

断层破碎带影响下隧道的震害分析

李廷春¹, 张乃杰¹, 刘建章², 王 辉¹

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021)

摘要:断层破碎带对隧道震害影响巨大,利用FLAC^{3D}数值计算方法,研究了不同空间方位断层破碎带影响下隧道的地震破坏规律。研究表明:含断层破碎带是隧道震害发生的主要影响因素;在相交断层破碎带处,与隧道横断面大角度相交的工况比小角度相交的工况不利,且破坏的部位发生在与断层破碎带相交的位置;在非相交断层破碎带处,倾角为30°的工况最不利,且隧道破坏发生在左边墙肩部和右边墙角部,位于地震波输入的水平 and 竖直扰动的剪切波和疏密波的合力方向。

关键词:断层破碎带;隧道;地震;震害规律

中图分类号:U451.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)01-0068-07

Analysis on Seismic Hazard of Tunnels in Fault Fracture Zone

Li Tingchun¹, Zhang Naijie¹, Liu Jianzhang², Wang Hui¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Shandong Provincial No. 4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang, Shandong 261021, China)

Abstract: Tunnel is influenced significantly by fault fracture zone in earthquake. In this study, FLAC^{3D} numerical simulation was used to conduct analysis on seismic failure law of tunnel structures in fault fracture zones of different spatial orientation. The results indicate that fault zone is the main factors of seismic hazard in tunnel. At the intersection of fault fracture zone, the project situation that the fault fracture zone intersected with high-angle to the tunnel cross section is worse than the low-angle project situation, and the site of destruction occur in tunnel where the position intersects with the fracture zone. At the place of non-intersect fault fracture zone, the project situation of 30° fault fracture zone is the worst. And the site of destruction occur in the left shoulder and right corner of sidewall and located in resultant direction of shear and density wave, which disturb by horizontal and vertical seismic wave.

Key words: fault fracture zone; tunnel; earthquake; seismic failure law

不论是山岭隧道、水底隧道还是地下隧道都与人们的生活息息相关,隧道给人们的出行带来了极大的便利。然而,地震来临时,隧道中断层破碎带的存在,给隧道的安全使用带来了非常大的危害,进行断层破碎带影响下隧道的震害分析意义重大。杨志华等^[1]采用三维离散元动力分析方法,模拟研究了穿越断层的成兰铁路邓家坪隧道围岩在强震和断层共同作用下的动力响应过程,结果表明:地震动荷载、断层等因素的共同作用改变了隧道围岩中的初始应力分布,使断层附近隧道围岩应力累积、集中,最终导致了具有高度复杂性的渐进性断层破裂过程和隧道围岩破坏过程。李旭升^[2]采用数值模拟方法,研究了断层宽度、倾角和围岩参数变化对穿越断层隧道的地震动力响应。朱长安等^[3]基于土-结构相互作用理论,对高烈度地震区跨断层破

收稿日期:2013-09-17

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2012EEM030)

作者简介:李廷春(1968—),男,山西朔州人,教授,博士,主要从事裂隙岩体力学特性方面的研究工作。

E-mail:tchli_sd@163.com

碎带公路隧道进行了抗震计算,得出隧道结构各控制点的位移、加速度及应力响应的一般规律。王峥^[4]利用数值模拟和模型试验相结合的方法研究了跨断层隧道的动力反应规律,分析了跨断层隧道衬砌开裂过程及破坏形态。王琼等^[5-6]进行了跨断层隧道地震反应分析研究,总结了震害现象和产生原因。

然而,断层破碎带并不都是与隧道相交,现实生活中在隧道周围也存在着大量的不与隧道相交的断层破碎带。本文以胶州湾海底隧道为工程背景,深入研究断层破碎带与隧道相交和不相交两种工况条件下隧道的地震破坏规律,充实断层破碎带影响下隧道震害的研究成果。

