

# 用于结构状态判别的PC斜拉桥温度效应

李宏江

(交通部公路科学研究院,北京100088)

**摘要:**温度效应对PC斜拉桥的结构状态判别至关重要。以天津永和大桥的维修为工程背景,分析了PC斜拉桥的温度效应,包括体系温差、索梁温差、主梁温度梯度、索塔温度梯度等对桥面线形、塔顶偏位、索力的影响。根据永和大桥前后2次维修的实测数据,验证了基于现行规范的PC斜拉桥温度效应分析方法的有效性,给出了结构状态判别中温度效应修正的方法和步骤。结果表明,体系温差和索塔温度梯度对塔顶偏位的影响较大,而索梁温差是影响主梁竖向变位的主要因素。尽管运营多年的旧桥结构的刚度退化可能会导致计算结果与相应的实测值出现一定的误差,但将基于现行规范的温度效应计算结果用于既有PC斜拉桥的结构状态判别基本上是可行的,可供同类型桥梁维修设计及施工控制参考。

**关键词:**维修;刚度;PC斜拉桥;结构状态判别;桥面线形;塔位

**中图分类号:**U448.27;U445.7+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)05-0081-05

## Temperature Effect Analysis for structural state Estimation of PC Cable-stayed Bridge

LI Hong-jiang

(Research Institute of Highway, MOC, Beijing 100088, P. R. China)

**Abstract:** The temperature effect was of crucial importance to estimate structural state of existing PC cable-stayed bridges. Taking Yonghe Bridge in Tianjin as a case, the influence of temperature effect, including temperature change of whole bridge, difference in temperature of cable and main girder, temperature Gradient in the transverse section of main girder, and temperature gradient in the transverse section of tower, was analyzed on geometry of bridge deck, inclined displacement at the top of tower and cable force. Based on observation data of Yonghe Bridge during the First and Second maintenance, effectiveness of temperature effect analysis based on the present bride code in China was verified. And then a modifying method of temperature effect in structural state estimation was proposed. It was shown that the temperature change of whole bridge and the difference in temperature of cable and main girder were the main factors to inclined displacement at the top of tower, and the difference in temperature of cable and main girder was the main factor to the deflection of main girder. Although a small error between measured and theoretical results caused by the rigidity deterioration of old bridge, the temperature effect analysis based on the present bride code in China could be feasible in structural state estimation of existing PC cable-stayed bridges and provided reference for maintenance and construction control.

**Key words:** maintenance; rigidity; PC cable-stayed bridge; structural state estimation; geometry of bridge deck; inclined displacement at the top of tower

收稿日期:2009-05-10

基金项目:交通部西部交通建设科技资助项目(200731822340)

作者简介:李宏江(1973-),男,博士,副研究员,主要从事大跨度桥梁结构理论与设计方法研究,(E-mail)hj.li@rioh.cn。

桥面线形、塔位、索力等是在用 PC 斜拉桥结构状态判别的重要参数<sup>[1-2]</sup>,但这些参数大多与温度相关<sup>[3]</sup>,常常耦合在检测结果中,影响到结构状态判别的准确性,如果不能对其进行有效的评价并予以剔除,就会导致结构状态判别失真,甚至可能会误导桥梁管养部门采取不恰当甚至不必要的维修策略,这对旧桥而言危害是相当大的。另外,合理估计温度效应也是既有 PC 斜拉桥维修施工控制的关键<sup>[4]</sup>。该文基于天津永和大桥维修前及维修过程中的实测数据,计算分析其温度效应,并给出它在结构状态判别中的应用方法。

## 1 背景桥概况

天津永和大桥为五孔一联、主孔跨径 260 m、双塔双索面、塔墩固结、连续呈漂浮体系的 PC 斜拉桥(如图 1 所示)。主梁全长 512.4 m,为典型的 P-K 断面形式,梁高 2.0 m,包括风嘴全宽 14.5 m,桥面净宽为 9+2×1.0 m。全桥拉索呈扇型布置,共 44 对,同一索号上、下游各 2 根,全桥拉索合计 176 根。塔高 55.5 m,塔柱斜腿段为型钢骨架混凝土空心柱,主墩为沉井基础,其余墩台为管桩基础,边墩设拉力摆索支座。设计荷载等级为汽-20 级,挂-100,人群荷载为 2.5 kN/m<sup>2</sup>。

