

大跨连续刚构桥精细化施工控制计算

许祥贵¹ 袁帅华² 刘斌²

(1. 中交一公局第四工程有限公司 南宁市 530031; 2. 湖南科技大学土木工程学院 湘潭市 411201)

摘要: 施工控制是保障大跨连续刚构桥顺利建成的重要措施。随着桥梁建设质量标准越来越高, 对施工控制的要求也越来越精细。施工控制计算是精细施工控制的基础, 本文在总结以往连续刚构桥施工控制计算研究的基础上, 提出连续刚构桥精细化施工控制计算方法。采用桥梁有限元通用计算软件对连续刚构桥的施工过程进行精细仿真分析, 通过研究桥面纵坡、桩基础、温度效应、临时荷载、结构刚度、自重、预应力等参数对计算模型的影响, 修正计算模型, 使计算模型更符合工程实际。

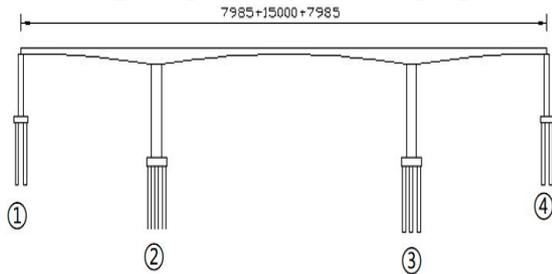
关键词: 连续刚构桥; 施工控制; 精细化; 计算

施工控制是大跨连续刚构桥施工全过程中的关键问题, 施工控制计算是实施施工控制的基础, 计算模型的准确性将直接影响到施工控制的效果, 因此在模型的建立时必须考虑各种影响模型准确性的因素, 建立一个精度比较高的计算模型。目前已有不少学者研究了连续刚构桥施工控制的计算方法^[1-6], 但已有研究大多侧重于某一个问题的计算, 系统性与全面性不够。随着桥梁建设质量标准的提高, 对施工控制精细化的要求也越来越高, 实现施工控制计算精细化就尤为重要。本文以某连续刚构桥为工程实例建立施工控制计算模型, 分析各种因素对计算模型精度的影响, 根据现场实际情况修正计算模型, 使理论计算与现场实际吻合, 从而实现施工控制计算精细化。

1 工程概况

某连续刚构桥桥型布置见图 1, 跨径布置为 (79.85+150+79.85) m, 主梁为单箱单室、变高度、变截面箱梁。桥梁全长 309.70m, 箱梁根部高度 9.3m, 跨中高度 3.5m, 箱梁根部底板厚 85cm, 跨中底板厚 32cm, 箱梁高度以及箱梁底板厚度按 1.6 次抛物线变化。箱梁顶板宽 12.5m, 箱梁底板宽 6.5m, 翼缘板悬臂长 3.0m。主梁采用挂篮悬臂施工, 箱梁 0 号节段长 11.0m, 每个悬浇“T”纵向对称划分为 17 个节段, 梁段数及梁段长从根部至跨中分别为 6×3.5m、4×4.0m、7×4.5m, 节段悬浇总长 68.5m。边、中跨合龙段长度均为 2m, 边跨现浇段长 3.85m。

主桥施工顺序如下: 进行全桥桩基础、下部结构施工; 搭托架现浇主梁 0#节段; 主梁从 1#节段开始悬臂施工, 对称平衡施工 1#~17#节段; 施工 16#节段时同时搭设托架浇筑边跨现浇段 19#节段; 边跨合龙、中跨顶推, 中跨合龙; 施工桥面系。



单位: cm

图 1 主桥桥型布置图

2 施工控制精细计算

2.1 初始结构计算模型

初始结构计算模型采用梁单元模拟, 本桥上部结构划分为 92 个单元, 2 号墩柱划分为 18 个单元, 3 号墩柱划分为 18 个单元。主桥初始结构计算模型图如图 2 所示。

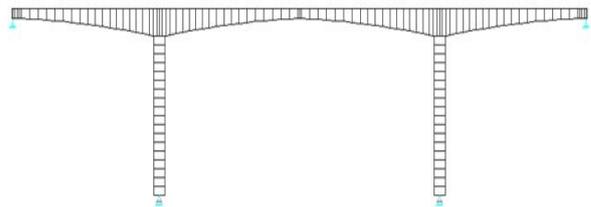


图 2 初始状态下主桥计算模型图

2.2 施工阶段模拟

为了对全桥各个施工阶段开展分析, 详细模拟该桥施工的每个阶段, 从墩身施工、托架现浇、挂篮悬浇、边跨合龙、中跨顶推、中跨合龙、二期恒载等阶段均进行精细模拟, 共 77 个施工阶段。

