

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.317>



地震作用下岩质边坡大型振动台试验研究进展

赵 飞, 俞松波, 李 博, 石振明*

同济大学土木工程学院, 上海 200092

摘要: 大型振动台试验方法可真实有效地模拟地震作用, 是近年来研究边坡地震动响应特性的常用方法, 被学者们广泛用于模拟研究各类支护结构加固的边坡工程中. 通过综述学者们有关边坡大型振动台模型试验的相关文献, 对其研究方法、研究对象及主要结论进行了分类评述. 最后, 通过分析目前岩质边坡大型振动台物理模拟试验研究中存在的问题, 指明了今后的研究方向, 为深入认识地震作用下岩质边坡的动力响应特性、变形破坏规律及支护结构与岩土体动力耦合作用机理奠定了基础, 具有重要的理论意义和工程价值.

关键词: 大型振动台试验; 岩质边坡; 支护结构; 动力响应; 破坏模式; 岩土工程.

中图分类号: P64

文章编号: 1000-2383(2022)12-4498-15

收稿日期: 2022-06-30

Research Advances on Large-Scale Shaking Table Test for Rock Slopes under Earthquake

Zhao Fei, Yu Songbo, Li Bo, Shi Zhenming*

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The large-scale shaking table test method can simulate seismic effects realistically and effectively, and is a common method for studying the ground vibration response characteristics of slopes in recent years. In this paper it reviews the relevant literature on large-scale shaking table test model on slopes and categorises the research methods, research objects and main findings. Finally, by analyzing the problems in the current research of large-scale shaking table physical simulation tests on rock slopes, in this paper it points out the future research directions and lays the foundation for an in-depth understanding of the dynamic response characteristics of rock slopes under seismic action, the deformation and damage laws and the mechanism of the dynamic coupling between the supporting structure and the geotechnical body, which has important theoretical significance and engineering value.

Key words: large-scale shaking table test; rock slope; support structure; dynamic response; failure mode; geotechnical engineering.

0 引言

随着我国“西部大开发”和“一带一路”倡议的

实施, 一系列重大工程与基础设施建设陆续开展, 如川藏铁路、青藏铁路、滇藏铁路等, 沿线地区大多为山地丘陵, 板块构造尤为活跃, 地震灾害频发(时

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2019YFC1509700).

作者简介: 赵飞(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害与防治技术方面研究工作. ORCID: 0000-0002-7032-3492. E-mail: zhaofei@tongji.edu.cn

* **通讯作者:** 石振明, 教授, 主要从事地质灾害与防治技术方面研究工作. E-mail: shi_tongji@tongji.edu.cn

引用格式: 赵飞, 俞松波, 李博, 石振明, 2022. 地震作用下岩质边坡大型振动台试验研究进展. 地球科学, 47(12): 4498-4512.

Citation: Zhao Fei, Yu Songbo, Li Bo, Shi Zhenming, 2022. Research Advances on Large-Scale Shaking Table Test for Rock Slopes under Earthquake. *Earth Science*, 47(12): 4498-4512.

振梁等,1995;何满潮和郭鹏飞,2018;乔建伟等,2019;彭建兵等,2020).地震灾害触发了大量边坡地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等,进而造成了重大经济损失和人员伤亡(黄润秋和李为乐,2008;许强,2009;周洪福等,2021).因此,有关地震作用下边坡动力变形失稳破坏的相关问题已成为工程建设和学术研究关注的重大课题(何满潮和郭鹏飞,2018;彭建兵等,2020).然而,由于岩质边坡地质条件复杂,现有监测手段仍无法对地震作用下实际边坡动力响应规律进行全面地研究(黄发明等,2020).大型振动台试验技术是近年来揭示岩质边坡地震动力响应和失稳破坏过程最为有效的方法,被学者们广泛用于探索复杂岩质边坡工程地震动响应规律及验证各类支护结构抗震性能等研究工作,取得了显著的成效.本文通过总结学者们有关边坡大型振动台模型试验的相关文献,对其研究方法、研究对象及主要结论进行了分类评述.最后,通过分析目前岩质边坡大型振动台物理模拟试验研究中存在的问题,指明了今后的研究方向,为深入认识地震作用下岩质边坡的动力响应特性、变形破坏规律及支护结构与岩土体动力耦合作用机理奠定了基础,具有重要的理论意义和工程价值.

1 大型振动台试验方法

大型振动台试验方法可真实有效地模拟地震作用,是研究边坡地震动响应特性的常用方法.从

目前已公布的研究文献可知,国内超过10个科研院所可提供大型振动台试验设备及技术,为研究者开展岩质边坡物理模型试验提供过了充分的试验条件.通过文献调研,本文汇总了近年来前人采用的大型振动台试验设备的主要技术参数,包括振动模式、振动台面尺寸、最大负载、最大水平位移,最大竖直位移、水平最大加速度、垂直最大加速度、加载频率范围等,如表1.通过分析文献可知,在岩质边坡试验加载方式上,依据试验目的的不同,现有研究中地震荷载的施加方式可分为单次加载和多次加载.单次加载是指仅对物理模型施加一次地震波,为获得其在一次地震荷载下的地震动响应特征,如许强等(2010)、邹威等(2011a,2011b)、刘汉香等(2012,2014)基于强震区地震特点,开展了大量岩质边坡振动台模型试验,研究了不同强震作用下均质、层状和含软弱夹层边坡的动力响应规律及变形破坏特性.多次加载是指对同一物理模型多次施加地震波直至破坏,以获得动荷载下岩质边坡的累积损伤规律及变形破坏特性,如刘永权(2017)、何春梅(2018)、刘树林等(2018)和刘新荣等(2019,2020)基于水库诱发地震特点,开展了一系列频发微地震对库岸边坡稳定性影响的大型振动台试验,研究了边坡岩体在反复微小地震动荷载作用下的累积损伤规律.

综合上述研究结果可知,在岩质边坡振动台试验方法上,现有研究中地震荷载的施加方式主要为单次加载和多次加载,单次加载是指对新建物理模

表 1 岩质边坡大型振动台试验设备主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of large-scale shaking table test equipment for rock slopes

试验地点	主要技术参数							
	振动模式	台面尺寸(m)	最大负载(kN)	水平位移(mm)	垂直位移(mm)	水平加速度(g)	垂直加速度(g)	频率(Hz)
大连理工大学(王学伍,2019)	单向	1.5×1.5	100	±300	—	—	—	0.1~20
华中科技大学(吴多华等,2020)	单向	4×4	150	±100	—	±1.0	—	0.1~38
武汉大学(冯细霞,2018)	双向	2×2	200	—	—	±2.5	±2.5	0.1~100
中国地震局兰州地震研究所(王秋懿等,2020)	双向	4×6	250	±250	±100	±1.7	±1.2	0.1~50
福州大学(Zhang <i>et al.</i> ,2022)	双向	4×4	220	±250	—	±1.5	—	0~50
重庆交通科研设计院(Lin <i>et al.</i> ,2017)	三向	6×3	350	±150	±100	±1.0	±1.0	0.1~70
中南大学(江学良等,2018)	三向	4×4	300	±250	±250	±1.0	±1.6	0.1~50
中国水利水电科学研究院(詹志发等,2019)	三向	5×5	200	—	—	±1.0	±0.8	0.1~120
重庆大学(Long <i>et al.</i> ,2020)	三向	6.1×6.1	600	—	—	—	—	—
中国核动力研究设计院(Liu <i>et al.</i> ,2021)	三向	6×6	600	±150	±100	±1.0	±0.8	0.1~80
中国地震局工程力学所(陶志刚等,2022)	三向	5×5	300	±80	±50	±1.0	±0.7	0.5~40

型单次施加地震波以获得其地震响应和破坏特征,多次加载是指对新建物理模型多次施加不同类型地震波直至模型破坏.两种加载方式的作用机制存在差异,导致主要试验研究结果无法对比分析.然而,地震荷载施加方式引起的差异性结果往往被研究者们忽略.

2 岩质边坡模型

相较于土质边坡,岩质边坡具有地质条件复杂的特点,特别是在地震作用下其动力响应规律和稳定性更加难以评价.因此,为了深入研究岩质边坡的地震响应特征及变形破坏规律,学者们在对实际岩质边坡开展野外地质调查后,建立概化的大尺度岩质边坡物理模型.本节通过综述前人研究中的岩质边坡模型,根据岩体结构特征和失稳不利因素,将其分为以下 5 类.

