

DOI: 10.11779/CJGE201504018

GFRP 锚杆结构预应力锁定装置研制与现场试验

刘 龙¹, 李国维^{2, 3*}, 贺冠军³, 余 亮^{2, 4}, 刘 学²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210098; 4. 浙江恒辉勘测设计有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 纤维增强聚合物(FRP)筋耐腐蚀, 抗拉强度高, 弹性模量小, 用于边坡加固锚杆结构是解决钢筋锚杆结构耐久性问题的途径之一, 预应力FRP锚杆结构是合理型式。FRP筋抗剪强度低, 钢筋锚杆施加预应力采用的刚性夹具不能用于FRP锚杆。基于端部封闭的钢套管充填膨胀剂锚固FRP筋法, 设计了FRP锚杆预应力施加及锚索装置, 并进行了现场试验。试验结果表明: 预应力锁定装置的原理可行, 结构合理, 使用方便, 能较好地完成玄武-玻璃纤维增强聚合物(B-GFRP)锚杆的预应力施加和锁定, 经历外部环境变化检验, 降雨、震动等环境影响产生的预应力损失均缘于杆体界面的黏结蜕化, 没有发生锁定装置失效导致荷载明显损失的现象。B-GFRP锚杆的预应力损失百分率在5%~35%间, 达到了精轧螺纹钢锚杆预应力损失的控制标准。

关键词: GFRP 锚杆; 荷载锁定装置; 预应力损失; 现场试验

中图分类号: TU41; TU59 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)04-0718-09

作者简介: 刘 龙(1988-), 男, 硕士, 主要从事边坡稳定性方面的研究。E-mail: 95620056@qq.com。

Development of load anchorage device for pre-stress GFRP soil nail reinforcement element in slopes and field tests

LIU Long¹, LI Guo-wei^{2, 3}, HE Guan-jun³, YU Liang^{2, 4}, LIU Xue²

(1. Collage of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for

Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Highway and Railway Research Institute,

Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Zhejiang Henghui Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: The fiber reinforced polymer (FRP) bars have the behavior of strong corrosion resistance, high tensile strength and small elastic modulus, and can be used to replace steel bars, which undergo wearing due to rusting in slope reinforcement. The pre-stress FRP bars are reasonable, but the bars have low shear strength and cannot be pre-stressed using the traditional rigid clamp, lest they are crashed to failure. An end anchoring pre-stress locking device is designed for pre-stress application and retention in the FRP bars. Field tests are conducted to verify the stability of the device. The test results show that the device is practically feasible and convenient, and it can apply and retain pre-stress in basalt-glass fiber reinforced polymer (B-GFRP) bars well. Exposure to external factors such as heavy rains and blasting results in the loss of pre-stress. The pre-stress loss is caused by degeneration of the bonding resulting from external factors, but not by the invalidation of the device. The pre-stress retention by the device in the B-GFRP bars is 5%~35%, which conforms to the control criterion for the pre-stress loss of the steel pre-stressed soil nail reinforcement.

Key words: GFRP soil nail; load anchorage device; pre-stress loss; field test

0 引言

传统锚杆一般选用钢筋作为杆体材料。工程中发现锚杆破坏失效最主要的原因是锚杆材料遭受腐蚀而破坏^[1-2]。纤维增强聚合物FRP筋是一种由树脂基质和纤维材料复合而成的新型加固材料。相对于钢筋FRP筋材有以下优点: 耐腐蚀; 抗拉强度高, 等于甚至高于预应力钢筋; 自重轻, 只有钢筋的15%~20%; 性价比高。用FRP锚杆替代钢筋锚杆用于岩土加固工

程, 能有效地解决锚杆结构的耐久性问题^[3-4]。

FRP筋材的弹性模量只是钢筋的1/4, 用作锚杆加固结构时, 为限制加固体的前期变形, 需对锚杆施加预应力。同时, 弹模小的材料属性也使其在加固体发

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41472240); 广东省教育厅科技部产学研项目(2009B09060011); 高校业务费专项项目(2014B04914)

收稿日期: 2014-08-04

*通讯作者

生收缩变形时而损失较少的锚固预应力^[5]。预应力 FRP 锚杆结构是替代钢筋锚杆结构的合理型式。由于 FRP 材料属性与钢筋不同, 预应力 FRP 锚杆结构的应力锁定方法需要深入研究。

目前, 国内外已开展预应力 FRP 筋混凝土梁静力性能的研究^[6-9], 而对于预应力 FRP 锚杆结构的研究, 国内外均刚刚起步, 部分学者从 FRP 筋的种类、表面形式、直径以及混凝土强度等方面研究了 FRP 筋与混凝土之间的黏结性能^[5, 10]。由于 FRP 筋的横向抗压强度及层间剪切强度比其抗拉强度低很多, 采用传统的钢筋锚固方法(如钢楔块锚固系统)锚固 FRP 筋, 会因为局部剪力过大导致 FRP 筋锚固段过早破坏。因此, FRP 筋预应力锁定方法是推广 FRP 筋锚杆预应力结构的关键技术。

本文所述试验研究, 开发了大直径喷砂 FRP 锚杆的预应力锁定装置, 并通过现场试验验证锁定装置对 FRP 筋预应力施加和保持的可靠性。

1 FRP 筋锚固方法

通常预应力钢筋锚杆通过螺纹螺母系统锁定预应力, 锚索的预应力通过楔形夹片系统锁定。其原理均是在杆体局部施加剪力以平衡轴向拉力。由于钢筋材料是均质材料, 破坏的本质是剪切破坏, 理想条件下, 锚固段局部的剪切破坏和整体拉伸破坏的极限状态是同步的, 因此这种小范围施加剪力的锚固方法是有效的。

