

一种特殊锚固结构抗动载性能研究

曾宪明 赵健 李世民 林大路

(总参工程兵科研三所 河南洛阳 471023)

摘要:本文采用LS-DYNA有限元软件,对分别采用一般锚固结构和特殊类型复合锚固结构加固支护的洞室在爆炸荷载作用下的性能进行了数值模拟。文中着重分析了在爆炸条件下应力波传播及爆坑形成过程、爆炸近区围岩中的压力波和复合锚固结构构造措施区断裂缝形成过程,同时与试验结果进行了比较,并对其作用机理进行了分析。结果表明:两个模型的计算爆坑大小与试验结果基本吻合;新型复合锚固构造措施段使得锚固区外的弱化区介质内出现了局部自由面,当爆炸应力波经过自由面时所产生的反射拉伸波导致该处裂缝产生;复合锚固结构洞室拱顶垂直向振动加速度峰值比单一锚固结构洞室的约小23.7%;单一锚固结构洞室比复合锚固结构洞室更容易出现结构性的冲切破坏和拉伸剥落破坏。

关键词:复合锚固类结构 抗爆性能 数值模拟

1 概述

锚固类结构是指锚杆、锚索、土钉一类岩土工程加固支护结构。复合锚固类结构是指各种单一锚固结构彼此或与其他各种传统工法联合使用的一类岩土工程加固支护结构。按照定义,土钉支护和复合土钉支护可分别归类于锚固类和复合锚固类结构之中。大量工程实践、试验研究与理论分析计算业已证实和证明,土钉支护具有良好抗静载性能和优越经济技术效果,可在城建、交通、铁路、冶金、水电、煤炭和人防等行业广泛应用^[1-2]。据报道,1989年美国加州北部发生7.1级的Loma Prieta地震,使国道1-880和地方道路上的许多桥梁、挡土墙工程等遭到严重破坏。而震区内的8个土钉墙工程(其中有3个位于震中33km范围内),其结构均未出现损坏迹象。这表明,土钉墙结构抗震性能也很好。土钉支护抗爆性能如何?国内外均未见报道。一般爆炸荷载与地震荷载作用时间相差2~3个数量级,作用方式有别,一般不可比拟。以往国内外做过大量锚杆喷射混凝土抗不同爆炸荷载试验研究,获得许多有价值成果。但土钉支护与喷锚支护的工作特性、作用机理及设计方法尚有一定差异,简单移植或借用锚杆支护的成果结论于土钉支护,似乎不合适、不合理也不科学。

本文所研究的新型复合锚固结构是指“注浆土钉-构造措施”型。“构造措施”是指在土钉

里端规律设置一段表面经过处理的空孔,填以特殊材料构成,如图1所示。这种新型复合结构型式主要用于地下空间的加固支护上,如图2所示^[3]。

本文采用数值模拟的方法对这种特殊锚固结构抗动载性能进行了分析,并与试验结果作了比较。

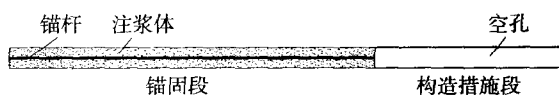


图1 新型复合锚固结构

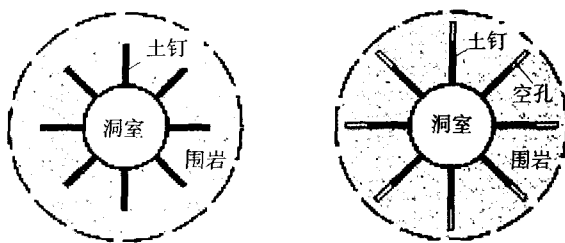


图2 单一锚固结构、新型复合锚固结构加固洞室示意图

2 模型建立

本次数值模拟涉及到爆炸流场的传播、结构动力响应、围岩中应力波传播三个方面问题,拟采用比较成熟的商业程序ANSYS/LS-DYNA^[4,7](970版)进行模拟分析。该程序是通用显式非线性动力分析有限元程序,可以求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等接触非线性、冲击荷载非线性和材料非线性问题。

