

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.02.023

# 不同连接方式下桥梁加宽拼接部分受力性能研究

陈宏, 曾天宝

(南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038)

**摘要:** 为研究桥梁上部结构连接方式对桥梁加宽拼接部分受力性能的影响,以南昌九洲高架桥加宽工程为背景,选取其中两跨连续箱梁作为研究对象,分别建立 MIDAS/Civil 梁格模型和 ABAQUS 实体模型,考虑新旧两桥不同期收缩徐变效应、基础不均匀沉降、拼接部分局部加载 3 种外部荷载,分析铰接、半刚接、刚接 3 种连接方式及不连接情况下桥梁加宽部分的受力性能。结果表明,3 种外部荷载会使拼接部分产生较大横向应力,对桥面板不利;铰接方式受力最简单,但结构整体性欠佳;刚接方式受力最复杂,对形变非常敏感,容易产生非常大的次内力而导致结构破坏,但结构整体性最佳,利于交通;半刚接方式的受力性能和结构整体性介于铰接和刚接之间。

**关键词:** 桥梁;桥梁加宽;受力性能;铰接;半刚接;刚接

中图分类号:U445.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)02-0111-07

随着经济的飞速发展,现有高速公路难以满足日益增长的交通出行需求<sup>[1]</sup>,公路改扩建势在必行。桥梁拼宽改造在公路改扩建中占有相当大的比例。桥梁拼接一般采用上部与下部结构均连接或上部结构连接、下部结构不连接的方式<sup>[2]</sup>。大量实践证明,桥梁拼宽会出现诸多问题,如新旧桥梁发生不一致的收缩徐变、基础不均匀沉降等。因此,有必要对桥梁加宽改造方法进行深入研究<sup>[3]</sup>。

国外在 20 世纪就提出了较成熟的桥梁加宽方法<sup>[4-8]</sup>,如美国对现浇梁桥、预制梁桥加宽形成了 SBWM 法(箱形梁撑杆加宽法)和 SGWM 法(梁撑杆加宽法),这类方法的设计理念大多是在桥梁设计过程中考虑后期加宽的需要,在桥梁结构尺寸上做出预留。国内对桥梁加宽的研究起步较晚,经过多年的发展,形成了适应各类实际情况的加宽方案。胡晓晔在拼宽桥梁上部结构连接的基础上提出湿接缝连接、铰缝连接和横隔板连接 3 种连接方式,通过对比分析得出湿接缝连接下受力性能最佳<sup>[9]</sup>。大量研究表明,混凝土收缩徐变、新桥沉降、车辆荷载对拼宽桥梁尤其是拼接部分的影响不容忽视。新桥收缩徐变会导致新旧桥出现变形差,是桥梁拼接计算分析的关键。Kovler K.指出旧桥梁在使用多年后,混凝土的收缩变形已基本完成,而新浇混凝土的收缩才开始,在桥梁运营时期,新混凝土的收缩徐变变形比旧混凝土变形大,旧桥对新桥的变形会产生约束作用,并产生附加内力<sup>[10]</sup>。由于旧桥在拼宽前已

完成了基础沉降,拼宽后桥梁支点截面可能发生横向不均匀沉降,桥梁截面产生严重变形。王亚东针对 T 梁加宽,根据梁格理论,利用有限元软件分析基础沉降差对上部主梁的影响,得出加宽拼接桥梁的受力性能与上部结构连接方式有关<sup>[11]</sup>。郑本辉等研究局部车辆荷载对拼接部分的影响,发现横向刚度较小的拼接部分在荷载作用下受力复杂,其接缝处的荷载布置包括多种情况,应力效应也大不相同<sup>[12]</sup>。现有研究多集中在特定荷载方式下拼接部分受力分析,未考虑不同连接方式的影响,对上部结构不同连接方式下受力性能的研究尚不多见。本文以南昌九洲高架桥加宽工程中两跨连续箱梁为研究对象,分析桥梁上部结构连接方式对桥梁加宽拼接部分受力性能的影响。

## 1 有限元模型设计

### 1.1 工程概况

南昌洪都高架与九洲高架立交节点桥梁 HD 匝道为 4×30 m+25 m 连续箱梁桥,取其中 30 m+25 m 两跨为研究对象。原桥梁断面为单箱单室结构,梁高 1.8 m、梁宽 8.5 m,顶板厚 25 cm,底板厚 22 cm,腹板厚 50 cm,翼缘板宽 1.9 m。加宽新桥箱梁梁高 1.8 m、梁宽 3.5 m,顶板厚 30 cm,底板厚 17 cm,腹板厚 50 cm,翼缘板宽 0.68 m(见图 1)。