2.3 计算参数影响分析

在施工整个过程中所建立的计算模型并非是一成不变的, 计算模型必须根据施工实际过程以及现场工程地质情况, 考虑桥面纵坡、桩基础、温度效应、临时荷载以及结构刚度等参数对模型计算的影响, 随时调整理论计算模型使之与施工实际情况相符, 再按修正后的模型确定新的理论计算值, 从而达到高精度计算的目的。

2.4 桥面纵坡影响分析

本桥纵断面位于 0.6% 纵坡上, 但为了充分考虑桥面纵坡的影响, 总共建立五个模型, 各个模型具体情况见表 1 所列。

表 1 计算模型表

名称	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
纵坡	0	0.6%	1.0%	2.0%	3.0%

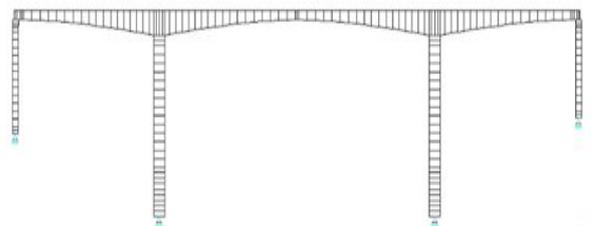


图 3 不考虑纵坡的计算模型 (模型 1)

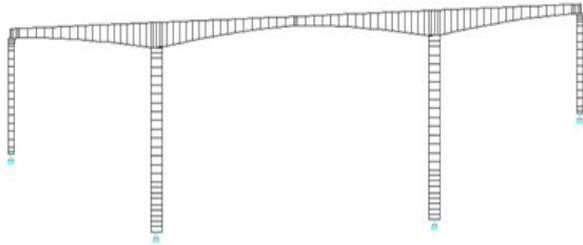


图4 考虑纵坡的计算模型(模型2~5)

通过这五个模型的对比分析,可以得出:桥面纵坡对主梁成桥累计挠度的影响。模型2~5在77施工阶段(成桥后十年收缩徐变)与模型1相比的累计挠度变化见图5。

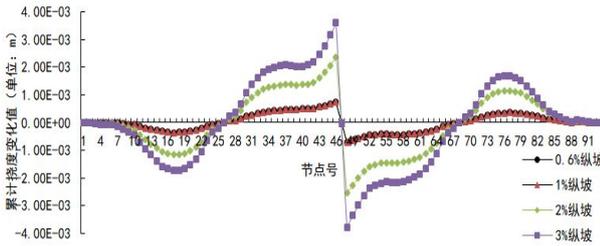


图5 桥面纵坡对主梁累计挠度影响图

由表1及图5可知:桥面纵坡越大,引起的主梁累计挠度变化越大,变化值最大的位置为主跨17号块前端,但在3%纵坡下主跨17号块前端的累计挠度变化也不到4mm,桥面纵坡对主梁挠度的影响不是很明显。

2.5 桩基础影响分析

承台群桩基础是连续刚构桥最常用的基础形式之一,考虑桩土相互作用是建立分析模型的难点。目前通常采用的计算方法是在墩底固结,或者依据某些简化算法,将桩基在一定深度处固结。然而,以固结边界条件替代群桩基础的桩土相互作用,来建立全桥计算分析模型,显然过于简单。以下讨论几种考虑桩土相互作用的集中方法^[7,8]:

(1) 墩底固结模型

在群桩基础总体刚度较大时,取墩底为固结约束,忽略承台以下基础变形对桥跨结构的影响。

(2) 分层文克尔弹簧模型

文克尔假定是考虑桩土相互作用的基本模型之一,将土层分层简化为文克尔弹簧,即假定桩土间的相互作用力与深度和桩身水平位移的乘积成正比,将群桩基础中的每排桩视为弹性地基梁,桩土之间的相互作用由弹簧对梁的水平弹性支承来实现。据此可得:

$$K_i = mb_1(z + z_0)h_i \quad (1)$$

式中, K_i 为每层土弹簧的劲度系数, h 为每一层土的厚度。

(3) 等效子结构模型

将承台及考虑桩土相互作用的桩基看成是整体计算模型中的一个子结构,在此定义它与上部结构连接处的节点为出口节点,将子结构关于其出口节点的刚度称为出口刚度。只要能够保证子结构出口刚度与桥规计算得到的群桩基础的刚度相等,则视其为群桩基础的等效子结构。

