

# 单侧隧道内爆炸荷载作用下双线地铁隧道的动力响应与抗爆分析

李忠献, 刘 杨, 田 力  
(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 研究了单侧地铁隧道内爆炸荷载作用下双线地铁隧道的动力响应, 并选用泡沫铝作为防爆措施进行了地铁隧道的抗爆分析. 在土-结构动力相互作用分析中, 采用有限元与无穷元相耦合的方法建立了由双线隧道及其周围有限成层土区、远场半无限土区的整体计算模型, 其中土体的有限元模型是依据某地铁工程的地质勘探资料建立的. 通过该实际地铁工程的数值仿真以及计算结果的对比分析, 揭示了爆炸超压、双线隧道的埋深和间距以及隧道周围土质条件对隧道衬砌应力场的影响; 研究结果也表明泡沫铝具有良好的缓冲吸能作用, 是提高地铁隧道抗爆能力的一种有效措施.

**关键词:** 隧道; 爆炸荷载; 动力响应; 抗爆; 泡沫铝

**中图分类号:** O 38

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2006)02-0173-09

近年来, 国内外学者围绕各类建筑物的抗爆防爆问题进行了深入系统的研究. Woznica 和 Low 等对遭受爆炸荷载冲击的各类型平板构件的动力响应进行了相关的数值模拟和实验研究<sup>[1-2]</sup>; Fatt 和陈肇元等对诸如混凝土、砖石等各种材质的墙体进行了抗爆响应的试验及数值模拟分析<sup>[3-4]</sup>; 方秦和柳锦春等分析了爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形态分析<sup>[5-6]</sup>; Syrunin 等研究了内外爆炸荷载作用下纤维玻璃壳体结构的动强度<sup>[7]</sup>; 李忠献和田力等分析了地下隧道内爆炸引起的地表各类结构的动力响应及滑移隔震效果<sup>[8-11]</sup>; 曹志远和田志敏等研究了爆炸荷载作用下地下结构的动力响应及与周围土体的非线性相互作用<sup>[12-13]</sup>.

城市地铁的大力兴建, 使得城市地铁隧道遭受爆炸恐怖袭击的危险增大. 如 2004 年 2 月莫斯科地铁遭受恐怖爆炸袭击而发生破坏, 2005 年 8 月伦敦多处地铁同时遭受爆炸恐怖袭击. 近年来, 有关地下隧道遭受隧道内爆炸荷载作用下的动力响应特征已经有了一些研究成果<sup>[14-15]</sup>, 但有关城市地铁隧道内的爆炸对其本身及相邻隧道的冲击破坏还缺乏系统的研究. 根据某地铁工程的地质勘探资料, 利用隧道内爆炸超压的折线模型<sup>[16]</sup>, 采用有限元、无穷元相耦合合法建立的双线地铁隧道的整体分析模型, 对地下双线地铁单侧隧道内爆炸超压引起其本身及相邻隧道衬砌的动力响应进行弹塑性动力时程分析, 研究分析爆炸超压、隧道埋深和间距以及周围土质条件对隧道衬砌应力场的影响.

## 1 计算模型

为了全面分析单侧(以下均假定右侧)隧道内意外爆炸荷载作用下双线地铁隧道的动力响应以及爆炸侧隧道内设置泡沫铝防护材料对隧道衬砌的抗爆效果, 建立一个包括隧道、周围有限成层土区以及远场半无限土区的整体计算模型, 如图 1 所示.

收稿日期: 2005-10-21

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50425824)和国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金(50528808).

作者简介: 李忠献(1961-), 安徽枞阳人, 博士, 教授.

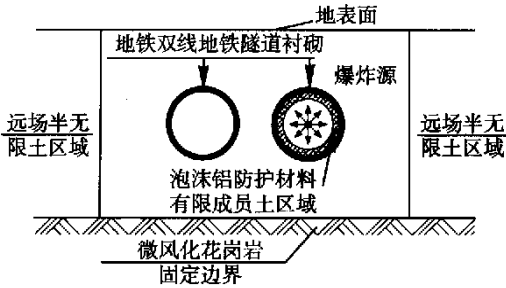


图1 计算模型

Fig.1 Calculation model

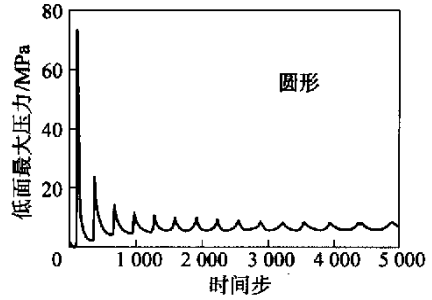


图2 隧道壁面最大压力变化过程

Fig.2 Change progress of the peak pressure on the wall of tunnel

### 1.1 圆形隧道中爆炸波的模拟

地下圆形隧道内中心爆炸时，隧道壁面最大压力变化过程如图2所示<sup>[17]</sup>。爆炸波由爆心发出，遇到隧道内壁后部分反射回爆心，经爆心处相互作用后再发出，如此反复多次，呈振荡衰减趋势；壁面压力的最高值在激波第一次到达壁面时出现，之后每次内壁承受的超压峰值相比前次均有所降低。图3给出了爆炸超压数值模拟的简化模型。

