

# 连钢箍接头服役混凝土电杆的性能评估及加固研究

徐金俊<sup>1</sup> 陈宗平<sup>1,2</sup> 夏开全<sup>3</sup> 李伊<sup>1</sup>

(1 广西大学土木建筑工程学院 530004 南宁; 2 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室 530004 南宁;

3 中国电力科学研究院 100055 北京)

**摘要:** 为了揭示带钢箍接头服役混凝土电杆的破坏机理和承载性能,对3根长4.2m、3根长3.5m的带有钢箍接头的混凝土电杆以及3根长4.2m采用碳纤维布(CFRP)加固的钢箍接头电杆进行了抗弯承载力试验。通过试验观察了各试件的受力全过程和破坏形态,并获取了荷载-挠度曲线、刚度退化规律曲线、极限承载力等重要指标。研究表明:未加固试件的破坏形态大多为混凝土拉裂、接头钢箍不屈服,具有明显的脆性;加固接头试件的破坏过程迅速,主要表现为混凝土与CFRP的表面粘脱失效而破坏,过程迅速,具有脆性破坏特点,黏贴双层碳纤维布试件比采用单层碳纤维布试件的承载力提高了32.8%;对比加固和未加固接头的试件,经单层加固后电杆的承载力提高58.8%、初始弹性刚度提高达3倍,且延性性质也有所改善;但加固与未加固试件的耗能能力大致相当,其截面应变均符合平截面假定。

**关键词:** “服役”混凝土电杆;钢箍接头;碳纤维布;承载能力;刚度退化

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11776/cjam.31.02.D012

## 1 引言

传统的环形混凝土电杆是输电线路的重要组成部分,目前此类混凝土电杆普遍应用于0.4~220 kV电压等级的送电线路和变电站室外架构中。在实际线路中,因受制于周围环境的约束,钢筋混凝土电杆的架设高度往往较高。为了方便生产、安装、运输<sup>[1-2]</sup>,整根电杆一般通过各单杆以连接接头的方式拼接而成,国内普遍采用了接头钢箍焊接法对混凝土电杆进行现场组装,由此满足线路架设所需的高度。在役混凝土电杆受各种环境因素的影响,包括冰冻、雨雪、风(地震)荷载的作用,不仅要求单个杆身具

有良好的承载能力,而且对接头的要求也非常高,接头的工作性能将在很大程度上决定整个电路系统的安全度和可靠性。至今,对电杆单根杆身的受力性能已有相关研究可循<sup>[3-10]</sup>,然而国内外尚无考虑钢箍接头的混凝土电杆承载能力的研究报道;并且,对于如何正确评定带已锈蚀钢箍连接接头的老旧混凝土电杆承载能力以及如何采取合理的加固措施都是亟待解决的问题。

本文以南方电网某路段的老旧钢筋混凝土电杆为研究对象,分别对6根中间带有钢箍接头的混凝土电杆和3根采用碳纤维布(CFRP)加固带钢箍接头的电杆进行抗弯试验评估研究,以期揭示该类电杆的受力机理和破坏形态,并探讨碳纤维加固后电

基金项目: 国家自然科学基金(50908057); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目(2012ZDX03)

收稿日期: 2013-04-12

修回日期: 2013-11-15

第一作者简介: 徐金俊,男,1986年生,广西大学土木建筑工程学院,博士生;研究方向——异形柱结构与再生混凝土结构的研究。

通讯作者: 陈宗平, E-mail: zpchen@gxu.edu.cn

杆的性态变化规律, 为丰富此类构件的设计与加固提供相关的技术支撑。

## 2 试验概况

### 2.1 试验构件及加固材料

选取6根长为4.2m、3根长为3.5m的电杆。接头两端的混凝土截面尺寸为: 外径400mm、内径300mm、壁厚50mm; 钢箍厚8mm, 其接头长200mm。实测得到混凝土的抗压强度为22.8MPa; 试验结束后将电杆破碎, 获取的纵筋为HPB235级钢筋, 直径为8mm, 实测屈服强度为401MPa, 极限强度为475MPa, 伸长率为27.5%。

