

爆炸平面波作用下大跨度洞室 稳定性模型试验研究

徐景茂^{1,2}, 顾金才², 陈安敏², 汪 涛², 张向阳²

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

摘 要: 通过抗爆模型试验, 研究了爆炸平面波作用下大跨度毛洞和锚喷衬砌支护洞室的受力变形和稳定状态。介绍了模型试验原理及方法, 根据试验实测数据分析了洞室围岩的受力特征、洞壁的运动变形特征、洞室的破坏形态及承载能力等。研究表明: 设计工况和超载工况下, 锚喷衬砌支护洞室侧墙部位垂直应力、拱顶加速度正峰值、拱顶位移峰值及残余值、洞壁环向应变峰值均明显小于毛洞; 超载试验后, 毛洞破坏严重, 丧失了承载能力, 而锚喷衬砌支护洞室破坏明显轻微, 承载能力可提高约 60%。

关 键 词: 相似理论; 模型试验; 平面波; 变形特征; 破坏形态

中图分类号: U451

文献标识码: A

Model test study of stability of large span tunnel under explosive plane wave

XU Jing-mao^{1,2}, GU Jin-cai², CHEN An-min², WANG Tao², ZHANG Xiang-yang²

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. The Third Research Institute of the Corps of Engineering, General Staff of PLA, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: Through the anti-explosion model tests, the deformation and steady state of large span unlined tunnel and bolting and shotcrete lining supported tunnel under explosive plane wave are studied. This paper introduces the principle and method of model test. Based on the test data, the stress characteristics of surrounding rock, deformation behavior of tunnel wall, and the fracture morphology as well as bearing capacity of tunnel are analyzed. Research shows that under the design condition and overload condition, when tunnel supported by bolting and shotcrete lining, vertical stress in side wall, acceleration peak value of tunnel vault, peak and residual value of the displacement of tunnel vault, and peak value of hoop strain on tunnel wall are less than unlined tunnel. After overload test, unlined tunnel is damaged badly and loss of bearing capacity; but bolting and shotcrete lining supported tunnel is damaged slightly, the bearing capacity can be increased by 60%.

Key words: similarity theory; model test; plane wave; deformation characteristic; fracture morphology

1 引 言

面对高技术侦察手段和精确制导武器^[1-3], 大型武器装备、重要战略物资等的防护问题日益突出, 地下防护工程向深地下和大跨度发展是必然趋势。开展地下大跨度工程加固技术研究, 提高防护工程抗力等级是应对现代战争的根本途径。Lee^[4-5]和 Davis^[6]等采用波函数展开法给出了半空间中无衬砌洞室对平面 P 波和 SV 波散射的解析解。尤红兵等^[7]利用间接边界元法, 在频域内求解了层状弹性半空间中洞室对入射平面 SV 波的散射问题, 比较了层状半空间和均匀半空间中洞室对入射平面 SV

波的放大作用, 指出层状半空间情况有可能导致较大的地表位移幅值。李刚等^[8]利用波函数展开法, 研究平面 SH 波入射下深埋圆形组合衬砌洞室的动力反应, 讨论了入射波频率、组合衬砌结构的厚度比、弹性模量、泊松比、密度等因素对围岩和衬砌结构动应力集中系数的影响。Ortlepp 等^[9]研究了静载和动载条件下大变形坑道的加固形式, 指出屈服锚杆可以吸收大量能量而使坑道不发生破坏。杨湖等^[10]通过理论分析研究了波在锚杆体内波动能量的外泄特征以及弹性波在锚杆、岩土介质及其耦合体系中的传播规律, 得到了波在锚固体系中的衰减规律及传播机制。顾金才等^[11]通过物理模型试验,

研究了洞室在平面装药和集中装药爆炸荷载作用下不同加固方案的对比抗爆效果,指出平面装药爆炸试验中洞室拱部材料均发生脱落,集中装药爆炸试验中洞室拱脚均产生剪切错动裂缝。从上述研究情况看,关于弹性状态下圆形(无)衬砌洞室对平面波的散射问题、平面波作用下洞室的动力响应和波在锚固体系中的传播机制等方面的理论研究较多,但试验研究较少,对平面波作用下喷锚洞室的破坏特征研究极少。受工程设计部门委托,我部开展了爆炸平面波作用下大跨度洞室稳定性模型试验研究,经过一年多的努力,解决了一系列模拟试验技术难题,如岩体模拟技术、锚喷与衬砌支护模拟技术、平面波加载技术、模型边界消波技术等,分别对毛洞与锚喷衬砌支护洞室进行了抗爆模型试验,测得了洞室围岩应力、洞壁应变、位移、加速度等大量波形数据,得到了洞室破坏形态,给出了洞室的设计安全系数,为实际工程设计提供了参考依据。限于篇幅,本文主要介绍爆炸平面波作用下大跨度洞室的受力变形特征及稳定状态。