### 1.2 地下隧道、周围有限成层土区及泡沫铝材料的有限元模型

对于隧道周围的土体，本文采用八节点等参元进行模拟，一方面较好地适应隧道的曲线边界，另一方面由于采用双曲型位移函数，可较精确地描述位移和应力变化<sup>[18]</sup>。另外，强烈的爆炸超压作用必将使隧道及其毗邻土体进入塑性阶段，在进行弹塑性分析时，需将此区域的单元分为弹性元、过渡元和塑性元三类。采用较高精度的高斯积分(共9个积分点)形成单元刚度矩阵，以某个积分点是否进入塑性来判定它的权代表的小区域是否进入塑性，以此确定单元的塑性区域。假设隧道衬砌(包含泡沫铝防爆材料)和周围土体均为符合相关流动法则的理想弹塑性材料，分别采用 Von-Mises 和 Mohr-Coulomb 屈服准则进行分析<sup>[19]</sup>。

### 1.3 远场半无限土区的离散模型

对于距隧道较远的半无限土体，为避免因引入人工边界造成爆炸波反射的不良后果，本文采用无穷元模拟。为便于与有限土区八节点等参元相耦合，保持位移连续性，远场无限土区采用七节点超参无穷元模型，其原理是利用 Lagrange 插值函数和衰减函数的乘积构造形函数<sup>[20]</sup>。

### 1.4 整体耦合模型

在分别形成地下隧道、周围有限土区以及远场半无限土区的数值模型后，根据两个区域边界处节点的动力平衡及位移协调条件，将两个区域的数值模型实现对接耦合，从而形成了既考虑隧道-土-隧道间相互作用又考虑爆炸波传播衰减作用的弹塑性耦合体系模型(即图1)，运用 Newmark 时程分析法中的弹塑性初应力方法对整个体系中单侧隧道内遭受爆炸冲击下的动力响应进行分析计算。

### 1.5 计算程序及算例验证

根据上述理论，本文使用 FORTRAN 语言编制了单侧隧道内爆炸荷载作用下双线地铁隧道动力响应

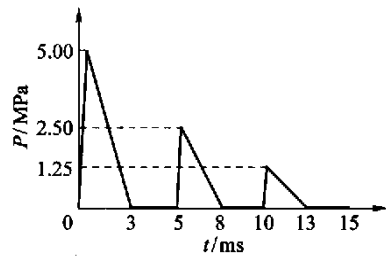


图3 数值模拟爆炸超压时程曲线的简化模型

Fig.3 Simplified model of time-history of the explosive overpressure

的非线性动力分析程序(APDDR),并依据地质资料,对巴朗(Baron)1975年所进行的“爆炸波作用下地下隧道衬砌的动力响应试验”进行了数值模拟<sup>[21]</sup>,得到了衬砌应力时程曲线如图4所示,图中同时给出了试验时程曲线.计算所得的应力峰值大小和到达时间与试验观测值存在一定差异,其原因是计算模型中没有考虑空气与爆炸波的相互作用,并且假设衬砌和围岩材料均匀、各向同性等.然而,计算曲线与试验曲线的变化趋势基本一致,衬砌内应力发展与试验值基本相同,这说明本文应用有限元和无穷元耦合形成的数值模型来研究爆炸荷载作用下地铁隧道动力响应的方法是可行的.

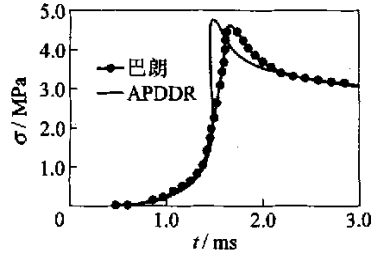


图 4 衬砌应力时程曲线

Fig. 4 Time-history of stress in liner

## 2 数值模拟与分析

### 2.1 工程概况与模型参数

某地铁工程双线隧道主要通过砾质黏土层和风化花岗岩地层.双线隧道最小间距为 3.0 m,最大间距为 7.2 m,最小埋深为 5.32 m,最大埋深为 19.27 m.隧道外径为 6 m,衬砌壁厚为 30 cm.本文选取条件最为不利的 3 个断面进行计算,分别是埋深最大的断面 1、地质条件较差的地层且埋深较大的断面 2 以及埋深最小的断面 3,各计算断面的位置如图 5 所示,各计算断面的数值计算模型如图 6 所示,各计算断面的隧道参数及模型参数如表 1,各计算断面的土层深度及力学参数如表 2,隧道衬砌材料及泡沫铝防护材料参数如表 3.计算中将底部的微风化花岗岩设为固定边界,计算时间步长取为 0.1 ms,爆炸超压的最大值为 5 MPa,整个爆炸作用历时 13 ms,如图 3 所示.

