

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0505

平面 P 波入射下浅埋平行双洞隧道 注浆加固减震机制

王帅帅^{1,2}, 高 波¹, 范凯祥¹, 申玉生¹, 张 涛¹

(1. 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; 2. 中交第二公路工程局有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 地震动作用下小净距隧道双洞之间存在动力放大效应, 依托某强震区小净距盾构隧道工程, 基于傅里叶贝塞尔级数展开法, 给出了平面 P 波垂直入射下地下半空间弹性介质中圆形双洞复合式衬砌洞室动应力解析解, 深入研究了洞室间距、隧道全环注浆加固参数对衬砌动应力集中的影响。研究表明: 洞室间距对衬砌的动应力有显著影响, 随着洞室之间距离减小, 左右洞室衬砌动应力明显放大; 2.5 倍洞径可以作为双洞洞室动力临界净距, 当洞室间距小于 2.5 倍洞径时, 应进行抗减震设计; 注浆全环加固隧道周边土体, 可以明显降低衬砌动应力, 随着注浆加固区土体刚度增加, 衬砌动应力幅值减小; 结合工程实际, 建议注浆加固区厚度取 0.5 倍的洞室半径值, 加固区岩体和围岩剪切波速度之比取 1.2。

关 键 词: 平面 P 波; 小净距隧道; 注浆加固; 减震机制; 动应力集中系数;

中图分类号: U 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)02-0683-08

Damping mechanism of shallow cylindrical parallel tunnel with grouting reinforcement zone

WANG Shuai-shuai^{1,2}, GAO Bo¹, FAN Kai-xiang¹, SHEN Yu-sheng¹, ZHANG Tao¹

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

2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The parallel small clear-distance tunnels have obvious dynamic amplification effect under earthquake loading. Small neighbourhood shield tunnels in the strong earthquake region were selected to investigate the dynamic response of shallow-buried parallel small clear-distance tunnels. A series of dynamic stress solutions was deducted for shallow-buried composite lined tunnels subjected to vertically propagating incident P waves using the Fourier-Bessel expansion method. Moreover, we discussed the influence of the distance between two tunnels and the grouting reinforcement zone on dynamic stress of tunnels. The results show that the distance between tunnels plays a vital role on the dynamic stress response of tunnels, and dynamic stress concentration factors of linings increase obviously as decreasing the distance of tunnels. The critical distance between the centres of two circular tunnels is proposed as 2.5 times diameter. The aseismic and damping design should also be suggested when the distance is below the critical value. The dynamic stress of linings decreases with grouting reinforcement ring zone set outside around tunnels, and the dynamic stress of linings decreases with increasing the stiffness of the grouting zone. The optimal ratio of shear wave velocity of the grouting zone to that of surrounding rock is suggested as 1.2. The recommended ratio of the thickness of the grouting zone to the tunnel radius is 0.5.

Keywords: plane P waves; small clear-distance tunnels; grouting reinforcement zone; damping mechanism; dynamic stress concentration factor

1 引 言

随着经济和社会发展, 将会有越来越多的隧道

穿越高烈度地震区, 由于小净距隧道双洞应力场存在相互影响, 而国内外针对强震区小净距隧道的抗减震技术研究较少, 可供借鉴的实例和经验十分有

收稿日期: 2016-03-17

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (No. 2016YFB1200401); 国家自然科学基金项目 (No. 51678501, No. 51778540, No.51778539, No. 51178398)。This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB1200401) and the National Natural Science Foundation of China (51678501, 51778540, 51778539, 51178398).

第一作者简介: 王帅帅, 男, 1988 年生, 博士后, 工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的施工及研发工作。E-mail: 8366wangshuai@sina.com

限, 因此, 开展高烈度地震区隧道群抗减震技术研究具有重要的科研和实际工程意义。

目前, 隧道抗减震理论研究主要包括数值模拟和解析法两种方式。而解析法是检验数值方法精度的重要手段, 对科学研究和实际工程仍然具有重要的指导意义。自从 Pao 等^[1]通过波函数展开法研究了无限空间中单个圆形洞室动应力集中问题后, Davis^[2]、LEE^[3-4]和纪晓东^[5]等进一步给出了半空间中单个圆形洞室及单层衬砌洞室动应力集中问题。Balendra 等^[6]研究了半空间中衬砌双洞室在 SH 波作用下的动力响应, 结论表明, 当隧道间距较小时, 两个洞室之间存在相互作用。梁建文等^[7-8]进一步用波函数展开法研究了 P 波和 SV 波入射下半无限空间无衬砌双洞室的动应力的分布。李宁^[9]进一步研究了 P 波和 SV 波入射下半无限空间中双洞衬砌洞室的动应力问题。

而目前关于圆形复合式衬砌洞室动应力集中系数问题的研究还不多见。文献[10-11]研究了无限空间内单个圆形组合衬砌隧道动应力集中问题。王帅帅等^[12-14]分析了平面地震波入射下设减震层圆形复合式衬砌单个洞室动应力集中问题, 研究表明, 减震层可以显著降低洞室二次衬砌动应力。皇民^[15]基于有限元软件和振动台模型试验, 研究了小净距隧道动应力特性, 结果表明, 设置减震层和注浆加固都可以降低小净距隧道动力响应。高峰等^[16]通过有限元研究了隧道设减震层和注浆加固两种减震措施, 研究表明, 对于软土隧道注浆加固具有较好的减震效果。

但据笔者所知, 目前针对半无限空间内复合式衬砌双洞室动应力集中系数解析解研究还很少。本文基于贝塞尔级数展开法, 研究了平面 P 波入射下弹性半无限空间平行双洞圆形双层衬砌洞室动应力集中问题, 并讨论了洞室间距、隧道注浆加固圈对衬砌动应力响应的影响, 研究结论可以为高烈度地震区小净距隧道抗减震设计提供参考。

