文章编号:1674-2974(2025)09-0139-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025094

浅埋偏压黄土隧道震害机制振动台模型试验研究

孙纬宇[1,2†],朱辉[1],梁庆国[1],方登甲[1],严松宏[1],曹小平[1],汪精河[1]
(1. 兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘 要:黄土高原地区强震频发,常发生大规模密集型黄土滑坡.浅埋偏压黄土隧道因覆盖层厚度小、坡面临空面等因素的影响,地震动放大效应明显,易发生严重震害.本文基于大型振动台模型试验,对浅埋偏压大断面黄土隧道的震害特征和震害机制进行了系统研究.结果表明,隧道空腔的存在对坡面加速度放大系数的分布特征影响较大,影响区域主要集中在0.25*H*~0.80*H*范围内;坡体内水平向加速度放大系数随高程的增大呈非线性增长趋势,约2/3坡高以下区域加速度放大效应较弱,约2/3坡高以上区域加速度放大效应显著增强;在水平向地震动作用下,偏压隧道衬砌沿右拱腰至左墙脚以及左拱腰至右墙脚共轭45°方向形成贯通拉压裂缝,震害严重;小角度偏压条件下,坡体内部产生了从坡顶贯通至隧道深埋侧墙脚处的连续滑裂面,坡体表面和坡顶产生了局部连续滑移和局部坍塌;隧道空腔的动力放大作用是坡表局部滑裂面形成的主要原因,而地震惯性力与岩土体重力产生的斜向合力是隧道衬砌深埋侧挤入变形、浅埋侧挤出变形的根本原因.本研究可为浅埋偏压黄土隧道的抗震设计提供参考.

关键词:偏压隧道;加速度放大系数;震害机制;振动台模型试验
中图分类号:U25;TU444 **文献标志码**:A

Shaking Table Model Test Research on Seismic Damage Mechanism of Shallow Buried Bias Loess Tunnel

SUN Weiyu[1,2†], ZHU Hui[1], LIANG Qingguo[1], FANG Dengjia[1], YAN Songhong[1], CAO Xiaoping[1], WANG Jinghe[1]
(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Loess Plateau region is prone to frequent strong earthquakes, which often trigger large-scale, intensive loess landslides. Shallow buried bias loess tunnels are highly susceptible to significant seismic damage due to factors such as thin overburden and unsupported slope faces, which result in pronounced seismic amplification effects. The seismic damage characteristics and mechanisms of shallow buried bias large section loess tunnels were

* **收稿日期**:2024-09-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208392,52168070, 52168058), National Natural Science Foundation of China(52208392, 52168070,52168058);中国博士后科学基金资助项目(2021M693843),China Postdoctoral Science Foundation(2021M693843);甘肃省科技厅重点研发计划资助项目(23YFGA0086),Gansu Provincial Science and Technology Department key research and development program (23YFGA0086)
作者简介:孙纬宇(1988—),男,甘肃天水人,兰州交通大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: 448221362@qq.com

systematically investigated through large-scale shaking table model tests. The results indicate that the presence of tunnel cavities significantly influences the distribution characteristics of acceleration amplification factors on the slope face, with the main affected region being between 0.25*H* and 0.80*H*. The horizontal acceleration amplification factor within the slope increases nonlinearly with elevation, with weaker amplification effects below approximately 2/3 of the slope height and significantly stronger amplification effects above approximately 2/3 of the slope height. Under horizontal seismic loading, the tunnel lining experiences extensive tensile and compressive through-cracks along the conjugate 45° directions from the right arch waist to the left wall foot, and from the left arch waist to the right wall foot, resulting in severe seismic damage. Under the condition of small-angle bias, continuous slip surfaces extend from the slope crest to the tunnel's deep-buried side wall foot, with local continuous sliding and localized collapse occurring at the slope surface and crest. The dynamic amplification effect of the tunnel cavities is the primary cause of the formation of local slip surfaces at the slope surface, while the combined shear force from the seismic inertia force and gravitational force of the rock-soil body is the fundamental cause of the inward deformation of the tunnel lining on the deep-buried side and outward deformation on the shallow side. The findings of this study provide valuable insights into the seismic design of shallow buried bias loess tunnels.

Key words: bias tunnel; acceleration amplification factor; seismic damge mechanism; shaking table model test

"一带一路"倡议和交通强国战略的深入实施,极大推动了我国西北部黄土高原地区的基础设施建设,使得黄土高原地区修建的铁路、公路以及地铁隧道等日益增多[1-2]. 黄土高原地区沟壑纵横、山林密布,受线路走向和地形条件的限制,大量隧道的进出口段不可避免地位于高陡斜坡边缘等抗震不利地段,形成了大量的傍山偏压黄土隧道.

受青藏高原北东向推挤和黄土高原东北部、东南部稳定块体阻碍作用的影响,我国黄土高原地区成为我国地震活动最为强烈的地区之一[3-4]. 历次强震震害调查表明,隧道洞口浅埋偏压段是震害最严重的区域之一,该区域常发生边仰坡垮塌、衬砌开裂等破坏情况,易造成洞口堵塞或掩埋,阻断交通,严重影响灾后救援工作[5-6].

目前,针对山岭隧道洞口段地震响应、震害特征及抗减震技术等方面的研究已取得了丰硕的成果. 如高峰等[7]通过三维数值模拟分析了隧道衬砌的地震响应沿隧道轴线的变化规律,明确了隧道洞口段抗震设防长度的主要影响因素;刘国庆等[8]对强震区引水隧道的洞口段边坡及隧道结构的地震响应特征和震害模式进行了研究;陶连金等[9]通过振动台模型试验,研究了山岭隧道仰坡坡度与洞口段衬砌受力特征及边坡破坏形式的关系;王帅帅等[10]研究了含软弱夹层隧道洞口仰坡及衬砌在水平和竖向地震作用下的动力响应与破坏特征,分析了地震动方向对隧道结构动力响应的影响;梁庆国团队[11-13]采用数值模拟和振动台模型试验,对黄土地区山岭隧道洞口段的动力响应及失稳形态进行了系统研究;任洋等[14]基于大型离心机振动台试验揭示了地形及地震动参数对隧道洞口段边坡动力响应特征的影响机制;Wang等[15]、Yu等[16]通过震害调查总结归纳了山岭隧道洞口段的震害类型及特征;Wu等[17]结合汶川地震龙溪隧道震害特征,采用ABAQUS软件基于黏弹性人工边界和域缩减法实现了瑞利(Rayleigh)波输入,并研究了其作用下隧道洞口段衬砌的损伤演化规律;隋传毅等[18]通过振动台模型试验发现,框架梁形式的仰坡支护体系在高烈度水平地震作用下能够显著提高仰坡整体抗震性能;崔光耀等[19]通过振动台模型试验对隧道洞口段的抗减震措施进行了研究,发现采用刚柔相济的抗减震措施具有显著的抗减震效果;Wang等[20]通过振动台模型试验对采用框架梁与抗滑桩加固隧道洞口段的抗震性能进行了研究,并基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform,HHT)对洞口段的损伤情况进行了识别分析.

