

引用本文:张国靖,刘永健,姜磊. 钢管混凝土墩柱截面选型[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(1):94-101.

ZHANG Guo-jing, LIU Yong-jian, JIANG Lei. Cross Section Selection of Concrete-filled Steel Tube Pier Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 94-101.

DOI:10.19815/j.jace.2018.10006

钢管混凝土墩柱截面选型

张国靖,刘永健,姜磊

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了获得一种易于操作的钢管混凝土墩柱单肢截面优选方法,对工程中常见的 3 种截面形式(圆形、矩形与矩形中空夹层截面)进行了截面优选研究。基于统一理论和等效截面思想,提出了表征截面压弯承载力的经济性指标界限偏心率,研究了套箍系数、矩形截面高宽比、矩形中空夹层截面挖空率对界限偏心率以及 3 种钢管混凝土截面经济性的作用规律。结果表明:套箍系数、矩形截面高宽比、矩形中空夹层截面挖空率越大,矩形和矩形中空夹层截面的经济性越好;当套箍系数大于 0.8,矩形截面高宽比大于 2.0,矩形中空夹层截面挖空率大于 0.3 时,这 3 个参数对界限偏心率的影响较小;界限偏心率能够很好地表征钢管混凝土单肢截面的经济性;在截面内力和材料给定的条件下,通过查界限偏心率表能够快速确定钢管混凝土墩柱最优截面形式,对工程实际具有一定的参考价值。

关键词:桥梁工程;截面选型;压弯承载力;钢管混凝土墩柱;界限偏心率

中图分类号:TU318

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)01-0094-08

Cross Section Selection of Concrete-filled Steel Tube Pier Columns

ZHANG Guo-jing, LIU Yong-jian, JIANG Lei

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to obtain an easy way to operate optimal selection method for single limb cross section of concrete-filled steel tube (CFST) pier column, the research of section optimization was carried out by the means of three common cross sections in engineering, including circular, rectangular and rectangular double-skin steel tubes. The economic index named boundary eccentricity ratio which could represent the cross section compressive bending capacity based on the unified theory and the method of equivalent cross section was presented. The effects of hoop coefficient, rectangular cross section aspect ratio, rectangular hollow section hollowed out rate on the boundary eccentricity ratio and the economy of the three CFST cross sections were studied. The results show that with the increasing of hoop coefficient, rectangular cross section aspect ratio and rectangular hollow section hollowed out rate, the economy of rectangular and rectangular double-skin steel tube cross section is getting better. When hoop coefficient is greater than 0.8, rectangular cross section aspect ratio is greater than 2.0 and rectangular hollow section hollowed out rate is greater than 0.3, the influences of the three parameters on boundary

收稿日期:2019-03-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51778058,51378068);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219310)

作者简介:张国靖(1992-),男,陕西榆林人,工学博士研究生,E-mail:izhangguojing@126.com。

通信作者:刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lyj_chd@gmail.com。

eccentricity ratio are small. The boundary eccentricity ratio can describe the economy of single limb cross section of CFST pier column preferably. The preferred cross-section of the CFST pier column can be obtained by searching the boundary eccentricity ratio table under the condition of given material and internal force. This method has certain reference value to the real project.

Key words: bridge engineering; selection of cross section; compressive bending capacity; concrete-filled steel tube pier column; boundary eccentricity ratio

0 引言

钢管混凝土墩柱常见的结构形式有单肢柱和格构柱,其中单肢柱多用于中小跨径桥梁,主要的截面形式有圆形和矩形截面^[1-4],在雅西高速公路干海子大桥^[5]、汶马高速公路克枯大桥^[6]和黄延高速 K15+644.312 车行桥等桥梁中均有应用^[7]。

圆形截面钢管混凝土的套箍作用强,轴压承载力高,在用于轴压构件或小偏压构件时其套箍效应能够得到充分体现^[8-9]。虽然矩形截面钢管混凝土柱轴压承载力低于相同材料用量下的圆形截面钢管混凝土柱,但其截面惯性矩较大,且可根据受力需要调整主轴方向的惯性矩。因此,矩形截面钢管混凝土柱压弯承载力不一定低于圆形截面钢管混凝土柱^[9-11]。当钢管混凝土柱的长细比或荷载偏心率较大时,采用圆形截面就显得不够经济。此外,由于截面靠近形心部位的材料并不能提供太多的抗弯刚度,因此可以去掉这一部分材料,做成中空夹层截面钢管混凝土柱。这种截面形式能够有效减轻结构自重,在用于桥墩时能够减少基础的工程量^[12-14]。

在相同的设计荷载条件下,采用不同截面形式的钢管混凝土墩柱对结构材料用量和工程造价有较大的影响^[11]。因此,有必要对不同截面类型的钢管混凝土墩柱进行截面选型研究,总结出一套钢管混凝土墩柱单肢截面的优选方法供工程设计参考。工程设计中,在给定设计荷载的情况下,需要选择一种截面形状,使钢管混凝土墩柱在满足承载力要求的前提下材料用量最少。该方法可表述为在材料强度和用量相同的条件下,选出一种压弯承载力最优的截面形状,侧重于截面承载力性质。为了便于分析研究,本文引入了钢管混凝土墩柱单肢截面经济指标界限偏心率,并提出了一套易于操作的钢管混凝土墩柱单肢截面的优选方法。

