

平面 P 波入射下深埋圆形复合式衬砌隧道 抗减震机理研究^①

王帅帅, 高 波

(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:基于 Fourier-Bessel 级数展开法, 研究深埋圆形三层复合式衬砌洞室在平面 P 波入射下的动应力集中问题, 并给出三层衬砌洞室动应力集中系数级数解析解; 依托某 IX 度地震区管道隧道实际工程, 分析不同衬砌刚度组合和厚度组合对洞室动应力集中系数的影响。研究表明: 注浆加固洞室围岩和设置减震层都可以降低二次衬砌动应力集中系数; 增大围岩注浆区弹性模量和厚度, 有利于减小衬砌动应力集中系数, 最优围岩注浆区厚度为 1 倍洞室净空半径; 减震层弹性模量降低, 减震层厚度增大, 二次衬砌动应力集中系数变小, 减震层弹性模量宜低于围岩弹模 1/20, 最优减震层厚度宜取 1/50 的洞室内净空半径。最后针对实际管道隧道抗减震技术, 考虑围岩稳定性, 提出“围岩-加固圈-减震层-衬砌”新型减震结构, 分析结果表明: 对比其他三种抗减震措施, 新型减震结构的减震效果最好。

关键词:平面 P 波; 隧道; 注浆; 减震层; 衬砌; 动应力集中系数

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)02-0159-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.02.0159

Mechanism of Resistance and Damping Technology in a Deep Circular Composite-lined Tunnel Subjected to Incident Plane P-waves

WANG Shuai-shuai, GAO Bo

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Using the Fourier-Bessel series expansion method, the dynamic stress concentration factors of deeply-buried circular composite-lined cavities subjected to plane P-waves were studied, and a dynamic stress concentration factor series solution for the cavities was derived. By combination with an actual pipe tunnel project in the IX seismic intensity zone, the influence of different combinations of lining stiffness and thickness on the factor was analyzed. This analysis shows that the dynamic stress concentration factor of the second lining decreased after installation of a grouting reinforcement zone and buffer layers. As the elastic modulus and thickness of the grouting zone increased, the factor of the second lining reduced and the optimal thickness of the grouting zone was equal to the clearance radius of the cavity. The dynamic stress concentration factor of the second lining decreased with a lower elastic modulus and larger damping layer thickness. The elastic modulus of the buffer layers was estimated to be below 1/20 of that of the surrounding rock, and the optimal thickness of the damping layers estimated at 1/50 of the cavity clearance radius. Finally, this new damping structure of "surrounding rock-grouting zone-buffer layers-lining" is

① 收稿日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178398)

作者简介: 王帅帅(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程研究。E-mail: 8366wangshuai@sina.com。

proposed for shock absorption of an actual pipeline tunnel. The results show that this new structure exhibits the best damping effect when compared with other measures.

Key words: plane P-waves; tunnel; grouting; buffer layers; lining; dynamic stress concentration factor

0 引言

基于波动力学研究弹性空间内圆形洞室动力问题一直是工程地震学的重要研究内容。Pao 等^[1]基于波函数展开法,研究了平面 P 波入射下的无限空间中圆形衬砌洞室的动应力集中问题;随后,LEE V W^[2-3]又将该解扩展到半空间中洞室的动应力集中问题;国内梁建文等^[4-5]进一步研究了半空间中圆形衬砌洞室动应力集中问题。而目前关于圆形洞室复合式衬砌动应力集中问题的研究较少;李刚等^[6]基于波函数展开法给出了无限空间中 SH 波入射下双层组合式衬砌的动力响应级数解;王长柏等^[7]研究了 P 波入射下深埋双层衬砌圆形隧道弹性波散射问题,并开展了引水隧道动应力集中系数的参数敏感性分析;王滢等^[8]基于 Biot 波动理论,通过 Laplace 变换和波函数展开法,研究了弹性波入射条件下饱和土体中圆形衬砌洞室动应力集中问题;王帅帅等^[9]研究了平面 SH 波入射下深埋软岩圆形组合衬砌隧道抗减震机理,并分析了围岩加固和设置减震层对隧道动应力集中系数的影响,研究表明加固围岩和设置减震层都可以降低二次衬砌的动应力集中系数。

