

超高韧性水泥基材料桥面连续构造的疲劳试验

胡克旭¹, 侯梦君¹, 余江滔¹, 董思卫²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中建三局集团有限公司工程总承包公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 通过 3 个桥面连续构造节点的疲劳试验, 分析不同材料(普通混凝土和超高韧性水泥基材料(UHTC))和配筋下桥面连续构造的疲劳性能。试验结果表明: 在疲劳荷载作用下, UHTC 材料表现出了明显的多缝开裂和延性破坏特征; 在同等应力条件下, UHTC 材料桥面连续构造节点的疲劳寿命是普通钢筋混凝土试件的 3 倍以上; 相同荷载作用下, 相比于普通混凝土, UHTC 能有效减缓钢筋应变幅的增长, 减缓桥面连续构造在疲劳荷载作用下的刚度退化, 从而大大提高了桥面连续构造的疲劳寿命。

关键词: 高延性纤维增强水泥基复合材料; 超高韧性水泥基材料; 桥面连续构造; 疲劳试验; 疲劳寿命

中图分类号: TU528.58; TU997

文献标志码: A

Experimental Study of Fatigue Behavior of Ultra-High Toughness Concrete Used for Bridge Continuous Decks

HU Kexu¹, HOU Mengjun¹, YU Jiangtao¹, DONG Siwei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. General Contractor Company, China Construction Bureau Group Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: A novel high performance fiber reinforced concrete ultra-high toughness concrete (UHTC) is expected to have promising applications in civil engineering due to its outstanding ductility. A series of fatigue tests were conducted on 3 continuous decks to study the fatigue properties of UHTC used as the structural joints in bridge continuous decks with different steel reinforcement ratios. The test results show that the UHTC specimens exhibit a significant multi-cracking behavior and good ductile failure characteristics under the fatigue load. The fatigue life of the UHTC continuous deck is more than three times that of the ordinary RC continuous deck at the same stress level. Under fatigue loading, the presence of UHTC can effectively reduce the increase of plastic strain

in steel reinforcement, decrease the bending stiffness degradation, and improve the fatigue life of continuous deck structure.

Key words: engineered cementitious composites (ECC); ultra-high toughness concrete (UHTC); continuous deck structure; fatigue test; fatigue life

简支梁桥由于构造简单、施工方便以及便于维修等特性, 被广泛应用于城市的高架桥梁的建设。在实际使用过程中, 由于汽车活载、温度变化等荷载的共同作用, 其桥面连续构造的上缘长期处于复杂应力状态, 加之普通混凝土的极限抗拉强度很低, 不可避免会出现结构病害, 影响桥梁使用性能, 工程上不得不频繁维修, 既费钱费时, 又影响交通^[1]。

高延性纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)作为一种新型超高延性纤维混凝土材料, 具有良好的拉伸应变硬化能力和裂缝控制能力^[2-3], 在土木工程领域具有广泛的应用前景。在国外, ECC 已经开始应用于结构物的新建和加固修复中, 并取得了良好的效果^[4-8]。将 ECC 应用于桥面连续构造处能够很好地满足桥梁的变形要求, 提高桥面连续构造的疲劳耐久性能。2001 年 Gilani 等^[9]最早开展对 ECC 材料在桥面连接板上的应用研究。2003 年 Kim 和 Li 等^[10-11]进行了 3 个全尺寸桥面连续构造模型的疲劳加载试验研究, 试验结果表明, ECC 试件相比于普通混凝土试件具有更好的裂缝控制能力。2008 年 Alissa 等^[12]提出了一种全生命周期的评价模型, 发现在桥面连续段运用 ECC 材料比普通混凝土具有更大优势。2012 年 Saber 等^[13]在桥面连续构造处使用纤维增强复合塑料(FRP)来代替普通混凝土, 试验结果表明, 使用 FRP 的桥面连续构造处的破坏程度明显降低, 且破

收稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51478362); 上海市住房和城乡建设管理委员会项目(2016-KF08)

第一作者: 胡克旭(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构加固与抗火。E-mail: kexuhu@tongji.edu.cn

