

# 钢管混凝土格构柱发展和研究

欧智菁<sup>1</sup>, 陈宝春<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院土木工程系, 福建 福州 350007; 2. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 介绍了钢管混凝土格构柱的工程应用和发展前景. 对钢格构柱及钢管混凝土格构柱的试验研究、有限元分析和极限承载力计算方法的研究现状和研究成果进行了综述和总结, 对国内现行设计规程计算方法的合理性进行了评价. 最后对钢管混凝土格构柱今后的研究方向进行了展望.

**关键词:** 钢管混凝土; 格构柱; 有限元; 极限承载力

**中图分类号:** TU398.9

**文献标识码:** A

## Experimental research on concrete filled steel tubular laced columns compressed eccentrically

OU Zhi - jing<sup>1</sup>, CHEN Bao - chun<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** The application and development prospects of concrete - filled steel tube (CFST) laced columns are introduced. Present status of steel laced columns and CFST laced columns, including test research, finite element analysis and the calculation methods of ultimate load - carrying capacity, are summarized. The rationality of calculation methods in China design criteria is evaluated. Finally the future research direction of CFST laced column is viewed.

**Keywords:** concrete - filled steel tube; laced columns; finite element; ultimate load - carrying capacity

格构柱是由柱肢和横向连接缀件组成的结构, 其中轴向柱肢是承受轴向荷载的重要构件, 横向缀件则作为将各分肢连接成整体、抵抗侧力的辅助构件. 与实腹柱不同, 格构柱由于缀件刚度有限, 使得柱子在失稳时产生较大的剪切变形, 进而降低其承载力, 因此设计中不能忽略剪切变形的影响.

格构柱截面形式包括等截面和变截面. 格构柱按柱肢材料可分为钢格构柱、钢管混凝土格构柱等. 本文研究的钢管混凝土格构柱是指用钢管混凝土作为柱肢、空钢管作为缀件 (或称缀管)、柱肢钢管与缀管采用焊接联接的以受压为主的构件. 格构柱中柱肢的根数称为肢数, 常见的有二肢柱、三肢柱和四肢柱. 格构柱按缀件可分为缀板式 (battened column) 和缀条式 (laced or latticed column), 其中缀条柱有 5 种主要的布置形式, 见图 1.

管混凝土格构柱在工业厂房和钢管混凝土桁肋拱中应用广泛<sup>[1]</sup>, 但相关的试验和理论研究开展得相对较少. 本文旨在对钢管混凝土格构柱的研究现状和研究成果作一个综述.

### 1 钢管混凝土格构柱的应用概况

钢管混凝土格构柱能以较小直径的柱肢取得较大的截面抗弯刚度, 且柱肢以受轴力为主, 能充分发挥钢管混凝土受压强度大的特性, 因此被大量应用于荷载偏心率较大或长细比较大的结构构件中, 如工业厂房、高层建筑、设备构架等. 表 1 列出了钢管混凝土格构柱的部分应用实例.

收稿日期: 2007 - 08 - 13

作者简介: 欧智菁 (1975), 女, 博士, 讲师.

基金项目: 福建工程学院科研发展基金资助项目 (GY - Z0309)

钢管混凝土格构柱还广泛应用于拱桥中. 前苏联在 1939 年建成了世界上第一座跨径 140 m 的上承式钢管混凝土桁拱<sup>[2]</sup>, 而钢管混凝土拱桥大量应用却是在 20 世纪 90 年代后的中国. 在文献 [3] 统计的 45 座已建的跨径超过 120 m 的钢管混凝土拱桥中, 有 33 座拱肋采用了格构式, 占总数的 71. 7%; 在跨径超过 200 m 的 22 座桥梁中, 则全部都采用格构式. 在这些拱肋中除一座为三肢和一座为六肢外, 其余全部为四肢式. 由此可见, 四肢格构式肋拱是大跨钢管混凝土拱桥拱肋的主要截面型式. 表 2 列出了钢管混凝土桁拱桥的部分应用实例.

