

文章编号:1671-8879(2014)03-0053-07

基于结构退化分析的桥梁长期挠度计算

李 源,贺拴海,侯 炜,任 伟

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对虎门大桥辅航道桥在运营期间中跨跨中过量下挠问题,通过有效预应力实测数据确定结构整体预应力束损失模型。选取 B3 收缩徐变模型,同时考虑截面刚度及弹性模量退化,结合有效预应力实测数据,提出考虑结构多因素退化的长期挠度计算方法,对比该计算方法计算结果与结构中跨跨中下挠实测数据,验证计算方法可用性并分析误差原因。研究结果表明:考虑结构四类退化的长期挠度计算方法较传统计算方法更为接近结构下挠实测值,运营过程中预应力正抛物线损失与结构实际下挠相符;考虑基于结构损伤的长期挠度计算结果与结构下挠实际观测值误差在 7% 以内,中跨预应力损失通常伴随边跨预应力“张紧”,这种“张紧”现象对结构长期下挠控制是有利的。

关键词:桥梁工程;结构退化;大跨径连续刚构桥;有限元法;长期挠度

中图分类号:U488.23

文献标志码:A

Bridge long-term deformation based on structure degradation

LI Yuan, HE Shuan-hai, HOU Wei, REN Wei

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Aimed at the problem of excessive long-term deformation, through the measured effective pre-stress, the regulation of pre-stress in the whole construct was obtained. Using the B3 shrinkage and creep model, with consideration of the decline of section stiffness and the variation of the elastic modulus, a structure degradation analysis method was presented. Through the comparison of the calculation results and the measured structure deflection, the feasibility of this method was proved. The causes for the errors were also analyzed. The results show that the results of the method with consideration of structure degradation is more close to the measured structure deflection than traditional one. The parabolic loss of pre-stressed concrete structure is reasonable in operation period. The calculation result based on the structure deflection is 7% less than the observed value. The mid-span pre-stress loss is often accompanied by the “tension” of the side one, and this “tension” phenomenon is beneficial for long-term deflection control. 4 tabs, 12 figs, 15 refs.

Key words: bridge engineering; structure degradation; large span continuous rigid bridge; finite-element method; long-term deformation

0 引 言

随着中国国民经济的发展,对公路交通等基础

设施提出了更高要求。大跨径连续刚构桥得到了广泛的应用,它具有施工技术成熟、刚度大、稳定性高等优点。然而中国大跨径连续刚构桥在服役一定年

收稿日期:2013-07-06

基金项目:交通运输部应用基础研究项目(2012319812100)

作者简介:李 源(1988-),男,陕西户县人,工学博士研究生,E-mail:175239591@qq.com。

限后普遍出现跨中下挠、开裂等问题,其中部分大跨径连续刚构桥年平均下挠量达到了 2 cm;严重影响结构的正常使用性能^[1-2]。很多学者针对这一问题进行了相关研究,王培金等探讨了大跨径预应力连续刚构桥长期挠度的挠度预测方法^[3];赵煜等分析了基于裂缝统计的预应力梁桥刚度折减方法和结构评价方法^[4];许震等对连续刚构桥下挠影响参数进行了分析计算^[5];吴小平等从分析结构曲率 k 推导截面 $M-K$ 关系的角度,分析梁式桥长期挠度^[6]。目前学者普遍认为大跨径连续刚构桥过量下挠是当前收缩徐变模型较为保守,然而在大跨径连续刚构桥长期挠度计算时,预应力损失取值、截面刚度下降等因素模拟时的取值界定尚未形成统一意见。为此,本文综合相关文献结合广东虎门大桥预应力检测结果,提出考虑结构多因素退化的长期挠度计算方法,将计算结果与结构真实下挠观测值进行对比,分析大跨径长期下挠结构损伤模拟机理和计算方法^[7]。

1 工程背景

虎门大桥辅航道桥主跨 270 m,跨径布置为 150+270+150 m,单幅桥主梁为单箱单室截面,桥墩顶部梁高 14.8 m,中跨跨中梁高 5 m,主桥下部为双薄壁墩身、群桩基础,是中国目前跨径最大的预应力混凝土连续刚构桥,结构总体布置如图 1 所示。