2 试验方案设计

2.1 试验概况

试验原型岩体为Ⅲ级,洞室为直墙拱顶形,毛洞净跨度 $D=22.8$ m,防护层厚度 $H=350$ m,外层沿全断面采用喷锚支护加固,喷射混凝土为 C20,拱顶、侧墙、底板均采用 $\phi 25$ mm 锚杆加固,里层为 C30 钢筋混凝土衬砌,配有环向、轴向钢筋,在洞室拱脚部位还进行了局部加强配筋。

针对原型共完成了 2 块模型试验,每块模型包括 1 次设计工况和 3 次超载工况试验,详见表 1。

表 1 模型试验概况
Table 1 Summary of model tests

模型 编号	模型 名称	设计工况		超 载 工 况					
				工况 1		工况 2		工况 3	
		W	R	W	R	W	R	W	R
		$/(g/m^2)$	/cm	$/(g/m^2)$	/cm	$/(g/m^2)$	/cm	$/(g/m^2)$	/cm
M1	毛洞	29.7	139.2	59.4	139.2	89.1	129.2	151.2	129.2
M2	锚喷衬砌 支护洞室	29.7	139.2	59.4	109.2	89.1	109.2	151.2	109.2

注: W 为模型试验中平面 TNT 装药量 (g/m^2), R 为装药位置距洞室拱顶的距离 (cm)。

2.2 设计思路及相似原理

本试验要求在模型洞室顶部产生平面波以模拟核触地爆对原型洞室的破坏效应,设计思路是:首先按现有规范^[12]计算出原型洞室部位的应力波参

数,如应力波峰值、上升时间、作用时间等;然后按 Froude 相似理论确定应力比尺、时间比尺,换算出模型洞室部位的应力波峰值、上升时间、作用时间等;最后,选择合适的爆炸方式、装药量和装药位置,在模型介质中进行爆炸试验。

文献[13]指出:采用 Froude 相似理论时,在同一个试验中很难同时满足冲量和应力的相似;一般地,如果系统的最大反应发生较早,则峰值应力应完全满足相似要求;如果系统的最大反应在超压已经充分衰减之后出现,则冲量应完全满足相似要求。本试验以洞室拱顶-底板相对位移最大值作为系统最大反应的判断指标,实测结果表明,拱顶-底板相对位移最大值发生在压应力充分衰减之前,即系统的最大反应发生较早。因此,本试验是按峰值应力满足相似要求来考虑的。

Froude 相似理论中基本变量由长度、密度和加速度组成,并指定加速度比尺 $K_a=1$,因而不需要采用离心机进行试验,但要求应力比尺 K_σ 与密度比尺 K_ρ 和几何比尺 K_l 之间满足关系: $K_\sigma = K_\rho K_l$ 。由于 σ 、 ρ 都是材料本身的性质,因而几何比尺 K_l 不能任意选取,应由模型和原形材料性质来决定。最终确定基本变量的比尺为: $K_l=0.029$, $K_\rho=0.857$, 则 $K_\sigma=0.025$ 。

2.3 模拟材料的选取

2.3.1 岩体模拟材料

本试验是在总参工程兵科研三所研制的岩土工程抗爆结构模型试验装置^[14]上开展的,模型尺寸为 240 cm $\times$ 150 cm $\times$ 230 cm,由于尺寸较大,所需模拟材料较多,故应尽量选择造价较低且能重复使用的材料为宜。经过多种材料的比较,最终确定岩体的模拟材料为型砂掺入 30% 的河砂及其他材料的混合料,其物理力学参数见表 2,可见该材料基本满足相似要求。

