

文章编号:1671-8879(2015)06-0079-06

基于长期变形监测数据的连续刚构 桥预应力损失识别

袁卓亚^{1,2}, 石雄伟³, 苗建宝³, 许冰³, 冯威³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国交通建设股份有限公司西北分公司, 陕西 西安 710065;
3. 西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

摘要:为掌握在役连续刚构桥结构预应力状态,提出了基于长期变形监测数据对结构真实预应力状态进行评估的新思路,通过有限元分析建立了结构有效预应力衰减引起长期挠度和混凝土收缩、徐变引起长期挠度的相关关系,结合影响矩阵原理建立了基于长期变形监测挠度数据识别结构有效预应力的方程,并进行了验证。同时在对监测数据进行数理统计分析的基础上针对某连续刚构桥进行了实桥损失识别。研究结果表明:与成桥状态相比,目前顶板钢束有效预应力平均损失 0.61%,底板钢束有效预应力平均损失 0.33%,结构状况良好,可供同类连续刚构桥预应力损失识别参考。

关键词:桥梁工程;预应力损失识别;影响矩阵;连续刚构;有效预应力

中图分类号:U448.21 **文献标志码:**A

Prestress loss identification of continuous rigid frame bridge based on long term deformation monitoring data

YUAN Zhuo-ya^{1,2}, SHI Xiong-wei³, MIAO Jian-bao³, XU Bing³, FENG Wei³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Communications Construction Company Limited Northwest Co. Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China;
3. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In order to grasp the prestressed state of the existing continuous rigid frame bridge, the new idea of damage assessment of the prestressed state was put forward based on long-term deformation monitoring data. The relationship between long-term deflection and concrete shrinkage creep was established though finite element analysis. Combined with influence matrix, the effective prestress equation based on deflection data identification of health monitoring was established and verified. At the same time, based on statistical analysis of monitoring data, the damages of a continuous rigid frame bridge were identified. The results show that compared with the completed bridge state, the average loss of roof effective prestress was 0.61% and the average loss of bottom plate effective prestress was 0.33%. The structure was in good condition. This

收稿日期:2015-07-08

基金项目:陕西省交通科技项目(10-38K)

作者简介:袁卓亚(1971-),女,陕西西安人,中国交通建设股份有限公司西北分公司教授级高级工程师,长安大学工学博士研究生,
E-mail:791027696@qq.com。

can be used as reference for the identification of prestressed loss of similar continuous rigid frame bridge. 4 tabs, 4 figs, 18 refs.

Key words: bridge engineering; loss identification of prestress; influence matrix; continuous rigid frame; effective prestress

0 引言

目前,中国公路干线上已经修建了大量的预应力连续梁(连续刚构)桥,其中部分在用桥梁均不同程度地出现跨中下挠、腹板、底板开裂等病害,这个问题很早就受到了国内外桥梁界的广泛关注,但是至今未得到很满意的解决^[1]。从诸多运营期连续刚构桥梁的典型病害可以看出,主梁下挠和梁体裂缝的出现,多与预应力衰减有关^[2-3]。因此,及时掌握结构有效预应力状态对保证结构安全运营尤为重要。

目前,有效预应力检测方法主要有 2 种:一种是将原结构开孔使钢绞线暴露,然后采用测试设备进行测试,这种方法费时费力,对结构有一定损伤,对桥梁结构整体有效预应力状态把握程度有限;另一种是无损检测技术^[4],由于其对结构损伤小,能快速宏观掌握结构状况,因而发展较快,是研究的热点,也取得了一定的成果,但尚未有完整研究成果^[5]。桥梁结构发生损伤是指与正常结构相比,在某些方面产生了异常现象,这些异常表现在结构的特征参数上。结构损伤识别即是对结构进行检测与评估,以确定结构是否有损伤存在,进而判断损伤的位置和程度,以及结构当前的状况、使用功能和结构损伤的变化趋势等^[6]。基于实测数据的损伤识别主要包括静力损伤识别^[7]、动力损伤识别^[8]及动静力综合损伤识别法^[9]。针对上述现状,本文从桥梁长期变形监测挠度数据为基础,提出一种基于长期变形监测数据的连续刚构桥预应力损失识别方法,以期能够确定结构的真实受力状态。

