

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.02.012

# 等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一算法

欧智菁, 陈盛富

(福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118)

**摘要:**介绍了斜缀管式和平缀管式等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的计算方法并进行评价分析。研究表明,不同缀管布置形式的钢管混凝土格构柱,其抗震性能具有共性。借鉴钢管混凝土单肢柱的计算框架,开展等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一算法研究,对弹性刚度、水平峰值荷载、峰值荷载位移、下降段刚度等主要参数的计算方法进行了深入探讨和算例分析,并以千海子大桥格构柱墩为研究对象,采用 OpenSEES 有限元程序,对骨架曲线算法进行工程实例验证。研究结果表明,计算值与试验值及有限元计算结果均吻合良好。最后提出了适合工程应用的等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一简化算法,为钢管混凝土计算理论的进一步完善和规程编撰提供参考。

**关键词:**钢管混凝土格构柱;等截面;骨架曲线;统一算法;抗震性能;规程

**中图分类号:**TU398.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2017)02-091-10

## A uniform calculation method of the skeleton curve of equal sectional concrete filled steel tube columns

OU Zhijing, CHEN Shengfu

(College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P.R.China)

**Abstract:** The calculation methods of skeleton curve of equal sectional CFST (concrete filled steel tube) columns with flat or inclined lacing tubes were introduced and analyzed. It's found the seismic behavior of equal sectional CFST columns has generality, no matter their lacing tubes are flat or inclined. To find out a uniform calculation method of skeleton curve of equal sectional CFST columns on the base of hysteretic model of CFST single tube column, we explored the calculation methods of elastic stiffness, horizontal peak load, peak load displacement and fall-period stiffness, and then carried out a verification experiment with OpenSEES program by taking the laced column pier of Ganhaizi bridge as an example. Research results indicate that the calculated values of the new calculation method are coincident well with the test and the numerical results. Finally the uniform method which can be adapted to engineering application is provided, and it can provide references for the calculation theory and relevant criteria of CFST structures.

**Keywords:** concrete filled steel tube column; equal section; skeleton curve; uniform calculation method; seismic performance; criterion

**收稿日期:**2016-08-15

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51408128);福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目(GY-Z15108)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51408128) and Program for New Century Excellent Talents in the Universities of Fujian Province(GY-Z15108).

**作者简介:**欧智菁(1975-),女,福建工程学院教授,博士,主要从事钢管混凝土组合结构方面的研究,(E-mail) sina99@163.com。

钢管混凝土格构柱既具有钢管混凝土柱的材料优势,又具有格构柱的截面优势(具有较大的截面抗弯刚度),其承压能力高,延性好,能较好地隔离、吸收和耗散地震能量,因而得到了工程界的广泛青睐,在对抗震性能要求高、地质条件较差的地震区桥梁的高墩结构、工业厂房、设备构架和大跨度钢管混凝土桁肋拱中,具有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。

骨架曲线是直观体现钢管混凝土格构柱抗震性能的重要指标,反映了构件受力与变形的各个不同阶段及特性(强度、刚度、延性、耗能等),也是确定恢复力模型中特征点的重要依据。关于它的计算,国内外先后开展了双肢和四肢斜缀管式和平缀管式等截面钢管混凝土格构柱滞回性能的试验研究和有限元分析,提出了相应的骨架曲线计算公式<sup>[5-11]</sup>。但这些计算方法都是基于各自构件的试验验证和数值分析,而忽略了等截面钢管混凝土格构柱抗震性能的共性,因而在计算理论体系的完整性和统一性方面存在一定缺憾,适用范围也受到限制。

对于等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线,文献[10-11]的具体计算公式见表 1。为便于比较,表 1 同时也列出了文献[12]关于圆形截面和方形截面(矩形截面)钢管混凝土单肢柱的计算公式。从表 1 可看出,现有钢管混凝土柱骨架曲线的计算方法之间存在着较大差异,大部分依靠试验数据或有限元计算结果的拟合,且计算公式繁琐,部分参数还需通过函数或复杂的公式代入计算(因篇幅所限,未完全列于表 1 中),这将给实际工程应用带来一定困难。为此,笔者依托钢管混凝土柱抗震性能的共同规律<sup>[13-14]</sup>,参考钢管混凝土单肢柱的计算框架,在对现有各计算方法分析评价和算例研究的基础上,提出适合工程应用的等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一简化算法,可供规程编撰时参考。

表 1 等截面钢管混凝土柱骨架曲线的计算方法

Table 1 Calculation methods of ultimate load carrying capacity of equal sectional CFST columns

