

输电杆塔用 Q420 钢管轴压稳定性能试验研究

吴锁平¹, 吕健¹, 张大长²

(1. 江苏省电力设计院, 江苏南京 211102; 2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏南京 211816)

摘要:文中分析比较了国内外不同设计规范关于高强度轴压稳定承载力计算理论, 开展了不同长细比 Q420 高强度钢管轴压稳定承载力试验。试验中钢管均发生极值点整体失稳破坏, 加载结束时 1/2 长度截面附近局部屈曲变形明显。计算分析不同长细比 Q420 高强度钢管轴压稳定承载力与其试验值进行比较, 长细比小于 60 的钢管稳定承载力试验值与计算值较接近, 长细比大于 60 的稳定承载力试验值与计算值相差较大, 按我国《钢结构设计规范》中的 b 类截面、日本钢规《AIJ1990》、加拿大输电规范《S37-94》及欧洲钢规《BS EN 1993》的轴压承载力计算值略偏于保守, 均可以满足工程应用。

关键词: Q420 高强度钢管; 轴压稳定承载力; 试验研究; 理论分析

中图分类号: TU3922

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)02-0052-04

进入 21 世纪以来, 我国输电线路发展进入飞速发展的阶段, 大批输电线路工程相继涌现。多年来, 我国输电铁塔钢材主要以 Q235, Q345 为主, 与国际先进国家相比, 材质较单一、强度值偏低, 可选余地较小^[1,2]。由于我国高强度钢的应用起步较晚, 且高强度钢在输电塔领域应用研究较少。目前还没有大范围推广应用。随着同塔多回路工程、大截面导线工程、大跨越工程的不断建设, 输电铁塔上的荷载不断提升, 大型输电塔广泛运用高强度钢管。日本在 20 世纪 90 年代相继建成的同塔双回路共 425 km 的 1000 kV 线路中, 辅助材采用角钢 SS41 或 STK41(屈服强度 255 MPa)型钢, 主材采用钢管 SS55 或 STK55(屈服强度 415 MPa); 日本 JEAC 6001—2000《架空送电规程》^[3]中的 JS690S(屈服强度 520 MPa); 欧美国家大多采用 55C-E, A36, G50, GR65 等级的钢材。在圆钢管截面类型划分方面, 美国结构稳定协会 SSRC^[4]、欧洲钢结构协会 ECCS^[5]和日本规范将圆管截面定义为 a 类截面, 我国《钢结构设计规范》^[6]中将轧制圆管截面定义为 a 类, 焊接圆管截面定义为 b 类。

本文对比分析我国《钢结构设计规范》、美国规范《ANSI/AISC 360—2010》^[7]、《AIJ 1990》钢构造限界状态设计规划^[8]、欧洲钢规《BS EN 1993-1-1:2005》^[9]、美国输电规范《ASCE48-05》^[10]、加拿大输电规范《S37-94》^[11]的相关理论, 计算分析 Q420 高强度钢管的轴压稳定承载力, 并与 Q420 高强度钢管轴压稳定承载力试验值进行比较, 探讨不同规范计算理论的实用性, 为 Q420 高强度钢在实际工程中的应用提供理论依据。

1 轴压稳定承载力理论

1.1 我国《钢结构设计规范》的计算理论

我国《钢结构设计规范》中关于构件稳定系数 φ

的计算公式。

当 $\lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{f_y/E} \leq 0.215$ 时:

$$\varphi = 1 - \alpha_1 \lambda_n^2 \quad (1)$$

当 $\lambda_n > 0.215$ 时:

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda_n^2} [(\alpha_1 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2}] \quad (2)$$

式(1,2)中: λ_n 为无量纲长细比; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为系数; f_y 为材料屈服强度; E 为材料弹性模量。

1.2 美国规范《AISC》的计算理论

美国规范《AISC》中关于构件稳定系数 φ 的计算公式。

当 $\lambda_n \leq 4.71 \sqrt{E/f_y}$ 时,

$$\varphi = 0.658^{f_y/f_E} \quad (3)$$

当 $\lambda_n > 4.71 \sqrt{E/f_y}$ 时,

$$\varphi = 0.877^{f_y/f_E} \quad (4)$$

$$f_E = \pi^2 E / \left(\frac{KL}{r} \right)^2 \quad (5)$$

式(3—5)中: f_E 为欧拉临界应力; K 为计算长度系数; L 为构件长度; r 为截面回转半径。

1.3 日本《AIJ1990》标准的计算理论

日本《AIJ1990 钢构造限界状态设计规准》中关于构件稳定系数 φ 的计算公式。

当 $\lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{f_y/E} < \bar{\lambda}_p = 0.15$ 时:

$$\varphi = 1.0 \quad (6)$$

当 $\bar{\lambda}_p < \lambda_n \leq \bar{\lambda}_e = 1.291$ 时:

$$\varphi = (1 - 0.5 \frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_p}{\bar{\lambda}_e - \bar{\lambda}_p}) \quad (7)$$

