

文章编号: 1002-0268 (2004) 06-0050-04

钢管混凝土哑铃型短柱极限承载力的等效单圆管算法

陈宝春, 黄福云, 肖泽荣
(福州大学土木学院, 福建 福州 350002)

摘要: 哑铃型截面是钢管混凝土拱肋常用的截面形式。本文根据钢管混凝土哑铃型柱轴压与偏压试验, 提出了将哑铃型截面等效成单圆管钢管混凝土截面, 然后应用钢管混凝土结构设计规程进行极限承载力计算的等效单圆管法。对试件的计算表明, 计算值与实验值吻合良好。这个方法概念清晰、计算简单, 可供工程应用参考。

关键词: 钢管混凝土; 哑铃型; 极限承载力; 等效单圆管法

中图分类号: U445

文献标识码: A

Equivalent Single Circular Tube Method for Ultimate Load-carrying Capacity of Concrete Filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Short Columns

CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun, XIAO Ze-rong

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

Abstract: Dumbbell-shaped section is often used in concrete filled steel tubular (CFST) arch rib. Based on the experiment of dumbbell-shaped CFST concentrically-loaded columns and eccentrically-loaded columns, an equivalent single circular tube method is proposed. In this method, the dumbbell section is transformed into an equivalent single CFST circle tube and the design specification of CFST structure is used to estimate the ultimate load. It can be seen from the calculation for the specimens that the predicting results by the equivalent single circular tube method are close to the testing results. The method is simple to calculate and clear to understand, which can be reference to engineering application.

Key words: Concrete-filled steel tube (CFST); Dumbbell-shape; Ultimate load; Equivalent single circular tube

0 概述

哑铃型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, 采用竖哑铃型截面的有 39 座, 采用横哑铃型截面(桁式)的有 15 座, 两者相加约占总数的一半。然而由于未对此类构件开展试验研究, 工程应用中常将钢管混凝土哑铃型构件视为钢筋混凝土构件进行极限承载力计算^[2], 缺乏科学性与合理性。为此, 作者进行了钢管混凝土哑铃型偏压柱的试验研究^[3,4]。本文在上述试验研究的基础上, 提出钢管混凝土哑铃型柱极

限承载力计算的等效单圆管法, 以供工程应用参考。

1 轴压试验简介^[3]

试件设计时, 选用了 1 座在建的跨径为 100m 的钢管混凝土拱桥的拱肋为原型, 考虑了两管间距、腹板间距的变化以及腹板是否有拉杆加劲的影响, 设计制作了 5 组试件, 每组 2 个, 共计 10 个试件。腹板的拉杆按高度的四等分设置了 3 根, 每根为 $\phi 6\text{mm}$ 的钢筋, 拉杆穿过钢腹板用螺母固定。试件的长度 L 均为 324mm, 长细比 为 3 ($=L/D$, 其中 D 为钢管半径)。哑铃型断面为 2 根直径 $\phi = 108\text{mm}$ 、壁厚 t

收稿日期: 2003-05-08

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目资助 (2003-318-798-20-1)

作者简介: 陈宝春 (1958 -), 男, 福建罗源人, 福州大学土木建筑工程学院教授, 博士生导师, 研究方向为拱桥及组合结构桥梁。

= 4mm 的无缝钢管和 4mm 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。

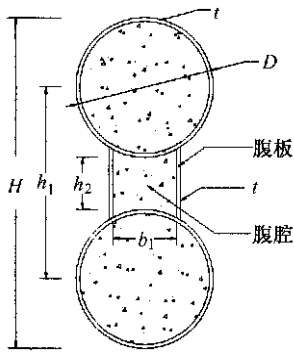


图 1 试件断面

钢材共做了 3 个标准试件, 弹性模量取其平均值, 为 2.01×10^5 MPa。试件详细资料见表 1。表中 h_2 为两管间距, b_1 为腹板间距, f_y 为钢管的屈服强度, f_{cu} 为混凝土立方体强度。

