

DOI: 10.11779/CJGE201611008

# 钢筋及 GFRP 筋锚杆与框架梁连接方式研究

李国维<sup>1,2</sup>, 刘学<sup>3</sup>, 贺冠军<sup>2</sup>, SIDI<sup>3</sup>, 吴建涛<sup>\*2</sup>, 郑诚<sup>3</sup>

(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. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 锚杆与框架梁的连接方式影响加固效果和工艺流程。GFRP 筋锚杆以其耐腐蚀、高强度特性成为钢筋锚杆腐蚀问题解决途径之一, GFRP 筋锚杆与框架梁的有效连接方式是需要研究的问题。通过钢筋折杆、钢筋直杆及 GFRP 筋直杆的框架梁锚固模型试验, 研究钢筋和 GFRP 筋锚杆框架梁锚固效果的差异。研究结果表明, 为施加预应力而研制的锁定装置能够实现 FRP 筋的预应力张拉和锁定, 工作状态稳定, 拆装方便操作简单; 钢筋折杆的框架梁锚固效果明显优于钢筋直杆锚固形式, 相同厚度梁体下, 折杆框架梁锚固结构能承担更高的荷载; 钢筋直杆与 GFRP 筋直杆的框架梁锚固效果相近; 以 GFRP 筋直杆等体积取代钢筋锚杆时, 按照钢筋弯折锚固形式设计的框架梁厚度不能直接用于 GFRP 筋锚杆锚固, 须根据直杆锚固试验确定框架梁厚度。

**关键词:** 连接方式; 锁定装置; 锚固效果; 框架梁

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)11-1990-09

作者简介: 李国维(1964-), 男, 博士, 研究员, 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。

## Connection of frame beams with anchor rods with GFRP and steel bars

LI Guo-wei<sup>1,2</sup>, LIU Xue<sup>3</sup>, HE Guan-jun<sup>2</sup>, SIDI<sup>3</sup>, WU Jian-tao<sup>2</sup>, ZHENG Cheng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai

University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The connection of anchor rods with frame beams can significantly influence the anchoring effectiveness and technological process. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bar is a good substitute to steel bar owing to its significant corrosion resistance and high strength characteristics. The connecting quality between GFRP bars and frame beams is a problem that needs to be studied. Through model tests on anchorage of frame beams, the anchoring effect of GFRP bars, straight steel bars and bending steel bars is analyzed. The test results show that the device developed for the application of prestressing is stable, and easy to assemble and disassemble. The anchoring effectiveness of steel bars with bending end is better than that with straight bars. The anchoring quality of GFRP bars and steel bars is similar. In addition, anchor structure of GFRP bars cannot follow the existing standards designed for the bending steel bars, and its anchoring thickness needs to be decided by model tests on anchorage of frame beams for straight bars.

**Key words:** connection; locking device; anchoring effectiveness; frame beam

## 0 引言

锚杆框架梁结构广泛应用于边坡加固工程, 但钢筋锚杆的腐蚀是导致其破坏的最主要原因是<sup>[1-2]</sup>。玻璃纤维增强聚合物(GFRP)筋以其良好的耐腐蚀性及力学性能已广泛应用于公路、桥梁、混凝土加固工程中<sup>[3-4]</sup>, 用其代替钢筋锚杆用于岩土工程, 可从根本上解决因钢筋锈蚀所导致的加固结构失效问题<sup>[5-6]</sup>。

然而, 若用 GFRP 筋代替传统钢筋锚杆用于框架梁结构, 需对钢筋及 GFRP 筋锚杆与框架梁的连接机

理进行深入研究。在钢筋锚杆框架梁中, 通常将钢筋锚杆的锚头部分弯折(弯折部分置于框架梁内受力筋外缘), 进而浇筑框架梁进行锚固, 该种锚固方式不需设计专门锚具, 因此技术简便, 造价经济。GFRP 筋由于横向抗剪强度不足, 无法弯折, 并且与钢筋的材

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472240); 广东省教育厅科技部产学研项目(2009B090600111); 中央高校基本科研业务费项目(2015B25514)

收稿日期: 2015-10-11

\*通讯作者(E-mail: 33528418@qq.com)

料性质、外表面形式等方面均存在差异, 因此, 在不弯折情况下框架梁对 GFRP 筋锚杆的锚固性能是决定 GFRP 筋锚杆框架梁技术能否被推广的关键。

本文开发了一种新型的张拉锁定装置用于试验研究, 在此基础上, 在室内模拟框架梁节点形式制作相应的混凝土试件, 通过抗拔试验, 对比分析直径均为 28 mm 的 GFRP 筋与直杆及折杆钢筋锚杆的受力变形及杆体界面黏结情况, 另外, 通过对锚杆剪应力分布情况的量化分析, 研究直杆锚固形式、折杆锚固形式及杆体材料差异对锚固效果的影响, 为施工设计提供设计依据。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 FRP 筋张拉锁定装置设计

目前, 针对 FRP 筋力学测试的锚固方法主要有夹片式、套筒灌胶式、混合式。夹片式锚固法主要利用刚性夹片内表面与锚杆外表面间的摩擦力及机械咬合力锚固 FRP 筋端部, 从而提供抗拔力<sup>[7]</sup>, 由于 FRP 筋层间抗剪强度较小, 因此该种锚固法易导致 FRP 筋表面因抗剪强度不足而破坏。套筒灌胶式锚固法主要利用钢套管内壁与锚杆外表面之间膨胀剂提供的膨胀力锚固 FRP 筋端部<sup>[8]</sup>, 该种锚固法的锚具与锚杆之间会产生一定的相对滑移, 且钢套管端部膨胀剂极易风化脱落, 影响锚固效果。本课题组在套筒灌胶式锚固法的基础上开发了钢管填充膨胀剂端部封闭锚固装置<sup>[9]</sup>, 该装置的优点是由于钢套管端部密封, 可有效阻止膨胀剂风化, 且在受力过程中, 密封环被压入钢套管内壁与锚杆外表面间的缝隙, 膨胀剂越密实, 套管与锚杆之间相对滑移越小, 达到日本相关规范的试验要求<sup>[10]</sup>, 缺点是无法锁定预应力, 因此无法用于实际工程及长期荷载试验。

