

王丽丽,梁庆国,孙文,等.入洞高程对黄土隧道洞口段动力响应特征的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(5):853-858.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.853.

WANG Lili,LIANG Qingguo,SUN Wen,et al.Influence of Portal Elevation on Dynamic Response Characteristics of Loess Tunnel Portal Section[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(5):853-858.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.853

入洞高程对黄土隧道洞口段动力响应特征的影响分析^①

王丽丽^{1,2},梁庆国³,孙文⁴,管延志⁵

(1.中国地震局兰州地震研究所 黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730070;

2.甘肃省岩土防灾工程技术研究中心,甘肃 兰州 730070; 3.兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070;

4.甘肃省建筑科学研究院,甘肃 兰州 730070; 5.济南军区善后工作办公室,山东 济南 250000)

摘要:针对桥隧耦接过程中隧道面临的入洞高程及仰坡坡度的问题,采用三维数值模拟的方法,通过设置不同坡度与不同入洞高程的模型,探究隧道及仰坡在这两种因素共同影响下的动力响应。研究结果表明:(1)在振动荷载作用下,隧道拱顶的位移随着距洞口距离的增加而减小,位移峰值位于距洞口 $y=0$ m 断面处,不同坡度、不同入洞高程模型均符合这一特征。(2)随着仰坡坡度的增加,隧道入洞高程的选择也应趋于增大,文中定义的隧道截面最大位移差 $\Delta_{\max}$ 可尝试为衡量地震动力响应提供一种新的判断思路。(3)隧道的存在对坡面的动力响应有一定影响,这种影响在洞口 1~1.5 倍跨径范围内最明显。

关键词:黄土隧道; 洞口段; 仰坡坡度; 入洞高程; 动力响应

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)05-0853-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0853

Influence of Portal Elevation on Dynamic Response Characteristics of Loess Tunnel Portal Section

WANG Lili^{1,2}, LIANG Qingguo³, SUN Wen⁴, GUAN Yanzhi⁵

(1.Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2.Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China;

3. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

4. Gansu Building Research Institute, Lanzhou 730050, Gansu, China;

5. Redress Office of Jinan Military Region, Jinan 250000, Shandong, China)

Abstract: The choice of portal elevation and gradient of upward slope values are critical to the safety and stability of the whole traffic line, especially, in the tunnel and bridge coupling process. To explore the dynamic response of tunnel portal section and upward slope under the influence of portal elevation and gradient of upward slope, models with different slope gradients and different portal elevations were constructed. These models were based on 3D numerical simulation, with the incident direction of seismic wave being parallel to the direction of the tunnel axis. Our results demonstrate that (1) Under seismic

① 收稿日期:2016-04-25

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2016IESLZ04);甘肃省省青年科技基金计划(1606RJYA239);国家自然科学基金(41562013,51608496)

作者简介:王丽丽(1988—),女,山东潍坊人,硕士,研究实习员,主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。

E-mail:wll_11539@163.com。

loads, with increasing distance from the tunnel portal, the displacement of the tunnel vault is gradually reduced, with the peak value of displacement located in the vault section of $y=0$ m (distance from the portal). Therefore, it is the portal section that is the most dangerous under the earthquake action, and it should receive the most attention when designing the whole tunnel line. (2) In this paper, $\Delta_{\max}$ is defined as the maximum displacement difference of the tunnel section. The change rule of $\Delta_{\max}$ indicates that with the increase of the gradient of upward slope, the portal elevation of tunnel should also be higher. The $\Delta_{\max}$ defined in this study may provide a new method to evaluate the seismic dynamic response. (3) By setting the contrast model, which is pure slope without tunnel, the influence of tunnel on the dynamic response of slope is studied. Firstly, the peak value of slope displacement is smaller than that with tunnel. Secondly, with increasing portal elevation, the tunnel will influence the dynamic response of the slope surface, due to the effects of portal elevation and slope gradient.

