

文章编号:1000-582X(2012)06-092-07

隧道穿越高烈度地震区断层带围岩地震响应分析

李 林,何 川,耿 萍,曹东杰

(西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:考虑地震荷载特征及隧道特点,运用多点同时激振的动力时程分析方法,采用结构面单元与实体单元组合模拟断层带的方法,研究了某穿越断层破碎带铁路隧道在未支护条件下的动力响应特性。分析了沿隧道横向、纵向和竖向激振地震工况下与断层破碎带接触部位所产生的位移差、加速度放大倍率和屈服单元等。结果表明:结构面单元与实体单元组合合理模拟了断层破碎带的地震响应特性;地震运动引起断层破碎带接触部位产生明显的位移差,横向输入地震动时位移差值最大,达到 51.8 mm,而沿纵向和竖向输入时,位移差值仅为横向输入的 44.3%和 23.1%;同一高程处断裂带的加速度放大倍率明显大于混合花岗岩;断裂带与混合花岗岩过渡段出现明显的剪切屈服区域,且横向、竖向输入地震动时尤其突出;断层破碎带对隧道在地震动作用下的响应规律影响显著,穿越断裂带隧道的断裂带部位与过渡段为抗震设计控制性区域,应深入加强抗震措施研究。

关键词:隧道工程;高地震烈度区;断层破碎带;地震时程分析;接触面

中图分类号:U456

文献标志码:A

Analysis of Seismic Dynamic Responses of Tunnel through Fault Zone in High Earthquake Intensity Area

LI Lin, HE Chuan, GENG Ping, CAO Dong-jie

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, P. R. China)

Abstract: Based on dynamic time history analysis, dynamic response behavior of an un-supported tunnel through fault zone which was simulated by interface and solid elements was studied under uniform input earthquake wave excitation. The analyses of response behaviors, including displacement difference, acceleration magnification, and plastic zones and so on, were carried out when earthquake wave excitation was input along transverse, longitudinal and vertical of tunnel respectively. The results show that simulation method for fault zone is effective; the earthquake causes obvious displacement difference at fault zone and surrounding rock contacting part. The maximal displacement difference reaches to 51.8mm under transverse uniform input earthquake wave excitation. And the displacement difference under vertical and longitudinal is only 44.3% and 23.1% of the transverse value, respectively; the acceleration magnification in fault zone is significantly greater than that in surrounding rock. Shear failure zone appears at the fault zone and surrounding rock contacting part, and it is especially prominent under input longitudinal earthquake wave excitation. It is proposed that fault zone has significantly influence on the dynamic performance of tunnel. The fault zone and the transitional zones are the control zones of seismic design

收稿日期:2012-01-04

基金项目:国家 973 计划资助项目(2010CB732105);国家杰出青年科学基金资助项目(50925830);高铁联合基金重点资助项目(u1134208)

作者简介:李林(1982-),男,西南交通大学博士,主要从事隧道与地下工程研究,(E-mail)lilin20023402@yahoo.cn。

when tunnel passes through fault zone, thus, the study on the anti-seismic measures should be further strengthened.

Key words: tunneling engineering; highly seismic region; fault zone; seismic time history analysis; interface

我国在建或拟建的大量铁路隧道属于高烈度地震多发区,考虑高地震烈度区隧道的动力响应,特别是过断层破碎带隧道的动力响应是当前工程建设必须面对的问题。实践证明,围岩条件较好的地下工程结构(隧道、地下厂房等),在地震烈度较小的情况下,抗震性较好且明显好于地面结构^[1],隧道震害一般多发生在围岩质量差和地层条件有较大变化等地质条件复杂部位^[2],地震发生时,断层、破碎带对隧道的抗震性能有较大的影响,是隧道震害较集中的部位。如 1995 年阪神地震中,山阳新干线六甲隧道在断层、破碎带处产生了较其他部位更严重的破坏,见文献^[3];1999 年台湾集集地震,石岗坝引水隧道由于穿越车笼埔断层,造成隧道衬砌在断层处产生严重的错动破坏^[4];2008 年 5 月汶川大地震中,由于断层的影响造成隧道衬砌破坏屡见不鲜,其中龙溪隧道由于附近发育 F8 断层,震后发现在该断层两侧各约 100 m 范围内出现二衬混凝土坍塌、开裂和错台以及仰拱隆起(最大达 60 cm)等严重震害现象^[5-8]。紫坪铺隧道由于断裂带 F11 的影响,导致隧道出现开裂、错缝等。针对隧道等地下工程地震作用下的响应特性,王威、任青文等^[9]概括分析了活动断裂带对深埋隧道的影响,指出活动断裂带的运动模式及其对隧道地应力场的影响为地震状况下隧道稳定性的主控因素;李海波、马行东等^[10]则通过数值模拟详细分析了地震波参数对地下岩体洞室响应特性的影响;王如宾等^[11]采用动力时程分析法研究了金沙江两家人水电站地下洞室动力响应问题;蒋树屏等^[12]采用二维有限元方法研究了嘎隆拉隧道断裂带处横断面地震响应分析。据此可知,对地下工程在无断裂带影响条件下,取得了较多颇有价值的研究成果;而对于穿越长大断裂带隧道的动力响应特性研究相对较少,由于隧道结构在地震作用下对周围围岩具有追随性这种特殊性质^[1],文中动力时程分析中不考虑支护结构的影响。

