

钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱极限承载力的修正格构式算法

韦建刚, 陈宝春, 肖泽荣

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 在对现有钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱极限承载力计算方法分析的基础上, 根据试验研究结果提出计算极限承载力的修正格构式算法. 计算结果与试验结果吻合良好且偏于安全, 可供工程应用参考.

关键词: 钢管混凝土; 柱; 哑铃形; 极限承载力; 偏心受压; 修正; 格构式

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Modified lattice method for ultimate load - carrying capacity of dumbbell shaped concrete filled steel tubular eccentrically - loaded stub columns

WEI Jian - gang, CHEN Bao - chun, XIAO Ze - rong

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: According to the experimental results of dumbbell - shaped CFST eccentrically - loaded columns and based on the analyses of the existing calculation methods, a modified lattice method to estimate the ultimate loads of dumbbell - shaped CFST eccentrically - loaded columns is proposed. The predicted values by this method agree well to the experiment results and safe for use. Therefore, this method can be used in engineering application.

Key words: CFST; column; dumbbell - shape; ultimate load; eccentrically - loaded; modified; lattice

哑铃形截面是钢管混凝土拱肋中常见的截面形式, 在文献[1]所统计的 109 座钢管混凝土拱桥中, 采用竖哑铃形截面的有 39 座, 采用横哑铃形截面(桁式)的有 15 座, 两者相加约占总数的一半. 为计算钢管混凝土哑铃形拱肋的极限承载力, 研究人员提出了钢管混凝土哑铃形截面构件的极限承载力计算方法^[2-5], 然而, 这些方法均未经试验验证, 各种计算方法因计算假定不同计算结果也不一样. 为此, 在钢管混凝土哑铃形截面偏压柱的试验研究^[6]的基础上, 提出了钢管混凝土哑铃形偏压构件极限承载力的等效单圆管算法^[7]. 本文在文献[6]、[7]的基础上, 通过对已有算法与试验结果的分析, 提出修正的格构式算法.

1 偏压试验^[6]简介

文献[6]进行了 8 根偏压构件的试验. 试件设计时, 选用了一座在建的跨径为 100 m 的钢管混凝土拱桥的拱肋为原型, 哑铃形断面为两根直径 $D = 108$ mm、壁厚 $a = 4$ mm 的无缝钢管和 4 mm 厚的腹板焊接而成, 在钢管内和腹腔内灌注 C50 混凝土, 试件断面见图 1. 以偏心率作为试验参数, 偏心距作用在竖向(强轴方向); 偏心率为 $e/(2i)$, 其中 e 为荷载偏心距, i 为截面的回转半径, 变化范围为 0.06 ~ 0.24. 试件的长度均为 800 mm, 长细比为 10. 试件的详细情况列于表 1.

试件编号 1、2、3、4 分别代表偏心距为 10、20、30、40 mm, 同一偏心距的试件有两根, 用括号内的数字来表示. 钢管的屈服强度为 $f_v = 429$ MPa, 混凝土立方体强度为 $f_{cu} = 29.8$ MPa. 试验采用分级加载, 弹性范围内每级荷载为预计极限荷载的 1/10, 当钢管受压区边缘纤维屈服后每级荷载约为预计极限

收稿日期: 2003 - 10 - 23

作者简介: 韦建刚(1971 -), 男, 博士研究生, 助理研究员.

基金项目: 福建省重大科技资助项目(2003F007); 福建省教育厅科研资助项目(JA03016)

荷载的 1/20, 每级荷载的持荷时间约为 5 min. 当接近破坏时慢速连续加载, 同时连续记录各级荷载所对应的变形值, 直至试件最终破坏时停止试验.

试验表明, 钢管混凝土哑铃形试件在各受荷阶段基本能保持平截面假定. 试件临近破坏时, 首先受压力较大的一肢的钢管先屈服, 然后腹板鼓出, 最后整个试件失去承载力. 从第一肢钢管屈服到整个试件丧失承载力, 荷载相差约 5% ~ 10%. 试件的极限承载力见表 1 的最后一列.

