

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.02.005

超高性能混凝土预制节段梁剪切性能有限元分析

轩帅飞, 郑辉, 梁雪娇

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 超高性能混凝土(UHPC)因具有高强度、高耐久性而被广泛地应用到桥梁工程中,在UHPC预制节段梁中,剪力键的剪切特性因缺少相应的规范而成为大家共同关注的问题。因此,通过有限元软件ABAQUS模拟了UHPC的直剪性能,主要研究参数包括剪切面面积、侧向应力以及接缝类型,分析比较了不同工况下构件的破坏模式以及荷载位移曲线,得出了各参数对UHPC构件之间性能的影响规律。分析表明:随着剪力键剪切面面积的增加,构件的抗剪承载力明显提升;在侧向应力较小时(不高于 $0.3f_c$),随着侧向应力的增加,构件的破坏荷载近似线性增加;胶接缝构件因具有良好的整体性能而使抗剪承载力比同条件下干接缝构件的抗剪承载力高16%。此外,日本JSCE规范计算值与数值模拟试验结果吻合良好,表明日本JSCE规范剪力键的设计公式可用于预测UHPC节段接缝抗剪承载能力。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 剪切面面积; 侧向应力; 接缝类型

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)02-0024-07

引文格式: 轩帅飞, 郑辉, 梁雪娇. 超高性能混凝土预制节段梁剪切性能有限元分析[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(2): 24-30.

Finite Element Analysis of Shear Performance of Ultra-High Performance Concrete Precast Segmental Beams

XUAN Shuaifei, ZHENG Hui, LIANG Xuejiao

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Ultra high performance concrete (UHPC) has been widely used in bridge engineering with its high strength and high durability. In precast UHPC segmental beams, the shear characteristics of shear keys have become a common concern due to the lack of corresponding specifications. Therefore, by using the finite element software ABAQUS, the direct shear performance of UHPC can be simulated, with three main research parameters included: shear area, lateral stress and joint type. An analysis and comparison have been made of the failure modes and load displacement curves of components under different working conditions, thus obtaining the influence rules of each parameter on the performance of UHPC components. The analysis shows that with the increase of the shear plane area, the shear capacity of the member is significantly improved; as the lateral stress, which is small, not higher than $0.3f_c$, increases, the failure load of the component increases approximately linearly. Due to the good overall performance of the rubber joint component, the shear bearing capacity is 16%, which is higher than that of the dry joint component under the same conditions. The calculated values of the JSCE specification in Japan are in good agreement with the

收稿日期: 2019-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608189), 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50130), 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2018]255号)

作者简介: 轩帅飞(1992-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为UHPC在桥梁工程中的应用, E-mail: 534749192@qq.com

通信作者: 郑辉(1986-), 男, 湖南耒阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事高等混凝土以及桥梁工程方面的教学与研究, E-mail: zhenghui@hut.edu.cn

numerical simulation test results, which shows that the design formula of the Japanese JSCE specification shear key can predict the shear capacity of UHPC joints.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); shear area of joint; lateral stress; joint type

0 引言

桥梁工程中常用的超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC), 是一类具有超高强度、超高延展性和超高耐久性的混凝土。UHPC 的超高强度是通过硅灰和水泥混合并具有较低的水灰比而获得的, 钢纤维的加入提高了 UHPC 的延展性以及抗震性能^[1-2]。自从加拿大建造了第一座 UHPC 桥梁以来, UHPC 已经在全世界范围内被逐渐应用到工程项目中。由于 UHPC 构件需要进行高温蒸汽养护, 同时还需要提高施工速度, 因此预制拼接 UHPC 是最优选择。在设计和建造预制节段桥时, 预制节段梁之间的剪力键是相邻两端梁传递压缩和剪切应力的关键部位^[3], 但是目前关于 UHPC 剪力键的剪切行为研究较少, 而且国内尚没有针对 UHPC 剪力键抗剪承载能力的设计规范, 因此有必要对 UHPC 剪力键的剪切行为进行研究。

