

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.18

高烈度区双洞隧道洞口段地震响应分析与 振动台模型试验

皇 民,苑俊杰,赵玉如,毕洁同,王 松
(河南工程学院土木工程学院,河南 郑州 451191)

摘要: 强震作用下,隧道地下结构损伤严重,其中洞口段更是抗震的薄弱环节,但其影响规律和特点目前尚缺乏系统的计算分析和研究。以强震区扯羊隧道为例,首先采用FLAC^{3D}对双洞隧道洞口段地震响应进行分析,再用模型试验的方法进行洞口段模型试验,测量其地震响应应变规律,观测其震害发展情况,并与数值分析结果相互验证。结果表明:地震作用下,隧道仰拱横向位移较大;随着隧道埋深增加,内力逐步增加,其中墙角部位内力较大;洞口处隧道围岩在强震作用下会产生贯通性裂缝,影响隧道洞口稳定;地震作用下的明洞与暗洞交接处内力较大;地震作用下的双洞隧道之间存在较强的动力相互作用。

关键词: 高烈度区;双洞隧道;洞口段;地震响应;模型试验

中图分类号: U458

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)01-0113-07

Seismic response analysis and shaking table test realization of double tunnel entrance in high intensity zone

HUANG Min, YUAN Junjie, ZHAO Yuru, BI Jietong, WANG Song
(School of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou, Henan 451191, China)

Abstract: Under the action of strong earthquake, the underground structure of the tunnel is seriously damaged, and the tunnel entrance is the weak link of the tunnel. Now we are still lack of systematic analysis and research about tunnel earthquake. The FLAC^{3D} software is used to calculate the seismic response of the tunnel entrance section with the numerical analysis method. The seismic response of the tunnel entrance is tested by the model test, and the seismic response strain law is measured and the development of earthquake damage is observed. The numerical analysis and experimental results show that the lateral displacement of the inverted arch of the tunnel is larger than the other monitoring point under the action of earthquake; with the increase of the depth of the tunnel, the internal force gradually increases, and the internal force at the corner of the tunnel is larger than the other monitoring point; the surrounding rock of the tunnel at the entrance will produce penetrating cracks under the action of strong earthquake, which will affect the stability of the tunnel entrance; the internal force of intersection of the open tunnel and hidden tunnel under the action of earthquake is larger than the other monitoring point. Strong dynamic interaction exists between two tunnels under earthquake action.

Keywords: high intensity area; double tunnel; entrance; seismic response; model test

收稿日期: 2019-05-15; 修订日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(50878187); 河南省科技攻关计划(162102310403); 河南省教育厅自然科学研究重点项目(12A560004); 郑州市科技发展计划项目(20130816); 河南工程学院博士基金(D2012008)

第一作者: 皇 民(1975-),男,河南博爱人,工学博士,副教授,主要从事隧道工程抗震、岩土工程方向研究。E-mail: huangmin_2006@163.com

0 引言

近年来强震的持续活动,导致许多隧道地下结构受损严重,如 2008 年的汶川地震使得附近很多隧道塌方,致使多条交通线中断,其中隧道洞口段震害尤其严重^[1-5]。而当前国内对隧道地下结构的抗震研究不足,隧道地下结构抗震规范中关于地下结构的条文不够深入和具体,不能适应强震区隧道工程的需要^[6-8]。

隧道洞口段是抗震的薄弱环节^[4],隧道洞口段抗震研究中,采用三维数值分析一直是一种比较有效的研究手段,且国内外学者已经取得了较多成果,但由于岩土非线性本构模型以及地震动力方程的复杂性,数值分析的局限性也较大,难以获得令人满意的隧道地震响应结果,因此目前振动台模型试验仍旧是研究隧道抗震的可靠手段。国内外一些学者利用地震振动台进行了山岭隧道洞口段模型试验,且获得了一定的研究成果。李育枢等^[9]对黄草坪 2#隧道洞口段进行了减震模型试验,发现从隧道模型洞口内 48~60 m 后,隧道地震响应趋于稳定,该范围是隧道洞口段抗震设防重点范围。蒋树屏等^[10]对嘎隆拉隧道洞口段进行了振动台试验研究,得出了地震作用下,隧道结构与岩土为同步震动,地震惯性力对隧道地震反应作用较小的结论,因此隧道地下结构抗震关键为隧道岩土体的稳定;陶连金等^[11]对软弱围岩中的山岭隧道洞口段动力模型进行试验研究,试验表明除了隧道衬砌结构之外,洞口仰坡也是隧道抗震的薄弱环节。

