

文章编号:1673-2049(2008)04-0047-06

# 波形钢板钢管混凝土柱的极限承载力

高 婧,陈宝春

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

**摘要:**提出了波形钢板钢管混凝土柱的有限元分析方法,采用正交异性板来模拟波形钢板。应用 ANSYS 通用程序对算例进行了分析,并应用有限元方法分析了偏心率、长细比 2 个主要参数对波形钢板钢管混凝土柱极限承载力的影响。结果表明:可采用稳定折减系数和偏心率折减系数相乘的计算公式来考虑二者对波形钢板钢管混凝土柱极限承载力的影响,其中偏心率折减系数可采用《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28:90)的计算公式;稳定折减系数应将换算长细比乘以考虑柱肢的钢材型号和混凝土强度等级的材料修正系数,然后采用《钢管混凝土结构设计与施工规程》(JCJ 01—89)的稳定系数计算方法。

**关键词:**钢管混凝土;波形钢板;混凝土柱;极限承载力;折减系数

**中图分类号:**TU398.9 **文献标志码:**A

## Ultimate Load Carrying Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Column with Corrugated Steel Webs

GAO Jing, CHEN Bao-chun

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

**Abstract:** A finite element analysis method was proposed for the new type composite column—concrete-filled steel tubular (CFST) column with corrugated steel webs, in which the corrugated steel web was simulated by orthotropic plate. ANSYS program was used to analyze the test specimens. The effects of two critical parameters (eccentric ratio and slenderness ratio) on ultimate load carrying capacity of concrete-filled steel tubular column with corrugated steel webs were analyzed. Results indicate that the formulae, which multiply reduction factor of stability and reduction factor of eccentric ratio to take influence of eccentric ratio and slenderness ratio into account, can be used to calculate ultimate load carrying capacity. The reduction factor of eccentric ratio can be obtained by the formula in *Specification for Design and Construction of Concrete-filled Steel Tubular Structures* (CECS 28:90), and the reduction factor of stability should be got by *Specification for Design and Construction of Concrete-filled Steel Tubular Structures* (JCJ 01—89), but the equivalent slenderness ratio should be corrected by multiplying the revised material factor, which takes the grade of steel and concrete into consideration.

**Key words:** concrete-filled steel tube; corrugated steel web; concrete column; ultimate load carrying capacity; reduction factor

收稿日期:2008-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50778043)

作者简介:高 婧(1979-),女,陕西黄龙人,工学博士研究生,E-mail:mariagaojing@fzu.edu.cn.

## 0 引言

波形钢板和钢管混凝土在工程结构中都有着广泛的应用。文献[1]中提出将波形钢板与钢管混凝土组合起来的新型结构,称之为波形钢板钢管混凝土结构,并开展了波形钢板钢管混凝土梁的受弯试验。试验研究表明,它避免了节点破坏问题,与钢管混凝土桁梁相比,抗弯刚度和极限承载力均有较大的提高<sup>[2]</sup>。波形钢板钢管混凝土也可以用于以受压为主的柱子,与钢管混凝土格构柱相比,主肢同为钢管混凝土单圆管试件,不同的是连接构件采用的是波形钢板而不是钢管腹杆,因此,其构造简单、制作方便,也简洁美观。为了解波形钢板钢管混凝土柱的受力性能,文献[3]中同时考虑长细比和偏心率 2 个参数,采用棋盘式的试验方案进行了 22 根波形钢板钢管混凝土四肢柱的轴压和偏压试验,探讨了偏心率和长细比 2 个参数对波形钢板钢管混凝土柱受力性能和极限承载力的影响,对柱肢和波形钢板的受力等进行了分析,并对其极限承载力的计算方法进行了初步探讨。本文中笔者在文献[3]波形钢板钢管混凝土柱试验研究的基础上,提出了有限元计算方法,应用 ANSYS 程序,以长细比和偏心率为主要参数,对其极限承载力进行了大量的数值分析,并提出了实用的计算方法。

