

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.044

UHPC节段梁键齿胶接缝抗剪性能试验研究

徐治芹¹,丁婧楠²,韩雄刚¹,周斌²,朱劲松²

(1.中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300074; 2.天津大学,天津市 300350)

摘要:为研究预制UHPC(Ultra High Performance Concrete, UHPC)节段梁间胶接缝在剪切荷载下的力学性能,开展了一组UHPC单键齿胶接缝和七组UHPC多键齿胶接缝抗剪性能试验,考虑键齿数量、键齿形式(高深比)、胶层厚度和正应力水平对剪切荷载下UHPC多键齿胶接缝破坏过程、破坏模式和承载能力的影响。结果表明:UHPC多键齿胶接缝均在极限荷载的0.6~0.7的范围内出现开裂,键齿数量、正应力水平和键齿形式(高深比)对UHPC多键齿胶接缝抗剪性能的影响较大,增加键齿数量,提高正应力水平,采用高深比较大的键齿形式均能在不同程度上提高UHPC多键齿胶接缝的抗剪承载力和延性;胶层厚度对UHPC多键齿胶接缝抗剪性能的提升影响较小;考虑键齿折减效应的计算公式能够较为准确的预测UHPC多键齿胶接缝的抗剪承载力。

关键词:超高性能混凝土;键齿胶接缝;节段梁;剪切荷载;抗剪性能

中图分类号:U446

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)12-0204-07

0 引言

超高性能混凝土具有超高的力学性能及耐久性,被认为是过去三十年最优异的水泥基复合材料之一,符合社会可持续发展对高性能材料发展的要求。桥梁节段预制拼装技术已在国内外多座桥梁工程中得以应用,节段间的接缝采用刮涂黏结剂的方式使节段箱梁黏结为一体^[1]。节段预制拼装UHPC桥梁则是将节段预制拼装技术和超高性能混凝土结合起来的一种新型桥梁形式,能够实现梁体分段预制,逐块拼装,具有施工快、质量易控、对周围交通影响小^[2],可以灵活制备生产的优点,提高施工效率的同时,保证了UHPC梁的成型质量。

接缝作为梁体整体受力的薄弱部位,其合理设计及基本性能影响着整体结构的受力性能及工作性能。关于预制节段梁胶接缝性能的研究大多集中于其抗剪性能,目前认为影响胶接缝抗剪性能的主要因素有接缝键齿布置^[3-5]、剪切面积^[6]及正应力水平等^[7]。UHPC键齿胶接缝的研究参数主要集中于键

齿布置和形式、胶接缝厚度、正应力水平和钢纤维掺量。Lee等^[8-9]通过直剪试验研究了接缝类型、正应力水平、试件材料、键齿深度、养护温度、养护时间等因素对接缝抗剪性能的影响。研究表明,正应力水平与键齿抗剪能力呈正相关,且存在最佳正应力水平;延长养护时间和高温养护可提高接缝抗剪强度;增大键齿高度对接缝强度有积极影响。不同键齿布置方式也影响接缝性能^[10-13],且正应力水平^[14-16]和钢纤维掺量^[6,17]对接缝的抗剪性能具有显著影响。然而,现有公式普遍低估UHPC键齿胶接缝的抗剪承载力^[18-19],因此需要更精确的计算公式以指导实际工程应用。

综上,对于UHPC胶接缝性能的研究仍不够完善,有些因素所得结论并不一致,且通过有限的试验来说明问题,数据量少,所得结论并不能完全阐明UHPC胶接缝的抗剪机理。因此本文通过抗剪性能试验研究键齿数量、键齿形式(高深比)、胶层厚度和正应力水平对UHPC键齿胶接缝承载能力和延性的影响,并基于试验结果对既有UHPC多键齿胶接缝承载能力计算模型进行评估,为UHPC多键齿胶接缝设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验试件设计及材料性能

UHPC多键齿胶接缝抗剪试验的试件形式及尺

收稿日期:2024-01-17

基金项目:天津市交通运输科技发展计划项目(2019B-21)

作者简介:徐治芹(1979—),男,学士,教授级高级工程师,从事道路桥梁设计及科研工作。

通信作者:朱劲松(1975—),男,博士,教授,博士研究生导师,从事装配化、高性能、长寿命桥梁结构研究工作。电子邮箱:jszhu@tju.edu.cn

寸见图1,各试件厚度均为150 mm。根据实际工程所使用的键齿形式确定试件中键齿的尺寸,将不同键齿形式编号为A、B和C,各形式键齿深度均为40 mm,键齿A、键齿B和键齿C的根部尺寸分别为130 mm、160 mm和210 mm,顶部尺寸分别为50 mm、80 mm

