

# 喷锚支护洞室抗爆现场试验洞顶位移研究

马海春<sup>1</sup>, 顾金才<sup>2</sup>, 张向阳<sup>2</sup>, 徐景茂<sup>2</sup>, 高光发<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 地下工程设施的稳定性是岩土工程重要研究内容, 如何提高爆炸荷载下洞室的抗爆能力对国防和民用工程都有重要的意义。因此, 开展现场洞室抗爆实验研究有着重要的战略意义。从喷锚支护洞室抗爆现场试验角度, 介绍不同的支护条件即长密锚杆、短密锚杆、常规锚杆三种不同条件下洞顶部位在上部爆炸条件下洞顶位移的特征。另外, 对使用两种不同垫板的锚杆支护下洞顶位移做了对比, 分析得到碗形垫板支护效果好于板形垫板支护效果的结论。文中还分析了洞顶与洞室跨度相对位移与爆炸比例距离的关系。通过本次试验以寻找最好的锚固效果, 为实际工程提供借鉴。

**关键词:** 抗爆能力; 洞室; 锚杆; 位移; 试验

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0369-04

**作者简介:** 马海春(1983-), 男, 安徽滁州人, 博士研究生, 从事岩土工程研究与结构抗爆。E-mail: mhaichun@mail.ustc.edu.cn。

## Displacement at top of underground cavern reinforced by grouted bolts during site explosion resisting tests

MA Hai-chun<sup>1</sup>, GU Jin-cai<sup>2</sup>, ZHANG xiang-yang<sup>2</sup>, XU Jing-mao<sup>2</sup>, GAO Guang-fa<sup>1</sup>

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. The Third Scientific Research Institute of the Corps of Engineers, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The stabilities of underground facilities are the important research contents of geotechnical engineering. It is meaningful to improve the explosion resisting abilities of underground caverns for national defense and civil projects. So it has important strategic significance to carry out site explosion resisting tests on underground caverns. The displacement characteristics at the top of an underground cavern under three different conditions are introduced, that is long and close cables, short and close cables and regular cables. Furthermore, the situations that two kinds of base plates are used for cables to protect the displacement of the top of the cavern are compared. A conclusion that the protecting effects of flaring cup base plates are better than paddle base plates is put forward. This passage also analyses the relationship between the relative displacement at the top of the cavern divided by the span of the cavern and the scale distance of the explosion is analyzed. It is helpful for searching for the best protecting effects for practical projects.

**Key words:** explosion resisting capacity; underground cavern; bolt; displacement; test

## 0 引言

现代战争中, 地下洞室将直接面临着各种钻地武器的直接打击, 提高洞室的抗爆能力有着重要的战略意义。在这方面国内学者外已经做了很多的相关研究<sup>[1-10]</sup>。利用锚杆提高洞室的稳定性是一种切实可行的支护技术类型, 但是不同的锚杆支护形式有不同的支护效果, 要取得最好的支护效果, 必须进行合理的实验和理论研究。因此开展爆炸荷载条件下, 不同种锚杆支护形式的洞室位移研究, 对于研究洞室锚固效果, 提高地下各种工程设施有着重要的意义。

## 1 试验介绍

现场试验内容共有常规锚杆试验类型、短密锚杆试验类型和长密锚杆试验类型 3 种支护类型。其中, 常规锚杆和短密锚杆实验的分布图分别见图 1, 2, 长密锚杆的分布位置与短密相同, 仅长度不同, 其中短密锚杆长为 1 m, 而长密和常规采用锚杆长度为 1.5 m。试验洞室跨度 3.0 m, 高 2.5 m。锚杆均为直径  $\Phi$  25 mm 的螺纹钢筋, 全长注浆, 其中注浆孔的大小是 5 mm。

注浆材料配比为水泥：砂：水：三乙醇胺=2：1：0.8：0.0005。室内测得该注浆材料弹性模量为 14.75 GPa，抗压强度为 40 MPa，泊松比为 0.13。试验采用：板形垫板和碗形垫板，见图 3。两种锚杆垫板试验区分界均以爆心为准，爆心前方（即靠近洞口一方）为板形垫板区，爆心后方为碗形垫板区。

