文章编号：1671-8496-(2026)-04-0032-07

既有简支空心板桥与现浇连续箱梁横向拼接性能分析

李院军
（广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司，广东 广州 510507）

摘　要：以中山—江门高速公路桥梁为例，针对主线桥与拼宽桥存在纵向伸缩缝的情况，为减少纵向伸缩缝带来的行车安全隐患，对主线桥简支空心板与拼宽桥现浇连续箱梁上部采用刚性连接，下部结构不做连接处理。针对简支空心板和现浇连续箱梁拼接存在上部结构刚度差异大和结构体系不同等问题，分别采用梁格法有限元模型和实体有限元模型，对刚性拼接后的桥梁整体受力和拼接带局部受力进行分析。结果表明：主线桥空心板和拼接桥现浇连续箱梁桥刚性拼接后，其承载能力验算和正常使用验算满足规范要求。拼接带受力较为复杂，呈现双向受力状态，横向弯矩最大值位于拼接带与箱梁连接处，纵向弯矩最大值出现在第三跨支点，对纵横向弯矩最大值位置进行验算，发现满足受力需求。根据拼接带的实际受力特点，对拼接带进行精细化设计，可为后续类似项目提供借鉴。

关键词：既有桥梁；简支空心板；现浇连续箱梁；横向拼接；刚性
中图分类号：U448.217　　**文献标识码**：A

Analysis of the Lateral Splicing Performance between Existing Simply Supported Hollow Slab Bridges and Cast-in-Place Continuous Box Girders

LI Yuanjun
（Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China）

Abstract: Taking the bridges on the Zhongshan-Jiangmen Expressway as an example, in response to the presence of longitudinal expansion joints between the mainline bridge and the widened bridge, rigid connections were adopted between the simply supported hollow slabs of the mainline bridge and the cast-in-place continuous box girders of the widened bridge, while the substructures remained unconnected. To address issues such as significant stiffness differences and different structural systems between the simply supported hollow slabs and the cast-in-place continuous box girders, a beam grid finite element model and a solid finite element model were employed to analyze the overall stress of the rigidly connected bridge and the local stress in the joint zone, respectively. The results indicated that after the rigid connection of the hollow slabs of the mainline bridge and the cast-in-place continuous box girders of the widened bridge, both the bearing capacity check and the normal use check met the specification requirements. The stress in the joint zone was relatively complex, exhibiting bidirectional stress conditions. The maximum transverse bending moment occurred at the junction between the joint zone and the box girder, while the maximum longitudinal bending moment occurred at the fulcrum of the third span. The verification of the maximum values of both longitudinal and transverse bending moments satisfied the stress requirements. Based on the actual stress characteristics of the joint zone, a refined design was implemented for the joint zone, providing a reference for subsequent similar projects.

Key words: existing bridges; simply supported hollow slabs; cast-in-place continuous box girders; transverse splicing; rigidity

收稿日期：2025-12-14
作者简介：李院军，工程师，硕士，研究方向为公路桥梁设计和理论

目前高速公路和国省道改扩建正在如火如荼地进行，桥梁扩宽改造一般采用分离式扩建或拼接方案，即将主线桥与拼宽桥进行拼接。桥梁分离式扩建方案成本较高，通常用于特大桥；拼接方案一般用于中小桥[1-3]。但对主线桥和拼宽桥进行拼接时也会面临各种问题，如拼接纵向缝、错孔拼接、上部结构刚度存在差异和结构体系不同等[4-9]。尤其是针对主线桥与拼宽桥上部结构刚度差异大，且两者结构体系不同的情况，目前鲜有学者研究。本文以深圳至岑溪高速公路中山新隆至江门龙湾段改扩建工程（简称中江高速）中一座中桥为例开展研究，该桥梁的主线桥为简支空心板桥，拼宽桥为现浇连续箱梁，两者之间存在纵向伸缩缝，出于行车安全的考虑，将主线桥与拼宽桥进行拼接。研究分别采用梁单元和实体有限元模型对拼接后桥梁整体和局部受力展开分析，可为后续上部结构拼接工程中存在刚度差异，及两者结构体系不同的情况提供参考。

