

# 单排微型桩加固碎石土滑坡物理模型试验

孔纪名<sup>1</sup> 蔡强<sup>1,2</sup> 张引<sup>1,2</sup> 韩培锋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/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;  
2. 中国科学院大学, 北京 100101)

**摘 要:** 微型桩因其自身优势被广泛使用,但有关其抗滑机理的理论研究相对较少。首先对模型桩的力学特性进行了标定试验,获得其弹塑性工作阶段的弹性模量,分别为  $0.69 \times 10^4$  MPa 和  $0.04 \times 10^4$  MPa;再通过不同桩间距下单排微型桩加固碎石土滑坡室内模型试验,研究微型桩抗滑机理。试验结果表明:不同桩间距下单排微型桩桩后土压力主要集中在滑面以上  $1/3$  桩身范围内;桩间距较小,土拱效应越明显,微型桩抗滑失效的最大临界弯矩越大,微型桩能承受的滑坡推力越大,抗滑效果越好。

**关键词:** 微型桩; 碎石土滑坡; 滑坡推力; 土拱效应; 临界弯矩

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

碎石土滑坡是一种常见的滑坡类型,在滑坡灾害的防治中,微型桩结构施工快捷,并且能有效防治发生中的灾害,因而被广泛使用。由于微型桩在组合类型和受力变形特性等问题上没有得到很好的解决,目前在微型桩的使用上目前还主要依据工程经验,设计上缺乏足够的理论支撑,影响了微型桩的推广使用。因此,研究微型桩抗滑受力特性和机理,为微型桩的工程使用提供技术支撑和就显得十分必要。本文以单排微型桩的为研究对象,采用物理模型试验与数值模拟验证方法,进行微型桩与碎石土滑坡相互作用机理研究。

## 1 物理模型试验设计

### 1.1 试验目的和内容

利用模型试验槽,对单排微型桩加固碎石土滑坡的过程进行模型试验,重现其抗滑的过程和特征。记录不同桩间距下单排微型桩的应变及滑坡体不同部位的应力等,分析微型桩和土体的受力变形规律。

### 1.2 模型试验相似条件

根据相似准则,物理量的相似主要是指一般几何相似、动力学相似以及运动学相似三类(其中一般几何相似即初等几何学相似,它的物理量纲通常只取长度单位)。凡是在几何相似条件下由动力学相似获得的解,理应满足运动学相似。根据相似理论原理,地质力学模型试验应满足下列相似判据

$$\begin{cases} \frac{C_\sigma}{C_r C_l} = 1 \\ C_u = C_\varepsilon = C_f = C_\varphi = 1 \\ C_\sigma = C_E = C_c = C_\tau \\ C_\delta = C_l \end{cases} \quad (1)$$

其中,几何条件相似系数:  $C_l = l_p/l_M$ ; 受力条件相似系数:  $C_\gamma = \gamma_p/\gamma_M$ 、 $C_c = c_p/c_M$ 、 $C_\sigma = \sigma_p/\sigma_M$ ; 摩擦相似系数:  $C_\varphi = \varphi_p/\varphi_M$ 。式中  $C$  为相似系数,  $l$  为几何尺寸,  $\gamma$  为材料重度,  $\sigma$  为应力,  $c$  为粘聚力,  $\varphi$  为摩擦角,下标  $P$ 、 $M$  分别代表原型和模型。

模型试验中,全部相似判据都满足的相似模型是极难获得的,只能使模型满足主要的相似判据。

收稿日期(Received date): 2013-02-19; 改回日期(Accepted): 2013-06-03。

基金项目(Foundation item): 国家高技术研究发展计划“863”计划项目(2012AA121302),四川省科技支撑计划(11ZC0550),中交股份科技研发项目(2011-ZJKJ-04)课题资助。[Supported by National high technology research and development program (“863” Project) project (2012AA121302), Sichuan Science and Technology Support Program(11ZC0550), CCCC R & D projects (2011-ZJKJ-04).]

