

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.003

瞬态 P 波扰动下深埋圆形复合衬砌引水隧洞 动力响应解析解及影响因素研究*

李梅^{1a,1b,1c}, 陆宇嘉^{1a}, 梅万全², 韩高升^{1d,3}, 陈光海⁴, 赵明生^{5,6}, 柯昌均^{1a}, 任高峰^{1a,1b,1c}

1. 武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室; c. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室; d. 土木工程与建筑学院, 武汉 430070;
2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430068;
4. 中铁上海工程局集团 第四工程有限公司, 天津 300000;
5. 非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室, 广州 510623;
6. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510623)

摘要: 爆破开挖产生的扰动 P 波会影响隧道的稳定性, 引水隧洞里充满了水, 其隧道围岩动力响应解析解求法与常规无水隧道的求法势必不一样。目前现有解析解研究多集中在稳态解和单衬砌隧道, 较少同时考虑存在复合衬砌隧道和有水的情况, 因此, 开展瞬态 P 波扰动下深埋圆形复合衬砌引水隧洞稳定性瞬态响应研究, 将隧道内流体视作另一种介质, 隧道与衬砌之间视为非理想接触面, 结合傅里叶合成技术、波函数展开法及梯形求积公式对隧道围岩瞬态响应进行理论求解; 通过与既有文献结果对比, 验证了方法的有效性; 进而分析围岩泊松比、非理想界面模型的弹性系数以及扰动荷载加载时间对动应力集中系数的影响。研究结果表明: 动力扰动过程中, 顶底板产生显著的压应力集中, 两帮出现显著的拉应力集中; 随着泊松比增大, 两帮由拉应力集中转化为压应力集中, 顶底板压应力集中逐渐减弱; 围岩衬砌接触较差时, 隧道围岩应力时程响应曲线出现显著振荡; 随着界面弹性系数增大, 非理想界面模型的动力响应收敛于理想界面模型的响应; 随着爆破荷载作用时间增加, 顶底板处的压应力峰值先增大, 两帮处的拉应力峰值先减小, 最后均趋向稳定。

关键词: 扰动 P 波; 复合衬砌引水隧洞; 瞬态响应; 傅里叶合成技术; 波函数展开法

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)02-0022-09

Analytical Solution and Influencing Factors of Dynamic Response of Deep-buried Diversion Tunnel with Circular Composite Lining under Transient Disturbance by P-wave

LI Mei^{1a,1b,1c}, LU Yu-jia^{1a}, MEI Wan-quan², HAN Gao-sheng^{1d,3}, CHEN Guang-hai⁴,
ZHAO Ming-sheng^{5,6}, KE Chang-jun^{1a}, REN Gao-feng^{1a,1b,1c}

- (1. a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Ministry of Education Key

收稿日期 (Date of reception): 2024-07-19

网络首发日期 (Published online): 2025-01-15

作者简介: 李梅 (1976-), 女, 副教授、博士, 主要从事采矿工程和岩土工程的教学和研发工作, (E-mail) sabina15@126.com。

通讯作者: 韩高升 (1976-), 男, 高级工程师、硕士, 主要从事隧道和地下工程的设计研发工作, (E-mail) 79428069@qq.com。

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目 (2022BEC040) 近距离多层磷矿优化开采碳排放核算关键技术研发; 国家自然科学基金 (52064003)

About the author: LI Mei (1976-), female, associate professor, Ph. D, mainly engaged in teaching and research of mining engineering and geotechnical engineering, (E-mail) sabina15@126.com.

Corresponding author: HAN Gao-sheng (1976-), male, senior engineer, master's degree, mainly engaged in the design and development of tunnels and underground engineering, (E-mail) 79428069@qq.com.

Fund Programs: Hubei Provincial Technological Innovation Special Major Project (2022BEC040); Research and Development of Key Technologies for Carbon Emission Accounting for Optimal Mining of Close-range Multilayer Phosphate Rock, National Natural Science Foundation of China (52064003)

Laboratory of Key Non-metallic Mineral Resources Green Utilization; c. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment; d. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430068, China; 4. China railway Shanghai Engineering Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300000, China; 5. Key Laboratory of Safety Intelligent Mining in Non-coal Open-pit Mines, National Mine Safety Administration, Guangzhou 510623, China; 6. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: Blasting excavation generates transient P-waves that significantly impact tunnel stability. For water-filled diversion tunnels, the dynamic response of the surrounding rock differs from conventional dry tunnels. Most existing analytical studies focus on the steady-state solution and single-lined tunnels, rarely accounting for composite linings or the presence of water. This paper investigates the transient stability response of deep-buried circular composite lining diversion tunnels under transient P-wave disturbances. The fluid within the tunnel is treated as a distinct medium, and the tunnel-lining interface is considered a non-ideal contact surface. By applying Fourier synthesis, wave function expansion, and trapezoidal quadrature formula, an analytical solution is derived. Validation through comparison with existing literature demonstrates the method's effectiveness. The study analyzes the effects of Poisson's ratio of surrounding rock, the non-ideal interface's elastic coefficient, and the disturbance's loading duration on the dynamic stress concentration coefficient. Results indicate that the compressive stress concentrations occur at the roof and floor, while tensile counterpart concentrations appear at the two sidewalls during dynamic disturbance. As Poisson's ratio increases, there is a transition from tensile to compressive stress concentration, with a gradual degree in compressive stress intensity. Poor contact between the rock mass and liner induces oscillations in the stress time-history curve. The dynamic response converges accordingly as the elastic coefficients of an imperfect interface approach those of a perfect interface. With increasing blasting load duration, peak dynamic stress around the roof and floor initially rises, then stabilizes, while stress at the sidewalls initially decreases before leveling off.

