文章编号：1001-1455(2014)06-0701-08 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)06-0701-08

爆破地震波作用下城市隧道结构动力响应的敏感性*

路 亮[1,2]，龙 源[1]，郭 涛[1]，谢全民[1,3]，赵长啸[1,3]，高福银[1]

(1.解放军理工大学野战工程学院，江苏 南京 210007；
2.中国人民解放军 72351 部队，山东 莱芜 271109；
3.武汉军械士官学校，湖北 武汉 430075)

摘要：选取纵波作为研究对象，采用波函数展开法，推导了无限弹性介质中复合衬砌结构隧道在爆破地震波作用下动力响应问题的解析解，结合南京红山南路隧道群开挖工程开展了隧道结构动应力集中因数的敏感性分析，并通过曲线拟合分别得到了隧道围岩及内衬环向动应力集中因数随隧道结构动力学及几何参数变化的回归方程。分析结果表明：隧道围岩和二次衬砌层的弹性模量及围岩泊松比对考察点处环向动应力的影响较大，而初期支护层弹性模量的影响几乎可以忽略不计；衬砌层厚度变化对围岩环向动应力的影响要远大于内衬，在隧道施工设计时可以通过增加衬砌层的厚度平衡隧道结构的受力状态，但增加初期支护层的效果不如二次衬砌层。

关键词：爆炸力学；动力响应；解析解；隧道结构；爆破地震波

中图分类号：O384；TD235.1 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

随着爆破技术在市政工程中的大力开发和利用，城市隧道结构的安全问题也随之出现。由于城市市区地域相对狭小，隧道周边爆破施工产生的爆破地震波往往会对既有隧道的结构和设施安全构成威胁，因此，研究爆破地震波作用下城市隧道结构的动力响应问题对隧道的抗震理论分析和结构设计具有重大的现实意义。目前，针对这类问题的求解方法主要有数值法和解析法 2 类[1-2]，其中数值法包括有限差分法、有限元法、边界元法等，解析法主要指波函数展开法、积分方程法、积分变换法等。现阶段对城市隧道动力响应问题的求解主要以数值法为主，然而解析法在分析问题本质方面有着数值法不可替代的作用，它能够通过数学理论基础检验数值计算的精度[3-5]。因此，对爆破地震波作用下城市隧道动力响应的解析求解方法有待深入研究。

城市隧道在爆破地震波作用下的动力响应分析的关键在于解决隧道围岩及衬砌结构的动力响应及应力集中问题，在研究中可将此类问题简化为加强洞室对弹性入射波的衍射问题。目前，针对这类问题的解析算法已进行了一定的研究工作。鲍亦兴等[6]利用波函数展开法研究了无限介质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；齐辉等[7]、史文谱等[8]采用复变函数的方法分别推导了 SH 波和 P 波入射下圆形衬砌洞室的解析解；纪晓东等[9]给出了平面 P 波和 SV 波入射下地下圆形衬砌洞室动应力集中问题的级数解。当前常见的城市隧道大都为初期支护加二次衬砌的复合式衬砌结构，因此，为了使解析结果能更好地指导工程实践，本文中选取构成爆破地震波主体的纵波(P 波)作为研究对象，利用波函数展开法研究复合衬砌结构隧道对爆破地震波衍射问题的解析方法，并结合南京红山南路隧道群开挖工程开展弹性 P 波作用下隧道结构动力响应的敏感性分析。

1 计算模型

炸药在岩石中爆炸后产生的爆破地震波在一定距离上可以视为平面简谐波[10]，假设无限空间介质

* **收稿日期**：2013-04-03；**修回日期**：2013-06-08
基金项目：国家自然科学基金项目(51178460，51204071)
作者简介：路 亮(1983—)，男，博士研究生。

和衬砌均为各向同性的弹性材料，则无限介质中复合衬砌隧道结构对 P 波衍射问题的计算模型可简化为图 1。由图 1 可知，平面 P 波沿垂直于隧道轴向的方向传播，当通过不同介质的分界面时，将在无限介质及隧道衬砌结构中产生反射 P 波、SV 波和折射 P 波、SV 波。

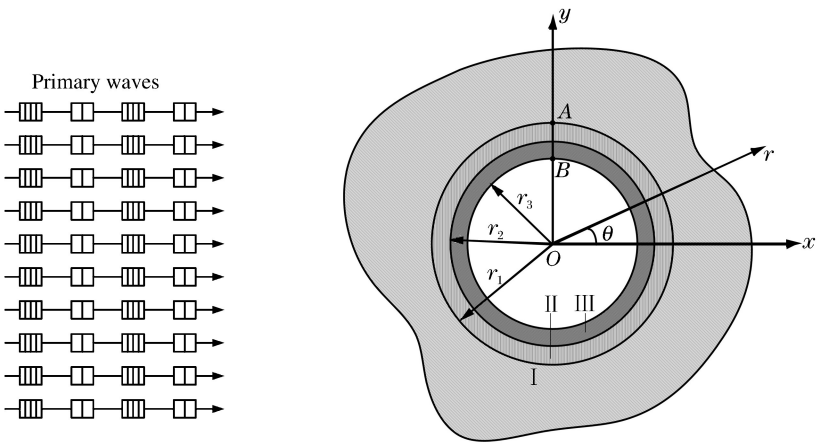

图 1 爆破地震波衍射问题计算模型

Fig. 1 A calculation model for the diffraction problem of blasting seismic waves

2 爆破地震波衍射问题的解析求解

2.1 介质中的波动场分析

圆频率为 ω 的入射简谐 P 波位移势函数 φ_{i} 可表示为：

$$\varphi_{\mathrm{i}}=\varphi_0\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\alpha_1 x-\omega t)} \tag{1}$$