就顺桥向而言,对于群桩基础的桩顶(承台底)有4个待定的刚度系数:抗压刚度 K_{pp} 、抗推刚度 K_{hh} (发生单位水平位

移所需要的水平力)、抗弯刚度 K_{mm} (发生单位转角所需要的弯矩),以及相干刚度 K_{hm} 或 K_{mh} (发生单位转角所需要的水平力或发生单位水平位移所需要的弯矩),且 $K_{hm} = K_{mh}$ 。以上4个值均可以由桥规或桩基础计算程序求得。采用以上4个数据,就可以根据以下方法得出计算等效子结构所需要的参数。将此等效子结构组装到桥墩以下,作为整体结构计算模型的一部分。若仅用1根竖向布置的梁做等效群桩基础,由承台顶位移等效以及矩阵逆步变换可以推得以下方程组:

$$\begin{aligned} \frac{EA_b}{L_b} &= K_{pp} & \frac{12EI_b}{L_b^3} &= K_{hh} \\ \frac{4EI_b}{L_b} &= K_{mm} & \frac{6EI_b}{L_b^2} &= K_{km} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: E 为桩基础混凝土弹性模量; I_b 为等效梁的抗弯惯性矩; A_b 为等效梁的截面积; L_b 为等效梁长度。

该连续刚构桥大桥主墩承台厚4.5m,基础采用桩径2.0m的钻孔灌注桩,桩基按纵向三排、横向三排布置,单线每墩共9根桩。由于其桩本身的变形比较小,属于端承桩,故计算中不用考虑桩与地层之间的摩擦力,即不用设置相互作用弹簧。本文考虑桩土效应的计算模型采用的是单梁等效子结构模型。为了考虑桩基础的影响,建立两种群桩基础计算模型:模型1:墩底固结模型;模型2:单梁等效子结构模型。

表2 模型2群桩基础等效参数

桩基位置	弹性模量 (MPa)	等效面积 (m ²)	等效惯性矩 (m ⁴)	等效梁长度 (m)
2号墩	3.25×10^4	39.00	549.25	14.50
3号墩	3.25×10^4	39.00	549.25	14.50

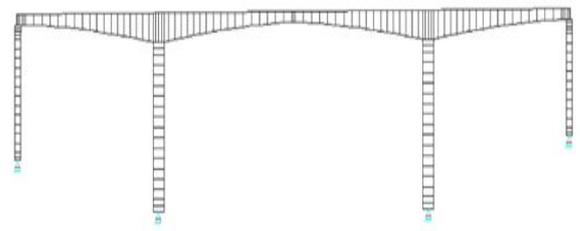


图6 墩底固结模型(模型1)

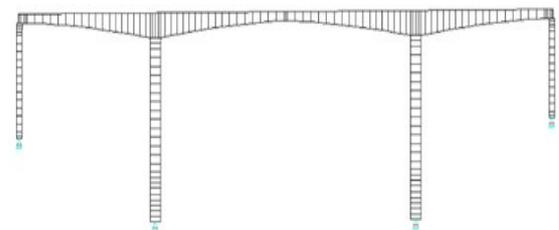


图7 单梁等效子结构模型(模型2)

同理,通过两个模型的对比分析,可以得出:桩基础对主梁累计挠度的影响。模型2相比于模型1在74施工阶段(成桥后)和77施工阶段(成桥后10年收缩徐变)的累计挠度变化见图8。

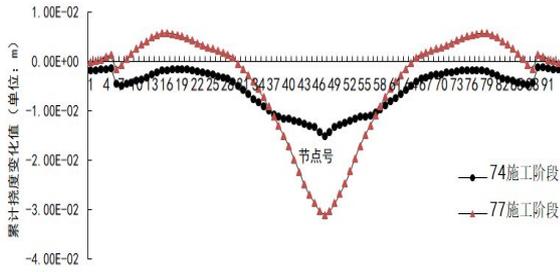


图8 桩基础对主梁累计挠度影响图

由图8可知：是否考虑桩基础对主梁跨中累计挠度影响比较明显，尤其是在成桥后十年收缩徐变时考虑桩基础的模型比墩底固结模型计算的中跨跨中累计下挠要大 3.1cm，因此，在计算模型中，必须考虑桩基础的影响。

