

文章编号: 1000-4750(2013)07-0068-07

钢管混凝土哑铃形截面构件抗扭承载力研究

韦建刚, 傅 斌, 陈宝春

(福州大学土木工程学院, 福建, 福州 350108)

摘 要: 开展了钢管混凝土哑铃形截面构件的约束扭转试验, 以试验为基础建立了有限元模型, 并进行了哑铃形截面抗扭承载力计算公式的推导并利用有限元加以验证, 研究结果表明: 钢管混凝土哑铃形截面构件表现出较好的扭转弹塑性性能; 提高腹腔宽度可较为显著地提高哑铃形构件的抗扭性能; 但腹腔高度的增加对于提高构件抗扭承载力并不明显; 哑铃形截面抗扭承载力为钢管和腹腔钢板、管内混凝土、腹腔混凝土三部分抗扭承载力之和, 其中腹腔混凝土所占的比重在5%以下, 在计算抗扭承载力时可以忽略, 以此推导并简化的抗扭承载力计算公式, 可以较为简便、准确地计算钢管混凝土哑铃形截面的抗扭承载力。

关键词: 钢管混凝土; 哑铃形截面; 扭转; 承载力; 试验

中图分类号: TU398 文献标识码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.0167

ANALYSIS OF TORSIONAL LOAD FOR CFST DUMBBELL SECTION

WEI Jian-gang, FU Bin, CHEN Bao-chun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: The experiment of restrained CFST (concrete filled steel tube) dumbbell shaped members under torsion loads was carried out and the finite element model was established. The calculation formula of torsional bearing capacity of CFST dumbbell shaped cross section was derived. The results show that CFST dumbbell shaped members show good torsional elastic-plastic property. Increasing the width of web interspace can remarkably improve the torsional property for dumbbell shaped members, while the effects of changing height of web interspace can be negligible. The torsional bearing capacity of the CFST dumbbell shaped members can be considered as the sum of steel members (the upper and lower steel tubes and the steel webs), the concrete filled in the tubes and the concrete filled in the web interspace. The proportion of the concrete filled in the web interspace for torsional bearing capacity is less than 5% and thus its effects can be negligible. The derived and simplified formula can be used to calculate the torsional bearing capacity of the CFST dumbbell shaped members with more simplicity and accuracy.

Key words: concrete filled steel tube (CFST); dumbbell shaped cross section; torsion; load; experiment

在我国交通工程建设中, 钢管混凝土拱桥的建造数量呈逐年递增的趋势; 按照形状, 钢管混凝土拱桥的拱肋截面主要可分为单圆管、哑铃形和桁式3种形式, 其中哑铃形截面所占比例最大, 约占总数的40%以上^[1]。由此可见, 钢管混凝土哑铃形

截面构件的基本力学性能是钢管混凝土拱桥应用基础理论研究的重要组成部分。为此, 以实际工程为背景, 文献[2-4]分别开展了钢管混凝土哑铃形截面构件的受压和受弯性能研究; 文献[5]则开展了钢管混凝土哑铃形截面拱的受力性能研究。但是实

收稿日期: 2012-03-12; 修改日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178119)

通讯作者: 韦建刚(1971-), 男, 广西上思人, 研究员, 博士, 主要从事桥梁工程研究(E-mail: weijg@fzu.edu.cn).

作者简介: 傅 斌(1989-), 男, 山东泰安人, 硕士, 主要从事桥梁工程研究(E-mail: 1658514732@qq.com);

陈宝春(1958-), 男, 福建罗源人, 教授, 博士, 主要从事桥梁工程研究(E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn).

