

文章编号: 1674—8247(2019)03—0065—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.03.014

## 单线铁路长联大跨连续梁力学特性精细数值分析

董宏伟

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**单线铁路长联大跨连续梁目前较为少见,需精细化分析。本文以国内最大的单线铁路连续梁桥(100+3×180+100)m 为依托工程,建立了主梁实体单元等 4 种数值模型,分析了 0 号块和跨中截面应力分布状态,对比量化了各模型计算径向力效应和温度效应的差异。研究表明:(1)由于支座宽度对负弯矩折减的影响,支点上方的 0 号块顶板应力明显小于 0 号和 1 号块交界处的应力,未考虑此影响的杆系单元模型结果偏于保守;(2)预应力钢束径向力导致底板中部出现横向拉应力,若以主梁实体单元模型中钢束径向力引起的应力为基准,框架杆系单元计算结果偏于不安全;(3)采用主梁杆系单元计算移动荷载作用下跨中截面应力和梯度温度截面应力偏于安全。

**关键词:**长联;连续梁;单线;铁路;力学特性;数值模型

**中图分类号:**U441<sup>+</sup>.5 **文献标志码:**A

## Numerical Analysis for Mechanical Properties of Long-span Continuous Girder of Single-track Railway

DONG Hongwei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The long-span continuous beams of single-track railways are still relatively rare and require detailed analysis. Based on the largest single-line railway continuous beam bridge (100 + 3 × 180 + 100) m in China, this paper establishes four numerical models such as the main beam solid element. The stress distribution state of the block 0 and the mid-span section is analyzed. The difference between radial force effect and temperature effect calculated by each model is compared and quantified. The research results show that: (1) Due to the effect of the bearing width on the reduction of the negative bending moment, the roof stress of the block 0 above the bearing is significantly less than that at the junction of block 0 and block 1. The results of the bar element model without considering this effect are conservative (2) The radial force of the prestressed steel causes transverse tensile stress in the middle of the bottom. If the stress caused by the radial force of the steel cable in the solid element model of the main beam is taken as the reference, the calculation result of the frame element has security risks. (3) The stress of mid-span section and the stress of gradient temperature section calculated by main beam element under moving load are safe.

**Key words:** long-span; continuous girder; single-track; railway; mechanical properties; numerical model

预应力混凝土连续梁桥因其跨越能力较强、结构简洁、施工方便等优点,成为广泛采用的桥型。为满足

收稿日期:2019-03-12

作者简介:董宏伟(1962-),男,高级工程师。

引文格式:董宏伟. 单线铁路长联大跨连续梁力学特性精细数值分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(3):65-69.

DONG Hongwei. Numerical Analysis for Mechanical Properties of Long-span Continuous Girder of Single-track Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 65-69.

列车运行安全和旅客舒适度的要求,需要连续梁结构具有足够的竖向、横向以及抗扭刚度。单线铁路长联大跨连续梁目前较为少见,且又需考虑构造经济性,其局部应力场特性与普通连续梁桥具有差异,构造细节及配筋均需特殊设计。因此,有必要对单线铁路长联特大跨连续梁进行精细数值分析。

关于预应力混凝土连续梁设计,国内外开展了大量研究。闫岩<sup>[1]</sup>采用极限状态法和容许应力法,对主跨100 m的连续梁进行了正截面抗弯强度和抗裂性等结构控制因素的对比分析。周东东<sup>[2]</sup>通过建立13个不同边中跨比的连续梁桥模型,分析了边中跨比对支反力、跨中挠度以及主梁内力的影响规律。钟新谷等人<sup>[3]</sup>以箱梁底板预应力束的等效径向力经典计算公式为基础,推导分析了定位误差和折线拟合曲线对径向力的影响。研究成果主要包括连续梁设计理念<sup>[1,4]</sup>、布跨设计和整体受力计算<sup>[2,5-6]</sup>、局部应力分析<sup>[3,7-8]</sup>等方面。但是,现有研究较少涉及单线铁路超大多跨连续梁应力状态的精确分析。