和130 mm,具体见图2。试验中试件总数量为8个,其中包含1个UHPC单键齿试件,7个UHPC多键齿试件,考虑了键齿数量、键齿形式(高深比)、胶层厚度和正应力水平对UHPC多键齿胶接缝抗剪性能的影响,各试件设计参数见表1。

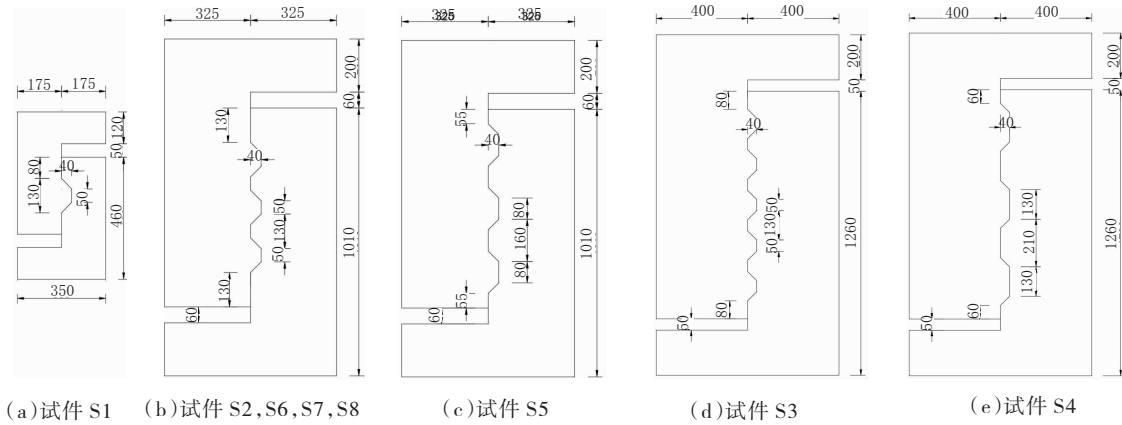


图1 试验试件形式及尺寸(单位:mm)

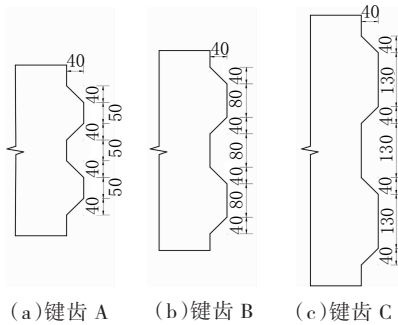


图2 键齿尺寸(单位:mm)

表1 试件编号及参数

试件编号	键齿数量	键齿形式	胶层厚度/mm	正应力水平/MPa
S1	1	A	2	0.5
S2	3	A	2	0.5
S3	5	A	2	0.5
S4	3	C	2	0.5
S5	3	B	2	0.5
S6	3	A	2	0.75
S7	3	A	2	0.25
S8	3	A	1	0.5

试验试件由凸键齿部分和凹键齿部分组成,首先浇筑凹键齿部分,然后以凹键齿的侧面作为凸键齿侧面模板完成凸键齿部分的浇筑。试件浇筑完成后首先在常温下覆膜养护24 h,拆模后在室温下继续喷水养护28 d。同时浇筑用于测量UHPC材料性能的试件,与试验试件进行同条件养护。试件养护完成后,在凹键齿与凸键齿表面涂抹预制节段拼接胶,在横向预应力的作用下持荷24 h,待胶层固化

以实现凹键齿部分与凸键齿部分的良好黏结。试验时实测UHPC抗压强度为121.7 MPa,抗拉强度为8.2 MPa,弹性模量为40.1 GPa。

1.2 试验加载及测量装置

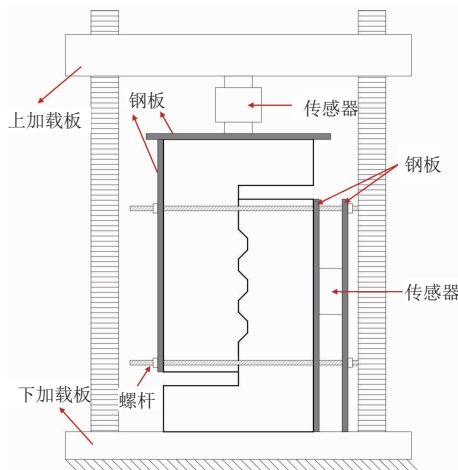
试验加载装置由竖向加载装置和横向加载装置组成,见图3。竖向采用500 kN电液伺服压力试验机施加荷载。横向采用钢板和螺杆组合进行加载,通过控制旋拧螺母实现不同等级横向正应力的施加。试验时,首先按预定等级施加横向正应力,再施加竖向荷载。竖向荷载首先预加载至预期极限荷载的20%,然后完全卸载,正式加载采用力控制模式,先以2 kN/s的速度,100 kN为一级加载至预期荷载的70%,然后以1 kN/s的速度,50 kN为一级加载至试件发生破坏,每级荷载持载时间不少于30 s。

