

文章编号:1673-9469(2014)02-0009-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2014.02.003

## 挡墙后爆炸冲击波绕流现象研究

吴媛媛<sup>1</sup>, 宋振森<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 西安建筑科技大学  
结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710311)

**摘要:**重要建筑通常采用防爆挡墙以防范恐怖主义袭击和意外爆炸。在爆炸冲击下,绕流作用使挡墙后的冲击波流场产生变化,导致墙后一定距离处的超压大幅提高,建筑承受比预期更大的荷载。本文用 LS-DYNA 对近地爆炸下刚性墙后的绕流现象进行了数值模拟,研究了超压时程规律及影响因素。研究发现,距离墙后 1.5~2.5 倍墙高区域内绕流超压较大,在 2 倍墙高处出现马赫反应,比无墙时更为危险。研究成果可为重要建筑物防爆挡墙的布置及挡墙后建筑抗爆分析提供参考。

**关键词:**防爆挡墙;爆炸冲击波;绕流超压;数值模拟

**中图分类号:**TU352.1

**文献标识码:**A

## Research on diffraction flow effect of explosion shock wave behind blast wall

WU Yuan-yuan<sup>1</sup>, SONG Zhen-seng<sup>1,2</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Xi'an University of Architecture and Technology, Shanxi xi'an 710311, China)

**Abstract:** Blast walls are widely used to prevent important architecture from terrorist attacks and accidental explosion. Diffraction flow effect makes the explosive shock flow field change and overpressure at a certain distance behind the wall is greatly increased. LS-DYNA was employed to study the diffraction flow and overpressure time-history behind blast walls in the case of an explosion near above ground. It is observed that the diffraction flow overpressure behind a wall about 1.5~2.5 times wall height is large, and it is more dangerous than there is no wall owing to Mach reaction happened around double wall height behind the wall. The research provides a reference for arrangement of blast walls and blast-resistant design of buildings behind the blast wall.

**Key words:** blast wall; explosive shock flow; diffraction flow overpressure; numerical simulation

为了防止或减少爆炸冲击波对重要建筑物造成的损害,通常在其周围设置防爆挡墙。冲击波在传播过程中遇到防爆挡墙,除了反射冲击外,入射冲击波沿墙顶传播运动形成旋风,一方面使反射波压力下降,一方面又与相邻的入射波一起作用形成绕流,绕流绕过墙顶,沿着墙后壁往下传播,墙后所受的压力逐渐增大,而墙前逐渐下降<sup>[1-2]</sup>。反射波在由入射波压缩及加热的空气中传播,因此传播速度快,其逐渐赶上甚至超过入射波,与入射波汇聚,出现高压力区,即马赫反应<sup>[3]</sup>。

一些学者对有挡墙和无挡墙情况下爆炸冲击波作用进行研究。Henrych<sup>[4]</sup>根据试验总结在时间  $t = \frac{3x}{C}$  以后,墙体迎爆面上爆炸冲击波作用消失,其中  $x$  为迎爆面高宽尺寸较小者的一半,  $C$  为反射冲击波中的声速,可取  $C = 300 \sim 400$  m/s。王仲琦等<sup>[5]</sup>人用二维多流体网格法分析爆炸点周围爆炸场的初始发展和绕过障碍的过程。穆朝民等<sup>[6]</sup>对爆炸冲击波作用与绕过刚性墙的规律进行了试验研究。目前,对防爆挡墙墙后绕流的破坏作用研究还不够,本文采用显示动力有限元软件 LS-DY-

NA 模拟爆炸冲击波在刚性墙影响下的反射与绕流,研究其规律有利于合理设计墙体的尺寸与布置。

### 1 空气爆炸的有限元模型

#### 1.1 材料模型

有限元模型由空气、炸药、挡墙组成。

##### (1)空气

空气采用 LS - DYNA 中 NULL 材料模型以及 LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程描述<sup>[7]</sup>,将其视为理想气体,即忽略距爆炸源较近区域的气体由于高温高压而引起气体性质的变化。LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程表达式为:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