本文以单线铁路长联大跨连续梁桥为依托工程,建立了主梁实体单元、杆系单元模型、横向框架杆系单元和实体单元等4种数值模型,分析了墩顶0号块局部应力和跨中截面应力分布状态,揭示了各模型模拟跨中底板等效径向力的偏差,对比量化了实体和杆系单元计算温度效应的差异。

## 1 工程概况

连(界)乐(山)铁路九峰岷江特大桥为跨越岷江而设,桥型为(100+3×180+100) m 预应力混凝土连续梁桥。桥梁平面位于直线上,线路纵坡0‰,无竖曲线上桥。列车设计速度160 km/h,单线行车。

主梁为C55预应力混凝土箱梁,单箱单室。箱梁截面采用二次抛物线变高截面,边墩及跨中处梁高7.0 m,主墩处梁高13.0 m,顶板厚0.6 m,顶板宽9.1 m;底板厚由0.48 m渐变至1.1 m,底板宽7.5 m。腹板采用竖直腹板,厚度按直线线性变化,由0.5 m渐变为1.0 m。两端翼缘悬挑各0.8 m。由于行车安全性、舒适性及横向地震作用对本桥横向刚度要求较高,主梁宽度不宜过窄,同时为满足梁体纵向预应力布置构造要求,综合对比后箱梁底宽选取7.5 m。箱梁采用悬臂灌注法施工,采用先次主跨、再边跨、最后主跨合龙的施工方案。

主梁竖向采用 $\phi 32$ 预应力混凝土用螺纹钢筋(PSB830),配套千斤顶张拉,对应锚具锚固,张拉时采用单端张拉的方式,张拉端设在梁顶。采用内径

45 mm( $\delta=0.5$  mm)金属波纹管成孔。

梁体纵向预应力体系采用高强度低松弛钢绞线,抗拉强度标准值1 860 MPa。顶板、腹板和底板钢束均采用17- $\phi 15.2$ 钢绞线,两端张拉,张拉锚下控制应力为 $0.70f_{pk}$ 。

## 2 有限元模型建立

### 2.1 主梁实体单元模型

采用Midas/FEA建立主梁实体单元模型,如图1所示。混凝土箱梁共划分为 $94.2 \times 10^4$ 个四面体单元,预应力钢绞线共752个钢束单元。节点数量为 $90.1 \times 10^4$ 个。边界条件模拟,考虑施工阶段的主墩支座临时固结,以及成桥后的真实约束情况。



图1 主梁实体单元网格模型

连续梁采用轻型挂篮分段悬臂灌注施工,分别在主墩墩顶立模灌注0号块,5 d龄期之后张拉预应力。在0号梁段安装挂篮,分别在挂篮上对称向两侧顺序灌注各梁段,移动挂篮,灌注下一个梁段,形成4个对称的T构;先现浇合龙次主跨,再现浇合龙边跨,最后利用挂篮现浇合龙中主跨,完成梁体施工。

恒载包括梁体自重、二期恒载、基础不均匀沉降。活载包括列车活载中-活载、动力系数、列车横向摇摆力、设计人行道竖向静活载等。附加力包括纵向制动力、风力、温度变化的作用(整体温变 $\pm 20$  °C,温度梯度为升温5 °C与降温-2 °C)等。

### 2.2 主梁杆系单元有限元模型

采用Midas/Civil建立主梁杆系单元有限元模型,如图2所示。单元数量为主梁212个,桥墩60个。节点数量为305个。边界条件及施工阶段与主梁实体单元模型相同。