目前山岭隧道抗减震措施主要包括注浆加固和在围岩和衬砌间设置减震层两种。高峰等^[10]针对这两种抗减震措施开展了数值模拟,研究表明两种措施都可以降低隧道二衬的动应力响应;徐华等^[11]采用数值模拟,研究了不同隧道减震层模式的减震机理与效果。

但目前针对注浆加固和减震层抗减震机理的研究还不多见,这两种措施的抗减震力学机理还不甚清楚,关于注浆加固和减震层的关键参数研究还很少。因此,本文进一步给出平面 P 波入射下深埋圆形洞室三层复合式衬砌结构动应力集中系数解析解,并结合某输气管道隧道工程,研究“围岩-加固圈-初衬-二次衬砌”、“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”和“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”三种抗减震结构的动应力问题,分析围岩注浆加固圈和减震层的刚度和厚度对洞室衬砌动应力的影响,给出隧道抗减震措施关键参数,最后结合理论研究和工程实际,提出新型减震结构。

1 理论模型

图 1 所示为各向同性弹性无限空间介质中圆形洞室复合式衬砌洞室,洞室内衬砌Ⅲ内半径为 R_4 ,洞室内衬砌Ⅱ内半径为 R_3 ,衬砌Ⅱ外半径为 R_2 ,衬砌Ⅰ外半径为 R_1 。平面 P 波沿 x 轴正向传播,当入射 P 波通过不同介质的分界面时,将在半无限介质、衬砌中产生散射的平面 P 波和 SV 波。半无限空间介质和衬砌介质的力学参数由 Lamé' 常数 λ_i 、 μ_i 和密度 ρ_i 确定,介质纵波和横波波速分别为 a_i 和 β_i 。

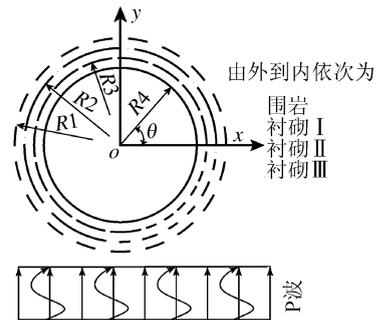


图 1 复合式衬砌洞室模型

Fig.1 Analysis model of the composite-lined cavity

圆形复合式衬砌洞室平面 P 波入射问题属平面应变问题,利用 Fourier 级数展开和 Bessel 函数积分,可将入射平面 P 波势函数在极坐标下展开为^[1]:

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

当 P 波通过半无限介质和衬砌 I 的界面时,将产生散射 P 波和 SV 波,其势函数表达式为:

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

$$\Psi_{(1)}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(k_{s\beta}r) \sin n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (3)$$

则半无限空间中总波势可表示为:

$$\phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \epsilon_n i^n J_n(k_{sa}r) + A_n H_n^{(1)}(k_{sa}r)] \cos n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$$\Psi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(k_{s\beta}r) \sin n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (5)$$

同理,衬砌 I 中总波势可表示为:

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

$$\Psi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} [E_n H_n^{(1)}(k_\beta^{l_1} r) + F_n H_n^{(2)}(k_\beta^{l_1} r)] \sin n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (7)$$

衬砌 II 中总波势为:

$$\phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} G [L_n H_n^{(1)}(k_a^{l_2} r) + L_n H_n^{(2)}(k_a^{l_2} r)] \cos n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (8)$$

$$\Psi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} [M_n H_n^{(1)}(k_\beta^{l_2} r) + N_n H_n^{(2)}(k_\beta^{l_2} r)] \sin n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (9)$$

