

文章编号: 1000-7598(2012)增1-0277-06

不同支护条件下锚杆支护作用的 模型试验研究与数值分析

陈 浩¹, 任伟中¹, 舒中根², 李 丹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. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100097; 3. 武汉科技大学 城市学院, 武汉 430065)

摘 要: 以重庆至长沙公路共和隧道为研究对象, 研制出相似模型材料和配套试验设备, 进行不同长度锚杆支护条件下的隧道超载试验。采用应变测量技术, 测量两种不同长度锚杆支护工况下的隧道关键部位的应变值, 据此分析围岩体在锚杆支护后的应力变化规律。通过模型材料室内试验, 获取岩体相关计算参数, 采用与模型试验相同的边界条件进行相应工况的有限元数值模拟, 研究围岩体的变形量、应力场和锚杆轴力因锚杆长度不同而产生的变化。结果表明, 模型试验和数值模拟反映围岩体应力和锚杆轴力因锚杆长度的不同而产生的变化是一致的。

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: U 451

文献标识码: A

Model test study and numerical analysis of mechanism of anchor bolt under different supporting conditions

CHEN Hao¹, REN Wei-zhong¹, SHU Zhong-gen², LI Dan³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, China; 2. China Highway Engineering Consulting Group Company Ltd., Beijing 100097, China;

3. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: According to rock character of a certain soft rock tunnel of Chongqing to Changsha highway, similar model materials and supporting test equipments are developed to reproduce the whole process of progressive failure of surrounding rock under different supporting conditions. Through solving a series of technological matters in execution and installation and testing, by using the strain measuring technology, the strain of key parts of the surrounding rock under different supporting conditions are measured; according to this, the variability of the stress of surrounding rock are studied. By model materials laboratory determining the related parameters of rock mass, the numerical simulation are worked with the same boundary condition as the model test, according to this, the stress field and the deformation of the surrounding rock are studied; the variation of the axial force of the anchor bolt is studied. We compare the variation of stress of the surrounding rock and the variation of the axial force of the anchor bolt under different supporting conditions 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; ture triaxial model-test machine

1 引 言

锚杆是地下工程的支护手段之一。20 世纪 60 年代末期, 随着新奥法的发展以及全长粘结式锚杆的出现, 进一步确定了锚杆在隧道支护结构中的地

位, 锚杆的使用范围也不断扩大, 许多国家都在锚杆的作用机制和支护效果上进行了大量的研究, 也取得了不少成果^[1-10], 但锚杆在隧道支护体系中到底发挥怎样的作用还不十分清晰。通常认为, 锚杆的支护效应有 4 种: 悬吊效应、增强效应、成拱效

收稿日期: 2011-03-31

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资助 (No. SKLZ08064); 国家科技支撑计划资助 (No. 2009BAK53B03)。

第一作者简介: 陈浩, 男, 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

应和内压效应。对于硬岩,锚杆的作用效果是可以保持岩块和控制岩块的移动,使围岩成为一体,促进平衡拱的形成;对于软岩,锚杆的作用效果是增加内压,以减小围岩塑性区和隧道变形^[11]。

实际上,锚杆的加固作用是多种效应同时产生作用的结果,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,对不同长度的锚杆的支护作用进行研究,能为优化设计提供参考,还可以丰富和发展隧道的支护理论和方法,具有重要的意义。

2 工程背景

重庆至长沙公路共和隧道全长4741 m,最大埋深为1000 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。根据地应力测量资料可知,最大水平主应力与垂直应力量值相差不大,约为20 MPa。

3 模型试验设计

3.1 相似材料

首先将软弱破碎隧道围岩从力学上概化为均匀介质,经过多组不同成分相似材料的配比试验,最终选用聚酰胺、环氧树脂、硅橡胶、硅橡胶固化剂、重晶石粉、砂和汽油的某种配比作为岩类的相似材料,所选用的材料满足相似判据 $C_\gamma C_1 / C_\sigma = 1$ (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,考虑到粘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,弹性模量 $E = 3 \times 10^3$ MPa,基本满足相似要求。砂浆的相似材料选用选用环氧树脂、聚酰胺、硅橡胶、硅橡胶固化剂和汽油所调配的粘结剂,粘结作用较好。

表1 相似材料的物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of the similar material

