

## 节段预制箱梁横向受力有限元分析

杨伟<sup>1</sup>, 沈燕霞<sup>2</sup>, 刘中原<sup>3</sup>(1. 洛阳璟信公路工程科技发展有限公司, 河南 洛阳 471000; 2. 郑州市建设安全监督站, 河南 郑州 450000;  
3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:**目前节段预制拼装技术在中国城市高架桥梁中正逐渐得到广泛的推广和应用,随着箱梁宽度的增加,混凝土箱梁桥悬臂较长,且宽箱梁多布置横向预应力钢束,空间性能比较复杂,箱梁横向效应越来越明显,研究宽箱梁结构横向受力分布及性能,有助于解决混凝土宽箱梁桥在分析与设计中的关键技术问题。该文以采用节段预制拼装技术的某在建城市高架等截面大悬臂连续梁桥为研究对象,采用 Midas/Civil 建立箱梁板单元模型,采用有限元软件 Ansys 建立节段箱梁的三维实体有限元模型,通过两种计算方法计算在各种荷载作用下的箱梁横向应力分布规律、应力分布情况,各计算结果均能满足规范要求,对不同跨径及变截面翼缘板的荷载有效分布宽度做了一定研究,结果可为类似工程横向受力设计计算提供一定的参考。

**关键词:**横向受力; 节段预制拼装; 有效分布宽度

**中图分类号:** U441+.5      **文献标志码:** A

箱梁的横向受力决定着箱梁整个顶板截面尺寸、钢筋的合理布置以及横向钢束的布置。对大悬臂箱梁桥面板合理进行横向受力计算分析可有效保证箱梁截面横向强度、刚度及稳定性。JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中涉及长悬臂箱梁在各种荷载作用下的横向效应研究简化计算方法相对较少,设计人员只能借鉴其他类似经验对桥面板进行横向配筋,可能会引起桥梁在运营阶段或施工阶段出现不同程度的裂缝,因此对大悬臂箱梁结构横向受力分布和性能及在各种荷载作用下的横向应力分布规律进行研究,总结出可运用在工程计算中的箱梁横向受力的简捷快速计算方法非常必要,且可以较好地解决大悬臂混凝土城市高架桥梁设计计算中的关键技术问题。

## 1 工程概况

某在建城市高架桥箱梁节段在预制场地采用短线法预制,相邻节段采用连续浇注,利用已预制好的梁端作为相邻梁段的端模。主梁采用单箱单室等高斜腹板预应力混凝土箱梁,节段预制拼装。中墩和边墩墩顶 0<sup>#</sup> 节段采用现浇。主梁主体采用节段预制拼装,中墩和边墩墩顶 0<sup>#</sup> 块采用现浇。根据构造及施工架设需

要,36~40 m 跨径的中跨、边跨均划分 12 个预制节段,30~35 m 跨径的中跨、边跨均划分 10 个预制节段,25~29 m 跨径的中跨、边跨均划分 8 个预制节段。悬拼预制拼装节段长度分别为 2.9 m、2.4 m 和 2.0 m。墩顶 0<sup>#</sup> 块与预制节段间设置 15 cm 湿接缝,跨中合龙段采用现浇。各节段梁采用密齿型剪力键,环氧树脂胶接缝。桥梁横断面图如图 1 所示。

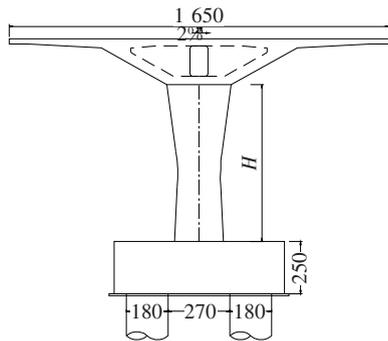


图 1 桥梁横断面图(单位:cm)

主线路侧分幅 16.5 m 宽,典型预制桥梁主梁采用单箱单室等梁高斜腹板预应力混凝土箱梁。顶板设单向横坡,利用箱梁整体旋转来形成。单个箱梁宽度为 16.5 m,底板宽度 2.2 m,悬臂长度为 4.0 m,箱梁梁高为 2.2 m。板厚度为 0.38 m,底板厚度为 0.27 m,顶板厚度为 0.23 m。箱梁跨中断面如图 2 所示。