FRP 筋是复合材料, 各向异性特征显著, 横向抗压、层间界面抗剪与轴向抗拉性能差异巨大。由此, 钢筋与锚具直接接触的锚固方式, 对于 FRP 筋不适用。FRP 筋锚固法的思路是, 建立 FRP 筋与钢套管的牢固连接, 通过钢套管过渡, 锚固钢套管从而锚固 FRP 筋。

试件与钢套管间填充膨胀性材料, 其遇水发生化学反应, 随时间发展产生一种膨胀性结晶体。由于试件与钢套管约束了结晶体的膨胀变形, 试件表面和钢套管内壁会承受极大的压力, 从而产生较大的静摩擦力, 并使试件、钢管及膨胀性材料 3 者之间不会产生相对位移, 从而达到锚固的效果^[5, 11-12], 原理见图 1, 各部件锚固示意图见图 2, 锚固完成后的实物图见图 3。

目前国内尚无关于 FRP 筋预应力性能测试的规范, 参照日本相关规范^[13], 要求在应力松弛试验进行过程中, 筋材的应变变化范围不超过 $\pm 25 \mu\epsilon$ 。为了验证上述端部封闭的套管充填膨胀剂锚固方法锚具的

滑移量是否满足要求, 文献[14]设计了不同荷载等级作用下钢套管与杆体相对滑移量试验, 结果表明端部封闭的钢套管充填膨胀剂锚固法端部滑移量满足规范要求。

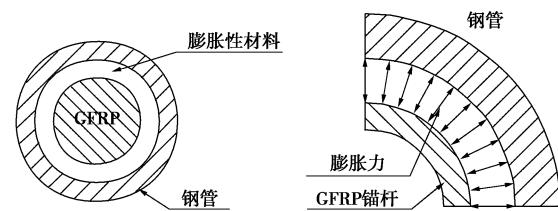


图 1 试件端部锚固受力分析

Fig. 1 Force analysis of end anchoring specimen

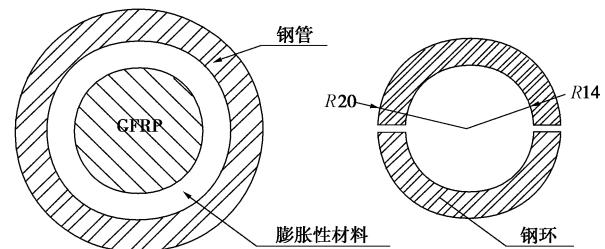


图 2 端部锚固示意图

Fig. 2 Schematic diagram of end anchoring method



图 3 试件端部锚固完成后实物图

Fig. 3 End anchoring specimen

2 FRP 锚杆的预应力锁定装置设计

本预应力锁定装置基于端部封闭的钢套管充填膨胀剂锚固方法锚固 FRP 筋, 钢套管叠加在用钢绞线锁定的中心穿孔锚盘上, 将 FRP 锚杆段过渡为钢绞线, 根据现行锚索预应力锁定技术, 完成 FRP 锚杆的预应力施加及锁定。

具体连接方法: 锁定装置各组成部分相对位置见图 4。首先将连接好钢套管的 FRP 锚杆杆体穿过中心带孔的锚盘, 锚盘与钢套管紧贴; 用楔形夹片将钢绞线固定在锚盘上; 钢绞线穿过混凝土承台中心预留的圆孔、承压板、测力计、工作锚、限位板、空心千斤

顶, 最后用工具锚进行锁定。当预应力施加完成, 可撤去工具锚、空心千斤顶及限位板, 由工作锚完成预应力的锁定。

其中测力计叠置在混凝土承台上面的承压板上, 工作锚叠置在测力计上永久受力, 一般是铸铁件, 减振性好, 耐腐蚀性较好; 在施加预应力时, 空心千斤顶叠置在工作锚和限位板以上, 工具锚叠置在空心千斤顶上方, 工具锚参与张拉过程且反复使用, 一般是锰钢件, 强度较高, 韧性较好。限位板具有在张拉过程中限制锚具夹片位移的作用。

工作原理: 张拉过程中, 空心千斤顶伸长时, 锚盘和工具锚的楔形夹片夹紧, 工作锚的楔形夹片不参与工作, 从而对 FRP 锚杆施加预应力; 空心千斤顶回缩时, 锚盘和工作锚的楔形夹片夹紧, 工具锚的楔形夹片不参与工作, 完成预应力 FRP 锚杆的锁定。

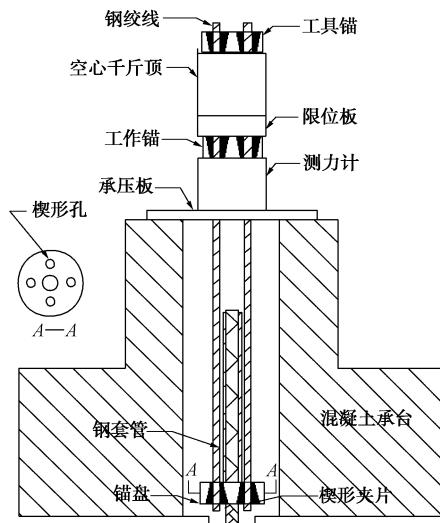


图 4 预应力锁定装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pre-stress locking device

