

DOI: 10.11779/CJGE2020S1026

# 抗滑短桩加固土坡模型试验及数值分析

曾红艳<sup>1, 2</sup>, 韩利彪<sup>1, 2</sup>, 周成<sup>\*1, 2</sup>, 刘伟<sup>1, 2</sup>, 谭昌明<sup>3</sup>

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;  
3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 抗滑短桩作为滑坡治理的一种主动防护结构, 在工程界得到逐步应用和发展。但该结构仅适用于滑体强度明显大于滑面强度的滑坡且无浅层滑坡, 这限制了抗滑短桩的推广应用。针对抗滑短桩支护时可能出现的浅层滑坡, 共开展天然工况下3组不同加固工况(0, 18, 28 cm)的单排抗滑短桩加固无黏性土边坡的模型试验, 采用PFC2D颗粒流软件对抗滑短桩加固的土坡进行数值模拟。通过分析颗粒流土坡模型的滑体位移及滑动面的变化规律, 研究不同桩长对土坡的加固机理, 离散元数值分析计算得到的结果与模型试验接近。结果表明: 抗滑短桩能有效加固土坡, 且随着抗滑短桩长度的增加, 加固的土体范围也逐渐增加, 滑移面逐渐沿垂直坡面方向向上抬升, 当抗滑短桩长度达到一定值后, 滑移面的上升速率开始降低; 经抗滑短桩加固后的土坡仍存在浅层滑动的趋势, 若桩长过短, 滑体易出现越顶现象。对可能出现的越顶现象及浅层滑动, 建议采用抗滑短桩联合坡脚挡墙共同加固。

**关键词:** 抗滑短桩; 模型试验; 颗粒流; 数值分析; 坡土滑移

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0132-05

作者简介: 曾红艳(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: 1354194258@qq.com。

## Model tests and numerical analysis of slopes reinforced by short anti-sliding piles

ZENG Hong-yan<sup>1, 2</sup>, HAN Li-biao<sup>1, 2</sup>, ZHOU Cheng<sup>1, 2</sup>, LIU Wei<sup>1, 2</sup>, TAN Chang-ming<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Sichuan Provincial Highway Planning, Survey, design and Research Institute, Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** As an active protective structure for landslide prevention, the short anti-sliding piles have been gradually developed and applied in the engineering field. However, this kind of structure is only suitable for landslides where the strength of the sliding mass is obviously greater than that of the sliding surface, and there is also no shallow landslides. The rainfall-induced landslides are generally shallow ones, which limits the application of short anti-sliding piles. For the slopes improved by anti-sliding piles, three kinds of groups model tests are conducted under natural conditions. A single row of short anti-sliding piles are installed with different pile lengths (0, 18 and 28 cm) for reinforcing the non-cohesive soil slope. The PFC<sup>2D</sup> particle flow software is used to simulate deformation of the soil slope. By analyzing the displacement of sliding body and the variation of the sliding surface, the reinforcement mechanism of the short anti-sliding piles with different lengths in the soil slope is studied. The results calculated by the discrete element numerical analysis method are close to those of the model tests. The results show that the short anti-sliding piles can effectively strengthen the soil slopes. With the increase of the length of short anti-sliding piles, the scope of the reinforced soil gradually increases, and the slip surface gradually rises along the vertical slope direction. However when the length reaches a certain value, the rising rate of the slip surface begins to decrease. The slope reinforced by the short anti-sliding piles still has the tendency of shallow sliding. If the pile length is too short, the slope soil will easily slide over the top of the pile. For the possible slope failure of overtopping and shallow sliding, it is suggested that the short anti-sliding piles should be used together with the retaining wall at the slope toe.