式中：φ_0 为入射 P 波的幅值；α_1 为入射 P 波的波数，$\alpha_1=\omega/c_{\mathrm{p}}$，$c_{\mathrm{p}}$ 为入射 P 波的波速。

考虑稳态波动情况下可省略时间因子 $\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}$，利用波函数展开法可将式(1)转换为级数形式：

$$\varphi_{\mathrm{i}}=\varphi_0\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon_n\mathrm{i}^n J_n(\alpha_1 r)\cos(n\theta) \tag{2}$$

式中：J_n 为第 1 类 Bessel 函数；ε_n 为 Neumann 因子，$n=0$ 时，$\varepsilon_n=1$；$n\geqslant 1$ 时，$\varepsilon_n=2$。

P 波通过介质 I 和 II 的分界面时，将在界面上产生反射 P 波和反射 SV 波，其位移势函数分别为：

$$\begin{cases}\varphi_{\mathrm{r}}=\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}A_n H_n^{(1)}(\alpha_1 r)\cos(n\theta)\\ \psi_{\mathrm{r}}=\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r)\sin(n\theta)\end{cases} \tag{3}$$

因此，介质 I 中的总势函数可表示为：

$$\begin{cases}\varphi_1=\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}\left[\varphi_0\varepsilon_n\mathrm{i}^n J_n(\alpha_1 r)+A_n H_n^{(1)}(\alpha_1 r)\right]\cos(n\theta)\\ \psi_1=\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r)\sin(n\theta)\end{cases} \tag{4}$$

同样，衬砌 II、III 中的总势函数分别可表示为：

$$\begin{cases}\varphi_2=\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}\left[C_n H_n^{(1)}(\alpha_2 r)+D_n H_n^{(2)}(\alpha_2 r)\right]\cos(n\theta)\\ \psi_2=\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}\left[F_n H_n^{(1)}(\beta_2 r)+G_n H_n^{(2)}(\beta_2 r)\right]\sin(n\theta)\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}\varphi_3=\sum\limits_{n=0}^{\infty}\left[K_nH_n^{(1)}(\alpha_3r)+L_nH_n^{(2)}(\alpha_3r)\right]\cos(n\theta)\\ \psi_3=\sum\limits_{n=0}^{\infty}\left[M_nH_n^{(1)}(\beta_3r)+N_nH_n^{(2)}(\beta_3r)\right]\sin(n\theta)\end{cases}\tag{6}$$

式中：α_i、β_i $(i=1,2,3)$分别为介质中 P 波和 SV 波波数，$\alpha_i=\omega/c_{\mathrm{p},i}$，$\beta_i=\omega/c_{\mathrm{s},i}$，$c_{\mathrm{p},i}$、$c_{\mathrm{s},i}$为对应衬砌中 P 波和 SV 波波速；$H_n^{(1)}$、$H_n^{(2)}$ 为第 1、2 类 Hankel 函数；A_n、B_n、C_n、D_n、F_n、G_n、K_n、L_n、M_n、N_n 为待定系数。

2.2　问题的求解

P 波入射弹性介质中的位移和应力应满足[6]：

$$\begin{cases}u_r=\dfrac{\partial\varphi}{\partial r}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\psi}{\partial\theta}\\ u_\theta=\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\varphi}{\partial\theta}-\dfrac{\partial\psi}{\partial r}\end{cases}\tag{7}$$

$$\begin{cases}\sigma_{rr}=\lambda\nabla^2\varphi+2\mu\left[\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial r^2}+\dfrac{\partial}{\partial r}\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\psi}{\partial\theta}\right)\right]\\ \sigma_{\theta\theta}=\lambda\nabla^2\varphi+2\mu\left[\dfrac{1}{r}\left(\dfrac{\partial\varphi}{\partial r}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2}\right)+\dfrac{1}{r}\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\psi}{\partial\theta}-\dfrac{\partial^2\psi}{\partial r\partial\theta}\right)\right]\\ \sigma_{r\theta}=2\mu\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial r\partial\theta}-\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial\varphi}{\partial\theta}\right)+\mu\left[\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial^2\psi}{\partial\theta^2}-r\dfrac{\partial}{\partial r}\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\psi}{\partial r}\right)\right]\end{cases}\tag{8}$$

