

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2020.02.013

轴心受压预应力斜撑杆钢柱承载能力研究^①

张旭, 袁军, 侯博宇, 孟二从, 乔克

西南大学 工程技术学院, 重庆 400716

摘要: 预应力撑杆钢柱具有承载性能好、稳定性强、用料节省等优点, 在现代钢结构工程中得到了越来越广泛的应用. 以轴心受压的斜撑杆预应力钢柱为研究对象, 通过 ABAQUS 软件进行线性与非线性屈曲分析, 研究了撑杆长度、拉索直径、斜撑杆与水平方向倾角、初始缺陷、支座约束条件等多种因素对这类预应力撑杆柱承载能力的影响. 研究表明, 撑杆长度、拉索直径、斜撑杆倾角均会影响预应力斜撑杆钢柱的承载能力; 缺陷敏感性和预应力敏感度分析还表明, 预应力斜撑杆钢柱是一类缺陷敏感型构件, 过大地增大初始拉索预应力并不会显著提高其承载能力.

关键词: 预应力钢柱; 斜撑杆; 屈曲分析; 稳定承载能力

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5471(2020)02-0085-08

预应力撑杆柱是一类通过拉索和撑杆为中心钢柱提供侧向支承, 从而使中心钢柱的承载性能及稳定性增强, 以减小结构变形、充分利用材料、降低造价的预应力钢结构构件. 在工程实际中, 这类构件既可作为一种结构构件单独受力, 又可与其他结构构件配合使用形成一些新型结构体系. 预应力撑杆柱因其简单美观、承载力好、充分用料、建筑设计表现丰富在如今形式多样的桥梁、钢结构等工程中得到了越来越多的应用.

自上世纪 70 年代以来, 不少学者已对预应力撑杆柱展开过大量研究. 舒赣平及侯善民等通过试验研究了预应力撑杆钢柱, 分析了长细比、钢柱截面、支座约束条件等不同因素对其承载能力的影响情况^[1]; Temple 及 Smith 等给出了预应力撑杆钢柱线性屈曲荷载的计算方法^[2-3]; Chan 等用数值分析法分析了不同参数对预应力撑杆柱稳定性的影响^[4]; Hafez 等得出了理想直撑杆预应力钢柱初始预应力和屈曲荷载间的关系^[5]; Saito 及 Wadee 等系统地研究了预应力钢柱缺陷敏感性问题, 提出了新的研究方法^[6]; Martins J P 及 Shahbazian Ashkan 等通过模型试验研究了单双层预应力撑杆高强度钢柱的承载性能, 突出了在这类结构中高强度钢的优越性能^[7]; 刘学春、许可冉等也研究了高性能钢对预应力撑杆系统稳定性能的影响^[8].

但近来研究多针对图 1(a)所示撑杆水平布置的预应力撑杆钢柱展开^[9-10], 对于图 1(b)所示的撑杆与水平方向有倾角的斜撑杆预应力钢柱研究较少. 为评价斜撑杆预应力钢柱的稳定性能, 本文将对斜撑杆预应力钢柱进行屈曲分析, 探求撑杆水平长度、拉索直径、撑杆与水平方向的倾角等不同参数对这类钢柱稳定性的影响, 为以后的实际应用提供帮助. 另外, 水平面上布置三组撑杆就能够满足承载需求且节省钢材, 故本次研究就针对在水平面上布置三组撑杆的斜撑杆预应力钢柱展开.

① 收稿日期: 2019-11-01
基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M623302XB); 重庆市博士后资助项目(Xm2017033); 中央高校基本业务费专项资金(XDJK2018C036).
作者简介: 张旭(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事钢结构方面的研究.
通信作者: 袁军, 副教授, 硕士研究生导师.