选取3根长为4.2m的电杆进行碳纤维布加固, 其工艺如下: ①将电杆表面混凝土表层以及接头处钢箍外表面锈蚀层磨掉, 利用工业丙酮将其清洗干净, 并用水泥砂浆将钢箍与混凝土杆身抹平; ②在混凝土电杆表面沿纵向黏贴碳纤维布, 对其中1根电杆进行双层黏贴, 另2根进行单层黏贴; ③在所有试件纵向碳纤维布的外表面黏贴环向碳纤维布并对其环箍, 环箍的宽度为50cm, 两环箍之间的净距为20cm, 环箍的黏贴顺序是从中间钢板环箍两侧往两端头按净距20cm逐一黏贴。

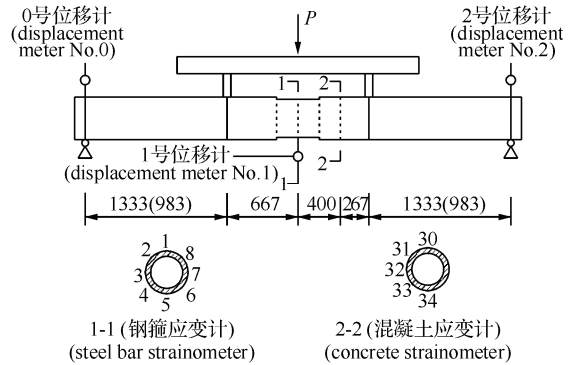
采用武汉长江加固技术有限公司生产的CJ300型碳纤维布和与之配套的YZJ-CQ纤维复合材料浸渍黏结用胶作为加固材料。CJ300型碳纤维布的抗拉强度大于3000MPa, 弹性模量大于 $2.1 \times 10^5$ MPa, 伸长率大于1.5%; YZJ-CQ纤维复合材料浸渍黏结用胶的抗拉强度大于30MPa, 抗压强度大于70MPa, 抗弯强度大于40MPa, 与混凝土的正拉黏结强度大于2.5MPa。

### 2.2 加载装置与加载制度

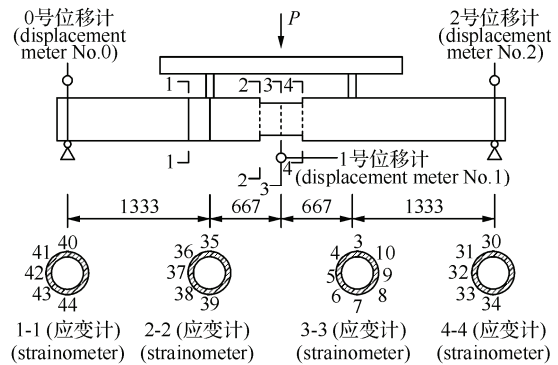
试验采用液压千斤顶通过分配梁在两个三分点处加载。因试件为环形截面, 将分配梁两端与电杆接触面特制成半圆形支座, 试件两端为特制的滚轴支座, 由此保证端头的自由转动。为了测量试件变形、内力分布等重要数据, 在支座和跨中部位布置了相应电子位移传感器, 并在钢箍和杆身的相应部位黏贴电阻应变计(应变计的黏贴以截面逆时针方向为正向, 采用角度表示, 黏贴部位之间相隔45°), 试件的加载装置如图1所示(其中杆件的尺寸单位采用毫米表示)。

试验采用荷载控制的加载制度加载, 试验前对试件预加载3遍, 然后以9.8kN作为加载步长分级

加载。为保证试件变形充分, 每级步长维持恒载5~10min进行实时数据采集。当荷载接近混凝土电杆的开裂荷载时, 将加载步长改为4.9kN, 此后以每级荷载4.9kN进行加载, 直至试件破坏。



(a) 未加固接头试件(non-strengthen specimens with joint)



(b) CFRP 加固头试件(strengthen specimens with joint)



(c) 加载实物 (loading actual member)

图1 试验加载装置及布表(片)概况  
Fig.1 Summary of test setup and meters (strain gauges)

## 3 试验结果及分析

### 3.1 破坏特征

#### 3.1.1 无加固电杆的破坏分析

表1为所有试件的特征值汇总情况, 其中:  $L$ 为杆长;  $P_{cr}$ 为电杆混凝土的开裂荷载;  $P_u$ 为极限荷载;  $U_{max}$ 为最大裂缝宽度;  $M_{cr}$ 为开裂弯矩;  $M_u$ 为极限破坏弯矩。由表1可知: 各试件的开裂荷载大致接近, 且与试件长度关系不大, 但破坏荷载在一定程度上

