

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.070>



新型混凝土防护边坡大型振动台试验

赵亚文¹, 董金玉^{1*}, 刘汉东¹, 祁生文², 罗嘉铭¹

1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450046

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 为解决传统喷射混凝土刚性大、延性差、易在震动中开裂失效的问题, 研发新型柔性混凝土材料. 基于一种掺入聚丙烯纤维与膨润土的新型柔性喷射混凝土, 以鲁甸红石岩滑坡为原型, 开展新型混凝土(NC)与普通混凝土(OC)防护边坡的对比振动台试验, 分析其动力响应与损伤演化机制. 在震动加载下, NC防护边坡自振频率变化较小, 较OC边坡更为平稳. Hilbert-Huang分析表明, NC防护边坡的能量响应在震动波主频处呈现显著分布, 而OC防护边坡能量则集中于自振频率附近. 边际谱能量进一步揭示, NC边坡损伤起始时间延迟, 能量耗散过程更为平稳, 结构完整性在强震作用下保持更优. 新型混凝土通过增强界面协调与耗能能力, 显著提升边坡抗震性能, 为地震区浅层滑坡防治提供延性更强、耐损性更好的技术途径.

关键词: 新型混凝土; 坡面防护; 大型振动台试验; 动力破坏特征; 自振频率; 边际谱能量; 工程地质学.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2026)04-1499-14

收稿日期: 2025-10-27

A Large-Scale Shaking Table Test of Slopes Protected by New-Type Concrete

Zhao Yawen¹, Dong Jinyu^{1*}, Liu Handong¹, Qi Shengwen², Luo Jiaming¹

1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: To solve the problems of traditional shotcrete, such as high rigidity, poor ductility, and easy cracking and failure during seismic activities, a new type of flexible concrete material was developed. Based on a new type of flexible shotcrete mixed with polypropylene fibers and bentonite and taking the Ludian Hongshiyuan landslide as a prototype, a comparative shaking table test of slopes protected by new-type concrete (NC) and ordinary concrete (OC) was carried out. The dynamic response and damage evolution mechanism were analyzed. Under seismic loading, the natural vibration frequency of the slope protected by NC changed less and was more stable than that of the slope protected by OC. Hilbert-Huang analysis shows that the energy response of the slope protected by NC was significantly distributed at the main frequency of the seismic wave. In contrast, the energy of the slope protected by OC was concentrated nearly at the natural vibration frequency. The marginal spectrum energy further revealed that the damage initiation time of the NC slope was delayed, the energy dissipation process was more stable, and the structural integrity was better maintained under strong earthquakes. The new-type concrete significantly improves the seismic performance of slopes by enhancing the interface coordination and energy-dissipation capacity. It provides a technical approach with stronger ductility and

基金项目: 河南省重点研发专项(No. 241111322900); 国家自然科学基金项目(No. 42090052).

作者简介: 赵亚文(1992-), 女, 博士后, 博士, 主要从事地质灾害与防治方面研究. ORCID: 0000-0003-2510-9013. E-mail: zyawen1213@163.com

* **通讯作者:** 董金玉(1977-), 男, 教授, 博士, 从事地质工程方面研究. E-mail: dongjinyu@ncwu.edu.com

引用格式: 赵亚文, 董金玉, 刘汉东, 祁生文, 罗嘉铭, 2026. 新型混凝土防护边坡大型振动台试验. 地球科学, 51(4): 1499-1512.

Citation: Zhao Yawen, Dong Jinyu, Liu Handong, Qi Shengwen, Luo Jiaming, 2026. A Large-Scale Shaking Table Test of Slopes Protected by New-Type Concrete. *Earth Science*, 51(4): 1499-1512.

better damage resistance for the prevention and control of shallow landslides in seismic areas.

Key words: new-type concrete; slope protection; large-scale shaking table test; dynamic failure characteristics; natural vibration frequency; marginal spectrum energy; engineering geology.

0 引言

近年来,全球中、强震频发($M \geq 5.0$),地震诱发的大规模次生滑坡灾害日益凸显,对人民生命财产和区域可持续发展构成严峻威胁(Qi *et al.*, 2010; Saba *et al.*, 2010; Fan *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2024; Tobita *et al.*, 2024).随着我国“十四五”规划重大基础设施向青藏高原、云贵高原等强震区延伸,库区边坡、交通廊道边坡、矿山边坡等工程边坡防控面临空前的震害挑战.地震诱发边坡失稳受控于地质构造内因与地震动力外因,是复杂的多尺度动力过程(张永双等, 2022; 鲁晓等, 2023).其抗震加固设计需考虑动力荷载时程特性、冲击累积效应及循环疲劳损伤等多重因素的交互影响.在此背景下,深入研究地震滑坡成灾机理,研发高效抗震加固技术,已成为工程地质领域亟待突破的关键问题.

目前,针对传统加固技术的研究主要围绕加固边坡动力响应和破坏特征、动力加固类型及参数、动力稳定性评价等方面开展(Li *et al.*, 2019; 何江等, 2021; Hu *et al.*, 2021; Bao *et al.*, 2025; 高幸等, 2025).何梓雷等(2024)通过框架梁与锚索桩板墙加固隧道洞口边坡振动台试验,揭示了坡体动力响应规律以及破坏模式,发现桩体锚索轴力、桩体弯矩以及桩后土压力响应主要受地震波低频控制.连静等(2024)通过振动台试验揭示了地震作用下覆盖型边坡—锚索抗滑桩系统渐进破坏过程,提出对覆盖型高陡边坡转折处防护结构宜按参考水平安评地震动峰值的3~4倍和竖向安评地震动峰值的2~3倍进行局部加强设计.Wang *et al.*(2025)通过离心机模型试验对比,发现锚索安装使边坡体系呈现独特的应力重分布特征,引发桩周斜坡加速度放大效应,显著减少坡顶沉降,形成桩体上部“倒梯形”土压力分布并优化土拱结构,同时改变桩体受力模式.贾志波等(2024)通过Fish语言开发引入抗滑桩断裂修正模块,提出了多抗滑桩间的变形协调关系和断裂顺序.陈建峰等(2022)、王哲等(2025)、赵飞等(2025)通过数值模拟,分析了关键支护参数对抗震抗滑桩—预应力锚索框架组合结构、桩锚组合结构的影响规律.王正振等(2025)通过MAT-

LAB软件结合拟静力法和极限平衡法计算了地震作用下框架预应力锚杆边坡稳定性.Wei *et al.*(2024)基于振动台试验提出了评估多锚点圆形桩的塑性效应系数,并形成了基于锚索轴力的滑坡变形预测方法.Qi *et al.*(2024)提出了结合锚索伸长量与桩体转角的Newmark地震位移预测方法,该方法能可靠预测锚索—桩组加固边坡的位移趋势,揭示忽略屈服加速度动态增益会导致余震位移高估,为位移抗震设计提供新思路.

基于上述传统加固结构在地震作用下的力学响应与破坏特性分析,学者们研发了新型加固结构与材料(戴轩等, 2023; 任寄瑜等, 2024).黄晓乐等(2022)通过振动台试验结合Hilbert-Huang变换和边际谱理论揭示植被混凝土喷护边坡在地震作用下的破坏机理,证实植被加筋网可有效提升坡体稳定性;陶志刚等(2022)通过NPR锚索振动台试验,发现NPR锚索通过吸收地震能量可有效控制坡体变形与位移.赖天文等(2021)基于新型玄武岩纤维复合材料锚索加固边坡振动台试验,发现该锚索可提升坡体刚度,限制坡体变形.周文强等(2025)验证了缓冲弹簧柔性外锚头对锚杆框架梁减震效果,发现柔性外锚头可有效控制锚杆结构损伤.纤维混凝土通过掺入细小纤维材料(钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等),显著改善传统混凝土抗裂抗拉性能.在建筑工程领域已广泛应用于剪力墙、连梁、柱、梁柱节点、桥墩等承重与耗能构件,展现出优异的延性、耗能能力、抗裂性及损伤容限,实现抗震韧性设计目标(孔宪京等, 2016; 崔光耀等, 2020; Wu *et al.*, 2024; Shariati *et al.*, 2025).随着材料技术进步,纤维混凝土正逐步应用于边坡抗震结构.例如, Ma *et al.*(2025)开展振动台试验发现纤维增强水泥基复合材料板桩墙在高强度地震中能保持结构完整性,并表现出更低的加速度响应与动态弯矩,在提升支护体系抗震韧性方面优势显著.

