

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.05.027

# 预应力混凝土多箱桥腹板裂缝产生机理及影响研究

石兆敏,刘桢杰,董佳霖

(浙江数智交院科技股份有限公司,浙江 杭州 310006)

**摘要:**以某座多箱室矮塔斜拉桥为依托,通过建立有限元实体模型对该桥典型悬浇节段进行施工模拟,分析在施工过程中腹板裂缝的主要发生机理,揭示腹板开裂主要是由混凝土水化热作用、腹板束张拉和混凝土收缩等因素叠加所导致的,并提出有针对性的预防措施和建议,为以后同类桥梁的设计、施工提供参考。

**关键词:**预应力混凝土多箱桥梁;腹板裂缝;产生机理;有限元分析

中图分类号:U445.7+1

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)05-0106-04

## 0 引言

近年来随着交通量增加、公路车道数增多,多箱室桥梁的建设越来越常见。相比常规单箱室桥梁,多箱室桥梁的横桥向受力更复杂,在施工和运营过程中,腹板处更易出现裂缝,影响全桥结构的耐久性。目前,该问题已引起越来越多桥梁建设者的重视。

产生腹板裂缝的原因有设计、施工等多个方面。常见因素有:(1)设计过程中仅对桥梁结构进行整体分析,但多箱室桥梁各个腹板间受力往往差异较大,若缺乏桥梁局部分析,可能导致局部腹板处主拉应力过大产生斜裂缝等问题;(2)施工中腹板混凝土分批浇筑,可能导致出现冷缝现象;(3)施工过程中,若混凝土配合比不合理,也会导致裂缝的产生<sup>[1-4]</sup>。

从理论分析角度而言,影响混凝土开裂的数值因素主要有收缩徐变、水化热、边界约束、弹性模量、强度等<sup>[5]</sup>。某个单项因素引起的附加主拉应力或许不大,但当某几个因素相叠加时,就有可能产生较大的附加主拉应力,从而使腹板开裂。目前关于腹板裂缝的研究大多数还停留在混凝土结构理论分析或者实验室的缩放模型模拟层面,缺乏实际工程结合有限元分析比较的有效模拟加以验证。

对于施工期间混凝土开裂后的处置方法,多数学者认为仍可采取相应有效措施进行减小或消除。邓志恒、顾凯锋等<sup>[6-8]</sup>多位学者的研究中均提到竖向预应力筋的有效张拉可及时对腹板既有裂缝进行封闭,以恢复结构刚度及整体性。赵启林等<sup>[9]</sup>通过量化

分析,对预应力混凝土桥梁腹板的竖向预应力筋与纵向腹板束的比例进行合理量化,可用于指导设计、施工。施颖等<sup>[10]</sup>通过理论分析和有限元建模计算,对竖向预应力的设计方法、竖向预应力与纵向下弯预应力的比较、竖向预应力的合理布置间距以及分批张拉引起的竖向预应力损失进行分析。

本文以某座多箱室矮塔斜拉桥为依托,分析研究了多箱室桥梁腹板裂缝产生的原因和机理,并通过理论分析对竖向预应力筋张拉后的混凝土压应力储备恢复情况进行模拟分析,提出有针对性的预防措施和建议。

## 1 多箱室桥梁腹板开裂实例

某桥采用93 m+155 m+93 m的预应力混凝土箱梁矮塔斜拉桥结构,主墩采用塔梁固结、墩梁分离的结构体系(见图1)。主梁采用单箱五室大悬臂变高箱梁截面形式,墩顶处梁高5.8 m,跨中处梁高3.3 m;箱梁顶宽34.5 m,单侧悬臂长度4.0 m,跨中处箱梁底宽23.5 m;箱梁外侧腹板采用斜腹板,内侧采用直腹板,厚度均为45~70 cm。箱室混凝土标号采用C55。

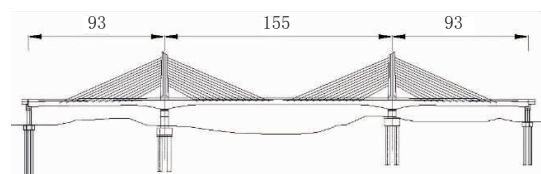


图1 主桥立面布置(单位:m)

