

# 砂固结内锚头预应力锚杆试验研究及应用

覃卫民, 葛修润, 王浩

(中国科学院 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 为将砂固结内锚头预应力锚杆推广应用到锚固工程中, 在长江三峡工程砂石料场及湖南凤滩电站地下厂房开展应用试验研究。通过三峡工程砂石料场边坡 12 根  $\phi 32$  mm 高强材质锚杆现场试验研究, 提出此类锚杆的设计方法和施工工艺, 对其锚固的长期稳定性进行预应力监测。根据凤滩电站工程实际情况进行技术创新, 研究出一种刚性封口的新型砂固结内锚头预应力锚杆, 获得国家专利局授权发明专利。

**关键词:** 桩基工程; 砂固结内锚头预应力锚杆; 刚性封口; 预应力监测

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)04 - 0769 - 06

## EXPERIMENTAL STUDY ON SAND CONSOLIDATED ANCHORAGE PRESTRESSED BOLT AND ITS APPLICATIONS

QIN Weimin, GE Xiurun, WANG Hao

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Sand consolidated anchorage prestressed bolt is composed of bolt, sand cylinder, steel circular plate, wooden sealed, trap, etc.. In order to apply sand consolidated anchorage prestressed bolt to anchorage engineering, experimental study is conducted in the Three Gorges Project on Yangtze River and underground caverns in Fengtan Hydropower Station. 12 bolts with high-strength materials and diameter of 32 mm are arranged in a granite slope in the Three Gorges Project. The experiments show that the tension of the bolt is over 300 kN; and the ultimate strength is about 540 kN. Design methods and construction techniques for sand consolidated anchorage prestressed bolt are provided according to the experimental study; and the prestress monitoring is carried out to test the bolt's long-term stability. Ten bolts with common materials are arranged in quartz sandstone slope in underground caverns in Fengtan Hydropower Station. The holes are drilled by different types of construction machinery. According to the experimental study in Fengtan Hydropower Station, new technologies such as a new type sand consolidated anchorage prestressed bolt with rigid seal to block sand are innovated, which has been authorized invention patents by Chinese Patent Office.

**Key words:** pile foundations; sand consolidated anchorage prestressed bolt; rigid seal; prestress monitoring

## 1 引言

砂固结内锚头预应力锚杆技术是由俄罗斯学者

首先提出的, 后来德国卡尔斯鲁厄大学岩土力学研究所的 Gudehus 教授访问俄罗斯时将此项新技术带回德国, 随后进行了一些室内试验工作<sup>[1]</sup>。由于德国的砂锚杆技术存在结构复杂、施工操作工艺不理

**收稿日期:** 2006 - 07 - 18; **修回日期:** 2006 - 11 - 15

**作者简介:** 覃卫民(1973 -), 男, 2000 年于武汉水利电力大学水工结构专业获硕士学位, 现为助理研究员, 主要从事安全监测、反馈研究和试验等方面的研究工作。E-mail: qwm1973@sohu.com

想等缺点，没有很好地运用到工程实际。葛修润将此项技术引入国内并进行改进，获得国家专利局授权实用新型专利(专利号 ZL97209453.9)<sup>[2]</sup>。

砂固结内锚头预应力锚杆由锚杆体、砂柱体、圆荷载板、木制封口、小铁夹等组成。其工作原理如下：首先采用天然砂、水泥、水按一定配比制作黏稠水泥砂浆，装入模具预制空心砂柱体；在锚杆体内锚头端焊接一个圆荷载板；用压缩木制成空心圆柱体作封口。将空心砂柱体套入锚杆体锚固端，待封口浸水膨胀到一定程度后，也套入杆体中，再将铁夹固定在锚杆上。最后将装配好的锚杆体推入锚孔中，等待封口充分膨胀。经空心千斤顶施加拉拔力，空心砂柱体被压碎成散砂并受压密，利用砂体与孔壁之间的摩擦力提供锚固力。施加预应力后的砂固结内锚头预应力锚杆结构见图 1。

