

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202305142024061964

文章编号: 1674-599X(2024)03-0017-10

引用格式: 沙国华, 杨政, 郭晨, 等. 悬臂拼装施工的预制节段箱梁桥预应力参数优化[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 17-26.

Citation: SHA Guohua, YANG Zheng, GUO Chen, et al. Prestress parameters optimization of precast segmental box girder bridge by cantilever assembly method[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 17-26.

## 悬臂拼装施工的预制节段箱梁桥预应力参数优化

沙国华<sup>1</sup>, 杨政<sup>1</sup>, 郭晨<sup>1</sup>, 王亚辉<sup>1</sup>, 李忠明<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 中建七局安装工程有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘 要:** 为揭示预制节段箱梁桥预应力相关参数对悬臂拼装阶段和合龙阶段箱梁横截面应力及施工期线形的影响, 选取某工程一联三跨预制节段箱梁桥, 针对悬臂拼装阶段和合龙阶段不同预应力参数取值对桥梁受力状态及变形特征的影响进行数值模拟。研究表明: 预制节段箱梁桥顶板钢束最优张拉控制应力为预应力钢束抗拉强度标准值的0.70~0.75倍, 与此同时应控制预应力钢束截面积不低于 $0.000\ 98\text{ m}^2$  ( $7\varnothing 15.2\text{ mm}$ )。顶板单侧钢束组预应力合力作用线与顶板中轴线之间的距离, 即顶板预应力合力偏心距宜取箱梁宽度的0.22~0.26倍。合龙阶段采用先张拉底板、腹板通长钢束, 再张拉中、边跨局部钢束的方式可使桥梁在不同张拉阶段之间的线形及横截面应力变化更加平缓, 有利于施工期间结构的安全控制。

**关键词:** 预制节段箱梁; 悬臂拼装法; 预应力合力偏心距; 张拉控制应力; 张拉顺序

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

## Prestress parameters optimization of precast segmental box girder bridge by cantilever assembly method

SHA Guohua<sup>1</sup>, YANG Zheng<sup>1</sup>, GUO Chen<sup>1</sup>, WANG Yahui<sup>1</sup>, LI Zhongming<sup>2</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Installation Engineering Co., Ltd. of CSCEC 7th Division, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** To elucidate the influence of prestress-related parameters of precast segmental box girder bridges on the stress distribution across the cross-section and longitudinal profile during the cantilever assembly and closure stages, a three-span prefabricated segmental box girder bridge was selected. Numerical simulations were conducted to investigate the effects of various prestress parameters during the cantilever assembly and closure stages on the structural responses and deformation characteristics of the bridge. The research findings indicate that the optimal tensioning control stress for the top slab tendons of precast segmental box-girder bridges is 0.70-0.75 times of the standard tensile strength value of prestressing tendons, concurrently necessitating the constraint that the cross-sectional area of the prestressing tendons should not fall below  $0.000\ 98\text{ m}^2$  ( $7\varnothing 15.2\text{ mm}$ ). The distance between the resultant prestressing force line of the single-side steel strand group in the top slab and its centroidal axis, namely, the eccentricity of the resultant prestressing force in the top slab, is recommended to be

收稿日期: 2023-05-14

基金项目: 中建七局安装工程有限公司委托科研项目(20191169)

通信作者: 杨政(1964—), 男, 教授, 主要从事混凝土强度理论及工程结构三维破坏理论等方面的研究工作。

E-mail: zyang@mail.xjtu.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

selected within the range of 0.22 to 0.26 times the width of the box girder. During the closure phase, the utilization of continuous steel tendons for both the bottom slab and the web was pretensioned, followed by the subsequent tensioning of localized tendons for midspan and edge spans, which facilitates a smoother distribution of alignment and cross-sectional stresses across various tensioning stages by promoting enhanced structural safety control throughout the construction period.

**Key words:** precast segmental box girder; cantilever assembly method; eccentricity of the resultant prestressing force; tensioning control stress; tensioning sequence

随着桥梁施工技术的不断发展,预制节段梁以其标准化、智能化的生产特点,逐渐成为桥梁工程中广泛应用的预制构件。采用预制节段梁不仅节省工期,亦符合当前低碳发展的要求,工厂化的生产方式消除了现场施工带来的诸多环境问题,而悬臂拼装则是预制节段梁桥的主要施工方法之一<sup>[1-2]</sup>。

目前,国内外针对预制节段箱梁桥的研究大多从桥梁整体受力出发,着重分析预制节段箱梁桥的接缝抗剪性能及拼装线形控制等。JIANG等<sup>[3]</sup>研究了混合钢筋束、荷载位置及接头数量对采用干接的预制混凝土节段桥抗弯承载力和延性的影响,并探讨了预应力钢绞线的挠度、极限荷载、应力和破坏模式。YUAN等<sup>[4]</sup>对4种配筋率(预应力筋)和2种荷载组合下的预制节段箱梁桥结构性能进行了试验研究。AHMED等<sup>[5]</sup>探究了侧向预压应力强度和偏心等对预制箱梁桥胶接缝抗剪性能的影响。吴东升等<sup>[6]</sup>对不同变宽方式下的预制节段箱梁的受力性能开展了研究,并提出了结构横向分幅异步架设的施工方法。桂水荣等<sup>[7]</sup>对不同拼装方式下的多幅变宽连续箱梁桥的受力和变形进行了对比研究,并就“S”形拼装方案使结构局部应力和扭矩过大的问题提出了优化方案。YAN等<sup>[8]</sup>针对预制节段梁桥的复杂受力特点,建立了考虑剪力滞效应、材料与几何非线性、预应力束滑移及接缝性能的高效数值分析模型。孙九春等<sup>[9]</sup>研究了大跨连续梁桥单T构悬臂拼装施工受力状态,并采用“冗余控制”机制满足了悬臂施工偏载条件下T构整体稳定和局部构件强

度的要求。田杰<sup>[10]</sup>以秀山跨海大桥副通航孔桥六跨连续-刚构变截面箱梁为例,介绍了风-浪-流作用对大跨径曲线节段预制梁悬臂拼装的影响。赵汗青等<sup>[11]</sup>以郑济铁路郑州黄河特大桥主桥连续钢桁梁为例,介绍了悬臂拼装法的施工步骤,并对钢桁梁悬臂架设施工过程进行了数值模拟。孙九春等<sup>[12]</sup>对上海市轨道交通某节点桥单T构悬臂拼装架桥机施工进行了强风状态下的有限元模拟,研究了T构在不同工况下的动力特性。不少研究人员还从影响预制节段箱梁桥受力及变形的因素入手,提出了减小节段箱梁混凝土收缩及徐变等的拼装施工控制方案<sup>[13-15]</sup>。