**Key words:** short anti-sliding pile; model test; particle flow; numerical analysis; sliding of slope soil

## 0 引言

抗滑桩是一种常用的抗滑结构物, 近年来在一些大型复杂的滑坡治理中, 为减小桩长, 节约工程造价,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 四川省重点研发项目(2020YFS0295)  
收稿日期: 2020-06-05  
\*通信作者(E-mail: czhou@scu.edu.cn)

出现了桩顶在地面以下较深部位的抗滑短桩<sup>[1]</sup>, 又称埋入式抗滑桩。抗滑短桩由于桩长较短, 桩身内力分布合理, 截面小和配筋少等诸多优点, 具有较好的应用前景, 在中国部分地区已取得成功应用<sup>[2]</sup>。

国内学者对抗滑短桩的研究主要集中在适用条件、受力特征和桩土共同作用等方面, 开展了一系列抗滑短桩模型试验<sup>[3-4]</sup>, 利用大尺寸边坡模型研究抗滑短桩的作用机理。随着计算机技术的发展, 许多学者采用数值计算方法来了解抗滑短桩的承载机理。胡峰等<sup>[5]</sup>采用 PLAXIS 程序建立堆积体滑坡中双排抗滑桩有限元模型, 分析不同沉埋深度下前后排桩的受力及滑体内塑性区的发展变化规律; 胡时友等<sup>[6]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 对桩长变化的抗滑短桩加固碎石土滑坡全过程进行有限元模拟, 研究受力变形特征及桩土相互作用机理; 唐晓松等<sup>[7]</sup>采用强度折减法考虑桩-土之间的共同作用, 得到埋入式抗滑桩推力与抗力的分布形式。

由于抗滑短桩仅适用于滑体强度明显大于滑面强度的滑坡<sup>[8]</sup>, 且无浅层滑坡, 仅需通过对滑带及其附近土的加固即可提高整体稳定。但降雨滑坡一般都是浅层滑坡, 这就限制了抗滑短桩的推广应用。本文针对抗滑短桩支护时可能出现的浅层滑坡问题, 开展了天然工况下 3 种不同长度的抗滑短桩加固无黏性土坡的滑坡模型试验, 借助 PFC<sup>2D</sup> 颗粒流软件对经抗滑短桩加固后的滑坡模型进行数值模拟, 通过分析土坡模型的滑体位移以及滑动面的变化规律, 研究不同长度的抗滑短桩对土坡的作用机理。

## 1 抗滑短桩模型试验

模型试验装置如图 1 所示<sup>[9-10]</sup>。模型槽长 200 cm、宽 50 cm、高 58 cm, 两侧为透明玻璃壁。边坡土体厚度为 45 cm, 倾角 35°。共开展 3 组不同桩长 (依次为 0, 18, 28 cm) 的单排抗滑短桩在天然工况下加固无黏性土边坡的模型试验。

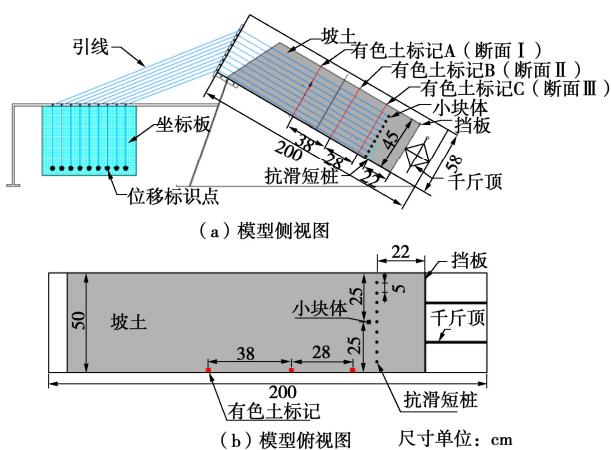


图 1 模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model test devices

### 1.1 试验材料

试验由固定于模型槽底部的 6 cm 厚的木板模拟滑床。滑坡土体由人工分层填筑夯实, 物理力学参数: 重度  $\gamma = 2.25 \text{ kN/m}^3$ , 不均匀系数  $C_u = 4.44$ , 曲率系数  $C_c = 1.11$ , 相对密度  $G_s = 2.76$ , 最大干密度  $\rho_{\text{dmax}} = 1.97 \text{ g/cm}^3$ , 最优含水率  $w_{\text{op}} = 11.93\%$ , 内摩擦角  $\varphi = 34.33^\circ$ , 黏聚力  $c = 0 \text{ kPa}$ 。填筑时为确保填筑的均匀性, 将模型边坡分三层进行填筑 (每层 15 cm), 每层填筑时又分为若干小层 (厚 5 cm), 逐层击实, 填筑完成后凿毛表面进行下一层的填筑, 保证上下填筑层接触紧密。