可以看出,以上研究大多围绕岩质隧道洞口段的地震响应特性及震害特征,而偏压黄土隧道是黄土边坡与隧道结构组成的复杂耦合体系. 黄土边坡的局部地形对地震动具有显著的放大作用,而隧道空腔(隧道断面的净空部分)的存在会进一步影响地震波在黄土边坡中的传播路径和特性. 这种双重因

素的耦合作用将使黄土边坡与隧道结构的震害更为显著.然而,目前针对偏压黄土隧道与黄土边坡相互作用机理的研究仍较有限.为此,以某浅埋偏压大断面黄土隧道为研究对象,通过振动台模型试验研究了水平地震作用下浅埋偏压隧道边坡及围岩的加速度分布特征、隧道衬砌的受力特征,以及围岩、边坡与衬砌结构的震害特征与机制,以期为浅埋偏压黄土隧道的抗震设计和优化提供理论参考.

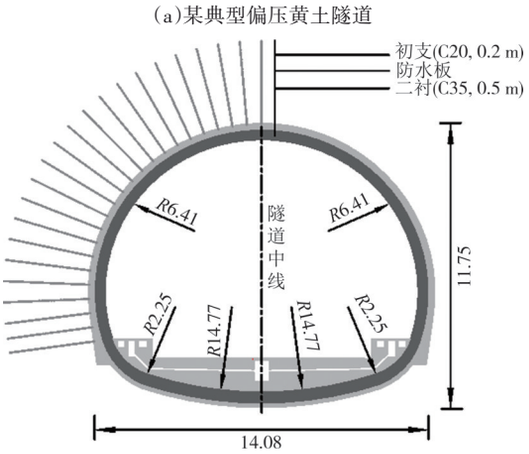
1　振动台模型试验设计

1.1　依托工程概况

依托工程为某典型偏压大断面黄土隧道,如图1(a)所示.该隧道进出口段位于黄土梁峁区,地势呈西南高、东北低的分布特征.隧道所在区域的海拔为2 010~2 140 m,围岩为浅黄色风积黄土,土质湿润且密实,孔隙较为发育.根据设计资料,该隧道高度为11.75 m,跨度为14.08 m,采用复合式衬砌结构.初期支护为厚度0.2 m的C20喷射混凝土,二次衬砌为厚度0.5 m的C35模筑钢筋混凝土,隧道横断面设计如图1(b)所示.



(a)某典型偏压黄土隧道



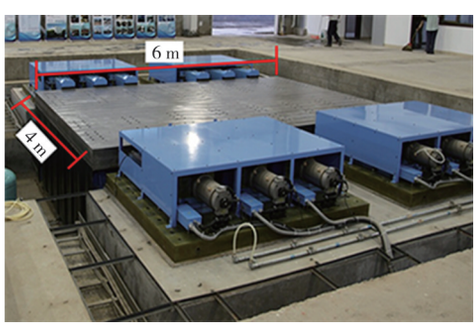
(b)隧道横断面设计(单位:m)

图1　某典型偏压黄土隧道及横断面

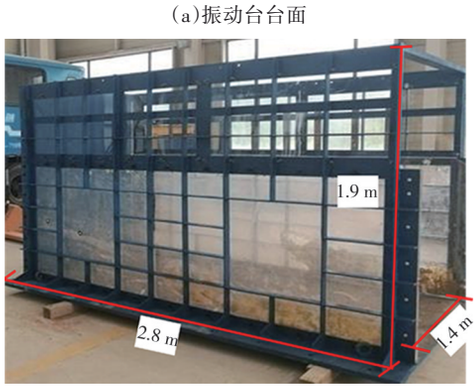
Fig.1　A typical bias loess tunnel and its cross section

1.2　振动台参数介绍

试验采用的振动台台面尺寸为4 m×6 m,如图2(a)所示.该振动台水平向单向加载时最大承载力为20 t,竖直向单向加载时最大承载力为15 t,水平竖直双向耦合加载时最大承载力为15 t;水平向单向加载时最大加速度为1.7g,竖直向单向加载时最大加速度为1.2g,水平竖直双向耦合加载时最大加速度为1.2g.试验使用刚性模型箱,长2.8 m,宽1.4 m,高1.9 m.为减弱模型箱边界对土体的约束作用,同时吸收刚性模型箱反射的地震波,试验中在模型箱的后壁贴覆一层与箱体大小一致、厚度为10 cm的聚乙烯泡沫板,以减小“模型箱效应”的影响.试验中采用的模型箱如图2(b)所示.



(a)振动台台面



(b)模型箱

图2　振动台台面及模型箱

Fig.2　Shaking table and model box

1.3　相似关系设计

模型试验中,模型结构与原型结构的尺寸、材料参数及所承受的荷载等需保持一定的比例.然而,由于原型的复杂性和试验条件的局限性,难以实现所有参数的完全相似性.因此,试验中通常以主要控制参数为基础进行相似设计,忽略次要参数的影响.结合振动台台面尺寸及原型偏压隧道的实际情况,最终确定原型与模型的几何相似比为25∶1.原型与模型同处重力场中,重力相似系数S_g=1,密度相似比S_ρ=1.以几何尺寸L、密度ρ和输入加速度a作为基本控制指标,依据Buckingham π理论和量纲分析方法

推导其余物理量的相似系数[21-22],最终确定振动台模型试验的相似系数如表1所示.按照几何相似比的要求,试验中制作了高度为47.0 cm、跨度为56.0 cm、衬砌厚度为2.0 cm的隧道结构进行振动台模型试验.

表1 振动台模型试验相似系数

Tab.1 List of similarity relations for the shaking table model test

物理参数	量纲	相似系数
几何尺寸L	L	S_L = 25
密度ρ	ML^{-3}	S_ρ = 1
加速度a	LT^{-2}	S_a = 1
弹性模量E	$ML^{-1}T^{-2}$	S_E = 25
应变ε	1	S_ε = 1
应力σ	$ML^{-1}T^{-2}$	S_σ = 25
黏聚力c	$ML^{-1}T^{-2}$	S_c = 25
内摩擦角φ	1	S_φ = 1
时间t	T	S_t = 5
频率ω	T^{-1}	S_ω = 0.2

1.4 相似材料配制

试验中,黄土相似材料的配制参考Wu等[23]关于黄土边坡振动台模型试验的配制经验,并结合室内试验结果,最终确定其配合比为黄土:水:锯末:重晶石粉(2 mm筛)=0.72:0.14:0.02:0.10.衬砌混凝土采用目前模型试验广泛使用的微粒混凝土[22,24].综合考虑微粒混凝土强度及流动性等特性,最后确定其配比为水泥(P32.5):细砂:水=1:6:1.5.模型相似材料的物理力学参数如表2所示.

