

# 断层破碎带相对位置影响下隧道的地震响应分析

吕连勋<sup>1</sup>, 李廷春<sup>1</sup>, 刘建章<sup>2</sup>, 吕学安<sup>1</sup>, 张仕林<sup>1</sup>

(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:**依据地震波衰减效应确定模型的动力加载方式, 将计算得到的地震波输入到能够考虑隧道与断层不同相对位置的典型数值模型中, 研究断层破碎带影响下隧道结构的地震动力响应规律。研究表明: 隧道与断层破碎带的相对位置关系对震害程度影响显著; 隧道位于断层上盘时, 地震动力响应比相交或位于下盘的情况剧烈; 地震破坏主要发生在边墙肩部和角部位置, 且断层破碎带与地震作用方向的夹角较小时, 隧道结构的动力损伤较严重。

**关键词:**断层破碎带; 隧道; 相对位置; 震害; 地震响应

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)01-0099-07

## Seismic Response Analysis of Tunnel Under the Effect of Relative Location of Tunnel and Fault Fracture Zone

Lü Lianxun<sup>1</sup>, Li Tingchun<sup>1</sup>, Liu Jianzhang<sup>2</sup>, Lü Xuean<sup>1</sup>, Zhang Shilin<sup>1</sup>

(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:** Seismic wave attenuation rule was studied to determine the loading method of computing models. The calculated seismic wave was input to typical numerical models considering different relative location of fault and tunnel, and the calculation results were analyzed to discuss the seismic dynamic response rule of tunnel. The study results prove that relative location of a tunnel and fault has significant effects on the seismic damage. For a tunnel situated in upper wall, the seismic dynamic response is more severe than those of the tunnels which intersects the fault or is situated in footwall. The lining damage occurs mainly in the shoulder and corner of the sidewall, and the damage is more serious when the angle between fault fracture zone and seismic oscillation direction is small.

**Key words:** fault fracture zone; tunnel; relative location; seismic damage; seismic response

隧道工程穿越或接近断层场地会加剧其地震动力反应, 导致围岩稳定性降低, 引起衬砌的整体或局部破坏。大量研究表明, 断层破碎带问题已经成为隧道工程抗、减震技术发展中需要注意的关键问题<sup>[1-3]</sup>。断层与隧道的相对位置关系不同, 引起的地震动力反应也不同。因此, 有必要研究断层破碎带相对位置影响下隧道结构的地震响应规律。

目前, 对于断层破碎带处隧道结构地震响应的研究已取得了一定成果。王永刚等<sup>[4-5]</sup>分别以华庄公路关

收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279096); 山东省自然科学基金项目(ZR2012EEM030)

作者简介: 吕连勋(1990—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程灾害防治方面的研究。

E-mail: lutherlyu@163.com

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, 本文通信作者。

E-mail: tchli\_sd@163.com

山隧道与伊朗 Koohrang-III 输水隧道为工程背景进行系统研究,记录了穿越断层破碎带的隧道结构在地震动力作用下各部位受力状态及位移反应;张维庆等<sup>[6-8]</sup>考虑到实际地震的不同机理,基于有限元、边界元等数值分析方法,总结了断层破碎带处隧道结构的非线性动力响应特征;Burrige 等<sup>[9-10]</sup>分别对穿过活跃断层与黏滑断层的隧道结构进行了缩尺模型的振动台试验,探讨了断层破碎带与隧道结构之间的相互影响,并提出隧道结构的柔性抗震与减震层抗震等关键技术。上述成果对研究断层场地隧道的地震响应规律起到了较大推动作用,然而,大部分成果在动力荷载加载时没有考虑地震动强度衰减的因素,而且有关隧道与断层不同空间位置的地震损伤研究相对较少。

本研究依据地震波衰减效应,提出一种合理的地震动衰减模型;以有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 的非线性动力反应分析模块为平台,进行数值模型的计算与分析,研究隧道靠近断层或与断层相交时,两者相对位置关系对隧道结构的地震动响应。研究成果将为断层场地隧道结构的抗震设防与减震设计提供参考。

