

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.374>



地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究进展与展望

吴善百, 王亮清*, 吴琼, 田建林, 郑罗斌, 孙自豪

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 锚固岩质边坡具有良好的抗震效果, 为深入了解其地震动响应机制, 系统梳理了地震荷载下锚固岩质边坡动力响应的国内外研究文献, 论述了地震作用下岩质边坡—锚固结构体系动力特性、锚固岩质边坡动力稳定性及其动力响应影响因素。基于现有研究成果, 未来可进一步分析强震或频发微震等不同地震荷载形式下的锚固岩质边坡动力演化模式; 借助基于演化模式的锚固岩质边坡地质力学模型, 明晰地震荷载传递规律、锚固结构力学演化特征与锚固岩质边坡动力响应特性, 综合揭示岩质边坡—锚固结构体系地震动耦联作用机理; 开展具有大塑性变形能力的新型抗震锚固结构设计关键技术的创新、集成与标准化, 并建立新型抗震锚固结构关键技术应用示范区。

关键词: 锚固岩质边坡; 锚杆; 锚固界面; 地震; 动力特性; 稳定性; 影响因素; 岩土工程。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2022)12-4456-13

收稿日期: 2022-04-20

Advance and Prospect for Seismic Dynamic Response of Anchored Rock Slope

Wu Shanbai, Wang Liangqing*, Wu Qiong, Tian Jianlin, Zheng Luobin, Sun Zihao

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The anchored rock slope has great anti-seismic effect, hence its dynamic response mechanism under earthquake is worthy of in-depth understanding. In this paper it systematically reviews the literature on the seismic dynamic response of anchored rock slope. The dynamic characteristics, dynamic stability, and factors influencing dynamic response for anchored rock slope under earthquake are discussed. Future research includes three aspects. Firstly, the dynamic evolution pattern of anchored rock slope under different earthquake types such as macroseism or frequent microseism will be analyzed. Secondly, through the geomechanics model of anchored rock slope based on evolution mode, scholars will reveal the transmission law of seismic load, the mechanical evolution process of anchorage structure, the dynamic response characteristics of anchored rock slope, and the coupling mechanism of rock slope-anchorage structure system under earthquake. Thirdly, innovation, integration, and standardization of key technologies for new anti-seismic anchorage structures with severe plastic deformation will be carried out. Application demonstration area of key technologies for new anti-seismic anchorage structures will be established.

Key words: anchored rock slope; bolt; anchorage interface; earthquake; dynamic characteristic; stability; influencing factor; geotechnical engineering.

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2019YFC1509705); 国家自然科学基金重点项目(No. 41931295); 国家自然科学基金面上项目(Nos. 41877258; 41877259); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(No.2019073)。

作者简介: 吴善百(1997-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害演化与防治研究。ORCID:0000-0003-0006-8235。E-mail:wushanbai@163.com

* **通讯作者:** 王亮清, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土体稳定性与地质灾害防治研究。ORCID:0000-0001-9584-5812。E-mail:w1q027@126.com

引用格式: 吴善百, 王亮清, 吴琼, 田建林, 郑罗斌, 孙自豪, 2022. 地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究进展与展望. 地球科学, 47(12): 4456-4468.

Citation: Wu Shanbai, Wang Liangqing, Wu Qiong, Tian Jianlin, Zheng Luobin, Sun Zihao, 2022. Advance and Prospect for Seismic Dynamic Response of Anchored Rock Slope. *Earth Science*, 47(12): 4456-4468.

0 引言

地震引发的边坡破坏对水利水电工程、公路交通系统及山区城镇造成了严重威胁.1994年美国洛杉矶北岭地震($M_L=6.6$)诱发了11 000余处边坡失稳,经济损失高达300亿美元(Parise and Jibson, 2000);2008年日本岩手宫城内陆地震($M_s=6.9$)造成4 000多处边坡破坏,导致多人失踪死亡,450余人受伤(Miyagi *et al.*, 2011).中国是全球震害最为严重的国家之一,且强震多发的中西部地区受灾更甚.2008年四川汶川大地震($M_L=8.0$)诱发了大约56 000处滑坡与岩石崩塌,产生超过10 000处潜在地震灾害点(Li and He, 2009);世界上规模最大的三峡水电站于2008年9月全面蓄水后,区域地震发生频率与震级显著增加,由此引发了较为严重的地质灾害(Tang *et al.*, 2019).随着我国“一带一路”倡议与“十四·五”规划实施,如雅鲁藏布江水电开发、川藏交通廊道与西部陆海新通道等国家重大项目将大面积覆盖强震区域,地区内广泛分布的岩质边坡在地震荷载下往往容易产生变形失稳,甚至是高位高能岩崩(罗刚等, 2022),给当地人民生命财产安全与基础设施建设运营造成巨大隐患.因此,如何有效控制边坡岩体在地震作用下的变形破坏,科学评价岩质边坡动力稳定性与长期安全性,是实现国民经济战略目标的重要保障.

锚杆(索)因具有效果好、施工易、成本低等优势而被广泛应用于岩质边坡破坏防治(Hatzor *et al.*, 2004;王亮清等, 2021),同时,在汶川震后边坡破坏调查中发现,大量未加锚岩质边坡变形失稳显著,而锚固岩质边坡只有部分发生了局部破坏,边坡因加锚而表现出良好抗震效果(谢和平等,

2008;王茂和罗庆, 2009;周德培等, 2010; Guo and Hamada, 2012; Ren *et al.*, 2016).例如,在汶川大地震后,都江堰—汶川公路沿线的锚索加固边坡虽然出现了表面裂缝(图1a)、部分锚头被拔出和未加固岩体滚落堆积于坡脚的现象(图1b),但边坡仍保持整体稳定(Guo and Hamada, 2012);如图1c所示,紫坪铺水利枢纽附近边坡在经受了8.0级主震后,左侧未支护边坡发生了严重破坏,但右侧锚固边坡总体上仍保持完整(谢和平等, 2008).然而,在强震作用下,锚固岩质边坡也会因锚固结构变形能力不足或锚固界面脱粘破坏等原因而发生失稳,且现今的锚固岩质边坡地震动理论研究明显落后于工程实践,所以开展地震荷载下锚固岩质边坡动力响应研究具有重要的理论意义与实际应用价值.

当前,地震作用下的岩质边坡破坏机制与动力稳定性、岩体锚固性能已得到良好评述(洪海春和徐卫亚, 2006; Tiwari *et al.*, 2014; Xiong and Huang, 2017; 寇昊等, 2018; 严敏嘉等, 2022),但针对地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究的系统总结仍是鲜有报道,而学者们在该领域已经开展了一系列研究,研究成果主要集中于以下3个方面:(1)地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系动力特性;(2)地震荷载下锚固岩质边坡动力稳定性评价;(3)地震荷载下锚固岩质边坡动力响应影响因素.鉴于此,本文对锚固岩质边坡地震动响应的现有研究成果进行分类综述,并结合当前存在的问题与不足,提出关于后续研究方向的建议.

1 地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系动力特性

随着锚固结构植入,边坡岩体的受力状态发生



图1 汶川大地震后震区典型锚固边坡抗震效果

Fig.1 Anti-seismic effect of typical anchored slope in Wenchuan earthquake area

a和b. 都江堰—汶川公路沿线锚索加固边坡,据Guo and Hamada(2012);c. 紫坪铺水利枢纽冲沙洞出口边坡,据谢和平等(2008)修改

变化,岩体变形得到有效限制,同时,在地震等营力作用下,边坡岩体应力应变的改变使得锚杆(索)锚固力发生调整,且锚固界面是传递锚杆(索)锚固力的关键部位,三者相互协同作用,彼此影响,共同构成了岩质边坡—锚固结构体系.此外,与锚固土体边坡地震破坏通常发生在土体中不同,锚固岩质边坡在地震荷载下的变形破坏常常发生于锚固系统,所以边坡中包含的锚杆(索)与锚固界面的地震响应探寻同样至关重要.当前,越来越多学者以岩质边坡—锚固结构体系为研究对象,通过原位监测、物理模型试验、数值仿真与理论解析等多种方法研究了锚杆(索)、锚固界面与锚固岩质边坡的地震动特性,提高了地震荷载下锚固岩质边坡动力响应与破坏防治的认识.下面从岩质边坡—锚固结构体系中锚杆(索)地震动应力应变特征与锚固界面地震动剪切作用、地震荷载下锚固岩质边坡动力特性 3 个方面展开论述.

