

层状岩质边坡动力失稳及加固研究进展

赵飞^{1,2}, 石振明^{1,2}, 俞松波^{1,2}, 周圆媛³, 李博^{1,2},
陈建峰^{1,2}, 张清照^{1,2}, 郑鸿超⁴

(1. 同济大学 土木工程学院 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 4. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430078)

摘要: 层状岩质边坡在强震作用下极易发生破坏, 导致崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害, 其稳定性评价及支护结构优化是工程建设和学术研究关注的重点问题。基于强震区现场调查、理论分析、数值模拟和物理模型试验等技术手段, 国内外学者针对强震区岩质边坡破坏机制及加固措施开展了大量卓有成效的研究工作。从层状岩质边坡失稳破坏特征、支护结构类型、支护结构加固机制、新型抗震支护结构等4个方面着手, 系统梳理了强震作用下岩质边坡支护结构的研究现状, 指明了目前支护结构基础研究与技术手段中存在的不足, 展望了今后边坡抗震支护结构的研发方向。研究结果为深入揭示强震区层状岩质边坡失稳机制与加固机制提供了理论支撑, 并为研发更可靠的支护结构奠定了科学基础。

关键词: 强震区; 层状岩质边坡; 动力破坏特征; 支护结构; 加固机制

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)11-3585-30

Research progress on dynamic failure and reinforcement of stratified rock slopes

ZHAO Fei^{1,2}, SHI Zhen-ming^{1,2}, YU Song-bo^{1,2}, ZHOU Yuan-yuan³, LI Bo^{1,2},
CHEN Jian-feng^{1,2}, ZHANG Qing-zhao^{1,2}, ZHENG Hong-chao⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;

4. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China)

Abstract: Stratified rock slopes are prone to damage under strong earthquake, leading to geological disasters such as crumbling, landslides and debris flow, and their stability evaluation and support structure optimization are key issues for engineering construction and academic research. Based on field investigations, theoretical analyses, numerical simulations and physical model tests in strong earthquake regions, scholars at home and abroad have carried out a lot of fruitful researches on the damage mechanism and reinforcement measures of rock slopes in strong earthquake regions. Starting from four aspects, including destabilization and damage characteristics of laminated rock slopes, types of support structures, reinforcement mechanisms of support structures and new seismic support structures, the research status of rock slope support structures under strong earthquakes is systematically reviewed, the shortcomings in the current basic research and technical methods of support structures are indicated, and the future research and development directions of seismic support structures for slopes are prospected. This study provides theoretical support for revealing the instability mechanisms and reinforcement strategies of stratified rock slopes in strong earthquake regions, while establishing a scientific foundation for developing more reliable support structures.

Keywords: strong earthquake region; stratified rock slope; dynamic failure characteristics; support structures; reinforcement mechanism

1 引言

自 21 世纪以来,受地质构造复杂、板块活动强烈的影响,我国青藏高原东缘(川滇、甘青地区)及新疆天山地震带等强震区地震地质灾害严重,6 级及以上地震高达 100 余次。强震诱发大型岩质边坡失稳破坏,其中层状岩质边坡失稳破坏的现象最为严重,如唐家山滑坡、王家岩滑坡、红石岩崩塌等典型崩滑事件^[1-5]。地震滑坡造成了大量房屋、交通、道路、市政、教育等基础设施受损破坏,威胁着人民的生命财产安全,严重制约着水电开发、铁路建设等国家重大战略计划的实施^[6-8]。鉴于强震区具有强震频发、地质灾害链复杂、工程抗震需求高等显著特征,开展强震荷载作用下顺层岩质边坡动力稳定性评估及抗震加固技术研究具有重要的理论意义和工程价值。

目前,强震区层状岩质边坡的研究仍然面临岩体结构复杂多变、地震波随机性强的严峻挑战。相对于静力作用,地震作用下层状岩质边坡的动力失稳破坏机制存在显著差异,这使得其稳定性评价和灾害防控更加复杂。一方面,层状岩体是由不同岩性、结构或年代的岩层交替叠加形成的地质体,其内部发育有大量裂隙、节理、软弱夹层和强风化软岩层等优势结构面(见图 1),显著的各向异性和非均质性导致层状边坡的工程地质条件愈加复杂,使

得层状边坡的动力响应规律和变形破坏特征不明确^[9-13]。另一方面,地震荷载作为一种随机、不规则的弹性波,其幅值、波长、频率、持续时间及作用机制具有较强的随机性和不确定性,这使得层状岩质边坡的动力稳定性更加难以评价^[14-17]。此外,传统支护结构由于结构简单、功能单一等特点,已无法完全满足强震区实际岩质边坡工程加固需求。据 2008 年汶川地震灾害后调查结果显示,强震荷载下桩锚结构易发生失效破坏,如抗滑桩的倾斜、断裂和过大位移等问题,以及锚杆或锚索易被拉断和拔出等问题^[18-19]。

基于上述原因,国内外学者结合强震区现场调查、理论分析、数值模拟和物理模型试验等多种技术手段,对强震区岩质边坡失稳及加固问题开展了大量卓有成效的研究工作^[20-26]。本文通过总结学者们有关强震区层状岩质边坡变形失稳破坏特征及支护措施研究的相关文献,分以下 4 个方面对研究现状进行评述:①层状岩质边坡动力失稳破坏特征概述;②支护结构类型概述;③支护结构加固机制分析;④新型抗震支护结构研发。最后,本文围绕主要研究内容指出了目前存在的问题,并对今后的研究方向进行了展望。本文定性地探讨了地震动力作用下岩质边坡的加固问题,为深入认识强震区层状岩质边坡动力响应规律、失稳破坏特征及优化加固方案奠定了基础。

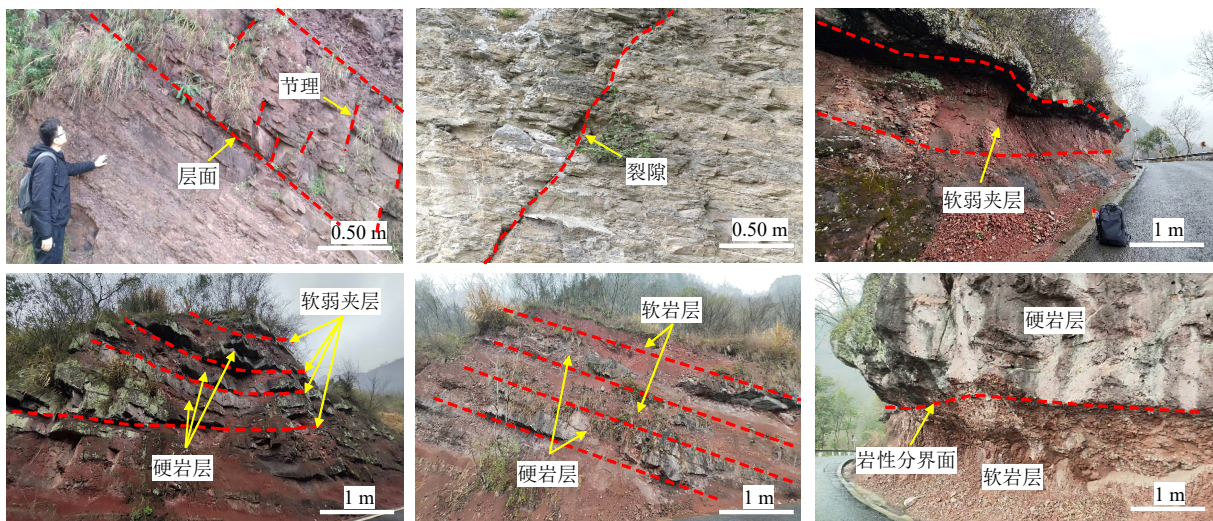


图 1 层状岩质边坡内部的层面、节理、裂隙、软弱夹层及软岩层

Fig.1 Bedding, joints, fissures, weak interlayers, and soft rock layers inside stratified rock slope

2 层状岩质边坡动力失稳特征概述

本节基于学者们已开展的现场调查、理论分

析、数值模拟和物理模型试验等研究成果,系统总结层状岩质边坡在强震作用下的动力失稳破坏特征。根据岩层产状与边坡空间关系的不同,重点对

水平层状、顺倾层状和反倾层状岩质边坡的动力破坏模式进行分类阐述。

2.1 水平层状岩质边坡

水平层状岩质边坡是指岩层走向与边坡走向一致、且岩层倾角接近 0° 的一类层状岩质边坡。根据岩性组合、岩体结构及主要控制因素，水平层状岩质边坡可划分为单一岩性水平边坡（岩性控制型、节理控制型）和软硬岩组合水平边坡（软岩控制型、软弱夹层控制型），如表 1 所示。

2.1.1 单一岩性型

在岩性控制型边坡研究方面，邹威^[27]通过大型振动台试验对比分析了均质软岩与硬岩边坡的地震响应，结果表明软岩边坡的变形破坏程度显著大于硬岩边坡，其中硬岩边坡主要表现为崩塌型破坏，而软岩边坡则以滑坡型破坏为主。侯红娟^[28]基于振动台模型试验研究发现，水平层状岩质边坡在强震作用下的变形破坏模式主要为拉裂-剪切滑移，且软岩边坡的变形破坏先于硬岩边坡发生。刘汉香^[29]通过多组大型振动台模型试验，系统对比了均质硬岩、软岩边坡与层状硬岩、软岩边坡的动力响应特性及变形破坏特征。上述研究表明，受高程放大效应和

软岩放大效应的影响，软岩与硬岩边坡在地震作用下的破坏特征存在明显差异：硬岩坡体中上部层面首先发生剪切，层间出现竖向张拉破坏并形成贯通裂隙，致使硬岩边坡最终呈现错动-剪切-崩落破坏模式（见图 2(a)）；软岩坡体上部岩层首先发生震动挤密，坡顶出现拉裂塌陷，并从坡体中下部剪出，最终表现为塌陷-剪切-滑移破坏模式（见图 2(b)）。

在节理控制型边坡研究方面，胡训健等^[30]运用 PFC2D 离散元数值模拟方法，揭示了含水平节理边坡在地震作用下的破坏机制，研究表明水平断续节理是影响边坡动力稳定性的关键控制因素，地震荷载可诱发边坡产生溃散型、拉裂-滑移-块体倾倒型以及拉裂-水平滑移型等多种破坏模式。刘新荣等^[31]通过开展含垂直和水平节理边坡的振动台试验，探究了水平层状岩质边坡的动力损伤破坏规律，发现微震作用下边坡上部沿节理面形成阶梯型破坏面并向坡面扩展，下部则形成平直的剪切破坏面，最终呈现整体阶梯状破坏特征。上述研究表明，边坡内部节理发育特征复杂多变，是影响边坡动力稳定性的重要因素。如图 2(c)所示，受高程放大效应和结构面效应的共同影响，地震作用下坡体中上部岩层

表 1 水平层状岩质边坡分类及其动力失稳破坏特征

Table 1 Classification of horizontal stratified rock slope and its dynamic failure characteristics

坡体结构类型	主要地质特征	变形破坏特征	主要破坏模式
H-S-LRS	水平软岩或硬岩组成	岩层内部发生拉裂破坏，岩层面发生剪切破坏，软岩边坡较硬岩边坡破碎严重	坡体上部软岩拉裂-中下部软岩剪切破坏-滑移型、坡体上部硬岩拉裂-中下部硬岩剪切破坏-倾覆或崩落型
H-S-JRS	同一岩性组成，次级节理发育，水平岩层组成	岩层内部节理发生拉裂破坏，岩层面发生剪切破坏，边坡中上部破坏严重呈碎块状	坡体中上部震碎-溃散型、坡体中上部岩体拉剪破坏-滑移型
H-C-SRS	水平软硬岩层上下分布	硬岩层内部发生拉裂破坏，软岩或软硬岩界面多发生拉裂或挤压剪切破坏，上软下硬边坡较上硬下软边坡更易失稳破坏	坡体上部软岩拉裂-软硬岩界面剪切破坏-滑移型、坡体上部硬岩拉裂-软硬岩界面剪切破坏-倾覆型
H-C-WRS	由水平厚硬岩层和薄软弱夹层组成	硬岩层内部发生拉裂破坏，软弱夹层被挤密剪切破坏，薄软弱夹层边坡较厚软弱夹层边坡变形破坏严重	坡体上部硬岩拉裂-软弱层挤密剪切破坏-滑移或崩落型

注：H 表示水平层状岩质边坡；S 表示单一岩性层状岩质边坡；C 表示软硬组合层状岩质边坡；LRS 表示岩性控制型层状岩质边坡；JRS 表示节理控制型层状岩质边坡；SRS 表示软岩控制型层状岩质边坡；WRS 表示软弱夹层控制型层状岩质边坡。

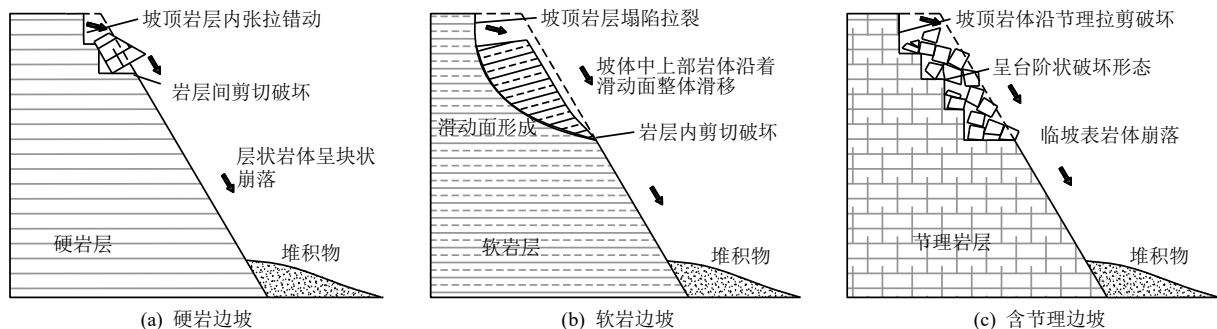


图 2 岩性与节理控制型水平层状岩质边坡动力破坏示意图

Fig.2 Schematic diagrams of dynamic failure of horizontal stratified rock slope controlled by lithology and joint

首先沿层面发生剪切破坏,顶部岩层内部沿节理产生张拉破坏;随着地震持时延长和震级增大,坡体内部节理逐渐发育并贯通,临空面附近岩体逐渐破碎松动,最终导致局部崩落或滑移,形成典型的阶梯状破坏形态。

2.1.2 软硬岩组合型

在软岩控制型边坡研究方面,许强等^[32]通过水平层状边坡模型试验发现,软硬岩组合边坡在水平和竖向地震波作用下表现出显著不同的加速度响应规律和破坏模式。Feng等^[33]结合模型试验与数值模拟研究表明,软岩位置对水平层状边坡动力破坏特征具有重要影响,软岩越靠近坡体上部,地震破坏程度越严重,其中硬岩主要发生拉破坏,软岩则以剪切破坏为主。刘汉香^[34]基于振动台试验揭示了水平边坡的失稳机制,发现上硬下软组合模型易发生崩塌破坏,而上软下硬组合模型则主要表现为拉剪破坏。邹威等^[35]通过振动台试验对比分析指出,相同地震作用下,上硬下软边坡破坏表现为岩层后缘拉裂后整体剪切错动形成崩塌,而上软下硬边坡则以坡顶岩体震碎滑落形成滑坡。田耘^[36]采用 PFC3D 离散元数值模拟研究表明,地震作用下上硬下软边坡主要呈现拉裂-水平滑移、拉裂-崩落-倾倒等破坏模式。上述研究表明,软硬岩组合边坡在地震作用下的破坏特征与单一岩性边坡类似,破坏主要集中于坡体中上部。其中上硬下软组合边坡中,软岩更易发生挤压变形和剪切破碎,与上部硬岩形成的张拉-剪切裂隙贯通导致边坡产生崩落和滑移破坏(见图 3(a));而上软下硬组合边坡在失稳时,坡顶发生张拉破坏,坡中下部多在软硬岩界面处产生剪切滑移,由于下部硬岩的约束作用,其动力响应相对较弱,破坏程度较轻(见图 3(b))。

在软弱夹层控制型边坡研究方面,徐冠军^[37]通过大型振动台试验对比分析了含泥化软弱夹层的凹型和凸型边坡破坏特征,发现凹型边坡呈现坡顶

拉裂-扩展-贯通、坡肩滑出、整体破坏的渐进破坏过程,而凸型边坡则表现为变坡线处拉裂-扩展、夹层界面剪断、整体破坏的破坏模式。Chen等^[38]的模型试验研究表明,含软弱夹层水平边坡的中上段易发生拉伸破坏,最终与软弱夹层贯通导致边坡整体失稳。周飞等^[39]通过对比不同厚度软弱夹层边坡的模型试验发现,相同地震作用下薄夹层边坡的破坏程度明显大于厚夹层边坡。Liu等^[40]的试验结果进一步表明,厚层软弱夹层具有减震效应,薄夹层边坡的地震动响应和变形破坏更为显著。上述研究表明,软弱夹层的厚度、强度和位置等特性是控制水平层状边坡地震变形破坏特征的关键因素。如图 3(c)所示,软弱夹层在地震作用下发生挤压变形和剪切破碎,上部产生竖向张拉破坏,最终形成贯通滑动面导致边坡上部岩体崩落或滑移。值得注意的是,含软弱夹层边坡的破坏模式与上硬下软边坡相似,但现有研究多集中于单一类型边坡的破坏特征,关于上硬下软边坡与含软弱夹层边坡在地震作用下相对破坏程度的对比研究较为缺乏,其破坏特征差异尚待进一步探讨。

2.2 顺倾层状岩质边坡

顺倾层状岩质边坡是指岩层倾向与坡面倾向一致的层状岩质边坡。根据岩性组合、岩体结构及主要控制因素,顺倾层状岩质边坡可划分为单一岩性顺倾边坡(层面控制型、岩性控制型、节理控制型)和软硬岩组合顺倾边坡(软岩控制型、软弱夹层控制型),如表 2 所示。

