

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.010

# UHPC-RC 节段组合梁的抗弯性能分析

严 靖, 陈 亮, 黄润钺

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:**为研究低预应力度条件下,不同节段接缝的超高性能混凝土-钢筋混凝土(UHPC-RC)组合梁的抗弯性能,文章基于 ABAQUS 有限元软件,建立 UHPC-RC 节段组合梁的基准有限元模型,并利用已有的试验数据验证该模型的合理性。节段接缝分别为平面干接缝、平面胶接缝、齿键干接缝和齿键胶接缝,在基准有限元模型的基础上,进一步研究节段接缝类型对组合梁抗弯性能的影响。研究发现,在四点受弯加载方式下,接缝的几何特征(平面或齿键)对组合梁的极限荷载和开裂荷载影响较小,环氧树脂胶的使用对组合梁的抗弯性能影响较大。

**关键词:**桥梁工程;超高性能混凝土-钢筋混凝土(UHPC-RC);节段组合梁;节段接缝;ABAQUS 有限元软件;cohesive behavior 模型

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)02-0207-07

## Study on flexural performance of UHPC-RC segmental composite beam

YAN Jing, CHEN Liang, HUANG Runyue

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:**To investigate the flexural performance of low-prestressed ultra-high performance concrete-reinforced concrete(UHPC-RC) composite bridges with different segmental joints, this study established a baseline finite element model of UHPC-RC segmental composite beam based on ABAQUS and verified the reasonableness of the finite element model by comparing the existing experimental data. The segmental joints were flat dry joints, flat epoxy joints, keyed dry joints and keyed epoxy joints, and on the basis of the verified finite element model, the effect of the types of segmental joints on the flexural performance of the composite beam was investigated. It was found that the geometric characteristics of the joints(flat or keyed) had less influence on the ultimate load and cracking load of the composite beam under the four-point bending loading mode, and the presence of epoxy resin adhesive had more influence on the flexural performance of the composite beam.

**Key words:**bridge engineering; ultra-high performance concrete-reinforced concrete(UHPC-RC); segmental composite beam; segmental joint; ABAQUS finite element software; cohesive behavior model

## 0 引 言

目前,随着桥梁装配化施工需求的增加,节段式桥梁被广泛应用。使用节段拼装桥梁,可以在加快施工速度的同时减少对交通的影响。然而,

文献[1]研究表明,在弹性状态下,节段拼装桥梁与现浇整体桥梁的力学性能相似,而在极限状态下,由于接缝的存在,节段桥梁的力学表现与整体梁出现较大的差异。因此,作为超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)节段

收稿日期:2022-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178135);安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME151)

作者简介:严 靖(1997—),男,安徽马鞍山人,合肥工业大学硕士生;

陈 亮(1980—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:popec@hfut.edu.cn.

桥梁中重要结构部件的节段接缝,其力学性能受到学者的关注。

过去几十年,由于普通混凝土(normal concrete, NC)节段桥梁的广泛应用,对于节段桥梁的研究主要集中在接缝的抗剪能力和整体性上。文献[2]通过胶接缝直剪试验研究胶层厚度对接缝抗剪承载力的影响,结果表明随着胶层厚度的增加,单齿键接缝的抗剪强度缓慢增加;文献[3]基于 ABAQUS 有限元软件建立桥梁接缝处节段实体模型,并进行局部应力分析,结果表明,体外预应力节段桥在 E2 地震作用下,节段接缝处于全截面受压状态,剪力键均未发生脱离,接缝的设计符合抗震需求。

