

简支转连续 T 梁桥湿接缝受力模拟与实测分析

张宇^{1,2}, 单衍勇³, 李超¹, 田利¹

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要 目的 研究装配式简支转连续 T 梁桥湿接缝的受力性能。方法 依托京雄高速公路, 建立全桥梁格有限元模型, 并对湿接缝受力进行现场实测分析。在数值模拟与实测结果吻合的基础上, 基于有限元模型, 对简支转连续施工工序和墩顶湿接缝宽度进行优化。结果 装配式 T 梁桥简支转连续过程中, 负弯矩区预应力张拉对湿接缝受力影响最大, 其次是二期恒载, 而体系转换对其影响有限。湿接缝早期弹性模量、截面非均匀收缩、配筋率以及环境温度对现场应力监测结果均有影响, 特别是早期弹性模量和截面非均匀收缩。简支转连续施工工序对成桥初期受力影响较大, 但对长期受力性能影响较小。对本项目而言, 在不增设负弯矩区预应力的前提下, 湿接缝宽度可适当增加但不宜超过 1.1 m。结论 湿接缝实测应力应根据混凝土早期弹性模量和截面非均匀收缩等因素进行修正。施工顺序需考虑桥梁成桥初期和长期性能需求。适当增加湿接缝宽度可提高经济跨度, 但应注意墩顶截面抗裂性。

关键词 简支转连续; 装配式 T 梁桥; 湿接缝; 应力监测; 湿接缝宽度

中图分类号 TU528.571; U445.4 文献标志码 A

Mechanical Simulation and Field Investigation of the Wet-joints of Simply Supported-to-continuous T-beam Bridges

ZHANG Yu^{1,2}, SHAN Yanyong³, LI Chao¹, TIAN Li¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan, China, 250061; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 3. Shandong Hi-speed Engineering Construction Group Co. Ltd., Ji'nan, China, 250014)

Abstract: In this paper, the behavior of the wet-joints of prefabricated simply supported-to-continuous T-girder bridge was studied based on the Beijing-Xiong'an Highway project. Finite element analysis was carried out by a beam lattice model, and field investigation was conducted for

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208178); 山东省自然科学基金项目(ZR2022QE128); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP22219)

作者简介: 张宇(1991—), 男, 博士, 主要从事混凝土及钢-混凝土组合结构桥梁等方面研究。

mutually corroboration. On the basis of the anastomosis between the numerical simulation and the field investigation results, the construction sequence and the selection of wet-joint width at the top of the pier were optimized through a finite element analysis. The results show that, during construction process, the prestress tensioning in the negative moment zone has the greatest influence on the stress state of wet-joints followed by the dead load of wearing surfaces and utilities, while the influence of system conversion is limited. The early elastic modulus of concrete, non-uniform shrinkage of concrete along the cross-section, reinforcement ratio and ambient temperature all have a large influence on the measured stress, which should be corrected, especially the early elastic modulus of concrete and non-uniform shrinkage. The theoretical thickness of each measurement point should be calculated separately. The construction process has a large impact on the initial stresses of the bridge, but has a small impact on the long-term stress performance considering the concrete creep. Under the premise of no additional prestressing in the negative moment area, the wet-joint width can be increased appropriately to improve the economic span, but attention should be paid to the crack resistance of the pier top section. For this project, the maximum wet-joint width should not exceed 1.1 m.

Key words: simply supported-to-continuous; prefabricated T-beam bridge; wet-joint; stress monitoring; wet-joint width

装配式预应力混凝土 T 梁桥具有结构简单、受力明确、节省材料、架设方便等特点,在中小跨径桥梁中被广泛应用。简支转连续梁桥因拥有良好的力学性能和桥面连续性而逐渐成为主流。研究表明,湿接缝在施工过程中受力复杂,受收缩、徐变影响较大,为上部结构的薄弱位置。因此,针对简支转连续 T 梁桥湿接缝受力性能进行研究具有重要意义。

长久以来,如何提高简支转连续梁桥湿接缝施工质量及受力性能的问题一直受到众多学者的关注。F. Menkulasi^[1]考虑了梁间距及跨度配置,通过对预制混凝土梁时变进行参数化分析,研究了简支桥梁连续性的要求,并确定了最佳连续性下的最小龄期。S. R. Mašović^[2]进行了后浇湿接缝的两跨预制连续梁长期行为试验,分析了混凝土的收缩、徐变对混凝土裂缝产生的影响程度,并提出了简化计算方法。张巨松等^[3]研究了不同水灰比、不同矿物外加剂对硅酸盐水泥收缩变形的影响。张宇等^[4-7]研究了梁格和空间网格等实用精细化有限元模型,为湿接缝的受力模拟提供了支撑。