1 动力模型与参数

1.1 计算模型

某铁路单线隧道全长 34.5 km,全隧道平均埋深约为 650 m,穿越主要断裂带 F11,经评价该断裂带对隧道工程影响较大,断裂带与线路近垂直,性质

为正断层,倾角约 60°,推测破碎带宽 80~160 m,断层破碎带采用考虑滑动的接触面单元和实体单元组合来模拟,计算模型及边界条件如图 1 所示。

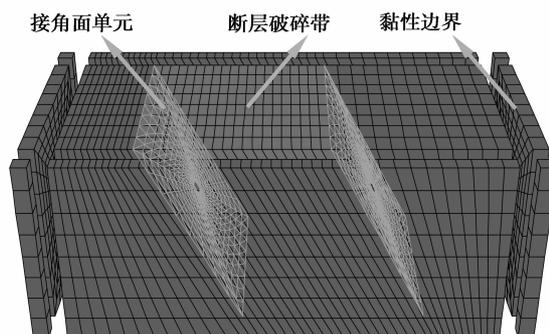


图 1 动力计算模型及边界条件

1.2 岩体力学参数及构造应力场

场区内主要为混合花岗岩,断裂中充填为角砾,考虑到低应变速率下,岩石的动态力学参数与静态力学参数差异不大^[10],数值模拟中采用岩石的静态参数,具体计算参数见表 1。同时考虑隧道场区内受区域构造应力场的影响,最大水平主应力优势方向与隧道轴线走向夹角 15°~18°,而隧道附近竖向应力场通过水压致裂法测量结果表明主要受重力场控制。

1.3 力学阻尼

动力分析计算中,采用工程上常用的瑞雷阻尼,设置瑞雷阻尼必须选择中间频率。对于地质体,阻尼一般是独立于频率的,中间频率选择出现在数值模拟中频率范围中间值。动力方程中阻尼矩阵 C 与刚度矩阵 K 和质量矩阵 M 有关^[13]

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (1)$$

式中, α, β 分别为质量比例阻尼系数和刚度比例阻尼系数。

1.4 动力边界条件与屈服准则

动力时程分析采用的是有限的模型,所以必须考虑动力边界条件以便吸收来自模型内部的入射波,黏滞边界通过在边界的法向和切向设置独立的阻尼筒得以实现,以便吸收来自模型内部的入射波^[14],在动力计算中采用黏性边界,即在边界之外设立与域内网格相同的属性单元以模拟无限域,该

单元与无限域边界单元之间以弹性及黏性元件相连,以便吸收边界的反射能量。无限域单元与边界单元间的作用力为

$$F_x = -\rho C_p (v_x^m - v_x^{ff})A + F_x^{ff}, \quad (2)$$

$$F_y = -\rho C_s (v_y^m - v_y^{ff})A + F_y^{ff}, \quad (3)$$

$$F_z = -\rho C_s (v_z^m - v_z^{ff})A + F_z^{ff}, \quad (4)$$

式中: ρ 为密度; C_s 、 C_p 为介质横波与纵波波速; v^m 为域内外边界节点各方向的速度; F^{ff} 为域外对应节点各方向速度,为域外单元的对应节点力。

在动力计算过程中,采用经典的 Mohr-coulomb

强度准则,屈服函数^[14]如下:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 + 2c \sqrt{N_\varphi}, \quad (5)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_t, \quad (6)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; φ 为摩擦角; c 为粘聚力; σ_t 为岩石抗拉强度; N_φ 为系数,且有