2.2.1 单一岩性型

在层面控制型边坡研究方面,王学伍^[41]和吴多华等^[42]通过振动台模型试验发现,地震作用下顺倾边坡呈现典型的渐进式破坏特征:坡肩和坡顶岩体首先松动开裂,坡脚岩体发生隆起剪切破坏,最终上下裂隙贯通导致岩体沿层面滑动失稳。张昆祥^[43]采用 3DEC 离散元方法模拟唐家山滑坡,揭示了顺

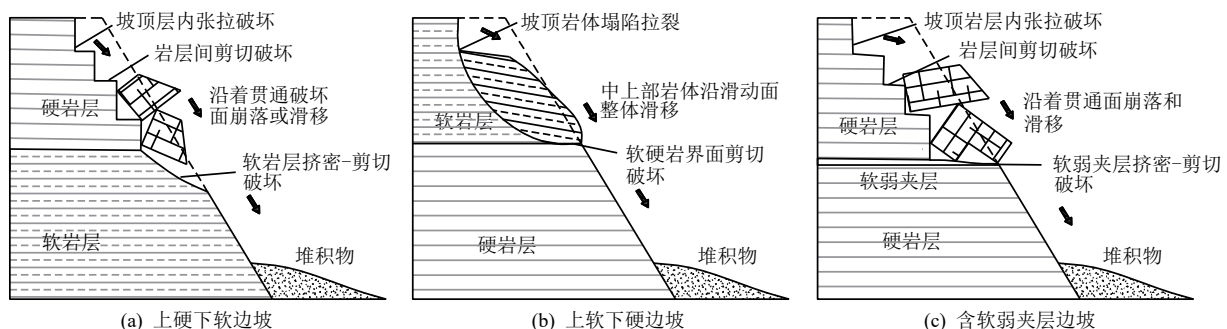


图 3 软岩和软弱夹层控制型水平层状岩质边坡动力破坏示意图

Fig.3 Schematic diagrams of dynamic failure of horizontal stratified rock slope controlled by soft rock and weak interlayer

表 2 顺倾层状岩质边坡分类及其动力失稳破坏特征
Table 2 Classification of bedding rock slope and its dynamic failure characteristics

坡体结构类型	主要地质特征	变形破坏特征	主要破坏模式
B-S-L _r RS	同一岩性，岩层产状与坡面相同	层角小于坡角：岩层面错动滑移；层角等于坡角：中上部岩层面错动滑移，下部隆起弯折剪切破坏；层角大于坡角：岩层面错动开裂倾倒	坡顶开裂-内部层面错动-滑移型、坡顶开裂-内部层面错动滑移-坡脚隆起剪切-滑移型、坡体岩层面开裂-倾倒型
B-S-JRS	同一岩性组成，次级节理发育，岩层产状与坡面相同	节理面发生拉张破坏，岩层面发生剪切破坏，边坡中上部破坏严重呈碎块状	坡顶拉裂-内部层面和节理扩张贯通-坡脚剪切-崩落或滑移型
B-S-LRS	软岩或硬岩组成，岩层产状与坡面相同	边坡上部沿着层面发生拉裂破坏，硬岩下部发生隆起弯折剪切破坏，软岩下部发生平滑剪切破坏	坡顶拉裂-硬岩层错动滑移-底部溃曲-滑移型、坡顶拉裂-下部软岩层剪切破坏-滑移型
B-C-SRS	软岩和硬岩互层，岩层产状与坡面相同	层角小于坡角：软岩层或软弱夹层被挤密发生剪切破坏，发生错动滑移；层角等于坡角：软岩层或软弱夹层发生拉裂破坏，下部隆起弯折剪切破坏	坡顶岩层拉裂-软岩层或软弱夹层剪切-滑移型、坡顶软岩层或软弱夹层拉裂-中下部硬岩层剪切-滑移型
B-C-WRS	厚硬岩层和薄软弱夹层组成，岩层产状与坡面相同		

注：B 表示顺倾层状岩质边坡；L_rRS 表示层面控制型层状岩质边坡。

倾边坡动力破坏过程：坡顶拉裂、坡脚剪切错动、沿滑动面滑移并在坡脚形成堆积体。贾俊^[44]结合物理模型和数值模拟研究表明，强震作用下陡倾边坡中锁固段岩体折断破坏，形成的破裂面与上部层面贯通，最终引发滑移弯曲式顺倾溃滑。Song 等^[45]通过大型振动台试验发现，库水和地震耦合作用下，水位骤降导致岩层面性质弱化是顺倾边坡沿层面滑动失稳的关键因素。Li 等^[46]的振动台试验进一步表明，强震作用下陡倾边坡坡顶沿层面滑动，滑动面与坡面近平行，坡底岩层突起断裂并与滑动面贯通。上述研究表明，顺倾边坡的稳定性主要受控于岩层面特征，特别是岩层面的强度及倾角。以不同层面倾角顺倾边坡为例，对缓倾、中倾、和陡倾边坡的动力破坏模式进行对比分析：图 4(a)显示当层面倾角小于边坡倾角时，地震诱发岩层间剪切裂隙和层内拉张裂隙，导致中上部岩体沿层面和节理发生崩落滑动；图 4(b)显示当层面倾角等于边坡倾角时，中上部岩体沿层面错动滑移，下部岩层弯折破碎，最终导致整体失稳；图 4(c)显示当层面倾角大于边

坡倾角时，坡面附近岩层发生张拉破坏，表现为逐层倾倒或隆起弯折破坏模式。

在岩性控制型边坡研究方面，侯伟龙^[47]以千枚岩和灰岩组成的软岩、硬岩边坡为研究对象，发现硬岩顺倾边坡主要沿层面和节理面破坏，而软岩顺倾边坡则以沿层面变形破坏为主。李果^[48]和黄润秋等^[49]通过大量模型试验发现，硬岩顺倾边坡呈现顺层滑移-下部隆起溃屈型失稳特征，而软岩顺倾边坡则表现为顺层滑移-底部挤出-分层滑移型失稳模式。Wang 等^[50]的物理模型试验表明，岩体强度决定含锁固段顺倾岩质边坡的动力破坏模式，其中高强度边坡发生弯曲破坏，低强度边坡发生剪切破坏。上述研究表明，不同岩性顺倾边坡失稳存在显著差异。地震导致硬岩边坡内部产生层间剪切裂隙与层内拉张裂隙，边坡中上部岩体沿着层面发生滑动，边坡下部岩层发生屈曲弯折破碎，层面裂隙与层内裂隙贯通，最终导致边坡整体失稳，见图 5(a)；软岩边坡中下部岩层拉张裂隙与层面剪切裂隙直接贯通，导致边坡发生沿着滑动面的滑动破坏(见图 5(b))。

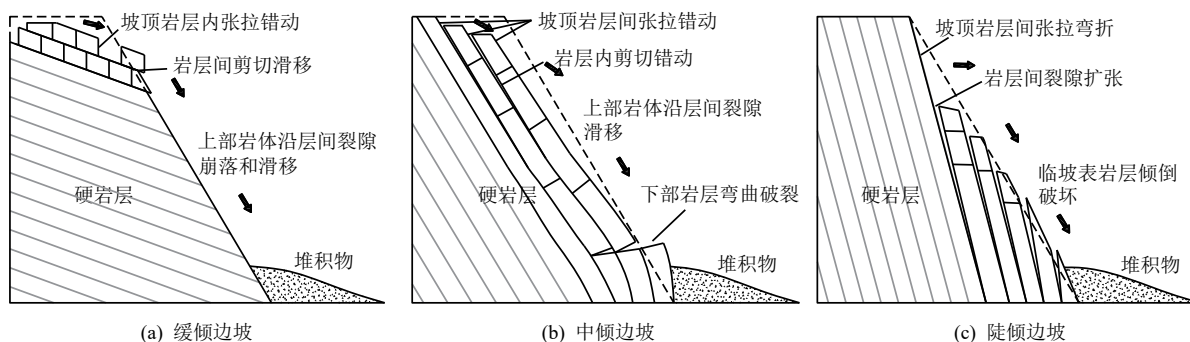


图 4 层面控制型顺倾边坡动力破坏示意图

Fig.4 Schematic diagram of dynamic failure of stratified controlled dip slope

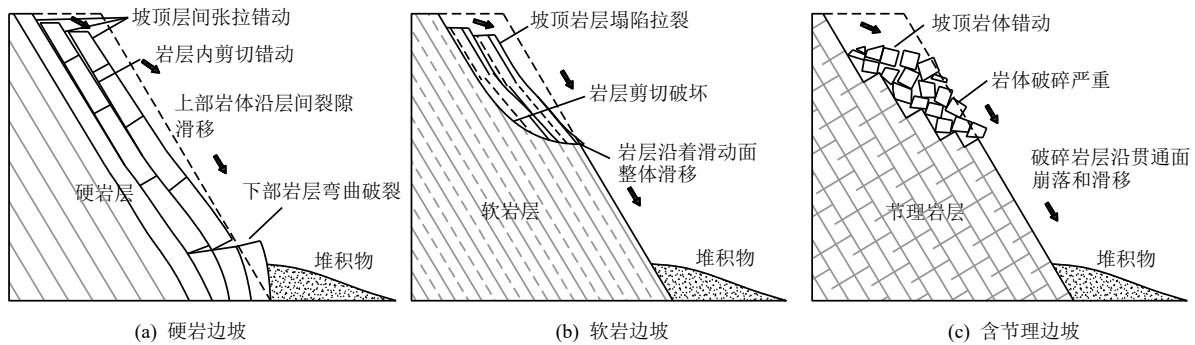


图5 岩性和节理控制型顺倾岩质边坡动力破坏示意图

Fig.5 Schematic diagram of dynamic failure in dip rock slopes controlled by lithology and joints

在节理控制型边坡研究方面, Che 等^[51]采用 ABAQUS 有限元分析和振动台试验研究了含顺倾节理边坡的动力响应特性, 发现边坡顶部变形破坏显著, 上部浅层沿滑动面完全塌陷, 坡体内出现沿节理的剪切-拉伸复合破坏。冯细霞^[52]结合振动台试验和非连续变形分析 (discontinuous deformation analysis, 简称 DDA) 结果, 揭示了两组正交节理顺倾边坡的失稳机制, 指出其动力失稳主要由层面剪切破坏和节理面拉张破坏共同导致。刘树林^[53]、刘新荣^[54]等通过振动台试验和离散元模拟 (universal distinct element code, 简称 UDEC), 研究了含起伏体边坡在高频地震作用下的破坏规律, 发现其失稳过程包括: 起伏体爬坡-啃断-磨平、次级节理起裂-扩展-贯通, 最终坡体沿复合破坏面整体滑移, 破碎岩体呈块状堆积于坡脚。Xu 等^[55]以拉月滑坡为例开展模型试验, 发现地震作用下节理面强度弱化导致两种破坏模式: 正向破坏 (后缘至前缘滑移带贯通后高位剪出) 和反向破坏 (前缘至后缘滑移带贯通后滑体分解)。上述研究表明, 节理特征是控制顺倾边坡失稳的关键因素。与完整性较好的硬岩边坡相比, 地震作用下节理发育良好的顺倾边坡内部岩体破碎更加严重, 其破坏多表现为沿着层面和节理面滑移和崩落的形式 (见图 5(c))。

2.2.2 软硬岩组合型

在软岩控制型边坡研究方面, Zhou 等^[12]以沙坝滑坡为例, 采用 FLAC^{3D} 数值模拟分析了软硬互层顺倾边坡动力响应机制, 发现软岩层的空间分布 (位置、数量、厚度) 显著影响地震波传播特性: 软岩层厚度越大、层数越多、越靠近坡顶, 边坡动力响应越强烈。Li^[56]通过离心振动试验对比了不同倾角软硬互层顺倾边坡的地震响应特性, 发现岩层较陡、强度较高的边坡易发生岩崩破坏, 而含软岩层的边坡更倾向于屈曲失稳。王志颖^[11]、Guo^[57]、Wang^[58]

等基于下归洼滑坡案例构建振动台物理模型, 将软硬互层顺倾边坡破坏过程划分为 4 个阶段: 岩层轻微沉降、岩石弯曲与后缘开裂、坡腰凹陷与隆起面破裂、剪切破裂与低位剪出。上述研究表明, 软岩层、岩层面和高程等多因素耦合作用加剧了顺倾边坡地震响应程度, 坡体上部岩层首先发生拉剪复合破坏, 坡体中下部发生沿着软岩层和硬岩层的剪切破坏 (见图 6(a))。

在软弱夹层控制型边坡研究方面, 范刚^[59-61]、Yang^[62]等通过振动台模型试验发现, 地震作用下含软弱夹层边坡呈现后缘垂直拉裂和中上部软弱夹层剪切滑动的复合破坏模式, 最终形成拉裂-滑移-崩落式失稳。巨能攀等^[63]基于水磨沟滑坡的离心振动台试验, 揭示了该类边坡在强震作用下的变形机制: 软硬互层岩体产生差异剪切破坏并向临空面弯曲倾倒, 整体表现为拉裂滑移-下部弯曲-上部倾倒的渐进破坏过程。宋丹青等^[64]采用 FLAC3D 数值模拟分析表明, 软弱夹层对地震波的折射和反射作用会显著增强边坡动力响应, 其破坏过程始于坡顶拉张破坏, 逐渐与软弱层贯通形成滑动面, 最终导致整体失稳。Xin 等^[65]的大型振动台试验将含多个软弱夹层边坡的破坏过程划分为 3 个阶段: 护坡内角张拉裂缝形成、裂缝扩展与顺层位错、后缘垂直张拉裂缝发育导致岩体滑移。Tian^[66]、Miao^[67]等以新磨滑坡为例, 发现含软弱夹层边坡在地震作用下呈现拉伸-剪切-滑移的复合破坏模式, 并具有多期地震累积损伤特征。Yang^[68]、Cui^[69-70]等的振动台试验证实, 多次地震作用会显著降低软弱夹层滑动面的摩擦系数, 导致边坡渐进破坏。上述研究表明, 软弱夹层与软岩层类似, 均表现出地震放大效应, 更易引发顺倾边坡失稳破坏。以层角小于坡角和层角等于坡角两种边坡模型为例, 含软弱夹层边坡的动力破坏特征进行深入分析: 对于软弱夹层倾角小于坡角的

情况，坡顶上部破坏特征与无软弱夹层边坡相似，而坡体中下部主要表现为软弱夹层处的剪切破坏，最终引发中上部岩体整体滑移（见图 6(b)）；当软弱夹层倾角等于坡角时，坡体中下部破坏特征与无软弱夹层边坡相近，但坡体上部主要表现为软弱夹层处的拉剪混合破坏，伴随岩层内部剪切破坏，裂隙贯通形成滑动面，最终导致坡体整体失稳（见图 6(c)）。

2.3 反倾层状岩质边坡

反倾层状岩质边坡通常指岩层坡面和岩层走向相同、倾向相反的层状岩质边坡。根据岩性组合、岩体结构及主要控制因素，反倾层状岩质边坡可进一步分为单一岩性反倾边坡（层面控制型、岩性控制型、节理控制型）和软硬岩组合反倾边坡（软岩控制型、软弱夹层控制型），如表 3 所示。

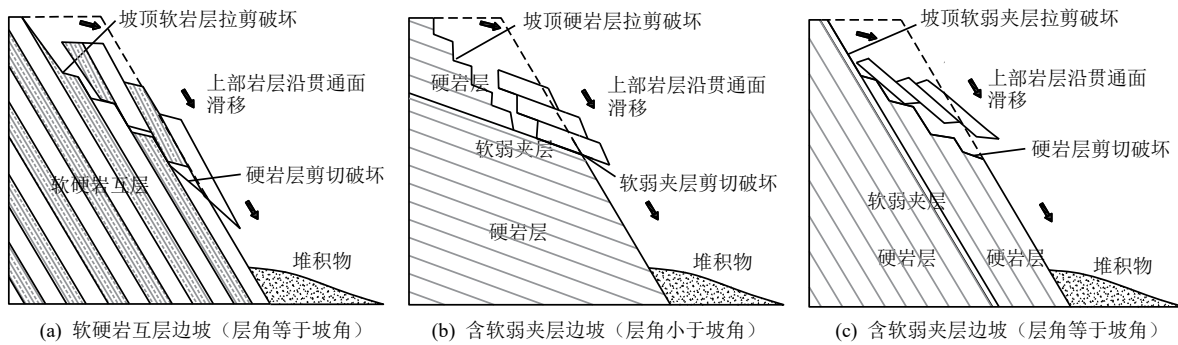


图 6 软岩和软弱夹层控制型顺倾岩质边坡动力破坏示意图

Fig.6 Schematic diagrams of dynamic failure of dip rock slope controlled by soft rock and weak interlayers

表 3 反倾层状岩质边坡分类及其动力失稳破坏特征

Table 3 Classification of counter-tilted rock slope and its dynamic failure characteristics

坡体结构类型	主要地质特征	变形破坏特征	主要破坏模式
CT-S-LRS	同一岩性组成，岩层产状与坡面相反	边坡上部岩层松弛错动，岩层倾角发生剪切弯折破坏	坡顶岩层弯曲错动-坡体下部岩层剪切弯折-滑移倾覆型
CT-S-JRS	同一岩性组成，次级节理发育，岩层产状与坡面相反	节理面发生拉裂破坏，岩层面发生剪切破坏，边坡中上部岩体破坏严重呈碎块状	坡顶岩体震碎-坡体内部拉剪破坏-崩落型
CT-S-LRS	软岩或硬岩组成，岩层产状与坡面相反	硬岩边坡上部岩层面松弛错动，岩层逐渐倾覆，下部发生剪切弯折破坏；软岩顶部发生拉裂破坏，临空面岩层向下弯曲变形，下部出现平滑剪切面；软岩边坡较硬岩边坡变形破坏严重	坡顶硬岩层弯曲错动-坡体中下部岩层剪切弯折-滑移倾覆型；坡顶软岩层弯曲拉裂-坡体中下部岩层平缓剪出-滑移型
CT-C-SRS	软岩和硬岩互层，岩层产状与坡面相同	边坡上部硬岩岩层面松弛错动，岩层逐渐倾覆弯折，下部软岩层或软弱夹层处被挤压发生剪切破坏；薄软弱夹层边坡较厚软弱夹层边坡变形破坏严重	坡顶岩层弯曲错动-坡体内部岩层剪切弯折-坡体下部软岩层或软弱夹层挤压剪切-滑移倾覆型
CT-C-WRS	厚硬岩层和薄软弱夹层组成，岩层产状与坡面相同		