采用悬臂拼装施工的预制节段箱梁桥,其顶板钢束一般会在节段拼装过程中张拉。因此,顶板钢束截面积、张拉控制应力及布置形式等因素对悬臂拼装施工阶段的节段梁横截面压应力储备、节段梁线形具有重要影响;非顶板钢束则在合龙阶段分批张拉。相关研究<sup>[16-17]</sup>表明,桥梁拉索及预应力筋张拉顺序、温度等会对合龙时及成桥状态下的桥梁线形和横截面压应力储备产生极大影响。然而,目前国内相关研究较少考虑桥梁施工步骤及预应力等参数引起的受力状态变化对节段梁应力及变形产生的影响。因此,有必要结合桥梁的施工步骤研究预应力等相关参数的影响。本文拟以图1所示的郑州市某城市快速路高架桥一联三跨预制节段箱梁桥为背景,对其在悬臂拼装阶段和合龙阶段的受力状态及变形性能进行数值模拟,研究顶板预应力

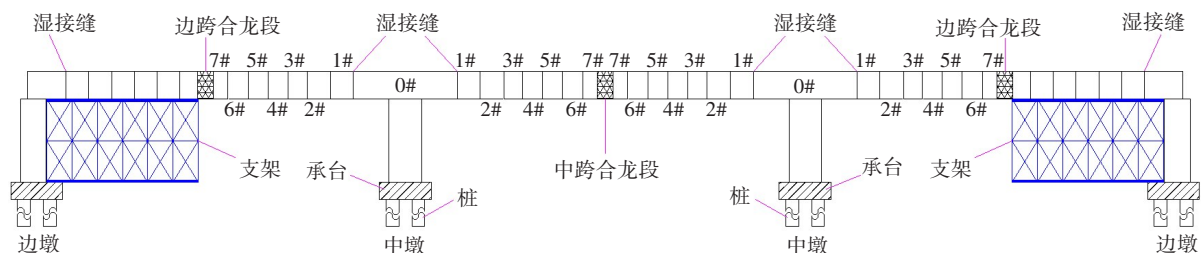


图1 一联三跨预制节段箱梁桥结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of a three-span precast segmental box girder bridge

相关参数对悬臂拼装阶段节段箱梁性能的影响,以及非顶板钢束张拉顺序对合龙阶段桥梁性能的影响,并提出相关参数的合理取值范围,为施工安全控制提供参考和指导。

## 1 预应力参数优化

在预制节段箱梁桥悬臂拼装阶段,顶板钢束一般在节段箱梁拼装过程张拉,其余位置钢束则在合龙阶段张拉,因此顶板钢束布置形式、张拉控制应力及钢束截面积是影响悬臂拼装阶段T构节段箱梁挠度及横截面压应力储备的主要因素,而腹板及底板钢束张拉的先后顺序则对合龙阶段的节段箱梁线形及横截面正应力产生影响。

根据预制节段箱梁桥悬臂拼装阶段和合龙阶段的施工特点,建立如图2~3所示的有限元模型(梁宽 $L=10\text{ m}$ )。在各墩柱底施加固定约束,随施工过程中施加预应力、节段自重及施工荷载,施工荷载( $15\text{ kN/m}^2$ )施加于第 $n-1$ 、 $n-2$ 节段,其中第 $n$ 节段为当前施工节段,在1#、2#节段施工期间,该施工荷载则施加于墩顶0#块上。采用生死单元法模拟悬臂拼装阶段各节段的对称悬臂拼装过程。混凝土采

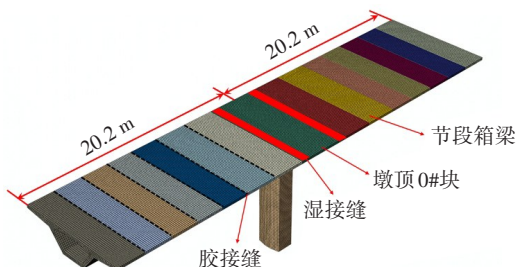


图2 预制节段箱梁桥T构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of T-structure of precast segmental box girder bridge

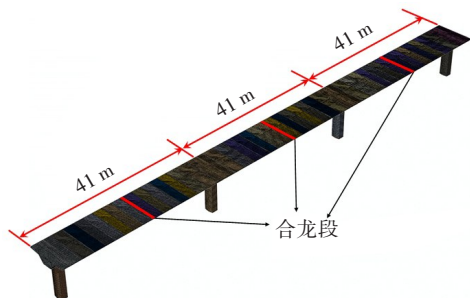


图3 一联三跨预制节段连续箱梁桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of a three-span precast segmental continuous box girder bridge spanning three consecutive spans

用ABAQUS软件中的塑性损伤模型,预应力筋及普通钢筋本构模型采用理想弹塑性模型。采用实体力筋法模拟预应力效应,并使用降温法精准施加预应力。环氧树脂胶的抗拉及抗压强度均比混凝土的大,且其接缝尺寸相对于节段梁极小( $3\text{ mm}$ 以内),故不对其单独划分单元,而使用硬接触模拟。节段梁与湿接缝采用实体建模。箱梁采用C60混凝土,结构钢筋为HRB400,预应力钢束为直径 $15.2\text{ mm}$ 的低松弛、高强度钢绞线,抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 。

为验证使用降温法模拟预应力效应、材料本构关系和单元选取等的合理性,利用本文的有限元建模方法建立与KIM等<sup>[18]</sup>的预制节段箱梁桥试验相对应的全尺寸几何模型,并对结果进行比较。KIM等对三节段拼接简支预制箱梁进行了静力加载破坏试验,并对加载下的节段及整体梁应变、挠度及裂缝形态等进行了分析。按照KIM等的试验构件建立的有限元模型如图4所示。

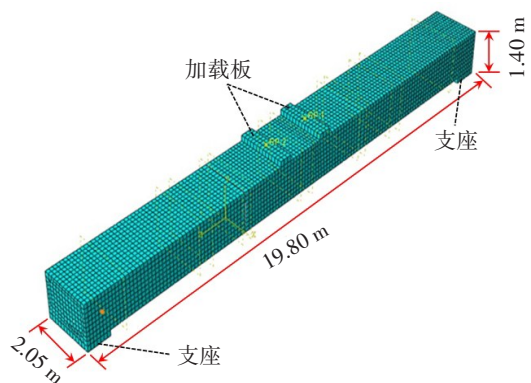


图4 KIM等的现场试验节段箱梁对应的有限元模型

Fig. 4 The corresponding finite element model to the segment box girder in KIM et al.'s experiments