1.1 锚杆(索)地震动应力应变特征

当岩质边坡—锚固结构体系受到地震荷载时,边坡上部锚杆(索)率先产生动力变形响应,同时,位于结构面附近锚杆(索)的应力应变增加也尤为显著(李林昊等,2018; Nie *et al.*, 2020),随着地震持续作用,从坡脚至坡顶锚杆(索)的峰值轴力呈现出高程放大效应(靳飞飞等,2020; Zhang *et al.*, 2020a; 张炜,2021);例如,言志信等(2019)基于 FLAC^{3D}有限差分软件分析了含软弱层锚固岩质边坡中锚杆的地震动应力演化规律,研究认为锚杆轴力沿杆长呈“人”字形分布(图 2a),轴力峰值位于软弱层处,且随着地震波持续输入,远离软弱层的锚杆段也相继受力,此外,不同位置锚杆的峰值轴力与边坡高程成正比(图 2b).而对于锚杆(索)预应力而言,预应力损失首先发生于坡顶,然后向坡体中下部转移,且坡顶预应力损失最为严重(付晓等,2018; Ma *et al.*, 2014).这与岩体结构面特征、边坡不同位置岩体的受力特性差异有关,结构面降低了岩体完整性,造成其容易发生变形破坏,使得该处的锚杆(索)通常承受较强的拉剪作用;此外,坡肩岩体具有坡面与坡顶两个临空面,其相较坡脚岩体所受约束较小,且边坡上部在地震作用时存在着明显的拉应力区(He *et al.*, 2019),最终导致了坡肩岩体容易产生较大变形位移,而锚杆(索)周围岩体的相对位移使得锚固结构发挥了支护作用(聂柏松等,2019; Peng *et al.*, 2020).

1.2 锚固界面地震动剪切作用

大量工程实践表明,包含了锚杆—砂浆界面与砂浆—岩体界面的锚固界面往往是锚固系统的薄弱环节(洪海春和徐卫亚,2006),锚固界面剪切破坏是地震作用下岩质边坡—锚固结构体系锚固失效的典型模式之一,其使锚固结构的延性难以得到充分发挥.当前成果主要基于全长粘结型锚杆开展了岩质边坡—锚固结构体系中的锚固界面地震动剪切作用研究.

因锚杆—砂浆界面的抗剪强度通常较砂浆—岩体界面的高,导致地震荷载下锚固岩质边坡中的砂浆—岩体界面率先破坏;随着砂浆—岩体界面破坏进行,锚固结构为了维持周围岩体稳定而不断将地震作用力传递给尚未脱粘破坏的锚固界面,所以锚杆—砂浆界面的剪应力也会受到影响而发生调整,不过其脱粘程度仍较砂浆—岩体界面的小(刘春波等,2020);在整个破坏过程中,界面剪应力峰值从最初位于中性点附近到逐渐向锚杆两端移动,中性点一般定义为剪应力为零且两侧剪应力方向相反的点.例如,龙哲等(2017)借助 FLAC^{3D}有限差分软件分析了地震荷载下锚固岩质边坡中两锚固界面的剪切作用,研究成果认为砂浆—岩体界面剪应力率先达到该界面的极限粘结强度而发生破坏,界面剪应力峰值点从初始破坏面向锚杆两端移动(图 3a),而锚杆—砂浆界面剪应力虽未达到该界面的极限粘结强度,但其峰值位置也会随着砂浆—岩体界面的脱粘而改变(图 3b).

以上皆是通过数值模拟方法分析了岩质边坡—锚固结构体系中锚固界面的地震动剪切作用,而在基于物理模型试验的研究中,砂浆—岩体界面与锚杆—砂浆界面先后产生动力应变响应(言志信等,2020),随着地震波持续输入,砂浆—岩体界面动应变达到峰值并发生破坏,这与砂浆脆性特征存在一定关联,与此同时,锚杆—砂浆界面地震动应变响应得到持续增强.模型试验与数值模拟的研究成果得到了良好印证.值得一提的是,基于物理模型试验的锚固岩质边坡中锚固界面地震动剪切作用研究依然较少,这是因为合理精细化构建锚固岩质边坡相似模型仍存在一定困难,具体表现为传统相似边坡模型大多采用夯实或砌筑的方法构建,然而夯实容易造成边坡密度不一,且分层明显,砌筑则会不可避免地人为生成大量结构面,此外这两种方法也难以合理获取与监测砂浆—岩体界面力学

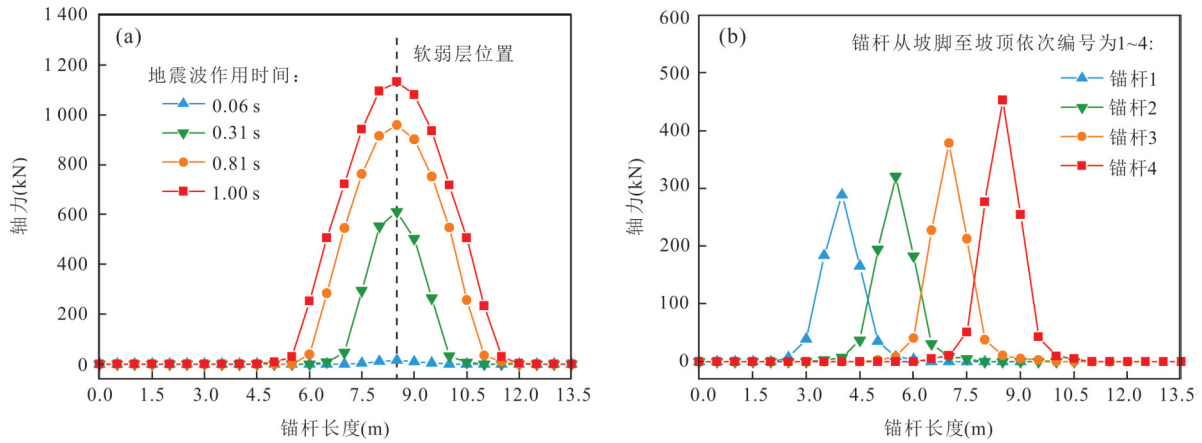


图2 地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系中锚杆轴力分布

Fig.2 Axial force distribution of bolt in rock slope-anchorage structure system under earthquake
a.同一锚杆在不同时刻的轴力分布;b.不同位置锚杆在同一时刻的轴力分布;据言志信等(2019)修改