实际桥梁中,拱肋是处于复合受力状态,受扭性能也是钢管混凝土构件需要开展的基本力学性能之一^[6],文献[7-9]曾开展了钢管混凝土单圆管截面构件的受扭试验和承载力研究,但目前未见哑铃形截面构件受扭性能研究的报导。

为此,本文仍依托文献[2-5]的工程背景,开展钢管混凝土哑铃形截面构件的扭转试验,并在此基础上进行其抗扭承载力计算公式的探讨。

1 试验设计

试验模型的实桥原型为郑州黄河公路二桥。该桥为主跨计算跨度为 95.5m,矢跨比 1/4.5,由两片拱肋组拼而成,每片为 2 根 $\phi 1000 \times 16$ mm 钢管和腹板组成高 2.4m 的哑铃形断面^[9]。本文试验构件截面尺寸仍延续文献[2-5]的试验设计,构件长度 L 均为 1.00m,由两根 $\phi 108 \times 4$ mm 的无缝钢管和厚 4mm 的腹板焊接而成,截面尺寸标识见图 1。取腹腔宽度 B 和两管间距 $H-2D$ 为构件参数。制作了五个构件,构件编号和主要参数见表 1。

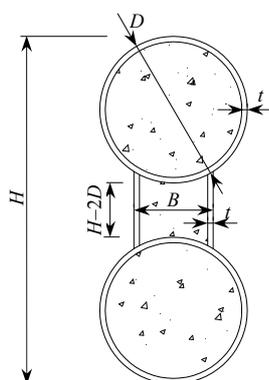


图 1 试验构件截面参数

Fig.1 The section parameter of test members

由材性试验可得试验构件的钢材屈服强度为 240.5MPa,抗拉强度 438.6MPa,弹性模量为 2.01×10^5 MPa。混凝土立方体抗压强度为 50.1MPa,弹性模量为 3.49×10^4 MPa,泊松比为 0.167。

试验在福州大学工程结构实验中心扭转试验机上进行,试验装置如图 2 所示。构件两端固定于扭转试验机锚固端框中,试验机一端为锚固端不动,另一端随试验机扇形转盘转动而产生扭矩。同时拉力传感器串联在钢丝绳中以读取拉力数值,再换算成扭矩荷载。试验过程中采用英国 HD3816 数据系统进行应变采集。

为量测构件不同部位的应力状态,试件的应变片分别布置于钢管和腹板表面,并在钢管上表面三

处安置倾角仪以量测转角。荷载采用分级加载制,初始阶段每级施加 $1\text{kN} \cdot \text{m}$ 扭矩,接近屈服段时每级施加 $0.5\text{kN} \cdot \text{m}$ 扭矩,每一级加载静止 5min 后采集数据。在整个试验加载过程中,从数据采集系统中可以时刻监测到应变随扭矩变化情况。

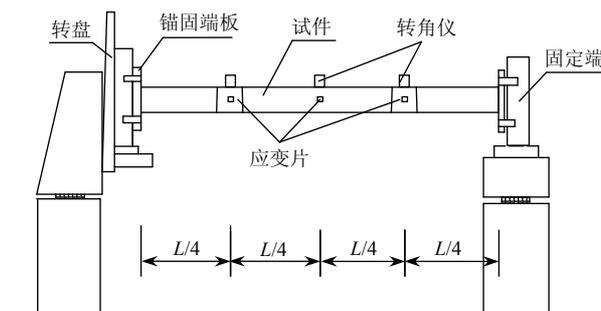


图 2 试验装置图

Fig.2 The test setup

表 1 哑铃形构件几何尺寸

Table 1 The geometry size of dumbbell shaped members

序号	构件编号	$H-2D/\text{mm}$	B/mm
1	YL50-40	50	40
2	YL50-70	50	70
3	YL25-40	25	40
4	YL100-40	100	40
5	YL100-70	100	70

2 试验现象

在受扭试验过程中各构件在扭矩加至约极限荷载的 70%之前,扭转变形均不明显,且施加扭矩与测读应变基本呈线性比例增加。临近极限扭矩时,构件两端面的相对转角急剧增大,而扭矩不再明显增加。之后构件扭转变形严重,且钢管表面伴随大量明显的滑移线出现,最终扭转试验机转盘达到最大行程后终止试验(约 80°),将此时对应的扭矩荷载称为试验最大扭矩。从试验前所划的等间距矩形白色网格线可直观看出各构件的扭转变形情况,典型构件的变形如图 3 所示。