Key words: P-wave disturbance; diversion tunnel with composite lining; transient response; Fourier synthesis technique; wave function expansion method

近年来,我国交通、矿山、水电及军事工程等领域的隧道埋深不断增大,地下隧道在建设和运营过程中可能受到由地震或爆炸产生的弹性波作用,其对隧道的稳定性有较大威胁^[1]。因此,开展动载荷作用下隧道围岩的动态响应解研究进而分析其稳定性很有意义。

目前国内外隧道抗震理论分析方法主要有解析法及数值法两类,解析法主要包括波函数展开法、复变函数法、积分方程法以及积分变换,数值法主要包括有限元法、有限差分法、边界元法以及离散元法^[2]。Pao 和 Mow 详细地阐述了波函数展开法^[3],研究了平面简谐 P 波、SH 波以及 SV 波在全空间圆形孔洞周围的散射,计算相关动应力集中系数分布。王长柏等对无限介质中双层衬砌圆形隧道的二维平面简谐 P 波衍射问题的解析解进行了推导^[4],并分析了不同介质弹性参数以及入射波频率对解析解结果的影响;丁海滨等采用波函数展开法对深埋圆形

复合式衬砌隧道的动应力集中问题进行研究^[5],并对衬砌厚度及弹性模量对动应力集中系数造成的影响进行了分析;王帅帅等基于 Fourier-Bessel 级数展开^[6],对 P 波入射下的深埋三层复合式衬砌洞室的动应力集中问题进行研究。上述研究主要聚焦于稳态 P 波在隧道周围的散射以及动应力集中,而实际工程扰动往往以瞬态波形式作用于隧道。因此,有必要开展隧道瞬态动力响应研究,以保障隧道的全生命周期安全运营。陶明等通过波函数展开法推导了无限空间弹性介质中充满流体的圆形衬砌洞室在平面 P 波作用下的解析解^[7-9],分析了弹性、刚性衬砌对洞室的动应力集中的影响,并在稳态解的基础上引用半正弦函数作为入射波,借助梯形求积法得到了瞬态 P 波作用下充满流体圆形衬砌洞室周围动应力的解析解,分析了不同衬砌参数和不同波长对围岩与衬砌内侧动应力集中的影响;李梅等引入三角形爆破荷载函数作为入射波^[10],通过波函数

展开法和梯形求积开展了爆破 P 波扰动下深埋有衬砌隧道瞬态动应力响应解析研究;梅万全等基于波函数展开法和拉普拉斯变换反演推导了时域动力响应的理论计算公式^[11],采用弹塑性细胞自动机中的动力模块模拟爆破引起的弹塑性动力响应,研究隧道不同位置的动应力集中系数及径向和环向速度比例系数变化。

然而,上述研究对象主要为无衬砌、单衬砌洞室或洞室无流体,同时考虑瞬态 P 波扰动下复合衬砌加引水隧洞的理论研究较少,故本文以深埋圆形双层衬砌引水隧洞为研究对象,将隧道内流体视作另一种介质,隧道与衬砌之间视为非理想接触面,结合傅里叶合成技术、波函数展开法及梯形求积公式对瞬态 P 波扰动下隧道围岩瞬态动力响应进行理论求解,并分析岩体泊松比、扰动荷载作用时间以及岩体-衬砌界面接触状态对隧道围岩响应的影响,为深埋隧道的加固技术提供理论基础。

1 瞬态 P 波扰动下深埋复合衬砌引水

当隧道长度远大于隧道半径时,平面 P 波扰动下的动应力响应问题可当作平面应变问题处理,可在稳态动应力响应解析解的基础上通过数值逆变换或梯形求积等方法求得瞬态动应力响应解析解,进而对引水隧洞及围岩周围的动应力进行分析^[12]。

如图 1 所示,处于无限空间介质中的深埋圆形双层衬砌引水隧洞计算模型可简化为平面应变问题,衬砌材料均为各向同性弹性,平面 P 波沿 X 轴正向传播至衬砌的外边界。由于应力波在波阻抗不同的介质中传播时会在介质分界面发生反射和透射,故平面 P 波传播至介质 I、II、III、IV 中均产生反射和透射。图中介质 I、II、III、IV 分别为围岩、初衬、二衬和流体。

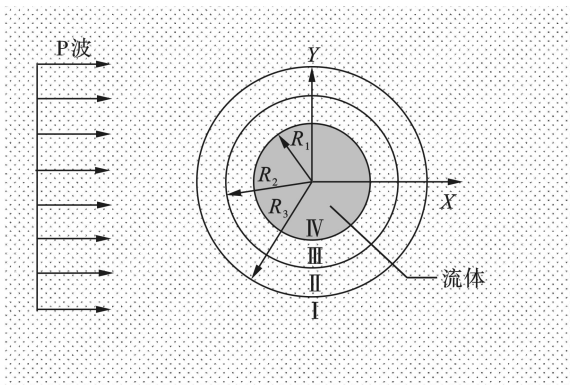


图 1 双层衬砌引水隧洞力学分析模型

Fig. 1 Mechanical analysis model of a double-lined diversion tunnel

1.1 深埋圆形双层衬砌引水隧洞波场分析

忽略时间影响因子 $e^{-i\omega t}$, 单位幅值的稳态平面 P 波在无限介质中的位移势函数表示为^[13]

$$\varphi^{(i)} = e^{i(\alpha_s x - \omega t)} \quad (1)$$

式中: $\alpha_s = \omega/C_{ps}$ 为围岩纵波波数; C_{ps} 为围岩纵波波速; ω 为入射 P 波的频率。

结合坐标变换及贝塞尔函数定义,式(1)可表示为

$$\varphi^{(i)} = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(\alpha_s r) \cos(n\theta) \quad (2)$$

式中: J_n 为第一类 n 阶贝塞尔函数,当 $n=0$ 时, $\varepsilon_n=1$, 当 $n>0$ 时, $\varepsilon_n=2$ 。

由于围岩和初衬的波阻抗差异,当稳态平面 P 波传播到围岩与衬砌的接触面上时,将会产生向外传播的衍射 P 波 φ_s 和 SV 波 ψ_s , 其势函数表达式为

$$\varphi_s = \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(\alpha_s r) \cos(n\theta) \quad (3)$$

$$\psi_s = \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(\beta_s r) \sin(n\theta) \quad (4)$$

