

微型桩组合结构模型抗滑机制试验研究

刘 鸿^{1,2}, 周德培¹, 张益峰¹

(1. 西南交通大学 岩土工程系, 成都 610031; 2. 四川理工学院 建筑工程学院, 四川 自贡 643000)

摘 要: 对以空间桁架微型桩体系的组合结构采用了分级加载的方法, 通过新的地质力学模型试验, 研究滑坡推力引起的微型桩体系内力变化规律, 并根据试验方法和空间桁架微型桩体系中各排桩的受力状态, 导出了分级加载条件下受横向约束的弹性地基梁的结构分析解。试验结果表明, 在碎石土地质条件下, 连系梁可以有效限制微型桩顶位移, 并减小桩身弯矩, 滑体中桩前土压力分布相对较为均匀, 各排微型桩桩体的弯矩大小分布比较接近, 最大弯矩位于滑面处; 基于受到横向约束的弹性地基梁的结构分析解, 可以较好地描述空间桁架式微型桩在分级加载后的内力变化及其分布规律。研究结果对正确分析微型桩的抗滑机制和微型桩抗滑设计具有较好的参考价值。

关 键 词: 微型桩组合结构; 模型试验; 抗滑机制

中图分类号: TU 42

文献标识码: A

Model test study of anti-sliding mechanism of micro-pile combined structure

LIU Hong^{1,2}, ZHOU De-pei¹, ZHANG Yi-feng¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Institute of Architecture and Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China)

Abstract: Adopting the step loading method on combined structure of spatial truss micro-pile system as supporting structure, the changing law of internal force of micro-pile system is studied by new geological mechanics model test. According to the test methods and the state of force of the space truss micro-pile system, the structural analysis solution which is under the conditions of step cyclic loading and based on the elastic foundation beam constrained laterally is deduced. The test results show that, under the conditions of the broken-rock soil, the link beam can effectively limit the micro displacement of pile top; and the moment of pile body reduced; the soil pressure distribution in front of the pile is relatively uniform in sliding body; the distribution of the moment of each row of micro-piles is relatively close to each other; the maximum moment is close to the sliding face. The structural analysis solution based on the elastic foundation beam constrained laterally deformation can describe the changing law of internal force and distribution rule of micro-pile system after step cyclic loading better. The research results have a good reference value for correct analysis of anti-sliding mechanism and anti-sliding design of the micro-pile.

Key words: micro-pile combined structure; model test; anti-sliding mechanism

1 引 言

微型桩及其组合结构作为一门新型的、正在迅速发展的岩土工程支护技术。对于小型滑坡及地基加固工程, 由于施工时仅需要轻型施工机具, 布桩灵活, 施工进度快, 对施工场地的适应性强和对环境影响小, 因此, 在地基加固、滑坡治理等领域得到了广泛应用, 并引起了业界的广泛关注和研究, 但对其抗滑机制及其相关设计理论还很不成熟, 并

严重滞后于工程应用^[1-10]。

微型桩及其组合结构的力学性能与其支护结构形式及加载方式存在较大关系, 目前主要采用独立微型桩体系、平面桁架微型桩体系、空间桁架微型桩体系、顶板连接式微型桩组合结构等结构形式, 并主要用以承担侧向或竖向荷载^[9-11], 在以往相关研究中, 主要讨论的是竖向承载作用的微型桩结构^[2, 9], 而对承受侧向荷载作用的微型桩结构深入研究较少, 微型桩体系和桩间岩土体间的传力机制往

往借助于数值模拟较多，而试验研究开展的较少，这就为本文的研究提供了契机。

目前国内外在微型桩体系的抗滑模型试验研究方面做得很少，闫金凯等^[3]开展了滑坡介质为黄土条件下的空间桁架微型桩体系抗滑机制的模型试验研究，在滑坡推力作用下，各排微型桩所受到的滑坡推力呈上小下大的三角形分布，且桩身最大弯矩位于滑面附近处；周德培等^[4]，肖维民^[5]，吴文平^[6]开展了顶板连接式微型桩组合结构抗滑机制的模型试验研究，在滑坡推力作用下，各排微型桩均能承担较大的弯矩，其中靠近加载装置的后排桩承担的弯矩最大，其余两排桩承担的弯矩相对较小。在微型桩组合结构的抗滑机制研究方面，肖世国等^[9]开展了有关顶板连接式微型桩组合结构抗滑机制的理论研究，并根据桩-岩土复合体效应，在滑坡推力作用下，各排微型桩所受到的滑坡推力呈上小下大的三角形分布，且各排微型桩桩身最大弯矩位于滑面附近处。冯君等^[10]开展了平面桁架微型桩体系及空间桁架微型桩体系抗滑机制的理论研究，在滑坡推力作用下，各排微型桩所受到的滑坡推力呈矩形分布，且各排微型桩桩身最大弯矩位于滑面附近处。

