

文章编号:1673-2049(2011)03-0029-05

# 大跨度预应力混凝土箱梁桥腹板 抗裂敏感性与配索优化分析

赵启林, 丁 勇, 翟可为

(中国人民解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:**针对各国大量悬浇预应力混凝土箱梁桥出现腹板斜裂缝,且腹板单纯配置竖向索的桥梁比腹板设置下弯索的开裂更为严重的现象,采用敏感性分析方法对单纯采用竖向索和单纯采用下弯索的腹板抗裂性进行了对比分析;针对腹板不仅存在剪应力而且存在竖向拉应力的客观事实,证明了下弯索无法克服腹板竖向拉应力导致的主拉应力,指出腹板进行竖向索与下弯索混合配置的必要性,且推导出了腹板竖向索与下弯索的合理配置比例。结果表明:在其他因素相同的情况下,采用竖向索抗剪的腹板抗裂可靠性明显低于采用下弯索的腹板抗裂可靠性。

**关键词:**斜裂缝;大跨度;预应力混凝土箱梁桥;腹板;敏感性

**中图分类号:**U448.213

**文献标志码:**A

## Analysis of Web Anti-crack Sensitivity and Tendon-collocating Optimization for Long-span Prestressed Concrete Box-girder Bridge

ZHAO Qi-lin, DING Yong, ZHAI Ke-wei

(School of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** The inclined cracks in webs of prestressed concrete box-girder bridge with suspended construction took place frequently, and it was more common in these with pure vertical tendons than those with bending ones. Comparison of web anti-crack property was conducted between them with the method of sensitivity analysis. Bending tendons were proved not to overcome the principal stress due to vertical tensile stress with the fact that vertical tensile stress exists as well as shear in webs. The need of mixed configuration with bending tendons and vertical ones was highlighted, and suitable proportion between vertical and bending tendons was given. The results indicate the webs with bending tendons are more reliable than those with pure vertical ones obviously even under the same condition.

**Key words:** inclined crack; long-span; prestressed concrete box-girder bridge; web; sensitivity

## 0 引言

采用悬臂法施工的预应力混凝土桥梁一般采用悬臂索下弯、设置竖向预应力钢筋或下弯索与竖向

索混合设置 3 种方法来抵消腹板由剪应力产生的主拉应力。但是随着桥梁运营年限的增加,大量该类桥梁出现了挠度过大的现象,且在出现挠度过大的同时必然伴随腹板开裂<sup>[1]</sup>。根据交通运输部公路科

收稿日期:2011-05-02

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(2007AA11Z120)

作者简介:赵启林(1973-),男,江苏淮安人,副教授,工学博士,E-mail:zhaohsq1919@163.com。

学研究院对中国 1980 年以后建造的主跨跨径大于 60 m 的近 180 座混凝土桥梁病害调查发现<sup>[2]</sup>:在单纯配置竖向索的箱梁中跨四分点出现斜裂缝的比例高达 95%,比弯索形式多近 20%。为此大量学者对该现象进行了详细研究,普遍认为竖向索的施工可靠性比较低是导致问题出现的主要原因,因而更多地要求加强竖向预应力索的施工控制,保证竖向有效预应力满足设计要求<sup>[3-5]</sup>,或建议设计中尽量采用下弯索,减少甚至取消竖向索<sup>[6]</sup>。毫无疑问,竖向预应力索的施工可靠性低是导致腹板开裂的主要原因,本文中笔者将从理论上加以说明:即使竖向索与下弯索的施工可靠性一致,单纯采用竖向索的腹板抗裂可靠性本身就低于设置下弯索的腹板抗裂可靠性,因而即使没有施工问题,以上现象也会出现;同时对悬臂施工的大跨度预应力混凝土箱梁桥而言,由于腹板竖向拉应力的客观存在,竖向索的配置又是必不可少的,因此下弯索与竖向索之间存在一个合理配置比例。