2.6 温度效应影响分析

2.6.1 日照温差对主梁挠度的影响

在连续刚构桥悬臂施工阶段，由于太阳辐射使主梁与薄壁墩的向阳面温度升高，而背阳面的温度基本保持不变，由此产生的温差荷载使主梁位移发生变化。取右幅2号墩最大悬臂状态进行计算分析，研究温度差+5℃（向阳面升温5℃）、温度差+10℃（向阳面升温10℃）、温度差+15℃（向阳面升温15℃）对主梁挠度的影响。其分析图式如图9所示，局部温差引起的主梁挠度如图10所示。

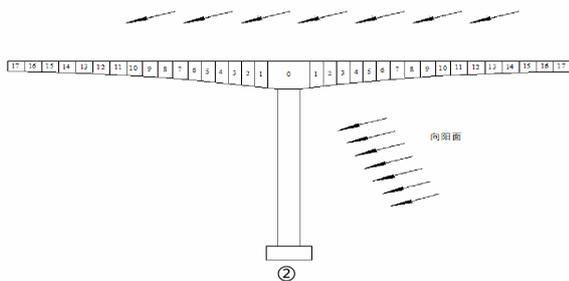


图9 悬臂施工阶段日照温差分析图

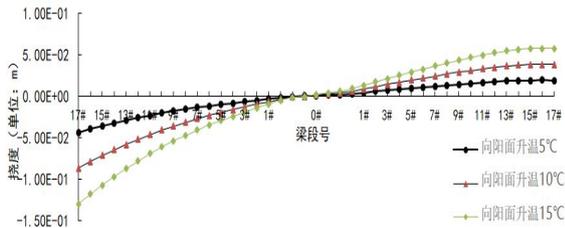


图10 局部温差引起的主梁挠度图

由图10可以看出：日照温差对主梁的线形影响很大，而且基本上呈线性变化，向阳面每升高1℃，引起背阳方向最大悬臂端下挠8.6mm，向阳方向最大悬臂端则上挠3.8mm。这是因为日照辐射会使桥墩往背阳方向发生偏位，使右幅2号墩边跨下挠和主跨上挠，而桥墩偏位引起的主梁挠度要大于主梁日照温差引起的挠度。在实际施工控制时需考虑因日照温差引起的主梁挠度变化，对立模标高进行修正，修正公式为：

$$H_{lm修正} = H_{lm} + f(\Delta T) \quad (3)$$

式中： H_{lm} 为某节段的立模标高， $f(\Delta T)$ 为因日照温差引起的该节段前端的挠度。

2.6.2 合龙温差对顶推力的影响

计算合龙顶推力一般为以下两种计算方法^[9]：(1)消除墩顶水平位移法。其计算过程可归纳为以下：①计算出由合龙温差产生的墩顶水平位移；②根据各墩不同的水平抗推刚度，计算出使墩顶产生单位位移所需的水平力；③按照合龙顺序，根据各墩的水平位移，通过循环迭代，多次试算，求得各墩的顶推力。(2)按消除主梁拉力法计算合龙顶推力。仅需考虑由降温效应在合龙段产生的拉力，以此结果作为合龙顶推力。按两种方法计算的结果基本一致，但比较两种方法的计算过程，按消除墩顶水平位移法计算合龙顶推力计算过程比较繁琐，而按消除主梁拉力法计算合龙顶推力则更加简单快捷^[3]。所以本文按照消除主梁拉力法来研究不同合龙温度对连续刚构桥顶推力的影响。大桥设计合龙温度18℃，顶推力2000kN，不同温度合龙顶推力函数表达式如下^[10]：

$$HL_T = f(T) \quad (4)$$

$$HL_{\Delta T} = f(\Delta T) \quad (5)$$

式中：T为温度， ΔT 为合龙温差， HL_T 为不同温度合龙轴力， $HL_{\Delta T}$ 为不同温差下合龙轴力。

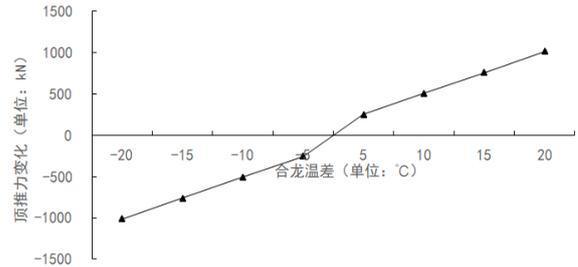


图11 合龙温差对顶推力影响图

由图11可知：合龙时温度越高，所需要的顶推力越大，且温度每升高5℃，顶推力呈250kN增加，由此可见温度对大跨径连续刚构桥的顶推力影响显著，在计算顶推力时必须考虑温度的影响。