式中: $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ , $\rho$  是空气当前密度; $\rho_0$  是空气初始密度  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_0 \sim C_6$  为常数,对于空气,取: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$  及  $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ , $\gamma$  为理想气体绝热指数,取  $1.4$ ;  $E$  为气体初始单位体积内能,取  $2.5 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

##### (2)炸药

TNT 炸药采用 LS - DYNA 中 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型及 JWL 状态方程描述<sup>[8]</sup>,方程具体形式为:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V} + \frac{\omega E}{V}$$

式中: $A, B, R_1, R_2, \omega$  为与炸药有关的参数, $V$  为相对体积, $E$  为初始单位体积内能,取值见表 1:

#### 1.2 算例描述

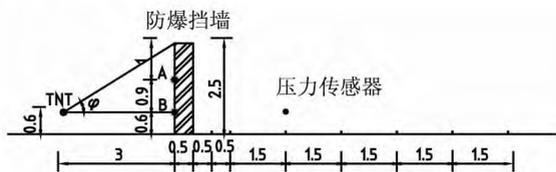


Fig.1 Schematic of test (units:m)

本文对总参工程兵科三所防爆挡墙的爆炸试验进行模拟<sup>[9]</sup>,如图 1 所示,将 4 kg TNT 当量炸药

表 1 TNT 炸药材料参数取值表

Tab.1 Material parameters of TNT

$\rho_0/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$A/\text{Pa}$	$B/\text{Pa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/\text{Pa}$
$1.631 \times 10^3$	$6.021 \times 10^{11}$	$0.1225 \times 10^{11}$	4.5	1.1	0.35	$0.07 \times 10^{11}$

置于防爆挡墙中轴线上,距离墙 3 m、爆炸高度为 0.6 m。试验对墙迎爆面取 A、B 两个测点,分别离地高 0.6 m、1.5 m,墙后由近及远放 7 个测点均与爆心在同一高度。

#### 1.3 有限元模型

用显式有限元软件 LS - DYNA 对图 1 所示试验进行数值模拟,有限元模型如图 2 所示。

数值模型由炸药、空气、挡墙组成。空气域大小为  $10 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ ;炸药位于空气域一端离地 0.6 m 处,采用立方体装药,TNT 等效当量为 4 kg,属于近地爆炸;墙迎爆面距爆心为 3 m,尺寸为  $0.5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}(h)$ 。炸药、空气、挡墙均采用 Solid164 实体单元,墙采用 Lagrange 网格,炸药和空气采用 Euler 网格建模。选用多物质 ALE 算法,通过 Constrained\_Lagrange\_In\_Solid 的约束条件使 Lagrange 单元和 Euler 单元之间共同作用,用流固耦合的算法来实现爆炸冲击波对结构的冲击模拟<sup>[10]</sup>。由于对称性,取模型的 1/4,对称面上采用对称边界条件,空气边界上定义无反射边界条件来模拟无限域空气,地面采用地面约束边界。

