

文章编号: 1000-7598(2011)增刊1-0719-07

深埋隧道锚杆支护作用的数值模拟与模型试验研究

陈浩¹, 任伟中¹, 李丹², 夏彬伟³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 武汉科技大学 城市学院, 武汉 430065; 3. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 以重庆至长沙公路共和隧道为研究对象, 研制出环氧-硅橡胶的相似模型材料, 在大型真三轴模型试验机上进行了隧道在毛洞和锚杆支护条件下的超载试验, 采用应变测量技术对隧道关键部位的应变值和锚杆的应变值进行了测量, 据此分析了围岩体在锚杆支护后的应力变化规律和锚杆的轴力变化规律。采用与模型试验相同的边界条件进行了隧道在锚杆支护条件下的数值模拟工作, 对围岩体的塑性区、应力场和锚杆轴力随荷载的变化过程进行了研究。结果表明, 两种手段反映的围岩体应力变化规律和锚杆轴力随荷载的变化规律是一致的。

关键词: 深埋隧道; 物理模型试验; 数值模拟; 锚杆; 真三轴模型试验机

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Numerical simulation and model test study of mechanism of bolt in deep tunnel

CHEN Hao¹, REN Wei-zhong¹, LI Dan², XIA Bin-wei³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. Key Lab. for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: According to rock character of a certain soft rock tunnel of Chongqing, the model material is made from epoxy resin, polyamide, silicom rubber, firming agent of silicon rubber, quartz grit, powdery barite and gasoline. The physical model test of the unreinforced tunnel and bolt-reinforced tunnel are made in the true triaxial model test machine. By using strain measure technology, the strains of key parts of the surrounding rock and the bolt are measured; according to these data, the variability of the stress of surrounding rock and the variability of the axial force of the bolt are analyzed. The numerical simulation are made with the same boundary condition as the model test; according to these data, the plastic zone, stress field and the deformation of the surrounding rock are studied; the variation of the axial force of the bolt is studied. We compare the variation of stress of the surrounding rock and the variation of the axial force of the bolt of the model test with the numerical simulation and draw the conclusion that the two processes coincide with each other.

Key words: deep tunnel; physical model test; numerical simulation; bolt; true triaxial model test machine

1 引言

现代交通、能源工程中隧道的基本特点是“地质条件复杂多变, 影响因素众多, 施工难度大”, 在深埋软弱破碎的岩体中开挖隧道, 其施工难度更大, 施工过程中常发生局部塑性变形及挤压性大变形等, 形成支护困难, 工程造价大大提高, 工期延长, 以至发生塌顶塌方坍方事故, 给工程的建设及正常使用带来了很大的影响。锚杆加固作为最常用、最

有效的方法之一, 其对岩体的加固作用机制尚未完全清楚, 锚固工程的设计主要还是靠工程类比法或半经验半理论的方法进行, 这样有可能给锚固工程设计造成浪费或产生潜在危险^[1]。因此, 研究锚杆的支护作用机制^[2-12]将在隧道的建设中、在工程经济 and 安全生产方面产生极大效益。

本文以共和隧道为工程背景, 分别采用物理模型试验和数值模拟手段, 对锚杆的支护作用进行了研究, 从而为指导隧道的设计和施工提供了有效的

收稿日期: 2010-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 40772186, No. 51008298); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (No. SKLZ08064); 国家科技支撑计划 (No. 2009BAK53B03)。

