

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.005

平面爆破 P 波扰动下深埋圆形衬砌隧道 瞬态动力响应解析解研究*

李梅^{1a}, 高鑫鑫^{1a}, 梅万全^{1b}, 雷涛^{1a}, 韩高升^{1b}, 潘鹏志², 张义云^{1a}

(1. 武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 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)

摘要: 目前爆破扰动下隧道的动力响应解析解研究多为稳态,且主要集中在无衬砌隧道;而实际工程施工爆破扰动以瞬态波的形式传播,且大多隧道有衬砌。因此,论文以深埋圆形有衬砌隧道为研究对象,采用波函数展开法和梯形求积,开展平面爆破 P 波扰动下的隧道瞬态动力响应解析解研究;通过分析平面简谐 P 波入射时衬砌和围岩中的波场,考虑深埋隧道衬砌与围岩相互作用的边界条件,确定隧道周围的稳态响应;在稳态解的基础上运用梯形求积,求出平面爆破 P 波扰动下深埋圆形衬砌隧道动力响应问题的瞬态解析解,进而分析隧道衬砌与围岩接触面和隧道内的动应力集中系数、径向和环向振动速度的动态响应情况。研究表明:本文解析结果与 FLAC 及 CASRock 数值结果一致,验证了本文方法的可行性以及正确性;动力扰动过程中隧道两帮出现拉应力集中,顶底板主要出现压应力集中,隧道两侧的径向振动速度要显著大于隧道顶部,环向振动速度随着爆破荷载的加卸载先增大后减小至零。解析结果可以为深埋隧道的支护提供理论基础。

关键词: 爆破 P 波;瞬态响应;圆形衬砌隧道;波函数展开法;CASRock

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)03-0033-08

Transient Analytical Solution and Dynamic Response of Deep Circular Lining Tunnel Subjected to Plane Blasting P-Wave Disturbance

LI Mei^{1a}, GAO Xin-xin^{1a}, MEI Wan-quan^{1b}, LEI Tao^{1a},
HAN Gao-sheng^{1b}, PAN Peng-zhi², ZHANG Yi-yun^{1a}

(1. a. School of Resources and Environmental Engineering; b. 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)

Abstract: At present, the analytical solutions of tunnel dynamic response under blasting disturbance are mostly steady-state. However, the actual blasting disturbance propagates in engineering construction are in the form of transient wave, and most of the tunnels are lined. Meanwhile, the study of transient solution mainly concentrates on unlined tunnel, but most tunnels have lining in practical engineering. Therefore, taking the deep buried circular lined tunnel as the research object, the analytical solution of tunnel transient dynamic response under plane blasting P-wave disturbance is studied by combining wave function expansion method with trapezoidal quadrature. In addition, by analyzing the wave field in the lining and surrounding rock when plane P-wave incident and considering the boundary conditions of interaction between the lining and surrounding rock, the relevant parameters of steady-state response are determined. Furthermore, on the basis of the steady-state solution, a transient analytical solution of the dynamic re-

sponse of a deep buried circular liner tunnel under plane blast P-wave perturbation is obtained by applying the trapezoidal quadrature method. The dynamic response of the dynamic stress concentration coefficient, radial and circumferential vibration velocity in the tunnel liner and surrounding rock contact surface and tunnel are then analyzed. The results show that: the theoretical solution in this paper are consistent with those obtained by FLAC and CASRock simulations, which verifies the feasibility and correctness of proposed method. Besides, the tensile stress concentration occurs in both sides of the tunnel during the dynamic disturbance, and the compressive stress concentration mainly occurs on the top and bottom slabs. The radial velocity vibration at both sides of the tunnel is significantly larger than that on the tunnel top, and the circumferential velocity vibration increases first and then decreases to zero with the addition and removal of the blast load. In a word, the analytical results can provide a theoretical basis for the support of deep-buried tunnels.

Key words: blasting P-wave; transient response; wave function expansion method; circular lining tunnel; CASRock

深埋长大隧道工程钻爆法施工过程中,产生的瞬态应力波会严重扰动既有隧道,对既有隧道造成的破坏不可忽视。因此,计算地下结构在动荷载下的动力响应解进而分析其变化特点具有重要意义。

目前,对爆破扰动下隧道结构动力响应计算多集中在稳态分析,其解析解多以波函数展开法为基础。Yi 等通过对深埋圆形衬砌隧道在平面 P 波作用下衬砌隧道的动应力集中系数(DSCF)进行解析计算^[1],研究了高频及低频入射波情况下动力影集中系数的变化规律,以及围岩不同位置上爆破波主频和围岩物理力学指标对动应力集中系数的影响^[2,3];在此基础上,Fan 等在接触面处引入线性弹簧模型^[4],系统研究岩体和衬砌的无量纲波数、界面弹簧常数和衬砌厚度对动应力集中系数的影响;Lu 等通过计算圆形隧道围岩质点速度响应的解析解^[5],分析波源与隧道轴线的比例距离和隧道波长半径比对径向速度比例因子(RVSF)和环向速度比例因子(HVSF)的影响。

