

DOI: 10.7652/xjtuxb201309019

玻璃纤维增强复合材料输电塔节点承载力试验研究及有限元分析

周磊¹, 汪楚清¹, 孙清¹, 王虎长², 赵雪灵²

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 西北电力设计院, 710075, 西安)

摘要: 为了推广玻璃纤维增强复合材料(GFRP)在输电线路中的应用,对 GFRP 进行了材料力学性能试验,获得了基本力学性能参数;进行了 6 个足尺寸 GFRP 节点试验,获得了节点构件的受力性能及破坏模式;对试验模型进行了有限元分析,数值结果与试验结果吻合较好。试验与数值分析结果表明:GFRP 具有很高的拉伸强度,并且顺纤维方向的拉伸强度远远大于垂直纤维方向的拉伸强度;GFRP 节点承载力高,可满足输电塔的安全要求,为方便 GFRP 节点设计,建议取主材轴向应变 5×10^{-3} 作为此种 GFRP 节点极限承载力临界值;节点的薄弱部位位于钢套管与复合材料管的连接处,节点连接方式是影响节点极限承载力的主要因素。

关键词: 玻璃纤维增强复合材料;节点;试验研究;有限元

中图分类号: TU311 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0112-07

Experimental Study and Finite Element Analysis on Ultimate Bearing Capacity of Joint of Glass Fiber Reinforced Polymer for Transmission Tower

ZHOU Lei¹, WANG Chuqing¹, SUN Qing¹, WANG Huchang², ZHAO Xueling²

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710075, China)

Abstract: To popularize the application of glass fiber reinforced polymer (GFRP) to power transmission tower, its mechanical properties are tested to obtain the fundamental mechanical parameters, and the performances and failure patterns of six full-scale GFRP connection joints are investigated. Static behaviors of the joints are also analyzed by the finite element model. Both experimental and numerical results show that GFRP material is endowed with high tensile strength, its tensile strength in parallel fiber direction gets extremely higher than that in transverse fiber direction, and GFRP joint with high bearing capacity can be used in transmission tower safely. The strain of 5×10^{-3} is suggested as critical value of GFRP joint ultimate strength for design. The weakest part of this joint is located in the connection of GFRP tube and steel bush, and the connection type becomes the main factor affecting the joint ultimate strength.

Keywords: glass fiber reinforced polymer; joint; experimental study; finite element

近年来,纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer,简称 FRP)作为一种新型材料已经在结构工程领域得到了广泛应用。由于 FRP 具有强度高、质量小、耐腐蚀、耐疲劳、耐高低温、电绝缘性好、易加工、运输方便、可设计性、维护成本低以及环境友好等优点,采用 FRP 材料代替钢材、混凝土已成为

输送电工程的一种发展趋势^[1]。纤维增强复合材料采用的纤维主要有碳纤维和玻璃纤维 2 种,碳纤维增强复合材料在许多方面性能优于玻璃纤维增强复合材料,但由于其导电性和价格昂贵,不适合应用于电力工程,因此输电结构中多采用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)^[2]。

输电杆塔分为单杆式和格构式 2 种。国外学者大多集中于对复合材料单杆塔的研究,例如对小径厚比圆管或锥形截面 FRP 输电杆的整体或局部屈曲研究^[3-7];一些学者还对 FRP 输电杆的动力特性进行了研究^[8-11]。在国内,首次将玻璃钢复合材料应用于荆门换流站接地极工程,并成功通过了真型变电构架试验^[12-13];李喜来等通过对 FRP 管件的试验结果进行统计分析,提出了采用“边缘破坏准则”的复合材料构件受压稳定承载力计算公式^[14]。

由于 GFRP 弹性模量低,为克服其变形大的缺点,一般采用格构式结构,然而,格构式复合材料杆塔致命的弱点是节点过多,特别是塔头部分,节点连接较为复杂。节点作为格构式输电塔连接的关键部位,受力复杂,在较大的载荷作用下能否保证必须的强度和刚度还没有经过试验论证,目前对复合材料节点连接问题的研究亦不多见。本文依托±660 kV 银川东换流站—红柳沟接地极线路工程,采用试验和有限元计算相结合的方法,对复合材料输电杆塔的节点力学性能进行研究。