该桥于 1987 年 12 月建成通车,后于 2006 年 7 月-2007 年 2 月进行了维修与加固,一方面对失效

的中跨合龙段进行了置换和加固<sup>[5]</sup>,调整了主梁的局部线形<sup>[6]</sup>,另一方面对全桥拉索进行了更换,在保证新旧拉索钢丝数相同的前提下,新换拉索采用了双螺旋线抗风雨振、复合防腐、长寿命成品索,钢丝为  $\Phi 5$  高强度、低松弛、镀锌、平行钢丝,其标准强度  $R_y^b \geq 1\ 670$  MPa,拉索外防护体系选用带隔离层的黑色高密度聚乙烯的双层护套,换索后又对部分新索的索力进行了调整<sup>[7]</sup>。维修加固后的交工验收荷载试验表明,全桥结构性能全面得以改善,桥梁承载能力基本恢复,全桥索力均匀,安全系数满足斜拉桥相关技术规范要求,主跨下挠得以明显缓解,置换后的中跨合龙段应力状态良好,与相邻预制节段之间的接缝的工作性能得到彻底改善<sup>[8]</sup>。2008 年 12 月-2009 年 5 月,该桥又进行了第 2 次维修,维修的原因是由于钢丝锈蚀及超载等因素造成辅助墩拉力摆索断裂,这次维修对辅助墩拉力摆索进行了更换,恢复了原结构的受力体系,同时对发生压溃破坏的南边跨合龙段进行了加固补强,其后拟进行索力调整,以使全桥的结构性能至少达到或接近前次维修后(2007 年 2 月)的技术状态。然而,制定索力调整目标的前提条件就是合理评判当前的结构状态,但由于维修施工周期较长,前后又经过了 2 次,实测数据会受到温度的影响而失去比较的同一性。如果结构状态评判不合理,会影响到二次维修中待进行的索力调整的方案和幅度,甚至会导致结构状态进一步恶化。

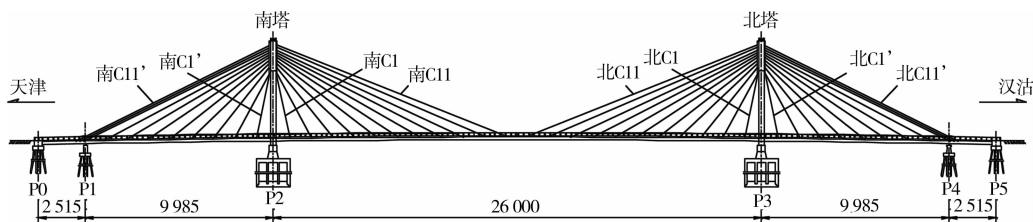


图 1 永和大桥总体布置/cm

## 2 永和大桥的温度效应计算

### 2.1 温度效应分析方法及相关规定

PC 斜拉桥的温度场及其变化规律不仅受到季节性温差的影响,而且也因日照温差的作用而使得组成斜拉桥的主梁、索塔、拉索等构件之间也存在温差,当然这主要是与不同材料的传温性能及构件的方位不同有关<sup>[9-10]</sup>。为了便于计算分析,通常把斜拉桥的温度作用分解为体系温差(升温或降温)、索梁温差、主梁温度梯度、索塔温度梯度等 4 种情况考虑<sup>[11]</sup>。

文献<sup>[11]</sup>规定,对于体系温差,可按当地情况而

定;对于索梁温差,可采用  $\pm(10\sim 15\text{ }^\circ\text{C})$ ;对于索塔左右侧面温差,可采用  $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ ;对于混凝土主梁上下缘温差,可采用  $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 。当然,如果有实测资料,可根据实测情况进行调整。

### 2.2 永和大桥温度效应计算结果

利用平面杆系分析程序(Dr. Bridge)建立计算模型,由于该桥桥面较窄,主梁刚度相对较柔,因此选用单主梁鱼骨刺模型<sup>[12]</sup>。其中,主梁为预应力混凝土单元,索塔为钢筋混凝土梁单元,拉索采用索单元模拟,全桥划分主梁单元 160 个,索塔单元 34 个,索单元 44 个,考虑纵向和竖向预应力钢筋以及混凝土的收缩徐变效应。桥台及辅助墩处约束主梁竖向

位移,塔墩底部固结。计算模型如图 2 所示。



图 2 平面杆系有限元模型

根据 2007 年 2 月第 1 次维修后和 2009 年第 2 次维修索力调整前在同 1 时段(早晨太阳出来之前)的桥面线形、塔位、索力的测试平均温度确定前后 2

