

文章编号: 1000-7598(2009)09-2805-05

锚杆对围岩的加固效果和动载响应的数值分析

杨自友^{1,2}, 顾金才^{2,3}, 杨本水¹, 陈安敏³, 徐景茂³

(1. 安徽建筑工业学院 土木工程学院, 合肥 230022; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230026;
3. 总参工程兵科研三所, 洛阳 471023)

摘要: 利用数值分析软件 LS-DYNA3D 程序, 对锚杆对围岩的加固效果和动态力学性能进行了显示动力分析, 比较了洞室围岩是否用锚杆加固时, 爆炸波引起的岩体中垂直应力、拱顶位移以及锚杆本身轴向应变的变化特点。结果发现: 同毛洞相比较, 加固洞室围岩应力较大, 拱顶位移较小; 通过分析锚杆轴向应变-时程曲线, 发现不同安装角的锚杆其轴向应变对动载的响应不同, 拱部锚杆先受压后受拉, 直墙部锚杆全受拉, 两部位锚杆均产生轴向拉应变; 将模拟的锚杆应变-时程曲线同模型试验的相应曲线进行了比较, 两者一致性较好, 其结果为动载作用下坑道围岩锚杆加固的布置方法提供了参考。

关键词: 锚杆; 加固效果; 爆炸波; 数值分析; 力学性能

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

Numerical analysis of reinforcement effects and response to dynamic loads characteristics of rock bolts

YANG Zi-you^{1,2}, GU Jin-cai^{2,3}, YANG Ben-shui¹, CHEN An-min³, XU Jing-mao³

(1. School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. The Third Research Institute of the Corps of Engineering, General Staff of CPLA, Luoyang 471023, China)

Abstract: The explicit dynamic analysis of the reinforcement effects and dynamic characteristics of rock bolts is carried out by LS-DYNA software. The change features of vertical stress of rockmass, vault displacement and axial strain of rock bolts themselves caused by explosive waves are compared whether wall rock is reinforced or not. By comparing the cavern that is not reinforced, the stress of wall rock is larger and the displacement of vault is less than the cavern that is reinforced by rock bolts. By analyzing the axial strain temporal curves of rock bolts, the response to the dynamic loads is different when rock bolts' installing angles are different. The rock bolts of vault bear pressure at first and tension after, and the rock bolts in upright wall bear tension absolutely. The axial tension strain generates at these two positions. The comparison between the axial strain temporal curves and the corresponding curves is carried out in model test. These two curves are compatibility. This simulation provides the references of arrangement methods in wall rock of tunnels reinforced by rock bolts under the effect of dynamic loads.

Key words: rock bolts; reinforcement effect; explosive wave; numerical analysis; mechanical characteristics

1 引言

锚杆加固作为一种廉价、便捷的主动加固方式, 已广泛应用于地下工程。许多学者通过室内相似模型试验、现场拉拔试验, 对锚杆对围岩的加固机制、锚杆自身的静态力学性能进行了大量的研究, 已基本弄清楚了锚杆的静态力学性能, 但在受爆炸、地震、岩爆等动载荷作用下, 有关锚杆对围岩的效果及其自身的动态力学性能的研究相对较

少。Tannant^[1]认为, 爆破荷载引起锚杆横向的和纵向的振动, 使得锚杆与岩体间产生了松动, 冲击荷载传不到锚杆中, 锚杆不会屈服破坏。Gisle^[2]通过模型试验指出, 在距离锚杆 3~4 m 的处爆破时, 锚杆对围岩的加固性能不受爆破震动的影响。文献[3]应用波函数展开法, 研究了爆破振动对砂浆锚杆的影响。通过试验研究锚杆自身的动态力学性能周期长、成本高, 不可能大量进行。目前要从理论分析的角度给出应力波与锚杆相互作用的完全解析

收稿日期: 2008-03-05

基金项目: 安徽建筑工业学院博士基金会(2009)资助。

第一作者简介: 杨自友, 男, 1975年生, 博士, 副教授, 研究方向为岩土工程及矿业工程。E-mail: zyyang75@mail.ustc.edu.cn

