

引文格式:陈宝春,陈逸聪,周家亮,等. 预应力 UHPC 槽形节段与整体式混凝土板组合梁受剪性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(3): 54-64.

CHEN Baochun, CHEN Yicong, ZHOU Jialiang, et al. Shear behavior of composite girder with prestressed UHPC channel segments and monolithic concrete slab[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 54-64.

DOI:10.19815/j.jace.2024.04031

# 预应力 UHPC 槽形节段与整体式混凝土板组合梁 受剪性能

陈宝春<sup>1</sup>, 陈逸聪<sup>1</sup>, 周家亮<sup>2</sup>, 刘永健<sup>3</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 莆田学院 土木工程学院, 福建 莆田 351100;

3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**将预制的 UHPC 槽形节段通过干缝连接和预应力张拉形成槽形梁, 再与整体现浇的混凝土板组合成的组合梁, 称为预应力 UHPC 槽形节段与整体式混凝土板组合梁 (PUCS-MCS 组合梁)。它是一种能充分发挥不同材料的性能、施工方便且整体性能好的新型桥梁结构。为探究其抗剪性能, 开展了 9 根模型梁的试验。分析了接缝数、接缝处剪力键数、剪跨比、UHPC 钢纤维体积率、配箍率和纵筋率等参数对试件变形、破坏模式、抗剪承载力的影响; 基于试验研究结果, 提出了 PUCS-MCS 组合梁抗剪承载力计算方法。结果表明: PUCS-MCS 组合梁均为剪压破坏, 所有梁在开裂前的荷载-挠度曲线差异不大, 在开裂后刚度不断下降; PUCS-MCS 组合梁的抗剪承载力随接缝处剪力键数、UHPC 钢纤维掺量、配箍率和纵筋率的增大而增大, 随干接缝数量增加和剪跨比的增大而减小, 其中影响最显著的是干接缝和剪力键, 影响最小的是钢纤维掺量和配箍率, 因此 PUCS-MCS 组合梁可不配箍筋, 并可采用较低钢纤维掺量的 UHPC。

**关键词:**超高性能混凝土; 预应力槽形节段梁; 整体式混凝土板; 组合梁; 受剪性能

中图分类号: TU378; U444

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)03-0054-11

## Shear behavior of composite girder with prestressed UHPC channel segments and monolithic concrete slab

CHEN Baochun<sup>1</sup>, CHEN Yicong<sup>1</sup>, ZHOU Jialiang<sup>2</sup>, LIU Yongjian<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China; 2. College of Civil

Engineering, Putian University, Putian 351100, Fujian, China; 3. School of Highway,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Prefabricated ultra-high performance concrete (UHPC) channel segments are connected by dry joints and prestressed tension to form a channel girder, which is then combined with a cast-in-place concrete slab to form a composite girder, which is called as prestressed UHPC composite segments girder with monolithic concrete slab (PUCS-MCS composite girder). It is a new type of bridge structure that can fully utilize the performance of different materials, provide good overall performance, and is easy to be constructed. To explore its shear behavior,

experimental study was conducted on the shear behavior of nine specimens with the parameters of dry joint number, number of the shear keys in the joint, shear-to-span ratio, steel fiber volume fraction of UHPC, stirrup ratio, and longitudinal reinforcement ratio. The effects of each parameter on the deflection, failure mode, and shear capacity of the specimens were analyzed. Based on the experimental study results, a formula was proposed for predicting the shear capacity of PUCS-MCS composite girder. The results show that the PUCS-MCS composite girders are all failed in shear compression. The load-deflection curves of all specimens are similar before cracking, and the stiffness of the PUCS-MCS composite girders weaken more significantly than that of monolithic girder without joint after cracking. The shear capacity of PUCS-MCS composite girders increases with the number of the shear keys in the joint, the steel fiber volume fraction of UHPC, the stirrup ratio, and longitudinal reinforcement ratio, and decreases with the dry joint number and shear-to-span ratio. Among these parameters, the most significant effects are induced by the number of shear keys and dry joints, and the least are the steel fiber volume fraction and the stirrup rate. Therefore, a PUCS-MCS composite girder can be made without stirrup, and the UHPC can be mixed with low steel fiber volume fraction.

**Key words:** ultra-high performance concrete; prestressed channel segmental girder; monolithic concrete slab; composite girder; shear behavior

**Author resume:** CHEN Baochun(1958-), male, PhD, professor, E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn.

## 0 引言

近年来,超高性能混凝土(UHPC)成为土木工程领域的研究热点。由于UHPC具有优异的力学性能和耐久性,因此被广泛应用于桥梁工程中<sup>[1-3]</sup>。由于UHPC梁材料强度高,重量相比普通混凝土梁显著降低,使得预制节段拼装UHPC梁得到广泛应用,然而如何在快速便捷的施工与结构连接的可靠性及耐久性之间取得平衡,依然是工程界面临的一个挑战<sup>[4-5]</sup>。此外,简支梁桥的面板作为主梁的一部分,在纵向受力时产生的压应力相对较小。但是,由于横向受力、局部受力以及结构设计的要求,面板需要有一定的厚度。当使用UHPC时,其高抗压强度可能无法得到充分利用。因此,一种顶板采用普通混凝土,而梁肋和底板(或下翼缘)使用UHPC的组合梁(RC-UHPC组合梁)被应用于工程中。这种组合梁主要采用现浇方式施工,如果要预制的话,受到运输和吊装条件的限制,通常只适用于小跨径的桥梁<sup>[6-7]</sup>。本文的研究对象则是将这两种类型梁结合的一种新型组合梁,它由预制的UHPC槽形节段通过干缝连接和预应力张拉形成槽形梁,再与整体现浇的混凝土板组合而成,称之为预应力UHPC槽形节段与混凝土整体板组合梁(PUCS-MCS组合梁)。它具有如下特点:①主要受力部分的UHPC槽形节

段不含纵向钢筋和横向箍筋,可在工厂快速、少人工制作,并应用工厂蒸汽设备进行热养护,通过一定时间的存放,可大大减少UHPC构件架设后的收缩;②预制节段短、重量轻,运输、架设成本低;③预制节段间采用干缝连接,在桥位处通过张拉预应力索形成槽形梁,施工方便;④桥面采用整体浇筑的普通混凝土,降低了材料费用,且提高了组合梁的整体性。

PUCS-MCS组合梁在国外已有一定的应用,但相关的基础研究并不充分。为将其应用于中国的桥梁工程,作者正开展一系列的相关研究。抗弯性能研究表明,钢纤维掺量对这类组合梁抗弯承载力影响相对有限,当钢纤维掺量从0%增加到3%时,PUCS-MCS组合梁的抗弯承载力仅提高9.8%;桥面板采用普通混凝土、槽形梁节段数对组合梁的抗弯极限承载力无显著影响。因此,从抗弯性能出发,PUCS-MCS组合梁在桥梁工程中的应用具有很好的技术可行性<sup>[8-9]</sup>。在此基础上,本文开展PUCS-MCS组合梁抗剪性能试验研究,共设计制做了9根模型梁,试验参数包括接缝数、剪力键数、剪跨比、钢纤维体积率、配箍率和纵筋率。对试件受力过程、破坏模式和抗剪承载力进行了分析,并探讨了各参数对其抗剪性能的影响,最后基于试验结果提出了组合梁抗剪承载力计算方法。