在扭矩加载过程中可听见有细微声响,分析原因是核心混凝土开裂及钢管表面铁屑脱落的原因。在受扭变形后期,扭矩已无较大增加,而此时扭转变形持续迅速增大,测读应变也增加快速。试验后将构件外包钢剥去,以观察内部混凝土的变化情况,发现钢管和腹腔内填混凝土并没有破碎,但在表面存有大量均匀分布的细微斜裂缝(见图 4)。从裂缝观测仪中测得,圆钢管内混凝土最大裂缝宽度为 0.2mm,腹腔内混凝土表面最大裂缝宽度为 0.1mm。与文献[9]单圆管受扭构件的混凝土裂缝相比,哑铃

形构件的混凝土裂缝宽度更加细小,且分布更均匀细密。另外,混凝土表面没有滑痕且保持光洁,表明钢与混凝土接触面没有相对滑动。



图3 试验构件的扭转变形

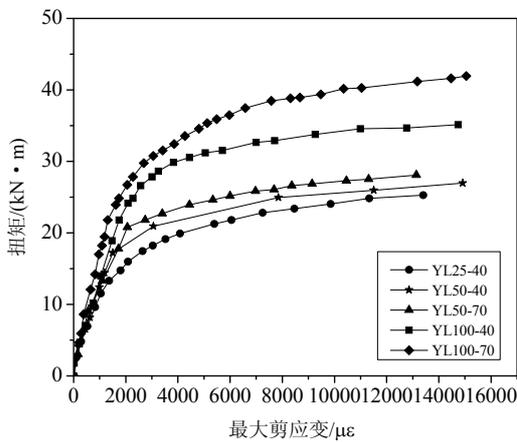
Fig.3 The torsional deformation



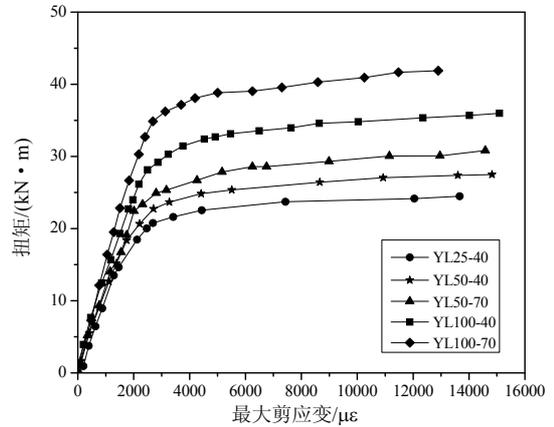
图4 管内混凝土的裂缝分布

Fig.4 The crack distribution of test members of concrete in steel tube

根据试验获得的扭矩-剪应变结果,绘制了 $T-\gamma$ 曲线。图5分别给出了构件管顶和腹板表面位置的扭矩-剪应变曲线图,图中反映出不同哑铃形截面尺寸构件的扭转受力性能有较大差异。其中构件 YL100-70 的抗扭刚度和扭转极限承载力最大,构件 YL100-40 次之,这说明了较大的腹腔宽度可较为显著地提高哑铃形构件的抗扭性能。同时从构件 YL25-40 与 YL50-40 试验结果的对比中也可以看出,截面高度的增加对于提高构件抗扭承载力并不明显。另外,试验中均未观察到扭矩-最大剪应变曲线的下降段,到扭转试验机转盘达到最大行程结束试验时,扭矩荷载仍有继续增加的趋势,但增长的幅度不大,整个受扭试验过程中构件体现出良好的扭转弹塑性及延性性能。



(a) 管顶部位



(b) 腹板部位

图5 试件扭矩-剪应变曲线

Fig.5 The torsion-shear strain curve

3 有限元模型

文献[11]曾以钢管混凝土单圆管构件扭转试验为基础,建立了钢管混凝土构件扭转受力的有限元非线性分析方法。本文采用有限元程序 ANSYS 进行钢管混凝土构件的受扭性能分析,建模中主要涉及的单元类型选取、结构离散、材料本构关系、边界约束条件及非线性求解方法等均同文献[11],同样在柱坐标系下建立三维有限元实体模型,试件一端面节点约束环向自由度,另一端面施加扭矩 M_t 。整个有限元模型共有 3200 个单元,其中 SOLID45 单元 960 个, SOLID65 单元 2240 个,有限元模型如图 6 所示。

