

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.009



施工阶段大跨径预应力混凝土刚构桥 腹板开裂机理

陈齐风^{1,2}, 郝天之^{2,3}, 张磊², 邱波², 徐赵东¹

(1. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096; 2. 广西交通科学研究院, 南宁 530007;

3. 柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州, 545005)

摘要:进行了大跨径预应力混凝土刚构桥腹板开裂机理研究, 基于弹性力学平面问题分析方法, 推导了集中荷载作用下的板件应力函数表达式, 绘制了不同受压边长与集中荷载长度比(d/a)下的横向应力曲线, 拟合了集中荷载作用下构件的横向应力求解函数, 构造了混凝土刚构桥腹板在预应力集中荷载作用下等效压力矩形的选取方法, 并基于平面应力的表达式提出了在三维情况下沿预应力轴线的横向应力计算方法。通过建立某预应力混凝土刚构桥0~3#段实体有限元模型, 分析施工过程中刚构桥混凝土腹板在不同等级预应力作用下的开裂情况。结果显示:有限元裂缝模拟与实桥腹板开裂范围一致, 有限元应力分析结果下限值与推导的横向应力求解函数计算结果接近, 变化趋势一致, 印证了横向应力函数求解方法的正确性。

关键词:刚构桥; 横向应力; 腹板开裂; 腹板预应力束; 钢筋

中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)05-0066-08

Web cracking mechanism of long span rigid-frame prestressed concrete bridge in construction stage

Chen Qifeng^{1,2}, Hao Tianzhi^{2,3}, Zhang Lei², Qiu Bo², Xu Zhaodong¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Guangxi Transportation Research Institute, Nanning 530007, P. R. China; 3. Liuzhou OVM Machinery Co. Ltd., Liuzhou 545005, Guangxi P. R. China)

Abstract: Web cracking mechanism of long span rigid-frame prestressed concrete bridge construction stage was presented. Based on the elasticity theory, the 2-D stress function of web under patching load was deduced, the function curve of the horizon stress of different coefficient (d/a) was drawn, then a horizon

收稿日期: 2016-03-22

基金项目: 中国博士后基金特别资助(2016T90410); 中国博士后科学基金面上项目(2015M581704); 广西自然科学基金(2015GXNSFBA139227, 2014GXNSFBA118258), 南宁市科学研究与技术开发计划(20163139), 广西科技攻关项目(桂科攻 1598009-1); 广西北部湾经济区科技园区创新创业人才培育项目(桂科计字[2015]245号-2)

作者简介: 陈齐风(1986-), 男, 主要从事大跨桥梁与组合桥梁研究, (E-mail) chenqifeng3333@163.com.

Received: 2016-03-22

Foundation item: Special Financial Grant from China Postdoctoral Science Foundation (2016T90410); China Postdoctoral Science Foundation funded project (2015M581704); Guangxi Natural Science Foundation Program (2015GXNSFBA139227, 2014GXNSFBA118258); Nanning Scientific Research and Technology Development Plan(20163139); Guangxi Science and Technology Project(1598009-1); Guangxi Beibu Gulf Economic Zone Science and Technology Park Innovation and Entrepreneurial Talent Cultivation Project([2015]245-2).

Author brief: Chen Qifeng (1986-), main research interest: large span bridge and composite bridge, (E-mail) chenqifeng3333@163.com.

stress function was fitted, and the method of equivalent pressure prism selection method was put forward. Later the 3-D situation horizon stress along the tendon line was considered based on 2-D horizon stress function. To verify the theory function, 0~3 # rigid frame bridge segment finite element model was established, the concrete web cracking analysis was carried out in different prestressed level. The results showed that the crackling area of the web in the bridge was coincided with the finite element analyze, the lower limit stress of the finite analysis was also coincided to the theory calculated of transverse stress function put forward by this paper.

Keywords:concrete bridge; transverse stress; web cracking; web tendons; reinforcement

预应力混凝土刚构桥具有跨越能力大、施工技术成熟、经济性能良好的优点,在 120~250 m 的中等跨径桥梁领域具有很强的竞争力。然而刚构桥在施工阶段和使用阶段腹板开裂问题一直困扰着工程界,中国多座刚构桥出现了腹板开裂,如 1988 年建成的洛溪大桥(65+125+ 180+110)m、1995 年建成的三门峡黄河公路大桥(105+4×140+105)m 分别在使用了 7 年与 10 年后出现了大量的腹板斜裂缝,广州华南大桥(110+190+100)m 在 1996 年施工脱模后出现腹板裂缝等^[1-3]。