式中: A_n 、 B_n 为待定系数; $H_n^{(1)}$ 为第一类 n 阶汉克尔函数; $\beta_s = \omega/C_{ss}$, β_s 为围岩横波波数, C_{ss} 为围岩横波波速。由叠加原理可得围岩介质中总波场

$$\varphi_1 = \varphi^{(i)} + \varphi_s \quad (5)$$

$$\psi_1 = \psi_s \quad (6)$$

初衬中的波场由初衬外侧的透射 P 波 φ_{L1} 和透射 SV 波 ψ_{L1} 以及二衬外侧的反射 P 波 φ_{L2} 和反射 SV 波 ψ_{L2} 组成,初衬的总波场为

$$\varphi_2 = \varphi_{L1} + \varphi_{L2} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_n^{(2)}(\alpha_{L1} r) \cos(n\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} E_n H_n^{(1)}(\alpha_{L1} r) \cos(n\theta) \quad (7)$$

$$\psi_2 = \psi_{L1} + \psi_{L2} = \sum_{n=0}^{\infty} D_n H_n^{(2)}(\beta_{L1} r) \sin(n\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} F_n H_n^{(1)}(\beta_{L1} r) \sin(n\theta) \quad (8)$$

二衬的波场由二衬的外侧的透射 P 波 φ_{L3} 和透射 SV 波 ψ_{L3} 以及二衬内侧的反射 P 波 φ_{L4} 和反射 SV 波 ψ_{L4} 组成,二衬的总波场为

$$\varphi_3 = \varphi_{L3} + \varphi_{L4} = \sum_{n=0}^{\infty} K_n H_n^{(2)}(\alpha_{L2} r) \cos(n\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} M_n H_n^{(1)}(\alpha_{L2} r) \cos(n\theta) \quad (9)$$

$$\psi_3 = \psi_{L3} + \psi_{L4} = \sum_{n=0}^{\infty} L_n H_n^{(2)}(\beta_{L2} r) \sin(n\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} N_n H_n^{(1)}(\beta_{L2} r) \sin(n\theta) \quad (10)$$

流体中的波场由二衬中的透射 P 波组成,其波场表达式为

$$\varphi_4 = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n H_n^{(1)}(\alpha_{L3} r) \cos(n\theta) \quad (11)$$

式中: $C_n, D_n, E_n, F_n, K_n, L_n, M_n, N_n, Q_n$ 为待定系数; $H_n^{(2)}$ 为第二类 n 阶汉克尔函数; $\alpha_{L1}, \alpha_{L2}, \alpha_{L3}, \beta_{L1}, \beta_{L2}$ 分别为初衬、二衬和流体的纵波和初衬、二衬的横波波数。

简谐 P 波在围岩传播方向上的应力强度定义为

$$\sigma_{0s} = -\mu_s \beta_s^2 \quad (12)$$

以此做归一化因子,分别定义围岩、初衬、二衬以及流体中的动应力集中系数为

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta s} = \sigma_{\theta\theta s} / \sigma_{0s} = \frac{2}{\beta_L^2 r^2} \sum_{n=0}^{\infty} [\varepsilon_n i^n \varepsilon_{21}^{(1)}(\alpha_s r) + A_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\alpha_s r) + B_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_s r)] \cos(n\theta) \quad (13)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta L1} = \sigma_{\theta\theta L1} / \sigma_{0s} = \frac{2\mu_2}{\mu_1 \beta_L^2 r^2} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{21}^{(4)}(\alpha_{L1} r) + D_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\beta_{L1} r) + E_n \varepsilon_{22}^{(4)}(\alpha_{L1} r) + F_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_{L1} r)] \cos(n\theta) \quad (14)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta L2} = \sigma_{\theta\theta L2} / \sigma_{0s} = \frac{2\mu_3}{\mu_1 \beta_L^2 r^2} \sum_{n=0}^{\infty} [K_n \varepsilon_{21}^{(4)}(\alpha_{L1} r) + L_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\beta_{L2} r) + M_n \varepsilon_{22}^{(4)}(\alpha_{L2} r) + N_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_{L2} r)] \cos(n\theta) \quad (15)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta L3} = \frac{\mu_3}{\mu_1 \beta_L^2} \sum_{n=0}^{\infty} Q_n \beta_{L2}^2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_L}\right) \cdot J_n(\alpha_f r) \quad (16)$$

式中: $\bar{\sigma}_{\theta\theta s}, \bar{\sigma}_{\theta\theta L1}, \bar{\sigma}_{\theta\theta L2}$ 分别为围岩与初衬接触面、初衬和二衬接触面以及隧道内表面处的环向应力; ρ_{L2}, ρ_f 分别为二衬和流体的密度; μ_1, μ_2, μ_3 分别为围岩、初衬和二衬的剪切模量。

1.2 边界条件及 P 波扰动下的动应力响应稳态解

当围岩与衬砌之间存在间隙介质及不完整面时,围岩与衬砌之间表现出非理想接触。在围岩与衬砌之间引入弹簧界面模型来模拟接触面之间的非理想接触,即应力连续,位移不连续^[14],即

$$\text{当 } r = R_3 \text{ 时} \begin{cases} \sigma_{r1} = \sigma_{r2} \\ \sigma_{r\theta1} = \sigma_{r\theta2} \\ u_{r1} = u_{r2} + \sigma_{r1} / k_r \\ u_{\theta1} = u_{\theta2} + \sigma_{r1} / k_\theta \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{当 } r = R_2 \text{ 时} \begin{cases} \sigma_{r2} = \sigma_{r3} \\ \sigma_{r\theta2} = \sigma_{r\theta3} \\ u_{r2} = u_{r3} \\ u_{\theta2} = u_{\theta3} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{当 } r = R_1 \text{ 时} \begin{cases} \sigma_{r3} = \sigma_{r4} \\ u_{r3} = u_{r4} \\ \sigma_{\theta3} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

