

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.01.020

## 节段超高性能混凝土桥梁干接缝直剪性能研究

古金伦<sup>1,2</sup>, 陈双庆<sup>3</sup>, 王靖君<sup>4</sup>, 裴必达<sup>5</sup>

(1. 广东省公路建设有限公司, 广州 510032; 2. 京珠高速公路广珠段改扩建管理处, 广州 510032; 3. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 4. 广深珠高速公路有限公司, 广州 东莞 523000; 5. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114)

**摘要:**为研究节段超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)装配式桥梁干接缝的直接剪切性能, 基于有限元分析理论, 在通用有限元分析软件(ABAQUS)中建模分析 UHPC 干接缝, 得到了 UHPC 接缝在直剪荷载作用下的受力性能; 利用已有试验数据对美国国家公路(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)节段桥梁设计规范及多位学者所提出的 UHPC 干接缝抗剪承载力计算公式进行适用性及准确性评价; 同时结合收集的实测数据拟合得到 UHPC 干接缝直剪承载力公式。结果表明, 基于混凝土塑性损伤理论的 ABAQUS 计算模型可以较好模拟 UHPC 干接缝的直剪受力特征, 各个模型试验结果与有限元结果的比值的平均值为 0.970, 变异系数为 0.107; 基于普通混凝土结构的美国 AASHTO 公式和西班牙 ATEP 公式不能准确预测 UHPC 干接缝的抗剪承载力, 计算结果偏于不安全; 前期学者提出的 UHPC 接缝计算公式预测结果偏保守, 经济性较差; 该研究给出的计算公式预测准确, 可为实际节段 UHPC 装配式桥梁的接缝设计与计算提供参考。

**关键词:**桥梁工程; UHPC; 干接缝; 有限元分析; 直剪承载力

中图分类号: U448.21+3

文献标识码: A

文章编号: 1006-8023(2024)01-0171-12

## Research on Direct Shear Performance of Dry Joints of Segmental UHPC Bridges

GU Jinlun<sup>1,2</sup>, CHEN Shuangqing<sup>3</sup>, WANG Jingjun<sup>4</sup>, PEI Bida<sup>5</sup>

(1. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510032, China; 2. Beijing Zhuhai Expressway Guangzhou Section Reconstruction and Expansion Management Office, Guangzhou 510032, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 4. Guangshen Zhuhai Expressway Co., Ltd., Dongguan 523000, China; 5. School of Civil Engineering, Changsha University of Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To investigate the shear behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) dry joints, based on finite element analysis theory, the UHPC dry joints were modeled and analyzed in the general finite element analysis software (ABAQUS), and the mechanical performance of the UHPC joints under direct shear load was obtained. Using existing experimental data, the applicability and accuracy of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) section bridge design code and UHPC dry joint shear strength calculation formula proposed by many scholars were evaluated. At the same time, the formula of direct shear capacity of UHPC dry joint was obtained by fitting the collected measured data. The results showed that the ABAQUS model based on the concrete plastic damage theory can simulate the direct shear force characteristics of UHPC dry joints. The average value of the ratio between the model test results and the finite element results was 0.970, and the coefficient of variation was 0.107. American AASHTO formula and Spanish ATEP formula based on ordinary concrete structure can not accurately predict the shear capacity of UHPC dry joint, and the calculation results were not safe. The prediction result of UHPC joint calculation formula proposed by scholars was conservative, and the economy was poor. The calculation formula given in this study was accurate and can provide reference for joint design and calculation of actual segment UHPC fabricated bridge.

**Keywords:** Bridge engineering; UHPC; dry joints; finite element analysis; direct shear capacity

收稿日期: 2023-04-09

基金项目: 湖南省青年基金项目(2021JJ40593); 湖南创新型省份建设专项(2019SK2171); 湖南省交通科技创新计划(202013)。

第一作者简介: 古金伦, 本科, 高级工程师。研究方向为桥梁健康诊断及运维安全控制。E-mail: 1032878600@qq.com

引文格式: 古金伦, 陈双庆, 王靖君, 等. 节段超高性能混凝土桥梁干接缝直剪性能研究[J]. 森林工程, 2024, 40(1): 171-182.

GU J L, CHEN S Q, WANG J J, et al. Research on direct shear performance of dry joints of segmental UHPC bridges[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1): 171-182.

## 0 引言

超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 是一种新型的水泥基材料,其主要特点包括超高的拉、压强度,优异的耐久性和出色的抗疲劳、抗冲击性能,其收缩徐变在蒸养阶段基本完成,因此具有研究、推广和应用的潜在价值<sup>[1]</sup>。把 UHPC 材料应用到节段预制桥梁结构中可以完善快速化施工的装配式桥梁体系,具有广阔的运用前景,不仅可以极大缩短施工时间,具有极大的经济潜力,而且可以把控施工质量,从而高效地生产优质的高性能 UHPC 桥梁。与整体浇筑桥梁相比,节段梁内纵向钢筋在键齿接缝截面截断,采用预应力筋将各个分离的节段连接为一个整体,接缝截面作为不连续的薄弱位置,其受力性能得到了广泛关注<sup>[2]</sup>。干、胶、湿接缝是较为常规的接缝处理形式,其中干接缝形式施工简单易控、施工速度快且无须额外处理,契合了装配式桥梁快速化施工的理念和特点。

目前,国内外针对普通混凝土节段梁的干接缝研究较多,提出了较为成熟的抗剪计算方法<sup>[2]</sup>。但是,相关的计算方法和理论是否适用于 UHPC 接缝仍需要进一步深入研究。相较于普通混凝土结构,UHPC 具有更高的强度,而且高强钢纤维的桥连作用使其表现出明显的受拉硬化特性,这些特点可能会导致 UHPC 接缝的直剪性能与普通混凝土接缝差异较大。为了明确其中的差异,有必要对 UHPC 接缝的直剪力性能展开研究与讨论。

2010 年之后,各国学者逐渐针对 UHPC 接缝的抗剪性能开展试验研究和理论分析。韩国学者 Lee 等<sup>[3-4]</sup>开展了 35 个 UHPC 接缝直剪试验,试验参数包括接缝类型、正应力水平、试件材料、键齿深度和养护温度。结果表明,键齿抗剪能力与施加的正应力水平呈正相关,但是存在最佳正应力水平使键齿表现出最佳抗剪性能。湿接缝试件全部表现为抗拉破坏,接缝变形能力随着温度提高而增长。提高键齿深度可以提高接缝承载能力,但是提高幅度有限。韩国学者 Kim 等<sup>[5]</sup>对不同养护条件下 UHPC 湿接缝的抗剪性能影响进行研究,考虑了不同养护时间(3、7、14、28 d)的影响,发现延长养护时间,保持高温养护可以获得更高的接缝抗剪强度。马来西亚学者 Voo 等<sup>[6]</sup>进行了 6 个 UHPC 干接缝直剪

