

DOI: 10.11779/CJGE201506015

减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究

王帅帅, 高波, 隋传毅, 闻毓民

(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)

摘要: 通过波函数展开法给出平面SV波入射下深埋圆形隧道“围岩—减震层—初期支护—二次衬砌”减震结构的动力响应解析近似解, 分析了减震层厚度、弹性模量对衬砌结构动应力集中系数的影响, 并开展了跨断层隧道抗减震研究大型振动台模型试验, 通过分析跨断层及其设置减震层后隧道衬砌动力响应特性和破坏形态, 得到以下有益结论: 减震层与围岩弹性模量比越低, 减震层厚度越大, 衬砌动应力集中系数越小; 减震层与围岩弹性模量的最优减震比在 $1/10 \sim 1/20$, 最优减震层厚度不宜大于0.2 m; 跨断层破碎带隧道设置减震层可以明显降低跨断层衬砌结构加速度峰值和衬砌动应变幅值; 断层处隧道衬砌裂缝分布数量多、复杂, 多集中于拱脚、拱肩, 并分布有剪切错动引起的环向裂缝, 设置减震层后, 断层处隧道衬砌裂缝明显减少, 衬砌受力得到明显改善; 断层处地表出现了平行断层方向为主的贯通裂缝和大量斜裂缝, 说明断层处以剪切破坏为主, 设置减震层后, 地表裂缝明显减少。

关键词: 波函数展开; 断层破碎带; 隧道; 减震层; 振动台试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)06-1086-07

作者简介: 王帅帅(1988-), 男, 安徽宿州人, 博士, 主要从事隧道及地下工程抗减震技术研究, E-mail: 8366wangshuai@sina.com。

Mechanism of shock absorption layer and shaking table tests on shaking absorption technology of tunnel across fault

WANG Shuai-shuai, GAO BO, SUI Chuan-yi, WEN Yu-min

(MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the wave function expansion method, the dynamic response analysis of a deep buried cylindrical composite-lining cavity with a new buffer layer mode, namely "rock- buffer layer-primary support-secondary lining" mode, in an elastic space subjected to incident plane SV waves is made. The factors affecting the dynamic stress concentration of the lining structure, elastic modulus and thickness of the buffer layer are discussed. By conducting the large-scale shaking table model tests on the tunnel across the fault zone, some engineering significant conclusions are drawn by analyzing the dynamic properties and fracture patterns of the tunnel across the fault and that with buffer layer. With the lower elastic modulus and smaller thickness of the buffer layer, the dynamic stress concentration of the secondary lining decreases, but the best ratio of the elastic modulus of the buffer layer to that of the surrounding rock is between $1/10 \sim 1/20$, and the optimal thickness of the buffer layer is no larger than 0.2 m. With the buffer layer, the lining peak acceleration and the dynamic strain amplitudes of the lining decrease. Most of the complex and wider cracks of the lining concentrate on the spandrel and arch foot when the tunnel crosses the fault zone, however, the number of lining cracks decreases with shock sorption joint layers, which shows that the force status of the lining is significantly improved. Wider cracks occur on the ground surface along the fault, and many smaller cracks intersect the fault, which shows that the tunnels and surrounding rock are damaged by shearing force when it crosses the fault, and the number of the crack on the top surface is reduced with the buffer layer. The research conclusions may provide references for the shock and sorption design of tunnels across fault, and they are of important practical engineering significance.

Key words: wave function expansion method; fault fracture zone; tunnel; shock absorption layer; shaking table test

0 引言

随着地下结构数量的增多和震害的频繁出现, 山岭隧道抗减震研究开始日益受到重视, 目前隧道抗震理论分析包括数值法和解析法两类。虽然数值法可以

模拟任意形状的隧道, 考虑材料的非线性性质, 但是解析法在问题本质分析方面有着数值法不可替代的作

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178398, 41102220)

收稿日期: 2014-01-03

用, 是检验数值法精度的重要手段。Pao 等^[1]采用波函数展开法研究了无限空间中洞室及单层衬砌隧道在弹性波入射下的动应力集中问题。随后, Davis 等^[2]、Lee 等^[3-4]推导了 SH 和 SV 波作用下圆形洞室的动力响应, 并分析了柔性管道在实际地震波作用下的动态响应; 梁建文等^[5]、纪晓东等^[6]基于大圆弧假定, 采用波函数展开法给出了半空间中地下圆形单层衬砌隧道对入射平面 Rayleigh 波、P 波和 SV 波散射问题的级数解; 李刚等^[7]、钟启凯^[8]通过波函数展开法得到平面 SH 和 P 波和 SV 波作用下双层衬砌动力响应解析近似解。