1 力学性能试验

GFRP 试件的基体为环氧乙烯基酯树脂,纤维为玻璃纤维,采用拉挤成型工艺加工,比传统缠绕工艺更先进。为了解 GFRP 材料的力学性能,并为有限元计算提供基本力学参数,对 48 个试件进行了力学性能试验,获得了 GFRP 顺纤维方向和垂直纤维方向的抗拉强度、弹性模量和泊松比。

1.1 试件设计

试验试件按照《GB/T 1447—2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法》规定设计,由鞍山远达电网工程有限公司采用拉挤工艺制作,纤维的体积分数约为 70%,玻璃纤维为 E 玻纤。试件型式如图 1 所示,试件尺寸见表 1。

表 1 试件尺寸							
mm							
型式	L	L_0	L_1	L_3	b	b_1	d
型式一	180	50	55	115	10	40	4
型式二	180					40	4

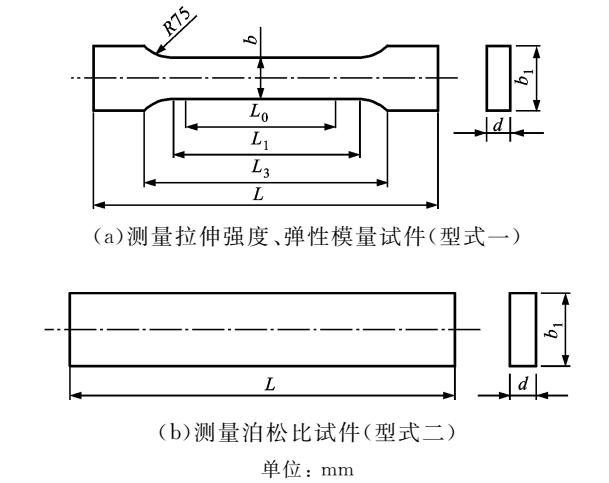


图 1 试件型式

1.2 试验仪器

拉伸试验采用上海华龙 WDW-300D 型材料拉伸试验机,该试验机精度可达 0.5 级,试验中可直接记录载荷、位移等数据。应变采集仪器为北戴河电子仪器厂生产的 CML-1H 型应变 & 力综合测试仪。图 2 所示为试件的测点布置,测点采用两向应变花。



图 2 测点应变花布置

1.3 力学性能及成本对比

GFRP 材料和输电塔传统材料的力学性能及成本对比如表 2 所示,可以看出:①GFRP 顺纤维方向的抗拉强度远远高于垂直纤维方向的强度,应充分利用其顺纤维方向的性能;②GFRP 的强度约为钢材的 2~4 倍,且后期维护费用低,综合效益高。

表 2 GFRP 与传统钢材的力学性能和成本对比

材料类型	强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	价格/ 10 ³ 元·t ⁻¹
GFRP (顺纤维方向)	774.33	44.638	0.281	13~18
GFRP (垂直纤维方向)	99.033	14.316	0.091	13~18
Q235 钢	235	206	0.3	4.0~4.5
Q345 钢	345	206	0.3	4.0~4.5
Q420 钢	420	206	0.3	4.5~5.0

注: GFRP 的强度值取抗拉强度,钢材的强度值取屈服强度;材料价格为目前市场价。

2 GFRP 节点试验

为了解 GFRP 节点的极限承载力、变形特点和失效模式,进行了节点试验。共设计了 6 个试件,分别进行了编号,其中 1 号和 2 号试件主材受拉,其他 4 个试件主材受压。

2.1 节点设计

试验节点为双 K 形节点,主体部分是 GFRP 管材,主材中部外套带有节点板的钢管,端部采用法兰连接,其余各支管端部外套钢管及焊接插板,通过螺栓连接保证各支管与主材的力传递。钢套管与复合材料管采用机械-胶粘混合连接(即在连接部位 GFRP 管外表面和钢套管内表面车出螺纹,在其间缠绕钢丝以产生一定的机械咬合力,然后涂上黏聚力极强的胶水,使粘合体固化)。为充分利用复合材料的抗拉性能,并反映节点的真实受力情况,加载时两边细斜杆受拉,中间杆受压。节点构造及主要几何尺寸如图 3 所示。