通讯作者: 余江滔(1975—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗火及加固。

E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

坏之后更易于维修. 国内徐世焯和刘问等^[14-16]于2011年开始进行了一系列超高韧性水泥基复合材料(ultra-high toughness cementitious composites, UHTCC)的疲劳性能试验,并建立了关于损伤量-应力水平的疲劳损伤模型. 之后通过后浇 UHTCC 既有混凝土复合梁弯曲疲劳性能试验,研究了疲劳荷载作用下超高韧性水泥基复合材料对混凝土的增强作用^[17]. 2016年张志刚^[18]研究了 ECC 的材料性能和自愈合机理,并利用 Abaqus 有限元建模模拟了 ECC 材料钢桥面铺装层在行车荷载作用下的力学响应. 然而,国内尚无 ECC 或 UHTCC 用于桥面连续构造的疲劳性能的研究报道, ECC 或 UHTCC 在桥梁结构中的应用有大量的工作需要开展.

在近年的研究中,笔者基于 ECC 的微观力学的原理,采用特殊处理的短切超高分子量聚乙烯纤维对不同类型的水泥基材料进行强化,成功地研发出具有超高延性和强度的水泥基复合材料. 直接拉伸试验表明,其具有优异的应变硬化和多重裂缝开裂性能. 材料的平均抗拉强度介于 5~20 MPa,平均拉伸应变介于 6%~12%,平均抗压强度介于 30~150 MPa. 由于其超高的延性,这种材料被命名为 ultra-high ductility cementitious composites(UHDCC)^[19-20]. 为了便于识别,国内的学者建议将 ECC、UHTCC 和 UHDCC 等名称统一为 ultra-high toughness concrete(UHTC). 因此,本文中 UHTC 称呼该材料.

本文进行了 UHTC 的材性试验和 3 个桥面连续构造节点的疲劳试验,分析 UHTC 的材料性能以及不同材料和配筋下桥面连续构造的疲劳性能,为 UHTC 材料用于桥面连续构造提供理论依据.

1 UHTC 材料力学性能试验

1.1 试验设计

1.1.1 试验材料及制备

制备 UHTC 的主要材料包括:P·II 52.5 硅酸盐水泥、一级粉煤灰、砂、聚乙烯(PE)纤维以及聚羧酸减水剂和增稠剂,其配比和 PE 纤维的物理力学性能如表 1 和表 2 所示. UHTC 的搅拌工艺为:将粉煤灰、水泥和砂搅拌均匀,再加入水、减水剂、增稠剂以及 PE 纤维. 搅拌终止时间以纤维不结团为判断依据,保证纤维分散均匀. 将搅拌均匀的拌和物装入试模成型,并置于室温条件下养护,48 h 后拆模,再常温养护 28 d.

首先进行 UHTC 的材性试验,包括单轴拉伸试

表 1 UHTC 组分(质量浓度)

Tab. 1 Mixture properties of UHTC

水泥	粉煤灰	砂	水	纤维	增稠剂	减水剂
570.2	684.3	456.2	338.7	19.2	1.5	3

表 2 PE 纤维的特性

Tab. 2 Properties of PE fiber

直径/ μm	纤维长 径比	体积掺 量/%	强度/ GPa	弹性模 量/GPa	断裂伸 长率/%	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
25	480	2	2.9	116	2.42	0.97

验、单轴压缩试验和四点弯曲试验. 其中,单轴拉伸使用的“狗骨”试件是在日本土木工程师学会推荐试件形状的基础上改进而成,试件的形状和尺寸如图 1 所示^[21]. 将试件端部制作成“狗骨”形状,以此避免夹持端部应力集中导致的试件断裂破坏. 受压试件采用的是 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试块. 四点弯曲试验梁的尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm.

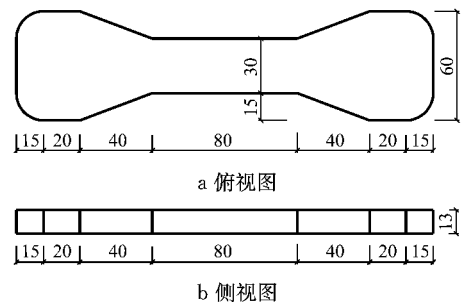


图 1 狗骨拉伸试件形状(单位:mm)

Fig. 1 Specimens for dog bone shaped tensile test(unit: mm)