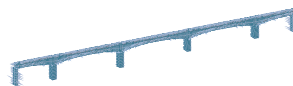


图2 主梁杆系单元模型

### 2.3 横向框架杆系单元和实体单元模型

选取中跨跨中截面,采用Midas/Civil建立横向框架杆系有限元模型,如图3所示。梁高7.0 m,桥面宽9.1 m,箱底宽7.5 m;顶板厚0.6 m,底板厚0.48 m,腹板厚0.5 m。

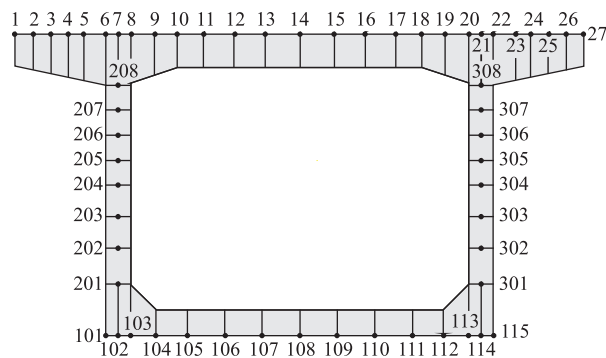


图3 主梁横向框架模型

同时,采用 Midas/FEA 建立中跨跨中截面的横向框架实体单元模型。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 墩顶0号块局部应力分析

##### (1) 恒载组合工况

成桥运营10年后(即考虑了长期混凝土徐变),恒载组合作用下0号块应力云图,如图4所示。由图4可知,隔板处主拉应力最大值为1.7 MPa。腹板与底板的倒角处主拉应力为2.3 MPa。由于边界条件约束和局部承压,支座上座板所在位置出现较大应力。

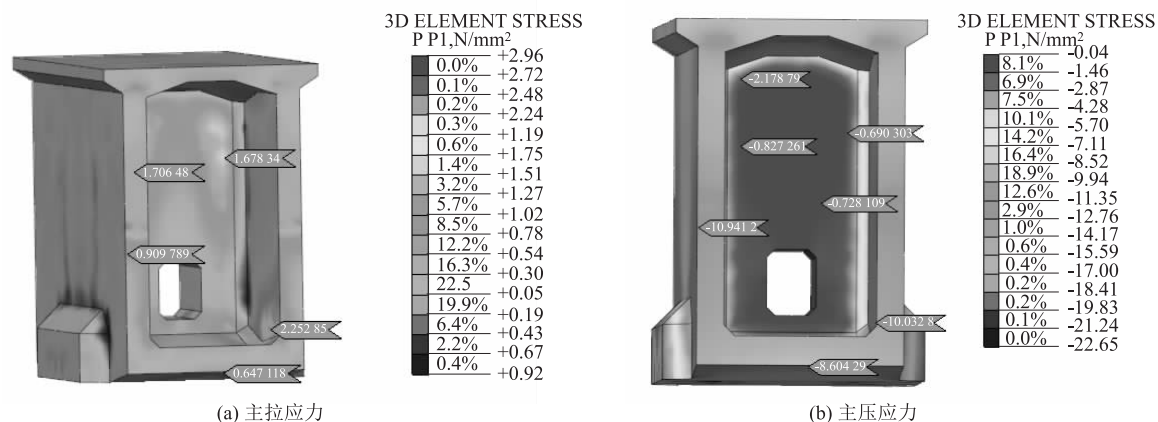


图4 恒载组合工况0号块主应力云图

##### (2) 移动荷载工况

移动荷载工况0号块纵桥向应力云图,如图5所示。计算方法是,提取主梁杆系单元有限元模型中移动荷载作用产生的0号块内力,然后将此内力施加到主梁实体单元模型,进而得到纵桥向应力云图。

