

大跨径预应力砼箱梁桥挠度监测与分析

雷丰豪, 彭辉

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 大跨径预应力砼箱梁桥运营中梁体会随着时间的推移发生下挠, 严重影响桥梁的运营安全。文中以湖南省涟源龙塘至新化琅塘高速公路白芦大桥为依托, 采用倾角仪对其挠度进行监测, 并运用灰色模型进行挠度预测。结果表明, 倾角仪实测挠度与灰色模型预测挠度基本一致, 采用灰色模型预测大跨径预应力砼箱梁桥挠度的整体精度高、可靠性强, 能实时预测桥梁变形。

关键词: 桥梁; 预应力砼箱梁; 挠度; 倾角仪; 灰色理论

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0118-03

大跨径预应力砼桥梁具有结构刚度好、通车平稳及伸缩缝设置少等优点, 但其主跨长期变形过大。各国规范对大跨径预应力砼箱梁桥长期变形给出了不同预测方法, 工程建设期间与成桥运营后挠度预测通常采用瞬间弹性变形乘以相关系数的方法。成桥后挠度长期监测主要体现在成桥线形确定上, 也就是预拱度变形预测。桥梁施工过程中, 设计预应力应能抵消成桥固定荷载产生的弯矩效应。牛艳伟等认为由于长期挠度与裂缝关系紧密, 而砼桥梁的开裂很难避免, 对大跨径预应力砼桥梁长期挠度进行预测时, 在考虑砼收缩徐变等时变因素的同时, 还应考虑长期挠度与裂缝之间交互作用的影响。贺拴海等认为考虑原桥预应力损失实测值及结构损伤的计算模型更贴近结构实际下挠值, 但并不完全吻合, 这是因为结构在运营过程中裂缝与预应力损失及砼收缩徐变相互耦合。郝章喜等认为预应力损失引起的挠度可通过改进预应力钢束材料和张拉工艺加以改善, 砼收缩徐变对长期挠度影响不明显, 砼徐变引起的挠度可通过改变上下缘应力差改变挠度方向和大小, 若徐变引起挠度向上, 便可有效减小箱梁长期挠度。杨斌等认为砼超重和桥面铺装施工误差导致的自重增加均可引起桥梁跨中长期挠度增加, 徐变系数、环境相对湿度的变化、预应力损失等对桥梁跨中长期下挠影响显著; 梁体刚度降低, 则跨中长期挠度增加, 其中早期刚度降低对跨中挠度增加影响较大。对于大跨度桥梁, 达到设计预应力完全抵消固定荷载弯矩效应存在一定困难, 因为桥梁材料强度与横截面高度有一定限制, 提高预应力效应或准确估算测量挠度变化是控制桥梁挠度过大的有效方法。该文结合湖南省涟源龙塘至新化琅塘高速公路

白芦大桥, 采用倾角仪测量大跨径砼箱梁桥的挠度, 并采用灰色关联法进行挠度预测。

1 桥梁挠度测量原理

1.1 倾角仪测量挠度

在桥梁上选取多个测量控制点, 采用倾角仪测量各点的倾角值, 对倾角值进行积分, 再利用最小二乘法得到控制点界面对应桥梁截面沿轴线方向的挠度值。如图 1 所示, K 代表桥梁上设置的倾角仪, θ_{ij} 为 i 倾角仪在第 j 状态对应的倾角值, $j=1$ 或 $j=2$ 表示倾角仪测量前后的两种不同状态, 则对应的桥梁挠度变形量 Δy_i 为:

$$\Delta y_i = x_i (\tan \theta_{i1} - \tan \theta_{i2}) \quad (1)$$

式中: x_i 为倾角仪到始点的距离。

活动荷载对桥梁的影响非常小, 对应的倾角值也很小, 式(1)可简化为:

$$\Delta y_i \approx x_i \theta_i \quad (2)$$

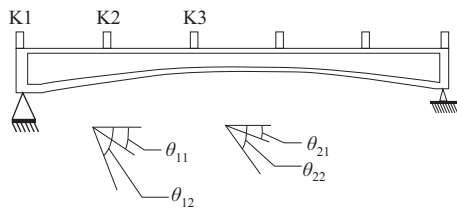


图 1 倾角仪测量桥梁挠度示意图

1.2 长期挠度测量系统原理

在桥梁第 i 跨设置 k 个倾角仪, 挠度曲线方程如下:

$$y = \sum_{j=1}^k A_j g(x_j) \quad (3)$$

式中: A_j 为测量系统中每个函数组的常数矩阵; $g(x_j)$ 为特殊函数, 具有线性无关性; j 为 i 跨上监

测点。

为实现倾角与挠度之间的转换关系,按下式对式(3)中 x 进行求导:

$$y(x_i) = \sum_{j=1}^k B_j g(x_j) \mid_{x_j=x_i} = \theta(x_j) \quad (4)$$

式中: B 为 A 与 $g(x_j)$ 一阶导数对应的系数乘积,是常数矩阵; $\theta(x_j)$ 为倾角仪测量倾角值。

设置目标函数状态为实验状态下桥墩支座发生位移,位移下沉量 $y(0)$ 与 $y(L)$ 对应的函数为:

$$y(0) = \sum_{j=1}^k A_j g(x_j) \mid_{x_j=0} \quad (5)$$

$$y(L) = \sum_{j=1}^k A_j g(x_j) \mid_{x_j=L}$$

根据式(5)可得到 K 数值一阶方程组、2 个 K 阶方程组,再结合最小二乘法得到挠度函数矩阵 A_j^* ($j=1,2,3,4,\dots,K$)。将该公式带入式(3),得到目标挠度曲线方程:

$$y = \sum_{j=1}^k A_j^* g(x_j) \quad (6)$$

2 工程实例分析

2.1 工程概况

湖南省涟源龙塘至新化琅塘高速公路全长 4.5 km,主线共设置 4 座大桥,其中白芦大桥长 426 m,采用 14×30 m 连续 T 梁,主桥为五跨变截面连续桥梁,路面宽 30 m。箱梁根部高 9 m,跨中梁高 3 m,箱梁高从距中心 3.0 m 处到跨中呈二次抛物线变化,顶板宽 16 m。

2.2 环状测量控制点布置

采用国家三等测量技术标准进行挠度测量,以基准点和工作基点为基础分别在桥梁的两端设置基准网形成闭合测量环路(见图 2)。

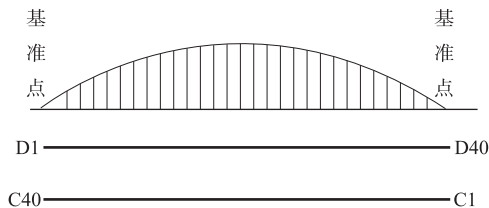


图 2 挠度监测点布置示意图

2.3 测量控制内容与要求

桥梁两端的基准点与桥梁挠度监控倾角仪布置控制点构成闭合回路,采用 $\pm 3''/\text{km}$ 倾角仪。在桥梁运行初期开始测量,周期为 3 个月观测 4 次;正式运营后半年观测 1 次。采用倾角仪观测倾角变化对

应的沉降需满足以下要求:倾角仪观测点为偶数;基辅划分角度之差不大于 3° ,若观测有误差,则再次测量;倾角仪的闭合误差不大于 3° 。为降低移动荷载对测量的影响,数据采集时间为 4:00—6:00。

2.4 倾角仪测量精度分析

该桥采用国家三级标准进行挠度测量,对该精度等级倾角仪的测量精度进行分析。设 $\theta_{H_i}^j$ 、 $\theta_{H_{i+1}}^j$ 和 $\theta_{H_i}^k$ 、 $\theta_{H_{i+1}}^k$ 分别为 j 、 k 点在 i 与 $i-1$ 之间的角度误差值,则 j 、 k 点对应的测量角度误差分别为:

$$(\theta_{\Delta H}^j)^2 = (\theta_{H_i}^j)^2 + (\theta_{H_{i+1}}^j)^2 \quad (7)$$

$$(\theta_{\Delta H}^k)^2 = (\theta_{H_i}^k)^2 + (\theta_{H_{i+1}}^k)^2$$

J 、 k 点之间的差异沉降误差中值为:

$$(\theta_{\Delta H_{jk}})^2 = (\theta_{\Delta H_i}^k)^2 + (\theta_{\Delta H_{i-1}}^j)^2 + (\theta_{\Delta H_i}^j)^2 + (\theta_{\Delta H_{i-1}}^k)^2 \quad (8)$$