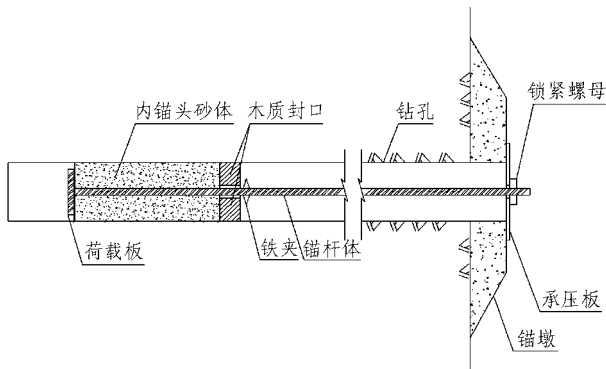


图 1 施加预应力后的砂固结内锚头预应力锚杆结构  
Fig.1 Structure of sand consolidated anchorage prestressed bolt after prestress is applied

陈荣等<sup>[3~5]</sup>在室内试验的基础上，在金山店铁矿-130 m 高程下一个废弃的巷道内进行了砂固结内锚头预应力锚杆现场试验，并进行了数值模拟分析。他们将锚固段砂体分为超密砂、密砂和松砂 3 个区域，由正算拟合法得出内锚固段各砂体区域的弹性参数，然后利用这些参数模拟出现场试验的围岩应力场及砂与锚孔壁之间摩擦力的分布情况。

## 2 三峡工程砂石料场应用试验

受长江三峡工程下岸溪砂石料场施工项目部委托，中国科学院武汉岩土力学研究所研究人员在室内试验的基础上开展了砂固结内锚头预应力锚杆施工设计与监测试验研究，其目的在于掌握这种新型锚杆的极限承载力，检验锚杆参数和施工工艺的合

理性，确认锚杆的长期工作性能，以保证锚固工程的可靠性。

试验地点选在砂石料场南面边坡，边坡岩性为灰黄色的斑状花岗岩，其力学参数为：抗压强度为 97 MPa，弹性模量为 47.1 GPa，泊松比为 0.25。设锚杆试验孔 12 个，钻孔用钻头直径为 80 mm 的潜孔钻完成，倾角为 5°~10°，孔间距为 2.5~3.0 m，孔深为 4~12 m。锚杆体材料为  $\phi$  32 mm 的四级精扎螺纹钢，抗拉强度为 1 090 MPa。现场试验成果见表 1 及图 2。

表 1 三峡工程现场试验成果

Table 1 Results of in-situ experiment in the Three Gorges Project

试验孔号	锚杆长度 /m	砂柱总长 /cm	封口外径 /mm	千斤顶行程/mm	拉拔力 /kN
1 <sup>#</sup>	8.0	70.0	78	190	400
2 <sup>#</sup>	8.0	90.0	78	235	370
3 <sup>#</sup>	4.0	60.0	78	300	360
4 <sup>#</sup>	7.5	80.0	76	-	-
5 <sup>#</sup>	11.5	95.0	78	380	410
6 <sup>#</sup>	10.0	91.0	78	295	390
7 <sup>#</sup>	8.0	82.0	78	250	310
8 <sup>#</sup>	7.5	75.5	80	265	320
9 <sup>#</sup>	8.0	75.0	78	290	350
11 <sup>#</sup>	10.0	91.5	76	240	360
12 <sup>#</sup>	9.0	89.0	76	310	410



图 2 现场试验全貌

Fig.2 General view of in-situ experiment

为了掌握在现场试验条件下锚杆的极限承载力，在 1<sup>#</sup> 孔进行了破坏试验。当千斤顶出力达 540 kN 时，锚杆结构发生破坏，油压表读数急剧下降至 0。继续施加拉拔力直至拔出整根锚杆时，发现荷载

板与锚杆体焊接处发生破坏, 荷载板与锚杆体已经脱离。

为了检验此类锚杆在地下水作用下的长期工作性能, 对地下水布满全孔的 6# 和 7# 孔内锚杆进行锚固力监测。监测仪器采用丹东虬龙传感器制造有限公司生产的 JXL-3 型钢弦式荷载传感器及配套的 SS-II 型频率接收仪, 监测时间持续 14 个月。监测期间, 锚杆试验区域经历了边坡开挖卸荷阶段以及丰富地下水浸蚀。6#, 7# 孔内锚杆锚固力-时间曲线见图 3。由图 3 可以看出, 存在丰富地下水作用的试验锚杆锚固效果依然良好。

