

崩塌危岩体减震消能复合加固结构抗震性能试验研究

祝介旺, 王生勇, 李文乐, 吕国靖, 张爱社, 周广强

Experimental study on seismic performance of composite reinforced structure with shock absorption and energy dissipation of potentially collapsed rock mass

ZHU Jiewang, WANG Shengyong, LI Wenle, LYU Guojing, ZHANG Aishe, and ZHOU Guangqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74

强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析

An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes

李娟, 何亮, 苟晓慧 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 157-163

岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究

A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides

张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 谢宇, 王玉峰, 姚志勇, 孙先锋 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 125-135

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate

刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120-126

基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124-132



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306009

祝介旺, 王生勇, 李文乐, 等. 崩塌危岩体减震消能复合加固结构抗震性能试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 124-135.

ZHU Jiewang, WANG Shengyong, LI Wenle, et al. Experimental study on seismic performance of composite reinforced structure with shock absorption and energy dissipation of potentially collapsed rock mass [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 124-135.

崩塌危岩体减震消能复合加固结构抗震性能 试验研究

祝介旺, 王生勇, 李文乐, 吕国靖, 张爱社, 周广强
(山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 地震区工程建设中崩塌危岩体的加固方式目前主要是锚固和支挡两类结构形式。加固结构与危岩体的连结都采用刚性连结, 结构与危岩体之间几乎无变形能力, 因此抗震性能较差。在地震作用下, 特别是强震作用下极易破坏失效, 造成崩塌灾害, 在我国西南地震区工程中大量存在此类破坏现象。为解决目前加固结构存在的问题, 设计了一种允许地震作用下危岩体能够有限度的变位、可以缓冲危岩体的地震冲击力、具有减震消能功能的崩塌危岩体复合加固结构, 结构由锚杆(索)、减震锚头(一级消能)、连梁、支撑桩以及设于连梁与支撑桩之间的作为二级减震消能装置所组成。为验证复合加固结构的功效, 除理论分析外, 利用振动台进行与同等条件普通锚杆加固结构的物理模型对比试验。试验选用具有地区代表性的不同波形、幅值与频率的地震波作为输入波形。理论分析与试验结果表明: 复合加固结构相较于无防护措施的同类型崩塌体理论分析, 其位移增长速度显著降低, 累积位移幅度显著减小; 相较于传统锚杆加固结构, 所承受的拉力和压力显著减小; 峰值加速度放大系数明显降低。证明复合加固结构利用自身的弹塑性变形以及阻尼力, 有效抵御由于地震作用在危岩体上产生的动应力, 有效转移了危岩体的冲击动能, 减震消能作用明显, 避免加固结构损坏, 从而阻止崩塌灾害的发生, 证明复合加固结构能够分层次地消弥小震、中震、大震时产生的地震能峰值。减震消能复合结构为地震区崩塌危岩体的加固提供了一种新的加固方案, 对于提升地震区工程中崩塌危岩体的加固技术具有较大的现实意义。

关键词: 崩塌危岩体; 减震消能复合结构; 振动台物理模型试验; 减震消能器

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0124-12

Experimental study on seismic performance of composite reinforced structure with shock absorption and energy dissipation of potentially collapsed rock mass

ZHU Jiewang, WANG Shengyong, LI Wenle, LYU Guojing, ZHANG Aishe, ZHOU Guangqiang
(School of Civil Engineering, Shandong JianZhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: At present, there are two types of structures for strengthening dangerous rock mass in earthquake area construction: anchorage and retaining. The connection between the two types of reinforced structures and the dangerous rock mass is rigid with very limited deformation ability between the structure and unstable rock mass,

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2023-09-20

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509703)

第一作者: 祝介旺(1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土(体)工程加固和地质灾害防治等方面的研究教学与生产工作。

E-mail: zhujiewang@163.com

which leads to the poor seismic performance of the structure. Under the seismic load especially when the magnitude of earthquake is strong, it is easy to fail and cause collapse disaster. This kind of damage phenomenon exists in a large number of seismic projects in southwest China. To solve the existing problems of the reinforced structure, a composite reinforced structure was designed in this study, and it allows the dangerous rock mass to be dislocated to a limited extent under the action of earthquakes, can buffer the seismic impact force of the dangerous rock mass, and has the function of shock absorption and energy dissipation. The structure is composed of anchor rod (cable), shock absorber anchor head (primary energy dissipation), connecting beam, supporting pile, and a secondary shock absorber and energy dissipation device between the connecting beam and supporting pile. To verify the effectiveness of the composite reinforced structure, besides theoretical analysis, a physical model comparison test on the common anchor reinforced structure under the same conditions is carried out by using a shaking table. Different seismic waves, amplitudes and frequencies, which are representative of the region, are selected as input seismic loadings. Theoretical analysis and experimental results show that the displacement growth rate and cumulative displacement amplitude of the composite reinforced structure decrease significantly comparing to condition for the same collapse body without protective measures. Compared with the traditional bolt-reinforced structure, the tensile force and pressure are significantly reduced. The amplification coefficient of peak acceleration PGA also decreased significantly. It is proved that the composite reinforced structure can effectively resist the dynamic stress caused by the earthquake on the dangerous rock mass by using its own elastoplastic deformation and damping force, effectively transfer the impact kinetic energy of the dangerous rock mass, and significantly reduce the shock and energy dissipation, which greatly avoids the damage of the reinforced structure and prevents the occurrence of collapse disasters. It is proved that the composite reinforced structure can slice off the peak seismic energy generated by small, medium and large earthquakes in layers, and has a good effect on damping and energy dissipation. This technology provides a new reinforcement scheme for the collapse dangerous rock mass, and has great practical significance for improving the consolidation technology of potentially collapsed rock mass in seismic area.

Keywords: potentially collapsed rock mass; vibration and energy dissipation composite structure; shaking table physical model test; shock absorber and energy dissipator

山地危岩体的崩塌以其突发性、难以预测性成为对人民生命财产造成巨大损失和威胁的主要灾害。根据中国地质环境监测院发布的全国地质灾害灾情, 仅在 2021 年, 全国共发生地质灾害 4 772 起, 其中危岩体崩塌占比 36%^[1]。导致崩塌灾害发生的因素较多, 如风化、卸荷等, 研究表明地震作用下危岩体发生崩塌灾害的概率会更高^[2], 是由于地震产生的惯性力会直接作用于危岩体, 导致崩塌危岩体失稳, 且产生的冲击能量远远超过防护措施的抵抗能力^[3], 目前危岩体的防护方法主要包括直接清除、锚固和支撑的主动防护法以及拦阻网、防护棚等被动防护法^[4]。

针对地震作用下崩塌危岩体的致灾机理及防护, 国内外学者进行了有益的研究, 刘永平等^[5]、黄润秋等^[6]从动力学和运动学角度对危岩体破坏机理、崩塌发生后的运动形式及影响因素进行了研究。刘传正等^[7]全面探讨了乌江鸡冠岭煤矿开采诱发山体崩塌的成因

