第 51 卷第 12 期
2023 年 12 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 51 No. 12
Dec. 2023

**文章编号**：0253-374X(2023)12-1813-09　　**DOI**：10. 11908/j. issn. 0253-374x. 23100

# 钢纤维对超高性能混凝土徐变损伤与失效行为的影响

徐腾飞[1]，张子飏[2]，卞香港[1]，刘志峰[3]

（1. 西南交通大学 土木工程学院，四川 成都 600031；2. 苏州科技大学 土木工程学院，江苏 苏州 215009；
3. 保利长大工程有限公司，广东 广州 510030）

**摘要**：为探明钢纤维对超高性能混凝土(UHPC)在高持久应力作用下的损伤与失效的影响，采用28天龄期的UHPC与普通混凝土试件开展了徐变损伤与失效试验。测试了各个试件加载全过程的轴向与环向应力应变，分析了其破坏模式、残余应变、徐变应变与名义泊松比。结合超声波无损检测与扫描电子显微镜手段，分析了UHPC内部微裂缝扩展与钢纤维与水泥基体的黏结损伤。结果表明：高持久应力的作用会导致UHPC与普通混凝土试件内部微裂缝扩展，引发构件横向膨胀，并最终导致构件破坏。UHPC中钢纤维的桥接约束效应可以很好地控制内部微裂缝扩展，从而限制了构件的横向膨胀。在持荷加载前，UHPC与普通混凝土具有类似的泊松比(0.18～0.19)；在持荷破坏时，UHPC的最大泊松比为0.28，而普通混凝土的最大泊松比达到0.6。当持久应力水平超过0.70 $f_c$时，徐变损伤开始出现，具体表现为循环加载的强度与弹性模量下降。随着持久应力水平的提升，钢纤维与水泥基体的黏结出现损伤，钢纤维无法约束试件内部微裂缝的扩展，从而进一步加剧了试件损伤，甚至导致了试件的破坏。

**关键词**：超高性能混凝土(UHPC)；内部微裂缝；徐变损伤；徐变失效；钢纤维

**中图分类号**：U443　　**文献标志码**：A

## Influence of Steel Fibers on Creep Damage and Failure Behaviors of UHPC

*XU Tengfei*[1], *ZHANG Ziyang*[2], *BIAN Xianggang*[1], *LIU Zhifeng*[3]

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China; 3. Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510030, China)

**Abstract**: To study the influence of steel fibers on damage and failure behaviors of ultra-high-performance concrete (UHPC) at short-term high sustained stress loading, an experimental program on creep damage and failure was proposed by using UHPC and normal concrete at the age of 28 days. The stress-strain relationship of each specimen was measured during the whole loading processing. The failure modes, irreversible strain, creep strain, and nominal Poisson's ratio were analyzed according to the tested results. Based on the non-destructive ultrasonic test and scanning electron microscopy test (SEM), the expansion of internal micro-cracks within UHPC specimens and the bond damage between steel fibers and matrix were characterized. The results show the high sustained stress of UHPC and normal concrete lead to the development of internal micro-cracks and lateral expansion of specimens, and finally result in the creep failure of specimens. The bridging and confinement effects provided by steel fibers can control the development of internal micro-cracks, and reduce the lateral expansion of specimens. Before sustained loading, UHPC and normal concrete have similar nominal Poisson's ratios of 0.18~0.19. After sustained loading, the nominal Poisson's ratio of UHPC becomes 0.28, whereas the normal concrete specimens have a higher nominal Poisson's ratio of 0.6. When the sustained stress was higher than 0.70 $f_c$, creep damage of UHPC specimens occurs, which lead to the reductions in strength and elastic modulus at cycle of reloading. With the increment in sustained stress, the bond between steel fibers and matrix is damaged, and the steel fibers fail to confine the development of internal micro-cracks. As a results, the specimens are continuedly damaged and finally fail.

**Key words**: ultra-high-performance concrete (UHPC); internal micro-cracks; creep damage; creep failure; steel fibers

收稿日期：2023-03-27
基金项目：国家自然科学基金(52378315)
第一作者：徐腾飞(1983—)，男，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为高性能与可持续混凝土。
E-mail：tengfeixu@swjtu. edu. cn

论文拓展介绍

超高性能混凝土(UHPC)作为一种力学性能与耐久性能更为优异的新型水泥基复合材料,与普通混凝土相比可以增加结构的跨度并减小结构的横截面,因此,基于UHPC有望研发出更经济、更环保、更坚固、更耐久的高性能结构。此外,UHPC具有早龄期强度高、强度增长速度快等特点,可显著加快施工的进度、减少工期。随着双碳战略的实施,UHPC在大跨度预应力混凝土桥梁方面越来越受到关注[1]。