以上研究都是针对单洞隧道洞口段的情况,而针对双洞隧道洞口段的地震分析与试验尚不多见。本文拟以雅泸高速扯羊双洞隧道洞口段为例,运用数值分析和模型试验相结合的手段,系统研究双洞隧道洞口段震害特征与工程应对措施。

1 工程概况

雅安至泸沽高速公路所处线路位置为强震断层,烈度最高为九度。其中扯羊隧道是雅泸高速公路通过彝海乡与曹古乡之间山体而设计的分离式路基隧道,左线全长 1 755 m,右线全长 1 730 m,最大埋深约为 242 m。隧道计算参数如表 1 所示。

2 建立洞口段数值模型

以扯羊隧道雅安端洞口为模型,采用 FLAC^{3D} 软件建立洞口段模型,共 99 070 个单元,节点 105 714 个(图 1)。模型纵向长 120 m,横向长 187 m,高度

165 m;边界条件采用黏动力边界;围岩本构关系采用摩尔库伦塑性模型,隧道衬砌采用弹性本构;地震波输入采用应力波输入,首先将加速度地震波积分为速度和位移波并与围岩波阻抗相乘可得到地震应力波,应力波输入时间间隔为 0.02 s。

表 1 隧道围岩与衬砌性质

Table 1 Calculation parameters of tunnel rock and lining

	密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
地表岩石	2 200	2	0.4	180	28
隧道围岩	2 200	2.7	0.35	300	30
注浆围岩	2 300	5	0.2	500	35
初期支护	2 200	22	0.2	—	—
二次衬砌	2 500	29.5	0.2	—	—

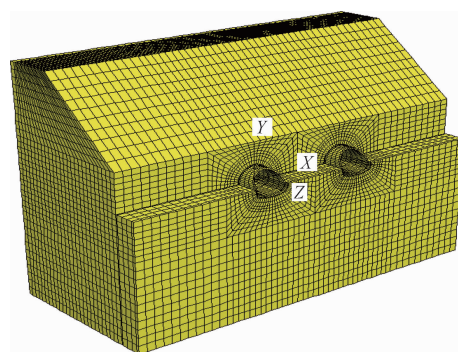


图 1 隧道洞口段分析模型

Fig. 1 Tunnel entrance model

隧址位于九度地震带,地震波采用四川省地震局提供的以危险性概率分析得到隧道基岩人工波(图 2)。

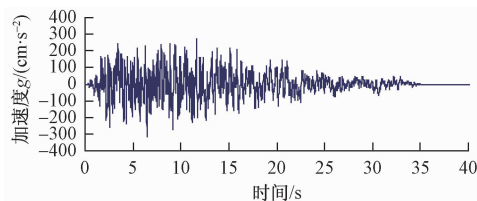


图 2 隧道地震波加速度

Fig. 2 Acceleration of seismic wave

对地震波进行三维频谱分析,如图 3 所示。可以看出:地震时程 5 s、10 s 和 15 s 对应的能量密度较高,且频率在 12 Hz 以内,表明地震波能量是以低频波为主。

地震波中除了测量和计算原因之外,还存在一定的干扰误差,若不校正,会导致计算结果产生偏差。因此,需要对原始地震波进行基线校正^[12-14]。在此采用 MATLAB 工具箱,对原始地震波进行修正,修正前后