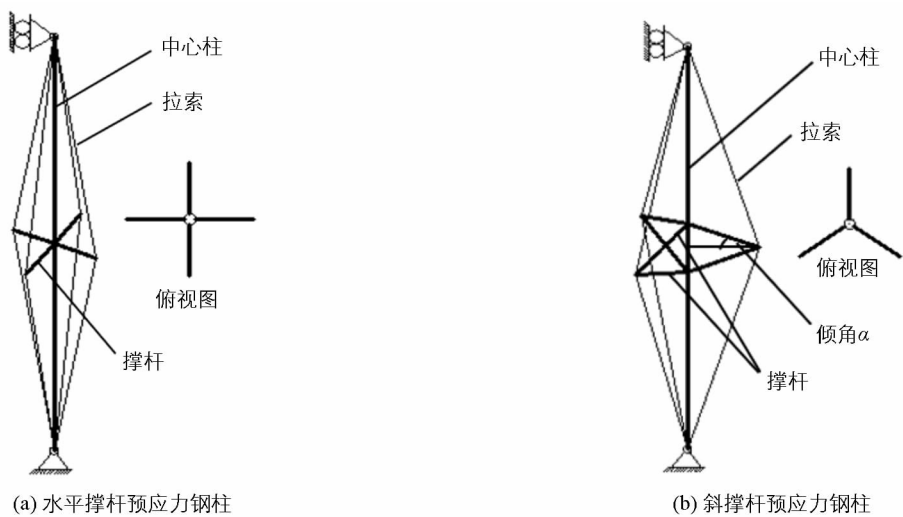


图 1 预应力撑杆柱几何模型示意图

1 分析模型

预应力撑杆柱由中心钢柱、横撑杆及拉索三部分构成，又分为内撑式及外撑式两种形式。本文研究类型为外撑式预应力撑杆柱，几何模型如图 1(b)所示。在水平面上，三组撑杆之间的角度为 120° ，撑杆与水平方向的倾角为 α 。中心柱及撑杆采用同种材料，内径 25.4 mm，外径 38.1 mm，弹性模量为 $201\,000\text{ N/mm}^2$ ，拉索弹性模量为 $202\,000\text{ N/mm}^2$ ，中心柱长 3 000 mm。本文采用 ABAQUS 进行有限元分析，中心柱和撑杆采用壳单元进行模拟，拉索采用桁架单元进行模拟。分析中假定拉索处于弹性状态，撑杆及中心柱间为刚接，中心柱轴心受压。图 2 所示即为预应力斜撑杆钢柱的有限元模型。本文在分析时，拟考察拉索直径 D 、斜撑杆的水平长度 L_a 、斜撑杆倾角 α 对预应力斜撑杆柱承载能力的影响。在本文的分析中，斜撑杆水平长度 L_a 分别取值 150, 225, 300, 375, 450 mm，拉索直径 D 分别取值 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0 mm，而倾角 α 分别取值 $0^{\circ}, 15^{\circ}, 60^{\circ}$ 。

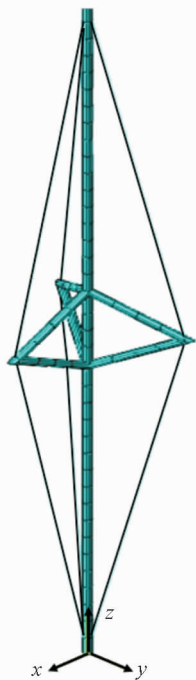


图 2 有限元模型示意图

2 屈曲分析

2.1 线性屈曲分析

2.1.1 模态分析

对预应力斜撑杆柱进行线性屈曲分析，发现这类构件通常会呈现出图 3 所示的这几种屈曲模态。图 3 (a)模态一及(c)模态三所示为对称屈曲模态、(b)模态二及(d)模态四所示为反对称屈曲模态，对于(a)模态一及(b)模态二两种屈曲情况而言，中心柱的最大侧向挠度大多出现在柱高四分之一处；对于(c)模态三所示的屈曲情况而言，中心柱的最大侧向挠度出现在柱跨中位置；对于(d)模态四所示的屈曲情况而言，中心柱的最大侧向挠度在柱高八分之一处。

表 1 为图 3 中相对应模态的分析模型参数。可以看出，当拉索直径较小、撑杆长度较小、撑杆及水平方向夹角较小时，对称屈曲模态为主要屈曲方式，随着拉索直径、撑杆长度或撑杆与水平方向夹角的增加，

预应力钢柱呈现反对称屈曲模态。当撑杆与水平方向夹角增加时, 柱中部与撑杆相交处的距离增加, 该部分的轴向刚度减小, 故发生形变, 使屈曲模态改变。

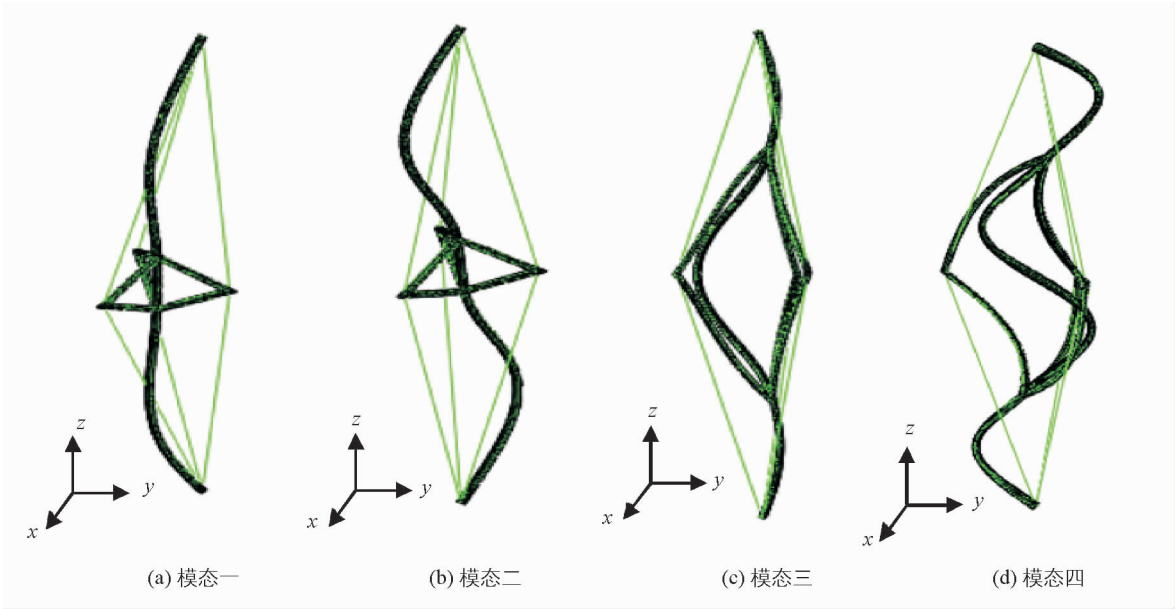


图 3 线性屈曲模态图

表 1 对应模态分析模型参数值

	模态一	模态二	模态三	模态四
撑杆水平长度(L_a)/mm	300	300	450	450
拉索直径(D)/mm	3.2	8.0	3.2	8.0
撑杆与水平方向夹角(α)/°	15	15	60	60

