

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.149>



桩锚参数对边坡地震动力响应的影响及震损机理

王哲^{1,2}, 石振明^{1,2}, 侯卓霖³, 赵飞^{1,2}, 张清照^{1,2*}

1. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092
2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092
3. 广州地铁集团有限公司, 广东广州 510000

摘要: 我国西南地区广泛分布层状岩质边坡, 在地震作用下极易发生失稳破坏, 诱发滑坡灾害。预应力锚索—抗滑桩组合支护作为最常用的加固措施, 其地震动力响应机制复杂, 目前基于震损演化规律的岩质边坡精细化抗震设计方法仍存在明显不足。鉴于此, 以四川某岩质边坡为例, 建立了预应力锚索—抗滑桩组合支护的 PLAXIS 数值模型, 开展了地震作用下抗滑桩位置、长度、间距、锚索预应力与间距等参数的动力响应规律研究, 并结合 HHT 边际谱方法研究震损发育机制与优化支护方案的抗震效能。获得以下主要研究结果: (1) 位移响应分析表明易震损区主要分布在滑动面上缘露头与下缘, 应分别采用注浆或锚索加密等措施加强; (2) 桩身 $0.3L \sim 0.4L$ 区域为震损破坏核心区, 适当加长桩长并合理布置间距可降低锚索超限风险, 提升整体承载能力; (3) 锚索在组合结构中更易破坏, 预应力提升有助群锚协同受力, 锚索间在震损易发区域加密 30%, 其他区域适当放宽的差异化布设方案可优化荷载分配、降低坡表动力响应; (4) 通过边际谱分析, 从震损能量的角度验证了“局部强化, 整体协调”方案可抑制上缘震损, 边际谱幅值降低约 48%。研究成果可为地震区岩质边坡的抗震支护设计提供理论参考与工程依据。

关键词: 层状边坡; 桩锚组合支护; 边际谱分析; 震损机理; 抗震优化; 工程地质学。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2025)10-3929-14

收稿日期: 2025-06-12

Seismic Dynamic Response and Damage Mechanism Analysis of Slope Reinforced by Pile-Anchor Structures

Wang Zhe^{1,2}, Shi Zhenming^{1,2}, Hou Zhuolin³, Zhao Fei^{1,2}, Zhang Qingzhao^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China

Abstract: Layered rock slopes are widely distributed in southwest China and are highly susceptible to instability and landslides under seismic loading. Prestressed anchor-anti-sliding pile composite support is one of the most commonly used reinforcement measures, yet its seismic response mechanism is complex, and refined seismic design methods for rock slopes based on damage evolution remain insufficient. To address this, a PLAXIS numerical model of a prestressed anchor-anti-sliding pile composite structure was established for a representative rock slope in Sichuan Province. The seismic response patterns of key parameters, including pile position, length, spacing, and anchor prestress and spacing, were investigated. The HHT-based marginal spectrum

基金项目: 国家重点研发计划项目(Nos.2023YFC3008300, 2023YFC3008305); 国家重点研发计划项目(No.2019YFC1509702).

作者简介: 王哲(1995—), 男, 博士研究生, 从事边坡地质灾害防治研究. ORCID: 0000-0001-6670-7592. E-mail: 2110233@tongji.edu.cn

* **通讯作者:** 张清照(1982—), 男, 副教授, 从事岩体力学及地质灾害防治研究, E-mail: zqz0726@163.com

引用格式: 王哲, 石振明, 侯卓霖, 赵飞, 张清照, 2025. 桩锚参数对边坡地震动力响应的影响及震损机理. 地球科学, 50(10): 3929—3942.

Citation: Wang Zhe, Shi Zhenming, Hou Zhuolin, Zhao Fei, Zhang Qingzhao, 2025. Seismic Dynamic Response and Damage Mechanism Analysis of Slope Reinforced by Pile-Anchor Structures. *Earth Science*, 50(10): 3929—3942.

method was employed to analyze damage development mechanisms and evaluate the seismic effectiveness of optimized reinforcement layouts. The main findings are as follows. (1) Displacement response analysis indicates that seismic damage is most likely to occur near the upper and lower ends of the sliding surface. Grouting and localized anchorage densification are recommended in these zones. (2) The region around $0.3L-0.4L$ of the anti-slide pile is identified as the seismic damage core zone. Extending pile length and optimizing pile spacing can help reduce the risk of tensile failure in anchors and enhance overall bearing capacity. (3) Anchors are more prone to failure than piles in the combined support system. Increasing prestress improves anchor synergy. A differentiated layout strategy—densifying anchor distribution by 30% in seismic-prone zones and relaxing it in stable areas—can optimize load transfer and reduce slope surface response. (4) Marginal spectrum analysis from an energy-based perspective further confirms the effectiveness of the “localized reinforcement, overall coordination” strategy. This approach suppresses seismic damage near the upper slope and reduces the marginal spectral amplitude by approximately 48%. Therefore, the findings provide theoretical and practical guidance for seismic support design of rock slopes in earthquake-prone regions.

Key words: layered rock slope; pile-anchor composite support; marginal spectrum analysis; seismic damage mechanism; seismic optimization; engineering geology.

0 引言

我国西部地区构造活动强烈,地震频发,常引发大规模滑坡等地质灾害。以 2008 年汶川地震为例,共诱发滑坡超过 15 000 处(李秀珍等,2011)。该区域地形高陡,岩体结构复杂,软岩夹层与破碎带普遍发育,震时极易出现“层间错动—剪胀—贯通”型破坏。针对含软弱夹层边坡的抗震支护机制开展深入研究,具有重要工程意义。

抗滑桩与预应力锚索的组合结构是目前边坡加固的主流方式。国内外学者开展的大量模型试验和数值模拟研究表明,柔性桩锚结构较刚性支护更具抗震优势(周德培等,2010),在模型试验中,杨明等(2008)提出“固脚强腰”支护理念,有效避免边坡越顶破坏;Fan *et al.* (2019)利用大型振动台研究发现组合结构能减小边坡加速度放大效应,不同坡度区域应采用差异化锚索布置;张卢明等(2020)和 Wu *et al.* (2021)验证了该结构对软弱夹层边坡具有良好的抗震性能,在 0.9 g 强震下锚索预应力损失为 17%~23%,桩锚表现出明显的协同特性。

在数值模拟方面,赖杰等(2014)采用有限差分法研究桩锚加固边坡动力响应,发现强度折减法可有效评估安全系数;黄土奎等(2016)分析了地震作用下抗滑桩剪力和弯矩的“S”型分布规律,与 Zhao *et al.* (2009)结果一致;Xu *et al.* (2021)指出,锚索预应力设置应合理控制在滑力的 20% 左右,以实现桩索协同抗滑。上述研究为理解组合支护结构的动力响应机制提供了基础,但震损演化规律与关键参数影响机制仍需进一步探讨,本文拟通过数值模拟方法对其开展系统研究。

此外,在结构优化研究方面,现有研究表明单纯提高支护强度与密度不仅经济性差,还可能因锚索过密导致相互干扰,形成整体拉裂面而引起失效(张发明等,2002)。因此,在明确不同部位锚索动力响应规律的基础上,实施差异化设计策略,以提升系统整体性能。近年来,Hilbert-Huang 变换(HHT)方法为支护体系的震损评估提供了新的能量分析手段。已有研究通过 HHT 边际谱提取地震信号特征,发现谱幅值与坡体位移及输入地震波类型密切相关,具备一定的震损识别能力(刘汉香等,2019;刘新荣等,2019)。但该方法在复杂结构中的定量应用体系尚未成熟。

综上,目前对桩锚组合支护边坡的震损演化过程、构件协同机制及能量响应规律仍缺乏系统研究。本文以四川某工程为依托,构建 PLAXIS 动力分析模型,重点研究桩锚参数对组合结构动力响应规律与震损分布特征的调控机制,结合 HHT 边际谱分析方法建立震损评估指标体系,进而提出精细化、差异化的抗震优化方案。研究成果为高烈度区岩质边坡的抗震支护设计提供理论参考与工程依据。

1 分析模型建立

1.1 工程原型

原型边坡位于四川省东北部,地处低山丘陵剥蚀地貌,边坡下伏岩层为砂质页岩,上层主要为泥质页岩,分布如图 1 所示。因不良地质作用沿强风化泥质页岩和中风化泥质页岩的接触面产生滑动。根据前期设计,抗滑桩设计长度为 $L=35$ m,直径 2 m 的圆柱形 C30 混凝土挖孔桩,预应力锚索锚固段长度为 8 m,锚固角为 $\beta=25^\circ$,每排由高至低设置 18 根

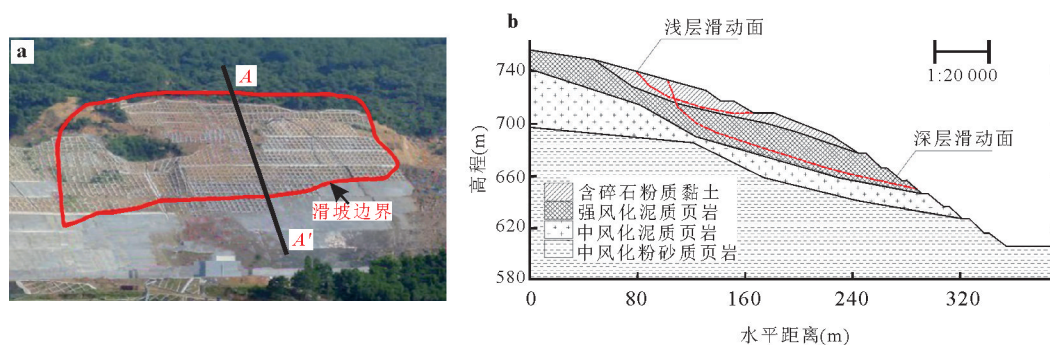


图 1 原型边坡现场区域图与剖面图

Fig. 1 Site area and cross-section of the prototype slope

a. 区域图; b. 剖面图

锚索, 1~18 由高至低排列, 锚索固定在 C30 混凝土框架梁上, 厚度 0.5 m.

