

新型钢束柱体系的稳定性能研究

王庆贺¹,王仕奇¹,陈宇²,张龙巍²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究新型钢束柱体系的稳定性能,为实际工程的应用及相关试验研究提供理论依据。**方法** 基于边缘屈服准则建立稳定性计算模型,分析弦板间距、计算长度、荷载偏心距、荷载角等参数对构件稳定性能的影响规律。**结果** 钢束柱体系的稳定性能随弦板间距、计算长度、荷载偏心距的增大而降低,而单肢柱的稳定性不受计算长度影响;钢束柱体系的稳定性随荷载角的增大呈现先减后增的趋势,其中四肢钢束柱体系的单肢柱稳定性不受荷载角影响;当荷载角 $\theta > 36.7^\circ$ 时,采用环形弦板的六肢钢束柱体系的单肢柱稳定性优于采用矩形弦板的六肢钢束柱体系的单肢柱稳定性。**结论** 考虑荷载初偏心时,六肢钢束柱体系的稳定性优于四肢钢束柱体系,其中采用矩形弦板的束柱体系的稳定性优于采用环形弦板的束柱体系。

关键词 钢束柱体系;单肢柱;双向压弯;稳定性;最不利荷载角

中图分类号 TU318

文献标志码 A

Structural Stability of New Type Steel Bound-Column System

WANG Qinghe¹, WANG Shiqi¹, CHEN Yu², ZHANG Longwei²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The stability behavior of new type steel bound-column system was investigated so as to provide a theoretical basis for practical engineering application and related experimental research. Following the edge yield criterion this stability calculation model of the new type steel bound-column system is established to analyze the influence of chord spacing, calculation length, load eccentricity and load angle on the stability performance of components. The stability performance of steel bound-column system decreases with increasing load eccentricity, chord-plate spacing and calculation length, while the stability of single column is independent of calculation length. The stability of the steel bound-column system first decreases and then increases with increasing load angle. The single column stability of the four-limb steel bound-column system is not affected by

收稿日期:2021-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51978418);天津市科技计划项目(18ZXGDGX00030);辽宁省科技厅博士科研启动项目(2019-BS-193);沈阳市中青年科技人才项目(RC200143)

作者简介:王庆贺(1987—),男,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构方面研究。

load angle. When the load angle θ is greater than 36.7° , the single column stability of the six-limb steel bound-column system with annular chord plate is better than that of the six-limb steel bound-column system with reinforcement chord plate. The stability of the six-limb steel bound-column system is better than that of the four-limb steel bound-column system when considering the initial load eccentricity, and the bound-column system with rectangular chord plate better than that with annular chord plate.

Key words: steel bound-column system; single column; biaxial bending and compression; stability; least favorable loading angle

模块化建筑运用图解生成与转换设计的方式分析建筑原型,通过合理的模数控制对建筑原型进行标准化和规格化分解,形成标准化杆件、连接节点以及构成模块,通过对部件的叠加及转化形成结构模块^[1]。装配式钢结构可采用格构柱,将多根单肢柱通过缀条或缀板连接。模块化装配式钢结构作为一种高度工业化的建筑,结合了模块化建筑及装配式钢结构的设计思路,具有施工效率高、安全性强及质量好等优点^[2-3]。工程应用中,钢结构格构柱所受荷载方向与主轴有一定偏离,使构件处于双向压弯状态。因此,解决构件在双向压弯状态下的稳定问题是保证工程质量的关键。鹿翰^[4]分析了长细比、分肢间距等因素对双肢格构柱稳定性的影响,得到各因素对双肢格构柱稳定性的影响规律:随长细比及分肢间距的增大,双肢格构柱的稳定性降低;通过对不同角度布置下格构柱的用钢量及临界荷载进行分析,认为缀条与单肢柱轴线的合理夹角为 $40^\circ \sim 55^\circ$ 。杨有福等^[5-7]针对三肢钢管格构柱的极限承载力及抗震性能进行了研究,将试验结果及规范结果进行对比,发现随着单肢柱钢管壁厚的增加,构件承载力及初始刚度逐渐增大,规范公式计算结果偏于安全。柯晓军等^[8-13]对四肢钢管格构柱在压弯条件下的稳定问题进行分析,在考虑几何和材料非线性基础上,研究了初弯曲对构件稳定性的影响,认为初弯曲为构件长度的0.1%时,稳定承载力下降约10%,之后每增加0.1%,稳定承载力下降约5%。杨应华^[14]等对压弯状态下四

肢钢管混凝土格构柱的稳定性进行分析,得到偏心距、偏心率等因素对四肢格构柱稳定性的影响规律:随偏心距、偏心率增大,四肢格构柱的稳定性降低。目前,针对钢束柱体系稳定性的研究尚未见到报道,且现有的钢结构规范或规程的计算方法不能直接用于钢束柱体系的稳定性计算。

