

节段预制拼装箱梁多节段悬拼创新设计

梁志磊

(中交公路规划设计院有限公司,北京市 100088)

摘要: 为提高某跨海桥梁海中节段预制拼装箱梁施工效率和精度,控制关键线路工期,首次提出多节段悬臂拼装技术。结合项目实际情况,通过改进体内预应力布置,比选多节段架设组合方案,创新性提出了节段梁“2+3+2”多节段悬拼方案。运用空间杆系有限元模型,依据现行规范开展全面受力验算,结果表明:桥梁各工况(持久、短暂)的承载力、抗裂、应力及挠度均满足规范要求。实际施工过程验证了设计方案的高效性和便利性,关键线路节约工期约5个月。该设计对同类市政、公路节段梁项目具有推广使用价值。

关键词: 跨海桥梁;节段预制拼装箱梁;多节段悬臂拼装;桥梁结构设计;快速化施工

中图分类号: TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0203-05

Innovative Design of Multi-Segment Cantilever Assembly for Precast Segmental Box Beams

LIANG Zhilei

(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To improve the construction efficiency and precision of precast segmental box beams in the offshore section of a cross-sea bridge and control the construction period of the critical line, a multi-segment cantilever assembly technology is proposed for the first time in the design. Combined with the actual project conditions, through the improvement of internal prestress layout, and the comparison and selection of multi-segment erection combination schemes, an innovative "2+3+2" multi-segment cantilever assembly scheme for segmental beams is put forward. A spatial bar system finite element model is adopted to conduct a comprehensive stress checking calculation in accordance with current codes. The results show that the bearing capacity, crack resistance, stress and deflection of the bridge under various working conditions (persistent and transient conditions) all meet the code requirements. The actual construction process verifies the high efficiency and convenience of this design scheme, which saves approximately 5 months of construction time on the critical lines. This design has popularization and application value for similar municipal and highway segmental beam projects.

Keywords: cross-sea bridge; precast segmental box beam; multi-segment cantilever assembly; bridge structural design; rapid construction

1 工程概况

预制节段拼装箱梁作为未来桥梁的发展方向,具有结构性能优、运输方便、施工期间对交通和环境影响小等优点^[1-4],因此在公路桥梁、轨道交通桥梁、市政桥梁上均有所运用^[5]。其中,对于悬臂拼装节段梁,目前结构设计和受力性能研究大多集中于逐块架设拼装技术^[6-11],对多节段悬臂拼装架设技术的研究为空白。因此,本文创新性提出多节段架设拼装技术,以进一步发挥预制拼装节段梁的优势特点。

某跨海通道高速公路水中桥梁,设计时速100 km/h,分离式结构布置,设计车道数为双向六车道。上部结构采用节段预制拼装箱梁结构,下部结构采用独柱式花瓶墩,如图1所示。

项目预制节段箱梁桥长4.2 km,共2 270片预制梁,其中关键线路长3.12 km。常规对称悬拼逐块架设需每吊装一对节段即张拉一次预应力,制约施工进度,单节段调整导致累积误差大,合龙精度难以保证,吊具调整节段梁姿态难、效率低。设计阶段创新性提出多节段预制悬拼技术,即“2+3+2”节段悬拼方案,可实现2~3个节段张拉一次预应力,以提高架梁效率和质量。

收稿日期: 2026-02-01

作者简介: 梁志磊(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

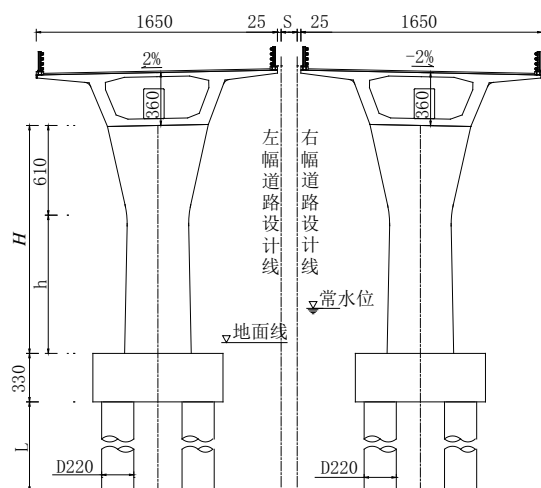


图1 分离式六车道节段梁结构断面(单位:cm)

