

石首长江公路大桥预应力混凝土箱梁 张拉方案对比分析

田 亮

(中国铁建大桥工程局集团有限公司,天津 300300)

摘要:针对石首长江公路大桥北边跨混凝土梁段,基于 ABAQUS 软件,采用桁架单元 T3D2 模拟预应力筋,实体单元 C3D10 模拟混凝土,建立了混凝土标准梁段的有限元计算模型。制定了预应力整体张拉和局部张拉两种方案,并对这两种方案下混凝土梁段的受力进行了对比研究。研究表明,混凝土箱梁的预应力张拉工序直接影响梁段在吊装和存梁阶段的整体受力。当采用局部张拉方案时,预应力混凝土梁段受力状况良好,满足设计要求。

关键词:预应力混凝土箱梁;张拉工序;ABAQUS;方案比选;有限元分析

中图分类号:U446;U448.23 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)02-0017-07

0 引言

预应力混凝土箱梁通过施加预应力以抵消箱梁的自重荷载,从而提高箱梁承载能力,具有整体受力性能好,抗扭抗弯刚度大、便于模块化施工等特点,是我国桥梁工程中普遍应用的桥梁结构形式。预应力混凝土箱梁分为现浇箱梁和预制箱梁两类,其中预制箱梁作为一种比较成熟的技术,广泛应用于各类大跨径公路桥梁^[1]。随着我国公路交通事业的飞速发展,越来越多的公路桥梁开始兴建,路桥工程的复杂性和多样性对预应力混凝土箱梁的施工水平提出了更高的要求。为确保施工安全,需明确预应力混凝土箱梁在施工各阶段的受力情况,这对计算精度和效率提出了更高的要求,以现代数值计算理论为基础的有限单元法为解决上述问题提供了一种途径。

目前对预应力混凝土箱梁桥在运营阶段的耐久性研究较多,如针对箱梁腹板开裂和跨中下挠过大等问题的研究已见于诸多文献^[2-5]。但对于预应力混凝土箱梁在施工阶段的受力研究较少,这将有可能导致梁体在施工过程中产生开裂。以石首长江公路大桥为工程背景,对不同张拉工序下预应力混凝土梁段在吊装、移运等施工阶段的受力进行计算分析,以规划合理的预应力筋张拉工序,从而为箱梁的安全施工提供理论指导。

1 工程概况

在建石首长江公路大桥主桥为双塔单侧混合梁斜拉桥,主桥采用主跨 820 m 的双塔不对称混合梁斜拉桥方案,桥跨布置为 $3 \times 75 \text{ m} + 820 \text{ m} + (300 + 100) \text{ m}$ 。钢混结合段位于北塔附近,并伸入主跨距北塔中心线 26.5 m;北边跨采用混凝土主梁,长 251.5 m;中跨和南边跨采用钢主梁,全长 1 193.5 m。主桥桥型布置如图 1 所示。

北边跨混凝土箱梁采用分离式双箱断面结构,顶板厚 35 cm,底板厚 40 cm,斜底板厚 35 cm,内腹板厚 55 cm;索塔区和支点区各部位板厚相应增厚。横桥向箱梁底板水平,桥面横坡由箱梁顶板斜置而成。钢混结合段处横隔板厚 0.8 m,其余横隔板厚 32 cm,顺桥向横隔板标准间距为 3.75 m。混凝土箱梁采用三向预应力混凝土结构,其中 A 类标准梁段长度为 38.5 m,宽 7.5 m,采用 C55 号混凝土,重约 815 t。

收稿日期:2016-02-05 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2017.02.04

作者简介:田亮(1984-),男,工学博士,工程师,主要从事大跨径桥梁结构分析及施工组织设计。E-mail: whut_tl@126.com

田亮.石首长江公路大桥预应力混凝土箱梁张拉方案对比分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(2):17-23.

