

武器爆炸作用下地下洞库坑道 动力响应数值模拟分析

赵德辉^{1,2}, 田大战², 张伟成²

(1. 西北工业大学 力学与建筑工程学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:对武器爆炸条件下地下洞库坑道动力响应进行了数值模拟分析。分析了武器爆炸作用效应, 推导了射弹侵彻岩石预估公式的基本形式, 分别模拟了开裂以及压碎过程, 给出了模型的破坏准则以及边界条件的处理。数值模拟对于人防工程以及防护工程的建设提供重要参考依据。

关键词:爆炸; 地下洞库; 坑道; 动力响应; 数值模拟

中图分类号: U455.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0052-04

武器爆炸条件下地下洞库坑道的动力响应涉及岩土动力学、流体动力学、塑性动力学和实验力学等诸多学科^[1]。近几年来, 国内外许多学者对该领域进行了广泛而深入的研究^[2-3], 但研究工作还主要以实验研究为主, 在某些近似假设条件下的解析方法或数值分析方法方面还研究较少。本文对武器爆炸条件下, 地下洞库坑道结构的动力响应问题进行数值模拟分析。

1 武器作用效应分析

1.1 计算假定

在本文的计算过程中采用如下假定: ①射弹的材料力学性能相比于靶体材料足够强; ②弹药攻击为侵彻和零攻角情况; ③靶体岩石材料与原体一致; ④忽略靶体材料的应变率效应。

1.2 量纲分析

根据相似第二定理(π 定理)和计算假设, 侵彻深度和所有影响因素的依存关系为

$$H = f(L, D, L_N, M, V, \rho_p, \rho_t, \sigma_{cl}, g) \quad (1)$$

式中: L 为射弹长度; D 为弹体直径; L_N 为弹头长度; M 为射弹质量; V 为弹速; ρ_p 为射弹综合密度; ρ_t 为岩石密度; σ_{cl} 为岩石的抗压强度; g 为重力加速度。以 D 、 M 、 g 作基准对式(1)无量纲化, 可得

$$\frac{H}{D} = f\left(\frac{L_N}{D}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_p D^3}{M}, \frac{\rho_t D^3}{M}, \frac{\rho_{cl} D^2 V^2}{Mg}, \frac{V^2}{gD}\right) \quad (2)$$

上式含有6个相似准则, 考虑到弹长 L 及综合密度 ρ_p 一般不易得到, 并且 $\rho_p D^3/M$ 与 $\rho_t D^3/M$ 略显重复, 在此略掉 L_N/D 、 L/D 、 $\rho_p D^3/M$, 按照比例模化方法可将式(2)简化为

$$\frac{H}{D} = NKf\left(\frac{M}{\rho_t D^3}, \frac{\sigma D^2}{Mg}, \frac{V^2}{gD}\right) \quad (3)$$

此时 $N = f_1\left(\frac{L_N}{D}\right)$, $K = f_2\left(\frac{L}{D}, \frac{\rho_p D^3}{M}\right)$ 。上式即为射弹侵彻岩石预估公式的基本形式。

收稿日期: 2007-07-13

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 赵德辉(1978-), 男, 山西霍州人, 讲师, 博士生, 主要从事防护工程、结构工程研究。

1.3 武器爆炸地冲击荷载计算

在此重点考虑常规炸弹侵彻岩石引起的地冲击荷载。计算采用《防护工程防常规武器结构设计规范》的规定进行。

2 数值模拟

2.1 材料本构关系

单元的应力—应变关系矩阵 D 定义为

$$D = (1 - \sum_{i=1}^{Nr} V_i^r) [D^c] + \sum_{i=1}^{Nr} V_i^r [D^r]_i \quad (4)$$

式中: Nr 为增强材料数目; V_i^r 为增强材料的体积与单元总体积的比值; D^c 为主材料的线弹性应力应变矩阵; D^r 为增强材料 i 的弹性应力—应变矩阵。

单元内增强材料 i 的方位如图 1 所示。单元坐标系定为 (X, Y, Z) , 用 (x'_i, y'_i, z'_i) 描述增强材料 i 的坐标系, 与每一个坐标系 (x'_i, y'_i, z'_i) 对应的应力应变矩阵为

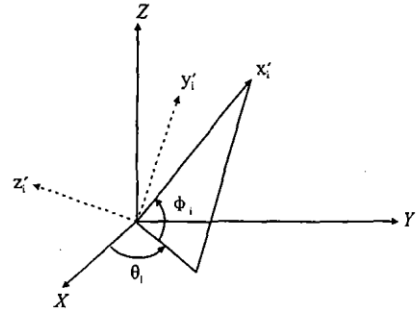


图 1 增强材料 i 的方位图

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{xz}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} = D^r \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中, E_i 为增强材料 i 的杨氏模量。