1 挠度相关性分析

影响结构长期挠度的因素很多,涉及到桥梁全寿命过程的各个阶段。但可按与时间的关系分为 2 类:一类与时间无关,如张拉应力、管道摩阻系数等;一类与时间相关,如预应力度、混凝土收缩、徐变、温度等。

对于和时间无关的参数,在建立模型时,应详细调查竣工资料和监控资料,真实模拟结构状态。例如结构超重是影响结构长期挠度的一个主要因素:一是模板变形引起的超方,根据监控经验,梁体在浇筑时由于胀模等因素影响会超重 2%~4%;二是用

混凝土进行桥面找平引起的额外超重。而混凝土弹性模量的真实性直接关系到结构计算的准确性,应结合竣工荷载试验数据进行修正,采用名义弹模。

与时间有关的参数主要是预应力度、混凝土收缩、徐变和温度^[10]。目前,国际上比较普遍认可的 6 项预应力损失中,对采用悬臂施工和后张法工艺的连续刚构桥梁而言,不涉及 σ_{13} 、 σ_{11} 、 σ_{12} 、 σ_{14} 为传力锚固时的损失,其计算方法经大量验证是可行的。而传力锚固后的损失第 5 项 σ_{15} 和第 6 项 σ_{16} 均为与时间有关的变量,而且和混凝土收缩、徐变存在相互影响^[11],将其所引起的预应力损失采用分项估算的方法尚存在一定的不合理性。

对于各种桥型体系、不同施工工艺、不同钢束形式及管道状况,钢束沿纵向的有效预应力实际值与理论值的分布关系可归纳为以下 3 种情况:分布模式 I,实际值和理论值之差为定值,实际发生损失与理论损失值变化趋势一致,仅大小不同,按等差关系折减;分布模式 II,实际值与理论值的比值为定值,按等比关系折减;分布模式 III,实际值与理论值满足特定函数关系。有文献研究证明:对分布模式 I,有效预应力的实际值与理论值的比值在 93%以上时,可以仅通过对预应力钢束松弛系数的调整来模拟钢束实际有效预应力沿程分布,相对误差在 5%以内;对分布模式 II,有效预应力的实际值与理论值的比值在 85%~93%范围内时,可以仅通过对钢束张拉控制应力的折减来模拟钢束实际有效预应力状况,相对误差在 5%以内;对分布模式 III,有效预应力的实际值与理论值的比值小于 85%时,可以通过同时调整张拉控制力、松弛系数和摩阻系数进行迭代试算,来模拟钢束实际有效预应力分布,相对误差在 5%以内^[12]。还可以通过有限元程序对相关系数进行调整,以实现对接有效预应力状态的高度仿真。