第一作者简介: 陈浩, 1981年生, 博士, 助理研究员, 主要从事边坡和地下洞室方面的研究工作。E-mail: hchen@whrsm.ac.cn

依据。

2 模型试验设计

本次试验在岩土工程大型真三轴物理模型试验机上进行,该装置具有真三轴模型试验功能, X(左右向)、Y(前后向)、Z(垂直向)3个方向均由轴向加载系统独立加压。

2.1 相似材料

本次试验的工程背景为重庆至长沙公路共和隧道,隧道全长4 741 m,最大埋深为1 000 m。隧道断面形式为三心圆曲边墙结构,跨度为12 m,高度为9.5 m。地应力约为20 MPa。经过多组相似材料的配比试验,最终选用环氧树脂、聚酰胺、硅橡胶、硅橡胶固化剂、砂、重晶石粉和汽油的某种配比作为岩类的相似材料,材料满足相似判据 $C_\gamma C_l / C_\sigma = 1$,几何相似比 $C_l = 55$,应力相似比 $C_\sigma = 74$,重度相似系数 $C_\gamma = 1.31$ 。相似材料的物理力学参数见表1(理论值为原型参数除以相似系数而得)。工程所用锚杆为 $\phi 36$ mm的II级螺纹钢, $E = 2 \times 10^5$ MPa,在选择锚杆材料时,考虑到黏结应变片的难易程度,选用 $\phi 3.0$ mm竹签作为锚杆的相似材料, $E = 3 \times 10^3$ MPa,基本满足相似要求。砂浆的相似材料选用环氧树脂、聚酰胺、硅橡胶、硅橡胶固化剂和汽油所调配的黏结剂,黏结作用较好。

表1 相似材料的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the similar material

取值类型	弹性模量 E/MPa	抗压强度 R_c/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比 μ
理论值	313.78	0.677	21	0.350
实测值	310.00	0.684	21	0.331

2.2 试件制作

试件由2层模型连接而成,两层模型尺寸均为 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,另加设两片尺寸为 $0.78 \text{ m} \times 0.78 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$ 的砂浆垫片,分别置于两层模型的外侧。两层模型一层为毛洞,一层布置有锚杆,锚杆布置参照现场施工设计图布置,自隧道竖向对称轴左右各 55° 范围内布置长锚杆, $55^\circ \sim 90^\circ$ 范围内布置短锚杆,共布置9层,相邻两层梅花形布置,布置角为 $10^\circ/\text{根}$ (图1)。长锚杆长为82 mm,短锚杆长为55 mm。

2.3 试验量测内容

试验中测量的主要内容是围岩和锚杆的应变场,围岩的应变测量主要采用BQ120-4BA型电阻应变片,在拱腰、拱肩和拱顶位置各布置1条测试

线(图2)。锚杆的应变采用BE120-3AA型电阻应变片,在锚杆表面黏贴应变片测试锚杆的应变值。

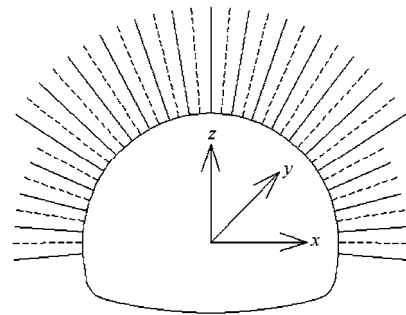


图1 锚杆布置示意图

Fig.1 Sketch of distribution of bolts

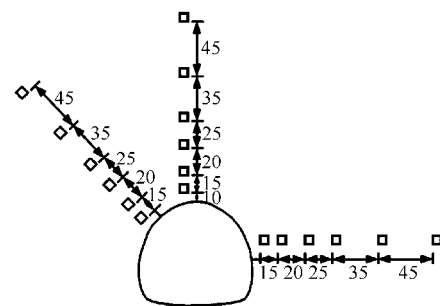


图2 测试线布置(单位: mm)

Fig.2 Monitoring line(unit: mm)

3 试验结果分析

3.1 应力测试结果

本次试验在岩土工程大型真三轴物理模型试验机上进行,在模型试件装入模型试验机样室之后,即开始同步施加水平荷载和垂直荷载(水平荷载和垂直荷载之比为1:1,施加荷载的速度为30 kN/min),荷载级别100 kN相当于实际工程中地应力水平,本次试验最终荷载为200 kN。

根据试验过程中每步荷载时所测得的各测试线上测试点的径向应变值 ϵ_r 和切向应变值 ϵ_θ 计算出各测点的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 。对锚杆加固模型各部位的测试线,作出其在50、100、150 kN不同荷载级别径向和切向应力曲线如图3所示。