| 类型                           | 弹性刚度   | 水平峰值荷载  | 峰值荷载位移   | 下降段刚度   |
|------------------------------|--|---|--|---|
| K 型缀管格<br>构柱 <sup>[10]</sup> | $K_a = a \cdot \frac{E_s I_s + 0.6 E_c I_c}{f\left(\frac{A_0}{A_z}, n\right) \cdot L^3}$ | $P_{\max} = \begin{cases} (-5.73n^2 + 4.45n + 1.8) \frac{M_y}{L_1} & (0 \leq n \leq 0.4) \\ (4.23 - 4.04n) \frac{M_y}{L_1} & (0.4 < n < 1) \end{cases}$ | $\Delta_{\max} = \frac{[(\ln r)^2 + 0.545 \ln r + 0.486] f(n) P_y}{K_a}$               | $K_T = \frac{-9.83n^{1.2} \lambda^{0.75} f_y}{E_s \xi} K_a$ |
| 平缀管格<br>构柱 <sup>[11]</sup>   | $K_a = \frac{3\zeta(E_s I_s + E_c I_c)}{(0.8L)^3}$                                       | $P_{\max} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^2\right]} \frac{M_y}{L}$   | $\Delta_{\max} = \frac{(2.045 + 66.902e^{\frac{\lambda^*}{\Gamma_{691}}}) P_y}{K_a}$   | 无   |
| 圆钢管单<br>肢柱 <sup>[12]</sup>   | $K_a = \frac{3(E_s I_s + 0.6 E_c I_c)}{(0.5L)^3}$  | $P_{\max} = \begin{cases} 1.05aM_y/L_1 & (1 < \xi \leq 4) \\ a(0.2\xi + 0.85)M_y/L_1 & (0.2 \leq \xi \leq 1) \end{cases}$                               | $\Delta_{\max} = \frac{6.74[(\ln r)^2 - 1.08 \ln r + 3.33] f_1(n) P_y}{(8.7 - s) K_a}$ | $K_T = \frac{0.03 f_2(n) f(r, a)}{c^2 - 3.39c + 5.41} K_a$  |
| 方钢管单<br>肢柱 <sup>[12]</sup>   | $K_a = \frac{3(E_s I_s + 0.6 E_c I_c)}{(0.5L)^3}$  | $P_{\max} = \begin{cases} (2.5n^2 - 0.75n + 1) \frac{M_y}{L_1} & (0 \leq n \leq 0.4) \\ (0.63n + 0.848) \frac{M_y}{L_1} & (0.4 < n < 1) \end{cases}$    | $\Delta_{\max} = \frac{(1.7 + n + 0.5\xi) P_y}{K_a}$                                   | $K_T = \frac{-9.83n^{1.2} \lambda^{0.75} f_y}{E_s \xi} K_a$ |

## 1 新提出的骨架曲线各参数计算方法

### 1.1 弹性刚度

文献[9-12]开展了多批包括钢管混凝土单肢柱、四肢格构柱在内的钢管混凝土构件的滞回性能试验研究和有限元参数分析,得到了钢管混凝土柱的一些共有的结论。研究表明,随着长细比的增大,含钢率的减小(或柱肢径厚比的增大),钢管混凝土柱的弹性刚度  $K_a$  有逐渐降低的趋势。

根据上述文献数值计算结果,随着轴压比由 0.1 增大到 0.5, K 型缀管和平缀管式等截面钢管混凝土格构柱标准试件的弹性刚度分别降低了 3.5% 和 4.5%。由此可见,轴压比对钢管混凝土格构柱弹性刚度的影响很小,为简化计算,可不予考虑。

### 1.1.1 弹性刚度的计算方法

因此,建议钢管混凝土格构柱的弹性刚度仍采用钢管混凝土单肢柱的计算框架<sup>[12]</sup>,见式(1);只需将分母中单肢柱的柱高  $L_0$  替换为格构柱的换算长度  $KL$ ,见式(2)。格构柱特有的参数,如柱肢纵向间距或者缀管竖向间距对构件弹性刚度的影响将体现在换算长细比系数  $K$  中。

$$K_a = \frac{3K_e}{(L_0)^3} = \frac{3(E_s I_s + 0.6E_c I_c)}{(L_0)^3}, \quad (1)$$

$$K_a = \frac{3(E_s I_s + 0.6E_c I_c)}{(KL)^3}, \quad (2)$$

式中: $K_a$  为弹性刚度; $K_e$  为抗弯刚度; $L_0$  为单肢柱柱高; $L$  为格构柱柱高; $E_s$  为钢的弹模; $E_c$  为混凝土的弹模; $I_s$  为柱肢钢管惯性矩; $I_c$  为混凝土惯性矩; $K$  为换算长细比系数。

由式(2)可见,换算长细比系数  $K$  是计算钢管混凝土格构柱弹性刚度的重要参数,由于缀管布置形式的不同,格构柱的剪切效应有一定差异,在系数取值上应做调整。

斜缀管式等截面钢管混凝土格构柱的换算长细比系数计算公式,参考四肢斜缀管格构柱极限承载力计算中  $K$  的计算方法<sup>[15]</sup>,如式(3)、(4)所示。

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{2} \left( \frac{b}{L} \right)^2 \left( 2.83 \frac{A_c}{A_d} + \frac{A_c}{A_b} \right) & \mu \leq 0.5, \\ \mu = 0.5 & \mu > 0.5, \end{cases} \quad (3)$$

$$K = \sqrt{1 + \mu}, \quad (4)$$

式中: $\mu$  为格构柱剪切柔度参数; $b$  为格构柱纵向间距; $L$  为格构柱高度; $A_c$  为单根柱肢面积; $A_d$  为单根斜缀条面积; $A_b$  为单根平缀条面积; $K$  为换算长细比系数。