试验过程中采用荷载传感器记录荷载,如图3所示,在试件上放置200 t的荷载传感器以连续记录竖向荷载。横向加载装置中两竖向钢板间放置100 t的荷载传感器以记录施加的横向正应力。试验加载过程中连续测量UHPC多键齿胶接缝试件的竖向位移,位移计布置见图4。

2 试验结果

2.1 破坏过程及破坏形态

试验试件最破坏时会出现胶层开裂或同时出现胶层开裂与键齿剪切破坏的现象,极限荷载时,试件破坏均伴随巨大声响,表现出明显的脆性。在竖向荷载作用下,所有试件均先在胶层处或胶层附近沿胶



(a) 试验加载装置设计



(b) 试件加载图示

图3 试验加载装置

层方向开裂,随着荷载的不断增大,试件出现不同程度的UHPC开裂和钢纤维拔出的噼啪声,裂缝继续

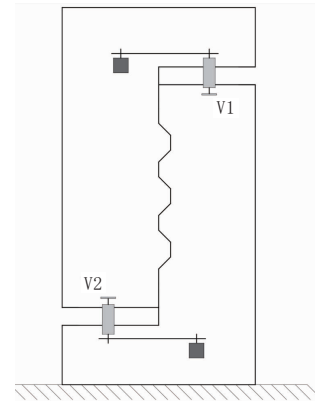


图4 试验量测装置

沿胶层不断扩展。随着荷载的进一步增大,试件S1、S7、S8的裂缝沿凹键齿和凸键齿黏结界面贯通,最终发生破坏,试件发生分离,破坏位置附近有部分UHPC剥落;试件S2、S3、S4、S5、S6除了出现沿粘结面的开裂破坏,还出现由界面向键齿方向或键齿根部的剪切裂缝各试件具体破坏形式见图5。

2.2 荷载及相对滑移结果

各试验试件的主要试验结果见表2和图6、图7,其中包括试件的开裂荷载 V_{cr} ,开裂荷载对应的开裂相对位移 S_{cr} ,极限承载力 V_u ,极限承载力对应的极限相对位移 S_u ,极限剪应力 τ_u ,开裂荷载与极限承载力的比值 V_{cr}/V_u ,延性系数 S_u/S_{cr} 。其中,极限剪应力为极限承载力与剪切面积的比值。

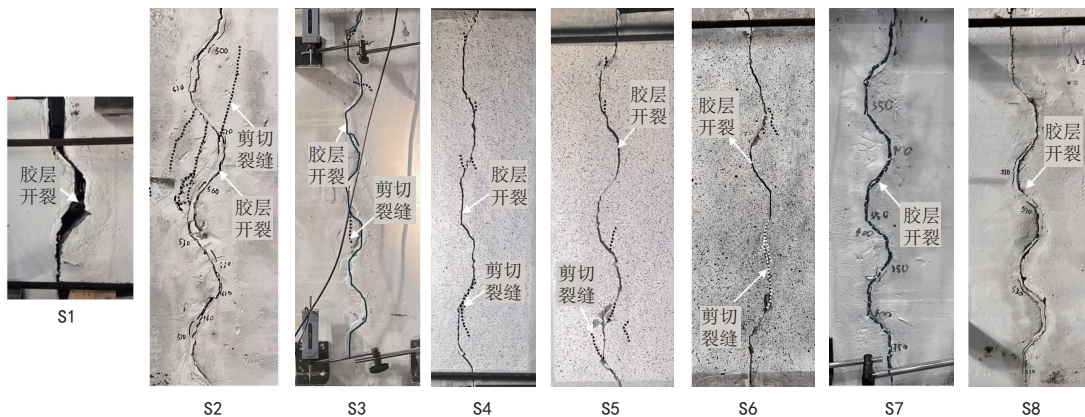


图5 试件破坏形态

表2 UHPC多键齿胶接缝抗剪试验主要试验结果

试件编号	开裂荷载 V_{cr}/kN	开裂相对位移 S_{cr}/mm	极限承载力 V_u/kN	极限相对位移 S_u/kN	极限剪应力 τ_u/MPa	V_{cr}/V_u	S_u/S_{cr}	破坏模式
S1	133	0.24	218	0.39	5.01	0.61	1.63	胶层开裂
S2	442	0.21	625	0.95	6.41	0.71	4.52	胶层开裂 + 剪切裂缝
S3	650	0.14	1032	1.55	8.49	0.63	11.07	胶层开裂 + 剪切裂缝
S4	601	0.17	905	1.34	8.04	0.66	7.88	胶层开裂 + 剪切裂缝
S5	467	0.19	658	0.97	7.44	0.71	5.11	胶层开裂 + 剪切裂缝
S6	563	0.28	846	1.87	8.68	0.67	6.68	胶层开裂 + 剪切裂缝
S7	299	0.16	459	0.85	4.71	0.65	5.31	胶层开裂
S8	397	0.25	550	0.89	5.64	0.72	3.56	胶层开裂