综上所述,地震边坡加固结构逐渐向高性能、强韧性、柔支护方向发展.然而,现有研究多集中于桩锚等深层加固结构,对浅表防护层在地震动下的界面协调性与损伤破坏机制关注不足.边坡喷护作为应用最为广泛的加固手段,其震害特征为:地震

作用下,边坡浅表层岩土体和喷护混凝土开裂明显,经降雨入渗作用,坡体产生明显滑动.因此,亟需开发兼具高延性、低刚度与强抗裂性的新型喷护材料,构建地震作用下坡体韧性防护体系,以阻断“地震—降雨—滑坡”灾害链.本文通过在喷射混凝土中掺入纤维和膨润土材料,改善其抗裂和弹性变形能力,研发新型喷射混凝土材料,以鲁甸地震红石岩边坡为研究对象,基于振动台试验对比普通混凝土与新型混凝土防护边坡动力响应及破坏规律,揭示坡面防护机理,为抑制地震作用下边坡坡面开裂提供新方法.

1 新型混凝土材料力学特性

1.1 材料配比设计

柔性混凝土因其低弹性模量与高延性等特性,已成为一种具有广泛应用前景的加固衬砌材料(鲁青云等,2024).基于此,本文通过掺入纤维材料,经室内试验研制出一种兼具低弹性模量、高延性及强韧性的新型混凝土(new-type concrete, NC).

根据《喷射混凝土应用技术规程》要求,边坡喷射混凝土强度应 \geq C20.本次试验以C20普通喷射混凝土(ordinary concrete, OC)配比为基准,添加聚丙烯纤维提升抗裂性能;置换部分水泥为膨润土,以降低材料弹性模量,增强变形能力;通过调整减水剂用量,满足施工和易性要求.

通过0.1%~0.3%体积掺量聚丙烯纤维和10%~30%膨润土置换量的多组室内混凝土配比试验,得到新型混凝土最优配比如表1所示.配比试验材料包括:P•O42.5R硅酸盐水泥;粒径5~10 mm的钙质碎石;细度模数3.5,粒径范围0~3.0 mm粗砂;15 mm聚丙烯纤维;兆佳科技ZJPC8020型粉状高效减水剂.

1.2 材料物理力学性能

对两类混凝土试件进行标准28 d养护后,通过

单轴抗压试验、劈裂抗拉试验、弯曲韧性试验测定物理力学性能(表2).由表2可知,新型混凝土单轴抗压强度减小15%,劈裂抗拉强度减小18%,抗折强度提高23%,弹性模量减小40%,弯曲试验极限挠度增大近一倍.新型混凝土强度虽略有下降,但韧性和变形能力显著提升,满足地震边坡对延性与耗能能力的需求.

1.3 单轴抗压变形破坏特征

添加聚丙烯纤维后,新型混凝土试块峰值应变达0.43%,而普通混凝土峰值应变为0.28%.新型混凝土破坏后,裂纹受纤维牵拉约束而扩展受限;表面开裂的混凝土块因纤维桥接作用未脱落,整体保持完整(图1).新型混凝土材料具有大变形特征与高抗裂性,可满足地震作用下变形协调与抗裂需求.

2 振动台试验设计

2.1 模型概化及砌筑

本次试验以红石岩滑坡为原型,概化模型包括上部硬岩、中部软弱夹层和下部稳定岩体3部分.模型相似比、相似材料及坡体砌筑方法与前期研究一致(刘汉东等,2022),相似比见表3.相似材料组成包括:硬岩材料:铁粉:重晶石粉:石英砂:松香:酒精=10:24:15:1:3;软弱夹层材料:黏土:石英砂:水:石膏=13:2:1:2;勾缝材料:铁粉:重晶石粉:石英砂:石膏:松香:酒精=21:112:12:8:1:32.相似材料具体物理力学参数如表4所示.

表1 混凝土配合比设计方案

Table 1 Concrete mix proportion design scheme

编号	水泥 (kg)	水 (kg)	砂 (kg)	石子 (kg)	膨润 土 (kg)	纤维 掺量 (%)	减 水 剂 (%)	膨润 土置 换率 (%)
普通混凝土(OC)	379	263	1088	713	0	0	0.1	0
新型混凝土(NC)	341	263	1088	713	38	0.1	0.1	10

表2 混凝土物理力学特性

Table 2 Physical and mechanical properties of concrete

材料	单轴抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	劈裂抗拉强度 (MPa)	弯曲韧性试验峰值挠 (mm)	抗折强度 (MPa)
普通混凝土(OC)	23.3	18.6	1.78	0.29	1.58
新型混凝土(NC)	19.7	11.2	1.46	0.57	1.95

模型砌筑采用下部稳定体及软弱夹层分层砌筑,上部硬岩砌块错缝砌筑的方法.试验模型箱尺寸为 $2.1\text{ m}\times 1.4\text{ m}\times 2.3\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),两侧为钢化玻璃,前后壁为钢板,板内粘贴 5 cm 厚海绵以消除边界反射.箱底焊接6根 $\Phi 12\text{ mm}$ 钢筋,增强摩擦阻力.

本研究采用对比试验设计,边坡左、右坡面分别使用普通混凝土(OC)和新型混凝土(NC)作为防护材料.坡面加固前先清除坡面浮尘,并采用高浓度酒精均匀喷湿坡面,以增强混凝土材料与坡面粘结性能.随后,对坡面左侧采用普通混凝土,右侧采用新型混凝土进行加固处理.因模型试验边坡尺寸较小,常规混凝土喷射设备难以精确控制喷射范围,故改用刮板涂抹工艺实施坡面加固.涂抹时,涂层厚度严格控制在 20 mm ,所有涂抹操作在混凝土初凝前完成;涂抹完成后覆盖塑料布,持续养护 28 d .为便于后续观察,养护结束后,采用稀释水泥砂浆刷涂坡面 1 mm 厚,保证坡面平整.刷浆结束后干燥一周,采用白色涂料对坡面进行薄涂,整个模型砌筑过程如图2所示.

2.2 模型监测

本次模型试验在垂直剖面 $1/4$ 、 $3/4$ 位置布置双向加速度传感器,对比两类混凝土加固边坡动力响应规律,监测点布设位置见图3.

2.3 振动台加载方案

试验采用地震波、白噪声以及正弦波进行水平加载.地震波选取鲁甸地震振动最为强烈的 20 s 波形,如图4所示.

此次试验振动台加载工作频率为 $0.1\sim 50.0\text{ Hz}$,加载前需对原始和压缩后的地震波进行滤波与基线校正.由于鲁甸地震波信号高频成分较多,按照相似比压缩滤波后信号失真明显,且振动

台输出波形与输入波形相差大.因此,本次试验加载地震波包括原始波、压缩 1.5 倍和 2 倍地震波,并统一采用 20 Hz 滤波处理.地震波单次加载时长为 $10\sim 20\text{ s}$,幅值 $0.1\sim 0.9\text{ g}$;白噪声加载时长为 30 s ,加载幅值 0.05 g ;正弦波加载时长为 20 s ,加载幅值 $0.1\sim 0.5\text{ g}$.加载时遵循幅值从低到高输入,优先加载压缩倍数大、加载时间短的波形.具体加载方案如表5所示.



