

文章编号:1001-4888(2014)03-0302-08

三维 DIC 在 GFRP 锚杆拉伸力学性能测试中的应用*

朱飞鹏¹, 王京荣¹, 雷冬¹, 何小元²

(1. 河海大学力学与材料学院, 南京 210098; 2. 东南大学工程力学系, 南京 210096)

摘要: 随着玻璃纤维增强塑料(GFRP)广泛运用于轨道交通及边坡加固中,其力学性能的测试显得尤为重要。基于三维数字图像相关(DIC)方法,研究了三种不同加载速率下 GFRP 锚杆的拉伸力学性能,分别得到了应力—应变曲线及弹性模量、抗拉强度、最大力总延伸率等参数。实验结果表明,螺旋状变截面锚杆的轴向应变呈非均匀分布,由三维 DIC 得到的锚杆弹性模量结果一致性优于传统的接触式引伸计方法,GFRP 锚杆几乎呈线性分布的应力—应变曲线表明该材料为典型的脆性材料。

关键词: 三维数字图像相关; 弹性模量; 玻璃纤维增强塑料; 引伸计; 抗拉强度; 延伸率

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-13-117

0 引言

纤维增强聚合物(FRP)是一种以高分子环氧树脂为基体,玻璃纤维(GFRP)、玄武岩纤维(BFRP)或碳纤维(CFRP)等为增强体,经过复合工艺而制成的复合材料。该材料具有耐腐蚀、抗拉强度高、质量轻、抗静电、不可燃、成本较低等优点。其中,GFRP 筋材具有高于普通钢筋的抗拉强度,由其制成的锚杆代替钢筋用于锚杆结构,可解决锚杆结构因长期运行而出现的腐蚀老化问题,当前已广泛运用于轨道交通及边坡加固中^[1,2],因此,对于 FRP 锚杆力学性能的测试就显得尤为重要。刘汉东等^[3]研究了 GFRP 锚杆的基本力学指标,用电测法得到了应力—应变曲线和弹性模量。刘广建等^[4]基于拉伸实验研究了锚杆中玻璃纤维含量对混杂 GFRP 锚杆拉伸强度与断后延伸率的影响。

数字图像相关(DIC)方法通过分析试样变形前后的表面散斑图像来获得位移与应变信息,是一种全场、非接触、高精度变形测量的现代光测力学手段。其中,二维 DIC 在应变测量方面存在易受离面位移影响的问题^[5-7],使得应变测量结果不够准确。而三维 DIC^[8,9]通过双目相机的视差数据和标定参数,重构出被测物表面在变形前后的三维形貌,进而获得三维位移场和应变场。与二维 DIC 不同,三维 DIC 获得了被测物的三维形貌,离面刚体位移的存在不会对其应变测试结果产生影响。因此,三维 DIC 具有较高的应变测量精度,目前已在多个领域得到广泛的应用^[10-14]。本文运用三维 DIC 方法对 GFRP 锚杆的拉伸力学性能作了研究,得到其应力—应变曲线及弹性模量、抗拉强度、最大力总延伸率等参数。

1 三维数字图像相关方法

三维 DIC 的基本原理是基于计算机双目立体视觉原理,利用两个互成一定角度的相机拍摄被测物

* 收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(11002048)资助

通讯作者: 朱飞鹏(1983—),男,博士,讲师。主要研究方向:光学测试方法的研究与应用。E-mail: zhufeipeng@hhu.edu.cn

表面,首先对双目立体视觉模型进行标定,获得双相机的内外参数,然后利用二维 DIC 中的相关匹配算法,得到左右两幅图中对应点的视差,从各点的视差数据和标定参数来重构被测物表面的三维形貌。图 1 为双目立体视觉的原理示意图,图中 O_{c1} 和 O_{c2} 分别表示两个相机的光心。