随着 UHPC 的发展,学者们开始对 UHPC 节段桥梁接缝的抗剪性能进行研究。为准确预测 UHPC 干接缝的抗剪强度,文献[4]基于莫尔圆理论,提出干接缝抗剪强度预测公式,并通过试验验证了公式的合理性;文献[5]通过直剪试验研究钢纤维掺量、侧向压力和齿键数量对 UHPC 胶接缝开裂荷载和极限荷载的影响,结果表明,齿键数的增加对接缝的承载力提高有限,而侧压可以显著提高接缝的抗剪承载力;文献[6]对超高性能混凝土-钢筋混凝土(ultra-high performance concrete-reinforced concrete, UHPC-RC)节段组合箱梁的抗弯性能进行试验,结果表明,在试验加载过程中,UHPC 的 U 型梁与普通混凝土桥面板能够保持良好的协同变形能力。以上文献大多利用试验对节段接缝进行研究。近年来,由于高昂的试验研究费用促使人们开始利用有限元软件进行工程应用分析,而目前国内外关于有限元软件分析节段接缝的研究主要集中在接缝的抗剪性能上。文献[7]基于 ABAQUS 软件使用 cohesive behavior 模型研究环氧树脂胶接缝齿键试件的抗剪性能,而对于胶接缝 UHPC 节段梁整体力学性能的有限元研究较少。此外,为防止高预应力度造成的桥梁严重上挠,某些桥梁采用低预应力度的设计。对于低预应力度的 NC 节段胶接缝桥梁,文献[8]的研究表明其接缝开裂先于梁体开裂。目前对于低预应力度 UHPC 节段胶接缝梁的研究较少。

综上所述,目前已开展的针对 NC 节段梁的试验较多,但关于 UHPC 节段组合梁的研究却十分有限。同时,国内外大量的研究主要关注节段接缝的抗剪性能,却忽略了节段组合梁整体力学行为的研究,尤其是低预应力水平下,节段组合梁

力学性能的研究较少。因此,为探究低预应力度下 UHPC-RC 节段组合梁的抗弯性能,本文基于文献[6,9]和相关规范<sup>[10-12]</sup>,建立不同节段接缝的 UHPC-RC 组合梁的 ABAQUS 有限元模型,并进一步对模拟结果进行分析和总结。

## 1 有限元模型概况

### 1.1 试件简介

本文以文献[6]中 UHPC-RC 节段组合箱梁试件为原型,进行有限元分析。该梁长 4 m,梁高 300 mm,梁下部为预制 UHPC 的 U 型梁,顶板为后浇的 C50 钢筋混凝土板。U 型梁分为 4 个节段,每个预制节段长度为 1 m。组合梁底部配置了布置 4 根纵向  $\phi 15.2$  mm 的预应力钢绞线,张拉力为 140 kN。RC 顶板纵向布置间距 80 mm、直径 6 mm 的 HRB400 普通钢筋,横向布置间距 100 mm、直径 8 mm 的 HRB400 普通钢筋。在预制 UHPC 的 U 型梁和后浇 RC 顶板之间预埋间距 100 mm、直径 10 mm 的 HRB400 普通钢筋作为剪力连接件,以加强接合面的黏结。组合箱梁截面尺寸、配筋及纵向布置如图 1 所示。该试件加载方式为四点加载,跨中纯弯曲段为 1 m。

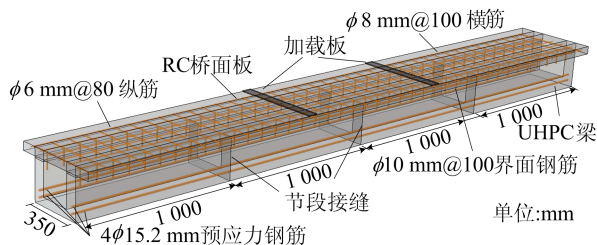


图 1 UHPC-RC 节段组合梁示意图

### 1.2 有限元模型简介

#### 1.2.1 材料本构

UHPC 和 C50 混凝土采用 ABAQUS 中混凝土损伤塑性模型 (concrete damaged plasticity, CDP),塑性参数见表 1 所列。表 1 中,  $k$  为拉伸子午线与压缩子午线上的第二应力不变量的比值。基于文献[13]提出的 UHPC 受压本构公式,得到的受压应力-应变关系如图 2a 所示,其中峰值抗压强度为 135 MPa。UHPC 受拉应力-应变关系采取三折线本构<sup>[14]</sup>,得到的受拉应力-应变关系如图 2b 所示,其中抗拉强度为 10 MPa。

桥面板的 C50 混凝土受拉、受压本构采用文献[10]的规定,得到的应力-应变关系如图 3a 所示,其峰值压应力和拉应力分别为 35.5、2.75 MPa。桥面板 HRB400 钢筋和预应力钢筋本构如图 3b

