

大直径喷砂 FRP 筋应力松弛试件锚固方法研究

李国维^{1, 2}, 倪春^{2, 3}, 葛万明^{2, 4}, 戴剑²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏南京 210098;
3. 淮河水利委员会治淮工程建设管理局, 安徽蚌埠 233001; 4. 江苏今迈工程勘察有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: 纤维增强合聚物 (FRP) 筋具有设计性好, 比强度高, 不导电、磁和耐腐蚀性强的优点。FRP 筋为非均质复合材料, 强度高、弹性模量小, 有尺寸效应, 用于预应力结构是一种趋势, 其应力松弛特性指标是一必要的设计参数。通过不同锚固方式的 FRP 筋应力松弛试验, 研究测试大直径喷砂 FRP 筋应力松弛特性的试件锚固方法和量测方法。研究表明, 改进的钢套筒灌胶锚固方法, 可有效减少加载过后 FRP 筋杆体的滑移量, 能满足杆体应力松弛实验要求; 预置加载设施的混凝土构件模拟锚固法, 可用于测试 FRP 筋锚杆结构的应力松弛综合性质; 光纤光栅变形监测方法能用于应力松弛试验, 所测应变数据可靠性高。

关键词: FRP 筋; 大直径; 喷砂筋; 应力松弛; 光栅监测

中图分类号: U418.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)02-0227-08

作者简介: 李国维(1964-), 男, 黑龙江大庆人, 河海大学博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事软基路堤变形和高边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: lgwnj@163.com。

Anchoring method for stress relaxation specimens with large-diameter sand-surface FRP bars

LI Guo-wei^{1, 2}, NI Chun^{2, 3}, GE Wan-ming^{2, 4}, DAI Jian²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnique and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Highway and Railway Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Construction Administration of Huaihe
River Water Resources Commission, Bengbu 233001, China; 4. Jiangsu Jinmai Engineering Investigation Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Recently, due to their high specific strength, non-electric conductivity, non-magnetic nature and corrosion resistance, fiber reinforced polymer (FRP) bars are being used in engineering structures built in corrosive environments to enhance the durability of reinforced concrete (RC). Moreover, because of their high strength, small elastic modulus and remarkable size effect, the FRP bars are applied to pre-stressed structures, and their stress-relaxation feature is an important design parameter. The anchoring and measuring method for stress relaxation specimens with larger-diameter sand-surface FRP bars is studied. The results show that the modified steel sleeve-type anchoring method can reduce the slippage of the specimens, which meets the requirements of specification. The counterpart experimental method of anchoring concrete component with pre-buried loading devices can be used to test the relaxation behavior of anchoring structures. Furthermore, the fiber optic grating technology is employed to monitor the continuous long-term strain process of rod body. The measured strain data are accurate and stable.

Key words: FRP bar; large diameter; sand surface; stress relaxation; fiber grating monitoring

0 引言

目前, 钢筋混凝土在土木工程中发挥着极其重要的作用, 然而由于钢筋本身耐腐蚀性差, 钢筋混凝土结构在恶劣环境中工作时或多或少出现了腐蚀不耐久的现象。纤维增强聚合物 (fiber reinforced polymer, 简称 FRP) 筋作为一种设计性好, 比强度高, 不导电, 不导磁, 耐腐蚀性好的新材料, 近年来已被用于海岸工程结构、桥梁结构、化工厂房结构、水利水电结构、

地下工程、巷道支护、边坡加固等方面^[1-6]来克服钢筋混凝土存在的一系列耐久性问题。

将 FRP 材料制作成筋材, 可以在工程中取代钢筋, 其拉伸强度比钢筋大, 弹模较小。例如: 直径为 25 mm 的普通玻璃纤维筋拉伸强度约为钢筋的 3~4 倍, 而弹模只为钢筋的 1/4。强度大、弹模小的材料

特性使其直接应用于混凝土结构代替钢筋存在一个障碍, 即在小应变下强度得不到充分发挥, 要充分发挥 FRP 筋材高强度的材料性能, 最好的方法便是加预应力^[7-8]。很多应用于实际工程中的纤维筋材是需施加预应力的, 因此, 研究 FRP 筋材在高应力下的应力松弛特性是十分必要的。

FRP 筋材作为一种非均质各向异性材料, 其横向抗剪强度远小于轴向抗拉强度, 材料力学特性存在显著的尺寸效应^[9]。考虑安全因素, 现用于锚固工程中的 FRP 筋材多为大直径筋材, 因此大直径 FRP 筋的锚固方法是应用该材料的一项关键性技术。

1 FRP 筋材料特性及常规锚固方式

1.1 FRP 筋材料特性

本试验的试验样品为一种新设计的拉挤型 FRP 筋材。为解决纯玻璃纤维筋材在碱环境下容易腐蚀的问题, 将两种不同纤维混合, 即在玻璃纤维束内芯的外层覆盖一层耐碱性较好的玄武岩纤维, 制成玄武岩-玻璃纤维混合复合材料。本试验采用的筋材为广东省中山市浦美复合材料有限公司生产的直径为 25 mm 的玄武岩-玻璃纤维混合复合材料, 基体为热固型环氧树脂, 各组份(质量)含量为: 树脂 19%; 玄武岩纤维 10%; 玻璃纤维 65%; 石英细砂约占 6%。本 FRP 筋用于广东省肇花高速公路边坡加固试验段代替钢筋锚杆, 设计抗拔力为 90 kN, 筋材截面照片见图 1。

