

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.006



考虑时变因素修正的混凝土斜拉桥换索前 初态模型

许红胜, 王 晟, 颜东煌, 林 鸣
(长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410114)

摘 要:为准确掌握混凝土斜拉桥换索施工前的索力和主梁受力状态,建立的换索施工前的初态分析模型,需要对其运营期间混凝土收缩徐变、预应力索应力松弛、恒载性超载等因素产生的影响进行评估。而混凝土弹性模量、徐变、收缩及预应力筋松弛等因素具有与时间历程和应力历史紧密关联的材料非线性特征,采用有限元增量分析是合理的选择。为此,在时间历程划分的基础上,推导了考虑材料徐变、松弛、收缩影响的弹塑性有限元求解方程,建立了时间增量步内单元计入徐变、收缩、松弛影响的数值函数表达式,给出了斜拉索损伤刚度修正的具体措施和恒载性超载影响计入的分析方法,建立的初态模型分析技术进一步改善了混凝土斜拉桥运营期的桥梁状态评估方法。

关键词:桥梁工程;桥梁状态;增量分析;混凝土斜拉桥;收缩徐变;应力松弛;恒载性超载

中图分类号:TU448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)04-0045-06

Analysis model before cable replacement construction of stay cable bridge with time-dependent effects

Xu Hongsheng, Wang Sheng, Yan Donghuang, Lin Ming

(Changsha University of Science & Technology School of Civil
and Architecture Engineering, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: In order to understand the cables forces and girder forces state of concrete cable-stayed bridge before the cable replacement construction, and to establish the analysis model of the bridge, the influence factors such as concrete creep & shrinkage, stress relaxation of prestressing tendons, element damage, overload of dead need to be evaluated. Creep, relaxation and shrinkage are closely associated with the material nonlinearity which dependent on time and stress history so it's reasonable to adopt the finite element analysis technology based on elastic-plastic incremental load method. Based on the specified time intervals, the incremental elastic-plastic finite element equilibrium equation is deduced which includes the effect of creep, relaxation and shrinkage. For the time increment step, numeric expressions of creep, shrinkage and stress relaxation are established for beam element. Methods are proposed to analyze the influence of stay-cables damage and overload of dead. The methods will improve the structure state analysis

收稿日期:2015-03-04

基金项目:国家自然科学基金(51178059)

作者简介:许红胜(1974-),男,副教授,主要从事大跨度桥梁与高层建筑分析理论研究,(E-mail)hongsheng74@163.com.

Received:2015-03-04

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51178059)

Author brief:Xu Hongsheng(1974-), associate professor, main research interests: large span bridges and high-rise building analysis theory, (E-mail)hongsheng74@163.com.

techniques for the concrete cable-stayed bridge in service period.

Key words: bridge engineering; bridge condition; incremental load method; concrete stay cable bridge; creep & shrinkage; stress relaxation; overload of dead

由于目前斜拉索的设计使用寿命明显低于斜拉桥的设计寿命,因此,在斜拉桥的运营期内不可避免的存在进行斜拉索更换的要求;在中国已建成的 300 余座斜拉桥中,20 世纪修建的 100 余座斜拉桥中有超过 20% 进行了拉索部分或全部更换的工作^[1]。

目前,中国已完成的斜拉桥换索工程中,通常由换索施工与调索施工两个阶段组成,其中换索设计目标较为统一,即基本遵照新旧索等索力代换原则^[2],新索的下料长度计算需要有较为准确的旧索索力数据,才能保证新索无应力索长计算的准确。中国《公路桥梁加固施工技术规范》中指出,斜拉桥的换索施工宜采用限载、限量、限速措施确保施工过程安全,不宜中断交通^[3],因此,在换索设计中需要准确评估索塔、主梁构件实际受力情况,以确定上述三限措施。为此,有必要建立准确的斜拉桥换索施工前的初态模型,以对桥梁实际受力状态有一个相对明确的分析判断。

