

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.108



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



高速铁路大跨度混凝土拱桥变形监测与分析

颜永逸¹, 杨国静¹, 宋晓东¹, 翁顺², 田炜³

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074; 3. 香港理工大学 土木及环境工程学系, 香港 999077)

摘要: 高速铁路设计时速快, 变形控制要求高。由于结构的受力特点和混凝土材料的特性, 混凝土拱桥在运营过程中会出现下挠变形, 直接影响轨道线形和行车安全。为保障沪昆客运专线北盘江大桥的行车安全性和舒适性, 通过对其建立自动化变形观测系统, 分析其变形和温度数据的变化规律, 结合拟合分析方法, 确定温度和变形的影响系数, 研究实测数据中徐变和温度效应的提取方法。结果表明: 与同期人工观测数据相比, 本系统的观测精度和有效性满足要求; 桥面线形受温度变化影响较敏感, 在低温时, 不均匀沉降差值大, 桥面线形相对不平顺, 随着温度升高, 沉降差值减小, 桥面线形逐渐趋于平顺; 通过建立的拟合计算徐变分析方法得到其相对徐变变形, 与规范理论值相差约 6%, 满足工程要求。

关键词: 高速铁路; 大跨度拱桥; 混凝土拱桥; 变形监测; 徐变

中图分类号: U446.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)03-0079-07

Deformation monitoring and analysis of long span high-speed concrete arch railway bridge

YAN Yongyi¹, YANG Guojing¹, SONG Xiaodong¹, WENG Shun², TIAN Wei³

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu 610031, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China; 3. Department of Civil & Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, P. R. China)

Abstract: High-speed railways are designed with high speed and therefore with deformation control requirements. Due to the structural mechanical characteristics and the material properties of concrete, the concrete arch bridge inevitably exhibit downward deflection in operation, which directly affects the track alignment and operation safety. In order to ensure the driving safety and comfort of Beipanjiang Bridge in Shanghai Kunming passenger special line, an automatic deformation observation system was established to monitor the deformation and temperature changes. The extraction methods of creep and temperature effect were studied. The impact factor of temperature and deformation were determined with polynomial fitting.

收稿日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(51778258, 51922046); 中铁二院院控计划(KYY2019029(19-21))

作者简介: 颜永逸(1993-), 男, 主要从事桥梁健康监测研究, E-mail: yanyyboy@qq.com.

翁顺(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: wengshun@hust.edu.cn.

Received: 2021-02-22

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778258, 51922046); Research Project of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, (No. KYY2019029(19-21))

Author brief: YAN Yongyi (1993-), main research interest: bridge health monitoring, E-mail: yanyyboy@qq.com.

WENG Shun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: wengshun@hust.edu.cn.

The results show that: The accuracy and effectiveness of the observation system satisfy the requirements; the bridge deck alignment is sensitive to the temperature change, the uneven settlement is great under low temperature, which decreases as the temperature rises; using the proposed creep analysis method, the relative creep deformation is only about 6% different from that of the theoretical value, which meets the computational precision requirements in engineering practice.

Keywords: high-speed railway; long-span arch bridge; concrete arch bridge; deformation monitoring; creep

山区铁路随西部大开发策略的实施得到高速发展。但山区峡谷地形复杂,环境恶劣,大跨度混凝土拱桥因其良好的刚度和环境适应性在铁路建设中得到广泛应用^[1]。对于高速铁路,过大变形会影响桥梁的平顺性、舒适性和安全性,因此,桥梁的长期变形控制要求很高^[2]。由于结构的受力特点和混凝土材料的特性,混凝土拱桥在运营过程中会出现下挠变形,需要对桥梁的变形开展监测和分析^[3]。