1.1.2 静载试验加载及测试

试验所采用的试验仪器是 MTS 公司生产的万能材料试验机,试件安装时,使试验机的轴线和试件的轴线尽量对中. 在拉伸试验的过程中,采取位移控制加载方式,材料处于准静态加载状态,位移加载速率为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. 受压试验加载由位移控制,加载速率为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. 四点弯曲试验采用三分点加载方式,跨度为 300 mm,加载间距 100 mm,采用位移控制加载,加载速率为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. 为了方便准确地得到试件跨中位移的试验数据,采用数字图像影像相关技术(digital image correlation, DIC)观测试件的位移. 获得荷载-位移曲线后,可进一步计算分析初始开裂应力与最大弯曲应力. 加载试验装置如图 2 所示.

1.2 试验结果分析

UHTC 狗骨试件具体的拉伸应力-应变曲线如图 3 所示,其平均抗拉强度为 4.67 MPa,极限拉伸

应变值在 7% 左右. 可以看出, 在单轴拉伸过程中, UHTC 材料展现出多缝开裂(图 4a)和应变硬化现象, 且存在 3 个明显的受力阶段(初始弹性阶段、应变硬化阶段和应力松弛阶段), 并表现出了良好的延性.

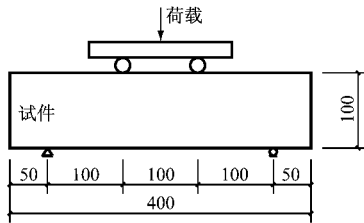


图 2 四点弯曲试验加载示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of setup for four-point bending test (unit: mm)

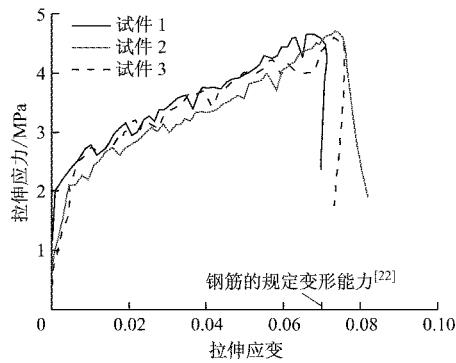


图 3 UHTC 拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of UHTC specimens

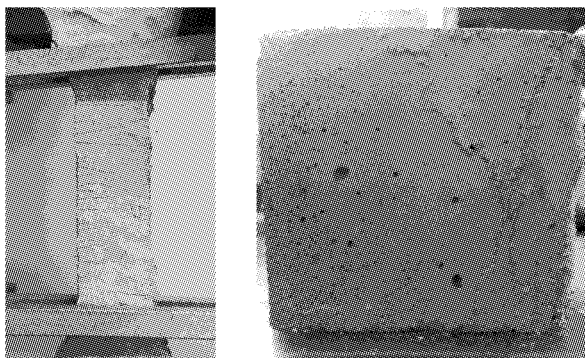


图 4 试件受拉和受压破坏形态

Fig. 4 Tensile and compressive failure modes of UHTC

轴向压缩试验测得 UHTC 材料的应力-应变曲线如图 5 所示, UHTC 平均轴压强度值为 36.51 MPa. 与普通混凝土试块单轴受压偏态单峰曲线相比, 经过峰值应力后, UHTC 试件曲线出现一小段快速下降, 之后下降速率明显趋缓, 在应变较大时仍能承受较大荷载, 不会发生急剧脆性破坏. 观察试件受压后的形态(图 4b), 发现除了轴向较大压缩变形

外, 试块整体性保持较好, 基本没有剥落和破碎. 出现这种现象主要是因为基体中掺有一定含量的纤维, 由于纤维的桥连作用, 试件的横向变形受到限制, 故表现出了明显的延性破坏特征.

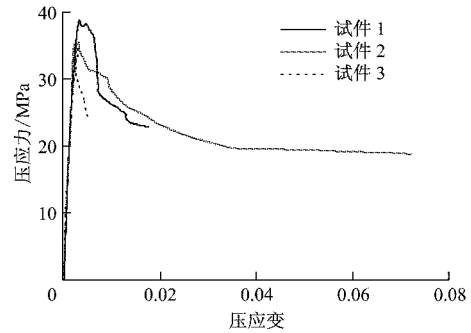


图 5 UHTC 受压应力-应变曲线

Fig. 5 Compressive stress-strain curves of UHTC specimens

对 2 根尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的小梁试件进行四点弯曲静力加载, 测得了 UHTC 试件的平均弯曲荷载为 49.5 kN, 平均弯曲强度为 14.8 MPa. 试件的弯曲应力与挠跨比的关系曲线如图 6 所示. 试件底面破坏形态如图 7 所示. 可以看出, 没有配筋的 UHTC 梁的弯曲性能与其单轴拉伸性能变化趋势类似, 表现出多缝开裂和良好的延性, 最大跨中挠度能达到 $L/20$ (L 为试件跨度) 左右.