## 1 地震动衰减模型

地震波传播过程中,随着断层距的增大能量逐渐耗散,波动峰值逐渐减小,称为地震波的衰减效应<sup>[11]</sup>。进行结构的非线性动力反应分析时,考虑地震波的衰减因素关系到动力模拟结果的合理性与准确性。

震源断层的类型与破裂长度、地震波的传播途径与距离、场地的地质类型与地貌特征等因素和地震波的衰减密切相关。目前尚难以通过理论方法来计算地震过程中加速度峰值(peak ground acceleration, PGA)、速度峰值(peak height velocity, PGV)和位移峰值(peak ground displacement, PGD)的衰减规律,只能根据记录到的地震数据,拟合地震动参数与震级、断层距等的近似关系。

在前人研究的基础上,根据多次强震事件中的大量地震记录,对地震波的加速度峰值、速度峰值与位移峰值随断层距的衰减变化规律进行分析。通过曲线拟合,得到近场强震条件下适用于断层场地的地震动衰减模型:

$$\lg Y = r_1 + r_2 M_w + r_3 \lg(R^2 + n^2)^{0.5} + e_0 \quad (1)$$

其中:Y 为地震动峰值,包括 PGA, PGV 与 PGD;  $M_w$  为某强震的矩震级;R 为断层距或震源距, km; n 为断层场地的饱和因子,取  $n=5$ ;  $r_1, r_2, r_3$  均为地震波回归系数;  $e_0$  为衰减模型的误差系数。

采用非线性最小二乘法进行地震动衰减模型的回归分析,得到模型的回归系数分别如下:

- 1) PGA  $r_1 = 2.7018, r_2 = 0.0451, r_3 = -0.4953, e_0 = -0.10$ ;
- 2) PGV  $r_1 = 0.4340, r_2 = 0.2715, r_3 = -0.6830, e_0 = -0.05$ ;
- 3) PGD  $r_1 = -2.4040, r_2 = 0.6268, r_3 = -0.6051, e_0 = -0.05$ 。

依据所提出的地震动衰减模型,以矩震级为 7.5 级的地震为例,计算地震动峰值随断层距的衰减关系,如图 1 所示。

## 2 数值模型与加载条件

### 2.1 计算模型

四川省境内岷江右岸某山岭隧道靠近龙门山断裂带,具备发生 7 级以上地震的地质条件。该隧道设计为单洞隧道,长度约为 3.2 km,开挖断面高 11.0 m,净宽 15.0 m。受断裂带的强烈构造作用,隧址区发育多条次生断层且均与隧道轴线平行或小角度相交,断层破碎带裂隙发育、挤压揉皱强烈,与周围岩土体结合很差。假设隧道附近某大断层发生强震,震源深度 15 km,震中距 15 km,据此建立断层与隧道不同相对位置因素的数值计算模型。

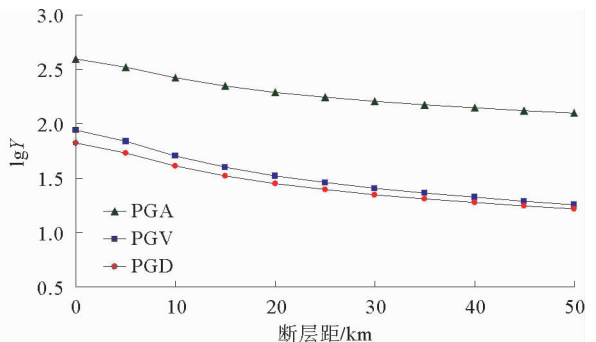


图 1 地震动峰值随断层距的衰减关系

Fig. 1 Attenuation relationship of seismic peak along with hypocentral distance

研究发现,断层破碎带与水平地面的夹角为  $30^\circ$  (断层倾角  $30^\circ$  和  $150^\circ$ ) 时,隧道结构的震害程度最严重<sup>[12-13]</sup>。但当地震波以一定入射方向作用于场地, $30^\circ$  和  $150^\circ$  两种角度的断层破碎带可引起完全不同的地震反应。隧道与断层破碎带有 3 种不同的相对位置:隧道位于断层上盘、隧道与断层相交以及隧道位于断层下盘,将不同相对位置关系与两种断层倾角进行组合后,共需建立 6 种典型工况的模型。

