

# 装配式矮T梁UHPC湿接缝构造力学性能研究

朱子琪<sup>1</sup>, 王炎<sup>1\*</sup>, 陈浙江<sup>2</sup>, 曹林龙<sup>1</sup>, 田大丰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>金华市交通投资集团有限公司, 浙江 金华

收稿日期: 2023年12月14日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年3月13日

## 摘要

为解决装配式矮T梁湿接缝抗剪强度弱、耐久性差等工程技术问题, 设计了一种新型锯齿超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete)湿接缝, 采用ABAQUS有限元软件分析湿接缝构造形式、配筋率和界面粗糙度对UHPC湿接缝界面力学性能的影响。研究表明: 有限元模型能较好地模拟矮T梁湿接缝的界面力学性能; 提出的新型锯齿形接缝整体力学性能和界面力学性能显著优于锯齿形接缝和平接缝, 最大界面承载力较平接缝提升了83.8%; 新型锯齿接缝界面承载力不随配筋率增高而同比增加, 配筋率对界面切应力呈单峰效应, 建议配筋率取4.0%; 湿接缝界面处剥离位移随界面粗糙度变化较小, 可减少在计算中的考虑。

## 关键词

超高性能混凝土, 矮T梁, 湿接缝, 数值模拟, 剪切性能

# Study on the Mechanical Properties of UHPC Wet Joints of Prefabricated Low T Beam

Ziqi Zhu<sup>1</sup>, Yan Wang<sup>1\*</sup>, Zhejiang Chen<sup>2</sup>, Linlong Cao<sup>1</sup>, Dafeng Tian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Jinhua Transportation Investment Group Co. LTD, Jinhua Zhejiang

Received: Dec. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to solve the engineering and technical problems such as weak shear strength and poor durability of prefabricated low T beam wet joints, a new type of sawtooth ultra-high performance

\*通讯作者。

文章引用: 朱子琪, 王炎, 陈浙江, 曹林龙, 田大丰. 装配式矮 T 梁 UHPC 湿接缝构造力学性能研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(2): 1090-1099. DOI: 10.12677/mos.2024.132103

concrete (UHPC) wet joints was designed, and the effects of wet joint structure, reinforcement ratio and interface roughness on the interface mechanical properties of UHPC wet joints were analyzed by ABAQUS finite element software. The results show that the finite element model can better simulate the interfacial mechanical properties of wet joints of low T beams. The overall mechanical properties and interfacial mechanical properties of the proposed new zigzag joint are significantly better than those of zigzag joints and flat joints, and the maximum interfacial bearing capacity is increased by 83.8% compared with flat joints. The bearing capacity of the new sawtooth joint interface does not increase year-on-year with the increase of reinforcement ratio, and the reinforcement ratio has a unimodal effect on the interface shear stress, so it is recommended that the reinforcement ratio is 4.0%, and the peeling displacement at the wet joint interface changes little with the interface roughness, which can reduce the consideration in the calculation.

## Keywords

Ultra-High Performance Concrete, Low T-Beam, Wet Seams, Numerical Simulation, Shear Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

交通运输部要求公路交通大力推进组合桥梁建设,在浙江关于进一步提高公路工程设计意见中明确指出,空心板在通车后普遍存在较多病害,限制使用空心板,推荐使用T梁、小箱梁。矮T梁有着减少桥下净空的优势,它已成为低高度桥梁中更具竞争力的桥梁类型之一[1][2]。装配式桥梁结构整体性能的薄弱环节之一是T型钢湿接缝的现浇混凝土位置,在实际运行中也会出现一些典型的病害,如梁端斜裂缝,横向联系裂缝等。