表2 相似材料物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of similar materials

材料	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa
原型黄土	1.65	14.50	21.3	18.40	—
模型黄土	1.62	14.20	6.36	18.80	—
衬砌	1.90	—	—	—	6.16

1.5 监测方案

模型边坡总高度为1.5 m,其中坡高1.2 m,偏压角度为30°,隧道浅埋侧拱肩至坡面的最小覆土厚度为0.4 m,坡脚至模型箱底部的距离为0.3 m.在坡面测线等间距布置6个加速度传感器(编号为A-1~A-6),用于分析隧道对坡面加速度变化规律的影响.在隧道中心轴线上设置一条加速度测线,传感器编号依次为A-10、A-9、A-8和A-5,用于测量从隧道仰拱底至坡面的加速度变化规律.此外,在距离隧道深埋侧边墙30 cm处设置一条竖向加速度测线,传感器编号为A-13~A-18,用于记录坡体内同一竖直面内不同埋深处的加速度变化规律.传感器具体布置情况如图3所示.

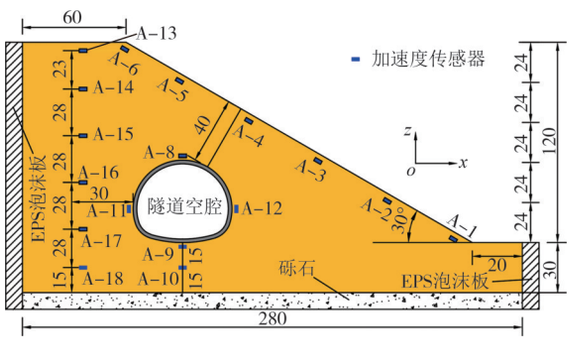


图3 加速度传感器布置(单位:cm)

Fig.3 Distribution of acceleration sensors(unit:cm)

为研究偏压黄土隧道在地震动作用下衬砌的变形与受力特征,在隧道衬砌内外表面沿环向布置混凝土应变片,其布置方式如图4所示.

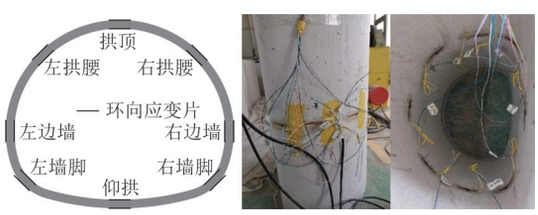


图4 隧道衬砌应变片布置示意图

Fig.4 Tunnel lining strain gauge layout diagram

1.6 模型制作

在浇筑微粒混凝土之前,首先在衬砌内膜上绑扎直径为1 mm、纵横向间距为10 mm的钢丝网,以模拟二衬配筋.完成配筋绑扎后,进行微粒混凝土的浇筑.浇筑过程中,需及时对混凝土进行振捣,以保证混凝土的密实性.混凝土浇筑完成后,经过7 d拆模并进行养护,养护满28 d后开展试验.边坡模型采用分层填筑法,每层层厚为10 cm,填筑时通过密度控制压实度,以确保边坡结构的稳定性.试验中,隧道衬砌由两节长度为70 cm的节段组成,节段间通过宽20 cm、厚0.5 cm的橡胶连接,以模拟隧道施工缝.衬砌节段安装及边坡模型填筑的具体过程如图5所示.

1.7 加载方案

试验选用了El-Centro波(简称EL波)和汶川地震中记录的汤峪波(简称TY波)作为加载地震波.试验的主要目的是研究浅埋偏压隧道的震害机理,同时考虑到相似材料并不完全满足设计相似比,所以加载地震波在输入时未进行时间压缩.两条加载地震波的波形如图6所示.



图 5　偏压黄土模型制作过程

Fig.5　The process of making a bias loess model

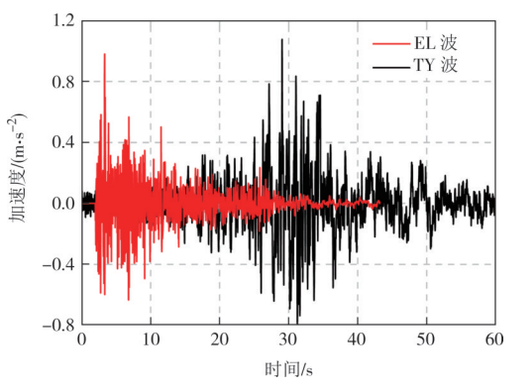


图 6　加载地震波加速度时程

Fig.6　Loading seismic wave acceleration time history

地震波加载峰值范围为 0.1g~1.2g,试验中按照由弱到强的顺序逐步加载. 在每个峰值下,先加载 EL 波,后加载 TY 波,加载方向为 X 向(水平向). 其中,X 向是指与隧道纵向相互垂直的方向,Z 向为竖直方向,地震波入射方向为垂直方向. 具体加载方案如图 7 所示.