然而,实际工程施工扰动以瞬态波的形式传播,对稳态波的研究成果不能全面描述瞬态波扰动对结构的动态影响。因此,在稳态解的基础上,部分学者用数值逆变换或梯形求积等方法对瞬态弹性波入射时无限弹性介质中隧道的解析解及动力响应影响进行了研究^[6-10]。梅万全等采用 Den Iseger 法数值逆变换,推导了深埋无衬砌隧道瞬态响应的理论公式^[6],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。Li 等首次推导出了定量评估爆破荷载作用下圆形隧道周围相对速度的理论公式^[7],从理论上详细研究了波长与隧道直径比对振动速度放大效应的影响。Li 等用梯形求积法^[8-10],计算深埋无衬砌隧道的动应力、速度和位移等瞬态响应理论解,并采用二维 PFC 数值模型对理论分析进行了验证,研究静态地应力和动态卸荷波耦合作用下既有隧道的破坏特征,并进一步从瞬态波的卸荷速率、卸荷路径、地应力及开挖半径等角度分析隧道周围的动力响应。

由上可知,对爆破扰动下深埋隧道结构的动力响应瞬态解研究目前主要集中在无衬砌隧道,采用数值逆变换法和梯形求积法求解无衬砌隧道的动力响应,且对接触面处和隧道内的动力响应研究比较少。而实际工程中大多隧道有衬砌,故开展爆破扰动下有衬砌隧道结构瞬态动力响应研究很有必要。鉴于相同计算精度下,数值逆变换法求解及编程复杂,因此,论文以深埋圆形有衬砌隧道为研究对象,采用波函数展开法和梯形求积,计算平面爆破 P 波扰动下隧道瞬态动力响应解析解,分析爆破扰动对隧道接触面处和隧道内不同位置的动应力集中系数(DSCF)及径向(RVSF)和环向(HVSF)速度比例系数的影响。

1 爆破 P 波(瞬态)扰动下深埋圆形衬砌隧道动力响应解析解

研究爆破 P 波对有衬砌隧道瞬态动力响应,可在稳态解的基础上进行,即通过对 P 波动力扰动的稳态解进行梯形求积,求得瞬态解析解,进而分析围岩及隧道结构的动力响应特征。

图 1 所示为位于无限空间介质中的深埋圆形衬砌隧道模型,围岩和衬砌均为弹性、均质和各向同性材料,且隧道无限长,可将该模型视为平面应变模

收稿日期:2022-06-27

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究工作,(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:山东省重大科技创新工程(2019JZZY020314);国家自然科学基金(51104111)

型。隧道衬砌内半径为 a , 外半径为 b , 爆破 P 波沿 X 轴正向传播。

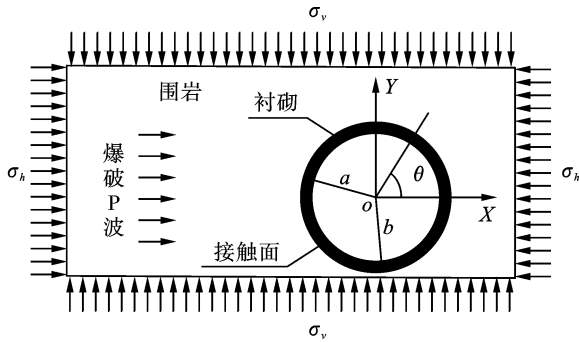


图 1 爆破 P 波扰动下深埋圆形衬砌隧道模型
Fig. 1 Model of deep circular lining tunnel under blasting P-wave disturbance

1.1 深埋圆形衬砌隧道波场分析

根据图 1, 平行入射稳态平面 P 波可表示为^[11]

$$\varphi^{(i)} = \varphi_0 e^{i(\alpha_s x - \omega t)} \quad (1)$$

利用波函数展开法, 上式可写为

$$\varphi^{(i)} = \varphi_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(\alpha_s r) \cos(n\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中: φ_0 为入射 P 波波幅; $\alpha_s = \omega/C_{ps}$ 为围岩介质的纵波波数; ω 为入射波频率; C_{ps} 为衬砌中的 P 波波速; i 为虚数单位; r 为隧道半径; J_n 为第一类 n 阶 Bessel 函数, 其中, 当 $n=0$ 时, $\varepsilon_n = 1$, 当 $n > 0$ 时, $\varepsilon_n = 2$ 。

当入射 P 波传播围岩与衬砌之间的接触面时, 接触面的存在使岩体中产生反射 P 波和反射 SV 波, 可由第一类 Hankel 函数分别表示为

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

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

式中: A_n 、 B_n 为待定系数; $H_n^{(1)}$ 为第一类 n 阶 Hankel 函数; $\beta_s = \omega/C_{ss}$, 为围岩介质中的横波波数; C_{ss} 为衬砌中 S 波波速。