1 工程概况及计算条件

1.1 工程概况

胶州湾海底隧道位于胶州湾海域内,隧址区内主要为第四纪地层,基岩类型主要为变质岩、火山岩、沉积岩及侵入岩四大类。隧址区地质构造以中、新生代脆性断裂构造最为醒目。近场区遭受最大地震影响烈度为Ⅸ度,由 1668 年郯城地震引起。隧道断面为椭圆形,设置仰拱,主隧道开挖断面高 11.2~12.0 m,宽 15.23~16.03 m,海域段主隧道埋深为 20~30 m。

1.2 数值计算

1.2.1 计算模型

计算时截取隧道左洞 HYK2+440~HZK3+210 段一横截面进行分析,建立大小为 70 m×70 m×2 m 的准三维模型。断层破碎带宽度取 10 m,隧道围岩取分布最广的一种,即安山质火山角砾岩。隧道支护采用锚杆加复合式衬砌,锚杆长 3.5 m,间排距 1.0 m×1.0 m,喷射混凝土厚 250 mm,浇注混凝土厚 700 mm,强度等级分别为 C50 和 C35。

数值模拟以有限差分软件 FLAC^{3D} 的动力计算模式为平台,并对软件进行二次开发后分析计算。围岩、初期支护和二次衬砌均采用 Mor-Coulomb 模型,锚杆(索)依据 FLAC^{3D} 中 Cable 结构单元模拟。分别对相交及非相交断层破碎带与隧道水平基线夹角为 0°,30°,60°,90°时隧道地震响应进行模拟分析。通过试算,非相交断层破碎带与隧道边界距离为 15 m 时,可突出地震下断层对隧道的影响,因此模拟中取二者的距离为 15 m 进行建模。

8 种角度方案中的参数均参照中铁大桥勘测设计院有限公司和国家海洋局青岛海洋研究所提供的工程地质报告,围岩及混凝土物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩及混凝土物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and lining concrete

材料	弹性模量/(GPa)	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪胀角/(°)
火山角砾岩	39.1	0.28	26	38	12.00	38
断层破碎带	20.0	0.33	21	27	0.25	27
初期支护	30.0	0.20	22	50	5.00	50
二次衬砌	35.0	0.20	25	55	7.20	55

1.2.2 地震反应时程分析

出于对隧道安全的考虑,本次模拟计算输入的地震激励为汶川地震中成都观测站前 20 s 地震波(震级 8.0 级,震中距为 73 km,最大加速度为 2.96 m/s²,地震烈度为 7 度)。在进行地震波输入时,经对地震波的高频成分进行过滤和对位移进行基线校正,得到地震波加速度时程曲线如图 1 所示。

计算时在模型底部同时输入同等量值的 x 向

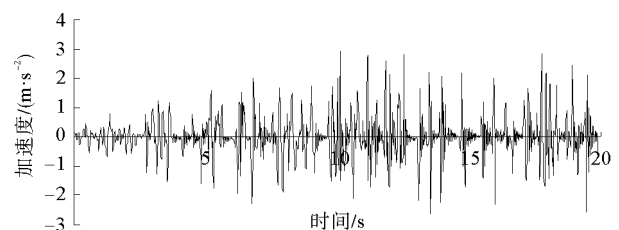


图 1 修正后的地震加速度时程曲线

Fig. 1 Corrected time-history curve of seismic acceleration

和 y 向地震加速度时程,来分别模拟水平扰动的剪切波和垂直扰动的压缩波。本次数值模拟的模型中采用瑞利阻尼,通过反复的试算,并根据现场试验和室内岩样阻尼试验的结果,最后取最小临界阻尼比为 0.05,最小中心频率取模型的自震频率为 7.14。对于锚杆等结构单元,采用的是局部阻尼,大小 $\alpha_L = \pi \times 0.05 = 0.1571$ 。

