

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.08.002

预应力混凝土现浇箱梁运营期腹板斜向 裂缝损伤分析

刘红义^{1,2,3}, 张劲泉³, 周建庭¹, 闫昕²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 中路高科交通检测检验认证有限公司, 北京 100088;

3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为了研究某通车5 a大跨径预应力混凝土变截面现浇箱梁运营期腹板斜向裂缝产生的原因, 对裂缝的时间和空间分布进行了详细检测和描述, 裂缝主要分布在跨中附近, 呈8字形分布, 斜向裂缝逐年增多。首先分析了此类裂缝产生的常见原因和机理, 重点从现行规范中的计算模式进行机理分析。然后建立了ABAQUS主桥实体有限元模型, 在该桥交通量、恒载、裂缝产生历史等充分调查的基础上, 采用单因素分析和耦合因素分析方法, 分析了箱梁竖向预应力损失、纵向预应力损失、超载等因素对箱梁腹板混凝土主拉应力的影响。结果表明: 竖向预应力损失对腹板混凝土主拉应力影响不大, 当纵向预应力损失21%或车辆超载45%时, 腹板混凝土主拉应力超限; 考虑竖向预应力损失40%、纵向预应力损失5%、超载40%等耦合因素, 腹板混凝土主拉应力亦超限, 耦合因素作用下有限元主拉应力超限位置与桥梁实际产生裂缝的位置具有一定的对应性; 超载、纵向预应力损失等耦合因素是该桥腹板产生斜向裂缝的主要原因。研究成果为同类桥梁裂缝成因分析和维修处治提供工程参考。

关键词: 桥梁工程; 斜向裂缝; 数值模拟; 箱梁; 腹板

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 08-0009-07

Analysis on Damage of Oblique Crack in Web of PC Cast-in-place Box Girder during Operation

LIU Hong-yi^{1,2,3}, ZHANG Jin-quan³, ZHOU Jian-ting¹, YAN Xin²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. China-Road Transportation Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100088, China;

3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to study the causes of oblique cracks in the web of a 5-year long-span prestressed concrete cast-in-place box girder with variable cross-section, the temporal and spatial distribution of cracks is detected and described in detail. The cracks are mainly distributed near the mid-span, in a splay shape, and the oblique cracks are increasing year by year. First, the common causes and mechanism of such cracks are analyzed, focusing on the mechanism analysis by the calculation mode in the current specification. Then, the ABAQUS solid finite element model of the main bridge is established. On the basis of full investigation of the bridge's traffic volume, dead load and crack generation history, by using the method of single factor analysis and coupled-factor analysis, the influences of vertical prestress loss, longitudinal prestress loss and overloading, etc. of box girder on the principal tensile stress of box girder web concrete are analyzed. The

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFE0103000, 2018YFB1600305)

作者简介: 刘红义 (1980-), 男, 河南舞钢人, 高级工程师. (183280375@qq.com)

result shows that (1) the vertical prestress loss has little influence on the main tensile stress of the web concrete, when the longitudinal prestress loss is 21% or the overloading is 45%, the principal tensile stress of the web exceeds the limit; (2) considering the coupling factors of vertical prestress loss of 40%, longitudinal prestress loss of 5% and overloading of 40%, the principal tensile stress of the web also exceeds the limit, under the action of coupling factors, the overrun position of the finite element principal tensile stress has a certain correspondence with the actual position of the bridge crack; (3) The coupling factors such as overloading and longitudinal prestress loss are the main causes of oblique cracks in the web of the bridge. The research result provides an engineering reference for the cause analysis and maintenance of similar bridge cracks.

Key words: bridge engineering; oblique crack; numerical simulation; box girder; web

0 引言

预应力混凝土现浇箱梁桥(连续梁和连续刚构)在我国公路交通系统中应用广泛,而大跨径预应力混凝土箱梁桥因其刚度大、变形小、免维护、跨径大等优点在我国得到快速发展。然而由于荷载、环境等因素影响,大跨径预应力混凝土箱梁不管是在施工期或者是运营期普遍存在箱梁裂缝。交通运输部公路科学研究院对180座预应力混凝土箱梁桥调查发现7类,共17种具有普遍性的裂缝^[1],其中底板横向裂缝、腹板垂直预应力管道的斜向裂缝与结构受力有关,影响桥梁结构安全性。