## 1 有限元计算方法

### 1.1 计算方法

由文献[3]可知,波形钢板钢管混凝土柱破坏时有较明显的面内弯曲,属整体破坏,管结构的特性并不明显,因此有限元分析时,可采用杆系单元模拟钢管混凝土单圆管主肢。在偏压荷载作用下以强轴方向面内受力为主,弱轴方向缀管的受力很小且都处在弹性阶段,因此有限元模型可以采用只考虑强轴方向的 2 个柱肢的平面模型。

钢管混凝土柱肢建模时采用由钢管单元和混凝土单元重合的双单元<sup>[4-9]</sup>,材料本构关系采用一维的表达式。对于管内混凝土,材料本构关系选用文献[10]的模型,它以一维形式表达,但考虑了钢管对核心混凝土的套箍作用,对于钢管本构关系采用四折线应力-应变关系曲线。

本文的有限元分析采用 ANSYS 通用程序。钢管混凝土柱肢用弹塑性梁单元 Beam188 来建模。几何非线性求解时,采用大挠度非线性有限元方法计算,用 Newton-Raphson 法求解。

### 1.2 波形钢板的简化

有限元分析时,波形钢板的计算模型有采用实体模型的,也有采用简化模型的。文献[11]中在应用 ANSYS 程序进行波形钢板钢管混凝土梁有限元分析时,采用 Shell181 单元模拟波形钢板。实体模型虽然能够反映波形钢板的三维空间受力特性,但建模复杂,计算效率较低。文献[12]中在进行波形钢板 PC 梁分析时,提出的采用弹簧模拟波形钢板中斜折板的简化模型可用于弹性阶段的分析,但不适用于非线性的分析。

波形钢板在轴向力作用下,由于折叠效应,其波折方向的轴向刚度将大大减小,因此可以将其简化为正交各向异性钢板,与轴向力方向垂直的弹性模量为钢板的弹性模量  $E_s$ ,与轴向力方向相同的(波折方向)弹性模量为  $E_x$ 。

设一单位高的波形钢板,钢板板厚为  $t$ ,取其中一个波长  $2(a+c)$ ,如图 1 所示。在轴向力  $P$  作用下,波形钢板的轴向变形  $\Delta_1$  可由卡氏定理求得

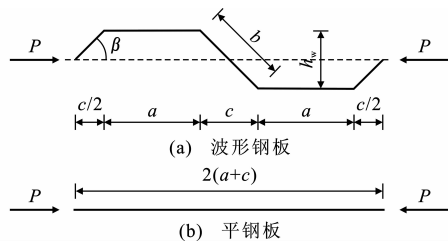


图 1 波形钢板轴向等效弹性模量计算

Fig. 1 Calculation of Axial Equivalent Elastic Modulus for Corrugated Steel Web

$$\Delta_1 = \frac{Ph_w^2}{6E_s I} (b+3a) \quad (1)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $h_w$  为波形钢板的几何参数;  $I$  为钢板单位宽度的截面惯性矩,  $I = t^3/12$ 。

设一弹性模量为  $E_x$  的平钢板,其与波形钢板在轴向投影等长、等厚且等高,在轴向力  $P$  的作用下的轴向变形为

$$\Delta_2 = \frac{2P(a+c)}{E_x t} \quad (2)$$

令  $\Delta_1 = \Delta_2$ ,则可以得到波形钢板波折方向的等效弹性模量,即

$$E_x = \frac{E_s(a+c)}{b+3a} \frac{t^2}{h_w^2} = E_s \alpha \frac{t^2}{h_w^2} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为波形钢板的形状影响系数,  $\alpha = \frac{a+c}{b+3a}$ 。

