

穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析

耿萍, 吴川, 唐金良, 李林
(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 通过数值分析和振动台模型试验相结合的方法, 研究穿越断层破碎带隧道在地震荷载作用下横向内力分布和纵向动力响应特性。结果表明: 围岩条件是影响衬砌地震内力的重要因素, 围岩越差, 地震作用产生的内力越大, 其抗震性能越差; 在横断面方向, 不同围岩条件下衬砌内力均在共轭 45° 方向最大, 为隧道抗震最不利位置; 在纵断面方向, 隧道位于围岩与断层破碎带接触面时, 衬砌地震内力急剧增大; 当隧道断面沿纵向远离断层破碎带一定距离后, 其内力趋于一个稳定值。研究结果可为穿越断层破碎带隧道结构抗震设防提供参考。

关键词: 隧道工程; 断层破碎带; 横向内力分布; 纵向响应特性; 动力分析; 振动台模型试验

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)07 - 1406 - 08

ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE PROPERTIES FOR TUNNEL THROUGH FAULT FRACTURE ZONE

GENG Ping, WU Chuan, TANG Jinliang, LI Lin

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

Abstract: The cross-sectional internal force distribution and longitudinal dynamic response characteristics of tunnel through fault fracture zone under seismic load are studied with both dynamic numerical analysis and shaking table model test. Results show that: (1) The condition of surrounding rock is the important factor affecting the internal force of tunnel liner caused by earthquake. The worse surrounding rock conditions are, the more remarkable internal force caused by earthquake produce and the worse seismic performance represent. (2) In the transverse direction, the position of conjugate direction of 45° is the most unfavorable tunnel seismic position; and the maximum internal force in tunnel lining is at the position under different conditions of surrounding rock. (3) In the longitudinal direction, when the tunnel traverses the interface between surrounding rock and fault, the internal force in tunnel lining caused by earthquake increases rapidly. (4) When the tunnel is far from the fault along the longitudinal direction, the internal force of tunnel tends to be a steady value. The research results can provide reference for seismic fortification of tunnel through fault fracture zone.

Key words: tunnelling engineering; fault fracture zone; internal force distribution in cross-sectional direction; response characteristics in longitudinal direction; dynamic analysis; shaking table model test

1 引言

隧道本身具有较好的抗震性能^[1], 但当其位于断层破碎带地段时, 受断层的影响, 造成拱效应,

从而降低或瞬间失去了岩压自持力, 使隧道的线性构造发生剪切变形而破坏。这种突然的变位方式通常被限制在一个狭小的范围内, 但引起的隧道破坏是灾难性的。此外, 断层破碎带常处在地震频发区域, 强烈的地壳运动、地壳应变能的释放与调整扩

收稿日期: 2012 - 02 - 05; **修回日期:** 2012 - 04 - 09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732105, 2011CB013605); 国家杰出青年科学基金资助项目(50925830)

作者简介: 耿萍(1964 -), 女, 博士, 1984年毕业于成都科技大学水工结构专业, 现任副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。
E-mail: gengp@scjtm.gov.cn

大了地层断裂分布的范围，在围岩压力与地震动力作用下，隧道衬砌极易产生震害。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的震害情况较纵向其他部位更为严重(见图 1^[2])；1999 年台湾集集地震中，台湾中部距发震断层 25 km 范围内就有 44 座隧道受损，其中严重受损者达 25%，中等受损者 25%^[3]；2008 年 5 月汶川大地震中，洞身初期支护和二次衬砌发生严重损坏的地段也大多处于穿越断层破碎带区域，如都江堰—汶川(都汶)高速公路隧道中穿越断层破碎带的龙池隧道、龙溪隧道和龙洞子隧道等，地震中很多部位发生了衬砌开裂^[4]，严重的甚至导致错台及整体坍塌，如图 2, 3 所示。

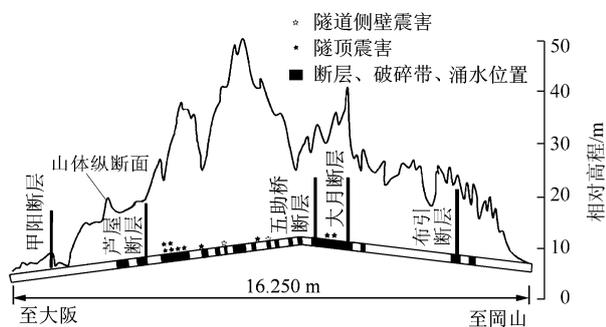


图 1 六甲隧道震害分布^[2]

Fig.1 Distribution of earthquake damage of Rokkou tunnel^[2]



图 2 龙池隧道洞内拱部纵、横向开裂^[4]