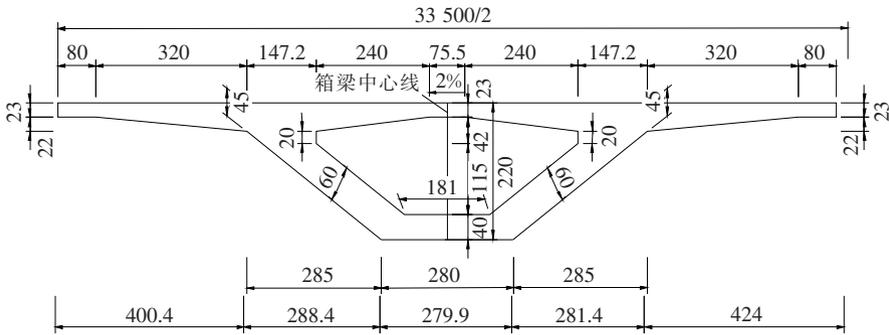


图 2 跨中横断面图(单位:mm)

## 2 长悬臂板计算理论

JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[1]</sup>计算翼缘板根部弯矩是以荷载分布宽度为基础,对悬臂长度 $\leq 2.5$  m的等厚度悬臂板的荷载有效工作宽度可近似按 $2l_0$ 取值,亦即荷载是近似按照车轮作用面 $45^\circ$ 扩散到桥面板,此理论是根据无限宽度的悬臂板在自由端作用一集中荷载并基于弹性理论分析而得到的。因轮压分布面积同荷载等级有关,荷载愈大,轮压的分布宽度也愈广,若仍按从轮压外侧 $45^\circ$ 分布,有效宽度过大,而对长悬臂板而言由于计算结果偏于不安全而不再适用,其计算思路是按有效分布宽度概念把悬臂板简化成梁来进行受力分析,此种方法虽简捷,却掩盖了板双向受力的特点,略有不妥之处:主梁支点附近的悬臂板是属于半无限宽度,若按此方法将不能更加真实反映此处的受力状况;此方法在分析短悬臂板时尚可用,因宽箱梁长翼缘板沿翼缘板长度方向除有负弯矩外,无限宽度的板条中还伴随有正弯矩。在《高等桥梁结构理论》<sup>[2]</sup>中对变厚度的长悬臂板常用的计算方式有以下几种:

### (1) 贝达巴赫公式

计算带边梁变截面长悬臂翼缘板时采用巴赫公式;其分布弯矩应满足峰值条件、平衡条件、边界条件、对称条件(图 3)。

$$m_x = \frac{-P}{\pi} \cdot \frac{A''}{\text{ch}\left(\frac{A''y}{\xi-x}\right)} \quad (1)$$

式中: $m_x$ 为悬臂根部单位宽度弯矩; $P$ 为集中荷载; $\xi$ 为荷载沿 $x$ 轴距悬臂根部的距离; $A''$ 为悬臂跨径。

(2) 张士铎教授建议的长悬臂行车道板的有效分布宽度计算式

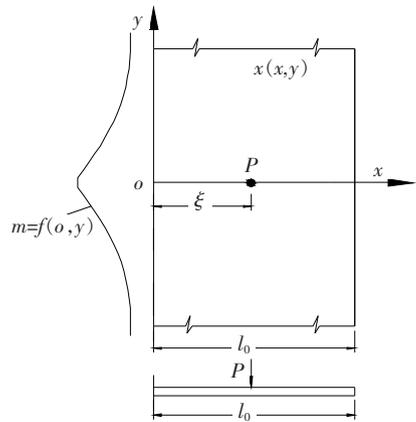


图 3 长悬臂行车道板  $m_x$  分布图

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \frac{b_1 \left( x_1 + \frac{b_1}{2} \right)}{\frac{b_1}{2.1} + \frac{a_1}{4.41} \ln \left[ \frac{a_1 + 2.1x_1}{a_1 + 2.1(x_1 + b_1)} \right]} + d \\ m(x, 0) &= \frac{\sum P \left( x_1 + \frac{b_1}{2} \right)}{a} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: $a$ 为车轮的有效分布宽度; $a_1$ 、 $b_1$ 为垂直于板跨、顺桥向通过铺装层分布到板顶的有效宽度; $d$ 为最外侧两车轮在沿桥纵向的距离; $P$ 为集中荷载。

