



地震作用下微型桩群桩支护黄土滑坡的土-桩动力响应分析

解庆禹¹, 黄强兵¹, 孙玉军², 马宗源³, 周恒⁴, 孟凡东¹, 郭治宇¹, 余岱金¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810001;
3. 贵州交通职业技术学院, 贵州 贵阳 551400; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要 微型桩具有施工快速便捷和扰动小等优点, 已在黄土滑坡快速治理中得到了应用。为揭示微型桩群桩支护黄土滑坡动力响应规律, 该文基于动态黏弹塑性本构模型 (VEP 模型), 研究微型桩与滑坡地震动力相互作用机制, 探讨合理桩间距。结果表明: 激振后 VEP 模型计算结果对地震量级较敏感, 模型考虑了土的黏弹塑性, 能够合理的反映地震作用下坡体位移规律; 地震作用下微型群桩的桩身产生弯剪组合破坏, 主要破坏位置位于滑面上下 2~4 倍桩径处; 建议微型群桩的列间距采用 5~7 倍桩径, 排间距采用 3~4 倍桩径进行布设。研究结果可为地震作用下黄土滑坡防治的数值分析与抗震设计提供依据。

关键词 微型桩; 数值模拟; 土动力特性; 桩间距优化; 滑坡; 地震

中图分类号: P642. 22 **DOI:** 10. 16152/j. cnki. xdxzbzr. 2024-01-013

Analysis of dynamic soil-pile response in micropile group supporting loess landslide under earthquake action

XIE Qingyu¹, HUANG Qiangbing¹, SUN Yujun², MA Zongyuan³, ZHOU Heng⁴,
MENG Fandong¹, GUO Zhiyu¹, YU Daijin¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. State Power Investment Corporation, Yellow River Upper Reaches Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810001, China;

3. Guizhou Communications Polytechnic, Guiyang 551400, China;

4. Powerchina Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract The micro-pile has the advantages of fast and convenient construction and small disturbance, and has been used in the rapid treatment of loess landslide. In order to reveal the dynamic response law of loess landslide supported by micro pile, based on the dynamic visco-elasto-plastic constitutive model (VEP model), the seismic dynamic interaction mechanism between micropile and landslide is studied, and the reasonable pile spacing is discussed. The results show that the numerical calculation is close to the physical model test. The calculation results of VEP model after excitation are sensitive to the magnitude of earthquake. The model considers the visco-elastic-plasticity of soil and can reasonably reflect the displacement law of slope under earthquake. Under the action of the earthquake, the pile body of the micro-pile group produces bending shear failure, and the main failure position is located at 2~4 times the pile diameter above and below the sliding sur-

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (42041006); 长安大学研究生科研创新实践项目 (300103723047)。

第一作者: 解庆禹, 男, 博士研究生, 从事地质工程研究, xieqy@chd.edu.cn。

通信作者: 黄强兵, 男, 博士, 教授, 从事地质工程、岩土及地下工程研究, hqb@chd.edu.cn。

face; it is suggested that the column spacing of micro pile group should be 5 ~ 7 times the pile diameter, and the row spacing should be 3 ~ 4 times the pile diameter. The research results can provide a basis for seismic design and numerical analysis of loess landslide prevention and control under earthquake.

Keywords micro pile; numerical simulation; soil dynamic characteristics; pile spacing optimization; landslide; earthquake

黄土地区地震诱发大量黄土滑坡^[1]。例如, 1920 年海原地震诱发多处大型黄土滑坡^[2], 2013 年岷县—漳县地震诱发近 600 处黄土滑坡^[3]。地震诱发黄土滑坡致灾具有突发性, 威胁着群众的生命财产安全^[4-5]。目前黄土滑坡防治逐步向轻型化与小型化方向发展^[6], 除了传统的抗滑桩或锚索抗滑桩等手段^[7], 微型桩施工快、扰动小, 在高速公路与铁路沿线滑坡抢险中得到了广泛应用^[8-11]。目前, 国内外学者开展了一系列地震作用下微型群桩的动力响应研究。例如, 文献[12-13]基于振动台模型试验确定了桩身前后滑坡推力、滑体抗力、桩身弯矩及桩身变形破坏位置。郑静等通过振动台模型试验研究了地震作用下布桩形式对微型桩的变形受力影响, 得出抗震性能好的布桩方式^[14]。胡时友等进行了不同桩间距下碎石土滑坡室内模型试验^[15]。基于数值模拟研究, 杨静开展了地震作用下微型桩加固支护边坡数值分析, 得出了桩排数与桩顶板厚的最优组合方式^[16]。Reza Noorzad 等通过倾斜微型桩抗震分析, 得出倾斜微型桩在地震荷载作用下具有良好的性能^[17]。朱慧宁研究了堆积层滑坡微型桩群支护最优列间距^[18]。陈光平研究了堆积层滑坡中多排桩的静动力特性与变形破坏规律^[19]。