1 工程概况

中江高速上某主线桥为 3 ×16 m 预制简支空心板桥，于2004 年建成，桥宽14 m，主梁高0. 8 m，桥面为 10 cm 现浇整体化层 + 10 cm 沥青路面，主梁混凝土为 C40，主梁下缘配置 16 根单根钢束。根据最新定检报告，桥梁为二类桥，上部结构未见明显病害。2011 年新增立交改造，在该桥位置上拼宽了一座新桥，新桥为 3 ×16 m 现浇连续箱梁桥，桥宽 15. 25 ~ 16. 4 m，主梁高 1. 3 m，桥面为 10 cm 沥青路面，主梁混凝土为 C40，箱梁为普通钢筋混凝土结构，上下缘纵向受力主筋为 HRB335 – 28。根据最新定检报告，该新桥为一类桥，上部结构未见明显病害。空心板悬臂外侧埋 L30 ×3 角钢，拼宽桥箱梁内侧也预埋 L30 × 3 角钢，并与空心板之间留 2 cm 纵缝，形成简易纵向伸缩缝，以下均称纵向伸缩缝。桥型布置如图 1、图 2 所示。

中江高速于 2021 年启动将双向 4 车道改为 8 车道的改扩建，需要对该位置进行改造加宽。2011 年立交改造时，拼宽桥的宽度已经满足需求，但随着行车道划分的变化，空心板桥与现浇箱梁桥之间的纵向伸缩缝位置正好处于改造后的第四车道的轮迹线位置，第四车道以重载车辆通行为主，当纵向伸缩缝的角钢出现翘起和断裂等病害，易引发安全事故，对行车安全构成重大隐患。因此亟需对空心板桥与现浇箱梁桥之间的纵向伸缩缝进行处理。

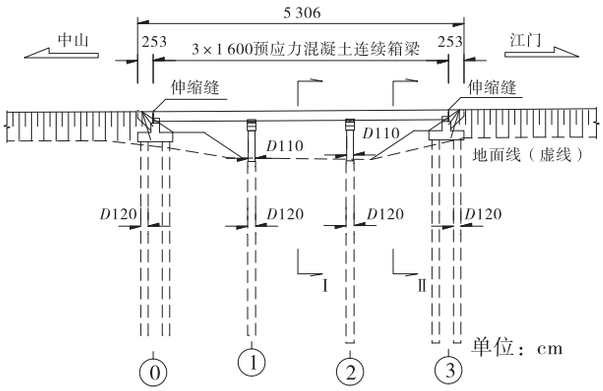


图 1　桥梁立面示意图

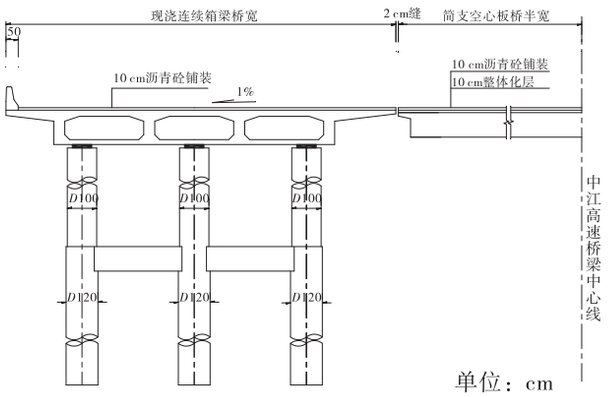


图 2　横断面示意图

2 桥梁拼宽方案比选

2. 1 总体方案比选

目前针对主线桥与拼宽桥之间的纵向伸缩缝处理方式主要有两种，一是拆除既有的角钢，更换成纵向伸缩装置；二是将主线桥与拼宽桥进行拼接[4]。方案一能短暂解决桥面纵向伸缩缝的问题，但在纵缝伸缩装置运行一段时间后，仍可能出现安全问题，且后期维修养护成本较高。方案二将主线桥与拼宽桥进行连接，有利于改善空心板内边梁受力，能够彻底解决桥面纵向伸缩缝的问题。综合比选下，建议采用方案二。

2. 2 拼接方式选择

空心板桥与现浇连续箱梁桥拼接方案采用上部结构连接，下部结构不连接的方式。其中上部结构连接又可以分为刚接（刚性连接）和铰接，

刚接时主线桥与拼宽桥上部结构能够共同受力，施工较为方便；铰接时主线桥与拼宽桥上部结构只能传递竖向剪力，能够减少主线桥与拼宽桥不均匀沉降和收缩徐变带来的不利影响，但施工复杂，后期维修养护工作量大。在本工程中，主线桥于2004年建成，拼宽桥于2011年建成，主线桥与拼宽桥不均匀沉降和收缩徐变已经基本完成，综合考虑下，采用刚性连接方式。