2 理论模型

半空间中圆形双洞复合式衬砌洞室弹性波散射问题的力学模型如图 1 所示。模型由外到内依次为围岩、一次衬砌和二次衬砌, 借鉴既有研究, 本文用一个半径足够大的圆弧近似模拟水平地表自由面^[2]。围岩和衬砌均为各向同性均质弹性介质, 介质力学参数由拉梅常数 λ_i 、 μ_i 和密度 ρ_i 确定, 介质 P 波和 S 波波速分别为 α_i 和 β_i ($i=s, 1, 2$ 分别代表围岩、一次衬砌、二次衬砌)。

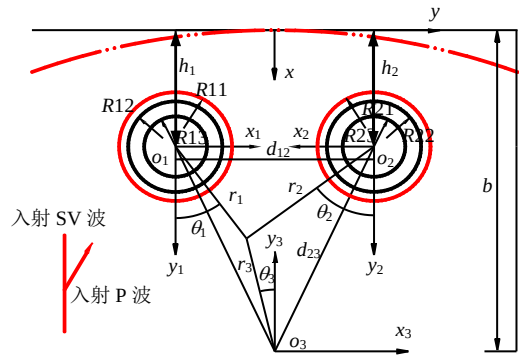


图 1 双层双洞衬砌洞室模型图
Fig.1 Model of composite-lined twin tunnels

对于半空间自由场地, 入射平面 P 波在地表面将产生反射 P 波和反射 SV 波, 利用傅里叶贝塞尔积分可将入射 P 波以及反射 P 波和反射 SV 波的势函数在 o_1 极坐标系中展开为^[2, 4]

$$\phi_{i+r}^{(1)}(r_1, \theta_1) = \sum_{n_1=0}^{\infty} J_{n_1}^{(1)}(k_{s\alpha} r_1) (G_{o_1, n_1} \sin n_1 \theta_1 + H_{o_1, n_1} \cos n_1 \theta_1) \quad (1)$$

$$\varphi_r^{(1)}(r_1, \theta_1) = \sum_{n_1=0}^{\infty} J_{n_1}^{(1)}(k_{s\alpha} r_1) (E_{o_1, n_1} \cos n_1 \theta_1 + F_{o_1, n_1} \sin n_1 \theta_1) \quad (2)$$

式中: $J_n^{(1)}$ 表示第 1 类 Bessel 函数; $k_{s\alpha}$ 、 $k_{s\beta}$ 为围岩 P 波和 S 波波数^[2]; 式中各待定系数分别为

$$\begin{Bmatrix} G_{o_1, n_1} \\ H_{o_1, n_1} \end{Bmatrix} = \varepsilon_{n_1} i^{n_1} \begin{Bmatrix} \cos n_1 \theta_\alpha \\ \sin n_1 \theta_\alpha \end{Bmatrix} \left\{ [\pm(-1)^{n_1} \exp(-ik_{s\alpha} h_1 \cos \theta_\alpha) + k_{11} \exp(ik_{s\alpha} h_1 \cos \theta_\alpha)] \right\} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} E_{o_1, n_1} \\ F_{o_1, n_1} \end{Bmatrix} = \varepsilon_{n_1} i^{n_1} \begin{Bmatrix} \sin n_1 \theta_\beta \\ \cos n_1 \theta_\beta \end{Bmatrix} k_{12} \exp(ik_{s\beta} h_1 \cos \theta_\beta) \quad (4)$$

式中: θ_α 、 θ_β 分别为 P 波入射角、反射 SV 波反射角, 即 $k_{s\alpha} \sin \theta_\alpha = k_{s\beta} \sin \theta_\beta$; 当 $n_1=0$ 时, $\varepsilon_{n_1}=1$; $n_1 \geq 1$ 时, $\varepsilon_{n_1}=2$; k_{11} 和 k_{12} 为入射波在自由地表的反射系数^[7]; h_1 见图 1。

同理可得, 入射 P 波以及反射 P 波和反射 SV 波的势函数在 o_2 极坐标系中展开为^[2, 4]

$$\phi_{i+r}^{(2)}(r_2, \theta_2) = \sum_{n_2=0}^{\infty} J_{n_2}^{(1)}(k_{s\alpha} r_2) \cdot (G_{o_2, n_2} \sin n_2 \theta_2 + H_{o_2, n_2} \cos n_2 \theta_2) \quad (5)$$

$$\varphi_r^{(2)}(r_2, \theta_2) = \sum_{n_2=0}^{\infty} J_{n_2}^{(1)}(k_{s\beta} r_2) \cdot (E_{o_2, n_2} \cos n_2 \theta_2 + F_{o_2, n_2} \sin n_2 \theta_2) \quad (6)$$

式中: 各待定系数分别为

$$\begin{Bmatrix} G_{o_2, n_2} \\ H_{o_2, n_2} \end{Bmatrix} = \varepsilon_{n_2} i^{n_2} \begin{Bmatrix} \cos n_2 \theta_\alpha \\ \sin n_2 \theta_\alpha \end{Bmatrix} [(-1)^{n_2} \exp(-ik_{s\alpha} h_1 \cos \theta_\alpha) \pm k_{21} \exp(ik_{s\alpha} h_2 \cos \theta_\alpha)] \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} E_{o_2, n_2} \\ F_{o_2, n_2} \end{Bmatrix} = \varepsilon_{n_2} i^{n_2} \begin{Bmatrix} \sin n_2 \theta_\beta \\ \cos n_2 \theta_\beta \end{Bmatrix} \mp k_{22} \exp(ik_{s\beta} h_1 \cos \theta_\beta) \quad (8)$$

式中: 当 $n_2=0$ 时, $\varepsilon_{n_2}=1$; 当 $n_2 \geq 1$ 时, $\varepsilon_{n_2}=2$; k_{21} 和 k_{22} 为入射波在自由地表的反射系数^[7]。