图1 新型混凝土破坏特征

Fig.1 Failure characteristics of new concrete

表3 模型试验主要相似常数

Table 3 Main similarity constants of model test

物理量	相似常数	备注
长度	350	控制量
加速度	1	控制量
密度	1	控制量
弹性模量	350	
黏聚力	350	
内摩擦	1	
泊松比	1	
时间	18	
速度	18	

表4 相似材料参数设计指标

Table 4 Design index of similar material parameters

材料	密度(kg/m^3)	抗拉强度(MPa)	弹性模量(MPa)	泊松比	黏聚力(MPa)	内摩擦角($^\circ$)
硬岩	2 650	0.010 0	100	0.23	0.024	38
软弱夹层	2 350	0.005 3	53	0.17	0.010	25
结构面					<0.010	21

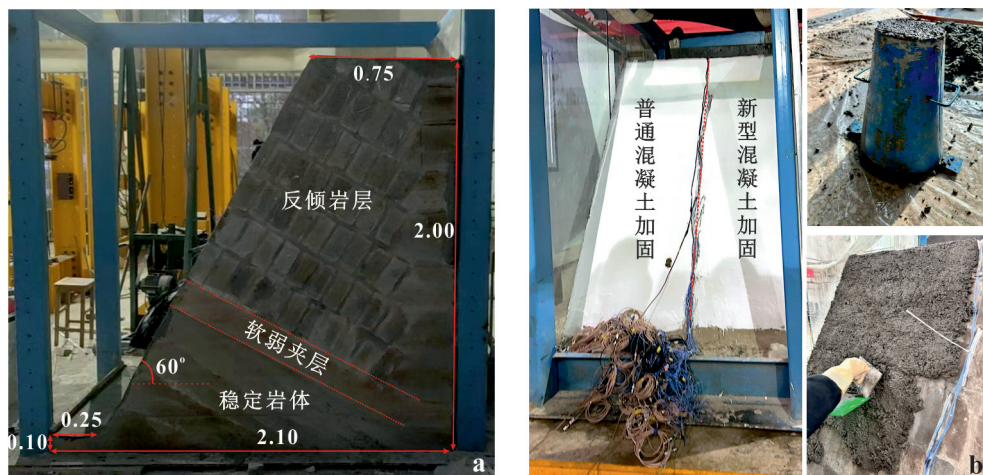


图 2 模型砌筑过程

Fig.2 Model masonry process

a. 模型尺寸(m); b. 刮涂混凝土加固坡面

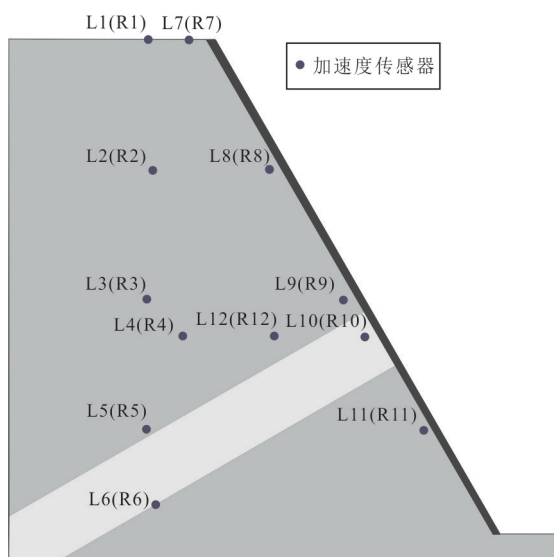


图 3 监测点位布设方案

Fig.3 Layout scheme of monitoring points
括号内为右侧新型混凝土监测点编号

3 坡面防护边坡动力破坏特征

加载初期,地震波及正弦波幅值较小($< 0.2\text{ g}$),OC防护边坡在软弱夹层上部出现细小裂纹,而NC防护边坡在吊装运输阶段产生的裂纹因坡体挤压密实而闭合.以 0.1 g 水平正弦波加载为例,OC防护边坡软弱夹层及其上方区域原有裂隙发生扩展,并产生新的细小裂纹(图5a);NC防护边坡软弱夹层上部的预制裂隙因压密作用而闭合消失(图5b).

OC防护边坡在中等强度鲁甸地震波加载下

($0.2\sim 0.5\text{ g}$),坡面出现剧烈抖动,坡面下部裂缝扩张.高强度鲁甸波加载下($0.6\sim 0.9\text{ g}$),从坡体侧面可观察到OC防护边坡软弱夹层位置出现明显张拉裂隙,软弱夹层与坡面混凝土脱离变形.受此影响,硬岩与软弱夹层交界处张拉开裂,裂纹延伸至坡表,形成水平裂缝L1.继续加载后,软弱夹层上部第1排硬岩继续开裂变形,在坡面衍生发育水平裂纹L2.NC边坡在中高强度地震波加载下未出现明显破坏.坡面发育的L1、L2裂纹只在OC防护边坡内开展,无法扩展至NC防护坡面范围内(图6).这表明新型混凝土的抗裂性能显著优于普通混凝土.

正弦波持续输入下,加固边坡破坏特征明显.采用 0.3 g 正弦波加载,NC喷护坡体软弱夹层在与硬岩交界面出现明显滑动,软弱夹层上部硬岩向下滑落(图7b).这种错动导致软弱夹层位置轻微隆起,未在坡面衍生出平行裂纹. 0.43 g - 5 Hz 正弦波加载时,OC防护边坡坡顶出现张拉裂隙F3;上部硬岩范围内的混凝土与坡面脱离;软弱夹层位置处裂隙继续扩展;下部稳定体部位则发育多条裂纹并震松鼓起(图7a).此时,NC防护边坡相对稳定,仅在坡体下部稳定体区域出现鼓起.从边坡正面可观察到F2裂纹变宽加深,但仍未延展至NC防护区域.坡体下部纵向裂纹沿两种混凝土材料交界线继续开裂.

按幅值 0.5 g - 5 Hz 加载正弦波,边坡发生明显破坏.OC防护边坡上部硬岩坡面防护混凝土崩塌脱落,坡顶松动后塌落,下部软弱夹层及稳定体鼓胀挤出(图8a).NC防护边坡坡顶喷护混凝土脱落,

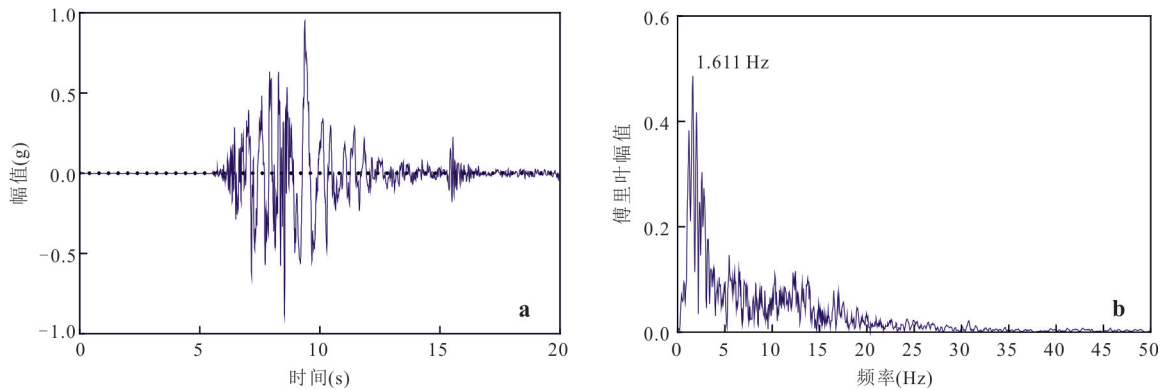


图4 加载地震波形

Fig. 4 Loading seismic waveform

a. 鲁甸地震原始波形; b. 鲁甸地震原始波傅里叶频谱

表5 加载方案

Table 5 Loading scheme

加载组数	波形	幅值(g)	频率(Hz)	加载时间(s)
W1	白噪声	0.05	—	20
1	鲁甸波	0.10	压缩1~2倍	10~20
W2	白噪声	0.05	—	20
2	鲁甸波	0.20	压缩1~2倍	10~20
W3	白噪声	0.05	—	20
3	正弦波	0.10	2.5~30	20
W4	白噪声	0.05	—	20
4	鲁甸波	0.30	压缩1~2倍	10~20
W5	白噪声	0.05	—	20
5	鲁甸波	0.40	原始波	20
W6	白噪声	0.05	—	20
6	鲁甸波	0.50	原始波	20
W7	白噪声	0.05	—	20
7	鲁甸波	0.90	原始波	20
W8	白噪声	0.05	—	20
8	正弦波	0.20	2.5~30	20
9	正弦波	0.30	2.5~30	20
10	正弦波	0.40	5	20
11	正弦波	0.50	5	至破坏

下部稳定体轻微挤出,稳定体表面的混凝土弯折(图8b)。

随着振动输入,OC防护边坡变形破坏呈现“微小裂纹开裂—坡脚裂纹扩展—软弱夹层拉裂—上部硬岩持续拉裂,坡面裂纹扩展,下部隆起—顶部混凝土塌落,坡顶崩塌破坏”的演化过程.NC防护边坡变形破坏呈现“裂纹挤密—软弱夹层滑动—下部坡面持续鼓起—顶部混凝土塌落—边坡轻微损伤”的演化过程。

整体而言,新型混凝土对边坡动力防护效果较

好.在较小地震作用下,新型混凝土具有大变形能力,使坡面防护材料与坡体结合更紧密,促进坡体内部岩体的挤密压实,减小坡体内部的破裂损伤.OC防护边坡坡表裂缝无法延伸至NC加固范围内.在边坡破坏前,NC无明显破裂,边坡完整性好.强烈地震作用下,NC可有效抑制坡体动力响应,提高边坡的整体稳定.