试验,对键齿接缝在侧应力和键齿数量影响下的接缝受力机理进行研究。结果表明,UHPC 接缝在达到破坏荷载前,界面剪切滑移很小。键齿的初始裂缝出现于键齿底部,裂缝开展后试件刚度降低,直至破坏滑动。试件破坏后的残余强度由破坏接触面的摩擦抗剪提供。Liu 等<sup>[7]</sup>、刘桐旭<sup>[8]</sup>进行了 19 个 UHPC 干接缝直剪试验,试验参数包括钢纤维含量、混凝土类型、正应力水平和键齿齿形参数。结果表明,增加正应力大小对接缝承载力提高显著,但是会使开裂荷载提前。在相同剪切面积下,大键齿接缝设计相比三键齿接缝设计的直剪强度高出 9.7%。对 UHPC 接缝而言,正应力水平和接缝类型、键齿数目和材料强度等因素对接缝抗剪能力的影响与普通混凝土接缝类似,但是在 UHPC 接缝设计中往往会考虑更高正应力水平的作用,采用小尺寸设计发挥材料优势。此外,目前仍缺乏明确的 UHPC 接缝设计、计算规范,美国 AASHTO 节段梁规范<sup>[9]</sup>等并不完全适用于 UHPC 接缝。

试验研究往往不能全面考虑各个因素的影响,采用过多的参数会导致试验花费较大,因此本研究采用有限元方法分析了 UHPC 接缝的受力特征,论证了有限元模型的可行性;对 UHPC 接缝的受力特征展开了分析讨论,包括主拉应力分布、损伤区域、接缝的张开和滑移等;并明确各个参数的主要作用;最后对 UHPC 干接缝承载力的计算展开了分析讨论,对已有公式和本研究公式通过试验结果进行了适用性和准确性评价,并进一步提出预测更为准确的计算公式。本研究结论可为实际节段预制 UHPC 装配式桥梁的接缝设计提供参考。

## 1 有限元模拟

### 1.1 试验模型概况

本研究采用非线性有限元分析软件 ABAQUS 中的塑性损伤 (Concrete damaged plasticity, CDP) 模型对 UHPC 干接缝的受力性能展开分析。依据刘桐旭<sup>[8]</sup>所完成的 17 个 UHPC 干接缝直接剪切试验,主要参数包括侧向应力、接缝类型(平接缝、键齿接缝)、键齿尺寸和数量,模型基本参数见表 1。试件厚度均为 150 mm,平接缝和单键齿接缝的剪切面高度为 300 mm,三键齿和大键齿接缝剪切面高度为 500 mm,试件内部布置两层直径 12 mm 的 HRB400E 钢筋,模型的基本构造和尺寸如图 1 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of models

试件类型 Type of specimens	编号 Number	UHPC 强度/MPa Strength of UHPC	侧向应力/MPa Lateral pressure
平接缝 Flat joint	F-1	120	6
	F-2	120	12
	F-3	120	18
	F-4	120	24
单键齿 Single-keyed joint	K1-C2-0.5	120	6
	K1-C2-1	120	12
	K1-C2-1.5	120	18
	K1-C2-2	120	24
三键齿 Three-keyed joint	K3-C2-0.1	120	1.2
	K3-C2-0.2	120	2.4
	K3-C2-0.5	120	6
	K3-C2-1	120	12
大键齿 Large-keyed joint	KD-C2-50-0.2	120	2.4
	KD-C2-100-0.2	120	2.4
	KD-C2-150-0.2	120	2.4
	KD-C2-0.2-R1	120	2.4
KD-C2-0.2-R2	120	2.4	

