

甘星球,曾旻,尤浩,等. 山岭隧道断层错动及地震响应模型试验研究[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 8-17. [GAN Xingqiu, ZENG Min, YOU Hao, et al. Study on Shaking Table Test of Mountain Tunnel under Fault Dislocation and Earthquake Action [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 8-17]

山岭隧道断层错动及地震响应模型试验研究

甘星球¹, 曾 旻¹, 尤 浩¹, 尉德新¹, 李 沛², 陈捷翎³

(1. 中交第一航务工程局股份有限公司, 天津 300461; 2. 中交天津港湾工程研究院股份有限公司, 天津 300222;
3. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 东非大裂谷处于持续扩张运动中, 断层错动和地震作用活跃。对此依托内马铁路2号隧道工程, 设计断层错动和地震作用下山岭隧道振动台试验。综合确定长度相似比0.05、密度相似比0.8、弹性模量相似比0.03, 设计了一种新型的断层错动装置和隧道震动裂缝声发射监测方法。试验结果表明: 断层错动装置较好的模拟了岩层错动, 声发射监测技术较好的监测了断层和地震作用下隧道衬砌微裂隙产生。断层错动和地震共同作用下, Y 方向的地震波引起隧道衬砌侧壁产生较大响应, Z 方向地震波引起隧道衬砌拱顶产生较大响应, 隧道衬砌加速度响应值受断层错动量影响较小。断层错动和地震共同作用下, Y 方向输入的地震波引起的隧道断层段衬砌侧壁受拉应变较大, 且随断层滑移量增加而增加, 其他位置拉应变较小。断层错动和地震共同作用下, Z 方向的地震波引起的隧道断层段衬砌拱顶和拱底外壁受拉应变较大, 且随断层滑移量增加而增加, 其他位置拉应变较小。该试验结果对类似隧道工程研究具有参考价值。

关键词: 东非大裂谷; 隧道; 振动台试验; 相似比; 断层错动; 声发射

中图分类号: U452.28

文献标示符: A

文章编号: 1001-8662(2021)03-0008-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.02

Study on Shaking Table Test of Mountain Tunnel under Fault Dislocation and Earthquake Action

GAN Xingqiu¹, ZENG Min¹, YOU Hao¹, YU Dexin¹, LI Pei², CHEN Jiuling³

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. School of Resources and Safety Engineering of Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Great Rift Valley of East Africa is in a continuous expansion movement, with active fault dislocation and seismic action. Based on the No.2 tunnel project of Nairobi Malaba railway, the shaking table tests of mountain tunnel is designed considering the action of fault dislocation and earthquake. The length similarity ratio, density similarity ratio and elastic modulus similarity ratio are determined to be 0.05, 0.8 and 0.03 respectively. A new

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508579, 51674287)

作者简介: 甘星球 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事地下工程方面的研究工作。

E-mail: 1045938440@qq.com

type of fault dislocation device is designed as well as the acoustic emission monitoring method for tunnel vibration cracks. The test results show that the fault displacement device well simulates the rock displacement, and the acoustic emission monitoring technology well monitors the whole micro fracture of tunnel wall during the test. Under the action of fault dislocation and earthquake, the seismic wave in Y direction causes a greater response on the side wall of tunnel lining, and the seismic wave in Z direction causes a greater response on the vault of tunnel lining, and the acceleration response value of tunnel lining is less affected by fault dislocation. And under the action of fault dislocation and earthquake, the tensile strain of lining side wall of tunnel fault section caused by seismic wave input in Y direction increases with the increase of fault slip, while the tensile strain at other positions is small. What's more, under the action of fault dislocation and earthquake, the tensile strains of the lining vault and the outer wall of the arch bottom of the tunnel fault section caused by the seismic wave in Z -direction are large, and increase with the increase of fault slip, while the tensile strain at other positions is small. The test results of this paper have reference value for similar tunnel engineering research.

Keywords: East African Great Rift Valley; Tunnel; Shaking table test; Similarity ratio; Fault movement; Acoustic emission

0 引言

地震对于隧道等工程结构产生的破坏性作用很大,往往会造成巨大的经济损失^[1]。为了减轻地震灾害的破坏作用,众多学者针对地震对于工程结构的影响进行了研究。李天斌研究了汶川大地震中山岭隧道破坏特征^[2]。Cilingir利用振动台试验研究了浅埋偏压洞口段隧道地震响应^[3]。杨林德、周晓洁、Yourself、Song和谷音等研究了隧道抗地震响应分析方法^[4-8]。周云东研究了非一致性地震作用下隧道响应规律^[9]。Wernicke分析了活断层隧道破坏机制^[10]。苏伟进行了模型试验相似材料研究^[11]。苏永奇等结合兰州地铁隧道结构研究了地震作用下的动力响应^[12]。同时参考了信春雷、高波、王帅帅等在研究跨断层隧道振动台试验时所采用的模拟断层错动装置进行了改良和优化^[13-15]。以上学者主要研究了隧道洞口、断层隧道地震作用破坏机理及相应的地震响应分析方法,但是没有考虑断层和洞口相互影响下地震及其他地质作用下隧道动力响应及相应的减震技术。