虽然微型群桩支护滑坡方面已经取得了丰富的研究成果, 但上述研究中采用的摩尔-库伦本构模型(M-C 模型)或 D-P 模型不考虑土体黏弹塑性^[20-22], 考虑土体黏弹塑性的桩-土动力响应规律尚不清楚。为此, 本文基于文献[23]提出的动态黏弹塑性本构模型(VEP 模型), 开展地震作用下黄土滑坡微型桩群桩支护动力响应研究, 分析地震作用下微型群桩的桩身变形破坏特征, 揭示考虑土体黏弹塑性的动力学特性的微型桩群桩支护滑坡的动力响应特性, 并探讨地震影响下微型桩群桩布设。

1 黄土黏弹塑性本构模型

计算采用 Ma 等建立的黄土黏弹塑性本构模

型(VEP), 根据 ABAQUS 提供的材料属性二次开发接口 vumat 实现^[23]。黏弹性本构关系为

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_v\delta_{ij} + 2\eta_c\dot{\varepsilon}_{ij} + \eta_\lambda\dot{\varepsilon}_v \tag{1}$$

式中: K 和 G 分别为体积模量和剪切模量; η_k 和 η_c 分别为体积变形和剪切变形的动态黏度, 由下式确定^[24]。

$$\eta_c = \frac{2GD}{2\pi f} \tag{2}$$

$$\eta_k = \frac{2KD}{2\pi f} \tag{3}$$

式中: D 为阻尼比; f 为结构频率。剪切模量 K 与阻尼比 D 随剪应变衰减^[25],

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_{\text{ref}}) \tag{4}$$

$$D/D_{\max} = (\gamma/\gamma_{\text{ref}})/(1 + \gamma/\gamma_{\text{ref}}) \tag{5}$$

式中: γ_{ref} 为参考剪切应变; $G_{\max}$ 为最大剪切模量; $D_{\max}$ 为最大阻尼比。模型数值计算结果与试验结果比较见图 1 所示。

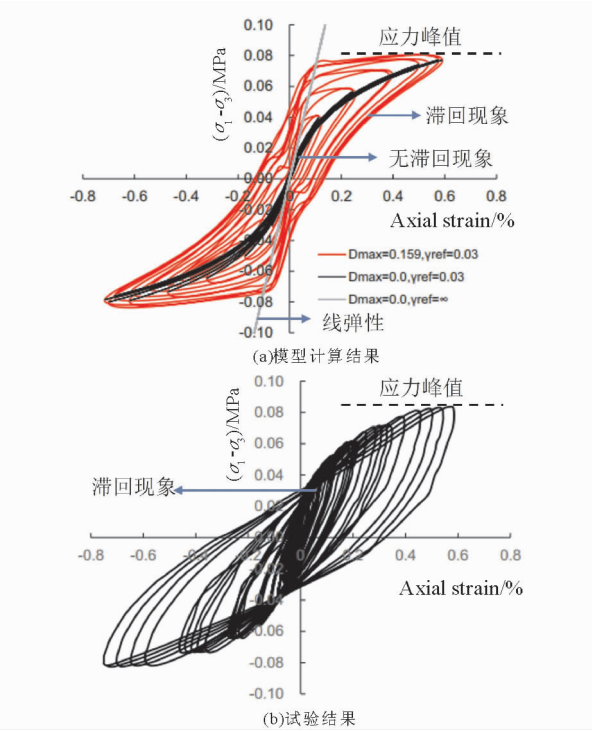


图 1 数值计算与试验结果对比(引自文献[23])
Fig. 1 Comparison of numerical simulation and experimental results (Reference [23])

当 $D_{\max}=0$ 时,如图 1(a) 中黑线所示,不会出现滞回现象;当参考剪切应变 $\gamma_{\text{ref}} \rightarrow \infty$, 阻尼比 D 为 0,如图 1(a) 中灰线所示,应力应变关系呈线弹性;当 $\gamma_{\text{ref}}=0.03, D_{\max}=0.159$ 时,黏弹塑性本构模型预测的应力滞回圈与频率为 1 的动三轴试验应力峰值相近,滞回形状相似,符合地震动力作用下土体的应力应变关系。因此,本文根据文献[23]参考剪应变 γ_{ref} 取 0.1,最大阻尼比 $D_{\max}$ 取 0.2。

2 地震动力滑坡模型的建立

2.1 振动台模型试验

据文献[26]振动台模型试验结果验证数值结果,物理模型试验流程见文献[26-27],滑坡原型尺寸见图 2。考虑到水平地震是诱发滑坡导致支护结构破坏的主要原因,模型试验采用水平方向输入汶川地震波,加速度时程曲线如图 3 所示。

