

跨断层铁路隧道衬砌结构地震动力响应分析

Seismic Dynamic Response Analysis of Railway Tunnel Lining Structures across Faults

刘佩怡^{1,2}, 李 忠^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 石家庄 050043)

摘 要: 我国西南部山区地质情况复杂, 在山岭隧道修建过程中, 不可避免会跨断层破碎带, 跨断层隧道在地震作用下极易发生破坏。为研究跨断层隧道在地震作用下动力响应基本规律, 以渝昆高铁彝良隧道工程实例为研究对象, 基于波动理论进行 FLAC 3D 数值模拟, 对跨断层铁路隧道地震动力响应进行分析。分析中考虑了地震动激励方向、隧道间距对隧道应力以及位移的影响。结果表明: 横向与纵向地震动激励方向均为不利激励方向, 在抗震设计时应重点考虑横向和纵向地震动的影响; 隧洞间距对隧道的地震响应具有重要影响, 随着隧道间距增加, 隧道间的相互作用会逐渐减弱, 当隧道间距超过 3 倍的隧道直径时, 隧道间的相互作用可以基本忽略。研究结果可为跨断层铁路隧道的抗震设计与安全评估提供理论依据与工程借鉴。

关键词: 铁路隧道; 断层破碎带; 数值模拟; 波动理论; 动力响应

中图分类号: U452.28 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0117-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.020

LIU Peiyi^{1,2}, LI Zhong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The geological situation in the southwest mountainous area of China is complicated. During the construction of mountain tunnel, it is inevitable to cross the fault fracture zone, and the cross-fault tunnel is easy to be destroyed under the action of earthquake. In order to study the basic law of dynamic response of cross-fault tunnel under earthquake action, Yiliang tunnel project of Chongqing-Kunming high-speed Railway is taken as the research object, the seismic dynamic response of cross-fault railway tunnel is analyzed by FLAC 3D based on wave theory and finite difference simulation method. In the analysis, the influence of ground motion excitation direction and tunnel spacing on tunnel stress and displacement is considered. The results show that both transverse and longitudinal ground motion excitation directions are unfavorable, and the effects of transverse and longitudinal ground motion should be taken into account in seismic design. Tunnel spacing has an important effect on the seismic response of the tunnel. With the increase of tunnel spacing, the interaction between the tunnels will gradually weaken. When the tunnel spacing exceeds 3 times the tunnel diameter, the interaction between the tunnels can be basically ignored. The findings of this study can provide a theoretical basis and engineering reference for the seismic design and safety

assessment of cross - fault railway tunnels.

Key words: railway tunnel; fault fracture zone; numerical simulation; wave theory; dynamic response

0 引言

随着我国隧道工程快速发展,西南地区隧道建设规模也在不断加大。在山岭隧道修建过程中,不可避免会穿越断层破碎带。通过对汶川地震隧道震后调查的研究发现,在地震作用下隧道衬砌结构极易发生开裂、错台、垮塌等破坏,其他震害现象(例如混凝土剥落、洞门破坏等)也会伴随发生。隧道结构是山区交通的枢纽,并且隧道震后修复十分困难,如果在地震作用下,隧道结构发生严重破坏,势必会阻碍交通、影响救援。因此,研究隧道结构地震动力响应十分重要。

目前,研究者对隧道结构地震动力响应开展了多方面研究。其中,数值分析、理论分析与振动台模型试验方法是研究隧道动力响应中使用最多的方法,并取得了丰硕成果。Wang 等^[1]研究了在地震作用下断层宽度和倾角对隧道动力响应的影响,结果表明断层倾角越大对隧道结构越有利,断层宽度越大对隧道结构越不利。皇民等^[2-3]结合数值分析与波动理论研究了洞室不同间距和不同衬砌刚度对双洞隧道动力响应的影响,研究结果表明随着间距增加,双洞隧道的地震响应逐渐减弱并趋近于单洞隧道的地震响应,柔性衬砌可减弱隧道地震动力响应。陈峻博等^[4]研究了蠕滑-强震叠加作用对隧道产生的影响,研究结果表明蠕滑-地震的双重作用会加大衬砌结构的损伤程度。周彦良等^[5]研究了地震波不同输入方向对曲线隧道的地震影响,研究认为横向、纵向地震动对曲线隧道影响最为显著。郭子润等^[6]基于实际工程背景,建立三维数值模型,研究兰州人工波在不同激振方向耦合下隧道结构动力响应规律。王杰等^[7]研究在双向地震动作用下,隧道间距对地震动响应的影响,结果表明当隧道间距超过3倍的隧道直径时,隧道之间的相互作用可以基本忽略。侯森等^[8]通过振动台模型试验,发现不同加载方向会引起隧道结构不同的变形和破坏,并且y向加载更易引起洞口结构的破坏。刘云等^[9]开展了穿越断层隧道的振动台对比试验,发现当断层倾角越小时,

