

文章编号:1673-2049(2010)01-0043-06

方钢管混凝土粘结强度试验研究

黄一杰^{1,2}, 薛建阳², 赵鸿铁², 仵建斌²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为了得出方钢管混凝土构件的粘结强度计算公式,进行了不同长宽比、宽厚比方钢管混凝土柱的轴心推出试验,得到了方钢管混凝土的粘结强度变化规律;总结并分析了各国相关试验,提出了当核心混凝土周边的薄壁混凝土破坏之后试件破坏这一思路,利用弹性力学与材料力学的相关理论,推导了方钢管混凝土粘结强度的半经验半理论公式。分析结果表明:方钢管混凝土的粘结强度受构件宽厚比影响较大,受长宽比影响较小;所得公式的计算结果与试验值吻合良好,为方钢管混凝土粘结强度计算提供了新思路。

关键词:方钢管混凝土;粘结强度;影响因素;弹性模量

中图分类号:TU392.3 **文献标志码:**A

Experimental Study of Bond Strength of Concrete-filled Square Steel Tube

HUANG Yi-jie^{1,2}, XUE Jian-yang², ZHAO Hong-tie², WU Jian-bin²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To obtain the bond strength calculating formula of concrete-filled square steel tube specimens, push-out experiments were carried out under different slendernesses and width-thickness ratios, and the change principle of bond strength of concrete-filled square steel tube specimens was obtained. According to domestic and foreign experiments, authors proposed that when the thin-walled concrete damaged, the sample was destroyed. Base on this principle, a semiempirical theory formula was deduced using elastic mechanics and material mechanics methods. Analytical results show that bond strength of concrete-filled square steel tube specimen is more affected by width-thickness ratio, and is less affected by the slenderness. The results of formula match well with those of experiments, which provide a new way to calculate bond strength of concrete-filled square steel tube columns.

Key words: concrete-filled square steel tube; bond strength; influence factor; elastic modulus

0 引言

方钢管混凝土结构具有承载力高、刚度大、抗震性能好、施工方便等优点^[1],是需要大力发展的一种建筑结构形式。在方钢管混凝土结构实际应用中,

外力一般先传到钢管壁上,然后再通过剪切粘结力传递给核心混凝土。各国相关试验表明:钢管混凝土粘结强度较低^[2-3],其剪力传递长度过长。这就会造成核心混凝土不能达到其设计强度或者虽然能够达到设计强度,但结构不能充分利用,从而导致钢管

收稿日期:2009-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50478044)

作者简介:黄一杰(1983-),男,山东济南人,同济大学工学博士研究生,E-mail:302huangyijie@163.com。

混凝土这种组合结构的优势得不到充分发挥。为了解决这些问题,需要对方钢管混凝土的剪切粘结性能做进一步的研究。

到目前为止,各国已经开展了一些对方钢管混凝土粘结性能的试验研究,但是还存在一些问题,如对其影响其粘结强度的因素存在较大争议等。为此,本次试验对方钢管混凝土的粘结性能进行了深入的研究。

1 试验概况

1.1 试验方案

试验在西安建筑科技大学结构实验室进行。加载装置为 YES-500 型长柱液压试验机,极限加载能力为 5 MN。为保证构件轴心受压,在加载之前,先找出构件的中心,以确保结果的准确性。为防止核心混凝土发生局压破坏,在加载端与核心混凝土之间放置 1 块尺寸略小于方钢管的刚性垫块,以便传递荷载。

采用推出试验方法,即外力首先加载到核心混凝土上,通过粘结力将荷载逐步传递给钢管,在试件自由端留有一定空隙,以便核心混凝土能够发生相对滑移,见图 1,其中, l 为构件长度。

在试件的两端设置千分表,用来测量加载段与自由端的滑移,在试验前先对方钢管内壁进行人工除锈,然后再涂抹化学药品进一步除锈,以保证钢管内壁光滑。

1.2 材料性质

本次试验钢材选用 Q235 钢,分别在壁厚为 5.5、3 mm 的钢管上截取标准试件,以测量钢材的性质,结果如表 1 所示。

表 1 钢材性质
Tab. 1 Properties of Steel

壁厚/mm	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
5.5	195	0.252	292	418
3.0	182	0.253	285	413

混凝土采用商品混凝土,强度等级为 C60。通过压预留的 6 块尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的混凝土标准试块,得出立方体混凝土的抗压强度标准值为 59 MPa。