由图3可以看出,锚杆支护后围岩体径向应力的变化规律比起毛洞^[13]有一个显著的不同,并非是随着距洞壁距离的增加而增大,而是在锚固范围(距洞壁 $0.73r$, r 为洞半径)内径向应力是先上升、后下降的,存在一个峰值。超出了锚固范围,才随着离洞壁距离的增大而增大。以拱顶处为例,在荷载级别为100 kN时,在锚固范围(距洞壁 $0.73r$)内,径向应力先是随着离洞壁距离的增大而增大,在距洞壁 $0.41r$ 处测点应力最大,为0.29 MPa,随后降

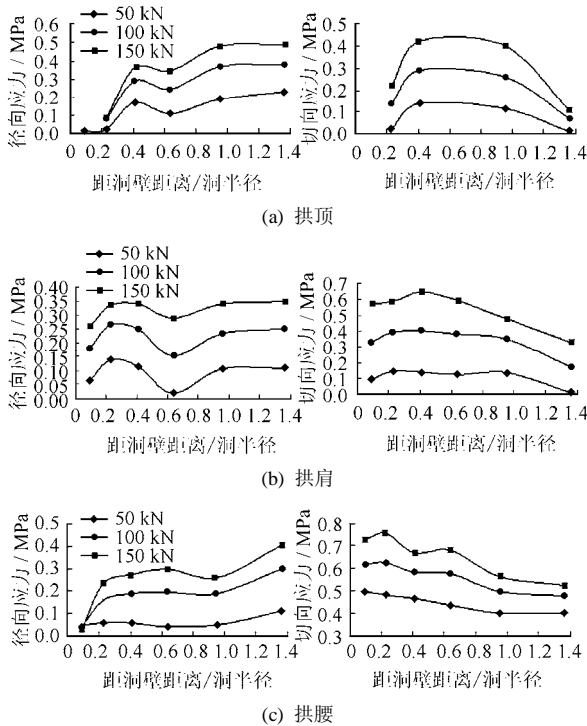


图3 不同荷载条件下径向应力和切向应力的比较
Fig.3 Comparisons between radial stress and tangential stress under different loading conditions

低，在距洞壁 0.63r 处测点应力为 0.24 MPa。超出了锚固范围后，应力则随着离洞壁距离的增大而增大，在离洞壁最远处测点径向应力最大，为 0.38 MPa。锚杆层切向应力的变化规律和毛洞是类似的，在洞壁附近应力集中，过了峰值点后随着离洞壁的距离增大切向应力随之降低，最后趋于稳定。

现选取毛洞和锚杆支护模型在同一级荷载（100 kN）下拱肩部位测试线的应力进行对比分析（图4）。由图4可以看出，经锚杆加固后径向应力整体有了一定程度的提高，锚杆层围岩体的径向应力要高于毛洞层，而且在锚固范围（距洞壁 0.73r 内）内测点径向应力的提高程度要大于锚固范围外的测点。锚固范围内距洞壁距离 0.227r 处测点径向应力提高程度最大，毛洞层此测点径向应力大小为 0.04 MPa，锚杆层此测点径向应力大小为 0.266 MPa，较毛洞层提高了 0.226 MPa。毛洞层距洞壁最远处测点径向应力大小为 0.145 MPa，而锚杆层距洞壁最远处测点径向应力大小为 0.25 MPa，较毛洞层提高了 0.105 MPa。可见锚杆对锚固体施加围压，导致径向应力整体有了一定程度的提高，且在锚固范围内比较明显，离锚固范围越远作用越弱。

