

高强预应力砼电杆受力性能分析

管品武¹, 李 黎², 刘立新¹, 张 葵¹

(1. 郑州工业大学土木建筑工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省第五建筑公司, 河南 郑州 450002)

摘 要: 等径高强预应力钢筋砼电杆在高压输电线路工程中的应用日益增加, 通过对其正截面承载力与变形性能的全过程分析, 并结合有关试验结果, 研究了截面尺寸、有效预应力、砼强度等级等因素的影响, 在此基础上, 从提高构件的承载力及工程应用角度分别提出了增加砼强度、构件壁厚及增加横向钢筋的设计建议。

关键词: 高强预应力砼; 环形构件; 极限承载力; 变形; 全过程分析

中图分类号: TU 375.3 文献标识码: A

离心法生产的钢筋砼环形构件能较好地克服等径普通钢筋砼电杆因抗裂性差、耗钢量高等缺点, 故在电力及邮电通讯线路建设中开始得到愈来愈广泛的重视和应用^[1]。此类构件受力性能各不相同, 但大多属受弯构件, 鉴于其处于试用阶段, 深入研究其受力性能十分必要, 本文结合有关试验结果, 对其进行受力全过程分析, 研究了截面尺寸、有效预应力、砼强度等因素的影响, 并在此基础上, 提出了有关建议。

1 承载力全过程分析

1.1 弯矩 - 曲率关系

在计算中, 采用以下基本假定: ①平截面假定; ②材料本构关系, 受压区砼采用非线性应力 - 应变关系, 考虑下降段及横向钢筋的约束作用, 受拉区砼采用线性应力 - 应变关系, 考虑受拉区砼的开裂及裂缝发展的影响如图 1 所示, 纵向高强碳素钢丝采用线性关系如图 2 所示; ③纵向钢筋直径小而密, 故假定其沿横截面中心以圆环形式均匀分布。

在弯矩 M 和轴力 N (有效预应力) 的作用下, 带裂缝截面的应变分布如图 3 所示。根据平衡条件, 得

$$\frac{N}{2} = \int_{r_2}^{r_1} \int_0^{a_1} \sigma_c \rho d\theta d\theta + \int_0^{a_1} \sigma_s \rho_s d\theta - \int_{r_2}^{r_1} \int_{a_1}^{a_2} \sigma_c \rho d\theta d\theta - \int_{a_1}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_s \rho_s d\theta, \quad (1)$$

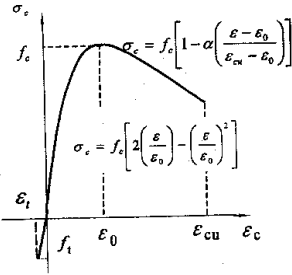


图 1 砼应力 - 应变关系

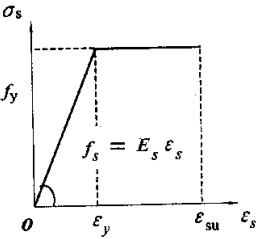


图 2 钢筋应力 - 应变关系

$$\frac{M}{2} = \int_{r_2}^{r_1} \int_0^{a_1} \sigma_c (\rho \cos \theta - r_1 + \epsilon_{c, \max} \operatorname{ctg} \varphi) d\rho d\theta + \int_0^{a_1} \sigma_s \rho_s (\rho \cos \theta - r_1 + \epsilon_{c, \max} \operatorname{ctg} \varphi) d\theta - \int_{r_2}^{r_1} \int_{a_1}^{a_2} \sigma_c (\rho \cos \theta - r_1 + \epsilon_{c, \max} \operatorname{ctg} \varphi) d\rho d\theta - \int_{a_1}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_s \rho_s (\rho \cos \theta - r_1 + \epsilon_{c, \max} \operatorname{ctg} \varphi) d\theta. \quad (2)$$

式中: N 为截面等效轴力 (有效预应力); M 为截面内力对中和轴的弯矩; r_1, r_2 为截面内径及半

径 r_s 为纵筋沿截面中心的分布半径 ρ_s 为纵筋沿截面中以 r_s 为半径的圆周分布线密度 α_1, α_2 为截面纤维压应力分别为零、开裂时的临界角 φ 为截面曲率 $\varepsilon_{c, \max}$ 为截面边缘最大受压应变 σ_s, σ'_s 为钢筋受拉、压应力 σ_c, σ'_c 为砼受拉、压应力。