2 断层破碎带与隧道相交工况下的震害分析

2.1 计算结果

地震模拟计算结束后,分别提取了 4 种角度震后隧道附近的塑性区图和隧道衬砌关键位置的地震位移反应值、应力值和加速度值。

1) 塑性区计算结果

相交工况下 4 种角度震后隧道附近塑性区分布如图 2 所示。

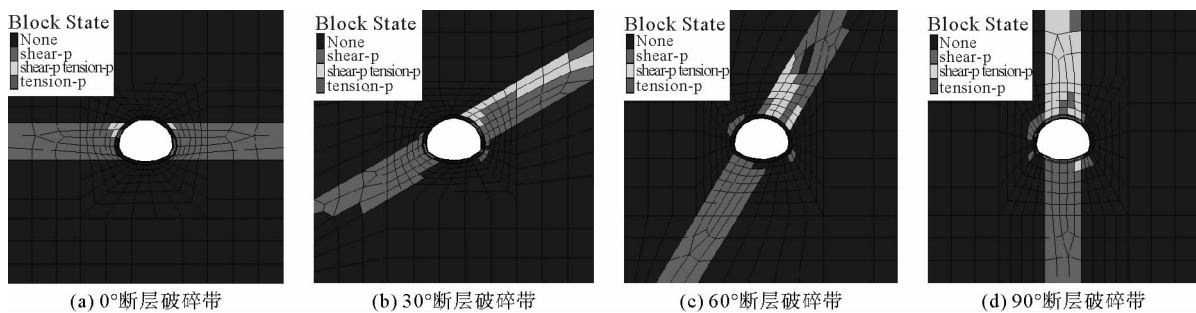


图 2 4 种角度震后隧道附近塑性区分布图

Fig. 2 Distribution of plastic zone near the tunnel after earthquake in 4 kinds of angle

2) 位移计算结果

4 种角度下隧道衬砌左帮、右帮、拱顶、拱底 4 个位置关键点的地震位移反应值,如表 2 所示。其中:左帮和右帮均指隧道左右边墙拱腰中部,时间指峰值出现的时刻。以峰值最大的左边墙拱腰节点水平位移时程曲线为例,4 种角度隧道震中位移时程曲线图如图 3 所示。

表 2 4 种角度中隧道地震位移反应值表

Tab. 2 Displacements values of seismic response in 4 kinds of angle

角度/(°)	水平位移峰值				竖向位移峰值			
	左帮峰值/m	时间/s	右帮峰值/m	时间/s	拱底峰值/m	时间/s	拱顶峰值/m	时间/s
0	0.091 57	4.975	0.091 25	4.974	0.062 62	4.960	0.06 206	4.964
	-0.216 60	19.080	-0.217 50	19.080	-0.146 00	19.060	-0.146 90	19.060
30	0.091 59	4.418	0.091 49	4.418	0.062 73	4.407	0.062 09	4.408
	-0.196 50	15.670	-0.196 50	15.670	-0.145 80	16.950	-0.146 70	16.940
60	0.092 57	4.159	0.092 67	4.161	0.064 43	4.148	0.063 64	4.151
	-0.220 80	15.960	-0.220 30	15.960	-0.149 40	15.960	-0.151 90	15.960
90	0.092 24	4.144	0.092 28	4.146	0.064 18	4.129	0.063 43	4.130
	-0.220 30	15.900	-0.218 50	15.900	-0.147 80	15.880	-0.151 00	15.890

3) 应力计算结果

4 种角度下隧道衬砌拱顶、拱底、左肩、右角 4 个位置关键点的最大、最小主应力值,如表 3 所示。其中:

拱顶和拱底指拱顶和反底拱中点,左肩指左边墙肩部,右角指右边墙底角。以峰值最大的 60°时左边墙肩部最大主应力时程曲线为例,4 种角度隧道最大主应力时程曲线如图 4 所示。

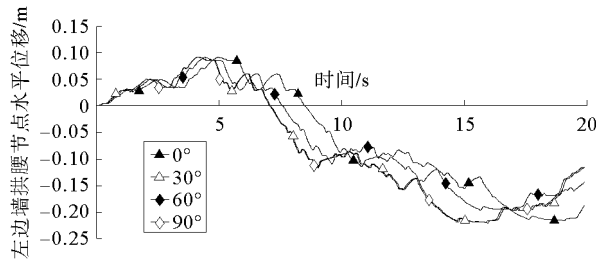


图 3 4 种角度左边墙拱腰节点水平位移时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of horizontal displacements at the middle of left sidewall in four kinds of angle

