

文章编号: 1001-1455(2010)05-0541-05

地下防护结构在冲击载荷作用下的动态破坏过程*

李旭东¹, 刘凯欣², 闫鸿浩³, 李晓杰³, 王 帅²

(1. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028;

2. 北京大学工学院力学与空天技术系湍流与复杂系统研究国家重点实验室, 北京 100871;

3. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过数字高速摄影技术和动态电测技术, 对马蹄形地下防护结构在冲击载荷作用下的动态破坏过程进行了缩比模型实验研究。结果表明, 底部是整个马蹄形结构最为脆弱的部分, 需要重点防护。在结构内层加装钢板或其他高强度防护材料会显著提高该种结构的抗冲击能力。结构的破坏是一个动态累积的过程, 而材料的抗拉强度直接影响这类结构的抗毁伤能力。通过获得的实验数据验证了采用 LS-DYNA 有限元软件对于地下防护结构在冲击载荷作用下破坏过程进行研究的可行性和准确性。

关键词: 固体力学; 动态破坏; 数字高速摄影; 地下防护结构; 抗毁伤

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·1565

文献标志码: A

1 引言

深钻地弹武器的发展对地下防护工程已构成严重的威胁, 对地下防护工程的研究近年来成为了冲击工程领域研究的一个热点^[1-4], 但非常缺乏有效的实验数据。

本文中, 通过数字高速摄影技术和动态电测实验技术, 对马蹄形地下防护结构在冲击载荷作用下的动态破坏过程进行缩比模型实验研究, 了解马蹄形地下防护结构在冲击载荷作用下破坏过程的一些重要特点和规律。并且, 通过这些实验数据验证采用 LS-DYNA 显式动力学有限元计算软件对于地下防护结构在冲击载荷作用下的破坏过程进行数值计算分析的可行性和正确性。

2 缩比模型实验

2.1 实验模型试件

马蹄形地下防护结构缩比模型试件在水泥砂浆质基体上, 按照不同的厚度内嵌了泡沫混凝土和 C30 混凝土, 如图 1 所示, 所用的混凝土类材料的配比和制作方法见表 1。在实验中, 部分马蹄形模型试件的内部紧贴着内壁加装了 1 层钢板。

整个模型试件可以分为 2 部分: 处于上部、横截面呈锥型的加载头和处于下部的试件。加载头和试件在接触端(即试件的上端)通过混凝土粘合剂粘接, 试件的下端与地面间垫有橡胶垫。设计和使用时横截面呈锥型的加载头, 是为了使入射波在变截面处得到透射加强, 提高生成载荷的强度。

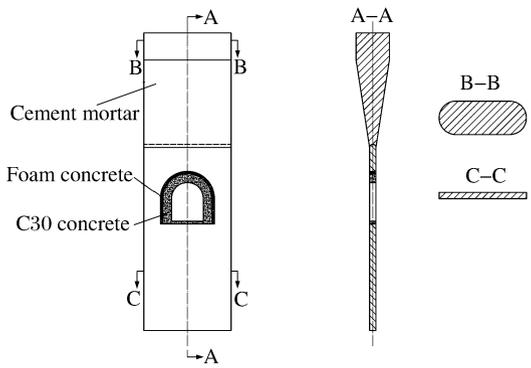


图 1 试件结构

Fig. 1 Structure of the specimen

* 收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572002, 10732010)

作者简介: 李旭东(1979—), 男, 博士, 高级工程师。

表 1 混凝土类材料的成分配比

Table 1 Component proportions of concrete materials

混凝土种类	质量配比	养护方法
水泥砂浆	膨胀剂:325#水泥:砂:水=0.1:0.9:3.0:0.5	振动压实,养护 28 d
泡沫混凝土	石膏:325#水泥:砂:水=0.1:0.9:3.0:0.5	养护 28 d

注:所用砂为颗粒直径不大于 1 mm 的细砂,C30 混凝土中的骨料颗粒直径小于 5 mm。

2.2 实验系统和方法

如图 2 所示,实验系统的最上端是一个载荷发生器,通过该发生器可以产生一个特定的强冲击载荷作用到试件的上端。基本工作原理是,通过引爆雷管炸开用以分离载荷发生器内部高压气室和水箱之间的铝板,实现高压气室和水箱间的联通,将压缩空气瞬间释放,作用力经由水介质作用到试件上,产生满足特定规律的冲击载荷。