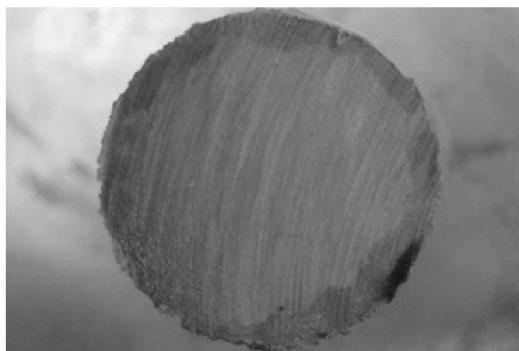


图 1 试件截面照片

Fig. 1 Photo of FRP rebars

前期对此筋材常规力学性能进行了测试, 得出筋材常规力学性能见表 1。

表 1 FRP 筋常规力学性能参数表

Table 1 Mechanical behaviors of FRP rebars

平均直径 /mm	极限荷载 /kN	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	破坏延伸率 /%
27.45	536.29	906.40	52.26	1.73

1.2 FRP 筋常规锚固方式

FRP 筋材的力学性能测试用到的锚固方式一般

有: 夹片式, 套筒灌胶式和混合式, 其中混合型是将夹片式及灌胶式结合起来使用。

夹片式锚固法。夹片式锚固法使用刚性夹片固定筋材端部, 根据夹片是否与筋材外表面耦合可以分为耦合型与压紧型的。耦合型的夹片内壁形态和筋材外表面形态吻合, 主要靠界面耦合时的机械咬合力供抗拔力, 主要适用于筋材表面有规则粗螺纹的情况。压紧型在工作时需要在夹片上施加一定的压力使其压紧在筋材表面, 主要依靠高压所产生的摩擦力作为锚固力, 由于 FRP 筋抗剪性能差, 因此为避免端部被压坏, 压紧型夹片式锚固法主要适用于小直径筋材。夹片法用于 FRP 筋锚固有滑移量少、应用方便的特点, 然而夹片为刚性材料, 锚具工作时有可能引起筋材表面的应力集中, 导致筋材表面因抗剪能力不足破坏。图 2 为黄志怀^[10]等做 FRP 筋现场试验所用的耦合型夹片式锚具。

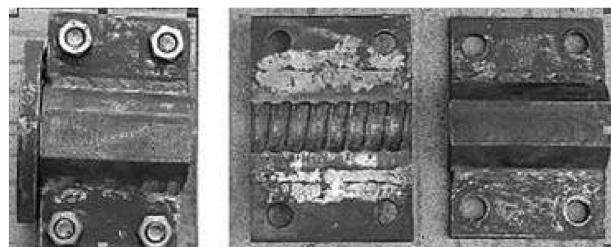


图 2 耦合型夹片式锚具

Fig. 2 Photo of clip-type anchors

同济大学袁国青^[11]等人研究小直径($\phi 13$ mm)、表面形态为螺纹状的 FRP 筋材应力松弛试验时使用了夹片锚具, 试验通过千分表观测滑移量几乎为零, 锚固效果较好。

套筒灌胶式锚固法。套筒灌胶式锚固方法根据套管内径是否变化可分为直套管及锥形套管两种。其原理为在筋材与套管之间填充带膨胀性质的黏结剂, 黏结剂的膨胀作用使得筋材被压紧在套管内部, 通过黏结力和摩擦力作为抗拔力进行锚固。此方法的优点是对筋材直径及表面形态无特殊要求, 相对于夹片式锚具, 能将压力平均传递至杆体表面, 防止锚固段筋材表面被剪坏, 试件制作简单; 缺点为加载过程中及加载后筋材与套管之间会发生相对滑移。图 3 为进行大直径喷砂 FRP 筋材常规拉伸性能试验时采用的直套管锚固方式。

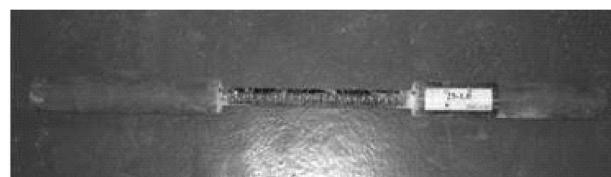


图 3 直套管灌胶式锚固试件

Fig. 3 Photo of specimen anchored in steel pipe

2 FRP 筋应力松弛试验锚固方式研究

应力松弛是材料在一定温度和约束承载状态下, 总应变保持不变, 应力随时间逐渐降低的现象。材料的应力松弛特性主要和材料本身的性质, 外界温度及所受的荷载大小有关, 它是材料的一个耐久性指标。应力松弛试验要求将材料加载至指定荷载后, 保持材料的应变不变, 测得材料在恒定应变条件下应力随时间的衰减规律。试验关键在于保持材料的应变在加载到指定荷载等级后恒定不变, 因此用于 FRP 筋松弛试验的锚固方法, 其实质为限制试件加载后筋材与锚固体之间的滑移量。从上述应力松弛试验要求可以看出, 试验中对滑移量的要求只限于加载后, 与加载过程中的滑移量无关。只要加载后端部滑移增量满足规范要求, 则所得的实验数据就能真实反映 FRP 筋的应力松弛特性。