根据几何相似比和材料的刚度相似要求, 选取一定直径的 HPB400 钢筋模拟钢筋混凝土圆桩, 安置在距挡板 22 cm 处。通过在底板上钻孔可以固定抗滑短桩, 该排模型桩的嵌固段长度均为 3 cm, 间距 5 cm, 距玻璃边壁也为 5 cm, 具体布置见图 1 (b)。

### 1.2 边界条件

在滑坡体前缘安置挡板与千斤顶, 千斤顶一端与挡板连接成一体, 另一端固定在滑槽上, 制模前先将千斤顶伸张到最大, 让挡板达到初始预定位置。为防止模型槽内土体沿挡板流出, 在挡板底部和侧面分别设置 8 cm 宽的塑料薄膜, 使靠近挡板位置的土体不漏出并随挡板一起运动。试验时利用挡板牵引式的滑移给整个坡积体模型施加位移边界条件使坡积土发生滑动。滑坡体侧面受模型槽两侧 1 cm 厚的玻璃壁约束, 保证试验过程中滑体土只发生顺坡方向的变形。

### 1.3 数据监测

通过在坡土内埋设小块体 (边长 2 cm 的正方体木块) 并通过 PE 丝线与模型槽左侧的位移标识点连接, 两者构成受力自平衡的测量系统。将连接小块体的 PE 线穿过模型槽顶部钢板预留的小孔, 左端绕过坐标板顶部的图钉 (类似滑轮), 使其在位移标识点 (重物) 的作用下自然下垂。坡积土滑移带动小块体产生滑移, 从而带动标识点移动, 通过监测坐标板上位移标识点的位置来获得坡土内部不同深度的顺坡向位移。小块体的埋设位置如图 1 (a), (b) 所示, 垂直坡面方向小块体间距为 5 cm, 距玻璃槽前后侧壁均 25 cm。

模型槽侧壁上绘有 2 cm×2 cm 的网格, 制模时在坡土与侧壁接触的表面位置注入有色土条进行位移标记。固定相机位置, 每隔 20 s 拍照, 利用照片读取有色土条的坐标位置, 从而得到土体的变形。模型试验结果将和下文数值计算结果绘于一起进行比较分析。

## 2 模型试验的数值分析

### 2.1 颗粒流边坡模型的建立及参数

根据室内模型试验建立颗粒流模型, 见图 2 (a)。

采用半径扩大法生成4300个颗粒，孔隙率为0.2。通过给墙1（挡板）施加特定的速度，顺着墙2（底板）向下运动来模拟模型试验中挡板的移动。通过自编fish代码，设置7条间距为20 cm的有色颗粒标记带，同时在底部设相应定位墙，来观察有色标记颗粒的相对运动和坡土变形。通过颗粒流直剪试验和双轴压缩试验并经过多次试算，得到颗粒流模型试验坡土的细观参数，即摩擦系数为1.2，法向和切向刚度分别为 $5.0 \times 10^8$ ,  $2.2 \times 10^8$  N/m，最大和最小半径分别为 $8 \times 10^{-3}$ ,  $4 \times 10^{-3}$  m，内摩擦角为34.7°，黏聚力为0。

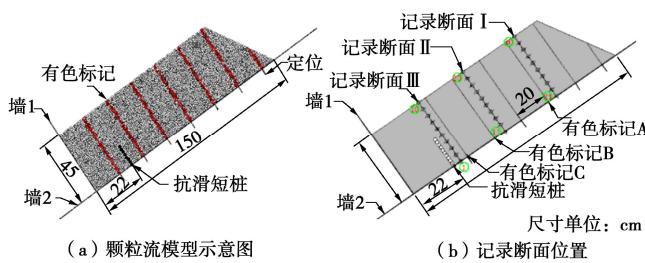


图2 颗粒流土坡模型

Fig. 2 Particle flow slope model

采用平行黏结颗粒簇模拟抗滑短桩，组成抗滑短桩的颗粒半径为0.011 m，颗粒之间采用平行黏结，半径乘子为1.0。参照前人经验，并经过多次试算，取摩擦系数为0.9，平行黏结法向与切向刚度为 $3.6 \times 10^{10}$  N/m，平行黏结法向与切向强度为 $4.3 \times 10^{15}$  Pa。