针对钢管填充膨胀剂端部封闭锚固法的以上缺点, 本研究对其进行了进一步改进, 开发了可灵活施加及锁定预应力并可重复使用的新型张拉锁定装置, 如图 1。本装置的主要部件包括拉杆、钢套管、张拉螺母、锁定螺母、定位环、密封环。钢套管内侧与外侧设螺纹, 其内侧与配套设计的拉杆通过螺纹连接, 外侧与螺母连接; 定位环外侧设螺纹, 中心设置中孔对锚杆固定定位, 同时定位环可阻止膨胀剂进入钢套管内螺纹段; 钢套管通过膨胀剂的自膨胀特性与锚杆之间形成自锁系统<sup>[11-13]</sup>, 限制钢套管与锚杆之间的相对滑移; 密封环通过螺纹拧入锚杆与钢套管内壁间的端部空隙, 避免钢套管端部膨胀剂风化脱落。

**工作原理:** 加载时, 穿心千斤顶作用在张拉螺母上张拉拉杆, 钢套管依靠与拉杆之间的螺纹连接, 将拉力从拉杆传递到钢套管(此时锁定螺母随钢套管向

上移动), 继而传递给锚杆。加载过程结束后, 拧紧锁定螺母锁定, 最后可撤去拉杆、钢垫板、穿心千斤顶、支架(上部钢垫板及四根丝杆), 进行重复使用。

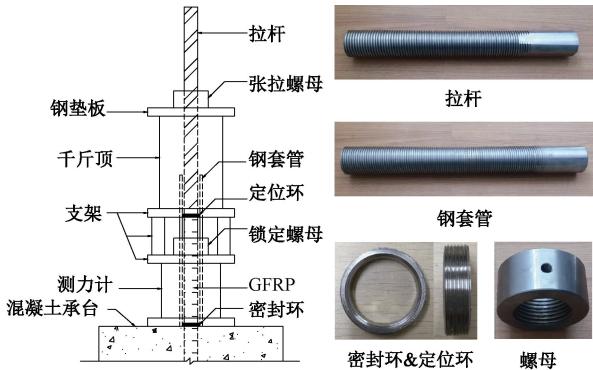


图 1 张拉锁定装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stretching and locking device

**张拉锁定装置组装步骤:** 将定位环通过螺纹拧入钢套管, 然后将锚杆伸入钢套管, 放入定位环中孔固定定位; 将无声破碎剂与水按照水灰比 1:3.3 的比例混合搅拌均匀后倒入钢套管中, 10 min 内将钢套管与锚杆间的空隙填满, 之后在钢套管端部使用定位模具定位。为防止无声破碎剂在固化过程中放热影响锚杆性能, 需在钢套管外部包裹湿布进行降温, 且间歇洒水, 湿布养护 24 h 后拆除端部定位模具; 用工具铲将钢套管端口处无声破碎剂刮平, 清理粉末, 然后将密封环穿过锚杆, 拧入钢套管内壁与锚杆间的端部空隙; 最后将试件置于室内空气中养护, 为保证钢套管内无声破碎剂充分固结, 试件养护时间不少于 15 d。

为保证加载及锁定过程一致, 钢筋锚杆外表面设螺纹, 并配套设计张拉螺母及锁定螺母。具体工作原理为: 加载时, 千斤顶直接作用在张拉螺母上张拉钢筋锚杆, 加载结束后, 拧紧锁定螺母锁定, 并可撤去拉杆、钢垫板、穿心千斤顶、支架, 进行重复使用。

### 1.2 试验试件及仪器

#### (1) 锚杆试件

本次试验采用的筋材为直径 28 mm 的 HRB335 普通螺纹钢筋, 以及广东省中山市浦美复合材料有限公司生产的直径 28 mm 的拉挤成型 GFRP 筋, 其材料组分及基本力学参数见表 1。试验共 5 个锚杆试件, 分别为直杆钢筋、折杆钢筋(弯折段的长度取 12 d 即 336 mm<sup>[14]</sup>)、3 根 GFRP 筋。GFRP 筋一端与钢套管连接固定, 钢筋锚杆加载段外表面设螺纹。锚杆及钢套管参数见表 2。

#### (2) 试验仪器

本试验采用的加载装置为液压穿心千斤顶; 荷载测量装置为 XYZ 三弦式锚索测力计及 BGK-408 振弦式读数仪; 锚杆滑移测量装置为百分表; 杆体应变测量装置为分布式光纤光栅传感器及 SM125 光纤解调仪<sup>[9]</sup>。

表 1 GFRP 筋常规力学性能参数及材料组分表

Table 1 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 /%
458.70	852.79	49.72	19	65	10	6

表 2 锚杆及钢套管参数

Table 2 Parameters of anchor rods and steel pipes

试件编号	锚杆种类	长度 /mm	直径 /mm	钢管长 度/mm	壁厚 /mm	黏结段长 度/mm
G150—30	GFRP 筋	1500	27.57	760	6.25	300
G120—40	GFRP 筋	1200	27.57	460	6.25	400
G130—50	GFRP 筋	1300	27.57	460	6.25	500
S150—30	直杆钢筋	1500	28.06	—	—	300
Z150—30	折杆钢筋	1500	28.06	—	—	300

