

大悬臂连续箱梁拓宽桥连接构件的受力特性

杨安畅,孟松,巩冠宏,刘金文*

山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357

摘要:为研究大悬臂连续箱梁拓宽桥连接构件的受力特性,以女姑口特大桥改造工程为研究背景,采用有限元软件 Midas Civil 和 Abaqus 分别对全桥和局部进行精细化数值模拟,分析横向拓宽桥整体模型在部分受力、恒载组合、运营状态 3 种工况下的受力情况及拓宽前后桥梁所受弯矩变化,分析局部构件模型在运营状态下所受应力。对箱梁和横肋进行实桥应变监测,对比分析实测应力与有限元模型分析应力。运营状态为最不利工况,在此工况下,左、右幅箱梁的应力极值均位于第 2 跨与第 15 跨跨中区域。取出现最大应力和最大竖向位移的第 15 跨建立局部精细化模型,加载后分析横肋、榫卯、套箍在运营状态工况下的应力,横肋顺桥向、横桥向压应力对称分布,顺桥向应力从两端向中部区域递减,端部最大压应力为 -5.40 MPa,最大拉应力为 0.42 MPa,横桥向应力从中部向两端递减,中部最大压应力为 -5.50 MPa,最大拉应力为 0.39 MPa。运营状态工况下,榫卯连接钢筋的应力极值出现在靠近横肋侧壁中部区域,5#榫卯承受最大应力 21.56 MPa;套箍应力对称分布,顺桥向两侧竖向钢筋中部区域出现应力极值,4#套箍承受最大应力 71.43 MPa,10#套箍承受最小应力 35.65 MPa。拓宽后的桥梁结构整体刚度增大,荷载传递路径变化,原主梁在运营状态工况下的弯矩分布明显改变,正弯矩区最大弯矩普遍减小,负弯矩区最大弯矩的绝对值小幅增大。第 15 跨左箱梁的顶板和底板纵向实测应力与有限元模型应力相近,横肋底面实测应力与有限元模型应力在 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 处相差较大。

关键词:大悬臂连续箱梁;拓宽桥;连接构件;有限元模拟;实桥测试

中图分类号:U448.21⁺3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2026)01-0044-11

引用格式:杨安畅,孟松,巩冠宏,等. 大悬臂连续箱梁拓宽桥连接构件的受力特性[J]. 山东交通学院学报, 2026,34(1):44-54.

YANG Anchang, MENG Song, GONG Guan hong, et al. Mechanical characteristics of connecting members in a widened bridge with long cantilever continuous box girders [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1):44-54.

0 引言

随着客货运输需求的快速增长,我国既有高速公路的通行能力已难以适应当前的交通负荷。我国现役桥梁已超过 100 万座^[1],其中 20%以上已进入服役末期或存在不同程度的老化问题^[2]。为缓解日益严重的交通运力不足问题,我国正积极推进既有路线的改扩建及复线工程建设。传统的高速公路桥梁多采用连续箱梁桥的结构形式,横向加劲肋和植筋等连接技术为新旧连续箱梁桥拓宽工程提供可靠的技术支撑,有效解决结构协同受力难题,显著提高桥梁拓宽工程的实施可行性。

研究人员对桥梁拓宽技术进行多维度研究,主要聚焦于新旧结构连接方式、力学行为演变规律以及接缝区域应力分布特征等关键问题。早期采用支撑箱加宽法(strutted box widening method, SBWM)^[3]研

收稿日期:2025-07-23

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME134)

第一作者简介:杨安畅(1999—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为桥梁智能建造与检测,E-mail:1442591423@qq.com。

*通信作者简介:刘金文(2000—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要研究方向为桥梁智能建造和检测,E-mail:1300454758@qq.com。

究现浇预应力混凝土连续箱梁桥拓宽技术,在桥梁初始设计阶段统筹考虑后期扩建需求,包括预应力钢束的合理布置和斜撑节点的预留,其原理是在箱梁腹板与底板连接区域预设斜撑构造,后期需拓宽时外移人行道,采用预设斜撑支承新增桥面实现横向扩展。在预制箱梁桥的拓宽工程中采用类似的加劲肋拓宽法(strutted girder widening method, SGWM)。从工程应用效果来看,这类技术特别适用于将既有双车道现浇箱梁桥(包括变高度和等高度截面)改造升级为三车道或四车道桥梁,技术关键在于实现新建部分与既有结构的协同工作,且最大限度地减少对原结构的扰动^[4-5]。翟建勋^[6]采用横向加劲肋连接方案解决大悬臂预应力箱梁桥的拓宽难题,通过软件 Midas Civil 数值模拟验证该方案可实现新旧结构的协同受力,满足内力传递要求。吴文清等^[7]采用软件 Midas Fea 建立嵌入式钢板拼接后的全桥有限元模型,分析在多种荷载工况下拓宽桥梁的位移及受力情况,采用嵌入式钢板连接方案可有效建立横向荷载传递路径,在主要荷载工况下结构应力分布均匀且处于可控范围。该连接方式能适应新旧桥梁纵向变形差异,满足拓宽的受力要求,具有较好的工程适用性和可靠性。柴晓婷^[8]对某连续弯箱梁桥拓宽进行数值模拟,研究活载、收缩徐变及温度耦合作用下的结构响应,发现旧梁顶板拼接缝的中间支座区域在车道荷载与收缩徐变共同作用下出现显著拉应力集中现象;新梁顶板拼接缝处拉应力主要由收缩徐变效应主导,其贡献率为耦合作用的 80%。陈康明等^[9]、Wu 等^[10]分析长联预应力混凝土连续梁桥的长期荷载效应,考察时变荷载对结构性能的影响规律,发现当采用全纵向拼接方案时,长期荷载将导致显著的横向位移,桥台及联间过渡墩区域变形最突出,混凝土收缩变形是诱发横向位移的主导因素,贡献率为总变形的 69%。

研究人员在中小跨径的板梁、T 梁和组合梁的拓宽技术上取得一定研究成果,拓宽工艺也逐渐成熟。但对于箱梁的横向拼接工艺仍处在探索阶段,现有研究多聚焦于整体受力性能分析^[11-12]、新旧桥收缩徐变作用、基础沉降^[12-13]、长联拼接等方面^[14-18],对关键连接构件的局部力学行为缺乏系统研究。在大悬臂混凝土箱梁桥的横向拼接方面缺少足够的工程实践经验。针对大悬臂连续箱梁的刚性拼接技术研究仍存在明显不足。

