

大跨度节段预制拼装桥梁设计与施工关键技术

李 闯¹, 王志强², 余茂峰¹

(1.浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030; 2.浙江交投交通建设管理有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 富春江特大桥主桥为 Y 形墩连续刚构箱梁桥, 采用节段预制悬臂拼装施工, 跨径布置为 $(85+2 \times 151+85)$ m。以该桥为工程实例, 针对大跨径节段预制拼装箱梁桥的特点, 重点对节段划分、接缝形式、剪力键构造、临时锚固构造、临时预应力构造、体外预应力体系等设计要点进行了介绍, 同时对锚固区及转向块等关键受力部位进行了专项验算, 最后对节段梁短线法预制、梁段吊装及调位、涂胶及临时预应力等关键施工技术进行了阐述, 相关做法可为同类桥型的设计与施工提供借鉴。

关键词: 大跨径; 连续刚构; 预制拼装; 短线法; 设计与施工

中图分类号: U442

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0083-05

0 引 言

法国是世界上最早开展桥梁预制节段拼装研究和应用的国家。20 世纪 50 年代, 法国学者 Freyssinet 首先采用了预应力混凝土桥梁的预制分段施工法。1954 年, 法国工程师 Jean Muller 设计的 Choisy-le-Roi 桥首次采用了短线匹配法进行箱梁节段的预制^[1]。20 世纪 80 年代, 由于体外预应力技术的发展, 桥梁节段预制拼装技术在欧美得到了大量运用^[2]。我国桥梁预制节段拼装技术的应用最早开始于 1964 年的五陵卫河大桥, 随后几十年也有使用, 但规模和数量不大。进入 21 世纪, 节段预制拼装技术伴随着体外预应力技术的成功而得到了充分发展, 并在我国迅速推广开来, 已经达到一定的水平^[3]。近几年, 节段拼装技术的应用逐渐由中、小跨径向大跨径桥梁发展。表 1 为国内建成或在建的部分预制悬拼梁桥。本文以已建的富春江特大桥为例, 介绍了大跨径变截面节段预制拼装桥梁设计与施工的关键技术。

1 节段预制拼装构造设计要点

1.1 桥型方案及结构体系

位于杭州绕城高速西复线上的富春江特大桥跨

越富春江Ⅲ级航道, 通航净空要求为 $126 \text{ m} \times 8 \text{ m}$, 主桥跨径布置为 $(85+151+151+85)$ m, 为连续刚构箱梁桥。考虑到项目工期短、质量要求高且水运方便等特点, 主桥箱梁采用节段预制悬臂拼装施工, 并设置体内和体外预应力, 主墩墩身为 Y 形墩, 墩身与主梁固结, 过渡墩与主梁之间设置支座, 采用高桩承台基础, 总体布置见图 1。

1.2 箱梁构造

富春江特大桥主桥上部结构采用单箱单室直腹板变高箱梁, 全宽 16.25 m, 底板宽 8.5 m, 翼缘宽 3.875 m; 主墩墩顶梁高 9.2 m, 跨中梁高 3.8 m, 两截面之间按 1.8 次抛物线变化。为了满足预制节段模块化、工厂化、流水线的施工要求, 以结构尺寸模数化、标准化及对称等为原则, 对结构构造形式及尺寸进行了细化。底板及腹板厚度变化做成阶梯变化, 但厚度变化不宜设置在节段接缝面处, 一般朝较厚端偏移 15~20 cm。图 2 给出了箱梁支点及跨中断面。

根据梁段重均衡的原则, 全桥除墩顶 0 号段采用现浇外, 其余节段均采用预制。预制节段标准长度分为 2.6、3、4、5 m, 边墩附近预制节段长度分别为 3、5.34 m, 边跨及中跨合龙预制节段长度均为 2 m, 0 号现浇段与 1 号预制梁段之间设置 0.8 m 宽后浇带。图 3 给出了边跨节段划分图和 1/2 中跨节段划分图。