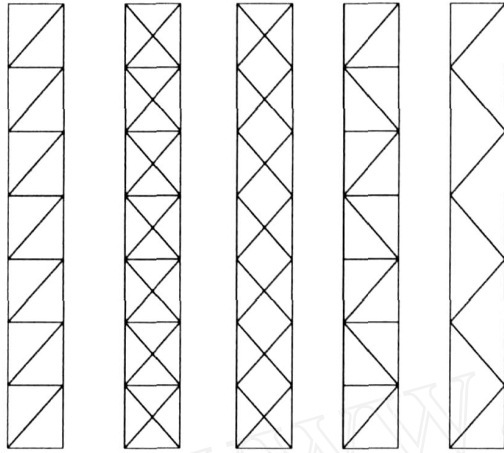


图 1 缀条柱缀条布置方式

Fig 1 Arrangement types of lacing tubes

表 1 钢管混凝土格构柱的应用实例

Tab 1 Application of CFST laced columns

序号	工程名称	建成年份	肢数
1	本溪钢铁公司连铸主厂房	1972	双肢柱
2	哈尔滨船舶修造厂船体车间	1977	三肢柱
3	武昌造船厂船体车间	1983	四肢柱
4	大连造船厂船体装配车间	1983	四肢柱
5	长春电厂电炉车间	1986	三肢柱
6	大连船用柴油机厂装联体厂房	1994	四肢柱
7	鞍山钢铁公司连铸连轧主厂房	2000	四肢柱
8	唐钢超薄带钢连轧厂房	2001	双肢柱
9	天津泰达国际会展中心	2003	四肢柱

表 2 钢管混凝土桁拱桥的应用实例

Tab 2 Application of CFST truss arch bridges

序号	工程名称	建成年份	跨径 /m	拱肋截面	$d_{\text{柱肢钢管}} / \text{mm}$
1	福建闽清石潭溪大桥	1997	136	四管桁式	$\phi 550 \times 8$
2	依兰牡丹江大桥	1997	100	三管桁式	$\phi 600 \times 12$
3	深圳北站大桥	2000	150	四管桁式	$\phi 750 \times 12$
4	广东广州丫髻沙大桥	2000	360	六管桁式	$\phi 750 \times 18$
5	重庆奉节梅溪河桥	2001	288	四管桁式	$\phi 920 \times 14$
6	浙江淳安县南浦大桥	2003	308	四管桁式	$\phi 850 \times 12$
7	广西南宁永和大桥	2004	338	四管桁式	$\phi 1\ 220 \times 16$
8	广东东莞水道特大桥	2005	278	四管桁式	$\phi 1\ 000 \times 16$
9	四川巫峡长江大桥	2005	460	四管桁式	$\phi 1\ 220 \times 22$

钢管混凝土桁拱的极限承载力计算常采用等效梁柱法<sup>[4]</sup>, 即将拱拟合成等效长度的梁柱来计算其承载力. 对于无铰拱非对称荷载作用时, 可拟成  $0.36S$  ( $S$  为弧长) 的等效格构柱.

根据文献 [1]、[3] 统计, 钢管混凝土格构柱及桁拱的主要参数范围见表 3 ( $e_0$  为偏心率,  $e_0$  为构件长细比,  $d/D$  为支主管管径比).

## 2 钢格构柱研究综述

国内现有钢管混凝土设计规程, 如 CECS 28: 90<sup>[5]</sup>、JGJ 01 - 89<sup>[6]</sup>、DL/T 5085 - 1999<sup>[7]</sup>等, 对钢管混

表 3 钢管混凝土格构柱及桁拱的主要参数范围

Tab 3 Main parameter scope of CFST laced column and truss arch bridge

工程实例	$e_0 / h$	$d/D$	缀条形式
格构柱	0.1 ~ 0.5	20 ~ 30	V形缀条
桁拱		40 ~ 60	N形缀条

混凝土格构柱的整体极限承载力均采用钢格构柱的计算方法, 因此, 这里首先对国内外钢格构柱的研究现状进行综述.