在三维 DIC 测试之前,首先需要进行系统标定,包括确定两个相机的焦距、主点坐标和各种畸变参数,以及左右两相机坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 。标定过程使用一块有特征点的平面标定板(圆点图案或棋盘格图案),这些特征点之间精确的相对位置已知,系统拍摄若干张不同姿态下的标定板图像,通过识别这些特征点在左右相机中的对应坐标,再根据光束法平差或非线性最小二乘优化方法可确定系统的内、外参数。优化的目标函数为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_{l,i}} \| m_{l,ij} - \tilde{m}(\mathbf{A}_l, k_{1,l}, k_{2,l}, \mathbf{R}_{1,i}, \mathbf{T}_{1,i}, X_{1j}) \|^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_{r,i}} \| m_{r,ij} - \tilde{m}(\mathbf{A}_r, k_{1,r}, k_{2,r}, \mathbf{R}_{1,i}, \mathbf{T}_{1,i}, \mathbf{R}_{r2l}, \mathbf{T}_{r2l}, X_{1j}) \|^2 \quad (1)$$

其中 $\tilde{m}(\mathbf{A}_l, k_{1,l}, k_{2,l}, \mathbf{R}_{1,i}, \mathbf{T}_{1,i}, X_{1j})$ 为左相机第 i 幅标定图上第 j 个特征角点经非线性模型计算得到的图像坐标; $m_{l,ij}$ 是左相机上由角点提取算法识别出的对应角点的真实图像坐标。 $\tilde{m}(\mathbf{A}_r, k_{1,r}, k_{2,r}, \mathbf{R}_{1,i}, \mathbf{T}_{1,i}, \mathbf{R}_{r2l}, \mathbf{T}_{r2l}, X_{1j})$ 为右相机第 i 幅标定图上第 j 个特征角点由非线性模型计算得到的图像坐标; $m_{r,ij}$ 是右相机上由角点提取算法识别出的对应角点的真实图像坐标。 $\mathbf{A}_l, \mathbf{A}_r$ 分别为左右相机的内参矩阵; k_1, k_2 为 1、2 阶畸变系数; \mathbf{R}_1 和 \mathbf{T}_1 为左相机旋转矩阵和平移矩阵; \mathbf{R}_{r2l} 和 \mathbf{T}_{r2l} 为右相机向左相机进行坐标转换的旋转矩阵和平移矩阵。公式(1)可由 Levenberg-Marquart 算法进行优化。

从图 1 中可知,空间中的待测点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 分别成像于左相机像面上的点 $P_1(u_1, v_1)$ 与右相机像面上的点 $P_2(u_2, v_2)$ 。双目立体视觉的目标就是利用相关算法识别左相机中点 P_1 在右相机中的坐标 P_2 ,再根据下面公式(2)、(3)中的投影关系,确定点 P 在预设世界坐标系中的三维坐标 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 。

$$z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $m_{ij}^k (k=1,2)$ 为投影矩阵的第 i 行第 j 列元素,从上两式中分别消去 z_{c1} 和 z_{c2} 可得到如下关于空间坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的四个共线方程:

$$\begin{aligned} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) X_w + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) Y_w + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) Z_w &= m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) X_w + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) Y_w + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) Z_w &= m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) X_w + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) Y_w + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) Z_w &= m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) X_w + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) Y_w + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) Z_w &= m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

利用最小二乘法可以求解上述方程,进而实现空间点三维坐标的重建。

在系统标定确定标定参数之后,用二维 DIC 算法得到左相机中的点 P_1 在右相机中的图像坐标 P_2 ,通过求解公式(2)和(3),就可得到被测物表面 P 点在世界坐标系下的三维坐标。被测物三维位移的计算可用示意图 2 来表示。为方便起见,任取参考状态下左相机图像点 P_1 子区域为例,与该状态下右相机图像做一次相关运算可重建该点的三维坐标 P ,然后将该子区域再分别与变形后左右相机两幅图各做一次相关运算,可确定空间点 P 变形后的三维坐标 P' ,将变形前后对应点 P 和 P' 的空间坐标对应相减即可得到该点的三维位移。对于参考状态下左相机图像中的每一点均采用上述操作可得整个被

测物表面的三维位移场,值得注意的是由于该位移场是建立在坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中,所以当被测物表面与平面 $X_w O_w Y_w$ 不平行时尚需将该坐标系向被测物表面坐标系进行转换。最终对该三维位移场使用差分算法便可得到被测物表面应变场分布。当被测物表面为一曲面时,则需将得到的三维位移向其切平面转换才可得到沿着曲表面分布的应变场。