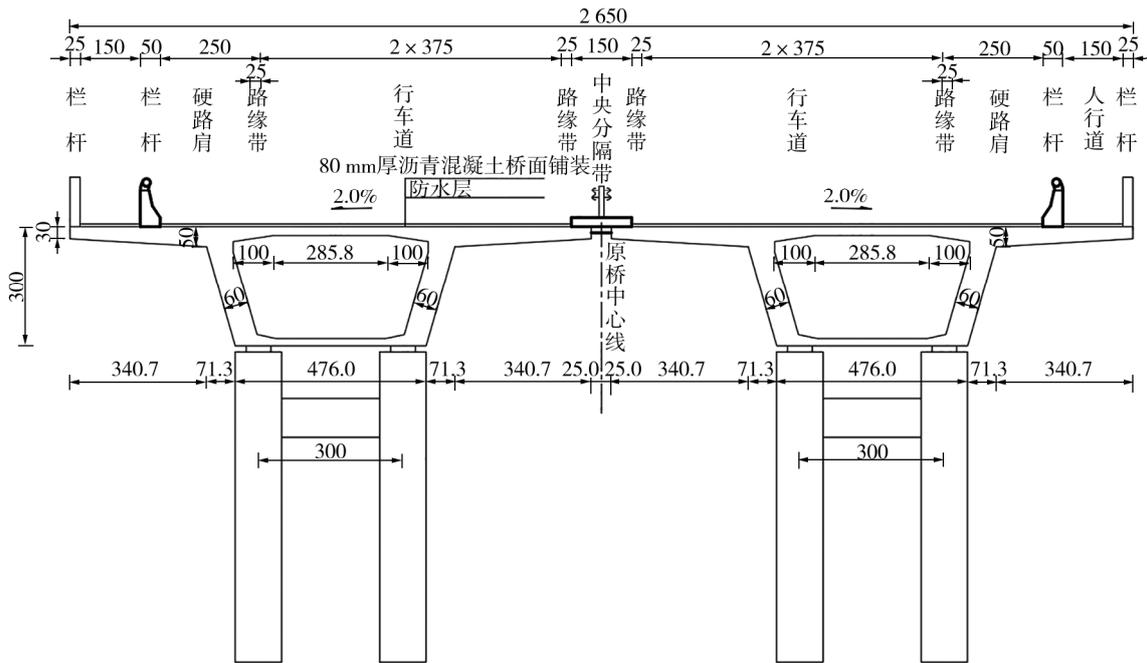
本文通过有限元模拟与实桥试验结合的方式,对大悬臂连续箱梁拓宽桥整体及局部拼接关键构件进行受力分析,对比拓宽前、后桥梁的受力特性,研究大悬臂混凝土箱梁桥拓宽工程中在不同荷载组合下的关键连接构件的受力机理及拓宽后的受力变化,揭示应力传递规律,为同类工程提供理论依据和技术参考。

1 工程概况

以女姑口特大桥旧桥左右幅横向拼接工程为研究背景。女姑口特大桥(如图 1 所示)位于 G22 青兰高速(原胶州湾高速)段内,桥梁原中心桩号为 K19+014。桥梁全长 3 060 m,桥梁全宽 2×13.25 m,单幅桥宽组合为 0.25 m(防撞墙)-1.50 m(人行道)-0.50 m(防撞墙)-10.25 m(行车道)-0.75 m(防撞墙)。箱梁纵向预应力系统采用 VSL 体系进行张拉施工,主要受力钢束由 14 束 VSL5-27 型钢绞线构成,每束设计张拉力为 3 543.68 kN,均沿两侧腹板布置,并集中锚固于结构施工接缝位置。为增强跨中区域的抗弯性能,在箱梁顶板内从跨中至施工接缝段设置 4 束 VSL5-12 型预应力钢束作为补充配束,无横向、竖向预应力,钢束布置如图 2 所示。

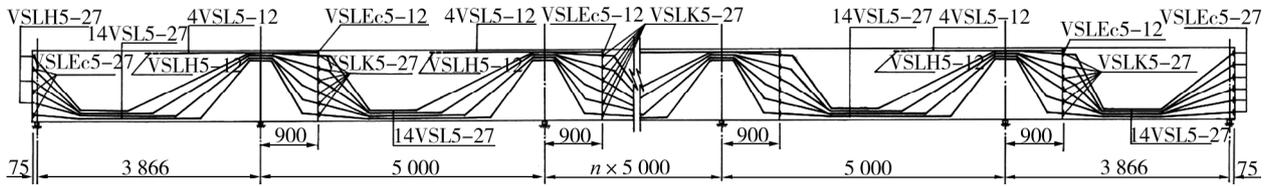
检测原女姑口特大桥,现场调查发现桥梁存在不同程度的病害,对既有桥涵进行综合评价分析后,确定对女姑口特大桥进行维修加固利用。

女姑口特大桥改造工程主要施工内容是在保持原有女姑口特大桥旧桥左右幅横坡参数不变的前提下,对既有结构进行优化整合,改造措施包括:拆除原桥中央分隔带,将分离式左右幅桥面通过结构拼接形成整体式断面,作为青兰高速改扩建工程中女姑口特大桥的右幅部分。女姑口特大桥旧桥拼接后横断面布置及车道划分如图 3 所示。改造前的桥面为两车道体系,改造后为五车道体系,将中央车道设为车道转换带。