中国关于 FRP 材料性能测试方法中, 暂无 FRP 棒材应力松弛特性试验的规范。日本土木工程协会有关于 FRP 棒材应力松弛试验的明确规定。本试验参照日本规范^[12], 要求在应力松弛试验进行过程中, 筋材的应变变化范围不能超过 $\pm 25 \mu\epsilon$ 。通过分析, 可以得出加载后拉伸段应变变化与端部滑移量的关系为

$$\Delta\epsilon = \frac{L(1 + \epsilon_1) - (L + \Delta L)}{L + \Delta L} - \epsilon_1 \quad (1)$$

式中 $\Delta\epsilon$ 为加载开始后由于端部滑移导致的筋材应变变化量; L 为加载段初始长度; ΔL 为加载后由于端部滑移导致的拉伸段伸长量, 其大小等于滑移量; ϵ_1 为试件加载后的初始应变。

化简式 (1) 并且略去小项可得式 (2)

$$\Delta\epsilon = -\frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

FRP 筋力学试验一般采用在端部杆体表面施加压力的方法, 使界面产生足够的摩擦力或者咬合力作为抗拔力。然而, 由于纤维筋材横向抗剪能力差, 若一味依靠增加锚固压力来增大抗拔力有可能导致端部因抗剪能力不足而被压坏。本文的研究对象为大直径 FRP 筋, 其极限荷载大, 相对于小直径筋材而言, 达到同一个应力水平所需施加的荷载要大; 又因为筋材表面经喷砂处理, 比表面为螺纹状的筋材提供的锚固力小很多^[13], 所以本材料的应力松弛试验在端部锚固方法上存在难点, 目前关于 FRP 应力松弛性能的研究基本集中在小直径筋材或者片材^[14]。还没有检索到关于大直径喷砂 FRP 筋应力松弛试验方法方面的文献。

2.1 钢管填充膨胀剂端部封闭锚固法

(1) 常规直套管锚方式存在的问题

为了分析常规套管灌胶锚方式能否满足应力松弛试验要求, 用此方式做了 3 种不同黏结剂的探索性试验, 每种试件各 1 个, 试件参数见图 4 及表 2, 加载装置见图 5。

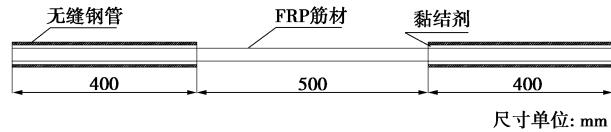


图 4 套管灌胶式锚固试件尺寸图

Fig. 4 Schematic diagram of specimen anchored by pipes

表 2 #1~#3 试件参数表

Table 2 Parameters of specimens No. 1~3

试件编号	#1	#2	#3
直径/mm	27.57	27.57	27.57
锚固段长度/cm	40	40	40
拉伸段长度/cm	50	50	50
黏结剂配比 (质量比)	0.3 : 水 : 碎石 : 膨胀水泥	0.3 : 0 : 1	0.3 : 0.5 : 0.5
养护时间/d	≥15	≥15	≥15

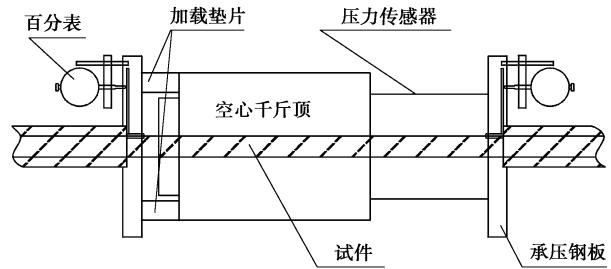


图 5 应力松弛试验加载装置图

Fig. 5 Schematic diagram of loading devices

其中, 加载装置为空心千斤顶, 手动泵液压加载; 荷载测量装置为北京基康生产的 BGK-4900 振弦式锚索测力计及 BGK-408 振弦读数仪。

试验过程中, 加到指定荷载等级后在千斤顶和端部承压钢板之间放置一对等厚钢垫片, 然后撤回千斤顶。视垫片、空心千斤顶外壳、压力传感器壳体为刚性材料。则加载后拉伸段应变变化只由试件端部滑移引起, 若筋材与锚固钢管不发生相对滑移, 则筋材拉伸段应变保持不变。试验过程中筋材与锚固钢管之间的滑移量根据放置在承压钢板上的百分表测得。试件每级荷载观测周期为 7 d。由于有效拉伸段长度近似为试件制作时中间拉伸段的长度, 因此由式 (2) 可以计算得出试验允许滑移量为 0.0125 mm。

对 3 种试件加载, 观察试件在加载后滑移增量随时间变化, 试验结果见图 6。

图 7, 8 为试件 #1 经加载后端部滑移情况。#1 试件加载过程中发生明显的滑移, 加载完成后, 滑移随时间继续发展。卸荷后发现, 在锚固端口界面上, 黏结剂风化成粉末, 并逐渐向试件内部剥蚀。

