

文章编号: 1001-4888(2014)02-0250-07

全长注浆锚杆锚固段剪应力分布特征试验研究^{*}

范俊奇^{1,2}, 董宏晓¹, 高永红^{1,2}, 楼梦麟²

(1. 总参工程兵科研三所, 洛阳 471023; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过 WES-50B 型万能材料试验机对分别模拟高、中、低三种强度围岩介质的锚杆模型进行了拉拔试验。结果表明, 锚杆锚固段的轴应变及第一、第二交界面的粘结应力分布按照负指数规律衰减。根据模型试验所得锚杆体轴应变试验结果, 在一定简化假设的基础上, 推导了以锚杆为代表的锚固结构轴力及第一、第二界面剪应力分布公式, 分析了锚固结构在均匀介质中内锚固段应力、轴力及交界面的剪应力传递、衰减规律, 探讨了拉拔力及介质强度对锚固段剪应力的影响。本文的研究为通过模型试验分析以锚杆为代表的锚固结构第一、第二界面剪应力分布提供了参考。

关键词: 全长注浆锚杆; 内锚固段; 剪应力分布; 试验研究

中图分类号: TU312⁺.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-063

0 引言

对于以锚杆为代表的锚固结构, 锚杆体与注浆体间的界面称为“第一界面”; 注浆体与孔壁间的界面称为“第二界面”。其第一、第二界面上剪应力是工程设计的基本依据和前提。无论是第一界面还是第二界面, 其上剪应力的分布是不均匀的, 这在学术界已取得共识。但时至今日, 我国有关锚固技术规范采用的仍然是平均剪应力的概念和方法, 这与锚固技术的发展是不相适应的。国内外关于锚固结构杆体的轴应变和锚固段剪应力的测量和试验研究较多, 成果也较为丰富^[1-11], 但理想的第一、第二界面剪应变真正测到的很少, 而且研究大多是单独进行的, 缺乏系统性。因此, 有必要将其综合起来作深入的研究。

本文对分别模拟高、中、低三种强度的围岩介质全长注浆锚杆模型进行了拉拔试验, 根据模型试验所得锚杆体轴应变试验结果, 在一定简化假设的基础上, 推导了以锚杆为代表的锚固类结构轴力及第一、第二界面剪应力分布公式, 研究分析了锚杆在均匀介质中内锚固段应力、轴力及交界面的剪应力传递、衰减规律, 分析了拉拔力及介质强度对锚固段剪应力的影响。本文的研究为通过模型试验分析以锚杆为代表的锚固结构第一、第二界面剪应力分布提供了参考依据。

1 试验概况

1.1 试件制作

试验中锚杆模型的制作方法如下: ①用 $\Phi 18\text{mm}$ 的 HRB335 热轧带肋钢筋制作锚杆, 在其表面按一定距离贴应变片, 以测取第一界面剪应变分布形态; ②将锚杆置于模拟锚孔的内径为 $\Phi 47\text{mm}$ 的 PVC 管中, 并灌浆形成注浆锚固体; ③切除 PVC 管, 在锚固体表面与第一界面测点相对应的位置粘贴应变,

^{*} 收稿日期: 2013-05-05; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278492)

通讯作者: 范俊奇(1975—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事防护工程及岩土工程试验研究。E-mail: lyfjq@163.com

以测取第二界面剪应变分布形态；④将锚固体再次置入孔内径为 $\Phi 72\text{mm}$ 的 PVC 管中，灌浆形成模拟围岩介质；⑤再次切除 PVC 管，在对应位置粘贴应变片，并将除测点之外的介质表面全部凿毛；⑥重复④和⑤工序，直至完成试件制作。试件养护期以最后一层围岩介质达到 28d 为准。制作完毕后的试件见图 1，测点布置见图 2。