学者们对大跨度拱桥的变形与控制展开了深入的研究。徐昕宇等^[3]基于车桥耦合分析,考虑了温度和徐变的影响,提出了“弦测法”技术的上承式拱桥变形控制方法和限值。尽管对于结构的变形控制有从理论分析和实际调控的众多方法,但准确获取结构的变形,特别是其中的徐变变形仍然是当前值得重点研究的难题。为了获得结构的变形和徐变变形成分,马坤等^[4]采用 GL2000 收缩徐变模型,考虑模型及参数的随机性,分别采用拉丁超立方抽样技术和基于响应面的 Monte carlo 抽样技术,对北盘江特大桥长期变形的随机性问题进行研究。张双洋等^[5]对北盘江大桥的收缩徐变进行了模型实验研究。张正阳等^[6]基于北盘江大桥的模型试验,结合贝叶斯方法对拱桥的长期变形和收缩徐变建立了模型并开展了预测。王永宝等^[7]建立了自然条件下徐变的预测模型。还有众多学者开展了模型试验与理论分析,都获得了一定的研究效果^[8-11]。但在运营过程中,桥梁结构施工过程、荷载和环境等多方面因素不断变化,对模型试验和理论计算得到的结构变形影响较大^[12]。因此,开展基于实桥的大桥变形监测与分析技术研究,才能得到更为合理的桥梁长期变形。

Brownjohn 等^[13]采用主成分分析方法分析了长期监测数据,得出桥梁的挠度与温度并非一般的线性关系,但并未量化温度影响。吴海军等^[14]利用重庆江津长江大桥的挠度监测系统数据,分析得到了结构挠度与温度变化之间的滞后效应。陈国良等^[15]利用挠度分量在时间尺度上不耦合的性质,提出了基于时间序列分析的挠度-温度效应分离方法,并以黄冈长江大桥的实测数据验证了该方法。刘纲

等^[16]在推导了温度和挠度的理论关系后,得到了位移与整体升降温的线性关系,并基于粒子群算法提取到了温度对变形的影响效应,提出了一种消除长期健康监测中温度效应的方法,并以长江上某主跨 330 m 的连续刚构桥进行了验证。Wang 等^[17]基于混凝土徐变的微预应力凝固理论,将龄期调整有效模量法和温度估算法集成到有限元模型中,提出了一种评价温度对钢管混凝土拱桥徐变性能影响的方法。预测结果与实测结果的对比验证了该方法的有效性,也说明钢管混凝土拱桥徐变效应分析中考虑温度的必要性。尽管还有众多学者对温度与变形的实测关系开展了研究,但这些方法较为复杂,或需要结合复杂的数学模型,或对关键参数的设置较敏感,实用性不强。

笔者基于实际监测得到的温度和变形数据,利用回归拟合分析,通过确定温度的周期影响范围和线性影响参数,提出一种新的大跨混凝土拱桥的徐变变形分析方法,并且以沪昆客运专线北盘江大桥的实测数据进行分析验证,结果表明,该方法的计算结果与规范的理论值吻合,且计算简单,无敏感参数设置,计算效率较高,适用性强。

1 工程概况

沪昆客运专线北盘江特大桥(如图 1 所示)为世界最大跨度混凝土拱桥,设计时速 350 km/h,桥梁全长 721.25 m,主桥设计为 445 m 上承式劲性骨架钢筋混凝土拱桥,矢高 100.0 m,矢跨比 1/4.45。桥址位于典型的 V 字形峡谷,山高坡陡、地形复杂。



图 1 北盘江特大桥

Fig. 1 Beipanjiang Bridge

轨道平顺性是高速铁路行车安全性和舒适性的重要保证,其对桥梁变形极为敏感。北盘江特大桥主跨大、运行时速高,为采用劲性骨架施工法的大跨度钢筋混凝土拱桥。采用此种施工方法形成的拱圈结构体系发生多次转换,结构刚度和强度也逐步形成,后期的收缩徐变变形非常复杂。由于山区独特的地形条件,不均匀的日照温差也会引起桥面的不确定变形。这些都给准确计算结构温度变形造成了很大的困难,直接影响到了轨道线形,进而影响到列车行车安全性和舒适性。因此,有必要对北盘江特大桥桥面变形进行长期监测,建立符合其结构特点的变形观测系统。通过实时监测,一方面确保运营行车安全,为日后养护管理决策提供科学依据;另一方面,掌握这种特殊桥型的收缩与徐变的变形特征