所示,其中桥面板 HRB400 钢筋采用理想弹塑性本构模型,屈服强度为 400 MPa,弹性模量为 195 GPa。参考文献[11],预应力钢筋本构为三折线本构,其弹性模量为 195 GPa,屈服强度和极限拉应力分别为 1 200、1 860 MPa。

表 1 混凝土塑性参数

参数	膨胀角/(°)	偏心率	强度比	$k$	黏性系数
数值	30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

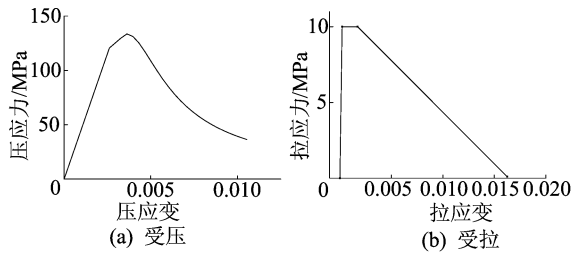


图 2 UHPC 本构曲线

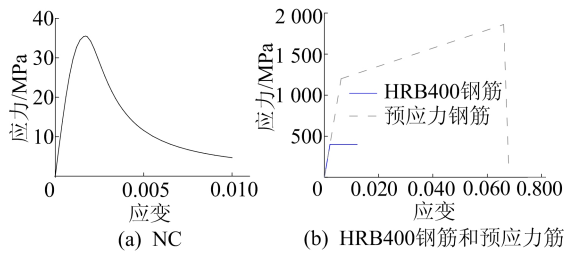


图 3 应力-应变曲线

1.2.2 边界条件

RC 桥面板与 UHPC 的 U 型梁之间采用绑定(tie)约束。为提高模型的运算速度,在保证精度的情况下,忽略普通钢筋网与混凝土的黏结滑移,将桥面板钢筋、界面抗剪钢筋内置(embeded)到混凝土实体单元中。考虑到试件的体内预应力钢筋与梁体相对滑移很小,因此预应力筋与梁体采取 embeded 约束。体内预应力钢筋的预应力施加方法较多,本文将采用降温法施加预应力,即通过对预应力筋进行降温使之收缩,然后通过连接将此收缩应变传递到梁体上,由此产生预应力效应。

节段接缝类型不同,其有限元建模方式也不同。作为对照组的整体现浇梁桥节段之间采用 tie 绑定约束,即将相邻梁段约束成一个整体,从而形成整体梁。

1) 干接缝的模拟。对于干接缝节段梁,接触面的阳面与阴面之间采取法向硬接触、切向“罚”摩擦的接触方式,其中摩擦系数为 0.8。

2) 胶接缝的模拟。目前学界多使用有限元

方法预测 UHPC-RC 节段组合梁的力学行为,而节段梁中胶接缝的界面模拟却没有统一的方式。以 ABAQUS 为例,节段胶接缝的有限元模拟方式主要有以下 4 种:① 使用完全粘结(tie 绑定)对接缝界面进行简化;② 假设界面中的胶接材料是纯弹性的,使用实体单元将其模拟出来;③ 假设胶接缝界面与干接缝力学行为相似,仅结合面间设置摩擦系数来模拟;④ 基于零厚度的线性接触单元模拟界面。

对于 UHPC 节段梁之间的胶接缝,本文采用 ABAQUS 中 cohesive behavior 模型来模拟接缝环氧树脂胶的力学特性,该模型是一种基于面的黏聚力行为接触方式,能较好地模拟出接缝处的环氧树脂胶的力学行为<sup>[7]</sup>。该模型主要有双线性模型、指数模型、多项式模型、梯形模型等。其中双线性模型理论清晰,公式易于推导,在分析过程中稳定性较好,因此本文采用双线性模型,该模型本构如图 4 所示。