注：CT 表示反倾层状岩质边坡；C 表示软硬组合层状岩质边坡。

2.3.1 单一岩性型

在层面控制型边坡研究方面，刘云鹏等^[71]通过物理模拟试验揭示了反倾边坡的渐进破坏过程，包括岩体松动碎裂、后缘坡肩拉裂、裂缝扩展与变形累积、前缘坡脚鼓出、最终形成抛起式溃滑剪出。杨国香等^[72]的试验研究表明，地震作用下反倾边坡的破坏始于坡顶结构面张开，随后浅层结构面逐步扩展，伴随块体剪断现象，最终导致中上部岩体松动并形成顺坡向弧形贯通裂缝。在此基础上，Yang 等^[73]进一步系统总结了反倾边坡的 4 种典型破坏模式：岩层面错动松弛、岩体倾覆破坏、剪切滑动面形成以及坡面大规模浅层破坏。江兴元^[74]基于大量

震害调查指出，地震作用下反倾层状岩质边坡主要呈现弯曲-拉裂和弯曲-倾覆两种破坏形式。Ning 等^[75]综合振动台试验和 UDEC 数值分析发现，边坡角和地层倾角均与稳定性呈负相关，并将反倾边坡倾覆破坏过程划分为 4 个阶段：地层拉伸裂缝发展、坡顶拉裂形成、倾覆区发育、完全破坏。Song 等^[76]采用 ABAQUS 有限元分析表明，反倾边坡表层块体随局部破坏累积逐步形成，在持续地震作用下最终沿顶层结构面滑动失稳。Liu 等^[77]结合振动台试验和 FLAC^{3D} 数值模拟发现，强震条件下反倾边坡破坏主要表现为剪切裂缝扩展、张拉裂缝扩展及阶梯式裂缝发育，最终导致倾覆-滑动复合破坏。Xin

等^[78]通过对比试验发现,相较于反倾边坡,顺倾边坡表现出更强的能量集中与释放特性,地震动响应更为剧烈,失稳风险显著增高。上述研究表明,反倾岩质边坡地震作用下的变形破坏受层面力学性质、层面倾角、边坡倾角影响最大。图 7(a)显示地震作用下反倾层状岩质边坡内部岩层间首先发生弯折错动破坏,岩层在地震力和重力作用下逐渐向临空面倾斜,进而导致岩层内部发生拉伸破坏,且逐渐贯通成滑动面,加剧了岩层倾倒,最终使得岩层岩体以崩落形式破坏。

在岩性与节理控制型边坡研究方面,侯伟龙^[47]通过大型振动台试验对比研究了硬岩与软岩反倾边坡的破坏特征,发现硬岩边坡沿节理面和层面呈现“折线形”破坏模式,而软岩边坡则表现为上部岩体向临空面的弯曲拉裂变形。Huang 等^[79]的试验研究进一步揭示,反倾硬岩边坡主要表现为后缘垂直拉裂与中下部平缓剪出的复合失稳,反倾软岩边坡则呈现坡顶拉裂与下部剪出的破坏特征。Li 等^[46]通过模型试验发现,随着地震强度增大,陡倾边坡内部次生节理持续发育并贯通形成滑动面,最终导致岩层发生倾斜断裂变形。冯细霞^[52]针对含正交节

理的反倾边坡开展振动台试验,指出层面拉破坏与节理面剪切破坏是导致反倾边坡失稳的主要机制。刘蕾等^[80]采用 FLAC/PFC2D 耦合数值模拟发现,地震作用下反倾边坡顶部以拉张破坏为主,坡内层面发生剪切破坏,而底部次级节理则表现为拉剪复合破坏,这种多模式破坏共同加速了滑动面的形成与发展。李祥龙等^[81]的离心机试验研究表明,无次级节理的边坡破坏始于坡脚并向后扩展形成弯折破坏,而含次级节理的边坡则从中后部开始向坡脚发展,形成倾角更大的台阶状贯通破坏面。上述研究表明,岩体强度和节理发育特征显著影响反倾岩质边坡在地震作用下的变形破坏模式。图 7(a)、7(b)分别展示了硬岩和软岩边坡的典型破坏特征,其中软岩边坡上部岩层主要表现为塌陷拉裂破坏,同时岩层内部产生剪切破坏,最终张拉裂隙与剪切面贯通形成滑动面,在重力和地震力共同作用下发生倾倒滑移,临空面岩体呈现明显弯曲变形特征。图 7(c)为节理控制型边坡破坏模式示意图,显示当反倾边坡内部节理发育时,地震作用下中上部岩体易沿层面和节理发生严重破碎,最终多以块状崩落形式失稳。

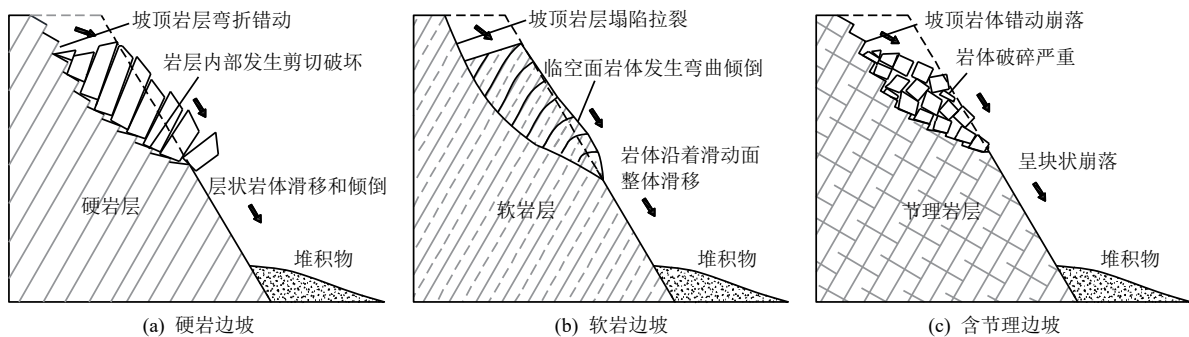


图 7 岩性与节理控制型反倾岩质边坡动力破坏示意图

Fig.7 Schematic diagrams of dynamic failure of counter-tilted rock slope controlled by lithology and joints

2.3.2 软硬岩组复合型

在软岩与软弱夹层控制型边坡研究方面,刘云鹏等^[82]运用 UDEC 离散元方法系统分析了软硬互层反倾边坡的地震响应机制,发现软弱岩层在地震作用下表现出显著的挤压变形特征,并呈现向临空面剪出的趋势。Zhi 等^[83]通过振动台模型试验研究指出,反倾边坡中的软弱夹层主要发生挤压变形。杨峥^[84]基于大型振动台试验揭示了含反倾软弱夹层边坡的动力破坏特征,表现为典型的“震裂-散体崩落型”破坏模式。刘汉香等^[85]通过对比试验研究发现,软弱夹层厚度显著影响边坡的破坏特征,薄

夹层模型的破坏程度明显高于厚夹层模型。范刚等^[86]建立了多软弱夹层反倾边坡振动台模型,观察到边坡动力破坏主要表现为交错分布的水平与垂直裂缝、软弱夹层挤压变形以及坡顶岩体破碎。Gu 等^[87]针对上硬下软型反倾边坡的试验研究表明,此类边坡的失稳模式主要为弯曲-剪切滑移复合型破坏。上述研究表明,地震作用下软岩和软弱夹层会显著加剧反倾边坡的动力响应与破坏程度。岩层间相互挤压作用导致岩体内部产生剪切破坏,裂隙贯通形成滑动面,最终在坡体中下部发生剪出滑移失稳(见图 8(a))。值得注意的是,软弱夹层厚度对边坡动力

响应和破坏模式具有重要影响。与厚软弱夹层相比，薄软弱夹层边坡破坏更为严重，这主要因为厚软弱夹层能有效消耗地震波能量。在重力和地震力共同

作用下，薄软弱夹层因强度较低多发生剪切破坏（见图 8(b)），而厚软弱夹层则主要表现为挤出弯曲变形（见图 8(c)）。

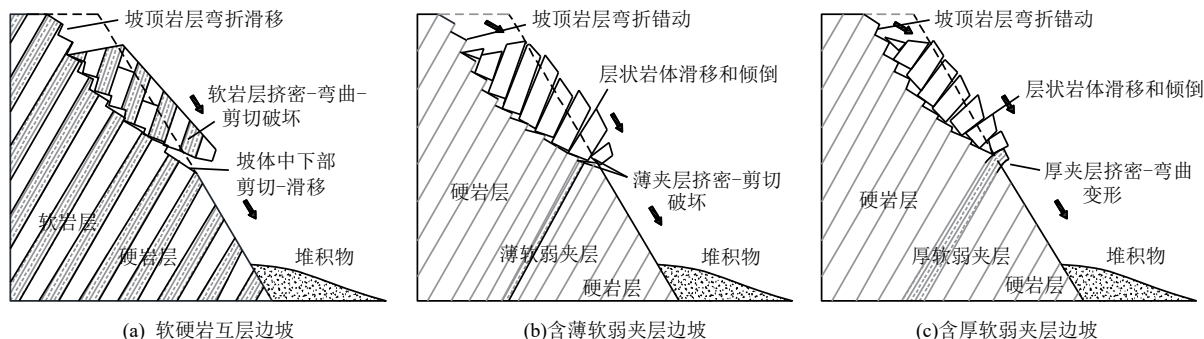


图 8 软弱夹层控制型反倾岩质边坡动力破坏示意图

Fig.8 Schematic diagrams of dynamic failure of counter-tilted rock slope controlled by soft rock and weak interlayers

综上所述，基于前人对层状岩质边坡的现场调查、模型试验及数值计算等研究，本文总结了层面、岩性、节理、软岩和软弱夹层等关键控制因素影响下，水平、顺倾及反倾层状岩质边坡在动力作用下的变形破坏特征与典型破坏模式：节理发育边坡易沿优势节理面发生平面滑动或楔形体破坏；层面控制型边坡多表现为沿层面滑动或溃屈破坏；岩性差异导致硬岩张裂崩塌与软岩挤出滑移的复合破坏；软岩边坡因强度低易产生塑流变形或整体滑移；而软弱夹层则易成为滑动通道，引发沿夹层滑动或挤出破坏。

此外，不同研究对比结果显示在同一控制因素类型（如软弱夹层控制型）的层状岩质边坡中，其失稳特征存在差异。造成这一现象的主要原因在于不同文献在方法学上的差异，具体包括①试验方法不同：部分研究采用振动台试验模拟地震动力作用，而另一些则采用离心振动试验，不同试验设备的加载方式、边界条件及相似比可能影响边坡的动力响应和破坏；②数值模拟方法不同：有限元法、离散元法、有限差分法及非连续变形分析等数值方法的适用性各异，其本构模型、接触算法及边界条件的设定均可能导致模拟结果出现偏差；③模型简化方式不同：部分研究对实际边坡的几何形态、岩层分布及结构面特征进行了不同程度的简化，如忽略次要节理或假设岩体为均质材料，这些简化可能影响边坡失稳机制的再现。因此，虽然本文基于主要控制因素对层状岩质边坡进行了系统分类，但由于不同文献采用的研究方法各异，所建立的边坡物理模

型和数值模型存在显著差异。加之主要控制因素（如节理面特性、层面强度参数、软岩和软弱夹层的物理力学性质等）本身具有不确定性，导致同一类型层状岩质边坡的动力失稳特征可能表现出差异。尽管如此，本研究通过系统梳理强震作用下层状岩质边坡失稳破坏过程中的共性特征，揭示了其内在的破坏规律，为工程实践中的边坡稳定性评价和抗震设计提供了理论依据。未来研究应着重关注控制因素的量化表征和标准化试验方法的建立，以进一步提高研究成果的可靠性和适用性。

3 支护结构类型概述

基于对岩质边坡动力变形破坏特征的分析，学者们进一步开展了针对支护结构加固边坡的研究工作。本节主要对传统支护结构进行分类概述，包括单一支护结构和组合支护结构。

在单一支护结构研究方面，叶海林等^[88-89]基于振动台试验技术，研究了锚杆和锚索加固岩质边坡动力特性。罗渝等^[90]利用 ANSYS 有限元软件，深入探讨了地震作用下桩和坡体相互作用机制。文畅平等^[91]通过大型振动台试验，对比分析了不同激振方式下重力式挡墙与桩板式挡墙加固边坡的动力变形特性。文畅平等^[92]还采用振动台模型试验，系统研究了桩板式挡墙在地震作用下的加速度响应、动位移特征及动土压力分布规律。曲宏略等^[93]基于振动台试验，对比研究了桩板墙在地震作用下的结构受力特性、加固机制及抗震性能差异。Li 等^[94]通过数值模拟方法，建立了单排抗滑桩加固顺倾层状岩

质边坡模型，重点分析了地震波频率、振幅及持续时间对抗滑桩力学特性的影响规律。上述研究表明，

既有单一支护结构按其组成及结构特征可分为锚杆、锚索、抗滑桩和挡墙等类型（见图9）。

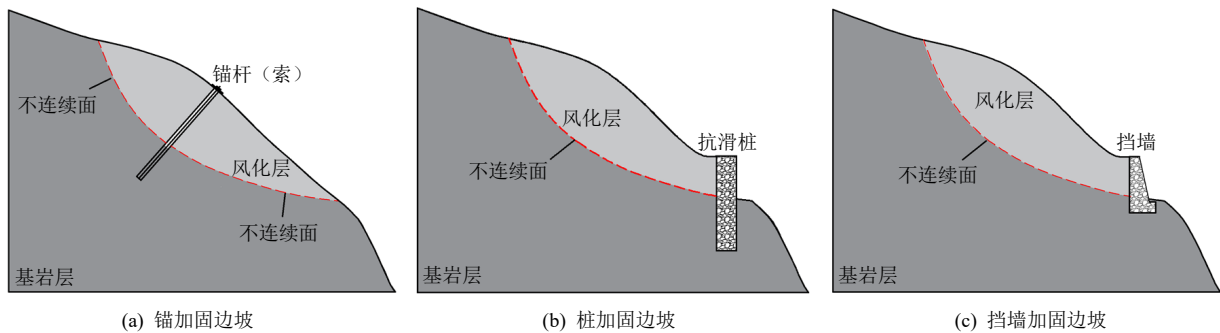


图9 单一支护结构加固边坡示意图

Fig.9 Schematic diagrams of slope reinforcement with a single supporting structure

在组合支护结构研究方面，刘昌清^[95]、赖杰^[96]等采用大型振动台试验，系统分析了双排桩支护结构在不同地震动参数下控制边坡动力响应及抑制岩土体滑移的效能。李乾坤^[97]、李楠^[98]、郑静^[99]等通过振动台试验，重点研究了微型桩群桩结构对边坡抗震性能的改善作用。陈行等^[100]运用 MIDAS/GTS 软件，对比分析了直线型、弧形及反向弧形连系梁抗滑桩的加固效果差异。刁钰等^[101]通过模型试验与 Plaxis 数值模拟，揭示了斜-竖直交替组合桩与单排抗滑桩的力学性能差异。肖世国^[102]、刘新荣^[103]等通过模型试验阐明了 h 型抗滑桩的加固机制。付晓^[104]、任祥^[105]等基于振动台试验，定量分析了锚索框架梁加固边坡的地震加速度响应特征及锚杆受力规律。曲宏略^[106]、Ma^[107]和 Lian^[108]等通过预应力锚索桩板墙振动台试验，系统比较了锚拉桩与单一抗滑桩的加固效果，并探讨了锚索对桩体受力变形的影响机制。王壮^[109]、Huang^[110]和 Chen^[111]等分别采用 GeoStudio 数值模拟和振动台试验方法，研究了锚

索抗滑桩在地震作用下的动力响应特性。付晓^[112]、Fan^[113]等通过大型振动台试验，揭示了多级锚索框架梁与双排抗滑桩组合结构的动力响应规律。Lin 等^[114-115]结合 FLAC3D 数值模拟与振动台试验，研究了锚固框架梁+板桩墙与锚索框架+重力式挡墙体系的抗震性能。上述研究表明，既有组合支护结构按照其组成及结构特点，可分为锚+框架梁、复合抗滑桩、锚+抗滑桩、锚+挡墙、锚+框架梁+抗滑桩、锚+框架梁+挡墙等组合支护体系（见图 10 和表 4）。

综上所述，单一支护结构凭借其受力机制明确、施工便捷、计算方法成熟及工程实践经验丰富等优势，在边坡加固工程中得到了广泛应用。然而，由于其结构形式简单、功能单一，在强震荷载作用下往往表现出抗变形能力不足、易发生局部破坏甚至整体失稳等问题，难以满足高烈度地震区的工程需求。为此，在实际边坡加固工程中，尤其是面临复杂地质条件或高地震风险区域时，工程界通常采

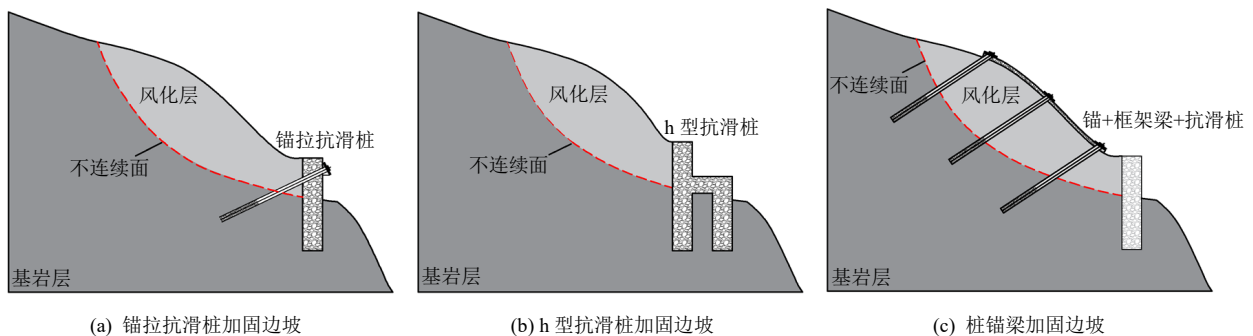


图10 组合支护结构加固边坡示意图

Fig.10 Schematic diagram of slope reinforcement with combined supporting structure