随着试件长度的减小而增大；破坏时裂缝宽度随着试件长度的减小而降低；所有试件的破坏主要为混凝土的破坏，接头钢箍均不出现屈曲破坏，甚至大部分接头钢材尚未屈服。破坏形态属于性质较脆的似“少筋梁”破坏，破坏形态及裂缝分布如图2所示。



图2 试件的破坏形态及裂缝分布  
Fig.2 Failure mode and fracture distribution of specimens



(a) RCP-CFRP-J1 (b) RCP-CFRP-J2(1) (c) RCP-CFRP-J3(2)

图3 加固试件的破坏形态  
Fig.3 Failure modes of reinforced specimens

### 3.1.2 加固电杆的破坏分析

3根跨中带钢箍接头加固CFRP混凝土电杆的破坏形态如图3所示(文中试件编号后括号内数字表示黏贴碳纤维布层数)。

从试件的最终破坏形态可见，采用 CFRP 加固接头后混凝土电杆的破坏首先是下部受拉区碳纤维布与混凝土产生局部粘结脱离，然后 CFRP 环箍之间的纵向碳纤维布被拉断，试件破坏。试验结束后，撕掉拉断的 CFRP 发现冒出的混凝土粉末是由于黏贴 CFRP 用的结构胶将表面混凝土拉脱引起。尽管跨中钢箍上部、下部先后达到屈服(试件 RCP-CFRP-J1(1)和 RCP-CFRP-J2(1))以及 RCP-CFRP-J3(2)仅上部达到屈服，但破坏并未发生在钢箍位置，而是在钢箍接头两侧的配合梁支座处。综上所述，RCP-CFRP-J1(1)和 RCP-CFRP-J2(1)属于类似“延性破坏”，RCP-CFRP-J3(2)属于类似“脆性破坏”。