A 类标准梁段横断面如图 2 所示。

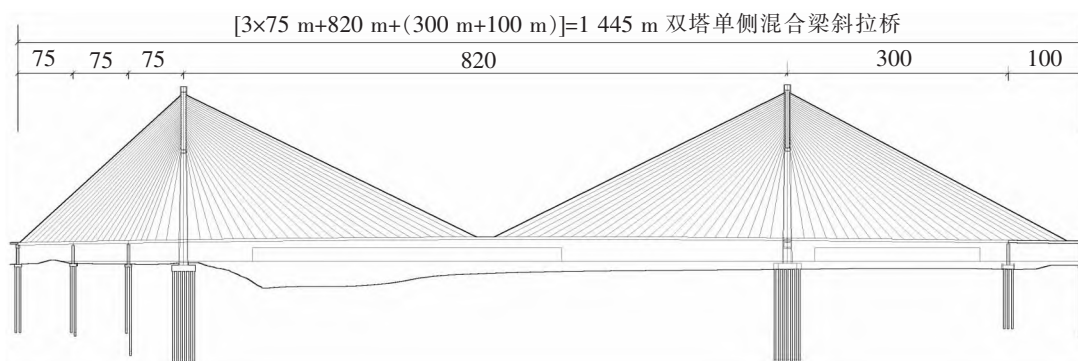


图 1 主桥桥型布置图(单位:m)

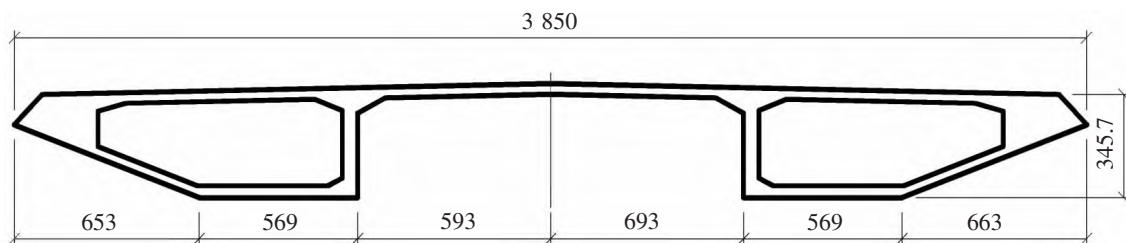


图 2 标准梁段横断面(单位:cm)

北边跨的混凝土梁段采用节段预制、滑移胶拼的施工方案。节段采用整幅预制,其中 A 类标准梁段长 7.5 m,吊装质量 815.7 t,共 20 个;其它梁段长度 5.0~7.5 m,吊装质量 736.1~1 047.9 t。梁段预制完成后,通过提升设备将预制梁段提升至滑移支架上,滑移至设计位置存放、拼装。按照梁段编号顺序(NJ01、NC01~NC36)从北塔向北边跨方向拼装,将全部混凝土梁段和钢混结合段连接成形,再按主桥上部构造架设施工顺序张拉斜拉索,同时悬臂吊装架设中跨钢箱梁节段,直至全桥合龙。标准梁段吊装及吊点布置如图 3 所示。