### (3) AASHTO 规范法

美国公路桥梁标准规范建议的集中力作用下板的有效分布宽度计算公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= 0.8x + 1.143 + d \\ m_x &= \frac{\sum Px}{a} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: $d$ 为最外面两车轮在沿桥跨方向的间距; $x$ 为荷载点到悬臂根部的距离; $a$ 为荷载的有效分布宽度; $m_x$ 为悬臂根部单位宽度弯矩。

### (4) 影响面法

在最不利位置布置车辆,按照 Homberg 绘制的变截面悬臂板  $m_x$  的影响面图,将各轮载值与影响面上坐标系中对应的  $\eta_i$  值相乘,通过叠加即可求得悬臂根部的  $m_x$ :

$$m_x = \sum P_i \eta_i \quad (4)$$

式中: $P_i$  为车轮  $i$  集中力; $\eta_i$  为相应影响面下的系数。

(5) 魏斯特加(Westergaard)公式

$$m_x = -\frac{P}{\pi} \cos^2 \varphi \quad (5)$$

式中: $m_x$  为无限宽度悬臂板根部单位宽度上的弯矩; $\varphi$  为夹角。

结合该文箱梁截面的实际情况,取标准车辆荷载中轴距为 1.2 m 的轮载局部加载在悬臂板上按上述公式分别计算图 4 所示的布载方式下的跨中截面悬臂板根部在车辆荷载作用下的弯矩,结果如表 1 所示。

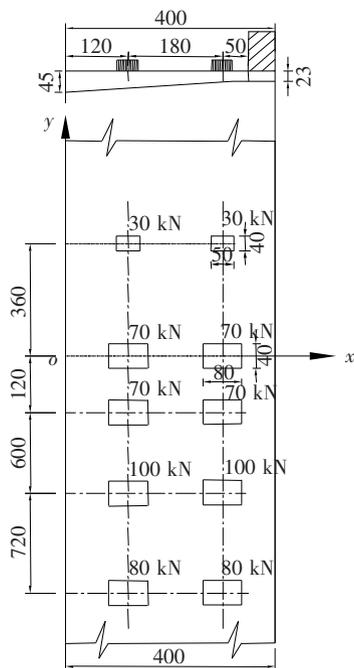


图 4 计算简图(长度单位:cm)

表 1 悬臂根部内力计算结果

计算方法	根部单位宽度弯矩/(kN·m)
贝达巴赫法	-102.25
张士铎法	-93.79
AASHTO 规范法	-144.76
影响面法	-84.78
魏斯特加法	-94.97

根据上述计算结果可知:AASHTO 规范法计算的弯矩值过大不经济,不宜采用,影响面法计算的结果

偏小,按此结果配筋不安全。

### 3 箱梁横向受力有限元分析

#### 3.1 板单元模型有限元分析

对于悬臂长度小于 2.5 m 在桥梁结构计算时,常根据横向分布系数取纵向 1 m 长单元建立框架有限元模型来处理及分析结构的横向空间受力效应<sup>[3-5]</sup>,该工程因悬臂长度为 4 m,框架模型法已不再适用,该文在建模型时选取一孔跨径为 40 m 的阶段拼装桥建立板单元模型进行分析<sup>[6]</sup>,各参数如下:

- (1) 箱梁自重:C60 混凝土,重度 26 kN/m<sup>3</sup>。
- (2) 横向预应力:每隔 0.7 m 布置 4 $\phi^s$ 15-4 钢束, $\mu=0.17$ , $k=0.0015$ ,张拉控制应力为 1395 MPa。
- (3) 二期恒载:包桥面铺装、防撞墙及相关附属等,按 72.2 kN/m 计。
- (4) 温度梯度:按规范添加。
- (5) 整体升降温:混凝土结构按整体升温 26.0 °C,整体降温 27.0 °C。
- (6) 车辆荷载:按城市 A 级标准车辆荷载进行加载,以面荷载形式添加,考虑冲击系数。