2 结构设计

2.1 总体设计及布置

西侧引桥采用60 m预应力混凝土节段预制拼装箱梁,设12联 $4 \times (5 \times 60) + 8 \times (4 \times 60) = 3120$ m,墩高10~60 m,其中1#~28#墩为高墩区(墩高26~62 m),采用墩梁固结体系,29#~52#为低墩区(墩高11~25 m),采用连续梁体系。采用悬臂拼装施工,平均纵坡-2.2%,最小平面半径7 600 m。节段梁采用C55混凝土,抗压强度设计值24.4 MPa,墩身采用C40混凝土,抗压强度设计值20.5 MPa。

2.2 箱梁结构及断面设计

采用分离式双主梁,单幅桥宽16.5 m,主梁采用等截面单箱单室斜腹板断面形式,标准横断面如图2所示。悬臂翼缘板长3.6 m,梁高3.6 m,箱梁底宽6.9 m。从梁端至跨中,各梁段底板厚度分别为47、42、37、32、27 cm,腹板厚为85、75、65、55、45 cm,顶板等厚28 cm。各梁段均为等截面,不同梁段壁厚在距离节段线15 cm处突变。

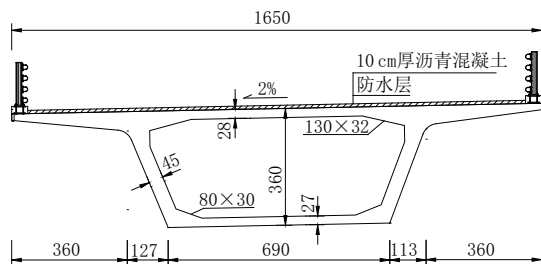


图2 60 m节段梁标准横断面(单位:cm)

每跨有0~8个节段,0#块为墩顶块,8#块为合龙块,1#~7#块为对称悬拼块,除合龙段长度为2.6 m,其余节段长度均为3.8 m。标准单节段吊装重量不超过155 t,最大吊装节段重200 t。

2.3 预应力体系

箱梁预应力由纵向预应力和横向预应力组成。纵向预应力由体内束和体外束组成。预应力标准强度为1 860 MPa,设计强度为1 260 MPa,单根直径为15.2 mm,体外预应力钢绞线采用填充型低松弛环氧涂层钢绞线。

纵向预应力按全预应力构件设计,顶板横向预应力按A类预应力构件设计。

架桥机拼装过程仅张拉体内预应力钢束^[5],满足施工阶段受力需求;合龙及架桥机过孔后再张拉体外预应力钢束,满足二期恒载和运营阶段受力需求。根据以上受力需求,计算确定体内预应力和体外预应力的配置比约为6:4。

2.4 逐块悬臂架设与多节段悬臂架设方案比选

2.4.1 预应力布置方案

常规体内预应力设计方案为逐块架设方案,需吊装一个块段张拉一次预应力,一个中跨需张拉7次,如图3所示。多节段架设方案为吊装2或3个块段张拉一次预应力,体内预应力的张拉次数为3次,如图4所示,可提高架梁速度。

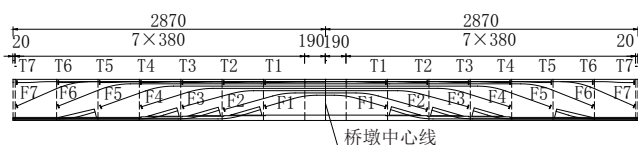


图3 常规逐块悬拼方案体内预应力布置(单位:cm)

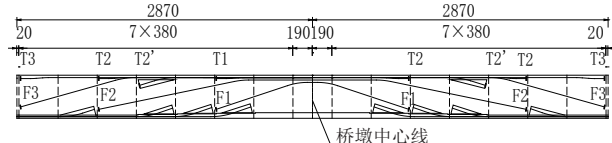


图4 多节段悬拼方案体内预应力布置(单位:cm)