徐变是水泥基材料的固有属性,是大跨度桥梁结构长期行为的重要影响因素。根据持久应力水平的不同,混凝土存在线性徐变、收敛型非线性徐变与发散型非线性徐变这3种徐变行为。针对线性徐变行为的研究,可以建立工程用的混凝土徐变模型,用于混凝土结构长期行为预测。针对收敛型非线性徐变的研究,可以获得非线性徐变阈值与持久状况下混凝土的准永久应力限值[2]。针对发散型非线性徐变的研究,可以确定混凝土的长期强度。当前,UHPC的徐变研究主要集中在应力水平低于40%抗压强度的UHPC线性徐变行为[3-9]。UHPC的收敛型非线性徐变与发散型非线性徐变行为鲜有报道。在工程实践中,结构构件也会存在局部高应力作用的情况,如:在张拉施工过程中施工不规范导致的钢筋束端板周围的混凝土承受短期高应力、桥梁结构在施工过程中体系转换不合理也会导致结构承受短期高应力以及结构由短期意外荷载引起的短期高应力的情况。研究UHPC在高应力下的徐变行为有助于阐明短期徐变应变及其与开裂、损伤和塑性的相互关系,进而对于评估UHPC在这些局部高应力区的应力重分布行为具有重大的意义[10-13]。

对于普通混凝土,国内外学者研究了其在短期高应力作用下的徐变破坏行为并给出了徐变阈值和长期荷载作用下的抗压强度。Mazzotti等[14]通过短期高应力徐变试验提出了高应力水平下的徐变损伤模型,该模型可以考虑非线性黏滞应变演化、混凝土内微裂纹形成与时变扩展等诸多因素。刘国军等[15]研究了混凝土单轴受压时的徐变损伤行为,揭示了高应力下混凝土内部徐变损伤的演变规律。Ruiz等[10]研究了高压应力下混凝土非线性徐变与开裂之间的关系,提出了一个物理模型来解释混凝土徐变破坏的机理。综上所述,目前的研究认为普通混凝土的短期高应力持续作用下的损伤和失效行为与混凝土内部微裂缝的开展密切相关。对于UHPC而言,其配比中含有钢纤维,钢纤维可以约束混凝土内部微裂缝的扩展,其是否会影响UHPC在高持久应力水平下的损伤与失效行为有待进一步研究。

为了探明超高性能混凝土(UHPC)在持续高水平压应力下的损伤与失效机理以及钢纤维的影响,对28天龄期的UHPC与普通混凝土试件开展了高应力短期持续作用下损伤与失效试验,分析了UHPC与普通混凝土在短期高应力持续作用下的损伤模式。通过徐变系数、名义泊松比、超声波无损检测与扫描电子显微镜(SEM)等手段研究了钢纤维的加入对UHPC短期高应力持续作用下损伤与失效的影响,给出了短期高应力持续作用下UHPC损伤与失效机理。

## 1 高应力短期作用下UHPC损伤与失效试验

### 1.1 原料及配合比

试验使用的超高性能混凝土(UHPC)采用满足《公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程》[16]中UC120强度等级要求的预拌料。该预拌料由水泥、硅灰、石英砂、超塑化剂、高效减水剂、钢纤维等组成。预拌料中的钢纤维是由端钩型与平直型2类纤维构成,其总体积占比为2.0%。其中,长13mm、直径0.2mm的端钩型钢纤维体积分数为0.6%;长13mm、直径0.2mm的平直型钢纤维体积分数为1.4%。

超高性能混凝土材料配合比如表1所示,材料的水胶比为0.18。

**表1 超高性能混凝土配合比**

**Tab. 1 Mix of UHPC**

| 质量/(kg·m$^{-3}$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 水泥 | 硅灰 | 石英砂 | 钢纤维 | 水 | 超塑化剂 | 减水剂 |
| 680 | 170 | 1 150 | 100 | 156 | 180 | 14 |

试验使用的普通混凝土由水泥、机制砂、石子、粉煤灰、矿渣与减水剂等组成,其配合比如表2所示,材料的水灰比为0.31。

**表2 普通混凝土配合比**

**Tab.2 Mix of normal strength concrete**

| 质量/(kg·m$^{-3}$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 水泥 | 机制砂 | 石子 | 水 | 减水剂 | 粉煤灰 | 矿渣 |
| 448 | 626 | 1 022 | 174.7 | 2 | 56 | 56 |

### 1.2 试件制作与力学性能

在制作试件时,按配合比称取相应的材料后倒入搅拌锅内,干拌2min使混合料混合均匀。然后将

水与减水剂混合后加入搅拌锅内，拌合4min。拌合完毕后将材料浇入试模制成试件。浇铸成型后，用塑料膜密封试件，24h后对试件脱模。试件脱模后在温度为20±2℃、相对湿度为95%的标准养护室中覆膜养护。

在高应力短期持荷试验前，对28d龄期的标准养护试件进行了力学性能测试，确定了材料的抗压强度与弹性模量。测试的试件为直径100mm、高度200mm的圆柱体试件。UHPC与普通混凝土28d龄期的抗压强度与弹性模量如表3所示。

**表3　28天龄期材料的力学性能**

**Tab. 3　Mechanical properties of materials aged 28 days**

| 材料 | 抗压强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|---|---|---|
| UHPC | 97.5 | 41.6 |
| 普通混凝土 | 74.6 | 34.5 |

### 1.3　短期高应力持荷试验设计

混凝土高应力短期持续作用下损伤与失效试验共设计有4类14组52个试件。其中第1类为对照组，试件将单调加载直至破坏。这些试件被命名为XM，其中：X表示材料类型（U：UHPC或N：普通混凝土），M表示单调加载。例如："UM"表示UHPC试件在28d龄期单调加载至破坏。