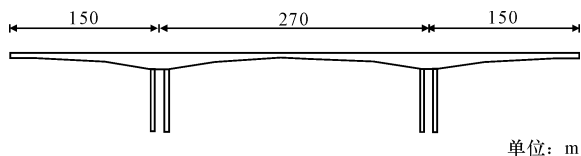


图 1 总体布置

Fig. 1 General arrangement

该桥自建成后中跨跨中持续下挠,并出现底板水平裂缝、腹板斜裂缝等病害,其跨中累积下挠量超过 26 cm,远超过其预留的 10 cm 预拱度,结构加固前跨中下挠值如图 2 所示。

虎门大桥辅航道桥于 2006 年 9 月进行加固并建立连通管检测系统,加固后观测其运营期结构各控制点下挠。观测值以加固后桥梁线型为基准值,观测结果如图 3、图 4 所示。

从图 3、图 4 可以得出,虎门大桥辅航道桥上游幅、下游幅跨中挠度总体呈现持续增大趋势,下游幅中跨跨中逐年下挠量更大且边跨呈现了一定程度的上挠。

2 结构退化模型

结构在运营期间的下挠是多因素耦合作用的结果,目前研究认为大跨径连续刚构桥持续下挠的主要原因

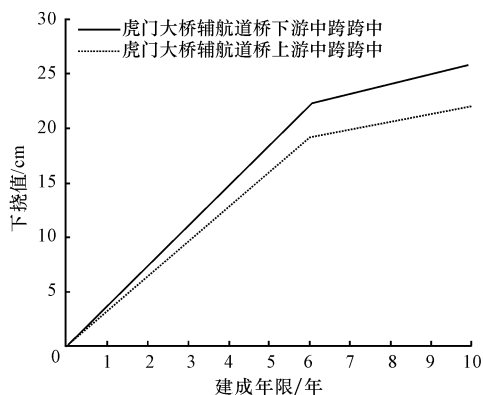


图 2 虎门大桥辅航道桥加固前下挠值

Fig. 2 Structure deflection of Humen auxiliary navigation bridge before reinforcement

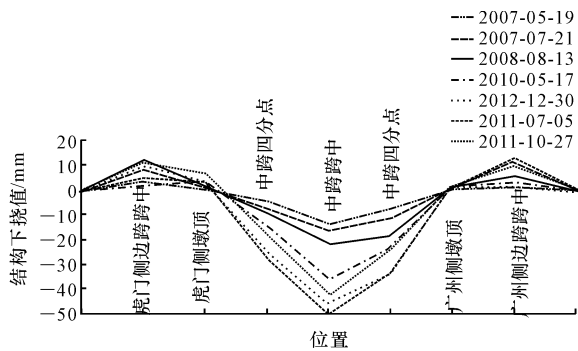


图 3 上游幅结构下挠值

Fig. 3 Structure deflection of upper side

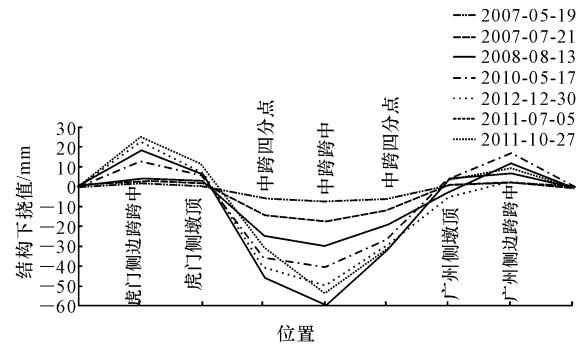


图 4 下游幅结构下挠值

Fig. 4 Structure deflection of downstream side

有:①设计上对于收缩徐变的计算偏于保守,与实际情况有一定差别;②钢束预应力损失引起的主梁下挠难以定量计算;③截面开裂后,截面刚度下降引起主梁的下挠;以上 3 种因素相互影响且会产生一定的耦合作用^[8]。

2.1 有效预应力模型

预应力损失是决定大跨径连续刚构桥长期下挠的重要因素,在服役多年后,由于收缩徐变的不确定性、截面开裂等因素,结构预应力实际损失与规范计算值有一定差别。计算大跨径连续刚构桥结构下挠,可通过有限测点的有效预应力检测值,得到测试