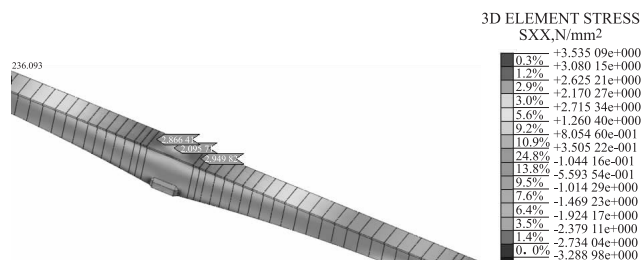


图5 移动荷载工况0号块纵桥向应力云图

由图5可知,支点上方的顶板应力为2.09 MPa,0号块顶板顺桥向两个端头的应力为2.9 MPa。而在相应的主梁杆系单元模型中,整个0号块顶板的计算结果均为2.9 MPa。这是由于支座宽度对弯矩折减的影响(削峰作用),导致实际支点处应力偏小。可见用杆系单元进行主梁计算偏于保守。

#### 3.2 跨中截面应力分析

根据主梁杆系单元模型计算结果,利用移动荷载

追踪器得出跨中拉应力达到最大值的移动荷载分布。然后,将其等效的荷载施加到实体单元模型中,计算得出跨中纵向最大拉应力为4.04 MPa,与杆系单元模型计算结果4.7 MPa较为相近,实体单元应力结果,如图6所示。因此,杆系单元模型进行移动荷载作用下跨中应力计算是偏于安全的。

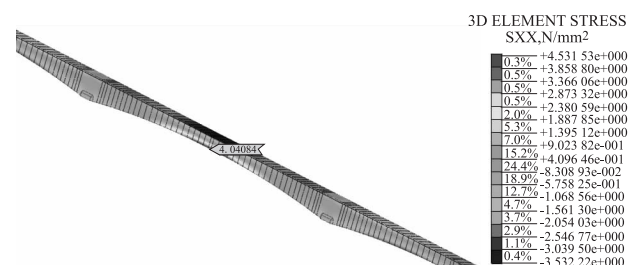


图6 移动荷载工况跨中拉应力云图

#### 3.3 径向力效应分析

预应力混凝土箱梁跨中截面底板崩裂的主要原因是底板钢束的等效径向力<sup>[9-10]</sup>。经过理论计算,预应力钢束在跨中底板产生的等效径向力为39.6 kN/m。为精确分析该径向力引起的不利影响,本文采用了以下4种计算模式:①横向框架杆系单元模型,理论径向压力39.6 kN/m;②横向框架实体单元模型,理论径向