式中：$\nabla^2\varphi=\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\varphi}{\partial r}+\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2}$；$u_r$、$u_\theta$ 分别为极坐标下的径向和环向位移；σ_{rr}、$\sigma_{\theta\theta}$ 和 $\sigma_{r\theta}$ 分别为极坐标下的径向、环向和剪切动应力；λ、μ 均为弹性介质的拉梅常量。

根据界面应力和位移连续条件，在隧道外表面 $r=r_1$ 处存在：

$$\begin{cases}\sigma_{rr}^{(2)}=\sigma_{rr}^{(1)}, & \sigma_{r\theta}^{(2)}=\sigma_{r\theta}^{(1)}\\ u_r^{(2)}=u_r^{(1)}, & u_\theta^{(2)}=u_\theta^{(1)}\end{cases}\tag{9}$$

在初期支护与二次衬砌的接触面 $r=r_2$ 处存在：

$$\begin{cases}\sigma_{rr}^{(3)}=\sigma_{rr}^{(2)}, & \sigma_{r\theta}^{(3)}=\sigma_{r\theta}^{(2)}\\ u_r^{(3)}=u_r^{(2)}, & u_\theta^{(3)}=u_\theta^{(2)}\end{cases}\tag{10}$$

在隧道内表面 $r=r_3$ 处存在：

$$\sigma_{rr}^{(3)}=0,\qquad \sigma_{r\theta}^{(3)}=0\tag{11}$$

将式(4)～(6)代入式(9)～(11)，整理可得方程组：

$$\mu\tilde{\mu}_1\varepsilon_{11}^3(\alpha_1r_1)A_n+\tilde{\mu}_1\varepsilon_{12}^3(\beta_1r_1)B_n-\varepsilon_{11}^3(\alpha_2r_1)C_n-\varepsilon_{11}^4(\alpha_2r_1)D_n-\varepsilon_{12}^3(\beta_2r_1)F_n-\varepsilon_{12}^4(\beta_2r_1)G_n=\varphi_0\varepsilon_n i^n\tilde{\mu}_1\varepsilon_{11}^1(\alpha_1r_1)\tag{12a}$$

$$\tilde{\mu}_1\varepsilon_{41}^3(\alpha_1r_1)A_n+\tilde{\mu}_1\varepsilon_{42}^3(\beta_1r_1)B_n-\varepsilon_{41}^3(\alpha_2r_1)C_n-\varepsilon_{41}^4(\alpha_2r_1)D_n-\varepsilon_{42}^3(\beta_2r_1)F_n-\varepsilon_{42}^4(\beta_2r_1)G_n=\varphi_0\varepsilon_n i^n\tilde{\mu}_1\varepsilon_{41}^1(\alpha_1r_1)\tag{12b}$$

$$\varepsilon_{71}^3(\alpha_1r_1)A_n+\varepsilon_{72}^3(\beta_1r_1)B_n-\varepsilon_{71}^3(\alpha_2r_1)C_n-\varepsilon_{71}^4(\alpha_2r_1)D_n-\varepsilon_{72}^3(\beta_2r_1)F_n-\varepsilon_{72}^4(\beta_2r_1)G_n=\varphi_0\varepsilon_n i^n\varepsilon_{71}^1(\alpha_1r_1)\tag{12c}$$

$$\varepsilon_{81}^3(\alpha_1r_1)A_n+\varepsilon_{82}^3(\beta_1r_1)B_n-\varepsilon_{81}^3(\alpha_2r_1)C_n-\varepsilon_{81}^4(\alpha_2r_1)D_n-\varepsilon_{82}^3(\beta_2r_1)F_n-\varepsilon_{82}^4(\beta_2r_1)G_n=\varphi_0\varepsilon_n i^n\varepsilon_{81}^1(\alpha_1r_1)\tag{12d}$$

$$\tilde{\mu}_2\varepsilon_{11}^3(\alpha_2r_2)C_n+\tilde{\mu}_2\varepsilon_{11}^4(\alpha_2r_2)D_n+\tilde{\mu}_2\varepsilon_{12}^3(\beta_2r_2)F_n+\tilde{\mu}_2\varepsilon_{12}^4(\beta_2r_2)G_n-\varepsilon_{11}^3(\alpha_3r_2)K_n-\varepsilon_{11}^4(\alpha_3r_2)L_n-\varepsilon_{12}^3(\beta_3r_2)M_n-\varepsilon_{12}^4(\beta_3r_2)N_n=0\tag{12e}$$

$$\tilde{\mu}_2\varepsilon_{41}^3(\alpha_2r_2)C_n+\tilde{\mu}_2\varepsilon_{41}^4(\alpha_2r_2)D_n+\tilde{\mu}_2\varepsilon_{42}^3(\beta_2r_2)F_n+\tilde{\mu}_2\varepsilon_{42}^4(\beta_2r_2)G_n-\varepsilon_{41}^3(\alpha_3r_2)K_n-\varepsilon_{41}^4(\alpha_3r_2)L_n-\varepsilon_{42}^3(\beta_3r_2)M_n-\varepsilon_{42}^4(\beta_3r_2)N_n=0\tag{12f}$$