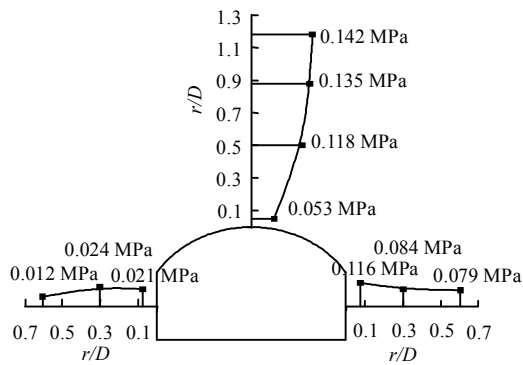
2.3.2 锚杆模拟材料

锚杆长度、间距按几何相似考虑,截面按抗拉变形刚度相似考虑,材料选用 $\Phi 2$ PVC 塑料焊条,其延伸率与钢材接近,屈服强度为 14.1 MPa,弹性模量为 1.37 GPa。

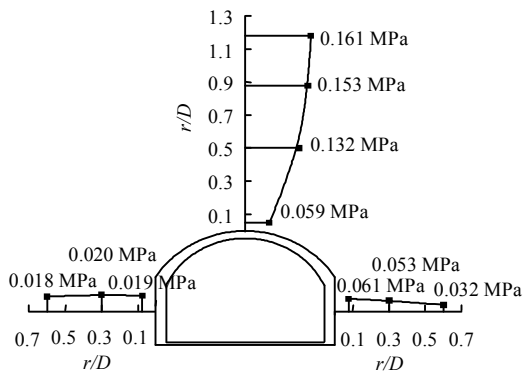
2.3.3 钢筋混凝土衬砌模拟材料

C30 钢筋混凝土衬砌采用石膏配铜丝网模拟,原型和模型衬砌的力学参数见表 3。这里配筋的模拟是按变形相似考虑的,即原型中钢筋的应变等于模型中铜丝的应变 ($K_\epsilon=1$),铜丝网布置为环向 $\phi 0.33$ mm $\times$ 19 mm,轴向 $\phi 0.23$ mm $\times$ 23 mm,洞室拱脚加强部位环向 $\phi 0.33$ mm $\times$ 30 mm,轴向 $\phi 0.23$ mm $\times$ 46 mm。模型洞室断面如图 1 所示。

了围岩向洞内的自由变形,从而使得支护洞室拱顶垂直应力较大;支护洞室拱部具有较大的承载能力,爆炸过程中承受了更多荷载,从而减小了侧墙垂直应力。



(a) 毛洞 M1



(b) 锚喷衬砌支护洞室 M2

图 4 设计工况下洞室围岩应力峰值

Fig.4 Schematic plan of stress peak values of surrounding rock under design condition

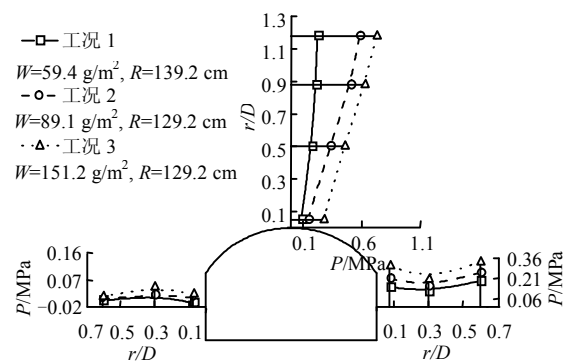
3.2 超载工况下洞室围岩的受力特征

超载试验时,两洞室对应工况平面装药量 W 相同,但毛洞 M1 的爆距 R 较大,这是因为 M1 的承载能力较低, R 较小时破坏将非常严重,难以确定其临界破坏荷载。表 4 为超载工况下洞室围岩应力峰值实测数据,图 5 是根据该数据绘制的峰值分布图。从图中可以看出,两种洞室围岩垂直应力峰值分布形态基本一致,而侧墙水平应力峰值分布形态明显不同;锚喷衬砌支护洞室 M2 的拱顶垂直应力、侧墙水平应力较大,但侧墙垂直应力较小。原因在于, M2 的爆距 R 较小,必然导致其拱部垂直方向、侧墙水平方向所受爆炸荷载较大,且侧墙水平应力波受边界反射波影响也较大,形态发生改变;侧墙垂直应力则由于 M2 拱部更多的承载分担能力反而较小。