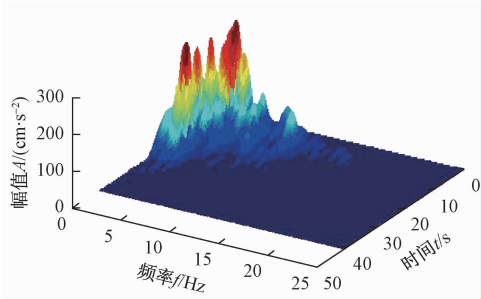


图 3 地震波时频分解三维图

Fig. 3 Three dimensional map of time frequency decomposition of tunnel wave

的地震波如图 4、图 5 所示。

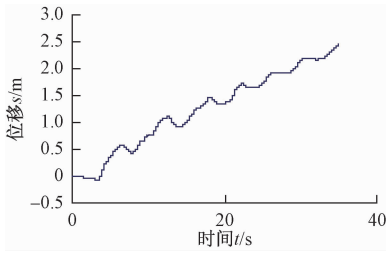


图 4 修正前的地震波位移时程

Fig. 4 The original displacement time history

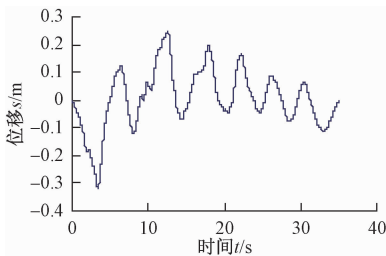


图 5 修正后的地震波位移时程

Fig. 5 The corrected displacement time history

3 数值计算结果

由于左右两隧道数值分析结果基本呈对称分布，在此以右洞隧道为例加以说明。右洞隧道在地震波作用下的峰值位移沿隧道纵向距离变化情况如图 6 所示，峰值内力沿隧道纵向距离变化情况如图 7 ~ 图 9 所示。

数值分析计算结果表明：

- (1) 明暗洞交接处位移较大，且在仰拱位置出现 X 方向位移最大值 12.40 cm，拱顶处最小为 11.34 cm，所有控制点的横向位移随埋深增大而趋于减小；
- (2) 随着隧道埋深增加，内力总体上逐步增加。

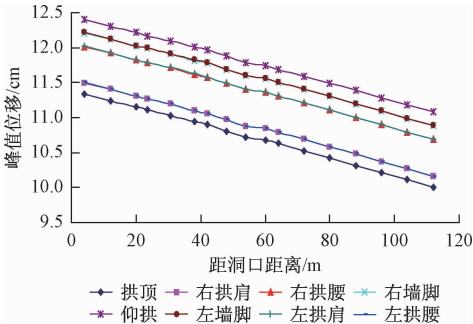


图 6 横向位移沿纵向变化图

Fig. 6 Horizontal displacement changes along longitudinal distance

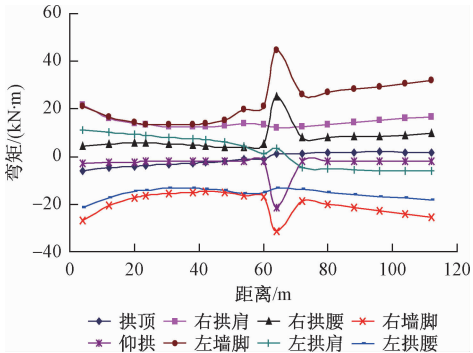


图 7 峰值弯矩沿纵向变化图

Fig. 7 Bending moment changes along longitudinal distance

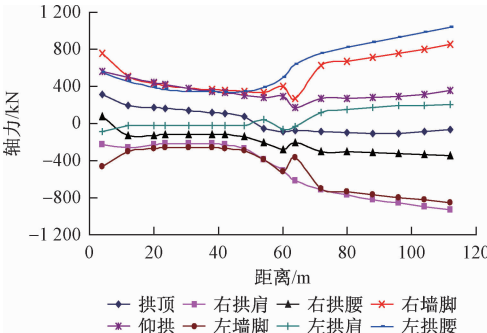


图 8 峰值轴力沿纵向变化图

Fig. 8 Axial force changes along longitudinal distance

但在里程 64 m 为隧道明洞暗洞交接处，隧道内力和位移均出现突变，其中弯矩突变情况最明显，左墙角弯矩值最大达到 44.56 kN·m；

- (3) 隧道仰拱处地震作用下的位移较大，而墙脚处内力较大，仰拱与墙脚处在隧道抗震中是较为不利的位置；
- (4) 右洞左侧与左洞右侧的位移内力较大，表明在地震作用下双洞隧道之间存在一定的动力相互作用。

