

强震作用下穿越断层隧道围岩力学响应研究*

杨志华^① 兰恒星^① 张永双^② 李郎平^① 熊探宇^②

(^①中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

(^②中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081)

摘要 通常情况下,地下工程震害比地面建筑物震害较轻,但是在强震条件下,地下工程震害依然突出。2008年5·12汶川大地震($M_s 8.0$)对地下工程造成了巨大破坏,尤其是穿越构造断裂带的铁路、公路隧道。本文采用三维离散元(3DEC)动力分析方法和实测汶川地震动记录,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。经过与实地调查的北川—映秀断裂带地表破裂情况对比验证,模拟结果具有较高的可信度。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,进而引起断层附近隧道围岩应力累积、应力集中,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,这个过程可以定性地划分为5个主要阶段:弹性应力集中阶段、破裂起始阶段、破裂加速阶段、稳定破裂阶段和破裂逐渐停止阶段。本研究将有助于深刻认识在强震和断层共同作用下的隧道围岩动力响应过程,并对隧道安全性评价具有重大意义。

关键词 隧道 强震 断层 渐进破坏过程 三维离散元

中图分类号: TU45 文献标识码: A

ROCK DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY TUNNEL TRAVERSING THROUGH FAULT UNDER STRONG EARTHQUAKE

YANG Zhihua^① LAN Hengxing^① ZHANG Yongshuang^② LI Langping^① XIONG Tanyu^②

(^①Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(^②Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

Abstract Usually, the earthquake-induced damage to underground structures is lighter than that to above-ground structures. But, under the condition of strong earthquakes and faults, the earthquake-induced damage to underground structures is still considerably serious. On May 12, 2008, Wenchuan earthquake with a magnitude of $M_s 8.0$ in Sichuan province, China caused tremendous damage to underground structures, especially the tunnels of railways and roads that traverse active faults. Dengjiaping tunnel of Cheng-Lan Railway (Chengdu to Lanzhou, in China) traverses the central fault belt in Longmenshan zone with complex geological conditions and developed active faults. This study uses dynamic module of 3 Dimensional Discrete Element Code (3DEC) and acceleration histories of Wenchuan earthquake in Qingping station to investigate the dynamic response process of Dengjiaping tunnel under the combined effects of strong earthquake and fault. Verified by comparing the ground motion of field survey and modeling results, the modeling results have high reliability. The modeling results show that the combined effects of

* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-31.

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010914025)和国家自然科学基金(41072241).

第一作者简介: 杨志华, 主要从事 GIS 与地质灾害研究. Email: yangzh@lreis.ac.cn

strong earthquake and fault disturb the initial field stress distribution and cause the stress accumulation and stress concentration of tunnel surrounding rock near faulting zone. The high stress concentration results in fault gradual rupture and tunnel gradual failure, which can be qualitatively divided into 5 stages: 1) elastic stress accumulation, 2) local rupture beginning, 3) rupture growth at high speed, 4) spontaneous rupture growth, 5) gradual stability state. This study is helpful to understand the dynamic response process of tunnel surrounding rock under the combined effect of strong earthquakes and faults, and has considerable significance for tunnel safety estimation.

Key words Tunnel, Earthquake, Fault, Gradual failure process, 3DEC

1 引言

从世界范围内的工程结构物震害情况看,通常情况下,与房屋、桥梁等地面建筑物相比较,隧道工程等地下建筑物震害较轻,这主要是因为地下岩体的震动加速度小于地面,并且隧道围岩有足够的刚度保持隧道形状不变,因此隧道工程相对具有较强的抗震性能^[1]。但是值得注意的是,在强震条件下,隧道工程震害依然突出。根据实际考察,2008年5月12日 M_s 8.0级汶川大地震对山岭隧道(公路、铁路)造成了巨大破坏,基本破坏类型可以概括为洞口边坡崩塌与坍塌、洞门裂损、衬砌开裂与错位、底板开裂与隆起、初期支护变形及开裂等^[2]。另外,1995年日本阪神大地震^[3]和1999年台湾集集地震^[4]等强震都造成了断层破裂带附近、衬砌缺陷段隧道结构的破坏,说明强震条件下的隧道震害问题需要高度关注。

国内外学者针对地震和断层对隧道等地下结构物的影响做了大量的研究。刘君等^[5]使用非连续变形分析(DDA)模拟了节理岩体中隧道开挖过程以及地震荷载作用下隧道围岩的动力响应,模拟结果表明节理倾角对岩体应力分布、隧道围岩变形有重要影响。刘妮娜等^[6]采用有限单元法研究了黄土地区的盾构地铁隧道在地震波动力荷载作用下的动力反应,结果显示盾构隧道的加速度和主应力最大值均产生于结构的底部。郑颖人等^[7]将有限元强度折减法 and 有限差分法(FLAC)相结合,分析了地震作用下无衬砌隧洞的力学规律,结果表明黄土隧洞在动力情况下首先是隧洞顶部出现局部拉破坏然后是侧边整体破坏。刘立宇等^[8]使用有限元方法(ABAQUS)分析了典型公路隧道在6种围岩条件下的地震响应,结果表明隧道围岩等级对隧道结构的地震动响应有较大的影响。方林等^[9]开展了穿越断层隧道振动台模型试验研究,试验结果表明地震时断层上下盘相互位移,导致断层处衬砌破坏