机制, 并提出了综合防治的对策。黄海宁等^[8]以郑万(郑州—万州)高铁宜万段沿线隧道洞口边坡危岩为研究对象, 利用 Rockfall 模拟软件对落石运动特征进行预测分析。Valaguss 等^[9]提出了一种简单的地震诱发落石危险区划方法, 结合地震区落石的起始频率, 模拟落石轨迹的动能。祁生文等^[10]利用 Newmark 法对动力作用下危岩体的极限位移进行研究。在防护技术方面, Peng 等^[11]基于锚杆支护岩石边坡的数值模型分析边坡动力响应, 验证永久位移是一个具有累积效应的过程, 采用有限元极限分析方法研究侧向荷载桩边坡的地震稳定性。陈涛^[12]采用 FLAC3D 模拟程序, 验证危岩体在长期荷载作用下锚固支护力比支撑桩支护更具有控制位移的优势, 基于最大位移分析得出撑-锚联合支护的最佳分配比为 6 : 4。Zhang 等^[13]基于极限分析上限定理结合拟静力方法, 通过确定预应力锚索自由段所需的临界长度确保受地震作用影

响的裂缝边坡的稳定性。Ye 等^[14]分析了地震荷载影响下预应力锚杆框架结构对边坡支护的动力响应,表明锚杆利用轴向力抵抗土层滑动面向下倾覆,从而提高边坡的动力稳定性。Huang 等^[15]基于极限分析上限定理,推导地震荷载作用下柔性无面板加筋土边坡屈服地震加速度系数计算公式,确定了影响其抗震性能的主要参数。龙哲^[16]通过振动台模型试验和数值模拟深入研究全长黏结锚杆锚固含软弱层顺倾岩体边坡在地震作用下边坡两锚固界面上的剪切作用。陈龙飞等^[17]发明了一种高陡危岩及大型崩塌岩土体的防护消能方法,可以有效控制危岩体崩塌。于德杰等^[18]发明了一种适用于边坡危岩体的崩塌防治装置,针对不同规格的岩体可以进行崩塌防治作业,有利于崩塌防治作业更加的牢固。陶志刚等^[19]对防滚石冲击和危岩体崩塌发明了一种新型柔性防护系统。利用多根横向锚索与多根竖向锚索交织形成防护网,防护网利用预紧力抵抗危岩体变形。袁博等^[20]利用 LS-DYNA 动力有限元软件模拟棚洞滚石冲击,表明在棚顶设置起坡橡胶垫层可以解决门式棚洞存在的安全问题。黄帅等^[21]发明了用于强震区高位滑坡的分布式主动消能结构,通过主防护网机构,达到分布式主动消能的目的。可以看出,对崩塌危岩体的防护技术的研究目前主要还是集中在对锚固和支撑机理研究及改进上,创新性研究较少。

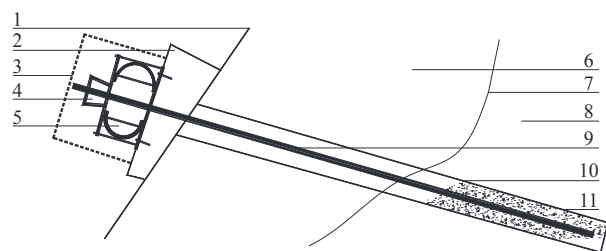
崩塌灾害的发生一般有 3 种形式:滑塌式、坠落式和倾倒式。由滑塌引起的崩塌灾害类型在野外大量存在^[22-23]。针对强震作用下的滑塌式崩塌(本文所述的崩塌皆为滑塌式崩塌)危岩体加固技术,在总结前人成果的基础上,根据弹塑性变形可以消耗能量的原理,结合已有技术,设计了一种在地震条件下,具有

削减地震峰值能量的减震消能复合加固结构体系,并利用大型振动台进行物理模型试验予以验证。通过不同地震波形、不同地震震级的试验,验证了复合加固结构对消减地震能量的有效性。

1 减震消能复合加固结构

1.1 复合加固结构

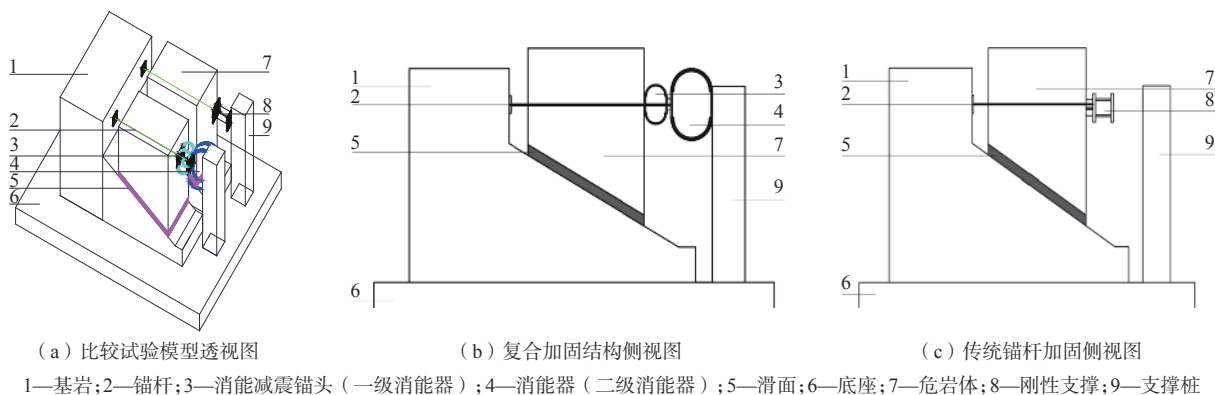
祝介旺等^[24]曾发明了一种具有减震消能功能的锚索(杆)端头锚固装置,该装置具有一定的减震消能效果,如图 1 所示。由于该装置受结构大小的影响,刚度较小,适合于小震或中震情况下的危岩体加固。为了消耗强震产生的高地震能量,在此装置的基础上,设计一种复合加固结构,由预应力锚索及消能减震锚头(一级消能器,刚度较小)、连接锚固端的连梁、支撑桩、设置于连梁和支撑桩之间的可用于消能的位移型消能器或速度型黏滞阻尼器(二级消能器,刚度较大)组成,一、二级消能结构通过串联组合成一种复合加固结构。如图 2(b)所示。



1—坡面;2—锚索孔找平垫板(或锚梁);3—锚墩保护罩;
4—预埋固定螺栓;5—组合式变形可控减震消能锚固墩;
6—危岩体;7—优势结构面;8—稳定基岩;
9—预应力锚索;10—锚索钻孔;11—锚固砂浆

图 1 锚索(杆)端头锚固装置

Fig. 1 End of anchorage device of anchor cable (rod)



(a) 比较试验模型透视图

(b) 复合加固结构侧视图

(c) 传统锚杆加固侧视图

1—基岩;2—锚杆;3—消能减震锚头(一级消能器);4—消能器(二级消能器);5—滑面;6—底座;7—危岩体;8—刚性支撑;9—支撑桩

图 2 比较试验模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of comparison test model

