

坑道口部爆炸冲击波压力传播规律

吴云泉^{1,3}, 许金余^{1,2}, 陈海天³, 李利晟³, 姚侃⁴

(1.西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072; 2.空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 3.广州军区空军后勤部机场营房处, 广东 广州 510052; 4.西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:坑道口部是防护的重点和难点。利用显式动力学有限元软件,通过合理简化假设,对典型的等截面直墙圆拱坑道口部爆炸的冲击波波过程进行了数值模拟,形象揭示出坑道中冲击波压力传播规律,即坑道中冲击波压力首先直线上升至最大值,随后由于坑道壁来回反射,出现了与自由大气中理想冲击波指数衰减不同的多个波峰震荡,并得到了峰值压力随距离衰减的模拟结果。再采用相似比为1/5的室外大比例模型,对0.8 kg,0.6 kg和0.4 kg 3种集团装药在坑道口部爆炸的冲击波压力传播规律进行了试验研究,由实测数据拟合出了冲击波峰值压力计算经验公式。结果表明,试验拟合公式与数值模拟及其他经验公式一致性较好,具有一定的工程使用价值。

关键词:坑道口部;爆炸冲击波;传播规律;数值模拟;模型试验

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.019

中图分类号: O347.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0090-05

随着信息技术的迅猛发展,高技术精确打击常规武器命中坑道口部爆炸成为可能。研究口部爆炸效应,对防护工程建设具有重要的军事和经济价值,成为近年来国内外防护工程领域研究的难点和热点^[1-3]。对坑道中冲击波传播规律的研究,国内以洛阳水利工程技术研究所为代表,国外以美国陆军工程兵水道实验站(WES)、德国厄恩斯特-马赫研究所(EMI)为代表。目前,坑道中冲击波传播规律的研究方法^[4-8]主要有理论分析、试验研究和数值模拟3种。由于涉及到复杂的绕射、反射及干涉等,理论分析方法大都进行了简化假设。试验研究又分为原型试验和模型试验。原型坑道试验能真实地反映实际爆炸效应,但试验周期长,破坏性大,成本高;基于爆炸相似律理论的比例模型试验,安全性高,成本低,可重复性强,试验的精度和可靠性较高,但也存在由于模型材料选择、模型细部不能严格模拟原型而带来的误差。此外,与原型试验一样,模型试验也不能了解中间变化过程。数值模拟技术为坑道中冲击波传播规律的研究开辟了一条新的途径,不仅可以降低试验成本,还可更深入理解对问题所包含的过程,但数值计算结果对材料模型和参数的依赖性较大,一般需要原型或比例模型试验结果的检验。

1 有限元数值模拟

1.1 物理模型与计算方法

原型坑道内衬为等截面直墙圆拱结构,净跨4 m,拱顶高4.5 m,长60 m;计算用武器为2 000 lb的美制MK84普通爆破弹,等效TNT当量为579.2 kg。

选用大型通用显式有限元软件进行数值模拟。进行如下简化假设:

* 收稿日期:2009-03-30

作者简介:吴云泉(1979-),男,河南南阳人,博士生,主要从事防护工程和机场工程研究;

E-mail:wyq04wyq@163.com

许金余(1963-),男,吉林靖宇人,教授,博士生导师,主要从事防护工程,结构工程与岩土工程研究。

1)用方块装药代替集团装药,则当炸药在坑道口地面爆炸时,可近似简化为平面问题进行计算。

2)根据 Hopkinson 比例定律^[9],全比例坑道缩小为高 4.5 cm,长 60 cm 的模型,药量为 0.58 g,从而使单元数量大为减少,能够在 PC 机上进行计算。

3)假定地面、坑道壁面及坑道入口处岩石界面,均不通过弹塑性变形吸收爆炸能量。通过约束空气质点的法向运动,形成刚性边界。

4)坑道入口外空气边界的范围为从炸药起爆到冲击波到达边界的持续时间与所研究点的压力—时间相比足够长。

经简化,爆炸场只涉及爆轰产物和空气 2 种介质。单元类型采用 PLANE162,单元形状为规则四边形。炸药单元与空气单元之间的接触采用共节点耦合在一起。为避免网格严重畸变,炸药和空气单元采用欧拉算法,每个时步执行 1 次输运计算。