Key words: loess tunnel; portal section; gradient of upward slope; portal elevation; dynamic response

0 引言

山岭隧道的洞口段、浅埋段和位于断层破碎带等软弱围岩段是地震时破坏程度最严重、破坏概率最高的部分,是隧道工程抗震设防的重点,也是未来发生地震时易损性最高的部位^[1]。西部地区是我国地震最活跃的地区,几乎每年都发生3级以上地震。西部山区交通工程建设的过程中,桥隧结构在整条线路中所占的比例越来越高,许多桥梁的墩高达到几十甚至上百米。然而,这些高耸的桥梁在穿越河谷后所连接的隧道必然会位于边坡的不同高度处,而这些隧道在未来地震中的动力响应及抗震性能不仅与进洞高程密切相关,也对整条线路的安全运营和震后快速救援与修复具有重要控制作用。

目前对于边坡的动力稳定性分析和隧道洞口段的地震反应分析,分别有大量研究文献发表。众多学者分别从围岩地质条件^[2-3]、隧道洞口的断面特性、隧道的施工方法^[4-5]等方面,对隧道洞口段的设防长度^[6-9]、震害调查与机理分析^[10-13]、修复技术和抗震减震技术优化^[15]等方向,采用振动台试验、数值模拟等方法进行了探究。但从国内外大量同类研究的文献检索和调研来看,考虑边坡进洞高程效应的隧道洞口段抗震技术研究和成果几乎为零,涉及相关的研究也较少。无论是震害调查与原因分析,还是数值模拟的建模与物理试验的模型方案设计,大多数隧道进行建模分析或模型试验都以从坡脚进入边坡为主,很少考虑边坡坡度及入洞高程的影响,更少考虑二者相互影响和交互作用。

本文采用动力有限元数值模拟的方法,通过设置不同仰坡坡角、不同入洞高程的模型,探究隧道洞口段的动力响应,以期山岭隧道进洞方式提供有

益的理论依据。

1 模型简介

1.1 模型参数

分别设置仰坡坡角为 30° 、 45° 、 60° 及 75° 四个模型,坡高统一为 50 m,隧道长度为 100 m,最大跨径为 6.5 m,隧道距边界的距离取最大跨的 5 倍^[16]。在上述 4 种坡度模型的基础上分别建立距离坡底为 0 m(坡底处入洞)、15 m(0.3 倍坡高)和 30 m(0.6 倍坡高)三种不同入洞高程模型。图 1(a)为模型尺寸示意图,图 1(b)为仰坡坡度 45° 、在距坡底 15 m 高程处入洞模型的网格划分图。

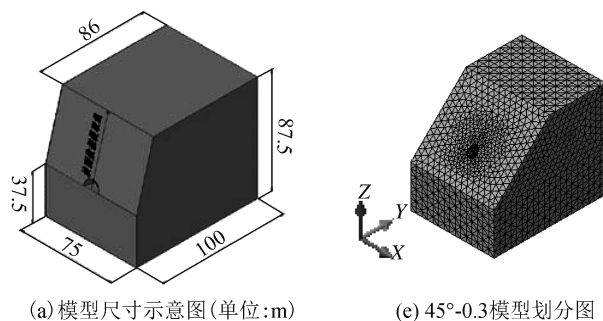


图 1 模型示意图

Fig.1 Diagram of model

在数值计算过程中,模型参数的准确性将直接影响分析结果的准确性。本文的数值模型大多采用莫尔-库伦准则和线弹性准则来确定材料的参数,因此黏聚力、内摩擦角、弹性模量、抗拉强度、密度等参数的准确性是至关重要的。本文以宝兰客专王家沟隧道为工程依托,实际取样进行关于原状样的无侧限抗压试验、三轴压缩试验、弹性模量试验及密度试验、抗拉强度试验^[17-18]等,为数值分析模型提供可靠的材料力学参数。结合铁路隧道设计规范(TB

10003-2005),岩体、支护结构的物理力学参数如表 1 所列。

表 1 数值模型材料物理力学参数

Table 1	Physical and mechanical parameters of the model					
	E /MPa	ν	γ /(kN·m ⁻³)	C /kPa	φ /(°)	σ_i /kPa
围岩	110.6	0.4	18.4	34.4	22.3	11.6
初衬	29 500	0.25	23	-	-	-
二衬	31 000	0.2	23	-	-	-