本桥采用悬臂浇筑法施工,1#~17#节段为悬浇节段,5#~17#节段张拉斜拉索。本桥在施工至2#块时,箱室内的部分直腹板出现开裂现象。并且裂缝主要集中在直腹板预应力管道对应位置,另有部分裂缝分布在靠近箱室底板的位置。现场开裂情况如图2

收稿日期:2022-08-11

作者简介:石兆敏(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

所示。



图2 腹板裂缝示意图

参考国内外多位学者研究成果,认为导致腹板开裂的潜在因素有腹板预应力钢束张拉、混凝土收缩作用和混凝土水化热作用3个方面。因此对这3个方面因素逐一进行理论分析。

## 2 计算参数与计算模型

施工阶段分析时,主要荷载有结构自重、施工阶段挂篮荷载、预应力作用,以及混凝土的收缩作用。

(1)结构自重。结构重力主要考虑混凝土的自重,取为 $26 \text{ kN/m}^3$ 。

(2)挂篮荷载。根据现场采用的挂篮实际重量取 $160 \text{ t}$ ,并根据前后支点作用位置模拟集中力加载。

(3)预应力作用。主桥纵向、竖向预应力钢束的张拉控制应力均为 $0.75 f_{pk}$ ,即 $1395 \text{ MPa}$ 。

(4)混凝土收缩作用。混凝土的整体收缩应变计算方法参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)相关要求模拟。

采用有限元分析软件 ANSYS,建立本桥0#~2#节段的实体模型,用于施工阶段分析(见图3)。混凝土采用 solid45 单元模拟;施工阶段分析中,根据裂缝出现位置,考虑当前施工阶段已张拉、锚固的腹板束 F2 与顶板束 T2 的作用,建立了直腹板中的腹板束 F2 的预应力孔道,顶板束 T2 与斜腹板处的腹板束 F2 采用 Link8 单元模拟,通过“实体力筋法”建立,并通过耦合节点自由度,使纵向预应力钢束单元与混凝土单元联系起来。成桥阶段分析中,竖向预应力钢束采用 Link8 单元模拟,通过“实体力筋法”建立,并通过耦合节点自由度,使竖向预应力钢束单元与混凝土单元联系起来。分析模型中,边界条件根据永久支座和临时支撑的位置确定。

## 3 开裂成因分析

### 3.1 预应力钢束张拉影响分析

腹板束张拉力取实测值 $2538.9 \text{ kN}$ ,并通过面荷载的形式施加。曲线段径向力通过线荷载的形式施加,线荷载集度 $q$ 根据下式计算:

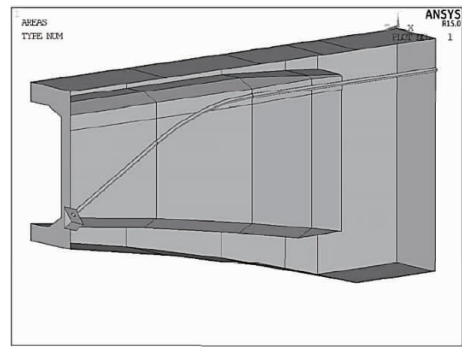


图3 节段分析有限元模型

$$q = \frac{F}{R}$$

式中: $q$ 为预应力孔道曲线段径向力线荷载集度, $\text{kN/m}$ ;  $F$ 为实际张拉力,取 $2538.9 \text{ kN}$ ;  $R$ 为预应力孔道曲线段曲率半径。

由于预应力的模拟加载方式等原因,所研究腹板处预应力束孔道曲线段内壁、锚固端附近的应力水平偏高,与实际情况存在一定偏差。因此,本次分析主要关注腹板两侧外表面的整体应力分布情况。

计算结果表明,所研究腹板两侧外表面的主拉应力基本在 $-0.47 \sim 1.02 \text{ MPa}$ 之间,未超过混凝土材料的抗拉强度标准值 $2.74 \text{ MPa}$ 。