严重,拱部和底板出现纵向贯通裂缝。

Jeon S 等^[10]通过实验室物理模型和FLAC2D数值方法模拟研究了断层和软弱面对隧道稳定性的影响,结果表明,由于断层等软弱面的存在,隧道围岩的变形量显著增加,而且沿软弱面出现明显的剪切变形。Mirko C 等^[11]用GeoELSE等方法分析了意大利南部邻近活动断层的深埋铁路隧道横断面的地震响应。Anastasopoulos I 等^[12]使用有限元方法(ABAQUS)研究了在断层破裂变形和并发地震震动的耦合作用下,70m海底深处沉管隧道的动力响应行为。Anastasopoulos I 等^[13]使用有限元方法研究了大构造断层对两个希腊高速公路隧道的影响。Genis M^[14]采用三维有限差分模型分析估计了Dorukhan隧道洞口的动力稳定性,结果表明,在同一平面上,垂直隧道轴线的波比平行隧道轴线的波引起更多的破坏。

总结国内外研究现状,当前研究主要是侧重于地震和节理、断层等不连续面对隧道稳定性的影响结果,包括隧道围岩应力分布、破裂位移、塑性区分布等,有少量文献涉及隧道变形失稳或岩石破坏等过程^[15,16],但是较少考虑强震和断层相互作用下的隧道围岩动力响应过程。目前的研究方法或手段主要有实地调查、实验室物理模型、理论分析和数值模拟4类,其中数值模拟多采用有限元方法或有限差分方法,离散单元法应用相对较少。离散单元法(Discrete Element Method, DEM)^[17]是针对节理岩体提出的一种适用于模拟不连续岩体大位移的数值方法,是在块体准刚性假设的前提下,以牛顿第二定律为理论基础建立起来,用微小运动状态的求解来模拟不连续岩体的大位移。有限元方法的缺点是不能模拟岩体的大变形问题,因此不适合模拟断层错动和隧道围岩破裂过程。二维离散元假定平面应力状态,限制了地震波能量的扩散^[18],因此地震响应可能被低估,而三维离散元克服了这些缺点。

本文采用三维离散元动力响应分析方法,选取成兰铁路龙门山段作为研究区,建立三维离散元几

何模型,选用绵竹清平地震台站的实测汶川大地震加速度记录,模拟研究了在强震和断层的共同作用下成兰铁路邓家坪隧道的动力响应过程,分析了断层附近隧道围岩应力分布、震动速率、应变和应变率的动力响应特征。

2 研究区概况

成兰铁路龙门山段处于青藏高原东南缘地形陡变带,这里不仅地形陡峻、岩性复杂,而且活动断裂发育、地震活动强烈、地质灾害频发,举世震惊的5·12汶川大地震即发生于龙门山中央断裂带上。汶川大地震诱发了大量高速远程滑坡,不仅造成巨大的财产损失和人员伤亡,而且造成震区多处交通、水利隧道出现不同程度的破坏。鉴于龙门山地区的复杂地质条件,选取成兰铁路龙门山段作为研究区,重点考察推荐线路中穿越龙门山中央断裂(北川—映秀断裂)的邓家坪隧道(图1)。

邓家坪隧道位于龙门山前山地带,隧道全长10534m,最大埋深约921m,属于特长埋深隧道。隧道进口在安县雎水镇柿子园,隧道出口在梅子滩。隧道穿越龙门山山脉中段高山峡谷深切侵蚀地貌,斜穿龙门山中央断裂带,是较为不利地段。

3 模型与动力计算

3.1 三维离散元模型

根据成兰铁路龙门山段的地质构造条件(图1),建立了研究区的三维离散元模型(图2a),模型范围长50km,宽50km,高10km。在建立模型的过程中,对局部小面积地层和远离隧道地层进行了概括,共划分为11个地层。图2b是隧道模型位于断层北侧(地层8中)的一部分,前表面是断层穿过隧道的位置。隧道中轴线平均埋深800m,长200m,采用马鞍状洞形(宽10m,高9m)。隧道穿越北川—映秀断裂,断裂两侧的隧道围岩分别处于两个不同的地层中(地层3和地层8)。

岩体采用弹性-各向同性(elastic-isotropic)本构模型,离散面接触模型采用库仑滑动(joint area contact-Coulomb slip)本构模型。根据研究区的相关地质资料和中国铁路工程地质手册^[19],并参考相关文献^[20,21],经过模拟结果验证(参考3.4和4.1节)(见表1,表2)。

3.2 阻尼和边界条件

3DEC 动力时程响应分析方法可以采用瑞利阻尼和局部阻尼两种阻尼形式,其表示形式为矩阵张

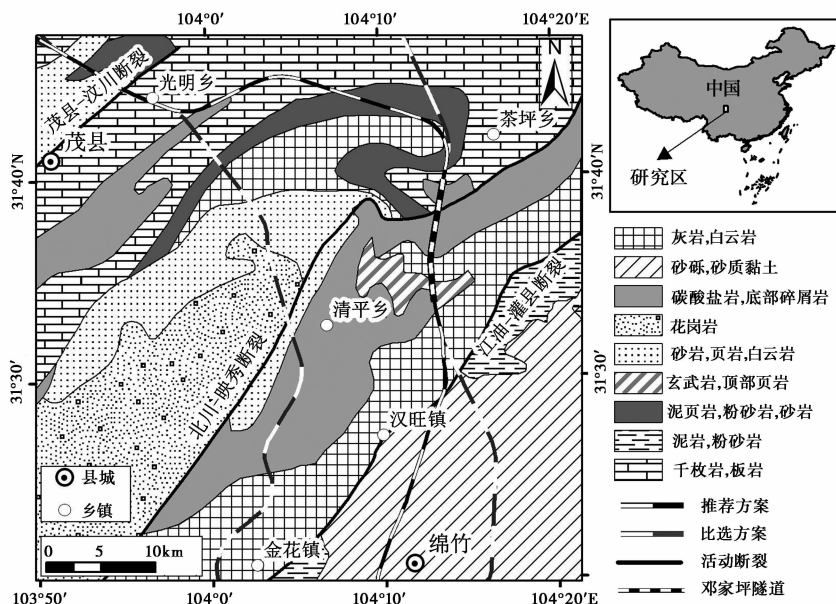


图1 成兰铁路龙门山段地理和地质概况

Fig. 1 Geographical and geological map of Longmenshan section of Cheng-Lan Railway