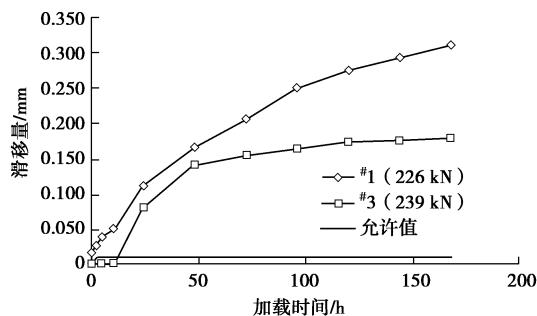


图 6 #1~#3 试件端部滑移增量观测图

Fig. 6 Variation of slippage of specimens No. 1~3 with loading time

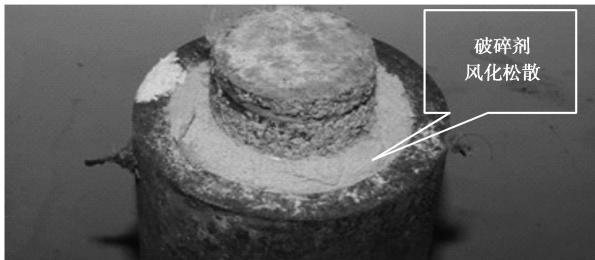


图 7 #1 试件加载后照片

Fig. 7 Photo of specimen No. 1 after loading

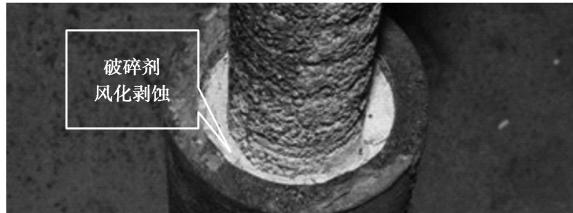


图 8 #1 试件加载后照片

Fig. 8 Photo of specimen No. 1 after loading

图 9, 10 为试件#2 加载后端部滑移情况。加载过程中发生明显滑移, 且由于抗拔力不足, 筋材直接从锚固体中拔出, 致使加载失败。试件#3 加载后情况如同试件#1, 但滑移量相比试件#1 小。

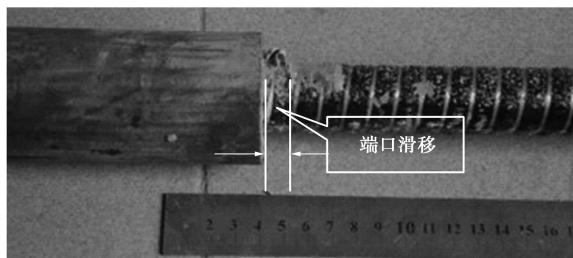


图 9 #2 试件加载后照片

Fig. 9 Photo of specimen No. 2 after loading

从受力角度分析: 尤春安^[15]给出了的全长黏结式筋材在弹性范围内, 杆体的剪应力及轴力随埋入深度的关系为

$$\tau = -\frac{azF}{\pi r} \exp(az^2) \quad , \quad (3)$$

$$N = F \exp(az^2) \quad . \quad (4)$$

式中 F 为锚杆端头所受荷载; r 为锚杆半径; z 为剪应力或轴力计算点距端部的深度; a 为界面参数, 是一个与岩体的弹性模量、泊松比及杆体弹模有关的常数。

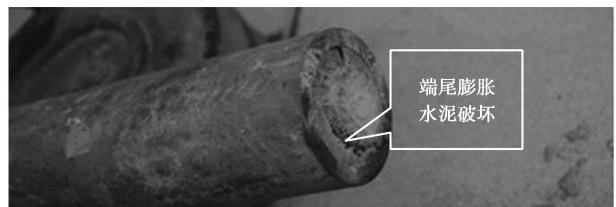


图 10 #2 试件加载后照片

Fig. 10 Photo of specimen No. 2 after loading

由式(3)、(4), 可以看出, 全长黏结筋材受拉后杆体拉应力随深度逐渐减小, 剪应力随深度先变大后变小, 在锚固段存在峰值。因此, 筋材在一定荷载和围岩条件下存在一个有效的锚固长度, 超过有效锚固长度部分对筋材锚固力大小不产生影响。杆体表面剪应力分布主要受到外荷载大小及黏结剂硬度影响, 荷载越大, 黏结剂越硬, 则剪应力峰值越高且有效锚固长度越短; 反之剪应力峰值越小且有效锚固长度越长。

综上, 常规直套管锚固方式不能满足应力松弛实验的要求。#1 试件, 试验现象表明锚固长度足够, 但在端部两种材料界面发生剪切裂缝后, 黏结剂风化引起卸荷, 杆体变形不断向锚固体发展, 滑移量不断增加。#2 试件, 由于膨胀水泥膨胀性能较低, 界面抗剪强度较低, 加载后形成贯通性裂缝, 导致#2 试件杆体从锚固体中整体拔出。#3 试件, 由于采用混合黏结方式, 端部黏结剂有一定强度, 弹模相对于#1 试件大, 且风化速度慢, 因此滑移增量较#1 小, 但还不满足应力松弛试验要求。主要原因是在锚固段与自由界面交界处, 黏结剂密实度不够, 且暴露在空气中风化成粉末状, 致使裂缝不断扩展, 滑移量逐步增加。