### 3.2 混凝土收缩作用影响分析

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中附录C第C.1.1条的有关规定,针对混凝土整体收缩作用的分析过程未计入因施工过程中养护不及时造成的混凝土上表面干缩作用等影响,混凝土的收缩应变可按下列公式计算:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cs}(t, t_s) &= \varepsilon_{cs0} \cdot \beta(t - t_s) \\ \varepsilon_{cs0} &= \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \\ \varepsilon_s(f_{cm}) &= [160 + 10 \beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \\ \beta_{RH} &= 1.55[1 - (RH/RH_0)^3] \\ \beta_s(t - t_s) &= \left[ \frac{t - t_s}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \end{aligned}$$

式中: $t$ 为计算考虑时刻的混凝土龄期, $d$ ;  $t_s$ 为收缩开始时的混凝土龄期, $d$ ,可假定为 $3 \sim 7 \text{ d}$ ;  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ 为收缩开始时的龄期为 $t_s$ 、计算考虑时刻的龄期为 $t$ 时的收缩徐变;  $\varepsilon_{cs0}$ 为名义收缩系数;  $\beta_s$ 为收缩随时间发展的系数;  $f_{cm}$ 为强度等级C25~C50混凝土在 $28 \text{ d}$ 龄期时的平均圆柱体抗压强度,  $\text{MPa}$ ,  $f_{cm} = 0.8 f_{cu,k} + 8 \text{ MPa}$ ;  $\beta_{RH}$ 为与年平均相对湿度相关的系数,上述公式适用于 $40\% \leq RH < 99\%$ ;  $RH$ 为环境年平均相对湿度,%;  $\beta_{sc}$ 为依水泥种类而定的系数,对一般的硅酸盐类水泥或快硬水泥,  $\beta_{sc} = 5.0$ ;  $h$ 为构件理论厚度,

$h=2A/u$ ,  $A$  为构件截面面积,  $u$  为构件与大气接触的周边长度;  $RH_0=100%$ ;  $h_0=100\text{ mm}$ ;  $t_1=1\text{ d}$ ;  $f_{cm0}=10\text{ MPa}$ 。

本次计算中,各参数的具体取值情况见表 1。

表 1 收缩徐变计算参数

项目	2# 块与 1# 块交接面	2# 块与 3# 块交接面
$A/\text{m}^2$	43.018 2	38.827 8
$u/\text{m}$	143.044 8	139.285 7
$h/\text{mm}$	601.464 7	557.527 4
$t/d$		6
$t_s/d$		3
$RH/\%$		80%
$\beta_{sc}$		5.0
$\beta_{RH}$		0.756 4
$\beta_s/(t-t_s)$	0.015 4	0.016 6
$f_{cu,k}/\text{MPa}$		55
$f_{cm}/\text{MPa}$		52
$\varepsilon_{cs}(f_{cm})$		$3.5 \times 10^{-4}$
$\varepsilon_{cs0}$		$2.647 \times 10^{-4}$
$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$	$4.075 \times 10^{-6}$	$4.396 \times 10^{-6}$

计算结果表明,考虑混凝土收缩作用后,所研究腹板内剖面和外表面由于混凝土收缩作用产生的主拉应力较小,均在 0.1 MPa 之内。

### 3.3 混凝土水化热作用影响分析

针对水化热作用产生的影响分析过程,参考既有工程实测的水化热量进行计算,具体参数见表 2。

表 2 材料水化热量

材料	用量 /kg	水化热 /( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	热量 /kJ
水泥	339	323	109 497
粉煤灰	48	155	7 440

混凝土绝热温升计算公式如下:

$$T = \frac{Q}{cm}$$

式中:  $Q$  为热量, kJ;  $c$  为混凝土的比热容, 取 0.96 kJ/( $\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ );  $m$  为混凝土质量, 取 2 600  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

经计算,得到绝热温升为 46.85 $^\circ\text{C}$ ,环境温度取 20 $^\circ\text{C}$

计算结果表明,浇筑完成后第 1 天的最高温度约为 43.98 $^\circ\text{C}$ ,脱模时的最高温度约为 40.43 $^\circ\text{C}$ ,预应力钢束张拉前的最高温度约为 25.93 $^\circ\text{C}$ 。在此仅研究更为不利的张拉前(第 6 天)时的节段混凝土应力情况,应力状况如图 4 所示。