钢束值并推定其他钢束永存预应力^[9]。

虎门大桥辅航道桥预应力检测时选取中跨跨中附近体内预应力底板束 2 束(Z11),边跨底板受拉区体内预应力钢束 2 束(B7),墩顶顶板束 2 束(30-1、31-1),共计 6 个测点。采用局部开槽的方法,借助预应力钢索张力测试仪进行直接测试。根据设计图纸,计算其应力沿程界限波动率 β ,得出以上钢束均为“平缓束(MT)”,应用分布模式判别指标作为

表 1 “平缓束”分布模式判别

Tab. 1 Judgement of “flat beam” distribution pattern

判别指标	分布模式	模拟方法
$0.93 < \gamma \leq 1.05$	等差分布	调整钢束松弛率系数 $(\sigma_c - \sigma_1) / \sigma_{con} \times 100 + 2.5$
$0.85 < \gamma \leq 0.93$	等比分布	单根钢束 $\gamma = \sigma_{peC} / \sigma_{peL}$ 为折减系数,调整张拉控制应力
$\gamma \leq 0.85$	混合分布	同时调整张拉控制应力、松弛率和摩擦系数

表 2 虎门大桥辅航道桥有效预应力检测结果

Tab. 2 Results of effective prestress of Humen auxiliary navigation bridge

测点名称	预应力钢束编号	实测平均值/kN	设计状态成桥理论值/kN	分布模式判别指标 γ	分布模式
1#	B7	181.34	170.47	1.02	等差分布
2#	B7	176.32	170.47	1.03	等差分布
3#	Z11	152.19	181.11	0.90	等比分布
4#	Z11	167.68	181.11	0.93	等比分布
5#	30-1	169.55	154.60	1.03	等差分布
6#	31-1	159.71	153.40	1.04	等差分布

通过表 1 中方法模拟测试钢束有效预应力沿程分布,对于同一截面处其他未测试钢束,可通过以下方法推定其有效预应力。对于同一施工工艺和施工方法下,可以认为钢束的摩擦与孔道偏差系数的变化量成比例,则有

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta \mu'}{\mu'} = \frac{\Delta k'}{k'} \tag{2}$$

结合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范》(JTJ D62-2004),对于测点位置位于反摩擦影响之外时有

$$\frac{\sigma_{II C}}{\sigma_{II L}} = \frac{\sigma_{con} (1 - e^{-(\mu + \Delta \mu) \theta + (k + \Delta k) x})}{\sigma_{con} (1 - e^{-(\mu \theta + k x)})} \tag{3}$$

联立式(2)、式(3)有

$$\Delta \mu = -\frac{\mu}{\mu \theta + k x} \ln \left[\frac{1 - \sigma_{II C} / \sigma_{II L} (1 - e^{-(\mu \theta + k x)})}{1 - e^{-(\mu \theta + k x)}} \right] \tag{4}$$

$$\Delta k = -\frac{k}{\mu \theta + k x} \ln \left[\frac{1 - \sigma_{II C} / \sigma_{II L} (1 - e^{-(\mu \theta + k x)})}{1 - e^{-(\mu \theta + k x)}} \right] \tag{5}$$

$$\mu'_1 = \frac{\Delta \mu}{\mu} \mu' + \mu' \tag{6}$$

$$k'_1 = \frac{\Delta k}{k} k' + k' \tag{7}$$

$$\sigma'_{IY} = \sigma'_{L1} (\mu'_1, k'_1) + \sigma'_{L2} (\mu'_1, k'_1) + \sigma'_{IbL} \tag{8}$$

式中: $\sigma_{II C}$ 、 $\sigma_{II L}$ 分别为基准测试钢束由预应力筋与管道

分布模式判别指标,即

$$\gamma = \frac{\sigma_{peC}}{\sigma_{peL}} \tag{1}$$

式中: σ_{peC} 、 σ_{peL} 分别为目标测试钢束应力实测值和理论值。

钢束有效预应力分布模式判别见表 1,有效预应力测试结果见表 2。表中: σ_c 为钢束应力实测值; σ_1 为钢束应力理论值; σ_{con} 为张拉控制应力值。