基于此,笔者提出四肢及六肢钢束柱稳定性及最不利荷载角的计算方法。分析弦板用钢量相同时,弦板间距、计算长度、荷载偏心距、荷载角对四肢及六肢钢束柱的整体稳定性及单肢柱稳定性的影响规律,量化各因素对钢束柱体系稳定性的影响幅度,为相关工程应用提供参考依据。

1 钢束柱稳定性理论分析

1.1 钢束柱体系设计

基于模块化钢结构建筑理念,笔者提出了一种新型钢束柱体系如图1所示。该体系包括多根单肢柱、法兰紧固盘及接樨梁等组件。其中单肢柱作为竖向受力构件,由上旋柱、连接柱、下旋柱构成,上、下旋柱通过连接柱成为整体,束柱加固弦板可以提高构件的抗剪能力,接樨梁为横向受力构件。法兰紧固盘作为核心的连接转换部件,固盘内部设置均质的柱孔,可以根据不同空间和承载需要,将不同数量的单肢柱及接樨梁通过樨卯锁连接。钢束柱体系可塑性强,当作用于钢束柱体系上的荷载发生变化时,可通过对梁柱系统的调配和法兰紧固盘的叠加布置,为钢束柱体系提供多种连接方式,从而提高钢

束柱体系的精确性及高效性。钢束柱体系采用自锁式构造,可避免实体单元的柱体向杆件模块化过程中受到单量度的限制,进而通过杆件的阵列形成一定的空间体系,因此相对于传统的实体单元,阵列化杆件更显轻盈,更具空间视觉转化性。

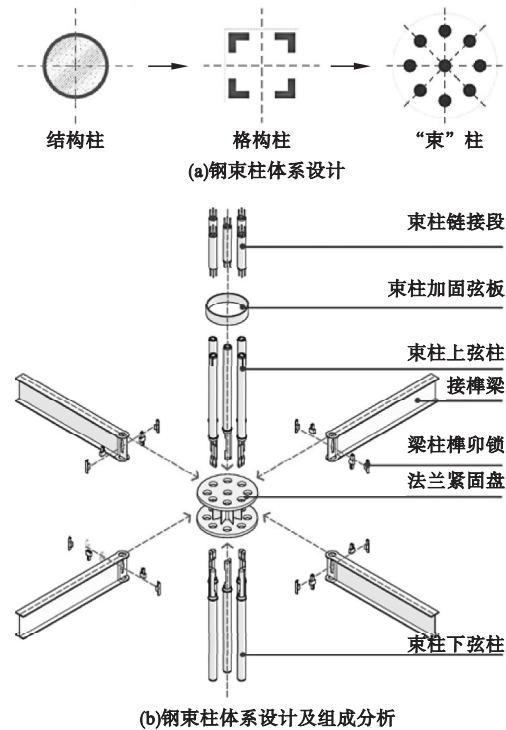


图1 钢束柱体系设计及组成分析

Fig. 1 Design and composition analysis of steel bound-column system

1.2 钢束柱体系及单肢柱的稳定性分析

钢束柱体系的实际受力状态复杂,笔者基于其典型的受力形式提出稳定性计算方法。法兰紧固盘作为核心连接部件,可以抵抗轴向压力、弯矩、剪力及局部挤压力,因此将法兰紧固盘视作固定端,钢束柱体系采取两端固定的边界条件。钢束柱体系采用弦板与法兰紧固盘共同加强单肢柱的整体性,在分析单肢柱稳定性时,计算长度取相邻弦板间净距。钢束柱体系的稳定性采用边缘屈服准则,构件的应力变化服从线弹性规律,不考虑截面塑性发展。钢束柱体系的应力为

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq f_y \tag{1}$$

式中: σ 为构件截面边缘处的正应力; A 为构件的截面面积; N 为构件的轴向压力; M_x 、 M_y 为作用在构件主轴方向的弯矩; W_x 、 W_y 为弹性截面模量。

考虑荷载初偏心时,钢束柱体系受到沿杆轴线的轴力和绕截面两个形心主轴方向的弯矩,结构处于双向压弯状态。钢束柱体系的整体稳定性采用《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)中规定双向压弯构件的计算方法:

$$\frac{N}{\varphi A f_y} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma W_{1x} f_y \left(1 - \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} + \frac{\beta_{my} M_y}{W_{1y} f_y} \leq 1.0 \tag{2}$$