### 1.2 MIDAS 梁格模型

梁格理论的基本思想是用一个等效的梁格代替

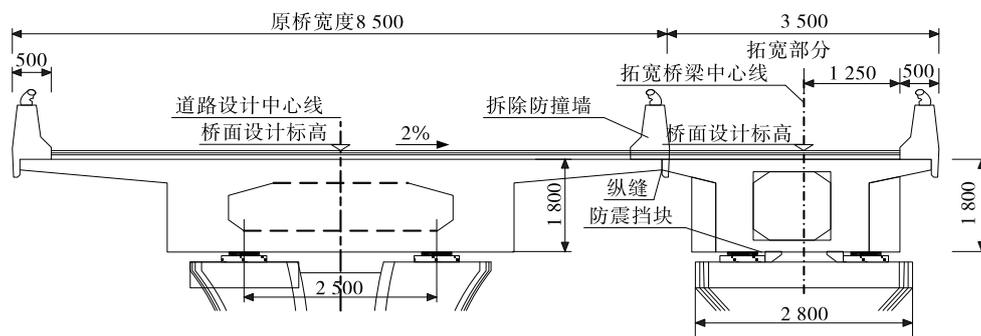


图 1 新旧两桥拼接横截面(单位:mm)

上部结构,梁的纵向刚度集中于纵向梁格内,横向刚度集中于横向梁格内,达到对主梁截面刚度较精准的把控。

将旧桥和新桥简化为 2 根单独的直梁进行模拟,模型包括新旧两桥主梁和横梁共 340 个节点。虚拟横梁采用与翼缘板平均厚度一致、宽度为 1 m 的矩形截面并在全跨范围内均匀设置,端节点分别和上下 2 根主梁节点对应并进行刚性约束(见图 2);横梁在接缝处按实际尺寸设置为一对节点,新旧两桥翼缘板相接处通过控制这对节点的相对约束实现接缝处的刚度调整,其中半刚接形式不释放转动约束,铰接形式释放任意一个节点绕 X 轴的转动约束。另外,在半刚接的基础上设置实横梁加强横向刚度以模拟刚接。

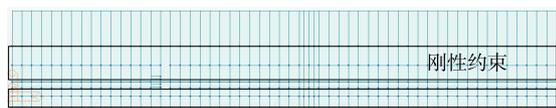
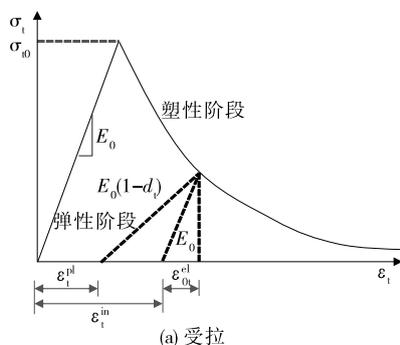


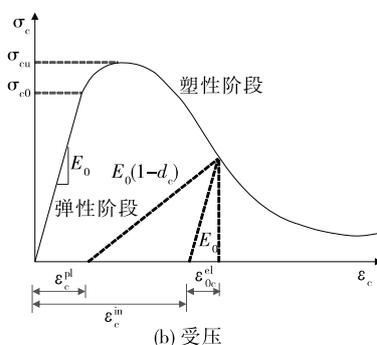
图 2 MIDAS 节点建立与约束示意图

(1) 材料定义。按照 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》定义主梁及横向联系为 C50 混凝土;钢筋为 HRB400,添加新桥主梁混凝土的时间依存材料特性。

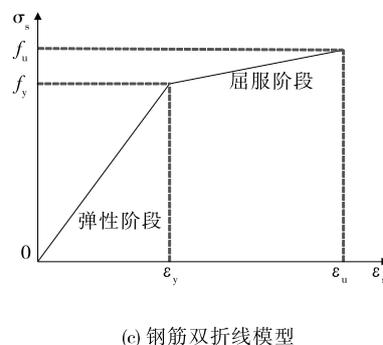
(2) 横梁布置。设置与拼接侧翼缘板刚度相当



(a) 受拉



(b) 受压



(c) 钢筋双折线模型

图 3 材料本构模型

的横梁并在全跨范围内均匀布置,为方便计算,结合箱梁实际尺寸,将虚拟横梁设置为厚 25.0 cm、宽 1.0 m 的矩形截面,将实横梁设置为厚 1.8 m、宽 20.0 cm 的矩形截面。