次结构的体系温差为 25 °C (2009 年第 2 次维修索力调整前的测试温度比 007 年 2 月第 1 次维修后的测试温度高,即体系升温 25 °C)。其它温度作用取用均参照文献[11]。

各种温度作用引起的主梁纵向位移、塔顶偏位以及索力变化如表 1 所列。其中索力增量百分比为温度作用产生的索力变化占设计恒载索力的百分率。各种温度作用产生的主梁竖向变形如图 3 所示。

表 1 温度作用对永和大桥结构性能的影响

工况	主梁梁端纵向变形/cm	主梁竖向变形/cm		塔顶水平位移值/cm	索力增量百分比
		最小下挠	最大上拱值		
体系升温 25 °C	-6.37	-0.5	0.9	-3.36	-0.4%
主梁上、下缘温差 5 °C	-0.90	-0.4	1.9	-0.9	-0.3%
索梁温差 15 °C	-0.60	-8.3	0.7	1.71	0.4%
索塔左右侧温差 5 °C	1.84(南侧); -1.84(北侧)	-0.4	0.6	2.16(南塔); -2.16(北塔)	±0.2%

注:主梁梁端纵向位移以向河侧为正,主梁竖向变形以向上为正,塔顶水平位移以向河侧为正,索力增量百分比以索力增大为正。

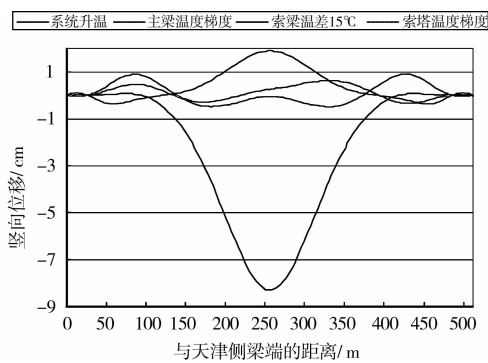


图 3 温度作用引起的主梁竖向变形

永和大桥的温度效应计算结果表明,各种温度作用对桥跨结构性能的影响是有所差异的。由表 1 可以看出,对于主梁的纵向变形,体系温差影响最为明显,索塔温度梯度次之,而主梁温度梯度和索梁温差影响均较小;对于塔顶偏位而言,体系温差影响较大,索塔温度梯度和索梁温差次之,主梁的温度梯度影响最小;对于索力,各种温度工况对其影响均较小,即使各种温度作用效应组合起来亦不会超过 3%,因此,该桥的索力测试即使不考虑温度的影响,也不会有太大的误差。由表 1 和图 3 均可看出,对于桥面线形(即主梁的竖向变形)而言,索梁温差效应最为显著,主梁温度梯度次之,而体系温差及索塔温度梯度对桥面线形的影响最小。

2.3 实测验证

图 4 示出了永和大桥 1 d 当中早晨和中午的实测线形,观测日期 2009 年 5 月 24 日。中午温度较

高,与早晨温差 15 °C。与早晨相比,中午的桥面线形变化主要表现为主跨下挠,跨中下挠量最大,为 10.3 cm,根据前述分析结果,可以认为主要是由索梁温差造成的(其引起的主跨跨中下挠量达 8.3 cm)。计算下挠量与实测值之间存在的差异,主要有 2 方面因素:1)与早晨相比,中午的结构温度场耦合了体系温差、主梁温度梯度以及索塔温度梯度的影响,尽管索梁温差效应是主要的。2)运营 20 a 有余的老桥又先后经过 2 次维修其桥跨整体刚度的降低也是事实,若依据文献[13],将主梁刚度按开裂情况考虑折减为原设计刚度的 85%,则主跨跨中下挠量为 9.8 cm,与实测值进一步接近。

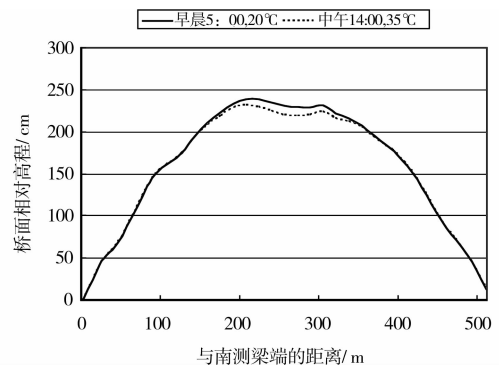


图 4 永和大桥 1 天当中早晨和中午的桥面线形

相比于早晨,中午时的塔位变化量为南塔 1.2 cm,北塔 2.2 cm,均向河侧倾斜,南北塔均向河侧倾斜是由于索梁温差的作用,而倾斜量不同是受到索塔

温度梯度的作用,与日照角度、索塔方位有关。从实测结果来看,中午时,塔顶偏位同时受到索塔温度梯度、索梁温差以及主梁温度梯度等的综合作用,其耦合效应的影响要比桥面线形高,因此,很难用计算值进行估计,这也是塔位测量尽可能选择在早晨的原因所在。