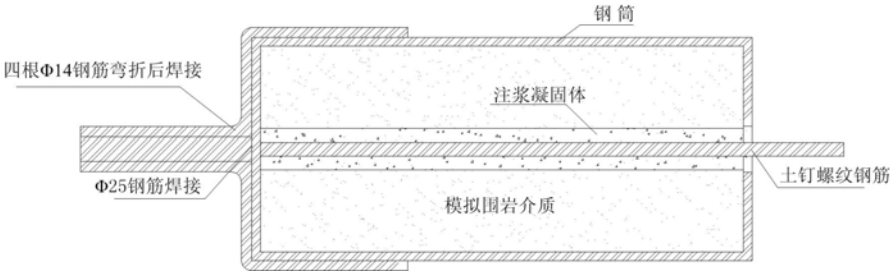


图 1 制作完毕后的试验模型
Fig. 1 Schematic of experimental bolt

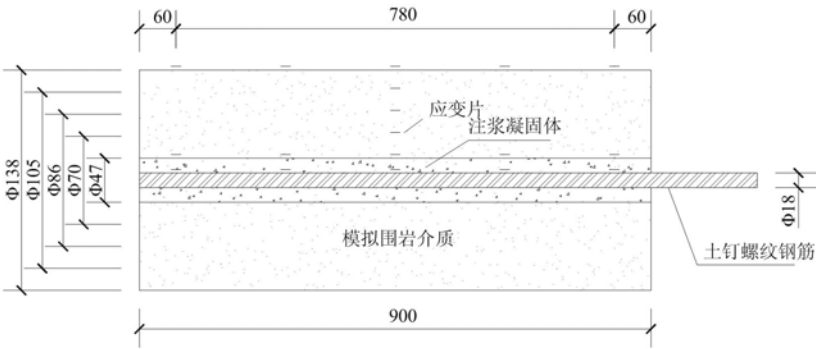


图 2 试件应变测点布置
Fig. 2 Arrangement of the strain measurement point

1.2 围岩介质及注浆体强度设计

为使试验构件更具有—般性，在试验构件的设计中，围岩介质的强度按显著高于、等于和显著小于注浆体强度设计，以分别模拟基岩、风化岩及土体介质。在每组试件灌注成型过程中，制作 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ 的标准砂浆试件，其抗压强度如表 1，表中数据为每组数据的平均值。

表 1 介质及注浆体单轴抗压强度试验结果

Tab. 1 Experimental result from the compression test

方法	单轴抗压强度 (MPa)	
	7d	28d
高强介质	31.8	53.14
中强介质	19.2	32.22
低强介质	3.7	7.26
注浆体	19.2	32.22



图 3 WES-50B 型万能材料试验机
Fig. 3 Universal test machine
of WES-50B

2 试验结果

2.1 试验现象

试验过程中对每个构件进行了分级循环加载，一直到构件完全破坏。在加载过程中，高强介质试件和中强介质构件的承载力均达到 140kN 以上，而低强介质试件承载力较弱，为 85kN。试验中观测到的

各试件破坏形态如表 2 所示。

表 2 各构件试验宏观观测情况

Tab. 2 Experimental result of macro-observation from test

构件类型	介质及注浆体观测结果	破坏形式	最大张拉力(kN)
高强构件	口部注浆体完全碎裂	杆体拉断	144
中强构件	口部注浆体部分碎裂	杆体未断、屈服	150
低强构件	口部注浆体完好,介质碎裂	注浆体从介质中拔出	85



图 4 低强试件注浆体被拉出现象

Fig. 4 The pull-out destruction of the bolt with low strength medium

造成各构件不同破坏形态的原因如下:①高强试件由于介质强度高,在口部形成应力集中,随着应力集中现象加强,最终将钢筋拉断;②中强介质在加载过程中应力集中现象较小,加载过程中注浆体在口部破坏不严重,钢筋没有拉断;③低强介质试件由于介质强度过低,在加载过程中,首先在注浆体与介质交界面破坏贯通,从而造成介质破坏、注浆体被拉出现象(图 4)。