当前桥梁施工中的湿缝施工技术还存在着较大的技术缺陷,具体表现为湿缝结构及缝中填料等。在湿接缝构造上,Feng Jiahui [3]等关注节点几何形状发生变化的结构剪切行为。通过试验研究和数值模拟研究受接缝宽度影响的剪切行为。提出考虑接缝宽度影响抗剪承载力评估计算模型。不同接缝宽度引起的旋转效应导致宽接缝裂纹较长。由于剪切构件沿裂缝的垂直区域扩大,在剪切荷载传递中涉及额外的混凝土。邵旭东[4][5]等研究了一种燕尾榫的湿接缝构造形式,将预制活性粉末混凝土与正交各向异性板相结合,提高混凝土在湿接缝上的抗拉强度,对燕尾榫接缝结构进行试验和理论分析,并介绍了荷载作用燕尾榫接缝裂缝宽度的计算公式。胡志坚等[6]等提出了一种优化的装配式桥面接缝结构,并分析了其抗弯性能,并利用ABAQUS有限元对湿接缝宽度、湿接缝界面形状、接缝加固率等参数进行了分析,提出了楔形或菱形连接。在接缝填料中,传统T梁混凝土强度等级相同或掺加防裂胶浆,在荷载作用下仍然存在着脱空现象,造成新老混凝土界面粘结失效、薄弱部位裂缝扩展,对桥梁的使用寿命和耐久性产生严重影响。Arafa [7]将完整混凝土一体板与UHPC接缝板进行静载试验,接缝板采用菱形、矩形,结果表明UHPC接缝桥面的裂缝荷载高于完好无损的普通混凝土板,且破坏均发生在普通混凝土板处,整体力学性能良好。崔冰等[8]总结了UHPC材料研究进展,材料组成、基本力学性能与桥梁应用UHPC发展历程,梳理总结了UHPC结构设计理论研究。目前对接缝混凝土还是处在一个不断学习、不断探索、不断完善的情况下。因此,重视接缝的构造形式和接缝中填料自身的作用,提升结构的极限承载力,对推动我国装配式桥梁的发展,具有十分重要的实际意义。

## 2. 新型湿接缝构造

矮 T 梁湿接缝在车轮作用下, 接缝受很大剪力作用[9], 本文以矮 T 梁横向位置湿接缝为研究对象, 为明确 UHPC 湿接缝剪切性能, 选取一段 T 梁连接处如图 1, 设计一种新型锯齿形湿接缝构造, 结合超高性能混凝土填充材料, 并与普通锯齿形接缝和传统平接缝两种构造进行对比如图 2。三种构件尺寸均为  $1470\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ , 其中接缝段长度为  $200\text{ mm}$  [10], 锯齿形键齿为边长  $80\text{ mm}$  等边三角形, 新型锯齿构造在键齿中部位置放平处理, 中部接缝高度为  $50\text{ mm}$ , 研究新型锯齿构造界面形式、配筋比例、界面粗糙度对接缝位置力学性能影响。

