

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430053

# 断层场地非线性驱动的跨断层隧道地震 响应机制研究\*

黎若寒<sup>1</sup>, 袁勇<sup>2</sup>, 赵旭<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学未来土木科技研究院, 重庆 400074; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为揭示断层场地非线性特征对跨断层隧道地震响应机制的影响, 通过振动台模型试验系统分析断层场地非线性特征驱动下隧道结构的动力响应规律。结果表明: 断层场地呈现显著三维空间响应特性, 其地震波反射折射效应导致高频成分放大并产生额外振动分量, 且随地震强度增大表现出剪切模量退化与阻尼增强的非线性行为; 跨断层隧道加速度响应呈现空间非均质分布特征, 断层交界面区域响应最为剧烈, 其频谱特性受场地效应与地震动输入共同控制; 隧道结构以剪切变形为主导破坏模式, 断层区域变形量级显著高于围岩区段, 节段间差异变形随地震强度增大呈非线性增长; 衬砌损伤演化具有显著空间关联性, 裂缝沿断层界面呈斜向分布, 结构动力特性参数变化有效表征了刚度退化过程。研究成果揭示了断层场地非线性驱动下隧道震害机理, 为跨断层隧道抗震设计提供了理论依据。

**关键词:** 跨断层隧道; 断层场地; 地震响应; 振动台试验; 非线性响应

**中图分类号:** U452.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1434-10

## Study on Seismic Response Mechanism of Cross-fault Tunnels Driven by Fault Site Nonlinearity

LI Ruohan<sup>1</sup>, YUAN Yong<sup>2</sup>, ZHAO Xu<sup>3</sup>

(1. Institute of Future Civil Engineering Sciences and Technology, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

**Abstract:** To reveal the influence of nonlinear characteristics of fault sites on the seismic response mechanism of cross-fault tunnels, the dynamic response of tunnel structures under the driving effect of site nonlinearity was systematically analyzed using shaking table model tests. The results indicated that the fault site exhibited a pronounced three-dimensional spatial response, where the reflection and refraction of seismic waves amplified high-frequency components and induced additional vibration components. Moreover, as seismic intensity increased, the site demonstrated nonlinear behavior, including shear modulus degradation and enhanced damping. The acceleration responses of the cross-fault

\* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-07-04

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2302103)、国家自然科学基金项目(51778487)资助

作者简介: 黎若寒(1993—), 男, 讲师, 博士。主要从事地下结构抗震研究。E-mail: liruohan@cqjtu.edu.cn

tunnels were characterized by spatially heterogeneous distribution, with the most pronounced response concentrated at the fault interface zone, whose spectral characteristics were jointly controlled by site effects and seismic input. Tunnel damage was dominated by shear deformation, with deformation magnitudes in the fault zone significantly exceeding those of the surrounding rock, and the inter-segment differential deformation increasing nonlinearly with seismic intensity. Lining damage evolution exhibited strong spatial correlation, with cracks tending to propagate obliquely along the fault interface. Variations in structural dynamic properties effectively reflected the stiffness degradation process. These findings reveal the seismic damage mechanism of tunnels under nonlinear fault site effects, thereby providing a theoretical basis for the seismic design of cross-fault tunnels.

**Keywords:** cross-fault tunnels; fault site; seismic response; shaking table test; nonlinear response

## 0 引言

震害调查表明,隧道穿越断层的区域极易遭受地震破坏<sup>[1-3]</sup>。因此,针对跨断层隧道的抗震分析对保障隧道结构稳定性与安全性具有重要工程意义。断层场地的典型特征表现为坚硬围岩包围的低剪切波速断层破碎带,其交界面会导致地震波反射、折射、波形叠加及转换等现象<sup>[4]</sup>。这些断层非线性特征会导致断层场地相比于均质场地地震响应更为复杂。

近年来,学界围绕断层场地对隧道地震响应的影响机制开展了系列研究,研究手段从二维数值模拟<sup>[5]</sup>逐步扩展至三维精细化建模<sup>[6]</sup>。就局部场地而言,断层往往呈现复杂且规模宏大的地质构造特征,这对数值模拟的边界条件与地震动输入提出了严峻挑战。已有研究通过复现跨断层隧道震害案例<sup>[7-8]</sup>或开展参数化分析<sup>[9-11]</sup>,初步探索了跨断层隧道的地震响应规律。断层破碎带的场地放大效应显著:由于波阻抗差异,破碎带会显著放大地震动峰值和局部频谱成分,导致输入到隧道结构的地震能量增强<sup>[12]</sup>;隧道结构响应的局部化特征显著,断层与围岩的刚度突变,导致隧道衬砌的内力和变形在交界处急剧增大,形成应力集中区<sup>[13]</sup>;对关键参数的影响规律研究表明,断层宽度、倾角、围岩与破碎带的刚度比是控制隧道响应的主导因素<sup>[9,14-15]</sup>。然而,尽管上述研究阐明了隧道的部分响应规律,但对震害机理的认知仍存在明显局限。现有成果多集中于分析隧道的宏观响应,对断层场地自身的复杂动力特性关注不足。数值模型在处理断层破碎带时,对其非线性动力行为的简化假定使得模型难以精确捕捉地震能量在断层介质中的耗散与传

递过程。因此,当前对于断层复杂的非线性特征是如何驱动隧道损伤累积和渐进破坏的内在物理机制,认知尚不清晰。振动台试验因其能够更真实反映土-结构相互作用特征,是揭示断层场地效应及其对跨断层隧道地震响应影响机制的理想研究手段。

