

文章编号:1671-1637(2024)03-0082-12

# 带钢底板 UHPC 梁抗剪承载力计算方法

晏班夫<sup>1,2</sup>, 刘 千<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1</sup>, 涂 兵<sup>2</sup>, 柯 璐<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:**为研究带钢底板的超高性能混凝土(UHPC)梁的抗剪性能和抗剪承载力计算方法,采用试验研究与理论分析的方法,设计制作了 7 片试验梁开展抗剪试验,试验参数包括接缝配置、纵向腹筋设置和剪跨比;结合极限平衡理论和分项线性叠加思想,建立了考虑箍筋、钢纤维、UHPC 基体及钢板抗剪贡献的带钢底板 UHPC 梁抗剪承载力计算建议公式,并与法国规范计算公式进行比较。试验结果表明:接缝梁的破坏形态均为接缝处错位的剪切破坏,主裂缝沿靠近跨中的接缝一侧斜向发展,而完整梁的破坏形态与剪跨比有关,随着剪跨比的增加从剪压破坏向弯剪破坏转变;接缝的存在会降低带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力,且随剪跨比的增大而减小,设置纵向腹筋则可有效提高其抗剪承载力与变形能力;采用本文提出的计算方法的抗剪承载力计算值与试验值的平均比值为 0.91,变异系数为 0.16,采用法国规范抗剪承载力计算方法的抗剪承载力计算值与试验值的平均比值为 1.08,变异系数为 0.29,因此本文提出的计算方法离散性较小,可适用于带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力计算。

**关键词:**桥梁工程;UHPC 梁;抗剪承载力;理论分析;钢底板;湿接缝

**中图分类号:**U445.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.03.005

## Shear bearing capacity calculation method for UHPC beams with steel bottom plate

YAN Ban-fu<sup>1,2</sup>, LIU Qian<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, TU Bing<sup>2</sup>, KE Lu<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:** To investigate the shear performance and the calculation method for the shear bearing capacity of ultra-high performance concrete (UHPC) beams with steel bottom plates, seven test UHPC beams were designed and fabricated for shear-resistance testing by test research and theoretical analysis, with test parameters including joint configuration, longitudinal web reinforcement layout, and shear span ratio. Combined with limit equilibrium theory and sub-item linear superposition, a recommended formula for calculating the shear bearing capacity of UHPC beams with steel bottom plates was established. Shear contributions from stirrups, steel fibers, UHPC matrix, and steel plates were considered in this formula. It was subsequently compared with the calculation formula prescribed by the French code. Test results show that the failure mode of joint beams is characterized by shear failure with joint malposition, with primary cracks

收稿日期:2024-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(U23A20662,52208307);广西科技计划项目(AB23026154)

作者简介:晏班夫(1972-),男,湖南冷水江人,广西大学教授,工学博士,从事 UHPC 桥梁新结构设计理论与工程实践研究。

引用格式:晏班夫,刘 千,王 凯,等.带钢底板 UHPC 梁抗剪承载力计算方法[J].交通运输工程学报,2024,24(3):82-93.

Citation:YAN Ban-fu, LIU Qian, WANG Kai, et al. Shear bearing capacity calculation method for UHPC beams with steel bottom plate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(3): 82-93.

progressing diagonally along the joint side near the mid-span. In contrast, the failure mode of intact beams is related to the shear span ratio, shifting from shear-compression failure to flexural-shear failure as the shear span ratio increases. The presence of joints reduces the shear bearing capacity of UHPC beams with steel bottom plates, and it decreases with the increase of the shear span ratio. The layout of longitudinal web reinforcement can improve the shear bearing capacity and deformability of these beams effectively. The average ratio of the calculated value of shear bearing capacity via the proposed method to the test value is 0.91, with a coefficient of variation of 0.16. In comparison, the average ratio of the calculated value of shear bearing capacity via the French code method to the test value is 1.08, with a coefficient of variation of 0.29. Therefore, the proposed calculation method exhibits lower discreteness and is applicable for the shear bearing capacity calculation of UHPC beams with steel bottom plates. 5 tabs, 10 figs, 31 refs.

**Key words:** bridge engineering; UHPC beam; shear bearing capacity; theoretical analysis; steel bottom plate; wet joint

**Author resume:** YAN Ban-fu (1972-), male, professor, PhD, yanbanfu@gxu.edu.cn.

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (U23A20662, 52208307); Scientific and Technological Plan Project of Guangxi Province (AB23026154)

## 0 引言

预制装配式桥梁具有施工快速,对周围交通及自然环境影响小、标准工厂化施工易于质量控制等优势,已经成为桥梁工程的重要发展方向。为使桥梁上部结构更为轻盈美观并降低全寿命周期内的维护成本,具有超高强度和超高耐久性等特点的超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)近年来已应用于预制装配式桥梁<sup>[1-2]</sup>。UHPC是将水泥、钢纤维、细石英砂、硅灰、高效减水剂等根据最大密度堆积理论配制而成的一种水泥基材料,具有高强度、低孔隙率和高韧性等特点。由于材料内部的孔隙与微裂缝减到最少,普通混凝土结构普遍存在的氯离子与硫酸根离子侵蚀、混凝土碳化、冻融循环等耐久性病害一般难以影响到UHPC材料内部基体,因此UHPC具有极高耐久性。由于自身强度较高,UHPC结构尺寸比传统混凝土结构更小,自重更轻。装配式混凝土桥梁结构通过局部接缝将相邻预制节段连接起来,接缝的局部构造、荷载传递方式和局部刚度将直接影响结构整体承载能力和变形性能。常见接缝类型有干接缝、环氧树脂胶接缝和湿接缝。干接缝和胶接缝一般应用于装配式预应力钢筋混凝土桥梁。对于预制装配式桥梁,常采用湿接缝将预制梁段连成整体。对于采用UHPC湿接缝的装配式UHPC梁,为增大新旧UHPC之间的黏结,常采用高压水冲、喷砂、表面拉毛处理、化学水洗

和人工凿毛等方式处理UHPC预制构件端结合面,但由于浇筑时间不同,接缝处新旧UHPC结合面的钢纤维并不完全连续,是装配式UHPC桥梁结构的薄弱位置<sup>[3]</sup>。

装配式UHPC结构在实际工程中已经得到一定应用,接缝处的抗剪构造、抗弯及抗剪性能是关注重点。抗剪承载力方面,国内外学者对UHPC完整梁开展抗剪试验研究,试验研究参数包括剪跨比,钢纤维掺量、配箍率等<sup>[4-15]</sup>。根据试验结果,Wang等<sup>[11]</sup>基于混凝土塑性理论建立了UHPC梁的抗剪承载力计算公式;戚家南等<sup>[12]</sup>基于极限平衡理论建立了UHPC梁的抗剪承载力计算公式;张宏战等<sup>[13-14]</sup>基于修正压力场理论建立了UHPC梁的抗剪承载力计算公式;马熙伦等<sup>[15]</sup>采用统计分析的方法,建立了基于桁架-拱模型的UHPC梁抗剪承载力计算公式。对于UHPC直剪构件,国内外学者对UHPC干接缝试件和湿接缝试件进行了直剪试验<sup>[16-19]</sup>。Liu等<sup>[20]</sup>根据试验结果提出了基于莫尔圆的UHPC干接缝直接抗剪强度简化计算公式;冯峥等<sup>[21]</sup>建立了适用于无腹筋UHPC整体界面和湿接缝界面的直剪承载力计算公式。对于采用UHPC接缝的普通混凝土预制结构,Ahmed等<sup>[22]</sup>制作了8块桥面板进行试验,试验表明,在弯剪荷载作用下,试件均在预制的普通混凝土部分破坏,UHPC接缝处有明显裂缝,在接缝处应用UHPC材料可以保证结构的整体性。可以看出,目前国内外的试验和理论研究主要集中于