2.4.2 结构受力对比

对逐块悬拼架设方案和多节段悬拼架设方案进行受力计算分析对比,结果如表1所示。多节段悬拼较单节段悬拼钢束用量基本相当,体内钢束用量略有增加,体外钢束用量略有减少,箱梁主拉应力减少36%,其余应力基本相当。

2.4.3 多节段架设方案选择

本项目中跨有1#~7#块对称悬拼,多节段架设可有3种组合方式:“3+2+2”,“2+3+2”,“2+2+3”。下面分别从设计、施工控制、施工安全角度分析考虑。

设计角度,起始段块数越多,墩顶预应力布置越密集,且3片起始段线形调整难度大,因此起始段应为2个块段。

施工控制角度,合龙段如果为3个块段,容差率

表1 逐块悬拼和多节段悬拼受力对比

比选项	常规逐块悬拼方案	多节段悬拼方案
预应力型号	顶板束 12φ [*] 15.2,	顶板束 17φ [*] 15.2,
	腹板束 19φ [*] 15.2,	腹板束 19φ [*] 15.2,
	边跨底束 25φ [*] 15.2,	边跨底束 23φ [*] 15.2,
	中跨底束 25φ [*] 15.2,	中跨底束 20φ [*] 15.2,
	体外束 27φ [*] 15.2	体外束 31φ [*] 15.2
频遇组合顶板	1.3 MPa	1.0 MPa
频遇组合底板	2.2 MPa	2.1 MPa
标准组合顶板	15.8 MPa	15.0 MPa
标准组合底板	13.3 MPa	12.6 MPa
主拉应力	0.6 MPa	0.38 MPa
钢束用量	体内束 135.2 t,	体内束 107.3 t,
	体外束 62.1 t,	体外束 84.3 t,
	合计 197.3 t	合计 191.6 t

低,因此合龙段附近应为2个块段。

施工安全角度,合龙段附近2个块段较3个块段架桥机安全系数更高。

通过以上分析比选,推荐采用“2+3+2”的节段梁多节段架设设计方案。

2.5 固结墩墩顶0#块设计

固结墩顶0#块底部与墩顶齐平湿接连接,采用预制薄壳+后浇横梁的设计方案,如图5所示。顶板预留后浇孔,预制横隔板厚22 cm,纵腹板设置为凹凸块形式,以增大抗剪能力,凸部分壁厚35 cm,凹部分壁厚25 cm。

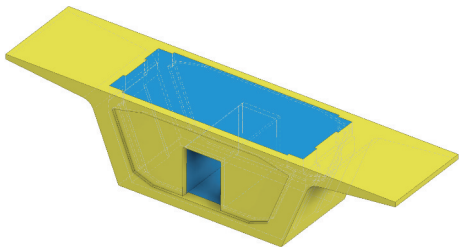


图5 固结墩顶预制薄壳+后浇横梁

预制纵横隔板上设置预埋钢筋,后浇段钢筋与预制段搭接,搭接长度为35 cm。

3 结构受力分析

节段预制拼装混凝土受弯构件非接缝区段的计算,应符合现行规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018,下文简称《桥规》)的规定^[12]。节段预制拼装混凝土受弯构件进行结构承载能力和应力计算时,均应计入接缝对受力性能的影响^[12],接缝处的计算应符合现行规范《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022,下文简称《装配桥规》)的规定^[13]。

总体计算采用空间杆系有限元模型,建立5×60 m

上下部桥梁结构,如图6所示,按照规范《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[14]施加荷载及边界条件。一期恒载包括主梁、横梁等自重,容重26 kN/m³,横隔板按集中荷载考虑。二期恒载包括人行道、防撞护栏、泄水管、桥面铺装等,按61.2 kN/m计;预应力管道摩阻系数0.15,管道偏差系数0.2;设计荷载为公路—I级荷载。全桥共离散为128个节点,121个单元,按实际工序模拟20个施工阶段。主墩与主梁为墩梁固结体系,过渡墩处约束竖向、横向及横向扭转。