1.2 地震波的选取

本文所采用的地震波是 MIDAS/GTS 有限元分析软件中自带的 1940,El Centro Site 地震波,其峰值为 0.356 9g,持时为 53.72 s。采用 SeismoSig-nal 软件对地震波进行滤波处理和基线校正。校正后的地震波加速度时程曲线如图 2 所示。地震波的人射方向为图 1(b)中 y 向,即沿隧道轴向方向。

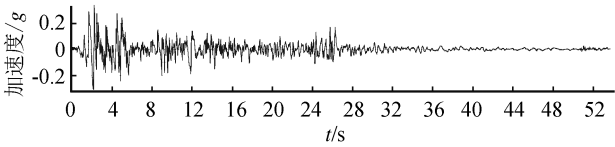


图 2 地震波无量纲加速度时程曲线

Fig.2 Acceleration time history curve of seismic wave

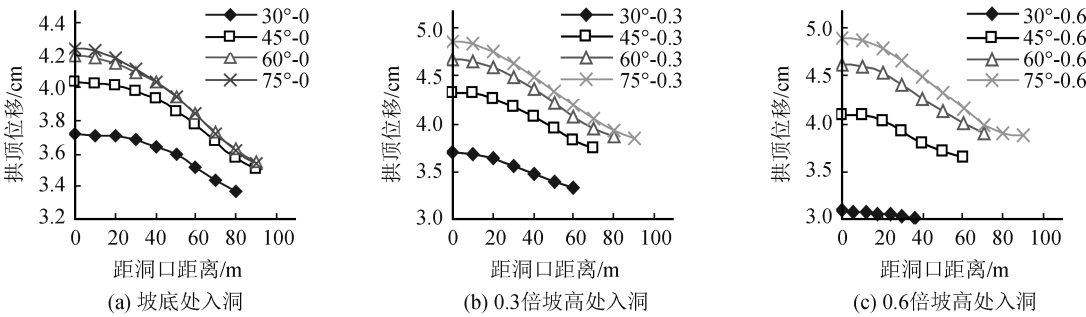


图 4 拱顶位移沿隧道轴向变化曲线

Fig.4 The displacement of vault along the axial direction of tunnel

分析图 4 可知,拱顶位移随着距洞口距离的增加而减小,位移峰值位于距洞口 $y=0$ m 处,不同坡度、不同入洞高程模型均符合这一特征。这是由于边坡在振动荷载作用下,地震波在坡面附近叠加,形成复杂波场,造成临空面的放大效应^[19]。因此,隧道的洞口段是地震发生时破坏程度最严重、破坏概率最高的部分,应该是隧道工程抗震设防的重点。分析图 4 还可知,仰坡坡度的变化对隧道结构的位移响应有重要影响,具体表现为:在入洞高程一定时,随着仰坡坡度的增加隧道拱顶的位移也逐渐增加,且在距洞口相同距离

2 结果分析

沿隧道轴向选取二衬的 10 个监控断面,分别为 $y=0$ m、10 m、20 m、30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m 及 90 m。各断面结果提取点如图 3 所示。文中各控制点的位移、加速度皆是指时程分析过程中各控制点的最大位移、最大加速度、最大内力。

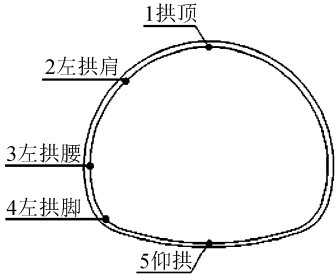


图 3 分析结果提取点分布图

Fig.3 Distribution of points from analysis result

2.1 隧道位移响应分析

在入洞高程一定的情况下,为探究仰坡坡度对隧道动力响应的影响,对拱顶在地震荷载作用下的位移进行提取(图 4)。

断面处,随着坡度的增加不同坡角模型间的位移差也逐渐减小。

为了更加清楚地探究在仰坡坡度与入洞高程的共同作用下隧道结构的位移响应变化趋势,对隧道拱顶与仰拱的位移峰值进行对比分析(图 5)。

如图 5 所示,分析坡度的变化对位移峰值的影响可知:在边坡坡面位移沿高程的放大效应影响下^[20],随着仰坡坡度的增加拱顶与仰拱位移峰值皆呈增大的趋势。而入洞高程对隧道位移的影响也与仰坡的坡度有关,具体表现为:当仰坡坡度 $\alpha>45^\circ$ 时,仰拱与拱顶的位移峰值皆随着入洞高程的增加