1.2 材料模型及其参数

空气材料模型采用 MAT-NULL 和多项式状态方程 EOS-LINEAR-POLYNOMIAL 描述。方程为^[10]:

$$P=(\gamma-1)\rho E/\rho \tag{1}$$

式中: ρ 为密度; γ 为绝热指数; E 为内能密度。

计算所采用的空气材料模型参数分别为: ρ 为 1.293/(kg·m⁻³), γ 为 1.4,初始压力为 100 kPa。

TNT 炸药采用高能炸药爆轰模型 MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 和 EOS-JWL 状态方程来描述。JWL 状态方程定义压力为内能和比容的函数,表达式为^[10]:

$$P=A(1-\omega/R_1V)e^{-R_1V}+B(1-\omega/R_2V)e^{-R_2V}+\omega E/V \tag{2}$$

式中: P 、 E 、 V 分别为爆轰产物的压力、内能和比容(单位体积); A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数。

计算所采用的 TNT 炸药材料及 JWL 状态方程参数见表 1。

表 1 TNT 炸药材料及 JWL 方程参数

Tab.1 Parameter of TNT materials and JWL equation

TNT 密度/(kg·m ⁻³)	C-J 压力/GPa	爆速/(m·s ⁻¹)	A/Pa	B/Pa	R ₁	R ₂	ω
1 630	21.0	6 930	371	3.2	4.2	0.9	0.3

1.3 计算结果与分析

图 1 为炸药的起爆及冲击波在坑道中传播的几个典型时刻压力云图。不难看出,炸药爆炸后,由于地面的阻挡和反射作用,产生了不断膨胀的近似半球形的冲击波,而刚性地面的反射作用提高了冲击波的强度。进入坑道后,在坑道壁面的约束下,冲击波在坑道壁面之间来回反射。由于反射冲击波的传播速度比入射波大,反射波追上入射波并与其合流,从而产生了不规则反射,即马赫反射。合流后形成的马赫杆垂直于反射壁面,并向坑道中心发展,较为混乱的流场逐渐成为较为稳定的平面冲击波。可见,用数值手段可以形象揭示坑道中复杂的波动过程。

图 2 为距坑道入口不同距离处的典型压力曲线。由图可知,坑道中的冲击波都是近乎垂直地上升到最大值。与自由大气中的理想冲击波波形不同,随后的压力并不是按指数衰减,而是出现多个波峰的震荡。显然,这是冲击波在坑道壁之间来回反射的结果,冲击波压力在坑道中逐渐衰减。

