

# 节段现浇预应力混凝土宽箱梁后浇湿接缝的 早龄期受力分析及开裂控制

李浩<sup>1</sup>,裴炳志<sup>2</sup>,郭泽平<sup>2</sup>,方志<sup>1\*</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖北省交通投资集团有限公司)

**摘要:**针对节段现浇预应力混凝土箱梁后浇湿接缝在早龄期因收缩导致的开裂问题,以嘉鱼长江公路大桥为背景,通过试验测试了该桥施工阶段箱梁混凝土早龄期力学性能,得到了箱梁节段混凝土的收缩预测模型。基于此,采用有限元软件 Midas/FEA 建立了湿接缝及相邻节段箱梁的有限元模型,分析了湿接缝在混凝土收缩作用下的应力场,并对不同的预应力张拉方案进行了分析。结果表明:湿接缝在混凝土收缩和相邻节段约束作用下,其在混凝土浇筑后第3 d在结合面位置由收缩导致的拉应力达到了1.8 MPa,为该龄期混凝土抗拉强度的87%,因此需在此时进行预应力的张拉以降低混凝土拉应力,防止混凝土在早龄期开裂;若湿接缝按常规方案张拉预应力,湿接缝早龄期最大主拉应力均小于混凝土即时抗拉强度,但其28 d最大主拉应力为2.75 MPa,为该龄期混凝土抗拉强度的93%,存在开裂风险;在该文提出的张拉方案下,湿接缝在早龄期最大主拉应力比常规方案降低了22.2%~32%,有效保证了后浇湿接缝在早龄期的抗裂性要求。

**关键词:**预应力混凝土结构;早龄期结构;收缩效应;预应力张拉;有限元法

## 1 引言

现代混凝土连续梁桥及斜拉桥普遍采用节段现浇施工工艺,随着高强混凝土的应用越来越广泛,混凝土结构因早期收缩作用而开裂的问题也日渐严重。节段现浇箱梁施工时相邻节段龄期差会引起相应的收缩应变差,导致后浇混凝土箱梁节段内产生显著的收缩拉应力。为避免混凝土箱梁因收缩拉应力过大而开裂,施工中一般在早龄期就对箱梁施加横向预应力以抵消或减小其收缩应力。但是,过早地张拉较大的预应力,会使其后期预应力损失加大,并可能加剧结构内初始微裂缝的扩散。同时,由于预应力张拉时会受到相邻节段约束的影响,横向预应力效应会扩散至相邻节段,若张拉应力过小会出现预应力不足的情况。因此为满足混凝土箱梁在施工期间的抗裂要求,需要确定早龄期混凝土箱梁横向预应力合理的张拉方案。

国内外学者对预应力混凝土结构在正常使用阶段的收缩徐变效应研究较多,但针对早龄期混凝土结构

收缩效应的研究较少。Mohammed 等对混凝土结构早龄期开裂和收缩之间的关系进行了分析,结果表明:混凝土结构的早龄期开裂主要是由于自身收缩引发的拉应力所造成。李小祥等对某连续刚构桥典型节段结合面部位的混凝土收缩应力分布进行了分析,结果表明:JTGD62-2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》算得的相邻节段结合面位置应力水平偏低。许大晴等以某矮塔斜拉桥为背景,分析了节段混凝土龄期差对结合面受力性能的影响,并指出因混凝土收缩产生的横向拉应力较大不可忽视。然而目前的研究大都只分析混凝土的收缩效应,对如何确定合理的预应力早龄期张拉方案以降低混凝土早龄期收缩效应方面的研究较少。

该文以嘉鱼长江公路大桥为背景,测试了该桥箱梁节段混凝土的早龄期力学性能,得到了混凝土的收缩预测模型。基于此,采用 Midas/FEA 建立该桥混凝土箱梁节段的实体有限元模型,分析箱梁早龄期的收缩效应,并对不同的早龄期横向预应力张拉方案进行研究。

收稿日期:2019-12-09(修改稿)