2.2 试验结果及分析

实验测得不同荷载下各类锚杆实测轴应变沿杆体长度方向的分布形态如图 5 所示。

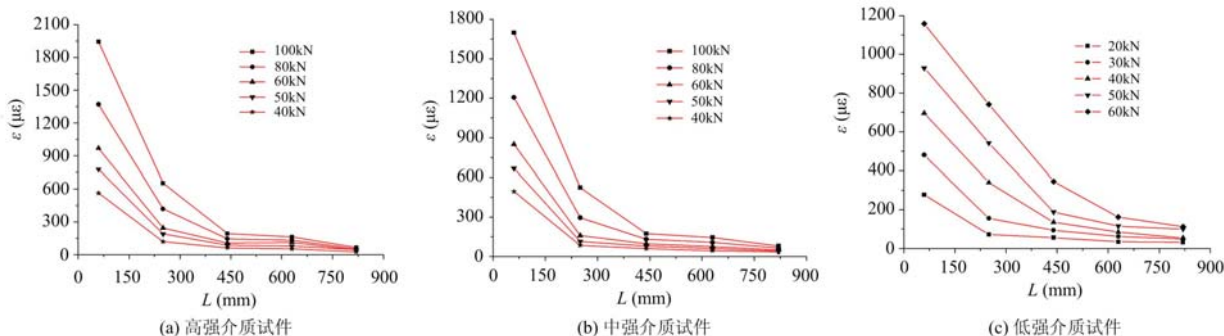


图 5 实测锚杆内锚固段杆体轴应变分布曲线

Fig. 5 Strain distribution curve in the internal anchorage section

由图 5 知,锚杆杆体轴应变沿杆体轴向是按指数规律衰减的。据此,分别对不同介质试件杆体轴应变进行近似拟合,其结果为^[12]:

$$\epsilon\left(\frac{x}{d}\right) = \frac{4 P_0}{\pi d^2 E_s} e^{-K_p \left(\frac{x}{d}\right)^{1.18}} \quad (1)$$

利用应力应变的关系,则杆体轴力方程为:

$$P(x) = P_0 e^{-K_p \left(\frac{x}{d}\right)^{1.18}} \quad (2)$$

式中: $\epsilon\left(\frac{x}{d}\right)$ 为杆体轴应变($\mu\epsilon$); ϵ_0 为外荷载作用点处的应变($\mu\epsilon$); x 为某点至外荷载作用点的距离(m); d 为杆体直径(m); D 为注浆体直径(m); E 为锚杆弹性模量(MPa); K_p 为荷载系数,与外荷载和介质强度相关; P_0 为锚杆外荷载(kN)。

试验所得不同介质中 K_p 与外荷载 P_0 之间的关系如图 6 所示,并可用下式表示:

$$\begin{cases} \text{高强介质: } K_p = 0.15579 e^{-0.01149 P_0} \\ \text{中强介质: } K_p = 0.11601 e^{-0.01157 P_0} \\ \text{低强介质: } K_p = 0.14734 e^{-0.03801 P_0} \end{cases} \quad (3)$$

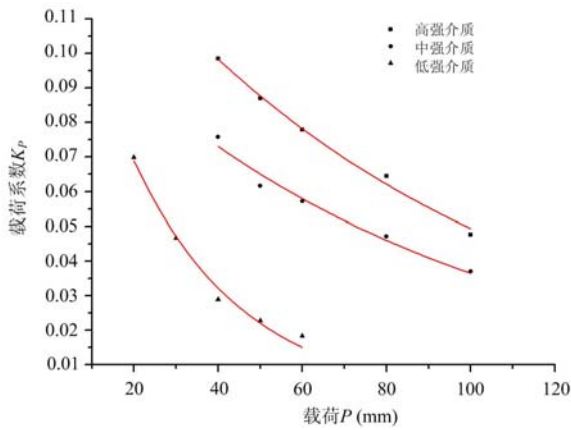
图6 荷载系数 K_p - P 关系曲线

Fig. 6 Relations between load and load factor

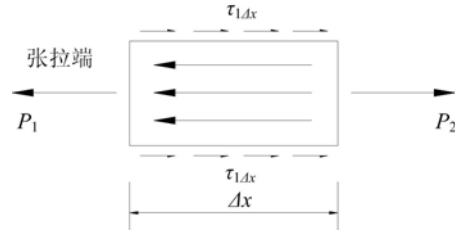


图7 锚杆微元体受力分析示意图

Fig. 7 Mechanical model of mini-unit of bolt

3 锚固段剪应力分布分析

3.1 第一界面剪应力公式的推导

锚杆承载时, 锚固段注浆体内的轴力随着与孔口距离的增大而减小, 在某一微段锚杆体上的轴力之差应由第一交界面的剪力来平衡, 其受力分析示意如图7所示。

由 $\sum x=0$, $p_2 - p_1 = \pi \cdot d \cdot \Delta x \cdot \tau_{1\Delta x}$ 得:

$$\tau_{1\Delta x} = \frac{P_2 - P_1}{\pi \cdot d \cdot \Delta x} \quad (4)$$

上式为锚杆两相邻测点间的平均剪应力。若 ΔL 足够小, 上式的计算结果可近似看成 $L=x$ 时第一交界面的剪力。此时:

$$\frac{P_2 - P_1}{\Delta x} = \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{dP}{dx} = \frac{-1.18 K_P P_0}{d} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.18} e^{-K_P} \left(\frac{x}{d} \right)^{1.18}$$

因此, 第一交界面上的剪应力可表示为^[7,8]:

$$\tau_1(x) = \frac{-1.18 K_P P_0}{\pi \cdot d^2} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.18} e^{-K_P} \left(\frac{x}{d} \right)^{1.18} \quad (5)$$

上式中, 负号表示剪应力方向与轴力相反。不同试件第一界面剪应力分布形态如图8。

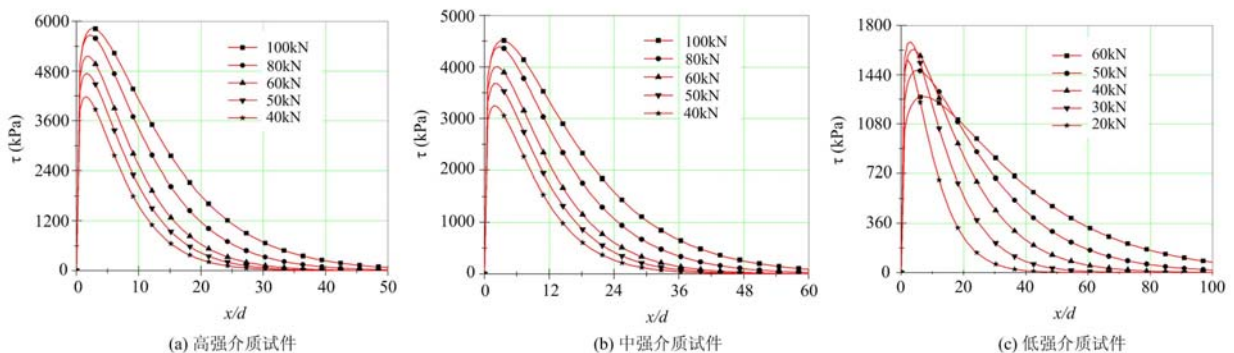


图8 锚杆第一界面剪应力分布形态

Fig. 8 Shear stress distribution in the first interface of bolt

3.2 第二界面的剪应力分布分析

杆体的拉应力是通过注浆体的剪切变形传递给围岩的, 近似假设注浆体为刚体, 则可从注浆体中取出长度为 dx 的微段进行分析(图9)。

由 dx 微段的轴向平衡条件 $\sum x=0$, 即 $\pi d \tau_1(x) dx - \pi D \tau_2(x) dx = 0$ 可得:

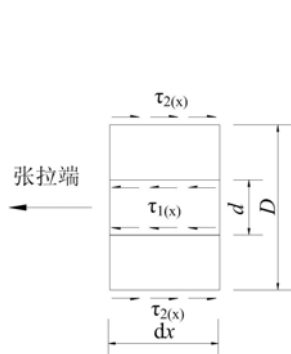


图 9 锚固体受力分析图

Fig. 9 Mechanical model
of anchoring body

$$\tau_2(x) = \frac{d}{D} \tau_1(x)$$

将(5)式代入上式即可得到第二界面上任一点的剪应力^[12]：

$$\tau_2(x) = \frac{-1.18 K_P P_0}{\pi \cdot d \cdot D} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.18} e^{-K_P \left(\frac{x}{d} \right)^{1.18}} \quad (6)$$

