

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.036

悬臂浇筑连续梁墩旁临时固结计算分析研究

莫山峰¹, 王伟², 覃晖³

(1.大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116024; 2.中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116024;
3.大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:墩梁临时固结是保障连续梁悬臂浇筑施工安全的重要措施, 结合实际工程中墩旁临时固结的设计, 采用三种计算方法, 分析计算结果的差异, 提出悬臂浇筑连续梁墩旁临时固结的合理计算方法。结果表明: 不考虑主墩作用的双链杆模型的计算结果与临时支墩实际受力状态差别较大; 考虑主墩作用的三链杆模型虽然比双链杆模型接近实际受力状态, 但忽略了零号梁段刚度的影响及节段施工过程中张拉预应力和主梁混凝土收缩徐变导致的主墩与临时支墩之间内力重分配的影响, 其计算结果与临时支墩实际内力仍有 30%左右的误差; 而有限元正装模型能够准确地计算出临时支墩的受力状态。因此采用有限元正装模型计算的结果进行临时支墩的设计, 可确保结构安全, 降低工程造价。

关键词:连续梁; 悬臂浇筑; 墩旁临时固结; 有限元分析; 正装分析

中图分类号: U445.466

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0167-05

0 引言

大跨混凝土连续梁桥以其线形优美流畅、造价经济且适应能力强的特点, 广泛地应用于高速公路、铁路、城市高架快速路以及山区道路中。悬臂浇筑法是目前建造大跨混凝土连续梁最常用的施工方法^[1], 为保证悬臂施工的安全性, 需采用有效的墩梁临时固结措施。临时固结的设计在目前主要有两种形式^[2-4]: 一种是在墩顶永久支座两侧设置临时固结支座, 称为墩顶临时支座, 这种多适用于墩顶尺寸空间充足、锚筋设置空间足够的情况; 另一种为墩旁临时固结, 即在主墩旁设置临时支墩进行固结, 这种多适用于桥墩尺寸不大、墩顶无足够空间设置临时支座的情况。

早期墩梁临时固结大多采用墩顶临时支座方式, 但随着桥梁工程的发展, 桥墩的尺寸设计越来越纤细, 景观造型也多种多样, 故墩旁临时固结的应用逐渐增多。对于墩旁临时固结, 临时支墩的内力计算方法还不是很完善, 计算方法大多采用与墩顶临时

支座计算相类似的方法。

大多数工程中对临时支墩的内力计算主要采用双链杆模型^[7-9], 但该模型未考虑桥梁主墩的承载作用, 假定上部荷载均由桥梁主墩两侧的临时支墩来承担, 类似于用墩顶临时支座计算的刚性双支点模型^[5], 故其计算结果与实际较为不符。

文献[10-12]采用了三链杆模型计算临时支墩的内力, 考虑了主墩的承载作用, 按主墩及临时支墩的刚度分配上部荷载反力, 类似于用墩顶临时支座计算的弹性三支点模型^[6]。采用三链杆模型进行计算, 虽然从一定程度上比双链杆模型接近实际受力状态, 但未考虑到悬臂浇筑连续梁的施工是节段顺序悬臂浇筑施工的, 各节段施工过程中张拉预应力及主梁混凝土的收缩徐变会使内力在桥墩主墩和临时支墩之间重新分配, 采用三链杆模型计算未考虑到这一情况, 因此其计算结果也与实际不符。

文献[13-14]采用有限元数值模拟方法计算临时支墩的内力, 但未采用施工正装模拟整个悬臂浇筑的施工过程, 其计算结果与三链杆模型的计算结果基本相同。

本研究主要针对墩旁临时支墩的设计计算问题, 选择一座(65+120+65)m的大跨混凝土连续箱梁桥作为研究依托工程, 通过 3 种方法计算临时支墩的内力状态, 分析计算结果的差异, 提出了对于临时支墩

收稿日期: 2023-09-09

基金项目: 辽宁省中央引导地方科技发展资金(2023JH6/100100054)

作者简介: 莫山峰(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事大跨桥梁设计及施工监控工作。

通信作者: 覃晖(1985—), 男, 博士, 副教授, 从事桥隧智慧建造与运维研究工作。电子邮箱: 375193483@qq.com

内力合理准确的计算方法。

1 工程概况及临时支墩方案

跨荆江大堤大桥为(65+120+65)m三跨预应力混凝土连续箱梁桥,箱梁顶板横向宽16.75 m,箱梁底宽11.75 m,翼缘悬臂长2.5 m。箱梁0号节段长12 m,每个悬浇的T形梁纵向对称划分为14个节段,梁段数及梁段长从根部至跨中分别为6×3.5 m、8×4.0 m,悬浇节段总长53 m,最大控制重量为2 660 kN,挂篮设计自重为970 kN。该桥的立面布置如图1所示。墩旁临时支撑布置如图2所示。

