

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.007

碳纤维布加固超役混凝土电杆的破坏机理及力学性能

陈宗平^{1a,1b}, 徐金俊^{1a}, 夏开全², 张超荣^{1a}, 周春恒^{1a}

(1. 广西大学 a. 土木建筑工程学院; b. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100055)

摘要:以某电网某路段超过服役期的钢筋混凝土电杆为研究对象,选取电杆杆身与跨中带钢圈接头的杆身试件各 6 根,其中各取 3 根试件采用碳纤维布(CFRP)沿杆件纵向进行加固,并对其进行了抗弯承载力试验,对比研究在不同的碳纤维布黏贴层数下加固电杆的受力性能和破坏机理。基于试验实测数据,对强度及刚度计算方法进行了研究,并提出了刚度退化的数学表达式。研究结果表明:采用碳纤维布加固电杆后,其破坏表现为混凝土与碳纤维布的表面粘脱失效所致,纵向碳纤维布被拉断作为最终破坏形态,破坏过程迅速,脆性明显;试件的截面应变分布符合平截面假定。加固前杆身试件的承载力退化严重,加固后混凝土电杆的承载能力和刚度均有显著提高,但加固电杆的损伤发展较加固前提早,且快而集中,综合多方面考虑,建议在混凝土电杆接头附近的一定距离内采取双层、杆身其余部位采用单层的碳纤维布加固方法。

关键词:混凝土电杆;碳纤维布;加固;承载力;刚度;损伤

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0038-09

Failure Mechanism and Mechanical Properties of CFRP Strengthened Super-servicing Reinforced Concrete Poles

Chen Zongping^{1a,1b}, Xu Jinjun^{1a}, Xia Kaiquan², Zhang Chaorong^{1a}, Zhou Chunheng^{1a}

(1a. College of Civil Engineering and Architecture; 1b. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, P. R. China)

Abstract: Super-servicing reinforced concrete poles (RCP) which come from a road section in a power grid, including six pole shafts and six specimens with a mid-span steel joint, were selected as samples to conduct a flexural strength test, in which three shafts and three poles with steel joint in the middle span were strengthened by CFRP in the longitudinal direction. The mechanical behavior and failure mechanism under different CFRP layers pasted were comparatively studied. Based on the measured test data, the calculation methods of strength and stiffness were investigated, and the mathematical expression of stiffness degradation mechanism was proposed. The result shows that the final failure mode of CFRP strengthened poles is the local bond failure between CFRP material and the external concrete, and the longitudinal CFRP is snapped. The process of damage is rapid and brittleness. The mean strain of cross-section is in accord with the assumption of plane cross-section. The strength degradation of shaft specimens without

收稿日期:2012-11-16

基金项目:国家自然科学基金(50908057、51268004);“八桂学者”建设工程专项经费资助

作者简介:陈宗平(1975-),男,教授,博士生导师,主要从事钢与混凝土组合结构、再生混凝土结构、异形柱结构及结构检测加固研究,(E-mail)zpcchen@gxu.edu.cn.

strengthened is throughly serious. As for the strengthened poles, the bearing capacity and stiffness under each forcing stage are improved with different levels. The damage of strengthened specimens develops faster and more intensive than that of none-strengthened ones. When multi-aspects are synthetically considered, there is a suggestion that double layers of CFRP should be pasted along the longitudinal in the joint of the site within a certain distance, and the single layer of CFRP should be adopted in the shaft.

Key words: reinforced concrete poles; CFRP; strengthen; bearing capacity; stiffness; damage

随着电网建设的日趋紧密,各类在役输电线路工作性能的好坏将直接关系到国民经济的发展,混凝土电杆普遍应用于广大城镇与农村的输电线路中,其安全性是保证送电线路正常运营的关键。为此,学者们对混凝土电杆的力学性能进行了大量研究,并取得了重要成果,如夏开全等^[1-3]开展了对预应力混凝土电杆和普通混凝土电杆的承载性能试验;方永浩等^[4]进行了锥形电杆的受力分析及有限元模拟;高润东等^[5-7]对离心成型预应力/钢筋钢纤维混凝土电杆做了相关试验和理论分析。对于服役一定年限后,电杆受环境侵蚀、人为破坏等因素的影响,其力学性能和耐久性能必定有所降低,特别是超过服役期限的混凝土电杆,杆件的受损程度更加严重,因此,很有必要对超役电杆进行相关加固研究。实际工程中的混凝土电杆往往通过钢圈连接接头将各单杆相互连接,以致满足架设所需的高度,针对杆身与连接接头不同的力学性能,研究采取不同的加固方式从而提高电杆的相关承载指标,对延长电杆的服役寿命具有现实意义。

受冰冻、雨雪、泥石流等恶劣的自然灾害影响,中国南方电网各路线运行情况有待进一步评估,而位于其中西南线路的钢筋混凝土电杆因服役年代久远,各项性能指标都有较大程度的退化。因碳纤维布加固结构具有较好的力学性能以及能减少后期维护费用^[8-18],本文选取其中某路段1959年开始服役的混凝土电杆12根,包括杆身试件和跨中带钢圈连接接头的杆身试件各6根,并对其采用碳纤维布(CFRP)进行相关加固,旨在考证该类构件经此方式加固后的受力性能及破坏机理,并为工程加固提供设计参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

