

一种易修复输电单管塔结构的概念设计和试验验证

张伟涛,戴靠山,张浩,易正翔

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘要:针对传统单管塔结构易发生底部截面破坏且不易修复的特点,借鉴自复位和易修复的概念,通过引入预应力技术和设定破坏装置,提出一种易修复输电单管塔结构。该单管塔结构在极端荷载作用下能够在保护主体结构不受损坏的前提下在设定部位发生破坏,设定破坏截面的设定破坏装置损坏后可以快速更换,从而实现整体结构的易修复性能,符合以可持续发展和循环经济为核心的绿色建造的理念。首先提出易修复单管塔结构的概念设计,对影响易修复单管塔结构力学性能的因素进行了理论分析,并通过单调推覆加载试验和有限元对理论分析进行验证。

关键词:单管塔结构;自复位;易修复;绿色建造;力学性能

中图分类号:TU352 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0193-06

Conceptual design and loading test of an easy-maintenance transmission steel pole structure

Zhang Weitao, Dai Kaoshan, Zhang Hao, Yi Zhengxiang

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: This paper develops an easy-maintenance transmission steel pole structure with a self-centering feature by introducing prestressing technology and a specified device. Under extreme loading conditions, the structure fails at a specified location so to protect other components. Additionally, the specified device is designed to be replaced conveniently after it is damaged, so it entitles the structure the feature of easy-to-repair. The new design contributes to green construction and sustainable development by reducing the entire structural damages of the power transmission lines. In this paper, a flow chart for this newly easy-maintenance transmission steel pole structure is proposed. Structural behaviors of this new design are studied through theoretical analyses and pushover testing.

Key words: tubular steel pole; self-centering; easy-maintenance; green construction; mechanical behavior

绿色建造是指立足于工程建设总体,在保证安全和质量的同时,通过科学管理和技术进步,提高资源利用效率,节约资源和能源,减少污染,保护环境,实现可持续发展的工程建设生产活动^[1]。在电力建设方面,单管塔结构因具有外形简洁美观、构造简单、传力明确、占地面积小、用钢量省等优点而被广泛应用^[2]。然而单管塔结构属于变截面、变厚度的

空间薄壁壳体结构,其力学性能复杂^[3],易发生底部截面破坏且难以修复,造成资源浪费,不符合绿色建造的理念。近些年来在土木工程防灾减灾领域,有学者^[4-7]提出一种摇摆和自复位结构的概念。笔者针对传统单管塔结构易发生破坏且不易修复的特点,借鉴自复位和易修复的概念,通过引入预应力技术和设定破坏装置,提出一种易修复输电单管塔结

收稿日期:2015-11-10

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20120072120001)

作者简介:张伟涛(1990-),男,硕士,主要从事可恢复性结构研究,(E-mail)1046777307@qq.com。

戴靠山(通信作者),男,副教授,博士生导师,(E-mail)kdai@tongji.edu.cn。

构。文中首先介绍了易修复单管塔结构的概念设计,提出易修复单管塔结构的设计方法,然后分析了易修复单管塔结构的力学性能,并通过单调推覆加载试验和有限元对理论分析进行验证。

1 易修复单管塔结构设计

1.1 易修复单管塔结构概念设计

绿色建筑要求提高能源利用效率,实现可持续发展,然而传统单管塔结构易发生底部截面破坏且不易修复,损坏后需要更换整根单管塔,造成极大的资源浪费。在传统单管塔结构设计的基础上借鉴自复位和易修复的概念,通过引入预应力技术和设定破坏装置,提出一种易修复输电单管塔结构(图 1)。该易修复单管塔结构在极端荷载作用下,结构在设定破坏装置部位发生损坏,损坏后可快速更换,避免更换整根单管塔,具有易修复特点。