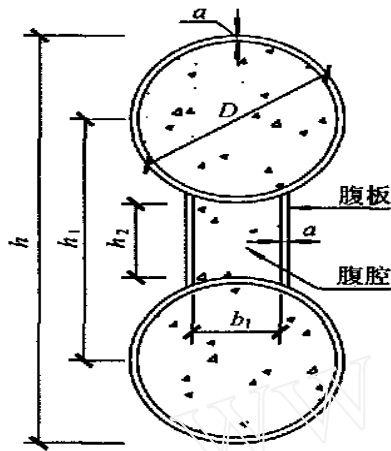


图 1 试件断面

Fig. 1 Section of specimen

表 1 偏压试件及试验结果一览表

Tab. 1 Specimen information and test results

试件编号	偏心距 l/mm	偏心率 $e/(2i)$	极限荷载 N/kN
B - 1(1)	10	0.06	2 100
B - 1(2)	10	0.06	2 120
B - 2(1)	20	0.12	1 955
B - 2(2)	20	0.12	2 000
B - 3(1)	30	0.18	1 700
B - 3(2)	30	0.18	1 690
B - 4(1)	40	0.24	1 625
B - 4(2)	40	0.24	1 600

2 现有计算方法介绍

2.1 折算面积法^[2-4]

文献[2]根据钢与混凝土的弹性模量之比将钢折算成混凝土面积, 对钢管混凝土哑铃形拱肋采用允许应力法并按钢筋混凝土构件进行强度计算(完全不考虑钢管对管内混凝土的套箍作用). 文献[3]的计算原理和文献[2]相同, 不过该方法考虑了钢管对混凝土的套箍作用, 将混凝土的强度提高一级, 比如将 C50 的混凝土按 C60 来计算. 文献[4]则认为钢管混凝土受力时的性质与钢材的性质相类似, 因此在材料屈服前可以将哑铃形截面中的钢腹板面积折算成钢管混凝土面积, 对规程《DL/T5058 - 1999》^[8]进行了相应的修改, 得出哑铃形截面压弯构件强度验算公式:

当 $N/A_0 \geq 0.2f_{sc}$ 时:

$$N/(A_0 f_{sc}) + M_x/(W_{0x} f_{sc}) \leq 1 \quad (1)$$

当 $N/A_0 < 0.2f_{sc}$ 时:

$$N/(1.4A_0 f_{sc}) + M_x/(W_{0x} f_{sc}) \leq 1 \quad (2)$$

其中: A_0 为换算面积, $A_0 = d^2/2 + 2 \sigma_{sc} t_1 h_1$; W_{0x} 为换算截面抵抗距, $W_{0x} = \{ d^4/32[1 + 4(1 + h_1/d)^2] + \sigma_{sc} t_1 h_1^3/6 \} / (h/2)$; σ_{sc} 为钢材与钢管混凝土弹性模量比.

利用文献[2] ~ [4]的方法, 计算了试验中的 14 根试件的承载力, 计算结果见图 2.

由图 2 可知, 用文献[2]的方法计算试件的承载力只有试验值的 40% 左右, 因为该文献只是将钢折算成混凝土的面积, 而且认为构件受压边缘达到混凝土的容许压应力时构件即破坏, 没有考虑钢管混凝土中钢管对混凝土的约束作用. 其算法未能充分考虑钢管混凝土材料的优点, 因此过于保守.

由文献[3]的计算方法计算出的承载力结果比文献[2]方法略高一些, 该计算方法通过将混凝土强度提高一级的方法来考虑钢管的套箍作用. 但是该方法过于简单, 依然是把钢管混凝土构件当作钢筋混凝土构件来计算, 没有充分反映钢管混凝土的特性, 因此计算出的承载力依然比试验结果低很多.

文献[4]的计算方法是将一哑铃形截面中的钢腹板面积折算成钢管混凝土面积(按两种材料的弹性

模量比), 然后整个构件按钢管混凝土构件来计算. 这种计算方法的计算结果与试验结果比较接近, 但是该方法仅能应用 DL/T^[8] 规程. 对于 JGJ^[9] 和 CECS^[10] 规程, 文献[4]的方法无法进行计算.

2.2 等效单圆管算法^[7]

文献[7]在对哑铃形偏心受压构件试验研究的基础上, 提出了将哑铃形构件等效成单圆管构件的极限承载力计算方法. 该方法忽略腹板与腹腔内混凝土的作用, 根据

$$EA = E_s A_s + E_c A_c \quad (3)$$

$$EI = E_s I_s + E_c I_c \quad (4)$$

求出截面回转半径 $i = \sqrt{EI/(EA)}$.

对于 JGJ^[9] 和 CECS^[10] 规程, 可将哑铃形截面等效成半径为 $2i$ 的单圆管截面. 对于 DL/T^[8] 规程, 则与文献[4]的方法基本相同. 分析结果表明, 计算结果与试验结果吻合较好(图 3). 但由于等效单圆管法实际上是对应于哑铃形偏压柱整个构件丧失极限承载力, 因此, 有些计算值超过了实测值, 从应用角度来说, 这部分偏于不安全.

