

DOI: 10.11779/CJGE201412020

# 微型桩群加固土坡稳定性分析

孙书伟<sup>1</sup>, 陈冲<sup>1</sup>, 丁辉<sup>1</sup>, 刘英<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

**摘要:** 微型桩是一种边坡快速加固技术, 多大面积成群布置。基于强度折减技术研究了微型桩群加固边坡安全系数的数值计算方法, 并对微型桩群加固均质土坡和含软弱夹层土坡的稳定性进行了对比分析。结果表明, 微型桩群加固均质土坡的破坏模式与其布设位置关系密切, 采用传统非耦合方法假定滑动面位置不变进行微型桩群的工程设计值得商榷; 对于均质土坡, 微型桩群锚固深度较小时, 桩身变形以刚性旋转为主, 随着锚固深度的增加, 微型桩群的变形由刚性倾斜转化为柔性弯曲变形, 对于含软弱夹层边坡, 微型桩群的变形主要是弯曲变形; 微型桩群最优锚固长度约为滑面以上自由段长度的 1.5~2.0 倍。削剪作用能够改善微型桩群受力并降低成本; 对于均质土坡, 当削剪长度小于自由段长度 1/4 时, 不会降低加固边坡的安全系数, 对于含软弱夹层边坡, 最大削剪长度约为自由段长度的 1/2; 实际工程中对于可削剪的微型桩部分, 无需设计加筋体, 仅将钻孔回填压实即可, 能够在确保加固效果的同时降低成本。

**关键词:** 微型桩群; 边坡; 安全系数; 锚固长度; 削剪效应

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)12-2306-09

作者简介: 孙书伟(1980-), 男, 副教授, 主要从事岩土边坡工程方面的教学和科研。E-mail: ssw1216@163.com。

## Stability analysis of earth slopes reinforced with micropiles

SUN Shu-wei<sup>1</sup>, CHEN Chong<sup>1</sup>, DING Hui<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>

(1. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Sinohydro Bureau 7th Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Micropiles are common reinforcements often used for slope stabilization under emergency conditions. In many circumstances they are extensively installed to cover a large area. A flow chart was suggested to calculate the factor of safety for micropile-reinforced slopes according to the shear strength reduction technique. Coupled analyses are performed for micropiles in a homogeneous slope with and without a thin weak layer. It is shown that the position of the micropiles has a significant impact on the failure mode of the reinforced slope for a homogeneous slope, indicating that the conventional design method based on uncoupled analysis in which the pile response and slope stability are considered separately is inaccurate. For relatively small embedment of micropiles, the response of micropiles is dominated by rigid-body rotation without substantial flexural distortion. The critical embedment depth to achieve fixed conditions at the base of the micropiles is found to range from 1.5 to 2 times the length above the sliding plane. Truncation of micropiles likely increases the capacity of the reinforcement system, and this benefit is particularly important for the slope with a thin weak layer. The largest truncation length of micropiles for homogeneous slopes and the slope with a thin weak layer is about 1/4 and 1/2 times the length above the sliding plane, respectively. The portion of truncated micropiles can be filled with soils and compacted in the standard procedure to decrease the cost in practice engineering.

**Key words:** micropile; slope; factor of safety; embedment length; truncation effect

## 0 引言

微型桩是一种小孔径的钻孔灌注桩, 多大面积成群布置(图1), 单桩直径小于300 mm, 桩内含有加筋体, 加筋体通常为钢筋、钢管以及钢轨等<sup>[1]</sup>。微型桩于20世纪50年代首次应用, 最初主要用于建筑物基础加固, 20世纪80年代后期, 随着钻孔设备的改进及钻孔工艺的提高, 微型桩群在边坡加固工程中得

到了较为广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。

国际微型桩协会(ISM)Bruce等<sup>[4]</sup>根据微型桩的注浆工艺, 将微型桩分为高压注浆型、低压注浆型、重力注浆型和二次注浆型; 冯君等<sup>[5]</sup>将边坡工程实践

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002090); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QZ05)

收稿日期: 2014-06-06

中的微型桩形式分为独立微型桩群、平面式微型桩结构、空间桁架结构和空间网状结构等 4 种; Lizzi<sup>[6]</sup>研究指出, 微型桩的加固机理在于微型桩群与桩间土形成致密的“三维复合体”, 外力作用下“三维复合体”整体受力, 从而能够抵抗较大的滑坡推力; 朱本珍等<sup>[7]</sup>、Sun 等<sup>[8]</sup>通过试验指出微型桩的受力机制与普通抗滑桩具有较大差异, 其水平承载力不仅与桩截面、抗弯刚度、微型桩平面布置方式有关, 与边坡岩土的类型也有直接关系, 采用弹性地基系数法进行微型桩群桩承载力分析过于保守, 并基于梁柱理论和弹塑性  $p-y$  曲线方法, 将微型桩组合结构的滑动抗力视为单根微型桩滑动抗力的总和, 建立了微型桩组合结构加固土质边坡的设计方法。



图 1 微型桩群加固边坡工程实例

Fig. 1 Micropiles for slope stabilization

目前关于微型桩加固边坡模型试验方面的成果较多, 如 Meyerhof 等<sup>[9]</sup>在软土和砂土中对直径 12.5 mm 具有不同插入深度的钢、木、尼龙模型桩进行了水平荷载作用下的柔性桩室内模型试验, 提出了计算软土和砂土中水平受荷桩极限承载力、位移及弯矩的经验公式; 胡毅夫等<sup>[10]</sup>通过 3 组大型模型试验研究了微型桩双排单桩与组合桩在加固边坡时的抗滑特性和破坏特性。陈正等<sup>[11]</sup>采用 Abaqus 程序对微型桩水平承载力进行了数值模拟, 研究结果表明较大的桩径、较高的桩周土的内摩擦角对提高微型桩水平承载力有显著作用。Sadek 等<sup>[12]</sup>系统研究了微型桩的动力特性, 指出倾斜微型桩群能够更好地消除地震液化现象。

综上所述, 目前关于微型桩群抗滑特性、水平承载力、固坡机理方面的研究较多, 微型桩加固边坡稳定性方面的研究较少。作为柔性支挡结构, 微型桩群的加固效果受边坡地质环境和变形特征等影响较大, 对不同类型边坡进行稳定性分析, 系统研究最优桩位、锚固长度等设计参数对微型桩群加固效果的影响, 对微型桩群加固边坡工程设计具有指导意义。