2.1 岩性强度控制型岩质边坡

均质岩质边坡中岩性和岩体结构较为简单,岩体强度是影响其稳定性的主要因素.基于此,学者们考虑了不同岩性强度组成对均质岩质边坡力学特性的影响.杨国香等(2012a)通过开展对向边坡振动台试验,研究了均质岩质边坡的动力破坏特征,结果表明均质结构边坡动力破坏主要表现为岩体首先震裂呈块体,后沿倾向坡外的裂缝发生滑塌.刘汉香等(2014)依托振动台模型试验,开展了均质岩质边坡模型试验,结果表明随着激振频率增大,越接近模型斜坡的共振频率,边坡加速度的响应程度越高.Liu *et al.*(2017)基于大型振动台试验方法,建立不同强度相似材料的均质岩质边坡模型,研究结果表明低强度材料的边坡在坡顶的加速度放大系数是高强度材料的边坡的 2.5 倍.詹志发等(2019)开展大型均质岩质边坡振动台试验,分析了均质边坡在不同频率和幅值地震波输入下的地震动响应特征,结果表明振幅越大,高频及自振频率附近频段对均质边坡的损伤越大.综上所述,均质岩质边坡的稳定性主要受地形、岩土体性质、地震波等因素控制,总体表现为高程越大、岩体强度越低、加载地震波振幅越大、地震波频率越接近边坡自振频率,边坡地震动响应越强烈,从而易使边坡中上部岩体发生破裂滑塌.

2.2 层面控制型岩质边坡

据地震灾后大量边坡破坏案例调查统计发现,层状岩质边坡在地震后更易发生失稳破坏,这与其

岩体结构特征有密切联系.为了研究地震作用下不同岩体结构对层状岩质边坡的影响规律,学者们开展了大量水平、顺倾、反倾岩质边坡振动台模型试验研究.

在水平层状岩质边坡方面,许强等(2010)、邹威(2011)、刘汉香(2011)、邹威等(2011b)、刘汉香等(2012)开展了不同岩性组合水平层状岩质边坡模型试验研究,结果显示地震波的激振方向会影响不同岩性组合结构边坡的加速度响应规律及破坏模式,上软下硬斜坡模型的竖直向加速度响应程度高于上硬下软斜坡模型,上软下硬边坡顶层岩体震碎呈散体状滑落,形成滑坡,而上硬下软边坡破坏主要是岩层后缘拉裂后整体剪切错动,最终形成崩塌.邹威等(2011a)、邹威(2011)、侯红娟(2013)、刘汉香(2014)通过振动台试验对比研究了地震作用下不同岩性水平层状边坡变形破坏特征,结果表明强震作用下水平层状岩质边坡的变形破坏现象发生在边坡的中上部,主要以拉裂-剪切滑移变形破坏模式为主,且软岩边坡先于硬岩边坡发生变形破坏且严重,硬岩坡体为崩塌型破坏,软岩边坡为滑坡型破坏.

在顺倾层状岩质边坡模型方面,杨国香等(2012b)通过开展对向边坡振动台试验,研究了顺层结构岩质边坡的动力加速度响应特征,结果表明边坡动力加速度分布存在明显非线性高程放大特性及非线性趋表特性.贾俊(2011)开展地震作用下陡倾顺层岩质边坡模型试验,研究了其变形破坏过程及失稳机制,认为滑坡下部岩体折断所形成的破裂面与上部贯通的层面组合形成滑动面,锁固段岩体折断破坏导致滑面贯通,滑坡整体发生滑移弯曲式顺层溃滑.董金玉等(2011, 2013)开展顺倾岩质边坡动力响应规律的模型试验,认为层面结构增强了对地震波的折射和反射作用,一定程度增大了层状岩质边坡加速度放大效应.王学伍(2019)通过顺层岩质边坡振动台模型试验,认为地震作用下顺层岩质边坡的破坏机制为坡肩和坡顶岩体松动、坡脚岩体剪切挤出破坏、坡面岩体顺层滑动、边坡整体破坏.吴多华等(2020)通过不同地震波下顺层岩质边坡模型试验,认为其破坏模式表现为:坡肩开裂、坡顶出现贯穿裂缝、坡脚附近的坡面隆起、坡顶贯穿裂缝与隆起部位贯通、边坡沿层面发生浅部滑动从而失稳破坏.

在反倾层状岩质边坡模型方面,刘云鹏等

(2011)开展了反倾边坡物理模拟试验研究,结果表明震动破坏阶段可分为岩土体松动碎裂、后缘坡肩拉裂、裂缝发展和变形位移累计、前缘坡脚鼓出及抛起式溃滑剪出等阶段.Guo *et al.*(2017)基于块体倾倒破坏极限平衡理论方法和振动台试验方法,对反倾边坡变形块体特性进行了研究,结果表明该理论方法预测的结果完全符合振动台试验下物理模型的变形特征和稳定性条件,可更好地用于评价地震荷载作用下可能发生倾倒破坏的边坡的稳定性.杨国香等(2012b)、Yang *et al.*(2018)通过大型振动台试验,研究了反倾岩质边坡的动力响应规律及破坏模式,结果表明在动力响应规律上,上部边坡对水平加速度的响应非常强烈,而下部边坡对垂直加速度的响应更强;在变形破坏模式上,地震动作用下岩层面错动和松弛、岩体倾倒破坏、剪切滑动面形成、坡面发生大规模浅层破坏.Ning *et al.*(2019)通过对比4种反倾岩质边坡物理模型试验结果,发现边坡坡角和地层倾角均与边坡稳定性成反比,且反倾岩质边坡倾倒破坏演化可分为地层中拉伸裂缝发展阶段、坡顶拉伸裂缝形成阶段、倾倒区形成阶段和破坏阶段.刘汉东等(2019)基于振动台试验方法,研究了强震作用下反倾层状岩质边坡的变形规律和破坏模式,结果表明在震动初期坡体表面部分岩体松动,最终脱离坡体坠落,随着震动的持续,裂隙沿坡体内部结构面逐渐贯通,产生崩塌破坏.

此外,一些学者对比研究了顺倾和反倾边坡在相同地震条件下动力响应规律及破坏特性.李振生等(2012)通过顺层和反倾岩质边坡物理模型大型振动台试验,研究认为结构面组合、动荷载类型和振动方向会影响振动波场的形成,从而使得两种边坡在不同地震作用下坡面加速度放大系数的节律性变化规律有所不同.侯伟龙(2011)、李果(2012)、黄润秋等(2013)、Huang *et al.*(2013)通过大型振动台试验,对比研究了顺倾和反倾岩质边坡在地震条件下的变形破坏特征,结果表明硬岩反倾斜坡为后缘垂直拉裂、中下部平缓剪出型失稳(L型滑面),软岩反倾边坡为坡顶部拉裂、下部剪出型失稳;硬岩顺层斜坡在变形破坏通常表现为顺层滑移—下部隆起溃屈型失稳,软岩顺层斜坡为顺层滑移—底部挤出一分层滑移型失稳.Li *et al.*(2019)开展大型振动台试验,研究了陡峭顺层和反倾岩质边坡的地震响应,发现边坡类型对不同类型岩石边坡的破坏机理和响应准则有显著影响,在地震荷载作用下,顺

层岩质陡峭边坡的滑动面与坡面基本平行,而倾倒岩质边坡的滑动面使岩层发生倾斜.

综上所述,层状岩质边坡的稳定性主要受边坡坡角、边坡岩性、层面性质等多种因素共同影响.在动力响应规律方面,高程越大,越趋近于地表,岩性强度越低,坡角与岩层倾角越大,层面性质越弱,则边坡动力响应越强烈.在变形破坏特征方面,水平层状岩质边坡主要破坏模式表现为坡顶拉裂—层面剪切滑移;顺层岩质边坡破坏表现为沿层面剪切和节理面拉裂,整体滑移失稳;反倾岩质边坡破坏表现为向临空面的弯折挤压变形,最终崩塌或滑移失稳.