作者简介:李浩,男,硕士研究生。E-mail:455978880@qq.com

\* 通信作者:方志,男,博士,教授。E-mail:zackfang@163.com

2 工程概况

嘉鱼长江公路大桥主桥为双塔双索面七跨连续不对称混合梁斜拉桥,主桥跨径布置为:(70+85+72+73) m+920 m+(330+100) m,全长4 660 m,结构整体布置如图1所示。主桥北边跨预应力混凝土箱梁采用如图2所示的单箱三室箱形截面,中心梁高382.5 cm,全宽38.5 m;标准梁段顶板厚30 cm,底板厚28

cm,腹板厚50 cm;混凝土强度等级为C55。

箱梁采用三向预应力体系,图3、4所示为湿接缝及相邻节段横向预应力布置,箱梁横向预应力均采用 $\phi 15.2$  mm 高强低松弛钢绞线。箱梁标准断面布置有顶板束 N1 及底板束 N2,分别采用4 $\phi 15.2$  mm 和3 $\phi 15.2$  mm 钢绞线,沿桥轴线按0.55 m 等间距布置,如图5(a)所示。横隔板断面布置有横隔板束 N3,采用19 $\phi 15.2$  mm 钢绞线,如图5(b)所示。

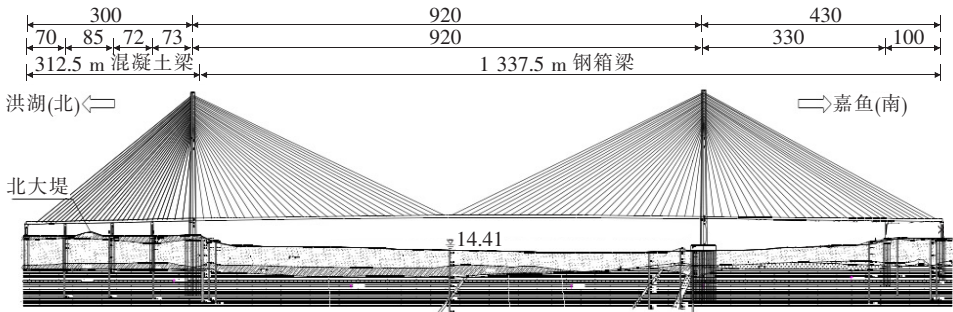


图1 嘉鱼长江公路大桥总体布置(单位:m)

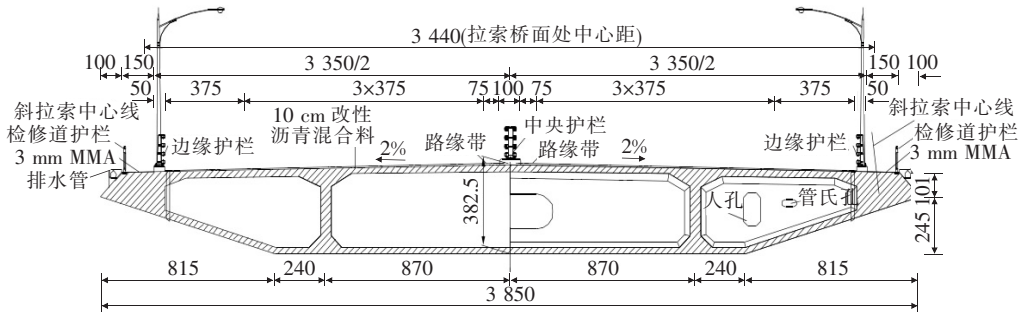


图2 边跨混凝土箱梁标准断面图(单位:cm)

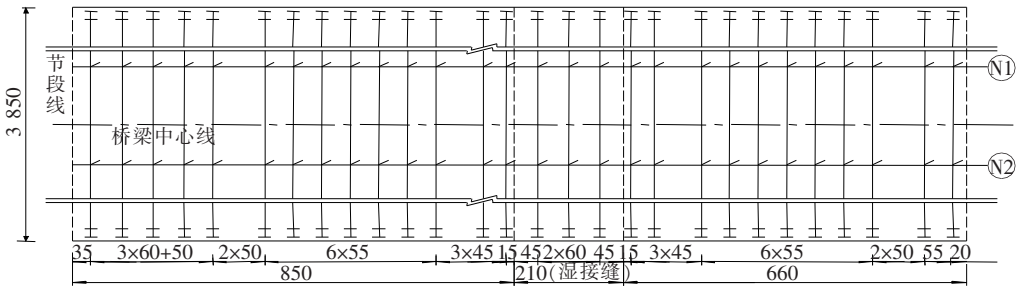


图3 横向预应力束平面布置(单位:cm)