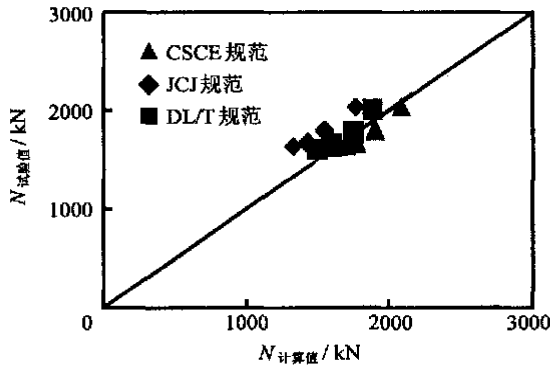


图 3 等效单圆管法^[7]计算值与试验值比较

Fig.3 Comparison of tested results and the predicted values by reference^[7]

2.3 格构式算法^[5]

文献[5]将哑铃形截面视为桁式拱肋, 相当于建筑物柱子中用缀板连接的格构柱, 认为整个截面的弯矩通过两肢钢管混凝土的轴力来平衡, 不考虑单肢钢管混凝土承受弯矩作用, 即将单肢钢管混凝土视为轴心受压构件进行承载力计算. 本文称这种方法为格构式算法. 由图 4 的平衡条件:

$$\begin{cases} N = N_1 + N_2 \\ M = Ne = N_1 \times (h/2) + N_2 \times (h/2) \end{cases} \quad (5)$$

可求得上下管的轴力为:

$$\begin{cases} N_1 = N/2 - M/h = \left\{ \frac{1}{2} - \frac{e}{h} \right\} N \\ N_2 = N/2 + M/h = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{e}{h} \right\} N \end{cases} \quad (6)$$

式中: N_1, N_2 分别为两肢钢管混凝土的轴力; N, M 分别为整个哑铃形截面的轴力和弯矩; h 为哑铃形截面两管中心距离.

应用国内有关钢管混凝土结构的设计规程^[8-10] 计算的哑铃形偏压试件的极限荷载与试验值的比较见图 5. 由图 5 可知, 计算值与试验值吻合较好. 但从应用角度来说, 比试验值大的部分在应用中偏于

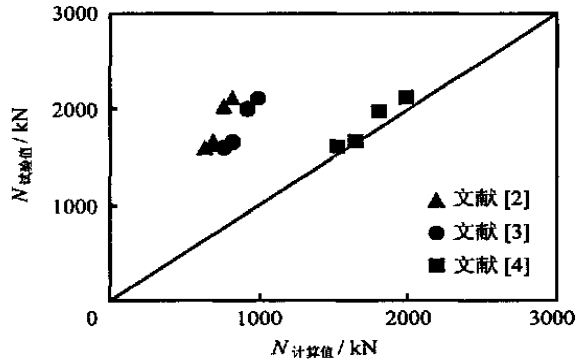


图 2 折算面积法^[2-4]计算值与试验值比较

Fig.2 Comparison of tested results and the predicted values by references^[2-4]

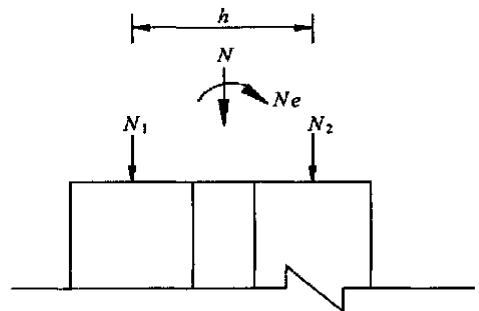


图 4 格构式算法示意图

Fig.4 Sketch for lattice method

不安全. 格构式算法视哑铃形截面为桁式截面, 然而与桁式截面不同, 哑铃形截面中两圆管的直径与高度之比在 1/2.5 附近, 单肢钢管混凝土本身的抗弯抵抗距不能忽略不计. 因此, 其单肢钢管混凝土不仅承受轴向压力, 还要承受相当大的弯矩, 即单肢钢管混凝土也是压弯构件. 大量试验研究表明, 偏心率对钢管混凝土的承载力有很大的影响, 偏心率越大, 承载力越低, 因此这种算法在应用上偏于不安全.

3 对格构式算法的修正

从前面的分析可以看出, 因为缺乏试验研究的基础, 现有的计算方法均不理想, 且各算法之间结果相差很大. 通过文献[6]钢管混凝土哑铃形偏压短柱的试验, 在格构式截面法的基础上, 本文提出考虑哑铃形构件中单肢管也承受弯矩的修正的格构式算法, 算法示意图见图 6.

