

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-131-05

岩体隧道锚固作用分析

李新平¹, 宋桂红¹, 刘巍², 彭元平³

(1.武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2.武汉市桥口区桥口市政工程总公司, 武汉 430030;
3.中国葛洲坝集团第五工程公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 在工程实例中利用数值模拟方法对考虑和不考虑松动圈的岩体, 在不同工况下锚杆加固前后的径向、环向应力, 径向、环向位移以及锚杆轴向应力进行全面比较分析。研究锚杆和松动圈对隧洞围岩力学性质的影响, 结果表明考虑和不考虑松动圈相比, 洞室表面径向位移要明显大一些, 而且外界载荷越大, 二者的差值越大; 在锚杆加固作用下环向应力峰值无论是否考虑松动圈, 其出现位置都较加固前向洞壁方向移动, 同时围岩径向位移在加固前后变化很大, 随着外界载荷的增大, 径向位移减小越明显。锚杆支护的主要作用之一是控制围岩的变形和发展, 通过锚杆加固改善应力环境来提高围岩的稳定性。

关键词: 地下隧道; 锚杆支护; 锚固效应; 松动圈; 数值模拟

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Analysis of anchoring mechanism of underground rockmass tunnel

LI Xin-ping¹, SONG Gui-hong¹, LIU Wei², PENG Yuan-ping³

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of technology, Wuhan 430070, China; 2. Municipal Engineering Head Office of Qiaokou District, Wuhan 430030, China; 3. 5th Engineering Construction Co., Gezhouba Group Corp., Yichang, 443002)

Abstract: The underground tunnel anchoring mechanism is analyzed by using the numerical simulation method. In the case study, considering the existence and nonexistence of the loose loop, anchoring effect of the bolt on the wall rock mechanical properties is studied by analyzing the radial displacement and stress, the hoop displacement and stress of the wall rock and the axial stress of bolt. The radial displacement of the chamber surface in the loose loop model is larger than that in the no loose loop model. Under the action of the bolt, the place of peak value of the hoop stress is more approach the chamber wall. It indicated that one of the main functions is to control the displacement and bolt to enhance the stability of the wall rock through improving the stress state.

Key words: underground tunne; anchoring support; anchoring effect; blasting loose loop; numerical simulation

1 引言

在岩体地下隧道的施工加固中锚杆支护得到了广泛应用, 其锚固的基本原理是依靠锚杆周围地层的抗剪强度来传递结构物的拉力或保持地层开挖面自身的稳定。锚固的承载主体是经过应力重分布后的围岩, 并非传统刚性支护中的刚性砌体。在锚杆支护中, 锚杆改良了围岩的性质且与围岩共同工作成为一个密不可分的承载结构体系。锚固支护系统中允许围岩产生一定的变形(松弛), 以释放围岩体中的地应力或进行应力重新分布, 在有效的监测下控制围岩的变形^[1~3]。本文分析了岩体隧道围岩的

主要力学特点及锚杆在地下隧道中的加固机理, 推导了围岩松动圈的各种力学参数。在数值计算中按是否考虑松动圈力学参数变化两种情况, 分别计算了岩体隧道在不同载荷下锚杆施工前后的力学状况与锚固效果。

2 隧道围岩力学特点

2.1 隧道围岩力学特点

地层中的地应力绝大多数情况下都是压应力, 岩体之间是相互咬合挤紧的, 虽经开挖扰动, 也还能形成一个自承的体系。地应力主要包括自重应力和构造应力。自重应力一般比较明确, 与埋藏深度

收稿日期: 2005-04-30

基金项目: 湖北省环境岩土工程重点实验室项目资助计划。

作者简介: 李新平, 男, 1963年生, 博士生导师, 主要研究方向: 裂隙岩体损伤、断裂特性及结构模型、强度理论研究和岩土锚固支护的复合材料力学理论与技术; 爆破控制技术与爆破效应的研究。E-mail: xinpinglei@mail.whut.edu.cn