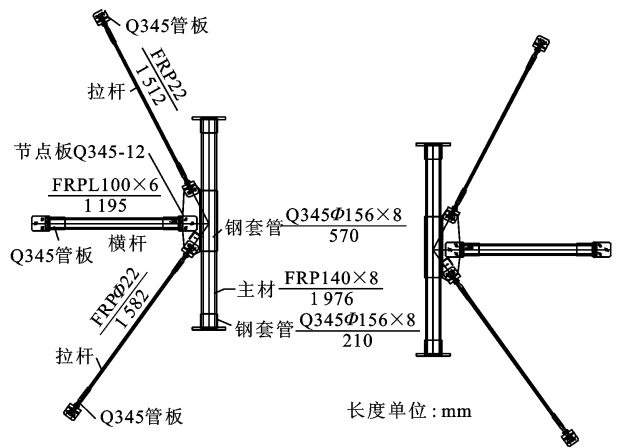
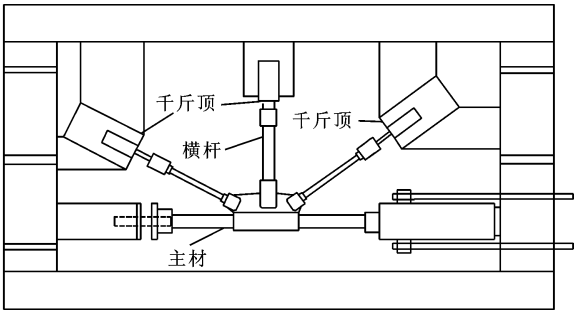


图 3 节点构造示意图

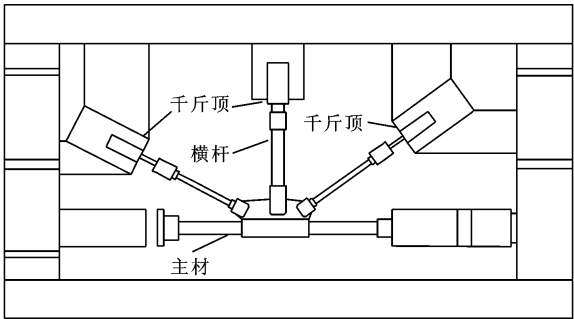
2.2 试验加载

针对 GFRP 节点的构造特点,本次试验设计、制造了相应的 H 型钢反力架。试验中采用了 2 000 kN 张拉千斤顶 1 个,1 000 kN 千斤顶 2 个,300 kN 张拉千斤顶 4 个。为确保同一型号的千斤顶在加载过程中的载荷同步,同一型号千斤顶由一个油泵控制,采用分油器分油加压。上述 7 个千斤顶共由 3 个油泵驱动。

由于主材受力方向不同,相应的加载方式也不同,如图 4 所示。主材受拉加载与受压加载的不同点在于反力架右部加载端的型式稍有差异。试验采用分级加载,共分为 6 级,各加载级载荷见表 3。



(a)节点主材受拉加载



(b)节点主材受压加载

图 4 节点试验加载示意图

表 3 加载方案

加载级	主材受拉节点 载荷/kN			主材受压节点 载荷/kN		
	主材	拉杆	横材	主材	拉杆	横材
1	108.9	23.64	15.31	181.5	11.82	15.31
2	217.8	47.28	30.62	363.0	23.64	15.31
3	326.7	70.92	45.93	544.5	35.46	30.62
4	435.6	94.56	61.24	726.0	47.28	30.62
5	544.5	118.2	76.55	907.5	59.10	45.93
6	653.4	141.8	91.86	1 089	70.92	45.93

注:试验中每加载一级载荷采集一次数据,直至试件破坏。

2.3 试验测试方案

在节点关键位置布置应变片或应变花,以便在试验过程中对节点的应变变化情况进行监测。立面测点布置见图 5,另一侧测点布置相同,在图中标号 1~8 位置及拉杆上布置单向应变片,钢套管和节点板上布置两向应变花。