作者简介(Biography): 孔纪名(1956-),男,重庆人,研究员,主要从事斜坡变形破坏规律研究。[Kong Jiming(1956-), male, professor. Mainly engaged in the study of the theory of mountain hazards and disaster reduction technology.] E-mail: jimingk@imde.ac.cn

因此,在模型试验过程中的相似性重点满足野外模型几何特征和动力作用过程相似,其它相似性也做适当考虑。

### 1.3 模型材料

#### 1. 模型桩

模型桩由PVC管灌注水泥砂浆制成,其中,PVC管的截面尺寸为直径 $D=2\text{ cm}$ ,长 $0.55\text{ m}$ ,水泥标号为325#,骨料采用的是粒径为 $1.0\text{ mm}$ 的石英砂。

#### 2. 滑体材料

选择重晶石粉、石英砂、碎石颗粒和水进行配置,各种材料质量百分比及试验材料的力学参数见表1、表2。

表1 模拟滑体材料配比

Table 1 Mixture ratios of rock and soil materials /%

材料	重晶石粉	石英砂	碎石颗粒	水
含量	28.0	34.0	32.0	6.0

表2 材料的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the test material

密度	质量含水量	比重	直剪强度	
$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$w/\%$	$\rho_s/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$C/\text{kPa}$	$\phi/^\circ$
2.14	4.33	20.96	19.79	33.0

#### 3. 模型底面

模型底部用厚 $0.07\text{ m}$ 的粘土层制作,底层的表面也作为模型的滑面。由于模拟滑体主要靠后部加载装置推动,模型底部滑面土体的力学强度参数对滑动的影响很小,因此,试验中不考虑其强度对模型滑动的影响。

#### 1.4 模型桩标定试验设计

为了测试模型桩的弹性模量,采用在桩身 $2/3$ 处施加竖向集中荷载的悬臂桩结构进行标定。

标定试验分两组,主要记录桩身位移、应变数据。模型桩悬臂段长 $0.45\text{ m}$ ,沿桩长方向上布置4个应变片,记录加载过程中的桩身应变值,应变片测点位置布置如图1。

#### 1.5 单排桩试验模型制作

试验共分3组,每组3根模型桩,桩间距分别为 $4D$ 、 $5D$ 、 $6D$ 。模型桩底部采用角钢夹具将其固定在模型底面上部,滑体厚 $0.45\text{ m}$ ,长 $1.9\text{ m}$ ,微型桩长 $0.55\text{ m}$ ,制备的模型见图2。

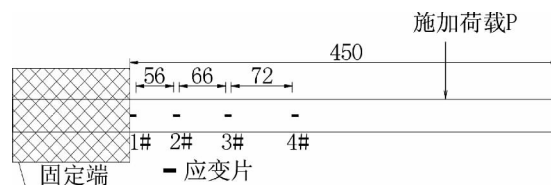


图1 桩体强度标定示意图

Fig. 1 The pile intensity calibration diagram

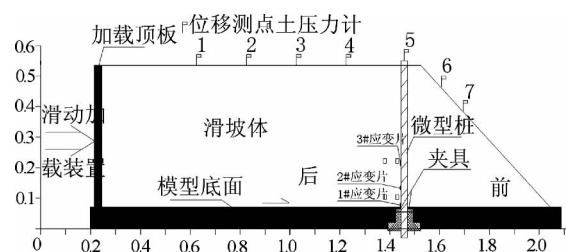


图2 试验模型示意图

Fig. 2 Test model diagram

### 1.6 测试系统

测试系统包括监测元件、应变片和数据采集系统。包括土压力计、数字应变仪、位移测量仪。

### 1.7 加载设计

滑坡发生滑动时,滑坡推力始终稳定作用在抗滑桩上,为模拟这个过程,在模型试验中用量程为 $20\text{ kN}$ 的推力加载装置对模型桩后土体施加荷载,用以模拟微型桩所受到的滑坡推力,加载方式为分级加载,加载幅度为每次使滑体向滑坡前缘移动 $10\text{ mm}$ ,滑体位移以 $S$ 表示。在每级荷载施加后,均要持荷一定时间,至桩结构受力和变形趋于稳定后才施加下一级荷载。