压力 39.6 kN/m;③主梁实体单元模型,理论径向压力 39.6 kN/m;④主梁实体单元模型,模型中输入预应力

钢束,钢束张拉产生径向力。4 种模式的计算结果,如图 7 所示。

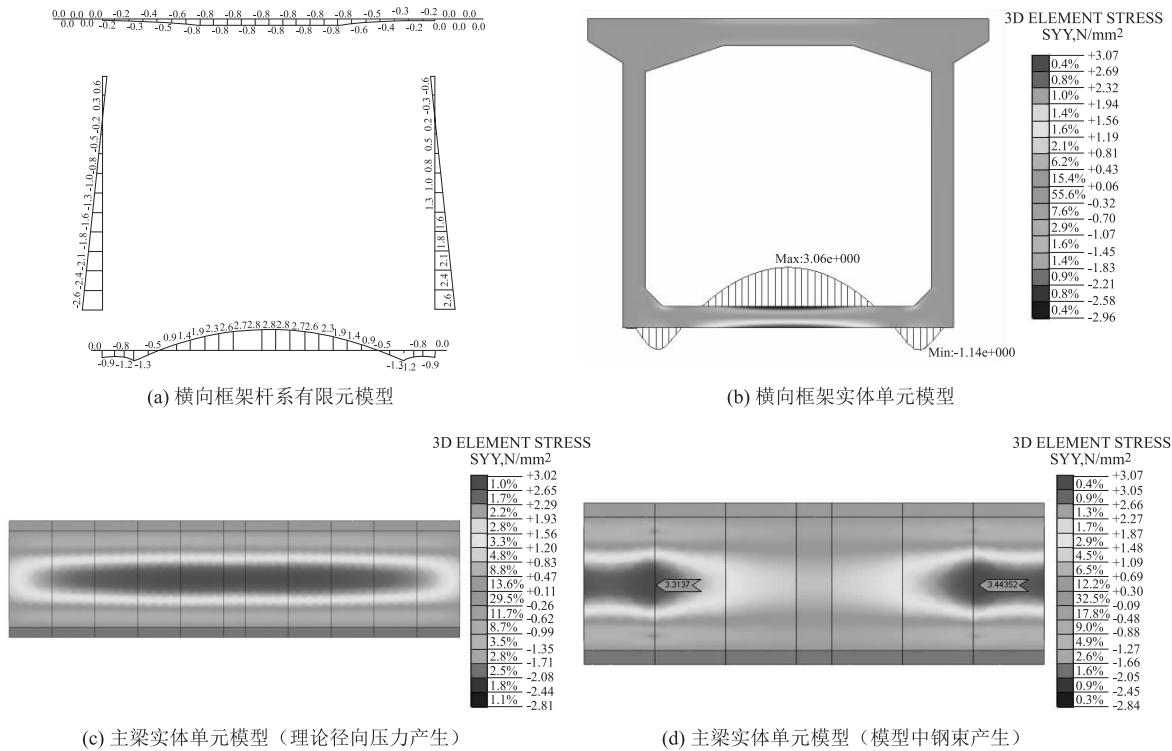


图 7 径向力产生的底板应力

由图 7 可知,径向力导致底板中部承受正弯矩,出现最大横向拉应力;底板两边在腹板的弹性约束作用下产生负弯矩。预应力钢束径向力引起的底板应力沿顺桥向呈现非均匀分布。

横向框架杆系单元模型,底板最大横向拉应力为 2.8 MPa。横向框架实体单元模型为 3.06 MPa。横向框架实体单元比杆系单元计算结果偏大,原因是底板和腹板连接方式不同。杆系单元模型中,底板与腹板采用刚性连接,刚度较大。而实体单元模型底板与腹板为实际结构连接,刚度较小,即腹板对底板的约束比杆系单元小,进而导致底板应力比杆系单元大。

主梁实体单元模型理论径向压力产生的最大应力为 3.02 MPa,与横向框架实体单元计算值 3.06 MPa 基本相同。说明实体横向框架模型和实体主梁模型计算结果一致。

主梁实体单元模型底板中实际钢束产生的横向拉应力最大值为 3.44 MPa,其影响范围约在合龙段两侧 2~4 个节段。该计算结果比横向框架杆系单元计算值约大 0.64 MPa,比其余两种模型约大 0.38 MPa。

因此,以主梁实体单元模型实际钢束产生的径向力效应为基准,横向框架杆系单元模型偏差最大,横向框架实体单元和施加理论径向压力的主梁实体单元偏

差较小。

3.4 温度效应分析

温度工况为不均匀温度,分别为升温 5 ℃、降温 2 ℃。主梁实体单元模型计算得出主梁顶板的最大拉应力约为 -1.07 MPa、压应力约为 0.43 MPa。主梁杆系单元有限元模型计算得出主梁顶板的最大拉应力约为 -1.7 MPa、压应力约为 0.7 MPa。因此,主梁杆系单元模型计算值偏大。

3.5 有限元模型对比

有限元模型对比,如表 1 所示。

表 1 有限元模型对比

模型类别	单元数量 / 个	运行时间 / h	0 号块 局部应力	跨中 截面应力	温度效应
实体单元	$94.2 \times 10^4$	28	正常	正常	正常
杆单元	212	0.1	偏于保守	偏于保守	偏于保守