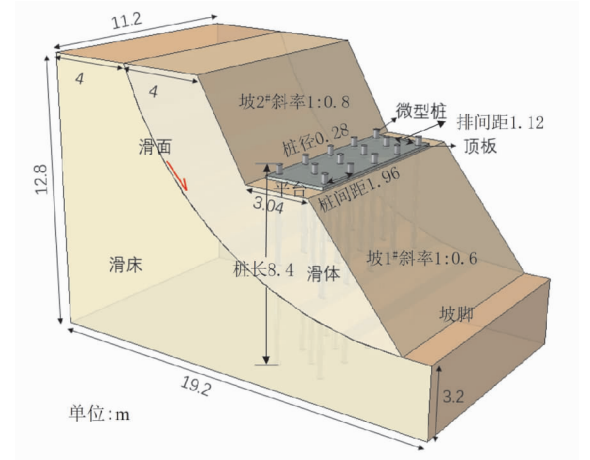


图 2 滑坡原型尺寸

Fig. 2 landslide prototype and model size

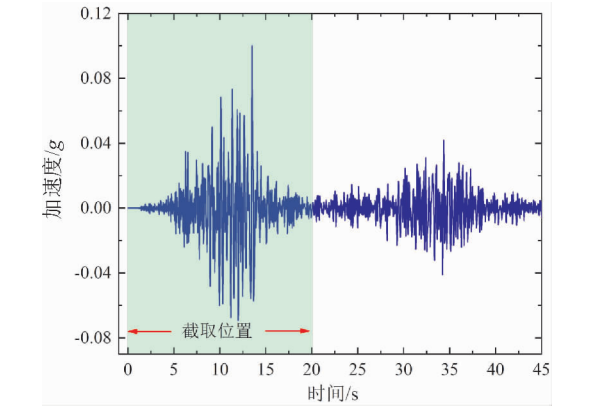


图 3 汶川地震波加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time history curve of Wenchuan earthquake wave

2.2 数值模型

由于微型桩加固滑坡模型为对称结构,数值模型取滑坡原型一半进行计算(见图 4),材料的动强度参数依据振动台物理模型试验参数以相似比换算得到,详见表 1^[26]。本构模型采用黏弹塑性本构模型(VEP 模型)。动力数值模型计算需经过地应力平衡和地震动力两个分析步进行,地应力平衡的作用是让数值模型处于重力作用下,而不发生影响计算结果的位移;地震动力分析步采用动力显式方式。地震动力有限元数值模拟时,对模型整体网格的尺寸要求较高,通常最大网格尺寸应小于最高频率对应波长 λ 的 $1/10$ ^[28]。本文网格最大尺寸为 0.45 m,满足动力网格设置条件。边界条件处理采用远置边界条件(见图 4),即将边界设置得足够远,以保证有限域内计算的精度,地震动力采用输入加速度时程方式实现(见图 3)。

表 1 材料参数取值

Tab. 1 Values of material parameters

部件	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$	弹性模量 E/MPa	泊松比
滑体	1 522.5	41.46	26	25	0.32
滑床	1 581	42.96	35	25	0.32
微型桩	1 200	—	—	3.6×10^4	0.20
桩顶板	700	—	—	450	0.20

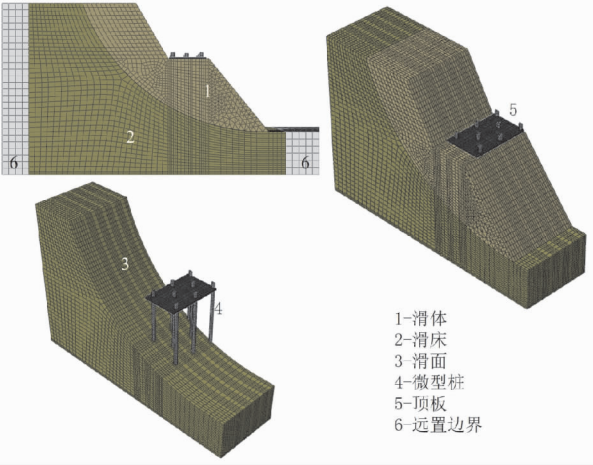


图 4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

3 土桩动力响应分析

3.1 滑坡加速度响应

取物理模型试验和数值模型的平台处和坡脚

处(见图 2)加速度时程曲线分析。如图 5 所示, VEP 模型计算的加速度与模型试验实测加速度时程曲线的变化趋势相同,加速度峰值主要集中在 9~14 s。模型试验在平台处实测峰值加速度为 0.254,坡脚处实测峰值加速度为 0.12;相同位置数值计算结果为 0.355 和 0.16,峰值加速度接近。值得注意的是,考虑土体动力特性的数值模型计算的加速度峰值具有一定的滞后性,特别是平台处测得的加速度时程曲线与模型试验相比整体滞后,推断是模型试验与数值模拟的边界设置