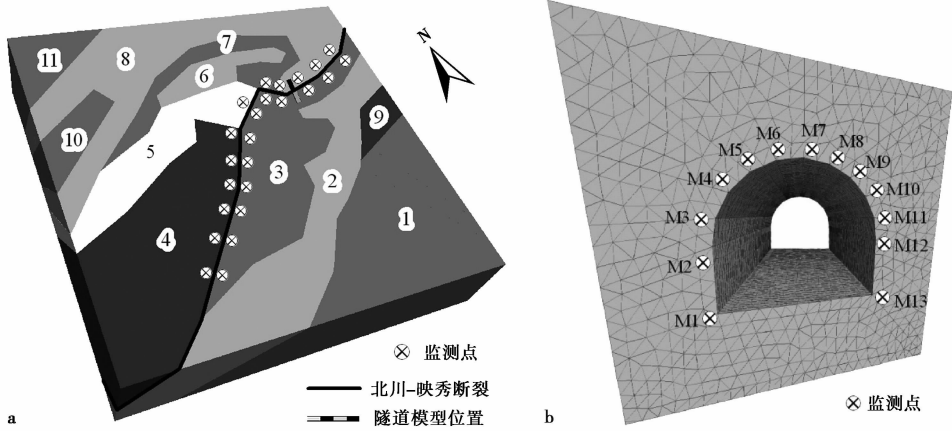


图2 研究区三维离散元模型(a),网格化后的隧道模型局部(b)

Fig. 2 3-Dimensional discrete element model of study area(a), Partial tunnel model with grid(b)

表1 岩体物理力学动参数

Table 1 Dynamic material properties of rock masses

地层	弹性模量 E/GPa	泊松比 γ	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1, 5	10	0.25	2200
2, 6	28	0.31	2300
3, 10	48	0.26	2400
4	71	0.22	2700
7	19	0.25	2300
8	35	0.25	2600
9	53	0.26	2500
11	52	0.25	2450

表2 结构面物理力学参数

Table 2 Material properties of discontinuities

	法向 刚度 K_n/GPa	切向 刚度 K_s/GPa	内聚 力 c/MPa	内摩 擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉 强度 T/MPa	残余 内聚力 c'	残余内 摩擦角 $\varphi'/(\text{°})$
断裂	1	0.8	0.8	25	0.5	0.4	20
节理	5	4	3.5	30	5	0.4	25

量(C),由质量阻尼矩阵(M)和刚度阻尼矩阵(K)两部分组成,如公式(1)。其中, α 是质量阻尼比例系数, β 是刚度阻尼比例系数。

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

瑞利阻尼一般需要设置2个参数,即临界阻尼比和中心频率。分析地震波频率和研究区地质特征,同时考虑质量阻尼和刚度阻尼的相互关系,模型采用的临界阻尼比是0.04,中心频率是20(Hz)。

在动力时程响应分析方法中,为了模拟较真实的无限远区域,可以采用自由场边界和黏滞边界两

种边界形式。黏滞边界通过在模型边界的法向和切向设置独立的阻尼筒来实现,以便吸收来自模型内部的入射波。在本研究中,模型底部和四周边界采用黏滞边界条件,顶部(地表面)采用自由边界条件。

3.3 地震动荷载

3DEC地震动荷载的输入可以采用两种方法:速度时程和应力时程,由于模型采用了黏滞边界条件,因此只能使用应力时程。首先由地震波加速度时程得到速度时程,然后把速度时程转换为应力时程,转换公式如下:

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) V_n \quad (2)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) V_s \quad (3)$$

公式中, σ_n 为法向应力; σ_s 为切向应力; ρ 为介质密度; C_p 和 C_s 分别为P波和S波在岩体中的传播速度; V_n 和 V_s 分别为质点的法向速度和切向速度。由公式(4)-(7)求取 C_p 和 C_s ,其中 E 是弹性模量; γ 为泊松比。

$$K = E/3(1 - 2\gamma) \quad (4)$$

$$G = E/2(1 + \gamma) \quad (5)$$

$$C_p = \sqrt{(K + 4/3G)/\rho} \quad (6)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (7)$$

考虑地震观测台站与邓家坪隧道之间的距离以及地震动记录数据质量,选取绵竹清平台站测得的汶川地震加速度记录,包括3个方向:东西(EW)、南北(NS)和竖直(UD)。每个方向上的加速度是由地震引发的P波和S波在这个方向上的分量叠加形成,因此,可以用3个方向上的加速度来表示P

