doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.04.017

斜拉桥施工维修加固全过程控制分析

邹泽西[1]，陈云海[2]
（1. 中国路桥工程有限责任公司，北京 100011；2. 交通运输部公路科学研究院，北京 100088）

摘要： 以某PC斜拉桥维修工程为背景，用GQJS软件研究对斜拉桥施工维修加固全过程模拟计算分析问题。根据全桥拉索索力、桥面线形、塔位、主梁混凝土应力和支座脱空等结构参数模拟维修前结构的实际状态，根据桥梁结构的病害状况对结构参数进行修正，模拟分析维修加固过程截面削弱和恢复、黏贴钢板、张拉体外预应力补强钢筋以及索力调整等施工工况。给出了维修后的结构在运营阶段中的计算分析结果。监测结果表明，维修加固后，主梁线形调整最终达到了预期目标，拉索索力更趋于均匀，维修过程中主梁混凝土应力、塔位以及摆索拉力的变化均在控制范围内，这说明了维修加固的施工控制达到了预期目标，同时保证了结构的安全。

关键词： 桥梁工程；斜拉桥；GQJS；维修加固；施工控制；结构分析；结构参数
中图分类号： U448.27 **文献标识码：** A **文章编号：** 1002-0268（2014）04-0100-06

Analysis of Controlling Cable-stayed Bridge in the Whole Process of Construction and Maintenance

ZOU Ze-xi[1], CHEN Yun-hai[2]
(1. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China;
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the maintenance project of a PC cable-stayed bridge, the simulation analysis of cable stayed bridge in the process of construction, maintenance and strengthening is conducted using the GQJS software. The status of the structure before maintenance is simulated according to the parameters of cable forces, alignment of finished bridge, displacements at top of pylons, concrete stress of main girder and bridge seat connection failure. The structure parameters are corrected according to the defect of bridge structure. The weakening and recovering of sections, bonding steel plates, strengthening by external tendons and adjustment of cable forces during maintenance are stimulated. The corresponding calculation result of this bridge in service stage after maintenance is presented. The monitoring result shows that (1) the improved alignment of its main girder meet expectations after maintenance, and the force distribution of all stay cables tended to be more uniform; Therefore, these results illustrated, the desireed structural goals of the construction control work of maintenance and reinforcement has been achieved well; (2) all the changes of the concrete stresses in main girder, the displacements at top of pylons, the cable forces of tension rocker bearing in maintenance are in the permitted range. Therefore, the desired structural goals were achieved in the construction control of stay cable force adjustment, and the structural safety is ensured.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; GQJS; maintenance and strengthening; construction control; structural analysis; structure parameter

收稿日期： 2013-07-11
作者简介： 邹泽西（1983-），男，北京人.（jerseyzou@163.com）

0　引言

目前，我国是世界上建造预应力混凝土斜拉桥（简称 PC 斜拉桥）数量最多的国家之一。由于结构耐久性等问题，有部分 PC 斜拉桥在通车运营一段时间后，结构的受力状态偏离原设计状态[1]，导致结构的混凝土开裂、主跨下挠、拉索的腐蚀退化、拉力摆索局部构件失效等病害产生，因此 PC 斜拉桥维修加固已成为工程中的热点问题，由此使得各种维修加固技术不断丰富，采用许多新的加固方法和措施。本文结合某 PC 斜拉桥维修工程，介绍如何使用桥梁结构设计软件对该斜拉桥从建设施工到维修加固施工全过程的精细化模拟计算分析技术。实测结果表明，维修加固后，主梁线形调整最终达到了预期目标，拉索索力更趋于均匀，维修过程中主梁混凝土应力、塔位以及摆索拉力等的变化均在控制范围内，实测结果与计算分析结果吻合的较好，维修加固达到了预期目标，保证了桥梁加固后结构的安全。

