

# 爆炸作用下跨度对地下结构破坏形态的影响

孙惠香<sup>1</sup>, 许金余<sup>1</sup>, 朱国富<sup>2</sup>, 祝捷<sup>1</sup>, 康婷<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学机场建筑工程系, 陕西西安, 710038;

2. 南空机场营房处, 江苏南京, 210000)

**摘要** 针对爆炸等动载作用下深埋大跨地下结构的动力响应进行研究, 应用 ANSYS/LS-DYNA 非线性动力有限元分析程序, 采用流固耦合算法和透射边界, 对不同跨度地下拱形结构在不同垂直起爆距离时进行封闭式爆炸数值模拟, 得到了不同跨度地下结构的破坏形态和最大应力变化曲线。结果表明: 大跨度地下结构由于自由临空面的增大, 破坏形态与小跨度结构的受力状态完全不同, 跨度越大, 远处爆炸对结构安全及围岩稳定性影响越大, 结构的动力学特性会发生本质的改变。

**关键词** 爆炸荷载; 地下拱形结构; 破坏形态; 数值模拟

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.020

**中图分类号** TU93<sup>+</sup>1 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0090-05

## Influence of Span for Deep Underground Arch Structure on Failure Modes under Blast Loading

SUN Hui-xiang<sup>1</sup>, XU Jin-yu<sup>1</sup>, ZHU Guo-fu<sup>2</sup>, ZHU Jie<sup>1</sup>, KANG Ting<sup>1</sup>

(1. Department of Airport Construction of Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China; 2. Airport and Barracks Management office of Nanjing Air Force, Nanjing, 210000, China)

**Abstract:** The blast load is very important to the construction of underground rock engineering and the defense engineering project. The study on underground structural failure modes under blast loading is always a hot problem. The underground structure is developing to big span direction. But so far, the study of big-span deep underground structure's dynamic response is seldom. The structural mechanics under blast loading is still not known well. So, the nonlinear dynamic finite element procedure of ANSYS/LS-DYNA is used and the fluid-solid coupling algorithm is selected to study the dynamic response of underground structure with different spans. The explosion is closed and the detonating distances are changed. The analysis shows that the mechanics status of big-span is complete changed compared to the small-span one. And also the maximum stress curves of structures with different spans are obtained.

**Key words:** blast load; underground arch structure; failure mode; numerical simulation

爆炸荷载是地下工程开挖和防护工程设计中的重要荷载, 爆炸荷载及其震动效应对大跨度地下围岩稳定性的影响不容忽视。随着技术、经济的不断发展, 深埋大跨度地下工程不断涌现, 爆炸荷载作用

收稿日期: 2012-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208506; 51208507)

作者简介: 孙惠香(1975—), 女, 吉林德惠人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程和防护工程研究。

E-mail: sunhx7504@sina.com.

下地下结构的力学机制和破坏形态的研究对于提高地下结构可靠性具有重要意义。

国内外学者、工程技术人员对爆炸荷载作用下地下结构的动力响应做了大量的研究, J. L. O' Daniel<sup>[1]</sup>等对由回填土、隔震材料、埋置炸药和部分埋置结构组成的土-结构体系,进行了地下爆炸冲击作用下动力响应分析。Tedesco J W 对爆炸条件下外设置软介质防护结构动力响应进行了研究<sup>[1]</sup>。2003年,美国应用研究合作公司的研究人员对恐怖分子使用炸弹爆炸时产生的冲击波和破片造成附近建筑物和人员的动力响应和破坏程度进行了一系列实验研究<sup>[2]</sup>。国内,方秦等<sup>[3-6]</sup>对爆炸荷载作用下的地下结构的动力响应进行了较为系统的研究,但是大跨地下工程的研究较少,其受力状态和破坏机理尚不清晰,爆炸荷载属于灾害荷载,危险性很大,原型试验实现难度大,因此本文针对爆炸荷载作用下不同跨度地下拱形结构,应用 ANSYS/LS-DYNA<sup>[7]</sup>非线性动力有限元分析软件建模,进行不同位置垂直起爆的数值模拟,研究跨度对地下结构破坏形态的影响。