H 成正比。垂直向应力 $\sigma_y = \gamma H$, 其中 γ 为岩体重度。构造应力与地质构造有关, 或水平向受到挤压, 或受到褶皱, 比较复杂。地层不断受到自然侵蚀, 地表被切割, 并受到断层破碎带以及其它弱面的影响, 因此地层中的应力是各种作用效果的最后反应。

铅垂应力与水平应力的关系为: $\sigma_h = \lambda \sigma_y$, 其中 λ 为水平地应力 σ_h 与铅垂地应力 σ_y 之比, H 为地层覆盖厚度 (m); σ_y , σ_h 以 MPa 计。500 m 以内, $\lambda=0.5\sim 3.5$, 2 000 m 以上, $\lambda=0.35\sim 1.25$, 埋藏极深时地应力呈静水压分布, 即 $\lambda=1.0$ ^[4]。

2.2 岩体松动圈力学参数

地下洞室开挖后, 由于应力释放和施工对距洞壁一定范围内的围岩产生扰动等原因, 使得围岩的原始应力状态遭到破坏, 导致应力重新分布, 成形后的隧道围岩分为 3 个应力区, 即爆破松动圈、原岩应力区以及位于它们之间的应力升高区 (承载圈), 如图 1 所示。

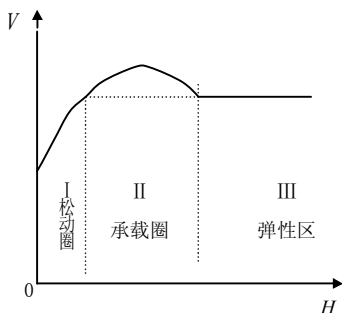


图 1 洞室围岩纵波波速与孔深关系曲线
Fig.1 Relationship between velocity of longitudinal wave and depth

一般情况下隧道原状围岩的力学参数 (E , V , c , ϕ , ρ , S_t , S_c) 是已知的, 而松动圈的岩体力学参数很难直接得到, 但可通过声波测量的方法间接求得^[5, 6]。实际施工过程中利用声波测试技术可以测量出围岩各个应力区的波速及松动圈的厚度。岩体松动圈的厚度视围岩情况而变化, 从几十厘米至一百多厘米不等。根据声波在围岩中的变化情况, 可以计算出松动圈岩体的各项平均力学参数, 但一般较原状围岩降低 40%~60% 不等。

由松动圈内的声波纵、横波速可以计算出松动圈岩体的泊松比及弹性模量即

$$\left. \begin{aligned} V_p / V_s &= [2(1-\nu)/(1-2\nu)]^{1/2} \\ E &= 2\rho(1+\nu)V_s^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 E 为岩体弹性模量; V 为岩体泊松比; ρ 为岩体密度; V_p 为纵波在岩体中的传播速度; V_s 为横波在岩体中的传播速度。

松动圈岩体的单轴抗压强度 S_{cs} 与未扰动围岩的单轴抗压强度 S_{cs} 之间存在以下关系:

$$S_{cs}/S_{cw} = (V_{ps}/V_{pw})^2 \quad (2)$$

同理, 松动圈岩体的抗拉强度 S_{ts} 与未扰动围岩的抗拉强度 S_{tw} 之间存在以下关系:

$$S_{ts}/S_{tw} = (V_{ps}/V_{pw})^2 \quad (3)$$

由摩尔-库仑定律, 松动圈岩石的凝聚力、内摩擦角、抗拉强度、单轴抗压强度之间存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} c &= 0.5(S_{cs}S_{cs})^{1/2}; \\ \phi &= \tan^{-1} [0.5(S_{cs} - S_{ts})/(S_{ts}S_{cs})^{1/2}]; \\ S_{ts} &= 2c \tan(45 - 0.5\phi); S_{cs} = 2c \tan(45 + 0.5\phi) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 c 为松动圈岩体凝聚力; ϕ 为松动圈岩体内摩擦角; S_{ts} 为松动圈岩体的抗拉强度; S_{cs} 为松动圈岩体的单轴抗压强度。

