

DOI: 10.11779/CJGE201403004

隧道穿越断层破碎带震害机理研究

何川^{1, 2}, 李林^{1, 2*}, 张景^{1, 2}, 耿萍^{1, 2}, 晏启祥^{1, 2}

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 首先对汶川“5.12”等各次大地震中跨越断层破碎带隧道震害进行了资料调研, 然后通过振动台模型试验及数值计算对跨断层破碎带隧道的动力响应进行了研究, 研究内容主要包括围岩与隧道结构的加速度响应特性、地层变形及衬砌结构内力分布规律等。分析结果表明: 震害调研结果、振动台模型试验和数值模拟结果有较好的吻合性, 穿越断层破碎带隧道在地震中易于产生破坏; 隧道断层带段围岩有较大的加速度响应特性, 加速度响应在断层接触段不连续; 地震过程中断层带段隧道结构对地层具有明显的追随性和依赖性; 断层带隧道错动破坏主要由断层带隧道围岩与较好段围岩位移不同步性而造成的位移差值引起, 且位移差值与断层带和隧道较好围岩类型有关; 隧道断层破碎带段与较好围岩段衬砌结构横断面具有基本相同的内力分布规律, 衬砌内力在共轭 45° 方向最大, 但断层破碎带段衬砌具有最大的内力峰值, 更易于在地震过程中产生破坏等。以上成果对于合理认识跨越断层破碎带隧道的地震响应特征具有重要意义, 可为隧道实际工程设计和施工的抗震设防提供宝贵的基础资料。

关键词: 隧道工程; 震害机理; 断层破碎带; 振动台模型试验; 隧道地震响应特性

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0427-08

作者简介: 何川(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: chuanhe21@163.com。

Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones

HE Chuan^{1, 2}, LI Lin^{1, 2}, ZHANG Jing^{1, 2}, GENG Ping^{1, 2}, YAN Qi-xiang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: First of all, a simple investigation into the responses of tunnels through fault zones during Wenchuan Earthquake and other major earthquakes is made. Then comparative analyses are carried out by means of shaking table model tests and numerical analyses, mainly on acceleration characteristics of the surrounding rock and tunnel structures, deformation laws of geological strata and distribution of internal forces and so on. The analyses indicate that the results of investigations, tests and numerical analyses are in good agreement and that the tunnels through fault zones are easily damaged. The acceleration response in fault contact segments is discontinuous, and the peak acceleration is obviously larger at the fault zones at the same elevation. The tunnel structure has little impact on the response of geological strata during earthquakes, and the behavior of the tunnel structure obviously adheres to and relies on geological strata in the fault zones. The tunnel dislocation damage mechanism is the relative displacement between the fault zone and the surrounding rock, and the relative displacement value is relative to the types of the surrounding rock. The tunnel cross-sectional structure in the fault zones has the same distribution characteristics of internal forces, that is, in conjugate directions of 45°, it is the greatest, but the tunnel structure has relatively higher internal forces and is easily damaged during earthquakes. Those findings are of great importance to the rational understanding of earthquake response behaviors of tunnels through fault zones, and they may provide precious data for the earthquake resistant design and construction of practical projects.

Key words: tunneling engineering; seismic damage mechanism; fault fracture zone; shaking table model test; seismic response character of tunnel

0 引言

“5.12”汶川等大地震表明, 工程地质环境较好的隧道工程有相对良好的抗震性能^[1-3], 隧道震害一般

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732105); 国家科技支撑计划课题(2012BAG05B03, 2013BAB10B04); 国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1134208); 国家杰出青年科学基金项目(50925830)

收稿日期: 2013-05-06

***通讯作者**

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^[4-8]。隧道断层破碎带段具有围岩地质条件差、地层由软岩到硬岩或由硬岩到软岩的过渡等特点,是隧道震害较集中的部位,1995 年阪神地震、1999 年台湾集集地震和“5.12”汶川地震等隧道震害均证明了这一规律。针对地震中断层破碎带的响应特性及稳定性特征,国内外研究人员做了一定的研究工作,何川等^[9]通过对某穿越断层破碎带铁路单线隧道的地震响应特征进行了研究,得出了断层破碎带对隧道的地震动响应规律有显著的影响、横向输入地震波时隧道围岩有较大的地震动响应值及隧道的断裂带部位与过渡段均为抗震设计控制性区域等;王威等^[10]通过理论分析方法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和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;蒋树屏等^[11]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,并由位移评价了隧道稳定性;王铮铮等^[12]通过抗震理论建立了围岩-隧道结构相互作用问题的静-动力联合分析模型,分析了高烈度地震区跨断层带隧道的非线性地震损伤反应特性,同时开展了强震作用下跨断层隧道灾变机理与控制的地震模拟振动台试验;A R Shahidi 等^[13]通过理论分析与数值计算对伊朗 Koohrang-III 输水隧道纵向的地震动响应特征进行了分析研究,同时设计了一种通过断层破碎带的柔性结构抗减震措施;方林等^[14]以西藏某复杂隧道工程为背景,开展了穿越断层破碎带隧道的振动台模型试验,得出了穿越断层隧道和均质围岩隧道地震动力响应规律有相似之处、断层处衬砌破坏严重及断层对地震波在岩土体内的传播有一定影响等成果。据此可知,对隧道工程在断层破碎带影响条件下的地震响应特性,也取得了一定颇有价值的研究成果,但是,通过振动台模型试验研究穿越断层破碎带隧道的地震响应特性及进而对断层破碎带的破坏机理的研究鲜有报道,而隧道断层段却是震后震害分布的主要部位,同时大量的穿断层破碎带隧道在建或拟建,对其机理的研究有极其重要的意义。