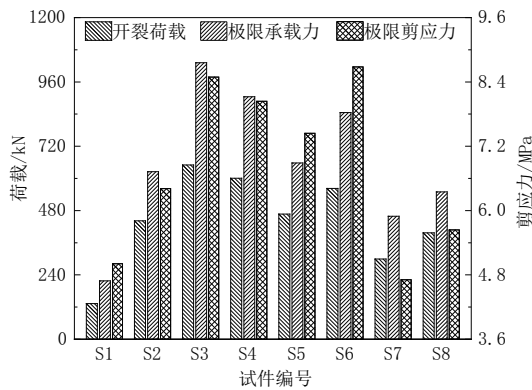


图6 各试件承载力及剪应力对比

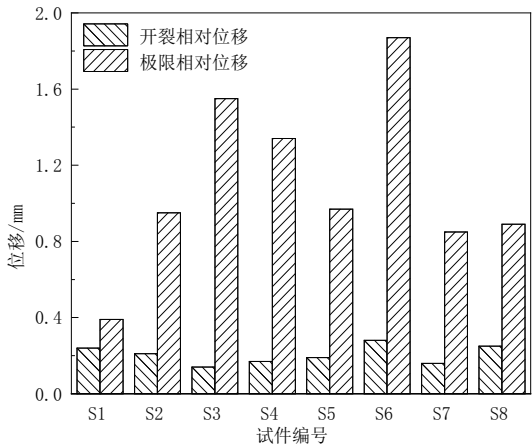


图7 各试件相对位移值对比

UHPC 多键齿胶接缝的抗剪承载力并不是几个对应单键齿抗剪承载的累加,键齿数量、正应力水平和键齿形式对 UHPC 多键齿胶接缝抗剪承载力有不同程度的影响。由表 2 可以看出,所有试件开裂荷载与极限承载力的比值 V_{cr}/V_u 在 0.61 ~ 0.72 之间,荷载作用下所有试件均在胶层处先发生开裂,因此不同参数对应下的 UHPC 胶接缝的 V_{cr}/V_u 值相差不大。由于不同试件在最终破坏时对应的破坏模式不同,因此延性系数出现一定程度的差异。不同参数对 UHPC 多键齿胶接缝抗剪性能的影响将在后续内容中进行详细阐述。

2.3 各参数对 UHPC 多键齿胶接缝抗剪承载力影响分析

2.3.1 键齿数量

不同键齿数对应试件的荷载 - 相对滑移曲线见图 8,UHPC 键齿胶接缝的开裂荷载、极限承载力和极限剪应力随键齿数量的变化见图 7。由表 2 和图 8、图 9 可以看出,键齿数目对 UHPC 键齿胶接缝的抗剪性能有很大的影响,随着键齿数量由 1 增加至 3 和 5,UHPC 胶接缝的抗剪刚度、开裂荷载、极限承载力、极限相对位移和极限剪应力均有不同程度的增长。三键齿和五键齿胶接缝的开裂荷载分别是单键

齿胶接缝开裂荷载的 3.32 倍和 4.89 倍。三键齿和五键齿胶接缝的极限承载力分别是单键齿胶接缝极限承载力的 2.87 倍和 4.73 倍。三键齿和五键齿胶接缝的极限剪应力分别是单键齿胶接缝极限剪应力的 1.28 倍和 1.69 倍。三键齿和五键齿胶接缝的极限相对位移分别是单键齿胶接缝极限相对位移的 2.44 倍和 3.97 倍。随着键齿数量的增加,胶接缝中键齿提供的机械互锁作用增强,使得 UHPC 胶接缝的极限承载力有明显的提高,延性也有较为明显的提升。由图 9 可以看出,开裂荷载和极限承载与键齿数量间呈线性关系,三键齿增加至五键齿时对胶接缝极限剪应力的提高明显于单键齿增加至三键齿时对胶接缝极限剪应力的提高。键齿数量、键齿间的粘结面积、机械互锁力的增加均会导致接缝剪应力的提高,键齿数量的不断增加也提高了胶接缝中影响剪应力各因素共同作用的效果,且更多的键齿能够分别承担由上部荷载传递而来的剪力,因此键齿数量的增加对剪应力的提高效果愈加明显。