锚杆层和毛洞层的切向应力变化规律是一致的，均为在洞壁附近应力集中，过了峰值点后离洞壁的距离增大应力随之降低，最后趋于稳定。在锚

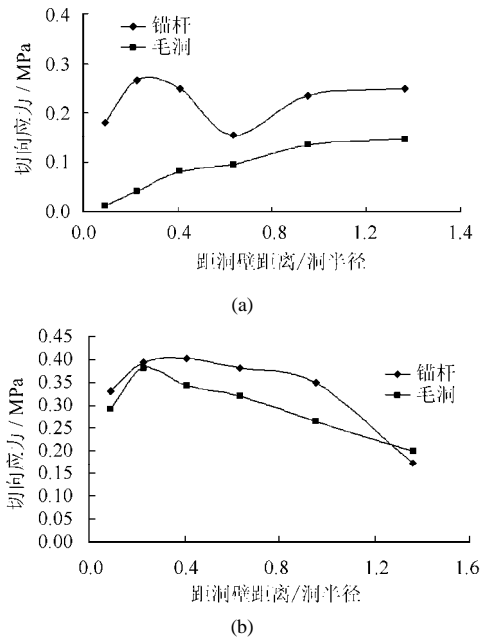


图4 毛洞和锚杆支护下径向应力和切向应力的比较
Fig.4 Comparisons of radial stress and tangential stress between unreinforced tunnel and bolt-reinforced tunnel

固范围以内锚杆层围岩体的切向应力要略大于毛洞层的应力，锚固范围以外两者是比较接近的。

锚杆所穿过的围岩依次分为 3 个部分：变形区、过渡区和稳定区。锚固圈包括稳定性较弱的碎裂区和部分塑性变形较大的塑性区。由于锚杆的约束作用，临空面附近稳定性较弱的岩体与深部稳定性较好的岩体通过锚杆连接在一起，增强了岩体结构的整体作用，使得围岩的整体性得到了显著提高，围岩的稳定性亦大大提高。随着围岩变形的增加，碎裂区的范围也在随之增大，在围岩碎胀变形的作用下杆体产生了一个径向锚固力，对锚固岩体施加围压，故锚固圈内围岩体的应力实质上是初始应力和锚杆施加围压的叠加，一方面将开挖后因二次应力调整形成的二向应力状态恢复到有利于稳定的三向应力状态，其峰值强度和残余强度均得到了提高；另一方面在锚杆的作用下岩体得以挤压加固，表面裂隙闭合，抑制了碎胀变形的发展，使得锚杆周围岩体的材料参数，如凝聚力、内摩擦角、抗压强度及弹性模量等得到了提高，也即提高了围岩的强度。故其变化规律不同于支护前的应力变化规律。