表 1 试件资料一览表

序号	试件编号	h_2 /mm	b_1 /mm	拉杆	f_y /MPa	f_{cu} /MPa
1	A-1 (1)	148	50	无	310.9	50.6
2	A-1 (2)	148	50	无	310.9	50.6
3	A-2 (1)	148	50	有	310.9	50.6
4	A-2 (2)	148	50	有	310.9	50.6
5	A-3 (1)	148	100	无	310.9	50.6
6	A-3 (2)	148	100	无	310.9	50.6
7	A-4 (1)	148	100	有	310.9	50.6
8	A-4 (2)	148	100	有	310.9	50.6
9	A-5 (1)	178	50	无	310.9	50.6
10	A-5 (2)	178	50	无	310.9	50.6

试验在福州大学结构工程试验中心的 500t 压力机上进行, 试件两端采用刀铰。试验装置见图 2。典型的荷载-位移曲线见图 3。极值荷载有两个, 即 B 点和 D 点。D 点所对应的峰值比 B 点略高, 但从应用角度来说变形已经很大, 因此, 将 B 点的峰值作为构件的极限荷载。典型的荷载-组合材料的泊松比曲线见图 4。从图 4 可以看出, 圆钢管对管内混凝土有紧箍作用, 钢腹板对腹腔内混凝土也有一定的紧箍作用, 但与圆钢管相比较小。

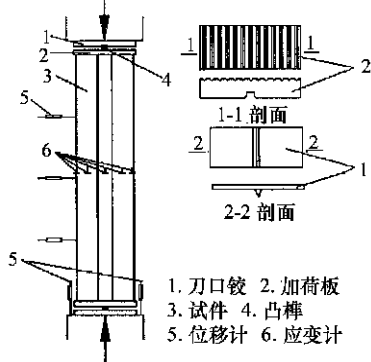


图 2 试件装置图

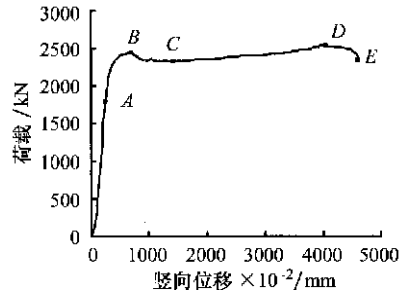


图 3 荷载-位移曲线

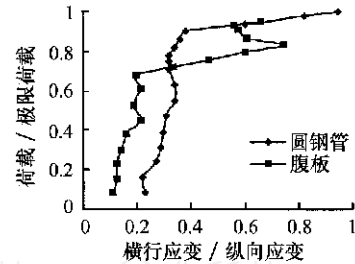


图 4 典型的荷载-组合材料泊松比曲线

2 轴压构件的等效单圆管法

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, 对钢管混凝土哑铃型拱肋采用容许应力法并按钢筋混凝土构件进行强度计算。从表 2 所列的按文献 [2] 计算的试件承载力 N_1 可见, 这种完全不考虑钢管对管内混凝土的套箍作用的计算结果只有试验值的 60% 左右, 所得结果偏于保守。

从试验分析可知, 钢管对混凝土有紧箍作用, 腹板对腹腔内混凝土也有一定的紧箍作用。因此, 本文提出将哑铃型等效成单圆管钢管混凝土的承载力计算方法。首先计算哑铃型截面的钢材 (钢管和腹板) 的面积 A_s 和混凝土 (管内和腹腔内) 的面积 A_c , 然后, 将按钢管面积为 A_s 和混凝土面积为 A_c 的单圆管钢管混凝土, 查有关规程^[6~8]进行承载力计算, 称此计算方法为方法 1。表 2 给出了按 CECS28: 90 计算的承载力 N_2 。

$$A_s = 2 \times A_{sg} + 2A_{sf} \quad (1)$$

$$A_c = 2 \times A_{cg} + A_{cf} \quad (2)$$

式中, A_s 、 A_c 为等效单圆管的钢管和混凝土的面积; A_{sg} 、 A_{sf} 分别为哑铃型中单根圆钢管和单块钢腹板的面积; A_{cg} 、 A_{cf} 分别为哑铃型中单根圆钢管内的混凝土面积和腹腔内的混凝土面积。