(2) 直套管锚固方式的改进

鉴于以上#1~#3 试件加载结果, 考虑将试件#3 锚固方式进行改进, 在锚固段端口, 钢管与筋材缝隙之间添加压密钢环(见图 11~13), 封堵端口处的黏结剂, 致使黏结剂在试件制作后, 以及加载过程中始终处于受压状态, 增加端口黏结剂的密实度, 并能有效防止黏结剂风化产生卸荷。

a) 试件制作

试件尺寸按照图 4 尺寸, 首先用 AB 胶将钢管与筋材以及圆环黏接, 然后将黏结试剂混合搅拌均匀后从两端浇入钢管中, 最后在端部加定位模具。为防止黏结剂在固化过程中因放热影响筋材性能, 在钢管外

包裹湿布降温, 且间歇洒水。湿布养护 24 h 后拆除端部定位模具, 浇筑另一端或置于室内空气中养护。试件完成后端口如图 13, 试件件数为一件。

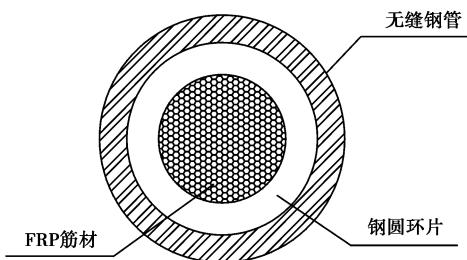


图 11 端部锚固示意图

Fig.11 Schematic diagram of improved anchor method

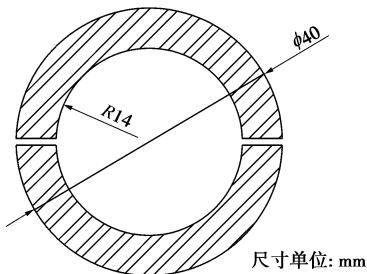


图 12 密封钢环片尺寸图

Fig.12 Schematic diagram of steel seal ring



图 13 试件端部锚固完成后实物图

Fig.13 Photo of specimen by using improved anchor method

b) 观测结果及数据分析

试件养护至少 15 d 后进行逐级加载, 记录加载至不同荷载等级后端部滑移量随时间变化规律 (图 14, 15)。加载过程中, 虽发现筋材与套管之间发生明显的滑移, 但加载结束后, 滑移得到控制, 满足应力松弛试验要求。

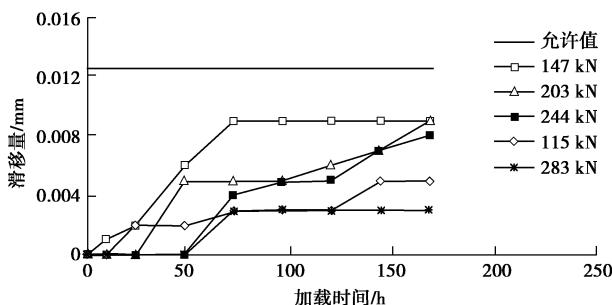


图 14 改进的钢管灌胶法端部滑移量结果图

Fig. 14 Variation of slippage of specimens with loading time by using improved anchor method

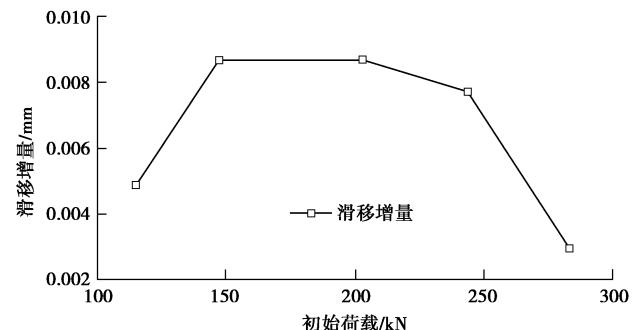


图 15 加载后滑移增量与荷载大小关系曲线

Fig. 15 Variation of slippage after loading with magnitude of loading

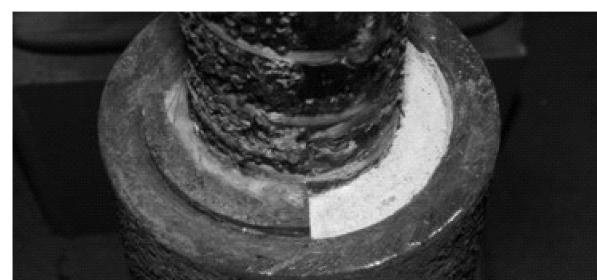


图 16 改进的钢管灌胶锚固实物图

Fig. 16 Photo of specimen anchored by improved method after loading

由图 14 可以看出, 各级荷载下端部滑移增量都没有超过规范中的允许值。分析原因为: 端口被钢环密封后, 大大提高了端口处黏结剂的密实度, 增加了试件的抗拔力, 同时避免了黏结剂的风化卸荷, 因此滑移量在加载后得到控制。此外, 由图 15 可以看出, 加载 7 d 后的滑移量随荷载先变大, 后变小。原因在于: 荷载较小时, 滑移量主要受荷载大小控制, 荷载增大则滑移量增大; 随着荷载的继续增大, 端部黏结体由于受压愈加密实, 使得加载结束后滑移增量反而开始减小, 由此可以推断出在更大荷载等级下, 只要在加载过程中锚固体不发生破坏, 加载后端部滑移增量就能满足应力松弛试验要求。