1　工程概况

国内某 PC 斜拉桥为五孔一联，主跨跨径为 260 m，双塔双索面、塔墩固结、连续漂浮体系的预应力混凝土斜拉桥，如图 1 所示，该桥全长 512．4 m，跨径布置为 25．15 m＋99．85 m＋260．0 m ＋ 99．85 m＋25．15 m。主梁梁高 2．0 m，包括风嘴总宽 14．5 m，塔高 55．5 m，主梁截面如图 2 所示，全桥拉索呈扇形布置，共 44 对，同一索号上、下游各 2 根，全桥拉索合计 176 根。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。全桥墩台编号由南向北依次为 P_0（桥台）、P_1（边墩）、P_2（桥塔）、P_3（桥塔）、P_4（边墩）、P_5（桥台），其中 P_1、P_4 辅助墩位置均设摆索拉力支座。设计荷载等级为汽－20 级，挂－100，人群荷载为 2．5 kN/m^2，地震烈度八度，原桥于 1987 年 12 月建成通车，运营至今已经有 25 a。

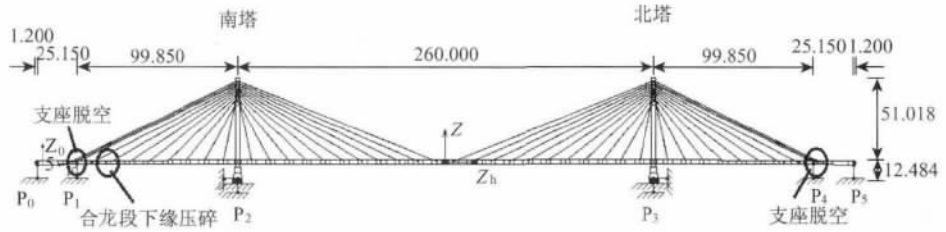

图 1　PC 斜拉桥立面布置图（单位：m）

Fig. 1　Elevation of a PC cable－stayed bridge（unit：m）

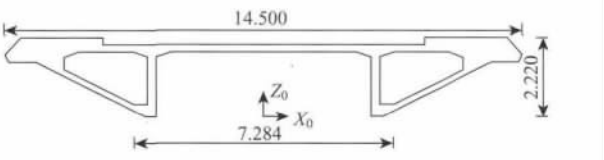

图 2　主梁标准预制节段横断面示意（单位：cm）

Fig. 2　Standard section of precast segment of main girder（unit：cm）

2005 年检测时发现该桥中跨合龙段开裂损坏、主梁下挠、拉索锈蚀、桥面铺装破损。2006 年该桥进行了维修与加固，包括拆除中跨合龙段、主梁线形调整、重建新的中跨合龙段、桥面铺装翻新、更换全桥拉索等。2008 年南侧边跨合龙段混凝土下缘出现挤压破坏迹象，辅助墩摆索拉力支座的摆索断裂，辅助墩支座与梁体脱空，全桥预制节段接缝处的封缝混凝土剥落，环氧树脂老化，接缝工作状况恶化，部分主要病害如图 1、图 3 所示。摆索拉力支座的摆索断裂后，桥跨结构受力体系发生了变化，针对上述病害情况，2008 年底再次对该桥梁进行维修。本文主要介绍该桥维修加固控制过程技术研究和维修前后的对比分析结果。

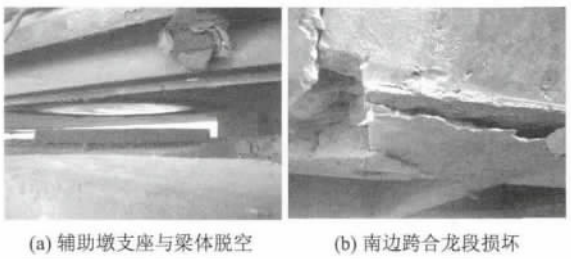

图 3　维修前主要病害照片图

Fig. 3　Defects photos before maintenance

2　结构状态模拟

第 2 次维修加固前，首先要模拟原设计施工计算过程和第 1 次加固过程结构的内力位移变化情况，

要使其计算结果与实测结果基本吻合，然后再模拟第2次维修前的结构状态：辅助墩拉力摆索失效(拆除辅助墩支座)、南边跨合龙段开裂下缘挤压破坏(截面削弱)、全桥预制节段接缝工作状况恶化(抗弯弹性模量降低)等状态，要使计算结果与第2次维修前结构状态的实测结果基本吻合，即主梁中跨下挠达12.7 cm，边跨上挠，南北塔塔顶位移分别向河侧倾斜6.7 cm、5.4 cm。造成前述病害的根源是拉力摆断裂后，桥跨结构受力体系发生了变化(5跨变3跨)。