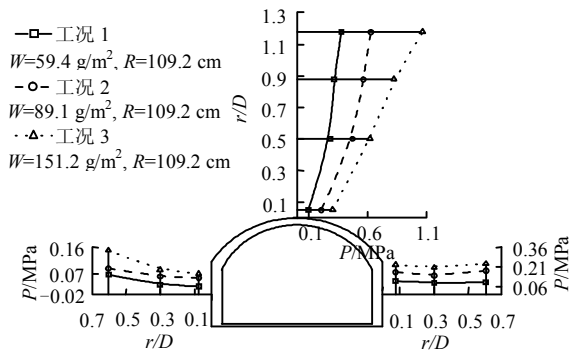
表 4 超载工况下洞室围岩应力峰值

Table 4 Stress peak values of surrounding rock under overload condition

洞室	测点	r/D	超载工况应力峰值/MPa		
			工况 1	工况 2	工况 3
毛洞	P1	1.179	0.223	0.581	0.725
毛洞	P2	0.878	0.208	0.502	0.621
毛洞	P3	0.501	0.171	0.331	0.452
毛洞	P4'	0.048	0.086	0.142	0.273
毛洞	P9	0.603	0.191	0.252	0.331
毛洞	P10	0.302	0.114	0.153	0.204
毛洞	P11	0.075	0.147	0.211	0.303
毛洞	P12	0.075	0.014	0.031	0.043
毛洞	P13	0.302	0.037	0.039	0.065
毛洞	P14	0.603	0.021	0.027	0.034
锚喷衬砌支护	P1	1.179	0.377	0.628	1.068
锚喷衬砌支护	P2	0.878	0.314	0.564	0.824
锚喷衬砌支护	P3	0.501	0.282	0.472	0.621
锚喷衬砌支护	P4'	0.048	0.097	0.207	0.303
锚喷衬砌支护	P9	0.603	0.095	0.182	0.234
锚喷衬砌支护	P10	0.302	0.089	0.143	0.204
锚喷衬砌支护	P11	0.075	0.104	0.171	0.228
锚喷衬砌支护	P12	0.075	0.028	0.056	0.071
锚喷衬砌支护	P13	0.302	0.034	0.061	0.083
锚喷衬砌支护	P14	0.603	0.067	0.088	0.149



(a) 毛洞 M1



(b) 锚喷衬砌支护洞室 M2

图 5 超载工况下洞室围岩应力峰值示意图

Fig.5 Schematic plan of stress peak values of surrounding rock under overload condition

4 洞壁的运动变形特征

4.1 洞壁加速度

洞壁加速度的典型实测波形如图 6 所示, 正值表示加速度 a 方向向下。由图可知, 两洞室拱顶运动规律基本相同, 洞壁的主要振动发生在 20 ms 以内, 40 ms 后基本停止振动。表 5 为各工况下洞壁加速度正峰值实测数据。从表中可以看出, 设计工况下支护洞室 M2 的洞壁加速度正峰值比毛洞 M1 平均约小 23%; 超载工况下, 虽然 M2 的爆距较小, 但其洞壁加速度正峰值除超载工况 1 时比 M1 略大外, 超载工况 2、3 时均明显小于 M1, 这说明超载工况下虽然锚喷衬砌支护洞室 M2 所受爆炸荷载较大, 但其洞壁振动剧烈程度并不比毛洞大, 可见 M2 的抗力得到了较大的提高。

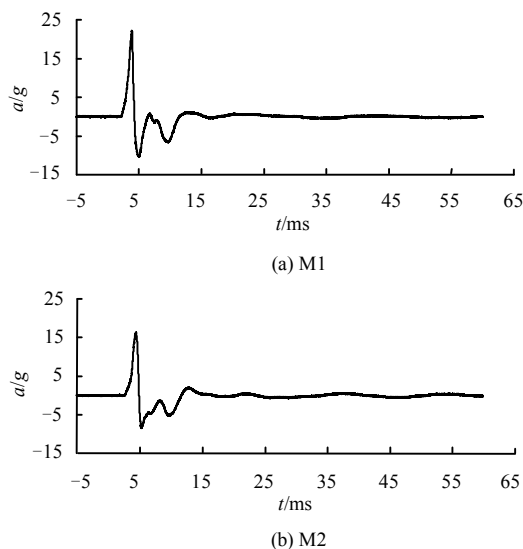


图 6 设计工况下洞壁加速度实测波形
Fig.6 Measured waveforms of acceleration of tunnel wall under design condition