因此,在对结构进行有限元分析的基础上,引入相关系数 β ,建立预应力损失引起长期挠度与混凝土收缩、徐变引起长期挠度的相关关系

$$\beta = \frac{\Delta_s}{\Delta_e} \quad (1)$$

式中: Δ_s 为混凝土收缩、徐变引起的长期挠度; Δ_e 为预应力损失引起的长期挠度。

2 有效预应力识别原理

影响矩阵是 20 世纪 60 年代由美国首先研究

的,主要用以解决各事件相互作用和相互影响的问题^[13]。本文引入影响矩阵的概念,在主梁未开裂的前提下,首先将主梁内的预应力钢束按其位置和特点分为 M 个组,编号分别为 $1, 2, \dots, M$; 其中 $M=2$ 或 $M=m+k$, 假定每组内所有预应力钢束的预应力损失程度均相同。当需识别整体预应力损失情况时,取 $M=2$, 即可将钢束分为 2 组, 分别为主梁顶板预应力钢束组和主梁底板预应力钢束组; 当识别要求较高时, 将同一施工梁段内锚固的顶板钢束和底板钢束分别设置为一个钢束组; 取 $M=m+k$, 其中 m 为梁段的顶板预应力钢束组数, k 为底板预应力钢束组数。假定在 t 时刻, 预应力识别组 $1^\#$ 的有效预应力降低 $a(\%)$, 计算得到全桥关键截面的位移变化量; 同理, 计算得到其他 $M-1$ 识别组的全桥关键截面位移变化量; 由这些位移变化量可以组成影响矩阵 \mathbf{A}_t 。

当 $M=2$ 和 $M=m+k$ 时, 损伤识别刚度矩阵分别为 $\mathbf{A}_t^{(2)}$ 、 $\mathbf{A}_t^{(M)}$

$$\mathbf{A}_t^{(2)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_t^{(M)} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nM} \end{bmatrix}$$

式中: a_{ij} 为编号为 j 的预应力钢束组的预应力损失为 a 时, 编号为 i 的挠度监测点因预应力损失引起的挠度。

可知

$$\mathbf{D}_t = \mathbf{A}_t^{(M)} \mathbf{\Delta}_{\sigma t} \quad (2)$$

式中: 矩阵 \mathbf{D}_t 为由 t 时刻各挠度监测点因预应力损失引起的挠度数据组成的列矩阵; $\mathbf{\Delta}_{\sigma t}$ 为 t 时刻 M 个预应力钢束组的预应力损失程度组成的列矩阵

$$\mathbf{D}_t = [d_{1t}, d_{2t}, \dots, d_{nt}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{\Delta}_{\sigma t} = [\Delta_{\sigma 1t}, \Delta_{\sigma 2t}, \dots, \Delta_{\sigma Mt}]^T \quad (4)$$

式中: d_{it} 为 t 时刻编号为 i 的挠度监测点因预应力损失引起的挠度; $d_{it} = d_i / (1 + \beta_i)$, 其中 d_i 和 β_i 分

别为编号为 i 的挠度监测点的总位移量及该点的相关系数。

根据计算得出的矩阵 $\mathbf{\Delta}_{\sigma t}$, 对 t 时刻各预应力钢束组的预应力损失程度进行计算时, 根据式(5)可计算出 t 时刻编号为 j 的预应力钢束组的预应力损失程度

$$\Delta \sigma_{jt} = \mathbf{\Delta}_{\sigma jt} a \quad (5)$$

式中: $\mathbf{\Delta}_{\sigma jt}$ 为 t 时刻编号为 j 的预应力钢束组的预应力损失程度。

求解出 $\mathbf{\Delta}_{\sigma t}$ 后, 需调用优化模块进行计算, 识别初始可假设初始值 $\mathbf{\Delta}_{\sigma 0} = [0, 0, \dots, 0]^T$, 构造优化函数 f_{con}

$$f_{\text{con}} = \mathbf{\Delta}^T \mathbf{\Delta} = \sum_{j=1}^m (d_j^C - d_j^T)^2 \quad (6)$$

式中: d_j^C 为计算出的某一测点的挠度变化值; d_j^T 为实测值。

因此, 当结构有效预应力降低时, 则 $f_{\text{con}} > 0$, 通过不断调整 $\mathbf{\Delta}_{\sigma t}$ 的大小, 可找到 1 组 $\mathbf{\Delta}_{\sigma t}$ 使得 f_{con} 最小, 则认为此时 $\mathbf{\Delta}_{\sigma t}$ 最接近结构真实状态, 该调整过程属多变量极小值优化的过程, 可借助 Matlab 求解。

