

# 导电超高性能混凝土的弯敏感知特性和荷载-挠度关系

王 艳<sup>1,2</sup>, 李奥阳<sup>1</sup>, 张少辉<sup>1</sup>, 郭冰冰<sup>2,3</sup>, 牛荻涛<sup>2,3</sup>

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055; 2. 绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055;  
3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

**摘 要:** 碳纤维为工程结构的智能化建设提供了新途径, 但其成本仍远高于其他纤维。利用废弃碳纤维(WCFs)制备了导电超高性能混凝土(C-UHPC), 探究了 C-UHPC 的受弯性能、弯敏感知特性和荷载-挠度关系。结果表明: 掺 WCFs 降低了 C-UHPC 的抗压强度。C-UHPC 电阻率随 WCFs 掺量的增加而降低, 当 WCFs 掺量为 1%(体积分数)时, C-UHPC 电阻率下降了 99.89%, 达到导电阈值。高掺量 WCFs(>1%)会使 C-UHPC 韧性下降。弯曲应力下, C-UHPC 的荷载-挠度曲线可分为弹性阶段、弯曲硬化阶段、破坏阶段。掺 WCFs 后 C-UHPC 具有受弯机敏特性, 以峰值荷载为变化节点, 峰前荷载的电阻曲线基本不发生波动, 峰后荷载的电阻曲线快速上升。基于现有模型, 建立了适用于 C-UHPC 的受弯荷载-挠度本构模型。最后, 引入应力、应变灵敏度分析了不同 WCFs 掺量下 C-UHPC 弯曲应力、应变与电阻的关系。

**关键词:** 超高性能混凝土; 废弃碳纤维; 导电性能; 弯敏感知; 荷载-挠度

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)2-0416-12

网络出版时间: 2024-08-09



超高性能混凝土(UHPC)因具有优异力学性能、延韧性和耐久性<sup>[1-3]</sup>, 已广泛应用于大跨建筑结构、隧道桥梁结构、修复加固工程等<sup>[4-5]</sup>。然而, 对于恶劣环境, 复杂的外界因素和受力形式易导致 UHPC 内部产生孔洞和裂缝, 加剧损伤劣化, 造成建筑结构表层剥落、承载力下降、服役寿命缩短等问题。若实现 UHPC 导电性能, 赋予其自感知特性, 达到智能监测需求, 对确保建筑结构的服役安全具有重要的理论意义和实用价值。

目前, 国内外学者研究 UHPC 自感知性能的成果较少, 但通过掺入导电材料对 UHPC 进行改性, 降低电阻率, 在现阶段已达成共识<sup>[6-8]</sup>。其中, 碳纤维作为一种导电材料, 为工程领域的多功能化建设创造了许多可实现的新途径<sup>[9-10]</sup>, 如热电材料<sup>[11]</sup>、电磁屏蔽<sup>[12]</sup>、增材制造<sup>[13]</sup>等, 但因其成本昂贵, 较难实现大规模工程应用。废弃物二次利用是减少材料成本最直接的方法, 采用废弃碳纤维(WCFs)满足性能需求的同时, 还可提高资源利用率、避免环境污染, 且其成本仅为原始碳纤维的 40%<sup>[14]</sup>。目前, 已有研究成果<sup>[15-16]</sup>揭示了 WCFs 降低普通混凝土电

阻率的导电机理, 但现阶段对于 WCFs 影响 UHPC 导电性能的研究匮乏, 导电性能与荷载-挠度间的关系有待探索, 且关于导电 UHPC (C-UHPC)受弯本构模型的研究鲜有报道。因此, 在满足 UHPC 优异力学性能的前提下实现较好的导电性能, 对 C-UHPC 的实际工程应用至关重要。

基于上述讨论, 以 UHPC 导电性能、受弯性能为研究点, 分析不同 WCFs 掺量下 C-UHPC 的弯敏感知特性和荷载-挠度关系, 通过扫描电子显微镜(SEM)观察纤维在微观结构的分布形貌, 最后构建出相适配的本构模型, 并探究应力、应变与电阻之间的变化规律, 以期对 C-UHPC 的推广应用提供理论基础。

## 1 实验

### 1.1 原材料

水泥: P·O 52.5 硅酸盐水泥, 比表面积 423 m<sup>2</sup>/kg; 硅灰: 比表面积为 19 230 m<sup>2</sup>/kg; 微珠: 比表面积为 3300 m<sup>2</sup>/kg, 堆积密度 0.65 g/cm<sup>3</sup>; 石英粉: 325 目精制石英粉。水泥、硅灰、微珠和石英粉的化学组成

收稿日期: 2024-01-09。 修订日期: 2024-03-21。

基金项目: 国家优秀青年科学基金(52222806); 国家自然科学基金面上项目(52078414); 陕西省杰出青年科学基金(2022JC-20)。

第一作者: 王 艳(1982—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2024-01-09. Revised date: 2024-03-21.

First author: WANG Yan (1982—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: wangyanwjx@126.com

成分如表 1 所示；细骨料：采用 8~16 目、16~26 目、26~40 目、40~70 目的石英砂(质量比是 4:3:2:1)；水：自来水；减水剂(SP)：聚羧酸高效减水剂，减水率≥ 30 %；钢纤维(SF)：镀铜平直型钢纤维；WCFs：盐城市翔盛碳纤维科技有限公司提供,机械加工制备；VCFs：日本东丽公司生产的高性能碳纤维。纤维均采用体积掺量，性能参数见表 2。

WCFs 与正常碳纤维(VCFs)存在一些差异，通过 SEM、Raman 光谱、接触角对 2 种纤维进行

对比研究。结果如图 1、图 2 和图 3 所示，主要区别如下：1) WCFs 的微观表面更为光滑，没有明显的凹槽；2) WCFs 表面接触角为 103.8°，说明表面润湿性相对较差，对水滴浸湿起到一定的阻隔效果；3)Raman 光谱是表征碳纤维材料石墨化度常用的技术手段之一，2 个波峰积分强度的比值  $R(R=S_D/S_G, S$  为波峰拟合面积)可用于表示石墨化度的高低， $R$  值越大，石墨化度越小，VCFs 的石墨化度大于 WCFs，WCFs 导电性能较低。

表 1 胶凝材料和石英粉化学组成

| Table 1 Chemical composition of cementitious materials and quartz powder |                  |                                |                                |       |      |                 |                  |                   | w/%              |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|
| Material                                                                 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> |
| Cement                                                                   | 17.75            | 3.78                           | 3.91                           | 65.32 | 2.20 | 4.63            | 0.77             | 0.51              | 0.23             |
| Silica fume                                                              | 97.95            | 0.17                           | 0.09                           | 0.20  | 0.25 | 0.79            | 0.33             | 0.10              |                  |
| Microsphere                                                              | 58.37            | 15.46                          | 7.11                           | 9.67  | 1.26 | 0.27            | 2.71             | 1.49              | 1.04             |
| Quartz powder                                                            | 97.97            | 1.22                           | 0.15                           | 0.08  | 0.06 |                 | 0.30             | 0.16              | 0.05             |

w is mass fraction.

表 2 纤维性能参数

| Table 2 Performance parameters of fibers |           |                         |                                           |                     |                      |
|------------------------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Sample                                   | Length/mm | Diameter/ $\mu\text{m}$ | Density/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | Tensile modulus/GPa | Tensile strength/MPa |
| SF                                       | 13        | 200                     | 7.85                                      | 210                 | 2850                 |
| WCFs                                     | 10        | 7                       | 1.76                                      | 230                 | 3530                 |
| VCFs                                     | 10        | 7                       | 1.80                                      | 230                 | 4900                 |

SF is steel fiber. WCFs are waste carbon fibers. VCFs are virgin carbon fibers.

表 3 C-UHPC 配合比

| Table 3 Mix proportion of conductive ultra-high performance concrete (C-UHPC) |                                                  |             |             |               |             |                  |                   |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------------|------|
| Sample No. (A-B)*                                                             | Mix proportion/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |             |             |               |             |                  | Volume fraction/% |      |
|                                                                               | Cement                                           | Silica fume | Microsphere | Quartz powder | Quartz sand | Superplasticizer | SF                | WCFs |
| 0.16-0%                                                                       | 787.5                                            | 78.75       | 157.5       | 275.625       | 787.5       | 15.6             | 1.5               | 0    |
| 0.16-0.5%                                                                     | 787.5                                            | 78.75       | 157.5       | 275.625       | 787.5       | 16.9             | 1.5               | 0.5  |
| 0.16-1.0%                                                                     | 787.5                                            | 78.75       | 157.5       | 275.625       | 787.5       | 19.5             | 1.5               | 1    |
| 0.16-1.5%                                                                     | 787.5                                            | 78.75       | 157.5       | 275.625       | 787.5       | 23.4             | 1.5               | 1.5  |
| 0.16-2.0%                                                                     | 787.5                                            | 78.75       | 157.5       | 275.625       | 787.5       | 26.0             | 1.5               | 2    |

\*: A represents water-binder ratio (W/B); B represents WCFs content.