试验采用三维摄影仪对试件整体变形和关键位置的位移进行观测,编码点均匀分布在节点表面各部位(见图 6)。

2.4 试验结果分析

2.4.1 位移 三维摄影测量系统可测得节点在不同加载级时的变形状态。图 7 为结构未加载和加载后的位移云图,通过对比可以很直观地观察节点构

件的整体变形趋势。

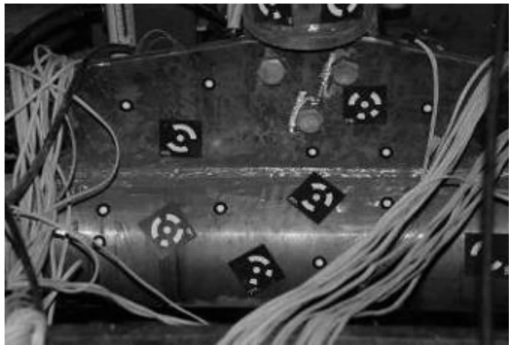
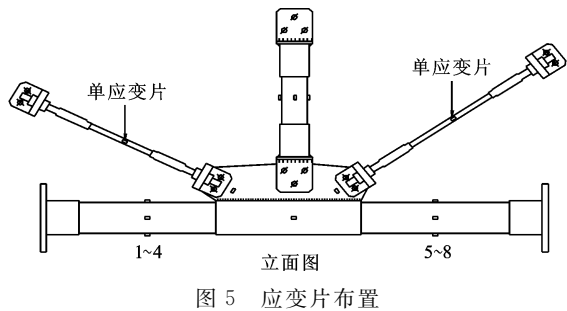
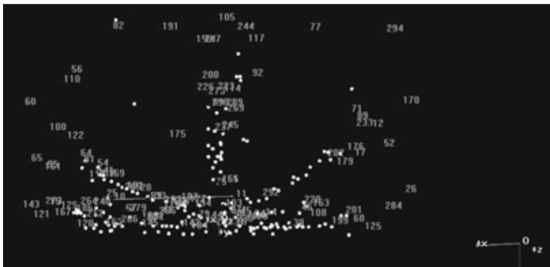
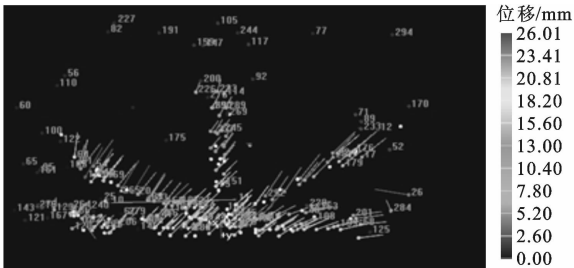


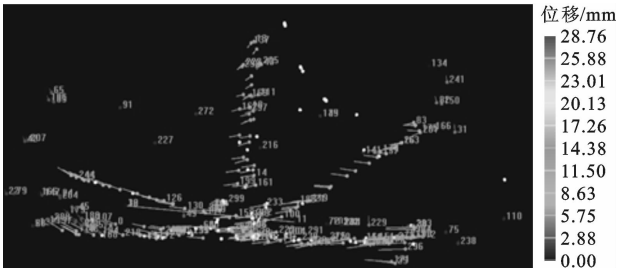
图 6 三维摄影测量系统编码点布置



(a)结构未加载时测点的位移状态



(b)第 6 加载级受拉节点的位移状态



(c)第 4 加载级受压节点的位移状态

图 7 节点测点的位移状态

图 7a 中的白点是在构件上布置的编码点,可以通过图 7b 和 7c 中编码点上的矢量线方向观察相应点处的位移方向,同时可按照矢量线的颜色对照旁边的谱图了解相应点的位移大小。三维测量结果表明:①主材受拉时,节点主要表现出斜向上的刚性位移,斜拉杆对主材变形影响很大,引起主材出现弯曲现象,破坏时主材中部挠度达到 20 mm;②主材受压时各个测点的位移几乎与主材受压方向平行,受压节点的变形主要集中在主材上,破坏时主材轴向位移达到 10 mm。

2.4.2 应变 为了分析试件破坏时其最大应变是否有一定的规律性,将采集到的各个试件的最大轴向应变列于表 4,并求出平均值。从表 4 可以得出以下结论。

(1)试件 1 与试件 2 为主材受拉试件,破坏时 2 个试件的主材最大应变值非常接近,分别为 5.113×10^{-3} 与 5.152×10^{-3} ,平均值分别为 3.373×10^{-3} 及 3.327×10^{-3} ,也非常接近。钢材与 GFRP 的弹性模量相差 4 倍,在二者连接处的位移不协调是造成节点破坏的主要原因。建议把 5×10^{-3} 作为主材受拉试件轴向应变的临界值。