壁摩擦引起的应力损失实测值及理论值; μ 、 μ' 分别为基准测试钢束和间接预测钢束的管道摩擦系数规范值; μ_1 、 μ'_1 分别为基准测试钢束和间接预测钢束的管道摩擦系数实际值; k 、 k' 分别为基准测试钢束和间接预测钢束的局部偏差影响系数规范值; k_1 、 k'_1 分别为基准测试钢束和间接预测钢束的局部偏差影响系数实际值; σ'_{IbL} 为间接预测钢束混凝土弹性压缩、收缩、徐变和钢材的松弛引起的总损失; σ'_{L1} 为间接预测预应力钢束由管道摩擦引起的损失值; σ'_{L2} 为间接预测预应力钢束由锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失值; $\Delta \mu$ 、 Δk 分别为钢束的摩擦系数变化值和孔道变差系数变化值; θ 为张拉端至计算截面平面曲线的夹角; σ'_{IY} 为间接预测钢束应力损失预测值。

上述计算方法可得到测试截面处间接预测钢束预应力参数 μ'_1 、 k'_1 ,进而模拟结构实际预应力损失。间接钢束预应力参数计算结果见下页表 3。表中, σ_C 、 σ_L 分别为预应力钢筋应力实测值及理论值。

得到预测钢束预应力参数 μ'_1 、 k'_1 ,代入式(7),得到 σ'_C ,再应用判别指标 $\gamma = \frac{\sigma_{peC}}{\sigma_{peL}}$ 作为分布模式判别指标,应用表 1 模拟间接预测钢束预应力。

表 3 间接钢束有效预应力参数

Tab. 3 Effective prestress parameters of indirect steel beam

钢束编号	已知参数						间接预测钢束预应力损失参数			
	σ_c	σ_L	μ	k	μ'	k'	$\Delta\mu$	Δk	μ'_1	k'_1
1#	1 295	1 218	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.30	0.003 4
2#	1 259	1 218	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.14	0.001 6	0.29	0.003 3
3#	1 087	1 294	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.08	0.000 9	0.23	0.002 6
4#	1 198	1 294	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.10	0.001 2	0.25	0.002 9
5#	1 211	1 104	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.17	0.001 9	0.32	0.003 6
6#	1 141	1 096	0.15	0.001 7	0.15	0.001 7	0.14	0.001 6	0.29	0.003 3

2.2 收缩徐变模型

高强度混凝土的大跨径连续刚构桥,收缩徐变的规范模拟方法偏于保守,不能反映结构的实际情况^[10];相关研究指出,Bazant 提出的 RILEM B3 模型更加接近实际情况,本次计算采用该收缩徐变模型进行计算^[11]。B3 模型是根据混凝土的固化理论建立的,该理论将弹性理论、粘弹性理论和流变理论结合起来,模拟混凝土宏观物理力学性质因水泥水化、固相物增多而随时间不断变化的理论。

B3 模型用徐变函数 $J(t,\tau,t_0)$ 表示单位应力下的总应变,将徐变分为基本徐变和干燥徐变。计算的数学表达式为

$J(t,\tau,t_0)=q_1+C_0(t,\tau)+C_d(t,\tau,t_0)$ (9)

式中: q_1 为单位应力产生的瞬时应变; $C_0(t,\tau)$ 为基本徐变度; $C_d(t,\tau,t_0)$ 为干燥徐变度, t_0 为干燥时的龄期。

2.3 截面刚度退化模型

截面开裂刚度下降对结构长期挠度影响很大,根据虎门大桥辅航道桥加固前《虎门大桥辅航道桥质量评定报告》,结构在两边跨跨中出现少量腹板斜裂缝,跨中附近出现腹板竖向开裂、底板横向开裂等病害;梁体表面有少量露筋、空洞、局部出现波纹管外露。虎门大桥辅航道桥经历了截面开裂刚度下降、加固、持续下挠、预应力损失等因素,单一的考虑开裂截面刚度模拟实桥的方法有一定局限性。本文分别考虑刚度下降 5%、10%、15% 计算结构竖向挠度。结构服役过程中截面刚度变化如图 5 所示。图中, T_0 为结构建成时间; T_1 为结构运营时间; T_s 为结构维修时间; T_u 为结构加固时间; T_{sd} 为结构维修后运营时间; T_{ud} 为结构加固后运营时间。