(3) 温变荷载定义。对于桥梁结构,考虑温度作用时应根据当地具体情况、结构物所使用的材料和施工条件等因素计算由温度引起的结构效应。在江西地区,整体升温 20 °C,降温 16 °C。

(4) 施工阶段定义。新旧两桥主梁均采用先简支后连续的方法进行施工,在旧桥运营 10 年后进行新桥拼接。

### 1.3 ABAQUS 实体模型

本文研究对象为 2 根横向刚度不同的箱梁进行拼接,由于局部车辆荷载和新桥基础沉降对局部拼接部分的影响较复杂,为更精确地分析拼接后拼接部分受力情况,采用 ABAQUS 有限元软件进行实体建模分析。

#### 1.3.1 本构模型的选取

混凝土本构关系采用 ABAQUS 中混凝土损伤塑性模型[见图 3(a)、(b)],混凝土标号为 C50,其本构关系根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中混凝土应力-应变曲线换算得到<sup>[13]</sup>。全桥钢筋采用两折线模型进行模拟[见图 3(c)]<sup>[14]</sup>。

### 1.3.2 模型参数及边界条件

混凝土采用八节点六面体单元(C3D8R),钢束采用两节点桁架单元(T3D2),混凝土与预应力钢筋之间采用嵌入约束连接,不考虑黏结滑移。

(1) Part 模块。建立新旧箱梁、横隔板和钢筋网的等比例模型,按照 MIDAS 材料参数定义截面属性。

(2) Assembly 模块。半刚接实体模型按整体双梁截面拉伸得到,湿接缝处混凝土厚度为 25 cm。在此基础上,削减接缝处混凝土和钢筋网厚度以模拟铰接,宽度设为 20 cm。在刚接方式中,新旧主梁腹板间设置横隔板,间隔 5 m,在跨中及支点处加强设置。切割出支点截面在箱梁底板处的表面用于设置边界条件。

(3) Step 模块。考虑到模型结构尺寸较大、单元类型有多种,计算时容易出现模型不收敛的情况,将最小分析步调到最小,最大分析步调到最大,并适当增大最大增量步数。

(4) Load 模块。定义 Assembly 模块中分割出来的底板表面约束,其中中支点表面设固定支座约束,其余设活动支座约束。在分析步 1(Step-1)中更

改表面约束模拟新桥基础沉降。按照 CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》,局部加载中车轮布载压强换算值取 0.58 MPa。

## 2 有限元分析结果

### 2.1 不同期收缩徐变影响分析

对于拼宽桥梁,旧桥运营时间较长,结构收缩徐变已基本完成,而新桥收缩徐变才开始,当新旧混凝土黏结在一起时,由于旧混凝土的收缩徐变变形比新混凝土变形小,对新浇筑混凝土的收缩徐变变形产生约束,导致新旧桥连接面中产生附加内力<sup>[15]</sup>。分析中,收缩徐变荷载通过在 MIDAS 中添加新桥主梁混凝土材料的时间依存材料特性来实现,同时考虑江西地区整体升降温、局部升降温工况,采用先简支后连续的方法施工,并设置新桥运营期为 10 年。

#### 2.1.1 新旧主梁的轴力变化

新桥收缩徐变引起的一部分变形是沿桥梁纵向的回缩,此时旧桥受到新桥纵向收缩的作用而受压,新桥受拉,内力峰值出现在跨中附近,并向两端逐渐减小(见图 4)。不同连接方式下新桥的峰值内力见表 1。

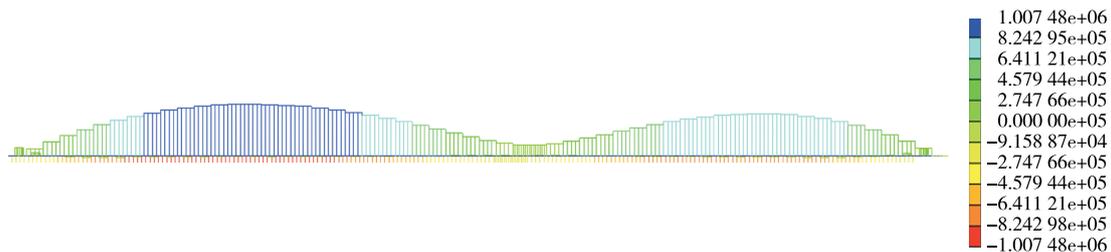


图 4 收缩徐变引起的新桥轴力图(单位:N)