(2)试件 3 和试件 5 的主材最大应变为 4.149×10^{-3} 和 4.818×10^{-3} ,试件 4 和试件 6 的主材最大应变分别为 6.557×10^{-3} 和 6.284×10^{-3} 。试验结果偏差较大,原因可能是试件加工质量存在差异,导致承载力不同,因此要想保证 GFRP 构件具有可靠的承载力,就必须严格控制其制造质量,制订 GFRP 构件设计导则势在必行。

(3)各个试件不同测点的应变具有一定的离散性,例如试件 1 的最小应变为 1.491×10^{-3} ,而最大应变为 5.113×10^{-3} ,相差 3.622×10^{-3} ,原因是部分节点在加载过程中出现了不同程度的弯曲,这与三维测量观测结果是一致的。

表 5 为主材中部钢套管及节点板上的测点测得的最大应变值。节点板上共有 4 个螺栓孔,每个螺栓孔附近布置一个应变花。应变花的一个方向平行于拉杆,另一个方向垂直于拉杆。另外,在套管上相隔 180° 布置了 2 个应变花(测点 5 和 6)。表 5 中前 8 组数据是节点板上的测点结果,后 4 组数据是钢套管上的测点结果。表示测点位置的 2 个数字,前一个代表测点,后一个代表平行于拉杆方向(1)或垂直于拉杆方向(2)。从表 5 中可以看出:节点板和钢套管上面的应变值普遍比较小,说明节点钢材连接部件处于弹性状态,足够安全;试件不同测点处的

应变值具有一定的离散性,表明节点板和钢套管受 力不均匀。

表 4 主材的最大轴向应变

试件	最大载荷 /kN	最大轴向应变/ 10^{-3}								应变平均 值/ 10^{-3}
		测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	
1	871.2	3.433	1.491	2.671	5.113	3.829	1.964	4.343	4.138	3.373
2	217.8	2.928	2.592	3.454	3.463	5.152	3.416	2.217	3.391	3.327
3	544.5	3.173	3.328	4.121	4.046	4.149	3.518	3.139	4.128	3.700
4	726.0	4.915	6.557	5.301	3.744	5.143	4.674	5.203	6.115	5.207
5	290.4	3.044	2.312	3.346	3.399	3.197	4.818	2.574	1.457	3.018
6	816.8	4.240	4.144	3.989	3.801	5.810	6.284	5.077	4.914	4.782

注:最大载荷为采集到的最大应变对应的载荷值。

表 5 钢构件的最大应变

试件	最大应变/ 10^{-6}											
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	5-1	5-2	6-1	6-2
1	151	195	21	260	181	98	568	190	382	70	359	-15
2	51	21	270	21	125	37	66	41	100	52	-41	35
3	-188	126	31	100	21	61	28	34	43	88	-75	-21
4	-20	-26	139	-31	32	29	-934	-6	69	-11	-208	-13
5	-5	10	-270	-33	81	45	76	168	61	48	-47	8
6	77	-213	-49	-31	121	-201	39	-92	0	-24	-166	-21

3 有限元分析

3.1 有限元计算模型

通过 SolidWorks 建立节点的实体几何模型,如图 8 所示。建模过程中不考虑螺栓对节点受力性能的影响,采用 Ansys 推荐的耦合方式模拟螺栓的作用,保证螺栓连接处载荷的传递与变形协调,如图 9 所示。在相同的试验边界条件和受力情况下对试件进行分析,采用网格划分软件 hypermesh 对节点结构的实体模型划分网格。有限元模型和边界条件见图 10,有限元模型共计 32 514 个单元,58 476 个节点。