### 3 温度效应修正在结构状态判别中的应用

永和大桥的 2 次维修是以前次维修后(即 2007 年 2 月)的技术状态为参照的,而索力调整是达到这一状态的重要调控手段。但索力调整目标必须在充分掌握结构当前状态及其与 2007 年维修后的状态之间的差异的基础上合理确定。结构当前的检测结果(包括桥面线形、塔位及索力等)与 2007 年维修后的状态之间的差异除了结构性的变化(如结构刚度退化、结构重量变化等)外,还包含了温度效应的影响。因此,必须予以剔除才能真实反映结构性的变化。

#### 3.1 塔顶偏位

表 2 列出了永和大桥前后 2 次塔位的观测结果,从观测时段及天气状况来判断,温度效应主要考虑体系温差修正。由表 2 可以看出,考虑温度修正后南北塔均向河侧倾斜了 5 cm 以上,而不考虑温度修正时南北塔平均向河侧倾斜仅 2.0 cm 左右,可见,是否考虑温度修正对塔位的判断有显著差异,这会直接影响到索力调整幅度,对索力调整方案有着重要的影响。

表 2 永和大桥第 1 次维修后与 2 次维修索力调整前的实测塔顶偏位

结构状态		前次维修后(2007 年 2 月 10 日, 6:50, 晴, -2℃)	本次维修索力调整前(2009 年 5 月 19 日, 6:00, 晴, 23℃)	系统升温 25℃	塔顶位移变化量	
		①	②		③	②-①
塔顶偏位/cm	南塔	0.8	2.6	-3.36	1.8	5.2
	北塔	0.1	2.3	-3.36	2.2	5.6

注:塔顶位移变化以向河侧倾斜为正。

#### 3.2 桥面线形

表 3 列出了永和大桥前后两次桥面线形的观测结果,从观测时段及天气状况来判断,温度效应主要考虑体系温差修正,表 3 给出了计入了体系温差影响后的桥面线形变化量。

表 3 永和大桥第 1 次维修后与 2 次维修索力调整前的实测桥面线形

高程测点与南侧梁端的距离/m	第 2 次维修后测点高程(2007 年 2 月 10 日,早晨 5:00~7:00, 晴, -2℃)/cm	2 次维修索力调整前测点高程(2009 年 5 月 19 日,早晨 5:00~7:00, 晴, 23℃)/cm	系统升温 25℃/cm	桥面线形变化/cm
	①	②	③	②-①-③
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
12.617	23.1	23.5	0.0	0.4
25.190	43.3	45.8	0.0	2.5
37.652	60.3	59.9	0.2	-0.4
50.067	79.0	76.1	0.4	-2.9
62.554	101.3	100.6	0.7	-0.7
75.025	123.2	123.8	0.8	0.6
87.489	143.0	144.7	0.9	1.6
99.954	154.9	156.9	0.8	2.0
112.427	164.1	165.3	0.5	1.2
125.015	173.8	174.5	0.3	0.7
141.399	192.9	194.2	-0.1	1.3
157.539	209.0	210.7	-0.4	1.7
173.770	222.1	223.1	-0.5	1.0
190.010	233.8	233.9	-0.5	0.1
206.278	238.0	239.0	-0.4	1.0
222.533	238.9	239.4	-0.2	0.5
238.777	235.4	235.6	-0.1	0.2
255.023	232.6	231.7	-0.1	-0.9
271.303	230.0	230.4	-0.1	0.4
287.569	229.2	229.8	-0.2	0.6
303.790	230.8	231.8	-0.4	1.0
320.032	220.7	222.4	-0.5	1.7
336.255	213.7	216.1	-0.5	2.4
352.495	204.4	207.8	-0.4	3.3
368.731	192.7	195.9	-0.1	3.2
384.774	179.0	183.3	0.3	4.4
397.343	168.8	173.3	0.6	4.5
409.885	154.4	159.0	0.8	4.7
422.377	137.6	143.1	0.9	5.5
434.856	119.4	124.3	0.8	5.0
447.342	99.7	104.2	0.7	4.5
459.841	82.2	85.9	0.4	3.8
472.311	67.8	71.4	0.1	3.6
484.807	49.4	53.5	0.0	4.2
497.386	30.2	35.1	0.0	5.0
509.970	7.7	12.4	0.0	4.7