本次数值模拟的主要目的是通过数值计算定量和定性地对两种锚固结构的抗爆性能，与试验结果进行相互验证，了解新型复合锚固结构构造措施段微观结构的演化过程，并对其作用机理作出分析。考虑到实际试验条件十分复杂，数值模拟不可能完全再现试验条件及试验中炸药爆炸与结构的相互作用过程，因此对问题作了必要简化处理。

计算模型对应于现场试验^[8]，即装药量为4200g、单一锚固结构洞室首次出现破坏时情形。取实际问题正中间的一个薄层进行分析，作“准二维”的近似，使用单层网格计算。

有限元模型由炸药、空气、围岩和锚固区四部分组成，见图3，其中复合锚固结构模型中空孔的尺寸与试验设计尺寸一致。建立二分之一模型，单层网格。采用多物质流耦合分析方法，炸药和空气采用欧拉算法，围岩和锚固区采用拉格朗日算法。炸药的起爆点与试验一致，在炸药上表面以下的1.25cm处（在炸药对称面上）。空气域与围岩结构相互交错，以提供炸药材料的可能流动空间。

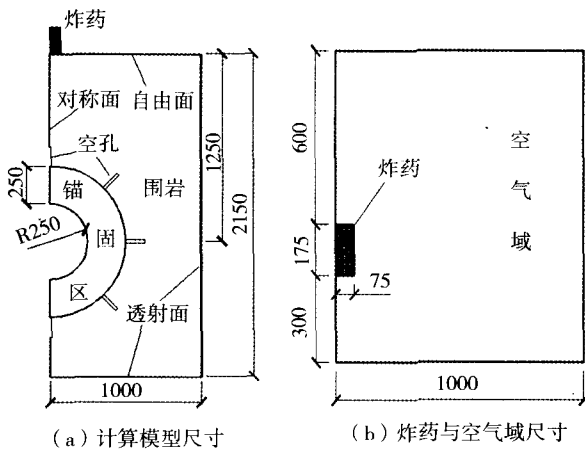


图3 计算模型及尺寸(单位: mm)

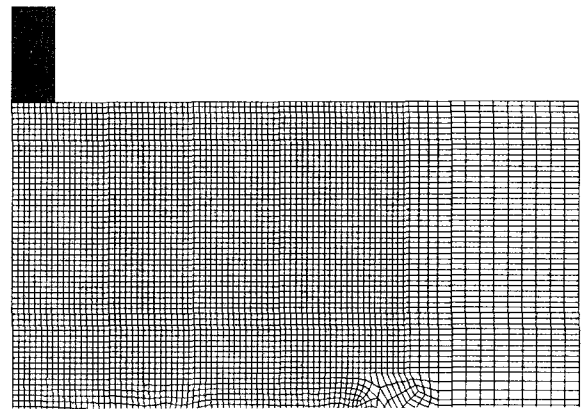
在对称面上施加对称约束，对整个模型施加厚度方向的约束，对模型底面及侧面施加透射边界，结构上表面为自由面，如图4a所示。

单位制采用cm-g- μ s制。计算时间取为700 μ s，每2.5 μ s输出一个结果数据文件。

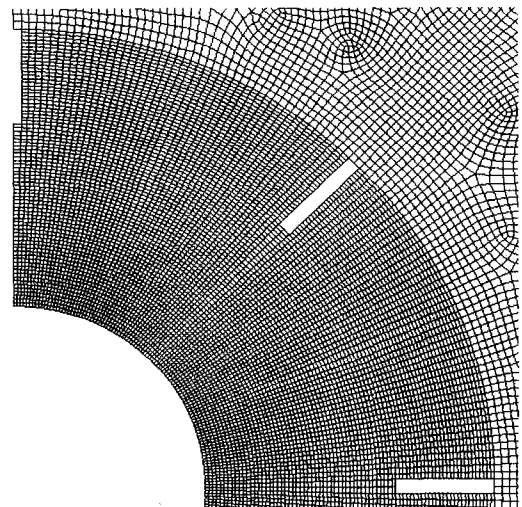
模型网格划分如图4所示。爆炸近区，单元大小为1 \times 1cm；锚固区及邻近锚固区的围岩网格