坑道中峰值压力随距离衰减的数值模拟结果与试验拟合结果将在下文详细说明。

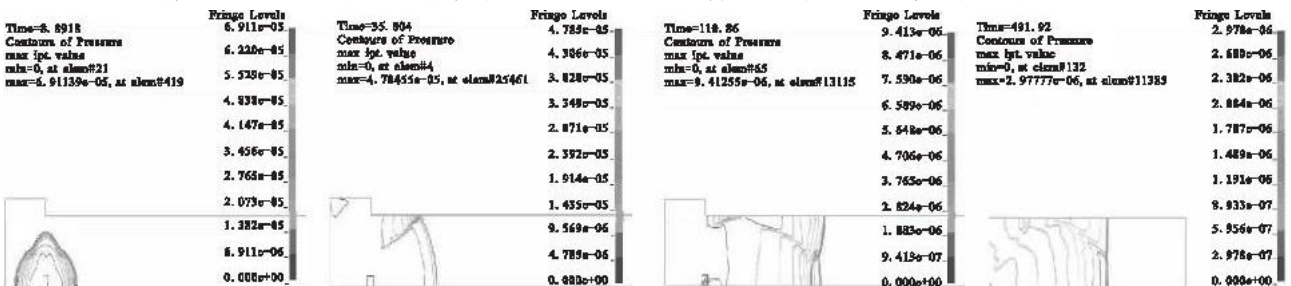


图 1 冲击波传播历程图

Fig.1 Propagation process of shock wave

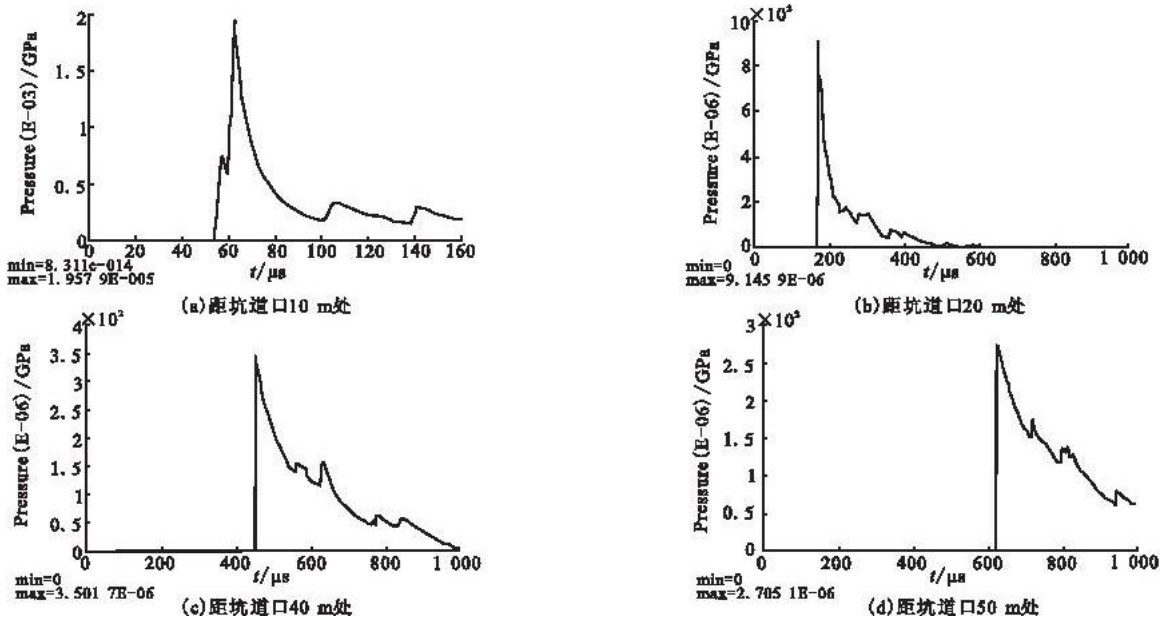


图 2 距坑道口不同位置处的典型压力曲线

Fig. 2 Typical pressure curves at different spots away from the entrance

2 大比例模型试验

2.1 试验方案

根据爆炸相似律,取相似比为 1/5。模型坑道分段浇筑成直墙圆拱钢筋混凝土单元,养护成型后吊装到事先开挖好的沟槽中。每个直墙圆拱单元混凝土强度等级为 C50,双面配筋,配筋率 1.9%,长度为 0.5 m,壁厚为 0.2 m,截面积为 0.67 m²。截面尺寸见图 3。

图 4 为测试系统示意图。爆炸源位于坑道口地面。埋在坑道侧墙上的压力传感器捕捉坑道中的压力信号,信号经传输电缆传给信号适配器放大后,由数据采集及处理系统记录^[11]。爆炸源由单块 0.2 kg 制式块状 TNT 炸药组成 0.8 kg, 0.6 kg 和 0.4 kg 3 种集团装药,各 3 炮。采用适于动态测量的宝鸡传感器研究所的 CYG 型固态压阻式传感器捕捉压力信号,将集数据采集、分析、结果输出为一体的 CS22125 动态分析仪作为数据采集及处理系统,CS-1 型动态应变放大器作为信号适配器,信号传输电缆采用带金属屏蔽的低噪音 4 芯电缆。

