

文章编号:1673-2049(2010)02-0083-06

方形薄壁钢管轻骨料混凝土短柱的承载力

肖海兵^{1,2}, 赵均海¹, 孙珊珊¹, 周 蓉¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 武汉市建筑设计院, 湖北 武汉 430014)

摘要:采用双剪统一强度理论, 综合考虑方形薄壁钢管的局部屈曲效应以及轻骨料混凝土与普通混凝土多轴强度准则差异的影响, 推导出了方形薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱的极限承载力计算公式, 同时分析了拉压比、材料强度参数、宽厚比和混凝土强度对极限承载力的影响。结果表明: 该计算结果与文献试验结果吻合良好, 验证了公式的合理性; 该结果为方形薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱的承载力分析计算提供了理论依据, 具有工程参考价值。

关键词:结构工程; 统一强度理论; 方形薄壁钢管; 轻骨料混凝土; 极限承载力

中图分类号: TU529.59 **文献标志码:** A

Bearing Capacity of Short Column of Lightweight Aggregate Concrete-filled Square Thin-walled Steel Tube

XIAO Hai-bing^{1,2}, ZHAO Jun-hai¹, SUN Shan-shan¹, ZHOU Rong¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Wuhan Architectural Design Institute, Wuhan 430014, Hubei, China)

Abstract: Based on the twin shear unified strength theory, considering the effects of local buckling of the square thin-walled steel tube and the multi-axial strength criterion for lightweight aggregate concrete, the calculation formulae of ultimate bearing capacity of short column of lightweight aggregate concrete filled square thin-walled steel tube were deduced, meanwhile, the influences of tension-compression strength ratio, material strength parameter, width-thickness ratio, as well as concrete strength on the ultimate bearing capacity were analyzed. Results show that the calculated results obtained in the paper agree well with test results from the references, and it can verify the rationality of the formulae. It can provide the theoretical basis for calculating the bearing capacity of short column of lightweight aggregate concrete filled square thin-walled steel tube, and this solution has an important practical value for engineering applications.

Key words: structure engineering; unified strength theory; square thin-walled steel tube; lightweight aggregate concrete; ultimate bearing capacity

0 引言

冷弯薄壁型钢是一种轻型材料, 由于其具备卓越的结构性能及延性, 被广泛用于别墅、农村建筑、

活动房、商业建筑、体育场(馆)和工业厂房等轻型结构中, 通常为 1 层或 2 层^[1], 但空心薄壁钢管柱在受压时易发生局部屈曲而失稳。轻骨料混凝土具有自重轻、保温、隔热、防火性能好等优点, 被广泛应用于

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001); 陕西省自然科学基金研究计划项目(SJ08E2_04)

作者简介: 肖海兵(1984-), 男, 湖南益阳人, 长安大学工学硕士研究生, E-mail: mailongwan@163.com.

工业与民用建筑、桥梁结构和海洋工程中^[2],但轻骨料混凝土强度低、塑性和韧性差、变形较大,施工工期长,如果在薄壁钢管中浇灌轻骨料混凝土,组成薄壁钢管轻骨料混凝土构件,使 2 种材料在受力过程中相互作用,不仅可以弥补 2 种材料各自的缺点,还能充分发挥二者的优势。与普通钢管混凝土相比,薄壁钢管轻骨料混凝土可以大幅度降低结构自重,使建筑物最大限度保持“轻质”的优越性,从而具有较好的抗震性能。此外,在多低层建筑中,由于结构构件承载力要求相对较低,对于普通钢管混凝土而言,其经济效果不是很理想^[3-13],而薄壁钢管轻骨料混凝土结构在多低层建筑中可以充分发挥它的优势,具有较好的经济效益。目前各国对薄壁钢管轻骨料混凝土的研究较少,基本上以试验研究为主^[14-15],缺乏深入、系统的理论分析。为了进一步研究薄壁钢管轻骨料混凝土的力学性能,使该结构体系快速地在工程中得以应用,本文中采用双剪统一强度理论,综合考虑薄壁钢管的薄壁效应以及轻骨料混凝土与普通混凝土多轴强度准则差异的影响,对方形薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱的力学性能进行研究。