所导致。

VEP 模型数值计算和模型试验加速度的放大效应与大多数边坡的加速度放大规律一致,表现出随着高程的增加,加速度呈放大效应^[29-31]。图 5(c)、(d)表明,M-C 模型由于不考虑土体黏弹塑性动力学特性,计算加速度的峰值远大于模型试验结果。综上,基于 VEP 模型的数值工况相关材料参数、接触关系、边界设置及地震动力输入方式等是相对合理的,动态黏弹塑性本构模型适用于复杂的边坡或滑坡动力响应分析。

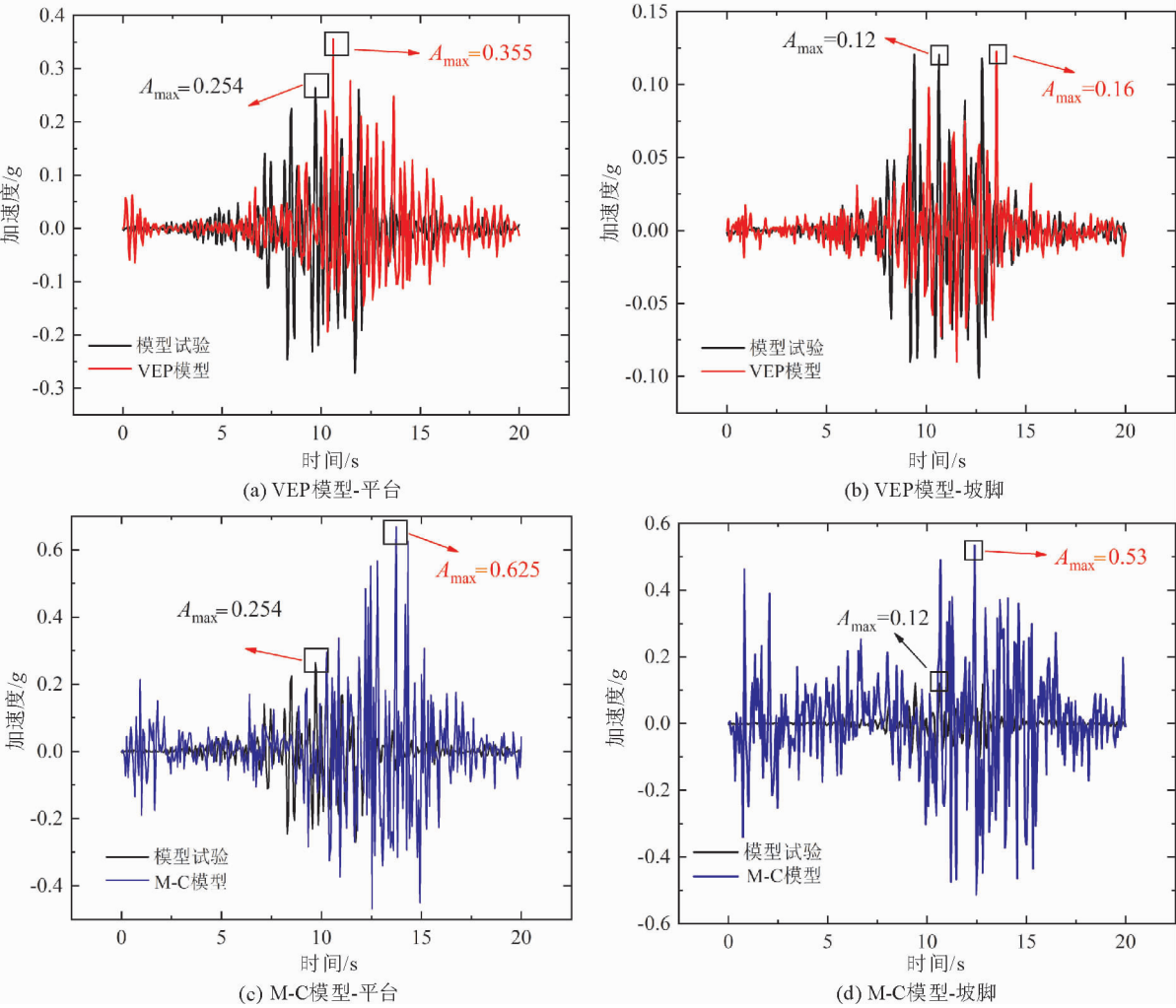


图 5 模型试验与数值模拟加速度对比

Fig. 5 Acceleration comparison between model test and numerical simulation

3.2 滑坡位移响应规律

由图 6 可见 VEP 模型的数值工况与 M-C 模型的数值工况在 0.1g 与 0.3g 条件下坡脚位移变化趋势相同。9 s 时进入到激振区,位移开始快速变化,激振过程中,VEP 模型计算的坡脚位移波动幅值较稳定,而 M-C 模型计算结果远远放大了位移响应。激振后(15 s 后),0.1g 条件下两种模