加载结束后对锚固端进行拆封观察 (见图 16), 发现端部黏结剂密实且完整, 说明改进的锚固方式有效地解决了试件^{#1}及^{#3}存在的端部界面黏结体风化卸荷问题, 因此采用端口密封处理的套管灌胶锚固方法制作的试件, 在用承压钢板加载过程中, 依靠混合破碎剂的膨胀性提供足够的抗拔力, 依靠承压钢板及密封环密实端口黏结剂, 控制加载后滑移增量, 使其达到应力松弛试验要求, 是一套可行的应力松弛试验方法。

2.2 预置加载设施的混凝土构件模拟锚固法

直接浇筑混凝土或者砂浆体锚固筋材, 是在筋材两端直接浇筑一定长度混凝土或者砂浆构件, 利用筋

材和锚固体之间的黏结力作为抗拔力, 图 17 为笔者研究 GFRP 筋全长黏结锚杆^[16]时使用的砂浆体锚固构件。该方法一次性可获得多项参数, 但试件制作工序繁琐。由于试件体积和重量大, 不能用数控试验机加载, 图 17 中采用空心千斤顶人工加载方法。

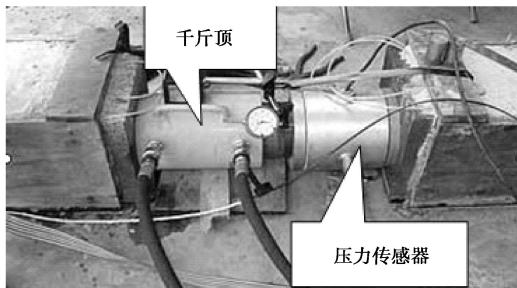


图 17 两端浇筑砂浆体锚固

Fig. 17 Photo of specimen anchored by cement mortar

将 FRP 筋用于边坡加固结构中代替钢筋锚杆时常在杆体与坡体之间注入水泥砂浆进行锚固, 因此, 采用砂浆体锚固方法制成的试件, 能有效模拟筋材在实际工作中的受力情况, 研究其整体的应力松弛特性也具有实际意义。砂浆构件锚固端部时, 在砂浆体内增加纵向受力传递筋及横向截面箍筋, 模拟岩体锚杆的坚硬围岩, 同时消除试件加载过程中产生的剪胀作用。

(1) 光纤光栅监测方法

常规 FRP 筋的性能试验变形监测中使用的方法有引伸计法, 应变片法及百分表或千分表法。这些方法各有优势与不足: 其中引伸计法所测结果比较精确但其所测应变为一段距离内的平均应变; 应变片法能观测某个点不同方向的应变, 结果也比较精确但观测仪器操作复杂且在长期连续观测方面存在不足; 百分表及千分表测法简单, 但精度较低且不能测量试件内部变形。本文研究 FRP 筋应力松弛试验方法, 要求测量结果精度高, 时间长, 且砂浆试件要求测量试件内部杆体应变, 因此, 以上测量方法都不能满足砂浆试件的应变观测要求。

光纤光栅技术是利用光栅反射特定波长光的特性来实现传感的。当入射光进入光纤时, 光栅会反射特定波长的光, 该反射光的中心波长值 λ_B 与光栅所受的轴向应变和温度有着线性的关系。当光栅受到拉伸应变或者受热膨胀时, 波长增大; 当光栅受到压缩应变或者遇冷时, 波长减小。该线性关系可以表达为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = c_e \Delta\varepsilon + c_T \Delta T \quad . \quad (5)$$

式中 λ_B 是反射光的初始中心波长; $\Delta\lambda_B$ 是中心波长的漂移量; $\Delta\varepsilon$ 和 ΔT 分别是光栅所受的应变、温度变化量; c_e 和 c_T 分别是光纤光栅的应变、温度标定系数,

其取值约为 $0.78 \times 10^{-6} \mu\varepsilon^{-1}$ 和 $6.67 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

光纤光栅监测技术主要优势在于光栅传感机理明晰, 检测精度高: 基于目前的解调技术, 光纤光栅传感器对于温度和应变的精度高达 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1 \mu\varepsilon$, 数据采集频率高达 5 kHz , 且传感器间距可根据试验需要设计、熔接, 并可实现长时间监测。本试验变形测量采用光纤光栅监测方法。

(2) 试件制作

试件及砂浆体尺寸见图 18, 试件长 3 m, 两端砂浆体长度各为 1.2 m, 其横截面为 $0.22 \text{ m} \times 0.22 \text{ m}$ 正方形截面, 中间加载段长度考虑千斤顶及压力传感器尺寸定为 0.5 m。浇筑试件前, 加载段预先放置空心千斤顶及压力传感器, 且在每端底部模板下放置 4 根等直径圆棒用以减小加载过程中砂浆体与地面之间的摩擦阻力。砂浆体锚固试件总计制作 1 件。