为记录坡土内部颗粒的位移，选取3个记录断面，每个断面上设置10个点，共30个监测点，用颗粒流history命令来记录坡土颗粒的位移，如图2(b)所示。其中记录断面I, II和III与模型试验中的断面对应。

## 2.2 边界处理及加载条件

颗粒流模型通过墙体和球体对模型施加边界条件。设置在模型边界静止的墙体可模拟模型受到的约束。墙体设置一定的平动和转动速度对模型进行加载，加载过程中，墙体的速度始终保持不变。本文用墙来做模型边界，一方面对坡积土进行约束，另一方面可通过给墙特定的速度来模拟挡板的平移，同时用位置固定的颗粒簇来模拟抗滑短桩对坡土的作用。参照模型试验挡板的平移速度，反复试算，给墙1施加沿墙2向下的速度为 $1.75 \times 10^{-3}$  m/s，计算1200万步。与模型试验类似，最终墙1沿墙2向下的位移为18 cm。

## 2.3 模型试验与数值分析的结果及对比分析

### (1) 不同桩长下土坡模型不同断面处的顺坡向位移分布

为对比分析不同桩长下土坡模型变形的数值模拟与模型试验结果，以各断面与坡面底板相交点为坐标原点和初始参照点，分别将边坡颗粒流模型的记录断

面I, II, III和模型试验有色土标记A, B, C断面处的顺坡向位移分布曲线绘制在图3(a), (b), (c)中。特别地，由于颗粒流数值模型中记录断面III与模型试验中小块体的埋设位置接近，将记录断面III的位移结果与坡土内的小块体位移也进行比较，见图3(d)。