由图 6, 根据外力平衡条件得:

$$\begin{cases} N = N_1 + N_2 \\ M = Ne = N_1 \times (h/2) + N_2 \times (h/2) + M_1 + M_2 \end{cases} \quad (7)$$

与式(5)相比, 式(7)的第二式比式(5)中多了两项: M_1 和 M_2 (单肢钢管混凝土所承受的弯矩). 因此, 要先求出 M_1 、 M_2 , 再求出 N_1 、 N_2 , 再求出每肢的偏心距 e_1 、 e_2 , 这样就可以对各肢应用单圆钢管混凝土的偏压计算公式进行极限荷载的计算了.

由试验可知, 哑铃形截面在各受荷阶段基本能保持平截面假定, 根据刚度分配原则可得:

$$\begin{cases} M_1 = M(EI)_1/(EI) = \alpha_1 Ne \\ M_2 = M(EI)_2/(EI) = \alpha_2 Ne \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\alpha_1 = (EI)_1/(EI)$, $\alpha_2 = (EI)_2/(EI)$; $(EI) = (EA)_1 b_1^2 + (EA)_2 b_2^2 + (EI)_1 + (EI)_2$; $(EA)_1 = E_s A_{s1} + E_c A_{c1}$, $(EA)_2 = E_s A_{s2} + E_c A_{c2}$; $(EI)_1 = E_s I_{s1} + E_c I_{c1}$, $(EI)_2 = E_s I_{s2} + E_c I_{c2}$. E_s 、 E_c 分别为钢管和混凝土的弹性模量; A_{s1} 、 A_{s2} 分别为上下肢钢管的面积; A_{c1} 、 A_{c2} 分别为上下肢管内的混凝土面积; I_{s1} 、 I_{s2} 分别为上下肢钢管的抗弯惯矩; I_{c1} 、 I_{c2} 分别为上下肢管内的混凝土抗弯惯矩; b_1 、 b_2 为上下肢距截面中心线的距离. 一般情况下, 有: $(EA)_1 = (EA)_2$, $(EI)_1 = (EI)_2$.

将式(8)代入式(6), 可得:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{N}{2} - \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h} M = \left[\frac{1}{2} - \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h} \times e \right] \times N \\ N_2 = \frac{N}{2} + \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h} M = \left[\frac{1}{2} + \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h} \times e \right] \times N \end{cases} \quad (9)$$

令 $M_1 = N_1 e_1$, $M_2 = N_2 e_2$, 由式(8)和式(9)可求得, 各肢的偏心距 e_1 、 e_2 为:

$$\begin{cases} e_1 = \frac{M_1}{N_1} = (\alpha_1 \times e) \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h} \times e \right]^{-1} \\ e_2 = \frac{M_2}{N_2} = (\alpha_2 \times e) \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h} \times e \right]^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

钢管混凝土哑铃形构件中两管可能都承受压力或者一管受压另一管受拉, 所以在计算时分为两种情况:

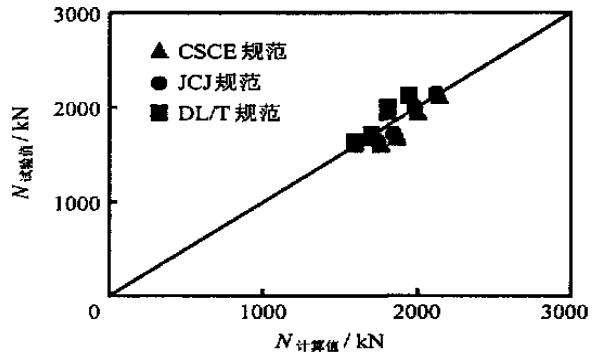


图 5 格构式算法计算值与试验值比较

Fig. 5 Comparison of tested results and the predicted values by lattice method

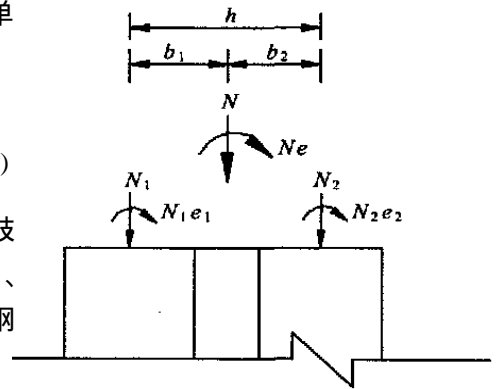


图 6 修正的格构式算法示意图

Fig. 6 Sketch for modified lattice method

1) 当 N_1 、 N_2 都大于 0 (两管受压). 此时由于 $N_1 < N_2$, 一般受压力较大的 N_2 这一肢的极限荷载为整个构件的控制荷载, 求出 N_2 的极限荷载后, 由式 (8) 和式 (10) 求得 N_1 , 代入式 (7) 第一式可求出构件的极限荷载 N .