结构破裂后可以带裂缝工作, 本文采用单元内部弥散裂缝法处理。

2.2 开裂的模拟

在某个积分点出现裂缝后, 通过在垂直于裂缝面方向上引入一个弱平面的方法来修正应力应变关系, 而且引入一个剪力转换系数。考虑可能引起跨越裂缝面滑动的后续荷载增加造成剪切强度降低的因素, 只在一个方向开裂材料的应力应变关系调整为

$$D_c^{ck} = \frac{E}{1+v} \begin{bmatrix} \frac{R(1+v)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-v} & \frac{1}{1-v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-v} & \frac{1}{1-v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_i}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_i}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

如果裂隙重新闭合, 则所有垂直于开裂面的压应力能够通过裂隙传递, 对闭合的裂隙引入一个剪力传递系数 β_c , 此时 D_c^{ck} 为

$$D_c^{ck} = \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2v}{2} \end{bmatrix}$$

考虑以上应力应变关系是按主应力方向为坐标轴方向建立,需要将 D_c^{ck} 转换到单元坐标系中:

$$D_c = [T^{ck}]^T D_c^{ck} T^{ck} \tag{7}$$

需强调,计算单元积分点的裂隙张开和闭合状态是基于开裂应变值 ϵ_{ck}^{ck} 确定的。若 $\epsilon_{ck}^{ck} < 0$, 则相应的裂隙认为是闭合的;若 $\epsilon_{ck}^{ck} \geq 0$, 则相应的裂隙认为要打开。当裂缝在某个积分点首次出现时,裂缝被假定为对于下一迭代步是打开的。

2.3 压碎的模拟

如果材料的某个积分点在单轴、双轴或三轴压应力作用下破坏,就认为材料在该点压碎。压碎一旦发生,便假定材料的强度已完全退化,此时该积分点对单元刚度的贡献可以被忽略。

2.4 模型的破坏准则

Ottosen4 参数混凝土破坏准则^[4-5]为

$$f(I_1, J_2 \cos 2\theta) = a \frac{J_2}{f_c^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_c} + b \frac{I_1}{f_c} - 1 = 0$$

式中: f_c 为混凝土单轴抗压强度;应力角 $\theta = \frac{1}{3} \arccos \left| \frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^2} \right|$; $\lambda = \lambda(\cos 3\theta) > 0$ 。根据等边三角形的薄模比拟法则,可以得到偏平面 $\lambda = k_1 \cos[\arccos(k_2 \cos 3\theta)/3] \cos 3\theta \geq 0$; $\lambda = k_1 \cos[\pi/3 - \arccos(-k_2 \cos 3\theta)/3] \cos 3\theta < 0$, k_1 为尺寸因子, k_2 为形状因子,其数值由 $\lambda_c(\theta=0)$ 、 $\lambda_c(\theta=\pi/3)$ 来确定。Ottosen 模型中的 4 个参数由混凝土的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、双轴等压强度和三轴等压强度的数据来确定。

3 算例

某洞库为直墙拱结构。埋深 $H=10$ m, 静跨 $L=4.2$ m, 直墙高 $h=2$ m, 矢高 $f=2.1$ m, 结构厚度 $d=0.5$ m, 底板厚度 $b=0.2$ m。材料为 C35 钢筋混凝土,配筋率 2%, 围岩为 I 类围岩,某低阻式爆破弹侵彻 2.2 m 后在结构正上方爆炸,具体荷载参数见表 1^[6-7]。

取结构的一半进行研究。将结构周围一并考虑以反映结构与介质的相互作用。有限元计算域,距爆炸点距离应大于炸弹侵彻后爆炸的压缩半径为: $r_a = mk_a \sqrt[3]{\beta C} = 0.34 \times 1.34 \times \sqrt[3]{1.35 \times 449} = 3.86$ m, 取 $R=3.9$ m。

