

反复张拉荷载作用下锚杆工作机理试验研究^{*}

Experimental study on bolting mechanism under cyclic tensile load

朱焕春

(武汉水利电力大学水电学院, 武汉, 430072)

吴海滨

(中国三峡工程开发总公司, 宜昌, 443133)

赵海斌

(中南勘测设计研究院, 长沙, 410014)

文 摘 三峡永久船闸高强结构锚杆在工程运行期将承担水压力、温度应力等周期性荷载的作用。该文叙述了反复张拉荷载作用下锚杆受力状态、变形特征和锚杆作用机理的现场试验结果, 揭示出循环荷载作用下锚杆应力大小和影响范围向会深度传递, 但变形相对稳定。

关键词 循环张拉荷载, 锚杆, 砂浆, 应力, 变形

中图法分类号 TU 45

作者简介 朱焕春, 男, 1963 年生, 博士, 副教授。主要从事岩石力学的科研、教学和生产。

Zhu Huanchun

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan, 430072)

Wu Haibin

(China Three Gorges Project Development Corporating, Yichang, 443133)

Zhao Haibin

(Middle South China Institute of Survey and Design and Research, Changsha, 410014)

Abstract High strength structural bolt in permanent shiplock at the Three Gorges Project will work under periodic load caused by water pressure and temperature stress during the operation. The field test results of bolt stress and deformation under cyclic tensile load are presented in this paper. And it is pointed out that the bolt stress will transfer to depth, but the deformation keeps constant under the cyclic tensile load.

Key words cycle tensile load, bolt, grout, stress, deformation

1 前 言^{*}

三峡水利枢纽永久船闸二期工程的加固设计方案中, 拟采用 10 余万根高强结构锚杆加固闸室直立坡和联接闸室薄壁混凝土。工程投入运行后, 受边坡岩体和混凝土变形和温度等因素、尤其是直立坡和衬砌墙之间地下水的作用, 高强结构锚杆可能直接受到反复张拉荷载作用。为了解这种荷载状态对锚杆应力、变形的影响, 在永久船闸四闸室南线南坡进行了锚杆反复张拉现场试验。关于全长粘结锚杆锚固机理的研究已有国内、外许多成果报道, 但对反复荷载作用下锚杆及浆体应力、变形特征的研究明显不足^[1~5]。本文主要叙述了在分级反复张拉荷载作用下锚杆应力、变形、岩体和砂浆变形特征的试验研究成果, 并根据实测资料对锚杆工作机理及砂浆所起的重要作用进行分析, 为设计决策提供科学依据。

2 试验条件与试验设计

2.1 试验条件

试验点位于永久船闸四闸室南线南坡, 试验孔所

在坡段岩性新鲜、单一, 为微风化、新鲜中粗粒闪云斜长花岗岩。试验坡段无断层通过, 地质构造以陡倾 NEE 向裂隙为主, 其次为 NW 向陡倾裂隙; 两组裂隙与边坡夹角均较小, 切割岩体呈块状。

本次试验共 1 组 3 根锚杆(编号依次为 F_{1-1} , F_{1-2} , F_{1-3}), 试验锚杆采用 $\phi 32$ mm V 级精轧螺纹钢。锚杆由 3 部分组成, 即孔内长 6 m 的锚固段、0.5 m 长自由段和长度不小于 1 m 的外露段。

中文还引用了 24 根无自由段锚杆($\phi 40$ mm IV 级螺纹钢)、不加循环荷载的张拉试验成果, 其试验条件与方法与本次试验类似。

锚杆孔孔径 76 mm, 灌浆材料为 $R_7 300^{\#}$ 水泥砂浆。锚杆采用先插杆后注浆的安装方式, 即把灌浆管随锚杆先插入孔内, 封堵孔口后再进行有压灌浆。锚杆用 $\phi 8$ mm 钢筋扎箍居中, 用 $\phi 38$ mm 橡皮套包扎锚杆形成自由段(锚杆与砂浆脱开)。