### (3) 锚杆试件

在 GFRP 筋与钢筋杆体表面开槽后埋入光纤光栅传感器<sup>[9]</sup>, 内置光纤光栅传感器实物图如图 2, 锚杆试样实物图如图 3。

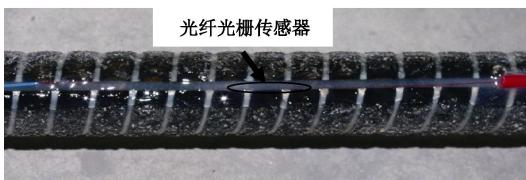


图 2 内置光纤光栅传感器

Fig. 2 Built-in FBG sensor

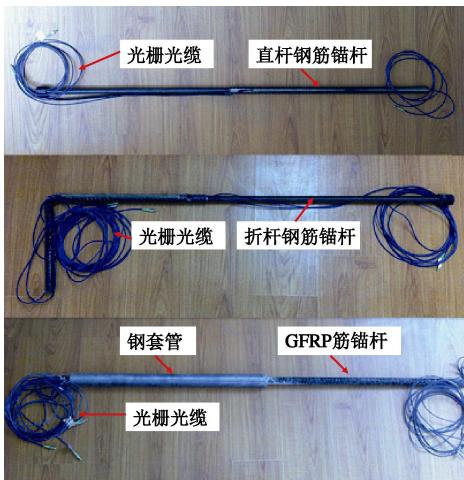


图 3 锚杆试样完成实物图

Fig. 3 Specimens of anchor rods with steel and GFRP bars

### (4) 混凝土试件

目前, 抗拔试验中混凝土试件的制作主要参照 3 种规定: Canadian Standards Association (CSA) 标准<sup>[15]</sup>、

Losberg 拉拔试验方法及《混凝土结构试验方法标准》<sup>[16]</sup>, 根据以上 3 种规定制作的混凝土试件均为尺寸较小的立方体试件, 忽略了实际工程中框架梁及箍筋对锚头部分混凝土的约束作用。

本试验参照实际工程中的框架梁节点部分制作 5 个钢筋混凝土试件, 其平面尺寸一致, 厚度分别为 360 (3 个), 460, 560 mm, 为减少混凝土试件端口处的应力集中对 GFRP 筋黏结性能的不利影响, 在端口中心留有深 60 mm, 直径 72 mm 的孔洞, 在锚杆与混凝土间形成无黏结段。以厚度 360 mm 的混凝土试件为例, 详细尺寸及实物图如图 4, 混凝土及配筋参数见表 3。

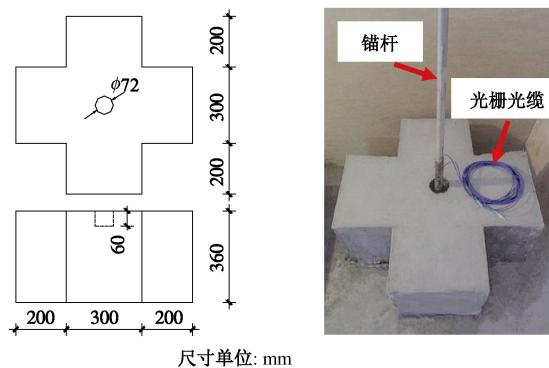


图 4 混凝土试件

Fig. 4 Concrete specimen

表 3 混凝土及配筋参数表

Table 3 Parameters of concrete and rebar

混凝土强度等级	配比	养护时间/d	实测抗压强度 /MPa	受力筋等级	直径 /mm	箍筋等级	直径 /mm
1 : 1.9 : 3.23 :							
C30	0.55(水泥 : 中砂 : 碎石 : 水)	28	32.5	HRB335	20	R235	10

### (5) 光纤光栅传感器布置

以 G150-30 试件为例, 直杆锚杆试件的测点布设位置如图 5; Z150-30 试件的锚杆为折杆锚杆, 测点布设位置如图 6。为减少混凝土试件端口处的应力集中对试验数据的影响, 并且使锚杆自由段有足够的长度调整杆体变形, 在测力计及混凝土试件之间设置反力架 (反力架钢板厚 30 mm, 立柱横截面尺寸为 80 mm×160 mm, 高 170 mm, 200 kN 作用下其变形可忽略不计)。5 个试件测点位置坐标见表 4。(取混凝土与锚杆自由段的接触点即锚固端面为坐标零点, 向混凝土锚固段内部方向为 x 轴正向, 其中自由段处传感器坐标为 -140 mm)

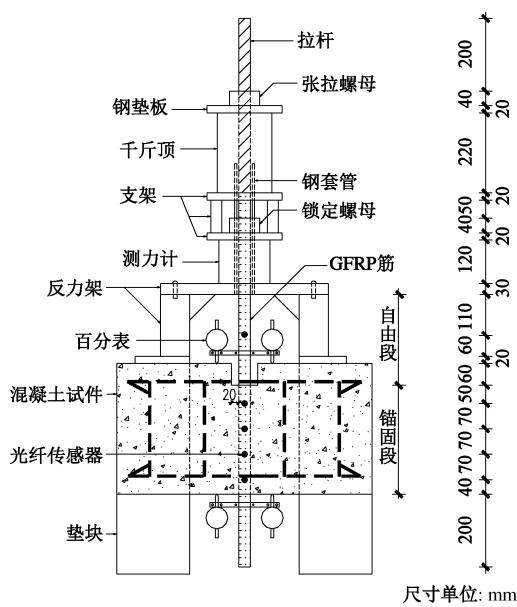


图 5 直杆锚杆试件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of specimen

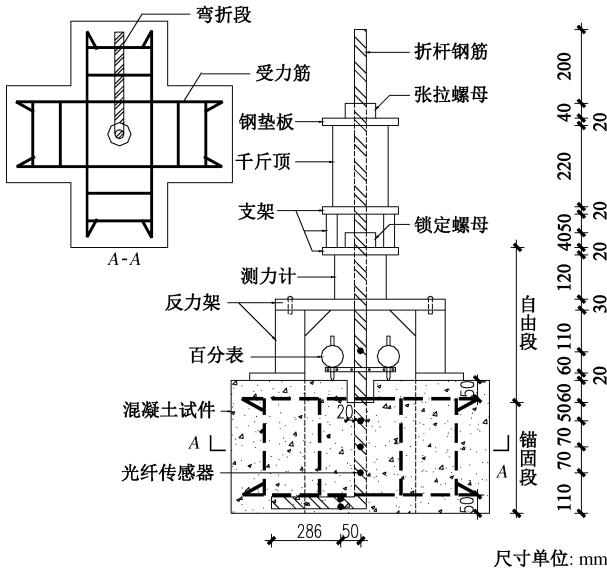


图 6 Z150-30 试件示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Z150-30 specimen