1.2 复合加固结构工作原理以及动力特性

地震发生时,地震波作用于山体,地震力通过基岩传递到山体的各个部位,由于边坡对地震波的放大效应,在危岩体上会产生较大的地震惯性力。危岩体与基岩的连结面(滑面)原本较弱,在地震惯性力的作用下,薄弱的滑面会被破坏,失去阻力,从而导致危岩体沿滑面发生滑动,产生脱离母岩的位移或位移趋势。在危岩体得到复合加固的情况下,危岩体的地震惯性力将向复合加固结构转移,加固结构将利用其可变形的功能发挥减震消能的作用。

在小震或中震工况下,位移由设置于锚墩的可变形锚头产生,并在锚头回复力的作用下产生往复运动,起到削弱地震能量峰值的作用;在大震工况下,作为一级消能的可变形锚头由于受位移量程和刚度的限制,在消耗掉部分地震能的情况下可能要屈服而失去变形能力,甚至锚杆(索)由于危岩体的位移过大发生锚固端拔出破坏,危岩体的作用则转移到刚度较大的二级消能装置,二级消能装置由于刚度较大,可以大大消耗危岩体的地震能,起到削峰地震能的作用,若遇到罕遇地震,导致二级消能装置屈服甚至破坏时,则由支撑桩将完成危岩体最后的支撑。通过一、二级消能器渐次的能量消减,达到小震不坏、中震可修、大震不倒的防护目标。

复合加固结构之所以能够起到减震消能的作用,其根本在于地震作用下危岩体产生的能量与可变形

的复合结构、大刚度的支撑桩之间的能量传递、转换与消耗。

当危岩体的动荷载施加到复合结构时,似在危岩体与支撑桩之间形成了一个压缩弹簧。弹簧是由大小两种刚度钢圈串联而成的减震消能器。当较小动荷载以压力的形式作用于消能器时,小刚度的一级消能器发生弹性变形,危岩体的动能转换为一级消能器的势能,从而消除掉危岩体的能量,而停止运动;当动荷载撤掉或处于拉状态时,消能器利用其弹性回复能力协助危岩体归位,达到减震消能确保安全的目的。中度地震作用下,危岩体动力作用比较强,位移也较大,一级消能器极限承载力和极限位移在吸收消耗一定的地震能量后,发生屈服,退出工作,剩余危岩体能量传递于二级消能器,形成二级消能器的势能。同理,当动荷载撤掉或处于拉状态时,二级消能器会释放吸收的势能协助危岩体部分归位,不至于发生崩塌灾害。当大震作用时,二级消能器在吸收一定的地震能量后,也将发生屈服,危岩体由支撑桩支撑保证最后的安全。

图3中消能器的拉压滞回曲线清楚地表明了上述过程,可以发现,在动荷载作用下,钢圈首先发生弹性变形,它所能承受的动应力随自身动应变的增加持续线性增加。当钢圈达到弹性极限时,动应变变化增大,动应力继续增加,钢圈达到屈服极限。此时钢圈可以继续承受动荷载,直到自身破坏。

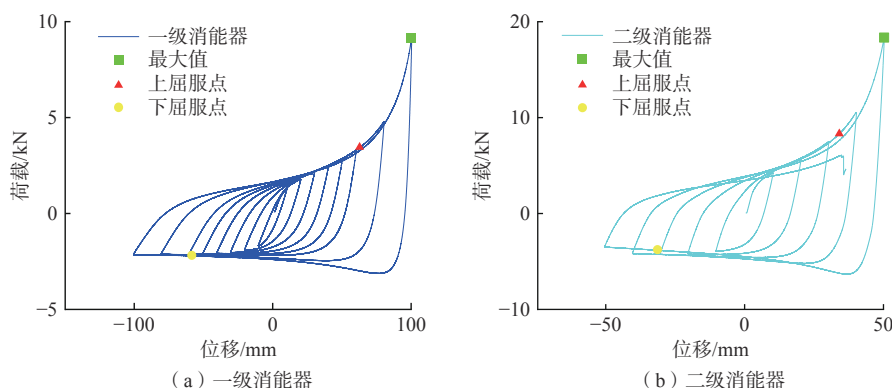


图3 荷载位移滞回曲线

Fig. 3 Hysteretic curves of load displacements

2 复合加固结构振动台试验模型设计

2.1 试验目标

为了验证所设计的减震消能复合加固结构的性能,拟利用振动台进行模型试验。振动台为液压式,台面尺寸3 m×3 m,载重10 t,振动方向三向六自由度,

最大加速度x、y向为1.5 g,z向为1.0 g,振动台系统的组成如图4所示。

根据振动台参数,设计崩塌试验模型。崩塌模式选择滑塌式^[25],滑塌式崩塌的特点在于危岩体在形成崩塌时,可以在基岩上有位移发生,区别于在几乎无

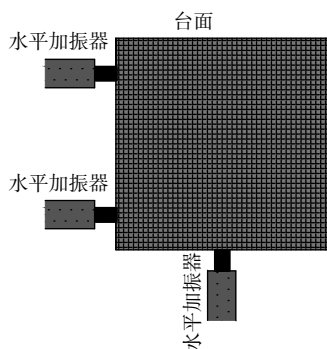


图 4 振动台系统组成示意图

Fig. 4 The composition diagram of shaking table system

位移的情况下突然发生的坠落式崩塌。危岩体与基岩之间的角度一般小于 55° 。根据这一认识和野外观察,滑塌支护试验模型由基岩、危岩体、软弱滑面、支撑桩、锚杆、消能减震锚头(一级消能构件)、二级消能构件、监测元件组成。在考虑试验目标和拟合软弱结构面参数、锚杆参数和消能器参数的情况下,基岩与危岩体角度设计成 30° 。为了与传统单纯锚杆加固相比较,在同一基岩上,设计了危岩体复合加固与传统加固的对比试验,如图 2 所示。

模型试验的设定目标,拟在地震加速度 $0.5g$ 时,消能减震锚头(一级消能器)屈服,在 $0.7g$ 时,位于桩与连梁间的消能器(二级消能器)屈服,根据该设计,为达到此试验目的,利用拟静力法进行计算,确定软弱结构面的力学参数、锚杆极限强度参数以及一级、二级消能器的力学参数。

2.2 试验设计

依据振动台参数,模型整体平面尺寸:长 $\times$ 宽 $\times$ 高= $2\,600\text{ mm}\times 2\,080\text{ mm}\times 1\,400\text{ mm}$ 。基岩平面尺寸为 $1\,200\text{ mm}\times 1\,725\text{ mm}$,中间部位空余为 $200\text{ mm}\times 925\text{ mm}$;危岩形状为梯形长边 940 mm ,短边 540 mm ,高 700 mm ,宽度 500 mm ,滑面厚度 60 mm ;滑面的尺寸为 $806\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 60\text{ mm}$,滑面与坡面平行;支撑桩是由两块等边槽钢 $200\text{ mm}\times 75\text{ mm}\times 5.3\text{ mm}$ 通过尺寸 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的钢板焊接而成的格构柱,柱底通过预埋件焊接固定于底座并在柱低侧面设置支撑加劲肋。