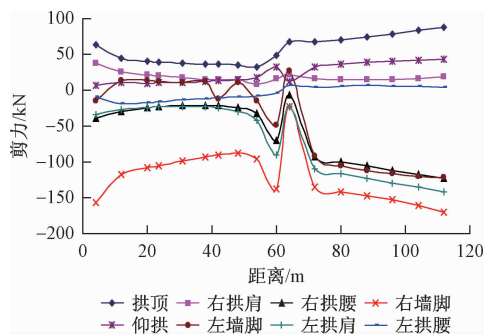


图9 峰值剪力沿纵向变化图

Fig.9 Shear force changes along longitudinal distance

4 模型试验

模型试验方案设计内容包括:计算相似参数、设计模型材料,加工试验模型,制作模型试验箱,选用振动台设备、加载地震波,试验量测与数据分析。

4.1 试验相似参数设计

根据相似理论^[15],以扯羊隧道洞口段为原型,依据试验条件以及数据采集需要,在几何长度、密度、质量等参数中,可以设定其中两个作为独立参数,按照设定的相似比推算出其他各参数的相似比。综合试验条件且参考其他相关文献,本次试验确定模型几何相似比为 1:30^[9-11]。隧道地震研究中一般设定泊松比 μ 、结构应变 ε 、材料摩擦角 φ 三个参数相似比为 1,相似准则计算中需要考虑的其他参数主要包括:物体几何尺寸 L 、物体质量 M 、物体密度 ρ 、时间 T 、结构荷载 F 、结构刚度 K 、结构应力 σ 、物体弹模 E 、结构振动频率 f 、速度 v 、加速度 a 、结构阻尼系数 c 一共 12 个参数,其中基本量纲参数为 3 个,可得量纲矩阵式如下:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} \\ F & L & T & M & K & \sigma & \rho & E & f & v & a & c \\ F & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ L & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & -2 & -4 & -2 & 0 & 1 & -1 \\ T & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & -1 & -1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由上述矩阵推导出如下方程组:

$$\begin{cases} F: & x_1 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_{12} = 0 \\ L: & x_2 + x_4 + x_5 + 2x_6 + 4x_7 + 2x_8 - x_{10} - x_{11} + x_{12} = 0 \\ T: & x_3 - 2x_4 - 2x_7 + x_9 + x_{10} + 2x_{11} - x_{12} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

求解(2)式可获得如下 π 矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} \\ F & L & T & M & K & \sigma & \rho & E & f & v & a & c \\ \pi_1 & -1 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_2 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_3 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_4 & -1 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_5 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_6 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \pi_7 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \pi_8 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \pi_9 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)

对该 π 矩阵进行计算可得到 9 条独立的 π 项公式,即 9 条相似准则,进而可得到试验中主要物理量的相似关系如表 2 所示。

表 2 主要参数相似关系

Table 2 Similarity ratio of main parameters

应力 C_σ	密度 C_ρ	几何 C_L	弹模 C_E	荷载 C_F	时间 C_T	加速度 C_a	阻尼 C_c	频率 C_f
45	1.5	30	45	40 500	5.5	1	7 394	0.2

4.2 模型试验材料制备

根据正交试验进行设计,采用机油、河砂及粉煤灰混合材料作为隧道围岩相似材料^[16]。配制材料比例为机油:河砂:粉煤灰=1:3:6。试验采用细度模数为 1.7~2.0 的细砂和二级 F 类粉煤灰,其中粉煤灰主要用于调节模型材料的容重以使其满足相似参数要求。

隧道衬砌结构设计标号为 C25,厚 0.5 m,相似材料拟采用石膏,按照相似关系计算其厚度为 17 mm。制作衬砌相似材料时可以掺入少量重型材质以增加其密度。

经过反复试验和对比,确定隧道衬砌相似材料配制比例为石膏:石英砂:水:重晶石=10:10:13:18。

隧道围岩相似材料的性质如表 3 所示。

表 3 隧道围岩相似材料参数

Table 3 Property parameters of similar materials in tunnel surrounding rock

名称	黏聚力 C/kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹模 E/GPa	密度 $\rho/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
原型	20~200	20~30	1.3~6.0	17~20
模型	0.44~4.4	20~30	0.028 9~0.133	11.3~13.3
试验参数	2.38	29.2	0.030 1	13