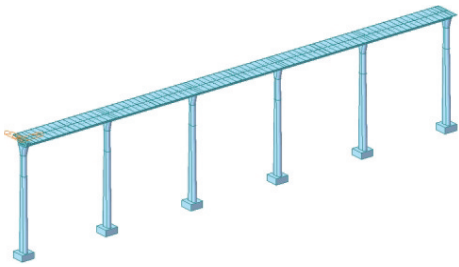


图6 5×60 m墩梁固梁节段梁有限元模型

计算内容包括承载力极限状态计算、正常施工阶段抗裂验算、挠度验算、应力验算、横向验算、施工阶段应力验算等。

3.1 承载力计算

3.1.1 受弯构件接缝位置正截面抗弯承载力

受弯构件接缝位置正截面抗弯承载力应满足下式^[8]要求:

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_f M_{ud}$$

式中:γ₀为结构重要性系数,本项目取1.1;M_d为截面弯矩设计值,N·mm;φ_f为抗弯承载力的接缝折减系数,取0.95;M_{ud}为构件的抗弯承载力设计值,N·mm。

根据以上公式计算的截面承载力包络图如图7所示,满足规范要求。

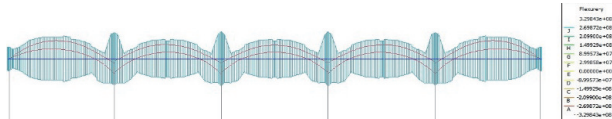


图7 持久工况弯矩包络图(单位:N·mm)

3.1.2 接缝面抗剪承载力计算

根据《装配桥规》5.4.8节,剪力最大利位置和验算结果如表2所示,最不利位置为近边跨支点处,计算结果满足规范要求。

表2 接缝位置斜截面抗剪承载力计算结果

位置	斜截面抗剪承载力/kN	剪力设计值/kN	安全系数
边墩支点处	36 236	19 470	1.86

3.1.3 接缝截面抗剪-弯承载力计算

按照《装配桥规》5.4.9和5.4.10进行接缝截面抗

剪-弯承载能力组合计算^[13],分别进行剪力和弯矩最不利工况下的迭代计算,计算结果如表3所示,安全系数大于1.0,且有一定富余,满足相关规范要求。

表3 接缝截面抗剪-弯承载力计算					
位置	类型	设计值	抗力值	安全系数	
边墩顶 接缝处	剪力	弯矩/(kN·m)	109 032	127 961	1.07
	最大	剪力/kN	19 103	26 651	1.27
	弯矩	弯矩/(kN·m)	120 959	136 755	1.03
	最大	剪力/kN	18 356	26 218.4	1.30

3.2 持久状况正常使用极限状态计算

3.2.1 正截面抗裂验算

按全预应力混凝土构件验算^[13],根据《装配桥规》5.5.8节,荷载频遇组合下截面正应力为:

$$\sigma_{st} - 0.8\sigma_{pc} \leq 0$$

式中: σ_{st} 为作用频遇组合下接缝截面边缘混凝土的拉应力,MPa; σ_{pc} 为永存预加力作用下接缝截面边缘混凝土的压应力,MPa。

荷载频遇组合下各工况箱梁顶底板正截面应力图如图8所示。由计算可知,各梁段均不出现拉应力,且顶板最小压应力为1.0 MPa,底板最小压应力为2.0 MPa,使用阶段正截面抗裂验算满足规范要求,且具有一定的应力储备。

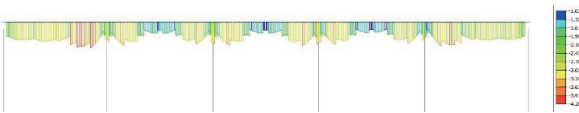


图8 节段箱梁上缘正应力包络图(单位:MPa)

