

文章编号: 1008-2786-(2013)5-588-06

# 高切坡潜在破裂面预测与超前支护桩加固研究

王娟<sup>1 2 3</sup>, 何思明<sup>1 2\*</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 高切坡潜在破裂面预测与稳定性判别是高切坡灾害防治的基础。采用极限分析上限定理, 结合弧形条分法思想, 构建了高切坡潜在破裂面预测与稳定性超前判别方法。针对危险性高切坡, 提出超前支护桩加固方法, 研究了超前支护桩抗力与加固高切坡整体稳定系数、潜在破裂面之间的对应关系。结合工程算例分析, 揭示了高切坡坡体抗剪强度、边坡高度、坡角以及开挖高度对高切坡潜在破裂面的定量影响, 为工程建设过程中高切坡灾害防护提供了一条可行的途径。

**关键词:** 极限分析上限定理; 高切坡; 潜在滑移面; 超前支护桩

**中图分类号:** TU 443

**文献标志码:** A

随着我国城镇化的发展, 大量的基础设施建设过程中, 常常需要对边坡进行开挖, 形成了大量的高切坡。如果切坡不当, 或开挖后不及时进行支护, 极易导致高切坡发生变形破坏, 甚至演变成滑坡, 造成重大的财产损失和人员伤亡, 给工程建设造成不可弥补的损失。针对这一问题, 何思明提出了危险性高切坡超前支护的概念。超前支护桩是指在高切坡形成之前, 首先对其进行危险性评价, 若判定高切坡属于危险性边坡, 特别是在施工过程中就有可能发生变形破坏的高切坡, 在边坡形成之前先进行支护结构设计和施工, 待支护结构完成后, 再开挖边坡, 这样一种提前支护的方法, 称为超前支护桩<sup>[1-5]</sup>。张晓曦<sup>[6]</sup>基于超前支护理论, 在考虑地震荷载作用下分析了高切坡超前支护体系发生永久位移的临界加速度条件和永久位移大小。

本文中还将运用到极限分析上限定理的方法对模型进行计算。极限分析理论从 Chen W F<sup>[7]</sup> 的著作《Limit analysis and soil plasticity》问世后而得到

广泛运用的。吴梦军<sup>[8]</sup>运用极限分析上限定理, 详细地推导出了公路边坡临界高度的计算公式, 说明了此法的准确性和有效性。陈佳等<sup>[9]</sup>采用极限分析上限法对大渡河某水电站岸坡存在的危岩体进行了稳定性计算, 得到了极限分析上限法的稳定系数。王根龙等<sup>[10]</sup>基于极限分析上限法提出加锚加固边坡稳定分析计算模型, 研究表明, 考虑水压力和地震作用力的边坡稳定系数将会减小, 而加锚后稳定系数将会得到提高。

本文基于极限分析上限定理的方法, 分析高切坡以及超前支护桩加固边坡的情况下破裂面的确定。从而提出了一种简便的理论分析方法。该方法认为桩加固后的边坡破裂面是任意分布的, 运用扇形条分法将加固边坡条分成任意个三角形块体。计算每块土体的内能耗散与外力功率, 总内能耗散与外力功率之间的比值为边坡安全系数。根据最优化理论即可得出边坡的潜在滑裂面的形状分布。

收稿日期(Received date): 2013-03-07; 改回日期(Accepted): 2013-03-25。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41272346); 科学支撑计划(2011BAK12B03)。[Supported by National Nature Science Foundation (41272346) and National Science and Technology Support Program(2011BAK12B03).]