隧道衬砌相似材料参数如表 4 所示。

4.3 模型试验振动台设计

试验振动台采用德国 SCHENCK 产品,几何尺寸

为 2.5 m×2.5 m,最大载荷 100 t,加载加速度峰值为 1 个重力加速度,台面在竖向和水平方向最大位移值为 50 cm,承载频率 0.1~30 Hz。台架主体为格栅结构,由钢板焊接并在局部进行加强(图 10)。控制系统采用 32 通道动态数字信号测试系统。

表 4 隧道衬砌相似材料参数
Table 4 Property parameters of similar materials of tunnel lining

测试参数	原型	模型	实验参数
密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	2.5	1.67	1.672
弹性模量 E/GPa	29.5	0.66	0.665
强度/MPa	12.5	0.28	0.29



图 10 振动台
Fig.10 Platform table

4.4 模型箱的设计

为了减小反射波对模型边界的影响,模型箱制作时应尽量降低边界效应^[13],其设计要求为:结构强度高,足够稳定;边界条件接近原型围岩的地震响应情况。

综合试验各项要求,确定模型试验箱高度为 2 m,横向与纵向长度均为 2.5 m(图 11)。模型箱采用刚性固定边界,其内侧铺设聚苯乙烯板厚度为 10 cm,以降低地震反射应力波对研究的干扰。

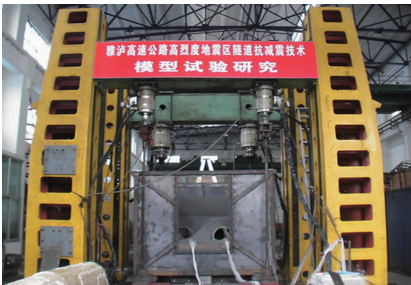


图 11 模型箱与试验装置
Fig.11 Model test box and loading device

4.5 模型试验监测

试验目的为观测隧道震害并分析结构震害机理和原因,在此基础上综合评价结构地震响应情况。试验量测内容主要包括加速度、应变记录和模型破坏观测。监测断面情况见图 12。其中断面 1 位于距离隧道洞

口 0.3 m 处,断面 3 位于距离隧道另一端 0.3 m 处,断面 2 处于断面 1 和断面 3 的中间中心位置。其中 1 断面为观测主断面,其余两断面为辅助断面。在隧道衬砌内外侧对称粘贴应变片,以监测应变应力值,应变片采用 5 mm×2 mm 泊式胶基电阻应变片,以半桥式进行观测。同时在隧道模型距洞口 20 cm 处及振动台上安设结构加速度计,通过结构加速度曲线的变化,反演模型围岩的地震响应。

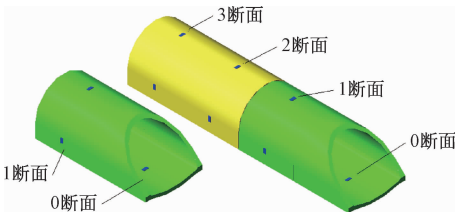


图 12 隧道模型监测测点布置图
Fig.12 Map of monitoring point of tunnel model

试验中隧道模型如图 13 所示。在隧道模型试验激振过程中,利用高速数据采集仪对隧道衬砌振动时的振幅进行分析。



图 13 隧道试验模型
Fig.13 Tunnel model for test

4.6 地震波加载方案

表 5 为试验地震波加载方式,分六次对隧道模型横向加载,输入加速度峰值逐级提高。

表 5 地震波加载情况
Table 5 Loading conditions of seismic waves

加载次序	1	2	3	4	5	6
输入加速度峰值 g	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8