2.7 临时荷载影响分析

为了分析临时荷载对计算模型的影响，在最大悬臂状态（17#块预应力张拉完成）考虑以下三种工况：①施加一个200kN的集中荷载在2号墩主跨17号块前端，分析其对全桥挠度的影响。②分别在2号墩主跨17号块前端施加50kN、100kN、150kN、200kN的集中荷载，分析其对主跨17号块前端挠度的影响。③分别在主跨5#块前端、主跨9#块前端、主跨13#块前端、主跨17#块前端施加一个200kN的集中荷载，分析其对主跨17号块前端挠度的影响。

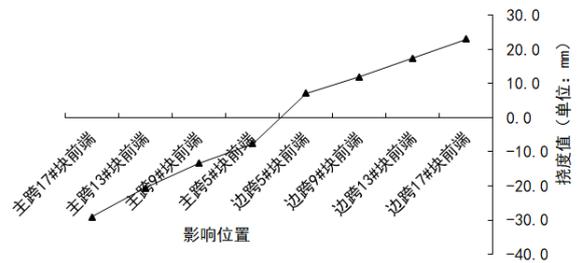


图12 临时荷载对主梁挠度影响图(工况1)

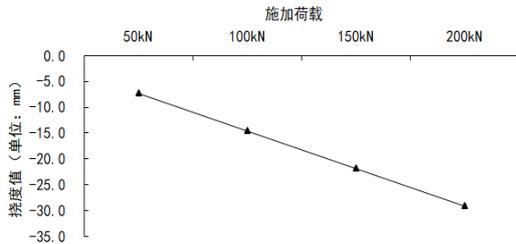


图 13 临时荷载对主梁挠度影响图(工况 2)

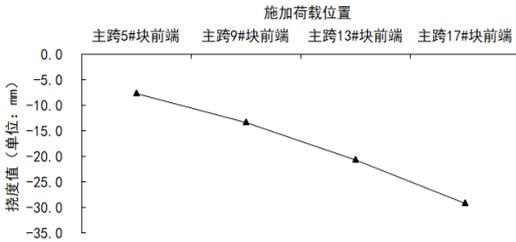


图 14 临时荷载对主梁挠度影响图(工况 3)

由图 12 可知:堆放在主跨的临时荷载既会引起主跨梁段整体下沉,还会使边跨梁段整体上翘,影响量最大的位置为主跨 17 号块前端,下沉量有近 3cm,其次是边跨 17 号块前端,上翘了 2.3cm;由图 13 分析可知,在主梁堆放的临时荷载重量越大,梁段的下挠也越大,而且基本上呈线性增长趋势。

由图 14 可知:梁段下挠值与临时荷载堆放的位置有关,堆放的位置越靠近最外侧梁段,主梁下挠值越大,而且基本上与 0 号块距离大小呈线性增长趋势。因此,必须严格控制临时荷载的摆放,如必需在主梁上堆放材料,则应严格控制堆放材料的重量,堆放的位置也应该选择在主梁 0 号块或其附近。

2.8 结构刚度影响分析

结构的刚度(主要表现为混凝土的弹性模量)并非一成不变的,混凝土的弹性模量会随时间变化。为了分析结构刚度对计算模型的影响,在计算模型中对主梁单元的弹性模量进行调整,研究弹性模量对主梁挠度的影响规律。77 施工阶段(成桥后十年收缩徐变)在不同弹性模量下主梁累计挠度的变化见图 15。

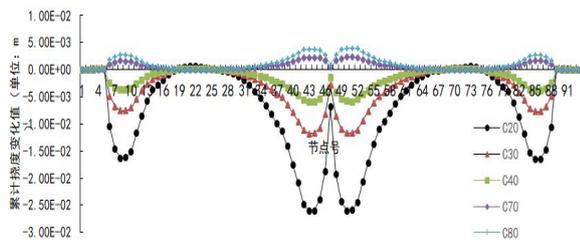


图 15 混凝土弹性模量对主梁累计挠度影响图

从图 15 可以看出:混凝土弹性模量对主梁挠度影响比较大,并且当混凝土强度没起来时,引起的主梁的累计挠度变化比较大,而实际施工时混凝土的加载龄期都比较短,因而弹性模量也比较低,所以在施工控制时应根据实际情况对立模标高做出相应的调整。