表 4 光纤传感器布设位置

Table 4 Sensors placement(unit: mm)

试件编号	传感器位置
G150-30	-140, 50, 120, 190, 260
G120-40	-140, 50, 120, 190, 260, 360
G130-50	-140, 50, 120, 190, 260, 360, 460
S150-30	-140, 50, 120, 190, 260
Z150-30	-140, 50, 120, 190, 弯折段

### 1.3 试验方案

#### (1) 试验内容

a) GFRP 筋锚杆张拉锁定装置锁定效果试验。通

过监测杆体在锁定过程中及锁定后的预应力损失, 综合评价该装置的锁定效果。

b) 折杆与直杆钢筋锚杆锚固效果对比试验。通过对折杆、直杆钢筋锚杆轴力及应变变化, 分析弯折段对锚杆锚固效果的作用。

c) 直杆钢筋、GFRP 筋锚杆锚固效果对比试验。研究杆体材料差异对直杆锚固效果的影响。

#### (2) 加载及测量方式

本次试验采用分级循环加载方式, 每级荷载 2 次加卸荷, 每级荷载增量约为 10 kN, 以测力计读数为有效数据, 每级荷载的稳压时间以测力计读数变化率小于 2 kN/h 为标准, 小于该数值时, 测量并记录该级荷载下的测力计读数、杆体应变值、百分表读数、千斤顶端部伸长量, 之后进行下一步加载。GFRP 筋锚杆加载到 130 kN 后锁定, 考虑到钢筋外表面设螺纹, 为防止屈服, 钢筋锚杆加载到 100 kN 后锁定进行长期观测。锚杆张拉前, 取 10~20 kN 对锚杆预张拉 1~2 次, 使锚杆系统完全平直, 各部位接触紧密, 以减缓张拉过程中各部分的受力不均匀<sup>[17]</sup>。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 FRP 筋张拉锁定装置效果

本文分别从锁定过程中及锁定后的杆体预应力损失情况对其锁定效果进行综合测试。锁定过程的步骤为加载到预定荷载后拧紧锁定螺母, 之后千斤顶卸压, 分别在卸压前、后测得两时刻下的荷载大小, 计算预应力损失。锁定过程中的预应力损失见表 5。锁定后, 锚杆自由段处杆体轴力随时间的变化曲线如图 7, 杆体自由段处预应力损失见表 6。

表 5 锁定过程中预应力损失表

Table 5 Losses of axial load during locking

试件编号	锚杆种类	卸压前荷载 /kN	卸压后荷载 /kN	荷载损失量 /kN	预应力损失率 /%
G150-30	GFRP 筋	131.8	128.5	3.3	2.44
G130-50	GFRP 筋	129.1	125.8	3.3	2.56
S150-30	直杆钢筋	98.2	96.1	2.4	2.46

表 5 显示, G150-30、G130-50 试件在锁定过程中预应力损失均小于 4 kN, 锁定荷载损失率约为 2.5%, 由此, 该装置的预应力锁定总体损失很少。

由张拉锁定装置的结构判断, 可能导致预应力损失的因素有: ①螺母与钢套管上的螺纹发生变形; ②与锁定螺母接触的钢垫板发生局部变形; ③锚杆与钢套管之间的滑移。

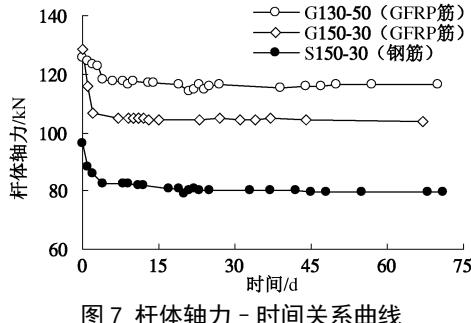


图 7 杆体轴力 - 时间关系曲线

Fig. 7 Axial force-time curves of specimens

表 6 锁定后杆体预应力损失表

Table 6 Losses of axial load after locking

试件 编号	保留荷载/kN				荷载损失率/%		
	0 d	7 d	67 d	70 d	0~7 d	0~67 d	0~70 d
G150-30	128.5	105.0	104.2	—	18.3	18.9	—
G130-50	125.8	117.7	—	116.3	6.4	—	7.6
S150-30	96.1	82.3	—	81.2	14.4	—	15.5

由于螺纹变形及钢垫板变形均为弹性变形，在锁定过程中已经完成，而套管滑移则具有黏塑性特征，与时间关联紧密，因此，该装置锁定过程的荷载损失还没有完全体现钢套管锚固的长期性状。

图 7 显示，3 个试件在锁定后 7 d 内的预应力损失较大，7 d 后杆体轴力趋于稳定。研究表明<sup>[18]</sup>，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%，由表 6 可知，本张拉锁定装置的预应力损失为 8%~20%，均在有效范围内。

S150-30 试件监测 70 d 的预应力损失率为 15.5%，而 G150-30 试件为 18.9%，后者略大。导致这种差别的原因在于：①荷载大小不同。预应力越小，杆体与混凝土及锚具之间的滑移越小，预应力损失越小。钢筋锚杆通过外螺纹锁定荷载，为防止屈服，S150-30 试件的锁定荷载设为 96.1 kN，而 G150-30 试件的钢套管具有更大的直径，锁定荷载设为 128.5 kN。因此，GFRP 锚杆预应力大，导致应力损失率相对高。②系统的结构不同。S150-30 试件由锚具导致预应力损失的因素仅为螺纹及钢垫板变形，而本锁定装置的预应力损失因素还包括锚杆与钢套管的相对滑移。由此，GFRP 筋较钢筋锚杆预应力锁定装置在较大荷载条件下依然能保持较低的损失率，说明了本装置用于预应力 GFRP 筋锚杆的有效性。