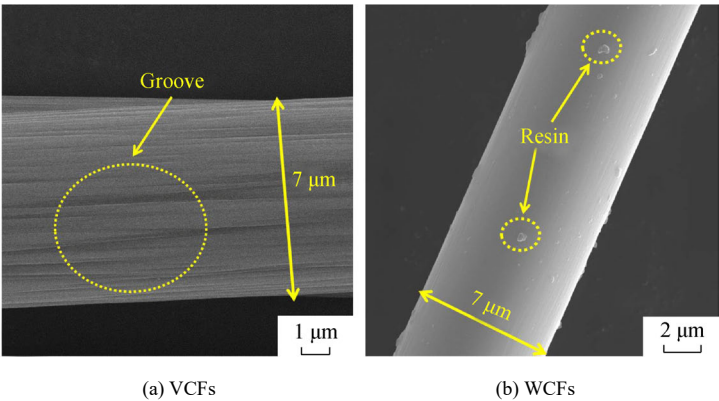


图 1 碳纤维的 SEM  
Fig. 1 SEM images of carbon fiber

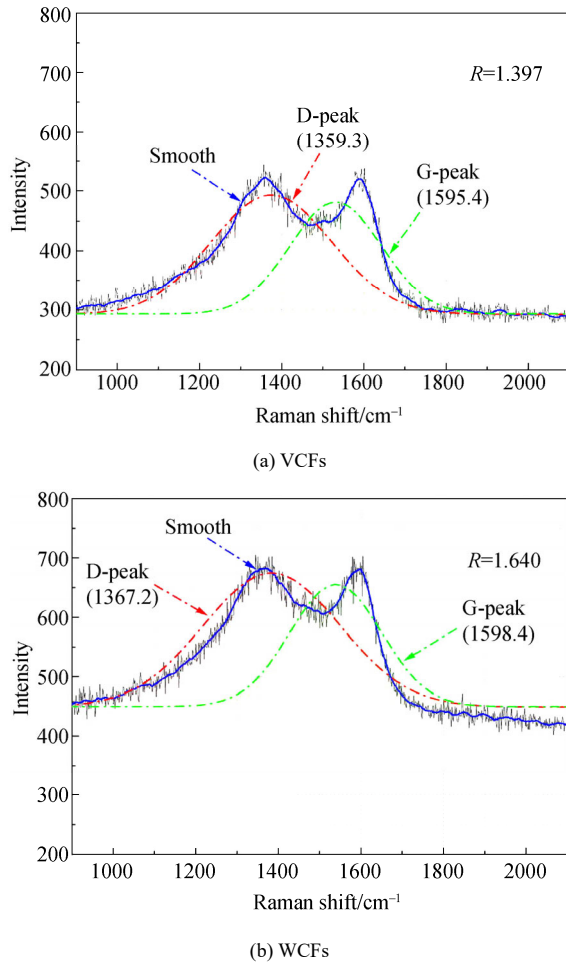


图2 碳纤维的 Raman 光谱  
Fig. 2 Raman spectra of carbon fiber

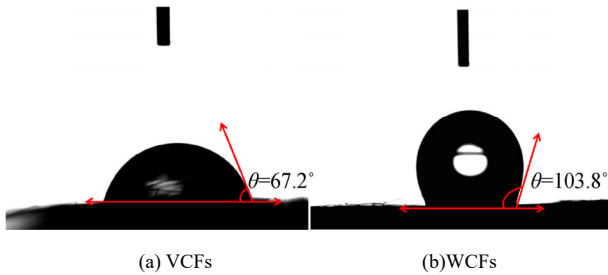


图3 碳纤维的接触角  
Fig. 3 Contact angle of carbon fiber

## 1.2 试件配合比及制备

C-UHPC 配合比设计参照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》<sup>[17]</sup>, 采用理论分析和预试验研究相结合的方式确定了最终配合比, 如表 3 所示。

首先, 按配合比称定所需材料用量, 将 WCFs、石英砂先干混 60 s(WCFs 多次、均匀加入), 倒入胶凝材料、石英粉后继续干拌 60 s, 然后加入水和减水剂湿拌 5 min, 最后缓慢均匀加入 SF 继续搅拌 3 min, 确保纤维和混凝土材料充分拌和均匀。C-UHPC 一次性入模并振动密实, 试件成型 1 d 后

拆模, 将脱模后的试件放入热水养护 3 d(90 ℃), 随后置于温度为(20±2) ℃、相对湿度≥95%的标准养护室进行养护。

## 1.3 方法

1.3.1 抗压强度 依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[18]</sup>进行力学性能试验, 对养护 1、3、7、28 d 的试件进行抗压强度试验, 加载速率为 1.20 MPa/s, 试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm, 每组 6 个试件, 取平均值作为最终试验结果。

1.3.2 导电性能 采用四电极法测试 C-UHPC 导电性能, 试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm, 每组 3 个试件, 养护龄期 28 d 时测量电阻率。电极片选用铜片(长宽: 120 mm×15 mm), 铜片间距为 100 mm, 高出混凝土表面 20 mm, 如图 4 所示。选用电压 5 V 的直流电源向 A-D 两端供电, 为了减少电阻率测量误差, 将 C-UHPC 与外部电阻箱串联连接, 使用数据采集模块测试 B-C 两端的电压, 通电 1 min 后, 待电压、电流稳定后读取数据。电阻及电阻率计算公式如式(1)、式(2)所示。电阻率结果为 3 个试件的平均值。

$$R_0 = R \frac{U_0}{U} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{S}{L} \times R_0 \quad (2)$$

式中:  $R_0$  为待测试件电阻,  $\Omega$ ;  $R$  为电阻箱电阻,  $\Omega$ ;  $U_0$  为试件 B-C 端的电压, V;  $U$  为电阻箱电压, V;  $\rho$  为待测试件电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $S$  为电极片与试件接触面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$  为试件 B-C 端电极间距, m。

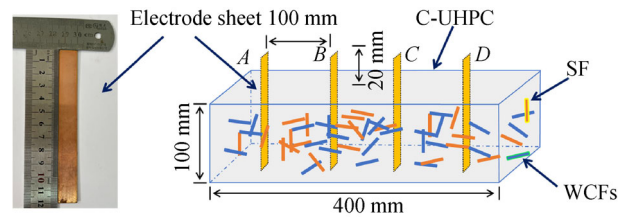


图4 导电试件参数  
Fig. 4 Parameters of conductive sample

1.3.3 弯敏感知特性 C-UHPC 弯敏感知特性主要研究弯曲荷载作用下, 应力、应变与电阻之间的变化关系。电阻测试过程参照小节 1.3.2。依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[18]</sup>进行弯曲强度试验, 加载时采用 CMT-5105 微机控制电子万能试验机, 功率 1.3 kW, 最大力为 100 kN, 加载速率为 0.14 MPa/s, 测试过程中, 荷

载由试验机应力传感器自动记录, 挠度由试件底部位移计进行测量。C-UHPC 弯敏特性测试装置如图 5 所示, 开始加载后, 同步采集荷载、挠度和电阻的变化值。

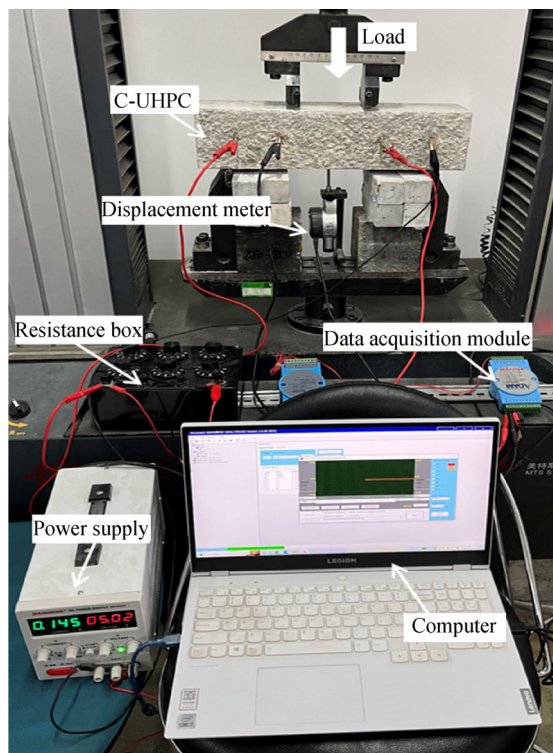


图 5 C-UHPC 弯敏感知特性测试装置图

Fig. 5 Test device diagram of C-UHPC bending sensitive properties

**1.3.4 微观结构** 利用 SEM 观测 C-UHPC 中纤维、纤维-基体界面的微观形貌。为使样品表面具有良好的导电性, 实验前, 对样品进行喷金处理, 设备型号为 Zeiss Gemini 300, 加速电压为 3 kV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 抗压强度