鉴于此,笔者及团队结合资料调研、振动台模型试验及数值计算研究了跨越断层破碎带隧道的地震响应特性,对围岩的加速度响应特性、围岩变形特征及衬砌内力分布等结果进行了分析,同时对隧道穿断层破碎带的破坏机理进行了讨论。

1 隧道跨断裂带地震震害调研

1.1 震害概况

实践证明,工程地质环境较好的地下工程结构,

抗震性相对较好,震害多发生在围岩质量差和地层条件有较大变化的断层破碎带及洞口段,如 1906 年美国旧金山地震,圣安德列斯水坝集水隧道由于横穿断层破碎带造成了严重的破坏,同时埋深 207 m 的莱特一号隧道由于断层破碎带的影响,造成了隧道洞顶坍塌,木料折断等破坏^[15];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,如图 1 所示^[3];1999 年台湾集集地震,穿越断层带隧道破坏严重,其中由于石岗坝引水隧道穿越车笼埔断层,造成隧道衬砌在断层处产生严重的错动破坏,隧道垂直向变形达到 4.0 m,水平向变形高达 3.0 m,整个隧洞破坏^[16];2008 年“5.12”汶川地震,断层的影响造成隧道出现了严重的破坏,表 1 为汶川地震后,都汶公路中穿越断层破碎带隧道工程破坏概况,表中可知:都汶公路穿越断层破碎带隧道震后均出现了不同程度的震害,其中龙溪隧道 F8 断层附近,断层两侧各约 100 m 范围内出现二衬混凝土坍落、开裂和错台以及仰拱隆起(最大达 60 cm)等严重震害现象;紫坪铺隧道由于断裂带 F11 的影响,导致隧道出现严重衬砌开裂和错缝^[4-8, 12]。

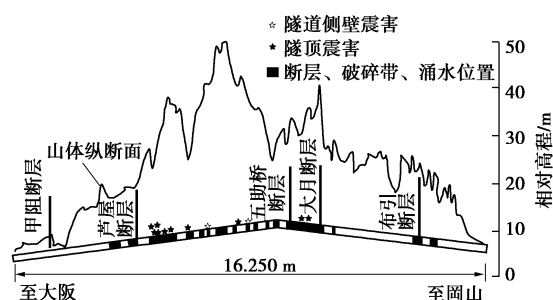


图 1 六甲隧道震害分布

Fig. 1 Distribution of earthquake damage of Liujia tunnel

1.2 破坏类型及特征

断层带最常见的震害类型主要为断层带产生错台及错台造成衬砌剪切相应产生开裂(如图 2),衬砌开裂主要为横向破裂、斜向破裂以及横向或斜向破裂贯通形成的环向破裂等。如都汶公路龙溪隧道在汶川地震后,在断层破碎带产生了严重的错台,沿错台附近产生了横向及斜向的裂缝,如图 3 所示。