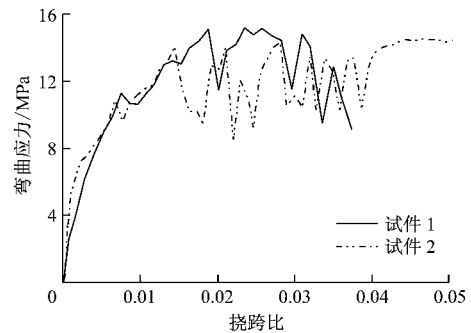


图 6 弯曲应力-挠跨比关系曲线

Fig. 6 Flexural stress-deflection ratio curves of specimens

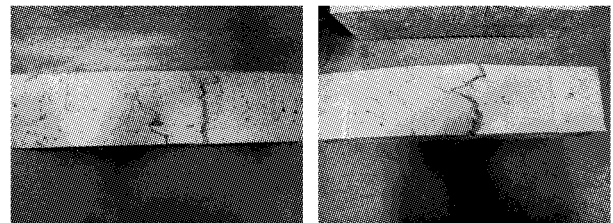


图 7 试件底面破坏形态

Fig. 7 Failure modes of bottom of specimens

2 UHTC 桥面连续构造疲劳试验

2.1 试验设计

2.1.1 试件制作

本试验以某实际工程为背景,在考虑桥面运行荷载下的简支梁和桥面连续构造层的受力状态后,共设计了3个足尺构造层试验试件,如表3所示,试件尺寸如图8所示。钢梁高度250 mm,在钢梁顶部设置抗剪栓钉,栓杆直径9 mm,长度55 mm,具体布置见图8。连续构造层高度100 mm,净跨长度2.55 m,其中脱粘带长度1.05 m,其与钢梁之间铺设0.2 mm厚聚四氟乙烯薄膜。试件 PL-1 为普通钢筋混凝土

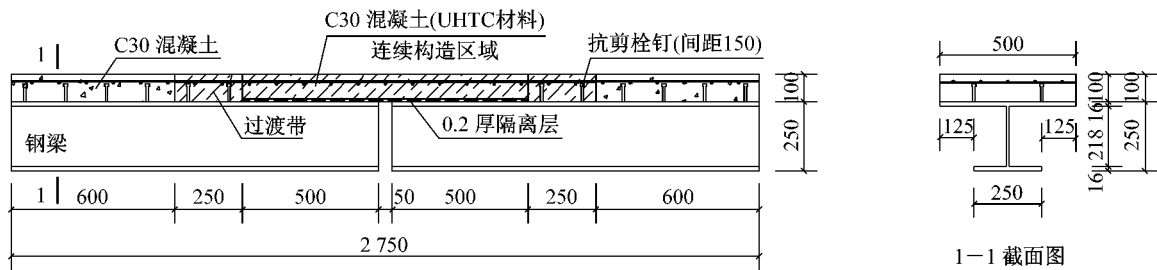


图8 试件 PL-1(PL-2 及 PL-3)尺寸图(单位:mm)

Fig. 8 Geometry details of specimens PL-1(PL-2 and PL-3)(unit: mm)

2.1.2 试验材料

试验所采用的商品混凝土强度等级为 C30, 实测 28 d 立方体轴心抗压强度为 28.1 MPa, 弹性模量为 2.9×10^4 MPa. 实测 $\phi 8$ 和 $\phi 12$ 受拉筋屈服强度为 456 MPa 和 457 MPa, 极限抗拉强度为 541 MPa 和 557 MPa. UHTC 采用与前文试验相同的配比, 实测 28 d 抗拉强度为 4.45 MPa, 抗压强度为 35.21 MPa.