及变化规律。

由于监测的重点是拱圈徐变变形及温度变化引起拱上梁竖向变形,因此,为了准确测量拱圈收缩徐变、温度作用引起的梁部下挠,在北盘江大桥的下游侧共选取了 14 个测点,上游侧选取了 3 个测点(如图 2),自下游标示位置引液管至上游对应测点,采用静力水准仪对竖向变形进行观测,监测基准点可设置于小里程侧桥台处。考虑到传感器设备安装、更换方便且不影响后期运营维护、检查,将观测点设置在拱上墩对应的箱梁内部,它能直接反映出梁部在运营期间由于拱圈收缩徐变和温度变化引起的上下起伏情况。2016 年 7 月,在沪昆线北盘江特大桥顺利完成了桥面线形自动化监测系统的安装和初调,并在 8 月完成了系统的移交。

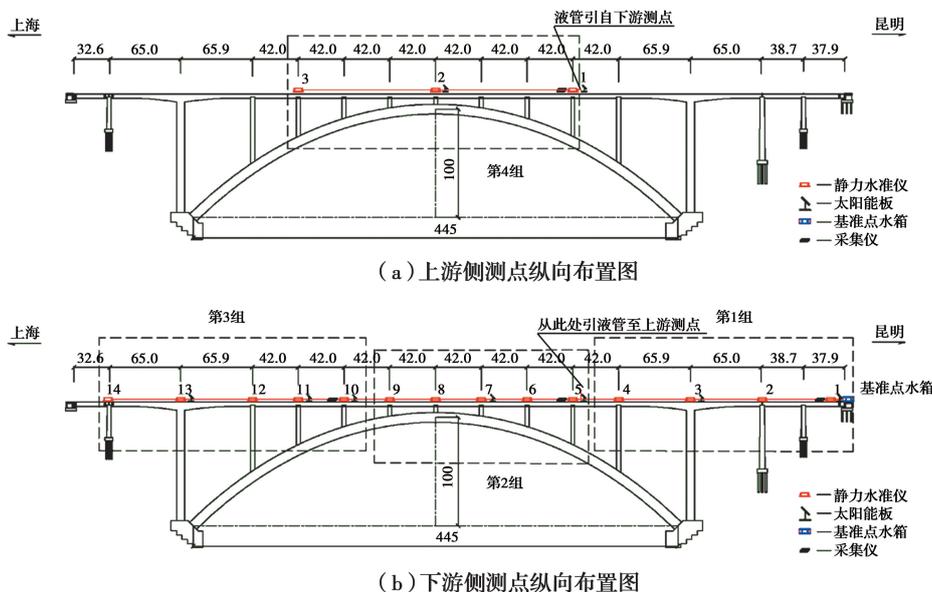


图 2 北盘江特大桥监测测点布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of monitoring points of Beipanjiang bridge(unit: m)

中铁二院测绘院自 2016 年 1 月 2 日至 2016 年 10 月 23 日对北盘江特大桥开展了人工观测。选取下游拱顶测点 2016-10-02—2016-10-23 时间段人工观测数据与同期自动化系统监测数据进行对比分析,沉降差异值数据结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,该期各监测部位均有不同程度的沉降变形发生,最大沉降变形发生在拱顶 5 号墩处,人工观测的沉降值为 21.6 mm,自动化监测的沉降值为 21.4 mm。两种监测方法各监测点的最大差值仅为 0.966 mm,自动化监测结果与人工观测结

果吻合较好,表明自动化监测具有较高的可靠性,且能满足高速铁路桥梁变形测量精度要求。

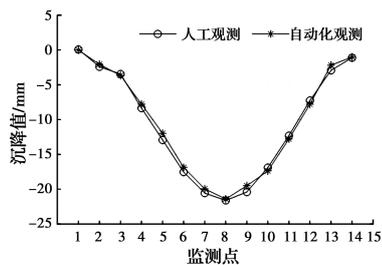


图 3 人工观测与系统观测数据对比图

Fig. 3 Comparison of manual observation and system observation data

2 变形分析与徐变计算

2.1 实测变形分析

为更直观地研究北盘江大桥桥面线形随温度和收缩徐变等的变形趋势,选取了系统运营半年内(2016-10-01—2017-05-18)的 8 个不同时间点,绘出了桥面下游各测点随时间(或温度)变化的趋势图,如图 4 所示。