而增大,隧道在 0.6 倍坡高处的位移值最大;而当仰坡坡度小于 45°时,隧道在较高的坡面高程处入洞时的位移小于在坡脚处入洞时的位移峰值,且当隧道选择在坡底处入洞时,仰坡坡度的变化对衬砌的位移峰值影响最小。然而由于洞口段与坡面相互作用的特殊性,对于地震对隧道的破坏危险性不能仅看隧道的位移响应,还应结合坡面位移以及隧道截面的位移差值来综合判断。

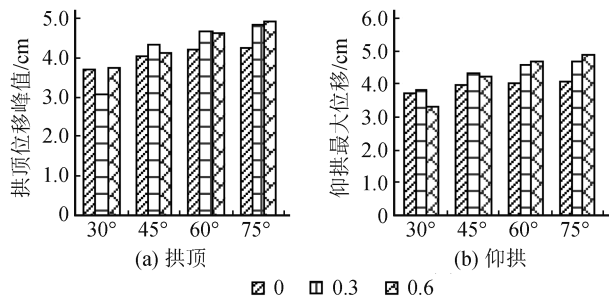


图 5 坡度与入洞高程对隧道位移峰值的影响
Fig.5 Effects of slope gradient and portal elevation on peak displacement of tunnel

隧道衬砌截面的相对变形量大小可以反映隧道结构的破坏危险性,因此定义位移差 $\Delta_{\max}$ 为隧道相同断面处仰拱与拱顶位移差值的最大值。位移差 $\Delta_{\max}$ 的大小可以衡量隧道断面的变形差值,也是对结构动力响应的一种反映。将坡角、高程分别作为平面 x 轴、 y 轴,将拱顶与仰拱的最大位移差 $\Delta_{\max}$ 作为竖向 z 轴,绘制三维曲面图(图 6)。

由图 6 可知,隧道在极高与极低的坡面高程处入洞时 $\Delta_{\max}$ 皆较大,在 0.3 倍坡高处入洞时该值最

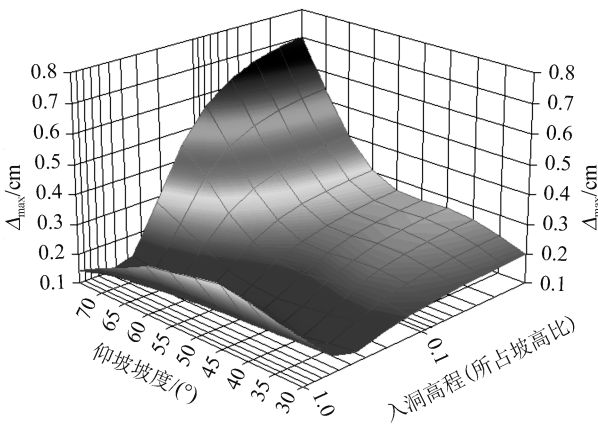


图 6 最大位移差 $\Delta_{\max-y}$ 与入洞高程和坡度的三维关系曲线图

Fig.6 3D relationship curves between $\Delta_{\max-y}$, portal elevation and slope gradient

小,且仰坡坡度对该值的影响也最小。分析坡度变化对 $\Delta_{\max}$ 的影响可知,入洞高程一定时 $\Delta_{\max}$ 的变化趋势是随着坡角的增大而增大,这种变化趋势在入洞高程小于 0.3 倍时愈加明显。

综上所述,隧道在大坡角、小高程(或极大高程)入洞时的 $\Delta_{\max}$ 值较大。结合图 5 分析可知,隧道在 0.3 倍坡高处入洞时的位移响应较小。隧道截面的最大位移差 $\Delta_{\max}$ 可尝试为衡量地震动力响应提供一种新的判断思路。