UHPC 完整梁、UHPC 直剪构件以及采用 UHPC 接缝的普通混凝土梁的抗剪性能研究,对采用 UHPC 湿接缝的 UHPC 预制接缝梁抗剪性能研究仍然较少。

为提高 UHPC 湿接缝的受力性能,本文提出一种在 UHPC 梁及其湿接缝下方设置钢底板的 UHPC 接缝梁结构。该结构不改变截面高度,通过下设钢板来改善 UHPC 接缝结合面的钢纤维不连续并迟滞接缝处裂缝的开展,而且钢板还可充当施工时的模板。显然梁底增设的钢板可以显著增加 UHPC 接缝梁的抗弯承载力,但是对结构抗剪承载力、接缝位置裂缝开展及影响尚不明确,因此,对带钢底板 UHPC 接缝梁的抗剪承载力进行研究具有一定工程意义。

本文通过模型试验和理论分析的方法,对 7 片 UHPC 梁底部设置钢板,采用不同 UHPC 接缝形式、不同纵筋设置及不同剪跨比的 UHPC 接缝梁的抗剪承载能力进行了研究;基于极限平衡理论和分项线性叠加思想,研究了带钢底板 UHPC 接缝梁的抗剪承载力计算方法。

## 1 模型试验

### 1.1 试验梁设计

试验梁参数如表 1 所示,其中: $L$  为梁长; $l$  为两端加宽段长度; $\lambda$  为剪跨比; $\rho$  为配筋率; $\rho_v$  为配箍率; $s$  为箍筋间距。共有 7 片下设钢板的 UHPC 试验梁,试验对比参数为有无湿接缝、有无腰筋和不同剪跨比,包括 3 片带钢底板配纵向腰筋接缝梁(S1、S2、S3)、1 片带钢底板无纵向腰筋的接缝梁(B),以及 3 片带钢底板配纵向腰筋的完整梁(C1、C2、C3),接缝梁 S1、S2、S3 与完整梁 C1、C2、C3 的剪跨比  $\lambda$  分别为 3.2、2.4 与 1.4,无纵向腰筋接缝梁 B 的剪跨比  $\lambda$  为 2.4。图 1 为试验梁一般构造,其中: $n$  为完整梁的箍筋数量; $n_1$  为接缝梁跨中段箍筋数量; $n_2$  为接缝梁支点段箍筋数量。试验梁均为矩形截面,截面尺寸为 150 mm×500 mm,有效高度 470 mm。试验梁下设钢板厚度均为 14 mm,栓钉布置于两相邻箍筋间,横向布置 2 排,接缝位置设置于加载点与支撑点中间。为防止加载时试验梁发生倾覆,将试验梁支撑处加宽至 300 mm。

表 1 试验梁参数

Table 1 Parameters of test beams

梁号	$L/m$	$l/m$	$\lambda$	$\rho/\%$	$\rho_v/\%$	$s/mm$	钢筋布置			
							纵筋	跨中加强钢筋	箍筋	腰筋
S1	3.8	0.2	3.2	1.14	0.897	75	4C16	2C16	C8	6C10
S2	3.1	0.2	2.4	1.14	0.897	75	4C16	2C16	C8	6C10
S3	2.0	0.1	1.4	1.14	0.897	75	4C16	2C16	C8	6C10
B	3.1	0.2	2.4	1.14	0.897	75	4C16	2C16	C8	
C1	3.8	0.2	3.2	1.14	0.897	75	4C16	6C16	C8	6C10
C2	3.1	0.2	2.4	1.14	0.897	75	4C16	2C16	C8	6C10
C3	2.0	0.1	1.4	1.14	0.897	75	4C16	2C16	C8	6C10

### 1.2 材料性能

本试验采用等级为 UHPC150 的超高性能混凝土材料,其中钢纤维均采用圆直型,长度为 13 mm,直径为 0.2 mm,体积掺量为 2%。UHPC 材料力学性能试验结果如表 2 所示。试验梁采用 HRB400 级钢筋,按《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)和《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2007)规范对 HRB40 钢筋进行拉伸试验,测试结果如表 3 所示。

表 2 UHPC 材料力学性能

Table 2 Material mechanical performances of UHPC

材料类型	立方体抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/GPa
UHPC150	161.1	21.1	47.14

表 3 钢筋力学性能

Table 3 Mechanical performances of reinforcement

钢筋类型	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%
HRB400	475.6	200	24.5

其中 UHPC 的抗拉强度为 8.44 MPa,通过抗折试验得到,其换算公式为

$$f_2 = f_1 \frac{\alpha_1 h^{0.7}}{1 + \alpha_1 h^{0.7}} \quad (1)$$

式中: $f_1$  为抗折试验中 UHPC 的初裂应力; $f_2$  为换算的 UHPC 抗拉强度; $\alpha_1$  为尺寸效应折减系数,取 0.08; $h$  为抗折强度试验试件的截面高度。

### 1.3 加载装置与测试方案

试验梁为简支结构,如图 2 所示,试验采用四点

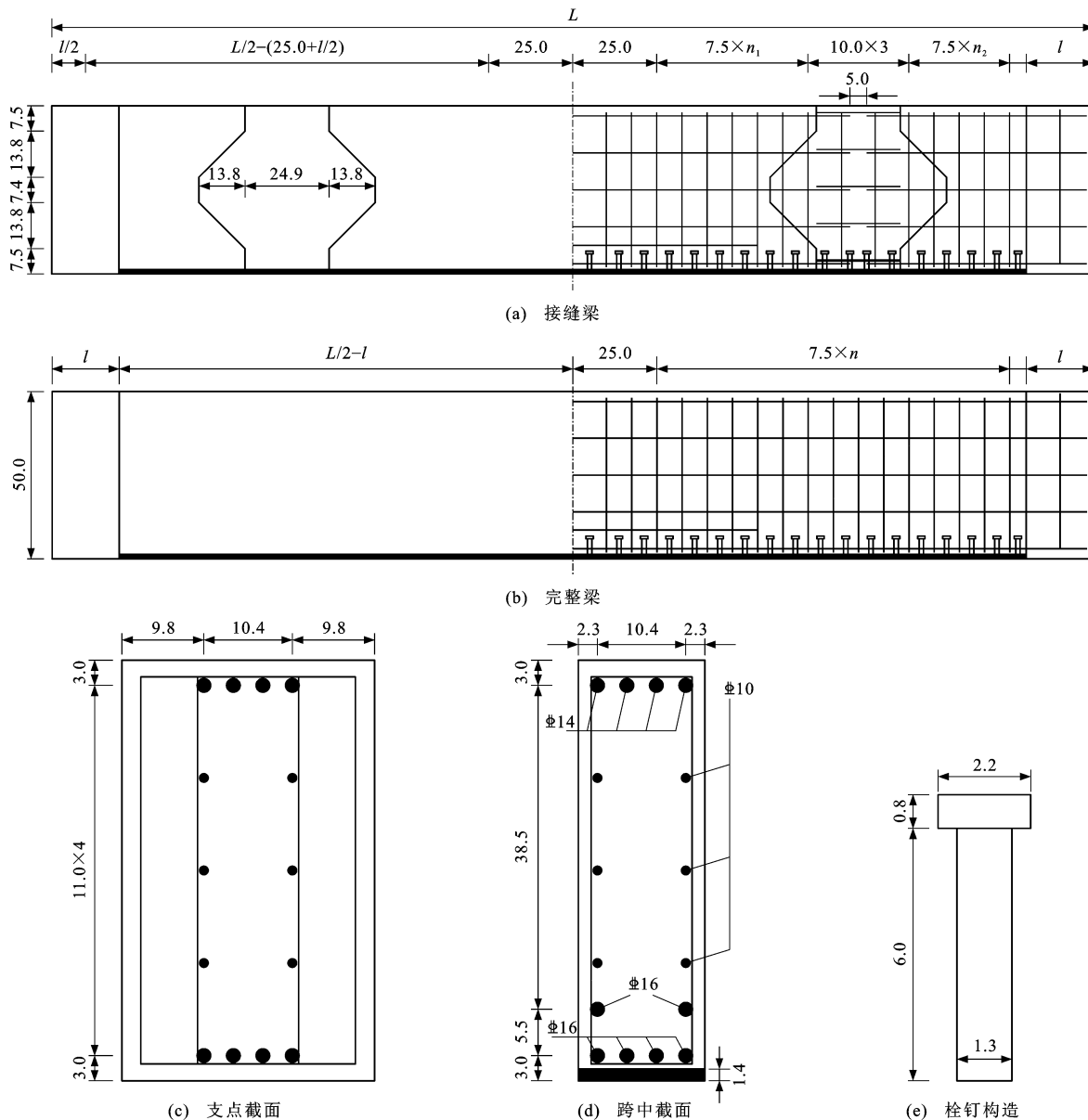


图 1 试验梁构造尺寸 (单位:cm)