国内外学者对箱梁腹板斜裂缝的开裂成因进行了研究,主要原因有薄壁箱梁的空间效应、活载剪力设计不当、下弯束的取消、腹板截面尺寸的减小、预应力损失、温度效应、混凝土收缩徐变效应、悬臂锚固力在腹板内引起的附加剪力等。楼庄鸿^[2]认为取消下弯束、作为平面问题分析、腹板偏薄等因素是引起腹板主拉应力斜向裂缝的原因,并且箱内斜裂缝一般要多于箱外。詹建辉等^[3]认为竖向预应力有效性降低、纵向预应力钢束有效性降低、腹板厚度过大的负误差以及混凝土强度不足是引起腹板斜向开裂的主要原因。吕志涛等^[4]从箱梁纵向预应力设计、竖向预应力设计、竖向预应力损失、结构构造设计、箍筋配置、混凝土材料特性等方面对箱梁的开裂和下挠进行了分析,指出取消下弯束、竖向预应力损失、腹板变薄是箱梁腹板产生裂缝的主要原因。贺志勇等^[5]采用ansys分析预应力混凝土等截面连续箱梁的腹板裂缝,研究了不同腹板厚度的主拉应力,验证了腹板厚度应大于60 cm的观点。俞先林等^[6]采用8节点实体退化板壳单元进行预应力混凝土连续箱梁空间应力分析,重点研究了超方、自重、箱梁刚度、预应力损失、温度等因素对箱梁截面主拉应力的影响规律,指出底板预应力损失及

开裂对截面主拉应力影响较大。于天来等^[7]采用MIDAS FEA分析了纵向、竖向预应力损失及活载超载等对预应力混凝土连续刚构桥腹板斜裂缝的影响。徐栋等^[8-9]指出箱梁设计方法中的验算应力不完整造成了现行规范体系的计算结果存有漏洞和缺失,使得有些常见开裂病害无法从现有设计计算框架中找到答案,指出现浇箱梁空间薄壁产生的活载剪应力比经验值偏大,从而导致设计对主拉应力开裂考虑不足,是腹板产生斜向裂缝的重要因素。陈华婷等^[10]研究了超载和预应力损失对箱梁不同布索方式的影响,认为超载对预应力混凝土箱梁腹板主拉应力有明显影响。陈齐凤等^[11]指出沿预应力管道的腹板斜裂缝主要是由预应力局压荷载引起的横向应力过大导致。唐小兵等^[12]对连续刚构箱梁腹板应力进行了测试,发现腹板竖弯纵向预应力钢束、竖向预应力及腹板厚度对腹板斜向裂缝比较敏感。XU等^[13]综合考虑水化反应、相对湿度差、收缩徐变、阳光热差效应、温度突变、车辆荷载等因素的共同作用,建立了钢筋混凝土和预应力混凝土箱梁桥的空间结构模型,应力分析结果表明,水化反应是箱梁底部初始开裂的主要原因,箱梁内部和外部的温差是后期开裂发展的主要原因。贺志奇等^[14]认为过大的预应力损失是产生腹板斜向裂缝的原因。

本研究针对某大跨径预应力混凝土现浇变截面连续箱梁桥成桥运营5 a过程中腹板斜向裂缝问题展开研究,对该桥历年的斜向裂缝进行统计分析,通过建立全桥Abaqus有限元实体模型分析箱梁的受力状态,结合规范和相关理论讨论裂缝产生的原因,以为同类桥的维修处治和设计提供依据。

1 工程实例

1.1 工程概况

某桥主跨为(80+140+80)m预应力混凝土变截面连续箱梁(如图1所示),主梁采用单箱单室箱

梁,箱梁顶板宽 12.0 m,底板宽 7.0 m,翼缘悬臂长度 2.5 m,主墩支点处 5.0 m 等高梁段梁高 8.5 m,跨中、合龙段及边跨支点处 9.0 m 等高段梁高 3.3 m (如图 2 所示),其余梁高按二次抛物线规律变化。跨中及边跨底板厚 32 cm,主墩支点处底板厚 150 cm,箱梁底板厚度按二次抛物线规律变化。箱梁腹板采用分段等厚度规律变化,其中 15[#]~21[#]截面腹板厚度为 50 cm,5[#]~14[#]截面腹板厚度为 65 cm,1[#]~4[#]截面腹板厚度为 80 cm。箱梁顶板厚度为 28 cm。箱梁边支点及中支点处设置横梁,厚度分别为 150 cm 和 250 cm。该桥设计荷载公路-I 级,2016 年 7 月通车,2017 年 7 月检查发现箱内顶板存在纵向裂缝,