当 $\lambda_n > \bar{\lambda}_e$ 时:

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2015-11-27

2014 年江苏省科技厅前瞻性联合研究项目: BY2014005-11

$$\varphi = \frac{1}{1.2\lambda_n^2} \quad (8)$$

1.4 欧洲钢结构设计规范的计算理论

欧洲钢结构设计规范《BS EN 1993-1-1:2005》中,冷弯成型钢管属于 c 类截面,构件稳定折减系数 χ 的计算公式。

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_n^2}} \leq 1.0 \quad (9)$$

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\lambda_n - 0.2) + \lambda_n^2] \quad (10)$$

式(9,10)中: α 为截面影响系数,对于钢管截面 $\alpha=0.49$ 。

1.5 美国《ASCE48-05》标准的计算理论

美国输电线路钢管设计规范《ASCE48-05》中关于构件轴压稳定承载力计算公式。

当 $\frac{KL}{r} \leq C_c$ 时:

$$f_a = f_y [1 - 0.5(\frac{KL/r}{C_c})^2] \quad (11)$$

当 $\frac{KL}{r} > C_c$ 时:

$$f_a = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (12)$$

$$C_c = \pi \left(\frac{2E}{f_y} \right) \quad (13)$$

1.6 加拿大《S37-94》标准的计算理论

加拿大输电规范《S37-94》中关于构件稳定系数 φ 的计算公式。

当 $0.15 \leq \lambda_n \leq 1.0$ 时:

$$\varphi = 1.035 - 0.202\lambda_n - 0.222\lambda_n^2 \quad (14)$$

当 $1.0 \leq \lambda_n \leq 2.0$ 时:

$$\varphi = -0.111 + 0.636\lambda_n^{-1} + 0.087\lambda_n^{-2} \quad (15)$$

当 $2.0 \leq \lambda_n \leq 3.6$ 时:

$$\varphi = 0.009 + 0.877\lambda_n^{-2} \quad (16)$$

当 $3.6 \leq \lambda_n \leq 5.0$ 时:

$$\varphi = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2 f_y} \quad (17)$$

2 Q420 高强钢管轴压承载力试验

2.1 轴压钢管试件

钢管试件规格为 $D377 \times 8$,钢管材质为 Q420,开展不同长细比的 Q420 高强钢管的轴压稳定承载力试验,长细比取值为 30,40,50,60,80,100,Q420 钢材的力学性能如表 1 所示。

2.2 加载及测试

由于钢管试件长度较大,如图 1 所示。Q420 钢管

表 1 材料力学性能

试件	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	延伸率 /%	弹性模量 /MPa
板材	439.4	500.2	21	2×10^5
卷管后板材	432.6	505.6	18	2×10^5

稳定承载力试验采用卧式水平加载,钢管两端采用核定承载力为 6000 kN 的球铰施加轴向力。



图 1 试验加载

为测量钢管关键部位的应变发展特点,如图 2 所示,在 $\frac{1}{2}L$ 、 $\frac{3}{8}L$ 、 $\frac{5}{8}L$ 、距两端 500 mm 处截面布置应变片,为测量端板转动的大小,在加载端对称布置 4 个位移计。

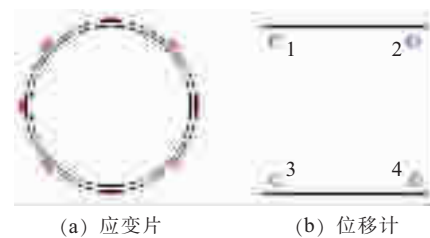


图 2 轴压试验测点布置

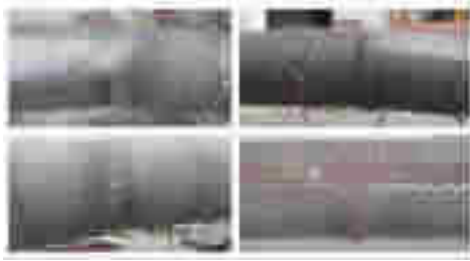
2.3 轴压承载力的试验结果

(1) 典型破坏形式。试验中随着轴压荷载的增大,各高强钢管发生相似的破坏形态。试件典型破坏模式轴压荷载达到一定值后,轴压钢管的侧向变形逐渐增大,即出现整体失稳现象;随着侧向变形继续增大,轴压荷载达到最大值,突然钢管跨中发生局部凹凸、褶皱的局部屈曲,轴压承载力迅速降低,即整体失稳后导致钢管发生局部失稳。典型轴压钢管 $D356 \times 8 - \lambda = 50$ 的破坏形态如图 3 所示。