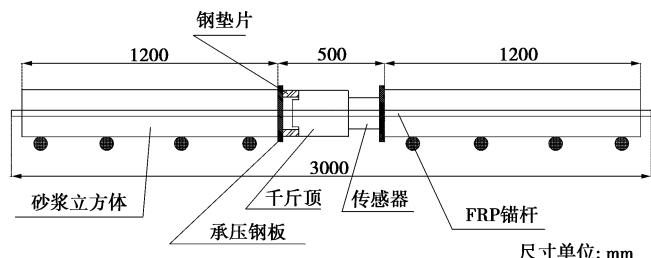


图 18 砂浆锚固试件尺寸图

Fig. 18 Schematic diagram of specimen anchored by mortar

试件应变测量采用光纤光栅及 MOI 的 SM125 光栅解调仪, 杆体表面对称布置 2 条光纤, 每条光纤包含 13 个对称分布的光栅传感器。试件浇筑前先在杆体表面全长刻槽, 然后将光纤传感器放入槽中, 用环氧树脂填充密封养护 1 d。之后将杆体、钢筋、千斤顶及压力传感器放入预制的木板模具中, 见图 19。锚固段布置的钢筋, 每端为 4 根 $\phi 12 \text{ mm}$, 长 1.15 m 纵向钢筋; 7 个 $\phi 8 \text{ mm}$, 边长为 150 mm 的箍筋, 箍筋布置采用端头密, 端尾疏的方式。砂浆用砂为中砂, 水泥为华润牌 42.5R 标号的普通硅酸盐水泥, 砂浆配比水: 砂: 水泥为 $0.4:1:1$ 。浇筑试件养护 20 d 后测得标准立方体试块抗压强度平均值为 41.51 MPa 。

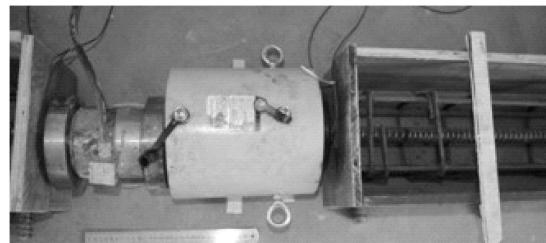


图 19 砂浆锚固试件照片

Fig. 19 Photo of specimen anchored by mortar

(3) 观测结果及数据分析

试件养护超过 20 d 后分级加载, 加载方式同钢管锚固试件, 测得每级荷载杆体应变, 试件成功进行了 5 个等级的加载观测过程, 加载至 374.23 kN 时试件发出一声巨响, 杆体所持荷载突然急剧下降, 试件一端的砂浆锚固体出现通体的裂缝 (图 20), 裂缝从加载段延伸至自由端, 并通过自由端横截面上的杆体位置, 说明在杆体与砂浆体之间出现了贯穿型的裂缝, 以至于界面处的黏结力大大减小, 不足以维持杆体的荷载水平, 导致杆体从砂浆体之间拔出, 此破坏模式为锚固体破坏。试件破坏后砂浆锚固体情况见图 20, 及各荷载等级下应变随时间变化曲线见图 21。

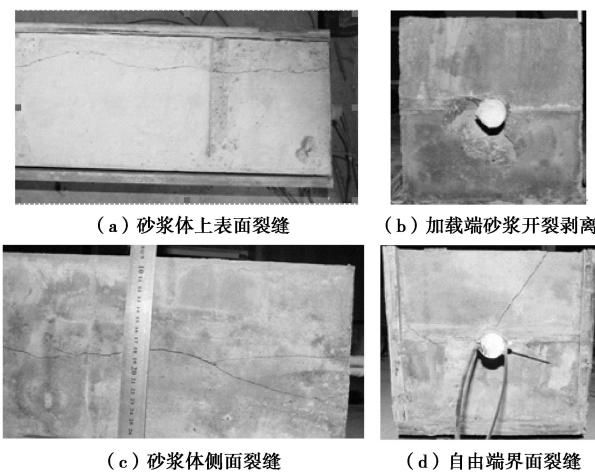


图 20 砂浆锚固试件加载后破坏形态图

Fig. 20 Photo of specimen anchored by mortar after loading

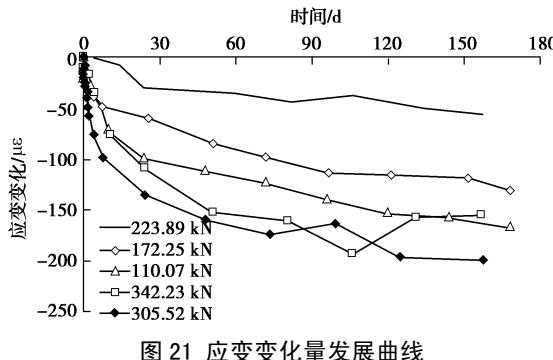


图 21 应变变化量发展曲线

Fig. 21 Development curves of variation of strain with time

由图 21 可以看出, 试件加载后杆体应变变化最大达到 $200 \mu\epsilon$ 时趋于稳定, 大于日本规范指标 $25 \mu\epsilon$ 。引起试验中杆体应力减小的因素主要为材料弹性模量的降低即松弛和试验过程应变的减小。混凝土构件锚固法, 杆体的应力减小为试件受力后的综合表现, 其中包含筋材的因素, 也有混凝土构件自身的影响。将 FRP 筋进行砂浆体锚固来模拟该材料在边坡锚杆加固结构中的实际运行状态, 据此试验能得出的锚固系统的松弛性能, 对 FRP 筋用于工程边坡的永久性锚杆加固结构有实际指导意义。若将该实验结果直接用于评