实验时,以雷管爆炸的瞬间作为零时刻给出同步信号。该信号经同步触发电路,触发 FAST-CAM-ultima PAX-i2 型数字高速摄影机开始工作,以 20 ms^{-1} 的拍摄速度和 128×256 的分辨率,记录冲击载荷作用下马蹄形地下防护结构模型试件的动态破坏过程;同时,该同步信号通过 DS310 型数字延时同步机,同步触发 Tektronix TDS2024 型数字示波器,记录经 SDY2107 型超动态应变仪放大的、4 路电阻应变片的应变信号,从而通过电阻应变片动态电测系统获得马蹄形地下防护结构模型试件上 4 点应变随时间的变化过程。此外,载荷发生器内部放置了压电传感器,通过自触发模式触发数据采集系统,记录实验中载荷发生器实际产生的载荷波形,该波形将用于通过数值计算分析实验过程时有限元模型的建立。

2.3 实验结果及分析

实验共进行了 10 发余,取得了较多的实验数据,而且重复性良好。

2.3.1 动态破坏过程

图 3 为冲击载荷作用下马蹄形地下防护结构缩比模型的动态破坏过程。

由图 3(a)可见,载荷发生器形成的入射压缩波在试件的底端反射后形成拉伸波(模型试件的底部均垫有橡胶垫),反射拉伸波向上传播至马蹄形试件的底部,并产生了第 1 道裂纹;此后,应力波继续在上端和下端间来回反射和传播,经历约 1.6 ms 后,应力波再次由试件的上端传播至马蹄形试件的拱顶部,产生了第 2 条裂缝。该裂缝首先沿着中轴线,在水泥砂浆与泡沫混凝土交界的地方产生,然后沿着水

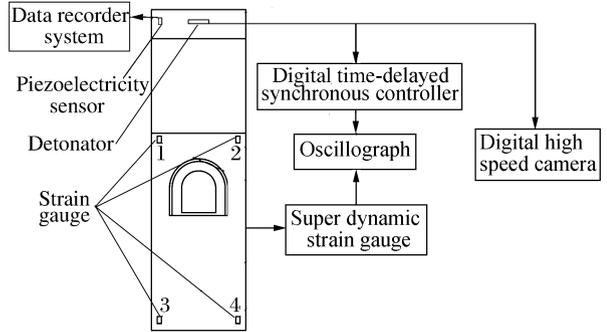
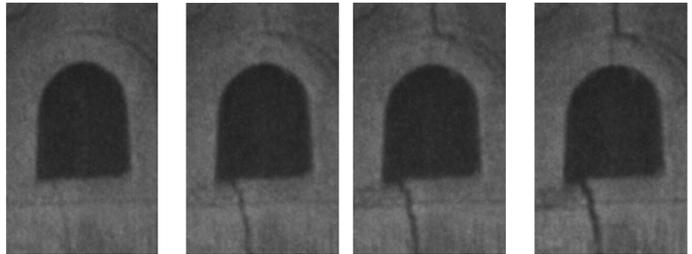


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Sketch of the experiment system

(a) With the inner steel plate



(b) Without the inner steel plate

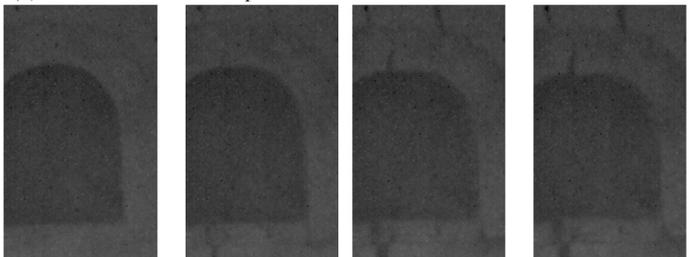


图 3 马蹄形试件的动态破坏过程

Fig. 3 Dynamic damage process of horseshoe-shaped specimens

泥砂浆基体向上扩展。而在马蹄形结构的底部,随着先期产生的第 1 条裂缝的加剧,马蹄形结构的下端向上翘起,产生了严重的破坏。

由图 3(b)可见,内层未加装钢板的试件的破坏过程,与内层加装钢板的试件的破坏过程非常类似,也是在反射拉伸波的作用下,马蹄形结构的底部首先沿着 C30 材料的内壁开裂,并且裂缝沿着下部的水泥砂浆基体继续张开。同样,结构的拱顶也随后出现开裂,而且,由于内层没有加装钢板作为支撑,使得整个拱顶垮塌了下来。

由此可知马蹄形地下防护结构在冲击载荷作用下动态毁伤过程的特点和规律:

(1)马蹄形结构的底部是整个结构最为脆弱的部分,在反射拉伸波的作用下,结构在此处最先开裂,并且随着破坏程度的加剧和累积,整个底部向上翘起,严重破坏了整体结构,需要着重加强防护。此外,马蹄形结构的拱顶部位沿中轴线也都出现了巨大的裂缝,同样是需要予以重点防护的区域。