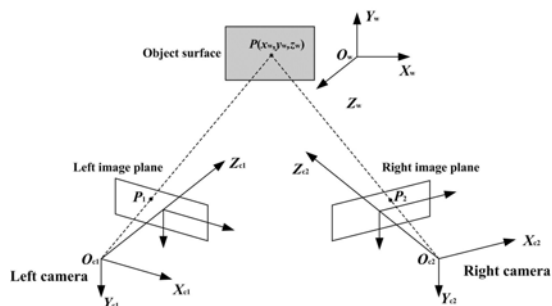


图 1 双目立体视觉的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of binocular vision

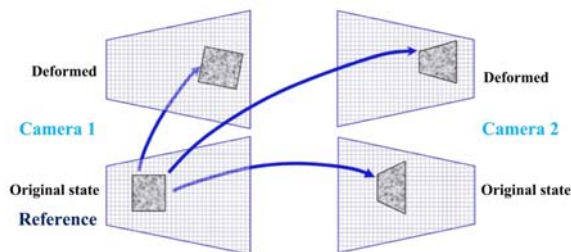


图 2 三维 DIC 中三维位移的计算

Fig. 2 Schematic diagram of 3D displacement calculation in 3D-DIC

2 实验过程

2.1 试样

本次实验所采用的材料为南京锋晖复合材料有限公司生产的 $\Phi 14$ 的 GFRP 螺旋状筋材,杆体呈规则的全螺纹结构,具有锚固力大、安装方便、易切割等优点。将切割后的四根 GFRP 锚杆两端分别与空心钢管用环氧粘结剂形成哑铃状的拉伸试件。在试件表面采用人工制斑方法制成随机分布的斑点,如图 3 所示,然后安装在试验机的两个夹头上。由于试件表面呈螺旋状,不适合贴应变片,因此为了与传统接触式方法的实验结果作对比,在图示试件的左侧位置安装一个标距为 50mm 的引伸计。该引伸计的位移测量精度为 $1\mu\text{m}$,因此应变测量精度为 $20\mu\epsilon$ 。

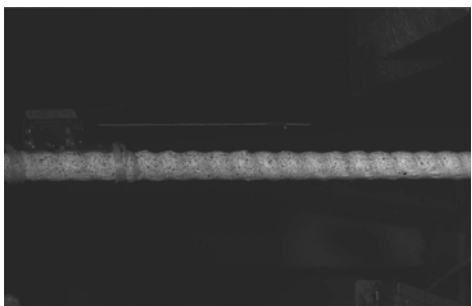


图 3 试样表面与引伸计

Fig. 3 Specimen surface and extensometer



图 4 实验测试系统

Fig. 4 Experimental system of measurement

2.2 实验装置和实验过程

实验所采用的加载系统为济南试金集团有限公司的 WAW-E2000 万能试验机,荷载量程为 2000kN。变形测试采用美国 CSI 公司的三维 DIC 系统,该系统主要由型号为 GRAS-50S5M-C 的两台 CCD 相机(分辨率为 2448×2048 pixels)和焦距为 50mm 的两个 Schneider 镜头组成。实验过程中采用卤素灯光源进行系统照明。整个实验测试系统如图 4 所示。

实验开始之前,调整好三维 DIC 系统中相机与试样之间的距离、两相机之间的夹角、照明光源的位置,进行相机调焦使得试样能够清晰成像,标定完系统参数之后,即可开始实验。

将试样安装于万能试验机上,由试验机对试样进行拉伸控制。实验中加载方式为位移控制,对四根试样选用三种不同的位移加载速率,相应地需要为三维 DIC 系统设置不同的图像采集速率,具体数值

如表 1 所示。试验机开始加载,三维 DIC 系统同时开始采集图像,记录好一定荷载下的图像序列号和引伸计的读数,便可将荷载与变形一一对应,直至试样被拉破坏为止。

表 1 实验参数设置

Tab. 1 Parameter settings of experiments

试样	直径(mm)	加载速率(mm/min)	三维 DIC 系统图像采集帧率(fps)
1	14	2	2
2	14	2	2
3	14	5	1
4	14	10	0.5