2.1.2 线性屈曲对比分析

由图 1(b)可知, 当撑杆倾角 $\alpha=0^\circ$ 时, 斜撑杆预应力钢柱变化为水平撑杆预应力钢柱。为了评价撑杆和拉索对受压钢柱稳定性能的影响, 本节拟对斜撑杆预应力钢柱、水平撑杆预应力钢柱以及不设撑杆的中心柱进行线性屈曲分析。

图 4 所示为三类受压钢柱的线性屈曲荷载。可以看出, 相较不添加撑杆的中心柱而言, 预应力撑杆钢柱可以将中心钢柱的承载力提高二倍以上, 相较水平撑杆钢柱而言, 斜撑杆钢柱能更好地提高中心柱的承载能力。由图 4(a)可知, 斜撑杆预应力钢柱的线性荷载值随着 L_a 的增加而增加。水平撑杆预应力钢柱的线性荷载先增后减, 当 L_a 小于 300 mm 时, 水平撑杆预应力钢柱的线性荷载随着 L_a 的增加而增加; 当 L_a 大于 300 mm 时, 其线性荷载随着 L_a 的增加而降低。由图 4(b)可知, 斜撑杆预应力钢柱的线性荷载值较高, 且其线性荷载随着索径 D 的增加呈直线增长。水平撑杆预应力钢柱线性荷载增长趋势先大后小, 当 D 小于 4.8 mm 时, 其线性荷载随着 D 的增加而增加; 当 D 大于 4.8 mm 时, 随着 D 的增加, 其线性荷载增长缓慢。综上所述, 斜撑杆形式的预应力钢柱能够显著提高结构的屈曲荷载, 可以改善水平撑杆预应力钢柱在撑杆长度及索径较大时, 屈曲荷载增长缓慢甚至出现下降的情况。

2.2 非线性屈曲分析

2.2.1 初始预应力计算

对于预应力撑杆钢柱而言, 预应力的设置尤其关键。近来, 理论最优初始预应力 T_{opt} 被用作施加初始预应力的基准。据文献[5]所述方法, 推求了斜撑杆预应力钢柱为拉索施加的理论最优初始预应力 T_{opt} 的计算公式。当撑杆与水平方向的倾角为 0° 时, 斜撑杆柱变为水平撑杆的预应力钢柱, 其理论最优初始预应力 T_{opt} 计算如文献[11]。

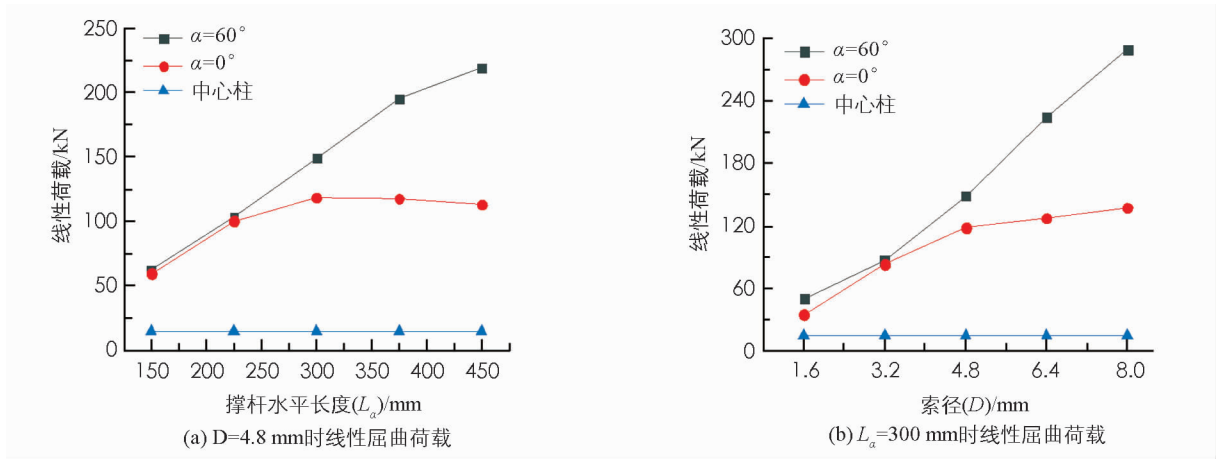


图 4 三类受压钢柱的线性屈曲荷载

斜撑杆预应力钢柱初始预应力 T_{opt} 的计算公式为

$$T_{\text{opt}} = \frac{C_1}{C_2} P_{T=0}^C \tag{1}$$

其中, $P_{T=0}^C$ 是初始预应力为 0 时的临界屈曲载荷, 系数 C_1 和 C_2 计算如下:

$$C_1 = \frac{\frac{\cos\beta}{K_{c1}} + \frac{\cos\beta}{K_{c2}} - \frac{\sin\beta\cos\gamma}{2K_{c2}\sin\gamma}}{\left[\frac{3\cos^2\beta}{K_{c1}} + \frac{3\sin^2\gamma\cos^2\beta - 6\sin\beta\sin\gamma\cos\beta\cos\gamma + 3\sin^2\beta\cos^2\gamma}{2K_{c2}\sin^2\gamma} - \frac{\sin^2\beta}{K_a\sin^2\gamma} + \frac{1}{K_s} \right]} \tag{2}$$

$$C_2 = \frac{\frac{3\cos^2\beta}{K_{c1}} + \frac{3\sin^2\gamma\cos^2\beta - 6\sin\beta\sin\gamma\cos\beta\cos\gamma + 3\sin^2\beta\cos^2\gamma}{2K_{c2}\sin^2\gamma} - \frac{\sin^2\beta}{K_a\sin^2\gamma} + \frac{1}{K_s}}{\frac{1}{K_s} + \frac{3\sin^2\beta\cos^2\gamma - 3\sin\gamma\cos\gamma\sin\beta\cos\beta}{2K_{c2}\sin^2\gamma} - \frac{\sin^2\beta}{K_a\sin^2\gamma}} \tag{3}$$

预应力计算示意图如图 5。其中, β 是拉索及中心柱间的夹角, γ 是斜撑杆与中心柱间的夹角, K_{c1} 是中心柱 L1 段的轴向刚度, K_{c2} 是中心柱 L2 段的轴向刚度, K_s 及 K_a 分别为拉索及撑杆的轴向刚度, 可按(4) 式计算:

$$K_{c1} = \frac{E_{c1}A_{c1}}{L_{c1}}, K_{c2} = \frac{E_{c2}A_{c2}}{L_{c2}},$$
$$K_s = \frac{E_sA_s}{L_s}, K_a = \frac{E_aA_a}{L_{a0}} \tag{4}$$

其中, L_{c1} , A_{c1} 及 E_{c1} 为中心柱 L1 段的长度、横截面积与弹性模量; L_{c2} , A_{c2} 及 E_{c2} 为中心柱 L2 段的长度、横截面积与弹性模量; L_s , A_s 及 E_s 为拉索的长度、横截面积及弹性模量; L_{a0} , A_a 及 E_a 为撑杆的长度、横截面积及弹性模量。

2.2.2 结果分析

本文在非线性屈曲分析时, 将第一阶线性屈曲模态作为斜撑杆预应力钢柱的初始几何缺陷分布形状。初始

缺陷取为 $L/300$, 其中 L 为中心柱长度, 拉索初始预应力取为 T_{opt} 。据 2.1 节可知斜撑杆预应力钢柱的线性屈曲荷载会随索径 D 及撑杆水平长度 L_a 的增加而增加, 本节将就斜撑杆预应力钢柱的倾角对钢柱的承载力及索力的影响进行研究。分析时 L_a 取 300 mm、 D 取 4.8 mm, 倾角 α 取 15° 及 60° 。图 6 所示为斜撑杆预应力钢柱在不同倾角时的荷载—位移曲线, 横坐标位移为中心柱的轴向压缩长度。由图 6 可知, 倾角 $\alpha=15^\circ$ 及倾角 $\alpha=60^\circ$ 的斜撑杆钢柱荷载—位移曲线在未达到极限荷载值前增长斜率相同, 即二者的初始刚

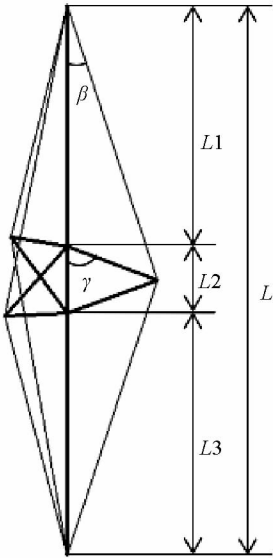


图 5 预应力计算示意图

度相同,但是斜撑杆倾角越大,预应力斜撑杆钢柱的承载力越高.

图 7 所示为预应力斜撑杆钢柱的索应力一位移曲线,横坐标位移为中心柱的轴向压缩长度,其中拉索编号如图 8 所示.可以看出,拉索 1 及拉索 4 的索应力很快降低至 0,拉索进入松弛状态;拉索 2、拉索 3、拉索 5 及拉索 6 的索应力先小幅减小后迅速增大,因此这些拉索对中心柱的约束也增大.对 $\alpha=15^\circ$ 的斜撑杆钢柱而言,随着位移增大,拉索 2,3,5,6 的索应力逐渐增大,但当压缩量大于 15 mm 时,增大趋势减缓.对 $\alpha=60^\circ$ 的斜撑杆钢柱而言,随着压缩量增大,拉索 2,3,5,6 的索应力会先增大后减小,当压缩量小于 15 mm 时,索应力逐渐增大;当压缩量大于 15 mm 时,索应力开始减小.换言之,撑杆倾角会影响拉索对中心柱的作用力,从而会影响预应力斜撑杆钢柱的承载力.

