

爆炸作用下坑道被覆结构局部破坏 效应数值分析*

邓春梅^{1,2}, 许金余^{1,3}, 沈刘军¹

(1 空军工程大学工程学院, 西安 710038; 2 空军工程设计研究局, 北京 100086;

3 西北工业大学, 西安 710072)

摘 要:文中利用 LS-DYNA 程序研究了坑道被覆结构在常规装药爆炸作用下的局部破坏效应。通过数值模拟可直观了解爆炸冲击波在被覆结构中的传播及与周围围岩的相互作用和分析被覆结构的受力特点。计算结果表明在爆炸应力波作用下混凝土被覆结构在反射拉伸波的作用下产生局部震塌破坏。

关键词:爆炸冲击波; 坑道被覆结构; 局部破坏效应; 数值模拟; 震塌

中图分类号: O383.2 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Tunnel Lining's Local Damage Effect Subjected to Subsurface Blast

DENG Chunmei^{1,2}, XU Jinyu^{1,3}, SHEN Liujun¹

(1 The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2 Air Force Engineering Design & Research Bureau, Beijing 100086, China;

3 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: LS-DYNA is employed to research the local damage effect of tunnel lining subjected to conventional subsurface blast. The propagation of the explosion wave and the mutual action between the mass rock and tunnel lining are better understood through the numerical simulation. The damage characteristics of reinforced concrete lining under explosive load are analyzed. The result showed that the spalling failure of the reinforced concrete lining is generated under the reflected extensive wave.

Keywords: explosion shock wave; tunnel lining; local damage effect; numerical simulation; spalling

0 引言

装药在围岩中爆炸时, 爆轰产物急剧膨胀, 在岩石中形成高速、高压冲击波并迅速向周围传播, 在很短的时间内冲击波由围岩中传播到地下拱形坑道, 当冲击波传到拱顶时, 在拱与围岩交界面发生冲击波的相互作用, 冲击压缩波作用到结构上后, 一部分冲击波发生反射, 并在结构表面及围岩之间进行多次反射, 其余形成透射波在拱中继续传播。透射的压缩波在坑道拱底临空自由面反射产生反射拉伸波, 使得抗拉强度大大低于抗压强度的混凝土结构产生震塌破坏, 对工程结构本身以及人员和设备造成很大的威胁和破坏。

文中采用非线性动力分析有限元程序 LS-DYNA 对大跨度坑道被覆结构在一定装药爆炸作用下的受力特征及震塌破坏效应展开研究, 并对震塌块石的速度进行了验证。

1 动力有限元模型的建立

某坑道被覆结构, 材料为 C30 混凝土, 围岩介于 I、II 之间, 计算装药量为 313kg, 埋深 4.6m, 装药距拱顶结构 1m, 在结构正上方爆炸。由于模型的对称, 建立四分之一模型, 对称面施加对称约束(关于 XOY、YOX 面对称), 其余面用非反射边界条件以模拟无限域。

由于装药直径很小, 而所关心的爆炸作用范围较大, 因此采用变步长方式对计算域进行离散

* 收稿日期: 2008-01-12

基金项目: 空军工程大学工程学院“优秀博士学位论文创新基金”(BC0510)资助

作者简介: 邓春梅(1971—), 女, 吉林江源人, 工程师, 博士, 研究方向: 岩土工程、防护工程。

差分,靠近炸药部分的网格划分地相对密集,边界部分相对稀疏。利用六面体三维实体 solid 164 单元分别对炸药和岩石、混凝土被覆进行空间离散,共生成单元 171792 个。坑道被覆四分之一计算模型网格划分如图 1 所示。

LS-DYNA user input

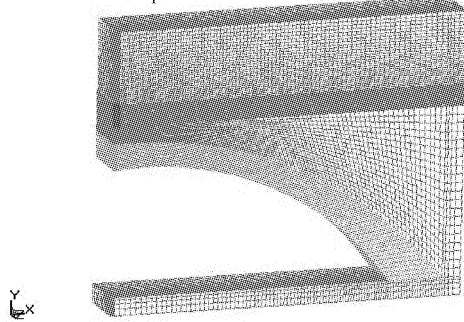


图 1 结构动力有限元模型

2 材料模型的选择及参数确定

1) 炸药材料模型

在 LS-DYNA 中,采用 * EOS_JWL 状态方程和 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型材料描述 TNT 高能炸药,爆轰产物压力和内能及相对体积关系如下:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