结合该线路的安全评定与加固工作,所有试件均为现场选取具有一定代表性的杆件,截取后运回实验室,通过回弹法实测数据推定该批试件的混凝土轴心抗压强度换算值为22.8 MPa;试验结束后,量测截取的钢筋,测试结果为:该批试件的纵向钢筋直径为8 mm、屈服强度为401 MPa,极限强度为475 MPa,伸长率为27.5%;连接接头的钢圈厚度为8 mm,长度为200 mm。本文采用武汉长江加固技术有限公司生产的CJ300型碳纤维布和配套的YZJ-CQ纤维复合材料浸渍粘结用胶作为加固材料。

1.2 试件制作

12个试件分2批进行,第1批为6根杆身试件,第2批为6根跨中带钢圈连接接头的试件,各取一半进行碳纤维布加固。所有试件杆长为4.2 m,其混凝土环形截面外径为400 mm、内径为300 mm、壁厚为50 mm;钢筋形心所在圆半径为169 mm,共16根。

首先通过砂轮机打磨等手段,将试件混凝土、钢圈外表浮层及锈蚀层清理干净,然后用工业丙酮清洗。CFRP的粘贴:第1批试件有2根为双层粘贴、1根为单层粘贴,并且在纵向CFRP的外表面粘贴环向CFRP环箍,环箍的宽度为10 cm,2环箍之间的净距为20 cm;第2批试件中,1根为双层粘贴,2根为单层粘贴,并在纵向CFRP的外表面粘贴环向CFRP环箍,环箍的宽度为50 cm,两环箍之间的净距为20 cm,环箍的粘贴顺序是从中间钢圈环箍两侧往两端头按净距20 cm逐一粘贴,各试件概况见表1。

表1 试件概况

试件编号	加固情况	试件编号	加固情况	试件编号	加固情况	试件编号	加固情况
RCP-1	未加固	RCP-(1)CFRP-1	纵向单层 CFRP	RCP-J1	未加固	RCP-(1)CFRP-J1	纵向单层 CFRP
RCP-2	未加固	RCP-(2)CFRP-2	纵向双层 CFRP	RCP-J2	未加固	RCP-(1)CFRP-J2	纵向单层 CFRP
RCP-3	未加固	RCP-(2)CFRP-3	纵向双层 CFRP	RCP-J3	未加固	RCP-(2)CFRP-J3	纵向双层 CFRP

注:RCP代表混凝土电杆;CFRP前数字为纵向黏贴碳纤维布层数;J为接头。

1.3 加载装置与加载制度

试验采用千斤顶通过分配梁加载,在各支点处采用特制的半圆形支座,试件两端为特制的滚轴支座。为了量测试件变形、内力分布等数据,在支座和跨中部位布置相应电子位移传感器,并在钢圈和杆身的相应部位粘贴电阻应变计,试验数据由日本 DTS602 数据采集系统自动采集。试件的加载装置及截面相关信息见图 1。