学者们对预应力混凝土刚构桥的腹板开裂问题开展了一系列研究:王国亮等^[4]调查了多座预应力混凝土连续梁与刚构桥开裂情况,指出箱梁主要开裂形式为腹板斜裂缝与箱体纵向裂缝。肖星星等^[5]对施工过程的刚构桥腹板在预应力张拉施工时出现沿预应力束方向的裂纹开展进行分析,指出腹板处局部拉应力过大是该桥在施工过程中出现腹板斜裂缝的主要原因;李黎等^[6]指出和箍筋配置偏少以及纵向预应力钢筋位置设置不当是箱梁腹板出现斜裂缝的主要原因之一。宋随弟等^[7]指出施工阶段中多个腹板应力影响因素的叠加可能产生较大的主应力,从而导致腹板开裂,周威等^[8]研究了预留孔道的活性混凝土构件锚固区局压性能,提出了活性粉末混凝土局部受压承载力计算方法。Okumus、Setiawan、Yaper 等采用试验与非线性有限元模拟,显示混凝土梁腹板在预应力作用下具有显著的横向拉应力^[9-12]。沈水龙等^[13]推导锚固区内力布置,并验证了 Guyon 提出的方程。

由研究现状可知,预应力混凝土刚构桥施工过程中锚后腹板开裂主要由锚压区局部压力过大引起。目前预应力混凝土刚构桥腹板局压应力引发的横向应力如何求解,仍缺少一个方便易用的表达式。本文以某桥在施工过程中出现腹板沿预应力束方向出现开裂问题作为工程背景,进行施工过程中预应

力束张拉时腹板开裂机理分析,基于弹性力学平面问题分析方法,推导了集中荷载作用下的板件应力的分布表达式,绘制了不同受压边长与集中荷载长度比(d/a)下的横向应力曲线,拟合了集中荷载作用下构件的横向应力求解函数,并考虑应力的三维传播情况推导沿预应力筋轴线的横向应力表达式,获得横向钢筋需求量表达式,并建立预应力混凝土刚构桥有限元节段模型验证横向应力求解函数的正确性。

1 混凝土刚构桥腹板开裂理论

在某预应力混凝土刚构桥施工过程中,腹板出现沿着波纹管的方向的裂缝,裂缝的宽度为 0.04~0.18 mm,深度为 12~77 mm,长度为 0.15~2.50 m,部分裂缝示意图 1;刚构桥施工过程中腹板开裂主要由于预应力局部压力过大,引起的的腹板局部横向拉应力较大,见图 2;加之预应力束孔道的存在削弱了截面,使得裂纹更易产生^[8]。

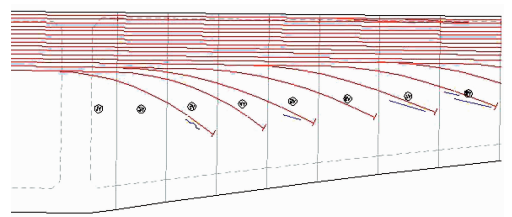


图 1 某刚构桥施工过程中腹板沿波纹管开裂示意图
Fig 1 Web cracking of a ridge-frame bridge during the construction stage

1.1 预应力局压下腹板应力分布函数求解

文献[14]给出了平面二维传播集中荷载(板或墙)时不同的 d/a (构件宽度/集中荷载宽度)下的横向应力分布图,指出不同的 d/a 值在距集中荷载施加表面 $0.1d\sim0.45d$ 范围内会出现横向拉应力峰值,见图 2。图中 P 为预应力大小。

基于弹性力学平面理论,腹板受集中荷载作用

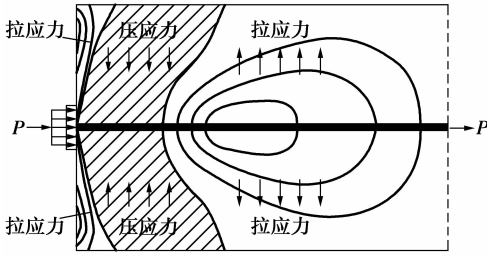


图 2 板受集中力的横向应力分布

Fig 2 Horizon stress distribution under patching load

问题可以简化为板件受到一边的边界受不连续压力、对边的边界受到连续压力作用的情形,如图 3 所示。图中, l_e 为集中荷载的传播长度^[14], a 为局压荷载宽度, d 为构件宽度, b 为构件厚度。基于弹性力学理论推导板件应力函数三角级数解答^[15], 此时, 图 3 中板的边界条件为:

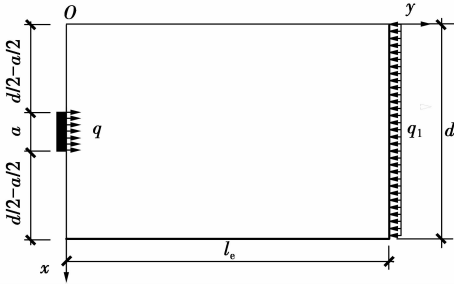


图 3 集中力作用下腹板受力模型简化

Fig 3 Simplify modal of web under patching load

左、右两边,有

$$\begin{cases} (\sigma_y)_{y=0} = -q(x) \\ (\sigma_y)_{y=l_e} = -q_1(x) \end{cases} \quad (\text{a}) \quad \begin{cases} (\tau_{xy})_{y=0} = 0 \\ (\tau_{xy})_{y=l_e} = 0 \end{cases} \quad (\text{b})$$