3 长期变形监测数据分析

某预应力混凝土连续刚构上部结构为 $(85+4 \times 160+85)\text{m}$, 单箱单室截面, 箱梁根部梁高 9.5 m , 跨中梁高 3.5 m , 其间接二次抛物线变化。箱梁顶板宽 12.90 m , 底板宽 7 m , 顶板厚 0.3 m , 底板厚由跨中 0.32 m 按二次抛物线变化至根部 1.1 m , 腹板分别为 0.50 m 和 0.65 m , 桥墩顶部范围内箱梁顶板厚 0.50 m , 底板厚 1.3 m , 腹板后 0.8 m 。

2011 年, 随施工进度对该特大桥建立了健康监测系统, 在各跨关键部位布置了挠度监测点以监测结构变位, 监测截面位置如图 1 所示。

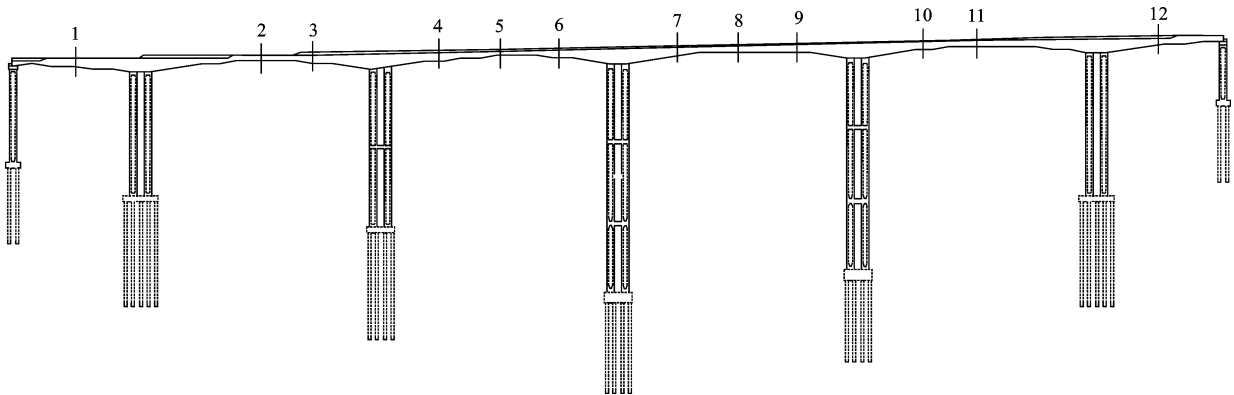


图 1 监测截面位置示意

Fig. 1 Location of monitoring section

实测数据如图 2 所示。经数据分析可知,大桥挠度监测数据变化规律与温度变化呈负相关性,近似成线性规律。本例需识别整体预应力损失情况,故取 $M=2$,将大桥主梁纵向预应力按顶、底板位置划分为 2 组,选取结构各跨跨中截面和部分主跨 $L/4$ 截面为评估截面。

分析得出相关系数 β ,计算结果见表 1,回归出部分监测点相关系数 β 随时间变化曲线,如图 3、图 4 所示。

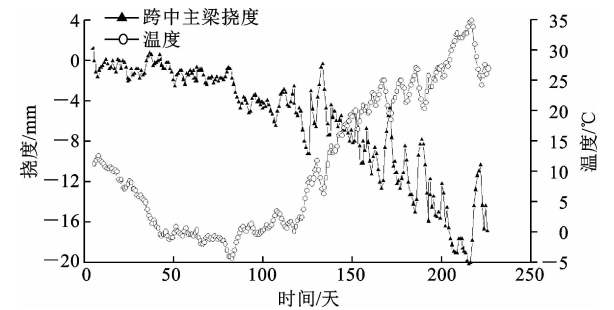


图 2 主跨跨中挠度、温度随时间变化曲线
Fig.2 Change of mid span deflection and temperature curve with time