初步拟定拼接带厚度为45 cm，先破除现浇箱梁悬臂以及60 cm宽的顶板，破除空心板悬臂以及60 cm宽的整体化层，保留悬臂上下缘钢筋，利用保留的钢筋进行连接。横向拼接断面如图3所示。

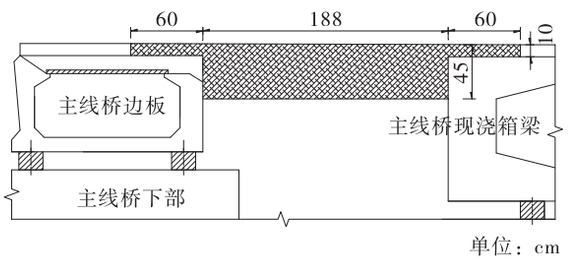


图3 主线桥与拼宽桥横向拼接断面局部示意图

3 桥梁整体受力分析

3.1 有限元模型

为分析桥梁整体受力，并为实体有限元模型中汽车荷载最不利布载提供依据，采用Midas Civil同步建立空心板与箱梁的有限元模型。其中箱梁采用单梁模型，空心板采用梁格模型。梁格模型采用虚拟横梁技术模拟空心板的铰缝连接，横向设置虚拟横梁，纵向宽度取1 m，横向宽度为桥宽，厚度为10 cm，空心板间虚拟横梁需要释放梁单元约束，仅保留传递竖向剪力。拼接带采用板单元，板单元采用自动网格划分，网格尺寸为1 m，全桥共建立1 087个节点、1 146个梁单元和100个板单元，有限元模型如图4所示。

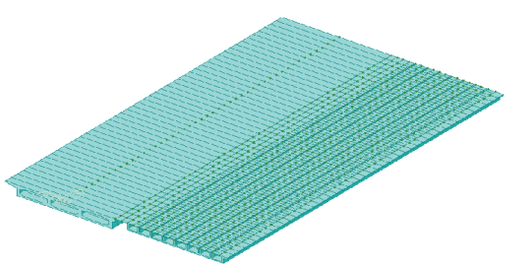


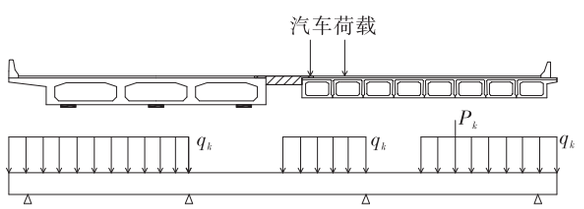
图4 Midas梁、板单元模型

为了简化整体模型，对下部结构采用固定点简化模拟，在固定点上建立弹性连接模拟支座，采用弹性连接与一般支承相结合的方式模拟边界条件，其中箱梁采用刚性连接与三个支座相连，用弹性连接模拟支座刚度。根据现场支座布置情况，简支梁部分采用板式橡胶支座，现浇箱梁采用盆式支座，支座刚度按实际支座参数计算。

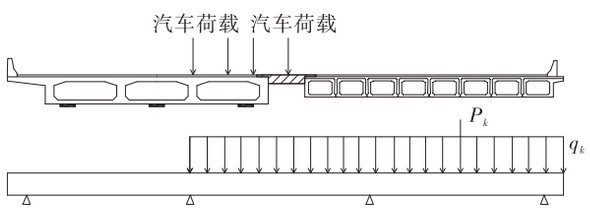
3.2 移动荷载确定

为分析拼接带在汽车荷载作用下的最不利布载情况，考虑拼宽改造后行车道的实际位置，以拼接带为横向布载中心，根据《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60—2015）的规定布置5个车道，考虑横向车道布载系数，采用Midas Civil计算桥梁的响应影响线和最不利车辆布载。

常规拼接带主要为单向板受力，以横向受弯为主。但由于本桥中主线桥空心板为简支体系，拼宽桥箱梁为连续梁体系，支点处纵向负弯矩较大，本桥的拼接带更接近双向受力的双向板，本次移动荷载布置分别考虑拼接带横向、纵向弯矩极值进行布载。本次验算初步拟定为对称配筋，选择纵横向弯矩极值处作为控制弯矩验算位置。经初步对比可知，拼接带的支点处纵向弯矩较大，第三跨跨中横向弯矩较大，因此分别以第三跨跨中的横向弯矩与支点纵向弯矩作为结构响应极值，采用Midas Civil的移动荷载追踪器计算各响应对应的最不利布载，以下简称活载1和活载2，车辆布载工况如图5和图6所示（图中均布荷载 $q_k=5.25$ kN/m，集中荷载 $P_k=146$ kN）。