1.2 地震动输入设置

本文采用云南鲁甸地震波作为基础输入波形, 加载方向为水平和竖直双向, 其中竖直分量幅值为水平向的 2/3, 以更贴近实际地震动特性. 所选地震波的加速度时程如图 2 所示.

参考《建筑抗震设计规范》与美国地质调查局 (USGS) 发布的 Modified Mercalli Intensity (MMI) 分级方法, 设置 5 种 X 方向峰值加速度 (PGA) 工况, 分别为 0.05、0.10、0.15、0.20 和 0.25 g, 代表微震、弱震、中震、中强震、强震工况.

1.3 边坡与支护结构模型参数

如图 3 所示, 边坡设置尺寸为 400 m × 10 m × 180 m (长 × 宽 × 高), 岩体本构采用摩尔-库伦模型, 各岩层参数如表 1. 采用点对点锚杆模型和 Embedded 单元分别模拟锚索自由段和锚固段, 两者刚性连接. 坡面框架梁采用板单元模拟, 桩体采用实体单元 C30 混凝土桩, 参数设置如表 2、3 所示. x 与 y 方向边界条件为自由边界, z 方向底部为固定边界.

1.4 模型网格与边界

在有限元分析中, 网格尺度与边界设置不合理会导致地震波的非正常反射和投射, 影响监测结果 (刘晶波等, 2020), 将目标波形滤波后输入矩形模型试算验证, 得出最合理尺寸为 10 m, 在保证监测精度的同时, 相较 5 m 网格能够提高 48% 计算效率. 双相输入时选取底部为固定边界、四周采用自由场边界效果最好, 这一结果与之前学者的研究一致 (董士欣, 2018).

1.5 动力特征阻尼参数确定

输入 0.1 g 的白噪声对模型进行激励, 根据传递函数法 (蒋良淮等, 2010; 范刚等, 2016, 2017) 得

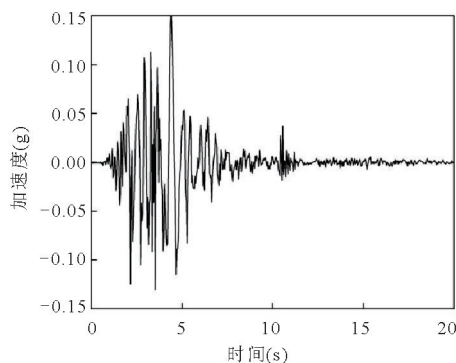


图 2 滤波处理后的鲁甸地震波

Fig. 2 Filtered Ludian seismic waves

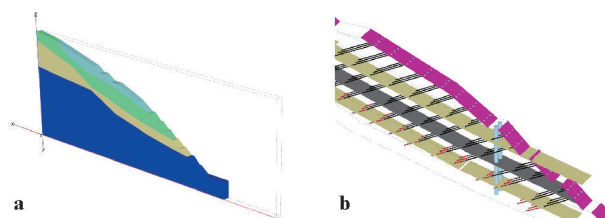


图 3 三维数值模型

Fig. 3 Three-dimensional numerical model

x 与 y 方向边界条件为自由边界, z 方向底部为固定边界. 灰色部分为软弱夹层, 黄色部分为上下正负界面

到边坡的第 1 主振频率为 2.1 Hz, 第 2 主振频率为 2.9 Hz, 如图 4 所示; 根据规范选取阻尼比 ξ 为 0.05, 得到瑞利阻尼参数为如表 4 所示.

2 桩体作用动力响应机理分析

2.1 抗滑桩位置的选取与动力稳定性分析

选取包括无支护在内的 8 种不同抗滑桩位置的方案进行对比研究, 桩位布置如图 5 所示, 桩长 35 m, 桩间距为 4 m.

表 1 数值计算模型材料参数
Table 1 Material parameters of the numerical calculation model

材料	重度 $\gamma(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E(\text{MPa})$	泊松比 ν	内摩擦角 $\theta(^{\circ})$	黏聚力 $c(\text{kPa})$
含碎石粉质黏土	19	24	0.35	15.5	23
强风化泥质页岩	21	65	0.30	19.0	46
中风化泥质页岩	24	450	0.25	29.0	120
中风化粉砂质页岩	24	1 800	0.25	35.0	298

表 2 抗滑桩模型参数
Table 2 Model parameters of anchor anti-sliding pile

参数	量值
重度 $\gamma(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	24
弹性模量 $E(\text{MPa})$	30 000
泊松比 ν	0.2

表 3 锚索模型参数
Table 3 Model parameters of anchor cable

参数	量值
重度 $\gamma(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	78
弹性模量 $E(\text{MPa})$	200 000
泊松比 ν	0.2
预应力(kN)	500

采用强度折减法得在不同桩位下的边坡静力稳定性系数如图 6 所示,通过强度折减法计算得到,无桩时安全系数最低为 1.339,安全系数最高的 3 个抗滑桩布置位置为 2、3、4 号位置,安全系数相较于其他位置较高,均能达到 1.4 以上,因此对这 3 个位置进行对比研究.结合剪应力分布图(图 7)可知,抗滑桩设置在 2 号位置时,潜在滑动面高于桩顶,可能发生越顶破坏.而布置在 4 号位置时,桩后剪切位移得到较好控制,但桩前区域形成了较大的剪切位移集中区域,这部分的潜在滑动区域没有得到良好支护效果.因此,对于边坡整体控制效果都较好的 3 号位置为抗滑桩设置的最佳位置,桩后的滑动面得到有效的支护,桩前的剪切应变较小.

首先研究边坡在地震过程中不同时刻的抗滑桩动力响应演化特征,地震输入为弱震工况($X=0.1\text{ g}$, $Z=0.067\text{ g}$).如图 8a 所示,抗滑桩弯矩呈现“S”型分布规律,这一现象与相关研究的结论基本一致(黄士奎等, 2016; Yang *et al.*, 2021),此外可以看出,施加地震荷载后的最大负弯矩点在 11 m ($0.3 L$)处,在静力条件下($t=0$)没有发生改变.地震输入在 5 s 时达到最大负弯矩 12 928 $\text{kN}\cdot\text{m}$.此时也达到最大负剪力为 $3\times 10^3\text{ kN}$,出现在桩顶深度为 17 m ($0.5 L$)处.而地震作用后($t=20\text{ s}$),由于边坡变形桩体位移等因素,桩身弯矩和剪力都没有恢复到静力条件下,表明除地震中,震后支护结构受到的外力依然大于静力条件.

然后研究不同地震强度对结构动力响应的影响程度,选取 $t=20\text{ s}$ 时刻作为对比节点,如图 9,地震波幅值从 0.05 g 提高到 0.25 g 过程中,峰值负剪力由 3.1 kN 提升到 4.0 kN,对应提升幅度分别为 10%、13%、19%、29%.最大负弯矩由 12 928 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 分别提升到 17 230 $\text{kN}\cdot\text{m}$,对应提升幅度分别为 7%、14%、23%、33%.抗滑桩易受弯震损深度为 8~15 m ($0.2 L\sim 0.4 L$),易受剪切震损的深度为 12~18 m ($0.3\sim 0.5 L$).综合来看,在深度为 12~15 m ($0.3 L\sim 0.4 L$)区域为抗滑桩的易震损破坏区域.因

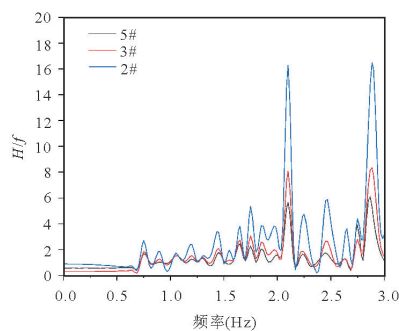


图 4 0.1 g 白噪声激励下模型的传递函数
Fig. 4 Transfer function of the model under 0.1 g white noise excitation