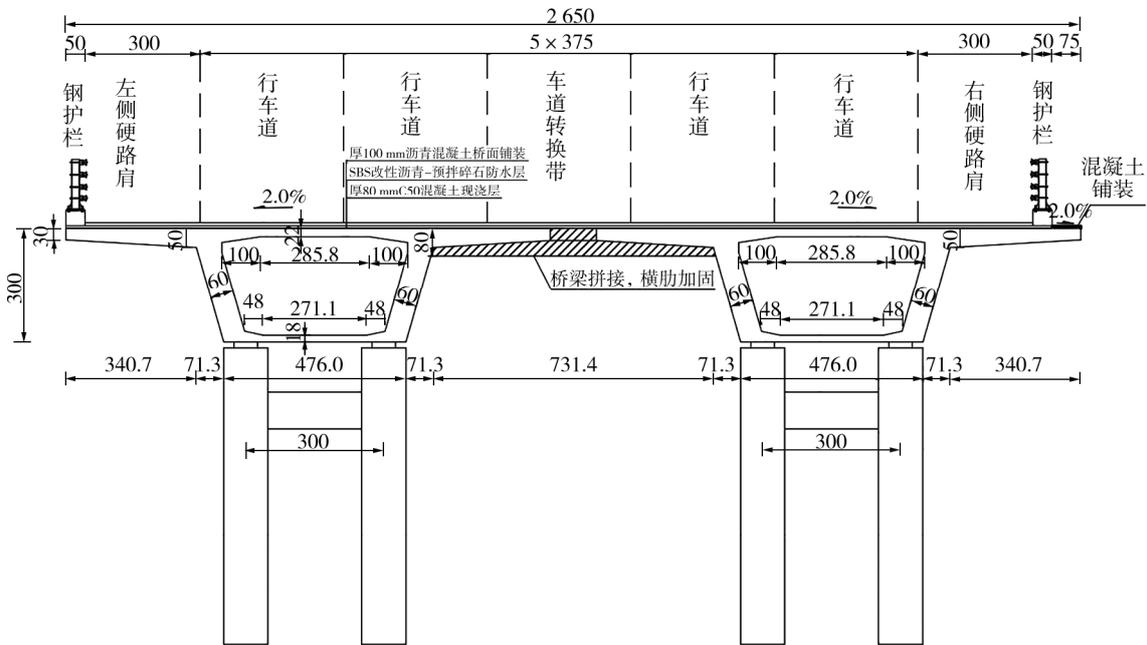
单位:cm。

图1 女姑口特大桥旧桥横断面布置及车道划分示意图



单位:cm。

图2 钢束布置示意图



单位:cm。

图3 女姑口特大桥旧桥拼接后横断面布置及车道划分示意图

为确保桥梁的结构安全和使用性能,在旧桥翼板处采用横肋加固技术,工艺流程如图4所示。沿旧桥桥梁中心线分别向左右两侧60.0 cm处标记箱梁翼板无损切割线,采用齿锯按跨沿切割线对箱梁翼板向下切割1.5 cm,在箱梁翼板下方,采用切割机按相应位置对混凝土进行切缝处理,切割时勿损伤原桥梁板钢筋。切割完成后在肋板、翼板位置植筋,植筋工艺主要流程为钻孔→清理钻孔→注胶→插入钢筋→调整→保护→检测。植筋完成后,在桥面上绑扎完成横肋钢筋骨架,将横肋钢筋骨架与植入的锚筋焊接为整体。安装完横肋钢筋骨架后,进行榫卯、套箍施工并安装模板,最后浇筑混凝土。

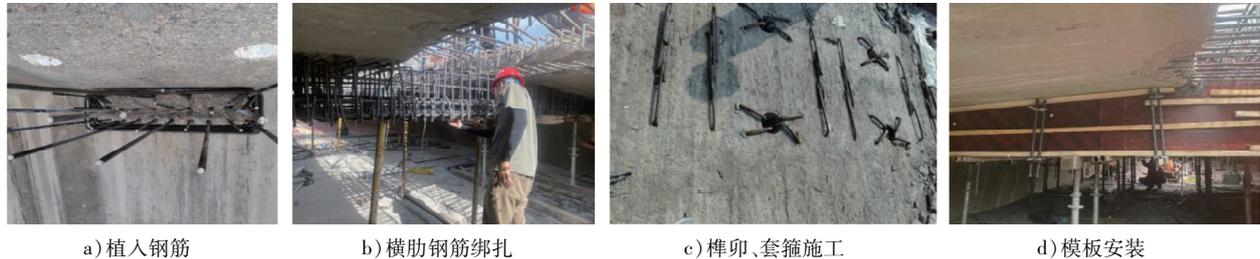


图4 横肋施工流程

采用横肋加固技术主要是避免车辆荷载直接作用于新旧结构接缝区域,防止桥面板凿除作业对原桥造成结构性损伤,采用榫卯、套箍构件将横肋结构与原桥梁箱梁紧密联结,使新旧桥梁受力整体化。具体实施方式为:沿桥纵向每隔3.00 m设置1道加强横肋,采用变截面设计横肋,统一宽度为1.22 m,高度在0.30~0.50 m线性渐变调整。全桥共计布置1 041道此类横肋构件。左右幅桥梁拼接位置三维空间构造示意图如图5所示。

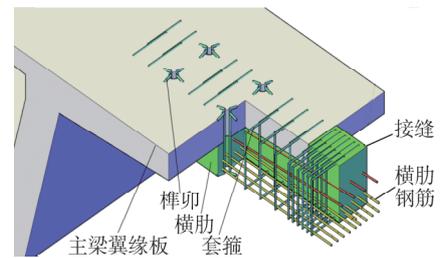


图5 拼接位置三维空间构造示意图

2 有限元分析

2.1 拓宽箱梁桥结构分析方法

采用拼接加劲肋实现新旧箱梁结构连接后,原预应力混凝土箱梁的受力体系发生显著变化,由独立单箱结构转变为协同工作的双箱组合体系^[19]。结构体系的转换将引起力学特性改变:1)新旧混凝土结构的收缩徐变差异导致界面产生附加应力;2)双箱结构的整体刚度分布发生重构;3)荷载传递路径改变。大悬臂预应力混凝土箱梁桥的空间受力行为更复杂。传统的解析方法难以准确预测此类结构的实际受力状态。采用软件 Midas Civil 2022 通过梁格法建立有限元模型,采用软件 Abaqus 构建三维实体有限元模型,模拟拓宽后结构的力学行为,研究加劲肋、榫卯、圈箍的应力分布。

2.2 全桥分析

2.2.1 模型建立

建立跨径组合为40 m-14×50 m-40 m的桥梁空间有限元模型及拼接构件模型,如图6所示,共设置4 358个节点和4 288个梁单元,其中左、右幅箱梁各包含281个单元,每道横肋采用6个单元进行离散化模拟。