## 1 分析方法

用于抗滑桩加固边坡稳定性分析的方法主要有非耦合分析和耦合分析 2 种。非耦合分析是一种简化分

析方法, 该方法将边坡失稳破坏和抗滑桩的受力分开考虑, 通常先根据边坡的破坏模式, 确定桩位处滑坡推力, 再根据外荷载的大小进行抗滑桩的内力计算和结构设计, 工程实践中主要采用这种方法。耦合分析则将抗滑桩-边坡体系视为整体, 同时求解边坡的稳定性和结构的受力行为, 从而可以分析抗滑桩的施加引起边坡破坏模式的变化。本文拟采用耦合分析方法对微型桩群加固土坡的稳定性进行研究, 实施过程借助于 FLAC<sup>3D</sup> 程序实现<sup>[13]</sup>。

### 1.1 岩土材料模型

文中采用修正 Mohr-Coulomb 模型描述边坡岩土材料的物理力学行为, 该模型屈服准则为张拉剪切组合的 Mohr-Coulomb 准则, 如图 2 所示。

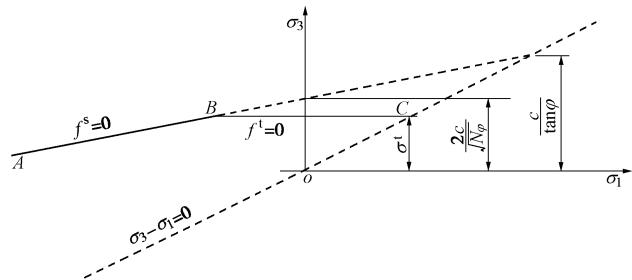


图 2 Mohr-Coulomb 屈服准则

Fig. 2 Failure criteria of modified MC model

用 Mohr-Coulomb 破坏准则描绘从点  $A$  到点  $B$  的破坏包络线  $f^s = 0$ , 应力以拉应力为正, 则

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad (1)$$

用式  $f^t = 0$  张拉破坏准则描绘从  $B$  点到点  $C$  的包络线:

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为内摩擦角,  $c$  为黏聚力,  $\sigma^t$  为抗拉强度应力, 符号以拉为正, 且有

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3)$$

模型中抗拉强度不超过  $\sigma_3$  值, 其最大值由下式给定:

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan\varphi} \quad (4)$$

分别用两个定义剪切塑性流动和张拉塑性流动的函数  $g^s$  和  $g^t$  描述势函数。函数  $g^s$  有如下形式:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad , \quad (5)$$

$$N_\psi = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \quad , \quad (6)$$

式中,  $\psi$  是剪胀角。函数  $g^t$  符合相关联流动法则, 写成

$$g^t = \sigma_3 \quad . \quad (7)$$

## 1.2 微型桩的模拟

微型桩采用 Pile 单元进行模拟。Pile 单元与实体单元之间的作用通过切向和法向的耦合弹簧实现。耦合弹簧的力学机制见图 3, 4, 图 3 (a)、4 (a) 分别为单元切向和法向力与剪切位移的关系, 图 3 (b)、4 (b) 分别为单元切向和法向满足的屈服准则。图中  $F_s/L$  和  $F_n/L$  为 Pile 单元单位长度受到的切向和法向力;  $k_s$ ,  $k_n$  为切向和法向的弹簧刚度;  $c_s$ ,  $c_n$  为微型桩与土接触界面的黏聚力;  $\varphi_s$ ,  $\varphi_n$  为接触界面的内摩擦角;  $p$  为微型桩的截面周长;  $\sigma_m$  为桩周土压力;  $g$  的两种状态 on 和 off 分别表示微型桩与土法向的张开和闭合。

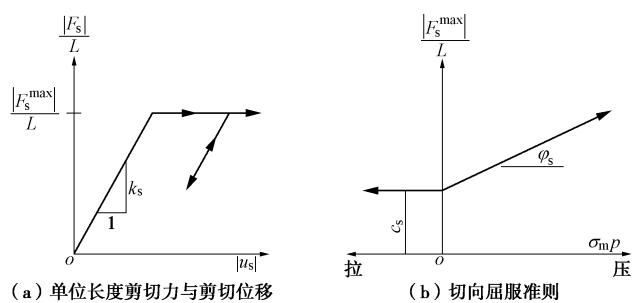


图 3 Pile 单元切向弹簧的力学性质

Fig. 3 Shear-directional behavior of pile element

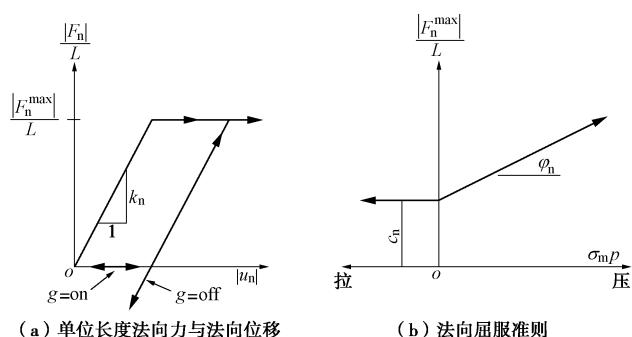


图 4 Pile 单元法向弹簧的力学特性

Fig. 4 Normal-directional behavior of pile element

## 1.3 微型桩群加固边坡稳定性计算方法

### (1) 强度折减技术

强度折减技术<sup>[14]</sup>求解边坡安全系数的原理是利用下) 调整边坡岩土材料的初始抗剪强度:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\text{trial}} &= \tan^{-1} \left( \frac{1}{F^{\text{trial}}} \tan \varphi \right), \\ c_{\text{trial}} &= \frac{1}{F^{\text{trial}}} c. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

采用折减后的  $c_{\text{trial}}$  和  $\varphi_{\text{trial}}$  进行稳定性的迭代求解, 边坡发生破坏时对应的折减系数  $F^{\text{trial}}$  即为边坡的安全系数。强度折减技术的缺点是安全系数计算依赖

于破坏判据的选择, 也就是计算结果可能不唯一。常用的破坏判据有塑性区贯通、计算不收敛或特征点应变或位移发生突变且无限发展。严格来说, 塑性区贯通只是边坡破坏的必要条件, 而不是充分条件, 也就是说, 塑性区贯通并不意味着边坡破坏; 以计算不收敛作为判据, 又使得安全系数计算严重依赖于计算软件的编写水平、误差控制条件等; 以应变或位移突变作为控制条件, 对“突变”的度量则难以量化。尽管存在上述缺陷, 但由于强度折减技术能够考虑不同材料之间的相互作用, 并且易于计算机编程, 比较适宜于研究微型桩群加固边坡的耦合稳定性。