1 统一强度理论

俞茂宏在双剪强度理论的基础上,建立了一种全新的考虑主应力 σ_2 影响的适用于各种不同材料的双剪统一强度理论,其数学表达式为^[16]

$$\left. \begin{aligned} F &= \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F' &= \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_s & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ \alpha &= \frac{\sigma_s}{\sigma_c}, b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_s}{\sigma_s - \tau_s} = \frac{1+\alpha-B}{B-1}, B = \frac{\sigma_s}{\tau_s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: F 、 F' 为主应力强度理论函数; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为 3 个主应力; α 为材料的拉压比; σ_s 为材料拉伸屈服极限应力; σ_c 为材料的压缩屈服极限应力; τ_s 为材料剪切屈服极限应力; b 为反映中间主剪应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的材料强度参数; B 为剪应力系数。

2 极限承载力计算

2.1 考虑冷弯效应的钢板强度提高值

对于冷弯薄壁钢管而言,钢管经冷加工成型,由于冷作用硬化的影响,屈服强度有所提高,其提高的幅度与钢管的材质、截面形状、尺寸及成型工艺、加工方式等因素有关,因此,考虑冷弯效应的钢板强度

提高值 f'_y 可按式(2)进行计算^[17],即

$$f'_y = [1 + \frac{\eta(12\nu-10)t}{l} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{2\pi}] f_y \quad (2)$$

式中: η 为成型方式系数,对于冷弯高频焊(圆变)方、矩形钢管,取 $\eta=1.7$,对于圆钢管和其他开口型钢,取 $\eta=1.0$; ν 为钢材抗拉强度与屈服强度的比值,对于 Q235 钢,取 $\nu=1.58$,对于 16Mn 钢,取 $\nu=1.48$; t 为型钢的壁厚; l 为型钢截面中心线的长度,可取作型钢截面面积与壁厚的比值; n 为型钢截面所含棱角数; θ_i 为型钢截面第 i 个棱角所对应的圆周角; f_y 为钢管的屈服强度。

2.2 方形薄壁钢管的承载力

薄壁钢管混凝土是相对壁较厚的普通钢管混凝土而言的,其主要差别在于薄壁钢管混凝土需要考虑薄壁钢管的局部屈曲对构件力学性能的影响。要判断薄壁钢管发生局部屈曲的临界条件,通常采用临界径厚比(圆钢管)或宽厚比(方钢管)来判断,但由于受残余应力、初始缺陷和混凝土离散等因素的影响,该比值很难通过试验直接加以确定,一般只能得出一个大致范围。另外,对薄壁钢管混凝土上构件的钢管屈曲时的临界径(宽)厚比尚没有一种较好的计算方法来求解,因此,各国研究者对薄壁钢管进行计算时需考虑局部屈曲时的临界径(宽)厚比差异,如文献[18]~[20]中计算的钢管混凝土轴压下宽厚比限值分别为 90、64、86.3。当钢管的径(宽)厚比超过其界限时,则需要考虑钢管局部屈曲对钢管与核心混凝土组合作用的影响。

由于薄壁钢管混凝土构件还处于研发阶段,目前中国规范对薄壁钢管混凝土构件抗压强度的计算尚没有做出规定,同时现有的计算方法种类繁多且复杂。因此,本文中采用一种全新的计算方法,不考虑薄壁钢管局部屈曲对构件力学性能的影响,直接采用双剪统一强度理论进行计算。

考虑到方形薄壁钢管轻骨料混凝土内部约束机理的复杂性,参考文献[21]的方法,将方形薄壁钢管等效为圆形薄壁钢管的受力情况进行分析,则等效圆钢管处于轴压、环拉和径向受压的三向应力状态。将方钢管混凝土的钢与混凝土面积按等面积方法分别转化为等效圆钢管混凝土的钢与混凝土面积,其计算公式为

$$\left. \begin{aligned} D^2 &= \pi r_c^2 \\ (D-2t)^2 &= \pi r_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} r_c &= 0.564 \, 2 D \\ r_i &= 0.564 \, 2 (D-2t) \\ t_0 &= r_c - r_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: D 为方钢管的外边长; r_e 、 r_i 、 t_0 分别为等效圆钢管的外半径、内半径和壁厚。

由于等效薄壁圆钢管为薄壁圆筒,按文献[22],应用统一强度理论对薄壁圆筒进行分析,得到等效圆钢管的内压力统一极限荷载 P 为

$$P=\frac{4t_0(1+b)}{4(1+b)r_i-2\alpha br_i+4\alpha t_0}f'_y\tag{5}$$

由文献[23]可知,方形薄壁钢管在轴压下的极限承载力 N_1 为

$$N_1=\{[4(1+b)r_i^2\pi+4\alpha br_it_0\pi]P-4(1+b)r_it_0\pi f'_y\}/(2\alpha)\tag{6}$$