东非大裂谷(East African Great Rift Valley)是世界陆地上最大的断裂带,在大约3000万年以前由非洲板块和印度洋板块张裂拉伸形成。地质活动剧烈而且频繁,火山以及地震作用时常出现。肯尼亚内罗毕—马拉巴标准轨铁路(内马铁路)一期项目三标段2号隧道具有浅埋、围岩破碎,张性断层较多等特点,施工环境复杂,工程技术难度大,且距进洞口40 m处存在一个宽4 m作用的断层。因

此有必要研究该近洞口断层的隧道火山地震响应规律以及相应减震技术。为此,拟依托内马铁路一期三标段2号隧道,开展穿越东非大裂谷隧道大型振动台模型试验。本文对该模型试验进行设计研究。

1 工程背景

内马铁路一期三标段2号隧道起止里程为DK46+390~DK47+500,中心里程为DK46+945,全长1110 m。隧址区地形起伏,山体自然坡度较大,最大埋深约46 m。上坡段坡度3%;下坡段坡度7%。整个隧道截面的地层分布主要包括强风化粗面岩以及弱风化粗面岩,其中强风化粗面岩的抗压强度为500 kPa,弱风化粗面岩的抗压强度为800 kPa,其他参数两者相同,其中粘结力1 MPa、内摩擦角37°、弹性模量6.5 GPa、泊松比0.26、重度24°、膨胀角0°。隧道截面呈马蹄形,Ⅳ级围岩二衬厚度为40 cm,混凝土强度等级为C30,初期支护喷射混凝土等级为C25,厚度为8 cm,锚杆长度为2.5 m,间距为1.2 m×1.5 m。隧道断面的参数见图1。

2 模型试验相似比及相似材料

在制作试验模型之前,需要通过模型试验相似比确定模型的主要参数。设计相似比时,首先需要依照原理及主要考虑因素,结合工程地质条件一起对于相似比进行设计。

3 隧道模型试验装置设计

3.1 隧道模型基本结构设计

根据研究重点对于整个隧道模型的结构布置进行设计和布置如下:将整个试验的隧道模型分为左右两段,每段长1.2 m,断层位于整个模型箱的中部,主要观测跨断层隧道在地震过程中的动力响应规律以及断层错动条件下,隧道受到地震作用时的动力响应。隧道模型实物见图2。



图2 隧道模型(养护待拆模)

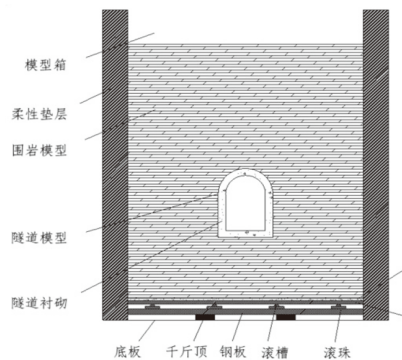
Fig.2 Tunnel model (maintenance to be demolished)

3.2 模型箱及模型断层错动装置设计

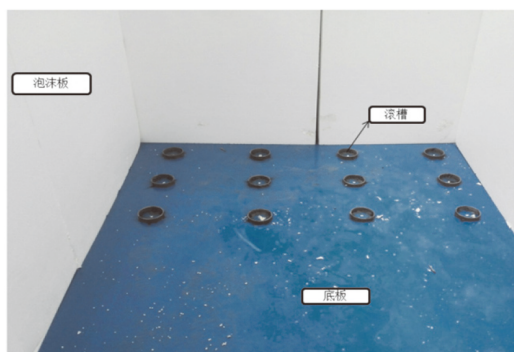
为了尽可能消除模型箱刚性边界对于地震波传播产生的边界效应的影响,同时考虑隧道模型尺寸以及振动台台面大小的限制,最终取模型箱宽度为4倍洞径,同时加厚两侧泡沫板厚度的方法。模型箱体具体设计如下:模型箱长×宽×高为 $(3.5 \times 2.3 \times 2.4) \text{ m}^3$,如下图3a所示,主体框架用槽钢[10焊接而成,在本次试验里我们设计了特殊的断层错动装置(如图3c)实现试验过程中的断层错动,在断层右侧模型箱底部设置两个夹层,夹层中间使用厚度为1 cm的钢板隔开,顶部也使用同样的钢板用以承受上覆围岩的重量,下方的夹层均匀固定有四个中心对称的载重10 kg的液压同步千斤顶,上方夹层设置为滚珠层,共设置12个滚槽,滚槽内放置有12个直径4 cm的滚珠,地震波输入前使用千斤顶进行抬升,模拟断层上下错动产生的位移,地震波输入时,模型箱底板带动上部滚珠滚动,滚珠带动上部围岩左右错动,在模型箱的侧壁设置聚苯乙烯泡沫板,泡沫板的厚度为20 cm,上部围岩撞击断层及模型箱四周泡沫板,同时产生回弹,能够很好的模拟断层左右错动的效果。优化后的断层错动装置可以同时满足水平双方向的地震波激励下断层错动效果。