预应力索应力松弛、混凝土收缩徐变、恒载性超载等因素是导致混凝土斜拉桥运营期间桥跨结构状态变化的主要原因^[4],而混凝土弹性模量、收缩徐变、预应力索应力松弛等因素影响效应具有与时间历程和应力历史紧密关联的材料非线性特征^[5],对其分析宜采用基于时间序列的非线性增量分析方法^[6]。考虑到目前中国绝大部分斜拉桥并未建立有效的桥梁健康监测系统,不能提供准确的桥梁状态变化的资料数据。因此,研究基于时间历程划分,结合相关影响因素的合理数值函数表达,利用非线性增量分析,确定斜拉桥换索施工前桥梁状态的初态模型,对于斜拉桥换索设计及施工监控具有显著的工程实际意义。

1 计算分析方法

1.1 增量形式有限元方程

为得到混凝土斜拉桥运营期间时间历程下桥跨结构变形与应力的演变历史,同时,保证材料非线性问题求解的精度,需要基于时间积分,采用增量方法建立方程进行分析。

假定模型符合小变形小应变假设,同时假定作

用荷载为保守力。根据分析要求,按时间历程依次划分 $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n, \Delta t_{n+1}, \dots$ 等时间段,则根据虚位移原理,基于 TL 格式,可建立 t_{n+1} 时刻增量形式的单元方程^[7]

$$\int_V (\sigma_{ij}^{t_n} + \sigma_{ij}^{t_{n+1}}) \delta_{ij}^{t_{n+1}} \epsilon_{ij} dV - \int_V (\bar{F}_i^{t_n} + \bar{F}_i^{t_{n+1}}) \delta_{ij}^{t_{n+1}} u_i dV - \int_S (\bar{T}_i^{t_n} + \bar{T}_i^{t_{n+1}}) \delta_{ij}^{t_{n+1}} u_i dS = 0 \quad (1)$$

式中:变量的左下标标识变量值累积开始的时间点;而左上标则标识变量值累积终止的时间点;符号 $\sigma, \epsilon, F, T, u$ 分别表示应力、应变、体积力、边界力和位移。

在考虑材料徐变(松弛)和收缩等影响的弹塑性理论中,当 Δt_{n+1} 足够小时,应变增量可以表示为

$$\epsilon_{ij}^{t_{n+1}} = \epsilon_{ij}^{t_n} + \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^c + \epsilon_{ij}^s \quad (2)$$

同时,根据式(2),应力增量和应变增量的关系式可表示为

$$\sigma_{ij}^{t_{n+1}} = \mathbf{D}_{ijkl}^{epcs} (\epsilon_{kl}^{t_{n+1}} - \epsilon_{kl}^c - \epsilon_{kl}^s) \quad (3)$$

式(2)中右上标 e、p、c、s 分别标识弹性应变、塑性应变、徐变(松弛)应变和收缩应变;式(3)中的 \mathbf{D}_{ijkl}^{epcs} 表示 Δt_{n+1} 时间段内单元的弹塑性矩阵。

将式(3)代入式(1)中,整理后可得

$$\int_V \mathbf{D}_{ijkl}^{epcs} \epsilon_{kl}^{t_{n+1}} \delta_{ij}^{t_{n+1}} \epsilon_{ij} dV = \int_V \bar{F}_i \delta_{ij}^{t_{n+1}} u_i dV + \int_S \bar{T}_i \delta_{ij}^{t_{n+1}} u_i dS + \int_V \mathbf{D}_{ijkl}^{epcs} \epsilon_{kl}^{t_n} \delta_{ij}^{t_{n+1}} \epsilon_{ij} dV + \int_V \mathbf{D}_{ijkl}^{epcs} \epsilon_{kl}^{t_n} \delta_{ij}^{t_{n+1}} \epsilon_{ij} dV - \int_V \sigma_{ij}^{t_n} \delta_{ij}^{t_{n+1}} \epsilon_{ij} dV \quad (4)$$