2.4 弹性模量变化模型

计算结构长期挠度,还应考虑弹性模量随时间的变化,本文建议选取《Model code 2010》中给出的弹性模量随时间发展的公式为

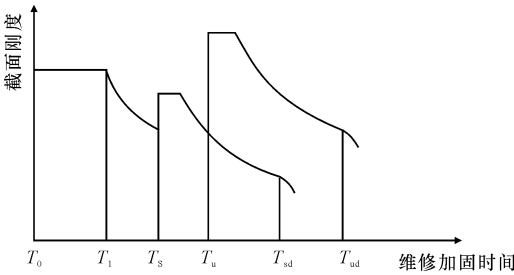


图 5 截面刚度变化

Fig. 5 Section stiffness change

$E_{ci}(t)=\beta_E(t)E_{ci}$ (10)

$\beta_E(t)=[\beta_{cc}(t)]^{0.5}$ (11)

$\beta_{cc}(t)=e^{s[1-(\frac{28}{t})^{0.5}]}$ (12)

式中: $E_{ci}(t)$ 为时间 t 混凝土的弹性模量(MPa); E_{ci} 为 28 d 龄期混凝土的弹性模量(MPa); $\beta_E(t)$ 为混凝土龄期计算的参数; $\beta_{cc}(t)$ 为混凝土龄期计算的参数; t 为混凝土龄期; s 为由混凝土中水泥等级决定的系数。

3 基于结构退化模型的长期挠度计算

3.1 基本假定

基于多种结构退化模型,可得到结构服役期的长期下挠计算值。由于结构经历维修加固,还需做以下假定,对结构原有预应力钢束应用 2.1 节计算结果进行折减,加固体外预应力束不考虑规范外的预应力损失。假定结构在加固完成后,体外预应力引起的结构上挠为其理论值的 50%,即结构实际挠度下挠值为

$\omega_t=\omega_0+0.5\omega_y+\omega_g$ (13)

式中: ω_t 为结构 t 时刻实际下挠值; ω_0 为结构加固前下挠观测值; ω_y 为结构加固体外预应力引起的反拱值; ω_g 为结构加固后连通器挠度观测值。

结构实际预应力损失随时间变化较为复杂,计算时以结构预应力检测结果 σ_c 及结构实际预应力推定值 σ_T 为时间终值,通过 3 种模拟方法模拟结构

预应力损失随时间变化情况:①结构预应力随时间线性损失,即以桥梁建成预应力理论值为起点、通常若干年后预应力检测实测值为终点,认为预应力损失在运营过程中线性损失,模拟方法见图 6;②结构预应力随时间正抛物线损失,即以桥梁建成预应力理论值为起点、通常若干年后预应力检测实测值为终点,认为在运营过程中预应力损失呈正抛物线,桥梁开始通车时预应力损失较快,使用过程中预应力损失速率逐步下降;模拟方法见图 7;③结构预应力

随时间反抛物线损失,即以桥梁建成预应力理论值为起点、通常若干年后预应力检测实测值为终点,认为预应力在使用年限中损失呈正抛物线,桥梁通车时预应力损失较慢,使用过程中预应力损失速率逐步上升;模拟方法见下页图 8。

3.2 计算结果

结构出现多处裂缝,通过截面刚度折减模拟其裂缝对结构长期挠度的影响^[12-15],定义 9 种工况计算结构长期挠度与实际观测值对比,工况组合见表 4。

表 4 计算工况

Tab. 4 Calculation conditions

工况	组合
工况 1	预应力线性损失+B3 模型+刚度下降 5%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 2	预应力正抛物线损失+B3 模型+刚度下降 5%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 3	预应力反抛物线线性损失+B3 模型+刚度下降 5%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 4	预应力线性损失+B3 模型+刚度下降 10%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 5	预应力正抛物线损失+B3 模型+刚度下降 10%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 6	预应力反抛物线线性损失+B3 模型+刚度下降 10%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 7	预应力线性损失+B3 模型+刚度下降 15%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 8	预应力正抛物线损失+B3 模型+刚度下降 15%+ Model code 2010 收缩徐变模型
工况 9	预应力反抛物线线性损失+B3 模型+刚度下降 15%+ Model code 2010 收缩徐变模型