2.9 结构自重影响分析

在施工控制时,如果出现主梁实际变形相较于理论变形总是偏大或偏小,则可能是因为在前建立计算模型时输入的梁体自重系数与实际情况存在一定的偏差,这时就需要根据主梁的实测变形情况来调整计算模型里单元的自重系数。为了分析结构自重对计算模型的影响,在计算模型中对主梁单元输入不同的自重系数,研究结构自重对主梁挠度的影响规律。77 施工阶段(成桥后十年收缩徐变)在不同自重系数下主梁累计挠度

的变化见图 16。

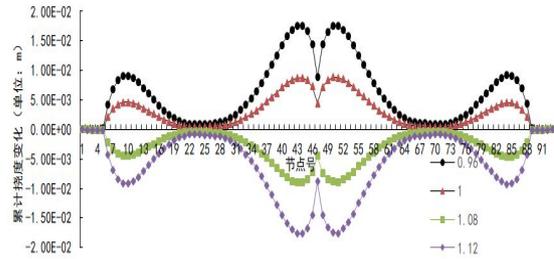


图 16 自重系数对主梁累计挠度影响图

从图 16 可以看出:随着主梁自重系数的增大,主梁有明显下挠的趋势。

2.10 预应力损失影响分析

在预应力结构的施工及使用过程中,由于张拉工艺、材料特性及环境条件影响等原因,使得预应力筋中的拉应力不断降低,成为预应力损失。满足设计需要的预应力筋中的拉应力值,应是张拉控制应力扣除预应力损失后的有效应力。为了分析预应力损失对计算模型的影响,在计算模型中对主梁单元输入不同的预加应力系数,研究预应力损失对主梁挠度的影响规律。77 施工阶段(成桥后十年收缩徐变)在预应力损失下主梁累计挠度的变化见图 17。

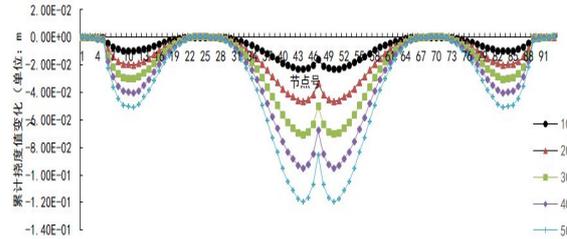


图 17 预应力损失对主梁累计挠度影响图

从图 17 可以看出:预应力损失会引起主梁明显下挠,在实际施工控制中必须严格控制预应力损失的大小。

3 结语

本文主要对施工控制计算中桥面纵坡、桩基础、温度效应、临时荷载、结构刚度、自重以及预应力损失的影响进行了分析讨论,通过这些相关参数的调整来修正理论计算模型,从而实现大跨连续刚构桥施工控制计算的精细化,保障了背景桥梁的高质量施工。

参考文献:

- [1] 向中富.桥梁工程控制[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 吴天鹏.基于改进 BP 神经网络的大跨径连续刚构桥施工控制方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [3] 戴文革.乌江大桥连续刚构桥施工控制技术的研究与实践[D].天津:天津大学,2008.
- [4] 苗建宝.不同抗推刚度连续刚构桥施工监控方法及合龙技术研究[D].西安:长安大学,2013.
- [5] 霍健.大跨径连续梁桥悬臂施工线形控制[D].哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [6] 肖雄,赵雷,黄志霜.大跨度连续刚构桥施工控制参数敏感性分析[J].四川建筑,2016,36(06):184-186.
- [7] 刘钊,谭皓,文武松等.连续刚构桥的群桩基础计算模型研究[J].桥梁建设,2005,(06):1-4.
- [8] 刘文海.桥梁群桩基础的空间等效子结构模型[J].山西建筑,2011,37(12):195-197.
- [9] 殷灿彬,王解军,唐灿.连续刚构桥高混合龙顶推力的计算方法研究[J].中南林业科技大学学报,2009,29(01):111-116.
- [10] 庄德顺,施颖.大跨径连续刚构桥不同温度下合龙顶推力[J].公路交通科技(应用技术版),2014,(05):264-265.