

装配式桥墩 UHPC 湿接缝的 剪切强度计算方法

周 救¹, 田兴旺¹, 朱国强¹, 马 雷²

(1. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 西安 710064; 2. 中交第二公路工程局有限公司, 西安 710064)

摘 要: 针对超高性能混凝土(UHPC)平湿接缝及键齿湿接缝直剪承载力的计算方法进行了研究, 结合 UHPC 湿接缝的构造及受力特点, 提出了包括界面黏聚力、摩擦力、键齿骨料黏结力及纤维贡献等关键项的 UHPC 湿接缝直剪强度模型。基于已有接缝试件直剪推出试验结果和有限元模拟结果, 经过线性回归分析, 确定界面黏结应力系数及摩擦因数, 通过对键齿骨料粘结力的推导和针对纤维贡献项的探讨, 给出了 UHPC 湿接缝的抗剪承载力计算公式。总结 9 种已有的 UHPC 湿接缝抗剪承载力计算公式, 将本文建议的直剪承载力计算模型、已有 9 种公式的预测承载力与试验值对比验证。结果表明: 随着侧向约束应力的增加, 平接缝的破坏荷载呈现非线性关系; 本文公式与试验值比值的平均值为 1.04, 与已有的 9 种公式相比更接近于 1, 由此可见, 本文公式的预测精度优于已有公式; 通过不同试验对 UHPC 湿接缝的抗剪承载力计算方法进行验证, 本文提出的直剪承载力计算方法的预测值与试验值吻合较好, 从而证明了计算方法的普适性, 并且可为 UHPC 键齿湿接缝界面的直剪承载力预测提供参考。

关键词: 桥梁工程; 超高性能混凝土; 湿接缝; 键齿; 直剪承载力

中图分类号: U443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3928-14

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240450

Direct shear strength of UHPC wet joints in precast piers

ZHOU Mi¹, TIAN Xing-wang¹, ZHU Guo-qiang¹, MA Lei²

(1. Key Laboratory for Old Bridge Detection and Reinforcement Technology of the Ministry of Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710064, China)

Abstract: The calculation methods for the direct shear carrying capacity of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) flat wet joints and keyed wet joints are investigated. By considering the construction and force-bearing characteristics of UHPC wet joints, a direct shear strength model for UHPC wet joints is proposed, which incorporates key factors such as interfacial cohesion, frictional resistance, aggregate interlock strength of keys, and fiber reinforcement contribution. Based on the results of direct shear tests on joint specimens and finite element simulation, linear regression analysis is conducted to determine the interfacial bond stress coefficient and friction coefficient. Through the derivation of the aggregate interlock

收稿日期: 2024-04-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978062); 陕西省重点研发计划项目(2024SF-YBXM-644); 山西省交通科技项目(2021-02-03); 陕西省交通科研项目(22-05K).

作者简介: 周救(1977-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 桥梁工程的抗震. E-mail: zhoumi@chd.edu.cn

strength of keys and the discussion on the fiber contribution, a formula for calculating the shear carrying capacity of UHPC wet joints is presented. Nine existing formulas for calculating the shear carrying capacity of UHPC wet joints are summarized, and the proposed direct shear carrying capacity calculation model is validated by comparing the predicted carrying capacity from the nine existing formulas with experimental values. The results indicate that with the increase in lateral confinement stress, the failure load of flat joints exhibits a nonlinear relationship; the ratio of the proposed formula to the experimental values has an average of 1.04, which is closer to 1 compared to the nine existing formulas, demonstrating superior prediction accuracy of the proposed formula. The verification of different experimental approaches on the shear carrying capacity calculation method for UHPC wet joints shows that the predicted values from the proposed direct shear carrying capacity calculation model align well with experimental values, thus proving the universality of the calculation method. This method can provide a reference for predicting the direct shear carrying capacity of UHPC keyed wet joint interfaces.

Key words: bridge engineering; ultra-high-performance concrete(UHPC); wet joints; keyed teeth; direct shear capacity

0 引 言

预制装配式桥墩具有环保、施工速度快、施工质量易控制的优点,降低了施工过程对交通及周围环境的影响,是桥梁智能建造的发展方向之一。预制节段间的接缝是影响装配式桥墩施工质量的重要部位,按照施工方法,接缝分为湿接缝、干接缝及胶接缝。湿接缝为将分块预制的预应力混凝土桥墩节段间采用现浇混凝土将节段连成整体的接缝;干接缝为将分块预制预应力混凝土桥墩节段通过预应力将节段连成整体形成的接缝;胶接缝为将分块预制预应力混凝土桥墩节段间通过特殊的黏合剂连成整体的接缝。

由于湿接缝对节段拼装精度要求较低,整体性好,因此墩柱节段间大多采用现浇湿接缝方式进行连接。同时,预制拼装桥墩的接缝按构造形式分为平接缝和键齿接缝,在接缝面和键齿根部受力复杂,易产生直剪破坏,且在湿接缝处材料基体不连续,增加了湿接缝连接的未知性,使桥墩节段间湿接缝成为影响预制拼装桥墩受力的关键环节。因此,对预制拼装桥墩节段间湿接缝处的抗剪性能开展研究是十分必要的。

自 20 世纪 50 年代以来,国内外诸多学者已经对预制拼装桥墩的接缝抗剪性能进行了一系列研究,Jones^[1]研究了预制后张预应力混凝土节段之间平湿接缝的力学性能及界面破坏模式,得到了相应界面的摩擦因数。Koseki 等^[2]开展了以接缝类型(湿接缝及胶接缝)和键齿形状(平接缝、单键齿及多键齿)为参数变量的混凝土接缝直剪试

验,指出 ACI 规范^[3]、PCI 计算手册均低估了键齿湿接缝试件的实际承载力,提出了湿接缝承载力的计算方法。Buyukozturk 等^[4]开展了 101 个接缝试件直剪试验,试验结果表明,胶接缝键齿试件抗剪承载力显著高于湿接缝键齿承载力。他们还总结了胶接缝和湿接缝的破坏特点及侧向应力和胶层厚度对试件承载力的影响,提出了湿接缝和胶接缝的抗剪承载力计算公式。Rombach^[5]公式则高估了多键齿湿接缝的抗剪承载力,并根据试验结果拟合出平胶接缝的抗剪承载力计算公式。卢文良^[6]通过对美国 AASHTO 规范^[7]中接缝抗剪承载力公式的机理和表达上的不足进行分析,给出了接缝直剪破坏的破坏模式和机理,以及预测接缝抗剪承载力的计算公式。王建超^[8]开展了考虑约束正应力水、接缝类型和键齿数量 3 个参数变量的试件直剪试验,并通过数值分析弥补试验试件数量的不足,建立了键齿破坏力学模型,提出了“均匀正应力作用下”的键齿接缝试件的抗剪承载力计算公式。邹琳斌等^[9-11]针对接缝类型、接缝构造形式、剪力键构造开展了接缝试件的直剪试验,并对美国 AASHTO 规范^[7]、日本预应力混凝土协会^[12]给出的接缝抗剪承载力计算公式及国内外学者给出的计算公式进行对比分析,基于摩尔应力圆推导了键齿湿接缝直剪承载力计算公式。闫泽宇^[13]开展了三组考虑键齿形式(平接缝、单键齿和三键齿)、侧向约束应力的超高性能混凝土(UHPC)胶接缝抗剪性能试验,通过回归分析,提出了 UHPC 胶接缝抗剪承载计算公式。