因此,本研究针对断层场地非线性特征以及跨断层隧道地震响应,开展振动台模型试验,针对不同超越概率下断层场地的非线性特征进行分析,并对断层场地非线性特征驱动下的跨断层隧道加速度响应、变形响应、破坏模式进行研究。研究成果可为跨断层隧道抗震设计提供参考。

## 1 振动台试验设计

### 1.1 试验平台

本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的多功能振动台系统上进行。该振动台系统由4个振动台与2个试验基槽组成,其中各台面尺寸均为4 m×6 m。选取承载能力为30吨的台面作为试验台面,其主要技术参数见表1。

表1 振动台主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of shaking table

技术参数	边台(A和D)
台面尺寸/m	6×4
最大加速度时承载能力/t	30
自由度	水平X向、Y向、转动
额定行程/mm	X、Y方向±500
额定速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	X、Y方向±1 000
额定加速度/g	X、Y方向±1.5
频率范围/Hz	0.1~50
额定倾覆力矩/(t·m)	200

## 1.2 相似比设计

相似关系直接影响振动台试验结果的合理性与有效性,需考虑设备性能参数(台面尺寸、承载能力、振动自由度、最大输入加速度及工作频率)与模型材料特性两大要素。在土-结构动力相互作用 1g 振动台试验中,由于难以完全满足所有设计参数的原型-模型相似比,通常依据研究对象特征优先保证关键相似关系<sup>[16]</sup>。本试验聚焦围岩-断层-隧道体系动力特性研究,确定以下相似设计原则:

(1) 考虑振动台台面尺寸、性能、承载吨位及其试验能力的制约;

(2) 围岩与隧道结构遵循相同的相似关系;

(3) 控制加速度相似比为 1。

综合考虑振动台台面尺寸和试验原型尺寸及台面载重,将几何相似比选定为 1/15。考虑试验处于 1g 重力场,需要控制加速度相似比为 1,因此根据常用模型材料的力学特性,将弹性模量相似比定为 1/60,密度相似比为 6/25。在量纲分析中,常用的基本量为力  $F$ 、长度  $L$  和时间  $T$ ,通过 3 个线性无关的基本量的相似关系,可以推导得到其余物理量的相似关系。试验中主要相似关系见表 2。

表 2 振动台试验相似关系

物理量	量纲	相似比
应力	$FL^{-2}$	1/60
应变	—	1
弹性模量	$FL^{-2}$	1/60
泊松比	—	1
密度	$FT^2L^{-4}$	6/25
长度	$L$	1/15
质量	$FL^{-1}T^2$	0.000 07
阻尼	$FL^{-1}T$	0.000 27
时间	$T$	0.252 99
频率	$T^{-1}$	3.952 75
速度	$LT^{-1}$	0.263 52
加速度	$LT^{-2}$	1.041 67

## 1.3 模型材料设计

对于岩石材料,现有研究多采用散粒体混合材料或石膏/水泥基材料进行模拟<sup>[17-18]</sup>。本研究基于相似理论,结合振动台承载能力、材料力学特性及施工可行性,选定泡沫混凝土作为围岩相似材料。

该材料兼具轻质特性与物理力学稳定性,其密度、强度等参数与岩石相似度较高,且具备施工便捷、成本可控等工程优势。

在断层破碎带模拟方面,针对松散介质特性及密度相似要求,采用河砂-木屑混合材料替代传统散粒体材料。该组合可有效复现断层破碎带的低强度、强非线性特征<sup>[19]</sup>。

隧道衬砌模拟材料方面,选用石膏基轻骨料复合材料进行模拟。石膏材料凭借其可塑性强、参数可调范围广等优势,配合玻化微珠轻骨料的掺入,在降低材料密度的同时提升力学性能,可满足试验所需的物理力学指标要求。具体材料参数见表 3。

表 3 原型和试验材料力学性质

Table 3 Mechanical properties of prototype and test materials

物理量	围岩	断层	隧道衬砌
弹性模量/MPa	100	5	500
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	560	410	600
泊松比	0.3	0.35	0.2
黏聚力/kPa	25	1.6	—
内摩擦角/(°)	18	19	—

## 1.4 模型设计

图 1 为试验模型的示意图。模型整体长度为 5.2 m,宽度为 3.0 m,高度为 2.0 m。模型中央是一个倾角 60°,宽度 1.0 m 的断层。隧道衬砌轴向长度为 5.2 m,由 13 节宽度为 0.4 m 的衬砌节段组成,各节段由上盘至下盘的方向编号为 1~13,节段之间通过环氧树脂进行连接。

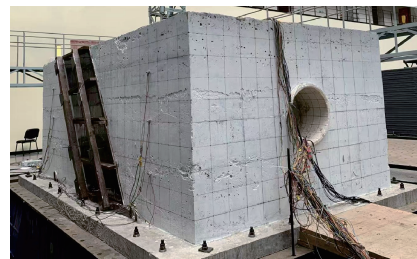


图 1 振动台模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of shaking table test model