为了更好地探讨微型桩组合结构的抗滑机制，笔者研制了一种新的、可进行分级加载的试验装置，通过对近 10 种材料的试验筛选，找到了能够模拟滑坡介质的模型材料，形成了一套新的试验方法；通过分级加载模型试验，以研究加载过程中各排微型桩所受到的滑坡推力的分布，以及各排微型桩桩身弯矩的变化特点及其分布模式，并从理论上导出了空间桁架微型桩体系在分级加载条件下各排微型桩的内力分布的结构分析解。这些研究结果对于人们从分级加载的角度来认识微型桩组合结构的抗滑作用机制是很有益的。

2 模型试验

2.1 模型材料与测点布置

模型试验以碎石土为滑坡介质，碎石土的粒径组成及其比例如表 1 所示，采用双层聚乙烯塑料薄膜拟滑面，滑床为预先埋设好的 C30 混凝土，并采用施加水平荷载的方式使滑坡体滑动。模型系统的测点布置，通过安装在微型桩前、后及滑体中的压力盒监测微型桩的受力情况；通过安装在桩顶和滑坡前缘土体中的位移计观测微型桩的变形情况；通过成对粘贴于微型桩主筋上的应变片测试微型桩桩身弯矩。根据试验结果确定微型桩的承载机制、受

力情况，地质力学模型试验系统示意图如图 1 所示，原型与模型之间的几何尺寸相似比为 $c_l = 10$ ，碎石土重度相似比 $c_\gamma = 1$ ，其余各主要物理量的相似比可按照相似理论导出。

表 1 模型材料的粒径组成及其比例
Table 1 The composition and proportions of grain size of model material

土体粒径 / mm	质量 / g	百分比 / %
0~0.074	18.235	1.60
0.074~0.100	79.190	7.00
0.100~0.250	83.145	7.30
0.250~0.500	84.738	7.50
0.500~1.000	120.190	10.62
1.000~2.000	168.962	14.92
2.000~5.000	220.346	19.46
5.000~10.000	285.361	25.20
≥10.000	72.071	6.40

2.2 试验设备

试验均采用地质力学模型试验系统进行，该系统主要由模型箱、测量系统及加载装置等组成（见图 1）。试验采用的钢制模型箱纵向长为 3.0 m，净宽为 1.8 m，高为 1.1 m。滑体在滑坡推力作用时会受到模型箱纵向侧壁的摩擦力作用，为降低摩擦系数，在模型箱的侧壁铺设了单层塑料薄膜。采用横截面为 12 mm×4 mm、长为 1 200 mm 的钢条模拟钢筋，放入 $\phi 15$ mm 的 PVC 管并在其中浇注水泥：砂 = 1:2 的水泥砂浆而形成微型桩，桩顶用横截面为 4 cm×3 cm 的 C30 混凝土框架梁模拟连系梁。如图 1(c)所示，应变片的间隔为 10 cm，并粘贴在经过注浆体轴线的纵剖面上。用塑料布盖严以防止水分的蒸发，并保证模型土体含水率基本相同。

测量系统包括测量元件和数据采集系统。试验中采用的测量元件包括电阻应变片、SZZX 型振弦式压力盒和 YHD-100 型位移传感器。电阻应变片试验数据及压力盒试验数据由 DH3816 静态应变仪采集。采用了型号为 BE120-5AA 的金属电阻应变片，以测定模型微型桩主筋的应变变化，在每个测点只粘贴一个应变片，与 DH3816 静态应变测量系统采用半桥接法进行电路连接，土压力盒与 DH3816 静态应变测量系统采用全桥接法。