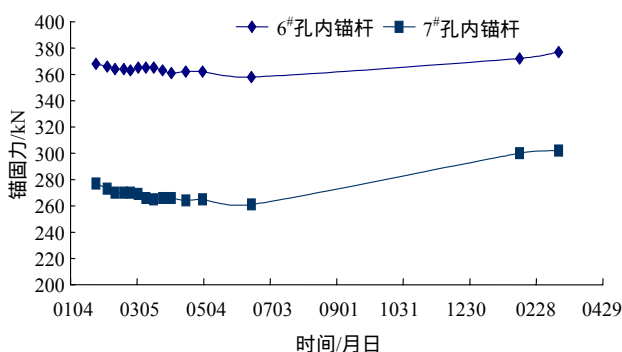


图 3 6#, 7# 孔内锚杆锚固力-时间曲线

Fig.3 Anchorage force-time curves of bolts in boreholes No.6 and No.7

结合室内试验和现场试验情况, 研究人员提出适合三峡下岸溪砂石料场边坡加固的砂固结内锚头预应力锚杆设计方法和施工工艺, 包括锚杆施工技术参数、外锚头锁定技术、减少锚固力损失的方法、锚固力施加方法及锚固力测定方法等。

### 3 凤滩电站地下厂房试验

#### 3.1 试验情况

凤滩电站二期扩容地下厂房尺寸为 90 m×24 m×64 m(长×宽×高), 分 8 层开挖, 全部开挖工作于 2003 年 1 月完成。厂房围岩主要为石英砂岩(II 类), 在拱顶和边墙局部地段出现断层和软弱夹层。为了厂房的安全, 除了系统锚杆和挂网喷混凝土外, 设计上还考虑采用长 8 m、预应力为 140 kN 的预应力锚杆进行加固。

主厂房安装了 4 根砂固结内锚头预应力锚杆, 位于下游侧边墙上, 位置如图 4 所示。

由于主厂房施工进度紧张, 研究人员无法在钻

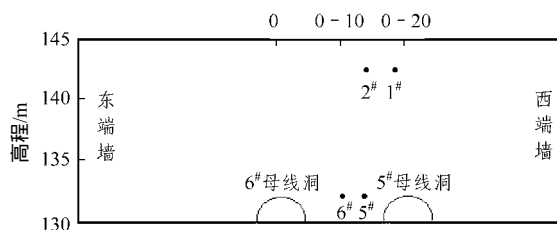


图 4 主厂房下游侧边墙锚杆位置立面示意图

Fig.4 Vertical plan of bolt position at downstream side of main underground caverns

孔口浇筑混凝土锚墩, 这样承压钢垫板与孔口边墙的接触面不能得到较好的吻合, 从而造成锚杆锁定的荷载值下降。

在锚固工程中深度为 2~5 m 的钻孔是很常见的, 多采用手风钻完成, 这使得检验砂固结内锚头预应力锚杆在手风钻钻孔中的工作性能显得很有必要。试验人员在主变运输洞边墙 128 m 高程处设置 2 个手风钻试验孔, 编号分别为 3#和 4#, 如图 5 所示。手风钻钻孔的孔径为  $\phi 50$  mm, 3#孔深 5 m, 4#孔深 3 m, 孔轴线有些弯曲。锚杆外径为 25 mm。本试验的独特之处在于采用刚性封口代替木制封口, 具有操作简便、快速施工的优点。关于刚性封口的情况详见第 4 节。

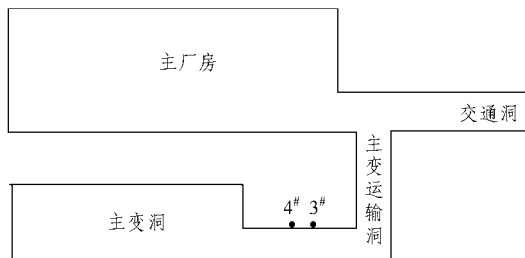


图 5 主变运输洞锚杆位置平面示意图

Fig.5 Layout of bolt position in transport tunnel

试验处岩面很不平整, 锚杆锁定时会有较大的预应力损失。因此在锚杆安装之前, 用水泥砂浆将岩面抹平整, 使岩面与锚杆轴向垂直, 与钢垫板有较好的吻合, 以减少预应力损失。在现场操作时, 应采用高标号水泥, 并在水泥浆配比中加大水泥用量比例, 若条件许可还加入适当用量的速凝剂, 以提高混凝土的早期强度。4#孔的孔口岩面经过以上方法处理, 1 d 后即可进行张拉, 并在以后的锚杆孔口岩面的处理中得到应用。