Fig.2 Longitudinal and cross-sectional cracking in Longchi tunnel^[4]



图 3 龙溪隧道衬砌发生错台^[4]

Fig.3 Liner dislocation of Longxi tunnel^[4]

针对穿越断层破碎带隧道的抗震问题，国内外

学者进行了大量的研究，取得了一些有意义的成果。熊良宵^[5]针对隧道与活断层的安全距离进行了分析和评价；王永刚等^[6]以华亭—庄浪(华庄)公路关山隧道为对象，对该隧道穿越断层破碎带的截面各部位受力及位移状态进行了记录和分析，并研究了设置减震缝对隧道抗震性能的影响；A. R. Shahidi 和 M. Vafaeian^[7]则通过对输水隧道的铰接设计来解决隧道穿越活动断层破碎带的纵向抗震问题。穿越断层破碎带隧道的抗震问题一直是隧道抗震研究的难点，其关键在于穿越断层破碎带隧道的动力响应特性不甚明确，无法采取针对性的措施进行抗震设防。我国现行的规范^[8-9]也仅从定性的方面指出：隧道位于断层破碎带时，其衬砌结构应予以加强。本文通过动力时程计算和振动台模型试验，得到隧道穿越断层破碎带时，其横断面和纵断面方向的动力响应特性，为穿越断层破碎带隧道结构抗震设防提供参考。

2 数值模拟

采用动力时程计算方法，通过分析穿越断层破碎带隧道在不同围岩条件下衬砌内力分布形态、以及隧道横断面方向和纵断面方向的内力变化规律，并结合振动台试验结果，对其动力响应特性进行系统研究。

2.1 计算方法

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行三维时程计算，LS-DYNA 是一个以显式为主，隐式为辅的非线性有限元求解器^[10]，不形成总体刚度矩阵，弹性项放在内力中，避免了反复更新刚度矩阵并求解线性方程组的计算成本。

LS-DYNA 显式动力分析采用中心差分方法，结构系统各节点在第 n 个时间步结束时刻 t_n 的加速度向量通过下式计算：

$$a(t_n) = M^{-1}[P(t_n) - F^{int}(t_n)] \quad (1)$$

式中： M 为结构本身的总体质量矩阵； $P(t_n)$ 为 t_n 时刻结构上所施加的节点外力矢量(包括分布载荷经转化的等效节点力)； $F^{int}(t_n)$ 为 t_n 时刻的内力矢量，它由下面几项构成：

$$F^{int} = \int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega + F^{hg} + F^{contact} \quad (2)$$

式中： $\int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega$ 为 t_n 时刻单元应力场等效节点力(相当于动力平衡方程的内力项)，其中， B 为应变矩阵， σ 为柯西应力矢量； F^{hg} 为沙漏阻力(为克服节点高斯积分引起的沙漏问题而引入的黏性阻力)；

$F^{contact}$ 为接触力矢量。

2.2 计算模型及参数

研究表明, 计算模型大于 5 倍洞径时, 边界的影响较小^[11-12], 隧道洞径 B 为 6.4 m(单线 140 km/h), 横向宽度取 80 m; 设置穿越的断层破碎带取为正断层, 与线路接近垂直, 倾角约 60° , 破碎带宽度为 20 m, 沿隧道纵轴方向长度为 160 m, 隧道埋深 40 m。围岩和断层破碎带均采用三维结构实体单元 solid145 模拟, 物理力学参数如表 1 所示。衬砌选用三维结构薄壳单元 shell163 模拟, 衬砌参数为: 密度 $2\,700\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 35 GPa, 泊松比 0.2。通过面与面接触选项控制断层破碎带与相邻围岩单元连接的接触界面。动摩擦因数一般小于静摩擦因数, 并考虑滑动速度及输入地震波频率对接触参数的影响^[13], 接触面的静摩擦因数取 0.455, 动摩擦因数取 0.420。计算模型如图 4 所示。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rocks

围岩类型	类型	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比
IV 级	原型	2 300	4.15	0.31
	模型	2 000	4.15×10^{-2}	0.31
V 级	原型	2 000	1.3	0.35
	模型	1 700	1.3×10^{-2}	0.35
断层破碎带	原型	1 700	0.8	0.38
	模型	1 445	0.8×10^{-2}	0.38