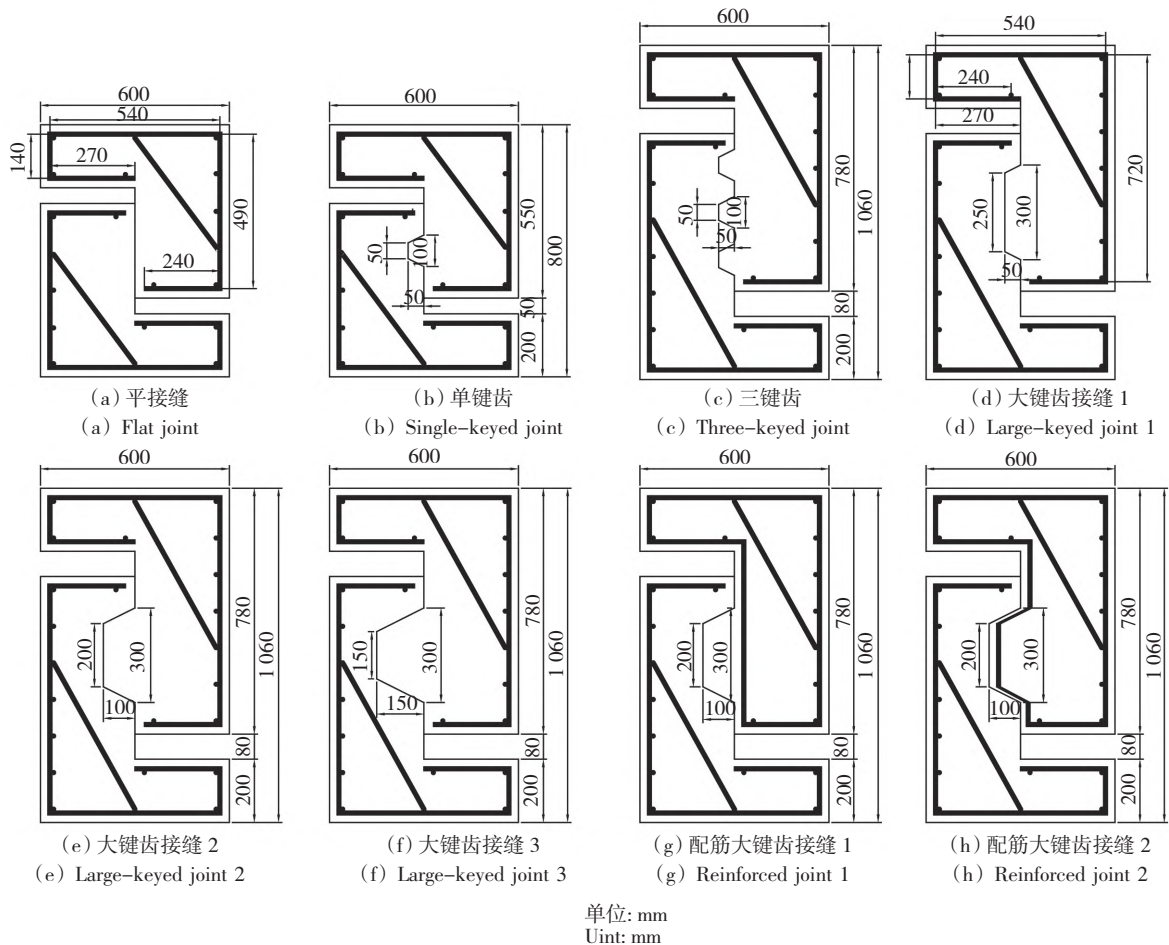


图 1 接缝模型基本构造图

Fig. 1 Specimen dimensions of joint models

## 1.2 有限元模型

根据上述试验模型,在 ABAQUS 软件中分别建立各个试件的非线性三维实体模型,如图 2 所示。

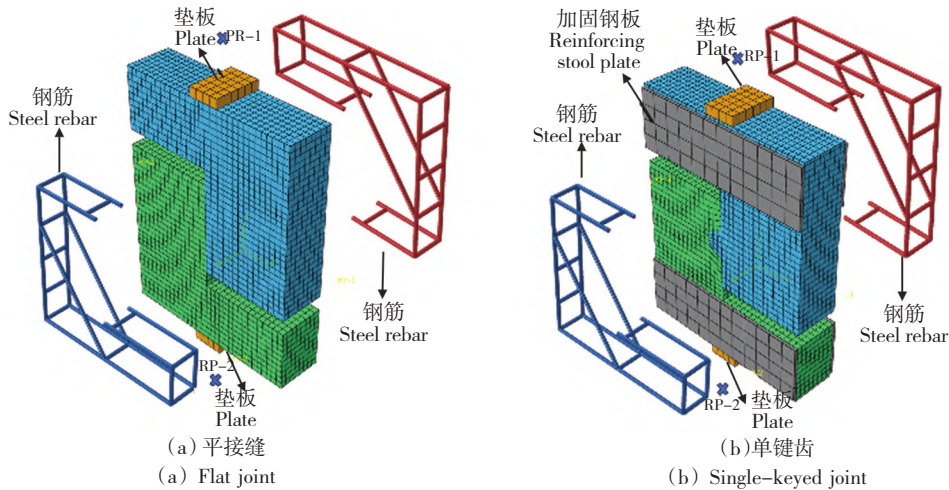


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

为了施加侧向压力,通过在试件两侧分别设置 2 个参考点 RP-3 和 RP-4,侧向荷载施加面与参考点通过运动耦合连接,随后在参考点上作用计算得到的集中力。同时,在试件中上部设置参考点 RP-1 作为加载点,与顶部垫板运动耦合,在 RP-1 上施加位移,通过位移进行加载,初始荷载步长设为 0.02。模型中的两层钢筋通过嵌入约束(embedded)埋入 UHPC 试件中,两键齿与顶、底部垫板均为实体单元(C3D8R),网格大小分别为 2 cm 和 2.5 cm,钢筋则采用桁架单元(T3D2)。

已有研究表明接缝的接触定义对仿真分析影响较大,在 ABAQUS 中,接触定义包含了切向和法向行为,本研究将切向接触设置为各向同性的摩擦,摩擦系数根据 AASHTO 规范建议设置为 0.6;法向接触类型采用硬接触(Hard contact),这一设置不会限制接触面之间传递的压力,且当压力小于等于零时,接触面即发生分离,相应的接触约束失效。此外,约束变化规律选用标准罚函数。

相关研究试件设计存在一些不合理的之处。对于三键齿接缝试件,接缝承载力较大导致试验过程中出现了试件上下部先于接缝处发生局部破坏的情况,因此研究中对试件粘贴钢板进行了加固。本研究在建模计算过程中发现,从单键齿试件开始,有限元计算就会出现上部结构局部破坏的情况,因此在键齿接缝试件中均对上下部两侧粘贴加

模型上下分别设置 10 mm 厚度的垫板,与试件采用捆绑连接(tie),底部垫板与参考点 RP-2 采用运动耦合(Kinematic coupling)连接,然后固结参考点 RP-2。

固钢板以避免局部破坏,如图 2 所示。钢板厚度根据相关研究设置为 8 mm,尺寸根据试件的上下部尺寸而定,即为 200 mm×600 mm,材料参数按照 Q345 钢材设置。钢板仅会增强试件上下部的局部强度,可以避免局部破坏,而不会影响有限元分析的结果,即只要粘贴的钢板可以避免局部破坏,钢板的厚度、尺寸和位置等参数不会影响接缝的破坏模式、承载能力和位移。

## 1.3 材料本构及塑性损伤模型

本研究中的钢筋采用理想弹塑性本构,试验模型中采用的钢筋型号为直径 12 mm 的 HRB400E 型钢筋,根据拉伸强度试验测得,屈服强度为 566.7 MPa,峰值强度为 673.7 MPa,应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )关系如图 3 所示,图中  $\epsilon_y$  和  $\epsilon_{tu}$  分别表示屈服应变和极限应变。

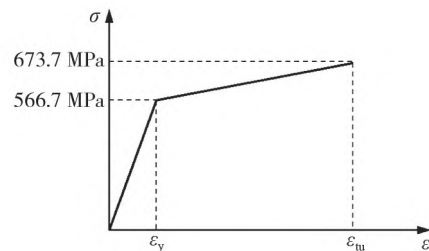


图 3 钢筋应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain curve of steel bars

结构的非线性分析需要选择合理的 UHPC 材

料的本构关系。在计算中,采用单波<sup>[10]</sup>提出的 UH-PC 本构关系,如式(1)所示。

$$\frac{\sigma}{f_c} = \begin{cases} ax + (6 - 5a)x^5 + (4a - 5)x^6 & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x - 1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:抗压强度  $f_c = 124.3 \text{ MPa}$ ;  $x = \varepsilon/\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0$  为峰值点应变,取  $\varepsilon_0 = 3\,500 \mu\varepsilon$ ;  $a$  为初始切线模量和峰值割线模量之比;初始切线模量  $E_c = 48 \text{ GPa}$ ;峰值模量  $E_{sec} = f_c/\varepsilon_0$ ;  $b$  为试验拟合参数,  $b = 2.41$ 。

UHPC 抗拉具有应变硬化特性,其受拉本构关系采用张哲等<sup>[11]</sup>提出的两阶段拉伸本构模型,见式(2)。

$$\sigma_t = \begin{cases} E_c \varepsilon_t & (0 \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{t0}) \\ f_t & (\varepsilon_{t0} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tp}) \\ \frac{f_t}{(1 + (\varepsilon_t - \varepsilon_{tp})l_c/w_p)^p} & (\varepsilon_{tp} < \varepsilon_t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:抗拉强度  $f_t = 6.7 \text{ MPa}$ ;极限拉应变  $\varepsilon_{tp} = 2\,000 \mu\varepsilon$ ;应力降低至  $2^{-p}f_t$  时的裂缝宽度  $w_p = 0.52 \text{ mm}$ ;截面特征长度  $l_c = 333.33 \text{ mm}$ ;拟合参数  $p = 0.98$ ;  $\varepsilon_{t0}$  为拉应变;  $\varepsilon_{t0} = f_t/E_c$ 。

根据上述公式可以得到 UHPC 的应力-应变关系,如图 4 所示。

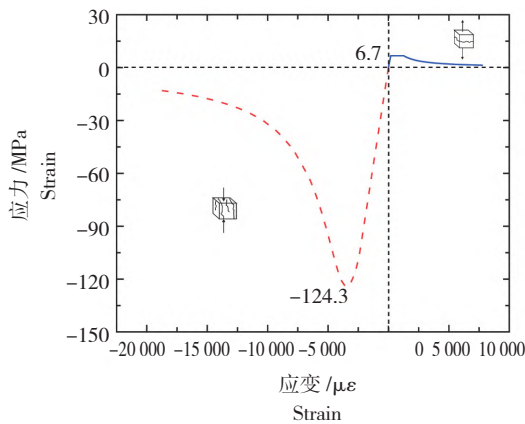


图 4 UHPC 应力-应变关系

Fig. 4 Stress-strain relation of UHPC

CDP 模型除了需要设置材料的应力-应变关系,其他塑性参数根据曹君辉<sup>[12]</sup>进行设置。另外,还需要设置 UHPC 的损伤因子,具体可以通过本构关系及 Sidiroff 能量等价原理换算推导确定。