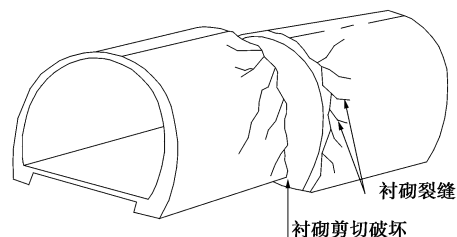


图 2 断层造成衬砌剪切产生的相应裂缝

Fig. 2 Cracks of shear damage of lining

表 1 都汶公路汶川地震隧道评估表

| Table 1 Assessment of Dujiangyan-Wenchuan highway tunnels during Wenchuan Earthquake | | | | | | | | | |
|--|----|--------|----------|---------|------|------|--------|--------|-----------------|
| 公路等级 | 编号 | 隧道名称 | 目前划分地震烈度 | 设计设防标准 | 长度/m | 施工方法 | 震中距/km | 不良地质状况 | 主要震害 |
| 高速公路 | 1 | 紫坪铺隧道 | IX~X度 | 隧道按Ⅶ度设防 | 4090 | 台阶法 | 10 | 瓦斯断层 | 衬砌开裂、衬砌移动及错位 |
| | 2 | 龙洞子隧道 | IX~X度 | 隧道按Ⅶ度设防 | 1071 | 新奥法 | 8 | 断层 | 衬砌开裂、渗漏、衬砌移动及错位 |
| | 3 | 龙溪隧道 | IX~X度 | 隧道按Ⅶ度设防 | 3691 | 台阶法 | 5 | 瓦斯断层 | 衬砌开裂、渗漏、衬砌严重错台 |
| 卧龙连接线 | 4 | 烧火坪隧道 | IX~X度 | 不详 | 451 | 新奥法 | 5 | 断层 | 衬砌开裂 |
| 二级路 | 5 | 龙池隧道 | Ⅷ~Ⅸ度 | 不详 | 1177 | 三台阶 | 10 | 断层瓦斯 | 路基底鼓、衬砌开裂及错台、渗漏 |
| | 6 | 皂角湾隧道 | Ⅷ~Ⅸ度 | 不详 | 1926 | 台阶法 | 14 | 断层 | 衬砌开裂、衬砌错台、附属物破坏 |
| | 7 | 彻底关隧道 | Ⅷ~Ⅸ度 | 不详 | 403 | 台阶法 | 20 | 断层 | 衬砌开裂、衬砌局部错台 |
| | 8 | 桃关隧道 | IX~X度 | 不详 | 625 | 台阶法 | 32 | 断层 | 衬砌开裂、附属物破坏 |
| | 9 | 草坡隧道 | IX~X度 | 不详 | 759 | 台阶法 | 34 | 断层 | 衬砌开裂、衬砌渗漏 |
| | 10 | 单坎梁子隧道 | IX~X度 | 不详 | 1567 | 台阶法 | 45 | 断层 | 衬砌开裂 |



图 3 龙溪隧道衬砌错台

Fig. 3 Dislocation of lining of Longxi tunnel

2 模型试验概况

2.1 试验装置

本次试验主要包括前期的模型相似配比试验和后期的振动台试验两大部分，前期模型相似配比试验在西南交通大学岩土工程试验中心完成。振动台试验在中国核动力研究设计院的大型三向六自由度（沿三轴平动和绕三轴转动）振动台上进行，该振动台的主要性能参数见表 2^[17]。

表 2 振动台主要性能参数

| Table 2 Main characteristic parameters of shaking table | |
|---|----------------------------|
| 名称 | 参数 |
| 台面尺寸 | 6 m×6 m |
| 台面最大负载能力 | 600 kN |
| 振动自由度数 | 三向六自由度 |
| 空载时台面最大加速度 | 水平向：3.0g 垂直向：2.6g |
| 满载时台面最大加速度 | 水平向：1.0g 垂直向：0.8g |
| 工作频率范围 | 0.1~80 Hz |
| 最大位移值 | 水平向：±250 mm 垂直向：±100 mm |

2.2 模型相似比准则及试验材料

由于岩土性状的复杂性，动力模型试验很难完全满足相似定理，但可根据振动台试验研究的核心内容及现有试验条件，通过近似相似的方法。本次振动台模型试验根据 Buckingham 原理，以长度相似比 $C_l=0.025$ 、密度相似比 $C_\rho=0.85$ 和弹性模量相似比 $C_E=0.01$ 为基本物理量相似比导出其他物理量相似比，相似比关系表达式及取值如表 3 所示^[17]。

表 3 振动台试验物理量相似比导出相似比

| Table 3 Similarity relationships for model tests | | | |
|--|--------|---|-------|
| 物理量 | 相似比关系式 | 相似比 | |
| 基础量 | 密度 | $C_\rho = \rho_m / \rho_p$ | 0.85 |
| | 长度 | $C_l = l_m / l_p$ | 1/40 |
| | 弹性模量 | $C_E = E_m / E_p$ | 1/100 |
| 导出量 | 时间 | $C_t = C_l C_l^{-0.5} C_\rho^{0.5}$ | 0.23 |
| | 加速度 | $C_a = C_l^{-1} C_E C_\rho^{-1}$ | 0.47 |
| | 应变 | $C_\varepsilon = \varepsilon_m / \varepsilon_p$ | 1 |
| | 应力 | $C_\sigma = C_E$ | 1/100 |
| | 位移 | $C_u = C_l$ | 1/40 |
| | 速度 | $C_v = C_E^{-0.5} C_\rho^{-0.5}$ | 0.108 |
| | 圆频率 | $C_\omega = C_l^{-1} C_E^{0.5} C_\rho^{0.5}$ | 3.69 |

注：C 为模型与原型之间物理量的相似比。

实践证明，影响隧道围岩力学性质的主要参数有黏聚力、弹性模量、内摩擦角和重度等，根据模型试验目的及相应规范^[18]，选取Ⅳ、Ⅴ级为较好的围岩原型。围岩模型材料采用石英砂、重晶石粉、甘油、水、中粗河砂、机油和凡士林等材料配制而成，断层带模型材料同时加入木屑等满足断层特征要求，试验物理