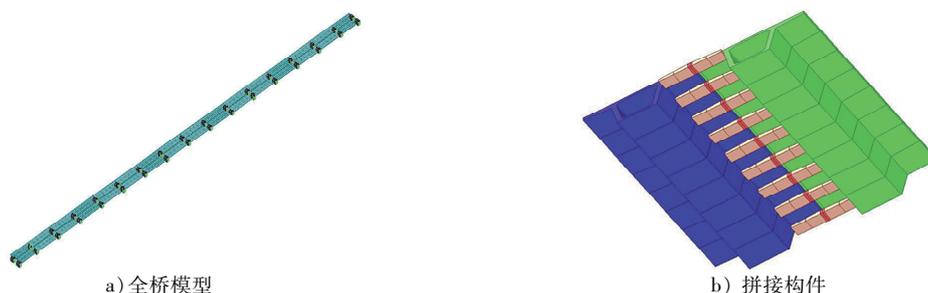


图6 有限元模型

2.2.2 材料参数

箱梁结构以 C50 高性能混凝土为主要材料,在横肋部位选用有补偿收缩特性的 C50 混凝土控制裂缝发展;选用公称直径为 12.7 mm (1×7 结构)、公称抗拉强度为 1 860 MPa 的高强度预应力钢绞线作为预应力筋材。普通钢筋配置方案为:原桥主体结构采用符合 II 级钢筋标准 (HRB335) 的普通钢筋,横肋等新建的关键受力部位采用高强带肋 HRB400 钢筋,提高结构的承载能力和耐久性能。整体有限元模型所用材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

结构	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
箱梁	34.5	0.2	2 600
横肋	34.5	0.2	2 600
预应力钢筋	195.0	0.3	7 850

2.2.3 荷载组合

在整体模型中,计算时考虑部分受力(工况 1)、恒载组合(工况 2)、运营状态(工况 3)等 3 种工况。工况 1 为结构自重、预应力效应、横向风压作用以及整体温度变化影响(含正负温差)。工况 2 为结构自重、预应力效应、横向风压作用以及整体温度变化影响(含正负温差)、桥面铺装等二期恒载作用。工况 3 为全部恒载作用(结构自重-二期恒载)、预应力效应、车辆荷载作用、风荷载效应、整体温度变化影响。

2.2.4 结果分析

桥梁左、右幅箱梁截面应力曲线如图 7 所示。

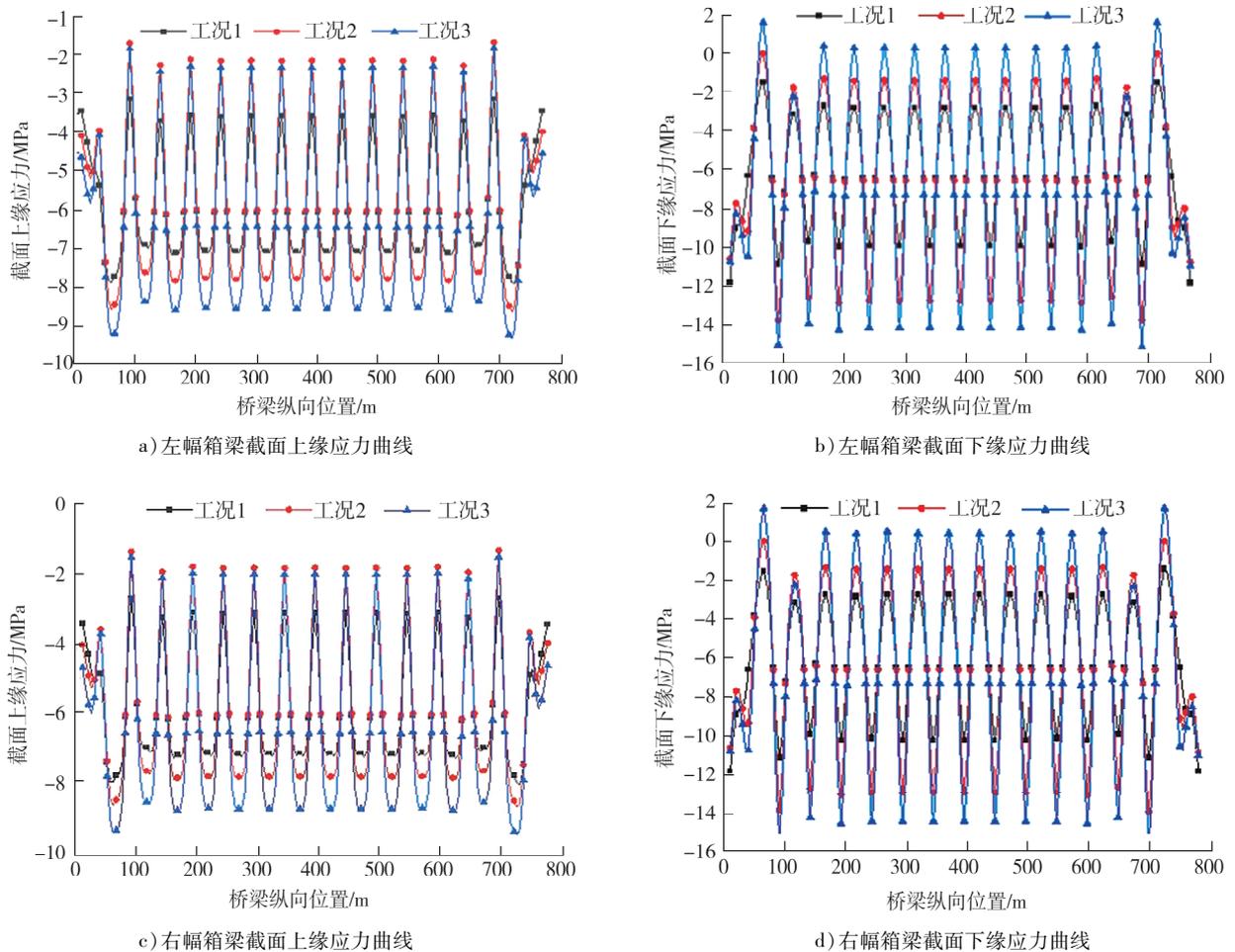


图 7 左、右幅箱梁截面应力曲线

由图 7 可知:工况 3 为左、右幅箱梁截面上缘应力的最不利工况;最大应力主要出现在第 2 跨和第 15 跨跨中,第 1 跨和第 16 跨的应力极值均位于跨中截面,上缘应力沿跨径分布较均匀;第 2~15 跨上缘应力

呈明显的跨中集中特征,从跨中向支座区域应力逐渐衰减。上缘最大压应力出现在第 2 跨和第 15 跨跨中,左幅箱梁分别为-9.22、-9.25 MPa,右幅箱梁分别为-9.39、-9.42 MPa;下缘最大压应力出现在第 2 跨和第 15 跨跨中,左幅箱梁分别为-15.10、-15.20 MPa,右幅箱梁分别为-15.30、-15.40 MPa,均不大于 $0.5f_{ck} = 16.40$ MPa (f_{ck} 特征抗压强度),满足设计规范要求^[20]。