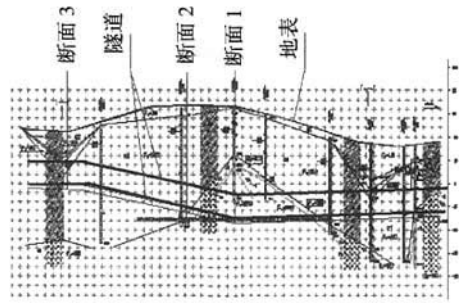


图 5 隧道断面纵剖面及计算断面位置图

Fig. 5 Longitudinal profile of a tunnel cross section and location of the calculation cross sections

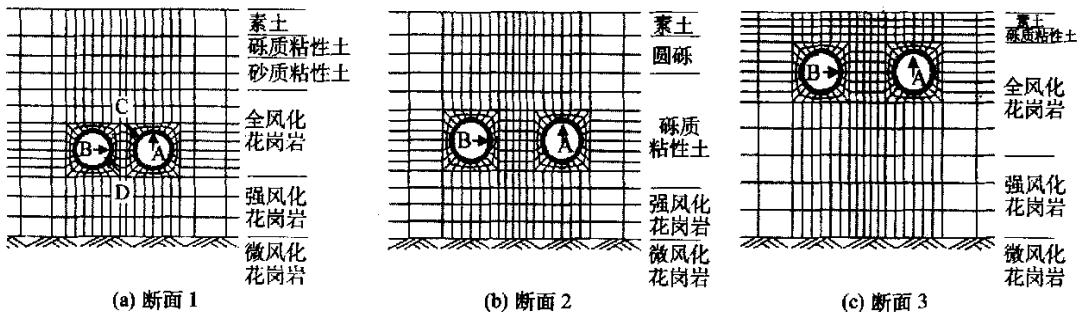


图 6 计算模型简图

Fig. 6 Sketch of calculation model

表1 各计算断面的隧道与模型参数

Tab.1 Model parameters of the calculation cross sections

断面	间距/m	埋深/m	计算宽度/m	计算深度/m
1	3.0	19.27	60.0	33.0
2	7.2	16.15	60.0	30.0
3	7.2	5.32	60.0	30.0

表2 各断面计算模型中各土层参数

Tab.2 Soil parameters of the calculation cross-sections

断面	层号	土层类型	层厚/ m	底层深 度/m	动弹性模 量/MPa	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松比	内摩擦 角/(°)	阻尼比
断面1	1	素土	3	3	86.4	2000	0.30	12.8	0.15
	2	砾质黏性土	3	6	54.0	1870	0.23	25.1	0.20
	3	砂质黏性土	6	12	46.8	1840	0.29	20.3	0.16
	4	全风化花岗岩	12	24	56.4	1910	0.25	21.6	0.18
	5	强风化花岗岩	9	33	58.2	1910	0.26	19.2	0.19
	6	微风化花岗岩							
断面2	1	素土	2	2	86.4	2000	0.30	12.8	0.15
	2	圆砾	5	7	100.51	2010	0.28	35.0	0.21
	3	砾质黏性土	14	21	54.0	1870	0.23	25.1	0.20
	4	强风化花岗岩	9	30	58.2	1910	0.26	19.2	0.19
	5	微风化花岗岩							
断面3	1	素土	2	2	86.4	2000	0.30	12.8	0.15
	2	砾质黏性土	2	4	54.0	1870	0.23	25.1	0.20
	3	全风化花岗岩	16	20	56.4	1910	0.25	21.6	0.18
	4	强风化花岗岩	10	30	58.2	1910	0.26	19.2	0.19
	5	微风化花岗岩							

表3 隧道衬砌材料及泡沫铝防护材料的参数

Tab.3 Parameters of the tunnel liner and the foamed aluminum

部位	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
衬砌	C40混凝土	32500	0.167	2500
内壁	泡沫铝	1200	0.3	1200

## 2.2 计算结果与分析

### 1) 断面1动力结果分析

图7分别给出了断面1的爆炸侧(即右侧)和相邻侧(即左侧)两个隧道衬砌径向加速度时程响应曲线。由此可以看出,直接承受爆炸超压作用的右侧隧道的衬砌上、下、左和右壁各个位置的径向加速度曲线存在3个明显的峰值,且各个位置的加速度变化趋势基本相同,如图7(a);左侧隧道衬砌上各个位置随着逐渐远离右侧爆心,其径向加速度峰值会急剧衰减,如图7(b);左侧隧道右壁的加速度峰值与右侧隧道的相比减小了近50倍,表明土体与结构阻尼使爆炸波的能量迅速耗散。