断层影响范围越大。Cao 等^[10-14]学者依据波动理论得出了地下洞室应力集中问题的解析解,为相应研究提供了理论依据。振动台模型试验结果更具有针对性并且更加直观,但模型试验会耗费大量精力和财力。相比于振动台试验,数值模拟与理论分析可以进行更加深入的研究。当前研究虽取得了很多成果,但现有研究很少考虑跨断层铁路双洞隧道地震动力响应。

鉴于此,基于波动理论,结合渝昆高铁彝良隧道工程实例,采用FLAC 3D对跨断层双洞隧道地震动力响应进行分析,分析中考虑了地震动不同激振方向、隧道间距对隧道应力以及位移的影响,并总结各影响因素对跨断层双洞隧道地震响应的作用规律。

1 工程概况

彝良隧道地属高原斜坡地带中山峡谷区,隧道在DK329+655(YDK329+615)处穿越黑老林断层,断层周围节理裂隙发育,断层在形成过程中影响宽度较大,断层为正断层,倾角为75°。彝良隧道穿越黑老林断层的地质模型如图1所示。断层破碎带围岩等级V级,断层附近围岩等级IV级,围岩及支护材料计算参数见表1。

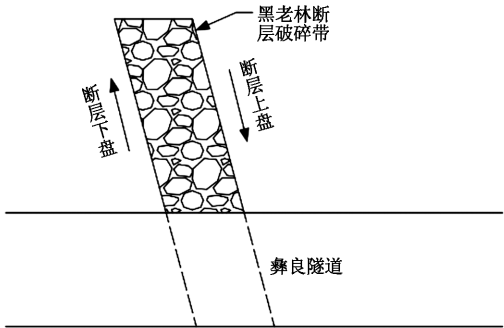


图1 彝良隧道地质模型
Fig.1 Geological model of Yiliang Tunnel

表1 围岩、断层、衬砌计算参数

结构名称	弹性模量 /GPa	泊松比	重度 / (kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
围岩	5.38	0.32	21.00	200	39
断层	1.50	0.38	17.69	50	27
初期支护	30.0	0.2	22		
二次衬砌	31.5	0.2	25		

2 建立计算模型

2.1 模型建立

根据圣维南原理,隧道开挖时会在 3 ~ 5 倍隧道直径中应力重分布,为减小边界效应,计算模型长、宽、高分别设为 60、120、80 m,断层倾角为 75°,选择断层计算宽度 5 m。运用 FLAC 3D 进行分析计算,围岩、断层、衬砌均采用实体单元模拟,分别取隧道间距 1D、2D、3D 工况建立数值计算模型(D 为隧道直径)。隧道间距为 2D 时计算模型示意图如图 2 所示。

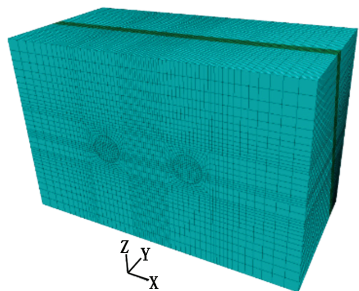


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation model

2.2 边界条件设置及地震动输入

2.2.1 边界条件设置

在模型四周施加自由场边界,减少边界上反射波对计算结果产生影响;在模型底部施加静力边界,提高计算结果的精确性。

2.2.2 地震动选取及输入

工程所处地区实测地震记录较少,因此采用 EI-Centro 波作为加载波形,使用 SeismoSignal 进行滤波和基线矫正,其峰值加速度为 0.4g,持时 28 s。地震动峰值加速度为 0.15g^[15],加速度时程曲线如图 3 所示。模拟计算选用加速度时程,在模型底部输入。