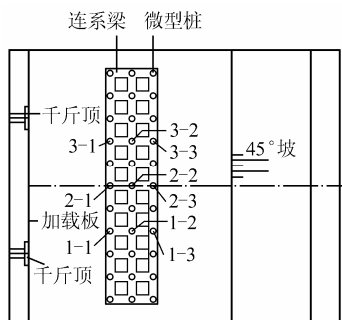
2.3 加载方式与数据采集

为了研究空间桁架微型桩体系在滑坡推力作用下，滑坡推力在各排微型桩间的力学传递机制，本文采用了分级加载方式，即采用两台液压千斤顶同

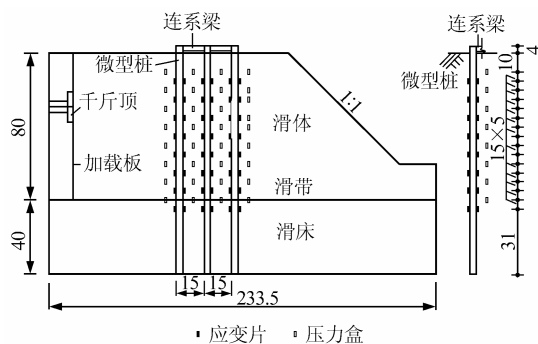
步施加水平荷载以模拟滑坡推力。两台千斤顶的压力 F 作用在加载板上, 加载板的面积 $A = 1.5 \text{ m}^2$, 通过加载板施加在模型土体上的水平应力为 $q = F/A$ 。本次试验采用分级加载的模式进行, 共分 8 级, 每一级荷载保持约 3 min 后再施加下一级荷载, 表 2 给出了各级荷载下的 q 值。



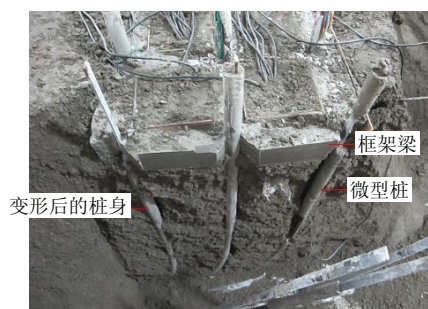
(a) 地质力学模型试验系统



(b) 微型桩平面布置图



(c) 微型桩剖面及测点布置图 (单位: cm)



(d) 变形后的微型桩实物照片

图 1 地质力学模型试验系统示意图

Fig.1 Sketches of geomechanics model test system

表 2 各级加载后的 q 值

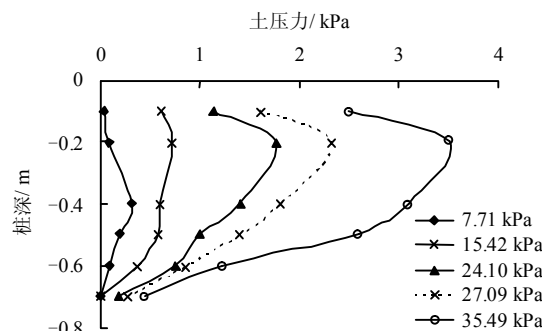
Table 2 Loading parameter values of the grading loading

级数	滑坡推力 / kPa	级数	滑坡推力 / kPa
1	7.71	5	35.49
2	15.42	6	41.74
3	24.10	7	46.53
4	27.09	8	54.23

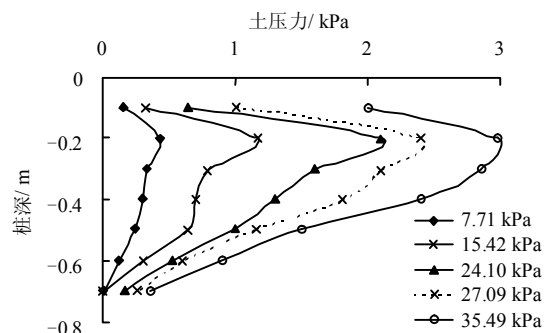
3 试验结果与分析

3.1 土压力试验测试结果分析

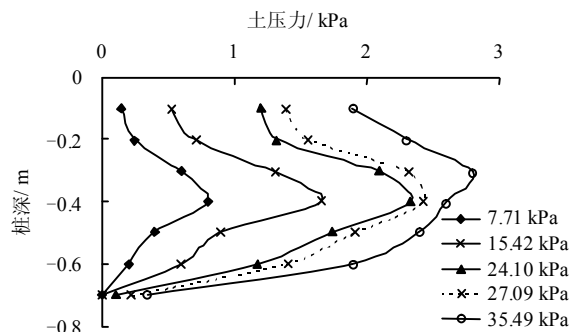
由图 2 可以看出, 当模拟的滑坡推力为 7.71 kPa, 且荷载不大时, 随着分级加载的进行, 各排桩的桩后土压力沿深度方向的分布曲线均有一拐点, 对滑坡体施加滑坡推力 7.71 kPa 后, 引起了 1~3 排桩桩后土压力的显著增大, 各排桩桩后土压力峰值分别出现在深度为 $-0.2 \sim -0.4 \text{ m}$ 附近; 当模拟的滑坡