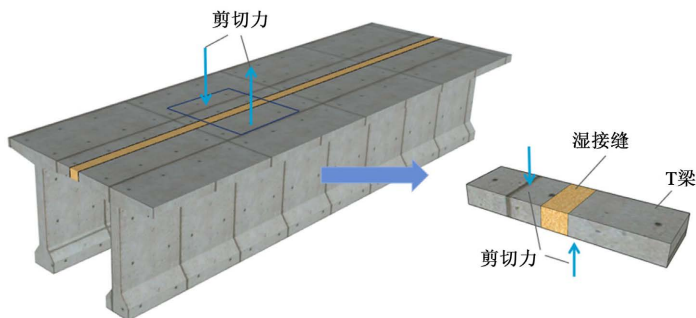


Figure 1. Schematic diagram of joint location

图 1. 接缝位置示意图

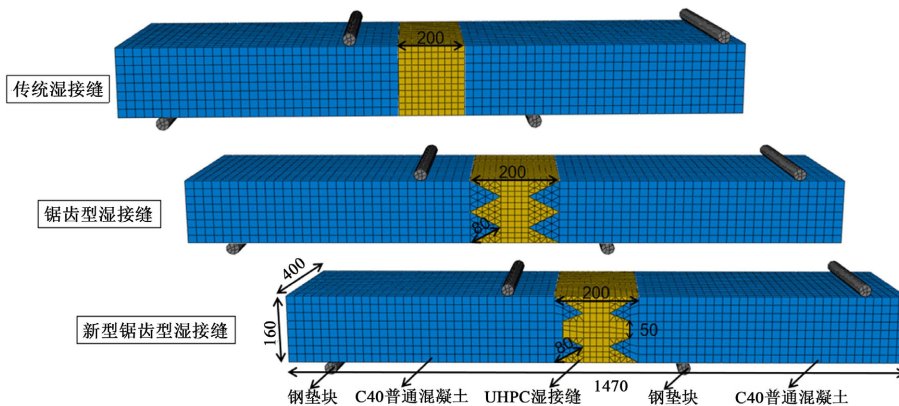


Figure 2. Schematic diagram of joint construction

图 2. 接缝构造示意图

## 3. 有限元参数分析

对试验板进行模拟计算采用 ABAQUS 有限元软件并建立数值模型, 进而对湿接缝板进行界面形式、配筋率、界面粗糙度等组合参数分析。加载棒布置间距为  $420\text{ mm}$ ,  $160\text{ mm}$  梁高上布置两层钢筋, 每层布置四根受拉钢筋, 纵筋间距  $100\text{ mm}$ , 钢筋均采用 HRB400 强度材料参数, 纵向钢筋直径  $\Phi 10$ , 纵筋保护层厚度  $20\text{ mm}$ , 上下布置两排钢筋。箍筋直径  $\Phi 8$ , 箍筋间距  $100\text{ mm}$ 。钢筋布置图如图 3。

### 3.1. 模型建立

为研究 UHPC 横向接缝在剪切作用下的受力行为, 装配式矮 T 梁湿接缝构造、配筋率、界面粗糙度对接缝界面力学性能及构造承载力的影响, 建立 7 个有限元模型, 加载方式采用力加载。为使模拟

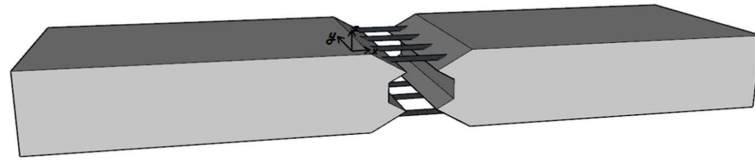


Figure 3. Finite element reinforcement arrangement  
图 3. 有限元钢筋布置图

精细化，界面连接处及接缝区域网格尺寸为 1.5 cm，两侧普通混凝土网格尺寸 2 cm。采用 C3D8R 八节点六面体线性减缩积分单元模拟 UHPC 和两边普通混凝土，三维二节点桁架单元 T3D2 模拟钢筋，钢筋作为嵌入体内置入混凝土中，对于锯齿形键齿处等倾斜的集合形状采用楔形单元模拟。钢垫块设置为离散刚体，与试验梁采用绑定约束。有限元材料参数见表 1。

Table 1. Finite element model material parameters  
表 1. 有限元模型材料参数

材料名称	泊松比	弹性模量/GPa	质量密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
UHPC	0.2	49.21	2.80
C40 混凝土	0.2	33.00	2.37
钢筋	0.2	206.00	7.80