第2类为不持荷循环加卸载组，包括加载、卸载和再加载3个步骤。这些试件被命名为UCXXC0，其中：第1个C代表持力荷载；XX是指初始荷载中的初始应力大小（0.60$f_c$、0.70$f_c$或0.80$f_c$）；第2个C表示徐变，0表示无徐变阶段。例如："UC70C0"表示UHPC试件在28天龄期时加载到0.70$f_c$，然后立即卸载，再单调加载直至试件破坏。

第3类为高应力短期持续作用下损伤试验组，包括加载、持荷、卸载和再加载4个步骤。这些试件被命名为UCXXCYY，其中：第1个C代表持力荷载水平；第2个C代表持载徐变。XX是指初始荷载中的初始应力大小（0.60$f_c$、0.70$f_c$或0.80$f_c$）；YY是指经持载徐变之后卸载时总应变与对应单调加载试件破坏时的峰值应变（$\varepsilon_c$）的比值（0.70$\varepsilon_c$、0.80$\varepsilon_c$、0.90$\varepsilon_c$或0.95$\varepsilon_c$）。例如："UC90C95"表示在28天龄期时加载至0.90$f_c$的UHPC试件，保持荷载直到总应变等于峰值应变的95%后卸载，最后再单调加载直至破坏。

第4类为高应力短期持续作用下失效试验组，包括加载、持荷2个步骤，这些试件被命名为XYY。其中：X表示材料类型（U：UHPC或N：普通混凝土），YY表示初始荷载中的初始应力大小（0.85$f_c$或0.95$f_c$）。例如："U85"表示UHPC试件在28d龄期被加载到0.85$f_c$的荷载水平并持荷直至失效。

表4给出了短期高应力持荷试验试件参数。

**表4　短期高应力持荷试验试件参数**

**Tab. 4　Specimen parameters of short-term high stress test**

| 编号 | 试件 | 持荷应力 | 持载后卸载应变 | 材料 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | UM | — | — | UHPC |
| 2 | NM | — | — | 普通混凝土 |
| 3 | UC70C0 | — | — | UHPC |
| 4 | UC80C0 | — | — | |
| 5 | UC90C0 | — | — | |
| 6 | UC60C70 | 0.60$f_c$ | 0.70$\varepsilon_c$ | UHPC |
| 7 | UC60C80 | 0.60$f_c$ | 0.80$\varepsilon_c$ | |
| 8 | UC70C80 | 0.70$f_c$ | 0.80$\varepsilon_c$ | |
| 9 | UC70C90 | 0.70$f_c$ | 0.90$\varepsilon_c$ | |
| 10 | UC80C90 | 0.80$f_c$ | 0.90$\varepsilon_c$ | |
| 11 | UC90C95 | 0.90$f_c$ | 0.95$\varepsilon_c$ | |
| 12 | U85 | 0.85$f_c$ | — | UHPC |
| 13 | U95 | 0.95$f_c$ | — | |
| 14 | N95 | 0.95$f_c$ | — | 普通混凝土 |

试验采用3 000kN万能试验机进行加载，加载速率为0.8MPa·s$^{-1}$。短期高应力持荷试验的测量装置布置如图1所示。在试验过程中，圆柱体试件的轴向应变使用设置于试件两侧的2个标距长度为120mm的LVDT（Linear Variable Differential Transformer）与2个轴向应变片进行同步测量。环向应变则通过设置与试件对侧的6个环向应变片进行测量。LVDT与应变片均连接至数据采集系统并以10Hz的频率记录测试数据。

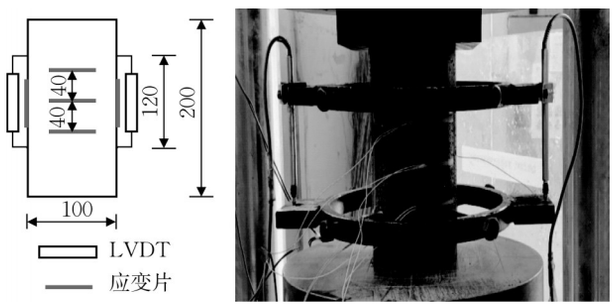



**图1　加载与测量装置（单位：mm）**

**Fig. 1　Loading and measurement configurations (unit: mm)**

## 2　试验结果

### 2.1　试件破坏形态

第1组（UM与NM）试件与第4组（U85、U95与N95）试件分别采用单调瞬时加载方式与高应力持

荷加载方式导致构件破坏,图2给出了破坏后不同材料与不同加载方式的破坏形态。

对比2种加载方式,可以明显发现,UHPC试件与普通混凝土试件在高应力持荷加载下均发生了明显的横向膨胀。这表明,在高应力的持续作用下,试件内部产生了微裂缝且持续发展,从而引发了横向膨胀;当横向膨胀达到一定程度时,试件发生破坏。

对比UHPC与普通混凝土试件,UHPC试件相对完整,没有明显的混凝土块剥落现象。这是因为UHPC内部的钢纤维具有桥接效应,可以限制试件内部的微裂缝扩展,从而也约束了UHPC的横向膨胀。

a UHPC单调加载　b UHPC高持久应力加载　c 普通混凝土单调加载　d 普通混凝土高持久应力加载

**图2　超高性能混凝土与普通混凝土试件破坏模式**

**Fig. 2　Failure modes of UHPC and normal concrete specimens**

## 2.2　应力-应变关系

为了更好地对比不同材料试件的应力-应变曲线,可以以单调加载试件的强度$f_c'$与峰值应变$\varepsilon_c$为基准,对试验应力-应变曲线进行标准化,如式(1)所示:

$$\bar{\varepsilon}=\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c},\bar{\sigma}=\frac{\sigma_0}{f_c'} \tag{1}$$