提取有限元模型中的节段箱梁跨中挠度和1/4跨挠度与KIM等的试验结果进行对比,如图5所示。由图5可以看出,在线弹性变形阶段试验结果与数值模拟结果基本一致,且两者的荷载-位移曲线斜率即结构刚度基本相同。随着裂缝的发展,结构逐渐出现塑性变形,试验与有限元模拟对应的挠度差值逐渐增大,但仍然小于10%,故本文有限元模拟所用方法及相关参数选择合理有效。

### 1.1 预应力合力偏心距

如图6~7所示,在T构的节段箱梁顶板内沿其中轴线两侧对称设置2组钢绞线,每组均包含T1~T7共7股钢束,组内钢束关于T1对称分布,因此每组钢束的预应力合力作用线位于T1钢束上。定义

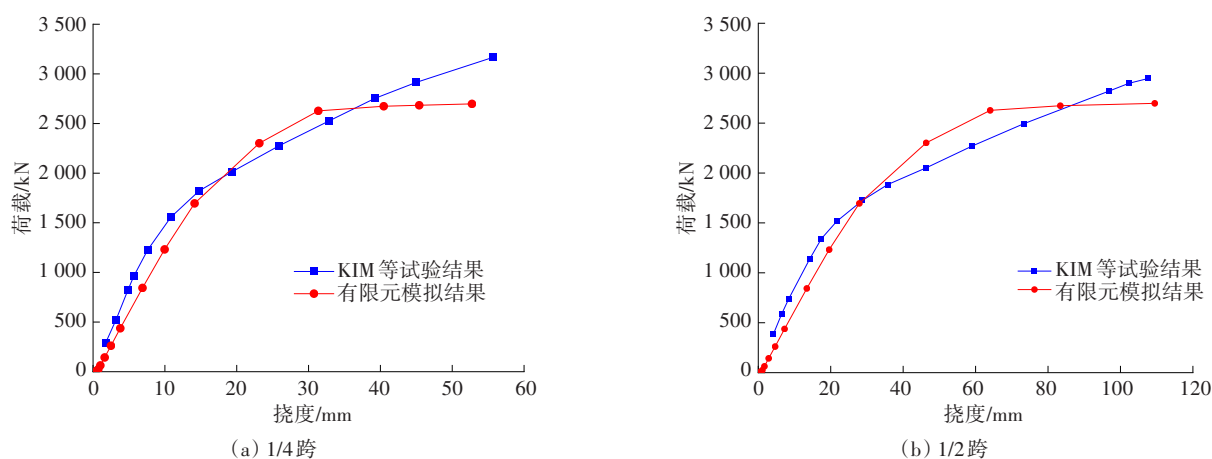


图5 KIM等试验实测与有限元模型节段梁挠度对比

Fig. 5 Comparison of the deflection between KIM et al.'s experiment and finite element model

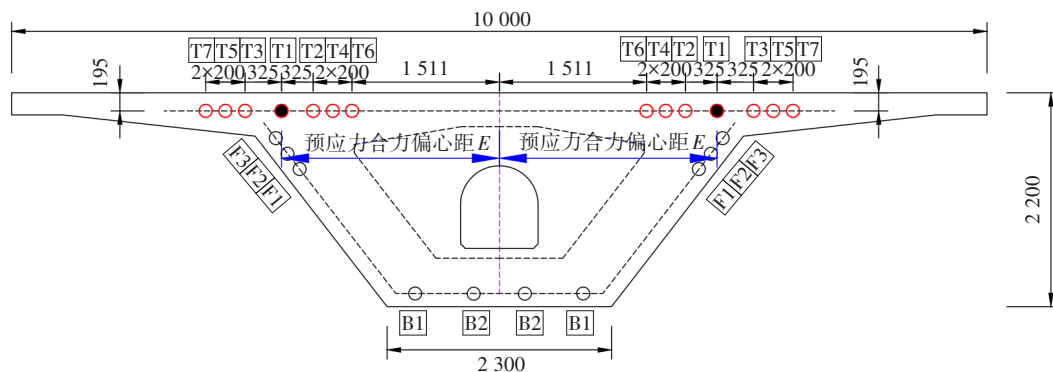


图6 箱梁截面形式及预应力合力偏心距示意图(单位:mm)

Fig. 6 Schematic diagram of the section and eccentricity of prestressed combined force (unit: mm)

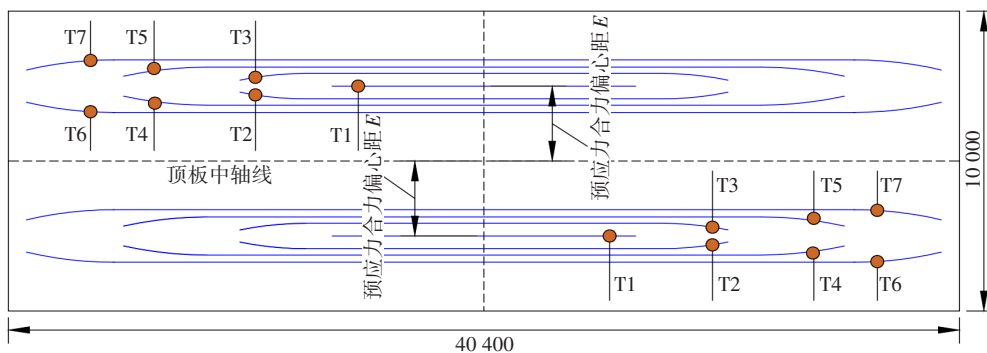


图7 T构预制节段箱梁顶板钢束布置平面图及偏心距(单位:mm)

Fig. 7 Layout plan and eccentricity of the bundles on the top plate of T-structure (unit: mm)

该合力作用线与顶板中轴线的距离为预应力合力偏心距,简称为偏心距 $E$ 。

控制每股顶板钢束截面积( $10\varnothing 15.2\text{ mm}$ )与其张拉控制应力( $0.75f_{pk}$ )不变,研究偏心距 $E$ 改变对悬臂拼装阶段预制节段箱梁线形及横截面正应力的影响。分别取 $E$ 为 $0.14L$ 、 $0.18L$ 、 $0.22L$ 、 $0.26L$ 及 $0.30L$ ( $L$ 为节段箱梁顶板宽度)。

#### 1) T构节段箱梁横截面正应力。

取墩顶0#块与1#节段间的湿接缝截面,不同偏

心距下该截面上下缘正应力分布如图8所示,图中编号“M-A10-F7.5-E1.4”表示顶板钢束截面积 $A_p$ 为 $10\varnothing 15.2\text{ mm}$ ,张拉控制应力为 $0.75f_{pk}$ ,预应力合力偏心距 $E$ 取 $0.14L$ ,其余以此类推。上缘最大压应力位于横截面最外侧,并随偏心距的增大而增大,即顶板钢束布置越靠近外侧,顶板两侧压应力储备越充足。然而,随着偏心距的增大,横截面中部压应力逐渐减小,截面中部的压应力储备逐渐降低。由于当顶板钢束截面积与张拉控制应力不变时,顶板