# 1 试验概况

## 1.1 试件设计

构件截面尺寸及配筋如图1所示。试件主要参数为接缝数  $n$  (取值为 0、1、2)、剪力键数  $K$  (取值为 0、2)、剪跨比  $\lambda$  (取值为 1.5、1.8)、钢纤维掺量  $V_f$  (取值为 1%、2%，钢纤维掺量为体积比)、配箍率  $\rho_{sv}$  (取值为 0%、0.3%) 和纵筋率  $\rho_s$  (取值为 1.5%、1.1%)。试件名在 PUCS-MCS 之后的第一个数表示接缝数。接缝数为 0 的试件 (PUCS-MCS-0) 槽形梁为一整体构件，为方便描述，后续称其为整体梁，将其余试件称为组合梁试件或组合梁。PUCS-MCS-1(1) 和 PUCS-MCS-1(2) 为参数一样的两根基本试件，接缝数为 1 (槽形梁的剪跨区仅有 1 条干接缝)，剪跨比为 1.5，平直干接缝，UHPC 钢纤维掺量为 1%，无箍筋，纵筋率 1.5%。对于接缝数为 2 的试件，其接缝位置如图 1(c) 所示，其他试件的编号中， $K-2$  表示接缝处剪力键数目为 2， $\lambda-1.8$  表示剪跨比为 1.8， $V_f-2\%$  表示钢纤维掺量为 2%， $\rho_{sv}-0.3\%$  表示配箍率为 0.3%， $\rho_s-1.1\%$  表示纵筋率为 1.1% (不布置底板上部的 2 根体外预应力钢绞线)，试件主要参数详见表 1。

试件长 2 000 mm，高 380 mm，由预制 UHPC 槽形节段与整体现浇的混凝土板组合而成。其中预制 UHPC 槽形节段的腹板高 260 mm，厚 50 mm，外倾角为  $70^\circ$ ，底板宽 260 mm，厚 70 mm。PUCS-MCS 组合梁中，仅有 PUCS-MCS-1- $\rho_{sv}-0.3\%$  配有箍筋，其箍筋的构造和布置如图 1(e) 所示，其余试件的 UHPC 槽形节段仅有预应力钢绞线。本文所述纵筋率即为预应力钢绞线配筋率，预应力钢绞线的布置如图 1(a)、(b) 所示。UHPC 槽形节段底部布置 8 根  $\phi^s 15.2$  mm 的预应力钢绞线，张拉力为 97.5 kN，上部布置 2 根  $\phi^s 15.2$  mm 的预应力钢绞线，张拉力为 20 kN。作用于槽形梁上的预应力除作为施工手段将槽形节段形成整体梁外，下部的预应力还要抵抗构件的绝大部分弯拉应力。组合梁上翼缘混凝土板宽 494 mm，厚 50 mm，板内布置间距 50 mm、直径 8 mm 的纵向钢筋。

制作 UHPC 槽形节段时，以整体的梁模板为基础，在所需预制的槽形节段的位置以同一模板进行分段，保证节段面之间的吻合度，同时对需要放置钢筋连接件的位置进行定位。对于干接缝带剪力键的试件，由于 UHPC 具有高抗压强度，因此剪力键内不需要额外配置钢筋等加强措施，剪力键的构造和

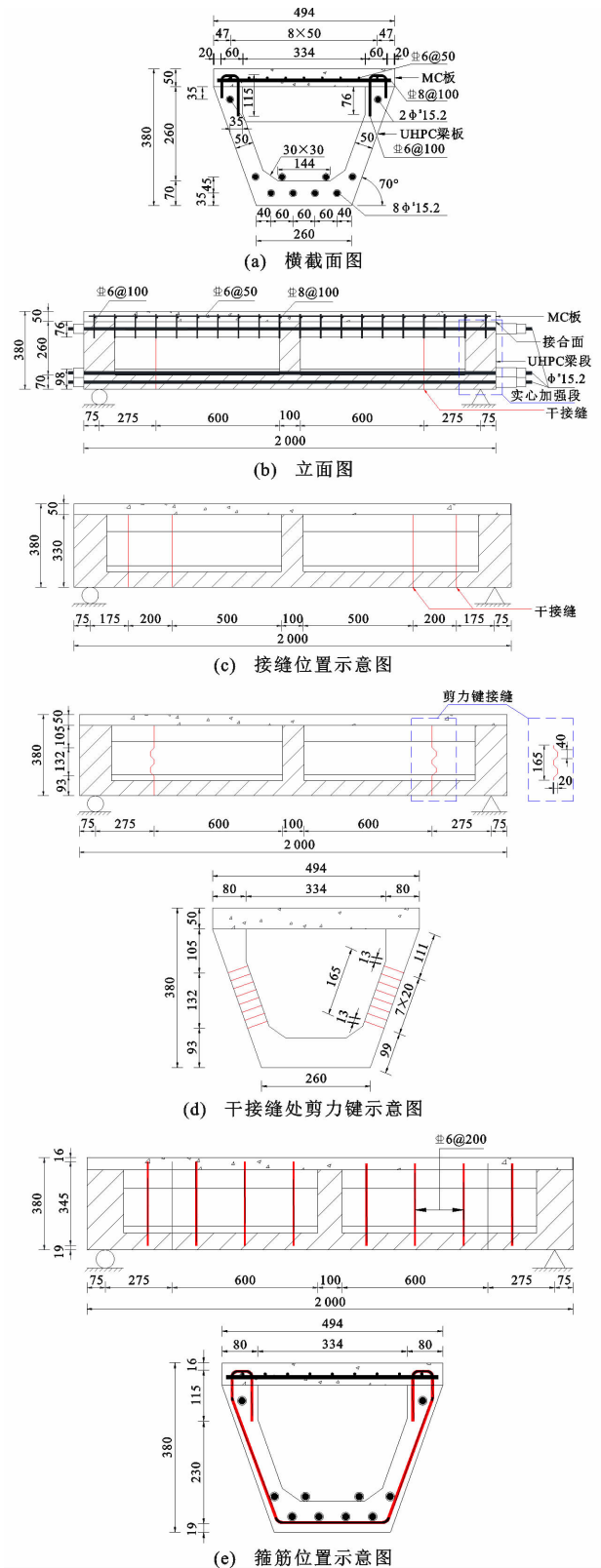


图1 构件截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.1 Section size and reinforcement of specimen (unit:mm)