作者简介(Biography): 王娟, 女, 四川遂宁人, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾技术与防护工程。[Wang Juan (1989-), female, Suining, Sichuan Province. Master Degree Candidate, mainly engaged in disaster prevention and mitigation and protection engineering.] Tel: 13608054195. E-mail: wangjuan1989@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): He Siming. E-mail: hsm112003@yahoo.com.cn

## 1 高切坡潜在破裂面预测与稳定性分析

假设边坡土体是各向同性的均质土体, 建立如图1所示的计算模型。边坡开挖的水平距离为  $D$ , 土坡高度为  $H$ , 边坡坡度为  $\beta$ 。假设边坡土体重度为  $\gamma$ , 内摩擦角为  $\varphi$ , 内聚力为  $c$ , 用扇形条块将整个土坡分为  $n$  份, 从坡顶到坡脚处分为  $n-1$  段; 剩下的部分分为一块, 则形成  $n$  个三角形块体。则任意一个三角形土块的顶角为  $\alpha_i$ , 任意三角形土条底边与条间断面成  $\beta_i$  角, 这样可将潜在滑移面看成是  $n-1$  段直线组成的, 就可以确定出边坡潜在滑移面。

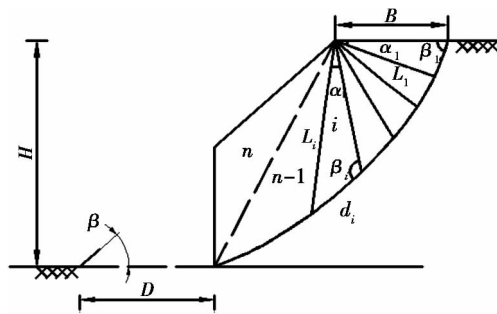


图1 高切坡计算模型

Fig. 1 Calculation model of high cut slope

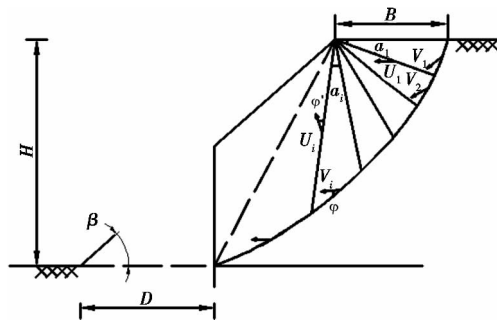


图2 高切坡速度场分布

Fig. 2 The velocity field distribution of high cut slope

### 1.1 多块体的重力

由图1可知, 坡脚至开挖断面的距离为  $D$ , 设竖直开挖高度为  $l$ , 即  $l = D \tan \beta$ 。取任意的多块体  $i$  根据图中几何关系和三角形的正弦定理可以得出各块体间断面与滑裂面的长度为

$$L_i = l \frac{\sin \beta_n}{\sin \alpha_{n-1}} \prod_{j=1}^i \frac{\sin \beta_j}{\sin (\alpha_j + \beta_j)} \prod_{j=1}^n \frac{\sin (\alpha_j + \beta_j)}{\sin \beta_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$d_i = \frac{\sin \alpha_i}{\sin \beta_i} L_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (2)$$

式中  $L_i$  为第  $i$  块土体与第  $(i+1)$  块土体的间断面长度  $d_i$  为潜在滑裂面长度。

任意三角形条块(考虑单位延米)的重量

$$G_i = \frac{1}{2} \gamma L_i d_i \sin (\alpha_i + \beta_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (3)$$

$$G_n = \frac{1}{2} \gamma l \left( \frac{H}{\tan \beta} - D \right) \quad (4)$$

### 1.2 多块体速度计算

图2中所示为任意土块体的速度场, 则每个滑裂面或块体间断面上都存在潜在速度。第  $i$  块土体对于滑裂面的潜在滑动速度为  $V_i$ , 与第  $i+1$  块土体间界面的潜在滑动速度为  $U_i$ , 每个直线形滑裂面、土块的间断面与多块体速度的夹角分别为  $\varphi$  和  $\varphi'$ 。第  $i$  块土体整体的速度构成第  $i+1$  块土体滑裂面的潜在速度  $V_{i+1}$ , 故可以得到任意多块体的速度表达式(图3):

潜在滑移面上的速度

$$V_{i+1} = \frac{\sin (\alpha_i + \beta_i - \varphi - \varphi')}{\sin (\beta_{i+1} - \varphi - \varphi')} V_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-2) \quad (5)$$

条间断面上的速度

$$U_{i+1} = \frac{\sin (\alpha_i + \beta_i - \beta_{i+1})}{\sin (\beta_{i+1} - \varphi - \varphi')} V_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-2) \quad (6)$$