1 截面选型参数确定

1.1 基本假定

钢管混凝土墩柱一般为压弯构件,本文主要研

究的是截面面内强度,且不涉及稳定问题。计算过程中假定:钢管混凝土偏压柱的计算中,钢管与混凝土之间无纵向相对滑移;钢材的应力-应变关系服从平面状态时的应力-应变关系^[15-17];圆形、矩形和矩形中空截面钢管混凝土都考虑了套箍作用^[12]。

截面优选的目标是当材料强度和材料用量相同时,选出一种压弯承载力最优的截面形状,必须采用等效截面才具有可比性。等效截面的含义是不同形式的截面不仅钢材和混凝土用量相同,而且钢管的面积 A_s 和混凝土的面积 A_c 也相同^[18]。这样,含钢率 $\rho = A_s / A_c$ 和标准套箍系数 $\xi = \rho f_y / f_{ck}$ (f_y 和 f_{ck} 分别为钢材的屈服强度和混凝土的抗压强度标准值)也相同。

1.2 几何参数

选择常见的 3 种钢管混凝土墩柱单肢截面进行截面比选研究,截面形状分别为圆形、矩形和矩形中空夹层截面(以下简称矩形中空截面),如图 1 所示,其中, D, t 分别为圆形钢管混凝土截面外径、壁厚, B_0, H_0, t_0 分别为矩形截面外宽度、外长度和壁厚, B_1, H_1, b, h, t_1 分别为矩形中空截面外宽度、外长度、内宽度、内长度和壁厚。

对于圆形钢管混凝土截面, D 和 t 是独立的,根据工程经验可知:钢管混凝土截面含钢率取值范围为 4% ~ 20%^[19];套箍系数 ξ 取值范围为 0.29 ~ 1.73^[20]。对于矩形钢管混凝土截面,为了便于 2 种截面参数的统一,需要将矩形截面等效为圆形截面,等效过程如式(1)~(3)所示。

$$\pi(D/2)^2 = B_0 H_0 = x_0 B_0^2 \quad (1)$$

$$B_0 = \sqrt{\pi/x_0} D/2 \quad (2)$$

$$\pi(D/2 - t)^2 = (B_0 - 2t_0)(x_0 B_0 - 2t_0) \quad (3)$$

式中: H_0, B_0 可用 D 等效,决定了矩形钢管混凝土的截面面积;矩形截面长宽比 $x_0 = H_0 / B_0$ 决定了矩形形状,且工程中 x_0 的取值范围一般为 1 ~ 3^[21]。

矩形中空截面等效为圆形截面的过程如式(4)~(6)所示。

$$\pi(D/2)^2 = B_1 H_1 - bh = (1 - \chi)x_1 B_1^2 \quad (4)$$

$$B_1 = \sqrt{\pi/(1 - \chi)x_1} D/2 \quad (5)$$

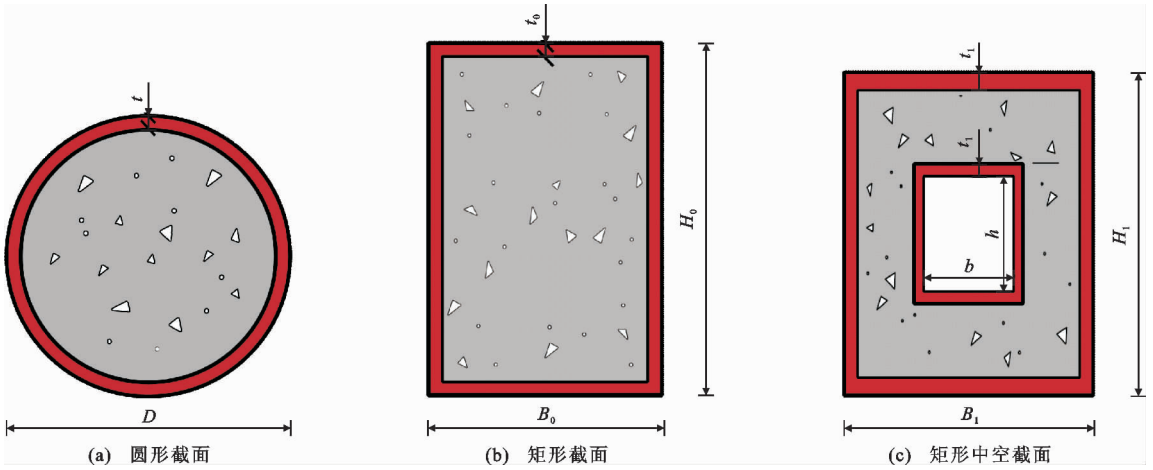


图 1 圆形、矩形和矩形中空夹层钢管混凝土截面几何参数

Fig. 1 Geometric Parameters of Circular, Rectangular and Rectangular Double-skin Steel Tubes Cross Section