这种计算方法简单明了, 然而, 它过高地估算了腹板对腹腔内混凝土的紧箍作用, 因此计算结果中有一小部分超出了试验值, 在工程应用中将偏于不安全。

因此, 可在方法 1 的基础上除去腹腔内混凝土承

载力因考虑紧箍作用而提高的部分，称这种计算方法为方法2。方法2计算所得的承载力 N_3 与试验结果吻合良好。但这种计算方法较为复杂，为节省篇幅，不再详述，仅将其计算结果 N_3 列于表2之中。

由于腹腔内混凝土的受力机理复杂，所占面积也不大，实际工程设计计算中，常将这部分的混凝土对承载力的贡献略去，也就是说在等效单圆管的混凝土面积计算时，略去 A_{cf} ，即

$$A_c = 2 \times A_{cg} \quad (2)$$

称这种计算方法为方法3。这种算法表面上看完全略去了腹腔内混凝土的作用，实际上由于在钢管面积计算中考虑了腹板，而混凝土面积计算中略去了腹腔内混凝土的部分，因而等效单圆管的套箍系数提高了，从而间接提高了混凝土的承载力。表2中根据CECS28:90计算的 N_4 为试验值的90%左右，根据其它二本规程计算的结果也在试验值的72%~92% (见图5)，表明计算方法3较为合理，且偏于安全，该方法又比较简单，建议实际工程应用。从图5的比较可知，三本规程以CECS28:90计算结果与试验吻合最好，另二本则偏小些也更偏于安全。

表2 轴压试件承载力计算值与试验值对比表

试件编号	文献 [2]	方法1		方法2		方法3		试验值 N_u	
		N_1	$\frac{N_1}{N_u}$	N_2	$\frac{N_2}{N_u}$	N_3	$\frac{N_3}{N_u}$		N_4
A-1	1478	0.611	2314.6	0.956	2227.3	0.920	2182.4	0.902	2420
A-2	1478	0.584	2314.6	0.915	2227.3	0.880	2182.4	0.863	2530
A-3	1660.9	0.613	2747.9	1.014	2522.9	0.931	2449.8	0.904	2710
A-4	1660.9	0.600	2747.9	0.992	2522.9	0.911	2449.8	0.884	2770
A-5	1554.3	0.634	2453.1	1.001	2354.1	0.961	2255.3	0.921	2450

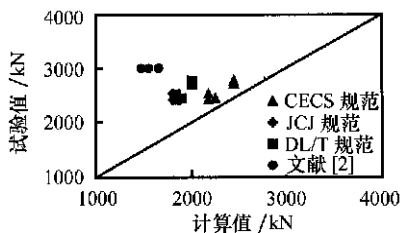


图5 轴压构件承载力计算值与试验值对比

3 偏压试验简介^[4]

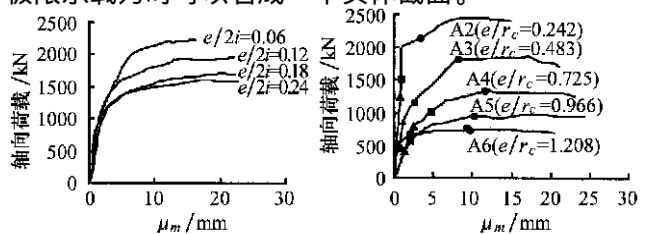
文献[4]进行了8根偏压构件的试验。试件的横截面与轴压试件中的A-1试件相同。在偏压试件中将偏心率作为试验参数，偏心距作用在竖向（强轴方向）。偏心率为 $e/2i$ ，其中 e 为荷载偏心距， i 为截面的回转半径，变化范围为0.06~0.24。试件的长度均为800mm，长细比为10 ($= L/i$ ，其中 L 为截面强轴方向的回转半径)。试件的详细情况见表3。

表3 偏压试件及试验结果一览表

试件编号	偏心距/mm	偏心率 $e/2i$	极限荷载 N_e /kN
B-1 (1)	10	0.06	2100
B-1 (2)	10	0.06	2120
B-2 (1)	20	0.12	1955
B-2 (2)	20	0.12	2000
B-3 (1)	30	0.18	1700
B-3 (2)	30	0.18	1690
B-4 (1)	40	0.24	1625
B-4 (2)	40	0.24	1600