Fig. 1 Structural sizes of test beams (unit: cm)

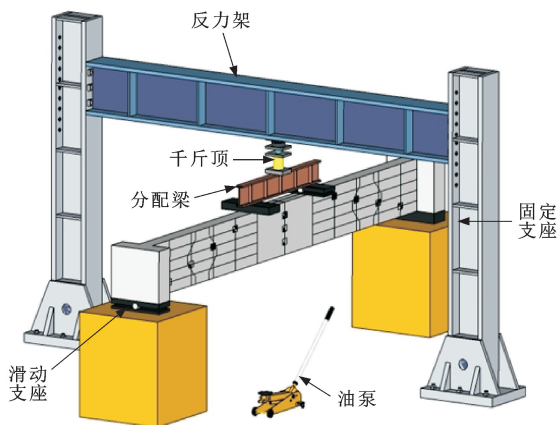


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading device

加载方式,两加载点间距为 50 cm,其上通过放置分配梁,使千斤顶施加的荷载均匀传递至试验梁。通过 250 t 液压千斤顶、200 t 振弦式压力传感器实现荷载的施加与控制。

根据试验内容采用以下测量方案。应变测点具体布置如图 3 所示,其中:LU 为 UHPC 左侧应变片;RU 为 UHPC 右侧应变片;MU 为跨中 UHPC 应变片;LH 为左侧箍筋应变片;RH 为右侧箍筋应变片;LB 为钢板左侧应变片;RB 为钢板右侧应变片;MB 为钢板跨中应变片;J 为纵筋应变片。电阻应变片的布置位置如下:试验梁跨中纵筋和接缝处的箍筋、跨中 UHPC 表面与弯剪段 UHPC 表面、钢板跨中与接缝处。在试验梁支撑点布置千分表,跨中与加载点对

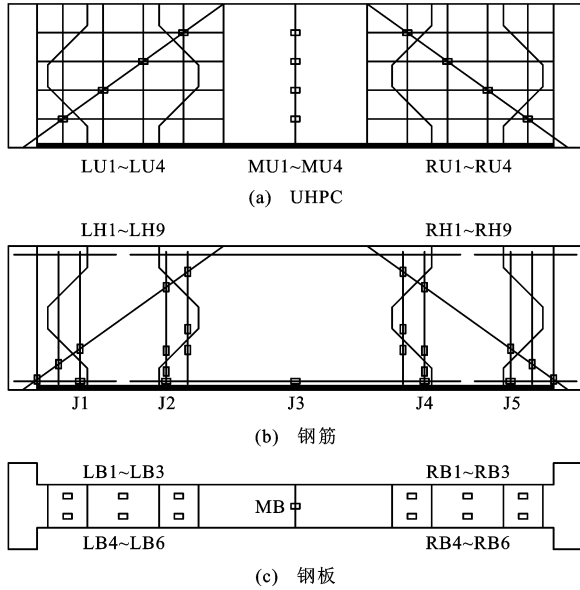


图3 测点布置

Fig. 3 Layouts of measuring points

应位置布设百分表测量试验梁的挠度变形,同时运用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术对试验梁的应变、裂缝进行辅助测试。

## 2 试验结果分析

### 2.1 试验现象及破坏特征

由于接缝的存在,接缝梁和完整梁的受力性能有显著区别,表4为试验梁的极限荷载和破坏形态,其中: $P_u$ 为试验试件的极限荷载; $P_r$ 为出现第1条斜裂缝时的荷载; $\mu$ 为采用几何作图法计算的结构延性系数; $\theta$ 为主斜裂缝与梁轴线的夹角。由表4可以看出:当剪跨比相同时,接缝梁S1与完整梁C1的极限荷载比值为 $1\,184/1\,467=0.81$ ,试验梁S2与C2的比值为 $1\,246/1\,668=0.75$ ,试验梁S3与C3的比值为 $1\,344/1\,735=0.77$ ,平均值为0.78;接缝梁与完整梁的延性系数均值接近,但对于剪跨比为1.4和2.4的带钢底板UHPC梁,接缝梁的延性则明显小于完整梁,说明接缝会降低带钢底板UHPC梁的抗剪性能和延性。同时,有腰筋的接缝梁与完整梁抗剪承载力均大于无腰筋接缝梁,表明腰筋可显著提高结构的抗剪性能,对于剪跨比为2.4和3.2的带钢底板UHPC梁,接缝梁的开裂荷载高于完整梁,说明下设钢板可以改善接缝梁的开裂性能。

试验梁的具体破坏形态见图4,试验梁的破坏形态可分为3种:剪错(错位剪切)破坏、剪压破坏和弯剪破坏。接缝梁均发生接缝错位的剪切破坏,即剪错破坏,剪跨比较小的完整梁发生剪压破坏,剪跨

比较大的完整梁则发生弯剪破坏。

表4 试验梁极限荷载与破坏形态

Table 4 Ultimate loads and failure modes of test beams

梁号	$P_u/\text{kN}$	$P_r/\text{kN}$	$\mu$	$\theta/(\text{°})$	破坏模式
S1	1 184	345	1.41	45	剪错
S2	1 246	296	1.23	45	剪错
S3	1 344	336	1.07	45	剪错
B	1 066	131	1.19	45	剪错
C1	1 467	237	1.28	50	弯剪
C2	1 668	224	1.33	57	剪压
C3	1 735	365	1.07	62	剪压

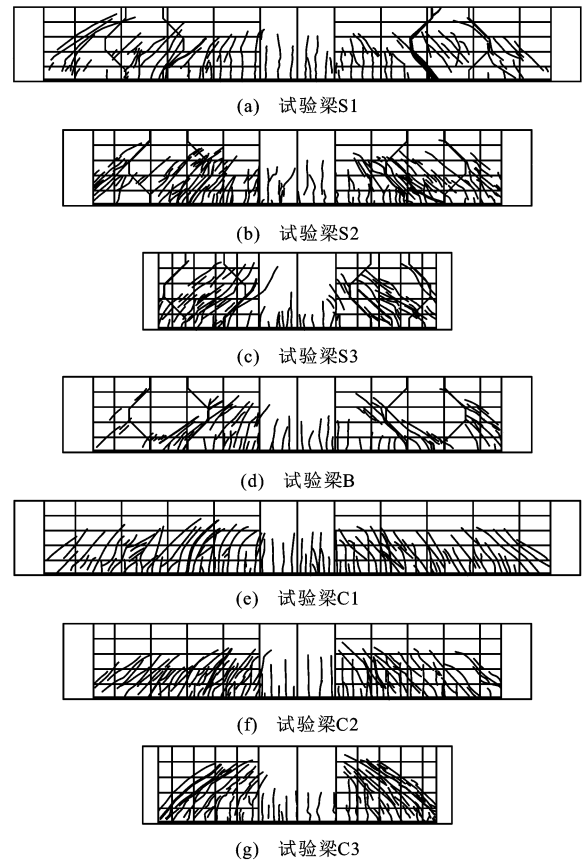


图4 试验梁破坏形态

Fig. 4 Failure modes of test beams

#### 2.1.1 剪错破坏

所有接缝梁的破坏形态均为靠近跨中侧接缝产生错位后的剪切破坏。以试验梁S1为例,其剪跨比为3.2,配箍率为0.897%,接缝区域有6根箍筋,最大间距为100 mm。 $P_e$ 为试验过程中的加载值, $P_e=304\text{ kN}$ 时,纯弯段出现首条裂缝,继续加载,其他区域陆续出现弯曲裂缝,跨中的弯曲裂缝的长度逐渐增加,但宽度发展缓慢; $P_e=345\text{ kN}$ 时,弯剪段出现首条斜裂缝,其位置在接缝结合面,并沿着接缝向上延伸;荷载继续增大,弯曲裂缝不再发展且接缝

