

微型桩群桩支护滑坡的地震动力响应研究

李楠, 门玉明, 高讴, 李坚, 刘雪玲

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 依托大型振动台进行微型桩群桩支护滑坡和无桩滑坡 2 组物理模型试验。采用 El Centro 波、汶川波、Kobe 波以及不同频率的正弦波作为输入地震波, 通过监测滑坡不同位置的加速度、桩身前后土压力及桩身应变等, 分析地震作用下 2 组滑坡的加速度响应规律、桩身前后土压力分布特征、桩身受力情况及破坏模式等。试验结果表明: 微型桩群桩支护结构可有效提高滑坡的抗震性, 对传播至滑坡体的地震波有一定阻滞作用, 尤其是坡脚附近, 但随着高程的增大, 这种阻滞作用趋于减弱。地震引发的桩后滑坡推力和桩后滑床抗力呈上小下大的“正三角形”分布, 桩前滑体抗力和桩前滑床抗力呈上大下小的“倒三角形”分布。地震作用时桩体弯矩峰值呈“M”型分布, 其最大弯矩点位于滑面上 1.4 倍桩径处和滑面下 6.6 倍桩径处, 随着加载量级的增大, 滑面上部最大弯矩点上移至 3.7 倍桩径处。地震激励后微型桩的损伤特征和破坏模式与静力情况类似, 呈反“S”型分布, 破坏区域主要集中在滑面上 1.4~4.0 倍桩径范围内以及滑面下 1.4~3.4 倍桩径范围内。

关键词: 边坡工程; 滑坡; 微型桩; 振动台试验; 动力响应

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)09 - 2144 - 08

Seismic behavior of the landslide supported by micropiles

LI Nan, MEN Yuming, GAO Ou, LI Jian, LIU Xueling

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Shaking table tests were performed to model two landslides (micropiles reinforced landslide and unreinforced landslide). El Centro waves, Wenchuan waves, Kobe waves and sinusoidal waves with different frequencies were applied respectively. Acceleration response of landslides, dynamic earth pressure distribution in front and back of micropiles, the stress condition and failure mode of micropiles were monitored and analyzed respectively. The results indicate that micropiles have a good seismic performance for landslide, and it can suppress the seismic wave propagating through the landslide, especially at the toe of landslide, however, the suppression decreases with the height. For the dynamic earth pressure distribution in the back of micropiles, the pushing force of sliding mass and the resisting force of sliding bed is distributed triangularly (small at the upper part and large at the lower part). For the earth pressure distribution in front of micropiles, the resisting force of sliding mass and the pushing force of sliding bed is distributed triangularly (large at upper part and small at lower part). The peak bending moment of micropile shows an “M” shape. The maximum bending moment point is near the place 1.4 times of pile diameter above the sliding surface and 6.6 times of pile diameter below the sliding

收稿日期: 2018 - 03 - 15; **修回日期:** 2018 - 06 - 04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572261); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(310826175029, 310826171016)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41572261) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. 310826175029 and 310826171016)

作者简介: 李楠(1990 -), 女, 2013年毕业于滨州学院安全工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地质灾害及建筑安全方面的研究工作。E-mail: linan1990111@163.com。通讯作者: 门玉明(1957 -), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: dcmenym@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0237

surface under earthquake, and the maximum bending moment point above the sliding surface moves up to the place 1.4 times of pile diameter with the increasing of loading amplitude. The failure characteristics of micropile after earthquake shows a reverse “S” shape, which is similar to that under static load conditions. The destruction area of micropile is distributed mainly in the place 1.4 - 4.0 times pile diameter above the sliding surface and 1.4 - 3.4 times pile diameter below the sliding surface.

Key words: slope engineering; landslide; micropile; shaking table test; dynamic response

1 引言

微型桩是采用钻孔、强配筋和压力注浆施工的小口径灌注桩，多数为成群布置，桩径一般小于 300 mm，长细比大于 30^[1]。因其具有占地面积小、对土层适应性强、振动噪声小、施工简单方便等优点，近年来在边坡及滑坡治理工程中得到越来越多的应用^[2-3]。目前关于静力作用下边坡(滑坡)微型桩的研究已取得丰硕成果^[4-6]，而对于地震作用下微型桩支护滑坡的动力响应研究较少。因此，有必要研究微型桩支护边坡(滑坡)的地震动力响应，以揭示微型桩内力变化规律，为微型桩防治滑坡抗震设计提供理论和试验依据。

研究地震作用下微型桩支护边坡(滑坡)响应的主要方法有数值模拟、理论分析和模型试验等。数值模拟方面，杨静^[7]采用 FLAC^{3D} 研究了不同微型桩结构形式支护边坡的动力响应特性。王栋^[8]采用 PLAXIS 对桩顶、桩底在不同约束条件下的地震响应进行了系统分析。R. Noorzad 和 G. R. Saghae^[9]利用 PLAXIS 研究了地震作用下倾斜微型桩动力响应。理论分析方面，徐小林等^[10-11]基于弹性地基梁分析方法，研究了滑坡体微型桩组合结构对地震力的特殊响应。