$$\pi(D/2-t)^2 = (B_1 - 2t_1)(x_1 B_1 - 2t_1) - (b + 2t_1)(h + 2t_1) \quad (6)$$

式中: H_1, B_1 可用 D 等效, D 决定了矩形中空钢管混凝土的截面面积; 矩形截面长宽比 $x_1 = H_1/B_1$, 截面挖空率 $\chi = b_1 h_1/(B_1 H_1)$, 其共同决定了矩形中空截面的形状, 工程中矩形中空截面挖空率 χ 取值范围一般为 $0 \sim 0.5$ [22]。

以上分析表明, 圆形截面可用 D 描述其几何特性, 矩形钢管混凝土可用 D 和 x_0 描述其几何特性, 矩形中空截面可用 D, x_1, χ 描述其几何特性。

1.3 计算方法

截面参数选定之后, 采用统一理论 [22] 确定钢管混凝土截面压弯承载力计算方法。

圆形和矩形截面压弯承载力计算公式为 [11-12]

$$\frac{N}{N_u} + \frac{M}{1.5M_u} = 1 \quad \frac{N}{N_u} \geq 0.255 \quad (7)$$

$$-\frac{N}{2.17N_u} + \frac{M}{M_u} = 1 \quad \frac{N}{N_u} < 0.255 \quad (8)$$

式中: N, M 分别为作用于构件的轴心压力和弯矩; N_u 为轴压承载力, $N_u = A_{sc}/f_{sc}$, 其中 A_{sc} 为钢管和管内混凝土面积之和, f_{sc} 为组合轴压强度, $f_{sc} = (1.212 + B\xi + C\xi^2)f_{ck}$, 对于圆形截面, $B = 0.176f_y/213 + 0.974, C = -0.104f_{ck}/14.4 + 0.031$, 对于矩形截面, $B = 0.131f_y/213 + 0.723, C = -0.07f_{ck}/14.4 + 0.026$; M_u 为抗弯承载力, $M_u = \gamma_m W_{sc} f_{sc}$, 其中 W_{sc} 为受弯构件的截面模量, γ_m 为塑性发展系数, 对于圆形截面取 1.2, 对于矩形截面 $\gamma_m = -0.483 + 1.926\xi^{0.5}$ 。

矩形中空夹层钢管混凝土截面压弯承载力计算公式 [22] 为

$$\frac{N}{N_u} + a \frac{M}{M_u} = 1 \quad \frac{N}{N_u} \geq 2\eta_0 \quad (9)$$

$$-b \left(\frac{N}{N_u} \right)^2 - c \frac{N}{N_u} + \frac{M}{M_u} = 1 \quad \frac{N}{N_u} < 2\eta_0 \quad (10)$$

$$\eta_0 = \begin{cases} (0.5 - 0.318\xi)(-0.8\chi^2 + 0.2\chi + 1) & \xi \leq 0.4 \\ (0.1 + 0.13\xi^{-0.81})(-0.8\chi^2 + 0.2\chi + 1) & \xi > 0.4 \end{cases}$$

$$a = 1 - 2\eta_0$$

$$b = (1 - \zeta_0)/\eta_0^2$$

$$c = 2(\zeta_0 - 1)/\eta_0$$

$$\zeta_0 = (0.14 - 0.14\chi^2)\xi^{-1.3} + 1$$

$$\xi = \rho f_{y0}/f_{ck} = A_{s0} f_{y0}/(A_{ce} f_{ck})$$

$$\rho = A_{s0}/A_{ce}$$

$$A_{sc} = A_{s0} + A_c$$

$$\gamma_m = 1.04 + 0.48 \times \ln(\xi + 0.1)$$

$$N_u = A_{sc} f_{sc} + A_{si} f_{yi}$$

$$M_u = \gamma_m W_{scm} f_{sc} + W_{si} f_{yi}$$

$$f_{sc} = (1.18 + 0.85\xi)f_{ck}$$

式中: A_{s0}, f_{y0} 分别为外层钢管的截面积和屈服强度; A_{si}, f_{yi} 分别为内层钢管的截面积和屈服强度; A_{ce} 为外钢管自身截面内部所包含的空隙面积; W_{scm} 为外钢管及其核心混凝土的组合抗弯模量; W_{si} 为内钢管截面抗弯模量。

1.4 界限偏心率

几何参数与压弯承载力计算方法确定之后需要确定截面经济性评价指标。首先, 可以通过假定 1 组几何参数来探寻 3 种截面压弯承载力变化规律与相互关系。对于圆形截面, 任意给定直径 D 和含钢率 ρ 就可以得到此条件下的截面压弯承载力曲线。对于矩形截面, 需给定一个长宽比 x_0 , 然后再按截