(a) 2-1 号桩后土压力



(b) 2-2 号桩后土压力



(c) 2-3 号桩后土压力

图 2 第 1~3 排桩所受土压力分布图

Fig.2 The distributions of the soil pressure of 1-3 row

推力为 15.42 kPa 或更大的滑坡推力时, 第 1~2 排桩桩后土压力峰值出现在深度为 -0.2 m 附近, 同时, 在 -0.2~-0.8 m 的范围内, 各排桩桩后土压力随着深度的增加而逐渐减小, 并在滑面附近趋于最小值。第 3 排桩桩后土压力峰值出现在深度为 -0.3~-0.4 m 附近, 同时, 在 -0.4~-0.8 m 的范围内, 各排桩桩后土压力随着深度的增加而逐渐减小, 并在滑面附近趋于最小值。对同一排桩(如 1-1、2-1 和 3-1 号桩)在相同深度的桩后土压力量测结果进行统计分析, 其标准差值在 0~0.15 kPa 的范围内。

3.2 微型桩桩身弯矩测试结果分析

试验完毕后对微型桩水泥砂浆内部以及水泥砂浆和模拟钢筋界面的监测, 发现界面未发生可见破坏。依据梁的横力弯曲理论及虎克定律, 可得到桩身弯矩的计算公式为

$$M(y) = W\sigma = WE_s(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2 \quad (1)$$

式中: $M(y)$ 为距离桩顶 y 点处微型桩受到的弯矩; W 为桩身横截面的抗弯截面系数; σ 为微型桩横截面受到的正应力; E_s 为钢筋的弹性模量; ε_1 为微型桩桩后的桩身应变; ε_2 为微型桩桩前桩身应变。

图 3 为实测桩身弯矩图, 由图可以看出, 当模拟的滑坡推力荷载不大时, 随着分级加载的进行, 各排桩桩身弯矩沿深度方向有所增大, 当施加滑坡推力为 7.71 kPa 后, 引起了 1~3 排桩的桩身弯矩显著增大, 各排桩的桩身弯矩峰值出现在滑面附近处; 当施加滑坡推力为 15.42 kPa 后, 1~3 排桩的桩身弯矩增量较大, 并具有 0 点, 位于深度为 -0.3 m 处, 在 0 点以下出现反向弯矩。随着荷载的增大, 呈现出以下曲线特征: 桩身弯矩峰值迅速增大, 且沿深度方向增加的速率加快, 在深度为 -0.75 m 处桩身弯矩值达到 0.42 kN·m。以上特征与后面式 (8) 分析结果相似, 可以使用这种函数对桩身弯矩进行曲线拟合。

通过对同一排桩在相同深度的桩身弯矩量测结果进行统计分析, 其标准差值在 0~0.20 kN·m 的范围内。

4 弹性地基梁受横向约束时的结构分析解

4.1 基本方程

结合滑坡推力作用下微型桩桩后土压力和微型桩水平位移的分布模式, 并应用反演理论、空间桁架微型桩体系与滑坡体的共同作用原理对试验结果进行分析, 可按照图 4 所示的平面刚架结构^[4]进行