上、下两边有

$$\begin{cases} (\sigma_x)_{x=0} = 0 \\ (\sigma_x)_{x=d} = 0 \end{cases} \quad (\text{c}) \quad \begin{cases} (\tau_{xy})_{x=0} = 0 \\ (\tau_{xy})_{x=d} = 0 \end{cases} \quad (\text{d})$$

式中: σ_x 为横向应力,方向为沿图 3 中的 x 轴正、负方向; σ_y 为纵向应力,方向为沿图 3 中的 y 轴正、负方向。根据边界条件(c),应力函数简化为

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = & - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m^2 \pi^2}{d^2} \cos \frac{m\pi x}{d} \left[(B/m + C_m d/m\pi) \sinh \frac{m\pi y}{d} + (A_m + D_m d/m\pi) \cosh \frac{m\pi y}{d} + \right. \\ & \left. D_m y \sinh \frac{m\pi y}{d} + C_m y \cosh \frac{m\pi y}{d} \right] \quad (1) \\ \sigma_x = & - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m^2 \pi^2}{d^2} \sin \frac{m\pi x}{d} \left[(A/m + 2D_m d/m\pi) \sinh \frac{m\pi y}{d} + (B_m + 2C_m d/m\pi) \cosh \frac{m\pi y}{d} + \right. \end{aligned}$$

$$C_m y \sinh \frac{m\pi y}{d} + D_m y \cosh \frac{m\pi y}{d} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y = & - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m^2 \pi^2}{d^2} \sin \frac{m\pi x}{d} \left[(A_m \sinh \frac{m\pi y}{d} + (B_m + \cosh \frac{m\pi y}{d} + C_m y \sinh \frac{m\pi y}{d} + \right. \\ & \left. D_m y \cosh \frac{m\pi y}{d} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

代入边界条件(a)(b),可得关于 A_m 、 B_m 、 C_m 、 D_m 的四元联立方程, $m=1, 3, 5, \dots$ 。通过该联立方程解得 A_m 、 B_m 、 C_m 、 D_m , 见式(5), 将式(5)代入(1)~(3)即为腹板的应力函数。

$$A_m + \frac{D_m d}{m\pi} = 0$$

$$B_m = \frac{2d}{m^2 \pi^2} \int_0^d q(x) \sin \frac{m\pi x}{d} dx$$

$$A_m \sinh \frac{m\pi l_e}{d} + B_m \cosh \frac{m\pi l_e}{d} + C_m l_e \sinh \frac{m\pi l_e}{d} +$$

$$D_m l_e \sinh \frac{m\pi l_e}{d} = \frac{2d}{m^2 \pi^2} \int_0^d q_1 \sin \frac{m\pi x}{d} dx \quad (4)$$

$$A_m \cosh \frac{m\pi l_e}{d} + C_m \left(\frac{d}{m\pi} \sinh \frac{m\pi l_e}{d} + l_e \cosh \frac{m\pi l_e}{d} \right) +$$

$$B_m \sinh \frac{m\pi l_e}{d} + D_m \left(\frac{d}{m\pi} \cosh \frac{m\pi l_e}{d} + l_e \sinh \frac{m\pi l_e}{d} \right) = 0$$

$$\text{令: } \frac{d}{m\pi} = S_1, \sinh \frac{m\pi l_e}{d} = w_1, \cosh \frac{m\pi l_e}{d} = w_2$$

解得

$$B_m = \frac{2d^3 q_1}{m^2 a \pi^3} \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi d}{2a} \right) - \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi d}{2a} \right) \right]$$

$$D_m = \frac{\left[\left(\frac{4d^2 q_1}{m^3 \pi^3} \right) (S_1 w_1 + l_e w_2) \right]}{[(l_e w_1 - S_1 w_2)(S_1 w_1 + l_e w_2) - (l_e w_2)^2]}$$

$$C_m = \frac{l_e w_1 D_m + B_m w_1}{S_1 w_1 + l_e w_2}$$

$$A_m = \frac{d \left[\left(\frac{4d^2 q_1}{m^3 \pi^3} - B_m w_2 \right) (S_1 w_1 + l_e w_2) \right]}{m\pi [(l_e w_1 - S_1 w_2)(S_1 w_1 + l_e w_2) - (l_e w_2)^2]} \quad (5)$$