由于地表大圆弧假定, 入射波在在地表会产生的内聚型的散射 P 波 $\phi_{s_3}(r_3, \theta_3)$ 和散射 SV 波 $\psi_{s_3}(r_3, \theta_3)$ 在 o_3 坐标系中其级数表达式可表示为

$$\begin{aligned} \phi_{s_3}^{(3)}(r_3, \theta_3) &= \sum_{n_3} J_{n_3}^{(1)}(k_{s\alpha} r_3) \cdot \\ &\quad (E_{s_3, n_3} \cos n_3 \theta_3 + F_{s_3, n_3} \sin n_3 \theta_3) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \psi_{s_3}^{(3)}(r_3, \theta_3) &= \sum_{n_3} J_{n_3}^{(1)}(k_{s\beta} r_3) \cdot \\ &\quad (G_{s_3, n_3} \sin n_3 \theta_3 + H_{s_3, n_3} \cos n_3 \theta_3) \end{aligned} \quad (10)$$

由于半空间场地中左洞存在, 入射波在隧道周边产生的发散型的散射 P 波 $\phi_{s_1}(r_1, \theta_1)$ 和散射 SV 波 $\psi_{s_1}(r_1, \theta_1)$ 在 o_1 坐标系中级数表达式为

$$\phi_{s_1}^{(1)}(r_1, \theta_1) = \sum_{n_1} H_{n_1}^{(1)}(k_{s\alpha} r_1) (E_{s_1, n_1} \cos n_1 \theta_1 + F_{s_1, n_1} \sin n_1 \theta_1) \quad (11)$$

$$\psi_{s_1}^{(1)}(r_1, \theta_1) = \sum_{n_1} H_{n_1}^{(1)}(k_{s\beta} r_1) (G_{s_1, n_1} \sin n_1 \theta_1 + H_{s_1, n_1} \cos n_1 \theta_1) \quad (12)$$

同理, 半空间场地中右洞周边产生的发散型的散射 P 波和 SV 波在 o_2 坐标系中表示为

$$\begin{aligned} \phi_{s_2}^{(2)}(r_2, \theta_2) &= \sum_{n_2} H_{n_2}^{(1)}(k_{s\alpha} r_2) \cdot \\ &\quad (E_{s_2, n_2} \cos n_2 \theta_2 + F_{s_2, n_2} \sin n_2 \theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \psi_{s_2}^{(2)}(r_2, \theta_2) &= \sum_{n_2} H_{n_2}^{(1)}(k_{s\beta} r_2) \cdot \\ &\quad (G_{s_2, n_2} \sin n_2 \theta_2 + H_{s_2, n_2} \cos n_2 \theta_2) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $J_n^{(1)}$ 和 $H_n^{(1)}$ 分别为第 1 类 Bessel 函数和第 1 类 Hankel 函数; E_{s_f, n_f} 、 F_{s_f, n_f} 、 G_{s_f, n_f} 、 H_{s_f, n_f} 为待定系数, 其中 $f=1, 2, 3$ 分别代表 o_1 、 o_2 、 o_3 坐标系。

左洞衬砌 i ($i=1, 2$ 分别代表一次衬砌和二次衬砌) 中存在由衬砌外表面引起的内聚型散射 P 波 $\phi_{i,1}^{(1)}(r_1, \theta_1)$ 与 SV 波 $\psi_{i,1}^{(1)}(r_1, \theta_1)$, 以及衬砌内表面引

起发散型散射 P 波 $\phi_{i,2}^{(1)}(r_1, \theta_1)$ 和 SV 波 $\psi_{i,2}^{(1)}(r_1, \theta_1)$, 其势函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{i,1}^{(1)}(r_1, \theta_1) &= \sum_{n_1=0}^{\infty} J_{n_1}^{(1)}(k_{i\alpha,1} r_1) \cdot \\ &\quad (E_{i, n_1}^{(1)} \sin n_1 \theta_1 + F_{i, n_1}^{(1)} \cos n_1 \theta_1) \\ \psi_{i,1}^{(1)}(r_1, \theta_1) &= \sum_{n_1=0}^{\infty} J_{n_1}^{(1)}(k_{i\beta,1} r_1) \cdot \\ &\quad (G_{i, n_1}^{(1)} \cos n_1 \theta_1 + H_{i, n_1}^{(1)} \sin n_1 \theta_1) \\ \phi_{i,2}^{(1)}(r_1, \theta_1) &= \sum_{n_1=0}^{\infty} H_{n_1}^{(1)}(k_{i\alpha,2} r_1) \cdot \\ &\quad (L_{i, n_1}^{(1)} \sin n_1 \theta_1 + M_{i, n_1}^{(1)} \cos n_1 \theta_1) \\ \psi_{i,2}^{(1)}(r_1, \theta_1) &= \sum_{n_1=0}^{\infty} H_{n_1}^{(1)}(k_{i\beta,2} r_1) \cdot \\ &\quad (N_{i, n_1}^{(1)} \cos n_1 \theta_1 + R_{i, n_1}^{(1)} \sin n_1 \theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $k_{i\alpha,i}$ 、 $k_{i\beta,i}$ 分别为左洞衬砌 i 中的压缩波波数和剪切波波数; $E_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $F_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $G_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $H_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $L_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $M_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $N_{i, n_f}^{(f)}$ 、 $R_{i, n_f}^{(f)}$ 为待定系数。