边界条件的模拟为单跨简支结构,不考虑纵向钢束的影响,由于截面悬臂较大且箱式较宽,考虑每节段箱梁桥面板中张拉 4 $\phi^s$ 15-4 横向钢束。模型共 100 098 个节点,16 900 个单元,板单元均以四点建立,悬臂板变截面单元厚度取单元  $i$ 、 $j$  端的平均值,模型共设置 3 个施工阶段:① 一次成桥;② 二期恒载;③ 收缩徐变。所建模型如图 5、6 所示。

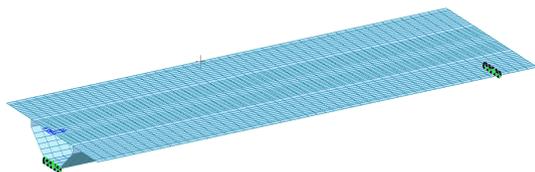


图 5 横向板单元模型图

在车辆荷载单独作用下,在图 4 所示偏载状态下悬臂根部单位宽度处的负弯矩为 100.3 kN·m(图 7),计算结果与理论计算中的贝达巴赫公式计算结果基本相吻合,误差在 2% 以内,说明按板单元计算大悬臂箱梁横向受力是合理的。

对悬臂板而言,其受力最不利的位置在悬臂板根部,其受力直接影响到配筋及使用寿命,结构的承载能力验算选用基本组合,应力、强度验算选用作用频遇组合、作用准永久效应组合、荷载标准值组合 3 种组

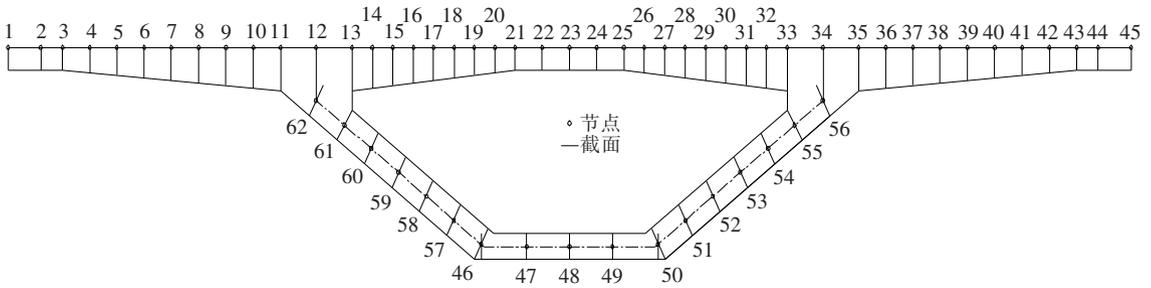


图6 板单元模型节点划分

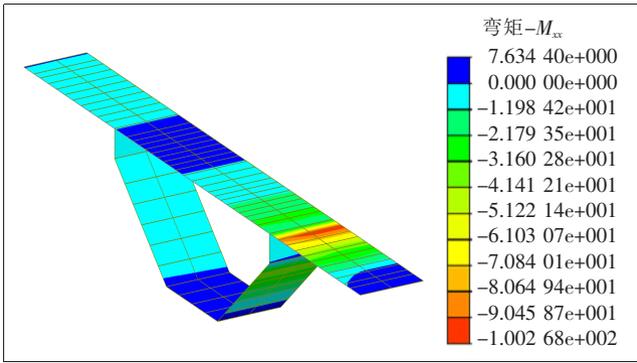


图7 悬臂板单位宽度弯矩图(单位:kN·m)

合<sup>[3,7-8]</sup>。各种荷载单独作用下箱室顶板水平方向的最大拉/压应力如表2、3所示。

将各荷载按最不利的短期效应进行荷载组合,悬臂板应力、箱室顶板横向应力如图8~10所示。

悬臂根部顶缘混凝土现1.5 MPa水平拉应力,小于C60混凝土抗拉强度设计值1.96 MPa,悬臂根部应加强配筋,悬臂根部底缘均为压应力;最大压应力为7.2 MPa,满足规范要求( $\leq 26.5$  MPa)。