另，由图 7 及表 6 可知，G130-50 试件的混凝土锚固长度较 G150-30 试件多 20 cm，后者的荷载损失约为前者的 2.5 倍。显然，锚固长度对预应力损失有很大的影响，预应力损失不仅仅是锁定装置的原因。实际工程中预应力锚杆的内锚固段长度远大于 30 cm，因此，实际工况下本装置预应力损失量要小于本试验结果，即本试验结果是偏于安全的。

综上，本锁定装置可以实现 FRP 筋的预应力张拉和锁定，预应力损失能控制在允许值范围内，具有拆装方便操作简单的优点，适用于 FRP 筋锚杆的长期荷载试验及工程现场的预应力张拉及锁定。

## 2.2 杆体弯折对钢筋锚固效果的影响

### (1) 直杆与折杆轴力分布差异

图 8 为直杆与折杆轴力随锚固深度的分布。图 9 是折杆弯折段应变随荷载的变化。表 7 为锚杆杆体滑移量，根据测点位置（见图 5、6），分为锚杆上、下端的滑移，图 10 为滑移量与荷载的关系。图 11 为杆体界面剪应力随锚固深度的分布，以相邻测点的轴力差除以之间杆体与混凝土的接触面积得到。

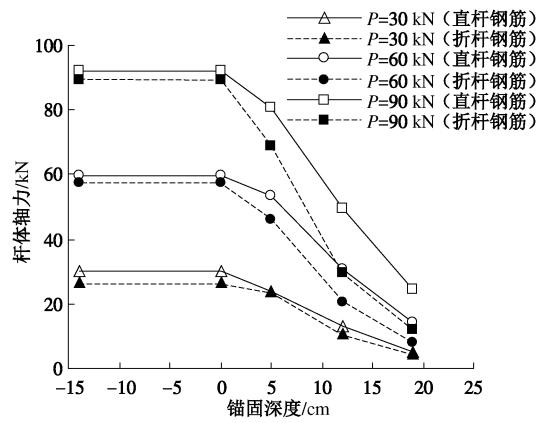


图 8 直杆与折杆钢筋锚杆杆体轴力 - 锚固深度关系曲线

Fig. 8 Axial force-depth curves of anchor rods under different loads

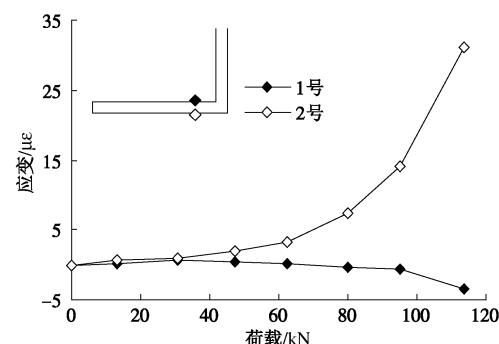


图 9 折杆钢筋弯折段应变 - 荷载关系曲线

Fig. 9 Strain-load curves of bending part

### 表 7 杆体滑移量

Table 7 Slippages of anchor rods with GFRP and steel bars

荷载/kN	S150-30 滑移/mm		Z150-30 滑移/mm		G150-30 滑移/mm	
	上端	下端	上端	下端	上端	下端
15	0.022	0.000	0.020	0.033	0.000	0.000
30	0.050	0.000	0.042	0.089	0.000	0.000
45	0.073	0.000	0.071	0.182	0.002	0.002
60	0.120	0.021	0.090	0.261	0.028	0.028
90	0.187	0.050	0.156	0.489	0.100	0.100
110	0.231	0.072	0.190	0.648	0.134	0.134

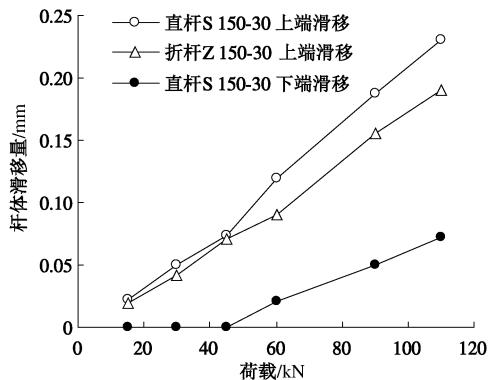


图 10 杆体滑移量

Fig. 10 Slippage of anchor rods

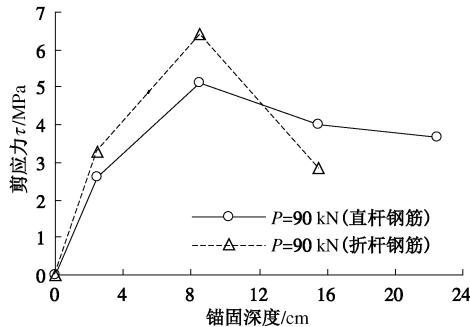


图 11 锚杆杆体剪应力 - 锚固深度关系曲线

Fig. 11 Shear stress-depth curves of anchor rods

图 8 显示，直杆与折杆钢筋锚杆杆体轴力随锚固深度的增加而减小，荷载为 30 kN 时两者随锚固深度的衰减曲线基本一致，荷载大于 60 kN 时折杆轴力小于直杆，轴力差值随荷载增加而增大，随锚固深度增加也增大。