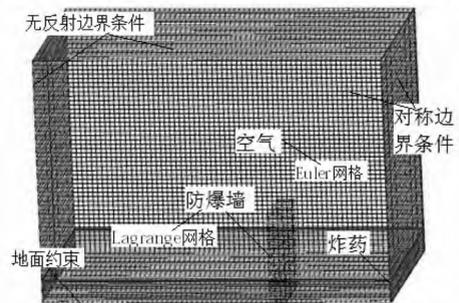


图2 计算模型图

Fig.2 Numerical model

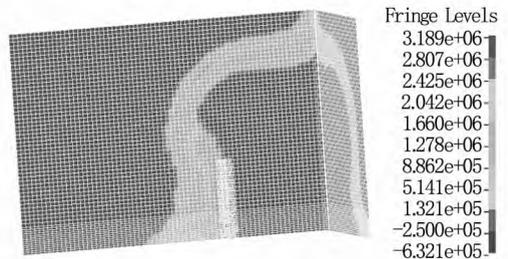


图3 爆炸冲击波绕过墙体时压力分布图

Fig.3 The pressure distribution after explosion shock waves around the wall

### 1.4 爆炸冲击的数值模拟结果与误差分析

爆炸后气体产物迅速膨胀形成冲击波,随着时间的增长不断向外传播,当遇到挡墙时产生反射波,经过一段时间之后,爆炸冲击波传播到墙的表面并与其相互作用。如图 3 所示,冲击波绕过墙体时的压力分布图。根据有限元计算得到墙迎爆面上测点 A、B 的反射超压时程曲线如图 4、图 5 所示,墙后测点 1、4 绕流超压时程曲线如图 6、图 7 所示。

综合图 4 ~ 图 7,可见炸药爆炸是一种高速反

应过程,在以毫秒计的短时间内释放巨大能量,产生的冲击波在空气中超声速传播,并使其通过处的空气压力急剧增大,当爆炸冲击波遇到障碍物,其反射和绕流超压时程曲线形状仍近似为三角形。冲击波绕流超压作用时间与墙迎爆面上的反射超压作用时间大 2 倍左右;在冲击波传至迎爆面后绕过墙体,使作用于墙体的超压迅速减小。由图看出,模拟结果与试验在趋势、时间、量级上都比较接近,为了进一步对比,将试验与数值模拟结果数据列于表 2,由表中数据可得到数据相差在 10% 左右,数值模拟误差较小。