3 预应力 FRP 锚杆现场试验

锚杆杆体预应力值的长期稳定性是锚固工程永久性与安全性的前提, 若预应力值小于设计值一定水平, 将导致其锚固功能的失效。本试验通过测试 FRP 锚杆杆体的预应力损失情况, 发现 FRP 锚杆结构预应力损失规律, 评价 FRP 锚杆预应力锚锁定装置的可行性。

3.1 试验场地条件

试验在肇花高速公路 K7+180—340 左侧高边坡一级平台进行。根据《肇花高速 K7+138—370 路堑工程地质勘查报告》, 试验场地表层 1~2 m 为全风化花岗岩, 其下部为中风化花岗岩(见图 5), 各岩层的物理力学参数如表 1。

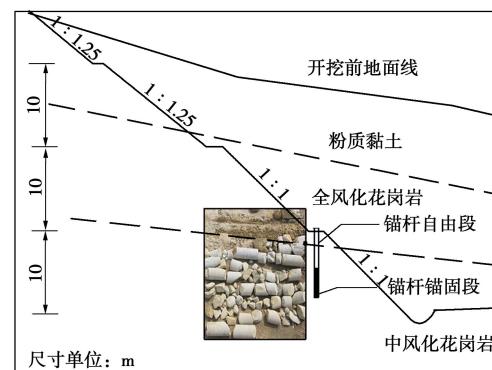


图 5 试验场地地质钻孔示意图

Fig. 5 Schematic diagram of field geology

表 1 试验现场岩石常规力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of rock from test field

地层 名称	含水 率 /%	孔隙 比	饱和 度 /%	液限 塑性 模量 /%	压缩 力 /MPa	黏聚 力 /kPa	内摩 擦角 /(°)	标贯 击数
粉质黏土	15.30	0.81	50.81	31.1	14	2.86	32.9	22.9
全风化 花岗岩	16.97	0.59	86.08	32.3	15	3.64	33.6	26.0

注: 各项参数为各岩层所取样本试验结果平均值。

3.2 试验过程

(1) 锚杆试样

本次试验试件为有自由段的 FRP 筋锚杆, 为广东省中山市浦美复合材料有限公司生产的直径为 28 mm 的拉挤成型的玄武-玻璃纤维增强聚合物筋(B-GFRP), 实物照片见图 6, 其常规力学参数及材料组分列入表 2。试件具体试验参数见表 3。

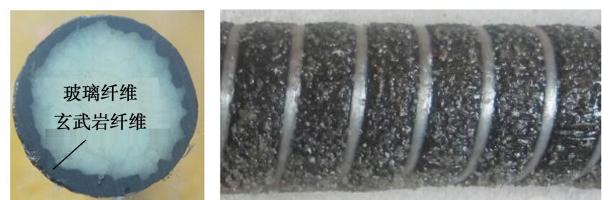


图 6 B-GFRP 筋横截面及外表面形态照片

Fig. 6 B-GFRP bar section and its surface morphology

表 2 B-GFRP 筋常规力学性能参数及材料组分表

Table 2 Mechanical properties and material composition of GFRP bars

力学指标				材料组分		
极限 荷载 /kN	抗拉 强度 /MPa	弹性 模量 /GPa	树脂 /%	玻璃 纤维 /%	玄武岩 纤维 /%	石英 细砂 /%
458.7	852.79	49.96	19	65	10	6

表 3 试件参数表

Table 3 Parameters of specimens

参数	试件编号		
	#1	#2	#3
锚杆长度/cm	800	800	800
锚杆直径/mm	27.57	27.57	27.57
钢套管段长度/cm	40	40	40
钢套管壁厚/mm	6.25	6.25	6.25
孔内锚固段长度/cm	350	350	350
自由段长度/cm	410	410	410
钻孔深度/cm	800	800	800

试件杆端采用测力计监测轴向荷载, 杆体采用内置光纤光栅传感器监测杆体应变。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = c_e \Delta\varepsilon + c_T \Delta T \quad . \quad (1)$$

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 $6.67 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。本次试验中, FBG 传感器处于地下, 没有考虑温度变化对测量数据的影响^[10]。试验中杆体的应变计算可简化成

$$\Delta\varepsilon = \Delta\lambda c_e \quad . \quad (2)$$

(2) 锚杆试件安装

B-GFRP 锚杆端部使用端部封闭的钢套管内膨胀锚固法进行锚固, B-GFRP 锚杆穿过锚盘, 钢套管叠放在锚盘上, 锚盘细部结构见图 7。使用对中器控制锚杆在孔内位置, 对中器结构见图 8。

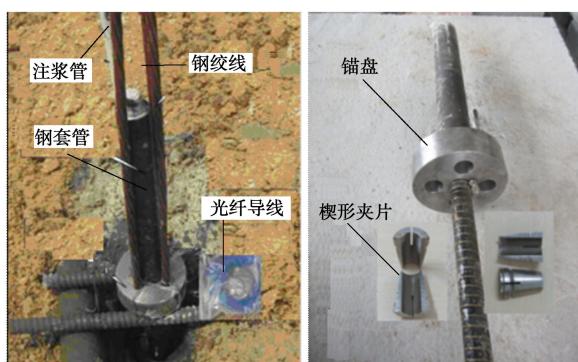


图 7 锚盘及夹片结构

Fig. 7 Anchor holder and clip

(3) 锚杆杆体光纤光栅传感器布设

本试验采用在 B-GFRP 锚杆全长内置光纤光栅的方法监测锚杆杆体应变, 选用深圳市畅格光电有限公司生产的光纤光栅, 采用 MOI 的 SM125 光栅解调仪采集数据。各试件均在 B-GFRP 杆体全长对称布设 2 根光纤光栅, 试件#1 每根光纤光栅有 4 个 FBG 传感器, 总计 8 个 FBG 传感器, 见图 9。