混凝土箱梁采用节段现浇施工工艺,自梁端开始分成8个施工大节段和7个湿接缝,湿接缝长度均为2.1 m。图6为箱梁1#~4#节段浇筑分区示意,每个施工段中按a、b、c、d、e、f的顺序分成小节段施工。节段浇筑时,规定相邻节段浇筑时间间隔不得超过30 d,以减小相邻节段间的收缩应力。同时,每一节段混凝土

浇筑完成3 d并拆除模板后,即张拉相应节段的横向预应力,形成箱梁横向预压应力以满足早龄期的抗裂要求。

在箱梁施工中,湿接缝处箱梁会受到相邻已浇筑节段的较强约束,其横向收缩效应最为显著,容易因收缩应力过大而产生裂缝,因此该文以嘉鱼长江公路大

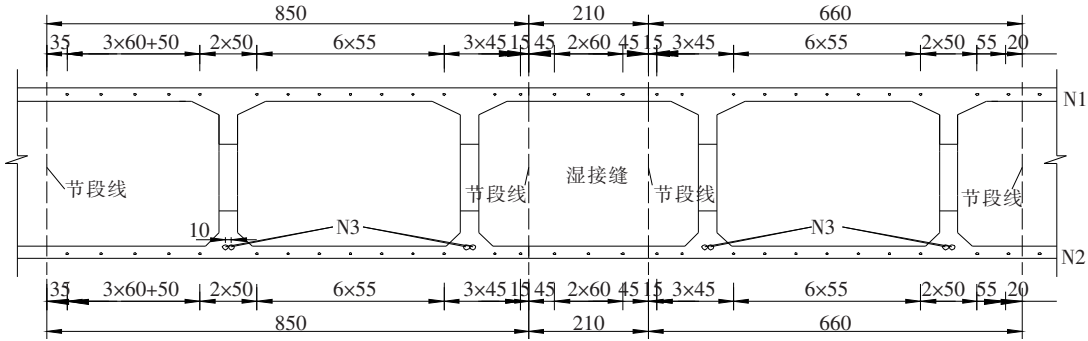
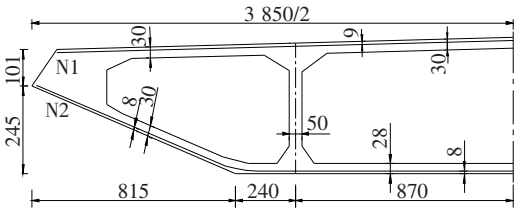
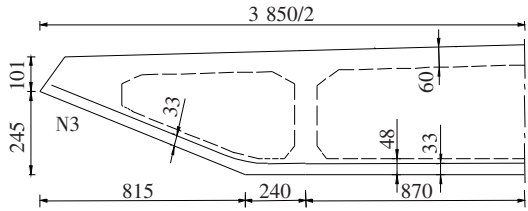


图 4 横向预应力束剖面布置(单位:cm)



(a)标准截面横向预应力布置



(b)横隔板截面横向预应力布置

图 5 截面预应力布置(单位:cm)



图 6 箱梁节段浇筑示意(单位:cm)

桥北边跨混凝土箱梁桥湿接缝作为研究对象,研究后浇湿接缝因早龄期收缩差引起的横向收缩受力情况,并对不同的预应力张拉方案进行分析。

### 3 试验研究

中国现行相关规范并未给出混凝土早龄期的物理力学性能参数的取值,特别是早龄期混凝土的收缩应变预测模型尤其缺乏。为得到箱梁在早龄期收缩效应下真实的受力状态,该文对嘉鱼长江公路大桥北边跨 PC 宽箱梁混凝土的材料强度及弹性模量进行测试,并以此为基础结合许巧对嘉鱼长江公路大桥箱梁 C55 混凝土收缩应变测试结果,确定适用于嘉鱼长江公路大桥北边跨箱梁混凝土的收缩应变预测模型。