## 2 算例分析

### 2.1 算例

文献[3]中的试件总计 22 根,包括 6 根轴压试

件和16根偏压试件,试件长细比变化范围为2~20,偏心率变化范围为0~0.4。试件柱高度为0.4~4 m。柱肢钢管单元外径为89 mm,钢管壁厚为1.8 mm,波形钢板板厚为1.5 mm。钢管与波形钢板采用Q345钢,实测屈服强度为386 MPa,钢材弹性模量 $E_s=2.06 \times 10^5$  MPa。管内混凝土弹性模量 $E_c=34.5 \times 10^3$  MPa,泊松比取为0.2,混凝土抗压强度标准值 $f_{ck}$ 为35.7 MPa。具体试验参数和试验结果见文献[3]。

根据试件的几何尺寸建立有限元计算模型,其中波形钢板模拟成正交各向异性板,将波形钢板几何参数( $a=40$  mm,  $b=42.4$  mm,  $c=30$  mm,  $h_w=30$  mm,  $t=1.5$  mm)代入式(3),得 $E_x=222$  MPa(仅为另一方向弹性模量 $2.06 \times 10^5$  MPa的1/928)。材料非线性求解时,将试件的材料参数代入,并输入相应的应力-应变曲线。

有限元分析计算时,将荷载分为50级,逐级加载直至出现下降段,取最大荷载为极限荷载。根据试验的加载装置定义边界条件,平面方向上不能左右移动,将柱肢的上下节点水平方向固结。

## 2.2 计算结果比较

图2为CC16组试件荷载-挠度曲线。由图2可以看出,计算值整体变化规律与试验值相一致。随着偏心率的增大,试件的承载力降低。波形钢板钢管混凝土柱破坏时有较明显的弯曲,属整体破坏。从图2中还可以看出:当荷载较小时,中截面挠度变化幅度不大,曲线接近直线;当荷载达到极限荷载的70%~80%时,挠度开始明显增加,表现出一定的延性。

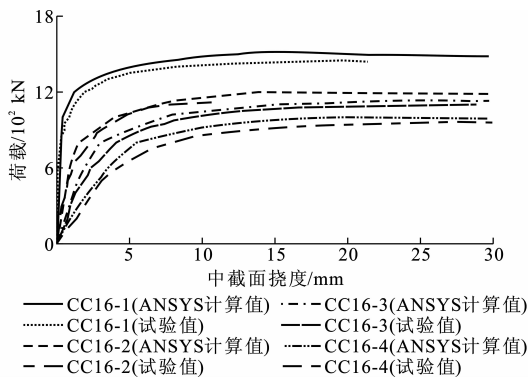


图2 CC16组试件的荷载-挠度曲线

Fig. 2 Load and Deflection Curves of Group CC16 Specimens

表1为文献[3]各试件的极限承载力计算值与试验值的比较。极限承载力的试验值与计算值均指

最大荷载。由表1可知,承载力试验值 $N_u$ 与不考虑初始挠曲的承载力计算值 $N_{cu}$ 以及考虑初始挠曲(挠曲为柱高度 $H$ 的1/1000)的承载力计算值 $N'_{cu}$ 比值的均值均为0.96,方差分别为0.05和0.043,是否考虑初始缺陷对轴压柱的承载力影响相对较大,而对偏压柱的承载力影响较小。计算结果表明,本文中提出的有限元计算方法能较准确地计算波形钢板钢管混凝土柱的极限承载力。在下面的计算中,所有参数计算均采用考虑初始缺陷的有限元模型。

## 3 参数影响分析

### 3.1 文献[3]的极限承载力计算公式

文献[3]的试验结果表明,长细比和偏心率对试件极限承载力的影响基本上是独立的,总体承载力的折减系数 $\varphi$ 可采用分离的偏心率折减系数和长细比折减系数(稳定系数)相乘来计算,从而波形钢板钢管混凝土柱的极限承载力可采用式(4)计算

$$N_u^* = \varphi N_o = \varphi_e^* \varphi_l^* N_o \quad (4)$$

式中: $N_u^*$ 为波形钢板钢管混凝土柱整体承载力; $\varphi_e^*$ 为考虑偏心率影响的折减系数; $\varphi_l^*$ 为考虑长细比影响的折减系数; $N_o$ 为轴心受压短柱的承载力。