## 1.5 监测方案

对于断层场地,地层监测主要包括加速度响应和变形响应两个部分。其中地层加速度监测包括断层上盘、断层和断层下盘三个部分,每个部分均

沿模型高程间隔 500 mm 布置加速度测点,如图 2 所示,每个加速度测点均包含两个方向的加速度计。

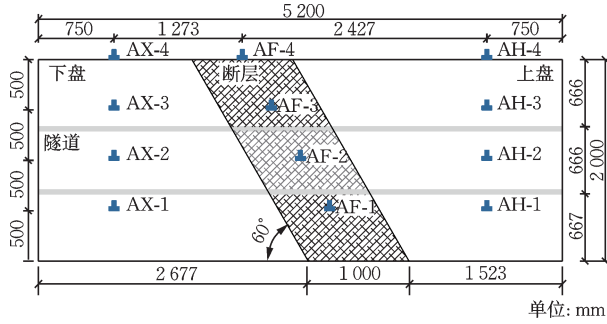


图 2 地层加速度测点布置图

Fig.2 Layout of acceleration measurement points in strata

对于隧道结构,监测内容主要包括隧道加速度、隧道环向和轴向应变、隧道直径变形。隧道衬砌沿轴向共计 13 个衬砌节段,将其沿断层上盘至断层下盘的方向依次编号为 1 至 13。图 3 为隧道加速度监测方案,沿隧道轴向共计 7 个监测节段,分别位于节段 3、节段 5 至节段 9 和节段 11 的中央,沿断层对称分布。

图 4 为隧道直径变形监测方案,直径变形监测断面与加速度监测断面一致,共 7 个监测断面。在

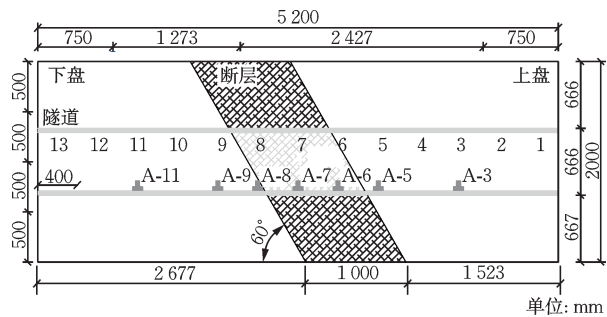


图 3 隧道加速度测点布置图

Fig.3 Layout of tunnel acceleration measurement points

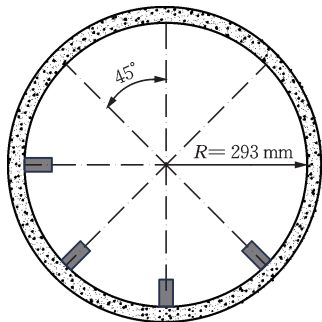


图 4 隧道直径变形监测布置图

Fig.4 Layout of tunnel diameter deformation monitoring

每个监测断面中,间隔 45° 布置一个位移传感器,通过监测隧道直径两端点的相对位移,可以实现对隧道在地震作用下的直径变形进行测量。每个监测断面共布置 4 个位移传感器。

## 1.6 输入地震动及加载制度

根据场地条件,本试验采用根据设计反应谱合成的人工地震波作为输入地震动,加速度时程曲线和对应的傅里叶谱如图 5 所示。选取不同超越概率的地震动峰值进行逐级加载,表 4 为本试验工况。

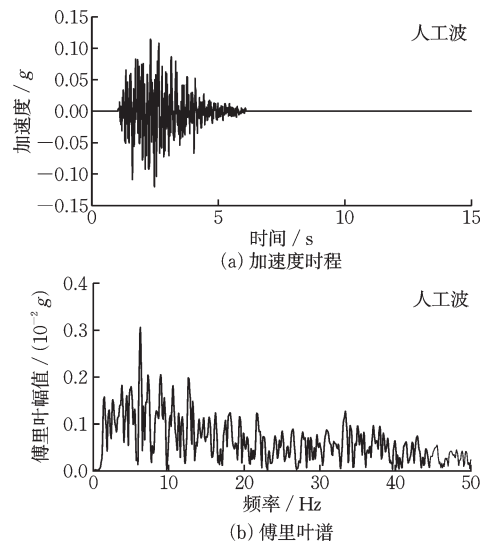


图 5 输入地震动

Fig.5 Input ground motion

表 4 加载工况

Table 4 Loading conditions

编号	加速度峰值/g	加载方向
1	0.12	x
2	0.31	x
3	0.40	x
4	0.62	x

## 2 断层场地非线性响应

### 2.1 加速度响应

图 6 和图 7 分别为断层场地的加速度时程曲线和对应傅里叶谱。对比加速度时程曲线可以发现断层场地不同区域加速响应差异显著,断层内的加速度显著大于断层两侧围岩。对比傅里叶谱可以发现,断层场地的频谱特性相比于输入地震波有较