理论上在对边坡岩土的强度参数进行折减时需要同时对微型桩的强度参数进行折减。但是这种处理会使计算变得复杂。另外微型桩破坏本身是不允许的。所以本文计算只对边坡岩土的强度指标进行折减, 微型桩则认为始终满足强度要求, 即采用弹性模型进行求解。

### (2) 微型桩群加固边坡安全系数的求解

图 5 为本文所采用的计算微型桩群加固边坡安全系数的实施流程。方法基于传统的强度折减法和二分法思路提出, 并借助于 FLAC<sup>3D</sup> 程序实现, 以计算不收敛作为边坡的破坏判据。首先通过线性插值的方法确定加固边坡安全系数的上限值  $F^{\text{up}}$  和下限值  $F^{\text{low}}$ , 其次通过二分法进行试算求解, 当安全系数的计算结果达到自定义的精度时, 结束计算过程, 获得加固边坡安全系数的精确值。该方法与 FLAC<sup>3D</sup> 程序中自带的 FOS 求解器相比, 求解速度更快; 而与 Dawon<sup>[15]</sup> 的插值方法相比, 不需要提前指定边坡安全系数的上限值  $F^{\text{up}}$  和下限值  $F^{\text{low}}$ , 可操作性更强。方法的实施过程如下: ①输入初始参数: 黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、抗拉强度  $T$  和计算容差  $\varepsilon$ 。②进行初始状态的稳定性判断( $F^{\text{trial}}=1$ ): 若计算收敛(不平衡力率  $R<1.0 \times 10^{-5}$ ), 表明加固边坡稳定; 若计算不收敛表明加固边坡不稳定。③通过线性插值的方法确定加固边坡安全系数的上限值  $F^{\text{up}}$  和下限值  $F^{\text{low}}$ : 对于稳定边坡, 不断提高体系折减系数 ( $F^{\text{trial}}=2F^{\text{trial}}$ ), 直至计算不收敛; 对于不稳定边坡, 不断降低体系折减系数 ( $F^{\text{trial}}=1/2F^{\text{trial}}$ ), 直至计算收敛。④通过二分法试算求解加边坡安全系数: 令  $F^{\text{trial}}=(F^{\text{up}}+F^{\text{low}})/2$  进行迭代求解, 若计算收敛, 则更新  $F^{\text{low}}$ ; 若计算不收敛, 则更新  $F^{\text{up}}$ 。⑤通过自定义精度获取加固边坡安全系数的精确值: 若计算过程满足  $F^{\text{up}}-F^{\text{low}}<\varepsilon$ , 则迭代过程结束, 此时  $F^{\text{trial}}$  即为体系安全系数的精确值。

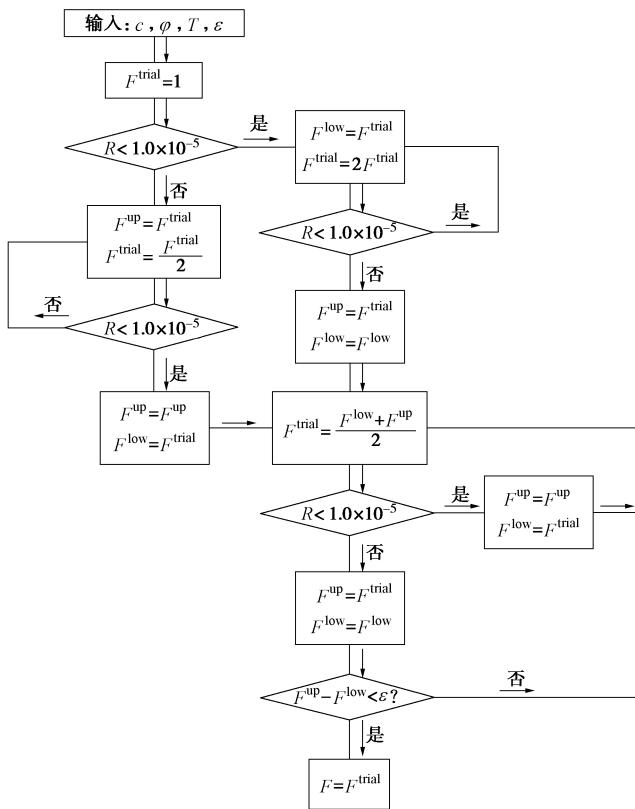


图 5 微型桩群加固边坡安全系数求解流程图

Fig. 5 Flow chart of obtaining  $F_s$  of micropile-reinforced slopes

## 2 分析方案

本次分析的土坡模型如图 6 所示, 图中模型 A 为均质土边坡, Cai 等<sup>[16]</sup>和 Won 等<sup>[17]</sup>对该模型边坡进行了系统分析, 模型长  $\times$  高 = 35 m  $\times$  20 m, 边坡高 10 m, 坡率  $H:V=1:1.5$ , 微型桩群的施加能够改变边坡的破坏模式; 模型 B 为存在软弱夹层边坡, 边坡破坏沿软弱夹层发生, 微型桩群的施加不改变滑面位置, 模型 B 的几何尺寸同模型 A。

Kourkoulis 等<sup>[18]</sup>研究表明, 边界位移作用下抗滑桩 ( $D=1.2$  m) 产生土拱效应的最大间距 (垂直推力方向)  $S=4D$  ( $D$  为桩径),  $S>4D$  后桩群中各桩受力类似于独立单桩; 随着桩间距的减小, 桩间土拱效应逐渐越强, 使抗滑桩群的整体滑动抗力有所增加; 但减小桩间距的同时会导致抗滑桩根数增多, 从而增加工程投资。目前微型桩排距 (平行推力方向) 方面的研究成果极少, 排距过小会导致群桩效应, 降低单桩的作用效率, 而排距过大则不利于微型桩群-边坡体系整体受力。微型桩为小口径钻孔灌注桩, 截面抗弯刚度低, 影响半径小于大截面抗滑桩, 为了保证微型桩群与桩间土形成三维复合体协同受力, 本次分析中微型桩间距  $S$  和排距  $S'$  均取  $3D$  (见图 8), 模型计算宽度