考虑地震作用对隧道结构稳定性的影响范围,两侧围岩分别取 4 倍隧道跨度,底部围岩取 4 倍隧道高度;为了突出断层破碎带的影响,通过反复试算,取断层计算宽度为 10 m,取非相交断层(隧道位于断层上盘或下盘)与隧道的边界距离为 10 m。模型的阻尼设置为瑞利阻尼,锚杆单元采用局部阻尼,其最小临界阻尼比与阻尼系数分别取为 0.05 和 0.157 1。

结合隧道实际地质与工程概况,取隧道围岩及衬砌混凝土的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩与衬砌物理力学参数表

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

材料位置	弹性模量/GPa	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	黏聚力/MPa	摩擦角/( $^\circ$ )	剪胀角/( $^\circ$ )
隧道围岩	14.0	2 400	0.28	2.50	23	38
断层破碎带	4.0	1 800	0.35	0.15	27	25
初期支护	30.5	2 200	0.20	5.50	50	55
二次衬砌	35.0	2 500	0.20	7.20	55	55

## 2.2 加载条件

将汶川地震中成都观测站前 20 s 的观测记录,作为动力荷载输入震源中,依据地震动衰减模型计算隧道场地的地震动强度。地震作用方向近似取震源与隧道中心的连线, $\theta=45^\circ$ 。修正后的地震波加速度时程曲线如图 2 所示。

通过在模型底部同时按比例输入  $y$  向与  $z$  向的地震加速度时程来模拟水平扰动的剪切波和竖直扰动的压缩波,并实现地震动作用方向与强度的控制。模型侧面采用自由场边界,底面采用粘滞性人工边界,以杜绝地震波的能量逸散,所输入的地震加速度时程需按式(2)转化为应力时程<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_n = -2(\rho C_p) v_n \\ \sigma_s = -2(\rho C_s) v_s \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\sigma_n, \sigma_s$  指施加在边界的法向应力和切向应力,Pa; $v_n, v_s$  分别为模型边界的法向速度和切向速度,m/s; $C_p, C_s$  分别为 P 波和 S 波的波速,m/s; $\rho$  是隧道场地岩土介质的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