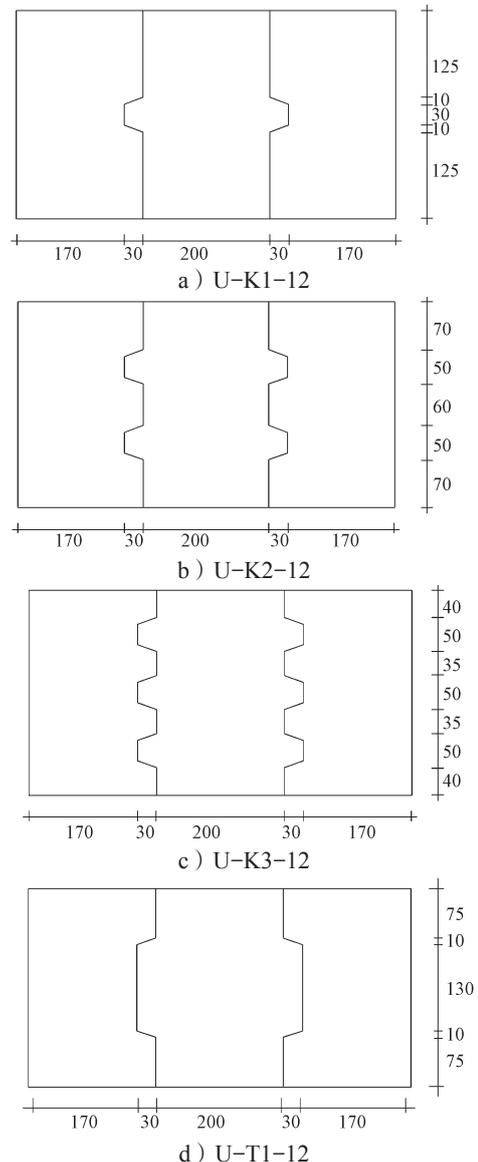
近年来, 国内外学者们对 UHPC 剪力键的剪切行为展开研究。如 Y. L. Voo 等^[4]对 UHPC 节段拼接梁进行了一系列的试验研究, 主要分析了不同键齿数量和不同侧向应力状态下节段梁的剪切性能, 并且建立了 UHPC 键齿接缝的理论计算模型, 推导出了适用于 UHPC 拼接梁的抗剪承载力计算公式。Jang H. O. 等^[5]通过实验研究, 分析了不同剪力键个数对拼接梁剪切性能的影响, 并且将其与没有任何接缝的整体构件进行了对比, 实验结果表明, 剪力键的剪切面积积极大影响了接缝的剪切性能。同时, 利用 ABAQUS 软件建立了每个研究试件的有限元模型, 得到的实验数值和模拟结果在位移、荷载以及破坏模式上的吻合度均较高。Kim Y. J. 等^[6-7]通过实验, 研究了不同接缝类型时剪力键的数量和高度、固化温度以及侧向应力对拼接梁抗剪承载力的影响, 并且将测试结果与 AASHTO 规范公式、JSCE (Japan Society of Civil Engineering) 规范公式计算结果进行对比, 以确定 UHPC 节段拼接梁抗剪承载力的计算方程。

本研究拟通过有限元软件 ABAQUS 对 UHPC 直剪性能进行模拟, 研究剪切面的面积、侧向应力以及接缝类型对节段梁直剪性能的影响, 对比分析不同工况的荷载-位移曲线及应力云图、破坏形态, 讨论

不同参数对抗剪承载力的影响, 以期为 UHPC 拼接构件的设计提供一定的理论参考。

1 构件设计尺寸及参数

本研究共设计 10 个直剪构件, 每个构件由 3 个试件拼接而成, 其中每个试件的长为 200 mm, 高为 300 mm, 厚为 60 mm。其中, 两边的试件设置凹槽, 中间匹配试件设置凸槽, 凹槽与凸槽中间设置的接缝形式为干接缝和环氧树脂胶接缝, 构件的截面形式如图 1 所示, 图中尺寸单位为 mm。