表 1 相关系数 β 计算结果

Tab.1 Calculation results of correlation coefficients of β

监测点编号	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年	第 6 年	第 7 年	第 8 年	第 9 年	第 10 年
1	-14.9	-9.1	-6.6	-5.0	-3.9	-2.9	-2.1	-1.3	-0.6	0.1
2	9.8	9.2	9.0	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	9.0
3	2.8	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1
4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.2	6.2	6.3
5	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.2	4.3	4.3	4.4
6	13.5	13.1	13.1	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	13.9
7	12.2	12.0	12.1	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9
8	4.4	4.3	4.3	4.4	4.4	4.5	4.6	4.6	4.7	4.7
9	6.3	6.5	6.7	6.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5
10	3.1	3.2	3.2	3.3	3.3	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5
11	10.4	9.9	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8
12	-15.8	-8.4	-5.3	-3.3	-1.9	-0.6	0.4	1.4	2.2	3.0

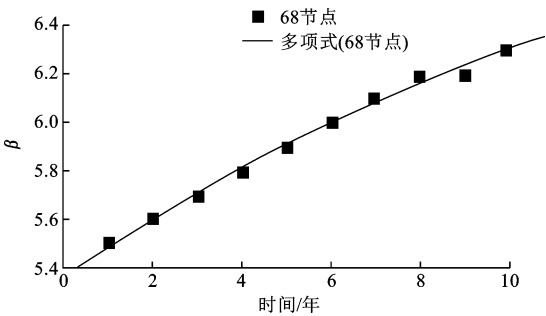


图 3 监测点 1 拟合曲线
Fig.3 Curve fitting of monitoring site 1

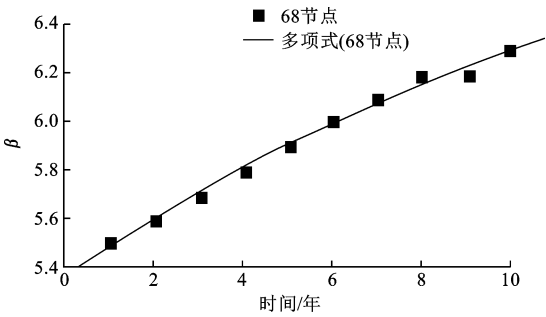


图 4 监测点 4 拟合曲线
Fig.4 Curve fitting of monitoring site 4

本次评价采用 2011 年 10 月 26 日至 30 日晚上 24 时测试数据为挠度基准值,以 2012 年 10 月 26 日至 30 日晚上 24 时测试数据为评估参数值,进行数据分析。为准确识别有效预应力损失程度,排除温度因素影响,对挠度-温度变化规律进行回归分析,解得有效预应力变化的关键截面挠度变化组成的列向量参数,见表 2。

表 2 某特大桥通车 1 年时的挠度变化

Tab.2 Change of deflection during one year after opened to traffic

关键截面编号	纵桥向位置/m	挠度实测值/mm	β	Δ
1	42.5	5.90	-13	-0.480
2	165.0	31.70	10	2.991
3	205.0	17.50	3	4.565
4	285.0	18.99	5	2.927
5	325.0	29.15	4	5.765
6	365.0	15.29	13	1.069
7	445.0	14.93	12	1.142
8	485.0	29.14	4	5.483
9	525.0	18.57	6	2.537
10	605.0	19.35	3	4.731
11	645.0	30.23	10	2.694
12	767.5	6.10	-14	-0.479

4 识别精度分析验证

为验证方法的精度,以该特大桥为实例,通过有限元法计算出影响矩阵,验证其精度^[8]。

假设底板束产生 15% 的损失,顶板束产生 25% 的损失,则有 $D_i = 10^{-5} \times [-8.063, 333.00, 843.52, 270.35, 654.84, 198.99, 205.63, 651.28, 285.63, 865.14, 344.82, -16.47]^T$

梁段优化计算时取初始值均为 0,即 $\Delta_{s0} = [0, 0, \dots, 0]^T$;此时优化函数 $f_{\text{con}} = 2.779\ 7 \times 10^{11}$ 。进行极小值优化计算后,当 $f_{\text{con}} = 119.24$ 时,计算趋于收敛。此时损失识别结果见表 3,实际损失系数和识别损失系数吻合良好。