(2) 轴压荷载—变形特性。试验得到典型钢管的轴压荷载—变形曲线如图 4、图 5 所示。钢管在达到屈



(a) 整体弯曲



(b) 局部屈曲

图 3 轴压钢管典型破坏模式

服承载力之前,随着轴压荷载的增大,荷载增长呈线性,位移变化很小;当轴压荷载临近或超过屈服承载力后,高强钢管侧向变形的发展明显加快,说明钢管由于整体失稳而引起局部屈曲,各测点应变发展呈不规则的非线性趋势。另外,基于钢管轴压荷载—变形曲线、轴向力—管中截面应变曲线可知,主管端部的转动变形明显,即为两端铰接加载。对于长细比小于 40 的构件,其局部屈曲变形明显大于整体弯曲变形;对于长细比大于 50 的构件,其整体弯曲变形大于局部屈曲变形。不同长细比 Q420 高强钢管试件的破坏模式为典型的极值点失稳破坏,且伴随比较明显的局部屈曲,与理论分析结果相符。

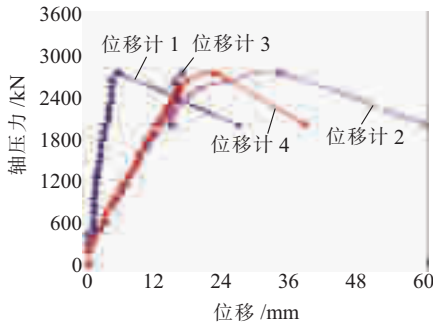


图 4 轴压荷载—变形曲线

3 Q420 高强钢管轴压承载力的对比分析

不同长细比钢管构件 $D377 \times 8$ 的轴压稳定系数的试验值、计算值、模拟值如表 2 所示。其中 Φ_{exp} 为试验稳定系数; Φ_{FEA} 为有限元模拟系数; Φ_a, Φ_b 是按《钢结构设计规范》计算的稳定系数; Φ_1 是按《AISC 360—2010》计算的稳定系数; Φ_2 是按《AIJ 1990》计算的稳定

表 2 Q420 高强钢管轴压稳定系数

λ	Φ_{exp}	Φ_{FEA}	GB 50017—2003		AISC	AIJ	BS EN	ASCE	S37-94
			Φ_a	Φ_b	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
30	0.908	0.968	0.939	0.879 5	0.921	0.872	0.874	0.951	0.902
40	0.834	0.928	0.9	0.833	0.864	0.807	0.731	0.913	0.838
50	0.785	0.889	0.849	0.763	0.796	0.742	0.701	0.864	0.765
60	0.76	0.818	0.77	0.675	0.72	0.678	0.609	0.804	0.682
80	0.691	0.566	0.57	0.499	0.558	0.578	0.443	0.651	0.490
100	0.621	0.384	0.397	0.357	0.402	0.382	0.322	0.459	0.360

注:AISC 为美国钢规;AIJ 为日本钢规;BS EN 为欧洲钢规;ASCE 为美国输电规范;S37-94 为加拿大输电规范。

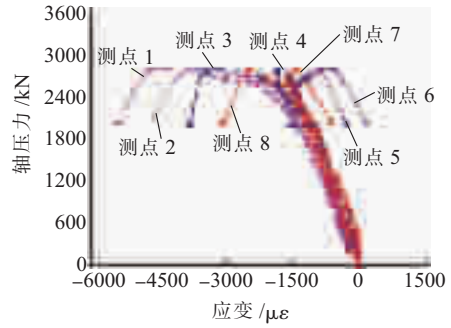


图 5 轴向力—管中截面应变曲线

系数; Φ_3 是按《BS EN 1993》计算的稳定系数; Φ_4 是按《ASCE 48-05》计算的稳定系数; Φ_5 是按《S37-94》计算的稳定系数。不同规范的稳定系数对比情况如图 6 所示。

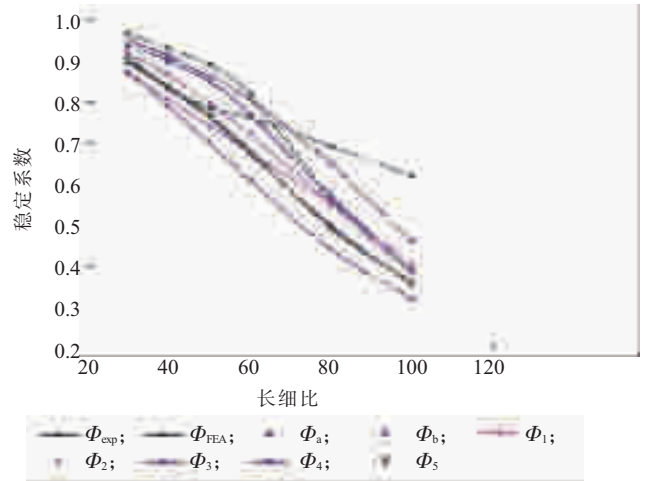


图 6 稳定系数计算值和模拟值及试验值对比

(1) 按《ASCE 48-05》计算的稳定系数计算值最大,按《BS EN 1993》计算的稳定系数计算值最小,相差 8% 以上;