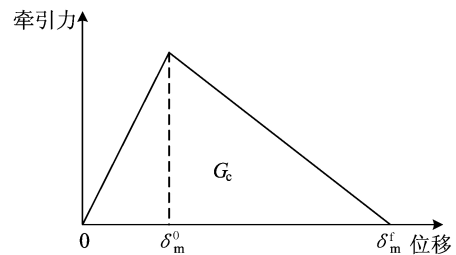


图 4 cohesive behavior 双线性本构模型

图 4 中:  $G_c$  为胶接缝的牵引分离断裂能。

对于线弹性阶段,由于 cohesive behavior 模拟的界面层厚度较小,法向上的变形较小,对切向变形影响较小,一般情况下该模型本构关系可以简化为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_m & 0 & 0 \\ 0 & k_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & k_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} \quad (1)$$

其中:  $t_n$ 、 $t_s$ 、 $t_t$  分别为法向(沿全局  $z$  轴)、切向 1(沿全局  $x$  轴)和切向 2(沿全局  $y$  轴)的牵引力;  $k_m$ 、 $k_{ss}$ 、 $k_u$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的刚度;  $\delta_n$ 、 $\delta_s$ 、 $\delta_t$  分别为相应的分离位移;  $\boldsymbol{\delta}$  为名义位移矩阵;  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵。

因为胶接缝中的接缝环氧树脂胶配合比不同,其力学特性会有较大的差异,所以本文参考文献[12]规定的 II 类环氧树脂胶固化物特性值,见表 2 所列,得出胶接缝模型中 cohesive behavior 的设置参数。

指标	数值
抗拉强度	15
抗压强度	70
拉伸剪切强度	8

从图 2b、表 2 可以看出,本文采用的环氧树脂胶和 UHPC 的抗拉强度分别为 15、10 MPa,显然环氧树脂胶的抗拉强度大于 UHPC,但胶-UHPC 界面黏结性能制约了环氧树脂抗拉能力的发挥,因此环氧树脂胶与 UHPC 的黏结强度最大不超过 10 MPa,本文胶-UHPC 界面的抗拉强度取值为 10 MPa,相应界面的抗剪强度为 8 MPa。通过换算得出界面内聚力接触模型的参数,其中界面的法向、切向 1 和切向 2 的刚度大小相同,即  $(k_m, k_s, k_n) = (50, 50, 50)$ ,断裂能  $G_c = 8$ 。界面的损伤应力  $(t_n^0, t_s^0, t_t^0) = (10, 8, 8)$ ,其中接触面的损伤准则采取最大主应力准则(max normal stress),采取的单位制为(MPa, N, mm)。为了模拟出环氧树脂胶失效后,接缝界面能发生分离,同时又设置了允许分离的界面法向“硬”接触约束关系。

### 1.3 基准有限元模型的验证

数值模拟与试验的荷载-挠度曲线如图 5 所示。

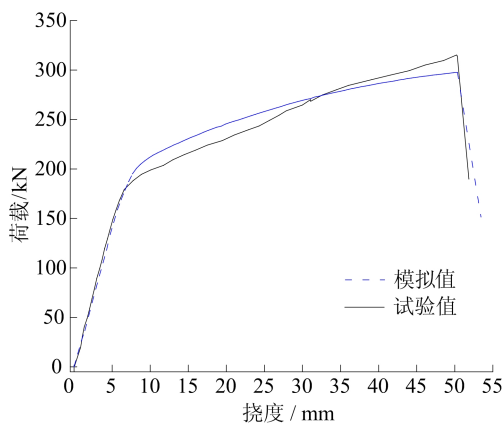


图 5 数值模拟与试验的荷载-挠度曲线

从图 5 可以看出,有限元模拟的结果与试验结果吻合较好。在弹性阶段,有限元模拟的梁体刚度与试验梁刚度几乎一致;在裂缝发展阶段,有限元模型的节段开裂时所对应的外荷载和挠度均比试验梁略大,但误差均在 10% 以内;在极限状态下,有限元计算所得的试件极限荷载比试验值小 6.0%,极限挠度大小几乎一致。从图 5 还可

以看出,有限元结果与试验值在节段接缝开裂到试件达到极限荷载这一阶段的荷载-挠度曲线有些偏差,原因可能是文献[13]中试验所用预应力钢筋的极限强度高于 1 860 MPa,造成试验所得的极限荷载大于有限元模拟。