实际工程中, 基于新奥法, 为保证施工中围岩和隧道稳定, 山岭隧道一般采用双层衬砌, 先施做初期支护, 再施做二次衬砌, 因此, 本文在前人研究工作的基础上, 推导了平面 SV 波入射下深埋圆形隧道“围岩—减震层—初期支护—二次衬砌”减震系统的动力响应基函数解析解, 讨论了减震层厚度、弹性模量对衬砌动应力响应的影响, 并通过跨断层隧道大型振动台试验, 分析跨断层隧道及其设置减震层后衬砌动力响应特性和破坏形态, 研究结论可以为穿越断层破碎带隧道结构抗震设防提供参考, 具有重要的实际工程意义。

1 计算模型

本文重在研究隧道“围岩—减震层—初期支护—二次衬砌”减震系统减震力学机理, 因此, 将深埋长隧道动力响应求解问题进行简化为各向同性弹性材料无限空间中圆形洞室问题, 同时为方便求解将初期支护和二次衬砌简化为一层衬砌介质。平面简谐 SV 波在无限线弹性介质中沿 x 轴正向传播, 如图 1 所示, 当 SV 波通过不同介质的界面时, 将产生散射的 SV 波和 P 波。

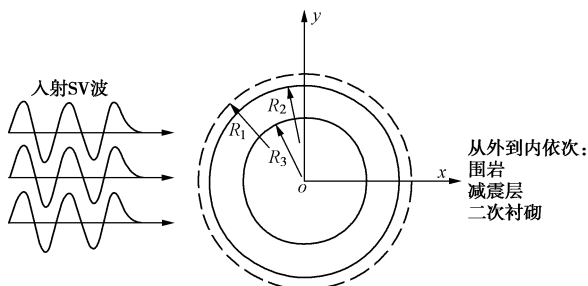


图 1 平面 SV 波入射隧道示意图

Fig. 1 Sketch of tunnel under incident plane SV waves

利用傅里叶级数展开和贝塞尔函数积分, 可将入射平面 SV 波在极坐标下展开为

$$\phi_{(1)}^{(i)} = \phi_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(\beta_1 r) \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (1)$$

当 SV 波通过围岩和减震层的界面时, 将产生散

射 P 波和散射 SV 波, 其表达式分别为

$$\phi_{(1)}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(\alpha_1 r) \sin n\theta e^{-i\omega t} \quad (2)$$

$$\phi_{(1)}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r) \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (3)$$

则围岩中总波势可表示为

$$\phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \varepsilon_n i^n J_n(\beta_1 r) + B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$$\phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(\alpha_1 r) \sin n\theta e^{-i\omega t} \quad (5)$$

则减震层中总波势可表示为

$$\phi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} [C_n H_n^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n H_n^{(2)}(\alpha_2 r)] \sin n\theta e^{-i\omega t} \quad (6)$$

$$\phi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} [E_n H_n^{(1)}(\beta_2 r) + F_n H_n^{(2)}(\beta_2 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (7)$$

则衬砌中总波势可表示为

$$\phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} [M_n H_n^{(1)}(\alpha_2 r) + N_n H_n^{(2)}(\alpha_2 r)] \sin n\theta e^{-i\omega t} \quad (8)$$

$$\phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} [R_n H_n^{(1)}(\beta_2 r) + S_n H_n^{(2)}(\beta_2 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (9)$$

SV 波入射下弹性介质应力位移和应力:

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \\ u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \frac{\partial \phi}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \right] \\ \sigma_\theta &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial \theta} \right) \right] \\ \tau_{r\theta} &= 2\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 ϕ_0 为入射波波幅, α_i , β_i 代表介质入射 P 波和 SV 波波数, μ 和 λ 为弹性介质的 Lamé 常数, A_n , B_n , \dots , S_n 为待定系数。

对于根据界面位移和应力连续条件, 可得在 $r=R_1$ 分界面上:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^1 &= \sigma_r^2, \tau_{r\theta}^1 = \tau_{r\theta}^2 \\ u_r^1 &= u_r^2, u_\theta^1 = u_\theta^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在 $r=R_2$ 分界面上:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^3 &= \sigma_r^2, \tau_{r\theta}^3 = \tau_{r\theta}^2 \\ u_r^3 &= u_r^2, u_\theta^3 = u_\theta^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

在 $r=R_3$ 分界面上:

$$\sigma_r^3 = 0, \tau_{r\theta}^3 = 0 \quad (14)$$

将式 (2) ~ (9) 代入 (10) 和 (11) 中得到围

岩和衬砌中的应力和位移。结合边界条件(12)~(14)可求解方程组得到待定系数 A_n , B_n , \cdots , S_n , 将其代入应力的表达式即可求得应力的级数表达式。