表 1 不同连接方式下新桥跨中轴力

连接方式	位置	跨中轴力/kN		
		收缩徐变前	收缩徐变后	两者差值
铰接	第一跨	117	1 046	929
	第二跨	72	811	739
半刚接	第一跨	110	1 003	893
	第二跨	72	815	743
刚接	第一跨	101	925	824
	第二跨	63	737	674

注:两者差值为收缩徐变后跨中轴力-收缩徐变前跨中轴力。

由表 1 可知:新桥收缩徐变会对纵向轴力产生影响,共同运营 10 年后,新桥跨中截面的轴力大

幅度增长。相对于半刚接、铰接方式,刚接时新桥跨中的轴力变化幅度有所减小,这是由于两桥横向联系刚度加大,收缩徐变的一部分能量被横隔板吸收,次内力在桥梁跨度范围内分布更均匀,桥梁纵向收缩变形量减小。第二跨的次内力效应小于第一跨,且比值接近跨度之比,即收缩徐变对拼宽桥的轴力影响随跨度增加而增长,接近线性关系。

#### 2.1.2 拼接部分横向应力分析

新桥收缩徐变引起的另一部分变形是竖向挠曲变形,对拼接部分的受力影响较大,该变形与桥梁收缩徐变前的初始状态有关<sup>[16]</sup>。该桥运营 10 年后全跨的竖向变形见图 5(a),跨中截面变形及观测点见图 5(b)。此时拼接部分产生较复杂的次内力,主要表现为拼接段旧桥翼缘板根部上缘受拉、下缘受压,

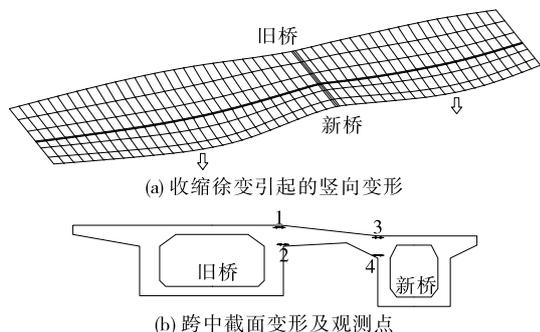


图 5 收缩徐变引起的新旧桥竖向变形

新桥翼缘板根部上缘受压、下缘受拉。

新旧两桥全跨发生不同程度扭转变形,在跨中部位达到最大值,此时拼接部分横向应力达到峰值。图 5(b)中,两跨跨中截面的旧桥翼缘板根部上缘(测点 1)、旧桥翼缘板根部下缘(测点 2)、新桥翼缘板根部上缘(测点 3)、新桥翼缘板根部下缘(测点 4) 4 个关键点的横向应力效应见表 2。

由表 2 可知:新旧桥共同运营 10 年后,相对于铰接,半刚接下应力效应表现为新桥翼缘板根部上

表 2 不同连接方式下关键点的应力效应

连接方式	位置	各测点的横向应力/MPa							
		1		2		3		4	
		收缩徐变前	收缩徐变后	收缩徐变前	收缩徐变后	收缩徐变前	收缩徐变后	收缩徐变前	收缩徐变后
铰接	第一跨	2.94	18.30	-2.96	-15.50	0.32	-5.37	-0.31	4.22
	第二跨	2.50	12.00	-2.02	-13.10	0.48	-3.11	-0.68	3.28
半刚接	第一跨	2.18	13.10	-2.39	-13.60	0.83	-10.80	0.96	11.00
	第二跨	2.03	10.90	-1.67	-9.39	0.58	-8.92	0.17	7.27
刚接	第一跨	0.87	2.70	-1.25	-3.26	0.57	-0.63	-0.64	0.42
	第二跨	1.12	3.34	-1.02	-2.99	0.31	-1.55	-0.84	0.16

下缘应力增大,而刚接时应力减小。这是因为半刚接比铰接有更大的横向刚度,在协调变形时产生更大的次内力,而刚接虽然有最大的横向刚度,但次内力更多地分配到横隔板上,大大降低了拼接部分翼缘板的应力效应。桥梁跨度不同,收缩徐变对拼接部分应力的影响不同,主要表现为跨度越大横向应力越大,且应力增长速度远大于跨度增长速度。

## 2.2 新桥基础沉降对拼接部分的影响

旧桥运营多年后,基础沉降已基本完成,而新拼宽桥梁的基础沉降还在发展中,形成新旧桥基础之间沉降差,导致拼接部分产生横向附加内力,且沿桥梁纵向不断变化。

### 2.2.1 中支截面的横向应力分析

新桥中支墩会发生沉降,而旧桥箱梁不发生位移,新旧两桥箱梁截面会产生竖向位移差且最大值发生在中支截面。选取拼接后中支截面(见图 6)为研究对象,对新桥箱梁底板施加 10 mm 强制位移,应力在截面宽度范围内的变化见图 7。