图8分别给出了断面1两个隧道衬砌的正应力和剪应力时程曲线。从图8(a)可以看出,爆炸超压的第一个波峰使右侧隧道全部截面处于受拉状态,拉应力达到峰值,持续时间在0.8到1.5ms左右,其中最大拉应力为3.4289MPa,发生在隧道顶部中央截面(即图6(a)中A截面)的外侧,随后隧道各截面又出现两个拉应力波峰,但峰值显著降低,最终在15ms以后各截面的应力趋于恒定,且均处于受压状态,压应力

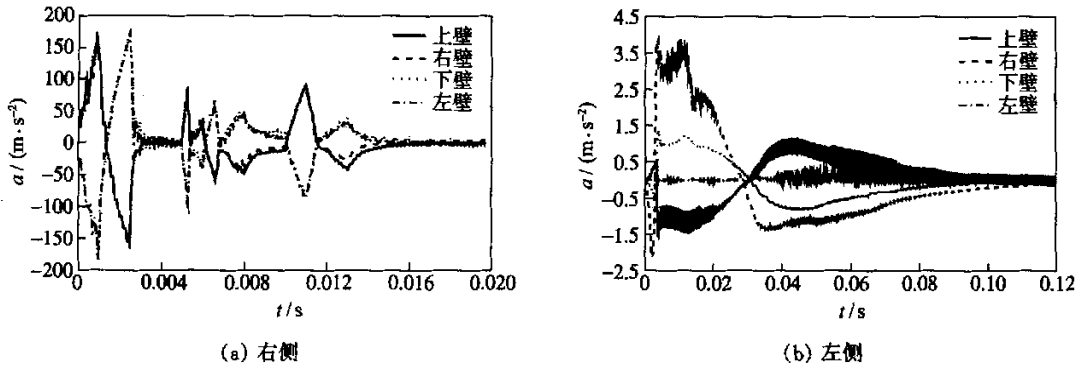


图7 断面1隧道衬砌径向加速度时程曲线

Fig.7 Radial acceleration time-history at the tunnel liner in the cross section 1

在 0.1 MPa 至 2.0 MPa 之间。从图 8(c)可以看出,右侧隧道的最大剪应力也出现在爆炸超压的第一个波峰作用时,最大值为 1.286 0 MPa,发生在隧道的 C 截面(见图 6(a))。从图 8(b)可以看出,爆炸波在 11 ms 后到达左侧隧道,随与爆炸中心的距离的加大,各截面应力的变化逐渐减弱,最大拉应力值为 0.273 9 MPa,发生在右壁中央截面(即图 6(a)中 B 截面)内侧。从图 8(d)可以看出,左侧隧道衬砌的剪应力的最大值为 0.020 1 MPa,发生在 D 截面(见图 6(a))。