图 9 显示，折杆钢筋锚杆弯折段的应变在荷载大于 60 kN 时才有显著变化，一侧受拉，一侧受压。

图 10 显示，荷载小于 45 kN 时，直杆与折杆钢筋锚杆锚固段上端的滑移量近乎相同，直杆钢筋锚固段下端没有滑移。

图 11 显示，相同荷载下，锚固深度 0~12 cm 范围内，折杆钢筋界面受到的剪应力大于直杆，19 cm 深度处折杆钢筋界面剪应力小于直杆。

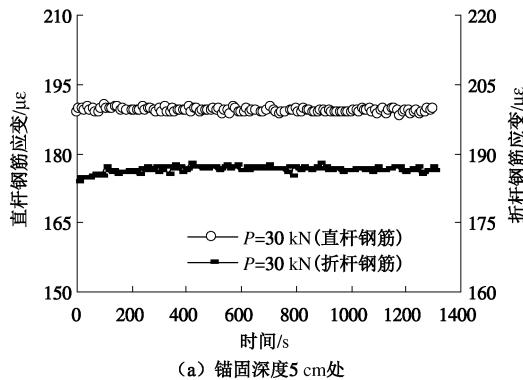
图 8~11 的现象说明：①荷载较小时，荷载的影响深度局限在锚固深度 0~19 cm 范围内，界面未发生相对滑移，杆体界面的黏结状态没有发生明显蜕化，此时直杆与折杆的黏结状态相同，所以两者的荷载深度曲线重合。②荷载较大时，杆体表面的黏结状态发生蜕化乃至滑移，荷载向深部传递。由于折杆的杆体滑移相对于直杆受到更大的限制，界面黏结蜕化程度低于直杆，所以直杆的荷载传递深度大且衰减率小，表现为直杆的轴力大于折杆，且轴力差异随深度增加。③折杆钢筋与混凝土的相对位移受到限制，界面的黏结状态受到的扰动较小，能保持更高的黏结力，从而

产生较大的界面剪应力。折杆条件下，混凝土能提供更高的界面剪应力，从而节省框架梁厚度。同时也说明，黏结力最大值出现在界面发生相对滑移之前。

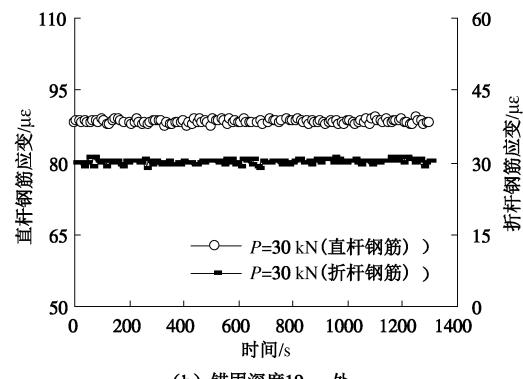
## (2) 直杆与折杆界面黏结状态蜕化过程差异

加载到相应荷载等级后保持荷载恒定，连续采集数据 1300 s，采集频率为 1 次/s。以此建立杆体应变的时间过程，由此判断杆体界面黏结状态的改变。

图 12, 13 分别为 30, 90 kN 荷载下直杆与折杆钢筋锚杆杆体各点应变随时间的变化。



(a) 锚固深度 5 cm 处

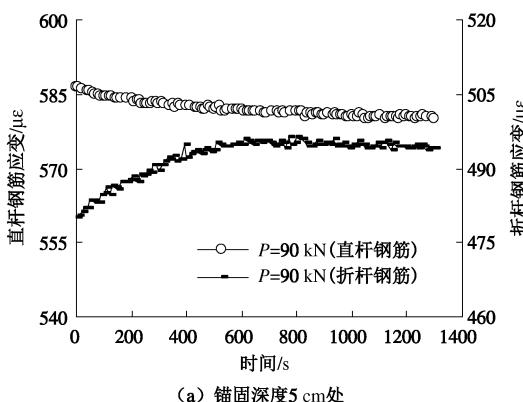


(b) 锚固深度 19 cm 处

图 12 30 kN 荷载条件下杆体各点应变 - 时间关系曲线

Fig. 12 Strain-time curves at different anchor depths (30 kN)

图 12 显示，荷载为 30 kN 时，直杆与折杆钢筋锚杆杆体相同位置的应变时间过程线近似平行，直杆应变略大（差异 20~90 με）。由此，杆体界面的黏结状态蜕化过程相近，绝对差别不大，因此，两种杆体的轴力分布情况相近。



(a) 锚固深度 5 cm 处

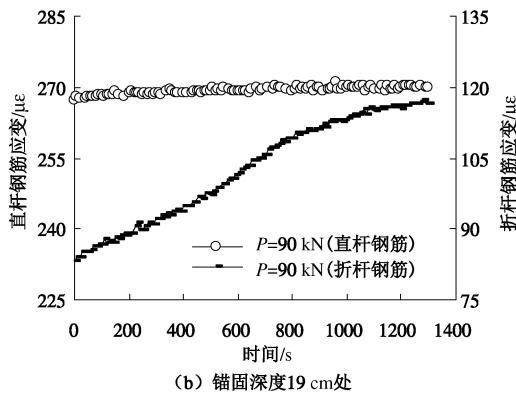


图 13 90 kN 荷载条件下杆体各点应变 - 时间关系曲线

Fig. 13 Strain-time curves at different anchor depths (90 kN)

图 13(a) 显示, 荷载为 90 kN 时, 直杆钢筋杆体锚固深度 5 cm 处的应变已经历过峰值处于扩散衰减阶段, 而该位置折杆的应变则处于增长聚集直至峰值的阶段。前者的界面黏结状态已越过了峰值, 而后者的黏结力则处于增长阶段。因此当前荷载下该处折杆杆体的界面黏结力要大于直杆。

图 13(b) 显示, 荷载为 90 kN 时, 锚固深度 19 cm 处直杆的黏结状态处于峰值, 而折杆的黏结状态尚未达到峰值。可以预计, 随时间延续直杆的黏结状态会先发生蜕化, 而折杆的黏结状态还要继续增长, 直至峰值或稳定。由此, 当前荷载下折杆的界面黏结状态的潜力尚未全部启用。

综上, 基于杆体轴力的分布和杆体界面黏结状态的变化过程, 杆体弯折对于钢筋锚杆的锚固效果有明显的强化作用, 可以更多发挥杆体界面的黏结作用, 提高锚固基体的锚固性能, 同厚度梁体下, 折杆框架梁锚固结构能承担更高的荷载。