## 1 2 种配索方式的可靠性对比分析

在悬浇预应力混凝土箱梁桥中,腹板配索有 2 种典型的方式:一种是悬臂索直线配置;一种是将悬臂索在接近锚固点时进行下弯。悬臂索直线配置是在腹板上单独设置竖向预应力钢筋来抵抗使用状态的剪力(图 1),对应腹板第一主应力  $\sigma_{tp}$  的计算公式为<sup>[7]</sup>

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy}}{2}\right)^2 + \tau_Q^2} \quad (1)$$

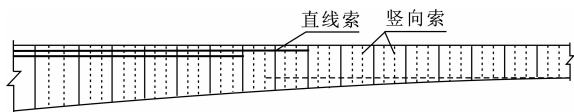


图 1 腹板单纯配置竖向索

Fig. 1 Webs with Pure Vertical Tendons

式中:  $\tau_Q$  为计算主应力点由作用短期效应组合计算的剪力  $Q$  产生的混凝土剪应力;  $\sigma_{cx}$  为计算主应力点由预加力和按作用短期效应组合计算弯矩  $M_s$  产生的混凝土纵向应力;  $\sigma_{cy}$  为竖向预应力钢筋的预加力产生的混凝土竖向压应力。

将悬臂索在接近锚固点时进行下弯可以依靠下弯索的竖向分力来抵抗使用状态下的剪力(图 2),对应腹板第一主应力的计算公式为

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx}}{2}\right)^2 + (\tau_Q + \tau_{Q_y})^2} \quad (2)$$

式中:  $\tau_{Q_y}$  为计算主应力点由预应力弯起钢筋的预剪力  $Q_y$  产生的混凝土剪应力。

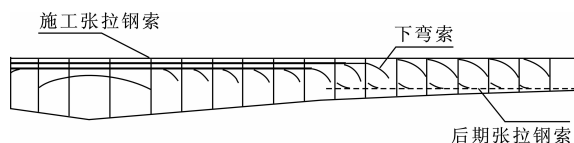


图 2 腹板单纯配置下弯索

Fig. 2 Webs with Pure Bending Tendons

由式(1)可知,腹板仅配置纵向直线索与竖向索时,腹板混凝土第一主应力受到纵向应力、竖向应力与剪应力的共同影响。由于腹板纵向直线索的配索量主要由结构的整体抗弯性能确定,规范 JTG D62—2004 中对其配置标准有详细规定,因而在腹板中性轴附近形成的纵向压应力一般较大并相对固定,大多在 10 MPa 以上。这样竖向应力与剪应力就成为影响腹板主应力的主要变量。腹板第一主应力关于竖向压应力  $\sigma_{cy}$ 、剪应力  $\tau$  的偏导数可分别表示为

$$\frac{\partial \sigma_{tp}}{\partial \sigma_{cy}} = 0.5 + \frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy}}{2} / \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy}}{2}\right)^2 + \tau_Q^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{tp}}{\partial \tau_{Q_y}} = 2(\tau_Q - \tau_{Q_y}) / \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx}}{2}\right)^2 + (\tau_Q - \tau_{Q_y})^2} \quad (4)$$

在结构设计中一般有  $\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy}}{2} > \tau_Q, \frac{\sigma_{cx}}{2} \gg \tau_Q - \tau_{Q_y}$ ,

则有

$$\frac{\partial \sigma_{tp}}{\partial \sigma_{cy}} > 1.207 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{tp}}{\partial \tau_{Q_y}} < \frac{4(\tau_Q - \tau_{Q_y})}{\sigma_{cx}} < 1.2 \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知,在一般结构中恒有  $\frac{\partial \sigma_{tp}}{\partial \sigma_{cy}} >$

$\frac{\partial \sigma_{tp}}{\partial \tau_{Q_y}}$ ,此式的意义为腹板第一主应力对竖向预应力的敏感性比对下弯索预剪应力的敏感性更高。