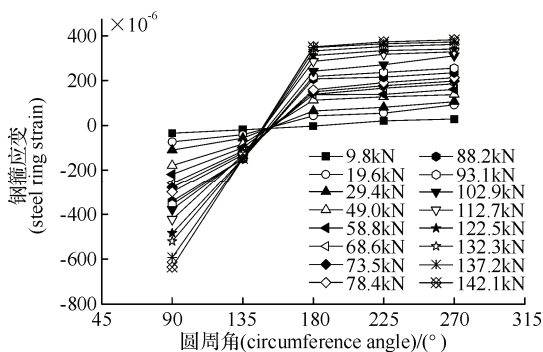


图 4(a) RCP-J1

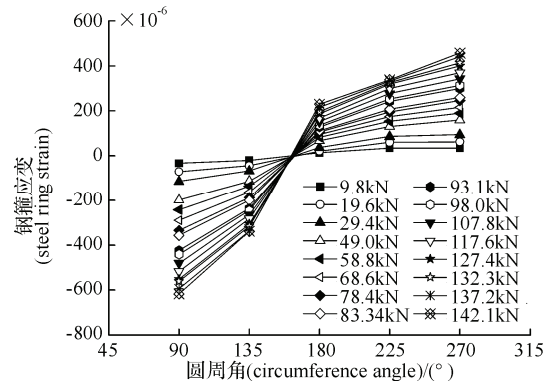


图 4(b) RCP-J3

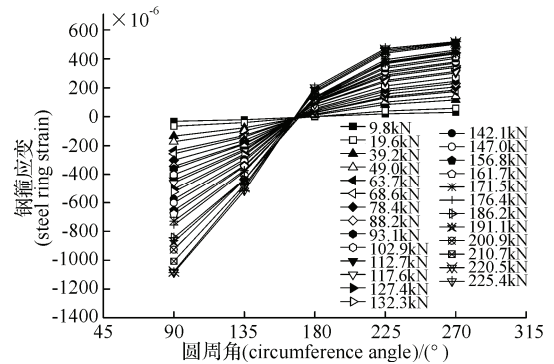


图 4(c) RCP-J4

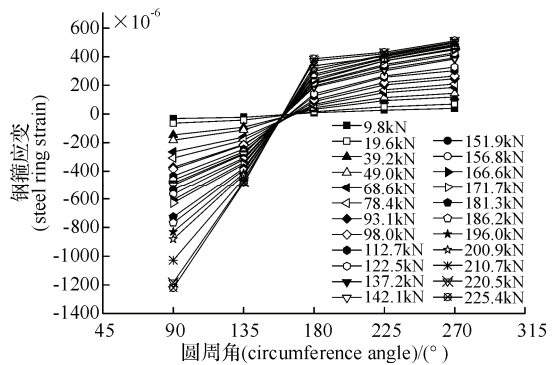


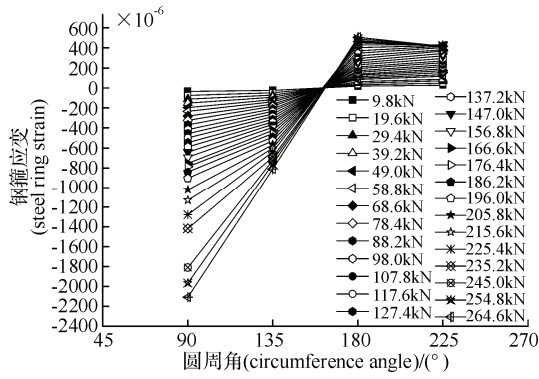
图 4(d) RCP-J6

图 4 跨中钢箍接头应变分布  
Fig.4 Strain distribution of steel ring joints at middle span

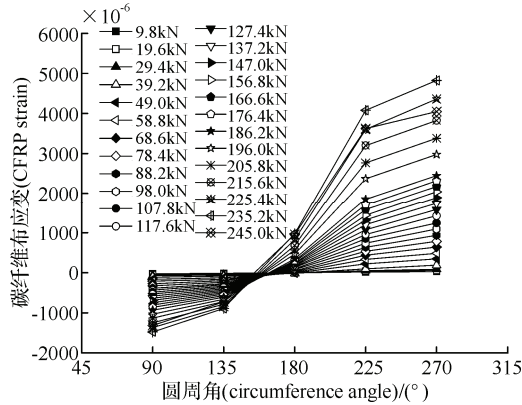
### 3.2 截面应变特征

图4为典型试件跨中带钢箍连接接头混凝土电杆钢箍的平均应变分布曲线，其中各曲线代表在不同荷载水平下，同一环形截面不同圆周处的应变分布规律。由图4可知，位于跨中的钢箍截面，其应变基本符合平截面假定。通过观察破坏后的试件及其各个应变值发现，无论位于受压区还是受拉区，除个别试件外，电杆试件的钢箍应变均较小。

图 5 为典型试件接头钢箍和截面 4-4 碳纤维布的应变分布情况。由图可见，在加载全过程中，混凝土电杆跨中接头钢箍和碳纤维布的平均应变也基本符合平截面假定。



(a) RCP-CFRP-J3(2)



(b) RCP-CFRP-J1(1)

图 5 部分试件的钢箍及碳纤维布应变分布图  
Fig.5 Strain distribution of steel rings and CFRP for parts of specimens

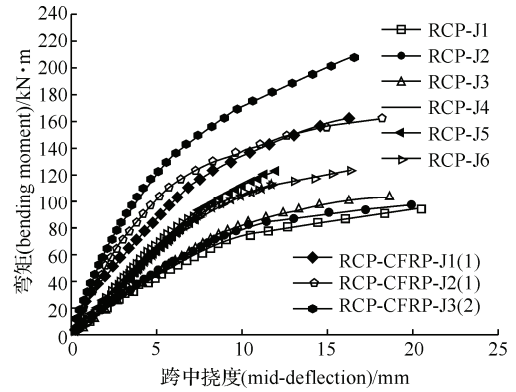


图 6 荷载-跨中挠度曲线

Fig.6 Load-mid-span displacement curves

### 3.3 弯矩-跨中挠度曲线

图6所示为试件的弯矩-跨中挠度曲线。由图可知: 有无加固的试件对应的曲线在初始阶段就具有明显的分叉; 当加载位于开裂前, 无加固试件对应的曲线基本处于同一直线上, 而加固试件与前述试件对应的曲线在加载初期就已分离。随着荷载的增大, 短杆试件与较长杆试件曲线逐渐分离, 但同类试件基本重合; 当试件进入塑性阶段后, 各试件表现出不同的非线性性质, 长为4.2m试件的曲线坡度比长为3.5m试件的平缓, 且各条曲线较为接近, 重合度也较好; 黏贴双层碳纤维布试件也逐渐与黏贴单层试件分离, 且