位置如图 1(c) 所示。对槽形节段进行统一浇筑，保证梁段的强度相同。在完成振捣的同时，按照设计

表1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimen

| 梁编号                           | $n$ | $\lambda$ | $K$ | $V_f/\%$ | $\rho_{sv}/\%$ | $\rho_s/\%$ |
|-------------------------------|-----|-----------|-----|----------|----------------|-------------|
| PUCS-MCS-1(1)                 | 1   | 1.5       | 0   | 1        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-1(2)                 | 1   | 1.5       | 0   | 1        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-0                    | 0   | 1.5       |     | 1        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-1-K-2                | 1   | 1.5       | 2   | 1        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-1- $\lambda$ -1.8    | 1   | 1.8       | 0   | 1        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-2- $\lambda$ -1.8    | 2   | 1.8       | 0   | 1        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-1- $V_f$ -2%         | 1   | 1.5       | 0   | 2        | 0.0            | 1.5         |
| PUCS-MCS-1- $\rho_{sv}$ -0.3% | 1   | 1.5       | 0   | 1        | 0.3            | 1.5         |
| PUCS-MCS-1- $\rho_s$ -1.1%    | 1   | 1.5       | 0   | 1        | 0.0            | 1.1         |

的位置插入深80 mm的钢筋连接件,连接件位置如图1(a)所示。经过高温和常温养护后,完成槽形节段的预制工作。

浇筑顶板前,将槽形节段调整对齐后穿插预应力钢绞线,通过预应力将槽形节段直接张拉成槽梁,干接缝之间不增加黏结剂,直接通过预应力结合。通过预制时留下的钢筋连接件搭设MC板的钢筋笼,钢筋布置如图1(a)、(b)所示,最后浇筑混凝土完成PUCS-MCS组合梁的浇筑工作。

## 1.2 试验材料

试件的UHPC和普通混凝土材料配合比见表2和表3。其中水泥采用P.O42.5水泥;硅灰中SiO<sub>2</sub>含量大于90%,比表面积为 $1.89 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;细砂粒径不大于0.63 mm,平均密度为 $2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;减水剂为CX-8聚羧酸酯高效减水剂,其减水率大于25%;钢纤维为直线型冷拔SSF超强钢纤维,公称直径为0.2 mm,公称长度为13.0 mm,长径比为65.0,弹性模量为200 GPa,抗拉强度为2200~2350 MPa。

表2 UHPC的配合比

Table 2 Mix ratio of UHPC

| 材料 | C    | SF   | QS   | QP   | A    | W    |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 比例 | 1.00 | 0.30 | 1.08 | 0.09 | 0.03 | 0.23 |

注:C为水泥;SF为硅灰;QS为石英砂;QP为石英粉;A为减水剂;W为水;各材料比例均为质量比。

表3 普通混凝土的配合比

Table 3 Mix ratio of conventional concrete

| 材料 | C    | F    | S    | G    | A    | W    |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 比例 | 1.00 | 0.15 | 1.43 | 2.23 | 0.02 | 0.32 |

注:F为粉煤灰;S为河沙;G为碎石。

试块随梁同批次浇筑,UHPC按照《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)<sup>[10]</sup>中试验方法进行试验,试验结果见表4,其中 $f_{cu}$ 为混凝土抗压强度,

表4 混凝土材料性能

Table 4 Material properties of concrete

| 混凝土种类 | $V_f/\%$ | $f_{cu}/\text{MPa}$ | $f_c/\text{MPa}$ | $f_t/\text{MPa}$ | $E_c/10^4 \text{ MPa}$ |
|-------|----------|---------------------|------------------|------------------|------------------------|
| UHPC  | 1        | 145.1               | 138.4            | 7.3              | 4.2                    |
| UHPC  | 2        | 171.6               | 158.2            | 8.9              | 4.5                    |
| 普通混凝土 |          | 59.0                | 51.7             | 4.6              | 4.0                    |

由边长为100 mm的立方体试块测得, $f_c$ 和 $E_c$ 分别为轴心抗压强度和弹性模量,均由 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的棱柱体试块测得, $f_t$ 为单轴抗拉强度,由狗骨试件<sup>[11]</sup>测得。普通混凝土按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)<sup>[12]</sup>中试验方法进行试验, $f_{cu}$ 由边长为150 mm的立方体试块测得, $f_c$ 和 $E_c$ 均由 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的棱柱体试块测得, $f_t$ 由边长为100 mm的立方体劈裂测得。

钢筋按照《金属材料 室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)<sup>[13]</sup>中试验方法进行试验。预应力筋根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[14]</sup>将残余应变为0.002时对应的应力定义为预应力筋名义屈服点。钢筋的测试结果如表5所示。

表5 钢材性能

Table 5 Material properties of steel

| 钢材种类   | 直径/mm | $f_y/\text{MPa}$ | $f_u/\text{MPa}$ | $E_s/10^5 \text{ MPa}$ |
|--------|-------|------------------|------------------|------------------------|
| HRB400 | 6.0   | 414              | 546              | 2.02                   |
| HRB400 | 8.0   | 452              | 633              | 2.04                   |
| 预应力钢绞线 | 15.2  | 1520             | 1907             | 1.94                   |

注: $f_y$ 和 $f_u$ 分别为钢筋的屈服强度和极限强度; $E_s$ 为弹性模量。

## 1.3 加载制度和测点布置

试件测点布置见图2,采用四分点集中力加载,两支间距(计算跨径)1850 mm。在加载点和跨中位置共布置了3个位移计。在试件顶板跨中、加载点和接缝处的纵向钢筋均粘贴了钢筋应变片,在UHPC槽梁端部的预应力钢绞线上布置套筒传感器。在试件加载点位置沿梁截面高度方向和UHPC槽梁与MC板的接合面处粘贴了混凝土应变片。采用DH3816静态应变测试系统用于采集位移、混凝土、钢筋和套筒传感器的应变数据。采用白炽灯观察裂缝,用彩色水笔进行标注,通过ZBL-F101裂缝测宽仪对主裂缝的宽度进行测量。

试件采用分级加载形式进行加载,加载制度参照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[15]</sup>。在正式加载前,试件进行了预加载,以消除试件非弹性应变,同时检查加载设备是否正常。试件正式加载后,在试件开裂前,每级加载20 kN;