为了定量说明以上结论符合实际桥梁结构中的应力状态,根据文献[8]中对多座桥梁的分析结果可知,一般桥梁在使用荷载下 1/4 跨附近腹板的剪应力一般在 5 MPa 左右,按照纵向应力在设计范围内分别取 6、10、15、20 MPa,代入式(1)、(2)中,而后在 0~4 MPa 区间变化竖向预压应力与下弯索的预剪应力计算相应的第一主应力,得到第一主应力关于预压应力和预剪应力的关系曲线,见图 3。

由图 3 可以看出,在纵向应力为 6 MPa 的情况下,第一主应力随竖向压应力与随预剪应力的变化规律基本一致,也就是说两者可靠性基本相同。但当纵向应力为 20 MPa 时,第一主应力随竖向压应力与随预剪应力的变化规律有明显差异,第一主应力与竖向压应力基本呈线性关系,而第一主应力与

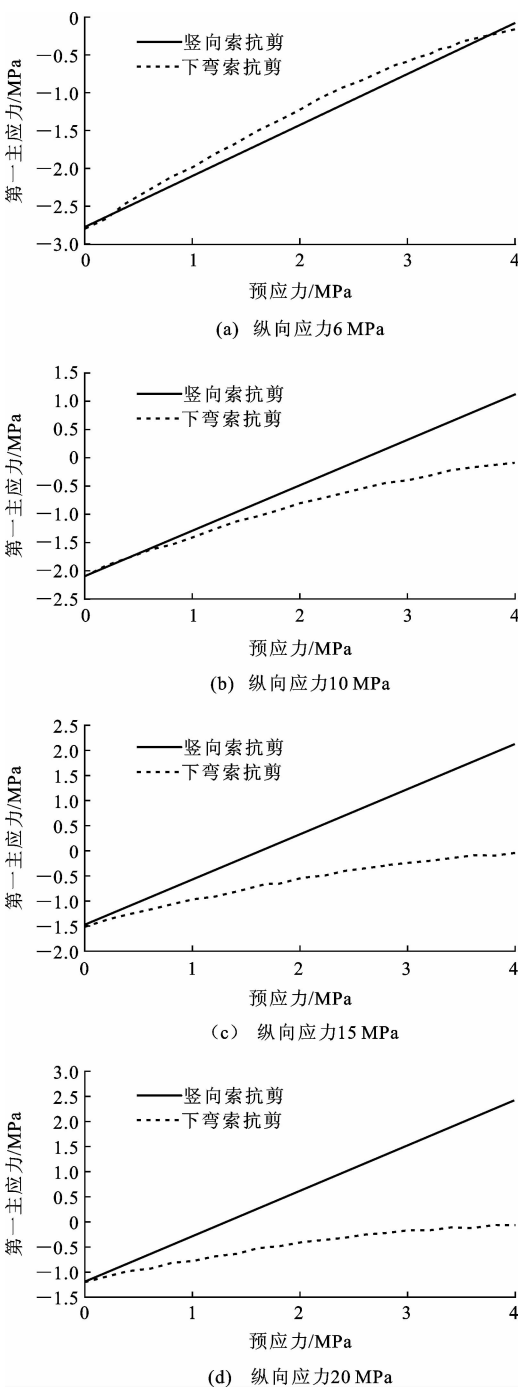


图 3 第一主应力与预应力的关系曲线

Fig. 3 Relations Between the First Principal Stresses and Prestresses

预剪应力则呈非线性关系,所有点的斜率都小于第一主应力与竖向压应力关系曲线的斜率。如果在 2 种配索方式下,腹板设计控制的第一主应力都为 0,而后随竖向索与下弯索预应力损失,第一主应力都降低至拉应力 1 MPa。竖向预应力与下弯索预应力所需的损失值见表 1。由表 1 可以看出,在纵向应力大于 6 MPa、第一主应力降低相同量值的情况下,