(2) 按《S37-94》计算的计算值与我国钢规中按 b 类截面计算值接近;

(3) 构件长细比大于 60 时,模拟稳定系数与按日本钢规《AIJ 1990》、美国钢规《AISC 360—2010》、我国钢规 a 类截面计算值比较接近;

(4) 长细比大于 60 时,试验稳定系数比理论计算值大,是因为构件两端球铰未能协调转动(与理想球铰有区别),导致构件计算长度偏小。

综上所述,对 Q420 高强钢管的轴压稳定承载力可按我国钢规中 b 类截面,日本钢规《AIJ 1990》,加拿大输电规范《S37-94》,或欧洲钢规《BS EN 1993》进行计算分析,且偏于保守。

4 结束语

基于上述 Q420 高强钢管轴压承载力特性的计算分析,可以得出如下结论:

(1) 长细比小于 60 的钢管稳定承载力试验值与计算值较接近,长细比大于 60 的稳定承载力试验值与计算值相差较大;试验中轴压钢管失稳破坏形式主要为极值点失稳,且 1/2 截面附近局部屈曲变形明显;

(2) 按《ASCE 48-05》计算的稳定系数计算值最大,按《BS EN 1993》计算的稳定系数计算值最小,相差 8% 以上;按《S37-94》计算的稳定系数计算值与我国《钢结构设计规范》中按 b 类截面计算值接近;

(3) Q420 高强钢管的轴压稳定承载力可按我国《钢规》中的 b 类截面,日本钢规《AIJ 1990》,加拿大输电规范《S37-94》,或欧洲钢规《BS EN 1993》进行计算分析,略偏于保守,可以满足工程应用。

参考文献:

[1] 何长华. 高强钢冷弯型钢在输电塔上应用可行性探讨[J]. 钢结构, 2004, 19(5): 35-37.

- [2] 李茂华. Q420 和 Q460 高强钢在输电线路铁塔应用的研究[R]. 北京: 国网北京电力建设研究院, 2006.
- [3] 日本 JEAC 6001—2000 架空送电规程[S].
- [4] GALAMBOS T V. ed. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures [R]. John Wiley & Sons, 1998.
- [5] STINTESO D. ed. European Convention of Constructional Steelworks Manual on the Stability of Steel Structures [R]. ECCS, Paris, 1976: 55-97.
- [6] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S].
- [7] ANSI/AISC 360—2010 An American National Standard Specification for Structural Steel Buildings[S]. Chicago, IL, 2005.
- [8] AIJ 1990 日本建筑学会钢构造限界状态设计规划(案)[S]. 1990.
- [9] BS EN 1993 Euro-Code 3: Design of Steel Structures[S].
- [10] ASCE/SEI 4-05 Design of Steel Transmission Pole Structures [S].
- [11] S37-94 Antennas Towers and Antenna-Supporting Structures [S].

作者简介:

吴锁平(1972),男,江苏姜堰人,高级工程师,从事电网工程设计工作;

吕健(1979),男,江苏盐城人,高级工程师,从事输电线路设计工作;

张大长(1971),男,浙江新昌人,教授,从事土木工程相关教学及科研工作。

Computational Theory and Comparison Analysis on Axial Compression Bearing Capacity of Q420 High Strength Steel Tube for Transmission Line Tower

WU Suoping¹, LYU Jian¹, ZHANG Dachang²

(1. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Computational theory of axial compression bearing capacity in different national and foreign design standards are compared. The axial compression tests of Q420 high strength steel tube with different slenderness ratios are carried out. Integral instability happens during the tests, and obvious local buckle appears in the section of 1/2 length at the end of test. The bearing capacities of Q420 high strength steel tubes are calculated and compared. The calculation results agree with the testing results of the steel tubes that slenderness ratio is smaller than 60, and the test results for other slenderness ratios are larger than the calculation results. The calculation results are conservative, which are obtained according to the code for steel structure design, AIJ 1990 of Japan, S37-94 of Canada and BS EN 1993, and the computational theory could apply to the engineering design.

Key words: Q420 high-strength steel tube; compression stability bearing capacity; test research; theoretical analysis

广告索引

江苏中凌高科有限公司
南京苏逸实业有限公司
南瑞科技股份有限公司

封一
封二
前插 1

《江苏电机工程》协办单位
江苏南瑞继保电气有限公司

封三
封四