价大直径 FRP 材料本身的松弛性状, 则偏于安全。

3 结语

采用钢管填充膨胀剂端部封闭锚固法, 加载后端部滑移小, 可用于测试大直径足尺寸喷砂 FRP 筋材料的应力松弛特性。

光纤光栅变形监测方法用于应力松弛试验, 解决了其它方法在应力松弛试验长期观测中存在的应变数据飘移和精度问题, 是一种有效和具有很高适用性的应力松弛试验辅助手段。

预置加载设施的混凝土构件模拟锚固法, 能达到锚固之目的, 可测得大直径足尺寸光面喷砂 FRP 筋锚固构件的应力松弛综合性状。对于大直径 FRP 材料, 由该方法得到的松弛参数则偏于安全。

参考文献:

- [1] 叶列平, 冯 鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24 - 36. (YE Lie-ping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24 - 36. (in Chinese))
- [2] 于 清. FRP 的特点及其在土木工程中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(6): 26 - 30. (YU Qing. Character and application of FRP composites in civil engineering[J]. Journal of Harbin University of C E & Architecture, 2000, 33(6): 26 - 30. (in Chinese))
- [3] 田 水, 朱 瞰. 纤维增强塑料 (FRP) 在结构加固工程中的应用[J]. 建筑结构, 2000, 30(3): 40 - 43. (TIAN Shui, ZHU Dun. Application of FRP in repair and rehabilitation of concrete[J]. Building Structure, 2000, 30(3): 40 - 43. (in Chinese))
- [4] 周长东, 黄承逵. FRP 复合材料在国外土木工程中的应用[J]. 建筑技术, 2002, 33(11): 848 - 849. (ZHOU Chang-dong, HUANG Cheng-kui. FRP compound material used in foreign civil engineering[J]. Architecture Technology, 2002, 33(11): 848 - 849. (in Chinese))
- [5] 曾 攀, 孙 卓. 纤维增强塑料(FRP)在桥梁建设中的应用现状[J]. 广州大学学报, 2006, 5(2): 90 - 93. (ZENG Pan, SUN Zhuo. FRP applications in bridge construction[J]. Journal of Guangzhou University, 2006, 5(2): 90 - 93. (in Chinese))
- [6] KIM Y J, GREEN M F, FALLIS G J. Repair of bridge girder damaged by impact loads with prestressed CFRP sheets[J]. Bridge Eng, 2008, 13(1): 15 - 23.
- [7] 张继文, 朱 虹, 吕志涛. 预应力 FRP 筋锚具的研发[C]//

- 第三届全国 FRP 学术交流会议论文集. 南京, 2004: 259 - 262. (ZHANG Ji-wen, ZHU Hong, LÜ Zhi-tao. Development of anchor devices of pre-stressed FRP tendon[C]// Industrial Construction. Nanjing, 2004: 259 - 262. (in Chinese))
- [8] 詹界东, 杜修力, 邓宗才. 预应力 FRP 筋锚具的研究与发展[J]. 工业建筑, 2006, 36(12): 65 - 68. (ZHAN Jie-dong, DU Xiu-li, DENG Zong-cai. Studies and application on anchorages of pre-stressed FRP tendons[J]. Industrial Construction, 2006, 36(12): 65 - 68. (in Chinese))
- [9] 刘汉东, 于新政, 李国维. GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3719 - 3723. (LIU Han-dong, YU Xin-zheng, LI Guo-wei. Experimental study on tensile mechanical properties of glass fiber reinforced plastic rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3719 - 3723. (in Chinese))
- [10] 黄志怀, 李国维, 王思敬. 不同围岩条件玻璃纤维增强塑料锚杆结构破坏机制现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1008 - 1018. (HUANG Zhi-huai, LI Guo-wei, WANG Si-jing. Field test on pullout behaviors of anchorage structures with glass fiber reinforced plastic rods for different surrounding rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1008 - 1018. (in Chinese))
- [11] 袁国清, 董国华, 马 剑. FRP 筋应力松弛试样端部锚夹方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(5): 3 - 6. (YUAN Guo-qing, DONG Guo-hua, MA Jian. Study of ends anchor method of stress relaxation specimens of FRP tendons[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(5): 3 - 6. (in Chinese))
- [12] JSCE-E 534 Test method for long-term relaxation of continuous fiber reinforcing materials[S]. Japan, 1995
- [13] KATZ A. Bond mechanism of FRP rebars to concrete[J]. Materials and Structures, 1999, 32(10): 761 - 768.
- [14] 李建辉, 邓宗才. FRP 应力松弛及徐变性能的研究近展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2007(3): 56 - 59. (LI Jian-hui, DENG Zong-cai. Progress in study of stress relaxation and creep of FRP composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2007(3): 56 - 59. (in Chinese))
- [15] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 399 - 341. (YOU Chun-an. Mechanical analysis on wholly grouted anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 399 - 341. (in Chinese))
- [16] 李国维, 高 磊, 黄志怀, 等. 全长黏结玻璃纤维增强聚合物锚杆破坏机制拉拔模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1653 - 1663. (LI Guo-wei, GAO Lei, HUANG Zhi-huai, et al. Pull-out model experiment on failure mechanism of full-length bonding glass fiber reinforced polymer rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1653 - 1663. (in Chinese))