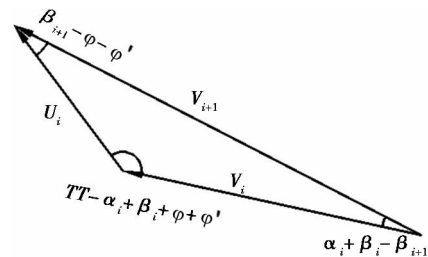


图3 速度矢量图

Fig. 3 The hodograph

### 1.3 外力功率

本文假设滑裂面为任意的滑裂面, 基于极限分析上限定理, 考虑滑体没有其他附加荷载作用的情况下, 整个滑体的外力功率由重力提供, 将第  $n$  土体与  $n-1$  土体看做一个整体, 这个整体具有与第  $n-1$  块土体相同的速度场。故外力功率表示如下

$$\dot{W}_{\text{soil}} = \sum_{i=1}^{n-1} G_i V_i \sin (\beta_i - \varphi - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j) + G_n V_{n-1} \sin (\beta_{n-1} - \varphi - \sum_{j=1}^{n-2} \alpha_j) \quad (7)$$

式中  $\dot{W}_{\text{soil}}$  为滑坡体重力做的外力功率。

#### 1.4 内能耗散

内能耗散由各块体速度间断面提供,包括两个方面:破裂面上的能量耗散和条分间断面上的能量耗散。

破裂面上的能量耗散(考虑单位延米)可表达为

$$\dot{D}_1 = c \sum_{i=1}^{n-1} V_i d_i \cos \varphi \quad (8)$$

式中  $\dot{D}_1$  为滑裂面上的能量耗散;  $c$  为土体的内聚力; 其他符号意义同前。

将  $n-1$  块土体与第  $n$  块土体看做一个整体,条分间断面上的能量耗散(考虑单位延米)按下式计算

$$\dot{D}_2 = c \sum_{i=1}^{n-2} U_i L_i \cos \varphi \quad (9)$$

式中  $\dot{D}_2$  为间断面上的能量耗散;  $c$  为土体内聚力。

根据极限分析上限定理,可知坡体的稳定程度取决于外力功率与内能耗散的相对关系,故可定义坡体稳定性系数  $K$  为

$$K = \frac{c \sum_{i=1}^{n-1} V_i d_i \cos \varphi + c \sum_{i=1}^{n-2} U_i L_i \cos \varphi}{\sum_{i=1}^{n-1} G_i V_i \sin(\beta_i - \varphi - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j) + G_n V_{n-1} \sin(\beta_{n-1} - \varphi - \sum_{j=1}^{n-2} \alpha_j)} \quad (10)$$

因此,我们可以得出边坡安全系数是关于潜在破裂面的破坏角  $\beta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的函数。通过数学优化理论可求得方程的最优解,得出  $\beta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的值,从而可以确定出超前支护桩的潜在破裂面形态

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \beta_1} &= 0 \\ \frac{\partial K}{\partial \beta_2} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial K}{\partial \beta_n} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对于一个给定的高边坡,当  $H=10\text{ m}$ ,边坡坡度  $\beta=60^\circ$ ,重度为  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ ,粘聚力  $c=15\text{ kPa}$ ,岩土体内摩擦角  $\varphi=25^\circ$ ,水平开挖距离  $D=2\text{ m}$  时,计算出安全系数为  $K=0.7$ ,破裂面的形状如图4。