面等效的方法确定截面压弯承载力曲线。对于矩形中空截面,则需给定一个长宽比 x_1 和截面挖空率 χ ,然后再按截面,等效的方法确定截面压弯承载力曲线。现取 $D=600\text{ mm}$, $\rho=10\%$, $x_0=x_1=1.6$, $\chi=0.25$,将这 3 种截面的压弯承载力曲线在同一张图中进行比较,如图 2 所示。

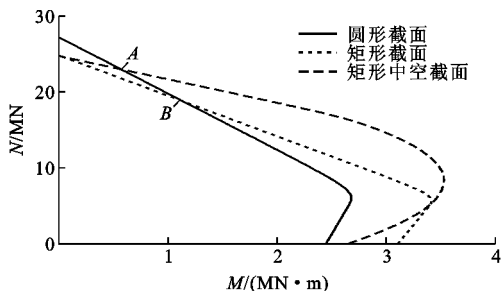


图 2 圆形、矩形和矩形中空截面压弯承载力比较

Fig. 2 Compressive Bending Capacity Comparison of Circular, Rectangular and Rectangular Double-skin Cross Section

在上述假定条件下,圆形截面钢管混凝土在偏心荷载较小的情况下压弯承载力较高;在偏心荷载较大的情况下,矩形和矩形中空截面压弯承载力较高。因此,选择圆形、矩形还是矩形中空截面取决于荷载偏心程度。由于圆形截面钢管混凝土轴压承载力高于矩形和矩形中空截面,而对于大偏心压弯构件,矩形和矩形中空截面压弯承载力大于圆形截面,因此圆形截面压弯承载力曲线必然与矩形和矩形中空截面压弯承载力曲线相交。承载力的分界点为图 2 中 A 和 B 点,其荷载偏心程度表征量为偏心距 e_{cr} ,定义 A、B 两点的偏心距为界限偏心距 e_{crA} , e_{crB} ,分别为 $e_{crA}=M_A/N_A$ 和 $e_{crB}=M_B/N_B$ (M_A , N_A 分别为 A 点处的弯矩和轴力, M_B , N_B 分别为 B 点处的弯矩和轴力)。

需要指出的是,界限偏心距是随 D 变化的,当 D 变为原来的 n 倍, N_u 相应变为原来的 n^2 倍,而 M_u 会变为原来的 n^3 倍,因此 e_{cr} 会变为原来的 n 倍,但 e_{cr}/D 不会改变,因此 e_{cr}/D 是不随截面尺寸变化的量,定义 e_{cr}/D 为界限偏心率,将其作为截面比选的经济指标。当 $e_{cr}/D < e_{crA}/D$ 时,圆形截面压弯承载力高于矩形和矩形中空截面;当 $e_{crA}/D < e_{cr}/D < e_{crB}/D$ 时,矩形中空截面压弯承载力高于圆形和矩形截面;当 $e_{cr}/D > e_{crB}/D$ 时,矩形中空截面压弯承载力高于矩形和圆形截面。

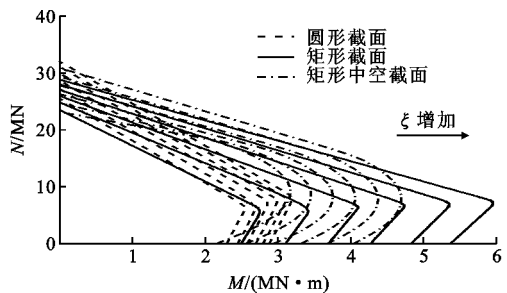
2 参数分析

从钢管混凝土压弯承载力计算方法中可以看

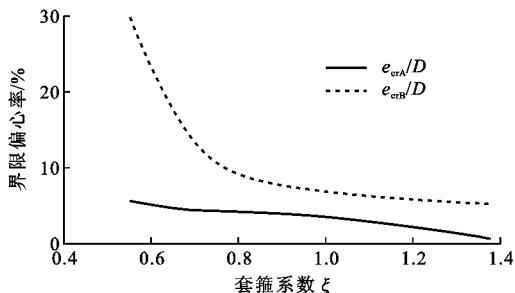
出,承载力主要与套箍系数、矩形截面的高宽比和截面挖空率有关,而界限偏心率是通过钢管混凝土截面压弯承载力曲线得到的,因此界限偏心率也主要与这 3 个因素相关,以下将分析这 3 个因素对界限偏心率的影响。

2.1 套箍系数影响

在 D , x_0 , x_1 , χ 一定的条件下,通过改变截面含钢率 ρ 来改变 ξ ,然后按上述方法可以计算得到 3 种截面钢管混凝土压弯承载力。在实际工程中钢管混凝土截面含钢率取值范围为 $4\% \sim 20\%$,结合本文给定的材料,其套箍系数取值范围为 $0.345 \sim 1.38$,在这个范围内改变 ξ 的取值可以得到一族压弯承载力曲线,并将曲线绘到一张图中,得到 3 种截面承载力曲线,如图 3(a)所示。此外,计算出不同 ξ 值下的界限偏心距 e_{cr}/D ,即可得到 e_{cr}/D 随 ξ 的变化规律,如图 3(b)所示。