衬砌 III 中总波势为:

$$\phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} [U_n H_n^{(1)}(k_a^{l_3} r) + W_n H_n^{(2)}(k_a^{l_3} r)] \cos n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (10)$$

$$\Psi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} [X_n H_n^{(1)}(k_\beta^{l_3} r) + Y_n H_n^{(2)}(k_\beta^{l_3} r)] \sin n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad (11)$$

式中: ϕ_0 为入射 P 波波幅; k_{α}, k_{β} 分别代表半无限空间介质的纵波和横波波数; $k_a^{l_1}, k_\beta^{l_1}, k_a^{l_2}, k_\beta^{l_2}$ 和 $k_a^{l_3}, k_\beta^{l_3}$ 分别代表衬砌 I、衬砌 II 和衬砌 III 的纵波和横波波数; $J_n, H_n^{(1)}$ 和 $H_n^{(2)}$ 分别为第一类 Bessel 函数和第一、二类 Hankel 函数, 详见文献 [1]; $A_n, B_n \dots$ 为势函数待定系数。

弹性介质中位移和应力的势函数表达式分别^[5]为:

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \\ u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \frac{\partial \Psi}{\partial r} \\ \sigma_{rr} &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) \right] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial \theta} \right) \right] \\ \sigma_{r\theta} &= 2\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \quad (14)$$

将式(4) ~ (11) 带入式(12)、(13) 中, 可得各层介质中的位移和应力势函数。

根据模型位移和应力连续条件, 可得

在半无限介质和衬砌 I 分界面上:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr}^1 &= \sigma_{rr}^2, \sigma_{r\theta}^1 = \sigma_{r\theta}^2 \\ u_{rr}^1 &= u_{rr}^2, u_{\theta\theta}^1 = u_{\theta\theta}^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

在衬砌 I 和衬砌 II 分界面上:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr}^3 &= \sigma_{rr}^2, \sigma_{r\theta}^3 = \sigma_{r\theta}^2 \\ u_{rr}^3 &= u_{rr}^2, u_{\theta\theta}^3 = u_{\theta\theta}^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在衬砌 II 和衬砌 III 分界面上:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr}^3 &= \sigma_{rr}^4, \sigma_{r\theta}^3 = \sigma_{r\theta}^4 \\ u_{rr}^3 &= u_{rr}^4, u_{\theta\theta}^3 = u_{\theta\theta}^4 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

在衬砌 III 内侧面零应力条件:

$$\sigma_{rr}^4 = 0, \sigma_{r\theta}^4 = 0 \quad (18)$$

将位移和应力表达式带入边界条件[式(15) ~ 式(18)] 中, 可联立求解方程组得到待定系数 $A_n, B_n \dots$, 将待定系数代入应力的表达式即可求得各层介质应力。

2 结果分析

2.1 工程背景

依托于中亚某天然气管道隧道工程, 管线穿越区域整体处于十分活跃的特提斯构造域, 为印度板块与欧亚板块碰撞的缝合带, 地壳运动强烈, 地震活动频繁。隧道穿越区域位于 IX 度地震烈度带中, 根据场地地震动评价报告, 50 年超越概率 10% 的加速度峰值为 0.4g, 50 年超越概率 5% 加速度峰值为 0.5g, 地震烈度和加速度峰值为目前国内很少遇到过的情况, 因此必须考虑纵波对隧道结构的影响。

隧址分布主要为强风化花岗岩, 呈碎石、角砾状结构, 围岩自稳能力较差, 围岩级别为 V 级。针对隧道地质条件, 同时结合设备资源情况, 满足两根 $\Phi 1219$ 管道安装需要, 隧道洞身净断面初步设计参数为: 洞宽 4.5 m、高 4.5 m, 初期支护采用 C20 喷射混凝土, 厚度为 15 cm; 二次衬砌采用 C30 混凝土, 衬砌厚度 30 cm。由于隧道处于强震带, 因此建议隧道断面拟采用抗震性能较好的圆形断面形式。

