

# 克服大跨 PC 连续刚构桥后期下挠设计措施

刘山洪<sup>1,2\*</sup>

1. 西南交通大学 交通运输工程博士后流动站, 四川 成都 610031; 2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074

**摘要:**对比分析几座大跨径预应力连续刚构桥后期下挠过度引起梁体开裂的主要设计参数,阐述了引起后期下挠的主要原因.为提高箱梁持久抗剪承载力,提出构造措施上可供参考的设计参数,并提出克服箱梁后期持续下挠的具体措施,有效地保障梁体处于健康状态.

**关键词:**预应力砼;连续刚构桥;箱梁;设计;预拱度

**中图分类号:**U448.215;U442.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-716X(2006)06-0004-04

目前,在公路、铁路桥梁工程设计中,大跨径预应力砼(PC)连续刚构桥作为一种结构受力简洁、合理的桥型正越来越多的被工程设计人员所采用,随着桥梁设计软件的升级完善和设计工程师设计经验、水平的进步及施工单位施工能力的提高,预应力连续刚构桥的设计趋向大跨径,桥墩也越建越高<sup>[1]</sup>.

近年来,一些大跨径 PC 连续刚构桥出现了以下问题<sup>[2~4]</sup>:①主梁箱腹板出现斜裂缝,主要是边孔近现浇段和中孔  $L/4 \sim 3L/8$  段出现较多;②主梁箱底板跨中部分张拉锚固后出现纵向开裂裂缝;③箱梁具有较长悬臂翼缘板在顶板悬臂根部出现纵向裂缝,宽箱梁在顶板跨中出现纵向裂缝;④主梁后期(运营期)变形下挠度普遍比设计值大,桥面纵坡与设计值相差大,行车舒适性差,引起使用安全的危机感.

其中,主梁后期收缩徐变引起的下挠度普遍比设计值大,桥面纵坡与设计值相差大,引起人们的高度关注,分别从不同角度寻求引起梁体持续不断下挠的关键因素.不同的设计思想是导致桥梁个体差异的直接原因,在设计中要权衡不同构造措施的优缺点,同时要顾及施工实施的可能性.随着设计理念的发展,设计者试图寻求更为有效的构造措施,在尝试新措施的过程中,有些潜在的问题就暴露出来了.以前曾经在边跨梁端不设弯起钢束,光靠竖向预应力引起大量开裂的惨痛教训<sup>[5]</sup>.

目前有争议的主要问题有:主墩处是否要考虑弯起束;是否需要在箱梁合龙段及中跨靠近悬臂端

设置横隔板,以增强梁体整体抗扭转、畸变的能力;砼徐变究竟发生多少年.

大跨 PC 连续箱梁桥出人意料地出现开裂,跨中挠度持续下挠.不能总是归因于现场工程师缺乏经验,对引起持续下挠的问题实质尚缺乏了解,需要进一步开展研究.除砼收缩、徐变及预应力松弛引起梁体正常下挠外,随时间变化的温度以及箱梁局部疲劳开裂,引起有效预应力的降低,都能导致梁体裂缝的开展,以前对此重视不够.

因此,对现有已进行过加固的同类桥梁案例进行分析,从设计上寻找引起梁体开裂的原因,从构造措施上入手,提高箱梁的持久承载力,避免受力裂缝的产生,在桥梁运营期间,采取有效的措施控制梁体下挠幅度.

## 1 降低箱梁持久承载力的主要因素

引起梁体挠度持续不断的降低,有多种因素共同影响.其中,砼收缩、徐变与预应力松弛的耦合作用;温度的变化导致预应力筋松弛量增加;局部疲劳荷载效应的作用,导致材料的抗力降低.表现为:按 JTJ023-85 公路桥涵设计规范<sup>[14]</sup>进行设计时,大跨 PC 箱梁截面的持久抗剪承载力储备不足.