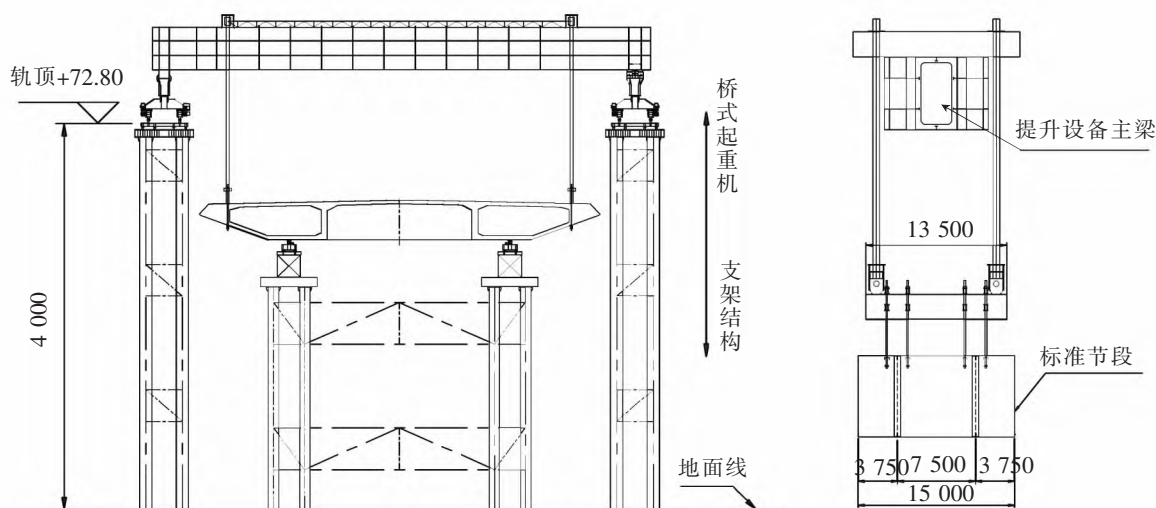


图 3 梁段吊装及吊点布置图(单位:mm)

2 计算模型

钢筋混凝土结构的模拟,通常有两类建模方法,整体式模型和分离式模型^[6]。其中分离式模型即将混凝土结构和力筋单独建模,划分网格后再进行节点耦合成为一个整体。本文采用分离式建模方法,建

立了 A 类预应力混凝土标准梁段的计算模型,以考察在不同预应力张拉工序下吊装、存梁及滑移阶段箱梁的受力情况。

2.1 有限元模型

基于 ABAQUS 软件,建立 A 类标准梁段的有限元实体模型。为便于分网和提高计算精度,混凝土采用高阶四面体单元 C3D10,预应力钢筋采用桁架单元 T3D2 模拟,未模拟普通钢筋。在 ABAQUS 中通过 *Embedded 命令将预应力钢束内嵌于混凝土梁内,耦合钢束与梁体的节点自由度^[7]。标准梁段实体模型和预应力筋模型分别如图 4、图 5 所示。

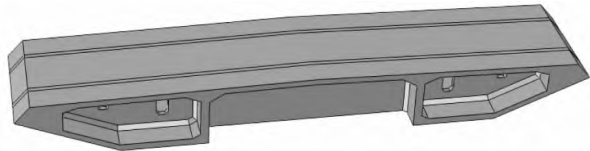


图 4 标准梁段实体模型

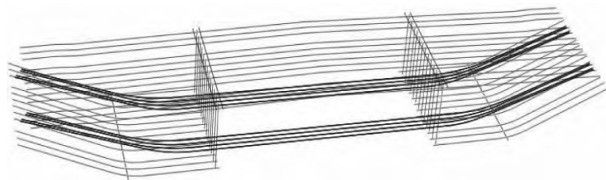


图 5 预应力筋模型

2.2 材料参数

混凝土箱梁主体结构采用 C55 混凝土,模型所用的材料参数按照规范选用,主要力学性能如表 1 所示。梁段移运过程中张拉的预应力筋分主要有两种:高强低松弛钢绞线和预应力螺纹钢筋。主梁横向预应力采用高强低松弛钢绞线,其公称直径 $\Phi_s 15.2$ mm;标准抗拉强度 $f_{pk}=1\ 860$ MPa;张拉控制应力为 $0.75f_{pk}$;弹性模量 $E_s=195$ GPa;热膨胀系数 $1.20E-5$ 。纵向预应力接长束和腹板竖向预应力采用 50 mm 预应力螺纹钢筋,标准强度 $f_{pk}=830$ MPa;张拉控制应力为 $0.9f_{pk}$;弹性模量 $E_s=200$ GPa;热膨胀系数 $1.10E-5$ 。

表 1 C55 混凝土力学性能

力学指标	弹性模量 E/MPa	泊松 比 γ	轴心抗压强度 设计值/MPa	抗拉强度设计 值/MPa	轴心抗压强度 标准值/MPa	抗拉强度标准 值/MPa
数值	3.55E4	0.2	25.3	1.96	35.5	2.74