主变洞安装了 4 根砂固结内锚头预应力锚杆, 其中 2 根位于上游侧边墙上, 位置如图 6 所示; 另 2 根位于下游侧边墙, 位置如图 7 所示。

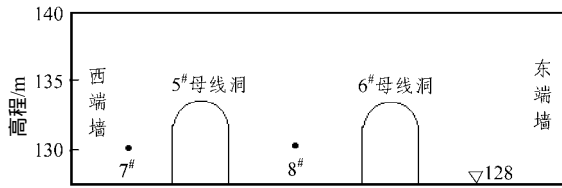


图 6 主变洞上游侧边墙锚杆位置立面示意图  
Fig.6 Vertical plan of bolt position at upstream side of main transform tunnel

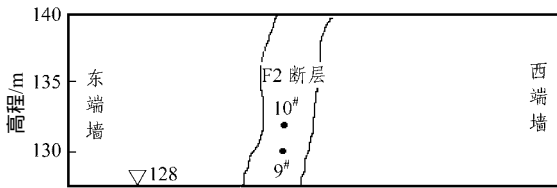


图 7 主变洞下游侧边墙锚杆位置立面示意图  
Fig.7 Vertical plan of bolt position at downstream side of main transform tunnel

地下厂房现场试验共安装了 10 根砂固结内锚头预应力锚杆, 试验成果见表 2, 其中 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>及 8<sup>#</sup> 孔内锚杆采用了刚性封口替代原有的木质封口。

表 2 风滩现场试验成果表

Table 2 Results of in-situ experiment in underground caverns of Fengtan Hydropower Station

试验孔号	锚杆长度 /m	砂柱总长 /cm	封口外径 /mm	千斤顶行程 /mm	拉拔力 /kN
1 <sup>#</sup>	8	82	70	240	200
2 <sup>#</sup>	8	88	70	240	200
3 <sup>#</sup>	4	70	38	340	170
4 <sup>#</sup>	3	66	38	305	160
5 <sup>#</sup>	8	78	70	480	160
6 <sup>#</sup>	8	82	70	390	180
7 <sup>#</sup>	8	84	70	250	190
8 <sup>#</sup>	8	90	58	235	180
9 <sup>#</sup>	8	85	70	245	200
10 <sup>#</sup>	8	84	70	240	180

### 3.2 锚杆锚固力监测分析

1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 孔测力计监测的时间较长。在安装 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 孔测力计时, 地下厂房大部在进行第 2 层开挖, 东面还在进行第 3 层开挖, 因此地下厂房的边墙处于开挖卸荷阶段, 变形较大。

以 1<sup>#</sup> 孔测力计为例, 阐述 1<sup>#</sup> 孔内锚杆在地下厂房 142 m 高程 0<sup>#</sup>~15<sup>#</sup> 孔桩边墙的工作情况。从 2002 年 7 月 30 日安装观测之日起, 正遇上开挖下游岩台, 测力计的荷载数值就在不断增大, 在数值上看

不到锚固力荷载在测力计安装后出现的下降趋势。2002 年 10 月, 主厂房下游拱角锚索孔造孔, 锚杆的轴力随着边墙的变形达到了极大值 318 kN; 测力计附近锚索孔的施工造成边墙震动很大, 测力计的观测值因而波动较大, 达 50 多个频率读数。11 月初, 随着 5<sup>#</sup> 母线洞的贯通, 引起边墙的变形和锚杆的伸长; 11 月 4~17 日间, 锚杆的外螺纹承受不住继续增大的拉力产生丝口打滑卸荷现象, 锚杆以稍低的预应力状态继续工作。主厂房下游边墙喷锚使得边墙的整体性好转, 锚杆的变形受到抑制; 1<sup>#</sup> 孔内锚杆附近的拱角锚索张拉有效地控制锚杆的变形, 测力计的读数一直变化不大, 见图 8。