(a) ξ 对 3 种截面压弯承载力的影响



(b) ξ 对界限偏心率的影响

图 3 套箍系数 ξ 对压弯承载力的影响

Fig. 3 Effects of Hoop Coefficient ξ on Compressive Bending Capacity

由图 3 可知,随着套箍系数增大,界限偏心率减小,说明矩形和矩形中空截面的经济性越好,且当套箍系数大于 0.8 后其对界限偏心率的影响较小。因此,在钢材和混凝土强度确定的情况下,含钢率越高,矩形和矩形中空截面墩柱的面内受力性能越好,经济性越好。

2.2 矩形截面高宽比影响

在 D , ξ , χ 一定的条件下,通过改变矩形截面长宽比 x_0 , x_1 ,然后按上述方法可以计算得到 3 种截

面钢管混凝土压弯承载力。为使计算结果具有可比性,矩形截面和矩形中空截面长宽比取值相同,即 $x_0=x_1=x$ 。考虑实际工程中矩形钢管混凝土的高宽比在1~3之间,在这个范围内改变 x 的取值可以得到一簇压弯承载力曲线,并将曲线绘到一张图中,得到3种截面承载力曲线,如图4(a)所示。此外,计算出不同 x 值下的界限偏心率 e_{cr}/D ,即可得到 e_{cr}/D 随 x 的变化规律,如图4(b)所示。

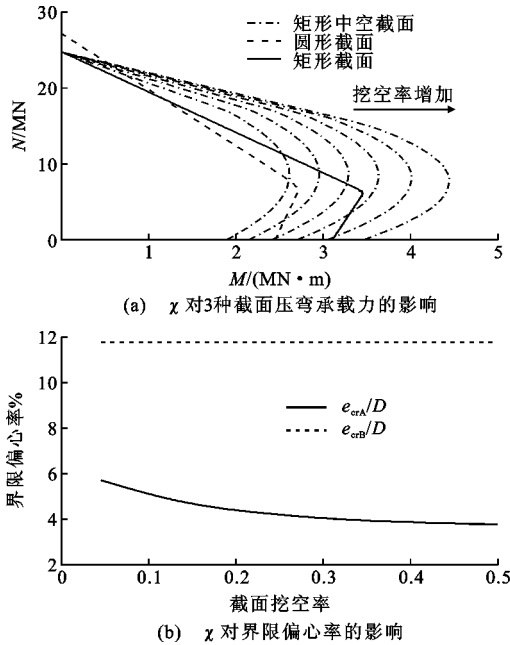


图4 高宽比对压弯承载力影响
Fig. 4 Effects of Aspect Ratio on Compressive Bending Capacity

2.3 截面挖空率影响

在 D, ξ, x 一定的条件下,改变截面矩形中空截面挖空率 χ ,然后按上述方法可以计算得到3种截面钢管混凝土压弯承载力。矩形中空夹层钢管混凝土的截面挖空率范围一般为0~0.5,在这个范围内改变 χ 的取值可以得到一簇压弯承载力曲线,并将曲线绘到一张图中,得到3种截面承载力曲线,如图5(a)所示。此外,计算出不同 χ 值下的界限偏心率 e_{cr}/D ,即可得到 e_{cr}/D 随 χ 的变化规律,如图5(b)所示。

由图5可知,随截面挖空率增大,界限偏心率减小,说明矩形中空截面经济性越好,且当截面挖空率超过0.3后其对界限偏心率的影响较小。因此,在材料、截面高宽比确定的情况下,可适当提高矩形截面挖空率,使矩形中空截面的经济性更优。

3 截面优选方法

通过以上分析可以得出,界限偏心率的取值主

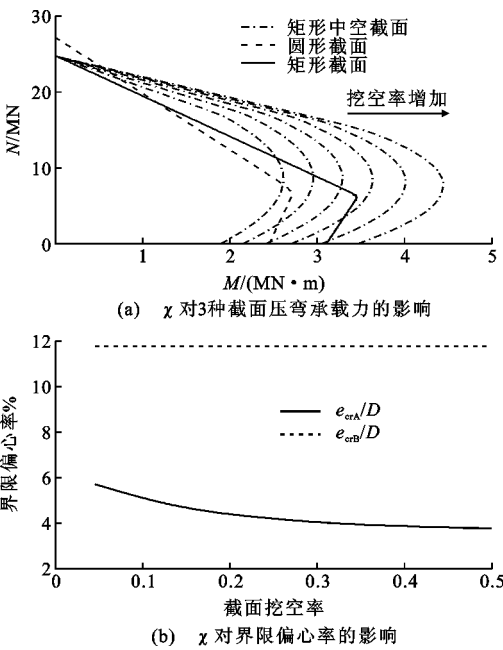


图5 截面挖空率 χ 对压弯承载力的影响
Fig. 5 Effects of Section Hollowed Out Rate χ on Compressive Bending Capacity