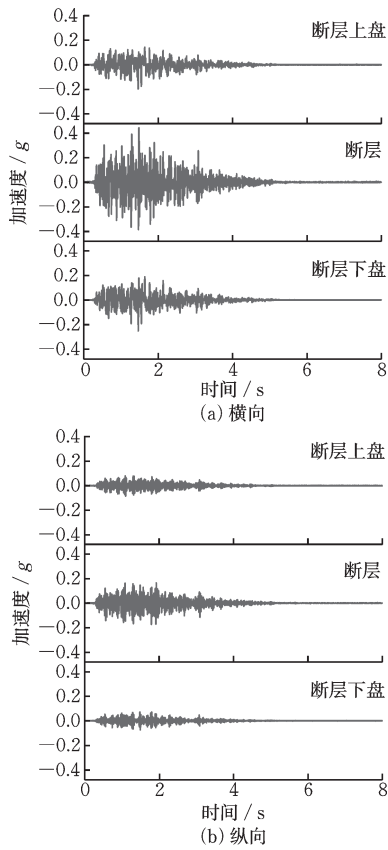


图6 地表加速度时程曲线

Fig.6 Acceleration time-history curves of ground surface

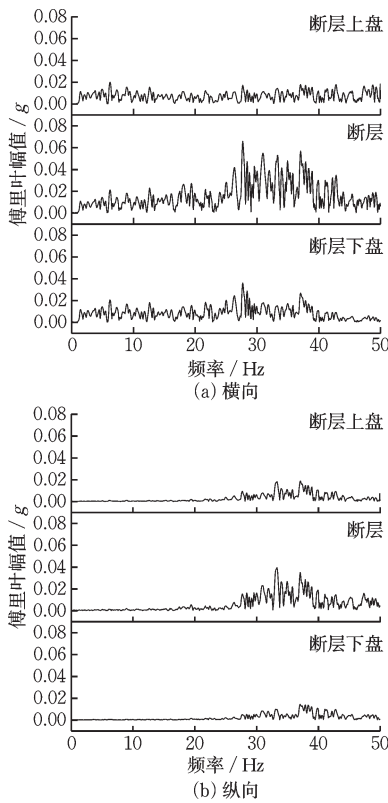


图7 地表傅里叶谱

Fig.7 Fourier spectra of ground surface

大差异。断层内地层的加速度在 25~45 Hz 频段响应较大,这也是断层内地层加速度显著大于断层两侧的原因之一,而断层下盘地层加速度同样在 25~45 Hz 的响应较大,而断层上盘该频段的响应并不突出。

对比同一监测点不同方向的加速度可以发现,虽然输入地震动只包含横向振动分量,然而依然在断层场地的地表监测到了加速度的纵向分量,这表明断层场地的动力响应是一个复杂的三维空间响应。对比纵向加速度分量的频谱可以发现,与横向加速度分量的频谱差异不同,断层场地各区域的纵向分量频谱特征相似,仅在幅值上存在一定差异。而纵向分量的频谱特征与断层内地层加速度横向分量的频谱特征相似,且仅包含大于 30 Hz 的频段。这表明整个断层场地内的纵向加速度分量来源于断层内地层。

图8为不同加速度峰值时断层场地不同区域的加速度放大系数沿竖向分布曲线。对比可以发现:断层场地的加速度响应规律在不同地震波峰值时类似:随着高度的增大,加速度放大系数逐渐增大,且断层内的加速度明显超过断层上盘和下盘,以及典型的上盘效应。随着输入加速度峰值的增大,断层场地一部分区域的加速度放大系数发生改变。考虑到加速度放大系数是与输入地震波峰值无关的无量纲参数,因此加速度放大系数的变化意味着可能的场地非线性行为。对于断层上盘,随着输入加速度峰值从 0.12g 增大至 0.31g 时,场地加速度放大系数均出现放大,但加速度峰值从 0.31g 增大至 0.62g 时,加速度放大系数并未发生改变。对于断层下盘,随着输入加速度峰值从 0.12g 增大至 0.62g,场地加速度放大系数逐渐增大。值得注意的是,断层内地层的加速度放大系数随着输入加速度峰值的增加而逐渐减小。这表明随着地震强度的增加,

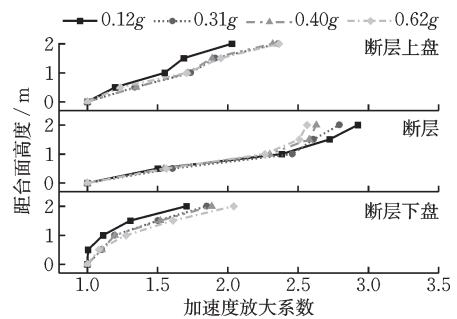


图8 地层加速度放大系数

Fig.8 Acceleration amplification factors of strata

断层地层内存在显著的非线性,这一现象也在某些土体模型试验中被观测到<sup>[20]</sup>。

## 2.2 非线性特征

图9为横向加载下输入加速度峰值为0.12g和0.62g时断层场地不同区域地表的传递函数。可以发现,总体而言随着输入地震强度的增加,断层场地会出现明显的非线性,导致剪切模量减小,进而使得频率降低(从传递函数曲线向左平移可以发现)。同时,地层的非线性还会使其阻尼增大,进而降低放大系数(表现为传递函数曲线峰值的下降)。与围岩相比,断层内的地层更为破碎,更易在强震作用下进入非线性,因此其传递函数曲线的变化更为显著。然而值得注意的是,对于地层上盘,在40~50 Hz频段的传递函数随着加载峰值的增加而放大。考虑到土壤阻尼通常与频率相关,非线性地层中的阻尼在较高频率下可能会减小,从而使得随着输入地震强度的提高而增大其放大效应。此外,断层内地层的非线性也增大了断层内地层和两侧地层之间的波阻抗比,从而使得地震波更多地在断层界面和断层上盘地表之的来回反射,进而使得断层上盘高频段的放大效应。这也表明断层场地的局部场地效应与输入地震动的强度和频率密切相关。