1.3 接缝形式及剪力键

目前节段施工接缝一般有现浇混凝土湿接缝、环氧胶接缝和干接缝 3 种^[4]。富春江特大桥主桥 1 号节

收稿日期: 2023-10-23

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021049)

作者简介: 李闯(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计与研究工作。

表 1 国内在建或建成的部分预制节段拼装桥梁

序号	桥名	建成时间	最大跨径 /m	预制方法	拼装方法
1	富春江特大桥	2021 年	151	短线预制	悬臂吊机对称悬臂施工
2	秀山大桥	2019 年	153	短线预制	悬臂吊机对称悬臂施工
3	乐清湾跨海大桥	2018 年	150	短线预制	悬臂吊机对称悬臂施工
4	上海崇明越江通道长江大桥引桥	2011 年	60	短线预制	架桥机对称悬拼、边跨悬挂施工
5	苏通大桥北引桥、中引桥	2008 年	75	短线预制	架桥机对称悬拼、边跨悬挂施工
6	深港西部通道引桥	2007 年	75	短线预制	架桥机对称悬拼、边跨悬挂施工
7	上海沪闵高架	2002 年	35	短线预制	架桥机整跨悬挂施工
8	上海浏河大桥	2000 年	42	长线预制	架桥机整跨悬挂施工
9	湘潭二桥	1993 年	90	长线预制	悬臂吊机对称悬拼施工

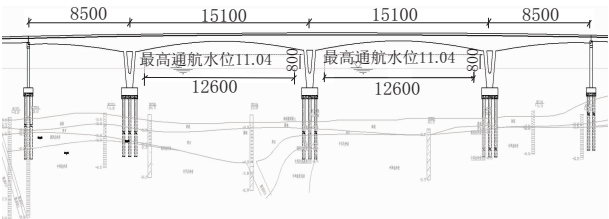


图 1 富春江特大桥总体布置(单位:cm)

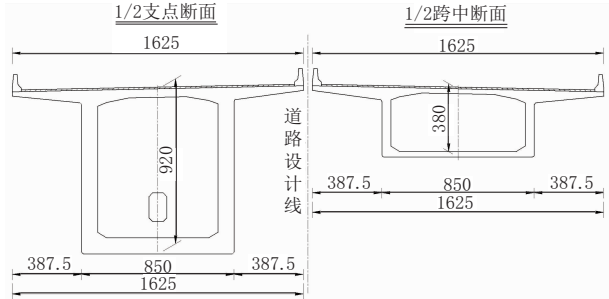


图 2 箱梁断面(单位:cm)

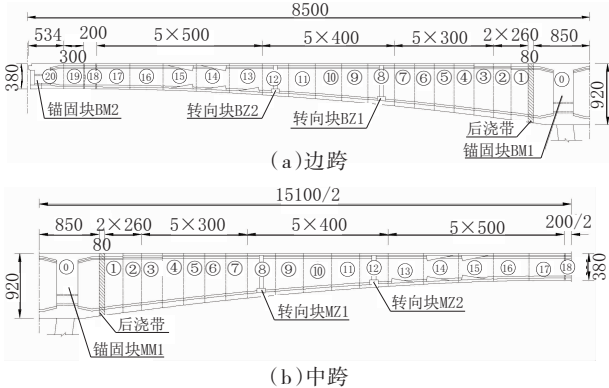


图 3 节段划分(单位:cm)

段与 0 号节段之间采用钢筋混凝土湿接缝,接缝宽 80 cm,设置预留钢筋进行搭接连接;其余预制节段悬拼均采用环氧胶接缝;边、中跨合龙则采用素混凝土湿接缝,两侧各预留缝宽 15 cm,若缝宽超过 20 cm,则应设置钢筋网片。