为  $2S$ , 桩顶和桩底自由。

本次计算采用的边坡岩土参数见表 1, 模型 B 中滑动面残余强度假定为岩土材料的 0.8 倍, 即  $c=8 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=20^\circ$ , 其他同岩土参数。微型桩群由 4 根微型桩组成,  $D=0.15 \text{ m}$ , 假定微型桩-土接触面为粗糙接触面, 避免两者发生切向相对滑动, 参考 Cai 等的做法<sup>[16]</sup>, 接触面刚度  $k_s$  和  $k_n$  分别取  $1.3 \times 10^{11} \text{ Pa}$  和  $1.3 \times 10^9 \text{ Pa}$ ; 黏聚力  $c_s$  和  $c_n$  分别取  $1.5 \times 10^{10} \text{ Pa}$  和  $1.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ ; 内摩擦角  $\varphi_s$  和  $\varphi_n$  均取  $20^\circ$ 。

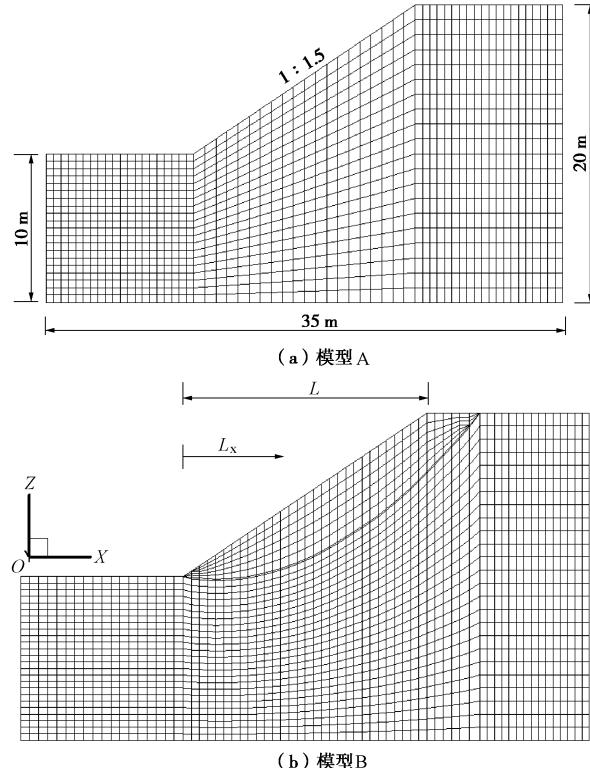


图 6 边坡模型

Fig. 6 Model of slopes

表 1 计算参数

Table 1 Parameters of materials

材料	重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	变形模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$
模型 A	20.0	60	0.3	10.0	20.0
模型 B	20.0	60	0.3	10.0	25.0

### 3 方法验证

本次计算求得模型 A 边坡的安全系数为  $F_s=1.16$ ，该结果与 Cai 等<sup>[16]</sup>和 Won 等<sup>[17]</sup>计算结果接近 ( $F_s=1.13\sim1.15$ )，FLAC<sup>3D</sup> 中安全系数受到网格精度和算法的影响，本次计算网格更加细密，所以结果略高于其它结果是合理的。模型 A 和模型 B 的破坏模式如图 7 所示，文中采用剪应变率来描述边坡的破坏模式。

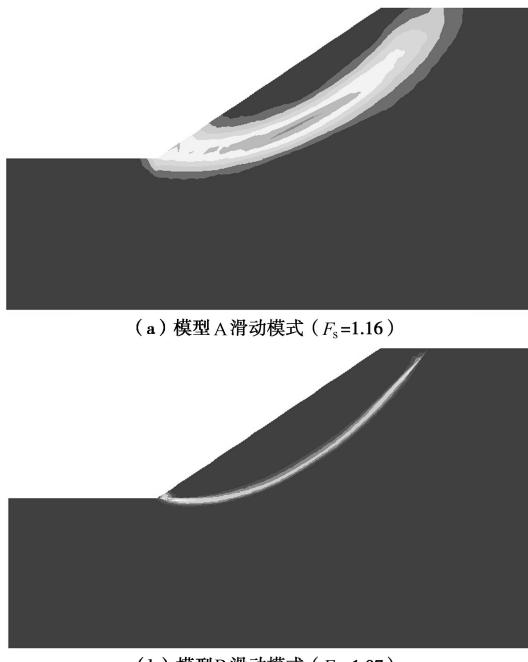


图 7 边坡破坏模式

Fig. 7 Failure modes of non-reinforced slopes

微型桩群加固边坡的破坏模式如图 8 所示, 模型 A 边坡  $F_s=1.45$ , 模型 B 边坡  $F_s=1.35$ , 为了直观评价微型桩群对边坡稳定性的影响, 定义  $I_f$  为边坡稳定影响因子:

$$I_f = \frac{F_{s(\text{加固})}}{F_{s(\text{未加固})}} \quad (9)$$

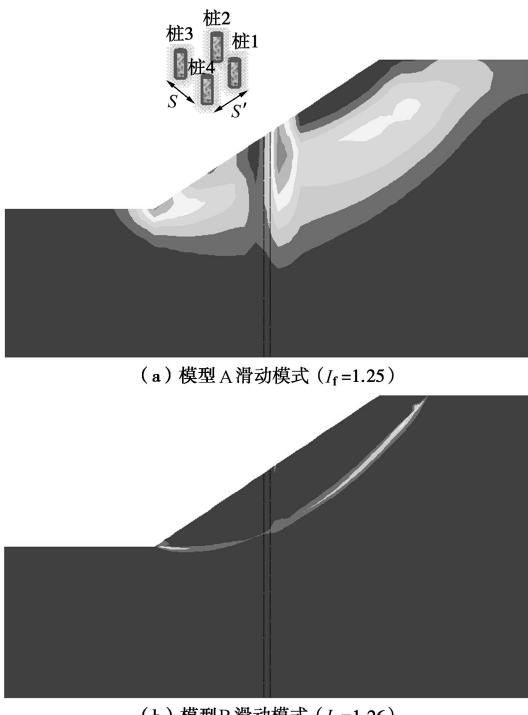


Fig. 8 Failure modes of reinforced slopes

设微型桩群平面中点处的水平位移为  $u_s$ , 相同深度位置微型桩最大结构位移为  $u_{pi}$ , 定义  $\delta$  为描述微型

桩群和桩间土体协同变形的作用系数:

$$\delta = \frac{u_s}{u_{pi}} \quad (10)$$

$\delta$  值越大表明微型桩群与桩间土的变形协调性越差, 当  $1 \leq \delta \leq 2$  时, 微型桩群与桩间土可视为“三维复合体”协同受力。图 9 为微型桩群加固边坡破坏时,  $\delta$  沿桩深的分布曲线。由图可知, 模型 A 中微型桩群与桩间土的变形协调性更好, 模型 B 在滑面位置略高, 主要由于模型 B 边坡在滑面位置应力更集中所致。本次分析中  $\delta$  总体在 1.5 以下, 表明间距  $S$  和排距  $S'$  为  $3D$  时能够保证微型桩群整体受力。