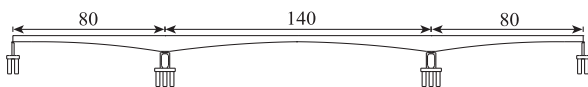


图 1 主桥桥型布置图 (单位: m)

Fig. 1 Layout of main bridge type (unit: m)

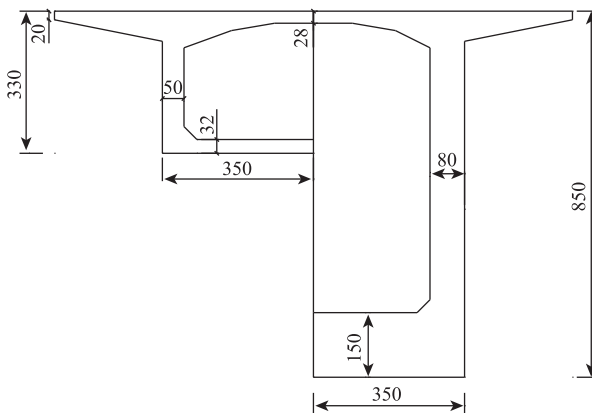


图 2 箱梁典型横断面 (单位: cm)

Fig. 2 Typical cross-section of box girder (unit: cm)

2019 年检查发现箱内腹板存在斜向裂缝,2020 年检查发现腹板内外侧新增斜向裂缝。

1.2 裂缝发展历史

该桥为双幅桥,设计、施工单位均相同。从空间上看,斜向裂缝主要发生在主跨跨中 $L/4 \sim L/2$ 之间腹板,呈“八”字形分布。右幅桥斜向裂缝的宽度范围为 0.1~0.2 mm,长度范围为 0.5~2.9 m,个别裂缝跨施工节段,最大裂缝深度 9.2 cm,左幅桥的斜向裂缝宽度范围为 0.1~0.14 mm,长度范围为 0.5~2.87 m。末次检查结果右幅桥斜向裂缝的数量 81 条,而左幅斜向裂缝的数量 41 条。右幅桥箱内外裂缝数量相当,而左幅箱内裂缝显著多于箱外。从时间上看,2017 年发现纵向裂缝,2021 年发现较多受力裂缝,整体表现为裂缝逐年增加,特别是 2019 年裂缝增长速率最大,由 3 条增加到 30 条。因此,整体上看右幅桥腹板斜向裂缝病害比左幅桥严重。左右幅桥箱梁裂缝发展规律如图 3 所示,右幅桥主跨左腹板箱内外裂缝情况展开如图 4 所示。

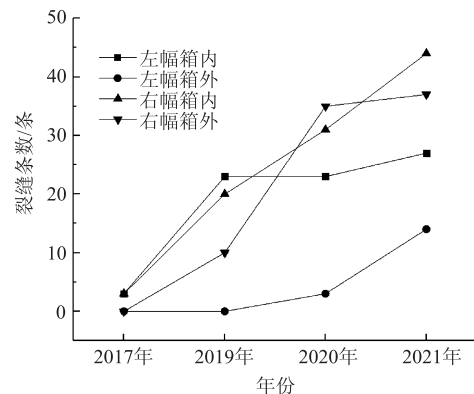


图 3 腹板斜向裂缝历年发展情况

Fig. 3 Development of oblique web cracks over years

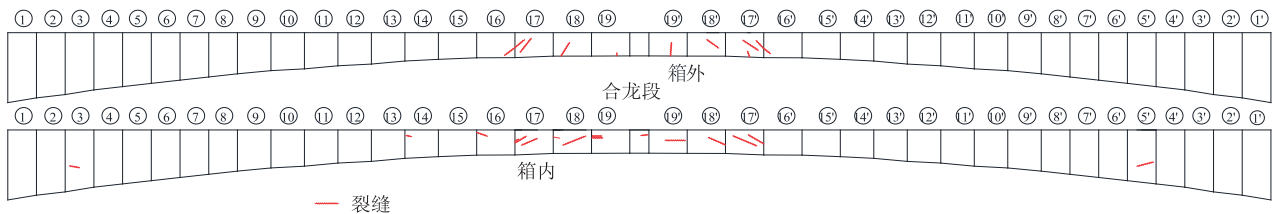


图 4 右幅桥主桥左腹板箱内外裂缝展开图

Fig. 4 Inside and outside crack expansion of left web box inright of main bridge

2 腹板斜裂缝机理分析

2.1 研究现状

目前关于腹板斜裂缝的研究主要集中在施工阶段,而对运营期产生的斜裂缝研究较少。腹板斜向裂

缝根据与预应力管道的走向可以分为两类:一类裂缝为沿预应力管道的斜向裂缝,一般认为是非受力裂缝^[15-16],裂缝产生的主要原因是腹板下弯束产生的径向力和腹板横向拉应力,径向力即张拉钢束引起的垂直钢绞线的横向应力超过混凝土抗拉强度,横向拉应