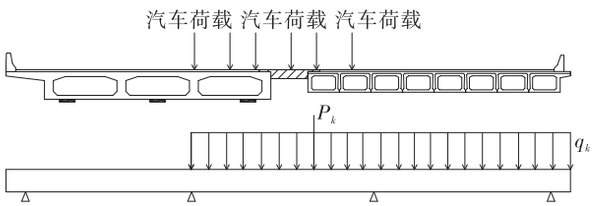


（a）正弯矩最不利布置

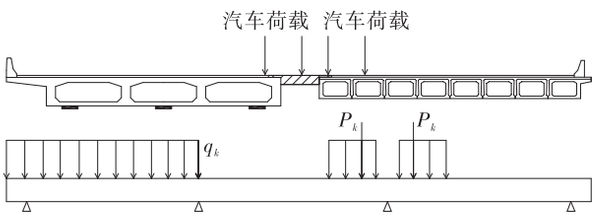


（b）负弯矩最不利布载

图5 拼接带跨中横向弯矩最不利车辆布载（活载1）



（a）正弯矩最不利布置



（b）负弯矩最不利布载

图 6　拼接带支点纵向弯矩最不利车辆布载（活载 2）

3.3 整体受力分析

根据竣工图资料以及模型试算结果，发现主线桥空心板边梁和次边梁受力最不利，对空心板和箱梁按照规范的规定进行验算。根据高速公路改扩建原则，承载能力极限状态验算按照拼宽后的标准执行，即按最新《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）规范进行验算；正常使用极限状态验算按原设计《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计》（JTJ 023—85）规范进行验算，空心板桥计算结果如表 1 和表 2 所示。拼宽后，空心板边梁抗弯承载力满足规范要求，富余度为 3.5%，空心板次近梁抗弯承载力富余度为 7.0%，抗剪承载力均满足规范要求。

表 1　空心板正常使用极限状态验算表

单位：MPa

板类型	工况	正截面抗裂验算			斜截面抗裂验算		
		应力值	允许值	是否满足	应力值	允许值	是否满足
次边板	组合 1	0.14	−2.08	是	−0.99	−1.56	是
	组合 2 或 3	−0.94	−2.34	是	−1.39	−1.69	是
边板	组合 1	0.1	−2.08	是	−1.18	−1.56	是
	组合 2 或 3	−0.93	−2.34	是	−1.59	−1.69	是

注：表 1 中应力值正值为压，负值为拉。

表 2　空心板承载能力极限状态验算表

单位：kN/m

板类型	抗弯验算			抗剪验算		
	效应值	允许值	富余度/%	效应值	允许值	富余度/%
次边板	1 707	1 826	7.0	568	746	31.4
边板	2 118	2 192	3.5	755	823	9.0

4 拼接带受力分析

上文采用梁单元与板单元有限元模型，对主线桥与拼宽桥拼接后的整体受力性能开展分析，并对主梁构件进行验算，但该模型在拼接带局部区域的应力计算结果存在失真。为了解决这一问题，下面针对主线桥和拼宽桥及其拼接带采用实体单元进行模拟，主要分析拼接带局部的受力情况。

4.1 实体有限元模型

采用通用有限元软件 ABAQUS 建立主线桥与拼宽桥的有限元实体模型。具体分析中，采用线性完全积分三维实体单元 C3D8R 分别建立箱梁、空心板以及拼接带三个部件，各部件之间采用 tie（绑定）连接。模型采用四面体网格划分，保证了网格划分的质量，未出现畸形单元，保证了求解的精度，网格种子大小为 100，为提高计算效率，将实体单元长度比设计为 1∶1∶2（沿桥梁纵向方向为 2），整个模型共划分 375 000 个单元、534 096 个节点和 534 096 个自由度。箱梁、空心板和拼接带分别采用 C40 和 C50 混凝土材料，对结构进行分析计算。有限元实体模型如图 7 所示。