#### 3.1 箱梁混凝土早龄期力学性能测试

在嘉鱼长江公路大桥北边跨 PC 宽箱梁施工现场进行混凝土取样,并制作立方体以及棱柱体试块。试

件制作完成以后,分两种条件养护:① 标养试件放在养护室养护,温度 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,湿度 $>95\%$ ;② 现场试件则在嘉鱼长江公路大桥北边跨混凝土箱梁施工现场同条件下养护,其环境温度及相对湿度变化如图 7 所示。所用 C55 混凝土的配合比见表 1。

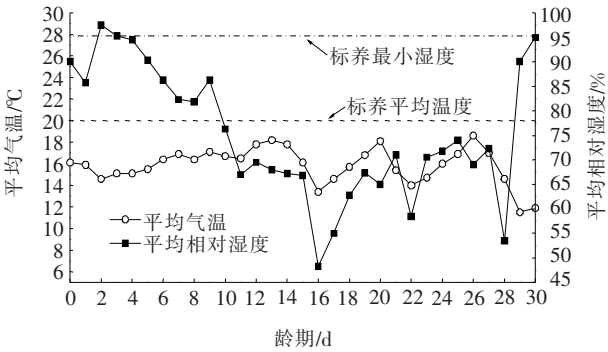


图 7 环境温度及相对湿度变化

试件养护达到相应龄期后,根据 GB 50081—2002 《普通混凝土力学性能试验方法标准》中混凝土立方体

抗压强度、棱柱体抗压强度及弹性模量试验方法进行      测试。测试结果如表 2 所示。

表 1    嘉鱼长江公路大桥 C55 混凝土配合比

水泥 (P. O. 52.5 级)/(kg · m <sup>-3</sup> )	细骨料 (中砂)/ (kg · m <sup>-3</sup> )	粗骨料/ (kg · m <sup>-3</sup> )		水 (井水)/ (kg · m <sup>-3</sup> )	外加剂 (减水剂)/ (kg · m <sup>-3</sup> )	掺合料 (粉煤灰)/ (kg · m <sup>-3</sup> )	水灰比	水胶比
		5.1 mm	10.2 mm					
333	720	348	811	125	5.71	143	0.482	0.337

测试结果表明:现养试件 3、5、7 以及 28 d 的抗压强度分别为标养试件的 100%、95.8%、92.2% 和 91.6%;现养试件 3、5、7 以及 28 d 的棱柱体抗压强度分别为标养试件的 94.6%、94.3%、89.09% 以及 89.5%。可见,现养条件下混凝土试件的强度低于标

养试件,且随着龄期的增长,不同养护条件的混凝土强度差异增大,主要是由于现场养护下,混凝土所处环境温度 and 湿度低于标养条件,使得现养试块强度低于标养试块,且这种降低会随着龄期的延长更加明显。

表 2    混凝土早龄期力学性能测试结果

加载龄 期/d	立方体抗压强度			棱柱体抗压强度			弹性模量		
	标准养 护/MPa	现场养 护/MPa	现养 标养/%	标准养 护/MPa	现场养 护/MPa	现养 标养/%	标准养护/ (×10 <sup>4</sup> MPa)	现场养护/ (×10 <sup>4</sup> MPa)	现养 标养/%
3	42.2	42.3	100	34.9	33.0	94.6	3.17	3.01	94.9
5	45.2	43.3	95.8	39.4	37.2	94.3	3.32	3.21	97.0
7	49.9	46.0	92.2	46.2	41.2	89.1	3.50	3.38	96.5
28	65.4	59.9	91.6	59.6	53.4	89.5	4.57	4.25	93.0

为分析实际施工条件中箱梁真实的受力状态,对现场养护条件下的棱柱体抗压强度及弹性模量数据进行拟合,得到梁段混凝土在整个施工阶段强度和弹性模量随时间变化的规律。如式(1)、(2)及图 8、9 所示。

$$f_c(t)=(1.07-\frac{2.68}{t+2.50})\times53.4\ (R^2=0.99)$$

(1)

$$E_c(t)=0.55\sqrt{f_c(t)}\ (R^2=0.98)$$

(2)

式中: $f_c(t)$ 、 $E_c(t)$ 分别为现场养护条件下  $t$  时刻混凝土的轴心抗压强度、弹性模量; $R^2$  为决定系数, $R^2$  的值越接近 1,说明回归曲线对观测值的拟合程度越好。