在衬砌区域 $a < r < b$ 且 $0 < \theta < 2\pi$ 内, 衬砌外边

$$DSCF_s = \bar{\sigma}_{\theta\theta s} = \sigma_{\theta\theta s} / \sigma_{0s} = \frac{2}{\beta_l^2 \varphi_0 r^2} \sum_{n=0}^{\infty} [\varphi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{21}^{(1)}(\alpha_s r) + A_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\alpha_s r) + B_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_s r)] \cdot \cos(n\theta) \quad (13)$$

$$DSCF_L = \bar{\sigma}_{\theta\theta L} = \sigma_{\theta\theta L} / \sigma_{0L} = \frac{2}{\beta_l^2 \varphi_0 r^2} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{21}^{(4)}(\alpha_l r) + D_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\beta_l r) + M_n \varepsilon_{22}^{(4)}(\alpha_l r) + N_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_l r)] \cdot \cos(n\theta) \quad (14)$$

式中: $\sigma_{\theta\theta s}$ 、 $\sigma_{\theta\theta L}$ 分别表示围岩和衬砌内质点的环向应力, 其中, 下标 S/L 分别表示围岩和衬砌。

使用类似的方法, 用质点速度峰值的大小 $v_{0s} =$

$$RVSF_s = \bar{v}_{rs} = v_{rs} / v_{0s} = \frac{-i}{\alpha_s \varphi_0 r} \sum_{n=0}^{\infty} [\varphi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{71}^{(1)}(\alpha_s r) + A_n \varepsilon_{71}^{(3)}(\alpha_s r) + B_n \varepsilon_{72}^{(3)}(\beta_s r)] \cdot \cos(n\theta) \quad (15)$$

界 $r = b$ 处, 产生折射 P 波 $\varphi_{L1}^{(r)}$ 和折射 SV 波 $\psi_{L1}^{(r)}$, 同时, 衬砌内边界 $r = a$ 处, 产生反射 P 波 $\varphi_{L2}^{(r)}$ 和反射 SV 波 $\psi_{L2}^{(r)}$, 它们的势函数表示为

$$\varphi_{L1}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_n^{(2)}(\alpha_l r) \cos(n\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$\psi_{L1}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} M_n H_n^{(2)}(\beta_l r) \sin(n\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\varphi_{L2}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} D_n H_n^{(1)}(\alpha_l r) \cos(n\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$\psi_{L2}^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} N_n H_n^{(1)}(\beta_l r) \sin(n\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (8)$$

式中: C_n 、 M_n 、 D_n 、 N_n 为势函数待定系数; $H_n^{(2)}$ 为第二类 n 阶 Hankel 函数; $\alpha_l = \omega/C_{pl}$, 代表衬砌介质中的纵波波数; C_{pl} 为衬砌中的 P 波波速; $\beta_l = \omega/C_{sl}$, 代表衬砌介质中的横波波数; C_{sl} 为衬砌中的 S 波波速。

1.2 边界条件和稳态 P 波扰动下的动力响应解析解

假设围岩与衬砌之间理想接触, 即位移和应力连续

当 $r = b$ 时

$$\begin{cases} \sigma_{rrs} = \sigma_{rrL} \\ \sigma_{r\theta s} = \sigma_{r\theta L} \end{cases} \quad (9)$$

当 $r = a$ 时

$$\begin{cases} \sigma_{rrL} = 0 \\ \sigma_{r\theta L} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_{rrs} 、 $\sigma_{r\theta s}$ 分别表示围岩内的法向应力和切向应力; σ_{rrL} 、 $\sigma_{r\theta L}$ 分别表示衬砌内的法向应力和切向应力。

边界条件结合应力和位移势关系, 即可得待定系数 A_n 、 B_n 、 C_n 、 M_n 、 D_n 、 N_n 。

围岩和隧道衬砌内 P 波在传播方向上的应力强度可分别定义为

$$\sigma_{0s} = \mu_s \beta_s^2 \varphi_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (11)$$

$$\sigma_{0L} = \mu_l \beta_l^2 \varphi_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (12)$$

以此做归一化因子, 定义隧道边界处的动应力集中系数 (DSCF) 为^[6]

$\alpha_l \omega \varphi_0 \cdot e^{-i\omega t}$, $v_{0L} = \alpha_l \omega \varphi_0 \cdot e^{-i\omega t}$ 将径向速度和环向速度归一化, 定义径向和环向速度比例因子 (RVSF) 和 (HVSF) 为

$$RVSF_L = \bar{v}_{rL} = v_{rL}/v_{0L} = \frac{-i}{\alpha_L \varphi_0 r} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{71}^{(4)}(\alpha_L r) + D_n \varepsilon_{71}^{(3)}(\alpha_L r) + M_n \varepsilon_{72}^{(4)}(\beta_L r) + N_n \varepsilon_{72}^{(3)}(\beta_L r)] \cdot \cos(n\theta) \quad (16)$$