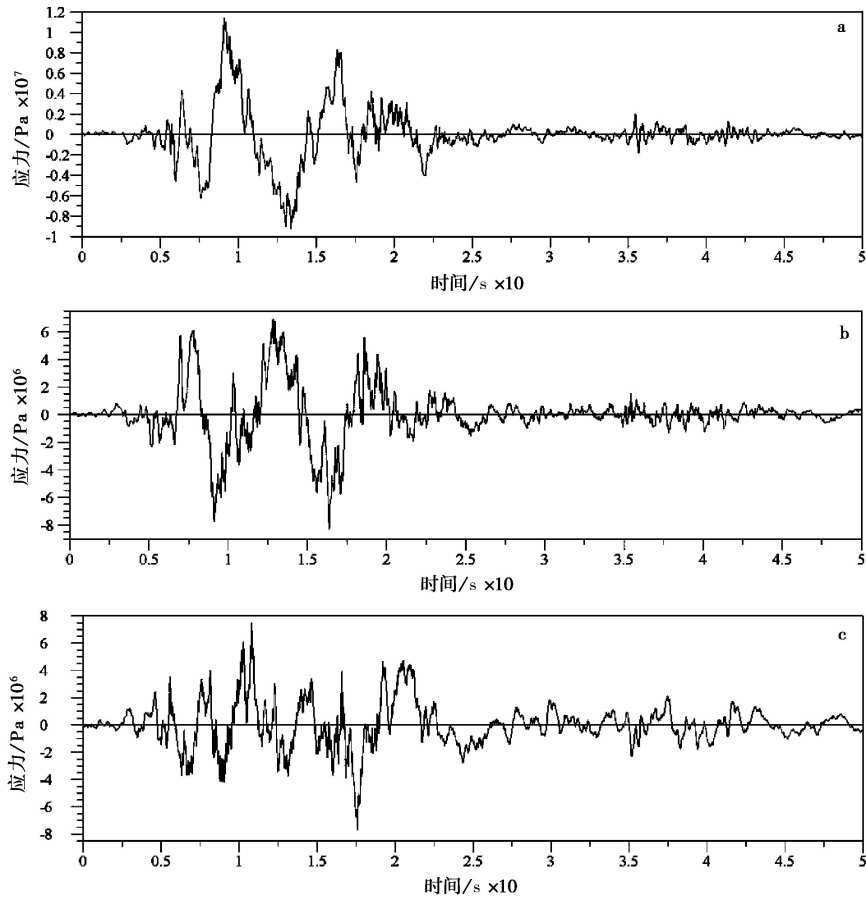


图3 应力时程

Fig. 3 Stress history

a. 水平东西方向; b. 水平南北方向; c. 竖直方向

波和S波的地震动荷载输入。考虑到3DEC动力分析的计算效率和地震波加速度时程的振幅(能量)分布,选取30~80s之间加速度时程。采用位于模型中部且靠近隧道的地层3的属性来计算 C_p 和 C_s ($C_p = 4752.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $C_s = 2706.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。图3是3个方向的应力时程曲线,通过水平应力时程(EW和NS)在模型底部添加切向动力荷载,通过竖向应力时程(UD)在模型底部添加法向动力荷载。

3.4 动力模拟计算

三维离散元模型及其动力计算条件准备就绪之后,可以进行动力模拟计算,三维离散元的动力模拟计算有3个主要步骤:

(1)首先计算在初始应力场和重力条件下的静力平衡。根据力学原理将最大和最小主应力分解到三维直角坐标系的3个方向上,然后给模型施加初始应力场,在竖直方向上施加重力场,在静力条件下计算并达到初始静力平衡。

(2)在静力平衡模型的基础上,添加临界阻尼比、边界条件、地震动荷载及中心频率等动力计算条件。

(3)进行动力模拟计算。由于模型的适度简化和参数条件的不确定性等因素,模拟结果往往与实际情况有一定误差,因此需要多次重复计算来修正模型参数条件。根据我国铁路工程地质手册^[19]中的岩石动参数区间,每个地层(不同岩石属性)选择几个待选参数,然后根据模拟结果和实测结果的对比误差对参数进行交叉验证,最终获得满意的计算结果。

4 结果与分析

4.1 结果验证

汶川大地震后,根据实地勘察^[22,23],北川—映秀断裂带的地表破裂以逆冲兼具右旋走滑为主,断面倾角陡,倾向NW。地表垂直位移介于1.60~

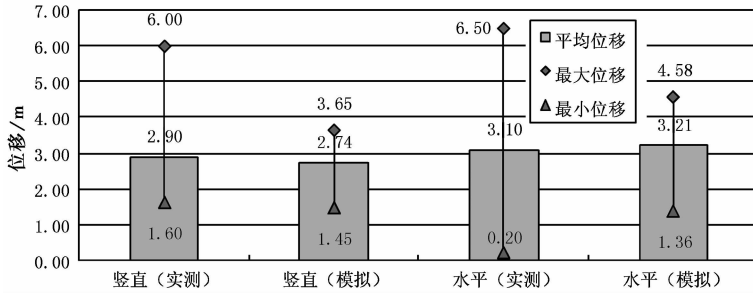


图4 地表实测位移与模拟位移的比较

Fig. 4 Comparison of ground displacement between field survey and model

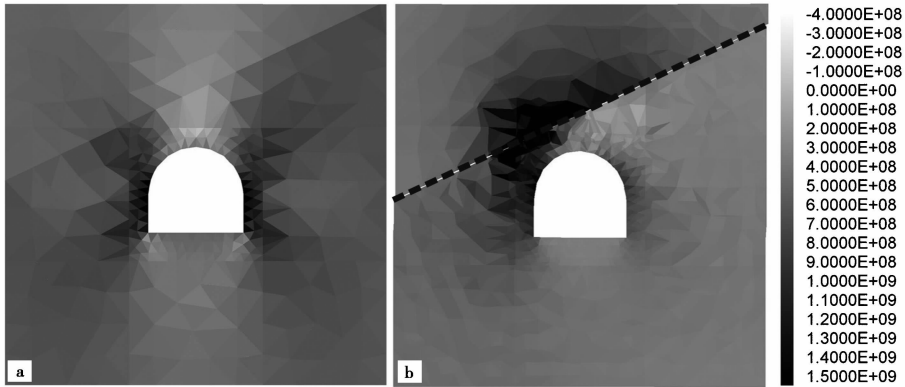


图5 动力荷载10s时隧道横截面最大主应力(Pa)

Fig. 5 Maximum principal stress(Pa) of tunnel cross-section when the10th second dynamic load

6.00m 之间,地表水平位移介于 0.20 ~ 6.50m 之间,平均地表垂向位移为 2.9m,平均地表水平位移为 3.1m,表明该地震破裂带存在逆冲运动分量和右行走滑运动分量。