## 2 试验结果分析

### 2.1 模型桩的物理力学性能

模型桩的物理力学性能对试验分析结果影响很大,在一定范围的应力作用下,桩体必须处于线弹性工作状态,确保在试验过程中测试数据反映模型桩真实情况。

根据试验结果,建立模型桩弯曲应力与应变之间的关系,如图3所示。

根据弹塑性理论,将模型桩分为弹性和塑性工作阶段,且弹塑性临界点的应力为 $17.23\text{ MPa}$ (即加载值为 $45.08\text{ N}$ ),对应的应变为 $2\,245\text{ }\mu\epsilon$ 。模型桩处于弹性工作阶段时,模型桩的弹性模量为桩体的割线模量即 $E=0.69\times 10^4\text{ MPa}$ ;当模型桩处于塑性

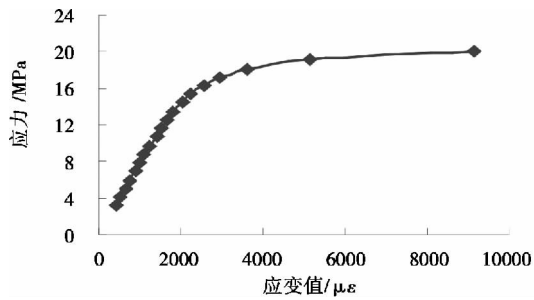


图3 模型桩弯曲应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of model pile

工作阶段时,将模型桩看做理想弹塑性体。模型桩从开始逐渐屈服直至破坏的整个阶段有一个应力强化过程,将这个强化过程简化为线性强化计算模型。此时模型桩的弹性模量为桩体的切线模量即  $E = 0.04 \times 10^4$  MPa。

## 2.2 单排微型桩模型试验

### 2.2.1 不同桩间距下桩后土压力分布规律

根据试验测试结果,在不同桩间距条件下模型底面以上4 cm、15 cm处的桩后土压力分布规律如图4所示。

在模型加载前,模型底面以上4 cm和15 cm处的土压力基本为0。在模型加载位移1~60 mm时,模型后缘土体产生瞬时变形,在模型微型桩前的土压力增长缓慢。其原因是由于滑体较松散,推力大部分耗散在滑体挤压密实过程中。随着水平推力的增加,滑体密实程度越来越密实,曲线斜率变陡,传递到桩上的推力加大,土压力和桩体弯曲变形快速增长,且越靠近模型底面处的土压力增长越快,直至微型桩达到其极限状态,随后土压力急剧减小,微型桩失效破坏。

在桩间距为8 cm时,当模型位移>160 mm,微型桩对桩间土的约束力增大,桩土契紧共同承受推力,桩间土体传递较大土压力到桩上,曲线斜率急剧增大,土压力达到峰值,桩间土拱破坏,微型桩进入塑性工作阶段。

在桩间距为10 cm时,当模型位移>140 mm,微型桩与桩后土体脱空,桩前土压力基本没有增加,曲线斜率减小。随后出现拐点,微型桩进入弹塑性阶段,桩后土压力达到最大值,微型桩失效破坏。

在桩间距为12 cm时,微型桩对桩间土体的契紧作用较小,形成的桩间土拱强度也较低。随着推力的增大,桩后土体从桩间绕流,微型桩直接承受推力作用,很快进入塑性变形破坏阶段,桩后土压力达到

峰值,微型桩破坏。

### 2.2.2 不同桩间距下桩间土压力分布规律

根据试验测试结果,不同滑体位移和桩间距下,桩间土压力分布规律如图5所示。

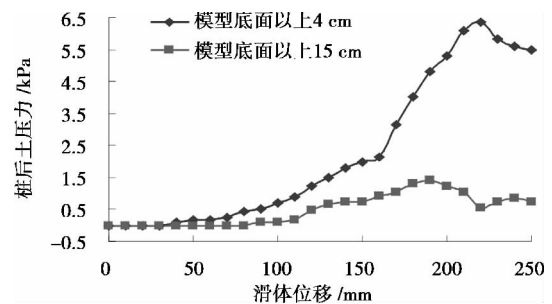
模型底面以上4 cm、15 cm处的桩间分别布设压力传感器,土压力分布规律如图5所示。桩间距较小时,桩间土体压力波动越大,土拱效应越明显;当桩间距较大时,桩间土体压力波动不明显。