同理, 右洞衬砌 i ($i=1, 2$) 中存在由衬砌外表面引起的内聚型散射 P 波 $\phi_{i,1}^{(2)}(r_2, \theta_2)$ 与 SV 波 $\psi_{i,1}^{(2)}(r_2, \theta_2)$, 以及衬砌内表面引起发散型散射 P 波 $\phi_{i,2}^{(2)}(r_2, \theta_2)$ 和 SV 波 $\psi_{i,2}^{(2)}(r_2, \theta_2)$, 其势函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{i,1}^{(2)}(r_2, \theta_2) &= \sum_{n_2=0}^{\infty} J_{n_2}^{(1)}(k_{i\alpha,2} r_2) \cdot \\ &\quad (E_{i, n_2}^{(2)} \sin n_2 \theta_2 + F_{i, n_2}^{(2)} \cos n_2 \theta_2) \\ \psi_{i,1}^{(2)}(r_2, \theta_2) &= \sum_{n_2=0}^{\infty} J_{n_2}^{(1)}(k_{i\beta,2} r_2) \cdot \\ &\quad (G_{i, n_2}^{(2)} \cos n_2 \theta_2 + H_{i, n_2}^{(2)} \sin n_2 \theta_2) \\ \phi_{i,2}^{(2)}(r_2, \theta_2) &= \sum_{n_2=0}^{\infty} H_{n_2}^{(1)}(k_{i\alpha,2} r_2) \cdot \\ &\quad (L_{i, n_2}^{(2)} \sin n_2 \theta_2 + M_{i, n_2}^{(2)} \cos n_2 \theta_2) \\ \psi_{i,2}^{(2)}(r_2, \theta_2) &= \sum_{n_2=0}^{\infty} H_{n_2}^{(1)}(k_{i\beta,2} r_2) \cdot \\ &\quad (N_{i, n_2}^{(2)} \cos n_2 \theta_2 + R_{i, n_2}^{(2)} \sin n_2 \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $k_{i\alpha,i}^{(2)}$ 、 $k_{i\beta,i}^{(2)}$ 分别为左洞衬砌 i 中的压缩波波数和剪切波波数。

引入模型应力和位移边界条件可得

(1) 半无限空间表面应力零条件

$$\sigma_r^{(s)} = 0, \sigma_{r\theta}^{(s)} = 0 \quad (r_3 = b_2) \quad (17)$$

(2) 左、右洞室二次衬砌内表面应力零条件

左洞室:

$$\sigma_{r_1}^{(l_1)} = 0, \sigma_{r_1\theta_1}^{(l_1)} = 0 \quad (r_1 = R_{13}) \quad (18)$$

右洞室:

$$\sigma_{r_2}^{(l_2)} = 0, \sigma_{r_2\theta_2}^{(l_2)} = 0 \quad (r_2 = R_{23}) \quad (19)$$

(3) 衬砌与半空间应力和位移连续条件

左洞室:

$$\begin{aligned}\sigma_{r_1}^{(l_1)} &= \sigma_{r_1}^{(s_1)}, \sigma_{r_1\theta_1}^{(l_1)} = \sigma_{r_1\theta_1}^{(s_1)} \\ u_{r_1}^{(l_1)} &= u_{r_1}^{(s_1)}, u_{\theta_1}^{(l_1)} = u_{\theta_1}^{(s_1)} \quad (r_1 = R_{11})\end{aligned}\quad (20)$$

右洞室:

$$\begin{aligned}\sigma_{r_2}^{(l_2)} &= \sigma_{r_2}^{(s_2)}, \sigma_{r_2\theta_2}^{(l_2)} = \sigma_{r_2\theta_2}^{(s_2)} \\ u_{r_2}^{(l_2)} &= u_{r_2}^{(s_2)}, u_{\theta_2}^{(l_2)} = u_{\theta_2}^{(s_2)} \quad (r_2 = R_{21})\end{aligned}\quad (21)$$

(4) 衬砌 1 和衬砌 2 界面应力和位移连续条件

左洞室:

$$\begin{aligned}\sigma_{r_1}^{(l_1)} &= \sigma_{r_1}^{(l_2)}, \sigma_{r_1\theta_1}^{(l_1)} = \sigma_{r_1\theta_1}^{(l_2)} \\ u_{r_1}^{(l_1)} &= u_{r_1}^{(l_2)}, u_{\theta_1}^{(l_1)} = u_{\theta_1}^{(l_2)} \quad (r_1 = R_{12})\end{aligned}\quad (22)$$

右洞室:

$$\begin{aligned}\sigma_{r_2}^{(l_2)} &= \sigma_{r_2}^{(l_1)}, \sigma_{r_2\theta_2}^{(l_2)} = \sigma_{r_2\theta_2}^{(l_1)} \\ u_{r_2}^{(l_2)} &= u_{r_2}^{(l_1)}, u_{\theta_2}^{(l_2)} = u_{\theta_2}^{(l_1)} \quad (r_2 = R_{22})\end{aligned}\quad (23)$$

由于上述介质中波势函数为在不同极坐标系中给出,在引入边界条件之前,应进行坐标变换(Graf 加法坐标变换公式详见文献[8])。

对于平面 P 波垂直入射作用下半无限空间双洞衬砌洞室动应力求解问题属于平面应变问题,将介质势函数代入弹性介质中的位移和应力表达式(见文献[1-2]),可得围岩和衬砌介质应力和位移,然后由边界条件可联立求解线性方程组,最后在 MATLAB 程序中编程求解无穷级数方程组,得到待定系数 $G_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $H_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $E_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $F_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $L_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $M_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $N_{l_i,n_f}^{(f)}$ 、 $R_{l_i,n_f}^{(f)}$ 等,最后可得介质中应力和位移的级数解析解。

3 数值结果分析

借鉴文献[1-2],引入介质环向动应力集中系数(DSFC),为

$$\tau_{\theta\theta}^* = \tau_{\theta\theta}^i / \tau_{\theta\theta}^0 \quad (24)$$

式中: $\tau_{\theta\theta}^0 = -u_s k_{s\beta}^2$ 。

引入入射波无量纲频率参数 η [1-2]为

$$\eta = \frac{2R_{13}}{\lambda_{s\beta}} = \frac{k_{s\beta} R_{13}}{\pi} = \frac{\omega R_{13}}{\pi \beta_s} \quad (25)$$

