

大跨度混凝土连续梁桥的病害成因分析

林帆¹, 王萍², 肖开军¹, 李伟¹

(1. 中交第二公路工程局有限公司, 西安 710065; 2. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321)

[摘要] 自20世纪80年代以来,我国建成了大量大跨度预应力混凝土连续体系桥梁,取得了辉煌成就,但随着桥梁建设数量与使用年限的增加,该类桥梁在施工与运营期陆续出现一些具有共性的病害:跨中挠度过大、箱梁开裂与跨中合龙段底板剥离等,而且有些病害已经导致桥梁重大的安全事故与经济损失。文章对国内数十座桥梁出现的病害随时间变化发展的趋势、在空间上分布的形态等进行了分析。根据现有的理论研究成果,分析了腹板斜裂缝、底板纵向裂缝、合龙段底板分层等病害的形成机理,提出了控制裂缝等病害发生的措施,并说明了这些控制措施在泰州大桥预应力桥梁上的应用情况。

[关键词] 预应力;混凝土;连续体系桥梁;病害;控制

[中图分类号] U446 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)04-0078-04

连续体系桥梁又可以分为连续梁桥与连续刚构桥,但是由于两者在跨越能力、受力特点与施工方法上较为接近,因而表现的病害形式也具有一定共性。在我国,对于单跨跨度超过60 m的混凝土连续桥梁,经常采用滑移支架或挂篮逐段浇筑成形,利用这两种方法施工的桥梁不仅施工过程中的结构体系与成桥时有明显区别,而且在施工过程中结构体系、荷载类型与量值等反复变化,加之施工周期较长,不确定性因素多,因而在大跨度混凝土连续桥梁上出现了变形过大、混凝土开裂等病害现象。相关单位对180座已经出现病害的该类桥梁进行了统计分析,发现该类桥梁病害现象较为严重。为此,针对国内数十座出现病害桥梁的相关资料进行了分析,进一步总结了病害在时间与空间上的发展规律与趋势,分析了病害形成机理,提出若干控制病害发生的措施。

1 跨中挠度过大与腹板斜向开裂

大跨度连续体系桥梁的长期变形一般较大,在

我国的桥梁设计规范中规定:当预应力导致的长期变形小于结构自重以及部分活荷载导致的长期变形时,需要事先设置一定的预拱度来抵消这种变形,从而保证桥梁长期运营后的线形平顺。但根据报道,我国大量该类桥梁在建成通车一段时间后,跨中出现严重的梁体下挠, $L/4$ 跨径附近的箱梁腹板出现斜向裂缝,桥梁线形不顺,刚度降低,给行车带来麻烦,造成安全隐患(见表1)。

从表1可见,出现挠度过大的预应力桥梁一般具有以下几个特点:a. 桥梁实际挠度一般远远大于按照规范计算的预测值,表2为国内某咨询单位对多座桥梁长期变形计算得到的预测值,对比表1与表2可见,主跨在120~230 m之间跨中挠度最大值不超过8 cm,而实测值均在16 cm以上;b. 挠度过大与腹板斜向裂缝具有共生性,即在出现挠度过大的桥梁无一例外地出现腹板开裂现象,部分桥梁也出现底板横向裂缝与纵向裂缝;c. 大多数桥梁 $L/8$ 到 $3L/4$ 之间腹板斜向裂缝呈现上宽下窄特征,位置