偏心率与长细比的折减系数均借用CECS 28:90规程<sup>[13]</sup>中单圆管钢管混凝土柱的计算公式。单圆管钢管混凝土柱的偏心率折减系数为

$$\varphi_e^* = \frac{1}{1 + 2e_0/h} \quad (5)$$

式中: $e_0$ 为偏心距; $h$ 为在弯矩作用平面内的柱肢重心之间的距离。

单圆管钢管混凝土柱的长细比折减系数为

$$\varphi_l^* = 1 - 0.0575 \sqrt{\lambda^* - 16} \quad (6)$$

$$\lambda^* = \mu\lambda = \sqrt{\lambda^2 + \frac{\pi^2 \beta}{0.385\alpha}} \approx \sqrt{\lambda^2 + 26 \frac{\beta}{\alpha}} \quad (7)$$

式中: $\lambda^*$ 为构件的换算长细比; $\lambda$ 为构件长细比; $\mu$ 为考虑剪切变形的长细比放大系数; $\beta = \frac{EA}{E_s A_p}$ ,  $E$ 为柱肢的弹性模量,  $A$ 为柱肢的横截面积,  $EA$ 为柱肢的抗压刚度,  $A_p$ 为波形板在弯曲平面内的面积,  $A_p = 2ht$ 。

分析表明,参数扩大后,长细比和偏心率对波形钢板钢管混凝土柱极限承载力的影响仍然是相互独立的,因此可采用稳定折减系数和偏心率折减系数相乘的简化计算公式来考虑二者对钢板钢管混凝土柱极限承载力的影响。

表 1 极限承载力计算值与试验值比较

Tab. 1 Comparisons Between Calculated Values and Test Values of Ultimate Load Carrying Capacities

试件编号	高度/m	长细比	偏心率	试验值 $N_u/\text{kN}$	不考虑初始挠曲		考虑初始挠曲	
					计算值 $N_{cu}/\text{kN}$	$N_u \cdot N_{cu}^{-1}$	计算值 $N'_{cu}/\text{kN}$	$N_u \cdot N'^{-1}_{cu}$
CC02-0	0.4	2	0.0	1 880	1 888.6	0.995	1 886.3	0.997
CC02-2			0.2	1 290	1 337.4	0.965	1 336.7	0.965
CC06-0	1.2	6	0.0	1 825	1 888.6	0.966	1 881.5	0.970
CC06-1			0.1	1 500	1 565.2	0.958	1 557.7	0.963
CC06-2			0.2	1 300	1 331.7	0.976	1 327.2	0.980
CC06-3			0.3	1 170	1 155.6	1.012	1 163.5	1.006
CC06-4			0.4	1 050	1 028.8	1.021	1 026.2	1.023
CC12-0	2.4	12	0.0	1 750	1 881.5	0.930	1 873.7	0.934
CC12-1			0.1	1 500	1 549.6	0.968	1 532.9	0.979
CC12-2			0.2	1 282	1 316.1	0.974	1 303.3	0.984
CC12-3			0.3	1 150	1 167.0	0.985	1 135.1	1.013
CC12-4			0.4	981	1 014.1	0.967	1 008.9	0.972
CC16-0	3.2	16	0.0	1 681	1 888.6	0.890	1 838.7	0.914
CC16-1			0.1	1 450	1 532.3	0.946	1 512.8	0.958
CC16-2			0.2	1 117	1 300.1	0.859	1 285.1	0.869
CC16-3			0.3	1 100	1 163.1	0.946	1 163.1	0.946
CC16-4			0.4	966	1 002.2	0.964	994.4	0.971
CC20-0	4.0	20	0.0	1 675	1 888.7	0.887	1 815.1	0.923
CC20-1			0.1	1 395	1 512.4	0.922	1 485.9	0.939
CC20-2			0.2	1 260	1 274.0	0.989	1 257.9	1.002
CC20-3			0.3	980	1 165.0	0.841	1 164.9	0.841
CC20-4			0.4	950	985.7	0.964	977.2	0.972