此外,有限元模型与试验的对比结果见表 3 所列。由图 5、表 3 可知,该基准有限元模型是合理、可靠的,能较准确地预测 UHPC-RC 节段组合梁的力学行为。

表 3 有限元模型与试验的对比结果

状态	指标	模拟值	试验值	模拟值/试验值
接缝开裂	荷载/kN	178.4	170.0	1.05
	挠度/mm	6.7	6.1	1.10
极限状态	荷载/kN	297.8	315.2	0.94
	挠度/mm	50.3	50.2	1.00

注:本文规定组合梁开裂状态为节段接缝达到 0.05 mm 时的状态;极限状态为试件达到峰值荷载状态。

为验证胶接缝模拟方法的合理性,本文基于文献[9]中 UHPC 平面胶接缝直剪试验,建立相应的胶接缝有限元模型,并将模型结果与试验数据进行对比,得出荷载-位移曲线,如图 6 所示。由文献[9]可知,胶接缝试件发生的是脆性破坏,当试件达到峰值荷载后突然发生滑移破坏,导致实验装置未能及时获取荷载-位移曲线的下降段。由图 6 可知,数值模拟得出荷载-位移曲线与试验值吻合较好。因此,针对胶接缝,本文采用的内聚力接触模型参数是合理的,可以较为准确地预测 UHPC 平面胶接缝的力学性能。

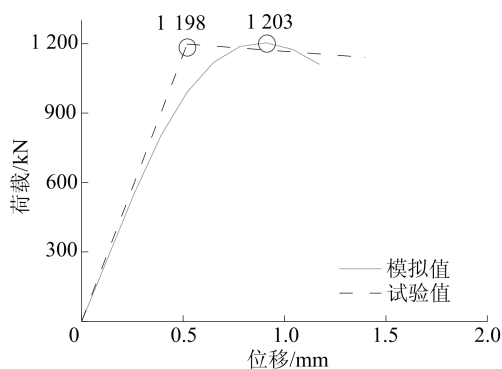


图 6 数值模拟与试验的荷载-位移曲线

## 2 节段接缝类型研究

目前,节段拼装桥梁的节段接缝主要有节段

平面干接缝、平面胶接缝、齿键干接缝和齿键胶接缝 4 种,显然以上 4 种接缝的 UHPC-RC 节段组合梁力学性能有些差异。因此,为探究接缝类型对 UHPC-RC 节段组合梁的影响,本文在基准有限元模型的基础上,建立其余 3 种接缝的 UHPC-RC 节段组合梁模型,即节段平面胶接缝、齿键干接缝和齿键胶接缝,其中齿键接缝的构造示意图如图 7 所示。

同时为形成对照试验,本文又建立了整体现浇 U 型梁的有限元模型,有限元模型参数见表 4 所列。以上 5 个 UHPC-RC 节段组合梁有限元模型的荷载同文献[6]一致,均为四点抗弯加载,纯弯区段长度为 1 m。

此外,为精准地模拟出节段接缝处的力学行为,将节段齿键部分的网格进行了细化,网格大小约为 5 mm×5 mm×5 mm。

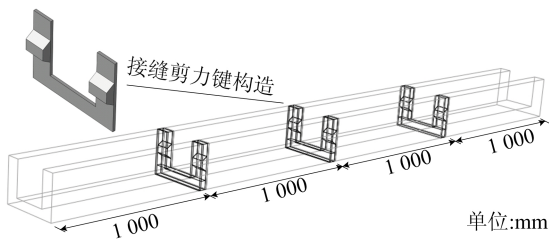


图 7 齿键接缝节段梁示意图

表 4 有限元模型参数

接缝类型	U 型梁节段之间的接触属性
整体现浇梁	tie 绑定
平面干接缝	法向硬接触,切向摩擦,摩擦系数 0.8
平面胶接缝	cohesive behavior
齿键干接缝	法向硬接触,切向摩擦,摩擦系数 0.8
齿键胶接缝	cohesive behavior