表 5 洞壁加速度正峰值

Table 5 Acceleration peak values of tunnel wall

测点	洞室	设计工况加速 度峰值/g	加速度峰值/g		
			工况 1	工况 2	工况 3
a1	毛洞	22.46	41.73	112.03	257.35
a1	支护洞室	16.21	49.30	98.41	182.24
a2	毛洞	21.63	37.63	130.19	233.22
a2	支护洞室	17.82	41.74	71.17	175.62

4.2 洞壁位移

洞壁位移 u 的典型实测波形如图 7 所示, 负值表示拱顶向下位移。

由该图可知, 两洞室拱顶运动规律基本相同, 在 10 ms 左右时, 拱顶到达最大向下位移; 40 ms

后基本停止运动, 到达残余位移, 这与图 6 是吻合的。表 6 为各工况下实测洞壁位移峰值和残余值(由 U1~U4 平均得到), 由该表可知, 各工况下支护洞室 M2 洞壁位移峰值 u_z 和残余值 u_{zr} 均小于毛洞 M1 洞壁位移峰值 u_m 和残余值 u_{mr} , 设计工况下峰值约小 31%, 残余值约小 65%, 超载工况下峰值小 12%~28%, 残余值小 58%~72%。可见, 支护效果非常明显。

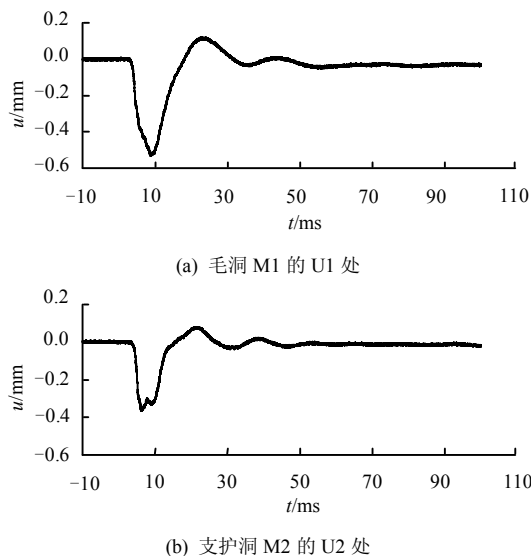


图 7 设计工况下洞壁位移实测波形

Fig.7 Measured waveforms of displacement of tunnel wall under design condition

表 6 洞壁位移峰值、残余值比较

Table 6 Comparison of peak and residual values of the displacement of tunnel wall

工况条件	毛洞 M1		支护洞室 M2		u_z/u_m	u_{zr}/u_{mr}
	位移 峰值	位移残 余值	位移 峰值	位移残 余值		
	u_m/mm	u_{mr}/mm	u_z/mm	u_{zr}/mm		
设计工况	0.51	0.043	0.35	0.015	0.69	0.35
工况 1	0.87	0.062	0.63	0.026	0.72	0.42
工况 2	1.35	0.134	1.19	0.038	0.88	0.28
工况 3	2.54	0.232	1.95	0.097	0.77	0.42

4.3 洞壁环向应变

各工况下洞壁环向应变峰值分布见图 8, 从图中可以看到:

(1) 在各工况下, 毛洞 M1 拱顶部位测点应变均为正值, 而支护洞室 M2 中均为负值。这说明, M1 拱顶处于受拉状态, 而 M2 拱顶处于受压状态; 在拱脚和直墙部位, 两洞室均为负应变, 说明这些部位均处于受压状态。

(2) 各工况下, M1 各测点应变峰值均明显大于 M2 对应测点应变峰值, 如设计工况下, M1 拱脚处

的应变为 -1.194×10^{-3} , M2 中 ϵ_4 应变峰值为 -4.64×10^{-4} , 前者是后者的 2.5 倍多, 对于墙中 ϵ_6 , 前者应变是后者应变的 5 倍, 这与前述 M1 的侧墙垂直应力较大是相符的。