3.2 偏心率折减系数

用文献[3]中提出的偏心率折减系数  $\varphi_e^*$  计算公式得到的计算值与试验值吻合较好。然而,受试验条件的限制,文献[3]中试件的偏心率范围较小( $e_0/h=0\sim0.4$ )。本文中在有限元分析时将偏心率变化范围扩大到 $0\sim1.2$ ,以探讨较大偏心率时式(5)是否还能适用。

图 3 为偏心率折减系数  $\varphi_e^*$  的有限元计算值与式(5)的比较, $\varphi_e^*$  值为各偏压试件的承载力与同一长细比的轴压试件承载力之比。从图 3 可以看出,各计算值与式(5)计算值规律一致,二者差值的均值为 0.008,方差为 0.024,说明式(5)在大偏心率的情况下依然适用。

3.3 长细比折减系数

与偏心率折减系数相似,用文献[3]中提出的长细比折减系数  $\varphi_l^*$  计算公式得到的计算值与试验值吻合较好。然而,文献[3]试件的长细比  $\lambda$  仅在  $2\sim20$  之间,本文中在有限元分析时将长细比范围扩大至  $2\sim240$ ,以验证式(6)是否还适用。

图 4 为采用 ANSYS 计算得到的折减系数及借

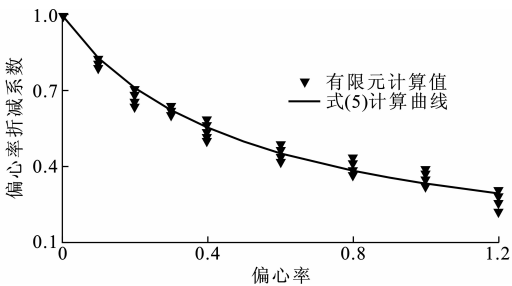


图 3 偏心率折减系数-偏心率的关系曲线  
Fig. 3 Relationship Curves Between Reduction Factors of Eccentric Ratio and Eccentric Ratios

用 CECS 28:90 规程和 JCJ 01—89 规程<sup>[14]</sup>相应公式计算的折减系数与换算长细比之间的关系。由图 4 可以看出,随着长细比的不断增大,有限元与式(6)计算的极限承载力均呈下降趋势,但二者的吻合程度随长细比的变化而变化。对于文献[3]的试件来说:当长细比很小( $\lambda<20$ )时,二者吻合较好,与试验值也很接近;当  $20<\lambda<100$  时,CECS 28:90 规程的计算值远比 ANSYS 的计算值小;当  $\lambda>100$  时,二者差别又缩小了。

文献[15]、[16]中通过试验研究、算例数值分析

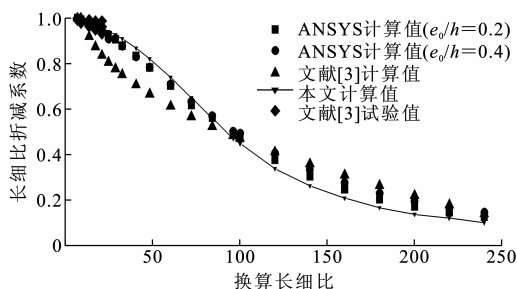


图 4 长细比折减系数-换算长细比的关系曲线

Fig. 4 Relationship Curves Between Reduction Factor of Slenderness Ratio and Equivalent Slenderness Ratio