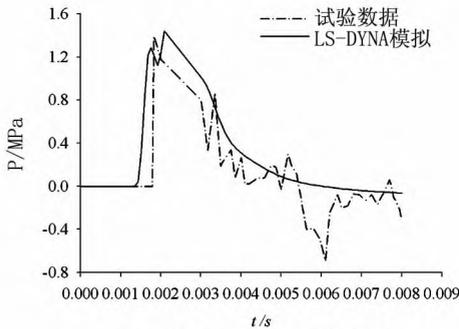


图4 测点A反射超压

Fig. 4 Reflection overpressure of point A

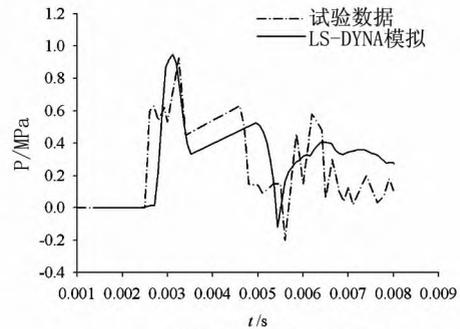


图5 测点B反射超压

Fig. 5 Reflection overpressure of point B

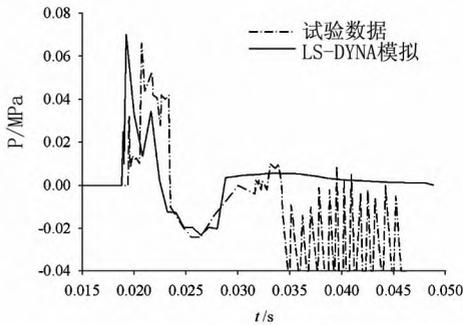


图6 测点1绕流超压

Fig. 6 Diffraction overpressure of point 1

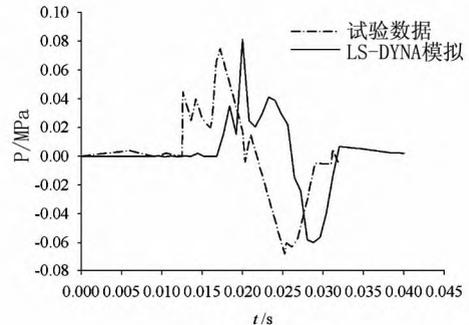


图7 测点4绕流超压

Fig. 7 Diffraction overpressure of point 4

表 2 试验与数值模拟数据对比

Tab. 2 Comparison of data on experiment and numerical simulation

测点	数据	峰值时间/ms	峰值压强/Pa	正压作用时间/ms
测点 A	数值模拟	2.07	1.425	4.379
	试验	1.83	1.382	3.843
	误差分析	11.59%	3.02%	12.24%
测点 B	数值模拟	3.13	0.947	3.487
	试验	3.25	0.923	3.173
	误差分析	3.83%	2.53%	9.00%
测点 1	数值模拟	19.2	0.070	3.757
	试验	20.6	0.066	4.093
	误差分析	7.29%	5.71%	8.94%
测点 4	数值模拟	19.8	0.082	8.748
	试验	17.2	0.075	9.401
	误差分析	13.13%	8.53%	7.46%

## 2 挡墙后绕流现象的分析

### 2.1 挡墙迎爆面反射效应

作用于迎爆面的荷载主要由反射冲击波引起,图8给出了墙体迎爆面距地面0、0.5、1.0、1.5 m高处的反射超压时程图。其中,超压峰值最大位于地面处(数值为1.706 MPa),而0.5 m高处的反射超压峰值最早出现,因为该处距离爆心距离最近。由于地面引起空气的压缩,并反射向外传播形成第二次冲击波,因此各点处的超压曲线均呈现双峰或多峰。从趋势上可见,挡墙迎爆面上爆炸冲击波作用在0.008 s后逐渐趋近0 MPa,这与 Henry 的结论所一致。反射超压沿着墙高分布不均匀,由于爆炸冲击波为近似球面向外高速传播,只有当墙高很小并爆炸源足够远时方可认为所受压力均匀分布。

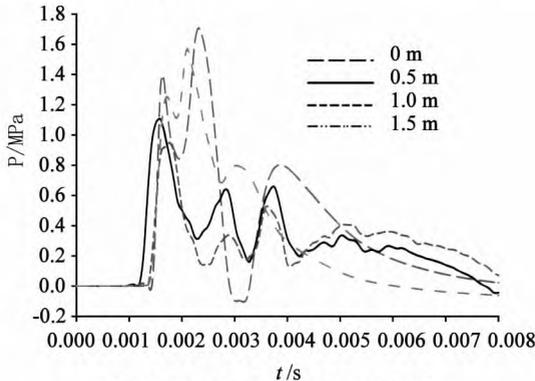


图8 迎爆面各处反射超压时程图

Fig.8 Reflection overpressure time history on blast wall

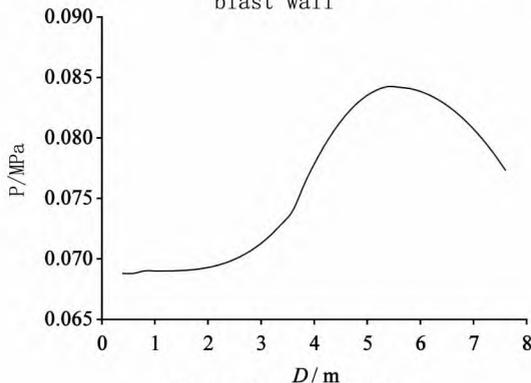


图9 墙后绕流超压峰值

Fig.9 Peak diffraction overpressure

### 2.2 墙后绕流效应分析

#### 2.2.1 墙后各处超压研究

距离墙迎爆面3 m的4 kg TNT炸药爆炸,墙背面离地高0.6 m处不同远近的各点的绕流峰值如图9所示,墙后由近及远各点的绕流超压峰值

在数值上趋势为由小到大,再变小。墙后2 m内压强值较小,刚性墙起到了一定的防爆作用,爆炸冲击波在遇到障碍物的情况下传播方式改变导致墙后壁2 m内的压强较小,是相对安全的位置。但在距离在约为2倍墙高处(此处约为5.487 m),压强峰值较大,其值比无墙时更大,表示该处产生了马赫反应使得冲击波压力大幅增强。超过马赫反应范围后,冲击波变为稀疏波,墙后超压峰值随着距离的增大而减小<sup>[11]</sup>。