式中: W_{1x} 、 W_{1y} 为弯矩作用平面内对受压最大纤维的毛截面模量; $M_x = Ne_o \cos \theta$ 、 $M_y = Ne_o \sin \theta$; e_o 为偏心距; θ 为荷载角; β_{mx} 、 β_{my} 为弯矩等效系数,假定钢束柱体系所受双向弯矩沿杆长相同,弯矩等效系数采用1.0;由于钢束柱体系的截面中部空心,不考虑塑性发展,故弯矩作用平面内均采用边缘屈服准则,塑性发展指数 γ 取1.0; N'_{Ex} 为折减后的欧拉临界力; φ 为构件在轴心受压条件下的稳定系数。束柱体系采用换算长细比:

$$\lambda_{ox} = \sqrt{\lambda_x^2 + \lambda_1^2} \tag{3}$$

式中: λ_x 为构件对 x 轴的长细比; λ_1 为单肢柱对最小刚度轴的长细比,计算长度取相邻弦板间的净距。

荷载角指荷载作用点与截面形心连线和截面形心轴的正向夹角^[12]。当荷载的作用点与截面形心主轴的角度达到最不利荷载角时,钢束柱体系易发生压弯失稳。针对式(2)中关于荷载角 θ 的项数进行求导,得到钢束柱体系的最不利荷载角的计算方法:

$$\theta = \arctan \left[\frac{W_{1x}}{W_{1y}} \left(1 - \frac{N}{N'_{Ex}}\right) \right] \tag{4}$$

单肢柱处于双向压弯状态时,构件会因受力过大进而丧失稳定性。单肢柱的稳定性检验采用《钢结构设计标准》(GB50017—2017)中规定双向压弯圆管的计

算方法:

$$\frac{N}{\varphi A f_y} + \frac{\beta M}{\gamma W_{f_y} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} \leq 1.0. \quad (5)$$

式中: M 为双向压弯圆钢构件整体稳定性的弯矩值,其值为 $M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$; β 为弯矩等效系数,取1.0;《钢结构设计标准》(GB50017—2017)规定圆钢构件采用实腹截面时,塑性发展系数取1.2。实腹式圆钢构件在各主轴上的弹性截面模量相同,此时,单肢柱的最不利荷载角为 0° 及 90° 。

单肢柱数量增多可以增强束柱体系的稳定性,但同时导致用钢量增加,经济性降低。为此,笔者设计了4种新型构件,分别采用环形弦板的四肢及六肢钢束柱体系、矩形弦板的四肢及六肢钢束柱体系,量化单肢柱数量及弦板形式对钢束柱体系及单肢柱稳定性的影响。

1.3 四肢钢束柱体系的稳定分析

1.3.1 采用矩形弦板的四肢钢束柱体系

四肢钢束柱体系采用矩形弦板时,构件以虚轴作为弯曲轴。为增强钢束柱体系的整体性能,使主轴方向单肢柱间距相等。此时,各单肢柱至主轴的距离相同,即 $L = B$ 。构件的形式如图2所示。

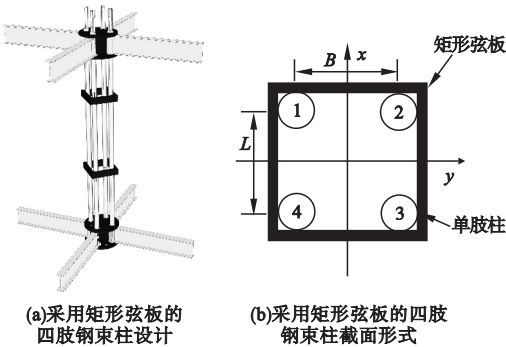


图2 采用矩形弦板的四肢钢束柱

Fig. 2 Four-tube steel bound-column with rectangular chord plate

钢束柱体系及单肢柱的应力分布服从线弹性规律,图3为四肢钢束柱体系的外力分布及单肢柱受力情况。

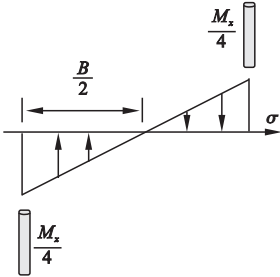


图3 四肢钢束柱的应力分析

Fig. 3 Stress analysis of four-tube steel bound-column

此时,作用在单肢柱上的轴向压力为 $N/4$ 、弯矩为 $M/4$ 。其中 M 为荷载初偏心产生的附加弯矩。基于此,可以得到四肢钢束柱体系的单肢柱稳定性计算方法:

$$\frac{N}{4\varphi A f_y} + \frac{M}{4.8 W_{f_y} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} \leq 1.0. \quad (6)$$

式中: d 为单肢柱的直径。

由此可知,作用在单肢柱上的力与荷载角取值无关,单肢柱的稳定性与荷载角无关。

构件在弯矩作用平面内对受压最大纤维的毛截面模量 $W_{1x} = W_{1y}$ 相同,得到四肢钢束柱体系的最不利荷载角为

$$\theta = \arctan \left(1 - \frac{N}{N'_{Ex}}\right). \quad (7)$$

式中: $1/(1 - \frac{N}{N'_{Ex}})$ 为考虑二阶弯矩的放大因子。

1.3.2 采用环形弦板的四肢钢束柱体系

四肢钢束柱体系采用环形弦板时,构件的形式如图4所示。构件的受力情况与采用矩形弦板的四肢钢束柱一致,可按照边缘屈服准则及线弹性规律的基本原则对该构件整体稳定性和单肢柱的稳定性进行分析。当采用的环形及矩形弦板的用钢量相同时,采用矩形弦板的四肢钢束柱体系对主轴的弹性抗弯模量大,具有更好的抗弯性能,而两种体系中单肢柱的稳定性是一致的,均可采用式(6)进行计算。

