文章编号:1005-0523(2010)03-0033-05

控制大跨 PC 梁桥长期下挠的综合举措研究

任 亮[1],张 王景[2],上官兴[1]

(1.华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2.江西省交通设计院,江西 南昌 330002)

摘要:针对目前大跨度预应力混凝土(PC)梁桥在运营后出现腹板开裂和跨中持续下挠等病害,在总结预应力混凝土梁桥下挠成因的基础上,以在建的主跨为 155 m 江西泰和赣江公路大桥为例,采用有限元法从恒载零挠度、加大跨中梁高和临时斜拉索辅助施工等新举措出发与传统设计进行分析比较,研究各种因素对预应力混凝土梁桥长期下挠的影响。结果表明:恒载零挠度设计,或者恒载零挠度设计和加大跨中梁高的综合设计措施对控制大跨度预应力混凝土梁桥的长期下挠更有效。

关 键 词:预应力混凝土梁桥;长期下挠;有限元法;综合举措

中图分类号:TU352.11 **文献标识码**:A

预应力混凝土梁桥作为一种常见的桥型,以其良好的结构性能和优美的外形在世界各地得到了广泛的应用。目前世界最大者为 1998 年建成的主跨为 301 m 的挪威新施托姆桥(New Stolma),国内最大跨度者为 1997 年建成的主跨 270 m 的广东虎门大桥辅航道桥。随着使用时间的增加,此类桥出现了显著的后期持续下挠问题,以致有些桥的下挠已影响到其自身能否继续安全可靠服役的程度。CEB(原国际结构混凝土协会)调查了 27 座跨度从 53～195 m 的预应力混凝土桥梁的变形。调查表明,有些桥梁在建造完成 8～10 年后挠度仍有明显增长趋势,甚至有以相同的变形速度的增加。英国的 Kingston 桥是一座跨度为 62.5 m+143.3 m+62.5 m 的预应力混凝土箱梁桥,1970 年建成后跨中挠度一直在缓慢地增大,至今已经超过 30 cm。1977 年建成的帕劳共和国 Koror-Babeldaob 桥,主跨 241 m,是当时世界上跨度最大的预应力混凝土箱型梁桥,建成后挠度不断加大,1996 年加固修补 3 个月后桥梁倒塌。还有美国 1978 年完工的 Parrots 渡桥在使用 12 年后,195 m 的主跨跨中下挠了约 635 mm。国内也有已建大跨度梁式桥跨中出现不同程度的下挠。主跨 245 m 的某大桥,运行 7 年来,下挠最大达 32 cm,并且在腹板部位伴随有大量的斜裂缝的出现。主跨 270 m 的虎门大桥辅航道桥,建成 6 年后,在 2003 年已下挠 22.248 cm,远超过了原来设计预留的 10 cm 的徐变预拱度。工程实例表明大跨预应力混凝土梁桥的后期下挠的程度已经远远超出了设计所预测的范围,严重影响到桥梁的使用寿命和行车舒适性,甚至危及高速行车时的安全。为此不少学者[1-6]从理论和实践出发,对预应力混凝土梁桥后期下挠的成因进行了深入的探讨和分析,也提出了一些预防的措施,取得了一定的效果。

本文在总结大跨预应力混凝土梁桥持续下挠成因的基础上,以在建的石城至吉安高速公路泰和赣江特大桥为例,采用有限元法从恒载零挠度、加大跨中梁高和临时斜拉索辅助施工等新举措出发与传统设计进行分析比较,研究各种因素对预应力混凝土梁桥长期下挠的影响,力求对这一现象进行有效地控制。

1 大跨径预应力混凝土梁桥下挠的主要原因

从预应力混凝土梁桥结构受力特性的机理上分析,预应力混凝土梁桥的挠度实际上是两部分总体作用方向相反的效应综合平衡的结果。作用效应之一就是结构体本身的恒载与活载作用,另一个就是桥梁预应力体系提供的作用效应。从结构体本身的作用效应上来说,除了荷载作用,结构刚度是影响挠度的主要因素,而箱梁的刚度受结构布置、混凝土开裂程度、预应力束的布置方式与有效预应力大小、混凝土收缩