为了进一步研究墙后爆炸冲击波绕流作用,分析对比有挡墙墙后发生绕流和无墙时自由空气爆炸冲击的压力时程曲线。取刚性墙墙后距墙背面分别为0.5、5、9.5 m(即距爆炸源分别为4、9.5、13 m)处的三个单元,单元与炸药在同一水平高度(距地面0.6 m处),离墙后,如图10~图12:

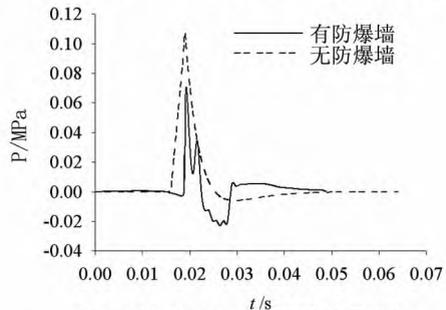


图10 墙后0.5 m处超压时程曲线

Fig.10 Overpressure time history 0.5 m behind the wall

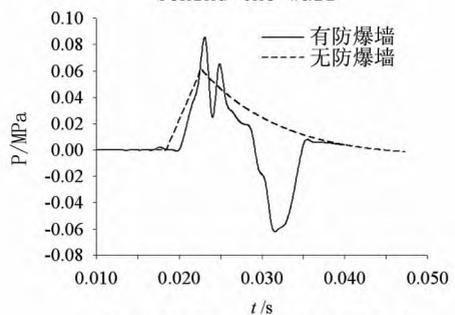


图11 墙后5 m处超压时程曲线

Fig.11 Overpressure time history 5 m behind the wall

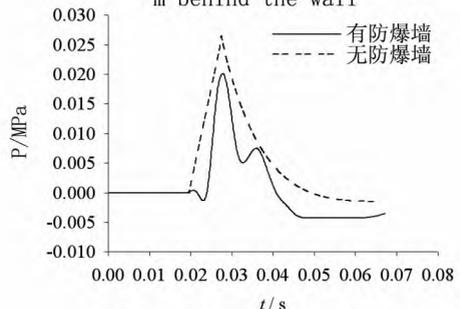


图12 墙后9.5 m处超压时程曲线

Fig.12 Overpressure time history 9.5 m behind the wall

表3 不同爆心距下防爆墙后超压峰值

Tab.3 Overpressure under different explosive center distance

挡墙高度/m	1.5	2	2.5	3	3.5	4
超压峰值距墙背面/m	3.198	4.285	5.487	3.938	2.231	2.524
超压峰值/MPa	0.085 9	0.089 1	0.084 5	0.079 7	0.082 1	0.081 6

表4 不同炸药量下防爆墙后超压峰值

Tab.4 Overpressure under different TNT quantity

TNT 当量 /kg	0.5	1	2	3	4	5
超压峰值距墙背面/m	5.393	5.414	5.437	5.397	5.487	5.435
超压峰值/MPa	0.013 6	0.025 2	0.034 5	0.057 9	0.084 5	0.118 7