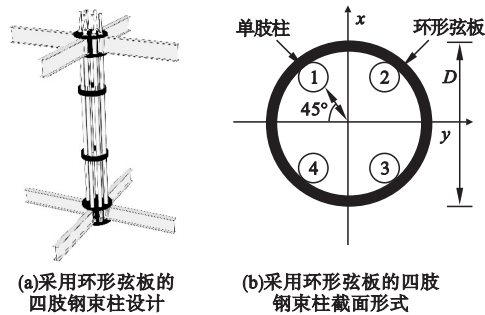


图 4 采用环形弦板的四肢钢束柱

Fig. 4 Four-tube steel bound-column with an annular chord plate

1.4 六肢钢束柱体系的稳定分析

1.4.1 采用矩形弦板的六肢钢束柱体系

采用矩形弦板的六肢钢束柱体系的受力状态较四肢钢束柱体系复杂,构件以虚轴及实轴作为弯曲轴。此时,构件主轴方向上的单肢柱间距相等即 $L=2B$ 。构件的形式如图 5 所示。

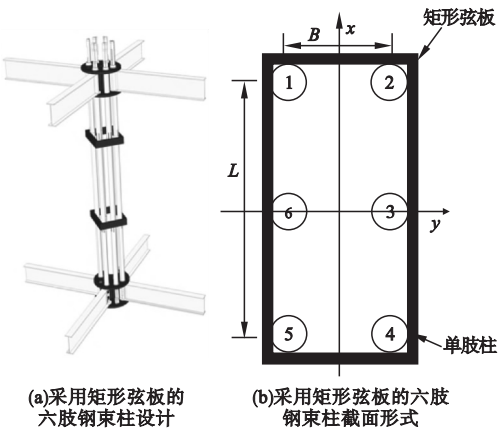


图 5 采用矩形弦板的六肢钢束柱

Fig. 5 Six-tube steel bound-column with rectangular chord plate

该束柱体系在双向压弯状态下的外力分布及单肢柱受力情况如图 6 所示。该束柱体系的受力特点为实轴上两根单肢柱仅承受实轴方向的弯矩,作用在虚轴的弯矩由顶点的四根单肢柱承担,实轴上单肢柱用 Z1 表示,顶点的单肢柱用 Z2 表示。得到各单肢柱的受力情况如表 1 所示。

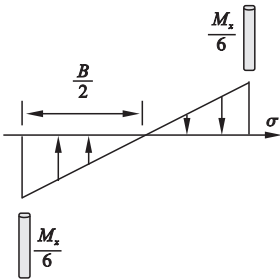


图 6 采用矩形弦板的六肢钢束柱的应力分析

Fig. 6 Stress analysis of six-tube steel bound-column with rectangular chord plate

表 1 各单肢柱受力分析

Table 1 Force analysis of each unit column			
单肢柱号	轴向压力	作用在 x 轴的弯矩	作用在 y 轴的弯矩
Z1	$N/6$	0	$M_x/6$
Z2	$N/6$	$M_y/4$	$M_x/6$
Z3	$N/6$	0	$M_x/4$
Z4	$N/6$	$M_y/4$	$M_x/8$

基于此,可以得到采用矩形弦板时,六肢钢束柱体系的单肢柱稳定性计算方法:

$$\frac{N}{6\phi A f_y} + \frac{\sqrt{\left(\frac{M_y}{4}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{6}\right)^2}}{1.2 W f_y \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} \leq 1.0. \quad (8)$$

当矩形加固弦板的长为宽的 2 倍时, $W_{lx} = 4/3 W_{ly}$ 。该束柱体系的最不利荷载角为

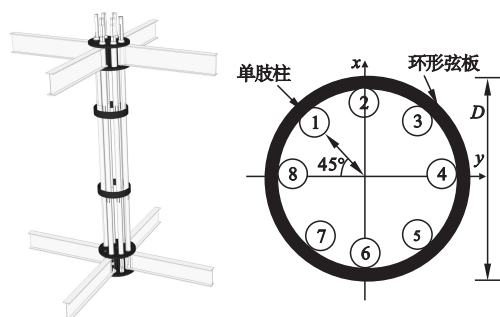
$$\theta = \arctan \left[\frac{4}{3} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}} \right) \right]. \quad (9)$$