预制节段接触面应设置凹凸的剪力键,以起到承受与传递节段间剪力的作用。同时还能在节段拼

装时起到定位作用,也可增加接缝的黏结界面^[5]。大桥采用复合式剪力键,剪力键主要设置在腹板上,少量设置在顶、底板上。剪力键的设置应以不与预应力孔道冲突为原则,尺寸应尽量统一,同时考虑美观等因素,一般设置在箱体内侧。其布置见图 4(a)。如图 4(b)所示,腹板剪力键的布置范围不宜小于梁高的 75%,剪力键横向宽度宜为腹板宽度的 75%;剪力键的截面采用梯形,其高度应大于混凝土最大集料粒径的 2 倍,高度与其平均宽度比宜取为 1:2。

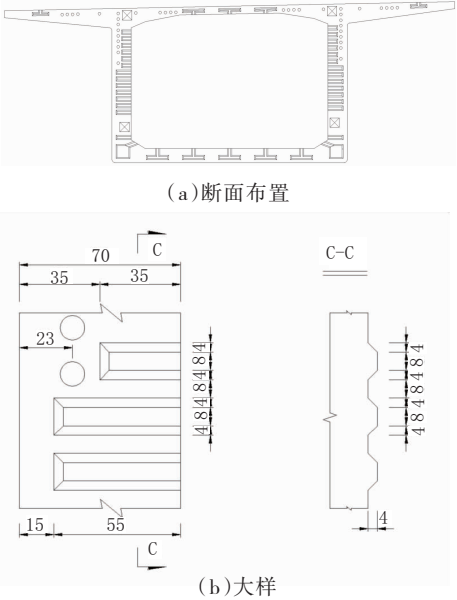


图 4 富春江特大桥剪力键布置

1.4 临时锚固

节段悬臂拼装过程中需要在墩顶 0 号块设置临时锚固,可按以下工况进行锚固设计及施工阶段受力验算。

- (1)长悬臂侧桥面考虑 0.6 kN/m² 施工堆载,短悬臂侧桥面考虑 0.3 kN/m² 施工堆载。
- (2)对称悬拼阶段应考虑差一个不平衡节段重造

成的最不利弯矩。

(3)考虑混凝土节段自重偏差,长悬臂侧箱梁自重增加 5%,短悬臂侧箱梁自重减少 5%。

(4)短悬臂侧主梁考虑 0.25 kN/m^2 上扬风力作用。

1.5 接缝临时预应力

相邻节段拼装前应在接触面涂抹环氧胶,拼装过程中通过设置临时拉杆(见图 5 和图 6),使接缝面具有不小于 0.5 MPa 的预压应力,临时拉杆拆除顺序和时间应以确保整个施工过程中接缝间不产生拉应力为原则。

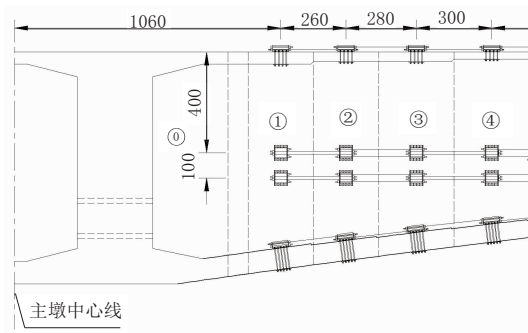


图 5 临时拉杆立面布置

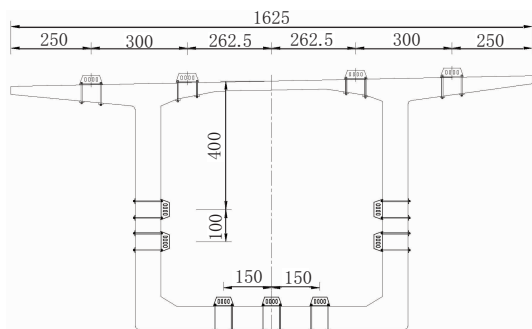


图 6 临时拉杆横断面布置

桥梁节段拼装时的临时拉杆采用精轧螺纹钢,1~8 号梁段临时拉杆需在 9 号梁段纵向预应力张拉锚固后才可逐步从 1 号梁段开始依次拆除,且悬臂施工阶段应始终保持悬臂端至少有 2 个节段存在临时拉杆。临时拉杆按照腹板、箱室顶板、底板和顶板翼缘的顺序张拉。