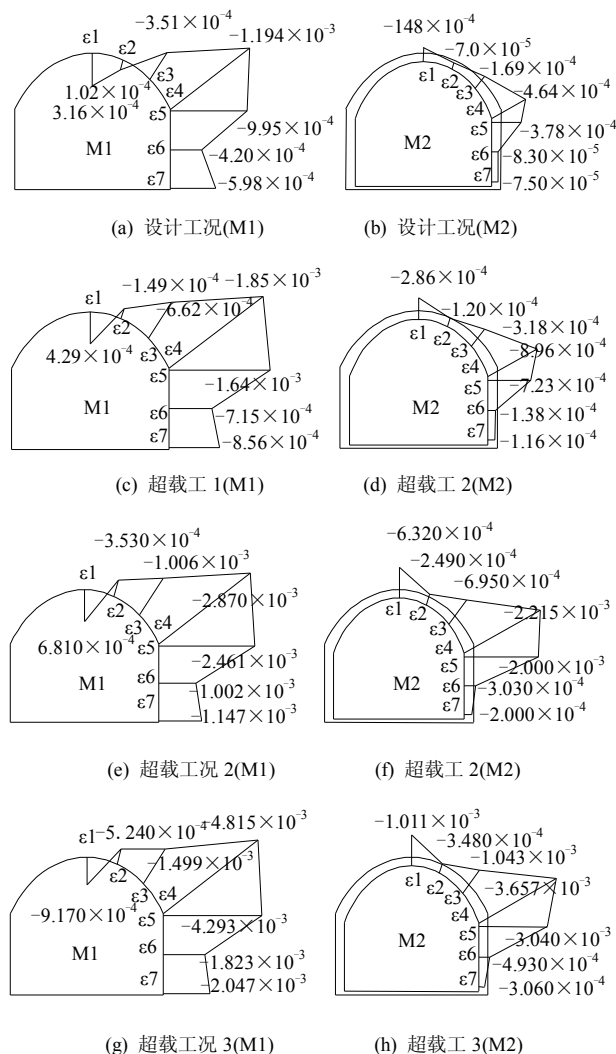


图 8 洞壁环向应变峰值分布

Fig.8 Distribution of peak values of hoop strain on tunnel

(3) 根据表 2, III级岩体的弹性压应变极限值可近似取为 $25/15\ 000=1.667 \times 10^{-3}$, 根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002) [15], C30 混凝土弹性压应变极限值可取为 1.640×10^{-3} , 由此可认为毛洞 M1 在超载工况 1 时已进入塑性破坏阶段, 而支护洞室 M2 的临界破坏荷载则介于超载工况 1 和超载工况 2 之间。

5 洞室的破坏形态及承载能力分析

5.1 洞室破坏形态

超载工况 3 后洞室的破坏照片见图 9。由图

9(a)、(b)可以看到, 毛洞 M1 已发生严重破坏, 拱部出现大量轴向和环向裂缝, 拱脚沿轴向出现较宽的挤压破碎带, 并有大面积剥离; 从解剖断面来看, M1 拱顶不仅有较深 (约 8 cm) 的纵向裂纹产生, 且在拱部上方已形成一个较大面积的塌落区, 拱脚部位的挤压破碎带深约 5 cm, 底板上沿轴向裂缝深度约 6 cm。这些现象表明, 毛洞 M1 已完全破坏, 丧失了承载能力。从图 9(c)可以看到, 锚喷衬砌支护洞室 M2 的破坏较轻微, 只在洞壁拱顶、拱脚出现少量裂缝, 伴有少量剥离发生, 但断面围岩完整, 未出现裂缝。



(a) 毛洞 M1 洞壁破坏形态



(b) 毛洞 M1 断面破坏形态



(c) 支护洞 M2 断面破坏形态

图 9 洞室破坏形态

Fig.9 Fracture morphology of tunnels

5.2 洞室承载能力分析

根据 4.3 节可知, 毛洞 M1 的临界破坏荷载为超载工况 1, 锚喷衬砌支护洞室 M2 的临界破

坏荷载介于超载工况 1 和超载工况 2 之间。若定义比例药量 $Q=W^{1/2}/R$, 用它来衡量洞室的承载能力, 则设计工况下, $Q_0=29.7^{1/2}/1.392=3.915\text{ g}^{1/2}/\text{m}^2$; M1 临界破坏工况下, $Q_1=59.4^{1/2}/1.392=5.537\text{ g}^{1/2}/\text{m}^2$; M2 临界破坏工况下, $Q_2=[(59.4+89.1)/2]^{1/2}/1.092=7.891\text{ g}^{1/2}/\text{m}^2$, 于是得到安全系数 $Q_1/Q_0=1.41$, $Q_2/Q_0=2.01$ 。可见锚喷衬砌支护洞室比毛洞承载能力约高 60%。