分析式(8)可知,当荷载角 $\theta = 90^\circ$ 时,单肢柱的稳定性最差。

1.4.2 采用环形弦板的六肢钢束柱体系

六肢钢束柱体系采用直径为 D 的环形弦板时,构件在虚轴上的受力情况与采用矩形弦板的六肢钢束柱一致,构件形式如图 7 所示。

图 8 为该束柱体系在主轴方向的外力分布及单肢柱受力情况。该束柱体系中,实轴上的 2 个单肢柱受力大小相同,四角上 4 个单肢柱的受力大小亦相同。实轴上单肢柱用 Z3 表示,四角上的单肢柱用 Z4 表示,各单肢



(a)采用环形弦板的六肢钢束柱设计

(b)采用环形弦板的六肢钢束柱截面形式

图7 采用环形弦板的六肢钢束柱

Fig. 7 Six-tube steel bound-column with annular chord

柱的受力分析如表1所示。笔者通过分析荷载角变化时,各单肢柱的受力大小进行单肢柱的稳定性计算。当荷载角 $\theta = 40.89^\circ$ 时,各单肢柱的受力大小相同;当荷载角 $\theta < 40.89^\circ$ 时,实轴上2个单肢柱所受弯矩较大,选取实轴上单肢柱进行稳定性计算;当荷载角 $\theta > 40.89^\circ$ 时,四角上的4个单肢柱所受弯矩较大。选取四角上的单肢柱进行稳定性计算,基于此,可以得到采用环形弦板时,六肢钢束柱体系的单肢柱稳定性计算方法:

$$\begin{cases} \theta < 40.89^\circ, \frac{N}{6\varphi A f_y} + \frac{M_x}{4.8 W_f \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} \leq 1.0; \\ \theta > 40.89^\circ, \frac{N}{6\varphi A f_y} + \frac{\sqrt{\left(\frac{M_y}{4}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{8}\right)^2}}{1.2 W_f \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} \leq 1.0. \end{cases} \quad (10)$$

束柱采用环形弦板时, $W_{1x} = 2\sqrt{3}/3 W_{1y}$ 。该束柱体系的最不利荷载角为。

$$\theta = \arctan \left[\frac{2\sqrt{3}}{3} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right) \right]. \quad (11)$$

构件中受力最大的单肢柱随荷载角的不同而变化,因此,单肢柱存在两个最不利荷载角。当 $\theta < 40.89^\circ$ 时,单肢柱的最不利荷载角为 0° ,当荷载角 $\theta > 40.89^\circ$ 时,单肢柱的最不利荷载角为 90° ,荷载角 θ 为 40.89° 时,单肢柱的稳定性最好。

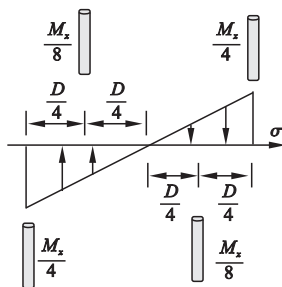


图8 采用环形弦板的六肢钢束柱的应力分析

Fig. 8 Stress analysis of six-tube steel bound-column with annular chord plate

2 钢束柱稳定性影响因素分析

笔者选取的钢束柱体系稳定性参数包括弦板间距、计算长度、荷载偏心距、荷载角^[11-13]。利用所分析的计算方法量化双向压弯状态下各参数对钢束柱体系及单肢柱稳定性的影响规律。采用环形弦板的四肢及六肢钢束柱体系用 S1、S3 表示,采用矩形弦板的四肢及六肢钢束柱体系用 S2、S4 表示。工程中四肢格构柱常用的矩形缀板尺寸为 $500 \sim 600 \text{ mm}$ ^[14];基于此,四肢钢束柱体系采用的矩形弦板长度 L 及宽度 B 均取 550 mm ,在保证弦板用钢量相同的前提下,单肢柱直径 d 取 100 mm 、环形弦板直径 D 取 700 mm 、六肢钢束柱体系采用的矩形弦板长度 l 取 740 mm 、宽度 d 取 370 mm 。在保证弦板稳定及构件刚度的情况下,钢材强度 f_y 取 235 MPa 、弦板间距 Δh 取 $700 \sim 3700 \text{ mm}$ 、计算长度 l 取 $3.0 \sim 4.5 \text{ m}$ 、荷载偏心距 e_0 取 $0.1 \sim 0.4 \text{ m}$ 、偏心力 N 取 200 kN 、荷载角 θ 取 $0^\circ \sim 90^\circ$,构件的稳定性能用 σ/f_y 表示。

2.1 弦板间距

图9为弦板间距 Δh 对钢束柱体系及单肢柱的稳定性影响规律。可以看出,弦板间距对钢束柱体系及单肢柱的稳定性影响较大,当钢束柱体系的计算长度一定时,应限制弦板间距。当弦板间距较大时,单肢柱的长细比较大,在钢束柱体系失稳之前单肢柱先