式中:$\bar{\varepsilon}$和$\bar{\sigma}$分别为标准化后量纲为一应变和量纲为一应力;$\sigma_0$和$\varepsilon_0$分别为试件的测试应力与测试应变。

表5给出了各个试件单调加载阶段结束时应变$\varepsilon_A$、卸载前应变$\varepsilon_B$、残余应变$\varepsilon_C$与相对残余应变$\varepsilon_C/\varepsilon_B$。图3给出了测试试件标准化后的量纲为一应力-应变关系。

图3a—3c为UHPC单调加载与无持荷循环加载试件的应力-应变关系对比。由图可以看出,当循环应力水平为$0.70f_c$时,UHPC试件基本处于弹性状态,其卸载后残余应变约为零,再次加载后,强度与弹性模量基本保持不变;当循环应力水平为$0.80f_c$与$0.90f_c$时,UHPC表现出一定的塑性状态,但基本无损伤,其卸载后具有约4%的相对残余应

**表5　短期高应力持荷试验试件的平均应变**

**Tab. 5　Average strain of specimens at short-term high sustained stress loading**

| 试件 | 单调加载应变/$10^{-6}$ | 徐变应变/$10^{-6}$ | 卸载前应变/$10^{-6}$ | 残余应变/$10^{-6}$ | 相对残余应变/% |
|---|---|---|---|---|---|
| UC70C0 | 1 782 | — | 1 792 | 75 | 4.19 |
| UC80C0 | 1 991 | — | 2 000 | 92 | 4.60 |
| UC90C0 | 2 299 | — | 2 303 | 108 | 4.69 |
| UC60C70 | 1 434 | 291 | 1 728 | 267 | 15.45 |
| UC60C80 | 1 400 | 604 | 2 005 | 563 | 28.08 |
| UC70C80 | 1 732 | 268 | 2 003 | 243 | 12.13 |
| UC70C90 | 1 740 | 518 | 2 256 | 478 | 21.19 |
| UC80C90 | 1 988 | 247 | 2 237 | 200 | 8.94 |
| UC90C95 | 2 200 | 200 | 2 399 | 166 | 6.92 |
| U85 | 2 012 | 240 | — | — | — |
| U95 | 2 012 | 172 | — | — | — |
| N95 | 2 144 | 569 | — | — | — |