力学参数见表 4。

表 4 围岩物理力学参数表

| Table 4 Properties of intact rock materials | | | | | |
|---|----|-----------------------|----------------------------|------------------------|---|
| 围岩级别 | 类型 | 黏聚力 c/MPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ | 变形模量 E/GPa | 重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ |
| IV | 原型 | 1.3 | 29 | 4.15 | 23 |
| | 模型 | 1.3/100 | 29 | 4.15/100 | 20 |
| V | 原型 | 0.2 | 26 | 1.3 | 20 |
| | 模型 | 0.2/100 | 26 | 1.3/100 | 17 |
| 断层带 | 原型 | 0.15 | 20 | 0.6 | 19 |
| | 模型 | 0.15/100 | 20 | 0.6/100 | 16 |

隧道结构模型材料采用性质和混凝土接近的石膏作为相似材料，经室内配合比试验确定石膏：水=1.1：1 的比例。

2.3 模型边界条件

振动台试验模型箱，减少模型箱边界的波动反射是试验的关键和难点^[19-21]。成功的模型箱设计要求边界条件对整个系统反应的影响最小，使围岩在模型箱容器中能再现自由场的地震反应，一般在模型箱内壁采用柔性材料来吸收边界的波以模拟土的边界，本次试验采用聚苯乙烯泡沫材料作边界条件，应用 Soong 建立的等效刚度和等效阻尼模型^[22]，通过试验方法测定其等效刚度 k_d 和等效阻尼 c_d 。

$$\left. \begin{aligned} c_d &= \frac{G''V}{\omega h^2} \\ k_d &= \frac{G'V}{h^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， G' 为聚苯乙烯泡沫材料储存剪切模量， G'' 为损耗剪切模量， h 为聚苯乙烯泡沫板的厚度， V 为体积， ω 为模型箱及土体的自振频率。

分析确定振动台模型试验中聚氯苯乙烯泡沫板的厚度为 19.2 cm，试验过程中采用 20 cm 厚度。同时在模型箱底部黏结一层碎石，用以增大接触面上的摩擦阻力，以免激振时模型土体与底板间发生相对滑移，更好再现基础条件。

2.4 试验测试方案

本次振动台试验采用铁路隧道单线标准模型 140 km/h ($B=6.4$ m)，隧道模型 160 m×80 m×52 m ($B=72$ m)，隧道埋深 22 m，模型中间设置断层破碎带宽度 20 m，断层破碎带倾角 60° ，两侧分别 70 m 的 V 级围岩及 IV 级围岩，衬砌模型采用 40 cm 厚的混凝土。

根据试验目的及试验条件，本次试验测试主要布置电阻应变传感器、加速度传感器和激光位移传感器以测试振动台激振过程中衬砌结构的应变值、隧道围

岩和模型结构的加速度值及隧道围岩的相对位移量。

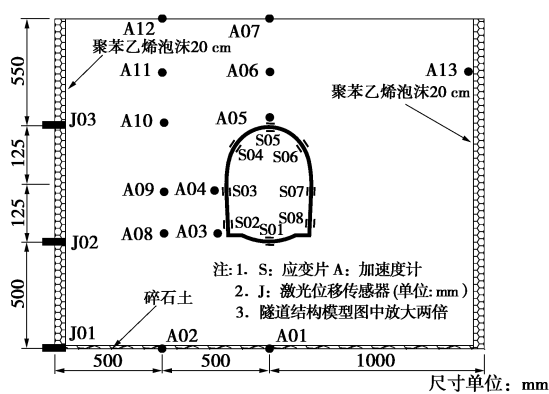


图 4 模型横截面监测点布置图

Fig. 4 Distribution of monitoring locations

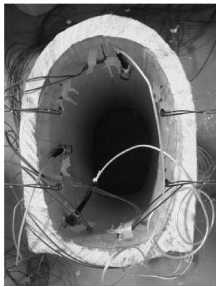


图 5 仪器布置实物图

Fig. 5 Arrangement of sensors on tunnel structure

试验过程中纵向布置 3 个相同的监测横截面位于 IV 级围岩、V 围岩及断层破碎带断面处，由于试验场地及仪器等因素，本次试验过程将位移测试仪器布置于 IV 级围岩段，横截面试验测试传感器布置如图 4、5 所示。

3 数值模拟

3.1 断层带模拟方法

通过在断层与围岩接触部位设置“Interface”结构面的方法来模拟断层与围岩之间的相对效应。“Interface”结构面主要由一系列三节点单元构成，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两种状态，其本构模型如图 6。接触面法向刚度和切向刚度按下式计算：

$$K_s = K_n = 10 \max \left[\frac{(K + \frac{4}{3}G)}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (2)$$