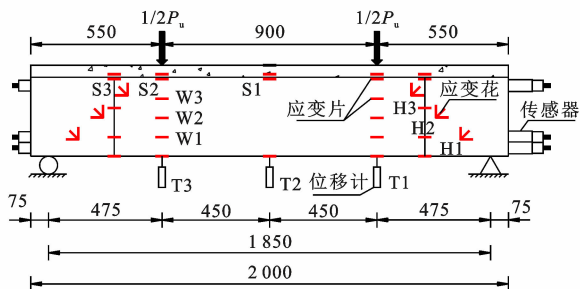
表 6 试验的主要结果

Table 6 Main results of experiment

| 梁编号                           | $P_{cr}/\text{kN}$ | $P_{her}/\text{kN}$ | $P_s/\text{kN}$ | $P_u/\text{kN}$ | $R_b$ | $\theta/(\circ)$ |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------|------------------|
| PUCS-MCS-1(1)                 | 380                | 480                 | 540             | 630             | 1.00  | 22~37            |
| PUCS-MCS-1(2)                 | 380                | 460                 | 540             | 625             | 1.00  | 21~35            |
| PUCS-MCS-0                    | 580                | 1 280               | 1 000           | 1 300           | 2.07  | 40~47            |
| PUCS-MCS-1-K-2                | 380                | 540                 | 460             | 770             | 1.23  | 30~40            |
| PUCS-MCS-1- $\lambda$ -1.8    | 360                | 420                 | 500             | 580             | 0.92  | 17~33            |
| PUCS-MCS-2- $\lambda$ -1.8    | 220                | 380                 | 600             | 540             | 0.93  | 26~39            |
| PUCS-MCS-1- $V_f$ -2%         | 400                | 480                 | 560             | 660             | 1.05  | 22~29            |
| PUCS-MCS-1- $\rho_{sv}$ -0.3% | 400                | 540                 | 560             | 640             | 1.02  | 18~29            |
| PUCS-MCS-1- $\rho_s$ -1.1%    | 300                | 420                 | 500             | 580             | 0.92  | 16~32            |



(a) 加载照片



(b) 加载示意图

图 2 加载方式和测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Loading method and measuring point arrangement (unit:mm)

出现腹剪斜裂缝后,每级加载 10 kN。每级荷载持荷 5~10 min,在此期间记录应变片、位移计、裂缝位置和宽度等实测的试验数据。

## 2 试验结果分析

### 2.1 试验主要结果

试验主要结果列于表 6,其中斜裂缝开裂荷载  $P_{cr}$  为试件出现首条斜裂缝时的荷载,水平裂缝开裂荷载  $P_{her}$  为当翼缘处出现水平裂缝时所对应的荷载,  $P_s$  为裂缝宽度达 0.2 mm 的荷载,极限荷载  $P_u$  为构件破坏时对应的荷载,  $R_b$  为各参数构件的极限荷载和两根基本试件的平行均值的比值,  $\theta$  为斜裂缝的角度(斜裂缝和水平线所形成的角度)范围。从表 6 可以看出,基本试件 PUCS-MCS-1(1)和 PUCS-MCS-1(2)的极限荷载相近,其他各试件主要试验结果也相近。从后续的图 3(b)、图 4(a)和(b)也可知二者的荷载-挠度曲线、裂缝开展模式也相近。在对比分析各试件与基本试件极限承载力时,取 2 根基本试件极限荷载的平均值(627.5 kN)为基本试件的极限荷载。后续其他对比分析时,也均取 2 根基本梁的平均值为基本梁的试验值。

### 2.2 荷载-跨中挠度曲线

图 3 为所有 PUCS-MCS 组合梁的荷载-跨中挠

度曲线。从图 3 可知,所有试件的受力均经历了弹性阶段(OA 段)、裂缝发展阶段(AB 段)和破坏阶段(BC 段)。其中,A 点为试件出现首条斜裂缝(宽度约 0.05 mm)时对应的荷载点,B 点为斜裂缝宽度达到 0.20 mm 时对应的荷载点,C 点为梁顶板被压溃、试件发生剪压破坏对应的荷载点。

由图 3(a)可知,在开裂前的 OA 段,各试件的荷载-挠度曲线基本重合,各参数对组合梁的弹性刚度影响不大。在裂缝发展的 AB 段,所有试件的刚度均减弱,其中 PUCS-MCS 组合梁刚度减弱程度较整体梁更明显,这是由于 PUCS-MCS 组合梁中的钢纤维“桥接”作用在干接缝处中断,影响 UHPC 中钢纤维的阻裂作用。试件在破坏阶段刚度不断下降,最后顶板被压溃,出现剪压破坏(图 4)。由图 3(b)可知,2 根基本试件的受力性能相近,为便于分析,采用 PUCS-MCS-1(1)与其他组合梁进行对比分析。由图 3(c)可知,整体梁 PUCS-MCS-0 的刚度、开裂荷载和极限荷载均高于基本试件,表明槽形梁的干接缝对梁的抗剪受力性能有不利影响。由图 3(d)可知,带有剪力键的 PUCS-MCS-1-K-2 试件进入破坏阶段时对应的荷载和极限荷载均明显高于基本试件,进入破坏阶段后,在相同荷载下,PUCS-MCS-1-K-2 的挠度小于组合梁,因此剪力键对于组合梁的承载力和刚度有改善作用。从图 3(e)中可以看到,增大剪跨比后,相同荷载下挠度增加的幅度大于其他组合梁的参数。对比图 3(e)、(f)可知,增加剪跨区的接缝数量,组合梁的开裂荷载明显降低,开裂后挠度明显增加。从图 3(g)可以看出,钢纤维仅在开裂前起作用,开裂后不再像整体梁一样在裂缝发展阶段维持刚度不变,而是和其他组合梁一样挠度明显突增,刚度下降。从图 3(h)、(i)可以看出,配箍率和纵筋率的变化对组合梁的挠度影响甚微。