无损材料的弹性余能( $W_0^e$ )计算公式如下。

$$W_0^e = \frac{\sigma^2}{2E_0} \quad (3)$$

等效有损材料弹性余能( $W_d^e$ )计算公式如下。

$$W_d^e = \frac{\sigma'^2}{2E_0} = \frac{\sigma^2}{2E_d} \quad (4)$$

$$E_d = E_0(1 - D)^2 \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得

$$\frac{\sigma^2}{2E_0(1 - D)^2} = \frac{\sigma^2}{2E_d} \quad (6)$$

进一步可以得到,

$$\sigma = E_0(1 - D)^2 \varepsilon \quad (7)$$

式中: $D$  为材料损伤度; $\sigma$  为应力; $\varepsilon$  为应变; $E_0$  为材料弹性模量; $\sigma'$  为有效应力; $E_d$  为材料损伤后的弹性模量。

相关文献对能量等价原理的应用进行了介绍,将理论分析与试验结果对比验证了该等价原理是可靠的,因而采用能量等价原理建立 UHPC 的损伤本构<sup>[12]</sup>。将式(7)变形可得

$$D = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \varepsilon}} \quad (8)$$

将前述 UHPC 受压和受拉应力-应变关系代入式(8),可得 UHPC 在受压和受拉状态下的损伤-应变关系。在软件中最终输入损伤度-非弹性应变关系,如图 5 所示。

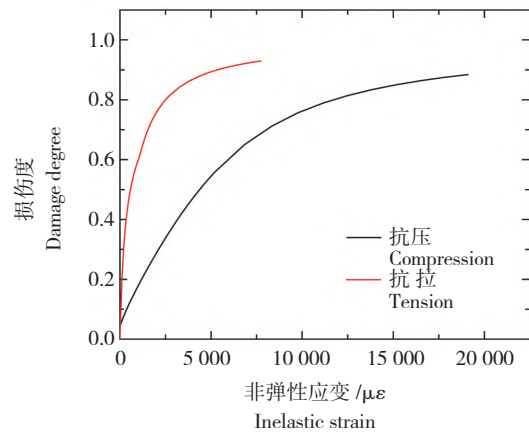


图 5 UHPC 损伤度-非弹性应变关系

Fig. 5 Damage-inelastic strain curve of UHPC

## 2 有限元结果与分析

### 2.1 平接缝

#### 1) 荷载-滑移曲线

平干接缝试件共有 4 个:F-1、F-2、F-3、F-4,试验参数是其侧向应力不同,分别为 6、12、18、24 MPa,各平干接缝模型的结果如图 6 所示。

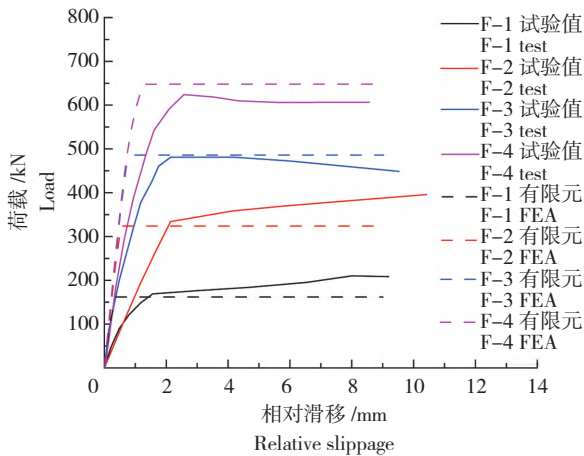


图6 平接缝荷载-滑移曲线  
Fig. 6 Load-slippage curve of flat joints

由图6可以看出,各个模型的试验值与有限元值趋势一致,但是有限元结果初始阶段的刚度略大,导致峰值荷载对应的相对滑移明显减小,这是因为拼装时接缝面没有完全契合,在加载初期,缝隙存在一个压实过程,这会使得试验结果明显大于有限元结果。对于后面其他试件而言也存在这一现象,但这并不会对最终承载力和基本受力特征产生影响,因此可用于分析讨论。对平干接缝而言,承载力基本与侧向压力的大小成正比,因此增加侧向压力的大小可以有效提高接缝承载力。

2) 试件损伤及破坏全过程

等效塑性应变 (Equivalent plastic strain, PEEQ) 是 ABAQUS 软件中评估材料塑性状态的关键指标,当其值大于零代表单元开始屈服,其值较大表示单元趋于破坏。对平接缝试件而言,接缝面并没有产

生损伤,试件属于摩擦失效。

2.2 单键齿接缝

1) 荷载-滑移曲线

单键齿接缝试件共有4个:K1-C2-0.5、K1-C2-1、K1-C2-1.5、K1-C2-2,试验参数是其侧向应力不同,分别为6、12、18、24 MPa,单键齿接缝结果如图7所示。由图7可知,除初始缺陷的压实过程导致有限元结果和初始刚度较大外,峰值荷载基本吻合。

2) 试件破坏全过程

根据计算结果可知,不同侧向压力下的单键齿试件具有类似的破坏特征,这里以试件 K1-C2-0.5,即侧向压力为6 MPa 的单键齿试件为例分析了其破坏过程,图8给出了该试件从屈服到破坏的全过程。试件阳齿根部首先进入塑性状态;随着荷载的增加,塑性区域开始沿键齿根部向上部开展;当试件破坏时,整个键齿根部区域几乎都进入塑性。