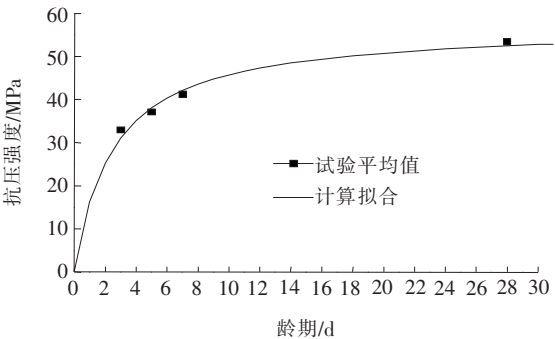


图 8    抗压强度随龄期变化拟合曲线

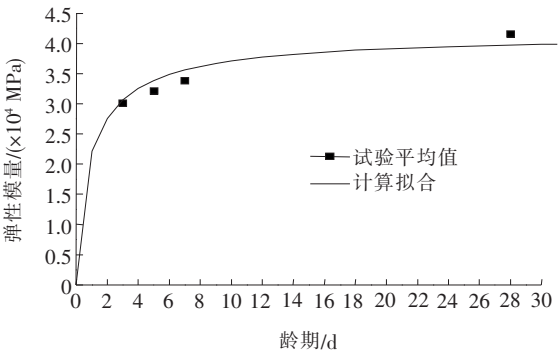


图 9    弹性模量随龄期变化拟合曲线

不同龄期混凝土的抗拉强度可根据式(3)由其立方体抗压强度近似确定,其随龄期变化的曲线如图 10 所示。式中  $f_t(t)$  和  $f_{cu}(t)$  分别为现场养护条件下  $t$  时刻混凝土的抗拉强度和立方体抗压强度。

$$f_t(t)=0.21[f_{cu}(t)]^{2/3}$$

(3)

3.2    箱梁混凝土早龄期收缩应变预测模型

为确定合理的收缩应变预测模型,结合嘉鱼长江公路大桥预制节段箱梁 C55 混凝土收缩应变测试结果,对比了 4 种常用的收缩预测模型,结果如图 11 所示。由图 11 可知:试验结果与 CEB—FIP 2010 模型的计算结果吻合较好,因此该文采用 CEB—FIP 2010



模型预测混凝土的收缩应变发展。

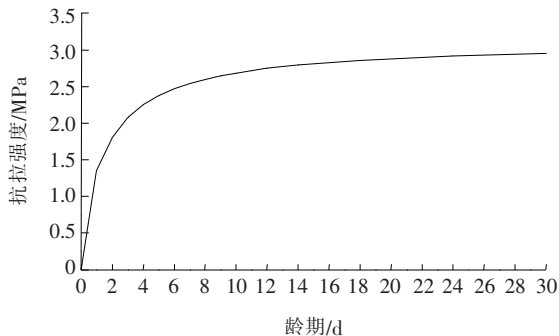


图 10 抗拉强度随龄期变化曲线

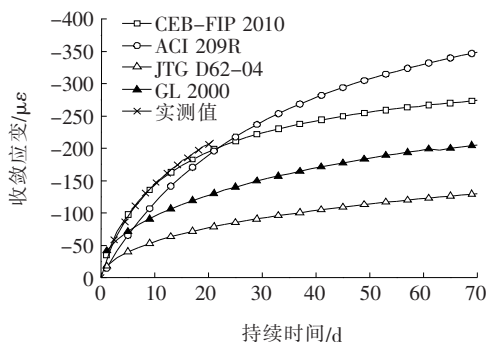


图 11 箱梁混凝土试验值与各规范收缩应变对比

CEB-FIP 2010 模型中混凝土总收缩应变由干缩应变和自收缩应变组成,即:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon_{cs}$  为总收缩应变;  $\epsilon_{cd}$  为干缩应变;  $\epsilon_{ca}$  为自收缩应变。其中干缩应变  $\epsilon_{cd}$  为:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} \quad (5)$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \sqrt{\left(\frac{2A}{u}\right)^3}} \quad (6)$$

$$\epsilon_{cd,0} = 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \times 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (7)$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \left[ 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 \right] \quad (8)$$