预应力对底板的作用效应不会随着偏心距的变化而改变,故截面下缘压应力没有明显的变化。

考虑到箱梁横截面的压应力储备,合理的偏心距 $E$ 应该使截面中部和两侧均有足够的压应力。因此,偏心距 $E$ 宜取 $0.22L \sim 0.26L$ ,即T1钢束布置在距离顶板中轴线 $0.22L \sim 0.26L$ 处,其余则按照设计间距关于T1对称布置。

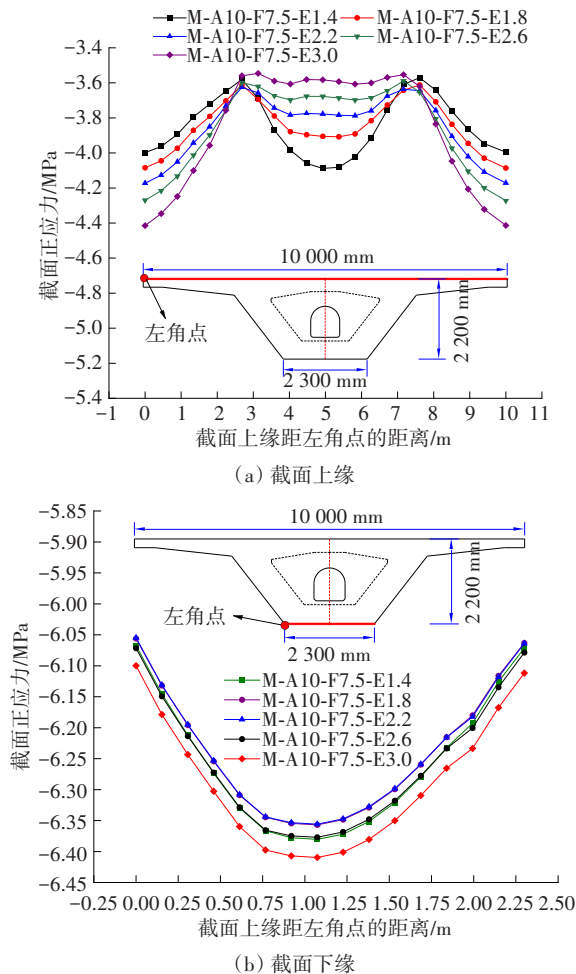


图8 不同偏心距下截面上下缘正应力变化规律

Fig. 8 Normal stress at the upper & lower edge of the section under different eccentricities

## 2) T构节段箱梁线形。

悬臂拼装阶段T构节段箱梁顶板中轴线线形随偏心距的变化如图9所示,其中1#~2#节段挠度受偏心距影响较小,其余各节段挠度随着偏心距的变化而变化。当偏心距增大,T构悬臂端逐渐由上翘变为下挠,即顶板钢束布置越靠近箱梁外侧,预应力对各节段挠度的影响越小。当 $E=0.22L \sim 0.26L$ 时,T构端部挠度相对较小,这对后续合龙施工有利。综合考虑节段箱梁桥在悬臂拼装阶段的抗裂能力、截面压应力储备和悬臂端部挠度等因素, $E=0.22L \sim 0.26L$ 为顶板钢束的最优布置参数。

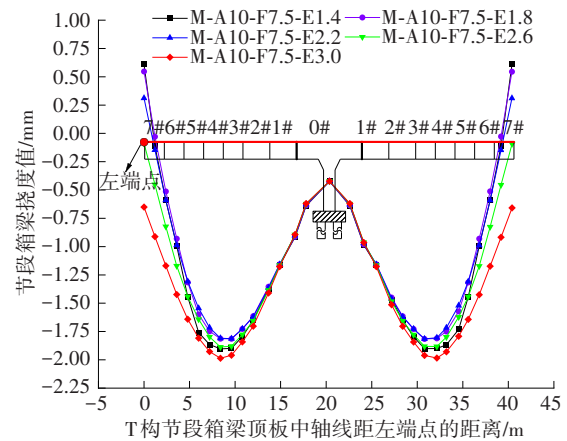


图9 T构预制节段箱梁线形随偏心距 $E$ 的变化

Fig. 9 Alignment of precast segmental box girder varying with eccentricity

## 1.2 顶板钢束张拉控制力

张拉控制力 $P_{con}$ 是钢束张拉控制应力 $\sigma_{con}$ 与其截面积 $A_p$ 的乘积<sup>[19]</sup>,即:

$$P_{con} = \sigma_{con} A_p \quad (1)$$

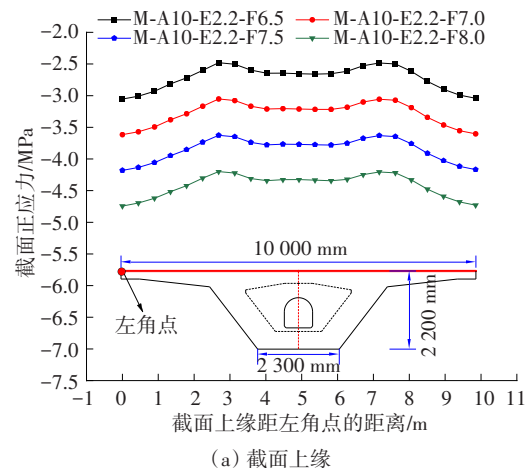
$P_{con}$ 反映了预应力作用于结构构件的整体效果,同时在预应力钢束实际张拉施工时,通过张拉控制力与实际张拉力的比较可较方便地校核钢束是否张拉到位。由式(1)可以看出,钢束截面积与张拉控制应力均会对预应力作用效果产生影响。

### 1.2.1 张拉控制应力

保持预制节段箱梁桥顶板钢束截面积( $10 \varnothing 15.2 \text{ mm}$ )及偏心距 $E(=0.22L)$ 不变,分别取张拉控制应力为 $0.65f_{pk}$ 、 $0.70f_{pk}$ 、 $0.75f_{pk}$ 和 $0.80f_{pk}$ ,研究其对T构箱梁横截面正应力及箱梁线形的影响。

#### 1) T构节段箱梁横截面正应力。

不同张拉控制应力下墩顶0#块与1#节段间的湿接缝截面上下缘正应力如图10所示。随着张拉控制应力的提高,截面上缘压应力逐渐增大,下缘压应力逐渐减小。合理的张拉控制应力应使预制节