近年来,UHPC 因其优异的力学性能、抗疲

劳性能,以及其钢纤维的桥连作用能够有效抑制裂缝的发展,受到诸多研究人员的关注。Jiang 等^[14]设计并完成了针对 UHPC 接缝试件的直剪试验,研究提出了多键湿接缝的顺序破坏机制,并建议三键齿湿接缝抗剪强度计算公式的折减系数取 0.7。刘桐旭^[15]开展了针对不同强度普通混凝土及不同配纤率的 UHPC 湿接缝试件的直剪推出试验,对既有美国 AASHTO 规范公式^[7]进行了改进。同时,对纤维对接缝承载力的贡献机理进行讨论,提出了 UHPC 湿接缝抗剪承载力计算公式。但现有的计算方法还集中在普通混凝土的键齿接缝上,而不适用于 UHPC 接缝,且对 UHPC 接缝连接处的纤维桥连作用相关研究较少,需要进一步研究适用于 UHPC 湿接缝的抗剪承载力计算公式。

为此,本文通过探究预制节段间 UHPC 湿接缝构造发生剪切破坏的破坏机理,明确影响 UHPC 湿接缝抗剪性能的因素及其影响权重,确定了包括界面抗剪、键齿抗剪及纤维贡献 3 个影响因素在内的 UHPC 湿接缝直剪承载力计算模型,通过已有的试验数据及数值分析结果验证计算公式的正确性。然后,对既有接缝直剪公式,包括美国 AASHTO 规范公式^[7]及其他学者提出的计算公式进行统计,将本文计算理论值与既有公式的计算值、试验结果进行比较,提出适用于 UHPC 湿接缝连接构造的抗剪承载力计算公式,以供制定相关规范作为参考。

1 UHPC 湿接缝抗剪性能理论

1.1 UHPC 界面黏接机理

目前,国内外对新旧混凝土界面研究已较为成熟,因此 UHPC 界面的黏接机理可根据既有的新旧混凝土黏接模型来进行研究和分析。新旧混凝土黏接破坏并非仅发生于结合面处,而是在新旧混凝土结合面附近存在一个“黏接破坏区”,该破坏区由新混凝土、黏接界面和旧混凝土所构成,成为新混凝土与旧混凝土的黏接过渡层。新旧混凝土黏结能力取决于过渡层混凝土的力学性能和微观构成。无抗剪钢筋的新老混凝土结合面在受力加载过程中,两种不同混凝土材料之间主要通过黏接力来抵抗竖向荷载,当黏接过渡层混凝土抗剪承载力达到极限荷载时,界面便会发生突然的脆性破坏^[16]。

在 UHPC 接缝的试验研究中,往往会在 UH-

PC 界面处发生破坏,而界面处在被破坏时会受到剪压拉弯等复杂应力作用。其中剪切应力起到主要作用。因此,界面黏接强度直接影响了接缝强度的大小。根据国内外学者关于 UHPC 接缝界面粘接性能开展的一系列研究工作^[17-19]可知,影响 UHPC 界面粘接性能的主要因素有 UHPC 材料强度和龄期、黏接角度、界面剂、界面粗糙程度等^[20],其中,界面粗糙程度是影响 UHPC 界面粘接性能的重要因素^[21]。

对 UHPC 界面黏接强度的理论计算,美国 AASHTO 规范^[7]同时考虑了摩擦力、界面黏聚力及钢筋抗剪作用的影响,其界面黏接强度计算公式为:

$$V_u = cA_{cv} + \mu(P_c + f_y A_s) \quad (1)$$

式中: A_{cv} 为界面混凝土面积, mm^2 ; P_c 为垂直于界面方向上的压力,N; f_y 为抗剪钢筋屈服强度,MPa; A_s 为抗剪钢筋截面面积, mm^2 ; c 为黏接应力,MPa; μ 为界面间摩擦因数。其中,黏接应力 c 和摩擦因数 μ 是反映界面黏接特性的主要参数,对两种不同材料相接处界面, c 和 μ 的取值需通过界面试验结果确定。

1.2 键齿接缝传力、破坏机理及其剪切抗力

根据已有的键齿接缝直剪试件键齿位置处破坏情况分析可知,如图 1 所示,键齿在竖向荷载的作用下会沿键齿上斜面产生水平正应力 n 和竖向剪切应力 v ,在两个方向应力的共同作用下,可以等价转换为正交于键齿上斜面的方向上的一个压应力 f 。随着加载的进行压应力不断加大,键齿上斜面根部混凝土首先开始出现裂缝,裂缝发展方向垂直于键齿上斜面,当加载继续进行,键齿内部形成斜压杆受力状态,不断出现短小细微平行的斜裂缝,最终裂缝贯通形成破坏面,试件发生类似于混凝土棱柱体压溃的斜压破坏^[22]。

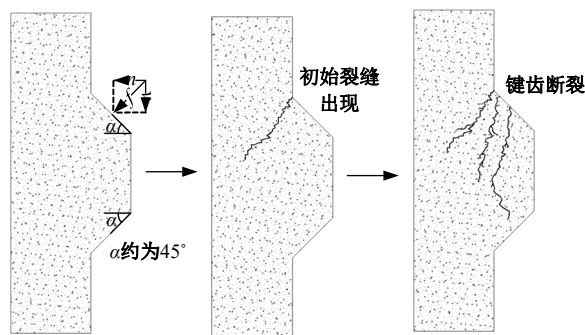


图 1 键齿接缝受力状态及破坏过程

Fig. 1 Stress state and failure process of keyed joints

在竖向剪切荷载作用下,键齿根部处混凝土主拉应力超过其混凝土极限抗拉强度,从而产生裂缝^[23]。提取键齿内一个单元体进行平面应力状态分析,如图 2 所示,其中 σ_x 、 σ_y 为正应力; τ_x 、 τ_y 为切应力; α 为主应力平面的方位角。当键齿出现裂缝达到极限承载状态时,键齿单元体对应摩尔应力圆如图 3 所示,其主拉应力值为极限抗拉强度值 f_t 。

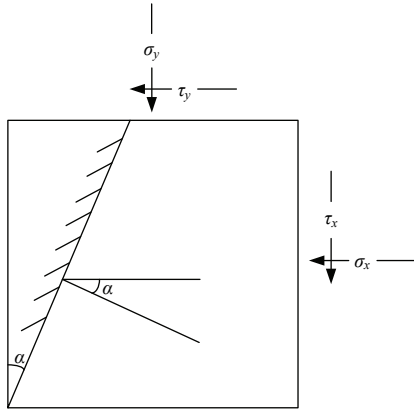


图 2 键齿单元体平面应力状态

Fig. 2 Plane stress state of keyed element body

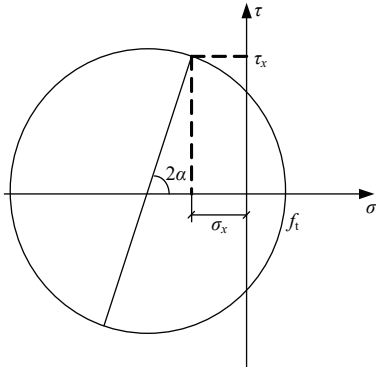


图 3 键齿微元体摩尔应力圆

Fig. 3 Mohr's stress circle of keyed micro element

由图 3 摩尔应力圆中的几何关系可得:

$$\frac{\tau_x}{\sin 2\alpha} = \frac{\tau_x}{\tan 2\alpha} + \sigma_x + f_t \quad (2)$$

根据单元体内的切应力互等定理及横向应力关系可得:

$$\tau_x = \tau_y = \tau \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sigma_n \quad (4)$$