综合以上研究可知,针对 T 梁桥湿接缝

截面非均匀收缩方面的认识仍然不足,导致现场测试很难真正起到应力监控的目的。其次,针对 T 梁桥湿接缝施工过程及长期徐变后的应力变化规律还不完善,特别是缺少有限元计算和现场实测结果的对比分析,限制了理论研究对工程实际的指导作用。基于此,笔者依托京雄高速工程,针对湿接缝受力开展了有限元分析和现场测试,前者基于梁格模型,考虑施工过程及混凝土的收缩、徐变特性,后者采用埋入式振弦应变计,考虑湿接缝浇筑早期弹性模量、截面非均匀收缩、本身配筋率以及环境温度对应力换算的影响。在数值模拟与实测结果吻合的基础上,进一步探讨了简支转连续施工工序以及墩顶湿接缝宽度对桥梁整体及湿接缝受力的影响。

1 有限元分析

1.1 工程概况及有限元模型

京雄高速泗庄枢纽互通段工程,采用三跨一联装配式 T 梁桥,单跨跨度为 30 m。桥梁上部结构截面尺寸如图 1 所示,共 8 片 C50 预应力钢筋混凝土 T 梁,总宽 16.749 m,其中边梁宽 1.8 m,中梁宽 1.6 m,

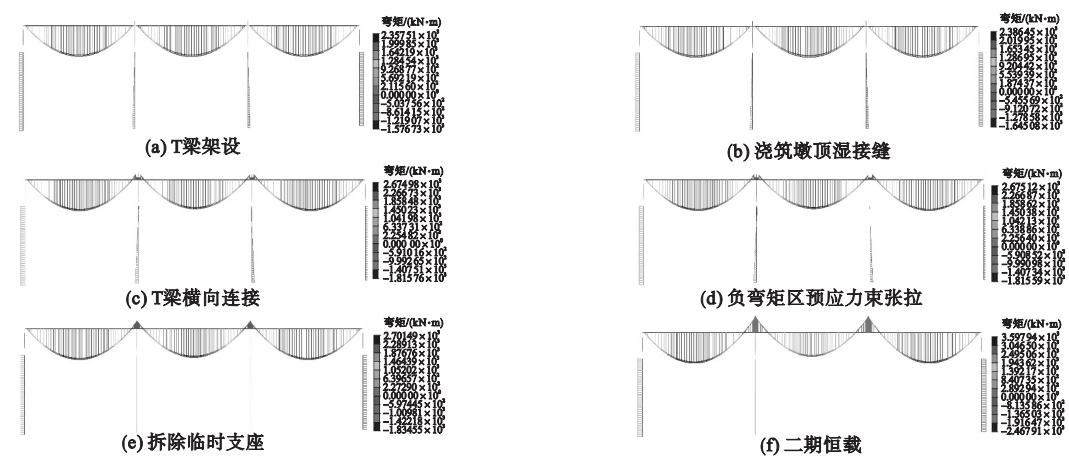


图 5 简支转连续各施工阶段弯矩图(只计入恒载)

Fig. 5 Bending moment diagram during simply supported-to-continuous process(only dead load)

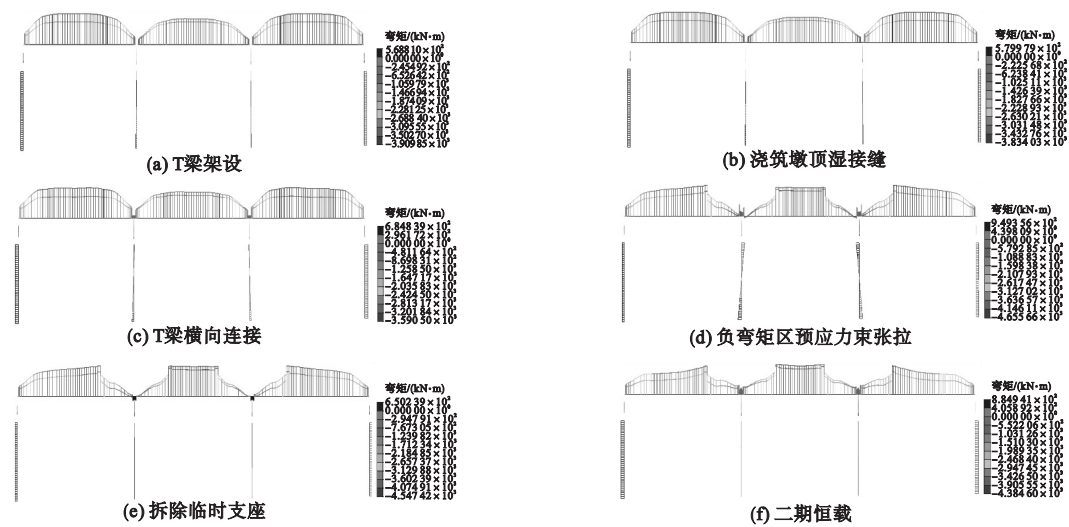


图 6 简支转连续各施工阶段弯矩图(计入恒载+预应力+收缩徐变)