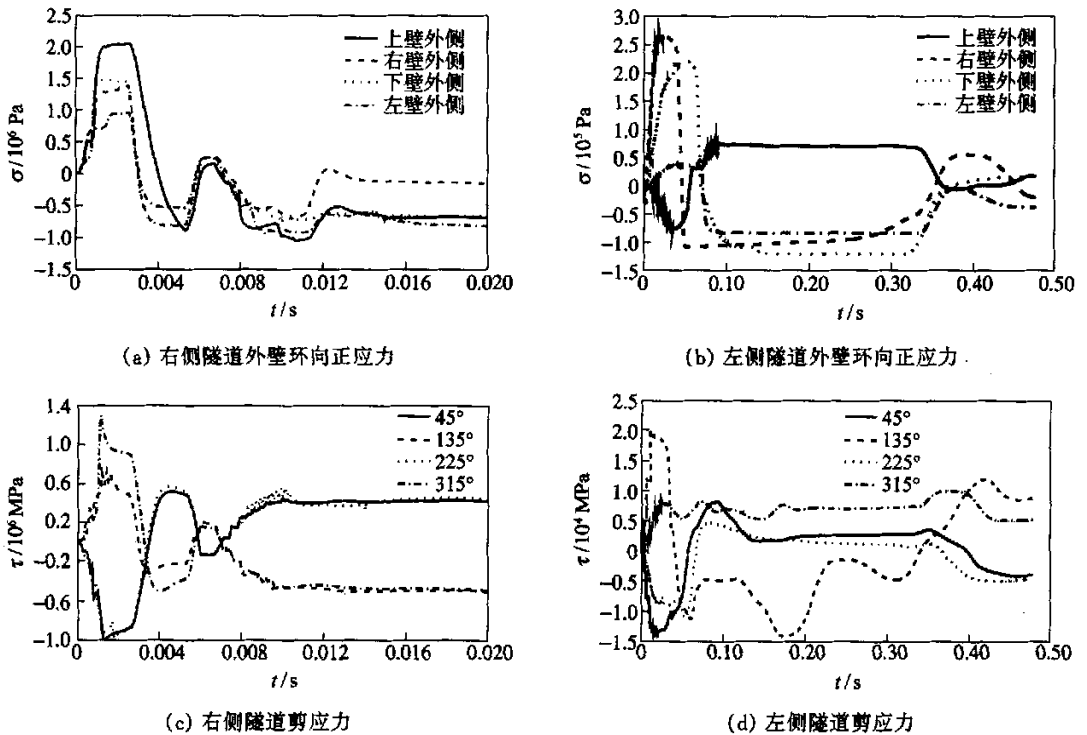


图8 断面1时程曲线

Fig.8 Stress time-history in the cross section 1

2) 三个计算断面计算结果的比较与分析

经过计算发现,断面 2 和断面 3 的应力及加速度的变化趋势及应力峰值出现的截面位置与断面 1 的情况基本相同;不同点在于,右侧隧道产生的应力峰值均比断面 1 小,左侧隧道产生的应力峰值衰减更快。总体而言,所计算的三个断面中两侧隧道的拉应力较大,压应力和剪应力均相对较小,又由于混凝土材料的抗拉性能低于抗压性能,所以结构的拉应力主要决定着结构是否安全。根据各断面中隧道拉应力最大

值出现的位置基本相同这个特点,选取右侧隧道A截面和左侧隧道B截面作为隧道动力分析的控制截面(位置如图6所示).三个计算断面右侧和左侧隧道的控制截面的应力比较如图9所示.

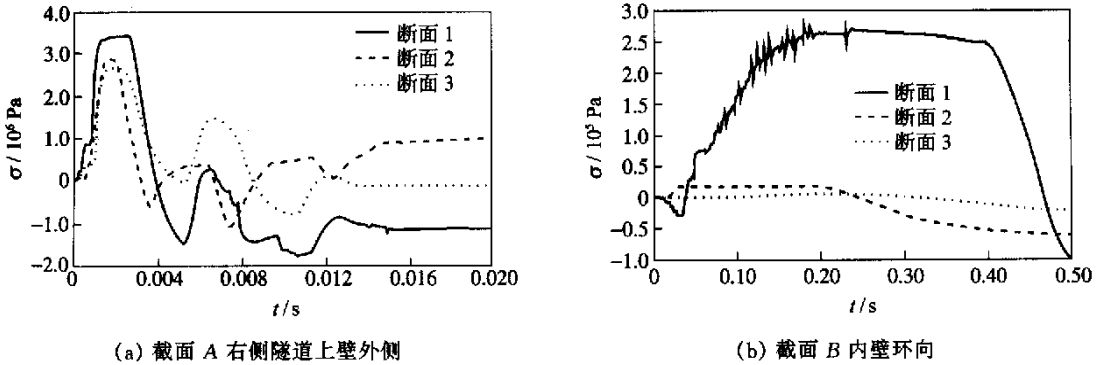


图9 3个计算断面隧道控制截面应力比较  
Fig.9 Comparison of stresses at the control section of the tunnel of the 3 cross-sections

从图9(a)和9(b)可以发现:3个计算断面中右侧隧道的控制截面的拉应力最大值均大于C40混凝土的抗拉极限标准值( $f_{tk}=2.4 \text{ MPa}$ ),此时隧道顶部衬砌会发生开裂,局部会形成贯通裂缝,在反复拉压的作用下会发生崩塌,隧道会遭到破坏;3个计算断面左侧隧道的拉应力最大值分别为 $0.2753 \text{ MPa}$ 、 $0.01642 \text{ MPa}$ 和 $0.007021 \text{ MPa}$ ,远远低于C40混凝土的抗拉极限标准值,不会发生破坏.另外,随着3个计算断面的隧道埋深的减小,右侧隧道控制截面A和左侧隧道控制截面B的最大拉应力值也在减小,这说明隧道的最大拉应力值随隧道埋深的增大而增加.

断面1的双线隧道间距为 $3 \text{ m}$ ,其中A与B截面最大拉应力的比值为 $13:1$ ,断面2和断面3的双线隧道间距为 $7.2 \text{ m}$ ,其中A与B截面最大拉应力的比值分别是 $173:1$ 和 $384:1$ .这说明,双线隧道间距越大,一侧隧道内发生的爆炸对邻侧隧道的影响越小.另外,虽然断面2和断面3的间距相同,但断面3隧道的埋深仅为 $5.32 \text{ m}$ ,所以断面3中一侧隧道内的爆炸对邻侧隧道的影响最小.

由此对该地铁工程可以做出如下综合评价:当双线地铁隧道的一侧隧道中承受 $5 \text{ MPa}$ 的爆炸超压时,爆炸侧隧道衬砌会发生受拉破坏,而相邻隧道属于安全.