$$HVFS_s = \bar{v}_{\theta s} = v_{\theta s}/v_{0s} = \frac{-i}{\alpha_s \varphi_0 r} \sum_{n=0}^{\infty} [\varphi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{81}^{(1)}(\alpha_s r) + A_n \varepsilon_{81}^{(3)}(\alpha_s r) + B_n \varepsilon_{82}^{(3)}(\beta_s r)] \cdot \sin(n\theta) \quad (17)$$

$$HVFS_L = \bar{v}_{\theta L} = v_{\theta L}/v_{0L} = \frac{-i}{\alpha_L \varphi_0 r} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{81}^{(4)}(\alpha_L r) + D_n \varepsilon_{81}^{(3)}(\alpha_L r) + M_n \varepsilon_{82}^{(4)}(\beta_L r) + N_n \varepsilon_{82}^{(3)}(\beta_L r)] \cdot \sin(n\theta) \quad (18)$$

式中： v_{rs} 、 v_{rL} 分别表示围岩和衬砌内质点的径向速度； $v_{\theta s}$ 、 $v_{\theta L}$ 分别表示围岩和衬砌内质点的环向速度； μ 表示剪切模量； $\varepsilon_{i,j}^{(k)}$ 表示各种波的贡献。

1.3 瞬态 P 波扰动下动力响应解析解

在上节所求的稳态 P 波扰动下隧道动力响应解析解的基础上,推导瞬态解析解,从而分析瞬态 P 波扰动下隧道的动力响应。

参考既有文献[12-14],用三角形爆破荷载函数定义爆破荷载的时间历程,即式(19)

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t/t_r, & 0 \leq t < t_r \\ (t_s - t)/(t_s - t_r), & t_r \leq t < t_s \\ 0, & t \geq t_s \end{cases} \quad (19)$$

图 1 模型中,入射波到达衬砌外边界时开始计时(即 $r=b$ 时时间为零)。经过的时间 t 被归一化为通过外半径 b 所需的时间

$$\tau = C_{ps} t/b \quad (20)$$

通过傅里叶变换,任意输入函数 $f(t)$ 引起的弹性系统瞬态响应可表示为

$$g(x_i, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(x_i, \omega) F(\omega) \cdot d\omega \quad (21)$$

式中： $\chi(x_i, \omega)$ 为系统的导纳函数,为单位振幅下系统的稳态响应,可用公式(13)~(18)表示； $F(\omega)$ 为爆破荷载函数(扰动函数) $f(t)$ 的傅里叶变换。

沿隧道边界输入的爆破荷载函数 $f(t)$ 的傅里叶变换 $F(\omega)$ 用 Heaviside 阶跃函数的傅里叶变换表示

$$F(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta}}, \text{Im } \zeta > 0 \quad (22)$$

式中： $\text{Re}(\zeta) = \alpha, b$ 。

系统的导纳函数可以简化为

$$\chi(x_i, \omega) = R(\omega) + iI(\omega) \quad (23)$$

式中： $R(\omega)$ 和 $I(\omega)$ 表示频率响应的实部和虚部。

对于因果函数,可用正弦函数表示瞬态响应,通过 Heaviside 阶跃函数输入引起的脉冲响应,可以用下式积分表示

$$g_h(x_i, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\omega) \cos \omega \tau d\tau = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega \quad (24)$$

根据 Duhamel 积分,任意扰动函数 $f(t)$ 的动态响应表示如下

$$g(x_i, t) = \int_0^t f(\tau) g'_h(t - \tau) d\tau = f(0) g_h(t) + \int_0^t f'(\tau) g_h(t - \tau) d\tau \quad (25)$$

当 $0 \leq t < t_r$

$$g(x_i, t) = \int_0^t \frac{1}{t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega + \frac{2}{\pi t_r} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \cos \omega t}{\omega^2} d\omega \quad (26a)$$

当 $t_r \leq t < t_s$

$$g(x_i, t) = \int_0^{t_r} \frac{1}{t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega = \int_{t_r}^t \frac{-1}{t_s - t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi t_r} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) [\cos \omega(t - t_r) - \cos \omega t]}{\omega^2} d\omega - \frac{2}{\pi(t_s - t_r)} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) [1 - \cos \omega(t - t_r)]}{\omega^2} d\omega \quad (26b)$$

当 $t \geq t_s$

$$g(x_i, t) = \int_0^{t_r} \frac{1}{t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega + \int_{t_r}^{t_s} \frac{-1}{t_s - t_r} d\tau \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) \sin \omega(t - \tau)}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi t_r} \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) [\cos \omega(t - t_r) - \cos \omega t]}{\omega^2} d\omega - \frac{2}{\pi(t_s - t_r)} \cdot \int_0^{\infty} \frac{R(\omega) [\cos \omega(t - t_s) - \cos \omega(t - t_r)]}{\omega^2} d\omega \quad (26c)$$