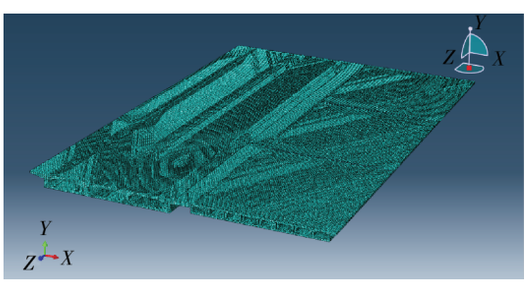


图 7　实体有限元模型

4.2 单个荷载工况下受力分析

本次计算主要考虑了恒载、活载 1 和活载 2、整体升降温等 5 个计算工况，计算工况如表 3 所示，分析每个工况下拼接带的受力情况。①一期恒载：考虑现浇箱梁上部结构，空心板的上部结构与 10 cm 现浇整体化层，拼接带的自重，按实

际断面尺寸计取，钢筋混凝土容重取 26 kN/m^3。②二期恒载：空心板 10 cm 沥青铺装层；现浇箱梁 10 cm 沥青铺装层，沥青混凝土容重取 24 kN/m^3。③基础沉降：由于主线桥于 2004 年建成，拼宽桥于 2011 年建成，认为其基础沉降已完成，本次计算暂不考虑基础沉降。④收缩徐变：由于主线桥和拼宽桥建成时间较长，2 座桥梁收缩徐变基本完成，仅拼接带自身的收缩徐变影响有限，故本次计算暂不考虑收缩徐变作用。⑤汽车荷载：根据第 3 节计算得到的最不利布载施加活载 1 与活载 2，分别对应跨中横向弯矩与支点纵向弯矩的最不利布载。⑥温度：考虑整体升温 20℃，降温 20℃。

表 3　计算工况

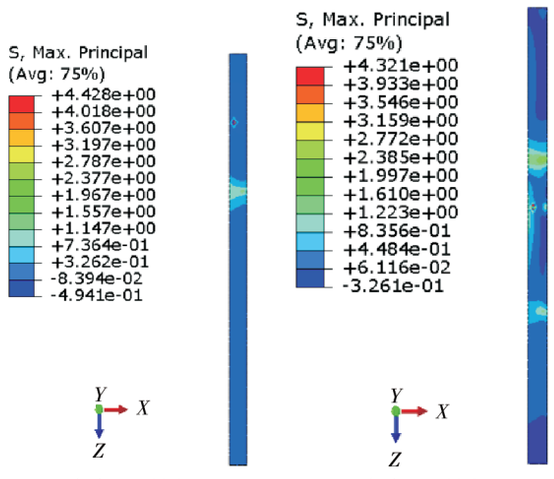
序号	荷载
工况 1	恒载（自重 + 二期铺装）
工况 2	活载 1（跨中弯矩最不利车道荷载）
工况 3	活载 2（支点弯矩最不利车道荷载）
工况 4	整体升温（ +20℃）
工况 5	整体降温（ −20℃）

4.2.1 各工况下应力分布情况

对各个工况作用下拼接带的效应最大值进行汇总对比分析，计算结果如表 4 所示。其中活载工况下的应力云图如图 8 所示。

表 4　单工况下拼接带效应汇总

工况	跨中横向弯矩 /(kN/m)	支点纵向弯矩 /(kN/m)	位置	主拉应力 /MPa
恒载	14.6	61.0	上缘	3.32
活载 1	14.2	26.0	上缘	4.43
活载 2	3.41	51.0	上缘	4.32
升温	0.15	0.85	上缘	0.47
降温	−0.15	1.4	下缘	0.26



（a）工况 2　　（b）工况 3

图 8　活载作用下拼接带应力分布

由图 8 和表 4 可知，5 个工况下，恒载和活载工况下内力和应力效应最大，其中跨中横向弯矩最大值为 14.6 kN/m，支点纵向弯矩最大值为 61.0 kN/m，可知拼接带是纵向弯矩控制。主拉应力最大值为 4.43 MPa，该应力出现在活载作用下拼接带靠近箱梁一侧的支点附近，主要由支点处结构连续产生的较大负弯矩导致。其余工况下，主拉应力最大值均出现在拼接带支点结构连续位置，应力超限范围有限，应力限值为 1.83 MPa，其余位置皆满足规范要求。

4.3 荷载组合下受力分析

根据 JTG D60—2015 进行荷载组合，其中基本组合按照第 4.1.5 条进行组合，频遇组合按第 4.1.6 条进行组合，荷载组合如表 5 所示。

表 5　荷载组合

序号	控制效应	组合类型	组合
cb1	跨中横向弯矩	基本组合	1.2 × 恒载 + 1.4 × 活载 1 + 1.05 × 升温
cb2	支点纵向弯矩	基本组合	1.2 × 恒载 + 1.4 × 活载 2 + 1.05 × 升温
cb3	跨中横向弯矩	频遇组合	1.0 × 恒载 + 0.7 × 活载 1 + 1.0 × 升温
cb4	支点纵向弯矩	频遇组合	1.0 × 恒载 + 0.7 × 活载 2 + 1.0 × 升温