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}. \quad (7)$$

当岩体内某一点应力满足: $f_s < 0$ 时,发生剪切破坏;当满足 $f_t > 0$ 时,发生拉伸破坏。

表 1 岩体物理力学参数

岩土类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	抗拉强度/ MPa	泊松比
混合花岗岩	2 700	42	1.2	57	1.5	0.25
断层破碎带	2 100	3	0.3	32	0.1	0.31

2 接触面单元

文中采用接触面单元由一系列三节点的三解开单元构成,接触面单元将三角形面积分配到各个节点中,每个接触面节点都有一个相关的表示面积。接触面为 Coulomb 滑动接触单元,主要有相互接触和相对滑动 2 种状态,其本构模型如图 2 所示。接触面法向刚度和切向刚度按下式计算。

$$K_s = K_n = 10 \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G \right)}{\Delta Z_{\min}} \right]. \quad (8)$$

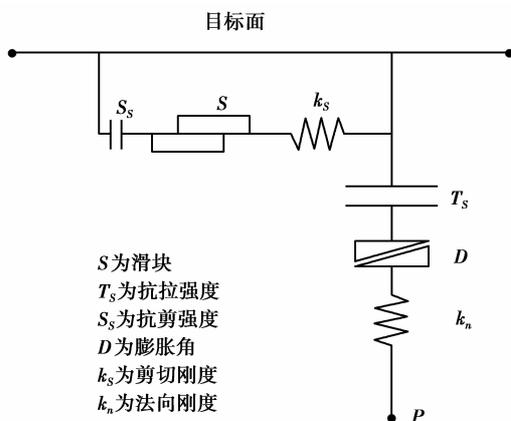


图 2 接触面本构模型示意图

式中: K 为体积模量; G 是剪切模量; ΔZ_{\min} 为接触面法向方向上连接区域上的最小尺寸,如图 3 所示。

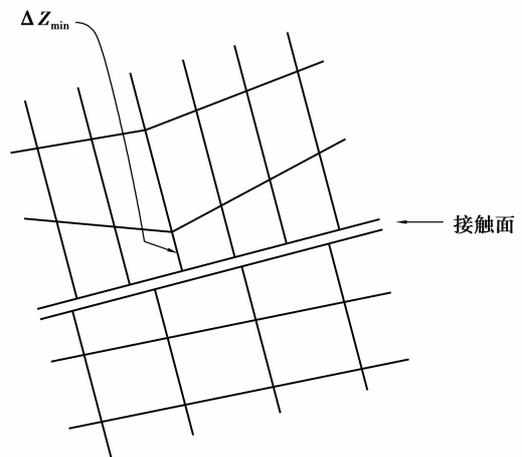


图 3 接触面法向方向上最小尺寸示意图

3 地震波输入参数

区内主要活动断裂为全新世活动断裂,具备发生 7 级及以上地震的构造条件。文中据场区内场地条件合成出相应人工波作为计算标准^[15],输入动力时程见图 4。

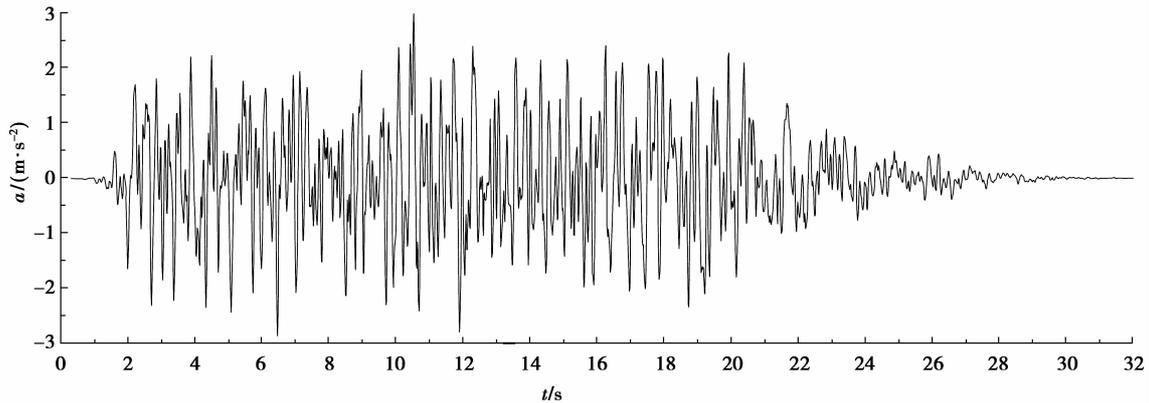


图 4 输入的加速度时程

4 隧道地震响应计算结果分析

根据图 5 的监测点布置,对隧道沿横向、纵向和

以 2/3 倍峰值加速度的竖向输入加速度时程后,得到了隧道在 3 种地震波输入状况下的隧道断层破碎带与混合花岗岩的位移差值、混合花岗岩与断裂带的放大倍率和屈服单元等结果。