根据参考文献[1], 引入介质动应力集中系数 (DSCF): $\sigma_\theta^* = \sigma_\theta^i / \sigma_\theta^0$, 式中: 平面 P 波入射下围岩中标准局部应力: $\sigma_\theta^0 = -k_{\beta}^2 \lambda \phi_0$ 。

引入入射波波数无量纲参数 $k_{\beta} R_1$, 由于低频地震波对地下结构动力影响较大, 因此本文仅针对 $k_{\beta} R_1 = 0.1$ 的低频垂直入射波开展研究。

2.2 动应力集中系数分布规律

首先研究洞室注浆加固和设置减震层结构的

减震效果。计算参数:围岩加固圈弹性模量取15 GPa,加固圈厚度为2.5 m;减震层弹性模量取30 MPa,减震层厚度为10 cm;其他计算参数如表1所列。

表1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

	弹性模量 E /MPa	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 ν
V级围岩	2 500	1 800	0.25
减震层	0~2 500	400~1 600	0.25
围岩加固圈	2 500~25 000	2 000	0.25
初衬	25 500	2 400	0.25
二次衬砌	30 000	2 500	0.25

双层衬砌洞室、“围岩-加固圈-初衬-二次衬砌”、“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”和“围岩-初期支

护-减震层-二次衬砌”洞室动应力集中系数分布如图2所示。从图中可以发现P波垂直入射下,洞室衬砌最大动应力集中系数均出现左右拱腰处。进一步对比图2中洞室的动应力集中系数分布规律,可以发现:注浆加固洞室围岩和设置减震层均可以有效降低二次衬砌动应力集中系数。

如图2(a)所示,双层衬砌洞室衬砌最大动应力集中系数为13.5,而如图2(b)所示,注浆加固洞室围岩2.5 m后,二次衬砌动应力集中系数则减小为7.2。对比图2(a)和图2(c)、(d)可见:当在围岩和初期支护间设置减震层时,二次衬砌最大动应力集中系数降低为11.9;而在初期支护和二次衬砌间设置减震层后,二次衬砌最大动应力集中系数降低为8.3,但双层衬砌洞室初期支护动应力集中系数只有6.3,此时,初期支护最大动应力集中系数增大为14.5。