动力荷载施加后,需要记录下衬砌关键位置的地震动反应数据,以便对模拟结果进行分析总结,模型断面的监测点布置如图 3 所示。

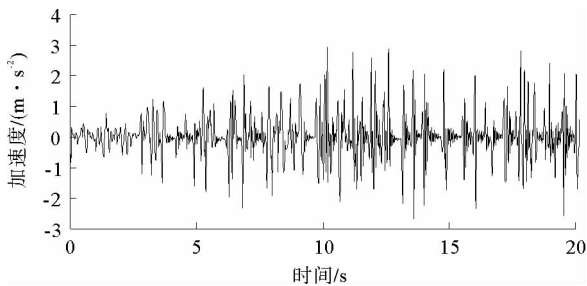


图 2 修正后的地震加速度时程曲线

Fig. 2 Corrected time-history curve of seismic acceleration

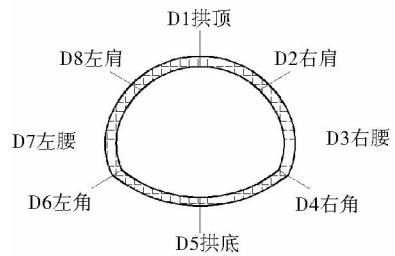


图 3 监测点示意图

Fig. 3 Schematic plot of monitoring points

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 塑性区计算结果与分析

图 4 和图 5 分别是断层倾角为  $30^\circ$  和  $150^\circ$  时,各工况地震作用后隧道附近的塑性区分布状态。

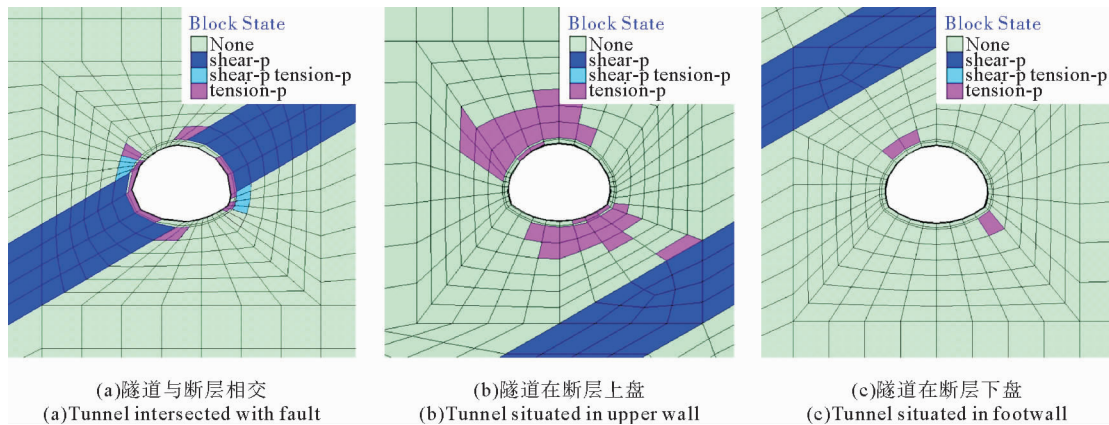


图 4 断层倾角  $30^\circ$  时震后隧道附近塑性区分布图

Fig. 4 Distribution of plastic zone near the tunnel after earthquake in  $30^\circ$  fault fracture zone

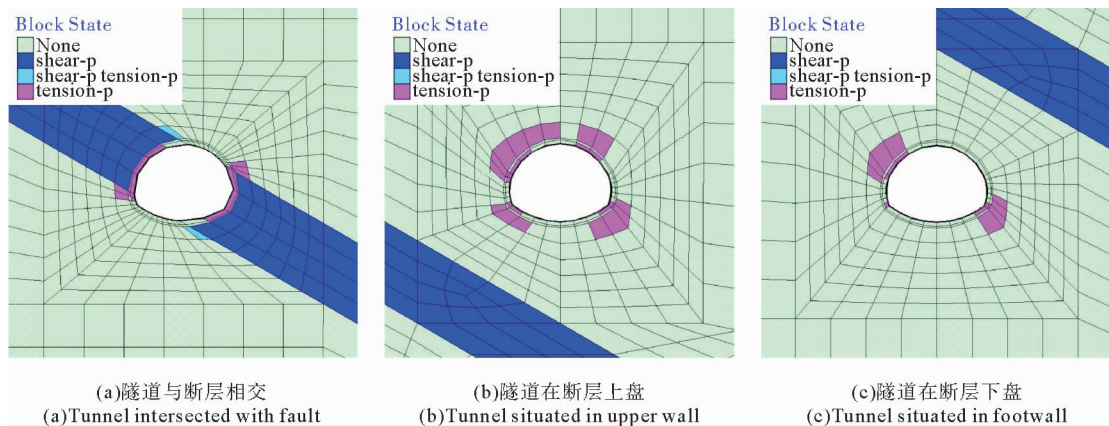


图 5 断层倾角  $150^\circ$  时震后隧道附近塑性区分布图

Fig. 5 Distribution of plastic zone near the tunnel after earthquake in  $150^\circ$  fault fracture zone

##### 1) 断层破碎带倾角为 $30^\circ$ 的塑性区结果分析

如图 4 所示,隧道与断层相交时,地震作用使左边墙肩部 and 右边墙底角处的衬砌及部分围岩进入塑性状态,并且断层破碎带接触的衬砌部位发生塑性破坏;隧道位于断层上盘时,左边墙肩部和右边墙底角处的衬砌和围岩均出现大范围塑性破坏,其塑性区面积远大于隧道与断层相交的情况;隧道位于断层下盘时,衬砌和围岩附近塑性区的发展方向与位于上盘的工况相一致,但塑性区面积较小。