力即泊松效应。其他原因包括温度、水化热、混凝土收缩徐变等因素。另一类裂缝垂直预应力管道的斜向裂缝或腹板竖向裂缝,此类裂缝一般认为是受力裂缝。吉林等^[17]通过理论分析和有限元模拟的方法对预应力混凝土箱梁腹板斜裂缝产生原因进行了分析,指出腹板竖向应力不仅与竖向预应力损失有关,还和纵向预应力锚固、顶板横向预应力张拉等因素有关。

众所周知,腹板产生受力斜向裂缝的主要原因是混凝土主拉应力超过混凝土的抗拉强度,一般认为腹板斜向受力裂缝产生的原因主要有竖向预应力损失、纵向预应力损失、超载、腹板厚度不足、温度、设计等因素。每座桥腹板开裂均有其独特性,源于腹板开裂成因的复杂性,需要结合每座桥梁裂缝的时空分布和建养历史才能进行准确的成因分析。

2.2 开裂机理分析

在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中规定,预应力混凝土受弯构件由作用频遇组合和预加力产生的混凝土主拉应力和主压应力应按下列公式计算:

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cy}}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx} - \sigma_{cy}}{2}\right)^2 + \tau^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{cx} = \sigma_{pc} + \frac{M_s y_0}{I_0}, \quad (2)$$

$$\sigma_{cy} = \sigma_{cy, pv} + \sigma_{cy, ph} + \sigma_{cy, t} + \sigma_{cy, l}, \quad (3)$$

$$\sigma_{cy, pv} = 0.6 \frac{n \sigma'_{pe} A_{pv}}{b s_p}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{V_s S_0}{b I_0} - \frac{\sum \sigma''_{pe} A_{pb} \sin \theta_p \cdot S_n}{b I_0}, \quad (5)$$

式中, σ_{tp} 为混凝土主拉应力; σ_{cx} 为混凝土法向应力; σ_{cy} 为混凝土竖向压应力; τ 为构件混凝土的剪应力; σ_{pc} 为混凝土预压应力; M_s 为按作用频遇组合计算的弯矩值; $\sigma_{cy, pv}$, $\sigma_{cy, ph}$, $\sigma_{cy, t}$, $\sigma_{cy, l}$ 为竖向预应力钢绞线的预加力、横向预应力钢筋的预加力、横向温度梯度和汽车荷载产生的混凝土竖向压应力频遇值; y_0 为构件换算截面重心至换算截面重心轴的距离; I_0 为换算截面的惯性矩; n 为在同一截面上竖向预应力钢筋的肢数; σ'_{pe} , σ''_{pe} 为竖向预应力钢筋、纵向预应力弯起钢筋扣除全部预应力损失后的有效预应力; A_{pv} 为单肢竖向预应力钢筋的截面面积; b 为计算主应力点处构件腹板的宽度; s_p 为竖向预应力钢筋的间距; A_{pb} 为计算截面上同一弯起平面内预应力弯起钢筋的截面面积; V_s 为剪力; S_0 , S_n

为计算主应力点以上(或以下)部分换算截面面积对换算截面重心轴、净截面面积对净截面重心轴的面积矩; θ_p 为计算截面上预应力弯起钢筋的切线与构件纵轴线的夹角。混凝土竖向压应力不仅考虑了折减后竖向预应力的效应,较《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)考虑了横向预应力钢筋的预加力、横向温度梯度和汽车荷载产生的混凝土竖向压应力的影响,从另一个侧面反映出部分老桥设计本身存在不足,当然引起混凝土竖向压应力的因素还包括顶板和腹板局部锚固效应、自重效应等因素。

3 实体有限元分析

在对该桥交通量、恒载、裂缝产生历史等充分调查的基础上,初步确定预应力损失、超载可能是产生腹板斜向裂缝的原因。传统杆系单元求解局部应力较难,特别是PC变截面箱梁桥空间效应比较突出,采用三维实体元模型分析时,可充分考虑箱梁剪力滞、畸变、扭转等空间效应,较为真实反映出箱梁结构受力状态,适宜分析因局部应力产生的斜向裂缝成因。因此采用Abaqus有限元软件依照PC变截面梁桥悬臂施工过程考虑45个施工阶段,建立桥梁沿纵桥向全桥模型,全桥共划分了27 216个6面体单元,如图5~6所示。



