

文章编号: 0451-0712(2006)08-0072-05

中图分类号: U446.2

文献标识码: B

大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制研究

王法武, 石雪飞

(同济大学桥梁工程系 上海市 200092)

摘 要: 目前国内大跨径预应力混凝土梁桥存在的主要病害是跨中下挠过大和箱梁梁体裂缝。本文对跨中下挠过大的主要原因进行了分析, 介绍了施工控制中线形控制的方法, 然后用恒载零弯矩理论给一座已建的 95 m + 160 m + 95 m 连续刚构桥重新配置预应力束, 并对原设计和恒载零弯矩配束从内力、位移、预应力筋用量三方面做一比较, 最后提出了控制跨中下挠过大的一些措施。

关键词: 大跨径梁桥; 跨中下挠; 长期挠度控制; 恒载零弯矩

据统计, 到 2004 年底, 我国高速公路通车里程已超过 3.4 万 km, 居世界第二位。2004 年底, 国务院审议通过了《国家高速公路网规划》。根据该规划, 未来 30 年, 我国将斥资 2 万亿元建设国家高速公路网, 使高速公路总里程达到 8.5 万 km。认真回顾总结我国桥梁建设中存在的问题, 具有十分重要的意义。

1 大跨径预应力混凝土梁桥存在的主要病害

目前, 国内大跨径预应力混凝土梁桥存在的主要病害是主跨跨中下挠过大、箱梁梁体产生裂缝。跨中下挠会进一步加剧箱梁底板开裂, 而箱梁梁体裂缝增多使结构刚度降低, 进一步加剧了跨中下挠, 这两者互相影响形成了恶性循环。以下是几座主跨跨中下挠过大的桥梁实例。

1.1 黄石大桥

黄石大桥为一座 5 跨预应力混凝土连续刚构桥, 跨径布置为 162.5 m + 3 × 245 m + 162.5 m, 连续长度达 1 060 m, 于 1995 年建成。该桥通车运营 3 年后, 跨中仍然持续下挠。该桥运营 7 年后, 各跨跨中均有明显下挠, 与成桥时相比, 大桥北岸次边跨 2 号墩和 3 号墩之间主梁跨中下挠累计已达 30.5 cm, 中跨 3 号墩和 4 号墩之间主梁跨中下挠已达 21.2 cm, 南岸次边跨 4 号墩和 5 号墩之间主梁跨中下挠累计已达 22.6 cm^[1]。

1.2 虎门大桥辅航道桥

虎门大桥辅航道桥为一座 3 跨预应力混凝土连

续刚构桥, 跨径布置为 150 m + 270 m + 150 m, 于 1997 年建成通车, 是当时世界上最大跨径的预应力混凝土连续刚构桥。连续 7 年的观测表明, 承台竖直变位和墩顶角位移很小, 但主跨跨中挠度却因混凝土收缩、徐变等因素而逐年增长, 而且尚未停止。2003 年 11 月测量数据表明, 与成桥时相比, 左幅桥跨中累计下挠达 22.2 cm, 右幅桥跨中累计下挠达 20.7 cm^[2]。

1.3 三门峡黄河公路大桥

三门峡黄河公路大桥主桥为一座 6 跨预应力混凝土连续刚构桥, 跨径布置为 105 m + 4 × 140 m + 105 m, 于 1992 年建成通车。2002 年 6 月对该桥的检查发现, 跨中区域下挠最大达到 22 cm, 另外梁体有大量裂缝^[3]。

1.4 广东南海金沙大桥

广东南海金沙大桥主桥为一座 3 跨预应力混凝土连续刚构桥, 跨径布置为 66 m + 120 m + 66 m, 于 1994 年建成通车。2000 年底对该桥检查发现, 主跨跨中挠度达 22 cm, 主跨箱梁腹板有大量斜裂缝, 最大裂缝宽度 1.15 mm^[4]。