1.6 体外预应力及减震装置

桥梁上部结构采用体内预应力和体外预应力组合受力体系。体外束构造体系包括锚具、钢束、预埋转向装置、限位减震装置等,详见图 7。体外束采用 PE 护层填充型环氧涂层钢绞线,边跨体外束两端分别锚固在边墩顶横梁和主墩顶横梁上,中跨体外束两端分别锚固在相邻主墩顶横梁上。为满足受力需要,体外束两锚固端之间需设置转向装置,通常采用分丝管式转向器,以便于单根钢绞线的穿束和张拉。为了防止体外索与桥梁产生共振,在体外索适当的

位置上安装限位减震装置,可缩短体外索的自由段长度并给索体适当减震,以防止体外索产生较大幅度的振动,影响结构安全。减震限位装置一端固定在索体上,一端固定在梁体上。

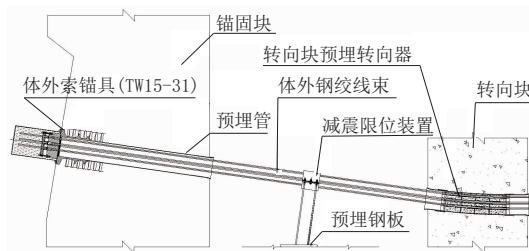


图 7 体外束构造体系

2 结构计算方法

2.1 设计参数取值

与普通预应力混凝土结构不同,悬臂节段拼装箱梁承载力计算应考虑体内预应力和体外预应力的共同作用。由于在相邻节段的接触面无普通钢筋穿过,预制节段拼装桥梁结构的抗弯能力仅考虑预应力钢束的作用。2022 年我国颁布施行了《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)^[5]。在此之前,我国预制拼装混凝土桥梁的设计主要参考美国 ASSHTO 规范^[6]及《公路体外预应力混凝土桥梁设计指南》(征求意见稿)^[7]。

按规范规定,节段预制拼装桥梁应对接缝位置接缝截面抗剪承载力、斜截面抗剪承载力及正截面抗弯承载力等进行验算,还应对施工阶段和使用阶段接缝截面应力进行验算。此外,体外预应力锚固横梁及转向块作为关键受力部位,承受较大集中外力作用,需进行专项应力分析。

2.2 锚固区及转向块验算

体外预应力锚固块和转向块是受力较大且集中的区域,设计人员采用 ABAQUS 有限元模型对锚固区和转向块进行了应力计算。经过分析,桥梁主拉应力最大的锚固块为 BM1 号锚固块(见图 3),主拉应力最大的转向块为 BZ1 号转向块(见图 3)。

图 8 给出了体外预应力 BM1 号锚固块(见图 3)的主应力数值分析结果。从图中可以看出,横梁主拉应力较大区域主要分布在横梁的体外预应力孔道附近和主梁截面突变区域。这一区域的最大主拉应力极值达到 5.45 MPa ,属于小区域集中应力;最大主压应力为 14.55 MPa ,主要分布在横梁底部。为了防止锚固块横梁因局部拉应力较大而开裂,应在横梁体外预应力锚固区域加强配筋,可加密设置 5~6 层钢

筋网片,同时也应适当加粗或加密横梁与箱梁顶、底、腹板之间的连接钢筋。

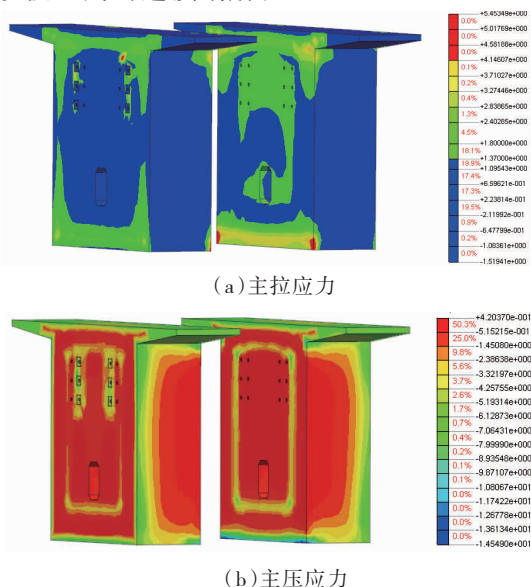


图8 BM1号锚固块应力(单位:MPa)