6 结 论

(1) 在设计工况下, 锚喷衬砌支护洞室拱顶垂直应力比毛洞略大 12%左右, 而侧墙垂直应力明显比毛洞小, 两者侧墙水平应力均很小且比较接近; 锚喷衬砌支护洞室洞壁加速度正峰值比毛洞约小 23%, 洞壁位移峰值约小 31%, 残余值约小 65%, 拱脚压应变峰值约小 61%。

(2) 在超载工况下, 虽然锚喷衬砌支护洞室的比例药量均较大, 承受爆炸荷载较大, 但由于其拱部承担了更多荷载, 其侧墙垂直应力、洞壁加速度正峰值、洞壁位移峰值及残余值、洞壁环向应变峰值均明显小于毛洞, 且超载工况 3 后, 毛洞破坏严重, 丧失了承载能力, 而锚喷衬砌支护洞室破坏明显轻微。可见, 锚喷衬砌支护效果显著。

(3) 两洞室在设计工况下均处于稳定状态, 但毛洞安全系数较低, 接近初始破坏状态; 毛洞在超载工况 1 时已进入破坏阶段, 而锚喷衬砌支护洞室的临界破坏荷载介于超载工况 1 和超载工况 2 之间, 承载能力比毛洞约高 60%。

参 考 文 献

- [1] 金丰年, 刘黎, 张丽萍, 等. 深钻地武器的发展及其侵略[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 34—40.
JIN Feng-nian, LIU Li, ZHANG Li-ping, et al. Development of projectiles and their penetration[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, 2002, 3(2): 34—40.
- [2] 王涛, 余文力, 王少龙, 等. 国外钻地武器的现状与发展趋势[J]. 导弹与航天运载技术, 2005, (5): 51—56.
WANG Tao, YU Wen-li, WANG Shao-long, et al. Present status and tendency of foreign earth-penetrating weapons[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2005, (5): 51—56.
- [3] 吴静, 邓堃, 柳世考, 等. 美军精确制导武器及其对抗技术的分析[J]. 飞航导弹, 2007, (6): 12—16.
- [4] LEE V W, KARL J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1992, 11(8): 445—456.
- [5] LEE V W, KARL J. On deformations of near a circular underground cavity subjected to incident plane P waves[J]. *European Journal of Earthquake Engineering*, 1993, 7(1): 29—36.
- [6] DAVIS C A, LEE V W, BARDET J P. Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30(3): 383—410.
- [7] 尤红兵, 梁建文. 层状半空间中洞室对入射平面 SV 波的散射[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 383—388.
YOU Hong-bing, LIANG Jian-wen. Scattering of plane SV waves by a cavity in a layered half-space[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 383—388.
- [8] 李刚, 钟启凯, 尚守平. 平面 SH 波入射下深埋圆形组合衬砌洞室的动力反应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 17—22.
LI Gang, ZHONG Qi-kai, SHANG Shou-ping. Dynamic response analysis of deep buried cylindrical composite-lining cavity subjected to incident plane SH waves[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(1): 17—22.
- [9] 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.
- [10] 杨湖, 王成. 弹性波在锚杆锚固体系中传播规律的研究[J]. 测试技术学报, 2003, 17(2): 145—149.
YANG Hu, WANG Cheng. Study of propagation law of elastic wave in anchorage system[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2003, 17(2): 145—149.
- [11] 顾金才, 陈安敏, 徐景茂, 等. 在爆炸荷载条件下锚固洞室破坏形态对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1315—1320.
GU Jin-cai, CHEN An-min, XU Jing-mao, et al. Model test study of failure patterns of anchored tunnel subjected to explosion load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1315—1320.

- [12] U.S. Naval Facilities Engineering Command. Structures to resist the effects of accidental explosions (TM5-1300)[S]. Alexandria: NAVFAC P-397 Design Manual, 1991.
- [13] ZAHRAH T F, MERKLE D H, AULD H E. AD-A209252. Gravity effects in small scale structural modeling[R]. Florida: US Air Force Engineering Services Center, 1988.
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.