1.3 试验结果

本次试验所得结果如表 2 所示。由表 2 可以看出:在相同长细比的情况下,随着钢管宽厚比的增大,构件的粘结强度有较大的提高,而长细比的变化对方钢管混凝土的粘结强度影响较小。

2 影响因素

结合本次试验的结果及各国相关文献可知,构件的宽厚比、含钢率、内壁粗糙程度等是影响粘结强度的主要因素,而混凝土强度等级、长宽比、钢材强度等是影响粘结强度的次要因素。

2.1 宽厚比

根据文献[4]可知,方钢管混凝土的宽厚比对其粘结强度有较大影响,一般随着宽厚比的增大,方钢管混凝土构件的粘结强度降低。本次试验^[5]也验证了这一现象,结果如图 2 所示。估计造成这种现象的原因是:宽厚比越大,则钢管径向刚度越小,外壁越容易发生鼓曲,与核心混凝土之间的粘结强度越低,但也并不是随着宽厚比的增大,粘结强度无限降低。由文献[6]可知:当宽厚比达到 50 时,随着宽厚比的增大,方钢管混凝土构件的粘结强度变化并不明显;当宽厚比小于 20 时,粘结强度增大趋势并不明显。

2.2 长宽比

相关试验^[7]表明:方钢管混凝土的长宽比对其粘结强度有影响,但是粘结强度随长宽比变化的规律尚不明确。图3为粘结强度随长宽比的变化,其

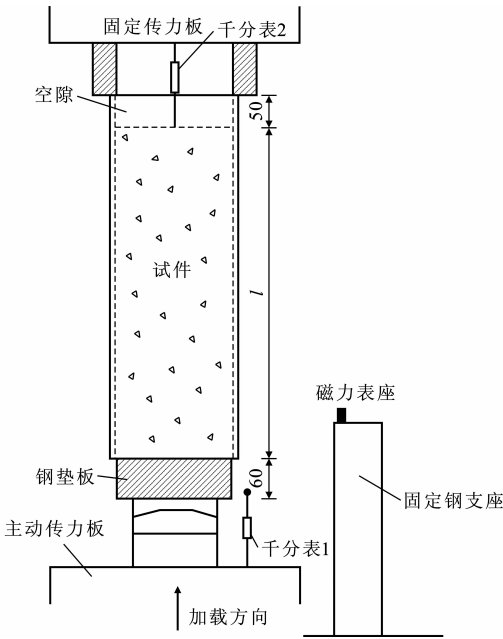


图 1 试验加载装置(单位:mm)

Fig. 1 Test Loading Device (Unit:mm)

试验采用分级静力加载的方式,在没有发生明显滑移之前,每级加载大小约为预估极限荷载的 5%。在滑移增大后,采用缓慢加载方式,直至构件破坏。

表 2 方钢管混凝土构件的平均粘结强度

Tab. 2 Average Bond Strengths of Concrete-filled Square Steel Tube Specimens

试件编号	长度/mm	宽度/mm	壁厚/mm	长宽比	宽厚比	混凝土强度	破坏荷载/kN	平均粘结强度/MPa
CFST1-P	450	150	5.50	3.0	27.3	C60	175.86	0.701
CFST2-P	450	150	3.75	3.0	40.0	C60	91.95	0.362
CFST3-P	450	150	3.00	3.0	50.0	C60	46.37	0.180
CFST4-P	825	150	5.50	5.5	27.3	C60	249.58	0.546
CFST5-P	825	150	3.75	5.5	40.0	C60	121.56	0.254
CFST6-P	825	150	3.00	5.5	50.0	C60	87.85	0.181
CFST7-P	1 050	150	5.50	7.0	27.3	C60	332.23	0.565
CFST8-P	1 050	150	3.75	7.0	40.0	C60	236.80	0.392
CFST9-P	1 050	150	3.00	7.0	50.0	C60	124.86	0.207