模拟的断层错动方向(图11)与实地勘察一致,都是逆冲兼具右旋走滑错动。在北川—映秀断裂带两侧分别选取了12个监测点(图2a),由相邻两个监测点计算得到一个地表垂向位移和一个地表水平位移,共得到12个地表垂向位移和12个地表水平位移(表3,图4)。平均地表垂向位移为2.739m,相对实测值误差是5.55%,平均地表水平位移为3.212m,相对实测值误差是3.61%,因此模拟结果具有较高的可信度。

4.2 应力分布特征

岩体中的断层、节理等软弱结构面能够对地震

波产生不同程度和不同方向的反射、折射和透射,各种入射、反射和折射波相互叠加形成了复杂的不均衡地震场,往往引起断层附近岩体中的应力累积和应力集中^[24],从而影响断层附近隧道围岩的变形和破坏。

图5显示了动力荷载10s时,有、无断层(或断层距离隧道较远)对隧道围岩横截面最大主应力分布的影响,黑色虚线指示断层。在图5a中,无断层作用或距离断层较远,最大主应力分布主要受岩体性质和隧道结构物的影响,在隧道两侧边墙产生了张应力集中,由于地震波的绕射作用,在隧道顶部产生了压应力集中。在图5b中,断层作用明显改变了隧道围岩应力分布,在隧道围岩左上方的断层两侧产生了张应力集中,隧道右上方产生了压应力集中。对比图5a和图5b可以看出,断层距离隧道较近时应力集中区域大于断层距离隧道较远时或无断层作

表3 模拟地表位移

Table 3 Modeling ground displacement

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均位移 A/m
水平位移 H/m	4.35	4.55	4.49	4.58	4.53	3.96	3.69	2.09	2.05	1.36	1.43	1.46	3.212
竖直位移 V/m	3.52	2.89	3.56	3.63	3.49	3.42	3.65	2.04	1.96	1.69	1.57	1.45	2.739

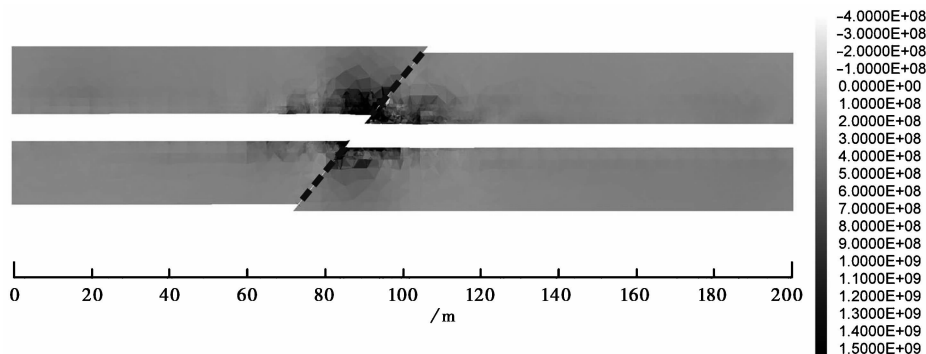


图6 动力荷载10s时隧道截面(沿轴线方向)最大主应力(Pa)

Fig. 6 Maximum principal stress (Pa) of tunnel section(along tunnel axis) when 10th second dynamic load

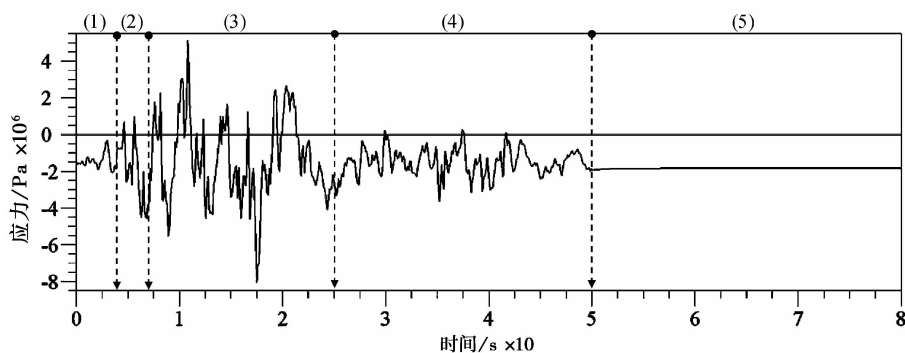


图7 监测点 M7(图2b)的应力时程

Fig. 7 Stress history of monitoring point M7(in figure 2b)

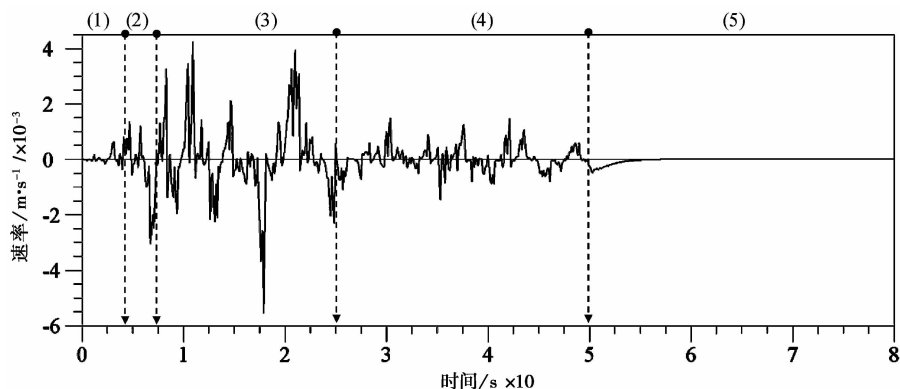


图8 监测点 M7(图2b)的震动速率时程

Fig. 8 Vibration velocity history of monitoring point M7(in figure 2b)