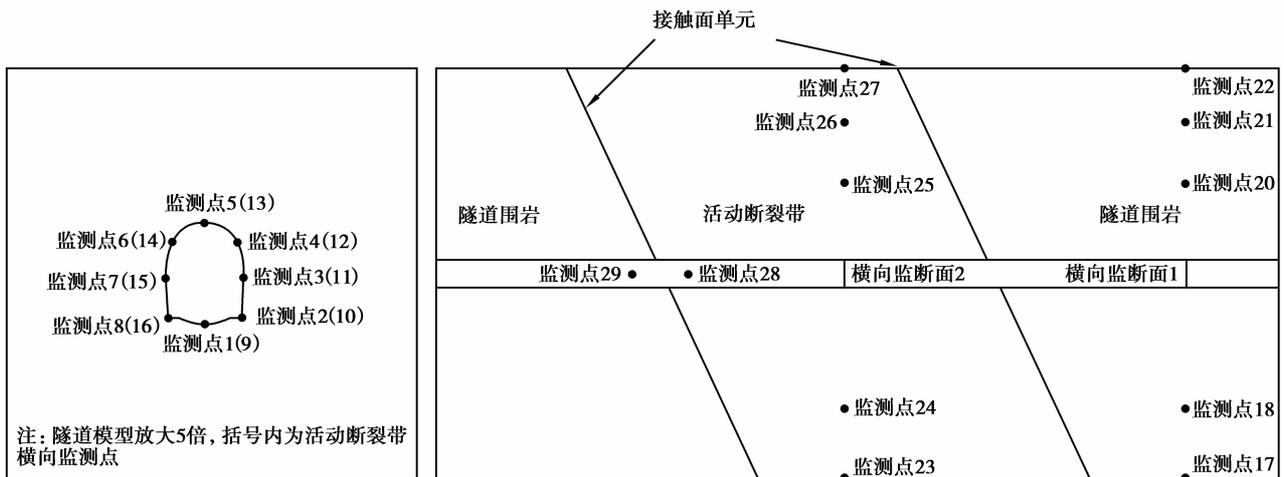


图 5 监测点布置图

4.1 断层破碎带与混合花岗岩位移差值结果

根据地震后隧道破坏实践可知,断裂带与围岩接触面常常造成隧道结构错缝、开裂等,文中从 3 种输入地震波工况下得到接触面处(监测点 28、29)隧道错缝结果如图 6~8 所示,隧道在 3 种输入方式下均出现明显的位移差值,沿隧道横向输入时,出现较大的位移差值,最大值出现在 16.9 s 时为 51 mm,而沿隧道纵向和竖向输入时的差值相对较小,分别为 10.1 s 时的 11.8 mm 和 16.8 s 时的 22.6 mm。计算结果表明沿隧道横向、竖向输入地震波时最容易造成隧道结构错动而破坏,应注意采取抗震措施;同时从图 6、图 8 的结果可知:隧道出现错缝较大值的时间点较吻合,垂直于隧道(横向、竖向)输入动力

