

# 爆炸波影响地下结构的数值模拟方法

张 蓓<sup>1</sup> 许增会<sup>2</sup>

(1. 上海建峰职业技术学院, 上海 201900; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**【摘要】** 采用动力有限元, 利用特有的爆炸单元直接计算炸药在岩土介质中爆炸、爆炸波传播及遇到地下洞室对其产生影响的全过程, 并针对某现场大型地下洞室抗爆试验, 利用数值模拟, 分析计算与现场爆炸、地质、洞室支护等条件相同情况下地下结构的动力响应, 模拟计算结论与现场试验结果分布规律相同、数值接近, 表明有限元法直接模拟爆炸对地下结构的影响具有一定的可靠性, 为进一步研究地下结构在爆炸荷载下的动力响应及安全评价打下基础。

**【关键词】** 爆炸荷载; 地下结构; 数值模拟

**【中图分类号】** TU 93

**【文献标识码】** A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2012. 04. 009

## Numerical Analysis Method of Explosion Wave Effect on Underground Structure

Zhang Bei<sup>1</sup> Xu Zenghui<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jianfeng Vocational Technical College, Shanghai 201900, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd, Shanghai 200032, China)

**【Abstract】** Using Dynamic finite element program, explosive elements are directly applied in rock elements to present the explosion in rocks and blast wave spread to underground structure. Results from numerical calculations of an explosion experiments showed the measurement relevant results. The method using Dynamic element program to simulate explosion loads effecting on underground structure is workable, this method can be adopt further to study the underground structure upon dynamic character and safety on explosion loads.

**【Key words】** explosion load; underground structure; numerical simulation

### 0 引言

炸药在岩土介质中爆炸并产生冲击波, 迅速衰减为震动波在岩土介质中传播, 遇地下洞室时, 产生反射和绕射, 对地下结构产生动力影响。除去地下军事设施必须考虑爆炸荷载影响外, 许多工业与民用的地下工程, 也可能受到爆炸荷载的影响。如铁路、公路隧道中两条近距离的平行单线隧道, 采用钻爆法施工时, 爆炸波势必影响到临近已施工隧道; 露天采矿中, 随着开采面的下移, 与地下的废石运输巷道的距离越来越近, 采用爆破开采方法时, 爆炸波会影响运输巷道的安全。

爆炸荷载对地下结构的动力影响是高度非线性的力学行为, 本文采用动力有限元 LS\_DYNA 程序, 利用爆炸单元和接触算法, 直接计算炸药在岩土介质中爆炸、爆炸波与围岩相互作用并传播、遇到地下洞室时

其产生影响的全过程, 对某现场大型地下洞室抗爆试验, 模拟现场的爆炸条件、地质条件、洞室支护条件, 计算该地下工程的结构动力响应, 将模拟计算结果对比现场抗爆试验的测试结果, 为进一步分析爆炸荷载对地下结构的影响及安全评价打下基础。

### 1 炸药在岩土中爆炸的模拟计算

#### 1.1 LS\_DYNA 爆炸过程的计算原理

利用 MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 爆炸单元<sup>[1]</sup>, 依靠体积膨胀来模拟炸药的爆炸过程, 爆炸单元产生压力, 通过接触关系传给岩石介质。炸药爆炸的化学能释放的程度用  $F$  表示,  $F$  表达式为:

$$F = \max(F_1, F_2)$$
$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t-t_1)DA_{\max}}{3v_e} & \text{If } t > t_1 \\ 0 & \text{If } t < t_1 \end{cases}$$

$$F_2 = \beta = \frac{1-V}{1-V_{CJ}}$$

在初始时刻,每个炸药单元的起爆时间  $t_1$  用该单元距离起爆点的距离除以爆轰速度  $D$  计算而得,根据上式,可以计算不同时刻的炸药化学能的释放程度,而爆炸产生的压力  $p$  则由  $F$  和炸药的状态方程决定:

$$p = F p_{\text{eos}}(V, E)$$

式中:  $p$  为爆炸压力;  $F$  为化学能释放比例;  $p_{\text{eos}}$  为炸药的状态方程。

TNT 炸药的状态方程由 JWL 方程来描述:

$$P_{\text{eos}} = A \left[ 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[ 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$

式中:  $A, B, R_1, R_2, \omega$  是炸药材料常数,  $P$  是压力,  $V$  是相对体积,  $E_0$  是初始化内能。TNT 炸药的这些参数都由试验测定。