工况 3 为拓宽后桥梁的最不利工况,且最大应力出现在第 15 跨,取第 15 跨结构建立局部精细化模型。

2.3 横向拼接局部构件精细化分析

2.3.1 模型建立

建立局部精细化有限元模型,采用不同的单元类型对结构各部件进行离散化处理。采用 C3D8R 单元模拟主梁和横向肋板,主梁截面较大,控制网格边长为 150 mm,最终离散得到 306 027 个实体单元。采用更精细的 30 mm 网格尺寸划分横肋构件,共生成 102 500 个 C3D8R 单元,如图 8a)所示。选用 T3D2 单元对横肋内部的钢筋增强件以及榫卯、套箍等连接部件进行建模。模型中的接触设置如图 8b)所示,其中通过内置区域技术将钢筋网、榫卯节点以及钢套箍等加强构件与混凝土基体进行耦合,如图 8c)所示。采用刚域耦合技术施加主梁内力:在主梁端部建立截面形心耦合节点,通过该节点施加从全桥分析模型中提取的跨中截面内力,如图 8d)所示。

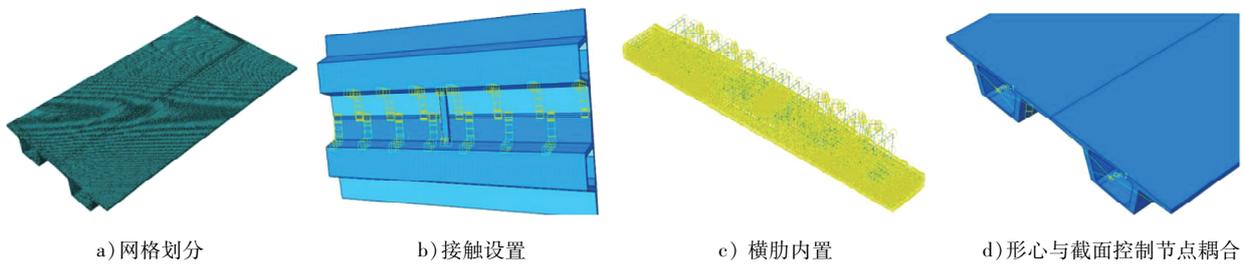


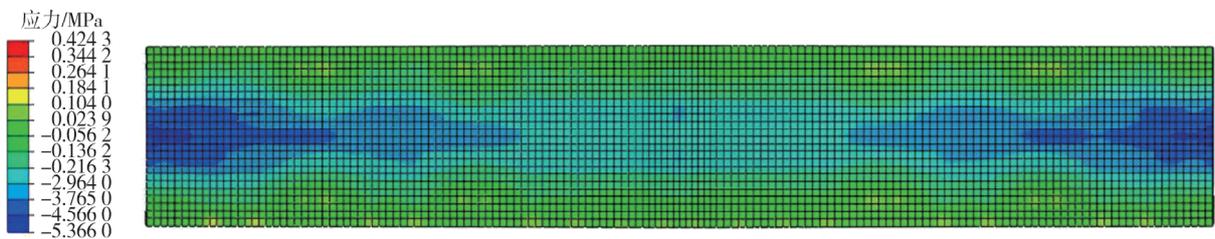
图 8 局部构件有限元模型

2.3.2 结果分析

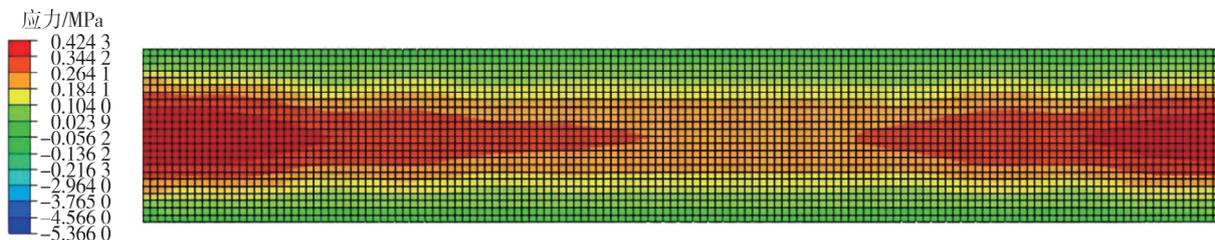
根据全桥模型有限元的分析结果确定,工况 3 为最不利工况。提取全桥模型中最不利一跨的内力对局部模型进行加载分析。