4.7 模型动力特性测试

试验前应对振动台台面输入小振幅白噪信号,用以测试模型动力特性,测试情况如图 14、图 15 所示,由图可知模型系统的自振频率为 5.74 Hz。

4.8 模型土及隧道结构开裂情况

在六次激振过程中,隧道衬砌结构表面未出现明显裂缝,墙角与仰拱等局部处有轻微裂纹,两个模型交

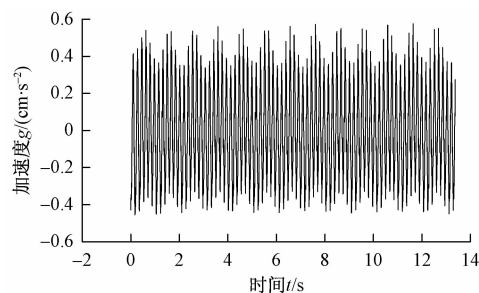


图 14 模型加速度响应

Fig. 14 Model system acceleration response curve

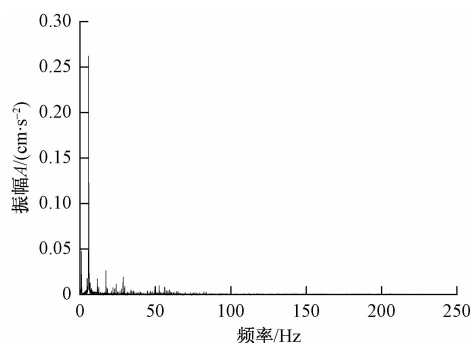


图 15 模型加速度响应傅里叶谱

Fig. 15 Model system acceleration Fourier spectrum

接处也有细小开裂现象(图 16)。



图 16 地震后隧道衬砌开裂情况

Fig. 16 Cracks of tunnel lining after earthquake

在震动过程中模型土表面出现了较多裂纹(图 17)。裂纹首先从距隧道拱顶两侧 45° 位置沿模型土向上发展,裂纹发展的主要原因是模型土与结构的相互作用;左洞右侧与右洞左侧的模型图开裂情况更加严重,表明双洞隧道之间在地震作用下存在有较强的动力相互作用,试验结论与之前的数值分析结果相一致。

隧道模型拱顶与仰拱监测点的地震响应如图 18、图 19 所示。

由图可知:仰拱处的应变峰值为 93 高于拱顶处应变峰值 71(应变值单位为 1×10^{-6}),两者数值比较接近而方向相反,表明两者在地震中存在错动响应,易导致隧道衬砌剪切破坏;各监测点的应变曲线在地震响



图 17 地震后模型围岩开裂情况

Fig. 17 Cracks on soils surface of model after earthquake

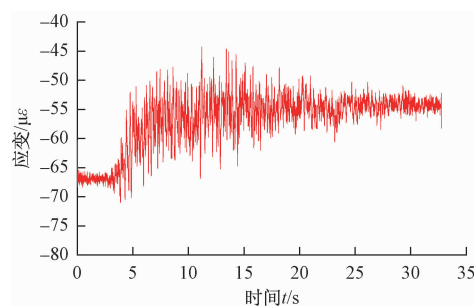


图 18 衬砌拱顶应变

Fig. 18 Strain of lining vault

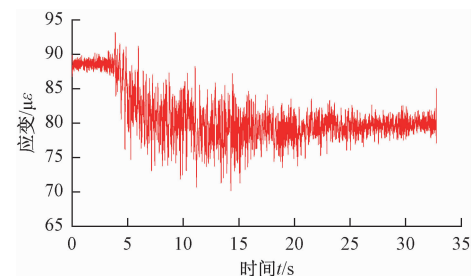


图 19 衬砌仰拱应变

Fig. 19 Strain of the invert arch of lining

应中存在较小的偏差,并保持到地震停止,表明衬砌在地震响应中产生了永久的附加应变。为了真实反应衬砌在地震响应中的应变曲线,需要剔除衬砌静应变的影响,在此设定隧道动应变为隧道总应变减去隧道静应变,并定义相对动应变为隧道动应变与隧道静应变之比。分析表明:衬砌总应变随距离洞口的距离增大而增大,衬砌相对动应变则随距离洞口的距离增大而减小。其原因是埋深的增大加强了围岩对隧道衬砌的约束作用,减弱了地震作用对衬砌的影响,因此较大的隧道埋深对隧道洞口的抗震是有利的。