Fig. 6 Bending moment diagram during simply supported-to-continuous process(dead load + prestressing + concrete shrinkage and creep)

以 26#桥墩湿接缝为例,各施工阶段中 湿接缝应力见表 2。

表 2 26#桥墩湿接缝各施工阶段截面最大应力

Table 2 Maximum stress of wet-joint over 26# pier at each construction stage MPa

施工阶段	工况内容	26#桥墩湿接缝截面最大应力			
		边梁		中梁	
		上缘	下缘	上缘	下缘
CS1	T 梁架设	—	—	—	—
CS2	湿接缝浇筑	-0.03	0.02	-0.02	0.015
CS3	横向连接	0.51	-0.70	0.58	-0.83
CS4	负弯矩张拉	-3.95	-1.30	-3.70	-1.45
CS5	拆除临时支座	-3.68	-1.62	-3.8	-1.8
CS6	二期恒载	-3.24	-4.02	-3.39	-4.57

由表2可知,湿接缝浇筑后早期应力较小,表明早期收缩、徐变引起的体系内力改变有限,T梁间横向连接使墩顶湿接缝承受了一定的负弯矩,但应力幅较小,负弯矩张拉是简支转连续施工过程的关键,为墩顶湿接缝建立了压应力储备,其中上缘为 $-3.70\sim-3.95\text{ MPa}$,下缘为 $-1.30\sim-1.45\text{ MPa}$ 。拆除临时支座,即体系转换,对湿接缝和桥梁整体受力的影响较小。二期恒载相当于在连续梁体系上施加均布荷载,增加了墩顶的负弯矩,使墩顶湿接缝下缘压应力增长较大。

2 简支转连续湿接缝实测分析

2.1 试验概况

为明确简支转连续施工过程中湿接缝的受力规律,在湿接缝内预埋振弦式应变计。测点布置如图7(a)所示:四处湿接缝测点分别为边梁1、边梁2、中梁1、中梁2,每处截面内布设6个测点,位于截面上翼缘和马蹄部分(见图7(b)),全桥共24个测点。对简支

转连续过程中的重要施工阶段进行测点的应变、温度数据采集,包括湿接缝浇筑、混凝土养护3 d、混凝土养护7 d、负弯矩预应力张拉、孔道压浆、混凝土养护14 d、桥面铺装、混凝土养护21 d和混凝土养护28 d。