解, 还是相当困难的, 而现代数值计算科学以及高性能计算机的发展, 提供了可利用数值分析的手段来研究锚杆在动载作用下的动态力学性能, Zhang^[4]利用数值计算, 模拟了灌浆锚杆中波的传播, 并考虑了网格密度和波频率对模拟结果的影响。薛亚东^[5]应用 FLAC 二维程序, 通过对计算模型施加震动波载荷, 研究锚杆的动态力学性能。荣耀^[6]等人通过对现场爆破载荷的计算, 以对模型输入爆破载荷的方式进行了数值分析, 指出锚杆对应力波传播有明显的衰减作用。凌贤长^[7]等采用量纲分析方法, 并考虑爆炸地冲击波-结构动力相互作用等因素的相似性, 求解了土-结爆炸冲击相互作用模爆试验的模型设计的相似关系。

曾宪明^[8]用相似模型试验和现场试验研究了在集中装药隔离顶爆下土钉支护黄土洞室临界抗力及其结果。陈剑杰^[9]利用小比例化爆模拟试验以及岩石脆性破坏模型的三维动力有限元数值模拟的方法, 对深埋岩石洞室在爆炸应力波作用下的破坏效应进行了研究。刘慧^[10]基于数值模拟和动光弹试验, 对马蹄形隧道在邻近爆破作用下的动态响应特点进行了分析, 提出了隧道迎爆一侧的动应力集中因子的近似确定方法。

本文应用数值分析软件 LS-DYNA3D 程序, 对所建的取自室内地质力学模型试验尺寸的模型, 数值模拟了在集中装药爆炸条件下, 由爆炸产生的应力波与全长粘结式锚杆的相互作用过程, 研究了该类型锚杆对围岩的加固效果及其自身的动载响应特性。

2 数值模拟内容

2.1 计算模型的建立

计算模型取自总参工程兵科研三所岩土与结构工程重点实验室的地质力学试验模型的一部分, 见图 1, 取宽×高×厚=75 cm×230 cm×3 cm, 即取沿洞

室平面的水平方向 75 cm, 竖直方向 230 cm, 为了计算简便, 洞室轴向仅取了 3 cm, 作近似二维的数值分析。洞室未加固时为毛洞, 加固洞室的锚杆取金属铝的材料参数, 长度为 18 cm、间距 3 cm。

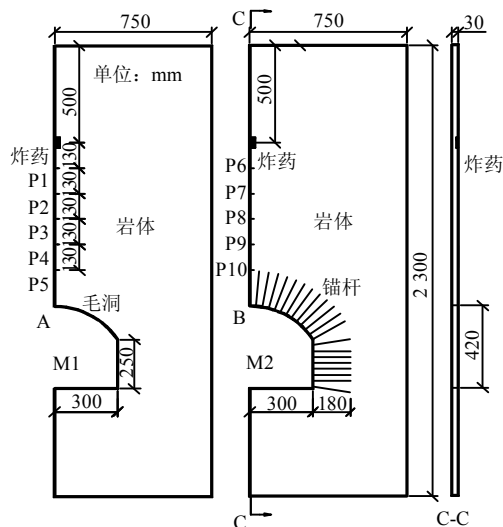


图 1 模型尺寸示意图 (单位: mm)
Fig.1 Diagram of model size (unit: mm)

岩体介质选用 SOIL-CONTRETE 材料, 密度取 1.7 g/cm³, TNT 炸药单元取总质量的 1/4, 即 25 g, 采用 JWLV 状态方程:

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

式中以及表 1 中: P 、 E 、 V 分别为爆轰产物的压力、内能和比容 (单位体积); A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWLV 方程必须输入的常数; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为炸药、模型介质及锚杆材料密度; P_{CJ} 为炸药爆轰压力; D_H 为爆速; E_0 为爆轰初始内能; G 、 K 分别为模型材料剪切模量、体积模量; E 、 μ 分别为锚杆材料弹性模量、泊松比。

表 1 TNT 炸药、JWL 方程、模型及锚杆材料参数
Table 1 Material parameters of TNT, JWL, model and bolt