$$\varepsilon_{71}^3(\alpha_2r_2)C_n+\varepsilon_{71}^4(\alpha_2r_2)D_n+\varepsilon_{72}^3(\beta_2r_2)F_n+\varepsilon_{72}^4(\beta_2r_2)G_n-\varepsilon_{71}^3(\alpha_3r_2)K_n-$$

$$\varepsilon_{71}^{4}(\alpha_3 r_2) L_n - \varepsilon_{72}^{3}(\beta_3 r_2) M_n - \varepsilon_{72}^{4}(\beta_3 r_2) N_n = 0 \tag{12g}$$

$$\varepsilon_{81}^{3}(\alpha_2 r_2) C_n + \varepsilon_{81}^{4}(\alpha_2 r_2) D_n + \varepsilon_{82}^{3}(\beta_2 r_2) F_n + \varepsilon_{82}^{4}(\beta_2 r_2) G_n - \varepsilon_{81}^{3}(\alpha_3 r_2) K_n - \varepsilon_{81}^{4}(\alpha_3 r_2) L_n - \varepsilon_{82}^{3}(\beta_3 r_2) M_n - \varepsilon_{82}^{4}(\beta_3 r_2) N_n = 0 \tag{12h}$$

$$\varepsilon_{11}^{3}(\alpha_3 r_3) K_n + \varepsilon_{11}^{4}(\alpha_3 r_3) L_n + \varepsilon_{12}^{3}(\beta_3 r_3) M_n + \varepsilon_{12}^{4}(\beta_3 r_3) N_n = 0 \tag{12i}$$

$$\varepsilon_{41}^{3}(\alpha_3 r_3) K_n + \varepsilon_{41}^{4}(\alpha_3 r_3) L_n + \varepsilon_{42}^{3}(\beta_3 r_3) M_n + \varepsilon_{42}^{4}(\beta_3 r_3) N_n = 0 \tag{12j}$$

式中：$\tilde{\mu}_1 = \mu_1/\mu_2$；$\tilde{\mu}_2 = \mu_2/\mu_3$；$\varepsilon_{11}^{3}$，$\varepsilon_{12}^{3}$，…，为各种波对应力及位移的贡献因子[6]。

求解上述方程组即可确定待定系数 A_n、B_n、C_n、D_n、F_n、G_n、K_n、L_n、M_n、N_n 的值，将待定系数代入式(4)～式(6)，便可确定介质 I、II、III 中的势函数，势函数确定后将其代入式(7)～(8)，可以得到平面 P 波入射下复合衬砌隧道结构的位移及应力分布。

3 爆破地震波作用下隧道动力响应的敏感性分析

红山南路隧道群位于南京火车站北侧，其中管廊隧道的 K1＋934.9～K1＋953.4 段与机动车隧道的 K1＋930.7～K1＋950.8 段和地铁 1 号线中心相交，最近处距离仅为 4.5 m。因此，地铁 1 号线既有隧道上方正在开挖的隧道群的爆破施工不可避免地会对地铁 1 号线的运行造成影响

表 1 敏感性分析所用的材料参数

Table 1 Materials parameters for sensitivity analysis

介质	E/GPa	ρ/(g·cm^{-3})	υ	d/m
围岩(I)	50(40～95)	2.60	0.26(0.20～0.40)	
C20 砼(II)	25(20～30)	2.50	0.25	0.15(0.10～0.30)
C30 砼(III)	32(20～36)	2.50	0.30	0.45(0.25～0.60)

已知交叉段地铁隧道所处地层岩性为石灰岩夹白云质灰岩，且岩体较完整，属Ⅲ级围岩地质；隧道内径为 5 m；初期支护层厚 0.15 m，采用 C20 砼；二次衬砌层厚 0.45 m，采用 C30 砼。将围岩、初期支护层、二次衬砌层分别视为图 1 中介质 I、II、III 层，其物理力学参数及几何尺寸如表 1 所示，E 为弹性模量，ρ 为密度，υ 为泊松比，d 为厚度，括号内数值为参数取值范围。图 2 为红山南路隧道群开挖施工中采集的爆破振动信号的时程曲线及功率谱密度 P 图，由于地下深孔、浅孔爆破振动的主频范围一般为 30～300 Hz[11]，结合图 2 给出的信息，本文计算中选取入射波频率为 200 Hz。