(1) 辅助墩拉力摆索断裂支座脱空的模拟方法

对于辅助墩摆索拉力支座的摆索断裂支座脱空的状况，建模时采用拆除辅助墩支座单元来考虑。此时由于拉力摆断裂后全桥结构的受力体系进行内力重分布，为了模拟拉力摆断裂前后内力变化的结构状态，即通过斜拉索索力调整使斜拉索索力逼近当前的实测索力值，同时必须兼顾以桥面线形和塔顶位移的检测结果，使模拟计算的桥面线形、塔顶位移以及索力尽可能逼近检测结果[2]，如图4所示。

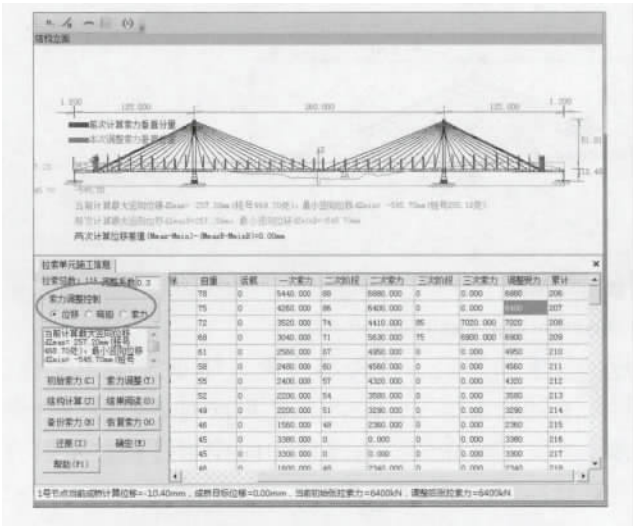

图4 维修前桥梁状态模拟的计算软件界面

Fig. 4 Interface of software for simulating state of bridge before maintenance

(2) 截面削弱的模拟方法

为模拟南边跨合龙段混凝土下缘被挤压破坏的状况，建模时把南边跨合龙段截面压坏的单元划分为上下2个单元，节点共用。上单元用于模拟截面削弱后的残留部分，下单元用于模拟截面削弱部分。通过单元的拆除和安装模拟截面局部挤压破坏和修复，而后当计算到运营阶段时上、下2个单元合并形成组合换算截面单元，运营阶段的结构计算采用一个合并后的组合换算截面单元计算。这种模拟方法很好地解决了合龙段混凝土下缘被挤压破坏和修复过程结构内力应力的变化过程[3-4]。

(3) 单元抗弯弹性模量随时间变化模拟计算方法

全桥主梁预制节段接缝材料老化、结构受损状况恶化采用抗弯弹性模量降低折减的方法模拟[3]。结构状况恶化之前主梁预制节段混凝土抗弯弹性模量按文献[5]第5.2.28条规定全预应力混凝土构件进行折减，即弹性模量折减系数为0.85(0.85×35 000=29 750 kPa)，结构状况恶化后混凝土抗弯弹性模量按文献[5]第4.2.1条规定的钢筋混凝土构件开裂截面进行折减，即弹性模量折减系数为0.67，当全桥主梁预制节段接缝材料修复并黏贴钢板后，混凝土抗弯弹性模量还是按常规的0.85进行折减。这样可以模拟斜拉桥施工、运用、损坏和加固全过程预应力混凝土箱梁材料逐步恶化及修复的结构特征。