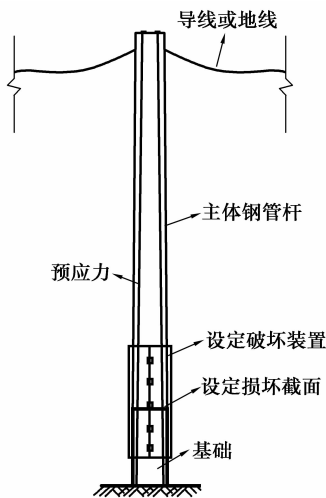


图 1 易修复单管塔结构

1.2 易修复单管塔结构设计流程

易修复单管塔结构在等承载力(保证其与之替代的传统单管塔具有相同承载能力)的基础上,通过引入预应力技术和设定破坏装置使其具有自复位和易修复性能,易修复单管塔结构设计流程如图 2 所示。

1)文献[8]指出,单管塔一般由刚度控制设计,易修复单管塔主体钢管杆的选型与传统单管塔结构一致,除应考虑截面形状、钢管壁厚、钢管稍径及钢管锥度外,应按照导线和地线的排列方式,以结构简单、受力均衡为原则选取经济合理的设计方案。

2)易修复单管塔荷载计算和传统单管塔荷载计算的方法一致,需根据国家标准^[9]计算线路正常运

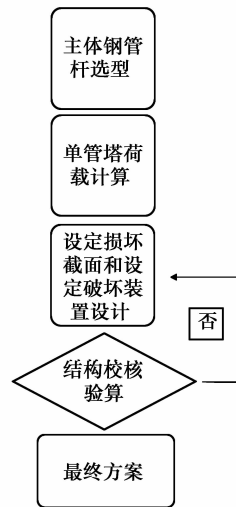


图 2 易修复单管塔结构设计流程

行情况、断线情况、不均匀覆冰情况和安装情况等各种荷载组合,必要时应验算地震等罕遇情况。

3)设定损坏截面和设定破坏装置的设计是易修复单管塔结构设计的重要环节,应在等承载力原则的基础上进行设定破坏装置的设计,为保证易修复单管塔结构的设定破坏装置在极端荷载作用下先于其他部件发生破坏,对其需要进行细化分析设计。

4)根据国家标准^[9]对易修复单管塔结构进行承载力极限状态和正常使用极限状态校核验算。

5)若不符合国家标准^[9]对于杆塔结构的基本规定,则需要重新进行设定损坏截面和设定破坏装置的设计。

1.3 预应力和设定破坏装置的设计

为方便施工,设定损坏截面一般选取距底部1~3 m处,同时为保证易修复单管塔结构和与之替代的传统单管塔具有相同承载力,对设定破坏装置需要进行细化分析设计。以一个圆截面单管塔为例,介绍设定破坏装置的设计方法。

求解传统单管塔结构底部截面屈服时底部截面弯矩

$$M = \gamma_1 \times f \times W_1 \quad (1)$$

式中: M 为传统单管塔结构底部截面屈服时截面弯矩; γ_1 为截面塑性发展系数,对圆形截面 $\gamma_1 = 1.15$; f 为钢材抗弯强度设计值; W_1 为传统单管塔结构底部截面净截面模量。

对于像单管塔这类高耸结构,出于安全考虑,笔者取传统单管塔结构底部截面屈服时刻的弯矩 M 作为易修复单管塔设定损坏截面处设定破坏装置损坏时的弯矩,考虑设定破坏装置制作加工以及经济

因素,依据式(1)在确定所需承载力 M 的基础上,对设定破坏装置进行设计。

设定破坏截面处的弯矩 M 主要由设定破坏装置和预应力承担,设定破坏装置可以有多种型式,本文拟采用钢套箍作为设定破坏装置,并对其设计原理进行阐述。钢套箍(图 3)由两个半圆形钢板通过螺栓拼接而成,将其包裹在设定损坏截面处,作为设定破坏装置。