型计算的坡脚位移变化相对平稳。0.1g 和 0.3g 两种地震量级条件下 VEP 模型计算的坡脚位移较大,且随着地震量级增加,坡脚位移差值越显著(0.56~1.18 cm),VEP 模型对地震量级的增加较为敏感。该模型能够反映地震动力作用下土体黏弹塑性对边坡变形的影响。

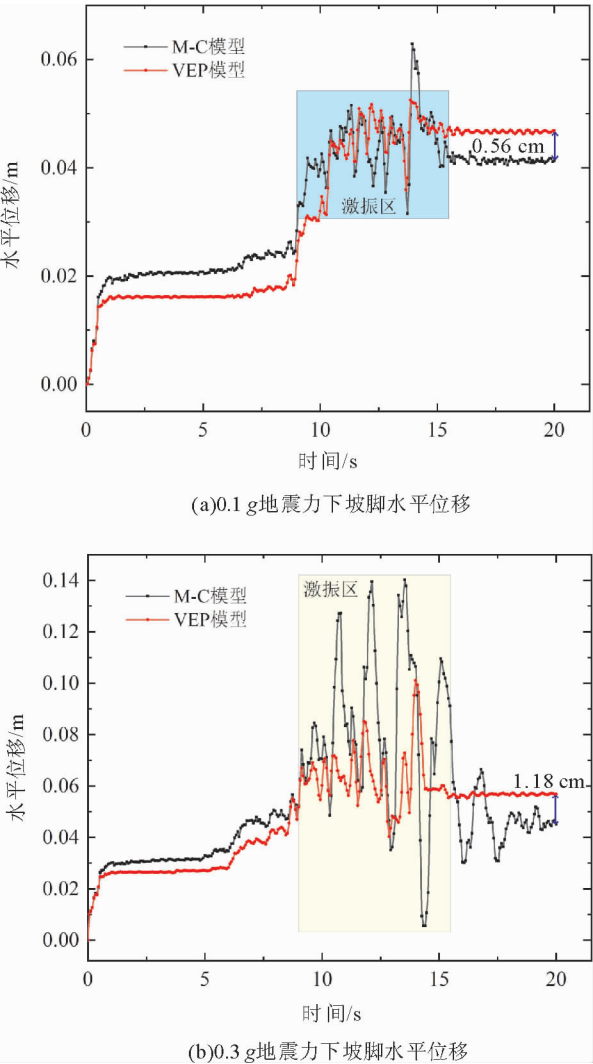


图 6 坡脚水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of slope toe

3.3 滑坡动土压力规律

分析 0.1g 地震力下基于 VEP 模型和基于 M-C 模型的桩后土压力,其中规定背对着坡脚的一侧为桩后。从图 7 后排桩和前排桩后土压力可以看出,桩身后土压力分布呈现出字母“W”的形状,具体表现为滑体的桩后土压力大于滑床的桩后土压力,主要原因是由于预设滑面使滑体的塑性变形大于滑床,桩底的土压力由于滑面上部的桩体前倾,从而导致桩底土压力大于滑床内其余段土压力。另外,VEP 模型数值工况的后排桩后土压力明显大于前排桩后土压力,与物理模型试验规律相同^[27],但是基于 M-C 模型的后排桩后土压力小于前排桩后土压力,与物理模型试验结果相反^[27],主要原因是 M-C 模型未考虑土的黏弹塑性,在地震过程中能量未得到合理消耗,导致