表 1 各试件参数及试验结果

Tab.1 Parameter of each specimen and test results

试件编号 (specimen code)	L / m	P <sub>cr</sub> / kN	M <sub>cr</sub> / kN·m	P <sub>u</sub> / kN	M <sub>u</sub> / kN·m	U <sub>max</sub> / mm	破坏形式 (failure model)
RCP-J1	4.2	58.8	39.19	142.1	94.71	4.50	混凝土开裂、接头钢圈不屈服(the concrete pulled cracks and joint steel ring non-yield)
RCP-J2	4.2	49.0	32.66	147.0	97.98	2.80	混凝土开裂、接头钢圈局部受压屈服( the concrete pulled cracks and joint steel ring yield in local region)
RCP-J3	4.2	58.8	39.19	156.8	104.51	2.50	混凝土开裂、接头钢圈不屈服(the concrete pulled cracks and joint steel ring non-yield)
RCP-J4	3.5	49.0	26.95	205.8	113.19	1.80	混凝土开裂、接头钢圈不屈服(the concrete pulled cracks and joint steel ring non-yield)
RCP-J5	3.5	58.8	32.34	225.4	123.97	0.82	混凝土开裂、接头钢圈不屈服(the concrete pulled cracks and joint steel ring non-yield)
RCP-J6	3.5	58.8	32.34	225.4	123.97	2.50	混凝土开裂、接头钢圈局部受压屈服(the concrete pulled cracks and joint steel ring yield in local region)
RCP-CFRP-J1(1)	4.2	—	—	245.0	163.29	—	钢箍钢圈上下屈服, 纵向 CFRP 拉断, 分配梁处混凝土破坏(the steel ring yield in upper and down region, the longitudinal CFRP snapped and the concrete near the distribution beam cracked)
RCP-CFRP-J2(1)	4.2	—	—	245.0	163.29	—	钢箍钢圈上下屈服, 纵向 CFRP 拉断, 分配梁处混凝土破坏(the steel ring yield in upper and down region, the longitudinal CFRP snapped and the concrete near the distribution beam cracked)
RCP-CFRP-J3(2)	4.2	—	—	313.6	209.01	—	钢箍钢圈上部屈服, 纵向 CFRP 拉断, 分配梁处混凝土破坏(the steel ring yield in upper region, the longitudinal CFRP snapped and the concrete near the distribution beam cracked)

其曲线继续呈现上升的趋势。比较同类杆长的加固和无加固试件发现: 碳纤维布加固后电杆的承载能力得到极大提升, 而且该承载力与黏贴碳纤维布层数的相

关性极为明显; 但从构件破坏时的延性与变形性能来看, 加固试件比未加固试件差。

## 4 工作性能分析

### 4.1 承载力

将杆长同为4.2m的加固和无加固试件进行承载力对比,发现采用碳纤维布加固后的普通混凝土电杆的承载力明显大于无任何加固措施的试件。图7所示为各试件的极限承载力分布情况。由图可知:纵向包裹一层CFRP的试件,其极限承载力比无加固电杆平均提高了58.8%;纵向采用双层CFRP加固后,接头承载力平均提高了1.1倍;对比双层碳纤维布加固试件与单层碳纤维布加固试件的承载能力,前者与后者相比强度提高了32.8%。