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。

3.2 计算模型及边界条件

计算模型采用与振动台模型试验一致的模型及设

置相同的围岩参数, 边界条件采用的是能吸收来自模型内部入射波的黏滞边界, 即在边界之外设立与域内网格相同属性单元以模拟无限域, 该单元与无限域边界单元之间通过在边界法向和切向设置独立的阻尼筒得以实现^[9], 隧道模型及边界条件如图 7、8 所示。

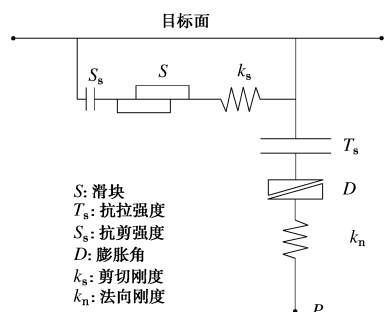


图 6 接触面本构模型示意图

Fig. 6 Components of bonded interface constitutive model

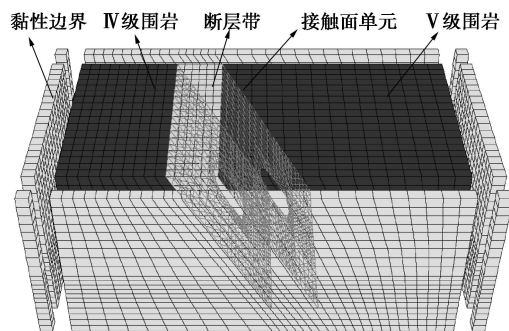


图 7 动力计算模型及边界条件

Fig. 7 Dynamic calculation model and boundary conditions of symmetrical loading tunnel and damping tunnel

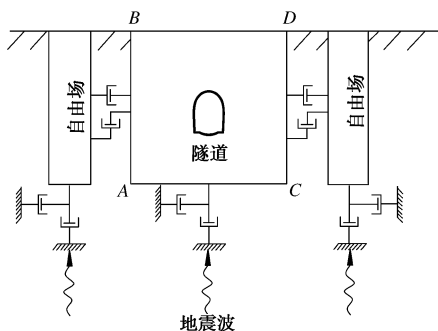


图 8 动力计算结构模型及自由场边界网格

Fig. 8 Model for seismic analysis of surface structures and free-field mesh

3.3 力学阻尼

阻尼产生主要来源于材料的内部摩擦以及可能存在的接触表面的滑动, 动力计算问题中的阻尼, 需要在数值模拟中重现自然系统在动载荷作用下的阻尼大

小。本次数值模拟计算中, 采用工程上常用的瑞雷阻尼, 通过输入最小临界阻尼比 ζ_{\min} 和最小中心频率 ω_{\min} 两个参数实现。假设动力方程中阻尼矩阵 C 与刚度矩阵 K 和质量矩阵 M 有关,

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (3)$$

式中, α , β 分别为质量比例阻尼系数和刚度比例阻尼系数。

4 地震动参数

地震波的传播方向通常可以分解为横向、纵向和竖向 3 个方向, 本次振动台试验及动力计算中主要考虑与隧道洞轴线水平垂直输入横向的地震动, 考虑地震烈度为 VIII 度, 加速度峰值 $0.3g$, 输入地震波如图 9 所示。

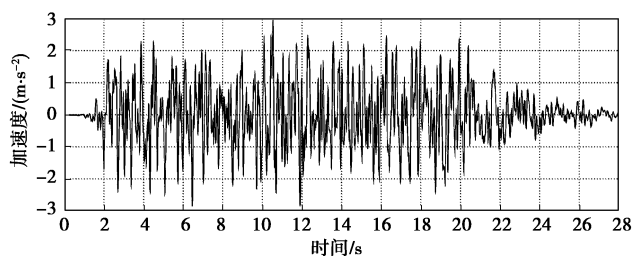


图 9 输入地震动加速度时程曲线

Fig. 9 Seismic wave of dynamic calculation

5 隧道地震响应成果分析

5.1 加速度特征

通过输入加速度峰值为 $0.30g$ 的地震动时程, 经振动台试验及数值计算得出了围岩及隧道结构的加速度反应结果, 部分计算结果见图 10。图中结果表明: 振动台模型试验与数值计算结果基本有相同的反应特征; 地震响应后隧道洞顶及围岩的加速度分布特征与输入加速度时程相似; 断层带隧道结构洞顶的加速度响应特征与相同高程处的响应特征相似, 说明隧道结构对围岩的地震动动力响应影响较小; 隧道断层带相应部位的加速度峰值较 IV、V 级围岩大, 呈现出围岩类型越差, 同一高程的加速度峰值越大, 说明加速度响应主要与围岩类型有关, 断层带与较好围岩接触部位同高程处加速度响应不同步。

图 11 为隧道在断层带、V 级围岩及 IV 级围岩中随高程变化的加速度放大系数, 从图中可以看出: 加速度随着高程的增加有明显的放大趋势, 断层带隧道围岩的加速度放大效应最明显, 表明地层加速度放大效应与围岩类型有关, 断层带围岩质量差, 在地震中有最大的加速度反应值。