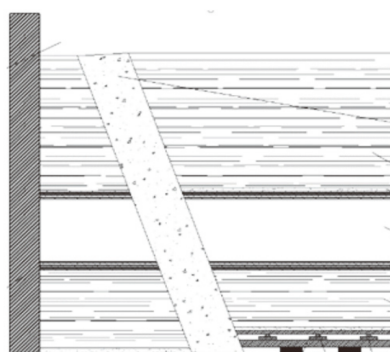
a.模型箱



b.模型隧道布置图



c.断层水平错动装置



d.断层隧道布置图

图3 隧道模型及断层装置布置图

Fig.3 Tunnel model and fault device

4 地震波输入及加载制度

采用中南大学4×4 m² 六自由度振动台地震波输入。该试验台最大加速度 1.0 g，最大载重 30 t，X、Y和Z方向最大位移分布为 250 mm，250 mm和

160 mm。本次试验选用 El Centro 波和 Kobe 波两种典型的地震波，使用 X 方向、Y 方向、Z 方向、XY 双方向四种输入方式进行加载，两种地震波均按照加速度峰值为 0.2 g，0.4 g，0.6 g 由小到大逐步进行试验。见下表 2。

试验实施过程中，首先同步千斤顶顶升 0 mm，

表 2 工况表
Table 2 Test cases

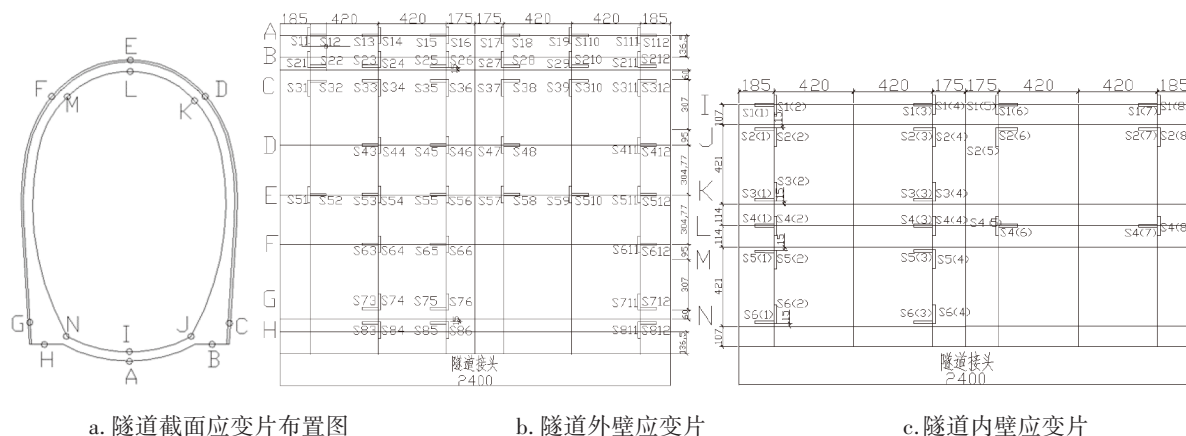
工况	断层错动	名称	大小	方向	工况	断层错动	名称	大小	方向
1	0	El 波	0.2 g	X	25	0	El 波	0.4 g	X
2	0	El 波	0.2 g	Y	26	0	El 波	0.4 g	Y
3	0	El 波	0.2 g	Z	27	0	El 波	0.4 g	Z
4	0	El 波	0.2 g	XY	28	0	El 波	0.4 g	XY
5	0	Kobe 波	0.2 g	X	29	0	Kobe 波	0.4 g	X
6	0	Kobe 波	0.2 g	Y	30	0	Kobe 波	0.4 g	Y
7	0	Kobe 波	0.2 g	Z	31	0	Kobe 波	0.4 g	Z
8	0	Kobe 波	0.2 g	XY	32	0	Kobe 波	0.4 g	XY
9	1 mm	El 波	0.2 g	X	33	1 mm	El 波	0.4 g	X
10	1 mm	El 波	0.2 g	Y	34	1 mm	El 波	0.4 g	Y
11	1 mm	El 波	0.2 g	Z	35	1 mm	El 波	0.4 g	Z
12	1 mm	El 波	0.2 g	XY	36	1 mm	El 波	0.4 g	XY
13	1 mm	Kobe 波	0.2 g	X	37	1 mm	Kobe 波	0.4 g	X
14	1 mm	Kobe 波	0.2 g	Y	38	1 mm	Kobe 波	0.4 g	Y
15	1 mm	Kobe 波	0.2 g	Z	39	1 mm	Kobe 波	0.4 g	Z
16	1 mm	Kobe 波	0.2 g	XY	40	1 mm	Kobe 波	0.4 g	XY
17	2 mm	El 波	0.2 g	X	41	0	El 波	0.6 g	X
18	2 mm	El 波	0.2 g	Y	42	0	El 波	0.6 g	Y
19	2 mm	El 波	0.2 g	Z	43	0	El 波	0.6 g	Z
20	2 mm	El 波	0.2 g	XY	44	0	El 波	0.6 g	XY
21	2 mm	Kobe 波	0.2 g	X	45	0	Kobe 波	0.6 g	X
22	2 mm	Kobe 波	0.2 g	Y	46	0	Kobe 波	0.6 g	Y
23	2 mm	Kobe 波	0.2 g	Z	47	0	Kobe 波	0.6 g	Z
24	2 mm	Kobe 波	0.2 g	XY					