表 3 损失识别验证
Tab. 3 Verification of loss identification

组别	顶板束	底板束
实际损失系数	-2.5	-1.5
识别损失系数	-2.499 9	-1.500 1
误差/%	0.01	0.01

从表 3 可以看出,此方法误差仅为 0.01% 左右,满足工程计算精度需要,可用于结构有效预应力识别中。

5 预应力损失识别

利用本文方法对大桥有效预应力进行损失识别,优化计算时取初始值均为 0,即 $\Delta_{s0} = [0, 0, \dots, 0]^T$;此时优化函数 $f_{\text{con}} = 1.14 \times 10^{0.07}$ 。进行极小值优化计算后,当 $f_{\text{con}} = 7.95 \times 10^{0.07}$ 时,计算趋于收敛,相当于初始值的 5.6%。此时损失识别结果见表 4,可知与成桥状态相比,顶板有效预应力平均损失 0.61%,底板有效预应力平均损失 0.33%,目前结构状况良好。

表 4 大桥有效预应力损失识别

Tab. 4 Effective prestress loss identification of bridge

组别	顶板束	底板束
识别损失系数	-0.006 1	-0.003 3

需要指出的是本文影响矩阵是基于设计参数计算生成的,而挠度初始值是在成桥初始状态测试的,由于施工中各因素影响,成桥初始状态的结构有效预应力和设计理论值存在一定差异,要求得结构有效预应力损失值,还应依据成桥时预应力实测值对影响矩阵进行修正。

6 结 语

(1)本文提出的基于结构长期变形监测数据对结构真实预应力状态进行损失评估的方法可以有效识

别连续刚构桥预应力损失,误差满足工程精度要求。

(2)通过对长期挠度监测数据的分析,完成了某连续刚构桥有效预应力识别,分析表明与成桥状态相比,目前该桥顶板钢束有效预应力平均损失 0.61%,底板钢束有效预应力平均损失 0.33%,与实际状态相符。

(3)通过实际工程应用表明,本方法识别结果与桥梁预应力实际状态相符合,说明本方法可以较好地反映结构的真实受力状态,该评估方法可为同类桥梁预应力损失分析提供借鉴。

参考文献:

References:

[1] 詹建辉,陈 卉.特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析[J].中外公路,2005,25(1):56-58.
ZHAN Jian-hui, CHEN Hui. Reasons of vertical deflections and cracks of large span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(1): 56-58. (in Chinese)

[2] 韦建刚,黄 蕾,李佩元,等.旧空心板简支梁桥的连续化改造加固研究[J].建筑科学与工程学报,2014,31(4):103-109.
WEI Jian-gang, HUANG Lei, LI Pei-yuan, et al. Research on continuous transformation and reinforcement for old simply supported hollow slab bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 103-109. (in Chinese)

[3] 田黎明,冯 威,马毓泉,等.高墩大跨径连续刚构结构挠度敏感性参数分析[J].公路交通科技,2012,29(8):279-282.
TIAN Li-ming, FENG Wei, MA Yu-quan, et al. Research on deflection sensitivity parameters of high pier and long-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2012, 29(8): 279-282. (in Chinese)

[4] Catbas N, Aktan A E. Condition and damage assessment; issues and some promising indices[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8): 1026-1036.

[5] 袁卓亚,曹 湘,许 冰,等.高墩大跨径连续刚构桥健康监测系統研究[J].公路交通科技,2012,29(10): 157-159.
YUAN Zhuo-ya, CAO Xiang, XU Bing, et al. Research on health monitoring system of high pier and long-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(10): 157-159. (in Chinese)

[6] 吴向男,徐 岳,梁 鹏,等.桥梁结构损失识别研究现状与展望[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(6):49-58.