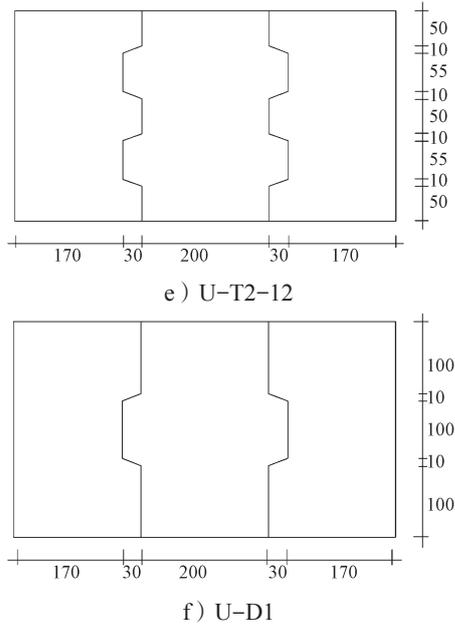


图1 构件尺寸详图
Fig.1 Specimen size

剪力键根部的面积为剪切面，为了研究剪切面面积对构件承载性能的影响，本研究设置了5种工况，即当剪力键形状大小相同时，设置剪力键个数为1, 2, 3个，即剪切面面积分别为3 000, 6 000, 9 000 mm²。同时，研究剪切面面积都为9 000 mm²时，剪力键个数对UHPC承载性能的影响，设置了单齿、双齿和三齿3种工况。研究低侧向应力 ($\sigma_n \leq 0.3f_c$, 其中 σ_n 为对试件施加的侧向应力, f_c 为轴心抗压强度) 状态下对构件剪切性能的影响时，在构件两端首先施加侧向应力的大小为0, 0.1 f_c , 0.2 f_c , 0.3 f_c 的压强荷载，其中UHPC的轴心抗压强度 $f_c=120$ MPa，然后在中间凸齿试件的上表面施加竖向荷载，荷载施加示意图如图2所示。

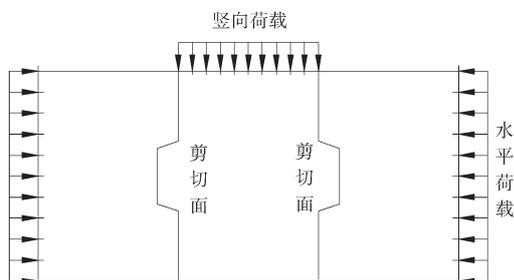


图2 荷载施加示意图
Fig.2 Schematic diagram of load application

表1汇总了各构件具体的设计参数，构件采用如U-K1-12的形式，其中U代表UHPC，K代表键齿，T代表剪切面面积为9 000 mm²的试件，D代表剪切面面积为6 000 mm²的试件，J代表胶接缝试件，1代表键齿数量，12代表侧向应力的数值。

表1 构件参数

Table 1 Design parameters of specimens

序号	试件编号	剪力键数量	剪切面面积/mm ²	侧向应力/MPa	接缝类型
1	U-K1-12	1	3 000	12	干接缝
2	U-K2-12	2	6 000	12	干接缝
3	U-K2-12	3	9 000	12	干接缝
4	U-T1-12	1	9 000	12	干接缝
5	U-T2-12	2	9 000	12	干接缝
6	U-D1-0	1	6 000	0	干接缝
7	U-D1-12	1	6 000	12	干接缝
8	U-D1-24	1	6 000	24	干接缝
9	U-D1-36	1	6 000	36	干接缝
10	U-J1-12	1	9 000	12	胶接缝

2 有限元模型的建立

2.1 UHPC本构模型

ABAQUS中混凝土塑性损伤模型 (concrete damage model of plastic, CDP) 能够很好地模拟混凝土的非线性行为，它基于两种不同的破坏机制，即混凝土材料的拉伸破坏和压缩破坏。UHPC受压应力-应变关系采用单波^[8]提出的本构模型，即

$$\begin{cases} y = ax + (6 - 5a)x^5 + (4a - 5)x^6, & x \leq 1; \\ y = x / (2.41 \cdot (x - 1)^2 + x), & x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $y=f/f_c$, $x=\varepsilon/\varepsilon_0$, 其中 ε_0 为UHPC试件的峰值压应力对应的压应变; a 为初始切线模量和峰值割线模量的比值。