## 2.1 试验研究

国外的钢桥修建得较多, 试验研究主要集中在等截面型钢格构柱上. 文献 [8] 介绍了以魁北克二桥为原型的钢格构柱试验. 研究表明: 3/4 的钢格构柱的破坏是由柱肢的局部屈曲引起的, 而不是整体破坏. 文献 [9] 以 San Francisco - Oakland Bay Bridge 为原型, 进行了三根型钢格构柱的往复加载试验, 并根据试验结果, 对文献 [10] 中钢格构式压弯构件内整体稳定计算的相关方程进行了修正.

国内以往钢结构工程少, 研究开展得也较少. 近年来随着梭形钢格构柱的应用日趋广泛, 陆续开展了一系列试验研究. 文献 [11]、[12] 结合广州新白云国际机场航站楼工程, 进行了三管梭形钢格构柱的足尺和缩尺模型的极限承载力试验研究. 研究表明, 三管梭形钢格构柱在轴压和两端铰接约束条件下, 其稳定破坏属极值点失稳. 破坏形式有非对称“S”形和单波形 2 种, 与初始几何缺陷  $\delta_0$  的分布形态及其幅值紧密相关. 构件自重对极限承载力影响较小, 初始几何缺陷的幅值及其分布模态对构件的稳定承载力及破坏形态影响显著.

文献 [13] 进行了 2 根四肢钢管格构柱偏心受压试验. 试验结果表明, 钢管格构柱没有明显的整体变形, 最后试件由于局部皱曲而破坏, 带有较强的局部破坏和脆性破坏的特点.

## 2.2 极限承载力计算方法研究

目前国际上对钢格构柱的设计计算中, 普遍考虑了剪力的影响, 其极限荷载的设计公式都建立在 1891 年 Engesser<sup>[14]</sup> 提出的计算方法的基础上, 将格构柱的屈曲问题简化成等效长度的实腹柱的屈曲问题, 其横向位移不仅由弯矩产生, 还包括横向剪力造成的附加挠曲.

文献 [14] 根据缀条伸长和缩短引起的剪切位移, 首次推导了双肢 N 形缀条柱的临界荷载  $P_{cr}$  的计算公式. 在此基础上, 文献 [15] 进一步推导了其它形式 (V 形、X 形、交叉形) 双肢缀条柱和缀板柱的临界荷载计算公式. 国内《钢结构设计规范》(GB 50017 - 2003)<sup>[16]</sup>、GB 50018 - 2002<sup>[17]</sup>, 参考了文献 [15] 中 V 形缀条柱的计算方法, 提出了双肢、三肢和四肢缀条柱换算长细比  $\lambda^*$  的简化公式, 其基本表达形式见式 (1):

$$\lambda^* = \sqrt{\lambda^2 + \mu^2} \quad (1)$$

式中:  $\lambda^*$  为换算长细比;  $\lambda$  为构件长细比;  $\mu$  为剪切影响附加值.

文献 [18] 提出了格构柱的剪切柔度  $\mu$ , 以考虑缀件参数和节点连接偏心对格构柱临界荷载的影响.  $\mu$  定义为格构柱一个节间内由剪力引起的角位移与弯矩引起的角位移之比. 该文献推导了缀条柱和缀板柱的  $\mu$  值计算公式, 并以图表的方式给出了不同边界条件下格构柱临界荷载  $P_{cr}$  与欧拉荷载  $P_e$  之间的关系. 文献 [19] 在文献 [18] 的基础上, 提出将原构件长细比  $\lambda$  乘以一个大于 1 的等效长度放大系数  $K$ , 来考虑剪切变形的影响, 从而得到换算后的长细比  $K\lambda$ :

$$\lambda^* = K\lambda = \sqrt{P_e/P_{cr}} \cdot \lambda \quad (2)$$

式中:  $P_{cr}$  为临界荷载;  $P_e$  为欧拉荷载;  $K$  为等效长度放大系数 (换算长细比系数). 其余符号含义同式 (1).

文献 [13] 试验结果分析表明, 采用 GB 50017 - 2003 规程<sup>[16]</sup> 计算的偏压钢格构柱试件的极限承载力与试验结果吻合良好, 表明规程在极限承载力计算方面是合理的. 但在该方法中当  $\lambda$  较小时, 用加法考虑剪切影响的换算长细比的计算结果偏大, 与其概念不符, 建议采用放大系数法来计算, 使其理论上更加合理.