### 1.1 箱梁腹板截面几何尺寸偏小

在相同的车道荷载作用下,无论 2 车道还是 4 车道,主梁均采用单箱单室箱形截面,相比之下,宽箱梁的腹板总厚度不足<sup>[6,9;11-13]</sup>;另外一种情况是:设计时采用的桥墩顶梁高偏小,根部高跨比偏小<sup>[10]</sup>,这些桥<sup>[6-13]</sup>均仅在墩顶和边跨支座处箱梁内

\* 收稿日期:2005-08-25;修订日期:2005-10-17

作者简介:刘山洪(1968-),男,重庆垫江人,博士后,从事高性能预应力砼桥梁结构行为及计算理论方面研究.

设置横隔板,其它部位无横隔板,设置道数偏少。

为了减少结构自重,对于宽箱梁,多数桥梁腹板仅仅是由构造决定其厚度。在  $L/4 \sim 3L/8$  跨附近一般纵向预应力的腹板束已经锚固完,顶板束则锚固在腹板两边的承托上,从构造上可以减薄腹板厚度。因此,这部分的腹板相对较薄,腹板总厚度过小。此外,梁高变化(梁底)曲线采用了二次抛物线,该段腹板高度降低的也比较多。总体呈现出设计采用的腹板厚度和高度偏低,截面砼持久抗剪能力储备不足。

下面列举出几个典型的进行过加固维修的大跨PC连续刚构桥案例,从中可以看出设计参数的取值差异,对桥梁结构行为的影响。

在桥梁建成运营4年后中跨跨中下挠超过20cm,两桥设计荷载均为汽车-20级,挂车-100,人群为3.5kN/m。其中,金沙大桥<sup>[8,9]</sup>上部结构形式为三跨预应力砼变截面连续刚构,主跨为(66+120+66)m,总宽度21m。断面形式为单箱单室箱梁,跨中梁高2.5m,墩顶梁高6.0m,腹板厚度最薄处40cm,根部高跨比1/20。大河铺大桥<sup>[10]</sup>上部结构形式为三跨预应力砼变截面连续刚构,跨度为(100+150+100)m,桥面总宽度9m。断面形式为单室箱梁,跨中梁高2.4m,墩顶箱梁根部高6.0m,根部高跨比1/25。

三门峡黄河公路大桥<sup>[11,12]</sup>是河南省首次建成的大跨径单箱单室连续刚构桥,该桥于1991年11月开工兴建,1993年12月正式通车。设计荷载为汽车-超20级,挂-120,人群为3.5kN/m。大桥全长1310m,连续刚构的跨径(105+4×160+105)m,边跨与中跨比值为0.66,较常规0.6大。箱梁截面为单箱单室,箱宽9.0m,顶板悬臂4.25m,全宽17.5m,根部及跨中梁高分别为8.0和3.0m,梁底曲线为二次抛物线,全桥仅在根部墩身处设厚1.6m的横隔板二道,与墩身连成整体,其它部位无横隔板。腹板厚度最薄处40cm,根部高跨比1/20。

某桥<sup>[6,7]</sup>上部结构为5跨(162.5+3×245+162.5)m预应力砼变截面连续刚构,该桥设计荷载为汽车-超20级,挂-120,人群为3.5kN/m。箱梁为三向预应力砼结构,采用单箱单室截面,顶板宽19.6m,底板宽10m,墩与箱梁固结的根部断面梁高13m,各跨跨中及边跨支架现浇段断面梁高4.1m,梁底下缘按二次抛物线变化。墩顶位置箱梁顶板厚50cm,其余部位箱梁顶板厚均25~50cm。墩顶位置箱梁底板厚150cm,其余部位箱梁底板厚由悬臂根部的135cm渐变至跨中的32cm。墩顶位置箱梁腹板厚120cm,其余部位箱梁腹板厚为80、65和50cm3种

尺寸,在距双壁墩墩中33m和71.5m处,采用突变形式过渡。腹板厚度最薄处50cm,根部高跨比1/18.85。

该桥于1995年建成通车,在2001年9月发现明显下挠,截止2002年5月,P2墩~P3墩之间的桥跨跨中下挠累计达30.5cm,P3墩~P4墩之间的桥跨跨中下挠达21.2cm,P4墩~P5墩之间桥跨跨中下挠22.6cm;在各跨跨中附近沿桥纵向50m范围内箱梁腹板出现多条斜裂缝,多为与顶板成30°~45°夹角的斜向主拉应力裂缝。