3.2 坡面位移响应分析

如图 7 所示对不同坡度、不同入洞高程模型在地震波作用下的坡面位移进行提取分析,其中坡面位移提取的位置如图 1(a)中所示。

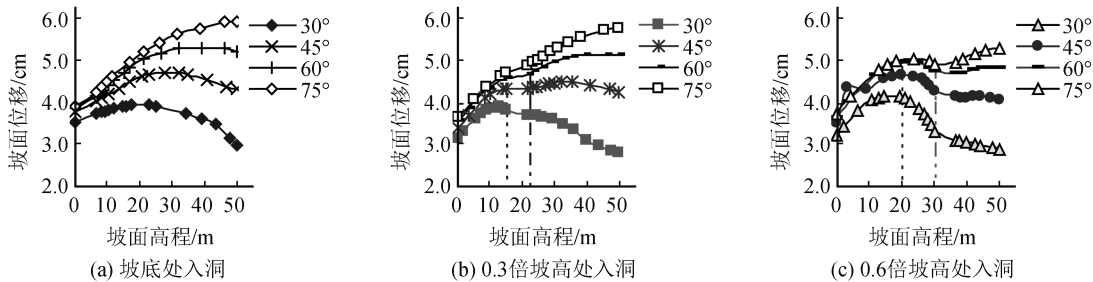


图 7 不同入洞高程模型坡面位移随坡面高程变化曲线

Fig.7 Variation curve of surface displacement with slope elevation

由图 7 可知,坡面位移随坡面高程的变化趋势与坡度和入洞高程有关。分析变化趋势的相同点为:入洞高程一定时,随着仰坡坡度的增加坡面位移也逐渐增大。其不同点为:如图 7(a)所示,当隧道在坡底处入洞时,位移整体呈现随坡面高程先增大后减小的趋势,位移峰值位于边坡的中上部。这与

汶川地震中洞口仰坡的破坏多以高位崩塌、滑塌、落石为主^[21-22]的现象相符合。一旦坡面发生滑坡,大量的落石与泥土会将位于坡底的洞口掩埋,因此传统的选择在坡底处入洞增加了洞口段被掩埋的风险,从而给抗震救灾带来非常大的隐患。

由图 7(b)、(c)可知,坡面位移随坡面高程变化的

曲线中有两个明显的转折点。分析这些转折点的位置与间距可知:隧道在 0.3 倍坡高处入洞时,第一个转折点位于距坡底 $z=15\text{ m}$ (即入洞高程)处,第二个转折点位于 $z=22\text{ m}$ 处,两者间的距离为 7 m ;在 0.6 倍坡高处入洞时,第一个转折点位于距坡底 $z=20\text{ m}$ 处,第二个转折点位于 $z=30\text{ m}$ (即入洞高程)处,两者间的距离为 10 m 。因此总的来说,隧道的存在对坡面位移在距洞口 $1\sim 1.5$ 倍跨径范围影响最大,这种影响随着洞高程的增大表现得愈加明显。

第二个转折点后坡面位移的变化趋势与坡角的大小有关。即当仰坡坡度 $\alpha\leq 45^\circ$ 时拐点后的坡面位移随坡面高程的增加逐渐减小,而当仰坡坡度 $\alpha>45^\circ$ 时则随坡面高程的增加而增加。结合图 8 可知, $\alpha>45^\circ$ 时,选择在大高程处入洞比选择在坡底处入洞的坡顶位移峰值更小,这与 $\Delta_{\max}$ 的表现一致。因此在线路线型的设计与选择中,尤其是在桥隧耦接的情况下,更应当考虑仰坡坡度与隧道入洞高程的抗震影响因素。

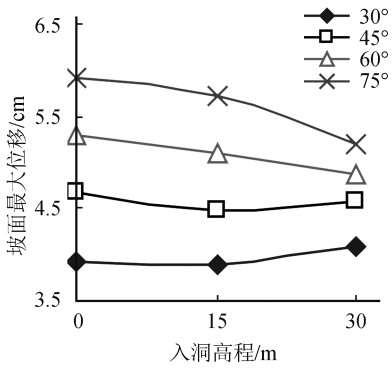


图 8 坡面位移转折点与入洞高程关系曲线
Fig.8 Relationship between portal elevation and turning point of slope displacement