2.3 软弱夹层控制型岩质边坡

含软弱夹层岩质边坡是一种常见的边坡类型,其决定了岩质边坡在地震作用下的稳定性.学者们采用大型振动台模型试验研究了含软弱夹层岩质边坡的地震动动力响应及破坏模式.刘汉香等(2015, 2016)、Chen *et al.*(2016)、Liu *et al.*(2021)开展了含不同厚度和倾角软弱夹层的斜坡地震响应规律试验研究,结果表明夹层厚度对坡体中上段和坡底的PHA起到了控制作用,夹层倾角对坡体中下段的PHA起到了控制作用.周飞等(2016)开展不同厚度水平软弱夹层的岩质边坡大型振动台模型试验,研究发现竖直向坡面加速度放大系数因软弱夹层厚度而异,薄夹层斜坡最大放大值出现在坡肩位置,而厚夹层斜坡最大放大值出现在软弱夹层底部.江学良等(2018)开展了下伏隧道含软弱夹层和软弱风化岩层岩质边坡的大型振动台模型试验,研究发现X激振方向上,边坡加速度表现为随高程线性放大特征,而Z激振方向上加速度沿坡高呈“U”型变化.Zhi and Yang(2007)开展了含软弱夹层的岩质边坡振动台模型试验,研究结果显示软弱夹层对顺层和反倾岩质边坡地震作用下动力破坏形式的影响是不同,顺层边坡主要沿软弱夹层滑动,而反倾边坡中软弱夹层主要产生挤压变形.徐冠军(2015)开展了含水平软弱层的凹型及凸型岩质边坡的振动台模型试验,研究结果显示,凹型边坡破坏过程为坡顶拉裂缝产生、裂缝进一步延伸扩展、裂缝贯通形成滑移面、坡肩滑出坡体失稳破坏,凸型边坡破坏过程为变坡线处有拉裂缝产生、裂缝及错动进一步扩展延伸、变坡线处两个夹层界面之间模型剪出崩塌、模型完全失稳破坏.杨峥(2015)基于大型振动台试验技术,研究含反倾软弱夹层斜坡动力变形

破坏特征,结果表明含反倾软弱夹层的斜坡为“震裂—散体崩落”型破坏.Fan *et al.*(2016)通过建立软弱夹层的岩质边坡模型,研究了边坡岩土体的破坏模式特征,结果表明顺倾边坡中软弱夹层表现为顺层滑动,反倾边坡中弱夹层表现为挤压变形.曹礼聪等(2017)基于大型振动台试验技术,研究了含倾斜强风化带(软弱夹层)边坡在地震波作用下的动力响应特征,结果表明强风化带处加速度峰值削弱明显,两种破坏模式分别为拉裂—剪切—滑移模式、拉裂—剪切—破碎模式.综上所述,地震作用下软弱夹层处的动力响应特点最为复杂,受较多因素影响,包括软弱夹层的厚度、倾角、分布位置,坡体的形态和地震波的激振方向等,很多试验研究结果中边坡动力响应规律不同.由此可见,软弱夹层对地震波的折射和反射作用表现出消能作用或增强作用,其所受的主要因素及作用机理尚不清楚.

2.4 结构面控制型岩质边坡

天然岩体内部含有大量的节理裂隙等结构面,其决定了岩体强度,并进一步控制着边坡稳定性.基于此,学者们采用大型振动台模型试验研究了含不同特性结构面的岩质边坡地震动力响应及破坏模式.倪振强(2012)开展了含非贯通型节理的高陡顺层岩质斜坡振动台模型试验,发现了边坡内部节理岩桥破坏贯通多为拉—剪复合型破坏.李阳等(2014)开展大型振动台试验,研究了具有已知滑动面边坡的失稳滑动机理,研究证明随着震级的增大,坡内结构面出现张开、闭合、滑移的运动状态,直至滑块产生较大的位移直至失稳破坏.王斌等(2015)基于大型振动台试验技术,研究了地震作用下含不连续面的高陡岩质边坡的破坏特征,结果表明含顺向不连续面的高陡岩质边坡的动力破坏形态呈现3个阶段:裂缝开展、坡面剥落、崩塌滑动.冯细霞(2018)开展振动台试验,研究了包含两组正交节理的顺层岩质边坡和反倾岩质边坡失稳机制,结果表明顺层边坡动力失稳主要由沿着节理的剪切变形引起,而反倾边坡模型动力失稳主要是由沿着节理的拉—剪切破坏引起的.Song *et al.*(2018)开展了含不连续面的岩质边坡动力损伤演化过程的振动台试验研究,结果表明地震期间边坡的损伤演化过程包括3个阶段:微小裂缝形成、边坡表面裂缝扩展和边坡滑动破坏.毕鹏程等(2020)针对岩体的不连续特性以及地震力的动力特性,开展了含不连续面的岩质边坡大型振动台试验,研究发现滑动面从

陡倾结构面剪入,与顺向结构面贯通,在坡脚处剪出,呈整体滑动破坏模式.综上所述,结构面是控制岩体稳定性的重要因素,结构面类型及产状决定了边坡的破坏特征.在地震荷载作用下,结构面附近岩土体力学性能薄弱,地震动响应加剧,导致非贯通结构面扩展贯通,形成滑动面,最终引发边坡失稳.

2.5 考虑水影响型岩质边坡

水是影响边坡稳定性的重要因素,目前学者们采用大型振动台模型试验研究了岩体含水量、降雨、库水等因素对岩质边坡的动力响应及破坏模式的影响.付晓等(2015)通过开展高陡反倾层状岩质边坡模型试验,研究发现泥化夹层含水量发生变化对坡面加速度放大效应影响显著,注水后X向加速度放大系数减小而Z向放大系数增大.范刚等(2015,2016)建立含泥化夹层饱水前后的岩质边坡振动台模型,研究发现泥化夹层饱水前,坡面加速度放大系数大于坡体内部,泥化夹层饱水后,下部坡体内部加速度放大系数大于坡面,中上部坡体内部加速度放大系数小于坡面.Cao *et al.*(2019)开展大型振动台模型试验,研究了降雨和地震因素对倾斜强风化边坡的动力破坏模式的影响,结果表明降雨和地震损伤主要发生在强风化夹层中,破坏模式主要为裂缝—剪切—滑动和裂缝—剪切—破碎.Song *et al.*(2018)通过大型振动台试验研究了顺层岩质边坡在库水水位快速下降下的动力稳定性,结果显示地震时库水水位快速下降主要对高水位和低水位之间的地表坡度产生相当大的影响.陈铸等(2018)基于地震及库水联合作用下含软弱结构面岩质边坡的大型振动台模型试验,研究发现在地震力、库水入渗及库水骤降联合作用下,坡体沿顺倾结构面发生倾覆滑动破坏.综上所述,由于静水压力和动水压力的产生、岩土体的自重应力增大、软弱夹层及结构面的性质弱化等问题,水在与地震荷载耦合作用下,可直接或间接地加速岩质边坡岩土体内部结构的破坏,进一步使得边坡的动力响应加剧,最终引起边坡失稳.

综合上述研究结果可知,在岩质边坡试验模型研究上,岩质边坡大型振动台试验模型可分为5类,分别为岩性强度控制型岩质边坡、层面控制型岩质边坡(水平层状、顺倾、反倾岩质边坡)、软弱夹层控制型岩质边坡、结构面控制型岩质边坡以及考虑水影响型岩质边坡等.从研究边坡工况条件可知,考

虑因素不断趋于复杂化,但尚未考虑包括大尺度的裂隙、断层等因素与地震耦合作用的影响,特别是一些富含水的裂隙和断层对地震作用下岩质边坡的影响.此外,既有研究表明,边坡岩土体参数与输入地震波参数是决定边坡稳定性的主要因素.在岩土体影响因素上,岩质边坡的稳定性主要受边坡地形、岩土体性质等因素控制,表现为高程越大,岩体强度越低,结构面越复杂且贯通性越好,位置越趋近于地表,则边坡地震动响应越剧烈;在地震波影响因素上,其稳定性主要与地震强度、地震频率、地震持时、激振方式等因素有关,具体表现为地震震级越高,地震频率越接近边坡自振频率,地震持时越长,激振方式越多向,则边坡岩体越易发生破裂滑塌.然而,既有研究仍存在关键结论模糊及研究深度不足等问题,如岩质边坡软弱夹层处动力响应问题:软弱夹层对地震波具有消能作用或增强作用所受的主要因素及作用机理尚不清楚.

3 岩质边坡支护方法

在岩质边坡振动台试验的研究基础上,学者们开展了大量有关岩质边坡支护方法的模型试验,进一步研究了不同支护结构加固岩质边坡的动力特性,为地震作用下岩质边坡工程防治提供理论依据.通过调查既有大型振动台试验研究中的边坡支护方法,对其进行了总结分类,如表 2 所示.