## 1.2 爆炸模拟结果

下面是用 LS\_DYNA 程序进行炸药在岩石中的爆炸和波传播的过程计算。炸药采用 TNT 炸药,球形装药,半径 0.25 m,其中用到的炸药参数和状态方程参数见表 1 和表 2<sup>[2]</sup>。图 1 是爆炸波在岩石中传播的压力等值条纹图,从图 1 中可以清晰看到圆柱形炸药起爆激起的圆形波阵面。图 2 是数值模拟的炸药爆轰后引起岩石粉碎和裂隙状况,从图 2 中我们可以分辨出岩石爆破过程在炸药周围形成的爆炸近区(强烈的冲击区)、爆炸中区(裂隙形成区)和爆炸远区(弹塑性振动区)。

表 1 TNT 参数

炸药种类	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	爆速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	C-J 爆压/GPa
TNT	1 630	6 930	21.0

表 2 JWL 状态方程参数

A/GPa	B/GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$	$V_0$
371.213	3.230 6	4.15	0.95	0.30	7.0	1.0

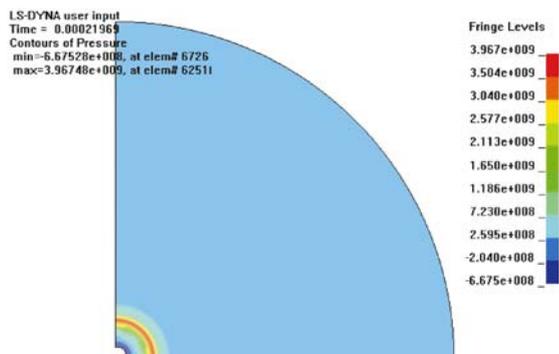


图 1 爆炸压力波等值条纹图

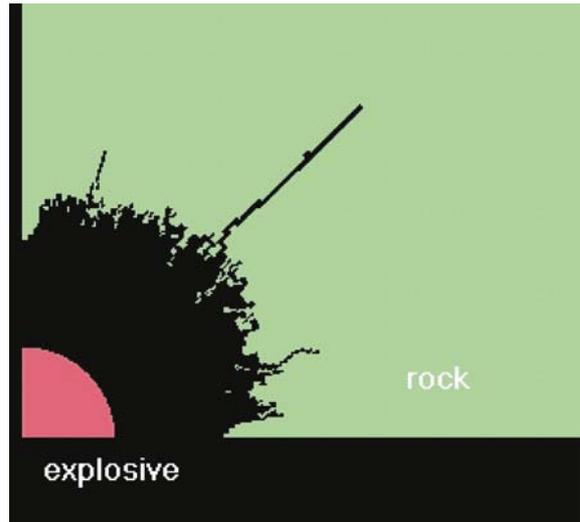


图 2 岩石破碎图

冲击波的衰减速度很快,一般作用范围是洞室半径的 3~7 倍,随后传播的是弹塑性应力波,从图 2 可以看到,岩石药室的破碎自由面是非常复杂的曲面,爆炸波将在这个曲面上发生复杂的反射和折射,甚至还要深入到岩石的裂隙中促进裂缝的进一步发展,这个复杂的过程,用单纯的理论分析非常困难,然而也只有从爆炸波最初始的传播状态开始考虑,才能得到较为准确的应力波形和频谱特性。LS\_DYNA 提供的 ALE 算法,使炸药具有流体性质,可以让炸药介质压力很好的作用在破碎后药室自由面上,爆炸波还可以深入到岩石的裂隙中与岩石进一步发生作用。这样就较真实地模拟了岩石破碎和应力波传播的全过程。

爆炸数值模拟在距离药室 10 m 处应力波的时间结果见图 3。该曲线的峰值为 11.5 MPa,和经验公式<sup>[2]</sup>计算结果具有较强的可比性,说明数值模拟较好地反映了爆炸波在岩石中的传播过程。图 3 还反映出随着时间的延长,因炸药的爆轰完毕,没有持续的能量供应,以及岩石介质本身的阻尼作用,应力波峰值随时间增长在逐渐减小。