[收稿日期] 2010-01-04

[作者简介] 林帆(1972-),男,海南临高县人,工程师,主要研究方向为大跨径混凝土梁桥施工;E-mail:linfan0825@126.com

表1 国内部分桥梁下挠现象

Table 1 Bending phenomena of some bridges in China

桥梁名称	结构形式	跨度/m	挠度/cm	病害特征描述
桥梁 1	某三跨预应力变截面连续刚构	100 + 150 + 100	27	1994 年建成,1998 年发现明显挠度,1999 年为 27 cm,同时箱梁两侧腹板出现大量斜向裂缝
桥梁 2	某预应力混凝土连续刚构	66 + 120 + 66	22	1994 年建成,1999 年发现明显下挠;2000 年检测发现箱梁两侧腹板出现大量斜向裂缝,下挠 22 cm,2001 年检测病害继续发展
桥梁 3	某混凝土连续刚构桥	162 + 3 * 245 + 162	30.5	1995 年通车,2001 年发现明显挠度,腹板裂缝斜向裂缝集中在 L/4 附近,内部多于外部
桥梁 4	某变截面三向预应力混凝土连续箱梁	42.5 + 65 + 42.5	10	1996 年投入使用,1999 年发现 4 分点处少量腹板斜与跨中底板横向裂缝;2000 年发现裂缝继续发展,腹板裂缝内侧多于外侧
桥梁 5	某变截面连续刚构	105 + 4 * 160 + 105	16	1992 年建成,1996 年发现跨中明显下挠,到 2002 年挠度与裂缝持续发展,箱梁腹板斜裂缝集中在边跨端部与 1/4 跨附近

靠近腹板的上托板,裂缝与水平夹角一般为 $15^\circ \sim 35^\circ$,靠近跨中部位腹板裂缝则基本呈水平形状。少数桥梁的腹板斜向裂缝从锚固齿板后底板处产生,并逐渐向上发展,一直到达翼板,裂缝呈现下宽上窄的特征,裂缝与水平夹角一般为 $35^\circ \sim 48^\circ$;d. 出现病害的桥梁一般为变截面形式,少数为等截面,无一例外地采用挂篮节段法施工,桥梁预应力主钢筋采用分段配筋形式,靠近支座附近在顶板与腹板布置悬臂索,跨中在底板内布置连续索,连续索一般锚固在跨长的 $L/8$ 到 $L/4$ 之间;e. 根据部分桥梁的跟踪监测,腹板斜向裂缝的宽度一般夏季大于冬季,最大可以增加 20%;f. 挠度过大与腹板斜向裂缝一般在桥梁运营 4 ~ 5 年后显现,腹板斜向裂缝一般先在 $L/4$ 附近出现,逐渐向跨中发展,个别桥梁继而跨中底板出现横向裂缝;g. 个别桥梁下挠现象在运营几年甚至十几年后基本呈线性持续发展,没有稳定的趋势。如虎门大桥辅航道桥在 1997 年到 2003 年为期 7 年的跟踪监测中就发现跨中下挠为 26 cm,折合跨径为 1/1 038,远远超过原先的预留值 10 cm,而且下挠处于持续发展当中,没有出现稳定趋势。

表2 连续刚构桥挠度预测值

Table 2 Forecast value of continuous rigid bridge deflection

桥名	跨径/m	最终挠度/cm
汤溪河大桥	130 + 230 + 130	2.1
月亮包大桥	110 + 210 + 110	1.5
巴阳 2 号大桥	100 + 180 + 100	7.1
姚家坡大桥	78 + 140 + 78	3.3
巴阳 1 号大桥	68 + 120 + 68	4.1

2 箱梁底板开裂与剥离

大量的普查发现,采用单悬臂转连续、挂篮悬臂平衡法施工连续梁与连续刚构,在桥梁施工与运营过程中底板极易出现多种病害形式:

1) 底板锚固齿板后端的横向裂缝与斜向裂缝。对于节段施工的桥梁,在桥梁运营一个时段后,底板上锚固跨中连续索的齿块后端会出现横向与斜向裂缝。某大桥的南北引桥连续箱梁,在运营六七年后在箱梁底板预应力锚固齿板后端出现横向裂缝,而后从底板与腹板交界处沿 45° 方向在腹板上向上扩展。经过系列研究,该类型的裂缝产生机理已经基本清楚:主要是因为齿板锚固集中力与外荷载整体弯矩在齿板后端产生了耦合,但是许多桥梁设计计算中忽略了集中力导致齿板后端的拉应力,因而计算拉应力远远小于实际拉应力,从而导致了裂缝的出现。