2 数值结果分析

在入射的稳态 SV 波作用之下, 围岩最大动应力幅值为 $\sigma_0 = -\beta^2 G \phi_0$, 定义界面圆孔附近的动应力集中系数 DSCF 为 $^{[1]} \sigma^* = \sigma_\theta / \sigma_0$ 。由于泊松比对衬砌动应力响应的影响较小^[8], 因此, 本文重点研究减震层弹性模量、密度和厚度对减震效果的影响, 将初期支护和二次衬砌简化为一层衬砌, 现按某实际隧道工程进行简化取圆形洞室, 洞室净空直径 D 为 10 m, 初期支护厚度为 0.2 m, 二次衬砌厚度为 0.3 m, 其他各层物理参数见表 1。

表 1 各层介质物理参数

Table 1 Main parameters of layers

结构层	弹性模量 E/MPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 ν
围岩	5000	2200	0.28
初期支护	30000	2500	0.22
减震层	500~5000	600~1600	0.20
二次衬砌	30000	2500	0.20

2.1 减震层弹性模量对减震效果影响

为了研究减震层弹性模量对衬砌动应力集中系数的影响, 定义减震层和围岩弹性模量比 μ , 本文取减震层厚度 h 为 20 cm, 其他参数按表 1 取值。

通过分析图 2 中衬砌动力集中系数随减震层弹性模量变化曲线可知: 减震层弹性模量越低, 二次衬砌动力集中系数越小, 但初期支护动力集中系数增大, 只有当减震层和围岩弹性模量比 μ 小于 0.1 时, 减震层减震效果较明显, 但当 μ 小于 0.05 时, 围岩动力集中系数急剧增大, 因此, 实际工程中建议减震层弹模与围岩弹模之比取 1/10 到 1/20。

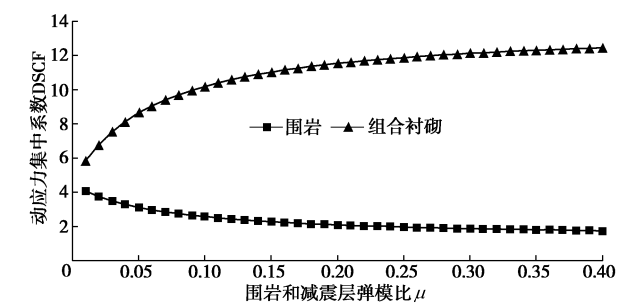


图 2 衬砌动应力放大系数随 μ 变化曲线图

Fig. 2 Variation of dynamic stress concentration of lining with various μ

2.2 减震层厚度对减震效果影响

为了分析减震层厚度对衬砌动力集中系数的影响, 减震层和围岩弹性模量比 μ 取 0.05, 其他参数按表 1 取值。

通过分析图 3 中衬砌动力集中系数随减震层厚度变化曲线可知: 减震层厚度 h 越大, 二次衬砌动力集中系数越小, 但初期支护动应力有所增大, 当减震层厚度 h 大于 0.2 m 时, 衬砌动力集中系数下降趋势减小, 由于实际工程加大减震层厚度会带来经济成本, 施工安全等敏感性问题, 因此, 实际工程中建议减震层尽量小于 0.2 m。

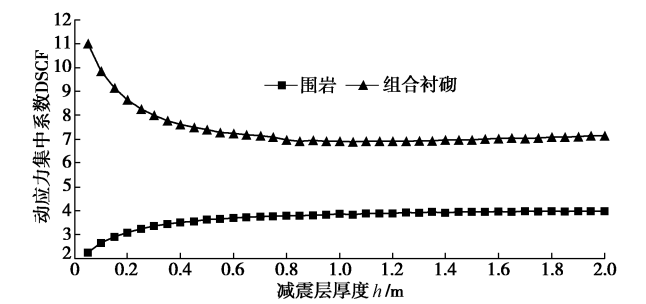


图 3 衬砌动应力放大系数随 h 变化曲线图

Fig. 3 Variation of dynamic stress concentration of lining with various h

3 试验方案

3.1 模型振动台参数

为了研究跨断层隧道的地震动力影响特性, 对设置断层和减震层两种工况进行了大型振动台试验。振动台采用中国地震局工程力学研究所三向六自由度振动台, 台面尺寸为 5.0 m×5.0 m, 频率范围为 0.5~40 Hz, 最大荷载 30 t, 最大加速度: 水平加速度为 1.0g, 竖向加速度为 1.0g。