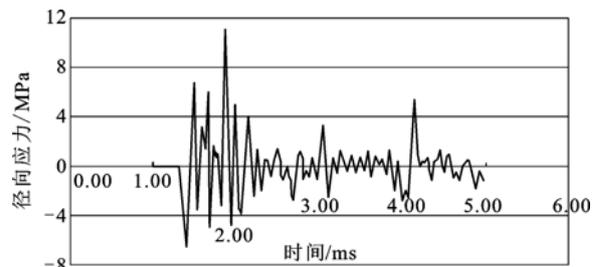


图 3 距药室 10 m 处岩石的压力波

由程序自动计算的见图 3 一样的压力波,在岩

石中继续传播,当遇到地下洞室时,产生反射、绕射,对地下结构产生影响,从而模拟爆炸、应力波传播、影响地下结构的全过程。

### 2 现场地下结构抗爆试验资料<sup>[3]</sup>

本次试验是对某锚喷支护黄土洞库进行的大型化爆现场试验。该洞跨度为 4.8 m,高度 3.78 m,在距离洞顶 8.2 m 处,集团装药量为 950 kg TNT,炸药在完全填塞的情况下爆炸(见图 4)。

#### 2.1 土质情况

洞库周围的地质条件为:岩土为  $Q_{II} \sim Q_{IV}$  的自重湿陷性轻亚粘土,由风积和冲积形成,呈褐黄色,土质结构密实,属中等压缩至低压缩性。密度  $\rho=1\ 480 \sim 1\ 540\text{ kg/m}^3$ ,压缩模量  $E_0=18 \sim 25\text{ MPa}$ ,内摩擦角  $=27^\circ \sim 29^\circ$ ,土体无侧限抗压强度  $R=0.15 \sim 2.5\text{ MPa}$ ,动弹性模量  $E_{动}=284.4 \sim 305.5\text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.307 \sim 0.34$ ,弹性波速  $C=250 \sim 800\text{ m/s}$ 。

#### 2.2 支护情况

采用锚喷网联合支护,喷射混凝土厚度为 8~10 cm,喷混凝土的抗压强度为  $R=14.4\text{ MPa}$ ,弹性模量  $E=23.3\text{ GPa}$ ,钢筋网为直径 8 mm 间距  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ,锚杆长 2.5 m,直径 18 mm,锚杆间距为 1 m。

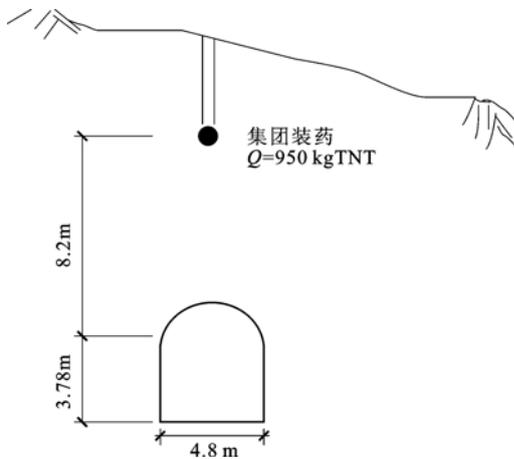


图 4 现场试验示意图

#### 2.3 试验结果

顶爆试验后,洞室喷层出现环向裂缝,隧洞某一段在拱顶偏右侧的拱腰处出现了混凝土局部剥离。此外,拱部偏左侧的拱腰处还出现了环向和纵向剪断的裂缝数十条。缝宽 0.1~0.5 cm,并多处出现混凝土剥离和钢筋弯曲外露。

洞周界面处实测径向压力值见图 5,单位为 0.1 MPa,分析认为拱顶左侧的 0.8 MPa 的实测数值异常,可以不作考虑。沿洞周喷层实测各点的实

测应变值见图 6,单位为  $\mu\epsilon$ 。拱顶受拉,拉应变值达到  $3\ 179\ \mu\epsilon$ ,其他部位均受压。拱部锚杆没有进行应变实测,只是在距墙底 1 m 左右的墙中间的两根锚杆有应变实测数据。锚杆的应变值很小,在  $-67\ \mu\epsilon \sim +39\ \mu\epsilon$  之间。

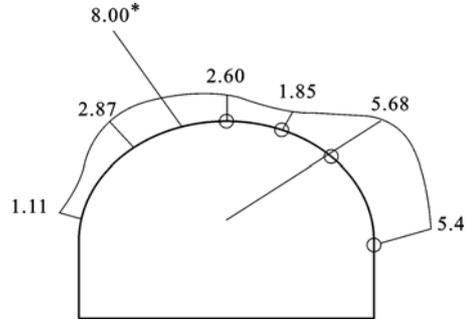


图 5 洞周实测压力值<sup>[3]</sup>(单位:0.1MPa)