3 实验结果与讨论

3.1 试样表面变形分布规律

按照表 1 中的参数设置依次进行四根试样的拉伸实验。用 Vic-3D 软件对实验过程中采集到的图像进行变形分析。由于 GFRP 锚杆试样呈全螺纹结构,故可重构出其表面三维形貌如图 5 所示,沿试样长度方向的应变场分布如图 6 所示。由图 6 可知螺旋状试样表面的应变分布呈周期性变化,其凸出部分表面应变相对较小,这是由其应力状态所决定的,因为试样表面凸起处的横截面面积较大。

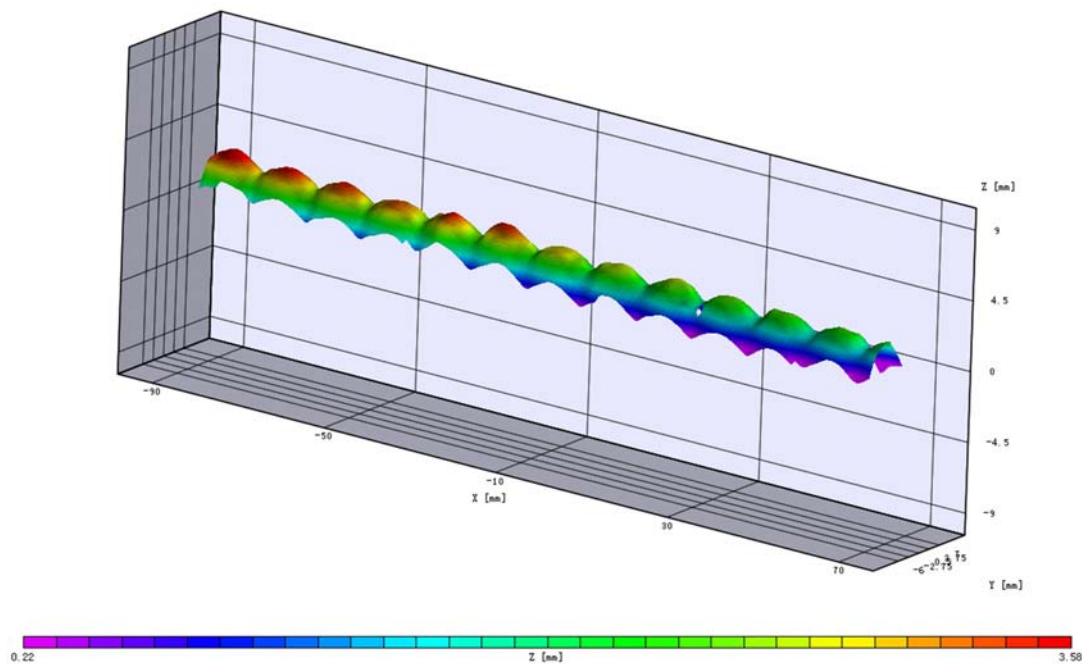


图 5 GFRP 锚杆试样表面三维形貌

Fig. 5 3D surface shape of GFRP bolt specimen

为便于观察,作出图 6 试样表面黑线上的变形分布如图 7 所示。其中图 7(a)为沿长度方向位移场即 U 场,图 7(b)为离面位移场即 W 场。图 7(a)的位移场呈现出类似台阶状的分布,该现象产生的原因在于试样凸起部分较大的截面面积引起了较小的位移;试样表面突起部分位移对应了台阶位置处数值,而试样凹槽部分位移则对应了两个台阶之间的过渡部分,且凹槽部分的最大位移以图中红色圆圈标记出。

图 7(b)中离面位移场有一个比较大的倾斜,主要是由两个夹头之间的相对转动引起,该现象在实验中是不可避免的。此外,图示位移场还存在一些较小的波动,通过分析可知,离面位移大小与 $\mu F/Ed$ 有关,其中 μ 、 E 为试样泊松比与弹性模量; F 为拉力大小; d 为试样直径。因此,可得到试样在表面凸起(直径 d 较大)部分的离面位移 W 较小,图中以蓝色圆圈标记处为试样凹槽部分的最大位移。