注:前后 2 次桥面线形观测均基于同一测量控制网。

鉴于体系温差对桥面线形影响较小,实际应用中  
对体系温差的修正可视桥梁跨度大小而定。从桥  
面线形的变化来看,由于基本上剔除了温度的影响,  
线形变化则可认为是由于前次维修后运营因素、本  
次维修所采取的施工措施(如恢复结构体系、修复边  
跨合龙段等)等结构性因素以及测量的系统偶然误  
差等所造成的,总体上来看,桥面线形变化不大。

#### 4 结 论

通过对永和大桥的温度效应计算及维修过程中  
实测数据分析,可以得到如下结论:

1)对于像永和大桥这样的双塔双索面漂浮体系  
PC斜拉桥,桥面线形、塔位等变形指标受温度影响  
较大,而索力受温度影响相对较小,可忽略不计。主  
梁的纵桥向变形和塔顶偏位受体系温差影响较大,  
而1天当中的主梁竖向变形,特别是主跨挠度主要  
是由于索梁温差所致,主梁温度梯度对桥面线形的  
影响不大,索塔的温度梯度会影响到2个塔的塔顶  
偏位的不对称性。

2)严格来说,既有PC斜拉桥的温度变形是由  
体系温差、索梁温差、主梁温度梯度以及索塔温度  
梯度综合作用的结果,四者耦合在一起。尽管现行  
规范中的温度计算模式还有待进一步完善<sup>[14-15]</sup>,但  
基于现行规范将几种效应相互分离、分别计算,找  
出各自的影响规律和影响程度对实际工程现象进行  
分析的方法基本上是可行的。永和大桥的实测数据  
分析结果表明,这种方法能够满足工程的精度要求,  
从而能够实现对结构状态的判别。

3)既有PC斜拉桥的实测资料较多,既有原  
设计或原竣工线形(或塔位),又有历次检测线形(或  
塔位),结构状态的实际变化取决于对这些指标判  
别的有效性。只有对受温度影响相对较大的结构变  
位予以剔除,才能彰显结构性的变化,以便对旧桥  
结构进行有效的把握。该文基于温度效应的计算分  
析为永和大桥结构状态的判别提供了技术处理手  
段,为下一步索力调整目标的确立提供了必要的依  
据,可供同类型桥梁维修加固设计及施工控制参  
考。

#### 参考文献:

- [1] TESAR A, MELCER J. Structural monitoring in advanced bridge engineering[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008,74(11): 1670-1678.
- [2] GUAN-YONG ZHANG, ZHI-JUN ZHANG, CHAD FISCHER. Structural health monitoring of a long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007,18(8): 835-843.
- [3] 李盼到,朱巍志,郭慧乾.大跨度混凝土斜拉桥温度效应的研究与分析[J].特种结构,2007,24(1):76-80.  
LI PAN-DAO, ZHU WEI-ZHI, GUO HUI-QIAN. Study and analysis of temperature effects on long-span concrete cable-stayed bridge[J]. Special Structures, 2007,24(1):76-80.
- [4] 陈常松,颜东煌,程海潜,等.大跨度PC斜拉桥施工控制中的温度效应分析[J].公路交通科技,2002,19(6): 84-87.  
CHEN CHANG-SONG, YAN DONG-HUANG, CHEN HAI-QIAN, et al. Analysis of temperature influence on long-span prestressed concrete cable-stayed bridge construction control[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(6):84-87.
- [5] 李宏江,李万恒,张劲泉,等.既有PC斜拉桥合龙段拆除的施工控制[J].公路交通科技,2008,25(8):61-66.  
LI HONG-JIANG, LI WAN-HENG, ZHANG JIN-QUAN, et al. Construction control for removal of the closure segment in an existing prestressed concrete cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2008,25(8): 61-66.
- [6] 李宏江,李万恒,张劲泉,等.既有PC斜拉桥的主梁桥面线形调整实践[J].铁道建筑,2009,39(5):3-6.  
LI HONG-JIANG, LI WAN-HENG, ZHANG JIN-QUAN, et al. Adjustment for deck alignment in an existing prestressed concrete cable-stayed bridge [J]. Railway Engineering, 2009,39(5):3-6.
- [7] 李宏江,王江,张永明,等.天津永和斜拉桥换索后的索力调整[J].公路交通科技,2008,25(10):79-83.  
LI HONG-JIANG, LI WAN-HENG, ZHANG JIN-QUAN, et al. Cable force adjustment after cable replacement for Tianjin Yonghe Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2008,25(10):79-83.
- [8] 李宏江,李万恒,张劲泉,等.天津永和大桥的维修与加固[J].世界桥梁,2009,37(1):53-56.  
LI HONG-JIANG, LI WAN-HENG, ZHANG JIN-QUAN, et al. Rehabilitation and Strengthening of Yonghe Bridge in Tianjin[J]. World Bridges, 2009,37(1):53-56.
- [9] ZHAO-DONG XU, ZHI-SHEN WU. Simulation of the effect of temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge [J]. Structural Health Monitoring, 2007,6(3): 177-189.