较密，大小控制在1 \times 1cm以内，爆炸远区及洞室远区围岩网格划分相对稀疏一些。炸药与空气域的网格共节点，大小控制在1 \times 1cm以内。单一锚固结构整个计算模型的单元数量为37393个，复合锚固结构整个计算模型的单元数量为37177个。

除复合锚固结构有限元模型有构造措施段(空孔)外，两个计算模型的大小，边界条件及网格划分完全一致。



(a) 炸药与爆炸近区围岩的网格



(b) 锚固区及围岩的网格

图4 计算模型的有限元网格

3 计算结果

计算单位制采用的是cm-g- μ s制，因此输出的计算结果中，位移单位为cm，时间单位为 μ s，压力或应力单位换算为标准单位制后为 10^{11} Pa，加速度单位换算为标准单位制后为

10^{10} m/s^2 。

3.1 应力波传播及爆坑形成过程

应力波在结构内的传播及爆坑的形成过程如图5~图9所示。应力波在经过复合锚固结构构造措施段区域的围岩介质时，围岩介质中出现了裂缝。

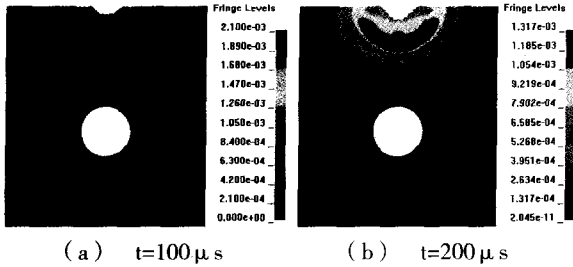


图5 $t=100, 200 \mu\text{s}$ 时结构的等效应力分布及爆坑

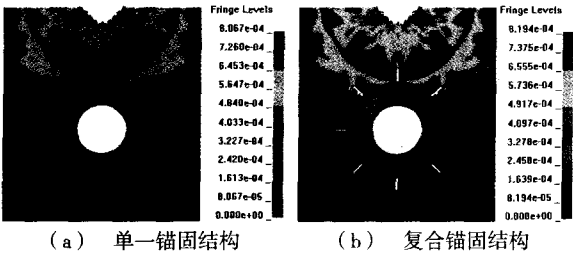


图6 $t=350 \mu\text{s}$ 时结构的等效应力分布及爆坑

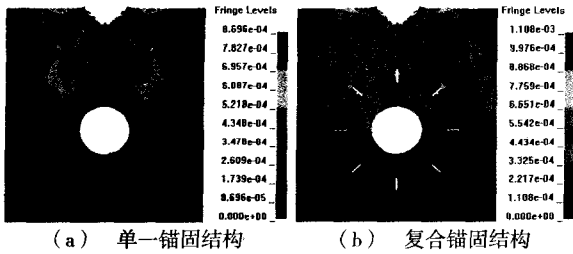