该桥墩的梁临时固结采用在桥梁主墩纵向两侧设置临时支墩支撑的方式。临时支墩采用Φ1 400×14 mm钢管混凝土结构,单侧各布置3根,每根钢管混凝土柱内设置10根直径为36 mm的HRB400锚筋,上端锚固于0号段腹板内,下端锚固于承台中。具体布置如图2所示。

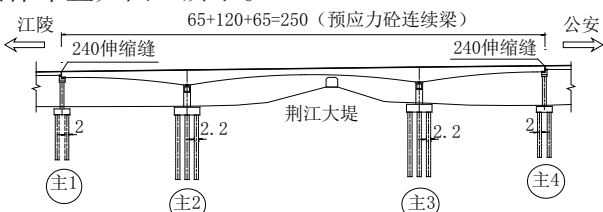


图1 桥梁立面布置图(单位:m)

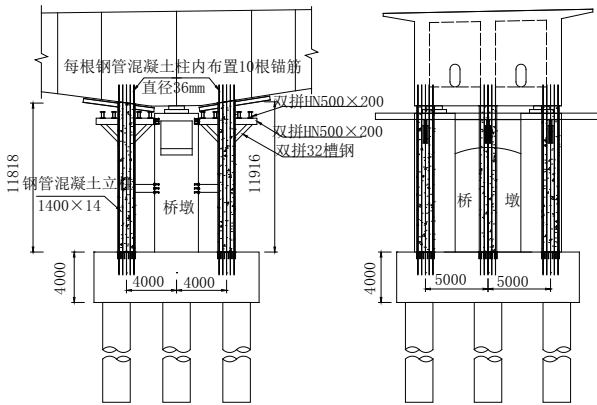


图2 墩旁临时支撑布置图(单位:mm)

2 临时固结中的不平衡荷载

临时固结中的不平衡荷载,主要考虑以下几种工况。

工况1:受结构自重偏差影响,一侧混凝土超方3%(含施工临时荷载的偏载),钢筋混凝土容重按设计为27.3 kN/m³。

工况2:挂篮及施工设备的偏差系数,一侧取1.04,另一侧取0.96,并计入动力系数1.2和0.8;挂篮及施工设备自重为97 t。

工况3:节段浇筑次序不平衡引起的偏差,控制

在20 t。

工况4:挂篮移位位置偏差相差一个节段,挂篮及施工设备自重97 t。

工况5:一侧挂篮连同新浇筑节段的混凝土掉落。

工况5为挂篮连同新浇筑节段混凝土掉落的极端荷载工况,不平衡荷载最大,虽然在施工过程中可采取有效措施防止发生挂篮掉落事故,但临时固结的设计应考虑此极端工况,避免由于掉落事故的发生导致更大的工程事故。因此按各工况同时出现的可能程度,临时支墩截面尺寸及锚筋设计的控制工况组合为:工况1+工况5。

临时支墩在控制工况的组合下,受力图示如图3所示,其中 $N=73\ 250\text{ kN}$, $M=173\ 250\text{ kN}\cdot\text{m}$, $d=4\text{ m}$ 。

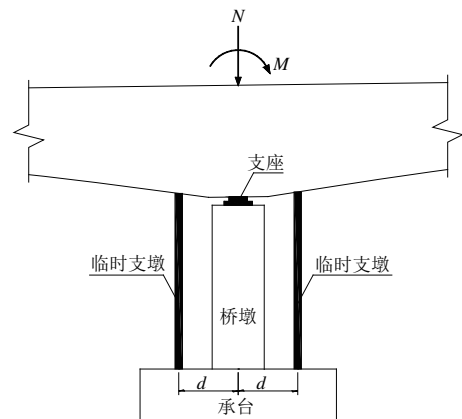


图3 墩旁临时支撑受力图示

3 临时支墩内力计算分析

以下采用3种计算方法计算临时支墩的内力,比较3种计算方法的差异。

3.1 双链杆模型计算

不考虑主墩的承载作用,假定悬臂浇筑施工的全部荷载均由临时支墩承担,且临时支墩中间区域的0号段刚度远大于临时支墩的刚度,假定0号段刚度无限大,临时支墩采用链杆模拟,可将计算结构体系简化为双链杆模型,如图4所示。

