

# 高性能粉煤灰混凝土桥梁徐变变形控制研究

Research on Creep Deformation Control of High Performance Fly Ash Concrete Bridge

刘旭

(新疆铁道勘察设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 为了降低徐变变形对桥梁结构性能、使用寿命及安全性的不利影响, 提出一种高性能粉煤灰混凝土桥梁徐变变形控制方法。以高性能粉煤灰混凝土为例, 构建有限元模型, 获取桥梁的徐变参数, 并提出延长铺轨时间、设计铺设恒载的顺序、策划体内和体外预应力束徐变变形控制方法。结果表明: 使用4种控制方法后有效降低了徐变变形引起的桥梁下挠值与桥梁上拱值, 有效控制了混凝土桥梁的后期变形, 说明所提方法是合理可行的, 可为今后工程设计提供一定的理论依据。

**关键词:** 高性能粉煤灰; 徐变变形; 桥梁构件; 混凝土强度

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0116-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.021

LIU Xu

(Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** In order to reduce the adverse effects of creep deformation on the performance, service life, and safety of bridge structures, a high-performance fly ash concrete bridge creep deformation control method is proposed. Taking high-performance fly ash concrete as an example, a finite element model is constructed to obtain the creep parameters of the bridge, and to propose methods for extending the track laying time, designing the sequence of laying dead loads, and planning the creep deformation control of internal and external prestressed tendons. The results showed that the use of four control methods effectively reduced the deflection and arch values of the bridge caused by creep deformation, and effectively controlled the later deformation of the concrete bridge. This indicates that the proposed methods are reasonable and feasible, and can provide a certain theoretical basis for future engineering design.

**Keywords:** high performance fly ash; creep deformation; bridge components; concrete strength

## 0 引言

高性能粉煤灰混凝土因其优越性能在桥梁等结构工程中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。徐变是混凝土材料的特性之一, 对于桥梁等混凝土结构的安全性和耐久性

具有重要影响。特别是在高性能粉煤灰混凝土中, 如何有效控制其徐变变形, 以确保桥梁结构的安全性和耐久性, 成为当前工程领域亟待解决的问题<sup>[2]</sup>。因此, 研究高性能粉煤灰混凝土桥梁的徐变变形控制方法, 对提升桥梁工程的质量具有重要意义。

当前混凝土桥梁徐变变形控制方法的研究呈现出多元化和深入化的发展趋势, 国内外学者针对混凝土桥梁的徐变变形问题, 进行了大量的理论研究和试验验证。其中, 郭安娜<sup>[3]</sup>依托楠溪江特大桥, 研究混凝土斜拉桥运营阶段收缩徐变对结构的影响,

作者简介: 刘旭 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 桥梁。

收稿日期: 2023-03-30

并通过有限元分析,探索变形控制措施,研究得出调整斜拉索索力并增大主梁底板预应力钢束的面积可以有效减小后期的收缩徐变变形;贾毅等<sup>[4]</sup>以礼仁大桥为背景,进行 Madis Civil 建模,并改进混凝土收缩徐变计算模型,利用改进后的模型实现徐变变形控制,研究得出预应力混凝土构件的轴力受混凝土收缩徐变影响较小,而其结构弯矩则受到较大影响;罗俊礼等<sup>[5]</sup>通过试验对比的方法研究张拉批次,张拉龄期,张拉控制应力对预应力混凝土桥梁徐变的影响,研究得出合理的延后终张拉对控制预应力梁长期变形有积极作用;杨敏等<sup>[6]</sup>建立考虑季节性温湿变化的混凝土桥徐变计算模型,将该模型应用于预应力混凝土连续梁桥徐变效应分析中,研究得出温湿变化对徐变效应影响较大;涂光亚等<sup>[7]</sup>以赤壁长江公路大桥为例,通过 BDCMS 计算软件进行受力计算,根据计算结果分析桥梁徐变特点,研究得出混凝土后期收缩徐变会使桥塔发生竖向变形和偏转;黄春亮等<sup>[8]</sup>通过 Midas/Civil 软件构建桥梁三维仿真模型,采用该模型研究斜拉桥受到收缩徐变效应影响,研究得出收缩徐变效应对矮塔斜拉桥主体结构各组成部分均有较大影响;王宾<sup>[9]</sup>从新旧桥梁的沉降和收缩徐变差异角度出发,提出增大桩径,堆载预压等控制措施,研究得出通过 UEA 补偿收缩混凝土进行湿接缝的施工,可以控制混凝土的收缩徐变;杨静静等<sup>[10]</sup>对桥梁承受的荷载及各类环境因素进行分组,依据分级管理原则对桥梁在长期运营条件下的变形控制标准与方法进行研究。研究得出车桥耦合动力分析与中点弦测法能有效管理车辆响应,且通过弦测法获得的轨道不平顺与车体加速度相关关系为铁路动力性能评估提供了简便方法;赵卫红<sup>[11]</sup>对混凝土桥梁徐变的性质进行分析,根据分析结果制定有针对性的控制策略,研究得出收缩徐变作用对桥梁预抛高设置产生影响程度的大小与桥梁的位置有关,主墩附近受到的影响最小,跨中所受影响最大;陈克坚等<sup>[12]</sup>基于 CEB-FIP 模型,分析工法、加载龄期、铺轨时间及拱上结构对徐变影响,探讨变形控制方案,研究得出工法和铺轨时间对混凝土收缩徐变影响较大,可作为变形控制技术的关键因素。