图9给出了BZ1号转向块的主应力数值分析结果。从图中可以看出,转向块主拉应力较大区域主要分布在转向块的体外预应力孔道附近。这一区域的最大主拉应力极值达到4.09 MPa,为局部小区域集中应力;最大主压应力为8.25 MPa。为了防止转向块因局部拉应力较大而开裂,应在体外预应力孔道附近设置加强钢筋,可在前后侧各增设4~5层封闭的环形加强钢筋,而转向块的上部由于受力较小,按构造配筋即可。

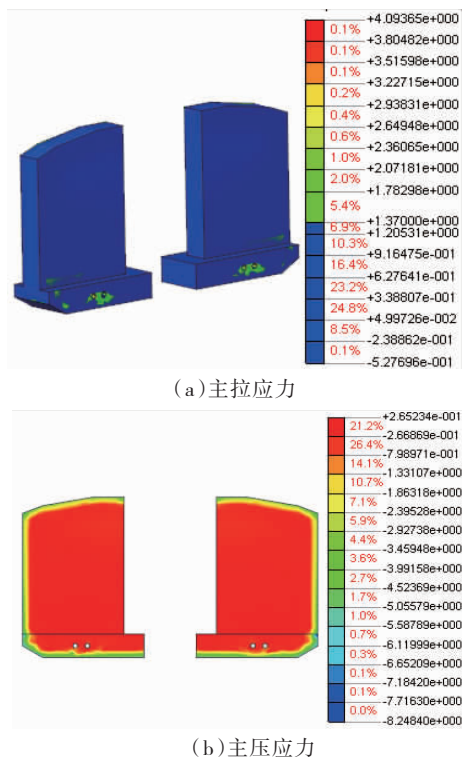


图9 BZ1号转向块应力(单位:MPa)

3 箱梁节段预制与拼装施工关键技术

3.1 节段梁短线法预制

富春江特大桥采用短线法预制。相比于长线法预制,短线法预制具有占地面积小、总体造价低等优点。然而,其对施工监测及控制精度要求较高,施工技术难度也相对较大^[8]。随着我国施工控制技术的提高,目前节段预制拼装桥梁大部分采用短线法进行预制。

大桥为了提高梁段预制工效, n 号节段浇注养护的同时,在独立的钢筋胎架上完成 $n+1$ 号节段的钢筋模块绑扎。然后待 $n-1$ 号节段移出预制台座后,将 n 号节段前移作为匹配梁段,并将绑扎好的 $n+1$ 号节段钢筋模块吊运至预制台座上进行浇筑。这样相邻两节段浇注养护和钢筋绑扎同时进行,可大大节省施工时间。富春江特大桥节段预制的过程实例照片见图10。



图10 节段预制过程

3.2 梁段吊装及调位技术

主梁吊装流程为:0号段现浇施工→浮吊吊装1号节段→现浇0号段与1号块之间的湿接缝→张拉主梁顶板与腹板预应力束→安装桥面吊机→对称悬臂拼装2~17号节段(同时支架法安装19、20号边跨墩顶块)→边跨合龙→张拉边跨合龙底板束→中跨合龙→张拉中跨合龙顶板及底板束→张拉体外预应力钢束→桥面及附属工程施工。

0号节段浇注完成后,用浮吊将1号节段吊装至钢托架平台,然后用万向千斤顶将1号预制节段调位就位,实测无误后,浇注二者之间的湿接缝,如图11所示。由于1号节段拼装线形精度控制要求较高,梁段拼装需要托架平台上进行多方向、多角度调整,