将以上方程式在不同 d/a 情况下距局压荷载作用面不同距离的横向应力绘于图 4, 并基于数值拟合获得 $x-y$ 轴平面上横向应力 σ_x 的近似式见式(6), 式中, 当 $y/d > 1$ 时, 取 $y/d = 1$ 。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_s}{q_1} \right) = & -0.918 + 0.096 \left(\frac{d}{a} \right) + 5.222 \left(\frac{y}{d} \right) - \\ & 0.039 \times \left(\frac{d}{a} \right) \left(\frac{y}{d} \right) - 0.007 \left(\frac{d}{a} \right)^2 - 9.388 \left(\frac{y}{d} \right)^2 + \\ & 0.010 \left(\frac{d}{a} \right) \left(\frac{y}{d} \right)^2 - 0.002 \left(\frac{y}{d} \right) \left(\frac{d}{a} \right)^2 + \end{aligned}$$

$$0.0003\left(\frac{d}{a}\right)^3 + 4.759\left(\frac{y}{d}\right)^3 \quad (6)$$

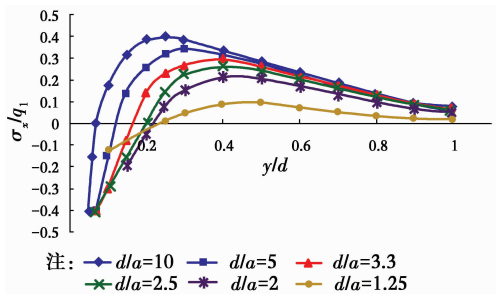


图 4 不同的 d/a 值对应的横向应力与均布力比值 (σ_x/q_1) 与纵向相对坐标 (y/d) 之间的关系

Fig 4 Relation curve between the (σ_x/q_1) and (y/d) of different d/a

1.2 三维情况的考虑

以上的应力分布函数表达式是根据二维平面应力传播得到,当在局压荷载的宽度 w 与板厚 b 差距较大时,应力以空间状态传播,即沿局压荷载中心作用线在垂直于腹板主平面方向,亦会出现较大的横向拉应力,使三维情况下的实际拉应力大于平面假设计算的应力值,见图 5。

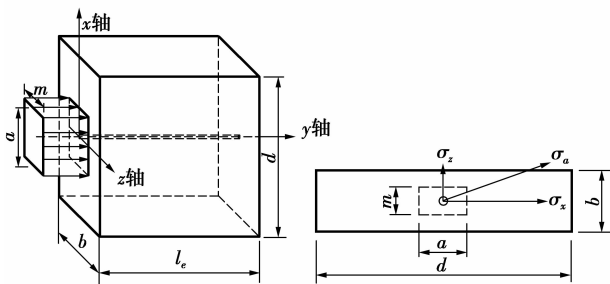


图 5 三维情况时沿预应力轴线的实际横向应力与二维平面假设下应力的关系

Fig 5 Relationship between the actually horizon stress and the 2-D hypothesis stress in 3-D situation

根据式(6),沿预应力作用线,在 $z-y$ 轴平面上的横向应力 σ_z 的近似考虑为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_z}{q_1}\right) = & -0.918 + 0.096\left(\frac{b}{m}\right) + 5.222\left(\frac{y}{b}\right) - \\ & 0.039\left(\frac{b}{m}\right)\left(\frac{y}{b}\right) - 0.007\left(\frac{b}{m}\right)^2 - 9.388\left(\frac{y}{b}\right)^2 + \\ & 0.010\left(\frac{b}{m}\right)\left(\frac{y}{b}\right)^2 - 0.002\left(\frac{y}{b}\right)\left(\frac{b}{m}\right)^2 + \\ & 0.0003\left(\frac{b}{m}\right)^3 + 4.759\left(\frac{y}{b}\right)^3 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: m 为锚具 z 轴方向宽度,当 $y/b > 1$ 时,取 $y/b = 1$,根据图 5,即沿预应力轴线上的最大横向应

力 σ_{xz} 为

$$\sigma_{xz} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2} \quad (8)$$

对 y 求导,可得 σ_{xz} 的最大值 $\sigma_{xz \max}$ 。在预应力作用下,若要使无横向配筋时混凝土不出现横向裂缝,并考虑施工过程混凝土强度并未完全发展,取 0.8 的安全系数,需满足

$$\sigma_{xz \max} < 0.8[f_t] \quad (9)$$

式中: $[f_t]$ 为混凝土开裂应力,布置横向钢筋,使混凝土不发生开裂,钢筋的用量应满足

$$\frac{A}{bS} > \frac{\sigma_{xz \max}}{f_y} \quad (10)$$

式中: S 为横向钢筋的间距。由于刚构桥腹板预应力布置形状下弯,与水平方向形成一定角度。为了方便公式的应用,对下弯钢束锚固区后选取等效局部受压矩形来进行分析。基于集中荷载在二维传播中的传播长度在达到 $l_e \approx d$ 时,可以大致变为平行传播,故可采用 $l_e/d = 1.0 \sim 1.2$,并控制 $d/a < 10$ 为条件的矩形来作为等效局部受压矩形^[14](阴影区域),见图 6。