2.1.3 疲劳试验加载制度

结合实验室现有的加载装置,采用将连续构造试件倒置的方式来模拟承受负弯矩状态. 试验采用四点弯曲对称加载,加载点间距即为模拟桥梁支座间距 500 mm,如图 9 和图 10a 所示. 加载方式采用力控制. 根据桥面连续构造在汽车活载作用下的疲劳荷载计算结果,取疲劳荷载的最大值 $P_{\max} = 14.3$ kN,最小值 $P_{\min} = 0.1P_{\max}$,即 1.43 kN. 加载波形为正弦波,频率取 6 Hz. 首先进行一次静载循环试验,荷载目标值为 14.3 kN,之后进行疲劳试验. 本次试验以 200 万次循环加载为目标,若桥面连续构造在 200 万次荷载循环后未发生破坏,将增大疲劳荷载幅值继续进行疲劳加载,直至试件破坏.

土试件. 在试件 PL-2 和 PL-3 的施工中,采用 UHTC 浇筑桥面连续构造区域的过渡区(长 250 mm)^[23].

作为对比试件,PL-1 根据规范正常设计配筋,配筋率为 1.13%. PL-2 的配筋率与 PL-1 相同,亦为 1.13%. PL-3 为构造配筋,配筋率为 0.50%,仅为 PL-2 的一半. PL-1 试件横向配筋 $\phi 8 @ 100$. 与混凝土材料不同,为保持 PE 纤维的纵向连续性,在 UHTC 材料连续构造长度范围内不设横向钢筋.

试件 PL-1 一次性浇筑完成,试件 PL-2 和 PL-3 先浇筑两端普通混凝土,次日对混凝土与 UHTC 结合面进行人工凿毛,再浇筑连续构造段的 UHTC.

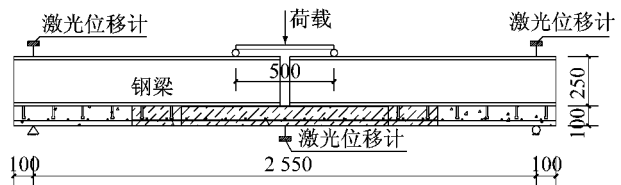


图9 试件倒置加载简图(单位:mm)

Fig. 9 Schematic of test setup with specimen inverted (unit: mm)

2.2 试验现象及分析

试件 PL-1 在首次静载循环后纯弯段出现 9 条微裂缝,卸载后残余挠度为 2.14 mm,钢筋应变基本完全恢复. 随着循环次数的增加,裂缝数量增长较少,其宽度不断扩展,跨中挠度不断增大,最终钢筋发生疲劳断裂,试件顶部混凝土压碎. 试验次数为 63.06 万次. 试件破坏形态如图 10b 所示.

试件 PL-2 为 UHTC 桥面连续构造,首次静载循环后,纯弯段出现 18 条微裂缝,卸载后试件残余挠度 4.61 mm,钢筋残余应变 800×10^{-6} . 循环加载中裂缝宽度、跨中挠度和钢筋应变未见较大增长. 经过 200 万次荷载循环后,试件没有发生破坏. 将荷载峰值 P_{\max} 提高到 28 kN 继续加载 6.95 万次,最终跨中部位出现局部密集微裂缝,钢筋发生疲劳断裂,跨

中 UHTC 发生局部撕裂破坏. 破坏形态如图 10c 所示.

试件 PL-3 为 UHTC 桥面连续构造, 在第一次静载循环中, 由于钢筋屈服, 力值无法加载到目标值 14.3 kN, 将此后 P_{\max} 定为 11.2 kN, 在此荷载作用下, 连续构造的跨中挠度是 PL-1 的 2 倍, 钢筋的应变为 PL-1 的 3 倍, 转角已经达到实际工程中简支梁桥主梁在车道荷载作用下的最大转角. 即使如此, 在 200 万次荷载循环后, 试件仍未破坏, 故加大疲劳荷载目标值至 13.3 kN 进行疲劳试验. 试件破坏时, 二次疲劳次数为 5.43 万次. 试件最终破坏形态如图 10d 所示.