模拟断层错动，然后白噪声扫描，采集数据，接下来依次输入表 2 中 1-8 工况地震波并同步采集数据，模拟断层错动和地震作用下隧道动力响应。重复上述过程，同步千斤顶分别顶升 1 mm，2 mm。

5 数据采集系统

试验中所使用的数据采集系统主要包括：加速度传感器、应变片以及声发射探测技术。加速度传感器以及应变片的布置方式主要参考数值分析计算

的结果进行选择。在每个横断面上我们主要观测的位置在几个受力最大的地方，根据各横断面的受力分析可知，受力最大的位置为拱底两侧的位置，其他受力较大的位置包括拱顶、拱底和侧拱中部。所以，主要的应变片，加速度传感器都布置在隧道模型的这几个位置的内壁外侧与土体接触的地方，见图 4。声发射技术是一种动态非破坏检测技术，采用声发射技术监测试验过程中隧道裂缝的产生。声发射探头布置见图 5。



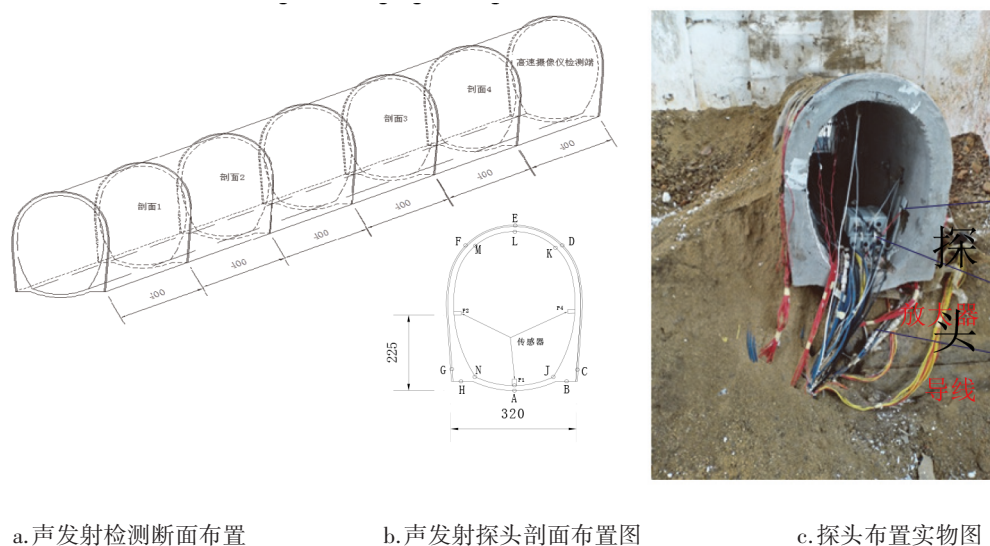
a. 隧道截面应变片布置图

b. 隧道外壁应变片

c. 隧道内壁应变片

图4 隧道衬砌应变片布置展开图

Fig.4 Strain gauge arrangement on tunnel wall



a. 声发射检测断面布置

b. 声发射探头剖面布置图

c. 探头布置实物图

图5 发射探头布置图(单位:cm)

Fig.5 Acoustic emission probe layout (unit: cm)

6 试验结果

6.1 边界效应分析

为检测模型箱边界效应,试验前在模型箱边界设置了加速度传感器。选取靠近和远离模型箱边界的两个加速度计,采用统计学中皮尔逊积矩相关系数,见式(1)来度量相同时刻下两加速度计所采集数据的相关程度,相关系数的计算结果见表3。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} = \frac{1}{n-1}$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i - \bar{A}}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \bar{B}}{\sigma_B} \right) \quad (1)$$

式(1)中A、B分别表示需要计算相关度的两个变量,在试验中具体分别代表加速度计在相同时刻采集到的加速度值; r 表示相关系数,通常认为当 $r \geq 0.9$ 时,可认为模型箱不存在影响试验数据的边界效应。由表3中的计算结果可知,模型箱的边界条件处理合理,可较好地完成试验。