4 坡面防护边坡动力响应

4.1 自振频率变化规律

在白噪声激励条件下,通过计算下部测点(L11/R11)与0上部任意测点加速度时程曲线的传递函数,并依据传递函数虚部随频率的变化规律,确定边坡结构的一阶自振频率.传递函数计算公式如下:

$$T_{xy(\omega)} = \frac{G_{xx}(\omega, \omega)}{G_{xy}(\omega, \omega_m)}, \quad (1)$$

式中: $G_{xx}(\omega, \omega)$ 为输入点自功率谱密度; $G_{xy}(\omega, \omega_m)$ 为输入点与输出点的互功率谱密度.

以加载前W1白噪声扫描结果为例,两侧边坡传递函数虚部随频率变化曲线如图9所示.由图9可知,坡体未加载前OC防护边坡自振频率为12.79 Hz,NC防护边坡自振频率为12.99 Hz.

试验共计对不同地震波作用后坡体进行了8次白噪声扫描,坡体自振频率变化如图10所示.地震波加载后白噪声扫描结果显示,随着加载持续进行,坡体自振频率呈总体下降趋势.其中,NC防护边坡在W2白噪声扫描下自振频率有所上升,分析认为这是由于坡体在早期加载下挤密所致.OC防护边坡在W4白噪声扫描下自振频率增大,分析认

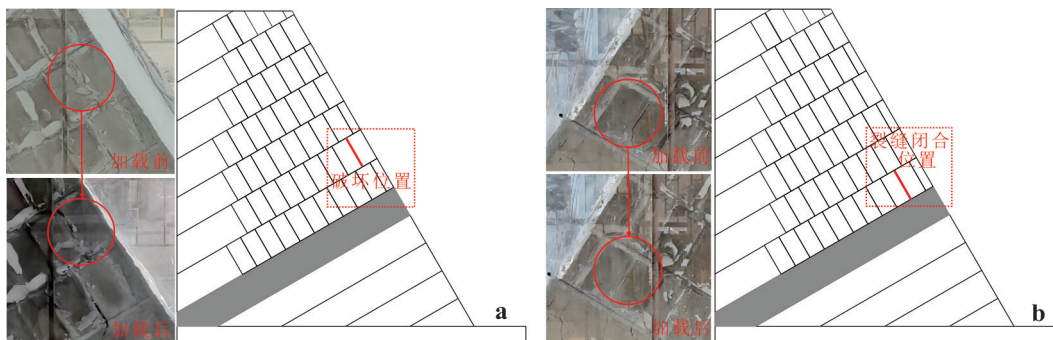


图 5 小幅值加载下坡体变形破坏特征

Fig.5 Deformation and failure characteristics of slope under small amplitude loading

a.OC 防护边坡裂纹扩展; b.NC 防护边坡裂纹闭合

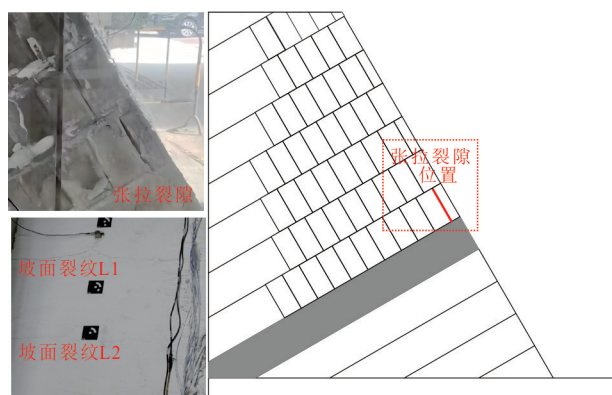


图 6 高强度地震波作用下坡体变形破坏特征

Fig.6 Deformation and failure characteristics of slope under high intensity seismic wave

为这是由于 W4 扫描前,一组正弦波型加载引起 OC 防护边坡产生结构性变化,造成自振频率的明显改变.整体而言,OC 防护边坡自振频率受波形影响变化剧烈,而 NC 防护边坡自振频率变化较为平稳.可

见新型混凝土加固后,坡体抵抗不同波形地震动扰动能力明显高于普通混凝土加固边坡.

4.2 加固边坡 Hilbert-Huang 时频响应

希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 具有处理效率高、自适应性强、时频分辨率高的特点,适用于地震信号这类非线性、非平稳信号的处理.具体过程如下:

(1) 经验模态分解:通过经验模态分解方法 (empirical mode decomposition, EMD),将地震信号分解为多个本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量和一个残余分量 (residue, RES).

(2) 筛选有效 IMF 分量:计算每个 IMF 分量与原始信号的相关系数,根据 Ayenu-Prah and Attoh-Okin(2010)提出的阈值方法,选取满足阈值要求的有效 IMF 分量.阈值计算公式如下:

$$\mu_{TH} = \frac{\max \mu_i}{10 \times \max \mu_i - 3}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

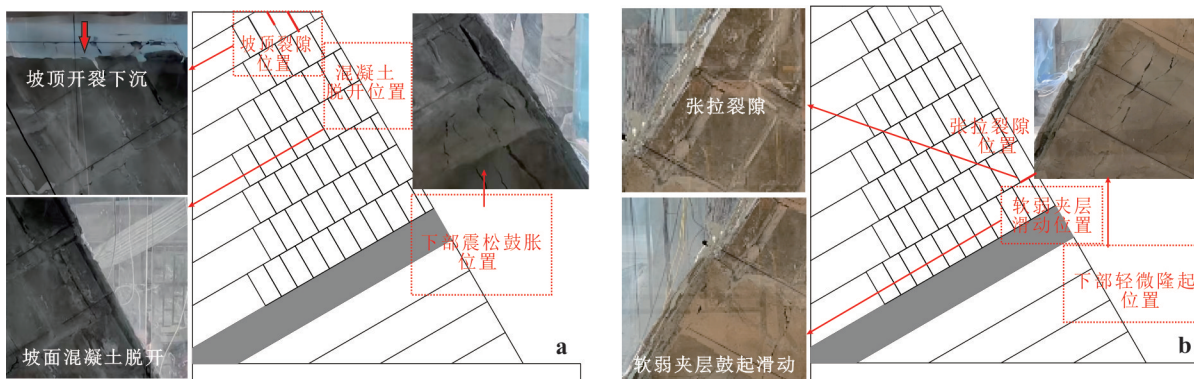


图 7 0.2~0.4 g 正弦波波作用下坡体变形破坏特征

Fig.7 Deformation and failure characteristics of slope under the action of 0.2-0.4 g sine wave