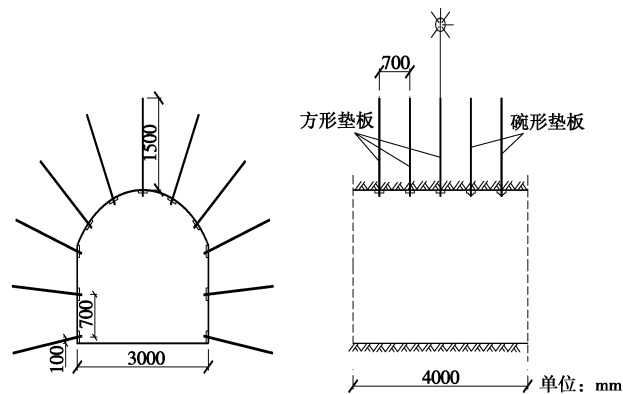


图 1 常规锚杆网喷试验类型锚杆布置  
Fig. 1 Distribution of regular cables

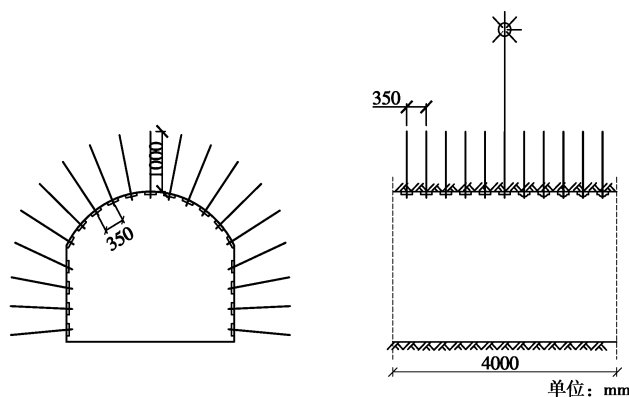


图 2 短密锚杆网喷试验类型锚杆布置  
Fig. 2 Distribution of short and close cables



图 3 板形和碗形垫板  
Fig. 3 Paddle base plate and flaring cup base plate

喷层喷射混凝土的施工采用干喷法，材料质量配比为水泥：水：砂=1：1：2。试验山体岩性以粗粒花岗岩为主。岩石矿物成分以正长岩、石英岩、斜长石为主，实测岩体纵波波速为 2300 m/s，说明岩体整体强度偏低。岩块抗压强度较高，约为 121.8 MPa，弹性模量为 33.7 GPa，泊松比为 0.2，密度为 2.71 T/m<sup>3</sup>。爆炸方案均按完全埋置爆炸条件： $h = m k_p \sqrt[3]{W} = 1.65 \times 0.58 \times \sqrt[3]{W}$  确定埋深，其中， $h$  是埋深深度 (m)， $k_p$  是相关常数， $W$  是炸药重量。对同一试验类型进行

6 次爆炸。第 1 炮为预备试验，最后 1 炮为破坏试验。对于常规锚杆试验类型和网喷试验类型，只进行前 5 次爆炸，最大药量为 14.4 kg。各炮次药量及埋深情况见表 1。

表 1 各炮次药量及埋深情况  
Table 1 Amount depth of every explosion

炮次	药量/kg	药包尺寸(长×宽×高)/cm	药包中心埋深/m	距洞顶/m
1	0.4	10×5×5	0.527	5.00
2	0.8	10×10×5	0.890	4.11
3	2.4	10×10×15	1.280	3.72
4	7.2	15×15×20	1.85	3.15
5	14.4	20×20×22.5	2.330	2.67
6	20.0	25×25×20	2.600	2.40