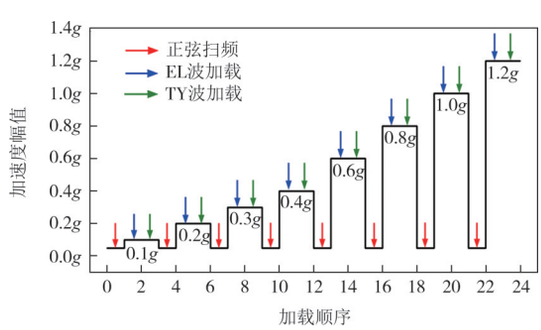


图 7　地震波加载方案

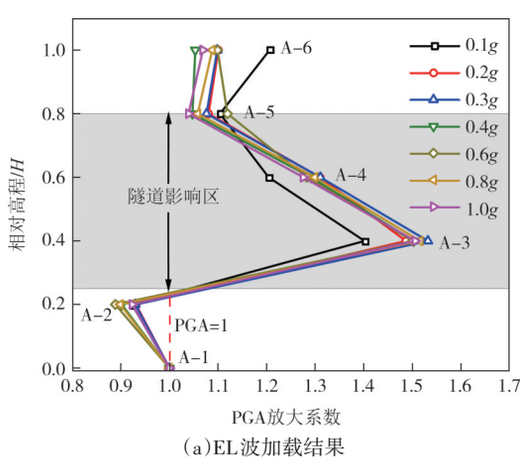
Fig.7　Seismic wave loading scheme

2　试验结果分析

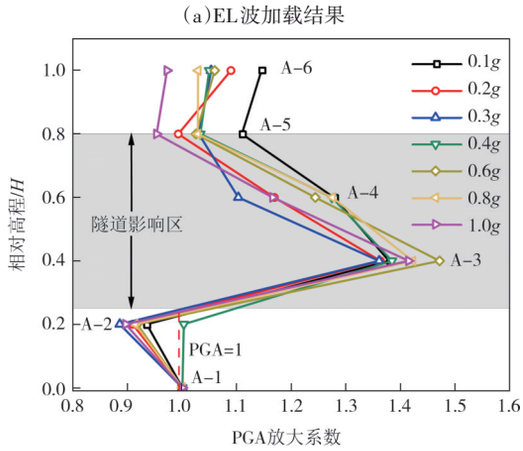
2.1　加速度放大系数分布规律分析

受边坡局部地形以及隧道结构存在的影响,地震波在传播的过程中会产生复杂的反射与叠加,导致边坡及坡体内部产生动力放大效应,对隧道结构产生影响. 为分析土体不同位置处加速度放大系数的变化规律,定义坡面的加速度放大系数为坡面各测点加速度峰值与 A−1 测点加速度峰值的比值. 同理,中心测线和竖直测线的加速度放大系数分别为各测点加速度峰值与 A−10 和 A−18 测点加速度峰值的比值.

图 8 为坡面 PGA(最大峰值加速度)放大系数随坡面高程的变化规律. 从图 8 可以发现,隧道结构的存在对坡面加速度放大系数分布特征的影响较大. 在 A−2 测点至 A−3 测点范围内,坡面加速度放大系数急剧增大,并在 A−3 测点达到峰值,而从 A−3 测点至 A−5 测点范围内又逐渐减小. 由此可知,隧道对坡面加速度响应的影响区域为 A−2 测点至 A−5 测点范围,相对高程为 0.25H~0.80H. 造成这一规律的主要原因在于,A−3 测点至 A−4 测点范围内坡面至隧道结构的距离最近,覆土厚度最小,且隧道模型断面尺寸较大,隧道空腔削弱了坡体对坡面土体的约束作用,同时坡面临空面产生加速度放大效应,使该区域内坡面土体的惯性作用更加显著,导致土体振动强烈.



(a)EL 波加载结果

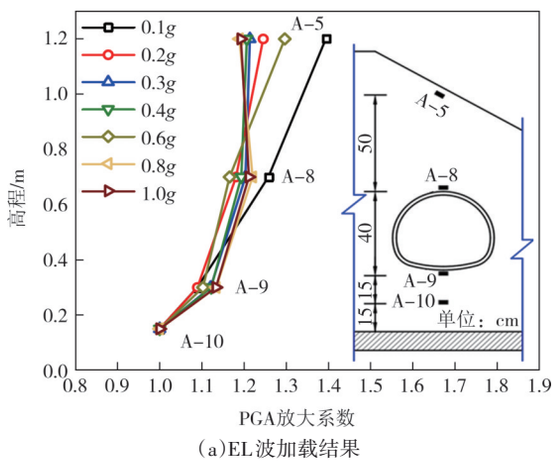


(b)TY 波加载结果

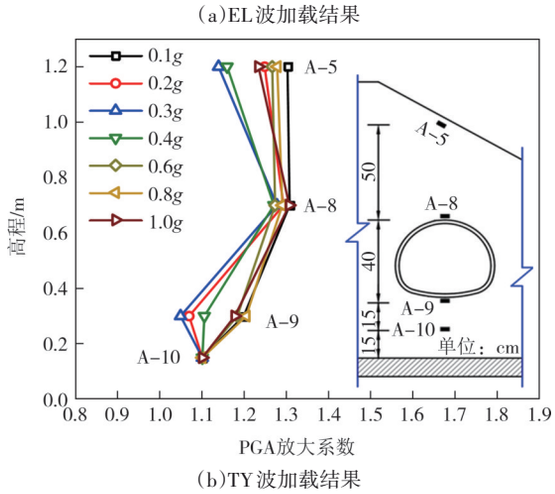
图 8　水平向加载坡面加速度放大系数

Fig.8　Horizontal loading slope acceleration amplification factor

图9为在水平地震作用下,隧道轴线上各测点加速度放大系数随高程的变化规律.从图9可以看出,隧道中心测线的加速度放大系数随高程增加呈现出非线性增长趋势.相较于仰拱部位,拱顶的加速度放大系数增幅更加显著.



(a)EL波加载结果



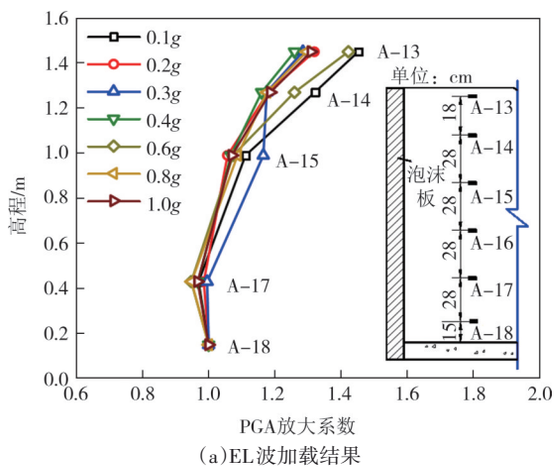
(b)TY波加载结果

图9 水平向加载隧道中心测线加速度放大系数

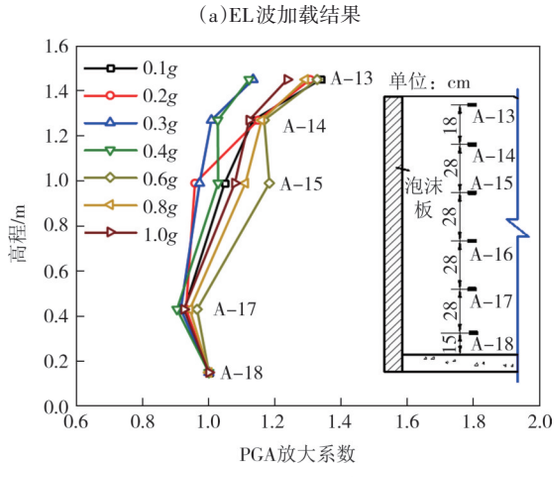
Fig.9 Acceleration amplification factor along the central measuring line in the tunnel under horizontal loading

在EL波加载条件下,仰拱A-9测点的PGA放大系数范围为1.09~1.13,平均值为1.11;而拱顶A-8测点的PGA放大系数范围为1.17~1.26,平均值为1.20,平均值增幅达8.1%.在TY波加载条件下,仰拱A-9测点的PGA放大系数变化范围为0.95~1.10,平均值为1.04;而拱顶A-8测点的PGA放大系数范围为1.17~1.21,平均值为1.19,平均值增幅达14.4%.这一现象的产生主要是由于隧道仰拱部位受土体的约束作用较强,其振动与周围土体基本同步;而拱顶受隧道空腔的影响,土体对其约束作用较弱,惯性效应更为显著,导致振动更为强烈.此外,从拱顶A-8测点到坡面A-5测点的PGA放大系数增幅较小,这表明隧道空腔对加速度放大效应的影响显著高于高程变化对加速度放大的影响.