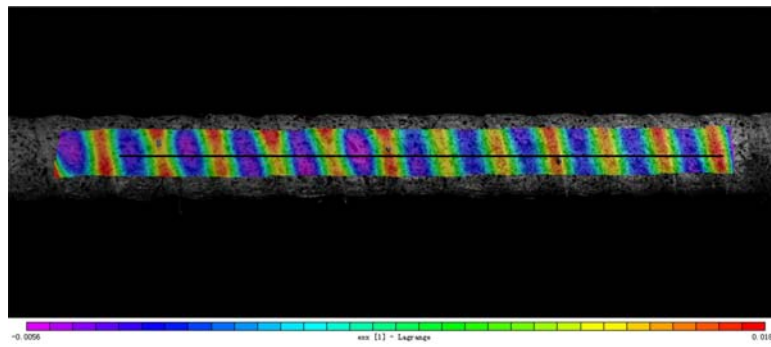


图6 试样表面应变场 ϵ_x 分布

Fig. 6 Distribution of strain field ϵ_x of specimen surface

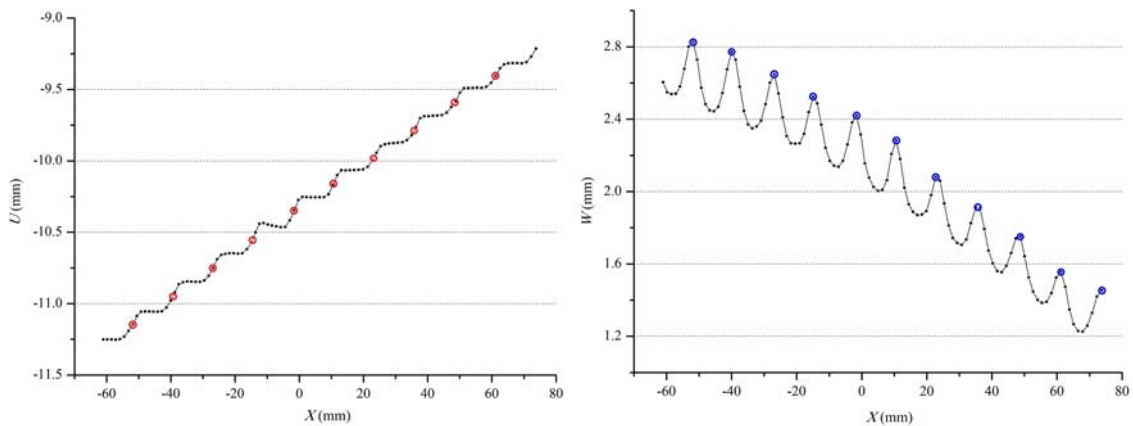


图7 试样沿图6中黑线的变形分布:(a)U场;(b)W场

Fig. 7 Deformation distribution of specimen along black line in Fig. 6:(a) U field;(b)W field

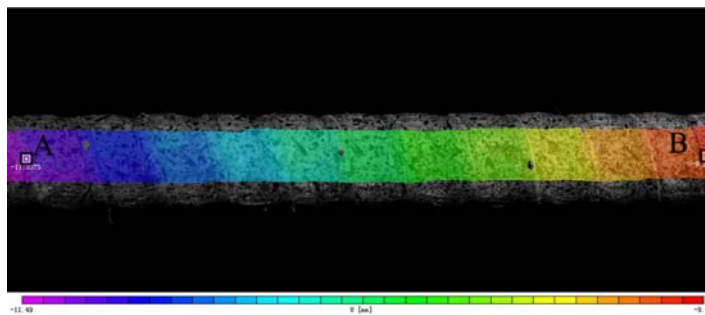


图8 虚拟引伸计标距点选取

Fig. 8 Position selection of virtual gauge length

3.2 应力—应变曲线与弹性模量

对于本文中单向拉伸实验而言,由于试样表面为非均匀应变场,要获得某荷载引起的拉伸应变,不宜再取应变场均值。采取如下操作方法:在试样表面沿长度方向选取两个有一定间距的点 A、B 作为标距点,组成一个虚拟引伸计;根据前面分析得到的标距点变形前后的空间三维坐标,采用如下公式便可得到拉伸应变:

$$\epsilon_x = \frac{\overline{A_1 B_1} - \overline{A_0 B_0}}{\overline{A_0 B_0}} \quad (5)$$