4.3.1 基本组合跨中横向弯矩

按照 cb1 荷载组合计算拼接带的横向弯矩效应，在有限元实体模型查看拼接带的主拉应力和跨中横向弯矩，计算结果如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知，cb1 组合作用下跨中主拉应力最大值为 2.68 MPa，出现在拼接带与箱梁连接处的上缘，仅是局部位置，其余位置主拉应力均满足规范要求。由图 10 可知，跨中横向弯矩最大值为 33.6 kN·m，同样在拼接带与箱梁连接处，上缘受拉，根据验算满足规范要求。在 cb1 基本组合下，主要关注拼接带横向弯矩分布，从拼接带横向弯矩图可知，拼接带横向弯矩是不对称的，靠近箱梁端横向弯矩远大于空心板端，这是由箱梁和空心板提供的竖向刚度不同导致的。

4.3.2 基本组合支点纵向弯矩

按照 cb2 荷载组合计算拼接带的支点纵向弯矩效应，在有限元实体模型查看拼接带的主拉应力和纵向弯矩，计算结果见图 11 和图 12。由图 11 可知，主拉应力的分布规律为支点处最大，并向跨中方向应力逐渐减小。其中最大主拉应力值为 7.36 MPa，出现在第三跨支点处，且仅是局部位置，其余位置主拉应力均满足规范要求。

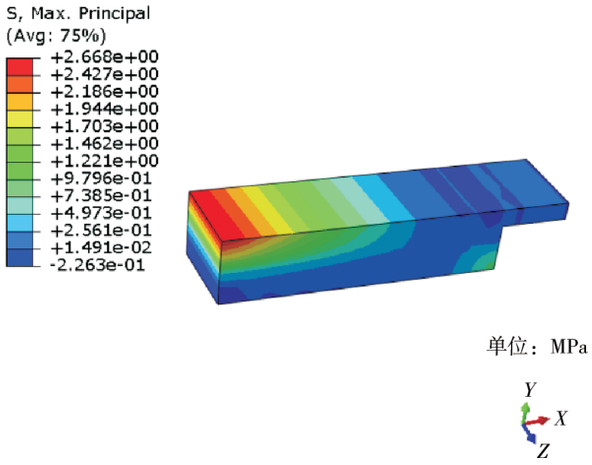


图 9　cb1 组合下拼接带跨中横向局部主拉应力云图

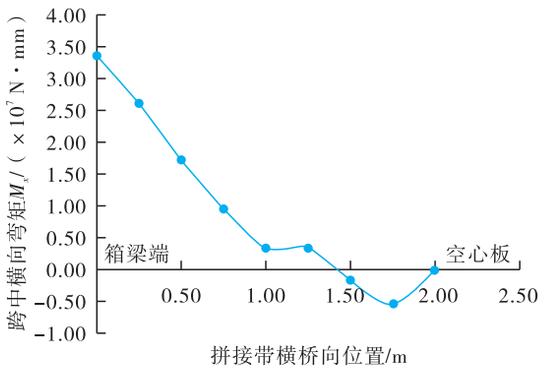


图 10　cb1 组合下拼接带跨中横向弯矩图

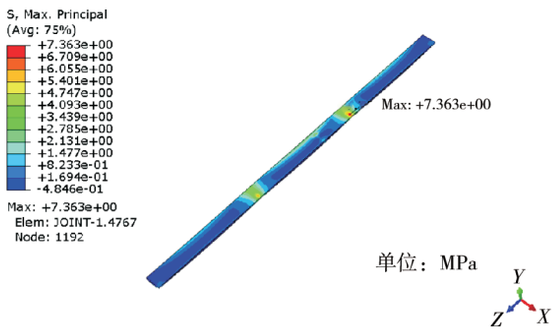


图 11　cb2 组合下拼接带主拉应力云图

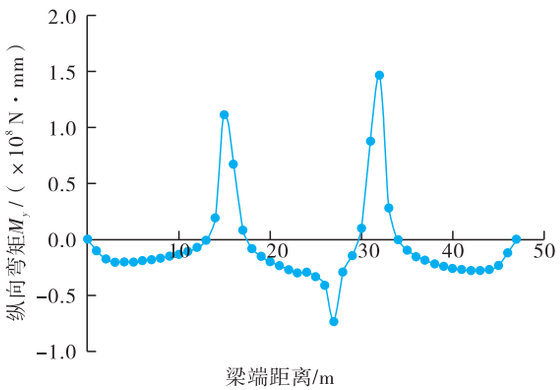


图 12　cb2 组合下拼接带纵向弯矩图

由图 12 可知，cb2 组合作用下纵向弯矩最大值为 150 kN·m，出现在第三跨支点处，上缘受拉，根据验算满足规范要求。拼接带纵向弯矩沿着纵桥向基本对称，稍有偏差是活载不对称加载导致。