要与套箍系数、矩形高宽比和截面挖空率有关,选取实际工程中常用取值范围计算出界限偏心率,见表1。表1中截面挖空率 $\chi=0$ 时对应的界限偏心率即为图1中圆形截面与矩形截面面内压弯承载力曲线交点B对应的界限偏心率,此时矩形截面和矩形中空截面是等价的。截面挖空率 $\chi=0.25, 0.5$ 时对应的界限偏心率即为图1中圆形截面与矩形中空截面面内压弯承载力曲线交点A对应的界限偏心率。

根据以上分析给出在工程设计中钢管混凝土墩柱截面选型的方法,共分为5个步骤:①初步拟定钢管混凝土墩柱圆形截面尺寸;②计算得初拟圆形墩柱截面的套箍系数;③计算得钢管混凝土墩柱的最大偏心距 e ;④计算得偏心率;⑤根据计算得到的截面套箍系数,查表1确定钢管混凝土截面的选型。对圆形与矩形截面,若存在某一高宽比,使得 $e/D > e_{cr}/D$,则矩形截面压弯承载力优于圆形截面,按矩形截面设计;若对于任意高宽比, $e/D < e_{cr}/D$,则圆形截面压弯承载力优于矩形截面,按圆形截面设计。上述方法适用于圆形与矩形中空截面、矩形与矩形中空截面选型比较。

4 工程算例分析

根据以上给出的钢管混凝土墩柱截面优选方法,下面将结合工程算例来详细说明实际工程设计如何进行钢管混凝土墩柱截面选型。

表 1 界限离心率
Tab. 1 Boundary Eccentricity Ratio

截面挖空率	长宽比	界限离心率/%							
		$\xi=0.345$	$\xi=0.552$	$\xi=0.690$	$\xi=0.820$	$\xi=0.966$	$\xi=1.104$	$\xi=1.242$	$\xi=1.380$
0.00	1.0			25.86	19.94	12.10	9.33	7.83	6.82
	1.5		29.62	11.77	8.37	7.01	6.21	5.64	5.17
	2.0	13.37	11.06	7.41	6.21	5.60	5.18	4.84	4.52
	2.5	9.25	7.41	5.92	5.29	4.93	4.65	4.41	4.16
	3.0	6.48	5.96	5.15	4.76	4.52	4.33	4.14	3.94
0.25	1.0	6.87	6.14	5.83	5.55	5.13	4.06	2.58	0.87
	1.5	5.92	5.62	4.21	4.22	3.77	2.95	1.87	0.64
	2.0	4.94	4.37	3.77	3.70	3.26	2.53	1.61	0.55
	2.5	3.96	3.82	3.52	3.41	2.98	2.31	1.47	0.50
	3.0	3.68	3.51	3.36	3.22	2.80	2.17	1.38	0.47
0.50	1.0	5.37	4.15	4.61	4.46	3.87	2.97	1.86	0.63
	1.5	4.32	3.93	3.87	3.67	3.16	2.42	1.52	0.52
	2.0	4.10	3.88	3.54	3.31	2.84	2.18	1.37	0.47
	2.5	3.58	3.42	3.34	3.11	2.66	2.04	1.29	0.44
	3.0	3.47	3.32	3.20	2.98	2.54	1.95	1.23	0.42

依托工程为黄延高速上一座跨线车行天桥,主体结构为矩形钢管混凝土组合桁架连续刚构桥,跨径布置为 24 m+40 m+24 m,主墩采用 PBL 加劲型钢管混凝土接钢筋混凝土桥墩,墩梁刚接^[7]。黄延车行天桥概况如图 6,7 所示。

为简化计算,将该方案桥墩等效为直径为 1 m,含钢率为 5%的圆形钢管混凝土柱。此外,由于本文主要关注钢管混凝土桥墩的面内压弯承载力,所以忽略横向联系的影响。采用 MIDAS/Civil 建立有限元模型,如图 8 所示。

通过分析关键截面墩顶截面,其最不利组合的内力为:轴力 $N=2\,171\text{ kN}$,弯矩 $M=140\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

该墩柱最大偏心距 $e=0.064\text{ m}$,其偏心率为 6.4%。通过查表 1 可知,按圆形截面设计经济性较好。

5 结 语

(1)套箍系数、矩形截面高宽比、矩形中空夹层截面挖空率越大,矩形和矩形中空夹层截面的经济性越好。当套箍系数大于 0.8,矩形截面高宽比大于 2.0,矩形中空夹层截面挖空率大于 0.3 时,此 3 个参数对界限离心率的影响较小。