### 2.3 影响隧道衬砌应力场的主要因素

图10给出了隧道周围土体的弹性模量发生变化时,爆炸冲击波对隧道衬砌应力场的影响.根据断面1,把隧道周围土质的动弹性模量由 $56.4 \text{ MPa}$ 降低为 $5.64 \text{ MPa}$ 进行计算,计算结果及比较如图10所示.从图10可以发现,右侧隧道A截面的最大拉应力值由 $3.4289 \text{ MPa}$ 降低至 $2.8721 \text{ MPa}$ ,并且应力峰值持续时间也减小.此外,左侧隧道B截面拉应力最大值也由 $0.2739 \text{ MPa}$ 下降到 $0.1006 \text{ MPa}$ .由此可以看出:当隧道周围土质的动弹性模量降低时,爆炸侧和相邻侧隧道的拉应力最大值均会减小.

进一步对隧道下方存在软弱土层的情况进行数值模拟分析,假设断面1的隧道下方 $2 \text{ m}$ 处存在厚度为 $3 \text{ m}$ 的软弱土层,计算结果如图11所示(图中下卧淤泥介质的动弹性模量为 $1.0 \text{ MPa}$ ).由此可以看出:隧道存在下卧软弱土层时,应力时程曲线比较光滑,左右侧隧道拉应力最大值均减小.

此外,对于断面1就爆炸超压等于 $5 \text{ MPa}$ 和 $50 \text{ MPa}$ 两种情况进行了比较分析.结果表明当右侧隧道承受的爆炸超压为 $50 \text{ MPa}$ 时,右侧隧道衬砌的A截面产生的最大拉应力为 $76.639 \text{ MPa}$ .左侧隧道衬砌的B截面产生的最大拉应力为 $1.7001 \text{ MPa}$ .当右侧隧道承受的爆炸超压为 $5 \text{ MPa}$ 时,右侧隧道衬砌的上壁外侧产生的最大拉应力为 $3.4289 \text{ MPa}$ ,左侧隧道衬砌的右侧内壁产生的最大拉应力为 $0.2739 \text{ MPa}$ .当超压增加10倍时,右侧隧道控制截面A的拉应力峰值增加了22.35倍,左侧隧道控制截面B的拉应力峰值增加了6.27倍.当爆炸超压增大时,右侧直接承受爆炸的隧道的应力变化会迅速增加,而左侧相邻隧道的应力也增加,但程度比右侧要小.

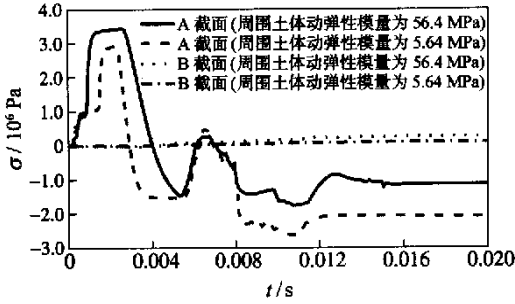


图 10 周围土质变化对隧道应力场的影响

Fig. 10 Influence of the property of surrounding soil on the stress in the tunnel

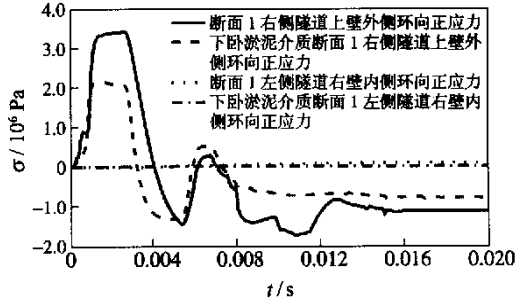


图 11 存在下卧软土层对隧道结构应力场的影响

Fig. 11 Influence of the subjacent soft soil layer on the stress in the tunnel

2.4 防爆措施

选用泡沫铝作为缓冲吸能材料。泡沫铝材料各向同性、强度高、稳定性好，且具有很高的阻尼减振和冲击能量吸收能力<sup>[22]</sup>。为此模拟在断面 1 右侧隧道衬砌内壁增加 20 cm 厚的泡沫铝，计算模型如图 12 所示，材料参数见表 3。

计算得到右侧隧道控制截面 A 和左侧隧道控制截面 B 的衬砌应力比较如图 13 和 14 所示以及表 4 所列。从中可以发现，当右侧隧道衬砌内增加泡沫铝材料，在直接承受爆炸波作用下，泡沫铝发生较大变形，从而吸收大量能量，使得右侧隧道控制截面 A 和左侧隧道控制截面 B 的衬砌的应力峰值均明显减小，应力峰值持续的时间缩短，整体应力变化曲线趋于平缓；两侧隧道衬砌的拉应力峰值均低于衬砌混凝土的极限抗拉强度，所以隧道衬砌不会发生破坏。爆炸冲击波在泡沫铝中传播时衰减较大，对隧道衬砌有明显的防护作用。