2.3 核心轻骨料混凝土的承载力

近年来,中国许多科研院校对轻骨料混凝土的多轴强度特性和变形规律进行了大量的试验研究,并根据试验结果建立了相应的本构关系和破坏准则。同时,由文献[2]可知,轻骨料混凝土在三向应力作用下应力-应变曲线有明显的应力平台区,并且在应力平台区轻骨料混凝土的内部结构已遭到大范围破坏,因此,在实际应用中,把应力平台区流塑段作为多轴压状态下轻骨料混凝土的极限强度,这样,轻骨料混凝土的拉、压子午线相交,极限强度面为一闭合的空间曲面,并且该空间曲面与静水应力轴相交于两点,即三轴等压极限强度点和三轴等拉极限强度点,这与一般认为的普通混凝土极限强度面为一开口空间曲面的结论是截然不同的,因此,根据普通混凝土建立的强度准则已不再适用于轻骨料混凝土。

由以上结论可知,钢管约束下普通混凝土的强度计算公式并不能很好地适应于核心轻骨料混凝土的强度计算。因此,针对轻骨料混凝土,采用文献[24]中从统一强度理论推导出的混凝土三向应力状态下的轴向抗压强度计算公式,即

$$\left. \begin{aligned} f'_c &= f_c + k\sigma_1 \\ k &= (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi) \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式中: φ 为混凝土的内摩擦角; k 的取值在 1.0~7.0 之间,具体由试验确定; f'_c 为混凝土三向应力状态下的轴向抗压强度; f_c 为混凝土圆柱体的单轴抗压强度; σ_1 为混凝土受到的侧向约束应力。

研究表明,方钢管对内部混凝土的约束可分为有效约束区和非有效约束区,考虑到其混凝土的约束计算比较复杂,本文中将方形薄壁钢管轻骨料混凝土的受力情况等效为圆形薄壁钢管轻骨料混凝土的受力情况进行分析,为弥补转化后圆钢管对核心混凝土的约束效应,引入混凝土强度折减系数^[25] γ_u , $\gamma_u=1.67D_c^{-0.112}$,其中 D_c 为等效圆钢管混凝土

钢管的内径。混凝土强度折减系数 γ_u 考虑了尺寸效应的影响。

轻骨料混凝土由于受到钢管的约束作用而处于三向应力状态,并且侧向约束力为 $\sigma_1=P$,将其代入式(7),同时引入混凝土强度折减系数 γ_u ,得到核心轻骨料混凝土的承载力 N_2 为

$$N_2=A_c\gamma_u f'_c=\pi r_i^2\gamma_u(f_c+kP)\tag{8}$$

式中: A_c 为核心轻骨料混凝土截面面积。

2.4 方形薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱的极限承载力

方形薄壁钢管轻骨料混凝土柱的轴向极限承载力为薄壁钢管、核心轻骨料混凝土的极限承载力之和,即

$$N=N_1+N_2\tag{9}$$

式中: N 为极限承载力。

将式(6)、(8)代入式(9),得到方形薄壁钢管轻骨料混凝土柱的轴向极限承载力 N 为

$$N=\{[4(1+b)r_i^2\pi+4\alpha br_it_0\pi]P-4\times(1+b)r_it_0\pi f'_y\}/(2\alpha)+\pi r_i^2\gamma_u(f_c+kP)\tag{10}$$

3 公式验算

采用文献[14]、[15]的试验数据进行极限承载力计算,试验所用的钢管考虑冷弯效应的钢板强度提高值可由式(2)计算得出,结果如表 1 所示。

表 1 考虑冷弯效应的钢板强度提高值

Tab. 1 Increasing Strength Values of Steel Considering Cold-formed Effect

试件编号	$D\cdot t^{-1}$	f_y/MPa	f'_y/MPa	$f'_y\cdot f_y^{-1}$	数据来源
100	108.7	229.3	235.26	1.026	文献[14]
120	134.8	229.3	234.12	1.021	
150	103.4	223.4	229.43	1.027	
4-1Q	120.8	222.7	227.88	1.023	文献[15]
4-2Q	103.4	222.7	228.75	1.027	
4-3Q	93.8	222.7	229.38	1.030	
4-4Q	80.5	222.7	230.50	1.035	