式中:  $\beta_{ds}(t, s)$  为混凝土的名义无约束干缩值;  $2A/u$  为构件理论厚度(mm);  $\beta_{ds}(t, s)$  为描述干缩应变与时间和理论厚度相关的系数;  $k_h$  为与理论厚度  $2A/u$  相关的系数;  $f_{cm}$  为混凝土圆柱体 28 d 龄期平均抗压强度(MPa);  $f_{cm0}$  为 10 MPa;  $\alpha_{ds1}$ 、 $\alpha_{ds2}$  为与水泥品种有关的系数;  $RH$  为周围环境相对湿度(%);  $RH_0$  为

100%;  $t$  为混凝土龄期(d);  $t_s$  为干缩开始时的混凝土龄期(d)。

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty) \quad (9)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5}) \quad (10)$$

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \quad (11)$$

式中:  $\beta_{as}(t)$  为描述自收缩应变与时间相关的系数;  $f_{ck}$  为混凝土圆柱体 28 d 龄期抗压强度特征值;  $\epsilon_{ca}(\infty)$  为混凝土收缩应变终极值。

## 4 早龄期混凝土箱梁收缩应力计算

### 4.1 有限元模型建立

采用 Midas/FEA 软件建立嘉鱼长江大桥北边跨混凝土湿接缝及相邻节段的有限元模型。混凝土箱梁采用实体单元进行模拟,建模时考虑相邻节段浇筑间隔为 30 d,网格尺寸均为 0.2 m × 0.2 m,共划分 250 584 个单元。已浇筑节段的梁端采用固结约束;底模对箱梁的约束作用参考实际的模板刚度,采用节点弹性支撑边界模拟,其平均刚度为 450 kN/m。

分析时主要考虑混凝土自重及收缩变形。混凝土自重取 24 kN/m<sup>2</sup>。为方便建模,根据式(12)将混凝土的收缩变形转化为当量温差施加在结构上以模拟收缩作用。

$$\Delta T = \epsilon_c(t) / \alpha \quad (12)$$

式中:  $\epsilon_c(t)$  为龄期  $t$  时的收缩应变;  $\alpha$  为混凝土线膨胀系数,取  $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

### 4.2 分析结果

由有限元分析结果可知:箱梁由于收缩导致的收缩拉应力出现在湿接缝顶板及底板处,且随着时间的推移,箱梁的收缩拉应力逐渐增大。箱梁最大主拉应力出现在湿接缝与相邻节段结合面顶板纵桥向位置,图 12 为箱梁最大主拉应力随的时间变化规律。

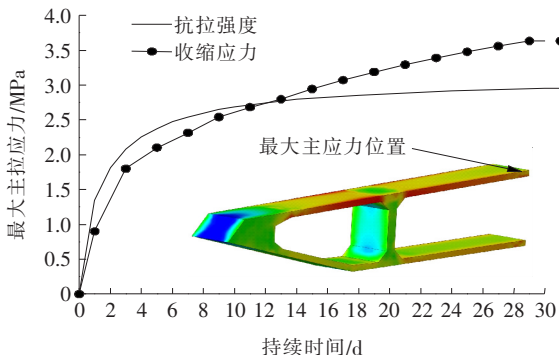


图 12 箱梁最大主拉应力时程曲线

由图12可知:结构内早龄期收缩应力较大,3 d时最大主拉应力达到1.80 MPa,此时混凝土的抗拉强度仅为2.07 MPa,存在开裂风险;11 d时最大主拉应力达到2.68 MPa,接近该时刻混凝土的抗拉强度为2.71 MPa,11 d后超过混凝土的抗拉强度,将引起混凝土开裂。

混凝土的早龄期收缩效应会在箱梁内产生较大的收缩拉应力,将导致箱梁产生早龄期裂缝,有必要在早龄期即进行箱梁的横向预应力张拉。

## 5 早龄期横向预应力张拉方案

### 5.1 湿接缝预应力布置

箱梁横向预应力采用 $\phi 15.2$  mm 高强低松弛钢绞线,抗拉强度标准值为1 860 MPa,张拉控制应力为1 395 MPa,弹性模量为195 GPa。箱梁横向预应力布置如图13所示,其中顶板束N1、底板N2每束分别为4 $\phi 15.2$  mm 钢绞线和3 $\phi 15.2$  mm 钢绞线,横隔板N3每束为19 $\phi 15.2$  mm,均为两端张拉。