a.OC 防护边坡明显破坏; b. NC 防护边坡轻微破

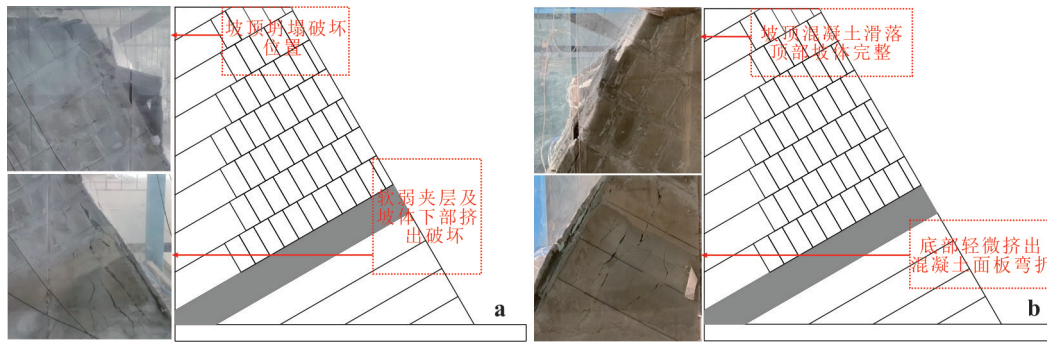


图 8 边坡最终破坏情况

Fig.8 The final failure of reinforced slope

a.OC 防护边坡最终破坏形态; b.NC 防护边坡最终破坏形态

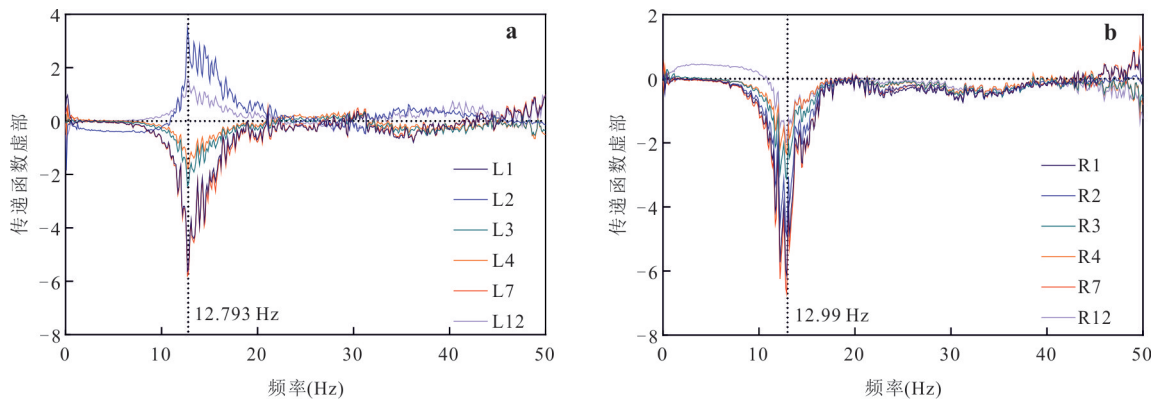


图 9 白噪声 W1 扫频下测点传递函数虚部

Fig.9 The imaginary part of the transfer function of the measuring point under white noise W1

a.OC 防护边坡; b.NC 防护边坡

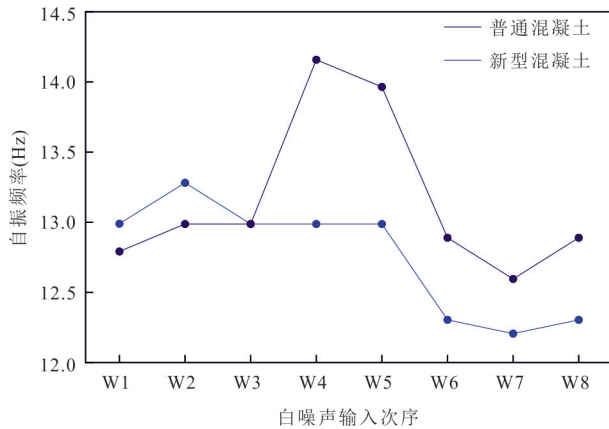


图 10 自振频率变化规律

Fig. 10 Variation law of natural vibration period

式中: μ_{TH} 为相关系数阈值, μ_i 为第 i 阶 IMF 分量与原始信号的相关系数, i 为 IMF 分量的阶数.

(3) Hilbert 谱计算: 对筛选出的有效 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 计算瞬时频率和瞬时幅值, 进而得到 Hilbert 谱:

$$H(\omega, t) = R_e \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i\omega_i(t)t}, \quad (3)$$

式中: R_e 为实数部分; $a_i(t)$ 为第 i 阶有效 IMF 在 t 时刻瞬时幅值; $\omega_i(t)$ 为第 i 阶有效 IMF 在 t 时刻瞬时频率.

以 0.3 g 原始波加载为例, 坡面测点 Hilbert 谱如图 11 所示. 由图 11 可知, OC 防护边坡测点 Hilbert 谱能量峰值整体大于 NC 防护边坡. OC 防护边坡 Hilbert 谱能量峰值主要集中在 6~10 Hz 范围内, 且峰值出现时间与加载峰值时间 2.34 s 基本一致. NC 防护边坡软弱夹层以上测点 (R7、R8) Hilbert 谱能量峰值集中在 5~8 Hz 范围内, 峰值出现时间与加载峰值一致. 此外, R7、R8 测点在 2 Hz 附近也表现出显著的能量. 软弱夹层内测点 (R10) 及软弱夹层下部测点 (R11) Hilbert 谱能量峰值集中在 2 Hz 附近, 峰值出现时间为 4.7 s 在加载峰值之后.

输入原始地震波的主频约为 1.9 Hz. NC 防护边坡具有更好的变形协调能力, 其动力响应与地震动输入特性耦合更紧密. 因此, 在软弱夹层及以下区

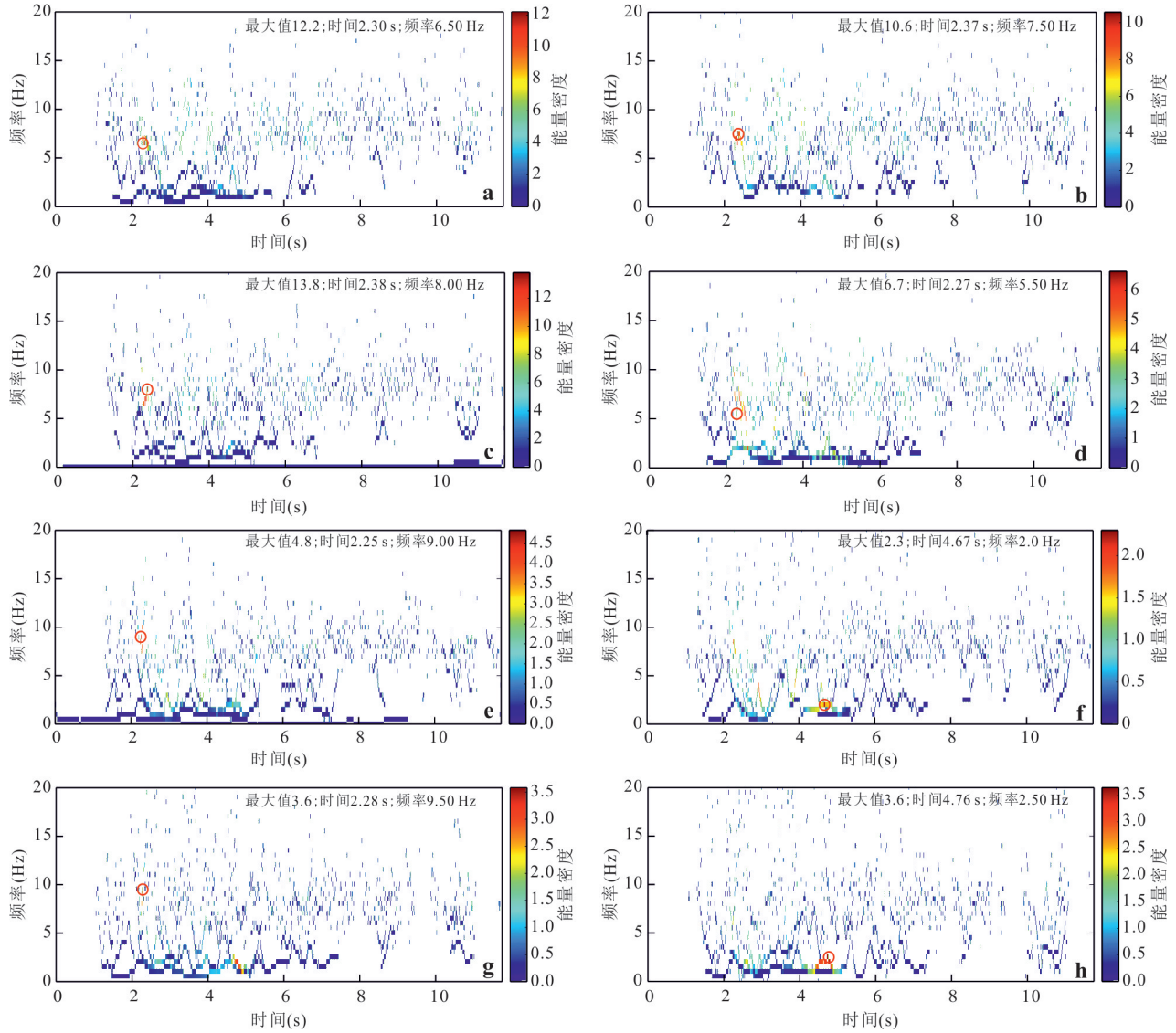


图 11 坡面测点 Hilbert 谱

Fig. 11 Hilbert spectrum of slope measuring point

a. L7 测点; b. R7 测点; c. L8 测点; d. R8 测点; e. L10 测点; f. R10 测点; g. L11 测点; h. R11 测点

域(测点 R10, R11)其响应能量峰值频率(2 Hz)更接近于地震波输入主频.在坡体上部(测点 R7, R8)受边坡地形放大效应和结构自振特性影响,除在 5~8 Hz(接近坡体自振频率)出现能量峰值外,在低频段(2 Hz)也表现出显著能量,这与地震波低频成分的放大有关.而 OC 防护边坡动力响应协调性较差,其结构自振效应占主导地位.因此,其 Hilbert 谱能量峰值主要集中在靠近自振频率附近(6~10 Hz),且幅值更高,表明其对地震动输入的频率选择性放大效应更显著.