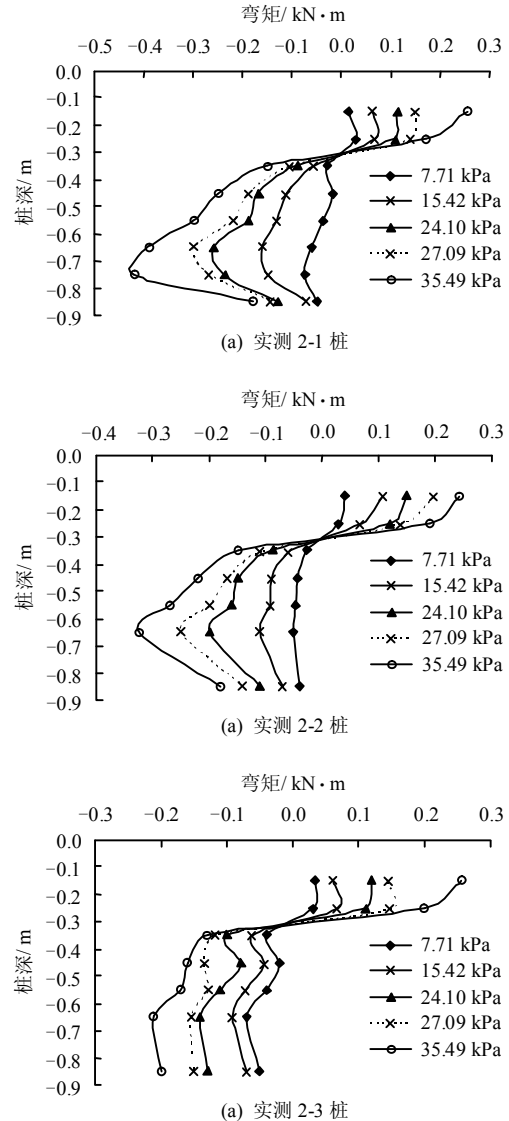


图 3 实测桩身弯矩图

Fig.3 The distributions of the measured moment of micro-pile body

分析, 并假定: 各微型桩在滑面以下的部分均嵌固在基岩内, 滑面处为固定端; 滑坡推力以均布荷载形式作用在微型桩组合结构上, 其滑坡推力分布集度为 q ; 各微型桩与连系梁的连接均为刚性连接; 假设受横向约束的弹性地基梁在考虑桩-土相互作用时满足温克尔计算模型假定。根据这些假设, 本文导出了各排微型桩所受到的弯矩、剪力及地基抗力的计算公式。

(1) 如图 5(b)所示, 当单根微型桩桩端 A 仅旋转单位角度, 即 $z_1=1$ 弧度时, 桩端 A 受到的弯矩 $M_{0\theta=-1}$ 和截面剪力 $Q_{0\theta=-1}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_{0\theta=-1} &= -\frac{K}{2\alpha^3} \frac{\varphi_2\varphi_3 - \varphi_1\varphi_4}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} \\ Q_{0\theta=-1} &= -\frac{K}{2\alpha^2} \frac{2\varphi_1\varphi_3 - \varphi_2^2}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中:

$$\varphi_1 = \text{ch}(\alpha x) \cos(\alpha x)$$

$$\varphi_2 = \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) + \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)$$

$$\varphi_3 = \text{sh}(\alpha x) \sin(\alpha x)$$

$$\varphi_4 = \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) - \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)$$

式中: K 为弹性地基系数; α 为微型桩的弹性标值, 根据各微型桩在顶端点 A 、 C 和 E 处的弯矩, 可求出作用在顶梁上的弯矩。

(2) 如图 5(b)所示, 当单根微型桩桩端 A 仅发生单位水平位移, 即 $z_4 = 1$ 时, 桩端 A 受到的弯矩 $M_{0y=1}$ 和截面剪力 $Q_{0y=1}$ 分别为

$$M_{0y=1} = \frac{K}{2\alpha^2} \frac{2\varphi_1\varphi_3 + \varphi_4^2}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} \quad (3)$$

$$Q_{0y=1} = -\frac{K}{\alpha} \frac{\varphi_3\varphi_4 + \varphi_1\varphi_2}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} \quad (4)$$

(3) 如图 5(a)所示, 基本结构中各单根微型桩桩顶端 A 在滑坡推力 q (需考虑滑床摩阻力对组合结构所受滑坡推力的影响) 作用下产生的固端弯矩及固端剪力分别为

$$M_{0q} = \frac{q}{2\alpha^2} \frac{2[1-\varphi_1]\varphi_3 - \varphi_4^2}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} \quad (5)$$

$$Q_{0q} = \frac{q}{\alpha} \frac{\varphi_3\varphi_4 - \varphi_2[1-\varphi_1]}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} \quad (6)$$

(4) 当基本结构的各节点在滑坡推力作用下发生位移 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 时 (见图 6), 根据叠加原理及结构的刚度方程, 可得

$$\left. \begin{aligned} r_{11}z_1 + r_{12}z_2 + r_{13}z_3 + r_{14}z_4 + R_{1P} &= 0 \\ r_{21}z_1 + r_{22}z_2 + r_{23}z_3 + r_{24}z_4 + R_{2P} &= 0 \\ r_{31}z_1 + r_{32}z_2 + r_{33}z_3 + r_{34}z_4 + R_{3P} &= 0 \\ r_{41}z_1 + r_{42}z_2 + r_{43}z_3 + r_{44}z_4 + R_{4P} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $r_{11} = M_{0\theta=-1} + 4i = -\frac{K}{2\alpha^3} \frac{\varphi_2\varphi_3 - \varphi_1\varphi_4}{2\varphi_3^2 - \varphi_2\varphi_4} + 4i$, i 为

连系梁 AC 或 CE 的线刚度; $r_{12} = r_{21} = r_{23} = r_{32} = 2i$; $r_{13} = r_{31} = 0$; $r_{14} = r_{41} = -Q_{0\theta=-1}$; $r_{22} = 8i + M_{0\theta=-1}$; $r_{33} = M_{0\theta=-1} + 4i$; $r_{24} = r_{34} = M_{0y=1}$; $r_{42} = r_{43} = -Q_{0\theta=-1}$; $r_{44} = -3Q_{0y=1}$; R_{1P} 、 R_{2P} 及 R_{3P} 为基本结构各节点在外荷载作用下的固端弯矩; R_{4P} 为固端剪力。