平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的换算长细比系数计算公式,可仿照斜缀管的公式形式,考虑到平缀管式钢管混凝土格构柱柔度更大,缀管对钢管混凝土柱肢的约束能力减弱,缀管剪切变形的影响更明显,柱的弹性刚度降低,因此在具体的参数取值上略作调整,见式(5)、(6),式中符号意义同式(3)、(4)。

$$\mu = \frac{1}{2} \left( \frac{b}{L} \right)^2 \left( 3.83 \frac{A_c}{A_b} \right), \quad (5)$$

$$K = \sqrt{1 + 5\mu}. \quad (6)$$

### 1.1.2 弹性刚度的计算验证

为探讨 1.1.1 节提出的弹性刚度的计算方法是否合理准确,以下分别对斜缀管和平缀管式钢管混凝土格构柱进行计算验证。

首先以文献[10]中的 52 根四肢等截面 K 形缀管钢管混凝土格构柱计算模型为算例,采用本文中提出的计算方法,弹性刚度  $K_a$  的计算值与有限元值的比较见图 1。构件长细比的变化范围为 6~28,轴压比的范围为 0.05~0.50,混凝土强度的变化范围为 C25~C80,柱肢钢管屈服强度的变化范围为 180~420 MPa,缀管厚度的变化范围为 1~4.5 mm。

从图 1 可以看出,弹性刚度  $K_a$  的计算结果与文献[3]有限元计算结果均吻合良好,误差基本控制在 10% 以内(图 1 中虚线代表两者数值的偏差程度,图 2~8 亦同)。两者之比的均值为 1.022,均方差为 0.052。

以文献[11]中的 41 根四肢等截面平缀管式钢管混凝土格构柱计算模型为算例(包含 7 根试验构件和 34 个计算模型),采用本文中提出的计算方法,弹性刚度  $K_a$  的计算值与试验值(有限元计算值)的比较见图 2。构件长细比的变化范围为 7.69~20,轴压比的范围为 0.1~0.5,混凝土强度的变化范围为 C30~C70,柱肢钢管屈服强度的变化范围为 240~480 MPa,柱肢钢管厚度的变化范围为 1~5 mm,缀管竖向间距的变化范围为 150~350 mm。

从图 2 可以看出,弹性刚度  $K_a$  的计算结果与试验结果和有限元计算结果均吻合良好,误差基本控制在

12%以内。两者之比的平均值为 0.975,均方差为 0.147。

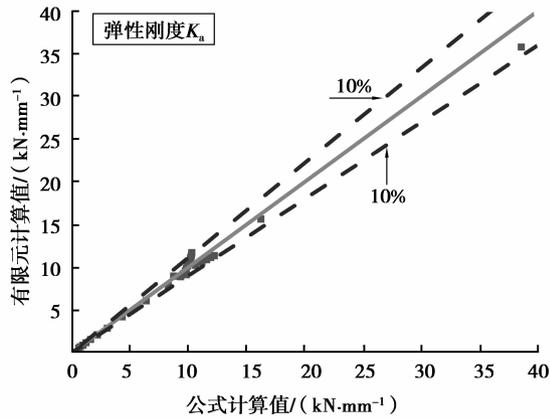


图 1 弹性刚度值比较(K形缀管式格构柱)  
Fig.1 Comparison of  $K_a$  of laced columns  
with inclined lacing tube

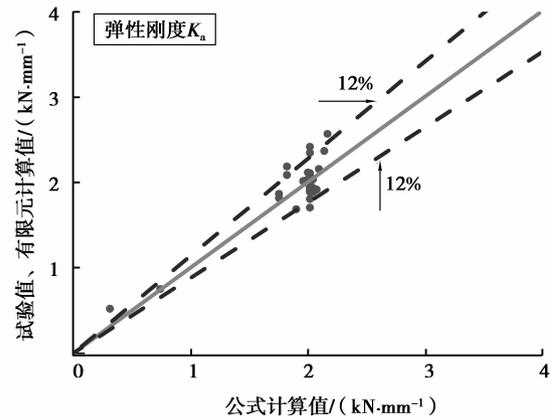


图 2 弹性刚度值比较(平缀管式格构柱)  
Fig.2 Comparison of  $K_a$  of laced columns  
with flat lacing tube

由上述计算分析可知,本文中提出的等截面钢管混凝土格构柱弹性刚度的统一算法,对于不同缀管布置方式的格构柱,均是适用的。

## 1.2 水平峰值荷载

文献[9-11]研究结果表明,随着钢材屈服强度、混凝土强度、含钢率的增大,或者构件轴压比、长细比的减小,钢管混凝土格构柱的水平峰值荷载呈现不同程度的提高,这与钢管混凝土单肢柱的影响规律基本一致。

### 1.2.1 水平峰值荷载的计算方法

对于作为压弯构件的钢管混凝土格构柱,其轴力与弯矩的关系曲线可近似为

$$\left(\frac{N}{N_0}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_0}\right)^2 = 1, \quad (7)$$

式中: $N$  为格构柱初始轴力; $N_0$  为格构柱轴压承载力; $M$  为格构柱弯矩; $M_0$  为格构柱抗弯承载力。

因此对于不同初始轴力作用下钢管混凝土格构柱的弯矩承载力为

$$M_{\max} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^2\right]} M_0. \quad (8)$$

对于水平荷载  $P$  作用于墩顶的钢管混凝土格构柱,水平峰值荷载为

$$P_{\max} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^2\right]} \frac{M_0}{L_1}, \quad L_1 = 0.5L, \quad (9)$$