收稿日期:2010-01-07

基金项目:华东交通大学科学研究基金项目(08TM01)

作者简介:任 亮(1980—),男,硕士,讲师,研究方向为桥梁新技术、新理论和新工艺。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

徐变特性与疲劳特性等因素的影响。另一方面，预应力体系对挠度的作用效应受预应力的布置和有效预应力的大小所左右。目前国内外比较认同的导致大跨径预应力混凝土梁桥下挠现象的主要因素[1-8]可能为：

(1) 混凝土收缩徐变存在较大不确定性(包含箱梁断面构件不同厚度导致的收缩差异影响、交通荷载和温度变化引起的反复荷载效应、施工接缝的影响、环境温度与湿度的变化等)，很难精确计算；

(2) 对预应力长期损失估计偏低；

(3) 混凝土的开裂；

(4) 施工质量。

这些对结构长期挠度产生影响因素有些不但具有较大随机不确定性，而且还相互耦合。故尽管现代计算手段不断取得进步，但准确预测大跨预应力混凝土的长期挠度仍然不是一件容易的工作。

2 控制大跨度预应力混凝土梁桥下挠新举措

在控制大跨径预应力混凝土箱梁桥长期挠度的措施方面，目前国内外的确出现了许多具体的防治方法[9]，如多次张拉保证纵向预应力的有效性，体外束、跨中顶推、跨中预压、主梁跨中部分梁段采用高强轻质混凝土等，但效果都不尽如人意。为此从结构自身出发、从设计出发采取相应的措施成为控制大跨度预应力混凝土梁桥长期挠度的新途径，以下将阐述这些新举措。

2.1 恒载零挠度

根据林同炎教授提出的荷载平衡概念，假如用预应力产生的弯矩平衡自重产生的弯矩，这样在预应力和自重作用下结构将处于轴向受压状态，结构在混凝土长期收缩徐变作用下，只会发生轴向缩短，而不会发生弯曲下挠，这就是“恒载零挠度”的概念。在理论上，在设计时只要保证结构在预应力和自重作用下每个截面弯矩为零，那么建造时就可以不设置预抛高，这样有利于施工控制。在实际的悬臂施工中，由于每个节段混凝土龄期有差异，预应力损失难以精确计算，很难保证每个截面弯矩都为零。但是可以根据恒载零挠度理论配束使每个截面自重和预应力产生的弯矩差较小，这样成桥后期徐变产生的挠度就较小。广东佛山石南大桥和湖南湘潭湘江二桥已经在施工中按恒载零弯矩进行了施工控制取得了较好的效果。

2.2 临时斜拉索辅助施工

依据恒载零挠度的原理，控制跨中下挠的关键是要消除恒载弯距，使其产生的挠度趋近零，对于跨度较小的桥，可以通过增设顶板悬臂预应力来达到平衡恒载弯距的目的，但是对于跨度较大的桥，无论是从设计还是施工以及结构尺寸构造上都很难通过增设顶板悬臂预应力来达到平衡恒载弯距的目的。针对这种情况，提出一种用施工手段来进行挠度控制的方法，即采用临时斜拉索辅助施工控制跨中长期下挠，如图 1 所示。具体做法为：首先设计中按照传统的包络图配置箱梁预应力束；然后在悬臂施工中架设临时钢塔，针对顶板上缘悬臂预应力不足，采用张拉斜拉索来做到悬臂施工期间箱梁不下挠，并辅助合拢中跨；最后待中跨合拢束张拉完毕，结构形成连续体系之后，再将钢塔和斜拉索拆除。