ρ_1 /(g/cm ³)	P_{CJ} /GPa	D_H /m·s ⁻¹	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /GPa	ρ_2 /(g/cm ³)	G /GPa	K /GPa	ρ_3 /(g/cm ³)	E /GPa	μ
1.63	27	6 930	371	7.43	4.15	0.95	0.3	7	1.7	0.856	0.958	2.72	76	0.34

2.2 计算过程及边界条件

炸药、岩体材料选用 6 面体实体单元模拟, 加固锚杆单元用梁单元代替, 为了方便计算, 建立了单排锚杆来加固洞室。计算模型中炸药、岩体和锚杆采取共用节点法划分网格。为了模拟出半无限体

中的应力波的传播规律, 模型右边界、下边界设置为透射边界, 左边界设置为水平位移为 0 边界, 上表面为自由边界。忽略岩体自重对应力波传播造成的影响, 模拟在集中装药爆炸条件下, 研究应力波在岩体传播过程中洞室拱顶的应力和位移的变化规

律, 锚杆轴向应变随安装角的变化情况。

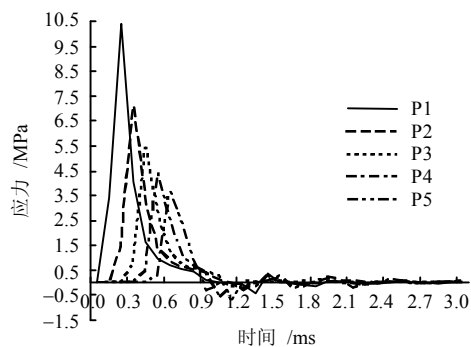
3 模拟结果分析

3.1 拱顶垂直峰值应力的比较

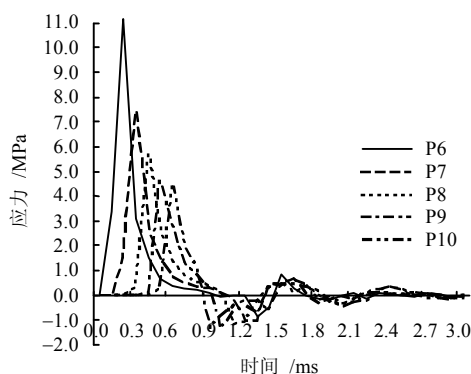
集中装药爆炸时, 在岩体中产生球面应力波, 共计算了 10 ms, 因 3 ms 后应力波强度已衰减到 0, 图 2 所示分别为连接炸药与毛洞 M1、加固洞室 M2 拱顶之间 5 个等距离单元 (见图 1) 的应力变化时程曲线, P1~P10 单元中垂直峰值应力大小见表 2。

表 2 单元垂直峰值应力
Table 2 Peak stress of elements

洞室	测点	应力 /MPa	洞室	测点	应力 /MPa
M1	P1	10.37	M2	P6	11.14
	P2	7.12		P7	7.49
	P3	5.44		P8	5.73
	P4	4.41		P9	4.65
	P5	3.67		P10	4.39



(a) P1~P5 曲线



(b) P6~P10 曲线

图 2 单元垂直应力峰值变化时程曲线
Fig.2 Vertical peak stress change temporal curves of elements

由图 2 可看出, 各单元应力变化时程曲线由上升段和下降段组成, 上升段时间和下降段时间共同组成了对围岩的正压时间。各时程曲线在形态上相似, 趋势上相同。随着爆炸应力波向拱顶的传播,

应力波强度发生了衰减, 这种衰减具体表现为远离爆心处岩体中单元应力会逐渐减小, 离拱顶较近的单元应力较小, 较远的应力较大, 岩体中应力的衰减是与岩体颗粒间的结合程度有关的, 结合越密, 衰减越慢; 由表 2 可知, 同洞室 M1 的拱顶 5 单元峰值应力相比, 洞室 M2 拱顶上方 5 单元应力较大, 即锚杆加固洞室围岩应力比毛洞的围岩应力大, 洞室 M2 用锚杆加固后, 使得岩体颗粒间的结合更加紧密, 限制了加固区域及其周围围岩的自由变形, 造成了岩体单元应力波强度衰减的速度慢, 增大了岩体颗粒间的约束力。可见锚杆的加固能限制围岩的变形, 但同时也增大了围岩中的应力, 只要围岩中应力不超过加固以后岩体所能承受的抗压强度和抗拉强度, 岩体就不会产生破坏。