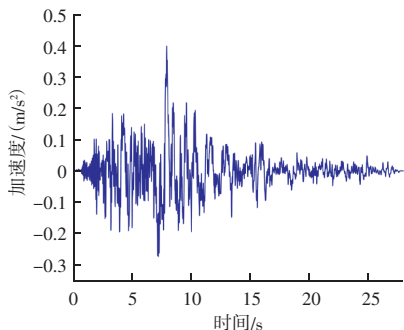


图 3 地震动加速度时程曲线

Fig. 3 Time history curve of ground motion acceleration

2.3 阻尼选取

模拟计算选用局部阻尼,局部阻尼参数为 0.157 1。

2.4 接触面设置

在地震作用下活动断层会出现错动,因此在断层与围岩交界面处设置接触面^[16],接触面参数计算公式为:

$$k_s = k_n = n \max \left(\frac{k + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right) \quad (1)$$

式中: k_s 、 k_n 分别为接触面上法向、切向刚度; k 为接触面周边最硬材料体积模量; G 为切向模量; n 为系数,与研究问题有关,通常取 10; Δz_{\min} 为接触面网格最小尺寸。

2.5 监测方案设计

在断层破碎带中心位置,左、右洞各设置一个监测断面。在每个监测断面的支护结构上分别设置拱顶、左拱腰、右拱腰、左拱脚、右拱脚、仰拱 6 个监测点,左右洞共 12 个监测点。监测点布置如图 4 所示。

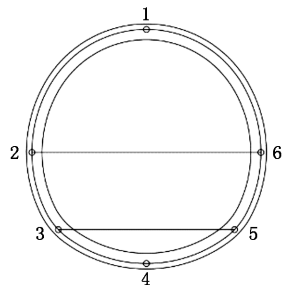


图 4 监测点布置

Fig. 4 Layout of monitoring points

2.6 分析方法

采用波动理论解析法与数值模拟法,从理论推导与工程仿真两个层面,综合分析双洞隧道的动力响应问题。

2.6.1 波动理论解析法

波动理论分析的二维模型如图 5 所示。图中圆形双洞隧道间距为 s ,隧道中心位于半空间表面以下的深度 h_1 处,圆形隧道半径为 d ,半无限空间性质由拉姆常数 λ 、 μ 和密度 ρ 定义,纵波和横波波速以及泊松比分别为 α 、 β 、 ν 。

假设一频率为 ω 的平面 P 波以 θ_α 角度入射,则在图 5 所示 O_1 、 O_2 、 O_3 坐标系中相应的波函数可由

道桥技术

Fourier-Bessel 级数推导得出, 引入式 (3) 边界条件, 并进行坐标变换^[17-18], 即可求得波函数中待定系数。

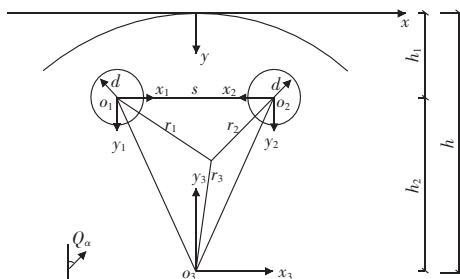


图5 波动理论分析二维模型

Fig. 5 Two-dimensional model of wave theory analysis

边界条件为隧道左、右洞室的内表面和半空间表面应力为零:

$$\begin{cases} \tau_{r_1 r_1} = \tau_{r_1 \theta_1} = 0 & r_1 = d \\ \tau_{r_2 r_2} = \tau_{r_2 \theta_2} = 0 & r_2 = d \\ \tau_{r_3 r_3} = \tau_{r_3 \theta_3} = 0 & r_3 = h \end{cases} \quad (2)$$

求解出所有待定系数后, 求得隧道左、右洞室表面环向动应力集中系数 τ^* :

$$\tau^* = \left| \frac{\tau_{\theta\theta}}{\mu k_\beta^2} \right| \quad (3)$$

$$\text{其中, } \tau_{\theta\theta} = \lambda \Delta^2 \phi + 2\mu \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right) \right]$$