考虑到大多数金属类材料都有明显的屈服点,并且韧性金属材料拉压比 α 一般为 0.77~1.00,因此,取 $k=3.0$ 、 $\alpha=0.8$ 、 $b=1.0$ 时式(10)的计算结果与文献[14]、[15]中试验结果进行比较,此时统一强度理论退化为双剪屈服准则,比较结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,基于统一强度理论推导的方形薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱的承载力计算公式所得的结果与试验结果吻合良好,说明将统一强度理论应用于方形薄壁钢管轻骨料混凝土柱的承载力计算是可行的。

表 2 文献[14]、[15]试验结果与本文计算结果的对比

Tab. 2 Comparisons of Test Results from References [14],[15] and Calculated Results in the Paper

试件编号	D/mm	t/mm	$D \cdot t^{-1}$	f'_y/MPa	f_c/MPa	N/kN	N_{shi}/kN	$N \cdot N_{\text{shi}}^{-1}$	数据来源
100-1	100	0.92	108.70	235.3	17.67	376.07	377.0	0.997 5	文献[14]
100-2	100	0.92	108.70	235.3	17.67	376.07	398.0	0.944 9	
100-3	100	0.92	108.70	235.3	17.67	376.07	369.0	1.019 2	
100-4	100	0.92	108.70	235.3	22.31	420.19	403.0	1.042 6	
100-5	100	0.92	108.70	235.3	22.31	420.19	429.0	0.979 5	
100-6	100	0.92	108.70	235.3	22.31	420.19	434.0	0.968 2	
120-1	120	0.89	134.83	234.1	17.67	476.51	483.0	0.986 6	
120-2	120	0.89	134.83	234.1	17.67	476.51	471.0	1.011 7	
120-3	120	0.89	134.83	234.1	22.31	539.18	533.0	1.011 6	
120-4	120	0.89	134.83	234.1	22.31	539.18	527.0	1.023 1	
150-1	150	1.45	103.45	229.4	17.67	823.62	877.0	0.939 1	
150-2	150	1.45	103.45	229.4	17.67	823.62	893.0	0.922 3	
150-3	150	1.45	103.45	229.4	17.67	823.62	887.0	0.928 5	
150-4	150	1.45	103.45	229.4	22.31	918.31	958.0	0.958 6	
150-5	150	1.45	103.45	229.4	22.31	918.31	976.0	0.940 9	
150-6	150	1.45	103.45	229.4	22.31	918.31	941.0	0.975 9	
4-1Q	180	1.49	120.81	228.0	19.29	1 119.65	1 082.5	1.034 3	文献[15]
4-2Q	150	1.45	103.45	229.0	19.29	855.95	943.0	0.907 7	
4-3Q	135	1.44	93.75	229.0	22.65	792.82	779.8	1.016 7	
4-4Q	120	1.49	80.54	230.0	22.65	685.74	536.0	1.279 4	

注： N_{shi} 为文献[14]、[15]中的承载力试验值。

4 影响因素分析

4.1 拉压比与材料强度参数

对于材料的承载力,只要确定了 α 、 b 的值,就能得到更准确的计算结果,并且对于不同的外包材料,考虑 α 、 b 的影响是非常有必要的。本文中取参数 $D/t=108.7$, $f'_y=235.3\text{ MPa}$, $f_c=17.67\text{ MPa}$,对式(10)的结果进行分析,拉压比 α 和材料强度参数 b 对方形薄壁钢管轻骨料混凝土柱的极限承载力的影响如图 1 所示。由图 1 可知:当 α 一定时,极限承载力随 b 的增大而增大;当 b 一定时,极限承载力随 α 的增大而增大。

4.2 宽厚比与混凝土强度

为了分析方便,定义 S_1 为方形薄壁钢管轻骨料混凝土的承载力提高系数, $S_1=N/N_0$,其中 N_0 为试件名义轴压强度承载力^[26], $N_0=A_s f_s+A_c f_{ck}$, A_s 为钢管的截面面积, f_s 为钢管的抗压强度, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。对式(10)承载力提高系数进行分析时,取 $k=3.0$, $\alpha=0.8$, $b=1.0$, $f_s=f'_y=235.3\text{ MPa}$,则宽厚比和混凝土强度对承载力提高系数的影响如图 2 所示。由图 2 可知,承载力