试验模型中左侧危岩体为减震消能复合加固结构,右侧危岩体为普通锚杆连接的传统加固方式。左侧的减震消能复合加固结构,仿照实际工程中危岩体与加固结构的连结方式,其锚杆的后端穿过危岩体连结到基岩上,锚杆的前端,焊接在作为一级消能器的减震锚头的外侧,二级消能器设计为位移型具有较大刚度的钢质环状结构,利用螺栓连接到一级消能器外侧和

支撑桩之间;对于传统锚杆加固,后端连结到基岩上,前端穿过危岩体在其前端固定,试验模型如图 2 所示。

2.3 模型材料选取以及消能构件尺寸

基岩采用 C30 混凝土浇筑,内部配置横向与纵向钢筋形成钢筋骨架。横、纵向钢筋与底座中的竖向钢筋绑扎在一起,斜坡处布置一排斜向钢筋,钢筋直径均为 12 mm 的 HRB335 型号。危岩体采用 C30 素混凝土浇筑,组成支撑桩的槽钢与埋于基岩的钢板的材质均为 Q235。

根据 2.1 试验设计目标,利用拟静力法计算滑面目标参数,锚杆目标参数和消能构件目标参数。

滑面目标参数如表 1。为获得此目标参数,选材料取石英砂、滑石粉、黄土、甘油、水作为试验滑面相似材料,通过室内直剪试验对滑面材料配比进行反复剪切试验,滑面试验数据如表 2 所示,测得不同滑面材料配比的黏聚力,最终试验相似材料配比为石英砂:滑石粉:黄土:甘油:水= $6:6:3:3:2$,滑面直剪试验试件破坏如图 5 所示,据表 1 材料比例序号得到不同滑面相似材料配比黏聚力图,如图 6 所示。

表 1 滑面目标参数和试验参数

Table 1 The target parameters and test parameters for sliding surface

类型	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
目标参数	11	16.0
试验参数	10.8	15.6

表 2 滑面相似材料的黏聚力表

Table 2 Cohesion of the similar materials for sliding surface

材料比例序号	石英砂:滑石粉:黄土:甘油:水	黏聚力/kPa
A	8:7:1:2:2	8.80
B	8:8:1:2:1	38.40
C	9:6:1:2:2	44.35
D	10:4:2:3:1	8.49
E	6:6:3:3:2	10.80

锚杆目标参数如表 3,锚杆采用直径为 6 mm 的带肋钢筋,利用角磨机对带肋钢筋进行加工,令其抗拉强度降低到目标参数的允许范围。通过电液伺服万能试验机对加工材料进行多次抗拉强度测试,最终确定钢筋打磨三分段位置,剩余截面尺寸为直径 3 mm 。锚杆试验参数如表 3 所示。

工程中消能构件的目标参数需根据地震强度大小、危岩体的重量、滑面角度、滑面可能提供的阻抗力等因素,计算出屈服强度,选择作为减震消能的钢材型号。试验所选参数如表 4、表 5,选取 Q235 材质

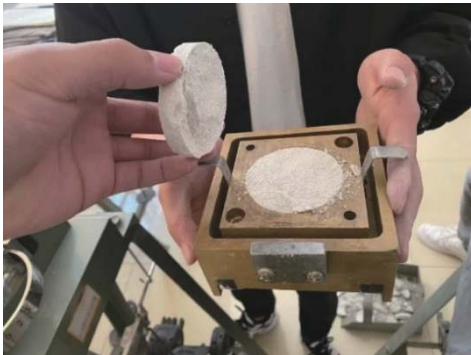


图 5 滑面试件破坏
Fig. 5 Damaged slip surface

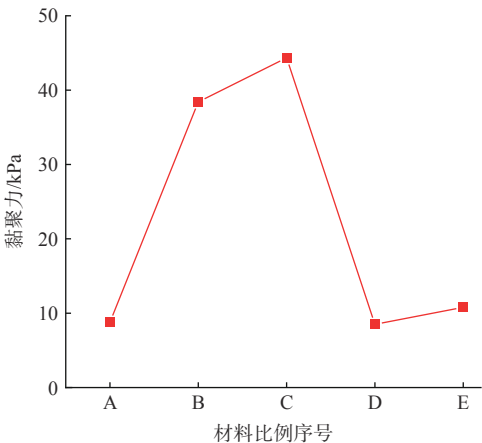


图 6 不同滑面相似材料配比黏聚力

Fig. 6 Cohesion of similar materials for different sliding surfaces

表 3 锚杆目标参数和试验参数

Table 3 Target parameters and test parameters of bolt

类型	极限抗拉强度/N
目标参数	1 508.3
试验参数	1 568.9

制成消能环,利用万能试验机对消能构件进行反复拉伸压缩循环试验,以确定消能构件的参数,试验采用位移控制加载方式,拉力为正、压力为负。消能构件的反复拉压循环试验如图 7 所示,最后得到消能构件的骨架曲线。

表 4 消能构件位移参数

Table 4 Displacement parameters of energy dissipating components

	试验参数/mm	目标参数/mm
一级消能器	59.17	58.5
二级消能器	31.30	30.4

通过反复拉伸压缩循环试验得到消能构件的滞回曲线,图 3 为消能构件的荷载位移滞回曲线。消能构件的位移参数见表 4,荷载参数见表 5。

表 5 消能构件荷载参数

Table 5 Load parameters of energy dissipating member

	试验参数/kN	目标参数/kN
一级消能器	2.11	2
二级消能器	4.38	4



图 7 反复拉压循环试验

Fig. 7 Repeated tension and compression cycle test

对比两个消能构件的试验滞回曲线,可以看出,两个消能构件的形状基本一致,塑性阶段曲线很平缓,表明两者都拥有较好的塑性变形,可以满足动荷载作用下延性大的变形需求。一级消能器的位移量很大,承载能力却不大;相反,二级消能器产生的位移量是一级消能器的一半,而承载能力是一级消能器的两倍,表明一级消能构件刚度远远小于二级消能构件刚度。同时,两者的弹性阶段和上升段初始阶段基本一致,但是二级消能器的峰值荷载远远大于一级消能器的峰值荷载。

通过试验,满足目标参数的消能构件尺寸:一级消能器两侧钢板尺寸为 160 mm×160 mm×16 mm,钢圈厚度 2 mm,宽度 20 mm,半径 100 mm;二级消能器两侧钢板尺寸为 160 mm×160 mm×16 mm,钢圈厚度 6 mm,宽度 10 mm,半径 50 mm。

