

# Study on Dynamic Response of Different Surrounding Rock Levels on Both Sides of Tunnel Fault Fracture Zone

Junpeng Zhu

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

**Abstract:** In this paper, based on the explicit difference method of a compound line railway tunnel, the seismic dynamic response numerical simulation is carried out on the stiffness and the different width of different surrounding rock on the two sides of the fault-crushing zone based on the explicit difference method, and the width of the different crushing belt is analyzed to be under the action of the earthquake, The displacement, velocity and stress response of the control points are monitored in the tunnel lining with different stiffness ratio of the surrounding rock at both sides. The data analysis shows that with the increase of the stiffness ratio of the rock mass on both sides of the fault-breaking zone, the stress of the lining under the action of the earthquake is increased sharply, and the tunnel is damaged under the condition of the earthquake intensity level and the stiffness ratio of the rock mass on both sides. The results of these studies And can provide reference for the structural design of the tunnel anti-seismic structure at the fault-breaking belt.

**Keywords:** Fault broken zone; Mountain tunnel; Dynamic response; Stiffness

## 隧道断层破碎带两侧不同围岩级别动力响应规律研究

祝俊鹏

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 本文以某复线铁路隧道为工程背景, 采用 FLAC3D 软件基于显式差分方法, 对断层破碎带两侧不同围岩刚度及不同宽度进行地震动力响应数值模拟研究, 分析得出不同破碎带宽度在地震作用下, 两侧不同围岩刚度比的隧道衬砌各监测断面控制点的位移、速度及应力响应规律。数据分析表明: 随着断层破碎带两侧岩体刚度比值的增大, 衬砌在地震作用下应力急剧增加, 在地震强度等级和两侧岩体刚度比达到一定条件下隧道发生破坏。这些研究成果, 可以为断层破碎带处隧道抗震结构设计提供参考。

**关键词:** 断层破碎带; 山岭隧道; 动力响应; 刚度

### 1 引言

进入 21 世纪我国地震灾害频发, 随着我国一带一路战略的深入发展, 为满足交通运输的需要, 山区交通生命线提升改造、新线及复线建设逐渐提上日程, 在公路铁路的建设改造过程中, 不可避免的会遇到断层破碎带。臧万军等<sup>[1]</sup>查阅汶川地震四川省内山岭隧道震害资料, 通过建立地震风险模糊综合评价模型进行分析表明, 断层与软弱破碎带的风险因素权重较高仅次于地震波的传播方向。综合文献研究分析, 国内外学者<sup>[2]</sup>对隧道洞身段的动力响应研究较多, 而针对两侧岩体刚度比的隧道的动力响应规律研究较少<sup>[3]</sup>, 难以为工程建设提供合理的依据。

本文以实际工程为背景采用 FLAC3D 软件基于显式差分方法, 对断层破碎带两侧不同岩体刚度隧道进行动力响应分析, 得出隧道衬砌纵向和横向地震响应一般规律; 最后分析得到在那种刚度比情况下隧道衬砌发生破坏。

### 2 工程背景

本某隧道位于重庆市彭水县境内, 线路走向自西向东, 为现有铁路隧道复线, 隧道依次穿越白果坪正断层、桐子岭逆断层及桐子岭正断层, 隧址区受断层破碎带的影响, 以破碎岩、角砾岩为主局部呈泥糜化状, 物探解译显示断层破碎带位置隧道洞身岩体破碎较严重。本文以跨桐子岭正断层破碎带段隧道进行研

究，隧道断面形式为曲墙复合式衬砌，净空高 8.4m，净宽 6.1m，初支厚度为 0.25m，二次衬砌厚度为 0.5m。鉴于隧道穿越断层破碎带类型较多，又具备发生 7 级地震的概率，针对断层破碎带两侧岩体不同刚度比的研究很有必要。

### 3 动力计算模型及数值模拟条件

#### 3.1 计算模型

选取隧道 YDK216+550-YDK216+710 段利用

Table 1. Physical and mechanical calculation parameters under different working condition

表 1. 不同工况下物理力学计算参数

围岩类型	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	弹性 模量 (GPa)	泊松比	摩擦角 (°)	粘聚力 (MPa)
完整岩体 1	22	4	0.32	30	0.2
完整岩体 2	23	6	0.3	35	0.5
完整岩体 3	23.5	8	0.25	40	0.7
完整岩体 4	24	10	0.25	42	0.9
完整岩体 5	24.5	12	0.25	45	1
上下盘破碎带	20	2	0.35	35	0.05
初期支护	23.5	15	0.25	/	/
C35 二次衬砌	24.5	32.5	0.2	/	/