引入插值函数矩阵 \mathbf{N} ,将单元内位移增量表达为节点位移增量形式

$$u_i^{t_{n+1}} = \mathbf{N} \Delta a_{n+1} \quad (5)$$

根据应变与位移的关系,可以得到单元应变增量用节点位移增量表达的形式

$$\epsilon_{ij}^{t_{n+1}} = L_{ij}^{t_{n+1}} u_i = \mathbf{L} \mathbf{N} \Delta a_{n+1} = \mathbf{B} \Delta a_{n+1} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4),可得到有限元的增量平衡方程

$${}^{t_{n+1}}\mathbf{K}^{ep} \Delta \mathbf{a}_{n+1} = {}^{t_{n+1}}\mathbf{Q} = {}_0^{t_{n+1}}\mathbf{Q}_w - {}_0^{t_n}\mathbf{Q}_l \quad (7)$$

$${}^{t_{n+1}}\mathbf{K}^{ep} = \int_V B^T {}^{t_{n+1}}\mathbf{D}_{ijkl}^{ep} B dV \quad (8)$$

$${}^{t_{n+1}}\mathbf{Q}_w = \int_V N^T {}^{t_{n+1}}\bar{F} dV + \int_S N^T {}^{t_{n+1}}\bar{T}_i dS + \int_V B^T {}^{t_{n+1}}\mathbf{D}_{ijkl}^{ep} {}^{t_{n+1}}\epsilon_{ij}^c dV + \int_V B^T {}^{t_{n+1}}\mathbf{D}_{ijkl}^{ep} {}^{t_{n+1}}\epsilon_{ij}^s dV \quad (9)$$

$${}^{t_n}\mathbf{Q}_l = \int_V B_0^T {}^{t_n}\sigma_{ij} dV \quad (10)$$

式(7)中 \mathbf{K}^{ep} 表示弹塑性刚度矩阵; \mathbf{Q} 表示不平衡力向量; \mathbf{Q}_w 表示外荷载向量; \mathbf{Q}_l 表示内力向量。与一般弹塑性有限元的增量平衡方程相比,差别在于外荷载向量中增加了计入徐变(松弛)和收缩影响的荷载项。

1.2 弹性模量影响

混凝土弹性模量是随时间变化的重要结构参数,对运营期的混凝土斜拉桥实际响应有明显的影 响。因此,在式(8)中,需要使用增量步起点的弹性模量 $E_c(t_n)$ 计算增量步内的弹塑性矩阵。 $E_c(t_n)$ 可采用 CEB-FIP90 的时间函数表达^[8]。

$$E_c(t_n) = E_c \sqrt{\exp\{s[1 - (28/t_n)^{0.5}]\}} \quad (11)$$

式中: E_c 是混凝土 28 d 的弹性模量; s 为不同水泥类型的影响系数,采用普通水泥时 s 取值为 0.25。

1.3 混凝土徐变影响

目前,用于大跨预应力混凝土桥梁收缩徐变分析的理论模型较多,常用的如 B3 模型、CEB-FIP90 模型、GL2000 模型、JTGD62 模型^[9]等,文献[10]中指出在缺乏温度、湿度变化等实际资料的情况下,宜采用 GL2000 模型进行箱梁桥的混凝土收缩徐变计算。

依据 Gardner 等^[11]提出的 GL2000 模型,则 Δt_{n+1} 时间段内徐变应变增量可表示为

$${}^{t_{n+1}}\epsilon_{ij}^c = \frac{{}_0^{t_n}\sigma_{ij}}{E_c} \varphi(t_{n+1}, t_n) = \frac{{}_0^{t_n}\sigma_{ij}}{E_c} [\varphi(t_{n+1}, t_0) - \varphi(t_n, t_0)] \quad (12)$$

式(11)中的 $\varphi(t_n, t_0)$ 为 GL2000 模型中的徐变系数。当不考虑混凝土斜拉桥中梁单元的损伤时,在一维有限元梁单元的应力应变关系式中, Δt_{n+1} 时间段内弹塑性刚度矩阵可简化为 $E_c(t_n)$ 。