1.5 国外一些跨中下挠过大的桥梁实例

科罗·巴岛(Koror-Babeldaob)桥是一座跨中带铰的 3 跨连续预应力混凝土刚架桥, 其跨径组合为 72 m + 241 m + 72 m, 是当时世界上同类桥梁中跨径最大者。1978 年建成通车, 通车后不久就产生了较大的挠度, 到 1990 年, 其挠度达到 1.2 m。后来

采用体外索施加预应力,使主跨中央挠度减小。1996年7月加固结束,加固处理后不到3个月就发生了倒塌事故^[5]。

英国的 Kingston 桥是一座跨径布置为 62.5 m + 143.3 m + 62.5 m 的预应力混凝土箱梁桥,主跨中央带铰。1970 年建成后跨中挠度缓慢加大,至 1998 年已经超过 30 cm^[6]。

美国 1979 年竣工的鸚鵡渡口桥(Parrotts Ferry Bridge),跨径布置为 99 m + 195 m + 99 m,上部结构采用轻质混凝土。该桥在使用 12 年后,195 m 的主跨跨中下挠了 63.5 cm。

2 大跨径预应力混凝土梁桥跨中下挠过大的原因分析

目前,我国大跨径预应力混凝土梁桥跨中下挠过大,是一个比较复杂的问题,是多个因素引起的。

2.1 混凝土收缩和徐变

混凝土的收缩和徐变是一个十分复杂而又难以精确计算的非线性问题。美国混凝土学会第 209 委员会 1982 年的报告指出,所有影响收缩、徐变的因素,连同它们所产生的结果本身都是随机变量,它们的变异系数最好也要达到 15%~20%^[7]。现在大跨径梁桥箱形截面越来越轻型,板件越来越薄,混凝土强度等级越来越高,使得徐变对结构的影响越来越大。多座桥梁跨中下挠过大,说明了人们对混凝土收缩、徐变的影响程度及长期性估计不足。

2.2 预应力损失

采用悬臂浇注法施工的预应力混凝土梁桥,预应力管道跨越几个节段,预应力与管道的实际摩擦系数 μ 以及管道偏差系数 k 通常比规范规定的要大。混凝土收缩、徐变引起的损失和预应力钢筋松弛损失随着时间的增加而逐渐增大,并且两者相互影响,一方面混凝土收缩、徐变使结构缩短,加剧了预应力松弛损失;另一方面,预应力松弛改变了结构的内力状态,从而影响着混凝土收缩、徐变。所有这些都影响了预应力损失的计算精度,使得预应力损失的实际值与理论计算值有较大差别。

2.3 施工质量

我国施工质量水平总体不高,管理不完善,在施工过程中,经常发生预应力波纹管的实际定位位置与设计要求偏差较大,改变了预应力束的偏心距,使得难以建立足够的预应力。另外,在孔道灌浆施工中,也常出现质量问题,如孔道中水泥浆未充满空

隙,水泥浆体硬化后收缩与孔道壁分离,水泥浆硬化后强度不满足规范要求等。

3 大跨径预应力混凝土梁桥的线形控制

目前,施工控制已经成为大跨径桥梁施工中的一个重要环节。线形控制是施工控制的主要部分,其目的是保证桥梁在运营一段时期后,线形满足设计要求。

大跨径预应力混凝土梁桥的线形控制主要采用预抛高的方法,即在建造期间通过设置预拱度来抵消桥梁长期下挠变形。然而,由于存在各种不确定因素,诸如混凝土材料的变异性、混凝土收缩徐变难以准确计算、预应力损失难以准确计算、施工中模板定位误差较大、预应力管道位置偏离设计较大等等,使得预抛高值取多大难以准确确定。鉴于人们对跨中下挠问题的担心,目前,预抛高值常常宁大勿小,对于大跨径预应力混凝土梁桥,一般预抛高值达到 $L/2\ 000 \sim L/1\ 000$ 。对于双向纵坡的桥梁,过大的预抛值相当于改变竖曲线的曲率半径,没有彻底改变竖曲线的形状,对行车速度、行车舒适性影响相对较小;而对于单向纵坡的桥梁,过大的预抛值彻底改变了竖曲线的形状,对行车速度、行车舒适性影响较大。