用下的应力集中区域。

图6是动力荷载10s时隧道轴线方向上围岩顶部和底部的最大主应力分布,黑色虚线指示断层。从图中可以看出,在强震动荷载和断层作用下,断层附近的隧道围岩中产生了应力集中(如图中的黑色区域),这里是隧道围岩最容易产生破坏的地方。应力集中主要发生于隧道与断层的相交区域,其他

区域没有发现大面积的应力集中,因此可以推断这里的应力集中是在地震动荷载过程中隧道与断层相互作用的结果。

4.3 应力和速率时程特征

为了监测在地震动荷载过程中的隧道围岩动力响应变化情况,在断层附近的隧道围岩中安置了13

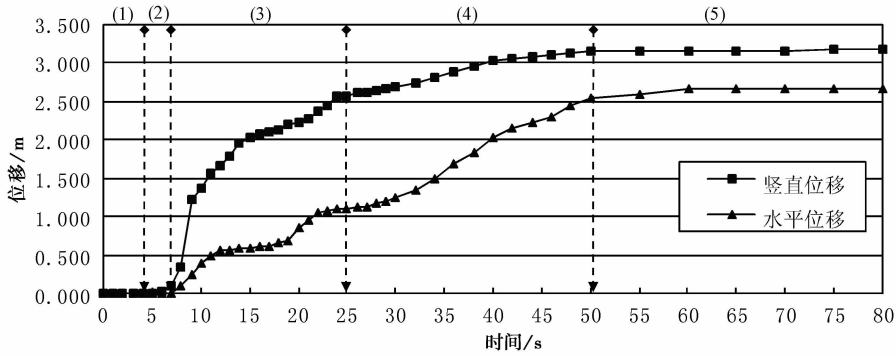


图9 断层附近隧道围岩平均位移时程

Fig. 9 Average displacement histories of tunnel surrounding rock near fault

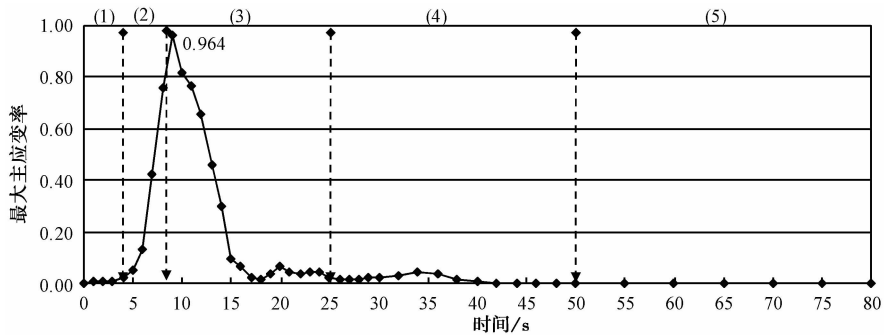


图10 断层附近隧道围岩平均最大主应变率时程

Fig. 10 Average maximum principle strain rate history of tunnel surrounding rock near fault

个监测点(图2b, M1~M13)。图7是监测点M7的应力时程曲线,在地震动荷载作用下,应力曲线呈波动状态。50s后,地震动荷载消失,随着隧道围岩中累积应力的释放,监测点M7逐渐恢复静压应力状态。图8是监测点M7的震动速率时程曲线,总体震荡趋势与图7的应力时程相似。当断层产生破裂破坏时,隧道围岩和断层破碎带发生了复杂的力学相互作用与能量交换,这种不规则力学作用和输入动力条件的耦合作用决定了隧道围岩的震动速率,因此监测点M7的震动速率时程并不与应力时程震荡趋势完全一致。

4.4 隧道围岩中断层破裂过程

在地震动荷载过程中,隧道围岩中的断层发生了逆冲破裂,造成断层附近隧道围岩破坏,因此可以通过监测断层附近的隧道围岩位移来反映断层的破裂特征。图9是断层附近隧道围岩中13个监测点(图2b)的水平和垂直平均位移时程,反映了断层破裂对隧道围岩的破坏作用。图10是断层附近隧道围岩中13个监测点的平均最大主应变率时程。地

震动荷载10s前后,断层附近隧道围岩内的最大不平衡力达到峰值,断层发生强烈的逆冲兼具右旋走滑错动,隧道围岩破坏急剧增加,最大应变率时程出现峰值。50s后,地震动荷载消失,断层错动增长缓慢,模型逐渐趋于稳定状态。

根据断层破裂过程中的断层附近隧道围岩应力累积、释放,以及震动速率、位移和应变率特征,可以推断出在强震作用下断层破裂及其引起的围岩破坏是一个具有高度复杂性的渐进过程,这个过程可以定性地划分为5个主要阶段(图7~11):弹性应力集中阶段、破裂起始阶段、破裂加速阶段、稳定破裂阶段和破裂逐渐停止阶段。图11给出了这5个主要阶段的断层破裂状态和隧道围岩应力分布,表4列举了这5个主要阶段中的动力荷载、隧道围岩应力、震动速率、位移和应变率等要素的主要特征。

