分布有差异, 前者沿深度呈非线性减小模式, 后者则为近似线性增大模式, 且后者整体小于前者, 意味着理论计算偏于保守; 在此局部范围以下, 两种方法得到的桩后坡体压力变化规律基本一致, 均为先近似线性增大, 近滑面处达到极大值, 然后再急剧减小; 二者得到的桩后峰值压应力偏差约 10%, 理论算法略小于数值模拟结果。

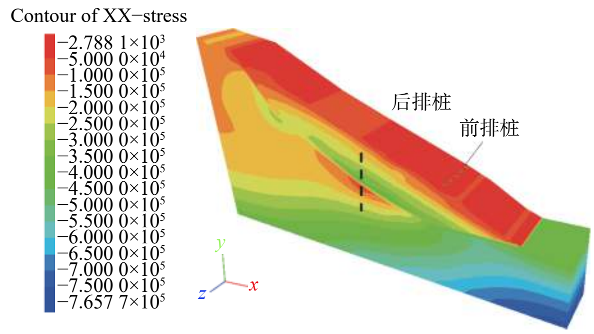

图 9　实例方案四加固坡体的水平应力分布云图

Fig. 9　Contour of horizontal stress of the reinforced landslide using the fourth design plan in the example

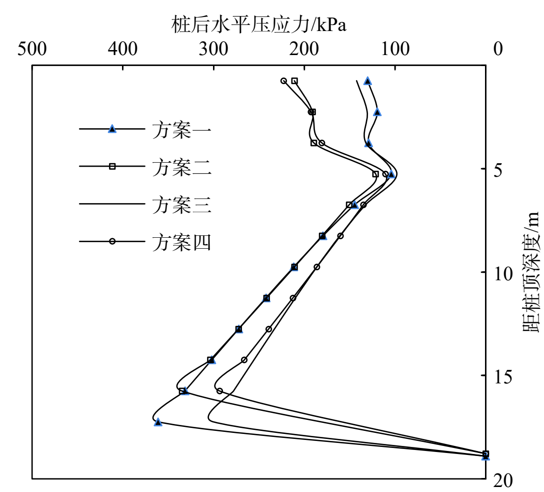

图 10　实例方案四时前排桩后侧推力分布模式对比

Fig. 10　Comparison of distribution patterns of thrust on the fore piles under the fourth design plan in the example

表 3 给出了传递系数法、FLAC^{3D} 模拟法和本文的斜条分法得到的 4 种设桩方案时的前排桩受荷段后侧坡体推力值。可见, 本文方法比传递系数法的结果分别偏大约 10.6%、12.5%、11.5%、13.4%, 而比 FLAC^{3D} 结果分别偏大约 13.2%、7.95%、1.31%、−0.72%。因此, 相对于传递系数法, 本文方法整体更接近于 FLAC^{3D} 计算结果。

表 3 不同方法求得的 4 种设桩方案下前排桩上推力值对比

Table 3 Comparison of thrust on the fore piles under four design plans by various methods / (kN·m^{-1})

计算方法	方案一	方案二	方案三	方案四
斜条分法	3 790.36	3 612.60	3 387.90	3 300.70
传递系数法	3 425.60	3 212.00	3 039.70	2 910.00
FLAC^{3D}	3 349.03	3 346.40	3 344.10	3 324.50

4 结论

(1)前排桩后侧推力呈不规则的抛物线形分布,其峰值点位置接近滑面,在峰值点以下,受荷段桩后坡体压力急剧减小至接近于零。

(2)对于后排桩沉埋模式的双排桩,前排桩后侧坡体推力小于后排桩全长模式的结果。本文方法实例计算表明,前者比后者偏小 8.6% ~ 10.6%。

(3)本文提出的斜条分法与传递系数法、FLAC^{3D}数值模拟方法计算的前排桩后侧坡体推力值较为相近,本文方法整体较既有两种方法均偏大,结果偏于保守一面。实例分析表明,本文方法比传递系数法结果偏大 10.6% ~ 13.4%,且相对更接近于 FLAC^{3D} 数值模拟结果。

参考文献(References):

[1] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(1): 1 − 13.

[2] 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)]

[3] WANG J J, LIANG Y, ZHANG H P, et al. A loess landslide induced by excavation and rainfall[J]. Landslides, 2014, 11(1): 141 − 152.

[4] XIAO S G, ZENG J X, YAN Y P. A rational layout of double-row stabilizing piles for large-scale landslide control[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(1): 309 − 321.

[5] XIAO S G. 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.

[6] 申永江, 杨明, 项正良, 等. 双排桩桩排间土拱效应的发育规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 70 − 74. [SHEN Yongjiang, YANG Ming, XIANG Zhengliang, et al. Development of soil arching between the double-row anti-sliding piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 70 − 74. (in Chinese with English abstract)]

[7] 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.