发生失稳,当弦板间距较小时,增加弦板的数量对提高单肢柱的稳定性不明显。以采用环形弦板的六肢钢束柱体系为例,弦板间距 Δh 由 2 700 mm 减小至 1 700 mm 时钢束柱体

系稳定性提高 11.80%,单肢柱稳定性提高 3.32%;弦板间距 Δh 由 1 700 mm 减小至 700 mm 时钢束柱体系的稳定性提高 6.58%,单肢柱的稳定性提高 1.80%。

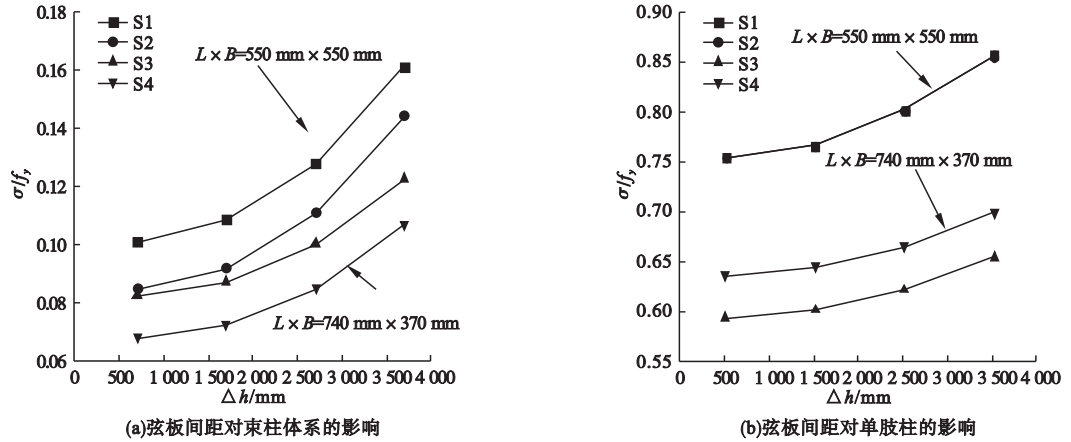


图 9 弦板间距的影响
Fig. 9 The influence of chord spacing

2.2 计算长度

图 10 为计算长度 l 对钢束柱体系及单肢柱的稳定性影响规律。由图 10 可知,钢束柱体系的稳定性随计算长度增加而降低,但不影响单肢柱的稳定性。这是由于随着计算长度的增加,换算长细比增大,二阶效应对构件稳定性的影响逐渐显著,构件趋向失稳破

坏,而计算单肢柱稳定性所采用的长细比取决于弦板间距。以采用环形弦板的六肢钢束柱为例,当计算长度 l 由 3.0 m 增加至 3.5 m 时,钢束柱体系的稳定性降低 22.06%,计算长度 l 由 3.5 m 增加至 4.0 m 时,钢束柱体系的稳定性降低 35.69%。