式中: σ_n 为试件横向约束应力。

联立以上各式可得:

$$\tau = \frac{\sin 2\alpha}{1 - \cos 2\alpha} (f_t + \sigma_n) \quad (5)$$

混凝土轴心抗压强度 f_t 与立方体轴心抗压强度 f_{cu} 间的关系,经验公式如下:

$$f_t = 0.26 f_{cu}^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

将其代入式(5),可得:

$$\tau = \frac{(0.26 f_{cu}^{\frac{2}{3}} + \sigma_n)}{\tan \alpha} \quad (7)$$

1.3 纤维对基体承载力的贡献

为了计算有效纤维分布区域(Effective fiber distributed region, EDR)中纤维拔出对抗剪承载力的贡献,引入了纤维贡献项的计算方法,采用 Qi 等^[24]提出的一种考虑 UHPC 中纤维分布、埋入长度及纤维与裂缝的夹角的纤维-基体分离抗剪模型来计算接缝的纤维贡献项。本文在此基础上假设各类型纤维贡献相互不影响,明确单根纤维的黏结拉力 F ,将其代入式(8)~(11)^[25],得到了适用于 UHPC 的直剪承载力纤维贡献项的计算公式。

$$V_f' = \frac{n_0}{n_c} \sum F_y \cos \theta = \frac{8\rho_f F w_e \cot \theta}{\pi^2 l_f d_f^2} \quad (8)$$

式中: n_0 为 EDR 区域内的纤维数量; n_c 为纤维在一圆周内(纤维角度从 0 变化到 π)的分布数量; F_y 为纤维断裂垂直于裂缝平面的分力; θ 为裂缝与水平方向夹角; ρ_f 为纤维体积掺量; F 为纤维黏结力; w_e 为 EDR 区域的宽度; d_f 为纤维直径; l_f 为纤维长度。

$$n = \frac{\rho_f b d w_e}{\left(\frac{d_f}{2}\right)^2 \pi l_f \sin \theta} \quad (9)$$

式中: b 为 EDR 区域厚度; d 为 EDR 区域高度。

$$w_e = l_f - \sqrt{\frac{0.48 l_f}{d_f}} \quad (10)$$

$$n_c = \frac{\pi l_f}{2 d_f} \quad (11)$$

对纤维的拉拔侧,纤维将从埋置长度较短的裂缝一侧拔出,因此最大嵌入长度为 $\frac{l_f}{2}$ 。假设纤维分布均匀且互不影响,根据连续性均匀分布概率模型,第 i 根纤维的嵌入长度 $l_{e,i}$ 表示为:

$$l_{e,i} = \frac{U l_f}{2}, \quad U \in (0, 1) \quad (12)$$

式中: U 为第 i 根纤维嵌入长度为 l_e 的概率。

在裂缝开展时,由于裂缝宽度及开裂角度的影响,桥连裂缝的纤维两端会产生一个夹角,如图 4 所示。假设原纤维与弯折后纤维的夹角为 θ ($\theta' \in [1^\circ, 45^\circ]$),基于材料力学中力与应力关系,

第 i 根纤维的黏结力 F_i 如下式所示:

$$F_i = \frac{\tau_b \pi d_f l_{e,i}}{\tan \theta'} \quad (13)$$

式中: τ_b 为单个纤维与基体之间的黏结强度, 如果没有测量值, 则光滑纤维取 10 MPa, 钩状或高强度扭曲钢纤维取 42 或 47 MPa^[26]。

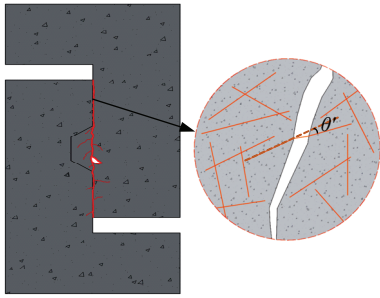


图 4 裂缝中钢纤维转角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of steel fiber corner in crack

假设 EDR 中有 n 根不同嵌入深度的纤维, 嵌入深度从 0 到 $\frac{l_f}{2}$, 折角 θ' ($\theta' \in [1^\circ, 45^\circ]$)。由于纤维分布均匀, 不同嵌入深度及不同折角角度的概率相同, 因此可以通过所有纤维的平均黏结力来计算单个纤维的黏结强度 θ' :

$$F = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{\theta'=1^\circ}^{45^\circ} F_{i,\theta'} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{\theta'=1^\circ}^{45^\circ} \frac{\tau_b \pi d_f l_{e,i}}{\tan \theta'} = \frac{37 \tau_b \pi d_f l_f}{4} \quad (14)$$

1.4 UHPC 湿接缝抗剪承载力计算公式

根据上述 UHPC 湿接缝连接抗剪机理, 结合相关规范^[7]及文献^[27], 可将 UHPC 湿接缝抗剪承载力分为接缝界面抗剪阻力、键齿抗剪能力及纤维贡献项 3 部分:

$$V_u = V_k + V_f + V_f' \quad (15)$$

式中: V_u 为 UHPC 湿接缝抗剪承载力, kN; V_k 为键齿抗剪能力, kN; V_f 为界面抗剪阻力, kN; V_f' 为纤维贡献项, kN。

(1) 键齿抗剪力部分

键齿抗剪力主要与混凝土材料性能和水平约束正应力值有关, 故基于式(7)的形式, 并取 $\alpha = 45^\circ$ ^[28]得出下式(16):

$$V_k = A_k \tau = \gamma A_k \left(0.26 f_{cu}^{\frac{2}{3}} + \sigma_n \right) \quad (16)$$

式中: A_k 为键齿根部面积, mm²; γ 为键齿折减系数, 单键齿取 1, 双键齿取 0.8^[4], 三键齿取 0.7^[29]; f_{cu} 为混凝土立方体抗压标准值; σ_n 为横向约束正

应力, MPa。

(2) 界面抗剪阻力部分

在 UHPC 湿接缝连接中, 界面抗剪阻力包括界面黏结力以及界面表面摩擦力。其中, 摩擦力与水平约束正应力相关^[27], 可得到式(17):

$$V_f = c A_{sm} + \mu \sigma_n A_j \quad (17)$$

式中: c 为界面黏聚应力, MPa; A_{sm} 为接缝面平整部分面积, mm²; μ 为摩擦因数; A_j 为接缝面总面积, mm²。

(3) 纤维贡献力部分

对于 UHPC 湿接缝连接构件, 取临界斜裂缝的倾角 θ 为 45° , 故纤维贡献项 V_f' 可由下式计算:

$$V_f' = \frac{8 \rho_f F \cot \theta \left(l_f - \sqrt{\frac{0.48 l_f}{d_f}} \right)}{\pi^2 l_f d_f^2} \quad (18)$$

$$F = \frac{37 \tau_b \pi d_f l_f}{4} \quad (19)$$

式中: θ 为裂缝与水平方向夹角; ρ_f 为纤维体积掺量; F 为纤维黏结力, kN; d_f 为纤维直径, mm; l_f 为纤维长度, mm。

2 界面抗剪阻力的确定

2.1 算例 1 界面黏聚应力及摩擦因数参数的取值

刘桐旭^[15]完成了 UHPC 平接缝、单键齿和多键齿等多组试件的直剪承载力试验。本文采用 ABAQUS 6.14 通用有限元程序对文献^[15]中平接缝试件进行数值模拟分析, 为拟合界面黏聚应力 c 及摩擦因数 μ 的确定提供数据基础, 通过线性拟合获得 UHPC 接缝界面抗剪阻力表达式。

2.1.1 有限元模型建立

文献^[15]中首先进行 UHPC 平接缝试件下部节段的预制, 然后对下部节段进行处理并进行二次支模, 浇筑 UHPC 平接缝试件的上部节段。为了获取不同横向约束下的平接缝试件的破坏荷载, 本文建立了 UHPC 平接缝的实体有限元分析模型, 对不同侧向应力 (3、6、12、24 MPa) 的接缝进行加载分析, 模型尺寸及有限元分析模型如图 5 所示。本模型中 UHPC 采用 C3D8R 实体单元, 钢筋采用 T3D2 桁架单元, 钢筋与 UHPC 混凝土通过“内嵌区域(embedded region)”命令形成整体。UHPC 接触模拟需考虑黏聚力作用, 通过定义接触中黏接行为属性(cohesive surface)建立黏