(5) 当基本结构的单根微型桩桩顶受到桩端弯矩 M_0 、桩端剪力 Q_0 作用并发生位移 z_j 、 z_4 时 ($j = 1, 2, 3$, 分别表示图 4 中的微型桩 AB 、 CD 和 EF), 桩深 x 处的弯矩 M 、剪力 Q 及地基抗力 σ 分别为

$$\begin{aligned} M &= z_4 \frac{K}{2\alpha^2} \varphi_3 + z_j \frac{K}{4\alpha^3} \varphi_4 + M_{j0} \varphi_1 + \\ &Q_{j0} \frac{1}{2\alpha} \varphi_2 - \frac{q}{2\alpha^2} \varphi_3 \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$M_{j0} = M_{0\theta=-1} z_j + M_{0y=1}^j z_4 + R_{jp}$$

$$Q_{j0} = Q_{0\theta=-1} z_j + Q_{0y=1}^j z_4 + R_{4p}^j$$

式中: $M_{0y=1}^j z_4$ 、 $Q_{0y=1}^j$ 分别为图 4 中 AB 、 CD 和 EF 微型桩的 A 、 C 和 E 桩端受到的弯矩 $M_{0y=1}$ 和截面剪力 $Q_{0y=1}$; R_{jp} 为上述桩端在外荷载作用下的固端弯矩; R_{4p}^j 为其固端剪力。

$$Q = z_4 \frac{K}{2\alpha} \varphi_2 + z_j \frac{K}{2\alpha^2} \varphi_3 - M_{j0} \alpha \varphi_4 + Q_{j0} \varphi_1 - \frac{q}{2\alpha} \varphi_2 \quad (9)$$

$$\sigma = k \left(z_4 \varphi_1 + z_j \frac{1}{2\alpha} \varphi_2 \right) - \frac{2\alpha^2 M_{j0} \varphi_3 + \alpha Q_{j0} \varphi_4 - q(1 - \varphi_1)}{b} \quad (10)$$

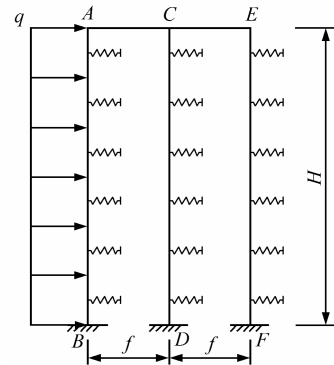
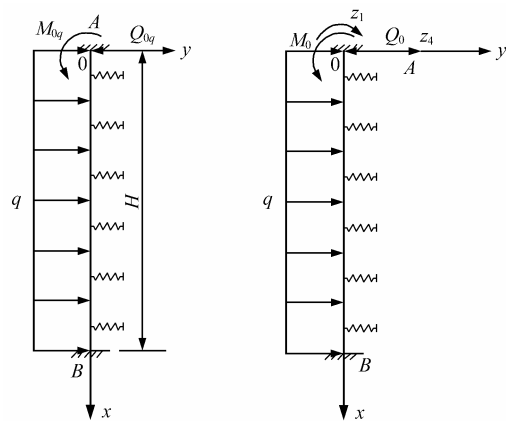


图 4 微型桩组合结构的计算分析模型

Fig.4 The analysis model of the combined structure



(a) 单根微型桩受力图

(b) 单根微型桩桩端条件

图 5 单根微型桩的计算模型

Fig.5 Calculation model of single micro-pile

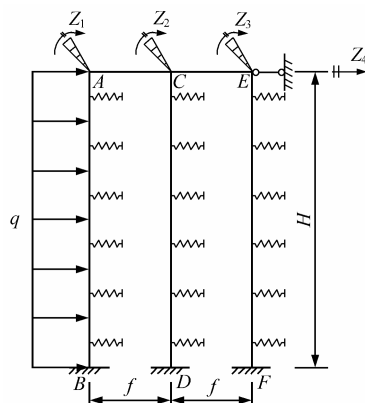


图 6 基本结构
Fig.6 The basic structure

取 $i = 15.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, $H = 0.8 \text{ m}$, 微型桩排距 $f = 0.15 \text{ m}$, 滑坡体碎石土的基床系数 $k = 8.0 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$, 弹性地基系数 $K = 9.6 \sim 1.6 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$, 弹性特征值 $\alpha = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} = 1.21 \sim 2.44 \text{ m}^{-1}$, 滑

坡推力 q 同表 2 一致, 滑坡基床系数 $k = 1.2 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$, 弹性地基系数 $K = 1.44 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$, 弹性特征值 $\alpha = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} = 22.75 \text{ m}^{-1}$, 并利用了 MATLAB 软