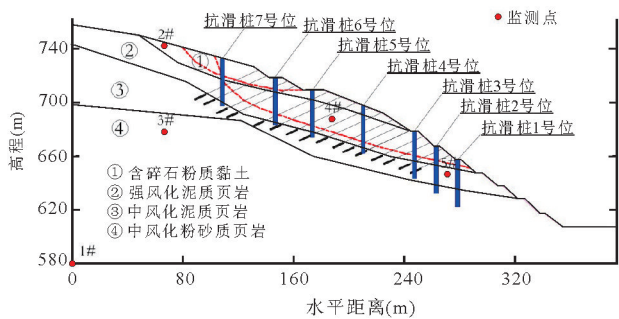


图 5 桩位布置方案与监测点位置
Fig. 5 Pile layout scheme and monitoring point locations

表 4 边坡模型瑞利阻尼参数
Table 4 Rayleigh damping parameters of the slope model

阻尼类型	质量参与系数 α	刚度阻尼系数 β	第 1 主振型周期 T_1 (s)	第 2 主振型周期 T_2 (s)
瑞利阻尼	0.765 29	$3.183\ 1\times 10^{-3}$	6.67	0.152

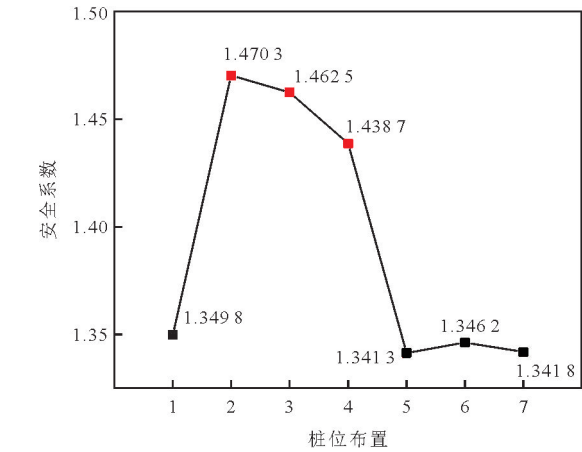


图 6 不同桩位布置下静力安全系数
Fig. 6 Static safety factors under different pile layouts

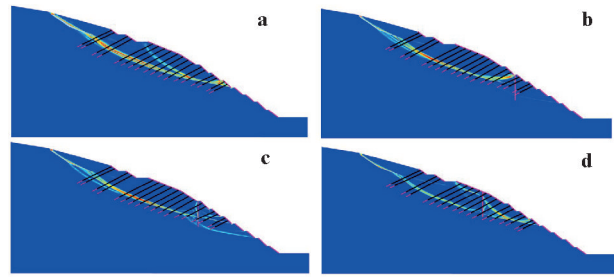


图 7 不同抗滑桩位置时的剪应力云图
Fig. 7 Shear stress contour maps for different anti-sliding pile positions
a. 无抗滑桩; b. 桩位 2; c. 桩位 3; d. 桩位 4

此在地震易发区,可在抗滑桩震损易破坏区域通过提高配筋率,或者采用新型的钢纤维混凝土(Zhao *et al.*, 2024),提高该区域抗震性能,从而提高支护结构整体抵抗地震动荷载的能力.

2.2 抗滑桩长度参数对于边坡支护结构动力响应的影响

基于工程实际经验,考虑抗滑桩长度参数如表 5,分析桩长对边坡支护结构动力响应的影响.

在 0.1 g 微强震作用下(图 10a)锚索峰值轴力随抗滑桩桩长增加呈现显著变化:当桩长由 25 m 增至 35 m 时,轴力由 1 363 kN 降至 1 239 kN(降幅达 9.1%),表明抗滑桩埋深增加降低了锚索的震损效应,抗滑桩分担了更多荷载,峰值弯矩和剪力随之提高,桩身震损效应也随之增加.但是当桩长超过

表 5 抗滑桩长度参数设置
Table 5 Length parameter settings of anti-sliding piles

工况	刚度 E (MPa)	桩长 L (m)	桩间距 D (m)
1	30 000	25	4
2	30 000	30	4
3	30 000	35	4
4	30 000	40	4
5	30 000	45	4

表 6 抗滑桩间距参数设置
Table 6 Spacing parameter settings of anti-sliding piles

工况	刚度 E (MPa)	桩长 L (m)	间距 D (m)
1	30 000	35	3
2	30 000	35	4
3	30 000	35	5
4	30 000	35	6
5	30 000	35	7

35 m 后,峰值弯矩和剪力幅趋于平缓,表明存在最优抗震桩长阈值区间,超出阈值后桩长增加对支护结构的分担效应影响较小.

在 0.15 g 中震工况下(图 10b)协同抗震机制产生显著影响:当桩长由 25 m 增至 35 m 时,锚索轴力超过极限抗拉拔力(1 500 kN)的危险区段从 5 处减少至 2 处(降幅 60%).抗滑桩峰值弯矩和剪力的变化趋势与 0.1 g 微震工况下的现象类似,在 35 m 后增幅区域平缓.对比分析表明,35 m 桩长可使锚索超限风险降低 60% 左右,最有利于锚索—抗滑桩支护结构协同抗震.

2.3 抗滑桩间距参数设置对于边坡支护结构动力响应的影响

考虑 5 种抗滑桩间距参数,如表 6 所示,研究对锚索—抗滑桩支护结构动力响应的影响.

在 0.1 g 微强震工况下,抗滑桩间距参数对桩—锚体系动力响应呈现显著调控作用(图 11).当桩间距从 3 m 增至 7 m 时,抗滑桩峰值弯矩由 15 010 kN·m 下降至 9 260 kN·m(降幅 38.3%),峰值剪力从 3 400 kN 下降到 2 300 kN(降幅 32.4%).而锚索轴力仅从 1 283 微增至 1 313,增幅(增幅 2.3%).这是因为桩间岩体参与了更多承载,减少了单桩受力,

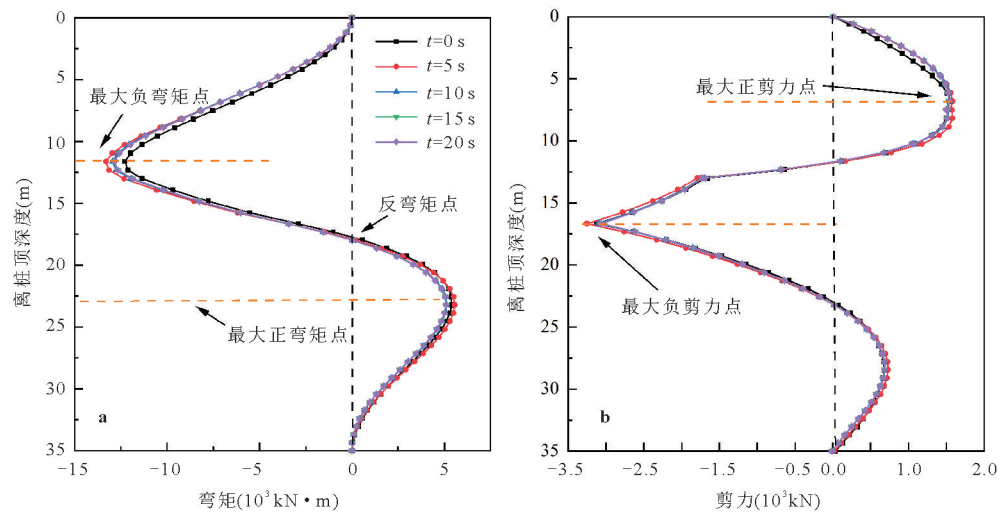


图 8 不同监测时间下抗滑桩弯矩与剪力图($t=20\text{ s}$)

Fig. 8 Bending moment and shear force diagrams of anti-sliding piles at different monitoring times ($t=20\text{ s}$)

a. 弯矩图;b. 剪力图

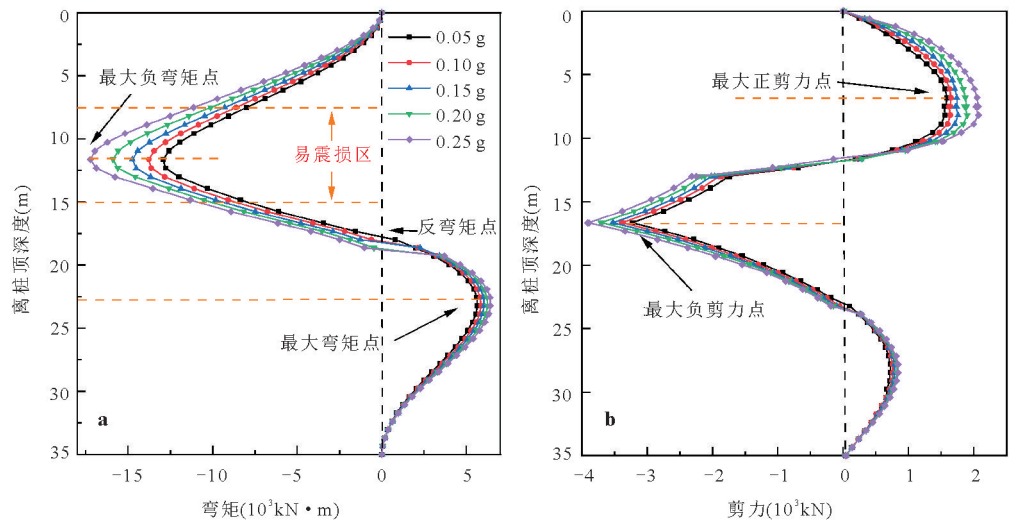


图 9 不同加速度输入下抗滑桩峰值弯矩与剪力图($t=20\text{ s}$)

Fig. 9 Peak bending moment and shear force diagrams of anti-sliding piles under different acceleration inputs ($t=20\text{ s}$)

a. 弯矩图;b. 剪力图

弱化了土拱效应,避免局部应力集中.因此,抗滑桩间距增大引发的剪力重分布效应显著强于锚索受力调整,适当增大抗滑桩间距可以更充分发挥抗弯性能,锚索—抗滑桩协同支护效果更好.