表 1 主应力为 0~1 MPa 时预应力所需损失值

Tab. 1 Prestress Loss Values when Principal Stress

Varies from 0 to 1 MPa				MPa
纵向应力值 $\sigma_{cx}$	6	10	15	20
竖向索预应力损失值 $\Delta\sigma_{cy}$	1.5	1.3	1.0	1.0
下弯索预应力损失值 $\Delta\tau_{Q_y}$	1.5	2.4	3.0	3.6

竖向索预应力所需损失值明显小于下弯索。而悬浇的大跨度预应力混凝土箱梁桥的纵向应力一般都在 6 MPa 以上,因此该类桥梁腹板第一主应力对竖向索预应力损失的敏感性明显大于其对下弯索预应力损失的敏感性。

## 2 竖向索的必要性分析

事实上并不是采用下弯索就能提高腹板抗裂可靠性,从腹板竖向应力计算模式的研究<sup>[9]</sup>可知,即使没有竖向预应力索,因受顶板局部锚固效应、顶板索的横向效应等因素的影响,腹板局部会出现较大的竖向拉应力,在最不利组合下甚至可以达到 5 MPa。因此,即使没有竖向索与下弯索,在只有纵向直线索的情况下,腹板第一主应力计算公式也应表示为

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma'_{cy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma'_{cy}}{2}\right)^2 + \tau_Q^2} \quad (7)$$

式中: $\sigma'_{cy}$ 为顶板局部锚固效应、顶板索的横向效应等导致腹板出现的综合竖向应力。

由式(7)可知,腹板竖向拉应力与剪应力一样都会使腹板在第一主应力方向产生拉应力,如果仅依靠纵向下弯索进行第一主应力的控制,则有

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma'_{cy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma'_{cy}}{2}\right)^2 + (\tau_Q + \tau_{Q_y})^2} \quad (8)$$

由于 $(\tau_Q + \tau_{Q_y})^2 \geq 0$ ,于是恒有

$$\sigma_{tp} \leq \sigma'_{cy} \quad (9)$$

式(9)表明,在只有下弯索的情况下,腹板第一主应力恒小于腹板综合竖向应力 $\sigma'_{cy}$ ,即如果腹板综合竖向应力为拉应力( $\sigma'_{cy} \leq 0$ ),则腹板第一主应力一定为更大的拉应力,因此,下弯索无法消除竖向拉应力的效应,只有设置竖向索才可以抵消部分或全部竖向拉应力效应,所以,如果希望控制腹板不出现拉应力或拉应力满足规范 JTG D62—2004 要求,对悬臂施工的大跨度预应力混凝土箱梁桥配置竖向索是必不可少的,腹板应采用下弯索与竖向索混合配置的配索形式。

## 3 竖向索与下弯索的合理配置比例

从前面的分析可知,对于悬浇预应力混凝土箱

梁桥,混合配索是必要的,于是第一主应力的计算公式可以表示为

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cy} + \sigma'_{cy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy} - \sigma'_{cy}}{2}\right)^2 + (\tau_Q + \tau_{Q_y})^2} \quad (10)$$

其运营期的腹板抗裂设计要求为

$$\sigma_{tp} \leq 0.4f_{tk} \quad (11)$$

式中:  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度设计值。

由前面的描述可知,在式(10)中纵向应力  $\sigma_{cx}$  是根据结构整体抗弯设计确定的,在结构整体几何尺寸与纵向配索确定后  $\sigma_{cx}$  也随之确定;  $\sigma'_{cy}$  主要与顶板局部锚固点引起的竖向应力等有关,在结构纵向配索与结构形式确定后  $\sigma'_{cy}$  也随后确定;  $\tau_Q$  是在结构短期作用组合下得到的腹板剪应力,结构整体布置确定后  $\tau_Q$  也是个定值。将式(10)代入式(11)中并取等号,有

$$\frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cy} + \sigma'_{cy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy} - \sigma'_{cy}}{2}\right)^2 + (\tau_Q - \tau_{Q_y})^2} = 0.4f_{tk} \quad (12)$$