为进一步研究坡体内同一竖直面上加速度响应的变化规律,提取了坡体竖向测线上各点的PGA放大系数,结果如图10所示.可以发现,在竖直方向上,坡体的加速度放大系数具有明显的高程放大效应,即随坡体高程的增加,坡体的加速度放大系数呈非线性增长趋势.



(a)EL波加载结果



(b)TY波加载结果

图10 水平向加载竖直测线加速度放大系数

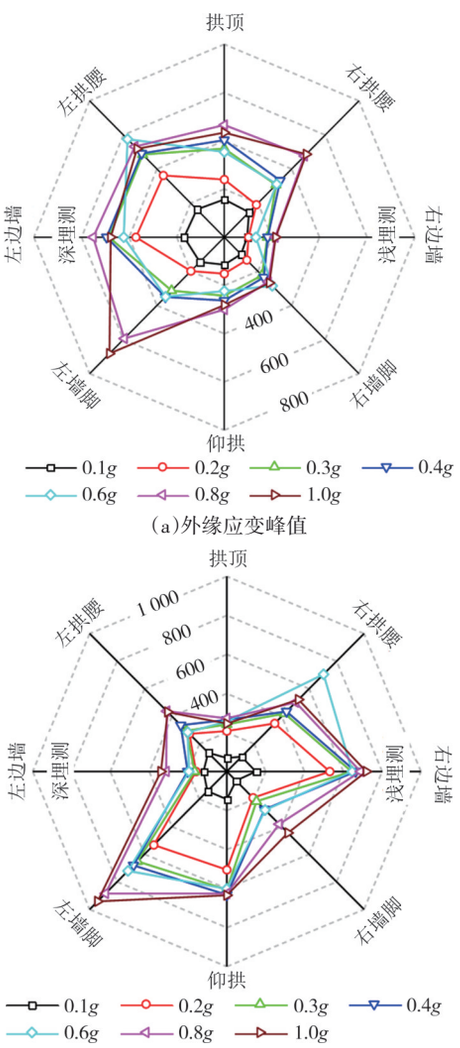
Fig.10 Acceleration amplification factor along the vertical measuring line under horizontal loading

在A-18测点至A-15测点范围内,PGA放大系数增幅较小,放大效应较弱;而从A-15测点至坡顶A-13测点范围内,PGA放大系数迅速增大,放大效应显著.具体而言,坡体从底部至中上部(约2/3坡高)区域,加速度的高程放大作用较弱;从坡体中上部(约2/3坡高)至坡顶区域,加速度高程放大效应则显著增强.这一现象的产生主要是由于坡体中下部土体的水平厚度较大,整体刚度较高,当地震波传播至此区域时,土体表现出较强的一致振动.此外,地震波从模型底部向上传播的过程中,部分能量被土

体阻尼消耗,高程放大作用不明显;而当地震波传播至坡体中上部后,由于土体水平向厚度减小、整体刚度降低,惯性振动效应增强,导致坡体顶部区域的加速度放大作用显著.

2.2　隧道衬砌变形特征分析

根据图 4 中衬砌环向应变片的布置位置,提取了隧道结构在水平向地震荷载作用下的应变峰值数据,并分别绘制了 EL 波和 TY 波作用下的衬砌环向应变峰值包络图,如图 11、图 12 所示.



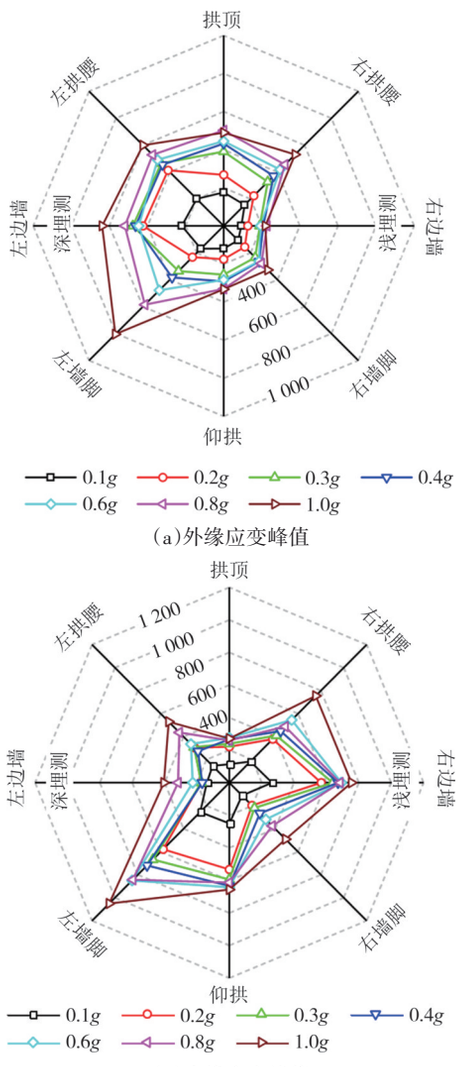
(a)外缘应变峰值

(b)内缘应变峰值

图 11　EL 波作用下衬砌环向应变峰值包络图(单位:με)

Fig.11　Peak envelope diagram of strain at lining circumferential under EL wave action (unit: με)

从图 11、图 12 可以看出,对于隧道衬砌外缘,在 EL 波作用下,右拱腰—左拱腰—左边墙—左墙脚范围内的衬砌应变峰值较大,而其他部位的应变峰值相对较小,这表明深埋侧隧道衬砌的应变峰值远大于浅埋侧,说明在水平地震作用下,深埋侧隧道衬砌外缘承受了更大的受力和变形,且受力和变形具有明显的偏压特性;而在 TY 波作用下,这种偏压特性在地震动加载幅值较小时较为明显,随着地震动加载幅值逐渐增大,该偏压特性有所减弱,但整体上右边墙—右拱腰—左拱腰—左边墙—左墙脚范围内的衬砌应变峰值较大,其余部位的衬砌应变峰值较小.