顶板横向跨中混凝土未出现水平拉应力,均为压应力,最大压应力为7.58 MPa,满足规范要求( $\leq 26.5$  MPa)。

表2 悬臂根部应力计算结果

MPa

荷载位置	自重	预应力	二期恒载	防撞护栏	声屏障	车辆偏载	温升	温降	温梯升温	温梯降温
板顶	1.7	-6.1	0.6	1.7	0.5	3.1	-0.02	0.01	-2.4	2.6
板底	-1.5	1.2	-0.5	-1.6	-0.5	-3.6	0	-0.02	1.2	-1.3

表3 箱室顶板应力计算结果

MPa

荷载位置	自重	预应力	二期恒载	防撞护栏	声屏障	车辆偏载	温升	温降	温梯升温	温梯降温
板顶	-0.7	-1.3	-0.3	0.6	0.2	-2.5	-0.01	0	-3.3	3.5
板底	1.6	-6.3	0.5	-0.1	0	2.1	0.01	-0.01	1.6	-1.8

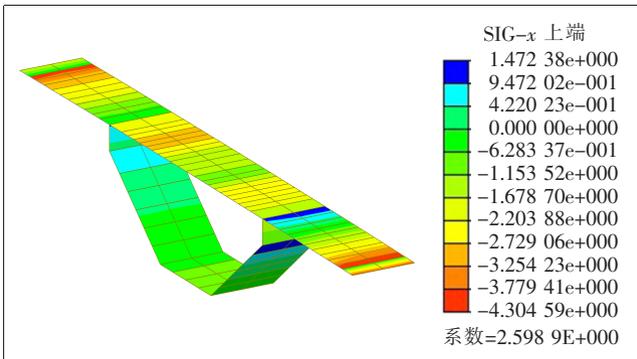


图8 悬臂板顶缘应力云图(单位:MPa)

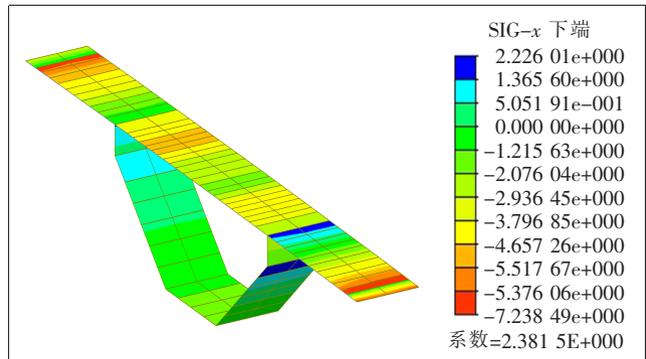


图9 悬臂板底缘应力云图(单位:MPa)

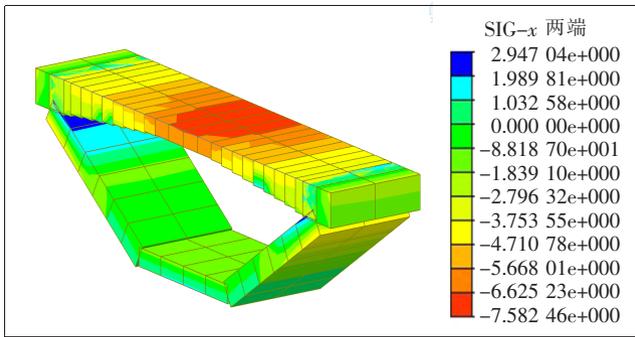


图 10 箱室顶板应力云图(单位:MPa)