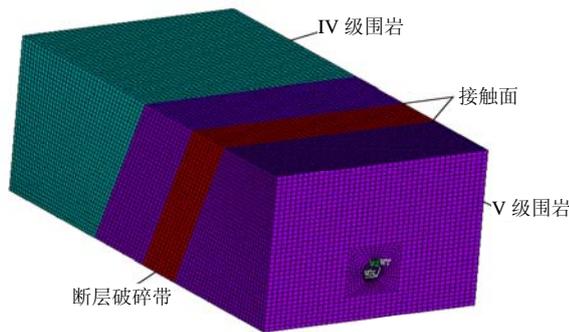


图 4 动力分析模型

Fig.4 Dynamic analysis model

2.3 力学阻尼及边界条件

采用 Rayleigh 阻尼, 动力方程中阻尼矩阵 C 与刚度矩阵 K 和质量矩阵 M 的关系为

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

式中: α , β 分别为质量比例阻尼系数和刚度比例阻尼系数。

数值模拟采用的是有限模型, 必须考虑合适的边界条件, 本文计算中在模型箱四周设置无反射边界, 即在边界之外设立与域内网格相同属性的单元以模拟无限域, 该单元与无限域边界单元之间以弹性及黏性元件相连, 以便吸收边界膨胀波与剪切波的反射能量。

2.4 输入地震动及监测方案

考虑到在地震波记录过程中不可避免地会引入噪音误差信号, 这种误差经过积分计算后将放大, 从而出现零位漂移现象, 因此将汶川地震加速度时程曲线进行基线校正后, 以区域地震基本烈度 VIII 度(对应峰值加速度 0.3 g)为例, 截取其峰值前、后 20 s 加速度时程, 输入与隧道洞轴线垂直的横向地震动, 其加速度时程曲线及相应的傅里叶变换分别如图 5, 6 所示。

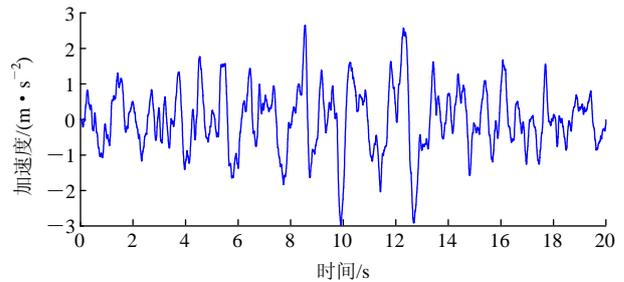


图 5 加速度时程曲线

Fig.5 Time history curve of acceleration

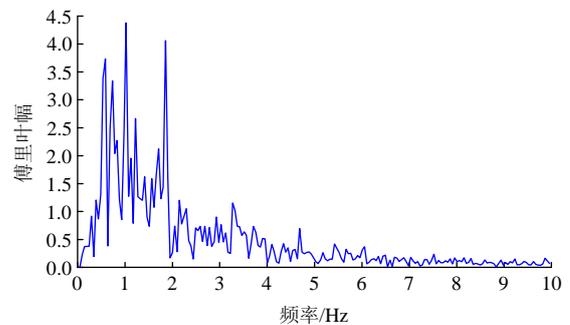
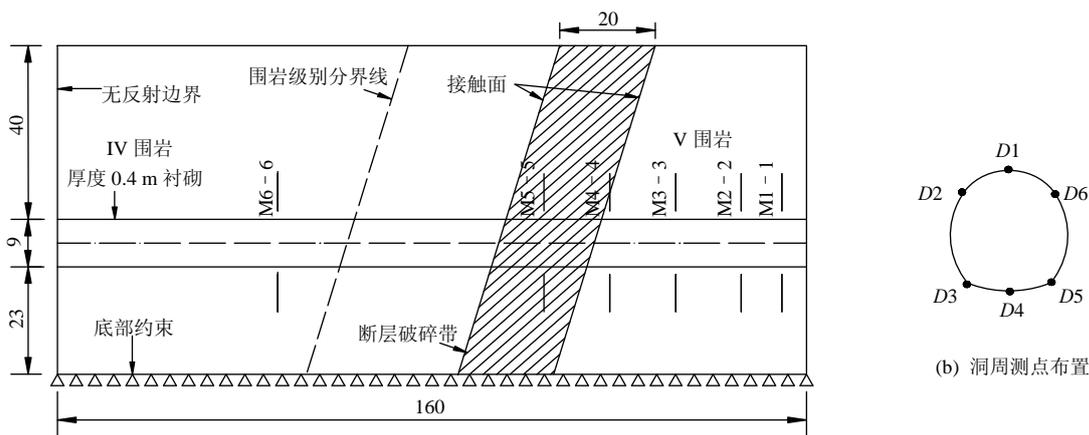


图 6 加速度时程傅里叶变换

Fig.6 Fourier spectra of acceleration

为了研究穿越断层破碎带隧道的横向和纵向动力响应特性, 选取典型监测断面和截面上具有最大内力响应值的衬砌部位(见图 7(a)), 提取地震波激振过程中衬砌结构各个选定监测截面上典型位置的内力时程。监测截面 M1 - 1~M6 - 6 距离岩体右边界实际距离分别为 4.0, 16.0, 32.0, 48.0, 64.0, 106.4 m。各监测截面上隧道洞周监测点 D1~D6 的位置如图 7(b)所示。