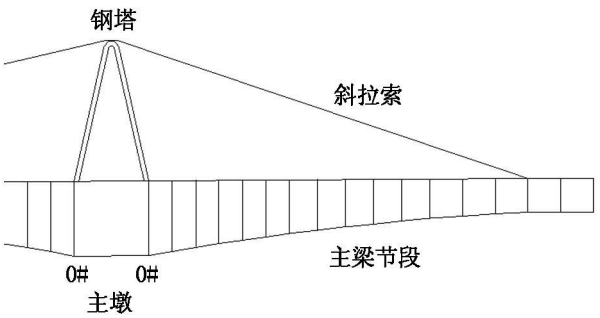

图 1 临时斜拉索辅助施工图

2.3 加大跨中梁高

目前对大跨度预应力混凝土梁桥梁高的选择，一般取支座处梁高为跨度的 1/18～1/20，跨中梁高取为支座处梁高的 1/3 左右，中间以抛物线过渡。对于中小跨度的预应力混凝土梁桥按此原则所确定的梁高变化曲线是可行的，但对于大跨度的预应力混凝土梁桥，跨中梁高的选取值得商榷。目前铁路上[10]大跨度预应力混凝土梁桥的跨中梁高一般取为支座处梁高的 1/2 左右，如表 1 所示，且按此原则设计施工的预

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应力混凝土梁桥运营后从未出现后期下挠现象，相反普遍出现跨中上翘的现象，需要将钢轨道渣扒掉，通过降低道渣高度消除跨中上翘量。因此，借鉴铁路上预应力混凝土梁桥主梁跨中梁高的取值方法，将大跨度预应力混凝土梁桥跨中梁高取为支座梁高的 1/2。考虑到加大梁高将使结构自重增加，为保证结构自重不变，适当减薄腹板厚度。对于腹板厚度无法再减薄的情况，宜将混凝土腹板改为波形钢腹板[11]。

表 1　部份铁路连续刚构桥梁高一览表

序号	桥名	孔跨布置/m	梁高/m	
			根部	跨中
1	南昆铁路清水河桥	72.3＋128＋72.8	8.8	4.4
2	温福铁路白马河桥	80＋3×145＋80	8.8	4.5
3	温福铁路田螺大桥	88＋160＋88	9.8	5.0
4	宜万铁路渡口河桥	72＋128＋70	8.8	4.2

3　实例分析

3.1　分析模型

泰和赣江公路大桥为石城至吉安高速公路上跨越赣江的一座特大桥，桥型布置如图 2。大桥主桥为 100 m＋155 m＋100 m 连续刚构，箱梁采用变截面三向预应力单箱单室连续箱梁结构，具体尺寸如图 3。

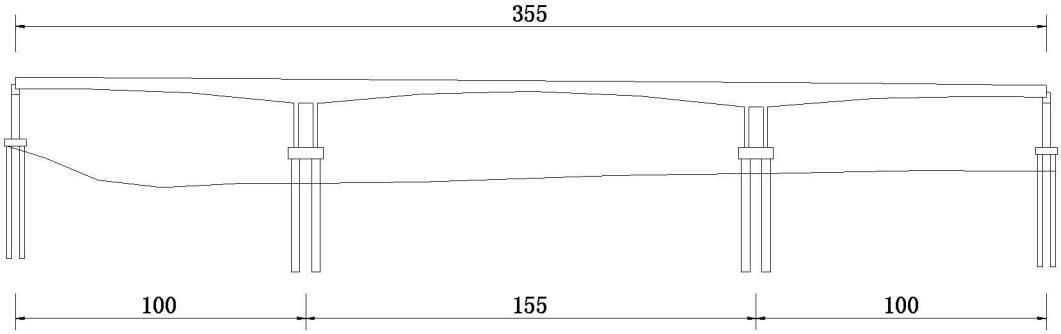

图 2　桥型布置图(单位 m)

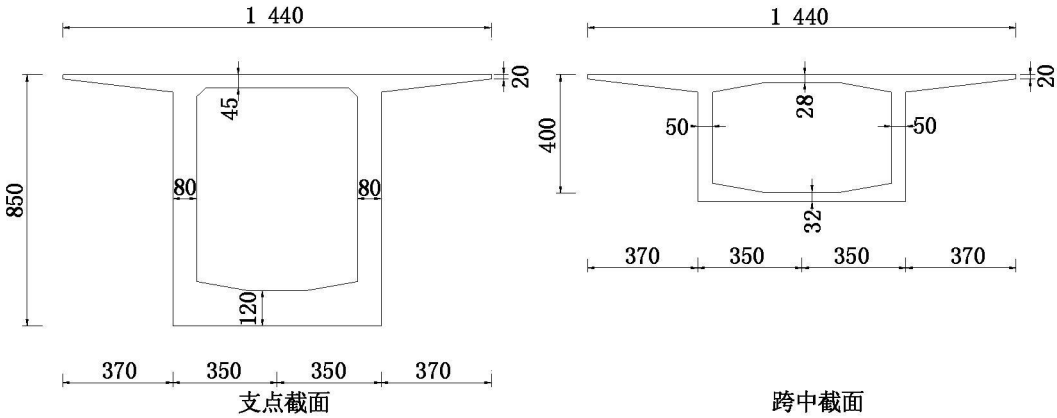

图 3　箱梁截面尺寸图(单位 cm)