(a) 截面上缘

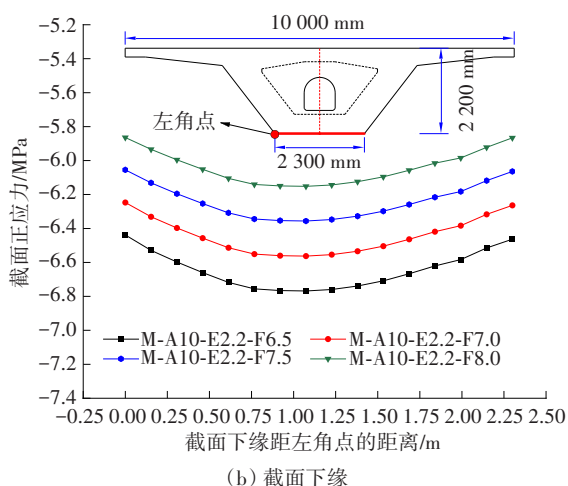


图10 不同张拉控制应力下截面上下缘正应力变化规律

Fig. 10 Normal stress at the upper & lower edge of the section under different tensioning control stress

段箱梁全截面具有足够的压应力储备。因此,考虑到截面下缘的压应力储备,张拉控制应力不应过大。

## 2) T构节段箱梁线形。

不同张拉控制应力下T构顶板中轴线线形的变化如图11所示。当张拉控制应力低于 $0.70f_{pk}$ 时,T构端部向下挠曲;当其大于 $0.75f_{pk}$ 时,T构端部向上翘曲;而当张拉控制应力为 $(0.70 \sim 0.75)f_{pk}$ 时,端部挠度接近于0,近似呈平直状态,由此可减小中跨合龙施工难度。综上所述,张拉控制应力的最优范围为 $(0.70 \sim 0.75)f_{pk}$ 。

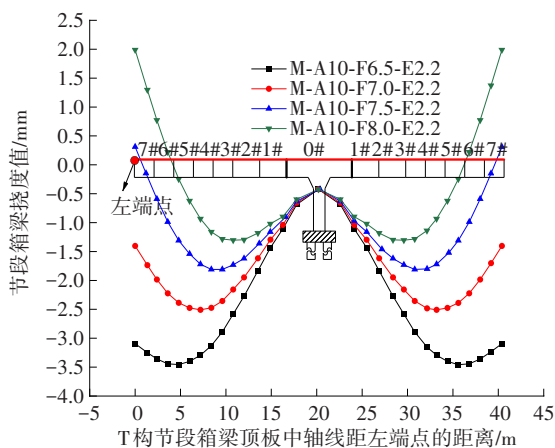


图11 T构预制节段箱梁线形随张拉控制应力的变化

Fig. 11 Alignment of precast segmental box girder varying with tensioning control stress

## 1.2.2 顶板钢束截面积

保持张拉控制应力 $(0.75f_{pk})$ 及偏心距 $E(=0.22L)$ 不变,分别以 $5\phi 15.2$  mm、 $7\phi 15.2$  mm、 $10\phi 15.2$  mm、 $12\phi 15.2$  mm及 $15\phi 15.2$  mm作为顶板钢束规

格,所对应的钢束截面积分别为 $0.000\ 70$ 、 $0.000\ 98$ 、 $0.001\ 40$ 、 $0.001\ 68$ 、 $0.002\ 10\text{ m}^2$ ,研究钢束规格(即截面积)变化对T构节段箱梁横截面正应力及箱梁线形的影响。

图12所示为不同钢束截面积下墩顶0#块与1#节段间的湿接缝截面上下缘正应力分布情况。由图12可以看出,随着截面积的增大,截面上缘压应力逐步增大。当顶板钢束为 $5\phi 15.2$  mm时,截面上缘压应力储备较小,且截面上缘中部产生拉应力,所以顶板钢束的截面积规格至少应高于 $5\phi 15.2$  mm。随着钢束截面积的增加,预应力效应逐步增大,所施加的预应力在底板处产生的弯矩将导致底板处出现拉应力,从而减小了底板处的预压应力储备,这对悬臂拼装阶段的结构裂缝控制不利,且过大的钢束截面积不符合经济性要求。

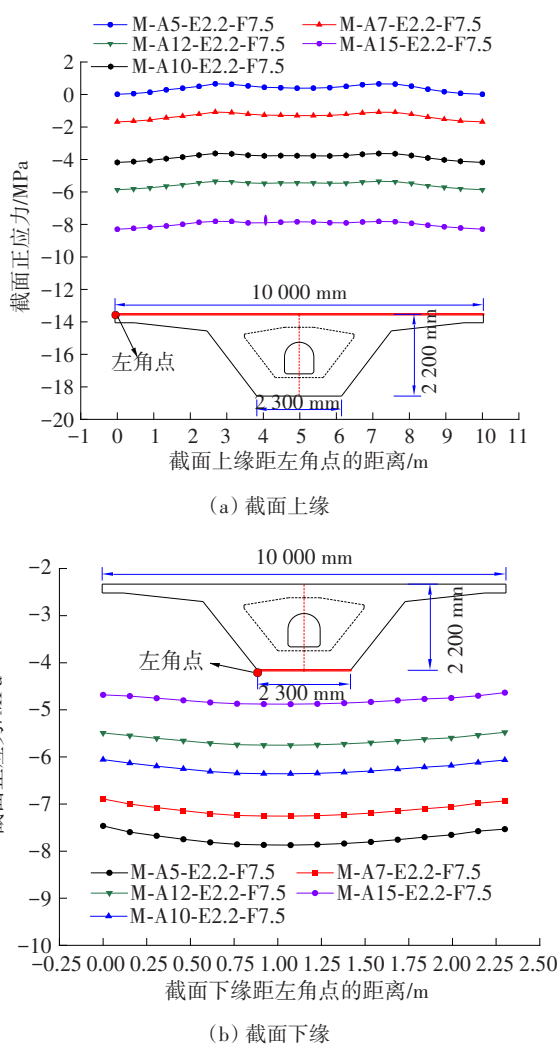


图12 截面上下缘正应力随钢束面积的变化

Fig. 12 Normal stress at the upper & lower edge of the section with steel tendon area

图13所示为T构预制节段箱梁线形随钢束截面积的变化。由图13可以看出,随着顶板钢束截面积的增大,T构端部挠度由下挠过渡为上翘,过大的端部下挠和上翘变形都将使桥梁在合龙阶段产生较大误差。因此,应选用规格为A10的顶板钢束,此时在合理的张拉控制应力下,端部接近水平,这对合龙施工有利。