3.3 隧道的存在对仰坡位移响应的影响分析

为进一步探究隧道的存在对仰坡动力响应的影响,特对常见仰坡坡度为 45° 与 60° 的有隧道存在与无隧道存在的边坡模型进行对比分析,具体结果如图 9 所示。

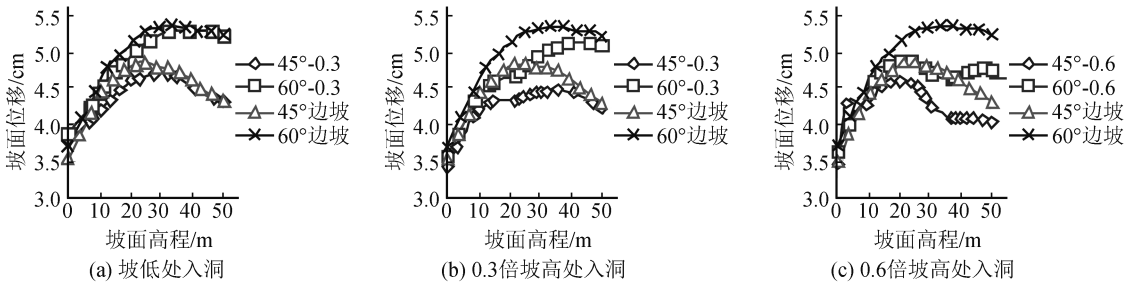


图 9 隧道对边坡动力响应的影响分析
Fig.9 Influence of the tunnel on dynamic response of slope

由图 9 的坡面位移峰值分析可知:(1)有隧道存在的边坡位移峰值小于无隧道存在的边坡。(2)当隧道在传统的坡底处入洞时,坡面的位移变化曲线与纯边坡的变化曲线趋势类似,二者间的数值差值也很小。(3)随着入洞高程的增加,隧道的存在对坡面位移的动力响应影响愈加明显。具体表现为:在入洞高程为 0.6 倍坡高、坡面高程 $z=20\sim 30\text{ m}$,即距离洞口 1 倍洞跨附近时达到峰值,随后有隧道的边坡和无隧道边坡的位移动力响应差别逐渐减小。

4 结论

(1) 在振动荷载作用下,隧道拱顶的位移随距洞口距离的增加而减小,其峰值位于距洞口 $y=0\text{ m}$ 断面处,且不同坡度、不同入洞高程模型均符合这一特征。这是由于边坡在振动荷载作用下临空面放大效应的影响,因此隧道的洞口段是发生地震时破坏

程度最严重、概率最高的部分,应成为隧道工程抗震设防的重点。

(2) 通过设置不同坡度与不同入洞高程的模型,探究隧道在仰坡坡度与入洞高程两种因素影响下的动力响应。研究发现:当隧道在传统的坡底处入洞时,其位移峰值随着坡度的增加而增大;而当仰坡坡度较大时,隧道在坡底处入洞时的动力响应明显大于在 0.3 倍与 0.6 倍坡高处入洞时。对最大位移差 $\Delta_{\max}$ 的研究也表明,隧道在 0.3 倍坡高处入洞时的 $\Delta_{\max}$ 值最小,且在此处入洞时仰坡坡度对 $\Delta_{\max}$ 的影响最小。因此,随着仰坡坡度的增加隧道入洞高程的选择也应趋于增大。隧道截面的最大位移差 $\Delta_{\max}$ 可尝试为衡量地震动力响应提供一种新的判断思路。

(3) 隧道的存在对坡面的动力响应有一定影响,这种影响与隧道的入洞高程 z 与仰坡坡角 α 大

小有关。具体表现为:当 $\alpha = 30^\circ$ 时隧道选择在坡底处入洞与 $\alpha = 45^\circ$ 时在 0.3 倍坡高处入洞时的坡面位移最小;当 $\alpha > 45^\circ$ 时,随着入洞高程的增加坡面位移峰值逐渐减小,隧道的存在对坡面动力响应的影响主要在洞口 1~1.5 倍跨径范围内最明显。