综上所述,锚索—抗滑桩联合支护结构中,抗滑桩的位置、间距、长度对于抗滑桩本身的动力响应影响显著,增加桩长、一定范围内提高间距更能发挥桩身抵抗受弯与受剪的性能.同时,在阈值范围内桩长调整对锚索拉力峰值的抑制效率明显,可以显著降低锚索超限风险.

3 锚索作用动力响应机理分析

将不同位置的锚索按照高程由高至低进行编号,如图 12,高程最高处的锚索支护结构为 1 号锚索,最低处为 18 号锚索.输入逐级增加的鲁甸波,监测地震荷载作用下不同位置锚索的动力响应,分析响应机理以及锚索预应力、锚索间距参数对支护结构动力响应的影响.

3.1 锚索结构地震动力响应分析

首先研究边坡在地震过程中不同时刻的锚杆响应演化特征,输入水平幅值 0.1 g、竖直幅值 0.067

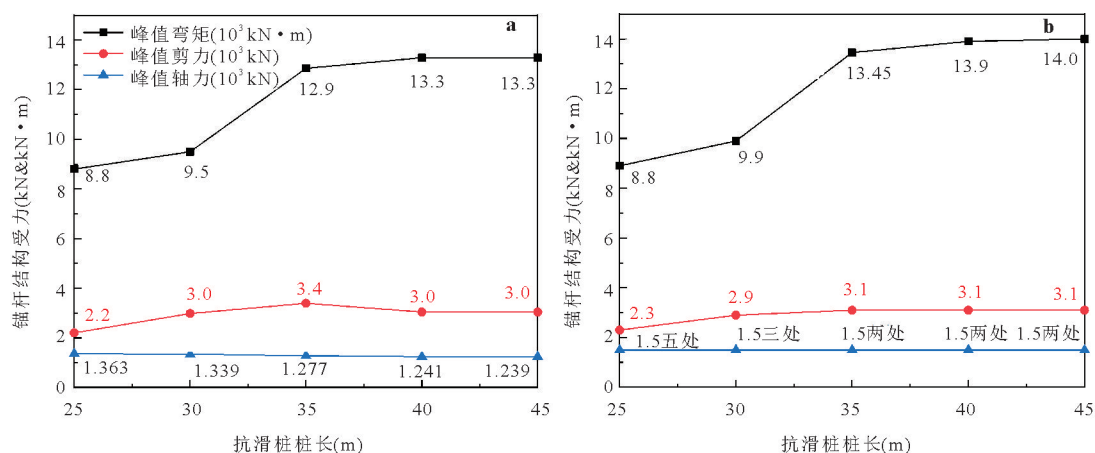


图 10 不同抗滑桩桩长下桩锚结构受力

Fig. 10 Structural forces of the pile-anchor system under different anti-sliding pile lengths

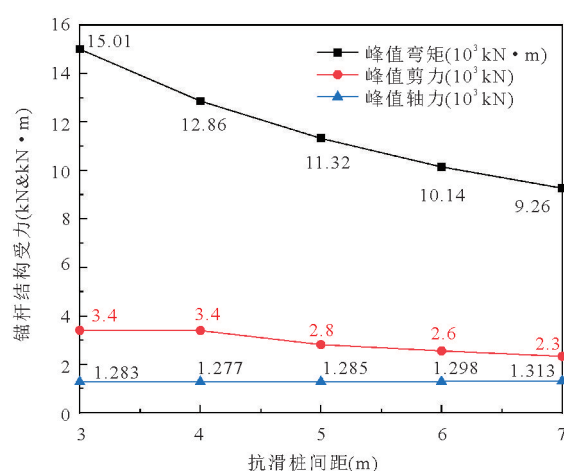
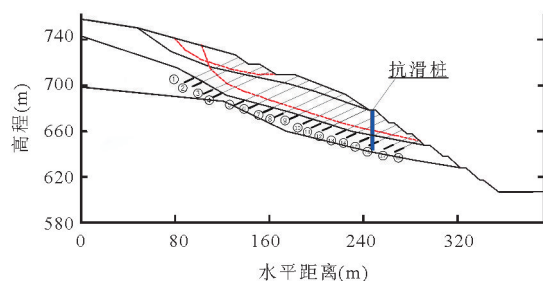
a. 0.10 g ; b. 0.15 g 图 11 不同抗滑桩桩间距下桩锚结构受力(0.10 g)Fig. 11 Structural forces of the pile-anchor system under different anti-sliding pile spacings (0.10 g)

图 12 锚索布置方案

Fig. 12 Anchor cable layout schemes

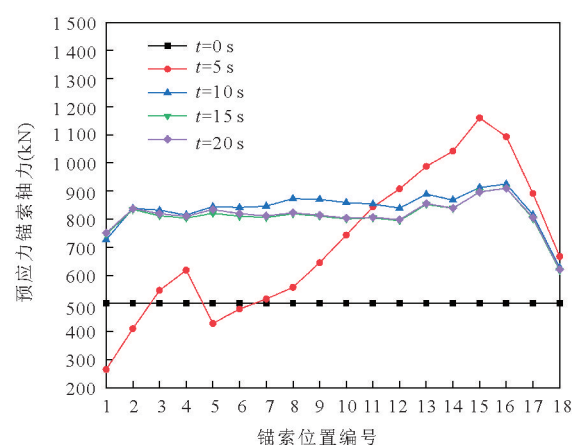


图 13 不同监测时间下锚索轴力响应

Fig. 13 Axial force response of anchor cables at different monitoring times

于震前所承受的荷载.相较于震前,震后锚索结构整体受力提升约60%,位于软弱滑动面下缘18号锚索提升效果最小,约30%.

图 14 揭示不同地震动强度下锚索峰值轴力变化规律:地震波幅值从 0.05 g (微震)增至 0.25 g (强震)过程中,除 4 号外,其他锚杆均在 0.2 g (中强震)时因轴力达到 1500 kN 极限抗拔力发生断裂;14~16 号预应力锚索在 0.15 g (中震)时相继失效,其轴力增速显著高于其他锚索,为锚索易损位置;18 号锚索轴力由 602 kN 增至 1085 kN ,没有达到极限承载力,未发挥全部支护效能.对比前文抗滑桩动力响应可知,组合支护体系中的锚索更易发生震损破坏,此结论与文献 (Lin *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2021) 研究结果一致.

地震幅值的增大也显著加剧了边坡震损效应,

g 的中等强度地震波,如图 13 所示,数据显示位于软弱滑动面下缘的锚索(15 号锚索)轴力在 5 s 时率先达到峰值,随着地震强度的衰减锚索受力趋于稳定,震后各预应力锚索受力情况比较接近,且都大

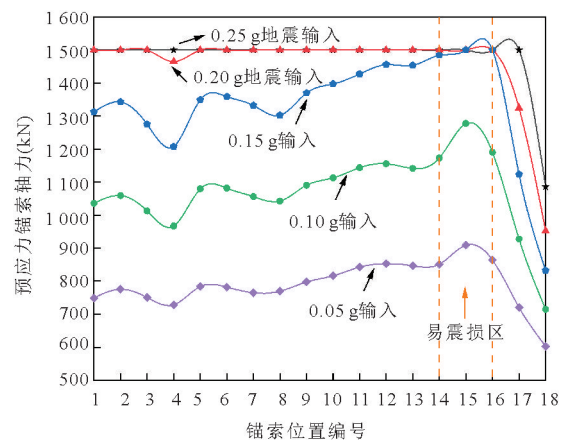


图 14 不同强度地震波时的锚索峰值轴力
Fig. 14 Peak axial force of anchor cables under seismic waves of different intensities

如图 15 所示,微震工况(0.05 g)下,震损发育取分布在软弱层上下缘,特别是下缘抗滑桩支护区域附近,沿滑动面存在局部破坏集聚点.当输入强度增至 0.1 g(中强震)时,震损区沿滑动面上缘及深层—浅层滑动面交界带扩展,深层滑动面下缘扩张效应明显.中震工况(0.15 g)下,14~16 号锚索周边形成密集震损发育区,15、16 号锚索率先拉断破坏,证明该区域为边坡抗震薄弱部位.