2) 当 $N_1 < 0$ 、 $N_2 > 0$ (一管受拉、一管受压). 此时一肢为偏心受拉构件, 一肢为偏心受压构件, 需分别求出两肢的极限荷载及其相应的总构件的极限荷载, 以总构件极限荷载较小的一个作为计算结果.

利用修正的格构式截面法, 计算了 8 个试件的极限承载力 (图 7). 一般情况下, 钢管混凝土哑铃形偏压构件的受力情况以第一种情况 (两管受压) 为多, 本文的 8 个试件的极限承载力计算全部为第一种情况. 修正的格构式算法实质上是以一肢钢管屈服作为构件的破坏判断准则, 因此, 它的计算结果要比等效单圆管的低约 5% ~ 10%; 而与格构式算法相比, 它考虑了单根圆管承受的弯矩作用, 所以计算的极限承载力也比格构式算法要低. 从图 7 可知, 使用本文提出的修正的格构式算法所计算钢管混凝土哑铃形截面偏压试件的极限承载力, 与试验值吻合良好且偏于安全, 建议工程应用时采用.

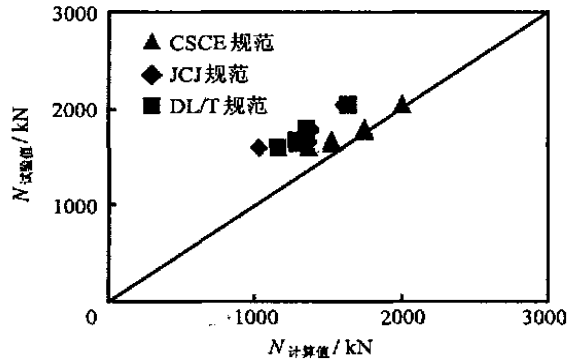


图 7 修正的格构式算法计算值与试验值比较
Fig. 7 Comparison of tested results and the predicted values by modified lattice method

4 结语

钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱的极限承载力计算方法中, 面积折算法实质是将钢管混凝土折算成钢筋混凝土来计算, 没有充分考虑钢管混凝土的特性, 计算结果过于保守, 不能充分发挥钢管混凝土的材料特性; 等效钢管混凝土的算法虽然与试验结果吻合较好, 但仅能采用 DL/T 规程; 等效单圆管法与试验结果吻合良好, 然而它所对应的极限荷载是整个构件丧失极限承载力时的荷载, 对于应用而言, 计算值大于试验值部分是偏于不安全的; 格构式算法是单肢钢管混凝土的轴心抗压强度验算, 没有考虑单肢钢管混凝土也承受一定的弯矩, 所以计算面钢管混凝土哑铃形截面构件的偏压承载力时偏于不安全.

本文根据钢管混凝土哑铃形截面构件的受力特性, 提出了修正的格构式截面法. 它既充分考虑了钢管对混凝土的套箍作用, 又考虑了哑铃形构件中单肢钢管的弯矩作用, 且以单肢钢管屈服作为构件丧失承载力的判断准则, 计算结果与试验值吻合较好, 且偏于安全, 建议工程应用采用.

此外, 由于钢管混凝土哑铃形截面腹板部分受力的复杂性, 且简便的计算方法有利于工程实际运用, 因此本文所提的计算方法忽略了腹板部分钢板和混凝土的作用, 该部分对哑铃形截面偏心受压时的传力作用将有待进一步的研究.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘金福. 哑铃型钢管混凝土拱桥拱肋截面设计[J]. 福建建筑, 1996(3): 16 - 18.
- [3] 金 鹏, 李立昌. 哑铃型截面钢管混凝土构件有限元分析[J]. 油气田地面工程, 1998(11): 70 - 73.
- [4] 涂 凌. 钢管混凝土拱桥承载力计算[J]. 重庆交通学院学报, 1999(6): 8 - 11.
- [5] 蒋凌云, 江 晖. 深圳芙蓉大桥设计[J]. 桥梁建设, 2000(3): 38 - 40.
- [6] 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形拱肋施工应力分析与偏压试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2002.
- [7] 陈宝春, 黄福云, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形短柱极限承载力的等效单圆管算法[J]. 公路交通科技, 2004(6): 50 - 53.
- [8] DL/T 5058 - 1999, 钢管混凝土组合结构设计规程[S].
- [9] CECS 28:90, 钢管混凝土结构与施工规程[S].
- [10] JCI01 - 89, 钢管混凝土结构与施工规程[S].