图5 Abaqus整体模型
Fig. 5 Abaqus overall model

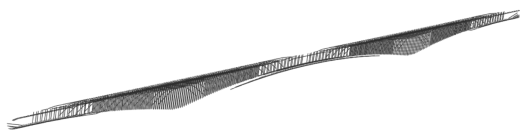


图6 预应力束示意图
Fig. 6 Schematic diagram of prestressed tendons

在恒载、预应力荷载、整体降温和负温度梯度荷载作用下,主跨跨中附近节段在正常使用极限状态频遇组合Ⅲ作用下处于最不利受力状态,成因分析均基于此组合。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)第6.3.1条,对于现场浇注(包括与之拼装)构件,斜截面混凝土主拉应力 σ_{cp} 应满足 $\sigma_{cp} \leq 0.4 f_{tk}$, f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值。

3.1 竖向预应力损失影响

本桥竖向预应力钢筋采用直径JL32 mm的高强

精轧螺纹粗钢筋, 精轧螺纹钢筋施工过程中预应力损失较大, 竖向预应力损失值取 0, 20%, 40%, 60% 和 80% 进行计算, 结果如图 7~8 所示。

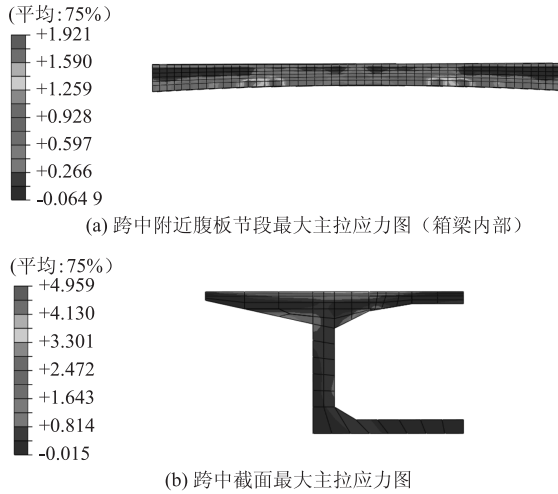


图 7 箱梁竖向预应力损失 80% 时应力图 (单位: MPa)

Fig. 7 Strain diagrams of box girder with 80% vertical prestress loss (unit: MPa)

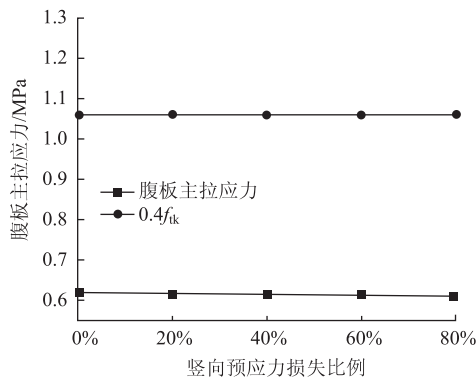


图 8 腹板主拉应力随竖向预应力损失变化

Fig. 8 Principal tensile stress of web varying with vertical prestress loss

由图 8 可知, 随着竖向预应力损失的增大, 腹板的主应力逐渐减少, 但变化幅度不大, 说明竖向预应力损失对腹板截面主拉应力影响不大, 这与相关研究成果不同。杆系模型的有限元结果一般结论是竖向预应力对腹板的主应力影响较大, 而本桥可能是由于下弯束预应力提供的主拉应力和横向纵向空间效应影响, 使竖向预应力对腹板的主应力影响不敏感。

3.2 纵向预应力损失影响

纵向预应力损失多介于 5%~15% 之间^[18], 这里模拟下弯束预应力损失值取 0, 5%, 10%, 15%, 20% 和 25% 计算, 结果如图 9~10 所示。