6.2 加速度响应

活断层竖向错动作用下,断层段隧道顶部以及侧壁地震加速度如图5所示。图5中X、Y和Z分别表示X、Y、Z方向的地震输入波下相应方向地震加速度。由图5可知:断层段隧道顶部Z方向地震波放大效应最为明显,断层段隧道侧壁Y方向地震波放大效应最为明显。在0.2g地震波作用下,活断层错动量对于X、Y和Z方向隧道地震加速度响应影响可以忽略。

表3 加速度计相关系数计算表

Table 3 Calculation table of accelerometer correlation coefficient

加载地震波类型	强度	断层位移大小/mm	相关系数
El波	0.2 g	0	0.980
Kobe波	0.2 g	0	0.963
El波	0.2 g	1	0.945
Kobe波	0.2 g	1	0.914
El波	0.2 g	2	0.987
Kobe波	0.2 g	2	0.909
El波	0.4 g	0	0.914
Kobe波	0.4 g	0	0.963
El波	0.6 g	0	0.917
Kobe波	0.6 g	0	0.973

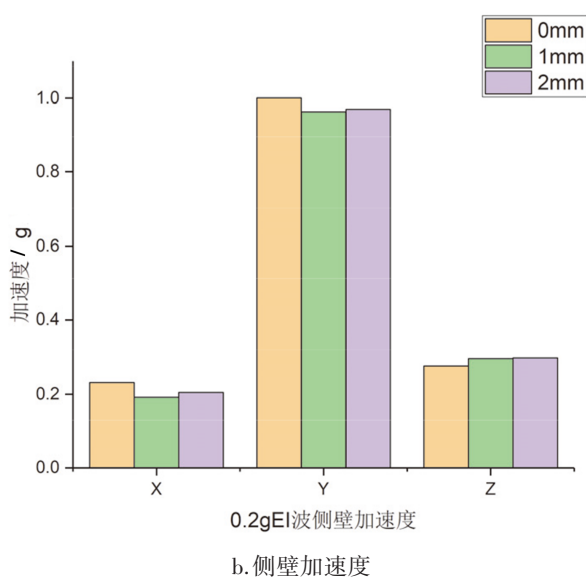
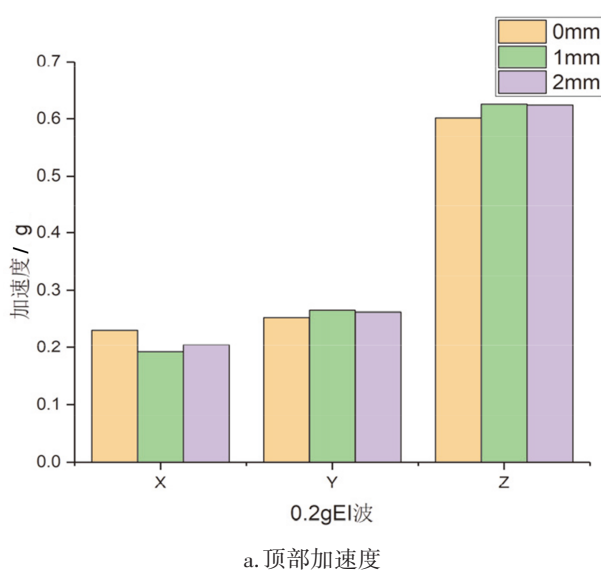


图6 断层截面隧道加速度分析

Fig.6 Acceleration analysis of fault section tunnel

6.3 应变响应

X方向地震波产生的隧道加速度和应变响应较小,因此只讨论Y、Z方向输入的地震波产生的隧道应变。图7为活断层错动和地震作用下,断层段隧道侧壁拱脚外壁应变。图7中一倍距和二倍距分别表示一倍距断层厚度的隧道内部断面以及二倍断层厚度的断面上的应变值。由图7所示:隧道右侧外壁的B、C两点(B、C点位置见图4a)上所产生的应变最大,断层段隧道破坏较为严重,与活断层距离越远,受到的影响越小。在二倍断层厚度的距离下,隧道的动力响应基本稳定。在右侧拱脚处,C点产生的应变值更大,同时,在Y方向地震波的作用下,侧壁受拉更明显。0.2 g地震波作用下,隧道衬砌拱脚应变值随断层错动量增加而增加。推测其原因为地震波输入前预先的断层错动作用导致的隧道外壁衬砌混凝土受拉变形,在地震波的作用下隧道衬砌产生的应变值增加,比没有断层错动作用下隧道衬砌更容易产生破坏。隧道结构左右侧产生的应变响应接近。