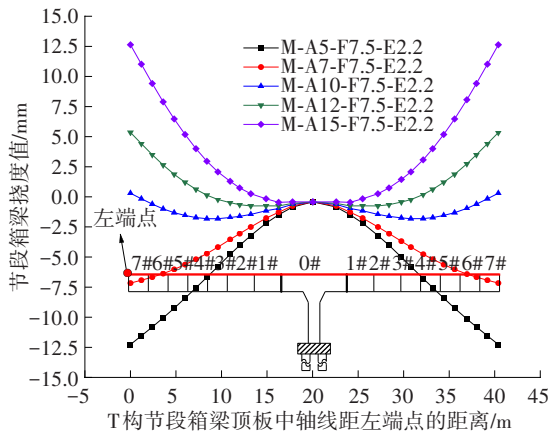


图13 T构预制节段箱梁线形随钢束截面积的变化

Fig. 13 Alignment of precast segmental box girder varying with sectional area of tendon

综上所述,顶板钢束张拉控制应力宜取 $(0.70 \sim 0.75)f_{pk}$ ,且每股钢束截面积的规格不应小于 $7\phi 15.2$  mm。因此,根据钢束张拉控制力、张拉控制应力和截面积之间的关系,每股顶板钢束的张拉控制力不应低于1 275.96 kN。

### 1.3 预应力钢束张拉顺序

图14为一联三跨预制节段箱梁桥钢束布置图。

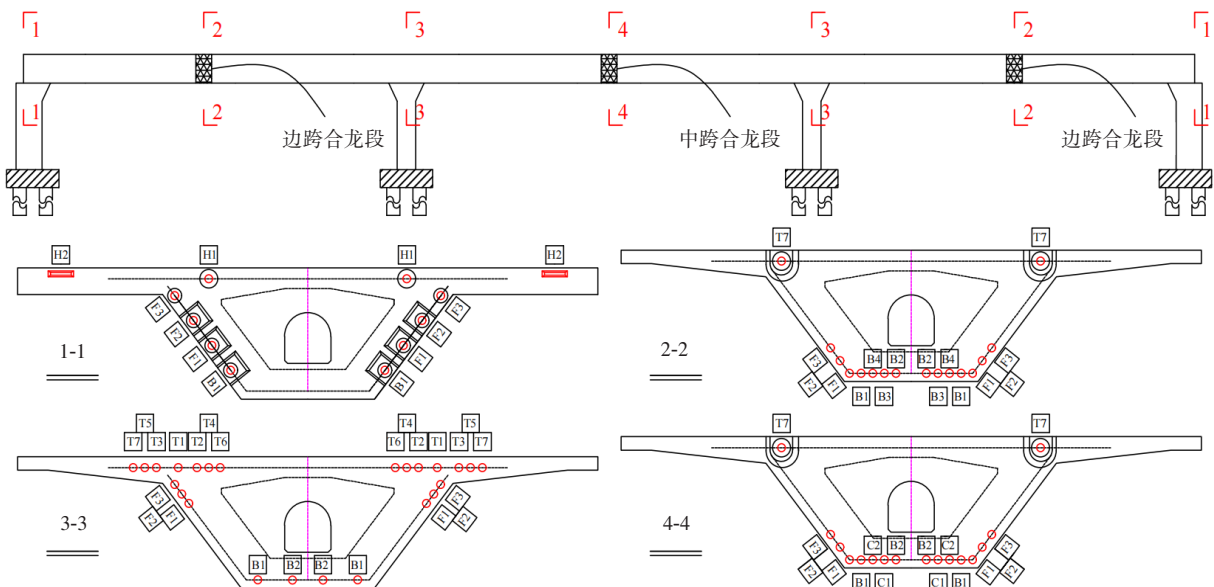


图14 一联三跨预制节段箱梁桥钢束布置图(单位:mm)

Fig. 14 Layout of tendons of a three-span precast segmental box girder bridge (unit: mm)

由图14可以看出,一联三跨预制节段箱梁桥预应力钢束类型及相应的张拉顺序分别为:①顶板T系列钢束在中墩处T构节段箱梁对称悬臂拼装时张拉;②顶板H系列钢束在边墩处节段箱梁拼装时张拉;③腹板F系列钢束、底板B系列钢束、中跨底板C系列钢束则在三跨合龙时张拉。因此,合龙阶段各类钢束张拉的先后顺序对节段箱梁线形及横截面压应力储备等至关重要。

为研究合龙阶段钢束张拉顺序对桥梁的影响,根据钢束的布置位置、长度设计以下4种张拉顺序:①首先张拉所有底板钢束,再张拉全部腹板钢束,简称B-F式;②首先张拉全部腹板钢束,再张拉所有底板钢束,简称F-B式;③首先张拉通长钢束,再张拉局部钢束,简称L-S式;④首先张拉局部钢束,再张拉通长钢束,简称S-L式。为便于对比,定义FT为所有钢束同时张拉完成后的箱梁应力及变形最终状态,在实际工程中受施工环境及设备的限制无法实现,此处仅作为参照。

合理的预应力钢束张拉顺序应使前后张拉阶段之间节段箱梁产生的变形过渡平缓,避免桥梁线形变化过大导致结构的整体性及稳定性受到影响。现考察在上述4种张拉顺序下在第一阶段完成时(first stage, FS)和FT状态下节段箱梁的受力及变形情况,并从截面压应力储备、线形变化平缓性方面比较不同张拉顺序的优劣。图15所示为第一阶段张拉完成后全桥的挠度状态。

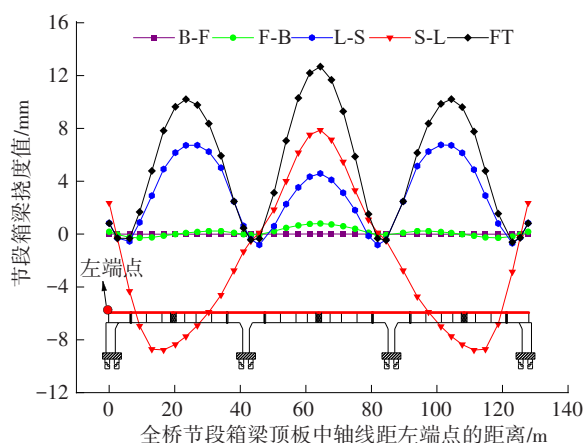


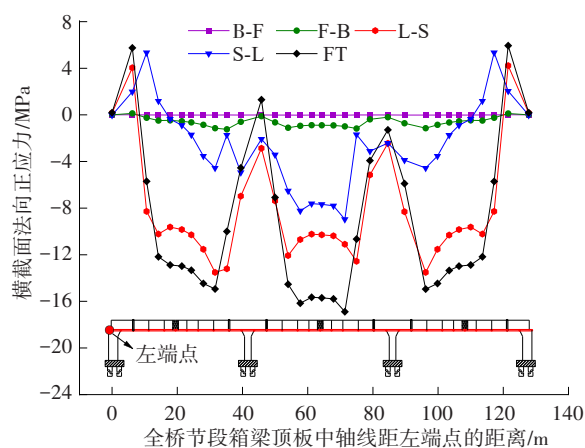
图15 不同张拉顺序下第一阶段完成时预制节段箱梁桥的线形

Fig. 15 Alignment of precast segmental box girder bridge with various tensioning sequences