4.3 加固边坡边际谱能量损伤

边际谱(marginal spectrum)可提供对信号每个频率上累积能量的大小.将 $H(\omega, t)$ 对时间积分,得

到 Hilbert 边际谱:

$$h_{(\omega)} = \int_0^T H(\omega, t) dt. \quad (4)$$

基于边际谱理论对测点波形进行时频域分析,可从能量角度揭示坡体的损伤演化过程.地震波在边坡内传播时,边际谱幅值随输入幅值增大逐渐增大,也随坡体高程增大而增大.当坡体发生振动损伤,地震能量在损伤部位无法完整传递,引起边际谱峰值的剧烈波动或突变(Fan *et al.*, 2016; 杨长卫等, 2022; Zhao *et al.*, 2025).因此,边际谱最大幅值的变化可作为坡体损伤指标.本文基于边际谱能量损伤识别方法对比两类混凝土加固边坡的损伤过程.

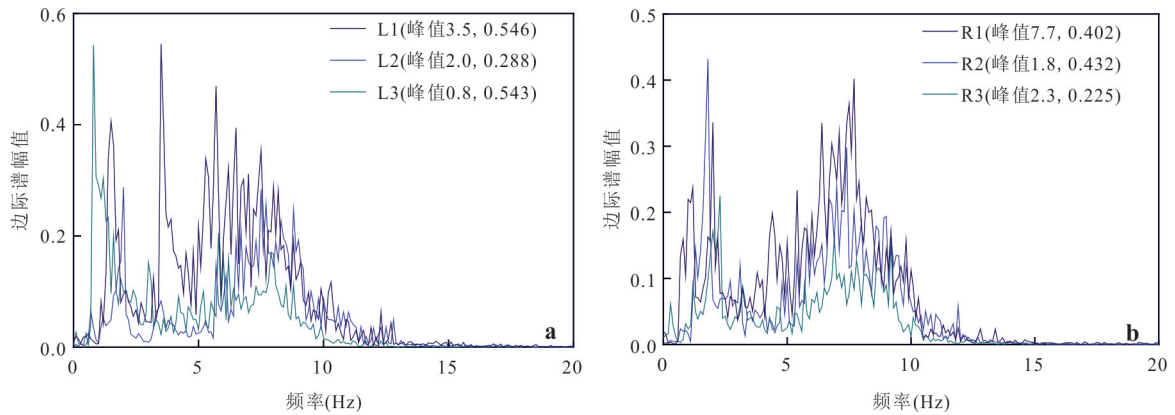


图 12 0.2 g 鲁甸地震波边际谱

Fig.12 0.2 g Ludian seismic wave marginal spectrum

a.OC 防护边坡; b.NC 防护边坡

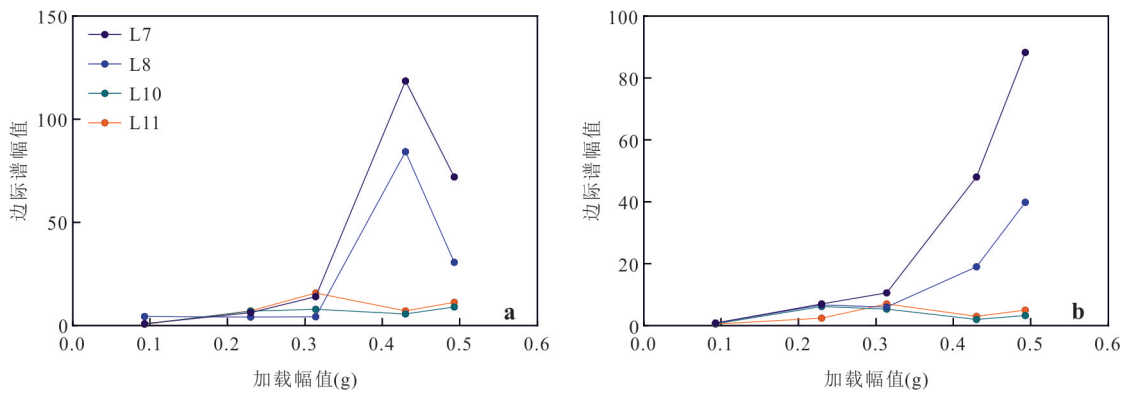


图 13 正弦波加载下的边际谱幅值变化

Fig. 13 Variation of marginal spectrum amplitude under sine wave loading

a.OC 防护边坡;b.NC 防护边坡

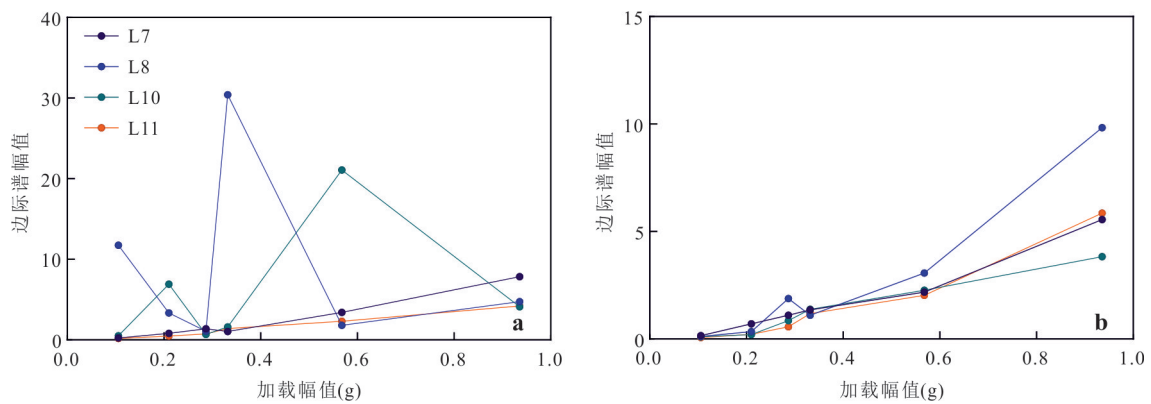


图 14 地震波加载下边际谱幅值变化

Fig. 14 Variation of marginal spectrum amplitude under seismic wave loading

a.OC 防护边坡;b.NC 防护边坡

以 0.2 g 鲁甸地震波为例,测点 L1~L3 及 R1~R3 边际谱如图 12 所示. 边际谱分析表明:OC 防护边坡测点 L1 边际谱呈现三峰特征,而测点 L2、L3 表现为双峰特征,且边际谱幅值随高程增大的特

性消失,这表明 OC 防护边坡上部已发生损伤.NC 防护边坡测点 R1~R3 边际谱均保持双峰特征,幅值基本随测点高程增大递增,这表明 NC 防护边坡在此条件下基本稳定.