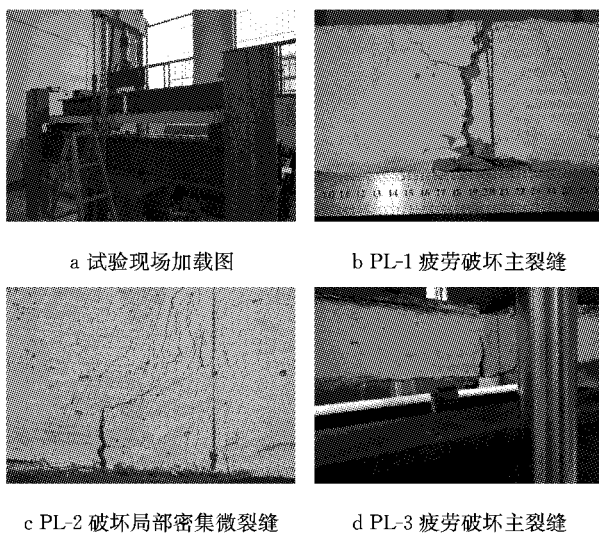


图 10 试验加载及疲劳破坏形态

Fig. 10 Specimens before and after fatigue testing

从试验过程来看, 桥面连续构造疲劳破坏过程可大致分为 3 个阶段: 静载初裂、疲劳变形发展、钢筋疲劳断裂. 3 个试件疲劳破坏均始于纯弯段内主裂缝所在截面附近受拉钢筋的疲劳断裂, 并表现出明显的疲劳破坏特征, 即钢筋断面较为平齐且没有明显的塑性收缩, 如图 11 所示. 对于试件 PL-3, 经过 200 万次荷载循环卸载后裂缝最大宽度仅为 $50 \mu\text{m}$, 加载到荷载峰值后裂缝最大宽度为 $60 \mu\text{m}$, 并未有

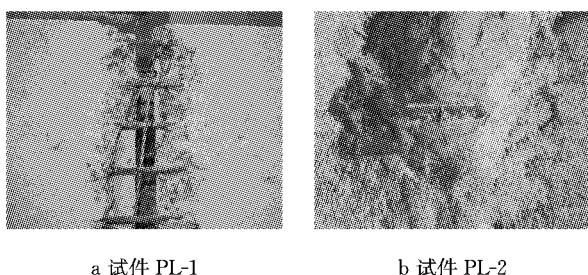


图 11 钢筋破坏形态

Fig. 11 Failure modes of steel in specimens

明显增长, 说明材料具有良好的裂缝控制能力.

2.3 试验结果分析

2.3.1 疲劳寿命分析

试件的疲劳试验结果如表 3 所示. 由于不含粗骨料, UHTC 的弹性模量低于普通混凝土. 在相近的荷载作用下, PL-2 和 PL-3 的挠度和钢筋应变均明显高于 PL-1. 即便如此, PL-2 的疲劳寿命仍是 PL-1 疲劳寿命的 3 倍以上, 表明采用 UHTC 材料对桥面连续构造疲劳性能有很大改善.

表 3 疲劳试验结果

Tab. 3 Results of fatigue test

试件编号	配筋	连续构造材料	荷载工况		静载跨中挠度/mm	静载钢筋最大应变/ 10^{-6}	疲劳加载次数/万次
			P_{\max}/kN	P_{\min}/kN			
PL-1	5 ϕ 12	混凝土	14.3	1.43	7.62	920	63.06
PL-2	5 ϕ 12	UHTC	14.3	1.43	8.62	1 514	200
			28.0	2.80	—	—	206.95
PL-3	5 ϕ 8	UHTC	11.2	1.12	14.28	2 876	200
			13.3	1.33	—	—	205.43

2.3.2 跨中挠度分析

图 12 是实测荷载-跨中挠度随循环次数变化曲线图. 可以看出, 在相同荷载作用下, 第一次静载循环阶段中试件 PL-2 跨中最大挠度比 PL-1 大 14% 左右, PL-1 卸载后残余挠度为 2.14 mm, PL-2 为 4.61 mm, 说明 PL-2 的初始刚度较 PL-1 小. 此后, 随着荷载循环次数的不断增加, 3 个试件的最大挠度和残余变形都逐渐增大, 且荷载-挠度曲线斜率即试件刚度在不断降低.