方法	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

3.2 模型试验装置

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)三个方向均由轴向加载系统独立加压。

隧道模型试验分“先开挖后加载”和“先加载后开挖”两种方法,这两种条件下,围岩的位移场不同,但应力场几乎是一致的^[12]。尽管“先加载后开挖”与实际情况相符,但本试验重点在于研究应力场的分布特征,采用了“先开挖后加载”的试验方法,以通过不同附加荷载代替地应力,实现隧道在不同地应力条件下的试验方案,达到研究隧道在不同应力状态、支护条件下围岩应力变化规律的目的。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,最终荷载为200 kN。

在模型试验过程中,采用针孔摄影机进行实时内窥摄影以监控洞室的整个破坏过程;采用应变测试装置测量围岩和锚杆的应变,在拱腰、拱肩和拱顶位置各布置1条测试线(图1)。

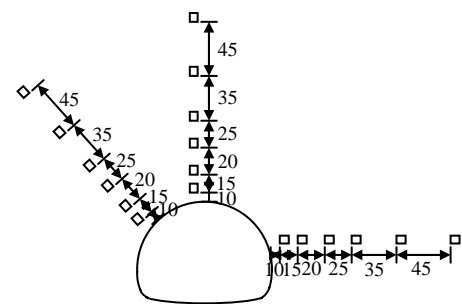


图1 测试线布置(单位: mm)
Fig.1 Monitoring line(unit: mm)

3.3 试验工况

本次试验主要进行两种工况的模型试验:模型尺寸均为 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,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度/根(图2)。工况1(短锚杆支护):锚杆长度分别为81 mm和55 mm;工况2(长锚杆支护):锚杆长度分别为109 mm和91 mm。为了保证两种工况的试验是在相同的边界条件和荷载下进行,制作时将2层模型连在一起,另加设2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2层模型的外侧,这样就形成了一个 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的试件(图3)。垫片尺寸略小是为了保证加载时左右水平向及竖向荷载只加载于模型试件上,垫片只起前后

水平向传递荷载作用。

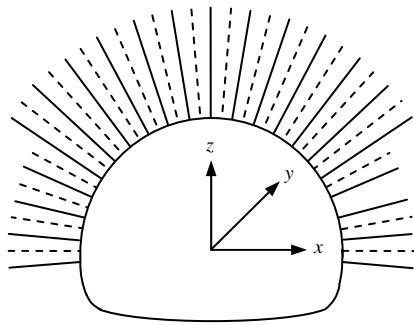


图 2 锚杆布置示意图

Fig.2 Sketch of distribution of anchor bolts

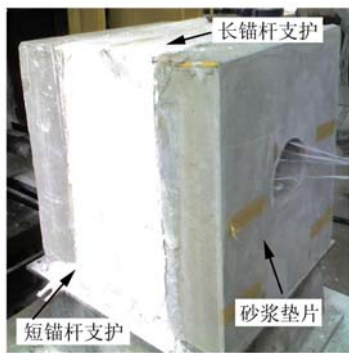


图 3 模型试件

Fig.3 Physical model

4 试验结果分析

4.1 变形破坏过程

由内窥摄影观测可知，最开始出现变形的是拱脚部位，出现长度很短的裂纹，随着荷载的增加，未见裂纹扩展，但洞壁有零星的小块脱落。随着荷载的进一步增加，拱脚部位出现小块的崩裂，其余部位未见明显的变形迹象。在卸载的过程中裂纹扩展，除此之外无其他明显破坏迹象。在卸载取出试件后可见明显的拱脚处两处裂纹向下延伸至模型边界。

4.2 应力测试结果

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 。对两种工况模型各部位的测试线，作出其在 100 kN 荷载级别下径向和切向应力的对比，如图 4 所示，图中， d 为距洞壁距离； r 为洞半径。由图可见，二者径向应力的变化规律是一致的，锚固范围内都是先上升后下降的，在锚固范围内存在一个峰值，出了锚固范围后随着离洞壁距离的增加而增加。对应力大小

进行比较可知，在锚固范围内，长锚杆层的径向应力要大于短锚杆层；在锚固范围外，二者则比较接近。可见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，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，而锚杆长度的增加其产生的径向锚固力也是增加的。