纵观现阶段的研究，有关滑坡微型桩动力响应的研究主要集中在数值模拟和理论分析两方面，模型试验相对较少。牛文庆^[12]基于振动台模型试验，研究了地震作用下“人”字形微型桩和平行体系微型桩支护边坡的地震响应，初次获得了宝贵的试验资料，为后续研究提供了有益的思路和帮助。但通过对比原始滑坡(无桩滑坡)和微型桩加固滑坡地震响应特征来揭示微型桩抗震机制的研究几乎未见报道。鉴于此，本文依托大型振动台，以均质土滑坡为研究对象，进行微型桩群桩支护滑坡和无桩滑坡 2 组物理模型试验。通过对比分析，研究了地震作用下微型桩支护滑坡的加速度响应规律、微型桩桩身前、后土压力分布特征、微型桩受力情况及

破坏模式等，揭示了微型桩支护滑坡的抗震机制，为地震区滑坡防治微型桩设计提供了试验依据。

2 振动台试验方案设计

地震模拟振动台采用西安建筑科技大学结构实验室的三维六自由度振动台触发体系。台面尺寸：4.1 m×4.1 m，最大负荷量 20 t，工作频率 0.1~100 Hz，最大加速度：水平 X 向为±1.5 g、水平 Y 向和竖向为±1.0 g。

模型箱为普通刚性模型箱，内部净空尺寸为 2.6 m×1.4 m×1.67 m(长×宽×高)，骨架由钢板、角钢、槽钢组成，箱体左右两侧采用钢化玻璃，以观测模型破坏现象。箱底内侧黏结一层碎石(最大粒径为 2.3 cm)，以减小箱底与土体之间的相对位移。地震波激励方向的箱壁前、后端内衬 10 cm 厚的泡沫板，以减小边界效应。

2.1 试验原型及试验模型概况

试验模拟的滑坡原型为均质土滑坡，滑体分为 1[#]坡(坡率：1：0.59)、平台(宽 3.04 m)和 2[#]坡(坡率：1：0.75)三部分，平台处垂直打入 3 排微型桩(梅花形布置)，桩结构类型为钢筋混凝土桩，桩顶采用混凝土板连接。微型桩原型桩长 8.4 m，桩径 28 cm。桩间距设计为 1.96 m(7 倍桩径)，排间距 1.12 m(4 倍桩径)。依据试验条件，本次模型试验采用的几何相似比为 8：1(原型：模型)，即试验模型的前后缘高差 1.6 m，桩长 1.05 m，桩径 3.5 cm，桩间距为 0.245 m，排间距 0.14 m。

微型桩群桩支护滑坡的振动台试验中，使模型的设计参数与原型参数完全满足相似关系是非常困难的，由于模型尺寸较小，很难采用人工质量的方法考虑重力效应，因此，采用重力失真模型。试验选取几何尺寸 $L(C_L=8)$ 、质量密度 $\rho(C_\rho=0.75)$ 、弹性模量 $E(C_E=3)$ 为基本控制量，其余物理量之间的相似关系由 Buckingham 定理导出，主要相似关系及相似常数见表 1。

表 1 相似关系及相似常数
Table 1 Similarity ratios of the model

物理量	关系式	相似常数	备注
几何尺寸 L	C_L	8	主控量
弹性模量 E	C_E	3	主控量
抗弯刚度 EI	$C_{EI} = C_E C_L^4$	12 288	
应力 σ	$C_\sigma = C_E$	3	
应变 ε	C_ε	1	
泊松比 μ	C_μ	1	
密度 ρ	C_ρ	0.75	主控量
质量 m	$C_m = C_\rho C_L^3$	384	
刚度 K	$C_K = C_E C_L$	24	
时间 t	$C_t = (C_m/C_k)^{1/2}$	4	
频率 f	$C_f = 1/C_t$	0.25	
阻尼 c	$C_c = C_m/C_t$	96	
加速度 a	$C_a = C_L/C_t^2$	0.5	

2.2 试验材料及制作过程

(1) 滑床与滑体

滑床与滑体采用均质土体，材料配合比为黏土：重晶石粉：细砂：膨润土 = 0.5：0.3：0.06：0.14，滑坡模型由人工分层夯筑而成，经填土过程中现场取土样进行材料参数试验，确定滑床与滑体的物理力学材料参数，见表 2。

表 2 滑床与滑体的物理力学参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	压缩模量 E_s/MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	含水率/%
滑体	2 030	13.82	6.57	26	13.9
滑床	2 108	14.32	7.24	28	15.0

预设滑带为圆弧状，采用厚 0.012 mm 的双层聚乙烯塑料薄膜模拟。滑带参数经试验和反算测得^[13]，黏聚力 $c = 3.5 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 16^\circ$ 。

(2) 微型桩与桩顶板

试验模型桩为预制桩，纵筋采用铝材，通过绑扎铝筋笼浇筑成模的方式制作。浇筑材料采用与混凝土材料性质相近的石膏材料，其水膏比为 0.7，抗压强度为 11.1 MPa。配筋形式为 $4\Phi 6 \text{ mm}$ 的桩周配筋。浇筑完成后经室内养护 18 d 达到目标强度后，于桩身表面涂抹一层 108 胶以提高石膏的耐水性，同时黏贴一层细砂以模拟桩土之间的相互作用。制作好的微型桩如图 1 所示。