图8为活断层错动作用下,断层段隧道拱顶外壁地震应变。图8中二倍距表示二倍断层厚度的断面上的应变值。由图8所示:活断层对于隧道衬砌的应变反应具有明显的放大作用,在与断层距离二倍断层厚度处的隧道处基本不产生影响。同时,随着断层错动量的增大,断层段隧道外壁整体应变值呈上升趋势,拱底受拉作用产生的应变值较大,拱顶较小。由于Z方向的地震波输入方向与预活断层错动方向相同,隧道整体的受力形式类似,可以推定应变增大是由活断层错动引起的。图6加速度分析表明在Z方向地震波作用下,隧道顶部加

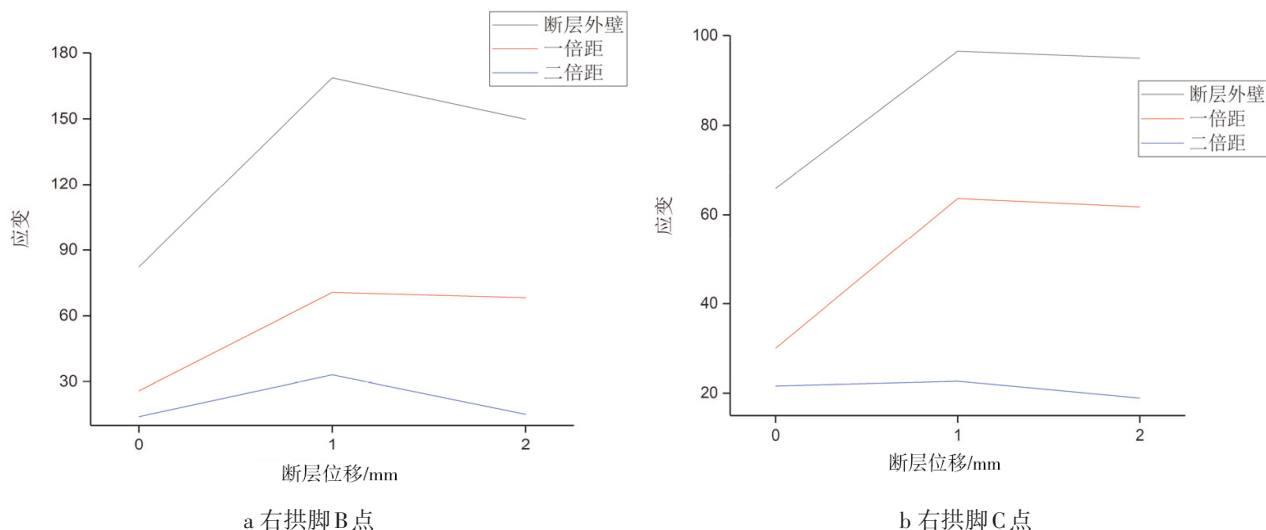


图7 Y方向地震波拱脚应变

Fig.7 Maximum strain on arch foot of seismic wave in Y direction

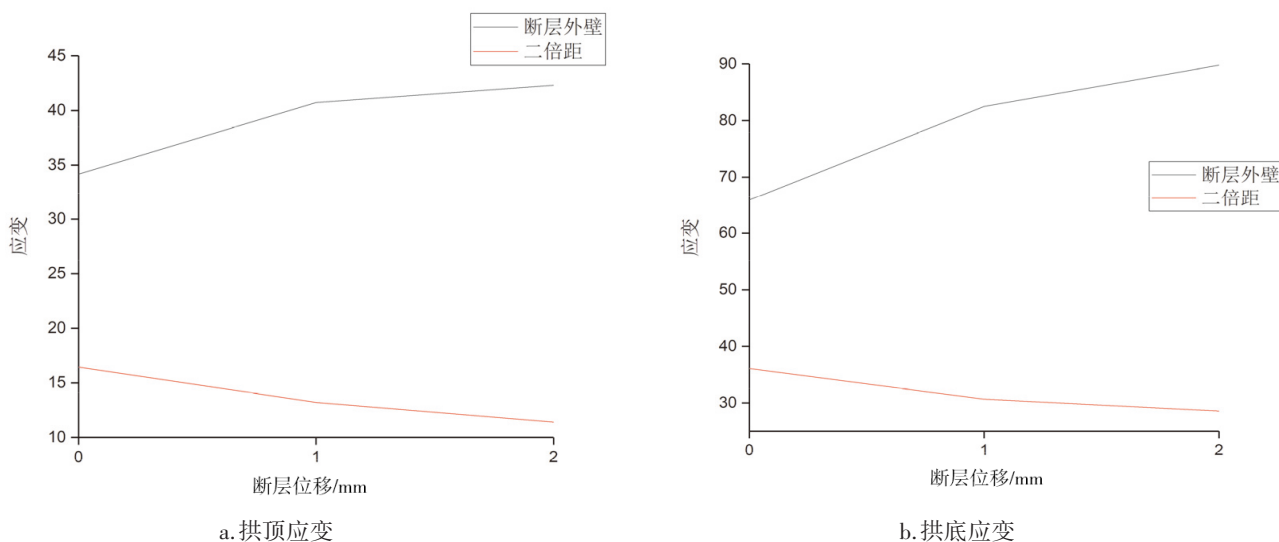


图8 Z方向拱顶和拱底应变分析

Fig.8 Strain analysis of arch top and arch bottom in Z direction

速度放大作用明显。因此,可以认为活断层错动对于断层段隧道衬砌拱顶外壁和拱顶竖直方向加速度影响较为明显。