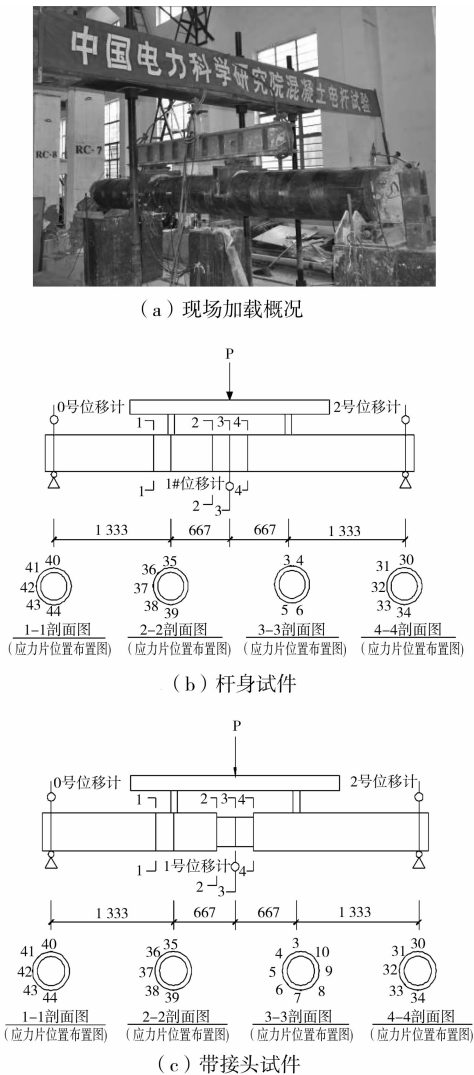


图 1 2 批电杆加载装置及布表(片)概况

试验采用荷载控制的加载制度,先预载,后以预估极限荷载的 5% 作为步长分级加载,为方便采集和

观察,每级荷载维持恒定时间为 5~10 min。

2 试验结果及分析

2.1 试验过程及破坏形态

在加载初期,所有试件荷载的增加与位移变化均呈线性关系,对比试件(未作 CFRP 加固电杆)表面混凝土无环向裂缝出现,加固试件表面的碳纤维布无拉断现象。当荷载增加至一定水平,第 1 批未加固试件在接近跨中处开始从截面底部出现环向微裂缝,第 2 批对比试件则在分配梁至钢圈之间的混凝土出现环向裂缝,并不断向顶部发展,而其余试件均无开裂现象。随着荷载的加大,第 1 批的对比试件截面底部和上部钢筋先后达到屈服,且裂缝增宽加深,加固的杆身试件截面上下边缘钢筋分别达到屈服;第 2 批试件中除黏贴双层碳纤维布的电杆外,其余加固试件均表现为钢圈底部和顶部钢材先后进入屈服状态,但未加固试件的钢圈应变值较小。继续加大荷载,所有加固试件在跨中位置附近听到一些碳纤维布与表面混凝土粘结脱离的撕裂声,但并没有发现任何开裂或 CFRP 材料断裂现象。荷载持续增加,此后每增加 1 级,都会听到类似的响声,当加载至接近破坏荷载时,在分配梁支座位置下端听到一声“轰”的巨响,发现在 2 条环向 CFRP 环箍之间的纵向碳纤维布被拉断,露出拉断的碳纤维丝,且 CFRP 被拉断处冒出混凝土粉末,试件的挠度急剧增大,荷载无法再增加,试验结束。试验结束后,撕掉拉断的 CFRP 发现,冒出的混凝土粉末是由于粘贴 CFRP 用的结构胶把表面混凝土拉脱引起。未加固试件则在靠近分配梁支座处断裂破坏。

综合破坏现象来看,2 批电杆中的对比试件均为混凝土受拉开裂,第 1 批试件为上下部钢筋先后达到屈服,而第 2 批的接头钢圈未能进入屈服,受压区混凝土并不压溃,破坏过程迅速,属“少筋梁”破坏;受 CFRP 加固试件的破坏为 CFRP 材料与表面混凝土产生局部粘结脱离,最后是 CFRP 环箍之间的纵向 CFRP 被拉断,其过程较为迅速,脆性性质明显,剥离 CFRP 布后,混凝土无压溃。部分试件的破坏形态见图 2。

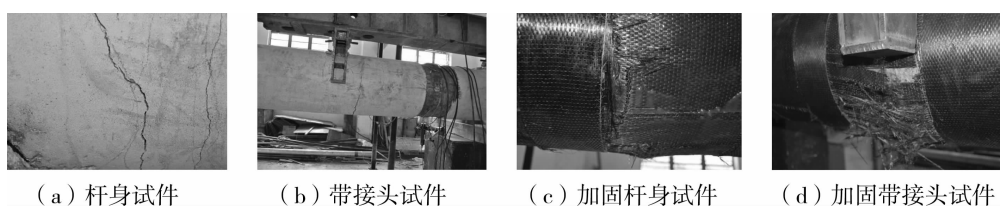


图 2 部分试件的破坏形态

2.2 截面应变特征

图3和图4为2类试件纯弯段内位于表面混凝土和表面碳纤维布的截面平均应变变化规律,图中曲线表示应变在各级荷载水平下沿截面高度的分布特性,其中横坐标对应图1中相应剖面的环向角度($^{\circ}$),纵坐标表示均值应变。从图3、图4可见,2类试件的截面应变大致符合平截面假定。对于第1批杆身试件,未加固电杆由于混凝土开裂后退出工作,主要为试验弹性阶段的应变分布,加固试件在加载

后期,特别是当试件接近破坏时,受拉区(T)的截面应变呈现出一定的曲线形态,如试件RCP-(2)CFRP-2底部拉区测点的应变突降,这可能是由于受拉区边缘范围混凝土裂缝受碳纤维布约束而发展缓慢,从而相互制约,导致CFRP的应变在此处有所降低;对于第2批带接头试件,加固试件的截面中性轴较之对比试件离受压区(C)边缘更为接近,拉区应变相对加大。