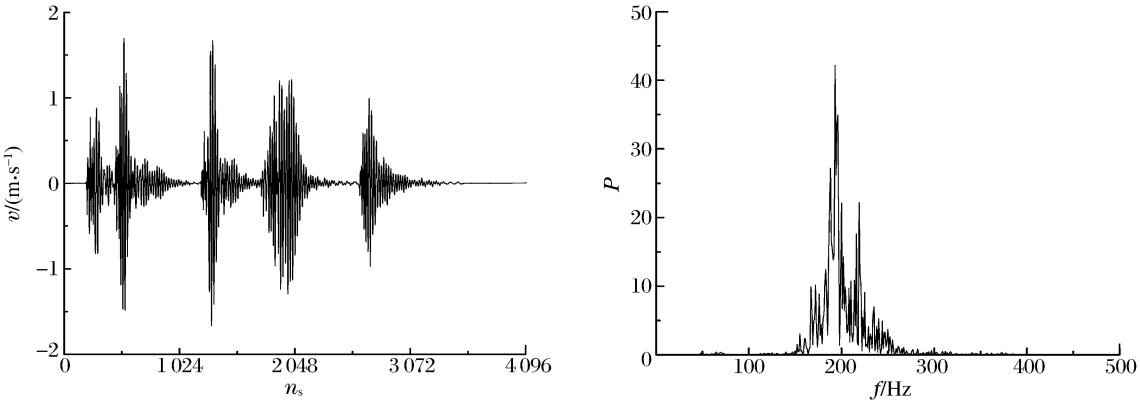

图 2 实测爆破振动信号时程曲线及功率谱密度

Fig. 2 Time history and power spectrum density of measurement signal

3.1 动应力集中因数分析

隧道在爆破地震波作用下的动力响应问题可以用动应力集中因数 K 具体反映，将 2.2 节中确定的待定系数代入式(8)，整理后可得衬砌结构的动应力集中因数：

$$K = |\sigma/\sigma_0| \tag{13}$$

式中：σ_0 为入射波的应力幅值，$\sigma_0 = -\mu\beta_1^2\varphi_0$。

根据式(11)可知，隧道内表面 $r=r_3$ 的径向应力 σ_{rr} 与剪切应力 $\sigma_{r\theta}$ 均为零，因此，本文中主要考察隧道物理力学参数及几何尺寸对隧道围岩(图 1 中 A 点)及内衬(图 1 中 B 点)环向动应力集中因数的影响。图 3 为在复合衬砌及单层衬砌条件下分别计算的隧道内衬环向动应力集中因数对比图。单层衬砌条件下将图 1 中的介质Ⅱ、Ⅲ等效为一层，该层材料参数参考表 1 中的介质Ⅲ，厚度为 0.60 m。

从图 3 中可以看出，其他条件相同的情况下，采用文献[6]中考虑单层衬砌方法计算得到的 K 要略低于本文中考虑复合衬砌的方法计算得到的 K，考虑单层衬砌计算的 $K_{\max}$ 为 1.769，而按照复合衬砌计算的 $K_{\max}$ 为 1.816。因此，解析计算中将双层的衬砌结构简化为单层衬砌可能偏于不安全，根据真实隧道结构进行分层计算是必要的。

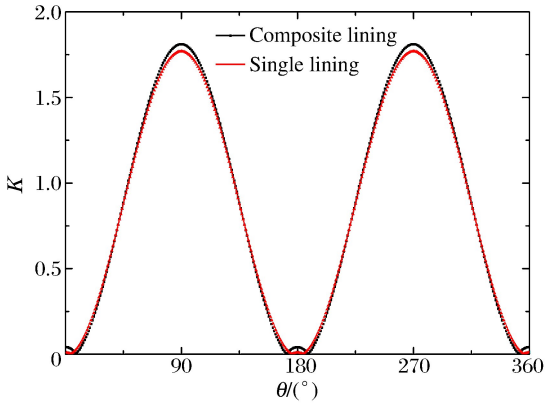

图 3　复合衬砌和单层衬砌条件下动应力集中因数对比

Fig. 3　Comparison of dynamic stress concentration factors between composite-lining and single-lining tunnels

3.2　隧道物理力学参数对其动力响应的影响

根据表 1 给出的红山南路隧道物理力学参数，借鉴 2.2 节中对待定系数的求解过程，可以求得不同参数取值范围内，隧道围岩及内衬环向动应力集中因数的变化规律，从而可以判断隧道结构动力响应的敏感参数，并以此指导隧道施工设计。

3.2.1　介质弹性模量的影响

通过改变隧道围岩、初期支护及二次衬砌的弹性模量 E_1、E_2、E_3 的取值范围，可分别得到 A、B 点环向动应力集中因数 K_A、K_B 随介质弹性模量的变化关系，如图 4～6 所示。对 K_A、K_B 进行数据拟合，可以得到如表 2 所示的回归方程。从统计学角度[12]分析表 2 中的相关性因数 R^2 及残差平方和 S_{rs} 可知，拟合后的回归曲线与原始数据对比体现出非常好的相关性，可真实地反映动应力集中因数随各层介质弹性模量变化的敏感性，能够为隧道抗震设计中合理匹配介质材料参数提供依据。