对于给定参数下高切坡的稳定性安全系数仅为0.7,如果不对高切坡进行超前支护,则会导致高切坡失稳破坏形成滑坡灾害。

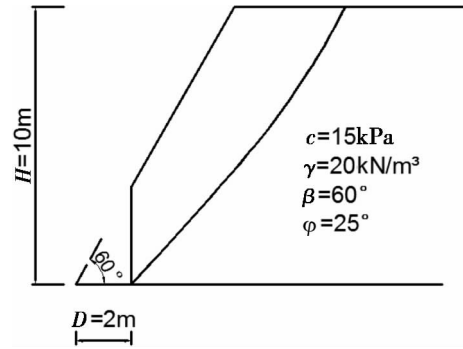


图4 高切坡预测破裂面

Fig 4 The failure surface of high cut slope

## 2 危险性高切坡超前支护加固边坡稳定性分析方法

针对危险性的高切坡,采用超前支护桩进行加固。计算模型如图5所示,边坡相关参数与上节提到的高切坡数据相同。土体的重力计算方法和多块体的速度计算方法以及内能耗散计算与前文中的高切坡计算方法一致。只是在此基础之上加入超前支护桩的作用即滑体对超前支护桩所做的功率。

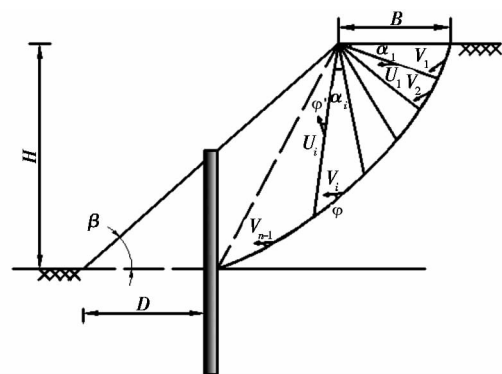


图5 超前支护桩加固边坡的速度场分布

Fig. 5 The velocity field distribution after reinforced by pre-embedded piles

超前支护桩提供的功率可按下式计算

$$\dot{D}_p = F V_{n-1} \cos(\beta_{n-1} - \varphi - \sum_{j=1}^{n-2} \alpha_j) \quad (12)$$

式中  $\dot{D}_p$  为超前支护桩作用的功率,  $F$  为滑体对超前支护桩每延米力的大小。

根据极限分析上限定理,可知坡体的稳定程度取决于外力功与内能耗散的相对关系,定义能量安全系数为内能耗散与外力功率的比值,则总内能耗散如下

$$\dot{D} = \dot{D}_1 + \dot{D}_2 + \dot{D}_p \quad (13)$$

由此可定义高切坡加固后的稳定性系数  $K$  为

$$K = \frac{c \sum_{i=1}^{n-1} V_i d_i \cos \varphi + c \sum_{i=1}^{n-2} U_i L_i \cos \varphi + F V_{n-1} \cos(\beta_{n-1} - \varphi - \sum_{j=1}^{n-2} \alpha_j)}{\sum_{i=1}^{n-1} G_i V_i \sin(\beta_i - \varphi - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j) + G_n V_{n-1} \sin(\beta_{n-1} - \varphi - \sum_{j=1}^{n-2} \alpha_j)} \quad (14)$$

显然,超前支护桩加固后的高切坡稳定系数是关于潜在破裂面的破坏角  $\beta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的函数。通过数学优化软件 Mathematicas 可确定最优解。从而可以确定出超前支护桩的潜在破裂面及达到某个安全系数时其支护桩需要提供的最小荷载。

### 3 算例分析

根据本文提供的方法,当  $H=10\text{ m}$ ,边坡坡度  $\beta=60^\circ$ ,重度为  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ ,粘聚力  $c=15\text{ kPa}$ ,岩体内摩擦角  $\varphi=25^\circ$ ,超前支护桩距离坡趾水平距离为  $D=2\text{ m}$  时,根据上文提到的方法,当超前支护桩提供每延米  $F=170\text{ kN}$  的力时,可以使得边坡稳定系数变为  $K=1.3$ 。此时对边坡进行开挖将不会出现边坡破坏等失稳问题。

下面研究不同的参数对边坡稳定的影响。

粘聚力  $c$  分别是  $10\text{ kPa}$ ,  $15\text{ kPa}$ ,  $20\text{ kPa}$  时,超前支护桩提供的抗滑力与安全系数的关系如图 6。