式中, $\overline{A_0 B_0}$ 和 $\overline{A_1 B_1}$ 分别为参考和变形状态下标距点之间的距离即标距。实验数据处理中虚拟引伸计的标距 A、B 点的选取如图 8 所示,选在试样上两个相距尽量大的凹槽位置,两者在图像上的距离大约为 1250pixels。考虑到三维 DIC 的位移识别精度约为 0.01pixel,因此,文中所取虚拟引伸计的应变测试精度为 $0.02/1250 \approx 16\mu\epsilon$ 。

根据前面介绍的处理方法,可得到四根试样的应力—应变曲线,如图 9 所示。其中试样 2 从夹头位置脱落,没有被拉断。图 9(c)~(d)中应力基本达到各自最大值,这一点可从后面的表 3 反映出。

从图 9 可知,GFRP 锚杆在拉伸破坏之前应力—应变一直呈线性关系,没有明显的屈服阶段,其破坏属于典型的脆性破坏。

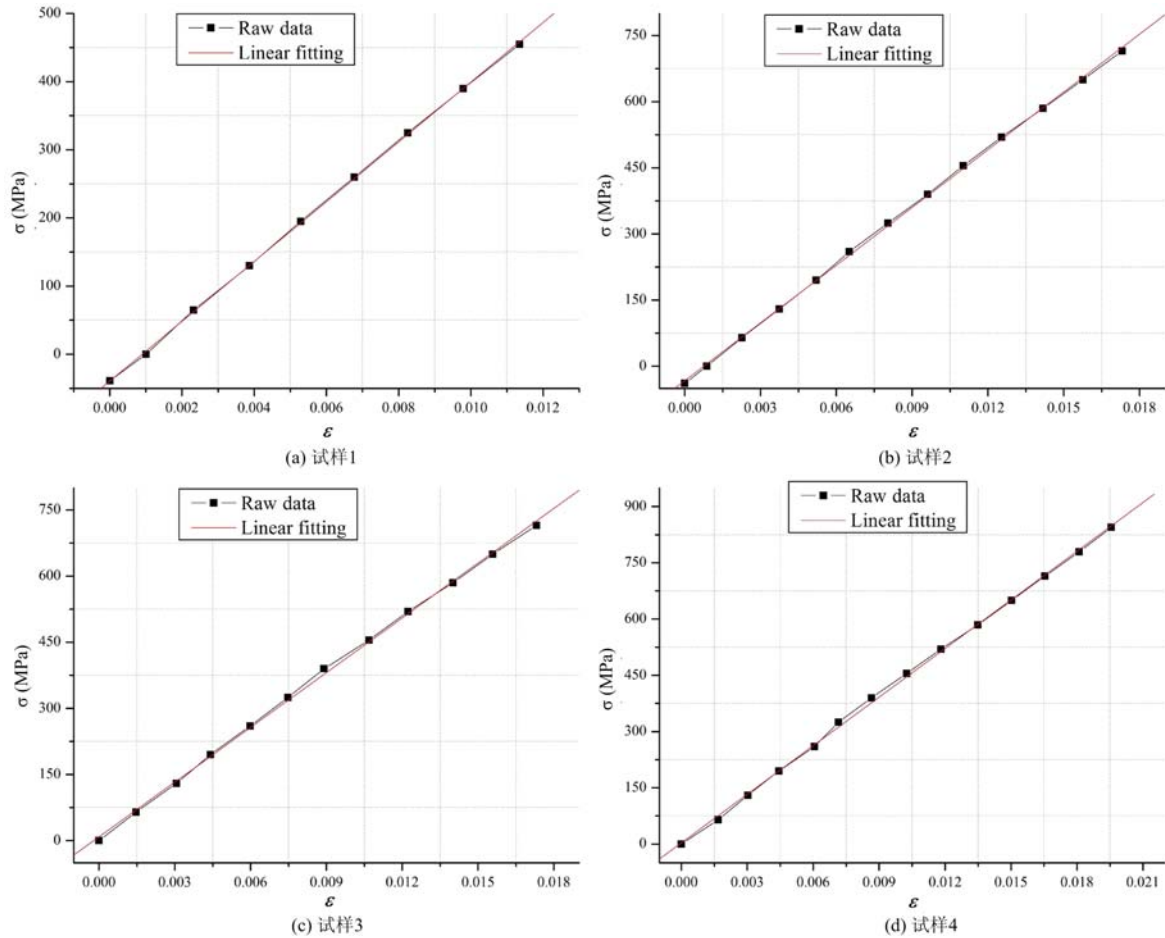


图 9 由三维 DIC 得到的应力—应变曲线

Fig. 9 Curves of stress-strain obtained with 3D-DIC

对于图 9 的应力—应变关系,依次采用最小二乘线性拟合方法,得到曲线的斜率即 GFRP 锚杆的弹性模量。将引伸计读数除以其标距得到应变值,同样可得传统接触式方法的应力—应变关系和弹性模量。两种方法的结果对比如表 2 所示。其中三维 DIC 测试的结果与厂家给出的弹性模量参考值 40~45GPa 相吻合,而且数据一致性要优于引伸计的结果。

表 2 引伸计与三维 DIC 得到的弹性模量对比

Tab. 2 Comparison of elastic modulus obtained with extensometer and 3D-DIC

试样	引伸计(GPa)	三维 DIC(GPa)
1	45.11	43.84
2	47.77	43.66
3	46.40	43.67
4	47.77	43.21

3.3 抗拉强度与延伸率