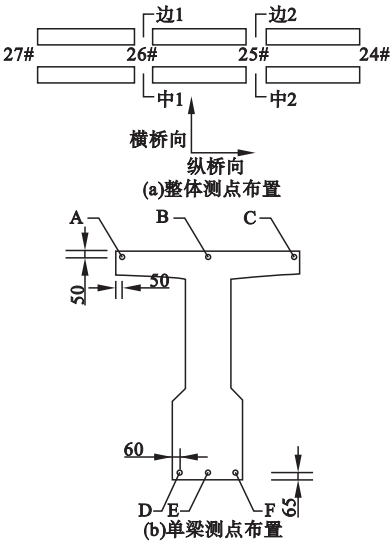


图7 应变计布置图

Fig. 7 Strain gauge layout
各测点应变实测结果如图8所示。

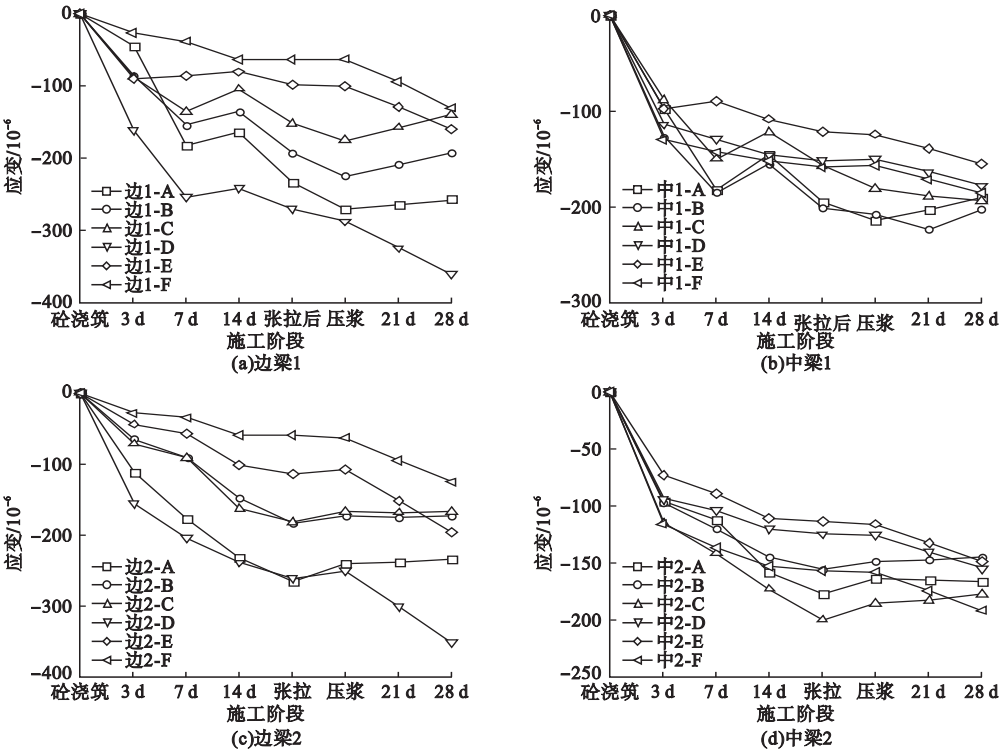


图8 各测点应变数据

Fig. 8 Strain data of each measuring point

由图 8 可知,湿接缝浇筑 7 d 内应变增长较大,此时湿接缝尚未参与受力,应变增长主要由混凝土收缩导致。此外湿接缝截面呈现明显的非均匀收缩的特点,边梁收缩应变明显大于中梁,尤以湿接缝上翼缘外侧测点 A 和马蹄外侧测点 D 最为显著,分析原因主要是由于该测点与外界环境发生湿度交换的速率更快。

2.2 结果分析

实测应变混合了温度、混凝土收缩、混凝土徐变等非应力应变因素,且早期的混凝土弹性模量是不断递增的,在 28 d 后才基本趋于稳定,因此若将实测应变直接乘以混凝土 28 d 的弹性模量,所得的应力结果将与实际存在较大误差^[9],笔者将对此进行修正。

本项目 C50 混凝土实测 28 d 抗压强度试验值 $f_{cu,k}=63.6$ MPa,根据《混凝土结构设计规范(GB 50010—2015)》^[10],其 28 d 弹性模量可按式(1)进行转换,计算结果为 3.64×10^4 MPa。

$$E_{c0} = \frac{100\,000}{\left(2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}\right)} \tag{1}$$

混凝土早期有效弹性模量可参照《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)^[11]估算,计算见式(2),3 d、7 d、14 d 计算结果为 0.861×10^4 MPa、 1.701×10^4 MPa、 2.607×10^4 MPa。

$$E(t) = \beta E_{c0} (1 - e^{-\varphi t}) \tag{2}$$

式中: t 为混凝土龄期; E_{c0} 为混凝土 28 d 弹性模量; β 为掺合料修正系数; φ 为系数,一般取 0.09。

应变计实测应变本身受到环境温度的影响,其增量应按式(3)进行修正:

$$\Delta \varepsilon_{\text{修}} = (\varepsilon_i - \varepsilon_0) + (\alpha_s - \alpha_c)(T - T_0) \tag{3}$$

式中: T 为测量温度; ε_i 为测量应变; T_0 为初始温度; ε_0 为初始应变; α_s 为应变计钢弦线膨胀系数,取 $12.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; α_c 为被测结构物的线膨胀系数,取 $10.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。各测点实测温度结果如图 9 所示。

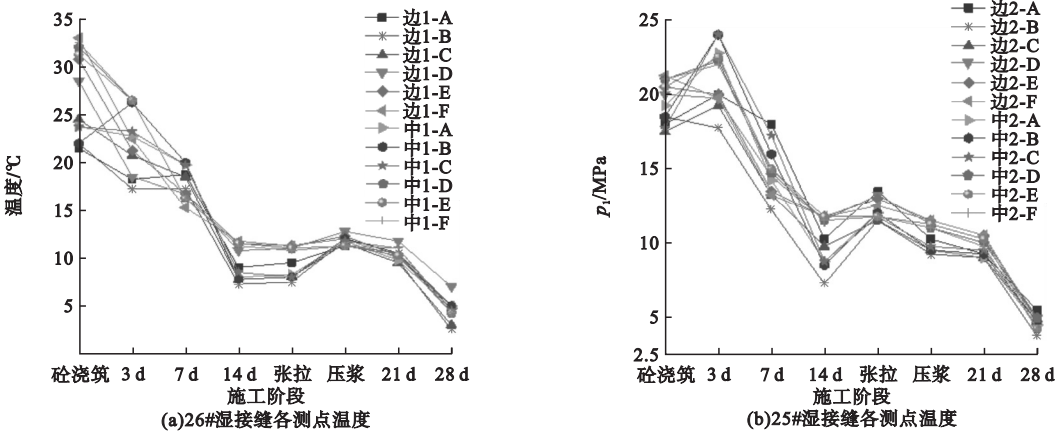


图 9 各测点温度结果

Fig. 9 Temperature data of each measuring point

湿接缝实测应变还包含了混凝土自身收缩的影响,其计算参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG 3362—2018)》^[8]进行。其中,环境年平均相对湿度 RH 取 55%,混凝土平均圆柱体抗压强度通过公式 $f_{cm} = 0.8f_{cu,k} + 8$ MPa,换算得 58.88