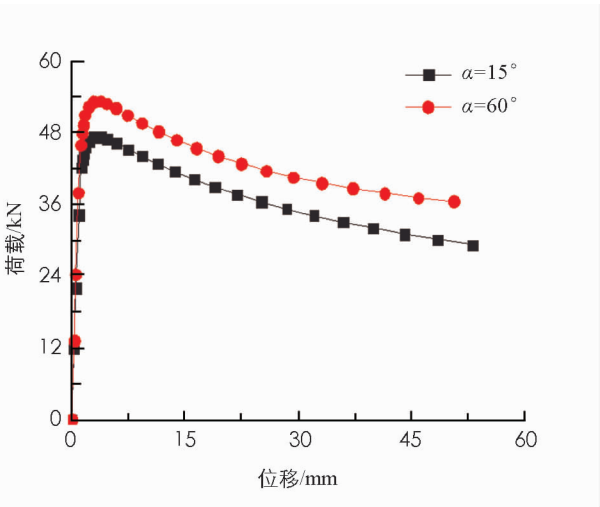


图 6 不同倾角时斜撑杆
预应力钢柱荷载一位移曲线

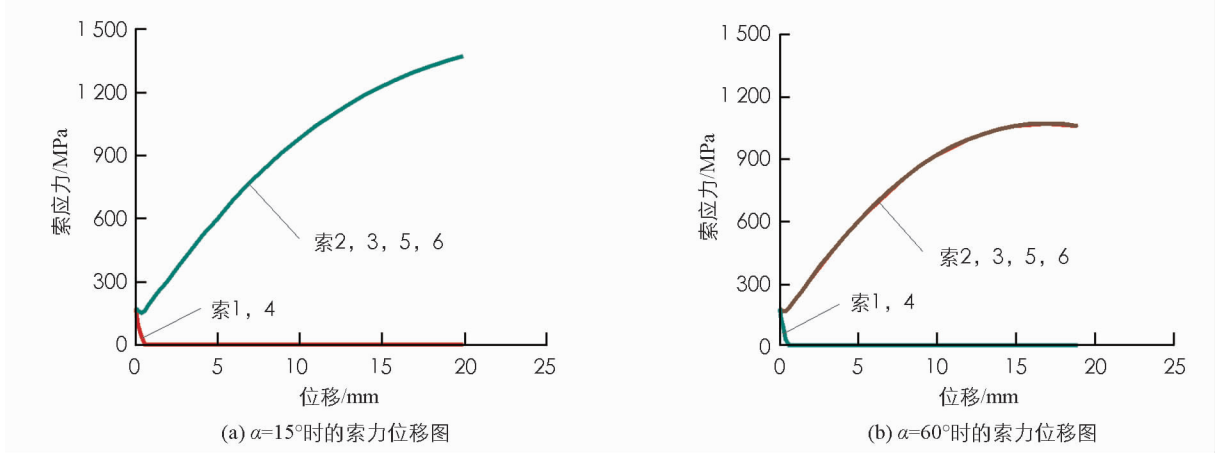


图 7 预应力斜撑杆钢柱索应力一位移曲线

3 参数分析

3.1 缺陷敏感性分析

为研究初始缺陷对斜撑杆预应力钢柱承载能力的影响,本节采用初始缺陷值分别为 $L/10\ 000$, $L/3\ 000$, $L/1\ 500$, $L/1\ 000$, $L/500$, $L/300$ 和 $L/200$ (L 为中心柱长度) 的斜撑杆预应力钢柱进行分析.分析时 L_a 取 300 mm、 D 取 4.8 mm、倾角 α 取 15° 及 60° ,将第一阶线性屈曲模态作为初始几何缺陷分布形状,拉索初始预应力取 T_{opt} .结果如图 9 所示,图 9(a),(c) 中横坐标所示位移是中心柱轴向压缩长度.

由图 9 可知,增加初始缺陷值会降低斜撑杆预应力钢柱的承载力,且随初始缺陷的增加,倾角 $\alpha=15^\circ$ 及 $\alpha=60^\circ$ 的斜撑杆预应力钢柱极限荷载的下降趋势一致.另外,初始缺陷值越小,斜撑杆钢柱达到极限荷载时对应的中心柱轴压位移越大.由图 9(a)、(c) 可知,在达到极

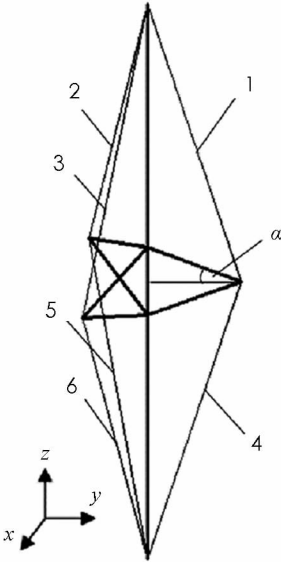


图 8 拉索编号图

限荷载前,斜撑杆钢柱的荷载-位移曲线的增长斜率相同均呈直线增长;在达到极限荷载值后,斜撑杆钢柱的荷载-位移曲线下降速率加快,初始缺陷值越小,斜撑杆钢柱的荷载-位移曲线下降速率越快,荷载-位移曲线越尖锐,初始缺陷值越大,斜撑杆钢柱的荷载-位移曲线下降速率越慢,荷载-位移曲线越平缓.由图 9 (b)、(d)可知,撑杆倾角 α 越大,斜撑杆钢柱的极限荷载值越大,极限荷载随初始缺陷值的增大呈直线下降,相较而言初始缺陷值大于 $L/1\,000$ 时,斜撑杆钢柱的极限荷载降低速率较初始缺陷值小于 $L/1\,000$ 时略快.