由图 4 可知,预应力束张拉前(第 6 天),由于水化热的作用,2# 节段箱梁腹板内部和外表面均存在一定拉应力,靠近 1# 节段(新老混凝土交接处)拉应

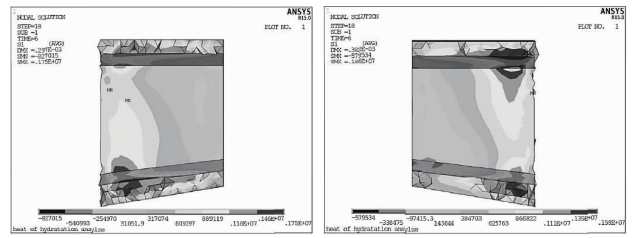


图 4 左右侧外表面应力情况

力有增大趋势,且拉应力最大值多集中于截面突变位置。其中,箱梁腹板内剖面的主拉应力处于 -0.1 ~ 1.86 MPa 之间,主拉应力最大值集中于钢束波纹管位置。两侧外表面的主拉应力处于 -0.25 ~ 1.75 MPa 之间,主拉应力最大值集中于翼缘板与腹板交接处,未超过混凝土材料的抗拉强度标准值 2.74 MPa。

### 3.4 综合因素分析

基于上述计算结果,选择 3 处不同区域对预应力束张拉、混凝土收缩作用和混凝土的水化热作用下箱梁应力分布情况进行综合比较考虑。其中,区域 A 靠近 1# 节段,位于预应力孔道上方;区域 B 靠近 3# 节段,位于预应力孔道上方;区域 C 靠近 1# 节段,位于顶应力孔道下方。荷载作用下,混凝土箱梁 A、B、C 位置竖向应力分布情况如图 5 所示。

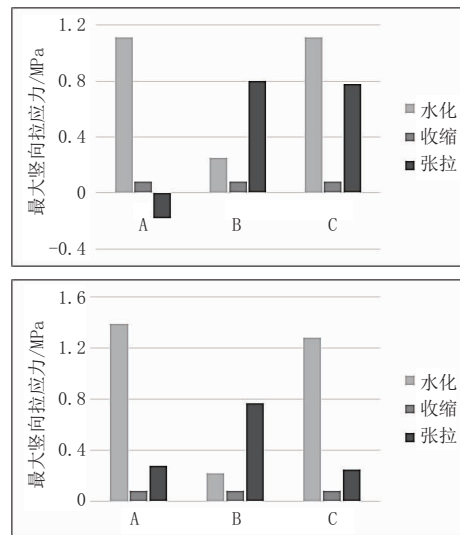


图 5 左右侧外表面应力情况

计算结果表明,靠近 1# 节段位置箱梁拉应力最大,拉应力主要由水化热作用引起,收缩引起的拉应力可忽略。水化热在腹板内部引起的竖向拉应力明显高于腹板外表面,约为腹板外表面应力的 1.35 倍,而预应力张拉在腹板内外表面引起的竖向拉应力差异不大。

综合考虑各项不利因素,箱梁腹板内剖面的竖向最大拉应力接近 2.3 MPa,两侧外表面的竖向最大拉应力接近 1.8 MPa,已接近混凝土材料的抗拉强度

标准值 2.74 MPa。

#### 4 竖向预应力钢束张拉影响分析

水化热、腹板预应力束张拉等造成节段箱梁产生较大拉应力,实际工程中通常对箱梁施加竖向预应力对其主拉应力进行控制。图6为在原模型基础上考虑竖向预应力张拉作用后箱梁节段应力分布情况。其中,竖向预应力钢束有效竖向预应力近似取其张拉控制应力的50%,即697.5 MPa。

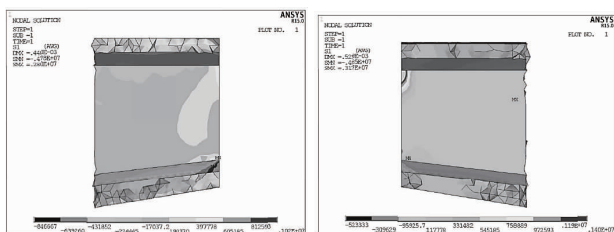


图6 左右侧外表面应力情况

计算结果表明,竖向预应力张拉后所研究腹板内剖面的主拉应力处于 $-0.30 \sim 0.53$  MPa,两侧外表面的主拉应力处于 $-0.22 \sim 0.40$  MPa。与原模型相比,腹板位置的主拉应力有所减小,表明竖向预应力束张拉可有效改善腹板开裂问题。从应力状况角度分析,竖向预应力束张拉可保证后续施工阶段腹板处混凝土局部应力满足规范要求。