将式(12)代入式(9)的计入徐变影响的荷载项,则可得到计入混凝土徐变影响的表达式

$$\int_V B^T {}^{t_{n+1}}\mathbf{D}_{ijkl}^{ep} {}^{t_{n+1}}\epsilon_{ij}^c dV = \int_V B^T {}^{t_n}\sigma_{ij} \frac{E_c(t_n)}{E_c} \phi(t_{n+1}, t_0) dV = {}^{t_n}\mathbf{Q} \frac{E_c(t_n)}{E_c} [\phi(t_{n+1}, t_0) - \phi(t_n, t_0)] \quad (13)$$

从式(13)可看出,增量步内的混凝土徐变影响可表示为单元内力向量的函数。

1.4 混凝土收缩影响

根据 GL2000 模型中的收缩应变函数,可得到 Δt_{n+1} 时间段内收缩应变增量表达式为

$${}^{t_{n+1}}\epsilon_{ij}^s = \epsilon_{shu} \beta(H) [\beta(t_n)] \quad (14)$$

式中: ϵ_{shu} 、 $\beta(H)$ 和 $\beta(t_n)$ 分别为 GL2000 模型中的终极收缩应变、湿度修正系数和时间修正系数。将式(14)代入式(9)的计入收缩影响的荷载项,考虑到对于梁单元,由于单元的收缩应变沿截面高度是一致的,所引起的作用效应仅表现为单元轴向节点力^[12],则可得到计入混凝土收缩影响的表达式

$$\int_V B^T {}^{t_{n+1}}\mathbf{D}_{ijkl}^{ep} {}^{t_{n+1}}\epsilon_{ij}^s dV = E_c(t_n) \epsilon_{shu} \beta(H) [\beta(t_{n+1}) - \beta(t_n)] \cdot [-A \ 0 \ 0 \ A \ 0 \ 0] \quad (15)$$

式中: A 表示梁单元的截面面积。从式(15)可以看出,增量步内的混凝土收缩影响可表示为负单元节点轴力向量。

1.5 预应力索松弛影响

在混凝土斜拉桥中,斜拉索与混凝土加劲梁的体内及体外预应力筋均属于在高应力状态下工作的钢索,存在与时间序列关联的应力松弛问题。文献[13]的试验结果表明,在使用应力与容许应力比不大于 0.55 时,1 000 h 松弛试验的普通索应力松弛率不会大于 1.5%,低松弛索应力松弛率不会大于 0.8%,且应力松弛绝大部分在 1 000 h 内已完成。考虑到斜拉索的应力比一般不大于 0.4,且通常采用低松弛索,可认为运营期间斜拉索应力松弛产生的影响不十分明显。而混凝土梁预应力筋的应力比较高,应力松弛率相应较大,由于其对混凝土梁截面应力状态影响明显,需要认真进行评估。根据文献[13]和文献[14]给出的应力松弛函数, Δt_{n+1} 时间段内预应力钢筋应力松弛增量可表示为

$${}^{t_{n+1}}\sigma_p^c r = {}^{t_{n+1}}\sigma_p^c r = {}^{t_n}\sigma_p^c r = \frac{\sigma_p^i}{k_1} (\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{py}} - 0.55) = R(t_n)$$

$$\text{当 } t_n \leq 1000 \text{ h 时, } R(t_n) = \lg(t_{n+1} - \lg(t_n)) \quad (16)$$

$$\text{当 } t_n \geq 1000 \text{ h 时,}$$

$$R(t_n) = 3 \left[\left(\frac{t_{n+1}}{10\ 000} \right)^{k_2} - \left(\frac{t_n}{10\ 000} \right)^{k_2} \right]$$

式中： σ_{pi} 和 σ_{py} 分别为扣除短期预应力损失后的钢索预应力值和钢索材料抗拉强度，当采用普通索时， $k_1=10$ 、 $k_2=0.19$ ；当采用低松弛索时， $k_1=45$ 、 $k_2=0.12$ 。需要指出的是，在式中， t_n 的单位需要从天换算成小时。