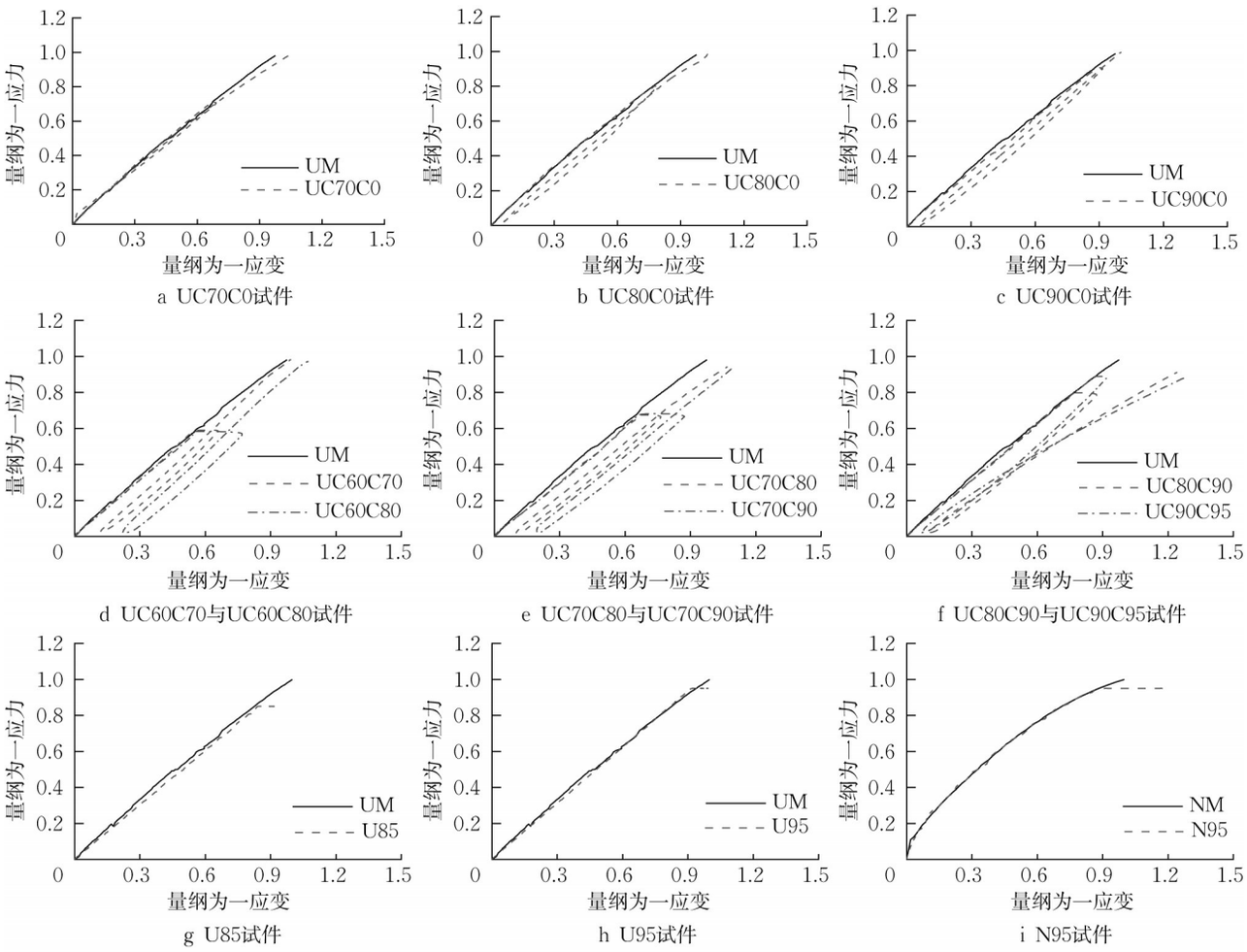



**图3　短期高应力持荷试验试件的应力应变关系**

**Fig. 3　Strain-stress relationship of specimens at short-term high sustained stress loading**

变,但再次加载后,强度与弹性模量仍然基本保持不变。

图3d—3f为UHPC单调加载与持荷后循环加载试件的应力-应变关系对比。由图可以看出,由于荷载的持续作用,各个试件均产生了明显的徐变塑性变形,并具有一定的残余应变。不同的持荷应力水平导致UHPC试件不同程度的损伤。当持荷应力水平为0.60 $f_c$时,卸载后再次加载的强度与刚度基本保持不变,徐变效应主要体现为徐变塑性变形;当持荷应力水平为0.70 $f_c$时,卸载后再次加载的强度与刚度略有降低,构件发生轻微损伤;当持荷应力水平为0.80 $f_c$与0.90 $f_c$时,卸载后再次加载的强度有一定程度的降低,再次加载与卸载路径出现显著偏离,再次加载的刚度显著下降,构件损伤较为严重,徐变效应中徐变损伤的比例逐步提高。同时,从表5中可以发现,随着持荷应力水平的提高,相对残余应变逐渐降低。这也表明,随着持久应力水平的提高,徐变损伤效应逐渐增强,徐变塑性效应逐步减弱。此外,对比无持荷循环加载试件与持荷后循环加载试件的应力-应变关系,可以推断,UHPC的损伤(循环加载强度与弹性模量降低)是由于高应力持荷引起的。

图3g—3i给出了UHPC与普通混凝土的单调加载与持荷加载直至破坏的应力-应变曲线。由图可以看出,UHPC在持荷加载下,破坏应变均小于单调加载的峰值应变,而普通混凝土的破坏应变则大于单调加载的峰值应变。UHPC的高强高韧主要原因是水泥基体的致密性与钢纤维对水泥基体的桥接约束作用。在高应力作用下(0.85 $f_c$与0.95 $f_c$),两者性能均已充分发挥。通过SEM观察发现,在持续应力作用下,钢纤维与水泥基体逐渐剥离。可以推断,高持续应力作用破坏时,钢纤维与水泥基体的黏结被破坏,桥接约束作用突然消失,UHPC的破坏体现出极强的脆性。

## 3 高持续应力短期作用损伤与失效分析

### 3.1 徐变应变

图4给出了高应力持荷阶段普通混凝土试件(N95)与UHPC试件(U95)的轴向应变与环向应变随时间的发展情况。由图可以看出,在高持续应力的作用下,普通混凝土与UHPC试件在很短的时间内就发生了破坏(N95构件持荷95 s,U95构件持荷352 s);在破坏前两者环向应变均有显著增长。这再次表明,在高持续应力作用下,构件内部微裂缝持续扩展,并发生横向膨胀。同时,普通混凝土与UHPC的对比可以看出,钢纤维的桥接约束作用有效抑制了UHPC试件内的微裂缝扩展,使UHPC试件的失效持时比普通混凝土延长了3倍左右。