4.3.3 频遇组合跨中横向弯矩

按照 cb3 荷载组合计算拼接带的横向应力情况，在有限元实体模型查看拼接带的主拉应力，计算结果如图 13 和图 14 所示。由图 13 可知，主拉应力的分布规律为拼接带与简支空心板支座连接最大，并向跨中方向应力逐渐减小。其中最大主拉应力值为 4.23 MPa，且仅是局部位置，其余位置主拉应力均满足规范要求。由图 14 可知，cb3 组合作用下拼接带跨中主拉应力最大值为 1.8 MPa，小于规范限值 1.83 MPa，出现在拼接带与箱梁连接处的上缘。

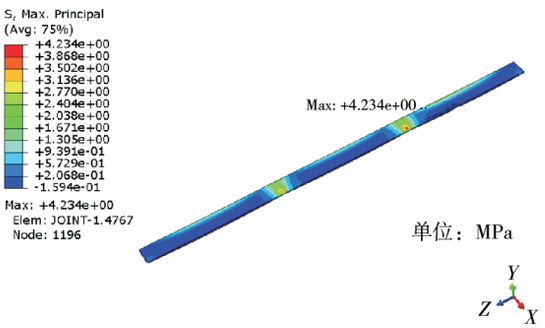


图 13　cb3 组合下拼接带主拉应力云图

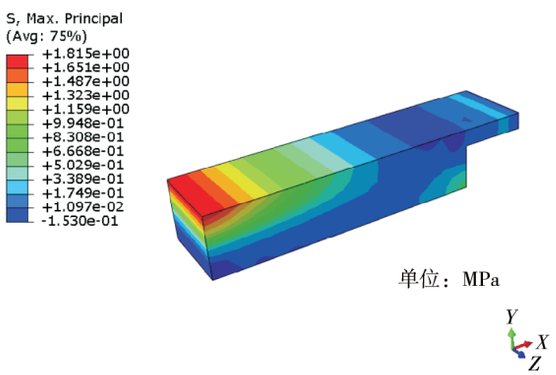


图 14　cb3 组合下拼接带跨中横向局部主拉应力云图

4.3.4 频遇组合支点纵向弯矩

按照 cb4 荷载组合计算拼接带的支点纵向应力情况，在有限元实体模型查看拼接带的主拉应力，计算结果如图 15 所示。由图 15 可知，主拉应力的分布规律为支点处最大，并向跨中方向应力逐渐减小。其中最大主拉应力值为 5.14 MPa，出现在第三跨支点处，仅是局部位置，其余位置主拉应力均满足规范要求。

通过上述 4 个荷载组合下的分析，可知拼接带基本组合下跨中横向弯矩最大值出现在拼接带

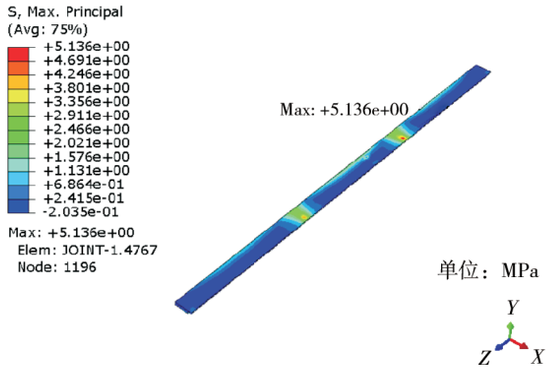


图 15　cb4 组合下拼接带主拉应力云图

与箱梁连接处，为 33.6 kN/m；纵向弯矩最大值出现在第三跨拼接带支点位置，为 150 kN/m。跨中横向弯矩控制下频遇组合，拼接带跨中主拉应力最大值为 1.8 MPa，满足规范要求。纵向弯矩控制下频遇组合，拼接带主拉应力最大值为 5.14 MPa，且仅限于局部位置，其余区域均满足规范要求。对拼接带进行正常使用极限状态下验算，经计算，拼接带纵向裂缝为 0.03 mm，横向裂缝为 0.028 mm，小于规范值 0.2 mm。