### 5.2 预应力张拉方案拟定

常规的预应力施工方法是在湿接缝浇筑前将相邻节段上的横向预应力张拉到位,湿接缝混凝土浇筑完毕3 d并拆除模板后再进行湿接缝内的预应力张拉。而在相邻节段约束作用下,湿接缝内预应力的张拉效应会扩散到相邻节段上,可能导致湿接缝内的预压应力不足。

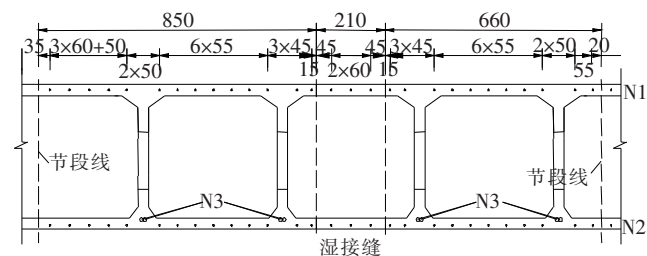


图13 横向预应力的顺桥向布置(单位:mm)

因此,该文提出一个新的预应力张拉方案,即在相邻节段靠近湿接缝位置的部分预应力束先不进行张拉,待湿接缝浇筑完毕后,再与湿接缝段预应力同时进行张拉,而梁段内预留的预应力束数量则需要根据预应力作用的扩散范围来确定。该文利用Midas/FEA分析了单根预应力束N1在结合面顶板位置张拉时箱梁横向受力情况,以结合面顶板中心为坐标原点,箱梁顶板中心的横向应力分布如图14所示。

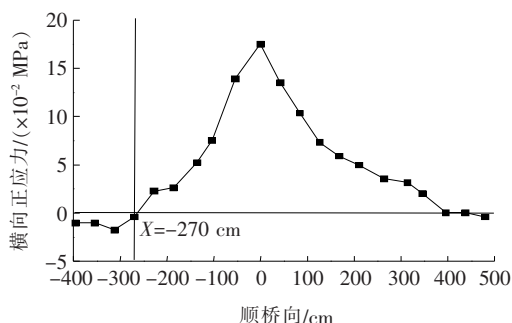


图14 单根预应力束N1张拉后顶板中心横向应力

由图14可以看出:在结合面位置张拉单根预应力,其预压应力传递的横向距离要小于270 cm。因此,在结合面外270 cm的范围内张拉预应力会对结合面产生一定的预压应力,可抵消该处收缩引起的拉应力。基于此,该文提出的方案是预留湿接缝相邻两侧箱梁节段距结合面270 cm内的预应力束,在湿接缝浇筑完毕后,再与湿接缝内的预应力同时进行张拉。此外,为了减少早龄期张拉引起的预应力损失,可在湿接缝浇筑完毕后的第3 d仅张拉到50%张拉控制应力,即697.5 MPa,并在7 d时再补张至100%张拉控制应力,即1 395 MPa。

以常规预应力张拉方案作为方案1,该文提出的方案作为方案2,采用MIDAS/FEA分别对两种方案下湿接缝的受力进行分析。两种方案的湿接缝处最大主拉应力均出现在结合面顶板中心位置,其应力时程曲线的对比如图15所示。

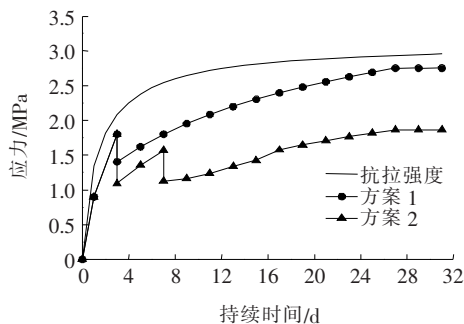


图15 不同方案湿接缝最大主拉应力时程曲线

由图15可知:

(1) 在方案1中,湿接缝最大主拉应力均小于混凝土的即时抗拉强度,箱梁3 d时最大主拉应力由1.80 MPa降低至1.40 MPa,而此时混凝土抗拉强度为2.07 MPa,预应力张拉改善了湿接缝早龄期的受力;但随着时间发展,最大主拉应力28 d时增大至2.75 MPa,而此时混凝土抗拉强度仅为2.96 MPa,存在开裂风险。