松动圈厚度可由声波测量数据计算求得:

$$h = 0.5x [(V_{pw} - V_{ps})/(V_{pw} + V_{ps})]^{1/2}$$

式中 h 为松动圈厚度; x 为折射波与直达波的临界距离; V_{pw} 为纵波在未扰动围岩中的传播速度; V_{ps} 为纵波在松动圈中的传播速度

3 岩体隧道的锚固效果数值计算

为了定量分析施工过程中对隧道围岩的扰动程度, 通过工程算例按是否考虑隧道围岩松动圈两种情况, 分别计算分析隧道在锚杆加固前后的力学状况来说明。锚固岩体是由岩体、锚杆和砂浆三种材料组成。

3.1 工程概况

3.1.1 隧道参数

隧道的横断面直径为 10 m, 轴线为一直线, 开挖在极深的岩体中(可认为是无限大的岩体)。隧道围岩的各项力学指标见表 1。

表 1 隧道围岩物理力学指标表

Table 1 Physico-mechanical parameters of tunnel rock mass						
岩性	V_p/V_s	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	ρ /g·cm ⁻³	c /MPa	f (tan ϕ)
砂岩	4 000/1400	1.0	0.35	2.2	0.7	0.7

假设松动圈岩体的泊松比与未扰动岩体一样, 取为 $\nu=0.35$, 松动圈厚度 $h=1.2$ m, 纵波在未扰动围岩中及松动圈的平均波速之比 $V_{ps}/V_{pw}=0.52/1.0$; 纵波在洞壁的表面波速为 1 600 m/s。由图 1 可见,

纵波波速在松动圈内是按曲线规律变化的，在文中假设它是线性变化的，由前述公式可推导出隧道松动圈岩石的其他各项物理力学指标，图中， $V_2=1\ 600\text{ m/s}$ ， $V_1=V_{pw}=4\ 000\text{ m/s}$ 。弹性模量的 2 个边界值：

$$E_2 = E(V_2/V_{pw})^2 = 0.16\text{ MPa}, E_1 = E\left(\frac{V_1}{V_{pw}}\right)^2 = 10\text{ GPa}。$$

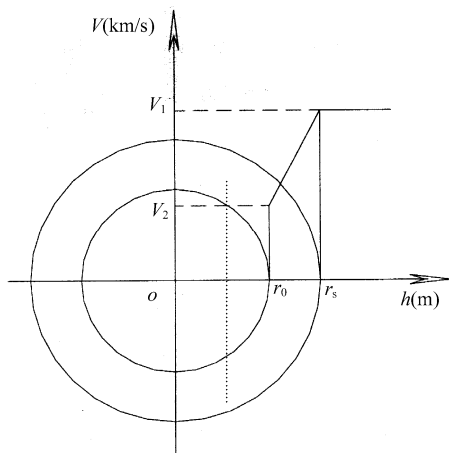


图 2 波速在围岩内的分布图

Fig.2 Profile of wave velocity in the wall rock

根据前述公式可得松动圈岩石的最小、最大凝聚力： $c_{s2} = c_w (V_{ps}/V_{pw})^2 = 0.112\text{ MPa}$ ， $c_{s1} = c_w \cdot (V_{ps}/V_{pw})^2 = 0.7\text{ MPa}$ ，未扰动围岩的平均抗拉、抗压强度分别为 $S_{tw}=0.197\text{ MPa}$ ， $S_{cw}=2.689\text{ MPa}$ 。所以松动圈岩体的平均抗拉、抗压强度分别为 $S_{ts} = 0.197\text{ MPa}$ ， $S_{cs} = 0.727\text{ MPa}$ 松动圈岩体的平均内摩擦角： $\tan\phi = 0.5(S_{cs} - S_{ts})/(S_{ts}S_{cs})^{1/2} = 0.7$ ，隧道松动圈围岩各项物理力学指标见表 2。

表 2 隧道松动圈围岩物理力学指标表
Table2 Physico-mechanical parameters of blasting loose loop rock mass

岩性	最小纵速 /m·s ⁻¹	最小弹模 /GPa	泊松比 ν	P /g·cm ⁻³	c /MPa	f
风化扰动砂岩	1 600	0.16	0.35	2.2	0.112	0.7