3.2 锚杆轴力测试结果

根据试验过程中锚杆上应变片测得的应变值计算出锚杆的轴力，作出拱腰和拱顶部位的锚杆随荷载变化的轴力沿杆长分布图如图5所示。

锚杆在加载初期（50、70、90 kN）受力状态为受压，这与工程实际是不一样的，原因为本次试验为先开洞先支护后加载。由于衬砌强度较高，所以

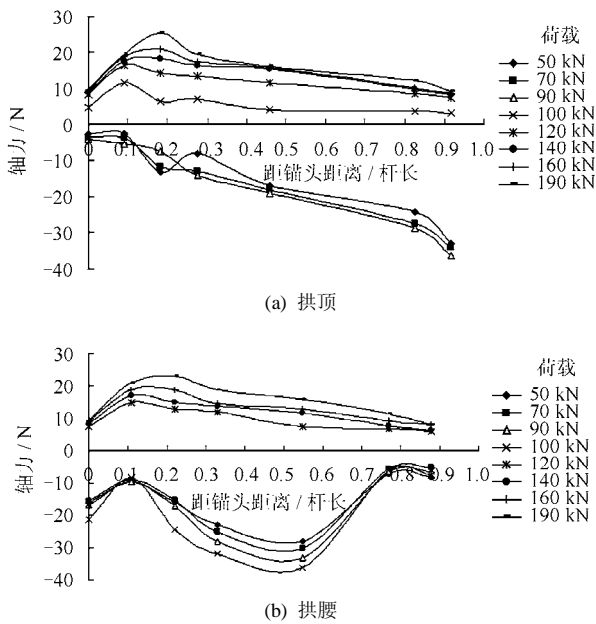


图5 锚杆轴力分布

Fig.5 Bolt axial force distributions along the bolt length

加载初期锚杆实际处于受压状态, 而非实际工程中的受拉状态。当荷载增大到一定程度后, 围岩开始向临空面变形时, 锚杆受力状态变为受拉, 而且可见到锚杆轴力最大点随着荷载的增加而逐渐向深部移动。以拱顶处锚杆为例, 荷载级别在 90 kN 之前锚杆均处于受压状态, 在荷载级别达到 100 kN 时锚杆开始处于受拉状态, 此时锚杆轴力最大点位于 $0.1L$ (L 为锚杆长) 处, 为 11.6 N。随着荷载的增加, 锚杆的轴力随之增大, 轴力最大点也逐渐向深部移动, 当荷载级别为 140 kN 时轴力最大点位于 $0.18L$ 处, 为 18.3 N; 当荷载级别为 230 kN 时, 轴力最大点进一步内移, 位于 $0.275L$ 处, 大小为 28.5 N。

由前文分析, 锚杆所穿过的围岩依次分为 3 个部分: 变形区、过渡区和稳定区。锚固圈包括稳定性较弱的碎裂区和部分塑性变形较大的塑性区。洞室开挖后, 洞壁附近围岩失去原来支撑, 向临空方向变形, 属于变形区, 岩体在锚杆上施加的摩阻力朝向洞内; 深部围岩变形较为平缓, 属于稳定区, 摩阻力朝向洞外。锚杆在围岩体内是一自身平衡体, 锚杆上轴力最大点与摩阻力方向发生反向的点相对应。随着荷载的增加, 变形区范围增大, 摩阻力反向点即锚杆轴力最大点也是逐渐向深部移动的, 摩阻力的增大同时也导致了锚杆轴力的增大。

4 数值模拟研究

4.1 计算模型与参数

数值计算模型的尺寸和物理模型一致, 为

$0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.2\text{ m}$, 所施加的边界条件与模型试验相符, 计算过程和模型试验一样均为先开洞先支护后加载, 与模型试验的加载相对应, 荷载大小取 $0.1\sim 0.7\text{ MPa}$, 其中 0.3 MPa 约相当于模型试验中 100 kN 的荷载。岩体的本构模型选用应变软化模型。利用相似材料实验室测试基本参数进行围岩力学参数反演分析, 经过多次反算, 确定了摩擦角、黏聚力、抗拉强度和剪胀角与塑性应变的关系。锚杆采用 FLAC^{3D} 中的 Cable 结构单元。锚杆的作用既有改善围岩应力状态的力学作用, 又有提高岩石力学参数的物理作用^[14], 但数值计算中线性杆单元不能有效地反映锚杆这一复杂的支护效应。因此本次分析采用等效方法, 将锚杆的物理作用通过提高围岩力学参数来实现。经过多次试算, 将锚杆加固范围内岩体的弹性模量、黏聚力、内摩擦角提高 10% 左右可以获得较好的等效效果。

4.2 塑性区

围岩在加载下塑性区如图 6 所示。

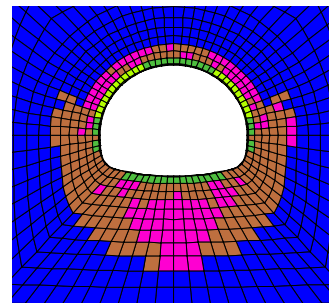


图6 塑性区状态

Fig.6 Plastic zone state

由图中可见, 围岩体的破坏形式主要是剪切破坏, 且由于锚杆长度的不一样, 塑性区的范围也有着明显的区别, 隧道竖向对称轴左右各 55° 范围内锚杆长度要长于 $55^\circ\sim 90^\circ$ 范围内, 其塑性区范围也要小。拱底未进行任何支护, 塑性区范围最大。

4.3 围岩体应力分布

根据应力计算结果 (图 7), 以拱顶处在各级荷载下的应力值 (图 8) 为例对围岩体的应力分布进行分析。

由图 8(a) 可见, 加上支护后围岩体的径向应力与毛洞相比有着明显的不同, 并非是一直随着离洞壁的距离增加而增加, 而是在锚固范围内呈现先上升后下降的趋势, 这一点和模型试验得到的结果是吻合的, 可见锚杆施加的围压和初始应力叠加后改变了其应力变化规律。以拱顶处测线在荷载级别为 0.3 MPa 时的应力分布为例, 锚固范围内共 7 个测点, 第一个测点距洞壁 $0.033r$, 其应力大小为