桩顶板的模拟材料为厚 1.8 cm 的木板。安装过程中，首先在预固定桩顶位置打孔(孔径为 3.8 cm)，



图 1 制作好的微型桩
Fig.1 Test micropiles

然后将木板嵌入到各桩桩顶，最后在桩顶与木板连接部位的空隙处填充密实环氧树脂固结剂以起到固定桩顶的作用，如图 2 所示。



图 2 桩顶板

Fig.2 Top plate of micropiles

(3) 模型制作过程

试验模型的具体制作过程为：固定模型桩于预设位置→夯筑滑床→按预设滑面形状削制滑面→铺设双层塑料纸→夯筑滑体→安装桩顶板→按坡体形状削制坡面→将滑坡模型固定至振动台。

为便于研究微型桩的抗震机制，制作与微型桩支护滑坡模型尺寸、材料均一致的无桩滑坡。此外，为保证 2 组试验在相同的地震波和相同的边界条件下进行，将 2 组模型分别放置在大小相等、边界处理方式相同的 2 个独立的模型箱内，且同时固定在振动台上，如图 3 所示。

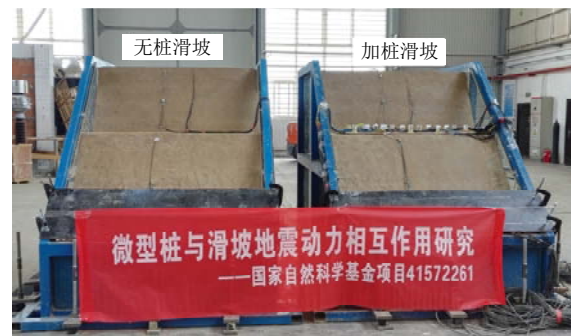


图 3 制作好的滑坡模型

Fig.3 Slope models for test

2.3 测试方案

2 组滑坡模型中心断面的坡面处各埋设 6 支加速度计(加桩滑坡：编号 A01~A06，无桩滑坡：编号 NA01~NA06)，坡内各埋设 5 支加速度计(加桩滑坡：编号 A07~A11，无桩滑坡：编号 NA07~NA11)，以监测坡体不同位置处的加速度响应。2 组模型的加速度测点布设完全一致，具体位置如图 4 所示。此外，试验激振前，在台面上安装 1 支加速度计作为激励控制。

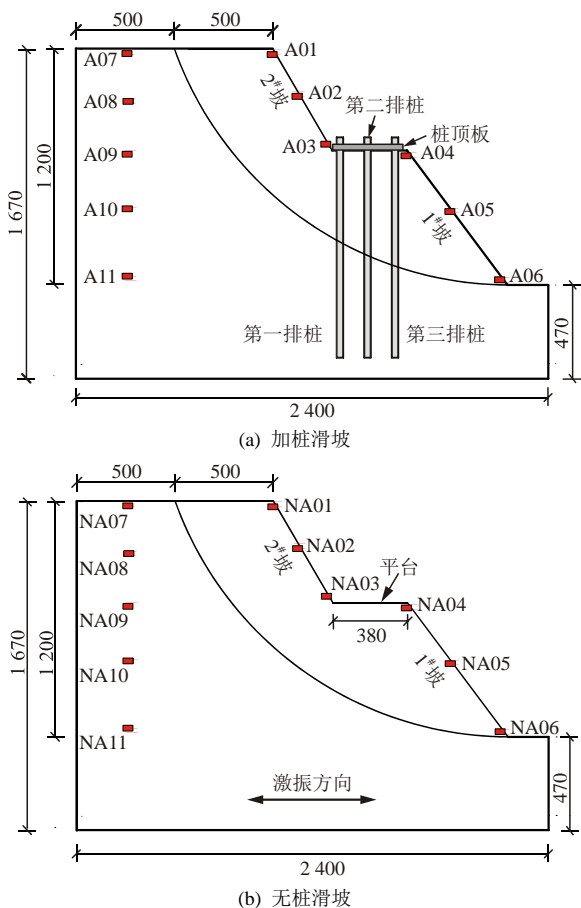


图 4 模型中心断面处加速度计布设图(单位: mm)

Fig.4 Layout of accelerometers in the mid-section of model (unit: mm)

每排桩各选取 2 根桩作为测试桩，第一排桩选取桩 2 和 4，第二排桩选取桩 6 和 9，第三排桩选取桩 11 和 13(平面位置见图 5)。在微型桩纵筋上黏贴 8 对应变片以获得相应测点的应变反应，桩身前、后布设 6 对土压力盒以监测桩身前、后土压力，具体测点位置见图 6。

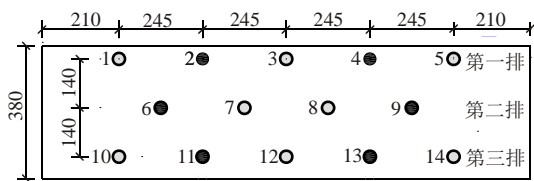


图 5 微型桩布设平面图(单位: mm)

Fig.5 Plane view of layout of micropiles(unit: mm)