炸药材料及状态方程参数见文献[1]。

2) 岩石材料模型

花岗岩采用弹塑性随动硬化模型 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 材料参数见文献[2]。

3) 混凝土被覆材料本构模型

混凝土在高应变率加载条件下的破坏机理与静力学问题中有很大的不同,材料的强度不仅与应变率有关,而且与材料的损伤,裂纹的扩展有关。文中采用混凝土损伤累积模型 H-J-C^[3] 对混凝土作破坏分析,该模型综合考虑了应变、高应变率、高压效应及损伤等因素,主要应用于高应变率、大变形下的混凝土与岩石模拟。它引入了损伤度 D ($0 \leq D \leq 1$), 当 $D = 1.0$ 时,认为单元失效,以后计算不再计入该单元。混凝土塑性流动的标准为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2)$$

式中: $\sigma^* = \sigma / f'_c$ 为归一化等效应力, f'_c 为准静态单轴压缩强度; D 为损伤度; $P^* = P / f'_c$ 为归一化压力; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 为实际应变率与参考应变率之

比,是无量纲应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。

损伤度的计算如下:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_P + \Delta u_P}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \epsilon_P$ 、 Δu_P 分别为等效塑性应变和塑性体应变, $T^* = T / f'_c$ 为最大归一化流体静拉力, D_1 、 D_2 为材料损伤常数。可见损伤度的累积与等效塑性应变和塑性体应变都有关。混凝土 J-H-C 材料参数见文献[3]。

3 数值模拟结果分析

3.1 被覆结构的受力特点

装药在围岩中爆炸时,爆轰产物急剧膨胀,在岩石中形成高速、高压爆炸波并迅速向周围传播。大约在 0.5ms 爆炸波由围岩传播到钢筋混凝土被覆中,在被覆与围岩交界面发生爆炸波的相互作用,一部分波发生反射,其余形成透射波在拱形被覆中继续传播。

当爆炸冲击波达到被覆拱顶时,在此产生压应力,如果达到混凝土的抗压极限强度时,就会产生失效破坏。根据图 2,被覆拱顶混凝土的爆炸荷载没有达到混凝土的抗压破坏极限,并且压力波峰值由爆源向被覆结构随距离的增大而衰减。被覆拱顶结构受力特征为:先短暂受压,再受拉,再短暂受压,然后持续受拉。

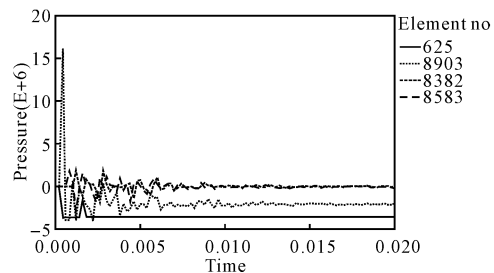


图 2 爆炸投影点下被覆拱顶单元压力时程曲线

3.2 被覆结构局部震塌破坏效应

根据文献[4]认为单元 625 和单元 8903(见图 2)产生剥离破坏。在坑道的迎爆面,产生反射拉伸波,当反射拉伸波的强度超过混凝土抗拉强度时,混凝土表面就会出现一层层拉裂,这种现象称为剥离。剥离通常发生在应力波的波头,应力波峰值越高,升压段越陡峭,作用时间越短,则剥离破坏越明显。

由于被覆拱底临空面自由面的存在,在拱底形成反射拉伸波。当反射拉伸波强度超过混凝土的抗拉极限,将造成被覆结构内侧的拉伸破坏,即混凝土发生破坏,产生层裂,也就是震塌。