区域内出现数条细微斜裂缝; $P_e=569$  kN时,主斜裂缝宽度达到0.2 mm,当其向上发展越过菱形接缝下斜边后,不再沿着接缝结合面延伸,而是沿着加载点的方向延展; $P_e=952$  kN时,顶面加载点附近的UHPC表皮爆裂; $P_e=1184$  kN时,荷载已经无法继续增大而且开始减小,此时按位移继续加载,顶面UHPC表皮不断爆裂,在 $P_e=1173$  kN后,试件在接缝结合面处发生突然断裂,钢板与UHPC脱离,钢板上的栓钉表现为依次破断,断裂面平滑,试验梁发生剪切破坏。

### 2.1.2 剪压破坏

试验梁C2的剪跨比为2.4,配箍率为0.897%,箍筋间距为75 mm。试验加载至 $P_e=196$  kN时,跨中和弯剪段同时出现数条弯曲裂缝; $P_e=224$  kN,弯剪段靠近加载点区域出现第1条指向加载点方向的斜裂缝,随后试件弯剪段底部不断出现平行斜裂缝; $P_e=515$  kN时,试件弯剪段靠近支点侧出现多条平行的长斜裂缝; $P_e=1347$  kN时,加载点附近混凝土爆裂并伴随钢纤维拔出的脆响,此后主斜裂缝的宽度迅速增加; $P_e=1668$  kN时,试件发出一声脆响,支点处钢板栓钉破断与UHPC脱离。试验梁最终破坏时弯曲裂缝较少,弯剪段多为密集的斜裂缝,主斜裂缝出现较早但发展缓慢,加载点处UHPC有压溃迹象,最终破坏形态表现为剪压破坏。

### 2.1.3 弯剪破坏

试验梁C1的剪跨比为3.2,配箍率为0.897%,箍筋间距为75 mm。试验加载至 $P_e=216$  kN时,跨中纯弯段首先出现数条弯曲裂缝; $P_e=237$  kN时,弯剪段靠近跨中区域每间隔7 cm左右出现数条弯曲裂缝; $P_e=456$  kN时,数条斜裂缝在弯剪段远离跨中一侧出现; $P_e=546$  kN时,弯剪段靠近跨中区域的弯曲裂缝开始发展成为斜裂缝; $P_e=1231$  kN时,加载点附近混凝土爆裂并伴随钢纤维拔出的脆响,弯剪段形成密集的网状斜裂缝群; $P_e=1278$  kN时,主斜裂缝开始迅速增长,其他裂缝不再变化; $P_e=1467$  kN时,试件发出一声巨响,主斜裂缝宽度增大至0.8 mm。试件最终破坏时弯曲裂缝的发展集中于跨中,弯剪段靠近支点处出现弯曲裂缝,主斜裂缝底部由弯曲裂缝发展而来,因此,认为其破坏形态为弯剪破坏。

综上所述,完整梁的弯曲裂缝分布区域随剪跨比增加而变宽,每条弯曲裂缝之间间距为7~8 cm,与栓钉的间距相同,说明栓钉布置与裂缝开展有一定关联;接缝梁受力薄弱处为接缝结合面,主斜裂缝均

位于接缝结合面,弯曲裂缝主要分布在跨中,接缝区域主要为斜裂缝,说明接缝处主要承受剪切作用。

贾依楠<sup>[23]</sup>制作了6片试验梁进行加载试验,其中不带钢底板的完整梁的构造和剪跨比与本文完整梁C1和接缝梁S1的构造和剪跨比基本一致,试验结果表明,在跨中部分设置钢板可以提高接缝梁的极限抗剪承载力,前者极限承载力为529 kN,完整梁C1的极限承载力为733.5 kN,接缝梁S1的极限承载力为592 kN。对比上述3片梁的抗剪极限承载力,可以看出,本文完整梁C1和接缝梁S1的极限承载力均高于贾依楠<sup>[23]</sup>试验中完整梁的极限承载力,因此,在UHPC梁下方设置钢板,可有效提高UHPC常规梁及接缝梁的极限承载力。

同时,本文运用DIC技术辅助测试试验梁的应变、裂缝等,DIC测试结果如图5所示,可以看出:对

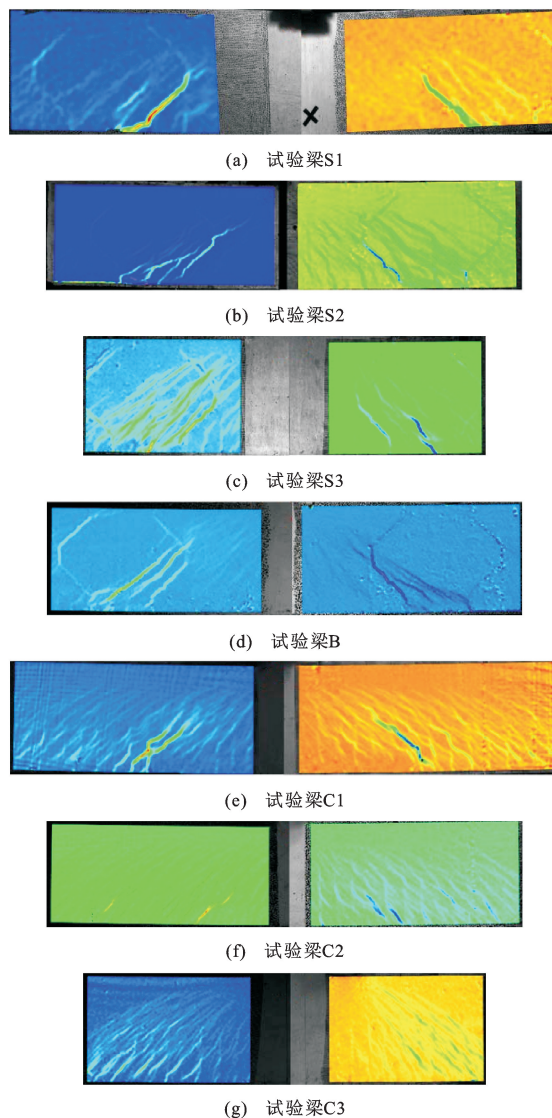


图5 DIC测试结果

Fig. 5 Test results of DIC

于接缝梁,接缝区域的菱形形状特征及主斜裂缝开展特征明显,说明接缝梁破坏前接缝发生明显的张开与错位,且主裂缝一般沿斜向接缝面继续斜向上发展。完整梁裂缝则表现出 UHPC 梁典型的细而密特征,而且主裂缝开展的特征较为明显。

## 2.2 荷载-挠度曲线与裂缝分布

接缝梁和完整梁的荷载-挠度曲线如图 6 所示(图中数值为最大斜裂缝的宽度,单位为 mm),可以看出:开始加载至首条裂缝出现,荷载挠度曲线基本呈直线;初始裂缝均为弯曲裂缝,加载数级后