这对于大型构件来说难度较大。为了实现对梁段多向调整功能,在托架平台上需集成多向调节的液压系统,同时配备可实现大角度旋转的转盘。1号预制节段的安装精度对成桥线性控制的成败起着关键性作用,必须引起高度重视。



图 11 1号节段安装

2~17号节段采用桥面吊机进行吊装悬臂拼装施工,如图12所示。先用驳船将预制块运至桥位处,用桥面吊机将预制块吊起并试拼。试拼无误后涂抹接缝环氧胶,然后正式拼装并张拉临时预应力拉杆。待环氧胶完全固化后,张拉永久体内预应力钢束。接着桥面吊机前移,完成1个节段的拼装过程,依次进行剩余节段拼装施工。19、20号节段为边跨墩顶块,两个节段需搭设墩旁支架,采用浮吊完成安装。

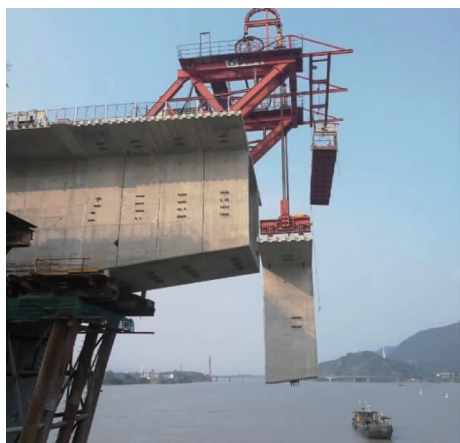


图 12 2~17号节段吊装

3.3 涂胶及临时预应力技术

环氧胶接缝较强,可传递正应力和剪应力,对接缝起到密封作用,其胶体性能及涂抹质量对梁段结构的耐久性能起到至关重要的作用。涂胶一般在节段吊装就位后、拼装之前进行。为了保证环氧胶固化时间能够满足施工需要,要结合现场的温度、湿度等条件,适时调整配胶比例。环氧胶的涂抹厚度要求在

1~3 mm,同时要确保接缝溢胶、粘贴密实饱满。抹胶应在所选胶的规定时间内完成。

节段拼装后,应及时张拉前后两节段之间的临时预应力,张拉应分2次,每次间隔为2 min,确保接缝面压力均匀,且控制在0.5~1.0 MPa,同时每次张拉胶体要溢出。临时预应力张拉后,必须在胶体固化前及时清理掉拼缝溢胶。待接缝环氧胶固化后,才可张拉永久体内预应力,并按顺序解除临时预应力,进行下一预制块悬拼施工。

3.4 合龙技术

节段悬拼合龙采用预制合龙块(18号节段)加双湿接缝进行施工,如图13所示。合龙块吊装就位后,旋转合龙块的平面和竖向角度,使两侧相邻T顺接,同时在合龙块两侧各预留一条15~20 cm宽的现浇湿接缝,通过该湿接缝来调节节段拼装过程中的施工误差,并起到连接作用,最后张拉合龙钢束。



图 13 合龙施工

4 结 语

(1)桥梁预制节段长度划分应充分考虑节段梁的运输条件,并遵守质量均衡原理。设计应对体外预应力锚固块及转向块等关键受力部位进行专项应力分析,并在拉应力较大区域增设防裂加强钢筋。

(2)短线法预制精度控制及节段拼装线形控制是施工控制的重点和难点,必须要由专业的施工监控单位进行全过程的监测和指导。

(3)桥梁节段预制拼装技术采用场外预制、现场拼装的方式,上、下部施工可同时进行,且受自然环境影响较小,能有效保证施工质量和速度,也为标准化施工和工厂化生产提供了可能。