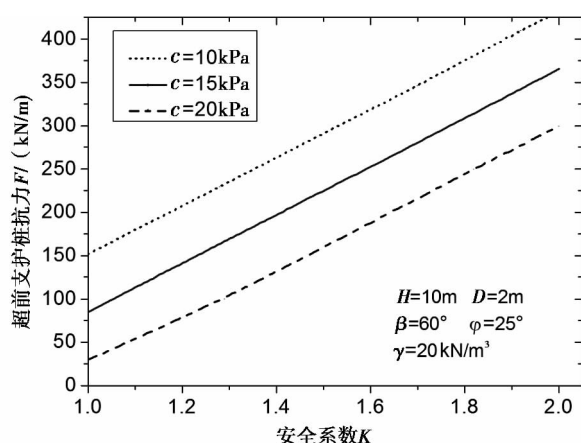


图6 不同粘聚力安全系数与超前支护桩最小抗力的关系曲线

Fig.6 The relationship between  $K$  and  $F$  which provided by pre-embedded piles when  $c=10, 15, 20\text{ kPa}$

由图 6 可知,边坡安全系数与超前支护桩提供的最小抗力之间的关系,随着超前支护桩提供的最小抗力的增加,安全系数呈线性增加关系。土体不同的粘聚力对边坡的稳定也有影响,从图中可知,粘

聚力越大,所需超前支护桩提供的最小抗滑力的值越小。

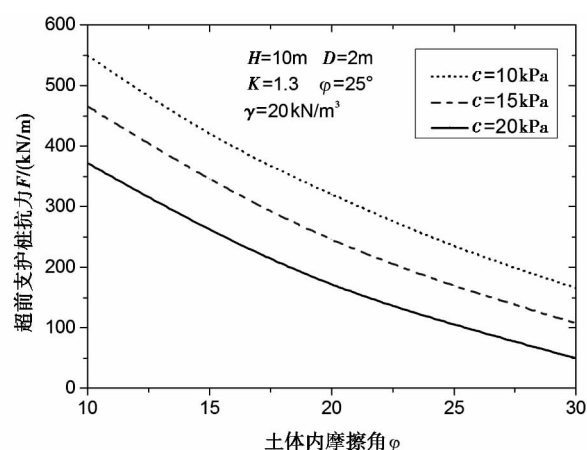


图7 土体内摩擦角与超前支护桩最小抗力之间的关系曲线

Fig.7 The relationship between  $\varphi$  and  $F$  which provided by pre-embedded piles when  $c=10, 15, 20\text{ kPa}$

图 7 中给出的是岩土体性质参数: 内摩擦角和粘聚力与超前支护桩所需提供的最小抗力的关系曲线,对于给定的边坡高度  $H=10\text{ m}$ ,  $\beta=60^\circ$ ,  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi=25^\circ$ ,  $D=2\text{ m}$ ,  $K=1.3$  时,超前支护桩每延米提供的最小抗力随着内摩擦角的增大而减小。随着粘聚力的增大所需超前支护桩的最小抗力也逐渐减小。

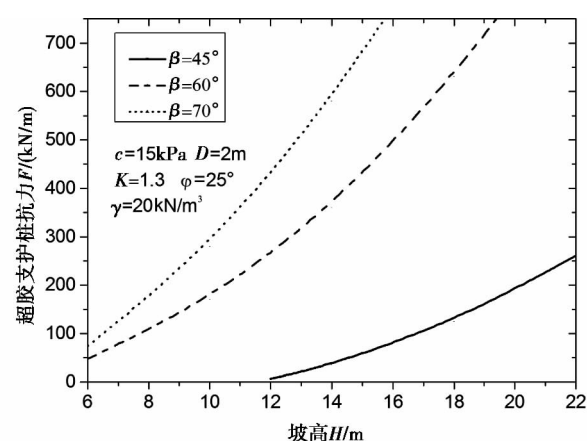


图8 坡高、坡度的与最小抗力之间的关系曲线

Fig.8 The relationship between  $H$  (the height of slope) and  $F$  which provided by pre-embedded piles when  $\beta=45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$