不同养护龄期的 C-UHPC 抗压强度试验结果如图 6 所示。由图 6 可见, 对比基准组(WCFs 掺量 0%), 掺入 WCFs 后 C-UHPC 抗压强度呈下降趋势, 降幅约为 21.40%、18.10%、16.00%、9.89%。这是因为 WCFs 表面较光滑, 与界面间的粘结力较弱, 且随 WCFs 掺量提高后, C-UHPC 内部纤维分散更加困难, 大量的气泡和孔隙生成于水泥浆体、SF 和 WCFs 交接处, 使其易受到应力集中而开裂破坏<sup>[15,19]</sup>。此外, 过高的掺量导致 C-UHPC 内纤维的平均间距缩短, WCFs 与 SF 易相互缠绕, 纤维间正向协同作用较弱<sup>[20]</sup>。值得注意的是, 与低掺量 WCFs 相比, 高掺量 WCFs 对抗压强度有少量提升

效果, 原因可能是纤维增加了 C-UHPC 的刚度和能量吸收能力<sup>[21]</sup>。

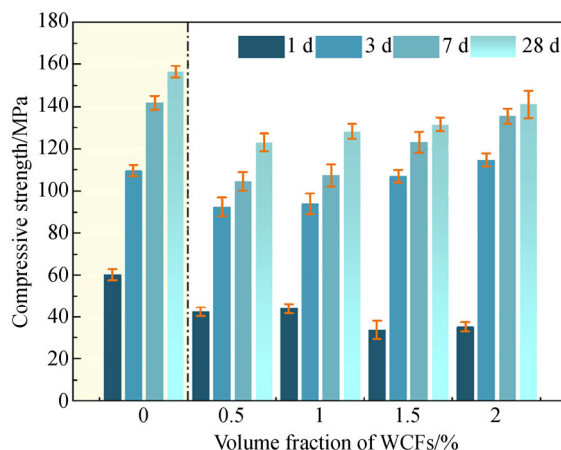


图 6 不同养护龄期下 C-UHPC 的抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of C-UHPC at different curing ages

### 2.2 导电性能

图 7 为不同 WCFs 掺量下 C-UHPC 的电阻率变化曲线。由图 7 可见, C-UHPC 电阻率随 WCFs 掺量的增加而下降。对比 WCFs 掺量 0%, 提高掺量至 0.5%、1.0% 时, C-UHPC 电阻率分别下降了 36.31%、99.89%, 继续提高掺量后电阻率无明显变化波动, 即掺量 1% 为导电阈值。这是因为少掺或未掺 WCFs 时, 电子的传输易受到不良导体阻碍, 而 C-UHPC 导电性强弱主要依靠 WCFs 相互搭接的有效概率, 更高的掺量意味着内部构架的连通导电网络更密、更稳定, 纤维可有效制止裂缝或孔洞对导电通路的中断干扰。此外, WCFs 表面含有的少量树脂不具备导电性, 不利于电子传输。除 WCFs 有效搭接传输电子外, 相邻且未接触的纤维在电荷场作用下会产生隧道效应<sup>[22]</sup>, 电子可短距离跳跃到其他纤维进行传输, 降低电阻率。

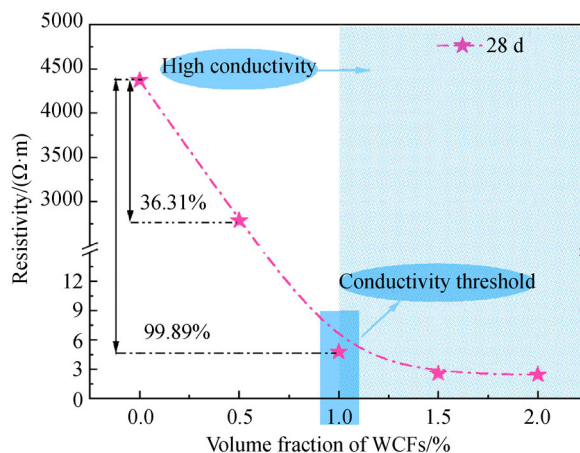


图 7 C-UHPC 导电性能

Fig. 7 Conductive property of C-UHPC

需要进一步解释的是,在胶凝材料水化过程中,WCFs 表面会被生成的水化产物部分覆盖,但当 WCFs 掺量大于等于 1%时,C-UHPC 达到导电阈值,纤维间的有效搭接概率已满足电子传输的导电通路,即部分纤维被水化产物包裹也不影响混凝土导电性能的强弱。

通过 SEM 可清楚观察到纤维在 C-UHPC 内部的分布位置,图 8 为 WCFs 在 C-UHPC 内部的导电路径。由图 8a 可见,掺入 WCFs 后,纤维相互搭接形成导电通路,电子通过纤维传递到 C-UHPC

的其他位置,进而游离于整个混凝土中,使其具有更高的导电灵敏度(见图 9)。由图 8b 可见,纤维间存在中断现象,此时并不能有效搭接,但距离相近的纤维间电子可跳跃传输,降低电阻。图 8c 为 WCFs 可连接裂缝,使电子通过纤维传递到裂缝的另一端,起到“桥梁”效果。由图 8d 可见,WCFs 与 SF 间存在搭接,SF 自身具有导电性,可降低混凝土电阻<sup>[23]</sup>,且 SF 直径远大于 WCFs ( $D_{SF}/D_{WCFs}=28.6$ ),2 种纤维可在不同尺度上有效传递电子,提高电导率。

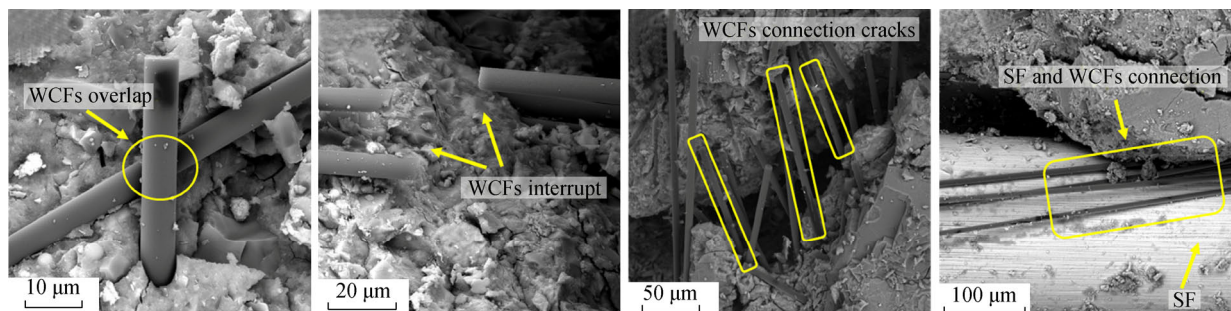


图 8 WCFs 在 C-UHPC 中的主要导电路径  
Fig. 8 Main conductive path of WCFs in C-UHPC

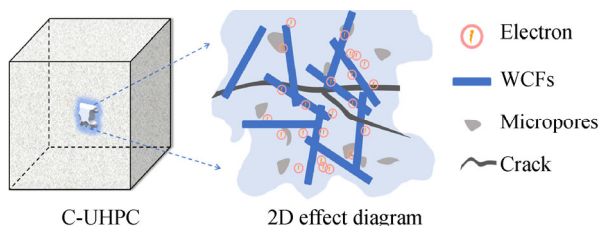


图 9 电子通过 WCFs 的传输示意图

Fig. 9 Schematic diagram of electron transport through WCFs

## 2.3 荷载-挠度

2.3.1 受弯荷载-挠度曲线 图 10 为不同 WCFs 掺量下 C-UHPC 的荷载-挠度曲线。由图 10 可见,掺入 WCFs 后,可有效提高 C-UHPC 的峰值荷载。C-UHPC 的荷载-挠度曲线均表现出较为一致的阶段特征,具体概括为 3 个阶段<sup>[24]</sup>:

1) 弹性阶段:弯曲荷载随挠度的增加而增大。此阶段 C-UHPC 并未产生裂缝,弯曲荷载主要由基体承受,SF 和 WCFs 未发挥增韧效果;2) 弯曲硬化阶段:弯曲荷载随挠度的增加而迅速上升。挠度较小时 C-UHPC 并未开裂,但内部开始产生微裂缝,弯曲荷载由基体和纤维共同分担,并通过纤维传递至未开裂部分。当荷载接近峰值时,C-UHPC 微裂缝不断扩展,新旧裂缝交汇延伸,逐渐达到基体开裂的临界裂缝;3) 破坏阶段:弯曲荷载随着挠度的增加,先维持一段平稳期后迅速下降。达到峰值弯

矩荷载后,C-UHPC 内部裂缝失稳,表面突现较大裂缝,但因纤维的“桥连作用”,试块不会产生脆性断裂。其中,荷载“断崖式”下降是因靠近试块表面的纤维受力突然拔出<sup>[25]</sup>,且下降高度随 WCFs 掺量的增加而增大。需要指出的是,WCFs 表面湿润性较差,当 WCFs 体积掺量过高时,SF 和 WCFs 因界面粘结、协调性、团聚等问题,不能发挥增强增韧效果,会导致 C-UHPC 韧性下降。平稳期则是靠近试块表面的纤维拔出后,未断裂试块内部纤维抵抗弯曲荷载过程,直至主裂缝进一步向两侧和轴向扩张,最后导致试块受弯破坏。

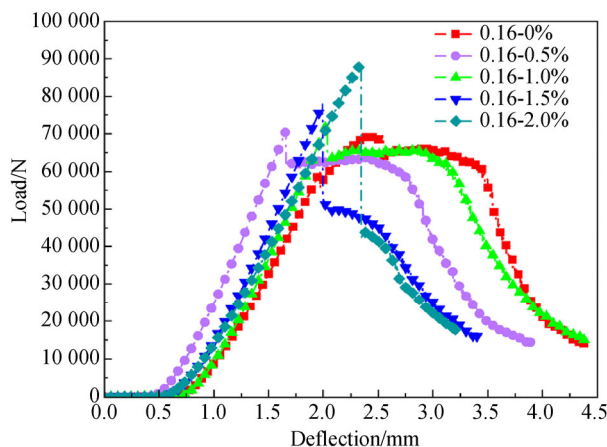


图 10 C-UHPC 的荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of C-UHPC

图 11 为 C-UHPC 在弯曲荷载下裂缝的扩张过程。由图 11 可见, C-UHPC 承受荷载后, 试件历经未裂、临界裂缝、宏观裂缝, 最后破坏。其中, 宏观裂缝主要为轴向裂缝, 自下而上扩张, 而纤维的“桥连效果”有效延缓了宏观裂缝的扩张速

率。图 12 为纤维-基体界面在弯曲荷载下的微观形貌。WCFs 和 SF 拔出后, 留下的沟壑较为光滑致密; 当拔出力较大时, WCFs 通过产生形变来消耗外力, 少数 WCFs 因足够大的拔出力而中断(见图 12b)。

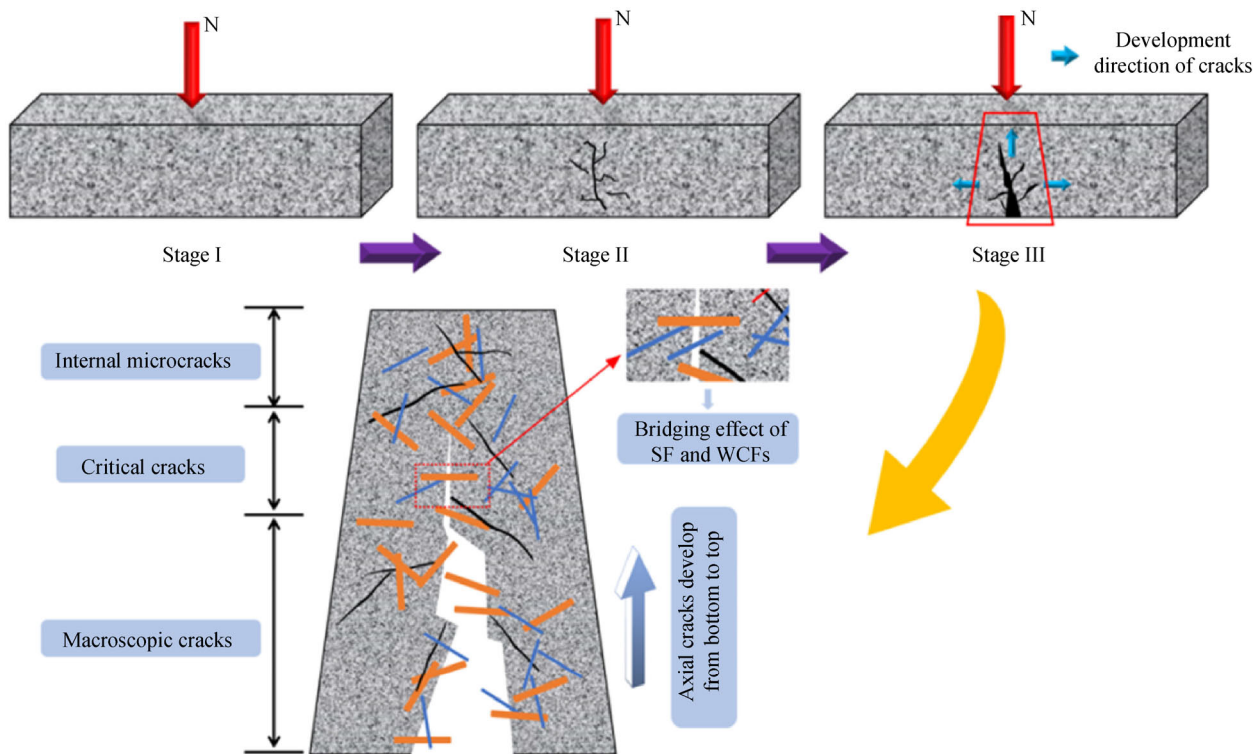


图 11 弯曲荷载下 C-UHPC 裂缝的扩张过程

Fig. 11 Expansion process of C-UHPC crack under bending load

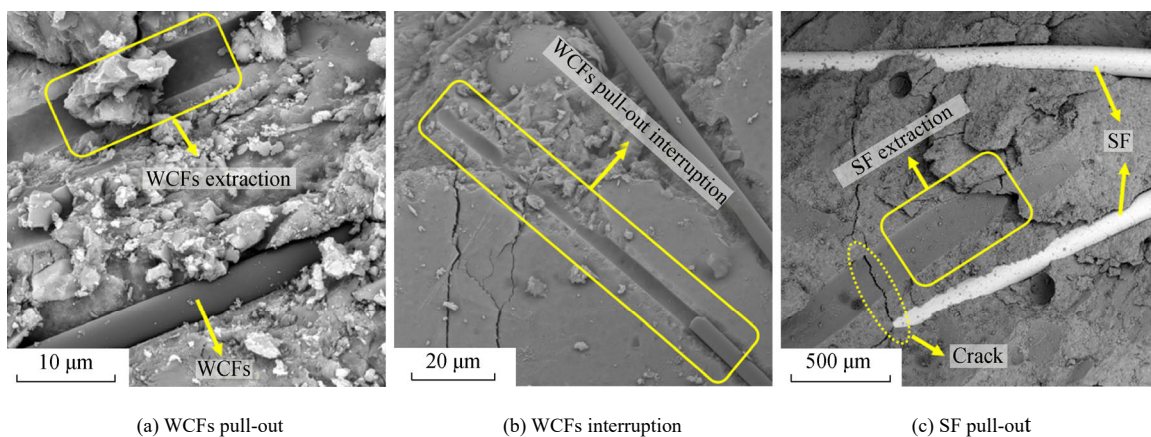


图 12 弯曲荷载下纤维-基体界面的微观形貌

Fig. 12 Microstructure of fiber-matrix interface under bending load

2.3.2 荷载-挠度本构模型 混凝土受力本构模型对于现代工程结构设计具有十分重要的意义, 但目前关于 C-UHPC 弯曲荷载下的损伤本构模型尚不明晰。从图 10 可见, C-UHPC 荷载-挠度曲线表现为 3 个阶段。采用 Soranakom 等<sup>[26]</sup>提出的荷载-挠度参数化模型, 可得到全过程弯曲荷载下试件的