将  $N/N_0$  用轴压比  $n$  来代替,式(9)可以进一步简化为

$$P_{\max} = \sqrt{(1 - n^2)} \frac{M_0}{L_1}. \quad (10)$$

其中  $M_0$  借用文献[12]方形钢管混凝土柱的计算公式

$$M_0 = (\gamma_m W_{\text{scm}} f_{\text{scy}}) \alpha, \quad (11)$$

$$\gamma_m = 1.04 + 0.48 \ln(\xi + 0.1), \quad (12)$$

$$W_{\text{scm}} = (A_s + A_c) \times r \times 4, \quad (13)$$

$$f_{\text{scy}} = \frac{N_0}{S} = \frac{N_0}{b \times c}, \quad (14)$$

式中: $\gamma_m$  为抗弯强度承载力计算系数; $W_{\text{scm}}$  为截面抗弯模量; $f_{\text{scy}}$  为组合抗压强度指标; $b$  为格构柱纵向间距; $c$  为格构柱横向间距; $\alpha$  为截面修正系数(考虑到文献[10]方型格构柱的截面特性,将水平峰值荷载乘以 1.45 的截面修正系数,文献[11]矩形截面格构柱, $\alpha$  值为 1.0)。

1.2.2 水平峰值荷载的计算验证

为探讨 1.2.1 节提出的水平峰值荷载的计算方法是否合理准确,以下分别对斜缀管和平缀管式钢管混凝土格构柱进行计算验证。以文献[10]和文献[11]中的四肢等截面钢管混凝土格构柱为算例,采用本文中提出的计算方法,水平峰值荷载  $P_{max}$  的计算值与试验值(有限元值)的比较见图 3 和图 4。

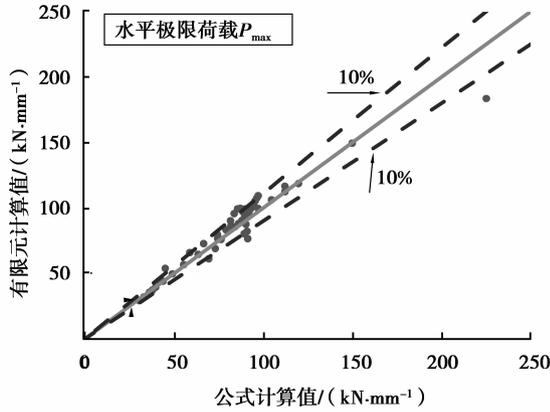


图 3 水平峰值荷载值比较(K形缀管式格构柱)

Fig.3 Comparison of  $P_{max}$  of laced columns with inclined lacing tube

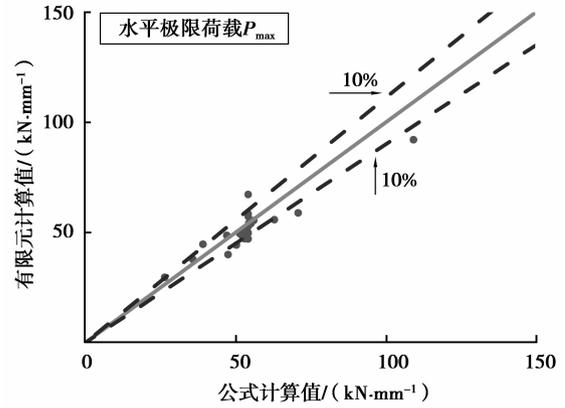


图 4 水平峰值荷载值比较(平缀管式格构柱)

Fig.4 Comparison of  $P_{max}$  of laced columns with flat lacing tube

从图 3 和图 4 可以看出,  $P_{max}$  的计算结果与试验结果和有限元计算结果均吻合良好,其均值分别为 0.997 和 1.04,均方差分别为 0.113 和 0.143,误差基本控制在 10% 以内。由上述计算分析可知,本文中提出的等截面钢管混凝土格构柱水平峰值荷载的统一算法,对于不同缀管布置方式的格构柱,均是适用的。

1.3 峰值荷载位移

文献[9-11]研究结果表明,钢管混凝土格构柱在水平往复荷载作用下的峰值荷载位移与轴压比、长细比和钢材屈服强度等多个参数有关,这与圆钢管混凝土单肢柱的影响规律基本一致,可采用其基本计算框架,见式(15)。

$$\Delta_{max} = K_p \cdot \frac{P_{max}}{K_a}, \tag{15}$$

$$K_p = \Delta_{max} / \left( \frac{P_{max}}{K_a} \right), \tag{16}$$

式中:  $\Delta_{max}$  为格构柱的水平峰值位移;  $K_p$  为峰值位移放大系数;  $P_{max}$  为水平峰值荷载;  $K_a$  为格构柱弹性刚度。

经过试算,钢管混凝土格构柱直接套用圆钢管单肢柱的峰值荷载位移计算公式,误差较大,且计算公式偏繁琐,因此应基于格构柱自身的受力特性,寻求更为理想、更简捷的峰值位移计算方法。

表 2 列出了等截面钢管混凝土格构柱峰值位移放大系数  $K_p$  的计算结果(按式(16)计算)。从表 2 可以看出,随着格构柱轴压比、长细比以及柱肢钢管钢材屈服强度的增大,峰值荷载位移的放大系数  $K_p$  呈现出明显的降低。而混凝土强度和缀管壁厚对水平峰值位移的影响很小。