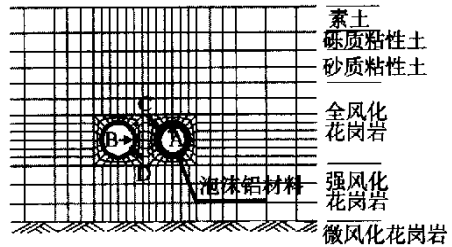


图 12 衬砌内增设泡沫铝保护层的计算模型

Fig. 12 Calculation model with foamed aluminum installed inner liner

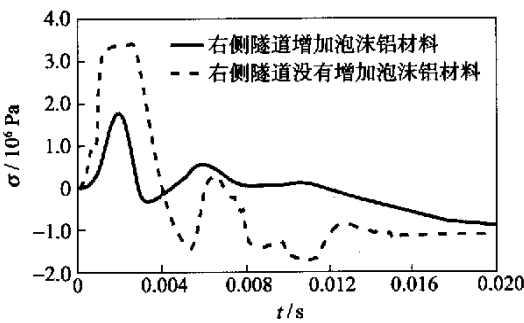


图 13 右侧隧道截面 A 衬砌内应力比较

Fig. 13 Comparison of stress in liner at section A of the right tunnel

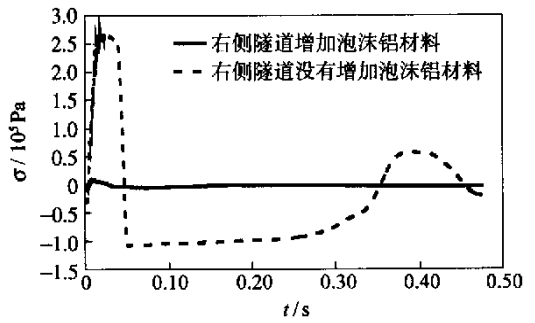


图 14 左侧隧道截面 B 衬砌内应力比较

Fig. 14 Comparison of stress in liner at section B of the left tunnel

表 4 有泡沫铝防护材料的隧道控制截面衬砌应力比较

Tab. 4 Comparison of stress in liner at control section with and without the foamed aluminum

防护情况	右侧隧道 A 截面			左侧隧道 B 截面		
	拉应力峰值/MPa	持续时间/ms	应力曲线变化	拉应力峰值/MPa	持续时间/ms	应力曲线变化
无泡沫铝材料	3.428 9	1.5	剧烈	0.273 9	27.5	剧烈
有泡沫铝材料	1.760 5	0.2	平缓	0.003 5	18.0	平缓

### 3 结束语

1) 隧道的埋深和其周围的土质条件,能对遭受爆炸的隧道及其邻近隧道的响应及破坏产生显著的影响.隧道埋深越大,周围土质越硬,则隧道衬砌的拉应力峰值越大,隧道结构越容易发生受拉破坏.

2) 隧道下卧软土层能对隧道内爆炸产生的冲击波起到显著的阻滞耗能效果,使得遭受爆炸冲击的隧道及其毗邻隧道衬砌的拉应力峰值均有所降低,因而对降低隧道衬砌的爆炸响应有着积极的作用.

3) 为了有效降低单侧隧道内意外爆炸对毗邻隧道的冲击破坏效应,应使双线地铁隧道的间距满足一定的安全性要求;相邻隧道的合理间距与其周围的土质条件密切相关,土质越硬,要求间距越大,且两隧道外壁间的最短距离应不少于一倍的隧道直径.

4) 在爆炸侧隧道内壁贴装泡沫铝材料,令其直接承受爆炸冲击,利用其良好的缓冲吸能作用,可明显降低隧道衬砌的应力及变形,起到隧道防爆的理想效果,因而具有广阔的应用前景.