3.2 锚索预应力参数设置对于边坡支护结构动力响应的影响

考虑锚索预应力参数如表 7,讨论 5 种预应力参数对边坡支护结构动力响应的影响.

在 0.1 g 的弱震工况下,锚索预应力对支护结构动力响应的影响(图 16)呈现以下规律:随着锚索预应力的增加,锚索系统的峰值轴力整体呈现增长趋势,表明合理增大预应力可通过主动约束岩体变形,更充分发挥支护结构承受动力荷载的能力,提升边坡稳定性.值得注意的是,边坡下缘 18 号锚索的轴力增长速率显著高于其他锚索,改善了 18 号锚杆存在的支护效果发挥不足的现象.同时,预应力增加使锚索轴力的震荡区间逐渐收窄,反映出锚索系统协同受力的均衡性改善.然而,预应力调控对支护边坡整体的稳定性提升效果有限,主要受限于岩体塑形不可恢复变形和锚固界面动态损伤,使得预应力锚索的变形调控能力变弱.因此在工程实践中,预应力优化需要辅以局部加固措施,以实现支护体系抗震性能的综合提升.

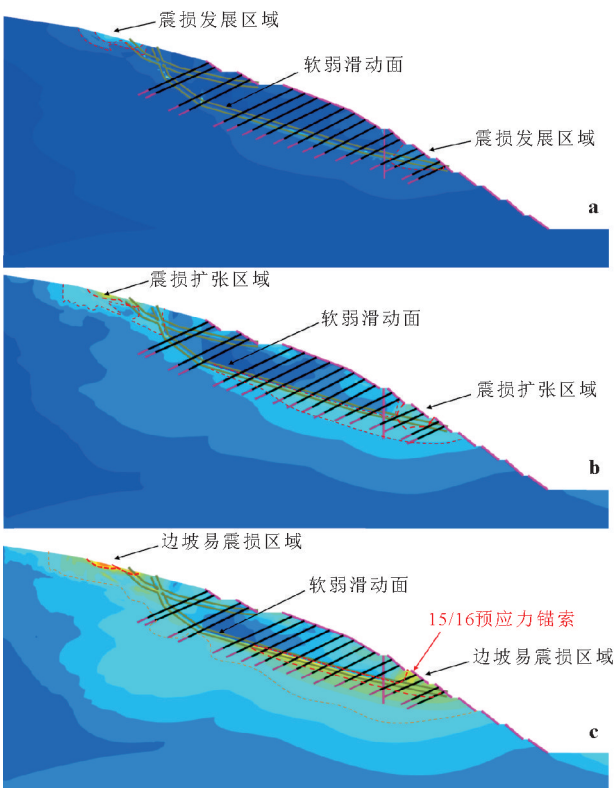


图 15 不同振幅边坡坡体峰值加速度响应云图
Fig. 15 Peak acceleration response contour maps of the slope under different amplitudes
a.0.05 g 坡体峰值加速度;b.0.10 g 坡体峰值加速度;c.0.15 g 坡体峰值加速度

表 7 锚索预应力参数设置			
Table 7 Prestress parameter settings of anchor cables			
工况	刚度 $E(\text{MPa})$	锚索预应力 $F(\text{kN})$	锚索间距 $D(\text{m})$
1	20 000	300	3
2	20 000	400	3
3	20 000	500	3
4	20 000	600	3
5	20 000	700	3

3.3 锚索间距参数设置对于边坡支护结构动力响应的影响

选取 5 种锚索间距参数:1 m,2.5 m,3 m,4 m 和 5 m,预应力保持 500 kN 不变,分析在不同锚索间距下锚索的动力响应变化.

锚索间距的改变会显著影响地震荷载在支护体系中的传递路径与分配机制.由图 15 可知,间距 3 m 时,支护结构能够抵抗的最大地震峰值加速度为 0.15 g(中震).间距降低为 2.5 m 和 1 m 时(图 17),分别提升至 0.2 g(中强震)和 0.25 g(中震),表

明减小锚索间距可显著增强锚索体系的抗震承载能力.但在实际工程中,锚索间距过小会影响抗滑桩施工空间,不适用于锚索—抗滑桩组合支护体系.同时,过小的间距可能导致相邻锚索的塑性区重叠,引发局部应力集中与荷载重分布.对比不同间距时不同位置的锚索受力特征,可发现按间距 2.5 m 布置时,4~9 号与 16~18 号锚索的轴力增幅明显滞后于其他位置,表明其抗拉拔能力未充分激活,存在过度安全储备;当间距进一步缩小至 1 m,在震级提升过程中,4~10 号与 16~18 号锚索的峰值轴力响应差异更为显著,相同区段仍呈现冗余受力状态.这一现象揭示:锚桩组合支护体系的抗震性能提升与锚索加密程度呈非线性关系,其本质受控于地震波传播方向以及群锚空间协同效应,具体影响需要进一步试验进行论证.在边坡抗震支护中,宜通过动态调整,对局部和整体采取不同的锚索间距或预应力设计,易震损区域增大密度“局部强化”,其他区域适度增大锚索间距实现“整体协调”.在避免锚索拉断的前提下,优化局部区段锚索的荷载分担比例.

以 0.15 g (中震) 抗震需求为例,采用“局部强化,整体协调”方法优化锚索间距参数:在易震损区 (12~16 号锚索) 将水平间距加密至 2.5 m (较稳定区间距缩减约 30%),中上部稳定区 (1~11 号锚索) 扩展至 4 m,底部低影响区放宽至 5 m.优化参数后锚索峰值轴力响应如图 18 所示,差异化间距布置使各锚索峰值轴力均控制在极限拉拔力的 70% 以内,保留约 30% 的安全储备,同时显著优化荷载分布.

相较于全断面 2.5 m 间距方案 (图 17a),易震损区下方 18 号锚索峰值拉拔力由 650 kN 提升至 933 kN (增幅 44%),锚索受拉峰值由 1 381 kN 降至 1 229 kN (降幅 11%),最大轴力极差从 731 kN 压缩至 296 kN (降幅 60%),有效抑制了局部锚索应力集中现象.这一结果揭示:基于地震响应分析的锚索间距差异化布置,易震损区域加密 30%,在关键部位提供抗拉拔冗余度,同时利用非震损区的间距扩展避免资源浪费,实现抗震性能与工程经济性的协同优化.

对比边坡坡内 (3#监测点) 与坡表 (4#监测点) 在锚索全 3 m 间距参数与差异化参数优化方案下的位移响应 (图 19a).结果表明优化后地震动输入时位移量显著降低:坡内位移峰值由 0.103 m 降至

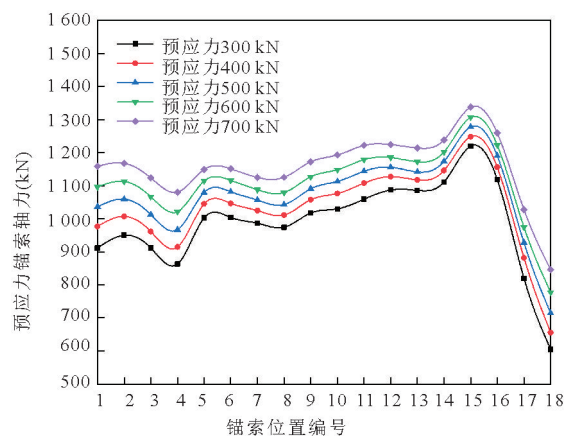


图 16 不同锚索预应力下锚索峰值轴力变化

Fig. 16 Variation of peak axial force of anchor cables under different prestress levels