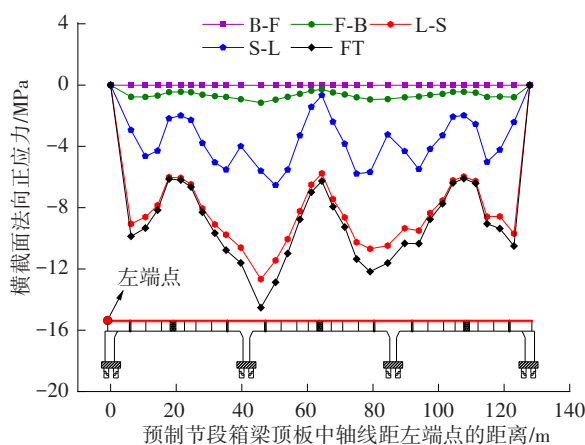
由图15可以看出, F-B式、B-F式的边跨跨中预拱度过小, S-L式由于在第一阶段仅张拉跨中底板局部短束, 所产生的预应力效应相对较小, 导致在边跨甚至产生下挠变形, 不利于抵消或减小桥梁自重、施工荷载及行车荷载等产生的下挠。且在上述3种张拉顺序下节段箱梁在第一阶段的挠度与FT状态下的差值过大, 导致在第二阶段张拉后节段的竖向位移变化较大, 不利于结构的整体稳定, 而在L-S式张拉顺序下变形过渡相对平缓, 且能保持合理的预拱度。

合理的预应力钢束张拉顺序还应使节段箱梁在不同张拉阶段均具有足够的压应力储备或使产生的拉应力在允许范围内, 箱梁顶板和底板中轴线上的横截面法向正应力分布可大致反映节段箱梁桥横截面正应力的变化情况。图16所示为不同张拉顺序下第一阶段张拉完成时顶板和底板中轴线横截面法向正应力的对比情况。由图16可以看出, S-L式及L-S式在第一阶段张拉完成后, 在边跨端部底板上轴线上部分横截面受到了拉应力, 但相比而言, L-S式所对应的截面拉应力在沿桥纵向的分布距离更短, 更加符合桥梁强度安全和抗裂性能的要求, 而在F-B式和B-F式张拉顺序下在第一阶段张拉完成后的横截面压应力过小, 不足以保证箱梁施工过程中的抗裂安全。

综上所述, 对于各张拉顺序, 顶、底板中轴线横截面法向压应力储备从大到小的顺序为: L-S式、S-L式、F-B式、B-F式。在顶板处采用L-S式或S-L式, 其第一阶段张拉完成后顶板的压应力储备均较充



(a) 顶板中轴线



(b) 底板中轴线

图16 不同张拉顺序下第一阶段张拉完成时顶、底板中轴线横截面法向正应力对比

Fig. 16 Comparison of the sectional normal stress of top & bottom plate central axis after the first stage with various tensioning sequences

足, 且FS与FT状态之间应力过渡平缓。

将上述4种张拉顺序在FS状态下的顶板中轴线挠度平均值、顶板中轴线横截面法向正应力平均值、底板中轴线横截面法向正应力平均值与FT状态下上述3个指标的平均值之间的变化程度定义为 $|\bar{\beta}|$ , 即:

$$|\bar{\beta}| = \left| \left[ \frac{(\bar{X}_{FT} - \bar{X})}{\bar{X}_{FT}} \right] \times 100\% \right| \quad (2)$$

式中:  $\bar{X}_{FT}$  为全部预应力张拉完成后顶板中轴线挠度平均值或顶、底板中轴线横截面法向正应力平均值;  $\bar{X}$  为上述4种张拉顺序下第一阶段张拉完成时顶板中轴线挠度平均值或顶、底板中轴线横截面法向正应力平均值。因此,  $|\bar{\beta}|$  可反映节段箱梁横截面正应力或箱梁挠度在同一张拉顺序下前后张拉阶段之间变化的剧烈程度。 $|\bar{\beta}|$  越大, 表示横截面正应

力或箱梁挠度波动程度越大,表1为不同张拉顺序下的 $|\bar{\beta}|$ 值。

由表1可知,在B-F式、F-B式和S-L式的张拉顺序下,3个指标对应的 $|\bar{\beta}|$ 值大多数接近或超过100%,即FT状态下的3个指标值是第一阶段张拉完成时的2倍,这不利于结构的整体稳定。而在L-S式张拉顺序下,3个指标对应的 $|\bar{\beta}|$ 值最小,前后张拉阶段所引起的结构变形及截面应力变化程度最低。

表1 不同张拉顺序下的 $|\bar{\beta}|$ 值

Table 1  $|\bar{\beta}|$  values in different schemes of tension sequence

指标	%			
	B-F式	F-B式	L-S式	S-L式
顶板中轴线挠度	99.99	96.05	39.77	124.42
顶板中轴线横截面法向正应力	99.87	92.17	6.11	59.38
底板中轴线横截面法向正应力	99.90	94.65	25.36	79.62

2 结论

本文选取郑州市某城市快速路高架桥为背景工程,对预制节段箱梁桥悬臂拼装阶段、合龙阶段进行有限元模拟,研究了这两个阶段的预应力相关参数对预制节段箱梁桥受力及变形性能的影响,研究结论如下:

1) 预制节段箱梁桥顶板单侧钢束组预应力合力偏心距 $E$ 宜取 $0.22L \sim 0.26L$ ,即顶板单侧钢束组预应力合力作用线与顶板中轴线的距离为箱梁宽度的 $0.22 \sim 0.26$ 倍,在此情况下T构节段箱梁在悬臂拼装阶段的线形及横截面法向正应力分布均较为合理。

2) 钢束截面积与张拉控制应力的合理选取应考虑两者的联系。从经济性方面考虑,当采用较小的钢束截面积时可以通过增大张拉控制应力获得预期的预应力作用效果,但对预应力锚固区的局部安全不利。反之,较大的钢束截面积搭配较小的张拉控制应力在经济性和预应力损失等方面存在不足。综上所述,在预制节段箱梁悬臂拼装阶段,顶板预应力钢束的最优张拉控制应力宜取 $(0.70 \sim 0.75)f_{pk}$ ,并控制预应力钢束规格不低于 $7\varnothing 15.2\text{ mm}$ (或钢束截面积 $A_p \geq 0.000\ 98\text{ m}^2$ ),或保证每股钢束的张拉控制力不低于 $1\ 275.96\text{ kN}$ 。

3) 从桥梁预拱度、线形及截面压应力储备等角

度考虑,并对比合龙阶段非顶板钢束不同张拉顺序下的桥梁线形变化与截面正应力分布状态,宜采用先张拉底板、腹板的通长钢束,再张拉中跨和边跨局部钢束的张拉顺序。

参考文献(References):

[1] 彭华春,张康康,时松,等.节段预制拼装桥梁研究综述[J].铁道标准设计,2022,66(10):75-83. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202107260003.  
PENG Huachun, ZHANG Kangkang, SHI Song, et al. Summary of research on segmental precast assembled bridge[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 75-83. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202107260003.