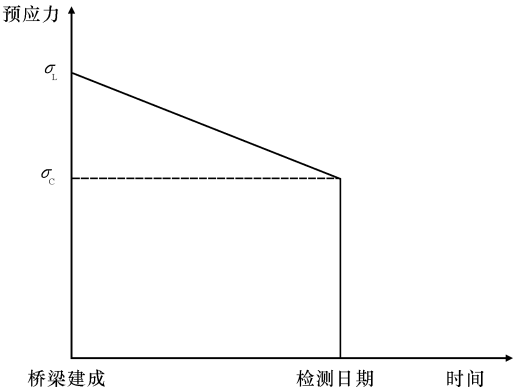


图 6 结构预应力随时间线性损失

Fig. 6 Linear loss of structure pre-stress with time

从计算结果可知(下页图 9~图 12),结构实际下挠与基于结构退化模拟的工况 4~工况 6 较为接近,工况 5 预应力损失模拟方法计算结构下挠与结构下挠实测结果趋势相似;工况 5 各时间节点挠度计算结果与实测值差别在 7%以内,说明工况 5 假定的结构损伤退化模型能够应用于该桥的长期挠度计算,基于结构损伤模拟的长期挠度计算方法可应用于此类结构长期挠度预测;边跨跨中、墩顶及桥梁其他控制点挠度理论计算结果与实测值差别较大(图 7),原因是中跨预应力损失通常伴随着边跨预应力“张紧”,因此边跨挠度变化更具随机性,墩顶挠度变化受基础、桥

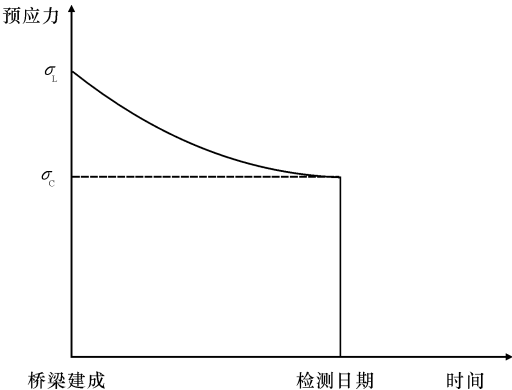


图 7 结构预应力随时间正抛物线损失

Fig. 7 Parabola loss of structure pre-stress with time

墩倾斜等多因素影响,亦具有很强随机性。结构实测下挠 2010 年 12 月、2011 年 7 月、2011 年 10 月检测值出现反拱可理解为整体降温对结构的影响。

计算结果表明,基于四类结构退化模型的大跨径长期挠度计算方法虽不能完全吻合结构在运营期的实际下挠,但由于预应力检测的确定性以及其他模型的可靠性,该计算方法对于预测大跨径连续刚构桥长期挠度有一定参考价值。