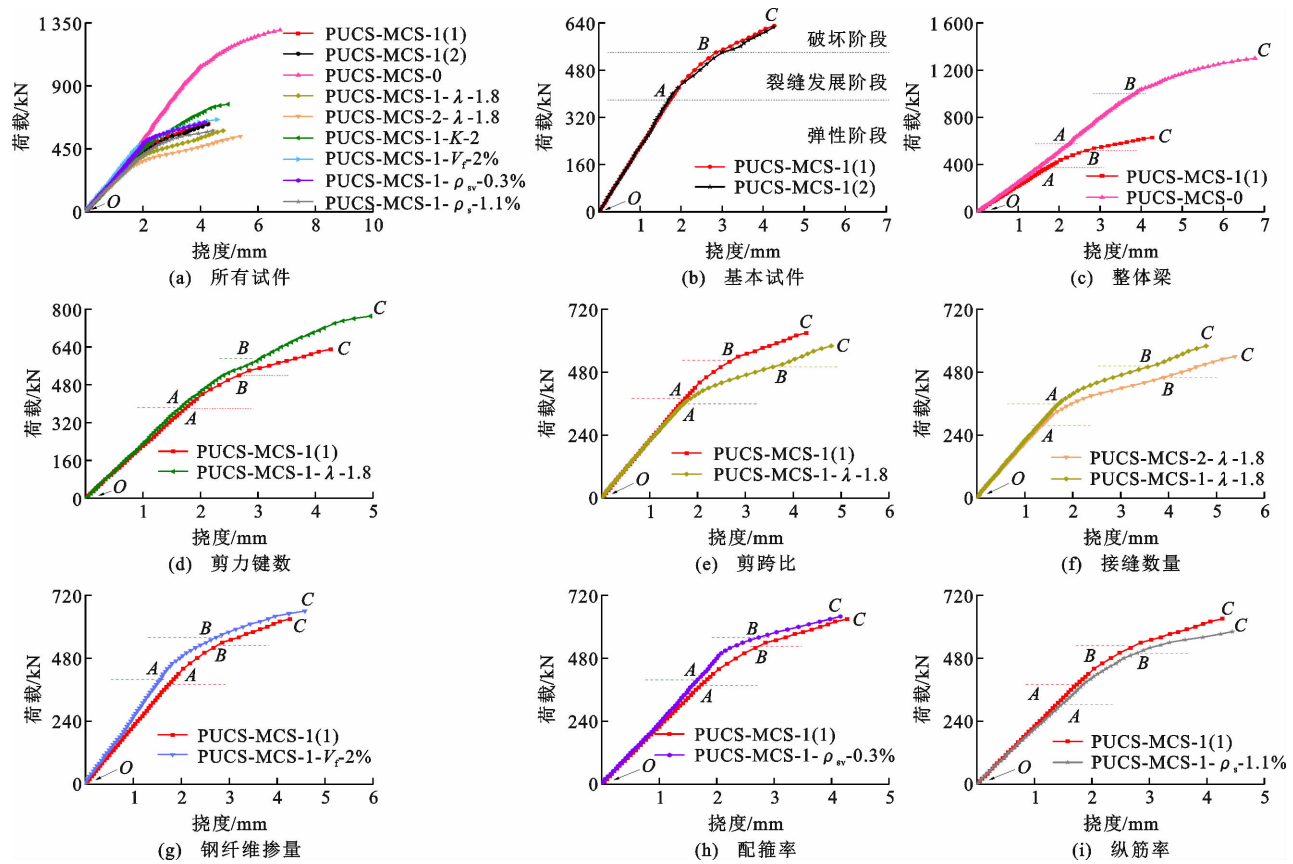


图3 试件荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection curve of specimens

## 2.3 裂缝

图4为所有试件最终裂缝分布和破坏形态,图4中括号外的数值为裂缝宽度,括号内的数值为荷载,例如0.05(380)表示出现裂缝的宽度为0.05 mm,对应的荷载为380 kN。可以看出所有试件均发生了剪压破坏。

对于PUCS-MCS组合梁,当荷载达到极限荷载 $P_u$ 的41%~63%时,组合梁剪跨段腹板中出现了与干接缝相交、指向加载点和支座的斜裂缝,宽度约为0.05 mm;在裂缝发展阶段,随着荷载的增加,斜裂缝的数量不断增加,并且向加载点和支座方向发展;荷载达到 $P_u$ 的72%~84%时,组合梁沿着顶板和UHPC槽形梁的交界处(简称接合面)均出现了宽度约为0.05 mm的水平裂缝;继续加载,荷载达到 $P_u$ 的78%~89%时,组合梁的最大裂缝宽度达到0.2 mm;进入破坏阶段后,随着荷载不断增加,组合梁的顶板侧面上由于竖向干接缝和水平接合面的错动,出现了从接缝顶部向加载点处发展的斜裂缝,继续加载,试件剪跨区的顶板出现贯通的裂缝,随后受压区混凝土被破坏,荷载无法继续增加,

组合梁最终形成了从支座处到加载点、与干接缝相交的斜裂缝,斜裂缝的角度主要集中在 $16^\circ\sim 40^\circ$ 之间、宽度在0.8~1.2 mm之间。

对于整体梁PUCS-MCS-0,裂缝开展初期的表现与组合梁相似。当加载至75% $P_u$ 时,梁的跨中出现了在组合梁中没有的、多根竖向弯曲裂缝;出现接合面水平裂缝时的荷载为98% $P_u$ ,远大于组合梁的72%~84% $P_u$ ;荷载达到 $P_u$ 时,梁中形成一条主斜裂缝,它与水平线所形成的角度为 $47^\circ$ ,宽度为1.3 mm。总体而言,整体梁的抗剪能力优于组合梁。

从图4(a)~(c)可以看出,在基本试件中,由于干接缝的存在,消耗了剪跨区混凝土产生裂缝的能量,裂缝分布表现出被干接缝阻断的不连续性,梁腹部的斜裂缝数量明显减少,同时斜裂缝角减小,范围为 $21^\circ\sim 37^\circ$ 。对比图4(e)和图4(f)可知,增加接缝数量后,干接缝的影响明显减小,斜裂缝数量明显增加,裂缝分布也更趋于整体梁,斜裂缝的角度明显增大。从图4(d)可以看出,增加剪力键数使干接缝的影响有所削弱,斜裂缝的角度增加且沿梁高的分布更均匀,主斜裂缝更为明显。结合图3的分析可知,干接缝数对组合梁的抗剪性能有削弱作用,而干接