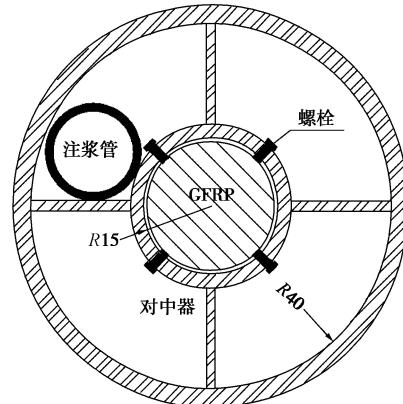


图 8 对中器结构

Fig. 8 Centering device

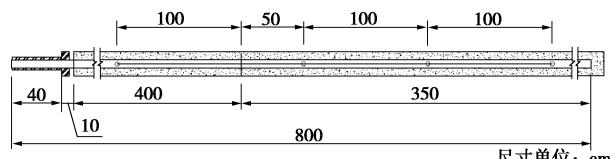


图 9 试件 FBG 传感器布设图

Fig. 9 Distribution of FBG sensors in GFRP

光纤光栅安装过程: 用切割机在 B-GFRP 杆体上开槽, 宽约 2 mm, 清洗并晾干; 将光纤光栅整体放入凹槽中, 并校准各光栅传感器在杆体中的位置, 微量预拉光纤光栅, 在光栅传感器具有微小拉应变时用 502 胶水黏结光栅传感器两端外部约 2 cm, 使其固定至凹槽内, 如图 10; 用 AB 型环氧胶水填充整个凹槽, 使整根光纤光栅固定在凹槽内。环氧胶水需 24 h 才能完全固化, 为了防止传感器意外断裂或者脱落, 固化期间不能移动试件, 如图 11。安装光栅传感器的锚杆没有进行张拉标定, 数据处理时认为光栅传感器的线性不变, 采用现场原位状态锚杆上光栅传感器张拉前的数值作为计算初值, 以此剔除由于安装、灌浆、凝结过程等产生的影响。



图 10 内置光纤光栅

Fig. 10 FBG sensor



图 11 填充环氧胶水

Fig. 11 Epoxy glue

(4) 锚杆自由段设置方法

采用直径为 30 mm 的塑料波纹管, 将试件^{#1, #2, #3} 试件的自由段杆体包裹, 并在两端用防水胶布密封, 防止砂浆体进入波纹管内部, 见图 12。

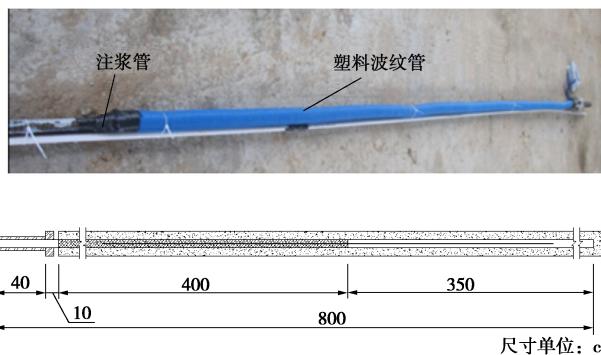


图 12 波纹管安装示意图

Fig. 12 Schematic diagram of corrugated pipe

(5) 锚杆安装

整平场地后, 钻孔方向垂直地面, 直径为 110 mm, 深度超过锚杆有效长度 0.5 m。钻孔过程全程取芯, 结束后使用清水彻底清洗钻孔孔壁, 避免因为孔壁残存的泥浆而影响到围岩与砂浆的黏结强度。

将锚杆绑扎对中器后送入孔内, 随后进行灌浆。灌浆材料采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 水泥: 砂: 水=1:5.27:1.16, 灌浆时采用孔底返浆的方式, 注浆压力为 1 MPa。初次灌浆后, 在水泥砂浆初凝前需进行补浆, 以确保灌浆效果。试验室测得 28 d 龄期的砂浆抗压强度为 11.1 MPa。

灌浆结束后, 在孔口浇注一混凝土承台, 承台中心用 PVC 套管预留工作孔, 同时隔离混凝土承台和锚杆。

3.3 预应力 FRP 锚杆的张拉试验

孔内水泥浆与孔口混凝土承台浇注完毕 30 d 后, 开始进行试件^{#1, #2, #3} 的张拉。试验前先对承载面

进行整平处理, 使其与锚杆杆体垂直。确保试验过程中荷载的作用方向都与锚杆杆体平行, 即为轴向张拉。

加载装置包括钢垫板、测力计、工作锚、限位板、油压空心千斤顶、工具锚和楔形夹片 7 部分, 如图 13 所示。



图 13 GFRP 锚杆现场试验照片

Fig. 13 Field test setup for GFRP anchor

试验加载仪器采用 ZY-50 型液压空心千斤顶, 由北京中煤矿山工程有限公司生产, 荷载测量装置为 BGK-4900 振弦式压力传感器以及 BGK-408 振弦读数仪, 由北京基康生产。