##### 2) 断层破碎带倾角为 $150^\circ$ 的塑性区结果分析

如图 5 所示,隧道与断层相交时,地震作用对隧道结构的破坏主要发生在与断层相接触的衬砌部位,对其他部位的影响较小;隧道位于断层上盘时,左、右边墙肩部与底角处的衬砌和围岩均出现塑性破坏;隧道位于断层下盘时,衬砌和围岩附近塑性区范围不大,且塑性区域的发展方向和面积均与断层倾角为  $30^\circ$  的情况类似。

结合图 4 与图 5 可知,无论隧道与断层处于何种相对位置,施加地震作用都会使断层破碎带迅速发生破坏;隧道位于断层上盘时,倾角为  $30^\circ$  和  $150^\circ$  两种工况的塑性区发展规律不同,但衬砌周围的塑性区分布面

积均明显大于相交及位于下盘的情况,其分布规律为: $S_{\text{上盘}} > S_{\text{相交}} > S_{\text{下盘}}$ 。

### 3.2 应力计算结果与分析

表 2 记录了各工况主要监测点的地震应力反应值,其中:左、右肩和左、右角分别指隧道左边墙及右边墙肩部和角部位置。

表 2 隧道衬砌最大和最小主应力反应值

Tab. 2 Values of maximum and minimum principal stress response of the tunnel lining

MPa

工况	最大主应力 $\sigma_{\max}$						最小主应力 $\sigma_{\min}$						
	拱顶	拱底	左肩	左角	右肩	右角	拱顶	拱底	左肩	左角	右肩	右角	
30°断层相交	动力	0.015	0.006	0.220	0.395	0.397	0.758	-2.528	-1.813	-3.958	-4.509	-4.944	-3.682
	静力	-0.159	-0.125	-0.044	-0.181	-0.037	-0.157	-0.583	-0.483	-1.011	-1.771	-1.635	-1.582
	差值	0.174	0.131	0.264	0.576	0.434	0.915	-1.945	-0.700	-2.947	-2.738	3.309	-2.100
30°断层上盘	动力	1.183	1.426	1.621	0.123	0.386	1.547	-1.327	-0.742	-2.994	-3.932	-2.816	-4.007
	静力	0.009	0.026	-0.014	-0.141	-0.024	-0.116	-0.231	-0.006	-0.800	-1.664	-0.975	-1.451
	差值	1.174	1.400	1.635	0.264	0.410	1.663	-1.096	-0.736	-2.194	-2.268	-1.841	-2.556
30°断层下盘	动力	0.250	0.504	1.115	0.192	0.356	0.805	-0.708	-0.345	-2.727	-3.077	-2.398	-3.650
	静力	0.007	0.014	-0.015	-0.122	-0.021	-0.116	-0.244	-0.013	-0.081	-1.487	-0.880	-1.426
	差值	0.243	0.490	1.130	0.314	0.377	0.921	-0.464	-0.332	-2.646	-1.590	1.518	-2.224
150°断层相交	动力	0.015	0.006	0.705	0.065	0.043	0.635	-2.576	-2.029	-4.035	-4.141	-4.261	-4.513
	静力	-0.159	-0.126	-0.035	-0.157	-0.044	-0.181	-0.583	-0.483	-1.634	-1.583	-1.011	-1.771
	差值	0.174	0.132	0.74	0.222	0.087	0.816	-1.993	-1.546	-2.401	-2.558	-3.250	-2.742
150°断层上盘	动力	1.189	1.255	0.692	0.431	0.816	0.292	-1.292	-0.604	-3.075	-3.298	-2.267	-4.380
	静力	0.009	0.026	-0.024	-0.116	-0.014	-0.141	-0.231	-0.006	-0.975	-1.451	-0.800	-1.664
	差值	1.180	1.229	0.716	0.547	0.83	0.433	-1.061	-0.598	-2.100	-1.847	-1.467	-2.716
150°断层下盘	动力	0.351	0.474	0.838	0.247	0.473	0.638	-0.714	-0.451	-2.720	-3.063	-2.469	-3.500
	静力	0.007	0.014	-0.021	-0.116	-0.015	-0.122	-0.244	-0.013	-0.881	-1.425	-0.813	-1.487
	差值	0.344	0.460	0.859	0.363	0.488	0.760	-0.470	-0.438	-1.839	-1.638	-1.656	-2.013