表 2 钢管混凝土格构柱的水平位移放大系数

Table 2 Main parameter scope of CFST laced column piers

| 参数  | 缀管形式 | 参数变化范围    | $K_p$     | $K_p$ 变化幅度/% |
|-----|------|-----------|-----------|--------------|
| 轴压比 | 斜    | 0.05~0.80 | 2.3~1.44  | -37.4        |
|     | 平    | 0.10~0.50 | 1.94~1.73 | -10.8        |
| 长细比 | 斜    | 4~28      | 2.19~1.54 | -29.7        |
|     | 平    | 5~20      | 3.31~2.09 | -36.9        |

续表

| 参数       | 缀管形式 | 参数变化范围  | $K_p$     | $K_p$ 变化幅度/% |
|----------|------|---------|-----------|--------------|
| 肢管钢材     | 斜    | 180~420 | 3.55~1.52 | -57.2        |
| 屈服强度/MPa | 平    | 240~480 | 2.94~1.47 | -50.0        |

### 1.3.1 峰值荷载位移的计算方法

根据表 2 中反映出的等截面钢管混凝土格构柱滞回性能,当肢管钢材屈服强度从 180 MPa 变化到 480 MPa 时,钢管混凝土格构柱的水平位移放大系数分别降低了 57.2% 和 50%,由此可见,除了轴压比和长细比外,肢管钢材屈服强度对水平峰值位移的影响也不可忽略。因此文献[10]和文献[11]关于等截面钢管混凝土格构柱的计算方法(见表 1)不考虑柱肢钢管钢材屈服强度对水平峰值荷载位移的影响,存在不合理之处。故结合参数分析结果,提出新的计算公式,见式(17)、(18)。

斜缀管式格构柱:

$$K_p = (2.4 - n - 0.03 \times \lambda^*) \times \left( \frac{345}{f_y} \right) \quad (17)$$

平缀管式格构柱:

$$K_p = (2.8 - n - 0.03 \times \lambda^*) \times \left( \frac{345}{f_y} \right) \quad (18)$$

### 1.3.2 峰值荷载位移的计算验证

为探讨 1.3.1 节提出的峰值荷载位移  $\Delta_{\max}$  的计算方法是否合理准确,以下分别对斜缀管和平缀管式钢管混凝土格构柱进行计算验证。采用本文中提出的算法,  $\Delta_{\max}$  计算值与试验值(有限元值)的比较见图 5 和图 6。

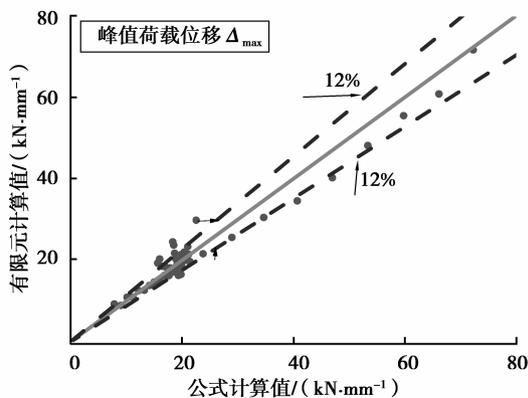


图 5 峰值荷载位移值比较(K形缀管式格构柱)

Fig.5 Comparison of  $\Delta_{\max}$  of laced columns with inclined lacing tube

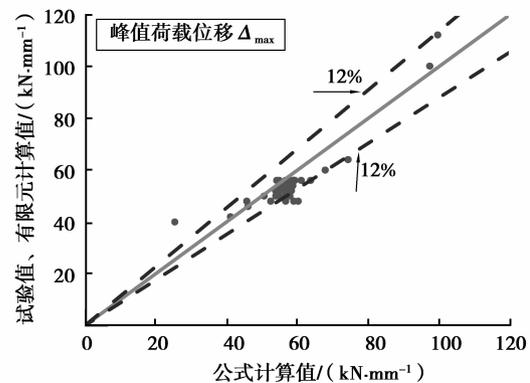


图 6 峰值荷载位移值比较(平缀管式格构柱)

Fig.6 Comparison of  $\Delta_{\max}$  of CFST laced columns with flat lacing tube

从图 5 和图 6 可以看出,峰值荷载位移的计算结果与试验结果和有限元计算结果均吻合良好,误差基本控制在 12% 以内。试验值与计算值之比的平均值分别为 1.029 和 1.054,均方差分别为 0.118 和 0.103。本文中提出的等截面钢管混凝土格构柱峰值位移的统一算法,对于不同缀管布置方式的格构柱,均是适用的。

### 1.4 下降段刚度

文献[9-11]研究结果表明,随着构件轴压比的增大、长细比的减小以及肢管钢材屈服强度的增大,钢管混凝土格构柱的下降段刚度呈现不同程度的提高,这与钢管混凝土单肢柱的影响规律基本一致。柱肢纵向

间距、缀管竖向间距、缀管钢材强度对格构柱的刚度退化影响很小。

1.4.1 下降段刚度的计算方法

根据上述参数影响规律,笔者建议等截面钢管混凝土格构柱的下降段刚度仍采用钢管混凝土单肢柱的计算框架,如式(19)。考虑到轴压比对下降段刚度的影响是分段式的,当  $n \leq 0.4$  时影响较大,当  $n > 0.4$  时影响可忽略不计。因此将公式进行改写,如式(20)所示。 $f(n)$  函数采用二段式,对于不同缀管布置,在系数上略有差异,见式(21)、(22)。

$$K_T = \frac{-9.83n^{1.2}\lambda^{0.75}f_y}{E_s\xi}K_a, \tag{19}$$

$$K_T = \frac{-9.83f(n)\lambda^{0.75}f_y}{E_s\xi}K_a. \tag{20}$$

斜缀管式格构柱:

$$f(n) = \begin{cases} 5n^2 & (n \leq 0.4), \\ 1 & (n > 0.4). \end{cases} \tag{21}$$