3.1 锚杆/锚索支护

锚杆/锚索支护技术具有施工简单、使用范围广泛、支护效果好等特点,是一种可有效提高岩土体强度并维护其稳定性的工程技术手段,学者们对此开展了一系列模型试验研究.叶海林等(2011)采用振动台模型试验进行锚杆加固岩质边坡研究,结果表明随着地震强度增大,锚杆动力响应表现为坡腰锚杆轴力最大→坡顶锚杆和坡腰锚杆轴力最大.言志信等(2020)开展了含软弱层顺倾岩体边坡锚固地震响应试验研究,研究发现地震作用下锚杆杆体的应变响应可分为拉压循环阶段、张拉阶段、强烈振荡阶段和残余应变阶段,砂浆的应变响应可分为拉压循环阶段、张拉阶段和破坏阶段.叶海林等(2012a)采用振动台进行预应力锚索加固岩质边坡模型试验,研究了预应力锚索轴力和预应力损失情况,结果表明随着输入地震波峰值的增大,锚索预应力损失呈先增大后减小的趋势,达到临界值后,不再发生预应力损失.付晓等(2018)开展了锚索框

架梁加固平面滑动型边坡的振动台试验,研究结果表明锚索在地震时表现出协同工作的特性,预应力损失最先发生在坡顶,然后向坡体中下部转移. Long *et al.*(2020)开展了锚索框架梁支护结构加固含软弱层岩质边坡模型试验,研究发现锚固界面(螺栓—灌浆界面和灌浆—岩石界面)上的剪切效应与边坡地震响应之间表现为正相关关系. Zhang *et al.*(2022)通过大型振动台试验,研究了预应力锚索框架梁加固边坡的破坏模式,结果表明预应力锚索框架梁加固边坡的地震破坏模式主要为滑动体顶部的拉伸裂缝和纵向裂缝的穿透、边坡上部自由面的坍塌和空鼓以及滑动体的整体滑动.王秋懿等(2020)通过振动台试验,对 BFRP 锚杆锚固边坡在 E1 地震波作用下的加速度及动应力响应特征进行了研究,研究结果表明 BFRP 锚固结构对边坡的加速度放大系数起到了有效的抑制作用,从而提高了边坡的整体稳定性.陶志刚等(2022)基于大型振动台试验方法,研究了地震作用下 NPR 锚索固坡效应,结果表明 NPR 锚索在地震作用下具有良好的吸能特性,通过吸收地震释放能量的方式增强边坡的整体性,降低坡体破坏程度.综上所述,学者们通过开展锚杆(锚索)加固岩质边坡大型振动台模型试验,研究了地震作用下边坡不同位置锚杆(锚索)、单一锚索全长段及锚固体及锚固界面的动力响应特性,并进一步对比了不同锚索锚固效果,揭示了锚杆(锚索)加固岩质边坡锚固机理.

3.2 抗滑桩支护

抗滑桩具有治理效果好、安全性能高等优点,是各类边坡治理工程进行抗滑处理的主要加固措施.学者们开展了大型振动台试验对单排抗滑桩、双排抗滑桩支护结构加固岩质边坡在地震作用下的动力响应规律及变形破坏特性进行了研究.许江波和郑颖人(2012)研究了埋入式抗滑桩抗震性能,结果发现相同地震强度下,未加固边坡在坡顶和坡脚部位发生破坏,产生贯通裂缝,而埋入式抗滑桩加固后边坡未出现破坏现象.赖杰等(2013)开展振动台试验研究了埋入式抗滑桩加固边坡的破坏模式,结果显示提高地震强度,埋入式抗滑桩加固边坡破坏面产生张拉—剪切复合破坏,最终发生跃顶破坏.刘昌清等(2013, 2014)、赖杰等(2014)通过大型振动台模型试验对比研究了单排桩和双排桩支挡结构在不同地震强度条件下的动力响应,结果表明在地震作用下双排桩支挡结构较单排桩可有效

表 2 地震作用下不同支护结构加固岩质边坡

Table 2 Reinforcement of rock slopes by different support structures under seismic action

支护结构类型	边坡是否含潜在滑面	主要研究内容	主要研究结果	参考文献
普通锚杆	无	锚杆轴力响应规律	地震强度增大,坡腰锚杆轴力最大转变为坡顶锚杆和坡腰锚杆轴力最大	叶海林等(2011)
	是	锚杆杆体、砂浆应变响应规律	锚杆:拉压循环、张拉、强烈振荡和残余应变阶段;砂浆:拉压循环、张拉和破坏阶段	言志信等(2020)
预应力锚索	无	锚索预应力损失规律	地震强度增大,锚索预应力损失呈先增大再减小最后趋于稳定的趋势	叶海林等(2012a)
锚杆/锚索/锚-梁支护结构	是	锚索预应力损失规律	锚索预应力损失最先发生在坡顶,后向坡体中下部转移	付晓等(2018)
	是	锚固界面剪切效应	边坡地震响应越强烈,锚固界面上的剪切效应越显著	Long <i>et al.</i> (2020)
	是	边坡的破坏模式	滑动体顶部拉伸裂缝和纵向裂缝穿透、边坡上部自由面坍塌空鼓、滑动体整体滑动	Zhang <i>et al.</i> (2022)
	无	边坡的加速度响应规律	BFRP 锚杆对边坡的加速度放大系数具有有效的抑制作用	王秋懿等(2020)
NPR 锚索	是	NPR 锚索固坡效应	NPR 锚索通过恒阻变形,能够吸收地震波能,降低坡体破坏程度	陶志刚等(2022)
抗滑桩支护结构	是	埋入式抗滑桩加固效果	埋入式抗滑桩可阻止贯通裂缝产生,防止坡顶和坡脚部位发生破坏	许江波和郑颖人(2012)
	是	埋入式抗滑桩加固边坡破坏模式	埋入式抗滑桩加固边坡破坏面首先产生张拉-剪切复合破坏,最终发生跃顶破坏	赖杰等(2013)
	是	单、双排抗滑桩加固效果对比	地震作用下双排桩结构较单排桩可有效降低边坡响应和抑制边坡变形	刘昌清等(2013, 2014)、赖杰等(2014)
	是	优化前后的锚索抗滑桩加固效果	优化后的多锚点锚索抗滑桩加固边坡可有效减小抗滑桩桩顶变形	冯帅等(2018)
组合支护结构	无	支护结构加固效果	悬臂抗滑桩加坡面锚杆支护结构加固后的边坡坡面累计相对位移较小	叶海林等(2012b)
	是	锚杆轴力和抗滑桩土压力规律	地震强度增大,同一锚杆抗力由外向内传递,桩前和桩后土压力呈现不同分布形式,滑带处的桩动土压力变化最明显	赖杰等(2015)
	无	边坡加速度响应规律	抗滑桩和锚杆联合支护可有效减低边坡临空面加速度放大效应	付晓等(2015)
	无	边坡位移响应规律	边坡位移响应由表及里逐渐减弱,边坡中部位移响应整体性较强	范刚和张建经(2017)
	是	锚索轴力和抗滑桩变形特征	地震强度增大,锚索轴力峰值增大,桩身弯矩呈非线性增大趋势,软弱结构面处的桩身变形最大	王德华等(2019)
	是	锚索轴力和抗滑桩土压力规律	锚索:轴力峰值增加比例沿高程呈现空间非一致性,抗滑桩:主动土压力分布呈三角形	付晓等(2017)
	是	边坡加速度响应规律	不同地震激振作用下,挡墙加固区加速度表现为高程放大效应,锚梁加固区加速度放大效应表现为上下强、中间弱	Lin <i>et al.</i> (2017)

降低边坡响应和抑制边坡变形,具有显著的抗震支护效果.冯帅等(2018)开展大型振动台试验,研究发现采用优化后的多锚点锚索抗滑桩加固边坡可减小桩顶变形,提高预应力锚索抗滑桩的抗震性能.综上所述,现有抗滑桩加固岩质边坡大型振动台模型试验结果表明,地震作用下,双排抗滑桩支挡结构较单排抗滑桩具有更好的支护效果,可有效降低边坡地震动效应,并减小桩身永久位移.