## 1 地下结构的数值模拟

### 1.1 数值模拟方案

由于隧道工程、防护工程多为直墙拱结构,因此,数值模拟方案的结构形式为直墙拱结构,直墙部分高度为 2 m,计算工况如表 1 所示。

表 1 数值模拟方案

Tab. 1 Numerical simulation program m

工况	跨度	拱高	起爆距离
1	6	5	1~5
2	12	6.5	1~5
3	24	6.5	1~5
4	40	12	1~5

结构为 0.5 m 的钢筋混凝土整体衬砌结构,由于炸药在岩石等固体中爆炸要比在空气和水中爆炸复杂得多,到目前为止,岩石中爆炸理论相对还不是非常成熟,爆炸应力波的传播与岩石的物理力学特性息息相关,岩石的结构构成、坚硬程度、密度、容重、脆胀性、波阻抗等均会影响应力波的传播规律<sup>[8]</sup>,为便于研究,现做以下假定:

1)将岩体宏观上看成连续、各向同性的均质体,不计实际上存在的节理裂隙影响。

2)由于洞室为细长结构,长度方向取 5 m 进行三维模拟,岩体开挖会在 3~5 倍洞径范围内引起应力重分布,有应力重分布的岩体叫做围岩,因此剖面模拟范围为洞径两边各取 3*l* 范围岩体。

3)结构荷载仅由爆炸荷载引起,地下结构在平时承受上部自重压力和围岩侧压力且有变形,但是变形是稳定的,化爆和核爆荷载要远远大于自重荷载产生的变形,因此,忽略自重对结构的影响。

4)封闭式爆炸。由于岩体是无限大的,边界在无限远处,为了和实际相符,将无反射边界条件实现于计算模型中。

装药为 50 mm×50 mm×100 mm 集中装药,装药量分别为 203.75 kg。炸药采用中心起爆,模型见图 1。

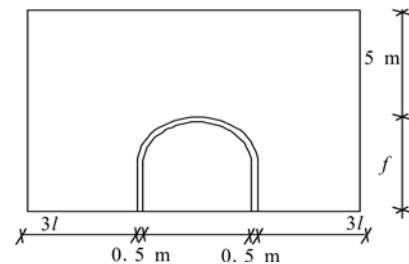


图 1 模拟模型

Fig. 1 Simulation model

### 1.2 材料模型

#### 1.2.1 炸药的材料模型参数设置

炸药选用 MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 模型<sup>[5]</sup>,参数见表 2。岩石为花岗岩,选用塑性动力学 MAT-PLASTIC-KINEMATIC 模型,按弹塑性材料考虑。衬砌结构为钢筋混凝土结构,混凝土采用 JOHNSON-HOLMQUIST-CONCRETE 材料模型,钢筋采用 MAT-JOHNSON-COOK<sup>[7,9]</sup>材料模型,参数见表 3。

#### 1.2.2 单元划分和算法选择

单元均采用实体单元 solid164 单元,具体单元划分见图 2。采用流固耦合算法来描述爆炸过程,炸药看作是流体,围岩和衬砌结构是固体,由于 Lagrange 算法在大变形中存在炸药单元附近的网格变形过大的问题,会影响模拟效果,因此对炸药采用 ALE 算法<sup>[10]</sup>,对衬砌结构和围岩采用 Lagrange 算法,通过流固耦合方式 (CONSTRAINED-LAGRANGE-IN-SOLID)<sup>[11]</sup>来处理各种物质间相互作用,以避免网格畸变带来的计算发散。

表 2 炸药材料参数

Tab. 2 Material parameter of dynamite

密度 /(kg · m <sup>-3</sup> )	爆速 /(m · s <sup>-1</sup> )	常数 A /GPa	常数 B /GPa	常数 R <sub>1</sub>	常数 R <sub>2</sub>	常数 ω	初始内能 /GPa	爆轰压力 /GPa
1 630	6 717	371	7.43	4.15	0.95	0.3	7.0	18.5

表 3 模型材料参数

Tab. 3 Material parameter

模型 材料	密度 /(kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /10 <sup>10</sup> Pa	泊松比 ν	抗压强度 /10 <sup>8</sup> Pa	失效应变	抗拉强度 /10 <sup>6</sup> Pa
花岗岩	2 600	5.50	0.27	1.17	0.03	2.45
混凝土	2 400	4.00	0.21	0.48	0.001 5	4.00
钢筋	7 850	20.00	0.27	3.00	6.75	300