对于整个截面的内力可利用局部方向内力的合力功能查看,在荷载基本组合下悬臂根部弯矩及剪力如图 11、12 所示。

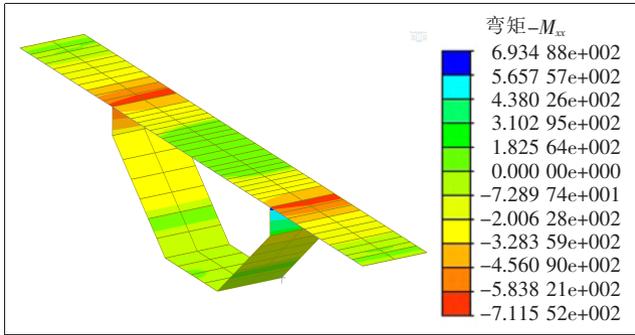


图 11 基本组合下悬臂根部弯矩图(单位:kN·m)

根据悬臂板的配筋分别计算悬臂板根部正截面截面抗弯和斜截面抗剪承载力,计算结果为:

$$M_d = 1\,234.8 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq M_x = 711.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_d = 1\,124 \text{ kN} \geq F_z = 252 \text{ kN}$$

悬臂板根部截面的弯矩和剪力均小于相应的承载力,悬臂板根部的抗弯和抗剪承载力满足规范要求。

### 3.2 箱梁横向受力实体有限元分析

采用三维实体空间有限元运用于结构计算分析,

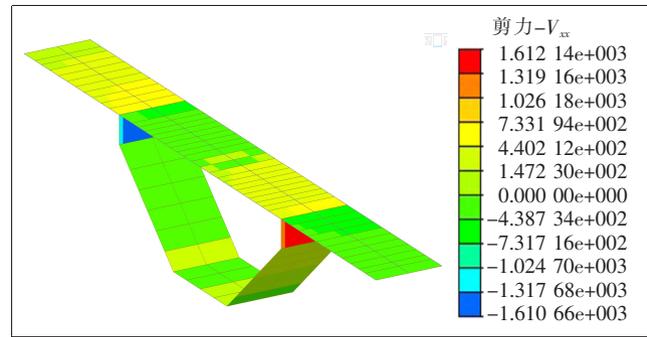


图 12 基本组合下悬臂根部剪力图(单位:kN)

能够精确得到各荷载产生的各种变形和应力,是目前箱梁横向受力细部分析计算中采用较为普遍的方法<sup>[4,7]</sup>。该文采用 Ansys 12.0 建立如图 13 所示实体有限元模型,模型中不考虑纵桥向预应力作用。全桥采用 Solid95 实体单元模拟混凝土单元,Link8 杆单元模拟横向钢束,各参数及荷载设置同板单元模型,边界条件为:箱梁左端断面约束 3 个方向自由度;右端断面约束横桥向 2 个方向自由度。



图 13 箱梁实体有限元模型

将各荷载按最不利的短期效应进行荷载组合,箱室顶板各荷载作用下的计算结果及横向应力如表 4、5 及图 14、15 所示。

表 4 悬臂根部应力计算结果

荷载位置	MPa									
	自重	预应力	二期恒载	防撞护栏	声屏障	车辆偏载	温升	温降	温梯升温	温梯降温
板顶	1.64	-7.5	0.41	1.17	0.23	3.4	-0.01	0	-2.2	2.3
板底	-1.67	1.55	-0.44	-1.26	-0.25	-4.1	0.01	-0.01	1	-1.4

表 5 顶板跨中处应力结果

荷载位置	MPa									
	自重	预应力	二期恒载	防撞护栏	声屏障	车辆偏载	温升	温降	温梯升温	温梯降温
板顶	-0.47	-1.7	-0.22	0.45	0.1	-2.15	0	0	-3.3	3.45
板底	1.44	-8.7	0.43	-0.01	0	1.76	0.01	0	1.5	-1.6

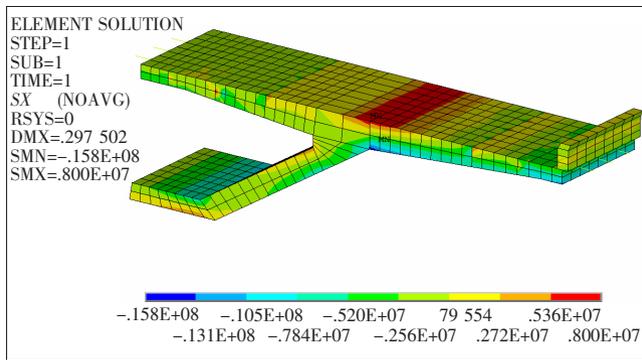


图14 悬臂根部水平方向应力云图(单位:Pa)