MPa,进一步计算可得名义收缩系数 $\varepsilon_{cs0} = 407.65 \times 10^{-6}$ 。现场实测应变表明,T 梁截面各测点收缩的速度不完全相同,特别在早期收缩阶段,这是因为各测点与外界环境发生湿度交换的速率不同,靠近外表的混凝土水分蒸发更快,收缩速度也更快。传统计算

方式中,采用“截面各位置纤维按同样的规律收缩”的原则计算收缩应变,对于大截面混凝土构件来说,显然是不正确的^[11-12]。因此,在进行收缩应变修正时,应分别计算截面各测点自身的理论厚度,计算如下:

$$h=2A/u.$$

(4)

式中: A 为截面积; u 为构件与大气接触的周边长度。计算示意图如图 10 所示。

各测点收缩应变曲线如图 11 所示,图例

括号内的数字为各测点理论厚度计算值。

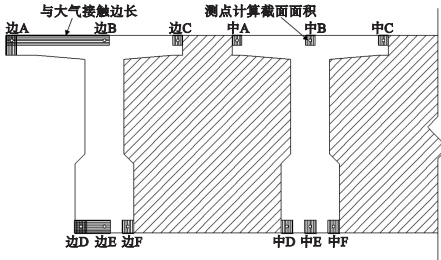


图 10 理论厚度计算图示

Fig. 10 Diagram of theoretical thickness calculation

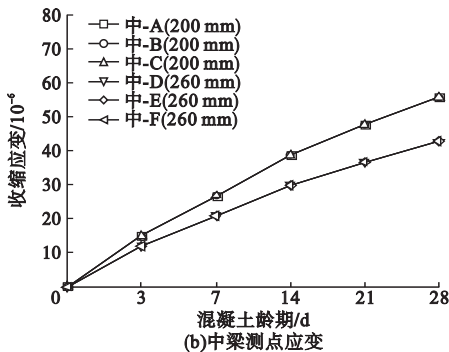
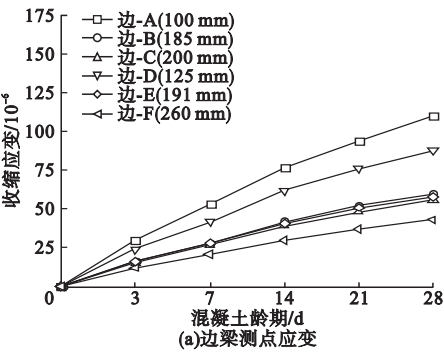


图 11 测点收缩应变曲线

Fig. 11 Shrinkage strain curves of measuring points

对于钢筋混凝土构件,尤其是混凝土强度达到 C50 及以上时,混凝土收缩量大小不仅与混凝土本身有关,还受到钢筋的影响,在相同条件下,钢筋混凝土收缩量明显小于素混凝土,可通过钢筋约束影响系数对收缩应变进行修正^[13]:

$$K_{S,Sh}(t,t_0)=\frac{1}{1+\rho\mu n[1+0.82\varphi(t,t_0)]}.$$

(5)

式中: $\rho=1+e^2/r^2$, e 为混凝土截面重心至钢筋重心的距离, r 为混凝土截面的回转半径; μ 为钢筋配筋率; n 为钢筋与混凝土弹性模量比值; $\varphi(t,t_0)$ 为混凝土徐变系数。

根据混凝土有效弹性模量和修正后测点的应变,计算各测点修正后的应力结果,得到湿接缝 1 处测点换算应力结果如图 12 所示。

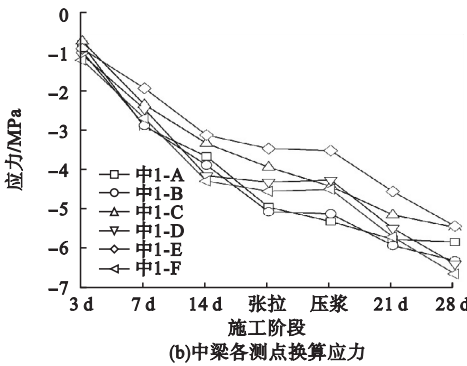
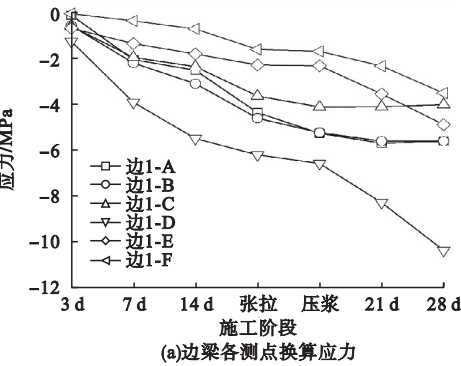