5 讨论与结论

虽然隧道等地下建筑物相对地面建筑物具有较强的抗震性能,震害较轻,但是强震仍然可以对其造成严重破坏,且隧道破坏往往造成铁路、公路等交通

表4 断层破裂过程和隧道围岩破坏过程的主要特征

Table 4 Main characters of fault rupture process and tunnel failure process

破裂阶段	地震荷载和围岩应力	围岩震动速率	断层破裂和围岩形变	围岩应变率
(1)弹性应力集中阶段	地震动荷载较小,围岩初始地应力平衡被扰动,应力累积开始。	震动速率较小	断层附近围岩局部区域微小变形引起的变形局部化	变形局部化引起的较小应变率
(2)破裂起始阶段	地震动荷载逐渐增长,围岩应力进一步累积。	震动速率明显增长	断层附近围岩局部区域出现不规则小裂隙,围岩不稳定性增加,引起局部小位移。	应变率逐渐增长
(3)破裂加速阶段	地震动荷载和围岩应力累积快速增长并出现峰值。断层加速破裂后,累积的围岩应力开始释放。	震动速率快速增长,出现了几个峰值。	断层附近围岩发生较大变形,断层逆冲破裂,断层附近围岩错动位移快速增长。	应变率快速增长,出现峰值,然后逐渐减小。
(4)稳定破裂阶段	地震动荷载减弱,累积的围岩应力逐渐释放,但仍保持一定水平。	震动速率逐渐减小	断层错动平稳、少量增长	应变率数值较小且变化不大
(5)破裂逐渐停止阶段	地震动荷载消失,累积的围岩应力进一步释放,逐渐趋于稳定状态。	震动速率进一步减小,直至为零。	断层错动逐渐停止	应变率逐渐趋于零

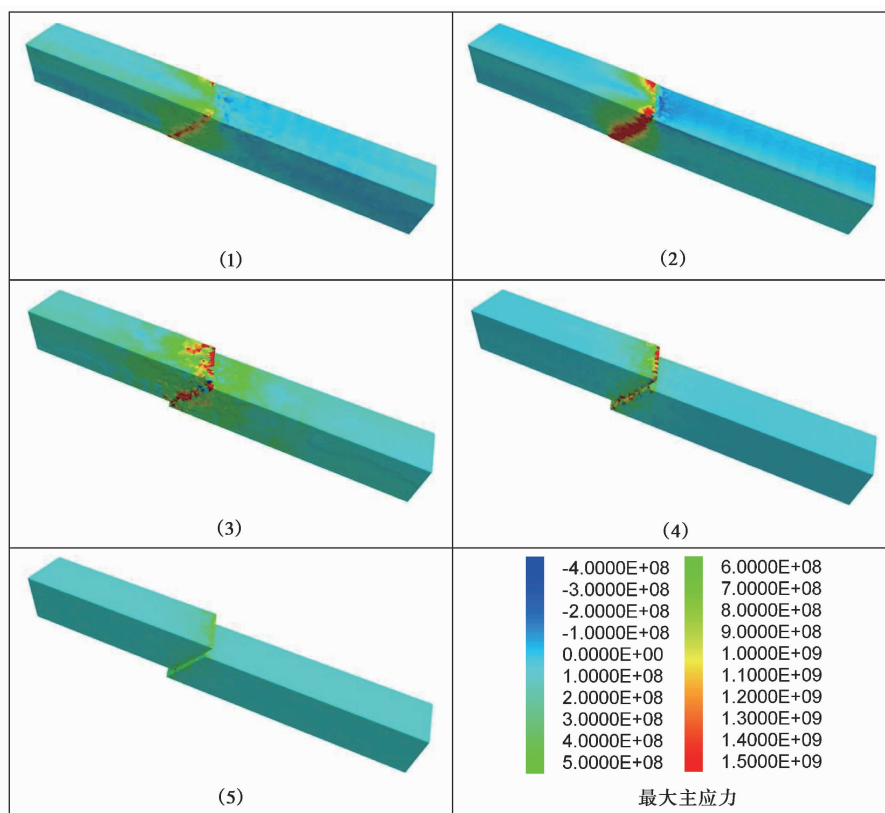


图11 断层破裂过程和隧道围岩应力分布

Fig. 11 Fault rupture process and stress distribution of tunnel surrounding rock

线的中断,影响灾害救援,因此其震害仍然需要高度关注。本文采用三维离散元动力响应分析方法和清平台站实测的汶川地震动记录,模拟研究了在强震和断层的共同作用下,成兰铁路龙门山段邓家坪铁路隧道围岩的动力响应特征。经过与实地调查的北川—映秀断裂带地表破裂情况对比验证,模拟结果具有较好的可信度,说明三维离散元方法可以用于

在地震和断层的共同作用下的隧道围岩破坏研究。

在地震动荷载过程中,断层对隧道围岩中的应力重分布产生了重要影响。地震波在断层等软弱结构面上能够产生复杂的反射、折射,各种入射、反射和折射波相互叠加形成了复杂的不均衡地震场,引起断层附近隧道围岩的应力累积、应力集中,从而造成了隧道与断层相交区域的隧道围岩变形和破坏。

在强震作用下,岩体内的断层、节理等软弱结构面更容易发生拉裂、错动等破坏,因此对隧道等地下工程具有更大的潜在威胁性。在强震作用下,断层破裂及其引起的隧道围岩破坏是一个具有高度复杂性的渐进过程,这个过程可以定性地划分为5个主要阶段:弹性应力集中阶段、破裂起始阶段、破裂加速阶段、稳定破裂阶段和破裂逐渐停止阶段。