图7 $t=450 \mu\text{s}$ 时结构的等效应力分布及爆坑

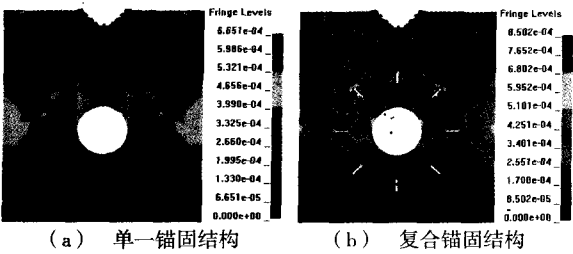


图8 $t=550 \mu\text{s}$ 时结构的等效应力分布及爆坑

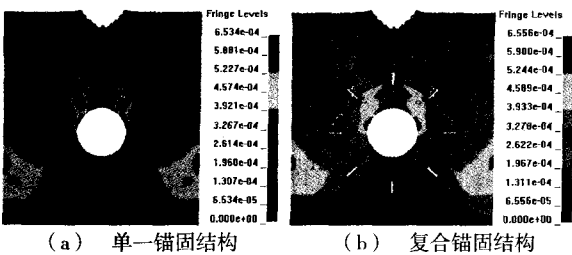


图9 $t=700 \mu\text{s}$ 时结构的等效应力分布及爆坑

3.2 爆炸近区围岩中的压力波

选取炸药下方25cm, 35cm及45cm处的三个围岩介质单元(见图10, 单元号为16293、16283及16274), 给出它们的压力时程曲线, 见图11。



图10 爆炸近区的三个围岩单元

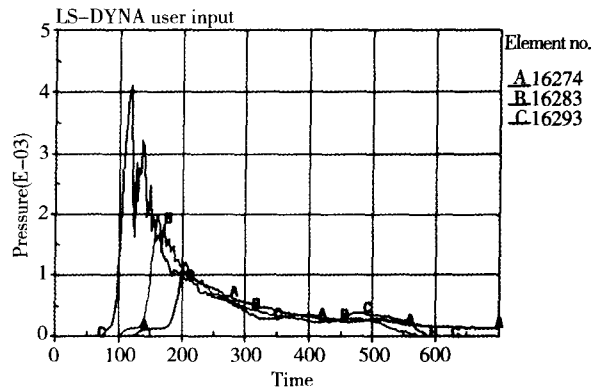


图11 爆炸近区围岩中的压力波形

3.3 复合锚固结构构造措施段裂缝形成过程

计算结果显示, 应力波经过复合锚固结构构造措施段时, 在其周围围岩介质中出现了裂缝, 其形成及发展过程见图12。

空孔区域围岩出现裂缝时, 其压力场如图13所示。一个裂缝失效单元的压力时程曲线如图14所示。

4 计算结果与试验结果分析

4.1 爆坑形成及应力波传播分析

爆炸近区网格单元尺寸为 $1 \times 1 \text{ cm}$ 。单一锚固结构模型爆坑中心垂直方向侵蚀单元数量为13个, 坑底单元节点的垂直向位移为 -4.2 cm , 因而