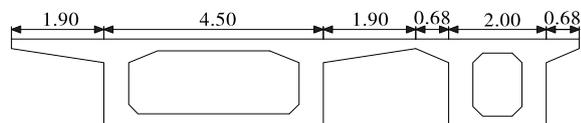


图 6 拼接后中支截面示意图(单位:m)

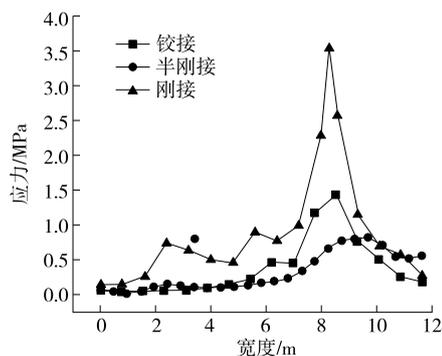


图 7 10 mm 沉降差下应力的横向变化

由图 7 可知:新桥的基础沉降会对旧桥和拼宽部分产生影响,沉降荷载作用下中支截面处结构的横向应力效应表现为刚接>铰接>半刚接。相对于铰接和半刚接,刚接方式下中支截面存在横隔板,沉降荷载的最大应力效应发生在接缝处且远大于其他位置。

### 2.2.2 应力效应沿跨度方向的变化规律

由于旧桥主梁对新桥主梁的支撑作用,2 根主梁截面的竖向位移差会随着远离中支截面而逐渐减小,应力效应也减小(见图 8)。旧桥翼缘板根部上缘、新桥翼缘板根部下缘、接缝处的横向应力均为拉应力,在跨度范围内的变化见图 9。

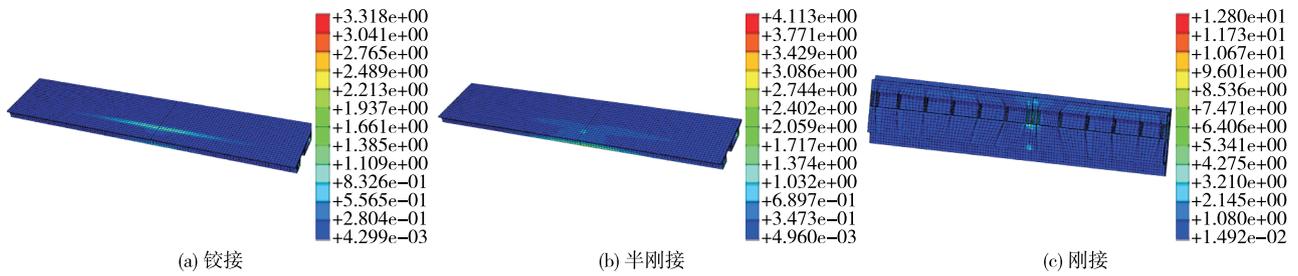


图 8 10 mm 沉降差下拼接部分应力云图(单位:MPa)