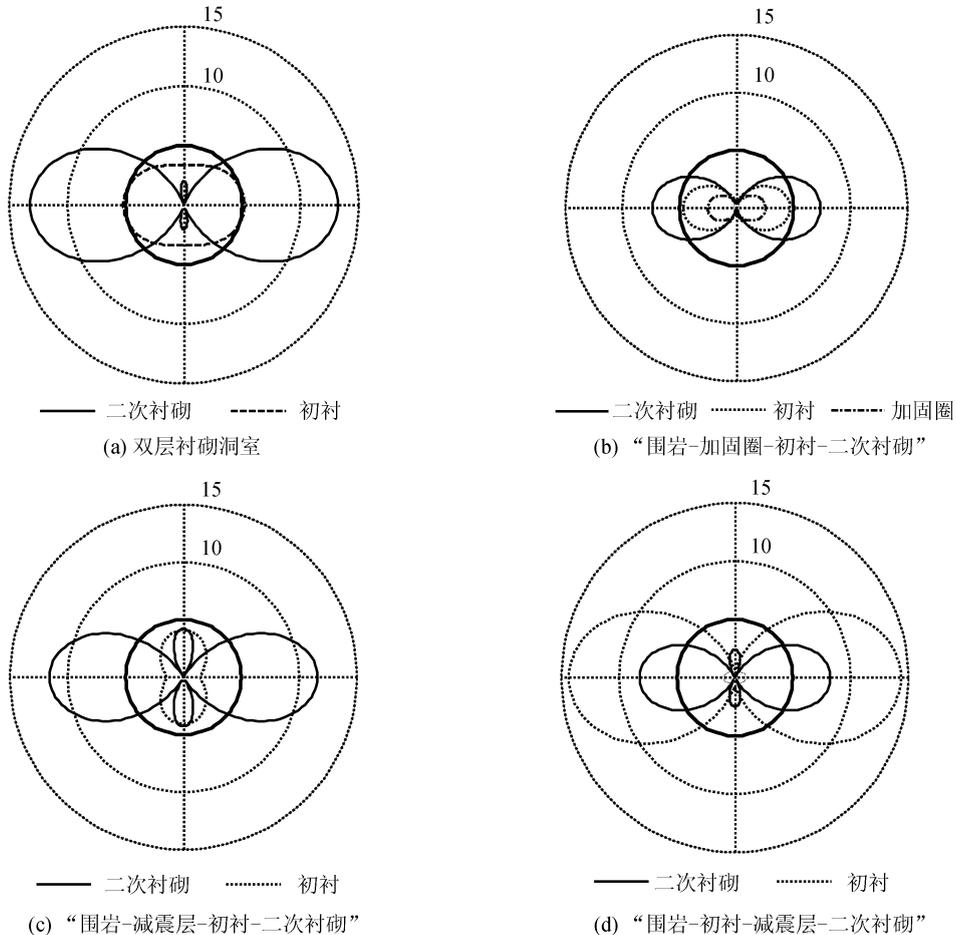


图2 不同结构洞室动应力集中系数

Fig.2 Dynamic stress concentration factors of cavities with different structures

根据文献[6,9],发现衬砌介质泊松比和密度对组合式衬砌结构动应力集中系数影响较小,因此,本文拟针对衬砌弹性模量和厚度两个参数进行优化研

究,引入衬砌介质和围岩弹性模量比 $\gamma = E_i/E_1$ 及衬砌介质和洞室净空半径比 $\lambda = h_i/R_4$ 两个无量纲参数。

2.2 洞室注浆加固圈参数优化

首先研究加固区厚度对洞室动应力的影响,计算参数:注浆加固圈弹性模量为 15 GPa,密度 2 200 kg/m³,泊松比 0.25,其他参数同上文。如图 3 所示,随着洞室围岩注浆加固厚度和洞室内净空半径比 λ 增大,二次衬砌动应力集中系数明显减小,说明实际工程中增大注浆加固圈的厚度对隧道结构有利。但应注意到,当 $\lambda > 1.0$ 时,增大注浆加固区厚度,二次衬砌动应力减小趋势降低,因此考虑到实际工程中经济成本,建议注浆加固区厚度不宜超过 1.0 倍隧道内净空半径。