桩后土压力的异常,土体动力特性在滑坡的抗震设计中需重点关注,否则会导致微型群桩中各排微型桩承担的应力比存在误差。

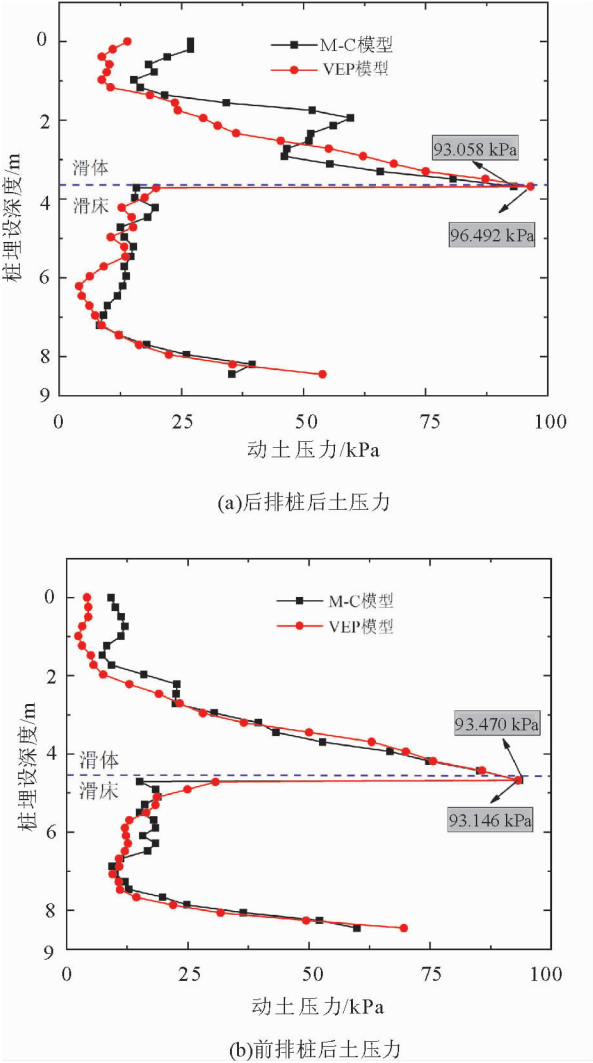


图 7 桩身土压力

Fig. 7 Soil pressure of pile

3.4 微型群桩桩身内力

图 8 为 0.1g 地震力下桩身剪力和弯矩随距桩底距离的变化曲线。由图 8 可见,基于 VEP 模型的前后排桩承受的剪应力较大,这是因为考虑了土的黏弹塑性的影响,使地震作用下滑体的动力响应更剧烈。根据弯矩和剪力最大值可以发现桩体破坏较严重位置为滑面上下 2~4 倍桩径处。另外,计算最大弯矩处所在截面剪力不为零,由此可认为地震动力下微型群桩加固滑坡桩身变形破坏模式属于弯剪组合破坏。后排桩向前排桩剪应力破坏逐渐减小,振动过程中后排桩既承担压力又承担拉力。

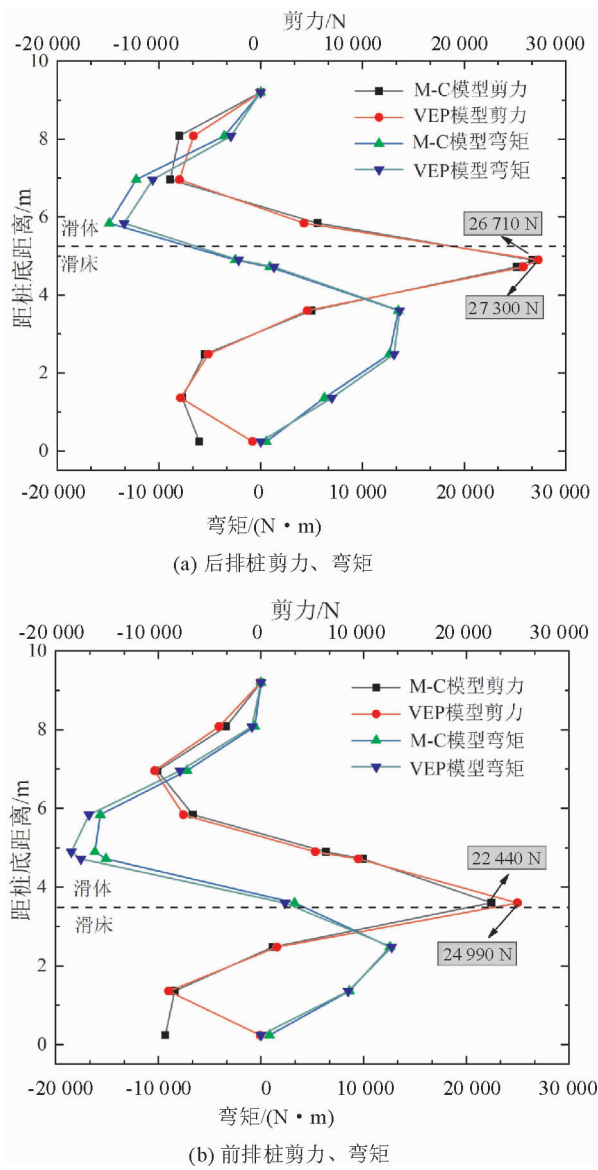


图 8 桩身剪力弯矩对比图

Fig. 8 Comparison of shear and bending moment of pile

4 微型群桩的桩间距优化探讨

在考虑土的黏弹塑性基础上对 0.1g 地震力下不同排间距和不同列间距的微型群桩的布设进行分析,具体工况见表 2。滑坡的抗震分析中位移是判定滑坡安全性的重要因素,故选择坡脚位移作为排列间距的优化判定因素。

由图 9 可见,随着列间距的增大,坡脚位移逐渐增大,这是因为列间距的增大导致在同一滑坡上布设的微型群桩数量减少,而且列间距的增加会极大削弱土拱效应^[18],桩间土未出现土拱区,土体从桩间滑出。列间距减少会显著减小滑距,但会增加微型群桩的布设量,增加经济成本,无法