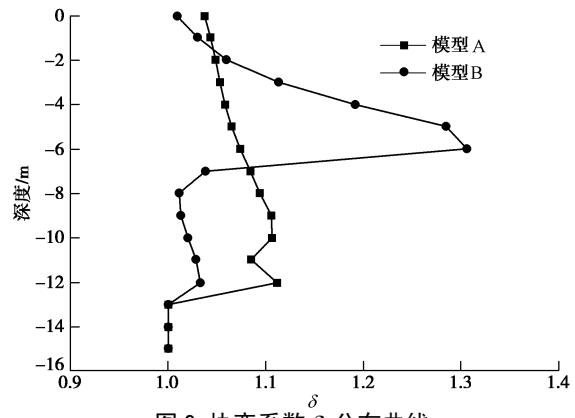


图 9 协变系数  $\delta$  分布曲线

Fig. 9 Values of  $\delta$  along micropiles

## 4 分析成果

### 4.1 桩位的影响

微型桩群布置在不同的位置对边坡稳定的影响如图 10 所示。由图可知, 当微型桩群布置在边坡中上部时 ( $L_x/L=0.7$ , 符号含义见图 6) 加固效果最优, 该结论与 Won 等<sup>[17]</sup>对大截面抗滑桩的计算结果一致; 且微型桩群对模型 B 的加固效果整体优于模型 A, 这表明微型桩群加固含软弱夹层边坡或滑坡的效果优于加固均质土边坡。