(a)外缘应变峰值

(b)内缘应变峰值

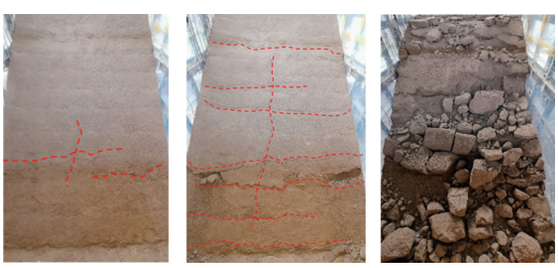
图 12　TY 波作用下衬砌环向应变峰值包络图(单位:με)

Fig.12　Peak envelope diagram of strain at lining circumferential under TY wave action (unit: με)

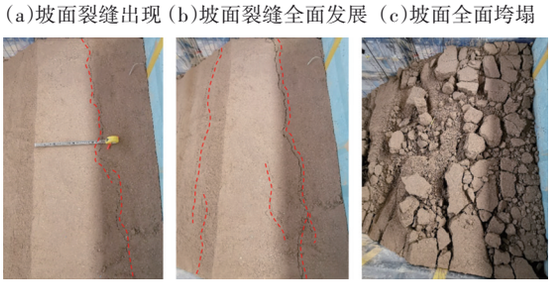
对于隧道衬砌内缘,EL 波和 TY 波作用下衬砌应变峰值的变化规律基本一致,表现为右拱腰、右边墙和左墙脚范围内的应变峰值较大,而其余部位的应变峰值较小.同时发现,无论是衬砌内缘还是衬砌外缘,相比于其他部位,右拱腰至左墙脚以及左拱腰至右墙脚的共轭 45°方向上衬砌的应变峰值均较大,这表明隧道衬砌在共轭 45°方向上产生了明显的拉压变形.

2.3 偏压隧道边坡及隧道结构震害特征分析

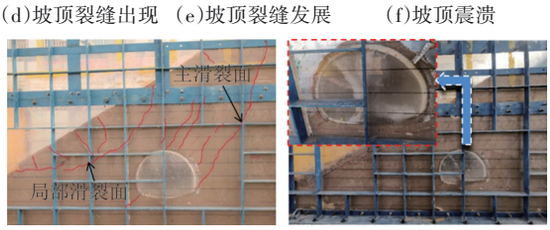
图13为地震波垂直入射下30°偏压黄土隧道边坡的震害特征.通过试验过程及影像资料的观察可以发现,当地震动加载幅值达到0.4g时,边坡坡面开始出现裂缝;随着加载幅值逐渐增大,这些裂缝逐步扩展并延伸.当加载幅值达到0.8g时,边坡坡面开始出现松动并伴随掉块现象,隧道周围裂缝迅速发展,逐渐形成从隧道拱顶上方延伸至边坡坡面的贯通裂缝,同时,浅埋侧墙角部位及深埋侧拱腰部位的裂缝进一步发育,边坡坡顶的横向裂缝也逐渐加宽.随着地震动加载幅值进一步增大至1.0g,边坡坡顶至深埋侧隧道拱脚的围岩之间形成贯通的圆弧形滑裂面,同时,边坡坡面局部也开始出现贯通的圆弧形滑裂面.当加载幅值达到1.2g时,边坡坡顶被震溃并发生垮塌,深埋侧隧道衬砌受到周围土体挤压,隧道内部发生约3 cm的变形,同时,深埋侧拱腰部位出现较宽裂缝,表明深埋侧衬砌产生了显著的变形与破坏.



(a)坡面裂缝出现 (b)坡面裂缝全面发展 (c)坡面全面垮塌



(d)坡顶裂缝出现 (e)坡顶裂缝发展 (f)坡顶震溃



(g)坡表及坡体滑裂面 (h)深埋侧围岩挤入隧道

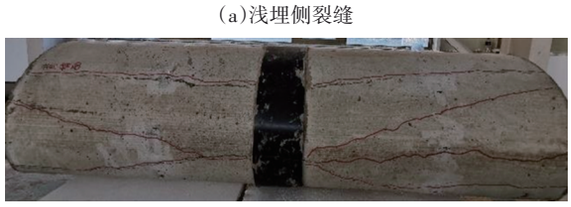
图13 30°偏压黄土隧道边坡震害特征

Fig.13 Seismic damage characteristics of 30° bias loess tunnel slope

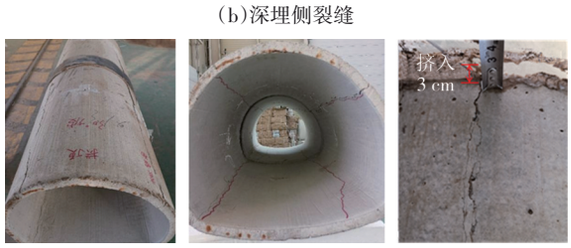
随着输入地震动加速度峰值的逐步提高,隧道结构破坏逐渐累积,最终呈现如图14所示的震害现象.从图14可以看出,在地震波垂直入射条件下,浅埋偏压大断面黄土隧道的左右拱腰和左右墙脚部位是震害的易发区域,而拱顶和仰拱部位几乎未受损坏.在水平地震动作用下,深埋侧土体受到水平惯性力的影响,产生朝向坡面临空面的位移,导致深埋侧衬砌被挤入隧道内部,挤入深度达3 cm.与此同时,浅埋侧衬砌则向坡体表面方向挤出,在左右拱腰和左右墙脚位置形成了纵向贯通裂缝,其中深埋侧衬砌内缘以及浅埋侧衬砌外缘的裂缝较宽.此外,深埋侧衬砌边墙外表面也出现纵向贯通裂缝,并伴随节段连接带的断裂,但内表面及浅埋侧边墙未见明显裂缝.由此可见,地震波垂直入射下,浅埋偏压黄土隧道的左右拱腰和左右墙脚是地震易损区域,且深埋侧的震害程度明显高于浅埋侧.因此,在进行抗震设计时,应特别关注这些关键区域,以提高隧道结构的抗震能力.



(a)浅埋侧裂缝



(b)深埋侧裂缝



(c)拱顶两侧裂缝 (d)内部纵向裂缝 (e)深埋侧衬砌挤入

图14 30°偏压黄土隧道衬砌震害特征

Fig.14 Seismic damage characteristics of 30° bias loess tunnel lining

3 边坡与隧道结构的震害模式及震害机制分析

通过分析试验后隧道边坡的震害特征,得出了地震波垂直入射下小角度浅埋偏压黄土隧道边坡的震害模式(图15)及震害机制.

从图15可知,对于小角度偏压的浅埋偏压黄土

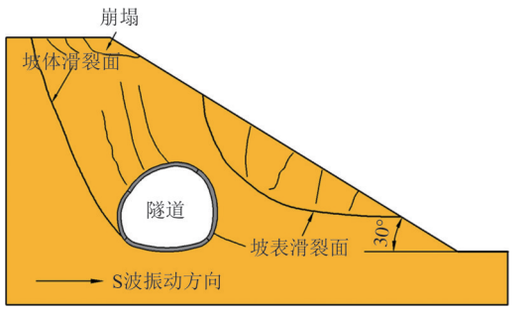


图 15　小角度浅埋偏压黄土隧道边坡震害模式

Fig.15　Seismic damage mode of small angle shallow buried bias loess tunnel slope

隧道边坡,在强震作用下坡面的整体稳定性较好,其破坏形式主要有两点:一是坡体内部从坡顶延伸至深埋侧隧道拱脚范围的连续滑移面;二是坡体表面的局部滑移和坡顶的局部坍塌.