5 拼接构造设计

通过第 4 节拼接带受力分析，得到拼接带各个荷载组合下内力的分布规律和最大效应值，现根据上述分析结果进行拼接带的构造设计与配筋设计。在进行拼接带设计时，往往只注重拼接带的横向钢筋设计，忽略了在既有简支空心板与现浇连续梁这种特殊拼接方式中，纵向弯矩也是一个重要控制因素，应该同时注意拼接带横向和纵向的配筋设计。拼接带构造和配筋设计如图 16 所示，由前述拼接带受力分析可知，拼接带支点位置纵向弯矩比较大，因此在原来 45 cm 的基础上，在支点纵向 1 m 范围内，将拼接带厚度由 45 cm 调整为 65 cm。将 N1、N1b 和 N5 横向受力钢筋尺寸设计为 HRB400－22，N3 和 N4 纵向受力钢筋尺寸也设计为 HRB400－22。为了减少支点附近的应力集中导致的开裂问题，采用 C50 补偿收缩混凝土，掺入一定比例的钢纤维与纤维素纤维。经验算，拼接带承载能力和正常使用极限状态均满足规范要求。

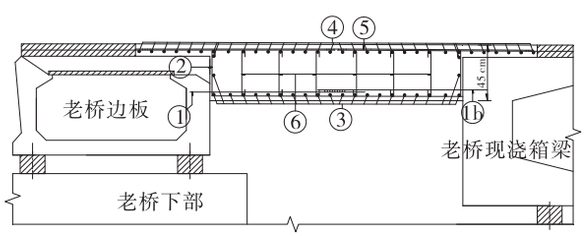


图 16　主线桥与拼宽桥拼接跨中断面配筋示意图

6 结论

以中江高速某中桥为工程实例，对主线桥和拼接桥之间的纵向伸缩缝进行处理，对简支空心板与现浇连续箱梁上部结构采用刚性连接方案，针对二者拼接存在上部结构刚度差异大和结构体系不同的情况进行整体和局部受力分析，可得到以下结论：

（1）随着行车道划分改变，主线桥与拼宽桥之间的纵向伸缩缝位置位于重载车道轮迹线上，为了消除安全隐患和减少后期养护工程量，建议对纵向伸缩缝进行处理。

（2）采用有限元模型进行受力分析时，拼接带为横纵向双向受力构件，不宜采用梁单元模拟；采用实体单元建立主梁与拼接带整体模型进行计算较为合理。

（3）采用实体有限元模型对拼接带进行受力分析可得，频遇组合作用下拼接带最大主拉应力为 5.14 MPa，出现在第三跨支点处，且仅限于局部位置，其余区域均满足规范要求。基本组合下拼接带纵向抗弯极限弯矩为 150 kN/m，横向极限弯矩 33.6 kN/m，均满足规范要求。正常使用极限状态下拼接带纵向裂缝 0.03 mm，横向裂缝为 0.028 mm，均小于规范值 0.2 mm。

参考文献：

[1]冯玉龙,林政园,王雪锋,等. 高速公路改扩建工程中拼宽桥梁的设计与施工关键技术分析[J]. 公路工程,2020,45(2):137-142.

[2]叶永城,李思清,张勇. 高速公路长联桥梁拓宽拼接影响因素分析及对策[J]. 铁道建筑,2013(10):24-27.

[3]陈康明,吴庆雄,陈宝春,等. 拓宽长联桥梁部分拼接方法与拼接构造试验[J]. 中国公路学报,2016,29(11):99-107.

[4]宗周红,夏樟华,陈宜言,等. 既有桥梁拓宽改造纵向接缝研究现状与实例分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2009,37(2):248-260.

[5]刘敏剑. 某高速公路空心板梁横向拓宽方案研究[J]. 广东交通职业技术学院学报,2023,22(4):23-26,75.

[6]方志,常红航,阳先全,等. 混凝土箱梁桥拓宽拼接后收缩和徐变引起的横向效应[J]. 中国公路学报,2013,26(6):65-72.

[7]冉云双. 基于刚度差异的上部结构拼宽方式研究[D]. 西安:长安大学,2018.

[8]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.

[9]卢建福,吴庆雄,陈康明,等. 刚性拼接不等高布置空心板桥受力性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(6):69-77.