图 12 测点换算应力曲线

Fig. 12 Converted stress curves of measuring points

由图 12 可知,墩顶湿接缝从浇筑至桥面铺装完成,整体以受压为主,特别是负弯矩区

预应力张拉后,截面压应力增长较大,随着二期恒载的施加,墩顶湿接缝截面为负弯矩增

量,因此截面下缘测点压应力增长较大,而上缘测点压应力出现略微降低。

2.3 有限元计算与实测结果对比

分别从边梁、中梁的上部和底部各取一个测点,将有限元分析结果与现场测试结果对比,结果如图 13 所示。

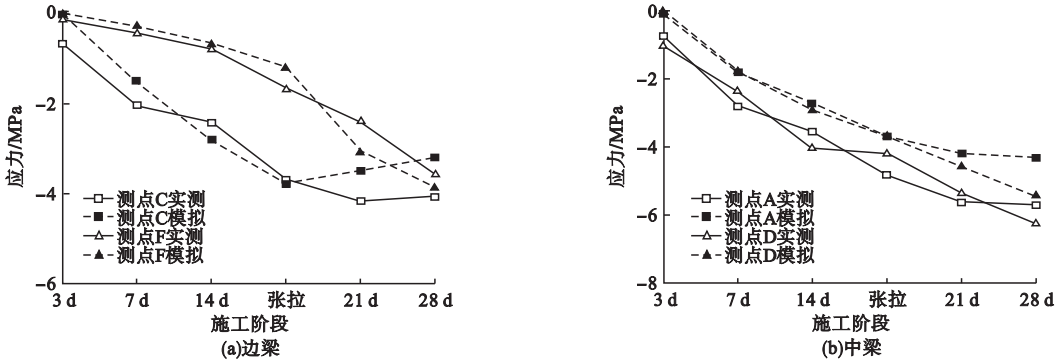


图 13 实测换算应力与有限元计算应力对比
Fig. 13 Comparison of measured and FEM calculated stresses

由图 13 可知,二者整体规律基本吻合,误差主要来自材料参数的不确定性、环境对实测数据的影响以及施工过程中的干扰。

3 湿接缝参数优化分析

3.1 桥梁简支转连续施工工序分析

T 梁架设完成后,可先浇筑 T 梁间的横向连接湿接缝(施工顺序一),也可先浇筑墩顶湿接缝完成纵向连接(施工顺序二)。为研究这两种施工顺序对桥梁受力的影响,取边跨边梁和中跨边梁的跨中截面,以及边梁、中梁的墩顶截面作为关键截面,基于有限元模型计算其位移、弯矩及应力,结果如图 14 ~ 图 16 所示。

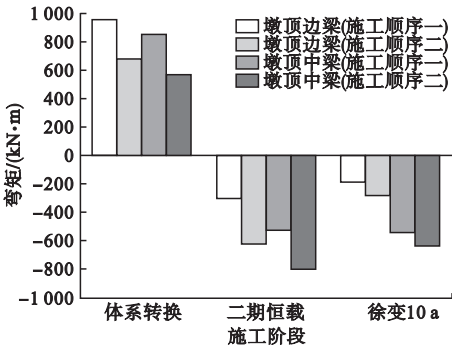


图 15 关键截面弯矩对比
Fig. 15 Bending moment comparison of key sections

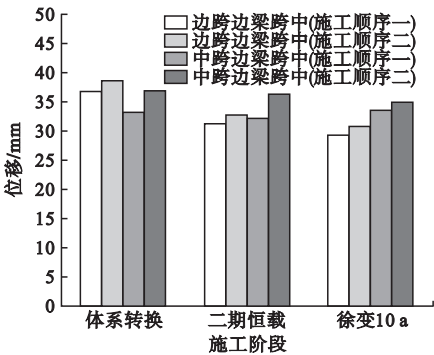


图 14 关键截面位移对比

Fig. 14 Displacement comparison of key sections

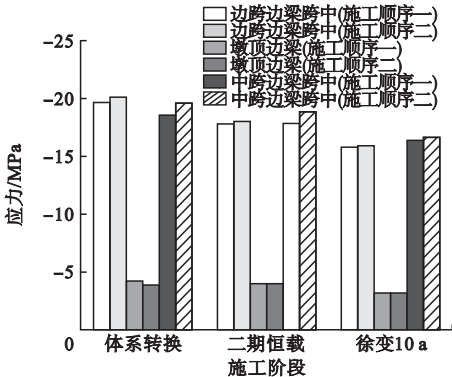


图 16 关键截面应力对比

Fig. 16 Stress comparison of key sections

由图可知,不同施工顺序导致桥梁位移、内力分布有所差异,具体来说,相较于施工顺序一,施工顺序二在体系转换、二期恒载阶段的跨中上挠值(预应力反拱)更大,同时墩顶负弯矩也更大。造成上述现象的原因在于,