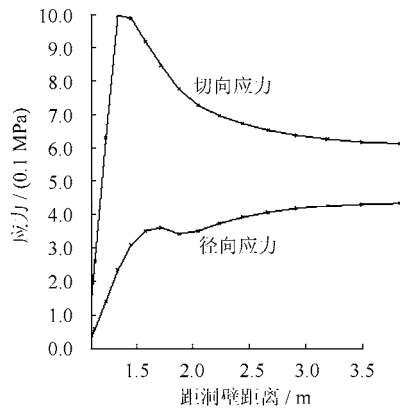
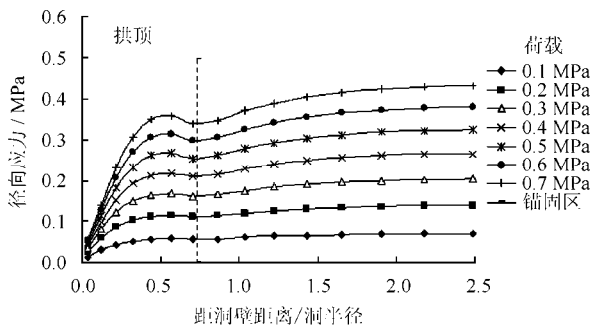
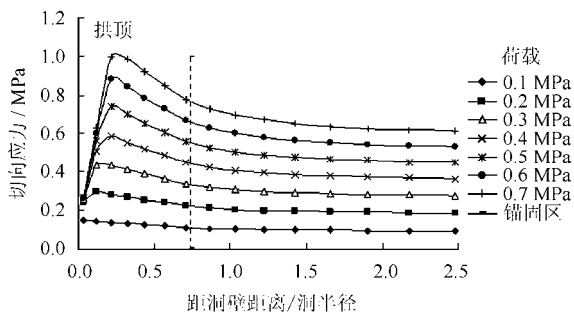


图 7 径向应力和切向应力

Fig.7 Radial stress and tangent stress



(a) 径向应力



(b) 切向应力

图 8 不同荷载条件下径向应力和切向应力的比较

Fig.8 Comparisons between radial stress and tangential stress under different loading conditions

0.015 MPa, 随着离洞壁距离的增大, 应力值逐渐增大, 到距洞壁距离为 $0.566r$ 处的第 6 个测点, 应力升至最大, 为 0.116 MPa; 然后到距洞壁距离为 $0.706r$ 处的第 7 个测点, 应力降为 0.111 MPa。锚固范围之外共 8 个测点, 其应力值随着距洞壁距离的增大而增加, 从距洞壁距离为 $0.861r$ 的第 8 个测点到距洞壁距离为 $2.48r$ 的第 15 个测点, 应力值从 0.166 MPa 逐渐升高到 0.204 MPa。

由图 8(b)可见, 围岩体的切向应力变化规律为在洞壁附近处应力集中, 过了峰值点后随着离洞壁距离的增加而降低, 且随着荷载级别的增大, 塑性区范围的增大, 峰值点距洞壁的距离是逐渐增大的。以拱顶测线为例, 在荷载级别为 0.1 MPa 时, 距洞

壁距离为 $0.033r$ 处的第 1 个测点为峰值点, 随着荷载级别的增加, 峰值点逐渐远离洞壁, 在荷载级别为 0.7 MPa 时, 峰值点移至距洞壁距离为 $0.216r$ 处的第 3 个测点。原因是洞室开挖后原有天然应力状态被破坏, 洞周二次应力的重分布造成应力集中, 围岩受到的应力超过其强度, 进入塑性状态, 导致应力向围岩深部转移, 同时塑性区岩石不断向洞室方向发生位移。在这个过程中塑性区的岩石强度有明显的降低, 自塑性区边界上的峰值降低到洞壁为残余值。模型试验中由于测点数量有限, 并未能反映出这一规律。