2) 对于采用移动式模架逐孔现浇法施工的多跨连续梁,在单悬臂状态下进行底板纵向预应力张拉时,经常引发底板的纵向裂缝,裂缝一般从悬臂端产生逐渐向桥墩扩展 1 ~ 2 m 左右。这类裂缝目前已经在多座采用滑移模架施工连续梁桥上陆续出现,为此许多学者分别进行了专项研究,基本搞清楚了导致裂缝出现的力学机理:由于在浇筑下一个梁段时,移动模架后端需要临时锚固在前期施工的悬臂端顶板与底板上,因而在底板腹板位置以及底板横向形成集中力,加之纵向预应力索在悬臂端腹板上需要临时锚固后接长,因而在悬臂端腹板上形成若干纵向集中力的作用。集中力以及梁体自重悬臂端的横向框架效应会在底板横向产生拉应力、而

预应力的深梁效应也会在底板形成拉应力,这两种拉应力单独或叠加后超过混凝土抗拉强度后,悬臂端底板就会沿纵向形成裂缝^[1,2]。

3)底板跨中合龙段的纵向裂缝与剥离破坏。对于节段施工的大跨度变截面预应力混凝土桥梁,合龙段的底板经常在合龙索张拉过程中出现多种严重破坏现象:一种是在合龙段底板沿顺桥向出现肉眼可见的纵向裂缝;第二种破坏就是从底板厚度方向来看,在预应力管道中间位置,也就是水平面积最小的位置形成大面积水平裂缝,上下分层,严重的甚至导致混凝土剥离;第三种破坏形式与第二种破坏形式基本相同,但是分层位置位于预应力管道的上部。

目前这些破坏形式的产生机理已经基本明确:预应力筋的空间效应以及材料泊松比效应应该是导致第一种与第二种形式破坏产生的主要原因,即底板纵向预应力钢筋在竖直面内布置为抛物线形的曲线,加上底板预应力索定位偏差导致的局部曲率,从而纵向预应力会对底板产生向下的径向分力,由于现在箱梁底板一般较宽,在横向底板可以看成弹性支撑在腹板上的受弯梁,此径向力与自重等共同作用下其下表面必然会产生拉应力,从而形成纵向裂缝,同时在纵向径向力作用下预应力管道之间混凝土会产生垂直于底板的拉应力,一旦拉应力超过混凝土抗拉强度,底板将沿管道截面积削弱的部位向下崩裂,形成上下分层^[3]。而第三种破坏形式相对复杂,它经历了由局部剪切破坏向整体分层破坏的发展与变化过程,即从纵剖面上看每个节段都有部分连续索在接缝部位向上弯折并锚固到齿板上,从而在接缝位置形成向上的集中力,而其他预应力索继续按照抛物线走向通过接缝,从而形成向下的荷载;从接缝的横剖面上看,向上的荷载与向下的荷载形成一对剪力,一旦剪力导致的剪应力超过混凝土抗剪强度,从而在底板局部形成斜向裂缝,斜向裂缝一旦形成后在连续索向下径向力作用下发生沿预应力管道上部向横向与纵向扩展,从而形成横向边缘宽、中间窄的水平裂缝^[4]。

3 病害的控制措施与应用

底板的分层破坏经常发生在施工期,而腹板斜裂缝是典型结构性裂缝,因此近期为控制这两种裂缝的出现,在设计与施工中提出了多种控制措施。现在普遍认为底板作为普通混凝土结构在径向力作

用下容易发生开裂,因此需要在底板上下层钢筋网之间设置竖向勾筋来防止分层开裂的出现。单根勾筋的面积 A_0 一般按照下式进行计算:

$$A_0 = \frac{\int q dx}{n_s n_b [\sigma]} \quad (1)$$

式(1)中: q 为预应力筋的等效径向力; n_s 为纵向梁段 S 范围内勾筋的总排数; n_b 为底板预应力筋影响范围内单排箍筋数; $[\sigma]$ 为底板分层破坏时允许力,对于锚固长度满足规范要求的拉筋,取钢筋设计值,当不满足长度要求时需要适当折减。有时为了进一步增强勾筋的效果,设计单位会在跨中2~3个节段的接缝处设置矮肋,将U型箍筋一端套住预应力管道,另一端可靠的锚固至矮肋中。