### 3.2. 模型本构关系

ABAQUS 中配筋混凝土一般采用弥散裂缝模型和损伤塑性模型[11]，损伤塑性模型适用于低压力环境中的混凝土构件。该模型假设混凝土在拉伸和压缩下的塑性特性是各向同性的，考虑了混凝土破坏的两种机制：拉伸裂缝和破碎过程中的压缩。通过使用各向同性损伤弹性和各向同性拉伸压力，该模型能够更准确地描述混凝土的非弹性行为。为了提高有限元模型的精度，本文决定使用 ABAQUS 混凝土本构模型中的损伤塑性模型来模拟 UHPC 在模型中的损伤行为。UHPC 的受压应力 - 应变曲线采用提出公式 [12]：

$$\frac{\sigma}{f_c} = \begin{cases} ax + (6-5a)x^5 + (4a-5)x^6 \\ \frac{x}{2.41(x-1)^2 + x} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\sigma$  - 压应力； $x = \varepsilon/\varepsilon_0$ ， $\varepsilon$  - 压应变， $\varepsilon_0$  - 峰值点应变； $a$  - UHPC 受压应力 - 应变曲线初始切线模量与峰值模量比值。

UHPC 的受拉应力 - 应变关系如下式：

$$\sigma = \begin{cases} E_t \varepsilon \\ f_t \\ f_t \frac{1}{[1 + (\varepsilon - 0.002) \times 400]^{0.95}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $f_t$  取 7.2 Mpa， $E_t$  - UHPC 受拉初始弹性模量； $\varepsilon_{t0}$  - UHPC 受拉弹性极限应变； $\varepsilon_{pc}$  - UHPC 应力软化起始点等效应变。

装配式矮 T 梁 UHPC 段与普通混凝土段的接触属性是建立模型的关键。ABAQUS 提供三种方法用于模拟混凝土接触：接触摩擦模型、绑定约束和粘聚力模型，本文采用黏聚力模型中的黏聚面来模拟不同混凝土之间的接触关系。本文对于 UHPC 和普通混凝土的界面损伤取二次名义应力准则，设置表面接触相互作用属性，滑移公式为小滑移，黏聚力模型基于牵引分离准则，而牵引分离准则最常用的本构模型为双线性本构模型[13]，如图 4 所示，普通混凝土和 UHPC 界面二次名义应力准则的表达如下：

$$\left(\frac{t_n}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1 \tag{3}$$

式中： $t_n$ -黏结面法向应力， $t_s$ -第一切向应力， $t_t$ -第二切向应力， $t_n^0$ 、 $t_s^0$ 和 $t_t^0$ 分别为对应的临界应力。

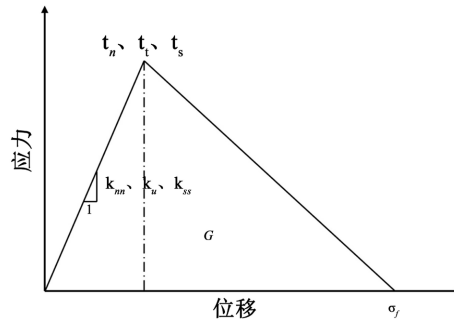


Figure 4. Bond-slip bilinear constitutive  
图 4. 黏结 - 滑移双线性本构

### 3.3. 参数设置

为了分析结构形状、配筋率和湿接缝界面粗糙度对湿接缝力学性能的影响，在试验研究方案中采用了正交试验分析方法。模型材料物理参数设置见表 2，材料塑性损伤参数见表 3。殷雨时[14]提出接缝边界的粗糙度对接缝的粘结性能有影响。为了详细研究这种效应，构建了三种不同粗糙度的粗糙度。在 ABAQUS 仿真软件中，将三种粗糙度模型定义为最小粗糙度(S)、中等粗糙度(M)和最大粗糙度(R)，见表 4。

Table 2. UHPC seam parameter design  
表 2. UHPC 接缝参数设计

序号	构造形式	配筋率	粗糙度
1	新型锯齿型	1.5	M
2	锯齿型	1.5	M
3	平接缝	1.5	M
4	新型锯齿型	3.0	M
5	新型锯齿型	4.5	M
6	新型锯齿型	1.5	S
7	新型锯齿型	1.5	R