由以上分析可知,采取合理的加固措施可进一步提高带钢箍接头老旧混凝土电杆的承载力。

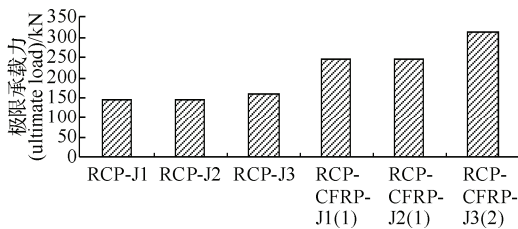


图7 试件的极限承载力对比

Fig.7 Comparison of specimens' ultimate bearing capacities

### 4.2 刚度

#### 4.2.1 刚度对比

通过对弯矩-跨中挠度求一次导,可得相应的刚度变化规律<sup>[11]</sup>,图8为参考该方法得到的各试件刚度随加载的退化规律曲线。

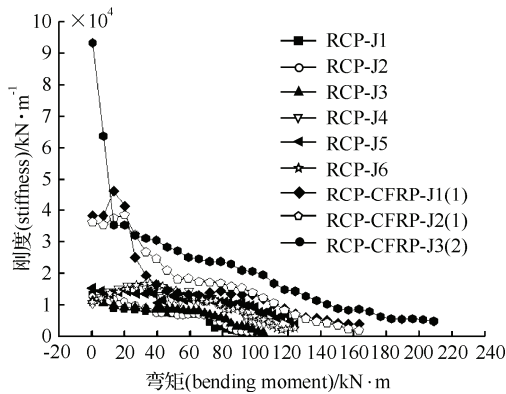


图8 各试件刚度退化规律曲线

Fig.8 Stiffness degradation rule curves

由图8可知,杆长为3.5m试件与杆长为4.2m试件的弹性刚度相比总体偏高,平均提高约50%。

由此说明相同的截面尺寸,杆长较小的试件具有相对较大的弹性刚度。经碳纤维布加固接头试件的初始刚度比未经过加固处理的试件显著提高,平均提高高达3倍左右,但随着荷载增加,特别是位于加载末期的加固试件,其刚度退化也较为缓慢;并且,对比采用双层CFRP加固试件与单层CFRP加固试件的刚度退化情况可知,前者退化程度也小于后者。究其原因在于碳纤维布抗拉性能好,这相当于增大了截面的配筋率,在一定程度上延缓了包裹在碳纤维布内混凝土裂缝的产生与开展。这也说明了采取合理的加固措施,可以提高带钢箍接头老旧混凝土电杆的抗变形能力,以此对电路系统的安全运营提供保障。

#### 4.2.2 刚度退化的数学描述

从各试件的弯矩-刚度曲线可知,在加载初期,由于荷载和变形大致呈线性变化,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,其曲线大体表现为指数函数形式(如图3所示),经数学拟合后,本文提出了以下经验公式

$$K = \begin{cases} K_e, & 0 < M \leq M_{cr} \\ K_e e^{-kM}, & M_{cr} < M \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $K_e$  为初始弹性刚度;  $M_{cr}$  为开裂弯矩;  $k$  为拟合系数:对于未加固杆长为4.2m的试件,其值介于0.0187~0.0277之间;对于杆长为3.5m的试件,其值介于0.0104~0.0242之间;对于加固接头后的试件,其值介于0.0112~0.0182之间。

### 4.3 耗能

构件的耗能能力是评价其抵抗外部作用能力的重要指标。在加载过程中,电杆通过吸能将外部荷载作用的能量转换为内能的形式进行抵抗变形;从另一层面来看也是构件整体损伤不断累积与发展的过程。耗能因子是反映电杆构件耗能能力的参数<sup>[11]</sup>,曲线计算模型见图10,其计算式为

$$\eta = \frac{S_{O A \Delta_u}}{S_{O M_u A \Delta_u}} \quad (2)$$

其中:  $S_{O A \Delta_u}$  表示弯矩-挠度曲线与横轴和平行于纵轴的过A点直线包围的面积;  $S_{O M_u A \Delta_u}$  为过A点分别平行于纵轴、横轴与纵轴、横轴所包围的矩形面积;  $M$  为试验弯矩;  $\Delta$  为跨中挠度;  $M_u$  为最大弯矩;  $\Delta_u$  为最大弯矩对应的跨中挠度。

表2 电杆耗能因子

Tab.2 Energy dissipation factor of poles

试件编号 (specimens code)	RCP-J1	RCP-J2	RCP-J3	RCP-J4	RCP-J5	RCP-J6	RCP-CFRP-J1(1)	RCP-CFRP-J2(1)	RCP-CFRP-J3(2)
耗能因子 (energy dissipation factor)	0.681	0.698	0.659	0.608	0.582	0.673	0.672	0.734	0.685

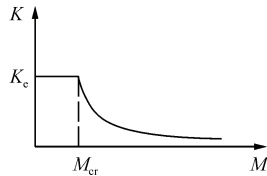


图9 刚度退化曲线简化模型  
Fig.9 Simplified model of stiffness degradation curve

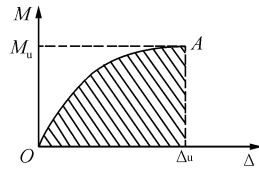


图10 计算模型图  
Fig.10 Figure of calculation model

表2所示为试件终值耗能因子,由表可见:平均来看,杆长较长试件的耗能能力比短杆试件的大;从有限的试验结果可知,采用碳纤维布加固后的电杆在一定程度上会表现出耗能能力增强的趋势,但与黏贴层数的关系不大。