3.2 拱顶位移的比较

图 3 所示分别为洞室 M1、M2 拱顶点 A、B 的位移时程曲线。在计算时间内, 图中拱顶位移是不可恢复的。

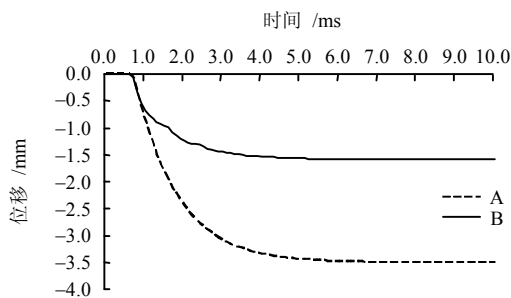


图 3 拱顶位移时程曲线
Fig.3 Temporal curves of vault displacements

由拱顶位移时程曲线可知, 在爆炸初始阶段, 即从炸药起爆到约 0.6 ms 时, 爆炸应力波还未传播到拱顶, 在这阶段拱顶位移为 0。A 点位移到 0.6 ms 后迅速增大, 在 8.0 ms 后不再增大, 维持为 3.51 mm, 而 B 点的位移从 0.6 ms 到约 7 ms 时也在增大, 以后趋于稳定值 1.59 mm, 毛洞拱顶 A 点位移小于加固洞室拱顶 B 点的位移, 即毛洞 M1 的拱顶位移增大的时间比加固洞室 M2 的时间长, 拱顶位移也比加固洞室的拱顶位移大, 这说明了洞室 M2 经锚杆加固后, 限制了围岩的进一步变形, 进而限制了拱顶位移的增加。

3.3 锚杆轴向应变及与试验结果的比较

3.3.1 锚杆轴向应变

为了研究随安装角的不同, 锚杆中轴向应变的变化情况, 分别选取了拱顶、拱腰、拱脚和水平锚杆中的中间单元 1~6 (见图 4), 研究这些单元中的轴向应变, 这些锚杆单元轴向应变-时程曲线如图 5 所示。

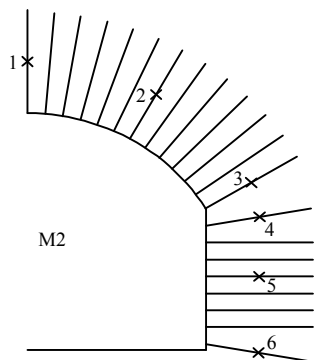
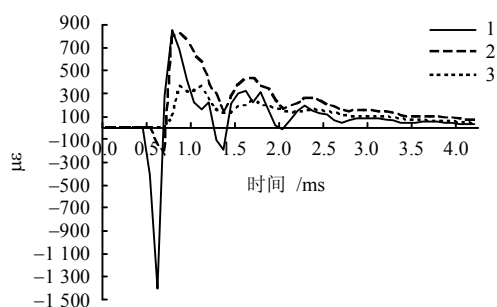
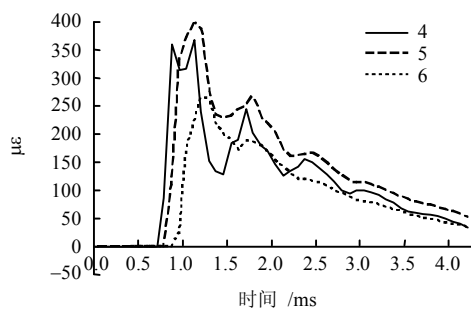