试件编号1、2、3、4分别代表偏心距为10、20、30、40mm，同一偏心距的试件有2根，用括号内的数字来表示。材性试验结果，钢管的屈服强度为 $f_y = 429\text{MPa}$ ，混凝土立方体强度为 $f_{ck} = 29.8\text{MPa}$ 。试验所测的构件极限承载力见表3的最后一列。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荷载的1/20，每级荷载的持荷时间约为5min。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。

两组试件的试验结果基本相同，图6(a)给出第一组试件在不同偏心率情况下的荷载 (N) 和中截面挠度 (μ_m) 关系曲线。由图6(a)可知，各试件的荷载-挠度曲线在线性段几乎重合，但进入非线性段后，偏心率越大，其曲线斜率减小越快，极限荷载也越小。图6(b)为文献[5]中钢管混凝土单圆管偏压柱不同偏心率情况下的荷载 (N) 和中截面挠度 (μ_m) 关系曲线。由图6(a)和图6(b)对比可知，钢管混凝土哑铃型偏压柱偏心率对 $N-\mu_m$ 曲线的影响和钢管混凝土单圆管偏压柱相似。试验表明，试件破坏时受压区的钢管先屈服，然后腹板鼓出，最后整个试件失去承载力。试件的极限承载力与偏心率的关系见图7。由图6(a)可知，随着偏心率的增加，试件的极限承载力下降；同时可知，哑铃型偏压柱极限承载力与偏心率的关系与单圆管的相似。试验还表明，钢管混凝土哑铃型试件在各受荷阶段基本能保持平面假定^[4]，因此在计算钢管混凝土哑铃型构件的偏压极限承载力时可以看成一个实体截面。



(a) 钢管混凝土哑铃型偏压柱 (b) 文献[7]的钢管混凝土单圆管偏压柱

图6 偏心率对 $N-\mu_m$ 曲线的影响

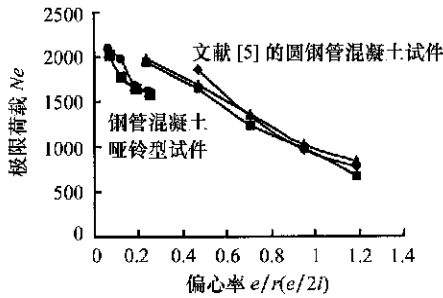


图7 极限荷载 (N_e) 和偏心率 ($e/2i$) 的关系曲线

4 偏压试件等效单圆管法

偏压构件承载力的计算同样也可采用文献 [2] 的折算面积法, 并按钢筋混凝土构件进行计算。从图 8 可见, 这种算法的计算值只有试验值的 40% 左右, 偏于保守。

由以上的试验分析可知, 钢管混凝土哑铃型试件荷载-挠度曲线、极限承载力与偏心率的关系曲线与单圆钢管混凝土偏压构件的相似, 因此, 在计算钢管混凝土哑铃型偏压极限承载力时, 与轴压试件等效单圆管法相似, 可将其等效成钢管混凝土单圆管偏压柱, 然后可按有关钢管混凝土结构设计规范或规程的计算方法进行极限承载力计算。以下以国内现有的三本相关的规程为例, 介绍偏压试件等效单圆管计算方法。

(1) CECS 规程^[6]

钢管混凝土单圆管的承载力计算公式为 $N_u = \eta_e N_0$, 其中 η 为长细比折减系数, e 为偏心率折减系数, N_0 为轴压短柱的承载力。这里讨论的是短柱问题, 所以长细比折减系数为 1 (下同)。CECS 中偏心率折减系数 η_e 与偏心率 e_0/r_c 有关 (e_0 为偏心距, r_c 为钢管的内半径)。

对于单圆截面, 回转半径为几何半径的一半, 即 $i = r/2$ 。对于哑铃型截面, 忽略腹板与腹腔内混凝土的作用, 根据 $EA = E_s A_s + E_c A_c$ 和 $EI = E_s I_s + E_c I_c$ 求出截面回转半径, $i = \sqrt{EI/EA}$ 。因此, 哑铃型截面就可以等效成半径为 $2i$ 的单圆管截面。将哑铃型等效成单圆管后, 可通过 e_0/r 代替圆钢管混凝土中的 e_0/r_c 求出 η_e (其中 $r = 2i - t$, i 为哑铃型截面的回转半径, t 为钢管厚度)。