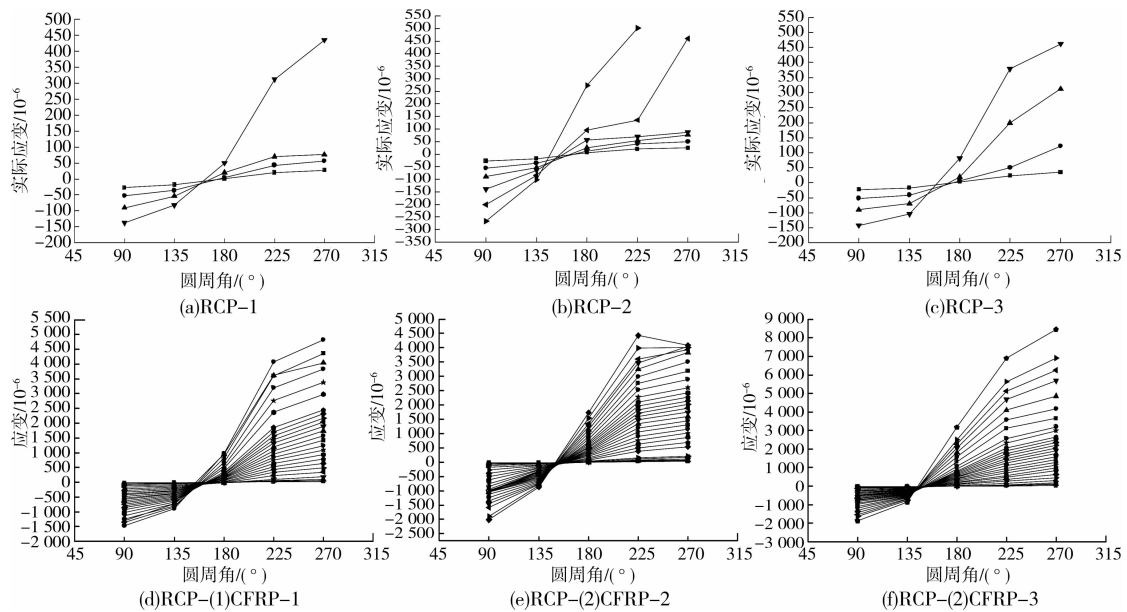


图3 杆身试件截面应变分布规律

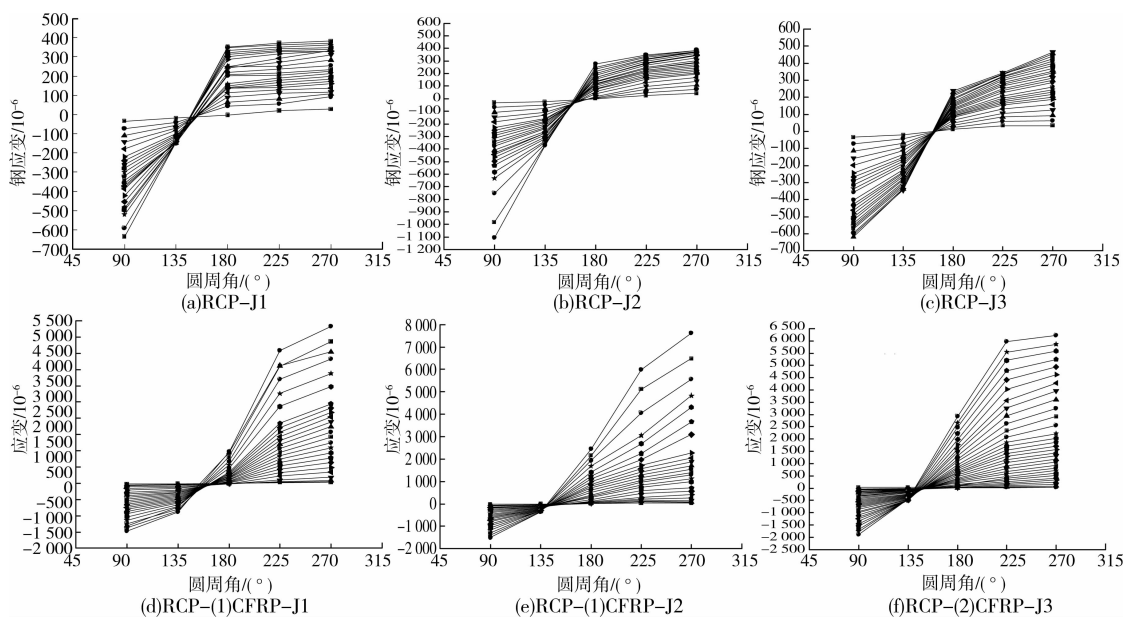


图4 接头试件截面应变分布规律

2.3 荷载-跨中挠度曲线

图5为所有试件的荷载-跨中挠度曲线。从图5可见,2批试件曲线的发展趋势大体相似:加固前的

试件都经历了线弹性阶段、弹塑性阶段以及荷载水平段;加固后的试件则表现为弹性增长段、弹塑性发展段。在曲线的开始阶段,不同模式下的试件荷载-

跨中挠度曲线保持一直线且相互重合,当经过一小段的重合期后,受加固的试件与对比试件曲线逐渐分离,但后者发展较为缓慢。随着荷载的增长,加固与未加固试件曲线各自保持较好的重合,此时非线性性质开始有所发展。从图 5(a)、(b)中 2 种加固方式的曲线可见,位于初期的曲线基本重合,与 CFRP 黏贴层数的关系不大,但随着加载进入末期或塑性发展段后,采取双层 CFRP 黏贴的试件曲线变得更陡。图 5(a)中可以显著看出,加固试件的强度和刚度有了明显提高,但变形能力更差,主要是由于采用 CFRP 加固后试件的破坏形态发生了改变,其表现为 CFRP 与混凝土之间的粘脱失效和 CFRP 被拉断,而 CFRP 就是一种脆性材料,破坏时无明显的预兆。因此,加固后电杆的脆性加大、延性变差,但其强度和刚度却得到了显著提高,一方面外加的 CFRP 材料本身就有很强的抗拉能力,其次,外包的 CFRP 对其内部的混凝土起到很好的约束作用,使得内部混凝土强度得到提高,从而导致其强度和刚度的提高。