重庆江津长江大桥<sup>[13]</sup>主桥为(140+240+140)m3跨一联预应力砼连续刚构,该桥于1994年开工建设,1997年12月建成通车。设计荷载汽车-超20级,挂车-120,人群荷载3.5kN/m。采用单箱单室三向预应力砼箱形截面,箱梁顶板宽22m,箱底宽11.5m,腹板厚度分为120、80、65和50cm4级,级间设置过渡段。根部及跨中梁高分别为13.5和4.0m,根部高跨比1/17.78。

重庆嘉陵江高家花园大桥<sup>[17]</sup>是重庆主城区外环高速公路跨越嘉陵江的公路桥梁,该桥于1996年1月开工,1998年12月竣工。设计荷载汽车-超20级,挂车-120,人群荷载3.5kN/m。全桥长970m,主桥为(140+240+140)m三跨一联的预应力砼连续刚构,中间设1.5m的中央分隔带,双向6车道,车行道23m,人行道2×3m。

箱梁为三向预应力砼结构,采用两幅单箱单室断面。每箱顶板宽15.36m,底板宽8.0m。两顶板间净距98cm。箱梁顶面翼缘板设1.5%单向坡。箱梁跨中及边跨支架现浇梁段高3.6m,墩顶箱梁根部高13.5m,根部高跨比1/17.78。

箱梁腹板在墩顶范围内厚100cm,从箱梁根部到10号梁段腹板厚60cm,11号梁段到20号梁段腹板厚50cm,21号梁段到30号和31号合拢梁段腹板厚40cm。边孔现浇32号梁段从支承端起6.0m处腹板厚60cm,其余厚40cm。箱梁底板0号梁段在墩顶范围内厚1.5m,从箱梁根部到跨中底板厚从1.2m起呈抛物线变化到0.32m。边孔现浇段底板,从合拢段到支承端厚度从0.32m起直线变化到0.6m。每号梁段间的腹板均设抗剪齿槽。

全桥共设12道横隔板,其中在12号和13号墩顶各设两道厚2.5m,在11号墩顶和14号墩帽上各设一道,厚1.5m,各横隔板和0号梁段底板设置施工人洞。

比较重庆江津长江大桥主桥和重庆嘉陵江高家花园大桥主桥,修建年代接近,总体布局大体一致,两桥主要差异在于:重庆江津长江大桥主桥主梁采

用整体单箱单室断面,而重庆嘉陵江高家花园大桥主桥主梁采用两幅单箱单室断面,因此前者腹板总厚度大约是后者的 2 倍,此外,前者的纵向有效预应力总和比后者大许多,相应地,前者的抗剪安全储备比后者大许多,这也是前者没有发生腹板开裂的主要原因<sup>[3]</sup>。

### 1.2 随时变化的温度引起有效预应力降低

在自然环境因素的影响下,箱梁的温度以年为周期缓慢变化,由于连续钢筋的约束作用,变温荷载会在箱梁内引起温度应力,砼材料在长周期荷载作用下有徐变和松弛现象,故箱梁的温度应力分析中应考虑松弛影响。在分析温度对大跨 PC 连续刚构桥的影响时人们往往疏漏时间这一参数,即桥梁在运营中除单纯的温度影响外,同时伴随着由徐变带来的应力松弛和收缩现象。应力松弛过程实际是在温度和应力作用下弹性变形不断转化为塑性变形的过程,导致主梁总长度呈现减少的趋势。

当箱梁顶面温度随着气温的下降而降低时,将产生体积收缩变形。对于纵向长度远远超出其它两个方向的箱形截面的梁体来说,主要表现为纵向收缩变形。由于梗肋(承托)的纵向约束,降温收缩变形受限制而转化为降温温度收缩应力。箱梁顶、底和腹板在降温下产生缩裂是由于累积的温度应力超过材料的抗拉强度而引起的。因此,随着时光的流逝,梁体的微裂纹逐步扩展为可见裂缝。

随时变化的温度生成新生裂纹,不断降低梁体截面的刚度,使跨中挠度不断下降,减少箱梁的持久承载力,目前正在进行这方面的试验研究工作。

### 1.3 箱梁局部疲劳效应的影响

20 世纪 70 年代以前,砼构件的疲劳问题并没有像钢结构疲劳问题那样受到重视。砼构件按容许应力法设计时,由于采用的容许应力较低,很少发现砼构件因疲劳而产生破坏的事件<sup>[15]</sup>。