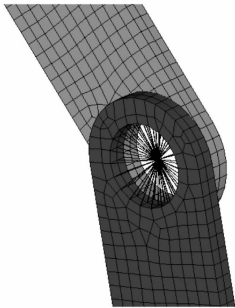


图 9 耦合示意图

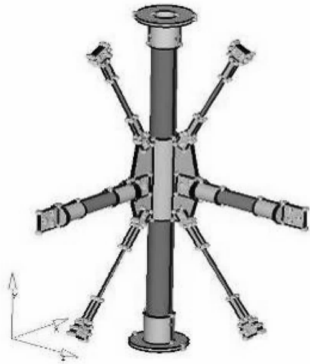


图 8 节点的实体几何模型



图 10 有限元模型和边界条件

GFRP 为正交各向异性材料,本构关系较复杂,完整描述力学行为的材料参数多达十几种,这些参数由试验确定比较困难,对于实际工程而言也没必要精细到这种程度。因为格构式结构杆件主要为拉压杆,主要作用力方向沿杆件轴向,考虑到环向纤维的贡献,GFRP 的主要力学指标可只考虑纵、横 2 个方向,即顺纤维和垂直于纤维方向,相应的力学参数由前述力学性能试验准确测得。有限元模型采用 Solid45 单元,各个 GFRP 构件的长度方向赋予顺纤维力学参数,环向赋予垂直纤维力学参数,根据 Ansys 中正交各向异性单元方向的规则,在划分网格和赋予材料参数时正确设置局部坐标系和单元坐标系,如图 11 所示。钢材构件采用理想弹塑性本构。模型胶体本构也很复杂,模型中假设胶体不会出现剪切破坏,钢材与 GFRP 的变形同步,即钢材与 GFRP 的连接处视为刚接。

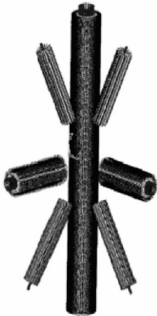


图 11 单元坐标系

3.2 数值结果与试验结果对比

限于篇幅,本文仅将主材受拉构件(1 号节点)的有限元计算结果与试验结果进行比较,以验证节点有限元分析结果的可靠性。

3.2.1 位移比较 有限元计算的整体位移云图见图 12,对比位移云图与三维光学变形矢量图可以看出,结构的变形趋势基本保持一致,节点整体都是斜向上弯曲变形,主材最大位移主要集中在主材中部(靠近主材受力端)。

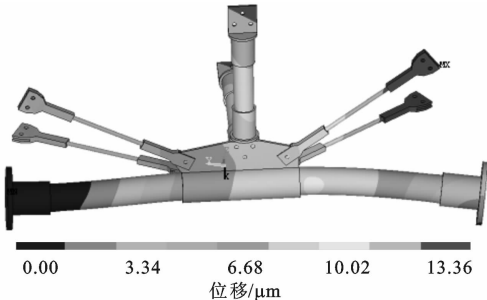


图 12 1 号节点的位移云图(载荷 4 级)

由于试验中的试件破坏全部在主材部分,所以这里只给出主材受力端轴向位移的比较结果,见表 6,可见在各个载荷级下主材的压缩量值很接近,有限元计算结果偏小,说明前述有限元模型处理偏刚性,而实际上钢材与复合材料连接处的胶体存在剪切滑移。

表 6 有限元计算位移与试验结果的比较

载荷级	试验压缩位移/mm	计算压缩位移/mm
1	2.174	1.620
2	3.584	3.200
3	5.330	4.800
4	7.363	6.399

3.2.2 应变比较 对主材上 8 个测点测得的轴向应变与有限元计算应变进行比较,结果见表 7,可以发现以下规律:两者的应变分布基本相同,特别是在前 3 级载荷下,试验与计算结果吻合较好,而在第 4 级载荷下计算结果明显大于试验结果,实际上当载荷分别为 308.55、363 和 417.45 kN 时,试验中试件发出较大响声,可能此时主材纤维已逐渐出现断裂,引起结构内部受力重新分布,使得第 4 级载荷下的试验结果较计算结果小很多。

图 13 为节点有限元计算的应变分布图,可以观察到主材上与钢套管连接的部位应力应变比较大,应力集中很明显。应力集中主要是因为主材 GFRP 的弹性模量比钢材小很多,当结构受外载荷作用时 GFRP 的变形和挠度都较大,在连接处产生较大的弯矩,“受拉区”和“受压区”纤维迅速变形,从而导致了应力集中。考虑到当主材载荷为 308.55、363 和 417.45 kN 时试件发出较大响声的试验现象,以及结构在载荷为 308.55 kN 时主材连接处的应变约为 5×10^{-3} ,因此建议以 5×10^{-3} 作为主材连接处胶接所能承受的最大应变。试验中试件的破坏位置与