每个试验类型共有 6 个拱顶位移测点，布置在爆心两侧，分别测量板形垫板区和碗形状垫板区的拱顶位移。每个位移测点均安装两套位移测试系统，测点布置见图 4。

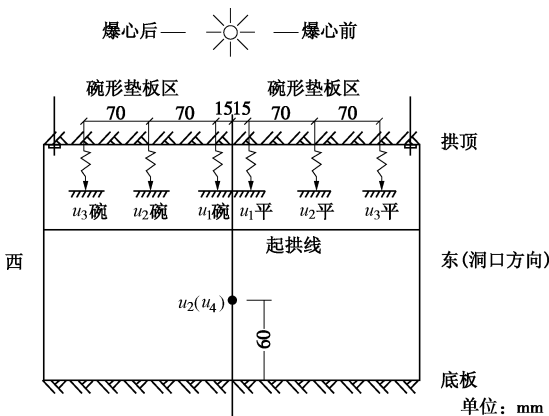


图 4 拱顶位移测试点分布  
Fig. 4 Distribution of displacement test points at top of cavern

## 2 结果分析

图 5~7 分别是短密、长密和常规锚杆支护类型下的洞室顶端位移，在炸药质量  $W=14.4$  kg，洞室顶部距爆炸中心距离  $R=2.67$  m， $R'=(R/W^{1/3})=1.10$  条件下，爆心下拱顶位移波形（位移以向上为正）。从图 5~7 中可以看出：

- (1) 各位移波形规律性很好，都有一个向下的最大位移峰值和一个较小的回向弹跳的较小峰值，然后是残余位移。
- (2) 从最大峰值位移所对应的时间看，常规锚杆的最大，43~47 ms 左右，短密锚杆和长密锚杆的较小，39~40 ms 左右。
- (3) 从最大峰值位移看，短密锚杆的最小，11~15 mm 左右，常规锚杆的最大，38~47 mm 左右，长密锚杆的居中，20~22 mm 左右。
- (4) 从同一个实验类型来看，碗形垫板的拱顶位

移比板形垫板的拱顶位移普遍偏小: 短密类型 11~15 mm 左右, 长密类型的 20~22 mm 左右, 常规类型的 38~47 mm 左右。

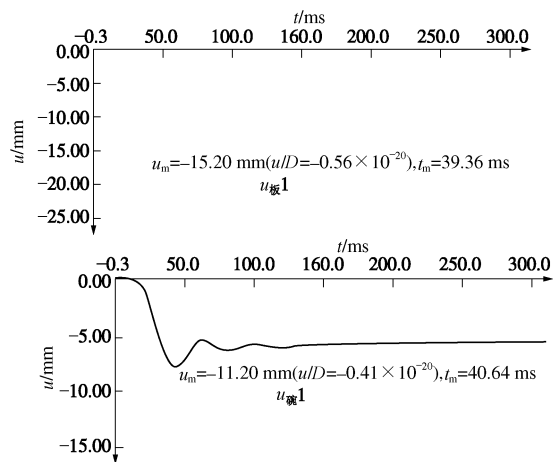


图 5 短密锚杆支护类型拱顶位移波形

Fig. 5 Displacement waves at top of cavern reinforced by grouted short and close cables

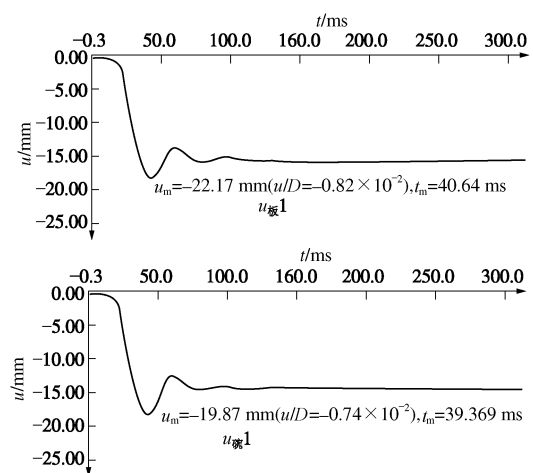


图 6 长密锚杆支护类型拱顶位移波形

Fig. 6 Displacement waves at top of cavern reinforced by grouted long and close cables