文献 [20 ~ 22] 认为格构柱除考虑剪切变形外, 还应考虑柱肢的压缩变形以及两端刚性垫板的影响, 由此提出了临界荷载的修正计算方法.

## 2.3 有限元分析研究

格构柱是高次超静定结构, 文献 [23] 提出格构柱的弯扭屈曲问题可以简化成四阶的两点边界值问题, 自编程序用以计算不同边界条件下格构柱的稳定问题. 该文献以 10 节间工字型钢格构柱 (X 形缀条) 为研究对象, 进行了算例分析. 研究表明, 两端固结的格构柱比两端铰支的格构柱极限荷载大 5.6% ~ 7.8%.

文献 [24] 采用 ANSYS 通用程序, 对钢格构柱的数值分析结果与国内钢结构设计规范的计算结果进行

了比较分析. 研究表明, GB 50017 - 2003 和 GB 50018 - 2002 规程中关于压弯格构柱的面内稳定计算方法偏不安全, 建议采用与压弯实腹柱相同的计算公式.

文献 [25 ~ 27] 结合试验研究<sup>[11, 12]</sup>, 采用通用程序 ANSYS, 对梭形钢格构柱的弹性屈曲荷载及极限承载力进行了系统的参数分析. 数值分析结果表明, 对称的弯曲屈曲荷载的大小取决于抗弯刚度的强弱, 相应的结构参数有格构柱的柱长、柱肢钢管的面积、惯性矩及缀管的长度(或缀板柱的换算长细比). 反对称的剪切屈曲荷载的大小取决于抗剪刚度的强弱, 主要由柱肢钢管和缀管的线刚度及柱肢钢管的局部长度确定(或缀板的厚度与数量). 当梭形柱的初始缺陷分布形式与一阶弹性屈曲模态一致时, 柱的极限承载力最低.

缀件的设计对钢管格构柱极限承载力有一定影响, 文献 [28] 采用弹塑性大挠度有限元, 对不同缀条布置形式的三肢钢管格构柱进行了极限承载力的比较, 并分析了缀条长细比的影响. 研究表明, M 形缀条柱具有最高的弹性屈曲荷载和极限承载力, N 形缀条柱的极限承载力也较高, 且布置形式均匀对称, 易于加工, 是一种理想的三肢钢管格构柱. 随着缀条长细比的逐渐加大, 格构柱的极限承载力逐渐降低, 其影响大约占 3% ~ 5%. GB 50017 - 2003 规程的计算结果与有限元值吻合良好, 可用于计算三肢钢管格构柱的极限承载力.

文献 [29] 应用 ANSYS 程序, 在对文献 [13] 的试验构件计算验证的基础上, 对钢管格构柱极限承载力进行了参数影响的数值分析, 对国内设计规程中的计算方法进行评价. 研究表明, GB 50017 - 2003 规程关于钢管格构柱承载力计算中偏心影响和稳定系数的计算方法是合理的. 随着支主管管径比  $d/D$  或缀条长细比的减小, 钢管混凝土格构柱的极限承载力逐渐增大, 其影响约在 2% ~ 3%. 建议在钢管格构柱设计中, 支主管管径比  $d/D$  选择在 0.3 左右. 缀条布置方式、斜缀条交角对钢管格构柱极限承载力的影响不大.

### 3 钢管混凝土格构柱的研究现状

目前钢管混凝土格构柱的试验和理论研究开展得较少. 总的来说, 对钢管混凝土单圆管的试验和理论研究开展得比较广泛且在不断地深入之中, 而钢管混凝土格构柱方面相对比较薄弱.

#### 3.1 试验研究

日本学者河野昭彦等人对双肢钢管混凝土格构柱在反复荷载作用下的滞回曲线、变形能力进行了试验研究<sup>[30]</sup>. 试验参数包括加荷方法、加荷方向、有无填充混凝土等. 文献 [31] 在上述试验结果的基础上, 对钢管混凝土格构柱的抗震性能进行了进一步研究. 结果表明, 钢管混凝土格构柱结构刚度大, 可应用于新型的抗震系统中.