#### 5 结语

本文主要分析相关腹板预应力钢束张拉、混凝土收缩作用和混凝土水化热作用3个因素对腹板应力状况的影响作用。根据现有计算结果,得到以下结论:

(1) 预应力钢束(尤其是腹板束)张拉、混凝土水化热作用和混凝土收缩均能引起混凝土箱梁腹板产生拉应力。其中,水化热作用影响最大;腹板束张拉影响次之;混凝土收缩影响较小,可忽略。

(2) 水化热作用下,箱梁腹板主拉应力最大值集中于钢束波纹管位置,腹板两侧外表面主拉应力最大值集中于翼缘板与腹板交接处,且水化热在腹板内部引起的竖向拉应力明显高于腹板外表面。

(3) 综合考虑各项不利因素,箱梁腹板内剖面的竖向最大拉应力接近 2.3 MPa,两侧外表面的竖向最

大拉应力接近 1.8 MPa,已接近混凝土材料的抗拉强度标准值 2.74 MPa,实际工程中应注重施工阶段混凝土的浇筑、养护控制。

(4) 从理论角度分析,现有裂缝可通过采取可靠措施对裂缝进行修复处理,减小对结构耐久性影响。其中,竖向预应力张拉对减小腹板处的主拉应力作用显著,实际工程中建议进行施工工序优化,提前竖向预应力钢束张拉工序,在完成节段纵向预应力钢束张拉后及时张拉该节段的竖向预应力钢束。

(5) 在本桥后续各个节段悬浇施工时,腹板主筋外侧增设了一层 10 mm 钢筋网片。根据现场实际情况看,对消除因混凝土水化热作用和混凝土收缩引起的腹板开裂问题效果明显。

(6) 对于存在腹板下弯束、板厚较大的区域,应尤其注意对混凝土浇筑、养护的控制,确保混凝土质量符合规范相关要求。条件允许时可对配合比进行适当优化,降低水化热作用的影响。为提高腹板斜截面抗裂性,可对腹板束下弯区域防崩钢筋进行适当加密,减小腹板束张拉时曲线段径向力的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] 刘山洪,钱永久,等.大跨PC箱梁桥腹板裂缝的控制研究[J].重庆交通大学学报,2005,24(4):19-22.
- [2] 高飞,王隼,罗立高.典型桥梁常见病害及成因分析[J].中国水运,2010,10(4):170-171.
- [3] 李海军,李军.连续梁桥预应力箱梁腹板裂缝成因浅析[J].华东公路,2000(3):26-29.
- [4] 郭延飞,彭俊强,王清明,等.预应力混凝土小箱梁连续端腹板局部裂缝病害成因分析及处治[J].北方交通,2021(12):23-31.
- [5] 应国刚,陈立平,应跃龙.施工期预应力混凝土箱梁顶板纵向裂缝成因分析与控制措施研究[J].公路交通科技(应用技术版),2013(11):298-302.
- [6] 邓志恒,罗志伟,林俊.竖向预应力损失对箱梁腹板斜裂缝影响分析[J].公路工程,2007,32(6):19-22,52.
- [7] 顾凯峰,彭卫.预应力混凝土连续箱梁桥腹板斜裂缝研究[J].公路,2004(7):35-38.
- [8] 王琳.大跨径预应力混凝土箱梁腹板裂缝探讨[J].公路,2004(7):35-38.
- [9] 赵启林,丁勇,翟可为.大跨度预应力混凝土箱梁桥腹板抗裂敏感性与配索优化分析[J].建筑科学与工程学报,2011,28(3):29-33.
- [10] 施颖,唐苍松,宣纪明等.混凝土箱梁腹板竖向预应力分析[J].桥梁建设,2006(1):8-11.