出现首条斜裂缝,此时所有试验梁的荷载挠度曲线呈线性,刚度未出现明显的降低;在裂缝宽度达到 0.30~0.40 mm 时,除剪跨比为 1.4 的试验梁外,试验梁的荷载挠度曲线的斜率明显减小,且随剪跨比增大,斜率变化越明显,此时接缝梁的主斜裂缝迅速发展,并沿着接缝结合面向加载点方向延伸,试验梁刚度减小,挠度不断增大,由于完整梁的主斜裂缝由弯曲裂缝发展而来,随着荷载增加,其主斜裂缝的发展速度明显小于接缝梁,挠度增长速度也小于接缝梁。

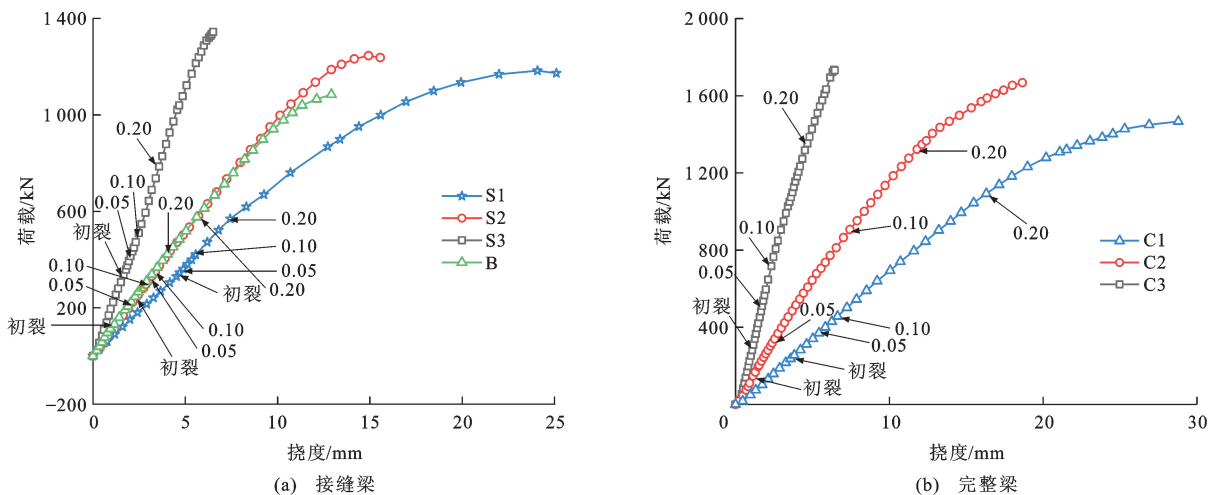


图 6 荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves

由图 6 可知,随着剪跨比的增大,接缝梁和完整梁的抗剪承载力均下降。剪跨比指的是构件截面弯矩与剪力和有效高度乘积的比值,对于简支梁,剪跨比可以表示为剪跨长度与有效高度的比值。剪跨比也反映了构件截面正应力和剪应力的数值关系,构件发生破坏时,是由于正应力和剪应力共同作用下的复合应力状态达到材料的极限强度而产生破坏<sup>[24]</sup>。对于简支梁来说,剪跨比越大,说明在相同剪力作用下,构件截面的正应力也越大,所受复合应力也更大,更容易发生破坏。另外,根据梁的挠曲方程  $EI\omega'' = M$  ( $E$  为梁的弹性模量; $I$  为梁的截面惯性矩; $\omega''$  为梁挠度方程的二阶导数; $M$  为梁的弯矩),可知,弯矩越大,构件的跨中挠度越大,因此,当剪跨比越大时,截面尺寸、配筋和加强钢板等构造相同 UHPC 梁抗剪承载力和荷载挠度曲线的斜率越低。

## 2.3 荷载-箍筋应变曲线

图 7 为接缝梁及完整梁箍筋的荷载-应变曲线,完整梁箍筋与接缝梁接缝处箍筋位置一致。结合文中 2.1 节的试验现象,可以看出,斜裂缝出现前,箍筋应变无明显变化,试验梁以受弯为主。随着荷载

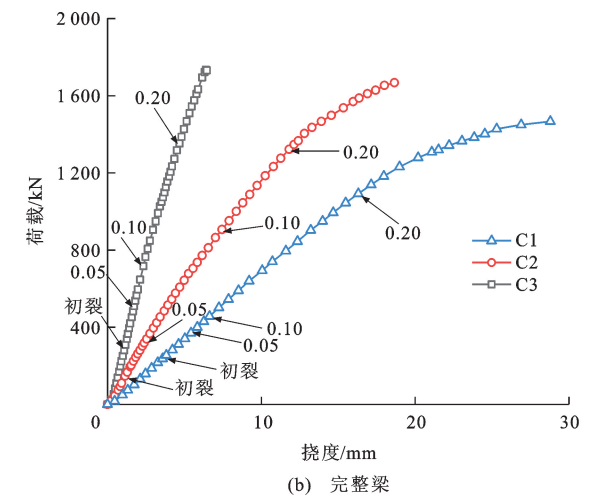


图 7 荷载-箍筋应变曲线

Fig. 7 Load-stirrup strain curves

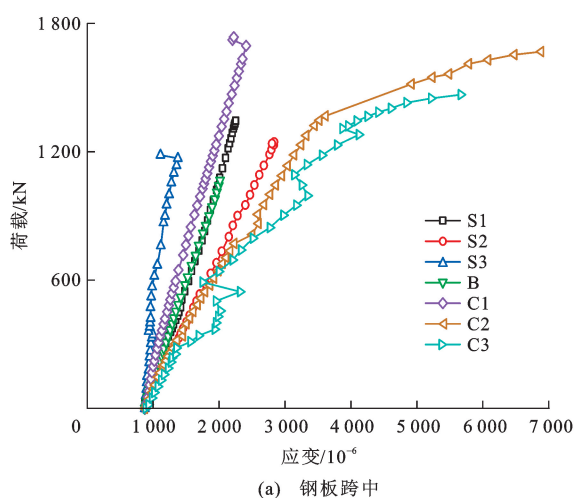
增加,斜裂缝迅速发展并贯穿箍筋,但由于钢纤维的桥接作用,裂缝宽度并未迅速发展,箍筋应变发生了小范围内的突变。

对比试验梁 B 和 S2 可以看出,腰筋可有效抑制斜裂缝的发展。接缝梁的箍筋突变随剪跨比的减小表现越明显,而完整梁的箍筋应变与剪跨比的关系不明显。当主斜裂缝出现后,接缝梁的箍筋应变

有一段增长速度较慢,说明试验梁接缝结合面两端的 UHPC 开始发生错位,应力释放,其他地方基本不再受力;完整梁的箍筋应变经过一段线性增长后发生突变甚至降低,说明完整梁由于开裂发生了应力重分布。

## 2.4 荷载-钢板应变曲线

图 8 为试验梁钢板底部跨中与弯剪段接缝位置处的荷载-应变曲线,可以看出:接缝梁钢板底部跨中应变一般不超过  $2.0 \times 10^{-3}$ ,并未屈服,而完整梁 C2、C3 钢板跨中应变超过  $6.0 \times 10^{-3}$ ,钢板早已屈服(屈服应变约为  $2.5 \times 10^{-3}$ ),但尚未发生破坏,这与模型梁以受剪破坏为主,破坏部位均位于弯剪段,且接缝梁对应的极限荷载均小于完整梁是一致的;