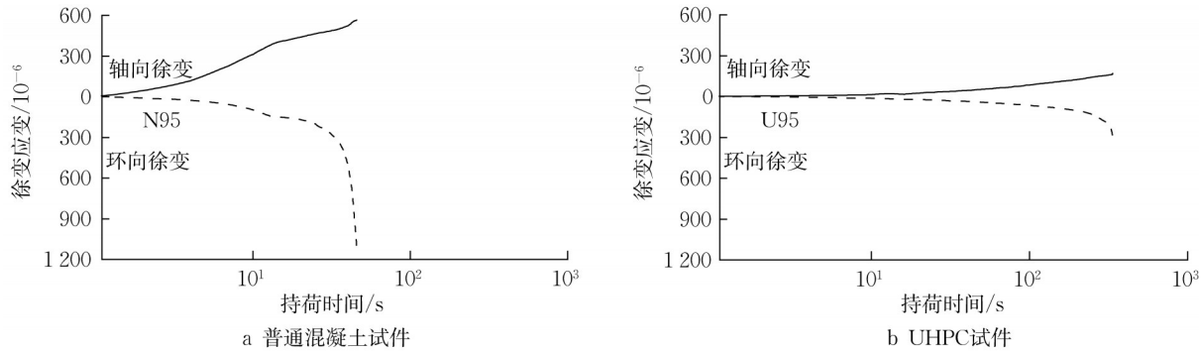



**图4 高持续应力短期作用下普通混凝土试件与超高性能混凝土试件的徐变应变**

**Fig. 4 Creep strains of UHPC and normal concrete specimens at short-term high sustained stress loading**

### 3.2 名义泊松比

在单向轴力的作用下,介质除发生轴向变形外,还会发生横向变形,即泊松效应,其中横向变形与轴向变形的比值称为泊松比。对于混凝土而言,在轴向压力作用下,除泊松效应导致的横向膨胀外,还可能因为内部微裂缝扩展而引发横向变形,因此混凝土的横向应变与轴向应变的比值可以定义为名义泊松比,并用于表征混凝土的损伤和微裂缝扩展[17]。根据定义,圆柱体的泊松比可写为负的径向应变与轴向应变之比,即

$$\mu=-\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_l} \tag{2}$$

式中:$\varepsilon_r$与$\varepsilon_l$分别为圆柱体试件的径向应变与轴向应变。圆柱体的径向应变很难测量,但根据式(3)可知,环向应变$\varepsilon_a$与径向应变$\varepsilon_r$是等价的,即

$$\varepsilon_r=-\frac{\Delta R}{R}=-\frac{2\pi\Delta R}{2\pi R}=\varepsilon_a \tag{3}$$

则圆柱体混凝土的名义泊松比$\mu$可由环向应变与轴向应变的负比值来表示,即

$$\mu=-\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_l} \tag{4}$$

图5给出了高应力持荷前后试件的名义泊松比变化。如图5所示,无论是UHPC试件还是普通混凝土,在持续荷载作用前均具有类似的泊松比,其值为0.18~0.19,但在持续高应力的作用下试件的名义泊松比均有了显著的增长,这可以定量表征在持续高应力作用下试件内部的微裂缝扩展情况。表6定量给出了高应力持荷前后名义泊松比的变化情况。总体而言,名义泊松比随着持久应力水平与徐变应变的增长而增大。对比普通混凝土与UHPC试件,普通混凝土在徐变破坏前的名义泊松比增长了215.8%,达到0.6。这表明普通混凝土内部已经产生了大量微裂缝,其名义泊松比已经超过了连续介质的泊松比上限0.5。反观UHPC,其在持久应力作用下,名义泊松比也有明显增长,但钢纤维的桥接约束作用限制了裂缝扩展,其最大名义泊松比仅为0.28。

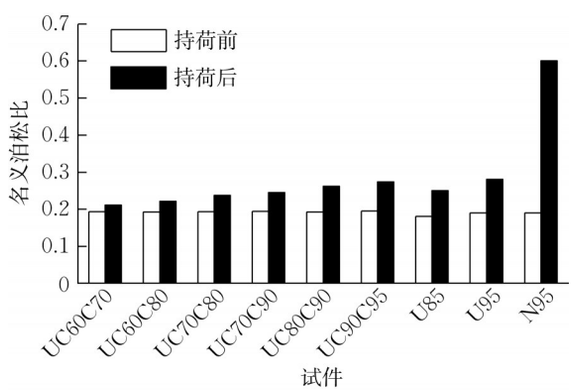



**图5 持荷前后试件的名义泊松比**

**Fig. 5 Nominal Poisson´s ratio of specimens before and after sustained loading**

表6　持荷前后试件的名义泊松比对比

Tab. 6　Comparison of Nominal Poisson´s ratio of specimens before and after sustained loading

| 试件 | 持荷时间/s | 名义泊松比 | | 名义泊松比变化/% |
|---|---|---|---|---|
| | | 持荷前 | 持荷后 | |
| UC60C70 | 1 670 | 0.19 | 0.21 | 9.1 |
| UC60C80 | 8 553 | 0.19 | 0.22 | 14.7 |
| UC70C80 | 1 395 | 0.19 | 0.24 | 22.7 |
| UC70C90 | 6 442 | 0.19 | 0.25 | 26.5 |
| UC80C90 | 290 | 0.19 | 0.26 | 36.0 |
| UC90C95 | 207 | 0.19 | 0.27 | 40.4 |
| U85 | 1 132 | 0.18 | 0.25 | 38.9 |
| U95 | 352 | 0.19 | 0.28 | 47.4 |
| N95 | 95 | 0.19 | 0.60 | 215.8 |

### 3.3　超声波无损检测

超声波检测是一种评价混凝土材料内部损伤的常用无损检测方法。当混凝土内部产生微裂缝后,由于超声波在混凝土和空气中的传播速率不同,因此可以通过超声波传播时间的变化来间接评估混凝土内部的开裂损伤[18]。

研究选取了5个循环加载损伤试件(UC90C0、UC60C70、UC70C80、UC80C90与UC90C95)进行超声波无损检测。如图6所示,在每一个试件的顶面与底面选取9个对测点,将收发器放置于对应位置对超声波传播时间进行测量,并取测量结果的平均值作为持荷前后超声波在混凝土内部的平均传播时间,即

$$\Delta\tau=\frac{1}{9}\sum_{k=1}^{9}\frac{\tau_{1k}-\tau_{0k}}{\tau_{0k}} \tag{5}$$

式中:$\Delta\tau$为短期高应力持荷后的超声波传播时间变化率;$\tau_{0k}$与$\tau_{1k}$为加载前与卸载后测区$k$测得的超声波传播时间。