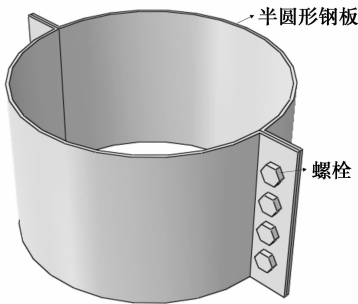


图 3 钢套箍立体图

为使钢套箍能够包裹设定损坏截面,其内径和锥度与设定损坏截面的外径和锥度一致,假定设定损坏截面位于钢套箍的 $1/2$ 高度位置,并取钢套箍的厚度和单管塔主体钢管杆壁厚一致,则钢套箍的高度由式(2)计算确定。

$$y \geq 2 \times \sqrt{24 \times (1 - \mu^2) \times M \times r^2 / Et^3} \quad (2)$$

式中: μ 为钢材材料泊松比; M 表示被替代的传统单管塔底部截面屈服时刻的弯矩; r 表示钢套箍内径; E 为钢材弹性模量; t 为钢套箍的厚度; f 为钢材抗弯强度设计值。

该易修复单管塔结构拟采用预应力钢绞线为结构提供预应力,预应力钢绞线的布置形式可以有多种,这里拟采用“八字形”布置,具体规格可以参照国家标准^[10]选择合适的预应力钢绞线。

2 易修复单管塔结构力学性能

设定破坏装置的型式对易修复单管塔结构的力学性能有重要影响,为方便工程人员进行设计,需要对该易修复单管塔结构的力学性能进行分析。式(3)可以定义设定损坏截面的转动刚度。

$$k = \frac{M}{\theta} \quad (3)$$

式中: M 表示设定损坏截面所受弯矩; θ 表示设定损坏截面的转角; k 为转动刚度。设定损坏截面处的转动刚度由钢套箍和预应力钢绞线提供,下面逐一

分析其对设定损坏截面转动刚度的影响。

2.1 钢套箍对设定损坏截面转动刚度的影响

主体钢管杆在受力过程中将对钢套箍产生挤压作用,将钢套箍看作薄壁圆管,取钢套箍设定损坏截面以上高度 h 进行分析。开口薄壁圆管承受内压 P ,假定其在钢套箍高度方向和圆弧方向呈三角形分布(图 4)。由 P 产生的应力分量 $\sigma = \frac{rP}{t}$ 量,圆周应变 $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ 。根据应变-位移关系,可得 a 点径向位移 u_a 和转角 θ_1 ,

$$u_a = r\epsilon = \frac{r\sigma}{E} = \frac{r^2 P}{Et}, \theta_1 = \frac{u}{h} = \frac{r^2 P}{Eth} \quad (4)$$

式中: u_a 表示钢套箍 a 点径向位移; r 为钢套箍内径与外径平均值; ϵ 表示圆周应变; σ 表示由 P 产生的应力分量; E 为钢材弹性模量; t 表示钢套箍的厚度; h 表示钢套箍在设定损坏截面以上高度。

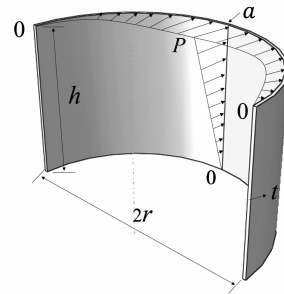


图 4 钢套箍内压受力示意图

由内压 P 的分布,可得钢套箍对设定损坏截面提供的弯矩

$$m_1 = Prh^2 / 6 \quad (5)$$

由式(3)~(5)可得钢套箍对设定损坏截面转动刚度贡献为

$$k_1 = \frac{m_1}{\theta_1} = \frac{Eth^3}{6r} \quad (6)$$

2.2 预应力钢绞线对设定损坏截面转动刚度的影响

根据设定损坏截面处预应力钢绞线几何变形图(图 5),对伸长量为 s_1 的预应力钢绞线内力变量 N_1 。

$$s_1 = d_1 \times \theta_2; \epsilon_1 = \frac{s_1}{l_1}; N_1 = E' A \epsilon_1 \quad (7)$$