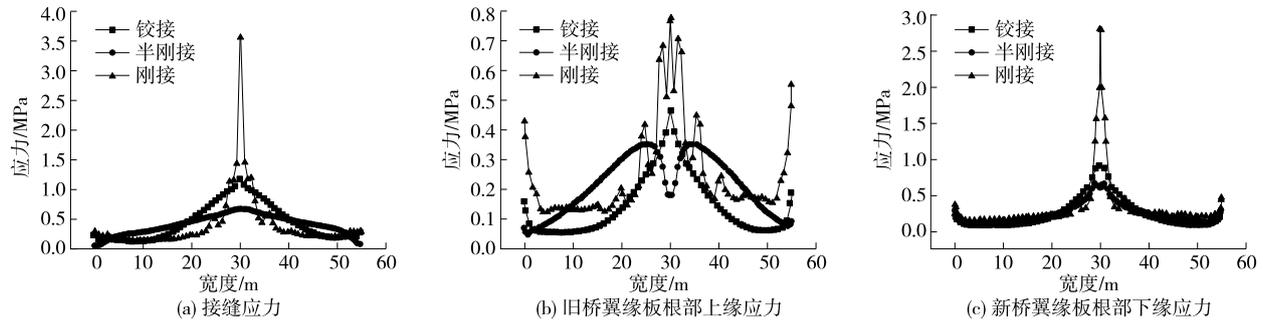


图 9 横向应力在跨度范围内的变化

由图 8 可知:新桥沉降荷载作用下,横向应力效应从中支截面向两跨跨中逐渐减小,接缝处横向应力沿跨度方向传递最远,影响范围最大。刚接方式下不同位置的横向应力主要由中支截面和附近的横隔板承担。结合图 9,3 种连接方式下横向应力均为接缝>新桥翼缘板根部下缘>旧桥翼缘板根部上缘。与铰接相比,半刚接方式下横向刚度增大,旧桥主梁对新桥的支撑作用更强,横向应力峰值出现在中支截面附近。

### 2.3 车辆局部荷载对拼接部分的影响

在拼宽桥梁中,横向刚度较小的拼接部分在车辆荷载作用下受力复杂,外侧翼缘板的横向加载相对于主梁变形小得多,可忽略不计,故主要考虑在拼接侧加载<sup>[14]</sup>。考虑接缝处的正载和偏载,即车轮作用于接缝的正上方和桥梁翼缘板端部(见图 10),根据 CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》,采用 55 t 标准车,轮重为 70 kN,尺寸为 0.2 m×0.6 m。

结构应力效应主要表现为两桥内侧翼缘板根部上缘和接缝处受拉,桥面板横向应力沿宽度方向的变化见图 11。由图 11 可知:在局部荷载作用下,连接方式对横向应力的影响较大。相比于拼接前,拼接后峰值应力减小,铰接方式下为 0.58 MPa,半刚接方式下为 0.62 MPa,刚接方式下为 0.21 MPa,且逐渐向新桥侧移动。

另外,车轮作用在上述位置时分为靠近旧桥的

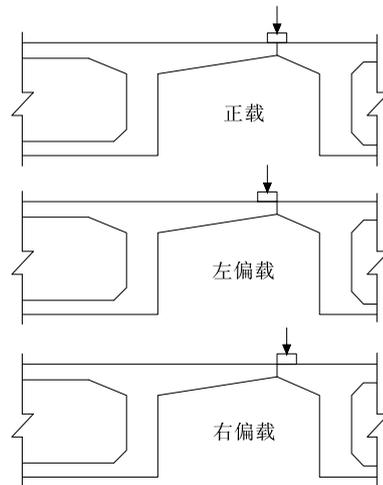


图 10 接缝处加载情况

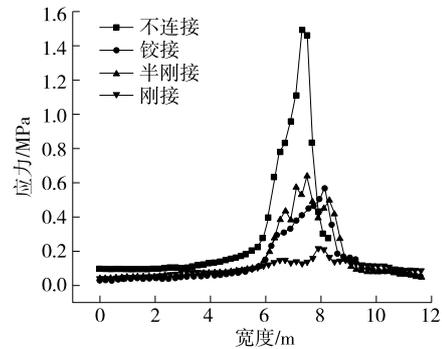


图 11 不同连接方式下拼接部分的横向应力

左偏载、靠近新桥的右偏载和完全作用在接缝处的正载,3 种加载工况下拼宽部分的横向应力见图 12。

由图 12 可知:3 种连接方式下各位置处应力总体表现为刚接>铰接>半刚接,拼接部分横向刚度越大,应力分布越均匀。对比 3 种加载工况,接缝加载和右偏载时的应力曲线较契合,峰值应力几乎出现在同一位置,而左偏载时的应力曲线偏向旧桥一侧,且