时程产生位移差规律相似。

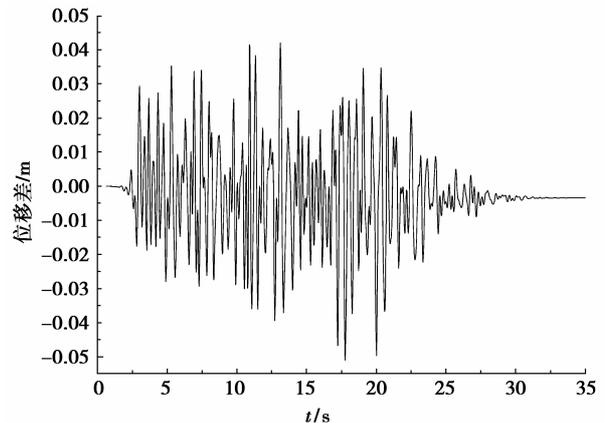


图 6 横向输入动力时程时位移差

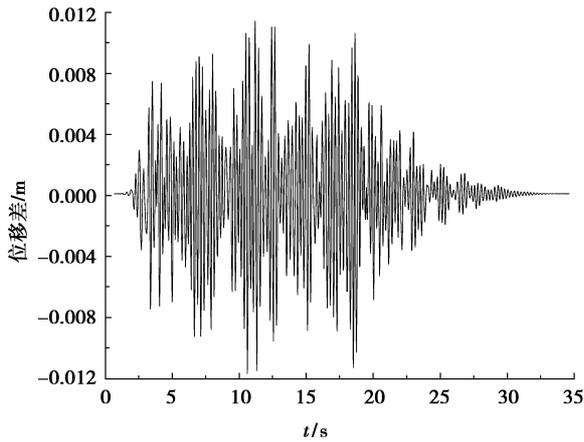


图 7 纵向输入动力时程时位移

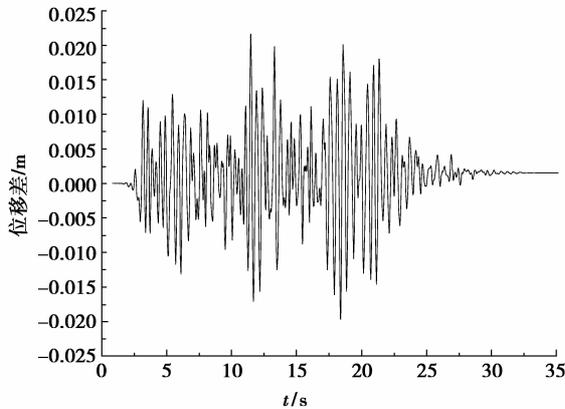


图 8 竖向输入动力时程时位移差

4.2 加速度放大倍率与隧道洞顶洞底位移差

3 种输入地震波工况下断层破碎带与混合花岗岩地震波加速度放大倍率统计结果如图 9~11 所示,从图可以看出:在同一高程处,3 种工况下断层破碎带明显有比混合花岗岩更大的加速度放大倍率,纵向输入地震波时的加速度放大倍率最大,竖向最小。说明纵向输入地震波时,断裂带与围岩对加速度反应均较为明显,横向、竖向次之。

洞顶和洞底的位移差计算结果如表 2 所示,可知断层破碎带处洞顶洞底位移差较大,3 种工况下断裂带的位移差相差不大,均为 5.5 mm 左右,而混合花岗岩的位移差却相对较小,最大值为横向输入地震波时的 2.62 mm。说明地震波输入方向对断裂带横截面洞顶与洞底的位移差值影响较小,隧道洞顶洞底位移差值与围岩类型有关,围岩类型较好,位移差值则较小。综上可知,断层破碎带与混合花岗岩产生的错动量值为隧道结构抗减震的主控因素,而围岩与断裂带部位洞顶底的位移差为非主控因素,应加强过渡段的抗减震措施。