### 2.3 直杆钢筋与 GFRP 筋的锚固效果差异

#### (1) 钢筋与 GFRP 筋杆体轴力分布差异

图 14 为直杆钢筋与 GFRP 筋锚杆杆体轴力随锚固深度的分布情况。图 15 为杆体界面剪应力与锚固深度之间的关系。图 16 为不同荷载下的杆体滑移量。

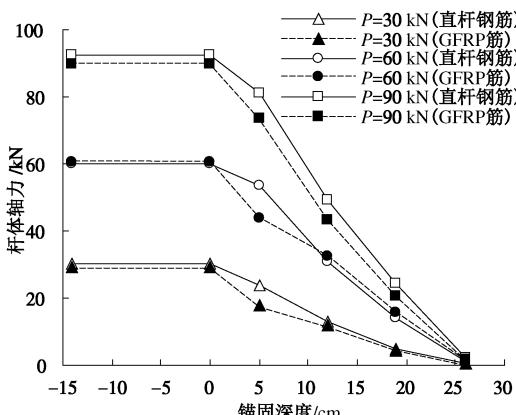
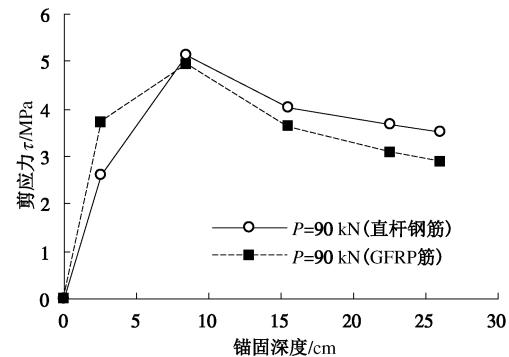
图 14 直杆钢筋与 GFRP 筋锚杆杆体轴力 - 锚固深度关系曲线  
Fig. 14 Axial force-depth curves of anchor rods under different loads

图 15 锚杆杆体剪应力 - 锚固深度关系曲线

Fig. 15 Shear stress-depth curves of anchor rods

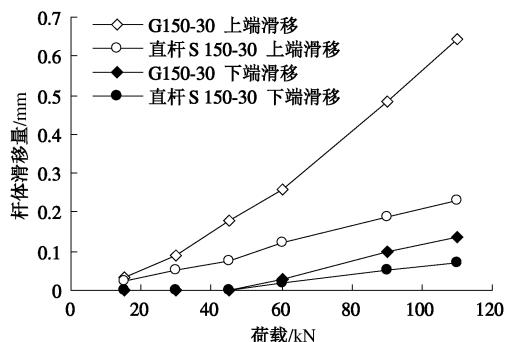


图 16 杆体滑移量

Fig. 16 Slippage of anchor rods

图 14 显示, 直杆钢筋与 GFRP 筋的杆体轴力随锚固深度的变化情况基本一致。图 15 显示, 90kN 荷载下, GFRP 筋与直杆钢筋杆体界面剪应力分布情况近似相同。由此, 直杆钢筋及 GFRP 筋与锚固基体的黏结状态近似一致。

图 16 显示, GFRP 筋的上端滑移量大于直杆钢筋, 且差值随着荷载的增加而增大; 荷载小于 45 kN 时, 两者的下端滑移量均为 0, 荷载大于 45 kN 时, 两者下端出现滑移, 滑移量差值随荷载增加的增幅远小于上端。由此, GFRP 筋及直杆钢筋与锚固基体均发生了整体相对滑移, 此时界面剪应力以摩擦性质为主, 滑动面处于锚固基体内部, 因此, 两者的界面剪应力分布基本一致, 且量值差别不大。

由于 GFRP 筋的弹性模量仅为钢筋的 1/4, 相同荷载下 GFRP 筋变形大于钢筋。另外, 杆体下端未承担外加荷载, 处于随动状态。因此, GFRP 筋的上端滑移量大于直杆钢筋, 而下端滑移量两者相近。

#### (2) 直杆钢筋与 GFRP 筋界面黏结状态蜕化差异

加载到相应荷载等级后保持荷载恒定, 连续采集数据 3400 s, 图 17, 18 分别为 30, 90 kN 荷载作用下, 直杆钢筋与 GFRP 筋各点应变随时间的变化。

图 17 显示, 荷载较小时 (30 kN), 钢筋各点处的应变稳定, 说明黏结状态稳定, 未发生蜕化现象; 而

GFRP 筋各点处的应变处于增长过程, 说明黏结状态处于启用过程中, 未来将达到峰值或稳定。由此, 两者的黏结状态, 最终取决于锚固基体的黏结强度, 在未达到黏结强度之前, 两者的黏结状态相同。

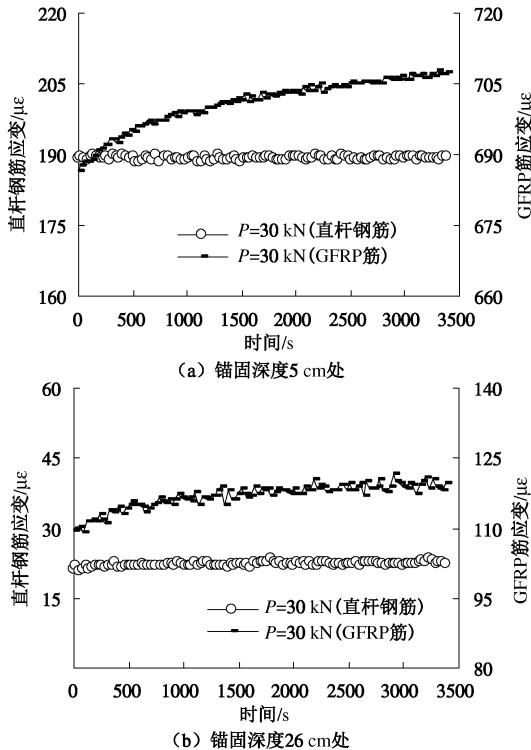


图 17 30 kN 荷载条件下杆体各点应变 - 时间关系曲线

Fig. 17 Strain-time curves at different anchor depths (30 kN)