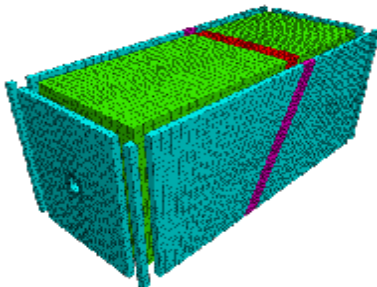


Figure 1. Numerical simulation analysis model  
图 1. 数值模拟分析模型

#### 3.2 人工边界

在 FLAC3D 计算分析中可以采用 Raleigh 阻尼，Raleigh 阻尼是一种正交阻尼，简单、方便。为了减小系统的固有振动的振幅，计算时可以将阻尼矩阵假设成为 C、刚度矩阵假设为 K 以及质量矩阵假设为 M:

FLAC3D 数值模拟建模分析，模型横向长度取 60m，竖向长度取 80m，纵向长度取 160m，断层破碎带倾角 75°，宽度分别为 10/20/40m，共三个模型，对 15 个工况进行数值模拟分析。围岩采用实体单元模拟，衬砌选用结构单元中的壳单元模拟。模型四周边界采用自由场边界，围岩采用 Mohr-Coulomb 屈服准则及弹塑性增量本构关系；衬砌采用弹性本构关系。此处仅列出不同围岩刚度比的围岩参数（见表 1），数值模拟分析模型如图 1 所示。

$$C = aM + bK \quad (1)$$

上式中 a 和 b 分别为质量和刚度比例阻尼系数。

在有限元数值模拟无限区域动力分析中，为了模拟较真实的现实情况，在模型四周施加自由场边界以减小边界效应对计算结果的影响，在底部施加静态边界条件以施加动力荷载。

#### 3.3 地震动参数

本文数值模拟计算选用经滤波及基线校正后的 0.1g 的 El-Centro 波对隧道进行动力响应研究<sup>[4]</sup>，加速度曲线积分校正及傅里叶变换后可知，地震波能量主要集中在前 20s 内，因此选取前 20s 进行计算，时程曲线如图 2 所示。

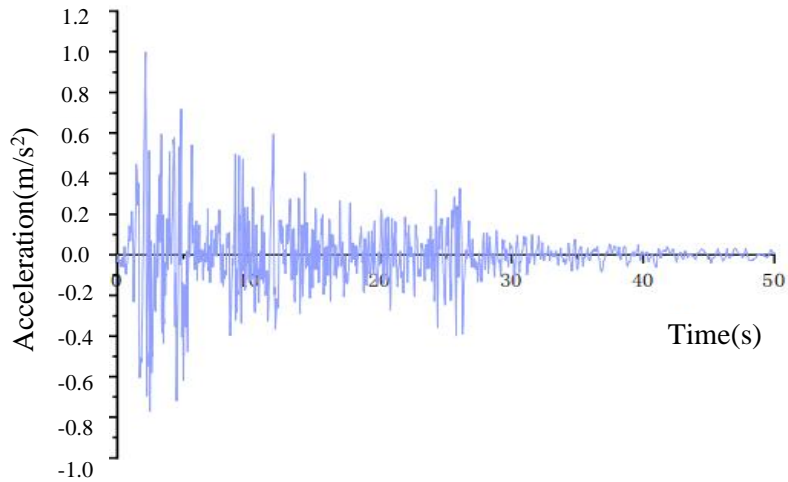


Figure 2. Input seismic wave acceleration time history curve  
图 2. 输入地震波加速度时程曲线

### 4 动力计算结果分析

沿隧道纵向选取 10 个断面进行监测，因 FLAC3D 软件监测点为模型中壳单元的节点<sup>[5]</sup>，所以监测点的布设与网格的划分关系密切。为了取得更好的监测数据，在隧道监测断面附近监测点加密，隧道横向监测点分别为拱顶、左右拱腰及拱底。

选取 10 个监测断面的监测点数据进行分析，通过 FLAC3D 软件可以得到不同监测点衬砌内力时程曲线，根据时程曲线提取在地震加速度为 0.1g 断层破碎带宽度为 10m、20m、40m，两侧围岩刚度比 2:1 的情况下各监测断面拱顶的第一、三主应力及弯矩最大值的变化情况。鉴于篇幅所限仅列出刚度比为 2:1 时应力及弯矩的变化情况(见表二)。(注：第一、三主应力及弯矩均取绝对值进行比较)

#### 4.1 应力响应结果分析

Table 2. Bending moment and peak principal stress of each monitoring section  
表 2. 各监测断面弯矩及主应力峰值

断层破碎带宽度/m	各监测断面隧道轴向位置/m	弯矩 M (kN · M)	第一主应力 (MPa)	第三主应力 (MPa)
10	50	2.1	3.04	0.14
	70	2.4	3.08	0.16
	80	3.3	3.48	0.24
	90	2.6	3.18	0.18
	110	2.2	3.11	0.15
20	50	2.4	4.02	0.19
	70	2.6	4.10	0.21
	80	3.8	4.56	0.33
	90	2.9	4.21	0.24
	110	2.5	4.18	0.21
40	50	2.5	4.21	0.22
	70	2.8	4.42	0.29
	80	4.1	4.89	0.42
	90	3.2	4.45	0.33
	110	2.8	4.28	0.26