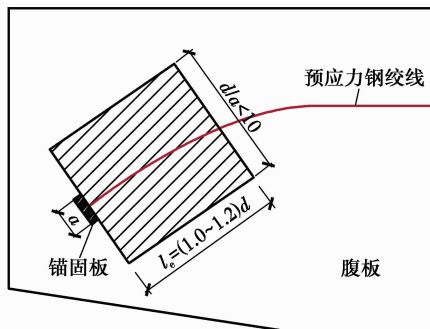


图 6 刚构桥腹板等效局部受压矩形(阴影部分)

Fig 6 Equivalent rectangular of web in rigid-frame bridge(shadow area)

由于刚构桥腹预应力锚具形状一般为圆形,其直径为 a_1 。应将该圆形等效为同面积的正方形对应的边长 a 带入式(6)、(7)、(8)中进行求解,此处:

$$a = 0.886 \times a_1$$

2 刚构桥腹板开裂有限元分析

2.1 工程背景与有限元模拟参数选择

某预应力混凝土刚构桥跨径布置为 88 m+160 m+88 m,在悬臂施工过程中腹板出现了沿波纹管方向的开裂,部分裂纹见图 1。以该桥为研究背景,建立该桥 0~3#段的有限元模型,通过改变预应力大小,以验证本文推导的横向应力公式(2)在刚构桥

腹板受集中荷载作用下的正确性。该刚构桥结构布置图见图 7。

采用有限元软件 ANSYS 对大跨径预应力混凝土刚构桥的负弯矩段 0~3#块进行了有限元实体建模分析,见图 7。采用 Solid65 单元提供的参数建立整体式钢筋模型,考虑腹板混凝土的三向配筋率;预应力筋位置在三维模型中划出,用 Link10 单元进行模拟,采用降温方法模拟预应力施加;吊篮设计荷载为 91 t,通过节点荷载施加在相应的节点上模拟。模型采用的单元详见表 1。

表 1 有限元模型参数选取

Tab 1 The parameter of element in finite element analysis

材料	钢筋混凝土		预应力筋
组成	混凝土	钢筋	
单元类型	Solid65	Link10	Link10
备注	$f_c=26.5, f_t=2.04$, 本构关系 MISO		$F_s=1\ 375\text{ MPa}$, 降温法模拟预应力

图 7 某刚构桥布置图

Fig 7 The Layout of the rigid-frame bridge

对腹板预应力进行敏感性分析,分别按设计荷载的 60%、80%、100%、120%取值;为减小由于预应力增大或减小使腹板受到的剪力变化,采用在预应力增大或减小时进行分布荷载补偿,见表 2,补偿的分布荷载加载位置取两根腹板预应力束锚固点位置之间。建立的有限元模型与钢束布置见图 8。

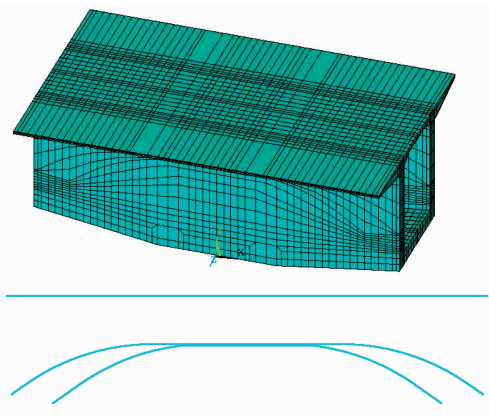


图 8 0~3#段箱梁有限元模型与钢束布置图

Fig 8 0~3# segment finite element modal of the box girder

表 2 有限元分析荷载补偿量

Table 2 The compensation force in FEA

预应力束/kN		1# 预应力束	2# 预应力束
与水平方向夹角/(°)		35	35
预应力等级	60%	1 080	1 080
	80%	540	540
	120%	-540	-540

注:补偿荷载方向向下为正。

2.2 混凝土刚构桥腹板有限元计算结果分析

2.2.1 原桥模型计算结果 对原桥模型进行计算,获得腹板应力与裂纹分布计算结果。图 9 为预应力束所在腹板切面的第一主应力图。

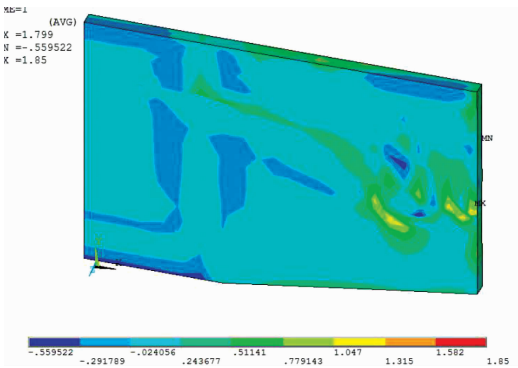


图 9 距腹板内侧表面 450 mm 第一主应力云图

Fig 9 Principal stress of web (450 mm off inside-surface, prestress = P)