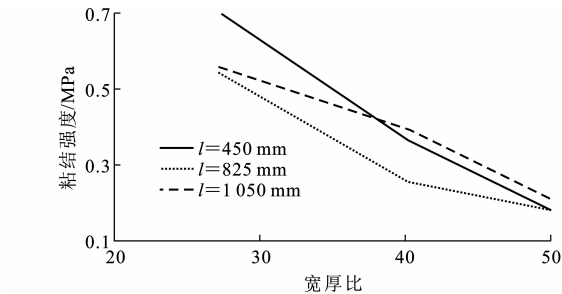


图 2 粘结强度随宽厚比的变化

Fig. 2 Changes of Bond Strengths with Width-thickness Ratios

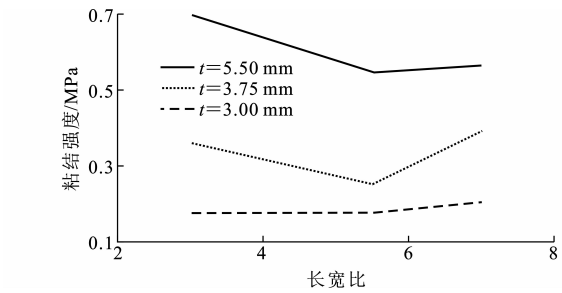


图 3 粘结强度随长宽比的变化

Fig. 3 Changes of Bond Strengths with Slendernesses

中, t 为钢管壁厚。从图 3 可以看出:在不同长细比的情况下,粘结强度的变化规律并不明显。但是根据实际经验可知,方钢管混凝土构件的粘结强度随长宽比的增大而增大,这是因为长宽比越大,构件就越容易发生偏心或弯曲,而偏心或弯曲作用是有利于粘结强度提高的。

2.3 内壁粗糙程度与密实度

方钢管的粘结强度与核心混凝土的密实度、钢管与混凝土之间的界面粗糙程度有关。密实度越好,接触面越粗糙,则钢管与混凝土之间的机械咬合力和摩擦力也越大,而这两者是构成粘结强度的主要组成部分,所以粘结强度也越高^[8-9]。

3 粘结强度公式的推导

以往所做的钢管混凝土粘结强度试验,仅给出了粘结强度的大致范围,而未能对其进行精确的计算,即使给出了计算公式,也是通过对试验数据拟合得到的,离散度较大。本文中笔者结合试验数据与理论分析,推导出了关于方钢管混凝土粘结强度的半经验半理论公式。

3.1 公式推导

根据 9 根方钢管混凝土轴心推出试件所得试验数据可知:在加载初期,剪切粘结强度沿构件长度方向呈指数分布;随着荷载的增加,其在长度方向上的分布趋于均匀;当达到破坏时,呈均匀分布。由于推出力较小,构件大部分还处于弹性状态。

推出试验中,在加载端,荷载由核心混凝土通过剪切粘结强度逐步传给外钢管。在自由端,混凝土几乎不受力或受力很小,推出力几乎全部由钢管承担。混凝土和钢管各自承担的外力是沿构件长度方向呈线性变换的。

考虑到钢管与混凝土各自的横向变形,混凝土的受力状态是从加载端的三面受压和侧面受剪逐步过渡到侧面轻微受拉并受剪,在此过渡范围内,必存在一段混凝土,其受力状态为竖向受压和侧面受剪。在此段混凝土内钢管混凝土的剪切粘结力主要由机械咬合力、化学胶结力和摩擦力构成。由文献[10]可知:在达到粘结破坏状态时,试件滑移较小,剪切粘结力主要由机械咬合力和化学胶结力来提供。此段混凝土四周的薄壁混凝土中微观裂缝不断发展,最后在压力和剪力共同作用下发生破坏,生成磨屑层,粘结强度由摩擦力来提供,并逐步降低。根据文献[11],薄壁混凝土在剪压或剪拉复合状态下的复合抗剪强度 τ 为

$$\tau = \sigma_0 \sqrt{0.009\,81 + 0.112\sigma/\sigma_0 - 0.122(\sigma/\sigma_0)^2} \quad (1)$$

式中: σ_0 为轴压强度; σ 为受拉或受压应力; τ 为在 σ 为一定值时混凝土的最大剪应力, 即复合抗剪强度。

在推出试验中, 视核心混凝土受力端为加载端, 外力由加载端通过剪切粘结强度逐步传递给外钢管, 在距加载端为 x 的位置, 钢管与混凝土各自承担的荷载为

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \tau_u ul - \tau_u ux = \tau_u u(l-x) \\ N_2 &= \tau_u ux \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: τ_u 为剪切粘结强度; N_2 为作用在钢管上的荷载; N_1 为作用在混凝土上的荷载; u 为截面周长。