(2) 若按方案 2 进行张拉,湿接缝 3 d 的最大主拉应力仅为 1.09 MPa,比原方案降低了 22.2%;随着时间发展,最大主拉应力在 28 d 时为 1.86 MPa,远低于 28 d 时混凝土抗拉强度 2.96 MPa,28 d 应力比原方案降低了 32%,混凝土箱梁在早龄期时开裂风险显著降低。

综上所述,与常规预应力张拉方案对比,该文提出的预应力张拉方案有效改善了湿接缝的受力,显著降低了混凝土箱梁在早龄期时的开裂风险,保证了箱梁在早龄期的抗裂性要求。

## 6 结 论

基于嘉鱼长江公路大桥 C55 混凝土力学性能测试,结合试验选取合适收缩应变预测模型,建立有限元模型,分析在早龄期收缩效应下箱梁收缩效应,并对不同的横向预应力张拉方案进行了分析,得到以下结论:

(1) 湿接缝在混凝土收缩和相邻节段约束作用下,其在混凝土浇筑后第 3 d 由收缩导致的拉应力达到了 1.80 MPa,该龄期混凝土抗拉强度仅为 2.07 MPa,存在开裂风险。且随着龄期的增大,收缩应力在 11 d 后会超过混凝土的抗拉强度,因此为了降低混凝土拉应力,在早龄期进行预应力的张拉是必要的。

(2) 在常规预应力张拉方案下,湿接缝内预应力的张拉效应会扩散到相邻节段上,导致湿接缝内的预压应力不足,湿接缝 28 d 最大主拉应力为 2.75 MPa,而此时混凝土抗拉强度为 2.96 MPa,存在开裂风险。

(3) 若按该文提出的方案进行张拉,湿接缝早龄期最大主拉应力比常规方案降低了 22.2%~32%,保证了箱梁在早龄期的抗裂性要求。建议施工时,相邻节段靠近湿接缝位置的部分预应力束先不进行张拉,待湿接缝浇筑完毕后,与湿接缝段预应力同时张拉。

## 参考文献:

- [1] 龚勇,程涛. 宽幅混凝土箱梁的横向收缩应变差分析[J]. 桥梁建设,2013(3).
- [2] 谢峻,王国亮,郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技,2007(1).
- [3] 王英飞,董伟. 混凝土收缩徐变效应对矮塔斜拉桥索力的影响评价研究[J]. 中外公路,2018(3).
- [4] X. T. Si, Francis T. K. Au. Accurate Time-Dependent Analysis of Concrete Bridges Considering Concrete Creep, Concrete Shrinkage and Cable Relaxation[J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 118-126.
- [5] Arezki Tagnit-Hamou, Mohammed Seddik Meddah. Evaluation of Rate of Deformation for Early-Age Concrete Shrinkage Analysis and Time Zero Determination [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 1076-1086.
- [6] 李小祥,石雪飞,阮欣,等. 中美规范下大跨径梁桥混凝土结合面收缩效应比较[J]. 土木建筑与环境工程, 2009(5).
- [7] JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(附条文说明)[S].
- [8] 许大晴,方正东. 矮塔斜拉桥节段结合面混凝土收缩效应分析[J]. 山西建筑,2016(33).
- [9] 涂兵. 混凝土收缩预测模型及拼宽桥梁结构的收缩效应[D]. 湖南大学硕士学位论文,2013.
- [10] 许巧. 早龄期混凝土的物理力学性能及其拉伸与压缩徐变试验研究[D]. 湖南科技大学硕士学位论文,2017.
- [11] GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [12] 田丽,毛永琳,阎坤. 不同养护条件对混凝土抗压强度的影响[J]. 工程地质学报,2007(S1).
- [13] 蔡绍怀,左怀西. 高强混凝土的抗裂强度[J]. 土木工程学报,1992(2).
- [14] ACI Committee 209. Prediction of Creep and Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures[R]. Michigan: American Concrete Institute, 1997: 1-92.
- [15] Garder NJ, Lockman MJ. Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(2): 159-167.
- [16] CEB-FIP Model Code 2010, Design code[S].
- [17] 杨文. 主跨钢箱梁混合架设的大跨混合梁斜拉桥施工控制研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2017.
- [18] 傅学怡,吴兵. 混凝土结构温差收缩效应分析计算[J]. 土木工程学报,2007(10).