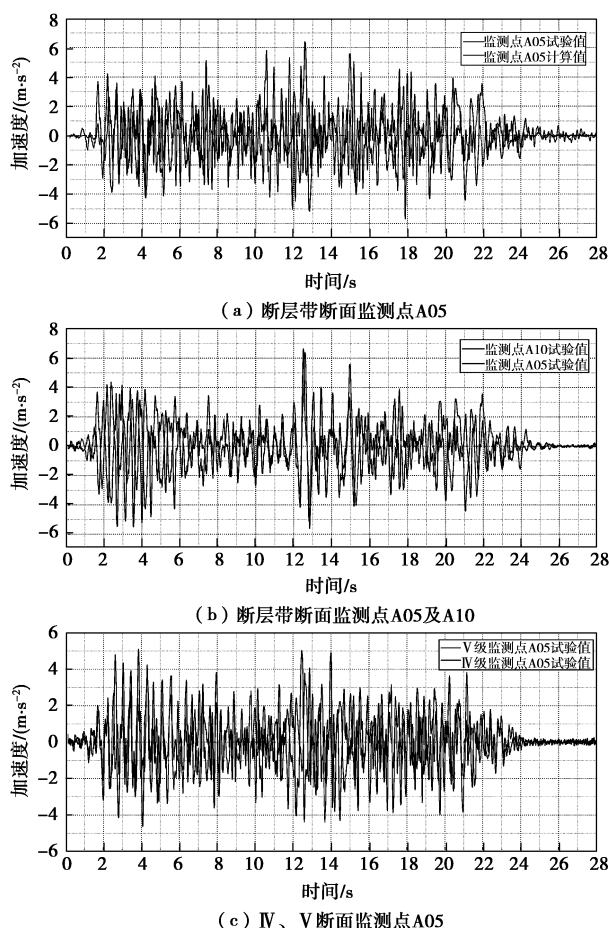


图 10 围岩段洞顶试验加速度时程

Fig. 10 Time histories of acceleration at arch crown elevation of tunnel in surrounding rock

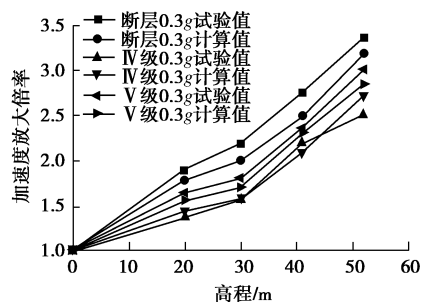


图 11 加速度放大倍率

Fig. 11 Acceleration amplification factor of earthquake excitation

5.2 围岩变形特征

图 12, 13 为试验与计算的位移时程曲线, 从图中知: 计算与试验结果具有基本相同的反应规律, 有较好的吻合性; 断层带在震动作用下产生的位移值比 IV 级围岩大, 表明隧道断层段围岩在震动作用下对位移结果反应敏感且产生较大的位移值。从图 14 断层带与 IV 级、V 围岩位移差时程曲线可知, 地震作用下, 断层破碎带与 IV 级、V 围岩均出现明显的位移差值, 且断层带与 IV 级围岩的位移差值大于 V 围岩的位移差值, 达到了 4.86 cm, 而断层带与 V 围岩的位移差值最大值为 2.82 cm, 这说明断层带与较好围岩在地震激励

过程中位移不同步, 其不同步性与断层带和较好围岩的围岩类型差别有关, 围岩差别越大, 接触面产生较大的位移差值, 反之, 则产生较小的位移差值。结果表明断层破碎带在接触部位产生错动剪切破坏的机理主要是断层带与质量较好围岩震动的不同步性, 而不同步性主要与围岩类型差别有关。

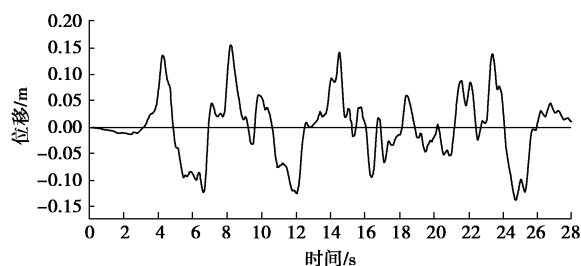


图 12 IV 级围岩 J03 试验位移时程曲线

Fig. 12 Time histories of displacement of shaking table tests at measuring point of J03 in grade IV rock