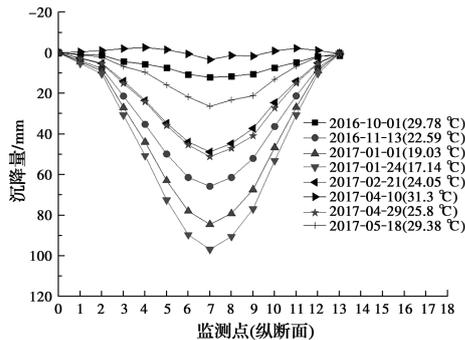


图 4 桥面线形随温度和时间的变化

Fig. 4 Variation of bridge deck alignment with temperature and time

由图 4 可知,桥面线形受温度变化影响较为敏感。在选取的几个时间段中,2017-01-24 的温度最低(17.14 °C),不均匀沉降差值最大,相对于桥台处,拱顶沉降达到 95 mm,桥面线形相对不平顺。随着温度的逐渐上升,沉降差值逐渐减小,当温度值为 31.3 °C 时(2017-04-10),相对于桥台处,拱顶的沉降差值最小,不到 5 mm,桥面线形处于较平顺状态。从上述分析可看出,截止桥梁开通运营半年内,影响桥面线形不平顺的主要因素依然是温度。收缩徐变的影响尚需延长观察时间进行判断。

2.2 变形成分分析

桥梁的徐变需要在长期的变形监测中分离得出,而通常情况下,长期监测的变形 S 中,不仅仅有徐变变形,还有温度效应、荷载效应和损伤效应。

$$S = S_T + S_P + S_C + S_D + S_R \quad (1)$$

式中: S_T 为温度效应; S_P 为荷载效应; S_C 为混凝土的收缩徐变; S_D 为结构损伤; S_R 为系统误差。

北盘江大桥为新建桥梁,且属于世界级重大工程,施工质量控制要求高,因此,可以认为在当前阶段其结构损伤效应基本没有。由于本系统与人工观测数据对比可靠性较高,因此,也可暂时忽略系统误差效应。对于荷载效应,通过选取不行车时间段的变形进行相应剔除。实际上,本阶段大桥的主要变

形成分为温度效应和收缩徐变效应,如何有效剔除温度效应成分变成了问题的关键。

通常,温度效应主要包含了两个主要成分:日温差和年温差。这两者在时间尺度上与其他成分不耦合,但日温差和年温差对于结构变形上引起的单位温差效应是相同的,所以,分离温差效应是可行的,但直接分离出日温差和年温差带来了更为复杂的计算。

2.3 徐变拟合计算方法

为快速、简单地得到徐变和温度效应的计算方法,提出二次拟合回归分析算法,并可对徐变数据进行相应预测。其过程如下:

1) 通过观测,获得桥梁结构的挠度变形数据和对应的温度数据。

2) 选取挠度变形和温度数据的日特征数据(通常可取凌晨时刻的数据,此时温度稳定,无列车荷载),假定日特征数据的总量为 N 。

3) 由于温度存在年温差效应,首要因素就是确定年度温差的影响时间范围,或确定其影响周期。选取第一时间间隔天数为 i ,计算日特征数据中的第 t 个数据和第 $t+i$ 个数据之间的挠度变形差 s_t^i 和温差 T_t^i ,建立一个样本 (s_t^i, T_t^i) , $t=1, 2, 3, \dots$,且满足 $t+i < N$,计算所有的 t ,得到时间间隔 i 下的挠度变形差和温差形成的 1 个第一样本集 U_i^1 ,即 $U_i^1 = [(s_1^i, T_1^i), (s_2^i, T_2^i), (s_3^i, T_3^i) \dots]$,对 U_i^1 以温差 T 为自变量得到拟合一次项系数,并取其绝对值为 k_i 。依次计算 $i=1, 2, 3, \dots$,得到 $U_1^1, U_2^1, U_3^1 \dots$,分别拟合计算 $k_1, k_2, k_3 \dots$ 得到关于 $i-k$ 的曲线,根据 $i-k$ 曲线的拐点确定 i' ; i' 即为温度的最大影响天数,即影响周期。