(a) 监测断面上测点布置

图 7 监测方案布置图(单位: m)

Fig.7 Layout of monitoring schemes(unit: m)

3 振动台试验

由于地震的随机性、土 - 结构相互作用的复杂性, 振动台模拟试验可以很好地再现地震过程, 进行人工输入地震波的控制, 是室内研究结构地震反应特性最直接的方法。它既能主动改变各种影响因素, 又可以从不同围岩级别、衬砌形式、地震波及地震烈度等多方面深入、细致地了解围岩及衬砌结构的动力响应规律, 检验理论分析和数值模拟的结果^[14-15]。

3.1 试验装置及模型箱设计

采用大型三向六自由度振动台进行模型试验^[16]。固定于振动台上的模型箱采用 2 个尺寸完全相同的刚性箱体同时振动, 以进行不同工况的比较。模型箱内壁黏贴柔性材料(聚氯苯烯泡沫板)来吸收侧向边界的地震波, 减小模型箱壁的反射效应, 且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, 模型箱如图 8 所示。

3.2 模型相似材料设计

考虑到本振动台试验模拟的隧道在地震荷载作用下的动力响应问题主要在弹性范围内, 因此满足弹性相似律即可。根据 Buckingham 定理, 在线弹性范围内各物理量可表达为

$$f(\sigma, l, E, \rho, t, u, v, a, g, \omega) = 0 \quad (4)$$

式中: σ , l , E , ρ , t , u , v , a , g , ω 分别为动应力、长度、弹性模量、密度、时间、位移、速度、加速度、重力加速度和圆频率。以长度 l 、密度 ρ 和

弹性模量 E 为基本未知量, 根据量纲分析理论, 其他未知量可以用基本未知量来表示, 式(4)可通过量纲转换表示为

$$f\left(\frac{\sigma}{E}, \frac{t}{l\sqrt{\rho/E}}, \frac{u}{l}, \frac{v}{\sqrt{E/\rho}}, \frac{a}{E/\rho l}, \frac{g}{E/\rho l}, \frac{\omega}{l^{-1}E^{0.5}\rho^{-0.5}}\right) = 0 \quad (5)$$

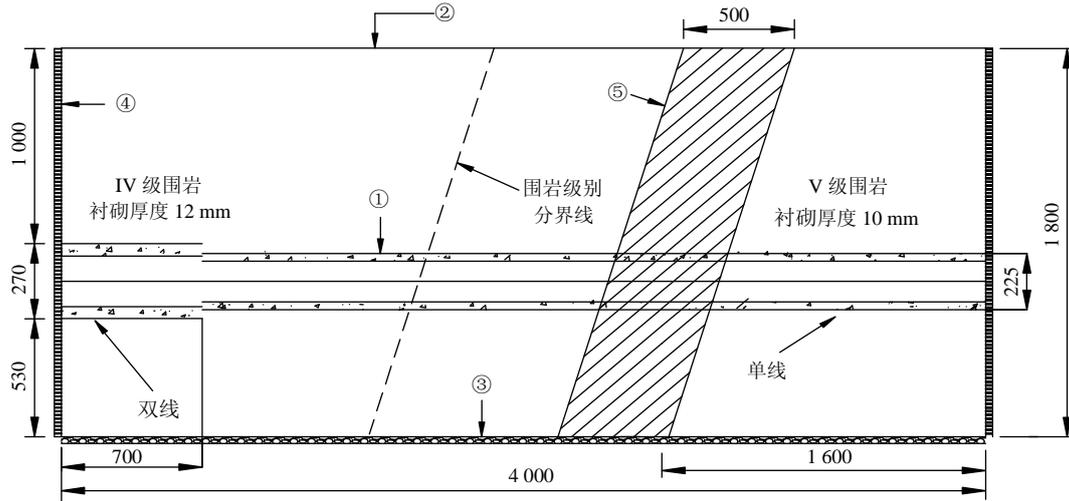
结合振动台的尺寸及仪器相关限定参数, 将模型的基础相似比选为几何比尺 1/40, 密度比尺 0.85, 弹性模量比尺 1/100, 根据弹性相似理论推导出时间、加速度和应变的相似比, 如表 2 所示。