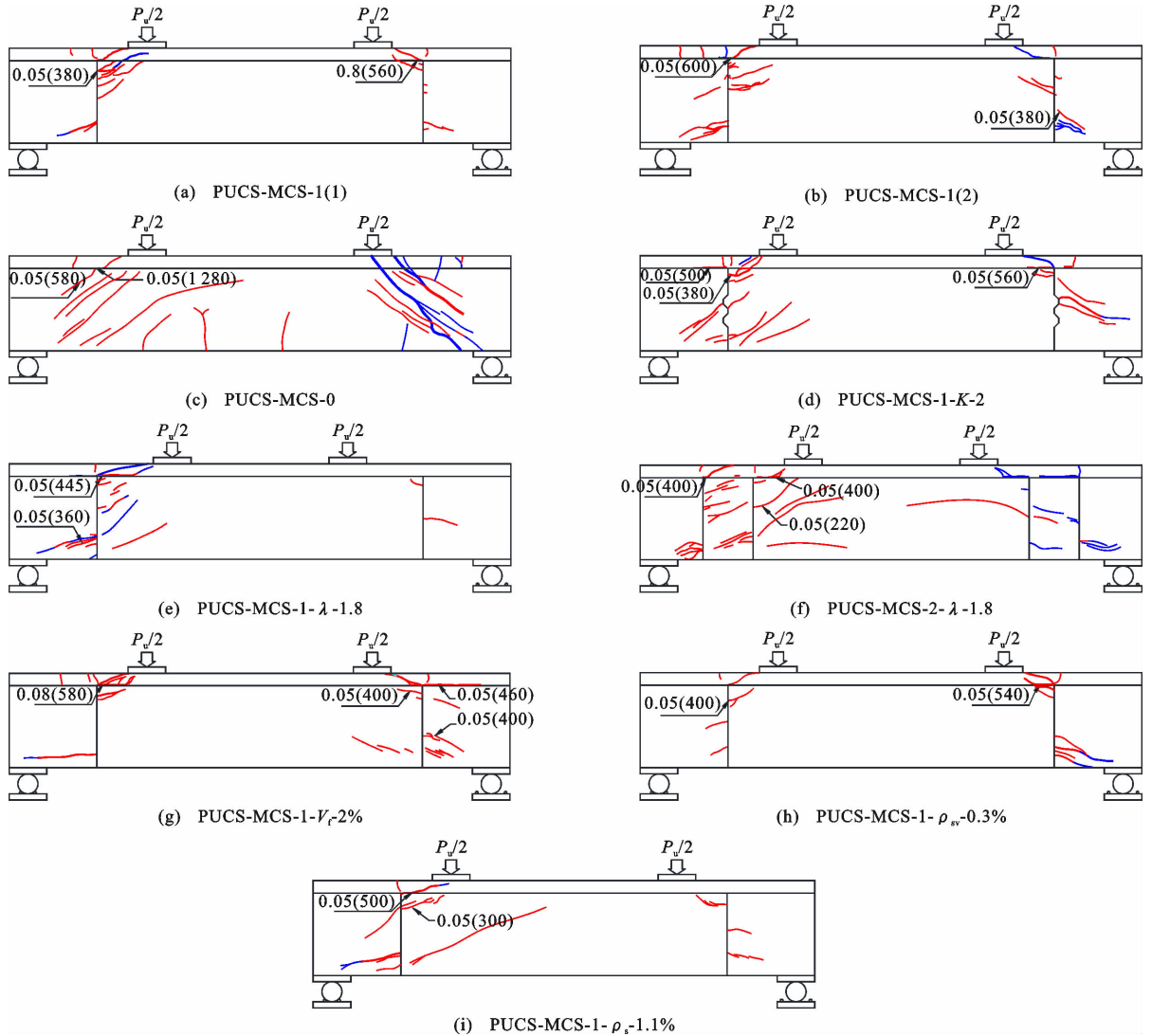


图4 试件裂缝分布与破坏形态

Fig. 4 Crack distribution and failure pattern of specimens

缝处的剪力键能改善干接缝的这种削弱作用。实际应用时,从抗剪性能出发,PUCS-MCS的槽形梁节段数不宜太多,干接缝处应设置剪力键。

从图4(e)可以看出,增加剪跨比减小了斜裂缝角度,对于结合面处的水平裂缝影响更明显,水平裂缝更早出现且长度更长;这与其他梁的抗剪性能相似,剪跨比的增大降低了梁的抗剪能力。从图4(g)、(h)可以看出,增加钢纤维掺量和配箍率会增强梁腹部处的抗开裂能力,使得构件的耗能更集中于接缝处,但对裂缝宽度影响较小;图4(i)还表明减少纵筋率对斜裂缝的分布影响较小。

此外,组合梁和整体梁中均出现了水平裂缝,但二者并不相同。在组合梁中,由于MSC板是整体浇筑的,而PUCS梁在干接缝处是断开的,因此在界面上的受力分布并不均匀。由于PUCS的腹板

较薄,会在干接缝和结合面的交接点处产生剪力,导致从该交接点开始出现水平裂缝<sup>[16]</sup>。而在整体梁中,结合面是截面的最薄弱处,因此,裂缝发展到结合面后,会沿着该薄弱面处继续发展,从而产生水平裂缝。

## 2.4 抗剪承载力

从表6可以看出,与基本试件相比,其他试件的极限荷载可分为极限荷载高于基本试件、低于基本试件和基本相同3组:第1组为PUCS-MCS-0和PUCS-MCS-1-K-2二个试件,第2组为PUCS-MCS-2-λ-1.8、PUCS-MCS-1-λ-1.8和PUCS-MCS-1-ρ<sub>sv</sub>-1.1%三个试件,第3组为PUCS-MCS-1-V<sub>f</sub>-2%和PUCS-MCS-1-ρ<sub>sv</sub>-0.3%二个试件。

在第1组试件中,整体梁(PUCS-MCS-0)的抗剪承载力在所有试件中最高,为基本试件的2.07

倍,表明干接缝对组合梁承载力有明显的有利作用。进一步对比第2组中的PUCS-MCS-2- $\lambda$ -1.8、PUCS-MCS-1- $\lambda$ -1.8试件可知,当干接缝数从1增加到2时,其极限荷载继续降低,这与抗弯承载力受干接缝数影响较小不同<sup>[8]</sup>。因此,一方面在实际应用中宜减少干接缝的数量,另一方面在组合梁抗剪极限承载力计算中应考虑干接缝的不利影响。

当试件的干接缝处剪力键数量从0增加到2时,PUCS-MCS-1-K-2试件的极限荷载为基本试件的1.23倍,表明增加剪力键数能有效提高组合梁的抗剪承载力。当然,本文的剪力键只设计了一种类型,不同类型的影响还有待今后的深入研究。

第2组3个试件的变化参数为剪跨比 $\lambda$ 的增大和纵筋率 $\rho_s$ 的降低,它们均导致组合梁极限荷载的降低。降低最为明显的是PUCS-MCS-2- $\lambda$ -1.8试件,剪跨比 $\lambda$ 增大加上槽形梁节段数为3,导致其极限荷载仅为基本试件的0.86倍。另两个试件PUCS-MCS-1- $\lambda$ -1.8和PUCS-MCS-1- $\rho_s$ -1.1%的极限荷载均为基本试件的0.92倍。

第3组2个试件的变化参数为UHPC中钢纤维掺量增大(从1%增大到2%)和箍筋率的提高(从0%增大到0.3%),二者的极限荷载均为基本试件的1.02倍,略有提高,但不明显。已有研究表明,钢纤维掺量对UHPC梁(整体梁)抗剪承载力增大作用明显<sup>[17]</sup>,然而,在组合梁中,UHPC中钢纤维的“桥接”作用被干接缝中断,所以其有益作用发挥不充分。从这点出发,PUCS-MCS组合梁不一定采用高掺量的钢纤维。同时,UHPC本身具有一定的抗拉强度,能够抵抗斜剪应力,研究表明混凝土中乱向分布的钢纤维可等效为数量相等的水平和垂直配筋<sup>[18]</sup>,因此,UHPC梁(整体梁)可不配箍筋,以简化施工。本文的试验结果表明,这一结论对于组合梁同样适用。

### 3 抗剪承载力计算方法

#### 3.1 整体梁的计算公式

对于UHPC梁的抗剪承载力已有较多的研究<sup>[19-20]</sup>。对钢筋UHPC梁(R-UHPC梁)的抗剪承载力研究表明,采用桁架-拱模型对于预测包括深梁、短梁和浅梁的R-UHPC梁抗剪承载力具有较好的适用性<sup>[17,21-22]</sup>,其通用公式见式(1)。

$$V = \frac{1}{2} R f_c b h_0 (1 - \varphi) + \varphi f_1 b h_0 + \varphi f_{sv} \rho_{sv} b h_0 \quad (1)$$