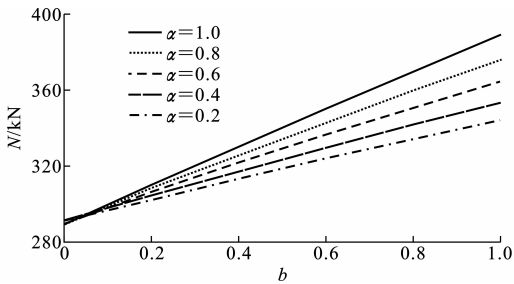


图 1 N 与 α 、 b 的关系

Fig. 1 Relations Among N and α , b

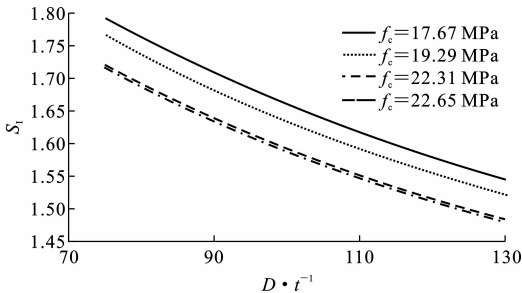


图 2 S_1 与 D/t 、 f_c 的关系

Fig. 2 Relations Among S_1 and D/t , f_c

提高系数随着宽厚比的增大和混凝土强度的提高而减小,这主要是因为随着宽厚比的增大和混凝土强度的提高,钢管混凝土的套箍指标减小所引起的。

5 结 语

(1)基于双剪统一强度理论,综合考虑方形薄壁钢管的薄壁效应以及轻骨料混凝土与普通混凝土多轴强度准则差异的影响,推导出了方形薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱的极限承载力计算公式。该公式考虑了中间主应力的影响,应用该公式时可以依据不同的材料选取相应的屈服准则和强度准则。

(2)将本文计算结果与文献试验结果进行比较,两者吻合良好,说明不考虑薄壁钢管局部屈曲的影响,直接将双剪统一强度理论用于方形薄壁钢管轻骨料混凝土柱的承载力计算是可行的,为工程设计提供了理论依据。

(3)结合本文理论计算公式分析了拉压比、材料强度参数、宽厚比和混凝土强度对方形薄壁钢管轻骨料混凝土柱极限承载力的影响。极限承载力随拉压比和材料强度参数增大而增大,承载力提高系数随着宽厚比的增大和混凝土强度的提高而减小。

参考文献:

References:

- [1] 高欣建,俞继前,林敏忠.冷弯型钢在轻钢建筑中的应用[J].新型建筑材料,1999(4):8-10,11.
GAO Xin-jian, YU Ji-qian, LIN Min-zhong. Application of Cold Forming Sections in Light Steel Construction[J]. New Building Materials, 1999(4): 8-10, 11.
- [2] 宋玉普.多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
SONG Yu-pu. Constitutive Relations and Failure Criterion of Multiple Concrete Materials[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.
- [3] 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.
- [4] 张常光,赵均海,张庆贺.CFRP-钢管混凝土核心柱的力学性能[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(6):830-834.
ZHANG Chang-guang, ZHAO Jun-hai, ZHANG Qing-he. Mechanic Behavior of Concentrically Reinforced of Columns Concrete Filled CFRP-steel Tube [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(6): 830-834.
- [5] 杜国锋,徐礼华,徐浩然,等.钢管混凝土组合T形短

柱轴压力学性能研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(4):549-555.

DU Guo-feng, XU Li-hua, XU Hao-ran, et al. Study on Behavior of Composite T-shaped Concrete Filled Steel Tubular Short Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 549-555.

- [6] 马淑芳,赵均海,魏雪英.双剪统一强度理论下钢管混凝土承载力的理论分析及试验研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2007,39(2):206-212.

MA Shu-fang, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying. Experimental and Theoretical Investigation of Load Capacities of Concrete Filled Steel Tube Based on the Twin Shear Unified Strength Theory[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(2): 206-212.

- [7] 闫月梅,杜晓巍.钢管混凝土柱加强环式节点的有限元分析[J].西安科技大学学报,2005,25(1):24-27.

YAN Yue-mei, DU Xiao-wei. Finite Element Analysis for Enforced Loop Joint of Concrete Filled Steel-tubular Column[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(1): 24-27.