4 结 语

(1)通过模拟结构多因素退化损伤,分多工况计

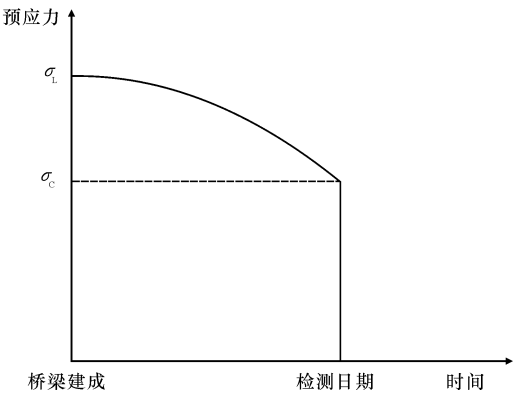


图 8 结构预应力随时间反抛物线损失

Fig. 8 Reverse parabola loss of structure pre-stress with time

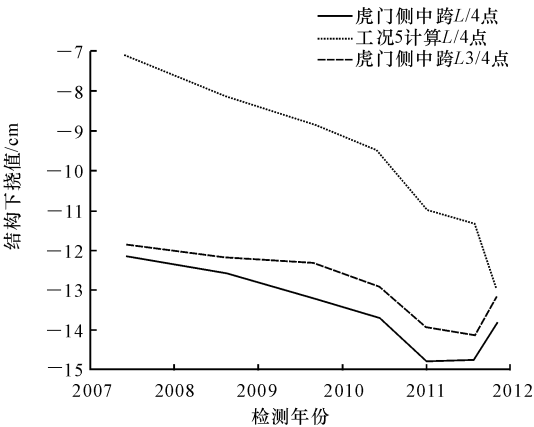


图 9 中跨 L/4 下挠值与工况 5 计算值

Fig. 9 Deflection values of L/4 of mid-span and calculated values of condition 5

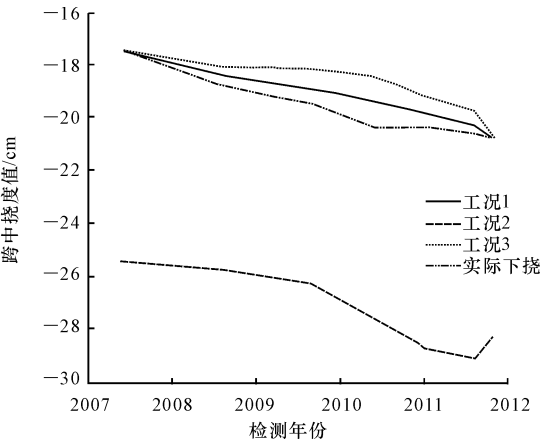


图 10 工况 1~工况 3 中跨跨中下挠值与结构实际下挠值

Fig. 10 Span deflection values in each condition and actual deflection values (1~3)

算大跨径连续刚构桥运营过程中跨中下挠,与结构真实下挠观测数据进行对比,分析误差原因,归纳此类桥梁长期下挠计算方法。

(2)采用基于结构预应力实测值推算结构整体

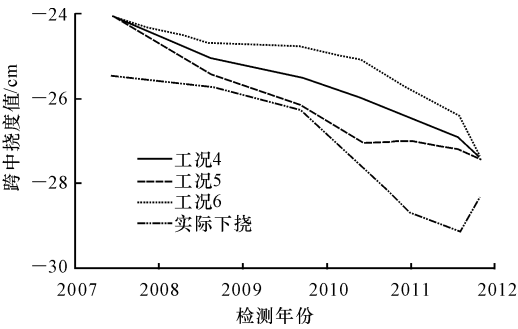


图 11 工况 4~工况 6 中跨跨中下挠值与结构实际下挠值

Fig. 11 Span deflection values in each condition and actual deflection values (4~6)

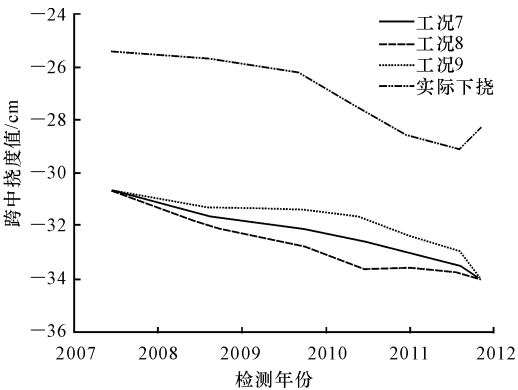


图 12 工况 7~工况 9 中跨跨中下挠值与结构实际下挠值

Fig. 12 Span deflection values in each condition and actual deflection values (7~9)

预应力损失的方法,通过 3 种不同预应力损失曲线分别计算结构长期挠度,计算结果表明,正抛物线预应力损失模型与结构实测下挠规律更为吻合。

(3)模拟结构因局部截面开裂、损伤引起的截面刚度下降时可参照相关外观检查报告,或实地进行调查,统计裂缝参数,推算结构整体刚度,应用 B3 收缩徐变模型及《Model code 2010》弹性模量发展模型进行计算。