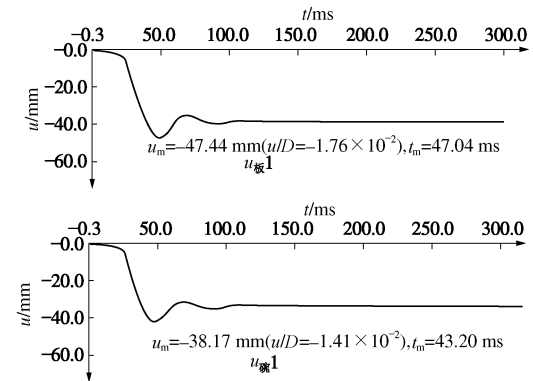


图 7 常规锚杆支护类型拱顶位移波形

Fig. 7 Displacement waves at top of cavern reinforced by regular cables

(5) 从各类型产生的残余位移数值看, 常规类型

的最大, 30~40 mm 左右; 短密类型的最小, 8~12 mm 左右; 长密类型的居中, 17~18 mm 左右。

图中还给出了各试验类型的相对位移值  $u/D$  ( $10^{-2}$ )。长密锚杆拱顶位移比短密锚杆拱顶位移大, 是由于长密锚杆末端更接近爆心, 从而受到的爆炸压力更大所致; 常规锚杆的拱顶位移最大, 除了锚杆较长, 受到的爆炸压力更大之外, 主要原因是由于锚杆密度不够, 对岩体提供的抗剪抗拉能力较小所致。

综上所述, 短密锚杆支护类型抗力最高, 长密锚杆支护类型抗力次之, 常规锚杆支护类型抗力最小。

各试验类型拱顶位移  $u$  与洞室跨度  $D$  的相对位移  $u/D$  与比例距离  $R/W^{1/3}$  之间的关系见图 8~10。从图 8~10 中可以看出:

(1) 试验拱顶相对跨度位移与比例距离之间关系均成负指数关系, 即  $u/D=a(R/W^{1/3})^{-b}$ , 只是不同的实验类型  $a, b$  的数值不等。

(2) 在小药量及爆点距拱顶距离较远时 (如第 3 炮), 不同垫板形式的 3 个锚杆试验类型的拱顶相对位移与比例距离的曲线比较接近, 说明此时垫板形式对加固效果的影响较小; 随着药量的增大及爆点距拱顶距离的减小, 垫板形式对加固效果的影响开始显现出来, 体现在不同垫板形式试验类型的拱顶位移与比例距离的曲线逐渐分离。

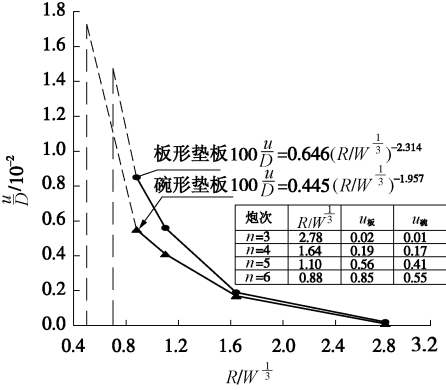


图 8 短密锚杆网喷支护类型拱顶相对位移与比例距离之间的关系

Fig. 8 Relationship between relative displacement at top of cavern reinforced by short and close cables and scale distance

(3) 整体上看, 长密锚杆拱顶相对位移与比例距离的关系曲线斜率较短密锚杆拱顶相对位移与比例距离的关系曲线斜率陡, 这说明长密锚杆加固洞室拱顶相对位移对爆炸药量及爆点距拱顶距离更敏感, 更早到达极限抗力点。

(4) 从  $u/D$  与  $R/W^{1/3}$  的关系曲线上可以近似地看出各试验类型的极限抗力, 即  $u/D$  与  $R/W^{1/3}$  的关系曲线近似与竖直线相切时的比例距离  $R/W^{1/3}$ , 它们大约是: ①短密锚杆支护类型, 板形垫板区 0.7 左右,

碗形垫板区 0.5 左右；②长密锚杆支护类型，板形垫板区 0.8 左右，碗形垫板区 0.7 左右；③常规锚杆支护类型，板形垫板区 1.1 左右，碗形垫板区 0.9 左右。

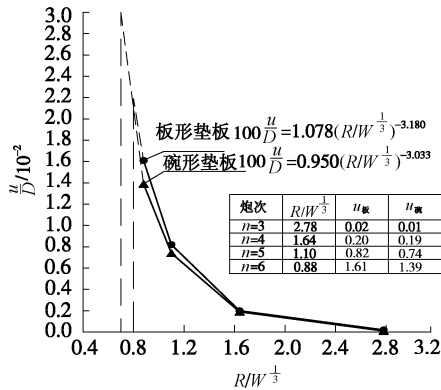


图 9 长密锚杆网喷支护类型拱顶相对位移与比例距离之间的关系  
Fig. 9 Relationship between relative displacement at top of cavern reinforced by long and close cables and scale distance