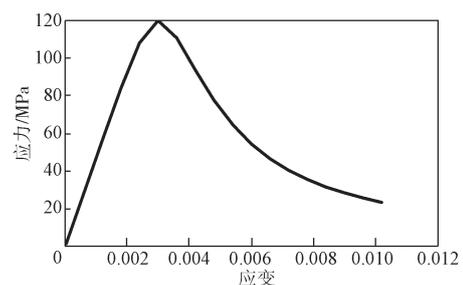
UHPC单轴受拉本构模型采用安明喆等^[9]提出的计算式，即

$$\begin{cases} y = Ax + (3 - 2A)x^2 + (A - 2)x^3, & x \leq 1; \\ y = x / [\alpha(x - 1)^\beta + x], & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

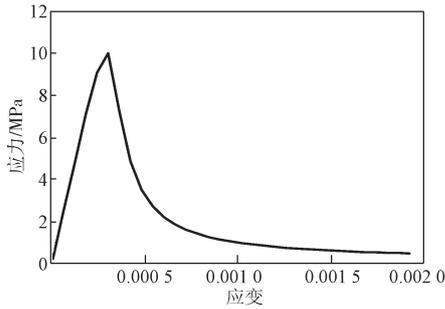
式中: $A = 1.27 \frac{f_t(\varepsilon_{t0} + 0.8\lambda_f \times 10^{-4})}{\varepsilon_{t0}(f_t + 4.32\lambda_f)}$, $y = \frac{f}{f_t}$, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$,

其中, f_t 和 ε_t 分别为UHPC的轴心抗拉强度及其对应的轴心抗拉应变, λ_f 为钢纤维含量特征值; α 为与钢纤维特性有关的参数, 本研究取 $\alpha=7$; β 为参数, 本研究中参考普通混凝土参数取1.7。

综上所述, UHPC本构曲线如图3所示。



a) 单轴受压应力-应变曲线



b) 单轴受拉应力 - 应变曲线

图 3 UHPC 本构关系曲线

Fig. 3 UHPC constitutive curve

CDP 其它基本参数采用文献 [10] 的计算方法, 如表 2 所示。

表 2 CDP 基本参数

Table 2 CDP basic parameters

参 数	取 值	参 数	取 值
弹性模量 /GPa	42	f_{b0}/f_{c0}	1.14
泊松比	0.19	K	0.667
膨胀角 /($^{\circ}$)	15	黏性参数	0.000 5
偏心率	0.1		

2.2 有限元模型的建立

在有限元模型中, 由于拼接的构件形状具有对称性, 为了减少计算时间, 取整个构件的一半进行建模, 并赋予相对应的边界条件, 即对凸齿最左侧设置水平约束, 并在凹齿试件下表面设置竖向约束。侧向应力以压强荷载的形式施加在试件的最右侧, 竖向荷载同样以压强荷载的形式施加在凸齿试件的上表面, 具体加载及约束方式如图 4 所示。

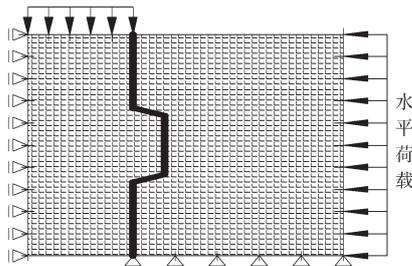


图 4 有限元荷载及边界条件

Fig. 4 Finite element load and boundary conditions

在接触分析中, 干接缝选择凹齿所在的面为主表面、凸齿所在的面为从表面, 在接触属性中定义法向分量和切向分量。其中, 切向行为中定义罚函数摩擦系数为 0.6。在环氧树脂胶接缝计算模型中, 将环氧树脂胶定义为弹性, 其中弹性模量为 5 GPa, 泊松比为 0.2, 在相互作用模块中, 将胶与 UHPC 绑定进行模拟试验 [11]。