(4) 本文采用的是三维有限元数值分析的方法,虽然分析方法较单一,但系统地分析了坡度与入洞高程两个影响因素对坡面和隧道结构的影响和交互作用。在后续的研究中还会结合振动台试验,并考虑分次输入多种地震波,以排除单一波的频谱效应等因素所产生的偶然性结果。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 王帅帅,高波,隋传毅,等.不同地质条件下隧道洞口仰坡地震破坏特性研究[J].岩土力学,2012,35(增刊1):278-283.
WANG Shuaishuai, GAO Bo, SUI Chuanyi, et al. Shakingtable Test for Seismic of Upward Slope at Tunnel Entrance in Different Geological Conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 35(Suppl1): 278-283.
- [3] 王祥秋,杨林德,高文华.复杂围岩隧道洞口段动力响应特性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(24):4461-4465.
WANG Xiangqiu, YANG Linde, GAO Wenhua. Analysis of Dynamic Response Properties for Entrance of Tunnel under Complicated Surrounding Rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Soil, 2005, 24(24): 4461-4465.
- [4] 王建秀,朱合华,唐益群,等.连拱隧道-边坡耦合作用:滑坡连拱隧道 [J].土木工程学报,2009,42(27):120-124.
WANG Jianxiu, ZHU Hehua, TANG Yiqun, et al. Interaction between Twin-arch Tunnel and Slope: Landslide Twin-arch Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(27): 120-124.
- [5] 喻军,刘松玉.隧道施工降低仰坡稳定性的机理分析[J].施工技术,2011,40(341):87-89.
YU Jun, LIU Songyu. Mechanism Analysis of Stability Reduction of Front Slope in Tunnel Construction [J]. Construction Technology, 2011, 40(341): 87-89.
- [6] 高峰,石玉成,严松宏,等.隧道洞口段抗震设防长度[J].中国公路学报,2006,19(3):65-70.
GAO Feng, SHI Yucheng, YAN Songhong, et al. Anti-seismic Fortified Length in Tunnel Outlet [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 65-70.
- [7] 李育枢,李天斌.高烈度地震区山岭隧道洞口减震问题的数值模拟研究[J].公路交通科技,2009,26(10):100-104.
LI Yushu, LI Tianbin. Numerical Simulation of Shock Absorption of Mountainous Tunnel Portal in Highly Seismic Region [J]. Journal of Highway and Transport Research and Development, 2009, 26(10): 100-104.
- [8] 耿萍,曹东杰,唐金良,等.铁路隧道洞口合理抗震设防长度 [J].西南交通大学学报,2012,47(6):942-948.
GENG Ping, CAO Dongjie, TANG Jinliang, et al. Rational Seismic Protection Length for Portal of Railway Tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6): 942-948.
- [9] 索然绪,王艳艳.瑞利波作用下隧道洞口段的抗震设防长度 [J].现代隧道技术,2011,48(4):13-17.
SUO Ranxu, WANG Yanyan. Seismic Fortification Length of Tunnel Portals under Rayleigh Wave Action [J]. Modern Tunnel Technology, 2011, 48(4): 13-17.
- [10] 崔光耀,王明年,于丽,等.汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究 [J].土木工程学报,2013,46(11):122-127.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Study on the Characteristics and Mechanism of Seismic Damage for Tunnel Structures on Fault Rupture Zone in Wenchuan Seismic Disastrous Area [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 122-127.
- [11] 李天斌.汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析 [J].工程地质学报,2008,16(6):742-750.
LI Tianbin. Failure Characteristics and Influence Factor Analysis of Mountain Tunnels at Epicenter Zones of Great Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742-750.
- [12] 高波,王峥峥,袁松,等.汶川地震公路隧道震害启示 [J].西南交通大学学报,2009,44(3):336-341,374.
GAO Bo, WANG Zhengzheng, YUAN Song, et al. Lessons Learnt from Damage of Highway Tunnels in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 336-341, 374.
- [13] 王明年,林国进,于丽,等.隧道抗震与减灾 [M].北京:科学出版社,2012.
WANG Mingnian, LIN Guojin, YU Li, et al. Tunnel Seismic and Shock Absorption [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [14] 郑清,高波,申玉生.山岭隧道震害调查及修复技术研究 [J].石家庄铁道大学(自然科学版),2010,23(4):46-48,52.
ZHENG Qing, GAO Bo, SHEN Yusheng. Investigation of Mountain Tunnel Earthquake Damage and Study on Remedial Measures [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2010, 23(4): 46-48, 52.
- [15] 陈卫忠,谭贤君,郭小红,等.特殊地质与环境地下工程稳定性研究 [M].北京:科学出版社,2012.
CHEN Weizhong, TAN Xianjun, GUO Xiaohong, et al. Study on the Stability of Underground Engineering under Special Geological Conditions [M]. Beijing: Science Press, 2012.