该桥观察期为运营初级 6 个月,数据采集时间为 4:00—6:00,对应的外界环境基本相同,故:

$$\begin{aligned} \theta_{\Delta H_i}^k &= \theta_{\Delta H_{i-1}}^k = \theta_{\Delta H_i}^j = \theta_{\Delta H_{i-1}}^j \\ (\theta_{\Delta H_i}^k)^2 &= 4(\theta_{H_i}^j)^2 \rightarrow \theta_{\Delta H_i} = 2\theta_{H_i} \end{aligned} \quad (9)$$

该桥挠度监测点离基准点的最远距离为 900 m,监测距离最远的角度偏差 $\theta_{\Delta H_i} = \pm 3\sqrt{0.9} = 2.82^\circ$,小于国家二级测量标准中角度偏差不大于 3° 的要求。

2.5 测量数据分析

在桥梁上设置多个连续形成闭合状态的倾角仪测量角度变化,对角度值进行积分,利用最小二乘法得到桥梁沿纵向的下沉挠度,再以极限检验法以 2 倍中误差寻找测量不稳定点,若出现不稳定点,则对倾角进行误差修正。图 3、图 4 为根据倾角仪测量角度求导所得桥梁挠度。

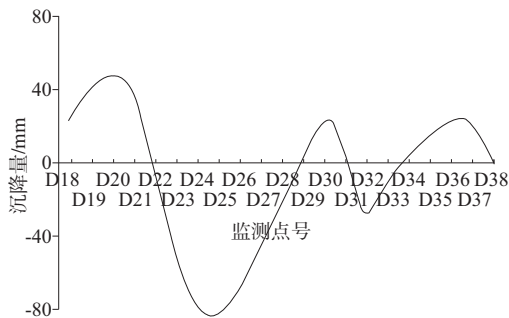


图 3 桥梁挠度监测变化曲线

由图 3、图 4 可知:随着桥梁使用时间的增长,各测点的挠度仍在降低,表明经过长时间的使用桥梁挠度变形仍在继续;前期由于桥梁处于不稳定试运营阶段,变形量较大,后期逐步稳定,但累计变形量在变大;各边跨跨中挠曲变形明显,出现向上的弧

拱;边跨相对于中跨与次跨其挠度值较小。

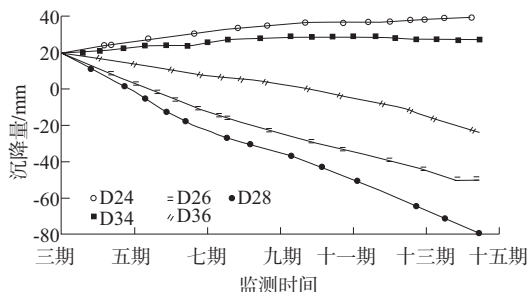


图4 重要监测点的挠度变化曲线

采用 MIDAS/Civil 建立模型(见图 5)对该桥工作环境与通行情况进行模拟,得到不同阶段挠度变化曲线(见图 6)。不同运营时间的挠度变化实测值与预测值的比较见图 7~9。