- WU Xiang-nan, XU Yue, LIANG Peng, et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(6): 49-58. (in Chinese)
- [7] 向天宇, 赵人达, 刘海波. 基于静力测试数据的预应力混凝土连续梁结构损失识别[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 79-82.
- XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da, LIU Hai-bo. Damage detection of prestressed concrete continuous beam from static response[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 79-82. (in Chinese)
- [8] 刘龄嘉, 贺拴海, 赵小星. 基于动力性能的 PC 梁有效预应力预测[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 37-40.
- LIU Ling-jia, HE Shuan-hai, ZHAO Xiao-xing. Effective prestress forecast of PC beam based on dynamic performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 37-40. (in Chinese)
- [9] 张启伟, 范立础. 利用动静力测量数据的桥梁结构损伤识别[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1998, 26(5): 528-532.
- ZHANG Qi-wei, FAN Li-chu. Damage detection for bridge structures based on dynamic and static measurements[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(5): 528-532. (in Chinese)
- [10] 夏樟华, 宗周红, 李嘉维, 等. 基于健康监测系统的长大
- 跨度连续刚构桥移动荷载识别[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 95-104.
- XIA Zhang-hua, ZONG Zhou-hong, LI Jia-wei, et al. Moving load identification of long span continuous rigid frame bridges based on health monitoring system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 95-104. (in Chinese)
- [11] 潘钻峰, 吕志涛, 刘 钊, 等. 苏通大桥连续刚构收缩徐变效应的不确定性分析[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 67-73.
- PAN Zuan-feng, LU Zhi-tao, LIU Zhao, et al. Uncertainty analysis of creep and shrinkage effect in continuous rigid frame of Sutong bridge[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 67-73. (in Chinese)
- [12] 孙 斌, 朱劲松, 肖汝诚. 大跨度预应力混凝土斜拉桥基于定期检测的损伤识别方法[J]. 公路交通科技, 2007, 24(6): 71-74.
- SUN Bin, ZHU Jin-song, XIAO Ru-cheng. Damage identification of cable-stayed bridge during the operations based on periodic detection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(6): 71-74. (in Chinese)
- [13] Yang I H, et al. Uncertainty and updating of long-term prediction of prestress forces in PSC box girder bridges[J]. Computers and Structures, 2005, 83(25/26): 2137-2149.

(上接第 62 页)

- DU Hao. Mixed effects models for airport pavement performance prediction[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [4] Yu J X, Chou E Y J, Luo Z R. Development of linear mixed effects models for predicting individual pavement conditions[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(6): 347-353.
- [5] Onar A, Thomas F, Choubane B, et al. Statistical mixed effects models for evaluation and prediction of accelerated pavement testing results[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(10): 771-780.
- [6] Prozzi A J, Madanat S M. Incremental nonlinear model for predicting pavement serviceability[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(6): 635-641.
- [7] Archilla A R. Repeated measurement data analysis in pavement deterioration modeling[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2006, 12(3): 163-173.
- [8] 刘玉海, 凌建明, 杜 浩. 道面状态转移概率估计的混合效应模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 1169-1175.
- LU Yu-hai, LING Jian-ming, DU Hao. Linear mixed effects model for estimating pavement condition Markov transition probabilities[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(8): 1169-1175. (in Chinese)
- [9] Shahin M Y. Pavement management for airports, roads and parking lots[M]. New York: Springer, 2005.
- [10] 孙立军, 刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1995, 23(5): 512-518.
- SUN Li-jun, LIU Xi-ping. General deterioration equation for pavement performance[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1995, 23(5): 512-518. (in Chinese)
- [11] Laird N M, Ware J H. Random-effects models for longitudinal data[J]. Biometrics, 1982, 38(4): 963-974.
- [12] Ben-Akiva M, Morikawa T. Estimation of switching models from revealed preferences and stated intentions[J]. Transport Research Part A: General, 1990, 24(6): 485-495.
- [13] Shyr F Y. Combining laboratory and field data in rail fatigue analysis[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [14] Archilla A R, Ooi P S K, Sandefur K G. Estimation of a resilient modulus model for cohesive soils using joint estimation and mixed effects[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 984-994.