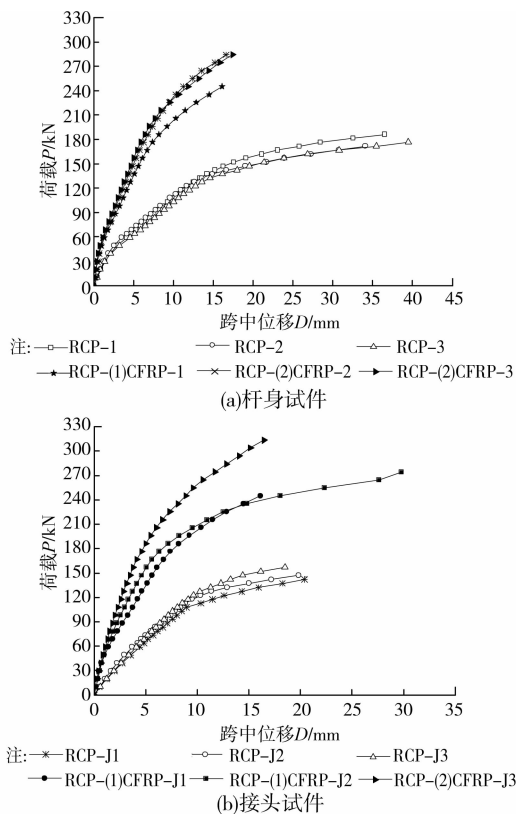


图 5 试件荷载-挠度曲线

3 极限承载力

3.1 极限荷载对比分析

图 6(a)所示为杆身试件的极限承载力分布概况。由图可知,经碳纤维布加固后,电杆杆身的承载

能力得到较大改善,纵向黏贴单层 CFRP 试件的极限荷载是对比试件的 1.32~1.43 倍,采用双层黏贴的试件极限值约是未加固试件的 1.62 倍。

图 6(b)所示为带接头杆身试件的极限承载力分布情况。从图中可见,对比加固前后的极限荷载,采用单层 CFRP 加固后的值相比加固前有了很大的提高,约为 75%;而以双层 CFRP 加固的试件极限荷载比未加固接头试件增大 111%,效果极为明显。

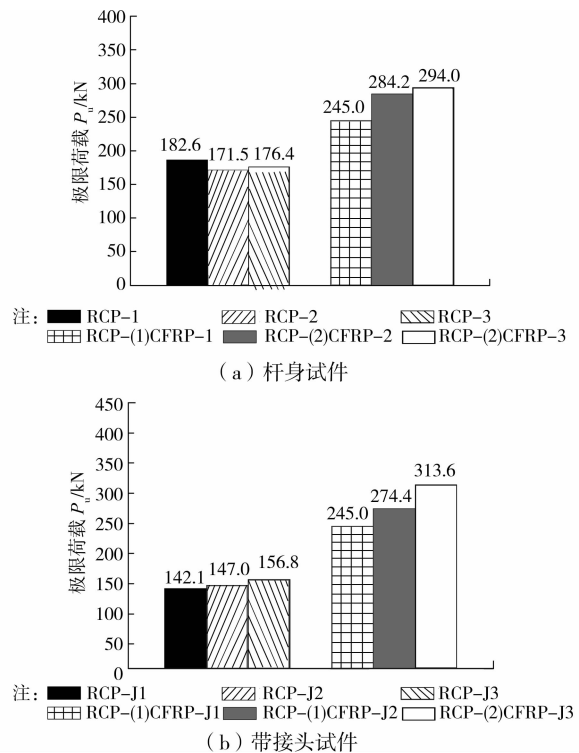


图 6 极限承载力分布概况

3.2 正截面承载力计算

因该路段电杆服役期已超过相应年限,且其超龄时间较长,杆件老化情况严重,为了明确电杆杆身受 CFRP 加固后所具有的承载能力,根据电力行业规范 DL/T 5154—2002《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》^[19]的规定,进行相应计算分析。环形截面受弯构件的正截面承载力可按式(1)~(3)计算:

$$M \leq f_c A (r_1 + r_2) \frac{\sin \pi \alpha}{2\pi} + f_s A_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{f_s A_s}{f_c A + 2.5 f_s A_s} \quad (2)$$

$$\alpha_t = 1 - 1.5 \alpha \quad (3)$$

式中: M 为弯矩设计值, $N \cdot mm$; r_1 为电杆的内半径, mm ; r_2 为电杆的外半径, mm ; r_s 为纵向普通钢筋所在圆的半径, mm ; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, MPa ; f_s 为钢筋抗拉强度设计值, MPa ; α 为受

压区混凝土截面面积与全截面面积的比值; α_t 为受拉纵向钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值,当 $\alpha > 2/3$ 时,取 $\alpha_t = 0$;A为混凝土截面面积, mm^2 。其中各值均按试验实测值计,计算结果列于表2中。

表2 杆身试件的试验值和计算值对比

试件编号	试验值 /kN	计算值 /kN	试验/计算
RCP-1	186.2	221.5	0.84
RCP-2	171.5	221.5	0.77
RCP-3	176.4	221.5	0.79
RCP-(1)CFRP-1	245.0	221.5	1.11
RCP-(2)CFRP-2	284.2	221.5	1.28
RCP-(2)CFRP-3	294.0	221.5	1.33

由表2可见,加固前的所有杆身极限承载力均低于计算值,说明老旧电杆的承载能力退化严重;而经CFRP的加固,杆身所具有的承载能力得到相应提高,且不同的碳纤维布黏贴层数具有较大影响。

综合多方面考虑,由于接头处为整根电杆的薄

弱部位,本文建议在接头部位的一定距离内采取纵向黏贴双层碳纤维布进行加固,而其余杆身处则以纵向单层碳纤维布给予补强。

4 刚度及损伤分析

4.1 刚度及退化规律

表3所示为所有试件加载初期的弹性刚度及加固杆件相对于未加固电杆的变化幅度,各值取弹性状态时的平均值,其中以对比试件的刚度值作为基准。由表3可见,对比2类加固前的杆件,带钢圈接头试件的弹性刚度略小于杆身试件的刚度,这可能是由于钢圈接头与混凝土连接处产生一定的锈蚀和碳化,导致接头连接性能退化;对于第1批试件,CFRP加固后的杆身刚度较之对比试件有了较大的提高,但与纵向黏贴碳纤维布层数的关系不明显,单层者与双层黏贴试件值较为接近;对于跨中带钢圈接头试件,经碳纤维布加固后,弹性刚度有了很大程度的提高,黏贴双层试件的值约是单层碳纤维布的2倍,不同数量的纵向碳纤维布对弹性刚度的贡献较为明显。