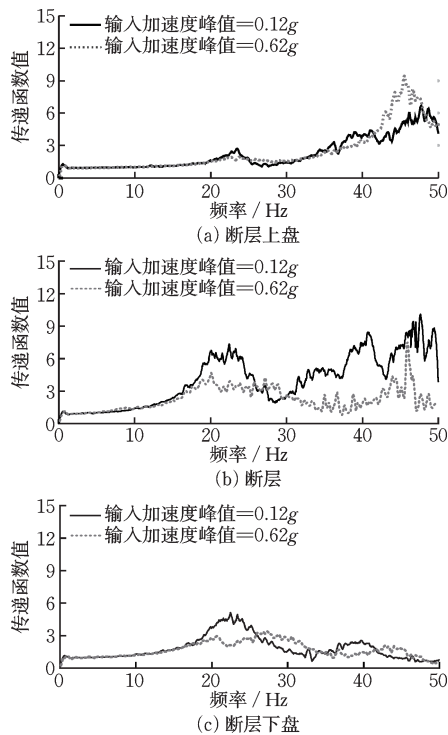


图9 地层传递函数对比

Fig.9 Comparison of transfer functions of strata

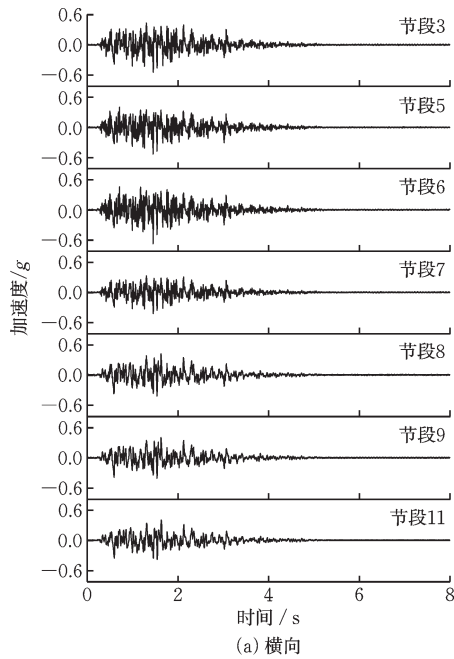
## 3 跨断层隧道响应

### 3.1 加速度响应

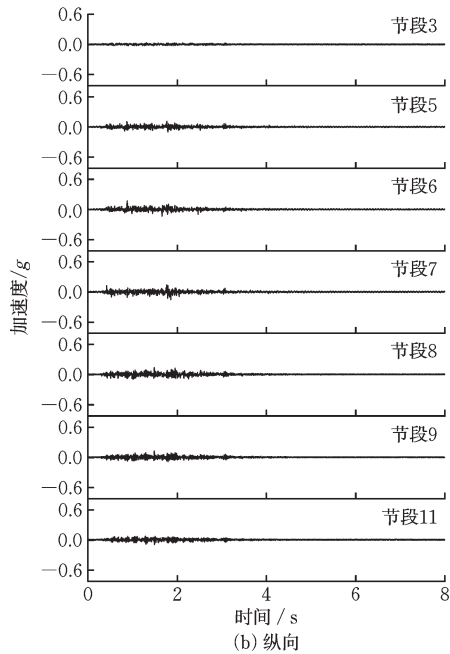
图10和图11分别为隧道纵向各监测节段的加速度时程曲线和对应傅里叶谱。可以发现与前文场地效应分析中隧道的动力特性分析一致,位于断层与断层上盘交界面处的隧道加速度响应最大,而断层上盘内的隧道加速度响应总体大于断层下盘内的隧道,其中节段6的隧道加速度响应最大,其次是节段5和节段7。其中节段3至节段11的横向峰值加速度分别为0.47g、0.57g、0.67g、0.54g、0.41g、0.40g、0.39g,纵向峰值加速度分别为0.03g、0.11g、0.17g、0.15g、0.13g、0.12g、0.09g。可以发现,由于断层场地的空间效应,在横向加载时,隧道在纵向存在较大的加速度分量,且集中在断层附近,其中最大纵向加速度分量位于节段6,即断层与断层上盘的交界处,纵向加速度分量为0.17g,达输入加速度峰值的45%。

从傅里叶谱可以发现,隧道不同区域的频谱特征存在一定的差异,节段8至节段11的高频部分显著小于其余节段。相比于断层场地的加速度响应,隧道加速度响应的频谱特征更接近输入地震动的频谱特征,即第一阶主频与输入地震动一致,但依然受场地频谱特征影响,即高频部分被放大。值得注意的是,断层下盘横向加速度响应的高频部分被抑制,然而纵向加速度响应的高频部分被放大。该现象可归结于不同物理效应在隧道横向与纵向的主导性差异。在横向,断层材料的高阻尼、低刚度特性产生的低滤波作用耗散了大量高频能量,导致高频成分被抑制。而在纵向,倾斜的界面通过波形转换产生纵向振动分量,并通过其独特的几何形态将转换波能量聚焦于断层下盘并产生相长干涉导致高频放大。

图12为不同地震波峰值下隧道不同节段的加速度放大系数。可以发现在不同地震动峰值下,穿断层隧道的加速度响应规律都类似:最大加速度位于断层和上盘交界处的节段6,其次为节段5和节段7,断层上盘内隧道的加速度大于断层下盘内隧道。随着地震动峰值的增大,隧道整体的加速度放大系数分布基本保持一致,但在断层附近略微减