聚力模型。图 6 为黏聚力模型在法向和切向上的双线性本构关系,上升段斜率为接触面刚度 K ,峰值点纵坐标值为接触面黏结强度 t^0 ,横坐标为接触面失效起始位移 δ^0 ,下降段重点横坐标为接触面失效极限位移 δ^f ,双折线与横坐标轴形成的面积为 G^C , n, s, r 分别代表法向 n 、切向 s 、切向 r 。试件模型加载分析共分为侧向约束施加和竖向荷载施加两个阶段。

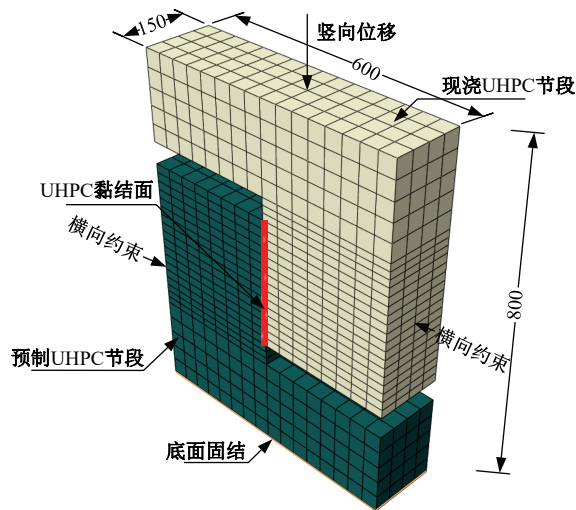


图 5 三维有限元分析模型

Fig. 5 Three-dimensional finite element analysis model

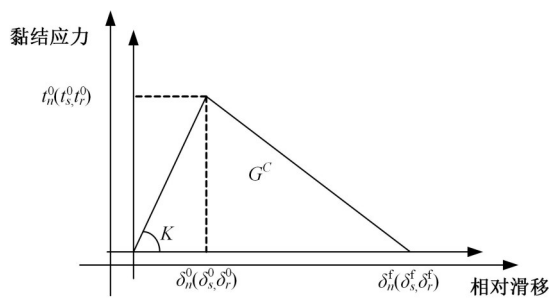


图 6 黏结应力-位移双线性本构模型

Fig. 6 Bonding stress-displacement bilinear constitutive model

2.1.2 有限元计算结果验证分析

将直剪试件有限元模拟结果与文献[15]试验结果进行对比(见表 1),可以看出有限元模拟的直剪试件破坏荷载以及破坏时的竖向位移与试验结果相比较接近,且破坏时竖向位移模拟值比试验值小。

图 7 为 4 种不同横向约束下有限元模拟与试验值的荷载位移曲线的对比图。从图中可以看出,相同横向约束应力下两条曲线发展变化规律一致,曲线荷载峰值及对应位移几乎相同;在不同横向约束应力下,试件抗剪承载力随横向约束应

表 1 不同侧向约束下试验值和有限元计算结果对比

Table 1 Comparison of test values and finite element calculation results under different lateral constraints

试件编号	破坏荷载/kN		破坏时竖向位移/mm	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
F-1	169.00	157.00	1.73	1.29
F-2	334.60	332.90	2.57	1.14
F-3	481.70	489.13	2.18	1.14
F-4	646.30	643.25	2.65	1.62

注:试件编号方法为 F(flat joint)-n(试件顺序号)。

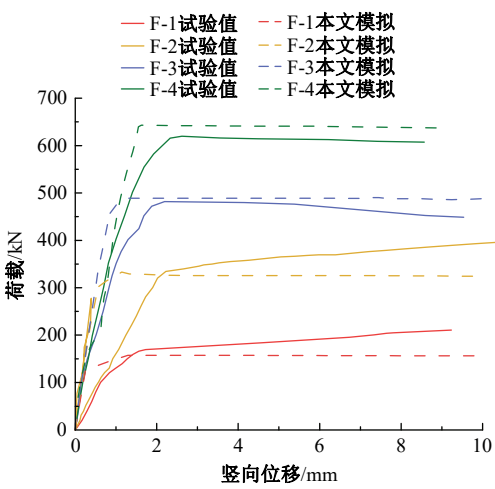


图 7 荷载-竖向位移曲线有限元计算值与试验值比较

Fig. 7 Load relative slip curves for the comparison of simulation and test

力的提高而增大。通过上述两点,验证了本文有限元模型建立方法的正确性。

通过对图 7 中试验数据与有限元分析结果的对比可以发现,有限元计算值在弹性阶段的刚度明显高于试验值,从而导致峰值荷载处的竖向位移明显减小。产生这种现象的主要原因是接缝间拼装,以及试验过程中接缝劈裂产生的混凝土碎屑导致接缝面咬合不完全充分,存在的一些间隙在试验过程被压实(如局部混凝土凸起的压碎),使试验竖向位移大于有限元值。

2.1.3 界面黏聚应力 c 及摩擦因数 μ 的确定

UHPC 界面抗剪阻力部分^[27]:

$$V_f = cA_{sm} + \mu\sigma_n A_j \tag{20}$$

从式(20)中可知,UHPC 界面间抗剪阻力包括界面黏结力及混凝土表面摩擦力,其相关影响系数为黏结应力和摩擦因数,基于有限元模型获得的数据(见表 2)分析求解得到。

对平接缝试件,接缝平整面面积即为接缝面

表 2 平接缝试件直剪有限元计算结果汇总

Table 2 Summary of finite element calculation results for direct shear of flat seam specimens

约束应力 /MPa	破坏荷载 /kN	约束应力 /MPa	破坏荷载 /kN
1	75.00	10.5	433.75
1.5	90.90	11	448.20
2	102.00	11.5	460.73
2.5	126.90	12	489.13
3	157.00	13	501.30
3.5	171.90	14	513.45
4	198.00	15	525.15
4.5	220.50	16	540.00
5	246.00	17	553.05
6	334.60	18	566.10
6.5	342.90	19	579.60
7	356.80	20	592.20
7.5	369.45	21	604.80
8	383.13	22	616.95
8.5	396.00	23	630.00
9	408.04	24	643.25
10	419.85		

总面积($A_j = A_{sm}$)。因此,在线性拟合过程中,可将式(20)转换为:

$$\tau = \frac{V_f}{A_j} = c + \mu \sigma_n \quad (21)$$

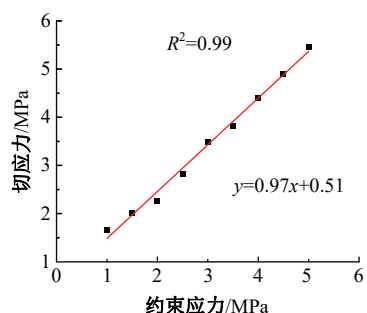
由于在不同侧向约束下,平接缝的破坏荷载呈现非线性关系,按斜率变化分为1~5 MPa、6~11.5 MPa和12~24 MPa三段,将其视为线性变化,平接缝模拟数据线性拟合结果如图8所示。

最后,将线性拟合结果代入式(21)可得到UHPC界面抗剪阻力公式:

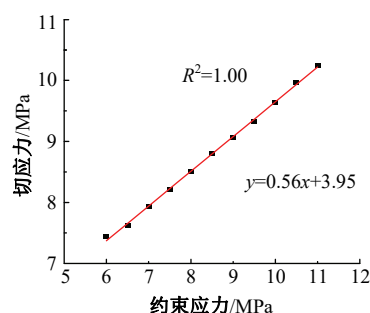
1~5 MPa段:

$$V_f = 0.97\sigma_n A_j + 0.51A_{sm} \quad (22)$$

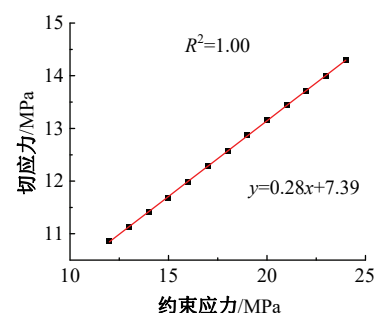
6~11.5 MPa段:



(a)约束应力1~5 MPa数据拟合



(b)约束应力6~11.5 MPa数据拟合



(c)约束应力12~24 MPa数据拟合

图 8 平接缝试件抗剪承载力数据拟合

Fig. 8 Fitting of shear capacity data of flat joint specimens

$$V_f = 0.56\sigma_n A_j + 3.95A_{sm} \quad (23)$$

12~24 MPa段:

$$V_f = 0.28\sigma_n A_j + 7.39A_{sm} \quad (24)$$

因此,将式(16)、(18)、(19)、(22)、(23)、(24)代入式(15),可得考虑键齿抗剪承载力 V_k 、界面抗剪阻力 V_f 和纤维黏结力 V'_f 的UHPC湿接缝抗剪承载力 V_u 计算式:

$$V_u = V_k + V_f + V'_f = \gamma A_k \left(0.26f_{cu}^{\frac{2}{3}} + \sigma_n \right) + \frac{74\rho_f \tau_b \cot \theta \left(l_f - \sqrt{\frac{0.48l_f}{d_f}} \right)}{\pi d_f} + \begin{cases} 0.97\sigma_n A_j + 0.51A_{sm} (1 \leq \sigma_n \leq 5) \\ 0.56\sigma_n A_j + 3.95A_{sm} (6 \leq \sigma_n \leq 11.5) \\ 0.28\sigma_n A_j + 7.39A_{sm} (12 \leq \sigma_n \leq 24) \end{cases} \quad (25)$$

2.2 算例 2 界面黏聚应力及摩擦因数参数的取值

为探究不同UHPC强度下UHPC湿接缝连接的抗剪性能,作者所在的课题组于2021年设计并完成了6组UHPC湿接缝试件的直剪承载力试验^[30]。本节在此基础上,通过对其进行数值模拟,从而获得对应的界面黏聚应力 c 及摩擦因数 μ 。

为实现对UHPC湿接缝直剪试验的有限元模拟,本文通过Abaqus建立了与试验试件相一致的有限元模型,模型建立方法与2.1节类似,UHPC平湿接缝试件尺寸图及有限元模型如图9和图10所示。为兼顾考虑模型计算精度和效率,模型网格划分采用全局布种与局部布种相结合的方式,在UHPC湿接缝附近单元网格划分较密,网格尺寸为7.5 mm,而在其他部分处单元网格划分较疏,网格尺寸为15~30 mm。

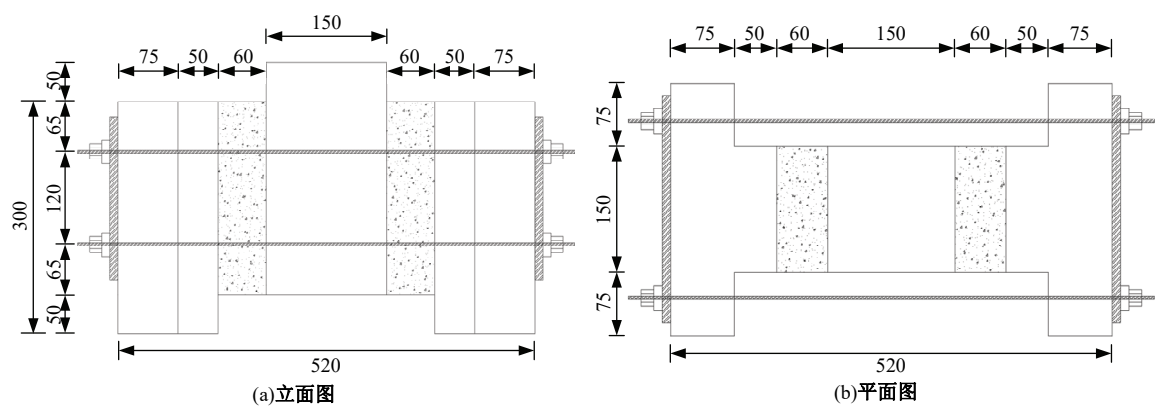


图 9 平接缝试件整体尺寸图(单位:mm)
Fig. 9 Overall dimension diagram of flat joint specimen (unit: mm)

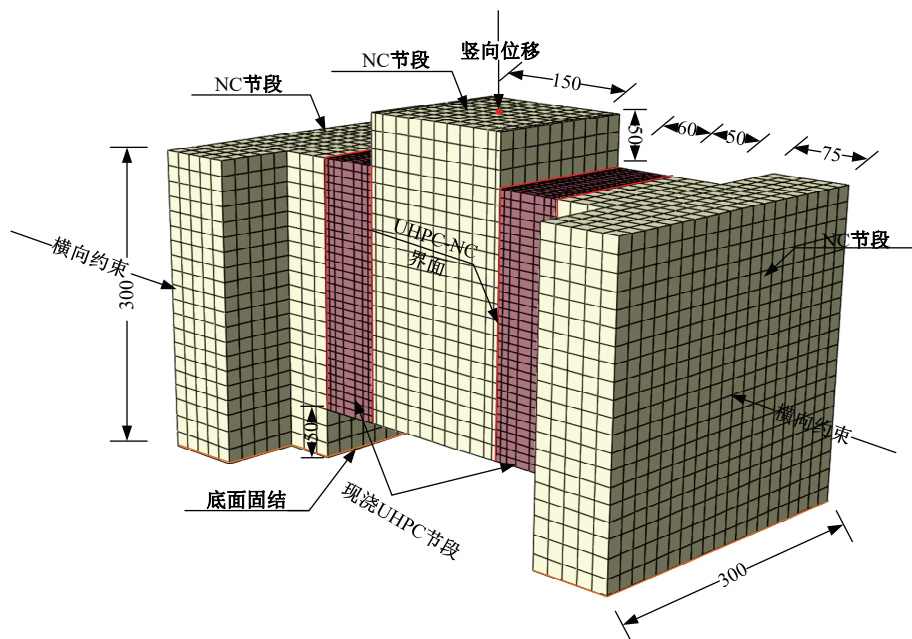


图 10 三维有限元分析模型
Fig. 10 Three-dimensional finite element analysis model

其中,UHPC-NC 界面采用 Hussein 等^[31] 经过试验验证黏聚力模型来模拟,黏聚力模型具体参数如表 3 所示。

将直剪试件有限元模拟结果与试验结果进行对比(表 4),可以看出有限元模拟的直剪试件破

坏荷载以及破坏时的竖向位移与试验结果相比较接近。其中,有限元模型破坏荷载模拟值略大于试验值(图 11)。

表 4 试验实测值与有限元结果对比

Table 4 Comparison between test results and finite element results

Table 3 Cohesive model parameters			
属性	法向 n	切向 s	切向 r
$K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	1 358	20 358	20 358
t/MPa	5.63	5.63	5.63
δ_0/mm	4.14e-3	2.77e-4	2.77e-4
δ_f/mm	0.241	0.241	0.241
稳定系数	0.001		

试件编号	破坏荷载/kN		破坏时竖向位移/mm	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
F-0 MPa	151.68	167.72	0.84	0.79
F-1 MPa	308.59	334.31	1.33	1.11
F-2 MPa	431.42	449.39	1.46	1.20
F-3 MPa	564.71	575.34	1.53	1.34