文献 [32] 介绍了钢管混凝土格构柱柱肢 K 形节点承载力的试验研究. 节点破坏特征为节点上部柱肢明显变粗, 直径增加 15%, 且发生局部褶皱, 而其内部混凝土仍保持整体. 钢管混凝土格构柱节点的实际承载力比按空钢管节点计算的理论值要大得多. 而由于试验数据太少, 该文献没有提出钢管混凝土节点承载力的具体计算方法.

福州大学陈宝春等人, 结合国家自然科学基金项目《钢管混凝土格构柱受力性能研究》, 以跨径 278 m 的东莞水道特大桥的拱肋为原型, 开展了 31 根四肢钢管混凝土格构柱(N 形缀条)的轴压、偏压系列试验研究<sup>[33~38]</sup>. 第一批试验以长细比为参数 ( $\lambda = 1.818 \sim 7.272$ ), 试验总数为 4 根<sup>[33]、[35]</sup>; 第二批试验以偏心率为参数 ( $e_0/h = 0 \sim 0.4$ ), 试验总数为 5 根; 第三批试验同时考虑长细比和偏心率两个参数 ( $\lambda = 2 \sim 20$ ,  $e_0/h = 0 \sim 0.4$ ), 试验总数为 22 根<sup>[37]</sup>. 试验结果表明, 钢管混凝土格构柱中的柱肢以受压为主, 其中近载侧柱肢始终处于小偏压状态, 受力后期钢管对管内混凝土的紧箍效应开始发生作用且不断增大; 远载侧柱肢随构件整体偏心率的增大由小偏压发展为大偏压状态, 在整个加载过程中钢管的紧箍力作用均不明显. 缀管的受力较小且都处在弹性阶段. 钢管混凝土格构柱破坏时有较明显的面内弯曲, 属整体破坏.

陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土偏压格构柱偏心率影响试验研究 [J]. 建筑结构学报 (已录用).

为研究缀管连接形式对钢管混凝土格构柱承载力的影响, 陈宝春等先后开展了 24 根平缀管和 6 根斜缀管 (V 形) 四肢钢管混凝土格构柱的轴压和偏压试验研究, 试验参数为长细比、偏心率. 试验结果表明, 平缀管式钢管混凝土格构柱缀管的受力以受弯为主, 应变较大; 随着长细比增加, 试件的破坏特性从局部压屈变为整体破坏. V 形缀条柱试件中, 斜缀管为压弯受力或拉弯受力且受力较大; 柱肢之间受力有一定差别; 随着长细比的增加, 缀条柱试件由分肢失稳向整体失稳转变.

文献 [39] 进行了 3 根上弦杆为钢管混凝土、上下弦杆均为钢管混凝土的桁梁试件和空钢管桁梁试件的对比试验研究. 研究表明, 弦管内填充混凝土可提高节点强度和刚度, 改变节点失效模式. 空钢管桁梁试件为边段节点弦杆钢管压陷, 钢管混凝土桁梁试件为边段节点弦杆钢管冲剪失效. 黄文金等进行了 3 根不同腹杆形式的钢管混凝土桁梁试件的四分点对称加载试验. 试验结果表明, 不同腹杆形式桁梁的整体承载力和变形能力从大到小为修正 Warren 式、Pratt 式和 Warren 式. 修正 Warren 桁梁和 Pratt 桁梁钢管混凝土节点失效模式为弦杆钢管冲剪失效, 而 Warren 桁梁为腹杆接头局部屈曲.