图9为活断层错动作用下,断层段隧道拱顶内壁上地震应变。由图9可知:0~1 mm活断层错动作用下,隧道内壁应变比隧道外壁应变小。但是在2 mm活断层错动条件下,断层段隧道拱顶和拱底地震应变超过了100微应变。因此,较大断层错动会对隧道内壁的地震响应产生较大影响。隧道内壁拱顶受拉,拱底受压,拱顶整体应变值明显大于拱底,同时由于断层破碎带本身的影响,断层段隧道应变较大,远离断层应变明显减小。由图9也可知:活断层错动作用下,隧道内壁拱脚应变值

比拱肩大。

6.4 声发射信号分析

图10是声发射数据,试验中峰频大于或者等于39 kHz的高频信号比例随着震级变化关系图,图中在工况点11,23,35(用透明三角形单独标出的点)高频声发射信号所占比例较高,这三个点分别对应0.2 g Z方向EI波和Kobe波、0.4 g Z方向EI波,在这些工况点处隧道模型内部结构反应较为剧烈,说明在这些工况点下隧道模型内部有局部的裂纹产生或者扩展,振动台试验过程中,初始时以较大的加速度来振动,隧道模型所受的振动型作用力比较强烈,所以初始时相对高频的信号

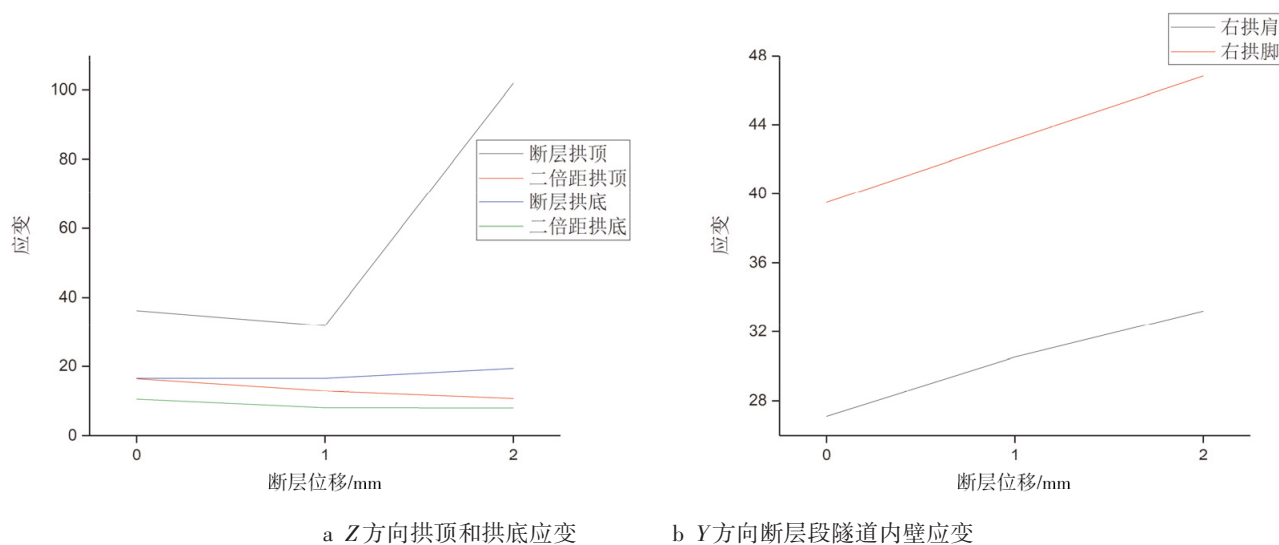
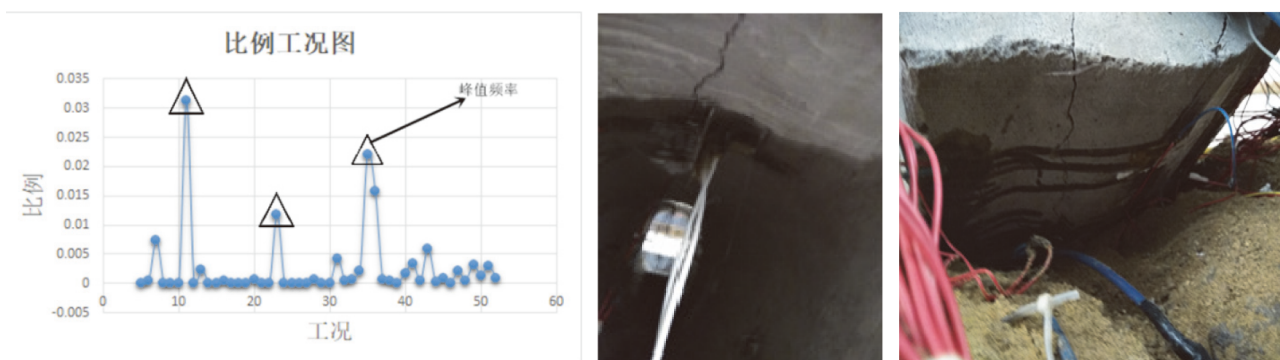