由公式(6)可得不同外荷载作用下各类试件第二界面上剪应力分布形态,如图 10 所示。

从图 3、图 8 和图 10 可知,锚杆轴应变及第一、第二交界面的剪应力分布的共同特征为：

(1) 在杆端处($x/d=0$),应变、轴力为最大值,其后沿轴线方向按负指数规律迅速衰减；

(2) 锚杆第一、第二交界面的剪应力分布规律是相同的,只是剪应力集中程度不同(本试验条件下,峰值相差近 3 倍)。剪应力在孔口处

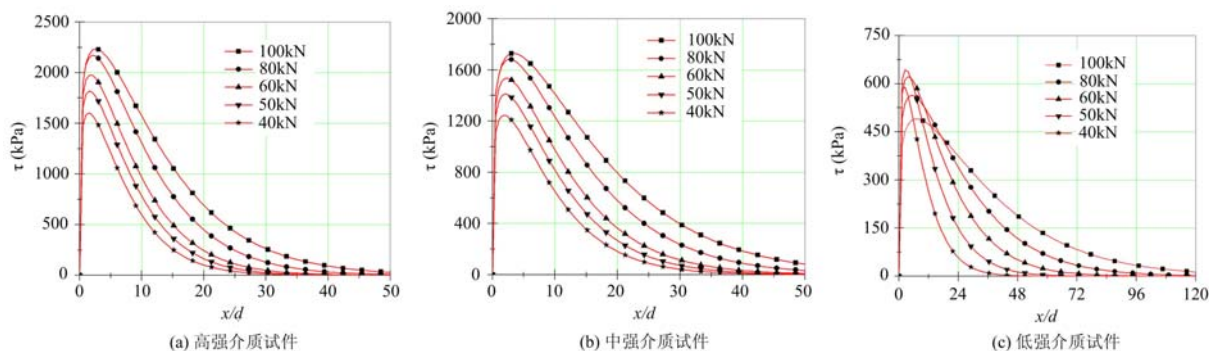


图 10 第二界面剪应力分布形态

Fig. 10 Shear stress distribution in the second interface

为零,在非常接近孔口处达到最大值,然后以较快的速率按负指数规律沿锚杆方向衰减。

(3) 由于轴力和剪应力衰减很快,因此锚杆轴力和有效剪应力值仅分布在杆体的有限长度范围内,锚杆的主要承力部位在其内锚固段的前部。

(4) 剪应力转移特性,随着拉拔荷载增大,峰值剪应力和零值剪应力同时向杆体深部转移,实际上这种转移是砂浆体局部产生破损的结果。这是一个非常重要的现象。

3.3 锚固段受力与拉拔力的关系

由公式(2)、(5)、(6)及图 5、图 8、图 10 可知,锚固段的轴力和第一、第二交界面的剪应力大小与锚杆杆端的拉拔力成正比。剪应力和轴力随拉拔力的增大而增大,但其受力区域和分布形式基本一致,主要都在有限的范围以内。在反复张拉荷载作用下,锚杆、砂浆和介质共同承担外荷载。三者同步协调,随着外荷载增加,这种协调工作状态被破坏,首先砂浆体被拉断,然后砂浆与孔壁被拉脱,使锚杆受力深度增大。

3.4 介质强度对锚固段剪应力分布的影响

锚杆锚固段的剪应力分布区域决定着锚杆的有效锚固长度,从公式(1)、(2)可知,锚固段剪应力的大小及分布受介质性质的影响,图 11 列出了试验中高、中、低三种介质强度锚杆在拉拔力同为 40kN 时的轴应变及剪应力分布比较。