整理上述边界条件即可确定相关未知复系数 $A_n, B_n, C_n, D_n, E_n, F_n, M_n, N_n, P_n, Q_n, R_n$; 再将所求出的待定系数带入位移与应力的势函数方程中,就可以得到围岩、初衬、二衬、水中的应力。

1.3 瞬态 P 波扰动下动应力响应求解

1.2 节仅对简谐 P 波入射下引水隧洞的稳态响应进行了理论分析,而在实际工程中产生的爆破扰动往往会表现出明显的非周期性,这些非周期性扰动会在隧道周围引起瞬态响应。瞬态 P 波扰动下的响应解析解可以在上节所求得的稳态解析解的基础上进行推导^[15,16]。

引入三角形爆破荷载函数来定义瞬态扰动 P 波 $f(t)$, 即

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \text{ 或 } t \geq t_s \\ \frac{t}{t_r}, & 0 \leq t < t_r \\ \frac{t_s - t}{t_s - t_r}, & t_r \leq t < t_s \end{cases} \quad (20)$$

将时间 t 归一化为入射波经过外半径 R_3 的时间^[17]

$$\tau = C_{ps} t / b \quad (21)$$

借助傅里叶变换,可将输入函数 $f(t)$ 引起的瞬态响应表示为

$$g(x_i, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(x_i, \omega) F(\omega) \cdot d\omega \quad (22)$$

式中: $\chi(x_i, \omega)$ 为系统的导纳函数,即上节所求的稳态响应; $F(\omega)$ 为输入函数 $f(t)$ 的傅里叶变换。

$$F(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi}}, \text{Im}\xi > 0 \quad (23)$$

式中, $\text{Re}(\xi) = \alpha_s b$ 。

系统的导纳函数可简化为

$$\chi(x_i, \omega) = R(\omega) + iI(\omega) \quad (24)$$

式中, $R(\omega), I(\omega)$ 分别表示稳态响应的实部和虚部。

由 Heaviside 阶跃函数输入引起的脉冲响应可以表示为

$$g_h(x_i, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\omega) \cos\omega\tau d\tau = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin\omega t}{\omega} d\omega \quad (25)$$

根据 Duhamel 积分,任意输入函数 $f(t)$ 产生的动态响应可表示为

$$g(x_i, t) = \int_0^t f(\tau) g'_h(t - \tau) d\tau = f(0) g_h(t) + \int_0^t f'(\tau) g_h(t - \tau) d\tau \quad (26)$$

当 $0 \leq t < t_r$,

$$g(x_i, t) = \int_0^{t_r} \frac{1}{t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi t_r} \int_0^\infty \frac{R(\omega) \cos \omega t}{\omega^2} d\omega \quad (27)$$

当 $t_r \leq t < t_s$,

$$g(x_i, t) = \int_0^{t_r} \frac{1}{t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega - \int_{t_r}^t \frac{1}{t_s - t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi t_r} \int_0^\infty \frac{R(\omega) [\cos \omega(t - t_r) - \cos \omega t]}{\omega^2} d\omega - \frac{2}{\pi(t_s - t_r)} \int_0^\infty \frac{R(\omega) [1 - \cos \omega(t - t_r)]}{\omega^2} d\omega \quad (28)$$

当 $t \geq t_s$,

$$g(x_i, t) = \int_0^{t_r} \frac{1}{t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega - \int_{t_r}^t \frac{1}{t_s - t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi t_r} \int_0^\infty \frac{R(\omega) [\cos \omega(t - t_r) - \cos \omega t]}{\omega^2} d\omega - \frac{2}{\pi(t_s - t_r)} \int_0^\infty \frac{R(\omega) [\cos \omega(t - t_s) - \cos \omega(t - t_r)]}{\omega^2} d\omega \quad (29)$$

运用数值积分方法计算上述无穷积分即可确定动力扰动下隧道围岩的时域响应。

2 解析求解方法有效性验证

把本文有流体双层衬砌隧洞的计算模型演变成无流体无衬砌的隧洞(空腔,模型1)和无流体单层衬砌隧洞(模型2),若上述求解方法对模型1和模型2的求解结果与文献既有方法求解结果相同,则可说明本文模型解析求解方法的有效性。

运用数值积分方法计算瞬态解时,若初衬和二衬的力学参数与围岩的力学参数一致($R_1 = R_2 = R_3$),此时双层衬砌引水隧洞计算模型退化为无衬砌引水隧洞;又令流体的弹性模量趋于0,则计算模型进一步退化成无衬砌引水隧洞不含流体的情况^[7](模型1),此时隧洞界面处的环向应力时程曲线如图2所示,与文献[18]的结果一致,说明了本文求解方法适用于无流体无衬砌的隧洞(模型1)。若初衬的力学参数与围岩力学参数一致,二衬的力学参数与文献[19]中衬砌参数相同,即初衬可看作围岩,且 $R_1 = R_2$,此时双层衬砌引水隧洞计算模型退化成单层衬砌引水隧洞计算模型,又令流体的弹

性模量趋于0,则单层衬砌引水隧洞计算模型退化成单层衬砌引水隧洞不含流体的情况(模型2),此时隧道模型2环向应力时程曲线如图3所示,与文献[19]的结果一致,说明了本文求解方法也适用于无流体单层衬砌隧道(模型2)。综上,说明本文模型解析求解方法有效。