注:试件编号方法为 F(flat joint)- n (试件横向约束力)。

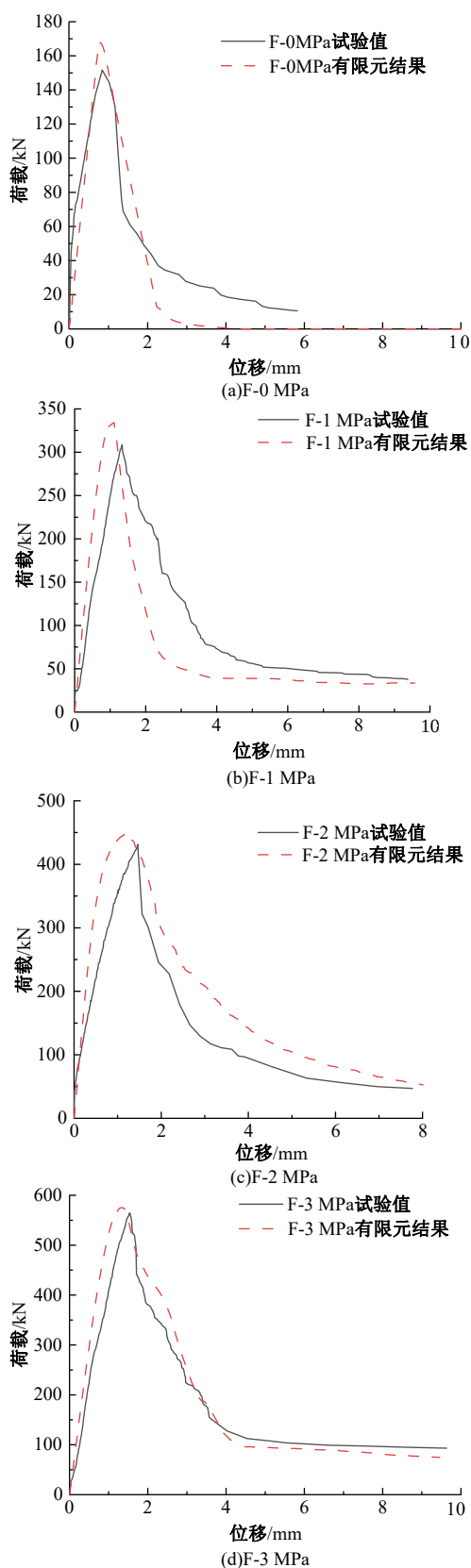


图 11 荷载-位移曲线:试验值与有限元结果对比图

Fig. 11 Load displacement curve: comparison between experimental values and finite element results

基于上述 UHPC 平湿接缝试件有限元模型得到不同横向约束下试件破坏荷载,如表 5 所示。

表 5 平接缝试件直剪有限元计算结果汇总

Table 5 Summary of finite element calculation results for direct shear of flat seam specimens

约束应力 /MPa	破坏荷载 /kN	约束应力 /MPa	破坏荷载 /kN
0.0	167.72	2.0	449.39
0.5	257.24	2.3	479.14
1.0	334.31	2.6	519.85
1.3	364.21	3.0	575.34
1.6	409.35		

根据式(21)将表 2 数据进行线性拟合,拟合结果如图 12 所示,得到 UHPC 界面抗剪阻力公式:

$$V_f = 1.74\sigma_n A_j + 2.51A_{sm} \quad (26)$$

将式(26)代入式(15),可得 UHPC 湿接缝抗剪承载力 V_u 计算式:

$$V_u = V_k + V_f + V_f = \gamma A_k \left(0.26f_{cu}^{\frac{2}{3}} + \sigma_n \right) + 74\rho_f \tau_b \cot \theta \left(l_f - \sqrt{\frac{0.48l_f}{d_f}} \right) + 1.74\sigma_n A_j + 2.51A_{sm} \quad (27)$$

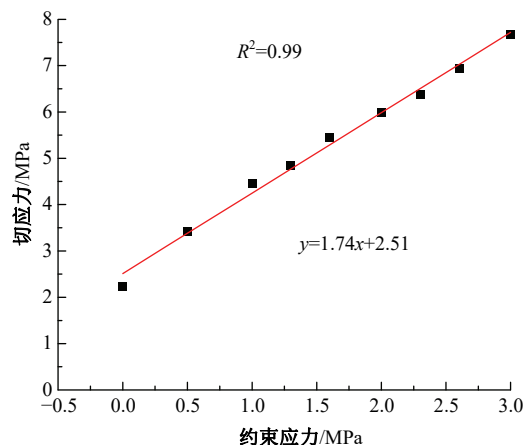


图 12 平接缝试件抗剪承载力数据拟合

Fig. 12 Fitting of shear capacity data of flat joint specimens

3 公式验证及对比分析

3.1 UHPC 湿接缝抗剪承载力公式验证

根据文献[15]、[30]试验中的键齿试件尺寸信息,如表 6、表 7 所示,材料及试验信息如表 8、表 9 所示,将其代入式(25)中,可得到各个试件的预测承载力,如表 8 所示。由表 8 可知,各 UHPC 试

件的直剪承载力计算值与试验值吻合较好。其中,文献[15]中的试件的预测值与实验值的误差范围为 0.26%~7.83%,文献[30]中的试件的预测值与实验值的误差为 13%~19%。产生原因是其 UHPC 平接缝试件试验时横向约束选择较为保守,导致在横向约束较大时的 UHPC 键齿接缝试件预测值偏大。

表 6 文献[15]中的试件尺寸汇总

Table 6 Summary of specimen size

试件类型	接缝平整面 积/mm ²	键齿根部面 积/mm ²	接缝面总面 积/mm ²
单键齿试件	30 000	15 000	51 213.2
三键齿试件	30 000	45 000	138 639.6
	30 000	45 000	88 713.2
大键齿试件	30 000	45 000	93 541.0
	30 000	45 000	102 811.5

表 7 文献[30]中的试件尺寸汇总

Table 7 Summary of specimen size

试件类型	接缝平整面 积/mm ²	键齿根部面 积/mm ²	接缝面总面 积/mm ²
单键齿试件	60 000	15 000	84 270
双键齿试件	45 000	30 000	93 540

表 8 UHPC 材料强度

Table.8 UHPC material strength

材料来源	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa
文献[15]	114.8	98.5
文献[30]	134.9	—

表 9 试验值与计算结果对比

Table 9 Comparison between test and calculated results

试件编号	界面阻力/kN	键齿抗力/kN	纤维贡献/kN	预测承载力/kN	试验承载力/kN	误差/%
K1-6	290.57	182.10	3.005	475.67	468.95	1.43
K1-12	393.77	272.10	3.005	668.87	707.23	5.42
K1-18	479.81	362.10	3.005	844.92	877.23	3.68
K1-24	565.85	452.10	3.005	1020.96	956.41	6.75
K3-1.2	176.67	231.08	3.005	413.76	383.70	7.83
文献[15] K3-2.4	338.05	269.01	3.005	610.06	608.50	0.26
K3-3	568.89	382.41	3.005	954.30	878.20	8.67
K3-12	687.52	571.41	3.005	1 261.93	1 229.60	2.63
KD(50)-2.4	221.82	384.37	3.005	609.20	—	—
KD(100)-2.4	233.06	384.37	3.005	620.44	667.70	7.08
KD(150)-2.4	254.64	384.37	3.005	642.02	—	—
文献[30] K1-6.89	1 160.88	206.10	0.123	1 367.10	1 149.00	19
K2-6.58	1 183.91	321.60	0.246	1 505.76	1 329.00	13

注:试件编号方法为 K(keyed joint) n (键齿数量)- m (侧向应力),KD(大键齿)(z)(键齿深度)- m (侧向应力)。

3.2 不同理论模型的对比分析

国内外许多学者对湿接缝进行研究,并提出了一些理论公式,本文列出了 9 种已知的键齿湿接缝直剪承载力计算模型,包括美国 AASHTO2003 规范^[7]等 9 种直剪承载力计算公式,并将其与本文所提出的直剪承载力计算模型进行对比分析。现将接缝直剪承载力公式归纳如下:

(1)Koseki^[2]计算公式

$$V_u = A_k \sqrt{f_c} (12 + 0.017 \sigma_n) + 0.6 A_{sm} \sigma_n \quad (28)$$

式中: A_k 为接缝面上键齿根部的面积; f_c 为混凝土抗压强度; A_{sm} 为接缝面上摩擦接触的面积。

(2)Buyukozturk^[4]计算公式

$$V_u = A_j (7.80 \sqrt{f_c} + 1.36 \sigma_n) \quad (29)$$

式中: A_j 为接缝面总面积。

(3)美国 AASHTO2003 规范^[7]计算公式:

$$V_u = A_k \sqrt{f_{cl}} (0.996 + 0.204 8 \sigma_n) + 0.6 A_{sm} \sigma_n \quad (30)$$

式中: f_{cl} 为键齿混凝土圆柱体抗压强度。

(4)Rombach^[5]计算公式:

$$V_u = 0.14 A_k f_c + 0.65 A_j \sigma_n \quad (31)$$

(5)卢文良^[6]计算公式:

$$V_u = \begin{cases} A_j (0.55 \sqrt{f_c} + 1.0 \sigma_n), & \text{单键齿} \\ 0.8 A_j (0.55 \sqrt{f_c} + 1.0 \sigma_n), & \text{多键齿} \end{cases} \quad (32)$$

(6)王建超^[8]计算公式:

$$V_u = A_k \sqrt{\sigma_n} (0.6 f_c - \sigma_n) + 0.6 A_j \sigma_n \quad (33)$$

(7)姜海波^[11]计算公式:

$$V_u = A_j(0.57\sqrt{f_c} + 0.6\sigma_n) \quad (34)$$

(8)Turmo^[25]计算公式:

$$V_u = A_k\sqrt{f_c}(0.1863\sigma_n + 0.9064) + 0.45A_{sm}\sigma_n \quad (35)$$

(9)张雪帅^[26]计算公式:

$$V_u = 0.8A_k(0.39f_c^{\frac{2}{3}} + 1.51\sigma_n) + 0.6A_{sm}\sigma_n \quad (36)$$

将所有试件试验所测得的荷载值与已有公式

计算值进行对比分析,结果如表 10 所示。将本文公式计算值、已有公式计算值与试验值的比值进行对比分析,结果如表 11、图 13 所示。本文公式与试验值比值的平均值为 1.04,与其他公式相比更接近与 1,且曲线较为平缓,波动较小,由此可见本文公式的预测精度优于已有公式。因此,本文提出的 UHPC 直剪承载力计算方法,可为 UHPC 键齿湿接缝界面的直剪承载能力预测提供参考。

表 10 已有公式计算值及试验值对比

Table 10 Comparison between the calculated values of the existing formula and the test

试件编号	计算值/kN									试验
	式(28)	式(29)	式(30)	式(31)	式(32)	式(33)	式(34)	式(35)	式(36)	
K1-0.5	143.65	328.73	683.96	425.45	608.95	502.31	497.01	307.21	327.17	468.95
K1-1	152.36	357.98	1225.38	609.82	916.23	836.04	681.38	526.34	543.89	707.23
K1-1.5	161.07	387.23	1766.81	794.18	1 223.51	1 146.28	865.74	745.47	760.61	877.23
K1-2	169.77	416.49	2308.23	978.55	1 530.79	1 445.67	1 050.11	964.60	977.33	956.41
K3-0.1	407.04	826.56	709.28	823.06	786.42	512.49	738.02	352.50	418.18	383.70
K3-0.2	409.24	842.39	990.93	922.88	919.51	788.22	815.88	440.78	505.01	608.50
K3-0.5	415.84	889.91	1835.89	1 222.34	1 318.80	1 452.93	1 049.46	705.62	765.50	878.20
K3-1	426.84	969.10	3244.15	1 721.45	1 984.27	2 400.13	1 438.76	1 147.01	1 199.66	1 229.60
KD(50)-0.2	409.24	539.03	990.93	850.99	735.48	716.32	522.06	440.78	505.01	—
KD(100)-0.2	409.24	568.37	990.93	857.94	775.50	723.27	550.48	440.78	505.01	667.70
KD(150)-0.2	409.24	624.70	990.93	871.29	852.36	736.62	605.03	440.78	505.01	—
K1-6.89	155.80	548.06	919.30	631.66	1 077.01	691.10	673.00	494.74	514.34	1 149
K2-6.58	284.84	605.59	1413.38	935.88	1 166.49	1 037.78	733.46	597.56	637.02	1 329

表 11 已有公式计算值、本文公式计算值与试验值比值对比

Table 11 Comparison of the ratio of the calculated value of the existing formula, the calculated value of the formula in this paper and the test value

试件编号	计算值/试验值									
	本文	式(28)	式(29)	式(30)	式(31)	式(32)	式(33)	式(34)	式(35)	式(36)
K1-0.5	1.01	0.31	0.70	1.46	0.91	1.30	1.07	1.06	0.66	0.70
K1-1	0.95	0.22	0.51	1.73	0.86	1.30	1.18	0.96	0.74	0.77
K1-1.5	0.96	0.18	0.44	2.01	0.91	1.39	1.31	0.99	0.85	0.87
K1-2	1.07	0.18	0.44	2.41	1.02	1.60	1.51	1.10	1.01	1.02
K3-0.1	1.08	1.06	2.15	1.85	2.15	2.05	1.34	1.92	0.92	1.09
K3-0.2	1.00	0.67	1.38	1.63	1.52	1.51	1.30	1.34	0.72	0.83
K3-0.5	1.09	0.47	1.01	2.09	1.39	1.50	1.65	1.20	0.80	0.87
K3-1	1.03	0.35	0.79	2.64	1.40	1.61	1.95	1.17	0.93	0.98
KD(100)-0.2	0.93	0.61	0.85	1.48	1.28	1.16	1.08	0.82	0.66	0.76
K1-6.89	1.20	0.14	0.48	0.80	0.55	0.94	0.60	0.59	0.43	0.45
K2-6.58	1.13	0.21	0.46	1.06	0.70	0.88	0.78	0.55	0.45	0.48
平均值	1.04	0.40	0.84	1.74	1.15	1.39	1.25	1.06	0.74	0.80

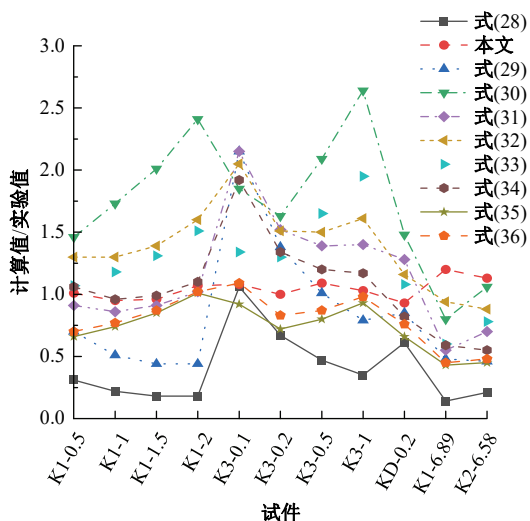


图 13 公式计算值/试验值

Fig. 13 Linear fitting of shear capacity data of flat joint specimens

4 结 论

(1) 本文基于 UHPC 纤维-基体离散模型详细讨论了钢纤维桥连作用的贡献, 所提出的直剪强度计算方法考虑了界面抗剪、键齿抗剪及纤维贡献项。

(2) 根据本文建立的直剪承载力计算公式, 所得到的计算值与试验值吻合较好, 计算得到的 UHPC 湿接缝试件的预测值与缩尺下的 UHPC 湿接缝试件直剪试验值较为接近: 算例 1 中, 单键齿湿接缝试件承载力的误差范围为 1.43%~7.08%, 三键齿湿接缝试件承载力的误差范围为 0.26%~8.67%; 算例 2 中, 单键齿湿接缝试件误差为 19%, 双键齿湿接缝试件误差为 13%。