相似材料的选择则主要考虑了围岩的黏聚力、内摩擦角、弹性模量和容重、衬砌混凝土的弹性模量等力学参数, 经配比试验, IV 和 V 级围岩及断层破碎带的相似材料采用一定比例的重晶石粉、细石英砂、机油和粉煤灰等的混合物进行模拟; 通过多组石膏制样的弹性模量测试及室内配合比试验, 本试验采用石膏 : 水 = 1.1 : 1 的模型模拟隧道衬砌。

3.3 加载及监测方案

对试验隧道埋深 1.0 m(实际埋深 40 m), 单线 140 km/h(实际洞径 $B = 6.4$ m)隧道沿横向输入峰值加速度为 0.3 g 的汶川地震波(见图 5)进行振动台模型试验研究。

与数值计算模型的监测截面相对应, 同时考虑隧道在横向地震作用下, 隧道结构横截面内力基本呈反对称分布^[17], 试验仅在衬砌结构对称轴以左的典型位置内、外两侧黏贴应变片进行监测, 应变片的栅长为 3 mm×2 mm, 型号为 BCL120 - 10AA, 并设置温度补偿片以减小测试误差。应变片采用 1/4



(a) 模型箱示意图(尺寸单位: mm)



①—隧道衬砌结构; ②—模型箱体; ③—底部碎石; ④—聚氯苯烯泡沫吸能边界; ⑤—断层破碎带
(b) 模型箱实体图

图8 模型箱

Fig.8 Model box

表2 模型试验物理量相似比

Table 2 Similarity ratios of physical quantities for model test

类型	物理量	相似比表达式	相似比
基础相似比	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
导出相似比	时间	$C_t = \sqrt{\frac{C_\rho}{C_E}}$	0.23
	加速度	$\frac{C_E}{C_\rho C_l}$	0.47
	应变	ϵ_m / ϵ_p	1.00

注: 下标“m”, “p”分别表示模型与原型。

拱中心处, 衬砌结构各监测点的应变值利用动态应变仪采集, 如图9所示。

为了有效地利用仪器, 同时考虑多种工况下试验设备的输出限制, 试验方案根据不同围岩条件布置监测断面 S2-2, S3-3, S4-4, 相同围岩条件下, 根据与断层的距离布置监测断面 S1-1, S2-2, S3-3, 如图10所示。

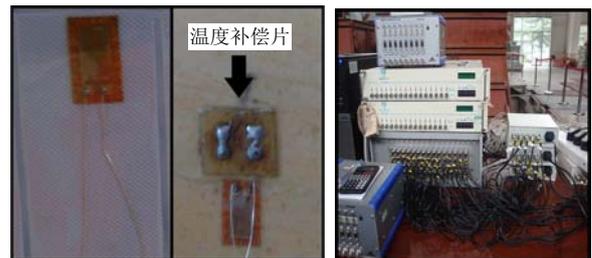


图9 应变片(左)及动态应变仪(右)

Fig.9 Strain gauge(left) and dynamic strain indicator(right)

桥接桥方式分别黏贴在衬砌拱顶、拱肩、墙角及仰

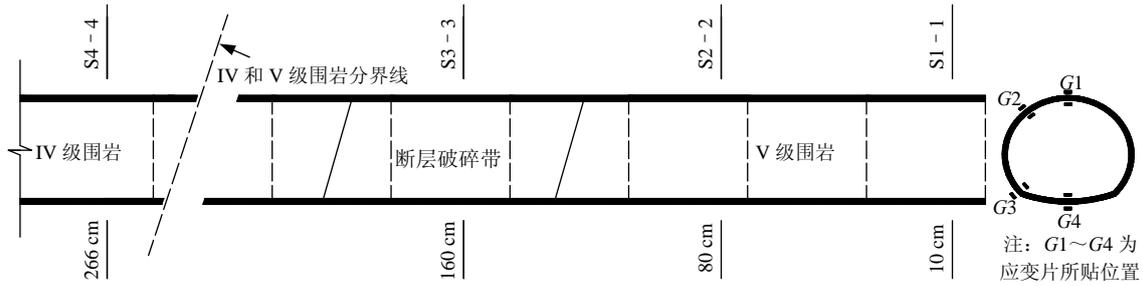


图 10 试验监测方案图

Fig.10 Test monitoring scheme

4 结果分析

通过动力时程计算和振动台模型试验，对图 7 和 10 所示监测断面各典型位置进行分析，换算得到 IV, V 级围岩条件下，原型隧道横断面和纵断面方向数值模拟和振动台模型试验的结果，由此揭示隧道结构的内力分布规律。

4.1 隧道横向内力分布规律

数值模拟计算的是衬砌横向监测断面 M3 - 3, M5 - 5, M6 - 6(见图 7)的内力时程，提取激振过程中的隧道衬砌监测点 D1~D6 的内力峰值，选择衬砌截面对称轴左边的监测值，绘出不同围岩条件下衬砌结构控制点的内力包络图，如图 11 所示，图中，弯矩以衬砌内部受拉为正，轴力以衬砌受拉为正，下同。