(1) 加载方式

试件预应力荷载分级施加, 取 180 kN (边坡锚杆设计荷载 90 kN 的 2 倍) 作为锚杆预应力的设计荷载, 同时采用超张拉方式来补偿张拉时锚具夹片回缩引起的预应力损失, 本次试验超张拉荷载取 1.1 倍的设计荷载值。

根据《岩土锚杆(索)技术规程》CECS22—2005^[15], 本次试验分级荷载分别为 36, 90, 135, 180, 198 kN。锚杆加载前, 取 18 kN 对锚杆预张拉 1~2 次, 使锚杆完全平直, 各部位接触紧密。

每一级荷载下稳定 10 min 后测读荷载值、光纤光栅波长值, 并记录试验现象。

(2) 预应力锁定

杆体荷载达到超张拉荷载 (198 kN), 待荷载值、光纤光栅波长值稳定后, 约 10 min, 撤去限位板、油压空心千斤顶和工具锚, 由工作锚进行锁定, 如图 14 所示, 锁定过程中杆体预应力会有一定程度的损失。锚杆锁定完成后, 通过测力计及光纤光栅传感器对杆体进行长期观测, 记录 B-GFRP 锚杆杆体的预应力损失情况。

4 试验结果及分析

4.1 锁定后杆体轴向荷载时间特征

钢绞线锚索预应力损失的影响因素主要包括^[16]:

钢绞线松弛、锚头夹具回缩、张拉系统摩阻力、岩体性质、混凝土徐变收缩、震动冲击影响、降水及温度变化。对于预应力 B-GFRP 筋, 在材料性质、锚固方法与预应力钢绞线工况显著不同, 除上述影响因素外, 还须考虑钢套管的滑移影响。本试验采用的锁定装置钢套管滑移导致的应变变化范围不超过 $\pm 25 \mu\epsilon$, 本试验最大轴向荷载 198 kN 导致杆体与套筒之间相对滑移产生的预应力损失不到 1 kN。



图 14 B-GFRP 锚杆预应力锁定

Fig. 14 B-GFRP bar pre-stress locking device

数据分析时, 根据材料的弹性模量, 将杆体锚固段和自由段的各光栅传感器应变值换算为轴向荷载。取内锚固段和自由段界面为坐标零点, 锚固段向内为 x 轴正向。图 15 为^{#1} 试件完成预应力锁定后的轴向荷载与持续时间的关系。

图 15 (a) 显示, 杆体自由段位置光栅传感器测定的杆体轴向荷载比杆体端部测力计值偏小, 但两点的轴向荷载随时间变化过程一致; 图 15 (b) 显示, 锚固深度 50 cm 处光栅传感器测定的杆体轴向荷载值小于自由段轴向荷载值, 且该点的轴向荷载随时间的变化趋势同自由段明显不同。

杆体端部测力计值为所施加荷载的实际值。自由段光栅传感器位置距离加载点约 4.0 m, 仪器安装过程中, 钢绞线穿过测力计和承压板上的圆孔时与孔壁接触, 且呈一定角度, 张拉过程中会产生摩擦力, 另, 试验场地表层的全风化花岗岩, 在锚杆张拉时承受锚墩压力, 锚杆孔壁可能脱落, 可导致喷砂 GFRP 锚杆杆体与外敷塑料波纹管之间的摩擦加剧, 也会引起杆体预应力的沿程损失。因此, 杆端测力计测定的轴向荷载大于自由段光栅传感器测定的轴向荷载。同理, 上述两点的杆体轴向荷载也一定大于锚固段 50 cm 处光栅测定的轴向荷载。

杆端和杆体自由段轴向荷载随时间延续显示逐渐衰减直至锁定后 61 d 达到稳定, 而锚固段 50 cm 处杆体轴向荷载却随时间呈现增加趋势至锁定后 61 d 同期

达到稳定。自由段轴向荷载衰减 32%, 锚固段 50 cm 处轴向荷载增加 19%。锚固段杆体轴向荷载的增长与自由段轴向荷载衰减同步发生, 两者应具有密切的关联性。

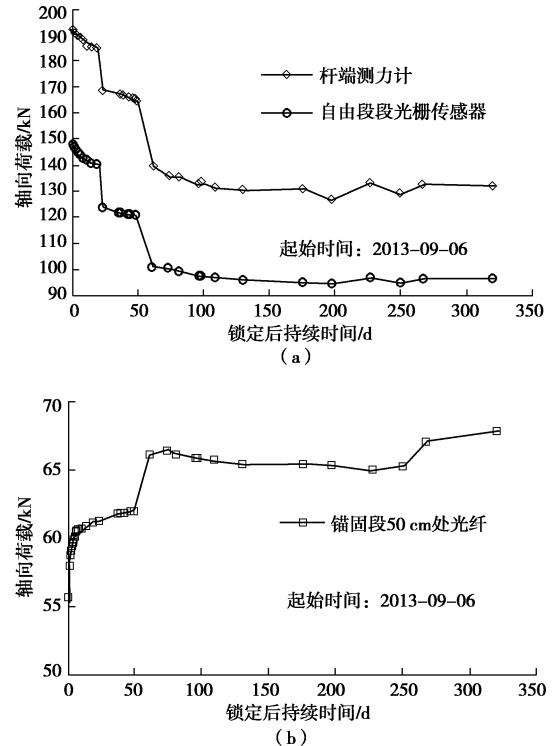


图 15 ^{#1} 试件杆体轴向荷载变化曲线

Fig. 15 Axial load histories of specimen No. 1

4.2 锁定后杆体轴向荷载空间特征

图 16 为锁定后不同时间杆体的轴向荷载分布情况, 实线为实测值, 虚线部分为根据文献[5]的室内试验结果推测值。图 16 显示, 锚固段轴向荷载随位置深度增加而衰减, 随时间增加轴向荷载分布范围扩大, 同一深度轴向荷载随时间增加而增大。