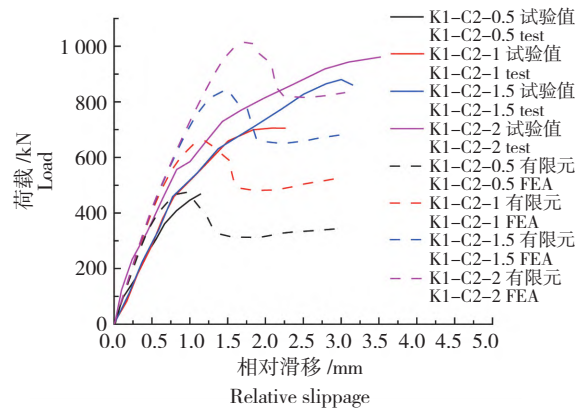


图7 单键齿荷载-滑移曲线  
Fig. 7 Load-slippage curve of single-keyed joints

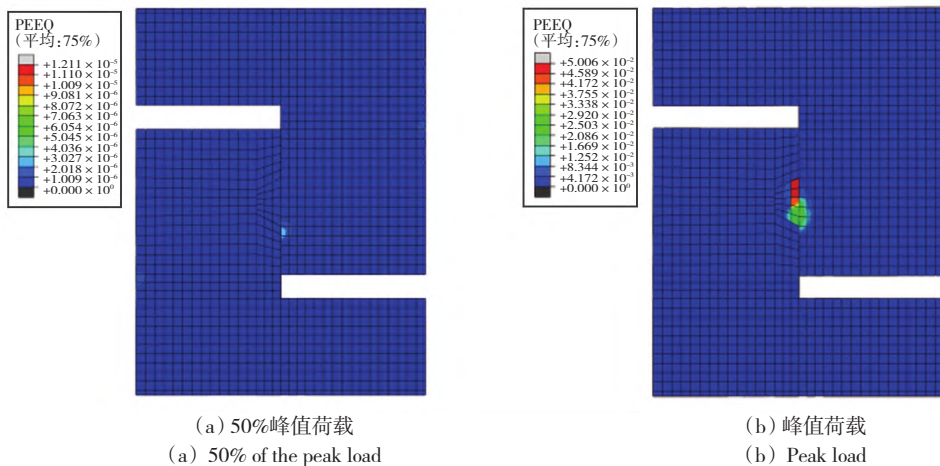


图8 单键齿模型等效塑性应变云图

Fig. 8 PEEQ distribution of single-keyed joints

相关研究表明混凝土键齿接缝直剪破坏通常属于抗拉破坏,即满足最大主拉应力破坏准则,因此需要关注试件在加载过程中的主拉应力变化,图 9 给出了单键齿试件在不同荷载下的主拉应力云图。由图 9 可知,荷载达到 50%峰值时键齿根部已经出现明显的应力集中现象;随着荷载继续增大,键齿根部及中部区域主拉应力明显增大;最后主拉

应力在整个键齿区域都达到一个较大值,伴随着键齿剪断,破坏随之发生。图 10 给出了单键齿试件在峰值荷载作用下剪切面受力云图,键齿上部有一定程度的张开,因此键齿上部接触应力小、下部接触应力大,键齿下部也承受更大的摩擦剪力,这也反映了单键齿试件从下往上逐渐发生破坏的总体受力特征。

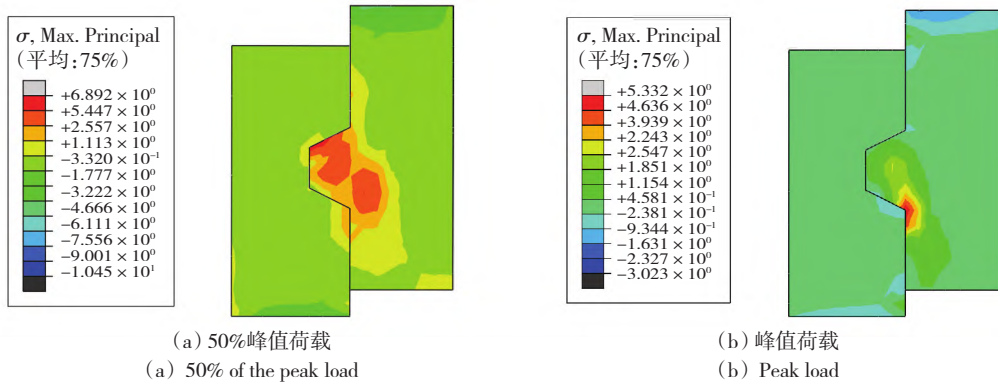


图 9 单键齿模型主拉应力云图

Fig. 9 Principle tensile stress of single-keyed joints

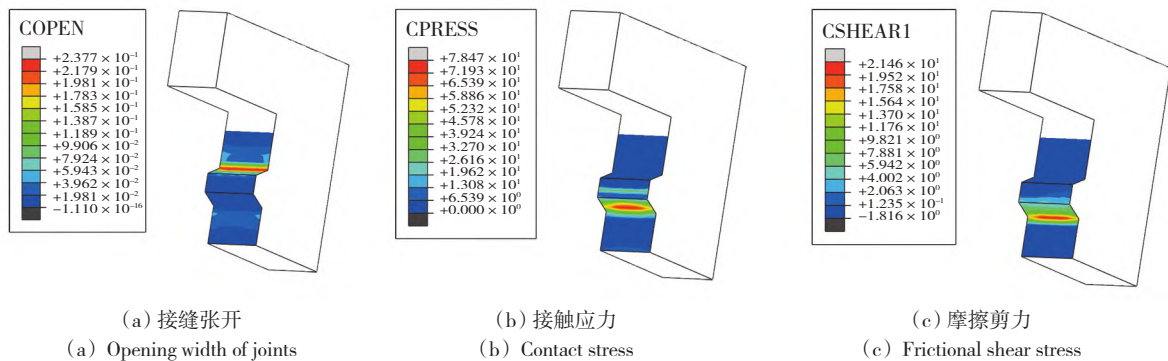


图 10 单键齿模型峰值荷载作用下剪切面受力云图

Fig. 10 Stress characteristics of shear plane for single-keyed joints

### 2.3 三键齿接缝

#### 1) 荷载-滑移曲线

三键齿接缝试件共有 4 个:K3-C2-0.1、K3-C2-0.2、K3-C2-0.5、K3-C2-1,试验参数是其侧向应力不同,分别为 1.2、2.4、6、12 MPa,各个模型的结果对比如图 11 所示。由图 11 可知,除了有限元结果曲线初始刚度较大外,峰值荷载基本吻合;三键齿干接缝试件的承载力与侧向压力也成正比;此外,增加键齿个数也可以提高 UHPC 接缝的极限承载力。

#### 2) 试件破坏全过程

根据计算结果可知,不同侧向压力下的三键齿

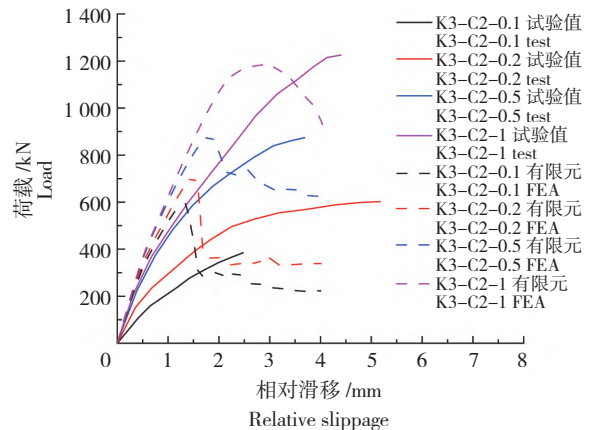


图 11 三键齿荷载-滑移曲线

Fig. 11 Load-slippage curve of three-keyed joints

试件具有类似的破坏特征,这里以试件 K3-C2-0.1,即侧向压力为 1.2 MPa 的单键齿试件为例分析了其破坏过程,图 12 给出了该试件从屈服到破坏的全过程。试件阳齿最下面的键齿根部首先进入

塑性状态,这对应着试验过程中首先在这一位置观察到裂缝开展;塑性区域随着荷载的增加开始沿着键齿根部向上部发展,并逐渐向上发展到每一个键齿根部;当试件破坏时,3 个键齿根部区域几乎都进入塑性。