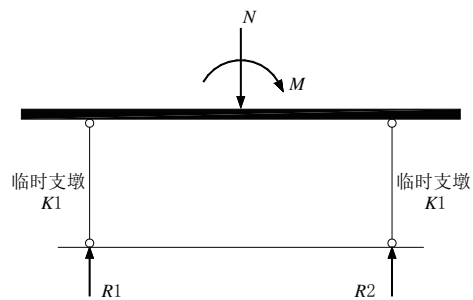


图4 双链杆计算模型

在图示荷载作用下,临时支墩的内力如式1所示:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{N}{2} + \frac{M}{2d} \\ R_2 = \frac{N}{2} - \frac{M}{2d} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_1 为远离偏心荷载侧的临时支墩内力,控制抗拉承载力,kN; R_2 为靠近偏心荷载侧的临时支墩内力,控制抗压承载力,kN; N 为悬臂施工上部重量(含不平衡荷载),kN; M 为悬臂施工的不平衡弯矩(工况1和工况5组合),kN·m; d 为临时支墩到主墩中心的距离,m。

3.2 三链杆计算模型

考虑主墩的承载作用,全部悬臂施工的荷载由主墩和临时支墩共同承担,主墩及临时支墩按刚度分配上部荷载。仍假定0号段的刚度无穷大,将结构计算体系简化为三链杆模型,如图5所示。

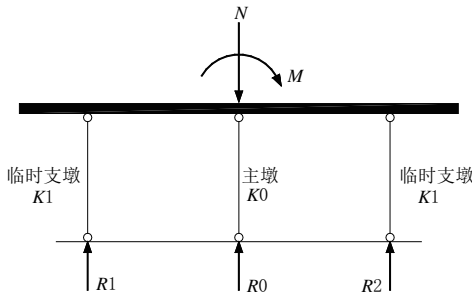


图5 三链杆计算模型

在图示荷载作用下,主墩及临时支墩的内力如式2所示:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{K_1 N}{2K_1 + K_0} + \frac{M}{2d} \\ R_2 = \frac{K_1 N}{2K_1 + K_0} - \frac{M}{2d} \\ R_0 = \frac{K_0 N}{2K_1 + K_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_1 为远离偏心荷载侧的临时支墩内力,控制抗拉承载力,kN; R_2 为靠近偏心荷载侧的临时支墩内力,控制抗压承载力,kN; R_0 为主墩内力,kN; N 为悬臂施工上部重量(含不平衡荷载),kN; M 为悬臂施工不平衡弯矩(工况1和工况5组合),kN·m;临时支墩到主墩中心的距离,m; d 为主墩竖向刚度,N/mm,主墩的尺寸为2~3.25 m×3.5 m,高度11.0 m,材料为C40混凝土; $K_0=2 \times 3.25 \times 10^4 \times 3 \ 250 \times 3 \ 500 / 11 \ 000=6.722 \times 10^7 \text{ N/mm}$; K_1 为临时支墩竖向刚度,N/mm,临时支墩采用3Φ1 400 mm×14 mm钢管混凝土结构,中灌C30混凝土,则 $K_1=3 \times (3.0 \times 10^4 \times \frac{\pi}{4} \times 13 \ 722 + 2.06 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} \times 77 \ 616) / 12 \ 050=1.417 \times 10^7 \text{ N/mm}$ 。

3.3 有限元正装模型

采用MIDAS Civil软件对整个悬臂浇筑施工过程进行模拟,悬臂施工一共对称浇筑14个节段,每个节段施工按照安装挂篮、浇筑混凝土节段以及张拉节段预应力三个阶段来模拟,并考虑混凝土收缩徐变的影响。在模型中考虑前述不平衡荷载工况1(存在结构自重偏差影响,一侧混凝土超方3%)和工况5(一侧挂篮连同新浇筑节段混凝土掉落),建立有限元正装模型如图6所示。