3 振动台试验

3.1 试验加载工况

参照《建筑抗震设计规范》^[26]以及选波原则^[27-28],地震输入波至少需要 3 条,考虑到该项目是以西南地

区建设工程特别是川藏铁路工程的地质灾害防治为背景,选用卧龙波、El Centro 波以及人工波作为地震输入波形。

卧龙波(汶川地震波)地震震级 8.0 级,震中烈度 11 度,是近年来西南地区所发生的能量最高,烈度最大,破坏力最强,持续时间最长的一次地震,是西南地区典型地震代表,又是本项目目标地;El Centro 波是美国记录的一条地震波,震级 7 级,满足强震试验中不同的震级的要求,同时该地震波是在 II 类场地土中测到的,川藏铁路工程崩塌路段也以 II 类场地居多,同时 El Centro 波被很多试验采用^[29-30],参数比较齐全;人工波是在两种自然波的基础上进行模拟并进行加

强,满足预期的加速度峰值、符合该建设场地预期的普特性和持续时间,以符合抗震规范反应谱曲线的要求。最终采取的地震波分别为 El Centro 波、卧龙波以及人工波,试验的地震波工况为单向水平输入,其频率、振幅作为变量来研究试验模型的动力响应规律。

所有波形的地震波峰值加速度为 $0.1\text{ g} \sim 0.7\text{ g}$ 的 7 组试验设计,并且在每一种地震波加载前需先进行白噪声扫频的激振试验,测量台面和试验模型的动力反应。图 8 为 3 种地震波输入波形,图 9 为崩塌危岩体底部基岩输出波形,通过输入输出波形的对比发现,波形基本上一致,由于振动台系统内部对地震波的损耗,导致存在稍微差异,输入波加载方案如表 6 所示。

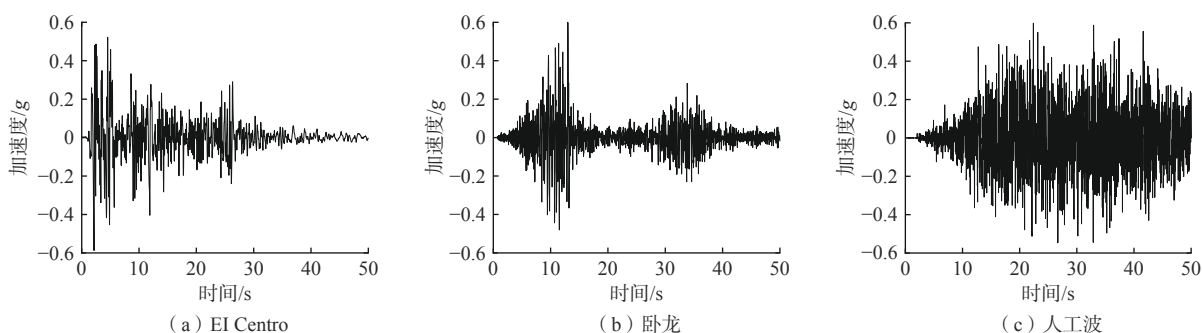


图 8 地震波输入波形

Fig. 8 Input waveforms of seismic wave

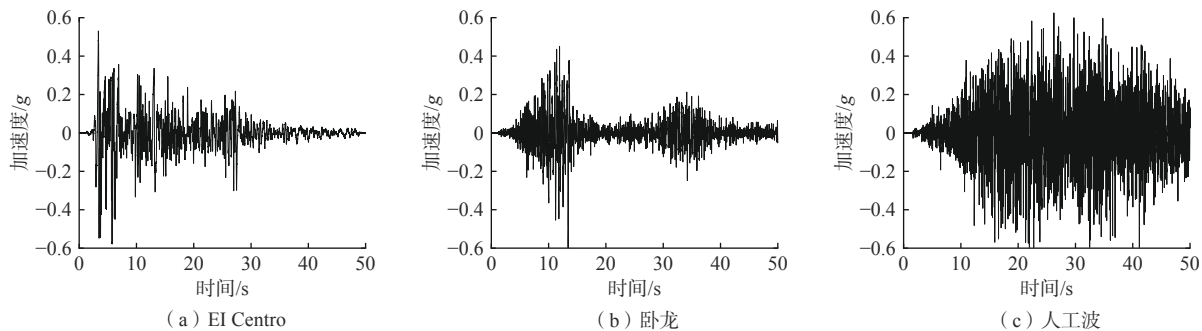


图 9 危岩体底部地震波输出波形

Fig. 9 Seismic wave output waveform at the bottom of dangerous rock mass

3.2 试验检测内容

由于试验输入的地震波为单方向的水平地震波,所以采用的加速度传感器为水平向加速度传感器,型号为中国地震局工程力学研究所生产的 891-II 型拾振器。布置 16 个通道,由 INV3060V 数据采集系统进行采集,加速度传感器的目的是检验地震波时程曲线的输入与输出,测得台面加速度峰值用来定义各测点的加速度放大系数,加速度传感器布置详图见图 10,图中 16 个标号为监测点位置。

在一级消能器与二级消能器之间连接动态拉压力传感器,根据作用力与反作用力的原理,消能构件两者受到力的大小相同;传统加固方式在锚杆危岩体固定端与支撑桩之间安装拉压力传感器,可以直接测定危岩体所受到的外力大小。在消能构件上面放置应变片,测定构件的变形量;位移测点传感器为 LE550 激光位移计,利用激光位移计来测量危岩体的永久变形。力、应变、位移的数据采用 16 通道 DH3820N 分布式信号测试分析系统进行采集。

表 6 振动台模型试验加载制度
Table 6 Loading system of shaking table test

序号	加载波形	加载方向	振幅/g	持时/s
1	白噪声	x	—	30
2	El Centro波	x	0.1	50
3	卧龙波	x	0.1	55
4	人工波	x	0.1	50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17	白噪声	x	—	30
18	El Centro波	x	0.5	50
19	卧龙波	x	0.5	55
20	人工波	x	0.5	50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	白噪声	x	—	30
26	El Centro波	x	0.7	50
27	卧龙波	x	0.7	55
28	人工波	x	0.7	50

3.3 试验数据

通过两个激光位移计,测得复合加固结构的危岩体以及支撑桩的实时位移变化,两个位移计的差可以测得危岩体不同地震波类型的下滑位移值。利用两个动态拉压力传感器测得复合加固与传统加固的实时拉压力大小,对比两个传感器来确定消能装置的耗能量。通过加速度传感器,测得 3 种 0.1 g~0.7 g 峰值加速度的输出波形,并且有 16 个监测点,得到 336 个地震波形。

4 试验数据分析

4.1 位移响应规律

为了更好地分析比较减震消能复合加固结构的效能,运用 Newmark 理论^[31]预测了危岩体在没有防护

措施的情况下,受到与试验地震加速度相同工况时产生的累积永久位移理论值。利用累积位移值与临界加速度和地震动峰值加速度比值模型计算 Newmark 累积位移值,计算公式如下^[32]:

$$\lg D_N = 0.215 + \lg \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{2.341} \left(\frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{-1.438} \right] \pm 0.510$$

式中: D_N ——累积位移值;

a_c ——临界加速度;

$a_{\max}$ ——地震动峰值加速度。

临界加速度计算^[33]:

$$a_c = (F_s - 1)g \sin \alpha$$

式中: F_s ——静态安全系数;

g ——重力加速度;