对于腹板斜裂缝,现在普遍的控制手段是:增加腹板厚度来综合考虑难以计算的温度效应与混凝土疲劳效应,在腹板关键部位选用抗裂性能优越的钢纤维混凝土或根据局部应力的计算结果适当加密腹板的箍筋来增强腹板的抗裂性能,将竖向筋配置成U型或将垫板做成整体锚固板来提高竖向预应力钢筋的可靠性等。在泰州大桥预应力桥梁中除加大了腹板厚度,还采用精细化结构分析来指导箍筋的配置。通过计算发现,除竖向预应力可以导致腹板竖向应力,其他作用也可以导致腹板出现3~4 MPa 竖向拉应力,2~3 MPa 的剪应力,因此采用腹板竖向应力只考虑竖向预应力效应的主应力计算模式会引起较大误差。为此,在该桥中采用了综合考虑锚固局部效应、横向预应力、自重等横向空间效应的腹板主应力计算公式:

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy}}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\sigma_{cy} = \sum_{i=1}^7 \sigma_{cy}^i$$

$$\tau = \tau_Q - \tau_{Qy} - \tau_J \quad (2)$$

式(2)中: σ_{cx} 是腹板纵向应力; $\sigma_{cy}^i (i = 1, \dots, 7)$ 分别是竖向预应力、顶板锚固、腹板锚固、顶板横向预应力张拉、顶板自重、活荷载偏载、温度等导致腹板产生的竖向应力; τ_J 是齿板锚固导致腹板剪应力。在该计算模式下对腹板主应力进行了详细计算,并在主应力计算结果的基础上进行了详细的配筋设计,较传统设计增加了箍筋的配置量。

4 结语

大跨度预应力混凝土桥梁目前存在跨中挠度过

大、腹板斜向开裂、底板横向裂缝、底板纵向裂缝以及底板上下分层等多种典型病害形式,尽管国内外学者开展了多种形式的科学研究,某些破坏形式的机理已经清楚,也提出了相应的防治措施,但是由于机制与理论问题,应该在以下方面采取进一步措施:

1) 加快研究成果向设计规范转化步伐。尽管有些破坏形式的机理已经清楚,也有相应的防治措施,但是由于研究成果往往局限在部分地区,部分科技人员、设计人员一般都严格按规范设计,最新的研究成果往往不能够及时反应到新的桥梁设计与建设中。

2) 加快大跨度预应力混凝土桥梁挠度过大与腹板开裂机理与控制措施的研究力度。大跨度预应力混凝土桥梁挠度过大与腹板开裂已经成为我国具有典型性桥梁病害,在桥梁运营 10 年左右就开始加

固的该类桥梁已经不下数十座,但是到目前为止导致病害出现的本质原因依旧不清晰,相应的设计计算理论不完善,因此应尽快解决该问题。

参考文献

- [1] 赵启林,周旺进,江克斌. 预应力混凝土箱梁桥施工中的裂缝成因分析与修补[J]. 公路交通科技,2006,6(23):82-92
- [2] 曹三鹏,刘 钊,岳力强. 移动模架施工 PC 连续梁桥悬臂段箱梁空间效应不利影响及其防治措施[J]. 公路交通科技,2006,12(23):90-94
- [3] 包立新,杨广来,杨文军. 对连续刚构桥底板开裂问题的探讨[J]. 公路,2004,(8):43-45
- [4] 潘大荣,赵启林,王景全,等. 预应力混凝土连续箱梁合拢段底板开裂机理[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2008,9(5):552-555

Mechanism and control of existing faults on long-span concrete continuous system bridges in China

Lin Fan¹, Wang Ping², Xiao Kaijun¹, Li Wei¹

(1. CCCC second Highway Engineering Co., LTD., Xi'an 710065, China;

2. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China)

[Abstract] Since 1980's, a lot of long-span prestressed concrete continuous system bridges have been constructed in China, and great success has been achieved. However, with the increase of numbers and service life of bridges, some similar diseases have been showed in this kind of bridges in succession. In this paper, the forms of many typical faults like excessive deflection in the mid-span, box beam crack and bottom slab stripping in the closure segment of mid-span, etc., have been summarized. And the characteristics of these faults' happening time, trend of development and distribution form have been pointed out. Their causes and corresponding prevention countermeasures have been analyzed. At last the direction which needs further study about the theory of computation and the measures which should be taken in design have been figured out

[Key words] prestressed; concrete; continuous bridge; fault; control method