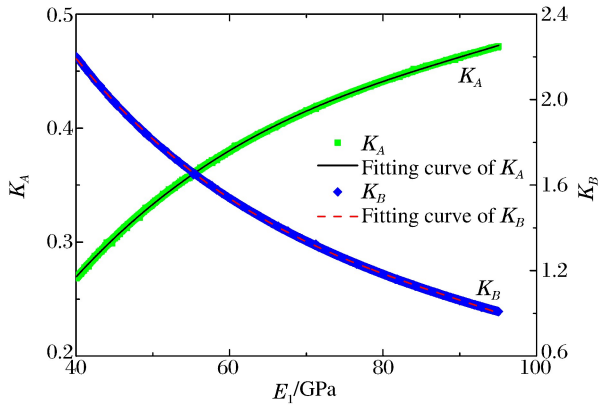

图 4　K_A、K_B 随围岩弹性模量的变化

Fig. 4　K_A and K_B varied with elastic modulus of surrounding rock

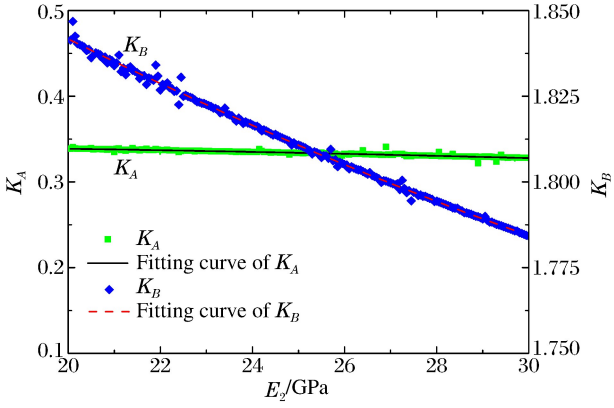

图 5　K_A、K_B 随初期支护层弹性模量的变化

Fig. 5　K_A and K_B varied with elastic modulus of primary lining

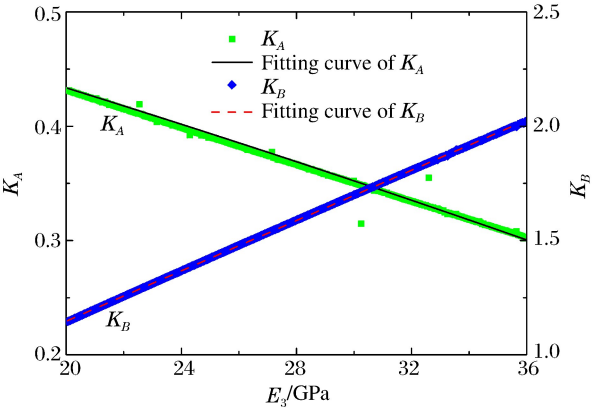

图 6　K_A、K_B 随二次衬砌层弹性模量的变化

Fig. 6　K_A and K_B varied with elastic modulus of secondary lining

由图 4 可知:当围岩的弹性模量 E_1 从 40 MPa 变化到 95 MPa 时,K_A 增大了 76.1%,而 K_B 则减小了 54.5%。由此说明,当隧道围岩弹性模量增大时,围岩中由爆破地震波中 P 波反射产生的动应力增大,而内衬结构中的动应力则呈减小趋势,且围岩弹性模量的变化对围岩动力响应的影响较明显。

从图 5~6 中可以看出:当初期支护层的弹性模量 E_2 从 20 MPa 增加到 30 MPa 时,K_A、K_B 分别减小了 3.26%和 3.24%,均呈减小趋势,但变化幅度不大;当二次衬砌层的弹性模量 E_3 从 20 MPa 增加到 36 MPa 时,K_A 减小了 29.9%,而 K_B 增大了 76.9%。

由此可以得出结论:在隧道抗震设计时,条件允许的前提下应尽可能选择弹性模量大的初期支护层;而对于二次衬砌层,由于衬砌环向应力的增大幅度要大于围岩的减小幅度,在隧道设计时,满足结构承载要求的条件下选择刚度较小的衬砌材料,可以有效改善隧道结构的受力情况。

表 2 动应力集中因数随隧道物理力学参数变化关系的回归方程

Table 2 Regression equations for relations between dynamic stress concentration factors and physico-mechanical parameters of tunnel

回归方程	R^2	S_{rs}
$K_A=-0.230+0.019E_1-1.818\times10^{-4}E_1^2+6.608\times10^{-7}E_1^3$	0.999	2.996×10^{-4}
$K_B=5.183-0.012E_1+1.100\times10^{-3}E_1^2-4.032\times10^{-6}E_1^3$	0.999	7.920×10^{-3}
$K_A=0.345+2.512\times10^{-4}E_2-2.697\times10^{-5}E_2^2$	0.978	3.875×10^{-4}
$K_B=2.012-1.037\times10^{-2}E_2+9.276\times10^{-5}E_2^2$	0.997	1.713×10^{-4}
$K_A=0.601-8.320\times10^{-3}E_3$	0.999	3.171×10^{-4}
$K_B=0.047+5.501\times10^{-2}E_3$	0.999	1.390×10^{-3}
$K_A=0.479-1.763\times10^{-2}\nu-2.075\nu^2$	0.999	1.098×10^{-4}
$K_B=2.221-0.743\nu-3.213\nu^2$	0.999	1.132×10^{-4}

3.2.2 泊松比的影响

由于初期支护及二次衬砌所用商砼的泊松比变化范围不大,本节仅针对隧道围岩泊松比变化对隧道结构动力响应的影响进行分析。图 7 为围岩泊松比变化对围岩及内衬环向应力影响的回归曲线,其回归方程及参数见表 2。从图 7 可看出:随泊松比的增大,K_A、K_B 分别减小 64.8%和 27.5%,围岩泊松比对围岩应力的影响比其对衬砌应力的影响大得多。