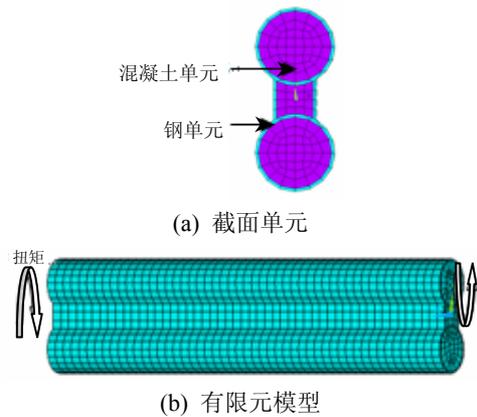


图6 哑铃形钢管混凝土试件的有限元模型

Fig.6 The finite element model of dumbbell-shaped members

采用上述模型,对哑铃形试件受扭进行了非线性有限元分析,提取各级扭矩作用下的钢管顶部与腹板处的最大剪应变数值,并与试验结果进行比较,图7为构件 YL25-40 与构件 YL50-40 有限元计算结果与试验值的对比,从图中可知,有限元计算

结果与试验结果吻合较好，可以用于开展钢管混凝土哑铃形构件的受扭性能分析。

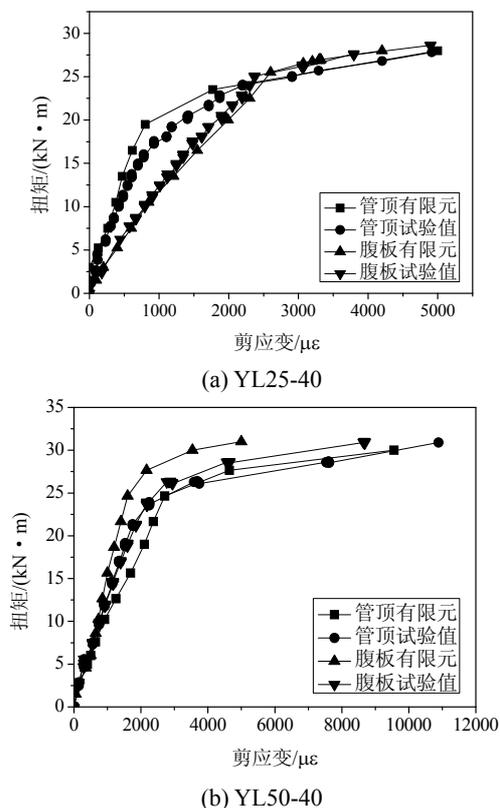


图 7 构件有限元结果与试验结果对比

Fig.7 The comparison between the finite element and the test results of member

4 抗扭承载力计算公式

图 8 为钢管混凝土哑铃形截面受扭时的剪力流图，从图中可以看出，在扭矩作用下，哑铃形截面的剪力流可由 3 部分闭合结构构成，即外围上下钢管和腹腔钢板(以下简称外围钢管)组成的剪力流、管内混凝土的剪力流、腹腔内混凝土的剪力流。因此，钢管混凝土哑铃形截面构件的抗扭承载力可看作由外围钢管、管内混凝土、腹腔内混凝土 3 部分组成。

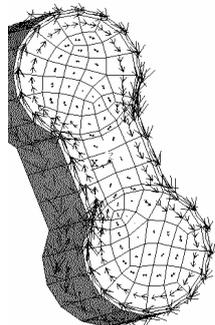


图 8 剪力流分布图

Fig.8 The shear flow distribution

其中，外围钢管部分可将其看成三室闭合截面，上下两圆管为 1 室、3 室，剪力流分别为 q_1 、 q_3 ；腹腔为 2 室，剪力流为 q_2 ，如图 9 所示。钢管与腹腔之间的管壁剪应力等于两室所属的剪应力之差。对于腹腔 2 室，可采用“以直代曲”的方法将其简化为矩形，如图 10 所示。