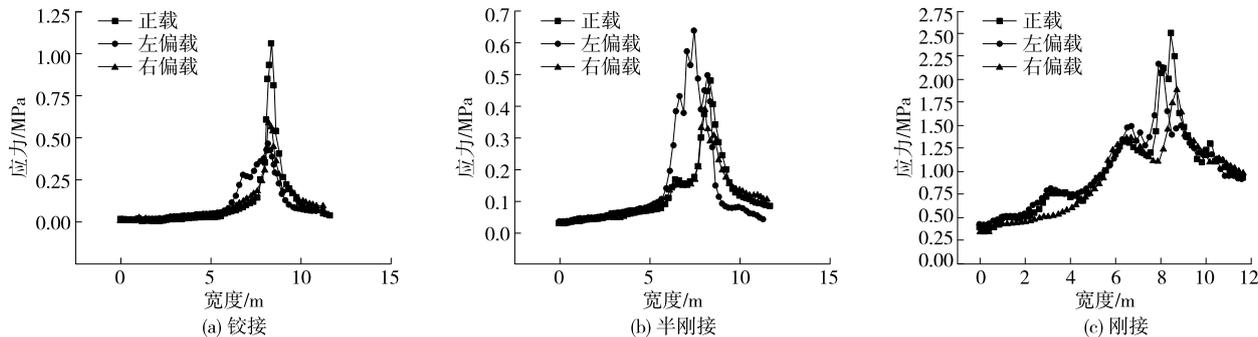


图 12 不同连接方式、不同加载工况下拼接部分的横向应力

#### 2.4 新旧桥梁在伸缩缝连接下的位移差分析

不同于以上 3 种横向连接形式,在没有设置横向传力结构的纵向伸缩缝连接中,结构对收缩徐变、基础沉降和车辆荷载不产生次内力效应,主要考虑的是新旧桥在连接处的竖向位移差,这种效应在车辆荷载作用下最突出。设置图 13 所示 2 种荷载组合,分别为旧桥下挠+新桥上移、旧桥上移+新桥下挠,分析新旧桥在第一跨跨中拼接处的竖向位移差。总体分为车道荷载产生的桥梁主梁竖向位移和车辆荷载产生的翼缘板端部竖向位移。根据 JTG 3362—2018《公路桥涵设计通用规范》,旧桥按双向两车道、新桥按双向一车道计算,横向车道折减系数为 1.0,  $q_k = 10.5 \text{ kN/m}$ ,  $p_k = 360.0 \text{ kN}$ , 车辆荷载轮重为 70.0 kN, 尺寸为  $0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ , 计算结果见表 3。

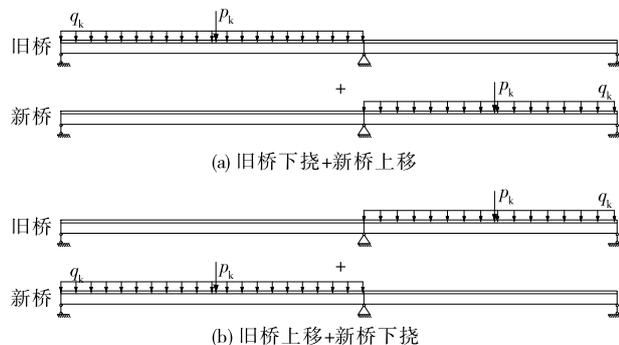


图 13 纵向荷载组合

由表 3 可知:通过纵向伸缩缝连接的箱梁桥在某跨跨中的翼缘板端部出现最大竖向位移差,该项目的最大竖向位移差为 12.4 mm。

拼接部分横向刚度越小越明显。这是由于旧桥翼缘板刚度较小,受局部荷载时刚度更大的新桥部分承受更大的荷载,只有在左偏载时旧桥翼缘板承担主要荷载,且随着接缝刚度的增大逐渐向新桥侧转移。

表 3 不同荷载组合下新旧桥位移差

荷载组合	位移差/mm
旧桥下挠+新桥上移	$6.7+2.1+2.8+0.8=12.4$
旧桥上移+新桥下挠	$1.8+7.2+0.3+2.8=12.1$

### 3 结论

采用有限元软件对实桥进行模拟计算,考虑新旧桥不同收缩徐变效应、基础不均匀沉降、拼接部分局部加载 3 个因素,分析拼接部分在铰接、刚接、半刚接 3 种不同上部结构连接方式下的受力性能,结论如下:

(1) 新桥的收缩徐变会导致新旧桥拼接部分产生复杂变形,其中跨中位置的应力效应最大,随着横向连接刚度的增大该应力效应减小。

(2) 新桥的基础沉降荷载是桥梁拼宽中不可忽视的外部因素。在新桥基础沉降荷载作用下,接缝、旧桥翼缘板根部上缘和新桥翼缘板根部下缘的应力较突出,且随着横向连接刚度的增大应力效应增大,其中接缝处的应力效应在桥梁纵向传递最远,应进行加固抗裂设计。

(3) 车辆的局部荷载产生的应力效应更复杂。一方面,新桥的拼接对旧桥翼缘板起到一定加固作用;另一方面,靠翼缘板横向刚度较小的主梁一侧偏载对局部应力影响较大,容易发生开裂,但随着横向连接刚度的增大该效应减小。

(4) 不进行受力连接的桥面会出现竖向位移差

过大的现象,需规范伸缩缝变形要求。3 种连接方式中,铰接方式的受力最简单,但桥梁整体性较差,影响行车;刚接方式下结构和受力最复杂,对结构形变非常敏感,在收缩徐变和基础沉降荷载作用下易产生非常大的次内力而导致结构破坏,但拼接后桥梁整体受力性能最佳,利于交通;半刚接方式下受力性能、结构整体性介于铰接和刚接之间,是拼宽桥梁设计中常用的上部结构连接方案。