式中: $R$ 为UHPC有效抗压强度系数,取为0.96; $b$

和 $h_0$ 分别为梁宽度和有效高度; $f_1$ 为混凝土抗拉强度; $f_{sv}$ 为箍筋屈服强度; $\varphi$ 为与剪跨比有关的系数, $\varphi = 1 + \lambda - \sqrt{\lambda^2 + \alpha}$ ,其中 $\lambda$ 为剪跨比, $\alpha$ 为截面相对受压区高度 $x_c$ 与一半的截面有效高度 $h_0$ 的比值,即 $\alpha = x_c / (h_0 / 2)$ 。

从上节的分析中可以看出,PUCS-MCS组合梁与UHPC整体梁的受力行为与破坏模式相似。为探讨是否可应用式(1)预测PUCS-MCS组合梁的抗剪承载力,将本文9根试验梁数据代入其中,计算结果与实测值比值的结果见表7第3列。

表7 既有算法计算值与试验值比较

Table 7 Comparison of calculated value from existing calculated method and tested value

| 梁编号                           | $V_u / \text{kN}$ | $V_{(1)} / V_u$ | $V_{(4)} / V_u$ | $V_{(5)} / V_u$ |
|-------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| PUCS-MCS-1(1)                 | 315               | 1.80            | 1.17            | 0.960           |
| PUCS-MCS-1(2)                 | 312               | 1.81            | 1.18            | 0.960           |
| PUCS-MCS-0                    | 650               | 0.93            |                 | 0.980           |
| PUCS-MCS-1-K-2                | 385               | 1.47            | 0.95            | 0.960           |
| PUCS-MCS-1- $\lambda$ -1.8    | 290               | 1.76            | 1.15            | 0.940           |
| PUCS-MCS-2- $\lambda$ -1.8    | 270               | 1.89            | 1.23            | 0.930           |
| PUCS-MCS-1- $V_f$ -2%         | 330               | 1.77            | 1.15            | 0.940           |
| PUCS-MCS-1- $\rho_{sv}$ -0.3% | 320               | 1.65            | 1.08            | 0.880           |
| PUCS-MCS-1- $\rho_s$ -1.1%    | 290               | 1.54            | 1.00            | 0.840           |
| 均值                            |                   | 1.62            | 1.11            | 0.930           |
| 变异系数                          |                   | 0.18            | 0.09            | 0.045           |

注: $V_u$ 为实际测得抗剪承载力; $V_{(1)}$ 为式(1)计算得到的抗剪承载力; $V_{(4)}$ 为式(4)计算得到的抗剪承载力; $V_{(5)}$ 为式(5)计算得抗剪承载力。

由表7中 $V_{(1)} / V_u$ 值可以看出,对于PUCS-MCS组合梁,其抗剪承载力计算值均高于试验值1.5倍以上,变异系数为0.18,因此,式(1)不能直接用于组合梁的抗剪承载力计算。此外还可以看出,PUCS-MCS-0整体梁的计算值为试验值的0.93倍,表明式(1)可以较好地预测整体梁的承载力,但计算的承载力偏低。这是因为式(1)的适用对象为R-UHPC梁,没有考虑预应力对抗剪承载力的提高作用。参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[14]</sup>的计算方法,在式(1)中加入考虑预应力贡献的参数 $V_p$ ,得到修正后的整体梁承载力计算值 $V_1$ ,计算公式如式(2)、(3)所示。

$$V_1 = \frac{1}{2} R f_c b h_0 (1 - \phi) + \phi f_1 b h_0 + \phi f_{sv} \rho_{sv} b h_0 + V_p \quad (2)$$

$$V_p = 0.05 N_{p0} \quad (3)$$

式中: $N_{p0}$ 为计算截面上混凝土法向预应力为0时的纵向预应力筋及普通钢筋的合力。

应用式(3)计算 PUCS-MCS-0 整体梁的抗剪承载力为 637 kN,为试验值的 0.98 倍,计算精度明显提高。但对于 PUCS-MCS 组合梁,其偏离值显然将进一步增大,这里不再重新分析。

### 3.2 节段梁的计算公式

从第 2.4 节分析可知,PUCS-MCS 组合梁的抗剪极限荷载与整体梁明显不同,其抗剪承载力的计算应考虑节段间接缝的不利影响。对于全断面的 UHPC 节段拼装梁,湖南省地方规范《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ43/T 325—2017)<sup>[23]</sup>和美国规范《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications》(LRFDUS-6)<sup>[24]</sup>认为接缝对其抗剪承载力的影响属于整体性影响,可按整体梁的 0.65 倍来计算,由此得到折减后的组合梁抗剪承载力计算值  $V_2$  如式(4)所示。

$$V_2 = 0.65 V_1 \quad (4)$$

将本文的组合梁试验数据代入式(4),计算结果与实测值比值的结果见表 7 第 4 列。可以看出,按式(4)计算的绝大部分组合梁抗剪承载力计算值仍普遍高于试验值,二者的比值平均值为 1.11。同时,各试件的计算值与实测值比值的变异系数为 0.09,离散性仍较大。

### 3.3 本文提出的计算公式

从前述分析可知,PUCS-MCS 组合梁抗剪承载力受各参数影响程度各异,应分别考虑,而不宜直接采用式(4)进行计算。在各参数中,剪跨比的影响在式(2)中通过系数  $\phi$  反映,钢纤维体积率和配箍率的影响很小,可通过式(2)右边第 2 项和第 3 项反映。本文试件的纵筋只有预应力筋,其影响可通过式(2)右边第 4 项和第 1 项反映。因此,本文重点考虑接缝数和剪力键数 2 个参数的影响,提出采用式(5)来计算组合梁抗剪承载力。与式(4)采用单一的折减系数不同,式(5)中的  $\varphi$  考虑了接缝和剪力键数量的影响,当构件为整体梁时, $\varphi=1$ 。由试验结果可知,整体梁与节段梁区别较大,以系数  $a$  考虑其影响;干接缝数对抗剪承载力起减小的作用,以干接缝数  $n$  和系数  $b_1$  考虑其影响;干接缝处的剪力键对抗剪承载力起增强作用,以剪力键数  $K$  和系数  $c$  考虑其影响。暂且考虑为线性影响,构建  $\varphi$  的具体表达式见式(6)。

$$V_3 = \varphi V_1 \quad (5)$$

$$\varphi = a(1 - b_1 n)(1 + cK) \quad (6)$$

将本文的 9 根试件试验数据代入式(5)、(6),可

求得特定系数  $a$ 、 $b_1$ 、 $c$  分别为 0.54、0.07、0.12。计算结果与实测值的比值见表 7 第 5 列。可以看出,计算值均与试验值吻合良好,两者比值的均值为 0.933,变异系数为 0.045。当然,由于本文 PUCS-MCS 组合梁试验数量不多,且现有的研究也相对有限,式(5)的准确性还需今后通过更多的试验、数值分析和理论研究进行验证。