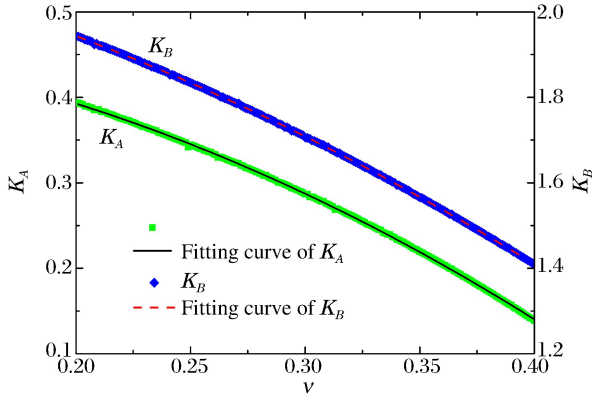

图 7 K_A、K_B 随围岩泊松比的变化

Fig. 7 K_A and K_B varied with Poisson's ratio of surrounding rock

3.3 隧道几何尺寸对其动力响应的影响

3.3.1 二次衬砌层厚度的影响

图 8 为二次衬砌厚度 d_1 变化对围岩和内衬环向应力影响的回归曲线图,具体的回归方程及参数见表 3。从图 8 可看出:当二次衬砌层厚度从 0.25 m 增加至 0.60 m 时,K_A 减小了 40.3%,K_B 增大了 3.5%,内衬中应力的增大幅度远小于围岩应力的减小幅度,这一点与单层衬砌是不同的[6]。

因此,在较不稳定的地层中进行隧道施工时,在综合对比围岩与衬砌材料参数及经济合理性的前提下可以考虑适当加大二次衬砌层的厚度。

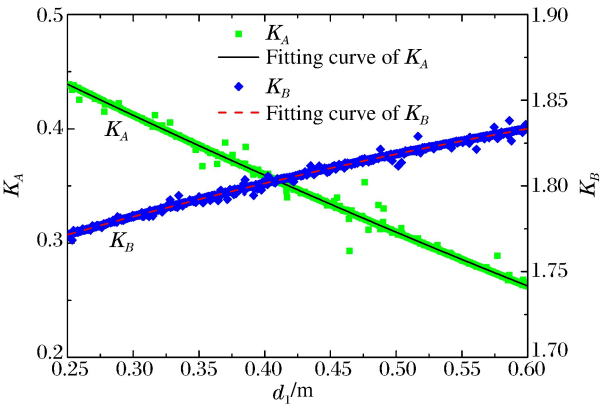

图 8 K_A、K_B 随二次衬砌层厚度的变化

Fig. 8 K_A and K_B varied with secondary lining thickness

3.3.2 初期支护层厚度的影响

图 9 为初期支护层厚度 d_2 变化对围岩和内衬环向应力影响的回归曲线，其回归方程及参数见表 3。由图 9 可知：当 d_2 从 0.10 m 变化到 0.30 m时，K_A 减小了 19.6%，K_B 增大了 2.0%，与二次衬砌层厚度 d_1 变化对 K_A、K_B 的影响规律相似，d_2 变化对围岩应力的影响要大于对衬砌应力的影响。因此，隧道设计时，也可以通过增加初期支护的厚度保证围岩与衬砌的动应力均小于其动抗拉强度，但效果次于增加二次衬砌厚度。

表 3 动应力集中因数随隧道几何尺寸变化关系的回归方程

Table 3 Regression equations for variations of dynamic stress concentration factors with geometrical dimensions of tunnel

回归方程	R^2	S_{rs}
$K_A=0.585-0.619d_1+0.135d_1^2$	0.989	5.160×10^{-3}
$K_B=1.710+0.275d_1-0.115d_1^2$	0.996	7.783×10^{-4}
$K_A=0.427-0.369d_2$	0.964	7.918×10^{-4}
$K_B=1.764+0.186d_2$	0.992	3.761×10^{-4}

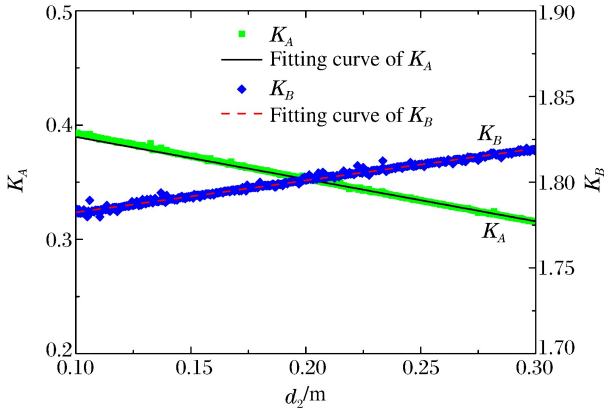

图 9 K_A、K_B 随初期支护层厚度的变化

Fig. 9 K_A and K_B varied with primary lining thickness

4 结　论

采用波函数展开法，推导了无限弹性介质中复合衬砌结构隧道在爆破地震波作用下衍射问题的解析解，结合实例分析了隧道物理力学参数及几何尺寸对其动应力集中因数的影响，得到如下结论：