和理论公式的推导,提出了钢管混凝土格构柱极限承载力的通用算法,并指出 JCJ 01—89 规程稳定系数的计算方法比 CECS 28:90 规程及 DL/T 5085—1999 规程更为合理,并且通过理论分析与公式推导,给出了材料修正系数的公式。从其推导过程可知,材料修正系数仅与柱肢的钢材、混凝土强度及含钢率有关。

从文献[3]的试验结果和本文前面的分析可知,波形钢板钢管混凝土柱的受力性能与钢管混凝土格构柱基本相同,其极限承载力的稳定系数计算方法可借鉴钢管混凝土格构柱的计算方法,但波形钢板的剪切刚度要大于钢管腹杆,因此换算长细比的计算方法有所不同。具体来说,首先根据式(7)计算出波形钢腹板钢管混凝土柱的换算长细比 $\lambda^*$ ;然后由 $\gamma = \sqrt{f_{sc}/E_{sc}} \sqrt{2.06 \times 10^5 / 235}$ 得到材料修正系数 $\gamma$ ,其中 $f_{sc}$ 、 $E_{sc}$ 分别为钢管混凝土构件的组合强度与组合模量;最后将 $\lambda^*$ 乘以材料修正系数 $\gamma$ ,再查 JCJ 01—89 规程附表 3 得到长细比折减系数。

对于文献[3]中的试件,由式(7)计算得到换算长细比后,将其乘以材料修正系数 1.18,然后由 JCJ 01—89 规程附表 3 查得长细比折减系数,如图 4 所示。由图 4 可知,本文计算值比文献[3]计算值与 ANSYS 计算值吻合更好。

### 3.4 极限承载力比较

以文献[3]的试件及第 3.2、3.3 节的有限元分析试件为例,采用上述计算方法得到的极限承载力计算值见图 5,其中长细比的变化范围为 2~120,偏心率的变化范围为 0~1.2。为了便于比较,轴心受压短柱承载力统一用有限元计算值代入。由图 5 可以看出,本文计算值与 ANSYS 计算值吻合良好,其均值为 0.950,方差为 0.011。本文计算值与文献[3]试验值的对比也表明,本文的计算方法是合理的,其均值为 0.959,方差为 0.001。

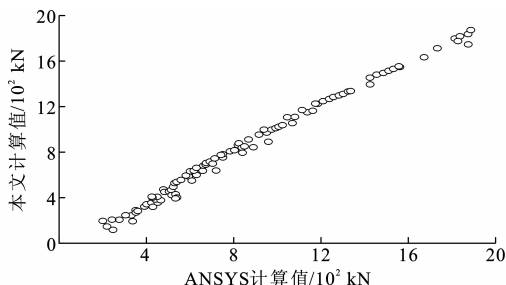


图 5 极限承载力计算值比较

Fig. 5 Comparisons of Calculated Values of Ultimate Load Carrying Capacities

## 4 结 语

(1)提出了采用正交异性板来模拟波形钢板的波形钢板钢管混凝土柱的有限元计算方法。应用 ANSYS 通用程序,建立了波形钢板钢管混凝土柱试件的有限元模型,有限元分析结果与试验结果吻合良好。结果表明:此方法可用于波形钢板钢管混凝土柱的极限承载力分析,为该研究与工程应用提供了一种实用的分析手段。

(2)应用本文提出的有限元计算方法,对波形钢板钢管混凝土柱极限承载力进行了偏心率、长细比 2 个主要参数的影响分析。结果表明:可采用稳定折减系数和偏心率折减系数相乘的简化计算公式来考虑二者对波形钢板钢管混凝土柱极限承载力的影响,其中,偏心率折减系数可采用 CECS 28:90 规程的计算方法;计算稳定系数时,应将换算长细比乘以考虑柱肢的钢号和混凝土强度等级的材料修正系数,然后采用 JCJ 01—89 规程的稳定系数计算方法。