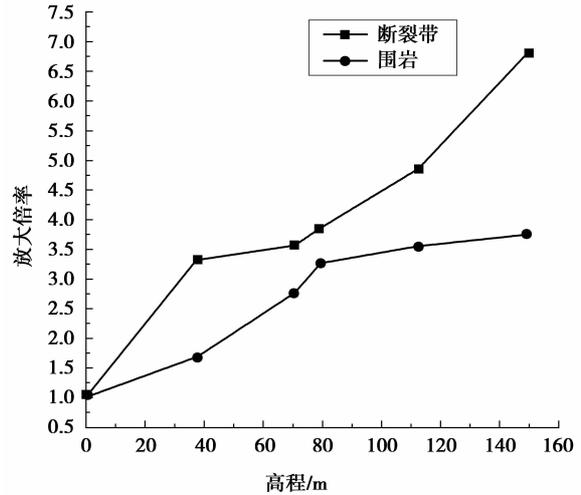


图 9 横向输入地震波放大倍率

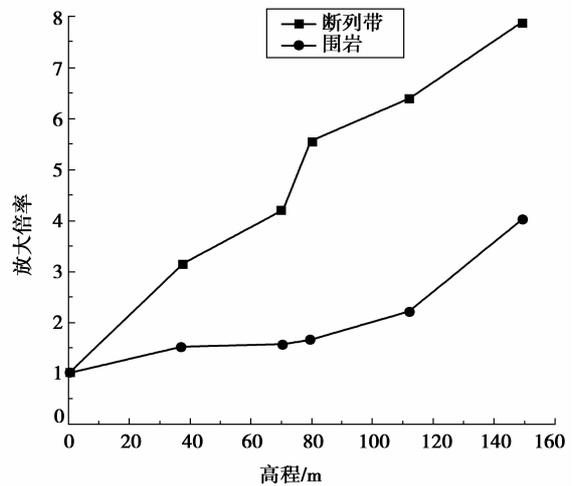


图 10 纵向输入地震波放大倍率

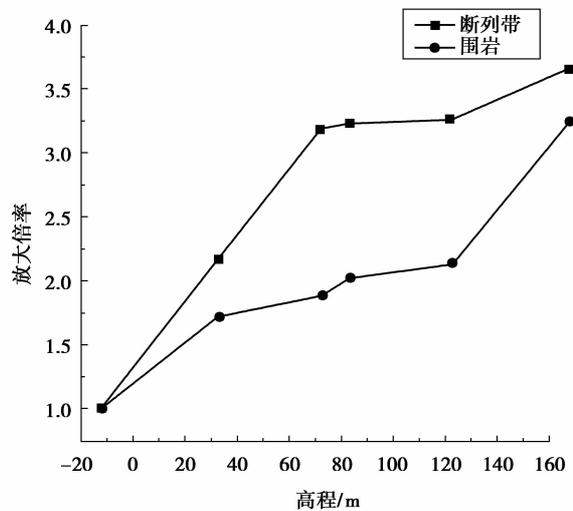


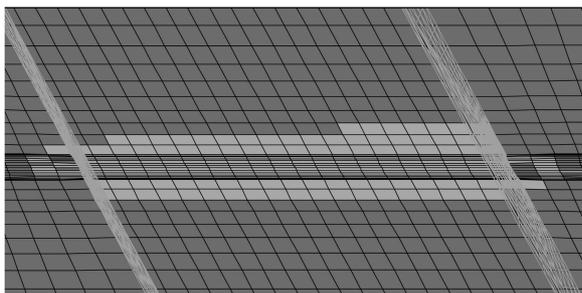
图 11 竖向输入地震波放大倍率

表2 不同方向输入地震波工况下洞顶底位移差

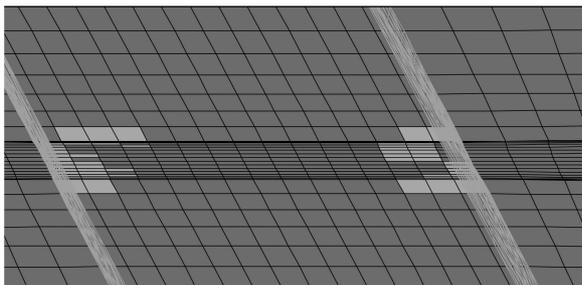
地震波输入方向	围岩类型	位移差值/mm
横向	断裂带	5.56
	围岩	2.62
纵向	断裂带	5.72
	围岩	2.06
竖向	断裂带	5.10
	围岩	1.20

4.3 隧道屈服单元分布

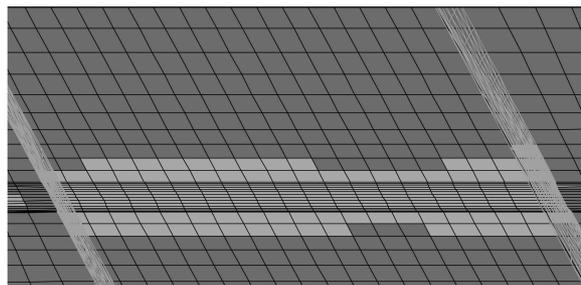
地震后隧道产生的屈服单元分布结果如图12所示。由图可知:3种工况下在断层破碎带处均出现了明显的屈服单元,屈服单元均为剪切破坏;横向、竖向输入地震剪切波时,剪切破坏区较大,而纵向输入时,仅在断裂带过渡段部位出现局部的剪切破坏。同时从图中可以看出:与断层破碎带接触的混合花岗岩过渡段3倍洞径范围内也出现了明显的塑性区,说明隧道穿越断层破碎带时,断层破碎带对隧道抗震性能有较大的影响,为隧道抗震的薄弱环节;断裂带与混合花岗岩过渡部位也为地震荷下的重点设防区域。断层破碎带地段隧道抗震设防时,设防段长度宜在全部断层破碎带地段长度的基础上向两端延伸不小于3倍洞径的距离。