弯剪段接缝梁和完整梁钢底板应变均小于  $2.25 \times 10^{-3}$ ,尚未屈服,这也符合弯剪段以受剪为主的受力特征。另外,钢底板与 UHPC 梁底通过栓钉保证两者的协同受力,从试验梁 S1 的破坏形态可以看出,加载前期,钢板主要起到抑制裂缝两端 UHPC 发生剪切错位的销栓作用;加载后期 UHPC 剪切斜裂缝发展迅速,超过极限状态后,其他部分无法继续提供抗剪贡献(如裂缝宽度过大等),受力转移至钢板,但由于钢板两端未进行约束,裂缝间的剪切错位导致原本协同工作的 UHPC 底面与钢底板间发生脱离,受力转移至栓钉,最后栓钉在剪力和拉拔力的复合作用下发生破坏,钢板及栓钉退出工作,试验梁 S1 发生剪切破坏。

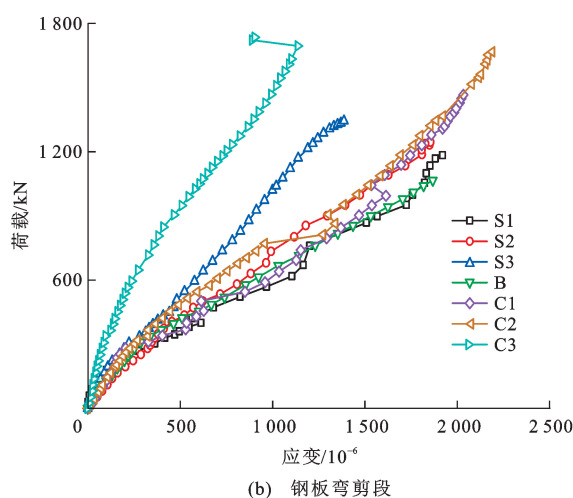


图 8 钢板荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of steel plate

## 3 抗剪承载力计算与对比

### 3.1 计算原理

钢筋混凝土结构的抗剪承载力受到许多因素的影响,如剪跨比、混凝土强度、有无腹筋和钢筋屈服强度等,这使得混凝土的抗剪承载能力难以得到准确统一的解释;此外由于 UHPC 的高强度与钢纤维的引入,带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力分析更为复杂。

目前国内外学者提出的抗剪承载力计算方法主要有极限平衡理论、修正压力场理论、桁架拱理论和塑性上限理论等<sup>[25]</sup>。其中极限平衡理论是根据钢筋混凝土结构的受力平衡和变形协调等关系方程,通过方程求解得到结构的抗剪承载力;斜截面极限平衡理论<sup>[26]</sup>通过对被斜裂缝分开的隔离体进行受力分析,结合平面应力状态下的混凝土强度准则,基于内力平衡方程和变形协调方程来求解抗剪承载力,该理论可较好描述钢筋混凝土梁的受剪破坏机

理。本文基于此理论进行带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力计算。

通过分项线性叠加方法,在 UHPC 基体、钢纤维、箍筋的抗剪贡献基础上加入钢底板销栓作用的影响来计算带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力

$$V_u = V_v + V_w + V_c + V_l \quad (2)$$

式中: $V_u$  为带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力计算值; $V_v$  为箍筋抗剪作用力; $V_w$  为钢纤维抗剪作用力; $V_c$  为 UHPC 基体抗剪作用力; $V_l$  为钢板销栓作用力。

### 3.2 各分项影响因素

#### 3.2.1 箍筋作用

UHPC 梁受剪破坏时箍筋已经屈服,根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018),箍筋提供的抗剪作用力为

$$V_v = A_v f_v \frac{h_0}{s} \quad (3)$$

式中:  $A_v$  为箍筋面积;  $f_v$  为箍筋屈服强度;  $h_0$  为梁的有效高度。

接缝处箍筋和预制节段的箍筋间距最大为 100 mm, 计算时箍筋间距取 100 mm。

### 3.2.2 钢纤维作用

根据 Hassan 等<sup>[27]</sup> 和 Naaman<sup>[28]</sup> 的研究, 钢纤维拔出时其抗力由拔出长度、钢纤维特征、纤维掺量等多种因素决定。假设整个斜裂缝截面上纤维作用均匀分布, 其受力状况如图 9(a) 所示。斜裂缝上的钢纤维的抗剪作用力计算公式为

$$V_w = 0.83 N_w F_w \cot(\theta) b d_f \quad (4)$$

$$N_w = \frac{T_w}{A_w} \alpha_w \eta_w \quad (5)$$

$$F_w = \sigma_f \pi d_w \frac{l_w}{2} + \Delta P \quad (6)$$

式中:  $N_w$  为截面上钢纤维分布数;  $F_w$  为单根纤维

拔出时所提供的抗力;  $b$  为梁截面宽度;  $d_f$  为钢纤维作用的投影高度, 对于完整梁取  $0.9h_0$ ;  $T_w$  为钢纤维掺率, 取 2%;  $\alpha_w$  为钢纤维轴向分布系数, 取 0.5;  $\eta_w$  为钢纤维横向分布系数, 取 0.375;  $A_w$  为钢纤维横截面积;  $\sigma_f$  为 UHPC 开裂抗拉强度, 根据试验得到;  $d_w$  为钢纤维直径, 取 0.2 mm;  $l_w$  为钢纤维长度, 取 13 mm;  $\Delta P$  为使用端钩型钢纤维时产生的锚固作用力, 采用圆直纤维时不计此项。

带钢底板 UHPC 接缝梁先浇筑预制段, 待其达到一定强度后再浇筑 UHPC 湿接缝, 接缝结合面由于钢纤维不连续, 是梁体的薄弱处。本文接缝梁的接缝形状为菱形, 其下部斜边与接缝发展方向一致, 最后的破坏面一般沿接缝结合面斜向上发展, 因而接缝梁钢纤维和完整梁钢纤维计算稍有差异, 如图 9(b) 所示, 接缝梁仅考虑接缝以上部分梁体钢纤维的作用。

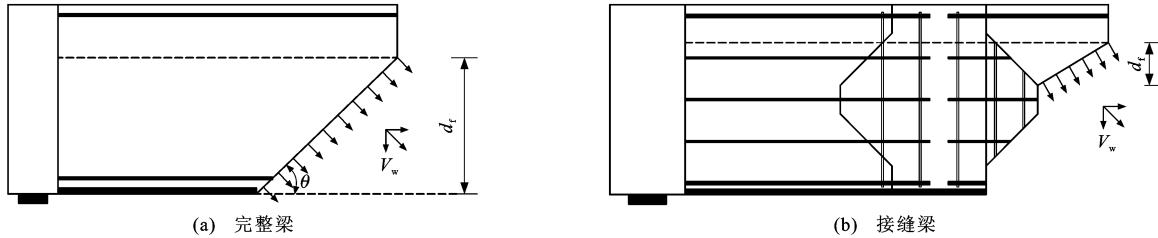


图 9 钢纤维作用

Fig. 9 Effects of steel fiber

### 3.2.3 UHPC 基体作用

带钢底板 UHPC 梁同时承担弯矩和剪力的作用, 需要考虑两种应力之间的相互影响。根据李浩稻<sup>[29]</sup> 所做的粗骨料 UHPC 梁抗剪试验, 假设当试件达到极限强度时, 混凝土在复合受力情况下主拉应力达到 UHPC 材料的抗拉强度。此时剪压区 UHPC 满足摩尔应力圆准则, 于是采用 Rankine 破坏准则<sup>[30]</sup> 描述该状态下 UHPC 应力

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_u}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_u}{2}\right)^2 + \tau_u^2} \leq f_{t1} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_1$  为 UHPC 主拉应力;  $\sigma_u$  为 UHPC 正应力, 取受压为负;  $\tau_u$  为 UHPC 剪应力;  $f_{t1}$  为弯剪状态下 UHPC 的抗拉强度, 由于主拉应力并不大近似取为抗拉强度。

将式(7)变形得到  $\sigma_u$ 、 $\tau_u$  关系式

$$\frac{\tau_u}{f_c} = \frac{\sqrt{f_t \left( \frac{f_t}{f_c} - \frac{\sigma_u}{f_c} \right)}}{\sqrt{f_c \left( \frac{f_t}{f_c} - \frac{\sigma_u}{f_c} \right)}} \quad (8)$$