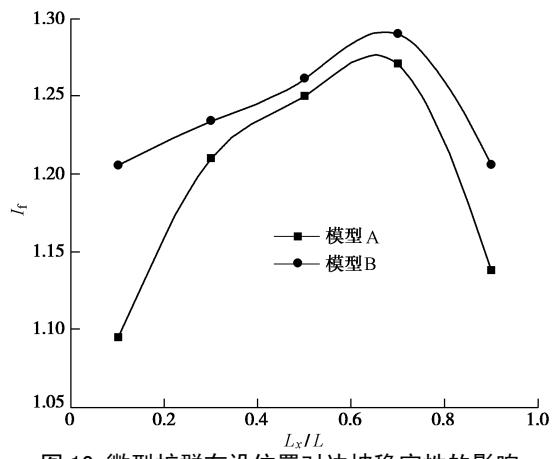


图 10 微型桩群布设位置对边坡稳定性的影响

Fig. 10 Effects of position of micropiles on slope stability



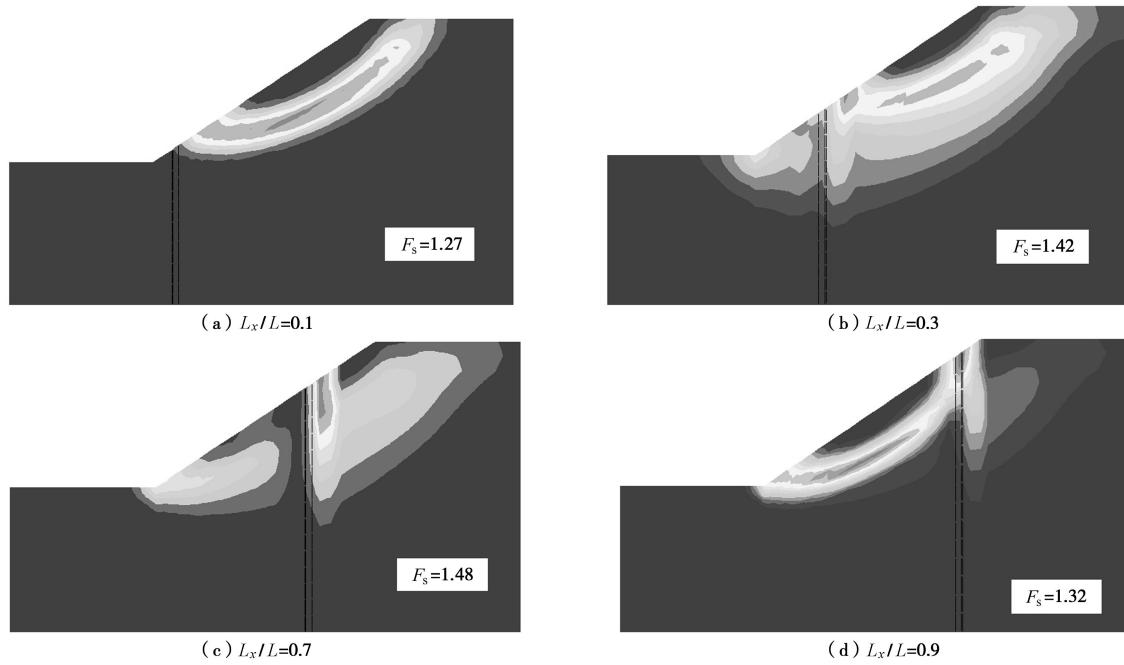


图 11 模型 A 滑动模式

Fig. 11 Effects of position of micropile on failure mode of model slope A

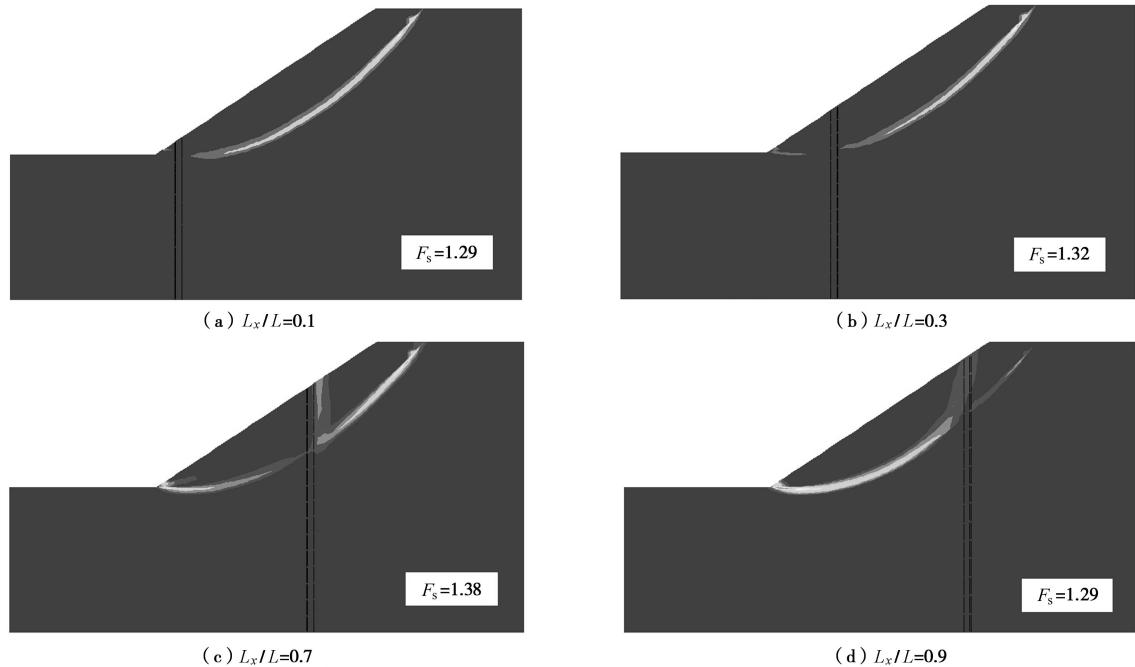


图 12 模型 B 滑动模式

Fig. 12 Effects of position of micropiles on failure mode of model slope B

微型桩群布置在不同位置时边坡的破坏模式见图 11, 12。由图 11 可以看出, 当微型桩群布置在模型 A 边坡坡脚 ( $L_x/L=0.1$ ) 时, 桩后坡体内部产生了贯通的塑性剪切带, 边坡产生了整体性越顶破坏; 随着微型桩群布设位置向中部移动, 破裂面逐渐向深部发展, 当  $L_x/L=0.3$  时, 微型桩群的上部区域产生了局部滑坡破坏, 下部坡体则仅在坡脚产生了应变集中, 边坡的变形模式由整体变形转化为局部变形, 边坡的安全系数明显提高; 当  $L_x/L=0.5$  时 (见图 8), 微型桩群加固

区域产生了明显的应变集中, 且坡脚产生了滑动剪出; 当  $L_x/L=0.7$  时, 桩前坡体内部的滑裂面逐渐向后部发展, 当  $L_x/L=0.9$  时, 桩前坡体内部形成了贯通的塑性剪切带, 下部坡体产生了整体的滑动破坏。

由图 12 可以看出, 微型桩群布设位置对模型 B 边坡的破坏模式影响不大, 破坏面均沿软弱夹层生成。这表明对于含软弱夹层边坡, 用传统非耦合方法假定滑动面位置不变进行微型桩群的设计基本合理, 但对于均质土边坡, 耦合作用下破坏模式与微型桩群的布

置位置关系较大,采用传统非耦合方法假定滑动面位置不变进行分析设计不合理,此时微型桩群加固边坡的工程设计应考虑耦合作用的影响。

#### 4.2 最优锚固长度

设微型桩群潜在破坏面以上长度为  $H_a$ ,破坏面以下锚固长度为  $H_b$ ,不同锚固长度下微型桩群对边坡稳定的影响见图 13。

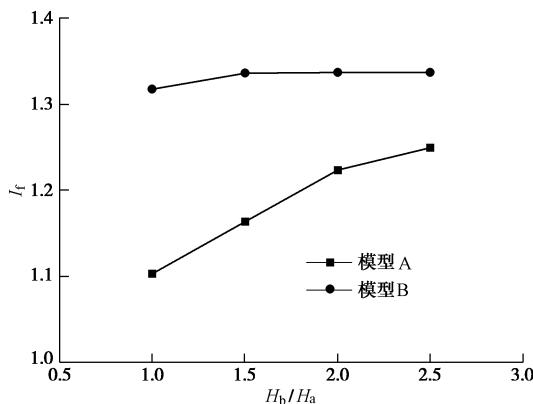


图 13 不同锚固长度微型桩群对边坡稳定性的影响

Fig. 13 Effects of embedment length of micropiles on slope stability

由图 13 可知,随着锚固长度的增加,模型 A 和模型 B 边坡的安全系数均有所增加,但对于模型 A,当  $H_b/H_a > 2$  以后,边坡的稳定性提高不明显;对于模型 B,当  $H_b/H_a > 1.5$  以后,影响系数则不再变化,此时桩底相当于固定约束,增加锚固长度不会提高边坡的稳定性。

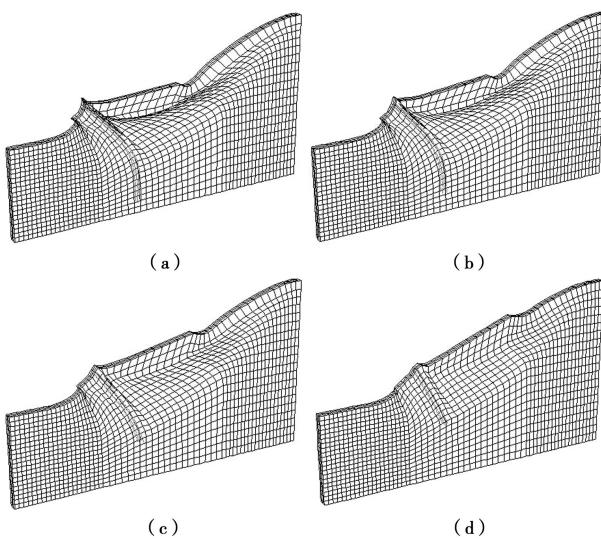


图 14 模型 A 变形模式

Fig. 14 Deformed meshes of reinforced model slope A

图 14,15 为不同锚固长度下微型桩群加固边坡的变形模式。对于模型 A,微型桩群锚固深度较小时(图 14 (c)、(d)),边坡的破坏以深层滑动为主,桩身变形以刚性旋转为主,微型桩群产生明显的整体性倾斜