震性能的初步评价[D].重庆:重庆大学,2012.

QIN Baolin.Preliminary Evaluation on the Seismic Behavior of Super High-rise Structure Examples on the Support of PERFORM 3D Software[D].Chongqing:Chongqing University,2012.

[14] 李艳.高性能纤维增强水泥基复合材料的力学性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.

LI Yan.Study on Mechanical Performance of High Performance Fiber Reinforced Cement Composite[D].Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2011.

[15] Quantification of Building Seismic Performance Factors;FEMA P-695[S].Washington;Federal Emergency Management Agency,2009.

[16] NICOLAS Luco, ALLIN Cornell C.Structure-specific Scalar Intensity Measures for Near-source and Ordinary Earthquake Ground Motions[J].Earthquake Engineering Research Institute,2007,23(2):357-392.

[17] DIMITRIOS Vamvatsikos, ALLIN Cornell C Incremental Dynamic Analysis[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2002,31(3):491-514.

[18] 史庆轩,梁兴文.土木工程专业毕业设计指导[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.

SHI Qingxuan,LIANG Xingwen.Guidance for Civil Engineering Graduation Design[M].Beijing:China Architecture & Building Press,2014.

[19] ROBERTO T,LEON M S.The Influence of Floor Members on the Behavior of Reinforced Concrete Beam-column Joints Subjected to Severe Cyclic Loading[D].Austin:The University of Texas at Austin,1983.

[20] SHOME N.Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures[D].Stanford;Stanford University,1999.

(上接第 858 页)

[16] 许增会,宋宏伟,赵坚.地震对隧道围岩稳定性影响的数值模拟分析[J].中国矿业大学学报,2004,33(1):41-44.

XU Zenghui,SONG Hongwei,ZHAO Jian.Numerical Analysis of Stability of Tunnel Surrounding Rocks under Earthquake[J].Journal of China University of Mining & Technology,2004,33(1):41-44.

[17] 吴旭阳,梁庆国,李春清,等.兰州九州重塑黄土抗拉特性研究[J].地震工程学报,2014,36(3):562-568.

WU Xuyang,LIANG Qingguo,LI Chunqing,et al.Study on Tensile Properties of Remolded Loess in Jiuzhou Development District,Lanzhou,China[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(3):562-568.

[18] LIANG Qingguo,WU Xuyang,LI Chunqing,et al.Mechanical Analysis Using the Unconfined Penetration Test on the Tensile Strength of Q₃ Loess around Lanzhou City,China[J].Engineering Geology,2014,183(2):342-329.

[19] 侯森,陶连金,赵旭,等.SH 波作用下山岭隧道洞口段结构动力响应研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):340-348.

HOU Sen,TAO Lianjin,ZHAO Xu,et al.Dynamic Response of Portal Section of Mountain Tunnels under Seismic SH Wave Action[J].China Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(2):340-348.

[20] 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 Hanxiang,ZOU Wei,et al.Large-Scale Shaking Table Test Study of Acceleration Dynamic Response Characteristics of Slopes[J].China Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(12):2420-2428.

[21] JUDITH Hubbard,JOHN H Shaw.Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau,and the 2008 Wenchuan (M_s7.9) Earthquake[J].Nature,12(458):194-196.

[22] 崔光耀,王明年,林国进,等.汶川地震公路隧道洞口段震害机理及抗震对策研究[J].现代隧道技术,2011,48(6):6-10.

CUI Guangyao,WANG Mingnian,Lin Guojin,et al.Study of the Earthquake Damage Mechanism and Aseismic Countermeasure of a Highway Tunnel Portal Section in the Wenchuan Seismic Disaster Area[J].Modern Tunnel Technology,2011,48(6):6-10.