3.3 组合结构支护

在实际边坡工程中,单一锚杆、锚索、抗滑桩支护结构往往无法满足支护要求.为此,学者们提出了锚+抗滑桩、锚+框架梁+抗滑桩、锚+框架梁+挡土墙等多级组合支护方法,并研究其加固岩质边坡的动力响应规律及变形破坏特性.叶海林等(2012b)开展了岩质边坡模型试验,研究结果表明悬臂抗滑桩加坡面锚杆支护结构加固后的边坡坡面累计相对位移较小,具有良好的抗震性能.赖杰等(2015)研究了抗滑桩和锚杆联合支护下边坡的地震响应规律,结果显示随着地震力增大,同一锚杆抗力由外向内传递,桩前和桩后土压力呈现不同分布形式,滑带处的桩动土压力变化最明显.付晓等(2015)开展了高陡反倾层状岩质边坡的振动台模型试验,研究发现抗滑桩和锚杆联合支护可有效减低边坡临空面放大效应,且边坡分级支护可有效降低 X 向加速度放大系数的高程增大效应,但对 Z 向会产生不利作用.范刚和张建经(2017)采用大型振动台试验研究了单排抗滑桩+预应力锚索格构组合支挡结构作用下边坡,研究结果显示组合支挡结构作用下,边坡位移响应由表及里逐渐减弱,边坡中部整体性较强.王德华等(2019)研究了多级组合支护结构加固含薄弱夹层岩质边坡的动力响应规律,发现随着提高输入地震强度,锚索轴力峰值不断增大,桩身弯矩呈非线性增大趋势,软弱结构面位置处的桩身变形明显大于其他位置.付晓等(2017)基于原型边坡设计了大型振动台模型试验,研究发现预应力锚索的轴力响应峰值增加比例沿高程呈现出空间非一致性,抗滑桩主动土压力分布规律将由“上小下大”转变成“上大下小”的三角形,抗滑桩被动土压力区 I 和 II 的分界点将向桩身下部发展.Lin *et al.*(2017)通过振动台试验,研究了在不同强度的汶川地震下锚+框架梁+重力式挡土墙支护陡坡的抗震性能,结果表明不同地震激振作用下,重力式挡墙加固区加速度表现为明显高程放

大效应,而锚固框格梁加固区加速度放大效应主要表现为上下部区域最强、中间区域最弱.综合现有桩锚组合结构加固岩质边坡大型振动台模型试验结果,地震作用下多级桩锚支挡结构可有效提高边坡的整体性,达到了多级支护结构协同支护效果,其较单一支挡结构具有更好的抗震性.

综合上述研究结果可知,在岩质边坡支护方法研究上,岩质边坡支护方法可分为3类,包括锚杆/锚索支护方法(单锚支护、锚框支护)、抗滑桩支护方法(单桩支护、双桩支护、锚索抗滑桩支护)、多级组合支护方法(桩锚组合支护、桩锚联合支护、锚+梁+挡土墙支护)等.然而,这些支护方法均比较传统,一些具有抗震消能的新型桩锚支护方法的适用性需要进一步在岩质边坡大型振动台试验中被验证.

4 存在问题与展望

综上所述,学者们采用大型振动台试验技术对地震作用下岩质边坡的动力响应规律和变形破坏特性及加固方法进行了研究,取得了显著的成效.然而,随着我国基础建设工程的持续快速发展,与地震作用下边坡失稳破坏有关的工程防治问题带来了一系列的挑战性难题.相关研究由于存在研究方法不统一、考虑工况因素简单、支护方法创新性缺乏、关键结论模糊有分歧、研究成果深度不足等问题,仍然无法满足工程建设需求.

(1)在岩质边坡振动台试验方法上,现有研究中地震荷载的施加方式主要为单次加载和多次加载,单次加载是指对新建物理模型单次施加地震波以获得其地震响应和破坏特征,多次加载是指对新建物理模型多次施加不同类型地震波直至模型破坏.两种加载方式的作用机制存在差异,导致主要试验研究结果存在差异,无法对比分析,这往往被研究者们忽略.

(2)在岩质边坡试验模型研究上,岩质边坡大型振动台试验模型可分为五类,分别为岩性强度控制型岩质边坡、层面控制型岩质边坡(水平层状、顺倾、反倾岩质边坡)、软弱夹层控制型岩质边坡、结构面控制型岩质边坡以及考虑水影响型岩质边坡等.从研究边坡工况条件可知,考虑因素不断趋于复杂化,但尚未考虑包括大尺度的裂隙、断层等因素与地震耦合作用的影响,特别是一些富含水的裂隙和断层对地震作用下岩质边坡的影响.

(3)在岩质边坡试验结果研究上,边坡岩土体参数与输入地震波参数是决定边坡稳定性的主要因素.既有研究表明,在岩土体影响因素上,岩质边坡的稳定性主要受边坡地形、岩土体性质等因素控制,表现为高程越大,岩体强度越低,结构面越复杂且贯通性越好,位置越趋近于地表,则边坡的地震动响应越剧烈;在地震波影响因素上,其稳定性主要与地震强度、地震频率、地震持时、激振方式等因素有关,具体表现为地震震级越高,地震频率越接近边坡自振频率,地震持时越长,激振方式越多向,则边坡岩体越易发生破裂滑塌.然而,既有研究仍存在关键结论模糊及研究深度不足等问题.

(4)在岩质边坡支护方法研究上,岩质边坡支护方法可分为3类,包括锚杆/锚索支护方法(单锚支护、锚框支护)、抗滑桩支护方法(单桩支护、双桩支护、锚索抗滑桩支护)、多级组合支护方法(桩锚组合支护、桩锚联合支护、锚+梁+挡土墙支护)等.然而,这些支护方法均比较传统,一些具有抗震消能的新型桩锚支护结构的抗震性和适用性需要进一步在岩质边坡大型振动台试验中被验证.

因此,在今后研究中,学者们应开展更多的复杂岩质边坡大型振动台试验研究,揭示地震作用下岩质边坡的变形失稳机制,并进一步探索验证岩质边坡新型支护方法,从而为工程建设和边坡地质灾害防治提供可靠的技术支撑.

References

- Bi, P. C., Che, A. L., Yuan, G. L., 2020. Displacement Evolution of Rock Slope under Earthquake Based on Shaking Table Test. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 31(3): 11–19(in Chinese with English abstract).
- Cao, L. C., Zhang, J. J., Liu, F. C., et al., 2017. Dynamic Response and Failure Mode of the Complex Site with Tilting Strongly Weathered Layer and Local Slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(9): 2238–2250(in Chinese with English abstract).
- Cao, L. C., Zhang, J. J., Wang, Z. J., et al., 2019. Dynamic Response and Dynamic Failure Mode of the Slope Subjected to Earthquake and Rainfall. *Landslides*, 16: 1467–1482.
- Chen, Z., Che, A. L., Yan, F., et al., 2018. Dynamic Response of the Slope by the Site of Jinsha River Bridge under the Action of Reservoir Water and Seismic Force. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(1): 148–155(in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Hu, X., Xu, Q., 2016. Experimental Study of Motion Characteristics of Rock Slopes with Weak Intercalation under Seismic Excitation. *Journal of Mountain Science*, 13(3): 546–556. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3212-0>
- Dong, J. Y., Yang, G. X., Wu, F. Q., et al., 2011. The Large-Scale Shaking Table Test Study of Dynamic Response and Failure Mode of Bedding Rock Slope under Earthquake. *Rock and Soil Mechanics*, 32(10): 2977–2982, 2988(in Chinese with English abstract).
- Dong, J. Y., Yang, J. H., Wu, F. Q., et al., 2013. Large-Scale Shaking Table Test Research on Acceleration Response Rules of Bedding Layered Rock Slope and Its Blocking Mechanism of River. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(Suppl. 2): 3861–3867(in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., 2017. Determination of the Seismic Displacement Relaxation Zone in the Reinforced Slope by Composite Retaining Structures. *Rock and Soil Mechanics*, 38(3): 775–783(in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., Fu, X., et al., 2015. Large-Scale Shaking Table Test on Dynamic Response of Bedding Rock Slopes with Silt Intercalation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(9): 1750–1757(in Chinese with English abstract).
- Fan, G., Zhang, J. J., Fu, X., et al., 2016. Energy Identification Method for Dynamic Failure Mode of Bedding Rock Slope with Soft Strata. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(5): 959–966(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/s00603-016-0971-7>
- Feng, S., Wu, H. G., Ai, H., et al., 2018. Seismic Optimum Design and Experimental Research on Anti-Slide Pile with Pre-Stressed Anchor Cable. *Science Technology and Engineering*, 18(12): 248–255(in Chinese with English abstract).
- Feng, X. X., 2018. Study on the Dynamic Response and Stability Analysis of Layered Rock Slopes (Dissertation). Wuhan University, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Fu, X., Fan, G., Liu, F. C., et al., 2015. Shaking Table Tests