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。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。在文献[8]中,介绍了一座 47 m + 70 m + 45 m 的 3 跨连续梁桥,采用恒载零弯矩理论分阶段配置预应力钢束。具体做法是:在悬臂阶段,按照结构零弯矩要求设计悬臂静定束,使单个 T 构仅受轴向压力;然后根据结构合拢顺序,设计后期束,满足正常使用阶段应力要求。对于采用悬臂浇注法施工的梁桥,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,可以根据恒载零弯矩理论配束,使每个截面在恒载作用下总弯矩较小,这样挠度和徐变内力均较小,有利于工程控制。

4 用恒载零弯矩理论给一座已建桥梁配束

本文以安徽荆涂淮河大桥为背景,采用恒载零

表 1 荆涂淮河大桥原设计自重弯矩和预应力弯矩

kN·m

块段号	预应力弯矩			自重弯矩	预应力弯矩 自重弯矩	预应力弯矩和 自重弯矩之和
	顶板束弯矩	腹板下弯束弯矩	合计			
0 号	523 195	150 926	674 121	—795 898	0.847	—121 777
1 号	516 940	142 080	659 020	—734 945	0.897	—75 925
2 号	470 013	121 612	591 625	—677 330	0.873	—85 705
3 号	426 026	114 984	541 010	—622 776	0.869	—81 766
4 号	385 035	96 347	481 382	—571 187	0.843	—89 805
5 号	346 737	89 574	436 311	—522 469	0.835	—86 158

795 898=84.7%,在最大双悬臂状态,预应力产生的弯矩不能抵消箱梁自重产生的弯矩。由于在最大双悬臂状态下,预应力产生的弯矩不能抵消箱梁自重产生的弯矩,使该桥每个悬浇节段断面处的累计位移较大,最大位移为 23 号块处,达到了 10.2 cm。按 10 年收缩徐变后总挠度为 3 倍弹性挠度,则下挠值为 3×10.2=30.6 cm,相当于主跨 160 m 的 1/523,其值相当

可观。

4.4 按恒载零弯矩配束后自重弯矩和预应力弯矩

按恒载零弯矩理论配置顶板束时,保持所有顶板束号、位置不变,仅改变每孔中的钢绞线根数。按照恒载零弯矩原则配置顶板预应力钢束后,0 号块附加每个节段处的预应力弯矩和自重弯矩见表 2。

表 2 荆涂淮河大桥恒载零弯矩配束后预应力弯矩和自重弯矩

kN·m

块段号	预应力弯矩			自重弯矩	预应力弯矩 自重弯矩	预应力弯矩和 自重弯矩之和
	悬臂束弯矩	下弯束弯矩	合计			
0 号	645 528	150 926	796 454	—795 898	1.001	556
1 号	637 846	142 080	779 926	—734 945	1.061	44 981
2 号	585 200	121 612	706 812	—677 330	1.044	29 482
3 号	535 658	114 984	650 642	—622 776	1.045	27 866
4 号	489 317	96 347	585 664	—571 187	1.025	14 477
5 号	445 823	89 574	535 397	—522 469	1.025	12 928

由表 2 可以看出,按照恒载零弯矩配置顶板束后,在最大双悬臂状态,预应力弯矩和自重弯矩之和较小,最大的为 1 号块断面,为 44 981 kN·m,仅占自重弯矩的 44 981/734 945=6.12%。

4.5 按恒载零弯矩配束前后位移与预应力筋用量对比

在最大双悬臂状态下,最大悬臂端附近各节段,原设计和恒载零弯矩配束后的位移情况见表 3。

表 3 按恒载零弯矩配束和原设计的位移

cm

节点号	块段号	原设计位移	恒载零弯矩设计位移
6	23 号	—9.9	—2.0
7	22 号	—10.2	—2.1
8	21 号	—9.9	—1.5
9	20 号	—9.1	—0.6
10	19 号	—8.0	0.4
11	18 号	—6.7	1.3
12	17 号	—5.4	1.9