式中: s_1 为预应力钢绞线 1 伸长量; θ_2 为主体钢管杆偏转角度; d_1 为设定损坏截面处预应力钢绞线 1 到旋转点距离; l_1 为预应力钢绞线 1 两端锚固点之间长度; E' 为预应力钢绞线弹性模量; ϵ_1 为预应力钢绞线 1 应变变量; N_1 为预应力钢绞线 1 内力变量; A

为预应力钢绞线横截面积。

对于伸长量为的预应力钢绞线同样可以得到

$$s_2 = d_2 \times \theta_2; \epsilon_2 = \frac{s_2}{l_2}; N_2 = E'A\epsilon_2 \quad (8)$$

式中： s_2 为预应力钢绞线 2 伸长量； θ_2 为主体钢管杆偏转角度； d_1 为设定损坏截面处预应力钢绞线 2 到旋转点距离； l_1 为预应力钢绞线 2 两端锚固点之间长度； E' 为预应力钢绞线弹性模量； ϵ_1 为预应力钢绞线 2 应变变量； N_1 为预应力钢绞线 2 内力变量； A 为预应力钢绞线横截面积。

由式(7)、(8)可得预应力钢绞线所提供的弯矩为

$$m_2 = \frac{E'A\theta_2}{L}[d_1^2 + d_2^2] \quad (9)$$

式中： L 为预应力钢绞线两锚固点之间长度， $L = l_1 = l_2$ 。

由式(3)、(9)可得预应力钢绞线提供的转动刚度为

$$k_2 = \frac{m_2}{\theta_2} = \frac{E'A}{L}[d_1^2 + d_2^2] \quad (10)$$

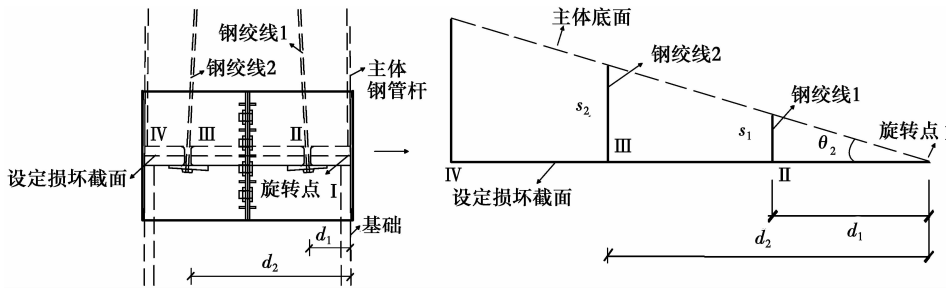


图 5 设定损坏截面处预应力钢绞线几何变形图

2.3 设定损坏截面的 $M_1\theta$ 模型

当钢套箍出现屈曲破坏时，计此刻设定损坏截面转角为 θ_y ，对一般的钢管临界屈曲压力为

$$P_{cr} = \frac{2}{1-\mu^2} E \left(\frac{t}{2r} \right)^3 \quad (11)$$

式中： P_{cr} 为钢管临界屈曲压力； μ 为钢材的泊松比。

由式(3)~(11)可得：

$$\theta_y = \frac{r^2 P_{cr}}{E t h}, M_y = (k_1 + k_2) \times \theta_y \quad (12)$$

当预应力钢绞线屈服时，认为结构失去自复位性能，计此刻转角为 θ_u ，

$$\theta_u = \frac{L\sigma_u}{Ed}, M_u = M_y + k_2 \times (\theta_u - \theta_y) \quad (13)$$

式中： L 为预应力钢绞线两端锚固点之间的长度； σ_u 为预应力钢绞线屈服强度； M_u 为设定损坏截面在预应力钢绞线屈服时刻弯矩； d 为设定损坏截面处离摆动点较远一侧预应力钢绞线到摆动点距离。综上分析可得设定损坏截面的 $M_1\theta$ 模型(图 6)。