表 1 荷载参数表

荷载峰值压力 /MPa	到达时间 /ms	升压时间 /ms	作用时间 /ms
17.29	3.01	0.301	4.951

图 2 为应力波传播历程图。图 3 为裂缝开展历程图。

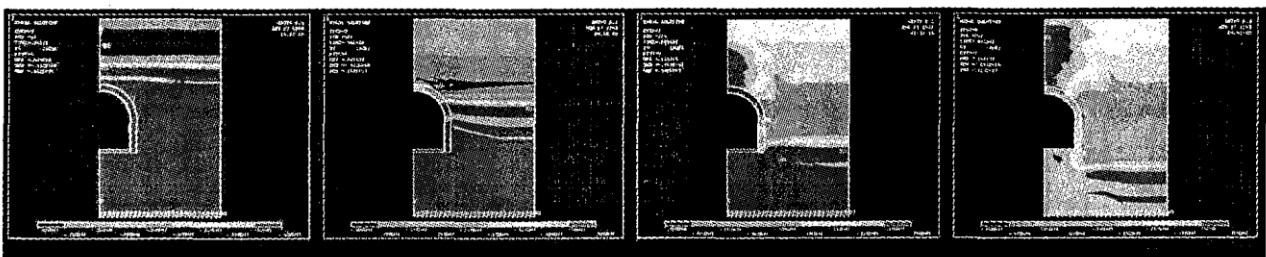


图 2 应力波传播历程图

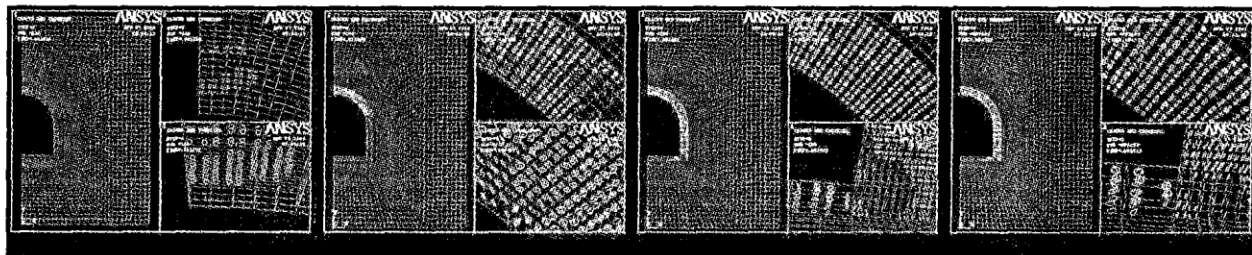


图3 裂缝开展历程图

4 结论

1) 由应力波传播历程图,爆炸入射波首先在结构上方的岩石介质中平行向下传播,遇到上部拱结构后,部分入射波开始反射,继续向下传播,大致在拱 45° 处的 B 点应力出现最小值,右边的介质中应力波在墙角 D 处呈一弧形向下传播,此时,拱结构上部反射回介质中的应力出现最大值。

2) 从裂缝开展历程看,结构首先在拱顶 A 处产生拉裂缝,后又闭合,并有部分单元出现第二次开裂,然后在 A 处和拱 45° 处的 B 处出现压碎现象,上部拱结构的破坏区由拱顶发展到整个拱圈,圆拱内侧以拉裂为主,外侧以压碎为主,拱 45° 处和拱角 C 处的压碎单元由外侧向内侧迅速发展,布满这一区域,破坏加重,墙角 D 处部分单元开始出现拉裂现象,破坏区由圆拱向直墙发展,最后圆拱和直墙破坏区连成一体。

参考文献:

- [1] 汪应洛. 系统工程理论方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 许金余,刘开帝,战勇. AHP法在阵地系统生存概率计算中的应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2001,2(1): 84-88.
- [3] Myers T F, Hershkovity J. The Effect of Base Caps on Setback - shock Simulator[A]. Proceedings of the 7th Symposium on Detonation[C]. Naval Surface Weapons Center, MP, 1981:82-334.
- [4] Jayas B S, Hosain M U. Behaviour of Headed Studys in Composite Beams - full Scale Tests[J]. Can J of Civ Eng. 1989, 16(3): 465-476.
- [5] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [6] 毕波,于毅,徐干成. 一种夹层板结构的动力有限元方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2002,3(3):77-81.
- [7] 许金余,于萍,赵靖. 单机掩蔽库群生存概率计算模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(6):8-11.

(编辑:田新华)

An Analysis of Numerical Simulation under Condition of Blast

ZHAO De-hui^{1,2}, TIAN Da-zhan², ZHANG Wei-cheng²

(1. Mechanics and Civil Engineering Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In this paper, the laws of motion about interaction of shrapnel and shock wave under condition of blast are researched. First of all, calculating assumptions for numerical analysis are given, and the laws of motion of shrapnel and shock wave are analyzed respectively. Then, current formulas are simplified. The conclusion can be used to respectively compute the time order and time difference, in which structures suffer from shrapnel and shock wave. The results show that the algorithm is effective.

Key words: blast; underground cave - hangar; tunnel; dynamic response; numerical value simulation