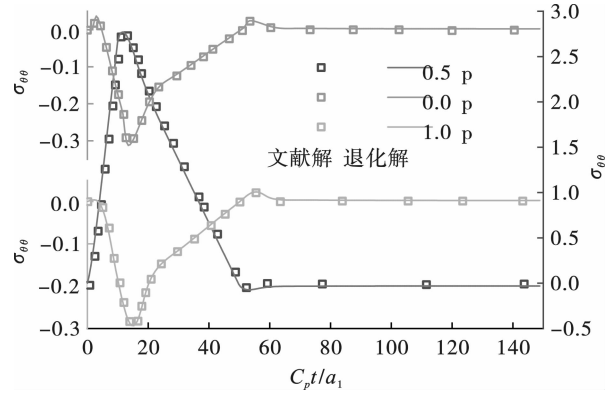


图2 退化解与文献18的比较

Fig. 2 Comparison of degradation with Ref. 18

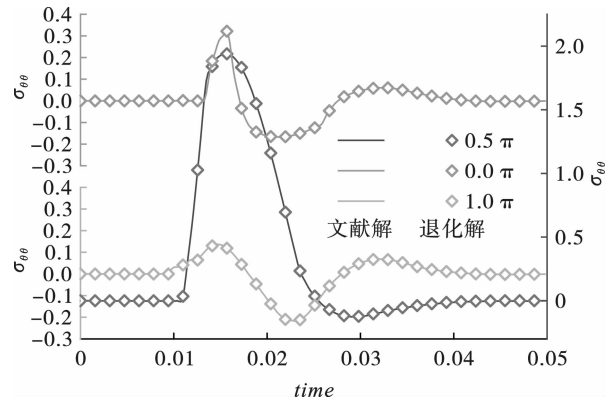


图3 退化解与文献19的比较

Fig. 3 Comparison of degradation with Ref. 19

3 参数对引水隧洞瞬态动力响应的影响分析

以文献[20]中模型参数为例,采用本文方法首先分析原有参数下引水隧洞瞬态动力响应分布情况,进而分析围岩泊松比、爆破荷载加载时间、界面弹性系数的变化对引水隧洞瞬态动力响应的影响。

3.1 引水隧洞瞬态动力响应分布规律

文献[20]计算模型为一无水双衬砌隧道,其参数为^[20]:围岩的弹性模量 $E_1 = 50$ GPa,泊松比 $\nu_1 = 0.22$,密度 $\rho_1 = 2700$ kg/m³;初衬的弹性模量 $E_2 = 29.5$ GPa,泊松比 $\nu_2 = 0.25$,密度 $\rho_2 = 2500$ kg/m³;二衬的弹性模量 $E_3 = 31$ GPa,泊松比 $\nu_3 = 0.25$,密度 $\rho_3 = 2500$ kg/m³;扰动荷载标准化上升时间 $\tau_r = 5$

以及总时间 $\tau_s = 5\tau_r$;瞬态 P 波扰动下引水隧洞围岩与衬砌接触面、初衬和二衬接触面以及隧道内表面处的归一化环向应力时程响应如图 4 所示。当 $\theta = 0.5\pi$ 时,围岩与衬砌接触面、初衬和二衬接触面以及隧道内表面处的环向应力随时间的变化趋势一致,均表现出明显的压应力集中;但隧道内表面处的环向应力峰值大于初衬与二衬接触面处的环向应力,这是因为二衬的弹性模量大于初衬的弹性模量,导致二衬表现出动力放大效应且二衬的受力状态与

初衬相比较差;当 $\theta = 0$ 和 π 时,各接触面及隧道内表面处的环向应力时程曲线大致相同,先从 0 开始增长到正峰值后迅速下降到负值,然后在 0 附近振荡,最终收敛于 0,各接触面以及隧道内表面处的两帮经历了从压应力集中到拉应力集中的过程。

3.2 围岩泊松比对动应力集中系数的影响

取围岩泊松比 $\nu_1 = 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4$,其他参数与 4.1 节一致。不同泊松比时隧道与围岩接触面处的环向应力时程曲线如图 5 所示。

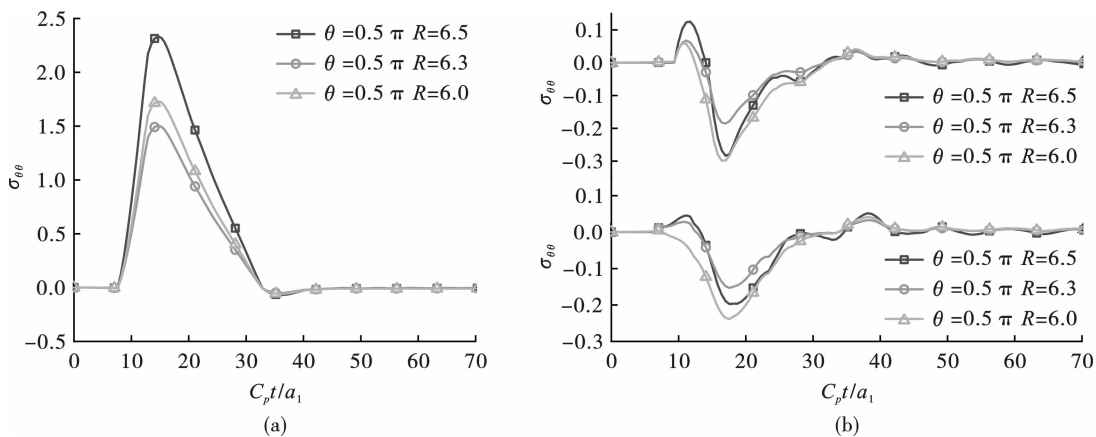


图 4 瞬态环向应力时程响应图

Fig. 4 Time-history response of transient circumferential stress

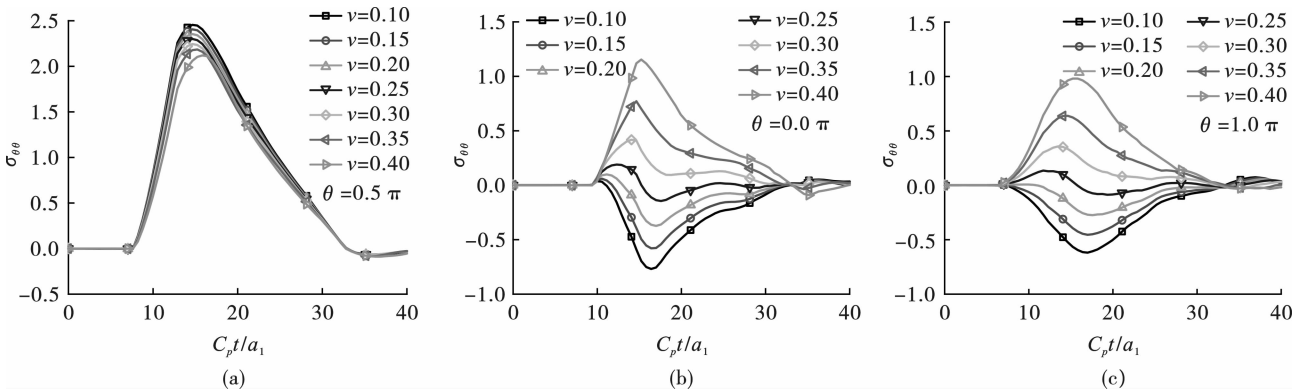


图 5 不同泊松比时瞬态环向应力时程曲线

Fig. 5 Time history curves of transient hoop stress at different Poisson's ratios