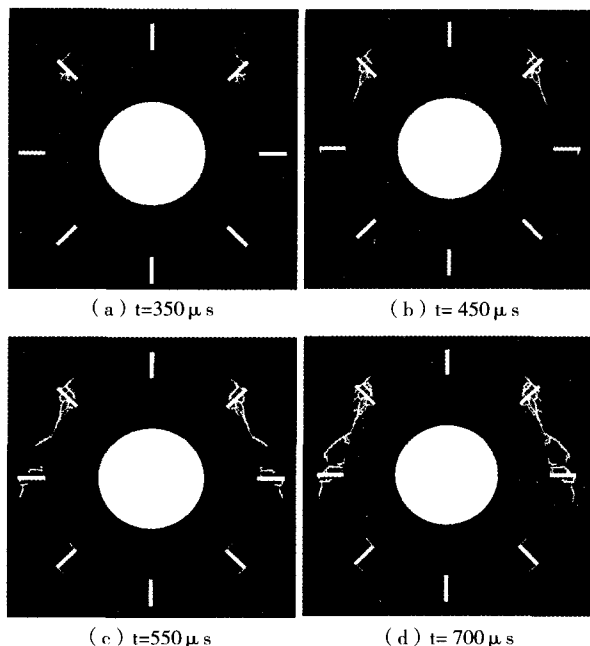


图12 构造措施段区域围岩中裂缝的形成和扩展

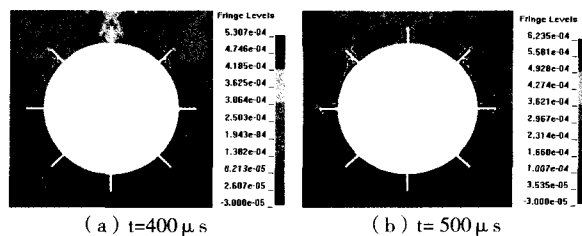


图13 空孔周围的压力分布

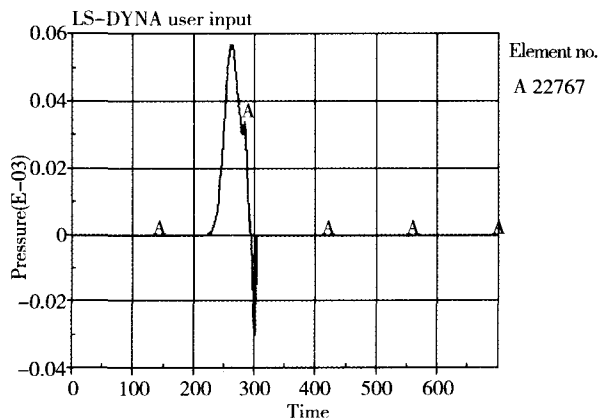


图14 一个裂缝失效单元的压力时程曲线

得出计算爆坑深度为17.2cm；爆坑边沿水平向侵蚀单元数量为19个，爆坑边沿单元节点的水平向位移为3.5cm，因而得出计算爆坑口部大小为45cm（22.5cm×2）。同理，得出复合锚固结构模型爆坑深度为17.8cm，爆坑口部大小为45cm。两个模型就爆坑大小而言，计算结果一致。

在与计算相对应的现场试验中，两个试件爆坑深度都是12cm，比计算值小30.2%~32.5%。考虑到试验过程中由于受现场施工条件限制，清理爆坑时不可能完全挖至爆坑坑底，因此，试验中观测的爆坑深度可能偏小。这表明，计算爆坑的大小与试验结果是基本吻合的。

计算得到的爆炸近区的压力波（图11）具有典型的爆炸压力波形态，峰值和衰减特征明显，符合爆炸压力波的一般特征，与文^[9, 11]给出的压力波或应力波形态基本一致，表明结构内的爆炸荷载具有较高置信度。

爆坑的形成是单元压缩屈服且以最大等效塑性应变作为材料屈服失效准则的结果。爆坑大小结果及爆炸近区荷载结果都表明计算中给定的材料参数值是较可靠的。

通过观察结构的等效力云图（图5~图9）及分析结构底部单元的压力时程曲线，可以得出700μs后，应力波峰值已基本传至整个模型。此外，由于在LS-DYNA中设定的透射边界并不是完全的非反射边界，当模型尺寸不大时，在透射边界上仍有一定强度的反射波，因而取700μs的计算时间是保守的，该时段内的计算结果是较可靠的。

如图6、图7所示，与单一锚固结构模型相比，应力波在经过复合锚固结构构造措施段区域围岩介质时，波阵面形态明显不同，复合锚固结构的空孔对洞室起到了一定的屏蔽作用，在这些空孔区域围岩介质中的等效力场强度很低。这是空孔的卸载作用所致。

4.2 复合锚固结构构造措施段裂缝成因分析

分析复合锚固结构空孔周围的压力场（图13）及裂缝失效单元的压力时程曲线（图14）表明，在空孔区域裂缝周围的压力场主要为拉力场。这是由于在空孔处存在局部自由面，当压力波经过这些空孔时，发生局部反射，空孔周围形成拉伸作用，而混凝土这类材料的抗拉强度相对较低，因而在空孔处出现了单元的拉伸失效，从而产生了裂缝。

本次计算中,围岩介质单元拉伸失效的准则是按照“当 $P \leq -T$ 时单元失效”规定的,未考虑损伤的影响,即不是按照“当 $P \leq -T(1-D)$ 时单元失效”规定的,因而出现的破坏偏少,如果考虑损伤将会出现更多的破坏(如裂缝增多)。