Table 3. Material damage plasticity parameters  
表 3. 材料损伤塑性参数

材料名称	膨胀角	偏心率	屈服应力比	不变应力比	粘性系数
C40	30°	0.1	1.16	0.667	0.005
UHPC	30°	0.1	1.16	0.667	0.05

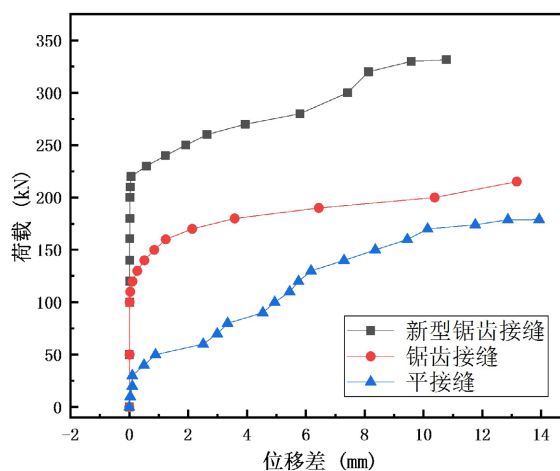
**Table 4.** UHPC-NC interface contact parameters**表 4.** UHPC-NC 界面接触参数

粗糙度	$K_{nn}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$K_{tt}, k_{tt}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	塑性位移/mm	摩擦因数
S	1358	20358	0.018	0.440
M	1358	20358	0.117	1.090
R	1358	20358	0.241	1.440

## 4. 有限元数值模拟结果分析

### 4.1. 界面形式对力学性能影响

采用 ABAQUS 建立配筋率为 1.5%、界面粗糙度为中等粗糙的 UHPC 湿接缝，并与锯齿形接缝和平接缝构造进行界面、整体力学性能对比分析，其中接缝缝宽均为 200 mm，键齿尺寸均为边长 80 mm 等边三角形。建立新型锯齿接缝矮 T 梁数值模型，加载方式采用力加载来控制，荷载提取加载点处数值，位移差即为 UHPC-普通混凝土界面位移做差，并取绝对值，即为梁上下错动位移差。最终得到 UHPC 接缝矮 T 梁荷载 - 位移差曲线计算值。有限元分析结果如图 5 所示。

**Figure 5.** Load-displacement difference curve**图 5.** 荷载 - 位移差曲线

从图中可以看出新型锯齿形接缝构造承载力明显高于锯齿形构造和平接缝构造，新型锯齿接缝对构造整体承载力提高作用显著，极限承载力达到 331 kN，相较于平接缝最大提升 83.8%，锯齿形接缝极限承载力达到 210 kN，对于平接缝也有 16.7% 的提高。新型锯齿形接缝构造在抑制界面位移上要优于传统的锯齿形接缝，键齿构造承担接缝一部分剪力，尤其是在界面开始发生剥离时的界面承载力提高了近 69.2%，对于平接缝界面承载力提高一倍。在装配式矮 T 梁的 UHPC 和普通混凝土交界处，新型锯齿构造显著减少了界面之间的剥离位移，在加载吨位 219 kN 时，界面开始发生剥离，此时由于构造处受拉钢筋约束界面剥离，位移差发展较为平缓，这有效地抑制了开裂和钢筋与超高性能混凝土的剥离。

荷载 - 切应力曲线中(见图 6)，新型锯齿切应力峰值点出现在 220 kN 处，此时界面开始剥离，最大切应力为 4.11 Mpa，锯齿形接缝和平接缝切应力峰值点均出现在界面开始发生剥离时，对应最大切应力为 3.03 Mpa 和 1.77 Mpa。新型锯齿接缝对界面有一定的承载作用，未出现大应力和应力集中情况。