由图 10 可知, 随着下弯束预应力损失的增大, 腹

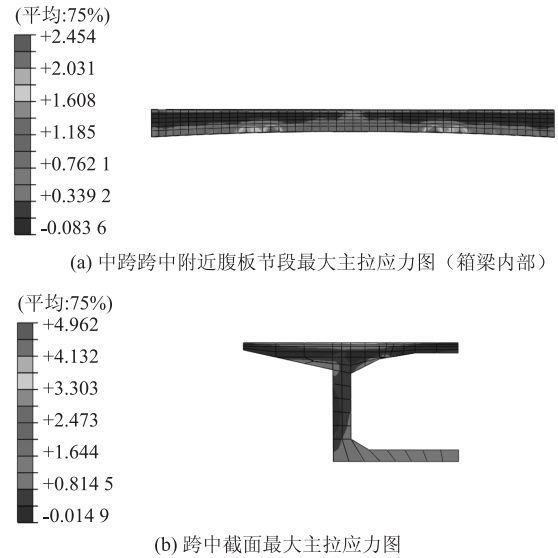


图 9 箱梁下弯束预应力损失 25% 时应力图 (单位: MPa)

Fig. 9 Strain diagrams of box girder with 25% prestress loss of lower bending tendons (unit: MPa)

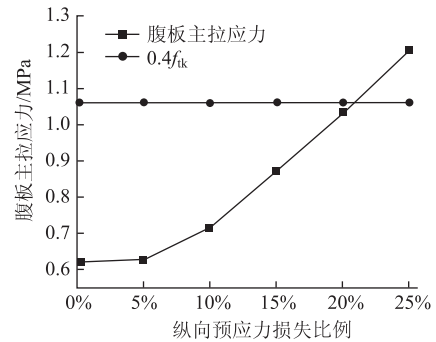


图 10 腹板主拉应力随纵向预应力损失变化

Fig. 10 Principal tensile stress of web varying with vertical prestress loss

板的主应力逐渐变大, 当预应力损失超过 21% 时, 中跨跨中腹板的主拉应力已经超过 C50 混凝土的抗拉强度标准值的 0.4 倍, 即 1.06 MPa, 腹板存在开裂风险, 表明下弯束预应力损失是腹板产生斜向裂缝的原因之一。

3.3 超载影响

依据该桥荷载实际调查结果和相关成果, 这里模拟活载超出设计值 10%, 20%, 30%, 40% 和 50% 计算, 结果如图 11~12 所示。

由图 12 可以看出: 随着超载的增大, 跨中腹板主拉应力逐渐变大, 超载对中跨跨中腹板主应力影响较大, 当超载效应值超过 45% 时, 中跨跨中腹板的主应力已经超过 1.06 MPa, 腹板存在开裂风险, 表明超载是腹板产生斜向裂缝的主要原因之一。

3.4 耦合因素分析

实际桥梁运营过程中受多种因素影响, 从上述

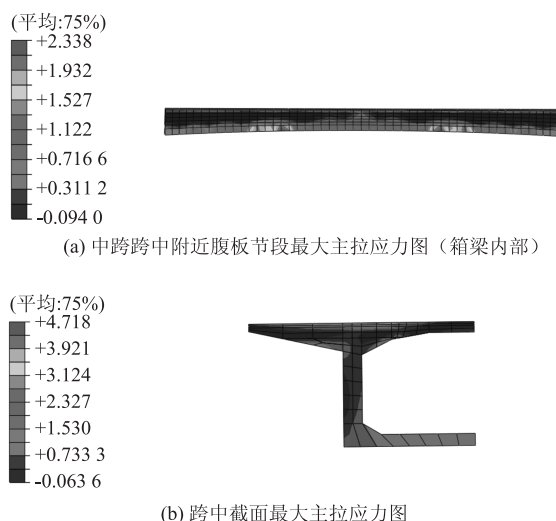


图 11 箱梁超载 50% 时应力图 (单位: MPa)

Fig. 11 Strain diagrams of box girder when overloaded by 50% (unit: MPa)

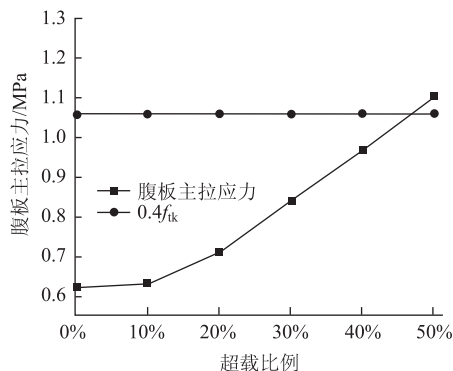


图 12 腹板主拉应力随超载变化

Fig. 12 Principal tensile stress of web varying with overload

分析中可以看出,下弯束预应力损失和超载都是产生腹板斜裂缝的主要原因,当下弯束预应力损失较大时,会影响悬臂浇筑施工节段的内力与变形,故在考虑下弯束预应力损失时,不能考虑过大。综合考虑竖向预应力损失、下弯束预应力损失和超载的影响,取中跨下弯束预应力损失 5%、竖向预应力损失 40%,经过模型计算分析,此时该桥中跨跨中附近节段的腹板主拉应力图如图 13 所示。此时,仅仅超载 40%,中跨跨中腹板的主应力已经超过 C50 混凝土的抗拉强度标准值的 0.4 倍,即 1.06 MPa。可以看出,考虑多重开裂影响因素后的连续箱梁中跨跨中附近腹板的强度储备难以满足主应力限值要求,容易产生腹板斜裂缝。