- on the Acceleration Response of an Anti-Dip Stratified Rock Slope with Composite Retaining Structure. *China Earthquake Engineering Journal*, 37(3):823—828(in Chinese with English abstract).
- Fu, X., Ji, W. Y., Zhang, J. J., et al., 2018. Seismic Response for Plane Sliding of Slope Reinforced by Anchor-Chain-Framed Ground Beams through Shaking Table Test. *Rock and Soil Mechanics*, 39(5): 1709—1719(in Chinese with English abstract).
- Fu, X., Zhang, J. J., Zhou, L. R., 2017. Shaking Table Test of Seismic Response of Slope Reinforced by Combination of Anti-Slide Piles and Multi-Frame Foundation Beam with Anchor Cable. *Rock and Soil Mechanics*, 38(2): 462—470(in Chinese with English abstract).
- Guo, S. F., Qi, S. W., Yang, G. X., et al., 2017. An Analytical Solution for Block Toppling Failure of Rock Slopes during an Earthquake. *Applied Sciences*, 7(10):1008. <https://doi.org/10.3390/app7101008>
- He, C. M., 2018. Mechanical Behavior of Muddy Soft Rock and Dynamic Stability of Soft-Hard Interbedded Slopes in Reservoir Area under Cyclic Loading (Dissertation). Chongqing University, Chongqing(in Chinese with English abstract).
- He, M. C., Guo, P. F., 2018. On Problems of Rock Mechanics and Engineering in the Belt and Road and Their Countermeasures. *Journal of Shaoxing University (Natural Science)*, 38(2):1—9(in Chinese with English abstract).
- Hou, H. J., 2013. The Seismic Dynamic Response Characteristics of the Shaking Table Test on Horizontally Layered Slope. Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Hou, W. L., 2011. Research on Large-Scale Shaking Table Physical Simulation Experiment of Steep-Dipping Stratified Rock Slope(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Ye, Z., Yao, C., et al., 2020. Uncertainties of Landslide Susceptibility Prediction: Different Attribute Interval Divisions of Environmental Factors and Different Data-Based Models. *Earth Science*, 45(12): 4535—4549(in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., Li, G., Ju, N. P., 2013. Shaking Table Test on Strong Earthquake Response of Stratified Rock Slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(5):865—875(in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., Li, W. L., 2008. Research on Development and Distribution Rules of Geohazards Induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(12):2585—2592(in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., Zhao, J. J., Ju, N. P., et al., 2013. Analysis of an Anti-Dip Landslide Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake in China. *Natural Hazards*, 68(2): 1021—1039. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0671-5>
- Jia, J., 2011. Study on Dynamic Responses and Failure Mechanism of Steep Bedding Rock Slope Triggered by Strong Earthquake—Taking Ganmofang Landslide as an Example (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. L., Niu, J. Y., Yang, H., et al., 2018. Large-Scale Shaking Table Model Test Study of Seismic Response Characteristics on Layered Rock Slope with Tunnel. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 35(4):762—768, 931 (in Chinese with English abstract).
- Lai, J., Zheng, Y. R., Liu, Y., et al., 2013. Shaking Table Test for Antiseismic Behaviour of Embedded Anti-Slide Pile and Numerical Simulation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(Suppl. 2): 4165—4173(in Chinese with English abstract).
- Lai, J., Zheng, Y. R., Liu, Y., et al., 2014. Shaking Table Tests on Double-Row Anti-Slide Piles of Slopes under Earthquakes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(4):680—686(in Chinese with English abstract).
- Lai, J., Zheng, Y. R., Liu, Y., et al., 2015. Shaking Table Text Study on Anti-Slide Piles and Anchor Bars of Slope under Earthquake. *China Civil Engineering Journal*, 48(9): 96—103(in Chinese with English abstract).
- Li, G., 2012. Failure Mechanism of Stratiform Rock Slope under Strong Earthquake (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Li, L. Q., Ju, N. P., Zhang, S., et al., 2019. Shaking Table Test to Assess Seismic Response Differences between Steep Bedding and Toppling Rock Slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1):519—531. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1186-1>
- Li, Y., Li, T. C., Niu, Z. W., 2014. Shaking Table Test Study on Dynamic Responses and Failure Mode of Slope. *Water Resources and Power*, 32(1):93—95(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. S., Ju, N. P., Hou, W. L., et al., 2012. Large-Scale Shaking Table Model Tests for Dynamic Response of Steep Stratified Rock Slopes. *Journal of Engineering Geology*,

- 20(2):242—248(in Chinese with English abstract).
- Lin, Y. L., Yang, G. L., Yang, X., et al., 2017. Response of Gravity Retaining Wall with Anchoring Frame Beam Supporting a Steep Rock Slope Subjected to Earthquake Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92: 633—649. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.002>
- Liu, C. Q., Jiang, C. S., Liang, Y., et al., 2014. Study of Shaking Table Test for High Slope Retaining Structure on Highly Seismic Region. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(Suppl. 2): 3798—3802(in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Q., Li, X., Zhang, Y. P., 2013. Shaking Table Test and Analysis of Double Row Pile Retaining Structure. *China Civil Engineering Journal*, 46(Suppl.2):190—195(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. D., Geng, Z., Wang, Z. F., et al., 2019. Study on the Deformation and Failure Mode of Anti-Dip Layered Rock Slope under Earthquake. *Water Power*, 45(9):17—21, 38 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. X., 2011. Large-Scale Shaking Table Test Study on Seismic Response of Combinational Rock Slopes. Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. X., 2014. Seismic Responses of Rock Slopes in a Shaking Table Test (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. X., Qiu, T., Xu, Q., 2021. Dynamic Acceleration Response of a Rock Slope with a Horizontal Weak Interlayer in Shaking Table Tests. *PLoS One*, 16(4): e0250418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250418>
- Liu, H. X., Xu, Q., Wang, L., et al., 2014. Effect of Frequency of Seismic Wave on Acceleration Response of Rock Slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(1): 125—133(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. X., Xu, Q., Zhou, F., et al., 2016. Influence of a Weak Interlayer of Different Thicknesses and Dip Angles on Seismic Acceleration Responses of a Slope. *Journal of China Coal Society*, 41(Suppl. 1): 118—124(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. X., Xu, Q., Zhou, F., et al., 2015. Shaking Table Test for Seismic Responses of Slopes with a Weak Interlayer. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(5):994—1005(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. X., Xu, Q., Zhu, X., 2017. Parametric Analysis of Horizontal Acceleration Response of Rock Slope to Seismic Waves in a Shaking Table Test. *International Journal of Georesources and Environment*, 3(1):22—34.
- Liu, H. X., Xu, Q., Zou, W., et al., 2012. Shaking Table Test for Vertical Dynamic Resonance Behavior of Layered Rock Slopes. *Journal of Vibration and Shock*, 31(22):13—19, 28(in Chinese with English abstract).
- Liu, S. L., Yang, Z. P., Liu, X. R., et al., 2018. Shaking Table Model Test and Numerical Analysis of the Bedding Rock Slopes under Frequent Micro-Seismic Actions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(10): 2264—2276(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).
- Liu, X. R., Xu, B., Liu, Y. Q., et al., 2020. Cumulative Damage and Stability Analysis of Bedding Rock Slope under Frequent Microseisms. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(4): 632—641(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. P., Huang, R. Q., Deng, H., 2011. Study on Physical Simulation Vibration Test of the Anti-Inclined Slab-Rent Structure Rock Slope. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(4):413—421(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., 2017. Study on Cumulative Damage Evolution Mechanism and Stability of Bedding Rock Slope in Reservoir Area under Frequent Microseismic (Dissertation). Chongqing University, Chongqing(in Chinese with English abstract).
- Long, Z., Yan, Z. X., Liu, C. B., 2020. Shear Effects on the Anchorage Interfaces and Seismic Responses of a Rock Slope Containing a Weak Layer under Seismic Action. *Mathematical Problems in Engineering*, (2020): 1—11. <https://doi.org/10.1155/2020/1424167>
- Ni, Z. Q., 2012. Study on Dynamic Response Mechanism of Slope Failure of Non-Through Jointed Rock Mass under Earthquake (Dissertation). Chinese Academy of Sciences, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Ning, Y. B., Zhang, G. C., Tang, H. M., et al., 2019. Process Analysis of Toppling Failure on Anti-Dip Rock Slopes under Seismic Load in Southwest China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(11): 4439—4455. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01855-z>