平缀管式格构柱:

$$f(n) = \begin{cases} n + 0.35 & (n \leq 0.4\lambda \leq 20), \\ n^{1.2} & (n \leq 0.4\lambda > 20), \\ 1 & (n > 0.4). \end{cases} \tag{22}$$

1.4.2 下降段刚度的计算验证

为探讨 1.4.1 节提出的下降段刚度的计算方法是否合理准确,以下分别对斜缀管和平缀管式钢管混凝土格构柱进行计算验证。采用本文中提出的计算方法, $K_T$  的计算值与试验值(有限元值)的比较见图 7 和图 8。

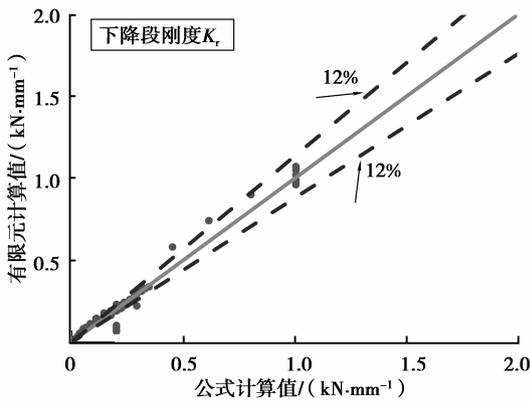


图 7 下降段刚度比较(K 形缀管式格构柱)  
Fig.7 Comparison of  $K_T$  of laced columns with inclined lacing tube

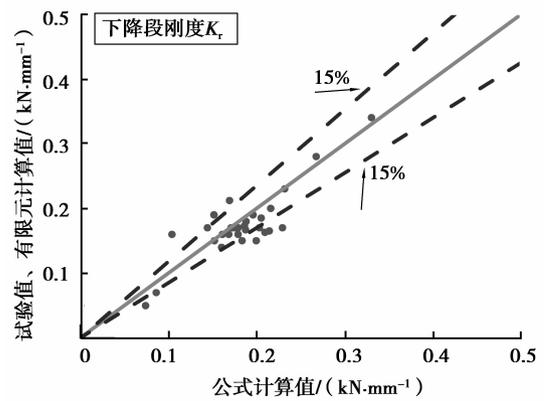


图 8 下降段刚度比较(平缀管式格构柱)  
Fig.8 Comparison of  $K_T$  of laced columns with flat lacing tube

从图 7 和图 8 可以看出,下降段刚度  $K_T$  的计算结果与试验值和有限元计算值均吻合良好,误差基本控制在 12% 以内。本文中提出的等截面钢管混凝土格构柱下降段刚度的统一算法,对于不同缀管布置方式均是适用的。

2 骨架曲线算法验证

为更加直观的考察本文第 1 节提出的等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的计算方法是否合理准确,以下将分别对 K 型缀管钢管混凝土格构柱和平缀管式钢管混凝土格构柱进行算例验证。

2.1 斜缀管式钢管混凝土格构柱算例验证

以文献[10]中标准模型构件(轴压比=0.2)为例,采用本文中提出的计算方法得到的骨架曲线与 ABACUS 有限元计算结果进行对比,见图 9。从图 9 可以看出,两条骨架曲线基本重合,对文献[10]中其他构件的计算结果也吻合良好,因篇幅所限,未一一列出。由此可见,本文中提出的骨架曲线计算公式,对文献[10]参数范围的等截面斜缀管式钢管混凝土格构柱,适用情况良好。

2.2 平缀管式钢管混凝土格构柱试验验证

以文献[11]中标准试件 GGZ0-0 为例,采用本文中计算方法得到的骨架曲线与 OpenSEES 有限元计算结果进行对比,见图 10。从图 10 可看出,两条骨架曲线基本重合,对文献[11]中其他构件的计算结果也吻合良好,因篇幅所限,未一一列出。由此可见,本文中提出的骨架曲线计算公式,对文献[11]参数范围的等截面平缀管式钢管混凝土格构柱,适用情况良好。

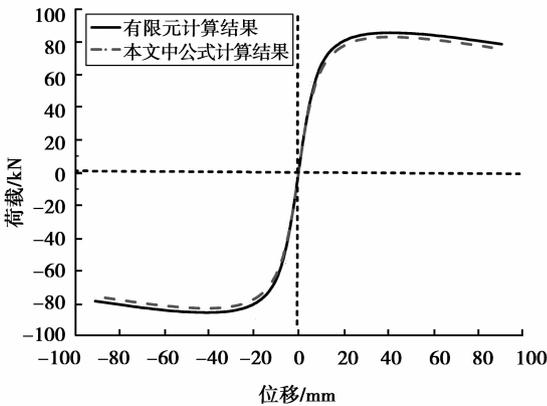


图 9 骨架曲线比较(K形缀管式格构柱)