振动台模型试验监测方案与数值模拟一致，在地震波激振过程中，获得衬砌监测断面 S2 - 2~S4 - 4(见图 10)上监测点 G1~G4 内、外边缘的应变时程。为了求得衬砌的内力响应，在线弹性阶段，弯矩 M 和轴力 N 时程计算公式分别如下：

$$M = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E_c W / 2 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E_c b h^2 / 12 \quad (6)$$

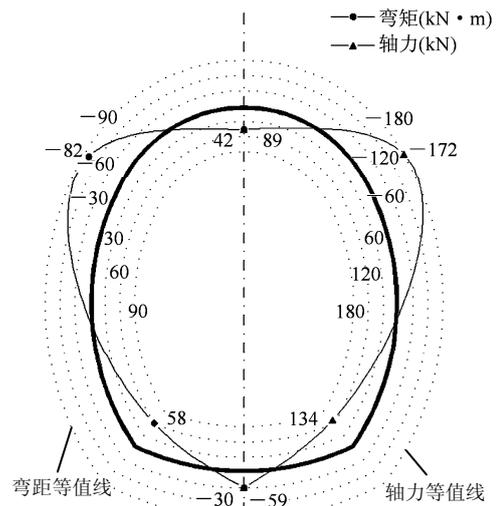
$$N = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)E_c A / 2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)E_c b h / 2 \quad (7)$$

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， A 为截面面积。

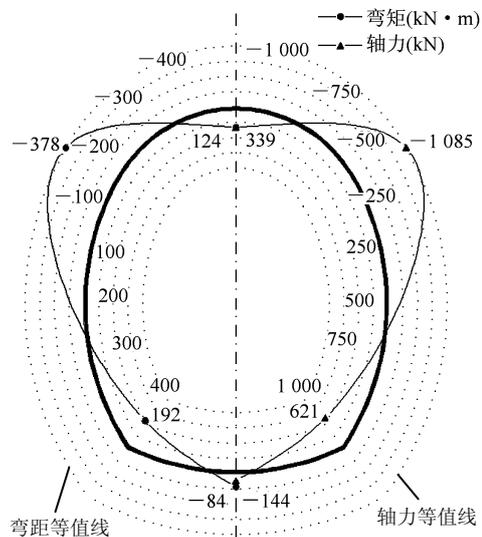
根据式(6)，(7)，计算出衬砌弯矩和轴力，提取内力的峰值，得到的内力包络图如图 12 所示。图 11, 12 中，为了同一幅图中表示的信息尽量多，各图中左半部分表示弯矩，右半部分表示轴力。

图 11 和 12 表明：围岩条件是影响衬砌内力的的重要因素，围岩越差，衬砌在地震作用下的内力响应值越大，抗震性能越差；隧道结构处于断层破碎带区域时，衬砌地震内力响应值明显大于处于 IV

和 V 级围岩处的内力响应值，但截面内力分布规律一致，衬砌共轭 45° 方向为隧道抗震最不利的位置；断层破碎带处衬砌内力的计算峰值出现在拱腰处(测点 D2)，其弯矩和轴力分别为 -378 kN·m 和 -1 085 kN；断层破碎带处衬砌内力的模型试验峰值也出现在拱腰处(测点 G2)，其弯矩和轴力分别为 -397 kN·m 和 -1 634 kN；振动台试验结果与动力时程计算结果的规律一致。



(a) IV 级围岩(M3 - 3 断面)



(b) 断层破碎带(M5 - 5 断面)

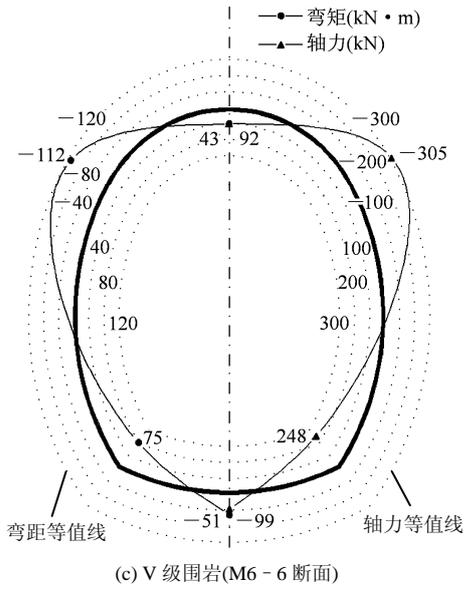


图 11 数值计算得出的衬砌内力包络图(0.3 g)
Fig.11 Internal force envelopes from numerical simulation(acceleration of 0.3 g)