表3 电杆试件弹性刚度

试件编号	$K_e / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	提高倍数	试件编号	$K_e / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	提高倍数
RCP-1	21.2		RCP-J1	18.3	
RCP-2	22.4		RCP-J2	18.0	
RCP-3	23.0		RCP-J3	16.6	
RCP-(1)CFRP-1	61.8	1.8	RCP-(1)CFRP-J1	61.8	2.5
RCP-(2)CFRP-2	56.3	1.5	RCP-(1)CFRP-J2	55.4	2.1
RCP-(2)CFRP-3	68.4	2.1	RCP-(2)CFRP-J3	117.9	5.7

图7为试件刚度在加载全过程中的分布情况。由图可知,随着荷载水平的提高,绝大部分试件的刚度变化表现为:位于加载初期的值较为稳定,随后当荷载有了较大提高后,其值迅速减小,之后刚度衰减幅度有变小的趋势,最终趋于稳定地降低。除个别试件外,加固者与对比试件的刚度退化过程较为相似,但位于弹性末期时,加固试件值较之初期有个上升的过程,这可能是碳纤维布开始参与较多抗弯贡献所起的作用。对比可见,无论是杆身试件还是带接头试件,经碳纤维布加固后,电杆受力各阶段的刚度均较之未加固试件的大;图7(a)所示,虽然加固试件的前期刚度较为接近,但当试件处于弹塑性发展阶段时,黏贴的CFRP层数对刚度的影响还是具有显著的区别,单层试件值比双层试件的小。

4.2 刚度退化的数学描述

从各试件的荷载-刚度曲线可知,对于加载初期,由于荷载和位移大致呈线性变化,因此假定此时的刚度可近似按水平直线描述;随着荷载的增加,刚度逐渐衰减,其曲线大体上表现为指数函数的形式,通过获取荷载-挠度曲线上的特征点荷载以及特征点刚度,并经数学拟合后,提出了以下经验公式:

$$K = \begin{cases} K_e & 0 < P \leq P_e \\ K_e e^{-kP} & P_e < P \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_e 为初始弹性刚度; P_e 为弹性极限荷载。 k 为拟合系数,建议取值如下:未加固的杆身试件, $k = 0.0158$;加固后的杆身试件, $k = 0.0072$;未加固的接头试件, $k = 0.0149$;加固接头后的试件, $k = 0.0098$ 。

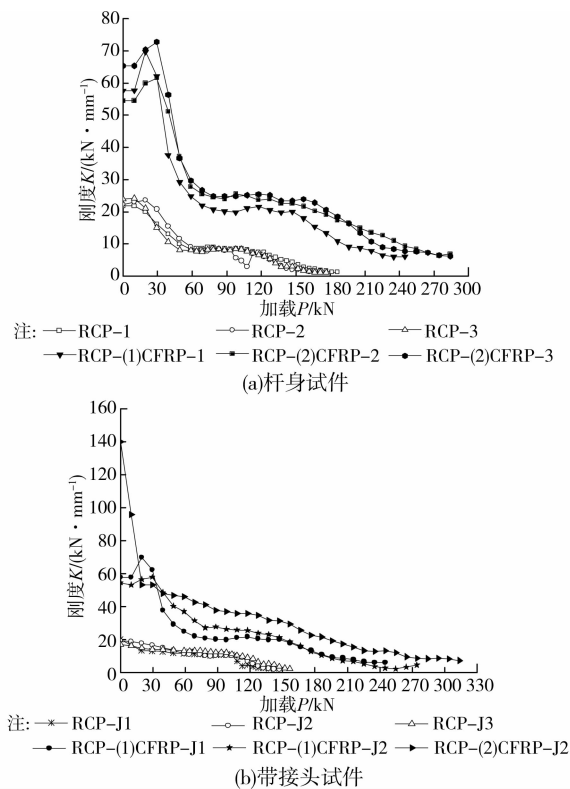


图 7 试件刚度随加载的变化规律

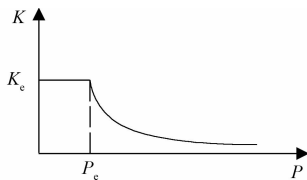


图 8 刚度退化的简化计算模型

4.3 刚度-裂缝宽度曲线

截面环向裂缝的产生与发展是电杆刚度退化的直接体现,由于加固试件的混凝土外表面被碳纤维布包围,表面混凝土的裂缝开展情况很难获取,且带钢圈接头试件的跨中为钢材,并不产生裂缝,因此,本文只限于讨论未加固的杆身试件。图 9 所示为该类型试件刚度-裂缝宽度曲线。从图中可见,3 根试件的变化规律基本相似,由此可用相应的数学表达式表示刚度与裂缝宽度的相互关系:

$$w = \begin{cases} 0 & K = K_e \\ a - b \ln K & K = K_e e^{-bP} \end{cases} \quad (5)$$