### 3.2 极限承载力计算方法研究

陈宝春等通过偏心率影响试验研究, 对国内三本钢管混凝土设计规程<sup>[5-7]</sup>中格构柱偏心率折减系数计算方法的正确性进行了探讨. 研究表明, 在试验范围内 (偏心率  $e_0/h = 0 \sim 0.4$ ) CECS 28: 90 和 DL/T 5085 - 1999 两本规程的计算方法合理; JCJ 01 - 89 规程的计算值与试验值偏离较大, 原因是它借用国内钢结构设计规范计算方法时, 将公式中的欧拉临界力参数  $N_{E_1}$  改为格构柱的轴向受压极限承载力  $N_k$ . 这 2 个参数的概念不同, 计算值也相差很大, 建议 JCJ 01 - 89 规程将其改回欧拉临界力参数.

文献 [34]、[37] 通过长细比影响试验研究<sup>[33, 37]</sup>, 对国内 3 本钢管混凝土设计规程<sup>[5-7]</sup>中格构柱换算长细比计算公式的合理性进行了探讨. 研究表明, 对于较小的构件, 各规程的计算方法将过多考虑缀件剪切变形对承载力下降的不利影响, 使计算值与试验值相差较大. 为此, 文献 [34] 提出采用放大系数图表的换算长细比计算方法, 将构件长细比乘以一个大于 1 的等效长度放大系数  $K$ , 来考虑缀件剪切变形的影响, 所计算的极限承载力与试验值吻合良好. 文献 [37] 在图表法的基础上, 提出以 N 形缀条布置方式和斜缀条交角 45° 为基本布置形式的简化算法. 此外, 文献 [29] 研究表明, CECS 28: 90 和 JCJ 01 - 89 规程的适用范围为 40 ~ 46, DL/T 5085 - 1999 规程的适用范围为 28 ~ 34, GB 50017 - 2003 规程的适用范围为 22 ~ 26. 当小于上述范围时, 对各设计规程提出了换算长细比计算的修正建议.

文献 [37] 通过对 N 形缀条式钢管混凝土格构柱正交试验结果的研究表明, 偏心率  $e_0/h$  和长细比对钢管混凝土格构柱极限承载力的影响很大, 随着  $e_0/h$  和 的增大, 格构柱的承载力逐渐降低. 两者的影响基本上是独立的, 格构柱总体承载力的折减系数可采用分离的偏心率折减系数和稳定系数相乘来表示, 见式 (3).

$$N_u^* = N_0 = \eta_e \eta_i N_0^* \quad (3)$$

式中:  $N_u^*$  为格构柱整体承载力;  $N_0$  为格构柱单肢柱的轴心受压短柱承载力之和;  $N_0^*$  为单肢柱的轴心受压短柱的承载力之和;  $\eta_e$  为偏心率折减系数;  $\eta_i$  为稳定系数.

陈宝春等通过对平缀条式和 V 形缀条式钢管混凝土格构柱试验结果的分析, 指出式 (3) 的计算公式也适用于这 2 种缀条布置形式的钢管混凝土格构柱. 其中偏心率折减系数  $\eta_e$  可采用 CECS 28: 90 规程的公式计算. 在稳定系数  $\eta_i$  方面, V 形缀条柱剪切刚度大于平缀条式格构柱, 因此其随长细比增加稳定系数的变化率小于平缀条式格构柱.

### 3.3 有限元分析研究

目前钢管混凝土格构柱有限元分析方面的研究开展的较少. 文献 [40] 自行编制了钢管混凝土格构柱空间有限元分析程序, 进行了钢管混凝土格构柱力学性能数值计算的研究. 文献中分别对钢格构柱和钢管混凝土格构柱依据统一理论及叠加原理下的静动力计算结果进行了分析比较. 研究表明, 在水平荷载作用下, 钢管混凝土格构柱的静动力柱端位移要比钢结构小得多. 随着柱肢的增多, 格构柱可承受的

陈宝春, 宋福春. 钢管混凝土平缀管格构柱极限承载力试验研究 [J]. 土木工程学报 (已录用).

陈宝春, 宋福春. V 形缀管钢管混凝土格构柱极限承载力试验研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (已录用).

黄文金, 陈宝春. 腹杆形式对钢管混凝土桁梁受力性能影响的试验研究 [J]. 建筑结构学报 (已录用).

外荷载明显增大;随着含钢率提高,钢管混凝土格构柱的刚度增大.该文献重点着眼于钢管混凝土格构柱动力性能的分析,对极限承载力的计算方法没有进行探讨.