4) 为提高计算效率,在温度影响周期下,建立线性的温度与变形影响关系系数。选取第二时间间隔天数为 p ,得到 p 对应的 1 个第一样本集 $U_p^1 = [(s_1^p, T_1^p), (s_2^p, T_2^p), (s_3^p, T_3^p) \dots]$ 。依次计算 $1p, 2p, 3p \dots np$,且 $np \leq i'$,得到 $U_p^1, U_{2p}^1, U_{3p}^1 \dots$,将 $U_p^1, U_{2p}^1, U_{3p}^1 \dots$ 集合形成第二样本集 $U^2 = [U_p^1, U_{2p}^1 \dots U_{3p}^1 \dots]$,对 U^2 以温差 T 为自变量得到拟合一次项系数,取该系数的绝对值为挠度变形差和温差的线性关系系数 K ,此即在温度周期下的温度与变形影响系数,通常要求 K 的 R^2 指标 > 0.85 。

5) 计算日特征数据的每相邻两个温度的温差 T' ,以日特征数据的第一个数据为基准,用温差 T

乘以系数 K , 并依次累计求和, 得到温度效应的变形曲线。

6) 用日特征数据曲线减去温度效应得到残余变形曲线。将残余变形曲线进行二阶最小二乘拟合, 进一步可以得到徐变随时间的拟合公式, 用以预测。

3 北盘江大桥徐变分析结果

选取北盘江大桥下游拱顶处的传感器自 2017 年 1 月 1 日至 2020 年 6 月 29 日为期 3 年半的变形观测数据进行分析。变形和温度的原始监测数据分别如图 5 所示。

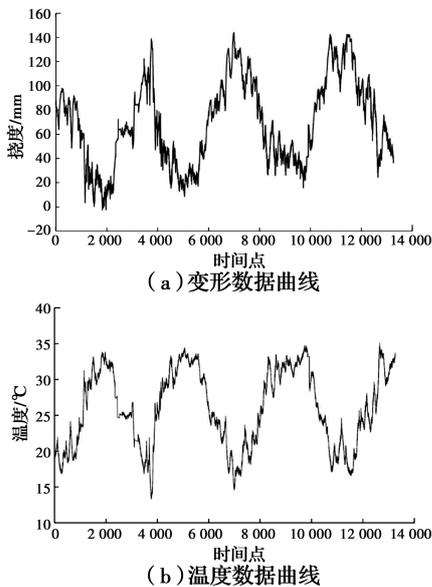


图 5 原始监测曲线
Fig. 5 Original monitoring curve

从图 5 可以看出, 北盘江大桥的变形和温度呈现周期规律, 最大相对变形为 140 mm, 最高温度为 34 °C。

选每日凌晨监测到的第一个数据作为日特征数据, 这样一方面没有列车荷载的效应, 另一方面日温差效应较小, 温度和变形较为稳定, 得到的日特征曲线如图 6 所示。

经过第 3 步得到的 $i-k$ 曲线如图 7 所示, 由此确定曲线的拐点为 $i' = 60$ 。

选定第 4 步中的 $p = 5$, 并得到 U^2 和温差 T 的分布数据和其拟合一次项系数如图 8 所示。由此确定挠度变形差和温差的线性关系系数为 $K = 6.17$ (R^2 为 0.970 6)。