3.2.2 斜截面抗裂验算

按全预应力混凝土构件验算,根据《装配桥规》5.5.8节,荷载频遇组合下斜截面混凝土的主拉应力:

$$\sigma_{tp} \leq 0.4f_{tk}=0.4\times 2.74=1.096\text{ MPa}$$

式中: σ_{tp} 为预加力和作用频遇组合下接缝位置混凝土的主拉应力,MPa; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值,取接缝两侧强度较低者,MPa。

荷载频遇组合下各工况箱梁斜截面主拉应力包络图如图9所示。由计算可知,最大主拉应力为0.38 MPa,小于1.096 MPa,满足相关规范要求。

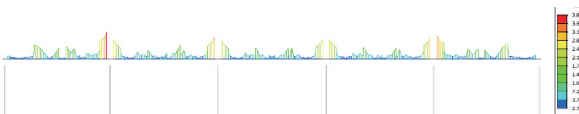


图9 箱梁斜截面主拉应力验算(单位:MPa)

3.2.3 挠度验算

边跨L/2处梁体下挠值为:11.1 mm×1.41=15.65 mm,小于<60 m/600=100 mm(规范限值),满足规范要求。

中跨跨中处挠度为:8.79 mm×1.41=12.39 mm,小

于60 m/600=100 mm(规范限值),满足规范要求。

3.3 持久状况应力验算

3.3.1 使用阶段正截面混凝土法向压应力验算

根据《装配桥规》,节段箱梁接缝截面的最大压应力不大于0.5倍混凝土抗压强度标准值,C55混凝土规范限值为17.75 MPa^[13]。计算表明,箱梁顶缘截面最大压应力15.6 MPa;箱梁底缘截面最大压应力为12.9 MPa,均小于容许值17.75 MPa。法向压应力验算满足规范要求。

各工况下正截面压应力包络图如图10所示。

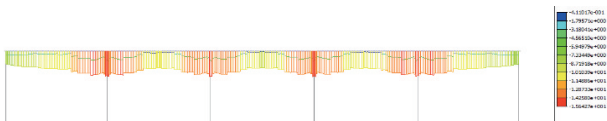


图10 箱梁顶缘正截面压应力验算(单位:MPa)

3.3.2 使用阶段斜截面混凝土主压应力验算

按照规范规定,在使用阶段,接缝截面混凝土的最大主压应力不大于0.6倍混凝土抗压强度标准值,对于C55混凝土为21.3 MPa^[13]。

计算表明,使用阶段混凝土最大主压应力为15.6 MPa,小于21.3 MPa,满足规范要求。

3.3.3 使用阶段受拉区钢筋拉应力验算

根据《桥规》7.1.5节规定,PC混凝土构件中钢绞线的拉应力需满足:体内预应力不大于1 209 MPa,体外预应力不大于1 116 MPa,预应力钢束应力水平均满足规范要求。

3.4 暂状工况应力验算

3.4.1 短暂工况混凝土法向压应力验算

根据《装配桥规》5.6.5节,预应力混凝土构件在施工阶段荷载作用下,接缝截面的法向压应力为14.7 MPa,小于18.46 MPa。如图11所示,施工阶段箱梁最大压应力出现在张拉体外束阶段箱梁截面底缘。

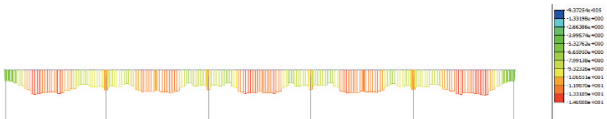


图11 施工阶段箱梁最大压应力验算(单位:MPa)

3.4.2 短暂工况混凝土法向拉应力验算

计算表明,施工阶段混凝土箱梁最大拉应力出现在吊装过程,梗腋变化处顶板上缘1.1 MPa,满足规范要求,结果如图14所示。

3.5 节段梁横向桥面板计算

节段梁横向顶板按A类PC混凝土构件设计,横向预应力型号为3φ15.2钢绞线,纵向间隔0.5 m布

置一道。建立横向计算模型,纵向板宽 1 m,施加自重及可变荷载,如图 12 所示。区别于常规混凝土箱梁,节段梁预制完成后需存放不少于 90 d 完成主要收缩徐变^[15],横向计算需考虑施工阶段吊装和存梁工况应力累积对成桥的影响。