如图10所示位于距离墙背面0.5 m的位置单元,有挡墙情况下约在0.018 6 s时空气压强开始迅速增大直至出现0.070 MPa的超压峰值,随即在0.034 s时出现第二个峰值(0.034 MPa),之后超压衰减至出现负压。无挡墙情况超压在0.0156 s时急剧增大至峰值0.106 MPa,然后不断衰减至趋于0 MPa。说明防爆挡墙对该区域确实起到减少冲击的作用,其超压峰值比在无墙时减少了30%。图11给出墙后5 m的单元超压时程图,波形图出现双峰现象,在0.023 0 s和0.024 8 s时刻分别出现0.085 2 MPa、0.065 1 MPa的超压峰值,这是由于绕流产生的空气波与地面发生反射所致。无挡墙情况下,在0.022 5 s时刻出现峰值0.060 3 MPa,有挡墙情况下的超压峰值比无挡墙时大了40%,可见由于绕流作用使得该处冲击波破坏作用更加厉害。图12显示在墙后较远的距离(4倍墙高)处,无挡墙和有挡墙情况下的该处的超压峰值分别为0.020 MPa、0.026 MPa,挡墙把冲击波绕流超压削弱了大约25%,无挡墙情况下冲击波传至该位置比有挡墙情况略微提前几个毫秒。在墙后距离超过发生马赫反射区域外的位置,绕流波为稀疏波,压力降低,挡墙具有一定的防护作用。

### 2.2.2 其他因素对绕流超压的影响

#### (1) 墙高对绕流超压的影响

保持炸药TNT当量为4 Kg不变,爆心离迎爆面的距离仍为3 m,调整挡墙高度进行数值模拟。表3给出不同高度挡墙在爆炸冲击下墙后最大超压峰值及其发生位置。可以看出,挡墙高度在小于2.5 m,最大绕流超压峰值均发生墙后2h(墙高)左右位置;而墙高变大时,墙后的超压最大值发生在墙后近处,超压峰值变化量不大。可以得出入射角 $\varphi$ (正切值为墙顶到爆心的垂直距离比爆心距墙迎爆面水平距离)在大于极限值 $40^\circ$ 时,绕流不明显,冲击波作用于墙体时运动方向改变

不大,因此墙背面的最大超压峰值发生在距离墙背后较近的位置。通常情况下,汽车炸弹属于近地爆炸,其离墙也有一定的距离,此时入射角 $\varphi$ 往往小于 $40^\circ$ ,就需要特别考虑距离墙后1.5~2.5倍墙高区域内的绕流作用。

#### (2) 炸药量对绕流超压的影响

爆心至挡墙迎爆面3 m距离不变,墙高仍为2.5 m,设置炸药当量分别为0.5、1、2、3、4、5 kg进行模拟,如表4所示,超压峰值随着TNT当量的增加而非线性增大,且随着药量越大,增大的幅度越大。峰值都发生在墙后5.4 m处,可见炸药量的大小影响了超压峰值的大小,但不影响峰值出现位置。

## 3 结论

(1) 墙迎爆面上反射超压沿墙高不均匀分布,这是由于爆炸冲击波传播以球形发展并在地面发生反射。

(2) 近地爆炸时爆炸冲击波由于地面的反射对结构产生二次冲击作用,出现超压双峰现象,第二次超压峰值要小于第一次峰值。

(3) 不同爆心距、炸药离地高度、墙高的情况下,当爆心与墙顶连线与水平夹角小于 $40^\circ$ 时,绕流效应明显,冲击波作用于墙体时运动方向改变,绕流超压峰值与TNT当量有正比关系。

(4) 绕流作用下,绕流波沿着地面运动,大约离墙后壁2倍墙高处形成马赫反应,其破坏作用比无墙时更大。因此在利用防护墙抗爆时,重要建筑尽量设计于墙后1.5~2.5倍墙高区域之外,而在墙后4倍墙高处相对比较安全。

### 参考文献:

- [1] NGO T, MENDIS P, GUPTA A, et al. Blast loading and blast effects on structures—an overview[J]. EJSE Special Issue: Loading on Structures, 2007(1): 76-91.