假设在混凝土与钢管上压应力均匀分布, 其大小分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{N_1}{A_c} \\ \sigma_2 &= \frac{N_2}{A_s} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: A_c 为核心混凝土的截面面积; A_s 为钢管的截面面积; σ_1 为核心混凝土均布压应力; σ_2 为钢管均布压应力。

由于在试验过程中, 推力较小, 试件基本处于弹性工作状态, 其轴向变形分别为

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= \frac{N_1}{E_c A_c} \\ \xi_2 &= \frac{N_2}{E_s A_s} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: ξ_1 为核心混凝土纵向压应变; ξ_2 为钢管纵向压应变; E_c 为核心混凝土的弹性模量; E_s 为钢管的弹性模量。

相应的横向应变分别为

$$\left. \begin{aligned} \xi'_1 &= \nu_1 \frac{N_1}{E_c A_c} \\ \xi'_2 &= \nu_2 \frac{N_2}{E_s A_s} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: ξ'_1 为核心混凝土横向压应变; ξ'_2 为钢管横向压应变; ν_1 为混凝土泊松比; ν_2 为钢材的泊松比。

在混凝土横向压应变与钢管横向压应变相等处, 两者之间横向压力较小或可忽略不计, 即

$$\left. \begin{aligned} \xi'_1 &= \xi'_2 \\ \nu_1 \frac{N_1}{E_c A_c} &= \nu_2 \frac{N_2}{E_s A_s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(2)代入式(6)可得

$$x' = \frac{\nu_1 / (E_c A_c)}{\nu_1 / (E_c A_c) + \nu_2 / (E_s A_s)} l = \Delta_1 l \quad (7)$$

式中: x' 为加载端至混凝土横向压应变与钢管横向压应变相等处的长度。

在 x' 处的混凝土所受压力为 $N'_1 = \tau_u ul(1 - \Delta_1)$, 由此得到 x' 处混凝土所受均匀压力 σ'_1 为

$$\sigma'_1 = \frac{N'_1}{A_c} = \frac{\tau_u ul(1 - \Delta_1)}{A_c} = 4\tau_u \frac{l}{B} (1 - \Delta_1) \quad (8)$$

式中: B 为构件宽度。

在此截面处, 混凝土的受力状态为竖向受压和侧面受剪, 当达到粘结破坏状态时, 混凝土四周的薄壁混凝土在压力与剪力共同作用下发生破坏, 从而导致核心混凝土与钢管壁之间生成磨屑层。此后, 剪切粘结强度由摩擦力提供, 并逐步降低。根据式(9)得出在临界破坏时混凝土界面上的剪应力为

$$\begin{aligned} \tau_u &= f_c \left\{ 0.448 \frac{l - \Delta_1 l}{B} + \left[0.2 \left(\frac{l - \Delta_1 l}{B} \right)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (0.0392 + 0.0766 \frac{l - \Delta_1 l}{B}) \right]^{1/2} \right\} / \\ &\quad \left(2 + 3.904 \frac{l - \Delta_1 l}{B} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: f_c 为混凝土的抗压强度。

3.2 系数调整

式(9)是理想状态下的方钢管混凝土的粘结强度计算公式, 但是实际上构件的长宽比、宽厚比、内壁粗糙程度等因素对其有较大影响, 为此引进系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 。 k_1 为考虑构件塑性发展和保证安全的系数, 取为 $1/7.5$ 。 k_2 为当长宽比大于 6 时的修正系数, $k_2 = (\frac{l}{6B})^{0.5} \geq 1$ 。 k_3 为宽厚比修正系数,

$k_3 = 1 / (\frac{B}{30t})^{1.7}$, 但当宽厚比大于 50 时, 仍取为 50。

根据文献[12], 当 $B = 20t$ 时, 近似取 k_3 为 0.9; 当 $20t < B < 30t$ 时, 线性内插; 当 $B > 20t$ 时, 偏于安全, $k_3 = 0.9$ 。 k_4 为表面粗糙程度系数, 根据文献[8], 建议当钢管表面不做处理且有锈蚀时取为 1.3; 当钢管表面经过手工除锈时取为 1.0; 当钢管表面经过机械除锈或手工除锈后又涂抹化学试剂进一步除锈的取为 0.7; 将涂有润滑油的取为 0.6。