#### 参考文献:

- [1] WOZNICA K, PENNETIER O, RENARD J. Experiments and numerical simulations on thin metallic plates subjected to an explosion [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology-ASME*, 2001, 123(2): 203-209.
- [2] LOW H Y, HAO H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading [J]. *Structural Safety*, 2001, 23(2): 157-178.
- [3] FATT M S H, OUYANG X, DINAN R J. Blast response of walls retrofitted with elastomer coatings [J]. *Structures and Materials*, 2004, 15: 129-138.
- [4] 陈肇元, 高健, 王志浩. 人防工程抗爆隔墙的设计[J]. *防护工程*, 1992: 4.  
CHEN Zhao-yuan, GAO Jian, WANG Zhi-hao. Design of the blast resistance partition wall of civil defense engineering[J]. *Protection Engineering*, 1992: 4. (in Chinese)
- [5] 方秦, 吴平安. 爆炸荷载作用下影响 RC 梁破坏形态的主要因素分析[J]. *计算力学学报*, 2003, 20(1): 39-42 + 48.  
FANG Qin, WU Ping-an. Main factors affecting failure modes of blast loaded RC beams. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, 20(1): 39-42 + 48. (in Chinese)
- [6] 柳锦春, 方秦, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形态分析[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 25-30.  
LIU Jin-chun, FANG Qin, et al. Analysis of dynamic responses and failure modes of RC beams under blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 25-30. (in Chinese)
- [7] SYRUNIN M A, FEDORENKO A G, IVANOV A G. Dynamic strength of fiber glass shells [J]. *Journal of Physics*, 1997, 7(3): 517-521.
- [8] 田力, 李忠献. 地下爆炸冲击波引起的基底滑移隔震建筑的动力响应[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(1): 16-23.  
TIAN Li, LI Zhong-xian. Dynamic responses of sliding base isolated buildings subjected to shock wave of underground explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(1): 16-23. (in Chinese)
- [9] 李忠献, 田力. 地下爆炸波作用下基底滑移隔震建筑-土-隧道相互作用的动力分析[J]. *工程力学*, 2004, 21(6): 56-64.  
LI Zhong-xian, TIAN Li. Dynamic interaction analysis of sliding base-isolated building-soil-tunnel subjected to underground explosion wave[J]. 2004, 21(6): 56-64. (in Chinese)
- [10] 李忠献, 田力. 地下爆炸波作用下基底滑移隔震大跨结构的动力响应分析 [J]. *计算力学学报*, 2005, 22(4): 457-464.  
LI Zhong-xian, TIAN Li. Dynamic response analysis for sliding base-isolated long-span structures subjected to underground explosion waves[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2005, 22(4): 457-464. (in Chinese)
- [11] 田力, 李忠献. 地下爆炸波冲击下隔震连续梁桥动力响应分析[J]. *天津大学学报*, 2005, 38(7): 602-610.  
TIAN Li, LI Zhong-xian. Dynamic response analysis of base-isolated continuous girder bridges subjected to underground explosion wave[J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, 38(7): 602-610. (in Chinese)
- [12] 曹志远, 曾三平. 爆炸波作用下地下防护结构与围岩的非线性动力相互作用分析[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5): 385-390.



- CAO Zhi-yuan, ZENG San-ping. Nonlinear dynamic interaction between underground structure and surrounding medium under blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 385-390. (in Chinese)
- [13] 田志敏, 钱七虎. 大压力爆炸动载作用下地下复合圆形结构研究[J]. *特种结构*, 1997, 14(3): 40-43.  
TIAN Zhi-min, QIAN Qi-hu, WU Bu-xu. Study on composite cylindrical structure in rock subjected to explosion induced intense dynamic loading[J]. *Special Structures*, 1997, 14(3): 40-43. (in Chinese)
- [14] 刘慧. 近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 175-181.  
LIU Hui. Dynamic response of hoof-shaped tunnels to adjacent blastings[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 175-181. (in Chinese)
- [15] 赵以贤, 王良国. 爆炸荷载作用下地下拱形结构动态分析[J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(3): 201-211.  
ZHAO Yi-xian, WANG Liang-guo. Dynamic analysis of responses of an underground arc structure to explosive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(3): 201-211. (in Chinese)
- [16] SMITH P D, MAYS G C, ROSE T A, et al. Small scale model of complex geometry for blast overpressure assessment [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 345-360.
- [17] 曹玉忠, 卢泽生. 抗爆容器内爆炸流场数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2001, 15(2): 127-132.  
CAO Yu-zhong, LU Ze-sheng. Numerical simulations of blast flow fields in closed blast-resistant containers[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(2): 127-132. (in Chinese)
- [18] 王勳成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [19] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [20] 赵崇斌, 张楚汉, 张光斗. 用无穷元模拟半无限平面弹性地基[J]. *清华大学学报*, 1986, 26(3): 51-64.  
ZHAO Chong-bin, ZHANG Chun-han, ZHANG Guang-dou. Simulation of semi-infinite plane elastic foundation using infinite elements[J]. *Journal of Tsinghua University*, 1986, 26(3): 51-64.
- [21] 李国豪. 工程结构抗爆动力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
- [22] DESHPANDE V S, FLECK N A. High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(3): 277-298.

## Dynamic Response and Blast-resistance Analysis of Double Track Subway Tunnel Subjected to Blast Loading Within One Side of Tunnel

LI Zhong-xian, LIU Yang, TIAN Li

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** This article investigated on the dynamic response of double track subway tunnel subjected to blast loading within one side of tunnel, and analyzed the blast resistance property of the subway tunnel by choosing foamed aluminum as the blast protection measure. An integral calculation model comprising of two-way subway tunnel and its neighboring finite stratified soil and the far-field semi-infinite soil was established by using the coupled finite and infinite element methods to investigate the interaction between soil and structural dynamic force. The finite element model of soil was established on the basis of geological exploration data of actual subway engineering. Through numerical simulation for the actual subway engineering and the comparative analysis on the calculated results, this article revealed the influence of the explosive overpressure, the embedded depth and the spacing interval of the double track tunnel, and the soil condition around the tunnel on the stress field of the tunnel lining. The results show that the foamed aluminum is of desirable cushioning effect and energy absorption property, which could be used as an efficient measure to improve the blast-resistance ability of the subway tunnel.

**Key words:** tunnels; explosive loading; dynamic response; blast resistance; foamed aluminum