PC 连续刚构桥跨径小于 100m 时,绝对变形比较小,实际工程中很少因变形过大而发生问题。随着高强度砼和高强度钢筋的采用,连续刚构桥向长、大、轻、细方向发展,结构的局部节段处于高应力工作状态,使用阶段的应变增大。在循环荷载作用下,箱梁的裂缝开展和截面刚度减少程度的研究就显得非常突出,而这方面的研究进行的很少。

对于全预应力砼结构,由于在使用荷载下,全截面受压,各种材料的应力变化幅度不大,因此全预应力砼结构有“不疲不裂”之说<sup>[16]</sup>。由于特大跨 PC 连续刚构桥的采用了大吨位群锚,箱梁局部部位并不是完全处于受压状态。在成桥荷载试验时,就观察到顶板与腹板交界的梗肋仅在合龙段范围内有明显的

纵向裂纹。

随着时间的流逝,有效预应力的损失,在重复荷载的用上,腹板或底板的局部地区出现裂纹,局部疲劳效应明显加强,进一步降低梁体截面的刚度,导致其持续不断的下挠。

从已建成的大跨 PC 连续刚构桥的实际结构行为可知,桥梁建成后,均通过了成桥荷载试验,并且符合现有规范的各项指标,但在运营 4 年后,均发现比较明显的腹板斜裂缝,随着时间的流逝,裂缝不断的增加,中跨跨中挠度也不断增加。

可见,特大跨径 PC 连续刚构急需制定特定的设计、施工强制性条例,以减少受力裂缝开展的可能,提高箱梁的耐久性。

## 2 提高箱梁持久承载力的设计措施

对于车道数小于 3 的特大跨径 PC 连续刚构桥,可采用单箱单室箱形截面;当行车道为 4 及 4 以上车道数时,建议采用两幅独立的箱梁。增加腹板的厚度和高度,采用合理的梁高变化曲线。增加横隔板的设置道数。改变设计理念,增强梁体持久砼抗剪承载力的安全储备。

### 2.1 提高梁体整体抗力的构造措施

大跨径 PC 连续刚构桥设计中,改善桥梁布置和局部构造设计,提高梁体整体抗剪能力。应适当减小边、中跨之比,可以降低边跨现浇段的剪力,从而减少此段的主拉应力,建议采用的边、中跨比为 0.55 ~ 0.6 之间。适当增加梁高,可增加主梁刚度,改善主梁应力状态,建议采用根部的高跨比为 1/15 ~ 1/17 之间。为减小  $L/4$  附近截面的主拉应力,适当减少梁高变化采用的抛物线次数,建议采用 1.5 ~ 1.7 次抛物线。同时,增加在  $L/4 \sim 3L/8$  跨附近腹板总宽度,增加梗肋(承托)尺寸,建议承托最小边大于 50cm。使腹板的刚度与顶底板刚度不至于相差悬殊,发挥承托的框架作用。增加横隔板的道数,弥补平面计算分析的不足,增加截面的横向刚度,建议横隔板设置 6 道以上。

### 2.2 改善梁体持久承载力受力状况

在设计上,增加备用预应力筋孔道,或在箱梁内设置好体外预应力筋转向定位装置。当发现截面有效预应力丧失过大时,采用二次张拉预应力筋的方法,弥补截面有效预应力的不足,改善梁体的持久承载力。

建议推广采用无粘结竖向预应力筋,1998 年建成的汉川汉江公路大桥,2005 年建成的白果渡嘉陵江大桥均采用了无粘结竖向预应力工艺措施。有力保障了短束力筋的竖向有效预应力。今后竖向预应力筋将朝着可调有效预应力的方式发展,根据监测