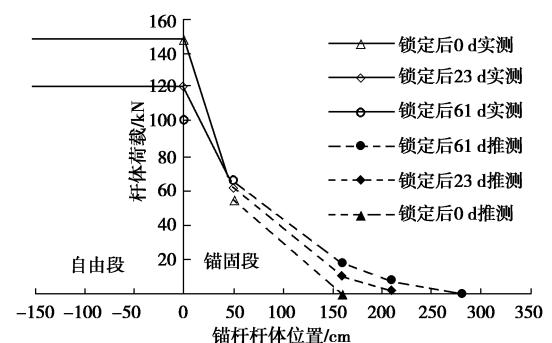


图 16 锚杆轴向荷载示意图

Fig. 16 Schematic diagram of axial load

张拉荷载引起的杆体应变可定义为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad . \quad (3)$$

式中 ε 为杆体应变; ΔL 为张拉荷载引起的杆体伸长

量；为杆体上的应变分布长度。

荷载锁定后，由于杆体应变向深部逐渐扩展，由此导致应变分布长度增加，锚固段深部位置应变从无到有，从小到大，从而引起自由段应变逐渐减小，导致自由段轴向荷载减小。

图 16 显示，锚固段 50 cm 处的实测轴向荷载值随时间延续而增长，证实了上述分析合理性。另据文献[5]的试验发现的杆体应变向深部扩展的现象，说明图 16 中推测的杆体荷载分曲线也是合理的。因此，图 16 所示杆体轴向荷载分布特征客观地揭示了杆体轴向荷载在空间上的变化规律。由此看出，杆体上的应变扩展是导致杆体自由段轴向荷载衰减的因素之一，可根据各自时间过程的对应性判断应变扩展是否轴向荷载衰减的诱因。

4.3 锁定荷载损失成因

降雨影响。图 17 为试件 1 预应力锁定后轴向荷载增量与持续时间的对应关系。

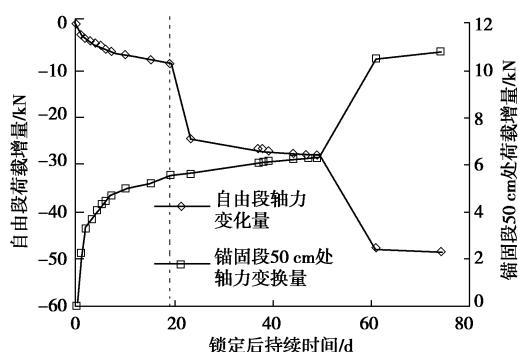


图 17 试件杆体轴向荷载增量变化曲线

Fig. 17 Variation curves of axial load increment

图 17 显示，荷载锁定后 0~19 d，锚固段 50 cm 处应变缓慢增加，对应时段自由段轴向荷载缓慢减小，两者的变化过程同步。另据文献[12]的试验结果，杆体材料自身连同锚固钢套管系统的应力松弛过程在 1 d 内完成。由此可认定，自由段轴向荷载的衰减主要是由于杆体应变的缓慢扩展导致。

图 17 显示，荷载锁定后 19~49 d，锚固段 50 cm 处应变连续缓慢增加，而自由段轴向荷载在 19~23 d 处出现第一次突变衰减，23~49 d 显示为缓慢衰减，显然两者的时间过程不对应。2013 年 9 月 22 日强台风“天兔”登陆广东，9 月 23 日试验现场最大日降雨量 69.5 mm。如图 5 所示，锚杆自由段位于全风化岩体内，锚固段位于中分化花岗岩体中，降雨仅对表层岩土体产生了影响，或引起锚墩沉降变形，导致杆端、自由段轴向荷载同时同量减小。锚固段围岩完整性较好，锚杆和围岩胶结牢固，50 cm 处的应力状态未受

到明显影响，杆体应变向深部扩展的趋势没有改变。降雨对杆体 L 轴向荷载的影响程度数据见表 4。

表 4 试件轴向荷载突变情况

Table 4 Variation of axial load of specimens

荷载情况	第 19 天	第 23 天	变化量/kN
外锚固端轴向荷载/kN	184.98	168.98	-16.00
自由段轴向荷载/kN	140.13	124.14	-15.99
锚固段轴向荷载/kN	61.21	61.26	0.05

爆破震动影响。杆体轴向荷载第二次突变发生在张拉后 49~61 d。试验锚杆所在位置，由于围岩完整性较好而需借助爆破才能开挖。2013 年 11 月 4 日，肇花高速公路 K7+180—340 左侧一级边坡开挖时进行了施工爆破，作业面上的爆破孔深 12 m，多孔同时起爆，爆破点距试验锚杆位置 3~100 m。爆破后发现 #1 试验锚杆轴向荷载发生了突变，如图 18，变化情况见表 5。

表 5 试件轴向荷载突变情况

Table 5 Variation of axial load of specimens

荷载情况	第 49 天	第 61 天	变化量/kN
外锚固端轴向荷载/kN	165.01	139.82	-25.19
自由段轴向荷载/kN	120.76	100.94	-20.22
锚固段轴向荷载/kN	61.93	66.12	4.19