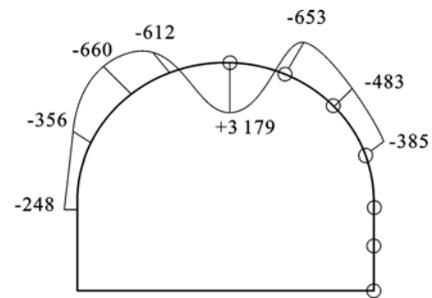


图 6 洞周喷层实测环向应变值<sup>[3]</sup>(单位: $\mu\epsilon$ )

### 3 对现场地下结构抗爆试验的数值模拟

采用动力有限元,利用数值模拟方法对上面介绍的现场地下洞室抗爆试验进行同等条件分析,比较计算和实测的结果

#### 3.1 有限元模型及本构模型参数

数值模拟按照 1:1 的几何比例对现场试验进行模拟,因为问题的对称性,仅对 1/2 模型进行计算,并按照平面应变情况做计算假定。下侧及右侧边界采用吸收边界,防止爆炸波在边界处反射,左侧为对称边界,计算模型见图 7。

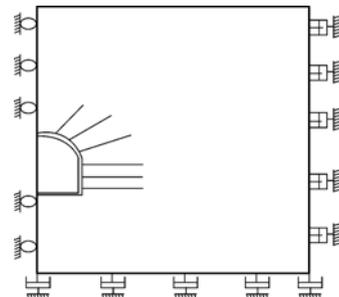


图 7 数值计算模型

计算中选用的材料本构模型如下:土体 D-P

模型,锚杆 弹性模型,混凝土喷层 winfrith-concrete 混凝土模型,该模型可以模拟混凝土材料的开裂和各向异性的特征,是 Broadhouse 和 Neilson 经过多年研究发展起来的较为有效的混凝土本构模型。各本构模型采用的模拟参数见表 3~表 5。其炸药的爆炸参数见表 1 和表 2。

3.2 数值模拟结果的比较分析

1)洞周径向压力

根据实测资料中实测数据的位置,在计算模型中同样选取相同的位置,提取相关位置的径向压力的时程曲线,典型的压力波形见图 8,图中纵坐标单位:Pa,横坐标单位:s。把对应位置的最大的压力峰值提取标记在洞周(见图 9)。

比较模拟计算数据图和实测数据图 6,压力峰值沿洞周分布规律相同,数值上较为接近,可以认为模拟结果和实测结果基本吻合。

2)喷层环向应变

对应实测喷层环向应变位置,取数值模拟结果,

绘成图 10。比较模拟计算结果图 10 和实测结果图 6,但喷层的应变趋势和实测相符,数值接近,因为数值模拟是理论上的结果对称,而实测中影响的因素较多,不能保证完全对称,可以认为模拟结果和实测是吻合的。

表 3 锚杆参数<sup>[3]</sup>

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹模/GPa	屈服应力/MPa	泊松比
7850	210	210	0.27

表 4 土体的物理力学参数<sup>[3]</sup>

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	动弹模 /MPa	抗压强度 /MPa	泊松比	摩擦角	内聚力 /MPa	弹性波速/(m·s <sup>-1</sup> )
1570	300	0.24	0.32	0.53	0.07	550

表 5 喷层参数<sup>[3]</sup>

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹模/GPa	泊松比	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
2200	22.5	0.20	13.4	1.54

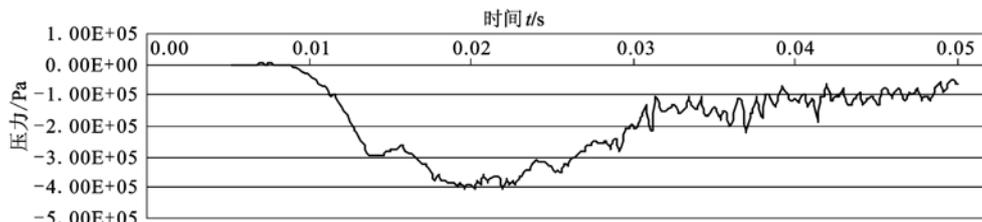


图 8 洞周压力时程图

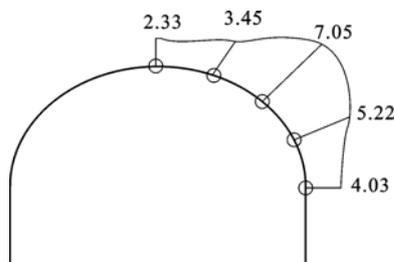


图 9 计算最大压力曲线(单位:0.1 MPa)