基于5 Hz水平正弦波不同幅值加载的边际谱分析表明:OC防护边坡在0.43 g加载后,于坡顶区域产生显著损伤;NC加固坡体除在0.3 g加载下发生轻微损伤外,整体未出现明显损伤;该结果与试验中实际观测到的边坡破坏情况一致(图13)。

地震波加载下,边坡边际谱幅值变化如图14所示。总体上,地震加载测得的边际谱幅值普遍低于正弦波加载下的幅值。OC防护边坡的边际谱幅值波动更为显著。例如,位于软弱夹层位置的测点L10和上部硬岩内的测点L8,在0.21 g、0.33 g和0.57 g加载后均出现异常波动,这与实际局部损伤位置相吻合。同时,白噪声扫描结果(工况W5、W7)表明,在相近加载强度后,边坡的自振频率发生明显变化,反映出结构整体刚度因损伤累积而出现退化。基于边际谱的局部损伤识别结果与基于白噪声扫描的整体动力特性变化,分别从局部响应和系统特性两个角度共同揭示了边坡从局部损伤到整体性能退化的演化过程,两者结论具有较好的一致性。

NC防护边坡的边际谱幅值则随输入幅值增大而持续稳定增长,仅在0.33 g加载时出现小幅波动。这表明在地震波加载过程中,OC防护边坡发生了明显的渐进式损伤,而NC防护边坡则基本保持完整,未出现可见损伤。该结果与白噪声扫描所得结论一致,进一步验证了NC材料在提升边坡抗震性能方面的有效性。

5 结论

基于大型振动台试验,结合Hilbert-Huang变换及边际谱能量分析,本文系统研究了新型混凝土(NC)和普通混凝土(OC)防护边坡的动力响应与损伤演化行为,得到以下主要结论:

(1)新型混凝土掺入聚丙烯纤维和膨润土后,力学性能得到明显优化:其弹性模量降低40%,峰值应变提高53%,弯曲试验极限挠度增大近1倍。NC表现出了高延性、高耗能、强抗裂的特点,更适用于地震作用下边坡防护。

(2)在动力加载过程中,NC防护边坡表现出更好的变形能力和损伤控制能力。OC边坡经历“裂纹萌生—扩展—层间脱开—整体失稳”的典型脆性破坏路径。而NC边坡则呈现“裂纹压密—局部滑移—缓慢鼓胀—局部损伤”的延性响应特征,并有效抑制了裂缝的贯通与发展。

(3)自振频率演化分析表明,NC边坡在多次地

震激励下频率变化更为平缓,结构刚度退化速率显著低于OC边坡,反映出其更强的抗扰动能力。Hilbert-Huang时频分析显示,新型混凝土防护边坡能量在地震波主频率附近分布明显,普通混凝土防护边坡能量在自振频率聚集显著。

(4)基于边际谱能量损伤分析发现,新型混凝土防护边坡的损伤起始更晚、能量耗散更平稳,表明其具有更强的损伤容限和能量耗散能力,在强震下仍能维持较高的坡体结构完整性。

该新型混凝土通过提升材料延性、改善界面协调性与耗能能力,能够有效增强边坡在地震作用下的浅层稳定性,为地震活跃区浅层滑坡的防治提供了一种兼具高延性、强韧性与抗裂性的创新技术路径。

References

- Ayenu-Prah, A., Attoh-Okine, N., 2010. A Criterion for Selecting Relevant Intrinsic Mode Functions in Empirical Mode Decomposition. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2(1): 1–24. <https://doi.org/10.1142/s1793536910000367>
- Bao, N., Chen, J. F., Wang, G. H., et al., 2025. Experimental and Numerical Investigations of Seismic Behavior of Slopes Reinforced with Sheet Pile Walls: Role of Retaining Sheet. *Engineering Geology*, 354: 108200. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108200>
- Chen, J. F., Du, C. C., Chen, S. X., et al., 2022. Mechanical Mechanism of Slopes Stabilized with Anti-Slide Piles and Prestressed Anchor Cable Frame Beams under Seismic Loading. *Earth Science*, 47(12): 4362–4372 (in Chinese with English abstract).
- Cui, G. Y., Wang, X. L., Wang, M. N., 2020. Shaking Table Model Test for Aseismic Performance of Fiber-Reinforced Concrete Lining of Tunnel Portal Section in Soft Rock. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 40(4): 650–655, 819 (in Chinese with English abstract).
- Dai, X., Ma, Y. X., Wei, S. W., et al., 2023. Seismic Performance Analysis of Frame Beams-Reinforced Slope under Different Earthquake Intensities. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 45(S2): 147–152 (in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., Wu, J. B., et al., 2016. Dynamic Response and Dynamic Failure Mode of a Weak Intercalated Rock Slope Using a Shaking Table. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8): 3243–3256. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0988-8>

- org/10.1007/s00603-016-0971-7
- Fan, X. M., Scaringi, G., Korup, O., et al., 2019. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 57(2): 421–503. <https://doi.org/10.1029/2018rg000626>
- Gao, X., Jia, J. Q., Zhang, L. H., et al., 2025. Analytical Solution of Dynamic Response of Prestressed Anchor Cable in Rock Slope under Earthquake. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 46(5): 134–144 (in Chinese with English abstract).
- He, J., Xiao, S. G., 2021. Calculation Method for Seismic Permanent Displacement of Assembled Multi-Step Cantilever Retaining Walls. *Rock and Soil Mechanics*, 42(7): 1971–1982 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. L., Jiang, G. L., Feng, H. Z., et al., 2024. Dynamic Response Characteristics of Bedrock and Overburden Layer Slope Supported by a Combination of Pile-Sheet Wall-Anchor Cables under Earthquake Action. *Rock and Soil Mechanics*, 45(7): 2011–2023 (in Chinese with English abstract).
- Hu, H. Q., Huang, Y., Xiong, M., et al., 2021. Investigation of Seismic Behavior of Slope Reinforced by Anchored Pile Structures Using Shaking Table Tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150: 106900. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106900>
- Huang, X. L., Wang, C. X., Qu, H. L., et al., 2022. Study on the Failure Mechanism of Substrate for Vegetation Concrete under Earthquake. *Journal of Basic Science and Engineering*, 30(4): 1048–1060 (in Chinese with English abstract).
- Jia, Z. B., Tao, L. J., Pan, J., et al., 2024. Study of Seismic Slope Stability Based on Modified Stabilizing Piles Model. *Journal of Vibration and Shock*, 43(24): 14–23 (in Chinese with English abstract).
- Kong, X. J., Qu, Y. Q., Zou, D. G., et al., 2016. Numerical Analysis of Seismic Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Face Rockfill Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(7): 841–849 (in Chinese with English abstract).
- Lai, T. W., Lei, H., Wu, Z. X., et al., 2021. Shaking Table Test Study on Basalt Fiber Reinforced Plastics in High Slope Protection. *Rock and Soil Mechanics*, 42(2): 390–400 (in Chinese with English abstract).
- Li, N., Men, Y. M., Yuan, L. Q., et al., 2019. Seismic Response of Micropiles-Reinforced Landslide Based on Shaking Table Test. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 2030–2050. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1664643>
- Lian, J., Wen, H., Tong, X. H., et al., 2024. Study of Large Shaking Table Test on Evolution of Dynamic Characteristics and Formation Mechanism of Bedrock and Overburden Layer Slope with Stabilizing Piles and Anchor Cables. *Journal of the China Railway Society*, 46(9): 156–163 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. D., Zhao, Y. W., Dong, J. Y., et al., 2022. Seismic Dynamic Response and Failure Mode of Anti-Dip Rock Slope with Weak Rock Stratum. *Earth Science*, 47(12): 4373–4389 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Q. Y., Xu, Y. J., Xia, C. C., et al., 2024. Mechanical Response of Fiber Reinforced Flexible Concrete for Compressed Air Energy Storage Underground Caverns. *Rock and Soil Mechanics*, 45(12): 3566–3575 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X., Qi, S. W., Zheng, B. W., et al., 2023. Distribution and Hazard Assessment of Collapses and Landslides in Sichuan-Tibet Traffic Corridor. *Journal of Engineering Geology*, 31(3): 718–735 (in Chinese with English abstract).
- Ma, D. L., Ding, X. M., Liu, H. L., et al., 2025. Shaking Table Test on Seismic Response of High-Steep Slope Supported by ECC Sheet-Pile Wall. *Science China Technological Sciences*, 68(10): 2020703. <https://doi.org/10.1007/s11431-025-3004-7>
- Qi, H., Du, C. C., Peng, M., et al., 2024. Seismic Displacement of Bedding Slopes Stabilized with Anchor Cables and Piles Considering Dynamic Yield Acceleration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(6): 208. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03707-9>
- Qi, S. W., Xu, Q., Lan, H. X., et al., 2010. Spatial Distribution Analysis of Landslides Triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China. *Engineering Geology*, 116(1–2): 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.011>
- Ren, J. Y., Chen, J. L., Ding, X. M., et al., 2024. Study on the Dynamic Response Characteristics of ECC Pile-Anchor Retaining Structure under Earthquake. *Journal of Railway Science and Engineering*, 21(10): 4089–4100 (in Chinese with English abstract).
- Saba, S. B., van der Meijde, M., van der Werff, H., 2010. Spatiotemporal Landslide Detection for the 2005 Kashmir Earthquake Region. *Geomorphology*, 124(1–2): 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.026>
- Shariati, M., Nejati, F., Ojani, P., et al., 2025. Hybrid