(4)节段梁预制场建设成本较高,在桥型方案比选时要优先考虑借用附近永久预制场的可行性,如确需新建预制场,应在造价比选中考虑节段梁预制场的建设费用。

不利加载时汽车荷载效应,出现了边墩曲线内侧单向受压支座脱空的情况,不满足特征状态1的抗倾覆要求。

依据公式(3)可知,影响特征状态1验算结果的主要因素有两个:支座竖向力永久作用标准值效应和失效支座最不利加载时汽车荷载标准值效应。对于布跨、桥宽、支座间距确定的情况,失效支座对应最不利加载的移动荷载效应是固定值,可通过边跨压重进而调整自重荷载效应的方式消除特征状态1时的支座脱空问题^[2]。边跨压重是增加边支座的永久作用标准值效应的有效途径。对D1#墩顶附近3m范围内道路中心线两侧各压重420kN,D3#墩顶附近3.1m范围内道路中心线左侧(曲线内侧)压重438kN。压重布置原则:增大边墩支反力且减小边墩曲线内、外侧两支座的反力差。

边跨压重后,失效支座对应最不利加载时移动荷载效应及梯度温度效应保持不变,仅箱梁自重荷载效应发生变化。

边墩增设配重能够有效增加永久作用标准值作用下的边墩支反力,作用基本组合下,箱梁桥所有支座均未出现负反力,消除了特征状态1时的支座脱空问题。

针对特征状态2:1-1#支座的稳定性系数为 $\sum R_{Gki} \cdot l_i / \sum R_{Qki,11} \cdot l_i = 5.22 (> 2.5)$;2-1#支座的稳定性系数为 $\sum R_{Gki} \cdot l_i / \sum R_{Qki,21} \cdot l_i = 5.17 (> 2.5)$;3-1#支座的稳定性系数为 $\sum R_{Gki} \cdot l_i / \sum R_{Qki,31} \cdot l_i = 7.77 (>$

2.5)。横桥向抗倾覆稳定性满足规范要求^[3]。

永久作用标准值作用下的支座支反力,也是特征状态2时稳定效应的关键指标,所以抗倾覆稳定性系数也得到较大提升。

可见,方案三,即全部桥墩采用双支座并且给主梁边墩位置处配重,能有效提高桥梁抗倾覆稳定性。

3 结 论

(1)两跨独柱墩曲线连续钢箱梁因其受力结构的特殊性,中墩单支座方案存在严重的上部结构横向倾覆风险。

(2)支反力较大的中墩采用双支座可以有效提高结构抗扭力矩,从而有效提升特征状态2的稳定性系数。

(3)曲线连续梁内外侧支座支反力差异大、边墩支反力小,是造成曲线梁边墩内侧支座脱空的直接原因。可以通过边跨压重,调节永久作用标准值效应下的支反力在各支座间均匀分布,以解决连续梁边墩曲线内侧支座脱空问题,从而提高箱梁桥抗倾覆稳定性。

参考文献:

- [1] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] 杨富光,李井辉.连续梁桥倾覆稳定性问题分析[J].河南科技,2019,29(4):119-122.
- [3] 王文龙,吴海军,董壮壮.支座布置形式对曲线梁桥抗倾覆能力的影响[J].中外公路,2015,5(4):197-200.

(上接第87页)

参考文献:

- [1] 王应良,高宗余.欧美桥梁设计思想[M].北京:中国铁道出版社,2008.
- [2] 魏明.节段预制拼装桥梁适用条件及若干关键技术研究[D].南京:东南大学,2016.
- [3] 申兆繁.广州地铁4号线节段拼装梁设计[J].铁道标准设计,2008(8):46-49.
- [4] 刘亚东,秦宗平,金卫兵.预制节段拼装连续梁桥设计要点和施工关

键技术[J].铁道建筑技术,2006(5):50-55.

- [5] JTG/T 3365-05—2022,公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].
- [6] ASSHTO.2017. LRFD Bridge Design Specifications,8th Edition[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [7] 李国平.公路体外预应力混凝土桥梁设计指南(征求意见稿)[Z].上海:同济大学,中交公路规划设计院,2007.
- [8] 王华.预制节段拼装桥梁施工关键技术浅析[J].城市道桥与防洪,2018(6):174-177,377.