文献[29]、[38]应用 ANSYS 有限元程序,在对文献[37]试验构件计算验证的基础上,进行了极限承载力参数影响的数值分析,提出了四肢钢管混凝土格构柱极限承载力合理实用的计算方法.

文献[29]、[38]的有限元分析时,扩大偏心率变化范围为  $e_0/h=0\sim 1.2$ ,  $\lambda=2\sim 200$ . 研究结果表明,在钢管混凝土格构柱极限承载力计算中,CECS 28:90 规程的偏心率折减系数计算方法较合理. 3 本规程中<sup>[5-7]</sup>,JCJ 01-89 的稳定系数计算方法最合理,但对换算长细比的修正方法上仍存在不合理之处. 钢管混凝土柱肢的钢材种类、混凝土强度、含钢率对稳定系数  $\varphi$  的影响均较大,不能忽略. 同一换算长细比时,柱肢的钢号或混凝土强度等级越高,含钢率越大,稳定系数越小. 为此,提出了换算长细比应乘以考虑以上 3 个影响因素的材料修正系数  $\eta$  的建议,并通过算例数值分析和理论推导,给出了  $\eta$  的计算方法.

文献[29]、[38]的构造参数分析结果表明,随着支主管管径比  $d/D$  的增大,钢管混凝土格构柱的极限承载力逐渐增大,其影响约在 6%~7%. 建议在钢管混凝土格构柱设计中, $d/D$  选择在 0.3~0.5 之间. 缀条布置方式对钢管混凝土格构柱极限承载力的影响不大,交叉形缀条柱承载力最大,其它形式缀条柱的极限承载力十分接近,差值在 2% 之间. N 形和 V 形都是理想的钢管混凝土格构柱的缀条布置形式. 斜缀条交角对钢管混凝土格构柱极限承载力的影响很小,进一步验证了文献[7]提出的换算长细比放大系数简化算法的合理性.

最后,文献[29]在有限元参数分析和对各规程方法评价的基础上,提出了四肢钢管混凝土格构柱和钢管格构柱极限承载力的简化通用算法. 算例分析结果表明,计算值与有限元计算结果吻合良好,可供工程应用和规程修订时参考.

陈宝春等采用上述有限元建模方法,对钢管混凝土 V 形缀条柱的极限承载力进行参数分析 ( $\lambda=6\sim 120$ ). 研究结果表明,V 形缀条柱的稳定系数与钢管强度和混凝土强度是相关的,随着钢管强度或混凝土强度的增加下降的趋势更大. 根据文献[38]中提出的 JCJ 01-89 规程基础上进行材料修正的方法,修正后的计算结果与有限元数值计算结果吻合较好,进一步验证了文献[38]提出的钢管混凝土格构柱稳定系数计算方法也适用于 V 形缀条柱.

#### 4 研究展望

介绍了钢管混凝土格构柱和桁拱桥的应用概况. 对钢管格构柱和钢管混凝土格构柱的试验研究、有限元分析,以及极限承载力计算理论方面的研究成果进行了综述和小结. 总的来说,钢管混凝土格构柱研究的系统性和理论深度还存在不足.

在四肢格构柱的研究中,对以压弯为主的常用偏心率与长细比开展了试验研究与有限元参数分析,取得了可喜的成果. 然而,对于大偏心率(尤其是拉弯构件)还未开展研究,还不能给出完整的轴力-弯矩相关曲线. 已进行的主要是 N 型缀杆,缀杆以其它形式布置的格构柱还未开展试验研究. 此外,目前的研究主要集中在四肢等截面钢管混凝土缀条柱方面,对于三肢或变截面格构柱等,对于缀板柱的受力性能和承载力等有待于进一步研究.