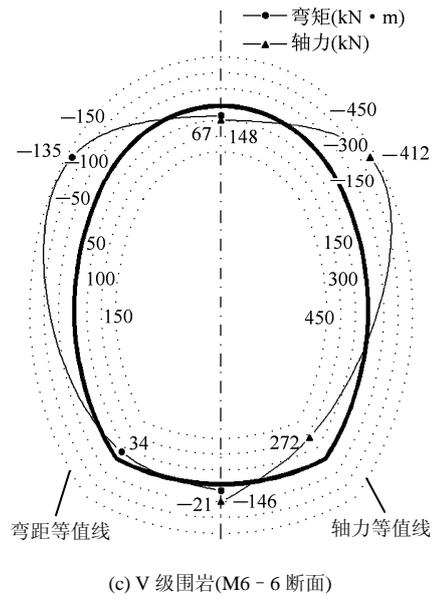
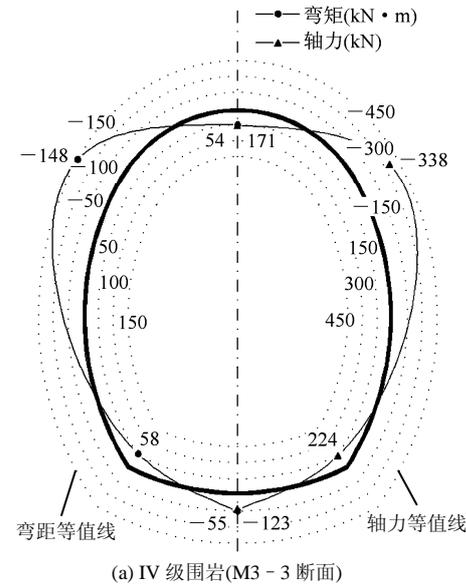
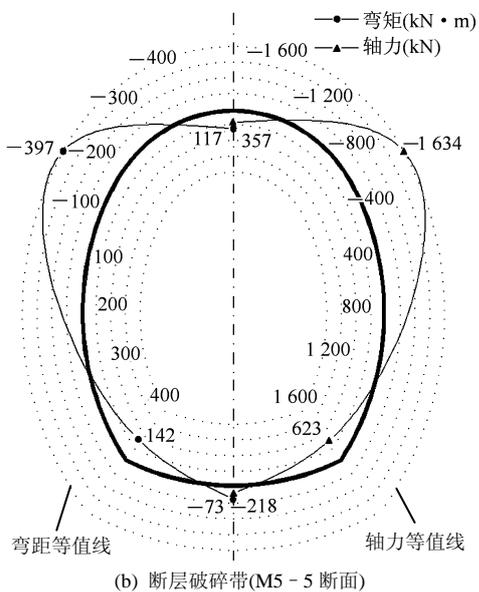


图 12 振动台试验得出的衬砌内力包络图(0.3 g)
Fig.12 Internal force envelopes of lining from shaking table test(acceleration of 0.3 g)



(a) IV 级围岩(M3 - 3 断面)

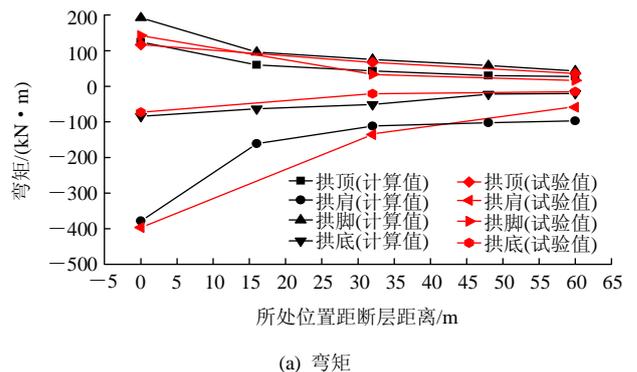


(b) 断层破碎带(M5 - 5 断面)

4.2 沿隧道纵向内力响应规律

数值模拟计算的是衬砌监测断面 M1 - 1~M5 - 5(见图 7)的典型监测点 D1~D6 处的内力时程,同时,监测与数值计算相对应振动台模型试验监测断面 S1 - 1~S3 - 3(见图 10)的控制点 G1~G4 处的应变结果,按式(6),(7)计算获得相应的内力时程。根据数值计算结果和试验数据,提取相同围岩条件下距断层不同位置处衬砌结构控制点的内力峰值,得到了沿隧道纵向衬砌的内力响应规律,如图 13 所示。