可见,式(12)中竖向压应力  $\sigma_{cy}$  与剪应力  $\tau_{Q_y}$  是 2 个待定变量,一个计算公式中有 2 个变量,方程的解不惟一,即为满足腹板抗裂设计式(11)的要求,竖向索与下弯索的混合配置方式可以有若干种可能。在目前的设计中,一般是先根据经验确定下弯索配置方式与数量,而后再根据式(12)来确定竖向索的数量,或根据经验分别确定竖向索与下弯索的数量,而后验算是否满足式(11),因此,目前的设计带有很大的经验性。

从式(6)可知,在  $\tau_{Q_y} \leq \tau_Q$  的情况下,预剪应力越大,腹板抗剪可靠性越高,但为了保证施工期腹板不出现开裂现象,预剪应力必须满足下式

$$\frac{\sigma_{cx}^s}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx}^s}{2}\right)^2 + \tau_{Q_y}^2} \leq f'_{tk} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{cx}^s$  为施工期腹板纵向正应力;  $f'_{tk}$  为施工期混凝土抗拉强度设计值。

于是有腹板的预剪应力为

$$\tau_{Q_y} = \sqrt{f_{tk}^2 - \sigma_{cx}^s f'_{tk}} \quad (14)$$

将式(12)写成预压应力关于预剪应力的表达式,则有

$$\sigma_{cy} = \frac{(\tau_Q - \tau_{Q_y})^2 + 0.4f_{tk}(\sigma_{cx} + \sigma'_{cy}) - \sigma_{cx}\sigma'_{cy}}{\sigma_{cx} - 0.4f_{tk}} \quad (15)$$

于是预剪应力与预压应力可以按照式(14)与式

(15)进行定量的配置。

## 4 结 语

(1) 单纯依靠竖向预应力索进行腹板抗剪设计的预应力混凝土箱梁桥经常出现腹板开裂现象并不是单纯由于竖向预应力施工不可靠导致的,即使竖向索具有与下弯索相同的施工可靠性,竖向索抗裂可靠性也低于下弯索抗裂可靠性,这是采用竖向索的腹板容易出现开裂的主要原因,因此腹板抗剪设计应尽量采用下弯索进行控制。

(2) 纵向索局部锚固效应等因素会导致腹板产生较大竖向拉应力,且下弯索无法抵消竖向拉应力效应,因此在腹板抗裂设计中,竖向索往往是必不可少的。综上所述,桥梁腹板宜采用竖向索与下弯索混合配索的方案。

(3) 为了满足施工期腹板抗裂要求,下弯索预应力取值应该以施工期腹板不出现开裂为原则,竖向预应力与下弯预剪应力的配置量可以按照式(14)与式(15)进行计算,但本文中的结论是建立在按照传统预应力张拉顺序基础上的,不同预应力张拉顺序可能对箱梁腹板受力造成不同影响,还需进一步研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 冯兆祥,赵启林,吉林. 混凝土连续体系桥梁的病害现状[J]. 中国市政工程,2008(3):29-31.  
FENG Zhao-xiang,ZHAO Qi-lin,JI Lin. Existing Hazards on Bridges of Concrete Continuous System[J]. China Municipal Engineering,2008(3):29-31.
- [2] 王国亮,谢峻,傅宇方. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技,2008,25(8):52-56.  
WANG Guo-liang,XIE Jun,FU Yu-fang. Investigation Research on Crack of Long-span Prestressed Concrete Box Girder Bridges in Service[J]. Journal of Highway and Transportation Research on Development,2008,25(8):52-56.
- [3] 陈露晔,吴文明,陈瑶. 箱梁腹板竖向预应力设置新方法研究[J]. 公路交通技术,2007(6):48-51.  
CHEN Lu-ye,WU Wen-ming,CHEN Yao. Research on New Methods for Vertical Pre-stress Setting of Box Beam Webs[J]. Technology of Highway and Transport,2007(6):48-51.
- [4] 陈宇峰,罗玲,王维红,等. PC 连续刚构桥运营阶段箱梁开裂机理及预防措施[J]. 重庆交通大学学报:自