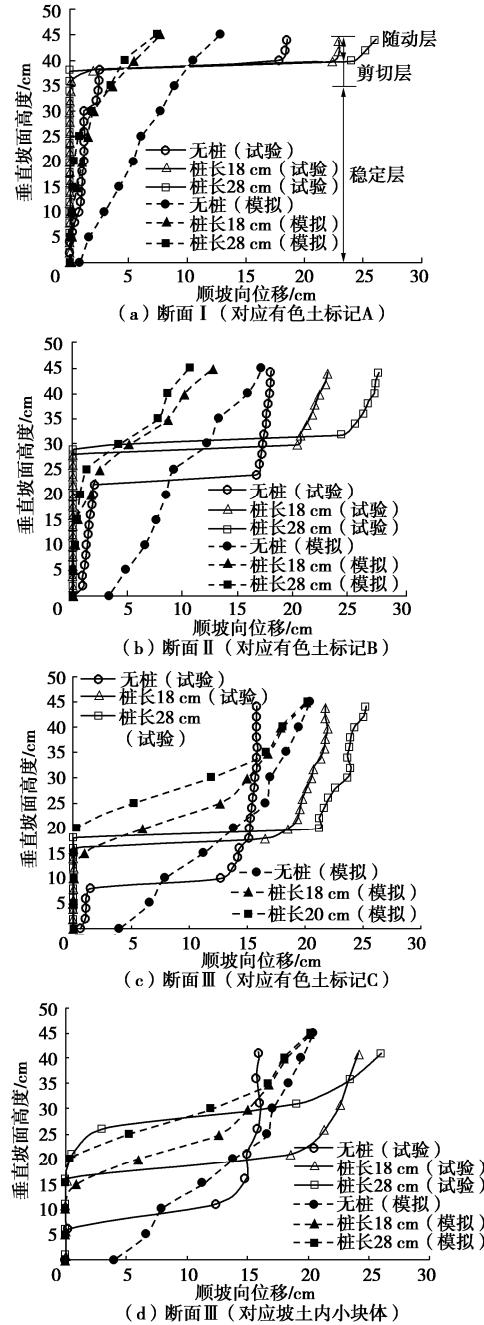


图3 数值模拟与模型试验的结果及对比

Fig. 3 Results of numerical simulation and model tests

在不同桩长下，由图3中3个断面的顺坡向位移分布可知，相对无抗滑短桩支护的情况，抗滑短桩的设置能有效加固土坡的深层土体，且随抗滑短桩长度的增长，在垂直坡面的方向稳定土体的高度逐渐增大，桩长为28 cm时稳定土体范围最大，数值模拟与模型试验结果均反映了此规律。在任一桩长下，根据3个

断面顺坡向位移曲线开始出现顺坡向位移的位置可以确定该桩长下滑移面的位置。在滑移面附近有剪切层出现, 在垂直坡面方向上, 剪切层位置随桩长的伸长向上抬升。随滑坡的进行, 同一位置的剪切层厚度发生变化, 不同位置的剪切层厚度各不相同。根据坡积土的位移特征, 自下而上可将坡土分为稳定层、剪切层和随动层, 如图 3 (a) 所示。

对比图 3 中不同断面处的数值模拟与模型试验结果可以看出: 对同一桩长, 数值分析与模型试验结果给出的顺坡向位移规律是一致的, 模型试验关于稳定层、剪切层和随动层的分界点更为明显; 对于表层土体, 数值模拟的位移值相对模型试验的明显偏小。但对于不同桩长的影响, 数值分析与模型试验结果给出的浅层位移分布规律有所不同, 数值模拟得到的土坡的浅层位移随桩长的增加而减小, 而模型试验结果则随桩长的增大而增大, 需酌情考虑软件无法考虑表层坡土的非饱和及超固结特性等的影响。另外, 在无桩时, 图 3 (b), (c), (d) 中数值模拟得到的垂直坡面方向靠近底部挡板位置的位移比模型试验测得的位移大, 主要是因为数值模拟底部颗粒相对墙体比较光滑, 而模型试验底部木板相对粗糙, 具有一定的防滑作用。

除了数值分析结果, 图 3 (c), (d) 还分别给出模型试验中有色土标记 C 与小块体法测得的位移。可以看出, 无桩和 18 cm 桩长下由小块体法绘得的顺坡向位移曲线与有色土标记 C 接近, 但 28 cm 桩长下, 小块体法得到的顺坡向位移曲线明显高于有色标记土。是因为桩长较短 (18 cm) 时, 抗滑短桩仅对坡土底部土体有阻滑作用, 底部 3~4 个小块体基本不发生顺坡向位移, 侧壁有色土条除底部原本能保持稳定的土体外, 其余部分均产生顺坡向位移, 所以无桩和 18 cm 长的桩支护时顺坡向位移曲线接近。当桩长增大, 抗滑短桩的加固范围也增大, 仅靠近坡面的小块体产生较大位移。而模型槽侧壁有色土条在滑移中受抗滑短桩的影响比坡土中的小块体小, 除原本能保持稳定的土体外, 其余土体发生顺坡向位移, 还发生垂直坡面方向高度的改变, 所以在抗滑短桩长度为 28 cm 时, 小块体法得到的顺坡向位移曲线与有色标记土 C 存在差异。另外图 3 (c)、(d) 中的数值分析结果与两种位移测定的结果也比较吻合。

## (2) 不同桩长下土坡模型的变形及滑移区分布特征

图 4,5 分别为数值分析得到的不同桩长下土坡的变形情况及位移云图, 图 6 为模型试验坡土滑动侧视图及有色土条变形图。利用这 3 个图分别分析不同桩长下土坡模型的变形及滑移区分布特征。