式中: w 为裂缝宽度, mm; 经拟合后, 建议系数 a 取值为 2.237; 系数 b 取值为 1.022。

4.4 损伤分析

在全过程加载中, 试件抗弯曲变形能力随荷载的增长而逐渐减弱, 由此而导致杆件的挠度逐步加大, 环向裂缝不断向截面顶部发展, 裂缝增长增宽增

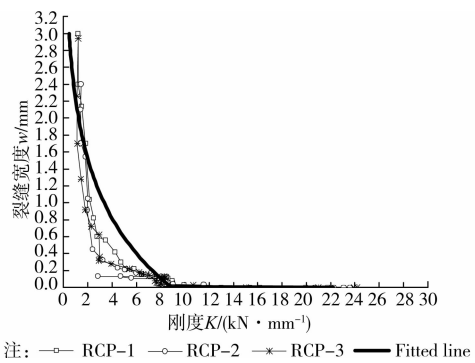


图 9 刚度-裂缝宽度曲线

深, 该类破坏形态的发展源于其截面微损伤累积的结果。为了定量地描述损伤发展过程, 依据经典损伤力学原理, 提出弯曲损伤度 D_s 的概念。文献[20]表明: 采用材料的弹性模量变化定义其损伤度是最实用、有效的方法。基于此, 本文提出的弯曲损伤度 D_s 是建立在整体刚度之上而得到, 其表达式为:

$$D_s = 1 - \frac{\bar{K}}{K} \quad (6)$$

式中: \bar{K} 为损伤后的刚度, 其值可通过求解荷载-跨中挠度的切线模量而得到。

考虑到加载初期电杆处于弹性状态, 认为此时无损伤, 因而定义损伤度为零; 当荷载提高后, 杆件进入弹塑性发展阶段, 开始出现微损伤, 此时未达破坏状态, 因而可定义该状态的损伤度介于 0~1 之间; 当试件破坏时, 此时损伤度达“1”。图 10 所示为各试件的损伤发展历程。由图可见, 经碳纤维布加固后的试件, 其损伤发展有所提前, 究其原因在于电杆采用 CFRP 包裹后, 内部混凝土受约束而强度有所提高, 导致脆性性质部分加强; 又碳纤维布与混凝土两类材料具有不同的损伤累积效果, 比较而言, 混凝土的脆性性质更明显, 两者之间的不均匀性导致损伤累积在混凝土更加集中。

5 结论

1) 采用 CFRP 加固电杆杆身及跨中带连接接头的电杆, 其最终破坏均表现为混凝土与 CFRP 的表面粘脱失效, 破坏时以纵向碳纤维布被拉断作为标志, 脆性性质明显, 混凝土无压溃。

2) 经测试后, 试验中未加固电杆和加固电杆的截面平均应变大致符合平截面假定。

3) 采用 CFRP 加固后的试件承载能力得到不同程度的增强; CFRP 加固的层数对带接头试件承载力影响颇大, 不同加固方式的加固效果明显, 但杆身试件采用的双层加固与单层加固区别不大, 这可能

与试验样本较少有关。

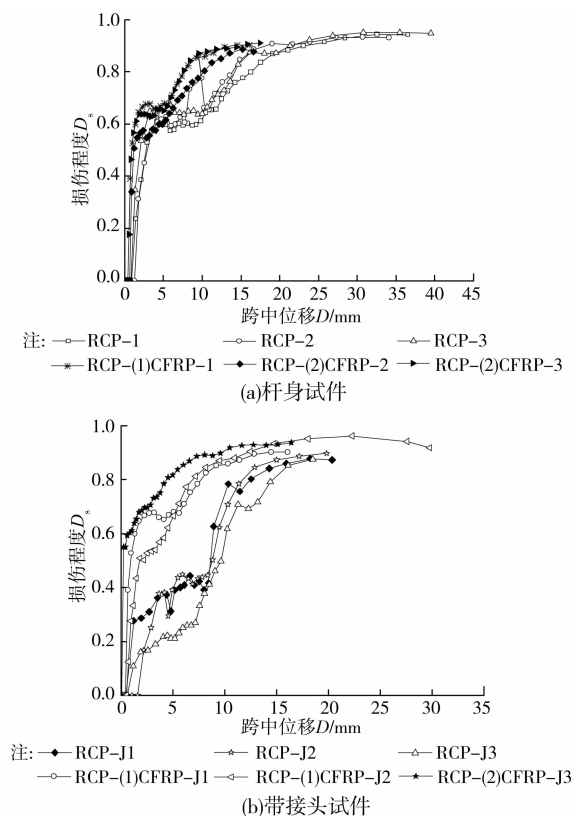


图10 试件损伤发展历程

4)根据相应的规范公式,验算了杆身试件的极限承载力,得到加固前的电杆杆身承载能力退化较大,加固后杆身的极限承载力显著高于计算值。

5)对比分析了各试件受力各阶段的刚度变化规律,得到加固后的刚度较之加固前有所提高,且与纵向黏贴CFRP层数有较大关系,并提出刚度退化规律公式;描述了对比的杆身试件刚度与裂缝宽度的变化关系。