2.3.2.1 横肋计算结果及分析

横肋不同方向应力云图如图 9 所示。



a) 横肋顶面顺桥向应力



b) 横肋底面顺桥向应力

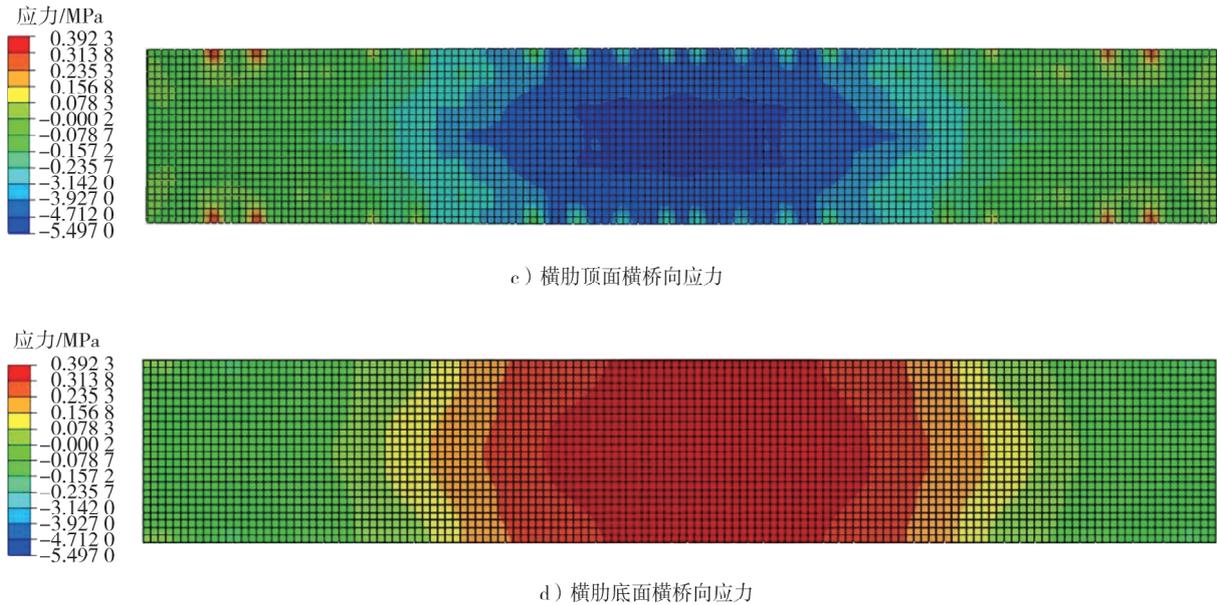


图9 横肋不同方向应力云图

由图9可知:在工况3作用下,第2跨跨中区域横肋顶面端部出现顺桥向最大压应力,为 -5.40 MPa ,底面端部顺桥向出现最大拉应力,为 0.42 MPa ,拉、压应力从两端向中部区域递减,压应力对称分布;顶面中部区域出现横桥向最大压应力,为 -5.50 MPa ,底面中部区域出现横桥向最大拉应力,为 0.39 MPa ,拉、压应力均由中部向两端递减,压应力对称分布。压应力不大于 $0.5f_{ck} = 16.40\text{ MPa}$,拉应力不大于 $0.7f_{tk} = 1.85\text{ MPa}$ (f_{tk} 为特征抗拉强度),均满足设计规范要求^[20]。

应力分布特征表明顺桥向应力极值位于端部,横桥向应力极值集中于中部,顺桥向、横桥向应力均呈梯度变化,这种分布模式与结构的边界约束条件及荷载传递路径密切相关。上表面最大压应力反映局部弯矩作用,下表面拉应力与整体弯曲变形有关。横桥向的中部压应力和下表面拉应力表明横向刚度对荷载有再分配作用。横肋的应力分布受整体荷载传递影响,且与局部构造细节密切相关,尤其是新旧结构连接部位的力学行为对整体应力分布影响显著。

2.3.2.2 榫卯及套箍计算结果及分析

将榫卯分别编号为 $1^{\#} \sim 8^{\#}$,如图10所示。按从左到右顺序对套箍编号,分别为 $1^{\#} \sim 16^{\#}$ 。根据Abaqus模型的计算结果绘制各榫卯、套箍的Mises应力峰值曲线,如图11所示。

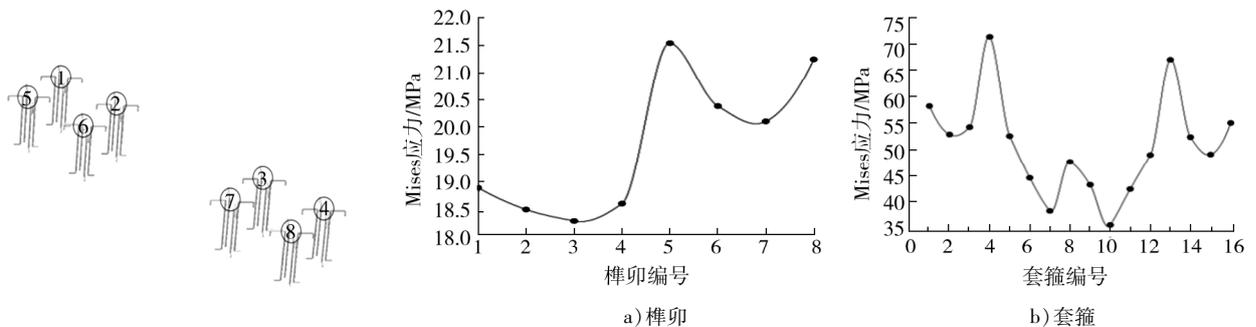


图10 榫卯

图11 局部构件应力峰值曲线

由图11a)可知:在工况3作用下,榫卯连接钢筋的应力极值集中出现在靠近横肋侧壁的中部区域,对应箱梁与横肋的接触界面区域。这种应力集中现象主要源于新旧结构接触面间的相对位移效应,连接钢筋中部区域承受较大的拉应力。 $1^{\#} \sim 4^{\#}$ 榫卯构件中, $1^{\#}$ 榫卯构件表现为最不利受力状态,Mises应力峰值为 18.88 MPa ; $5^{\#} \sim 8^{\#}$ 榫卯构件组中, $5^{\#}$ 榫卯构件承受最大应力,为 21.56 MPa 。拉应力不大于 $0.75f_{yk} =$

300.00 MPa(f_{yk} 为标准屈服强度),压应力不大于 $0.8f_{yk} = 320.00$ MPa,均满足设计规范要求^[20]。

由图 11b)可知:在工况 3 作用下,各套箍的应力对称分布;应力极值主要集中于顺桥向两侧竖向钢筋的中部区段,对应箱梁与横肋的接触界面区域。4#套箍承受最大应力 71.43 MPa,10#套箍应力最小,为 35.65 MPa,其余套箍的应力介于 4#套箍与 10#套箍间,拉应力不大于 $0.75f_{yk} = 300.00$ MPa,压应力不大于 $0.8f_{yk} = 320.00$ MPa,应力均满足设计规范要求^[20]。套箍应力较大,主要起承力作用,承受横肋传递的拉应力;榫卯承受压力较小,主要承担固定构件作用。

2.4 拓宽后结构受力状态变化

采用软件 Midas Civil 建立桥梁拓宽前、后的全桥有限元模型,研究原桥结构内力变化规律。原桥在边界条件调整和结构形式改变时均会影响其内力分布,且考虑自重、预应力和活载等作用的影响,对比分析二车道原桥与五车道拓宽后桥梁的受力特性。活载布置方式上,原桥采用居中加载模式,拓宽后按新桥轴线对称布载如图 12 所示。通过数值模拟发现拓宽前、后的结构体系对称受力,取 0~400 m 桥梁分析拓宽前、后桥梁的弯矩如表 2 所示。