α ——滑坡面倾角。

静态安全系数计算^[34]:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma h \sin \alpha} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma \tan \alpha}$$

式中: c' ——黏聚力/kPa;

γ ——岩土体重度/(kN·m⁻³);

h ——滑面厚度/m;

α ——滑坡面倾角/(°);

φ' ——内摩擦角/(°);

γ_w ——地下水的重度/(kN·m⁻³);

m ——滑体被水浸透的厚度比例。

理论计算值与试验值如图 11 所示。通过理论位移曲线发现,无防护措施的危岩体位移曲线随着峰值加速度呈三次抛物线分布。试验曲线显示,复合加固结构防护的危岩体位移曲线在 El Centro 波与卧龙波加载工况下随着峰值加速度呈线性分布,而在人工波

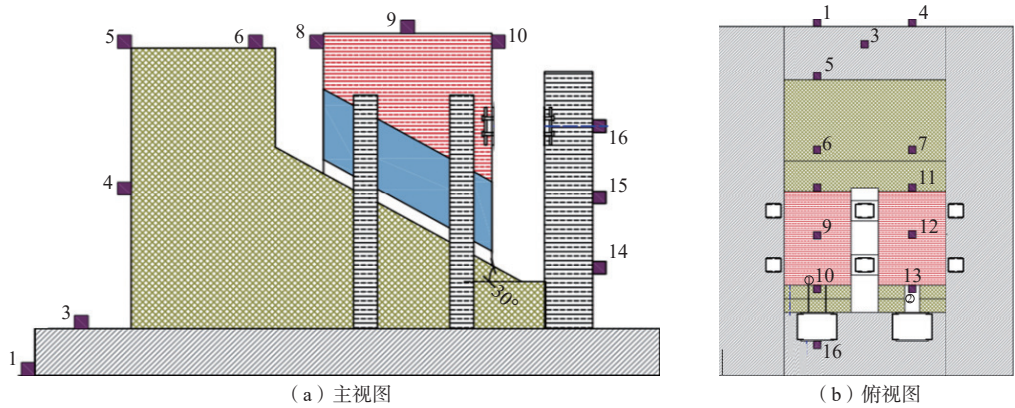


图 10 加速度传感器布置详图
Fig. 10 Detail layout of acceleration sensors
注: 1—16 为监测点位置。

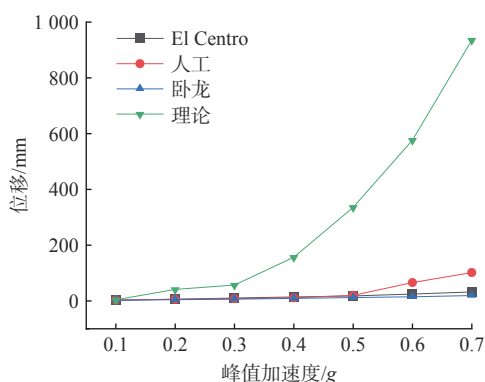


图 11 危岩体位移曲线

Fig. 11 Displacement curves of dangerous rock mass

加载工况下位移曲线前期呈线性分布,后期曲线斜率发生改变。这种现象的原因是一级消能器在后期已经发生了破坏,而且通过图 8、图 9 输入输出地震波波形发现,在相同峰值加速度下人工波比 El Centro 波、卧龙波的波形循环幅度大,因此后期人工波下的位移会大于其他波。根据模型试验的设定目标,即拟在地震加速度 0.5 g 时,一级消能器屈服,在 0.7 g 时,二级消能器屈服。现以人工波曲线来分析消能装置的试验现象,当峰值加速度达到 0.5 g 之前,一级消能器与二级消能器受力共同抵抗地震荷载,位移曲线增长幅度低。当峰值加速度达到 0.5 g 时,危岩体位移值由 19.97 mm 突增到 65.56 mm ,此时一级消能器屈服引起位移的突变,一级消能器破坏,如图 12(a)所示。随着加速度峰值的持续增加,二级消能器继续承载。当峰值加速度达到 0.7 g 时,危岩体最终累积位移值为 100.62 mm ,达到消能器最大位移发生破坏,二级消能器破坏如图 12(b)所示,整个危岩崩塌体变形如图 13 所示。通过理论值与试验值比较可以发现,理论计算的累积永久位移值明显高于复合加固结构的危岩体试验位移值,且理论曲线斜率较大,说明位移增长速

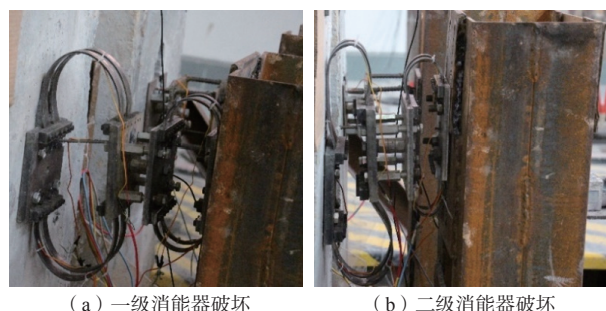


图 12 消能构件破坏图

Fig. 12 Failures of the energy dissipating member



图 13 崩塌危岩体变形图

Fig. 13 Deformations of collapsed rock mass

度大。该比较结果表明,复合加固结构的危岩体在地震作用下位移增长速度大大降低,累积位移幅度减小,显示了危岩体复合加固结构减震消能的有效性。

4.2 受力响应规律

图 14 为不同地震波形(拉为正,压为负),不同地震加速度情况下危岩体用复合加固结构与传统锚杆加固时的地震加速度受力关系曲线。试验曲线表明,三种地震波作用下加固结构的受力曲线变化规律相似;不同峰值加速度情况下,传统锚杆加固结构的受力要大于减震消能复合加固结构的受力;传统锚杆加固结构受力曲线在 0.4 g 峰值加速度时斜率发生改变,其原因是锚杆结构此时达到其设计极限强度而被拉断,地震在危岩体上产生的地震力由原来的锚杆承担

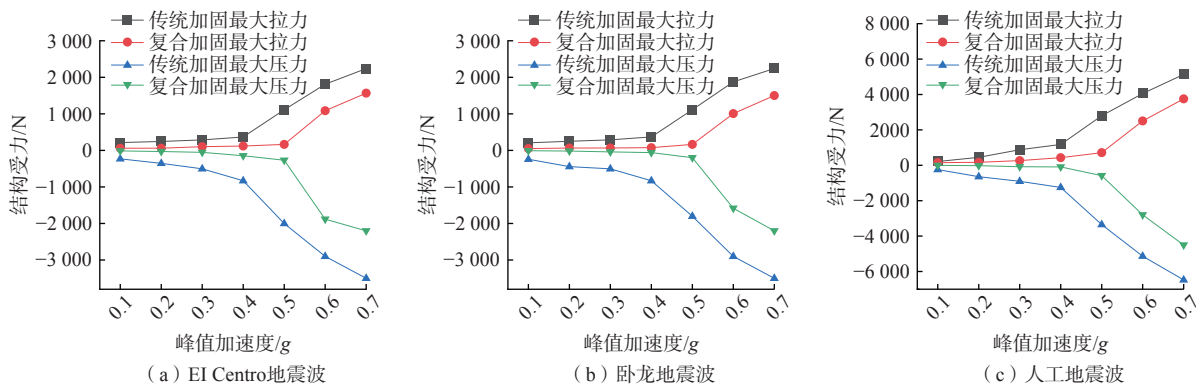


图 14 不同加速度峰值下加固结构受力曲线图

Fig. 14 Stress curves of reinforced structures under different peak acceleration

变化为由支撑桩承担。复合加固结构受力曲线斜率变化的分界点为 0.5 g 峰值加速度, 其原因是此时复合结构的一级消能器发生屈服, 锚杆发生破坏所致, 复合结构加固锚杆破坏滞后于传统加固的锚杆正体现了一级消能器的滞回作用。在一级消能器破坏后, 二级消能器继续发挥滞回作用, 所以其结构受力一直小于传统加固结构受力, 表明复合结构的消能减震功能。