3.5 裂缝成因分析

主跨跨中 42 m 范围内不利组合作用下的腹板主拉应力云图如图 14 (a) 所示,与桥梁结构实际产生裂缝的位置如图 14 (b) 所示,基本上呈对应关系。

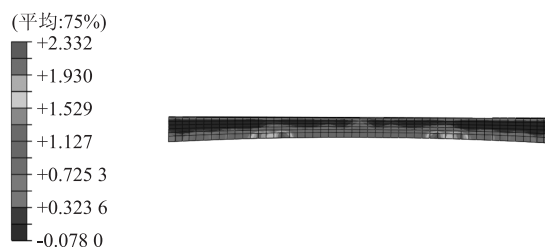


图 13 多因素作用下跨中节段腹板最大主拉应力图 (单位: MPa)

Fig. 13 Maximum principal tensile stress diagram of web under effect of multiple factors (unit: MPa)

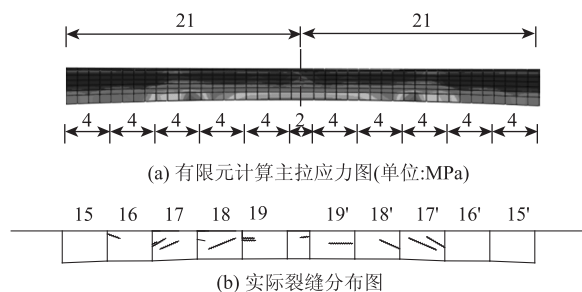


图 14 主跨跨中腹板主拉应力与实际裂缝分布对比图

Fig. 14 Comparison of principal tension diagram of midspan of main span and distribution of actual cracks

4 结论

(1) 对裂缝的空间分布和发展历史进行统计整理,该桥右幅桥腹板斜向裂缝较多,整体上箱内裂缝多于箱外裂缝,裂缝一般与预应力管道方向垂直,与水平方向的夹角介于 25° 和 60° 之间。

(2) 竖向预应力损失对腹板主拉应力影响不显著,而纵向预应力损失和超载对腹板主拉应力影响显著,当纵向预应力损失 21% 或超载 45% 时,腹板主拉应力均超限。

(3) 箱梁空间效应明显,各影响因素不是简单叠加,当竖向预应力损失 40%、纵向预应力损失 5%、超载 40% 时腹板主拉应力超限,可以判断该桥腹板斜向裂缝的主要原因是纵向预应力损失、超载等耦合因素。

参考文献:

References:

- [1] 王国亮,谢峻,傅宇方.在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J].公路交通科技,2008,25(8):52-56.
WANG Guo-liang, XIE Jun, FU Yu-fang. Investigation Research on Crack of Long-span Prestressed Concrete Box Girder Bndges in Service [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (8): 52-56.
- [2] 楼庄鸿.大跨径梁式桥的主要病害[J].公路交通科