(a) 横向

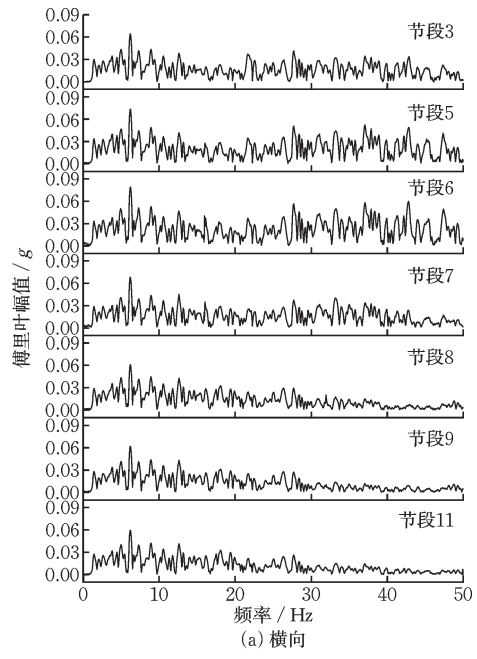


(b) 纵向

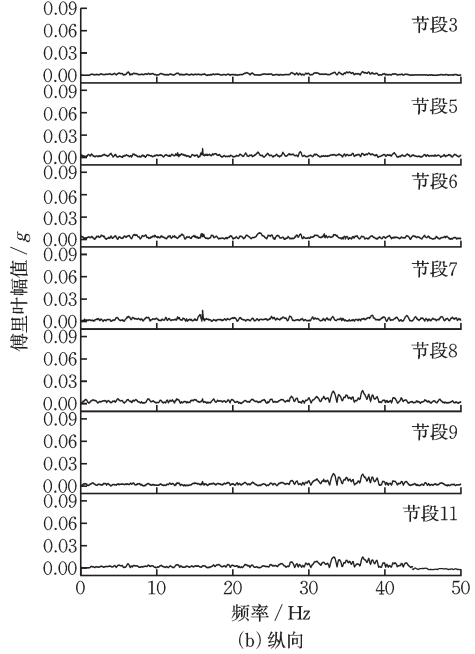
图10 隧道加速度时程曲线

Fig.10 Acceleration time-history curves of tunnel

小。结合前文断层场地非线性分析中断层场地加速度放大系数与地震动峰值的关系可以发现,横向加载时,断层内地层随地震动峰值的增大进入非线性阶段,导致地层加速度放大系数减小,进而使得该区域的隧道加速度放大系数也随之减小。而断层上盘和下盘地层随着地震波峰值的增大并未表现出明显的非线性,因此其加速度放大系数变化较小,该区域隧道的加速度放大系数变化也较小。



(a) 横向



(b) 纵向

图11 隧道傅里叶谱

Fig.11 Fourier spectra of tunnel

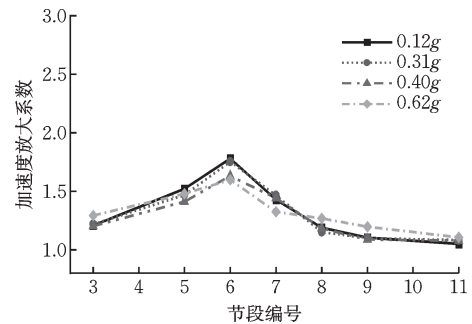


图12 隧道加速度放大系数

Fig.12 Acceleration amplification factors of tunnel

### 3.2 变形响应

图 13 为不同地震动峰值横向加载下隧道不同节段的直径变形对比。节段 3 和节段 11 由于直径变形量值较小,图中未展示这两个节段的直径变形。可以发现地震动峰值的增大并未显著改变隧道各节段的直径变形规律,隧道整体仍然是以  $45^\circ$  方

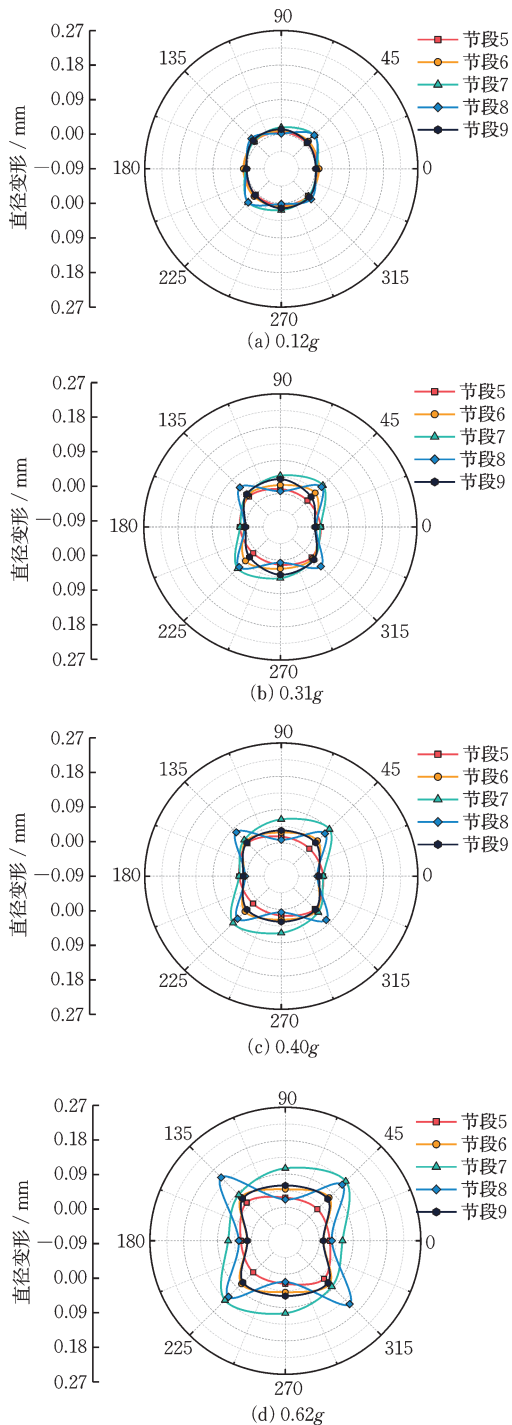


图 13 隧道直径变形

Fig.13 Diameter deformation of tunnel

向的剪切变形为主,且位于断层内的节段 7 和断层与下盘界面处的节段 8 变形响应最为显著。然而随着地震动峰值的增大,不同节段间的相对变形差异也随之增大:0.12g 时,相邻节段间同一位置的最大直径变形差异为 0.008 4 mm;0.31g 时,直径变形差异为 0.028 7 mm;0.40g 时,直径变形差异为 0.044 4 mm;0.62g 时,直径变形差异为 0.062 5 mm。这种相邻节段间直径变形响应的差异是隧道纵向内力产生的原因之一。