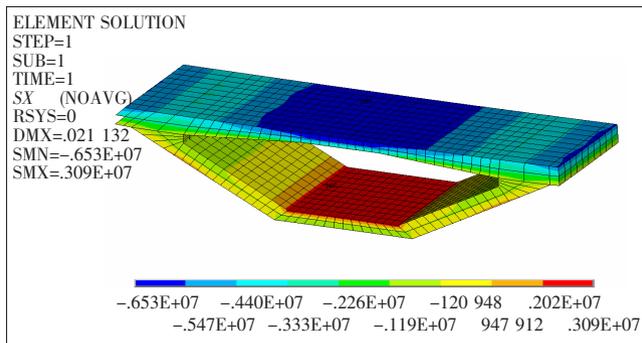


图15 箱梁顶板水平方向应力云图(单位:Pa)

顶板悬臂根部混凝土未出现水平拉应力,均为压应力;最大压应力为7.64 MPa,满足规范要求( $\leq 26.5$  MPa)。

顶板横向跨中混凝土未出现水平拉应力,均为压应力,最大压应力不超过7 MPa,满足规范要求。

对悬臂板根部断面的应力进行积分,得到悬臂根部截面  $M_z = 726.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,剪力  $F_z = 647.5 \text{ kN}$ ,验算结果均满足要求。

综上计算结果发现:在施加横向预应力后,桥面板受力发生了较大改变,预应力效应结果较大,是钢束模拟方法不同造成的。将两种计算方法对比发现各结果基本相近,各计算结果均满足规范要求,说明用板单元模型计算箱梁横向受力是可行的。

#### 4 荷载有效分布宽度参数影响分析

根据上述计算分析,验证了板单元模型计算结果的精度,为了研究长悬臂板荷载有效分布宽度的规律,本节将结合有限元法及项海帆《高等桥梁结构理论》<sup>[2]</sup>中对于大悬臂板提出一种有效分布宽度的计算公式,研究长悬臂板厚度变化及悬臂板长度不同时的荷载有

限宽度分布规律,公式如下:

$$a = \frac{P \left( x_1 + \frac{b_2 + 2H}{2} \right)}{m_x} \quad (6)$$

式中: $m_x$ 为悬臂根部单位宽度弯矩; $P$ 为集中荷载; $x_1$ 为集中荷载 $P$ 距离悬臂根部距离; $b_2$ 为沿悬臂跨径方向有效分布宽度; $H$ 为铺装层厚度。

采用上述有限元板单元模型方法计算变厚等长悬臂板的荷载有效分布宽度,选取跨度 $l_0 = 4 \text{ m}$ ,悬臂板变厚段斜率同该文保持一致,悬臂根部厚度 $t_2 = 0.45 \text{ m}$ 不变,分别计算悬臂端厚度 $t_1 = 0.23 \text{ m}$ 、 $0.28 \text{ m}$ 、 $0.33 \text{ m}$ 、 $0.38 \text{ m}$ 、 $0.43 \text{ m}$ 、 $0.45 \text{ m}$ ,为便于分析,计算时按该文图4所示混凝土悬臂板在端部承受车辆偏载下的内力状态,选5号车轮处的分布宽度进行分析,根据上述公式计算车轮5的有效分布宽度见表6。

表6 不同厚度悬臂板荷载有效分布宽度

悬臂长度 $l_0/\text{m}$	根部厚度 $t_2/\text{m}$	端部厚度 $t_1/\text{m}$	单位宽度弯矩/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	有效宽度/ $\text{m}$
4	0.45	0.23	-22.5	5.0
4	0.45	0.28	-20.4	5.5
4	0.45	0.33	-19.2	5.8
4	0.45	0.38	-17.5	6.4
4	0.45	0.43	-15.4	7.3
4	0.45	0.45	-13.7	8.1