式中： $R(\omega)$ 由公式(13)~(18)的实部表示^[7,8],根据公式(26)及梯形求积法即可确定爆破荷载作用下隧道的瞬态响应解析解。

2 梯形求积法解析解结果有效性验证

为了验证梯形求积法求得的解析结果的正确性,运用 FLAC^{3D} 软件和工程岩体破裂过程分析软件 (CASRock) 中的动力分析模块 CASRock. Dyna 计算的数值结果与 Matlab 计算的解析解进行对比验证^[15-19]。

选取文献[6]中的算例,隧道横断面为圆形,内径 $a = 6.0$ m,外径 $b = 6.5$ m,监测点位于隧道拱顶,数值模型尺寸为 400 m \times 400 m \times 2 m,如图 2 所示。在计算模型的左侧边界施加爆破应力波,模拟隧道受到的瞬时动力扰动,时间从爆破荷载传至隧道接触面处开始计算,爆破荷载上升时间 2.5 ms,爆破荷载施加总时间 12.5 ms。其他边界设置为粘性人工边界,吸收边缘反射的应力波。其他参数为:围岩的弹性模量 $E_s = 50.00$ GPa、密度 2700 kg/m³、泊松比 0.20 ,衬砌的弹性模量 $E_L = 30.00$ GPa、密度 2500 kg/m³、泊松比 0.25 。

计算得到的有衬砌隧道 DSCF 如图 3 所示。位于围岩与衬砌接触面处监测点的 DSCF 明显大于衬砌内部监测点,理论计算 DSCF 峰值略大于数值模拟 DSCF 峰值,且数值结果与理论结果的差异相比曲线振幅较小,其差异可忽略,说明用梯形求积计算爆破扰动下有衬砌隧道的动力响应合理。

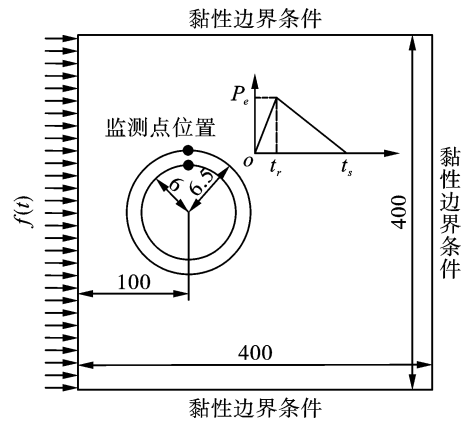
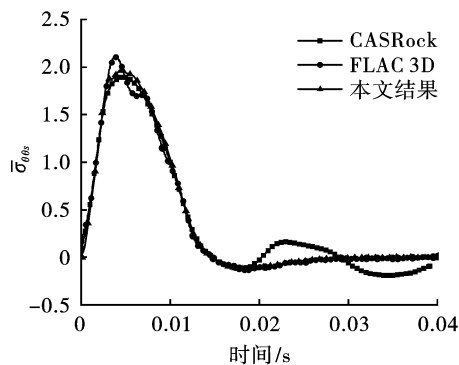
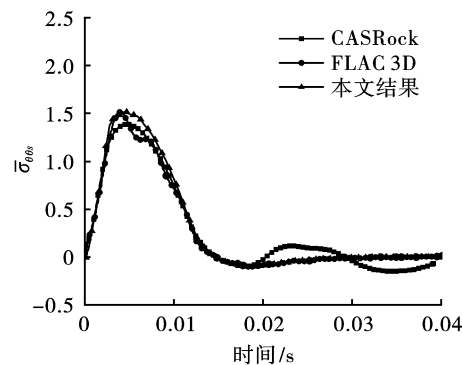


图 2 数值模型(单位:m)

Fig. 2 Numerical model(unit:m)



(a) 围岩与隧道衬砌接触面处 DSCF
(a) DSCF of contact surface between surrounding rock and tunnel lining



(b) 隧道衬砌内 DSCF
(b) DSCF in tunnel lining

图 3 动应力集中系数的梯形求积解与 FLAC3D 数值模拟解比较

Fig. 3 Comparison between trapezoidal quadrature solution of DSCF and FLAC3D numerical simulation solution

3 爆破 P 波扰动下圆形衬砌隧道动力响应分析

3.1 工程背景

锦屏二级水电站 1#、3#引水隧洞工程,引水隧洞采用 TBM 和钻爆法结合开挖,洞线平均长度 16.67 km,全洞一般埋深 $1500 \sim 2000$ m,最大埋深 2525 m,其中,TBM 开挖段为圆形隧洞,开挖半径约 6.6 m,衬砌厚度 0.6 m,属于典型的深埋长大隧洞。

引水隧洞主要穿越三叠系下统、杂谷脑组、上统、白山组、盐塘组共 5 套地层,在 TBM 开挖段埋深

较大、地应力较高的白山组地层中选取垂直于引水隧洞轴线的竖直剖面作为计算断面,计算模型材料物理学参数如表 1 所列。

表 1 材料物理学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)
围岩	40	0.18	2770
衬砌	28	0.20	2500