3 维修施工控制过程

通过模拟第2次维修前的结构状态，要使其计算结果与第2次维修前结构状态的实测结果基本吻合，然后实时跟踪第2次维修施工过程中结构受力变形状态，模拟恢复拉力摆索、边跨合龙段复位、截面增大补强、张拉体外束、索力调整、裂缝补强以及黏贴钢板等施工工况，并要在施工过程中根据实测结果进行计算参数识别和计算模型修正，使计算结果与实测情况尽可能吻合。可见斜拉桥加固施工控制计算分析工作较新桥设计或施工监控难度要大得多。

(1) 维修工序

该桥维修加固的主要施工工序：施工前结构初始状态调查－恢复南侧辅助墩摆索拉力支座－恢复北侧辅助墩摆索拉力支座－南边合龙段增大截面法补强－张拉无黏结体外束预应力－索力调整－主梁预制节段接缝黏贴钢板补强。

(2) 温度效应作用修正

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，也因日照温差的作用使得组成斜拉桥的主梁、索塔、拉索等构件之间存在温差，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[6]。通过温度作用计算结果表明，各种温度作用对桥梁结构性能的影响是有所差异的，因此对于每个施工工序，要考虑体系温差、主梁上下缘温差、索梁温差以及索塔温差的影响，特别是对主梁线形

和塔顶偏位的监测结果进行修正，剔除温度效应作用的影响才能真实反映施工控制过程中结构特性的变化。

(3) 恢复辅助墩摆索拉力支座施工过程模拟计算方法

施工控制中采用水箱压重法消除主梁底面与辅助墩支座顶面之间的脱空距离，按先恢复南侧辅助墩摆索拉力支座后再恢复北侧辅助墩摆索拉力支座的施工顺序进行。压重实施时分期逐步加载，并实时观测分析，一期压重总重为 300 kN，主要是要消除压力支座的脱空距离和改善开裂断面应力分布，一期压重完成后立即将临时支撑顶紧梁体。然后继续压重，使合龙段上下位置相对稳定，以防止温度变化造成开裂断面上下浮动，减少浮动对加固施工作业和加固质量的影响。

(4) 截面补强模拟计算方法

南边跨合龙段采取临时支撑固定后，凿除压碎开裂断面下缘混凝土，填充高强环氧树脂砂浆、在底板和斜腹板沿纵向黏贴厚 10 mm 的钢板、浇注补强预应力锚固区段混凝土和张拉体外预应力束的补强方式对结构进行维修。全桥预制节段接缝和出现混凝土裂缝等病害区段，采取灌缝和黏贴钢板的补强方式进行维修。在模拟分析时，将钢板等效换算成钢筋信息，在黏贴钢板的阶段把等效钢筋安装上，合龙段张拉的无黏结体外预应力模拟时将预应力孔道面积、孔道摩阻参数和孔道偏差系数置为 0 即可模拟。

(5) 索力调整

参照 2007 年维修后的索力，以塔位和桥面线形双控原则初步确定了斜拉索索力调整方案和工序。调索方案分横桥向索力调整和纵桥向索力调整 2 个阶段进行。横桥向索力调整时要求：横向 4 根索中与平均值相差超过 5%，或最大最小之间相差比较大的拉索进行索力调整；顺桥向索力调整是对全桥纵向分布拉索进行调整，使桥梁的内力、应力、线形以及塔位得到改善，确保桥梁维修施工期间和正常运营阶段的安全[7-8]。

4　维修加固效果分析

对整个维修加固前、后全桥结构状态的变化进行对比分析，根据大桥维修前、后的监测结果，可以得到如下结论。

(1) 桥面线形

考虑了温度效应作用的修正后，维修前后的实测结果和理论计算结果对比来看，理论计算结果比实测结果稍微偏大一些，如表 1 所列，但从实际桥面线形变化来看，通过本次工程维修，缓解了因辅助墩拉力摆断裂等前面工序以及测量的系统偶然误差所累计造成的边跨桥面上拱、中跨桥面下挠趋势，尽管边跨有轻微的下挠，但其下挠量较小，说明整个工程维修施工过程的结构状态模拟和采取的施工措施（如恢复结构体系与修复边跨合龙段、张拉体外束和调索等）是可行的。

表 1　维修前后主梁竖向位移（单位：cm）

Tab. 1　Vertical displacements of main girder before and after maintenance (unit: cm)