最终粘结力的计算公式可化为

$$\tau = \frac{[l / (6B)]^{0.5}}{7.5 [B / (30t)]^{1.7}} k_4 \tau_u \quad (10)$$

式中: τ_u 按式(9)计算。

文献[13]表明: 对于钢筋混凝土构件, 钢筋与混凝土之间的粘结强度并不与混凝土的立方体抗压强度成正比, 而是与混凝土的抗拉强度大致呈线性关系。由于其抗拉强度近似为抗压强度的 0.1 倍, 因此式(10)也可以写成如下形式

$$\tau = [1.8 (\frac{l}{6B})^{0.5} / (\frac{B}{30t})^{1.7}] k_4 f_t \{ 0.448 \times$$

$$\frac{l-\Delta_1 l}{B}+[0.2(\frac{l-\Delta_1 l}{B})^2+(0.039\ 2+0.076\ 6\ \frac{l-\Delta_1 l}{B})]^{1/2}\}/(2+3.904\ \frac{l-\Delta_1 l}{B})\tag{11}$$

3.3 结果对比

将式(11)的值与本次试验数据相比较,如表 3 所示。由表 3 可以看出:当构件宽厚比较小时,公式

值较精确;但是当宽厚比较大时($B/t>50$),数值偏大。分析其原因是:当宽厚比较大时($B/t>50$),构件的套箍作用明显降低,从而使得摩阻力下降较大,粘结强度降低。但总体来说,试验值与公式的计算结果吻合良好。

将式(11)与文献[4]中的 6 根方钢管混凝土轴心推出试验结果数据相比较,见表 4。从表 4 可以看出:二者吻合良好,这说明式(11)有较好的适用

表 3 本文试验结果与公式计算结果比较

Tab. 3 Comparisons Between Experimental Results in the Paper and Calculated Results of Formulas

试件编号	CFST1-P	CFST2-P	CFST3-P	CFST4-P	CFST5-P	CFST6-P	CFST7-P	CFST8-P	CFST9-P
M_1/MPa	0.701	0.362	0.180	0.546	0.254	0.181	0.565	0.392	0.207
M_2/MPa	0.510	0.300	0.210	0.540	0.320	0.220	0.600	0.360	0.240
$M_2\cdot M_1^{-1}$	0.730	0.830	1.160	0.990	1.240	1.250	1.060	0.910	1.160

注: M_1 为粘结强度试验值; M_2 为粘结强度计算值。

表 4 文献[4]的试验值与公式计算结果比较

Tab. 4 Comparisons of Experimental Values of Reference [4] and Calculated Results of Formulas

试件编号	FG-1	FG-2	FG-3	FG-4	FG-5	FG-6
M_1/MPa	0.48	0.55	0.47	0.49	0.50	0.60
M_2/MPa	0.59	0.59	0.58	0.47	0.47	0.61
$M_2\cdot M_1^{-1}$	1.23	1.07	1.23	0.96	0.94	1.02

性。由于条件限制,本次试验未能对宽厚比 $B/t>50$ 情况下的方钢管混凝土构件粘结强度做进一步研究,相关文献表明,随着试件尺寸的增大,粘结强度会发生变化^[14-23]。

4 结 语

(1)构件宽厚比、内壁光滑程度、养护水平是影响方钢管混凝土粘结强度的主要因素,而混凝土强度、钢材强度、长宽比、龄期等是次要因素。剪切粘结力随宽厚比的增大而呈非线性降低,内壁越粗糙其值越大;当构件长宽比、混凝土龄期增大时,其值变化不大。

(2)依据文献并结合理论分析推导了粘结强度公式,经过验算,与试验结果吻合良好。

(3)方钢管混凝土柱的粘结强度一般较低,为了使这种组合结构能够充分发挥作用,建议设置抗剪连接件来传递外力。

参考文献:

References:

[1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:科学出版社,2001.
ZHAO Hong-tie. Steel and Concrete Composite