3.2 隧洞瞬态动力响应分布规律

采用上述解析解公式研究爆破扰动下隧洞瞬态

动力响应分布规律,取爆破荷载标准化上升时间 $\tau_r=5$,总时间与上升时间的比值 $t_s/t_r=5$,其他计算参数如表1所列。爆破扰动对隧洞接触面处和隧洞衬砌内的动应力集中系数及速度振动比例因子的计算结果如图4所示。隧洞衬砌内与隧洞接触面处的动力响应曲线形状相同,幅度显著减小。

爆破荷载加卸载过程中产生的动应力集中系数见图4(a)和图4(b),爆破扰动过程中,隧洞和衬砌接触面处及隧洞内表面处均产生了明显的动应力集

中,主要表现为拉应力集中于 $\theta=0$ 和 π 处,压应力集中于 $\theta=\pi/2$ 处。 $\theta=0$ 和 π 处的DSCF时程曲线趋势大致相同,加载过程中,DSCF迅速增加到第一个正峰值,然后下降到最小值;卸载过程中,DSCF从最小值增大到次正峰值,然后减小到零。 $\theta=\pi/2$ 处的DSCF时程曲线趋势大致相同,加卸载过程中,DSCF增加到第一个正峰值后再降到最小值,最后减小到零。

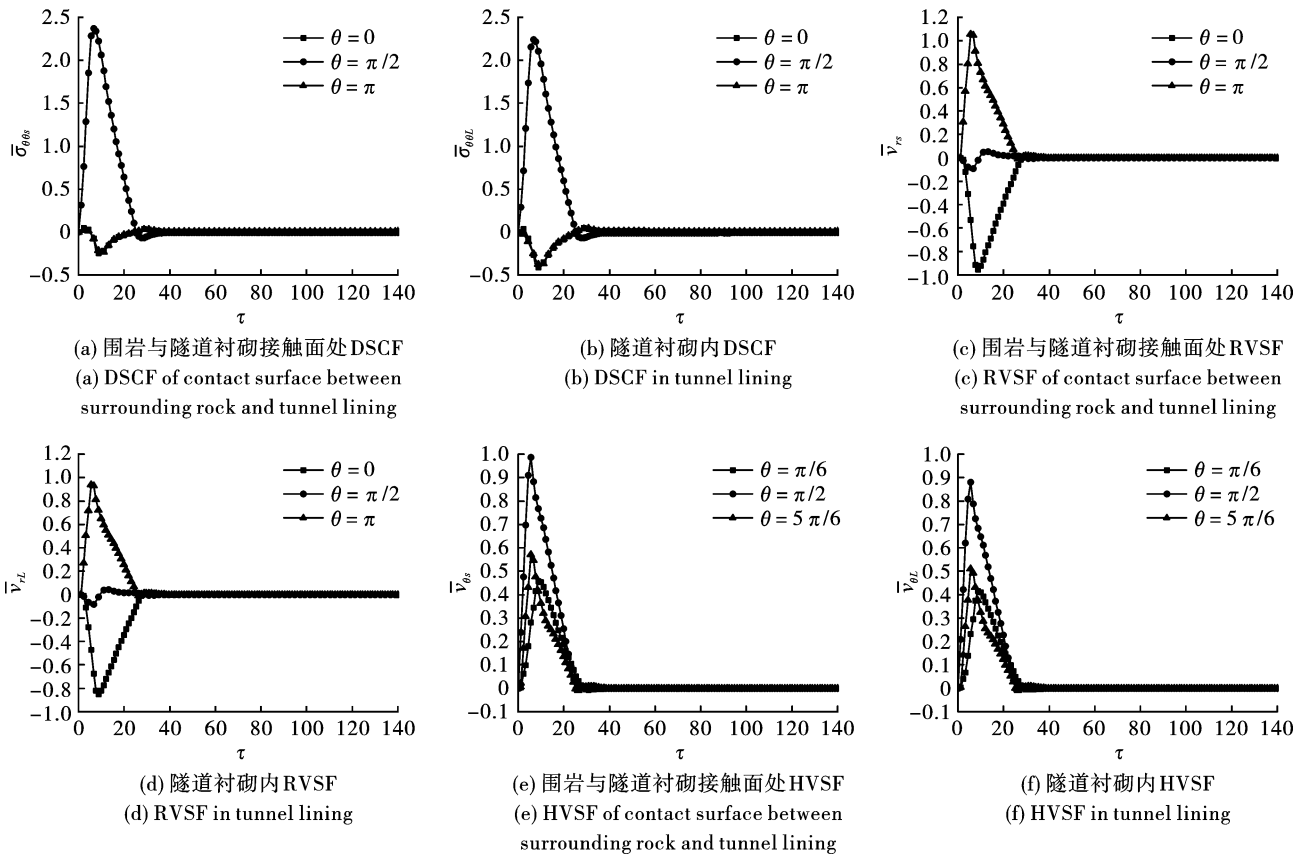


图4 平面爆破P波扰动下隧道动力响应解析结果

Fig. 4 Analytical results of tunnel dynamic response under plane blasting P-wave disturbance