主梁	维修后(2009 年 9 月 14 日，晴 19 ℃) - 维修前(2009 年 3 月 17 日，晴 10 ℃) 不考虑温度修正 ①	系统温升 9 ℃ ②	主梁竖向位移变化 考虑温度修正 ①+②	理论计算
南边跨	-4.9	0.34	-4.6	-5.3
中跨	14.6	-0.99	13.6	13.8
北边跨	-2.3	0.34	-2.0	-3.2

注：1. 每升高 1 ℃，中跨位移向下挠 1.1 mm，反之，相反；2. 每升高 1 ℃，边跨跨中位移向上挠 0.38 mm，反之，相反；3. 主梁竖向位移偏量：向上挠为正，向下挠为负

(2) 塔顶纵向水平位移

考虑了温度效应作用的修正后，维修前后的实测结果和理论计算结果对比来看，南、北塔顶纵向水平位移变化值实测结果比理论计算结果大一些，如表 2 所列。但总体来讲，维修后可以使南、北塔塔顶纵向水平位移由河侧向岸侧变化，使塔顶向河侧倾斜的趋势得到很大的改善，明显改善了塔柱的受力状态。

表 2　维修前后塔顶顺桥向水平位移（单位：cm）

Tab. 2　Horizontal displacements at top of pylons before and after maintenance (unit: cm)

桥塔	维修前实测(2009 年 3 月 17 日，晴 10 ℃) ①	维修后实测(2009 年 9 月 14 日，晴 19 ℃) ②	系统温升 9 ℃ ③	塔顶位移变化 不考虑温度修正 ②-①	考虑温度修正 ②+③-①	理论计算
南塔	6.7	0.7	1.0	-6.0	-5.0	-4.8
北塔	5.4	-1.4	1.0	-6.8	-5.8	-4.9

注：1. 每升高 1 ℃，塔顶位移向岸侧偏移 1.1 mm，反之，相反；2. 塔顶位移偏量：向河侧偏移为正，向岸侧偏移为负。

(3) 拉索应力

维修前后的索力实际监测结果和理论计算结果如图 5 所示。全桥南、北桥拉索分别以南、北标识，

拉索按照由短索向长索方向编号，岸侧拉索依次为 $C_1' \sim C_{11}'$，河侧拉索依次为 $C_1 \sim C_{11}$。

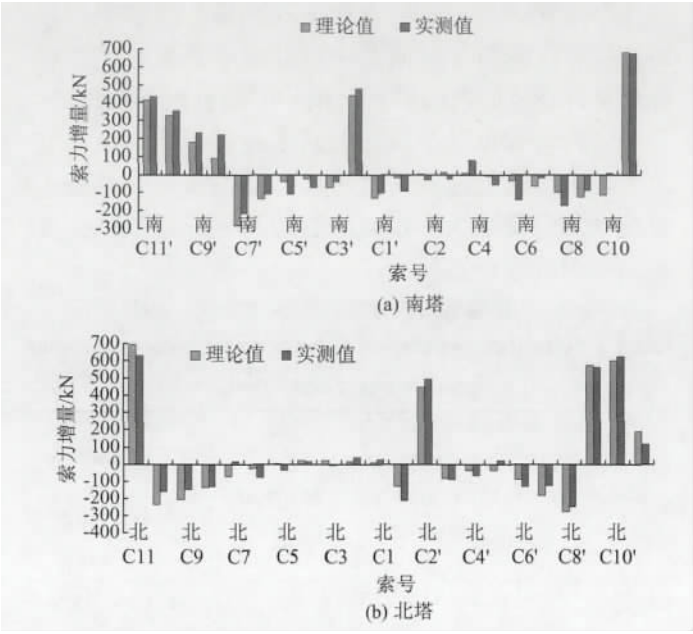

图5 维修后的实测索力增量与理论计算增量比较

Fig. 5 Comparison of cable force increment after maintenance between measured value and calculated value