图 13 为加载过程中试件跨中最大挠度和最小挠度随荷载循环次数的变化规律. 可以看出, 尽管混凝土试件(PL-1)和 UHTC 试件(PL-2 和 PL-3)的疲劳寿命相差很大, 但二者挠度发展规律基本相似, 呈典型的三阶段发展规律: 第一阶段, 迅速发展阶段, 由于 UHTC 试件刚度较低, 故挠度增长高于混凝土试件; 第二阶段, 稳定增长阶段, PL-1 裂缝扩展, 几乎没有新的裂缝产生, 对于 UHTC 试件, 这一阶段仍有新的裂缝在不断产生, 挠度增长来自旧裂缝的扩展和新裂缝的产生; 第三阶段, 失稳破坏阶段, 当疲劳次数达到破坏临界值后, 梁跨中挠度迅速增长直至破坏, 2 个 UHTC 试件在 200 万次疲劳加载前并没有达到这一阶段, 在加大疲劳幅值后才进入第三阶段.

2.3.3 桥面连续构造刚度分析

根据材料力学相关知识^[24], 对于均质弹性体材料, 短期荷载作用下挠度与截面刚度的关系可以表示为

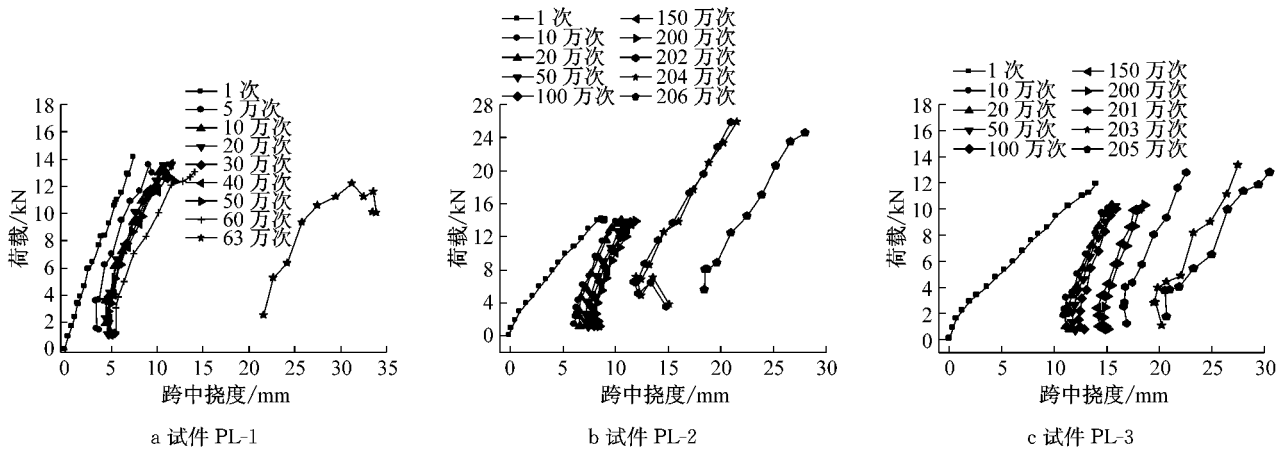


图 12 不同循环次数下试件荷载-跨中挠度曲线

Fig. 12 Load-span deflection of specimen at different cycles

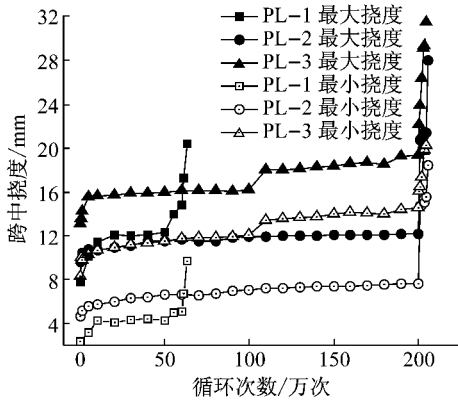


图 13 试件跨中挠度-荷载循环次数曲线

Fig. 13 Span deflection-load cycles of specimen

$$B_s = \beta_s \frac{Pl^3}{f}$$

式中: B_s 为试件的抗弯刚度; f 为跨中最大挠度; P 为跨中作用集中荷载值; l 为试件跨度; β_s 是与荷载形式、支承条件相关的系数, 本试验条件下 $\beta_s = 0.0197$.