#### 参考文献:

- [1] 沈汉,沈莲芬.高速公路上桥梁设计的几个问题[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会,广东省公路学会,广东虎门技术咨询公司,等.中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十二届年会论文集(下册).北京:人民交通出版社,1996:4.
- [2] 霍文棠.公路桥梁拼宽设计[J].公路,2019,64(5):131-134.
- [3] 王宗华.高速公路桥梁加宽拼接技术优化研究[D].西安:长安大学,2009.
- [4] 景国庆.新旧箱梁拼接部位的设计与研究[D].南京:东南大学,2012.
- [5] 何琨,朱军.中国高速公路建设历程与发展战略[J].筑路机械与施工机械化,2004,21(10):8-10.
- [6] WEST R.The use of grillage analogy for the analysis of slab and pseudo-slab bridge decks[R].Cement & Con-

crete Association Res Repts,1973.

- [7] ROWE T E. Concrete bridge design [M]. London: Applied Science Publisher,1962.
- [8] 王玉娜.改扩建高速公路现状评价及设计优化[D].郑州:郑州大学,2014.
- [9] 胡晓晔.高速公路桥梁拼宽设计[J].交通世界,2021(5):123-124.
- [10] KOVLER K.Interdependence of creep and shrinkage for concrete under tension[J].Journal of Materials in Civil Engineering,1995,7(2):96-100.
- [11] 王亚东.T 梁桥加宽中几个问题的研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [12] 郑本辉,黄亮生,仲健.新老桥拼缝连接的有限元分析[J].中国勘察设计,2017(1):98-101.
- [13] 高向玲,张业树,李杰.基于 ABAQUS 梁单元的钢筋混凝土框架结构数值模拟[J].结构工程师,2013,29(6):19-26.
- [14] 林峰,顾祥林,匡昕昕,等.高应变率下建筑钢筋的本构模型[J].建筑材料学报,2008,11(1):14-20.
- [15] 温庆杰,叶见曙.新旧混凝土梁横向拼接的收缩徐变效应[J].中国公路学报,2007,20(4):53-57.
- [16] 茹毅,刘其伟.收缩徐变作用下混凝土连续箱梁拼宽桥拼接段受力性能研究[J].中外公路,2016,36(2):196-200.

收稿日期:2022-11-30

\*\*\*\*\*  
(上接第 110 页)

#### 参考文献:

- [1] 徐元孝,颜俊.山区特大跨径悬索桥钢桁梁架施工工艺探讨[J].公路交通技术,2018,34(4):63-67+75.
- [2] 纪为详,陶路.山区大跨度悬索桥钢桁梁施工技术[J].桥梁建设,2012,42(3):107-113.
- [3] 许红胜,彭东哈,吴佳东,等.山区悬索桥钢主梁施工新工艺研究与应用[J].湖南交通科技,2022,48(1):130-133.
- [4] 张海顺.大跨度钢桁梁悬索桥临时连接方式分析研究[J].土木工程学报,2020,53(12):98-105.
- [5] 刘吉晗.大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [6] 朱红明,程海潜,李清,等.大节段钢桁梁悬索桥主梁架设的窗口铰接法研究[J].中外公路,2021,41(6):120-123.

- [7] 任仁,罗亨文,陶路.坝陵河大桥钢桁梁施工方法比选[J].桥梁建设,2013,43(3):114-119.
- [8] 陈浩,潘权,韩伟威.悬索桥主梁施工过程铰数量对结构体系的影响分析[J].公路与汽运,2022(3):104-109.
- [9] 张海顺.大跨度钢桁梁悬索桥合理刚接时机的研究[J].铁道建筑技术,2021(1):49-53.
- [10] 许红胜,何任珂,周大庆,等.一种大跨度悬索桥拼装施工方法:CN112853993A[P].2021-05-28.
- [11] 徐君兰,向中富.关于悬索桥的重力刚度[J].重庆交通学院学报,2000(2):71-74.
- [12] 刘钊,刘厚军.悬索桥主缆变形及重力刚度新算法[J].工程力学,2009,26(6):127-132.
- [13] 陶路,陈雷,黄盛.坝陵河大桥临时铰设置与施工技术研究[J].中外公路,2012,32(6):199-202.

收稿日期:2023-03-15