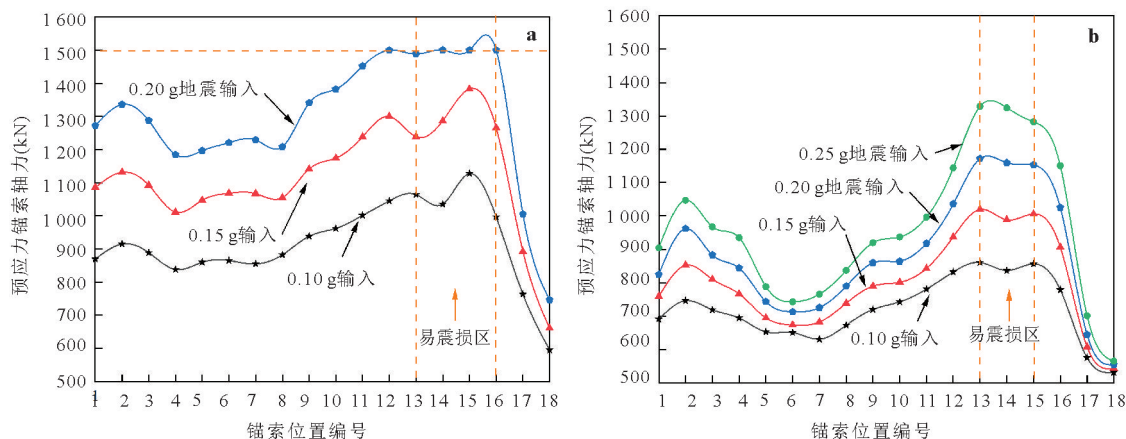


图 17 不同强度地震输入下锚索峰值轴力

Fig. 17 Peak axial force of anchor cables under seismic inputs of different intensities

a. 2.5 m; b. 1 m

0.095 m (降幅 7.8%), 位移稳定值由 0.073 m 降至 0.059 m (降幅 19.2%); 坡表移峰值由 0.124 m 降至 0.109 m (降幅 12.1%), 位移稳定值由 0.095 m 降至 0.082 m (降幅 13.7%). 受软弱滑动面控制, 优化后坡表位移仍然高于坡内约 14.7%~18.6%, 说明坡表区域仍为抗震薄弱环节进一步以 1# 监测点为基准分析加速度放大效应, 优化后坡内加速度放大系数由 2.854 降至 2.366 (降幅 17.1%), 坡表由 2.866 骤降至 2.045 (降幅 28.6%), 表明桩锚支护体周边区域的加速度响应抑制效果尤为显著. 该现象印证优化后的锚索布置通过调整应力路径, 有效削弱了地震波在坡体浅层的动力放大效应, 且对坡表区域的加速度调控效能更好.

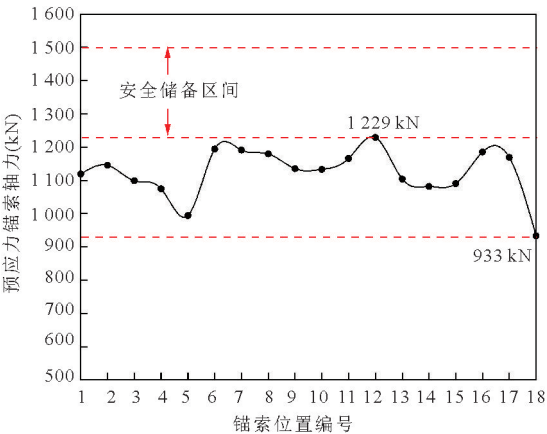


图 18 设置抗震等级 0.15 g 优化间距参数下锚索峰值轴力

Fig. 18 Peak axial force of anchor cables under optimized spacing parameters for seismic intensity of 0.15 g

4 桩锚支护岩质边坡的震损能量分析

在地震波激励中坡体损伤部位边际谱幅值和特征频率会发生显著变化, 采用基于 Hilbert-Huang 变换 (HHT) 的边际谱分析方法对支护边坡进行震损效应的能量分析.

在边坡表面高程方向布设 4 个表面测点 (编号 1#~4#) 监测其加速度动力响应谱 (图 20). 考虑 3 种工况: 工况 1: 为间距锚索支护 (间距 3 m), 输入峰值加速度 (PGA) 为 0.1 g 的双向鲁甸波; 工况 2: 锚索间距不变, 提高地震动强度 $PGA=0.15\text{ g}$; 工况 3: 采用“局部强化、整体协调”的间距设计方案, 1~11 号锚索间距 4 m, 12~16 号锚索间距 2.5 m, 17~18 号锚索间距 5 m, 地震波幅值 0.15 g. 对 3 组工况的测点加速度时程数据进行 HHT, 提取其希尔伯特谱, 并通过频域积分得到边际谱, 以量化不同频率成分的能量分布特征.

图 21 为工况 1 边坡在 0.1 g 地震波时的监测点边际谱. 3# 监测点相较于 1# 监测点幅值和总能量小幅增长, 说明坡表加速度存在高程放大效应. 但 2# 监测点和 4# 监测点的能量幅值分别为 1# 监测点的 2 倍和 8 倍, 大于 3# 监测点. 这表明坡体在 2# 监测点 (位于软弱滑动面上缘) 和 4# 监测点 (位于滑动面下缘上部) 附近存在显著的幅值变化区域. 结合图 14b 峰值加速度响应图分析, 2# 监测点附近对应坡表破坏剧烈区域, 4# 监测点附近则为震损破坏的扩展区, 与边坡破坏模式的空间分异性一致.

这里值得注意的一点是, 范刚 (2016) 和刘汉香等 (2019) 指出震损区域通常伴随边际谱幅值降低,

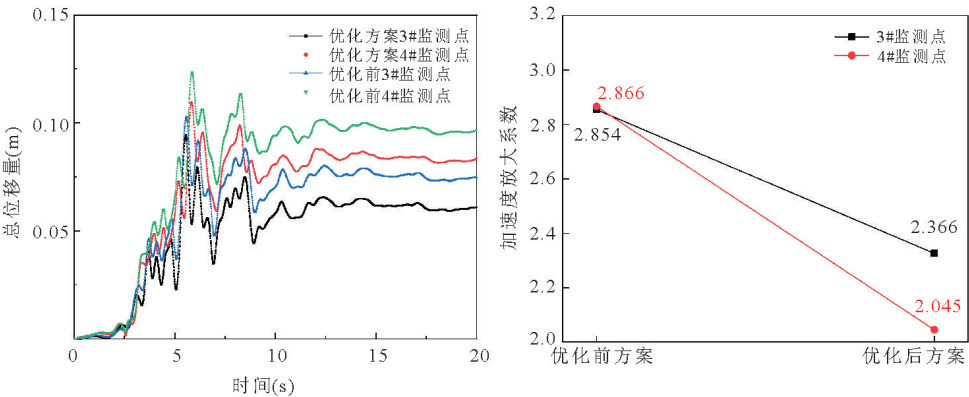


图 19 设置抗震等级 0.15 g 优化前后监测点位移与放大系数

Fig. 19 Displacement and amplification factor of monitoring points before and after optimization under 0.15 g seismic intensity

a. 位移; b. 放大系数

本研究则呈现激增现象.原因是有限元方法未考虑岩体破裂后的能量耗散,导致局部损伤区仍维持高能量状态,但通过特征频率与能量的剧烈变化判断边坡震损效应是可行的.

工况 2 增大地震波输入强度后(图 22),各测点边际谱幅值均显著提升,其中 2# 监测点和 4# 监测点的幅值能量分别达到工况 1 中 1# 监测点的 10 倍和 13 倍.2# 监测点边际谱幅值增加速度明显加快,同时 4# 监测点的幅值同样处于较高的水平,表明在地震作用下,软弱滑动面上缘(4# 监测点)率先出现

震损发育区域,随着地震震级提高,软弱滑动面上缘震损破坏进一步发育扩张并达到峰值,同时软弱滑动面下缘上部附近震损区发育,当地震震级进一步提高时,两处的震损破坏效应都达到峰值.

工况 3 改变了锚索间距,2# 监测点附近锚索间距变小,而 3# 监测点附近间距增大.分析边际谱(图 23)可以看出,2# 监测点的幅值约为工况 1 的 5 倍,相较工况 2 降低 48%.但 4# 监测点的响应仍保持高值.这表明该方案有效抑制了软弱面下缘附近的破坏发展,但对上缘区域的震损控制效果有限,在工程实践中需综合采用注浆等加固方法对软弱面上缘进行支护.

综合 3 组工况的边际谱演化特征,可以推断在边坡受地震荷载时,软弱滑动面上缘因高程放大效应率先形成震损发育核心,随着地震能量进一步增加时,软弱滑动面上缘震损区能量激增,下缘震损区同步强化造成较大的破坏.而差异化的锚固间距支护方法可以大幅降低下缘损伤扩展速率,阻断了特定震损路径.从震损效应能量的角度验证了“局部强化—整体协调”的差异化锚索间距可以提高支护结构抗震性能.