- [8] 魏锦,赵均海,刘彦东,等.钢管混凝土轴压短柱的极限承载力分析[J].建筑科学与工程学报,2008,25(3):81-86.

WEI Jin, ZHAO Jun-hai, LIU Yan-dong, et al. Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Axial Compression Short Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 81-86.

- [9] 韩林海,陶忠,刘威,等.长期荷载作用对方钢管混凝土柱承载力的影响[J].中国公路学报,2001,14(3):57-61.

HAN Lin-hai, TAO Zhong, LIU Wei, et al. Effects of Long-term Loads on the Strength of Concrete-filled Steel Box Columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 57-61.

- [10] 韩林海,陶忠,刘威,等.长期荷载作用下方钢管混凝土轴心受压柱的变形特性[J].中国公路学报,2001,14(2):52-57.

HAN Lin-hai, TAO Zhong, LIU Wei, et al. Long-term Effects in Concrete-filled Steel Box Columns Under Sustained Loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 52-57.

- [11] 韦建刚,陈宝春.钢管混凝土拱桥拱肋刚度设计取值分析[J].交通运输工程学报,2008,8(2):34-39.

WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun. Analysis on Rib Ri-

- gidity of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 34-39.
- [12] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 40-46.
YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Mechanical Behavior of Concrete Filled Circular Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 40-46.
- [13] 李小伟, 赵均海, 朱铁栋, 等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 77-81.
LI Xiao-wei, ZHAO Jun-hai, ZHU Tie-dong, et al. Mechanics Behavior of Axially Loaded Short Columns with Concrete-filled Square Steel Tube [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 77-81.
- [14] 何明胜, 刘新义. 方形薄壁钢管轻骨料混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(2): 18-21.
HE Ming-sheng, LIU Xin-yi. Study on Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Filled Square Thin-walled Steel Tubes Under Axial Load [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(2): 18-21.
- [15] 王秋萍. 薄壁钢管混凝土轴压短柱力学性能的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
WANG Qiu-ping. Study on Behavior of the Concrete-filled Thin-walled Steel Tube Short Column Under Axial Load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [16] YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Its Applications [M]. Berlin: Springer Press, 2004.
- [17] 《冷弯薄壁型钢结构设计手册》编著组. 冷弯薄壁型钢结构设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996: 16-17.
Compiling Group of Designer's Handbook for Cold-formed Thin-wall Steel Structures. Designer's Handbook for Cold-formed Thin-wall Steel Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996: 16-17.
- [18] 曹宝珠, 张耀春. 方形薄壁钢管混凝土柱管壁的宽厚比限值[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1713-1716.
CAO Bao-zhu, ZHANG Yao-chun. Limit of Width-thickness Ratio of Steel Plates in Concrete-filled Square Thin-walled Steel Tube Columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(12): 1713-1716.
- [19] WRIGHT H D. Buckling of Plates in Contact with a Rigid Medium [J]. The Structural Engineer, 1993, 71(12): 209-215.
- [20] UY B, BRADFORD M A. Elastic Local Buckling of Steel Plates in Composite Steel-concrete Members [J]. Engineering Structures, 1996, 18(3): 193-200.
- [21] 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 Tubular Structures [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [22] 翟越, 魏雪英, 计琳, 等. 薄壁圆筒在双剪统一强度理论下的统一解[J]. 长安大学学报: 建筑与环境科学版, 2004, 21(3): 1-3.
ZHAI Yue, WEI Xue-ying, JI Lin, et al. Unified Limit Solutions for Thin Wall Cylinder Based on Twin Shear Unified Strength Theory [J]. Journal of Chang'an University: Arch & Envir Science Edition, 2004, 21(3): 1-3.
- [23] 翟越, 赵均海, 计琳, 等. 钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 55-58.
ZHAI Yue, ZHAO Jun-hai, JI Lin, et al. Unified Solutions on Axial Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tube [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 55-58.
- [24] 赵均海. 强度理论及其工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHAO Jun-hai. Strength Theory and Its Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [25] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, et al. Behavior of Centrally Loaded Concrete Filled Steel Tube Short Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [26] 陶忠, 于清. 新型组合结构柱——试验、理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TAO Zhong, YU Qing. New Composite Structure Columns: Experiment, Theory and Method [M]. Beijing: Science Press, 2006.