Structures[M]. Beijing:Science Press,2001.
[2] MORISHITA Y, TOMII M, YOSHIMURA Y. Experimental Studies on Bond Strength in Concrete Filled Square and Octagonal Steel Tubular Columns Subjected to Axial Load[J]. Transaction of Japan Concrete Institute,1979(1):359-366.
[3] MORISHITA Y, TOMII M, YOSHIMURA Y. Experimental Studies on Bond Strength in Concrete Filled Circular Steel Tubular Columns Subjected to Axial Load[J]. Transaction of Japan Concrete Institute,1979(1):351-358.
[4] 池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结性能的试验研究与有限元分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2004.
CHI Jian-jun. Experimental Study and FEA of the Shear Bond Behaviors at the Interface of Concrete-filled Steel Tube[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology,2004.
[5] 任少华. 方钢管混凝土粘结性能及临界粘结长度的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
REN Shao-hua. Experimental Study on the Bond Properties and Critical Bond Length of Concrete-filled Square Steel Tubes[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology,2008.
[6] 康希良,赵鸿铁,薛建阳,等. 钢管混凝土粘结滑移问题综述分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2006,38(3):321-326.
KANG Xi-liang, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, et al. Summarized Review of the Bond-slip Problems of Concrete Filled Steel Tubes (CFST)[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology:Natural Science Edition,2006,38(3):321-326.
[7] CAMERON B. Bond Behavior in Concrete Filled Tube

- Composite Columns[D]. Seattle: University of Washington, 1997.
- [8] 徐有邻. 变形钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- XU You-lin. Experimental Study on Properties of Bond Deformed Reinforced Concrete [D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [9] 薛立红, 蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(下)[J]. 建筑科学, 1996(4): 19-23.
- XUE Li-hong, CAI Shao-huai. Bond Strength at the Interface of Concrete-filled Steel Tube Columns[J]. Building Science, 1996(4): 19-23.
- [10] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- CAI Shao-huai. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [11] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Principle and Analysis of Reinforced Concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [12] SHAKIR-KHALIL H. Resistance of Concrete-filled Steel Tubes to Pushout Force[J]. The Structural Engineer, 1993, 71(13): 234-243.
- [13] 帕克 R, 波利 T. 钢筋混凝土结构[M]. 秦文钺, 译. 重庆: 重庆大学出版社, 1986.
- PARK R, PAULAY T. Reinforced Concrete Structures[M]. Translated by QIN Wen-yue. Chongqing: Chongqing University Press, 1986.
- [14] VIRDI K S, DOWLING P J. Bond Strength in Concrete Filled Circular Steel Tubes[R]. London: Imperial College, 1975.
- [15] 闫月梅. 多高层钢结构框架的整体稳定分析[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(4): 382-385.
- YAN Yue-mei. Overall Stability Analysis of High-rise Steel Frames[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(4): 382-385.
- [16] 周天华, 郭彦利, 卢林枫, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁节点的非线性有限元分析[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 283-287.
- ZHOU Tian-hua, GUO Yan-li, LU Lin-feng, et al. Nonlinear FEM Analysis of Bearing Capacity Behavior of Concrete-filled Square Tubular Column and Steel Beam Joints[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 283-287.
- [17] 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 Rigidity of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 34-39.
- [18] 王春生, 宋天诣, 冯亚成, 等. 高强钢-混凝土组合梁受力性能分析[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 27-33.
- WANG Chun-sheng, SONG Tian-yi, FENG Ya-cheng, et al. Structural Behavior Analysis of High Strength Steel-concrete Composite Girders[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 27-33.
- [19] 许凯明, 张明中. 大跨径钢管混凝土拱桥主拱混凝土灌注阶段空间稳定分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(12): 66-68.
- XU Kai-ming, ZHANG Ming-zhong. Spatial Stability Research on Concrete Construction Stage of Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(12): 66-68.
- [20] 马生强. 钢筋混凝土墩柱加固滞回耗能试验[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(5): 65-67.
- MA Sheng-qiang. Energy-intensive Test of Reinforced Concrete Pier Column Reinforcing[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(5): 65-67.
- [21] 张淑云, 白国良, 李红星, 等. 钢筋混凝土框架异型节点抗剪承载力研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(2): 170-174.
- ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Anti-shear Capacity of Abnormal Joints of RC Frame[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(2): 170-174.
- [22] 许淑芳, 张兴虎, 王琼梅, 等. 钢筋混凝土空心剪力墙弯剪受力性能试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(4): 465-468.
- XU Shu-fang, ZHANG Xing-hu, WANG Qiong-mei, et al. An Experimental Study on Flexure and Shear Behavior of R. C Hollow Shear Wall[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(4): 465-468.
- [23] 张淑云, 白国良, 朱佳宁, 等. 钢筋混凝土框架异型边节点抗震性能试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(2): 147-150.
- ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, ZHU Jia-ning, et al. Experiment on Seismic Behavior of the Abnormal Exterior Joint of Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(2): 147-150.