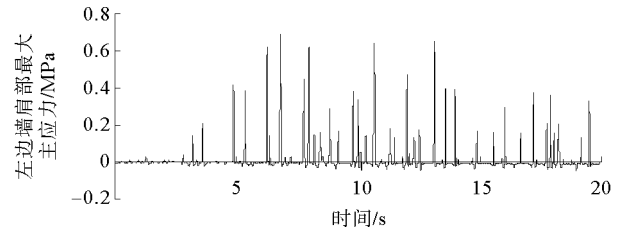


图 4 倾角为 60°时左边墙肩部最大主应力时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of maximum principal stress at the shoulder of the left sidewall in 60° fault fracture zone

表 3 4 种角度中隧道最大和最小主应力反应值表

Tab. 3 Values of maximum and minor principal stress response in 4 kinds of angle

角度/(°)	最小主应力最小值/MPa				最大主应力最大值/ MPa			
	拱顶	拱底	左肩	右角	拱顶	拱底	左肩	右角
0	-0.395	-0.348	-3.57	-4.45	0.098 9	0.027	0.371	0.158
30	-0.576	-0.426	-1.65	-3.19	0.019 8	0	0.390	0.185
60	-1.250	-0.871	-1.32	-3.10	0.378 0	0.344	0.693	0.396
90	-0.643	-0.713	-2.55	-3.65	1.400 0	0.914	0.356	0.153

4)加速度计算结果

4 种角度下隧道衬砌左肩和右角的水平峰值、拱顶和拱底的竖向峰值,如表 4 所示。其中:左帮和右帮均指隧道左右边墙拱腰中部。

表 4 4 种角度中隧道地震加速度反应值表

Tab. 4 Acceleration values of seismic response in 4 kinds of angle

角度/(°)		0	30	60	90
水平峰值	左帮峰值/m	4.408	-4.021	4.886	-5.158
	右帮峰值/m	4.799	-4.514	4.457	-4.121
竖向峰值	拱顶峰值/m	3.170	-3.180	3.801	-3.301
	拱底峰值/m	3.445	-3.305	4.201	-4.129

2.2 计算结果分析

1)塑性区计算结果分析

从图 2 中可以看出,0°时,断层破碎带以外的围岩没有进入不利的塑性状态;90°时,除和 30°,60°都在隧道左边墙肩部和右边墙底角围岩出现小范围塑性区外,还在左边墙底角和右边墙肩部围岩部位出现;随角度增大,围岩塑性区面积略有增长,且基本上沿断层破碎带方向发展。衬砌的塑性区出现在断层破碎带与其相交的位置,衬砌的塑性区面积大小规律为: $S_{90^\circ} > S_{30^\circ} > S_{0^\circ} > S_{60^\circ}$ 。

2)位移计算结果分析

从图 3 可以看出,随着角度的增大,监测点达到其峰值所对应的时间有所提前;分析表 2 可知,各正向峰值满足: $u_{60^\circ} > u_{90^\circ} > u_{30^\circ} > u_{0^\circ}$;各负向峰值满足: $u_{60^\circ} > u_{90^\circ} > u_{0^\circ} > u_{30^\circ}$;左帮、右帮的位移值总是大于拱顶、拱底

的位移值。

3) 应力计算结果分析

通过图 4 可以看出,倾角为 60° 时左边墙肩部最大主应力值向纵轴正向突变激烈;从表 3 中可以看出,隧道结构的肩部和底角对地震的最大、最小主应力响应较隧道其他部位要明显;拱顶和反底拱的最大主应力峰值满足: $\sigma_{90^\circ} > \sigma_{60^\circ} > \sigma_{0^\circ} > \sigma_{30^\circ}$, 左边墙肩部和右边墙底角的最大主应力满足: $\sigma_{60^\circ} > \sigma_{30^\circ} > \sigma_{0^\circ} > \sigma_{90^\circ}$; 拱顶和反底拱的最小主应力峰值的数值满足: $\sigma_{60^\circ} > \sigma_{90^\circ} > \sigma_{30^\circ} > \sigma_{0^\circ}$, 左边墙肩部和右边墙底角的最小主应力峰值满足: $\sigma_{0^\circ} > \sigma_{90^\circ} > \sigma_{30^\circ} > \sigma_{60^\circ}$ 。