- FRP Steel Jacketing for Enhancing the Seismic Resilience of Corroded RC Bridge Columns in Harsh Environments: A Finite Element and Experimental Study. *Structures*, 81: 110231. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110231>
- Tao, Z. G., Wang, X., Guo, A. P., et al., 2022. Shaking Table Test on the Effect of NPR Anchor Cable on Slope Reinforcement under Earthquake. *Journal of China Coal Society*, 47(9): 3410—3420 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J. J., Li, T. T., Pei, X. J., et al., 2024. Experimental Study on Multistage Seismic Damage Process of Bedding Rock Slope: A Case Study of the Xinmo Landslide. *Journal of Earth Science*, 35(5): 1594—1612. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1829-z>
- Tobita, T., Kiyota, T., Torisu, S., et al., 2024. Geotechnical Damage Survey Report on February 6, 2023 Turkey-Syria Earthquake, Turkey. *Soils and Foundations*, 64(3): 101463. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101463>
- Wang, Y., Zheng, T., Sun, R., et al., 2025. Centrifuge Test Study on the Influence Mechanism of Anchor Cable Installation on the Seismic Response of Pile-Anchor Structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 190: 109160. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109160>
- Wang, Z., Shi, Z. M., Hou, Z. L., et al., 2025. Seismic Dynamic Response and Damage Mechanism Analysis of Slope Reinforced by Pile-Anchor Structures. *Earth Science*, 50(10): 3929—3942 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Z., Zhang, Z. T., Dai, G. L., et al., 2025. Stability Analysis of Slope Reinforced with a Frame-Prestressed Anchor Rod Structure Using Pseudodynamic Method. *China Journal of Highway and Transport*, 38(1): 119—128 (in Chinese with English abstract).
- Wei, H., Tao, Z. G., He, M. C., et al., 2024. The Cumulative Damage Evolution Law of Multi-Anchor Circular Piles Reinforced Landslide under Earthquake Action. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8): 6321—6336. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03857-y>
- Wu, C., Ma, G., Zhu, D. J., et al., 2024. Seismic Retrofitting of GFRP-Reinforced Concrete Columns Using Precast UHPC Plates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 187: 109024. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109024>
- Yang, C. W., Zhang, L., Dong, L. J., et al., 2022. Research on the Difference of Dynamic Responses between Bedding and Toppling Rock Slopes Based on Shaking Table Test. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(2): 271—281 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Wu, R. A., Guo, C. B., et al., 2022. Geological Safety Evaluation of Railway Engineering Construction in Plateau Mountainous Region: Ideas and Methods. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1736—1751 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F., Shi, Z. M., Li, B., et al., 2025. Research on Dynamic Performance Optimization and Stability Evaluation of Seismic Pile-Cable Composite Structure for Bedding Rock Slope in Meizoseismal Areas. *Earth Science*, 50(10): 3943—3954 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. W., Dong, J. Y., Liu, H. D., et al., 2025. Seismic Response and Damage Model Analysis of Rocky Slopes with Weak Interlayers. *Open Geosciences*, 17(1): 20220621. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0621>
- Zhou, W. Q., Jiang, L. W., Luo, Q., et al., 2025. Shaking Table Test on Seismic Performance of Anchoring Frame Beam with Flexible External Anchor Heads. *Rock and Soil Mechanics*, 46(4): 1163—1173, 1186 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈建峰, 杜长城, 陈思贤, 等, 2022. 地震作用下抗滑桩—预应力锚索框架组合结构受力机制. *地球科学*, 47(12): 4362—4372.
- 崔光耀, 王雪来, 王明年, 2020. 隧道软岩洞口段纤维混凝土衬砌抗震性能研究. *振动测试与诊断*, 40(4): 650—655, 819.
- 戴轩, 马云祥, 魏少伟, 等, 2023. 不同地震强度下新型装配式锚索框架梁加固边坡抗震性能分析. *岩土工程学报*, 45(增刊2): 147—152.
- 高幸, 贾金青, 张丽华, 等, 2025. 地震作用下岩质边坡预应力锚索动力响应解析. *东北大学学报(自然科学版)*, 46(5): 134—144.
- 何江, 肖世国, 2021. 多级拼装悬臂式挡墙地震永久位移计算方法. *岩土力学*, 42(7): 1971—1982.
- 何梓雷, 蒋关鲁, 冯海洲, 等, 2024. 地震作用下桩板墙—锚索组合支护基覆型边坡的动力响应特性. *岩土力学*, 45(7): 2011—2023.
- 黄晓乐, 王晨旭, 曲宏略, 等, 2022. 地震作用下植被混凝土基材破坏机理研究. *应用基础与工程科学学报*, 30(4): 1048—1060.
- 贾志波, 陶连金, 潘菁, 等, 2024. 基于修正抗滑桩模型的地震边坡稳定性研究. *振动与冲击*, 43(24): 14—23.
- 孔宪京, 屈永倩, 邹德高, 等, 2016. 钢纤维混凝土面板堆石

- 坝的抗震性能数值分析. 水利学报, 47(7): 841—849.
- 赖天文, 雷浩, 武志信, 等, 2021. 玄武岩纤维增强复合材料在高边坡防护中的振动台试验研究. 岩土力学, 42(2): 390—400.
- 连静, 温浩, 童心豪, 等, 2024. 覆盖型边坡—锚索抗滑桩动力学特征演化规律与成因机制的大型振动台试验研究. 铁道学报, 46(9): 156—163.
- 刘汉东, 赵亚文, 董金玉, 等, 2022. 含软弱岩层反倾岩质边坡地震动力响应与破坏模式. 地球科学, 47(12): 4373—4389.
- 鲁青云, 徐英俊, 夏才初, 等, 2024. 纤维增强柔性混凝土压气储能地下洞室力学响应研究. 岩土力学, 45(12): 3566—3575.
- 鲁晓, 祁生文, 郑博文, 等, 2023. 川藏交通廊道崩滑灾害分布及其危险性评价. 工程地质学报, 31(3): 718—735.
- 任寄瑜, 谌建霖, 丁选明, 等, 2024. ECC 桩锚支护体系在地震作用下的动力响应特性研究. 铁道科学与工程学报, 21(10): 4089—4100.
- 陶志刚, 王璇, 郭爱鹏, 等, 2022. 地震作用下 NPR 锚索固坡效应振动台试验研究. 煤炭学报, 47(9): 3410—3420.
- 王哲, 石振明, 侯卓霖, 等, 2025. 桩锚参数对边坡地震动力响应的影晌及震损机理. 地球科学, 50(10): 3929—3942.
- 王正振, 张振涛, 戴国亮, 等, 2025. 基于拟动力法的框架预应力锚杆支护边坡的稳定性计算. 中国公路学报, 38(1): 119—128.
- 杨长卫, 张良, 董陇军, 等, 2022. 基于振动台试验的顺层及反倾岩质斜坡地震响应差异性研究. 岩石力学与工程学报, 41(2): 271—281.
- 张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等, 2022. 高原山区铁路工程建设地质安全评价: 思路与方法. 地质学报, 96(5): 1736—1751.
- 赵飞, 石振明, 李博, 等, 2025. 强震区顺层岩质边坡抗震桩锚组合结构动力性能优化及稳定性评估研究. 地球科学, 50(10): 3943—3954.
- 周文强, 蒋良滩, 罗强, 等, 2025. 锚杆框架梁柔性外锚头减震性能振动台模型试验研究. 岩土力学, 46(4): 1163—1173, 1186.