- 然科学版,2007,26(6):43-45,114.
- CHEN Yu-feng, LUO Ling, WANG Wei-hong, et al. Mechanism and Precautionary Measures for Cracking of Pre-stressed Concrete Continuous Box Girder of Continuous and Rigid Frame Bridges in Service Phase [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2007, 26(6): 43-45, 114.
- [5] 顾凯锋, 彭卫. 预应力混凝土连续箱梁桥腹板斜裂缝研究[J]. 公路, 2004(7): 35-38.
- GU Kai-feng, PENG Wei. Research on Inclined Cracks in Webs of Prestressed Concrete Continuous Box-girder [J]. Highway, 2004(7): 35-38.
- [6] 鄢芳华. 悬臂浇注连续箱梁腹板下弯束的设置分析[J]. 北方交通, 2007(12): 41-44.
- YAN Fang-hua. Analysis of Arrangement of Web's Bent-down Tendon of Continuous Box Beam in Cantilever Cast [J]. Northern Communications, 2007(12): 41-44.
- [7] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [8] 潘大荣. 大跨度预应力混凝土桥梁长期变形控制技术研究[D]. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2009.
- PAN Da-rong. Research on Control Technology for Long-term Deformation of Long-span Prestressed Concrete Bridges [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009.
- [9] 吉林, 赵启林, 丁勇. 预应力箱梁桥腹板主应力计算探讨[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 85-90.
- JI Lin, ZHAO Qi-lin, DING Yong. Discuss on Calculation of Principal Stress About Webs of Pre-stressed Box-girder Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 85-90.
- (上接第28页)
- of Composite Walling Under In-plane Shear [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 60(1): 59-83.
- [4] YAMADA M. Steel Panel Encased RC Composite Shear Walls [C]//ASCE. Composite Construction in Steel and Concrete II. New York: ASCE, 1992: 899-912.
- [5] 曹万林, 张建伟, 陶军平, 等. 内藏桁架的混凝土组合低剪力墙试验[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(2): 195-200.
- CAO Wan-lin, ZHANG Jian-wei, TAO Jun-ping, et al. Experimental Study on Low-rise RC Shear Wall with Concealed Truss [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2): 195-200.
- [6] 常卫华, 曹万林, 赵长军, 等. 内藏钢桁架混凝土核心筒抗震试验及计算分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(4): 379-386.
- CHANG Wei-hua, CAO Wan-lin, ZHAO Chang-jun, et al. Experiment and Analysis on Seismic Behavior of RC Composite Core Walls with Concealed Steel Truss [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(4): 379-386.
- [7] 曹万林, 王敏, 王绍合, 等. 高轴压比下钢管混凝土边框组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 85-90.
- CAO Wan-lin, WANG Min, WANG Shao-he, et al. Seismic Behavior Research on Composite Shear Wall with Concrete Filled Steel Tube Columns in High Axial-load Ratio [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 85-90.
- [8] 曹万林, 曾彬, 王敏, 等. 钢管混凝土边框与剪力墙连接键工作性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(5): 603-610.
- CAO Wan-lin, ZENG Bin, WANG Min, et al. Experiment on Working Performance of Connection Constructional Measure Between Concrete Filled Steel Tube Columns and Shear Wall [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(5): 603-610.
- [9] 郭健, 刘伟庆. 钢筋混凝土异形柱框架-短肢剪力墙结构振动台试验与理论分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(5): 610-615.
- GUO Jian, LIU Wei-qing. Shaking Table Test and Theoretical Analysis on RC Frame-short Pier Shear Wall Structure with Special-shaped Columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(5): 610-615.
- [10] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [11] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- HAN Lin-hai, YANG You-fu. Technique of Modern Concrete-filled Steel Tube Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.