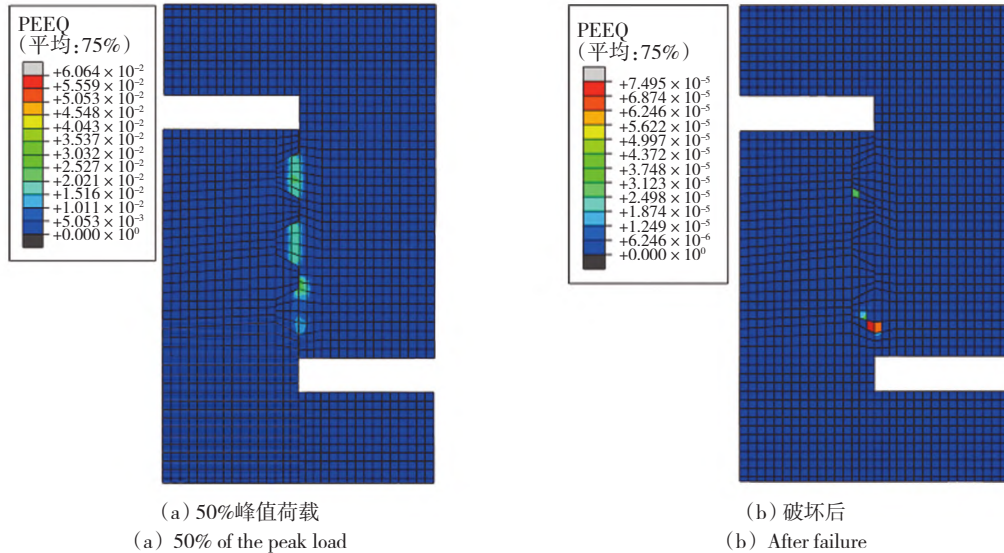


图 12 三键齿模型等效塑性应变云图

Fig. 12 PEEQ distribution of three-keyed joints

图 13 给出了三键齿试件在不同荷载下的主拉应力云图,由图 13 可知,3 个键齿的应力分布不均匀,阳齿下部键齿根部和阴齿最上部键齿根部在 50% 峰值荷载时就出现了较大的拉应力,且逐渐扩散。随着荷载继续增大,各键齿根部及中部区域主拉应力开始明显增大;主拉应力在 3 个键齿区域都

达到一个较大值,在剪切面附近形成应力集中,伴随着键齿剪断,破坏随之发生。图 14 给出了三键齿试件在峰值荷载作用下剪切面受力云图,由图 14 可知,对于三键齿试件,键齿上部有一定程度的张开,且最上部键齿的上侧面张开最大,而最下部键齿的下侧面张开最小;因此各个键齿的上侧接触应力小、下

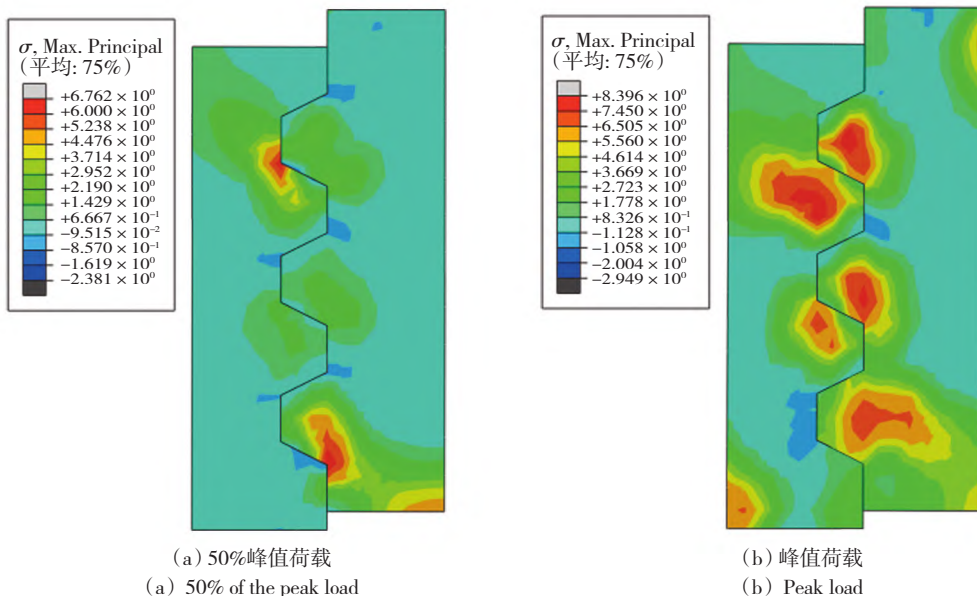


图 13 三键齿模型主拉应力云图

Fig. 13 Principle tensile stress of three-keyed joints

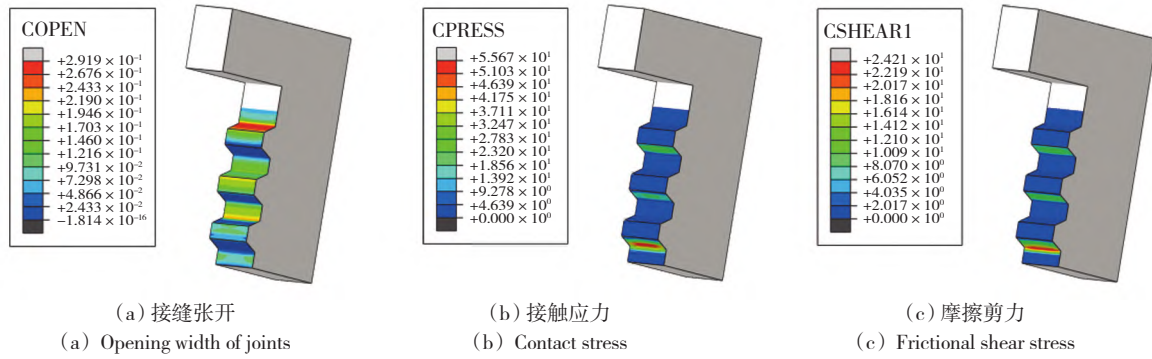


图 14 三键齿模型峰值荷载作用下剪切面受力云图

Fig. 14 Stress characteristics of shear plane for three-keyed joints

侧接触应力大,且越靠下,接触应力越大;同时,键齿下部也承受更大的摩擦剪力,其分布特点基本与接触应力的分布特征一致。各个键齿的应力分布不均匀,因此在其承载力的分析中需要考虑这一情况。

### 2.4 大键齿接缝

大键齿试件有 3 个,各键齿高度均为 300 mm,其区别是键齿根部的深度不同,分别是 50、100、150 mm,即键齿的深高比分别为 1 : 6、1 : 3 和 1 : 2, KD-C2-50-0.2 和 KD-C2-150-0.2 由于局部破坏及运输损坏,没有得到相应的试验结果,因此仅给出了 KD-C2-100-0.2,即键齿深度为 10 mm 的试验结果,这里给出了各试件的有限元模拟结果及试件 KD-C2-100-0.2 的结果,如图 15 所示。由图 15 可知,类似于其他试件,有限元结果表现出更大的刚度,但是峰值荷载十分接近;键齿深度对荷载-位移曲线的形状影响很小,模型的刚度和荷载-位移曲线下阶段趋势都基本类似;键齿深度越