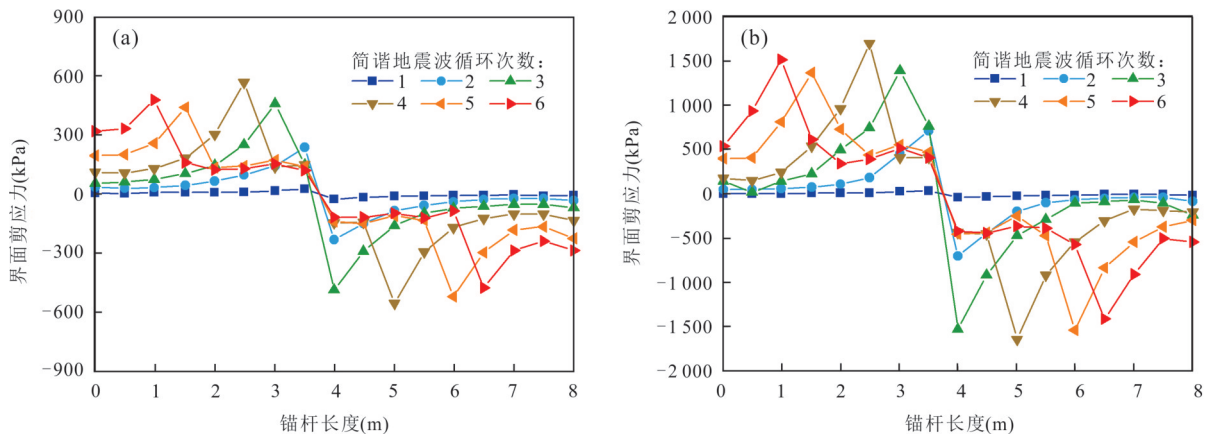


图3 地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系中锚固界面剪应力分布

Fig.3 Shear stress distribution of anchorage interface in rock slope-anchorage structure system under earthquake
a.砂浆—岩体界面剪应力;b.锚杆—砂浆界面剪应力;图据龙哲等(2017)修改

参数;而基于浇筑法构建锚固岩质边坡相似模型,不仅能较好模拟大自然中岩体胶结岩化的形成过程,更使得测试元件在锚固系统中的合理布设成为了可能(龙哲,2020).因此,未来可通过浇筑方式构建锚固边坡相似模型,并借助离心机、振动台等多尺度物理模型试验深入研究地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系中两锚固界面的剪切作用机理.

1.3 锚固岩质边坡地震动特性

在动应变、动应力、加速度、速度与位移等边坡地震动响应中,加速度是根本,因为岩体任意微元的动应力状态与其加速度的关系符合牛顿第二定律,而动应力又可通过岩体模量与动应变建立联系,速度、位移也可分别由加速度对时间的一次与二次积分获得.边坡加速度响应分布常用峰值加速

度(peak ground acceleration, PGA)放大系数表征,其一般定义为坡体任一单元加速度峰值与输入地震波加速度峰值之比,PGA放大系数体现了边坡中不同位置岩体受到地震荷载影响的强弱程度.在地震作用下,锚固岩质边坡通常也会表现出非锚固岩质边坡中PGA放大系数的高程放大效应、趋表效应与鞭梢效应,趋表效应是指在同一高程下PGA放大系数由坡体内部至坡体表面增大的现象,鞭梢效应是指坡顶处的PGA放大系数急剧增加;然而,由于锚固结构在岩体中发挥了嵌固作用,所以锚固岩质边坡的趋表效应与鞭梢效应有所减弱,加速度放大效应也更趋于稳定(吴尚杰等,2017;赖天文等,2021).其中,即使在双向地震波的共同激振作用下,锚固岩质边坡的水平与竖向PGA放大系数也表现

出了类似的高程放大效应,例如 Long *et al.*(2020) 基于振动台模型试验发现含软弱层锚固顺倾岩质边坡在 XZ 双向地震波激振时,水平 PGA 放大系数整体上随着边坡高程增加而增大(图 4a);许明等(2018)利用离心机模型试验提出锚固岩质边坡在水平与竖向地震波共同激振时,坡面竖向 PGA 放大系数呈现出高程放大效应,且与输入地震波的加速度峰值成正比(图 4b)。

位移是边坡变形失稳的直观表征,锚固岩质边坡的加速度分布特征在岩体位移中也得到体现,如 Peng and Yan(2013)发现锚固岩质边坡的加速度响应在宏观上表现为坡肩发生剧烈振动,黄秋香等(2016)认为在汶川主震作用下锚固岩质边坡水平向变形具有一定的临空面放大效应;此外,锚固岩质边坡的地震动位移通常由较大地震加速度引起,且位移具有累积性(聂柏松等,2019;Peng *et al.*, 2020;张炜,2021),其中,最大水平位移往往出现在边坡上部(靳飞飞等,2020;Zhang *et al.*, 2020a),因此,Lü *et al.*(2017)认为锚固结构施加于坡顶处可显著提升岩质边坡在地震作用下的动力稳定性,这是不同于传统的“强腰固脚”式的边坡破坏防治思路。

边坡岩体的响应位移特征往往形成了锚固岩质边坡的地震动失稳模式,在地震作用下,锚固岩质边坡破坏模式通常表现为局部破坏,而较少产生大规模整体性滑移,因为发育于岩体中的结构面是岩质边坡变形失稳的重要控制边界,也是抵抗外力的薄弱环节,而锚固结构的植入导致岩体弹性模量提高、泊松比降低(Peng and Yan, 2013),且锚固措

施使节理岩体自振频率远离地震波主频率,从而降低了节理岩体的加速度响应幅值(王建等,2010),甚至改变了原有潜在的滑动面位置。付晓等(2018)通过振动台模型试验研究了锚索加固平面滑动型岩质边坡地震破坏模式,结果表明边坡破坏主要呈现为坡体顶部震碎与无约束坡面岩体的剥蚀、掉块;刘春波等(2020)借助 FLAC^{3D} 有限差分软件分析了含不同软弱夹层的顺层锚固岩质边坡破坏过程,并认为边坡失稳模式主要分为沿着主软弱夹层的倾倒-滑移破坏和层间错动倾倒-滑移破坏;Zhang *et al.*(2020b)认为由于锚固结构的存在,预应力锚索加固边坡的中下部呈现出较好抗震性能,地震破坏主要发生在坡体顶部与自由面,破坏模式表现为边坡上部的张拉裂缝延伸、自由面塌陷与局部滑块滑移。

2 地震荷载下锚固岩质边坡动力稳定性评价

边坡地震动力稳定性最常用的评价指标为安全系数,在安全系数计算方法中,包含了 Sarma 法、Bishop 法等的极限平衡法因具有力学模型简单、通用性强的特点而被广泛应用于工程实践,而作用于岩体的地震惯性力是地震诱发边坡失稳的主要原因(祁生文等,2004),通过极限平衡理论计算锚固岩质边坡地震动力稳定性的核心就是将地震作用等效为水平或竖直方向的加速度,并借助水平或垂直拟静力因子将此加速度产生的惯性力施加在对

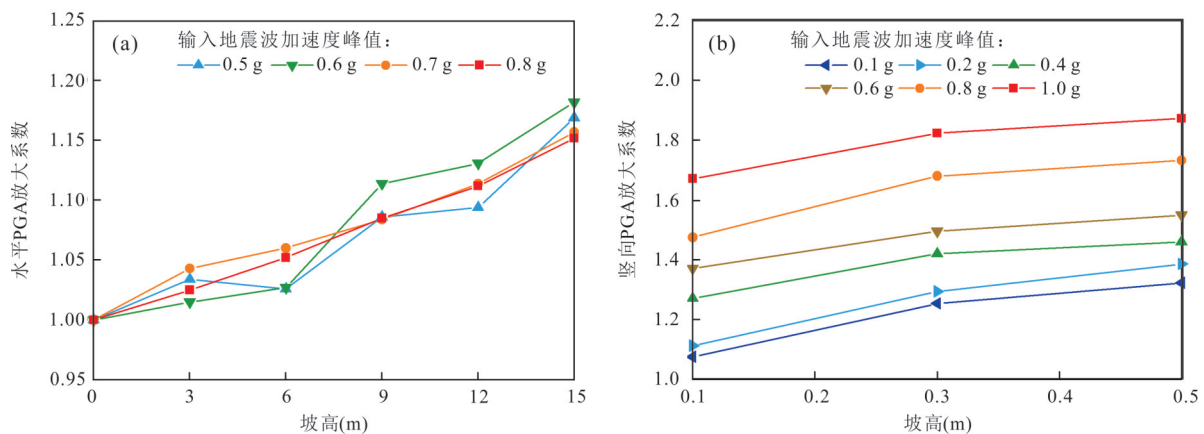


图 4 地震荷载下锚固岩质边坡 PGA 放大系数随边坡高程变化曲线

Fig.4 Variation for amplification coefficient of peak ground acceleration with slope elevation in anchored rock slope under earthquake