图4 锚杆单元编号图

Fig.4 Sketch of rock bolts elements numbers



(a) 拱部



(b) 直墙部

图5 拱部和直墙部锚杆轴向应变-时程曲线

Fig.5 Axial strain temporal curves of rock bolts in vault and upright wall

图5中的单元轴向应变-时程曲线,正值表示锚杆受拉应力作用,产生了瞬时拉应变,负值表示锚杆受压应力作用,产生瞬时压应变。若以锚杆与垂直方向的夹角作为安装角,则与图5中6条曲线相对应的6根锚杆的安装角分别为0°、30°、60°、近90°、90°和大于90°,即安装角在增大,这将影响爆炸波向锚杆传播的方向。在计算时间内,拱部1、2单元先受压后受拉,而且大部分时间受拉应力作用,3单元则全受拉应力作用。拱顶锚杆先受压后受拉是因爆炸应力波传播至拱顶的过程中,锚杆被约束而受压应力作用,当应力波被拱顶反射后,将产生反射拉伸波,使得锚杆产生了瞬时的拉应变,因此,拱部锚杆轴向应变是爆炸入射应力波与拱顶反射应力波与锚杆相互作用的结果。直墙部锚杆4、5、6单元与沿直墙绕射的应力波作用,锚杆中产生了拉应变。对于用金属材料制成的锚杆来说,其抗拉强度比岩土介质的抗拉强度大,如同钢筋混凝土中钢筋的作用一样,相当于提高了被其加固的围岩的抗拉强度,从而使锚杆对围岩的加固能力得以发挥。

从单元中应变的具体峰值来看,拱部锚杆中的应变值大于直墙部锚杆中单元的应变,因本文模拟的是炸药在拱顶正上方爆炸,应力波在岩体中发生衰减,因而造成了离拱顶较远处,锚杆单元中的应变较小。

3.3.2 模型试验概况

模型试验模拟的是直墙拱顶型洞室,埋深20 m,跨度3~5 m,岩体加固锚杆使用 $\phi 18$ mm的螺纹钢,洞室围岩按III类岩体性质考虑,其中III类围岩参数及模型材料的物理力学参数见表3。

表3 III类围岩及模型材料参数

Table 3 Rock III and material parameters of models

介质	重力密度 $\gamma / (\text{kg}/\text{m}^3)$	粘聚力 C / MPa	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	变形模量 E / GPa	泊松比 μ	抗压强度 R_c / MPa	抗拉强度 R_t / MPa
III类围岩	2 450~2 650	0.7~1.5	39~50	6~20	0.25~0.3	15~30	0.83~1.4
模型材料	1 600~1 800	0.06~0.12	39~50	0.48~1.6	0.25~0.3	1.5~2.0	0.07~0.11

根据量纲分析理论,按照Froude比例法,要求 $K_\sigma = K_\rho K_L$,确定密度、应力、几何相似比尺为: $K_\rho = 0.67$, $K_\sigma = 0.06$, $K_L = 0.09$ 。试验所建模型尺寸为宽 $\times$ 高 $\times$ 厚=1.5 m $\times$ 2.3 m $\times$ 2.4 m,即试验模型宽为图1宽的2倍,高尺寸一样,厚度方向分为2个试验段,每个试验段1.2 m,分别为毛洞和加固洞室,加固洞室的加固长度为600 mm,模型试验采用集中装药形式,分别100 g TNT,加固锚杆用直径