式中:  $f_c$  为 UHPC 立方体抗压强度;  $f_t$  为 UHPC 抗拉强度。

根据材性试验结果和文献<sup>[26]</sup>, UHPC 的抗拉

强度取  $f_t = 0.05 f_c$ , 采用线性回归的方法对式(8) 进行简化, 得到方便计算的强度破坏准则

$$\frac{\tau_u}{f_c} = \frac{\alpha_1 \sigma_u}{f_c} + \alpha_2 \quad (9)$$

式中:  $\alpha_1$  为线性回归斜率, 取 -0.165 3;  $\alpha_2$  为线性回归截距, 取 0.075 7。

钢板 UHPC 梁弯剪段出现裂缝后, 截面发生应力重分布, 这时仍采用传统的材料力学公式计算截面上正应力和剪应力已不适用。为简化计算, 假设隔离体截面的正应力和剪应力均成矩形分布(图 10)。根据隔离体的受力平衡, 可得到平衡方程

$$V_c = \tau_u b x \quad (10)$$

$$\rho f_y b h_0 = -\sigma_u b x \quad (11)$$

$$\rho f_y b h_0 \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) = V_c \lambda h_0 \quad (12)$$

式中:  $x$  为受压区高度;  $f_y$  为钢筋屈服强度。

联立式(9)和式(10)~(12)可以得到 UHPC 基体的抗剪作用力计算公式

$$V_c = \frac{b h_0 \rho f_y (2 \alpha_2 f_c - \alpha_1 \rho f_y)}{2 \lambda \alpha_2 f_c + \rho f_y} \quad (13)$$

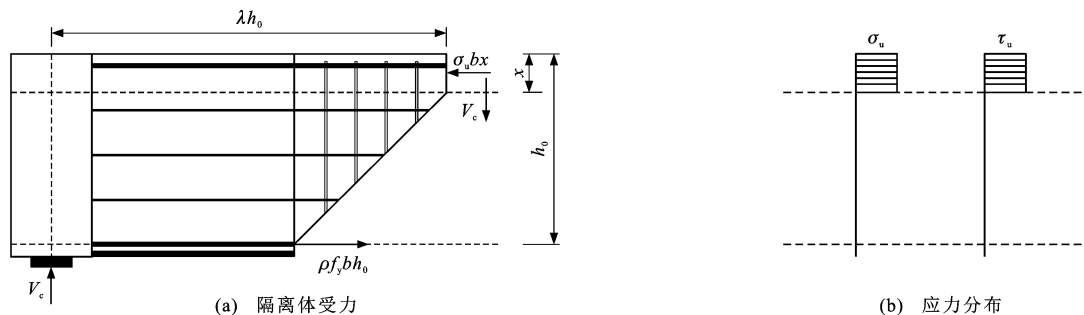


图10 计算图示

Fig. 10 Calculation illustration

### 3.2.4 钢板销栓作用

当 UHPC 梁斜截面开裂后,梁体在荷载作用下发生剪切错位,此时钢板起到了抑制了裂缝两端产生相对位移的作用,其销栓作用为带钢底板 UHPC 梁提供了抗剪贡献。根据文献[31],对钢板销栓作用力  $V_1$  考虑如下

$$V_1 = \frac{2f_{t2}b_c}{\alpha_3(1+\alpha_3\omega_r)} \quad (14)$$

$$\alpha_3 = \sqrt[4]{\frac{E_c}{2\alpha_k\pi E_s I_s}} \quad (15)$$

式中:  $f_{t2}$  为 UHPC 轴心抗拉强度,根据试验结果取 8.44 MPa;  $b_c$  为地基宽度,对于矩形梁取其梁宽;  $\alpha_3$  为钢板与混凝土相对刚度系数;  $\omega_r$  为 UHPC 梁破坏时临界裂缝宽度,本文取 2 mm;  $\alpha_k$  为 UHPC 单轴受拉试验得到的系数,本文取 1.25;  $E_c$  为 UHPC 的弹性模量;  $E_s$  为钢板的弹性模量;  $I_s$  为钢板自身惯性矩。

### 3.3 法国规范 UHPC 抗剪计算公式

在进行 UHPC 结构设计时,通常采用 *National Addition to Eurocode 2—Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPRC)* (NF P 18-710)(简称法国规范)来计算 UHPC 构件的抗剪承载力,该计算方法将 UHPC 结构的抗剪承载力分为 UHPC 基体、钢纤维与箍筋 3 部分,其承载力计算公式为

$$V_F = V_{F1} + V_{F2} + V_{F3} \quad (16)$$

$$V_{F1} = \frac{0.21}{\gamma_f \gamma_E} k f_{cl}^{1/2} b_c h_0 \quad (17)$$

$$V_{F2} = \frac{A_v}{s} f_v z \cot(\theta_c) \quad (18)$$

$$V_{F3} = \frac{A_f \sigma_{fl}}{\tan(\theta_c)} \quad (19)$$

$$\sigma_{fl} = \frac{1}{K \gamma_f} \frac{1}{\omega_1} \int_0^{\omega_1} \sigma_f(\omega) d\omega \quad (20)$$

式中:  $V_F$  为法国规范计算的抗剪承载力;  $V_{F1}$  为法国

规范中的 UHPC 基体提供的抗剪贡献;  $V_{F2}$  为法国规范中箍筋提供的抗剪贡献;  $V_{F3}$  为法国规范中钢纤维提供的抗剪贡献;  $\gamma_f$  为 UHPC 受拉分项系数;  $\gamma_E$  为结构安全系数,规范中取  $\gamma_f \gamma_E = 1.5$ ,为与前述建立的公式进行对比,取  $\gamma_f \gamma_E = 1.0$ ,  $\gamma_f = 1.0$ ;  $k$  为预应力影响系数,取 1;  $f_{cl}$  为 UHPC 圆柱体轴心抗压强度标准值,取 141 MPa;  $b_c$  为 UHPC 梁截面腹板宽度;  $z$  为内力的力臂,取  $0.9h_0$ ;  $\theta_c$  为主压应力与梁轴线夹角;  $A_f$  为钢纤维分布的有效区域的面积,取  $0.9b_c h_0$ ;  $\sigma_{fl}$  为 UHPC 开裂后的残余抗拉强度,本文取 8.02 MPa;  $K$  为纤维朝向系数,取 1;  $\omega_1$  为裂缝最大宽度允许值,按规范取 0.3 mm;  $\sigma_f(\omega)$  为开裂后 UHPC 拉应力,由 UHPC 的应力-裂缝宽度函数计算得到;  $\omega$  为裂缝宽度。

对于接缝梁,其钢纤维作用的计算同 3.2 节内容,只计入在接缝结合面以外的钢纤维作用,计算图示同图 9(b)。

### 3.4 抗剪承载力计算结果对比

表 5 为试验梁的抗剪承载力理论计算值与试验结果的对比,其中:  $V_c$  为带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力试验值。由表 5 可知,本文提出的带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力计算方法考虑了钢板销栓的抗剪贡献,计算结果比法国规范计算值更接近试验结果。本文抗剪承载力计算方法的抗剪承载力计算值与试验值的平均比值为 0.91,方差为 0.02,变异系数为 0.16,而法国规范抗剪承载力计算方法的抗剪承载力计算值与试验值的平均比值为 1.08,方差为 0.10,变异系数为 0.29,本文提出的抗剪承载力计算公式的变异系数较小,离散性较小。可见:本文提出的抗剪承载力计算公式适用于带钢底板 UHPC 梁的抗剪承载力计算。