### 3.3 非线性破坏模式

由前文可知,场地的重要非线性特征是传递函数峰值的降低和场地主频的减小,其中传递函数峰值的降低意味着阻尼的增大,而场地主频的减小意味着材料的损伤。根据 Z.Z. Wang 等<sup>[21]</sup>的研究,隧道衬砌的损伤和弱化可以通过衬砌主频的变化来识别和量化。通常情况下,结构损伤表现为主频的降低,这可以归因于裂缝的产生导致隧道整体刚度的降低。每次加载结束后都采用白噪声对模型进行扫频,为隧道衬砌的损伤识别提供可能的依据。图 14 为衬砌各节段在试验前后横向和纵向的传递函数曲线。观察可以发现,在隧道横向,各节段的传递函数变化规律有一定差异:位于断层上盘的节段 3 和节段 5 主要表现为第一阶主频的峰值下降和曲线向左平移;位于断层和上盘交界处的节段 6 表现为第二阶主频的峰值下降和曲线向左平移;节段 7 至节段 11,主要表现为曲线整体的向左平移。考虑隧道整体的动力响应差异主要位于 30~50 Hz 频段,因此节段 6 在该频段传递函数峰值的下降和向左平移意味着结构可能的损伤。这种隧道整体传递函数的平移意味着隧道周围岩土体在多级加载下出现的弱化。

在试验完成后,对隧道的结构完整性进行检查和评估,尤其是裂缝的空间分布情况。在位于断层与上盘的交界处的节段 6 发现了一系列裂缝。图 15 为节段 6 的裂缝示意图。在隧道内侧,衬砌上共出现了七条明显的裂缝,包括一条主裂缝和六条次级裂缝,而隧道外侧共有两条裂缝。衬砌上的主裂缝主要沿着断层界面平行分布,位置靠近断层与上盘的交界面处,长度约为 1 300 mm。其余六条次级裂缝与主裂缝呈斜向相交,大致平行于断层界面,长度为 80~420 mm 不等。可以发现,衬砌内侧主裂缝两侧有明显的错位现象,这表明沿裂缝方向存在可能的剪切作用。对于其余平行于断层交界面的

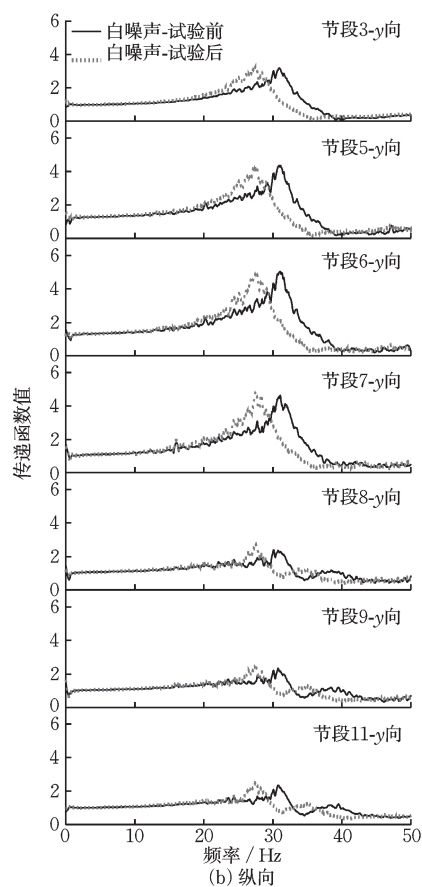
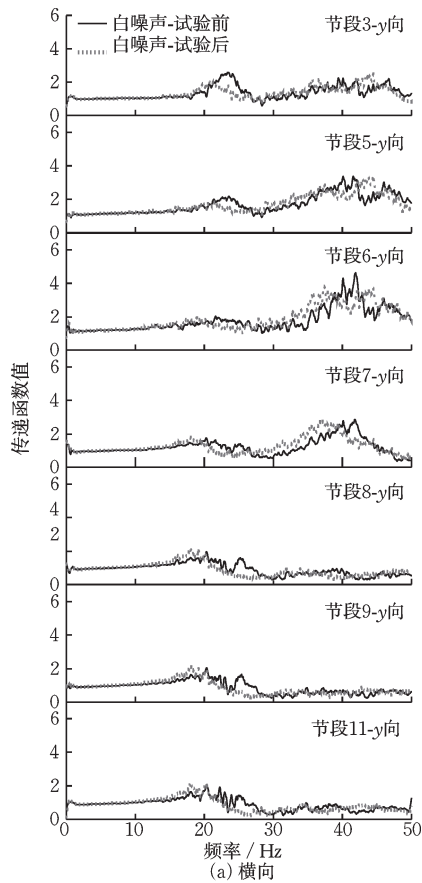


图 14 隧道传递函数对比

Fig.14 Comparison of tunnel transfer functions

次级裂缝,这种倾斜裂缝不仅在穿断层隧道的震害中被发现,也常见于一些地层性质发生变化的区域。这些倾斜裂缝是由于不同地层之间的相对变形差异导致的。

### 3.4 断层场地非线性特征驱动的隧道震害机理

对于穿断层隧道震害机理,其核心在于断层场地非线性行为所驱动的一系列连锁反应。首先,随着地震动强度增大,材料性质最为软弱的断层带率先进入强非线性状态,表现为剪切模量急剧退化和阻尼显著增大,如图 9 所示。这一材料层面的非线性行为是隧道震害的重要驱动力之一。它与断层场地非对称的几何构造一同使得断层以及两侧围岩产生剧烈的差异运动,这导致地震作用下,断层与断层上下盘产生非一致的剪切变形。隧道作为横跨三部分区域的长线性结构,承受这种沿线急剧变化的强制变形,从而在刚度突变的断层-围岩界面处产生了极大的剪切应力与弯矩集中。这种局部应力集中,进一步反映在结构动力特性的变化上:节段 6 的传递函数在强震加载后出现了最显著的刚度退化特征,如图 14 所示。最终,当集中的应力超过衬砌承载极限时,便以物理损伤的形式得以释放,表现为在节段 6 观察到的、以剪切变形为主导的斜向密集裂缝,如图 15 所示。因此,断层场地非线性导致断层场地差异运动加剧,非一致运动使得隧道应力集中,进一步导致结构损伤演化,构成了断层非线性驱动下隧道震害的完整机理链条。