由表6可见:对于相同长度的变厚长悬臂板比按照等厚度悬臂板理论得到的有效分布宽度小得多,当悬臂板长度一定,悬臂段变厚度 $t_2/t_1$ 比值在2~1变化时,悬臂根部的负弯矩值随着比值的减小而减小。

对于不同悬臂板长度变化及板厚发生变化时的有效荷载分布规律,令 $l_0 = 3 \text{ m}$ 、 $3.5 \text{ m}$ 、 $4 \text{ m}$ 、 $4.5 \text{ m}$ 、 $5 \text{ m}$ ,在翼缘板 $t_2/t_1 = 1$ 或2不变(保持 $t_2 = 0.45 \text{ m}$ ),仍按图4所示加载方式,保持5号车轮距离悬臂根部距离不变,选5号车轮处的分布宽度进行分析,通过改变上述参数,有效宽度计算结果如表7所示。

表7 不同跨径悬臂板荷载有效分布宽度

悬臂长度 $l_0/\text{m}$	$t_2/t_1 = 1$		$t_2/t_1 = 2$	
	单位宽度弯矩/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	有效宽度/ $\text{m}$	单位宽度弯矩/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	有效宽度/ $\text{m}$
3.0	-16.4	6.8	-21.6	5.2
3.5	-15.7	7.1	-20.9	5.4

续表 7

悬臂 长度 $l_0/m$	$t_2/t_1=1$		$t_2/t_1=2$	
	单位宽度弯 矩/(kN·m)	有效宽 度/m	单位宽度弯 矩/(kN·m)	有效宽 度/m
4.0	-13.7	8.1	-20.5	5.5
4.5	-12.8	8.8	-20.0	5.6
5.0	-12.2	9.2	-19.7	5.7

由表 7 可见:对于相同厚度的悬臂板,有效分布宽度随悬臂板跨径的增加而增大,对于相同长度的悬臂板,变厚悬臂板比等厚度悬臂板的荷载分布宽度小得多,而从悬臂板根部单位宽度的最大内力值来看,变截面翼缘板的最大负弯矩较相同跨径的等厚翼缘板增大了 31%左右,且悬臂板长度越大差值也越大。对于同样跨径的翼缘板,变厚度悬臂板根部单位宽度的弯矩值较等截面悬臂翼缘板的要大很多,因此在分析悬臂根部负弯矩时不能忽视变截面带来的影响。

## 5 结论

通过对等宽节段预制拼装箱梁长悬臂桥面板横向受力进行计算研究,通过理论计算结果以及不同有限元软件计算进行对比,得到以下结论:

(1) 单位宽度弯矩计算误差在 2% 以内。经有限元计算分析,板单元模型与实体模型计算结果相差不大。

(2) 计算结果较准确地反映箱梁结构的横向应力分布规律,各计算结果也均满足规范要求,验证了板单元模型计算的可靠性。

(3) 当悬臂板长度一定时,对于变厚长悬臂板较

等厚度悬臂板理论得到的有效分布宽度小得多;对于等厚悬臂板,有效分布宽度随悬臂板跨径的增加而增大;对于等长悬臂板,变厚悬臂板较等厚悬臂板的荷载分布宽度小得多,对于变截面的长悬臂板受力理论计算推荐采用贝达巴赫公式计算,对以后类似桥梁设计具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 中交公路规划设计院. 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.
- [2] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 肖金梅. 大悬臂展翅混凝土连续箱梁桥横向受力分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [4] 王业忠. 预应力混凝土连续刚构桥箱梁横向受力分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [5] 黄运林, 杨聪, 万和安, 等. 石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 101—104.
- [6] 黄宏辉, 黄筱琪, 袁晟, 等. 预应力混凝土单箱多室宽箱梁桥空间受力性能研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 128—133.
- [7] 郭晓雷, 卜建清. 长悬臂混凝土箱梁翼缘板荷载有效分布宽度计算分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 1—5, 19.
- [8] 任虹昌. 大跨变截面波形钢腹板箱梁横向受力分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [9] 王兆南. 箱形梁横向内力解析理论及其应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [10] 何嘉祥. 混凝土箱梁桥的横向内力计算方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.