表 4 支护结构类型、组成及特点
Table 4 Classification, composition and characteristic of support structures

支护结构分类			支护结构组成	支护结构特点
结构类型	具体名称	缩写		
单一支护结构	锚	A	锚杆或锚索、锚墩	依靠自身材料弹性变形和结构变形提供抗拉力，从而提高岩土体承载力，锚索支护效果优于锚杆
	抗滑桩	P	单排抗滑桩	多根抗滑桩呈单排分布，桩间无连接，依靠自身抗弯折力强度阻止岩土体滑动
	挡墙	W	连续墙体 抗滑桩、桩间板	重力式挡墙依靠墙体自重抵挡岩土体滑动，桩板式挡墙依靠抗滑桩与桩板共同阻止岩土体变形
	锚+梁	AB	锚杆（索）、框架梁	以坡面框架梁为平台，通过预应力锚杆或锚索对边坡岩土体进行锚固
组合支护结构	复合抗滑桩	CP	多排抗滑桩 抗滑桩、连系梁	通过改变抗滑桩数量、空间排布方式及桩间连接梁形式，增强抗滑桩间的联系，提高支护结构整体性
	锚+桩	AP	锚杆（索）、抗滑桩	通过锚杆或锚索对桩或挡墙施加预应力，增大桩和挡墙的支护力，防止其倾斜变形
	锚+挡墙	AW	锚杆（索）、挡墙	
	锚+梁+桩	ABP	锚杆（索）、框架梁、抗滑桩	通过锚和框架梁对边坡坡面及内部进行支护，及抗滑桩或锚拉抗滑桩对边坡坡脚及内部进行支护
	锚+梁+挡墙	ABW	锚杆（索）、框架梁、挡墙	通过锚和框架梁对边坡坡面及内部进行支护，通过挡墙或锚拉挡墙对边坡坡脚及内部进行支护

注：A 表示锚杆（索）；P 表示抗滑桩；W 表示挡墙；AB 表示锚杆（索）+框架梁组合结构；CP 表示复合抗滑桩组合结构；AP 表示锚杆（索）+抗滑桩组合结构；AW 表示锚杆（索）+挡墙组合结构；ABP 表示锚杆（索）+框架梁+抗滑桩组合结构；ABW 表示锚杆（索）+框架梁+挡墙组合结构。

用由多种单一支护结构协同组成的组合支护体系。这种组合支护体系能够充分发挥不同支护结构的力学特性（如桩的深部抗滑能力、锚索的主动加固效应及挡墙的坡脚防护作用），实现优势互补，从而显著提升边坡的整体稳定性和抗震性能。然而，需要指出的是，尽管组合支护结构在抗震性能、安全冗余度等方面具有显著优势，但由于涉及多种支护形式的协同工作（如刚度匹配、变形协调及动力耦合效应），其在地震下的相互作用机制仍存在诸多不确定性。例如，不同支护构件之间的动力响应差异、能量耗散分配规律以及潜在失效模式等问题尚未得到充分揭示，这在一定程度上制约了组合支护体系的优化设计与工程应用。

此外，本文通过系统梳理国内外关于边坡支护结构的研究文献，还发现各类支护结构在适用条件及环境方面呈现出明显的共性特征。从岩土工程地质条件来看，现有研究主要聚焦于 3 类典型边坡：强风化岩质边坡（如花岗岩、泥岩等风化程度较高的岩体）、土质边坡（包括黏性土、砂性土及碎石土等）以及层状岩质边坡（如灰岩、砂岩等具有明显层理结构的岩体）。这 3 类边坡代表了工程实践中常见的失稳风险较高的边坡类型。在动力荷载环境方面，现有研究主要考虑了以下几种典型工况，①地震波类型：既包含实际地震记录（如汶川波、El Centro 波、TAFT 波、Kobe 波等具有代表性的强震记录），也包含人工合成地震波；②地震强度范围：峰值加速度 PGA（peak ground acceleration）多

集中在 0.10g~1.00g 之间，这一区间基本涵盖了从设计基准地震到罕遇地震的工程需求；③激振方向：主要考虑水平向（X 向）、竖向（Z 向）以及双向（XZ 向）激振，其中双向激振更符合实际地震作用特征。值得注意的是，虽然不同研究采用的支护结构形式各异（如锚杆、抗滑桩、挡土墙等），但其适用条件与环境参数的选择却表现出高度的一致性。这种共性特征一方面反映了工程实践中边坡支护的关键控制因素，另一方面也体现了学者们对重要工程问题的共识。这为后续对比分析不同支护结构加固机制奠定了基础。

4 支护结构加固机制分析

岩质边坡中支护结构加固机制不仅受岩土体性质影响，还与支护结构自身力学性质有关。为充分地发挥不同支护结构的力学作用，达到最优的加固效果，学者们基于现场调查、理论分析、室内试验和数值计算方法，研究了地震作用下不同支护结构加固边坡的力学响应规律。基于此，本节围绕几类常见支护结构，总结了锚、桩、墙及组合结构的加固机制。

4.1 锚杆（索）加固机制

在锚杆（索）加固机制研究方面，叶海林等^[116]运用 FLAC3D 软件研究发现，地震作用下锚杆首先因轴力超限屈服，随后滑体大变形导致软弱结构面处锚杆承受显著剪切作用。Mortazavi 等^[117]通过 FLAC3D 模拟 3 种全黏结锚杆动力响应，证实屈服

型锚杆能有效吸收地震能量,是控制岩体变形的最优选择。姚婕等^[118]基于 ANSYS3D 建立的边坡模型表明:锚杆抗震效果显著,顶部锚杆应力大于下层,边缘锚杆受力较中部更大,单根锚杆应力呈滑面处最大并向两侧递减的分布特征。武志信^[119]、王秋懿^[120]等的试验研究表明,纤维复合材料锚杆不仅抗拉强度高,能有效抑制边坡加速度放大效应,其耐腐蚀性还可确保长期支护效果。言志信等^[121]通过软弱层顺倾岩体边坡试验发现,地震作用下锚固系统呈现砂浆先变形传力,继而与锚杆、岩体协同工作的力学响应。陈艺文^[122]的 FLAC3D 模拟揭示,耗能锚索通过高强让压环簧结构的塑性变形有效耗散地震能量。Long 等^[123]的模型试验表明,软弱夹层处锚索-灌浆界面和灌浆-岩石界面的剪切效应与边坡地震响应呈正相关性。Nie 等^[124]的离心试验证实,锚索能显著降低边坡加速度放大效应,且结构

面处锚索在地震中受力更为突出。

综上所述,地震作用下锚杆(索)结构依靠自身的抗拉拔性和抗剪切性等特点对边坡进行加固。如图 11 所示,地震导致边坡内部不连续面贯通形成滑动面,在地震力和岩土体自重重力作用下,岩土体发生滑动,进而导致锚杆(索)承受拉拔力和剪切力,锚固段承受剪切力;随着边坡滑动位移增大,锚杆(索)自由段可能发生拉断、剪断等破坏,锚固段可能发生锚索被拔出、锚固剂及其与围岩界面处剪切破坏。由此可见,锚杆(索)的加固机制具体表现在 3 个方面:锚杆(索)的锚固段与岩土体可通过锚固剂稳定连接,三者协同变形防止锚杆(索)被拔出;锚杆(索)通过结构或材料变形吸收地震波,防止岩土体发生大变形破裂;当锚杆(索)穿过大型断层、软弱夹层、节理裂隙、层理面等不连续面时,其抗剪切特性可防止地震作用下岩层滑动。

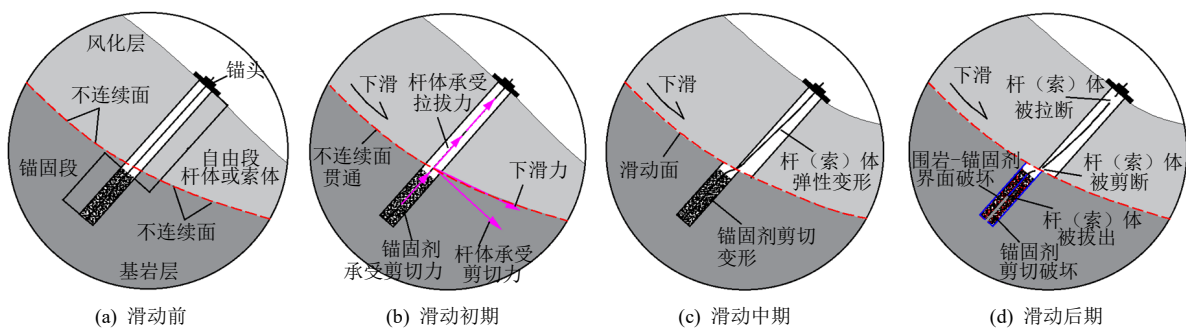


图 11 锚杆(索)支护结构加固边坡的作用过程机制

Fig.11 Mechanism of anchor bolt (cable) reinforcement in slope stabilization

4.2 抗滑桩加固机制

在抗滑桩加固机制研究方面,吴永等^[125]基于极限分析上限定理指出,地震时抗滑桩失效是在特定方向和强度的地震反复作用下损伤间断性累积的结果。张建经等^[126]采用有限元分析方法发现,随着抗滑桩的埋深增大,桩身位移沿桩顶向桩底减小,动土压力仅在滑面处出现较大变化。许江波等^[127-128]通过 FLAC2D 数值模拟与振动台试验,揭示埋入式抗滑桩可显著抑制边坡变形位移,其桩体最大剪力与弯矩集中分布于滑带-滑床接触界面。姚爱军等^[129]基于模型试验阐明,悬臂抗滑桩加固边坡中加速度响应呈自基底向坡顶递增特征,坡顶放大系数达峰值,其加固效应与桩间土拱效应协同抑制邻近土体动力响应,且桩身弯矩分布呈现非线性衰减规律。赖杰等^[130]基于振动台试验与 FLAC2D 数值模拟联合研究揭示,埋入式抗滑桩前后土压力呈非线性拱形分布(上部递减、下部递增),地震烈度增强

诱发边坡经历张拉-剪切复合破坏机制,最终演化为后缘贯通式破坏。孙文^[131]运用 MIDAS/GTS 构建顺倾岩质边坡数值模型,证实抗滑桩可显著抑制坡表位移及结构面错动。黄士奎等^[132]通过 FLAC3D 动力分析表明:桩体剪力和弯矩时程演化均呈现出先增大后趋于稳定的特征,桩身剪力呈倒 S 型,弯矩呈 S 型。Qu 等^[133]借助 ANSYS3D 建立桩-土耦合数值模型,发现抗滑桩抗震性能存在 4 阶段演化规律:弹性承载、截面塑性区渐进扩展、塑性铰链形成、整体截面失效。

综上所述,地震作用下抗滑桩结构依靠自身的抗弯折性和抗剪切性等特点对边坡进行加固。如图 12 所示,地震导致边坡内部不连续面贯通形成滑动面,在地震力和岩土体自重重力作用下,岩土体发生滑动,进而导致抗滑桩承受岩土体推力和滑面剪切力;随着边坡滑动位移增大,抗滑桩可能发生较大弯曲变形、倾斜位移、剪切破坏及越顶破坏等问

题。由此可见，抗滑桩在地震作用下的加固机制具体表现在：抗滑桩依靠自身结构的抗弯折性和抗剪切性，阻止潜在滑动面、软弱夹层、结构面等位置的岩土体变形破裂，进而有效降低边坡地震动响应，减小边坡位移。

4.3 组合结构加固机制

相比锚杆、锚索、挡土墙、抗滑桩等单一支护

结构，组合锚固结构具有种类多、加固效果好、加固机制复杂等特点。表 5 为几类典型组合支护结构加固机制及适用岩质边坡类型，本文通过分析既有研究中的锚杆（索）+框架梁、复合抗滑桩、锚杆（索）+抗滑桩、锚杆（索）+框架梁+抗滑桩、锚杆（索）+框架梁+挡墙等几种常见组合结构特征。

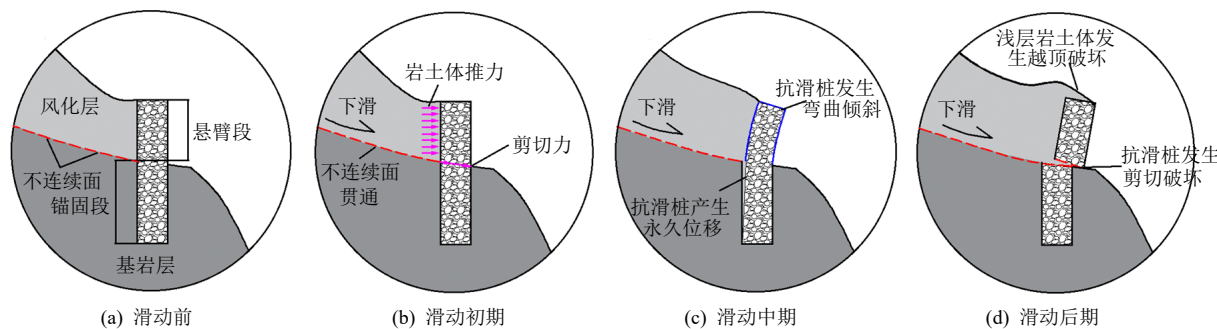


图 12 抗滑桩支护结构加固边坡的作用过程机制
Fig.12 Mechanism of anti-slide pile reinforcement in slope stabilization

表 5 典型组合支护结构的加固机制

Table 5 Reinforcement mechanism of typical combined-support structures

结构类型	支护结构与岩土体的相互作用机制	适用层状岩质边坡类型
AB	依靠锚杆（索）与外部框架梁协同受力，增强岩土体的整体性，减弱边坡地震动响应，降低坡体上部临空面岩体破碎程度	适用于强震作用下坡体上部易拉裂且坡面破碎的节理和层面控制型岩质边坡（JRS、L _r RS）
CP	复合抗滑桩组合结构间协同受力，降低边坡地震动响应，阻止坡体下部结构面、层面、软弱夹层破坏贯通滑动	适用于强震作用下易沿着潜在滑动面破坏且滑体较为完整的软岩和软弱夹层控制型岩质边坡（SRS、WRS）
AP	依靠预应力锚索，改变抗滑桩的支护形式为主动支护，减小边坡内部结构面、软弱夹层变形破坏，阻止坡体下部滑动	适用于强震作用下极易沿着深部潜在滑动面破坏且滑体较为完整的层面、软岩和软弱夹层控制型岩质边坡（L _r RS、SRS、WRS）
AW	依靠预应力锚索，减小边坡内部结构面、软弱夹层变形破坏，阻止坡体下部滑动，防止坡体下部岩土体破碎崩落	适用于强震作用下坡体下部浅层地表完整性较差的岩性、节理和软岩控制型岩质边坡（LRS、JRS、WRS）
ABP	依靠锚杆（索）框架梁和锚拉桩或抗滑桩，增强岩土体的整体性，降低坡体上部临空面岩体破碎程度，阻止坡体内部结构面、软弱夹层破坏贯通-向下滑动	适用于强震作用下坡体上部易拉裂且坡面破碎、坡体下部极易沿着深部潜在滑动面破坏且滑体较为完整的岩质边坡（LRS、L _r RS、SRS、WRS）
ABW	依靠锚杆（索）框架梁降低坡体上部临空面及内部岩体破碎程度，依靠锚拉挡墙或挡墙减小边坡下部变形破坏，阻止坡体内部结构面、软弱夹层破坏贯通、下部岩土体破碎崩落滑动	适用于强震作用下坡体上部易拉裂、坡面破碎且坡体下部浅层地表完整性较差的岩质边坡（JRS、LRS、SRS、WRS）

锚杆（索）+框架梁组合结构增强了锚索之间的联系，且可避免由于锚头处岩体动力破碎导致锚索预应力损失甚至失效问题；另一方面，该组合支护结构在地震作用下可与岩土体产生协同变形，吸收地震波能量，使得岩土体的整体性增强，从而有效减弱边坡地震动响应，阻止岩土体破裂滑动。付晓等^[104]基于振动台试验揭示锚索框架梁体系协同承载机制：地震作用下锚索群呈现应力重分布特征，预应力损失呈现迁移演化规律。任祥等^[105]通过振动台模型证实，随着地震强度增大，锚杆主动抗震抗

滑特性增强，各层锚杆受力情况发生了调整。杨果林等^[134]通过试验对比汶川波作用下两种支护体系位移模式：锚杆格构式框架以剪切滑移为主，而预应力锚索体系表现出弯剪耦合特征，证实了预应力体系具有更优的位移协调能力。郝建斌等^[135]发现锚杆格构梁轴力由上至下呈现波动特征，说明锚杆加固对边坡竖向变形影响较大。叶帅华等^[136]运用 GeoStudio 建立多级边坡动力耦合模型，发现预应力锚杆的自由段与锚固段轴力均随地震持时波动性变化，自由段轴力较大，锚固段轴力沿远离自由段

方向递减。Zhang 等^[137]通过试验发现, 预应力锚索框架梁加固边坡呈阶段破坏: 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。