通过波动理论, 可求解出隧道周边的动应力集中系数, 从而在理论上分析隧道间距与相互作用的关系。

2.6.2 数值模拟法

数值计算分三步^[19]: 首先进行自重应力场计算, 平衡初始地应力; 然后运用台阶法开挖隧道, 并完成衬砌支护; 最后, 施加动力边界条件、施加动力荷载、施加局部阻尼、设置监测点, 进行动力求解, 并对动力计算结果进行分析。

3 结果分析

3.1 基于波动理论的隧道间距影响分析

采用波动理论解析方法计算在不同隧道间距下, 平面 P 波入射时洞室表面的环向动应力集中系数。

η 为 P 波入射频率, 当 $\eta = 1.0$, 隧道间距 $s/d =$

2.5 时, $\tau^* = 8.2$; 隧道间距 $s/d = 1.0 \times 10^5$ 时, $\tau^* = 2.9$ 。计算结果表明, 当隧道间距增大时, 隧道左、右洞室表面环向动应力集中系数逐渐减小, 隧道间存在相互作用。从波动理论上证明了双洞隧道之间存在相互作用, 且这种相互作用随隧洞间距增加而减弱。

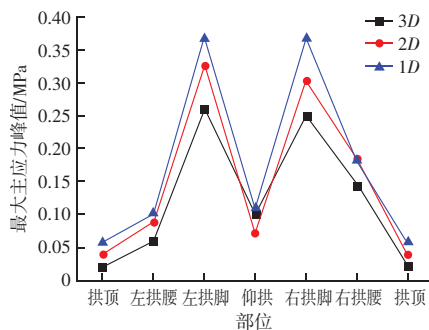
3.2 隧洞间距对隧道动力响应影响验证分析

波动理论分析从理想弹性介质角度, 揭示了隧道间距增大减弱相互作用的规律。为验证这一理论在实际复杂工程地质条件下的适用性, 并探究对衬砌结构受力与变形的具体影响, 采用 FLAC 3D 数值模拟, 在模型底部沿 x 横向输入地震动的条件下, 对比分析隧道间距为 1D、2D、3D 三种工况下的应力与位移响应。

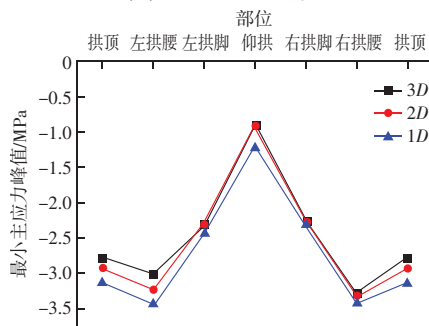
3.2.1 应力响应

隧道结构的受力情况直接反映了隧道在地震作用下的安全情况。提取衬砌结构监测点所监测的最大主应力与最小主应力峰值数据, 绘制隧道不同部位处应力峰值关系图, 如图 6 所示。

FLAC 3D 中规定压应力为负值, 拉应力为正值, 但在进行力的分析时仅考虑绝对值, 最大主应力作



(a) 最大主应力峰值



(b) 最小主应力峰值

图6 隧道不同部位应力响应峰值

Fig. 6 Peak stress response of different parts of the tunnel

为衬砌结构受拉，最小主应力作为衬砌结构受压。从图中数据可知，无论隧道间距，最大主应力数值均在拱脚处达到最大，最小主应力峰值在拱腰处达到最大。由于隧道在不同的隧道间距下主应力峰值部位不同，故在进行抗震设计时应根据不同的隧道间距进行设防。

3.2.2 位移响应

位移是隧道衬砌结构变形一个重要参考指标，隧道不同部位位移峰值关系如图7所示。在地震作用下，隧道衬砌结构位移峰值从上到下依次减小，隧道拱顶处产生最大位移峰值。从整体上看，隧洞在间距为 $1D$ 时产生位移最为明显，随着隧洞间距增加，位移峰值逐渐减小。分析其产生原因为，隧洞间相互作用会随隧洞间距增加而减弱，隧道各部位位移峰值随隧洞间距增加也逐渐减小，当隧洞间距为 $3D$ 时，仰拱部位位移峰值接近 9 mm 。根据王杰等^[7]研究，当隧道间距超过 $3D$ 时，隧道之间的相互作用可以基本忽略。