- 技, 2006, 23 (4): 84-87.
- LOU Zhuang-hong. Main Faults in Large Span Beam Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (4): 84-87.
- [3] 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 (1): 56-58.
- ZHAN Jian-hui, CHEN Hui. Cause Analysis of Deflection of Main Beam and Crack of Box Girder of Super Long-span Continuous Rigid Frame [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2005 (1): 56-58.
- [4] 吕志涛, 潘钻峰. 大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题 [J]. 土木工程学报, 2010, 43 (1): 70-76.
- LÜ Zhi-tao, PAN Zuan-feng. Issues in Design of Long-span Prestressed Concrete Box Girder Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (1): 70-76.
- [5] 贺志勇, 阳初, 张建军. 基于 ANSYS 的等截面连续箱梁桥腹板裂缝分析 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (6): 63-68.
- HE Zhi-yong, YANG Chu, ZHANG Jian-jun. Analysis of Web Cracks of Continuous Box-beam Bridges with a Constant Cross-section Based on ANSYS [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41 (6): 63-68.
- [6] 俞先林, 叶见曙, 吴文清. 大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂病害 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43 (6): 101-104.
- YU Xian-lin, YE Jian-shu, WU Wen-qing. Cracking Damage of Long Span Prestressed Concrete Box Girder Bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43 (6): 101-104.
- [7] 于天来, 姜震. 连续刚构箱梁桥腹板开裂原因分析 [J]. 中外公路, 2013, 33 (2): 132-136.
- YU Tian-lai, JIANG Zhen. Cause Analysis of Web Cracking of Continuous Rigid Frame Box Girder Bridge [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33 (2): 132-136.
- [8] 徐栋, 徐方圆, 赵瑜, 等. 箱梁结构完整验算应力和空间网格模型 [J]. 土木工程学报, 2014, 47 (5): 46-55.
- XU Dong, XU Fang-yuan, ZHAO Yu, et al. Complete Checking Stresses of Box Girder Structure and Spatial Grid Model [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (5): 46-55.
- [9] 徐栋, 孙远, 吴佳璞. 箱梁薄壁效应及腹板开裂成因分析 [J]. 桥梁建设 [J], 2009 (4): 76-79.
- XU Dong, SUN Yuan, WU Jia-pu. Analysis of Thin-wall Effect and Causes of Cracking in Web of Box Girder [J]. Bridge Construction, 2009 (4): 76-79.
- [10] 陈华婷, 王鹏亮, 张文学. 预应力混凝土箱梁不同布索方式对比分析 [J]. 公路, 2015, 60 (4): 99-103.
- CHEN Hua-ting, WANG Peng-liang, ZHANG Wen-xue. Comparative Analysis of Different Cable Layout Modes of Prestressed Concrete Box Girder [J]. Highway, 2015, 60 (4): 99-103.
- [11] 陈齐风, 郝天之, 张磊, 等. 施工阶段大跨径预应力混凝土刚构桥腹板开裂机理 [J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38 (5): 66-73.
- CHEN Qi-feng, HAO Tian-zhi, ZHANG Lei, et al. Web Cracking Mechanism of Long Span Rigid-frame Prestressed Concrete Bridge in Construction Stage [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2016, 38 (5): 66-73.
- [12] 唐小兵, 贾志伟, 黄爱, 等. 连续刚构桥施工过程中腹板斜裂缝成因分析及试验研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2017, 41 (2): 195-198.
- TANG Xiao-bing, JIA Zhi-wei, HUANG Ai, et al. Analysis of Formation Causes and Experimental Study on the Diagonal Cracks in the Web of Continuous Rigid Frame Bridge During Construction [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2017, 41 (2): 195-198.
- [13] XU H Z, YAN X F. Numerical Analysis of Temperature Influence on Transverse Cracks in Concrete Box-girder Bridges [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020 (1): 1-11.
- [14] HE Z Q, LI Y H, XU T, et al. Crack-based Serviceability Assessment of Post-tensioned Segmental Concrete Box-girder Bridges [J]. Structures, 2021, 30: 1097-1108.
- [15] 郭凡, 杨永清, 刘国军. 预应力混凝土连续箱梁桥施工中腹板斜裂缝分析 [J]. 铁道建筑, 2010 (11): 24-26.
- GUO Fan, YANG Yong-qing, LIU Guo-jun. Analysis on Skew Cracking in Web of Prestressed Concrete Continuous Box-girder Bridge during Construction [J]. Railway Engineering, 2010 (11): 24-26.
- [16] 刘芳平, 周建庭, 宋军, 等. 悬臂施工过程中箱梁腹板斜裂缝成因分析 [J]. 施工技术, 2012, 41 (23): 47-50.
- LIU Fang-ping, ZHOU Jian-ting, SONG Jun, et al. Analysis of Formation Causes of Diagonal Cracks in Box Girder Web during Cantilever Construction [J]. Construction Technology, 2012, 41 (23): 47-50.
- [17] 吉林, 赵启林, 丁勇. 预应力箱梁桥腹板主应力计算探讨 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (6): 85-90.
- JI Lin, ZHAO Qi-lin, DING Yong. Discuss on Calculation of Principal Stress about Webs of Prestressed Box Girder Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (6): 85-90.
- [18] 张方, 钱永久, 唐继舜. 基于结构性能的 PC 连续刚构桥损伤分析 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44 (6): 817-822.
- ZHANG Fang, QIAN Yong-jiu, TANG Ji-shun. Performance-based Damage Analysis for PC Continuous Rigid Frame Bridges [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44 (6): 817-822.