爆破震动影响了锚杆全长周围的岩土体，胶结体受到了震动影响，杆体界面黏结强度发生了蜕化^[10]，杆体应变加速向深部扩展，锚固深度 50 cm 处的应变进一步增大，导致锚杆自由段轴向荷载再次减小。由于震动影响范围包含上层全风化岩体和下部中风化岩体，锚墩沉降变形和杆体黏结蜕化同时发生，产生了较上次更大的轴向荷载损失。

综上，锚杆锁定轴向荷载的损失，与环境因素导致的锚固体整体变形和杆体界面黏结强度蜕化相对应，尚未发生由锁定装置本身导致的轴向荷载明显损失。

4.4 锁定装置的有效性

试验锚杆 #2 试件在 2013 年 12 月 9 日锁定，#3 试件在 2013 年 12 月 10 日锁定，杆体轴向荷载随时间变化曲线如图 18。

2013 年 12 月 14 日试验现场所在区域最大降雨量 116.5 mm，受降雨影响，试验锚杆 #2、#3 试件轴向荷载发生了显著减小。试验锚杆 #2、#3 试件和 #1 试件同在一级平台上，环境条件相同，产生的轴向荷载损失现象类似。由图 18 可见，#2 试件锁定 7 d 之后轴向荷载趋于稳定，#3 锚杆试件锁定 6 d 之后轴向荷载趋于稳定。

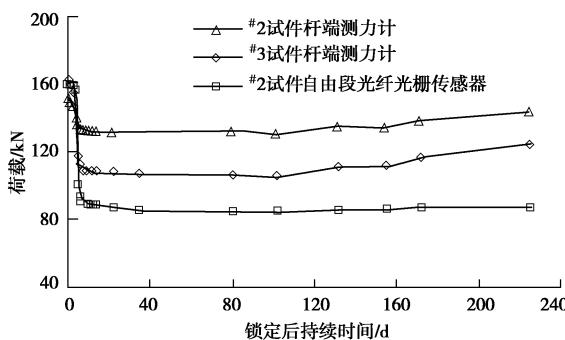


图 18 #2 和#3 试件杆体轴向荷载变化曲线

Fig. 18 Axial load histories of specimens No. 2 and 3

表 6 为 3 个试验锚杆的锁定轴向荷载损失情况。

数据显示, #1 试件监测时间 320 d, 轴向荷载损失率最大值 33.9%, 轴向荷载稳定时间为 61 d; #2 试件监测时间 225 d, 轴向荷载损失率最大值 12.9%; #3 试件监测时间 225 d, 轴向荷载损失率 34.6%。

表 6 试件轴向荷载损失百分率情况

Table 6 Loss of axial load specimens (%)

试件编号	5 d	10 d	40 d	80 d	155 d	200 d	225 d	320 d
#1	1.5	2.6	13.9	29.4	—	33.9	—	31.1
#2	10.3	12.8	—	12.9	11.6	—	5.3	—
#3	27.9	33.5	—	34.6	31.4	—	23.6	—

研究表明^[17], 一般预应力钢筋锚杆框架梁中的锚杆预应力损失约为 25%~40%。本锁定装置用于 B-GFRP 筋锚杆所产生的荷载损失没有超出钢筋预应力锚杆的荷载损失范围。另由于 FRP 筋弹性模量约为钢筋的 1/4, 发生同样的应变扩展, 相对于钢筋锚杆, 采用 FRP 锚杆将产生较小的荷载损失。

综上所述, 本锁定装置用于 B-GFRP 筋锚杆预应力施加和锁定, 荷载损失的主要原因是杆体荷载向深部扩展, 表现为荷载重新分布, 杆端和自由段荷载有所减小, 杆体深部承担荷载增加。而实际上作用在杆体上的荷载总量的损失率要大大小于锁定荷载的损失率, 仅用表 6 数据评价本锁定装置的效果是不全面的, 显然也是保守的。由此, 若依据预应力钢筋锚杆的控制标准, 本锁定装置用于 B-GFRP 筋锚杆预应力施加和锁定是有效的。

5 结 论

(1) 基于端部封闭的钢套管内膨胀锚固方法锚固 FRP 筋, 钢套管叠加在钢绞线锁定的中心穿孔锚盘上, 将 FRP 锚杆段过渡为钢绞线, 借助现行锚索预应力锁定技术, 完成 FRP 锚杆的预应力施加及锁定, 操作方法具有可行性。

(2) 降雨、震动等环境影响产生的预应力损失均

缘于杆体界面的黏结蜕化, 没有发生锁定装置失效导致荷载明显损失的现象。为保证锚杆结构加固表层岩土体的作用效果, 还应采取其它措施限制杆体荷载向深部扩展。

(3) 本锁定装置用于 B-GFRP 锚杆预应力施加和锁定, 产生的荷载损失满足普通钢筋锚杆预应力损失的控制要求, 用于实际工程具有可行性。

致 谢: 现场试验受到广东肇阳高速公路有限公司的大力支持, 同时河海大学土木与交通学院岩土力学与堤坝工程试验室的技术人员提供了无私的帮助, 在此一并致谢!