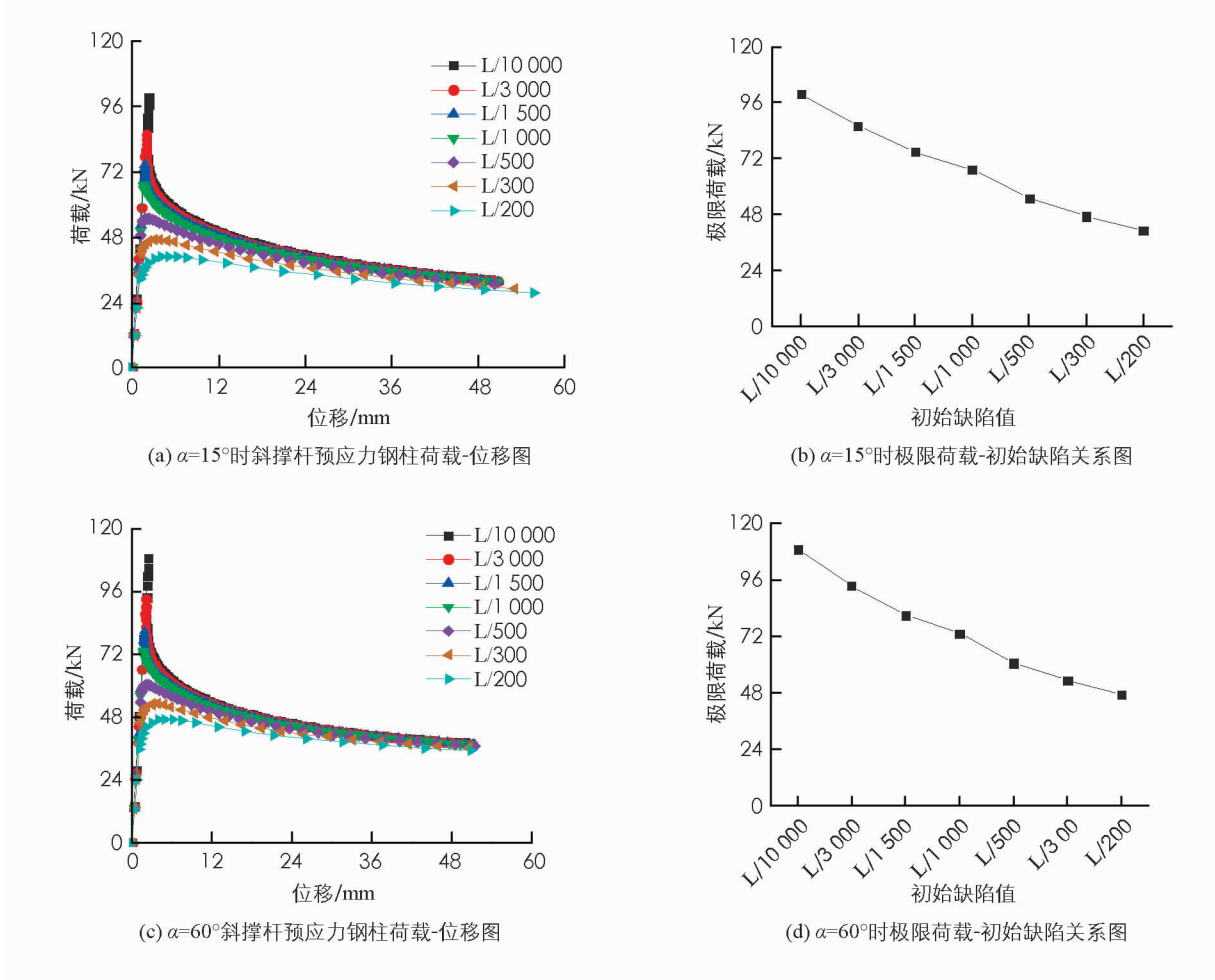


图 9 斜撑杆预应力钢柱缺陷敏感性分析

3.2 预应力敏感度分析

为研究为拉索施加的初始预应力对斜撑杆预应力钢柱承载能力的影响,本节采用拉索初始预应力分别为 T_{opt} , $2T_{\text{opt}}$, $3T_{\text{opt}}$, $4T_{\text{opt}}$, $5T_{\text{opt}}$, $6T_{\text{opt}}$, $7T_{\text{opt}}$, $8T_{\text{opt}}$, $9T_{\text{opt}}$ 和 $10T_{\text{opt}}$ 的斜撑杆预应力钢柱进行分析.分析时将第一阶线性屈曲模态作为初始几何缺陷分布形状,初始缺陷取 $L/300$ (L 为中心柱长度), L_a 取 300 mm、 D 取 4.8 mm,倾角 α 取 15° 及 60° ,结果如图 10 所示,图 10(a)、(c)中横坐标所示位移是中心柱轴向压缩长度.