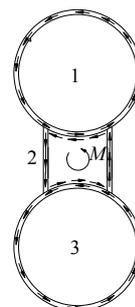


图 9 钢管部分三室闭合截面

Fig.9 The three room closed section of the steel tube

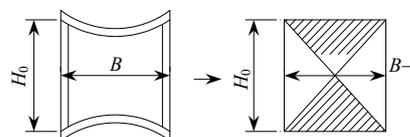


图 10 腹腔钢板简化示意图

Fig.10 The simplified schematic diagram of the abdominal section

由于 1 室、3 室为钢管闭合薄壁截面，可知其极限扭矩荷载 T_{up1} 为^[12]：

$$T_{up1} = q_1 \int \rho \cdot ds = 2A_1 \tau t_1 \quad (1)$$

式中： $q_1 = \tau_1 t_1$ 为圆钢管内剪力流； t_1 为圆钢管壁厚； ds 为钢管微元； $A_1 = \frac{\pi}{4}(D - t_1)^2$ 为薄壁圆环中心线所包围的面积； τ 为钢管的剪切强度， $\tau = f_y / \sqrt{3}$ ， f_y 为钢管的屈服强度。

对于腹腔 2，因上下钢板与圆管共用，其剪力流 $q_0 = q_2 - q_1$ ，考虑到钢管与钢板在加载后期在接近极限扭矩时，剪应力都达到钢材屈服强度，因此其极限扭矩荷载 T_{up2} 为^[12]：

$$T_{up2} = q_2 \int_{左右} \rho \cdot ds + (q_1 - q_2) \int_{上下} \rho \cdot ds = \frac{1}{2} A_2 \cdot \tau \cdot (2t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中： $\frac{1}{2} A_2 = \frac{1}{2}(B - t_2) \cdot H_0$ 为剪力流中心线所包围的面积的一半； t_2 为钢腹板厚度。

对于钢管内混凝土，借鉴文献[13]基于破坏线理论提出的钢管混凝土内混凝土的极限抗扭承载力公式为：

$$T_{up} = 0.7W_t f_c \quad (3)$$

式中： f_c 为混凝土圆柱体抗压强度， $f_c = 0.8f_{cu,k}$ ， $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值； W_t 为抗扭截面系数，取值可参见文献[14]。

所以可分别得到圆管内混凝土极限扭矩荷载 T_{up3} 与腹腔内混凝土极限扭矩荷载 T_{up4} 为：

$$T_{up3} = \frac{\pi d^3}{16} f_c \quad (4)$$

$$T_{up4} = \frac{1}{3} b^2 h \cdot f_c \approx \frac{1}{3} (B - 2t_2)^2 H_0 \cdot f_c \quad (5)$$

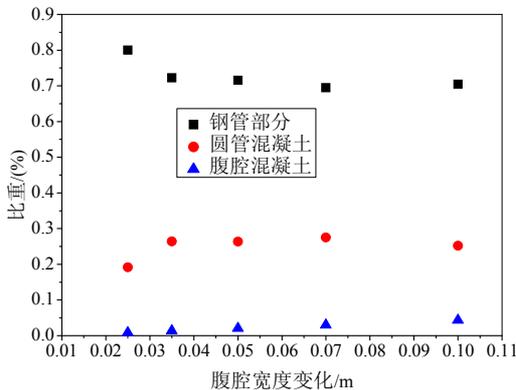
式中， d 为圆管内混凝土直径。

综合上述分析，钢管混凝土哑铃形截面抗扭承载力计算公式可近似为：

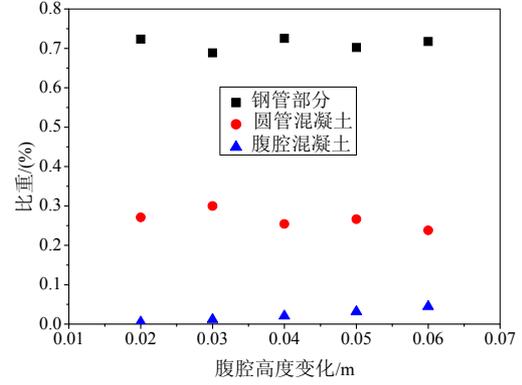
$$T_{up} = 2T_{up1} + T_{up2} + 2T_{up3} + T_{up4} = 4A_1\tau t_1 + \frac{1}{2} A_2\tau(2t_2 - t_1) + 2\frac{\pi d^3}{16} f_c + \frac{1}{3} (B - 2t_2)^2 H_0 f_c \quad (6)$$