满足微型群桩的设计初衷。

表 2 微型群桩布设方案
Tab. 2 Micro pile group layout scheme

优化工况	微型桩布设位置(桩径 d)			
列间距	$3d$	$5d$	$7d$	排间距 $4d$
排间距	$3d$	$4d$	$5d$	列间距 $7d$

此外,微型群桩在滑坡支护具有群桩协同作用,当列间距较小时,微型群桩的前排分担的应力较小,后排微型桩承担主要下滑力,当列间距达到为 5~7 倍桩径时,微型群桩承担的应力得到改善,微型群桩整体发挥抗滑作用(见表 3)。因此,微型群桩的列间距布设在 5~7 倍桩径时,达到微型群桩的最佳协同支护效果。

表 3 微型群桩各排桩承担应力比

Tab. 3 Bearing stress ratio of each row of micro pile group

列间距	$3d$	$5d$	$7d$
后排桩	0.434	0.415	0.399
中排桩	0.375	0.359	0.360
前排桩	0.191	0.226	0.241

由图 9 可见,排间距与坡脚位移的变化未呈现出线性关系,当排间距为 4 倍桩径时,坡脚位移最小,支护效果最佳。当排间距较小时,中排微型桩的土拱作用区与后排桩的加固区重合,前排与中排也呈现此现象,未最大发挥三排桩的协同加固效果,导致三排桩的整体协同性较差。另外,当排间距过大时,各排桩之间的协同加固区削弱,群桩的协同性减弱,各排桩成独立加固状态,因此坡脚位移较大。在充分考虑坡脚位移和微型群桩的协同效应的基础上,采用排间距为 3~4 倍桩径布设较合理。

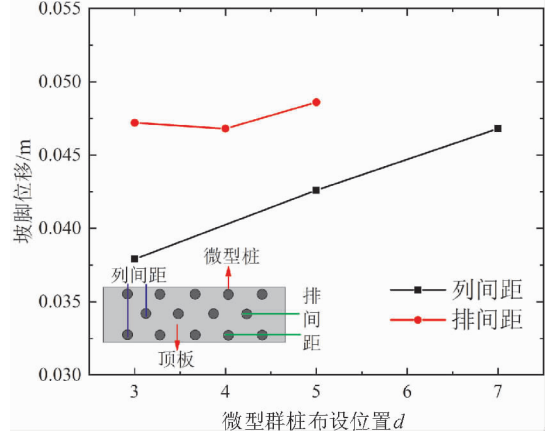


图 9 不同排列间距坡脚位移变化曲线

Fig. 9 Displacement curve of slope toe with different arrangement spacing

5 结论

本文基于动态黏弹塑性本构模型(VEP模型),研究了地震作用下微型桩群桩支护黄土滑坡的土-桩动力响应,探讨了合理桩间距,得出3条主要结论。

1) 基于VEP模型的数值结果与物理模型试验规律具有较好的一致性,传统的摩尔-库伦模型高估了地震黄土滑坡稳定性,对抗震设计不利。VEP模型在滑坡防治数值分析中能够考虑土的黏弹塑性,对地震量级的增加较为敏感,更能合理反映地震作用下坡体变形规律。