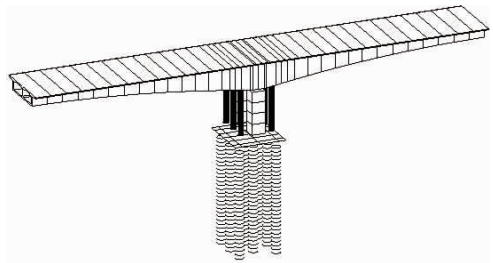


图6 有限元正装模型

3.4 计算结果分析

墩旁临时固结在3种计算模型中的计算结果如表1所示。表中正值为受拉,负值为受压。

表1 3种计算模型计算的墩内力 单位:kN

计算模型	临时支墩 R_1	主墩 R_0	临时支墩 R_2
双链杆模型	-14 969	—	-58 281
三链杆模型	10 795	-51 527	-32 518
有限元正装模型	7 773	-44 066	-36 657

从表1可以看出:3种计算方法得到的临时支撑的轴力相差较大,尤其是双链杆模型, R_2 临时支墩的压力比三链杆模型及有限元正装模型的结果大了70%左右,会造成临时支墩的截面尺寸设计过大,而 R_1 临时支墩未计算出拉力,导致对抗拉承载力估计不足,使结构处于不安全状态。考虑在实际悬臂浇筑施工过程中,0号段混凝土直接浇筑在主墩顶的永久支座和临时支墩上,箱梁底部是与永久支座的顶部及临时支墩的顶部紧密接触的,实际主墩与临时支墩一起承担各个施工阶段的荷载,因此双链杆计算模型的计算结果与实际受力较为不符。

三链杆模型的计算结果中, R_2 临时支墩的压力比有限元正装模拟的计算结果小了11%, R_1 临时支墩的拉力比有限元正装模型的计算结果大了38%,这种差别是由于三链杆模型中假定0号段抗弯刚度无穷大,实际0号段并非完全的刚性体,其刚度对墩内力的分配影响不能忽略不计,并且实际主墩、临时

支墩与上部梁体构成的结构为超静定结构,三链杆计算模型未考虑此超静定结构在整个悬臂浇筑施工过程中由张拉预应力以及混凝土收缩徐变所导致的墩内力重分布的影响。

以悬臂浇筑0~13号节段施工过程中临时支墩的内力变化数据,来分析0号段的抗弯刚度对墩内力分配的影响和节段施工过程中张拉预应力及混凝土收缩徐变导致墩内力重分布的影响。主墩两侧临时支墩的内力变化曲线如图7所示,可见临时支墩的轴力随着节段悬臂浇筑施工的进行波浪式增大,并非线性增加。每个混凝土主梁节段在施工过程的浇筑混凝土阶段临时支墩轴力增大,在张拉预应力阶段临时支墩轴力减小。

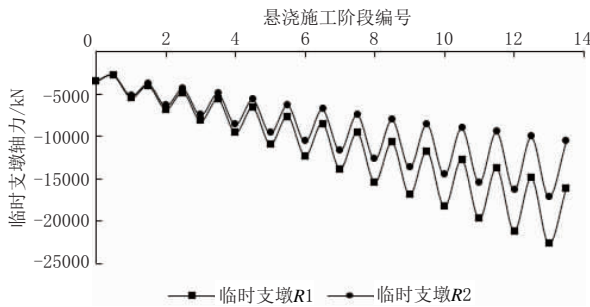


图7 临时支墩轴力变化曲线图

主墩及临时支墩在0号~13号节段施工过程中浇筑混凝土阶段的内力变化情况如图8所示,可见在各节段施工过程中,混凝土浇筑阶段产生的临时支墩轴力增量与主墩轴力增量之和为当前混凝土浇筑节段主梁的重量,但是临时支墩与主墩的轴力增量之比并非成固定比例,未按照临时墩与主墩的轴向刚度比例分配,产生这种结果是由于0号段抗弯刚度的影响,其刚度并非无限大,浇筑混凝土过程中0号段会发生变形,导致临时支墩与主墩的轴力增量之比为非固定数值,这一比例的变化如图9所示。随着节段悬臂浇筑施工的进行,梁段悬臂长度越来越大,临时支墩分配的轴力与主墩分配的轴力之比值从0.6逐渐增大到2.4,而按三链杆模型计算的理论轴力比值为0.42(临时支墩轴向刚度与主墩轴向刚度之比值),可见墩轴力的实际分配与三链杆模型的计算结果差别很大。

各节段施工过程中在张拉预应力阶段临时支墩轴力与主墩轴力的变化量如图10所示。从图中可以看出,在张拉预应力的阶段,临时支墩的轴力变小,主墩的轴力增大,主墩轴力增大的数量为单侧临时支墩轴力减小数量的两倍,即节段张拉预应力过程导致了内力在临时墩与主墩之间重分配。临时支墩