4) 加速度计算结果分析

由表 4 可以看出,除右边墙拱腰加速度的数值大小为 $a_{90^\circ} > a_{60^\circ} > a_{0^\circ} > a_{30^\circ}$ 外,其他监测点的加速度数值均随角度增大而增大。

2.3 相交工况下的震害分析小结

对于相交工况:①围岩和衬砌的塑性区主要发生在与断层破碎带相交的部位, 90° 时围岩和衬砌的破坏最为严重。② 60° 较其他角度在隧道所有部位产生的位移值最大,且左帮、右帮比拱顶、拱底位移值大。即 60° 工况下隧道产生变形破坏的概率要大于其他工况,且左帮、右帮比拱顶、拱底更容易发生破坏。③ 90° 时在隧道拱顶和拱底的最大主应力最大,说明 90° 时在拱顶和拱底最易出现受拉破坏。④随角度的增大,隧道所有部位的加速度呈增大趋势,说明隧道承受的惯性力在不断增大。

3 断层破碎带与隧道非相交工况下的震害分析

3.1 塑性区计算结果

地震模拟计算结束后,分别提取了 4 种角度震后隧道附近的塑性区图和隧道衬砌关键位置的地震位移反应值、应力值和加速度值。

1) 塑性区计算结果

非相交工况下 4 种角度震后隧道附近塑性区分布如图 5 所示。

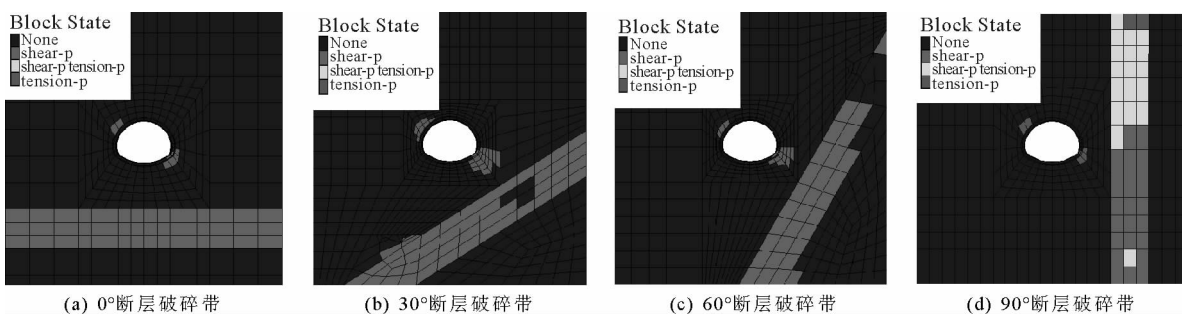


图 5 4 种角度震后隧道附近塑性区分布图

Fig. 5 Distribution of plastic zone near the tunnel after earthquake in 4 kinds of angle

2) 位移计算结果

4 种角度下隧道衬砌左帮、右帮、拱顶、拱底 4 个位置关键点的地震位移反应值,如表 5 所示。其中:左帮和右帮均指隧道左右边墙拱腰中部,时间指峰值出现的时刻。以峰值最大的右边墙拱腰节点水平位移时程曲线为例,4 种角度隧道震中位移时程曲线图如图 6 所示。

3) 应力计算结果

4 种角度下隧道衬砌拱顶、拱底、左肩、右角 4 个位置关键点的最大、最小主应力值,如表 6 所示。其中:拱顶和拱底指拱顶和反底拱中点,左肩指左边墙肩部,右角指右边墙底角。以峰值最大的 30° 时右边墙底角最大主应力时程曲线为例,4 种角度隧道最大主应力时程曲线如图 7 所示。