(下转第105页)

- database of fields studies [J]. *Ashrae Transactions*, 2000, 38(2): 485-492.
- [11] WONG N H, FERIADI H, LIM P Y, et al. Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore [J]. *Building and Environment*, 2002, 37(2): 1267-1277.
- [12] 黄恒栋, 谯京旭. 夏热冬冷地区建筑节能设计标准的商榷-建筑热环境与节能研究(七) [J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(5): 13-18.  
HUANG HENG-DONG, QIAO JIN-XU. A deliberation in design standard for energy efficiency of buildings in hot-summer and cold-winter zone [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, 27(5): 13-18.
- [13] MUI K W H, CHAN W T D. Adaptive comfort temperature model of air-conditioned building in Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 2004, 38(2): 837-852.
- [14] 黄继红, 张毅, 郑卫锋. 江浙地区传统民居节能技术研究 [J]. *建筑学报*, 2005, 9: 22-23.  
HUANG JI-HONG, ZHANG YI, ZHENG WEI-FENG. Study of energy-saving techniques in traditional folk house in the areas of Jiangsu and Zhejiang [J]. *Architectural Journal*, 2005, 9: 22-23.
- [15] 罗明智, 李百战, 徐小林. 重庆夏季教室热环境研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(1): 88-91.  
LUO MING-ZHI, LI BAI-ZHAN, XU XIAO-LIN. Research on classroom thermal environment during the summer in Chongqing [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, 27(1): 88-91.
- [16] GRIFFITHS I. Thermal comfort studies in buildings with passive solar features: field studies report to commission of the European Community [R]. ENS 35909, UK, 1990.
- [17] ISMAIL M. BUDAIWI. An approach to investigate and remedy thermal-comfort problems in buildings [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(5): 2124-2131.
- [18] MC CARTNEY K J, NICOL J F. Developing an adaptive control algorithm for Europe [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(1): 623-635.
- [19] MILNE GR. The energy implications of a climate-based indoor air temperature standard [C]//Standards for Thermal Comfort-Indoor Air Temperature Standards for the 21st Century, 1995: 182-189.
- (编辑 王秀玲)

(上接第 85 页)

- [10] BARR P J, STANTON J F, EBERHARD M O. Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(2): 186-194.
- [11] JTJ/T D65-01-2007 公路斜拉桥设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Professional and Propositional Standard of the People's Republic of China. JTJ/T D65-01-2007, Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] WEI-XIN REN; YOU-QIN LIN; XUE-LIN PENG. Field load tests and numerical analysis of Qingzhou Cable-stayed Bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, 12(2): 261-270.
- [13] JTJ 023-85 公路钢筋混凝土及预应力桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.  
Code of Communications Ministry of P. R. China. JTJ023-85, Specifications for Design of Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Highway and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 1985.
- [14] 郭棋武, 方志, 裴炳志, 等. 混凝土斜拉桥的温度效应分析 [J]. *中国公路学报*, 2002, 15(2): 48-51.  
GUO QI-WU, FANG ZHI, PEI BING-ZHI, et al. Temperature effect analysis of concrete cable-stayed bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(2): 48-51.
- [15] 杨继. 斜拉桥箱梁温度场及温度效应的研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.  
YANG JI. Research on temperature field and temperature effect of box girder P. C. cable-stayed bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007.
- (编辑 胡玲)