在现有研究的基础上,为了进一步探索和优化

粉煤灰在高性能混凝土中的应用,以减小桥梁结构在长期使用过程中由徐变效应引起的变形,提高桥梁的耐久性和安全性,提出一种高性能粉煤灰混凝土桥梁徐变变形控制方法。

## 1 工程实例

### 1.1 工程概况

某市城际专线上的一座混凝土连续钢构大桥,桥形为双面索斜拉桥,桥塔总高度为 90.28 m,大桥整体呈 A 字形,大桥拉锁为平行钢丝结构,整座桥共计设置 18 对拉索,大桥跨境距离为 80 m + 80 m,大桥整体布置结构如图 1 所示。

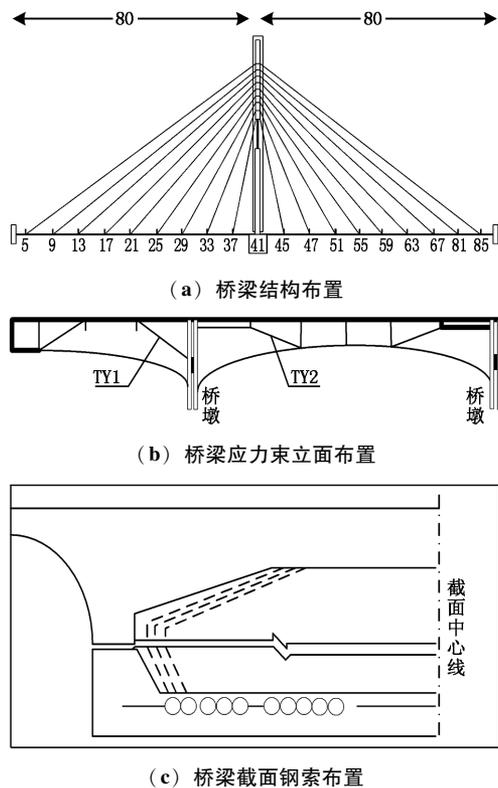


图 1 大桥整体布置结构图

Fig. 1 Overall layout structure of the bridge

### 1.2 有限元模型建立

通过桥梁结构微软程序 GQWS12.3 建立该桥有限元模型,有限元模型共 118 个单元,其中桥梁主梁单元为 80 个,桥梁斜拉索单元为 15 个,桥梁主塔单元为 23 个。桥梁桥塔单元材料为 C80 混凝土,密度为  $300 \sim 1\,200 \text{ kg/m}^3$ ,桥梁斜拉索单元材料为金刚石应力钢丝。有限元模型的各个材料参数见表 1。

## 道桥技术

表1 有限元模型的桥梁构件材料性质参数

Table 1 Material property parameters of bridge components in finite element model

桥梁构件	分类	材料	泊松比	弹性模量 /GPa	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )
桥梁主梁	梁单元	C80 混凝土	0.188 7	32	29.45
桥梁拉索	索单元	金刚石应力钢丝	0.371 4	218	88.14
桥梁主塔	塔单元	C80 混凝土	0.188 9	32	26.71

## 2 徐变变形参数取值

混凝土徐变的大小用徐变系数表示,影响混凝土徐变系数的条件有:混凝土材料、外界环境、荷载3类参数<sup>[13]</sup>。环境温度徐变系数表达式为:

$$\varphi(t, \tau, T) = \varphi_0 \left( \frac{t - \tau}{\tau_0 + \tau} \right)^m \cdot \exp[\alpha(T - T_{\text{ref}})] \quad (1)$$