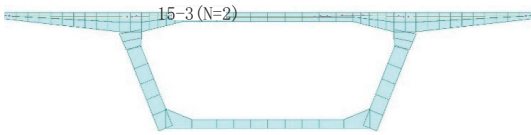


图 12 节段梁横向计算模型

3.5.1 吊装、存梁工况桥面板应力

现场存梁、吊梁照片如图 13 所示。本项目吊装、存梁阶段最大拉应力为 1.1 MPa,位于顶板梗腋变化处,如图 14 所示。



图 13 节段梁吊梁、存梁现场照片



图 14 吊装、存梁工况顶板上缘应力(单位:MPa)

3.5.2 运营阶段抗裂验算

运营阶段的横向抗裂计算需考虑吊装、存梁工况应力的累加,按 A 类构件验算:梗腋变化处顶板下缘最大拉应力 0.4 MPa,小于 1.9 MPa,如图 15 所示,满足要求。

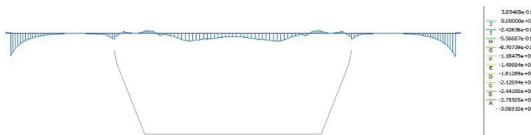


图 15 顶板下缘应力(单位:MPa)

4 施工方案及工效

本项目采用多节段悬臂拼装架设方案,现场施工照片如图 16 所示,施工流程示意图如图 17 所示。

本项目通过采用多节段悬拼设计方案,每个 T 构节省 4 次张拉工作,平均可节省 4 d 工期,控制线路 3.12 km 左右幅采用两台架桥机,共节约工期约 5 个月。箱梁线形、受力性能正常,目前已运营通车约 1 年。



图 16 节段梁多节段悬拼现场照片

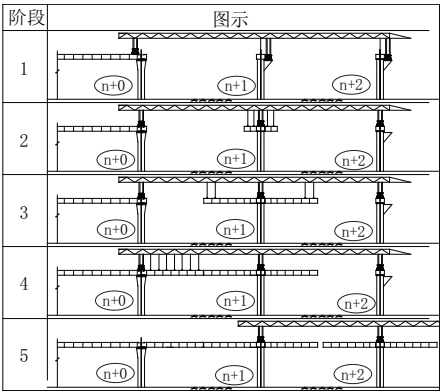


图 17 施工流程示意图

5 结 语

通过方案比选和受力分析,创新性提出节段预制拼装箱梁多节段悬臂拼装技术,验证了 60 m 跨径节段梁“2+3+2”多节段悬拼技术的可行性,证明了这种技术在提升施工效率、控制工期方面的优势,为同类桥梁节段箱梁快速施工提供了技术支撑。未来可进一步扩大适用场景,结合不同跨径和施工环境差异,推动节段预制拼装技术的多元化应用和推广,进一步发挥节段拼装箱梁的优势。

参考文献:

[1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[2] 贺拴海. 桥梁结构理论与计算方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.

[3] 吴东升, 卢永成, 齐新, 等. 南昌市洪都大道高架桥节段梁结构设计[J]. 城市道桥与防洪, 2020(2): 67-70; 84.

[4] 王猛. 大挑臂复合截面节段梁总体布置与结构体系研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(7): 93-97.

[5] 吴东升. 城市节段预制拼装箱梁桥结构设计的技术特点与创新[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 70-75.

[6] 徐治芹, 丁婧楠, 韩雄刚, 等. UHPC 节段梁键齿胶接缝抗剪性能试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(12): 204-210.

[7] 刘文杰, 韩冰, 阎武通, 等. 预制拼装混凝土节段梁的结构力学性能研究进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 81-99.

[8] 陶玉锋. 节段预制拼装体外预应力 UHPC 箱梁抗剪性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2025.

[9] 姚杰. 节段预制拼装桥梁干接缝抗剪承载力计算分析研究[D]. 西

(下转第 249 页)