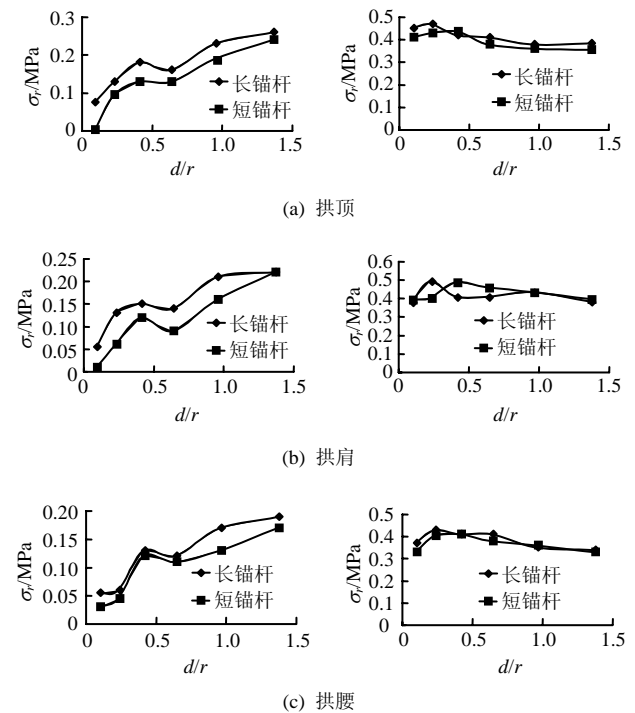


图 4 不同支护条件下径向应力和切向应力的比较

Fig.4 Comparisons between radial stress and tangential stress under different supporting conditions

二者切向应力的变化规律是一致的，均在洞壁附近应力集中，过了峰值点后应力随着离洞壁距离的增加而降低。但长锚杆层的峰值点比短锚杆层更靠近洞壁，是因为长锚杆对锚固岩体施加的围压要大于短锚杆，其支护效果也要优于短锚杆，故塑性区的范围也要小于短锚杆。对其应力大小比较可知，在塑性区内长锚杆层围岩体的应力要大于短锚杆，塑性区外二者的应力比较接近。其原因是长锚杆的支护效果优于短锚杆，对围岩体的峰值强度和残余强度的提高都要强于短锚杆，故塑性区内围岩体的应力要大于短锚杆支护工况。

5 数值模拟

5.1 本构模型与参数取值

岩体的本构模型选用应变软化模型,是基于与剪切流动法则不相关联而与拉力流动法则相关联的摩尔-库仑模型,差别在于塑性屈服开始后,黏聚力、内摩擦角、剪胀扩容和抗拉强度可能会发生变化。结合模型试验及室内试验获取了岩土体相关计算参数。

数值计算模型的尺寸和物理模型一致,所施加的边界条件和荷载均与模型试验相符。锚杆采用FLAC3D中的cable结构单元。锚杆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^[13],但在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,获得了较好的等效效果。

5.2 变形量对比

取不同工况在同级荷载(0.3 MPa)下的变形情况进行比较,见表2。由表中可见,各部位位移均为毛洞的最大,锚杆支护后位移减小,且长锚杆支护下各部位位移要小于短锚杆支护下。

表2 不同工况下位移

Table 2 Comparisons of displacements under different supporting conditions

位置	不同工况的位移/mm		
	毛洞	短锚杆支护	长锚杆支护
拱顶	0.189	0.124	0.121
拱腰	0.193	0.163	0.159

5.3 围岩体应力对比

对3种工况荷载级别为0.3 MPa时的围岩体应力进行比较,各部位径向和切向应力曲线如图5所示。由图可见,同级荷载下毛洞的径向应力最小,且其应力是随着距洞壁距离的增大而增大。加设锚杆后径向应力有了一定程度的提高,由于锚杆对锚固岩体施加了围压,导致其应力变化规律有了明显的不同,表现为在锚固区内应力存在一个峰值,是先上升后下降的,对长锚杆和短锚杆来说区别主要在于锚固区内长锚杆的径向应力要高于短锚杆,锚固区外比较接近。以拱顶部位测线为例,距洞壁距离最远的测点,径向应力为0.183 MPa,加设短锚杆后,其值为0.212 MPa;加设长锚杆后,其值为0.224 MPa。在锚固范围内,短锚杆支护工况下最大径向应力为0.170 MPa,长锚杆支护工况下最大径