3.2 模型材料参数

由于增加对隧道模型刚度无影响的围岩模型配重比较困难, 考虑到试验模型的尺寸较小, 本次试验中采用重力失真模型。基于团队前期研究成果^[9-10], 综合考虑振动台尺寸、承载能力和隧道原型尺寸, 确定模型试验基本相似比如下: 几何相似比 $C_l=1/25$, 弹性模量相似比 $C_E=1/42$, 根据相似关系得出密度相似比 $C_\rho=1.4$, 其余物理量相似关系如表 2 所示。

表 2 模型相似关系和相似比

Table 2 Similarity relations and ratios of physical parameters

物理量	相似关系	相似比
长度	C_l	1/25
密度	C_ρ	1/1.4
弹性模量	C_E	1/42
泊松比	$C_\mu = 1$	1/1
时间	$C_t = C_\rho^{0.5} C_E^{-0.5} C_l$	1/4.564
应力	$C_\sigma = C_E$	1/42
位移	$C_u = C_l$	1/25
加速度	$C_a = C_\rho^{-1} C_E C_l^{-1}$	1/1.2

按正交试验理论, 最终根据试验结果, 确定隧道

围岩采用粉煤灰、河沙和机油的混合物模拟,粉煤灰:河沙:机油=0.56:0.30:0.14;衬砌材料选用中砂为骨料的微粒混凝土,水泥与中砂的质量比为 1:6,水灰比为 1:1,并内置钢丝网对隧道衬砌进行补强;断层破碎带围岩采用内聚力较小的砂砾石模拟,并在断层和围岩接触面上布设聚乙烯塑料布,以减小摩擦力;减震层采用刚度较低、密度较小的橡塑海绵来模拟,橡塑海绵厚 50 mm,长 400 mm。衬砌和围岩模型材料力学参数:围岩材料:弹性模量为 42.9 MPa,密度为 1.41 g/cm³,黏聚力为 3.0 kPa,内摩擦角为 21°;衬砌材料:弹性模量为 5.44 GPa,抗压强度为 5.09 MPa。

3.3 试验模型箱尺寸

试验模型箱采用刚性模型箱,尺寸为 3.7 m (长)×1.5 m (宽)×1.8 m (高)。为了降低模型箱底部边界对试验的影响,增加模型和箱底的摩擦力,在模型箱底部浇筑了一层表面粗糙的砂浆层,以防止震动中模型箱和模型土发生相对位移。衬砌模型每段长度 800 mm,相邻衬砌间用环氧树脂植筋胶粘接成整体,以确保衬砌结构能模拟隧道原型整体受力状态。

为了研究断层及其设置减震层后隧道衬砌动力响应,对原试验布置进行适当简化,以突出研究内容,模型尺寸布置如图 4 所示。

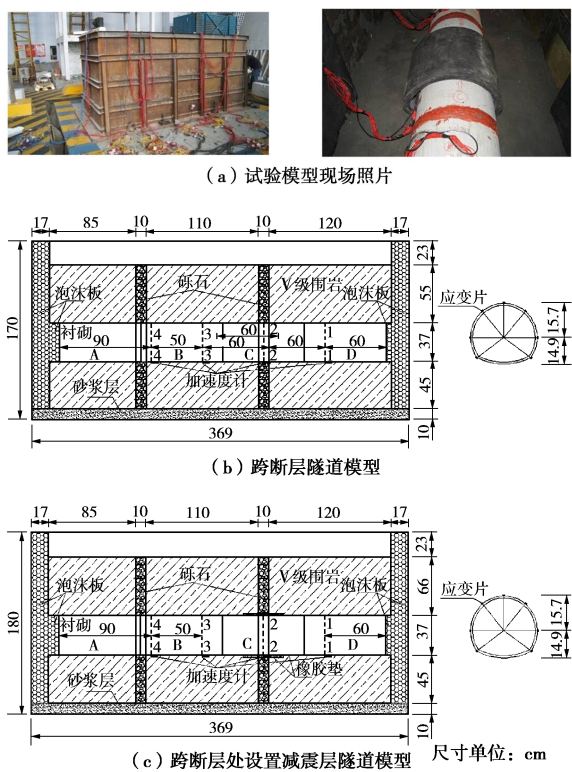


图 4 试验方案

Fig. 4 Test schemes

为实现断层两侧围岩相互错动,图 4 中 3-3 截面

所在的围岩试体底部采用了断层滑动装置^[11](如图 5 所示)。在水平剪切激振过程中,断层滑动装置上围岩产生滑动,又因为橡塑海绵而产生回弹,从而实现断层的错动。由装置的橡塑海绵厚度为 10 cm,压缩之后其厚度为 5 cm,所以断层最大错动位移值为 5 cm,根据本试验的几何相似比,试验中的断层位移值在实际工程中为 1.25 m。