- Peng, J. B., Cui, P., Zhuang, J. Q., 2020. Challenges to Engineering Geology of Sichuan-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377—2389(in Chinese with English abstract).
- Qiao, J. W., Zheng, J. G., Liu, Z. H., et al., 2019. The Distribution and Major Engineering Problems of Special Soil and Rock along One Belt One Road. *Journal of Catastrophology*, 34(Suppl. 1): 65—71(in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. L., Wang, J., Zhang, X. D., 1995. Zoning Characteristics of Seismicity in China. *Acta Seismologica Sinica*, 17(1): 20—24(in Chinese).
- Song, D. Q., Che, A. L., Chen, Z., et al., 2018. Seismic Stability of a Rock Slope with Discontinuities under Rapid Water Drawdown and Earthquakes in Large-Scale Shaking Table Tests. *Engineering Geology*, 245: 153—168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.011>
- Tao, Z. G., Wang, X., Guo, A. P., et al., 2022. Shaking Table Test Study on the Effect of NPR Anchor Cable on Slope Reinforcement under Earthquake. *Journal of China Coal Society*(in press)(in Chinese with English abstract).
- Wang, B., Che, A. L., Ge, X. R., 2015. Shaking Table Test on Earthquake Response of Discontinuous Medium High and Steep Rock Slope. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 49(7): 951—956(in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Wu, Z. J., Zhang, J. J., et al., 2019. Analysis of Antiseismic Effect of Anisotropic High Slopes Reinforced by Multi-Frame Retaining Structure. *Journal of Vibration Engineering*, 32(3): 404—414(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. Y., Wu, H. G., Zhang, J. J., et al., 2020. Response of the Slope Reinforced with BFRP Anchors to Earthquake: A Case Study of the Slope at the Xiangshui River. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 31(2): 94—101(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. W., 2019. Dynamic Response Law and Failure Mechanism of Bedding Rock Slope under Earthquake (Dissertation). Dalian University of Technology, Dalian(in Chinese with English abstract).
- Wu, D. H., Liu, Y. Q., Li, H. B., et al., 2020. Shaking Table Tests on Dynamic Amplification and Failure Mechanism of Layered Rock Slopes under Seismic Actions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(10): 1945—1956(in Chinese with English abstract).
- Xu, G. J., 2015. Study on the Seismic Behavior of High Slope through Shaking Table Test in Southwest Yunnan (Dissertation). Chang'an University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Xu, J. B., Zheng, Y. R., 2012. Shaking Table Model Tests on Embedded Anti-Slide Piles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34(10): 1896—1902(in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., 2009. Main Types and Characteristics of the Geo-Hazards Triggered by the Wenchuan Earthquake. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 20(2): 86—93(in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Liu, H. X., Zou, W., et al., 2010. Large-Scale Shaking Table Test Study of Acceleration Dynamic Responses Characteristics of Slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(12): 2420—2428(in Chinese with English abstract).
- Yan, Z. X., Liu, C. B., Long, Z., et al., 2020. Experimental Study on Seismic Response of Anchorage of Bedding Rock Slope with Weak Layer. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(12): 2180—2188(in Chinese with English abstract).
- Yang, G. X., Qi, S., Wu, F. Q., et al., 2018. Seismic Amplification of the Anti-Dip Rock Slope and Deformation Characteristics: A Large-Scale Shaking Table Test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115: 907—916.
- Yang, G. X., Wu, F. Q., Dong, J. Y., et al., 2012a. Study of Dynamic Response Characters and Failure Mechanism of Rock Slope under Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(4): 696—702(in Chinese with English abstract).
- Yang, G. X., Ye, H. L., Wu, F. Q., et al., 2012b. Shaking Table Model Test on Dynamic Response Characteristics and Failure Mechanism of Antidip Layered Rock Slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(11): 2214—2221(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., 2015. The Large-Scale Shaking Table Test Study of Dynamic Deformation Characteristics and Response of Slope with Anti-Dip Weak Interlayer (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Ye, H. L., Zheng, Y. R., Li, A. H., et al., 2012a. Shaking Table Test Studies of Prestressed Anchor Cable of Slope under Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(Suppl. 1): 2847—2854(in Chinese with English abstract).
- Ye, H. L., Zheng, Y. R., Li, A. H., et al., 2012b. Shaking Table

- Tests on Stabilizing Piles of Slopes under Earthquakes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34(2): 251–257(in Chinese with English abstract).
- Ye, H. L., Zheng, Y. R., Lu, X., et al., 2011. Shaking Table Test on Anchor Bars of Slope under Earthquake. *China Civil Engineering Journal*, 44(S1):152–157, 176(in Chinese with English abstract).
- Zhan, Z. F., Qi, S. W., He, N. W., et al., 2019. Shaking Table Test Study of Homogeneous Rock Slope Model under Strong Earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 27(5):946–954(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Niu, J. Y., Fu, X., et al., 2022. Failure Modes of Slope Stabilized by Frame Beam with Prestressed Anchors. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(6): 2120–2142. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1752806>
- Zhi, S., Yang, L., 2007. Dynamic Response Differences between Bedding and Counter-Tilt Rock Slopes with Intercalated Weak Layers. *Journal of Disaster Research*, 11: 681–690. <https://doi.org/10.20965/jdr.2016.p0681>
- Zhou, F., Xu, Q., Liu, H. X., et al., 2016. An Experimental Study of Dynamic Response Characteristics of Slope with Horizontal Weak Interlayer under Earthquake. *Rock and Soil Mechanics*, 37(1): 133–139(in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. F., Fu, W. X., Ye, F., et al., 2021. Study on Sliding-Shearing Deformation and Failure Mode of Rock Slope with Steep Weak Structural Plane. *Earth Science*, 46(4): 1437–1446(in Chinese with English abstract).
- Zou, W., 2011. Large-Scale Shaking Table Test on Dynamic Response of Homogeneous Slopes under the Effect of Strong Earthquake (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Zou, W., Xu, Q., Liu, H. X., 2011a. Designing the Model for Testing the Dynamic Response of Rock Slopes. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 22(1):87–91(in Chinese with English abstract).
- Zou, W., Xu, Q., Liu, H. X., et al., 2011b. Large-Scale Shaking Table Model Test Study on Failure of Layered Rocky Slope under Strong Ground Motion. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 31(4): 143–149(in Chinese with English abstract).
- 31(3):11–19.
- 曹礼聪, 张建经, 刘飞成, 等, 2017. 含倾斜强风化带及局部边坡复杂场地的动力响应及破坏模式研究. *岩石力学与工程学报*, 36(9):2238–2250.
- 陈铸, 车爱兰, 严飞, 等, 2018. 库水与地震力共同作用下金沙江特大桥桥址边坡动力响应研究. *岩石力学与工程学报*, 37(1):148–155.
- 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等, 2011. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究. *岩土力学*, 32(10):2977–2982, 2988.
- 董金玉, 杨继红, 伍法权, 等, 2013. 顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究. *岩石力学与工程学报*, 32(增刊2):3861–3867.
- 范刚, 张建经, 2017. 组合支挡结构加固边坡地震位移松弛区确定方法研究. *岩土力学*, 38(3):775–783.
- 范刚, 张建经, 付晓, 等, 2015. 含泥化夹层顺层岩质边坡动力响应大型振动台试验研究. *岩石力学与工程学报*, 34(9):1750–1757.
- 范刚, 张建经, 付晓, 等, 2016. 含软弱夹层顺层岩质边坡动力破坏模式的能量判识方法研究. *岩土工程学报*, 38(5): 959–966.
- 冯帅, 吴红刚, 艾挥, 等, 2018. 预应力锚索抗滑桩抗震优化设计与试验研究. *科学技术与工程*, 18(12):248–255.
- 冯细霞, 2018. 层状岩质边坡地震动力响应与稳定性分析(博士学位论文). 武汉: 武汉大学.
- 付晓, 范刚, 刘飞成, 等, 2015. 组合支护结构作用下反倾层状岩质边坡加速度响应振动台试验研究. *地震工程学报*, 37(3):823–828.
- 付晓, 冀文有, 张建经, 等, 2018. 锚索框架梁加固平面滑动型边坡地震动力响应. *岩土力学*, 39(5):1709–1719.
- 付晓, 张建经, 周立荣, 2017. 多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究. *岩土力学*, 38(2):462–470.
- 何春梅, 2018. 循环动载下泥质软岩力学行为及库区软硬互层边坡动力稳定性研究(博士学位论文). 重庆: 重庆大学.
- 何满潮, 郭鹏飞, 2018. “一带一路”中的岩石力学与工程问题及对策探讨. *绍兴文理学院学报(自然科学)*, 38(2):1–9.
- 侯红娟, 2013. 水平层状斜坡地震动响应特性的振动台试验研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 侯伟龙, 2011. 陡倾层状岩质边坡的大型振动台物理模拟试验研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 黄发明, 叶舟, 姚池, 等, 2020. 滑坡易发性预测不确定性: 环境因子不同属性区间划分和不同数据驱动模型的影响. *地球科学*, 45(12):4535–4549.
- 黄润秋, 李果, 巨能攀, 2013. 层状岩体斜坡强震动力响应的