复合抗滑桩组合结构增强了抗滑桩之间的联系, 使其在地震作用时可协同受力, 防止桩间岩土体发生动力剪切破坏; 另一方面, 该组合结构充分利用桩间岩土体, 形成桩-岩土体-桩形式的共同支护体, 可有效降低边坡地震动响应。陶云辉^[138]、曲宏略等^[139]通过数值模拟与模型试验, 揭示了地震作用下桩板式挡墙结构的受力特性, 证实其具备优异抗震性能。李楠等^[98]基于振动台试验发现, 微型桩群桩支护体系不仅能提升滑坡抗震性能, 且对滑坡体地震波传播具有阻滞效应, 特别是坡脚附近岩土体。陈行等^[100]采用 MIDAS/GTS 建立直线型、弧形及反向弧形排布形式的抗滑桩连系梁加固边坡三维模型, 研究表明弧形排布抗滑桩的抗震加固效能优于其余两种形式。刁钰等^[101]结合室内模型试验与 Plaxis 数值分析, 发现斜-竖直交替组合桩在抑制位移及增强边坡稳定性方面较单排竖直桩更具优势。刘昌清等^[95, 140]通过大型振动台试验对比单、双排桩支护体系的动力响应特征, 结果表明双排桩在强震区高边坡中可显著降低地震动响应并有效抑制岩土体滑动。赖杰等^[96, 141]进一步通过振动台试验对比双排桩与单排桩支护边坡的抗震性能, 基于试验现象、加速度放大系数、相对峰值位移、累积位移及破坏模式的系统分析, 验证了双排抗滑桩的卓越抗震效果。

锚杆(索)+抗滑桩/挡墙组合结构增强了锚和桩之间的联系。一方面, 该组合结构改善了抗滑桩支护形式, 通过预应力锚索对抗滑桩施加预应力, 由传统的被动支护变为主动支护; 另一方面, 该组合结构地震作用下具有协同受力特性, 通过锚索将抗滑桩与深部岩土体锚固成为一个整体, 不仅扩大了抗滑桩支护范围, 而且使得岩土体的整体性增强, 可有效降低边坡地震动效应, 并减小自身永久位移。曲宏略等^[106]通过振动台试验研究预应力锚索桩板式挡墙的地震响应, 发现锚索安装可有效约束桩体变形, 同时促使桩板结构对土体产生主动反压效应, 导致桩背土压力增幅显著提升。Ma 等^[107]采用大型振动台试验对比不同振动强度下抗滑桩与锚拉桩板墙加固边坡的动力响应, 证实锚拉桩体系较单一抗滑桩展现出更优的抗震性能。王壮等^[109]基于有限差分软件 FLAC2D 对比分析双排抗滑桩、锚索抗滑桩及连续桩键复合结构的抗震效果, 揭示锚索抗滑桩

通过提供高抗滑力抑制边坡滑移趋势, 其预应力施加可有效控制桩顶位移并增强桩体承载力。Huang 等^[110]利用 GeoStudio 对比无支护、抗滑桩、锚杆及锚拉桩加固边坡的动力响应, 表明锚拉桩具有最优抗震性能, 可实现坡体变形最小化、内力分布最优化及稳定性最大化。郑桐等^[142]基于离心模型试验开展锚索抗滑桩加固滑坡体研究, 证实桩体上部锚索可显著抑制坡体中心区域的加速度放大效应。冯帅^[143]、Pai^[144]、Wei^[145]等通过大型振动台试验发现, 采用多锚点优化的锚索抗滑桩既能解决锚头失效问题, 又可显著提升预应力锚索抗滑桩的抗震性能。丁选明等^[146]采用大型振动台试验研究工程水泥基复合(engineered cementitious composite, 简称 ECC)材料桩-消能锚韧性支挡结构动力特性发现, 阻尼器和 ECC 材料和联合作用显著改善了桩锚结构的抗震性能。

锚杆(索)+框架梁+抗滑桩组合结构体现了刚柔并济的支护特点, 提高了边坡的整体性, 使得边坡的自振频率增大, 进而减弱地震作用下边坡动力响应和变形破坏程度。Fan 等^[113]通过大型振动台试验对比双排抗滑桩与预应力锚索框架梁组合支护体系的动力响应特性, 证实该复合结构可显著抑制边坡加速度放大效应。叶海林等^[147]基于岩质边坡振动台模型试验发现, 悬臂抗滑桩联合坡面锚杆框架梁支护体系能够有效控制坡面累积相对位移, 表现出优异的抗震性能。付晓等^[148]针对高陡反倾层状岩质边坡开展振动台试验, 揭示抗滑桩-锚杆联合支护可削弱临空面加速度放大效应, 且分级支护策略虽能抑制水平向加速度放大系数的高程递增趋势, 但可能诱发不利的竖向响应。付晓等^[112, 149]通过原型边坡大型振动台试验发现, 多级锚索框架梁与双排抗滑桩组合结构在地震中可形成协同抗震机制, 显著提升整体稳定性。范刚等^[150]基于振动台试验分析单排抗滑桩加锚索框架梁组合支护体系, 表明组合支护体系可显著抑制边坡位移响应, 呈现由表及里逐层衰减的特征, 且边坡中部位移场具有显著的整体性。王德华等^[151]通过多级组合支护加固含软弱夹层岩质边坡的振动台试验发现, 随地震强度增大, 锚索轴力峰值呈线性增长, 而桩身弯矩呈非线性递增, 且软弱结构面处桩体变形尤为显著。陈建峰等^[152]采用 MIDAS/GTS 有限元程序建立抗滑桩-预应力锚索框架数值模型, 分析了桩锚结构内力变化以及荷载分担规律, 结果表明随着地震强度增大, 桩锚承担的荷载逐渐增大, 且抗滑桩分担的下滑力比例增大。

锚杆(索)+框架梁+挡墙组合结构集中了上述几种锚固结构的支护特点,体现了边坡“从外到内、从上到下”协同支护的理念。文畅平等^[9]通过大型振动台模型试验,研究了地震作用下锚杆格构式框架和预应力锚索格构式框架护坡位移模式及变化特性,并且分析了各支护结构的抗震性能。Lin 等^[153]通过振动台试验与数值模拟研究锚固框架梁-重力式挡墙支护陡坡的动力特性,发现锚固框架梁的非线性力学行为较重力式挡墙更为突出,其耗能机制对整体抗震性能提升具有关键作用。进一步地, Lin 等^[114]基于 FLAC3D 数值模拟对比分析了单一锚索框架结构与锚索框架+重力式挡墙组合结构在不同地震动幅值作用下的动力响应特征,数值模拟揭示土压力、变形及加速度响应具有显著差异性,建议高烈度区优先采用组合支护体系以实现最优抗震效果。Lin 等^[115]采用 FLAC3D 数值模拟与振动台试验相结合的方法,系统研究了汶川地震动参数下锚索框架梁+桩板式挡墙复合结构的动力响应。结果表明,相同地震作用下,桩板式挡墙背面土压力峰值随墙高增加呈递增趋势,而锚固框架梁后方土压力则呈递减规律。Qu 等^[154-155]运用 FLAC3D 系统研究了桩板式挡墙在不同地震作用下的位移响应与变形模式,深入揭示了桩-土体系动力耦合作用中惯性力传递与土体塑性区扩展的互馈机制。曲宏略等^[156]通过精细化数值模拟探讨预应力锚索桩板式挡墙的地震响应规律,证实锚索约束显著降低挡墙位移幅值,但导致锚固区附近墙后土压力出现局部应力集中现象。

综上所述,地震作用下边坡组合支护结构的加固机制主要体现在以下两个重要方面:首先,组合支护结构通过与坡体岩土体的紧密耦合作用,形成了一个具有高度整体性的抗震共同体。这种耦合作用不仅显著增强了坡体的结构完整性,更重要的是通过提高坡体的自振频率,有效降低了地震动对边坡的响应效应。具体而言,支护结构与岩土体的协同作用改变了边坡的动力特性,使其固有频率远离地震波的卓越频率范围,从而大幅减小了共振风险,提升了边坡的地震稳定性。其次,在强震作用下,各类支护构件(如锚杆(索)、框架梁、抗滑桩、挡土墙等)通过精心设计的连接构造,实现了协同变形和能量耗散。这种多级抗震耗能机制表现为:在中小地震时,各构件共同承担地震力;在强震作用下,各构件按照预先设计的屈服顺序依次进入塑性阶段,通过分级耗能来吸收地震能量。这种抗震理念,既保证了支护结构在常遇地震下的刚度需求,

又满足了强震下的韧性要求,实现了刚柔并济的抗震效果。

此外,本文通过分析各支护结构加固边坡的动力响应规律,还总结了支护结构与岩土体的相互作用机制。针对不同控制因素下的层状岩质边坡动力变形破坏特征,进一步提出了相应的组合支护结构选型建议,包括桩+锚+梁、挡墙+锚+梁等多种组合支护体系(见表 5)。需要特别指出的是,组合支护结构的抗震性能及机制是一个复杂的系统工程问题,其影响因素主要包括:①支护构件的空间布置形式,包括间距、排距、倾角等几何参数;②结构连接节点的协同工作性能,如锚固段的传力机制、桩-锚-梁节点的变形协调性等;③材料性能的时变特性,特别是循环荷载作用下的强度退化和刚度衰减现象;④岩土-结构相互作用效应,包括接触面的摩擦特性与能量耗散机制。鉴于此,在实际工程应用中,建议采用以下设计策略:基于场地地震危险性分析,确定合理的地震动参数;通过模型试验和数值模拟手段,评估不同支护方案的抗震效果;结合过程经济性和施工可行性,进行多方案比选;设置变形监测系统和应急加固措施,提升支护结构在全寿命周期内的可靠性和耐久性。

5 新型抗震支护结构研发

为了解决强震作用下锚索的拉断或拔出、锚固剂的剪切破坏、抗滑桩/挡土墙的倾斜和永久位移等问题,学者们在新型材料和新型结构用于提高支护结构的自身强度和协同受力特性等方面进行了尝试,提出了一系列新型抗震支护结构^[22, 157]。本节基于对岩质边坡地震动力变形破坏特征、传统支护结构类型及其加固机制的综合分析,从支护结构中的新型材料、结构及其作用机制的角度,总结了新型抗震支护结构的研发现状及存在的问题,展望了新型支护结构的研究方向。

5.1 新型锚杆(索)结构

在新型锚杆索支护结构研究方面,学者们采用一些具有特殊物理力学特性的材料和结构,如高强度金属、纤维、记忆合金、橡胶等材料,以及让压管、弹簧、阻尼器、滑移装置等结构,使得锚杆的抗拉拔和抗剪切特性得以增强,以此来解决锚杆和锚索加固边坡易发生动力失效的问题^[22]。何满潮等^[158]基于材料的负泊松比(negative poisson's ratio,简称 NPR)效应,研发出恒阻大变形锚杆,该锚杆具有动荷载下快速响应、高恒阻力、大变形量等特点。Tao^[159]、陶志刚^[160]、Dai^[161]等进一步开展边坡模型

试验,研究了 NPR 锚杆动力特性,结果表明, NPR 锚杆通过材料和恒阻装置结构的变形可实现分级让压,从而吸收边坡岩土体的变形能。Li^[162]结合静态拉伸试验和动力落锤试验,研究发现 D 型锚杆的设计可在整个长度上充分利用螺栓材料的强度和变形能力,具有较好的承载力和变形能力。Wu 等^[163]基于结构间的强摩擦性能,提出的一种由一根带有末端扩大头的光圆杆体和聚合物包裹体组成的剪切型大变形锚杆 Yield-Lok 锚杆,当拉力载荷超过设计极限值时,锚头在聚合物包壳内发生相对滑动,通过滑移摩擦来吸收和转移岩体变形能。王斌等^[164]基于动静组合支护原理,提出了一种动静组合型锚杆,该锚杆可有效解决岩体层表面开裂剥离造成现有锚杆托板悬空失效问题,在深部矿井的现场初步应用中取得了良好的防治效果。唐治等^[165]提出一种让位缓冲结构的吸能防冲锚杆,该锚杆能够适应冲击过程中围岩快速大变形的破坏特点,有效引导控制冲击能量的释放和转化,将高能量消耗在让位缓冲过程中,从而有效抵御冲击动载荷的影响,保证围岩和支护体系的稳定。赵文^[166]、杨书海^[167]等基于玄武岩纤维材料的高强抗拉特性,提出了一种玄武岩纤维筋材锚杆,该材料可增大锚固段杆体材料与锚固剂之间的摩擦性,进而提高锚杆的抗拔特性。Xu 等^[168]提出了一种自适应锚索 (adaptive anchor cable, 简称 AAC), 通过开展模型试验,研究了其在加固边坡中的荷载传递机制,结果表明 AAC 的滑动套筒消能装置自动调整其张力或变形,使其变形与岩土体的变形一致,从而在地震产生瞬间缓冲消能。如图 13(a)所示,涂兵雄等^[169]基于高强钢弹簧的力学特性,提出了一种可用于地震作用下岩质边坡支护的具有变形自恢复功能的让压锚杆,该锚杆在承受冲击荷载或地震作用时,通过高强钢弹簧的压缩能消耗冲击能,减小锚杆及支护结构的损伤,当地震波消散后,高强钢弹簧自动回弹伸长,锚头变形自恢复。陈峰等^[170]基于材料的正负泊松比效应,提出了一种正负泊松比相间的恒阻大变形竹节式锚杆,该锚杆具有屈服强度高、塑性变形量大、易膨胀等特性,可以保证岩土体的稳定性。如图 13(b)所示,杨逾等^[171]基于双向阻尼器工作原理,提出一种可用于边坡支护的抗震锚杆,该锚杆在瞬时地震力作用下,双向阻尼器瞬时受拉发生变形,减小地震力影响,地震力消失后,双向阻尼器释放能量恢复到正常使用状态,对坡面产生约束,起到很好的抗震消能作用。吴学震等^[172]基于加热可膨胀-气化材料膨胀特性,提出了一种地震后可主动修复的抗

震锚杆,当该锚杆锚固体在强震作用下碎裂破坏后,熔化的材料填充锚固剂破碎区,可防止地下水对锚杆杆体的侵蚀,有效增强锚固力。Gao 等^[173-174]基于弹簧结构的消能原理,提出了一种压缩自恢复型 (compression and self-recovery, 简称 C&S-R) 锚索,并开展了动力模型试验,验证了 C&S-R 锚索具有较好的抗震加固性能,可减少地震作用下边坡的内部损伤。如图 13(c)所示,赵飞等^[175-177]基于材料和结构的变形消能特性,提出一系列具有变形自复位的抗震锚杆,并验证了其具有良好的抗震性,解决了现有锚杆强震作用下杆体易屈服破坏,循环荷载下变形无法恢复等问题。

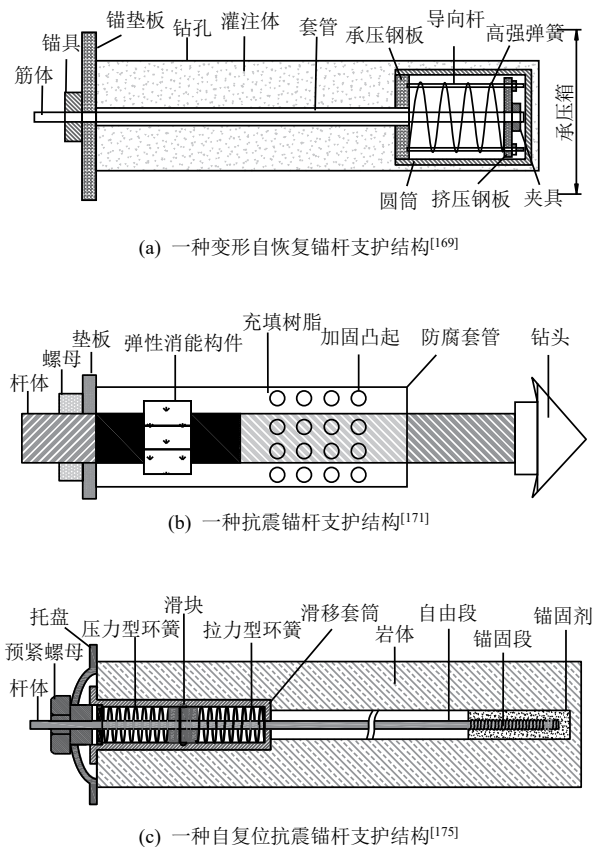


图 13 几类新型锚杆(索)结构示意图

Fig.13 Schematic diagrams of several new anchor structures

5.2 新型组合结构

在新型锚杆索支护结构研究方面对于抗滑桩,学者们通过改变其材料组成、组合结构、连接关系及空间分布形式来增强抗滑桩的抗弯折和抗剪切特性,使得抗滑桩间联系更加密切,从而提高抗滑桩与岩土体之间的协同变形性。李朝红等^[178]基于双肢加耗能连杆的组合结构形式,提出了一种双肢耗能

抗滑桩，该组合结构中主、副肢桩体及其耗能连杆系作为一个结构整体共同抵抗滑坡推力作用，从而提高抗滑桩的抗震性能。如图 14(a)所示，胡宏强等^[179]基于锚拉桩特点，提出一种适用于强震区的耗能减震型滑坡桩锚支护体系，该体系具有双重耗能减震机制，锚索减震装置及桩后缓震材料均可消耗地震能量。赵磊等^[180]基于一种形状记忆合金和阻尼器，研发了一种主动型边坡支护系统锚杆，该支护系统主要由支护网、主动型旋转阻尼装置和连接于支护网与主动型旋转阻尼装置之间的牵引绳组成，可对边坡崩塌岩土体进行安全防护。如图 14(b)所示，侯小强等^[181]基于 h 型抗滑桩结构特点，提出了一种 h 型斜横梁减震抗滑桩的建造方法，该方法通过解决斜横梁与短桩之间的连接问题，能够减小整个抗滑桩的位移、弯矩和剪力。马少坤等^[182]基于双

排抗滑桩结构特点，提出一种让位抗滑双排桩支护结构，该抗滑桩结构通过弧形排列的双排抗滑桩以及异形截面冠梁连接结构，提高了抗滑桩整体刚度，可很好地减缓下滑力对抗滑桩的冲击。如图 14(c)所示，赵飞等^[177, 183-184]基于双向阻尼器结构特点，提出一种新型抗震组合抗滑桩支护结构，该支护结构利用桩体与阻尼器之间的协同受力性能，有效减小单个桩体的永久变形和位移，提高了抗滑桩的抗滑、抗震性能，可保证抗滑桩提供稳定的支护功能。