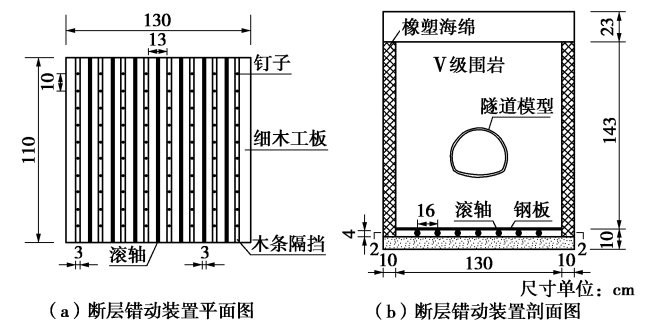


图 5 断层错动装置^[11]

Fig. 5 Dislocation devices for simulating motion of faults

3.4 输入地震波

试验输入汶川大地震的卧龙波,输入的水平向卧龙波按照时间相似比压缩,得到振动台输入地震波的加速度时程曲线,输入地震波加速度时程和傅里叶频谱图如图 6 所示。由其傅里叶幅值谱图可知,输入地震波能量集中在 0~10 Hz 的低频率区间内,超过 20 Hz 高频部分傅里叶幅值几乎为零,说明输入地震波以低频波为主。试验为单向激振,沿平行断层方向按水平 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g 和 1.0g 的加速度幅值逐级加载。

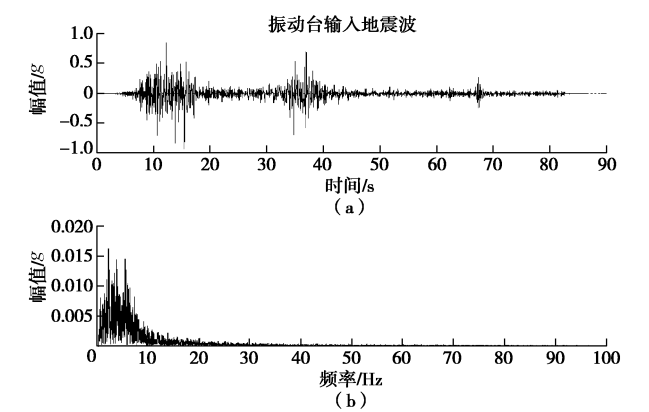


图 6 输入地震动加速度-时程和加速度傅氏谱

Fig. 6 Acceleration time-histories and Fourier spectra of input seismic waves

4 试验结果分析

为了研究跨断层隧道设置减震层前后动力特性,选择加速度峰值、动应变幅值、衬砌和地表裂缝分布形态进行研究。

4.1 跨断层隧道加速度响应特性

分析对比试验中输入激振加速度为 $1.0g$ 时, 跨断层隧道、普通洞身段和断层处设置减震层隧道结构上加速度峰值, 如表 3 所示。

表 3 各断面加速度峰值

Table 3 Values of physical parameters of similar materials			
断面位置	断层处	设置减震层处	普通洞身
	2-2	2-2	3-3
加速度峰值/ g	1.41	1.02	1.05

可以发现跨断层处隧道加速度峰值最大, 普通洞身段隧道加速度峰值较小, 远小于断层处隧道加速度峰值, 说明了断层的存在加剧了跨断层处隧道动力响应。设置减震层后隧道加速度峰值减小, 远小于断层处隧道加速度峰值, 说明了设置减震层可以有效降低跨断层处隧道的动力响应。

为了进一步研究动力作用下隧道加速度响应特性, 将不同加载次序下断层处、设置减震层和普通段隧道加速度峰值列举如图 7 所示。

如图 7 中曲线所示, 随着输入加速度增大, 3 种工况下隧道加速度响应峰值均呈增加趋势, 同时可以发现, 跨断层处隧道加速度峰值最大, 设置减震层 2—2 断面处衬砌加速度峰值较小, 隧道普通洞身段隧道加速度峰值最小, 说明断层加剧了隧道动力响应, 设置减震层后, 可以有效减小衬砌结构的动力响应。