## 5 结 论

通过上述分析,得到的主要结论如下。

- 1) 对于无加固电杆试件,试件的破坏主要表现为靠近分配梁的混凝土破坏,接头钢箍均未出现屈曲破坏,甚至大部分接头钢材尚未屈服;截面应变符合平截面假定。
- 2) 采用CFRP加固接头后的试件,以纵向碳纤维布被拉断作为破坏标志,截面应变仍符合平截面假定。
- 3) 对于未经加固的试件,较长杆长试件的极限承载力比较短试件低;对于同样杆长的试件,加固接头的电杆比未作接头加固处理试件的承载力明显提高;纵向加固双层CFRP试件比单层CFRP试件的承载提高了32.8%。
- 4) 杆长较短试件的初始弹性刚度比较长杆的大,采用加固接头后,试件的刚度提高幅度较大,平均达3倍。
- 5) 运用数学手段提出的刚度退化规律公式可供同类服役混凝土电杆的加固设计参考。
- 6) 电杆的耗能能力因构件杆长而异,而与是否加固的关系不明显。

## 参 考 文 献 (References)

[1] 刘树堂,刘智勇,宋长青.特高钢筋混凝土电杆整立的系吊绳系的设计研究[J].电力建设,2004,25(7):30-32.(Liu Shutang, Liu Zhiyong, Song Changqing. Study on design of erecting cable system of super-high reinforced concrete pole[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(7): 30-32 (in Chinese)).

[2] 孙有亮,马跃进,郝建军.水泥电杆搬运栽杆机研究[J].河北农业大学学报,2011,34(5):125-127.(Sun Youliang, Ma Yuejin, Hao Jianjun. Study on the machine of cement pole flitting and seedling buries[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2011, 34(5): 125-127 (in Chinese)).

[3] 刘思远,夏开全,陈宗平.在役钢筋混凝土电杆抗弯承载力研究[J].混凝土,2011,260(6):60-63.(Liu Siyuan, Xia Kaiquan, Chen Zongping. Study on residual carrying capacity of existing reinforced concrete poles[J]. Concrete, 2011, 260(6): 60-63 (in Chinese)).

[4] 刘思远,夏开全,陈宗平,等.在役钢筋混凝土电杆剩余承载力试验研究[J].混凝土,2010,246(4):48-53.(Liu Siyuan, Xia Kaiquan, Chen Zongping, et al. Study on residual carrying capacity of existing reinforced concrete poles[J]. Concrete, 2010, 246(4): 48-53 (in Chinese)).

[5] 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 Yonghao, Dai Wangbi, Pang Erbo, 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 (in Chinese)).

[6] 高润东,赵顺波,张天光,等.离心成型钢筋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 Rundong, Zhao Shunbo, Zhang Tianguang, 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 (in Chinese)).

[7] 赵顺波,高润东,李长永,等.离心成型预应力钢筋纤维混凝土电杆设计试验研究[J].工程力学,2006,23(SI):151-156.(Zhao Shunbo, Gao Rundong, Li Changyong, et al. Design and experimental study of prestressed SFRC pole fabricated by centrifugal shaping method[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(SI): 151-156 (in Chinese)).

[8] 高润东,李晓克,赵顺波.等径离心成型钢筋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 Rundong, Li Xiaoke, Zhao Shunbo. 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 (in Chinese)).

[9] 杜宏彪,雷预枢.纤维预应力混凝土电杆的试验研究与应用[J].工业建筑,1999,29(7):28-31.(Du Hongbiao, Lei Yushu. Experimental study and application of fiber prestressed concrete poles[J]. Industrial Construction, 1999, 29(7): 28-31 (in Chinese)).

[10] 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 Kaiquan, Zhang Xiangang, Chen Zongping, et al. An experimental study on the ultimate bending capacity of in-service prestress concrete pole[J]. Journal of Guangxi University: Natural Sciences, 2012, 37(1): 29-33 (in Chinese)).

[11] 徐金俊,陈宗平,薛建阳,等.圆钢管再生混凝土界面黏结失效的推出试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(7):148-157.(Xu Jinjun, Chen Zongping, Xue Jianyang, et al. Failure mechanism of interface bond behavior between circular steel tube and recycled aggregate concrete by push-out test[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 148-157 (in Chinese)).