爆破荷载在达到 $\theta=0$ (图4(c))处,介质径向速度迅速达到峰值并逐渐减小到零,在 $\theta=\pi/2$ (图4(d))时,介质径向速度产生轻微震荡,但速度振动幅值较小。

对于接触面处和隧道内的环向速度(图4(e))和(图4(f)),由公式(17)和式(18)可知,当 $\theta=0$ 和 π 时, $\bar{v}_{\theta s} = \bar{v}_{\theta L}$,而在 $\theta=\pi/6, \pi/2, 5\pi/6$ 处,环向速度均随着爆破荷载迅速增大到峰值后减小至零。

3.3 围岩与衬砌弹性模量比对隧洞瞬态动力响应峰值的影响

考虑到密度和泊松比对衬砌动应力集中系数影响较小^[20],因此,主要研究爆破P波扰动下围岩与

衬砌弹性模量比对隧洞瞬态动力响应峰值的影响,分析结果可参与指导隧洞减震施工。引入围岩与衬砌介质弹性模量比 $\gamma = E_s/E_L$,计算参数见表1。图5~7给出了弹性模量比 $\gamma=1\sim 10$ 时,洞室动应力集中系数峰值、径向和环向速度比例因子峰值分布。

当 $\gamma < 2$ 时,随着 γ 的增加,洞室衬砌内动应力集中系数峰值、径向和环向速度比例因子峰值降低最快; $\gamma=4$ 时,动应力集中系数峰值下降值占对应最大下降值的80%,径向和环向速度比例因子峰值下降值占对应最大下降值72%。但在 γ 从1到10增大过程中,围岩与衬砌的接触面处的动应力集中系数峰值、径向和环向速度比例因子峰值无显著变

化,可见,对围岩进行加固,提高其弹性模量,可使部分衬砌中的能量转到围岩,且围岩与衬砌弹性模量比越大,越有利于隧洞结构稳定。

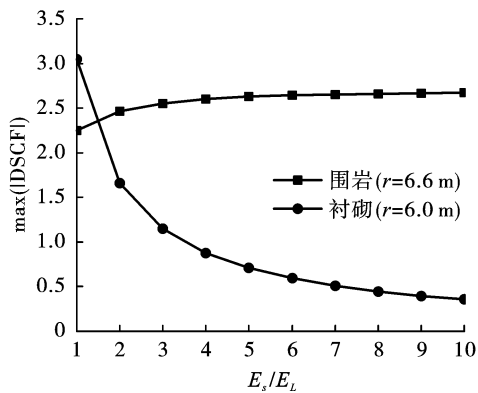


图 5 动应力集中系数峰值随 γ 的变化
Fig. 5 Variation of maximum DSCF with γ

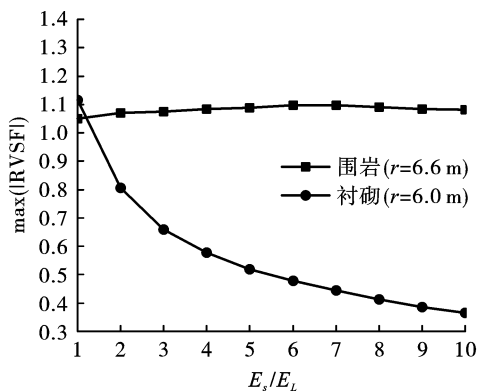


图 6 径向速度比例因子峰值随 γ 的变化
Fig. 6 Variation of maximum RVSF with γ

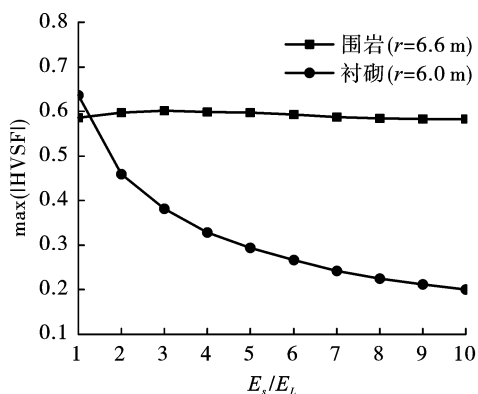


图 7 环向速度比例因子峰值随 γ 的变化
Fig. 7 Variation of maximum HVSF with γ

4 结论

论文基于波函数展开法,在稳态解的基础上,采用梯形求积,推导了平面爆破 P 波扰动下圆形有衬砌隧道动力响应的瞬态解析解,分析了爆破 P 波扰

动对隧道衬砌接触面处和隧道内的动应力集中系数 (DSCF) 及径向和环向速度振动 (RVSF、HVSF) 的影响。研究成果可为类似工程计算提供参考。主要结论如下:

(1) 隧道衬砌与围岩之间接触面处拱顶及两侧拱腰位置的 DSCF、RVSF 和 HVSF 的变化趋势相同,且接触面处的响应峰值要大于衬砌内侧。

(2) 隧道顶板处的 DSCF 和 HVSF 效应远比左右侧壁处显著,相反,隧道两侧壁处的 RVSF 效应远比顶板处显著,且动应力集中系数响应峰值远大于速度振动响应峰值。