由表 2 数据得到以下结果:①从最大主应力数据可以看出,各工况监测点静力作用下受微弱拉力或没有受拉,而地震动力作用下均处于受拉的状态;②从最小主应力数据可以看出,各工况监测点因动力扰动受压区量值均有大幅增加,但数值远小于衬砌的抗压强度,对破坏产生的影响不大;③从断层破碎带相对位置分析,隧道位于断层上盘时,监测点的应力响应比隧道与断层相交和隧道位于下盘的情况更加剧烈,隧道结构受力最不利;④断层倾角为 30°的情况,衬砌左边墙肩部和右边墙底角的主应力反应值大于拱顶和反底拱部位的量值,且动力荷载施加前后,这两个部位最大主应力差值明显大于其他位置;⑤断层倾角为 150°的情况,不同工况监测点规律有差异,隧道位于上盘时,监测点的主应力量值均比较大,而隧道与断层相交或位于下盘时,左肩和右角部位的应力响应比其他位置剧烈。

### 3.3 位移计算结果与分析

图 6 给出了断层倾角为 30°时各工况右边墙角部节点的水平位移时程曲线;图 7 给出了断层倾角为 150°时各工况右边墙角部节点的竖向位移时程曲线。表 3 记录了隧道位于上盘 10 m 时的地震位移反应值,其中:左腰和右腰指隧道左、右边墙拱腰中部节点。

从图 6 和图 7 可以看出,地震作用下不同工况模型达到位移峰值的时刻较一致,且隧道与断层相交和位于断层下盘两种情况的位移时程曲线几乎重合;隧道位于断层上盘的位移响应比其他两种相对位置的情况剧烈。

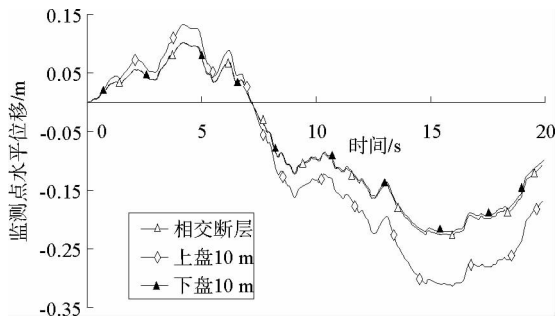


图 6 30°断层右边墙角部节点水平位移时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of horizontal displacements at the corner of right sidewall in 30° fault fracture zone

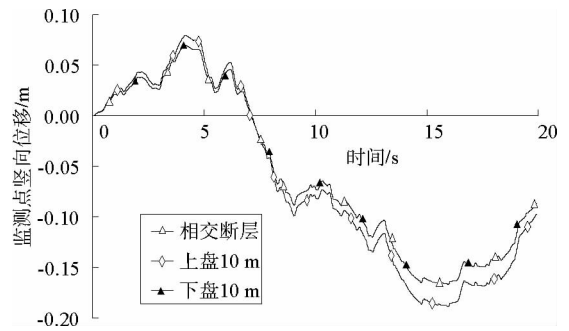


图 7 150°断层右边墙角部节点竖向位移时程曲线

Fig. 7 Time-history curve of vertical displacements at the corner of right sidewall in 150° fault fracture zone

表 3 隧道位于上盘 10 m 处地震位移反应值

Tab. 3 Displacements values of seismic response of the tunnel located 10 m above fault

工况	水平位移峰值				竖向位移峰值			
	左腰峰值/m	时间/s	右腰峰值/m	时间/s	拱底峰值/m	时间/s	拱顶峰值/m	时间/s
30°断层	0.133 8	4.191	0.133 8	4.178	0.083 3	4.162	0.080 0	4.162
	-0.317 0	15.980	-0.317 0	15.970	-0.199 3	15.960	-0.187 6	15.960
150°断层	0.129 2	4.193	0.129 4	4.191	0.079 8	4.167	0.079 8	4.168
	-0.300 6	15.970	-0.300 5	15.970	-0.189 7	15.960	-0.189 7	15.960