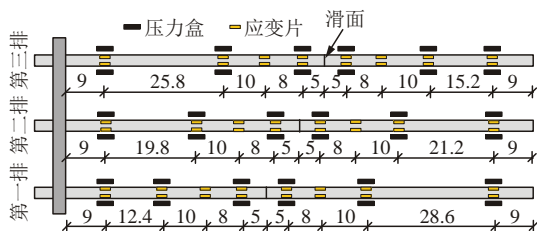


图 6 桩身应变片、压力盒布设图(单位: cm)

Fig.6 Layout of strain gauges and pressure cells on micropiles (unit: cm)

2.4 加载方案

由于水平地震是导致支护结构破坏、诱发滑坡的主要原因，因此本试验均采用单向水平输入的方式加载地震波。考虑到不同地震波频谱特性的影响，对模型输入 4 种不同类型的地震波，分别为：汶川波(代号: Wen)，El Centro 波(代号: El)，Kobe 波(代号: Ko)以及 4, 8, 12 Hz 三种频率的正弦波(代号: S)。

试验前、结束后、以及输入加速度峰值改变时，均对模型进行加速度峰值为 0.03 g 的白噪声(代号: W)扫描，以了解模型的自振频率、阻尼比等动力特性参数。试验采用逐级增大加速度峰值的方式加载，具体加载工况见表 3。

表 3 加载工况
Table 3 Loading conditions

序号	代号	加速度峰值/g	频率/Hz
1	W - 1	0.03	
2, 3, 4	El - 1, Wen - 1, Ko - 1	0.10	
5, 6, 7	S - 1	0.10	4, 8, 12
8	W - 2	0.03	
9, 10, 11	El - 2, Wen - 2, Ko - 2	0.20	
12, 13, 14	S - 2	0.20	4, 8, 12
15	W - 3	0.03	
16, 17, 18	El - 3, Wen - 3, Ko - 3	0.30	
19	W - 4	0.03	
20, 21, 22	El - 4, Wen - 4, Ko - 4	0.40	
23	W - 5	0.03	
24, 25, 26	El - 5, Wen - 5, Ko - 5	0.60	
27	W - 6	0.03	
28, 29, 30	El - 6, Wen - 6, Ko - 6	0.80	
31	W - 7	0.03	

3 试验结果分析

3.1 试验现象

(1) 无桩滑坡震动响应

滑坡模型滑动状态及裂缝发育情况如图 7 所示。输入加速度峰值为 0.1 g 的地震波激励后，无桩滑坡无明显变化。输入加速度峰值为 0.2 g 的 Kobe 波激励后，2#坡面上部及坡顶产生多处细裂缝(见图 7(a))，同时滑坡上部预设滑面处产生一些与滑面走势相近的细微裂缝(见图 7(b))，随着地震荷载的不断激励，裂缝不断扩展。直至输入加速度峰值为 0.2 g 的 12 Hz 正弦波激励后，整个滑体沿预设滑面快速滑动，坡脚水平位移达 8.0 cm，坡顶沉降 7.2 cm。输入加速度峰值为 0.3 g 的汶川波激励后，坡脚水平前移