在混凝土梁的有限元模型中，预应力筋一般模拟为二力杆单元，则可得到 Δt_{n+1} 增量步计入应力松弛影响的预应力钢筋轴力增量为

$${}_{n+1}^{t_n} N_{pr} = \frac{\sigma_{pi}}{k_1} \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{py}} - 0.55 \right) R(t_n) [-A_s \quad A_s]^T \quad (17)$$

1.6 斜拉索损伤影响

大量调查发现，斜拉索的损伤主要表现为腐蚀和疲劳导致的局部钢丝截面削减和部分钢丝断丝^[15]，对其损伤一般采用截面折减的方法进行模拟，其中钢丝断丝时，采用全索长截面折减处理，而局部钢丝截面削减采用局部索段截面折减处理。

1.7 恒载性超载影响

恒载性超载主要由于混凝土斜拉桥的桥面铺装重量改变所导致，对于斜拉桥的受力状态有明显的影响，需要认真评估确定其影响。

假设运营期内，混凝土斜拉桥在短期荷载组合下其响应为线性，则可采用影响矩阵法进行恒载性超载的荷载取值评估。具体方法如下：

1) 首先确定恒载性超载发生的时间段，假设发生在 Δt_{n+1} 时间段内。

2) 将主梁 1/4 跨挠度和索塔塔偏作为优化目标，将变形实测值与 t_{n+1} 时间点收缩徐变、应力松弛效应

产生变形理论值的差值，定义为优化目标向量 $\{f\}$ 。

3) 在 Δt_{n+1} 时间段内，对各相邻索距内的主梁单元上施加单位线荷载，计算相应主梁各 1/4 跨挠度、索塔塔偏的响应系数，形成影响矩阵 $[IA]$ 。

4) 则各相邻索距的主梁恒载性超载荷载系数矩阵 $\{co\}$ 可由式(18)确定。

$$\{co\} = [IA]^{-1} \{f\} \quad (18)$$

2 实际工程应用

2.1 工程简介

湘江银盆岭大桥主桥为双塔单索面塔梁固结预应力混凝土斜拉桥，跨径为 105 m + 210 m + 105 m(见图 1)。主梁采用三室闭合预应力混凝土箱梁，箱梁高 3.4 m，主箱顶宽 22.3 m，左右大悬臂长度 4.9 m。斜拉索呈扇形分布，东、西塔每塔两侧各 15 组斜拉索，每组斜拉索设计为横桥向上、下游两根拉索。主梁上纵桥向索距为 6.2 m，横桥向索距为 2.4 m。原设计荷载为：汽车—20 级，挂车—100，人群 3.50 kN/m²。