(3) 增大围岩与衬砌弹性模量之比可有效降低衬砌内动应力集中系数峰值和速度比例因子峰值,但超过 2~4 倍比例后,降低效果有限,建议对围岩采取注浆加固等措施提高围岩与衬砌弹性模量比,保证隧道结构稳定。

参考文献 (References)

- [1] YI Chang-ping, LU Wen-bo, ZHANG Peng, et al. Effect of imperfect interface on the dynamic response of a circular lined tunnel impacted by plane P-waves [J]. Tunneling And Underground Space Technology, 2016, 51 (1): 68-74.
- [2] 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.
- [2] LI Xing-hua, LONG Yuan, JI Chong, et al. Analysis of dynamic stress concentration factor of existing circular tunnel lining under blasting seismic wave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2218-2224. (in Chinese)
- [3] 李兴华, 龙源, 纪冲, 等. 爆破地震波作用下隧道围岩动应力集中系数分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 578-582.
- [3] LI Xing-hua, LONG Yuan, JI Chong, et al. Analysis of dynamic stress concentration factor of tunnel surrounding rock under blasting seismic wave [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 578-582. (in Chinese)
- [4] FAN Zhan-feng, ZHANG Ji-chun, XU Hua. Theoretical study of the dynamic response of a circular lined tunnel with an imperfect interface subjected to incident SV-waves [J]. Computers & Geotechnics, 2019, 110: 308-318.
- [5] 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]. Tunneling and

- Underground Space Technology, 2019, 83(1):393-400.
- [6] 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.
- [7] LI Chong-jin, LI Xi-bing. Influence of wavelength-to-tunnel-diameter ratio on dynamic response of underground tunnels subjected to blasting loads[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2018, 112:323-338.
- [8] LI Xi-bing, CAO Wen-zhuo, TAO Ming, et al. Influence of unloading disturbance on adjacent tunnels [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 84:10-24.
- [9] LI Chong-jin, LI Xi-bing, LIANG Li-sha. Dynamic response of existing tunnel under cylindrical unloading wave [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 131:1365-1609.
- [10] LI Xi-bing, LI Chong-jin, CAO Wen-zhuo, 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.
- [11] (美) 鲍亦兴, (美) 毛昭宙, 著. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [12] 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):35-41.
- [12] XU Ye-qin, LI Mei, YAO Jun-wei, et al. Influence of blasting load on stability and deformation failure characteristics of tunnel surrounding rock mass with weak interlayer[J]. Blasting, 2020, 37(2):35-41. (in Chinese)
- [13] MEI Wan-quan, XIA Yuan-you, HAN Gao-sheng, et al. Theoretical responses of shallow-buried circular cavity subjected to transient P wave [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 225:699-710
- [14] 明 胜, 姚颖康, 孙金山, 等. 钻孔爆破过程中炮孔远区爆炸荷载的实验研究[J]. 爆破, 2019, 36(3):1-8, 15.
- [14] MING Sheng, YAO Ying-kang, SUN Jin-shan, et al. Experimental study on blasting load in far area of blast hole during drilling and blasting[J]. Blasting, 2019, 36(3):1-8, 15. (in Chinese)
- [15] LI Mei, MEI Wan-quan, PAN Peng-zhi, et al. Modeling transient excavation-induced dynamic responses in rock mass using an elasto-plastic cellular automaton[J]. Tunneling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 96:103183-103198.
- [16] 潘鹏志, 梅万全. 基于 CASRock 的工程岩体动力响应分析方法、软件与应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(3):1-10.
- [16] PAN Peng-zhi, MEI Wan-quan. CASRock-based dynamic response analysis methods, software and applications for engineering rock masses [J]. Hazard Control in Tunneling and Underground Engineering, 2021, 3(3):1-10. (in Chinese)
- [17] 李邵军, 郑民总, 邱士利, 等. 中国锦屏地下实验室开挖隧洞灾变特征与长期原位力学响应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(8):842-852.
- [17] LI Shao-jun, ZHENG Min-zong, QIU Shi-li, et al. Characteristics of excavation disasters and long-term in-situ mechanical behavior of the tunnels in the China Jinping Underground Laboratory[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8):842-852. (in Chinese)
- [18] FENG Xia-ting, PAN Peng-zhi, ZHOU Hui. Simulation of the rock microfracturing process under uniaxial compression using an elasto-plastic cellular automaton. [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7):1091-1108.
- [19] YAN Fei, PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, et al. A novel fast overrelaxation updating method for continuous-discontinuous cellular automaton[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 66:156-174.
- [20] 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.
- [20] LI Gang, ZHONG Qi-kai, SHANG Shou-ping. Dynamic response analysis of deep buried circular composite lining cavern under incident plane SH wave[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(1):17-22. (in Chinese)