2.2.2 不同预应力等级作用下的腹板计算结果 由图 9 可知,腹板在拉索锚固区域附近沿波纹管方向有一较大主拉应力区,该区域拉应力大小在 0.80~1.91 MPa 之间。由图 10 可知,在腹板混凝土在预应力锚固区域附近发生了局部拉裂,开裂方向为垂直预应力施加的方向,裂纹主要分布在锚后的 1.5~2.0 m 的范围内,与图 1 的裂纹布置对比,开裂模式吻合,说明该刚构桥出现裂纹的主要原因为预应力集中荷载过大。对腹板的预应力束的预应力大小进行参数分析,预应力大小分别取原预应力大小的 60%、80%、120%。图 11~13 分别为原预应力大小 60%、80%与 120%作用下的腹板开裂图。图 14~16 分别为原桥预应力大小 60%、80%与 120%下腹板第一主应力图。

由图 11~13 可见,随着预应力的增大,腹板上裂缝的范围增大。由图 14~16 可见,随着腹板施加预应力的增大,局部拉应力呈正相关增大,拉应力大小区间分别为 0.67~1.55 MPa、0.74~1.75 MPa、

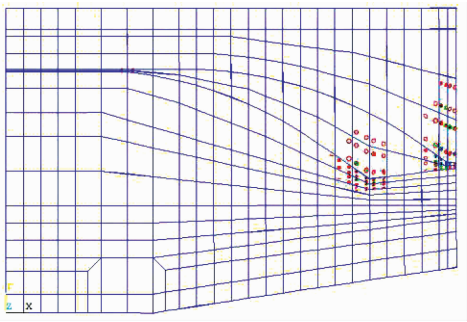


图 10 原桥模型的腹板开裂图

Fig 10 web cracking result , prestress = P

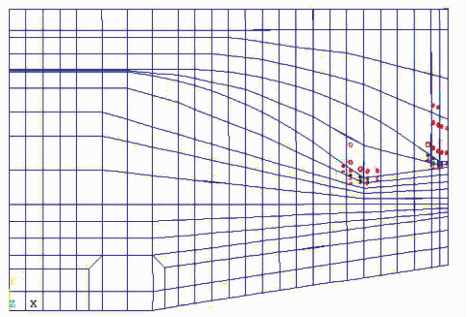


图 11 预应力为原桥 60%腹板裂缝

Fig 11 Web cracking result , prestress = 60% P

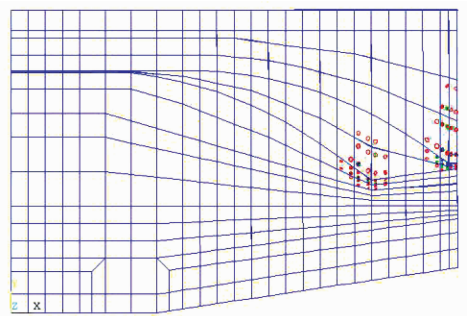


图 12 预应力为原桥 80%腹板裂缝

Fig 12 Web cracking result , prestress = 80% P

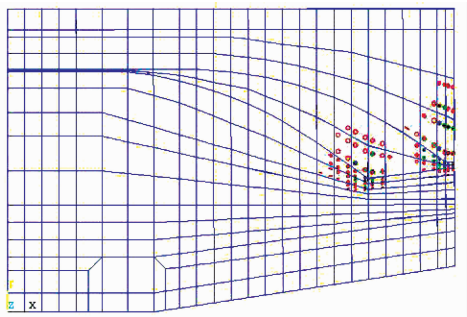


图 13 预应力为原桥 120%腹板裂缝

Fig 13 Web cracking result , prestress = 120% P

0.95~2.19 MPa;根据 1.1 节提出的方法,对该桥腹板进行最大横向应力的计算,该桥腹板横向应力相关计算参数见表 3。根据式(2),计算 60%、80%、

100%、120% 预应力作用下,将 y/d 分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 位置时的横向应力值列于表 4,并绘于图 17 中与有限元拉应力结果进行比较,结果显示,理论计算结果最大值为 $y/d=0.4$ 时,该值接近于有限元拉应力结果的下限,整体变化趋势一致,考虑本文有限元分析采用降温法模拟预应力,未考虑锚具尺寸,会使横向拉应力有限元结果偏大。

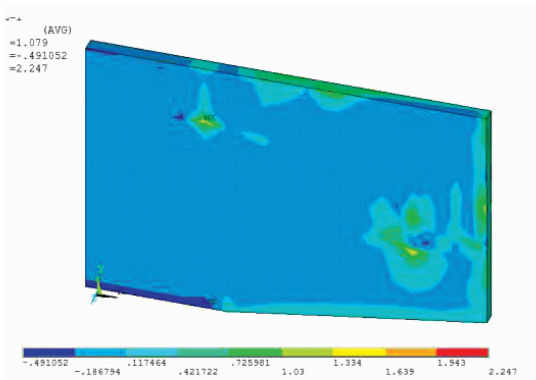


图 14 预应力为 60%腹板主应力图(距腹板内侧 450 mm)