a. 水平 PGA 放大系数,据 Long *et al.*(2020)修改;b. 竖向 PGA 放大系数,据许明等(2018)修改

应滑体单元的重心上,同时,锚杆(索)支护效应则通过对滑面施加锚固力来实现。然而,因为极限平衡法简化了研究对象的应力—应变关系,所以在分析锚杆(索)、锚固界面和围岩之间的相互作用机制及其对边坡动力稳定性的影响方面存在一定局限性,未来可针对局部的关键结构开展严谨的弹塑性力学分析,使极限平衡理论能够更好反映地震荷载下锚固岩质边坡动力稳定性。姚爱军和苏永华(2003)考虑了边坡坡面加固力与地震作用的影响,改进了 Sarma 边坡稳定性分析模型,研究表明改进模型在含不规则滑移面的岩质边坡锚固工程稳定性评价中表现出良好适宜性,其为强震区锚固岩质边坡地震敏感性分析的快速开展提供了参考;之后,Zhang *et al.*(2006)基于 Sarma 法基本思想,建立了考虑锚杆支护效应与地震荷载的锚固岩质边坡滑体计算模型,并将其应用于实际岩质高边坡稳定性评价中,结果表明该模型能有效反映地震对多平面滑动型锚固岩质边坡稳定性的影响,较好模拟了锚杆对边坡的支护效果;而阮晓波等(2013)则基于极限平衡理论,运用拟动力法分析了单平面滑动型锚固岩质边坡的地震动力稳定性,研究发现当岩体放大系数逐渐增大时,拟动力法所得地震安全系数越发小于拟静力法所得地震安全系数。

除了极限平衡法之外,还可以利用极限分析法求取边坡安全系数,当前针对地震作用下锚固岩质边坡安全系数计算主要采用极限分析上限法,该方法将滑体视为刚体,将滑面视为塑性区,以极限状态时自重、地震惯性力与锚杆(索)锚固力等外荷载所做的功等于速度间断面上内能耗散的功为条件,从而求取锚固岩质边坡地震动力安全系数。极限分析法具有严谨的理论基础与严格的假设条件,但在考虑复杂荷载、渗流等多场作用对锚固岩质边坡稳定性的影响方面存在一定困难。王根龙等(2007)综合考虑锚杆支护作用、地震惯性力与裂隙水压力的影响,提出了锚固岩质边坡的极限分析上限法安全系数计算式,结果表明该表达式能合理实现地震荷载下具有不规则滑面的锚固岩质边坡动力稳定性计算,且所得解为严密的数学理论解;之后,王根龙等(2009)还借助塑性极限分析法,推导出了考虑地震作用力与锚杆锚固力的单平面滑动型岩质边坡安全系数上限解公式,算例表明该方法结果与规范推荐的刚体极限平衡法结果相差甚小;而严敏嘉等(2018)、Yan *et al.*(2019)则分别针对单平面滑动型

顺层岩坡与具有圆弧形滑动面的边坡,结合极限分析上限法,基于边坡失稳过程中锚索实际受力变化的考虑,建立了预应力锚索加固边坡地震动力安全系数表达式,研究成果皆发现计算表达式所得安全系数的动态变化幅度明显减小,其准确反映了锚索的抗震效果。

然而地震惯性力具有交变性,当地震瞬时冲击力很大时,锚固岩质边坡安全系数会小于1,但这也不一定造成边坡整体失稳,而是有可能只导致边坡产生一定的永久变形,因此,利用 Newmark 滑块分析法求解滑体永久位移就成了评价锚固岩质边坡地震动力稳定性的另一判据。传统 Newmark 滑块分析法的计算参数只需地震波加速度与边坡屈服加速度即可(严敏嘉等,2022),其中核心参数为屈服加速度系数,但传统计算往往将边坡屈服加速度简化为定值,即锚固岩质边坡初次失稳瞬间的屈服加速度,实际上滑体运动会引起锚固结构与边坡几何条件等参数的变化,进而导致锚固岩质边坡实时屈服加速度发生改变,因此,在借助 Newmark 滑块位移法分析锚固岩质边坡地震动力稳定性时,锚固结构应力演化特性与屈服加速度时变效应的准确表征可作为下一步研究工作的方向。Su *et al.*(2018)考虑了预应力锚索的支护效应,推导出锚固岩质边坡的屈服加速度与永久位移计算表达式,结果表明该模型能较好分析含不规则滑移面的锚固岩质边坡地震动力稳定性;之后,考虑到地震任意持时中滑块下滑会引起锚索轴力变化,赵宇臻等(2021)提出了针对单平面滑动型锚固岩质边坡位移的实时动态 Newmark 滑块分析法,算例表明该方法得到的位移相较传统 Newmark 滑块分析法的小,其很好地弥补了传统 Newmark 滑块分析法未考虑锚索轴力动态变化的不足。

3 地震荷载下锚固岩质边坡动力响应影响因素

当具有不同地震动参数的地震营力作用于锚固岩质边坡时,伴随着岩质边坡—锚固结构体系内的结构面与锚固参数等差异,最终在内部结构与地震外动力的共同影响下,锚固岩质边坡往往会表现出不一致的动力特性与稳定性。此外,由于在各影响因素分析中通常需要涉及大量对照试验,而锚固岩质边坡实际尺寸较大,即使通过相似性原理与量纲分析开展多组模型试验也具有一定难度,所以数

值试验与理论解析等研究手段常被应用于地震荷载下锚固岩质边坡动力响应的影响因素研究.下面从岩体结构面参数、锚固参数与地震动参数 3 个方面进行阐述.

3.1 岩体结构面参数

涵盖了各种不连续界面的结构面是岩体的关键组成要素(柴波等,2022),而结构面的物理力学性质(黏聚力、内摩擦角)与空间形态(倾角、厚度、间距)显著影响着锚杆(索)锚固力与锚固界面剪应力的发挥,进而造成地震作用下锚固岩质边坡动力稳定性变化.例如,岩体节理会扩大加速度放大的频率范围,从而提升锚固岩质边坡地震动响应表现(王建等,2010),其中,软弱夹层更是一种弹-黏性结构分散体系,其弹性模量小、拉剪强度低,具有明显的流变特性(孙钧,2007),传统研究多将软弱夹层简化为一个平面而忽略其厚度等空间特征,且当前关于软弱夹层倾角对地震荷载下锚固岩质边坡永久位移与锚固界面峰值剪应力的影响仍存在不同观点.Ma *et al.*(2014)提出相较于干燥状态的软弱夹层,锚固反倾岩质边坡中预应力锚索的地震动响应在软弱夹层处于饱和状态时更为强烈;周炜等(2016)通过极限分析上限定理推导出了地震作用下锚固顺层岩质边坡临界无量纲总锚固力表达式,结果认为在地震荷载下锚固顺层岩质边坡处于临界状态时的锚杆锚固力与节理内摩擦角呈正相关,与节理倾角、节理黏聚力呈负相关;之后,李亚鹏和言志信(2019)提出在地震作用下含软弱层锚固岩质边坡永久位移、锚固界面峰值剪应力与软弱夹层厚度成正比,与软弱夹层黏聚力、内摩擦角成反比,且随着软弱夹层倾角增大,永久位移与峰值剪应力先增大后减小,软弱夹层参数对锚固界面剪应力的影响权重由大到小依次为倾角、黏聚力、内摩擦角和厚度;但刘春波等(2020)则认为含软弱层锚固顺层岩质边坡永久位移、锚固界面峰值剪应力随软弱夹层数量和厚度的增加而增大,随间距和倾角的增加而减小.