在动载作用下,构造措施段的作用可以认为包括“三介质”效应,动应力集中效应,“材料效应”,应力波导流效应,应力波会聚效应等。其中,三介质效应是指在锚固区以外的介质中布设大量空孔后,使该区域介质产生整体弱化,稳定性降低,且降低了构造措施段周围介质的波阻抗(ρC),减小了应力波的透射系数,使得原有介质从二介质系统(围岩-锚固区)变为三介质系统(围岩-弱化区-锚固区),由于弱化区在爆炸过程中不断劣化而吸收爆炸能,从而降低了传至锚固区介质的应力波峰值;材料效应是指围岩介质通常属于抗拉性能很低的脆性介质,而构造措施段使得围岩介质的这种材料性质表现出来,构造措施段使得锚固区以外的围岩介质出现了局部自由面,爆炸压力波经过这些局部自由面时产生反射的卸载拉伸波,使这些局部自由面处的介质出现了破坏,从而有效地降低了爆炸波强度。

构造措施段的这些综合作用减弱了锚固区的受力。本次数值模拟仅是较好地显示了构造措施段的材料效应等,但定量地区分这些效应的“贡献”份额是较困难的。

实际试验过程中是由低到高逐级累次加载的,构造措施段处已产生的裂缝必将为下次加载进一步增强其效应。因而,在累次加载作用下,相对于单一锚固结构,复合锚固结构构造措施段将会产生更明显的抗爆效应。如果数值模拟采用重启动分析的方法,将会观察到这种累次爆炸作用后的结果。

5 结论

采用LS-DYNA程序较成功地模拟了两种锚固结构的抗爆性能,较好地动态显示了整个结构的微观演化过程,计算中所给定的材料参数具有较

高的置信度,所采用的模拟方法也较为合理,主要得出了以下结论。

(1) 两个模型的计算爆坑大小与试验结果基本一致,平均误差为31.4%。

(2) 复合锚固结构构造措施段周围出现了裂缝,主要是构造措施段的材料效应所致,即构造措施段使得锚固区外的介质内出现了局部自由面,当爆炸应力波经过构造措施段时,在这些局部自由面处产生反射拉伸波,而围岩又是抗拉性能较低的介质,因而在构造措施段处产生了裂缝。

(3) 复合锚固结构洞室的变形和振动显著小于单一锚固结构洞室,前者洞室拱顶垂直向振动加速度峰值比后者的约小23.7%。

(4) 相对于复合锚固结构洞室,单一锚固结构洞室易出现结构性的冲切破坏和拉伸剥落破坏。这一规律与试验结果一致。

参考文献

- [1] 陈肇元,崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用(第一版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [2] 喻晓今,曾宪明. 土钉瞬态应力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊1): 4438-4441
- [3] 曾宪明,李世民,林大路. 新型复合锚固结构静力弱化效应试验研究[J]. 防护工程, 2008, (4): 20-25
- [4] 苏立君,韩波,廖红建等. 土钉支护体系的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊1): 1269-1273
- [5] LS-DYNA Keyword Manual version 970 [R]. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2003.
- [6] M' hamed Souli. LS-DYNA Advanced Course in ALE and Fluid-Structure Coupling[R]. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, 2002.
- [7] J.O.HALLQUIST. LS-DYNA 970 Theoretical Manual [R]. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 1998.
- [8] 李世民,曾宪明等. 锚固类结构抗爆性能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2)
- [9] 荣耀,许锡宾. 锚杆对应力波传播影响的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 115-119
- [10] Zheng Quanping, Zhou Zaosheng, etc. Study on application of principle of dynamic stress detour to increase resistance of protective structure. Proc of the 9th Int Conf on Computer Methods and Advances in Geomechanics, WUHAN CHINA, Nov, 1997.
- [11] 喻晓今,余学文. 数种情形下土钉的瞬态应变累积效应分析[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(4): 1-4