2.3 载荷及边界

载荷主要考虑梁段自重和预应力,并考虑了预应力损失。梁段在地面预制台座预制完毕后,通过提升设备逐步提升至滑移支架,在梁段风嘴底部对称布置 4 个吊点,吊点布置如图 6 所示。梁段在存梁及滑移阶段处于四点临时支撑状态,支座位于梁段的横隔板处,支座中心与梁段中心横向距离 12 m,临时支座布置如图 7 所示。在本模型中,为了尽可能准确地模拟实际工况,吊点、支座与梁段底面建立只受压不受拉的接触关系,并约束其竖向位移自由度。

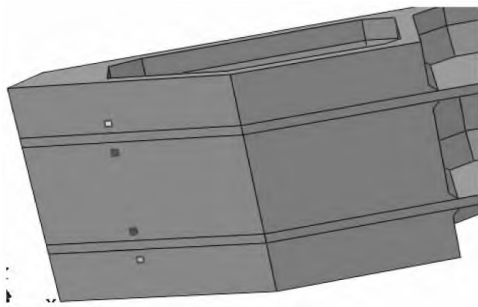


图 6 节段吊装吊点位置

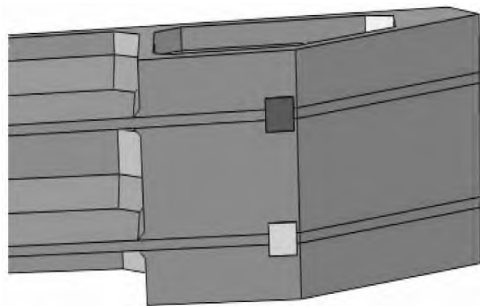


图 7 四点临时支座布置

2.4 预应力张拉

预应力的施加可通过初试应变法和降温法实现^[8],其中降温法是将预应力筋单元人为施加温降 ΔT ,钢筋收缩模拟预应力的施加。在本计算模型中,钢绞线预应力的施加通过“降温法”实现,施加的温降 ΔT 采用下式计算

$$\Delta T = \frac{F}{E_s A_{\text{eff}} \alpha} \quad (1)$$

式中, ΔT 表示降温值; F 表示预应力施加值; E_s 表示弹性模量; A_{eff} 表示钢束有效截面积; α 表示钢束热膨胀系数。

移梁前张拉梁段预应力, 采用两种张拉方案进行计算。第一种方案是张拉全部横向及竖向预应力, 包括顶板束 N1、底板束 N2、腹板束 N3 以及横隔板束(N4, N4', N5, N5'); 第二种方案是只部分张拉横隔板束中的 N5 及 N5', 同时张拉纵向预应力 N6, 其余横向及竖向预应力的张拉与第一种方案相同。梁段预应力筋布置如图 8 所示。

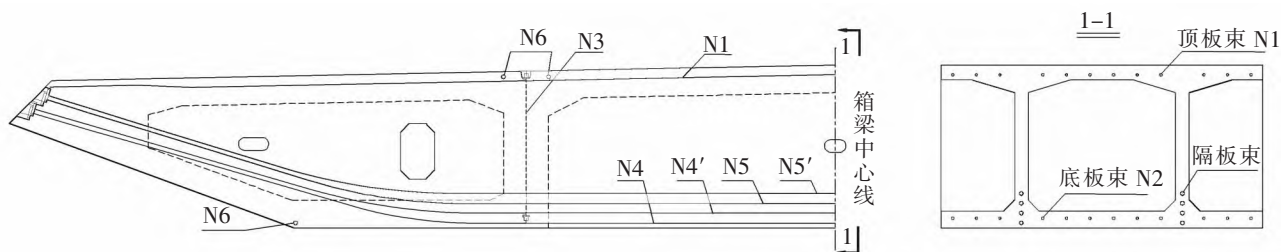


图 8 预应力筋布置图

3 结果分析

基于建立的预应力混凝土箱梁的有限元模型, 按照两种张拉方案, 横向、竖向预应力整体张拉方案以及隔板预应力部分张拉方案, 对梁段在吊装及存梁滑移阶段的受力进行计算, 并对计算结果进行讨论分析。