4.4 锚杆轴力

计算过程中对锚杆轴力进行了监测 (图 9), 据此作杆体轴力分布图 (图 10)。

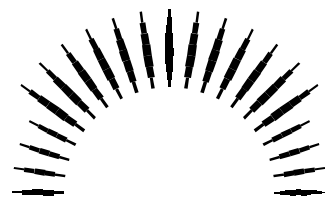


图 9 锚杆轴力计算结果

Fig.9 Bolt axial forces

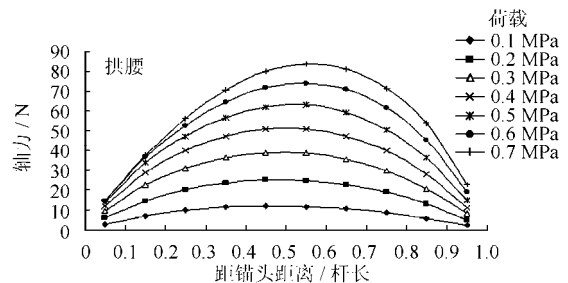


图 10 锚杆轴力沿杆长分布示意图

Fig.10 Bolt axial forces along the bolt length

由图可见, 锚杆的轴力均为拉力, 且随着荷载的增加而增加的, 在同级荷载下锚杆轴力沿杆长的变化规律为先增加后减小, 轴力最大点位于锚杆中间, 且随着荷载的增大, 轴力最大点是逐渐往深部移动的。在荷载级别为 0.1 MPa 时, 轴力最大点位于锚杆的第 4 段, 大小为 11.98 N; 荷载级别为 0.4 MPa 时, 轴力最大点即移到锚杆的第 5 段, 大小为 51.06 N。由图可见, 随着荷载的增加, 塑性区范围的增加, 锚杆轴力逐渐增大, 轴力最大点也逐渐向深部转移, 数值模拟和模型试验反映的锚杆轴力变化规律是一致的。

5 结论

采用室内大型物理模型试验和数值模拟相结

合的手段,对隧道在毛洞和锚杆支护条件下应力变化规律和锚杆的轴力变化规律进行了研究,得到以下结论:

(1) 所研制的相似材料主要物理力学治疗的理论值和实测值较为接近,性能稳定,试验重复性好;加载设备大型真三轴模型试验机 3 个方向上均能通过轴向加载系统独立加压,自动化控制,并能实时采集数据;应变测试技术能真实准确地测得围岩体和锚杆的应变变化过程。试验条件能较好地满足大型模型试验的需要。

(2) 数值模拟采用和模型试验相同的边界条件,有效地弥补了模型试验无法实现全场的定量监测这一缺憾,两者的结果具有良好的一致性。

(3) 锚杆的作用既有改善围岩应力状态的力学作用,又有提高岩石力学参数的物理作用。力学作用就是锚杆的锚固力作用于围岩,将开挖后因二次应力调整形成的二向应力状态恢复到有利于稳定的三向应力状态,改善了围岩的应力状态,提高了围岩的承载能力;而物理作用就是锚杆的作用下岩体得以挤压加固,表面裂隙闭合,改善和提高了岩石强度 R_c 、弹性模量 E 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等力学与变形参数。

(4) 锚杆在围岩体内是一自身平衡体,锚杆上轴力最大点与摩阻力方向发生反向的点相对应。由于本次试验为先开洞先支护后加载,加载初期锚杆处于受压状态,当荷载增大到一定程度后,围岩开始向临空面变形时,锚杆受力状态变为受拉,随着荷载的增加锚杆轴力逐渐增大且轴力最大点逐渐向深部移动。