总的来说，除个别拉索外，大部分拉索索力实际监测累计增量值和理论计算变化值结果差别不大，出现偏差的原因主要是因为维修前索力监测时北侧辅助墩拉力摆并未完全断开，而理论模拟计算时认为北侧辅助墩拉力摆已完全断开，而且还有温差的影响造成的。这说明整个维修的施工控制模拟过程是可行的、可控的、满足要求。

维修过程中考虑了结构恒载和活载引起的内力，包括自重、温度变化、混凝土收缩徐变[9]、基础不均匀沉降、体系转换等荷载作用，根据维修后运营阶段最不利荷载组合工况的拉索最不利应力计算结果如图5所示。拉索应力的最大值为776 MPa，出现在北 C5′拉索上（见图6），小于规范容许计算限值835 MPa（按文献[10]第4.3.1规定，拉索的容许应力应符合下列规定：$[\sigma] \leqslant 0.4R^b = 0.4 \times 1670 = 668$ MPa，而根据4.3.2规定，验算拉索在考虑挂车、支座沉降、温度综合效应荷载组合时，其容许应力需乘以提高系数 $K = 1.25$），满足规范要求。

(4) 主梁应力

2006年和2008年的2次维修加固工程中，主梁的应力不断发生变化，并会发生重分布，为使主梁的应力状态控制在规范容许范围内，避免修改施工过程中产生新的裂缝，必须对箱梁主要控制截面的混凝土应力进行控制。

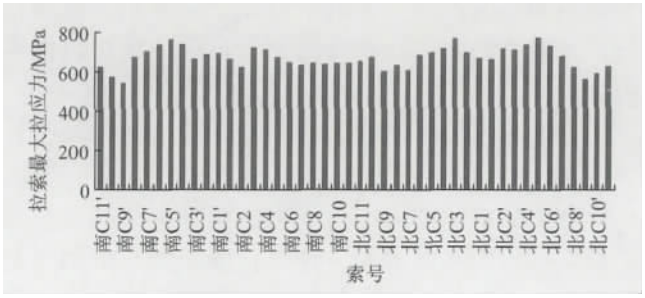

图6 维修后运营阶段拉索的最大拉应力

Fig. 6 Maximum cable tensile stress in operation phase after maintenance

根据维修过程中的恢复南侧辅助墩拉力摆、恢复北侧辅助墩拉力摆、张拉无黏结体外束预应力和索力调整4个主要施工控制阶段中的主梁混凝土应力实际监测结果和理论计算结果对比分析得出：在维修过程中没有出现异常应力监测结果出现，监测应力值与理论值相差很小，差值均在2 MPa以内，满足要求，其最大压应力均未超出规范规定的混凝土应力限值，这说明整个维修加固过程中主梁处于安全状态[11-12]。

由于原设计按部分预应力构件设计，容许箱梁混凝土出现拉应力，因此在出现拉应力的断面只能按B类部分预应力混凝土构件验算开裂后混凝土应力状态。由运营阶段最不利荷载组合工况的计算结果得出，出现拉应力的开裂后混凝土断面按B类部分预应力混凝土构件验算时，对于中跨：开裂后的最不利位置混凝土断面最大压应力值为：9.80 MPa $<$ 16.2 MPa（规范计算限值），对于边跨：开裂后的最不利位置混凝土断面最大压应力值为：11.69 MPa $<$ 16.2 MPa，均符合规范要求[5]。

(5) 拉力摆应力验算

总体来讲，南、北侧辅助墩拉力摆恢复后，索力调整使南、北侧辅助墩拉力摆拉力减小，支座压力增加，提高了拉力摆的安全储备。根据维修后运营阶段最不利荷载组合工况的计算结果得出：南、北侧辅助墩拉力摆索最不利拉应力值分别为310 MPa、372 MPa，均小于规范计算限值708 MPa，满足规范要求。

5 结论

本PC斜拉桥维修工程主要包括南北侧辅助墩压力支座更换、拉力摆恢复、南边跨合龙段上缘开裂下缘挤压破坏截面修补、南边跨合龙段扩大截面浇筑和张拉体外束、索力调整等多个施工工序，各个