表 5 4 种角度中隧道地震位移反应值表

Tab. 5 Displacements values of seismic response in 4 kinds of angle

角度/(°)	水平位移峰值				竖向位移峰值			
	左帮峰值/m	时间/s	右帮峰值/m	时间/s	拱底峰值/m	时间/s	拱顶峰值/m	时间/s
0	0.092 04	4.163	0.092 44	4.162	0.063 21	4.148	0.062 84	4.151
	-0.219 80	15.950	-0.219 70	15.950	-0.146 20	15.950	-0.145 30	15.940
30	0.093 46	4.508	0.093 52	4.511	0.065 16	4.494	0.065 74	4.503
	-0.232 70	17.290	-0.232 70	17.290	-0.153 20	17.280	-0.152 40	17.270
60	0.092 44	4.162	0.092 47	4.159	0.064 14	4.151	0.064 71	4.148
	-0.220 10	15.950	-0.220 10	15.960	-0.150 80	15.950	-0.150 10	15.950
90	0.092 03	4.162	0.092 10	4.161	0.063 16	4.148	0.062 26	4.149
	-0.219 80	15.960	-0.219 60	15.950	-0.140 40	15.950	-0.139 60	15.950

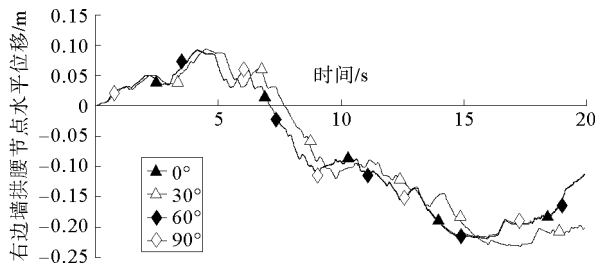


图 6 4 种角度右边墙拱腰节点水平位移时程曲线
Fig. 6 Time-history curve of horizontal displacements at the middle of right sidewall in four kinds of angle

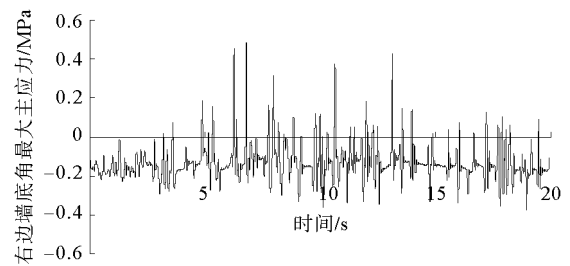


图 7 倾角为 30°时右边墙底角最大主应力时程曲线
Fig. 7 Time-history curve of maximum principal stress at the bottom of the right sidewall in 30° fault fracture zone

表 6 4 种角度中隧道最大最小主应力反应值表

Tab. 6 Values of maximum and minor principal stress response in 4 kinds of angle

角度/(°)	最小主应力最小值/MPa				最大主应力最大值/MPa			
	拱顶	拱底	左肩	右角	拱顶	拱底	左肩	右角
0	-0.131	-0.179	-1.65	-3.28	0.253	0.305	0.591	0.390
30	-0.385	-0.345	-1.77	-3.47	0.450	0.339	0.817	0.573
60	-0.372	-0.225	-1.67	-3.36	0.310	0.334	0.552	0.394
90	-0.129	-0.159	-1.54	-3.01	0.253	0.299	0.516	0.330

4)加速度计算结果

4 种角度下隧道衬砌左肩和右角的水平峰值、拱顶和拱底的竖向峰值,如表 7 所示。其中:左帮和右帮均指隧道左右边墙拱腰中部。

表 7 4 种角度中隧道地震加速度反应值表

Tab. 7 Acceleration values of seismic response in 4 kinds of angle

角度/(°)		0	30	60	90
水平峰值	左帮峰值/m	5.095	-4.473	5.625	-6.006
	右帮峰值/m	4.488	-4.464	4.996	-6.542
竖向峰值	拱顶峰值/m	4.253	-4.103	4.656	-4.946
	拱底峰值/m	3.667	-3.356	3.944	-3.846

3.2 计算结果分析

1) 塑性区计算结果分析

从图5可以看出,围岩的塑性区主要出现在断层破碎带、隧道左边墙肩部和右边墙底角,围岩塑性区面积的大小规律为: $S_{30^\circ} > S_{60^\circ} > S_{0^\circ} > S_{90^\circ}$;衬砌的塑性区出现在右边墙底角,面积大小规律和围岩相同。