[8] RANDOLPH M F. The response of flexible piles to lateral loading[J]. Géotechnique, 1981, 31(2): 247 − 259.

[9] POULOS H G. Design of reinforcing piles to increase slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(5): 808 − 818.

[10] 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.

[11] 孙勇. 桩前预留土体对抗滑桩影响的分析与计算研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 58 − 63. [SUN Yong. Researches on the anti-slide pile with remainning soils in front of pile[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 58 − 63. (in Chinese with English abstract)]

[12] 申永江, 黄立, 严克伍. 悬臂双排桩桩排距的计算方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 59 − 63. [SHEN Yongjiang, HUANG Li, YAN Kewu. Calculation method of the piles row distance of cantilever double-row anti-slide piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 59 − 63. (in Chinese with English abstract)]

[13] 张玲, 朱幸仁, 欧强. 考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 72 − 80. [ZHANG Ling, ZHU Xingren, OU Qiang. Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 72 − 80. (in Chinese with English abstract)]

[14] 铁道部第二勘测设计院. 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 China Railway. Design and calculation of stabilizing pile [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.(in Chinese)]

[15] 铁道部第二勘测设计公司科研所. 抗滑桩模型试验第一阶段报告——桩前滑体抗力分布的研究[J]. 路基工程, 1985(3): 59 − 65. [The Second Survey and Design Institute of China Railway. Report of the first stage of stabilizing pile model test: Study on resistance distribution of slide mass in front of the pile[J]. Subgrade

Engineering, 1985(3): 59 − 65. (in Chinese)]

[16] 铁道部第二勘测设计院勘测处路基科抗滑桩专题组. 抗滑桩模型试验第二阶段报告——滑体为粘性土时桩前滑体抗力分布的研究[J]. 路基工程，1986(3): 24 − 34. [The Second Survey and Design Institute of China Railway. Report of the second stage of stabilizing Pile model Test: Study on resistance distribution of cohesive soil in front of the pile[J]. Subgrade Engineering, 1986(3): 24 − 34. (in Chinese)]

[17] 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)]

[18] 雷文杰. 沉埋桩加固滑坡体的有限元设计方法与大型物理模型试验研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)，2006. [LEI Wenjie. Study on design method of deeply buried piles stabilizing slides and large scaled model tests[D]. Wuhan: Institute of Geotechnical Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese with English abstract)]

[19] 胡峰. 基覆式滑坡中双排全长式与沉埋式抗滑桩受力规律研究[D]. 成都: 西南交通大学，2010. [HU Feng. Research on the mechanical features of double-row anti-slide piles with tops exposed or embedded in bedrock-overburden landslide control[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese with English abstract)]

[20] 郑颖人，赵尚毅. 用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力[J]. 岩石力学与工程学报，2004, 23(20): 3552 − 3558. [ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Calculation of inner force of support structure for landslide/slope by using strength reduction fem[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3552 − 3558. (in Chinese with English abstract)]

[21] 赵尚毅，郑颖人，李安洪，等. 多排埋入式抗滑桩在武隆县政府滑坡中的应用[J]. 岩土力学，2009, 30(增刊1): 160 − 164. [ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, LI Anhong, et al. Application of multi-row embedded anti-slide piles to landslide of Wulong County government[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup1): 160 − 164. (in Chinese with English abstract)]

[22] 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)]

[23] 刘鸿. 双排抗滑桩计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学，2007. [LIU Hong. Investigation on double-row anti-sliding piles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese with English abstract)]

[24] 李明康. 加固滑坡的双排抗滑桩合理排距分析[D]. 成都: 西南交通大学，2013. [LI Mingkang. Analysis of reasonable row spacing between double-row anti-slide piles in landslide control[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)]

[25] 肖世国，何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法[J]. 岩土力学，2015, 36(2): 376 − 380. [XIAO Shiguo, HE Hong. An approximate analytical method for calculating thrust on double-row stabilizing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 376 − 380. (in Chinese with English abstract)]

[26] 杨磊. 双排抗滑桩计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学，2017. [YANG Lei. Study on calculation method of double-row anti-slide piles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese with English abstract)]

[27] 铁道第二勘察设计院.铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2006[S]. 北京: 中国铁道出版社，2006. [The Second Survey and Design Institute of China Railway. Code for design on retaining structures of railway subgrade: TB 10025—2006[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.(in Chinese)]

[28] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报，2005, 24(21): 3818 − 3827. [WANG Gongxian. Key technique in landslide control and its handling measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3818 − 3827. (in Chinese with English abstract)]

编辑：张明霞