(a) 横向输入地震波后屈服单元分布



(b) 纵向输入地震波后屈服单元分布



(c) 竖向输入地震后屈服单元分布

注:图中紫红色单元为剪切屈服单元,蓝色单元为未屈服区域。

图12 地震后隧道产生的屈服单元分布

5 结论

文中采用动力时程分析方法,结合某穿越活动断裂带铁路隧道,研究了隧道在未支护条件下穿越活动断裂带的动力响应特性。

1) 断层破碎带对隧道的抗震性能有较大的影响,常产生较大的错动量和剪切破坏,断层破碎带与混合花岗岩过渡段均为隧道抗震性能的控制性区域,为隧道重点设防区域,断层破碎带地段隧道抗震设防长度宜在全部断层破碎带地段长度的基础上向两端延伸一定距离,具体设防段长度应根据相应工程进行具体分析,建议设防长度向两端延伸的距离不小于3.5倍隧道洞径。

2) 垂直于隧道(横向、竖向)输入地震荷载时的动力响应特征(塑性区,位移差规律性)相似,同时断层破碎带与混合花岗岩接触面产生比纵向输入更大的位移差值与塑性区域。

3) 隧道在同一高程处断裂带产生明显比围岩更大的加速度放大,纵向输入地震波时放大倍率最明显。

4) 隧道断裂带与围岩在地震下所产生的错动量大于隧道断裂带、围岩部位洞顶与洞底所产生的位移差值,为隧道抗减震措施考虑的主要因素。

参考文献:

- [1] HE C, KOIZUMI A. Study on seismic behavior and seismic design methods in transverse direction of shield tunnels [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 11(6): 651-661.
- [2] 川島一彦. 地下构筑物耐震设计[M]. 东京:鹿岛出版会, 1994: 43-60.

- [3] JSCE. The 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake [J]. Japan Society of Civil Engineers, 1996, 81(3): 38-45.
- [4] SHARMA S, JUDD W R. Underground opening damage from earthquakes [J]. Engineering Geology, 1991, 30(3/4): 263-276.
- [5] 王明年, 崔光耀, 林国进. 汶川地震灾区公路隧道震害调查及初步分析[J]. 西南公路, 2009(4): 41-46.
WANG MING-NIAN, CUI GUANG-YAO, LIN GUO-JIN. Reconnaissance and analysis of highway tunnels under Wenchuan earthquake [J]. Southwest Highway, 2009(4): 41-46.
- [6] 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 TIAN-BIN. 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.
- [7] 钱七虎, 何川, 晏启祥. 隧道工程动力响应特性与汶川地震隧道震害分析及启示[C]//汶川大地震工程震害调查分析与研究. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2009: 73-778.
- [8] 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.
- [9] 王威, 任青文. 活动断裂对深埋隧洞影响的研究概述 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 175-180.
WANG WEI, REN QING-WEN. General introduction to the effect of active fault on deeply buried tunnel [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 175-180.
- [10] 李海波, 马行东, 李俊如, 等. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 358-362.
LI HAI-BO, MA XING-DONG, LI JUN-RU, et al. Study on influence factors of rock cavern displacement under earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 358-362.
- [11] 王如宾, 徐卫亚, 石崇, 等. 高地震烈度区岩体地下洞室动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 569-573.
WANG RU-BIN, XU WEI-YA, SHI CHONG, et al. Dynamic response analysis of rock underground caverns in highly seismic region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 569-573.
- [12] 蒋华, 蒋树屏, 王晓雯, 等. 断层带处公路隧道横断面抗震分析[J]. 隧道建设, 2009, 29(1): 14-29.
JIANG HUA, JIANG SHU-PING, WANG XIAO-WEN, et al. Study on transverse seismic response of highway tunnel in fault region [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(1): 14-29.
- [13] Itasca Consulting Group Incorporation. FLAC^{3D} (fast lagrangian analysis of continua in 3D) users manual [M]. Version3. 0. USA: Itasca Consulting Group Incorporation, 2005.
- [14] 丁皓江, 何福保, 谢贻权, 等. 弹性和塑性力学中的有限单元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [15] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.

(编辑 陈移峰)