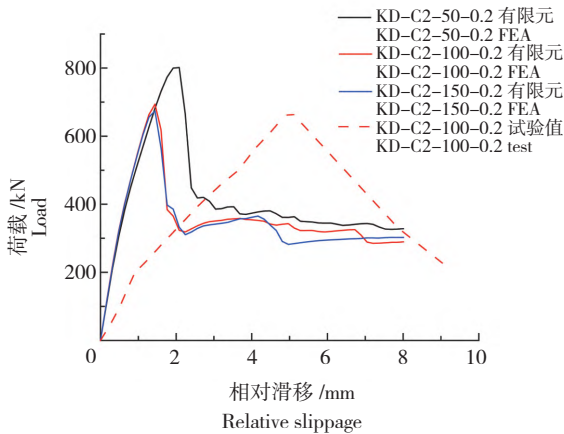


图 15 大键齿荷载-滑移曲线

Fig. 15 Load-slippage curve of big keyed joints

小,试件的承载力会更高,键齿的深高比为 1 : 6 的试件承载力最高,键齿深高比为 1 : 3 和 1 : 2 的试件承载则十分接近。大键齿试件的受力特征与单键齿结果类似。

为分析键齿配筋形式对 UHPC 大键齿干接缝受力的影响,参考研究中以深高比为 1 : 3 的大键齿 KD-C2-100-0.2 为基础另外设置了 2 种不同配筋形式的试件作为对照,包括 KD-C2-0.2-R1 和 KD-C2-0.2-R2,这里给出了各试件的有限元模拟结果及试件 KD-C2-100-0.2 的结果,如图 16 所示。配筋大键齿的破坏过程与无配筋大键齿试件类似,由图 16 可知,有限元模拟的结果基本一样,没有体现出不同配筋形式的特点;从试验结果看,R1 的配筋方式可以略微提升接缝的承载力和刚度;R2 这种配筋方式则对承载力和刚度影响很小,但是在一定程度上提高了 UHPC 接缝的延性。

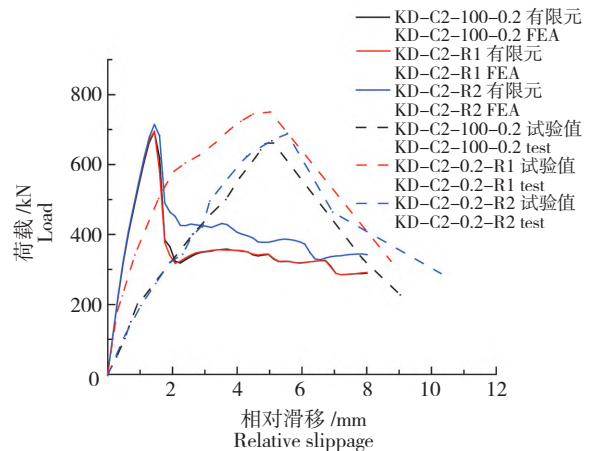


图 16 配筋大键齿荷载-滑移曲线

Fig. 16 Load-slippage curve of reinforced large-keyed joints

### 2.5 小结

表 2 列出了各个试件的有限元和试验结果的

对比情况,各个模型的试验值与有限元值之比的平均值为0.97,变异系数为0.107,表明本研究所建立的ABAQUS有限元模型可以有效模拟UHPC

干接缝在直剪荷载作用下的受力行为。除了试件K3-C2-0.1的试验值与有限元值之比较小之外,其他试件结果均十分接近。

表2 结果汇总  
Tab. 2 Summary of results

试件类型 Types of specimens	编号 Number	试验破坏荷载( $V_{test}$ )/kN Experimental failure load	有限元结果( $V_{FEA}$ )/kN FEA results	$V_{test}/V_{FEA}$
平接缝 Flat joint	F-1	169.0	162.0	1.04
	F-2	334.6	324.0	1.03
	F-3	481.7	486.0	0.99
	F-4	616.3	648.0	0.95
单键齿 Single-keyed joint	K1-C2-0.5	468.9	475.1	0.99
	K1-C2-1	707.2	660.8	1.07
	K1-C2-1.5	877.2	839.1	1.05
	K1-C2-2	956.4	1 016.4	0.94
	K3-C2-0.1	383.7	597.6	0.64
三键齿 Three-keyed joint	K3-C2-0.2	608.5	710.6	0.86
	K3-C2-0.5	878.2	877.3	1.00
	K3-C2-1	1 229.6	1 184.8	1.04
	KD-C2-50-0.2	—	801.4	—
大键齿 Large-keyed joint	KD-C2-100-0.2	667.7	693.6	0.96
	KD-C2-150-0.2	—	674.1	—
	KD-C2-0.2-R1	748.2	695.1	1.08
	KD-C2-0.2-R2	693.4	714.9	0.97

### 3 UHPC 干接缝直剪承载力计算分析

#### 3.1 规范公式

##### 1) 美国 AASHTO 规范公式<sup>[9]</sup>

美国 AASHTO (1999) 公式认为混凝土干接缝受力主要由键齿抗剪和接触面摩擦提供,表达式如式(9)所示。

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c} (0.996 + 0.2048\sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n \quad (9)$$

式中: $\sigma_n$  为接缝面有效正应力,MPa; $A_k$  为接缝面键齿抗剪面积,mm<sup>2</sup>; $A_{sm}$  为接缝面上摩擦面面积,mm<sup>2</sup>; $f'_c$  为圆柱体抗压强度标准值,MPa; $\mu$  为摩擦系数。

##### 2) 西班牙 ATEP 规范公式<sup>[13]</sup>

西班牙 ATEP 规范 (1996) 将键齿贡献划分为正应力作用的贡献增量和基体贡献两部分,其干接缝计算如式(10)所示。

$$V_j = A_k (1.14\sigma_n + 1.8\sqrt{f_{ck}}) + 0.6A_{sm}\sigma_n \quad (10)$$

式中, $f_{ck}$  为混凝土抗压强度标准值,MPa。

#### 3.2 学者建议计算公式

上述两规范公式均是针对普通混凝土接缝,近

年来,多国学者针对 UHPC 干接缝承载力提出计算公式如下。

##### 1) Voo 等<sup>[6]</sup>公式

马来西亚 Voo 等<sup>[6]</sup>基于莫尔应力圆原理,推导了 UHPC 干接缝的直剪强度如式(11)所示。

$$V_j = \mu A_{sm} \sigma_n + \sum_{i=1}^n A_{ki} \sqrt{(f_t + \frac{\sigma_n}{2})^2 - (\frac{\sigma_n}{2})^2} \quad (11)$$

式中: $A_{ki}$  为第  $i$  个键齿的剪切面面积; $f_t = 0.9f_{sp,u}$ ,  $f_{sp,u}$  为测得的 3 点弯曲极限抗拉强度。

##### 2) 刘桐旭<sup>[8]</sup>公式

刘桐旭<sup>[8]</sup>同样基于莫尔应力圆原理,推导了 UHPC 干接缝的直剪强度计算如式(12)一式(13)所示。

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c} (0.97 + 0.1\sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n \quad (12)$$

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c} [0.9 + (0.13 - 2.7 \times 10^{-4} f'_c) \sigma_n] + \mu A_{sm} \sigma_n \quad (13)$$