(2) JG 规程^[7]

钢管混凝土偏心受压杆件承载力设计值计算公式为 $N_e = \eta_e (A_s f_s + K_1 A_c f_c)$ 。其中 η_e 为钢管混凝土偏心受压杆件设计承载力折减系数, 通过 e_0/D 的值

按表格查用, 其中 $D = 4i$, i 为哑铃型截面的回转半径, 它的计算与 CECS 规程中的等效单圆管算法一样。

(3) DL/T 规程^[8]

DL/T 规程是根据边缘屈服准则判断截面是否达到极限承载力, 所以通过判断哑铃型截面边缘屈服准则来求哑铃型截面的极限承载力。本文在利用 DL/T 规范计算哑铃型构件的承载力时, A_{sc} 取两肢钢管混凝土的横截面积; f_{sc} 取单肢钢管混凝土的组合强度, W_{sc} 取两圆管内截面抵抗距, $W_{sc} = d^4/32 [1 + 4(1 + h_1/d)^2]$ 。

将哑铃型截面等效成钢管混凝土单圆管, 利用三本规范对试验中的 8 根构件的偏压承载力进行了计算, 计算结果见图 8 和表 4。从图 8 和表 4 可知, 本文提出的哑铃型偏压构件承载力计算的等效单圆管法的计算结果与试验值吻合良好。三本规程中 CECS 28: 90 计算的结果最大且有部分超过了试验值, 应用时稍偏于不安全, 其余二本规程计算结果与试验值吻合很好, 建议在实际工程中应用。

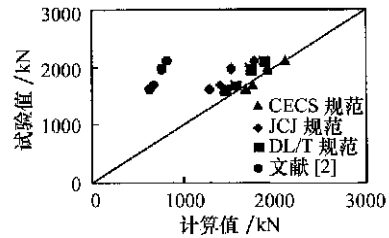


图8 计算值与试验值对比

表4 偏压试件承载力计算值与试验值对比表

试件编号	CECS ^[5]		JGJ ^[6]		DL/T ^[7]		实验结果 N_e
	N_{10}	N_{10}/N_e	N_{11}	N_{10}/N_e	N_{12}	N_{10}/N_e	
B-1 (1)	2118	1.01	1767	0.84	1880	0.90	2100
B-1 (2)	2118	0.99	1767	0.83	1880	0.89	2120
B-2 (1)	1927	0.98	1522	0.78	1733	0.89	1955
B-2 (2)	1927	0.96	1522	0.76	1733	0.87	2000
B-3 (1)	1761	1.04	1404	0.83	1572	0.92	1700
B-3 (2)	1761	1.05	1404	0.84	1572	0.93	1690
B-4 (1)	1690	1.04	1285	0.79	1449	0.90	1625
B-4 (2)	1690	1.06	1285	0.80	1449	0.91	1600

5 结论

(1) 哑铃型轴压短柱中的圆钢管混凝土与单圆钢管混凝土的受力性能相近。腹腔内的混凝土也受到圆钢管和钢腹板的一定程度的约束。计算其极限承载力时, 可以将哑铃型轴压短柱等效成单圆管截面进行, 等效时钢管的面积包括圆管和腹板, 而混凝土面积仅考虑管内混凝土部分。 (下转第 57 页)

间梁单元近似模拟,在单元特性输入中并未加入任何假设,而是按实际的材料和几何特性输入;方法1对拱肋根据刚度等效的原则用平面有限元进行简化计算;方法2同样采用平面有限元进行计算,但在拱肋的建模过程中,将拱肋视为单一的组合材料,根据统一模量理论,计算得到统一的弹性模量 E_{sc} ,而截面的几何特性按实际的输入。很明显,方法2计算中拱肋的刚度小于方法1,故其计算精度不及方法1。