向应力为0.215 MPa,可见支护强度的提高对于提高围岩体的径向应力有着明显的作用,对于围岩体稳定性是有利的,且不同长度的锚杆的支护作用的不同主要体现在锚固范围内。

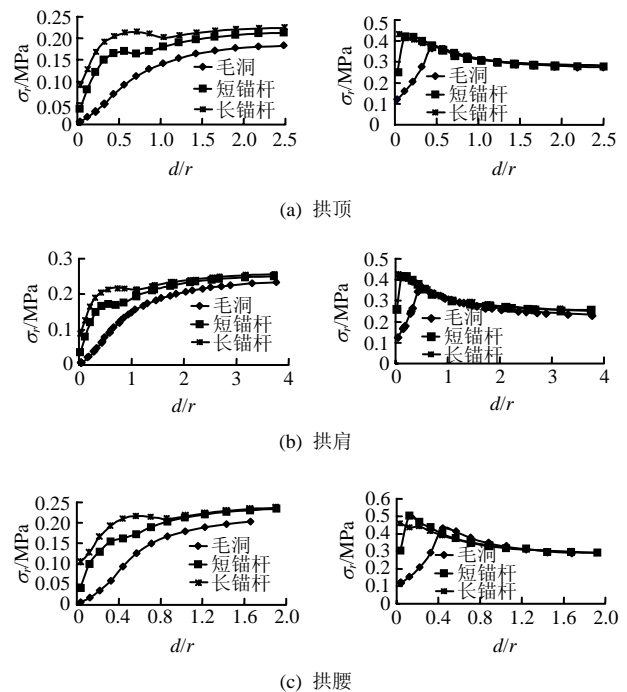


图5 不同支护条件下径向应力和切向应力的比较

Fig.5 Comparisons between radial stress and tangential stress under different supporting conditions

不同工况下应力峰值点距洞壁的距离有着明显的区别,支护强度越高,峰值点离洞壁越近,峰值应力也越大,但过峰值点后各工况切向应力差别不大。以拱顶测线为例,毛洞工况峰值点位于距洞壁 $0.440r$ 处的测点,其应力大小为0.370 MPa;短锚杆支护时峰值点位于距洞壁 $0.120r$ 处的测点,其应力大小为0.426 MPa;长锚杆支护时峰值点位于距洞壁 $0.033r$ 处的测点,其应力大小为0.433 MPa。距洞壁距离最远的测点($2.483r$),毛洞工况的应力值为0.276 MPa,短锚杆支护时应力值为0.282 MPa,长锚杆支护时应力值为0.283 MPa,区别并不特别明显。

临近临空面处测点的应力也有着明显的区别,以拱顶测线为例,该测点的应力在毛洞工况为0.122 MPa,短锚杆支护时为0.256 MPa,长锚杆支护时为0.433 MPa,可以认为塑性区岩体的强度的下降自塑性区边界上的峰值降低到洞壁为残余值,随着支护强度的提高,残余强度有着明显的提高。

由前文分析,锚杆所穿过的围岩依次分为三部分:变形区、过渡区和稳定区。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。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，整个锚固圈内岩体得以挤压加固，表面裂隙闭合，黏聚力、内摩擦角均得到提高，也即提高了围岩的强度。另一方面，通过轴向力改变了围岩的受力状态，使锚固体由二向应力状态转变为三向应力状态，其峰值强度和残余强度均得到了提高，同样达到了提高锚固体强度的目的，故锚固范围内锚杆层围岩体的切向应力要大于毛洞层的应力。锚杆长度的增加其对锚固岩体施加的围压也是增加的，故长锚杆对围岩体的峰值强度和残余强度的提高都要高于短锚杆。数值模拟和模型试验得到的结果是吻合的。

5.4 锚杆轴力对比

选荷载级别为 0.3 MPa 时的锚杆轴力进行比较，两种不同工况下拱顶和拱腰处的锚杆轴力对比如图 6 所示（长锚杆长度设定为 1）。由图可见，长锚杆的轴力明显要大于短锚杆，以拱顶处为例，长锚杆轴力最大为 61.42 N，短锚杆轴力最大为 52.38 N，长锚杆对于围岩体的支护作用要优于短锚杆。