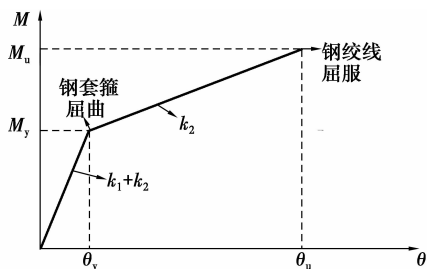


图 6 设定损坏截面的模型

3 易修复单管塔结构节点试验及有限元分析

3.1 易修复单管塔结构节点试验

为验证上文提出 $M-\theta$ 模型，截取一根易修复单管塔结构底部一个区段，对其进行单调推覆加载分析，研究设定损坏截面的力学性能。节点试验模型如图 7，主体钢管杆、基础、钢套箍均采用 Q235 钢制作，预应力钢绞线采用 1×7 结构钢绞线，抗拉强度 $f_p = 1570$ MPa，参考截面面积 $s_n = 140$ mm²。

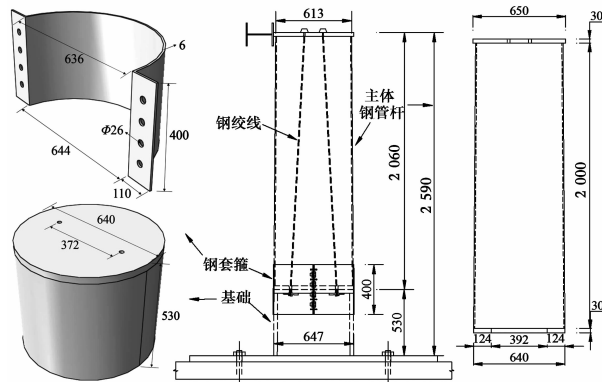


图 7 节点试验模型

将各个试件按图 7 组装后置于试验位置固定，安装位移传感器和力传感器，并对钢绞线施加预应力至指定状态，组装完成后试验装置如图 8 所示。

为得到加载过程中主体结构位移(s_1 和 s_2)和转角(θ),在主体钢管杆顶部和底部(相距 h_{12})布置拉线位移计(图8),主体钢管杆转角计算公式 $\theta=(s_1-s_2)/h_{12}$;在节点试验模型顶部布置力传感器(图8),记录加载过程中钢绞线内力变化情况(图9);同时,可以通过作动器读出节点试验模型顶部位移和反力,由此可以得到节点试验模型顶部位移-反力曲线(图10)。

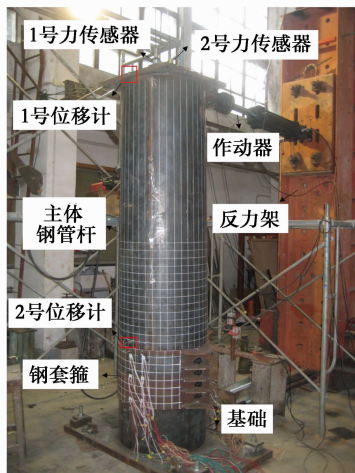
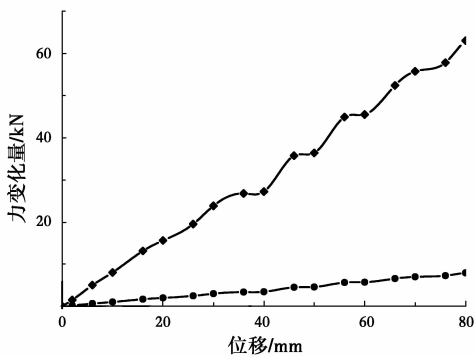


图8 实验室结构加载现场



注: \blacklozenge 1号力传感器 \blacksquare 2号力传感器

图9 水平推覆位移-钢绞线力关系图

由图9可以看出,在加载过程中钢绞线内力增大,且离作动器较近一侧的钢绞线2内力增大明显,说明其对结构整体具有牵引作用。由图10可以看出,加载过程结构刚度发生变化,但在试验过程中节点试验模型主体和基础部件均未发生明显的破坏现象,而钢套箍变形比较明显。按上文提出的方法计算设定损坏截面的 k_1 、 k_2 和 $M-\theta$ 曲线,与试验得到的设定损坏截面 $M-\theta$ 曲线进行对比(图11)。对比分析可知,理论分析得到的设定损坏截面的 $M-\theta$ 曲线与试验结果比较吻合,证明上文对设定损坏截