- [2] 宁建国,王成,马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [3] 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.
- [4] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [5] 王仲琦,宁建国,赵衡阳,等. 挡墙对远场爆炸效应影响的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 87-91.
- [6] 穆朝民,任辉启,李永池,等. 爆炸冲击波作用于墙体及对墙体绕射的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(2): 169-174.
- [7] 杨鑫,石少卿,程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压

- 峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008(1): 16-18.
- [8] 白金泽. Ls - dyna 3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [9] Ls - dyna keyword user's manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2009.
- [10] CHENG Q, WU H. Modeling of simultaneous ground shock and air blast pressure on nearby structures from surface explosions[J]. Elsevier International Journal of Impact Engineer, 2005(31): 699-717.
- [11] 郝莉,马天宝,王成,等. 爆炸冲击波绕流的三维数值模拟研究[J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1042-1048.

(责任编辑 王利君)

(上接第3页)

## 4 结论

1) 在开挖顺序上,不论采用哪种开挖方式,两者拱顶位移都大致相同,并在两隧道之间的夹岩和埋深较大的一侧拱腰处都会产生应力集中现象,在仰拱处产生张拉应力,隧道开挖过程应力重分布相互影响较为复杂,产生夹岩处明显的受力不对称性。施工时要重点对拱腰处,特别是埋深较大的拱腰和夹岩处做好加强措施。

2) 先开挖埋深较小的右洞,相比较先开挖埋深大的左洞,应力集中部分较少,最大主应力和隧道水平收敛较小,围岩受到扰动轻,初期支护上的位移和受力也较为合理,更有利于围岩的稳定性。

3) 埋深较小一侧隧道开挖时,开挖掌子面对埋深较大隧道的拱顶位移影响较小,在一倍开挖宽度时,就已稳定,而对自身某断面拱顶位移和隧道的水平收敛影响较大,为了两隧道同时施工的安全性,要保持两隧道开挖掌子面最少 30 m 的距离,即 2 倍的开挖宽度。

## 参考文献:

- [1] 刘伟. 小净距公路隧道净距优化研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [2] 杨小礼,睦志荣. 浅埋小净距偏压隧道施工工序数值分析[J]. 中南大学学报, 2007, 38(4): 765-769.
- [3] 傅鹤林,张聚文. 软弱围岩中大跨度浅埋偏压小间距隧道开挖数值模拟[J]. 采矿技术, 2009, 9(5): 17-21.
- [4] 张利民. 山岭复杂条件下一级公路建设技术标准的选定方法研究[J]. 四川理工学院学报:自然科学版, 2011, 24(4): 373-375.
- [5] 李荣伟. 小净距隧道施工顺序 FLAC3D 模拟分析[J]. 水科学与工程技术, 2011(1): 82-84.
- [6] 孔亮,徐林生. 观音庙隧道进口小净距段动态施工的数值模拟研究[J]. 西部探矿工程, 2006(8): 159-161.
- [7] 靳晓光,刘伟. 小净距偏压公路隧道开挖顺序优化[J]. 公路交通科技, 2005, 22(8): 61-64.
- [8] 张小旺. 浅埋隧道施工过程仿真分析[D]. 郑州:郑州大学, 2007.
- [9] 董淑惠,冯德成,江宁恒,等. 早期受冻温度对负温混凝土微观结构强度的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(1): 64-66.

(责任编辑 刘存英)

(上接第8页)

- structural steels due to ultra low cycle fatigue[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6): 701-712.
- [8] FEMA. Recommended seismic design criteria for new moment-resisting steel frame structures [R]. Report No. FEMA 350, FEMA, Washington, DC, 2000.
- [9] AISC. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. AISC, Chicago, IL, 2002.
- [10] FEMA. State of art report on connection performance

- [R], Report No. FEMA355D, FEMA, Washington, DC, 2000.
- [11] ROEDER. General issues influencing connection performance [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(4): 420-428.
- [12] CHANGSHI MAO, JAMES RICLES, LE WU LU, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9): 1036-1044.

(责任编辑 刘存英)