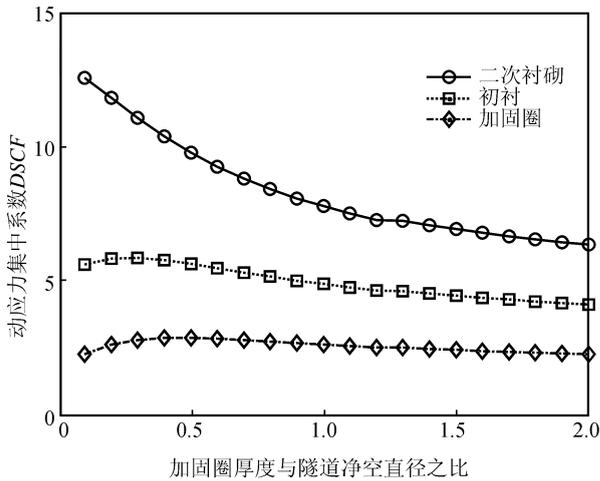


图 3 注浆加固洞室动应力集中系数随 λ 变化图

Fig.3 Dynamic stress concentration factor of cavity with grouting zone versus λ

为研究加固区弹性模量参数 γ 对洞室动应力的影响,选取计算参数:注浆加固圈厚度取 2.5 m,其他参数同上文。如图 4 所示,随着注浆区围岩弹性

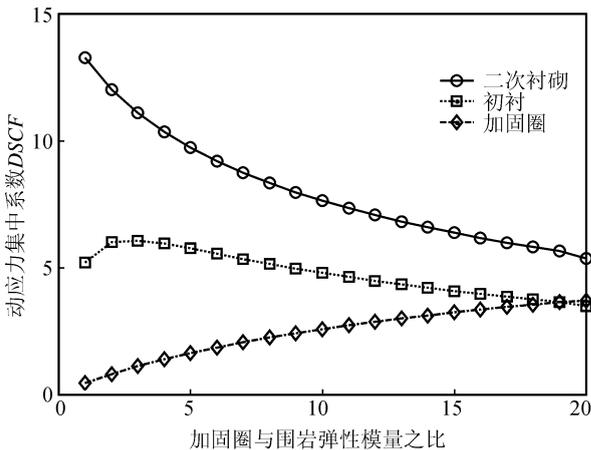


图 4 注浆加固洞室动应力集中系数随 γ 变化图

Fig.4 Dynamic stress concentration factor of cavity with grouting zone versus γ

模量增大,洞室衬砌动应力集中系数显著降低,可见提高加固区弹模有利于隧道结构抗震。

进一步对比分析注浆区厚度和弹性模量对洞室动应力集中系数的影响,考虑到增大注浆区厚度的成本,实际工程中采用增加注浆区围岩刚度参数则更为经济有效。

2.3 减震层参数优化研究

(1) 减震层弹性模量

针对减震层弹性模量对“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”和“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”洞室动应力集中系数的影响开展研究,计算参数:减震层厚度 h 取 10 cm,其他计算参数同上文。

如图 5(a)所示,对于“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”洞室,当减震层和围岩弹模比 γ 小于 1/20 时,随着减震层弹性模量减小,洞室初衬和二次衬砌的动应力集中系数明显降低。

如图 5(b)所示,对于“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室,当减震层和围岩弹模比 γ 小于 1/20 时,随着减震层弹性模量减小,洞室二次衬砌的动应力集中系数显著降低,但初衬动应力集中系数变大。

结合图 5(a)、(b)曲线变化规律,建议实际工程中减震层弹性模量取值应低于围岩弹性模量的 1/20。

(2) 减震层厚度

针对减震层厚度对“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”和“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室动应力集中系数的影响开展研究,计算参数:减震层弹性模量 30 MPa,其他参数同上文。

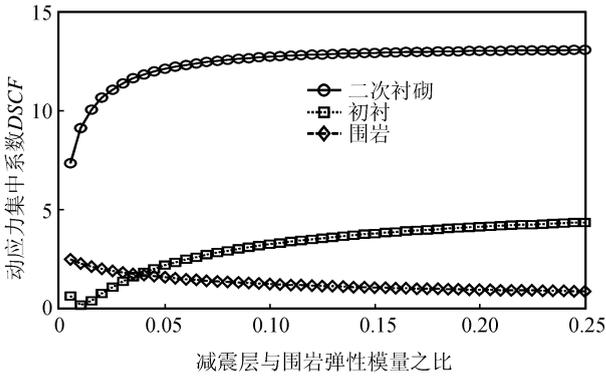
如图 5(c)所示,减震层厚度对“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”洞室动应力集中系数有显著影响,随着减震层厚度和洞室内净空半径之比 λ 增大,洞室初衬和二次衬砌动应力集中系数减小。

如图 5(d)所示,对于“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室,随着减震层厚度和洞室内净空半径之比 λ 增大,洞室二次衬砌动应力集中系数减小,但初衬动应力集中系数的影响增大;当减震层厚度与洞室内净空半径比 $\lambda > 1/50$ 时,减震层减震效果降低。