## 4 结 语

(1)所有试件(含 PUCS-MCS 组合梁和整体梁)受力全过程均可分为弹性、裂缝开展和破坏 3 个阶段。在弹性阶段,所有试件其荷载-挠度曲线差异不大;在裂缝发展阶段,PUCS-MCS 组合梁刚度减弱现象较整体梁更明显;试件在破坏阶段刚度不断下降,最后均发生剪压破坏。

(2)PUCS-MCS 组合梁的抗剪性能随干接缝数的增加而下降,极限承载力降低明显,这与 PUCS-MCS 组合梁抗弯承载力受干接缝数影响较小不同。因此,从受剪性能出发,实际应用中宜减少干接缝的数量;同时,在其抗剪极限承载力计算中应考虑干接缝的不利影响。

(3)在 PUCS-MCS 组合梁中槽形节段接缝处设置剪力键,能有效提高其抗剪性能,建议在实际工程中设置;在其抗剪极限承载力计算中可考虑其有利影响。当然,本文的剪力键只设计了一种类型,不同类型的影响还有待今后的深入研究。

(4)与 UHPC 梁(整体梁)中抗剪承载力随纤维掺量的提高而明显提高不同,PUCS-MCS 组合梁中钢纤维的“桥接”作用被干接缝中断,其有益作用发挥不充分。从这点出发,PUCS-MCS 组合梁可用低掺量的钢纤维。同时,箍筋对其抗剪承载力影响较小,实际应用中 PUCS-MCS 组合梁可不配箍筋。

(5)PUCS-MCS 整体梁需考虑预应力对其承载力的提高作用。R-UHPC 梁的抗剪承载力计算公式由于没有考虑干接缝的削弱作用,直接应用将高估其抗剪承载力。采用单一折减系数的全断面节段梁的抗剪承载力计算公式,仍高估其承载力,且没有考虑不同参数的不同影响,离散性较大。本文基于试验研究,提出了分别考虑干接缝不利影响和接缝处剪力键有利影响的 PUCS-MCS 组合梁抗剪承载力计算方法。但限于试件数量,其准确性还需今后通过更多的试验、数值分析和理论研究进行验证。

## 参考文献:

## References:

- [1] CHEN B C, AN M Z, HUANG Q W, et al. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering in China[C]//Iowa State University. Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC. Des Moines: Iowa State University, 2016: 1-8.
- [2] MISHRA O, SINGH S P. An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete [J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2019, 8(2): 97-143.
- [3] MISHRA S, UNIVERSITY P. Reviewing some properties of ultra high performance concrete[J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2020, V9(6): 108-121.
- [4] JABBAR A M, HAMOOD M J, MOHAMMED D H. Ultra high performance concrete preparation technologies and factors affecting the mechanical properties: a review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1058(1): 012029.
- [5] YANG J, CHEN B C, SU J Z, et al. Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: a review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022, 9(3): 363-387.
- [6] 李 兰, 季文玉. 铁路 20 m 预应力 RPC 低高度 T 梁张拉阶段应力及变形研究 [J]. 铁道建筑技术, 2007(6): 34-36.  
LI Lan, JI Wenyu. Study on stress and deformation of 20 m pre-stress RPC low-attitude T-beam at the stretching stage in railway[J]. Railway Construction Technology, 2007(6): 34-36.
- [7] 陈宝春, 黄卿维, 傅元方, 等. 4-30 m 活性粉末混凝土箱梁桥的设计与施工[C]//中国土木工程学会. 第九届全国高强与高性能混凝土学术交流会论文集. 福州: 中国土木工程学会, 2014: 313-319.  
CHEN Baochun, HUANG Qingwei, FU Yuanfang, et al. Design and construction of 4-30 m ultra-high performance concrete box girder bridge [C]//China Civil Engineering Society. Proceeding of the Ninth National Conference on High Strength and High Performance Concrete, Fuzhou: China Civil Engineering Society, 2014: 313-319.
- [8] CHEN Y C, ZHOU J L, GUO F Z, et al. Experimental study on the flexural behaviors of prestressed segmental ultra-high-performance concrete channels and reinforced conventional concrete deck composite girders[J]. Buildings, 2023, 13(7): 1841.
- [9] CHEN Y C, ZHOU J L, CHEN B C, et al. Flexural behavior of the composite girder of a prestressed segmental UHPC channel and a reinforced conventional concrete deck[J]. Buildings, 2023, 13(12): 3132.
- [10] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [11] 杨 简, 陈宝春, 沈秀将, 等. UHPC 单轴拉伸试验狗骨试件优化设计[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 37-46, 55.  
YANG Jian, CHEN Baochun, SHEN Xiujiang, et al. The optimized design of dog-bones for tensile test of ultra-high performance concrete[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 37-46, 55.
- [12] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [13] 金属材料 室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
Metallic materials — Tensile testing at ambient temperature: GB/T 228—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [14] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] AMAURY H, FLORENT B, PIERRE M, et al. UHP-FRC direct shear characterization applied to web-flange shear design of T-shaped girders[C]// TOUT-LEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of Symposium on Ultra-high Performance Fibre-reinforced Concrete. Montpellier: RILEM, 2017: 431-440.
- [17] CHEN B C, ZHOU J L, ZHANG D, et al. Shear performances of reinforced ultra-high performance concrete short beams[J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115407.
- [18] 高丹盈, 史 科, 赵顺波. 基于软化拉压杆模型的钢筋钢纤维混凝土梁柱节点受剪承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(9): 101-109.

- GAO Danying, SHI Ke, ZHAO Shunbo. Calculation method for shear capacity of steel fiber reinforced concrete beam-column joints based on softened strut-and-tie model[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(9):101-109.
- [19] 金陵志,周家亮,李月霞,等. 高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增 2):277-285.
- JIN Lingzhi, ZHOU Jialiang, LI Yuexia, et al. Experimental study on shear behavior of reactive powder concrete beams with high strength steel bars[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 277-285.
- [20] 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 Xilun, CHEN Baochun, 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.
- [21] CHEN B C, ZHOU J L, ZHANG D, et al. Experimental study on shear performances of ultra-high performance concrete deep beams[J]. Structures, 2022, 39:310-322.
- [22] ZHOU J L. Shear behaviors of R-UHPC deep flexural members[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2023.
- [23] 活性粉末混凝土结构技术规程:DBJ43/T 325—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- Technical specification for reactive powder concrete structures; DBJ43/T 325—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [24] AASHTO LRFD bridge design specifications: LRF-DUS-6[S]. Washington: AASHTO, 2012.