#### 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.
- [2] . . . . . [M]. : , 1963.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [4] 陈宝春, 秦泽豹. 钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力计算的等效梁柱法 [J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 99-106.
- [5] CECS 28:90 钢管混凝土结构设计及施工规程 [S]. 1990.
- [6] DL/T 5085-1999 钢管混凝土组合结构设计规程 [S]. 1999.
- [7] JCJ 01-89 钢管混凝土结构设计及施工规程 [S]. 1989.
- [8] Wylie L T, M. W S E. Brief review of steel column tests [J]. Journal of the Western Society of Engineers, 1940, 45(3): 99-116.
- [9] Michael Kleiser, Chia-Ming Uang. Steel latticed members under cyclic axial and flexural actions [J]. Journal of Structural En-

- gineering, 1999(4): 393 - 400
- [10] AISC. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1993.
- [11] 郭彦林, 高玉峰. 三管梭形钢格构柱足尺寸破坏性稳定试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(5): 31 - 40
- [12] 兰勇, 郭彦林, 刘涛, 等. 三管梭形钢格构柱缩尺模型破坏性稳定试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(5): 41 - 46
- [13] 欧智菁, 陈宝春. 钢管格构柱偏心受压极限承载力分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 578 - 582
- [14] Engesser F. Die knickfestigkeit gerader stabe[J]. Zentralblatt der Bauverwaltung, 1891(11): 483 - 486
- [15] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of elastic stability[M]. New York: McGraw - Hill, 1961.
- [16] GB 50017 - 2003 钢结构设计规范[S]. 2003.
- [17] GB 50018 - 2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 2002.
- [18] Lin F J, Clauser E C, Johnston B G. Behavior of laced and battened structural members[J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1970, 96(7): 1377 - 1400
- [19] Galambos T V. Guide to stability design criteria for metal structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998
- [20] Ziegler H. Arguments for and against Engesser's buckling formulas[J]. Ing Arch, 1982, 52: 105 - 113
- [21] Gjelsvik, A. Buckling of built-up columns with or without stay plate[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(5): 1142 - 1159.
- [22] Gjelsvik, A. Stability of built-up columns[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(6): 1331 - 1345.
- [23] Alexander G Razdolsky. Euler critical force calculation for laced columns[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005(10): 997 - 1003
- [24] 刘书江, 童根树. 格构式压弯杆平面内稳定计算[J]. 钢结构, 2004, 19(2): 58 - 61.
- [25] 邓科, 郭彦林. 轴心受压梭形变截面钢管格构柱的弹性屈曲性能[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 31 - 37.
- [26] 郭彦林, 陈国栋, 兰勇. 三管梭形钢格构柱稳定极限承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(5): 25 - 30.
- [27] 兰勇, 郭彦林, 陈国栋. 梭形钢管格构柱弹性屈曲性能[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(5): 18 - 24.
- [28] 马智刚. 三肢钢管格构柱稳定极限承载力研究[J]. 工程设计与设计, 2005, 52(5): 12 - 14.
- [29] 欧智菁. 四肢钢管混凝土格构柱极限承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2007.
- [30] 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塑性動と変形能力に関する実験的研究[C]. 日本建築學造系論文集: 第482号, 东京: [出版者不详], 1996
- [31] Kawano A, Sakino K. Seismic resistance of CFT trusses[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 607 - 619.
- [32] 林红. 钢管混凝土格构式柱节点连接计算[J]. 钢结构, 2003, 18(6): 36 - 39.
- [33] 陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土偏压格构柱长细比影响试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 73 - 89.
- [34] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土格构柱偏心受压面内极限承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 80 - 83.
- [35] Ou Zhijing, Chen Baochun. Experimental research on concrete filled steel tubular laced columns compressed eccentrically [C]//Composite and Hybrid Structures Harbin: Proceedings of the 8th ASCCS International Conference, 2006
- [36] Chen Baochun, Ou Zhijing. Analyses on critical load of concrete filled steel tubular laced columns compressed eccentrically [C]//Composite and Hybrid Structures Harbin: Proceedings of the 8th ASCCS International Conference, 2006
- [37] 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.
- [38] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土格构柱极限承载力计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 55 - 63.
- [39] 陈宝春, 黄文金. 圆管截面桁梁极限承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 53 - 61.
- [40] 周立. 钢管混凝土格构柱力学性能数值计算的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002

(责任编辑: 王阿军)