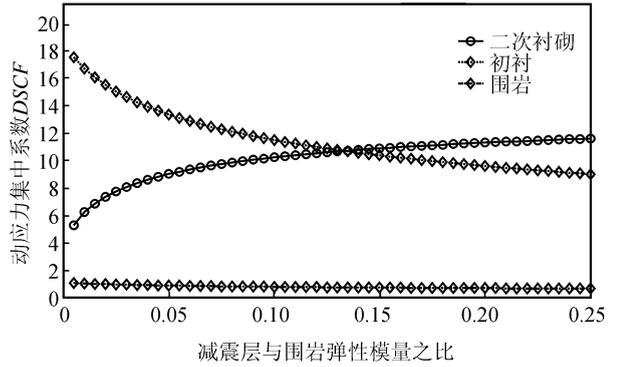
对比分析图 5(c)和(d)可见,对于“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室,当减震层厚度参数 λ 从 0 增大到 1/50 时,二次衬砌最大动应力集中系数由 13.5 减小到 12.1,但对于“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”洞室,此时二次衬砌最大动应力集中系数从 13.5 减小到 8.2,说明初衬和二次衬砌间设置减震

层具有较好的减震效果。考虑到实际工程中围岩的稳定性,建议采用“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”减

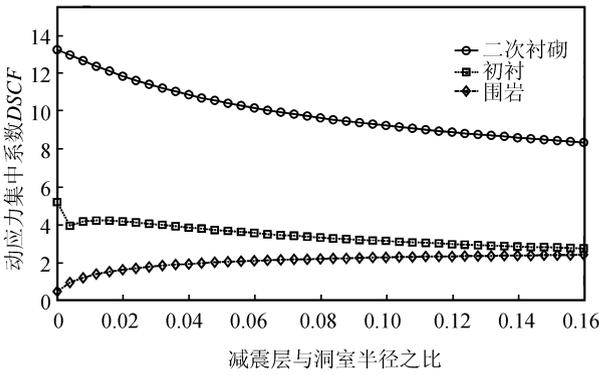
震结构,其中减震层最优厚度为洞室内净空半径的1/50。



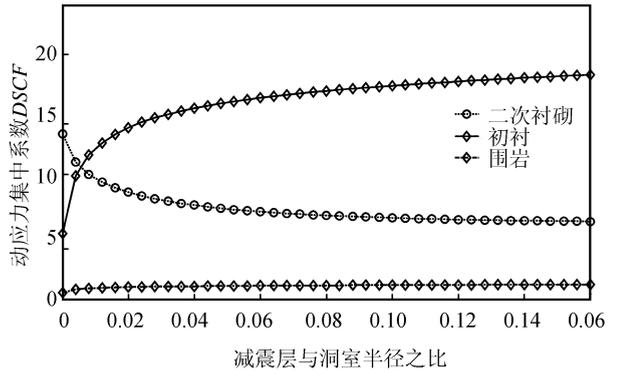
(a) “围岩-减震层-初衬-二次衬砌”洞室



(b) “围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室



(c) “围岩-减震层-初衬-二次衬砌”洞室



(d) “围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室

图5 不同结构洞室动应力集中系数随λ变化图

Fig.5 Dynamic stress concentration factors of cavities with different structures versus λ

3 管道隧道新型减震结构

针对该管道隧道穿越区域位于IX度地震烈度带中,考虑隧址分布主要为强风化花岗岩,呈碎石、角砾状结构,围岩自稳能力较差,建议隧道采用“围岩-加固圈-减震层-衬砌”减震结构。注浆加固圈不仅可以改善围岩力学参数,保证围岩稳定,还可以起到抗震效果,结合在加固圈岩体和衬砌间设置减震层,进一步减小衬砌动应力。主要设计参数:围岩注浆区厚度为1倍洞室内净空半径,取2.5 m;注浆区岩体弹性模量取为10倍围岩弹模值,即15 GPa;减震层弹性模量取50 MPa,减震层厚度取0.1 m,其他参数见表1。低频垂直入射波作用下,“围岩-加固圈-减震层-衬砌”动应力集中系数分布如图6所示。