隧道围岩破坏的实质就是在强震和断层作用下岩体损伤随动力荷载的渐进过程,它取决于岩体工程地质(摩擦力、强度等)、水文地质条件恶化及应力状态变化引起的损伤累积和断裂发展的时间效应。本研究仅考虑了地震荷载、断层和岩体工程地质条件,其他如水文地质等因素的作用有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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 Tianbin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 742 ~ 750.
- [2] Wang Zhengzheng, Gao Bo, Jiang Yuanjun, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after Wenchuan earthquake[J]. Science in China (Series E), 2009, **52**(2): 546 ~ 558.
- [3] Samata S, Ohuchi H, Matsuda T. A study of the damage of subway structures during the 1995 Hanshin-Awaji earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, **19**(3): 223 ~ 239.
- [4] Wang WL, Wang TT, Su JJ, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(3): 133 ~ 150.
- [5] 刘君, 孔宪京. 节理岩体中隧道开挖与地震作用下围岩的稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增1): 4929 ~ 4933.
Liu Jun, Kong Xianjing. Stability of tunnel in jointed rock masses during excavation and under earthquake load. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S1): 4929 ~ 4933.
- [6] 刘妮娜, 门玉明, 彭建兵, 等. 地震荷载作用下地铁盾构隧道动力响应分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(4): 58 ~ 62.
Liu Nina, Men Yuming, Peng Jianbing, et al. Dynamic response of shield metro tunnel in earthquake load. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, **37**(4): 58 ~ 62.
- [7] 郑颖人, 肖强, 叶海林, 等. 地震隧洞稳定性分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1081 ~ 1088.
Zheng Yingren, Xiao Qiang, Ye Hailin, et al. Study of tunnel stability analysis with seismic load. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1081 ~ 1088.
- [8] 刘立宇, 陈之毅, 袁勇. 围岩级别对强震作用下隧道地震响应的影 响[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(增1): 1314 ~ 1318.
- [9] Liu Liyu, Chen Zhiyi, Yuan Yong. Impact of rock class on seismic responses of mountain tunnels under severe earthquakes. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(S1): 1314 ~ 1318.
- [9] 方林, 蒋树屏, 林志, 等. 穿越断层隧道振动台模型试验研究[J]. 岩石力学, 2011, **32**(9): 2709 ~ 2713, 2820.
Fang Lin, Jiang Shuping, Lin Zhi, et al. Shaking table model test study of tunnel through fault. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2709 ~ 2713, 2820.
- [10] Jeon S, Kim J, Seo Y, et al. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock-A scaled model test and numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(3): 486.
- [11] Mirko C, Laura C, Carlo GL, et al. Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: A case study in Southern Italy[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, **9**(4): 975 ~ 995.
- [12] Anastasopoulos I, Gerolymos N, Drosos V, et al. Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, **6**(2): 213 ~ 239.
- [13] Anastasopoulos I, Gazetas G. Analysis of cut- and -cover tunnels against large tectonic deformation[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2010, **8**(2): 283 ~ 307.
- [14] Genis M. Assessment of the dynamic stability of the portals of the Dorukhan tunnel using numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**(8): 1231 ~ 1241.
- [15] 赵瑜, 张春文, 刘新荣, 等. 高应力岩石局部化变形与隧道围岩灾变破坏过程[J]. 重庆大学学报, 2011, **34**(4): 100 ~ 106.
Zhao Yu, Zhang Chunwen, Liu Xinrong, et al. Study on strain localization and progressive failure of surrounding rock under high pressure environment. Journal of Chongqing University, 2011, **34**(4): 100 ~ 106.
- [16] Hajiabdolmajid V, Kaiser PK, Martin CD. Modelling brittle failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **69**(6): 731 ~ 741.
- [17] 廖红建, 王铁行, 谢永利, 等. 岩土工程数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Liao Hongjian, Wang Tiexing, Xie Yongli, et al. Numerical Analysis of Geotechnical Engineering. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [18] Chen SG. Discrete element modeling of an underground explosion in a jointed rock mass[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2000, **18**(2): 59 ~ 78.
- [19] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程地质手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
First Survey and Design Institute Ministry of Railways. Railway Engineering Geology Guide. Beijing: China Railway Press, 2010.
- [20] 兰恒星, 伍法权. 岩土力学数值模拟中力学参数的确定方法

- [J]. 世界地质, 2001, **20**(1): 66 ~ 71.
- Lan Hengxing, Wu Faquan. The decision of mechanical parameters for numerical simulation of rock and soil mechanics. *World Geology*, 2001, **20**(1): 66 ~ 71.
- [21] 黄志全, 王思敬, 李华晔. 岩体力学参数取值的置信度及其可靠性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(1): 33 ~ 35.
- Huang Zhiquan, Wang Sijing, Li Huaye. The believable degree of mechanical parameters of rock mass and its reliability. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, **18**(1): 33 ~ 35.
- [22] 陈桂华, 徐锡伟, 郑荣章, 等. 2008 年汶川 M_S 8.0 地震地表破裂变形定量分析——北川—映秀断裂地表破裂带[J]. 地震地质, 2008, **30**(3): 723 ~ 738.
- Chen Guihua, Xu Xiwei, Zheng Rongzhang, et al. Quantitative analysis of the co-seismic surface rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China along the Beichuan-Yingxiu fault. *Seismology and Geology*, 2008, **30**(3): 723 ~ 738.
- [23] 李勇, 黄润秋, 周荣军, 等. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(1): 3 ~ 18.
- Li Yong, Huang Runqiu, Zhou Rongjun, et al. Geological background of Longmenshan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(1): 3 ~ 18.
- [24] 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): 568 ~ 575.
- Wang Rubin, Xu Weiya, Shi Chong, et al. Dynamic response analysis of rock underground caverns in highly seismic region. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(3): 568 ~ 575.

新书推荐

《岩石高边坡稳定性工程地质分析》

黄润秋 著

内容简介

本书结合我国西部特殊的地域地质环境条件、针对边坡高陡、地质环境条件复杂及工程边坡开挖规模巨大等特点,全面阐述岩石高边坡稳定性分析的工程地质基础、变形破坏机理及稳定性分析和评价方法,主要包括基本原理、岩石高边坡工程地质环境条件、高边坡工程地质现场工作方法、高边坡岩体结构分析、自燃和人工高边坡变形破坏机理、高边坡变形破坏的全过模拟理论及渗流、强震条件下的高边坡稳定性评价、高边坡稳定性的过程模拟与过程控制等,全书共 12 章。

本书可供国土资源开发、地质灾害防治、水利水电、交通土建、矿山开采等领域以及高等院校、科研院所从事工程地质、岩土工程勘测设计的科研、教学、科技人员参考使用。

联系方式:电话:82998084

Email:engineer2003@mail.igcas.ac.cn