当 $\theta = 0.5\pi$ 时,随着围岩泊松比的增大,接触面处的环向应力峰值在不断减小;当 $\theta = 0$ 和 π 时,随着泊松比的增大,两帮的拉应力逐渐减小。当泊松比大于 0.25 时,围岩应力状态发生改变,由拉应力集中转变为压应力集中,并随着围岩泊松比的增大,环向压应力峰值也在不断增加。在实际工程中,当隧道围岩的泊松比小于 0.25 时,就需要注意隧道两帮处可能出现的拉破坏。

3.3 不同爆破荷载加载时间对动应力集中系数的影响

取爆破荷载加载时间 $\tau_r = 2、4、6、8、10$,爆破荷

载总时间与加载时间比值取 5,不同爆破荷载加载下瞬态环向应力时程曲线如图 6 所示; $\theta = 0.5\pi$ 时,环向压应力峰值随着加载时间 τ_r 增大而增大, $\tau_r \geq 8$ 时,环向应力峰值保持不变;当 $\theta = 0$ 和 π 时,环向压应力峰值随着加载时间 τ_r 增大而减小,环向拉应力峰值也随着加载时间 τ_r 增大而减小,最终趋于平稳状态。综合 $\theta = 0、0.5\pi、\pi$ 的环向动应力变化可知,环向动应力先增大后减小,最后收敛于 0;隧道顶底板处出现明显的压应力集中,两帮处出现拉应力集中。计算结果表明,隧道中心处各角度的环向应力一致,隧道中心处 ($R = 0$) 环向应力随爆破荷载