由于拼接缝之间存在着较为复杂的接触问题, 容易造成不收敛问题, 为此构件采用 8 节点减缩积分三维实体单元 (C3D8R)。将剪力键进行切割并将网

格精度设置为 0.01 m, 得到模型最终的网格划分图, 如图 5 所示。

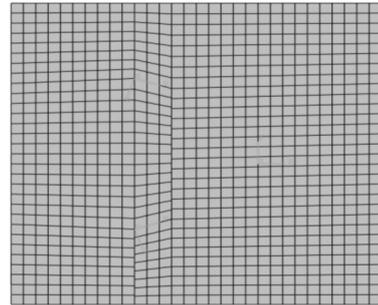


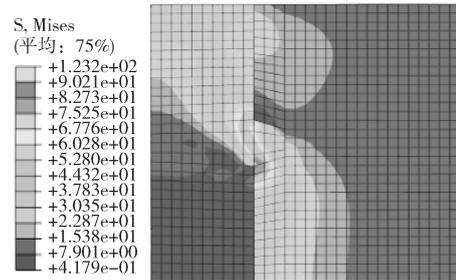
图 5 网格划分图

Fig. 5 Mesh map

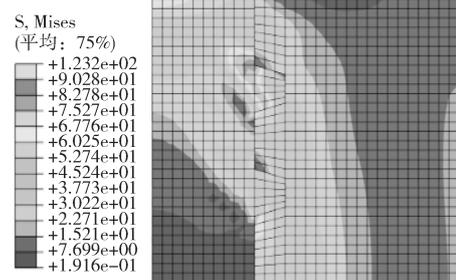
3 有限元结果分析

3.1 键齿数量和剪切面面积的影响

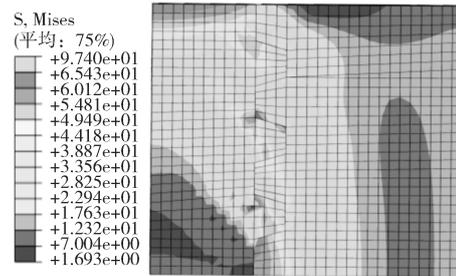
图 6 为 U-K1-12、U-K2-12 和 U-K3-12 的有限元分析应力云图, 因它们具有相同的键齿形状, 可被用于对比研究剪切面面积对承载性能的影响; 图 7 所示为剪切面面积相同的条件下, 不同键齿数量构件的有限元分析应力云图。



a) U-K1-12



b) U-K2-12



c) U-K3-12

图 6 不同剪切面面积不同键齿数量构件的应力云图
Fig. 6 Stress map of different shear area with different shear keys

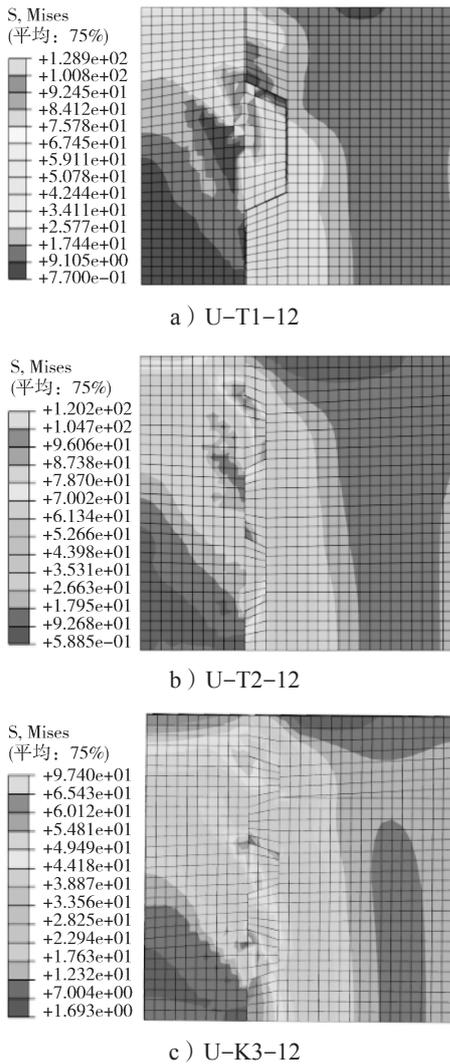


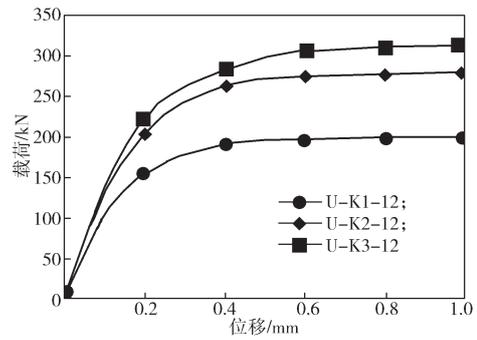
图7 相同剪切面面积不同键齿数量构件的应力云图
Fig. 7 Stress field of specimens with different shear keys and same shear area