为分析前述各种措施对控制预应力混凝土梁桥长期下挠的效果，设计了以下 6 种方案。

方案 1：传统包络图设计。

传统预应力混凝土梁桥配索设计，所选基本结构是桥梁最终状态—运营状态的连续梁图式。设计的原则是控制不出现拉应力并预留一定的压应力储备。

方案 2：恒载零挠度设计。

(C)1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

新的预应力混凝土梁桥配索设计，合拢段顶、底板预应力设计所选基本结构是桥梁最终状态－运营状态的连续梁图式，但顶板悬臂预应力设计所选基本结构为桥梁的最大悬臂状态图式。设计的原则是控制不出现拉应力并预留一定的压应力储备。

方案 3：跨中加大梁高设计。

与传统包络图设计原则基本一致，但主梁跨中梁高取为支点处的 1/2，且主梁自重保持不变。

方案 4：临时斜拉索辅助合拢设计。

采用传统包络图设计主梁纵向预应力，为实现施工期间主梁不下挠，采用斜拉索辅助悬臂施工直至结构形成连续体系。

方案 5：跨中加大梁高和恒载零挠度设计。

采用恒载零挠度设计纵向预应力，同时将跨中主梁取为支点处主梁高度的 1/2，保持主梁自重不变。

方案 6：跨中加大梁高和临时斜拉索辅助合拢设计。

传统包络图设计主梁纵向预应力，跨中主梁取为支点处主梁高度的 1/2，同时采用临时斜拉索辅助施工。

现采用有限元静力分析程序桥梁博士分别对上述 6 种设计方案进行分析，分析中考虑恒载、活载、预应力和收缩徐变等因素，其中计算规范采用 JTGD 60－2004《公路桥涵设计通用规范》。

3.2 结果对比

通过对以上 6 种设计方案进行计算分析，得到各方案在不同阶段跨中的挠度值(为预期实际下挠值的一部分，未考虑预应力混凝土的质量、预应力的张拉施工、梁桥的养护等影响)，表 2 列举出 6 种设计方案在成桥阶段、成桥 3 年、成桥 5 年、成桥 10 年和成桥 30 年后的跨中挠度值，从表中可以看出：

(1) 在传统的包络图设计中，由于对恒载(长期持续荷载)和变化荷载(活载及附加力)是同等对待的，预应力的设计既要考虑恒载又要同时考虑变化荷载的作用，这样使得预应力的设计不能完全针对起主导作用的恒载，也不可能实现零弯矩，所以产生较大的后期下挠是必然的。

(2) 恒载零挠度设计以挠度为目标控制，其特点是用预应力的设计手段来减少初始挠度和初始转角。这样当后期混凝土徐变发生时，梁体以轴向位移为主，弯曲下挠为辅，因而就能极大地减少合拢后的持续下挠绝对值，是非常有效的控制后期下挠的措施。

(3) 方案 3 在方案 1 基础上加大了主梁跨中高度，同时保持主梁自重不变，在成桥 30 年后主梁跨中挠度值为－2.9 cm，相对于方案 1 减少了 30%，说明加大跨中梁高对控制预应力混凝土梁桥的后期下挠是有效的。