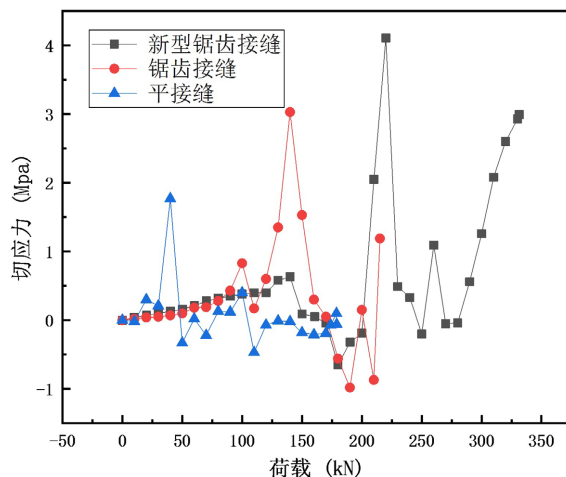


Figure 6. Load-shear stress curves

图 6. 荷载 - 切应力曲线

#### 4.2. 配筋率对力学性能影响

为了研究配筋在 1.5%、3.0% 和 4.0% 的情况下对湿接缝界面的力学性能影响, 建立接缝宽度 200 mm, 接缝界面粗糙度为中等粗糙度的新型锯齿型构造有限元模型。有限元分析结果如图 7、图 8 所示:

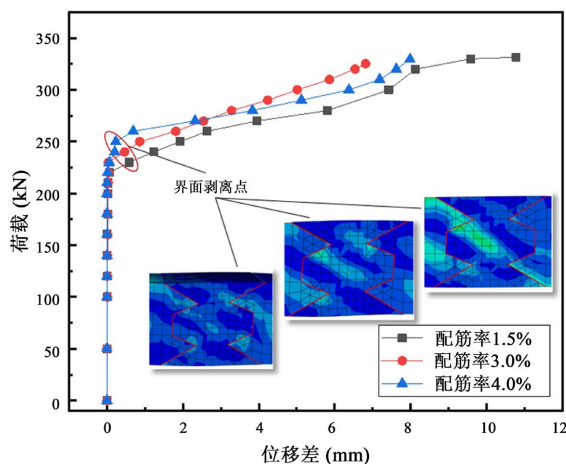


Figure 7. Load-displacement difference curve

图 7. 荷载 - 位移差曲线

从图中可以得出, 各配筋率对荷载和位移差影响不大, 整体趋势相似, 其中配筋率 4.0% 情况下对承载力略有提高。在界面开裂阶段, 配筋率 4.0% 相对配筋率 3.0% 的情况下基本发生在相同荷载, 两者相较于配筋率 1.5% 的情况略有提高。三种配筋率界面承载力相差不大, 从云图中可以看出不同配筋下发生界面位移的应力随之变大, 应力集中点也出现在界面剥离点即键齿根部处。随着界面剥离位移差增加, 配筋率较少的情况下位移差发展较快, 最大位移差达到 10.78 mm, 此时界面完全剥离, 构件退出工作。

荷载 - 切应力曲线图中, 三种配筋率在 0~200 kN 时切应力发展平缓且趋向一致, 随着荷载增加, 切应变值发生突变, 此时界面开始开裂呈现单峰效应, 三者最大切应力出现位置相近, 说明配筋率未改变界面受力模式, 在钢筋加入工作后, 界面切应力逐渐减小。总体来说, 界面处切应力整体变化相近, 可

得出配筋率对湿接缝剥离位移影响很小, 构件极限承载力变化不大, 可以考虑忽略相同配筋形式下的配筋率影响, 在实际工程中可以考虑配筋样式、拼装搭接钢板等形式综合考虑, 以此提高湿接缝抗剪承载力。