由图6、图7可以得知，构件破坏表现为在剪切面处的剪切破坏。构件破坏时，左侧凸齿构件上部施加的荷载传递到接缝处，由于接缝处的不连续性，键齿成为传递压缩和剪切的主要部位。随着荷载的增加，剪力键剪切面处被剪切破坏。由U-K2-12、U-K3-12和U-T2-12应力云图可知，干接缝双齿和三齿构件的破坏模式为下部键齿在剪切面先发生破坏，随后上部键齿继续承担荷载而发生破坏。每个键齿的破坏形式基本相似，都是先从键齿根部率先发生破坏，然后蔓延至整个剪切面。

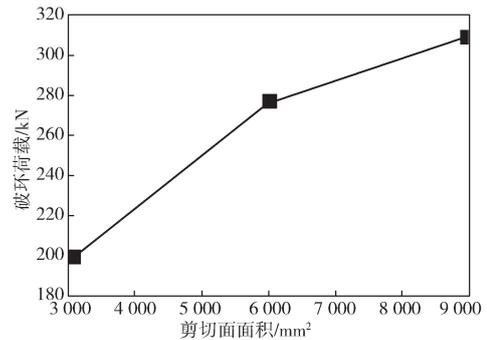
图8为不同剪切面面积、不同键齿数量的构件荷载-位移曲线及破坏荷载随剪切面面积变化曲线，图9为相同剪切面面积、不同键齿数量时构件的荷载-位移曲线。

由图8可以得知，随着剪切面面积的增加，试件的破坏荷载随之增加，但随着剪切面面积成倍数增加

时，破坏荷载并不呈现出线性增长，如图8b所示。然而当剪切面面积相同时，构件的破坏荷载近似相等，如图9所示。当剪切面面积都为9000mm²时，单键齿的破坏荷载为315.9kN，双键齿的破坏荷载为325.4kN，表明随着键齿数量的增加，构件的抗剪承载力会出现一定程度的增强，这是由于多齿试件键齿之间存在着机械互锁效应。



a) 相同侧向应力时的荷载-位移曲线



b) 破坏荷载随不同剪切面面积的变化曲线

图8 剪切面面积对荷载的影响

Fig. 8 Influence of shear surface area on loading

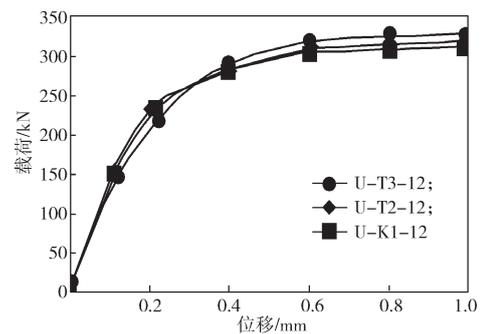
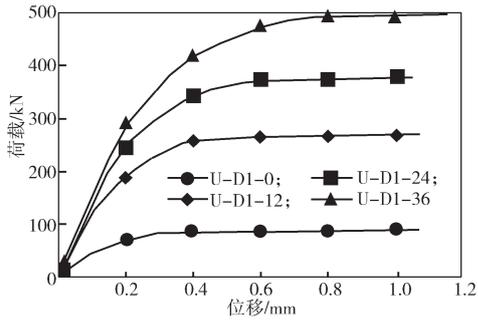


图9 相同剪切面面积构件的荷载-位移曲线

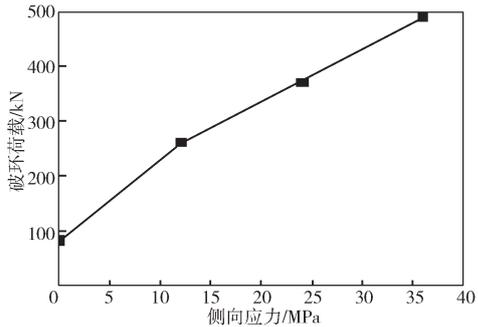
Fig. 9 Load-displacement curves of specimens with the same shear area