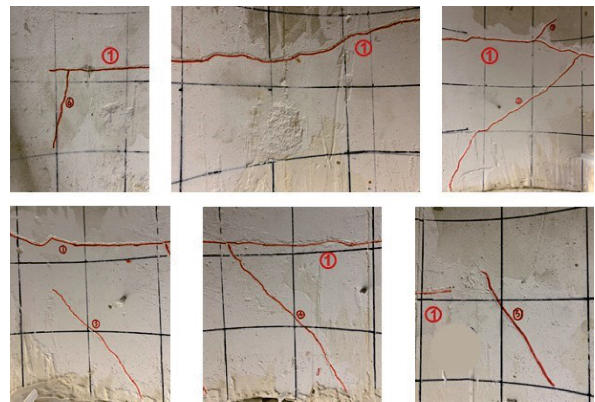


图 15 隧道裂缝示意图

Fig.15 Schematic diagram of tunnel cracks

## 4 结论

通过跨断层隧道振动模型试验,对不同超越概率地震动作用下断层场地的非线性响应特征以及

跨断层隧道的加速度响应、变形响应、破坏模式进行了分析,主要结论如下:

(1) 断层场地地震动力响应呈现显著的三维空间响应特性和非线性,断层内部地层在25~45 Hz频段响应最为显著,其加速度放大系数显著超越围岩区域的,并存在客观的纵向振动分量,随着地震动强度的增大,断层内地层呈现非线性特征。

(2) 跨断层隧道的加速度响应呈现显著空间非均质性,断层与上盘交界处隧道产生最大加速度响应,其频谱特性受输入地震动与场地效应的共同作用,差异主要位于高频成分,随着地震动强度增大,断层附近隧道因地层非线性导致加速度放大系数衰减。

(3) 跨断层隧道在地震作用下以45°方向剪切变形为主,断层内及交界区段呈现最显著变形响应,随着地震强度增大,相邻节段间相对变形差异显著增大。

(4) 跨断层隧道衬砌损伤演化呈现显著空间关联性,主频的降低和传递函数的整体减小有效表征了衬砌的刚度退化过程,而衬砌的裂缝分布也有效佐证了这一特征。

(5) 断层场地非线性驱动的隧道震害机理是一个从场地到结构的能量传递与集中过程。场地的非线性放大了断层两侧的差异运动,并将破坏应力集中于隧道与断层的交界面处,导致该区域的结构刚度退化并产生剪切破坏。

## 参考文献:

- [1] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(4): 247-293.
- [2] Chen Z Y, Shi C, Li T B, et al. Damage characteristics and influence factors of mountain tunnels under strong earthquakes[J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(2): 387-401.
- [3] Roy N, Sarkar R. A review of seismic damage of mountain tunnels and probable failure mechanisms[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(1): 1-28.
- [4] Li J C. Wave propagation across non-linear rock joints based on time-domain recursive method[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 193(2): 970-985.
- [5] Ardeshiri Lajimi S, Yazdani M, Assadi Langroudi A. Control of fault lay-out on seismic design of large underground Caverns [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50: 305-316.
- [6] Wang X W, Xiong Q R, Zhou H, et al. Three-dimensional (3D) dynamic finite element modeling of the effects of a geological fault on the seismic response of underground Caverns [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 96: 103210.
- [7] Yu H T, Chen J T, Yuan Y, et al. Seismic damage of mountain tunnels during the 5·12 Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(11): 1958-1972.
- [8] Li L, Xian L P, Yao C F, et al. Numerical modeling of seismic responses and seismic measures of tunnel crossing a fault zone: A case study[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 5640561.
- [9] 赵密, 欧阳文龙, 黄景琦, 等. P波作用下跨断层隧道轴线地震响应分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3645-3655.
- Zhao M, Ouyang W L, Huang J Q, et al. Analysis of axis dynamic response of rock tunnels through fault fracture zone under P waves of earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3645-3655. (in Chinese)
- [10] Huang J Q, Zhao M, Du X L. Non-linear seismic responses of tunnels within normal fault ground under obliquely incident P waves[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 61: 26-39.
- [11] Zhou H, He C D, Wang S W, et al. Dynamic stress concentration factors and damage mode of horseshoe tunnels crossing fault fracture zone[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(5): 5127-5141.
- [12] Li R H, Yuan Y, Zhao X, et al. Local site effect of fault site and its impact on seismic response of fault-crossing tunnel[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2024, 28(11): 3019-3037.
- [13] 何川, 李林, 张景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(3): 427-434.
- He C, Li L, Zhang J, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 427-434. (in Chinese)
- [14] 杜修力, 苏驰翔, 黄景琦, 等. SH波水平入射穿越垂直断层隧道动力响应分析[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(2): 269-280.
- Du X L, Su C X, Huang J Q, et al. Analysis of dynamic response of rock tunnels with vertical fault fracture zone under SH waves[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2019, 14(2): 269-280. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)

(下转第1454页)