由表 1 可知,综合考虑建模与运算成本,杆单元有限元模型能够满足长联大跨桥梁设计的计算需求。同时,若开展局部构件精细化分析,仍需采用实体单元有限元模型。

4 结论

(1) 由于支座宽度对 0 号块负弯矩的削峰作用,

支点上方的顶板应力明显小于0号块和1号块交界处的顶板应力。杆系单元模型不能直接考虑此影响,计算结果偏于保守。

(2)预应力钢束径向力导致跨中底板中部承受正弯矩,出现最大横向拉应力。若以主梁实体单元模型实际钢束径向力产生的应力为基准,横向框架实体单元偏差较小,框架杆系单元计算结果偏于不安全。为避免径向力引起开裂,应增强跨中底板横向配筋。

(3)采用主梁杆系单元模型计算移动荷载作用下跨中截面应力和截面梯度温度产生的应力是偏于安全的。

## 参考文献:

- [1] 闫岩. 极限状态法与容许应力法铁路大跨连续梁设计对比分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5): 62-66.  
YAN Yan. Comparison and Analysis of Limit State Method and Allowable Stress Method for Railway Long-span Continuous Beam[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 62-66.
- [2] 周东东. 小边跨PC连续梁桥静力分析及设计参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.  
ZHOU Dongdong. Static Analysis and Study on Design Parameters of PC Continuous Beam Bridge with Small Span[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [3] 钟新谷, 林小雄, 舒小娟. 预应力混凝土变截面箱梁桥底板预应力束的等效径向力研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 103-109.  
ZHONG Xingu, LIN Xiaoxiong, SHU Xiaojuan. Study on Equivalent Radial Force in Prestressed Cable of the Prestressed Concrete Variable Cross-section Box Girder Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 103-109.
- [4] 吴雪峰. 中俄同抚大堤大桥预应力混凝土连续梁设计研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 9-12.  
WU Xuefeng. Design Study on Prestressed Concrete Continuous Girder of China-Russia Tongfu Dadi Bridge[J]. Railway Engineering, 2018, 58(2): 9-12.
- [5] 康景亮. 京沈客运专线(109.8+170+170+90.8)m V撑连续梁设计[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(10): 62-66.  
KANG Jingliang. Design of (109.8+170+170+90.8)m V-Support Continuous Beams on Beijing-Shenyang Dedicated Passenger Railway[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(10): 62-66.
- [6] 高吉才, 金庆利. 大跨径PC变截面连续梁设计要点探讨[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 125-128.  
GAO Jicai, JIN Qingli. Design Points of Long Span PC Variable Section Continuous Beam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(6): 125-128.
- [7] 于晓光. 悬臂浇筑箱梁0号块开裂原因分析及防裂措施[J]. 世界桥梁, 2014, 42(1): 87-92.  
YU Xiaoguang. Causes of No. 0 Block Cracking in Cantilever-cast Box Girder and Crack-proof Measures[J]. Bridges of World, 2014, 42(1): 87-92.
- [8] 陈艳. 贵广铁路大跨预应力混凝土连续梁端部局部应力分析[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(2): 57-60.  
CHEN Yan. Analysis on Local Stress of the End of Long-span Prestressed Concrete Continuous Girder in Guiyang-Guangzhou Railway[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(2): 57-60.
- [9] 向木生, 石彬, 严琼建. 箱梁合龙束径向力的横向效应分析与防治措施[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 63-67.  
XIANG Musheng, SHI Bin, YAN Qiongjian. Transverse Effect Analysis of Radial Force in Box Girder Closure Tendon and Prevention Measures[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(1): 63-67.
- [10] 仲济涛, 刘钊. 悬臂施工连续梁桥顶板预应力束平弯段径向力效应[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 89-94.  
ZHONG Jitao, LIU Zhao. Effect of Radial Force Caused by Horizontal Bend of Prestressing Tendons in Top Flange of Continuous Box Girder Bridge[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 89-94.

(编辑:赵立红 苏玲梅)