变形;随着微型桩群锚固深度的增加(图 14(a)、(b)),微型桩群的整体抗滑能力明显增加,微型桩群的变形以柔性弯曲为主,表明深层土体的抗力得到了有效发挥。但对于模型 B,微型桩群的变形规律差别不大,桩身变形主要是弯曲变形。

#### 4.3 削剪效应

微型桩截面抗弯刚度低,极易产生弯曲破坏。将微型桩顶部进行削剪(图 16),能够减小滑坡推力及其作用力臂,从而在一定程度上减小桩身弯矩,有利于微型桩群受力。但削剪过长则诱发加固边坡发生越顶破坏,导致加固工程的失败。

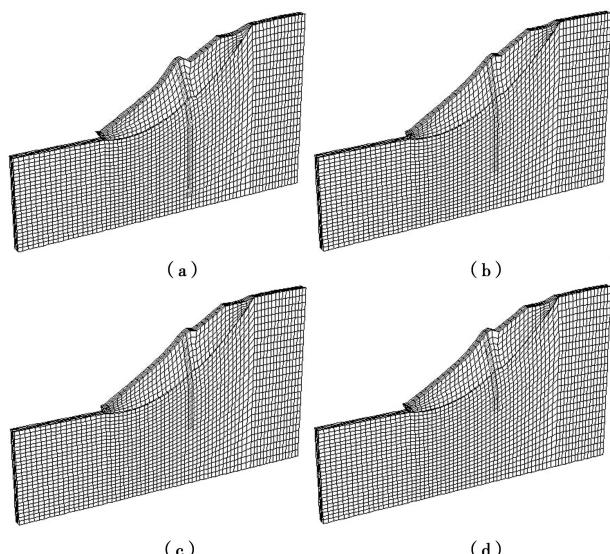


图 15 模型 B 变形模式

Fig. 15 Deformed meshes of reinforced model slope B

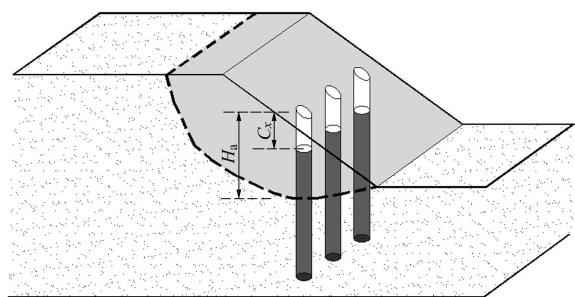


图 16 削剪示意图

Fig. 16 Truncation of micropiles for increased capacity

削剪效应对微型桩群加固边坡稳定性的影响如图 17 所示,可以看出,削剪效应对微型桩群加固边坡的整体稳定性逐渐降低。但对于模型 A,当  $C_x \leq 1/4H_a$  时,削剪微型桩对加固边坡的整体稳定性影响不大;对于模型 B,当  $C_x \leq 1/2H_a$  时,削剪效应对边坡的整体稳定性影响不大;  $I_f$  降低约 5%。

研究削剪效应的实际意义在于改善微型桩群受力,降低加固成本。不同削剪长度下微型桩群加固边

坡的内力分布如图 18 所示, 图中横坐标  $M$  为弯矩,  $Q$  为剪力, 纵坐标  $H$  为桩长。

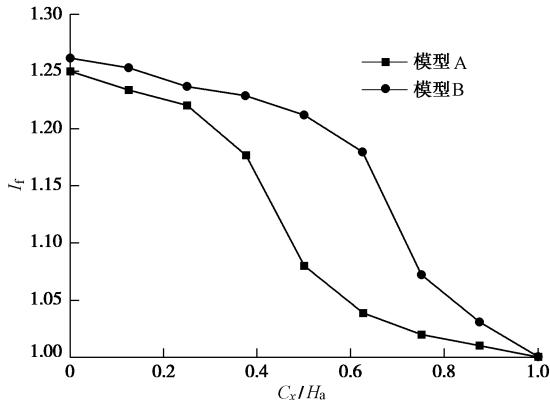


图 17 不同削剪长度微型桩群对边坡稳定性的影响

Fig. 17 Effects of truncation of micropiles on slope stability

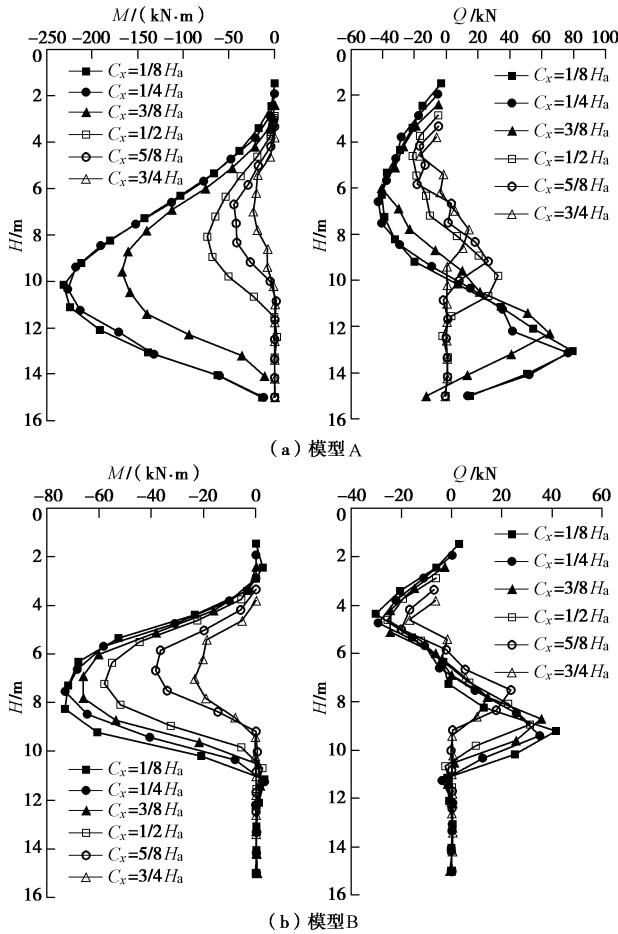


图 18 微型桩内力图

Fig. 18 Internal forces of micropiles

由图 18 (a) 可知, 对于模型 A, 削剪长度  $C_x \leq 1/4 H_a$  时, 不同削剪长度微型桩桩身内力分布差别不大;  $C_x > 1/4 H_a$  之后, 微型桩最大桩身弯矩和剪力均随  $C_x$  的增大明显降低, 表明削剪效应改善了微型桩的受力条件, 即降低了桩身最大弯矩, 但此时微型桩的抗滑力也有所降低, 且最大桩身弯矩的位置由深到浅变