式中: $\varphi(t, \tau, T)$ 为考虑时间 $t$ 、加载龄期 $\tau$ 和环境温度 $T$ 影响的徐变系数; $\varphi_0$ 为基本徐变系数; $\tau_0$ 为参考龄期; $m$ 为与时间效应相关的指数; $\alpha$ 为温度敏感系数; $T_{\text{ref}}$ 为参考温度; $\exp(\cdot)$ 为自然指数函数。对于湿度与温度随时间发展的系数表达式分别如下:

$$T(t) = T_{\text{avg}} + A \sin \frac{2\pi t \phi}{P} \quad (2)$$

式中: $T(t)$ 为时间是 $t$ 时的温度; $T_{\text{avg}}$ 为平均温度; $A$ 为温度变化的振幅; $P$ 为温度变化的周期; $\phi$ 为相位角。

$$RH(t) = RH_0 e^{\kappa t} \quad (3)$$

式中: $RH(t)$ 为时间 $t$ 时的相对湿度; $RH_0$ 为初始相对湿度; $\kappa$ 为干燥速率系数。

在混凝土强度、外界环境相对温度、外界环境相对湿度、理论厚度、名义徐变系数、荷载约束系数范围相同的情况下,结合TB 10002.3—2005<sup>[14]</sup>与JTG D62—2004<sup>[15]</sup>规范中的计算方法获取不同粉煤灰混凝土龄期下的徐变系数,将实际测试的徐变系数与规范取值对比,徐变系数对比曲线如图2所示。

徐变系数的实测值与JTG D62—2004的拟合效果更为接近,因此后期徐变变形的控制方法使用JTG D62—2004中的徐变系数。

## 3 桥梁徐变变形控制研究

利用有限元软件求解出桥梁未使用任何后续变

形控制方法,20年后的徐变变形情况如图3所示。

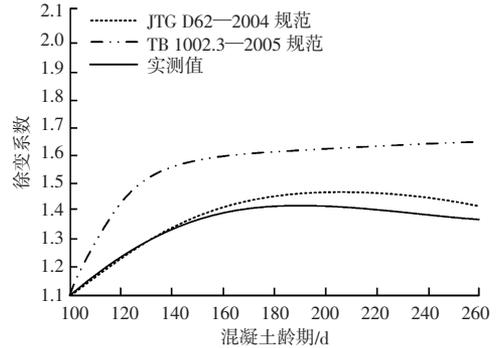


图2 徐变系数对比曲线

Fig. 2 Comparison curve of creep coefficient

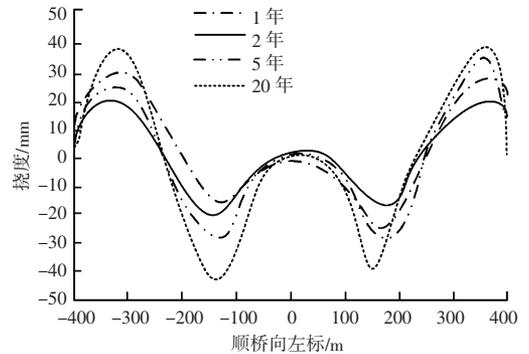


图3 桥梁整体未使用变形控制方法的后期变形情况  
Fig. 3 Late stage deformation of the bridge without the use of deformation control methods

在没有使用变形控制方法的背景下,桥梁20年后,桥梁中跨下挠变形值高达45 mm,桥梁边跨上拱变形值高达39 mm。

## 3.1 推迟铺轨时间

在原桥梁施工方案的计划合龙日期(即桥梁主体结构拼接完成的日期)基础上,为了确保施工质量和进度,延迟铺轨的时间,以减小桥梁轨道在后期可能出现的变形。同时,考虑到实际的施工时间限制,将桥梁铺轨的推迟时间设定在半年左右。采用延长铺轨时间控制方法的桥梁后期变形情况如图4所示。

使用延长铺轨方法的桥梁中跨下挠值为36 mm,桥梁边跨上拱值为29 mm。对比图3桥梁,中跨下挠缩短了9 mm,边跨上拱缩短了10 mm,延迟铺轨时间可以降低徐变引起的桥梁上拱值与下挠值。在实际桥梁建设中,可以适当减少铺轨时间来优化桥梁后期徐变变形情况。

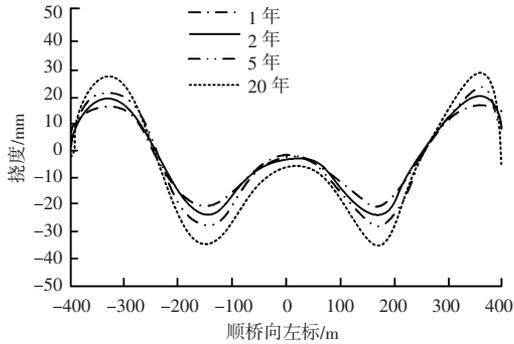


图4 延长铺轨时间控制方法的桥梁后期变形情况  
Fig. 4 Bridge deformation in the later stage using the control method of extending track laying time