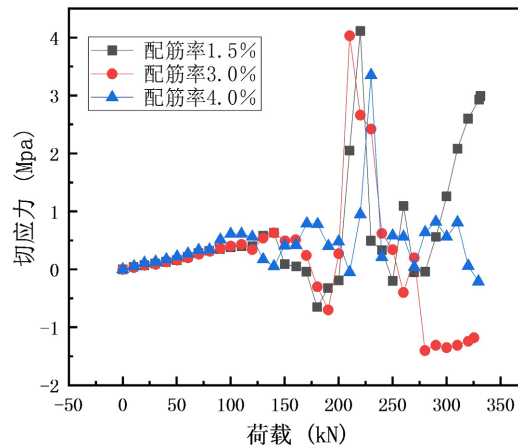


Figure 8. Load-shear stress curves

图 8. 荷载 - 切应力曲线

#### 4.3. 界面粗糙度对力学性能影响

为了研究不同粗糙程度对新型锯齿形湿接缝构造的影响规律, 分别采用光滑、粗糙中度和粗糙三种界面对比分析, 三种不同粗糙度均采用湿接缝宽度为 200 mm, 接缝配筋率为 1.5% 的新型锯齿形构造有限元模型开展有限元数值模拟分析。总体来说, 不同粗糙度的界面位移差增长趋势相似, 对比分析结果如图 9、图 10 所示:

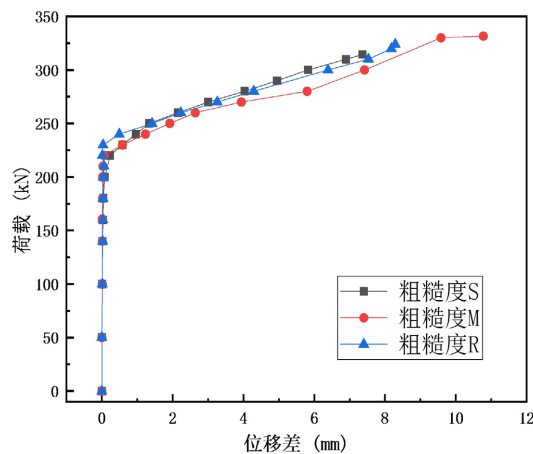


Figure 9. Load-displacement difference curve

图 9. 荷载 - 位移差曲线

从图中可以看出, 随着荷载增加, 界面剥离发生、开展趋势一致, 以最大粗糙度 R 情况为例, 最大位移差增幅较最小粗糙度 S 减少了 12.6%, 极限承载力达到 323.94 kN, 最小粗糙度极限承载力也达到了 314.33 kN, 总体来看, 位移差和极限承载力变化范围不大, 可以认为界面粗糙度对界面剥离开裂影响很小, 在采用新型锯齿型构造时, 可不考虑界面粗糙度对接缝刚度状态的影响。