由表 3 可以看出,当采用恒载零弯矩配束后,在最大双悬臂状态下,桥梁跨中附近位移显著减小,由原设计的 10 cm 减小到 2 cm。

原设计单幅桥 2 个主墩顶板束 T1~T23 总用量为 164.25 t,按照恒载零弯矩配束后,单幅桥 2 个主墩的顶板束 T1~T23 总用量为 217.24 t,增加了 52.99 t,均摊到桥面上为 52.99×1 000/(11.45×350)=13.22 kg/m²。假定钢绞线每吨 1.1 万元,则增加的费用为 52.99×1.1=58.3 万元。原设计的纵向预应力束材料指标为 72.94 kg/m²,按照零弯矩配束后,纵向预应力束材料指标为 86.16 kg/m²。原设计墩顶截面纵向预应力配筋率为 0.729%,采用恒载零弯矩配束后,增加到 0.843%。

5 小结

为了控制大跨径预应力混凝土梁桥跨中下挠过大,应从多方面考虑。在设计方面,可以通过多配置

预应力钢筋,优化预应力设计使得自重弯矩和预应力弯矩的差值尽量减小,从而减小混凝土的长期收缩徐变;做好箱梁的抗剪设计,提高结构的耐久性,使得箱梁不产生裂缝,保证结构的刚度和预应力钢筋不被腐蚀;设计时要充分考虑到混凝土收缩、徐变的不确定性,做好一些备用措施的设计,比如预留备用预应力管道,在跨中下挠过大时可以及时补救。

在施工方面,首先预应力管道定位一定要准确,确保建立足够的预应力;其次,预应力束张拉后要及时灌浆,而且灌浆要饱满;再次,为了减小混凝土长期收缩、徐变,应适当延长混凝土初次加载龄期;最后,应做好现场混凝土收缩、徐变试验和预应力孔道的摩阻试验,获得比较接近现场的徐变系数和管道摩阻系数、偏差系数,以便校正设计。

参考文献:

[1] 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,(2).

[2] 杨志平,朱桂新,李卫. 预应力混凝土连续刚构挠度长期观测[J]. 公路,2004,(8).

[3] 马健. 三门峡黄河公路大桥的主桥加固[J]. 公路,2004,(6).

[4] 陆中元,李建华,朱念清. 广东南海金沙大桥的维修加固[J]. 铁道建筑,2004,(10).

[5] 陈开利. 帕劳共和国的桥梁倒塌事故[J]. 国外公路,1998,(6).

[6] 孙海林,叶列平,杨孚衡. 城市轨道交通预应力混凝土连续梁桥的收缩和徐变分析[J]. 公路交通科技,2005,(1).

[7] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[8] 刘桂生. 悬臂施工连续梁桥分阶段预应力设计[J]. 公路测设简讯,1996,(6).

[9] 上官兴. 控制大跨梁桥长期下挠的新技术[A]. 2004 年全国公路桥梁学术会议论文[C].

A Study on Long-Term Deflection Control of Long Span Prestressed Concrete Girder Bridge

WANG Fa-wu, SHI Xue-fei

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: At present, main problems of long span prestressed concrete girder bridges in China are excessive midspan sag and cracks in box girder. In the paper, main causes of excessive midspan sag are analysed, line control method during construction is introduced. Then prestress tendons of a continuous rigid frame bridge with span of 95 m+160 m+95 m are redesigned using zero bending moment method, and the original design method and zero bending moment method are compared in internal force, displacement and amount of prestress tendons. Last, some measures to control excessive midspan lag are given.

Key words: long span girder bridge; midspan sag; long-term deflection control; zero bending moment of dead load