Fig 14 Principal stress of web
(450 mm off inside-surface, prestress = 60% P)

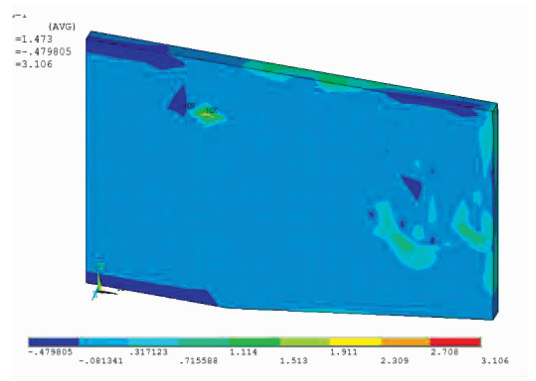


图 15 预应力为 80%腹板主应力图(距离腹板内侧 450 mm)

Fig 15 Principal stress of web
(450 mm off inside-surface, prestress = 80% P)

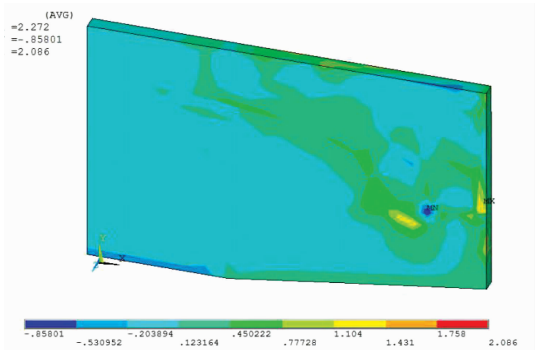


图 16 预应力为 120%腹板主应力图(距离腹板内侧 450 mm)

Fig 16 Principal stress of web
(450 mm off inside-surface, prestress = 120% P)

表 3 腹板横向应力计算参数

Table 3 Parameter of horizon stress calculation mm				
腹板厚 b	预应力束	锚具直径 a_1	d	l_e
650	25 ϕ 15.2	340	3 000	3 600

表 4 式(6)~(8)计算不同预应力对应的腹板横向应力值

Table 4 Horizon stress result of equation (6)~(8)				
预应力	60%	80%	100%	120%
$y/d=0.2 \sigma_{xy}/(\text{MPa})$	0.338	0.450	0.563	0.676
$y/d=0.3 \sigma_{xy}/(\text{MPa})$	0.473	0.630	0.788	0.946
$y/d=0.4 \sigma_{xy}/(\text{MPa})$	0.498	0.664	0.832	0.996
$y/d=0.5 \sigma_{xy}/(\text{MPa})$	0.442	0.590	0.737	0.884

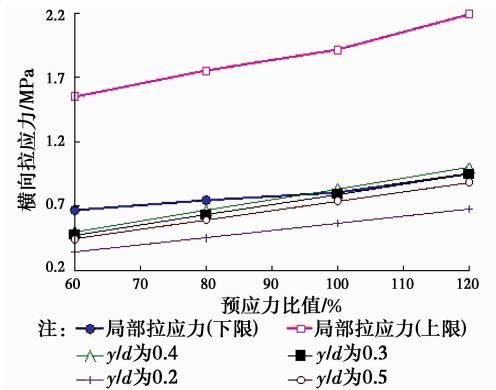


图 17 腹板预应力筋附近局部拉应力(剔除了应力集中的计算结果)与腹板预应力施加大小关系

Fig 17 Relation curve between web tension stress and prestress level

由有限元分析结果可知,由于预应力锚固区域局部压应力较大,出现了垂直于预应力筋方向较大的横向应力,从有限元分析结果可知,预应力施加的局部区域内主拉应力为 0.70~2.20 MPa 之间,随着预应力的增大,腹板局部的主拉应力增大,主拉应力方向为垂直于预应力束的方向,故极可能出现沿预应力方向的裂纹。

有限元计算结果表明该桥腹板预应力锚后应力较大,与施工过程出现腹板锚后沿波纹管开裂的现象吻合。

2.3 计算结果与规范对比

采用横向应力公式(6)~(9)计算在不出现开裂情况下,预应力最大承载力值,并与规范[16]的局压承载力结果进行对比。取 $d=10a=3\,010\text{ mm}$,由式(6)~(9)计算得当 $y=0.223\,d$ 时,横向拉应力 $\sigma_{xz\max}$ 达到最大,为 $\sigma_{xz\max}=0.396q_1$,本桥的腹板混凝土为 C50 混凝土, $[f_t]=1.83\text{ MPa}$,将施工过程的

开裂应力偏安全的取为 $0.8[f_t]=1.46\text{ MPa}$ 。本文推导的腹板最大局压承载力值与规范[16]的局压承载力设计值 $[P]$ 见表 5,本文得到的腹板局压承载力与规范[16]对比,数值大 4.6%。