结合图 10(a)和图 10(c)可知,随着拉索初始预应力的增加,斜撑杆柱的承载力呈增大趋势,拉索初始预应力越大,斜撑杆柱达到极限承载力时中心柱的轴向压缩位移越大,倾角 α 越大,斜撑杆柱的极限承载力-位移点分布越接近.结合图 10(b)和图 10(d)可知,当初始预应力小于 $6T_{\text{opt}}$ 时,随着初始预应力的增加,斜撑杆柱的极限承载力都呈增大趋势;当初始预应力大于 $6T_{\text{opt}}$ 时,斜撑杆柱的极限承载力增长幅度减小;当初始预应力达到 $9T_{\text{opt}}$ 时,斜撑杆柱的极限承载力都开始下降.这说明为拉索施加的初始预应力取值不宜过大,否则会影响结构后屈曲性能.

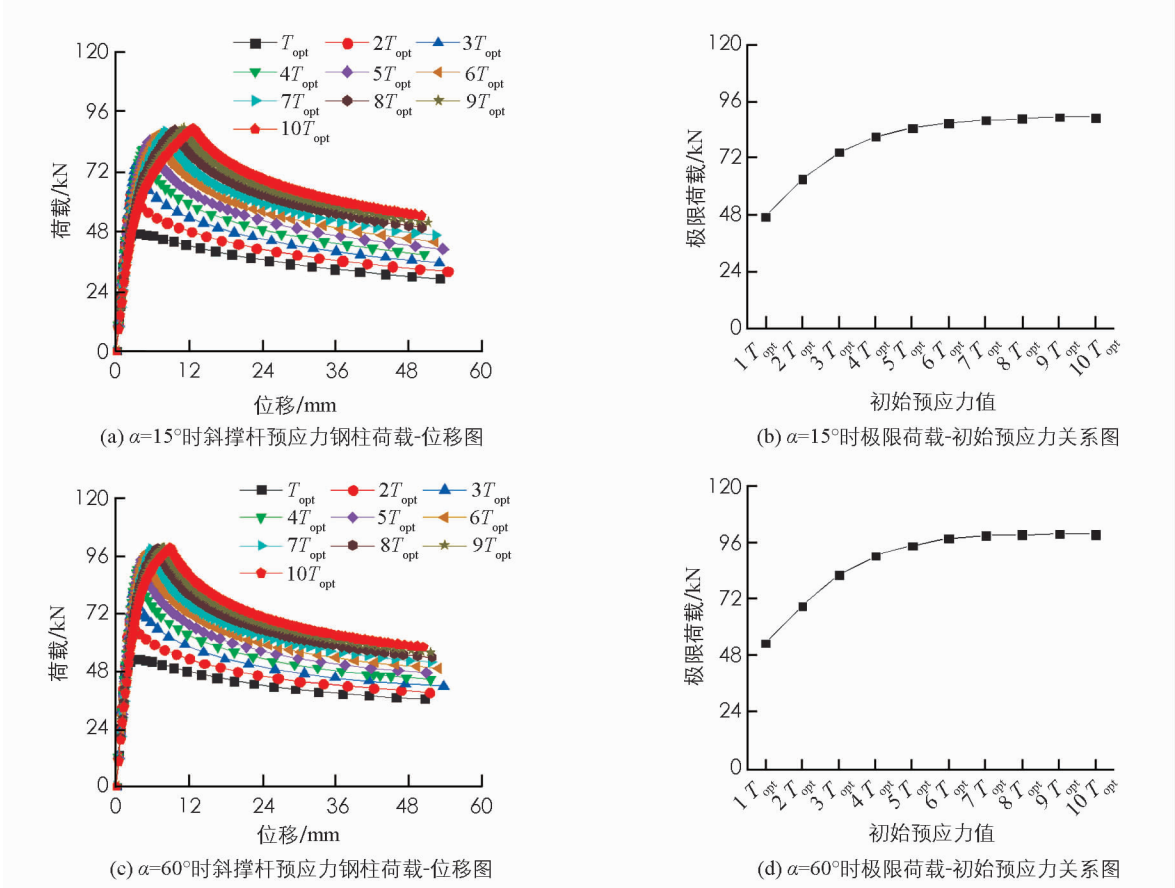


图 10 斜撑杆预应力钢柱预应力敏感度分析

3.3 支座约束的影响

在上述分析中,柱端约束均为铰接,为考虑支座约束对预应力撑杆钢柱稳定性能的影响,因此本节将考虑柱端约束为刚接和铰接两种情况.分析时 L_a 取300 mm、 D 取4.8 mm, α 取 15° 及 60° ,初始缺陷取 $L/300$ (L 为中心柱长度),拉索初始预应力取 T_{opt} .不同支座条件下斜撑杆预应力钢柱承载力随中心柱轴压位移变化的关系如图11,图中横坐标位移表示中心柱轴向压缩长度.由图11可知,增大倾角 α 可以提升斜撑杆预应力钢柱的承载性能,但增大 α 对支座刚接的斜撑杆预应力钢柱承载性能的提升效果大于同等条件下支座铰接的斜撑杆预应力钢柱.同时还可以看出,支座刚接的斜撑杆预应力钢柱的承载能力明显高于支座铰接的斜撑杆预应力钢柱.