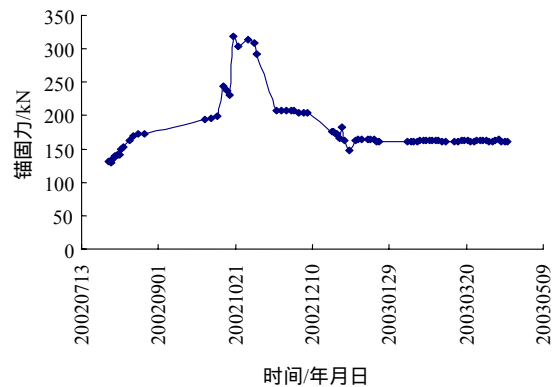


图 8 1<sup>#</sup> 孔内锚杆锚固力 - 时间曲线

Fig.8 Anchorage force-time curve of bolt in borehole No.1

3<sup>#</sup> 孔测力计安装在两母线洞间高程 132 m 的 5<sup>#</sup> 孔。从 3<sup>#</sup> 孔测力计的观测值可以看出, 测力计安装时的锚固力数值在 1~2 d 后有下降的情况。由于 2002 年 10 月 20 日测力计安装时 6<sup>#</sup> 母线洞已经贯通, 5<sup>#</sup> 母线洞即将贯通, 锚杆的受力状态变化很小; 当 11 月中旬两母线洞之间开挖卸荷(3 m 高差)时, 测力计的荷载数值才有所上升, 但增量非常小; 随着母线洞之间的边墙喷锚的完成, 锚杆的变形受到抑制, 其后锚杆的受力状态平稳, 直到高程 136 及 131 m 主厂房与主变洞之间对穿锚索孔的施工, 锚杆测力计的荷载数值因钻孔卸荷而增大; 随后锚索的张拉使得边墙的变形受到抑制, 测力计读数呈下降趋势, 见图 9。

## 4 砂固结锚杆技术创新研究

### 4.1 刚性封口的新型砂固结内锚头预应力锚杆

在原有砂固结内锚头预应力锚杆结构中, 封堵散砂是靠木制封口浸水膨胀与岩壁产生摩擦力来实现的。木制封口存在以下不足之处:

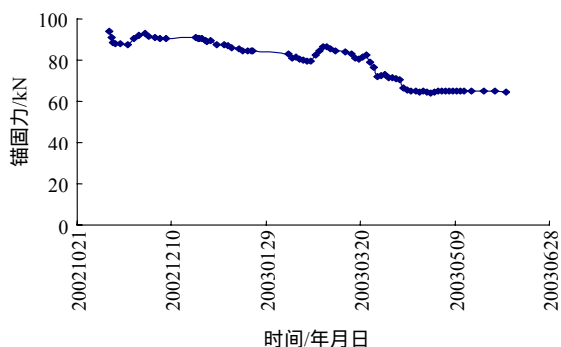


图 9 3# 孔内锚杆锚固力 - 时间曲线

Fig.9 Anchorage force-time curve of bolt in borehole No.3

(1) 选材范围窄。在空心砂柱体被挤碎压密产生摩擦力之前, 要求膨胀后挤紧锚孔的封口能承受一定的拉力而不产生滑动。选材试验表明, 只有水曲柳等少数硬质木材符合要求。

(2) 木制封口要求木材材质好, 且会浪费部分木材。

(3) 制作工序烦琐, 木制封口必须经历选材、切割、干燥、压缩及车床加工等工序才能制成。

(4) 不容易掌握封口浸水时间。木制封口浸水膨胀后, 其膨胀速率受温度、吸水率等因素影响, 普通工人在操作中不容易掌握封口浸水时间。封口浸水时间不够使得封口膨胀潜力不够, 与岩壁产生的摩擦力达不到要求; 封口浸水时间过长使得封口在锚杆体送入钻孔过程中, 其外径达到了钻孔的直径, 发生堵塞现象, 使得封口不能到达预定位置, 无法满足施工设计要求。

针对木制封口的不足, 研究人员在凤滩扩机工程试验现场找到了一种替代木制封口的新型封口: 刚性封口。新型砂固结内锚头预应力锚杆由锚杆体、砂柱体、圆荷载板、刚性封口、圆铁环等组成, 施加预应力后的结构图见图 10。