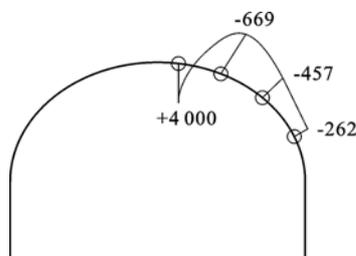


图 10 计算喷层应变(单位:με)

根据上面数值模拟和实际工程测试结果的比较分析,可以看出,本文在数值模拟的计算程序、边界条件、本构模型、模拟方法的选择和运用上,可以较

为真实地反映实际锚喷支护结构喷层和锚杆的动力响应状态,采用数值模拟计算爆炸对地下结构影响具有一定的可靠性。

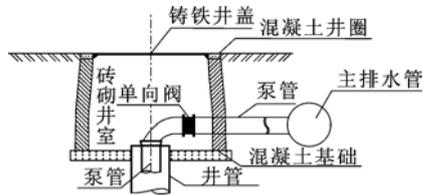
4 结 论

1)用动力有限元直接模拟炸药在岩土介质中爆炸,采用专门的炸药单元完成炸药在岩石中爆炸和波传播过程的计算,计算结果可以明确区分爆炸在岩石中形成的粉碎区,裂隙区和弹塑性振动区,计算应力波和经验公式结果基本一致,表明有限元可以直接模拟炸药在岩土介质中爆炸—应力波传播过程,可作为影响地下洞室的荷载源,更真实反映爆炸波的传播特性。

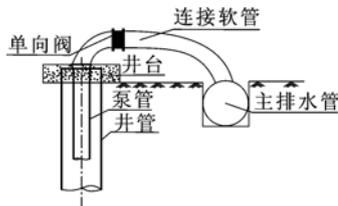
2)对现场锚喷支护抗爆试验做了参数一致的数值模拟,结果对比分析表明,模拟计算得到的数据和实测数据具有可比性,分布规律和实测吻合。表明本文采用的数值方法,可以较为真实地模拟实际地下洞室在爆炸荷载下的动力响应,为进一步采用数值模拟方法研究爆炸荷载下地下结构的动力响应及安全

(下转第 207 页)

于 1.0 m, 电缆可穿硬质管材后与排水管路同槽敷设。明设形式的排水管路保护难度较大, 排水主管宜选用钢管且喷涂标识, 电缆如随排水管路一同架设, 二者之间应做绝缘处理。



(a) 暗埋式井口示意剖面图



(b) 明设式井口示意剖面图

图 5 管井井口示意图

基坑施工中锚杆成孔作业易造成管井损坏。锚杆施工前应采用吊铅锤的方法, 在基坑侧壁明显标识出管井位置, 并设专人指挥。锚杆钻进过程中注意出土情况, 一旦发现豆石滤料, 应立即停钻, 调整锚杆孔位。

地铁车站基坑端头设置盾构竖井时, 端头处沿线路纵向 6~9 m 的范围内需注浆加固, 包括锚杆施工注浆在内, 易发生浆液随地下水流入临近的

管井内造成管井损坏的情况。应在注浆时调整管井内的水泵泵型、泵量, 并不间断抽排, 直至无浆液排出为止。

#### 4 结 论

北京地区采用管井降水方法较早, 积累了丰富的施工设计经验。在地铁工程的应用过程中总结发现:

1) 基于抽水试验成果完成的降水方案设计计算更加合理、可行。

2) 成井质量和成品保护是施工过程控制的关键。

上述两点是确保管井降水实现预期效果的必要条件。

#### 参 考 文 献

- [1] 李传尧, 张峻岩. 当前基坑降水中的几个问题[J]. 城市勘测, 1997(2): 45-48.
- [2] JGJ120—1999 建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] JGJ/T111—1998 建筑与市政降水工程技术规范[S].
- [4] DB11/489—2007 建筑基坑支护技术规程[S].
- [5] 地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队. 水文地质手册[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 341-376.
- [6] QGD—013—2005 轨道交通降水工程施工质量验收标准[S].

收稿日期: 2012-04-18

(上接第 199 页)

性评价, 提供基础性的借鉴和参考; 同时, 提供的现场试验结果, 也可供其他动力计算程序校核模拟结果准确性使用, 确保进一步数值模拟研究的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] LS\_DYNA keywords user's manual, Livermore software technology corporation, 2003.

- [2] 杨 军, 金乾坤. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 陆浩亮. 锚喷支护抗爆动力响应[D]. 上海: 同济大学, 1985.

收稿日期: 2012-02-28