3.2 锚固参数

岩质边坡锚固工程中的工程地质条件与锚固材料属性一般难以发生较大变化,因此改变锚杆(索)的长度、直径、间距与角度等锚固参数往往成为了边坡抗震设计优化的高效途径.通常来说,随着锚杆(索)布设数量增加,地震荷载将由更多锚固结构承担,从而减小了边坡破坏与锚固结构失效的

可能,但由于岩质边坡-锚固结构体系在地震荷载下的复杂受力特性,不同锚固岩质边坡的锚固参数往往存在着最优解,而在这些锚固参数中,锚固角尤为重要,因为其优化结果通常能显著改善锚杆(索)支护效果(Qi and Tan,2018),且锚固角优化正从传统的加固方向与坡面走向垂直的二维设计,转变为加固方向不受限制的三维优化(安彩龙等,2020),当前关于锚固角对锚固岩质边坡地震动力稳定性的影响尚未形成普适性结论.叶海林等(2010)通过FLAC^{3D}有限差分软件提出锚杆位置、间距和锚固段长度对锚固岩质边坡地震动力安全系数影响显著,而安全系数对锚孔直径和锚筋直径较不敏感;刘建华等(2012)推导了地震作用下锚固岩质边坡破坏运动解与锚杆内力解表达式,结果发现锚固岩质边坡地震动位移幅值随着锚杆间距的增加而增大;王秒等(2013)认为增大预应力锚索的布置密度能有效控制锚固顺层岩质边坡中裂纹扩展贯通;同时,林永亮等(2013)提出较小锚固角对双向锚固岩质边坡稳定性起着积极作用;但周炜等(2016)则认为临界状态下锚固顺层岩质边坡中锚杆锚固力与锚固角呈正相关;此外,言志信等(2018)发现随着砂浆层厚度增加,锚杆-砂浆界面脱粘长度减小,而砂浆-岩体界面脱粘长度增大,适当减小锚杆间距有利于边坡稳定;之后,Zheng *et al.*(2021)基于通用离散元法提出锚固反倾岩质边坡抗震能力随着锚索间距减小、锚索预应力增加而提升,较小锚固角有利于该边坡体系的整体稳定.

3.3 地震动参数

地震持时、幅值与频率是地震动参数中的基本三要素,锚固岩质边坡在地震作用下的动力响应通常随着地震持时、幅值的增加而愈发强烈,但当持时超过某一定值后其影响往往较为有限.李林昊等(2018)通过离心机模型试验提出锚固岩质边坡中预应力锚索的响应变形与水平地震加速度成正比;之后,李亚鹏和言志信(2019)基于FLAC^{3D}有限差分软件发现含软弱层锚固岩质边坡中锚固界面剪应力随着地震持时增加而呈阶梯式增大,且剪应力与地震动能量密切相关;Nie *et al.*(2020)也提出锚固岩质边坡PGA放大系数与地震烈度成正比;Gu *et al.*(2021)研究成果表明典型锚固双层岩质边坡中锚杆总锚固力与水平地震加速度系数成正比.此外,随着地震波频率越接近锚固岩质边坡的固有频率,边坡地震动响应则表现越为明显(刘建华等,

2012).

除了水平向地震波,竖向地震波的激振作用同样不可忽视,通过加速度峰值耦合等方法生成多向耦合地震波,使研究中的输入地震波更符合实际.此外,锚固岩质边坡对各地震动参数的动力响应敏感性存在差异,正交设计、极差分析与层次分析等研究方法常被用来获取地震动参数中的主控因子.周炜等(2016)认为在临界状态下锚固顺层岩质边坡中锚杆锚固力与水平地震加速度影响系数呈正相关,与竖向地震加速度影响系数呈负相关;之后,Long *et al.*(2020)基于振动台模型试验提出当输入XZ双向、X单向、Z单向地震波时,锚固界面峰值剪应力依次递减,且在XZ双向激振中,X向地震波对锚固界面剪切效应起主导作用,但Z向地震波作用也不容忽视;此外,靳飞飞等(2020)认为地震动参数对含软弱层锚固岩质边坡中锚杆轴力的影响权重由高到低依次为阿里亚斯强度(AI)、峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)、绝对累积速度(CAV)、持时和特征周期,但对边坡位移的影响权重由高到低依次为AI、CAV、PGA、PGV、持时和特征周期.

4 展望

面对地震诱发型山地灾害防治的迫切需求,国内外学者在锚固岩质边坡地震动响应规律等方面取得了重要研究成果,但由于边坡所处地质环境与动力耦合的复杂性,仍对地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系动力作用机理缺乏系统认识,今后可基于以下3个关键科学技术问题开展进一步的研究工作.

4.1 不同地震荷载形式下锚固岩质边坡动力演化模式

不同类型的岩质边坡通常具备特别的坡体结构与地质条件,其破坏演化过程往往差异较大,且边坡在地震营力中有着独特的动力失稳模式,如震动溃裂、高速抛射等(黄润秋,2009);此外,地震荷载不仅有破坏力巨大的强震($M_L \geq 6$),也存在着频发的微震($M_L < 3$),针对典型岩质边坡,其失稳模式在强震或频发微震作用下表现出不一致性(刘树林等,2018).因此,岩质边坡—锚固结构体系地震动力演化模式研究是一项必不可少的基础性工作.今后可通过自然历史分析、工程地质精细调查、原位监测、物理模型试验与数值模拟等研究方法,针对不同类型的锚固岩质边坡,明晰其在强震或频发微

震等不同地震荷载形式下的动力破坏过程与演化模式,为岩质边坡—锚固结构体系地震动耦联作用机理研究提供坚实基础.

4.2 岩质边坡—锚固结构体系地震动耦联作用机理

岩质边坡—锚固结构体系具有独特的地震动力演化规律,其根源在于边坡与锚固结构之间存在着耦联作用,然而传统上基于静力学的锚固结构与边坡地质力学模型建立,皆未能充分考虑岩质边坡的动力演化过程及其与锚固结构的协同作用机理,加之地震荷载的交变性与复杂性,导致岩质边坡—锚固结构体系的长期安全性难以得到有效保障.由此可知,锚固岩质边坡的动力演化是一个复杂的多场耦合过程,多维数据挖掘与融合是揭示地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系耦联作用机理的重要途径.随着现代调查手段的飞速发展,未来可基于锚固岩质边坡地震动力演化模式,有机融合遥感、小型无人机与地面详细调查等多源数据信息,同时突出三维激光扫描和LiDAR等非接触调查技术的优势,逐步开展“面—线—点”式地质灾害勘测,准确表征锚固岩质边坡的三维形貌特征、多相性及其所赋存的应力场、温度场、化学场与渗流场,立体精细化建立多场多相作用下的锚固岩质边坡地质力学模型.根据不同动力演化模式下的锚固岩质边坡地质力学模型,借助多尺度物理模型试验、多维特征参量关联监测、数值试验与理论解析等研究方法,分析不同地震形式下的荷载传递规律、锚固结构力学演化特征与锚固岩质边坡动力响应特性,综合揭示岩质边坡—锚固结构体系地震动耦联作用机理,为新型抗震锚固结构设计研发提供重要依据.