3.1.2 锚杆的材料常数及几何参数

锚杆间距：洞壁环向间距 $a=1.0\text{ m}$ ，洞轴方向间距 $b=1.2\text{ m}$ ，锚杆长度为 $l=2.5\text{ m}$ ，锚杆直径：25 mm，弹性模量为 210 GPa，泊松比 $\nu=0.3$ ，质量密度为 7.8 g/cm^3

3.2 地下隧洞锚固的数值模拟分析

数值分析计算采用 MSC. Marc 有限元软件进行分析，其中岩石单元采用 8 节点三维实体单元，锚杆钢筋采用 8 节点三维加筋单元模拟，岩石的材料

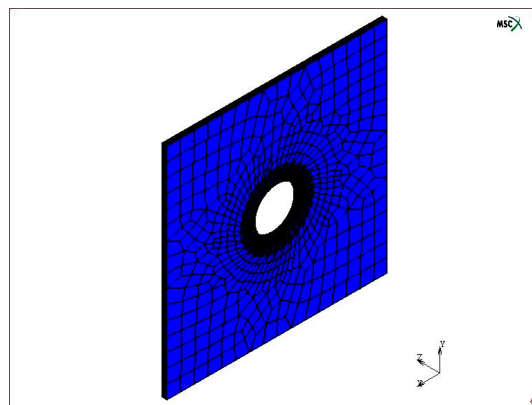
采用弹塑性材料，屈服准则采用线性 Mohr-Coulomb 屈服准则。

3.2.1 计算工况

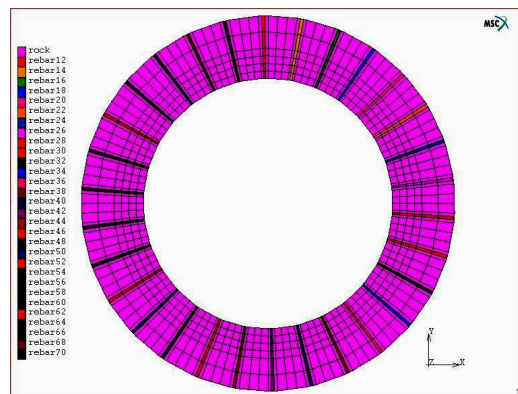
岩洞初始应力：假定无剪应力状态，只受水平应力和竖直应力 σ_1 ， σ_2 作用；考虑 σ_1/σ_2 为不同比值和是否考虑松动圈的以下 12 种工况组合，即为以下 4 种工况：(1)不考虑松动圈时无锚杆的计算；(2)不考虑松动圈时有锚杆的计算；(3)考虑松动圈时无锚杆的计算；(4)考虑松动圈时有锚杆的计算，并计算考虑 3 种情况，a: $\sigma_1/\sigma_2=1/1$ ；b: $\sigma_1/\sigma_2=1/3$ ；c: $\sigma_1/\sigma_2=0/1$ （注：如第 1 种工况在 $\sigma_1/\sigma_2=1/1$ 情况下称为工况 1a，其余类同）。

3.2.2 有限元计算及分析

隧道的单元划分及有限元计算模型见图 3。



(a)