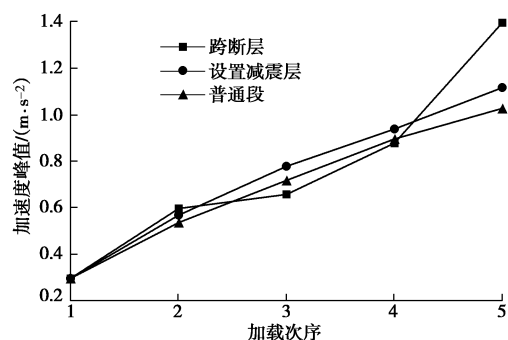


图 7 隧道加速度随加载次序变化曲线

Fig. 7 Variation of tunnel acceleration with loading sequence

分析 3 条曲线, 可以发现当第 3 次加载时, 即输入加速度为 $0.6g$ 时, 跨断层段未设减震措施 2—2 断面加速度峰值小于其他断面, 当第 5 次加载时, 衬砌加速度峰值远大于其他断面, 呈明显非线性, 衬砌结构沿纵向变形不一致, 结构受力复杂, 可以认为当输入加速度为 $0.6g$ 时衬砌已出现破坏。

为了进一步分析断层及断层处设置减震层对隧道动力响应特性的影响, 选取模型断面 3—3, 设置断层 2—2 及设置减震层模型断面 2—2 的加速度傅氏频谱曲线进行分析, 如图 8 所示。

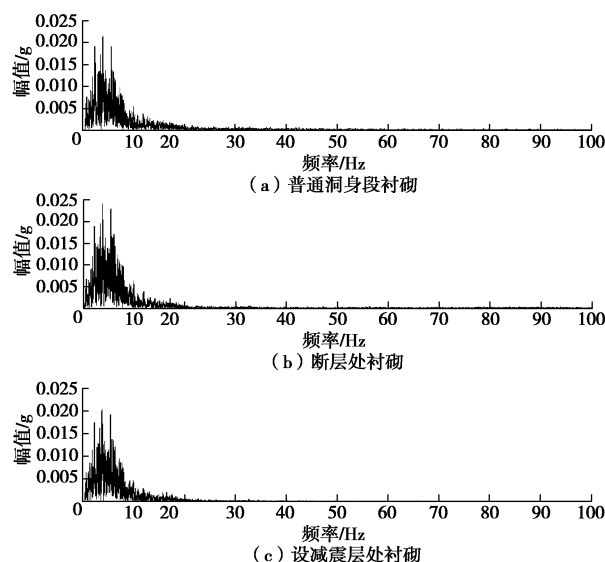


图 8 隧道衬砌加速度-时程和加速度傅氏谱

Fig. 8 Acceleration time-histories and Fourier spectra of tunnel linings

通过对比分析图 8 中隧道 3 种工况下的加速度傅氏谱曲线, 可以发现普通段隧道、断层处隧道及其设置减震层后隧道傅氏谱曲线相似。对比图 8(a)和(b), 可见由于断层的存在, 加剧了隧道衬砌的动应力响应, 其傅氏谱峰值大于普通洞身段隧道值。分析图 8(b)和(c)断层处设置减震层前后隧道加速度傅氏谱曲线, 可以发现傅氏谱曲线相似, 说明设置减震层没有显著改变结构的地震反应的频谱特性, 只是傅氏谱峰值有一定降低, 对比前述理论分析结果, 说明减震层对低频波有较好的减震效果。

4.2 衬砌应变幅值动力特性

为了更好地研究衬砌动力特性, 本文选取监测断面衬砌动应变幅值作为研究对象, 当输入激振加速度为 $0.2g$ 时, 衬砌各部位应变幅值如图 9 所示。

分析图 9 中跨断层段、普通段、跨断层处设置减震层段 3 条曲线, 可以发现, 隧道衬砌左右拱肩处动应变幅值最大, 且衬砌呈 45° 方向衬砌动应变幅值分布较大, 因此, 跨断层隧道衬砌加强衬砌拱肩和拱脚部位。

对比跨断层处、普通洞身段和断层处设置减震层隧道衬砌动应变幅值, 可以发现, 跨断层段衬砌结构, 特别是拱肩处应变幅值远大于普通段衬砌结构, 结合断层处隧道加速度峰值放大效应, 可见断层加剧了隧道的动力响应。同时分析跨断层处设置减震层后衬砌的动应变幅值, 可以发现和普通段大概一致, 小于跨断层处衬砌应变幅值, 并且可以发现, 跨断层处隧道衬砌动应变幅值相差较大, 呈不均匀分布, 设置减震层后, 衬砌动应变幅值分布较均匀, 说明减震层可以有效降低衬砌动力响应, 改善衬砌受力状态。