式中: ω 为地震波自振圆频率; $\lambda_{s\beta}$ 为半无限介质的 S 波波长。

在下文计算中,假定半无限介质和衬砌介质的泊松比为 0.25,为了尽可能模拟半空间水平地表,大圆弧半径按 $b = 10\,000 R_4$ 取值。本文拟针对浅埋平行双洞双层衬砌、“加固圈-衬砌”洞室开展研究,参考既有研究,隧道二次衬砌厚度按 $(R_{12} - R_{13}) / R_{13} = 0.15$ 取值,一次衬砌厚度按 $(R_{11} - R_{12}) / R_{13} = 0.05$ 取值,衬砌介质与半空间介质剪切波速比为 3,对应密度比为 2.5/1.8。

3.1 平行双洞隧道动应力分布规律

考虑到实际工程中对隧道影响主要是低频波,参考既有文献研究^[2,4],根据场地地震评估报告,地震波主要以低频为主,本文选取 $\eta = 0.25$ 的垂直入射 P 波下双层衬砌双洞隧道动应力问题进行研究。

不同净距下,左洞和右洞洞室二次衬砌动应力集中系数分布如图 2 所示。从图中可以发现,两洞室之间距离对洞室动应力有显著影响,随着洞室之间间距增大,洞室衬砌动应力明显减小。当洞室中心间距为 $1.25D$ (D 为隧道内净空直径, $D = 2R_{13}$)

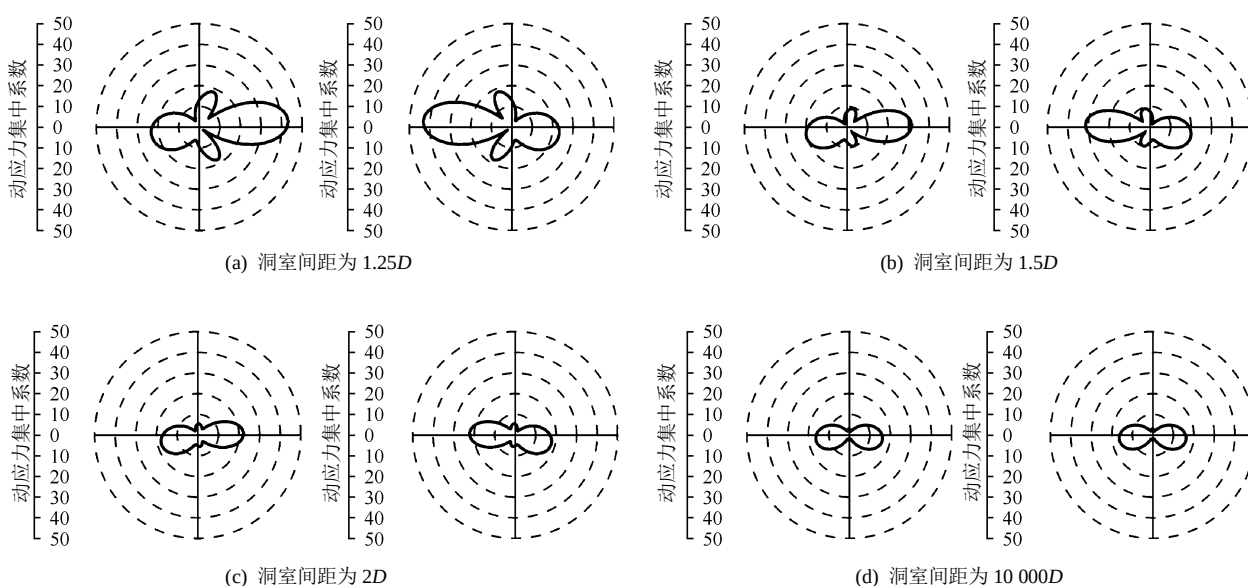


图 2 平行双洞隧道二次衬砌动应力集中系数分布图($\eta=0.25$)

Fig.2 Dynamic stress concentration factors of the secondary linings for tunnels ($\eta=0.25$)

时, 左、右洞室衬砌最大动应集中系数为 43。当洞室中心间距离为 $2D$ 时, 左右洞室衬砌最大动应集中系数为 22.5。并且动应力最大值都出现在左右洞室中间部分, 实际工程中应重点关注。而当洞室间距增大为 $10\,000D$ 时, 左、右洞室管片最大动应力集中系数则减小到 16.6, 出现在左、右洞室拱腰方向, 此时左、右洞室受力状态接近于单个洞室情况, 和文献[5]单个洞室计算结果一致, 说明本文理论推导及结果正确。

如图 3 所示, 当隧道间距大于 $2.5D$ 时, 随着左、右洞室间距离增大, 洞室二次衬砌最大动应力减小趋势降低。例如, 当洞室中心间距离为 $1.25D$ 时, 洞室衬砌最大动应集中系数为 43; 当洞室中心间距离为 $2.5D$ 时, 洞室衬砌最大动应集中系数减小为 18.3; 而当洞室间距增大到 $5D$ 时, 洞室衬砌最大动应集中系数减小为 17.4, 已基本接近单个洞

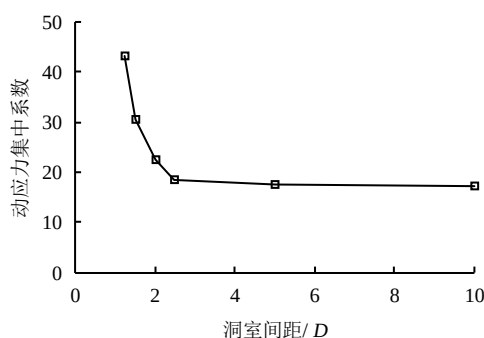


图 3 二次衬砌最大动应力集中系数随间距变化情况

Fig.3 The maximum dynamic stress concentration factor of the secondary lining for various distances