### 3.2 设计体内后张预应力束

体内预应力束徐变形变控制方法，可以通过减小内板预应力产生的弯矩和自重产生弯矩的差值来改善形变。由图3可知，桥梁中跨下挠度较大，所以在体内预应力束前后，需要确保桥梁的理论厚度与强度必须满足应力束条件。体内预应力束控制方法的桥梁后期变形情况如图5所示。

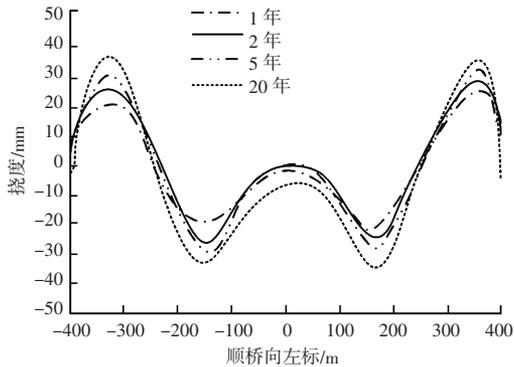


图5 体内预应力束控制方法的桥梁后期变形情况  
Fig. 5 Bridge deformation in the later stage using internal prestressing control method

桥梁体内预应力束控制在铺轨后进行拉力，边跨上拱35 mm，中跨下挠37 mm，降低了徐变变形引起的桥梁下挠值。

### 3.3 设计体外预应力束

体外预应力束是在桥梁铺轨后进行张拉的，对桥梁主梁进行施工时，需要预先确定体外预应力束的坐标位置，在后期桥梁变形量较高时，有选择性地挑选预应力束张拉，且要对体外应力束的数量进行一定规划，确保桥梁强度达到75%时才能进行应力张拉。对桥梁的中跨与边跨都布置了体外应力束，每个中跨位置都设置了8索体外束，达到缩短中跨下

挠的目的；每个边跨位置都设置了6索体外束，达到缩短边跨上拱的目的。张拉应力设置为880 MPa，采取体外应力束控制方法的桥梁后期变形图如图6所示。

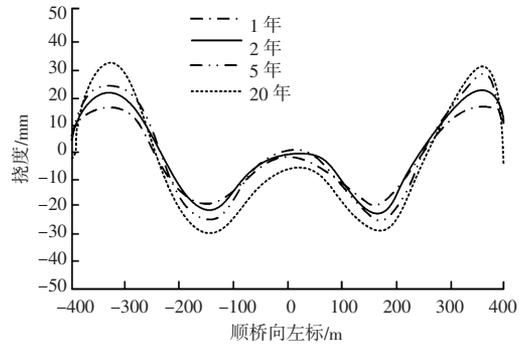


图6 体外应力束控制方法的桥梁后期变形情况  
Fig. 6 Bridge deformation in the later stage using the external stress beam control method

使用体外应力束控制方法的桥梁中跨下挠值为32 mm，桥梁边跨上拱值为34 mm，对比未使用变形控制方法的后期变形情况，该方法降低了徐变变形引起的桥梁上拱值。

### 3.4 设计铺设恒载的顺序

根据上述变形控制方法，延长铺轨时间可以缩短后期桥梁变形，不仅延长铺轨时间，改变铺轨顺序也可以同样影响后期的桥梁变形。计算了3种铺轨顺序对桥梁后期变形的影响，3种铺轨顺序为：同时铺设桥梁整跨（(a)传统铺设顺序）；从桥梁顶端与尾端同时向桥梁跨中进行铺设（b）；从桥梁跨中同时向从桥梁顶端与尾端进行铺设（c）。铺设恒载的顺序控制方法的后期形变结果见表3。

表3 三种铺设恒载顺序控制方法的后期形变对比结果  
Table 3 Comparison results of late deformation of three control methods for laying constant load sequence

铺设顺序	中跨		边跨	
	跨中/mm	变化/%	跨中/mm	变化/%
a	6.12	0	2.96	0
b	5.21	12.84	1.98	12.36
c	5.13	16.92	1.74	18.45

通过三种铺设恒载顺序控制方法的后期形变对比结果可以看出，同时铺设桥梁整跨顺序（a），对桥梁徐变变形控制没有影响，效果不佳；从桥梁顶端与尾端同时向桥梁跨中的铺设顺序（b），可以缩短由于徐变变化导致的边跨上拱值与中跨下挠值，边跨上拱值缩短了12.36%，中跨下挠值缩短了12.84%；从桥梁跨中同时向从桥梁顶端与尾端的铺