4.3 新型抗震锚固结构设计关键技术研发与应用示范

锚固结构的延性发挥吸收了大部分岩体变形所释放能量,而常规锚杆(索)在强震作用下存在着难以适应岩体大变形的缺陷,同时,地震所生成的应力波会使具有高波阻抗特性的锚杆(索)产生较高动应力,进而导致锚固结构屈服失效,加之当前的边坡震害防治技术是以未充分考虑边坡演化过程的静态设计为主,这都造成了常规锚固结构抗震有效性与边坡时效稳定性难以得到充分保证.此外,现有的湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站与中国科学院东川泥石流观测研究站等皆为地质灾害形成机理与防治技术应用研究提供了有

力支撑,但针对强震区域中典型的边坡锚固工程应用示范区建设仍是有待开展.鉴于此,未来可在“地质演化—过程控制”思想的指导下,结合地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系耦联作用机理,提出针对不同演化模式的锚固工程空间布设、锚固力与最优设计参数确定方法,实现具有大塑性变形能力的新型抗震锚固结构设计关键技术的创新、集成与标准化,同时,在地震易发区域建立新型抗震锚固结构关键技术应用示范工程,更好地检验各类锚固结构抗震效果与推广锚固结构关键技术.

5 结语

岩质边坡—锚固结构体系在地震荷载中表现出了良好的抗震效果,开展锚固岩质边坡地震响应研究具有重要的理论意义与实际应用价值.在地震作用下,岩质边坡—锚固结构体系中的锚杆(索)应力应变特征与锚固界面剪切作用、锚固岩质边坡动力特性的研究成果,促进了岩质边坡—锚固结构体系地震动协同作用机制的探寻;锚固岩质边坡动力稳定性评价成果为提出岩质边坡—锚固结构体系多参量时效稳定性评价方法提供了思路;而岩体结构面参数、锚固参数与地震动参数对锚固岩质边坡动力响应影响的研究成果,则是为建立以边坡稳定性与岩体位移为目标控制变量、以内外影响因素为主要控制自变量的岩质边坡—锚固结构体系地震灾变控制模型形成了有力支撑.

基于此,未来可以“动力演化模式—耦联作用机理—关键技术研发、标准化与应用示范”为核心脉络,针对不同类型的岩质边坡—锚固结构体系,明晰其在强震或频发微震等不同地震荷载形式下的动力演化模式;借助基于动力演化模式的锚固岩质边坡地质力学模型,通过多尺度物理模型试验、多维特征参量关联监测、数值试验与理论解析等研究方法,分析地震荷载传递规律、锚固结构力学演化特征与锚固岩质边坡动力响应特性,综合揭示岩质边坡—锚固结构体系地震动耦联作用机理;在“地质演化—过程控制”思想的指导下,结合地震荷载下岩质边坡—锚固结构体系耦联作用机理,提出具有大塑性变形能力的新型抗震锚固结构的布设、锚固力与最优设计参数确定方法,实现新型抗震锚固结构设计关键技术的创新、集成与标准化,并建立新型抗震锚固结构关键技术应用示范工程.

致谢:衷心感谢评审专家与编委对本文提出的

宝贵意见,以及朱林锋、王琛璐、安彩龙、邓姗、吕萌、黄舒对本文提供的帮助,特此一并致谢!

References

- An, C. L., Liang, Y., Wang, L. Q., et al., 2020. Three-Dimensional Optimization Design for the Direction Angle of Anchor Cable Reinforcement in Wedge Rock Slope. *Rock and Soil Mechanics*, 41(8): 2765–2772(in Chinese with English abstract).
- Chai, B., Shi, X. S., Du, J., et al., 2022. How to Realize Elaborated Analysis of Regional Rock Mass Structure? A Review and Idea. *Earth Science*, 47(12): 4629–4646(in Chinese with English abstract).
- Fu, X., Jin, 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).
- Gu, X. B., Wang, Y. H., Ji, X. J., et al., 2021. The Analysis of Anchoring Mechanism of Rock Slope in Two Layers Based on the Nonlinear Twin-Shear Strength Criterion. *Advances in Civil Engineering*, (2021): 1–8. <https://doi.org/10.1155/2021/5565320>
- Guo, D. P., Hamada, M., 2012. Lessons Learnt from Seismic Damage Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake. International Conference on Vibration, Structural Engineering and Measurement (ICVSEM2012), Shanghai. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.889>
- Hatzor, Y. H., Arzi, A. A., Zaslavsky, Y., et al., 2004. Dynamic Stability Analysis of Jointed Rock Slopes Using the DDA Method: King Herod's Palace, Masada, Israel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5): 813–832. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.02.002>
- He, Y., Liu, Y., Hazarika, H., et al., 2019. Stability Analysis of Seismic Slopes with Tensile Strength Cut-off. *Computers and Geotechnics*, 112: 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.04.029>
- Hong, H. C., Xu, W. Y., 2006. Review and Prospect of Anchorage Properties of Reinforced Rockmass under Earthquake. *Metal Mine*, (3): 5–10, 84 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Q. X., Xu, X. T., Xu, C., et al., 2016. Dynamic Response Characteristics of an Anchored Rock Slope during Wenchuan Earthquake. *Rock and Soil Mechanics*, 37(6): 1729–1736(in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., 2009. Mechanism and Geomechanical Modes of

- Landslide Hazards Triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(6):1239—1249(in Chinese with English abstract).
- Jin, F.F., Yan, Z.X., Zhai, J.Y., et al., 2020. Study on the Influence Weights of Ground Motion Parameters on Seismic Responses of Anchored Rock Slope. *Water Power*, 46(2): 36—41(in Chinese with English abstract).
- Kou, H., Li, N., Guo, S.F., 2018. Advances in Failure Mechanisms and Stability of Rock Slopes under Earthquake Action. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 38(4):81—88(in Chinese with English abstract).
- Lai, T.W., Le, 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, L.H., Zhao, Y.F., Wang, X.G., 2018. Centrifuge Experiment-Based Study on Slope Reinforcing Effect of Anchor Cable. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 49(1):143—148(in Chinese with English abstract).
- Li, X.P., He, S.M., 2009. Seismically Induced Slope Instabilities and the Corresponding Treatments: The Case of a Road in the Wenchuan Earthquake Hit Region. *Journal of Mountain Science*, 6(1): 96—100. <https://doi.org/10.1007/s11629-009-0197-1>
- Li, Y.P., Yan, Z.X., 2019. Influence of Weak Interlayer Parameters for Anchored Interface Shear Action of Rock Slope under Earthquake. *Journal of Vibration and Shock*, 38(8): 48—53, 79(in Chinese with English abstract).
- Lin, Y.L., Li, X.X., Zhang, B., 2013. Quasi-Static Analysis of Seismic Stability of Double-Directional Anchored Rock Slope under Extreme Conditions. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 9(5): 1186—1190, 1200(in Chinese with English abstract).
- Liu, C.B., Yan, Z.X., Zhang, G.H., et al., 2020. Study on the Influence of Soft Layer Parameters on the Stability and Anchorage of Rock Slope. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 42(4): 28—34(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.H., Wang, Y., Fu, K.L., et al., 2012. Force Analysis of Anchor Bolts Reinforcing Rock Slope under Simple Harmonic Vibration Load. *Rock and Soil Mechanics*, 33(Suppl.1):85—90(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).
- Long, Z., 2020. Shear Effects on the Anchorage Interfaces of a Rock Slope Containing a Weak Layer under Seismic Action (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou(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>
- Long, Z., Yan, Z.X., Zhou, X.L., 2017. A Numerical Simulation of Anchored Interface Shear Stress for Bolt in Rock Mass Slope under Earthquake. *Scientia Sinica Technologica*, 47(10):1049—1056(in Chinese).
- Luo, G., Chen, Q.G., Shen, W.G., et al., 2022. Research Status and Development Trend of the High-Altitude Extremely-Energetic Rockfalls. *Earth Science*, 47(3):913—934(in Chinese with English abstract).
- Lü, Q.C., Liu, Y.R., Yang, Q., 2017. Stability Analysis of Earthquake-Induced Rock Slope Based on Back Analysis of Shear Strength Parameters of Rock Mass. *Engineering Geology*, 228:39—49. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.07.007>
- Ma, H.S., Fu, X., Feng, X.G., et al., 2014. Large-Scale Shaking Table Test Study on Pre-Stressed Anchor Cable of Counter-Tilt Layer Rock Slope. 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA), Zhangjiajie. <https://doi.org/10.1109/isdea.2014.139>
- Miyagi, T., Yamashina, S., Esaka, F., et al., 2011. Massive Landslide Triggered by 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake in the Aratozawa Dam Area, Tohoku, Japan. *Landslides*, 8(1): 99—108. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0226-8>
- Nie, B.S., Shen, Z.Z., Hou, B.L., et al., 2019. Dynamic Processes of Anchored Rock Slope with Discrete Element Method. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 17(2): 202—208(in Chinese with English abstract).
- Nie, Y., Zhao, Y.F., Wang, X.G., et al., 2020. Seismic Response of Rock Slopes with the Anchor Cable in Centrifuge Modeling Tests. *Advances in Civil Engineering*, (2020):1—12. <https://doi.org/10.1155/2020/8170258>
- Parise, M., Jibson, R.W., 2000. A Seismic Landslide Susceptibility Rating of Geologic Units Based on Analysis of Characteristics of Landslides Triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California Earthquake. *Engineering Geology*, 58(3—4): 251—270. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00038-7)
- Peng, N.B., Dong, Y., Zhu, Y., et al., 2020. Influence of