附中文参考文献

- 毕鹏程, 车爱兰, 袁刚烈, 2020. 基于振动台试验的地震作用下岩质边坡位移演化特征. *中国地质灾害与防治学报*,

- 振动台试验.岩石力学与工程学报,32(5):865—875.
- 黄润秋,李为乐,2008.“5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究.岩石力学与工程学报,27(12):2585—2592.
- 贾俊,2011.强震作用下陡倾顺层岩质边坡动力响应分析及失稳机制研究——以干磨滑坡为例(硕士学位论文).成都:成都理工大学.
- 江学良,牛家永,杨慧,等,2018.下伏隧道层状岩质边坡地震响应特性的大型振动台试验研究.应用力学学报,35(4):762—768,931.
- 赖杰,郑颖人,刘云,等,2013.埋入式抗滑桩抗震性能振动台试验与数值分析.岩石力学与工程学报,32(增刊2):4165—4173.
- 赖杰,郑颖人,刘云,等,2014.地震作用下双排抗滑桩支护边坡振动台试验研究.岩土工程学报,36(4):680—686.
- 赖杰,郑颖人,刘云,等,2015.抗滑桩和锚杆联合支护下边坡抗震性能振动台试验研究.土木工程学报,48(9):96—103.
- 李果,2012.强震条件下层状岩体斜坡动力失稳机理研究(博士学位论文).成都:成都理工大学.
- 李阳,李同春,牛志伟,2014.边坡动力响应特性及破坏过程的振动台试验研究.水电能源科学,32(1):93—95.
- 李振生,巨能攀,侯伟龙,等,2012.陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究.工程地质学报,20(2):242—248.
- 刘昌清,蒋楚生,梁瑶,等,2014.高烈度地震区高边坡支挡结构振动台试验研究.岩石力学与工程学报,33(增刊2):3798—3802.
- 刘昌清,李想,张玉萍,2013.双排桩支挡结构振动台模型试验与分析.土木工程学报,46(增刊2):190—195.
- 刘汉东,耿正,王忠福,等,2019.强震作用下反倾层状岩质边坡变形及破坏模式研究.水力发电,45(9):17—21,38.
- 刘汉香,2011.软硬岩组合型斜坡地震响应的大型振动台模型试验研究(硕士学位论文).成都:成都理工大学.
- 刘汉香,2014.基于振动台试验的岩质斜坡地震动力响应规律研究(博士学位论文).成都:成都理工大学.
- 刘汉香,许强,王龙,等,2014.地震波频率对岩质斜坡加速度动力响应规律的影响.岩石力学与工程学报,33(1):125—133.
- 刘汉香,许强,周飞,等,2015.含软弱夹层斜坡地震动力响应特性的振动台试验研究.岩石力学与工程学报,34(5):994—1005.
- 刘汉香,许强,周飞,等,2016.软弱夹层厚度和倾角对斜坡地震动加速度响应规律的影响.煤炭学报,41(增刊1):118—124.
- 刘汉香,许强,邹威,等,2012.层状岩质斜坡竖向动力响应特性的振动台试验研究.振动与冲击,31(22):13—19,28.
- 刘树林,杨忠平,刘新荣,等,2018.频发微小地震作用下顺层岩质边坡的振动台模型试验与数值分析.岩石力学与工程学报,37(10):2264—2276.
- 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.
- 刘新荣,许彬,刘永权,等,2020.频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性分析.岩土工程学报,42(4):632—641.
- 刘永权,2017.频发微震下库区顺层岩质边坡累积损伤演化机理及稳定性研究(博士学位论文).重庆:重庆大学.
- 刘云鹏,黄润秋,邓辉,2011.反倾板裂岩体边坡振动物理模拟试验研究.成都理工大学学报(自然科学版),38(4):413—421.
- 倪振强,2012.地震作用下非贯通节理岩体斜坡破坏的动力响应机理研究(博士学位论文).成都:中国科学院.
- 彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020.川藏铁路对工程地质提出的挑战.岩石力学与工程学报,39(12):2377—2389.
- 乔建伟,郑建国,刘争宏,等,2019.“一带一路”沿线特殊岩土分布与主要工程问题.灾害学,34(增刊1):65—71.
- 时振梁,王健,张晓东,1995.中国地震活动性分区特征.地震学报,17(1):20—24.
- 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(待刊).
- 王斌,车爱兰,葛修润,2015.岩质高陡边坡动力响应及失稳机制大型振动台模型试验研究.上海交通大学学报,49(7):951—956.
- 王德华,吴祚菊,张建经,等,2019.多级组合支护结构对非均质高边坡抗震性能影响分析.振动工程学报,32(3):404—414.
- 王秋懿,吴红刚,张金江,等,2020.BFRP 锚杆加固斜坡对地震动的响应特征——以功东高速响水河边坡为例.中国地质灾害与防治学报,31(2):94—101.
- 王学伍,2019.地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及其破坏机制(硕士学位论文).大连:大连理工大学.
- 吴多华,刘亚群,李海波,等,2020.地震荷载作用下顺层岩体边坡动力放大效应和破坏机制的振动台试验研究.岩石力学与工程学报,39(10):1945—1956.
- 徐冠军,2015.滇西南地区高边坡抗震性能振动台模拟试验研究(硕士学位论文).西安:长安大学.
- 许江波,郑颖人,2012.埋入式抗滑桩振动台模型试验分析.岩土工程学报,34(10):1896—1902.
- 许强,2009.汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究.地质灾害与环境保护,20(2):86—93.
- 许强,刘汉香,邹威,等,2010.斜坡加速度动力响应特性的大

- 型振动台试验研究. 岩石力学与工程学报, 29(12): 2420—2428.
- 言志信, 刘春波, 龙哲, 等, 2020. 含软弱层顺倾岩体边坡锚固地震响应试验研究. 岩土工程学报, 42(12): 2180—2188.
- 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等, 2012a. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究. 岩石力学与工程学报, 31(4): 696—702.
- 杨国香, 叶海林, 伍法权, 等, 2012b. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(11): 2214—2221.
- 杨峥, 2015. 含反倾软弱夹层斜坡动力变形破坏特征及响应规律的大型振动台试验研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等, 2012a. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(增刊 1): 2847—2854.
- 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等, 2012b. 地震作用下边坡抗滑桩振动台试验研究. 岩土工程学报, 34(2): 251—257.
- 叶海林, 郑颖人, 陆新, 等, 2011. 边坡锚杆震动特性的振动台试验研究. 土木工程学报, 44(S1): 152—157, 176.
- 詹志发, 祁生文, 何乃武, 等, 2019. 强震作用下均质岩质边坡动力响应的振动台模型试验研究. 工程地质学报, 27(5): 946—954.
- 周飞, 许强, 刘汉香, 等, 2016. 地震作用下含水平软弱夹层斜坡动力响应特性研究. 岩土力学, 37(1): 133—139.
- 周洪福, 符文熹, 叶飞, 等, 2021. 陡倾坡外弱面控制的斜坡滑移—剪损变形破坏模式. 地球科学, 46(4): 1437—1446.
- 邹威, 2011. 强震作用下均质斜坡动力响应的大型振动台试验研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 邹威, 许强, 刘汉香, 2011a. 强震作用下岩质斜坡动力响应特性的大型振动台试验方案设计. 地质灾害与环境保护, 22(1): 87—91.
- 邹威, 许强, 刘汉香, 等, 2011b. 强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究. 地震工程与工程振动, 31(4): 143—149.