### 3 结果与讨论

#### 3.1 荷载-挠度曲线

不同节段接缝的 UHPC-RC 节段组合梁在

四点加载下的荷载-挠度曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,胶接缝试件荷载-挠度曲线可分为以下 3 个阶段:在加载初始阶段,荷载-挠度曲线呈线性变化;当节段接缝开裂后,试件刚度下降,曲线进入非线性阶段;当达到峰值荷载后,荷载-位移曲线进入下降段直至破坏。干接缝试件的荷载-挠度曲线也可分为上述 3 个阶段,但与胶接缝试件有所不同的是,干接缝试件达到峰值荷载后,曲线迅速进入下降段,试件最终因预应力筋突然断裂而发生破坏。

从图 8 还可以看出,UHPC-RC 节段胶接缝组合梁在达到峰值荷载前,荷载-挠度曲线与整体式梁十分接近。

当接缝中环氧树脂胶失效前(即节段接缝开裂之前),平面胶接缝试件的力学行为与整体式十分接近,同时其极限荷载与整体式相差很小;当接缝中环氧树脂胶失效后(即节段接缝开裂后),胶接缝试件的力学特性趋同于干接缝试件。

在裂缝发展阶段,齿键接缝组合梁的外荷载比平面接缝的略高,表明齿键接缝试件开裂后的力学性能优于平面接缝。

不同状态下的力学特性结果汇总见表 5 所列,峰值荷载下各试件的应力云图如图 9 所示,图 9 中单位为 MPa。

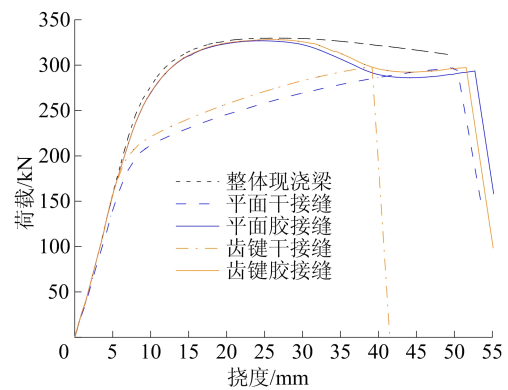


图 8 不同类型节段接缝组合梁的荷载-挠度曲线

表 5 不同状态下的力学特性结果

接缝类型	接缝开裂			极限状态		
	荷载/kN	挠度/mm	接缝开裂宽度/mm	荷载/kN	挠度/mm	接缝开裂宽度/mm
整体现浇梁				329.8	26.5	
平面干接缝	178.4	6.7	0.05	297.8	50.3	8.20
平面胶接缝	191.1	6.1	0.05	326.7	24.5	0.70
齿键干接缝	173.5	5.6	0.05	298.4	39.1	6.50
齿键胶接缝	190.4	6.1	0.05	328.2	25.3	0.70