变形趋势(见图 13), 荷载-挠度关系如式(3)所示:

$$\sigma_t(\varepsilon_t) = \begin{cases} E\varepsilon_t & (0 \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr}) \\ E\varepsilon_{cr} + E_{cr}(\varepsilon_t - \varepsilon_{cr}) & (\varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tm}) \\ \mu E\varepsilon_{cr} & (\varepsilon_{tm} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_t$  为截面底部纤维的挠度;  $E$  为弹性模量;  $\varepsilon_{cr}$  为裂后挠度;  $\varepsilon_{tm}$  为峰值挠度;  $E_{cr}$  为裂后弹性模量;

$\mu = \sigma_p / E \varepsilon_{cr}$  为归一化后残余荷载, 其中,  $\sigma_p$  为残余荷载;  $\varepsilon_{tu}$  为极限挠度。

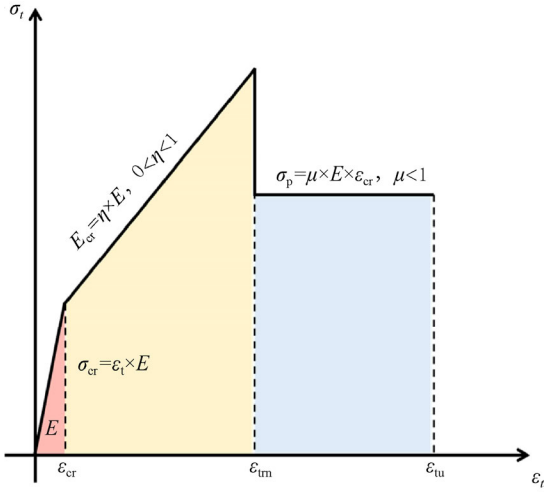


图 13 Soranakom 提出的受力本构模型<sup>[26]</sup>

Fig. 13 Stress constitutive model proposed by Soranakom<sup>[26]</sup>

$\varepsilon_t$  is deflection of fibers at the bottom of the section.  $E$  is elastic modulus.  $\varepsilon_{cr}$  is post crack deflection.  $\varepsilon_{tm}$  is peak deflection.  $E_{cr}$  is post cracking elastic modulus.  $\mu$  is normalized residual load.

针对弯曲荷载下 C-UHPC 的本构模型, 需提出以下假设<sup>[27]</sup>: 1) 平截面假定; 2) 纤维与基体的应变保持一致; 3) 忽略剪切破坏。然而, 关于曲线第 2 阶段( $\varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tm}$ )和第 3 阶段( $\varepsilon_{tm} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}$ ), 其变化趋势并非线性, 相差较大。因此, 第 2 阶段和第 3 阶段采用非线性函数, 如下式(4)和式(5)所示<sup>[28–30]</sup>。

第 2 阶段:

$$\frac{\sigma_t}{f_c} = \frac{A(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tm}}) + B(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tm}})^2}{1 + C(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tm}}) + D(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tm}})^2} \quad \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tm} \quad (4)$$

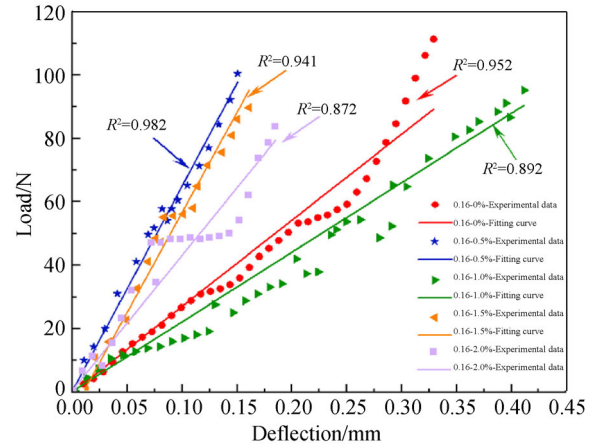
第 3 阶段:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{tm}} = \frac{\varepsilon_t / \varepsilon_{tm}}{a \times (\varepsilon_t / \varepsilon_{tm} - 1)^b + \varepsilon_t / \varepsilon_{tm}} \quad \varepsilon_{tm} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu} \quad (5)$$

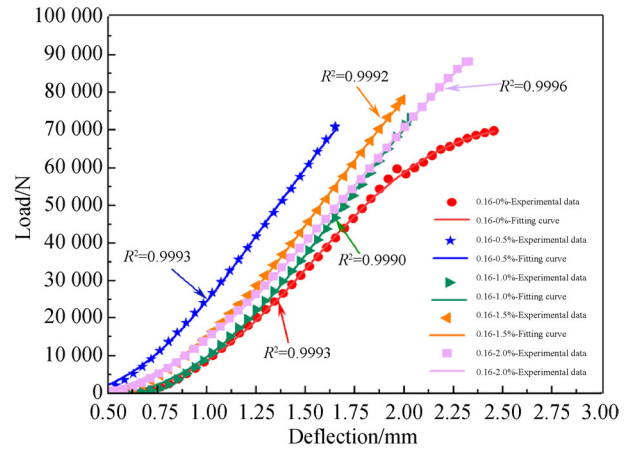
式中:  $\sigma$  为应力, N;  $f_c$  为弯曲强度, MPa;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $a$ 、 $b$  为系数。

基于上述讨论, 联合式(3)、式(4)和式(5)建立了 C-UHPC 的荷载–挠度本构模型, 对其进行拟合计算后, 得出 3 个阶段的曲线分布, 结果如图 14 所示。从拟合曲线图可看出, 对于弹性阶段, 掺入 WCFs 后, 相关系数  $R^2$  有所下降, 最小值为 0.872。弯曲硬化阶段, 各拟合曲线与试验曲线偏差较小, 吻合度较好, 且相关系数  $R^2$  均  $\geq 0.990$ 。曲线下降阶段, 因纤维拉结效果, C-UHPC 表现出一定的延性, 但拟合曲线仍能较好反应试件的破坏状态, 与试验曲线接近重合, 较为准确反应了 C-UHPC 加载时的劣

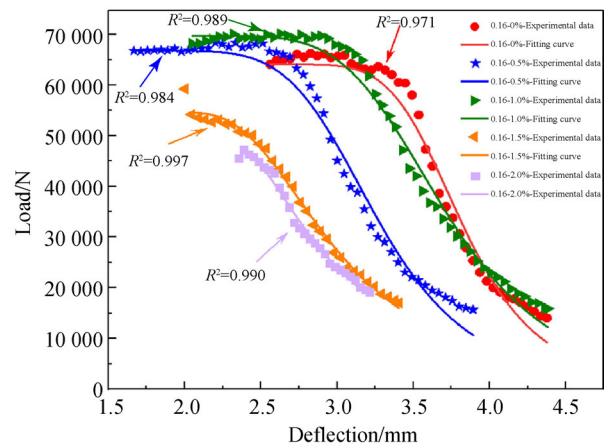
化规律。整体来看, 本工作建立的荷载–挠度本构模型曲线与试验曲线总体趋势吻合精度较高。



(a) Elastic stage



(b) Bending hardening stage



(c) Failure stage

图 14 C-UHPC 抗弯本构模型的拟合曲线

Fig. 14 Fitting curves of C-UHPC flexural constitutive model

## 2.4 弯敏感知特性

图 15 为不同 WCFs 掺量下 C-UHPC 的弯敏感知特性曲线。由图 15 可见, C-UHPC 受弯曲荷载时, 电阻发生变化, 这一现象表明 C-UHPC 具有受弯机

敏特性。未掺 WCFs 时, C-UHPC 承受弯曲荷载后, 电阻表现为先下降后趋于平缓, 试件临近破坏后电阻急剧增加。WCFs 掺量为 0.5% 时, 以峰值荷载为变化节点, 峰前荷载的电阻曲线小幅度下降, 峰后荷载的电阻曲线快速上升。继续提高 WCFs 掺量后, 峰前荷载的电阻曲线基本不发生波动, 峰后荷载曲线变化相似。这是因为 C-UHPC 受到外部荷载时, 内部微裂缝、微孔闭合, 使导电路径暂时增加且更加完善, 电阻下降。但提高 WCFs 掺量后, 荷载引起的细小微裂缝并未立即显著影响导电网络, 电阻