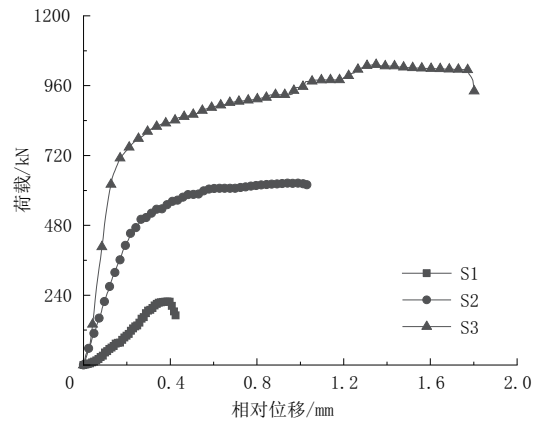


图8 不同键齿数试件荷载 - 相对位移曲线

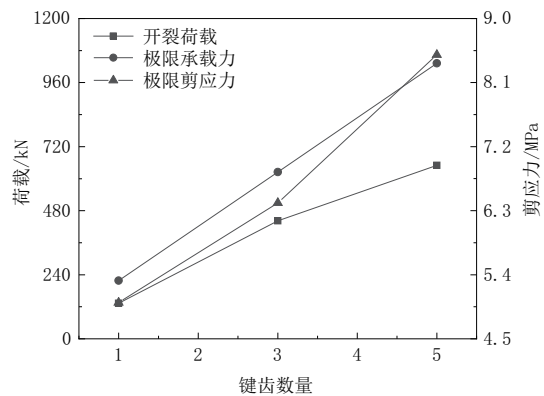


图9 UHPC 胶接缝荷载和剪应力与键齿数量的关系

2.3.2 正应力水平

不同正应力水平对应试件的荷载 - 相对滑移曲线见图 10,UHPC 键齿胶接缝的开裂荷载、极限承载力和极限剪应力随正应力水平的变化见图 11。由表 2 和图 10、图 11 可以看出,正应力水平对 UHPC 键

齿胶接缝的抗剪性能有很大的影响。随着各试件预加正应力水平的增加,UHPC多键齿胶接缝的抗剪刚度变化不大,开裂荷载、极限承载力和极限剪应力与正应力水平基本呈线性增长关系。正应力水平由0.25 MPa增加至0.5 MPa时,UHPC多键齿胶接缝的开裂荷载、极限承载力和极限剪应力分别增加了48%、36%和36%,正应力水平由0.5 MPa增加至0.75 MPa时,UHPC多键齿胶接缝的开裂荷载、极限承载力和极限剪应力分别增加了27%、36%和35%。UHPC多键齿胶接缝的开裂相对位移和极限相对位移随正应力增加也有明显的增长,正应力水平由0.25 MPa增加至0.5 MPa和由0.5 MPa增加至0.75 MPa时,开裂相对位移分别增加了31%和33%,极限相对位移分别增加了12%和97%。随着正应力水平的增加,凹键齿部分与凸键齿部分间的摩擦力和机械互锁力都会相应增加,从而使键齿间咬合的更加紧密,在竖向荷载作用下,除了胶层参与抗剪,键齿也在很大程度上抵抗剪切作用,从而使得UHPC多键齿胶接缝的极限承载力和极限剪应力不断提高,破坏模式也由单纯的胶层开裂向胶层开裂和键齿开裂同时发生而转变。