表3 各工况下拱肋截面钢管应力值比较

加载工况	测点	实测值 /MPa	理论值/MPa			
			方法1	方法2	方法3	
中跨跨中5 辆偏载	中跨拱肋	上缘	-17.92	-30.76	-36.18	-25.10
	跨中上游	下缘	22.40	23.74	28.61	18.70
中跨跨中5 辆偏载	中跨拱肋	上缘	-13.60	-13.69	-16.12	-12.00
	跨中下游	下缘	6.59	10.78	12.98	9.25
边跨跨中4 辆偏载	边跨拱肋	上缘	-15.45	-21.31	-25.03	-17.80
	跨中上游	下缘	8.45	14.41	17.12	11.10
边跨跨中4 辆偏载	边跨拱肋	上缘	-8.65	-9.34	-10.98	-7.96
	跨中下游	下缘	4.12	6.52	7.75	5.17

表4 各工况下拱肋挠度值比较

加载工况	测点	实测值 /mm	理论值/mm			
			方法1	方法2	方法3	
中跨跨中5 辆偏载	中跨拱肋	上游	-8.80	-11.20	-13.00	-8.82
	跨中	下游	-4.60	-4.80	-5.60	-4.17
边跨跨中4 辆偏载	边跨拱肋	上游	-3.60	-4.10	-4.80	-3.83
	跨中	下游	-1.40	-1.70	-2.00	-1.66

(上接第53页)

(2) 钢管混凝土哑铃型偏压短柱的荷载-挠度曲线随偏心率增大的变化规律与单圆钢管混凝土偏压柱的相似。在哑铃型截面中圆钢管混凝土的受力相当于单圆钢管混凝土小偏压受力,腹板对腹腔内的混凝土有一定的约束作用,但作用较小。计算其极限承载力时,可以将哑铃型偏压短柱等效成单圆管截面进行,等效时不考虑腹板和腹腔内混凝土的作用,具体等效方法与采用的钢管混凝土结构设计规程有关。

(3) 无论是轴压短柱还是偏压短柱,钢管混凝土哑铃型截面的极限承载力等效成单圆管的算法,计算结果与试验结果均吻合良好。然而,从应用角度出发,偏压构件中个别计算值大于试验值,在应用中是偏于不安全的。因此,对钢管混凝土哑铃型截面极限承载力的计算还有待进一步的探讨。

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

5 结论

(1) 空间建模分析计算值与实桥荷载试验测试结果符合较好。

(2) 在采用简化方法时,对钢管混凝土拱肋宜选择等效刚度法建模分析。

参考文献:

[1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

[2] 许士杰, 王元丰. 钢管混凝土肋拱桥拱肋截面几何特性计算的探讨 [J]. 力学与实践, 1999, 21 (5): 48 - 49.

[3] 潘有光, 钟善桐. 钢管混凝土轴心受压构件稳定承载力的理论分析 [J]. 建筑结构学报, 1992, 13 (1): 43 - 52.

[4] 国家建筑材料工业局标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (JCJ-089) [S]. 同济大学出版社, 1989.

[5] 中国工程标准化协会标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (CECS 28: 90) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.

[6] 能源部颁. 钢管混凝土组合结构设计规程 (DL 5099-97) [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[7] 蔡绍怀. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1992.

[8] 蒋家奋, 汤关祚. 三向应力混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.

[9] 钟善桐. 钢管混凝土结构 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1994.

[10] 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] 黄福云, 陈宝春. 钢管混凝土哑铃型轴压短柱试验 [C]. 中国钢协钢-混凝土组合结构协会第九次年会论文集, 2003.

[4] 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃型拱肋施工应力分析与偏压试验研究 [D]. 福州大学硕士论文, 2003.

[5] 陈宝春, 欧智菁, 王永来, 韩林海. 钢管混凝土偏心受压承载力试验分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2002, 30 (6): 838 - 844.

[6] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (CECS 28: 90) [S]. 中国计划出版社, 1990.

[7] 国家建筑材料工业局标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (JCJ 01-89) [S]. 同济大学出版社, 1989.

[8] 中国电力行业标准. 钢管混凝土组合结构设计规程 (DL/T 5058-1999) [S]. 中国电力出版社, 1999.