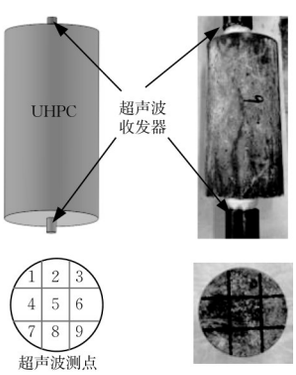



图6　超声波无损检测及测点布置

Fig. 6　Measuring point layout of ultrasonic testing

图7给出了根据式(5)计算得到的超声波传播时间变化率。可知,与无持荷循环加卸载相比,持荷对UHPC的损伤影响更大。无持荷循环加卸载试件的最大应力水平达到0.90$f_c$时,其超声波传播时间变化率仅6%,表明其内部损伤不明显;而对于持荷循环加卸载试件而言,持久应力水平从0.60$f_c$变化至0.90$f_c$时,其超声波传播时间变化率由8%增长至27%,表明持久应力导致构件持续损伤。

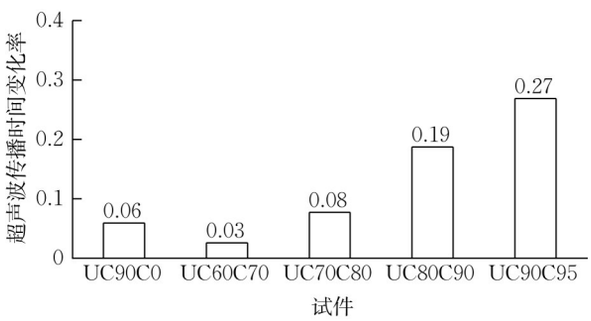


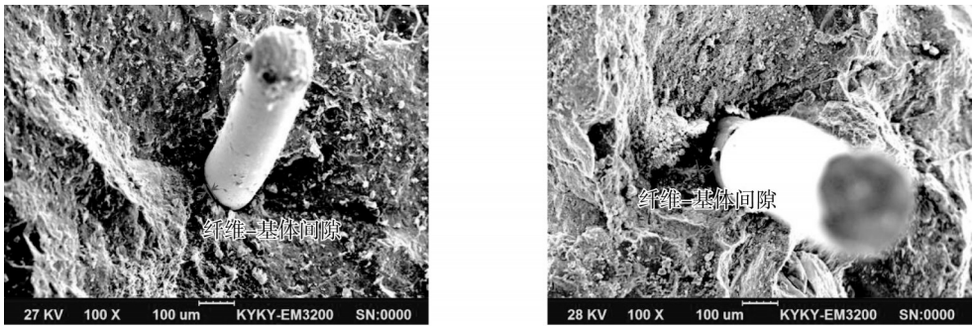

图7　试件循环加载前后超声波传播时间变化率

Fig. 7　Rate of change in ultrasonic travel time of specimen before and after a loading cycle

### 3.4　纤维与混凝土基体微观结构

为了进一步分析短期高应力持荷对钢纤维与混凝土基体之间黏结的影响,对相同应力水平作用下的不持荷循环加卸载试件(UC90C0)与持荷循环加卸载试件(UC90C95)进行了SEM分析。这2组试件循环加卸载后,典型的纤维-水泥基体微观结构如图8所示。

由图8可以看出,在未经历短期高应力持荷时,UHPC中钢纤维与水泥基体之间的黏结良好,仅在少量界面上观察到很小的缝隙,钢纤维与水泥基体具有良好的黏结,因此再次加载时其强度与弹性模量均无明显下降。但高应力短期持荷后,多数钢纤维与水泥基体之间的缝隙增长明显,钢纤维与水泥基体之间的黏结性能劣化。钢纤维已经无法限制水泥基体内的微裂缝扩展,从而导致UHPC的强度与弹性模量显著下降,甚至引起UHPC的构件失效。




a UC90C0试件　　b UC90C95试件

**图8　未持荷试件与持荷试件的纤维-混凝土基体界面黏结情况**

**Fig. 8　Bonding details of fiber-matrix interface without and with sustained loading**

## 4　结语

设计并开展了14组52个UHPC与普通混凝土试件的徐变损伤与失效试验,包括:2组单调加载试件、3组无持荷循环加卸载试件、6组持荷循环加卸载试件与4组持荷破坏试件。通过对破坏形态、应力-应变关系、徐变应变、名义泊松比、超声波无损检测与纤维微观形态等分析,得出以下结论:

(1)高持续应力的短期作用会导致UHPC与普通混凝土试件内部微裂缝扩展,引发构件横向膨胀,并最终导致构件破坏。

(2)UHPC中钢纤维的桥接约束效应可以很好地控制内部微裂缝扩展,从而限制了构件的横向膨胀。在持荷加载前,UHPC与普通混凝土具有类似的泊松比(0.18~0.19);在持荷破坏时,UHPC的最大泊松比为0.28,而普通混凝土的最大泊松比达到0.6。

(3)当持久应力水平超过0.70$f_c$时,徐变损伤开始出现,具体表现为循环加载的强度与弹性模量下降。随着持久应力水平的提升,钢纤维与水泥基体的黏结出现损伤,钢纤维无法约束试件内部微裂缝的扩展,从而进一步加剧了试件损伤,甚至导致了试件的破坏。

**作者贡献声明:**

徐腾飞:提供思路、研究支持与论文撰写。

张子飏:实验方案设计、数据分析与论文修订。

卞香港:实验开展与论文修订。

刘志峰:工程设计与应用指导。

**参考文献:**

[1] 刘超,孙启鑫,邹宇罡.超高性能混凝土-混凝土组合简支梁弯曲性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(5):664.
LIU Chao, SUN Qixin, ZOU Yugang, *et al*. Experimental study on bending performance of ultra-high performance concrete-normal concrete composite simply supported beam [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(5): 664.