### 2.2.3 不同桩间距下桩身弯矩分布特点

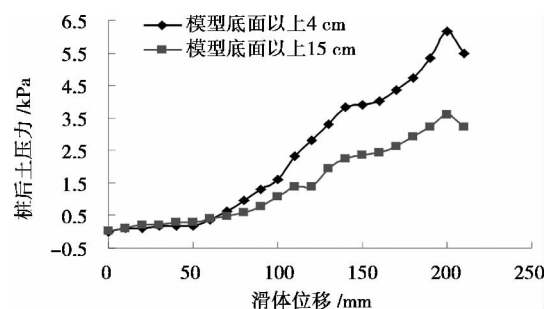
假设微型桩始终处于弹性工作阶段,根据模型桩的弹性模量和桩体的应变值,由公式2可计算出相应测点的弯矩值

$$M = W_z \cdot E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

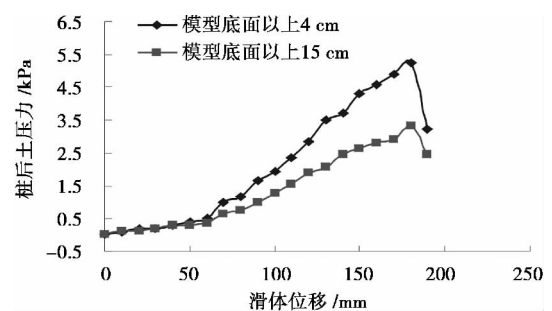
式中  $W_z$  是模型桩横截面抗弯系数,  $E$  为模型桩的



a 桩间距为8 cm (Pile spacing 8 cm)



b 桩间距为10 cm (Pile spacing 10 cm)



c 桩间距为12 cm (Pile spacing 12 cm)

图4 持续滑动条件下桩后土压力分布曲线

Fig. 4 Continued to slide under the conditions of the pile soil pressure distribution curves

弹性模量  $E$  是桩身应变。

不同滑体位移和桩间距下, 桩身的弯矩分布曲线如图 6 所示。

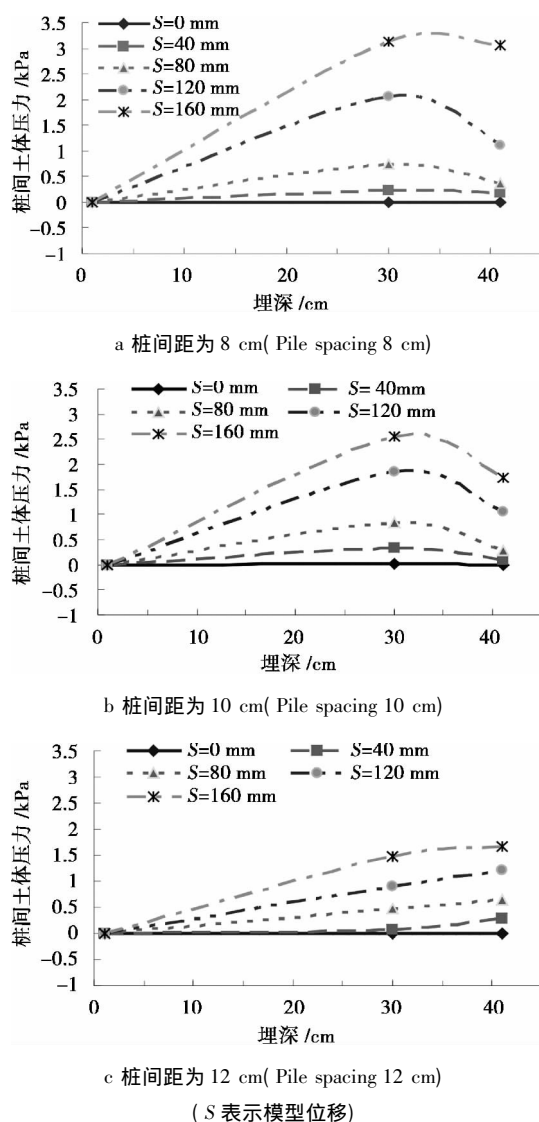


图 5 持续滑动条件下桩间土压力分布曲线

Fig. 5 Continued sliding conditions under pile of earth pressure distribution curves