(1)研究爆破地震波作用下隧道衍射问题的解析求解过程，可以为隧道抗震设计中合理匹配衬砌材料和厚度提供指导性意见，其解析结果有助于解决更复杂的工程应用问题。

(2)比较复合衬砌和单层衬砌条件下内衬结构的环向动应力集中因数，得知解析计算中将隧道衬砌简化为单层结构偏于不安全，根据隧道真实结构进行求解是必要的。

(3)围岩和二次衬砌弹性模量变化对隧道结构所选 2 处考察点环向动应力的敏感性要远大于初期支护层；围岩、内衬的环向动应力均随围岩介质泊松比的增大而减小，且前者变化的敏感程度大于后者。

(4)在不稳定的地层中，通过增大衬砌层的厚度在一定程度上可以改善围岩和衬砌结构的受力情况，且增加二次衬砌层厚度的效果要优于初期支护层。

参考文献：

[1] 郑永来，杨林德，李文艺. 地下结构抗震[M]. 上海：同济大学出版社，2005：152-156.

[2] Pao Y H. Applied mechanics in science and engineering[J]. Applied Mechanics Review, 1998,51(2):141-153.

[3] 王长柏，李海波，周青春. 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. 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.

[4] 高广运，李育枢，李天斌. P 波作用下浅埋圆形衬砌隧道动力反应分析[J]. 中南公路工程，2007，32(2)：56-60.
Gao Guang-yun, Li Yu-shu, Li Tian-bin. Dynamic analysis of shallow buried circular lining tunnel with vertical incident P wave[J]. Central South Highway Engineering, 2007,32(2):56-60.

[5] 梁建文，巴振宁，Lee V W. 平面 P 波在饱和半空间中洞室周围的散射(I)：解析解[J]. 地震工程与工程振动，2007，27(1)：1-6.
Liang Jian-wen, Ba Zhen-ning, Lee V W. Scattering of plane P waves around a cavity in poroelastic half-space(I): Analytical solution[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007,27(1):1-6.

[6] 鲍亦兴，毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 刘殿魁，苏先樾，译. 北京：科学出版社，1993：321-354.

[7] 齐辉,王艳,刘殿魁. 半无限空间界面附近 SH 波对圆形衬砌的散射[J]. 地震工程与工程振动,2003,22(3):41-46.
Qi Hui, Wang Yan, Liu Dian-kui. Dynamic analysis of shallow embedded lining structure by incident SH waves [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,22(3):41-46.

[8] 史文谱,刘殿魁,林宏. 半无限空间中稳态 P 波在衬砌周围的散射[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(3):19-26.
Shi Wen-pu, Liu Dian-kui, Lin Hong. Scatting of steady P waves around a circular lining in half space[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002,22(3):19-26.

[9] 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.

[10] 言志信. 爆破地震效应及安全[M]. 北京:科学出版社,2011:95-107.

[11] 肖正学. 爆破地震波动力学基础与地震效应[M]. 成都:电子科技大学出版社,2004:163-171.

[12] 何晓群. 应用回归分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2007:72-80.

Dynamic response sensitivity of urban tunnel structures under blasting seismic waves to parameters*

Lu Liang[1,2], Long Yuan[1], Guo Tao[1], Xie Quan-min[1,3],
Zhao Chang-xiao[1,3], Gao Fu-yin[1]

(1. *College of Field Engineering, University of Science and Technology of PLA, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. 72351 *Unit, Laiwu* 271109, *Shandong, China*;
3. *Wuhan Ordnance N.C.O Academy, Wuhan* 430075, *Hubei, China*)

Abstract: Primary waves were chosen as the study object, then an analytical solution for the dynamic response of tunnels with composite lining in infinite media under blasting seismic waves was deduced based on the wave function expansion method. According to the solution, the sensitivity of dynamic stress concentration factors to parameters was analyzed with the tunnel group excavation at Nanjing Hongshan South Road. By curve fitting, the regression equations were obtained for the hoop dynamic stress concentration factors of the surrounding rock and inner lining varied with the kinetic and geometrical parameters, respectively. The analysis result show that the elastic moduli of the surrounding rock and secondary lining and the Poisson's ratio of the surrounding rock have more impact on the hoop dynamic stress at the observation points and the effect of the elastic modulus of the primary lining is negligible. The lining thickness change has greater influence on the hoop dynamic stress of the surrounding rock than on the inner lining. Increasing the lining thickness can balance the stress states of the tunnel structures in designs and constructions, but the effect by the thicker inner lining is not as well as that by the thicker secondary lining.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; analytical solution; tunnel structures; blasting seismic waves

---

* Received 3 April 2013; Revised 8 June 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51178460,51204071)
Corresponding author: Lu Liang, jzd04-20087@163.com

(责任编辑 张凌云)