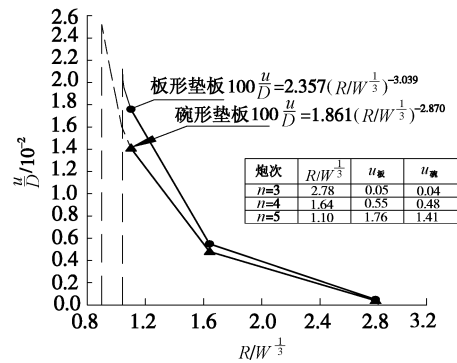


图 10 常规锚杆网喷支护类型拱顶相对位移与比例距离之间的关系  
Fig. 10 Relationship between relative displacement at top of cavern reinforced by regular cables and scale distance

3 结 论

本文结合现场试验，分析不同锚杆支护类型下的洞室拱顶位移变化情况，可以得到以下结论：

- (1) 锚杆支护下的洞室拱顶位移要好于没有支护条件下的洞室拱顶位移；这说明锚固的必要性；
- (2) 短密锚杆的支护效果在本试验中好于长密锚杆的支护效果，并非锚杆越长支护效果越好；
- (3) 碗形垫板对围岩提供了更大的支撑力，碗形垫板的效果好于板形垫板。

对于何种长度的锚杆，何种密度锚杆支护条件下有最好的支护效果，需要开展更多的相关分析研究。

参考文献：

[1] 高永莉. 防护工程国外研究进展[R]. 洛阳：总参工程兵科研三所，1989. (GAO Yong-li. Overseas evolution of the

research on protective engineering[R]. Luoyang: The Third Scientific Research Institute of the Corps of Engineers, General Staff of PLA, 1989. (in Chinese))

[2] GISLE S, ARNE M. The influence of blasting on grouted rock bolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 65 - 70.

[3] ORTLEPP W D, STACEY T R. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 15 - 21.

[4] JAMES A M. Simulation devices for use in studies of protective construction[R]. Air Force Weapons Lab Kirtland AFB NM, 1966.

[5] 沈俊, 顾金才, 陈安敏, 等. 岩土工程抗爆结构模型试验装置研制及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1077 - 1080. (SHEN Jun, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Development and applications of the model test apparatus on anti-explosion structures in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1077 - 1080. (in Chinese))

[6] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 拱顶部端加密锚杆支护洞室抗爆加固效果模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 378 - 383. (WANG Guang-yong, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Model tests on anti-explosion anchoring effect of tunnels reinforced by dense bolts at arch top[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 378 - 383. (in Chinese))

[7] CHARLES E J, GEORGE S. Brick model tests of shallow underground magazines[R]. Department of the Army Waterways Experiment Station Corps of Engineers, 1992. (in Chinese))

[8] 易长平, 卢文波, 张建华. 爆破振动作用下地下洞室临界振速的研究[J]. 爆破, 2005, 22(4): 4 - 8. (YI Chang-ping, LU Wen-bo, ZHANG Jian-hua. Study on critical failure vibration velocity of underground chambers under action of blasting vibration[J]. Blasting, 2005, 22(4): 4 - 8. (in Chinese))

[9] 陈建功, 张永兴. 完整锚杆纵向振动问题的求解与分析[J]. 地下空间, 2003, 23(3): 268 - 271. (CHEN Jian-gong, ZHANG Yong-xing. Solution and analysis for the longitudinal vibration of integrated anchor bar[J]. Underground Space, 2003, 23(3): 268 - 271. (in Chinese))

[10] 陈剑杰. 深埋岩石铜室在爆炸应力波荷载作用下的破坏效应[D]. 上海：同济大学, 2000. (CHEN Jian-jie. Failure effect of underground rock openings under stress wave induced by blast[D]. Shanghai: Tongji University, 2000. (in Chinese))