工序期间涉及结构体系转换、恒载变化、结构刚度变化等影响结构受力性能的因素。

该桥维修加固工程施工控制难度和风险都很大，不可预见因素很多，尤其加固过程中的结构状态模拟难度很大，必须通过实时跟踪分析维修施工过程中结构受力变形状态，使维修施工过程中桥面线形、塔顶纵向水平位移、主梁混凝土应力以及索力等监测参数的实测值与理论计算结果较为吻合。在运营阶段的计算分析中，索力、主梁混凝土应力、钢筋应力以及塔墩强度验算结果均满足规范要求，保证了大桥维修加固工程的顺利完成。

参考文献:

References:

[1] 张开银，张军辉，梁新宇，等. 某斜拉桥的病害成因及加固研究 [J]. 交通科技，2008，229 (4)：25 – 28.
ZHANG Kai – yin，ZHANG Jun – hui，LIANG Xin – yu，et al. The Cable – stayed Bridge Disease Test and Cause Analyses and Reinforcement Research [J]. Transportation Science & Technology，2008，229 (4)：25 – 28.

[2] 汪劲丰，施笃铮，徐兴. 确定斜拉桥最优恒载索力方法的探索 [J]. 浙江大学学报：工学版，2002，36 (2)：152 – 155.
WANG Jin – feng，SHI Du – zheng，XU Xing. Exploration of the Optimal Cable Tension of Cable – stayed Bridge under Permanent Loads [J]. Journal of Zhejiang University：Engineering Science Edition，2002，36 (2)：152 – 155.

[3] 陈云海，陈可，吕建鸣. PC 斜拉桥辅助墩摆索拉力支座恢复加固施工控制分析 [J]. 公路交通科技，2011，28 (4)：79 – 83.
CHEN Yun – hai，CHEN Ke，LÜ Jian – ming. Analysis of Construction Control for Rehabilitation of Tension Rocker Bearing of Subsidiary Piers in PC Cable Stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2011，28 (4)：79 – 83.

[4] 吕建鸣，宋建永. 组合截面桥梁结构计算方法研究 [J]. 公路交通科技，2005，22 (6)：68 – 71.
LÜ Jian – ming，SONG Jian – yong. Study on Analysis Method for Co – section Bridge Structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2005，22 (6)：68 – 71.

[5] 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].

[6] 李宏江. 用于结构状态判别的 PC 斜拉桥温度效应 [J]. 土木建筑与环境工程，2009，31 (5)：81 – 85.
LI Hong – jiang. Temperature Effect Analysis for Structural State Estimation of PC Cable – stayed Bridge [J]. Journal of Civil，Architectural & Environmental Engineering，2009，31 (5)：81 – 85.

[7] 陈云海，李宏江，吕建鸣. PC 斜拉桥辅助墩摆索拉力支座恢复后的索力调整 [J]. 公路交通科技，2012，29 (6)：87 – 92.
CHEN Yun – hai，LI Hong – jiang，LÜ Jian – ming. Cable Force Adjustment after Rehabilitation of Tension Rocker Bearing of Subsidiary Piers in a PC Cable – stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportion Research and Development，2012，29 (6)：87 – 92.

[8] 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，WANG Jiang，ZHANG Yong – ming，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.

[9] 吕建鸣，陈云海. 预应力混凝土桥梁徐变计算方法的研究 [J]. 公路交通科技，2005，22 (7)：58 – 63.
LÜ Jian – ming，CHEN Yun – hai. Study of Analysis Method for PC Bridge Creep [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2005，22 (7)：58 – 63.

[10] JTJ 027—96，公路斜拉桥设计规范 [S].
JTJ 027—96，Design Specifications of Highway Cable Stayed Bridge [S].

[11] 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 Wang – 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.

[12] 王标，王艳，常全军. 大跨径 PC 斜拉桥施工监控分析 [J]. 交通科技与经济，2010，12 (1)：76 – 79.
WANG Biao，WANG Yan，CHANG Quan – jun. Construction Control of Long – span PC Cable – stayed Bridge [J]. Technology & Economy in Areas of Communications，2010，12 (1)：76 – 79.