(3) 由于需要通过数值模拟的方法获得界面黏聚应力 c 及摩擦因数 μ , 且随着侧向约束应力的增加, 平接缝的破坏荷载呈现非线性关系, 为提高本文提出的 UHPC 湿接缝直剪承载力预测方法的计算精度, 需对平接缝试件开展较为全面的侧向约束力下的直剪试验。

(4) 在侧向约束应力及键齿根部面积相同的情况下, 湿接缝大键齿承载力预测值高于三键齿承载力预测值。为提高本文提出的 UHPC 湿接缝直剪承载力预测方法的计算精度, 可将三键齿简化为大键齿, 从而可降低施工难度, 提高施工速度。

(5) 本文公式计算所得单键齿、三键齿湿接缝直剪承载力与试验值的比值均接近于 1, 已有计

算公式计算值与试验值比值波动较大。由此可见, 本文公式针对 UHPC 湿接缝抗剪承载力预测精度优于已有公式, 可适用于 UHPC 键齿湿接缝界面的直剪承载力计算。

参考文献:

- [1] Jones L L. Shear test on joints between precast post-tensioned units[J]. Magazine of Concrete Research, 1959, 11(31): 25-30.
- [2] Koseki K, Breen J E. Exploratory study of shear strength of joints for precast segmental bridges[R]. Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, 1983: 33-52.
- [3] ACI 318-83. Building code requirement for reinforced concrete[S].
- [4] Buyukozturk O, Bakhoum M M, Michael B S. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12): 3380-3401.
- [5] Rombach G A. Precast segmental box girder bridges with external prestressing: design and construction[J]. Segmental Bridges, 2002, 19(2): 1-15.
- [6] 卢文良. 节段预制体外预应力混凝土梁设计理论研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2004.
Lu Wen-liang. Study on the design theory of segmental precast concrete girders with external tendons[D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2004.
- [7] AASHTO. LRFD bridge design specifications[S/OL]. [2024-01-15]. <https://downloads.transportation.org/Publications/LRFDDBDS-10.pdf>
- [8] 王建超. 节段预制拼装混凝土桥梁接缝抗剪性能试验研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2011.
Wang Jian-chao. Experimental study on shear behaviour of joints in precast concrete segmental bridges[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2011.
- [9] 邹琳斌. 体外预应力节段施工混凝土桥梁湿接缝剪切性能研究[D]. 广州: 广东工业大学土木与交通工程学院, 2012.
Zou Lin-bin. Research on shear properties of dry joints in segmental precast concrete bridge with external tendons[D]. Guangzhou: School of Civil and Transport Engineering, Guangdong University of Technology, 2012.
- [10] 陈黎. 预制节段式混凝土桥梁干接缝抗剪性能研究

- [D]. 广州: 广东工业大学 土木与交通工程学院, 2013.
- Chen Li. Research on shear behavior of dry joints in precast segmental concrete bridge[D]. Guangzhou: School of Civil and Transport Engineering, Guangdong University of Technology, 2013.
- [11] 姜海波, 李宇鸿, 肖杰, 等. 预制节段干接缝体外预应力混凝土简支梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 188-195.
- Jiang Hai-bo, Li Yu-hong, Xiao Jie, et al. Shear behavior of precast concrete segmental simply supported beam with external tendons and dry joints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 188-195.
- [12] Wakasa T, Otsuka H, Yabuki W. Experimental study of the shear strength of precast segmental beams with external prestressing[J]. Structure Concrete, 2005(6): 63-80.
- [13] 闫泽宇. 节段预制拼装 UHPC 接缝抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2019.
- Yan Ze-yu. Study on shear performance of joints in precast UHPC segmental bridge[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2019.
- [14] Jiang H B, Shao T F, Fang Z C, et al. Shear-friction behavior of grooved construction joints between a precast UHPC girder and a cast-in-place concrete slab[J]. Engineering Structures, 2021, 228: No. 111610.
- [15] 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: 东南大学土木工程学院, 2017.
- Liu Tong-xu. Experimental and theoretical research on shear behavior of joints in precast UHPC segmental bridges[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2017.
- [16] 王振领. 新老混凝土粘结理论与试验及在桥梁加固工程中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2006.
- Wang Zhen-ling. Study on bond theory and test of new and old concrete and its application in bridge strengthening engineering[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2006.
- [17] Aaleti S, Petersen B, Sritharan S. Design guide for precast uhpc waffle deck panel system, including connections[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2013.
- [18] Graybeal B. Ultra-high-performance concrete connections for precast concrete bridge decks[J]. PCI Journal, 2014, 59 (4): 48-62.
- [19] 邵旭东, 管亚萍, 晏班夫. 预制超高性能混凝土 π 形梁桥的设计与初步试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 46-56.
- Shao Xu-dong, Guan Ya-ping, Yan Ban-fu. Design and preliminary experiments of UHPC π -shaped girder bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 46-56.
- [20] 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复既有混凝土结构界面粘结性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2016.
- Zhang Xiao-chen. Study of interface bond behavior between precast ultra high performance concrete repaired and existing concrete structure[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2016.
- [21] Victor G, Jed L, Michael P, et al. Fracture mechanics testing of the bond between composite overlays and a concrete substrate[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001, 15(11): 1351-1371.
- [22] 吴威业. 预制节段拼装桥墩抗剪性能研究[D]. 宁波: 宁波大学土木工程与地理环境学院, 2017.
- Wu Wei-ye. Shear resistant performance investigation of precast segmental bridge columns[D]. Ningbo: School of Civil and Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, 2017.
- [23] 过镇海, 张秀琴. 砼受拉应力-变形全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1988(4): 45-53.
- Guo Zhen-hai, Zhang Xiu-qin. Experimental investigation of complete stress-deformation curves of concrete intension [J]. Journal of Building Structures, 1988(4): 45-53.
- [24] Qi J, Ma Z J, Wang J. Shear strength of UHPFRC beams: mesoscale fiber-matrix discrete model[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 143: No. 0401629.
- [25] Turmo J, Ramos G, Aparicio A C. FEM modelling of unbonded post-tensioned segmental beams with dry joints[J]. Engineering structures, 2006, 28(13): 1852-1863.
- [26] 孙雪帅. 预制拼装桥梁节段间接缝抗剪性能试验研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2015.
- Sun Xue-shuai. Experimental study on shear behavior of joints in precast segmental bridges[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2015.
- [27] 冯峥, 李传习, 周佳乐, 等. UHPC 键齿湿接缝直剪试验及湿接缝直剪承载力统一公式[J]. 土木工程

- 报, 2022, 55(6): 79-91.
- Feng Zheng, Li Chuan-xi, Zhou Jia-le, et al. Direct shear test on UHPC key-wet-joints and the unified calculation formula of direct shear capacity of UHPC wet-joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6): 79-91.
- [28] 吴威业. 预制节段拼装桥墩抗剪性能研究[D]. 宁波: 宁波大学土木工程与地理环境学院, 2017.
- Wu Wei-ye. Shear resistant performance investigation of precast segmental bridge columns[D]. Ningbo: School of Civil&Environmental Engineer and Geography Science, Ningbo University, 2017.
- [29] Shamass R, Zhou X, Alfano G. Finite-element analysis of shear-off failure of shear-off failure of keyed dry joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 20(6): No. 04014084.
- [30] 马雷. 预制装配式桥墩 UHPC 湿接缝抗剪性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2022.
- Ma Lei. Research on shear performance of UHPC wet joints in assembled segmental column[D]. Xi'an: Highway School, Chang'an University, 2022.
- [31] Hussein H H, Walsh K K, Sargand S M, et al. Modeling the shear connection in adjacent box-beam bridges with ultrahigh-performance concrete joints. I: model calibration and validation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(8): No. 04017043.