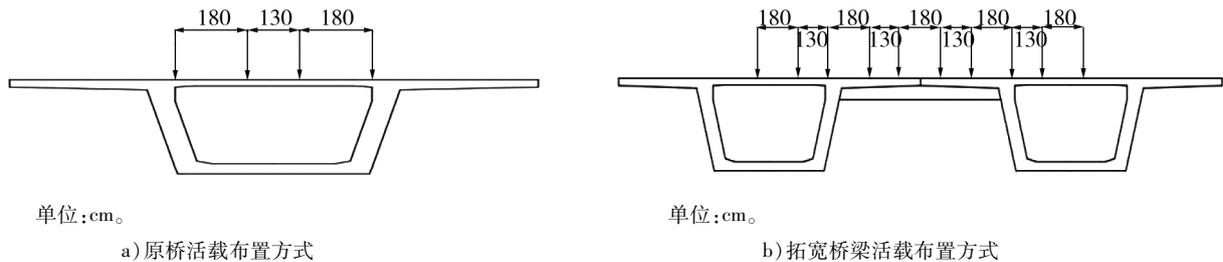


图 12 活载布置方式

表 2 原桥及拓宽后桥梁弯矩变化

距小桩号支点距离/m	原桥弯矩/(kN·m)	拓宽后弯矩/(kN·m)	拓宽前后弯矩差绝对值/(kN·m)	弯矩变化率/%
0	-30 905.1	-34 262.9	3 357.8	10.9
50	14 548.4	13 762.8	785.6	5.4
100	-7 265.9	-8 118.3	852.4	11.7
115	25 592.0	22 418.0	3 174.0	12.4
200	-4 818.1	-5 237.6	419.5	8.7
315	27 256.0	24 775.7	2 480.3	9.1
400	-4 779.2	-5 036.0	256.8	5.4

注:弯矩变化率为拓宽前、后弯矩差与原桥弯矩绝对值之比。正弯矩为下缘受拉,负弯矩为上缘受拉。

由表 2 可知:拓宽桥梁后,原主梁在最不利工况下的弯矩分布特性明显改变,正弯矩区极值普遍减小,负弯矩区极值的绝对值小幅增大。从受力机理来看,恒载与预应力作用的增强导致结构弯矩显著增大,其中边跨和中跨跨中截面的弯矩变化最敏感。尽管由二车道增至五车道,但新增活载对原结构弯矩的贡献率反而降低,这主要源于拓宽后荷载传递路径的改变及结构整体刚度的提高。弯矩重分布现象表明,恒载和预应力的主导作用可改善正弯矩区受力状态,负弯矩区应力水平略增。

3 实桥试验

3.1 实桥荷载布置及应变计布置

本桥设计采用公路-I 级车道荷载,按双向五车道布载,荷载布置如图 12b)。在桥梁第 15 跨的支点、 $L/4$ 、跨中 $L/2$ 、 $3L/4$ 四个断面共布置 30 个应变计进行监测,如图 13 所示。

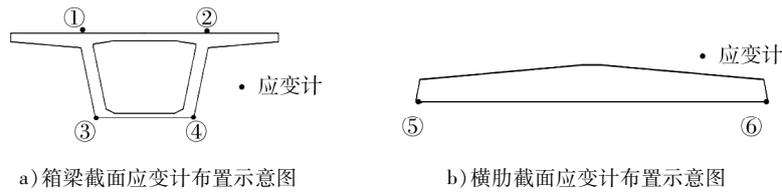


图13 实桥应变计布置示意图

3.2 现场实测应力与有限元分析应力对比

第15跨左箱梁、横肋现场实测应力与有限元模型计算应力对比如图14所示。

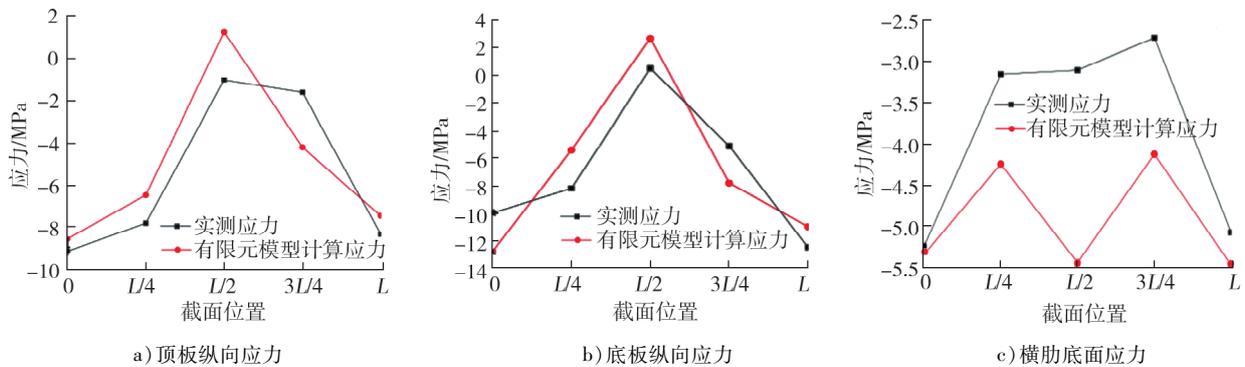


图14 第15跨实桥测试应力与有限元模型应力

由图14可知:顶板和底板纵向实测应力与有限元模型应力相近,横肋底面实测应力与有限元模型计算应力在 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 处相差较大;在拓宽桥梁的纵桥向应力传递过程中,从支点至跨中区段,顶板和底板的正应力减小;在跨中至支点段,应力逐步增大,与经典梁理论中弯矩沿跨长的分布规律一致,验证结构受力的合理性。横肋在全桥纵向的应力传递表现出更复杂的起伏特征:在 $L/4$ 至 $L/2$ 区段、 $3L/4$ 至 L 区段应力递增,在 0 至 $L/4$ 区段、 $L/2$ 至 $3L/4$ 区段应力减小。横肋应力峰值主要出现在 $L/2$ 附近区域,该位置的实测应力与有限元模型计算应力差异显著,最大相差约 2.5 MPa 。差异主要源于部分应变计损坏及实际工程中的边界条件非线性效应。既有桥梁的现场支座受长期服役影响,可能产生摩擦阻力、不均匀沉降等非线性约束,这些因素与理想有限元模型中的简化边界条件存在较大区别。

实测应力的传力路径与有限元模拟结果一致,各控制截面的实测应力与有限元模型应力之差基本控制在工程允许范围内。在顶板 $L/2$ 断面出现的最大应力差(2.5 MPa)仍处于材料安全应力范围内,施工监测数据表明,桥梁在整个横向拼宽过程中始终维持可靠的结构安全状态,表明有限元模型的参数设置和计算精度能满足工程需求,实际结构行为与理论模型间的差异主要来源于边界条件的理想化假设。