2.2 试验设计

按设计要求, 试验荷载分 3 个循环。其中, 第 1、

第2循环的荷载分级形式相同,即按 $0 \rightarrow 150 \rightarrow 200 \rightarrow 250 \rightarrow 300 \rightarrow 350 \rightarrow 450 \rightarrow 600 \rightarrow 450 \rightarrow 350 \rightarrow 300 \rightarrow 250 \rightarrow 200 \rightarrow 150 \rightarrow 0$ kN的方式施加,第3循环在按此方式加载至600 kN后一次卸载至0,施加每级荷载稳压30 min后读数。

每根锚杆上布置了7个应变(力)测量点,各测点距孔口锚固端的距离分别为0.2, 0.7, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0和5.7 m。

试验中还进行了锚杆变形、孔口岩体变形和砂浆应变(力)测量。其中锚杆变形测量点布置在紧贴孔口处,岩体变形测量点布置在距锚杆10 cm处;砂浆应力测量通过灌浆前预置应变砖的方法实现,该项工作只在其中的一根锚杆(编号为 T_1)进行。与孔口附近锚杆应力测点对应地共布置了3个测点,每一测点(应变砖)由一个三向应变花组成。

3 试验装置与试验过程

3.1 试验装置

反复试验加载系统由高压油泵、空心千斤顶及专用夹具组成。为保证施加反复张拉荷载时的反力不影响试验成果的可靠性,试验中将千斤顶反力作用在一根长度为2 m的刚性横梁上,并由横梁及两端反力墩承担(图1)。

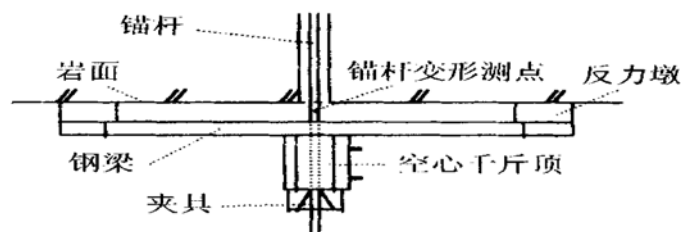


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental equipment

考虑到张拉荷载较大并且反复作用,普通应变计的测量误差可能较大,本次试验中锚杆应力的测试元件采用美国Gekon公司生产、由应变针和激振线圈组成的弦式应变计。与之相适应地,采用Gekon-403弦式读数仪测量应变值。砂浆应变由国产YJ-28型静态电阻应变仪测量,锚杆和岩体变形大小分别用百分表和千分表读取。

3.2 试验过程

试验前先进行试验锚杆制作,即:

a) 按弦式应变针的长度要求在设计贴片位置上对锚杆进行打磨;打磨面应平整光滑。

b) 用Gekon公司生产的专用设备、材料清洗打磨面后,定位和粘贴弦式应变针;然后安装激振线圈,引出电缆。

c) 对安装好的应变计进行编号和防水保护处理。应变计编号规定为:从孔口到孔底依次为#1~#7。

试验过程包括场地整平、设备安装、调试及试验测试。

试验前先对反力墩承载面进行整平处理,并与锚杆垂直。保证试验过程中荷载作用方向与锚杆平行,即为轴向张拉。

试验设备安装包括加载设备和测量设备安装。水平千斤顶安装前先在反力墩与千斤顶之间安装刚性承载垫板,安装上空心千斤顶后用不同厚度的钢板调整承载钢板,使千斤顶与锚杆同轴。连接千斤顶的进、回油管,并在试验前预加荷载检验加载设备安装是否满足要求,必要时进行调整。安装基准梁,使基准梁接近锚杆孔口段并脱离试验台架,保证试验过程不扰动基准梁。锚杆及岩体变形测量的磁性表座安装在基准梁上,其中,锚杆位移测量的两块百分表对称分布。

4 试验成果分析

4.1 锚杆应力及影响深度

反复张拉荷载试验特征荷载作用下锚杆应力分布特征见图2~图4。

图2显示了第1次循环时锚杆应力分布随张拉荷载的变化,张拉荷载增大时,相应点处锚杆应力增大;同时,锚杆受力深度也相应增大,但在试验条件下,当张拉荷载达到600 kN时,所有27根锚杆最大受力深度不超过2.0 m。