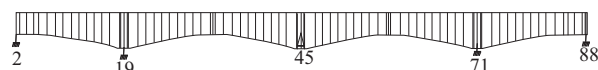


图5 白芦大桥结构计算模型

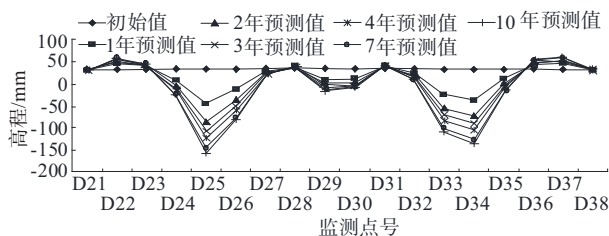


图6 白芦大桥挠度变形预测值

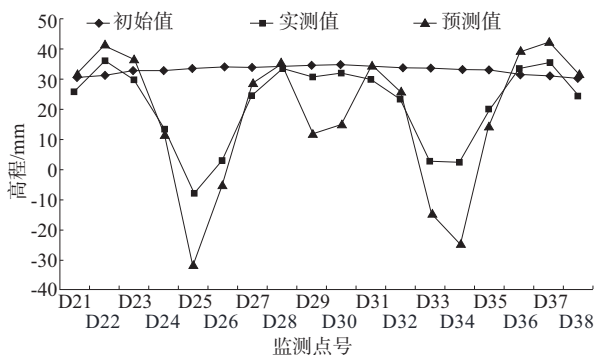


图7 白芦大桥通行2年后实测挠度与预测挠度比较

由图 7~9 可知:该桥实测挠度与计算挠度基本相符,挠度变化与桥梁变形规律一致,桥梁通行时间越久,实测值与计算值越接近;计算挠度比实测挠度稍大;实测值在桥梁结构可接受挠度变化范围内,桥梁处于健康状态。

2.6 桥梁挠度变形预测

根据图 3,监测点 D24 与 D33 的测量挠度变化较大,采用灰色模型对这两个监测点的挠度进行预测。将近一期监测数据加入预测模型,综合考虑其

他监测点的挠度,采用计算机软件对数据进行灰色理论拟合,实测值与预测值对比见图 10。

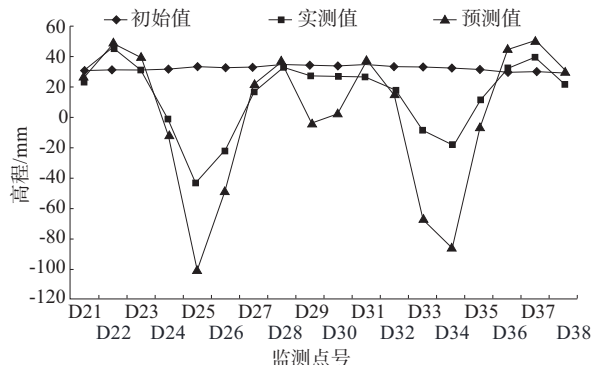


图8 白芦大桥通行5年后实测挠度与预测挠度比较

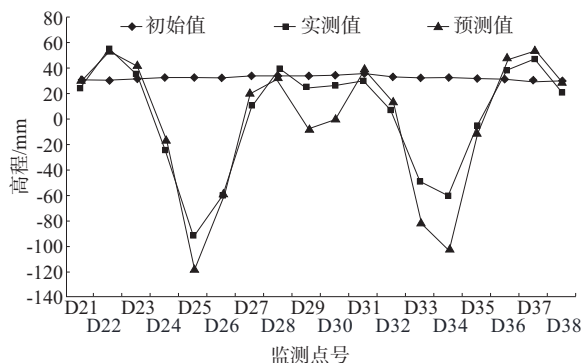


图9 白芦大桥通行8年后实测挠度与预测挠度比较

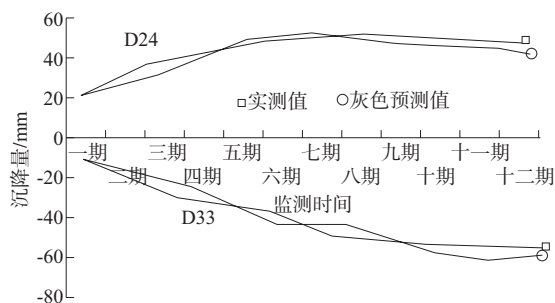


图10 D24与D33监测控制点挠度实测值与预测值对比

由图 10 可知:倾角仪测量挠度与灰色模型预测挠度基本一致,采用灰色模型进行挠度预测具有整体精度高、可靠性强的特点,能对桥梁变形进行实时预测。

3 结论

(1) 采用倾角仪能在误差范围内对大跨径预应力砼桥梁的边跨、中跨等进行挠度测量,其测量精度满足国家二级测量标准。

(2) 灰色模型预测挠度值与倾角仪测量挠度值基本吻合,灰色模型可用于大跨径预应力砼桥梁挠

(下转第 135 页)

值、应力(应变)校验系数均值、相对残余应变均值、冲击系数实测最大值与理论值之比、一阶竖弯自振频率实测值与理论值之比 6 种荷载试验参数指标建立基于熵值法加权灰靶理论的空心板桥结构状况评价模型,对 8 座桥梁的技术状况进行评价,评价结果与按《城市桥梁养护技术规范》评价的结果基本一致,准确率达 75%,该模型可用于预应力砼空心板桥结构工作状况评价。

(2) 参数指标权重值经熵值法求得,由于数据样本差异、参与评价因素的灰性等原因,该权重值能反映各指标对桥梁结构工作状况评价影响的相对大小,可为桥梁结构工作状况评价提供一定参考,但不具有绝对性。

参考文献:

- [1] 张彬,滕飞.现役桥梁承载能力的灰靶理论评价[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015,34(4).