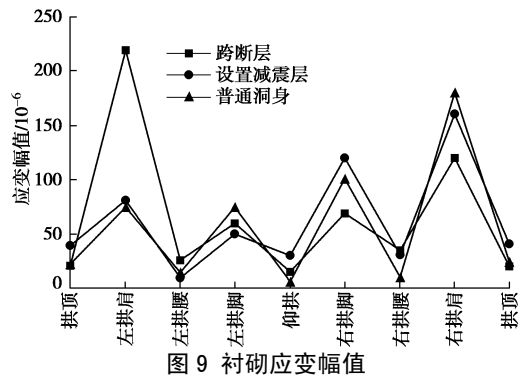


Fig. 9 Amplitude of lining dynamic strain

为了更好地说明断层及设置减震层后, 隧道衬砌动力响应特性, 选取隧道衬砌最大动应变幅值的进行比较, 如图 10 所示。

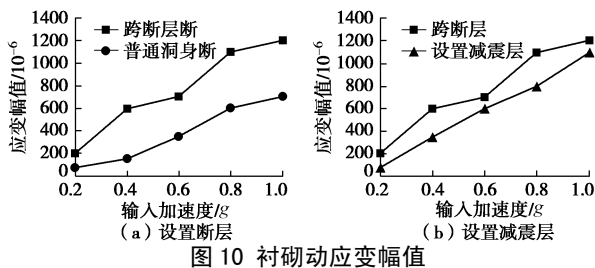


Fig. 10 Amplitude of dynamic strain of the left spandrel

如图 10 (a) 所示, 跨断层段和普通洞身段隧道衬砌最大动应变幅值均随着输入加速度增加而变大, 同时跨断层段应变幅值明显大于普通洞身段, 说明了由于断层的存在, 加剧了隧道结构的动力响应。分析跨断层隧道衬砌动应变幅值增加曲线, 可以发现和普通段衬砌最大动应变幅值呈线性增加不同的是, 跨断层段隧道衬砌最大动应变幅值呈明显非线性趋势, 当输入加速度达到 $0.6g$ 时, 较 $0.4g$ 时其动应变幅值增量变化较小, 结合此时地表破坏形态和内部录像, 可以发现此时衬砌已经出现破坏。

跨断层和设置减震层后隧道衬砌最大动应变幅值如图 10 (b) 所示。对比图中设置减震层层后, 跨断层处隧道衬砌动应变幅值随输入激振加速度变化曲线, 可以发现设置减震层后, 衬砌动应变幅值减小, 结合前文理论分析, 可知设置了减震层后, 由于减震层刚度较低, 可以缓解围岩和衬砌之间的相互作用, 从而降低衬砌动应力响应。

4.3 衬砌结构破坏形态分析

如图 11 所示, 试验中穿越断层 C 段衬砌处模型外侧拱肩、拱腰、拱脚和仰拱出现了纵向贯通裂缝, 其中拱脚和仰拱处通长裂缝是由于模型安装填筑过程中静力所致, 由于断层错动, 造成隧道结构处于扭曲复杂空间受力状态, 因此, 也会产生沿隧道轴线方向的通长裂缝。在跨断层位置处出现了断层剪切错动引起的环向裂缝, 模型内部左拱肩出现了较多裂缝, 模

型破坏最严重, 可见断层的存在加剧了隧道的动力响应。模型破坏性形态和汶川地震中龙溪隧道破坏形态一致^[12], 说明试验结果是可信的, 因此, 实际工程中应重点设防。



图 11 跨断层 C 段衬砌裂缝形态

Fig. 11 Fracture shape of lining C crossing fault zone

如图 12 所示, 跨断层处隧道 C 段衬砌设置了减震层后的破坏形态。可以发现, 断层处隧道衬砌外部只有少量裂缝集中在拱脚及仰拱部位, 未出现因断层错动产生的环向裂缝, 衬砌其他部位未见明显破坏。



图 12 设置减震层后 C 段衬砌裂缝形态

Fig. 12 Fracture shape of lining C with shock absorption layer

对比图 11, 12 两种工况下跨断层隧道衬砌裂缝破坏形态, 可以发现跨断层处设置减震层, 可以有效降低衬砌的动力响应。

4.4 地表破坏形态分析

对比分析跨断层及其设置减震层后, 隧道跨断层处上方地表模型土破坏形态如图 13 中 (a)、(b) 所示。如图 13 (a) 断层处地表裂缝形态, 根据试验录像, 当输入加速度达到 $0.4g$ 时, 跨断层地表就出现了平行于断层的裂缝, 说明断层发生了错动变形。当输入加速度进一步增加时, 地表裂缝宽度增大, 并且出现了很多斜裂缝, 进一步说明断层段隧道及围岩破坏以剪切错动为主。