将试样拉伸破坏时的荷载除以截面积得到抗拉强度。由于 GFRP 锚杆破坏是从部分纤维被拉断开始,逐渐发展为整个试样“劈裂”式破坏(如图 10 所示),无法得到其断后延伸率,因此,只能根据试样

最大荷载下的伸长量获得最大力总延伸率,结果参数如表 3 所示。其中,试样 2 从夹头位置脱落,其最大力总延伸率参数偏小。实验结果表明:对于 GFRP 锚杆而言,抗拉强度与最大力总延伸率并没有随着加载速率的增加而提高。试样 1、3、4 的抗拉强度均值为 799MPa,大于普通钢材(Q235 钢为 235MPa),但是延伸率(均值为 1.94%)与塑性较差。

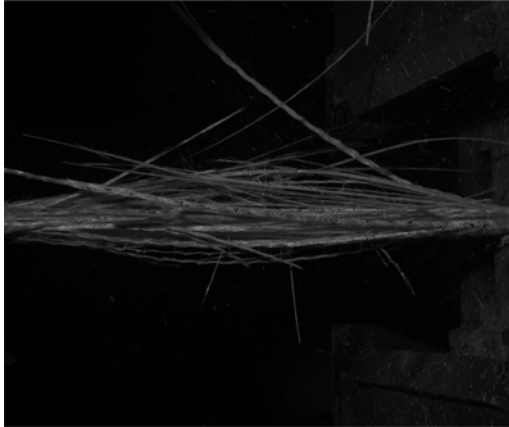


图 10 GFRP 锚杆的破坏形态

Fig. 10 Failure mode of GFRP bolt

表 3 GFRP 锚杆拉伸破坏时的参数

Tab. 3 Parameters of tensile fracture of GFRP bolts

试样	最大荷载 (kN)	抗拉强度 (MPa)	最大力 总延伸率
1	123.3	801	2.07%
2	112.73(未断)	732.3	1.77%
3	114.45	743.5	1.74%
4	131.13	851.8	2.01%

4 结论

在万能试验机上用三维 DIC 方法研究了三种不同加载速率下,直径为 14mm 的 GFRP 锚杆试样的拉伸力学性能。实验结果表明:对于本文中的螺旋状锚杆试样,由于变截面的原因使得其轴向位移不再呈理想的线性分布,进而产生了非均匀应变场。因此,通过选取试样表面上的两个标距点,组成一个虚拟引伸计,来计算其拉伸应变。分别得到了其应力—应变曲线及弹性模量、抗拉强度、最大力总延伸率等参数。

(1) 四根 GFRP 锚杆试样的应力—应变曲线均呈线性分布,无明显屈服阶段,其破坏为脆性破坏。

(2) 实验结果对比表明,由三维 DIC 得到的锚杆弹性模量结果一致性优于传统的接触式引伸计方法。

(3) 就破坏时的抗拉强度而言,GFRP 锚杆试样约为 800MPa,优于普通钢材;而其破坏时的最大力总延伸率约为 1.94%,塑性较差。

参考文献:

- [1] 李国维,刘朝权,黄志怀等.应用玻璃纤维锚杆加固公路边坡现场试验[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):4056—4062(LI Guowei, LIU Chaoquan, HUANG Zhihui, et al. In-situ Test of Glass Fiber Reinforced Polymer Anchor on Highway Slope Reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2):4056—4062(in Chinese))
- [2] 孙会想,沈才华.玻璃纤维锚杆注浆加固掌子面效果研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):131—135(SUN Huixiang, SHEN Caihua. Research on Strengthening Effect of Grouting Glass Fiber Bolts for Tunnel Face[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(4):131—135(in Chinese))
- [3] 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 Handong, YU Xinzheng, LI Guowei. 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))
- [4] 刘广建,李小磊,曾新芳.新型锦纶、涤纶混杂玻璃纤维锚杆的拉伸试验研究[J].煤矿机械,2010,31(01):45—47(LIU Guangjian, LI Xiaolei, ZENG Xinfang. Experimental Study on Tensile Properties of a New Type Nylon/

- Polyester and Glass Fiber Hybrid Composites Bolts[J]. *Coal Mine Machinery*, 2010, 31(01): 45—47 (in Chinese))
- [5] 戴相录, 谢惠民, 王怀喜. 二维数字图像相关测量中离面位移引起的误差分析[J]. *实验力学*, 2013, 28(1): 10—19 (DAI Xianglu, XIE Huimin, WANG Huaixi. Analysis of the Error Caused by Off-plane Displacement in Two-dimensional Digital Image Correlation Measurement[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(1): 10—19 (in Chinese))
- [6] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The Effect of Out-of-plane Motion on 2D and 3D Digital Image Correlation Measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746—757.
- [7] Pan B, Yu L P, Wu D F, et al. Systematic Errors in Two-dimensional Digital Image Correlation Due to Lens Distortion[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(2): 140—147.
- [8] McNeill S R, Sutton M A, Miao Z, et al. Measurement of Surface Profile Using Digital Image Correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1997, 37(1): 13—20.
- [9] Orteu J J. 3-D Computer Vision in Experimental Mechanics[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(3-4): 282—291.
- [10] McGinnis M J, Pessiki S, Turker H. Application of Three-dimensional Digital Image Correlation to the Core-drilling Method[J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 45(4): 359—367.
- [11] Robert L, Nazaret F, Cutard T, et al. Use of 3-D Digital Image Correlation to Characterize the Mechanical Behavior of a Fiber Reinforced Refractory Castable[J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(6): 761—773.
- [12] Sutton M A, Ke X, Lessner S M, et al. Strain Field Measurements on Mouse Carotid Arteries using Microscopic Three-dimensional Digital Image Correlation[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2008, 84A(1): 178—190.
- [13] Soons J, Lava P, Debruyne D, et al. Full-field Optical Deformation Measurement in Biomechanics: Digital Speckle Pattern Interferometry and 3D Digital Image Correlation Applied to Bird Beaks[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2012, 14: 186—191.
- [14] Väänänen S P, Yavari S Amin, Weinans H, et al. Repeatability of Digital Image Correlation for Measurement of Surface Strains in Composite Long Bones[J]. *Journal of Biomechanics*, 2013, 46(11): 1928—1932.

Application of 3D-DIC in Tensile Mechanical Properties Test for Glass Fiber Reinforced Plastic Bolt

ZHU Fei-peng¹, WANG Jing-rong¹, LEI Dong¹, HE Xiao-yuan²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With glass fiber reinforced plastic (GFRP) is widely applied in rail traffic and slope reinforcement, its mechanical property measurement becomes particularly important. Based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) technique, tensile mechanical properties of GFRP bolt subjected to three different loading rates were studied and parameters such as stress-strain curve, modulus of elasticity, tensile strength and total elongation percentage produced by maximum force were obtained respectively. Experimental results indicate that the axial strain distribution of spiral specimen with variable cross-section is nonuniform. Modulus of elasticity result consistency of GFRP bolts obtained from 3D-DIC is better than that from conventional contact extensometer method, and the almost linear stress-strain curve of GFRP bolt indicates that this is a typical brittle material.

Keywords: three-dimensional digital image correlation (3D-DIC); modulus of elasticity; glass fiber reinforced plastic (GFRP); extensometer; tensile strength; elongation percentage