湘江银盆岭大桥 1990 年 12 月竣工，1991 年 2 月投入运营。2012 年 6—9 月，进行了全部斜拉索更换施工。

2.2 分析说明

利用本文分析方法编制的计算程序，对湘江银盆岭大桥运营期的桥梁结构状态进行了分析，分析情况说明如下：

1) 根据 1990 年 12 月湘江银盆岭大桥主桥静动力试验报告中提供的主梁线形和索力数据建立杆系有限元初始模型。

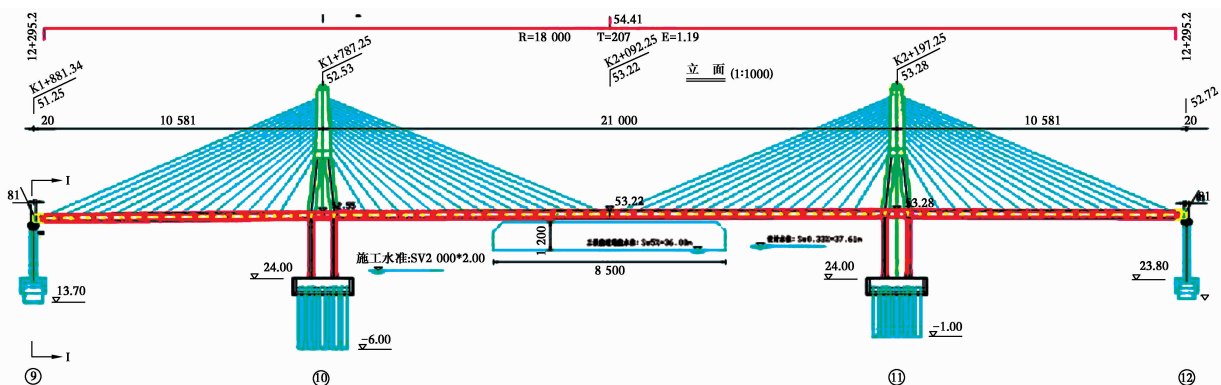


图 1 长沙湘江银盆岭大桥主桥斜拉桥桥型布置图

Fig. 1 The layout of the main bridge of Changsha Xiangjiang Yinpenling bridge

2)施工期混凝土构件初始加载时间 t_0 :主塔墩以 1989 年 2 月计入;混凝土加劲梁按如下方法确定:1989 年 12 月开始,每悬拼节段(3.1 m)施工期 10 d 依次计算。

3)分析的时间序列划分:从 1991 年 1 月开始,前 5 年每 3 个月划分为一个时间增量步,以后每 6 个月划分为一个时间增量步,到 2012 年 6 月共划分 54 个时间增量步。

4)斜拉索损伤修正:根据 2003 年斜拉索开窗检测情况,对东塔边跨下游 14 # 索、东塔中跨下游 13 # 索、西塔中跨上游 14 # 索及 15 # 索考虑近梁局部索段面积折减 5%。

5)恒载性超载修正:根据 2011 年对桥面铺装的检查,铺装层超厚,在第 53 个增量步内进行恒载性超载的评估计算。

2.3 分析结果验证

换索施工前,在中跨跨中利用 2 辆 30 t 载重车(前轴 6.3 t,后双轴 24.5 t)进行了加载测试,挠度的实测值与理论分析值比较如表 1。

表 1 加载试验实测挠度与分析值比较

Table 1 The comparison between measured value and analysis value of girder deflections under load test mm

| | 实测值 | 分析值 1 | 分析值 2 |
|---------|-----|-------|-------|
| 中跨东 8#索 | 3.4 | 4.0 | 4.5 |
| 中跨跨中 | 7.3 | 8.3 | 9.2 |
| 中跨西 8#索 | 3.1 | 4.0 | 4.4 |

注:分析值 1 考虑弹性模量时变影响,分析值 2 则不考虑。

从表 1 可以看出,考虑混凝土弹性模量时变影响的分析结果更加接近于实测挠度结果。

利用本文考虑时变因素影响的分析方法计算结果,及通用软件 sap2000 的分析结果,与 2005 年 10 月和 2011 年 11 月挠度实测结果比较如表 2。

表 2 运营期主梁挠度分析值与实测值比较

Table 2 The comparison between measured values and analysis values of the girder deflection under service mm

| | 2005 年 10 月 (第 41 增量步) | | 2011 年 11 月 (第 53 增量步) | | | |
|---------|---------------------------|---------|---------------------------|------|-------|-------|
| | 实测值 | Sap2000 | 本文 | 实测值 | 本文 1 | 本文 2 |
| | 中跨东 9#索 | 84 | 52.7 | 64.5 | 95 | 71.3 |
| 中跨跨中 | 159 | 74.8 | 101.2 | 174 | 114.7 | 120.3 |
| 中跨西 9#索 | 93 | 54.9 | 72.4 | 102 | 78.3 | 80.3 |