根据试验结果, 加载开始一段时间内模型桩的弯矩增长非常缓慢, 微型桩基本没有产生明显位移 (OA 段), 这是由于水平推力大部分用来克服桩后土体的阻滑力和压密实滑坡后缘土体, 只有小部分的推力传递到桩上。随着滑体持续滑动, 土拱效应逐步增强, 桩间土体向两侧的桩上传递推力增大, 桩身弯矩快速增长 (AB 段), 微型桩处于弹性状态。随后变形的增加, 弯矩曲线出现拐点 (B 点), 此时微型桩进入弹塑性受力状态, 直至破坏。

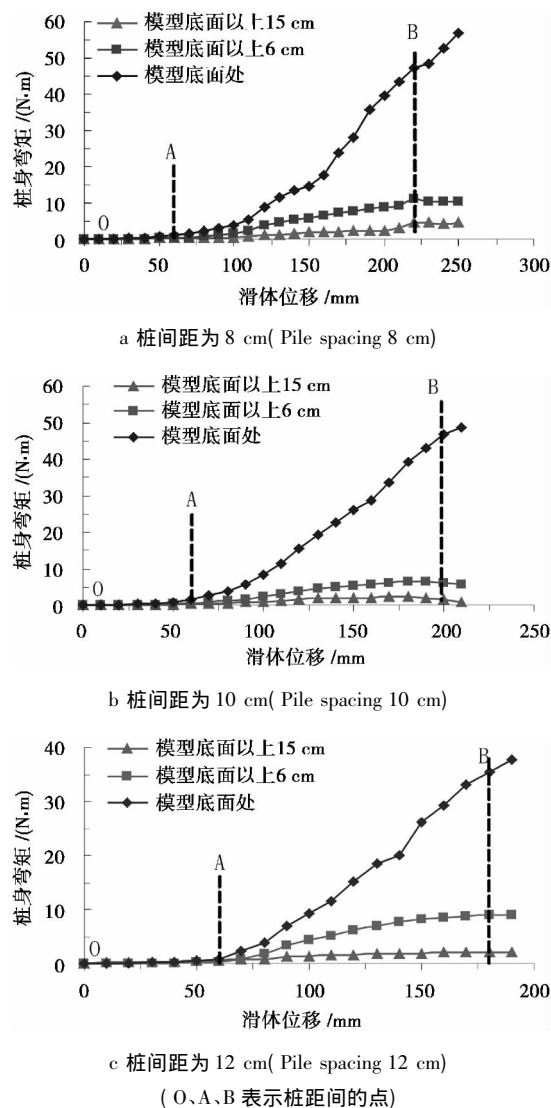


图 6 持续滑动条件下桩体弯矩图

Fig. 6 Continued sliding conditions under pile bending moment diagram

从微型桩不同深度的弯矩分析, 从滑面到坡面, 桩体弯矩由大到小, 表明滑面处的桩身弯矩是桩能承受的最大弯矩。

#### 2.2.4 不同桩间距下桩身弯矩分析

以在相同受力条件下模型滑面附近的桩体弯矩为例。不同桩间距桩体的弯矩变化呈以下特点。

当桩间距为 8 cm 时, 模型位移 220 mm 时, 桩体达到最大的弯矩状态 (图 7)。桩间距为 10 cm 时, 模型位移 200 mm 时, 桩体即达到最大的弯矩状态。桩间距为 12 cm 时, 当模型位移 170 mm 时, 桩体达到最大的弯矩状态。试验表明, 桩间距越小, 桩体产生的弯矩大。桩间距较大时, 桩与桩后土体易分离, 桩间土拱强度低, 土体可绕过桩体在模型前缘

堆积,模型位移产生的作用力直接作用于桩体,桩体达到最大弯矩时的位移最小,因此,也反应出桩体的抗滑能力随之降低。

2.2.5 不同桩间距下微型桩抗滑效果分析

由悬臂桩结构的受力特点也可知,微型桩在滑面附近是最易发生破坏的部位。因此,以模型滑面以上 4 cm 土压力和桩身弯矩为例,分析不同桩间距下微型桩的抗滑效果。

模型在相同受力的情况下,桩间距 8 cm 时,模型位移 220 cm,桩后土压力为 6.23 kPa,桩体达到最大的桩身弯矩 40.45 nm(图 8 a)。在桩间距 12 cm