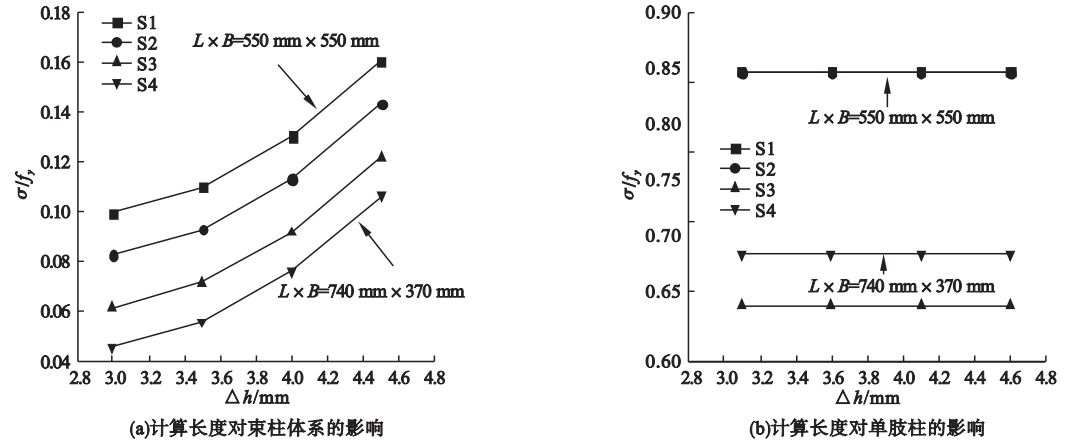


图 10 计算长度的影响
Fig. 10 The influence of calculation length

2.3 荷载偏心距

图 11 为荷载偏心距 e_0 对钢束柱体系及单肢柱的稳定性影响规律,构件的稳定性随

荷载偏心距的增加而降低,且偏心距越大,构件稳定性的下降幅度越大。以采用环形弦板的六肢钢束柱体系为例,荷载偏心距 e_0 由

0.1 m 增至 0.2 m 时,构件的稳定性降低 4.26%;荷载偏心距 e_0 由 0.2 m 增至 0.3 m

时,构件的稳定性降低 20.93%。

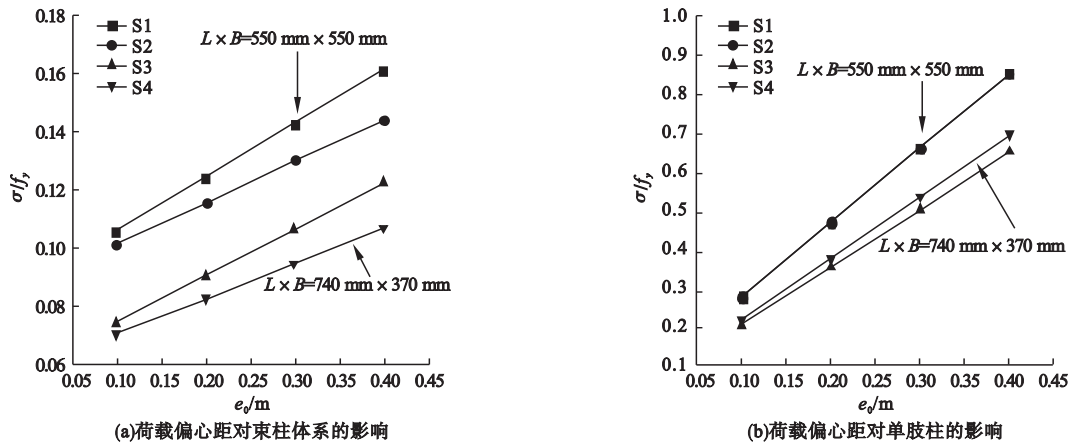


图 11 荷载偏心距的影响

Fig. 11 The influence of load eccentricity

2.4 荷载角

图 12 为荷载角 θ 对钢束柱体系及单肢柱的稳定性影响规律,钢束柱体系的稳定性随荷载角 θ 增大呈现先减后增的趋势,四肢钢束柱体系中的单肢柱的稳定性不受荷载角的影响。六肢钢束柱体系采用环形弦板时,单肢柱的稳定性随荷载角 θ 增大呈现先增后

减的趋势;而采用矩形弦板时,单肢柱的稳定性随荷载角 θ 增大而不断降低。当荷载角 $\theta = 36.7^\circ$ 时,两种体系的单肢柱稳定性相同;当荷载角 $\theta < 36.7^\circ$ 时,采用矩形弦板的束柱体系的单柱稳定性较好;当荷载角 $\theta > 36.7^\circ$ 时,采用环形弦板的束柱体系的单肢柱稳定性较好。

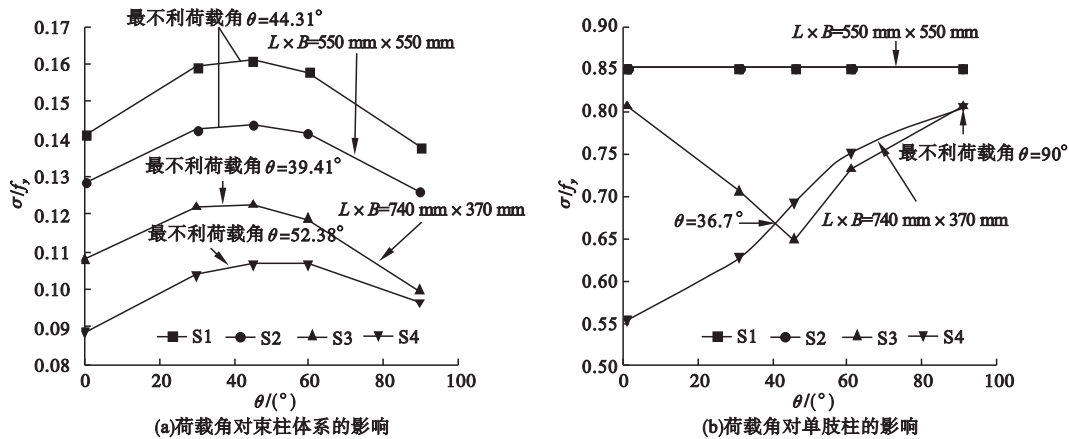


图 12 荷载角的影响

Fig. 12 The influence of load angles

3 结 论

(1) 双向压弯状态下,六肢钢束柱体系的稳定性优于四肢钢束柱体系,相较于采用环形弦板的束柱体系,钢束柱体系采用矩形

弦板的稳定性更好。

(2) 推导了钢束柱体系的单肢柱稳定性及最不利荷载角的计算方法,当荷载角 $\theta > 36.7^\circ$ 时,采用环形弦板的束柱体系的单肢柱具有更好的稳定性。