室情况。因此, 可以认为 $2.5D$ 为地震条件下小净距隧道抗震设防临界净距值。

3.2 全环注浆加固平行双洞隧道动应力分析

目前, 软土隧道抗震一般采用注浆加固^[15-16]提高地基承载力, 减小作用在隧道衬砌上的地震力。本文依托于实际工程, 进行简化, 取平行小净距盾构隧道洞室中心距离为 $2D$, 重点研究注浆加固圈对小净距隧道动力响应特性的影响。高峰等^[16]研究表明, 加固区越密实, 加固圈土体刚度越大, 减震效果越好。因此, 本节重点研究注浆加固圈土体刚度对小净距隧道动力响应特性的影响。

在分析中将一次衬砌赋值为注浆加固圈参数, 二次衬砌赋值为隧道衬砌参数, 隧道衬砌厚度按 $R_{12}/R_{13}=1.1$ 取值, 隧道抗震注浆加固圈厚度按 $(R_{11}-R_{12})/R_{13}=0.5$ 取值。半无限空间介质和衬砌介质参数为: 衬砌介质与半空间介质剪切波速比为 3, 密度比为 $2.5/1.8$, 为了一般性分析, 引入刚度参数 $\mu=\beta_1/\beta_s$, 为注浆加固圈和隧道周边土体剪切波速之比, 文中取 $\mu=1.0$ 、 1.2 、 1.5 、 2.0 依次分析。

对比图 4(a)、4(b)可以发现, 未设抗震措施的左、右洞隧道衬砌最大动应力集中系数达到 30.4, 出现在洞室中间土体部分。而当采用注浆加固隧道全环土体时, 随着注浆加固区土体刚度增加, 左、右洞最大动应力集中系数减小, 如当 $\mu=1.2$ 时, 左、右洞最大动应力集中系数为 23.9。可见注浆加固隧道周边土体可以起到良好的减震效果, 研究结论和文献[15-16]得到注浆加固减震效果较好相同。

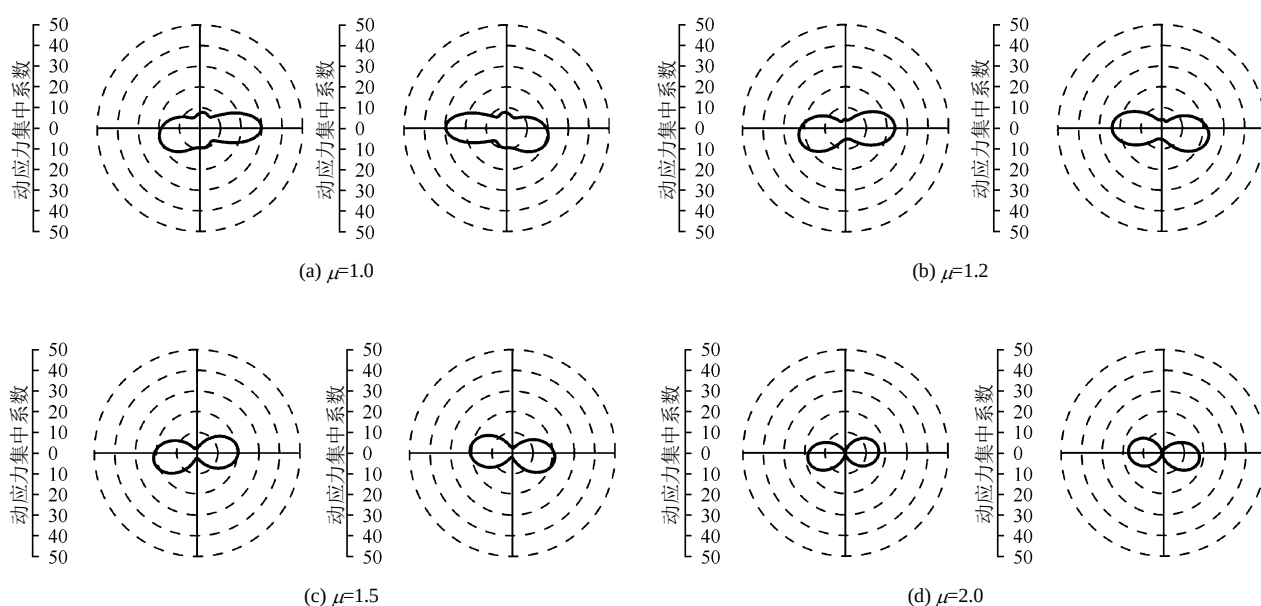


图 4 不同加固圈刚度下双洞隧道动应力集中系数

Fig.4 Dynamic stress amplitudes of tunnels with grouting reinforcement zones for various μ

进一步对比分析加固区土体刚度对左、右洞室隧道动应力分布的影响,如图5所示。当 $\mu=1.0$ 时,左、右洞衬砌内侧最大动应力集中系数为30.4;当 $\mu=1.2$ 时,隧道最大动应力集中系数减小为23.9,降低了6.5;而当 $\mu=2.0$ 时,隧道最大动应力集中系数减小为18.0,较 $\mu=1.2$ 时,隧道动应力集中系数则减小了5.9。可见,当 $\mu>1.2$ 时,随着加固区弹性模量增加,隧道管片内力减小趋势降低,考虑控制注浆加固区注浆质量较难,建议实际工程中小净距隧道注浆加固区岩土体和场地围岩剪切波速比 $\mu=1.2$ 。