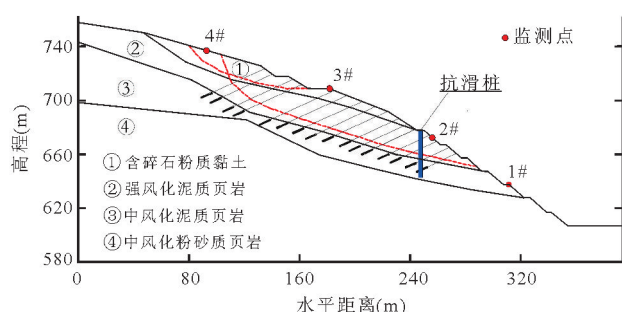


图 20 坡表加速度时程监测点布置

Fig. 20 Layout of monitoring points for slope surface acceleration time histories

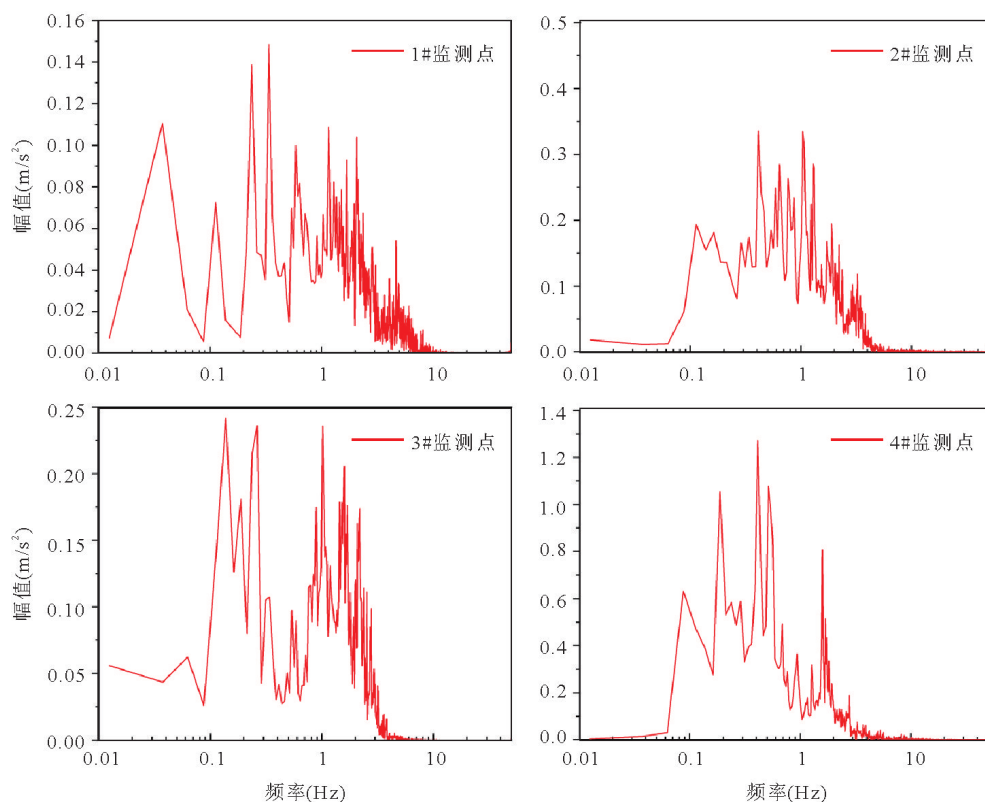


图 21 等间距支护在 0.1 g 地震波时测点边际谱图

Fig. 21 Marginal spectrum of monitoring points under 0.1 g seismic wave with uniformly spaced support

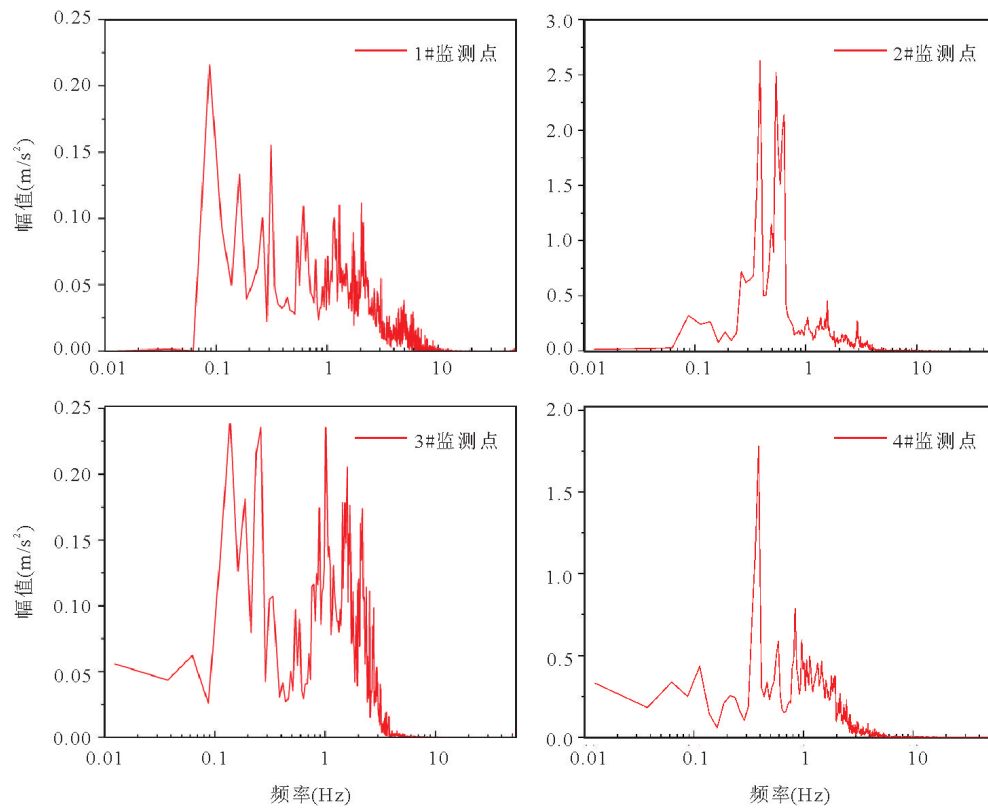


图 22 工况二下桩锚支护坡面附近监测点边际谱图

Fig. 22 Marginal spectrum of monitoring points near the pile-anchor reinforced slope surface under working condition II

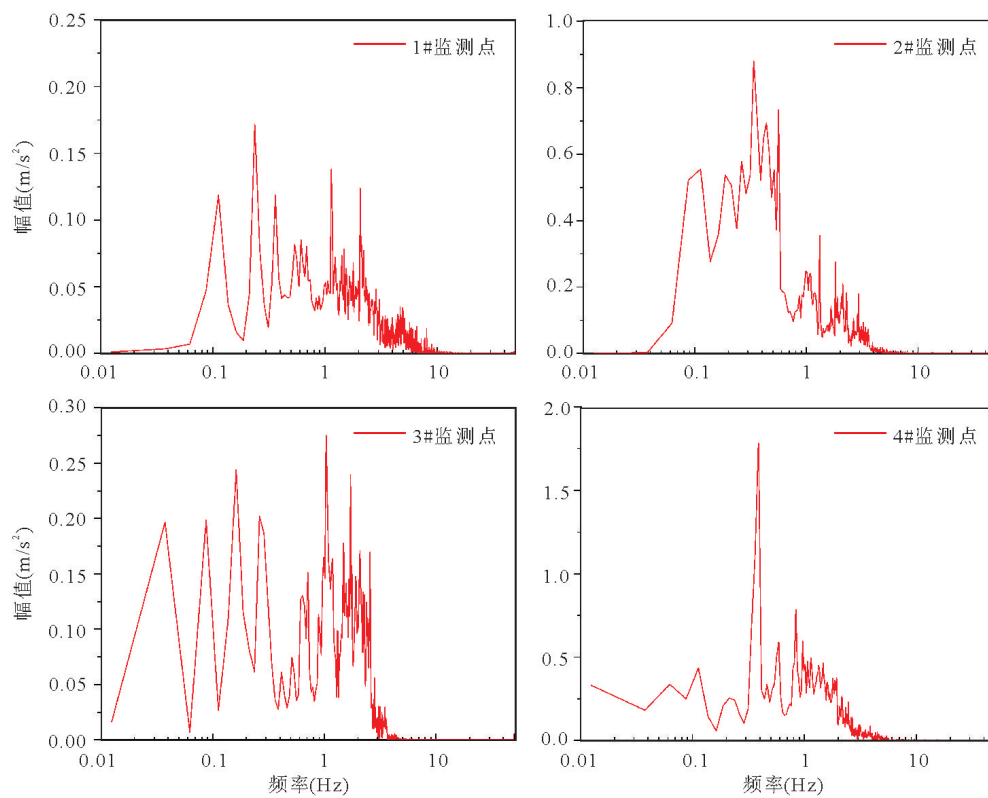


图 23 工况三下桩锚支护坡面附近监测点边际谱图

Fig. 23 Marginal spectrum of monitoring points near the pile-anchor reinforced slope surface under working condition III

5 结论

本文基于某岩质边坡工程,建立了考虑多参数耦合的预应力锚索—抗滑桩组合支护三维有限元模型,系统研究了地震作用下边坡震损分布特征与支护系统动力响应机制,并基于 HHT 边际谱分析方法提出了震损能量评价与差异化优化策略.主要结论如下:

(1)位移响应分析表明边坡震损区域分布特征为主要沿软弱滑动面发育,集中分布于深浅层滑面交汇区及深层滑面下部,易引发局部破坏甚至整体失稳.因此,上缘露头区和下缘扩展区是组合支护体系抗震设计的重点控制部位,可分别采用注浆和加密锚索等加固措施提升其抗震稳定性.

(2)抗滑桩动力响应分析得出,桩长为 35 m 时,其 $0.3L \sim 0.4L$ 深度范围(约 10.5~14 m)为震损高发区.针对该区域,建议采用纤维混凝土等高韧性材料进行局部加固,以提高其抗弯折和抗剪切特性.此外,适当增加桩长并优化桩间距,不仅可提升抗滑桩的整体抗滑承载力,还能有效降低锚索的峰值拉应力及超限风险,从而显著增强组合结构的整体抗震协同性能.