3.2 侧向应力的影响

U-D1-0、U-D1-12、U-D1-24和U-D1-36的破坏模式与上节介绍的构件的破坏模式相似，故不再展示其应力云图。图10所示为不同侧向应力条件下构件的荷载-位移曲线及破坏荷载随侧向应力的变化曲线。



a) 不同侧向应力时的荷载 - 位移曲线



b) 破坏荷载随侧向应力的变化曲线

图 10 侧向应力对荷载的影响

Fig. 10 Effect of lateral stress on loading

由图 10a 可以看出, 一方面, 侧向应力提高了构件的刚度, 减少了构件在相同荷载条件下接缝处的竖向位移; 另一方面, 随着侧向应力的增加, 构件的破坏荷载提高, 同时也提高了试件在破坏时的竖向位移。由图 10b 可以看出, 侧向应力较低时, 随着侧向应力的增加, 破坏荷载值近似线性增加。

3.3 接缝类型的影响

接缝类型对构件的直剪性能有着显著的影响, 采用环氧树脂连接的构件具有良好的整体性, 其承载性能明显优于干接缝的。胶接缝构件的破坏模式也与干接缝构件的略有不同, 表现为更加明显的整体破坏, 如图 11 所示。

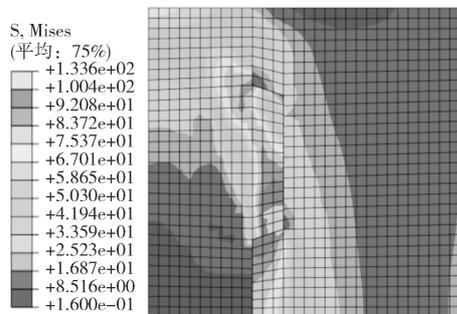


图 11 胶接缝应力云图

Fig. 11 Exopy joints stress cloud

图 12 为相同齿型、相同侧向应力时胶接缝构件和干接缝构件的荷载 - 位移曲线。由图 12 可以看出, 胶接缝构件的荷载 - 位移曲线初始斜率较大,

代表着其整体性能较好。胶接缝构件的破坏荷载约为 370 kN, 比干接缝的抗剪承载力约高出 16%, 因此胶接缝构件更适合被应用于实际工程中。

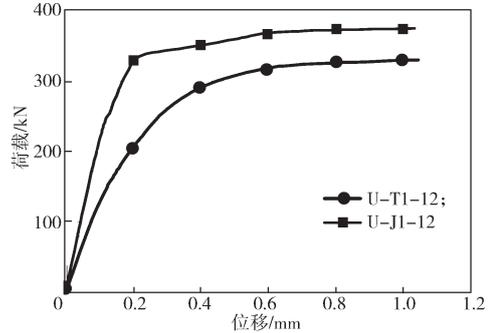


图 12 不同接缝类型的荷载 - 位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of specimens with different type of joints

3.4 与设计规范对比

作为 UHPC 剪力键的最新设计规范, 即日本土木工程师学会提出的 UHPC 剪力键设计公式^[12]如下:

$$V_{cwd} = \mu \cdot f_{cd}^b \cdot \sigma_{nd}^{1-b} \cdot A_{cc} + 0.1 \cdot A_k \cdot f_{cd} \quad (3)$$

式中: μ 为接缝处的平均摩擦系数; f_{cd} 为 UHPC 抗压强度设计值; σ_{nd} 为垂直于接缝的平均正应力; A_{cc} 为接缝面处的总面积; A_k 为剪力键根部剪切面的面积, b 为接缝面形状指数, 湿接缝时 b 取 0.4, 胶接缝时 b 取 0.5。

JSCE 设计公式中主要包括两项, 第一项为摩擦提供的承载力, 第二项为剪力键的剪切提供的抗剪承载力。由公式 (3) 可知, 每一项都有 f_{cd} , 表明混凝土强度不仅对其剪切性能有影响, 而且对摩擦力有一定的影响。

当 $A_k=6\ 000\ \text{mm}^2$ 时, 将模拟值与规范值, 以及与东南大学宋守坛^[13]所试验的抗压强度为 52 MPa 的普通混凝土直剪性能进行对比, 结果如图 13 所示。