1.3 无反射边界验证

无反射边界又叫做透射边界,根据虚功原理,无反射边界把边界上的分布阻尼力转化成等效节点力加到边界上,保证波能量能透过边界继续向外传递,避免发生由于有限域边界波的反射,造成实际结构的应力分布受到干扰。模型单元划分和等效应力云图见图 2~图 3。

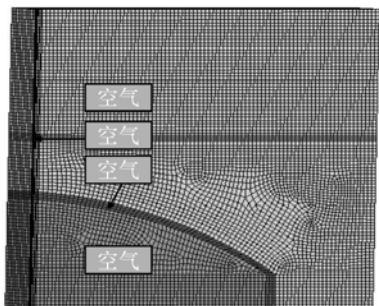


图 2 24 拱 1/4 模型单元划分  
Fig. 2 Element division of 24 arch 1/4 model

由图 3 可以看出,应力波在边界处完全透射,没有反射现象,说明无反射边界设置合理,能够模拟无限大的岩体。

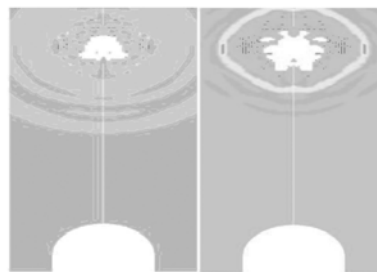


图 3 围岩的等效应力云图  
Fig. 3 The equivalent stress nephogram of surrounding rock

2 跨度对结构破坏形态影响应力分析

当炸药在拱顶垂直爆炸时,经过一系列的模拟,得到不同起爆距离,不同跨度支护结构各部位的应力分布见表 4。

表 4 结构不同部位最大应力

Tab. 4 The maximum stress of different structure parts

跨度/m	爆距/m	直墙根部/MPa	拱脚/MPa	拱肩/MPa	拱顶/MPa
6	1	15, -20(13)	33, -75(48)	63, -92(55)	-88.2, -205(129)
	2	16.1, -26(17)	28.3, -29(45)	58, -73(67,)	64.0, -64(54)
	5	5.2, -15(9.5)	7.0, -25(10.0)	13.2, -18(11.2)	34.0, -25(20)
12	1	14, -13(-10)	12, -37(23.5)	61.2, -85(52)	-96.5, -222(152)
	2	15.8, -13.5(-11.5)	11.8, -38(24)	52.0.0, -80(51)	64.5, -65(55)
	5	6.2, -10.1(6.7)	6.5, -22.5(14.1)	12.3, -23(14.9)	33.5, -18.3(27.3)
24	1	12.8, -7(8.9)	58.2, -16.9(11.2)	35.5, -78(50)	-114.3, -311(101)
	2	15.2, -5.3(11.3)	12.5, -48.5(29.3)	27.2, -75(50.2)	68.2, -72.0(59.2)
	5	4.7, -4.2(3.1)	4.2, -12.5(8.1)	8.9, -22.0(14.0)	49.2, -33.1(34.6)
40	1	2.5, -8(-1.6)	-1.48, -1.75(1.25)	12.5, -56.2(34.2)	-124.0, -335(108)
	2	3.5, 9.5(-1.8)	-14.5, -16.2(1.5)	20.5, -76.5(47.5)	63.2, -61.5(54.6)
	5	-62.5, -54.5(55.5)	-51.5, -74.2(52.5)	33.5, -82.0(50.5)	65.2, -61.2(54.5)

表 4 中数据分别为支护结构上表面单元的最大主应力 σ<sub>1</sub>、最小主应力 σ<sub>3</sub>和最大剪应力 τ<sub>max</sub>(括号内

数值),本模拟中混凝土的抗压强度为 48 MPa,抗拉强度为 4 MPa。根据莫尔-库仑准则,对于岩土等脆性材料,其方程式为<sup>[12]</sup>:

$$|\tau| = c - \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $c$  为材料的内聚力,  $\varphi$  为内摩擦角,但是混凝土很少测  $c$  和  $\varphi$ ,根据图 4,可以得到:

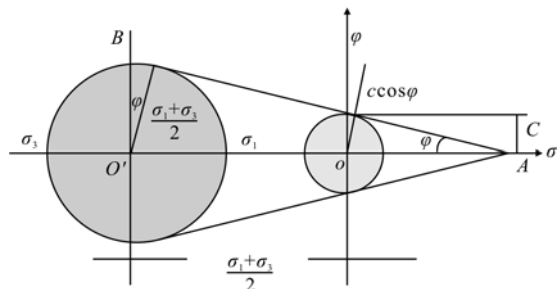


图 4 莫尔-库仑准则

Fig. 4 Moer-Kulun criterion

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \varphi + \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \quad (2)$$

经过变换令  $f_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ ,  $f_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$ , 可以得到

到修正的莫尔-库仑准则:

$$\frac{\sigma_1}{f_t} - \frac{\sigma_3}{f_c} = 1 \quad (3)$$

令  $m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{f_c}{f_t}$ , 则式(3)变为:

$$m \sigma_1 - \sigma_3 = f_c \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (4)$$

由表 4, 根据修正的式(4), 有以下结论:

1) 当起爆距离为 1 m 垂直爆炸时, 6 m 跨度结构中, 存在很大的拉应力, 拱顶最大最小主应力均受拉, 根据计算, 从拱顶到拱脚  $m \sigma_1 - \sigma_3 \geq f_c$  均成立, 说明拱发生了整体破坏, 围岩坍塌, 随着跨度的增加, 临空自由面越大, 上部岩体变形增大, 拉应力越大, 拱顶应力增大, 跨度为 40 m 时, 最大拉应力达到 335 MPa, 拱顶由于岩石破碎区塌落荷载受拉产生破坏。拱脚和直墙应力减少, 当跨度为 40 m 时, 拱肩和拱脚处  $m \sigma_1 - \sigma_3 < f_c$ , 说明由于跨度增大, 应力波传递路径增大, 随着应力波衰减, 拱发生局部破坏。

2) 当起爆距离逐渐增大到 2 m 时, 6 m 拱拱肩处剪应力比较大, 基本接近于主拉应力, 此时, 结构下表面的应变为  $3.21 \times 10^{-4}$ , 钢筋的弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa, 强度为 300 MPa, 此时钢筋的应力为 64.2 MPa, 所以钢筋并没有屈服, 说明结构发生的是剪切破坏。

3) 当起爆距离增大到 2 m, 跨度增大到 24 m 时, 拱顶主压应力要远远大于主拉应力, 说明拱以弯曲变形为主。按照式(4)进行计算, 拱顶和拱肩发生了弯曲破坏。

4) 当跨度达到 40 m, 起爆距离为 1 m 时, 拱脚和直墙根部  $m \sigma_1 - \sigma_3 < f_c$ , 拱顶和拱肩处  $m \sigma_1 - \sigma_3 \geq f_c$ , 拱发生的是局部剪切破坏, 当起爆距离增大到 5 m 时, 拱脚和直墙根部的最大主应力变为拉应力, 最小主应力突然增大, 均超过了抗拉强度, 整个支护结构的应力均满足式(4), 说明拱的跨度增大, 自由临空面增大, 围岩竖向变形增大, 结构发生了整体受拉破坏。结构各部位应力变化曲线如图 5~图 6。

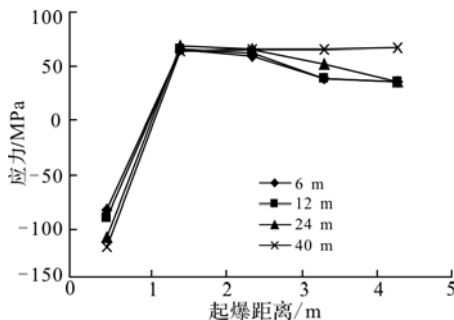


图 5 拱顶最大主应力变化曲线

Fig. 5 The  $\sigma_1$  curve of vault

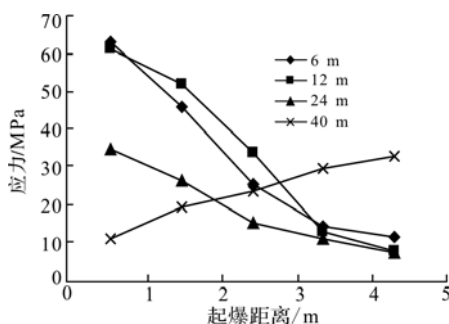


图 6 拱肩最大主应力变化曲线

Fig. 6 The  $\sigma_1$  curve of spandrel

由图 5 可见, 相同爆距时, 随着跨度增大, 最大主应力由拱顶拉应力到拱肩逐渐变为压应力, 并且不断降低, 拱顶压应力随跨度增大而不断增大, 但是随着跨度增大, 应力随着起爆距离增大降低的速度减慢。图 6 表明拱肩处应力随着起爆距离的增大而降低, 但是跨度增大到 40 m 时, 拱肩处应力随着起爆距离的增大出现了增大的现象, 直墙根部与拱肩处变化规律相同。