其震害机制分析如下:首先,局部地形对地震动具有显著的放大效应.在地震过程中,水平向加速度呈瞬时动态变化,方向不断交替,使坡体产生反复的水平向惯性力.在坡表土体经受反复的张拉应力作用后,土体逐渐被震松,在坡肩几何突变的位置发生局部垮塌.由于坡面和隧道空腔双临空面的存在,坡表局部滑裂面周围土体的约束作用减弱,而惯性作用则显著增强.这种双重放大效应最终导致坡表局部滑裂面的出现.

其次,对于坡体内部滑裂面,其形成机理与地震惯性力和岩土体重力的合力方向密切相关.以不利于坡体稳定为前提,当假定地震产生水平向右的惯性力时,该惯性力与岩土体的重力共同作用,产生朝向坡脚的合力.由于坡度较小且坡脚覆土较厚,坡脚位置土体具有较好的稳定性,因此未能形成贯通坡脚的连续滑裂面.相反,隧道空腔的存在削弱了周围土体的约束能力,为上覆土体下滑提供了通道.当地震荷载达到一定阈值后,坡体深部土体沿着坡顶至隧道深埋侧墙脚的路径发生滑动,最终形成贯通坡顶和隧道深埋侧墙脚的连续滑裂面.

根据浅埋偏压黄土隧道边坡的震害机制,可以得到偏压黄土隧道衬砌结构的震害机制,如图 16 所示.

从图 16 可以发现,浅埋偏压黄土隧道左右拱腰和左右墙脚是地震作用下的易损部位.对于深埋侧隧道,上方下滑土体自重对隧道衬砌产生显著挤压作用,使深埋侧拱腰部位遭受严重破坏.具体表现为:衬砌外侧受到挤压力形成挤压裂缝,内侧则因拉

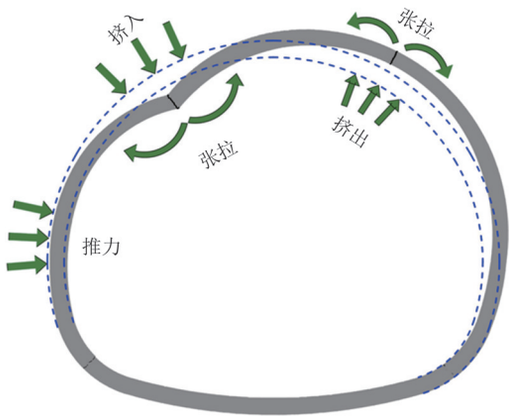


图 16　小角度偏压黄土隧道衬砌震害机制

Fig.16　Seismic damage mechanism of small angle bias loess tunnel lining

力作用产生拉裂缝,挤压与拉伸的共同作用导致拱腰部位衬砌产生朝向隧道内部的变形;此外,地震荷载产生的水平推力进一步加剧了深埋侧隧道的变形,尤其在拱腰和拱墙部位,衬砌向隧道内部的变形明显增强,这导致深埋侧拱脚部位承受较大弯矩,形成拱脚外侧张拉裂缝与内侧挤压裂缝的典型破坏模式.

对于浅埋侧隧道,受地震水平推力和上覆土体下滑共同作用,衬砌产生朝向坡面的挤出变形.浅埋侧拱腰部位由于覆土厚度薄弱,挤出变形最为显著,破坏程度也更为严重,其中衬砌外侧承受张拉力形成张拉裂缝,内侧则受挤压力作用产生挤压裂缝.同时,浅埋侧拱脚部位因承受上覆土体自重和水平地震推力的共同作用,同样形成较大弯矩,其衬砌内侧表现为张拉裂缝,外侧表现为挤压裂缝.

相比之下,隧道仰拱部位因位于水平位置,能有效抵抗水平地震荷载的作用,受力相对均匀.因此,仰拱部位的衬砌未见明显裂缝,震害程度较轻,与拱腰和拱脚部位的显著破坏形成鲜明对比.

综上所述,黄土隧道由于高孔隙度、低黏聚力以及特殊的地质结构,在地震作用下的震害特征和机理具有显著的特殊性.具体而言,黄土隧道在地震作用下更易发生局部坍塌和贯通滑裂等震害现象,尤其是在坡体表面和隧道周围区域.这主要源于黄土材料的结构特性,使得震害集中于左右拱腰及墙脚等薄弱部位,而拱顶和仰拱部位由于围岩的约束作用较强,震害较轻.

此外,与岩质偏压隧道相比,由于土质偏压隧道上覆围岩对隧道结构的约束作用较弱,使得土质隧

道对地震波的放大效应更为敏感,尤其是在高程增加和隧道空腔存在的情况下,坡面和隧道周围的动力响应显著增强,表现为局部滑移、贯通裂缝以及边坡局部坍塌等破坏形式.而岩质隧道由于围岩对隧道结构的约束作用较强,使得其加速度放大效应相对较小,其动力响应更多依赖岩体和支护结构的耦合作用,破坏形式主要表现为地震波在层间传播引发的剪切滑移和局部张裂等[25-26].因此,偏压黄土隧道相较于岩质偏压隧道的震害更为严重,震灾风险更高,应在抗震设计中予以重点关注.

4 结 论

通过振动模型试验,对浅埋偏压大断面黄土隧道边坡及坡体内部加速度放大系数的分布特征、隧道衬砌的受力变形特征、边坡与隧道衬砌的震害特征以及震害机制进行了分析,得出以下结论.

1)隧道空腔对浅埋偏压黄土隧道边坡表面加速度放大效应的影响较为显著,主要影响区域集中在坡体高度的0.25H~0.80H范围内.随着坡面与隧道结构距离的减小,土体的惯性作用增强,振动愈加剧烈.

2)坡体内部加速度放大系数受隧道空腔和坡体高程共同影响.加速度放大系数随高程增加呈现出非线性增大趋势,隧道空腔对加速度放大效应的影响显著高于高程变化对加速度放大系数的影响.

3)在水平地震荷载作用下,浅埋偏压隧道衬砌的应变峰值具有明显的偏压特性,深埋侧衬砌应变峰值远大于浅埋侧.左右拱腰和左右墙脚是地震作用下的薄弱部位,沿右拱腰至左墙脚以及左拱腰至右墙脚的共轭45°方向产生了明显的拉压裂缝与挤压变形.