### 参考文献:

### References:

- [1] 陈宝春,高 婧.波形钢腹板钢管混凝土梁受弯试验研究[J].建筑结构学报,2008,29(1):75-82.  
CHEN Bao-chun,GAO Jing. Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Beam with Corrugated Steel Web Under Bending [J]. Journal of Building Structures,2008,29(1):75-82.
- [2] 黄文金,陈宝春.钢管混凝土桁梁受弯试验研究[J].建筑科学与工程学报,2006,23(1):29-33.  
HUANG Wen-jin, CHEN Bao-chun. Experimental Research on Concrete-filled Steel Tube Truss Girder Under Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):29-33.
- [3] GAO Jing, CHEN Bao-chun. Experimental Research

- on Concrete Filled Steel Tubular Columns with Trapezoidally Corrugated Steel Webs[C]//XIAO Y. Proceeding of the 10th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Beijing: Science Press, 2008: 611-616.
- [4] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱材料非线性有限元分析方法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 344-348.
- WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun. Finite Element Methods for Analysis on Material Nonlinearity of Concrete-filled Steel Tubular Arch [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2004, 32(3): 344-348.
- [5] 周绪红, 孔祥福, 侯健, 等. 波纹钢腹板组合箱梁的抗剪受力性能[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 77-82.
- ZHOU Xu-hong, KONG Xiang-fu, HOU Jian, et al. Shear Mechanical Property of Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 77-82.
- [6] 陈宝春, 韦建刚, 王加迫. 钢管混凝土拱桥的挠度限值研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 56-60.
- CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, WANG Jia-po. Research on Deflection Limit Value for CFST Arch Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 56-60.
- [7] 刘永健, 刘君平, 郭永平, 等. 钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 53-57.
- LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, GUO Yong-ping, et al. Bond-slip Mechanics Behaviors of Structures Concrete Filled Steel Tubes [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 53-57.
- [8] 刘扬, 邬晓光, 徐芳元. 钢管造型拱竖向转体施工结构仿真分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 49-52.
- LIU Yang, WU Xiao-guang, XU Fang-yuan. Simulation of Vertical Shift Constuction of Steel Tube Arch Bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 49-52.
- [9] 刘永健, 周绪红, 刘君平. 矩形钢管混凝土 T、Y 型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 28(5): 48-52.
- LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Behavior of Concrete Filled Rectangular Steel Tube T-joints and Y-joints Under Compression [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 28(5): 48-52.
- [10] 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 Structure—Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] 高婧, 陈宝春. 波形钢腹板钢管混凝土梁有限元分析及参数研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 722-728.
- GAO Jing, CHEN Bao-chun. Nonlinear Finite Element Analysis and Parametric Studies on Concrete Filled Steel Tubular Beam with Corrugated Steel Web [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2008, 36(5): 722-728.
- [12] 黄玲, 彦坂熙, 陈宝春, 等. 应用二维折迭联结单元的波形钢腹板 PC 梁分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 875-881.
- HUANG Ling, HIKOSAKA H, CHEN Bao-chun, et al. Analysis of Prestressed Concrete Bridge with Corrugated Steel Web by Using 2-D Accordion Spring Element Model [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2006, 34(6): 875-881.
- [13] CECS 28:90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. CECS 28:90, Specification for Design and Construction of Concrete-filled Steel Tubular Structures [S].
- [14] JCJ 01—89, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. JCJ 01—89, Specification for Design and Construction of Concrete-filled Steel Tubular Structures [S].
- [15] 陈宝春, 欧智菁. 四肢钢管混凝土格构柱极限承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 32-41.
- CHEN Bao-chun, OU Zhi-jing. Experimental Study on the Ultimate Load Carrying Capacity of Four-tube Concrete Filled Steel Tubular Laced Columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 32-41.
- [16] 陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土格构柱极限承载力计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 55-63.
- CHEN Bao-chun, OU Zhi-jing. Calculation Method for the Ultimate Load Carrying Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Lattice Columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1): 55-63.