(3) 钢束柱体系及单肢柱的稳定性随弦板间距、荷载偏心距减小而增强,钢束柱体系稳定性随计算长度的增加而降低,随荷载角 θ 增大呈现先减后增的趋势。

参考文献

- [1] 丁阳,邓恩峰,宗亮,等. 模块化钢结构建筑连接节点研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):33-40.
(DING Yang, DENG Enfeng, ZONG Liang, et al. State-of-the-art on connection in modular steel construction [J]. Journal of building structures, 2019, 40(3): 33-40.)
- [2] 陈敦宜,张肇毅,王卉,等. 建筑工业化及绿色模块建筑[J]. 工业建筑, 2014, 44(6): 108-111.
(CHEN Aoyi, ZHANG Zhaoyi, WANG Hui, et al. Construction industrialization and green module building [J]. Industrial construction, 2014, 44(6): 108-111.)
- [3] 辛善超,王志强. 模块连接的建构思辨:基于模块化体系的建筑“设计—建造”研究[J]. 西部人居环境学刊,2016,31(6):23-28.
(XIN Shanchao, WANG Zhiqiang. Tectonics reflections of module connection: research on architecture “design with construction” based on modular system [J]. Journal of human settlements in west China, 2016, 31(6): 23-28.)
- [4] 鹿翰. 双肢格构柱平面内稳定与优化应用研究[D]. 青岛:山东科技大学,2017.
(LU Han. Study on the plane stability and optimization of lattice column with double limbs [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.)
- [5] 杨有福,宋冬瑞. 三肢圆钢管格构柱抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(2):9-14.
(YANG Youfu, SONG Dongrui. Seismic performance of three-legged circular steel tube latticed columns [J]. Progress in steel building structures, 2017, 19(2): 9-14.)
- [6] 章彦. 四肢钢管混凝土轴压格构柱力学性能分析与承载力计算[D]. 湘潭:湘潭大学,2015.
(ZHANG Yan. Mechanical property analysis and bearing capacity calculation on four-tube CFST laced columns under axial compression [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.)
- [7] 邹艳花,陈伯望,文洪. 四肢钢管混凝土格构柱耗能能力有限元分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(24):85-90.
(ZOU Yanhua, CHEN Bowang, WEN Hong. Finite element analysis of energy dissipation capacity of four-tube concrete filled steel tubular lattice columns [J]. Building structure, 2018, 48(24): 85-90.)
- [8] 柯晓军,苏益声,商效琚,等. 钢管混凝土组合柱压弯性能试验及承载力计算[J]. 工程力学, 2018, 35(12):134-142.
(KE Xiaojun, SU Yisheng, SHANG Xiaoyu, et al. Strength calculation and eccentric compressive test of steel tube-reinforced concrete composite columns [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(12): 134-142.)
- [9] 王丹,黄承逵,刘明,等. 异形柱双偏压构件正截面承载力试验及设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2001(5):37-42.
(WANG Dan, HUANG Chengkui, LIU Ming, et al. Research on experiment and design method of specially-shaped columns under eccentric loading [J]. Journal of building structures, 2001(5): 37-42.)
- [10] 宁克洋,杨璐,赵梦晗. 不锈钢压弯构件整体稳定性能有限元研究与承载力计算方法[J]. 工程力学, 2019, 36(12):113-120.
(NING Keyang, YANG Lu, ZHAO Menghan. FE research on the overall stability of stainless-steel beam-columns and calculation method of bearing capacity [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(12): 113-120.)
- [11] 徐亚丰,金松. 钢管—圆钢管高强混凝土组合柱偏心受压有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1):40-50.
(XU Yafeng, JIN Song. Finite element analysis on circular steel tube composite column filled with steel-reinforced high strength concrete under eccentric loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2016, 32(1): 40-50.)
- [12] 李幅昌,闫海龙,陈博文. 高强方钢管高强混凝土轴压短柱力学性能的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5):847-855.
(LI Guochang, YAN Hailong, CHEN Bowen. Finite element analysis on mechanical behavior of the high strength concrete-filled high strength square steel tube stub column under axial compressive loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2015, 31(5): 847-855.)
- [13] 刘昌永,王庆贺,王玉银,等. 带钢接头的装配式钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1):208-214.
(LIU Changyong, WANG Qinghe, WANG Yuyin, et al. Flexural behavior of precast reinforced concrete beams with steel end connectors [J]. Journal of building structures, 2013, 34(S1): 208-214.)
- [14] 杨应华,曹凯翔. 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定性[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3):1-12.
(YANG Yinghua, CAO Kaixiang. Stability analysis of welded Q460 I-section columns with slender web under biaxial bending [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2017, 39(3): 1-12.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)