3.1 横向及竖向预应力张拉

按照第一种张拉方案计算, 将横向及竖向预应力张拉至控制应力, 对梁体在吊装和存梁滑移两种工况下的受力进行讨论。

3.1.1 吊装工况

根据《混凝土结构设计规范》GB50010—2010, C55 混凝土的抗拉强度设计值为 1.96 MPa。吊装工况下梁段的主拉应力分布如图 9~图 11 所示。

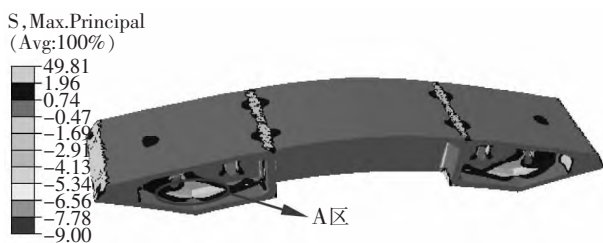


图 9 箱梁主拉应力分布(吊装, 顶面)

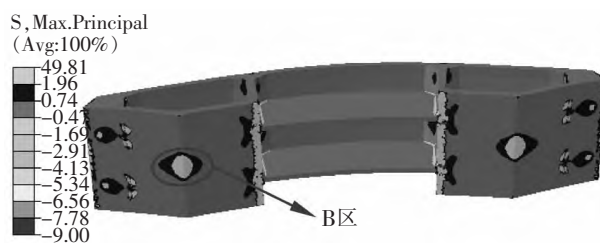


图 10 箱梁主拉应力分布(吊装, 底面)

由应力云图可看出, 在横向和竖向预应力筋张拉到位的情况下, 剔除预应力锚固及吊点处的应力集中区, 在横隔板与底板连接部位, 如图 9 所示 A 区; 平地板与斜底板过渡区域, 如图 10 所示的 B 区, 出现了较大范围的应力超标区, 最大主拉应力值分别约为 2.5 MPa 和 3.6 MPa。这是由于隔板处预应力筋的径向分力导致的^[9]。在该张拉方案下进行吊装作业, 梁段偏于危险, 部分区域可能会开裂。图 12 为箱梁竖向位移分布, 梁体中部最大上拱约 11.77 mm, 风嘴处下挠约 3.13 mm。

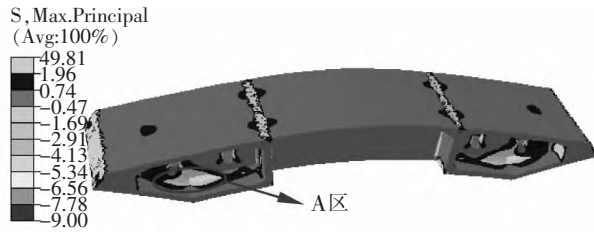


图 11 横隔板主拉应力分布(吊装)



图 12 箱梁竖向位移(吊装)

3.1.2 存梁滑移工况

存梁、滑移阶段箱梁均采用四点临时支撑,边界条件相同,因此采用同一模型进行计算。存梁滑移工况下梁段的主拉应力分布如图 13~图 15 所示。由应力云图可看出,相比吊装阶段,存梁滑移阶段的应力超标区范围扩大,数值也有所增加,应力超标位置同样出现在横隔板与底板连接部位以及平地板与斜底板过渡区域,最大主拉应力值分别约为 5.3 MPa 和 4.6 MPa。由图 16 可得,梁段中部上拱最大值与吊装阶段接近,为 11.72 mm,但风嘴下挠大大增加,约为 13.7 mm。相比吊装工况,在该张拉方案下进行存梁滑移作业,箱梁局部开裂的可能性更大。

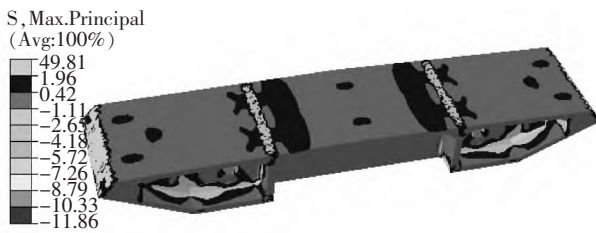


图 13 箱梁主拉应力分布(存梁滑移,顶面)