## 4 结语

(1) 下设钢板可提高 UHPC 接缝梁的抗剪承载

表 5 抗剪承载力计算值与试验值

Table 5 Calculation values and test values of shear bearing capacity

梁号	$V_v/\text{kN}$	$V_w/\text{kN}$	$V_c/\text{kN}$	$V_l/\text{kN}$	$V_u/\text{kN}$	$V_e/\text{kN}$	$V_u/V_e$	$V_F/\text{kN}$	$V_F/V_e$
S1	224.7	85.7	115.8	78.0	504.2	592.0	0.85	608.1	1.03
S2	224.7	85.7	151.1	78.0	539.5	623.0	0.87	608.1	0.98
S3	224.7	85.7	244.3	78.0	632.7	672.0	0.94	608.1	0.90
B	224.7	85.7	151.1	78.0	539.5	533.0	1.01	608.1	1.14
C1	299.6	189.5	115.8	78.0	682.9	733.5	0.93	954.3	1.30
C2	299.6	189.5	151.1	78.0	718.2	834.0	0.86	954.3	1.14
C3	299.6	189.5	244.3	78.0	811.4	867.5	0.94	954.3	1.10

力,由于弯剪耦合作用,其抗剪承载力与剪跨比的增长成反比,接缝的存在会使带钢底板 UHPC 梁的受剪性能降低,腰筋的配置可以提高带钢底板 UHPC 接缝梁的抗剪承载力。

(2)带钢底板 UHPC 接缝梁在接缝结合面处发生破坏,相同情况下,下设钢板可以改善 UHPC 接缝梁的开裂性能。

(3)基于极限平衡理论提出的抗剪承载力计算方法考虑了 UHPC 基体、钢纤维、箍筋、钢板销栓作用的贡献,可以较好地预测带钢底板 UHPC 接缝梁和完整梁的抗剪承载力。

(4)带钢底板 UHPC 接缝梁的抗剪破坏形态和抗剪承载力与钢板的布置和约束方式关系密切,有待进行更深入的研究。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 阎培渝.超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J].混凝土世界,2010(9):36-41.  
YAN Pei-yu. Development and present situation of ultra high performance concrete (UHPC)[J]. China Concrete, 2010(9): 36-41. (in Chinese)
- [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 Bao-chun, JI Tao, HUANG Qing-wei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24. (in Chinese)
- [3] 李国平,胡 皓,任 才,等.桥梁混凝土结构接缝的耐久性性能[J].土木工程学报,2018,51(7):98-103.  
LI Guo-ping, HU Hao, REN Cai, et al. Study on durability of joints in concrete bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 98-103. (in Chinese)
- [4] VOO Y L, POON W K, FOSTER S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(11): 1393-1400.
- [5] VOO Y L, FOSTER S J, IAN G R. Shear strength of fiber

reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 123-132.

- [6] MESZOELY T, RANDL N. Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams[J]. Engineering Structures, 2018, 168: 119-127.
- [7] YANG K H, CHUNG H S, LEE E T, et al. Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 1343-1352.
- [8] DINH H H, PARRA-MONTESINOS G J, WIGHT J K. Shear strength model for steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10): 1039-1051.
- [9] KWAK Y K, EBERHARD M O, KIM W S, et al. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(4): 530-538.
- [10] ZAGON R, MATTHYS S, KISS Z. Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124(15): 258-268.
- [11] WANG Qiang, SONG Hua-lin, LU Chun-ling, et al. Shear performance of reinforced ultra-high performance concrete rectangular section beams [J]. Structures, 2020, 27(8): 1184-1194.
- [12] 戚家南,王景全,周 凯,等. UHPC 梁受剪性能试验与抗剪承载力计算方法[J].中国公路学报,2020,33(7):95-103.  
QI Jia-nan, WANG Jing-quan, ZHOU Kai, et al. Experimental and theoretical investigations on shear strength of UHPC beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 95-103. (in Chinese)
- [13] 张宏战,张瑞瑾,黄承逵.基于 MCFT 理论的钢纤维混凝土梁的截面分析[J].工程力学,2008,25(3):144-150.  
ZHANG Hong-zhan, ZHANG Rui-jin, HUANG Cheng-kui. Sectional analysis of steel fiber reinforced concrete beams using modified compression field theory [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 144-150. (in Chinese)
- [14] 马恺泽,马煜东,邢国华,等.配筋超高性能混凝土梁受剪性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(12):179-188.  
MA Kai-ze, MA Yu-dong, XING Guo-hua, et al. Study on shear behavior of reinforced ultra-high performance concrete

- beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(12): 179-188. (in Chinese)
- [15] 马熙伦,陈宝春,杨 艳,等. R-UHPC 梁的抗剪承载力计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(5): 16-26.  
MA Xi-lun, CHEN Bao-chun, YANG Yan, et al. Calculation method of shear bearing capacity of R-UHPC beam[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(5): 16-26. (in Chinese)
- [16] WU Peng-tao, WU Cheng-qing, LIU Zhong-xian, et al. Investigation of shear performance of UHPC by direct shear tests[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 780-790.
- [17] JANG H, LEE H, CHO K, et al. Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 16-23.
- [18] PAN Ren-sheng, HE Wei-wei, CHENG Ling-xiao, et al. Direct shear strength of UHPC large-keyed epoxy joint: theoretical model and experimental verification[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2022, 27(9): 04022083.
- [19] PAN Ren-sheng, CHENG Ling-xiao, HE Wei-wei, et al. Direct shear performance of UHPC multi-keyed epoxy joint[J]. *Structures*, 2022, 44(2): 1898-1909.
- [20] LIU Tong-xu, WANG Zhen, GUO Jian, 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.
- [21] 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]. *土木工程学报*, 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. (in Chinese)
- [22] AHMED A, FARGHALY A S, AHMED E A, et al. Laboratory testing of GFRP-RC panels with UHPFRC joints of the Nipigon River Cable-Stayed Bridge in Northwest Ontario, Canada[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(11): 05016006.
- [23] 贾依楠. 带 T 型条带 UHPC 菱形湿接缝梁受力性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2020.  
JIA Yi-nan. On the mechanical behavior of the UHPC diamond wet joint beam with T-shaped strip[D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [24] 高剑平,吴章勇,任 乐,等. 梁侧锚贴钢板加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2012, 34(2): 13-16.  
GAO Jian-ping, WU Zhang-yong, REN Le, et al. Experimental study on bending behavior of reinforced concrete beam strengthened with bolted side steel plate[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2012, 34(2): 13-16. (in Chinese)
- [25] 王 峥. 钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012.  
WANG Zheng. Research on inclined section shear capacity of reinforced concrete beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)
- [26] 徐海滨,邓宗才. 超高性能混凝土梁抗剪承载力计算方法[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2015, 43(7): 24-28, 71.  
XU Hai-bin, DENG Zong-cai. Shear bearing capacity of ultra-high performance concrete beams[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2015, 43(7): 24-28, 71. (in Chinese)
- [27] HASSAN A, MEHDI B, WILLIAM D C, et al. Response of steel fiber-reinforced concrete beams with and without stirrups[J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(3): 359-367.
- [28] NAAMAN A E. Tensile strain-hardening FRC composites: historical evolution since the 1960[C]//CHRISTIAN U G. *Advances in Construction Materials 2007*. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 181-202.
- [29] 李浩稻. 粗骨料 UHPC 梁斜截面抗剪性能试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.  
LI Hao-dao. Experimental research on shear behavior of ultra-high performance concrete structure with coarse aggregate[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [30] 过镇海,王传志. 多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究[J]. *土木工程学报*, 1991, 24(3): 1-14.  
GUO Zhen-hai, WANG Chuan-zhi. Investigation of strength and failure criterion of concrete under multi-axial stresses[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1991, 24(3): 1-14. (in Chinese)
- [31] XIA Jun, XIAO Yu-lin, MACKIE K R, et al. Dowel action and shear strength contribution of high strength rebar embedded in ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. *Engineering Structures*, 2015, 83: 223-232.