施工顺序二更早地形成了连续梁体系,将横向连接湿接缝的重量以连续梁受力的形式进行承担。应力层面的规律与位移、内力类似,但由于预应力的存在,差异有所减小。在成桥徐变十年后,无论位移、内力还是应力,两种施工顺序带来的差异大大减小。所以,考虑桥梁成桥初期受力性能,施工顺序二更符合成桥受力特点,但考虑桥梁长期受力性能,则两种施工方法的差别有限。

3.2 墩顶湿接缝宽度研究

简支转连续 T 梁桥两跨之间通过墩顶湿接缝连接。在不改变预制梁长度的情况下,微调墩顶湿接缝宽度会改变桥梁跨径,同时由于临时支撑与永久支撑的距离发生改变,桥梁结

构体系受力会受到一定影响。为研究墩顶湿接缝宽度的影响,按 0.2 m 级差设定湿接缝宽度,即 0.5 m,0.7 m,0.9 m,1.1 m,1.3 m,1.5 m,其中 0.7 m 为原设计值。

成桥及活载作用下,不同湿接缝宽度的桥梁各关键截面位移变化趋势见图 17。由图可知,随着湿接缝宽度的增大,恒载或活载作用下,边跨、中跨跨中位移均呈减小趋势(下挠),但变化量不大,湿接缝宽度 1.5 m 相比 0.5 m 而言,成桥状态下,挠度增幅约为 0.6%~2%,活载作用下,挠度增幅稍大,约为 6%~7%,恒、活载共同作用下,挠度增幅约为 2.4%~3.6%。成桥状态增幅较小的原因为正弯矩区预应力充足,使桥梁上拱,位移基数大。

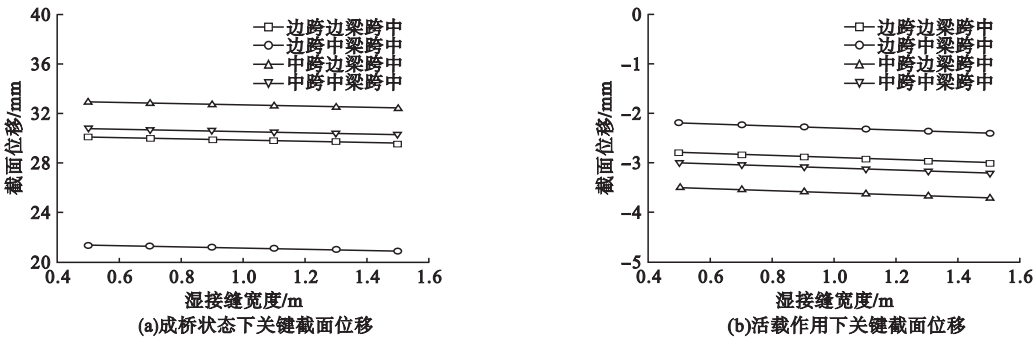


图 17 不同湿接缝宽度桥梁关键截面位移

Fig. 17 Displacement of key sections with different wet-joint widths

成桥及活载作用下,不同湿接缝宽度的桥梁墩顶截面弯矩变化趋势见图 18。由图可知,随着湿接缝宽度的增大,墩顶负弯矩呈增大趋势,成桥状态下增幅较大,约为 37%~44%,活载作用下增幅较小,约为 3%~5%,