2) 位移计算结果分析

通过例图6可以看出,达到峰值的时刻并不相同;对比分析表5发现,隧道衬砌左帮、右帮、拱顶、拱底4个位置位移的峰值绝对值均满足: $u_{30^\circ} > u_{60^\circ} > u_{0^\circ} > u_{90^\circ}$;左帮、右帮的位移值总是大于拱顶、拱底的位移值。

3) 应力计算结果分析

由例图7看出,倾角为 30° 时右边墙底角最大主应力时程曲线向纵轴正向突变得最为激烈;从表6中可以看出,最大、最小主应力峰值基本上满足: $\sigma_{30^\circ} > \sigma_{60^\circ} > \sigma_{0^\circ} > \sigma_{90^\circ}$;最大最小主应力峰值在隧道结构的肩部和底角的响应比较明显。

4) 加速度计算结果分析

从表7中可以看出,隧道水平与竖直加速度峰值的绝对值满足: $a_{30^\circ} > a_{60^\circ} > a_{0^\circ} > a_{90^\circ}$;左帮、右帮的加速度值大于拱顶、拱底的加速度值。

3.3 非相交工况下的震害分析小结

对于非相交工况:① 30° 时围岩和衬砌的破坏最严重,围岩的破坏主要出现在断层破碎带、左边墙肩部和右边墙底角,而衬砌的破坏仅出现在右边墙底角。② 30° 时隧道所有部位的位移值最大,且左帮、右帮比拱顶、拱底位移值大。即 30° 工况下隧道产生变形破坏的概率大于其他工况,且左帮、右帮又比拱顶、拱底容易发生破坏。③ 30° 时在隧道各个部位的最大主应力最大,且左肩、右角比拱顶、拱底的最大主应力大。说明 30° 工况时隧道结构承受的拉应力最大,而左肩和右角又是最易产生受拉破坏的薄弱环节。④ 30° 时在隧道衬砌的加速度最大,且左帮、右帮比拱顶、拱底的加速度大。说明 30° 工况隧道承受的惯性力最大,且帮部较大。

4 结论

1) 不管相交与否,含断层破碎带是隧道震害发生的主要影响因素之一。

2) 对于相交工况,断层破碎带与隧道大角度相交比小角度相交易出现隧道衬砌破坏,且破坏的部位发生在与断层破碎带相交的位置。

3) 对于非相交工况,倾角为 30° 时断层破碎带对隧道结构最为不利;隧道破坏发生在左边墙肩部和右边墙角部,位于地震波输入的水平 and 竖直扰动的剪切波和疏密波的合力方向,说明隧道产生震害的部位与地震波入射方向有关。

4) 相比较而言,断层破碎带和隧道相交时的塑性区、位移峰值、应力最大值、加速度值大于非相交时的数值,说明断层破碎带与隧道相交对隧道的震害影响较大,但也不能忽视非相交工况下断层破碎带的影响。

参考文献:

- [1] 杨志华,兰恒星,张永双,等. 强震作用下穿越断层隧道围岩力学响应研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 171-181.
Yang Zhihua, Lan Hengxing, Zhang Yongshuang, et al. Rock dynamic response of railway tunnel traversing through fault under strong earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 171-181.
- [2] 李旭升. 高烈度地震区行波效应下断层对隧道的动力影响和加固措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 37-58.
- [3] 朱长安,李海清,林国进,等. 断层破碎带隧道地震反应规律的数值模拟研究[J]. 公路, 2012(4): 254-259.
Zhu Changan, Li Haiqing, Lin Guojin, et al. A study on numerical simulation of seismic response of tunnel in fault-rupture zone[J]. Highway, 2012(4): 254-259.
- [4] 王峥峥. 跨断层隧道结构非线性地震损伤反应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 69-178.
- [5] 王琼. 跨断层隧道地震反应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011: 13-41.
- [6] 张维庆. 穿越断层隧道震害机理以及抗减震技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 13-60.

(责任编辑:吕海亮)