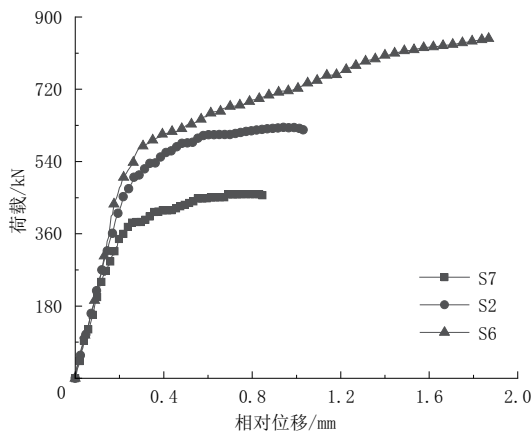


图 10 不同正应力试件荷载 - 相对位移曲线

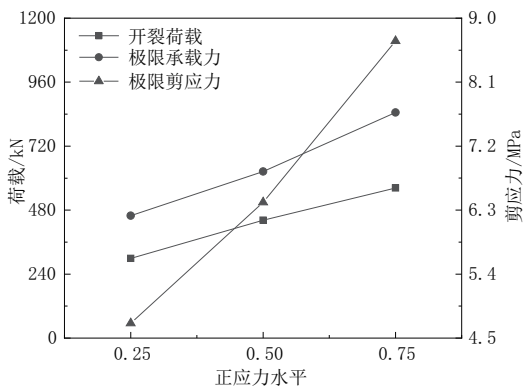


图 11 UHPC 胶接缝荷载和剪应力与正应力水平的关系

2.3.3 键齿形式

不同键齿形式对应试件的荷载 - 相对位移曲线

见图 12。为了更加清晰的体现不同键齿形式对 UHPC 多键齿胶接缝抗剪性能的影响,计算键齿的高深比以代表不同的键齿形式。键齿高深比与 UHPC 多键齿胶接缝开裂荷载、极限承载力和极限剪应力间的关系见图 13。由表 2 和图 12、图 13 可以看出,键齿形式对 UHPC 多键齿抗剪性能的影响程度不同。3 种键齿形式对应 UHPC 多键齿胶接缝试件的抗剪刚度相差不大,试件开裂后相对位移随荷载增长较快。键齿高深比由 3.25(键齿 A)增加至 4(键齿 B)和由 4(键齿 B)增加至 5.25(键齿 C)时,UHPC 多键齿胶接缝的开裂荷载分别增加 6%和 29%,极限承载力分别增加 5%和 38%,极限剪应力分别增加 16%和 8%,开裂相对位移分别降低 10%和 11%,极限相对位移分别增加 2%和 38%。键齿高深比增长幅度较小时(3.25~4),对开裂荷载和极限承载力的影响较小,键齿高深比增长幅度较大时(4~5.25),开裂荷载和极限承载力有明显的增长。由于不同键齿形式胶接缝对应的剪切面积不同,因此观察胶接缝的极限剪应力可以发现,键齿高深比对极限剪应力有明显影响,这是由于键齿 A、键齿 B 和键齿 C 的深度一致,高深比不同体现的是键齿根部剪切长度的不同,键齿根部剪切长度增加即根部剪切面积增加,胶接缝处有更大的抵抗剪应力的区域,同时,高深比的提高也增加了键齿间的粘结面积,胶层对胶接缝剪应力的提高也有一定的贡献,因此增加高深比会明显提高接缝处的极限剪应力。随着键齿高深比的增加, S_u/S_{cr} 的值有明显的提高,说明增加键齿高深比或者说增加键齿根部剪切面积能够有效提高 UHPC 多键齿胶接缝的延性。

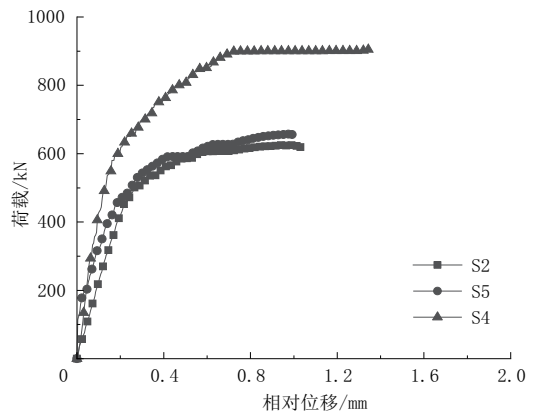


图 12 不同键齿形式试件荷载 - 相对位移曲线

2.3.4 胶层厚度

试件 S8 和试件 S2 对应的荷载 - 相对位移曲线见图 14。由图 14 可以看出,两个试件的荷载 - 相对位移曲线变化趋势基本一致,胶层厚度 2 mm 试件的

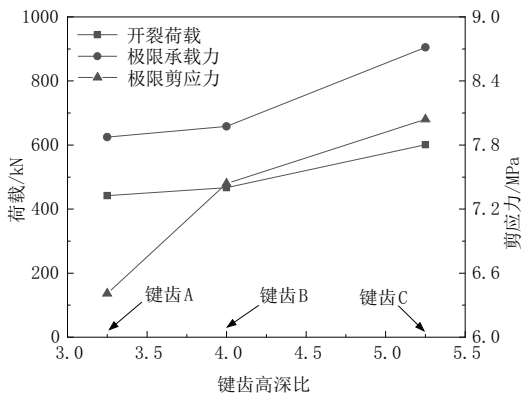


图 13 键齿高深比(键齿形式)和剪应力与正应力水平的关系
抗剪刚度略大于胶层厚度 1 mm 试件的抗剪刚度。由表 2 可以看出,胶层厚度由 1 mm 增加至 2 mm 时,UHPC 多键齿胶接缝的开裂荷载、极限承载力和极限剪应力分别增加了 11%、14%和 14%, S_u/S_{cr} 的增加 了 27%。胶层厚度增加,增加了凹键齿与凸键齿间的黏结强度,从而提高了胶接缝的承载力以及延性。