为2.1 mm的铝棒代替,长度为18 cm,间距3 cm,模型试验材料其配比为:砂:水泥:水:速凝剂=15:1:1.6:0.016 6(重量比)。

3.3.3 锚杆轴向应变模拟与试验结果比较

因传感器故障以及锚杆轴向应变测量的难度较大,模型试验中仅测得2个测点的锚杆轴向应变-时程曲线,如图6所示。

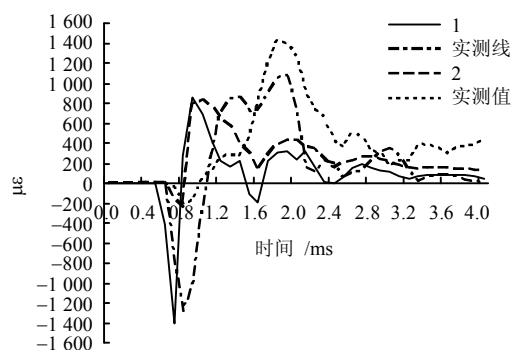


图6 模拟线与实测线的比较
Fig.6 Comparison of simulating and test curves

图6显示了图4中1、2单元轴向应变-时程曲线同试验所得相应曲线的对比结果。由图可知,拱顶锚杆的轴向应变-时程曲线由两部分组成,即压、拉应变-时程曲线。从峰值上看,压、拉应变的峰值两者相差不多;从形态上看,模拟曲线与实测曲线较为一致,都经历了先压后拉阶段;在锚杆产生瞬时应变的时间上,实测曲线大于模拟曲线,尤其是拉应变的产生时间,而且实测曲线的残余应变较模拟曲线的大,这可能是与锚杆周围围岩的密实程度有关,数值模拟中把围岩看成一个整体,而试验中,模型是用水泥砂浆制成,类似岩土介质,里面难免有空隙和孔洞,造成围岩比较疏松,因应力波在疏松介质的空隙和孔洞中会产生来回的反射和衍射,使其与疏松围岩的作用时间较长,与密实围岩的作用时间较短。试验中,锚杆周围围岩较为疏松,故锚杆中产生瞬时应变的时间较长。

4 结 论

(1) 锚杆对岩体的加固效果是明显的,限制了加固洞室拱顶的位移,使得其位移比毛洞拱顶处的位移小。锚杆对围岩的加固,使被加固区域及其上方的围岩应力比毛洞中的围岩应力大。

(2) 对锚杆单元的轴向应变的分析知,在计算时间内,不同安装角处的锚杆单元对动载的响应不同,洞室拱部锚杆先受压后受拉,直墙部锚杆全受拉,产生拉应变,使得锚杆对围岩的加固作用得到了充分发挥。通过与实测锚杆轴向应变-时程曲线的比较,两者在形态和趋势上较为一致,说明数值分析的结果较为可信。

参 考 文 献

- [1] TANNANT D D, BRUMMER R K, YI X. Rockbolt behaviour under dynamic loading field tests and modeling[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1995, 32(6): 537—550.
- [2] GISLE STIERN, ARNE MYRVANG. The influence of blasting on grouted rockbolts[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1998, 13(1): 65—70.
- [3] 易长平, 卢文波. 爆破振动对砂浆锚杆的影响研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(8): 1312—1316.
- [4] YI Chang-ping, LU Wen-bo. Research on influence of blasting vibration on grouted rockbolts[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1312—1316.
- [5] ZHANG C S, ZOU D H, MADENGA V. Numerical simulation of wave propagation in grouted rock bolts and the effects of mesh density and wave frequency[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, 43(4): 634—639.
- [6] 薛亚东, 张世平, 康天合. 回采巷道锚杆动载响应的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1903—1906.
- [7] XUE Ya-dong, ZHANG Shi-ping, KANG Tian-he. Numerical analysis of dynamic response of rock bolts in mining roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1903—1906.
- [8] 荣耀, 许锡宾, 赵明阶, 等. 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.
- [9] RONG Yao, XU Xi-bing, ZHAO Ming-jie, et al. The numerical simulating propagation of stress waves in the country rock with bolting[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(1): 115—119.
- [10] 凌贤长, 胡庆立, 欧进萍. 土-结爆炸冲击相互作用模爆试验相似设计方法[J]. *岩土力学*, 2004, 25(8): 1249—1253.
- [11] LING Xian-chang, HU Qing-li, OU Jin-ping. A scale modeling method of simulation explosion test of soil-structure impactive interaction due to exploding[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1249—1253.
- [12] 曾宪明, 杜云鹤, 李世民. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1892—1897.
- [13] ZENG Xian-ming, DU Yu-he, LI Shi-min. Testing study of prototype and model comparison on resisting dynamical load with soil nail supporting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1892—1897.
- [14] 陈剑杰, 孙钧, 林俊德. 深埋岩石硐室受爆炸应力波作用的破坏效应[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(4): 402—404.
- [15] CHEN Jian-jie, SUN Jun, LIN Jun-de. Failure of deep-buried rock openings under blast stress wave[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001, 20(4): 402—404.
- [16] 刘慧. 近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 175—181.
- [17] LIU Hui. Dynamic response of hoof shaped tunnels to adjacent blastings[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 175—181.