恒、活载共同作用下,增幅约为 13.3%~14.4%。成桥状态增幅较大的原因为负弯矩区预应力平衡了一部分由二期恒载形成的负弯矩,负弯矩基数较小,因此更敏感。

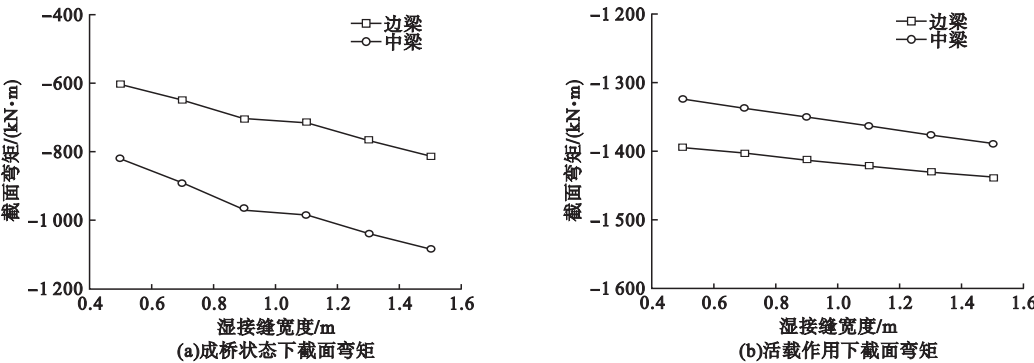


图 18 不同湿接缝宽度下墩顶截面弯矩

Fig. 18 Bending moment of section over pier under different wet-joint widths

综合图17、图18可知,湿接缝宽度的增加对墩顶区域的影响较跨中区域更大,原因是简支转连续T梁桥的墩顶负弯矩绝对值较跨中正弯矩要低,预应力储备也远不如跨中正弯矩区充足(见图5、图6),其上缘更容易发生开裂,因此是湿接缝宽度设计的关键控制指标。对于本例,当湿接缝宽度大于1.1 m时,墩顶截面上缘在恒载、活载共同作用下将出现拉应力(消压),面临开裂风险,故建议湿接缝宽度最大不超过1.1 m。

4 结 论

(1)在装配式T梁桥简支转连续施工过程中,负弯矩区预应力张拉对湿接缝截面应力影响最大,为湿接缝建立了压应力储备,其次是二期恒载,而体系转换对其影响有限。

(2)实测应变换算为应力时需考虑混凝土早期弹性模量、截面非均匀收缩、配筋率及环境温度修正,其中截面非均匀收缩各测点的理论厚度需单独计算。

(3)先浇筑墩顶湿接缝后完成T梁横向连接能够更好地利用连续梁体系,但考虑长期徐变,由施工顺序带来的差异大大减小,实际施工顺序可根据桥梁成桥初期和长期性能需求灵活选用。

(4)对于简支转连续T梁桥而言,湿接缝宽度的增加对墩顶区域的影响较跨中区域更大。适当增加湿接缝宽度可提高经济跨度,但应注意墩顶截面抗裂性,对于本项目,在不增设负弯矩区预应力的前提下,湿接缝宽度不宜超过1.1 m。

参考文献

- [1] MENKULASI F, PATEL A, BAGHI H. An investigation of AASHTO's requirements for providing continuity in simple span bridges made continuous [J]. *Engineering structures*, 2018, 158: 175 – 198.
- [2] MAŠOVIĆ S R, STOŠIĆ S R, PEČIĆ N P. Research of long-term behaviour of non-prestressed precast concrete beams made continuous [J]. *Engineering structures*, 2014, 70: 11 – 22.
- [3] 张巨松, 杨奇, 李宗阳. 水灰比、矿物外加剂对水泥的收缩变形实验[J]. 沈阳建筑大学学报

(自然科学版), 2012, 28(3): 521 – 526.

- (ZHANG Jusong, YANG Qi, LI Zongyang. Experimental study on shrinkage strain of cement with different water-cement ratio and mineral admixture [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2012, 28(3): 521 – 526.)
- [4] ZHANG Y, XU D. Application of the corresponding force matrix in analysis and reinforcement design of concrete box bridges [J]. *Structural engineering international*, 2022, 32(2): 175 – 182.
- [5] HU F J, LU Y, ZHANG X, et al. General design and key technology of Nanchang Chaoyang bridge [J]. *Structural engineering international*, 2019, 29(2): 319 – 325.
- [6] ZHANG Y, XU D, LIU C. Behavior and stress check of concrete box girders strengthened by external prestressing [J]. *Computers and concrete*, 2018, 22(2): 133 – 142.
- [7] XU D, ZHANG Y, XU F, et al. Unified flexural design method for deep and shallow beams using non-linear grid model [J]. *Structural engineering international*, 2017, 27(4): 482 – 491.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.)
- [9] 赖凛. PC梁桥现场应力测试数据计算修正研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
(LAI Li. Research on how to modify data in PC girder bridge stress testing [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for construction of mass concrete: GB 50496—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.)
- [12] 许航, 谭景文, 李隆. 截面非均匀收缩对大跨径混凝土箱形梁桥长期变形的影响[J]. 公路, 2010(4): 99 – 103.
(XU Hang, TAN Jingwen, LI Long. Influence of section non-uniform shrinkage on long-term deformation of long-span concrete box girder bridge [J]. *Highway*, 2010(4): 99 – 103.)
- [13] 胡狄. 预应力混凝土桥梁时变效应分析的钢筋约束影响系数法[J]. 工程力学, 2006(6): 120 – 126.
(HU Di. Reinforcement restraint influence coefficient method for time-varying effect analysis of prestressed concrete bridges [J]. *Engineering mechanics*, 2006(6): 120 – 126.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)