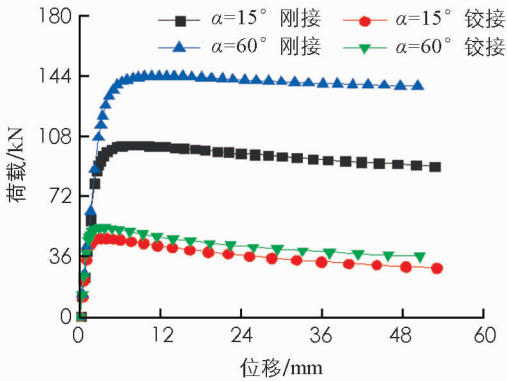


图 11 不同支座条件下
斜撑杆预应力钢柱荷载-位移图

4 结 论

- 1) 相较无撑杆的中心柱及水平撑杆预应力钢柱而言,斜撑杆预应力钢柱能更好地提高受压钢柱的承载能力,增大撑杆长度和拉索直径均会提升这类结构构件的承载能力.
- 2) 缺陷敏感性和预应力敏感度分析表明,预应力支撑钢柱为缺陷敏感型构件.在这类构件中,适当提高初始预应力水平可以提升这类结构构件的承载能力,但是过高的初始预应力并不会进一步改善其承载能力.
- 3) 柱端约束为刚接的斜撑杆预应力钢柱承载能力明显大于支座采用铰接方式的斜撑杆预应力钢柱,

增大斜撑杆倾角 α 对支座刚接的斜撑杆预应力钢柱承载性能的提升效果大于同等条件下支座铰接的斜撑杆预应力钢柱.

参考文献:

- [1] 舒赣平, 候善民, 陈大好, 等. 内撑式预应力撑杆柱的稳定承载能力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 79-117.
- [2] TEMPLE M C. Buckling of Stayed Columns [J]. Struct. Div. ASCE, 1977, 103(4): 839-851.
- [3] SMITH R J, ELLIS J S, McCAFFERY G T. Buckling of a Single-Crossarm Stayed Column [J]. Journal of the Structural Division, 1975, 101(1): 249-268.
- [4] CHAN S L, SHU G P, LÜ Z T. Stability Analysis and Parametric Study of Pre-Stressed Stayed Columns [J]. Engineering Structures, 2002, 24(1): 115-124.
- [5] HAFEZ H H, TEMPLE M C, ELLIS J S. Pretensioning of Single-Crossarm Stayed Columns [J]. Journal of the Structural Division, 1977, 105(2): 359-375.
- [6] SAITO D, WADEE M A. Numerical Studies of Interactive Buckling in Prestressed Steel Stayed Columns [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 432-443.
- [7] MARTINS J P, SHAHBAZIAN A, LUÍS SIMÕES DA SILVA L, et al. Structural Behaviour of Prestressed Stayed Columns with Single and Double Cross-Arms Using Normal and High Strength Steel [J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2016, 16(4): 618-633.
- [8] 刘学春, 许可冉, 张爱林. 高性能钢预应力撑杆柱整体稳定性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 156-161.
- [9] 张文福, 李 洋, 刘迎春, 等. 单横隔预应力撑杆柱对称与反对称屈曲的近似公式与参数分析 [J]. 空间结构, 2019, 25(1): 31-39.
- [10] 杨浴儿, 孟二从, 乔 克, 等. 箱形预应力撑杆钢柱整体稳定性能研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 100-105.
- [11] LI P C, WADEE M A, YU J L, et al. Stability of Prestressed Stayed Steel Columns with a Three Branch Crossarm System [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 274-291.

Buckling Capacity Analysis of Axially Compressed Prestressed Stayed Steel Columns with Split-up Crossarm Systems

ZHANG Xu, YUAN Jun,
HOU Bo-yu, MENG Er-cong, QIAO Ke

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: The prestressed stayed steel column has the advantages of good bearing performance, strong stability and material saving, and has been widely used in modern steel structure engineering. In this paper, the axially compressed prestressed stayed steel columns has been taken as the research object, and the linear and nonlinear buckling analysis been carried out by ABAQUS software. The effects of various factors such as the length of the crossarm, the diameter of the stay, the angle between the split-up crossarm and the horizontal direction, the initial imperfections and the bearing constraints on the bearing capacity of the prestressed stayed steel column have been investigated. The research in this paper shows that the length of the crossarm, the diameter of the stay, the angle between the split-up crossarm and the horizontal direction will affect the bearing capacity of the prestressed stayed steel column with split-up crossarm. In addition, the imperfection sensitivity and initial pretension sensitivity analysis of this paper also show that the prestressed stayed steel column with split-up crossarm is a kind of imperfection-sensitive component. Excessively increasing the initial stay pretension does not significantly improve its bearing capacity.

Key words: prestressed stayed steel columns; split-up crossarm; buckling analysis; buckling capacity

责任编辑 汤振金