(2)界限离心率能够很好地表征钢管混凝土单肢截面的经济性。在截面内力和材料给定的条件下,通过查界限离心率表能够快速确定钢管混凝土

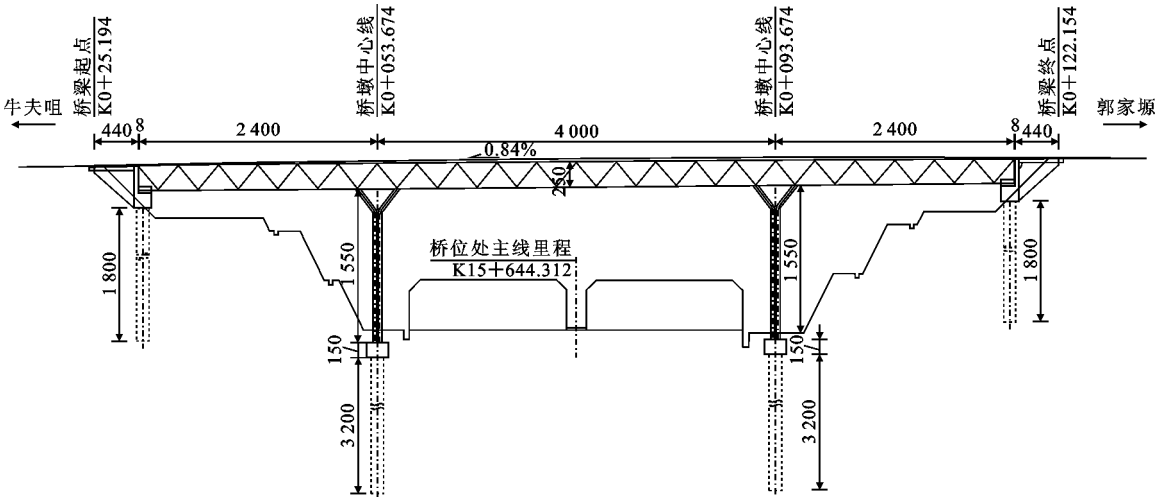


图 6 黄延车行天桥概况(单位:cm)

Fig. 6 Huangyan Overbridge Survey (Unit:cm)

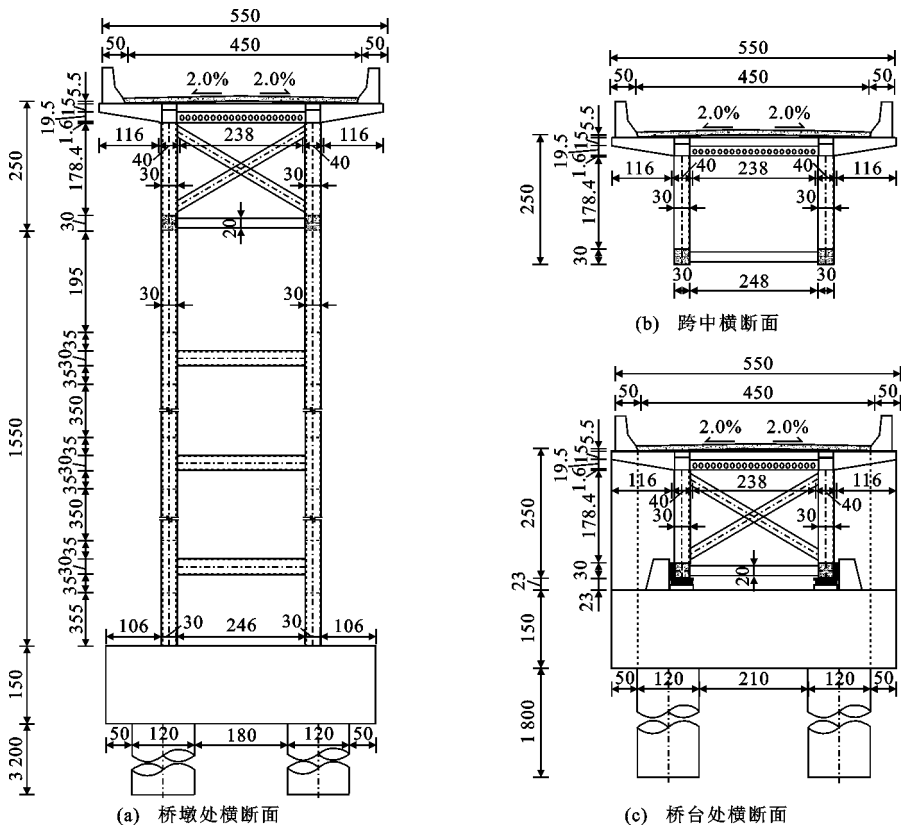


图 7 黄延桥车行天桥横断面(单位:cm)

Fig. 7 Cross Section of Huangyan Overbridge (Unit:cm)