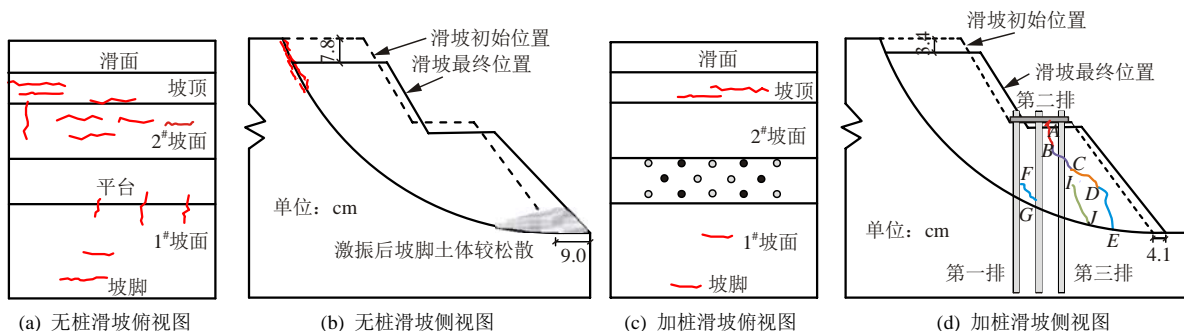


图 7 滑坡模型滑动状态及裂缝发育情况

Fig.7 Deformation modes of model landslides and the development of cracks

9.0 cm, 坡顶沉降 7.8 cm, 与此同时坡脚土体较之前愈加松散, 整个滑体堆积在箱体前侧(见图 7(b))。

(2) 微型桩支护滑坡震动响应

输入加速度峰值为 0.1 g~0.2 g 的地震波激励后, 加桩滑坡基本无明显变化。输入加速度峰值为 0.3 g 的汶川波激励后, 第二、三排桩桩间土体产生一条 4 cm 长的张拉裂缝 AB(见图 7(d)), Kobe 波激励后, 2#坡面上部产生少许裂缝, 输入加速度峰值为 0.4 g 的 El Centro 波激励时, 可明显观测到裂缝 AB 两侧土体的拉裂变形, 该工况激励后, 裂缝 AB 向下延伸至点 C, 裂缝宽度约 0.8 cm, 与此同时, 加桩滑坡开始滑动, 坡脚水平前移 0.6 cm, 坡顶沉降 0.4 cm。同量级的汶川波激励后, 裂缝 ABC 不断拓宽且向下延伸至点 D, 坡脚水平位移累计为 3 cm, 坡顶累计沉降 2.3 cm。同量级的 El Centro 波激励后, 第一排桩前侧 5 cm 处再次出现张拉裂缝 FG, 同时裂缝 ABCD 延伸至点 E。输入加速度峰值为 0.6 g 的 El Centro 波激励后, 滑体继续滑动, 裂缝继续扩展。直至输入加速度峰值为 0.8 g 的 Kobe 波激励后, 坡脚水平前移 4.1 cm, 坡顶沉降 3.4 cm, 试验终止。

对比 2 组滑坡滑动时间(无桩滑坡: 0.2 g 时开始滑动; 加桩滑坡: 0.4 g 时开始滑动)及滑动距离(无桩滑坡: 坡脚前移 9.0 cm, 坡顶下沉 7.8 cm; 加桩滑坡: 坡脚前移 4.1 cm, 坡顶下沉 3.4 cm)可见, 无桩滑坡在较低量级地震波激励(0.2 g)时, 即进入极限平衡状态, 且很快失稳, 快速滑动。加桩滑坡在较高量级地震波激励(0.4 g)时才进入失稳状态, 之后缓慢滑动, 直至桩体严重受损无法承担土体重力和地震力。可见, 微型桩群桩支护结构可有效提高滑坡的抗震性。

3.2 加速度响应规律

为便于研究滑坡加速度响应规律, 采用 PGA 放大系数(定义为测点加速度峰值与台面加速度峰值的比值)这一指标进行分析, 以输入加速度峰值为

0.2 g 的 El Centro 波工况为例, 图 8 为该工况下 2 组滑坡坡面测点的 PGA 放大系数对比图。

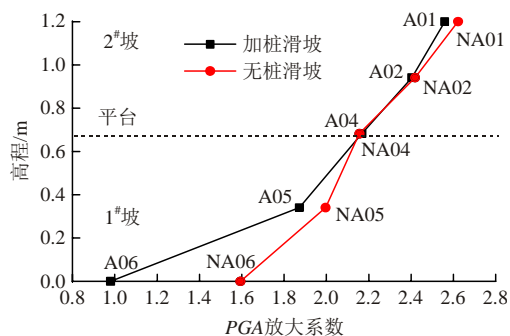


图 8 0.2 g 的 El Centro 波作用下 2 组滑坡坡面 PGA 放大系数对比图
Fig.8 PGA amplification coefficients of slope surface in two landslides under El Centro waves with the amplitude of 0.2 g

2 组滑坡坡面测点的加速度响应均随高程增大而增强, 趋于坡顶时最强烈, 具有明显的高程放大效应。其中, 无桩滑坡坡顶 PGA 放大系数达坡脚的 2.61 倍, 加桩滑坡坡顶 PGA 放大系数为坡脚的 1.64 倍。

对比 2 组滑坡 PGA 放大系数可以看出, 微型桩支护滑坡 1#坡面(平台下部坡面, 如图 4(a)所示)的 PGA 放大系数明显小于无桩滑坡。加桩滑坡坡脚处测点 A06 的 PGA 放大系数仅为 0.98, 与输入波相比坡脚加速度响应稍有削弱, 与无桩滑坡相比, 加桩后坡脚 PGA 放大系数减小幅度高达 38%。这主要是因为微型桩群桩结构提高了滑坡的整体性和稳定性, 当地震波作用至滑坡时, 微型桩可以抵消地震波的部分能量, 对地震波有一定阻滞作用, 但随着高程的增大, 这种阻滞作用趋于减弱。可见微型桩支护结构对于直接支护部位的坡体(1#坡)具有非常显著的抗震作用, 尤其是坡脚, 而对于陡倾坡面, 支护桩顶以上坡面(2#坡, 平台上部坡面, 如图 4(a)所示), 其对加速度的抑制作用不明显。因此,

在工程抗震设计时，对于分段支护滑坡，当坡面较陡时，对于未加桩部位的滑体，还应辅助其他支护结构，如加设锚杆(索)等。

3.3 桩身前、后动土压力响应

地震引发的动土压力是微型桩受力变形的主要原因，可以揭示桩 - 土相互作用的抗震机制，研究地震作用下桩身前、后动土压力的分布特征对微型桩支护滑坡的抗震设计具有重要意义^[14]。约定微型桩面向坡脚一侧为桩前，背向坡脚一侧为桩后。将每次激振前的土压力归零，仅考虑地震引发的动土压力变化。以桩 9 为例，对其在输入加速度峰值为 0.1 g~0.6 g 的 El Centro 波作用下桩后动土压力(见图 9(a))以及桩前动土压力(见图 9(b))的分布情况进行分析，需说明，输入加速度峰值达到 0.8 g 后，部分测点无数据，未在图 9 中给出。