参 考 文 献

- [1] 顾金才,沈俊,陈安敏,等. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 917—921.
GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Model test study of strain distribution regularity in rock mass caused by prestressed anchorage cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 917—921.
- [2] 翟英达. 锚杆预紧力在巷道围岩中的力学效应[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 856—859.
ZHAI Ying-da. The mechanics effect of bolt pretension in roadway surrounding rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(8): 856—859.
- [3] 杨强, 杨晓君, 周维垣. 水布垭枢纽地下厂房围岩稳定及锚固分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 11—15.
YANG Qiang, YANG Xiao-jun, ZHOU Wei-yuan. Numerical analysis on stability and grouted bolts of surrounding rock of Shuibuya underground power plant[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(4): 11—15.
- [4] 张社荣, 顾岩, 张宗亮. 超大型地下洞室围岩锚杆支护方式的优化设计[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 47—52.
ZHANG She-rong, GU Yan, ZHANG Zong-liang. The optimized design of rockbolts supporting the large-scale underground cavities[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2007, 26(5): 47—52.
- [5] 谷栓成, 姚国圣, 刘娟, 等. 锚杆在软岩中作用机理的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(41): 74—76.
GU Shuan-cheng, YAO Guo-sheng, LIU Juan, et al. A study on the acting mechanism of bolts in soft rock[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)**, 2005, 24(41): 74—76.
- [6] 姚显春, 李宁, 陈蕴生. 隧洞中全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2272—2276.
YAO Xian-chun, LI Ning, CHEN Yun-sheng. Theoretical solution for shear stresses on interface of fully grouted bolt in tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2272—2276.
- [7] 方勇, 何川. 全长黏结式锚杆与隧道围岩相互作用研究[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 111—116.
FANG Yong, HE Chuan. Study on the interaction of whole bonded rock bolt and tunnel surrounding rock[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(6): 111—116.
- [8] 尤春安, 高明, 张利民, 等. 锚固体应力分布的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 63—66.
YOU Chun-an, GAO Ming, ZHANG Li-min, et al. Experimental research on stress distribution in anchorage body[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.1): 63—66.

- [7] HOEK E. 实用岩石工程技术[M]. 刘丰收, 崔志芳, 王学潮, 等译. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [8] HANDY R L, PITT H H, ENGLE L E, KLOCKOW D E. Rock borehole shear test[C]//Proceedings of 17th Symposium on Rock Mechanics.[S. l.]: American Society of Civil Engineers, 1986: 1—11.
- [9] FAIUREMEZGER R A, WHITE D J, HANDY R L. Measurement of effective stress shear strength of rock[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization. Franci:[s. n.], 2008.
- [10] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [11] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley and Sons, 1943.
- [12] MEYERHOFF G G. Some recent research on bearing capacity of foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1963, 1(1):16—26.
- [13] 王玉杰. 向家坝水电站坝基岩体特性现场综合试验研究(中间成果报告)[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010.

上接第 724 页

- [9] 汤雷, 赵海云, 陆士良. 巷道围岩变形破坏过程中锚固力的变化规律[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 22—25.
TANG Lei, ZHAO Hai-yun, LU Shi-liang. Variation of anchoring force during the course of deformation and failure of surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(6): 22—25.
- [10] 刘泉声, 张华, 林涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3732—3737.
LIU Quan-sheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on stability of deep rock roadways in coal mines and their support measures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3732—3737.
- [11] 陈耕野, 刘斌, 万明富, 等. 韩家岭大跨度公路隧道应力监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5509—5515.
CHEN Geng-ye, LIU Bin, WAN Ming-fu, et al. Analysis of stress monitoring of a large-span highway tunnel in Hanjialing mountain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.2): 5509—5515.
- [12] 陈建勋, 姜久纯, 王梦恕. 黄土隧道网喷支护结构中锚杆的作用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 71—75.
CHEN Jian-xun, JIANG Jiu-chun, WANG Meng-shu. Function of rock bolt of lattice girder and shotcrete support structure in loess tunnel[J]. **Chinese Journal of Highway and Transport**, 2007, 20(3): 71—75.
- [13] 陈浩, 杨春和, 李丹, 等. 软岩隧道锚杆支护作用的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2922—2927.
CHEN Hao, YANG Chun-he, LI Dan, et al. Model test study on the mechanism bolt in soft rock tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2922—2927.
- [14] 高谦, 刘福军, 赵静. 一次动压煤矿巷道预应力锚索支护设计与参数优化[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 859—864.
GAO Qian, LIU Fu-jun, ZHAO Jing. Prestressed anchor supporting design and parameters optimization for a coal tunnel affected by first mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 859—864.