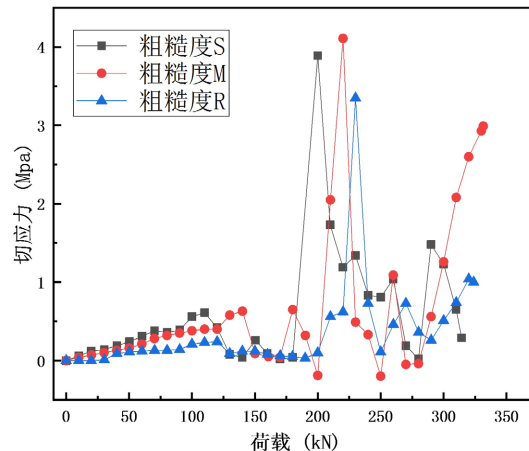


Figure 10. Load-shear stress curves

图 10. 荷载 - 切应力曲线

荷载 - 切应力曲线图中, 随着荷载逐渐增加, 最大粗糙度 R 相对最小粗糙度 S 应力减少了 29.8%, 三种总体发展缓慢, 在荷载增加到 200 kN 时, 最小粗糙度 S 工况下切应力突变至 3.89 Mpa, 此时界面开始沿键齿方向发生剥离, 在 210 kN 荷载时, 中等粗糙度和最大粗糙度切应力分别达到了 4.11 Mpa 和 3.35 Mpa, 随着荷载增加, 构造钢筋加入工作, 界面切应力发展变化放缓, 从图中发展趋势可以看出, 随着粗糙度的逐渐增大, 界面切应力未发生同比例增长变化。在三种程度粗糙度下最大切应力相差不大, 最大切应力均出现在 200 kN 荷载左右, 从有限元结果看不同粗糙度界面最大切应力和极限荷载相差不大, 可以得出粗糙度对普通混凝土-UHPC 界面承载力影响不大, 尤其是对构件受剪切作用下, 其主要承载力由钢筋承担, 在实际工程考虑中, 可通过增加底部钢板等增加措施, 提高湿接缝构造的抗剪切能力。

## 5. 结论

本文提出新型锯齿形湿接缝, 通过数值模型探究了 UHPC 横向接缝力学性能影响因素, 主要结论如下: 1) 新型锯齿形构造承载力明显优于锯齿形和平接缝构造, 新型锯齿型构造极限承载力较平接缝提升 83.8%, 界面承载力较平接缝提高了 69.2%, 新型锯齿构造能较好抑制界面剥离, 使接缝界面力学性能得到明显提升。2) 新型锯齿形构造位移差与配筋率同比增加, 配筋率对构造极限承载力增加影响不大, 配筋率对界面切应力影响不明显。在本文提出的构造下, 建议新型锯齿形构造配筋率取 4.0%。3) 新型锯齿形构造位移差受界面粗糙度变化而不呈现相关变化趋势, 不同界面粗糙度对构造极限承载力和界面切应力变化影响很小。

## 参考文献

- [1] 陈娟娟, 刘杰. 矮 T 梁承托处裂缝产生的原因及影响分析[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 92-95.  
<https://doi.org/10.14048/j.issn.1671-2579.2018.06.019>
- [2] 金秀辉, 黄侨, 杨大伟, 傅金科. 预应力混凝土矮 T 斜梁桥的试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 74-77+85.
- [3] Feng, J.H., Fang, S., Chen, M.Z., et al. (2023) Effect of Joint Width on Shear Behaviour of Wet Joints Using Reactive Powder Concrete with Confining Stress. *Engineering Structures*, 293, Article ID: 116566.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116566>
- [4] 邵旭东, 应李溶君, 赵旭东. 型钢-UHPC 组合连续梁墩顶负弯矩区接缝抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(9): 34-47.
- [5] 邵旭东, 孔小璇, 邱明红, 等. 先简支后连续混凝土梁负弯矩区 UHPC “T 形”湿接缝试验研究[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48(3): 1-13.

- 
- [6] 胡志坚, 尹炳森, 俞文生. 预制拼装桥面板 UHPC 湿接缝抗弯性能分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(6): 29-35.
- [7] Arafa, A., Farghaly, A.S., Ahmed, E.A., *et al.* (2016) Laboratory Testing of GFRP-RC Panels with UHPFRC Joints of the Nipigon River Cable-Stayed Bridge in Northwest Ontario, Canada. *Journal of Bridge Engineering*, **21**, No. 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000943)
- [8] 崔冰, 王景全, 刘加平. UHPC 桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J]. 中国公路学报, 2023, 36(9): 1-19.
- [9] 张菊辉, 赵玉川, 牛朝乾, 等. 预制小箱梁近支点湿接缝抗剪机理试验及理论研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 177-187.
- [10] 朱劲松, 佟欣瑶, 刘晓旭. 装配式小箱梁桥 UHPC 免支模湿接缝抗弯性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230306.1407.004.html>, 2024-03-08.
- [11] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67+82.
- [12] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2002.
- [13] 张轶, 张阳, 刘颖峰, 等. 带湿接缝的预制 UHPC-NC 组合板试验与分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(8): 63-69.
- [14] 殷雨时, 杨纪, 苏庆田, 等. 装配式节段梁 UHPC 湿接缝界面力学性能数值模拟分析[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(1): 77-85.