Fig.9 Comparison of skeleton curve of laced columns with inclined lacing tube

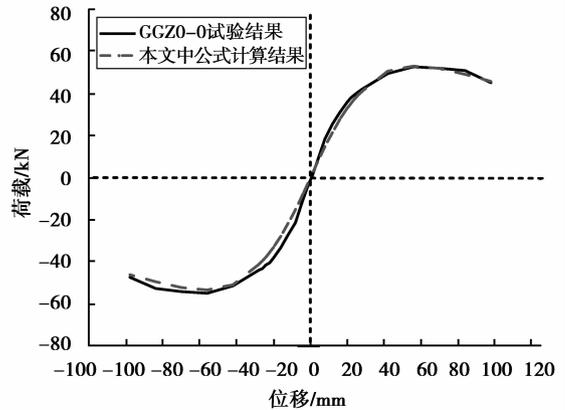


图 10 骨架曲线比较(平缀管式格构柱)

Fig.10 Comparison of skeleton curve of laced columns with flat lacing tube

3 骨架曲线算法的工程实例验证

本文第 2 节中的算例研究对象均是按一定缩尺比例制作的构件,其尺寸范围相对较小。为了解本文中提出的骨架曲线计算公式对于实桥的适用性,本节将选取一座实桥算例——干海子大桥 2 号墩为研究对象,其主要计算参数见表 3。(干海子的柱墩为变截面钢管混凝土格构柱,在计算时忽略柱肢坡度,选取 2 号墩的中截面尺寸作为计算算例的截面尺寸。)

表 3 干海子大桥的计算参数

Table 3 Calculation factors of Ganhaizi bridge

| 参数        | 数值     | 参数          | 数值                  |
|-----------|--------|-------------|---------------------|
| 柱高/mm     | 24 000 | 缀管外径/mm     | 406                 |
| 柱肢纵向间距/mm | 1 625  | 缀管壁厚/mm     | 10                  |
| 柱肢横向间距/mm | 12 560 | 钢材弹性模量/MPa  | $2.06 \times 10^5$  |
| 节间距/mm    | 2 000  | 钢材屈服强度/MPa  | 345                 |
| 柱肢外径/mm   | 813    | 混凝土弹性模量/MPa | $0.345 \times 10^5$ |
| 柱肢钢管壁厚/mm | 12     | 混凝土抗压强度/MPa | C50                 |
| 轴压比       | 0.15   |             |                     |

采用本文中提出的计算方法得到的干海子大桥 2 号墩的骨架曲线与 OpenSEES 有限元计算结果(应用文献[11]的有限元计算模型)进行对比,见图 11。从图 11 可以看出,两条骨架曲线基本重合。由此进一步验

证了本文中提出的等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线计算公式,对于实桥工程,也同样适用。

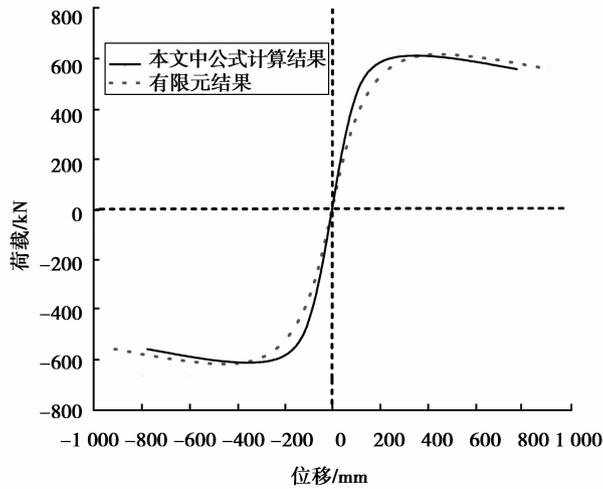


图 11 骨架曲线比较(干海子大桥)

Fig.11 Comparison of skeleton curve (Gan haizi bridge)

### 4 等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一算法

由上述算例分析可知,本文中提出的等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一算法(见表 4),对于斜缀管式和平缀管式格构柱,均是适用的。该计算方法思路清晰明了,得到了文献[10]和文献[11]试验构件和扩大参数计算模型的验证。与表 1 中的原计算方法相比,表 4 的计算公式简捷实用,大大简化了计算过程,适于工程应用。

表 4 等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一算法

Table 4 Uniform calculation methods of ultimate load carrying capacity of CFST columns

| 类型          | 弹性刚度  | 水平峰值荷载   | 峰值荷载位移  | 下降段刚度  |
|-------------|---|--|---|--|
| 等截面钢管混凝土格构柱 | $K_a = \frac{3(E_s I_s + 0.6 E_c I_c)}{(KL)^3}$   | $P_{max} = \sqrt{(1-n^2)} \frac{2M_0}{L}$<br>$M_0 = \alpha \gamma_m W_{scm} f_{scy}$ | $\Delta_{max} = K_p \cdot \frac{P_{max}}{K_a}$                                | $K_T = \frac{-9.83 f(n) \lambda^{0.75} f_y}{E_s \xi} K_a$  |
| 斜缀管式        | $K = \sqrt{1+\mu}$<br>$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{L}\right)^2 \left(2.83 \frac{A_c}{A_d} + \frac{A_c}{A_b}\right)$<br>$\begin{cases} \mu \leq 0.5 \\ \mu = 0.5 & \mu > 0.5 \end{cases}$ | 同上式  | $K_p = (2.4 - n - 0.03 \times \lambda^*) \times \left(\frac{345}{f_y}\right)$ | $f(n) = \begin{cases} 5n^2 & (n \leq 0.4) \\ 1 & \\ & (n > 0.4) \end{cases}$                                       |
| 平缀管式        | $K = \sqrt{1+5\mu}$<br>$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{L}\right)^2 \left(3.83 \frac{A_c}{A_b}\right)$   | 同上式  | $K_p = (2.8 - n - 0.03 \times \lambda^*) \times \left(\frac{345}{f_y}\right)$ | $f(n) = \begin{cases} n + 0.35 & (n \leq 0.4 \leq 20) \\ n^{1.2} & (n \leq 0.4 > 20) \\ 1 & (n > 0.4) \end{cases}$ |