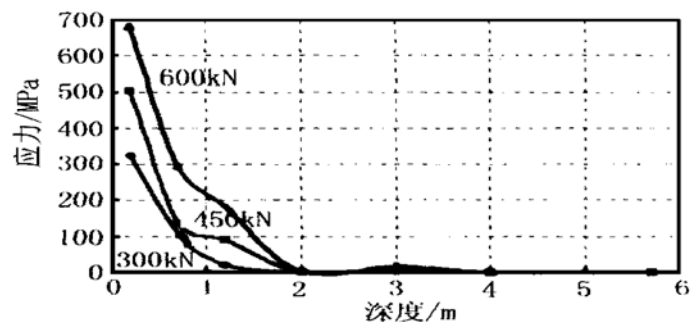


图2 不同荷载下锚杆应力曲线

Fig. 2 Bolt stress under different loads

图3显示不同循环时同一荷载对应的锚杆应力分布有所区别,第1循环时锚杆应力分布正常,距受载点最近的第1个测点应力最大,应力向深处衰减很快;第2循环时第1测点应力降低,第2,3测点应力较第1循环显著增高;第3循环时第1,2测点应力降低,更深处的锚杆应力保持增高的趋势。3根反复张拉试验锚杆得出同样的规律。另一方面,在试验条件下,锚杆明显受力的深度没有超过2.0m。

由此可见,循环荷载作用下锚杆应力会随循环次

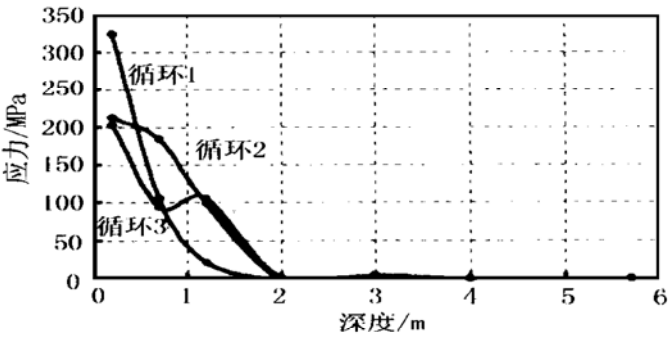


图3 不同循环时锚杆应力分布(300kN)

Fig. 3 Bolt stress at different loading cycles (under 300kN)

数增加而不断变化, 表现为荷载作用点附近锚杆应力随循环荷载次数增加而降低, 深处应力则略有增大。可以预见, 当其他条件不变时, 循环荷载增加到一定次数后, 这种变化会逐渐减弱并趋于稳定, 在工程中表现为锚杆应力随影响因素周期性变化而不断调整的结束, 即达到工程稳定的要求。有关循环荷载下锚杆应力传递的临界深度、应力调整达到稳定的荷载循环次数等问题尚需进一步研究。

图4给出了第1根(编号 T_1)锚杆中第2个测点的应力过程线。当第1循环张拉荷载超过200 kN时, 该点处才开始明显受力, 在300 kN时变化较大。握裹于砂浆内的锚杆应力滞后于张拉荷载作用和张拉荷载达到一定值后出现应力突变现象与砂浆同锚杆的联合工作机理密切相关。

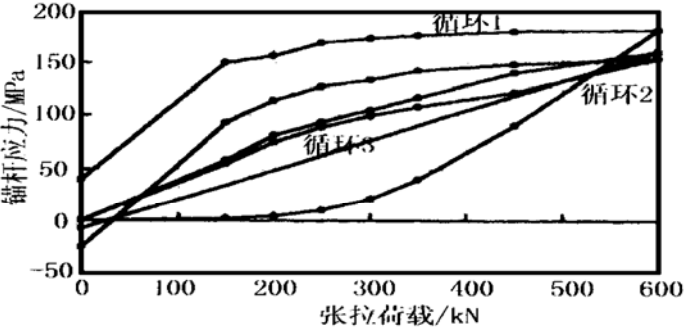


图4 锚杆应力与张拉荷载关系曲线

Fig. 4 Curves of bolt stress vs tensile load

4.2 锚杆-岩体变形

在设置自由段后, 孔口处岩体变形几乎不随张拉荷载发生变化, 岩体变形用千分表难以测到。这与不设自由段时24根试验锚杆在相应位置上测得的0.33 mm的平均变形量存在一定的差别。显然, 设置自由段后, 锚杆传递给岩体的荷载不会由边坡表层松弛岩体承担, 对保证边坡岩体稳定有利。