图9 隧道内壁应变

Fig.9 Maximum strain on tunnel inner wall

所占比例较高,此时隧道模型中裂纹萌生或者扩展都比较集中,所以相对高频信号比例较高,由图 10b、图 10c 试验完成后所拍摄的隧道模型内外的情况,可以很明显的看出试验过程中隧道内外

壁均产生了裂纹扩展的现象。说明声发射可以有效的监测地震过程中隧道裂隙的产生。但是表征隧道裂缝产生的其他声发射信号变化规律,还需要更为广泛的深入的研究。



a. PIC 仪器实验数据峰频随震级变化图

b. 隧道内壁顶部裂纹

c. 隧道外壁底部裂纹

图 10 声发射结果

Fig.10 Acoustic emission results

7 结论

本文对穿越东非大裂谷隧道在火山地震的共同作用下的大型振动台物理模型试验的设计进行了系统的分析和研究,得到如下结论:

(1)根据三个基本量长度相似比 0.05、密度相似比 0.8、弹性模量相似比 0.03,推算出其余物理量的相似比;根据相似比,设计模型箱长×宽×高为 $(3.5 \times 2.3 \times 2.4) \text{m}^3$ 以及隧道基本布置;设计出相似

材料配比试验。

(2)为了研究断层和地震作用下,隧道动力学响应,设计了一种新型的断层错动装置,并达到了良好的试验效果。

(3)断层错动和地震共同作用下,Y方向的地震波引起隧道衬砌侧壁产生较大响应,Z方向地震波引起隧道衬砌拱顶产生较大响应,隧道衬砌加速度响应值受断层错动量影响较小。断层错动和地震共同作用下,Y方向输入的地震波引起的隧道断层段衬砌侧壁受拉应变较大,且随断层滑移量增加而

增加,其他位置拉应变较小。断层错动和地震共同作用下,Z方向的地震波引起的隧道断层段衬砌拱顶和拱底外壁受拉应变较大,且随断层滑移量增加而增加,其他位置拉应变较小。

(4)采用声发射监测技术可以较好的监测断层和地震作用下隧道衬砌微裂隙产生。

参考文献

- [1] Wernicke B. Low - angle normal faults and seismicity: A review[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1995,100(B10):20159-20174
- [2] 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
- [3] CILINGIR U, MADABHUSHI S P G. A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 452-462
- [4] 周晓洁,张越宇,何颖,等. 地震波斜入射下沉管隧道的地震响应分析[J]. 地震工程学报,2017,39(4):600-608
- [5] Youssef M A H, Jeffrey J H, Birger S, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(4):247-293
- [6] Song C M, Wolf J P. Dynamic stiffness of unbounded medium based on damping-solvent extraction[J]. EESD, 1994,23(2):169-181
- [7] 谷音,朱清,钟华,等. 考虑水平及竖向地震影响的盾构隧道动力分析及Pushover方法研究[J]. 工程抗震与加固改造,2017,12(S1):44-51
- [8] 周云东,上官子恒,褚飞飞,等. 地震动非一致性对隧道动力响应的影响分析[J]. 地震工程学报,2017,39(1):8-12
- [9] 何永辉. 穿越活动断层山岭隧道破坏机制及其安全性分析[D]. 成都:西南交通大学,2017
- [10] Wernicke B. Low-angle normal faults and seismicity: A review[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1995,100(B10):20159-20174
- [11] 苏伟,冷伍明,雷金山,等. 岩体相似材料试验研究[J]. 土工基础,2008,10(5):73-75
- [12] 苏永奇,马伟,李明勇,等. 兰州地铁隧道结构在地震作用下的动力响应[J]. 地震工程学报,2015,37(4):938-943
- [13] 信春雷,高波,王英学,等. 跨断层隧道可变形抗减震措施振动台试验研究[J]. 岩土力学,2015,21(4):1041-1049
- [14] 信春雷,高波,闻高明,等. 跨走滑断层隧道地震破坏特征与抗减震措施研究[J]. 振动工程学报,2016,13(4): 694-703
- [15] 王帅帅,高波,隋传毅,等. 减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,15(6):1086-1092