(4)大跨径连续刚构桥中跨预应力损失会导致边跨预应力“张紧”从而引起边跨上挠,实际计算过程中可以偏保守的忽略这种作用,即边跨预应力仅考虑规范规定的预应力损失。

(5)本文分析方法适用于大跨径连续刚构桥长期分析计算,分析思路可供其他桥型长期挠度计算参考。

(6)基于结构损伤实测值的大跨径连续刚构桥长期下挠计算,为该类桥梁的下挠预测提供了一条新思路。结构损伤多因素耦合效应对下挠的影响等问题还需进一步深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 杨志平,朱桂新,李 卫. 预应力混凝土连续刚构桥挠度长期观测[J]. 公路,2004(8):285-289.
YANG Zhi-ping, ZHU Gui-xin, LI Wei. Long-term observation of deflection of prestressed Rigid frame bridge[J]. Highway,2004(8):285-289. (in Chinese)
- [2] 牛艳伟,石雪飞,阮 欣. 大跨径混凝土梁桥的长期挠度实测分析[J]. 工程力学,2008,25(增1):116-119.
NIU Yan-wei, SHI Xue-fei, RUAN Xin. Measured sustained deflection analysis of long-span prestressed concrete beam bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008,25(S1):116-119. (in Chinese)
- [3] 王培金,盛洪飞,赵尚栋. 大跨连续刚构桥预应力混凝土箱梁的长期挠度预测探讨[J]. 公路交通科技,2007,24(1):87-89,99.
WANG Pei-jin, SHENG Hong-fei, ZHAO Shang-dong. Discussion about the longstanding deformation prediction of large span continuous rigid bridge prestressed concrete box girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(1):87-89,99. (in Chinese)
- [4] 赵 煜,贺拴海,李春风,等. 在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(9):1271-1275.
ZHAO Yu, HE Shuan-hai, LI Chun-feng, et al. Evaluating system of bearing capacity for existing cracked prestressed concrete box girder based on crack feature [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(9):1271-1275. (in Chinese)
- [5] 许 震,张雪松,徐君兰. 连续刚构跨中下挠的参数影响分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2007,26(4):9-13.
XU Zhen, ZHANG Xue-song, XU Jun-lan. Analysis of parameters affecting the midspan deformation of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2007,26(4):9-13. (in Chinese)
- [6] 吴小平,宋一凡,贺拴海. 公路钢筋混凝土梁桥的长期挠度分析[J]. 交通运输工程学报,2001,1(4):48-50.
WU Xiao-ping, SONG Yi-fan, HE Shuan-hai. Analysis of long term deflection of reinforced conciete beams [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2001,1(4):48-50. (in Chinese)
- [7] 李世安,贺拴海,宋一凡. 在役 PC 梁桥现存应力测试与研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(2):96-100.
LI Shi-an, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Detection and research of existing stress of PC grider bridge in service[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012,34(2):96-100. (in Chinese)
- [8] Santiago R. Design of long span concrete box girder bridges challenges and solutions [C]//ASCE. Proceedings of the 2004 Structures Congress-Building on the Past;Securing the Future, Nashville:ASCE,2004:361-371.
- [9] 郭 琦. 复杂预应力体系梁式结构有效预应力预测理论与方法研究[D]. 西安:长安大学,2009.
GUO Qi. Theory and methodology of predication on effective prestress for beam structures with complicated prestressing systems[D]. Xi'an:Chang'an University,2009. (in Chinese)
- [10] Garder N J, Lockman M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete [J]. Material Journal ACI,2001,98(2):159-167.
- [11] 丁文胜,吕志涛,孟少平,等. 混凝土收缩徐变预测模型的分析比较[J]. 桥梁建设,2004(6):13-16.
DING Wen-sheng, LU Zhi-tao, MENG Shao-ping, et al. Analysis and comparison of prediction models for concrete shrinkage and creep [J]. Bridge Construction,2004(6):13-16. (in Chinese)
- [12] Fu M Z, Liu Y J, Li N, Zhang Z W, et al. Application of modern timber structure in short and medium span bridges in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, English Edition,2014,1(8):72-80.
- [13] Balaji R K, Appart V S R. Stochastic modeling of crack width in reinforced concrete beams subjected to fatigue loading [J]. Engineering Structures, 2004, 98(2):26-31.
- [14] 赵 煜,任 伟,李春风,等. 预应力混凝土简支箱梁裂缝损伤参数影响分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):58-63.
ZHAO Yu, REN Wei, LI Chun-feng, et al. Parameter influence analysis of existing simply-supported box girder bridge based on crack feature [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010,30(2):58-63. (in Chinese)
- [15] Hariri K, Holst A, Wichmann H J, et al. Assessment of the state of condition of prestressed concrete structures with innovative measurement techniques and first applications[R]. Washington D C;SAGE,2003.