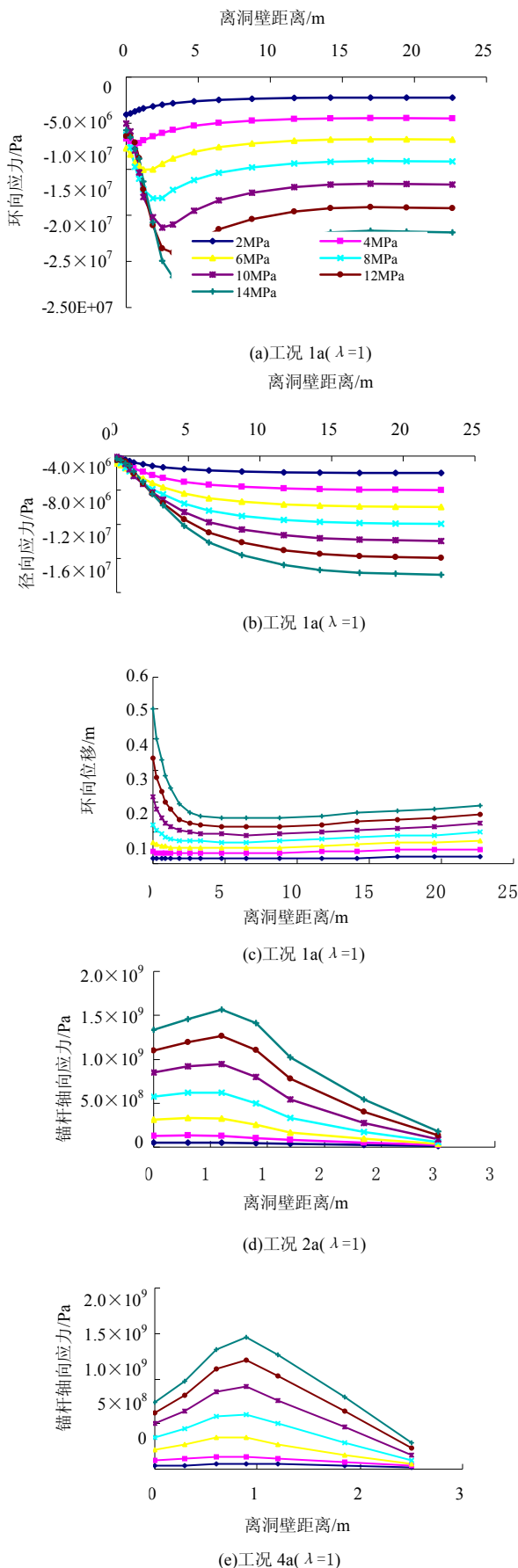


(b)

图 3 有限元模型立体图以及加筋局部正视图

Fig.3 Computation FEM diagram and reinforced part model

对于各种计算工况，通过有限元方法得出的数据作出环向应力图、径向应力图以及径向位移图，对于有锚杆支护的情况，还作了锚杆轴向应力图。如图 4 所示。

图 4 $\lambda=1$ 时在不同外荷载作用下的计算结果比较Fig.4 $\lambda=1$ computation result

通过以上计算和所作的曲线可以分析得出:

(1) 在无锚杆支护且 $\lambda=1$ 的加载情况下, 如果考虑松动圈的影响, 环向应力峰值出现向洞室内深处转移的现象, 说明围岩松动圈范围在进一步扩大, 二者的环向应力峰值的大小区别不大; 在加载比较小, 即弹性加载情况下 ($\sigma_1=\sigma_2=2\text{MPa}$), 无松动圈模型 (工况 1a) 的环向应力是逐渐减小至原始应力状态, 而松动圈模型 (工况 3a) 的环向应力峰值出现在松动圈界面上, 表现出围岩受爆破开挖破裂损伤而出现松动的情况; 这两种工况的径向应力的变化趋势大体保持一致; 松动圈模型 (工况 3a) 的洞室表面径向位移要明显大一些, 载荷越大, 二者的差值越大, 这是由于围岩松动岩性劣化所引起的, 这与实际情况是相符的。

(2) 从工况 1a~4a 的环向应力、径向应力和径向位移的计算结果曲线分析, 可以看出锚杆加固的主要效果有: 在锚杆加固作用下, 环向应力峰值无论是否考虑松动圈, 其出现位置都向洞壁方向移动, 也就是说锚杆加固减少了岩体的松动范围; 在弹性加载情况下 ($\sigma_1=\sigma_2=2\text{MPa}$ 时), 松动圈模型的锚杆加固 (工况 4a) 的环向应力也出现峰值, 这不是加载引起的, 而是围岩受爆破开挖破裂损伤而出现的松动情况; 围岩径向位移在加固前后变化很大, 载荷越大, 锚杆支护作用使径向位移减小的效果越明显, 可以认为锚杆支护的主要作用之一是控制围岩的变形和发展。