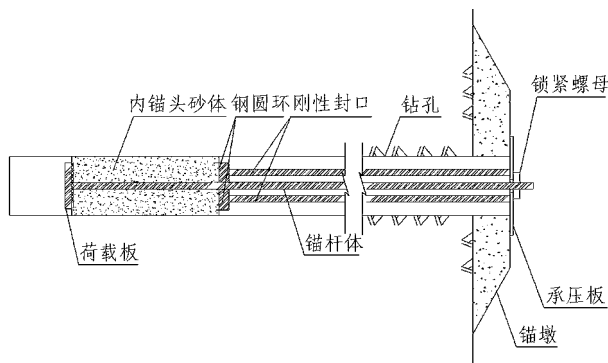


图 10 施加预应力后新型砂固结内锚头预应力锚杆结构示意图

Fig.10 Structure of new type of bolt sand consolidated anchorage prestressed bolt after prestress is applied

### 4.2 刚性封口的力学分析

刚性封口涉及的力学问题主要是钢管的稳定性问题。钢管在锚杆施加预应力过程中始终处于受压状况, 考虑到工程中钻孔的长度和孔径, 钢管作为一细长构件, 面临的是压杆稳定性问题。由欧拉公式得等截面压杆的临界力公式<sup>[6]</sup>为

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} \quad (1)$$

式中:  $E$  为压杆的弹性模量,  $I$  为压杆截面对  $z$  轴的惯性矩,  $\mu$  为压杆的长度系数,  $L$  为压杆的长度。

新型砂固结内锚头预应力锚杆结构中的钢管可以看成是处于两端固定的支承状态。假设钢管长度为 8 m, 内径为 40 mm, 外径为 46 mm,  $E$  取  $2.1 \times 10^5$  MPa, 由欧拉公式计算出钢管的临界力为 28.5 kN。若取市场上壁厚最小(2 mm)的钢管来计算, 其内径为 40 mm, 外径为 44 mm,  $E$  取  $2.1 \times 10^5$  MPa, 由欧拉公式计算出钢管的临界力为 7.55 kN。

室内进行木制封口试验研究时, 曾经将外径为 56~60 mm, 长度为 50 mm 的水曲柳封口浸水后套入锚杆, 装入内径为 65 mm 的钢管中, 待封口充分膨胀(放置 20 min)后进行拉拔试验。由拉拔试验得知水曲柳封口膨胀产生的摩阻力都在 5 kN 以上, 个别达到 9 kN。

因此, 从力学角度看, 用刚性封口替代木制封口完全可行, 钢管长度越短, 其失稳临界力越大。

### 4.3 室内拉拔试验

在理论可行的基础上, 在室内采用刚性封口进行拉拔试验。试验采用普通薄壁水管模拟锚孔, 锚孔的内、外径分别为 56 和 50 mm, 长度为 1 m; 锚杆直径为 25 mm, 长度为 1.1 m; 采用普通水管作为刚性封口, 水管的内、外径分别为 34 和 30 mm, 长度为 40 cm。室内拉拔试验过程如下:

(1) 采用刚性封口, 在锚杆送入锚孔后, 架设拉拔装置进行拉拔试验。油压表读数上升顺利, 当油压表读数为 12.0 MPa(拉拔力约为 120 kN)时, 停止加压。

(2) 松开油压装置释放拉拔力至 0, 取出锚孔内的刚性封口, 重新架设拉拔装置进行拉拔试验。

(3) 在刚性封口不存在的情况下, 油压表读数达到 7.0~7.5 MPa 就不能继续上升, 并有读数下降的趋势。

(4) 松开油压装置释放拉拔力至 0, 将刚性封口重新放入锚孔内, 重新架设拉拔装置进行拉拔试验。

(5) 在刚性封口存在的情况下, 油压表读数会重新达到 12.0 MPa。继续施加拉拔力, 当油压表读

数为 15.0 MPa 时, 停止加压。

(6) 松开油压装置释放拉拔力至 0, 取出锚孔内的刚性封口, 重新架设拉拔装置进行拉拔试验, 并加入荷载测力计。

(7) 在刚性封口不存在的情况下, 油压表读数达到 9.0~9.5 MPa 就不能继续上升, 并有读数下降的趋势。

(8) 停止加压, 将锁紧螺母紧锁在测力计垫板上, 然后松开油压装置释放拉拔力至 0。

(9) 将测力计与二次仪表连接, 记录测试数据, 计算施加在锚杆上的预应力。

由于锚杆内锚头超密砂段已经形成, 没有封口存在的砂固结预应力锚杆也能提供锚固力, 从室内试验的情况看, 可以达到 60%, 这与陈荣等<sup>[7]</sup>关于砂体锚固力分析的研究结果较为接近。