钢管混凝土哑铃形截面的抗扭承载力由外围钢管、管内混凝土、腹腔内混凝土 3 部分组成。腹腔高度/腹腔宽度/圆管直径/圆管壁厚等结构参数以 YL50-40 构件尺寸为基准，单一变化某一参数，分析各部分所占比重变化情况。图 11 为利用上述方法，采用有限元模型计算的上述 3 部分结构在哑铃形截面抗扭承载力中所占比重的变化情况。从图中可以看出，外围钢管部分在抗扭承载力中所占比重最大，大多数情况下在 70%~80%；管内混凝土的比重则在 20%~30%，不可忽略；而腹腔内混凝土所占的比重最小，大多数情况下在 5%以下。由此可见，在哑铃形截面抗扭承载力的组成中，腹腔混凝土的作用可以忽略。因此，式(6)可简化为：

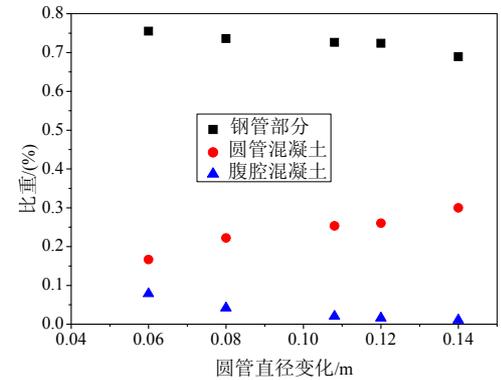
$$T_{up} = 4A_1\tau t_1 + \frac{1}{2} A_2\tau(2t_2 - t_1) + 2\frac{\pi d^3}{16} f_c \quad (7)$$



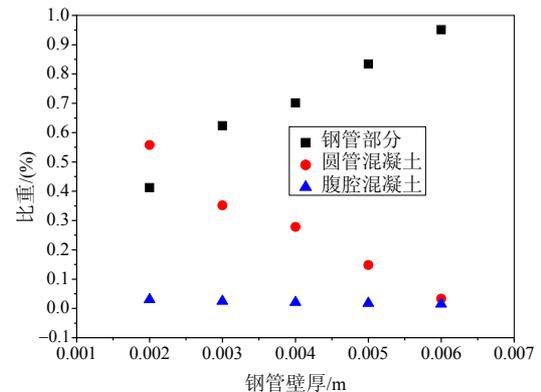
(a) 腹腔宽度变化时各部分比重



(b) 腹腔高度变化时各部分比重



(c) 圆管直径变化时各部分比重



(d) 钢管壁厚变化时各部分比重

图 11 哑铃形截面抗扭承载力各部分比重图

Fig.11 The proportion of parts of CFST dumbbell shape torsional capacity

同时，根据文献[15]的统计，钢管混凝土哑铃形拱桥中，80%的拱肋截面其弦管壁厚与腹板壁厚相同，即 $t_1 = t_2$ ，此时，式(7)可进一步简化为：

$$T_{up} = \tau t(4A_1 + A_2) + 2\frac{\pi d^3}{16} f_c \quad (8)$$

文献[15]的统计数据表明，哑铃形拱肋腹板间距与圆管直径比值 b_1 / D 的取值范围为 0.25~1，以 0.5 居多。腹板高度与总高比值 h_2 / H 的取值范围为 0.05~0.25，以 0.15 居多。为验证抗扭承载力计

算公式的正确性,采用有限元模型对哑铃形钢管混凝土受扭构件进行分析,各参数以文献[15]统计的数据进行选择。图 12 给出了式(9)的计算值与有限元值、试验值的对比曲线,图中可看出公式值与有限元结果和试验结果吻合较好。