按照 $K = 6.17$ 计算得到的温度效应曲线和徐变曲线分别如图 9、图 10 所示。从图 9 中可以看出,

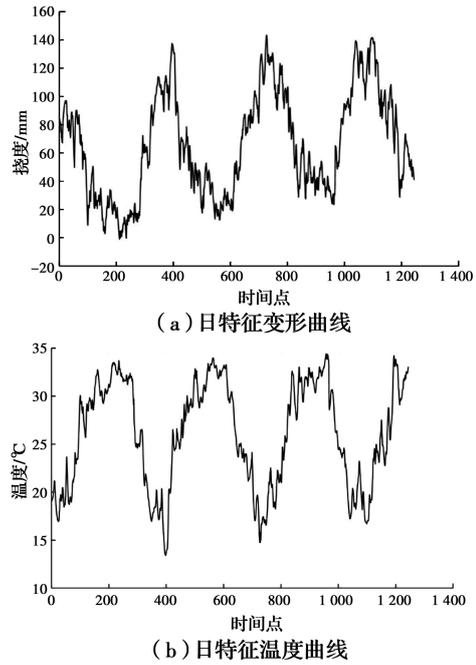


图 6 日特征曲线
Fig. 6 Daily characteristic curve

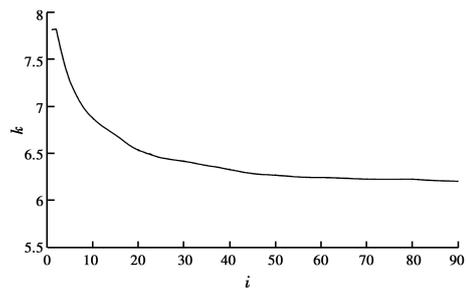


图 7 $i-k$ 曲线
Fig. 7 $i-k$ curve

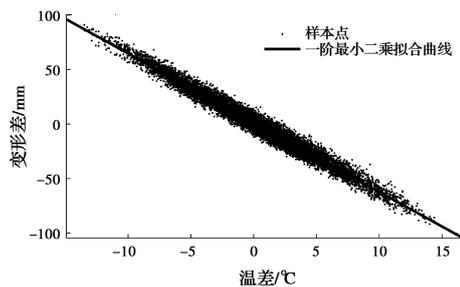


图 8 系数 K 拟合图
Fig. 8 Fitting diagram of coefficient K

经过分离后的温度效应呈现更显著的周期规律, 最大和最小的温度效应变形差达到 134 mm。

从图 10 得到北盘江大桥自 2017 年 1 月 1 日至 2020 年 6 月 29 日发生的相对徐变变形约为 47.8 mm。为验证该结果的有效性, 按照中国铁路 05 规范通过 Midas Civil 软件计算北盘江大桥的理

论徐变变形如表1所示。

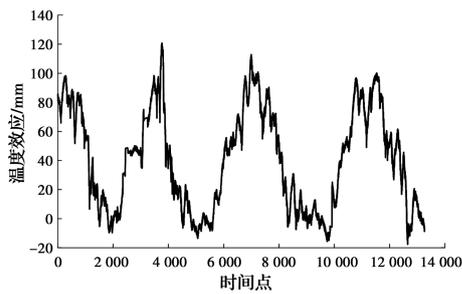


图9 温度效应曲线

Fig. 9 Temperature effect curve

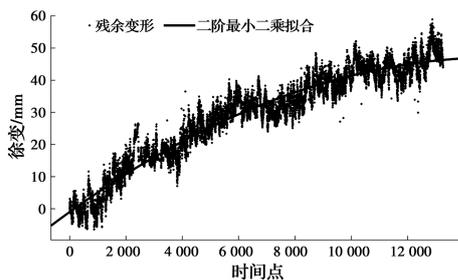


图10 徐变拟合曲线

Fig. 10 Creep fitting curve

表1 理论计算徐变值

Table 1 Theoretical creep value

时间/月	徐变理论值/mm
6	22.9
12	37.2
24	58.7
36	73
48	80.9

依据表1计算自2017年1月1日至2020年6月29日发生的相对徐变变形(后者徐变值减去前者徐变值,后者徐变值按表中相邻月份值线性内插得到)约为50.9 mm,与实测徐变47.8 mm相差6%,且实测徐变相对较小,基本满足工程要求。并且基于该拟合二次曲线,还可推进时间达到对结构徐变的适当预测效果。

4 结论

沪昆客运专线北盘江特大桥设计时速快,变形控制要求高。为保障列车行车安全性和舒适性,建立了符合其结构特点的变形观测系统,通过对数据的分析得到如下结论:

1)与人工观测数据对比,本自动化系统的观测精度较高,有效性满足要求。

2)桥面线形受温度变化影响较为敏感。在温度最低时,不均匀沉降差值大,桥面线形相对不平顺。随着温度的逐渐上升,沉降差值逐渐减小,桥面线形逐渐处于较平顺状态。

3)提出了一种大跨度拱桥徐变计算方法,通过确定温度和变形的影响系数,采用拟合分析的方法提取实测数据中的徐变和温度效应。截至2020年6月29日,该桥的计算相对徐变变形约为47.8 mm,与规范理论值50.9 mm相差6%,满足工程要求。

参考文献:

- [1] 赵人达,张正阳. 我国钢管混凝土劲性骨架拱桥发展综述[J]. 桥梁建设, 2016, 46(6): 45-50.
ZHAO R D, ZHANG Z Y. A summary of development of concrete-filled steel tube framed arch bridges in China [J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 45-50. (in Chinese)
- [2] 陈克坚,杨国静,胡玉珠. 铁路大跨度混凝土拱桥徐变变形控制因素研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 48-53.
CHEN K J, YANG G J, HU Y Z. Research on the creep control factors of railway long-span concrete arch bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 48-53. (in Chinese)
- [3] 徐昕宇,郑晓龙,陈克坚,等. 基于弦测技术的铁路上承式拱桥桥面变形限值研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8): 74-79.
XU X Y, ZHENG X L, CHEN K J, et al. Investigation on the limit value of deck deformation of railway deck arch bridge by chord measurement method [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(8): 74-79. (in Chinese)
- [4] 马坤,向天宇,赵人达,等. 高速铁路钢筋混凝土拱桥长期变形的随机分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 141-146.
MA K, XIANG T Y, ZHAO R D, et al. Stochastic analysis of long-term deformation of reinforced concrete arch bridges for high-speed railways [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 141-146. (in Chinese)
- [5] 张双洋,赵人达,占玉林,等. 收缩徐变对高铁混凝土拱桥变形影响的模型试验研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(12): 102-110.
ZHANG S Y, ZHAO R D, ZHAN Y L, et al. Model test study on influence of creep and shrinkage on

- deformation of high-speed railway concrete arch bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38 (12): 102-110. (in Chinese)
- [6] 张正阳, 赵人达. 高速铁路混凝土拱桥长期变形贝叶斯预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8): 1875-1881.
ZHANG Z Y, ZHAO R D. Bayesian prediction of long-term deflection of high-speed railway concrete arch bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8): 1875-1881. (in Chinese)
- [7] 王永宝, 贾毅, 廖平, 等. 自然环境条件下混凝土徐变预测模型[J]. 铁道学报, 2018, 40(7): 100-108.
WANG Y B, JIA Y, LIAO P, et al. Prediction model of concrete creep in natural environment [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(7): 100-108. (in Chinese)
- [8] YOON Y S, LEE S K, LEE M S, et al. Rheological concrete creep prediction model for prestressed concrete bridges constructed by the free cantilever method [J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63 (9): 645-653.
- [9] RAPHAEL W, ZGHEIB E, CHATEAUNEUF A. Experimental investigations and sensitivity analysis to explain the large creep of concrete deformations in the bridge of Cheviré [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 9: 1-8.
- [10] KOLÍNSKÝ V, VÍTEK J L. Verification of numerical creep and shrinkage models in an arch bridge analysis [J]. Structural Concrete, 2019, 20(6): 2030-2041.
- [11] FENG S Y, WEI L M, HE C Y, et al. A computational method for post-construction settlement of high-speed railway bridge pile foundation considering soil creep effect [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(7): 2921-2927.
- [12] BAZANT Z P, YU Q, LI G H. Excessive long-time deflections of prestresses box girders. II: Numerical analysis and lessons learned [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(6): 687-696.
- [13] BROWNJOHN J M W, KOO K Y, SCULLION A, et al. Operational deformations in long-span bridges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11 (4): 556-574.
- [14] 吴海军, 王旭焱, 韦跃, 等. 混凝土桥梁健康监测中的温度滞后效应[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(27): 241-247.
WU H J, WANG X Y, WEI Y, et al. Temperature hysteresis effect in health monitoring of concrete bridges [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(27): 241-247. (in Chinese)
- [15] 陈国良, 林训根, 岳青, 等. 基于时间序列分析的桥梁长期挠度分离与预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 962-968.
CHEN G L, LIN X G, YUE Q, et al. Study on separation and forecast of long-term deflection based on time series analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44 (6): 962-968. (in Chinese)
- [16] 刘纲, 邵毅敏, 黄宗明, 等. 长期监测中结构温度效应分离的一种新方法[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 55-61, 100.
LIU G, SHAO Y M, HUANG Z M, et al. A new method to separate temperature effect from long-term structural health monitoring data [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 55-61, 100. (in Chinese)
- [17] WANG Y F, MA Y S, HAN B, et al. Temperature effect on creep behavior of CFST arch bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18 (12): 1397-1405.

(编辑 胡玲)