时,模型位移 180 cm,桩后土压力为 5.26 kPa,桩体即达到最大的桩身弯矩 30.30 nm(图 8 b)。由此可知,桩间距越小,微型桩能承受的滑坡推力越大,微型桩的抗弯能力越好。

假设微型桩为线弹性体,处于纯弯曲受力,且不考虑摩擦阻力、桩间和桩前土体抗力,根据材料力学可计算得到桩身承受的推力。桩间距为 8 cm、12 cm 时,相应的单根微型桩的最大抗滑力分别记为  $T_8$ 、 $T_{12}$ ,则有  $T_8 = 0.505 \text{ kN/m}$ 、 $T_{12} = 0.379 \text{ kN/m}$ 。

综上所述,桩间距为 4D 是单排微型桩的最佳抗滑桩间距,即桩间距较小,微型桩抗滑效果相对越好。

3 数值模拟验证

3.1 数值模型的建立

将数值模型的所有边界条件定义为与物理模型试验一致,模型滑体、滑滑及微型桩都按 SOILD45 方法进行网格单元划分,有限元模型如图 9 所示。

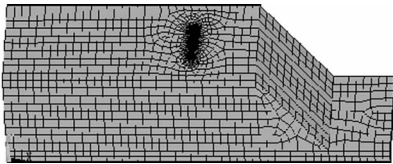


图 9 单排微型桩加固碎石土滑坡的有限元模型  
Fig.9 Finite element model of single row of micro-pile reinforcement gravel soil landslide

考虑到滑体的非线性,采用 Drucker - Prager 弹塑性模型模拟,微型桩采用线弹性模型,滑面作为刚体考虑,滑体与滑床、桩体与滑体间的摩擦系数分别为 0.3 和 0.15(表 3)。

表 3 数值模型物理参数

Table 3 Physical parameters of the numerical model

材料	重度 /( $\text{kN/m}^3$ )	弹性模量 /( $\text{MPa}$ )	泊松比 %	内摩擦角 / $^\circ$	粘聚力 /( $\text{kPa}$ )
滑体	20.96	5.06	0.3	33.0	19.79
桩	25.0	6 900	0.32	弹性材料	

3.2 数值计算结果

将加载全过程中模型底面以上 4 cm 和 15 cm 处的桩后土压力、模型底面处桩身弯矩计算结果提取出来,绘制成如图 10、图 11 所示的曲线。

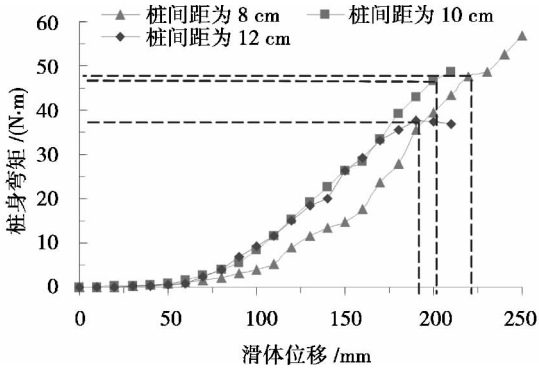
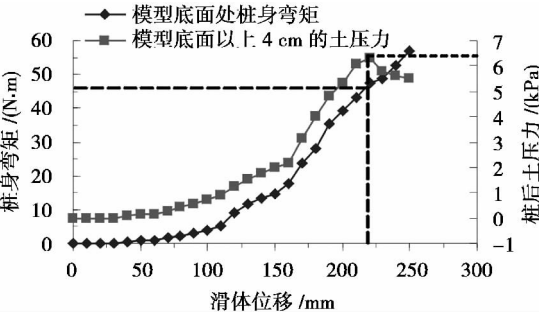
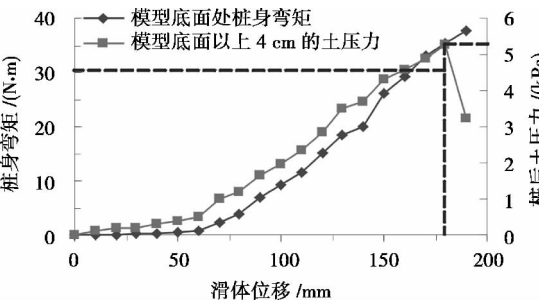