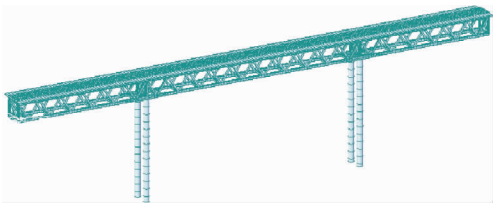


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite Element Model

墩柱最优截面形式,对实际工程具有一定参考价值。

(3)本文通过比较钢管混凝土单肢截面的压弯承载力来比选截面经济性,但实际工程中墩柱高度较高,长细比较大,墩柱截面经济性是否由压弯承载力控制还需进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 周绪红,刘永健,姜磊,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2017,30(11):45-62.
ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, JIANG Lei, et al. Review on Mechanical Behavior Research of Concrete Filled Rectangular Hollow Section Tube Stiffened with PBL[J]. China Journal of Highway and Trans-

port, 2017, 30(11): 45-62.
[2] 高诣民,刘永健,周绪红,等. 高性能钢管混凝土组合桁梁桥[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 174-187.
GAO Yi-min, LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, et al. High-performance CFST Composite Truss Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 174-187.
[3] 刘彬,刘永健,周绪红,等. 中等跨径装配式矩形钢管混凝土组合桁梁桥设计[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 20-31.
LIU Bin, LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, et al. Design of Mid-span Fabricated RCFST Composite Truss Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 20-31.
[4] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and Advanced Applications of Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Structures: Members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228.
[5] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁非线性地震响应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 90-98, 116.
WU Qing-xiong, HUANG Yu-fan, CHEN Bao-chun. Nonlinear Aseismic Performance of Lightweight Bridge with CFST Composite Truss Girder and Lat-

- tice Pier[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12): 90-98, 116.
- [6] 周汉平,魏军,黄勇,等.汶川克枯大桥钢结构制造工艺[J].西南公路,2019(2):6-12.
ZHOU Han-ping, WEI Jun, HUANG Yong, et al. Manufacturing Technology of Steel Structure for Wenchuan Keku Bridge[J]. Southwest Highway, 2019(2):6-12.
- [7] 刘永健,马印平,田智娟,等.矩形钢管混凝土组合桁梁连续刚构桥实桥试验[J].中国公路学报,2018,31(5):53-62.
LIU Yong-jian, MA Yin-ping, TIAN Zhi-juan, et al. Field Test of Rectangular Concrete Filled Steel Tubular Composite Truss Bridge with Continuous Rigid System[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5):53-62.
- [8] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
CHEN Bao-chun. Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2016.
- [9] 刘永健,姜磊,张宁.钢管混凝土中钢管的纵向容许应力[J].建筑科学与工程学报,2015,32(6):1-7.
LIU Yong-jian, JIANG Lei, ZHANG Ning. Longitudinal Allowable Stress of Steel Tube in Concrete-filled Steel Tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(6):1-7.
- [10] 姜磊,刘永健,侯蓓蓓.钢管混凝土拱肋轴力-应变关系[J].中国公路学报,2016,29(11):90-98.
JIANG Lei, LIU Yong-jian, HOU Bei-bei. Axial Force-strain Relationship of Concrete-filled Steel Tube Arch Rib[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11):90-98.
- [11] 聂建国,陶慕轩.钢管混凝土截面形状的比选研究[J].建筑结构,2008,38(7):106-109.
NIE Jian-guo, TAO Mu-xuan. Study on Comparison and Optimization of Section Types of Concrete-filled Steel Tube[J]. Building Structure, 2008, 38(7):106-109.
- [12] 陶忠,韩林海.中空夹层钢管混凝土的研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(增):144-146.
TAO Zhong, HAN Lin-hai. Development in the Research of Concrete-filled Double-skin Steel Tubes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(S):144-146.
- [13] 赵均海,郭红香,魏雪英.圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):50-54.
ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):50-54.
- [14] 张国靖,刘永健,侯蓓蓓,等.薄壁空心钢箱混凝土墩抗震性能参数分析[J].建筑科学与工程学报,2019,36(1):101-111.
ZHANG Guo-jing, LIU Yong-jian, HOU Bei-bei, et al. Parameter Analysis of Seismic Performance of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(1):101-111.
- [15] KNOWLES R B, PARK R. Strength of Concrete Filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(12):2565-2587.
- [16] SHAKIR-KHALIL H, ZEGHICHE Z. Experimental Behavior of Concrete-filled Rolled Rectangular Hollow-Section Columns[J]. The Structural Engineer, 1989, 67(19):345-353.
- [17] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].3版.北京:清华大学出版社,2003.
ZHONG Shan-tong. Concrete-filled Steel Tube Structure[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [18] 钟善桐.圆形和方形钢管混凝土柱工作性能与经济性比较[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(增):27-30.
ZHONG Shan-tong. The comparison of Behaviors and Economics for Concrete-filled Steel Tube (CFST) with Circular and Square Cross Sections[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(S):27-30.
- [19] GB 50923—2013,钢管混凝土拱桥技术规范[S].
GB 50923—2013, Technical Code for Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[S].
- [20] 韩林海.钢管混凝土结构-理论与实践[M].北京:科学出版社,2004.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures: Theory and Practice[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] CECS 159:2004,矩形钢管混凝土结构技术规程[S].
CECS 159:2004, Technical Specification for Structures with Concrete-filled Rectangular Steel Tube Members[S].
- [22] 王志滨.矩形中空夹层钢管混凝土压弯构件力学性能研究[D].福州:福州大学,2005.
WANG Zhi-bing. Behaviour of Concrete Filled Double-skin Steel Tubular Beam-columns with Rectangular Sections[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.