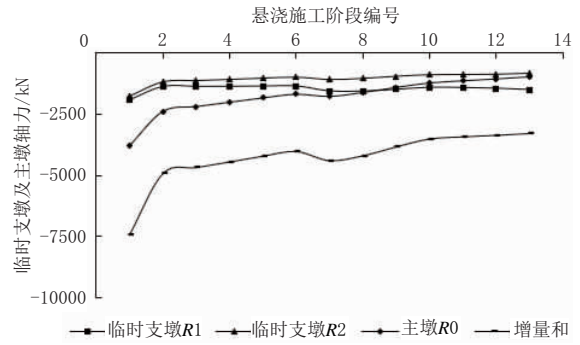


图8 浇筑各节段混凝土阶段主墩及临时支墩轴力增量图

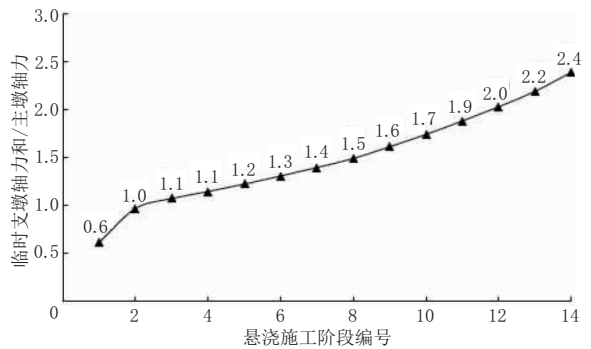


图9 临时支墩与主墩的轴力增量比值

轴力与主墩轴力在混凝土收缩徐变作用下的轴力变化量如表2所示。从表中数据可看出,在混凝土收缩作用下,临时支墩轴力变小,主墩轴力增大;在徐变作用下,临时支墩轴力变大,主墩轴力变小。混凝土的收缩徐变作用会使得临时墩与主墩之间内力重分配。

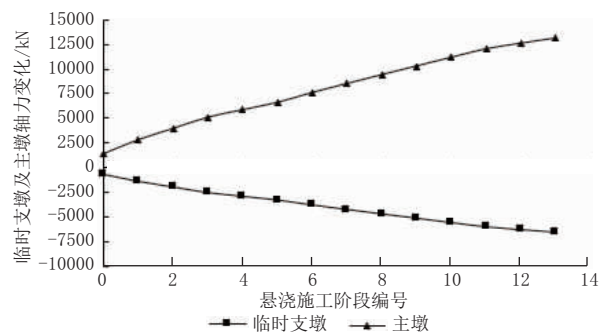


图10 张拉预应力阶段主墩与临时墩轴力变化曲线

表2 混凝土收缩徐变作用下轴力值 单位:kN

计算模型	临时支墩	主墩
收缩	1 425	-2 850
徐变	-196	392

三链杆模型仅通过临时墩与主墩固定的刚度比例分配随着混凝土节段浇筑由于恒载增加所产生的墩内力,并未考虑张拉预应力及混凝土收缩徐变的影响。实际墩旁临时固结结构为超静定结构,其0号墩刚度并非无穷大,张拉预应力及混凝土收缩徐变的影响必然导致临时支墩与主墩之间的内力重分配。

布,三链杆计算模型未能充分考虑这一影响,导致内力计算结果有所误差。

通过以上分析,可以得出双链杆模型及三链杆模型均考虑不了0号段实际刚度的影响及张拉预应力和混凝土收缩徐变导致的墩内力重分布的影响。墩旁临时固结准确的计算方法为有限元正装模型计算,目前有限元软件快速成熟的发展使得有限元数值计算较为方便,故临时支墩的设计可根据有限元正装模型的计算结果进行。受压承载力控制值为 $R_2/3$,取-12 200 kN;受拉承载力控制值为 $R_1/3$,取2 600 kN。

钢管混凝土立柱受压承载力的计算如式3所示:

$$\theta = \frac{f_a A_a}{f_c A_c} = \frac{215 \times 60\ 960}{24.4 \times 1\ 478\ 420} = 0.36 \leq [\theta] \quad (3)$$

式中: $A_c f_c$ 为钢管内的核心混凝土横截面面积, mm^2 ; f_c 为钢管混凝土的抗压强度设计值, N/mm^2 ; $A_a f_a$ 为钢管的横截面面积, mm^2 ; f_a 为钢管混凝土的抗拉和抗压强度设计值, N/mm^2 。