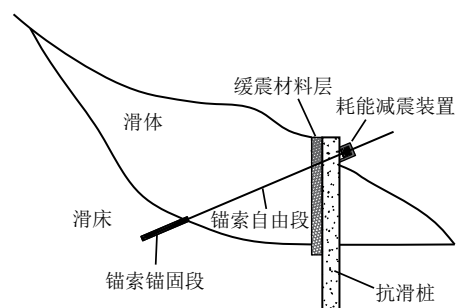
5.3 存在问题

既有新型支护结构在加固边坡上更多提供了承载力和消能功能，在静力作用下对边坡具有良好的加固效果。然而，地震荷载是一个瞬时或短时间的动荷载，其力学作用机制不同于静荷载，导致边坡岩体和支护结构在两种荷载作用下的力学响应及变形破坏特征存在显著差异^[20-21]。目前，既有新型支护结构依靠材料或结构的变形可有效消耗地震波能，然而在地震波消散后实现变形恢复方面还存在不足。这将导致该类型支护结构在多次往复性地震动荷载作用下变形或位移逐渐过大，以致无法对边坡继续提供支护力。同时，强震荷载发生时，要求新型支护结构具有快速响应、高抗冲击和良好的协同受力特性。目前，既有组合支护结构之间的连接结构多采用刚性结构连接，而采用柔性结构连接的研究成果相对较少，特别是在组合支护结构加固边坡的自振频率演化规律等研究方面仍是空白。最后，受技术手段、研究经费、工程应用对象等条件限制，大量新型抗震支护结构的动力特性和抗震机制尚不明确，特别是组合支护结构，其协同抗震机制和适用性还需要深入分析和验证。然而，组合支护结构的动力变形演化过程、失效模式及其抗震机制受地震动特性、岩体结构力学特性、界面滑移效应等多因素非线性耦合作用的显著影响，这导致传统力学模型在机制研究方面存在明显局限性。

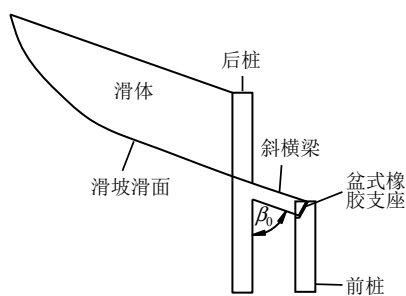
基于上述分析，在将来的研究工作中，针对新型支护结构的动力特性、性能优化及抗震机制的研究，可着重于以下几个方面：

(1) 新型支护结构动力特性研究

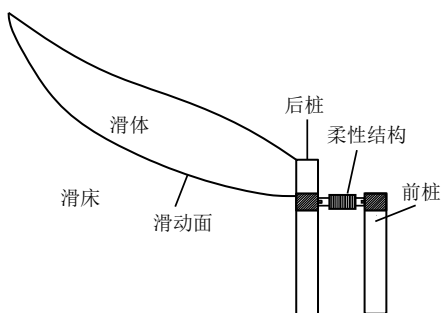
针对传统支护结构抗动力荷载作用效能偏低的问题，基于静力与动力荷载作用机制的显著差异，重点研发具有多阶段抗震功能的智能组合支护结构，实现静力承载-动力耗能-震后自复位等多功能集成：在静力阶段提供稳定支撑；在动力阶段通过特殊设计的耗能元件（如形状记忆合金、摩擦阻尼器等）有效吸收地震能量；在震后阶段利用预应力



(a) 一种抗震锚杆支护结构^[179]



(b) 一种耗能减震型滑坡桩锚支护结构^[181]



(c) 一种组合抗滑桩支护结构^[183]

图 14 几类新型抗滑桩结构示意图

Fig.14 Schematic diagram of several new anti-slide piles

技术或智能材料特性实现结构自复位。这种全周期抗震设计理念有望显著提升支护结构的抗震性能,有效控制震后残余变形,为边坡工程的全寿命周期抗震安全提供创新解决方案。

(2) 基于频率调控的支护结构性能优化研究

立足于强震作用下加固边坡动力响应及破坏特征,深入探究边坡自振频率的演化规律及其与支护结构的相互作用机制。通过构建“支护结构-边坡岩土体”动力耦合分析模型,研发具有自适应调频功能的智能支护系统。该系统能够实时监测边坡动力特性变化,通过主动或被动调控方式(如变刚度装置、质量调谐阻尼器等)动态匹配边坡自振频率,有效规避共振效应。这种基于频率优化的设计方法,有望从根本上改变传统抗震的理念,实现从“被动抗震”到“主动抗震”的技术跨越。

(3) 多源数据融合的协同抗震机制研究

针对新型组合支护结构抗震机制研究的复杂性,构建“监测-试验-模拟-算法”四位一体的研究方法体系。具体包括:①基于机器学习算法(如深度神经网络、随机森林等)建立多源数据融合分析模型,有效整合现场监测数据、室内动力模型试验结果和精细化数值模拟成果;②提出考虑支护结构-岩土体非线性相互作用的协同抗震理论,建立包含材料非线性、接触非线性和几何非线性的耦合分析模型;③通过数据驱动与理论分析相结合的方法,系统揭示强震荷载-岩体结构-桩锚支护体系的多尺度动力耦合机制,为新型支护结构的优化设计提供理论基础。

6 结论与展望

本文从层状岩质边坡动力失稳破坏特征、支护结构类型、支护结构加固机制、新型抗震支护结构等4个方面,评述了强震作用下岩质边坡加固问题研究进展,并对岩质边坡抗震支护结构未来的研究方向和研究工作重点进行了展望,主要得到以下结论:

(1) 层状岩质边坡动力变形破坏特征方面,基于既有层状岩质边坡现场调查、模型试验及数值计算研究结果,对层面、岩性、节理、软岩和软弱夹层控制型水平、顺倾及反倾层状岩质边坡在强震作用下的动力变形破坏特征及破坏模式进行了总结:节理发育边坡易沿优势节理面发生平面滑动或楔形体破坏;层面控制型边坡多表现为沿层面滑动或溃屈破坏;岩性差异导致硬岩张裂崩塌与软岩挤出滑移的复合破坏;软岩边坡因强度低易产生塑流变形

或整体滑移;而软弱夹层则成为滑动通道,引发沿夹层滑动或挤出破坏。实际震害中,这些因素往往相互耦合,形成更为复杂的复合破坏模式。

(2) 支护结构类型及加固机制方面,根据既有支护结构的组成、结构特点及加固机制,对其进行了分类概述,包括单一支护结构和组合支护结构。结合前人的研究成果,以锚杆(索)+框架梁、复合抗滑桩、锚杆(索)+抗滑桩、锚杆(索)+框架梁+抗滑桩、锚杆(索)+框架梁+挡墙等组合结构为例,对地震作用下支护结构加固边坡的作用机制进行了分析:锚杆(索)加固机制主要体现为其结构体系优异的抗拉拔性能和抗剪切承载能力;抗滑桩加固机制则突出表现为结构体卓越的抗弯折刚度与抗剪切强度;而组合支护结构的加固机制在于通过多级阻滑体系形成协同工作机制,显著提升整体结构的抗震性能。

(3) 新型抗震支护结构研究展望方面,从新型支护结构中的材料、结构及其作用机制的角度,总结了新型抗震支护结构的基本思路及研发现状;对新型支护结构研究方向进行了展望:动力特性上,同时考虑静动荷载作用差异,研发出兼具静力承载-动力耗能-震后自复位的新型支护结构;性能优化上,分析加固后层状岩质边坡自振频率演化特征,优化组合支护结构来降低边坡动力响应及破坏程度;抗震机制上,采用机器学习方法融合现场监测、室内试验及数值模拟等多源数据,提出协同抗震理论分析方法。

参考文献

- [1] 黄润秋,许强,裴向军,等.汶川地震地质灾害研究[M].上海:科学出版社,2009.
HUANG Run-qiu, XU Qiang, PEI Xiang-jun, et al. Geohazards assessment of the Wenchuan earthquake[M]. Shanghai: Science Press, 2009.
- [2] 许强,李为乐.汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J].工程地质学报,2010,18(6):818-826.
XU Qiang, LI Wei-le. Distribution of large-scale landslide induced by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 818-826.
- [3] 殷跃平,张永双,伍法权,等.汶川地震地质灾害调查成果与展望[J].中国地质调查,2014,1(1):1-9.
YIN Yue-ping, ZHANG Yong-shuang, WU Fa-quan, et al. Results and prospects of geological hazard investigation in Wenchuan earthquake[J]. *Geological Survey of China*, 2014, 1(1): 1-9.

- [4] 常祖峰, 常昊, 杨盛用, 等. 红石岩与甘家寨特大型地震崩滑体特征及其成因[J]. 地震地质, 2017, 39(5): 1030-1047.
CHANG Zu-feng, CHANG Hao, YANG Sheng-yong, et al. Characteristics and genesis of the landslide mass caused by the Hongshiyuan and Ganjiazhai mega earthquakes[J]. **Seismology and Geology**, 2017, 39(5): 1030-1047.
- [5] 张彦琪, 李西, 谢英情, 等. 以鲁甸地震和彝良地震为例分析云南昭通地质构造与地震灾害特点[J]. 地震研究, 2016, 39(2): 270-278.
ZHANG Yan-qi, LI Xi, XIE Ying-qing, et al. Taking the Ludian earthquake and Yiliang earthquake as examples to analyze the geological structure and seismic disaster characteristics of Zhaotong, Yunnan province[J]. **Journal of Seismological Research**, 2016, 39(2): 270-278.
- [6] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.
PENG Jian-bing, CUI Peng, ZHUANG Jian-qi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [7] 王通, 刘先峰, 袁胜洋, 等. 顺倾及反倾层状碎裂结构斜坡地震反应的大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 489-501.
WANG Tong, LIU Xian-feng, YUAN Sheng-yang, et al. Large-scale shaking table test on the seismic response of dip and anti-dip layered fractured structural slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(2): 489-501.
- [8] 何梓雷, 蒋关鲁, 冯海洲, 等. 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[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2011-2023.
HE Zi-lei, JIANG Guan-lu, FENG Hai-zhou, et al. Dynamic response characteristics of bedrock and overburden layer slope supported by a combination of pile-sheet wall-anchor cables under earthquake action[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(7): 2011-2023.
- [9] ZHAO F, SHI Z M, YU S B, et al. A review of fracture mechanic behaviors of rocks containing various defects[J]. **Underground Space**, 2023, 12: 102-115.
- [10] ZHAO F, SHI Z M, YU S B. Fracture mechanics behaviors of fissured rock under dynamic loading—a review[J]. **Environmental Earth Sciences**. 2022, 81: 526.
- [11] 王志颖, 郭明珠, 曾金艳, 等. 地震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2566-2578.
WANG Zhi-ying, GUO Ming-zhu, ZENG Jin-yan, et al. Experimental study on dynamic response of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 2566-2578.
- [12] ZHOU Y Y, ZHAO F, SHI Z M. Dynamic response mechanism of bedding slopes with alternatively distributed soft and hard rock layers under different seismic excitation directions: insights from numerical simulations[J]. **Materials**, 2024, 17(23): 5939.
- [13] SHI W P, ZHANG J W, SONG D Q, et al. Dynamic response characteristics and instability mechanism of high-steep bedding rock slope at the tunnel portal in high-intensity seismic region[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2024, 57: 827-849.
- [14] TAI D P, QI S W, ZHENG B W, et al. Effect of excitation frequency and joint density on the dynamic amplification effect of slope surface on jointed rock slopes[J]. **Engineering Geology**, 2024, 330: 107385.
- [15] CHEN J, WEN L Y, BI C J, et al. Multifractal analysis of temporal and spatial characteristics of earthquakes in Eurasian seismic belt[J]. **Open Geosciences**, 2023, 15(1): 20220482.
- [16] YAGHOUBI E, EMAMI A R, BIRZHANDI M S. IDA-based collapse safety assessment of torsional-irregular buildings, considering ductility and damage[J]. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 2023, 23(20): 2350200.
- [17] XU B, LIU X R, ZHOU X H, et al. Investigation of the dynamic response pattern and instability mechanism of a bedding rock slope subjected to frequent seismic loads[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2024, 24(7): 04024117.
- [18] ZHANG J J, QU H L, LIAO Y, et al. Seismic damage of earth structures of road engineering in the 2008 Wenchuan earthquake[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2012, 65(4): 987-993.
- [19] JIA Z B, TAO L J, BIAN J, et al. Research on influence of anchor cable failure on slope dynamic response[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2022, 161: 107435.
- [20] 梁庆国, 韩文峰, 谌文武, 等. 岩体地震动力破坏问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2783-2788.
LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng, CHEN Wen-wu, et al.

- Discussion on rockmass failure under seismic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Suppl.2): 2783-2788.
- [21] 赵飞, 俞松波, 李博, 等. 地震作用下岩质边坡大型振动台试验研究进展[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4498-4512.
ZHAO Fei, YU Song-bo, LI Bo, et al. Research advances on large-scale shaking table test for rock slopes under earthquake[J]. **Earth Science**, 2022, 47(12): 4498-4512.
- [22] 石振明, 谢可禄, 赵飞, 等. 消能抗震锚杆的研究进展与思考[J]. 地球科学, 2023, 49(2): 522-537.
SHI Zhen-ming, XIE Ke-lu, YU Song-bo, et al. Research advance and thinking on energy dissipation and seismic bolts[J]. **Earth Science**, 49(2): 522-537.
- [23] 雷晓锋. 地震激励作用下锚固系统研究现状[J]. 华北地震科学, 2020, 38(1): 8-13.
LEI Xiao-feng. Research status of anchorage system under seismic excitation[J]. **North China Earthquake Sciences**, 2020, 38(1): 8-13.
- [24] 吴善百, 王亮清, 吴琼, 等. 地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究进展与展望[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4456-4468.
WU Shan-bai, WANG Liang-qing, WU Qiong, et al. Advance and prospect for seismic dynamic response of anchored rock slope[J]. **Earth Science**, 2022, 47(12): 4456-4468.
- [25] ZHOU H Y, CHE A L, ZHU R J. Damage evolution of rock slopes under seismic motions using shaking table test[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 55: 4979-4997.
- [26] QI S W, HE J X, ZHAN Z F. A single surface slope effects on seismic response based on shaking table test and numerical simulation[J]. **Engineering Geology**, 2022, 306: 106762.
- [27] 邹威. 强震作用下均质斜坡动力响应的大型振动台试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
ZOU Wei. Large-scale shaking table test on dynamic response of homogenous slopes under the effect of strong earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [28] 侯红娟. 水平层状斜坡地震动响应特性的振动台试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
HOU Hong-juan. The seismic dynamic response characteristics of the shaking table test on horizontally layered slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [29] 刘汉香. 基于振动台试验的岩质斜坡地震动力响应规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
LIU Han-xiang. Seismic responses of rock slopes in a shaking table test[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [30] 胡训健, 卞康, 李鹏程, 等. 水平厚层状岩质边坡地震动力破坏过程颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2156-2168
HU Xun-jian, BIAN Kang, LI Peng-cheng, et al. Simulation of dynamic failure process of horizontal thick-layered rock slopes using particle flow code[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(9): 2156-2168.
- [31] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 地震作用下水平层状岩质边坡累积损伤与破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2507-2516.
LIU Xin-rong, DENG Zhi-yun, LIU Yong-quan, et al. Study of cumulative damage and failure mode of horizontal layered rock slope subjected to seismic loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2507-2516.
- [32] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420-2428.
XU Qiang, LIU Han-xiang, ZOU Wei, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic response characteristics of slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2420-2428.
- [33] FENG W K, HUANG R Q, XU Q. Seismic response analysis of horizontal layer slope with soft and hard rock combination[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 90-93: 1326-1333.
- [34] 刘汉香. 软硬组合型斜坡地震动响应的大型振动台模型试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
LIU Han-xiang. Large scale shaking table study on seismic response of combinational rock slopes[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [35] 邹威, 许强, 刘汉香, 等. 强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 143-149.
ZOU Wei, XU Qiang, LIU Han-xiang, et al. Large-scale shaking table test study on the failure of layered rocky slope under strong ground motion[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2011, 31(4): 143-149.