注:1. Sap2000 中混凝土徐变收缩采用 CEB-FIP90 模型

2. 本文 1 未计入恒载超载荷载,本文 2 按实测铺装超厚值计入恒载性超载荷载

从表 2 可以看出,本文考虑时变因素影响的分析方法计算结果相比 sap2000 分析结果更加接近于主梁长期挠度测试结果。

在换索施工中部分索(选取差值较大索)实测启动索力值与本文计入恒载性超载分析值和设计预测值的对比情况如表 3。

表 3 换索实测索力与分析值比较

Table 3 The comparison of cable force measured value and analysis value

| | value and analysis value | | | kN |
|-----------|--------------------------|-------|-------|----|
| | 实测值 | 本文值 | 设计值 | |
| 东塔边跨 8#索 | 7 488 | 7 380 | 6 584 | |
| 东塔中跨 15#索 | 8 554 | 8 308 | 7 696 | |
| 西塔中跨 8#索 | 8 805 | 8 580 | 7 938 | |
| 西塔边跨 9#索 | 8 955 | 8 812 | 8 447 | |

注:给出的数值均为上下游索力之和

从表 3 可以看出,本文计入时变因素影响和恒载性超载影响所得索力分析结果与换索施工时实测的启动索力更加吻合。

3 结 论

1)对于运营期混凝土斜拉桥的受力状态分析,需要考虑混凝土弹性模量、收缩徐变及预应力应力松弛等时变因素的影响,本文给出的分析方法可以方便地计入其影响效应。

2)为了准确评估需要进行换索施工的混凝土斜拉桥的实际索力,需要考虑恒载性超载的可能及评估超载荷载的取值。

参考文献:

[1] 成永强.既有斜拉桥换索状况综述[J].山西建筑,2010(9):332-334.
Cheng Y Q. Overview on cable replacement condition of existing cable-stayed bridge [J]. Shanxi Architecture, 2010(9):332-334. (in Chinese)

[2] 纪昌平,何敬波.西樵大桥斜拉索更换的设计与施工[J].公路,2008(6):68-70.
Ji C P, He J B. Design and construction of Xizhan Bridge stay cable replacement [J]. Highway, 2008(6):68-70. (in Chinese)

[3] 中交第一公路勘察设计院有限公司. JTG/T J23—2008 公路桥梁加固施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2008
CCCC First Highway Consultants Co., LTD. JTG/T J23—2008 Technical specifications for strengthening

- construction of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [4] 蒋伟平, 李亚东, 徐俊. 斜拉桥换索设计方法探讨[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 57-62.
Jiang W P, Li Y D, Xu J. Research on cable replacement design for cable-stayed bridges [J]. Structural Engineers, 2010, 26(2): 57-62. (in Chinese)
- [5] Robert C H. A study of time-related properties of concrete [R]. Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1977: 1-63.
- [6] Khalil M S, Dilger W H, Ghali A. Time-dependent analysis of PC cable-stayed bridges [J]. Journal of Structure Engineering, 1983, 109(12): 1980-1996.
- [7] 王勛成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1997: 491-511.
Wang X C, Shao M. Basic principle of Finite element method and numerical method [M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 491-511. (in Chinese)
- [8] Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP Model Code 1990[S]. London: Thomas Telford LTD, 1993.
- [9] 杨小兵. 混凝土收缩徐变预测模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 19-33.
Yang X B. Research on predication model of concrete shrinkage and creep [D]. Wuhan: Wu Han University. 2004: 19-33. (in Chinese)
- [10] 汪剑, 绍旭东. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析[J]. 土木工程学报, 2008(1): 70-80.
Wang J, Shao X D. Analysis and field measurement of concrete box girder bridges for shrinkage and creep effects [J]. China Civil Engineering Journal, 2008(1): 70-80.
- [11] Gardner N J, Lockman M J. Design provision for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(2): 159-167.
- [12] 颜东煌, 田仲初. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报, 2004(2): 55-58.
Yan D H, Tan Z C. Finite element method and application for the shrinkage and creep of concrete bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004(2): 55-58. (in Chinese)
- [13] Buckler J D, Scribner C F. Relaxation characteristics of prestressing strand [R]. Prestressed Concrete Institute, University of Illinois, 1985: 30-34.
- [14] Jose M A, Manuel E. Role of residual stresses in stress relaxation of prestressed concrete wires [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8): 703-708.
- [15] 熊涛. 混凝土斜拉桥易损性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 40-80.
Xiong T. Vulnerability analysis of concrete cable-stayed bridge [D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2006: 40-80. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)