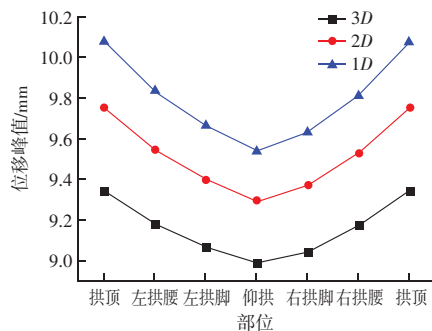


图7 隧道不同部位位移响应峰值

Fig. 7 Peak displacement response of different parts of the tunnel

3.3 地震动激振方向对隧道动力响应的影响

以上分析表明，隧道间距是影响动力响应的重要因素。然而，地震动本身具有不确定性，特别是地震动激振方向，同样对结构安全具有决定性影响。为比较地震动不同激振方向对隧道衬砌结构的影响，以隧道间距为 $2D$ 时的计算模型为例，在模型底部分别沿 x 、 y 、 z （横向、纵向、竖向）三个方向输入地震动，观察地震动不同激振方向对隧道衬砌结构应力以及位移的影响。

3.3.1 应力响应

隧道不同部位应力峰值关系如图8所示。在地震作用下，无论哪个激振方向，拱顶处是最大主应力峰

值最大部位，拱顶处同样也是最小主应力峰值最大的部位，故在抗震设防中应重点考虑隧道拱顶部位设防。隧道在受纵向地震动激振时，应力峰值最大，故就应力分析而言，纵向地震动激振方向为不利方向。

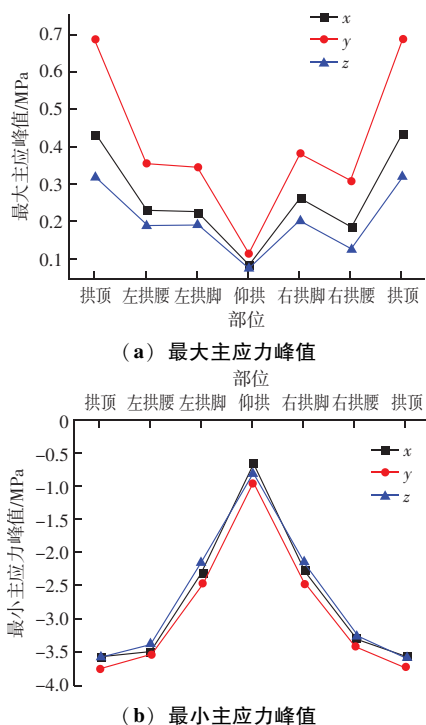


图8 隧道不同部位应力响应峰值

Fig. 8 Peak stress responses at different parts of the tunnel

3.3.2 位移响应

拱顶、仰拱、拱脚和拱腰处位移峰值如图9所示。 x 、 y 、 z 三个方向地震动在对应方向产生的位移差距不大，并且仅从数据来看，不同方向地震动激励下产生的对应方向位移峰值差距较小，难以判断隧道哪个部位产生更大的位移。从整体上看，隧道在 x 向地震动输入时产生 x 向位移较为显著，故就位移控制而言， x 向地震动为不利方向。

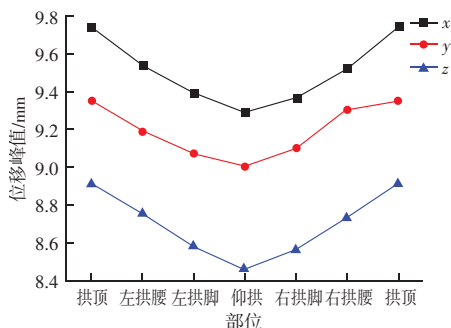


图9 隧道不同部位位移响应峰值

Fig. 9 Peak displacement response of different parts of the tunnel

道桥技术

4 结论

以工程实例研究地震动激振方向、隧道间距对跨断层铁路隧道在地震作用下衬砌结构应力和位移的影响,取得主要结论如下:

(1) 波动理论分析表明,动应力集中系数随隧道间距增大而逐渐减小,说明隧道间存在相互作用,且该作用随间距增加而减弱。在不同的隧道间距工况下,隧道衬砌结构最大主应力峰值均产生在拱脚部位,最小主应力峰值产生在拱腰处,抗震设计时应根据实际隧道间距进行针对性设防;隧道衬砌结构位移峰值从上到下依次递减,隧道拱顶部位响应最为显著。

(2) 地震动激振方向对隧道响应影响显著。 y 向地震动输入引起隧道衬砌结构 y 向应力峰值最大,拱脚处为应力集中最不利部位;在 x 向地震动输入时产生更显著的横向位移响应。综合考虑,横向与纵向地震动激励方向均为不利激振方向,在抗震设计时应重点考虑横向和纵向地震动的影响。

(3) 综合波动理论与数值分析结果,当隧道间距超过3倍洞径($3D$)时,双洞隧道间的相互作用基本可忽略,可近似按单洞隧道进行抗震分析与设计。

参 考 文 献

- [1] WANG Y C, GUO Y, QIU Y, et al. Dynamic behavior of fault tunnel lining under seismic loading conditions [J]. Journal of Central South University, 2023, 30 (2): 584–598.
- [2] 皇民, 段敬民, 毛庆超, 等. 不同衬砌刚度下山岭双洞隧道地震动力响应分析 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (7): 39–46, 63.
- [3] 皇民, 赵玉如, 蒯世豪, 等. 洞室间距对双洞山岭隧道地震动力响应影响分析 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (2): 27–35.
- [4] 陈峻博, 王天强, 耿萍, 等. 蠕滑-强震叠加作用下跨断层隧道动力响应分析研究 [J/OL]. 铁道标准设计, 2025, 69 (1): 129–138.
- [5] 周彦良, 戴俊, 张晓君. 地震波输入方向对曲线隧道地震响应的影响分析 [J]. 铁道建筑, 2013 (8): 65–67.
- [6] 郭子润, 梁庆国, 房志群, 等. 考虑地震波激振方向的浅埋偏压双联拱黄土隧道动力响应规律研究 [J]. 地震工程学报, 2023, 45 (3): 742–750.
- [7] 王杰, 刘华北, 邹炎, 等. 水平及竖向地震共同作用下双线隧道的响应分析 [J]. 震灾防御技术, 2020, 15 (4): 670–683.
- [8] 侯森, 陶连金, 赵旭, 等. 不同加载方向的山岭隧道洞口段地震响应振动台模型试验 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2016, 47 (3): 994–1001.
- [9] 刘云, 赖杰, 辛建平, 等. 穿越断层隧道地震响应规律动力对比试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (12): 4693–4702.
- [10] CAO H, LEE V W. Scattering and diffraction of plane P waves by circular cylindrical canyons with variable depth – to – width ratio [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1990, 9 (3): 141–150.
- [11] DAVIS C A, LEE V W. Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30 (3): 383–410.
- [12] LEE V W, KARL J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities [J]. Soil Dynamics Earthquake Engineering, N8, 1992, P445–456.
- [13] BALENDRA T, THAMBIRATNAM D P, KOH C G, et al. Dynamic response of twin circular tunnels due to incident SH – waves [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1984, 12 (2): 181–201.
- [14] LEE V W, CAO H. Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115 (9): 2035–2056.
- [15] 刘继军. 地震动力响应分析最佳阻尼形式研究 [J]. 工程技术研究, 2020, 5 (3): 269–270.
- [16] 邱雨. 断层隧道围岩-衬砌结构地震响应规律及抗震对策研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [17] 梁建文, 张浩, LEE V W. 平面P波入射下地下洞室群动应力集中问题解析解 [J]. 岩土工程学报, 2004 (6): 815–819.
- [18] 梁建文, 张浩, LEE V W. 地下双洞室在SV波入射下动力响应问题解析解 [J]. 振动工程学报, 2004 (2): 16–24.
- [19] 朱长安. 断层破碎带隧道地震动力响应分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.