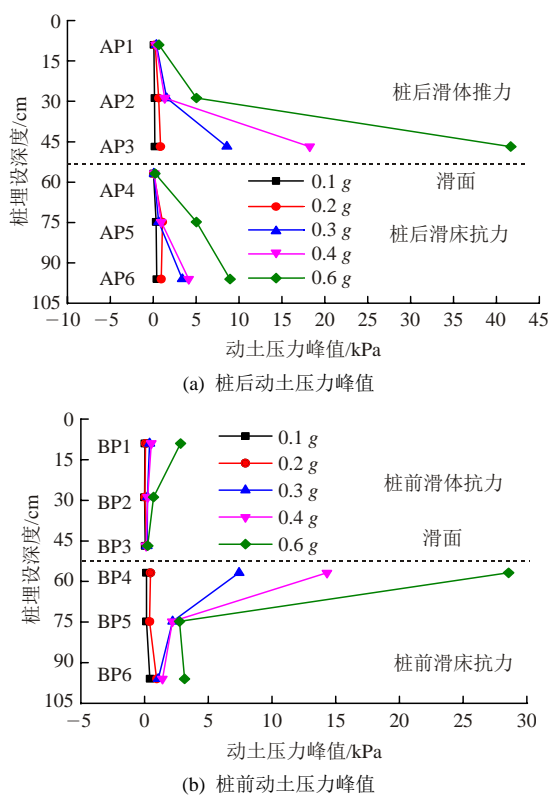


图 9 El Centro 波作用下桩 9 桩身前、后动土压力分布情况
Fig.9 Front and rear pressures of the fourth micro-pile under El Centro waves

(1) 桩后动土压力分布

桩后滑坡推力：低量级地震波(0.1 g)作用下，滑坡处于稳定状态，桩后滑坡推力较小，测点 AP1(桩顶附近)动土压力峰值为 0.08 kPa，AP2(埋深 8.6 倍桩径处)为 0.17 kPa，AP3(滑面上 1.4 倍桩径处)为 0.19 kPa，呈上小下大的“正三角形”分布。输入加速度峰值增大至 0.2 g 时，滑坡依然保持稳定状

态，测点 AP1，AP2 增幅很小，AP3 增幅略大，为 0.66 kPa。输入加速度峰值为 0.3 g~0.6 g 时，滑坡由稳定状态逐渐进入极限平衡状态(0.3 g)和失稳状态(0.4 g 之后)，滑体沿预设滑面不断挤压桩体，桩后各测点的滑坡推力均有所增加，测点 AP3 增幅最大，各量级作用下分别增加 7.75 kPa(0.3 g)，9.64 kPa(0.4 g)和 23.45 kPa(0.6 g)，整个滑动过程中桩后滑坡推力始终保持“正三角形”分布。因此，微型桩抗震设计时，应特别注意滑面附近的滑坡推力，建议加大其附近桩截面配筋。

桩后滑床抗力：与桩后滑坡推力相比，桩后滑床抗力较小。但桩后滑床抗力分布特点与桩后滑体推力类似，也呈上小下大的“正三角形”分布，桩底动土压力峰值最大。这主要是因为滑体的滑动导致滑面上部桩体前倾，而桩底附近的桩身在上部桩体的协同作用下，有绕滑床内某点向后转动的趋势，从而导致桩底动土压力峰值最大。

(2) 桩前动土压力分布

桩前滑体抗力：输入加速度峰值在低量级地震波(0.1 g)作用下，桩体所受的滑体抗力非常小，桩顶附近 BP1 测点的动土压力峰值仅为 0.03 kPa，BP2(埋深 8.6 倍桩径处)为 0.01 kPa，BP3(滑面上 1.4 倍桩径处)为 0.05 kPa，呈“K”型分布；输入加速度增大至 0.2 g 时，各测点滑体抗力增幅很小，依然保持“K”型分布；输入加速度峰值 0.3 g 时，测点 BP1 的动土压力峰值增大至 0.41 kPa，BP2 为 0.24 kPa，BP3 为 0.20 kPa，呈上大下小的“倒三角形”；输入加速度峰值增大至 0.4 g 时，各测点滑体抗力略有增长，依然保持“倒三角形”分布；输入加速度峰值为 0.6 g 时，测点 BP1 突然增大至 2.84 kPa，测点 BP2 略有增大，而 BP3 几乎没有变化。

桩前滑床抗力：与桩前滑体抗力类似，桩前滑床抗力也呈“倒三角形”分布，越靠近滑面，滑床抗力越大。这主要是因为，滑体滑动时，桩后土体挤压桩体至桩体前倾，而桩体挤压桩前滑床土，最终导致滑床抗力不断增大。此外，桩底附近的桩身有向滑坡后缘移动的趋势，因此桩底附近的桩前滑床抗力相对较小。

3.4 桩身弯矩响应

试验激振过程中，桩身前、后测点产生相应的应变反应，通过公式 $M = WE_s(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$ 可计算出相应测点弯矩。其中， M 为桩身弯矩， W 为桩身横截面的抗弯截面系数， E_s 为纵筋的弹性模量， ε_1 为桩前测点应变， ε_2 为桩后测点应变。