加载时间变化情况如图 6(d) 所示,随着加载时间的增大,隧道中心处的压应力峰值逐渐减小,振荡幅度

也逐渐减小。

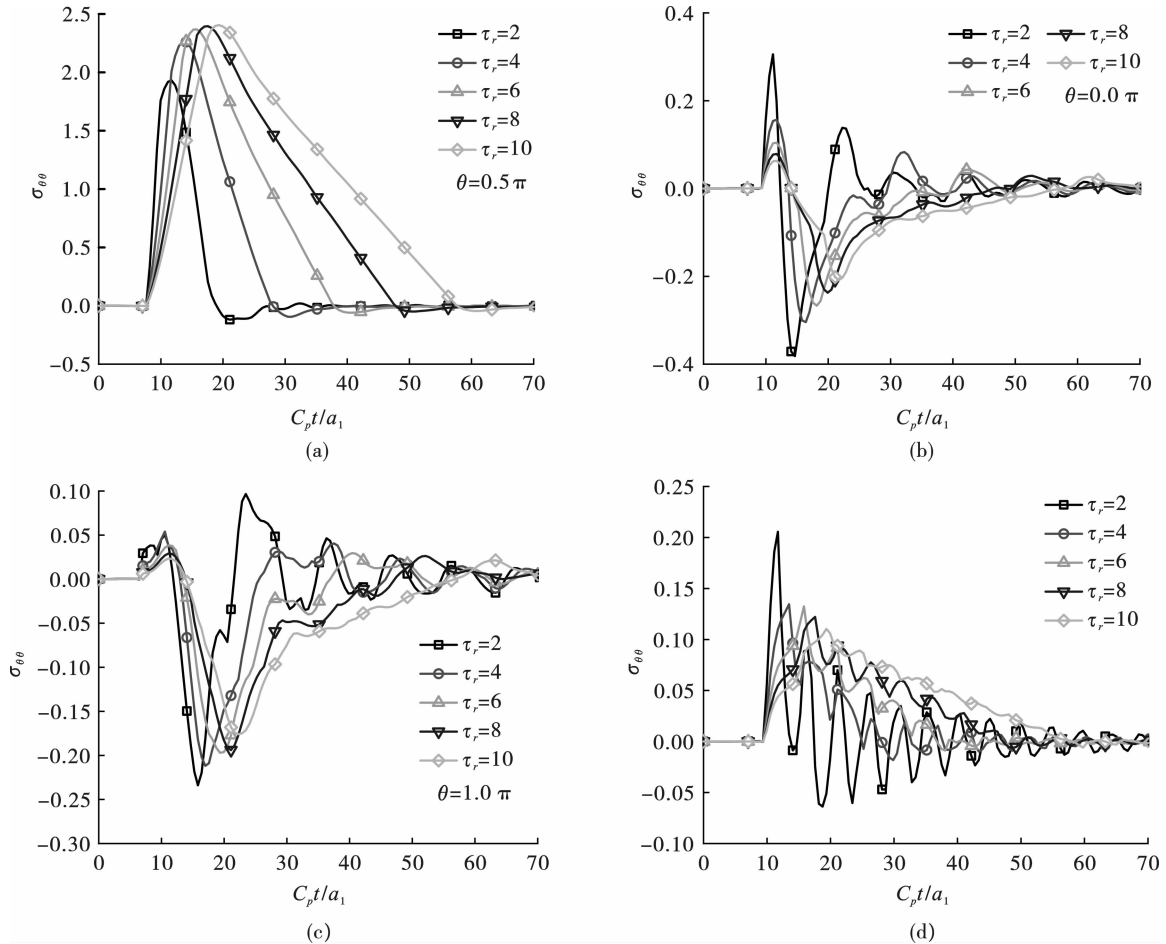


图 6 不同爆破荷载加载下瞬态环向应力时程曲线

Fig. 6 Transient circumferential stresses under different blast load loads

3.4 界面弹性系数对动应力集中系数的影响

围岩及衬砌的力学参数与 3.1 节一致,环向弹性系数 $K_\theta = 100\mu_1/R_3$, 径向弹性系数 $K_r = 0.1\mu_1/R_3, \mu_1/R_3, 10\mu_1/R_3, 100\mu_1/R_3$; 不同径向弹性系数下各接触面和隧道内表面处的动应力分布见图 7。当 $R = 6.5$ 时,顶板的压应力峰值随着径向弹性系数 K_r 的增大而减小;两帮的拉应力峰值随着径向弹性系数 K_r 的增大而减小,最终收敛于理想界面模型。当 $R = 6.3, 6.0$ 时,随着径向弹性系数 K_r 的增大,顶底板的压应力峰值不断增大,两帮的拉应力峰值随着径向弹性系数 K_r 的增大而减小,最终收敛于理想界面模型;当 $K_r = 0.1\mu_1/R_3, \mu_1/R_3$ 时,围岩与衬砌接触面的接触较差,界面处产生了充能和放能,导致界面处的环向应力产生振荡。当径向弹性系数 $K_r = 100\mu_1/R_3$, 环向弹性系数 $K_\theta = 0.1\mu_1/R_3, \mu_1/R_3, 10\mu_1/R_3, 100\mu_1/R_3$, 径向弹性系数对动应力集中系数的影响(图 8)与环向弹性系数的影响类似。

4 结论

论文通过波函数展开法得到系统的导纳函数,引入三角形爆破荷载定义瞬态入射波,利用傅里叶积分变换和梯形求积法推导了深埋圆形双衬砌引水隧洞的瞬态动力响应解析解;分析了引水隧洞瞬态动力响应分布规律以及泊松比、界面弹性系数、爆破荷载加载时间对动应力集中系数的影响,得到下列结论:

(1) 瞬态波扰动过程中,各接触面以及隧道内表面处产生了明显的动应力集中,顶底板处表现为压应力集中,两帮表现为拉应力集中。

(2) 围岩与衬砌接触面处的顶底板的压应力峰值随着泊松比的增大而减小,两帮处的动应力随着泊松比的增大由拉应力集中表现为压应力集中。

(3) 各接触面和隧道内表面处顶底板的动应力集中系数随着界面弹性系数的增大而减小,两帮处

的动力集中系数随着界面弹性系数的增大而增大,最终都收敛于理想界面模型。

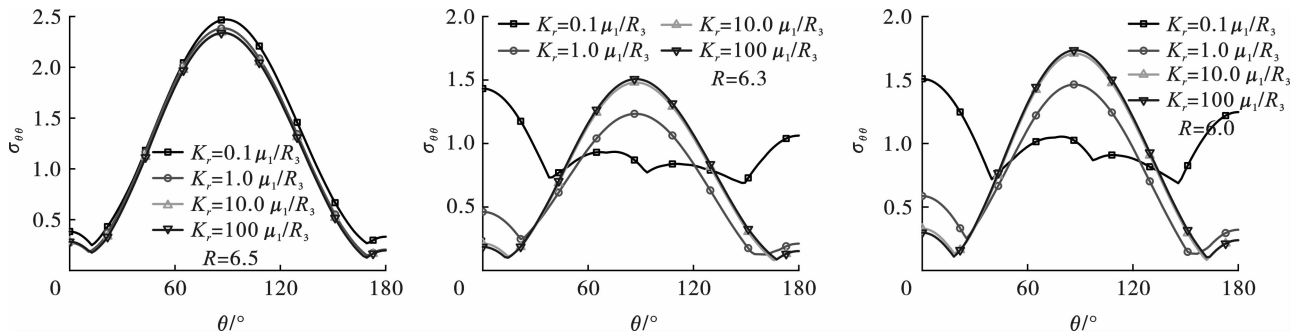


图 7 不同径向系数下动应力集中系数随时间变化分布图

Fig. 7 Distribution of dynamic stress concentration coefficients with time under different radial coefficients

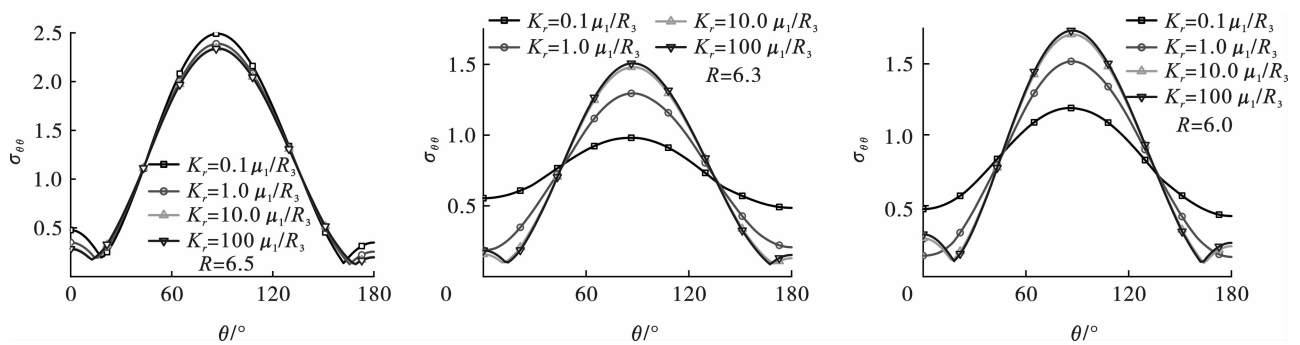


图 8 不同环向系数下动应力集中系数随时间变化分布图

Fig. 8 Distribution of dynamic stress concentration coefficients with time under different circumferential coefficients

(4) 围岩与衬砌接触面处的顶底板的压应力峰值随着爆破荷载加载时间的增大先增大,然后保持不变,两帮的拉应力峰值随着爆破荷载加载时间的增大逐渐减小,最后保持不变。

参考文献 (References)

[1] 李兴华,龙 源,纪 冲,等. 爆破地震波作用下既有圆形隧道衬砌动应力集中系数分析[J]. 岩土力学, 2013,34(8):2218-2224.