图 18 (a) 显示, 较大荷载下 (90 kN), 钢筋与 GFRP 筋在 5 cm 处的应变相继达到峰值, 并出现衰减现象。由此说明该点的黏结状态已经历过峰值, 锚固段中已经存在黏结蜕化现象, 荷载向深部转移。更深位置 (12、26 cm) 两种杆体的应变都处于增长状态, 尚未达到峰值或稳定, 且增长速率趋同。说明当前荷载下更深位置的黏结状态尚未出现蜕化, 并处于同步发展状态。

综上, 基于杆体轴力的分布和杆体界面黏结状态的变化过程, 钢筋直杆和 GFRP 筋锚杆的黏结状态相近, 杆体与锚固基体的界面黏结状态取决于锚固基体的剪切强度。相同锚固长度的钢筋直杆和 GFRP 筋锚杆具有相近的锚固效果。

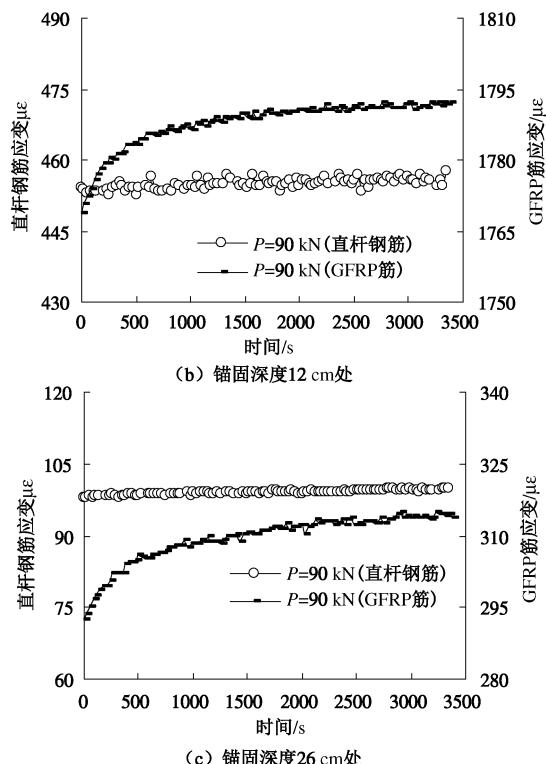
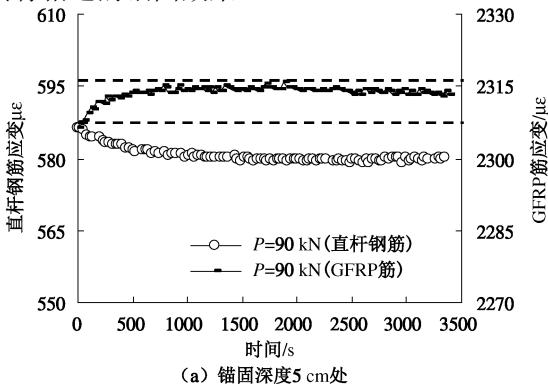


图 18 90 kN 荷载条件下杆体各点应变 - 时间关系曲线

Fig. 18 Strain-time curves at different anchor depths (90 kN)

### 3 结 论

(1) 为施加预应力而研制的锁定装置能够实现 FRP 筋的预应力张拉和锁定, 工作状态稳定, 拆装方便操作简单, 并可重复使用, 适用于 FRP 筋锚杆的长期荷载试验及工程现场的预应力张拉及锁定。

(2) 钢筋锚杆端部弯折锚固法, 可更多发挥杆体界面的黏结作用, 锚固效果明显优于钢筋直杆锚固形式, 同厚度梁体下, 折杆框架梁锚固结构能承担更高荷载。

(3) GFRP 筋锚杆与直杆钢筋锚杆的黏结状态相近, 杆体与锚固基体的界面黏结状态取决于锚固基体的剪切强度, 两者的框架梁锚固效果相近。

(4) 以 GFRP 筋等体积取代钢筋锚杆时, 按照钢筋弯折锚固形式设计的框架梁厚度不能直接用于 GFRP 筋锚杆锚固, 须根据直杆锚固试验确定框架梁厚度。

### 参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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 corroded reinforced concrete structures[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2003, **22**(10): 51 - 53. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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.
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 蒋田勇, 方 志 CFRP 筋黏结式锚具锚固性能试验[J]. 中国公路学报, 2011, **24**(1): 68 - 77. (JIANG Tian-yong, FANG Zhi. Experiment on anchorage performance of bond-type anchorage for CFRP tendon[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, **24**(1): 68 - 77. (in Chinese))
- [9] 李国维, 倪 春, 葛万明, 等. 大直径喷砂 FRP 筋应力松弛试件锚固方法研究[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))
- [10] JSCE-E 534 Test method for long-term relaxation of continuous fiber reinforcing materials[S]. Japan, 1995.
- [11] 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.
- [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, Volume 2013, Article ID 201767.
- [13] 渡道明, 戈鹤川. 静态破碎剂的应用[J]. 爆破, 1985(4): 42 - 50. (DU Dao-ming, GE He-chuan. The application of static crushing agent[J]. Blasting, 1985(4): 42 - 50. (in Chinese))
- [14] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 2011. (GB 50010—2010Code for design of concrete structures[S]. 2011. (in Chinese))
- [15] CSA S806—02 Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers[S]. 2002. (in Chinese))
- [16] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准[S]. 2005. (GB 50152—92 Standard for test methods of concrete structures[S]. 2005. (in Chinese))
- [17] CECS 22—2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 2005. (CECS 22—2005 Technical specification for ground anchors[S]. 2005. (in Chinese))
- [18] 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))