##### 3) 潘仁胜等<sup>[14]</sup>公式

潘仁胜等<sup>[14]</sup>基于有限元数据拟合和摩尔应力圆分析,提出了 UHPC 干接缝计算如式(14)所示。

$$V_j = \begin{cases} A_k(0.78\sqrt{f'_c} + 1.89\sigma_n) + \mu A_{sm}\sigma_n (\sigma_n \leq 3 \text{ MPa}) \\ A_k(1.01\sqrt{f'_c} + 0.95\sigma_n) + \mu A_{sm}\sigma_n (\sigma_n \geq 3 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (14)$$

### 3.3 本研究计算公式

从上述已有计算公式可知,其基本理论均基于材料力学的摩尔应力圆,这种方法虽然受力机理明确,但是混凝土材料强度值具有一定的随机性,且单个学者所具有的试验数据较少,往往具有一定局限性。本研究采用数理统计方法,拟合得到了适用于UHPC干接缝的计算公式。

从给出的接缝承载力计算公式及键齿干接缝的受力机理可知,干接缝直剪承载力模型可表示如下。

$$\text{模型一: } V_j = A_k \sqrt{f'_c} (C_1 + C_2 \sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n$$

$$\text{模型二: } V_j = A_k (C_1 \sqrt{f'_c} + C_2 \sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n$$

干接缝的抗剪承载力被分为键齿剪切力和摩擦力 2 个部分考虑,参数  $C_1$  反映的是混凝土强度对键齿抗剪的影响,参数  $C_2$  反映的是侧向压力对键齿抗剪的影响,两模型的区别是代表 UHPC 强度的  $\sqrt{f'_c}$  是在括号内还是外,其本质是反映了侧向压力  $\sigma_n$  和混凝土强度  $\sqrt{f'_c}$  的耦合作用。为方便计算,分析时摩擦系数  $\mu$  根据 AASHTO 取为 0.6。

这里收集了现有国内外 UHPC 干接缝试件的直剪数据:Shin<sup>[15]</sup>试件 10 个、Gopal 等<sup>[13]</sup>试件 6 个、Voo 等<sup>[6]</sup>试件 6 个和刘桐旭<sup>[8]</sup>试件 15 个,总计 37 个试件,正应力水平涵盖 1.2~25.23 MPa 范围,通过拟合得到 UHPC 干接缝承载力计算公式如下。

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c} (1.477 + 0.0534\sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n \quad (15)$$

$$V_j = A_k (1.5636\sqrt{f'_c} + 0.5797\sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n \quad (16)$$

不同计算公式的对比情况见表 3。

表 3 计算模型对比

Tab. 3 Comparison of calculated modes

公式 Formulae	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
模型一 Model I	1.05	0.33	0.32
模型二 Model II	1.06	0.35	0.33
AASHTO	1.27	0.34	0.27
ATEP	1.24	0.39	0.32
Voo et al <sup>[6]</sup>	0.65	0.15	0.23
刘桐旭 <sup>[8]</sup> Liu Tongxu <sup>[8]</sup>	0.87	0.22	0.25
潘仁胜 <sup>[14]</sup> Pan Rensheng <sup>[14]</sup>	0.87	0.21	0.24

由表 3 可以看出,AASHTO 规范和 ATEP 规范预测较为接近,偏于不安全;3 个学者提出的公式均偏于保守,设计计算时没有充分利用 UHPC 的材料强度,经济性较差;本研究给出的公式可以更为准确地预测 UHPC 干接缝的抗剪强度。

## 4 结论

本研究将节段预制 UHPC 桥梁中的干接缝作为研究对象,对其直剪性能开展了有限元分析,并对结果进行了分析讨论。同时,评价分析了已有干接缝的直剪强度计算公式的适用性和准确性,并根据计算模型拟合得到新的计算公式。得到主要结论如下。

1) 本研究采用的基于 CDP 理论的 ABAQUS 模型,可以较好地模拟 UHPC 干接缝在直剪荷载作用下的受力特征,各个模型的试验值与有限元结果之比的平均值为 0.97,变异系数为 0.107。

2) UHPC 接缝的承载力随着侧向压力、键齿数量的增加而增大;大键齿接缝的承载力与其键齿的深高比相关;键齿配筋对其受力性能影响较小。

3) 基于普通混凝土接缝的美国 AASHTO 公式和西班牙 ATEP 公式不能准确预测 UHPC 接缝的承载力,计算结果偏于不安全;学者提出的 UHPC 接缝计算公式预测结果偏于保守。

4) 本研究基于大量试验数据拟合得到的计算公式可以准确预测 UHPC 干接缝的直剪承载力,可以为节段预制 UHPC 装配式桥梁干接缝的设计计算提供参考。

## 【参 考 文 献】

- [1] GRAYBEAL B A. Material property characterization of ultra-high performance concrete[R]. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2006.
- [2] AHMED G H, AZIZ O Q. Shear strength of joints in precast posttensioned segmental bridges during 1959—2019, review and analysis[J]. Structures, 2019, 20: 527—542.
- [3] LEE C H, CHIN W J, CHOI E S, et al. An experimental study on the joints in ultra high performance precast con-

- crete segmental bridges[J]. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2011, 23(2): 235-244.
- [4] LEE C H, KIM Y J, CHIN W J, et al. Shear strength of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) precast bridge joint[M]// *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, Springer, Dordrecht, 2012: 413-420.
- [5] KIM H S, CHIN W J, CHO J R, et al. An experimental study on the behavior of shear keys according to the curing time of UHPC[J]. *Engineering*, 2015, 7(4): 212.
- [6] VOO Y L, FOSTER S J, VOO C C. Ultrahigh-performance concrete segmental bridge technology: Toward sustainable bridge construction[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(8): B5014001.
- [7] LIU T, 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.
- [8] 刘桐旭. 节段预制拼装 UHPC 梁接缝抗剪性能试验与理论研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- LIU T X. Experimental and theoretical research on shear behavior of joints in precast UHPC segmental bridges[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] AASHTO. Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges (second edition) [S]. Washington DC, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
- [10] 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.
- SHAN B. Experiment and research on the basic mechanical properties of reactive powder concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2002.
- [11] 张哲,邵旭东,李文光,等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(8): 50-58.
- ZHANG Z, SHAO X D, LI W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(8): 50-58.
- [12] 曹君辉. 钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- CAO J H. Research on basic performance of steel-thin UHPC lightweight composite deck [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [13] GOPAL B A, HEJAZI F, HAFEZOLGHORANI M, et al. Numerical analysis and experimental testing of ultra-high performance fibre reinforced concrete keyed dry and epoxy joints in precast segmental bridge girders[J]. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2019, 11(4): 463-472.
- [14] 潘仁胜,何伟伟,程灵霄,等. UHPC 大键齿干接缝直剪性能及尺寸参数分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(7): 129-137.
- PAN R S, HE W W, CHENG L X, et al. Direct shear behavior and dimensional parameter analysis of UHPC dry joint with big shear key[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(7): 129-137.
- [15] SHIN J. Ultra-high performance concrete (UHCP) precast segmental bridges[D]. Hamburg: Technische Universität Hamburg, 2016.