件编程分析, 得到了各排微型桩桩身弯矩、桩后土体抗力分布的理论分析结果, 分别如图 7、8 所示。

4.2 桩身弯矩分布规律研究

对比图 3、7, 当模拟的滑坡推力荷载不大时, 理论和实测分析结果均表明, 随着分级加载的进行, 在滑坡体范围内, 各排桩桩身弯矩沿深度方向有所增大, 当施加的滑坡推力为 7.71 kPa 后, 引起了 1~3 排桩的桩身弯矩显著增大, 各排桩的桩身弯矩峰值出现在滑面附近处; 当施加的滑坡推力为 15.42 kPa 后, 1~3 排桩桩身弯矩增量较大, 并具有 0 点, 在 0 点以下出现反向弯矩。但理论与实测分析结果也有所差别, 主要表现在: 在滑坡体范围内, 理论分析与实测的 0 点位置相比有所下移, 位于深度为 -0.45 m 处; 当施加的滑坡推力相同时, 1~3 排桩桩身弯矩的理论分析结果变化速率均加快, 较实测分析结果有所不同, 前者在抗滑段及锚固段弯矩的变化速率均加快, 尤其是抗滑段位于滑面上 $-0.45 \sim -0.80 \text{ m}$ 范围的桩身弯矩变化较大。因此, 在进行微型桩结构的理论分析时, 不能仅将桩身弯矩峰值所在的断面作为危险断面分析对象, 还应扩大抗滑段的截面验算范围。

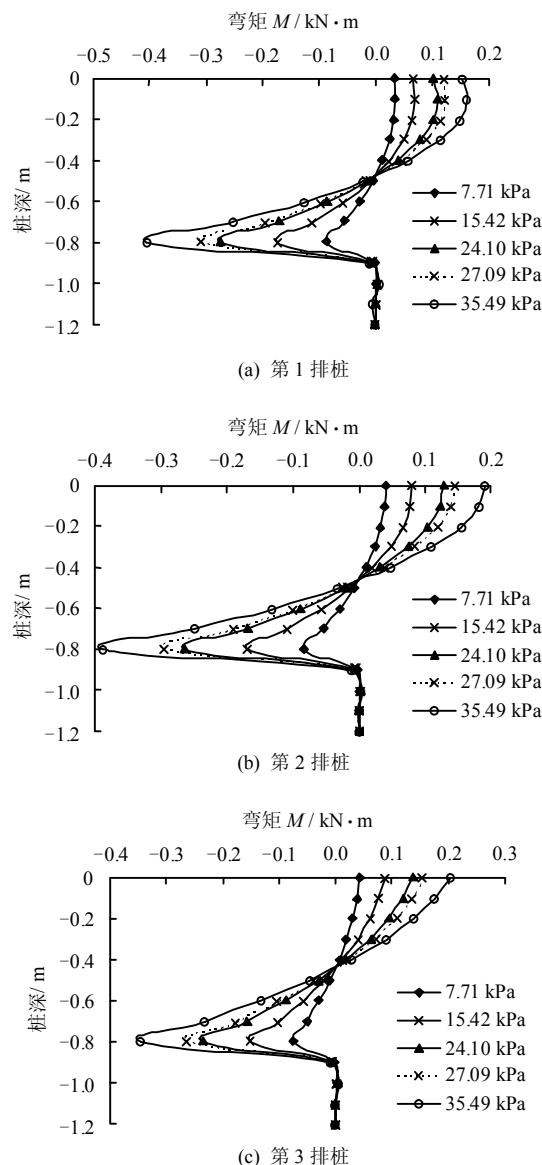


图 7 微型桩桩身弯矩分布理论解
Fig.7 The distributions of theoretical solution of the moment of micro-pile body

4.3 土体压应力分布规律的研究^[12]

对比图 2、8, 当模拟的滑坡推力荷载不大时, 理论和实测分析结果均表明, 随着分级加载的进行, 在滑坡体范围内, 各排桩受到的土体抗力沿深度方向有所减小, 当施加滑坡推力为 7.71 kPa 后, 在深度为 $0 \sim -0.7 \text{ m}$ 范围内, 引起了 1~3 排桩受到的土体抗力显著增大, 各排桩的土体抗力峰值出现在桩顶附近, 0 点位于滑面处; 当施加滑坡推力为 15.42 kPa 后, 1~3 排桩受到的土体抗力增量较大, 土体抗力沿深度方向变化速率有所加快, 并在滑面趋于 0 点。对比图 2(b)与图 8(a)、图 2(c)与图 8(b), 在 $-0.4 \sim -0.8 \text{ m}$ 的范围内, 各排桩桩前土压力随着深度的增加而逐渐减小, 并在滑面附近趋于最小值。可以看出, 理论与实测分析结果也有所差别,