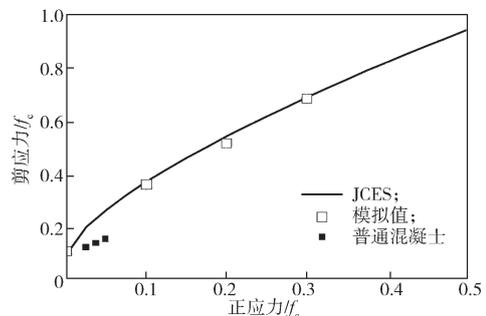


图 13 模拟试验结果与 JSCE 预测值对比

Fig. 13 Comparison between FEA and JSCE

由图 13 可以得知, UHPC 的直剪性能明显优于普通混凝土的直剪性能, 日本 JSCE 规范计算值与数值模拟试验结果具有较好的一致性。这一结果表明, 日本 JSCE 规范的剪力键设计公式可用于预测 UHPC

节段的接缝抗剪承载能力。

4 结论

本文通过 10 个 UHPC 直剪数值模拟试验, 研究了不同键齿数量、侧向应力以及接缝类型对 UHPC 直剪性能的影响, 得出如下结论:

1) 键齿形状相同时, 增加键齿的数量可以显著提高构件的抗剪承载力, 当剪力键剪切面积一定时, 随着剪力键数量的增加, 其抗剪承载力有所折减, 但折减不多。由此可以得出, 剪力键剪切面的面积对构件抗剪承载力有着显著的影响。

2) 明显改变构件的刚度, 在侧向应力较低时(侧向应力不大于 $0.3f_c$), 随着侧向应力的增加, 构件的抗剪承载力近似线性增加。

3) 良好的整体性可以显著提高构件的抗剪承载力, 由有限元模拟知胶接缝的抗剪承载力比干接缝的约高出 16%。

4) 规范计算值与数值模拟试验结果吻合良好, 故日本 JSCE 规范剪力键的设计公式, 可有效预测 UHPC 节段接缝抗剪承载能力。

参考文献:

- [1] 孙世国, 鲁艳朋. 超高性能混凝土国内外研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 184-199.
SUN Shiguo, LU Yanpeng. Research Progress of Ultra High Performance Concrete at Home and Abroad[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(20): 184-199.
- [2] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of Research on Ultra-High Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24.
- [3] 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.
- [4] VOO Y L, FOSTER S J, VOO C C. Ultra-Performance Concrete Segmental Bridge Technology: Toward Sustainable Bridge Construction[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(8): B5014001. doi:10.1061/(asce)be.1943-5592.0000704.
- [5] JANG H O, LEE H S, 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: 1-17.
- [6] KIM Y J, CHIN W J, JEON S J. Interface Shear Strength at Joints of Ultra-High Performance Concrete Structures[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 59.
- [7] 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): 212-218.
- [8] 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 Bo. Test and Research on Basic Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2002.
- [9] 安明喆, 杨志慧, 余自若, 等. 活性粉末混凝土抗拉性能研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 54-58.
AN Mingzhe, YANG Zhihui, YU Ziruo, et al. Experimental Study on the Tensile Performance of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 54-58.
- [10] 曾宇, 胡良明. ABAQUS 混凝土塑性损伤本构模型参数计算转换及校验[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 106-109.
ZENG Yu, HU Liangming. Calculation Transformation and Calibration of ABAQUS Concrete Plastic Damage Constitutive Model[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6): 106-109.
- [11] 梁华廉. 预制节段混凝土桥梁接缝抗剪性能数值分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
LIANG Hualian. Numerical Analyses of Shear Behaviors of Joints in Precast Concrete Segmental Bridges[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [12] KEITETSU Rokugo. Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Concrete Structures[S]. Japan: Japan Society of Civil Engineers, 2008: 27-29.
- [13] 宋守坛. 高速铁路预制拼装箱梁桥抗弯及接缝抗剪试验研究与理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.
SONG Shoutan. Experimental Study and the Oretical Analysis in Bending and Joint Shear of High-Speed Railway Precast Segmental Concrete Box Bridges[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

(责任编辑: 廖友媛)