(3)锚索动力响应分析得出,受地震波入射方向及锚索群协同效应的影响,锚索间距与系统抗震性能呈非线性响应关系,且更易发生失效破坏.基于“局部强化—整体协调”的理念,提出“震损区加密 30% 锚索间距、非震损区适当放宽”的差异化布设方案,可优化荷载分配、降低坡表加速度放大效应,实现抗震性能与经济性的平衡.

(4)基于 Hilbert-Huang 变换(HHT)构建的边际能量谱分析方法,可有效追踪震损动态演化过程,并量化不同支护方案的防控效果.分析得出地震作用下边坡震损演化呈现明显时空分异特征:初始阶段在软弱滑动面上缘形成微裂隙,随着地震能量累积逐步向下缘扩展.采用基于震损分析的“局部强化”优化支护方案实施后,上缘区域 HHT 边际谱幅值显著降低 48.2%,从震损能量角度进一步验证了“局部强化、整体协调”式抗震支护的有效性.

References

Dong, S. X., 2018. Parameter Sensitivity Analysis in Numerical Simulation of Soil Dynamics Problems (Dissertation). Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang (in Chinese with English abstract).

- Fan, G., 2016. The Dynamic Response and Time-Frequency Method for Seismic Stability Evaluation of Layered Rock Slope with Weak Intercalated Layer(Dissertation). Southwest Jiaotong University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., Fu, X., et al., 2016. Application of Transfer Function to On-Site Shaking Table Test. *Rock and Soil Mechanics*, 37(10): 2869—2876(in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., Fu, X., 2017. Research on Transfer Function of Bedding Rock Slope with Soft Interlayers and Its Application. *Rock and Soil Mechanics*, 38(4): 1052—1059(in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., Qi, S. C., et al., 2019. Dynamic Response of a Slope Reinforced by Double-Row Anti-Sliding Piles and Pre-Stressed Anchor Cables. *Journal of Mountain Science*, 16(1): 226—241. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5041-z>
- Huang, S. K., Zhao, J., Liu, D. Y., 2016. Seismic Response Analysis for the Prestressed Anchor Anti-Slide Pile Supporting Slope Based on FLAC3D. *Journal of Seismological Research*, 39(1): 74—78, 180(in Chinese with English abstract).
- Jiang, L. W., Yao, L. K., Wu, W., et al., 2010. Transfer Function Analysis of Earthquake Simulation Shaking Table Model Test of Side Slopes. *Rock and Soil Mechanics*, 31(5): 1368—1374(in Chinese with English abstract).
- Lai, J., Li, A. H., Zheng, Y. R., et al., 2014. Dynamic Stability Analysis of Slopes Reinforced by Anchor Anti-Slide Pile. *China Earthquake Engineering Journal*, 36(4): 924—930(in Chinese with English abstract).
- Li, X. Z., Kong, J. M., 2011. Types and Characteristics of Typical Landslides Triggered by “5.12” Wenchuan Earthquake. *Journal of Mountain Science*, 29(5): 598—607(in Chinese with English abstract).
- Lin, Y. L., Cheng, X. M., Yang, G. L., et al., 2018. Seismic Response of a Sheet-Pile Wall with Anchoring Frame Beam by Numerical Simulation and Shaking Table Test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115: 352—364. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.028>
- Liu, H. X., Xu, Q., Zhu, X., et al., 2019. Marginal Spectrum Characteristics of the Rock Slope with a Soft Interlayer during an Earthquake. *Rock and Soil Mechanics*, 40(4): 1387—1396(in Chinese with English abstract).
- Liu, J. B., Bao, X., Tan, H., et al., 2020. Seismic Wave Input Method for Soil-Structure Dynamic Interaction Analysis Based on Internal Substructure. *China Civil*

- Engineering Journal*, 53(8): 87–96(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. R., Deng, Z. Y., Liu, Y. Q., et al., 2019. Study of Cumulative Damage and Failure Mode of Horizontal Layered Rock Slope Subjected to Seismic Loads. *Rock and Soil Mechanics*, 40(7): 2507–2516(in Chinese with English abstract).
- Wu, Z.J., Wang, Z.J., Bi, J.W., et al., 2021. Shaking Table Test on the Seismic Responses of a Slope Reinforced by Prestressed Anchor Cables and Double-Row Antisliding Piles. *Shock and Vibration*, 2021(1): 9952380. <https://doi.org/10.1155/2021/9952380>
- Xu, X., Huang, Y., 2021. Parametric Study of Structural Parameters Affecting Seismic Stability in Slopes Reinforced by Pile-Anchor Structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147: 106789. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106789>
- Yang, M., Yao, L. K., Wang, J., et al., 2008. Centrifuge Model Test of Earthquake Countermeasures for Deposit-on-Slope. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 43(3): 335–340(in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Men, Y. M., Rutherford, C. J., et al., 2021. Static and Dynamic Response of Micropiles Used for Reinforcing Slopes. *Applied Sciences*, 11(14): 6341. <https://doi.org/10.3390/app11146341>
- Zhang, F. M., Liu, N., Zhao, W. B., et al., 2002. Optimizing Design Method of Prestressed Cables in Reinforcing Rock Slope. *Rock and Soil Mechanics*, 23(2): 187–190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. M., Yue, J. G., Zhang, J. J., et al., 2020. Seismic Behavior of the Composite Retaining Structures in Case of Nuclear Power Plants in High Soft-Rock Slopes under Strong Earthquakes. *China Earthquake Engineering Journal*, 42(3): 742–750(in Chinese with English abstract).
- Zhao, B., Taucer, F., Rossetto, T., 2009. Field Investigation on the Performance of Building Structures during the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake in China. *Engineering Structures*, 31(8): 1707–1723. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.039>
- Zhao, F., Shi, Z. M., Li, Q. Y., et al., 2024. A Comprehensive Performance Evaluation and Optimization of Steel/Carbon Fiber-Reinforced Eco-Efficient Concrete (FREC) Utilizing Multi-Mechanical Indicators. *Journal of Cleaner Production*, 441: 140993. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140993>
- Zhou, D. P., Zhang, J. J., Tang, Y., 2010. Seismic Damage Analysis of Road Slopes in Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(3): 565–576(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 董士欣, 2018. 土动力学问题数值模拟中的参数敏感性分析 (硕士学位论文). 石家庄: 石家庄铁道大学.
- 范刚, 2016. 含软弱夹层层状岩质边坡地震响应及稳定性辨识时频方法研究(博士学位论文). 成都: 西南交通大学.
- 范刚, 张建经, 付晓, 等, 2016. 传递函数在场地振动台模型试验中的应用研究. *岩土力学*, 37(10): 2869–2876.
- 范刚, 张建经, 付晓, 2017. 含软弱夹层顺层岩质边坡传递函数及其应用研究. *岩土力学*, 38(4): 1052–1059.
- 黄士奎, 赵杰, 刘道勇, 2016. 基于FLAC3D预应力锚杆抗滑桩支护边坡地震响应分析. *地震研究*, 39(1): 74–78, 180.
- 蒋良潍, 姚令侃, 吴伟, 等, 2010. 传递函数分析在边坡振动台模型试验的应用探讨. *岩土力学*, 31(5): 1368–1374.
- 赖杰, 李安红, 郑颖人, 等, 2014. 锚杆抗滑桩加固边坡工程动力稳定性分析. *地震工程学报*, 36(4): 924–930.
- 李秀珍, 孔纪名, 2011. “5.12”汶川地震诱发典型滑坡的类型和特征. *山地学报*, 29(5): 598–607.
- 刘汉香, 许强, 朱星, 等, 2019. 含软弱夹层斜坡地震动力响应过程的边际谱特征研究. *岩土力学*, 40(4): 1387–1396.
- 刘晶波, 宝鑫, 谭辉, 等, 2020. 土-结构动力相互作用分析中基于内部子结构的地震波动输入方法. *土木工程学报*, 53(8): 87–96.
- 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等, 2019. 地震作用下水平层状岩质边坡累积损伤与破坏模式研究. *岩土力学*, 40(7): 2507–2516.
- 杨明, 姚令侃, 王建, 等, 2008. 斜坡堆积体抗震加固措施离心模型试验. *西南交通大学学报*, 43(3): 335–340.
- 张发明, 刘宁, 赵维炳, 等, 2002. 岩质边坡预应力锚索加固的优化设计方法. *岩土力学*, 23(2): 187–190.
- 张卢明, 岳建国, 张建经, 等, 2020. 强震作用下核电厂顺层软岩高边坡组合支挡结构抗震性能研究. *地震工程学报*, 42(3): 742–750.
- 周德培, 张建经, 汤涌, 2010. 汶川地震中道路边坡工程震害分析. *岩石力学与工程学报*, 29(3): 565–576.