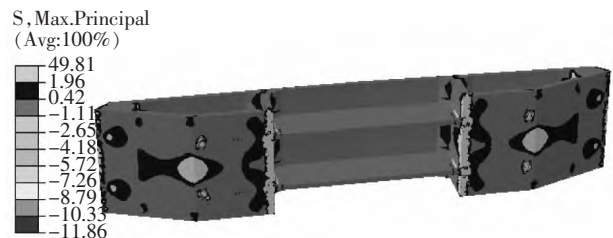


图 14 箱梁主拉应力分布(存梁滑移,底面)

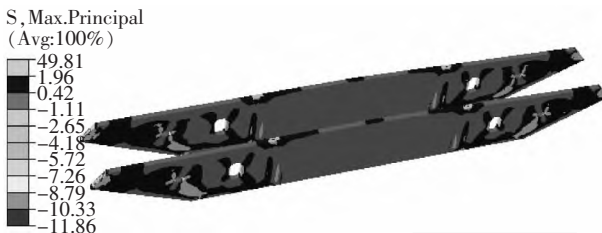


图 15 横隔板主拉应力分布(存梁滑移)



图 16 箱梁竖向位移(存梁滑移)

3.2 隔板预应力部分张拉

采用第二种张拉方案,张拉顶板束 N1、底板束 N2,腹板束 N3,横隔板束中的 N5 及 N5',同时张拉纵筋 N6,同样对箱梁在吊装和存梁滑移两种工况下的受力进行讨论。

3.2.1 吊装工况

吊装工况下梁段的主拉应力分布如图 17~图 19 所示。剔除预应力锚固及吊点处的应力集中区,由应力云图可看出,相比第一种张拉方案,该工况下箱梁主体区域主拉应力值均小于 1.96 MPa,不存在超标区,箱梁顶板和横隔板处于受压状态,有一定的压应力储备。由图 20 可看出,该吊装工况下箱梁中部出现约 2 mm 的轻微下挠,这是由于未张拉隔板预应力束 N4 和 N4'导致。总体上看,可认为在该张拉方案下,吊装梁段各部位应力满足设计要求,箱梁偏于安全。

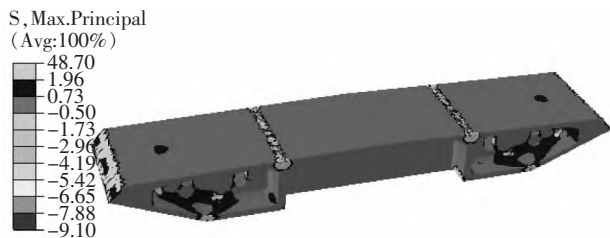


图 17 箱梁主拉应力分布(吊装,顶面)

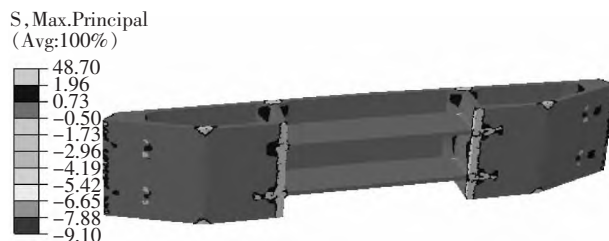


图 18 箱梁主拉应力分布(吊装,底面)



图 19 横隔板主拉应力分布(吊装)



图 20 箱梁竖向位移(吊装)

3.2.2 存梁滑移工况

存梁滑移工况下梁体的主拉应力分布如图 21~图 23 所示。剔除预应力锚固及支座处的应力集中区,由应力云图可看出,该工况下箱梁主体区域不存在大范围应力超标区,且顶板、横隔板等部位存在一定的压应力储备,梁体受力满足设计要求。与吊装工况不同的是,存梁滑移阶段梁体中部上拱约 3 mm,风嘴处下挠约 4.6 mm,如图 24 所示。因此,该张拉方案下,在进行存梁滑移作业时,梁体是偏于安全的。