[1] LI Xing-hua, LONG Yuan, JI Chong, et al. Analysis of dynamic stress concentration coefficient of lining of existing circular tunnel under blasting seismic wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2218-2224. (in Chinese)

[2] 付 佳,梁建文,杜金金. 平面 SH 波激励下的土-隧道动力相互作用的解析解[J]. 岩土工程学报, 2018, 38(4): 558-598.

[2] FU Jia, LIANG Jian-wen, DU Jin-jin. Analytical solution of soil-tunnel dynamic interaction under planar SH wave excitation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 38(4): 558-598. (in Chinese)

[3] (美)鲍亦兴, (美)毛昭宇,刘殿魁,等. 弹性波衍射与动态应力集中[J]. 北京:科学出版社,1993.

[3] BAO, MAO, LIU Dian-kui, et al. Elastic wave diffraction

and dynamic stress concentration [J]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)

[4] 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.

[4] WANG Chang-bai, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Parameter sensitivity analysis of dynamic stress concentration problem of deep buried tunnel under P wave action [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 775-780. (in Chinese)

[5] 丁海滨,徐长节,童立红,等. P 波作用下饱和土中深埋圆形复合式衬砌隧道动应力响应研究[J]. 计算力学学报, 2018, 35(5): 589-596.

[5] DING Hai-bin, XU Chang-jie, TONG Li-hong, et al. Study on dynamic stress response of deep-buried circular composite lining tunnel in saturated soil under P wave action [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(5): 589-596. (in Chinese)

[6] 王帅帅,高 波. 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[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 159-165.

[6] WANG Shuai-shuai, GAO Bo. Study on seismic absorption mechanism of deep-buried circular composite lining tunnel under planar P wave incidence[J]. Journal of Earthquake

- Engineering, 2016, 38(2):159-165. (in Chinese)
- [7] 陶明, 向恭梁, 赵瑞. 深埋引水隧洞对应力波的散射与动应力集中[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5):859-868.
- [7] TAO Ming, XIANG Gong-liang, ZHAO Rui. Scattering of stress waves and dynamic stress concentration in deep buried diversion tunnels[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(5):859-868. (in Chinese)
- [8] XIANG Gong-liang, TAO Ming, ZHAO Rui, et al. Dynamic response of water-rich tunnel subjected to plane P wave considering excavation induced damage zone[J]. Underground Space, 2024, 15:113-130.
- [9] TAO Ming, XIANG Gong-liang, ZHAO Rui, et al. Scattering of P-wave and transient response around a fluid-filled cavity in an elastic medium[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(2):568-583.
- [10] 李梅, 高鑫鑫, 梅万全, 等. 平面爆破P波扰动下深埋圆形衬砌隧道瞬态动力响应解析研究[J]. 爆破, 2022, 39(3):33-40.
- [10] LI Mei, GAO Xin-xin, MEI Wan-quan, et al. Study on transient dynamic response of deep buried circular lining tunnel under P-wave disturbance of plane blasting[J]. Blasting, 2022, 39(3):33-40. (in Chinese)
- [11] MEI Wan-quan, LI Mei, PAN Peng-zhi, et al. Blasting induced dynamic response analysis in a rock tunnel based on combined inversion of Laplace transform with elasto-plastic cellular automaton[J]. Geophysical Journal International, 2021, 225(1):699-710.
- [12] 丁三毛. 考虑地应力影响的深埋圆形管道在爆破P波作用下的动力响应[J]. 爆破, 2023, 40(3):177-184.
- [12] DING San-mao. Dynamic response of deeply buried circular pipeline under blasting P wave considering the influence of in-situ stress[J]. Blasting, 2023, 40(3):177-184. (in Chinese)
- [13] 陶明, 姚靖, 李夕兵. 平面P波入射具有不完美界面圆形夹塞的动态响应特性[J]. 爆破, 2022, 39(3):25-32.
- [13] TAO Ming, YAO Jing, LI Xi-bing. Dynamic response characteristics of circular plug with imperfect interface incident of planar P wave[J]. Blasting, 2022, 39(3):25-32. (in Chinese)
- [14] YI Chang-ping, ZHANG Ping, DANIEL Johansson, et al. Dynamic response of a circular lined tunnel with an imperfect interface subjected to cylindrical P-waves[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55:165-171.
- [15] LU Shi-wei, ZHOU Chuan-bo, ZHANG Zhen, et al. Particle velocity response of surrounding rock of a circular tunnel subjected to cylindrical P-waves[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83:393-400.
- [16] 徐叶勤, 李梅, 姚俊伟, 等. 爆破荷载对含软弱夹层隧道围岩稳定性和变形破坏特征的影响[J]. 爆破, 2020, 37(2):25-41.
- [16] XU Ye-qin, LI Mei, YAO Jun-wei, et al. Effect of blasting load on stability and deformation and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer[J]. Blasting, 2020, 37(2):25-41. (in Chinese)
- [17] TAO M, ZHAO H T, LI Z W, et al. Analytical and numerical study of a circular cavity subjected to plane and cylindrical P-wave scattering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95:103143.
- [18] LI Xi-bing, LI Chong-jin, CAO Wen-zhou, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104:131-146.
- [19] MEI Wan-quan, XIA Yuan-you, PAN Peng-zhi, et al. Transient wave-induced dynamic responses of a circular composite-lined tunnel with imperfect interface[J]. Waves in Random and Complex Media, 2022:1-23.
- [20] 王帅帅, 高波. 隧道设置减震层减震机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3):592-603.
- [20] WANG Shuai-shuai, GAO Bo. Study on damping mechanism of seismic absorbing layer in tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3):592-603. (in Chinese)

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。