- [36] 田耘. 高烈度区水平复杂层状岩质边坡的动力破坏机制[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
TIAN Yun. Dynamic failure mechanism of horizontal complex layered rock slope in high intensity area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [37] 徐冠军. 滇西南地区高边坡抗震性能振动台模拟试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
XU Guan-jun. Study on the seismic behavior of high slope through shaking table test in southwest Yunnan [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [38] CHEN Z L, HU X, XU Q. Experimental study of motion characteristics of rock slopes with weak intercalation under seismic excitation[J]. **Journal of Mountain Science**, 2016, 13(3): 546-556.
- [39] 周飞, 许强, 刘汉香, 等. 地震作用下含水平软弱夹层斜坡动力响应特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 133-139.
ZHOU Fei, XU Qiang, LIU Han-xiang, et al. An experimental study of dynamic response characteristics of slope with horizontal weak interlayer under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 133-139.
- [40] LIU H, QIU T, XU Q. Dynamic acceleration response of a rock slope with a horizontal weak interlayer in shaking table tests[J]. **PLoS ONE**, 2021, 16(4): e0250418.
- [41] 王学伍. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及其破坏机制[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
WANG Xue-wu. Dynamic response law and failure mechanism of bedding rock slope under earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [42] 吴多华, 刘亚群, 李海波, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1945-956.
WU Duo-hua, LIU Ya-qun, LI Hai-bo, et al. Shaking table tests on dynamic amplification and failure mechanism of layered rock slopes under seismic actions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(10): 1945-956.
- [43] 张昆祥. 地震诱发层状岩质斜坡动力响应数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
ZHANG Kun-xiang. Study on dynamic response of layered rock slope induced by earthquake through numerical simulation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [44] 贾俊. 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—以干磨坊滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
JIA Jun. Study on dynamic responses and failure mechanism of steep bedding rock slope triggered by strong earthquake-taking Ganmofang landslide as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [45] SONG D Q, CHE A L, CHEN Z, et al. Seismic stability of a rock slope with discontinuities under rapid water drawdown and earthquakes in large-scale shaking table tests[J]. **Engineering Geology**, 2018, 245: 153-168.
- [46] LI L Q, JU N P, ZHANG S, et al. Shaking table test to assess seismic response differences between steep bedding and toppling rock slopes[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2019, 78: 519-531.
- [47] 侯伟龙. 陡倾层状岩质边坡的大型振动台物理模拟试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
HOU Wei-long. Research on large-scale shaking table physical simulation experiment of steep-dipping stratified rock slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [48] 李果. 强震条件下层状岩体斜坡动力失稳机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
LI Guo. Failure mechanism of stratiform rock slope under strong earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [49] 黄润秋, 李果, 巨能攀. 层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 865-875.
HUANG Run-qiu, LI Guo, JU Neng-pan. Shaking table test of strong earthquake response of stratified rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 865-875.
- [50] WANG J C, CHEN G Q, XU Q. Seismic signal characteristics and precursory information of bedding landslide with locked segments[J]. **Engineering Geology**, 2024, 341: 107709.
- [51] CHE A L, YANG H K, WANG B, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. **Engineering Geology**, 2015, 201: 45-56.
- [52] 冯细霞. 层状岩质边坡地震动力响应与稳定性分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
FENG Xi-xia. Study on the dynamic response and stability analysis of layered rock slopes[D]. Wuhan:

- Wuhan University, 2018.
- [53] 刘树林, 杨忠平, 刘新荣, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2264-2276.
- LIU Shu-lin, YANG Zhong-ping, LIU Xin-rong, et al. Shaking table model test and numerical analysis of the bedding rock slopes under frequent micro-seismic actions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(10): 2264-2276.
- [54] 刘新荣, 许彬, 刘永权, 等. 频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 632-641.
- LIU Xin-rong, XU Bin, LIU Yong-quan, et al. Cumulative damage and stability analysis of bedding rock slope under frequent microseisms[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42 (4): 632-641.
- [55] XU M, YU X T, PAN Y H, et al. Analysis of the seismic dynamic response and failure mode of the Layue landslide[J]. **Landslides**, 2023, 20: 1135-1148.
- [56] LI L Q. Seismic stability of steep consequent rockslides with different lithology assemblies: a comparative Study[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2024, 83: 353.
- [57] GUO M Z, WANG C, ZHANG H, et al. Shaking table test study on dynamic response of bedding rock slope with weak rock[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2022.
- [58] WANG C, GUO M Z, CHEN X L, et al. Damage evolution of the bedding rock landslide and debris landslide under earthquakes in the Three-rivers Basin[J]. **Engineering Geology**, 2024, 339: 107631.
- [59] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 含泥化夹层顺层岩质边坡动力响应大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1750-1757.
- FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Large-scale shaking table test on dynamic response of bedding rock slopes with silt intercalation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34 (9): 1750-1757.
- [60] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 959-966.
- FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Energy identification method for dynamic failure mode of bedding rock slope with soft strata[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(5): 959-966.
- [61] FAN G, ZHANG J J, WU J B, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of a weak intercalated rock slope using a shaking table[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(8): 3243-3256.
- [62] YANG C W, ZHANG L, LIU Y, et al. Shaking table test on dynamic response of bedding rock slopes with weak structural plane under earthquake[J]. **Frontiers in Physics**, 2020, 8: 556714.
- [63] 巨能攀, 邓天鑫, 李龙起, 等. 强震作用下陡倾顺层斜坡倾倒变形机制离心振动台试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 99-108, 117.
- JU Neng-pan, DENG Tian-xin, LI Long-qi, et al. Centrifugal shaking table test on toppling deformation mechanism of steep bedding slope under strong earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40 (1): 99-108, 117.
- [64] 宋丹青, 黄进, 刘晓丽. 地震作用下层状岩质边坡动力响应[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48(5): 113-120.
- SONG Dan-qing, HUANG Jin, LIU Xiao-li. Dynamic response of layered rock slopes under earthquakes[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2021, 48(5): 113-120.
- [65] XIN C L, YANG F, FENG W K, et al. Seismic responses and shattering cumulative effects of bedding parallel stepped rock slope: model test and numerical simulation[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2025, 17(4): 2009-2030.
- [66] TIAN J J, LI T T, PEI X J, et al. Experimental study on multistage seismic damage process of bedding rock slope: a case study of the Xinmo landslide[J]. **Journal of Earth Science**, 2024, 35: 1594-1612.
- [67] MIAO S S, SU L J, ZHANG C L, et al. Dynamic response characteristics and damage failure process of bedding rock slope in shaking table test[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2024, 83: 358.
- [68] YANG H L, CUI S H, PEI X J, et al. Multiple earthquake-induced progressive failure of bedding slopes with a saturated weak layer: shaking table model tests[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2023, 170: 107906.
- [69] CUI S H, PEI X J, YANG H L, et al. Bedding slope damage accumulation induced by multiple earthquakes[J].

- Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2023, 173: 108157.
- [70] CUI S H, PEI X J, HUANG R Q, et al. The analysis of seismic induced progressive instability and failure mechanisms: a case study[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2024, 174: 105646.
- [71] 刘云鹏, 黄润秋, 邓辉. 反倾板裂岩体边坡振动物理模拟试验研究[J]. 成都理工大学学报 (自然科学), 2011, 38(4): 413-421.
LIU Yun-peng, HUANG Run-qiu, DENG Hui. Experimental study on physical simulation of vibration of anti-tilt plate fractured rock slope[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Natural Sciences)**, 2011, 38(4): 413-421.
- [72] 杨国香, 叶海林, 伍法权, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2214-2221.
YANG Guo-xiang, YE Hai-lin, WU Fa-quan, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(11): 2214-2221.
- [73] YANG G X, QI S W, WU F Q, et al. Seismic amplification of the anti-dip rock slope and deformation characteristics: a large-scale shaking table test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 115: 907-916.
- [74] 江兴元. 地震触发岩质滑坡破坏模式与危险性预测[D]. 成都: 中国科学院大学, 2016.
JIANG Xing-yuan. Rock landslide failure mode and risk forecast induced by earthquake[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [75] NING Y B, ZHANG G C, TANG H M, et al. Process analysis of toppling failure on anti-dip rock slopes under seismic load in southwest China[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(4): 4439-4455.
- [76] SONG D Q, CHEN Z, CHAO H, et al. Numerical study on seismic response of a rock slope with discontinuities based on the time-frequency joint analysis method[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2020, 133: 106112.
- [77] LIU H D, ZHAO Y W, DONG J Y, et al. Experimental study of the dynamic response and failure mode of anti-dip rock slopes[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80: 6583-6596.
- [78] XIN H L, LI W H, WANG Z, et al. Shaking table tests on the stability of dip and anti-dip rock slopes with structural planes induced by seismic motions[J]. **Engineering Geology**, 2024, 341: 107707.
- [79] HUANG R Q, ZHAO J J, JU N P, et al. Analysis of an anti-dip landslide triggered by the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. **Natural Hazards**, 2013, 68(2): 1021-1039.
- [80] 刘蕾, 陈亮, 崔振华, 等. 逆层岩质边坡地震动力破坏过程 FLAC/PFC^{2D} 耦合数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1257-1262.
LIU Lei, CHEN Liang, CUI Zhen-hua, et al. FLAC/PFC^{2D} hybrid simulation for seismically induced failure process of toppling rock slope[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(6): 1257-1262.
- [81] 李祥龙, 唐辉明. 逆层岩质边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 687-694.
LI Xiang-long, TANG Hui-ming. Dynamic centrifugal modelling tests on toppling rock slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 687-694.
- [82] 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋, 等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 30-37.
LIU Yun-peng, DENG Hui, HUANG Run-qiu, et al. Numerical simulation study on seismic response of inverted soft hard interlayered rock slope[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2012, 39 (3): 30-37.
- [83] ZHI S, YANG L. Dynamic response differences between bedding and counter-tilt rock slopes with intercalated weak layers[J]. **Journal of Disaster Research**, 2007, 11(4): 681-690.
- [84] 杨峥. 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[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
YANG Zheng. The large-scale shaking table test study of dynamic deformation characteristics and response of slope with anti-dip weak interlayer[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [85] 刘汉香, 许强, 周飞, 等. 含软弱夹层斜坡地震动力响应特性的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 994-1105.
LIU Han-xiang, XU Qiang, ZHOU Fei, et al. Shaking

- table test for seismic responses of slopes with a weak interlayer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(5): 994-1105.
- [86] 范刚, 张建经, 付晓. 含泥化夹层反倾岩质边坡动力响应的大型振动台试验[J]. **地震工程学报**, 2015, 37(2): 422-427.
FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao. Large-scale shaking-table test to study dynamic response of anti-inclined rock slopes interlayered with silt[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 37(2): 422-427.
- [87] GU K S, ZHOU J, GUO M Z. Shaking table test study of anti-dip rock slope with complex structural plane under earthquake[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2024, 83: 468.
- [88] 叶海林, 郑颖人, 陆新, 等. 边坡锚杆地震动特性的振动台试验研究[J]. **土木工程学报**, 2011, 44(增刊 1): 152-157, 176.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LU Xin, et al. Shaking table test on anchor bars of slope under earthquake[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(Suppl.1): 152-157, 176.
- [89] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(增刊 1): 2847-2854.
Ye Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LI An-hong, et al. Shaking table test studies of prestressed anchor cable of slope under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.1): 2847-2854.
- [90] 罗渝, 何思明, 何尽川. 地震作用下抗滑桩作用机制研究[J]. **长江科学院院报**, 2010, 27(6): 26-29.
LUO Yu, HE Si-ming, HE Jin-chuan. Research on the mechanism of anti sliding pile under earthquake action[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2010, 27(6): 26-29.
- [91] 文畅平, 杨果林. 地震作用下挡土墙位移模式的振动台试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(7): 1502-1512.
WEN Chang-ping, YANG Guo-lin. Large-scale shaking table tests study of seismic displacement mode of retaining structures under earthquake loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1502-1512.
- [92] 文畅平, 江学良, 杨果林, 等. 桩板墙地震动力特性的大型振动台模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(5): 976-985.
WEN Chang-ping, JIANG Xue-liang, YANG Guo-lin, et al. Large-scale shaking table model test study of seismic response characteristics of sheet-pile retaining wall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 976-985.
- [93] 曲宏略, 李瑞峰, 张建经, 等. 两种典型桩板墙地震响应特性的对比分析[J]. **岩土力学**, 2017, 38(5): 1335-1342.
QU Hong-lue, LI Rui-feng, ZHANG Jian-jing, et al. Comparative analysis of seismic response characteristics of two representative sheet pile walls[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38 (5): 1335-1342.
- [94] LI L F, XUE L, JIANG T, et al. A study on the dynamic response and deformation of slopes supported by anti-slide piles subjected to seismic waves with different spectral characteristics[J]. **Sustainability**, 2024, 16(22): 9623.
- [95] 刘昌清, 李想, 张玉萍. 双排桩支挡结构振动台模型试验与分析[J]. **土木工程学报**, 2013, 46(增刊 2): 190-195.
LIU Chang-qing, LI Xiang, ZHANG Yu-ping. Shaking table test and analysis of double row pile retaining structure[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2013, 46(Suppl.2): 190-195.
- [96] 赖杰, 郑颖人, 刘云, 等. 地震作用下双排抗滑桩支护边坡振动台试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(4): 680-686.
LAI Jie, ZHENG Ying-ren, LIU Yun, et al. Shaking table tests on double-row anti-slide piles of slopes under earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 680-686.
- [97] 李乾坤, 石胜伟, 韩新强, 等. 微型组合抗滑桩力学特性模型试验[J]. **兰州大学学报 (自然科学)**, 2015, 51(6): 841-844.
LI Qian-kun, SHI Sheng-wei, HAN Xin-qiang, et al. A model test of mechanical characteristics of micro-pile combined structure[J]. **Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)**, 2015, 51(6): 841-844.
- [98] 李楠, 门玉明, 高讴, 等. 微型桩群桩支护滑坡的地震动动力响应研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2018, 37(9): 2144-2151.
LI Nan, MEN Yu-ming, GAO Ao, et al. Seismic behavior of the landslide supported by micropiles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018,

- 37(9): 2144-2151.
- [99] 郑静, 牛文庆, 吴红刚, 等. 地震作用下微型桩支挡结构振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 2798-2806.
- ZHENG Jing, NIU Wen-qing, WU Hong-gang, et al. Experimental study on vibration table of micro-pile retaining structure under earthquake action[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.1): 2798-2806.
- [100] 陈行, 陈文字, 宋兴海, 等. 地震作用下弧形抗滑桩加固边坡的动力响应及稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 79-86.
- CHEN Xing, CHEN Wen-yu, SONG Xing-hai, et al. Dynamic response and stability of arc anti-slide piles in slope reinforcement under earthquake[J]. **Safety and Environmental Engineering**, 2020, 27(4): 79-86.
- [101] 刁钰, 晋壮壮, 黄胜, 等. 斜-竖直交替组合桩加固边坡特性研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(11): 91-96.
- DIAO Yu, JIN Zhuang-zhuang, HUANG Sheng, et al. Study on slope reinforcement characteristics of inclined vertical alternating composite piles[J]. **Industrial Construction**, 2020, 50(11): 91-96.
- [102] 肖世国. 边(滑)坡治理中 h 型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2152.
- XIAO Shi-guo. Analytical method for h-type combined anti-sliding pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2146-2152.
- [103] 刘新荣, 欧明喜, 郑颖人, 等. h 型抗滑桩抗滑机制模型试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(2): 33-37, 91.
- LIU Xin-rong, OU Ming-xi, ZHENG Ying-ren, et al. Model investigation of sliding resistance for h-type anti-slide pile[J]. **Journal of Civil Architectural and Environment Engineering**, 2013, 35(2): 33-37, 91.
- [104] 付晓, 冀文有, 张建经, 等. 锚索框架梁加固平面滑动型边坡地震动力响应[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1709-1719.
- FU Xiao, JI Wen-you, ZHANG Jian-jing, et al. Seismic response for plane sliding of slope reinforced by anchor-chain-framed ground beams through shaking table test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1709-1719.
- [105] 任祥, 汪班桥, 李楠. 地震作用下锚固滑坡的动力响应特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(5): 676-681.
- REN Xiang, WANG Ban-qiao, LI Nan. Study on dynamic response of anchorage landslide under earthquake at different loading magnitude[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Sciences)**, 2019, 51(5): 676-681.
- [106] 曲宏略, 张建经, 王富江. 预应力锚索桩板墙地震响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 313-320.
- QU Hong-lue, ZHANG Jian-jing, WANG Fu-jiang. Seismic response of prestressed anchor sheet pile wall from shaking table tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(2): 313-320.
- [107] MA N, WU H G, MA H M, et al. Examining dynamic soil pressures and the effectiveness of different pile structures inside reinforced slopes using shaking table tests[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2019, 116: 293-303.
- [108] LIAN J, DING X M, WEN H, et al. Dynamic responses and evolution characteristics of bedrock and overburden layer slope with space anchor cable anti-slide piles based on large-scale shaking table test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2023, 175: 108245.
- [109] 王壮, 苏雷, 时伟, 等. 地震作用下不同支护结构对滑坡加固效果研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 176-187.
- WANG Zhuang, SU Lei, SHI Wei, et al. Reinforcement effect of landslide on different support structures under earthquake[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2023, 31(1): 176-187.
- [110] HUANG Y, XU X, MAO W W. Numerical performance assessment of slope reinforcement using a pile-anchor structure under seismic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2020, 129: 105963.
- [111] CHEN G P, YANG C W, TONG X H, et al. Shaking table test on dynamic response of a deposit slope with a weak interlayer reinforced by the pile-anchor structure[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2023, 70: 107912.
- [112] 付晓, 张建经, 周立荣. 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[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 462-470.
- FU Xiao, ZHANG Jian-jing, ZHOU Li-rong. Shaking table test of seismic response of slope reinforced by combination of anti-slide piles and multi-frame