除个别测值以外, 3根锚杆在张拉到600 kN时的变形量都在5~6 mm之间。图5给出了 T_1 锚杆变形与张拉荷载之间的关系, 它显示在第1循环、第1级荷载作用下, 初始位移偏大。如果按后面几级荷载作用

下的变形变化率对该测值进行修正, 则最大变形量基本为6 mm。本次试验结果显示, 锚杆变形量不受荷载循环次数的影响。

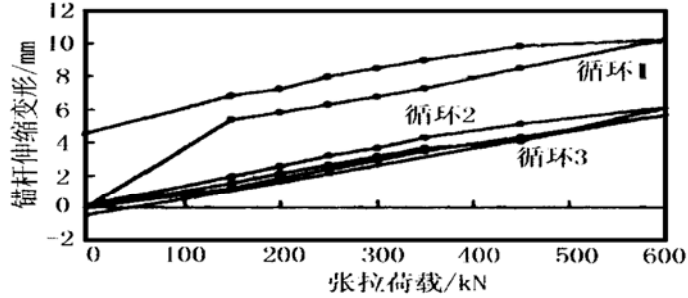


图5 锚杆变形与张拉荷载关系曲线

Fig. 5 Bolt deformation curve vs tensile load

根据资料^[6]中的试验成果, 24根高强锚杆在600 kN张拉荷载作用下的平均变形量为4.4 mm, 与本次试验成果差别明显。张拉试验条件下锚杆变形量与锚杆本身抵抗变形能力密切相关, 这24根锚杆的试验条件与本次试验基本相同, 仅锚杆直径相差较大, 二者在锚杆承担变形量方面存在明显差别。由此可见, 锚杆变形与锚杆本身特性(材质、直径等)密切相关。

4.3 张拉荷载下锚杆工作机理分析

张拉荷载作用在锚杆上时, 锚杆、砂浆与岩体共同承担外荷。在低外荷下, 三者同步协调变形。随着外荷增大, 这种协调工作状态会被破坏。试验结果揭示, 一般先出现砂浆体被拉断, 然后是砂浆与孔壁之间被拉脱, 使得锚杆受力深度增大。本次试验中布置在 T_1 锚杆0.2 m处的应变砖中与锚杆近似平行的一组应变计揭示了上述特征。该应变计在张拉过程中测值变化情况见表1。

表1 砂浆应变增量测值

Table 1 Strain increments in grout

荷载/kN	$\Delta \epsilon / \mu\epsilon$	荷载/kN	$\Delta \epsilon / \mu\epsilon$
0~ 150	292	450~ 600	8
150~ 200	103	600~ 450	- 8
200~ 250	- 280	450~ 350	- 12
250~ 300	266	350~ 300	- 18
300~ 350	- 34	300~ 250	- 12
350~ 450	58	250~ 200	- 628

试验中当张拉荷载小于200 kN时, 砂浆变形随外荷增大, 拉应变不断增大, 与锚杆协调工作; 当荷载增至250 kN时, 应变增量为负值(-280 $\mu\epsilon$), 测点附近砂浆断裂。但由于砂浆与锚杆及砂浆与孔壁的粘结, 在荷载增至300 kN时, 应变由受张转为受压, 增量达266 $\mu\epsilon$, 此时砂浆与周围介质的抗剪力起决定作用; 此后的