对比图2和图6,可以发现新型减震结构衬砌最大动应力集中系数最小。

4 结论

基于Bessel-Hankel级数展开法,给出平面P

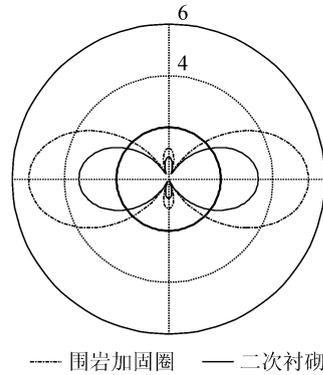


图6 “围岩-加固圈-减震层-衬砌”洞室动应力集中系数

Fig.6 Dynamic stress concentration factor of cavity with buffer layers between grouting zone and lining

波入射下无限空间中三层衬砌圆形洞室动应力集中系数解析解,结合IX度强震区管道隧道抗减震设计实例,分析不同衬砌刚度和厚度组合的“围岩-加固圈-初衬-二次衬砌”、“围岩-减震层-初衬-二次衬砌”和“围岩-初衬-减震层-二次衬砌”洞室的动应力

问题洞室动应力集中系数变化规律,最后结合工程实际情况,建议采用“围岩-加固圈-减震层-衬砌”综合减震措施。研究表明:注浆加固洞室围岩和设置弹模较低的减震层都可以降低二次衬砌动应力;围岩注浆加固区弹性模量越大,衬砌动应力集中系数越低,最优注浆加固区厚度为1倍洞室内净空半径;减震层弹性模量宜取1/20,最优减震层厚度为1/50洞室内净空半径。本文研究结论也可以为强震区洞室抗减震研究提供参考。

致谢:本文得到西南交通大学博士生创新基金资助。

参考文献(References)

- [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] Lee V W, T Rifunac M D. Response of Tunnels to Incident SH Waves[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1979, 105: 643-659.
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 王长柏, 李海波, 周青春, 等. P 波作用下深埋隧道动应力集中问题参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 775-780.
WANG Chang-bo, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Parameters Sensitivity Analysis of Dynamic Stress Concentration for Deep Buried Tunnel under Incident Plane Waves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 775-780. (in Chinese)
- [8] 王滢, 高盟, 高广运, 等. 饱和土中圆柱形衬砌对瞬态弹性波的散射[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 324-330.
WANG Ying, GAO Meng, GAO Guang-yun, et al. Scattering of Transient Elastic Wave by Cylindrical Cavity with Lining in Saturated Soil[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 324-330. (in Chinese)
- [9] 王帅帅, 高波, 申玉生, 等. 平面 SH 波入射下深埋软岩隧道抗震机理研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊 1): 280-286.
WANG Shuai-shuai, GAO Bo, SHEN Yu-sheng, et al. Study on the Mechanism of Resistance and Damping Technology of Deep Soft Rock Tunnels Subjected to Incident Plane SH Waves [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Supp1): 280-286. (in Chinese)
- [10] 高峰, 石玉成, 严松宏, 等. 隧道的两种减震措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 222-229.
GAO Feng, SHI Yu-cheng, YAN Song-hong, et al. Study of Two Shock Absorption Measures in Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 222-229. (in Chinese)
- [11] 徐华, 李天斌. 隧道不同减震层的地震动力响应与减震效果分析[J]. 土木工程学报, 2011(增刊 1): 201-208.
XU Hua, LI Tian-bin. Seismic Dynamic Response and Damping Effect Analysis of Different Buffer Layers on Tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(Supp 1): 201-208. (in Chinese)