根据文献[5-7],单元 644(见图 3)处拉伸波(压力波中拉伸相)已经达到混凝土的抗拉强度(-4MPa),由于混凝土被拉断而拉伸波波峰被削平。

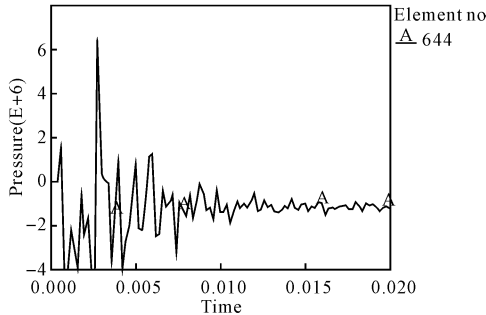


图 3 爆炸投影点以下被覆拱底单元 644 压力-时程曲线

但由于被覆结构所采用的 JHC 模型,该模型存在着拉压不对称性,因而模型中不能直接观察混凝土的拉伸破坏模式,这与文献[8-9]的结论一致。所以为了观察破坏结果,设失效拉力为-4.0MPa,得到被覆结构节点震塌速度(见图 4、图 5)。

图 4 中被覆拱底横剖面上节点 A、B、C、D、E、F、G 产生震塌,震塌脱落速度见图 4。各节点与爆炸中心投影点距离依次增大,并且随距离的增大,震塌速度依次减小。

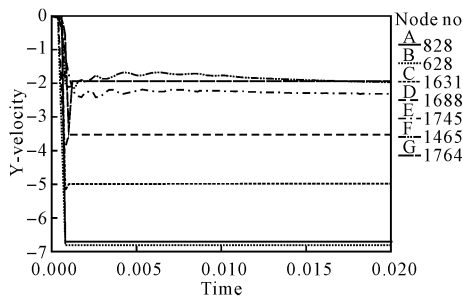


图 4 爆炸投影点以下被覆拱底横剖面上节点震塌速度-时程曲线

图 5 中被覆拱底纵剖面(沿坑道轴向)上 A、B、C、D、E 等各节点产生震塌,各节点距爆炸投影点距离渐次增加,震塌速度逐渐变小。

4 结论

1)当爆炸冲击波到达被覆结构顶部时产生压应力,该应力峰值没有达到混凝土的抗压破坏极限,即被覆结构顶部没有产生压碎破坏;

2)在爆炸应力波荷载作用下,被覆结构迎爆面由于反射拉伸产生剥离,被覆结构内侧即背爆

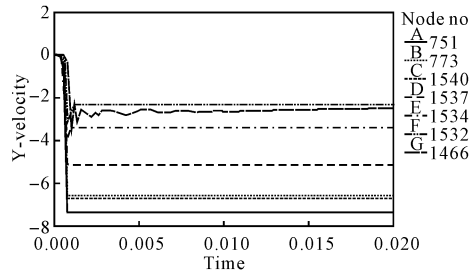


图 5 爆炸投影点以下被覆拱底轴向节点震塌速度-时程曲线

面受反射拉伸作用,产生震塌破坏,并且随距离的增大,震塌速度减小;

3)震塌产生的落石将对坑道内部人员和设备的安全造成极大威胁。

参考文献:

- [1] LS-DYNA User's Manual (970)[Z]. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2001.
- [2] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [3] Holmquist T J, Johnson G, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures [C]// Proc. 14th International Symposium on Ballistics, Canada 1995: 591-600.
- [4] 李茂生,刘建武,吴祥云,等. 地下坑道工程抗毁伤能力研究[C]// 中国土木工程学会防护工程分会第六次学术会议论文集,昆明,1998,11:239-243.
- [5] 赵巨岩,白春华. 装药位置对震塌高度的影响[J]. 工程爆破,2005,11(1): 22-24.
- [6] 王后裕,陈上明,言志信,等. 爆炸荷载作用下既有地下结构衬砌破损问题的数值模拟[C]// 中国土木工程学会防护工程分会第十次学术年会论文集,乌鲁木齐, 2006,8:341-346.
- [7] 李秀地,徐干成,郑颖人. 爆炸荷载作用下地下结构局部层裂分析[J]. 地下空间与工程学报,2005, 11(6): 853-855.
- [8] 鞠杨,夏敬昌,谢和平,等. 爆炸荷载作用下煤岩巷道底板破坏的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3664-3668.
- [9] 卢志芳. 爆炸荷载作用下长江隧道的动力响应和损伤分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
- [10] 王斌,金丰年,徐汉中,等. 装药爆炸临界震塌爆距的计算分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006,25(4):546-548.
- [11] 范新,章克凌,王明洋,等. 钢纤维喷射混凝土支护抗常规爆炸震塌能力研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(7):1437-1442.