变化平缓。然而, 超过峰值荷载后, 基体逐渐开裂, 轴向裂缝扩展, 中断了多数导电路径, 导致电阻成倍递增。

基于上述曲线变化关系, 在实际工程应用中, 当电阻呈直线变化且波动较小时, 表明结构处于设计承载范围内, 未达到承载力极限; 当电阻快速上升时, 突变的电阻可作为预警信号, 表明结构可能处于损伤状态, 应立即结合其他检测手段对其进行安全评估, 及时判断损伤部位, 并修补加固。

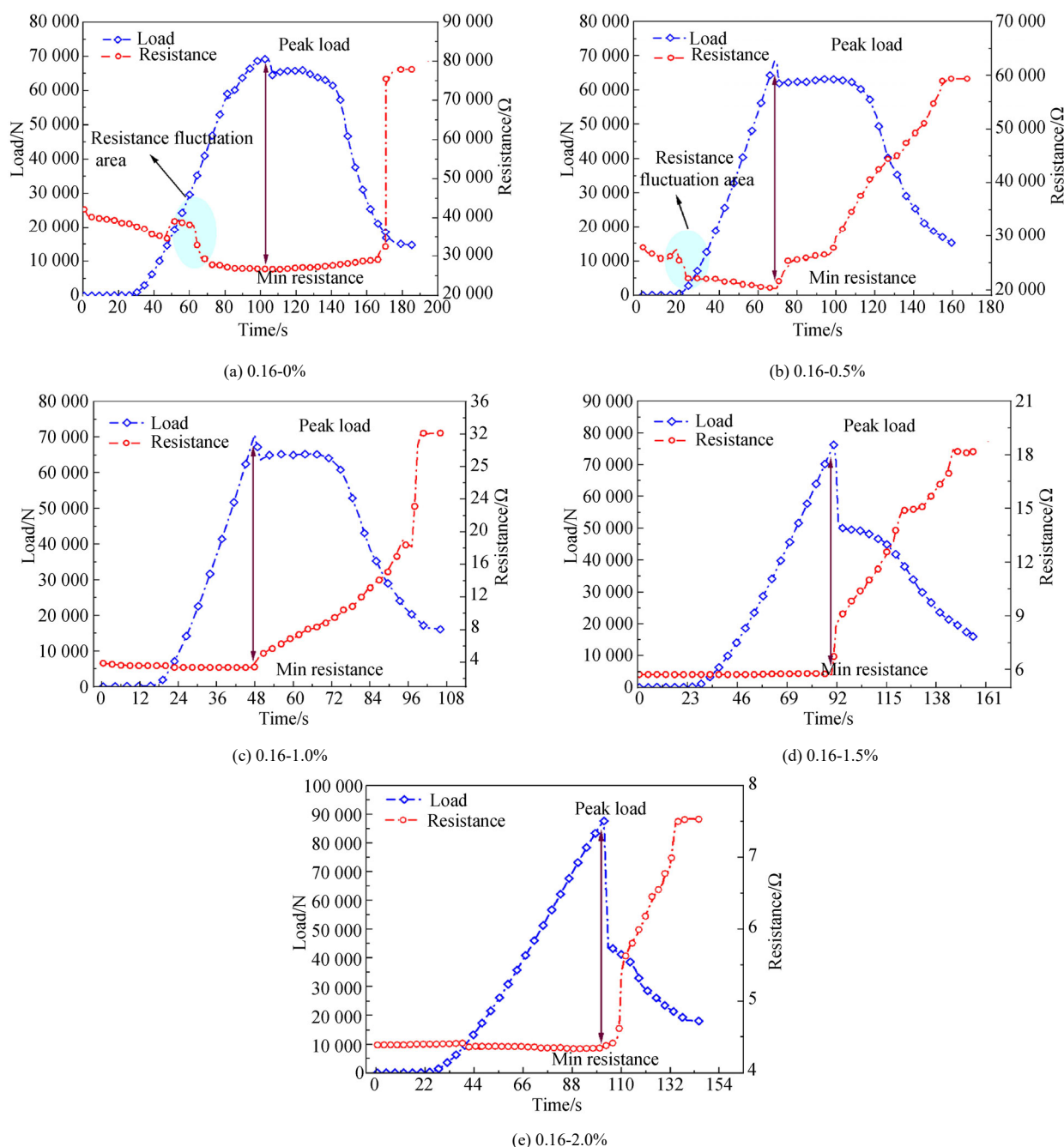


图 15 C-UHPC 的弯敏感知特性曲线

Fig. 15 Bending sensitive characteristic curve of C-UHPC

## 2.5 弯曲应力、应变与电阻关系

为探究不同 WCFs 掺量下弯曲应力、应变与电阻的关系,本节在 C-UHPC 弯敏感知特性的基础上,借鉴文献[31–32]提出的灵敏度( $S$ )进行分析。灵敏度是一个绝对变化量,本工作中指电阻随应力、应变所产生的动态变化程度,其计算公式如下式(6)、式(7)所示。

$$S_{\sigma} = \left| \frac{(R_t - R_0)}{R_0} \right| \div \sigma_t \quad (6)$$

$$S_{\varepsilon} = \left| \frac{(R_t - R_0)}{R_0} \right| \div \varepsilon_t \quad (7)$$

式中:  $S_{\sigma}$  为应力灵敏度, %/MPa;  $S_{\varepsilon}$  为应变灵敏度, %/mm;  $R_0$  为初始电阻,  $\Omega$ ;  $R_t$  为  $t$  时刻的电阻,  $\Omega$ ;  $\sigma_t$  为  $t$  时刻沿加载方向的应力, MPa;  $\varepsilon_t$  为  $t$  时刻沿加载方向的应变, mm。

值得注意的是, 试验中弯曲荷载加载方向自上到下, 但通过上述研究可知, 实际影响电流传输是轴向裂缝的左右扩张, 即裂缝宽度, 这种变形中断了 C-UHPC 内部的有效导电网络, 因此应变灵敏度实际应为垂直于荷载方向的应变。基于此, 引入泊松比改进式(7), 泊松比是指材料受力后按一定比值产生的形变, 即材料沿荷载方向伸长(或缩短)时,

垂直于荷载方向会产生缩短(或伸长)变形, 计算公式如下式(8)所示<sup>[33–35]</sup>。将式(8)代入式(7), 可得到垂直于加载方向的应变灵敏度。

$$\nu = \left| -\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} \right| \quad (8)$$

式中:  $\nu$  为泊松比;  $\varepsilon_a$  为加载方向应变, mm;  $\varepsilon_b$  为垂直于加载方向应变, mm。

需要指出的是, 掺入 WCFs 后可赋予 UHPC 力敏特性, 即通过测量电阻变化率的改变, 准确反映 C-UHPC 应力、应变的变化规律。基于以上考虑, 计算得出 C-UHPC 的应力、应变灵敏度, 计算结果如下表 4 所示, 其动态变化曲线如图 16 和图 17 所示。

应力灵敏度可分为 2 个阶段: 首先, 应力灵敏度随应力增加而先大幅度下降后趋于平缓, 其次, 应力抵达峰值后开始下降, 灵敏度提高。掺入 WCFs 会降低 C-UHPC 的应力灵敏度, 以峰值荷载对应的应力灵敏度为例, 对比 WCFs 掺量 0%, 提高掺量至 1%、2% 时, 应力灵敏度分别下降了 67.24%、98.56%。其中, 初始加载时灵敏度较大, 这是因为较小的外部荷载难以引起 C-UHPC 电阻的显著变化, 超过峰值应力后, C-UHPC 电阻陡增且应力逐渐下降, 导致应力灵敏度增大, 这与 C-UHPC 弯敏感知曲线变化规律相符合。

表 4 C-UHPC 应力/应变灵敏度的计算结果

Table 4 Calculation results of stress/strain sensitivity of C-UHPC

| Sample    | $S_{\sigma}$ |         |           | $S_{\varepsilon}$ |         |           |
|-----------|--------------|---------|-----------|-------------------|---------|-----------|
|           | Average      | Maximum | Peak load | Average           | Maximum | Peak load |
| 0.16-0%   | 0.336 0      | 3.068   | 0.017 40  | 0.028 3           | 0.167 8 | 0.028 60  |
| 0.16-0.5% | 0.195 6      | 1.932   | 0.013 10  | 0.035 1           | 0.154 8 | 0.005 58  |
| 0.16-1.0% | 0.175 4      | 1.502   | 0.005 70  | 0.070 2           | 0.197 4 | 0.006 61  |
| 0.16-1.5% | 0.072 5      | 0.451   | 0.007 60  | 0.043 1           | 0.138 2 | 0.000 94  |
| 0.16-2.0% | 0.021 2      | 0.132   | 0.000 25  | 0.008 2           | 0.046 5 | 0.000 56  |

$S_{\sigma}$  is stress sensitivity.  $S_{\varepsilon}$  is strain sensitivity.