### 3 结论

通过对不同跨度地下拱形结构进行不同起爆位置垂直爆炸 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟分析, 可以得到以下结论:

1) 通过应力分析, 不同装药、不同起爆位置时, 大跨度的拱形结构的破坏形态与小跨度结构的破坏形态完全不同。起爆距离较小(1 m)时, 小跨度结构发生整体破坏, 而大跨拱(40 m)则发生局部破

坏。随着装药位置距拱顶位置增大,小跨度结构一般发生剪切(2 m)局部破坏,较远的起爆距离(5 m)时,较大跨度结构(24 m)将会发生弯曲破坏。而大跨结构(40 m)由于临空自由面的增大,围岩竖向变形增大,结构发生了整体受拉破坏。

2)相同爆距时,跨度增大,拱顶和拱肩处压应力不断增大,随着跨度增大,应力降低的速度减慢。但是,大跨结构拱肩处应力随着起爆距离的增大而增大。说明跨度越大,远处爆炸对结构安全及围岩稳定性有很大影响,结构的动力学特性发生了本质的改变。

#### 参考文献(References):

- [1] Robert E C, Cornelius J H. The air force manual for design and analysis of hardened structure of america [M]. New Mexico: Civil nuclear systems corporation albuquerque, 1980.
- [2] Pandey A K, Ram K, Paul D K, et al. Non-linear response of reinforced concrete containment structure under blast loading[J]. Nuclear engineering and design, 2006, 23(6): 993-1002.
- [3] 方秦,陈力,张亚栋,等.爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应与破坏模式的数值分析[J].工程力学,2007, 24(SII):135-144.  
FANG Qin, CHEN Li, ZHANG Yadong, et al. Numerical investigation for dynamic response and failure modes of rc structures due to blast loading [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(SII):135-144.
- [4] 柳锦春,方秦,龚自明,等.爆炸荷载作用下梁的动力响应和破坏形态分析[J].爆炸与冲击,2003, 23(1): 25-30.  
LIU Jinchun, FANG Qin, GONG Ziming, et al. Analysis of dynamic responses and failure modes of R/C beams under blast loading [J]. Explosion and shock waves, 2003, 23(1):25-30. (in Chinese)
- [5] 方秦,钱七虎.应力波与带软衬垫的地下结构动力相互作用[J].爆炸与冲击,1988, 8(4):289-298.  
FANG Qin, QIAN Qihu. Dynamic interaction between stress waves and underground structure with crushable backpacking [J]. Explosion and shock waves, 1988, 8(4):289-298. (in Chinese)
- [6] 吴平安,方秦.脉冲荷载作用下土中浅埋钢筋混凝土框架结构直剪破坏研究[J].振动与冲击,2004, 23(2):113-116.  
WU Ping'an, FANG Qin. Analysis on direct-shear failure of shallow-buried rc frames subjected to impulsive loading[J]. Journal of vibration and shock, 2004, 23(2):113-116. (in Chinese)
- [7] 白金泽. LS-DYNA 3D 理论基础与实例分析[M].北京:科学出版社,2005.  
BAI Jinze, Theory foundation and example analysis [M]. Beijing: Science press, 2005. (in Chinese)
- [8] 李翼棋,马素贞.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992.  
LI Yiqi, MA Suzhen. Mechanics of explosion [M]. Beijing: Science press, 1992. (in Chinese)
- [9] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUA [M]. 2003.
- [10] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M].北京:科学出版社,2005.  
ZHAO Haiou. Dynamic Analysis Guide of LS-DYNA [M]. Beijing: Science press, 2003. (in Chinese)
- [11] 时党勇.基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.  
SHI Danyong. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2005. (in Chinese)
- [12] 江见鲸,陆新征,叶列平.钢筋混凝土有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2005.  
JIANG Jianjing, LU Xinzhen, YE Lieping. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2005. (in Chinese)

(编辑:徐敏)