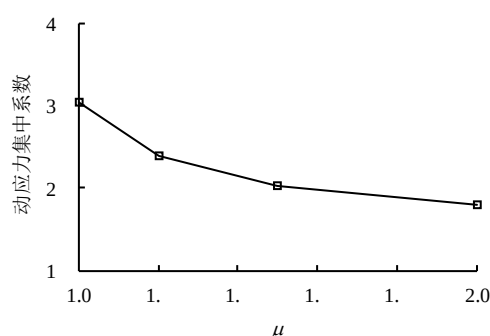
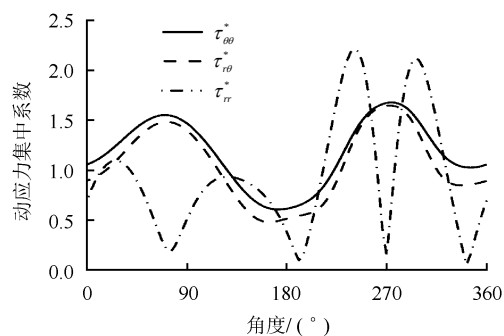


图5 二次衬砌最大动应力集中系数随参数 μ 变化情况
Fig.5 The maximum dynamic stress concentration factor of the secondary lining for μ

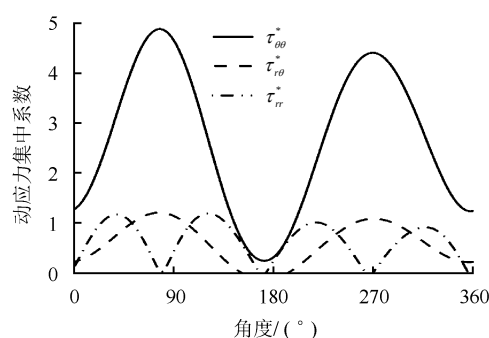
3.3 平行双洞隧道全环注浆抗震机制分析

从上述分析可见,注浆加固隧道周边围岩,可以显著降低平行双洞隧道衬砌最大动应力集中系数。由于在垂直P波入射下,左、右双洞隧道呈对称受力状态,因此,本节只分析右洞隧道及其注浆加固后的围岩3个方向动应力集中系数,如图6所示。

对比图6(a)、6(b)可以发现,对于平行双洞隧道,当注浆加固隧道后,外侧围岩切向动应力集中系数 $\tau_{\theta\theta}^*$ 增大,径向动应力集中系数 τ_{rr}^* 和 $\tau_{r\theta}^*$ 减小。这说明在垂直入射P波作用下,围岩和隧道发生相互作用,围岩以法向受力为主,当注浆加固隧道外侧一圈围岩后,由于注浆加固区岩土体刚度较大,减小了衬砌和围岩之间的径向变形,但相应的围岩的切向动应力集中系数 $\tau_{\theta\theta}^*$ 增大,从而缓解作用在衬砌上的法向作用力,减小了径向动应力集中系数 τ_{rr}^* 和 $\tau_{r\theta}^*$ 。例如,对于双洞衬砌洞室其洞周围岩最大径向动应力集中系数 $\tau_{rr}^*=2.2$ 及 $\tau_{r\theta}^*=1.7$ (如图6(a)所示),而注浆加固后,相应值减小为1.1和1.2(如图6(b)所示),而切向动应力集中系数幅值 $\tau_{\theta\theta}^*$ 则从1.6增大为4.9。



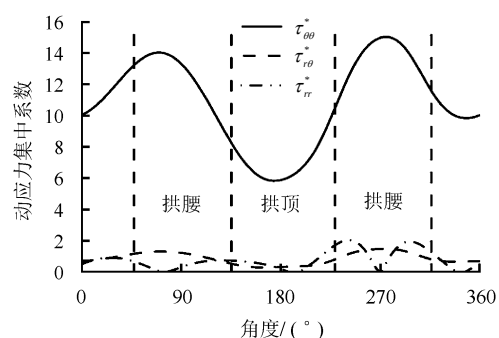
(a) $\mu=1.0$



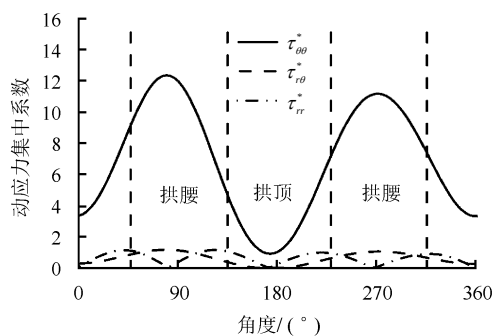
(b) $\mu=2.0$

图6 平行双洞隧道围岩动应力集中系数曲线

Fig.6 Dynamic stress concentration factors of surrounding rock for tunnels



(a) $\mu=1.0$



(b) $\mu=2.0$

图7 平行双洞隧道衬砌动应力集中系数曲线

Fig.7 Dynamic stress concentration factors of linings for tunnels

对比图 7(a)、7(b)可见, 注浆加固双洞隧道围岩后, 洞室衬砌外侧动应力集中系数 $\tau_{\theta\theta}^*$ 显著减小, 径向动应力集中系数 τ_{rr}^* 和 $\tau_{r\theta}^*$ 也减小。这进一步说明由于注浆加固后, 隧道周边岩土体刚度增大, 加固区岩土体可以承担一部分地震动引起围岩变形作用力, 因此, 隧道衬砌外侧切向动应力集中系数 $\tau_{\theta\theta}^*$ 减小。例如, 对于双洞隧道衬砌最大切向动应力集中系数 $\tau_{\theta\theta}^* = 15.1$, 出现在洞室中间位置拱腰处, 而注浆加固后, 相应值减小为 13.4, 出现在隧道另一侧拱腰处; 对于隧道拱顶和仰拱部分, 注浆加固后, 其最大切向动应力集中系数 $\tau_{\theta\theta}^*$ 明显降低, 例如仰拱相应值从 10.1 减小为 3.5, 拱顶处切向动应力集中系数幅值从 6.3, 减小为 1.5。