(3) $\lambda=1/3$ 时, 在洞室顶部垂直方向的径向应力变化曲线与 $\lambda=1$ 时的情况发生了较大变化, 即径向应力也出现了峰值, 峰值出现部位与环向应力较一致。由于环向应力和径向应力峰值都是压应力, 它们出现的部位锚杆较好地改善了围岩支承的应力条件。锚杆加固后, 环向应力和径向应力峰值都向洞壁移动, 锚杆加固通过改善应力环境来提高围岩的稳定性。锚杆加固前后的位移变形控制效果更加明显, 反映围岩自承能力和锚杆加固的共同支护作用效果。

(4) 从工况 2a, 4a, 2b, 4b 的锚杆轴向应力图可以看出, 随着外界载荷的增加, 锚杆轴向应力沿杆长的非均匀变化程度越大, 锚杆围岩浅部承受了较大的锚固力, 锚杆轴向应力峰值出现在离洞壁一定距离上; 在考虑松动圈模型中, 锚杆轴向应力峰值向围岩深部转移, 洞壁端锚杆轴向应力减小, 另一端锚杆轴向应力增加, 锚杆轴向应力峰值减少, 相应提高了锚杆轴向应力沿杆长的均匀变化程度;

$\lambda=1/3$ 时, 在洞室顶部锚杆轴向应力峰值与 $\lambda=1$ 相比增加了, 这是由于前者更好地控制了围岩变形使锚杆承受的荷载相应增加。

4 结 论

(1) 考虑松动圈的模型的洞室表面径向位移要明显大一些, 外界载荷越大, 二者的差值越大, 这是由于围岩松动岩性劣化所引起的。

(2) 弹性加载情况下松动圈模型的环向应力峰值出现在松动圈界面上, 表现出围岩受爆破开挖破裂损伤而出现松动的情况且环向应力峰值出现向洞室内深处转移的现象, 说明围岩松动圈范围在进一步扩大。

(3) 在考虑松动圈模型中, 锚杆轴向应力峰值向围岩深部转移, 洞壁端锚杆轴向应力减小, 另一端锚杆轴向应力增加, 锚杆轴向应力峰值减少, 因此相应提高了锚杆轴向应力沿杆长的均匀变化程度。

(4) 锚杆加固作用下环向应力峰值无论是否考虑松动圈, 其出现位置都向洞壁方向移动, 也就是说锚杆加固减少了岩体的松动范围; 同时围岩径向位移在加固前后变化很大, 载荷越大, 锚杆支护作

用使径向位移减小的效果越明显, 可以认为锚杆支护的主要作用之一是控制围岩的变形和发展; 环向应力和径向应力峰值都向洞壁移动, 也就是承压环向洞壁移动, 锚杆加固通过改善应力环境来提高围岩的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 张作, 杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [2] 孙钧. 中国岩土工程锚固技术的应用与发展[A]. 国际岩土锚固与灌浆新进展会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [3] 宋桂红. 岩体锚杆支护系统复合材料数值仿真模拟研究与分析[硕士论文 D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [4] 李兆权. 应用岩石力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [5] 李维树. 隔河岩电站洞群围岩松动圈检测及其厚度分析[J]. 长江科学院院报, 1995, 12(2): 44—48.
- [6] 边智华, 高鸣安. 隔河岩电厂引水隧洞施工振动与松动圈监测[J]. 大坝观测与土工测试, 1998, 22(5): 14—17.
- [7] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] Little John G S. Ground anchorages, corrosion protection performance[J]. Proc. Instn. Civ. Engrs. 1987, (82): 645—662.
- [8] 庄军生. 国外预应力混凝土工程实践指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [9] SL212—98, 水工预应力锚索设计规范[S].
- [10] 高大水. 岩土预应力锚索的腐蚀破坏与防腐[J]. 岩土锚固工程, 2003, (1): 1—6.
- [11] SL46—94, 水工预应力锚固施工规范[S].
- [12] CES22—90, 土层锚杆设计与施工规范[S].
- [13] GBJ25—90, 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].
- [14] 高大水, 曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, (5): 653—656.

上接第 130 页