[2] 中华人民共和国交通运输部.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018 [S].北京:人民交通出版社,2018
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

[3] MERTOL H C, RIZKALLA S, ZIA P, *et al*. Creep and shrinkage behavior of high-strength concrete and minimum reinforcement ratio for bridge columns[J]. PCI Journal, 2010, 55(3): 138.

[4] XU Y, LIU J, LIU J, *et al*. Experimental studies and modeling of creep of UHPC [J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 643.

[5] ZHU L, WANG J J, LI X, *et al*. Experimental and numerical study on creep and shrinkage effects of ultra high-performance concrete beam [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 184: 107713.

[6] GARAS V Y, KURTIS K E, KAHN L F. Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4): 493.

[7] 刘路明,方志,刘福财,等.室内环境下UHPC的收缩徐变试验和预测[J].中国公路学报,2021,34(8):10.
LIU Luming, FANG Zhi, LIU Fucai, *et al*. Experimental study on the shrinkage and creep of UHPC in indoor environments [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8):10.

[8] 崔存森.养护制度对超高性能混凝土收缩徐变及其基本力学性能的影响[D].北京:北京交通大学,2018.
CUI Cunseng. Influence of curing regime on shrinkage, creep and basic mechanical properties of ultra-high performance

concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[9] 戚佳颖.考虑徐变的钢-UHPC组合梁桥的长期性能数值研究[D].天津:天津大学,2020.
QI Jiayin. Numerical investigation of mechanical properties of steel-UHPC composite bridge considering creep [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

[10] RUIZ M F, MUTTONI A, GAMBAROVA P G. Relationship between nonlinear creep and cracking of concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(3): 383.

[11] TSUBAKI T, SUMITRO S. Numerical simulation model for mechanical behavior of fiber reinforced concrete [C]//Third International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-3). Freiburg: AEDIFICATIO Publishers, 1998: 531-540.

[12] ZHANG Z, XU T, DENG K, *et al*. Experimental study on creep failure of non-steam-cured ultrahigh-performance concrete under high uniaxial compressive stress [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(6): 04022105.

[13] ZHANG Z, XU T, CASTEL A. Damage of non-steam-cured UHPC under axial compression with and without short-term sustained loading history [J]. Structures, 2022, 38: 1066.

[14] MAZZOTTI C, SAVOIA M. Nonlinear creep, Poisson's ratio, and creep-damage interaction of concrete in compression [J]. Materials Journal, 2002, 99(5): 450.

[15] 刘国军,杨永清,郭凡,等.混凝土单轴受压时的徐变损伤研究[J].铁道建筑,2012(12):3.
LIU Guojun, YANG Yongqing, GUO Fan, *et al*. Study on creep damage of concrete under uniaxial compression [J]. Railway Engineering, 2012(12):3.

[16] 中国工程建设标准化协会公路分会.公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程:CECS G—2019 [S].北京:人民交通出版社,2019.
Highway Branch of China Association for Engineering Construction Standardization. Technical standards for highway ultra-high performance concrete (UHPC) bridge: CECS G—2019 [S].Beijing: China Communications Press, 2019.

[17] ZHAOXIA L. Effective creep Poisson's ratio for damaged concrete [J]. International journal of fracture, 1994, 66 (2): 189.

[18] BREYSSE D. Nondestructive evaluation of concrete strength: an historical review and a new perspective by combining NDT methods [J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 139.

(上接第1803页)

BI Jihong, HUO Linying, QIAO Haoyao, *et al*. Constitutive model of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension [J]. Engineering Mechanics, 2020,37(6):155.

[77] 喻渴来,卿龙邦,王苗.定向钢纤维增强水泥基复合材料断裂特性模拟分析[J].硅酸盐通报,2018,37(3):810.
YU Kelai, QING Longbang, WANG Miao. Simulation and analysis of fracture characteristics of directional steel fiber reinforced cement matrix composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018,37(3):810.

[78] 刘博雄.定向钢纤维增强水泥基复合材料的断裂特性及理论模型研究[D].天津:河北工业大学,2018.
LIU Boxiong. Study on fracture characteristics and theoretical model of directional steel fiber reinforced cement matrix composites [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.

[79] 王晓婷.定向钢纤维水泥基材料Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝断裂研究[D].天津:河北工业大学,2018.
WANG Xiaoting. I-II mixed mode fracture properties of aligned steel fiber reinforced cementitious composite [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.

[80] 卿龙邦,喻渴来,慕儒,等.定向钢纤维增强水泥基复合材料抗拉细观模拟[J].建筑材料学报,2018,21(4):561.
QING Longbang, YU Kelai, MU Ru, *et al*. Meso-scale simulation of tension properties for aligned steel fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Building Materials, 2018,21(4):561.