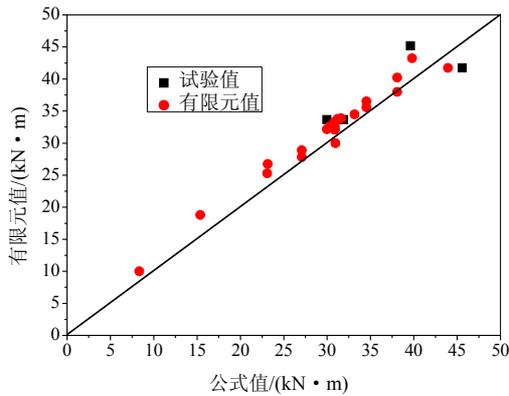


图 12 公式值与有限元值对比

Fig.12 The comparison of the finite element and the formula results

5 结论

以郑州黄河二桥为工程背景,开展了钢管混凝土哑铃形截面构件的约束扭转试验,以试验为基础建立了有限元模型,并进行了哑铃形截面抗扭承载力计算公式的推导和分析,研究结果表明:

(1) 试验中均未观察到扭矩-最大剪应变曲线的下降段,到扭转试验机转盘达到最大行程结束试验时,扭矩荷载仍有继续增加的趋势,试验中钢管混凝土哑铃形截面表现出较好的扭转弹塑性性能。

(2) 提高腹腔宽度可较为显著地提高哑铃形构件的抗扭性能,但腹腔高度的增加对于提高构件抗扭承载力并不明显。

(3) 根据哑铃形截面受扭时剪力流的分布情况,可将哑铃形截面抗扭承载力分为钢管主腹腔钢板、管内混凝土、腹腔混凝土三部分抗扭承载力之和,其中腹腔混凝土所占的比重在 5%以下,在计算抗扭承载力时可以忽略,并以此推导了抗扭承载力的计算公式,该公式可以较为简便、准确地计算钢管混凝土哑铃形截面的抗扭刚度。

参考文献:

[1] 陈宝春,刘福忠,韦建刚. 327 座钢管混凝土拱桥的统计分析[J]. 中外公路, 2011, 31(3): 96-103.
Chen Baochun, Liu Fuzhong, Wei Jianguang. Statistic analysis of 327 concrete filled steel tube arch bridges [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2011, 31(3):

96-103. (in Chinese)

[2] 陈宝春,肖泽荣,韦建刚. 钢管混凝土哑铃形偏压构件试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 89-95.
Chen Baochun, Xiao Zerong, Wei Jianguang. Experiment study of concrete-filled steel tubular dumbbell shaped columns under eccentric loads [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 89-95. (in Chinese)

[3] 陈宝春,黄福云,盛叶. 钢管混凝土哑铃形短柱轴压试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 187-194.
Chen Baochun, Huang Fuyun, Sheng Ye. Experimental study of dumbbell-shaped concrete-filled steel tube columns under concentric load [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 187-194. (in Chinese)

[4] 陈宝春,盛叶,韦建刚. 钢管混凝土哑铃形梁受弯试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 119-125.
Chen Baochun, Sheng Ye, Wei Jianguang. Experimental study of concrete filled steel tubular dumbbell shaped beam under bending [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 119-125. (in Chinese)

[5] 陈宝春,盛叶. 钢管混凝土哑铃形拱面内极限承载力研究[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 94-104.
Chen Baochun, Sheng Ye. Research on load-carrying capacity of concrete filled steel tubular dumbbell shaped rib arch under in-plane loads [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 94-104. (in Chinese)

[6] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥计算理论研究进展[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 47-57.
Chen Baochun. State-of-the-art theory of calculation for concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12): 47-57. (in Chinese)

[7] 徐积善,周竞. 钢管混凝土中柱在压扭复合受力下的试验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991, 24(增刊): 43-50.
Xu Jishan, Zhou Jing. The experimental research of the concrete-filled steel tubular slender column under combined compression and torsion [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1991, 24(Suppl): 43-50. (in Chinese)