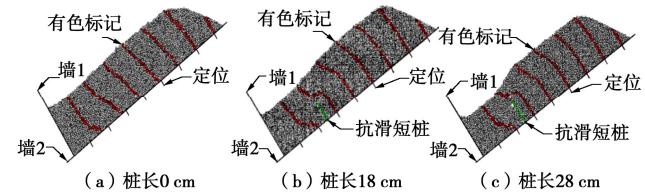


图 4 不同抗滑短桩长度下颗粒流土坡模型试验变形结果

Fig. 4 Deformations of soil slope of particle flow under different lengths of short anti-sliding piles

从图 4 看出: 随着墙 1 沿坡面向下平移, 整个坡土产生较大的变形, 墙 1 附近的有色标记土变形最大, 沿坡面向上变形逐渐减小。坡土表层位移最大, 随深度增加变形逐渐减小, 坡顶上方两个标记带的下部位移几乎为零。坡土从与墙 2 的接触位置开始滑动, 底部发生较大的剪切变形, 形成剪切层, 向上为随动层。将 3 种桩长的数值分析结果对比发现: 抗滑短桩的设置在一定程度上减小了后方土体的变形程度, 也减小了整个坡体发生滑动的范围, 对其后方土体的抗滑作用明显。从图 4 (b), (c) 中可以看出, 抗滑短桩后方第一个有色标记在抗滑短桩顶部位置出现了比较大的曲折变形, 表明坡土有越过桩顶向下滑动的趋势。

从图 5 可以看出, 挡板 (墙 1) 带动土体产生滑动, 使靠近挡板位置的土体出现明显沉陷, 并逐渐向上发展, 呈现出明显的牵引式特征。抗滑短桩的设置, 大大减小了坡土发生大变形的范围, 且随着抗滑短桩长度的增加, 变形在 0.02 m 内的土体范围逐渐增加, 抗滑短桩后方土体的变形逐渐得到控制。桩长从 18 cm 增至 28 cm, 稳定土体的范围变化不大, 抗滑短桩的加固效果并没有明显增加。经抗滑短桩加固后的土坡仍存在浅层滑移, 从抗滑短桩高度位置向上, 颗粒变形逐渐增大, 颗粒有越过抗滑短桩向下滑动的趋势。

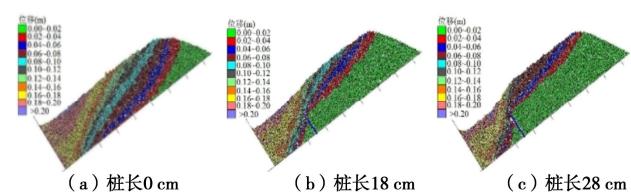


图 5 颗粒流模型试验位移云图

Fig. 5 Displacement nephogram of particle flow model test

从图 6 的模型试验结果看出, 随着抗滑短桩长度增加, 滑移面逐渐向上抬升, 稳定土体范围逐渐增大。顺坡往下, 垂直坡面方向上稳定土体的高度依次减小, 越远离坡脚挡板, 其顺坡向位移越小, 断面 III 最靠近坡脚挡板, 土体的顺坡向位移最大。表明随着坡脚挡板的平移, 坡土从靠近挡板的底部开始变形, 并逐步向上发展, 表现出牵引式破坏的特征。图 6 的模型试验结果一定程度上对数值模拟结果进行了验证。

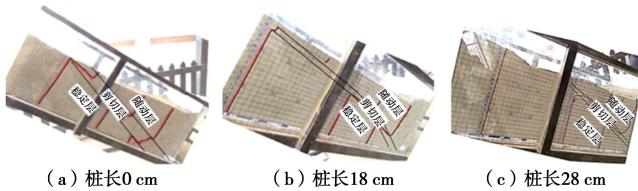


图 6 不同桩长支撑下坡土滑动侧视图及有色土条变形图

Fig. 6 Slide side view and deformation diagram of colored soil strip under different pile lengths

### 3 结 论

(1) 抗滑短桩的设置能够抑制坡土沿滑动面的整体滑移, 滑移面位置随着抗滑短桩长度增加逐渐向上抬升。随着抗滑短桩长度的增加坡积土稳定的区域逐渐增加, 继续加大桩长(由 18 cm 增至 28 cm), 其增加效果不明显。