图 13 地表裂缝形态

Fig. 13 Fracture shape of soil surface

如图 13 (b) 断层处地表裂缝形态, 设置减震层后, 隧道跨断层处地表进出线少量平行断层裂缝, 但裂缝宽度较小, 裂缝破坏较未设置减震层得到了明显减轻, 可见断层处设置减震层可以有效降低地表震害。

5 结论和建议

本文通过波函数展开法,推导了平面 SV 波入射下深埋圆形隧道“围岩—减震层—初期支护—二次衬砌减震”系统的动力响应基函数解析解,讨论了减震层厚度、弹性模量对衬砌动应力响应的影响,并通过跨断层隧道大型振动台试验,分析跨断层隧道及其设置减震层后衬砌动力响应特性和破坏形态,分析了跨断层隧道及其设置减震层后隧道结构动力响应特性、衬砌和地表破坏形态,得出了以下 4 点结论。

(1) 减震层与围岩弹模之比越小,减震层厚度越大,二次衬砌动应力集中系数越小,建议实际工程中减震层与围岩最佳弹模比取值在 $1/10 \sim 1/20$ 之间,最佳减震层厚度小于 0.2 m。

(2) 跨断层隧道衬砌加速度峰值和动应变幅值明显增大,断层处隧道结构应重点设防,在断层处设置的减震层可以有效降低衬砌加速度峰值和动应变幅值,改善衬砌受力状态。

(3) 跨断层处衬砌裂缝多集中于拱肩、拱脚处,断层处出现了剪切环裂缝,设置了减震层后,衬砌裂缝明显减少,衬砌受力得到明显改善。

(4) 跨断层处地表以平行断层方向的宽度较大的剪切错动裂缝为主,同时分布许多宽度较小的斜向裂缝,设置减震层后地表裂缝明显减少。

建议实际工程中跨断层隧道应采用钢筋混凝土衬砌,并加强拱肩和拱脚部位,通过断层处设置减震层降低隧道动力响应。

参考文献:

- [1] PAO Y H, MAO C C. The diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations[M]. New York: Crane, Russak & Company Inc, 1972.
- [2] DAVIS C A, LEE V W, BARDET J. Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, **30**(3): 383 - 410.
- [3] LEE V W, T RIFUNAC M D. Response of tunnels to incident SH waves[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1979, **105**: 643 - 659.
- [4] LE E V W, KARL J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, **11**: 445 - 456.
- [5] 梁建文, 纪晓东. 地下衬砌洞室对 Rayleigh 波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(4): 24 - 31. (LIANG Jian-wen, JI Xiao-dong. Amplification of Rayleigh waves due to underground lined cavities[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(4): 24 - 31. (in Chinese))
- [6] 纪晓东, 梁建文, 杨建江. 地下圆形衬砌洞室在平面 P 波和 SV 波入射下动应力集中问题的级数解[J]. 天津大学学报, 2006, **39**(5): 511 - 517. (JI Xiao-dong, LIANG Jian-wen, YANG Jian-jiang. On dynamic stress concentration of an underground cylindrical lined cavity subjected to incident plane P and SV waves[J]. Journal of Tianjin University, 2006, **39**(5): 511 - 517. (in Chinese))
- [7] 李 刚, 钟启凯, 尚守平. 平面 SH 波入射下深埋圆形组合衬砌洞室的动力反应分析[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2010, **37**(1): 17 - 22. (LI Gang, ZHONG Qi-kai, SHANG Shou-ping. Dynamic response analysis of deep buried cylindrical composite-lining cavity subjected to incident plane SH waves[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, **37**(1): 17 - 22. (in Chinese))
- [8] 钟启凯. 地下圆形组合衬砌洞室在地震波下的动力反应分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2009. (ZHONG Qi-kai. Dynamic response analysis of underground cylindrical composite-lining cavern subjected to seismic waves[D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese))
- [9] 王峥峥, 高 波, 索然绪. 双洞隧道洞口段抗减震振动台试验[J]. 中国公路学报, 2009, **22**(2): 71 - 76. (WANG Zheng-zheng, GAO Bo, SUO Ran-xu. Shaking table tests on entrance anti-seism of double track tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, **22**(2): 71 - 76. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 信春雷, 高 波, 周佳媚, 等. 跨断层隧道抗减震措施性能振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014(8): 1414 - 1422. (XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking table tests on performances of anti-seismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(8): 1414 - 1422. (in Chinese))
- [12] 高 波, 王峥峥, 袁 松, 等. 汶川地震公路隧道震害启示[J]. 西南交通大学学报, 2009, **44**(3): 336 - 374. (GAO Bo, WANG Zheng-zheng, YUAN Song, et al. Lessons learnt from damage of highway tunnels in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, **44**(3): 336 - 374. (in Chinese))