4)浅埋偏压黄土隧道边坡在小角度偏压条件下的破坏形式主要为坡体内部从坡顶延伸至深埋侧隧道拱脚范围的连续滑移面,以及坡体表面的局部滑移和坡顶的局部坍塌.地震惯性力与岩土体重力产生的斜向合力是隧道衬砌深埋侧挤入变形、浅埋侧挤出变形的根本原因.

参考文献

[1] 王兰民,蒲小武,陈金昌. 黄土高原地震诱发滑坡分布特征与灾害风险[J]. 城市与减灾,2019(3):33-40.
WANG L M, PU X W, CHEN J C. Distribution feature and disaster risk of earthquake-induced landslide in Loess Plateau [J]. City and Disaster Reduction,2019(3):33-40.(in Chinese)

[2] 程选生,周欣海,王平,等. 黄土隧道结构的振动台模型试验研究[J]. 中国公路学报,2021,34(6):136-146.
CHENG X S, ZHOU X H, WANG P, et al. Shaking table model test of loess tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021,34(6):136-146.(in Chinese)

[3] WANG L M, WU Z J, XIA K, et al. Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic ground motion and its seismic design methods [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,126:105090.

[4] 马润勇,彭建兵,袁志东,等. 青藏高原隆升的黄土高原构造侵蚀效应[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(3):289-293.
MA R Y,PENG J B,YUAN Z D,et al. Geological hazard effect in loess plateau due to Qinghai-Tibet Plateau uplift[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29 (3) : 289-293. (in Chinese)

[5] WANG W L,WANG T T,SU J J,et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (3) : 133-150.

[6] 王泽军, 陈铁林, 崔光耀, 等. 强震区隧道洞口软硬岩交接段围岩注浆抗震措施效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 96-102.
WANG Z J, CHEN T L, CUI G Y, et al. Aseismic effect of grouting measures for tunnel portal structure at interface between soft and hard rock in high-intensity earthquake zone [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 96-102. (in Chinese)

[7] 高峰, 石玉成, 严松宏, 等. 隧道洞口段的抗震设防长度[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 65-69.
GAO F, SHI Y C, YAN S H, et al. Anti-seismic fortified length in tunnel outlet [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 65-69.(in Chinese)

[8] 刘国庆,肖明,陈俊涛,等. 强震区隧洞洞口段地震响应数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(11):2804-2812.
LIU G Q, XIAO M, CHEN J T, et al. Numerical simulation of seismic response for tunnel portal section in strong earthquake area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(11):2804-2812.(in Chinese)

[9] 陶连金, 侯森, 赵旭, 等. 不同仰坡度数的山岭隧道洞口段动力响应振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊1): 91-98.
TAO L J, HOU S, ZHAO X, et al. Large-scale shaking table test for dynamic response in portal section of mountain tunnel with different gradients of upward slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup.1): 91-98.(in Chinese)

[10] 王帅帅,高波,周裕,等. 隧道洞口含软弱夹层仰坡振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2699-2705.

WANG S S, GAO B, ZHOU Y, et al. Shaking table test on tunnel front slope with weak intercalation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup.1): 2699-2705. (in Chinese)

[11] 孙文,梁庆国,刘青霞,等. 强震作用下黄土隧道洞口段地震动放大效应研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 935-943.
SUN W, LIANG Q G, LIU Q X, et al. Amplification effect of the portal section of loess tunnels under strong earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 935-943. (in Chinese)

[12] 孙文,梁庆国,乔向进,等. 不同失稳形态黄土边坡的动力响应研究[J]. 铁道学报,2022,44(6):123-130.
SUN W, LIANG Q G, QIAO X J, et al. Study on dynamic response of loess slopes with different failure patterns[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(6): 123-130. (in Chinese)

[13] 艾胜军, 梁庆国, 赵涛, 等. 黄土隧道洞口段坡-隧系统地震动力响应振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 168-177.
AI S J, LIANG Q G, ZHAO T, et al. Shaking table experimental study on seismic dynamic response of slope-tunnel system at the portal section of loess tunnel[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(6): 168-177. (in Chinese)

[14] 任洋,李天斌,赖林. 强震区隧道洞口段边坡动力响应特征离心振动台试验[J]. 岩土力学,2020,41(5):1605-1612.
REN Y, LI T B, LAI L. Centrifugal shaking table test on dynamic response characteristics of tunnel entrance slope in strong earthquake area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1605-1612. (in Chinese)

[15] WANG Z Z, ZHANG Z. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 45: 45-55.

[16] YU H T, CHEN J T, BOBET A, et al. Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 54: 102-116.

[17] WU D, GAO B, SHEN Y S, et al. Damage evolution of tunnel portal during the longitudinal propagation of Rayleigh waves[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2519-2543.

[18] 隋传毅,高波,申玉生,等. 隧道高陡仰坡抗震性能振动台试验分析[J]. 振动与冲击,2017,36(19):186-194.
SUI C Y, GAO B, SHEN Y S, et al. Shaking table tests and analysis on tunnel structures with high steep slope[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(19): 186-194. (in Chinese)

[19] 崔光耀,蒋梦新, 王明胜. 高烈度地震区隧道洞口段纤维混凝土衬砌抗震效果分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 207-213.
CUI G Y, JIANG M X, WANG M S. Anti-seismic effect of fiber-reinforced concrete lining at tunnel portals in high-intensity seismic areas[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 207-213. (in Chinese)

[20] WANG Q, GENG P, LI P S, et al. Dynamic damage identification of tunnel portal and verification *via* shaking table test [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 132: 104923.

[21] 范刚. 含软弱夹层层状岩质边坡地震响应及稳定性判识时频方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
FAN G. Study on time-frequency method of seismic response and stability identification of layered rock slope with weak interlayer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)

[22] XIN C L, WANG Z Z, GAO B. Shaking table tests on seismic response and damage mode of tunnel linings in diverse tunnel-void interaction states [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 295-304.

[23] WU Z J, ZHAO D Y, CHE A L, et al. Dynamic response characteristics and failure mode of slopes on the loess tableland using a shaking-table model test[J]. Landslides, 2020, 17(7): 1561-1575.

[24] XIN C L, WANG Z Z, YU J. The evaluation on shock absorption performance of buffer layer around the cross section of tunnel lining[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 131: 106032.

[25] 江学良, 牛家永, 杨慧, 等. 下伏隧道层状岩质边坡地震响应特性的大型振动台试验研究[J]. 应用力学学报,2018,35(4): 762-768.
JIANG X L, NIU J Y, YANG H, et al. Large-scale shaking table model test study of seismic response characteristics on layered rock slope with tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(4): 762-768. (in Chinese)

[26] 刘汉香, 周逸飞,李欣. 层状复合岩体边坡动力特性及地震响应特性的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 676-689.
LIU H X, ZHOU Y F, LI X. Shaking table test of dynamic responses of a layered complex rock slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 676-689. (in Chinese)