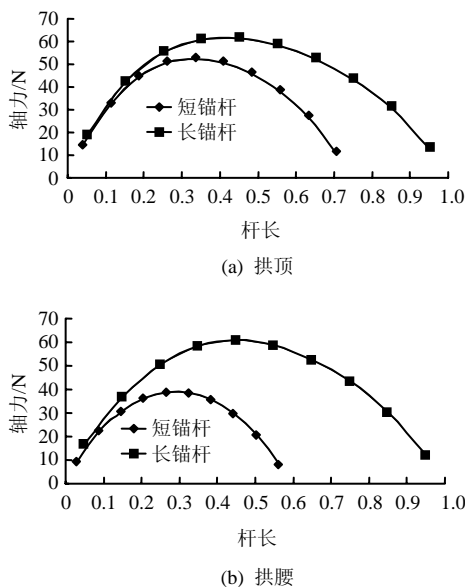


图 6 不同支护条件下锚杆轴力计算结果对比
Fig.6 Comparisons of axial forces of anchor bolt under different supporting conditions

6 结 论

(1) 同级荷载下毛洞的径向应力最小，锚杆长度增加，支护后径向应力也随之增大。对于切向应

力，不同工况的区别在于峰值点距洞壁的距离，支护强度越高，塑性范围越小，峰值点离洞壁越近，峰值应力也越大，但过了峰值点后切向应力差别不大，且塑性区内测点应力是随着支护强度的提高逐渐增大的，可见支护强度的提高对围岩的峰值强度和残余强度均有着明显的提高。

(2) 锚杆支护后，由于锚杆对锚固圈岩体施加了围压导致其应力变化规律有明显的不同，表现在支护范围内径向应力存在一个峰值，在支护范围内径向应力是先上升后下降的，支护范围外才随着离洞壁距离的增加径向应力增大，且锚杆长度的不同对于径向应力的影响更多的是体现在锚固范围内，锚杆长度的增加会导致锚固范围内应力的增加，但锚固范围外并无明显区别。

(3) 支护后锚杆各部位位移都会减小，支护条件的改善对于减小拱顶位移有着明显的作用，但对于拱底位移，锚杆长度的不同并无明显区别。

(4) 锚杆的轴力是随着荷载的增加而增加的，且随着荷载的增加，轴力最大点会逐渐往深部转移。长锚杆的轴力明显要大于短锚杆，可见长锚杆对于围岩体的支护作用要优于短锚杆。加设衬砌后由于衬砌承担了部分的支护作用，导致锚杆的轴力下降。

参 考 文 献

[1] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面深埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1618—1625.
TAN Zhong-sheng, YU Yu, WANG Ming-nian, et al. Experimental research on bolt anchorage effect on large-section deep-buried tunnel in loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1618—1625.

[2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.

[3] 靳晓光, 李晓红, 杨春和, 等. 深埋隧道-支护结构稳定性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1473—1476.
JIN Xiao-guang, LI Xiao-hong, YANG Chun-he, et al. Stability of surrounding rock-supports structure of deep buried tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1473—1476.

[4] 乔春生, 张清. 锚杆轴力分布与软弱岩体中隧道塑性区的关系[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 72—75.
QIAO Chun-sheng, ZHANG Qing. Relation between

- axial force distribution of rock bolt and plastic zone of the tunnel in soft and weak rock mass[J]. **Journal of The China Railway Society**, 1999, 21(2): 72—75.
- [5] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342—345.
HOU Chao-jiong, GOU Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 342—345.
- [6] 张延新, 蔡美峰, 乔兰, 等. 高速公路隧道开挖与支护力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1284—1289.
ZHANG Yan-xin, CAI Mei-feng, QIAO Lan, et al. Study on mechanical response to excavation and support or expressway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1284—1289.
- [7] 方勇, 何川. 全长粘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] 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(4): 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(4): 74—76.
- [9] 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): 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.): 63—66.
- [10] 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.
- [11] 郭小红, 王梦恕. 隧道支护结构中锚杆的功效分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2234—2239.
GUO Xiao-hong, WANG Meng-shu. Analysis of efficacy of rock bolt for tunnel support structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2234—2239.
- [12] 顾金才, 明治清. 锚固洞室洞周应变分布特征模型试验研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(8): 110—114.
GU Jin-cai, MING Zhi-qing. Model test study on strain distribution pattern around anchoring opening[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(8): 110—114.
- [13] 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.