将钢筋和砼的本构关系代入式 (1) 式 (2) 利用平截面假定导出有关变形协调条件, 以应变加载的形式 (给定每一级 $\varepsilon_{c, \max}$) 把等效预应力转换为轴力 N , 不断迭代 φ 值, 直至满足给定误差。重复以上过程, 从而得到各级荷载下的 $M - \varphi$ 关系。

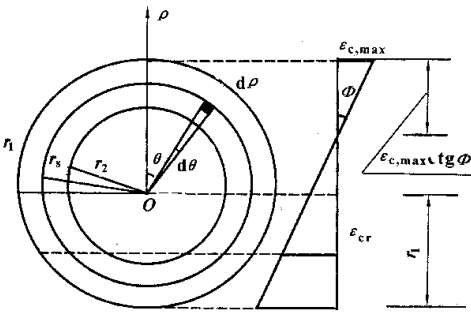


图 3 截面应变分布

1.2 变形的计算

根据所求 $M - \varphi$ 关系, 按一般结构力学方法可得单调横向加载的简支受弯构件跨中挠度

$$f = \int_0^{\frac{l}{2}} \varphi(x) x dx \quad (3)$$

式中: $\varphi(x)$ 为相应荷载 M, N 下曲率沿梁跨方向的分布, 可由 $M - \varphi$ 关系确定; l 为梁跨长。

1.3 数值解与试验值的比较

一高强预应力砼环形构件总长 $l = 6000 \text{ mm}$, $r_1 = 275 \text{ mm}$, $r_2 = 215 \text{ mm}$, $r_s = 235 \text{ mm}$, 纵筋: $48\Phi 5$ $f_{py} = 1280 \text{ MPa}$, 螺旋箍筋 $\Phi 4 @ 50$, C 50 砼。张拉控制力 $F = 978.4 \text{ kN}$ (以下简称实际构件)。采用两点对称加载时的试验结果与数值解对比如表 1 和图 4 所示, 开裂荷载相差 12%, 极限荷载则几乎完全一致, 这说明上述方法来分析高强砼预应力环形截面构件的承载力是可靠而有效的。构件挠度变形曲线在裂缝出现以前几乎重合, 但随着裂缝的出现、发展、增加, 数值解刚度稍小, 变形偏小, 相应于极限荷载 P_u 的极限变形相差 18%, 这是由于考虑到高强砼预应力环形截面构件的相对脆性, 不考虑塑性铰的作用, 数值解中以钢筋和砼的应力 (应变) 特征值为构件的破坏标志所致, 如图 5 所示, 当荷载接近破坏荷载 P_u 时, 挠

度不再增加 (数据重合), 而试验中因压区砼的破碎而造成构件变形的急剧增加。而且试验中所测的构件最后变形为破坏后的变形、而非极限状态下的变形, 故偏大。但两者总体趋势符合较好 (特别是接近破坏荷载以前), 因此其分析高强砼预应力环形截面构件变形的的方法是可行的, 也是可靠的。

表 1 试验值与数值解的承载力特征值比较

项目	$M_{cr} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_u / (\text{kN} \cdot \text{m})$
试验值	149.8	283.3
计算值	133.7	283.9