(4) 方案 4 采用斜拉索辅助施工，实现无预抛高的合拢，成桥 30 年后的挠度值与方案 1 相比减少了 52%，因此该措施对于控制后期下挠是非常明显的。

(5) 方案 5 和方案 6 为组合设计方案，相对于单项设计方案，组合设计方案对控制大跨度预应力混凝土梁桥后期下挠更有利，是更好的控制措施。

表 2 主梁跨中挠度值

项目	跨中挠度值/cm				
	成桥阶段	成桥 3 年	成桥 5 年	成桥 10 年	成桥 30 年
方案 1	－1.88	－3.01	－3.26	－3.59	－4.21
方案 2	2.82	2.68	2.60	2.39	1.90
方案 3	－0.74	－1.77	－2.00	－2.31	－2.90
方案 4	0.51	－0.83	－1.09	－1.42	－2.05
方案 5	3.95	3.86	3.83	3.70	3.23
方案 6	1.77	0.54	0.30	－0.02	－0.61

注：负值表示下挠，正值表示上翘。

(C)1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　结论

本文针对目前大跨度预应力混凝土梁桥在运营后出现腹板开裂和持续下挠等病害，以在建的主跨为 155 m 江西泰和赣江公路大桥为例，采用有限元法从恒载零挠度、加大跨中梁高和临时斜拉索辅助施工等新举措出发与传统设计进行分析比较，研究各种因素对预应力混凝土梁桥长期下挠的影响，得到如下结论：

(1) 传统包络图设计由于预应力的设计不能完全针对起主导作用的恒载，也不可能实现零弯矩，所以产生较大的后期下挠是必然的。

(2) 恒载零挠度、加大跨中梁高和斜拉索辅助施工等都是有效的控制后期下挠的措施，但恒载零挠度设计，或者恒载零挠度设计和加大跨中梁高的综合运用对控制大跨度预应力混凝土梁桥的后期下挠更有效。

参考文献：

[1] 陈宇峰，徐君兰，余武军. 大跨 PC 连续刚构桥跨中持续下挠成因及预防措施[J]. 重庆交通大学学报，2007，26(4)：6-8.
[2]高仙桂，陈希安. 大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析[J]. 公路与汽运，2007，119(2)：109-111.
[3]王法武，石雪飞. 大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制研究[J]. 公路，2006，59(8)：72-76.
[4]谢峻，王国亮，郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技，2007，24(1)：47-50.
[5]马润平，卫军，高宗余. 大跨预应力混凝土梁式桥后期下挠原因分析[J]. 铁道工程学报，2007，104(5)：51-54.
[6]詹建辉，陈卉. 特大跨度连续刚构主梁下挠及裂缝原因分析[J]. 中外公路，2005，27(2)：56-58.
[7] IAN N ROBERTSON. Prediction of vertical deflections for a long-span prestressed concrete bridge structure[J]. Engineering Structures，2005，27 (12)：1 820-1 827.
[8]VLADIM R，STEK K R，et al. Box girder bridge deflections[J]. ACI Concrete International，2006，28 (1)：55-63.
[9]王首绪，詹建辉. 特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝的体外预应力处治[J]. 中外公路，2007，27(3)：146-149.
[10]韩稼春. 高速铁路无碴轨道大跨度连续刚构设计[J]. 交通科技，2007，233(4)：7-9.
[11] 陈宝春，黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路，2005，24(7)：45-53.

A Study on Comprehensive Measures of Long-term Deflection Control of Long Span Pre-stressed Concrete Girder Bridge

Ren Liang[1]，Zhang Jing[2]，Shang Guanxing[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture，East China Jiaotong University，Nanchang 330013，China；2. Jiangxi Jiaotong Designing Institute，Nanchang 330002，China)

Abstract：At present，the main problems of long span pre-stressed concrete box girder of continuous rigid frame bridges are excessive mid-span deflection and cracks in box girders. In order to find measures to control long-term deflection of pre-stressed concrete girder bridge，based on summarizing main causes of excessive mid span sag，taking a 155 m Taihe bridge over the Ganjiang River in Jiangxi as an example，new measures including zero deflection method，increasing depth of mid-span beam and temporary aided construction by virtue of stayed-cable and traditional design method are investigated and compared by using the methods of finite element. The results show that it is more effective for controlling long-term deflection of pre-stressed concrete girder bridge by adopting zero deflection design or comprehensive designing measure of combing zero deflection method with increasing depth of mid-span beam.

Key words：pre-stressed concrete girder bridge；long-term deflection；methods of finite element；comprehensive measures

(责任编辑　王全金)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net