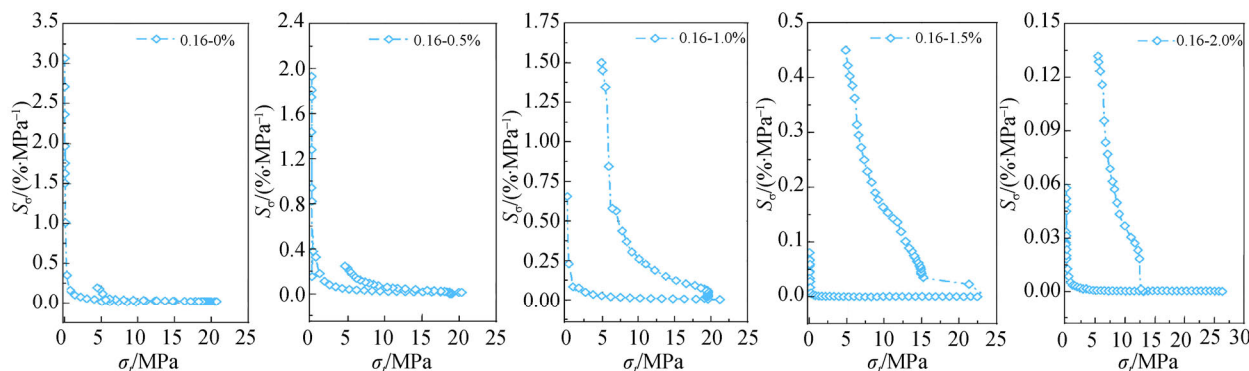


图 16 C-UHPC 应力灵敏度与应力的动态变化曲线

Fig. 16 Dynamic change curve of stress sensitivity and stress of C-UHPC

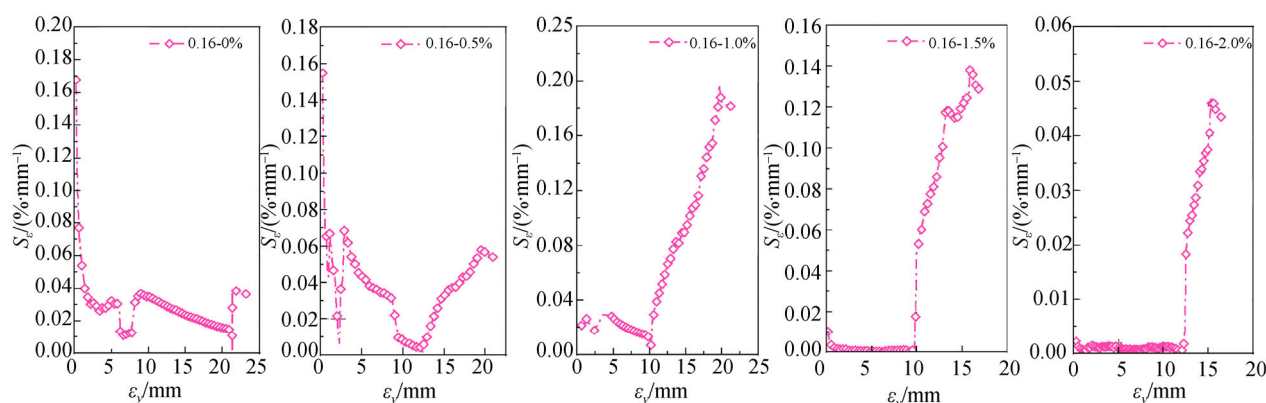


图 17 C-UHPC 应变灵敏度与应变的动态变化曲线

Fig. 17 Dynamic change curves of strain sensitivity and strain of C-UHPC

应变灵敏度随应变的增加而先下降后上升。与应力先增大后减小的变化不同,垂直于加载方向的应变持续增加。以峰值荷载对应的应变灵敏度为例,对比 WCFs 掺量 0%,提高掺量至 1%、2%时,应变灵敏度分别下降了 76.89%、98.04%。这是因为未开裂时,高掺量下 C-UHPC 导电性较好,感应应变变化的敏感程度较高,应变灵敏度较小。但随应变的增加,临界裂缝逐渐扩张至宏观裂缝(见图 11),中断了电流的传输,减少了有效感知的获取路径,从而使灵敏度增大。

### 3 结论

1) 掺入 WCFs 会降低 C-UHPC 的抗压强度,提高其导电性能。高掺量 WCFs(>1%, 体积分数)会降低 C-UHPC 的韧性。弯曲应力下, C-UHPC 荷载-挠度曲线变化可分为弹性阶段、弯曲硬化阶段和破坏阶段。

2) C-UHPC 受弯曲荷载时,电阻发生变化,表现出受弯机敏特性。掺入 WCFs 后, C-UHPC 以峰值荷载为变化节点,峰前荷载的电阻曲线基本不发生波动,峰后荷载的电阻曲线快速上升。当 WCFs 掺量为 1%时, C-UHPC 达到导电阈值,继续提高纤维掺量对电阻率无显著影响。

3) 建立了适用于 C-UHPC 受弯荷载-挠度模型的三段式本构方程,计算结果表明拟合曲线与试验结果吻合度较好,预测精度高。

4) 灵敏度可准确反应 C-UHPC 应力、应变与电阻的动态变化程度。引入泊松比改进了应变灵敏度的计算公式,得到了垂直于加载方向的应变灵敏度。灵敏度随应力、应变的增加均表现出先下降后上升的变化趋势。掺入 WCFs 可有效降低 C-UHPC 应力、应变灵敏度。

### 参考文献:

- [1] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741-751.
- [2] SHEN P L, LU L N, HE Y J, et al. The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2019, 118: 1-13.
- [3] ZHANG G, PENG G F, ZUO X Y, et al. Adding hydrated lime for improving microstructure and mechanical properties of mortar for ultra-high performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2023, 167: 107130.
- [4] ZHOU M, LU W, SONG J W, et al. Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering[J]. Constr Build Mater, 2018, 186: 1256-1267.
- [5] AZMEE N M, SHAFIQ N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications[J]. Case Stud Constr Mater, 2018, 9: e00197.
- [6] SONG F C, CHEN Q, ZHENG Q M. Multifunctional ultra-high performance fibre-reinforced concrete with integrated self-sensing and repair capabilities towards *in situ* structure monitoring[J]. Compos Struct, 2023, 321: 117240.
- [7] WANG D Y, DONG S F, WANG X Y, et al. Sensing performances of hybrid steel wires and fibers reinforced ultra-high performance concrete for *in situ* monitoring of infrastructures[J]. J Build Eng, 2022, 58: 105022.
- [8] LEE S J, YOU I, KIM S, et al. Self-sensing capacity of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete containing conductive powders in tension[J]. Cem Concr Compos, 2022, 125: 104331.
- [9] FORINTOS N, CZIGANY T. Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers-A short review[J]. Compos Part B Eng, 2019, 162: 331-343.
- [10] WANG Y, LI A Y, ZHANG S H, et al. A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry[J]. Constr Build Mater, 2023, 367: 130301.
- [11] WANG D G, SU Y Y, CHEN D Z, et al. Preparation and characterization of poly(3-octylthiophene)/carbon fiber thermoelectric composite materials[J]. Compos Part B Eng, 2015, 69: 467-471.
- [12] PAKDEL E, KASHI S M, BAUM T, et al. Carbon fibre waste recycling into hybrid nonwovens for electromagnetic interference shielding and