图 10 为 0.3 g 的 El Centro 波作用时, 桩 9 滑面下 5 cm 处测点的弯矩时程曲线。地震波激励时, 微型桩产生反复的拉压变形(约定桩前受拉为正, 桩前受压为负)。由于激振过程中, 地震作用不断使滑体滑动, 每次激振后, 桩体均有不同程度的损伤, 定义震后采集到的弯矩值为“残余弯矩”, 用以表征震后桩体的损伤程度。

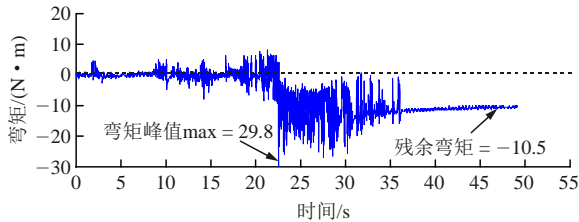


图 10 0.3 g 的 El Centro 波作用时桩 9 滑面下 5 cm 处测点弯矩时程曲线

Fig.10 Time curve of bending moment at the measuring point of the ninth micropile 5 centimeters below the sliding surface under 0.3 g El Centro wave

(1) 桩身弯矩峰值

将激振前的弯矩值归零, 仅考虑地震引发的动弯矩变化。图 11 给出了 El Centro 波各量级地震波(0.1 g~0.6 g)作用下桩 9 的弯矩峰值分布图。

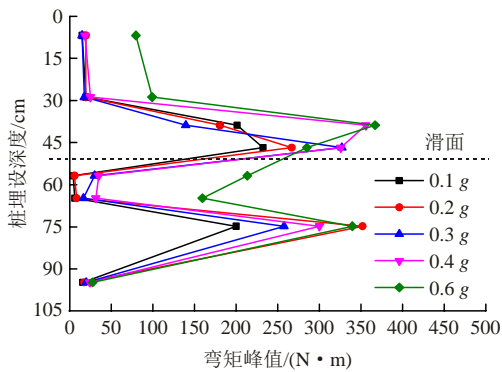


图 11 El Centro 波各量级下桩 9 弯矩峰值分布情况

Fig.11 Peak bending moment of the ninth micropile under El Centro waves with different loading amplitudes

由于微型桩的长细比大, 属于柔性结构, 与普通抗滑桩^[14]相比, 桩体容易出现多个反弯点。同一量级地震作用下, 桩身弯矩峰值以滑面为界呈“M”型, 当输入加速度峰值为 0.1 g~0.3 g 时, 最大弯矩点位于滑面上 5 cm 处(1.4 倍桩径)和滑面下 23 cm 处(6.6 倍桩径)。当输入加速度峰值增大至 0.4 g~0.6 g 时, 滑面上部最大弯矩点上移至滑面上 13 cm(3.7 倍桩径)处。

(2) 桩身残余弯矩

图 12 为 El Centro 波各量级地震波(0.1 g~0.6 g)激励后桩 9 的桩身残余弯矩图。

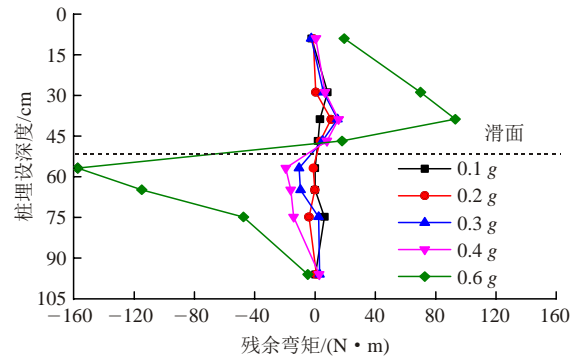


图 12 El Centro 波各量级下桩 9 残余弯矩分布情况

Fig.12 Bending moment of the ninth micropile under El Centro waves with different loading amplitudes

输入加速度峰值 0.1 g~0.2 g 地震波激励后, 桩身各测点的残余弯矩非常小, 说明桩体无明显损伤。地震波激励时桩体、滑床、滑体三者运动形式一致, 滑坡整体性较好, 尽管桩体产生反复的拉压变形, 但激振后很快恢复原形。随着输入加速度峰值的增大(0.3 g~0.6 g), 滑体从稳定状态逐渐进入极限平衡状态 and 失稳状态, 桩体内部损伤不断加剧。桩身残余弯矩峰值以滑面为转折点, 滑面以上为正值, 滑面以下为负值, 呈反“S”型分布。

3.5 桩体破坏现象

试验结束后, 从侧面开挖模型, 以观察桩体的破坏现象。图 13 为模型中心剖面图, 可以看出, 地震作用后桩体的破坏情况与残余弯矩分布规律一致。滑面上部抗滑段表现为凸向坡脚, 破坏区域主要为滑面上 1.4~4.0 倍桩径范围内, 桩身后侧石膏体挤压破损, 桩身前侧石膏体受拉破坏严重, 成块掉落、裸露筋体, 该区域以上至桩顶未见破坏现象。滑面以下嵌固段表现为凸向滑坡后缘, 破坏区域主要为滑面以下 1.4~3.4 倍桩径范围内, 桩身前侧石膏体挤压破损, 桩身后侧石膏体受拉破坏严重, 该区域以下至桩底未见破坏现象。滑面上、下 1.4 倍桩径范围内无破坏现象, 仅向坡脚方向倾斜而已。