- foundation beam with anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 462-470.
- [113] FAN G, ZHANG J J, QI S C, et al. Dynamic response of a slope reinforced by double-row anti-sliding piles and pre-stressed anchor cables[J]. **Journal of Mountain Science**, 2019, 16(1): 226-241.
- [114] LIN Y L, LU L, YANG G L. Seismic behavior of a single-form lattice anchoring structure and a combined retaining structure supporting soil slope: a comparison[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2020, 79(3): 78.
- [115] LIN Y L, CHENG X M, YANG G L, et al. Seismic response of a sheet-pile wall with anchoring frame beam by numerical simulation and shaking table test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 115: 352-364.
- [116] 叶海林, 郑颖人, 黄润秋, 等. 锚杆支护岩质边坡地震动力响应分析[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(4): 1-7.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, HUANG Run-qiu, et al. Analysis on dynamic response of rockbolt in rock slope under earthquake[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2010, 26(4): 1-7.
- [117] MORTAZAVI A, ALAVI F T. A numerical study of the behavior of fully grouted rockbolts under dynamic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, 54: 66-72.
- [118] 姚婕, 许锐, 郝建斌. 地震作用下锚杆支护边坡动力响应分析[C]// 第 26 届全国高校安全工程专业学术年会暨第 8 届全国安全工程领域工程硕士研究生教育研讨会, 湘潭, 2014 年 10 月 25-26 日. 北京: 气象出版社, 2014.
YAO Jie, XU Rui, HAO Jian-bin. Dynamic response analysis of bolt-supported slopes under seismic action[C]// Proceedings of the 26th National Academic Annual Conference on Safety Engineering in Institutions of Higher Education & the 8th National Seminar on Engineering Master's Education in the Field of Safety Engineering, Beijing: China Meteorological Press, 2014.
- [119] 武志信, 吴红刚, 谢显龙, 等. 高边坡防护中 BFRP 锚固结构的振动台试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 94-104.
WU Zhi-xin, WU Hong-gang, XIE Xian-long, et al. Shaking table test of traditional anchorage and BFRP anchorage in high slope protection[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2019, 30(6): 94-104.
- [120] 王秋懿, 吴红刚, 张金江, 等. 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[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 94-101.
WANG Qiu-yi, WU Hong-gang, ZHANG Jin-jiang, et al. Response of the slope reinforced with BFRP anchors to earthquake: a case study of the slope at the Xiangshui river[J]. **Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2020, 31(2): 94-101.
- [121] 言志信, 刘春波, 龙哲, 等. 含软弱层顺倾岩体边坡锚固地震响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2180-2188.
YAN Zhi-xin, LIU Chun-bo, LONG Zhe, et al. Experimental study on seismic response of anchorage of bedding rock slope with weak layer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(12): 2180-2188.
- [122] 陈艺文. 边坡的动力响应及新型耗能预应力锚索抗震性能研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
CHEN Yi-wen. Study on dynamic response of slope and anti-seismic behavior of new energy-dissipation prestressed anchor cable[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [123] LONG Z, YAN Z X, LIU C B. Shear effects on the anchorage interfaces and seismic responses of a rock slope containing a weak layer under seismic action[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2020: 1424167.
- [124] NIE Y, ZHAO Y F, WANG X G, et al. Seismic response of rock slopes with the anchor cable in centrifuge modeling tests[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2020, 2020: 8170258.
- [125] 吴永, 何思明, 李新坡. 地震波作用下抗滑桩的失效机制[J]. 四川大学学报 (工程科学), 2009, 41(3): 284-288.
WU Yong, HE Si-ming, LI Xin-po. Failure mechanism of anti-slide pile under seismic wave[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Sciences)**, 2009, 41(3): 284-288.
- [126] 张建经, 刘强. 抗滑桩水平地震作用修正系数分析—汶川地震典型抗滑桩破坏工点分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 2): 89-92.
ZHANG Jian-jing, LIU Qiang. Seismic analysis of horizontal seismic coefficient of lateral loaded pile[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(Suppl.2): 89-92.
- [127] 许江波, 郑颖人, 叶海林, 等. 埋入式抗滑桩支护地震边坡研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4):

- 781-788.
- XU Jiang-bo, ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, et al. Research of embedded anti-slide pile supporting slope during earthquake[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(4): 781-788.
- [128] 许江波, 郑颖人. 埋入式抗滑桩振动台模型试验分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1896-1902.
- XU Jiang-bo, ZHENG Ying-ren. Shaking table model tests on embedded anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(10): 1896-1902.
- [129] 姚爱军, 史高平, 梅超. 悬臂抗滑桩加固边坡地震动力响应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 53-58.
- YAO Ai-jun, SHI Gao-ping, MEI Chao. Experimental model study of seismic response of slope reinforced by cantilever stabilizing piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Suppl.2): 53-58.
- [130] 赖杰, 郑颖人, 刘云, 等. 埋入式抗滑桩抗震性能振动台试验与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 4165-4173.
- LAI Jie, ZHENG Ying-ren, LIU Yun, et al. Shaking table test for antiseismic behavior of embedded anti-slide pile and numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Suppl.2): 4165-4173.
- [131] 孙文. 顺层岩质边坡抗震技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- SUN Wen. Study on anti-seismic technology for bedding rock slope[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [132] 黄士奎, 赵杰, 刘道勇. 基于 FLAC 预应力锚杆抗滑桩支护边坡地震响应分析[J]. 地震研究, 2016, 36(1): 74-78.
- HUANG Shi-kui, ZHAO Jie, LIU Dao-yong. Seismic response analysis of slope supported by FLAC^{3D} prestressed anchor anti sliding pile[J]. **Journal of Seismological Research**, 2016, 36(1): 74-78.
- [133] QU H L, LIU Y, LUO H, et al. Seismic response characteristics of stabilizing pile based on elastic-plastic analysis[J]. **Shock and Vibration**, 2018, 2018(19): 7672587.
- [134] 杨果林, 文畅平. 格构锚固边坡地震响应的振动台试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1482-1493.
- YANG Guo-lin, WEN Chang-ping. Shaking table test study on dynamic response of slope with lattice framed anchor structure during earthquake[J]. **Journal of Central South University (Natural Sciences)**, 2012, 43(4): 1482-1493.
- [135] 郝建斌, 郭进扬, 张振北, 等. 地震作用下锚杆支护边坡动力响应[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 46-55.
- HAO Jian-bin, GUO Jin-yang, ZHANG Zhen-bei, et al. Dynamic response of anchors-supported slope under earthquake[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2017, 17(3): 46-55.
- [136] 叶帅华, 时轶磊, 龚晓南, 等. 框架预应力锚杆加固多级高边坡地震响应数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 153-158.
- YE Shuai-hua, SHI Yi-lei, GONG Xiao-nan, et al. Numerical analysis of earthquake response of multistage high slopes reinforced by frame structure with pre-stressed anchors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl.1): 153-158.
- [137] ZHANG J J, NIU J Y, FU X, et al. Failure modes of slope stabilized by frame beam with prestressed anchors[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2022, 26(6): 2120-2142.
- [138] 陶云辉. 地震条件下桩板结构受力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- TAO Yun-hui. Stress analysis of sheet-pile structure under earthquake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [139] 曲宏略, 张建经. 桩板式抗滑挡墙地震响应的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 743-750.
- QU Hong-lue, ZHANG Jian-jing. Research on seismic response of anti-sliding sheet pile wall by shaking table test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 743-750.
- [140] 刘昌清, 蒋楚生, 梁瑶, 等. 高烈度地震区高边坡支挡结构振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3798-3802.
- LIU Chang-qing, JIANG Chu-sheng, LIANG Yao, et al. Study of shaking table test for high slope retaining structure on highly seismic region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.2): 3798-3802.
- [141] 赖杰, 郑颖人, 刘云, 等. 抗滑桩和锚杆联合支护下边坡抗震性能振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 96-103.
- LAI Jie, ZHENG Ying-ren, LIU Yun, et al. Shaking table text study on anti-slide piles and anchor bars of slope

- under earthquake[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(9): 96-103.
- [142] 郑桐, 刘红帅, 袁晓铭, 等. 基于动力离心试验的锚拉桩加固滑坡时程响应分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(3): 39-47.
ZHENG Tong, LIU Hong-shuai, YUAN Xiao-ming, et al. Time history response analysis of landslide mass reinforced by anchorage pile based on dynamic centrifugal test[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2017, 26(3): 39-47.
- [143] 冯帅, 吴红刚, 艾挥, 等. 预应力锚索抗滑桩抗震优化设计与试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 248-255.
FENG Shuai, WU Hong-gang, AI Hui, et al. Seismic optimum design and experimental research on anti-slide pile with pre-stressed anchor cable[J]. **Science Technology and Engineering**, 2018, 18(12): 248-255.
- [144] PAI L F, WU H G. Shaking table test of comparison and optimization of seismic performance of slope reinforcement with multi-anchor piles[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2021, 145: 106737.
- [145] WEI H, TAO Z G, HE M C, et al. The cumulative damage evolution law of multi-anchor circular piles reinforced landslide under earthquake action[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2024, 57: 6321-6336.
- [146] 丁选明, 刘学成, 王春艳, 等. ECC 桩-消能锚韧性支挡结构的地震响应规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 76-88.
DING Xuan-ming, LIU Xue-cheng, WANG Chun-yan, et al. Seismic response characteristics of ECC pile-energy dissipation anchor ductile retaining structure[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2025, 47(2): 76-88.
- [147] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡抗滑桩振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 251-257.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LI An-hong, et al. Shaking table tests on stabilizing piles of slopes under earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(2): 251-257.
- [148] 付晓, 范刚, 刘飞成, 等. 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[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 823-828.
FU Xiao, FAN Gang, LIU Fei-cheng, et al. Shaking table tests on the acceleration response of anti-dip stratified rock slope with composite retaining structure[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 37(3): 823-828.
- [149] 付晓, 张建经, 廖蔚茗, 等. 组合支护结构加固高边坡的地震动响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 831-842.
FU Xiao, ZHANG Jian-jing, LIAO Wei-ming, et al. Shaking table test on seismic response of slopes reinforced by pile-cable retaining structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(4): 831-842.
- [150] 范刚, 张建经. 组合支挡结构加固边坡地震位移松弛区确定方法研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 775-783.
FAN Gang, ZHANG Jian-jing. Determination of the seismic displacement relaxation zone in the reinforced slope by composite retaining structures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 775-783.
- [151] 王德华, 吴祚菊, 张建经, 等. 多级组合支护结构对非均质高边坡抗震性能影响分析[J]. 振动工程学报, 2019, 32(3): 404-414.
WANG De-hua, WU Zuo-ju, ZHANG Jian-jing, et al. Analysis of the influence of multi-level composite support structure on the seismic performance of heterogeneous high slope[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2019, 32(3): 404-414.
- [152] 陈建峰, 杜长城, 陈思贤, 等. 地震作用下抗滑桩-预应力锚索框架组合结构受力机制[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4362-4372.
CHEN Jian-feng, DU Chang-cheng, CHEN Si-xian, et al. Mechanical mechanism of slopes stabilized with anti-slide piles and prestressed anchor cable frame beams under seismic loading[J]. **Earth Science**, 2022, 47(12): 4362-4372.
- [153] LIN Y L, YANG G L, YANG X, et al. Response of gravity retaining wall with anchoring frame beam supporting a steep rock slope subjected to earthquake loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 92: 633-649.
- [154] QU H L, LUO H, LIU L, et al. Analysis of dynamic coupling characteristics of the slope reinforced by sheet pile wall[J]. **Shock and Vibration**, 2017: 9043518.
- [155] QU H L, WANG C X, ZHANG G L, et al. Seismic damage mechanism of bedrock and overburden layer slope reinforced by sheet pile wall[J]. **Journal of Geophysics and Engineering**, 2019, 16(4): 667-679.

- [156] 曲宏略, 李瑞峰, 张建经, 等. 预应力锚索桩板墙的地震响应及影响参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 536-545.
QU Hong-lue, LI Rui-feng, ZHANG Jian-jing, et al. Research on seismic responses and influence parameters for prestressed anchor sheet pile wall[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(2): 536-545.
- [157] GUPTA P, MEHNDIRATTA S. Exploring the efficacy of slope stabilization using piles: a comprehensive review[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2025, 55: 3442-3459.
- [158] 何满潮, 冯吉利. 恒阻大变形锚杆: 中国, CN10185-8225A[P]. 2010-10-13.
HE Man-chao, FENG Ji-li. Constant resistance large deformation anchor rod: China, CN101858225A[P]. 2010-10-13.
- [159] TAO Z G, ZHU C, HE M C, et al. A physical modeling-based study on the control mechanisms of Negative Poisson's ratio anchor cable on the stratified toppling deformation of anti-inclined slopes[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2021, 138: 1-18.
- [160] 陶志刚, 王璇, 郭爱鹏, 等. 地震作用下 NPR 锚索固坡效应振动台试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3410-3420.
TAO Zhi-gang, WANG Xuan, GUO Ai-peng, et al. Shaking table test on the effect of NPR anchor cable on slope reinforcement under earthquake[J]. **Journal of China Coal Society**, 2022, 47(9): 3410-3420.
- [161] DAI W, WANG G W, TAO Z G, et al. Large-scale field test on deformation mechanism and stability enhancement of soil slope reinforced by the micro-NPR bolt[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2024, 83: 114.
- [162] LI C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(7): 396-404.
- [163] WU Y K, OLDSSEN J. Development of a new yielding rock bolt—yield lok bolt[C]//The 44th US Rock Mechanics Symposium-5th US/Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City: Curran Associates, Inc., 2010: 190-197.
- [164] 王斌, 聿多兵, 马春德, 等. 岩爆灾害控制的动静组合支护原理及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1169-1178.
WANG Bin, DA Duo-bing, MA Chun-de, et al. Principle and preliminary application of combined static-dynamic support to rockburst disaster controlling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(6): 1169-1178.
- [165] 唐治, 潘一山, 徐兴强, 等. 一种让位缓冲吸能防冲锚杆: 中国, CN108119175A[P]. 2018-06-05.
TANG Zhi, PAN Yi-shan, XU Xing-qiang, et al. A type of yielding buffer energy absorption and anti-collision anchor rod: China, CN108119175A[P]. 2018-06-05.
- [166] 赵文, 康景文, 陈云, 等. 一种玄武岩纤维筋材锚杆的施工工艺: 中国, CN105464110A[P]. 2014-04-06.
ZHAO Wen, KANG Jing-wen, CHEN Yun, et al. Construction technology of basalt fiber reinforced anchor rod: China, CN105464110A[P]. 2014-04-06.
- [167] 杨书海, 徐岗, 任志平, 等. 一种玄武岩纤维复合筋锚杆体: 中国, CN105756057A[P]. 2016-07-13.
YANG Shu-hai, XU Gang, REN Zhi-ping, et al. A type of basalt fiber composite reinforcement anchor body: China, CN105756057A[P]. 2016-07-13.
- [168] XU M, TANG Y F, LIU X S, et al. A shaking table model test on a rock slope anchored with adaptive anchor cables[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2018, 112: 201-208.
- [169] 涂兵雄, 童江, 章钧翔, 等. 一种变形自恢复的让压锚杆: 中国, CN110056381A[P]. 2019-07-26.
TU Bing-xiong, TONG Jiang, ZHANG Jun-xiang, et al. A deformation self-recovering yielding anchor rod: China, CN110056381A[P]. 2019-07-26.
- [170] 陈峰, 唐春安, 杜艳红, 等. 一种正负泊松比相间的恒阻大变形竹节式锚杆: 中国, CN110863851A[P]. 2020-03-06.
CHEN Feng, TANG Chun-an, DU Yan-hong, et al. A constant resistance large deformation bamboo joint anchor rod with alternating positive and negative Poisson's ratios: China, CN110863851A[P]. 2020-03-06.
- [171] 杨逾, 王梦楠, 何金婵, 等. 一种用于边坡工程的抗震锚杆: 中国, CN112267461A[P]. 2021-01-26.
YANG Yu, WANG Meng-nan, HE Jin-chan, et al. A seismic anchor rod for slope engineering: China, CN112267461A[P]. 2021-01-26.
- [172] 吴学震, 郑含芳, 陈党辉, 等. 一种可主动修复的抗震锚杆: 中国, CN112780324A[P]. 2021-05-11.
WU Xue-zhen, ZHENG Han-fang, CHEN Dang-hui, et al. A seismic anchor rod that can be actively repaired: China,

- CN112780324A[P]. 2021-05-11.
- [173] GAO X, JIA J Q, BAO X H, et al. Shaking table model tests and stability analysis of slopes reinforced with new anti-seismic anchor cables[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2024, 28(11): 4973-4989.
- [174] GAO X, JIA J Q, BAO X H, et al. Shaking table test for seismic performance of rock slope reinforced by C&S-R anchor cables[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 180: 108596.
- [175] 赵飞, 石振明, 俞松波, 等. 一种自复位抗震锚杆: 中国, CN217204139U[P]. 2022-08-16.
ZHAO Fei, SHI Zhen-ming, YU Song-bo, et al. A self-resetting seismic anchor and installation method: China, CN217204139U[P]. 2022-08-16.
- [176] 赵飞, 石振明, 陈建峰, 等. 一种分级让压自复位抗震锚杆及安装方法: 中国, CN114351699B[P]. 2023-02-07.
ZHAO Fei, SHI Zhen-ming, CHEN Jian-feng, et al. A graded self-resetting seismic anchor and installation method: China, CN114351699B[P]. 2023-02-07.
- [177] 赵飞. 强震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及新型桩锚组合结构抗震机制研究[D]. 上海: 同济大学, 2024.
ZHAO Fei. Research on dynamic response of bedding rock Slope and seismic mechanism of new pile-anchor composite structure under strong earthquake[D]. Shanghai: Tongji University, 2024.
- [178] 李朝红, 徐光兴, 闫敏鸣, 等. 一种双肢耗能抗滑桩及其施工方法: 中国, CN109235460A[P]. 2020-08-07.
LI Chao-hong, XU Guang-xing, YAN Min-ming, et al. A dual limb energy dissipation anti slip pile and its construction method: China, CN109235460A[P]. 2020-08-07.
- [179] 胡宏强, 黄雨. 一种适用于强震区的耗能减震型滑坡桩锚支护体系: 中国, CN112144549A[P]. 2020.12.29.
HU Hong-qiang, HUANG Yu. An energy dissipation and seismic reduction landslide pile anchor support system suitable for strong earthquake areas: China, CN112144549A [P]. 2020-12-29.
- [180] 赵磊, 李元东. 一种主动型边坡支护系统: 中国, CN112663639A[P]. 2021-04-16.
ZHAO Lei, LI Yuan-dong. An active slope support system: China, CN112663639A[P]. 2021-04-16.
- [181] 侯小强, 李松, 郭红东, 等. 一种 h 型斜横梁减震抗滑桩的建造方法: 中国, CN112921956A[P]. 2021-06-08.
HOU Xiao-qiang, LI Song, GUO Hong-dong, et al. Construction method of H-shaped inclined crossbeam seismic and anti-slide pile: China, CN112921956A[P]. 2021-06-08.
- [182] 马少坤, 李金梅, 段智博, 等. 一种让位抗滑双排桩支护结构: 中国, CN113684841A[P]. 2021-11-23.
MA Shao-kun, LI Jin-mei, DUAN Zhi-bo, et al. A type of anti-slide double row pile support structure: China, CN113684841A[P]. 2021-11-23.
- [183] 赵飞, 石振明, 陈建峰, 等. 一种抗滑桩: 中国, CN114197495B[P]. 2022-11-15.
ZHAO Fei, SHI Zhen-ming, CHEN Jian-feng, et al. A type of anti-slide pile: China, CN114197495B[P]. 2022-11-15.
- [184] ZHAO F, SHI Z M, YU S B, et al. Reinforcement mechanism of new flexible combined piles (FCP) for rocky slopes under earthquake[C]//The XIV Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. [S. l.]: [s. n.], 2023.