应变又转为负增长,并在 $350 \rightarrow 450 \rightarrow 600 \rightarrow 450 \rightarrow 350 \rightarrow 300 \rightarrow 250$ kN 的加荷载过程中变化很小,判断此时该段砂浆已与孔壁拉脱(在资料^[6]中的短高强锚杆试验中普遍出现过拉脱现象),进一步卸荷后砂浆中的应变砖受压明显,可能重新与孔内浆体接触。

一般地,在张拉过程,由于锚杆螺纹的作用,锚杆与砂浆之间的抗剪强度取决于砂浆的强度,只要灌浆密实,砂浆则不易产生破坏。试验中出现进一步卸荷后砂浆中的应变砖受压明显的现象也说明了砂浆仍随锚杆产生收缩变形,并挤压断裂面另一侧砂浆,需要注意的主要是砂浆与孔壁之间的抗剪能力,资料^[6]中 24 根无自由段短高强结构锚杆的拉拔试验结果也证实了这一点。由于第 1 循环荷载作用下孔口附近砂浆断裂并与孔壁拉脱,第 2、第 3 循环荷载作用时,孔口段砂浆所能分担外荷的最大值等于锚杆与孔壁之间的摩擦力,它显然低于砂浆拉脱前粘着状态下的抗剪力。因此,在同样大小的外荷作用下,由于孔口段砂浆分担外荷的能力降低,锚杆应力就会向深部传递,形成上述随循环次数增加锚杆应力不断向深部传递的现象。可以预见,在其他条件不变的情况下,随着加载循环次数增加,锚杆应力传递深度会趋于一个定值,即存在一个临界深度。但随地下水渗入等因素的作用,已拉脱砂浆段与孔壁之间的摩擦力会降低,临界深度也会随之增大。关于临界深度值大小的问题,仍需要进一步研究。在第 1 循环荷载作用下,当张拉荷载低于 200 kN 或 250 kN 时,锚杆上第 2、第 3 测点的应力较小(即上述应力滞后现象),在应力-荷载曲线上的斜率也较小;当张拉荷载大于这个数值时,其应力增大,曲线上的斜率也相应增大。注意到此时的张拉荷载与上述砂浆断裂荷载大小相当,二者之间可能存在内在联系,即相对较深处锚杆受力状态的改变可能与浅部砂浆的断裂有关,但对这一问题的肯定回答仍需作进一步研究。

5 结 论

(1) 在 600 kN 张拉荷载作用下,锚杆主要在 0.7 ~ 1.2 m 的范围内受力比较明显;循环荷载的作用会使这一深度不断增加,在试验条件下,锚杆受力深度不超过 2.0 m。

(2) 张拉荷载较低时,锚杆、砂浆和岩体可以协调工作;当张拉荷载增大到一定值(试验中为 200~ 250 kN),砂浆断裂,继而与孔壁之间产生剪切破坏,锚杆深部应力增大。循环荷载作用会使产生砂浆破坏深度增大,并最后趋于一稳定值,试验条件下的稳定值在 2.0 m 以内。

(3) 循环张拉荷载作用下锚杆最大变形在 6 mm 左右。剔除锚杆变形初始测值外在因素的影响,各循环荷载作用下的最大变形接近。同等条件下,锚杆变形量与锚杆直径关系密切,锚杆本身对变形的控制作用明显。

参 考 文 献

- 1 Hyett A J, Bawden W F, Reichert R D. The Effect of rock mass confinement in the bond strength of full grouted cable bolts. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstra*, 1992, **29**(5): 503~ 524
- 2 Bawden W F, Hyett A J, Lausch P. An experimental procedure for the in situ testing of cable bolts. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstra*, 1992, **29**(5): 525~ 533
- 3 邹志晖,汪志林. 锚杆在不同岩石中的工作机理. *岩土工程学报*, 1993, **15**(6): 71~ 79
- 4 朱浮生,郑雨天. 全长粘结式锚杆的加固机理. *岩石力学与工程学报*, 1996, **15**(4): 333~ 337
- 5 杨更社,何唐铺. 全长锚固锚杆的托板效应. *岩石力学与工程学报*, 1991, **10**(3): 236~ 245
- 6 武汉水利电力大学. 三峡永久船闸短高强结构锚杆现场试验. 研究报告. 1998