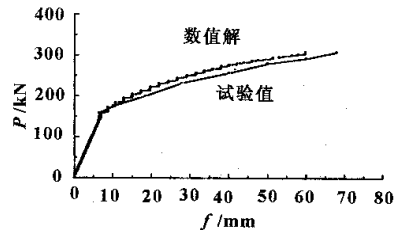


图 4 跨中挠度试验值与数值解的对比

2 影响高强砼预应力环形截面构件性能的主要因素

2.1 砼强度等级

本节采用实际高强预应力砼环形构件的构件参数为: 总长 $l = 6000 \text{ mm}$, $r_1 = 275 \text{ mm}$, $r_2 = 215 \text{ mm}$, $r_s = 235 \text{ mm}$, 纵筋: $48\Phi 5$ $f_{py} = 1280 \text{ MPa}$, 螺旋箍筋 $\Phi 4 @ 50$, 砼强度等级分别为 C 40, C 50, C 60。张拉控制力 $F = 978.4 \text{ kN}$ (为方便与试验结果比较, 中间过渡试件采用实际构件参数)。如图 5 所示, 随着砼强度的提高, 构件的极限强度 M_u 增加, 构件跨中挠度呈增加趋势。试件均因纵筋屈服而破坏, 但随承载力的进一步提高, $f_{cu} = 40, 50 \text{ MPa}$ 的试件砼被压碎, $f_{cu} = 60 \text{ MPa}$ 的试件因纵筋拉断而丧失承载能力。如图 5a 所示, 中等砼强度 (C 40) 构件的截面曲率变化较高强砼平缓, 但受力性能基本类似, 三类构件的延性比 β 分别为 1.22, 1.66, 1.83。这说明实际构件 ($\Phi 550$ 高强预应力砼电杆研制试用构件) 配筋适当, 且构件承载能力取决于压区砼的抗压能力, 高强砼因其砼受压区应力具有更大的应力峰值而提高了构件的延性, 但该类构件的延性较普通砼依然较低。

2.2 有效预应力

构件参数同 2.1, 有效张拉力分别为 $F = 763, 863, 963 \text{ kN}$ 。有效预应力对构件性能的影响如图 6 所示, 三类试件的开裂荷载 M_{cr} 分别为 124.2,

136.6, 144.2 kN·m, 极限承载力依次为 287.7, 284.0, 281.6 kN, 但随着预应力的增加, M_u 呈下降趋势. 这是因为三类构件的破坏形态均为受拉纵筋屈服, 并因压区砼破碎而失去承载能力(极限承载力取决于压区砼), 增加预应力可明显改善构件开裂性能, 但也增加压区砼负担. 随着预应力的

增加, 极限变形逐渐减少, 构件的延性比依次为 1.57, 1.66, 1.96, 说明有效预应力降低了构件的变形性能. 鉴于构件本身变形性能较低, 有必要在保证开裂荷载的基础上, 适当限制构件的有效预应力.

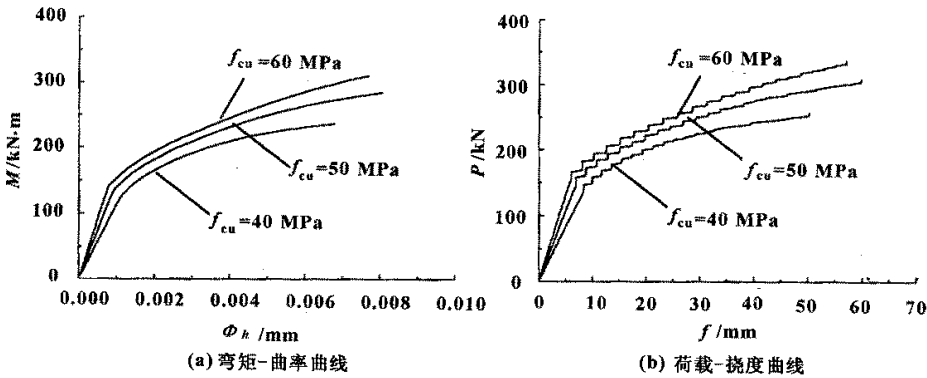


图 5 砼强度的影响

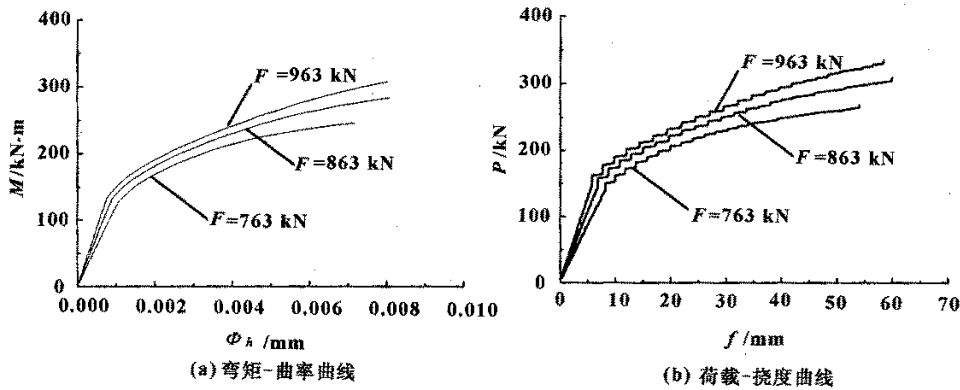


图 6 有效张拉力的影响

2.3 截面尺寸

本节试件参数如表 2 所示, 其他参数同实际构件. 如图 7 所示, 随着截面面积增加, 构件的极限强度 M_u 增加, 构件跨中挠度呈增加趋势. 纵筋

均能屈服, 但随承载力的进一步提高, 试件 3-1, 3-2 砼被压碎, 试件 3-3 因纵筋拉断而丧失承载能力. 构件延性比依次为 1.37, 1.66, 1.8, 说明增加砼面积可以改善构件的变形性能.