### 5 结 论

1) 介绍并比较了现有文献中关于等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的计算方法。通过梳理各参数对骨架曲线的影响规律,对原计算方法的不合理之处进行了分析。

2) 依托钢管混凝土格构柱抗震性能的共同规律,同时借鉴钢管混凝土单肢柱的计算框架,在对现有各计算方法分析评价的基础上,提出了等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线的统一算法,包括弹性阶段刚度、水平峰值荷载、峰值荷载位移以及下降段刚度的计算公式。对于不同的缀管布置形式,均采用统一的公式形式,只是在个别参数的取值上略有差异。

3) 对斜缀管式和平缀管式等截面钢管混凝土格构柱,分别进行了统一算法的算例验证。研究结果表明,

无论是骨架曲线的各关键参数,亦或是骨架曲线的整体线形,其计算值与试验结果或有限元计算结果均吻合良好,验证了本文提出的等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线统一简化算法的合理性,可供工程应用和钢管混凝土抗震设计规程等编写时参考。

#### 参考文献:

- [1] 蔡绍怀.现代钢管混凝土结构[M].北京:人民交通出版社,2003.  
CAI Shaohuai. Modern steel tubular confined concrete structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].北京:人民交通出版社,2007.  
CHEN Baochun. Concrete filled steel tubular arch bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [3] Ou Z J. The practice of concrete filled steel tube piers to bridges: a review[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405/406/407/408: 1602-1605.
- [4] 臧华,涂永明.钢管混凝土在桥梁工程中的应用与前景[J].中国市政工程,2010(4):34-36.  
ZANG Hua, TU Yong-ming. Application & prospect on CFST in bridge engineering[J]. China Municipal Engineering, 2010(4): 34-36. (in Chinese)
- [5] 河野昭彦,松井千秋,崎野良比吕.繰返し水平力を受けるコンクリート充填鋼管トラス柱の弾塑性挙動と変形能力に関する実験的研究[J].日本建築學會構造系論文集,1996,482(4):141-150.  
Akihiko K, Chiaki M, Yoshihito S. An experimental study on the elasto-plastic behavior and deformability of concrete-filled tubular truss beam-columns under cyclic loading[J]. Journal of Structural & Construction Engineering of AIJ, 1996, 482(4): 141-150. (in Japanese)
- [6] 河野昭彦,松井千秋.弦材にコンクリート充填した平行弦鋼管トラスの變形能力[J].日本建築學會構造系論文集,1999,522(8):129-135.  
Akihiko K, Chiaki M. The deformation capacities of parallel chord trusses with concrete filled tubular chord[J]. Journal of Structural & Construction Engineering of AIJ, 1999, 522(8): 129-135. (in Japanese)
- [7] Kawano A, Sakino K. Seismic resistance of CFT trusses[J]. Engineering Structures, 2003, 25(5): 607-619.
- [8] Kawano A, Matsui C. The deformation capacity of trusses with concrete filled tubular chords[C/OL]// The Conference of Composite Construction in Steel and Concrete IV, Banff Alta, Canada, 2000[2016-02-02]. <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40616%28281%2964>.
- [9] 邓萱奕.钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D].长沙:中南大学,2012.  
DENG Xuanyi. Study on the seismic performance of concrete filled steel tubular lattice column[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [10] 罗瑶.四肢钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D].长沙:中南大学,2013.  
LUO Yao. Studies on the seismic performance of four-tube concrete filled steel tubular laced columns[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [11] 吕银花.平缀管式等截面钢管混凝土格构柱滞回性能研究[D].福州:福州大学,2015.  
LYU Yinhua. Studies on hysteretic behavior of uniform section concrete filled steel tubular laced columns with flat lacing tube[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015. (in Chinese)
- [12] 韩林海,陶忠,刘威.钢管混凝土结构:理论与实践[M].北京:科学出版社,2004.  
HAN Linhai, TAO zhong, LIU Wei. The concrete filled steel tubular structures from theory to practice[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [13] 徐培蓁,聂瑞锋,叶列平.方钢管混凝土柱累积耗能性能的实验研究[J].工程科学学报,2011,33(8):1037-1042.  
XU Peizhen, NIE Ruifeng, YE Lieping. Experimental study on accumulate energy dissipation performance of concrete filled square steel tubular columns[J]. Chinese Journal of Engineering, 2011, 33(8): 1037-1042. (in Chinese)
- [14] Elremaily A, Azizinamini A. Behavior and strength of circular concrete-filled tube columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(12): 1567-1591.
- [15] 陈宝春,欧智菁.四肢钢管混凝土格构柱极限承载力试验研究[J].土木工程学报,2007,40(6):32-41.  
CHEN Baochun, OU Zhijing. Experimental research on ultimate load carrying capacity of four-tube concrete filled steel tubular laced columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 32-41. (in Chinese)