图 7 模型位移与微型桩弯矩

Fig.7 Model displacement and micro piles bending moment



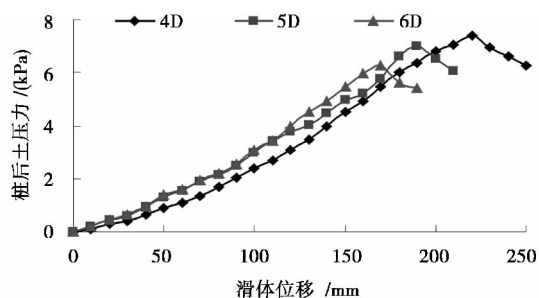
a 桩间距为 8 cm( Pile spacing 8 cm)



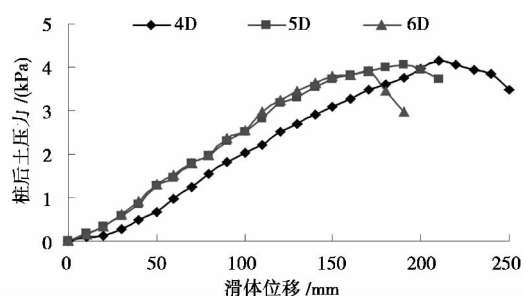
b 桩间距为 12 cm( Pile spacing 12cm)

图 8 土压力和桩身弯矩随滑体位移变化曲线

Fig.8 The soil pressure and bending moment curves with the slip



a 模型底面以上 4 cm (4 cm above the bottom surface of the model)



b 模型底面以上 15 cm (15 cm above the bottom surface of the model)

图 10 不同桩间距下桩后土压力分布曲线

Fig.10 The earth pressure distribution curves of pile under different pile spacing

数值模拟表明: 加载开始后一段时间内, 模型底面以上 4 cm、15 cm 处的桩后土压力均较小; 随着滑体的持续滑动, 桩后土压力快速增长, 桩间距越大, 桩后土压力增长幅度越大, 且越靠近模型底面, 桩后土压力增长越快。

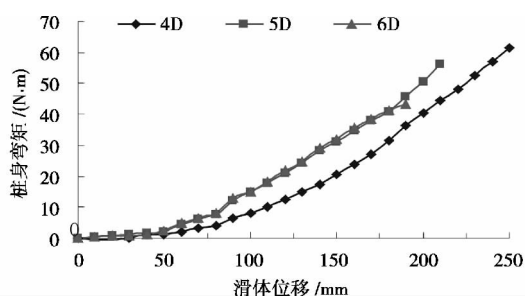


图 11 模型底面处桩身弯矩图

Fig. 11 Bending moment diagram at the bottom of the model

微型桩抗滑失效前, 相同加载条件下, 桩间距较小, 桩身弯矩相对也较小。这是由于桩间距越小, 桩对桩间土体的约束力越强, 桩后土拱效应越明显, 桩土共同作用的整体性越好。随着滑体的持续滑动, 桩间距越大, 微型桩越早发生弯曲破坏。

## 4 结论

通过对研究模型桩的力学特性和不同桩间距下

单排微型桩加固碎石土滑坡的抗滑过程, 得到以下几点认识:

1. 不同桩间距下单排微型桩桩后土压力主要集中在模型底面以上 1/3 桩身范围内。
2. 微型桩加固碎石土滑坡过程中, 桩间距较小, 土拱效应越明显, 微型桩抗滑失效的最大临界弯矩越大, 微型桩能承受的滑坡推力越大, 抗滑效果越好。即桩间距较小, 微型桩抗滑效果相对越好。
3. 试验研究表明, 在碎石中土中 4D (桩径) 桩间距是单排微型桩最佳的抗滑桩间距。