面 $M-\theta$ 模型理论分析的可行性。

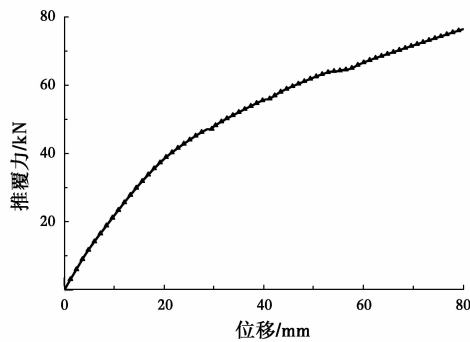
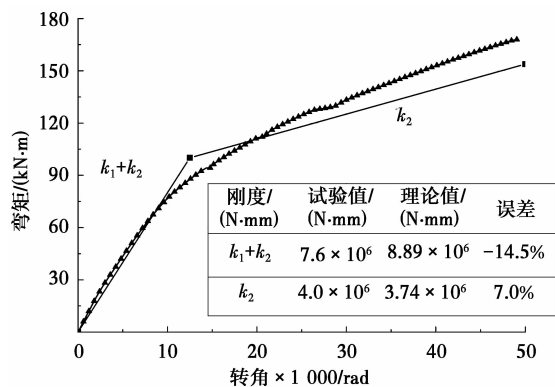


图10 节点试验模型顶部位移-反力曲线



注: \blacklozenge 试验 \blacksquare 理论

图11 理论与试验设定损坏截面 $M-\theta$ 曲线

3.2 易修复单管塔结构有限元分析

通过有限元分析软件ABAQUS,建立试验试件的有限元模型,钢材材料选用双线性随动强化模型模拟,Q235钢弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ N/mm²,泊松比 $\mu=0.3$,屈服强度取235 MPa,屈服后弹性模量取 $0.01E$ 。预应力钢绞线材料模型亦选用双线性随动强化模型,弹性模量 $E'=1.95 \times 10^5$ N/mm²,泊松比 $\mu'=0.3$,屈服强度取1502 MPa,屈服后弹性模量取 $0.01E'$,横截面积 $s_n=140$ mm²。模型厚度方向的尺寸明显小于其他维度,故采用壳单元(S4R)模拟,预应力钢绞线只能承受轴向拉力作用,选用桁架单元(T3D2)模拟。基础、主体钢管杆和钢套箍之间的相互作用选用面面接触(surface-to-surface contact)模拟。

模拟试验加载过程,在模型顶部施加水平荷载,得到模型顶部位移-反力曲线(图12)。通过分析可知,I点附近可修复单管塔结构模型刚度发生变化,II点处预应力钢绞线屈服,认为结构此时失去自复位性能。同时可修复单管塔结构应力主要集中在设定损坏截面处,并且钢套箍应力明显大于主体钢管

杆和基础。对比试验和有限元分析得到的位移-反力曲线(图 13),可知由有限元分析得到的位移-反力曲线与试验结果变化趋势基本一致,采用这种建模方式得到的有限元模型在一定程度上可以进行易修复单管塔结构的受力分析模拟。