参 考 文 献:

- [1] 仲伟秋, 王海超, 何世钦. 受腐蚀钢筋混凝土结构性能的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(10): 51~53. (ZHONG Wei-qiu, WANG Hai-chao, HE Shi-qin. Study on performance of corroding steel reinforced concrete structures[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(10): 51~53. (in Chinese))
- [2] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7~13. (CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7~13. (in Chinese))
- [3] 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]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 39(3): 24~36. (in Chinese))
- [4] 袁勇, 贾新, 闫富友. 岩石 GFRP 锚杆的可行性研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(9): 13~15. (YUAN Yong, JIA Xin, YAN Fu-you. Feasibility study on GFRP rock bolts[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9): 13~15. (in Chinese))
- [5] LI Guo-wei, NI Chun, PEI Hua-fu, et al. Stress relaxation of grouted entirely large diameter B-GFRP soil nail[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(4): 495~508.
- [6] FAM A Z, RIZKALLA S H, TADROS G. Behavior of CFRP for prestressing and shear reinforcements of concrete highway bridges[J]. ACI Structural Journal, 1997: 77~86.
- [7] KERSTENS J J G M, BENNENK W. Prestressing with carbon composite rods: a numerical method for developing reusable prestressing systems[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(1): 43~50.
- [8] PARK S Y, NAAMAN A E. Shear behavior of concrete beams

- prestressed with FRP tendons[J]. PCI Journal, 1999: 74 - 85.
- [9] ZHANG B R, BENMOKRANE B, CHENNOUF A. Prediction of tensile capacity of bond anchorages for FRP tendons[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000, 4(2): 39 - 47.
- [10] 李国维, 戴 剑, 倪 春, 等. 大直径喷砂内置光纤光栅 GFRP 锚杆梁杆黏结试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1450 - 1457. (LI Guo-wei, DAI Jian, NI Chun, et al. The bond behavior between concrete frame beam and sand-coated GFRP soil nail with fiber bragg grating sensor installed within[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1450 - 1457. (in Chinese))
- [11] 黄志怀, 李国维. 玻璃纤维增强塑料锚杆设计研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(4): 36 - 40. (HUANG Zhi-huai, LI Guo-wei. Study of glass fiber reinforced plastic anchor design[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(4): 36 - 40. (in Chinese))
- [12] LI Guo-wei, PEI Hua-fu, HONG Cheng-yu. Study on the stress relaxation behavior of large diameter B-GFRP bars using FBG sensing technology[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013: 1 - 12.
- [13] JSCE-E 534. Test method for long-term relaxation of continuous fiber reinforcing materials[S]. 1995.
- [14] 李国维, 倪 春, 葛万明, 等. 大直径喷砂 FRP 筋应力松弛试验锚固方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 227 - 234. (LI Guo-wei, NI Chun, GE Wan-ming, et al. Anchoring method for stress relaxation specimens with large-diameters and-surface FRP bars[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 227 - 234. (in Chinese))
- [15] CECS22—2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 2005. (CECS22—2005 Technical specification for ground anchors[S]. 2005. (in Chinese))
- [16] 汪剑辉, 张胜民, 赵 强. 边坡加固中锚索预应力损失影响因素及对策探讨[J]. 施工技术, 2007, 36(8): 25 - 27. (WANG Jian-hui, ZHANG Sheng-min, ZHAO Qiang. Discussion on influencing factors and countermeasures of cable anchor's pre-stress in reinforcing slopes engineering[J]. Construction Technology, 2007, 36(8): 25 - 27. (in Chinese))
- [17] 周 勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆柔性支护结构的锚杆预应力损失研究[J]. 工程勘察, 2010(9): 1 - 6. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Research on the anchor pre-stress loss of grillage flexible supporting structure with pre-stressed anchors[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(9): 1 - 6. (in Chinese))

新书预告

《地基处理监测技术》一书将于今年 5 月问世, 它由南京水利科学研究院娄炎与何宁两位教授共同完成, 由中国建筑工业出版社出版, 全书 50 多万字。该书第一次全面阐述了软基处理中的现场监测技术, 是作者三十多年从事软土特性研究和软土地基加固的成果和实践经验的总结, 全书共 8 章。第 1 章为总论, 内容包括: 从总体上阐述地基处理中监测的目的、意义、对象和内容; 首次提出了监测应遵循的真实性、及时性、整体性和统一性原则; 介绍了监测手段、监测系统、仪器布置、仪器安装以及预警值设定和资料整理分析的原则, 特别提出了搞好监测要具备的基本知识和技能。后面 7 章分别详细阐述地表沉降、分层沉降、水平位移、孔隙水压力、土压力、地下水位和真重度的监测, 内容包括监测的具体目的、监测仪器、埋设技术、监测要求、资料整理与成果应用, 以及工程应用实例。本书不仅仅介绍具体的监测技术以及如何实施这些监测技术, 同时也花了大量篇幅阐明这些监测技术依据的原理、在地基处

理工程中的运用以及它们能解决的与工程有关的土力学问题。这当中有很多是作者与南科院同行的经验、体会和总结, 不少内容都是一般书中难以见到的。作者在写具体内容时, 做到叙述要求与阐明原理相结合; 在讲清做法的同时, 也把为什么说明白; 在介绍应用案例的同时也给出作者的看法。书中第 7、8 章是讲地下水位和真重度的监测, 其中负压下的地下水位和真重度监测工作历史较短, 还不太成熟, 行业内对一些问题还有不同看法, 作者花费不少篇幅阐明了测试方法的原理、存在问题及解决思路, 不少意见也是首次提出。相信本书的出版对推动现场监测技术的研究和在工程中的正确应用将有很大帮助。

本书内容丰富, 叙述详尽具体, 技术实用, 理论与实践结合紧密。可供建筑、水利、电力、交通、铁路、环境等部门的岩土工程技术人员使用; 对规范制定、教学、科研、设计、施工、管理的岩土工程人员有着很好的参考作用。

(本刊编辑部)