由图 8 中曲线可知,对于给定参数的边坡,随着坡高的增加,所需提供的超前支护桩的抗力随之增加,随着坡度的增加,所需抗滑力也随之增加,图 8

中还可以得出,为了使边坡稳定系数达到  $K = 1.3$  时,不同坡高不同坡度条件下所需超前支护桩的最小抗力。

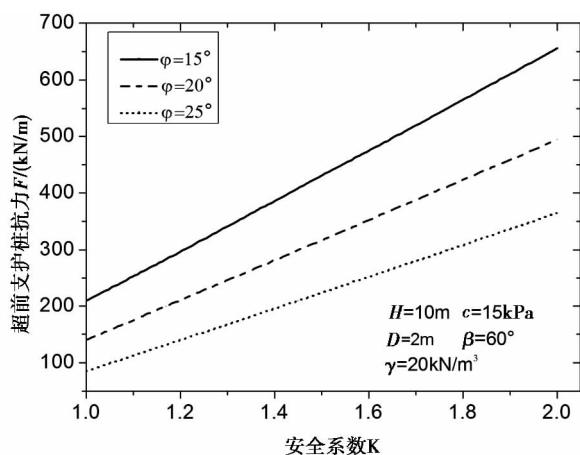


图9 不同摩擦角时安全系数与超前支护桩最小抗力的关系曲线

Fig. 9 The relationship between  $K$  and  $F$  which provided by pre-embedded piles when  $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$

由图9中的曲线关系可知,土体内摩擦角较大时,达到一定的安全系数时,所需要的超前支护桩最小抗力的值较小。由图10可知,随着开挖距离的增大,所需要的超前支护桩最小抗力随之增大。

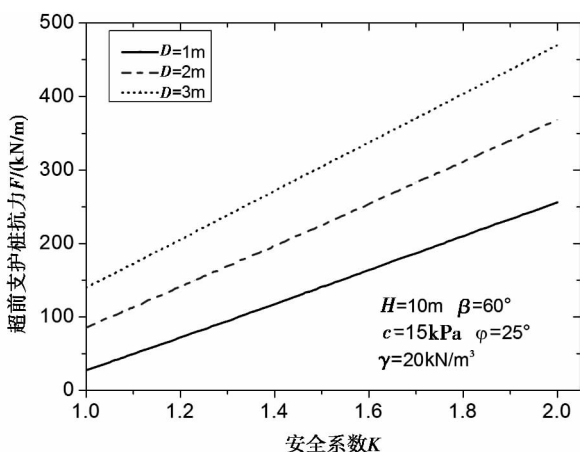


图10 开挖距离不同安全系数与超前支护桩最小抗力的关系

Fig. 10 The relationship between  $K$  and  $F$  which provided by pre-embedded piles when  $D = 1, 2, 3, m$

从图11可以看出,随着内摩擦角的增加,潜在滑移面的埋深逐渐变浅,因此,我们可以得出,土体的抗剪强度参数  $\varphi$  值的变化对边坡潜在滑移面分布的影响是明显的。

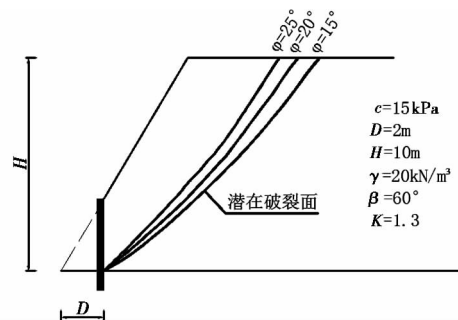


图11 不同内摩擦角情况下边坡潜在破裂面的分布情况

Fig. 11 The distribution of potential rupture surface at different  $\varphi$

## 4 结论

通过上述理论分析与实例验证,可以得出:

1. 对于稳定边坡进行开挖时,要先对开挖后的情况进行稳定性分析,如果稳定性不够,则需要对边坡进行加固后,再实施开挖,否则就会产生滑坡等灾害。
2. 土体的粘聚力与内摩擦角对边坡的稳定性安全系数有较大的影响。随着粘聚力与摩擦角的增大,土体的稳定性也增大。
3. 土体内摩擦角越大,潜在破裂面出口距离超前支护桩的水平距离较小。
4. 超前支护桩每延米所提供的最小抗力随着内摩擦角和粘聚力的增大而减小;随着边坡高度和边坡角的增大而增大。