[2] 曾锋,周东东,孙一方.高速公路混凝土预制梁智能制造技术研究[J].公路与汽运,2023(2):122-126. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.028.  
ZENG Feng, ZHOU Dongdong, SUN Yifang. Research on intelligent manufacturing technology of expressway concrete precast beam [J]. Highways & Automotive Applications, 2023 (2) : 122-126. DOI: 10.20035/j.issn. 1671-2668.2023.02.028.

[3] JIANG H B, LI Y H, LIU A R, et al. Experimental study on shear behavior of precast concrete segmental beams with hybrid tendons and dry joints [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23 (10) : 4354-4367. DOI: 10.1007/s12205-019-1229-1.

[4] YUAN A M, HE Y, DAI H, et al. Experimental study of precast segmental bridge box girders with external unbonded and internal bonded posttensioning under monotonic vertical loading [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20 (4) : 4014075. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000663.

[5] AHMED G H, AZIZ O Q. Influence of intensity & eccentricity of posttensioning force and concrete strength on shear behavior of epoxied joints in segmental box girder bridges[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 117-129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2018. 11.220.

[6] 吴东升,卢永成,任才.城市高架变宽预制节段梁结构设计 with 关键技术研究[J].桥梁建设,2021,51(6):99-105. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2021.06.014.  
WU Dongsheng, LU Yongcheng, REN Cai. Design of variable-width precast segmental girders of urban viaducts and study of key techniques [J]. Bridge Construction, 2021, 51 (6) : 99-105. DOI: 10.3969/j.issn. 1003-4722.2021.06.014.

[7] 桂水荣,叶远盛,谢阳福,等.多幅变宽连续箱梁桥逐跨拼装施工方案优化比选[J].桥梁建设,2020,50

- (2): 92-97. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2020.02.016.
- GUI Shuirong, YE Yuansheng, XIE Yangfu, et al. Optimization and comparison of span-by-span assembly schemes for continuous box girder bridge with variable width and multiple decks[J]. Bridge Construction, 2020, 50 (2) : 92-97. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-4722.2020.02.016.
- [8] YAN W T, HAN B, XIE H B, et al. Research on numerical model for flexural behaviors analysis of precast concrete segmental box girders [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110733. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110733.
- [9] 孙九春, 薛武强, 曹虹. 大跨连续梁桥单T构悬臂拼装施工力学状态控制技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(4): 125-132. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2022.04.018.
- SUN Jiuchun, XUE Wuqiang, CAO Hong. Techniques to control load bearing behavior of T-frame of long-span continuous girder bridge during asymmetrical cantilever assembly[J]. Bridge Construction, 2022, 52(4) : 125-132. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2022.04.018.
- [10] 田杰. 大跨径曲线连续-刚构梁桥预制节段悬臂拼装技术实践[J]. 公路, 2018, 63(12): 134-137.
- TIAN Jie. Practice of cantilever assembly technology for precast segments of long-span curved continuous rigid frame bridge[J]. Highway, 2018, 63(12): 134-137.
- [11] 赵汗青, 任为东, 高静青, 等. 长联大跨连续钢桁梁悬臂拼装全过程仿真研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65 (11) : 6-11. DOI: 10.13238/j. issn. 1004-2954. 202104260006.
- ZHAO Hanqing, REN Weidong, GAO Jingqing, et al. Simulation research on the whole process of cantilever erection of long-connected large-span continuous steel truss girders [J]. Railway Standard Design, 2021, 65 (11) : 6-11. DOI: 10.13238/j. issn. 1004-2954. 202104260006.
- [12] 孙九春, 余海兵, 薛武强. 单T构悬臂拼装架桥机抗风性能研究[J]. 公路, 2021, 66(10): 163-169.
- SUN Jiuchun, YU Haibing, XUE Wuqiang. Research on wind resistance performance of cantilever assembled bridge girder with single T-structure [J]. Highway, 2021, 66(10): 163-169.
- [13] 张怡雪, 毛江鸿, 方明山, 等. 考虑存梁期影响的节段悬拼混凝土桥徐变变形分析[J]. 桥梁建设, 2021, 51 (4): 73-80. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2021.04.011.
- ZHANG Yixue, MAO Jianghong, FANG Mingshan, et al. Creep deformation analysis for precast concrete segmental bridge considering influence of girder storage time [J]. Bridge Construction, 2021, 51 (4) : 73-80. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2021.04.011.
- [14] 赵健, 王元清, 宋伟俊, 等. 石首长江公路大桥北边跨主梁施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.04.019.
- ZHAO Jian, WANG Yuanqing, SONG Weijun, et al. Key techniques for construction of main girder of north side spans of Shishou Changjiang River highway bridge [J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.04.019.
- [15] 桂水荣, 尧晨, 谢阳福, 等. 逐跨节段拼装连续刚构桥力学性能及桥墩参数研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48 (5): 57-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2020.05.012.
- GUI Shuirong, YAO Chen, XIE Yangfu, et al. Study of mechanical property and pier parameters for continuous rigid-frame bridge constructed using span-by-span segmental assembly [J]. World Bridges, 2020, 48 (5) : 57-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2020.05.012.
- [16] 王达, 黎峥. 大跨径混合式叠合梁斜拉桥合龙方案研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3) : 67-73. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210908001.
- WANG Da, LI Zheng. Research on the closing scheme of a long-span hybrid composite girder cable-stayed bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (3) : 67-73. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/ u.20210908001.
- [17] 张丰, 颜东煌, 陈常松. 大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2) : 91-97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.014.
- ZHANG Feng, YAN Donghuang, CHEN Changsong. Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the finished bridge state[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37 (2) : 91-97. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u. 2021.02.014.
- [18] KIM J, CHUNG W, JAY KIM J H. Experimental investigation on behavior of a spliced PSC girder with precast box segments[J]. Engineering Structures, 2008, 30 (11) : 3295-3304. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2008.04. 029.
- [19] 沈蒲生. 混凝土结构设计原理[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- SHEN Pusheng. Design principle of concrete structure [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2020.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:周锐)