4.3 加速度响应规律

为方便描述地震作用下的危岩体加速度响应规律, 引入地震加速度放大系数(PGA), 即将危岩体监测点实测地震波加速度峰值与输入地震波加速度峰值(PGA)的比值定义为地震波峰值加速度 PGA 放大系数。通过对放大系数的比较, 分析不同地震波类型、不同加速度峰值下的危岩体地震动力响应的规律。图 15 为卧龙地震波作用下试验模型 8 号、9 号、10 号、12 号和 13 号监测点峰值加速度放大系数曲线。其中 8 号、9 号、10 号为消能复合结构的危岩体监测点, 12 号、13 号为连接普通锚杆的危岩体监测点(传统加固)。

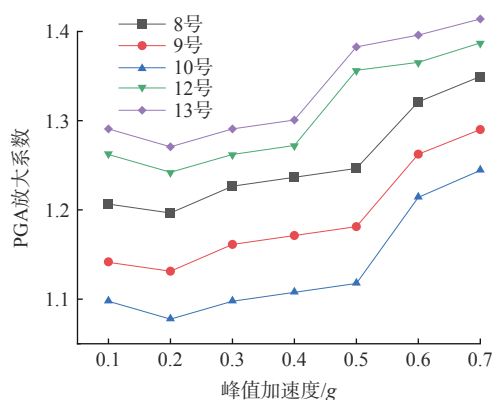


图 15 卧龙波不同振幅作用下危岩体测点峰值加速度 PGA 放大系数

Fig. 15 PGA amplification coefficient of peak acceleration of dangerous rock mass under different amplitudes of Wolong wave

图 15 PGA 放大系数曲线显示, 8 号、9 号、10 号监测点峰值加速度 PGA 放大系数比 12 号、13 号检测点所示的 PGA 放大系数要低, 表明减震消能构件在地震波动力作用下, 通过反复拉伸压缩变形, 其阻尼作用和滤波作用消耗了部分地震能, 降低了试件的动力响应, 从而使具有减震消能加固结构的危岩体的峰值加速度 PGA 放大系数比普通锚杆加固的危岩体要低, 这一试验结果表明复合加固结构相对于传统加固结构具有降低峰值加速度 PGA 放大系数的作用。同时该图还显示, 传统锚杆加固结构 PGA 放大系数值以 0.4 g 加速度作为分界点发生突变, 复合消能结构所加固的危岩体 PGA 放大系数值以 0.5 g 加速度作为分界

点发生突变, 该现象与受力响应规律现象吻合, 原因是 0.4 g 加速度时传统加固结构锚杆发生断裂, 0.5 g 加速度时复合消能加固结构一级消能器发生屈服, 从而导致曲线值在此处发生突变。这也表明了复合消能加固结构消耗了部分地震能, 从而延缓了锚杆的破坏。该曲线从两方面说明了复合加固结构消能减震的效果。

5 结论

(1) 振动台试验结果与理论计算结果比较, 在地震作用下不做防护的危岩体理论计算所产生的累积永久位移很大, 位移增长幅度变化明显。在复合加固结构防护下, 位移增长速度大大降低, 累积位移幅度减小, 显示了危岩体复合加固结构减震消能的有效性。

(2) 地震动力作用下复合加固结构的减震消能装置所受的拉力和压力要小于普通锚杆加固结构所受的拉、压力, 表明复合加固结构的可变形设计削弱了地震力峰值, 达到减震消能效果。

(3) 地震作用下的危岩体复合加固结构峰值加速度 PGA 放大系数相较于普通锚杆加固结构的 PGA 放大系数明显降低, 表明复合加固结构具有阻尼减震的能力。

总之, 滑移式崩塌减震消能支护结构振动台试验表明, 由锚杆(索)、减震锚头(一级消能)、连梁、支撑桩以及设于连梁支撑桩之间的消能器(二级消能)组成的复合加固结构, 利用自身弹塑性变形的能力, 可以削弱地震能峰值, 降低所加固危岩体的加速度放大效应, 具有良好减震消能功效, 合理设计后, 可以做到小震不坏、中震可修、大震不倒。

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 2021 年全国地质灾害灾情及 2022 年地质灾害趋势预测 [R/OL]. (2022-01-13) [2023-06-06]. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Disaster situation of geological disasters in 2021 and Trend forecast of geological disasters in 2022 [R/OL]. (2022-01-13) [2023-06-06]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113_2717375.html. (in Chinese)]
- [2] 杨志华, 张永双, 郭长宝, 等. 青藏高原东缘地质灾害影响因子敏感性分析 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 673-683. [YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, et al. Sensitivity analysis on causative factors of geohazards in eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 673-683. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘志强. 崩塌危岩体形成机制分析及防治措施研究