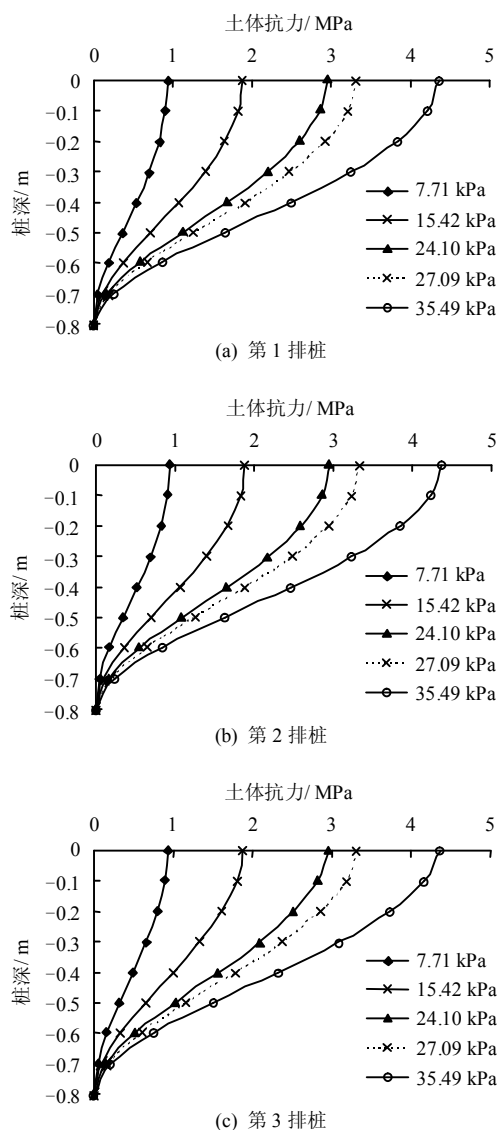


图8 第1~3排桩土体抗力分布理论解
Fig.8 The distributions of theoretical solution of soil resistance

主要表现在：理论分析结果的峰值在桩顶附近，而实测分析结果的峰值在深度 $-0.2 \sim -0.4$ m附近；前者为单调递减分布，而后者分布曲线出现了拐点。产生差别的原因：一方面在于理论分析假定地基为均质弹性体，而实际地基受到桩-土相互作用时，位于地表的土体由于受到的重力值较小，根据摩尔-库仑定律，即使有较大的水平应力作用，位于地表的土体极易发生剪切破坏，为使加载过程中桩后岩土体不发生剪切破坏，需要较大的重力作用，因此，实测分析结果的峰值在一定深度处；另一方面在于土体抗力的计算位置和桩后土压力测点距离桩身水平距离也有所不同，桩后土压力测试结果仅能近似反映土体抗力的分布特点。因此，在进行微型桩结构的理论分析时，有必要适当降低滑坡体在地表的基床系数来进行理论分析。

5 结论

(1) 空间桁架微型桩体系，其抗滑机制除了表现在微型桩组合结构增强了滑面的抗剪能力外，各排微型桩也受到了较大的弯矩和土体抗力作用，因此桩-土共同作用形成的抗滑体还具有较强的联合抗压和抗滑能力。

(2) 空间桁架式微型桩组合结构可按本文提出的采用受横向约束的平面刚架结构进行简化计算，基于受到横向约束的弹性地基梁的结构分析解得到了各排微型的桩身弯矩和土体抗力，并结合试验分析，由此形成的设计计算方法可得出较为合理的计算结果。

参考文献

- [1] KEELEY J, GRONECK P, SHARMA T, et al. Micropile design and construction guidelines implementation manual[R]. [S. l.]: [s. n.], 2000.
- [2] 吕凡任, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99—105.
LÜ Fan-ren, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(3): 99—105.
- [3] 闫金凯, 殷跃平, 门玉明, 等. 滑坡微型桩群桩加固工程模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4): 120—128.
YAN Jin-kai, YIN Yue-ping, MEN Yu-ming, et al. Model test study of landslide reinforcement with micropile groups[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(4): 120—128.
- [4] 周德培, 王唤龙, 孙宏伟. 微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1353—1362.
ZHOU De-pei, WANG Huan-long, SUN Hong-wei. Micro-pile composite structure and its design theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1353—1362.
- [5] 肖维民. 微型桩结构体系抗滑机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] 吴文平. 抗滑微型桩组合结构的计算理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [7] 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.