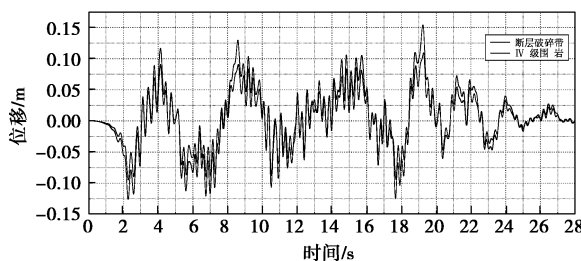


图 13 围岩对应于 J03 点计算位移时程曲线

Fig. 13 Time histories of displacement of calculation at measuring point of J03

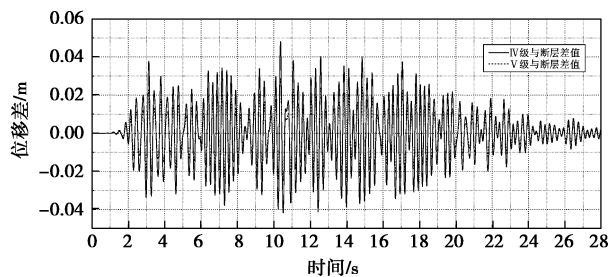


图 14 围岩与断层带位移差计算时程曲线

Fig. 14 Displacement difference of transverse earthquake excitation

5.3 内力分布特征

根据振动台模型试验监测的应变结果, 通过转换计算, 得出隧道结构在相应监测点位的内力结果。转换计算公式如下:

$$M = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E_c W / 2 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E_c b h^2 / 12 \quad (4)$$

$$N = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) E_c A / 2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) E_c b h / 2 \quad (5)$$

式中, ε_1 为内边缘应变值, ε_2 为外边缘应变值, E_c 为混凝土弹性模量, W 为截面抵抗矩, b 为宽度, h 为衬砌厚度。

由地震波特性及试验与计算结果, 得出隧道结构

在不同时刻点的内力值, 时刻点 10.68 s 及 19.34 s 内力分布图如图 15, 16, 从图中结果可知, 断层破碎带及 IV、V 围岩隧道结构横截面具有基本相同的内力分布特征, 结构承受正反向弯矩与拉压轴力循环荷载, 隧道结构左拱腰、左墙脚、右拱腰和右墙脚出现较大的弯矩和轴力分布, 其他部位则相对较小; 但断层带部位隧道结构存在较大的极值, 0.3g 工况下断层段隧道结构最大弯矩试验与计算值分别为 276.38 kN·m 和 239.51 kN·m, 而 V 围岩段结构的最大弯矩试验与计算值分别为 172.13 和 186.17 kN·m, 仅为断层带的 62.3% 和 77.73%, 所以地震中断层带隧道结构承担较大的地震荷载, 特别是断层带段隧道左拱腰(监测点 S02)、左墙脚(监测点 S04)、右拱腰(监测点 S08)和右墙脚(监测点 S06)承担最大的内力峰值, 易于产生各种破坏, 应注意抗减震设防。

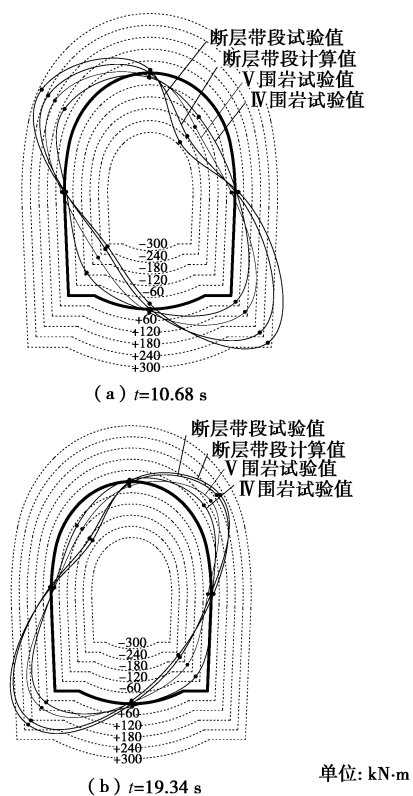


图 15 地震激励弯矩图

Fig. 15 Distribution of bending moments at 10.68, 19.34 s

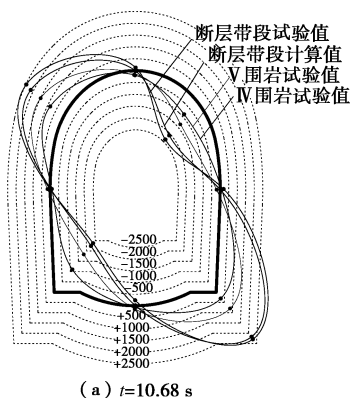
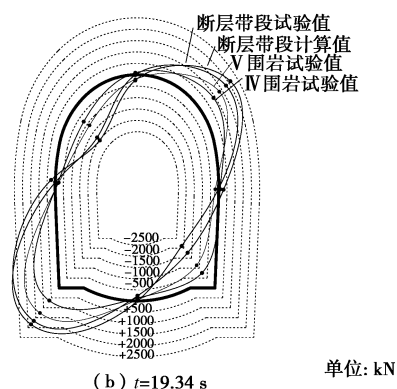
(a) $t=10.68$ s