## 参考文献 (References)

- [1] Wang Gongxian. Present situation of engineering measures for preventing and controlling landslide in China and Abroad [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1): 1-9 [王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 1-9]
- [2] Kong Jiming. The model test research of breakdown process of layue landslide on the highway from Sichuan to Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(Suppl.): 133-138 [孔纪名. 川藏公路拉月滑坡破坏过程模型试验研究 [J]. 山地学报, 2003, 21(增刊): 133-138]
- [3] Lei Wenjie, Zheng Yingren, Feng xiating. Analysis of pile location on landslide control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 950-954 [雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 950-954]
- [4] Wang Shichuan, Chen Lixin, Zhang Jin. The analysis of elastic-plastic design theory of anti-slide piles (I) [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1997, 29(4): 426-429 [王士川, 陈立新, 张进. 抗滑桩的弹塑性理论分析 (I) [J]. 西安建筑科技大学学报, 1997, 29(4): 426-429]
- [5] Heyman L, Boersma L. Bending moments in piles due to lateral earth pressures [J]. Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1961, 2: 425-429
- [6] Ito T, Matsui T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles [J]. Soil and Foundations, 1975, 15(4): 43-59
- [7] Chen L, Poulos H G. Analysis of pile-soil interaction under lateral loading using infinite and finite elements [J]. Computers and Geotechnics, 1993, 15(4): 189-220
- [8] Lee C Y, Hull T S, Poulos H G. Simplified pile-slope stability analysis [J]. Computers and Geotechnics, 1995, 17(1): 1-16
- [9] Cantoni R, Collotta T, Ghionna V N, et al. A design method for reticulated micropiles structure in sliding slopes [J]. Ground Engineering, 1989, 22(1): 41-47
- [10] Gong Jian, Chen Renpeng, Chen Yunming, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3541-3546 [龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3541-3546]

## Physical Model Test of Debris Landslide Reinforcement with Single Row Micro-pile

KONG Jiming<sup>1</sup>, CAI Qiang<sup>1 2</sup>, ZHANG Yin<sup>1 2</sup>, HAN Peifeng<sup>1 2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process / Chinese Academy of Science Institute of Mountain Hazards

and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Micro-piles are widely used because of its own advantages, but relatively few theoretical studies about its anti-slide mechanism. Firstly, the mechanical properties of the model pile into calibration tests, to get of elasto-plastic session elastic modulus, were  $0.69 \times 10^4$  MPa and  $0.04 \times 10^4$  MPa. Through the different pile spacing under a single row of miniature pile reinforcement gravel soil landslide indoor model experiment to study the micro-piles against sliding mechanism. The test results show that: different pile spacing, single row of micro-pile soil pressure mainly concentrated in the range of slip surface more than 1/3 of the pile. The pile spacing is small, soil arching effect, the greater the micro pile skid failure critical moment, the micro pile can withstand landslide thrust the greater skid the better.

**Key words:** Micro-pile; Gravel soil landslide; Landslide thrust; Soil arching; Critical moment

---

### 封面照片: 祁连山之夏

门源县属青海海北藏族自治州,地处祁连山脉腹地黄河支流大通河(又称浩门河)上游河谷地带,距离省府西宁约156 km,县城所在地浩门镇。全县平均海拔约2 800 m,全县共有15万人左右,22个民族共存,其中44.7%是回族。因此,门源县全称是门源回族自治县。门源有着青海最大的油菜花基地,是西北地区的主要油料产区之一。每年的7月是油菜花盛开的季节,西起青石嘴、东到玉隆滩、北到与甘肃交界的冷龙岭、南到大坂山,油菜花绵延几十公里,整个门源顿时变成了一片金色的海洋。门源的油菜花田大多向着浩门河谷的方向倾斜,两边是金灿灿的油菜花海,中间浩门河像一条玉带在花海流淌,在蓝天白云雪山的映衬下,气势恢弘,凸显出那股铺天盖地的霸气。门源油菜花号称有近3.4万公顷,蔚为壮观,和南方小片小片油菜地不是一个概念,和贵州兴义的大片油菜花也不同。每当天气晴朗的时候,蓝天、白云、雪山、花海,壮美的景色令人叹为观止(拍摄地点:青海省海北藏族蒙古族自治州门源县,海拔2 851 m)。

(蓝永超)