## 参考文献(References)

- [1] He Siming, Interaction of pro-reinforced pile-soil of high cutting slop [J]. Journal of Mountain Science: 2006, 24(5): 574 - 579 [何思明. 高切坡超前支护桩与坡体共同作用分析[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 574 - 579]
- [2] He Siming, Li Xinpo, Wang Chenghua. Mechanism on interaction between pre-reinforced anchor bolt and rock mass in high cutting slop [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1050 - 1054 [何思明, 李新坡, 王成华. 高切坡超前支护锚杆作用机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1050 - 1054]
- [3] He Siming, Li Xinpo. Study on the interaction between high cutting slope and pre-embedded piles [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(3): 43 - 46 [何思明, 李新坡. 高切坡超前支护桩作用机制研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(3): 43 - 46]
- [4] He Siming, Zhang Xiaoxi, Ouyang Chaojun. Static dynamic reponse and permanent displacement forecast for high cutting slope pre-reinforced by pile [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(5): 127 - 133 [何思明, 张晓曦, 欧阳朝军. 超前支护桩加固高切坡的静动力响应与永久位移预测研究]

- [J]. 四川大学学报:工程科学版 2010, 42(5): 127-133]
- [5] Luo yu, He Siming, He Jinchuan. Study on pre-reinforced Road Filling Slope Anti-sliding Piles[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2009, 41(6): 63-67 [罗渝, 何思明, 何尽川. 路堤边坡抗滑桩超前支护研究[J]. 四川大学学报:工程科学版 2009, 41(6): 63-67]
- [6] Zhang Xiaoxi. The limit analysis of slope engineering stability[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University 2011. [张晓曦. 边坡工程稳定性极限分析[D]. 成都: 西南交通大学 2011.]
- [7] W F Chen. Limit analysis and soil plasticity [G]. Amsterdam: Elsevier: 1975.
- [8] Wu Mengjun, The appliance of upper bound limit analysis to highway slope stability [J]. Journal of Chongqing Jiaotong College, 2002, 21(3): 52-55 [吴梦军. 极限分析上限法在公路边坡稳定分析中的应用[J]. 重庆交通学院学报 2002, 21(3): 52-55]
- [9] Chen Jia, Peng Sheqin, Liu Genliang. Stability analysis of unstable rock collapsing based on limit analysis upper bound method [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2009, 28(2): 180-184 [陈佳, 彭社琴, 刘根亮. 基于极限分析上限法的危岩体崩塌稳定性分析[J]. 河南理工大学学报:自然科学版 2009, 28(2): 180-184]
- [10] Wang Genlong, Wu Faquan, Qi Shengwen et al. Research on limit analysis upper bound method for stability evaluation of anchored rock slope [J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering 2007, 26(12): 2556-2563 [王根龙, 伍法权, 祁生文, 等. 加锚岩质边坡稳定性评价的极限分析上限法研究[J]. 岩石力学与工程学报 2007, 26(12): 2556-2563]

## Prediction the Potential Rupture Surface for High Cut Slope and Study on the Pre-embedded Piles

WANG Juan<sup>1 2 3</sup>, HE Siming<sup>1 2</sup>

(1. Key laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**Abstract:** The prediction of potential failure surface and the stable discrimination is the basis of prevention for the high cut slope. We use the upper bound theorem of limit analysis, combined with curved slice method to build a new method for high-cut slope. We proposed a reinforcement structure ahead of excavating which called pre-embedded piles. Study on the relationship between the resistance provided by the pre-embedded piles and the overall stability of the high cut slope, the coefficient corresponding relationship between resistance provided by the pre-embedded piles and the potential failure surface. Combined with engineering example, this article reveal the impact of the potential rupture surface with the landslide shear strength, slope height, slope angle and the height of excavation. Then, a feasible way to protect the high cut slope in the construction process is provided.

**Key words:** Limit analysis upper bound theorem; high cut slope; potential rupture surface; pre-embedded piles