(2)在内层加装钢板或其他高强度防护材料,可以提高马蹄形地下防护结构的抗冲击能力。如果不加装内层高强度防护结构,随着马蹄形防护结构在拱顶出现巨大的裂缝和严重的破坏,结构顶部会整体垮塌下来。在内层加装了钢板后,由于高强度内壁对整个结构起到了支撑作用,整个结构最终也没有垮塌。加装了内层钢板的试件在实验结束后仍然是一个结构完整的整体,而没有加装内层钢板的试件全部垮塌成一堆碎片。图 4 给出了加装了内层防护钢板的模型试件在实验前后的状态。



图 4 内层加装钢板的试件在实验前后的形态

Fig. 4 Appearance of the specimen with the inner steel plate before and after experiment

(3)结构的开裂并不是初次入射的应力波刚传播时就产生的,而是应力波在结构内部经多次入射、反射后才产生的,是动态累积的过程。该累积过程造成了对马蹄形地下防护结构拱顶部位的压弯破坏,结构内侧形成了拉应力集中区,拉应力破坏模式在整个破坏过程中起主要作用,材料的抗拉强度直接影响这类结构的抗毁伤能力。

2.3.2 应变和载荷

图 5 为内层加装钢板的地下防护结构模型中 4 点应变随时间的变化过程。可以看到:初始入射压缩波在由试件的上端传播至下端的过程中明显出现了衰减;入射压缩波在试件的下端反射后形成反射拉伸波。图 6 为载荷发生器生成和实际作用到试件上的载荷。

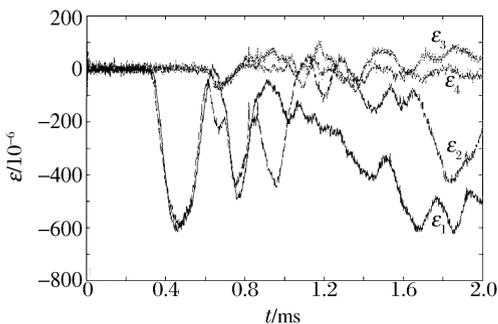


图 5 结构中应变随时间的变化

Fig. 5 Variations of strain with time in the structure

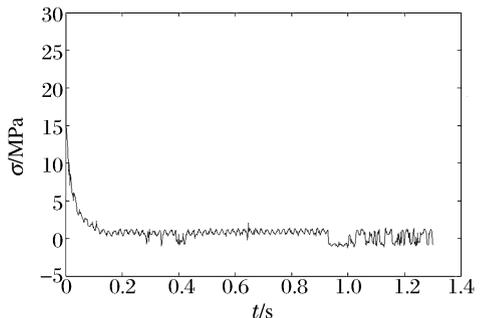


图 6 载荷发生器生成的载荷

Fig. 6 Loading generated by the loading generator

3 数值计算分析

采用 LS-DYNA 显式动力学有限元软件,对内层加装钢板的马蹄形地下防护结构缩比模型在冲击载荷作用下的动态破坏过程进行了数值模拟。几何模型的 3D 建模与图 1 实际结构一致。水泥砂浆、泡沫混凝土和 C30 混凝土采用体单元 Solid 164 划分网格,并且在结构的内部紧贴着拱形内壁用 Shell 163 壳单元添加了一层钢板。水泥砂浆和 C30 混凝土采用 * MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 材料模型,钢板采用 * MAT_JOHNSON_COOK 材料模型,泡沫混凝土采用 * MAT_CRUSHABLE_FOAM 材料模型。全部模型参数由前期进行的系列材料参数测试实验及相关文献中获得^[5-6]。根据实验中测得的多组载荷发生器产生的实际载荷曲线,确定加载载荷的升载时间为 150 μs 。在计算过程中,结构底端固定,其余表面自由。

通过数值计算得到的内层加装钢板的马蹄形地下防护结构缩比模型破坏形态,与实验结果基本一致。图 7 为马蹄形地下防护结构模型中应变片 2 处沿竖直方向正应变随时间的变化过程。由于实验中试件的下端与地面之间垫有橡胶垫,这种边界条件既不是固支、简支,也不是自由端,不能严格对应数值计算中的精确约束。但是,对比此前未受反射波干扰的第 1 个入射波峰值的大小及随时间的变化规律,可以看出,数值模拟所得的结果与实验中应变片的实测结果比较吻合。

4 结论

通过数字高速摄影技术和动态电测技术,获得了内层加装钢板和未加装钢板的 2 种马蹄形地下防护结构缩比模型,在冲击载荷作用下动态毁伤过程的实验数据。由实验可知:

(1) 马蹄形结构的底部在整个结构中最脆弱,结构在此处将最先开裂,严重破坏整体结构;马蹄形结构的拱顶部位也会沿中轴线出现巨大裂缝。

(2) 在内层加装钢板或其他高强度防护材料,可以提高马蹄形地下防护结构的抗冲击能力。

(3) 在冲击载荷作用下地下防护结构的开裂是一个动态累积的过程。拉应力破坏模式在整个破坏过程中起主要作用,材料的抗拉强度直接影响这类结构的抗毁伤能力。

用 LS-DYNA 软件对缩比模型实验进行了数值计算分析。经实验结果验证,选择了合适的材料模型和参数,数值计算可以较准确地模拟地下防护结构的缩比模型在冲击载荷作用下的动态毁伤过程。这可为相关问题原型的数值计算分析提供参考。

参考文献:

- [1] 曹志远,曾三平. 爆炸波作用下地下防护结构与围岩的非线性动力相互作用分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 385-390.
- [2] CAO Zhi-yuan, ZENG San-ping. Nonlinear dynamic interaction between underground structure and surrounding medium under blast loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 385-390.
- [3] 李志成,黄小平,钱七虎. 防护结构拟动力试验方法及其数值积分方法研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(1): 26-34.
- [4] LI Zhi-cheng, HUANG Xiao-ping, QIAN Qi-hu. Pseudo-dynamic testing of protective structures and study of numerical integration method[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(1): 26-34.
- [5] 刘殿书,冯明德,王代华. 复合防护结构的动力响应及破坏规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3): 335-338.

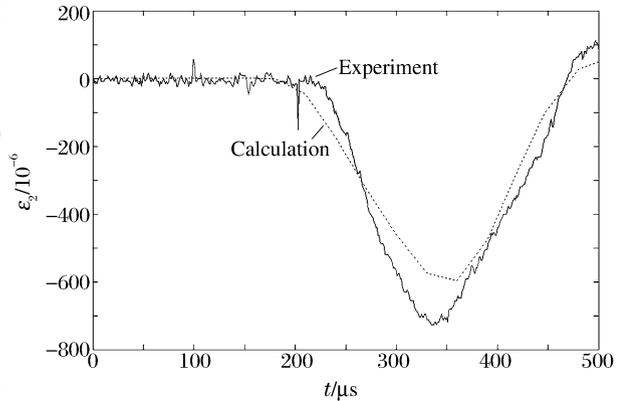


图 7 马蹄形地下防护结构应变随时间的变化

Fig. 7 Variations of strain with time in the horseshoe-shaped underground protective structure

LIU Dian-shu, FENG Ming-de, WANG Dai-hua. Research on dynamic response and failure law of composite protective structure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007,36(3):335-338.

[4] 方秦,钱七虎. 防护结构设计中应变速率效应问题[J]. 爆炸与冲击,1997,17(2):104-110.

FANG Qin, QIAN Qi-hu. Discussion on the consideration of the ratesensitivity in design of protective structures [J]. Explosion and Shock Waves, 1997,17(2):104-110.

[5] 陈建林,李旭东,刘凯欣. 素混凝土本构模型参数的试验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2008,44(5):689-694.

CHEN Jian-lin, LI Xu-dong, LIU Kai-xin. Experimental research on parameters of constitutive model for a cement mortar[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008,44(5):689-694.

[6] 李旭东,刘凯欣,张光升,等. 冲击波在水泥砂浆板中的聚集效应[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008,48(8):1272-1275.

LI Xu-dong, LIU Kai-xin, ZHANG Guang-sheng, et al. Focusing of shock waves in cement mortar plates[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008,48(8):1272-1275.

Dynamic damage process of an underground protective structure subjected to impact loading*

LI Xu-dong¹, LIU Kai-xin², YAN Hong-hao³, LI Xiao-jie³, WANG Shuai²

(1. China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China;

2. State Key Laboratory of Turbulence and Complex Systems, Department of Mechanics & Aerospace Engineering, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: By adopting the digital high-speed photography and dynamic electrical measurement technique, a scale-reduced model was designed to experimentally investigate the dynamic damage process of a horseshoe-shaped underground protective structure under impact loading. Experimental results indicate that the bottom is the weakest part of the horseshoe-shaped structure and need be protected excessively. The shock resistance of this kind of structure can be evidently improved by adding steel plates or other high-strength protecting materials in its inner layer. The scale-reduced experiment was simulated numerically by using the LS-DYNA finite element software. The numerical results are in agreement with the experimental results. It displays that the LS-DYNA finite element software is feasible to be used to simulate the dynamic damage process of the scale-reduced model for horseshoe-shaped underground protective structures.

Key words: solid mechanics; dynamic damage; digital high-speed photography; underground protective structure; anti-damage

* Received 30 June 2009; Revised 31 August 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10572002,10732010)

Corresponding author: LI Xu-dong, lixudong08@gmail.com