(2) 随着坡积土坡脚挡板的平移, 坡土从坡底开始变形, 并逐步向上发展, 表现出了牵引式破坏的特征。垂直坡面方向, 根据坡积土的位移特征, 自下而上分别为稳定层、剪切层和随动层。

(3) 抗滑短桩虽然能有效加固边坡深层土体, 但浅层土体仍存在滑移现象, 实际应用时建议联合坡脚挡墙共同加固, 使边坡达到整体稳定状态。

(4) 在以后的研究中宜考虑抗滑短桩的受力与变形。另外数值分析与模型试验结果存在一定差别, 后期可改变数值模拟的底部接触状态或计算范围, 并与模型试验结果和工程边坡实例对比, 探究不同模拟方式对计算结果的影响。

### 参 考 文 献:

- [1] 雷用, 郑颖人, 陈克勤. “抗滑短桩”概念及其受力影响探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2009(3): 608 - 615. (LEI Yong, ZHENG Ying-ren, CHEN Ke-qin. Inquiring the concept and loading influence of short anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009(3): 608 - 615. (in Chinese))
- [2] 梁丰收, 何光春, 刘明维, 等. 埋入式抗滑桩在三峡库区斜坡码头岸坡中的应用[J]. 港工技术, 2009, 46(5): 17 - 19. (LIANG Feng-shou, HE Guang-chun, LIU Ming-wei, et al. Application of embedded anti-slide pile in sloping wharf of Three Gorges Reservoir region[J]. Port Engineering Technology, 2009, 46(5): 17 - 19. (in Chinese))
- [3] 蔡强, 李乾坤, 石胜伟, 等. 钢管抗滑短桩受力特性物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 679 - 684. (CAI Qiang, LI Qian-kun, SHI Sheng-wei, et al. Study of mechanical characteristics of short anti-sliding steel pipe pile by physical model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 679 - 684. (in Chinese))
- [4] 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 Ya-kun, ZHENG Ying-ren, LEI Wen-jie. Analysis of the experimental mechanism of deeply buried anti-slide pile by FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 63 - 68. (in Chinese))
- [5] 胡峰, 何坤. 沉埋式双排抗滑桩受力及沉埋深度有限元分析[J]. 路基工程, 2013(5): 152 - 154, 158. (HU Feng, HE Kun. Analysis on stress and burying depth of double-row deeply buried anti-slide piles by FEM[J]. Subgrade Engineering, 2013(5): 152 - 154, 158. (in Chinese))
- [6] 胡时友, 蔡强, 李乾坤, 等. 抗滑短桩加固滑坡体模型试验三维数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 969 - 977. (HU Shi-you, CAI Qiang, LI Qian-kun, et al. Three dimensional FEM simulation of slope reinforcement by short anti-sliding pile[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 969 - 977. (in Chinese))
- [7] 唐晓松, 郑颖人, 邱文平. 多排抗滑桩治理工程的有限元设计计算与优化[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(5): 548 - 554. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, QIU Wen-ping. FEM design and calculation in the governance engineering of anti-slide piles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 548 - 554. (in Chinese))
- [8] 雷用, 许建, 郑颖人. 抗滑短桩的适用条件研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增刊): 1647 - 1651, 1664. (LEI Yong, XU Jian, ZHENG Ying-ren. Suitable conditions analysis of short anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S2): 1647 - 1651, 1664. (in Chinese))
- [9] 韩利彪. 坡积土剪切层变形控制及生态护岸初步研究[D]. 成都: 四川大学, 2016. (HAN Li-biao. Preliminary Study on Deformation Controlling of Shearing Zone and Vegetated Revetment of Slope Soil[D]. Chengdu: Sichuan University, 2016. (in Chinese))
- [10] 刘伟. 根垫层锚拉仿生根生态护坡初步研究[D]. 四川成都: 四川大学, 2016. (LIU Wei. Preliminary Study on Artificial Roots Combined with Roots-cushion by Prestressed Cable in Biotechnical Slope Protection[D]. Chengdu: Sichuan University, 2016. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)