- Ground Motion Parameters on the Seismic Response of an Anchored Rock Slope. *Advances in Civil Engineering*, (2020): 1–10. <https://doi.org/10.1155/2020/8825697>
- Peng, N. B., Yan, Z. X., 2013. Dynamic Responses of Anchored Rock Slope under Earthquake: A Numerical Study. *Disaster Advances*, 6(2):4–11.
- Qi, K., Tan, Z. Y., 2018. Stability Analysis of an Intense Weathered Rock Slope and Optimum Reinforcement Design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2): 1049–1057. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0373-y>
- Qi, S. W., Wu, F. Q., Liu, C. L., et al., 2004. Engineering Geology Analysis on Stability of Slope under Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(16): 2792–2797(in Chinese with English abstract).
- Ren, A. W., Wang, Y. J., Chen, Z. Y., et al., 2016. Performance of the Reinforced Right Abutment Slope of Zipingpu Dam during Magnitude 8.0 Earthquake, Wenchuan, China. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(4): 298–307. <https://doi.org/10.1144/qjgeh2015-033>
- Ruan, X. B., Sun, S. L., Liu, W. L., 2013. Seismic Stability of Anchored Rock Slope Using Pseudo-Dynamic Method. *Rock and Soil Mechanics*, 34(S1): 293–300(in Chinese with English abstract).
- Su, L. J., Sun, C. N., Yu, F. W., et al., 2018. Seismic Stability Analysis of Slopes with Pre-Existing Slip Surfaces. *Journal of Mountain Science*, 15(6): 1331–1341. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4759-3>
- Sun J., 2007. Rock Rheological Mechanics and Its Advance in Engineering Applications. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(6): 1081–1106(in Chinese with English abstract).
- Tang, H. M., Wasowski, J., Juang, C. H., 2019. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China Lessons Learned from Decades of Research. *Engineering Geology*, 261: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267>
- Tiwari, R. C., Bhandary, N. P., Yatabe, R., 2014. Spectral Element Analysis to Evaluate the Stability of Long and Steep Slopes. *Acta Geotechnica*, 9(5): 753–770. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0292-x>
- Wang, G. L., Wu, F. Q., Qi, S. W., et al., 2007. Research on Limit Analysis Upper Bound Method for Stability Evaluation of Anchored Rock Slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(12): 2556–2563(in Chinese with English abstract).
- Wang, G. L., Zhang, J. H., Li, J. W., et al., 2009. Study on Energy Method for Estimation of Highway Rock Slope Stability. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 26(12): 1–6, 16(in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Yao, L. K., Jiang, L. W., 2010. Research on Dynamic Response of Rock Blocks in Slope and Anti-Seismic Effect of Anchor Reinforcement to Rock Mass. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 27(3): 6–11(in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Zhu, L. F., Zheng, L. B., et al., 2021. Shear Test of Bolted Joint Rock Masses Considering Joint Roughness. *China Journal Highway Transport*, 34(6): 38–47 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., Li, H. B., Liu, Y. Q., et al., 2013. Reinforcement Mechanism of Bedding Rock Slopes with Prestressed Anchor Cable Subjected to Seismic Loads. *Rock and Soil Mechanics*, 34(12): 3555–3560(in Chinese with English abstract).
- Wang, M., Luo, Q., 2009. Thoughts on Design of the Damaged Road by Wenchuan Earthquake Zone. *Journal of Railway Engineering Society*, (2): 21–24(in Chinese with English abstract).
- Wu, S. J., Jiang, Y. J., Deng, T., et al., 2017. Seismic Responses of Weak Interlayered Slope with Anchor-Frame Reinforcement Using Model Slope on Shaking Table. *Journal of Engineering Geology*, 25(4): 1065–1072(in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., Deng, J. H., Tai, J. J., et al., 2008. Wenchuan Large Earthquake and Post-Earthquake Reconstruction-Related Geotechnical Problems. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(9): 1781–1791(in Chinese with English abstract).
- Xiong, M., Huang, Y., 2017. Stochastic Seismic Response and Dynamic Reliability Analysis of Slopes: A Review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100: 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.06.017>
- Xu, M., Tang, Y. F., Liu, X. S., et al., 2018. Seismic Dynamic Response of Rock Slope Anchored with Adaptive Anchor Cables. *Rock and Soil Mechanics*, 39(7): 2379–2386 (in Chinese with English abstract).
- Yan, M. J., Xia, Y. Y., Liu, T. T., 2018. Limit Analysis of Bedding Rock Slopes Reinforced by Prestressed Anchor Cables under Seismic Loads. *Rock and Soil Mechanics*, 39(7): 2691–2698(in Chinese with English abstract).
- Yan, M. J., Xia, Y. Y., Liu, T. T., et al., 2019. Limit Analysis under Seismic Conditions of a Slope Reinforced with Prestressed Anchor Cables. *Computers and Geotechnics*,