结果,及时调整竖向有效预应力。

增加在  $L/4 \sim 3L/8$  跨附近腹板的箍筋,增强该部分砼的套箍效应。即便竖向有效预应力损失过大,仅靠钢筋砼本身就能提供足够的抗剪力。

### 2.3 提高箱梁局部抗疲劳的措施

为减少温度应力对大跨PC连续刚构桥的不利影响,减少一联的总跨数,以便减少温度应力引起的疲劳效应。建议尽量采用三跨一联的布置方式。

采用劲性骨架或预应力钢管砼桁架作为腹板,极大地提高腹板的抗剪承载力。

## 3 结 语

从设计角度,分析引起箱梁持久承载力降低的主要因素,从中可以看出:以年为周期缓慢变化的温度是造成箱梁有效预应力持续不断降低的一个重要因素,以前对此认识不足,今后需要加强这方面的研究。

随着对大跨PC连续刚构桥长期运营的结构行为了解的进一步加深,对其合理的设计方案逐步形成共识,需要制定合理的边、中跨之比,摒弃采用宽箱梁的做法。对局部构造的设计方式也达成一致意见,需要增加根部高跨比,增加梁高,采用低次抛物线作为梁高变化曲线,增加  $L/4 \sim 3L/8$  跨附近腹板截面的几何尺寸,加大承托几何尺寸,增加横隔板的道数,强化箱梁的纵、横向的框架效应。但对箱梁局部疲劳效应的认识不足,尚需加强这方面的试验研究。

### 参考文献:

- [1] 屈国. 预应力混凝土连续刚构设计[J]. 东北公路, 2003, 26(4): 93-94.
- [2] 刘山洪, 钱永久. 大跨PC箱梁桥腹板裂缝的控制研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(4): 19-22.
- [3] 罗凤林, 谢邦珠. 预应力混凝土连续刚构桥的几个问题探讨[J]. 中国公路, 2004, (20): 131-133.
- [4] 杨志平, 朱桂新, 李卫. 预应力混凝土连续刚构桥挠度长期观测[J]. 公路, 2004, (8): 285-289.
- [5] 楼庄鸿. 现有大跨径预应力混凝土梁式桥的缺陷[A]. 2003年全国桥梁学术会议论文集[C], 189-193.
- [6] 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.
- [7] 李宏江, 李万恒, 程寿山, 等. 体外预应力在某连续刚构桥加固中的应用及其效果分析[J]. 铁道标准设计, 2004, (12): 48-51.
- [8] 李新平. 预应力混凝土连续刚构桥的加固设计[J]. 华东公路, 2002, (4): 17-19.
- [9] 殷增民, 刁文治, 杨金生, 等. 大跨度混凝土连续刚构桥的加固[J]. 天津建设科技, 2004, 14(4): 30-32.
- [10] 牟兵, 张京街. 预应力混凝土连续刚构桥的加固设计[J]. 重庆建筑, 2003, (5): 45-46.
- [11] 王用中, 杨兴其. 三门峡黄河公路大桥设计[J]. 桥梁建设, 1992, (1): 45-52.
- [12] 陈万春, 马建素. 大跨度连续刚构桥加固施工监测与控制[J]. 公路, 2004, (10): 152-157.
- [13] 罗世勋, 谢邦珠. 当代四川公路桥梁(续集 1987-1995)[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1996: 86-87.
- [14] 中华人民共和国交通部部标准. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTJ023-85)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [15] 黄华, 刘鸣. 混凝土构件疲劳设计规定及相关问题探讨[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(3): 19-23, 28.
- [16] 邓鹏麒. 预应力混凝土结构疲劳研究综述[J]. 山西建筑, 2005, 31(1): 30-31.
- [17] 罗凤林. 预应力钢筋混凝土连续刚构——重庆高家花园嘉陵江大桥[J]. 西南公路, 1995, (3): 6-8.

## Overcoming post-downwarping of long span PC continuous rigid frame girder by design measures

LIU Shan-hong<sup>1,2</sup>

1. Post Doctor Station of Transportation and Traffic school, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

**Abstract:** Comparing with the design parameters of several long span prestressed concrete continuous rigid frame girders, which have excessive downwarping caused by girder cracking, the main reasons of causing girder downwarping are presented. In order to improve the permanent shear carrying capacity of box girder, design parameters of improving structural measures are proposed. Specific measures, which can overcome the continual post-downwarps of box girders, are presented. They can also guarantee girders in health states effectively.

**Key words:** prestressed concrete; continuous rigid frame girder; box girder; design; camber