- [J]. *江西建材*, 2023(2): 144 – 145. [LIU Zhiqiang. Analysis on the formation mechanism of collapse dangerous rock mass and study on its prevention measures[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2023(2): 144 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 邱然, 向传华. 大别山北麓信阳片区某崩塌(危岩体)地质灾害形成机制分析及防治建议 [J]. *中国金属通报*, 2020(10): 243 – 244. [QIU Ran, XIANG Chuanhua. Formation mechanism analysis and prevention suggestions of a collapse (dangerous rock mass) geological disaster in Xinyang area at the northern foot of Dabie Mountain[J]. *China Metal Bulletin*, 2020(10): 243 – 244. (in Chinese)]
- [5] 刘永平, 仉磊, 李广杰. 某高陡边坡崩塌落石运动特征分析及其防治 [J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(1): 30 – 33. [LIU Yongping, NAI Lei, LI Guangjie. Falling rock movement characteristic and reinforcement measures of a high steep slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(1): 30 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄润秋, 刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 882 – 891. [HUANG Runqiu, LIU Weihua. *In-situ* test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 882 – 891. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘传正, 黄学斌, 黎力. 乌江鸡冠岭山崩堵江地质灾害及其防治对策 [J]. *水文地质工程地质*, 1995, 22(4): 6 – 11. [LIU Chuazheng, HUANG Xuebin, LI Li. Geological disasters of Jiguanling landslide blocking the river in Wujiang River and its prevention and control countermeasures[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1995, 22(4): 6 – 11. (in Chinese)]
- [8] 黄海宁, 巨能攀, 黄健, 等. 郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 164 – 172. [HUANG Haining, JU Nengpan, HUANG Jian, et al. Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 164 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [9] VALAGUSSA A, FRATTINI P, CROSTA G B. Earthquake-induced rockfall hazard zoning[J]. *Engineering Geology*, 2014, 182: 213 – 225.
- [10] 祁生文, 伍法权, 严福章. 岩质边坡动力反应分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. [QI Shengwen, WU Faquan, YAN Fuzhang. Rock slope dynamic response analysis[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)]
- [11] PENG Ningbo, DONG Yun, ZHU Ye, et al. Influence of ground motion parameters on the seismic response of an anchored rock slope[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1 – 10.
- [12] 陈涛. 基于 FLAC3D 的危岩撑-锚联合支护分配比研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 64 – 70. [CHEN Tao. A study of the distribution ratio for combined spore-anchor supporting of unstable rocks based on FLAC3D[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 64 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [13] ZHANG Jingwu, LI Mingdong, YI Jinxiang, et al. Investigation on the stability of fissured slopes reinforced with anchor cables under seismic action[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 1 – 14.
- [14] YE Weina, ZHOU Yong, YE Shuaihua. Dynamic stability analysis of frame anchor-supported slope[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(15): 1489.
- [15] HUANG Liang, HE Weili, HOU Yujie, et al. Seismic behavior of flexible geogrid wrap-reinforced soil slope[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1 – 12.
- [16] 龙哲. 地震作用下含软弱层岩体边坡锚固界面剪切作用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [LONG Zhe. Study on shear effect of anchorage interface of rock slope with weak layer under earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈龙飞, 邓安, 程谦恭, 等. 一种高陡危岩及大型崩塌岩土体的防护消能方法: CN115470560A[P]. 2022-12-13. [CHEN Longfei, DENG An, CHENG Qiangong, et al. Protection and energy dissipation method for high-steep dangerous rock and large-scale collapsed rock-soil body: CN115470560A[P]. 2022-12-13. (in Chinese)]
- [18] 于德杰, 吕兰颂, 刘海艇, 等. 一种适用于边坡危岩体的崩塌防治装置: CN112761170A[P]. 2021-05-07. [YU Dejie, LYU Lansong, LIU Haiting, et al. Collapse prevention and control device suitable for slope dangerous rock mass: CN112761170A[P]. 2021-05-07. (in Chinese)]
- [19] 陶志刚, 刘奎明, 胡杰, 等. 一种防滚石冲击和危岩体崩塌的新型柔性防护系统: CN115559234A[P]. 2023-01-03. [TAO Zhigang, LIU Kuiming, HU Jie, et al. A New flexible protection system against the impact of Rolling Stones and the collapse of dangerous rock: CN115559234A [P]. 2023-01-03. (in Chinese)]
- [20] 袁博, 祝介旺. 滚石冲击下棚洞破坏动力响应分析及改进对策——以川藏公路(安久拉山南麓)门式棚洞为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 57 – 66. [YUAN Bo, ZHU Jiewang. Dynamic response analyses and improvement countermeasures of shed-tunnel

- destruction under rolling stone impact: a case study of the shed-tunnel in the southern foot of the Anjiula Mountain on the Sichuan-Tibet Highway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 57 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 黄帅, 刘传正, 张景发, 等. 用于强震区高位滑坡的分布式主动消能结构及施工方法: CN113718670B[P]. 2022-07-22. [HUANG Shuai, LIU Chuazheng, ZHANG Jingfa, et al. Distributed active energy dissipation structure for high-position landslide in strong earthquake area and construction method: CN113718670B[P]. 2022-07-22. (in Chinese)]
- [22] 陈洪凯, 周云涛, 唐红梅. 基于时程分析的滑塌式危岩清除爆破动力稳定性计算方法 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 31 – 34. [CHEN Hongkai, ZHOU Yuntao, TANG Hongmei. Dynamic stability calculation method for unstable sliding rock under excavation blasting based on time history analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(15): 31 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 阿发友, 孔纪名, 倪振强, 等. 滑塌式危岩体稳定性影响因素敏感性分析 [J]. 勘察科学技术, 2011(2): 1 – 5. [A Fayou, KONG Jiming, NI Zhenqiang, et al. Sensitivity analysis on influential factors of slip-collapse unstable rock mass stability[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2011(2): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 祝介旺, 张路青, 张爱社, 等. 锚固装置、预应力锚固结构及其施工方法: CN112663605B[P]. 2022-05-27. [ZHU Jiewang, ZHANG Luqing, ZHANG Aishe, et al. Anchoring device, prestress anchoring structure and construction method of prestress anchoring structure: CN112663605B[P]. 2022-05-27. (in Chinese)]
- [25] 吕艳, 陈天宝, 王祚鹏, 等. 太行山大峡谷崩塌发育特征及成因模式研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1304 – 1315. [LÜ Yan, CHEN Tianbao, WANG Zuopeng, et al. Study on the development characteristics and genetic patterns of collapses in the Taihang Mountain grand canyon, China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(4): 1304 – 1315. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)]
- [27] 王亚勇, 刘小弟, 程民宪. 建筑结构时程分析法输入地震波的研究 [J]. 建筑结构学报, 1991, 12(2): 51 – 60. [WANG Yayong, LIU Xiaodi, CHENG Minxian. Study on the input of earthquake ground motion for time-history analysis of structures[J]. *Journal of Building Structures*, 1991, 12(2): 51 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33 – 37. [YANG Pu, LI Yingmin, LAI Ming. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(6): 33 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 李振伟. 带悬挑全转换结构抗震性能振动台试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022. [LI Zhenwei. Shaking table test study on seismic performance of full transfer structure with cantilever[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 石鑫朔. 高延性混凝土加固夯土墙房屋振动台试验及有限元分析 [D]. 保定: 河北农业大学, 2022. [SHI Xinshuo. Shaking table test and finite element analysis of high ductility concrete reinforced rammed earth wall building[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析——原理方法程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. [CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. Stability analysis of rock slope: Principle, method and procedure[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese)]
- [32] 贾召亮, 郑川, 吴艳梅, 等. 基于 Newmark 模型的地震滑坡承灾体风险评估——以 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震为例 [J]. 地震研究, 2023, 46(3): 366 – 375. [JIA Zhaoliang, ZHENG Chuan, WU Yanmei, et al. Risk assessment the hazard-bearing bodies by the earthquake-induced landslides based on the newmark model: A case study of the 2014 Ludian, Yunnan $M_s6.5$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 2023, 46(3): 366 – 375. (in Chinese with English abstract)]
- [33] WILSON R C, KEEFER D. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote lake, California, earthquake[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1983, 73(3): 863 – 877.
- [34] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3/4): 271 – 289.