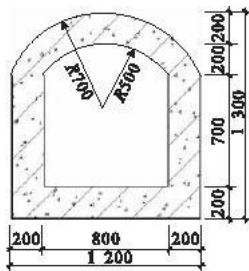


图 3 直墙圆拱截面

Fig. 3 Section of straight wall-top-arch tunnel structure



图 4 测试系统示意图

Fig. 4 Sketch map of testing system

2.2 试验结果与分析

实测的典型冲击波波波形见图 5,波形曲线与数值模拟结果一致。

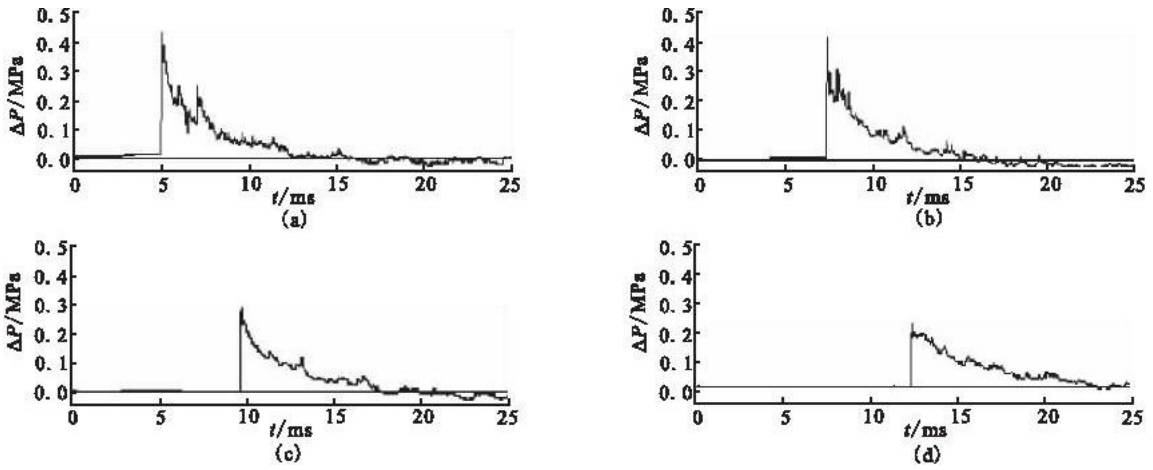


图 5 典型冲击波波形
Fig.5 Typical curves of shock waves

实测冲击波峰值压力见图 6。根据爆炸相似律和量纲知识,由试验数据可拟合出口部爆炸坑道中冲击波峰值压力公式为:

$$\Delta P = 2879 (C^3 / D) (X/D)^{-0.98} \tag{3}$$

式中:ΔP 为超压;C 为等效 TNT 当量;X 为测试点至坑口的距离;D 为坑道直径。

由公式(3)计算出坑道各截面的最大峰值压力随距离的衰减关系如图 7 所示。为便于比较,图中一并给出数值模拟和其他经验方法的计算结果。可以看出,试验拟合公式与数值模拟以及美国 WES(1997)、洛阳水利所的计算结果一致性较好,具有一定的工程使用价值;德国 EMI(1989)的计算结果最大,可能与其装药方式是柱状有关。

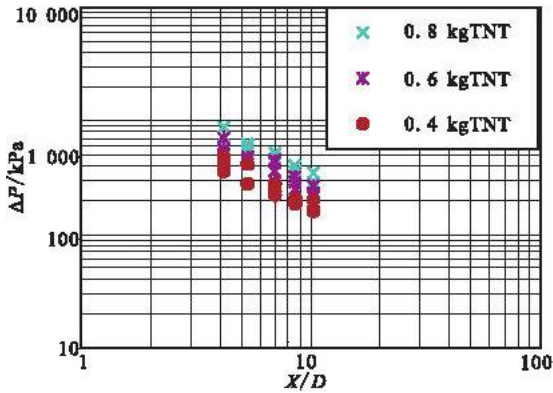


图 6 实测冲击波峰值压力

Fig.6 Measured peak pressure of shock wave

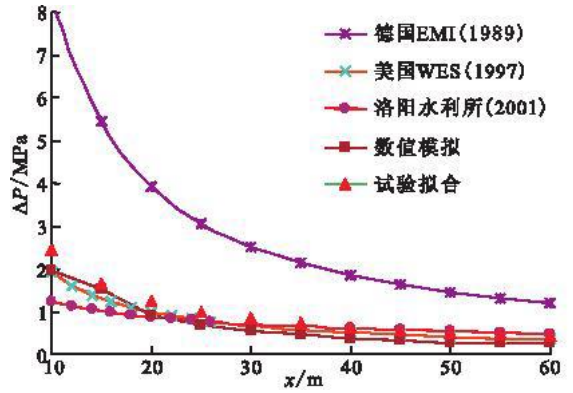


图 7 冲击波峰值压力衰减比较

Fig.7 Curves of peak pressure attenuation with distance

3 结论

1)由数值模拟形象反映了坑道口部爆炸冲击波压力的传播历程:坑道中的冲击波首先直线上升至最大值,随后由于坑道壁来回反射作用,以多个波峰震荡衰减。

2)采用相似比为 1/5 的室外大比例坑道模型试验,进一步揭示了坑道口部爆炸冲击波压力传播规律,由实测试验数据拟合出了冲击波峰值压力计算经验公式。

3)试验拟合公式与数值模拟、美国 WES(1997)、洛阳水利所的计算结果一致性较好,对坑道工程建设具有一定价值。

参数文献:

[1] WELCH C R. In-tunnel Airblast Engineering Model for Internal and External Detonations[C]//Proceedings of the 8th

- International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Mclean Virginia:[s. n.],1997:195—208.
- [2] 庞伟宾,何翔,李茂生,等.空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J].爆炸与冲击,2003,23(6):573—576.
PANG Weibin,HE Xiang,LI Maosheng,et al.The Formula for Airblast Time of Arrival in Tunnel[J].Explosion and Shock Waves,2003,23(6):573—576.(in Chinese)
- [3] Morris J P,Rubin M B,Blair S C,et al.Simulations of Underground Structures Subjected to Dynamic Loading Using the Distinct Element Method [J].Engineering Computations,2004,21:384—408.
- [4] Igra,Wu X,Falcovitz J,et al.Experimental and Theoretical Study of Shock Wave Propagation Through Double-bend Ducts [J].Journal of Fluid Mechanics,2001,437:255—282.
- [5] Chen S G,Ong H L,Tan K H. Shock Wave Propagation in Tunnels[C]//Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Singapore:[s. n.],2001:143—148.
- [6] 李加贵,边小华,张雷.爆炸冲击波传播的数值模拟与试验数据对比[J].山西建筑,2006,32(8):106—107.
LI Jiagui,BIAN Xiaohua,ZHANG Lei.Numerical Simulation of Blast Wave Propagation in Tunnel Compared with Experiment Data[J].Shanxi Architecture,2006,32(8):106—107.(in Chinese)
- [7] J.亨利奇.爆炸动力学及其应用[M].熊建国译.北京:科学出版社,1987.
Henrych J.Dynamics of Explosion and Its Use[M].Translated by XIONG Jianguo.Beijing:Science Press,1987.(in Chinese)
- [8] Shigeharu Ohyagi,Eiji Nohira,Tetsuro Obara,et al.Propagation of Pressure Waves Initiated by Flame and Detonation in A Tube [J].JSME International Journal Series B,2002,45(1):192—200.
- [9] 萨文科.井下空气冲击波[M].龙维祺译.北京:冶金工业出版社,1979.
Tsarenkova C K.Air Shock Wave in the Underground [M].Translated by LONG Weiqi.Beijing:Metallurgical Industry Press,1979.(in Chinese)
- [10] Linvermore Software Technology Corporation LS-DYNA Keyword User's Manual[M].[S. l.]:Linvermore Software Technology Corporation;Version 960,2001.
- [11] 孟吉复,惠鸿斌.爆破测试技术[M].北京:冶金工业出版社,1992.
MENG Jifu,HUI Hongbin.Measuring and Testing Technique of Blasting[M].Beijing:Metallurgical Industry Press,1992.(in Chinese)

(编辑:姚树峰,徐敏)

Study of Shock Wave Pressure Propagation Laws of the Explosion at the Tunnel Entrance

WU Yun-quan^{1,3},XU Jin-yu^{1,2},CHEN Hai-tian³,LI Li-sheng³,YAO Kan⁴

(1.Northwestern Polytechnical University,Xi'an 710072,China;2.Air Force Engineering University,Xi'an 710038,China;3.Guangzhou Air Force Logistics Department,Guangzhou 510052,China;4.Xi'an University of Architecture and Technology,Xi'an 710055,China)

Abstract: Entrance is the keystone part of a tunnel and is very difficult to be protected. The dynamic finite element program is employed to simulate the explosion shock wave propagation in typical wall-arch tunnel with uniform section. Some parameters are simplified via assumptions. In course of a numerical simulation, the shock wave pressure value in the tunnel rises to the maximum straight in a moment. Then, due to the reflection back and forth along the inner surface, multi-peak appears, which is different from the ideal shock wave by exponential decay in the free atmosphere. More, the outdoor large-scale model test is tried on with the similar ratio as 1/5, including three-level quantities 0.8kg, 0.6kg and 0.4kg TNT. It further reveals the pressure propagation laws in the tunnel. And at the same time this article gives the fitting empirical formula of the peak pressure by dimensional theory according to the measured test data. The result shows that the fitting test is consistence with the numerical simulation and other empirical formulas.

Key words: tunnel entrance; explosion shock wave; propagation laws; numerical simulation; model test