根据保守计算考虑,临时支墩按两端铰接的假定进行计算,则 $L_\theta = ul = 11\ 919\ \text{mm}$ 。

考虑长细比影响折减系数,则

$$\varphi_l = 1 - 0.115 \sqrt{L_e / D - 4} = 0.756$$

$$N_u = 0.9 \varphi_l f_c A_c (1 + \alpha \theta) = 40\ 450\ \text{kN} > 1.5 \times 12\ 200\ \text{kN}$$

故钢管混凝土立柱的受压承载力满足规范要求。

再计算钢管混凝土立柱的受拉承载力:

钢管混凝土柱内有10根直径36 mm的HRB500钢筋可提供拉力,则

$$N = 10 \times 1\ 018 \times 415 = 4\ 225\ \text{kN} > 1.5 \times 2\ 600\ \text{kN}$$

故钢筋的抗拉强度满足规范要求。

4 结 语

通过对一座(65+120+65)m大跨混凝土连续梁墩旁临时固结计算方法的分析探讨,得出以下结论:

(1)按3种模型的计算方法得到的临时支墩的设计内力相差较大,根据连续梁悬臂浇筑施工的实际情况,有限元正装模型可以准确计算出临时支墩的实际内力状态;

(2)双链杆模型忽略了主墩的实际支撑作用,一

侧临时支墩所受的压力比三链杆模型及有限元正装模型的大了70%左右,造成临时支墩截面尺寸设计过大,另一侧未计算出拉力,导致对抗拉承载力估计不足,使结构处于不安全状态,双链杆模型计算结果与临时支墩实际受力严重不符;

(3)考虑了主墩作用的三链杆模型虽然比双链杆模型更接近实际受力状态,但忽略了0号段刚度的影响以及张拉预应力和混凝土收缩徐变导致的主墩与临时支墩之间的内力重分配的影响,其计算结果与实际受力仍有30%左右的误差;

(4)有限元正装模型可以准确地得出临时支墩的内力状态,且随着有限元计算软件的广泛成熟发展,对悬臂浇筑施工的有限元数值模拟将越来越方便、适应性好、准确度高,可为类似连续梁悬臂施工墩旁临时固结计算提供参考,值得推广。

参考文献:

- [1] 吴国忠,钟正强.大跨度连续梁桥施工控制[J].中外公路,2003(1):73-75.
- [2] 宁平华.结合斜拉桥塔梁临时固结装置研究[J].中外公路,2004(4):72-74.
- [3] 董立功.PC连续箱梁悬臂施工支撑式临时固结的计算分析[J].现代交通技术,2009,6(1):65-67.
- [4] 王磊,郭宝圣,杨军宏.飞云江跨海特大桥变截面连续箱梁体外临时锚固设计与施工[J].公路交通科技,2018,35(增刊1):87-91.
- [5] 樊城源.连续梁悬臂施工临时固结设计[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2018,27(2):17-19.
- [6] 孟庆斌,王明慧,张桥等.悬臂浇筑连续梁墩旁临时固结及计算分析研究[J].铁道工程学报,2021,38(1):72-75,90.
- [7] 张冬,张飞.连续梁悬浇法施工梁墩临时固结方案优化[J].水科学与工程技术,2019(3):55-57.
- [8] 王国杰.连续箱梁悬臂施工临时固结设计与分析[J].国防交通工程与技术,2014,12(增刊1):41-43.
- [9] 邝友成.悬臂浇筑连续梁临时固结体系计算分析[J].铁道建筑技术,2014(增刊1):61-64.
- [10] 孙九春.PC悬浇梁墩旁临时固结的计算方法研究与应用[J].铁道工程学报,2014,31(9):59-64.
- [11] 刘海青.悬浇变截面预应力砼箱梁桥连续墩墩梁临时固结的受力浅析[J].福建交通科技,2017(3):62-64.
- [12] 薛文明,阳华国,李鸿盛.京杭运河特大桥主桥12~#主墩临时固结方案优化及安全复核计算[J].中外公路,2012,32(增刊1):81-83.
- [13] 魏明亮,刘三奇.悬臂法施工连续梁临时固结体系抗倾覆计算分析[J].工程与建设,2020,34(3):521-522.
- [14] 邢立伟.三家子特大桥128m连续梁墩梁临时固结设计[J].国防交通工程与技术,2017,15(增刊1):11-13.