从图 11 可知,对于不同介质强度的试件,其剪应力分布形态是一样的,只是其衰减速率和受力区域不同,高强介质中锚杆的受力区域为距孔口深度 $30d$;中强介质中锚杆的受力区域为距孔口深度 $40d$;低强介质中锚杆的受力区域为距孔口深度 $70d$ 。由此可以得出:介质强度越高锚杆所受的剪应力、轴力越大,剪应力轴力的分布范围越小、越集中,锚杆的有效锚固长度也就越小;介质强度越低,锚杆所受的剪应力、轴力越小,剪应力轴力的分布范围越大、越均匀,锚杆的有效锚固长度也就越大。从某种意义上说,用拉力型锚杆加固软岩的效果比加固硬岩的效果更好。

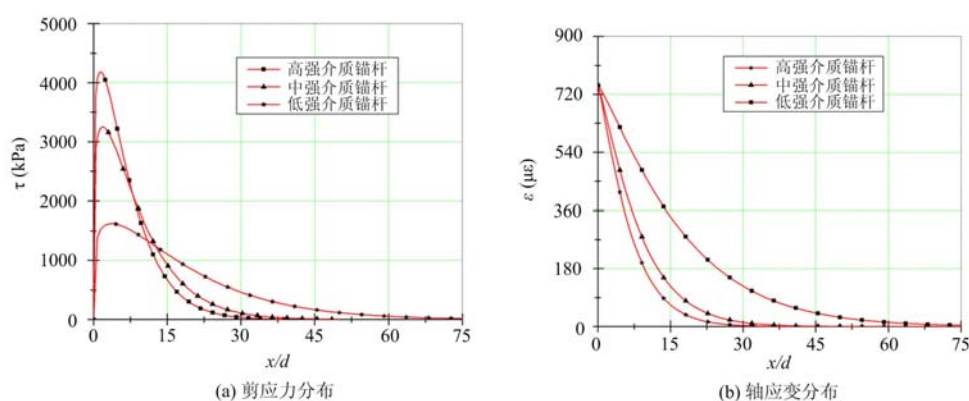


图11 不同介质中锚杆剪应力及轴应变分布对比

Fig. 11 Variations of shear Stress & strain distribution of bolt in different medium

4 结论

本文通过对不同介质中锚杆室内拉拔试验研究和简单分析,初步得到如下结论或认识:

(1) 本文所采取的试验方法简单可行,能够较好地模拟锚杆内锚固段的实际受力情况,其试验结果对分析锚固类结构锚固力的分布状态以及指导其设计等都具有一定的借鉴意义。

(2) 在拉拔力作用下,锚杆杆体处处呈受拉状态,注浆体处处呈受压状态(剪应力均为负值)并以这种受拉方式使剪应力沿内锚固段向底端传递。

(3) 锚杆的应力、应变、杆体的轴力及剪应力的分布是很不均匀的。孔口处应变、轴力为最大值,其后沿轴线方向迅速减小;剪应力在孔口处为零,在非常接近孔口处达到最大值,然后以较快的速率衰减。因此锚杆的主要承力部位在其内锚固段的前部。

(4) 锚固段的轴力和第一、第二交界面的剪应力的大小与拉拔力成正比。第二界面剪应力是第一界面剪应力衰减的结果。相对于高、中、低三种强度介质,第二界面的剪应力分布特征与第一界面的基本相近,只是量值和分布范围有较大差别。

(5) 介质强度对锚固类结构的剪应力分布有重大影响,介质强度越高,锚杆所受的剪应力、轴力越大,分布范围越小,越集中,锚杆的有效锚固长度也就越小;介质强度越低,锚杆所受的剪应力、轴力越小,分布范围越大,越均匀,锚杆的有效锚固长度也就越大。

参考文献:

- [1] 曾宪明, 杜云鹤, 范俊奇等. 锚固类结构第二交界面剪应力演化规律、衰减特性与计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 4611—4626 (ZENG Xianming, DU Yunhe, FAN Junqi, et al. Discussion on evolutionary law, attenuating characteristic and calculating method for the shearing stress of the second interface of nchorage type structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 2005, 24(Supp 1): 4611—4626 (in Chinese))
- [2] 卢黎, 张永兴, 吴曙光. 压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 3765—1520 (LU Li, ZHANG Yongxing, WU Shuguang. Distribution of stresses on bonded length of compression type rock bolt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 3765—3769 (in Chinese))
- [3] 孙玉宁, 周鸿超, 宋维宾. 端锚可回收锚杆锚固段力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3014—3020 (SUN Yuning, ZHOU Hongchao, SONG Weibin. Research on mechanical character of bonding segment of end-anchored retrievable resin bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Suppl): 3014—3020 (in Chinese))
- [4] 张培胜, 阴可. 拉力型锚杆锚固段传力机理的全过程分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 717—723 (ZHANG Peisheng, YIN Ke. An analysis method of the whole working course for the force transferring mechanism in fixed segment of tensile-type anchor bar [J]. Chinese Journal of Underground Space and

- Engineering, 2009, 5(4):717–723 (in Chinese))
- [5] 武崇福, 李长洪, 毕鑫 等. 深基坑预应力锚杆轴力分布研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(8):134–137 (WU Chongfu, LI Changhong, BI Xin, et al. Study on distribution of axial force in prestressed anchor for deep foundation pit[J]. Building Structure, 2011, 41(8):134–137(in Chinese))
- [6] Wu Shenxing. Dynamic experimental study of bond-slip between bars and the concrete in Xiaowan arch dam[C]// In: New Developments in Dam Engineering-Wieland. London: Taylor and Francis Group, 2004:951–959.
- [7] 曾宪明, 林大路, 李世民 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2):3609–3625 (ZENG Xianming, LIN Dalu, LI Shimin, et al. Comprehensive research of critical anchorage length problem of rod of anchorage type structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 2009, 28(Supp2): 3609–3625 (in Chinese))
- [8] 杨松林, 荣冠, 朱焕春. 混凝土中锚杆荷载传递机理的理论分析和现场试验[J]. 岩土力学, 2001(1):72–74 (YANG Songli, RONG Guan, ZHU Huanchun. Theoretical analysis and in-site experiment on load-transfer mechanism of bolt in cement [J]. Rock and soil mechanics, 2001, 22(1):71–74 (in Chinese))
- [9] 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚固段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22):3765–3769 (XU Jingmao, GU Leiyu. Test study on the peak shear strength between grout and bore wall in the interior bond section of prestressed anchorage cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 2004, 23(22):3765–3769 (in Chinese))
- [10] 荣冠, 朱焕春, 周创兵. 螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3):469–475 (RONG Guan, ZHU Huanchun, ZHOU Chuangbing. Test study on working mechanism of fully grouted bolts of thread steel and smooth steel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 2004, 23(3):469–475 (in Chinese))
- [11] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6):696–699 (JIANG Zhongxin. A Gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type [J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 2001, 23(6):696–699 (in Chinese))
- [12] 范俊奇. 锚固类结构内锚固段剪应力分布规律研究[D]. 兰州大学(硕士学位论文), 2005 (FAN Junqi. Study on the shear stress distribution of internal anchorage section of anchoring-type structure[D]. Lanzhou University (ph. M. Thesis), 2005 (in Chinese))

Experimental Study of Shear Stress Distribution in Internal Anchoring Section of a Full-length Grouting Anchor

FAN Jun-qi^{1,2}, DONG Hong-xiao¹, GAO Yong-hong^{1,2}, LOU Meng-lin¹

(1. The 3rd Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Resistant in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Drawing experiment of anchor model in simulated surrounding rock medium with high, medium and low intensity was carried out respectively by using universal test machine WES-50B. Results indicate that the distribution of axial strain in anchoring section and bond stress at the first and second interface decays in accordance with the law of negative index. Based on model experimental results of anchor body axial strain and certain simplifying assumptions, formulae about axis force of anchoring structure and shear stress distribution at the first and second interface were derived. The stress in internal anchoring section, the axial force and the shear stress transfer and attenuation in homogeneous medium were analyzed. Above results may provide a reference for experimental analysis of shear stress distribution at the first and second interface of anchoring section.

Keywords: full-length grouting anchor; internal anchoring section; shear stress distribution; experimental study