由于隧道位于下盘的震害程度比较严重,表 3 仅列出了隧道位于断层下盘的位移反应值。可以看出,动力影响下相同工况不同部位的峰值时刻有微小差别,但位移峰值具有极高的一致性;断层倾角分别为 30°和 150°时,各监测点的水平位移峰值与竖向位移峰值均相差不大,但总体而言,倾角为 30°的工况各向位移峰值比倾角为 150°时略大,隧道结构的动力扰动更加严重。

#### 4 结论

通过对隧道与断层破碎带不同相对位置因素的典型数值模型进行非线性地震动力反应分析,得到以下结论:

- 1) 无论处于何种相对位置关系,断层破碎带处隧道结构的动力反应明显放大,断层破碎带是引起隧道震害的关键因素之一。
- 2) 隧道结构与断层破碎带的相对位置关系对其震害程度影响显著。隧道位于断层上盘时,围岩与衬砌的塑性区面积、主应力差值、位移峰值均大于相交和位于下盘的情况,说明隧道位于断层破碎带上盘受到的动力扰动剧烈。
- 3) 受地震水平剪切波和竖向疏密波的合力作用,隧道结构边墙肩部和角部位置进入塑性状态,并且其位移峰值与主应力值均大于其他部位,边墙肩部和角部位置是抗震的薄弱环节。
- 4) 对于断层倾角为 30°和 150°的情况,断层破碎带与地震作用方向的夹角较小(30°倾角)时,各监测点的水平与竖向位移均大于夹角较大(150°倾角)的情况,隧道结构的震害程度比较严重。

#### 参考文献:

[1] Ulsay R, Aydan O, Hmada M. The behaviour of structures built on active fault zones: Examples from the recent earthquakes of Turkey[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2002, 19(2): 149-167.  
 [2] 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].

Tunneling and Underground Space Technology,2001,16(3):133-150.

- [3]李廷春,殷允腾.汶川地震中隧道结构的震害分析[J].工程爆破,2011,17(1):24-27.

Li Tingchun, Yin Yunteng. Seismic damage analysis of tunnel structure in Wenchuan earthquake[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(1): 24-27.

- [4]王永刚,丁文其,景韧.关山隧道断层破碎带三维有限元地震动力响应[J].公路交通科技,2011,28(8):115-119.

Wang Yonggang, Ding Wenqi, Jing Ren. Seismic dynamic response of fault fracture zone at Guanshan tunnel based on 3D FEM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(8): 115-119.

- [5]Shahidi A R, Vafaian M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 213-221.

- [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,2009:15-40.

- [7]耿萍,何悦,曹东杰,等.不同倾角断层对隧洞围岩稳定性影响[J].铁道建筑,2012(12):43-46.

Geng Ping, He Yue, Cao Dongjie, et al. Impact on the stability of tunnel surrounding rock caused by different angle fault[J]. Railway Engineering, 2012(12): 43-46.

- [8]赵宝友.大型岩体洞室地震响应及减震措施研究[D].大连:大连理工大学,2009:59-67.

- [9]Burrige P B, Scott R F, Hall J F. Centrifuge study of faulting effects tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 5(7): 949-967.

- [10]崔光耀,王明年,于丽,等.穿越黏滑错动断层隧道减震层减震技术模型试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(9):1753-1758.

Cui Guangyao, Wang Mingnian, Yu Li, et al. Model tests on damping shake technology of shock absorption layer of tunnels crossing stick-slip faults[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1753-1758.

- [11]江辉,慎丹,倪永军,等.近断层地震地面运动峰值衰减规律研究[J].北京交通大学学报,2011,35(4):83-87.

Jiang Hui, Shen Dan, Ni Yongjun, et al. Research on peak attenuation relationship of near-fault earthquake ground motion [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4): 83-87.

- [12]刘建章.断层破碎带处隧道结构的震害机理分析[D].青岛:山东科技大学,2013:45-60.

- [13]李廷春,张乃杰,刘建章,等.断层破碎带影响下隧道的震害分析[J].山东科技大学学报:自然科学版,2014,33(1):68-74.

Li Tingchun, Zhang Naijie, Liu Jianzhang, et al. Analysis on seismic hazard of tunnels in fault fracture zone [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 33(1): 68-74.

(责任编辑:吕海亮)