2) 桩身内力数据显示地震动力下微型桩群桩加固滑坡桩身变形破坏模式属于弯剪组合破坏,桩身主要破坏发生在滑面上下2~4倍桩径处。

3) 考虑坡脚位移及微型群桩的协同支护效应,建议微型群桩的列间距采用5~7倍桩径进行布设,排间距采用3~4倍桩径布设。

参考文献

- [1] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):530-540.
ZHANG M S, LI T L. Study on inducing factors and formation mechanism of loess landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.
- [2] ZHANG D, WANG G. Study of the 1920 Haiyuan earthquake-induced landslides in loess (China)[J]. Engineering Geology, 2007, 94(1/2):76-88.
- [3] 殷志强,陈红旗,褚宏亮,等. 2008年以来中国5次典型地震事件诱发地质灾害主控因素分析[J]. 地学前缘,2013,20(6):289-302.
YIN Z Q, CHEN H Q, CHU H L, et al. Analysis on the key controlling factors of geo-hazards triggered by five typical earthquake events in China since 2008[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(6):289-302.
- [4] YIN Y P, ZHENG W M, LI X C, et al. Catastrophic landslides associated with the M8.0 Wenchuan earthquake[J]. Bull Eng Geol Environ, 2011, 70:15-32.
- [5] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.
HUANG R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3):433-454.
- [6] 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(1):2-10.
WANG G X. Present situation of engineering measures for preventing and controlling landslide in China and abroad[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998(1):2-10.
- [7] 张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望[J]. 地质灾害与环境保护,2000,11(2):89-97.
ZHANG Z Y. The present status technical advance and development trends of landslide remedial measures[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2):89-97.
- [8] BRUCE D A, DIMILLIO A L, JURAN I. A primer on micropiles[J]. Civil Engineering-asce, 1995, 65(12):51-54.
- [9] 姜春林,吴顺川,吴承霞,等. 复活古滑坡治理及微型抗滑桩承载机理[J]. 北京科技大学学报,2007,29(10):975-979.
JIANG C L, WU S C, WU C X, et al. Reinforcement of a reformatory ancient landslide and mechanism of mini-type anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2007, 29(10):975-979.
- [10] 余桂红,李红超. 锚索施工过程中微型桩对滑坡的治理[J]. 中国地质灾害与防治学报,2001(2):70-72.
YU G H, LI H C. Landslide's control with minipiles in the course of anchor construction[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001(2):70-72.
- [11] 林春秀,张泳雄,刘容识. 垭顶微型桩在软岩边坡加固中的应用[J]. 土工基础,2006(5):11-12,25.
LIN C X, ZHANG Y X, LIU R S. Application of minipiles on the top of cutting for the reinforcement of soft rock slope[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006(5):11-12,25.
- [12] 李楠,门玉明,高讴,等. 微型桩群桩支护滑坡的地震动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(9):2144-2151.
LI N, MEN Y M, GAO O, et al. Research on seismic dynamic response of landslide supported by micro-pile group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(9):2144-2151.
- [13] LI N, MEN Y M, YUAN L Q, et al. Seismic response of micropiles-reinforced landslide based on shaking table test[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019,10(1):2030-2050.
- [14] 郑静,牛文庆,吴红刚,等. 微型桩大型振动台试验

- 坡体及桩动力特性研究[J]. 铁道工程学报, 2017,34(9):22-28.
- ZHENG J, NIU W Q, WU H G, et al. Large-scale shaking table test of micro-pile-study on dynamic characteristics of slope and pile[J]. Chinese Journal of Railway Engineering Society, 2017,34(9): 22-28.
- [15] 胡时友,蔡强,李超杰. 三排微型桩加固碎石土滑坡物理模型试验研究[J]. 水文地质工程地质,2018,45(3):56-62.
- HU S Y, CAI Q, LI C J. A study of the physical model test of debris landslide reinforcement with three row micro-piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3):56-62.
- [16] 杨静. 微型桩加固边坡的动力响应特征及抗震计算方法研究[D]. 重庆:西南交通大学,2012.
- [17] NOORZAD R, SAGHAEE G R. Seismic Analysis of inclined micropiles using numerical method[C]//ISKANDER M, DEBRA P E, LAEFER F, et al. International Foundation Congress and Equipment Expo 2009. 2009:406-413.
- [18] 朱慧宁. 考虑地震作用的滑坡防治微型桩合理桩间距研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [19] 陈光平. 滑坡防治微型桩抗震设计研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [20] 刘铮,李滨,贺凯,等. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析[J]. 地质力学学报,2020,26(4):471-480.
- LIU Z, LI B, HE K, et al. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong Landslide in Tibet under strong earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4):471-480.
- [21] GAO X, TIAN W, LI J, et al. Analysis of Deformation characteristics of filled subgrade treated by micro-pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2021,2021:1-8.
- [22] 孙书伟,朱本珍. 微型桩群加固土坡抗滑力数值模拟研究[J]. 铁道工程学报,2018,35(1):1-5,83.
- SUN S W, ZHU B Z. Numerical simulation study of the ultimate resistance of micropiles in earth slope stabilization[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1):1-5,83.
- [23] MA Z Y, LIAO H J, DANG F N, et al. Seismic slope stability and failure process analysis using explicit finite element method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021,80:1287-1301.
- [24] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. New York:McGraw Hill, 1993.
- [25] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972,98(6):603-624.
- [26] 李楠. 微型桩与滑坡地震动力相互作用研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [27] 李楠,门玉明,汪班桥,等. 微型桩群桩支护均质土滑坡的振动台模型试验[J]. 工程地质学报,2019,27(6):1371-1378.
- LI N, MEN Y M, WANG B Q, et al. Shaking table model test of micro-pile group pile supporting homogeneous soil landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2019,27(6):1371-1378.
- [28] KUHLMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1973, 99(5):421-427.
- [29] SRILATHA N, LATHA G M, PUTTAPPA C G. Seismic response of soil slopes in shaking table tests: Effect of type and quantity of reinforcement[J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2016,2(4):33.
- [30] FAN G, ZHANG J, WU J, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of a weak intercalated rock slope using a shaking table[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(8):3243-3256.
- [31] MEUNIER P, HOVIUS N, HAINES J A. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008,275(3/4):221-232.

(编辑 亢小玉)