#### 4.4 刚性封口的现场应用

在凤滩扩机工程中安装了 10 根砂固结内锚头预应力锚杆, 其中 3 根锚杆采用了刚性封口, 分别位于 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>和 8<sup>#</sup>孔, 见表 2。

#### 4.5 刚性封口的优点

在新型砂固结内锚头预应力锚杆结构中, 采用刚性封口可以克服木制封口的不足之处。从制作工序上看, 钢圆环和荷载板是一样的, 不需要额外的工序, 而钢管可以选用市场上的规格产品, 避免了木制封口在制作上的烦琐工序; 从使用操作上看, 刚性封口作为装配式的部件, 具有使用简单、便于操作的优点; 从力学角度上看, 刚性封口封堵散砂是靠钢圆环与钢管、钢管与承压板之间相互作用的轴向反力产生阻力来实现的, 避免了因木制封口浸水膨胀能力不足产生滑动而造成封口失效的现象发生, 封堵散砂作用是可靠的, 从而大大提高了锚固成功率; 从施工时间上看, 在锚杆整体送入钻孔内后即可开始施加拉拔力, 不需要浸水等待膨胀, 具有快速施工的优点, 特别适用于临时支护和抢险工程。

该新型砂固结内锚头预应力锚杆及其锚固方法于 2003 年 6 月 6 日申请国家发明专利, 专利受理号为 03128107.9, 并于 2006 年 6 月 14 日获得国家专利局授权。

## 5 结 论

在前人有关砂固结内锚头预应力锚杆锚固机制

的有效性和可行性的基础上, 通过三峡工程下岸溪砂石料场高边坡和凤滩电站地下厂房现场得以应用和推广, 提出了较成熟的砂固结内锚头预应力锚杆的设计方法和施工工艺, 并根据工程实际情况进行技术创新, 研制出一种刚性封口的砂固结内锚头预应力锚杆。

#### 参考文献(References):

- [1] STAZHEVSKY S B, KOLYMBAS D. Vorgespanute anker nach dem dilatan zprinzip P202[J]. Boden und Felsmechanik, 1993, 4(1): 202 - 205.
- [2] 葛修润, 丰定祥, 陈荣, 等. 砂固结内锚头预应力锚杆研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增): 1 091 - 1 097.(GE Xiurun, FENG Dingxiang, CHEN Rong, et al. Study on sand consolidated anchorage prestressed bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(Supp.): 1 091 - 1 097.(in Chinese))
- [3] 陈荣. 一种新型的岩石加固锚杆——砂固结内锚头预应力锚杆的试验及理论研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.(CHEN Rong. A new type of bolt for rock—experimental and theoretical study on sand consolidated anchorage prestressed bolt[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998.(in Chinese))
- [4] 陈荣, 彭伟东, 尹建华, 等. 砂固结预应力锚杆的试验及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 330 - 333.(CHEN Rong, PENG Weidong, YIN Jianhua, et al. Testing study and numerical simulation of sand-consolidated-anchorage-prestressed bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 330 - 333.(in Chinese))
- [5] 陈荣, 杨树斌, 吴新生, 等. 砂固结预应力锚杆的室内试验及锚固机制分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 235 - 237.(CHEN Rong, YANG Shubin, WU Xinsheng, et al. Laboratory tests on consolidated sand anchorage with prestressed bolt and analysis of anchorage mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 235 - 237.(in Chinese))
- [6] 袁海庆. 材料力学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000: 179 - 187.(YUAN Haiqing. Mechanics of materials[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2000: 179 - 187.(in Chinese))
- [7] 陈荣, 邓学璟, 胡正东, 等. 砂固结锚固室内试验及砂土强度特性理论的再认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 73 - 75.(CHEN Rong, DENG Xuejing, HU Zhengdong, et al. Laboratory testing study on sand-consolidated-anchorage-prestressed bolt and new suggestion on sand strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 73 - 75.(in Chinese))