图 16 地震激励轴力图

Fig. 16 Distribution of axial forces at 10.68, 19.34 s

6 结 论

本文通过震害资料调研、振动台模型试验及数值计算对穿断层破碎带隧道的震害特征及震害机理等进行了分析研究, 得到了如下结论:

(1) 断层破碎带对隧道的抗震性能有较大的影响, 穿越断层带隧道在地震中易于破坏且断层带段为隧道抗震破坏的控制性区域; 断层破碎带段隧道震害破坏主要以错动及各种开裂为主。

(2) 围岩的加速度响应与围岩类型有关, 断层带加速度放大效应比质量较好围岩明显, 相同高程处断层带具有最大的加速度峰值, 断层带段与质量较好围岩段加速度响应不同步, 在过渡带容易破坏。

(3) 地震动作用下隧道断层带对位移结果反应敏感且易产生较大的位移值; 断层带段隧道与质量较好围岩段在地震激励过程中位移不同步且产生明显的位移差值, 其位移差值与断层带和质量较好围岩的围岩类型有关, 围岩类型相差越大, 接触面产生的位移差值越大, 反之, 则产生较小的位移差值。

(4) 断层破碎带隧道错动破坏基本机理是地震激励过程中隧道断层带段与质量较好段围岩类型不一致, 从而产生相对的地震反应(如加速度、位移等)导致隧道错动破坏, 而相对的地震反应主要与围岩类型差别有关。

(5) 断层带段隧道结构在地震波作用下, 结构横截面承受与一般围岩段有相同的内力分布特征, 承受正反向弯矩与拉压轴力循环荷载, 共轭 45° 方向出现较大的弯矩和轴力分布等, 但断层带段隧道结构在地震波作用下呈现较大的内力峰值, 在地震过程中易于破坏。

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 - 662.

- [2] 川岛一彦. 地下构筑物的耐震设计[M]. 东京: 鹿岛出版会, 1994: 43 - 60. (KAWAMATA K. Seismic design of underground structure[M]. Tokyo: Kajima Press, 1994: 43 - 60. (in Japanese))
- [3] JSCE. The 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake[J]. Japan Society of Civil Engineers, 1996, **81**(3): 38 - 45.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 钱七虎, 何川. 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, 2009: 773 - 778. (QIAN Qi-hu, HE Chuan. Dynamic response characteristics and lessons learnt from damage of tunnels in Wenchuan earthquake[C]// Reconnaissance and Analysis of Tunnel Seismic Damages in Great Wenchuan Earthquake, 2009: 773 - 778. (in Chinese))
- [7] WANG Zheng-zheng, GAO Bo, JIANG Yuan-jun, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(2): 546 - 558.
- [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**: 133 - 150.
- [9] 李林, 何川, 耿萍, 等. 隧道穿越高烈度地震区断层带围岩地震响应分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, **35**(6): 92 - 98. (LI Lin, HE Chuan, GENG Ping, et al. Analysis for seismic dynamic responses of tunnel through fault zone in high earthquake intensity area[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2012, **35**(6): 92 - 98. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 蒋华, 蒋树屏, 王晓雯. 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. Study on transverse seismic response of highway tunnel in fault region[J]. Tunnel Construction, 2009, **29**(1): 14 - 29. (in Chinese))
- [12] 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, 2007. (WANG Zheng-zheng. Nonlinear seismic damage response of tunnel structure across fault[D]. Chengdu: Southwest JiaoTong University, 2007. (in Chinese))
- [13] SHAHIDI A R, VAFAEIAN 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.
- [14] 方林, 蒋树屏, 林志, 等. 穿越断层隧道振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2709 - 2713. (FANG Lin, JIANG Shu-ping, LIN Zhi, et al. Shaking table model test study of tunnel through fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2709 - 2713. (in Chinese))
- [15] DOWDING C H, ROZEN A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking[J]. J Geotech Eng Div, ASCE, 1978, **104**(GT2): 175 - 191.
- [16] SHARMA S, JUDD W R. Underground opening damage from earthquakes[J]. Engineering of Geology, 1991, **30**: 263 - 276.
- [17] 李林, 何川, 耿萍, 等. 浅埋偏压洞口段隧道地震响应振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2540 - 2548. (LI Lin, HE Chuan, GENG Ping, et al. Large-scale shaking table test for shallow-buried unsymmetrical tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2540 - 2548. (in Chinese))
- [18] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. 2004. (in Chinese))
- [19] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2002, **30**(7): 781 - 785. (WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, **30**(7): 781 - 785. (in Chinese))
- [20] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 89 - 97. (CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZUO Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 89 - 97. (in Chinese))
- [21] MIZUNO H, IIBA M. Shaking table testing of seismic building-pile-soil interaction[C]//Proc 8th of WCEE. San Francisco, 1984: 649 - 656.
- [22] 吴波, 李惠. 建筑结构被动控制的理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997. (WU Bo, LI Hui. Theory and application of passive control of building structures[M]. Haerbin: Harbin Institute of Technology Press, 1997. (in Chinese))