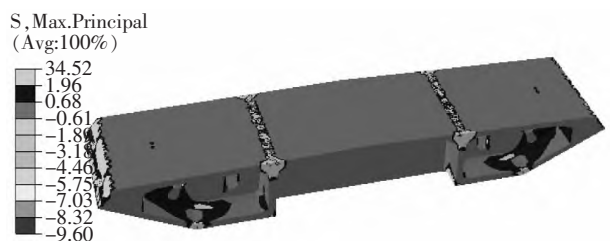


图 21 箱梁主拉应力分布(存梁滑移,顶面)

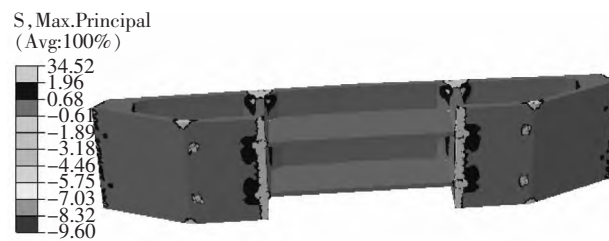


图 22 箱梁主拉应力分布(存梁滑移,底面)



图 23 横隔板主拉应力分布(存梁滑移)



图 24 箱梁竖向位移(存梁滑移)

4 结论

基于 ABAQUS 建立了预应力混凝土梁段的计算模型,对两种预应力张拉方案下梁段在吊装和存梁滑移阶段的受力进行了对比分析,得到如下结论:

(1)采用张拉全部横向及竖向预应力方案,梁体在吊装和存梁滑移阶段,其横隔板与底板连接部位,以及平地板与斜底板连接过渡区域,出现较大范围的应力超标区,此时进行施工作业,梁体偏于不安全,可能产生局部开裂。

(2)采用张拉部分隔板束及纵筋的方案,当吊点和支座面无沉降,均处于同一水平面时,梁段在吊装、存梁和滑移过程中,梁段各部位应力均满足设计要求,该状况下进行施工作业,梁体是安全的。

参 考 文 献

- [1]李圣荣.现浇箱梁暨预制箱梁施工关键技术[D].上海:同济大学土木工程学院,2008.
- [2]吕志涛,潘钻峰.大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J].土木工程学报,2010,43(1):70-76.
- [3]杨晋文.连续刚构桥跨中下挠的影响因素分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(2):17-20.
- [4]俞先林,叶见曙,吴文清.大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂病害[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):101-104.
- [5]王国亮,谢峻,傅宇方.在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J].公路交通科技,2008,25(8):52-56.
- [6]张洁,高荣誉.分离式与整体式钢筋混凝土模型有限元分析[J].安徽建筑工业学院学报:自然科学版,2013,21(4):5-8.
- [7]王玉镯,傅传国.ABAQUS结构工程分析及实例详解[M].北京:中国建筑工业出版社,2013:163-169.
- [8]徐祥,戴自航.岩土预应力锚固作用三维数值模拟的等效力法[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):20-25.
- [9]何海.变高度预应力混凝土箱梁桥底板纵向裂缝成因分析及防治[J].公路工程,2001,26(3):61-62.

Comparison and Study of Stretching Scheme for Prestressed Concrete Box Girder of Shishou Yangtze River Highway Bridge

Tian Liang

(CRCC Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd. Tianjin 300300, China)

Abstract: For the north sidespan's concrete beams of Shishou Yangtze River Highway Bridge, the finite element calculation model of standard concrete beam is established based on ABAQUS software, in which truss element T3D2 is used to simulate the prestressed tendons, and the solid element C3D10 is used to simulate the concrete. The two schemes of prestress integral tension and partial tension are designed, and the stress of concrete beams under these two schemes are compared. The results show that the tensioning procedure of concrete box girder directly affects the integral stress of beam segment during hoisting and storage stage, and the stress condition of the prestressed concrete beam meets the design requirements when the local tension scheme is adopted.

Key words: prestressed concrete box girder; stretching procedure; ABAQUS; scheme comparison; FEA