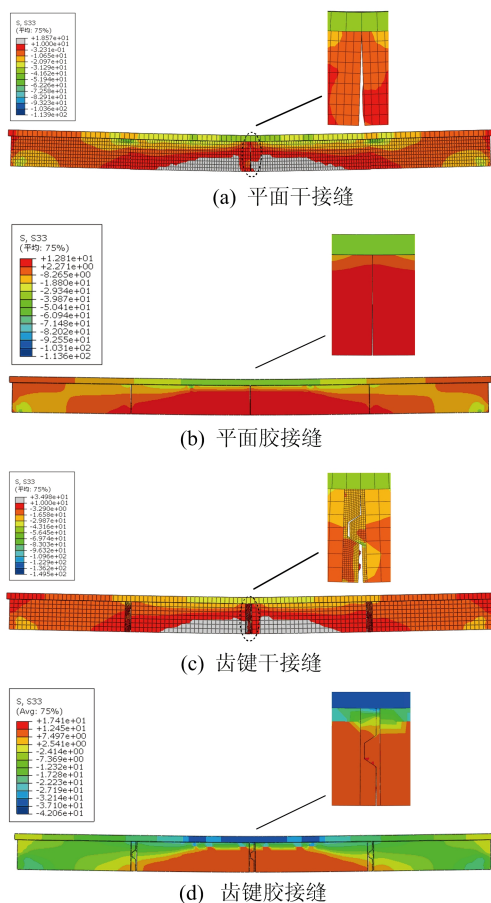


图 9 峰值荷载下节段拼装 UHPC-RC 节段组合梁应力云图

由接缝有无使用环氧树脂胶的对比发现,平面胶接缝试件和齿键胶接缝试件的极限荷载比分别比对应的干接缝高 9.7%、10.0%,比整体梁低 0.9%、0.5%;平面胶接缝试件和齿键胶接缝试件的接缝开裂荷载分别比对应的干接缝试件高 7.1%、6.7%。对比不同节段接缝的试件达到极限荷载时的接缝开裂宽度可知,胶接缝试件的接缝开裂宽度明显小于干接缝试件。以上现象说明,使用环氧树脂胶可以改善节段梁的力学行为,提高节段梁的极限荷载和开裂荷载,降低节段接缝开裂宽度;原因是环氧树脂胶能使节段梁底拉应力在接缝处发生传递,有利于接缝面抗弯力矩的形成,从而提高节段梁的整体性。

接缝的几何特征对比发现,齿键干接缝的极限荷载比平面干接缝高 0.2%,但其开裂荷载比平面干接缝低 3.7%;齿键胶接缝的极限荷载比平面胶接缝高 0.5%,其开裂荷载比平面胶接缝低 0.4%。总之,接缝几何特征不同的节段梁之间的开裂荷载和极限荷载的差别都在 4.0% 以内;由此可知,接缝的几何特征对 UHPC-RC 节段梁开裂荷载和极限荷载的影响不是很明显。

从图 9 可以看出,当试件达到峰值荷载时,齿键干接缝、齿键胶接缝和平面胶接缝试件的两侧接缝在加载过程中均未发生开裂,而平面干接缝试件的两侧接缝发生了微小的竖向错位,表明平面干接缝的整体性最差。

### 3.2 荷载-预应力钢筋应力曲线

荷载-预应力钢筋应力曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,胶接缝试件的荷载-预应力钢筋应力曲线可分为如下 3 个阶段:在初始阶段呈线性增长;在裂缝发展阶段(裂缝开展或接缝张开),应力增长速率逐渐变大;达到峰值荷载后,荷载-预应力钢筋应力曲线进入下降段。同理,对于干接缝试件,其荷载-预应力钢筋应力曲线可分为如下 2 个阶段:在初始阶段呈线性增长;在裂缝发展阶段,曲线缓慢上升直至试件发生破坏。

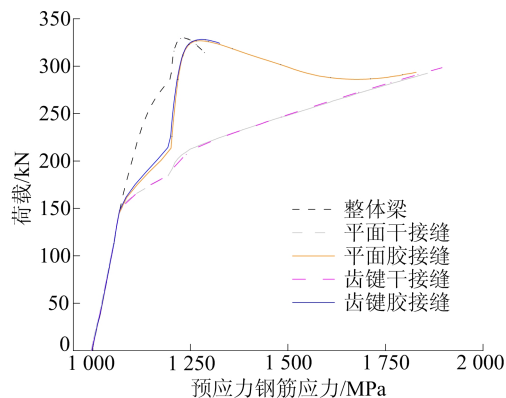


图 10 荷载-预应力钢筋应力曲线

从图 10 还可以看出,当试件达到峰值荷载时,胶接缝试件的体内预应力筋未达到抗拉强度值,而此时干接缝试件的预应力筋达到抗拉强度值。此外,当预应力钢筋拉应力一致时,胶接缝试件所承担的外荷载比干接缝的大,比整体现浇梁的略小。由此说明,节段接缝面使用环氧树脂胶有利于提高 UHPC-RC 节段组合梁的整体性,进而有利于发挥预应力钢筋的抗拉性能。

### 3.3 荷载-接缝开裂宽度曲线

荷载-节段接缝开裂宽度曲线如图 11 所示。该曲线可分为如下 3 个阶段:初始阶段呈线性变化;在裂缝发展阶段,节段接缝张开速率逐渐变大;达到峰值荷载后,荷载-节段接缝开裂宽度曲线进入下降段。胶接缝试件对比干接缝试件发现,在裂缝发展阶段,胶接缝试件的节段接缝张开速率明显高于干接缝试件;胶接缝试件达到峰值荷载时对应的节段接缝开裂宽度要小于干接缝试