数据分析表明第一、三主应力在断层破碎带附近拱顶应力峰值发生突变,在断层破碎带中间位置达到峰值,随着断层破碎带宽度的增加,应力峰值逐渐增大但增幅不明显。弯矩峰值的变化情况与应力的变化情况相似。随着隧道断层破碎带两侧围岩刚度比值的增大,断层破碎带处第一、三主应力峰值较良好段差值逐渐增大,隧道断层破碎带处应力响应影响范围也逐渐增大,两侧刚度比值达到3时隧道破碎带处衬砌达到强度极限发生横向剪切破坏,两侧刚度比值达到6时,破坏情况最为严重。

随着断层宽度的增加拱顶、拱腰、拱底应力峰值沿隧道轴向范围逐渐增大;两侧的刚度比值小得围岩比刚度比值大的影响范围大,这表明破碎带两侧围岩等级越差抗震设防段越大,但抗震设防范围与刚度小时差别不大。

#### 4.2 位移响应对比分析

对隧道各监测断面拱顶、拱腰、拱底的位移时程曲线对比分析可知,在不同破碎带宽度及两侧不同围岩刚度比的隧道垂直与水平方向位移时程曲线与0.1g地震位移曲线相似,但具有一定的滞后效应。对不同工况下的位移时程曲线分析可知越靠近断层破碎带位置位移越大,在破碎带中心位置位移达到峰值;沿隧道纵向衬砌位移,断层上盘各监测断面的位移比断层下盘位移稍大,可见断层破碎带上盘抗震设防强度和范围应比下盘大。在两侧围岩刚度一定时,随着断层破碎带宽度的增加,隧道破碎带处各方向的位移明显增大,垂直方向的位移明显大于水平方向的位移,远离破碎带隧道垂直方向的位移随破碎带宽度的变化不明显。断层破碎带宽度一定时,随着两侧围岩刚度比值的增大,隧道破碎带处衬砌的位移滞后效应逐渐增大,拱顶处最为明显,拱腰、拱底次之。同时,随着两侧围岩刚度的增大,隧道衬砌水平方向位移差值逐渐减小,而垂直方向位移逐渐增大。

## 5 总结

通过对不同破碎带宽度及不同围岩刚度比条件下的隧道动力响应进行数值模拟计算分析,得出以下结论。

(1) 在断层破碎带两侧岩体刚度比一定时,随着断层破碎带宽度的增加,衬砌水平方向位移变化不大,垂直方向位移明显增大;断层上盘位移明显大于下盘,在抗震设防上盘应重点考虑。

(2) 当断层破碎带宽度一定时,随着断层破碎带两侧围岩刚度比值的增大,断层破碎带处应力及弯矩峰值逐渐增大,且远远大于常规段,而影响范围没有明显增大。

## References (参考文献)

- [1] Zang Wanjun, Wang Zhengzheng. Fuzzy comprehensive evaluation and analysis of earthquake damage law and seismic risk in cave section of mountain tunnel. *Modern Tunnel Technology*. 2014, 51(01), 45.  
臧万军, 王峥峥. 山岭隧道洞身段震害规律与地震风险模糊综合评价分析. *现代隧道技术*. 2014, 51(01), 45-53.
- [2] Geng Ping, Wu Chuan, Tang Jinliang, Li Lin. Analysis of dynamic response characteristics of tunnel through fault fracture zone. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2012, 31(07), 1406-1413.  
耿萍, 吴川, 唐金良, 李林. 穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析. *岩石力学与工程学报*. 2012, 31(07), 1406-1413.
- [3] Sui Chuanyi, Gao Bo, Shen Yusheng, Wang Jianxi, Xinchun Lei. Shaking table test analysis of seismic structure performance of cross-fault tunnel. *Journal of Railways*. 2017, 39(11), 124.  
隋传毅, 高波, 申玉生, 王建西, 信春雷. 穿越断层隧道抗震结构性能振动台试验分析. *铁道学报*. 2017, 39(11), 124-130.
- [4] Liu Yun, Lai Jie, Xin Jianping, Li Xiudi, Xing Rongjun. Dynamic comparative experimental study on seismic response law of cross-fault tunnel. *Geotechnical mechanics*. 2019, (12), 1-10.  
刘云, 赖杰, 辛建平, 李秀地, 邢荣军. 穿越断层隧道地震响应规律动力对比试验研究. *岩土力学*. 2019, (12), 1-10.
- [5] Tang Yinfei. Study on seismic dynamic response and anti-shock measures in fault fracture zone of mountain tunnel. Southwest Jiaotong University. 2018.  
唐垠斐. 山岭隧道断层破碎带地震动力响应规律及抗减震措施研究. 西南交通大学. 2018.