## 道桥技术

设顺序(c),可以更优效果的缩短由于徐变变化导致的边跨上拱值与中跨下挠值,边跨上拱值缩短了18.45%,中跨下挠值缩短了16.92%,由此可见,三种铺设顺序中,从桥梁跨中同时向从桥梁顶端与尾端的铺设顺序(c)为最佳。

### 3.5 综合使用4种控制方法

在桥梁施工条件允许、保证桥梁强度的情况下,将延长铺轨时间、设计铺设恒载的顺序、策划体内后张预应力束、体外预应力束的4种控制方法结合起来。综合使用4种控制方法的桥梁后期变形情况如图7所示。

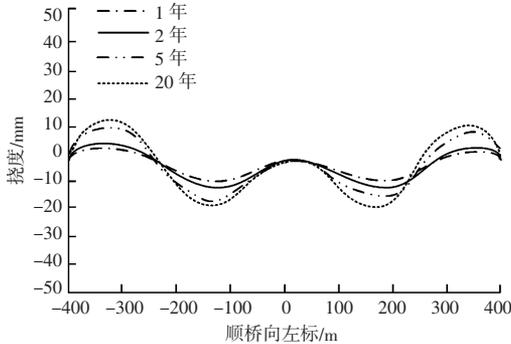


图7 使用4种控制方法的桥梁后期变形情况  
Fig.7 Deformation of bridges in the later stage using four control methods

使用4种相结合的控制方法桥梁中跨下挠值为19 mm,桥梁边跨上拱值为13 mm,使用4种控制方法后有效降低了徐变变形引起的桥梁下挠值与桥梁上拱值,有效控制了混凝土桥梁的后期变形。

## 4 结论

结合实际工程,对高性能粉煤灰混凝土桥梁的徐变变形控制方法进行了研究,并应用有限元软件对新规范中关于徐变变形计算公式中各参数的取值进行了合理选取,为今后高性能粉煤灰混凝土桥梁徐变变形控制提供了技术支持。研究结果如下:

(1) 根据新规范,用等效龄期代替环境龄期,来计算混凝土桥梁的徐变挠度是合理的。

(2) 采用有限元数值模拟方法可以合理预测高

性能粉煤灰混凝土桥梁徐变变形,计算结果与实测结果吻合较好。

(3) 延长铺轨时间、设计铺设恒载的顺序、策划体内后张预应力束、体外预应力束都可以降低由于徐变引起的桥梁上拱与下挠问题,可以超高效率的控制预应力混凝土桥梁的后期变形。

## 参 考 文 献

- [1] 杨俊斌,刘学毅,杨荣山. 假缝对Ⅱ型轨道板上拱稳定性影响研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(5): 26-32.
- [2] 曾勇,李勇岐,孙旭东,等. 特大跨钢管混凝土拱桥徐变效应分析[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 76-84.
- [3] 郭安娜. 大跨度铁路预应力混凝土斜拉桥收缩徐变影响及控制措施研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 73-77.
- [4] 贾毅,韦朝宽,辜光磊,等. 大跨度预应力混凝土连续梁桥徐变效应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(3): 456-464.
- [5] 罗俊礼,李光辉. 张拉工艺对预应力混凝土桥梁徐变的影响研究[J]. 施工技术, 2019, 48(11): 28-31.
- [6] 杨敏,罗成,高燕梅,等. 考虑季节性温湿变化的混凝土桥梁徐变计算模型研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(1): 53-58.
- [7] 涂光亚,邹磊,石洋. 后期收缩徐变对结合梁斜拉桥受力影响研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 150-154.
- [8] 黄春亮,骆俊杰,李蓉,等. 收缩徐变效应对三塔单索面矮塔斜拉桥的影响分析[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 192-197.
- [9] 王宾. 高速公路预制板桥梁拓宽施工基础沉降及收缩徐变控制[J]. 工程机械与维修, 2023(1): 36-39.
- [10] 杨静静,高芒芒,赵文博,等. 大跨度铁路桥梁变形控制标准研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(3): 137-143.
- [11] 赵卫红. 混凝土收缩徐变对桥梁施工控制的影响[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(8): 124-125.
- [12] 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.
- [13] 韩斌,吉坤,胡亚飞,等. ANN-PSO-GA模型在湿喷混凝土强度预测及配合比优化中的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 584-591.
- [14] 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范: TB 10002.3—2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [15] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004[S].