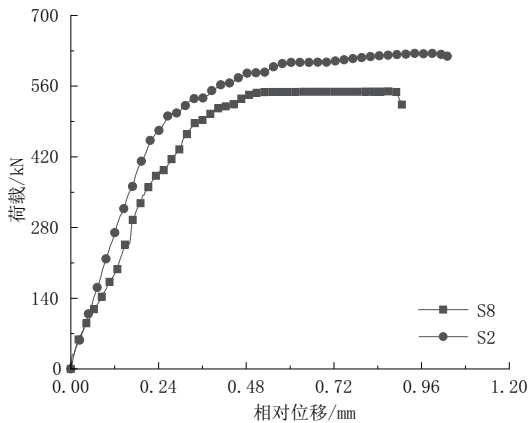


图 14 不同胶层厚度试件荷载-相对位移曲线

3 UHPC多键齿胶接缝抗剪承载力计算方法

目前,关于 UHPC 键齿胶接缝直剪承载力的计算公式将 UHPC 键齿胶接缝的抗剪承载力分为 UH-PC 键齿根部剪切贡献,平接缝部分摩擦贡献和接缝环氧树脂胶黏聚力的贡献。

Gopal^[20]通过 6 个 UHPC 接缝试件的直剪试验提出了理论计算公式:

$$V_u = A_{sk} \sqrt{(f_t + \frac{\sigma_n}{2})^2 - (\frac{\sigma_n}{2})^2} + (-0.009\sigma_n + 0.54) \cdot A_{sm} \sigma_n + C(A_{sm} + A_{ke}) \quad (1)$$

式中: f_t 为 UHPC 的抗拉强度; σ_n 为剪力键接触面上的正应力; A_{ke} 为键齿表面胶层面积; C 为环氧树脂胶在 UHPC 表面的黏结力,由 ASTM 规范建议取为 3.7。

潘任胜等^[17]在 Gopal 等人的理论基础上,通过试验结果考虑了多键齿的折减效应,提出的计算公式为:

$$V_N = K \cdot \left[\frac{1}{2} \left[-(f_t - \sigma_n) + \sqrt{(f_t - \sigma_n)^2 + 4f_t(f_t - \sigma_n)} \right] \sum_{i=1}^N A_{ki} + (-0.007\sigma_n + 0.54)A_{sm} \sigma_n + C(A_{ke} + A_{sm}) \right] \quad (2)$$

式中: K 为多键齿接缝抗剪折减系数,取为 0.85; N 为键齿数量; $\sum_{i=1}^N A_{ki}$ 为键齿根部剪切面积之和; A_{sm} 为平接缝接触摩擦面积。

郑凡^[15]基于试验提出了 UHPC 胶接缝抗剪承载力计算公式:

$$V_{je} = [1.05 + (0.13 - 2.67 \times 10^{-4} f_c') \sigma_n] A_k \sqrt{f_c'} + 0.65 \sigma_n A_{sm} + 6.38 A_e \quad (3)$$

式中: f_c' 为 UHPC 圆柱体抗压强度值,UHPC 立方体抗压强度和圆柱体抗压强度接近,取换算系数为 1^[21]。

闫泽宇^[11]基于试验提出了 UHPC 键齿胶接缝抗剪承载力计算公式:

$$V_j = 1.09 A_k \sqrt{f_c'} + 0.72 \sqrt{f_c'} A_{sm} + 0.83 \sigma_n A_j \quad (4)$$

式中: A_j 为剪力键整个接触面积; A_k 为键齿部分齿根面积; A_{sm} 为剪力键平接部分接触面积。

采用式(1)~式(4)计算 UHPC 多键齿胶接缝的抗剪承载力,并与试验值进行对比,计算结果见表 3。

由表 3 可以看出,式(1)、式(3)和式(4)均未考虑多键齿的折减效应,因此计算结果与试验结果差距较大,式(2)是基于多键齿胶接缝抗剪试验提出的,考虑了多键齿的折减系数,因此能够较为准确的预测 UHPC 多键齿胶接缝的抗剪承载力。

4 结论

目前关于 UHPC 多键齿胶接缝抗剪性能研究尚不完善,且所得结论并不一致。基于这一现状,本文开展了 UHPC 多键齿胶接缝抗剪性能试验,明确了键齿数量、键齿形式、胶层厚度和正应力水平对胶接缝承载能力和延性的影响规律,并通过试验结果对既有承载能力计算模型进行评估。得出以下结论:

(1)UHPC 多键齿胶接缝均在极限荷载的 0.6 ~ 0.7 的范围内出现胶层的开裂,最终会出现胶层开裂的破坏现象或同时出现胶层开裂与键齿剪切破坏的现象。

(2)增加键齿数量,提高正应力水平,采用高深比较大的键齿形式均能不同程度的提高 UHPC 多键齿胶接缝的抗剪性能。胶层厚度对抗剪性能影响较小。

表3 既有公式计算UHPC多键齿胶接缝抗剪承载力

试件编号	$V_{(1)}/kN$	$V_{(2)}/kN$	$V_{(3)}/kN$	$V_{(4)}/kN$	V_u/kN	$V_{(1)}/V_u$	$V_{(2)}/V_u$	$V_{(3)}/V_u$	$V_{(4)}/V_u$
S2	901	766	1506	1064	625	1.44	1.22	2.41	1.70
S3	1233	1048	2314	1436	1032	1.19	1.02	2.24	1.39
S4	1157	984	2213	1348	905	1.28	1.09	2.44	1.49
S5	895	761	1691	1050	658	1.36	1.16	2.57	1.60
S6	903	768	1528	1090	846	1.07	0.91	1.81	1.29
S7	898	763	1483	1039	459	1.96	1.66	3.23	2.26
S8	901	766	1506	1064	550	1.64	1.39	2.74	1.93

(3)潘仁胜等人提出的考虑多键齿折减的公式能较好地预测UHPC多键齿胶接缝的抗剪承载力。

参考文献:

[1] 吴世曾,张文锋,杨靖,等.环氧树脂粘结剂在节段预制拼装桥梁中的应用[J].城市道桥与防洪,2019(11):168-171.
 [2] 杨炜,任才.预制装配式盖梁在无锡凤翔路高架桥中的应用[J].城市道桥与防洪,2019(11):121-124.
 [3] Ahmed G H,Aziz O Q.Shear behavior of dry and epoxied joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading[J].Engineering Structures,2019,182:89-100.
 [4] Yuan A,Yang C,Wang J,et al.Shear Behavior of Epoxy Resin Joints in Precast Concrete Segmental Bridges[J].Journal of Bridge Engineering,2019,24(4):04019009.
 [5] 苟文忠,陈浩,程高,等.节段预制拼装胶接缝抗剪性能试验[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):77-85.
 [6] 袁爱民,何雨,程磊科,等.节段预制桥梁胶接缝剪切性能试验研究[J].重庆交通大学学报,2014,33(6):22-33.
 [7] 李学斌,杨心怡,李东昇,等.剪力键和胶接缝抗剪承载力试验研究[J].土木工程学报,2022,55(1):100-108.
 [8] Lee C H,Chin W J,Choi E S,et al.An Experimental Study on the Joints in Ultra High Performance Precast Concrete Segmental Bridges [J].Journal of Korea Concrete Institute,2011,23(2):235-244.
 [9] Lee C H,Kim Y J,Choi E S.Shear Strength of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) Precast Bridge Joint[J].HPFRCC6,413-420.
 [10] 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.

[11] 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,2020.
 [12] Gopal B A,Hejazi F,Hafezolzhorani M,et al.Shear Strength of Dry and Epoxy Joints for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete[J].ACI Structural Journal,2020,117(1):279-288.
 [13] Gopal B.A,Hejazi F,Hafezoghori M,et al.Numerical analysis and experimental testing of ultra-high performance fiber 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] 轩帅飞.超高性能混凝土节段预制拼装梁抗剪性能研究[D].长沙:湖南工业大学,2021.
 [15] 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,2022,47(6):1-9,41.
 [16] 李兴斌.节段预制拼装UHPC箱梁接缝构造形式及力学性能研究[D].长沙:湖南大学,2023.
 [17] 潘仁胜,程凌霄,何伟伟,等.UHPC键齿胶接缝直剪性能试验研究[J].土木工程学报,2022,55(11):38-49,117.
 [18] Kim Y J,Chin W J,Jeon S J,et al.Interface Shear Strength at Joints of Ultra-High Performance Concrete Structures [J].International Journal of Concrete Structures and Materials,2018,12(59):1-14.
 [19] Jiang H,Chen L,Ma Z J,et al.Shear Behavior of Dry Joints with Castellated Keys in Precast Concrete Segmental Bridges[J].Journal of Bridge Engineering,2015,20(2):04014062.
 [20] Gopal BA,Hejazi F,Hafezolzhorani M,et al.Shear Strength of Dry and Epoxy Joints for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete[J].ACI Struct J,2020,117(1):279-288.
 [21] Graybeal B,Davis M .Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 M Pa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete[J].Aci Materials Journal,2008,105(6):603-609.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smcdi.com 电话:021-55008850 联系网站: http://www.csdqyfh.com