4 结 论

本文推导了平面 P 波垂直入射下双洞圆形双层衬砌洞室动应力级数解, 并分析了洞室间距、隧道全环注浆加固对洞室动应力集中的影响, 得到以下结论:

(1) 当洞室间距较小时, 左、右洞存在明显的动力放大效应, 隧道最大动应力集中出现在洞室中间部分土体上下部。

(2) 随着洞室间距增大, 衬砌动应力幅值显著减小, 洞室中心间距 $2.5D$ 可以作为动力条件下双洞隧道临界净距。

(3) 全环注浆加固隧道周边土体, 可以提高地基承载力, 减小了作用在隧道的变形压力, 进而降低衬砌动应力幅值。

(4) 注浆加固区土体刚度越大, 衬砌动应力幅值越小, 综合考虑经济因素, 建议加固区岩土体与围岩剪切波速比为 1.2。

本文研究结论不仅可以为高烈度地震区圆形双洞平行交通隧道减震设计提供参考, 也可以为强震区城市地下管廊、输水洞等隧道群设计提供借鉴。

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] 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.
- [6] THAMBIRAJAH BALENDRA T, THAMBIRATNAM D P, KOH C G, et al. Dynamic response of twin circular tunnels due to incident SH-wave[J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 1984, 12(2): 181—201.
- [7] 梁建文, 张浩, LEE VINCENT W. 平面 P 波入射下地下洞室群动应力集中问题解析解[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(6): 815—819.
LIANG Jian-wen, ZHANG Hao, LEE VINCENT W. An analytical solution for dynamic stress concentration of underground cavities under incident plane P waves[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 815—819.
- [8] 梁建文, 张浩, LEE VINCENT W, 等. 地下双洞室在 SV 波入射下动力响应问题解析解[J]. *振动工程学报*, 2004, 17(2): 132—140.
LIANG Jian-wen, ZHANG Hao, LEE VINCENT W. An analytical solution for dynamic stress concentration of underground twin cavities due to incident SV waves[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2004, 17(2): 132—140.
- [9] 李宁. 半空间中圆形衬砌洞室群对平面 P 波和 SV 波的散射[D]. 天津: 天津大学, 2006.
LI Ning. Scattering and diffraction of cylindrical lined cavities in half-space subjected to P & SV waves[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [10] 王明年, 关宝树. 高烈度地震区地下结构减震原理研究[J]. *工程力学*, 2000, (A03): 295—299.
WANG Ming-nian, GUAN Bao-shu. Study of the mechanism of shock absorption layer of underground structure in highly seismic zone[J]. *Engineering Mechanics*, 2000, (A03): 295—299.

- [11] 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.
- [12] 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制研究[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(Supp.1): 280—286.
- [13] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1086—1092.
WANG Shuai-shuai, GAO Bo, SUI Chuan-yi, et al. Mechanism of shock absorption layer and shaking table tests on shaking absorption technology of tunnel across fault[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(6): 1086—1092.
- [14] 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.
WANG Shuai-shuai, GAO Bo. Damping mechanism and shaking table test on mountain tunnel linings with buffer layers[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(3): 592—603.
- [15] 皇民. 浅埋双洞隧道地震动力响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
HUANG Min. Study on seismic dynamic response of shallow double-holt tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [16] 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.

(接第 682 页)

《岩土力学》2017 年第 2 期被 EI 收录论文 (38 篇, 收录率 100 %) (2)

序号	论文题名	作者	页码
21	换填覆重法处理砂类硫酸盐渍土地基的室内模拟试验	岳浩淼, 黄建明, 文 桃, 等	471—478
22	煤与瓦斯突出物理模拟试验中甲烷相似气体的探索	张庆贺, 王汉鹏, 李术才, 等	479—486
23	渗流条件下含裂缝压实膨润土应力及渗透性能试验研究	陈 洁, 张永浩, 韩小元, 等	487—492
24	熔融石英粒径对透明土位移测量精度的影响	常 艳, 雷振坤, 赵红华, 等	493—500
25	三维滑体锚固力计算方法及工程应用	卢坤林, 王运敏, 朱大勇	501—506
26	高拱坝基础不对称性及其加固效果研究	宋子亨, 刘耀儒, 杨 强, 等	507—516
27	土体参数空间变异性对边坡失效模式间相关性及其系统可靠度的影响	郑 栋, 李典庆, 曹子君, 等	517—524
28	基于剪切行为结构面形貌特征的描述	宋磊博, 江 权, 李元辉, 等	525—533
29	基于数据新旧程度和预测取值区间调整的沉降组合预测方法	曹文贵, 印 鹏, 贺 敏, 等	534—540
30	开采沉陷动态预计的分段 Knothe 时间函数模型优化	张 兵, 崔希民	541—548
31	地下洞室分期开挖应力扰动特征与规律研究	李建贺, 盛 谦, 朱泽奇, 等	549—556
32	伊犁深厚湿陷性黄土浸水入渗及沉降变形特征分析	安 鹏, 张爱军, 邢义川, 等	557—564
33	基于统计参数的二维节理粗糙度系数非线性确定方法	王昌硕, 王亮清, 葛云峰, 等	565—573
34	季节性冻土区土钉边坡支护结构冻融反应分析	张 媛, 董建华, 董旭光, 等	574—582
35	地震条件下危岩崩塌运动特性的初步探讨	黄小福, 张迎宾, 赵兴权, 等	583—592
36	基于切比雪夫谱元模型的成层场地地震反应分析	邢浩洁, 李鸿晶, 杨笑梅	593—600
37	一种双重孔隙-裂隙岩体流变模型及其在地下洞室有限元分析中的应用	符贵军, 张思渊, 张玉军	601—609
38	裂纹扩展和连接过程的近场动力学数值模拟	谷新保, 周小平	610—616