图 13 微型桩破坏情况

Fig.13 Destruction of micropiles

整体来看,地震作用下微型桩的破坏特征与静力情况类似^[5]。在抗震设计时,按照重点加固滑面附近桩身强度进行设计是可行的。

4 结 论

本文设计并完成了微型桩群桩支护滑坡和无桩滑坡 2 组振动台模型试验,通过分析 2 组滑坡的加速度响应规律、桩身前后动土压力分布以及桩体受力情况等,揭示了地震作用下微型桩支护滑坡的抗震机制。具体结论如下:

(1) 微型桩群桩支护结构可有效提高滑坡的抗震性。当地震波作用至滑坡时,微型桩可以抵消地震波的部分能量,对地震波有一定阻滞作用,这种阻滞作用在坡脚发挥得极其显著。但随着高程的增大,这种阻滞作用趋于减弱。

(2) 地震引发的桩后滑坡推力和桩后滑床抗力呈上小下大的“正三角形”分布,桩前滑床抗力和滑体抗力呈上大下小的“倒三角形”分布。地震作用时,桩体弯矩峰值以滑面为界呈“M”型,当输入加速度峰值为 0.1 g~0.3 g 时,其最大弯矩点位于滑面上 5 cm 处(1.4 倍桩径)和滑面下 23 cm 处(6.6 倍桩径)。当输入加速度峰值增大至 0.4 g 和 0.6 g 时,滑面上部最大弯矩点上移至滑面上 13 cm(3.7 倍桩径)处。

(3) 地震激励后微型桩的破坏特征与静力情况类似,桩身残余弯矩和破坏模式表现为以滑面为界点的“反 S”型,破坏区域主要集中在滑面上 1.4~4.0 倍桩径范围内,以及滑面下 1.4~3.4 倍桩径范围内。在进行滑坡防治微型桩抗震设计时,重点加固这一区域内的桩身配筋是很有必要的。

参考文献(References):

- [1] BRUCE D A, DIMILLIO A F, JURAN I. Introduction to micropiles: an international perspective[C]// Foundation Upgrading and Repair for Infrastructure Improvement. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 1995: 1 - 26.
- [2] 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 Depei, 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))
- [3] 刘鸿,肖世国,张益锋. 微型桩组合结构抗滑机理模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 35(1): 18 - 24. (LIU Hong, XIAO Shiguo, ZHANG Yifeng. Experimental study on the anti-sliding mechanism of micro-pile composite structure[J]. China Railway Science, 2015, 35(1): 18 - 24. (in Chinese))
- [4] 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 Jinkai, YIN Yueping, MEN Yuming, et al. Model test study of landslide reinforcement with micropile groups[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 120 - 128. (in Chinese))
- [5] 孙书伟,朱本珍,马惠民,等. 微型桩群与普通抗滑桩抗滑特性的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1 564 - 1 570. (SUN Shuwei, ZHU Benzhen, MA Huimin, et al. Model tests on anti-sliding mechanism of micro-pile groups and anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1 564 - 1 570. (in Chinese))
- [6] KEVIN W CARGILL, STEPHEN L DIMINO, NILESH SURTI, et al. Tied-back micropile walls in landslide repair[C]// Deep Foundations Institute Annual Conference on Deep Foundations. Washington D C: [s. n.], 2006: 319 - 326.
- [7] 杨静. 微型桩支护边坡的动力响应特征及抗震计算方法研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (YANG Jing. Study on dynamic response characteristics of reinforced slope with micropiles and the aseismic analysis method[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [8] 王栋. 微型桩抗滑结构地震反应分析[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (WANG Dong. Research on micropiles to earthquake load[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [9] NOORZAD R, SAGHAEI G R. Seismic analysis of inclined micropiles using numerical method[C]// 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo Contemporary Topics in Deep Foundations, ASCE. [S. l.]: [s. n.], 2009: 406 - 413.
- [10] 徐小林,王全才,王浩,等. 排架式微型桩组合结构受力分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 280 - 284. (XU Xiaolin, WANG Quancai, WANG Hao, et al. An analysis of mechanical behaviors of row micro-pile composite structure[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 280 - 284. (in Chinese))
- [11] 王唤龙. 微型桩组合抗滑结构受力机理及防腐性研究[博士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (WANG Huanlong. Research on stress mechanism and anti-corrosion of micropile composite anti-slide structure[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [12] 牛文庆. 微型桩支护结构地震动力特性试验研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2016. (NIU Wenqing. Research on earthquake dynamic experiment of micropiles supporting structure [M. S. Thesis][D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2016. (in Chinese))
- [13] 刘洪佳,门玉明,李寻昌,等. 采用不同滑面材料的滑坡模型试验研究[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 10 - 13. (LIU Hongjia, MEN Yuming, LI Xunchang, et al. Study on slip material in landslide model tests[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 10 - 13. (in Chinese))
- [14] 涂杰文,刘红帅,汤爱平,等. 悬臂抗滑桩加固堆积型滑坡地震响应离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增 1): 2 925 - 2 934. (TU Jiewen, LIU Hongshuai, TANG Aiping, et al. Centrifugal model test on seismic response of colluvial landslide reinforced by cantilever anti-slide pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.1): 2 925 - 2 934. (in Chinese))