6)加固试件因材料间存在损伤累积的不均匀性,加固电杆的损伤累积较之加固前试件快而集中。

7)综合考虑经济效益,建议在接头部位的一定距离内采取纵向黏贴双层碳纤维布进行加固,而其余杆身处则以纵向单层碳纤维布给予补强。

参考文献:

- [1] 夏开全,张向冈,陈宗平,等.服役预应力混凝土电杆极限承载力试验研究[J].广西大学学报:自然科学版,2012,37(1):29-33.
Xia K Q, Zhang X G, Chen Z P, et al. An experimental study on the ultimate bending capacity of in-service prestress concrete pole [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2012, 37(1): 29-33.
- [2] 刘思远,夏开全,陈宗平.在役钢筋混凝土电杆抗弯承载能力研究[J].混凝土,2011,260(6):60-63.
Liu S Y, Xia K Q, Chen Z P. Study on residual carrying capacity of existing reinforced concrete poles [J]. Concrete, 2011, 260(6): 60-63.
- [3] 刘思远,夏开全,陈宗平,等.在役钢筋混凝土电杆剩余承载能力试验研究[J].混凝土,2010,246(4):48-53.
Liu S Y, Xia K Q, Chen Z P, et al. Study on residual carrying capacity of existing reinforced concrete poles [J]. Concrete, 2010, 246(4): 48-53.
- [4] 方永浩,戴王比,庞二波,等.锥形钢筋混凝土电杆的力学性能检测与有限元分析[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(6):687-692.
Fang Y H, Dai W B, Pang E B, et al. Mechanical property test and finite element analysis for tapered reinforced concrete pole [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(6): 687-692.
- [5] 高润东,赵顺波,张天光,等.离心成型钢筋钢纤维混凝土电杆受力性能试验研究[J].土木工程学报,2005,38(8):43-48.
Gao R D, Zhao S B, Zhang T G, et al. An experimental study on the behavior of steel fiber reinforced concrete pole fabricated by centrifugal shaping method [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 43-48.
- [6] 赵顺波,高润东,李长永,等.离心成型预应力钢纤维混凝土电杆设计试验研究[J].工程力学,2006,23(Sup1):151-156.
Zhao SH B, Gao R D, Li C Y, et al. Design and experimental study of prestressed SFRC pole fabricated by centrifugal shaping method [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Sup1): 151-156.
- [7] 高润东,李晓克,赵顺波.等径离心成型钢筋钢纤维混凝土电杆受力性能试验研究[J].电力建设,2005,26(2):37-39.
Gao R D, Li X K, Zhao S B. Experimental study on behaviors of equal-diameter steel fiber reinforced concrete poles fabricated by centrifugal shaping method [J]. Electric Power Construction, 2005, 26(2): 37-39.
- [8] Teng J G, Chen J F, Smith S T. FRP strengthened RC structures [M]. UK: John Wiley & Sons, 2002.
- [9] Elchalakani M, Fernando D. Plastic mechanism analysis of unstiffened steel I-section beams strengthened with CFRP under 3-point bending [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 53: 58-71.
- [10] Al-Mahmoud F, Castel A, François R, et al. RC beams strengthened with NSM CFRP rods and modeling of peeling-off failure [J]. Composite Structures, 2010, 92(8): 1920-1930.
- [11] 高仲学,杨威. CFRP布加固钢筋混凝土梁可靠性分析[J].土木建筑与环境工程,2011,33(6):36-43.

- Gao Z X, Yang W. Reliability analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheet [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(6): 36-43.
- [12] Bambach M R, Jama H H, Elchalakani M. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(10): 1112-1121.
- [13] Al-Rousan R, Issa M. Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3520-3529.
- [14] Haedir J, Zhao X L. Design of CFRP-strengthened steel CHS tubular beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 203-218.
- [15] Silvestre N, Young B, Camotim D. Non-linear behaviour and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2613-2630.
- [16] Zhao X L, Al-Mahaidi R. Web buckling of lightsteel beams strengthened with CFRP subjected to end-bearing forces [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(10): 1029-1036.
- [17] Firmo J P, Correia J R, França P. Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: Protection systems with insulation of the anchorage zones [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 1545-1556.
- [18] American Concrete Institute. ACI 440. 2R-02 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures [R]. Detroit, USA: American Concrete Institute, 2002.
- [19] DL/T 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [20] 蔡四维, 蔡敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

(编辑 王秀玲)

(上接第 31 页)

- Liu T, Gui Y, Wang Z Q. Development review on flexural strengthening by FRP [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009, 24(4): 356-361.
- [15] Wu Y F, Huang Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures [J]. ASCE Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273.
- [16] 管延华, 苗海涛, 宋修广. FRP-螺栓联合加固技术锚固参数的研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40(3): 128-132.
- Guan Y H, Miao H T, Song X G. Study of the anchoring parameter for the hybrid bonding of FRP [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(3): 128-132.
- [17] 张峰, 牛平霞, 李树忱, 等. FRP-螺栓联合加固 RC 梁粘结性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(6): 7-13.
- Zhang F, Niu P X, Li S C, et al. Experimental analysis on bonding behavior of hybrid-bonding of FRP [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(6): 7-13.
- [18] 管延华, 蒋斌松, 宋修广. FRP-螺栓联合加固 RC 梁抗弯试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 202-206.
- Guan Y H, Jiang B S, Song X G. Experimental study of flexural capacity on RC beams strengthened with hybrid bonding of FRP [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 202-206.

(编辑 王秀玲)