件。以上现象再次表明,环氧树脂胶可以提高 UHPC-RC 节段组合梁的整体性,减小节段接缝的开裂宽度。

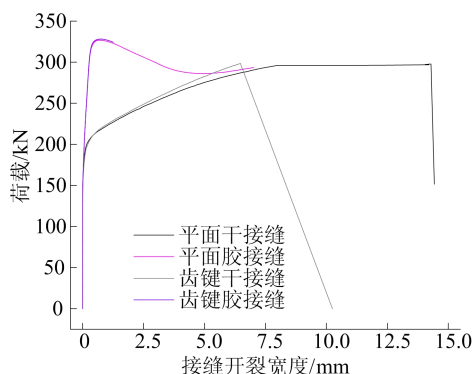


图 11 荷载-接缝开裂宽度曲线

#### 4 结 论

本文对低预应力度下,不同类型的节段接缝 UHPC-RC 组合梁桥展开研究,为分析其整体力学性能,建立 ABAQUS 有限元模型,并对结果进行分析,得出以下结论:

1) 在四点受弯加载方式下,接缝几何特征(平面或齿键)不同的节段梁之间的开裂荷载和极限荷载的差距都在 4.0% 以内,即接缝的几何特征对 UHPC-RC 节段组合梁开裂荷载和极限荷载的影响不是很明显。

2) 有无使用环氧树脂胶对组合梁的极限荷载影响较大,即节段接缝使用环氧树脂胶可以改善节段梁的力学行为,提高节段梁的整体性,增加梁的开裂荷载和极限荷载,同时降低节段接缝的开裂宽度,进而有利于发挥出预应力钢筋和 UHPC 的抗拉性能。

3) 本文基于 cohesive behavior 模型模拟环氧树脂胶接缝的方法是可行的;分析结果表明,本文建立的 ABAQUS 有限元模型能较为准确地模拟 UHPC-RC 节段组合梁的抗弯特性,为以后的节段组合梁桥的研究提供参考。

#### [参 考 文 献]

[1] BUYUKOZTURK O, BAKHOUM M M, BEATTIE S M.

Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116 (12): 3380-3401.

[2] 蔡东波,侯正宝,江涛,等. 混凝土预制节段梁不同厚度胶接缝抗剪试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(8):1072-1078.

[3] 梅应华,胡可,陈亮,等. 全体外预应力节段预制拼装箱梁桥震害研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6):54-59.

[4] LIU T X, WANG Z, GUO J, et al. Shear strength of dry joints in precast uhpc segmental bridges: experimental and theoretical research [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(1):04018100. 1-04018100, 18.

[5] PAN R S, CHENG L X, ZHOU X, et al. Direct shear performance of UHPC multi-keyed epoxy joint[J]. Structures, 2022, 44(10):1898-1909.

[6] 陈昭晖,郭芳枝,苏家战,等. 节段拼装预应力 UHPC-RC 组合箱梁受弯性能试验[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(6):755-761.

[7] JANG H, LEE H, CHO K, et al. Numerical and experimental analysis of the shear behavior of ultrahigh-performance concrete construction joints[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018(3):1-17.

[8] 王瑞. 节段预制胶拼受弯构件抗裂性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.

[9] 郑凡,江建,李有志. 节段预制 UHPC 桥梁接缝抗剪性能试验研究[J]. 公路工程, 2021, 47(6):1-9.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002:61-75.

[11] 中国钢铁工业协会. 预应力混凝土用钢绞线规范:GB/T 5224—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014:1-20.

[12] 中国建筑材料工业协会. 混凝土裂缝用灌浆环氧树脂材料:JC/T 1041—2007[S]. 北京:中国建材工业出版社, 2007:3.

[13] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙:湖南大学, 2002.

[14] 徐海滨. HRB500 钢筋预应力超高性能混凝土梁受力性能研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.

(责任编辑 张 镛)