表 5 本文腹板承载力与规范[16]腹板局压承载力结果对比

Table 5 Result Comparison of this article and the code [16]	
项目	单位/t
本文推导的腹板可承载的最大预应力值 P	737.6
规范[16]的局压承载力设计值 $[P]$	701.9

3 结 论

1)基于弹性理论平面问题三角级数求解方法,获得了集中荷载作用下板件的应力函数表达式。

2)基于弹性平面理论推导的应力函数求解式,拟合了集中荷载下横向应力求解函数,提出了预应力混凝土刚构桥腹板预应力等效矩形选取方法,并推导了三维情况下沿预应力轴线横向应力的表达式。

3)理论计算结果接近于有限元拉应力结果的下限,两者整体变化趋势一致,验证了本文推导拟合的集中荷载下横向应力求解函数的有效性;有限元计算结果的裂纹范围与工程实例一致,印证了本文工程背景中的预应力混凝土刚构桥腹板开裂的主要原因因为预应力局压荷载引起的横向应力过大导致。

参考文献:

[1] 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(2):56-58.
ZHAN J H, CHEN H. Crack and box girder deflection analysis in large span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25 (2):56-58. (in chinese)
[2] 马健.三峡门黄河公路大桥的主桥加固[J].公路,2004,(6):62-64.
MA J. Reinforcement of Sanmenxia highway bridge [J]. Highway,2004,(6):62-64. (in chinese)
[3] 李红霞,吴骏.某连续刚构桥开裂原因分析及加固设计[J].水利与建筑工程学报,2013,11(12):180-185.
LI H, WU J. Analysis on crack reason of a continuous rigid-framed bridge and design of reinforcement for it [J]. Journal of Water Resources and Architecture Engineering, 2013,11(12):180-185. (in chinese)
[4] 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 G L, XIE J, FU Y F. Investigation research on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service [J]. Journal of High way and Transportation on Research and Development, 2008, 25(8): 52-56. (in chinese)

[5] 肖星星,李程华,万重文,等. 预应力混凝土箱梁桥悬臂施工中腹板斜裂缝成因分析[J]. 中外公路, 2008, 28(2): 124-128.

XIAO X X, LI C H, WAN C W, et al. Web inclined cracks analysis in prestressed concrete box girder bridge during cantilever construction [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(2): 124-128. (in chinese)

[6] 李黎,叶志雄,陈元坤. 预应力混凝土刚构桥施工阶段腹板斜裂缝分析及其加固[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(10): 96-100.

LI L, YE Z X, CHEN Y K. Study on slant cracks on webs of prestressed rigid frame bridge during construction and its reinforcement [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(10): 96-100. (in chinese)

[7] 宋随弟,祝兵. 预应力混凝土连续刚构桥腹板斜裂缝发生机理研究[J]. 桥梁建设, 2008(3): 71-74.

SONG S D, ZHU B. Investigation of occurrence mechanism of inclined cracks in webs of PC continuous rigid frame bridges [J]. Bridge Construction. 2008(3): 71-74. (in chinese)

[8] 周威,胡海波. 预留孔道活性粉末混凝土局压性能与承载力分析[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 119-128.

ZHOU W, HU H B. Analysis on bearing capacity and behavior of reactive powder concrete with empty concentric duct under local pressure[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 119-128. (in chinese)

[9] OKUMUS P, OLIVA M G, BECKE S. Nolinear finite element modeling of cracking at ends of pretensioned bridge girders[J]. Engineering Strutures, 2012, 40(7): 267-275.

[10] SETIAWAN A F, SULISTYO D, AMINULLAH A. Finite element method for numerical analysis of post-tension anchorage zone [J]. Procedia Engineering, 2014, 95: 272-278.

[11] YAPAR O, BASU P K, NORDENDALE N. Accurate finite element modeling of pretensioned prestressed concrete beams [J]. Engineering Structures, 2015, 101: 163-178.

[12] ABDELATIF A O, OWEN J S, HUSSEIN M F M. Modelling the prestress transfer in pre-tensioned concrete elements [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 94: 47-63.

[13] SHEN S L, HOU D W, ZHAO J L, et al. Assessment of internal forces for intermediate anchorage zone of post-tensioned concrete structure [J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 370-378.

[14] F. 莱昂哈特. 特殊钢筋混凝土构件设计[M]. 程积高. 译. 北京: 水利电力出版社, 1986: 45.

LEONHARDT F. Design of special reinforced concrete members[M]. Translate by CHENG J G. Beijing. Water Resources and Electric Power Press. 1986: 45. (in chinese)

[15] FUNG Y C, TONG P. Classical and computational solid mechanics[M]. Singapore: World Scientific, 2001.

[16] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges an culverts: JTG D62-2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in chinese)

(编辑 胡玲)