- sound absorption[J]. J Clean Prod, 2021, 315: 128196.
- [13] LIU W H, HUANG H H, ZHU L B, et al. Integrating carbon fiber reclamation and additive manufacturing for recycling CFRP waste[J]. Compos Part B Eng, 2021, 215: 108808.
- [14] ZHANG J, CHEVALI V S, WANG H, et al. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling[J]. Compos Part B Eng, 2020, 193: 108053.
- [15] 王艳, 全志平, 张少辉. 回收碳纤维对高强水泥基材料力学性能与导电性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1332–1343.  
WANG Yan, QUAN Zhiping, ZHANG Shaohui. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(5): 1332–1343.
- [16] 王艳, 张彤昕, 郭冰冰, 等. 回收碳纤维混凝土导电性[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2855–2863.  
WANG Yan, ZHANG Tongxin, GUO Bingbing, et al. Acta Mater Compos Sin, 2022, 39(6): 2855–2863.
- [17] 清华大学等. GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 中国建筑科学研究院有限公司. GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 住房和城乡建设部, 2019.
- [19] 杨虹, 王海龙, 王红珊, 等. 碳纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(11): 108–112.  
YANG Hong, WANG Hailong, WANG Hongshan, et al. Build Struct, 2021, 51(11): 108–112.
- [20] 李福海, 刘耕园, 刘梦辉, 等. 纤维协同效应下超高性能混凝土的弯曲性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(12): 1835–1844.  
LI Fuhai, LIU Gengyuan, LIU Menghui, et al. J Tongji Univ Nat Sci, 2023, 51(12): 1835–1844.
- [21] HAN B G, ZHANG L Q, ZHANG C Y, et al. Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 479–489.
- [22] LI H, XIAO H G, OU J P. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites[J]. Cem Concr Compos, 2006, 28(9): 824–828.
- [23] 柳根金, 丁一宁, 宋世德. 复掺碳纤维-纳米炭黑/混凝土智能层对裂缝自监测性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2348–2358.  
LIU Genjin, DING Yining, SONG Shide. Acta Mater Compos Sin, 2021, 38(7): 2348–2358.
- [24] 姚一鸣, 翟梦超, 董路遥, 等. 纤维网格增强超高性能混凝土拉伸刚化机理及协同增强效应[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2364–2374.  
YAO Yiming, ZHAI Mengchao, DONG Luyao, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2364–2374.
- [25] 毕继红, 霍琳颖, 乔浩玥, 等. 单向受拉状态下的碳纤维混凝土本构模型[J]. 工程力学, 2020, 37(6): 155–164.  
BI Jihong, HUO Linying, QIAO Haoyue, et al. Eng Mech, 2020, 37(6): 155–164.
- [26] SORANAKOM C, MOBASHER B. Correlation of tensile and flexural responses of strain softening and strain hardening cement composites[J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(6): 465–477.
- [27] 姚一鸣, 陈璨, 翟梦超, 等. 考虑拉伸刚化效应的纤维网格增强超高性能混凝土弯曲性能[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 1938–1949.  
YAO Yiming, CHEN Can, ZHAI Mengchao, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(8): 1938–1949.
- [28] 朱彬荣, 潘金龙, 周震鑫, 等. 3D 打印高延性水泥基复合材料的单轴受拉和受压行为[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5): 844–854.  
ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(5): 844–854.
- [29] 蔡向荣. 超高韧性水泥基复合材料基本力学性能和应变硬化过程理论分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
CAI Xiangrong. The basic mechanical performance and strain hardening process theoretical analysis of ultra high toughness cementitious composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [30] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 33–39.
- [31] DONG S F, HAN B G, OU J P, et al. Electrically conductive behaviors and mechanisms of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. Cem Concr Compos, 2016, 72: 48–65.
- [32] AZHARI F, BANTHIA N. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(7): 866–873.
- [33] 李雪, 刘成. 工程力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018: 54–56.
- [34] 胡翱翔. 超高性能混凝土力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
HU Aoxiang. Research on mechanical performance of ultra-high performance concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [35] 杨旭. 基于连续-细观损伤力学的超高性能混凝土本构模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
YANG Xu. Study on constitutive model of ultra-high performance concrete based on continuum-meso-damage mechanics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

## Bending Sensitive Characteristics and Load-Deflection Relationships of Conductive Ultra-High Performance Concrete

WANG Yan<sup>1,2</sup>, LI Aoyang<sup>1</sup>, ZHANG Shaohui<sup>1</sup>, GUO Bingbing<sup>2,3</sup>, NIU Ditao<sup>2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

### Extended Abstract

**Introduction** In modern society, the electricity is the foundation of all intelligent facilities. To realize the intelligent development of

cementitious materials, electrical conductivity is one of the important directions for the future research of engineering structures and building materials. Of which, ultra-high performance concrete (UHPC) has been widely used in large-span building structures, tunnel and bridge structures, and repair and reinforcement projects, etc. If the conductive properties of UHPC are realized, and its self-sensing characteristics are given to achieve the demand of intelligent monitoring, it is of great theoretical significance and practical value to ensure the service safety of the building structure. It has reached a consensus at present that UHPC is modified by adding conductive materials to reduce the resistivity. However, conductive materials are expensive and difficult to achieve large-scale engineering applications. The use of waste carbon fibers (WCFs) can not only meet the performance requirements, but also reduce the preparation cost, improve the utilization rate of resources, and avoid environmental pollution. But at this stage, there is a lack of research on the influence of WCFs on the electrical conductivity of UHPC, and the relationship between electrical conductivity and load-deflection needs to be explored. Therefore, this paper took the electrical conductivity and bending performance of UHPC as the research point, and analyzed the bending sensitivity and load-deflection relationship of C-UHPC under different WCFs content. And the variation law between stress, strain and resistance was explored.

**Methods** The UHPC with conductive properties was prepared by WCFs and steel fiber (SF), and the final mix ratio was determined by combining theoretical analysis and pre-experimental research. The water-binder ratio of C-UHPC was 0.16, and the content of WCFs was 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2% (in volume), respectively. Due to some differences between WCFs and virgin carbon fibers (VCFs), a comparative study of the two fibers was carried out by SEM, Raman spectroscopy, and contact angle. The compressive strength tests of C-UHPC cured for 1, 3, 7 d, and 28 d were carried out. The conductivity of C-UHPC was tested by four-electrode method (28 d). The bending sensitivity of C-UHPC mainly studied the relationship between stress, strain, and resistance under bending load. During the test, the load was automatically recorded by the stress sensor of the test machine, the deflection was measured by the bottom displacement meter of the specimen, and the resistance was measured by the external resistance box. After loading, the change values of load, deflection, and resistance were collected synchronously. Finally, SEM was used to observe the microscopic morphology of fibers and fiber-matrix interface in C-UHPC.

**Results and discussion** Compared with VCFs, the surface of WCFs was smoother, but the wettability and graphitization degree were relatively poor. Compared with the reference group (WCFs content of 0%), the compressive strength of C-UHPC decreased after the addition of WCFs, which was attributed to the smaller bond force between the interface of WCFs and matrix. In addition, WCFs and SF were easily entangled with each other, and the positive synergism between fibers was weak. The resistivity of C-UHPC decreased with the increase of WCFs content, but when the content of WCFs was greater than or equal to 1%, C-UHPC reached the conductive threshold, that is, the effective lap probability between fibers satisfied the conductive path of electronic transmission. The main conductive pathways of WCFs in C-UHPC included overlapping, connecting cracks, and micropores. When C-UHPC was subjected to bending load, the specimen underwent uncracked, critical cracks, macroscopic cracks, and finally failure. Of which, the macro cracks were mainly axial cracks, which expanded from bottom to top.

A three-stage constitutive equation applicable to the C-UHPC bending load-deflection model was established with high prediction accuracy. When C-UHPC was subjected to bending load, the resistance changed, and this phenomenon indicated that C-UHPC had a bending sensitive property. Taking the peak load as the change node, the resistance curve of the pre-peak load decreased slightly, and the resistance curve of the post-peak load increased rapidly. This was because when C-UHPC was subjected to external loading, the internal microcracks and micropores were closed, resulting in a temporary increased and more complete conductive path, and the resistance decreased. After exceeding the peak load, the matrix gradually cracked, and the axial cracks expanded, interrupting most of the conductive paths, resulting in an increase in resistance. The stress sensitivity could be divided into two stages: first, the stress sensitivity decreased significantly first and then tends to be gentle with the increase of stress; second, the stress began to decrease after reaching the peak value, and the sensitivity increases. The Poisson's ratio was introduced to improve the formula for strain sensitivity, and the strain sensitivity perpendicular to the loading direction was obtained. The strain sensitivity decreased first and then increases with the increase of strain.

**Results and discussion** The addition of WCFs could reduce the compressive strength of C-UHPC, but improved its conductivity. Under bending stress, the load-deflection curve of C-UHPC could be divided into elastic stage, bending hardening stage, and failure stage. After mixing with WCFs, C-UHPC took the peak load as the change node, and the resistance curve of the pre-peak load basically did not fluctuate, and the resistance curve of the post-peak load increased rapidly. When WCFs content was 1%, C-UHPC reached the conductive threshold, and continuing to increase fiber content had no significant effect on the resistivity. The sensitivity of C-UHPC decreased first and then increases with the increase of stress and strain.

**Keywords** ultra-high performance concrete; waste carbon fibers; conductive property; bending sensitivity; load-deflection