从图 13 可以看出:在围岩与断层破碎带接触面处,衬砌各控制点的内力值都远大于距离断层破碎带较远的相应点内力值;距离断层破碎带越远,衬砌的内力值越小;当截面远离断层破碎带一定距离后,其变化趋于平缓,即沿隧道纵向截面的内力值收敛于一个稳定值;振动台试验与动力计算结果有相似的纵向内力分布规律。



(a) 弯矩

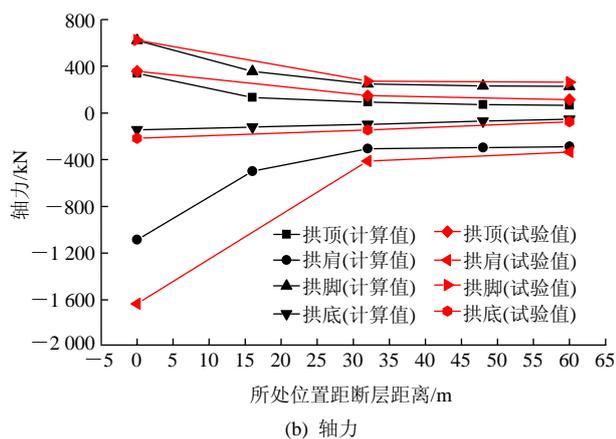


图 13 衬砌典型位置的内力与距断层距离的关系

Fig.13 Relationship between internal force of lining's typical position and distance to fault

5 结 论

通过数值计算与振动台模型试验, 分析穿越断层破碎带隧道横向和纵向的动力响应特性, 得出如下主要结论:

(1) 围岩条件是影响衬砌内力的因素, 断层破碎带处衬砌内力响应值远大于 IV 和 V 级围岩处的内力响应值; 围岩越差, 地震引起的相应位置内力越大, 抗震性能越低。

(2) 隧道处于不同围岩条件下, 其横截面内力分布规律一致, 内力峰值均在共轭 45° 方向出现, 即衬砌共轭 45° 方向为隧道抗震最不利位置, 应注意设置加筋补强等措施。

(3) 隧道位于破碎带处, 特别是位于围岩与断层破碎带接触面时, 其典型位置的内力值都远大于距离断层破碎带较远处相应位置的内力值; 当隧道衬砌截面远离断层一定距离后, 隧道纵向截面的内力值收敛于一个稳定值; 需要通过更全面的研究提出穿越断层破碎带隧道合理的抗震设防长度。

参考文献(References):

[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] Japan Society of Civil Engineers. The 1996 Hyogoken-Nambu earthquake[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 1996, 81(3): 38 - 45.

[3] 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.

[4] 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[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742 - 750.(in Chinese))

[5] 熊良育. 活断层地区隧道抗震问题的数值模拟研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2006.(XIONG Liangxiao. The study on numerical simulation of tunnel anti-seismic in active fault zone[M. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.(in Chinese))

[6] 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.(in Chinese))

[7] 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.

[8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50111—2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50111—2006 Code for seismic design of railway engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.(in Chinese))

[9] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ 044—89 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ 044—89 Code for seismic design of highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1989.(in Chinese))

[10] 尚晓江, 苏建宇, 王华峰, 等. ANSYS LS-DYNA 动力分析法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 10 - 11.(SHANG Xiaojiang, SU Jianyu, WANG Huafeng, et al. Dynamic analysis and engineering example in ANSYS LS-DYNA[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 10 - 11.(in Chinese))

[11] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 软土地铁车站结构的振动台试验[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 7 - 11.(YANG Linde, JI Qianqian, ZHENG Yonglai, et al. Shaking table test on metro station structures in soft soil[J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(1): 7 - 11.(in Chinese))

[12] 陈国兴, 王志华, 左 熹. 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 Guoxing, WANG Zhihua, 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))

[13] 马良筠, 高安泽, 刘克远. 岩石某些力学参数的试验研究[J]. 力学学报, 1991, 23(4): 507 - 512.(MA liangyun, GAO Anze, LIU Keyuan. Experimental study on some mechanical parameters of rock[J]. Acta Mechanica Sinica, 1991, 23(4): 507 - 512.(in Chinese))

[14] GOTO Y, MATSUDA Y, EJIRI J, et al. Influence of distance between juxtaposed shield tunnels on their seismic responses[C]// Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. [S.l.]: [s.n.], 1988: 569 - 574.

[15] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(4): 247 - 293.

[16] 西南交通大学. 铁路工程结构物抗震设计标准与方法研究——铁路隧道工程抗震设计标准与方法研究报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2011.(Southwest Jiaotong University. The study of structures seismic design standards and methods in Railway engineering—report of the study of structures seismic design standards and methods in railway engineering[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.(in Chinese))

[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): 2 540 - 2 548.(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): 2 540 - 2 548.(in Chinese))