4 结论

以女姑口特大桥改扩建工程为背景,对比分析桥梁在最不利荷载工况(运营状态)下的受力情况,分析局部构件拓宽前、后的受力状态。

1)在最不利荷载工况下,拓宽桥梁左、右幅箱梁上、下缘均为压应力;桥梁横肋的应力分布规律主要受结构对称性、荷载传递路径和边界约束条件的综合作用。顺桥向压应力对称分布,横肋上表面端部区域出现最大压应力(-5.40 MPa),下表面两端形成最大拉应力(0.42 MPa);横桥向应力对称分布,最大压应力(-5.50 MPa)集中于上表面中部,最大拉应力(0.39 MPa)出现在下表面中央区域。

2)榫卯的最大应力集中出现在靠近横肋侧壁的中部区域,对应于箱梁与横肋结构的接触交界面位置。这种应力集中现象主要源于新旧结构接触面间的相对位移效应,连接钢筋中部区域承受较大的拉应力。桥梁拓宽后,原主梁在最不利荷载工况下的弯矩分布特性显著变化。正弯矩区最大弯矩普遍减小,

负弯矩区绝对值小幅增大。

3)顶板和底板纵向实测应力与有限元模型应力相近,横肋底面实测应力与有限元模型应力在 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 处相差较大。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2023-06-16(002).
- [2] 高倩,李旭杰,潘少军,等. 一种智能化数据采集设备在桥梁测试中的应用[J]. 测控技术, 2017, 36(9): 24-26.
- [3] SHUSHKEWICH K W. Design of prestressed concrete bridges to accommodate future widening[J]. PCI Journal, 2005, 50(3): 74-89.
- [4] CORBETT P W, WATTERSON T J. Widening of existing bridges on state highway 16 in Auckland[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-bridge Engineering, 2016, 169(3): 203-214.
- [5] 李顺波,宋宇飞. 既有桥梁拼宽方案分析与对比[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(2): 94-95.
- [6] 翟建勋. 大悬臂混凝土箱梁桥横向拓宽拼接加劲肋的设计研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [7] 吴文清,赵昊,章世祥. 三向预应力混凝土箱梁桥拓宽改造箱梁翼缘板连接结构研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(2): 13-18.
- [8] 柴晓婷. 连续弯箱梁桥拓宽后拼接缝受力及平面内结构变形研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
- [9] 陈康明,吴庆雄,陈宝春,等. 长联预应力混凝土连续梁桥拼接问题分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1238-1245.
- [10] WU W Q, ZHANG H, LIU Z, et al. Numerical analysis on transverse splicing structure for the widening of a long multi-span highway concrete continuous box girder bridge[J]. Materials, 2022, 15(19): 6805.
- [11] TAN Z C, YU J C, ZHANG S Y. A multi-technique hybrid method for the widening and splicing of new and old beam bridges[J]. Sustainability, 2024, 16(14): 6164.
- [12] 杨新燕. 桥梁T梁与箱梁斜向拼接结构受力性能有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(5): 178-184.
- [13] 谭小磊. 基于有限元的混凝土连续箱梁拼宽桥拼接段受力性能模拟分析[J]. 科学技术创新, 2023(5): 125-128.
- [14] 刘发,厉广广,杨洋,等. 基于长标距光纤光栅应变传感体系的拼宽桥梁动态变形现场测试[J]. 公路, 2024, 69(9): 117-123.
- [15] GUO Q, SUN Y B, MI T. Retracted: assessment on long-term deflection of concrete beam bridges based on uncertainty quantification method[J]. Structures, 2021, 34: 3013-3027.
- [16] 杨忠胜. 既有拼宽T梁桥连接方式优化研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(4): 106-111.
- [17] WU W Q, CAO C, WU Y Q, et al. Numerical analysis on sliding-type transverse splicing connection applied in widening continuous concrete box-girder bridge[J]. Buildings, 2024, 15(1): 35.
- [18] 高士亮. 新旧桥梁拓宽拼接力学行为研究[J]. 工程建设与设计, 2021(20): 58-60.
- [19] 张炎. 加宽装配式简支空心板梁桥荷载横向分布系数探讨[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(2): 44-46.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.

Mechanical characteristics of connecting members in a widened bridge with long cantilever continuous box girders

YANG Anchang, MENG Song, GONG Guanhong, LIU Jinwen*

School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To study the force characteristics of the connection components of the large cantilever continuous box girder widening bridge, taking the Nügukou Bridge reconstruction project as the research background, fine numerical simulations of the entire bridge and local sections are conducted with finite element software Midas

Civil and Abaqus. The stress conditions of the overall model of the widening bridge under three working conditions: partial load, constant load combination, and operational state are analyzed, along with the changes in bending moments before and after widening the bridge. The stress on the local component model is analyzed under operational conditions. Strain monitoring is performed on the box girder and transverse ribs, and a comparative analysis of the measured stresses and the stresses obtained from the finite element model is conducted. The operational state is the most unfavorable condition, under which the stress extremes of the left and right box girders are located in the middle regions of the 2nd and 15th spans. A local refined model is established for the 15th span, which exhibits the maximum stress and vertical displacement. After loading, the stresses on the transverse ribs, mortises, and stirrups are analyzed under the operational state. The compressive stresses of the transverse ribs in the longitudinal and transverse directions exhibit a symmetric distribution, with longitudinal stresses decreasing from the ends toward the middle region. The maximum compressive stress at the ends is -5.40 MPa, and the maximum tensile stress is 0.42 MPa. The transverse compressive stresses decrease from the middle to the ends, with the maximum compressive stress in the middle being -5.50 MPa and the maximum tensile stress being 0.39 MPa. Under the operational state, the extreme values of stress for the reinforcement in the mortise connections appear in the middle region near the side walls of the transverse ribs, with the 5[#] mortise bearing the maximum stress of 21.56 MPa. The stirrup stresses exhibit a symmetric distribution, with extreme stresses occurring in the middle regions of the vertical reinforcements on both sides. The 4[#] stirrup bears the maximum stress of 71.43 MPa, while the 10[#] stirrup bears the minimum stress of 35.65 MPa. The overall stiffness of the bridge structure increases after widening, with changes in the load transfer path. The bending moment distribution of the original main beam under operational conditions is significantly altered, with the maximum bending moment in the positive moment region generally decreasing, while the absolute value of the maximum bending moment in the negative moment region slightly increases. The measured longitudinal stresses of the top and bottom plates of the left box girder in the 15th span are close to those of the finite element model, while the measured stresses on the bottom surface of the transverse ribs differ significantly from the finite element model stresses at $L/4$, $L/2$, and $3L/4$.

Keywords: large cantilever continuous box girder; widened bridge; connecting member; finite element simulation; real bridge detection

(责任编辑:王惠)