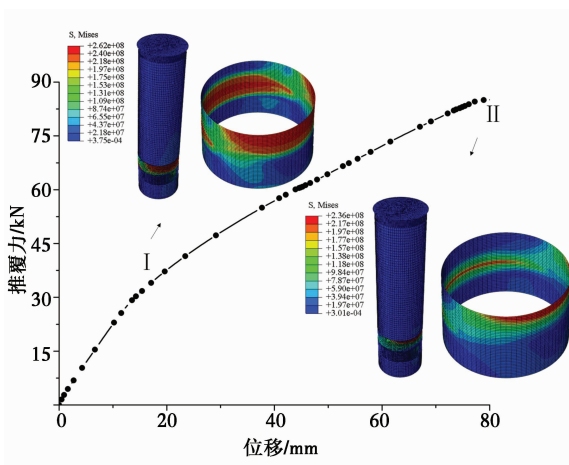
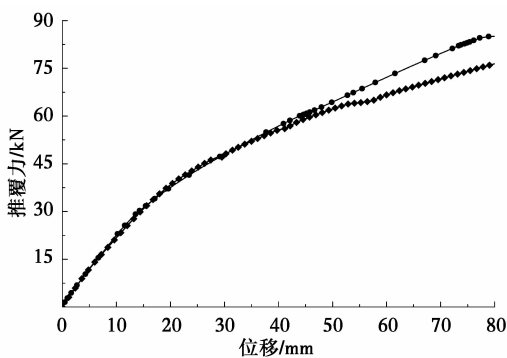


图 12 有限元分析顶部位移-反力曲线



注: —●— 试验位移-反力曲线 —●— 数值位移-反力曲线

图 13 试验和有限元分析位移-反力曲线

4 结论

1) 借鉴自复位和易修复的概念,提出一种易修复输电单管塔结构,该易修复单管塔结构可在极端荷载作用下在设定破坏装置部位发生破坏,同时设定破坏截面处的设定破坏装置损坏后可以快速更换,从而避免更换整根单管塔,实现单管塔结构的易修复性能,节约资源,符合绿色建造的理念。

2) 采用钢套箍作为易修复单管塔结构设定破坏装置,经理论分析可知,该易修复单管塔结构设定破坏截面的 $M-\theta$ 曲线大致呈双线性, $M-\theta$ 曲线刚度变化第一点由钢套箍弹性屈曲应力决定;为验证理论分析的可行性,对该易修复单管塔结构节点模型进行单调推覆加载试验,试验结果表明,理论分析得

到的设定破坏截面的 $M-\theta$ 曲线与试验结果比较吻合;

3) 通过有限元分析软件 ABAQUS 对该节点模型进行有限元分析,结果表明由有限元分析得到的位移-反力曲线与试验结果变化趋势基本一致,同时钢套箍的应力明显大于主体钢管杆和基础,说明易修复单管塔结构在极端荷载作用下能够在指定部位发生破坏,从而实现单管塔结构的易修复性能,节约资源。

预应力钢绞线的布置型式和设定破坏装置的型式将对易修复单管塔结构的力学性能产生影响。笔者只对一种预应力钢绞线和一种设定破坏装置的情况进行了初步探讨。实际工程中,工程设计人员可以根据情况选取不同的钢绞线的布置型式与设定破坏装置的设计型式,这方面还需要细化深入研究。

参考文献:

- [1] 肖绪文,冯大阔.我国推进绿色建造的意义与策略[J].施工技术,2013(7):1-4.
- [2] 黄健,潘汉明,屠海明,等.单管塔的选型设计[J].钢结构,2004,19(1):35-37.
- [3] 王笑峰,何敏娟.锥形单管塔的非线性静力分析[J].结构工程师,2000,4:21-24.
- [4] Housner G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53 (2): 403-417.
- [5] Priestley M J N, Tao J. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons[J]. PCI Journal, 1993, 38(1): 58-69.
- [6] Kurama Y, Sause R, Pessiki S, et al. Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 622-633.
- [7] 周颖,吕西林.摇摆结构及自复位结构研究综述[J].建筑结构学报,2011,32(9):1-10.
- [8] 黄健,屠海明,潘汉明.单管塔的简化设计[J].钢结构,2003,18(2):34-35.
- [9] 国家能源局. DL/T 5154-2012 架空输电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 5224-2014 预应力混凝土用钢绞线[S]. 北京:中国标准出版社,2014.