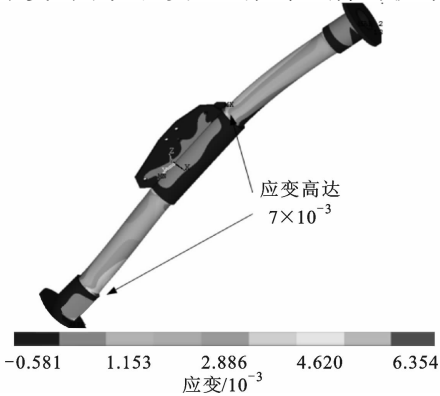


图 13 1 号主材的轴向应变分布(载荷 4 级)

应力集中的位置完全一致,在此发生节点板套管脱胶并产生破坏。

表 7 有限元计算应变与试验结果的比较

载荷级	应变片位置	试验应变/ 10^{-3}	计算应变/ 10^{-3}
1	1	0.931	0.769
	2	1.333	1.072
	3	0.785	0.763
	4	0.371	0.328
	5	1.429	0.851
	6	1.719	1.465
	7	0.652	0.727
	8	0.327	0.024
2	1	1.182	1.412
	2	1.827	1.854
	3	1.030	1.397
	4	0.686	0.948
	5	2.002	1.651
	6	2.476	2.886
	7	1.251	1.410
	8	0.659	0.052
3	1	2.046	2.100
	2	2.569	2.617
	3	1.606	1.982
	4	1.363	1.584
	5	2.888	2.440
	6	3.354	4.330
	7	2.076	2.105
	8	1.276	0.078
4	1	2.335	2.718
	2	2.881	3.490
	3	1.772	2.643
	4	1.724	2.048
	5	3.272	3.061
	6	4.022	5.773
	7	2.794	2.884
	8	1.462	0.104

综上所述,有限元分析结果可以较好地反映出节点的受力变化特点。计算和试验结果都表明,GFRP 与钢套管的连接处有较大的应力集中,使得结构容易发生脱胶,并产生破坏。因此,在设计中要特别关注 GFRP 与钢套管的连接。

4 结 论

通过 GFRP 的力学性能试验、节点试验以及有限元分析,可以得出以下结论。

(1)GFRP 具有很高的抗拉强度,并且顺纤维方向的抗拉强度远远大于垂直纤维方向的强度,可以

按照构件中的主应力方向布置纤维的主方向,使材料性能充分发挥。

(2)为方便 GFRP 节点设计,根据试验结果,建议取主材轴向应变 5×10^{-3} 作为此种 GFRP 材料节点极限承载力的一个临界值。钢材节点板上的应变较小,说明其具有很高的安全储备能力,可满足实际工程应用的需要。

(3)试验和有限元计算结果均显示节点破坏集中在钢套管与 GFRP 管的连接部位,因此节点的连接强度是影响节点承载能力的关键因素。

(4)有限元计算存在一定误差,建立精细模型需考虑各个方向上拉、压、弯部分的弹性模量、剪切模量、泊松比和强度,同时要考虑 GFRP 与钢套管连接部位胶体的弹性模量和剪切强度。

参考文献:

[1] FUJIKAKE K, MINDESS S, XU Hanfeng. Analytical model for concrete confined with fiber reinforced polymer composite [J]. ASCE Journal of Composites for Construction, 2004, 8(4): 341-351.

[2] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用于结构工程创新 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 1-5.

LU Zhitao. Application of high performance FRP and innovations of structure engineering [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 1-5.

[3] IBRAHIM S M. Performance evaluation of fiber-reinforced polymer poles for transmission lines [D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 2000.

[4] IBRAHIM S, POLYZOIS D. Ovalization analysis of fiber reinforced plastic poles [J]. Composite Structures, 1999, 45 (1): 7-12.

[5] MASMOUDI R, MOHAMED H, METICHE S. Finite element modeling for deflection and bending responses of GFRP poles [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, 27(6): 639-658.

[6] METICHE S, MASMOUDI R. Full scale flexural testing on fiber reinforced polymer (FRP) poles [J]. The Open Civil Engineering Journal, 2007(1): 37-50.

[7] SABOORI B, KHALILI S M R. Static analysis of tapered FRP transmission poles using finite element method [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(3): 247-255.

[8] POLYZOIS D J, RAFTOYIANNIS I G, UNGKURAPINAN N. Static and dynamic characteristics of multi-cell jointed GFRP wind turbine towers [J]. Composite Structures, 2009, 90(1): 34-42.

(下转第 125 页)