- 108: 226—233. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.027>
- Yan, M. J., Zhang, J. M., Tan, S. R., 2022. Research Status and Development of Rock Slope Stability Analysis under Seismic Conditions. *Engineering Journal of Wuhan University*, 55(1):29—38(in Chinese with English abstract).
- Yan, Z. X., Li, Y. P., Long, Z., et al., 2019. Interfacial Shearing of Anchored Rock Slopes with a Weak Layer under Earthquake Loading. *Journal of Tsinghua University*, 59(11):910—916(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).
- Yan, Z. X., Qu, W. R., Long, Z., et al., 2018. Influences of Anchorage Parameters on Distribution of Shear Stress at Anchorage Interface of Rock Slopes under Earthquakes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(11): 2110—2119(in Chinese with English abstract).
- Yao A. J., Su Y. H., 2003. A Method for Stability of Slope Engineering with Complicated Rock-Mass. *China Civil Engineering Journal*, 36(11): 34—37(in Chinese with English abstract).
- Ye, H. L., Huang, R. Q., Zheng, Y. R., et al., 2010. Sensitivity Analysis of Parameters for Bolts in Rock Slopes under Earthquakes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 32(9):1374—1379(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Niu, J. Y., Fu, X., et al., 2020a. Shaking Table Test of Seismic Responses of Anchor Cable and Lattice Beam Reinforced Slope. *Journal of Mountain Science*, 17(5): 1251—1268. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5712-4>
- Zhang, J. J., Niu, J. Y., Fu, X., et al., 2020b. 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>
- Zhang, Q. Y., Zhang, X. T., Xiang, W., 2006. Application of Sliding Block Computation Model in Stability Evaluation for Anchored Rockmass Slope. In: Putra, I. S., Suharto, D., eds., *Fracture and Strength of Solids VI*, Pts 1 and 2, Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, Durnten-Zurich, 1515—1519. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.306-308.1515>
- Zhang, W., 2021. Numerical Simulation of Dynamic Characteristics of Prestressed Anchor Rock Slope under Seismic Action. *Nonferrous Metals Engineering*, 11(3):117—122 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. Z., Xia, Y. Y., Wang, Z. D., et al., 2021. The Real-Time Dynamic Newmark Sliding Block Displacement Method for Post-Earthquake Displacement of Anchored Rock Slope. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 38(5):2057—2063(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y., Wang, R. Q., Chen, C. X., et al., 2021. Dynamic Analysis of Anti-Dip Bedding Rock Slopes Reinforced by Pre-Stressed Cables Using Discrete Element Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 130: 79—93. <https://doi.org/10.1016/j.engabound.2021.05.014>
- 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).
- Zhou, W., Li, H. B., Liu, Y. Q., et al., 2016. Pseudo-Dynamic Analysis of Anchored Characteristics of Layered Rock Slopes Subjected to Seismic Loads. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(Suppl. 2): 3570—3576(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安彩龙, 梁焯, 王亮清, 等, 2020. 岩质边坡楔形体锚索加固方向角三维优化设计. *岩土力学*, 41(8):2765—2772.
- 柴波, 史绪山, 杜娟, 等, 2022. 如何实现区域岩体结构精细化分析? 综述与设想. *地球科学*, 47(12):4629—4646.
- 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.
- 洪海春, 徐卫亚, 2006. 地震作用下岩体锚固性能研究综述与展望. *金属矿山*, 357(3):5—10, 84.
- 黄秋香, 徐湘涛, 徐超, 等, 2016. 汶川地震中锚固岩质边坡的动力响应特征. *岩土力学*, 37(6):1729—1736.
- 黄润秋, 2009. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质学模式. *岩石力学与工程学报*, 28(6):1239—1249.
- 靳飞飞, 言志信, 翟聚云, 等, 2020. 地震动参数对锚固岩质边坡地震响应影响权重研究. *水力发电*, 46(2):36—41.
- 寇昊, 李宁, 郭双枫, 2018. 地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性研究进展. *水利水电科技进展*, 38(4):81—88.
- 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.
- 李林昊, 赵宇飞, 汪小刚, 2018. 预应力锚索边坡加固作用的离心机试验研究. *水利水电技术*, 49(1):143—148.
- 李亚鹏, 言志信, 2019. 地震作用下软弱夹层参数对岩质边坡锚固界面剪切作用影响. *振动与冲击*, 38(8):48—53, 79.
- 林永亮, 李新星, 张波, 2013. 双向锚固岩石边坡抗滑稳定性拟静力分析. *地下空间与工程学报*, 9(5):1186—1190,

- 1200.
- 刘春波, 言志信, 张功会, 等, 2020. 软弱夹层参数对岩质边坡稳定性及锚固影响研究. 三峡大学学报(自然科学版), 42(4):28-34.
- 刘建华, 汪优, 付康林, 等, 2012. 简谐振动荷载下锚杆加固岩质边坡的受力分析. 岩土力学, 33(增刊 1):85-90.
- 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.
- 龙哲, 2020. 地震作用下含软弱层岩体边坡锚固界面剪切作用研究(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 龙哲, 言志信, 周小亮, 2017. 地震作用下岩体边坡锚固界面剪切作用数值模拟分析. 中国科学: 技术科学, 47(10):1049-1056.
- 罗刚, 程谦恭, 沈位刚, 等, 2022. 高位高能岩崩研究现状与发展趋势. 地球科学, 47(3):913-934.
- 聂柏松, 沈振中, 侯冰铃, 等, 2019. 基于离散单元法的锚固岩质边坡动力响应研究. 南水北调与水利科技, 17(2):202-208.
- 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等, 2004. 地震边坡稳定性的工程地质分析. 岩石力学与工程学报, 23(16):2792-2797.
- 阮晓波, 孙树林, 刘文亮, 2013. 锚固岩石边坡地震稳定性拟动力分析. 岩土力学, 34(增刊 1):293-300.
- 孙钧, 2007. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展. 岩石力学与工程学报, 26(6):1081-1106.
- 王根龙, 伍法权, 祁生文, 等, 2007. 加锚岩质边坡稳定性评价的极限分析上限法研究. 岩石力学与工程学报, 26(12):2556-2563.
- 王根龙, 张军慧, 李巨文, 等, 2009. 公路岩质边坡稳定性评价的能量法研究. 公路交通科技, 26(12):1-6, 16.
- 王建, 姚令侃, 蒋良淮, 2010. 边坡岩石块体动力响应及锚固抗震效应研究. 公路交通科技, 27(3):6-11.
- 王亮清, 朱林锋, 郑罗斌, 等, 2021. 考虑节理粗糙度的锚固节理岩体剪切试验. 中国公路学报, 34(6):38-47.
- 王茂, 罗庆, 2009. 汶川大地震中道路破坏及设计反思. 铁道工程学报, 26(2):21-24.
- 王秒, 李海波, 刘亚群, 等, 2013. 顺层岩质边坡预应力锚索抗震加固机制研究. 岩土力学, 34(12):3555-3560.
- 吴尚杰, 蒋宇静, 邓涛, 等, 2017. 含软弱夹层锚框支护边坡的地震响应研究. 工程地质学报, 25(4):1065-1072.
- 谢和平, 邓建辉, 台佳佳, 等, 2008. 汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题. 岩石力学与工程学报, 27(9):1781-1791.
- 许明, 唐亚锋, 刘先珊, 等, 2018. 自适应锚索锚固岩质边坡地震动力响应分析. 岩土力学, 39(7):2379-2386.
- 严敏嘉, 夏元友, 刘婷婷, 2018. 地震作用下预应力锚索加固顺层岩坡极限分析. 岩土力学, 39(7):2691-2698.
- 严敏嘉, 张佳敏, 谭思蓉, 等, 2022. 地震作用下岩坡稳定性研究现状与发展. 武汉大学学报(工学版), 55(1):29-38.
- 言志信, 李亚鹏, 龙哲, 等, 2019. 地震作用下含软弱层锚固岩质边坡界面剪切作用. 清华大学学报(自然科学版), 59(11):910-916.
- 言志信, 刘春波, 龙哲, 等, 2020. 含软弱层顺层岩体边坡锚固地震响应试验研究. 岩土工程学报, 42(12):2180-2188.
- 言志信, 屈文瑞, 龙哲, 等, 2018. 地震作用下锚固参数对岩体边坡锚固界面剪应力分布影响分析. 岩土工程学报, 40(11):2110-2119.
- 姚爱军, 苏永华, 2003. 复杂岩质边坡锚固工程地震敏感性分析. 土木工程学报, 36(11):34-37.
- 叶海林, 黄润秋, 郑颖人, 等, 2010. 岩质边坡锚杆支护参数地震敏感性分析. 岩土工程学报, 32(9):1374-1379.
- 张炜, 2021. 地震作用下预应力锚杆岩质边坡动力特性数值模拟研究. 有色金属工程, 11(3):117-122.
- 赵宇臻, 夏元友, 王智德, 等, 2021. 锚固岩质边坡震后位移实时动态 Newmark 滑块位移法. 应用力学学报, 38(5):2057-2063.
- 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.
- 周炜, 李海波, 刘亚群, 等, 2016. 地震作用下顺层岩质边坡锚固特性的拟动力分析. 岩石力学与工程学报, 35(增刊 2):3570-3576.