5 结论

(1)地震作用下,隧道仰拱横向位移较大,随着隧道埋深增加,各监测点位移及隧道衬砌相对动应变均趋于减小。

(2)随着隧道埋深增加,内力逐步增加。其中墙角部位内力较大,属于抗震薄弱环节。

(3)强震作用下,洞口处隧道围岩产生贯通性裂缝,影响洞口稳定,应针对洞口采取有效的加固措施。

(4)地震作用下的明洞与暗洞交接处存在内力和位移的突变,为抗震薄弱环节。

(5)左洞隧道的右侧与右洞隧道的左侧应变高于其他两侧,说明试验模型中的双洞隧道之间在地震作用下存在一定的地震动力相互作用。

参考文献:

- [1] 潘昌实. 隧道及地下结构物抗震问题的研究概况[J]. 世界隧道, 1996, 33(5): 7-16. [PAN C S. A survey of seismic problems of tunnels and underground structures[J]. World Tunnel, 1996, 33(5): 7-16. (in Chinese)]
- [2] TAJIRI MASARU. Damage done by the great earthquake disaster of the Hanshin-Awaji district to the kobe Municipal Subway System and restoration works of the damage [J]. Japanese Railway Engineering, 1997, 37(2): 19-23.
- [3] IIDA HIROOMI. Damage and restoration of Daikai station of Kobe Rapid Transit Railway [J]. Japanese Railway Engineering, 1997, 37(2): 24-27.
- [4] 朱永全. 109号隧道地震灾害与加固处理的思考[J]. 国防交通工程与技术, 2008, 6(4): 1-4. [ZHU Y Q. Our reflection on the earthquake damage to the No. 109 tunnel and our consolidating treatment [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2008, 6(4): 1-4. (in Chinese)]
- [5] 崔光耀, 伍修刚, 王明年, 等. 汶川8.0级大地震公路隧道震害调查与震害特征[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 9-16. [CUI G Y, WU X G, WANG M N, et al. Earthquake damages and characteristics of highway tunnels in the 8.0-magnitude Wenchuan earthquake [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 9-16. (in Chinese)]
- [6] 铁路工程抗震设计规范: GB50111—2006 [S]. 2006. [Code for Seismic Design of Railway Engineering: GB50111—2006 [S]. 2006. (in Chinese)]
- [7] 地铁设计规范: GB50157—2013 [S]. 2013. [Code for Design of Underground Railways: GB50157—2013 [S]. 2013. (in Chinese)]
- [8] 公路工程抗震规范: JTG B02—2013 [S]. 2013. [Code for Seismic Design of Highway Engineering: JTG B02—2013 [S]. 2013. (in Chinese)]
- [9] 李育枢, 李天斌, 王栋, 等. 黄草坪2#隧道洞口段减震措施的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1128-1136. [LI Y S, LI T B, WANG D, et al. Large-scale shaking table test for vibration-absorption measures of portal section of huangcaoping tunnel no. 2 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1128-1136. (in Chinese)]
- [10] 蒋树屏, 文栋良, 郑升宝. 嘎隆拉隧道洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 649-656. [JIANG S P, WEN D L, ZHENG S B. Large-scale shaking table test for seismic response in portal section of galongla tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 649-656. (in Chinese)]
- [11] 陶连金, 李书龙, 侯森, 等. 山岭隧道洞口段地震响应振动台模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 7-16. [TAO L J, LI S L, HOU S, et al. Shaking table test for seismic response in portal section of mountain tunnel [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(4): 7-16. (in Chinese)]
- [12] 赵淑红. 时频分析方法及其在地震波数据处理中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2003. [ZHAO S H. Time frequency analysis method and its application in seismic wave data processing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese)]
- [13] BOASHASH B, O'SHEA P. Polynomial Wigner-Ville distributions and their relationship to time-varying higher order spectra [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(1): 216-220.
- [14] 陈灯红, 彭刚, 姚艳华, 等. 地震波时域数值优化研究及应用[J]. 世界地震工程, 2008, 24(4): 130-135. [CHEN D H, PENG G, YAO Y H, et al. Research and application on the numerical optimization of the earthquake wave time-domain [J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(4): 130-135. (in Chinese)]
- [15] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005. [YANG J J. Similarity theory and structural model test [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005. (in Chinese)]
- [16] 朱长安, 林国进, 陈志学. 隧道振动台模型试验相似材料研究[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 196-199. [ZHU C A, LIN G J, CHEN Z X. Research on similar materials for tunnel shaking table model test [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(5): 196-199. (in Chinese)]