[8] 金伟良,葛中桂,曲晨,等. 薄壁离心钢管混凝土构件抗扭试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 36(增刊): 34-38.
Jin Weiliang, Ge Zhonggui, Qu Chen, et al. Experimental study for centrifuge concrete-filled thin-walled steel tubular members [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2001, 36(Suppl): 34-38. (in Chinese)

[9] 陈宝春,李晓辉. 钢管混凝土(单圆管)约束扭转试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 735-739.
Chen Baochun, Li Xiaohui. Experimental study on restricted torsion for concrete filled steel tube (single circular) [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2008, 36(5): 735-739. (in Chinese)

- [10] 汤意. 郑州黄河公路二桥设计[J]. 交通标准化, 2006(4): 129—132.
Tang Yi. Design of the Second Yellow-river Highway Bridge in Zhengzhou [J]. Communications Standardization, 2006(4): 129—132. (in Chinese)
- [11] 李晓辉, 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土构件受扭有限元非线性分析方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 412—417.
Li Xiaohui, Wei Jiangan, Chen Baochun. Nonlinear finite element methods on torsional mechanism for concrete filled steel tube [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2010, 38(3): 412—417. (in Chinese)
- [12] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991: 55—56.
Guo Jinqiong, Fang Zhenzheng, Zheng Zhen. Design theory of box girder [M]. Beijing: China Communications Press, 1991: 55—56. (in Chinese)
- [13] 金伟良, 袁伟斌. 基于破坏线模型的离心钢管混凝土扭转承载力[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 106—111.
Jin Weiliang, Yuan Weibin. Torsional ultimate bearing capacity of centrifugal concrete filled steel tube based on model of failure line [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 106—111. (in Chinese)
- [14] 于光瑜, 秦惠民. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 73.
Yu Guangyu, Qin Huimin. Material mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 73. (in Chinese)
- [15] 陈宝春, 王同洛. 中国混凝土填充钢管拱桥概况[J]. 实践设计建造与结构, 2009, 14(2): 70—80.

(上接第 60 页)

- [6] 鈴木英之, 西原寛, 松崎育弘. SRC 造から RC 造へ構造形式が切り替わる柱のせん断性状[C]. 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 1999: 1069—1070.
Suzuki H, Nishihara H, Matsuzaki Y. Shear performance of the column where structural form changes from SRC to RC [C]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Chyugoku, 1999: 1069—1070. (in Japanese)
- [7] 今野修, 今泉隆之, 山本憲一郎, 等. 超高層建築物における下層階への SRC 構造適用に関する実験的研究, その 1 SRC 柱の靱性性能に関する実験計画[C]. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 九州, 1998: 1029—1030.
Kon-No S, Imaizumi T, Yamamoto K, et al. Experimental study on high-rise building with lower floor composed of SRC structure. Part1: Outline of the tests about deformation capacity of SRC columns [C]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Kyushu, 1998: 1029—1030. (in Japanese)
- [8] 木村润一, 新宮義信. 繰返しせん断を受ける混合部材の構造性能[C]. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 九州, 1998: 1067—1068.
Kimura J, Shingu Y. Structural performance of SRC-RC mixed member under cyclic bending moment and shear [C]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Kyushu, 1998: 1067—1068. (in Japanese)
- [9] 伍凯. 低周反复荷载下转换柱基本受力行为与抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
Wu Kai. Study on basic mechanical behavior and seismic performance of SRC-RC transfer column [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] 赵世春. 型钢混凝土组合结构设计原理[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004: 118—119.
Zhao Shichun. Steel reinforced concrete composite structure computation theory [M]. Chengdu: South-West Jiaotong University Press, 2004: 118—119. (in Chinese)
- [11] 周正海. 高强钢骨混凝土柱抗震性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1997.
Zhou Zhenghai. Experimental study on seismic performance of steel reinforced high strength concrete column [D]. Beijing: Tsinghua University, 1997. (in Chinese)
- [12] 李俊华. 低周反复荷载作用下型钢高强混凝土柱受力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
Li Junhua. Study on performance of steel reinforced high-strength concrete columns under cyclic reversed loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2005. (in Chinese)