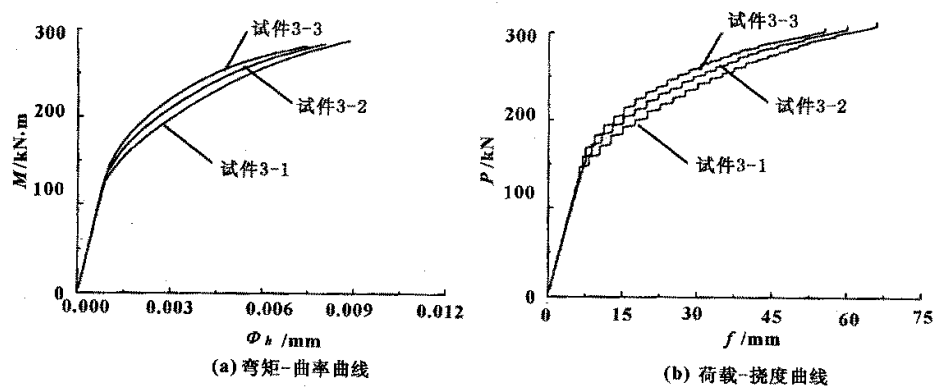


图 7 截面尺寸的影响

表 2 横截面尺寸			mm
项目	r_1	r_2	r_s
试件 3-1	270	220	245
试件 3-2	275	215	245
试件 3-3	280	210	245

3 主要结论与建议

Φ550 高强预应力砼电杆开裂荷载较高 , 具有很好的抗裂性能 , 同时具有较高的极限承载力 , 但因材料呈脆性 , 构件变形性能较差 . 纵筋虽能屈服 , 但决定构件极限承载力的为受压区砼抗压能力 , 受拉纵筋均未拉断 , 受拉区与受压区的强度不相匹配 , 从进一步提高构件承载能力的角度出发 ,

必须再提高砼的强度或砼的面积(增加壁厚) ; 若从工程角度出发 , 则可适当减少纵筋 ; 为提高构件的延性 , 须增加横向配箍率 , 以约束高强砼 , 充分发挥纵筋的承载潜力 .

参考文献 :

[1] 王新玲 , 崔国游 , 毕淑萍 . 500 kV 送电线路线路 Φ550 等径高强预应力砼电杆杆段试验研究及分析 [J] . 特种结构 , 1996 , 13 (1) : 57 - 60 .
[2] 沈聚敏 , 翁义军 . 钢筋砼构件的变形和延性 [J] . 建筑结构学报 , 1986 (2) : 22 - 27 .
[3] COHN M Z , RIVA Pao . Flexural ductility of structural concrete sections [J] . PCI Journal , 1991 , March - April : 72 - 87 .

Ultimate Capacity and Deflect Analysis of High - strength
Prestressed Concrete Electricity Poles

GUAN Pin - wu¹ , LI Li² , LIU Li - xin¹ , ZHANG Yan¹

(1 . College of Civil & Builing Engineering , ZhengZhou University of Technology , Zhengzhou 450002 , China ; 2 . Fifth Construction Corp . of Henan Province , Zhengzhou 450002 , China)

Abstract : High - strength prestressed concrete electricity poles with large diameter are being widely used in high voltage transmitted electricity circuitry projects . Asked for the need of practice , the circularity members ' ultimate capacity and deflect are studied by means of full - process analysis method . The members ' property governed by the parameters of section dimension , effective prestressed force , concrete strength and so on are discussed . The conclusion is in agreed with test results . Finally , Some suggestion , such as increasing the concrete strength , decreasing the longitudinal reinforcement ratio and increasing the stirrup ration and so on , is brought forward to advance the members ' flexural ductility .

Key words high - strength prestressed concrete ; circularity member ultimate capacity ; deflect ; full - process analysis method