- [2] 秦煜,刘来君,张艳,等.混凝土桥梁结构工作状况综合评价体系[J].广西大学学报:自然科学版,2011,36(4).
[3] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
[4] 邓聚龙.灰色理论基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.
[5] 许涛,黄晓明,赵永利.隧道路面类型选择及调查研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(1).
[6] 邱薏华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2002.
[7] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力评定规程[S].
[8] CJJ 99—2017,城市桥梁养护技术规范[S].
[9] 赵慧.预应力砼空心板现场静载试验研究[J].公路与汽车,2019(2).
[10] 张永平,关良勇,黄应征.某预应力混凝土空心板桥火灾后检测评估[J].公路交通科技:应用技术版,2018(11).

收稿日期:2019-08-01

(上接第 120 页)

度预测。

参考文献:

- [1] 牛艳伟,石雪飞,阮欣.大跨径砼梁桥的长期挠度实测分析[J].工程力学,2008,25(增刊 1).
[2] 贺拴海,李源,任伟,等.大跨连续刚构桥长期挠度实测分析及预测[J].武汉理工大学学报,2014,36(4).
[3] 郝章喜,吴雪城,彭鹏,等.大跨径预应力混凝土箱梁桥长期挠度分析[J].西部交通科技,2016(6).
[4] 杨斌,陈闯,韦仕荣,等.大跨径连续刚构桥长期下挠影响因素分析[J].贵州大学学报:自然科学版,2017,34(6).
[5] 陈旭,刘秀霞,谭建德.大跨径连续刚构桥跨中下挠影

响因素分析[J].西部交通科技,2012(2).

- [6] 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,2015,26(1).
[7] 杜晓冬.大跨径预应力混凝土连续刚构桥长期挠度分析及施工控制实践[D].西安:长安大学,2011.
[8] 叶贵如,周玉龙.倾角仪在大跨度桥梁挠度检测中的应用[J].公路交通科技,2015,26(11).
[9] 戈铭,孙泽信.大跨度预应力混凝土箱梁桥的挠度监测与预测研究[J].现代交通技术,2016,7(5).
[10] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力评定规程[S].

收稿日期:2019-06-24

(上接第 131 页)

从三维方向上分别就位。其主要技术特点:1) 顺桥向设置可靠的反力座,临时墩采用精轧螺纹钢串联,使千斤顶和临时墩的水平力可靠地传递到反力座上,有效解决拖拉过程中抵抗水平力的关键问题。2) 纵移滑道和横移滑道的合理转换是其关键施工技术之一。3) 不设导梁是其特点之一。

参考文献:

- [1] 程慧林.曲线桥顶推施工技术[J].铁道建筑技术,2004(2).
[2] 贾建平.高架桥施工支架横移及纵向拖拉施工技术[J].国防交通工程与技术,2003(4).

- [3] 胡云江,王骞.拱架横移技术在吊南河大桥上的运用[J].交通世界,2013(15).
[4] 洪建和,齐庆明,杨春梅.跨线桥整体纵向拖拉就位法简介[J].铁道建筑技术,2008(8).
[5] 刘文武,张志才,范君.晋豫鲁铁路通道跨京广线钢桁梁拖拉法施工技术[J].铁道建筑,2014(9).
[6] 巩立伟.浅谈 70 m 箱梁 MGB 板滑移法[J].铁道建筑技术,2007(增刊).
[7] 王德宇,卢浩,孟庆祥.大跨度预制箱梁横移架设技术[J].铁道建筑,2003(7).
[8] 韩荟,石雅清.侧位横移转纵移喂梁在架梁工程中的应用[J].山西建筑,2012,38(18).

收稿日期:2019-10-27