化表明边坡破坏由深层向浅层发展; 对于模型 B, 削剪长度  $C_x \leq 1/2 H_a$  时, 微型桩最大桩身弯矩随  $C_x$  的增大明显降低, 但微型桩最大桩身剪力降低不明显, 即所提供的抗滑力没有降低, 表明此时的削剪长度能够确保微型桩群加固效果的同时改善其受力条件;  $C_x > 1/2 H_a$  之后, 微型桩最大桩身剪力随  $C_x$  的增大明显降低, 说明微型桩群所提供的抗滑力逐渐降低, 从而导致边坡安全系数的降低。

上述分析结果表明, 用微型桩群加固均质土坡时, 削剪长度  $C_x \leq 1/4 H_a$  时不降低边坡稳定性; 用微型桩群加固含软弱夹层边坡时, 削剪作用更为明显, 最大削剪长度可达自由段长度的 1/2, 此时边坡稳定性不会明显减低并且微型桩的受力也会得到明显改善。削剪长度大于上述临界值时, 加固边坡的稳定性会迅速降低。实际工程中对于可削剪的微型桩体, 无需设置加筋体, 仅需将钻孔回填压实即可, 以降低成本。

## 5 结 论

(1) 基于强度折减技术提出了微型桩群加固边坡安全系数的数值计算方法, 对微型桩群加固均质土坡和含软弱夹层边坡的稳定性进行了耦合分析。

(2) 对比分析的结果表明, 微型桩群对含软弱夹层边坡的整体加固效果优于均质土坡, 将微型桩群布置在边坡中上部能够取得更好的加固效果。但对于均质土坡, 边坡的破坏模式与微型桩群的布设位置关系较大, 采用传统非耦合方法假定滑动面位置不变进行微型桩群的设计不合理, 微型桩群加固边坡的工程设计应考虑耦合作用的影响。

(3) 对于均质土坡, 微型桩群锚固深度较小时, 桩身变形以刚性旋转为主, 随着微型桩群锚固深度的增加, 微型桩群的变形由刚性倾斜转化为柔性弯曲变形; 对于含软弱夹层边坡, 微型桩群的变形主要是弯曲变形。微型桩群最优锚固长度约为自由段长度的 1.5~2.0 倍。实际工程中应考虑地层条件、微型桩群布置方式等的影响综合确定锚固长度。

(4) 削剪作用能够改善微型桩群受力, 并降低加固工程成本。对于均质土坡, 当削剪长度小于自由段长度 1/4 时, 不会降低加固边坡的安全系数; 对于含软弱夹层边坡, 削剪作用更为明显, 最大削剪长度可达自由段长度的 1/2; 超过最大削剪长度, 削剪作用会使边坡安全系数迅速降低, 可能导致边坡发生越顶破坏。实际工程中对于可削剪的微型桩部分, 无需设计加筋体, 仅将钻孔回填压实即可, 能够在确保加固效果的同时降低成本。

(5) 本文基于理想化模型开展微型桩群加固边坡

稳定性研究, 真实条件下边坡的地形地貌和地层条件更为复杂, 不同坡形、岩性、地质结构等对微型桩群加固边坡稳定性的影响需进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] SHIELDS D R, PE M. Buckling of micropiles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**: 334 – 337.
- [2] 丁光文, 王 新. 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004, **18**(1): 47 – 50. (DING Guang-wen, WANG Xin. Application of micropiling compound structure in a landslide treatment engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, **18**(1): 47 – 50. (in Chinese))
- [3] 刘 凯, 刘小丽, 苏媛媛. 微型抗滑桩的应用发展研究现状[J]. 岩土力学, 2008, **28**(增刊): 675 – 679. (LIU Kai, LIU Xiao-li, SU Yuan-yuan. Research on application development of anti-slide micropiles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **28**(S0): 675 – 679. (in Chinese))
- [4] BRUCE D A, DIMILLIO A F, JURAN I. A primer on micropiles[J]. Civil Engineering Magazine, 1995, **65**: 51 – 54.
- [5] 冯 君, 周德培, 江 南等. 微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(2): 284 – 288. (FENG Jun, ZHOU De-pei, JIANG Nan, et al. A model for calculation of internal force of micropile system to reinforce bedding rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(2): 284 – 288. (in Chinese))
- [6] LIZZI F. Special patented systems of underpinning and more generally, subsoil strengthening by means of pali radice (root piles) with special reference to problems arising from the construction of subways in built-up area[R]. Urbana-Champaign: Special Lecture given at university of Illinois at Urbana-Champaign, 1971.
- [7] 朱本珍, 孙书伟, 郑 静. 微型桩群加固堆积层滑坡原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 2858 – 2864. (ZHU Ben-zhen, SUN Shu-wei, ZHENG Jing. In-situ testing study of accumulative formation landslide reinforced by micropile group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2858 – 2864. (in Chinese))
- [8] SUN S W, ZHU B Z, WANG J C. Design method for stabilization of earth slopes with micropiles[J]. Soils and Foundations, 2013, **53**(4): 487 – 497.
- [9] MEYERHOF G G, SASTRY V, YALCIN A S. Lateral resistance and deflection of flexible piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**(3): 511 – 522.
- [10] 胡毅夫, 王庭勇, 马 莉. 微型抗滑桩双排单桩与组合桩抗滑特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(7): 1499 – 1505. (HU Yi-fu, WANG Ting-yong, MA Li. Research on anti-sliding characteristics of single double-row and composite anti-slide micropiles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(7): 1499 – 1505. (in Chinese))
- [11] 陈 正, 梅 岭, 梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2219 – 2224. (CHENG Zheng, MEI Ling, MEI Guo-xiong. Numerical simulation of lateral bearing capacity of flexible micropile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **31**(7): 2219 – 2224. (in Chinese))
- [12] SADEK M, ISAM S. Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, **24**: 473 – 485.
- [13] ITASCA. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 2005.
- [14] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C L, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, **25**(4): 671 – 689.
- [15] DAWSON E M, ROTH C L, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, **49**(6): 835 – 840.
- [16] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[J]. Soils and Foundations, 2000, **40**(1): 73 – 84.
- [17] WON J, YOU K, JEONG S. Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**: 304 – 315.
- [18] KOURKOULIS R, GEOLAGOTI F, ANASTASOPOULOS I, et al. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(7): 663 – 677.