对于普通混凝土和 UHTC 材料等非均质和非弹性材料, 可参考上述公式对截面刚度进行简单计算. 从图 14 可以看出, PL-1 初始刚度是相同配筋的 PL-2 的 1.2 倍, 试件 PL-2 (配筋率 1.13%) 初始刚度是试件 PL-3 (配筋率 0.50%) 的 1.8 倍. 三者荷载循环开始阶段刚度下降都比较迅速, 当荷载循环次数达到 10 万次后, PL-1 的刚度开始低于 PL-2 试件的刚度, 此后 3 个试件刚度变化进入平稳降低阶段. 在荷载循环次数达到 50 万次后, PL-1 刚度又开始急速下降, 直至破坏. 而 PL-2 和 PL-3 刚度仍处于缓慢下降阶段, 直到 200 万次仍然没有破坏趋势. 这说明采用 UHTC 材料能够有效改善桥面连续构造刚度退化的情况.

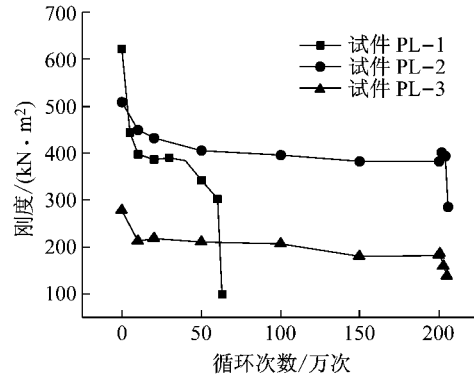


图 14 试件刚度随荷载循环次数变化规律曲线

Fig. 14 Stiffness versus load cycles of specimens

2.3.4 受拉钢筋应力分析

从图 15 可以看出, 3 个试件纵向受拉钢筋的最小应变和最大应变随循环次数增长呈现和跨中挠度类似的三阶段发展规律. 加载初期, 试件 PL-1 的钢筋应变远低于 PL-2 和 PL-3. 但随着疲劳加载次数的增加, 混凝土底部裂缝宽度增大并向上发展, PL-1 的钢筋应变迅速增长, 从而发生破坏. 试件 PL-2 和

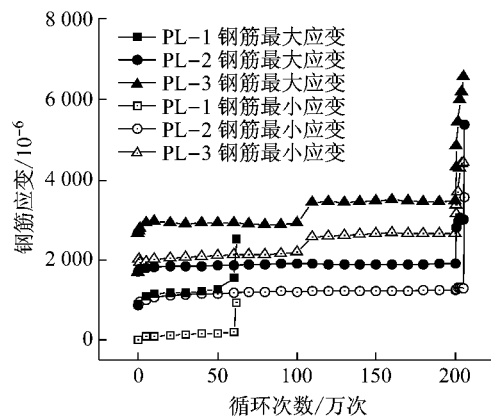


图 15 受拉钢筋应变发展曲线

Fig. 15 Development of tensile strain in steel

PL-3 在循环次数达到 200 万次之前,钢筋的最大应变和最小应变均呈两段式发展.图 16 为试件钢筋应变幅随循环次数变化曲线.可以看出,相比于钢筋应变幅值不断上升的试件 PL-1,UHTC 试件(PL-2 和 PL-3)在前 200 万次的加载循环过程中,钢筋应变幅值整体呈现下降趋势.

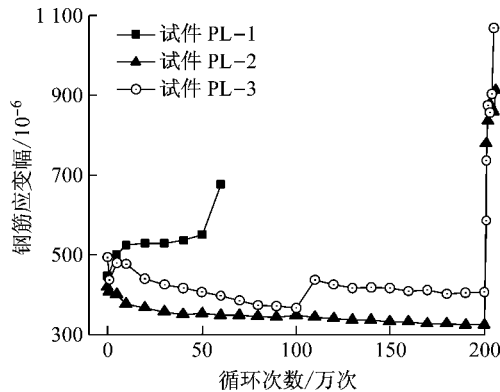


图 16 试件受拉钢筋应变幅-循环次数变化趋势曲线

Fig. 16 Variation versus load cycles

表 4 为 3 个试件在 50 万次和 200 万次疲劳加载后的钢筋应变和应变幅值.可以看出,虽然疲劳加载过程中 PL-2 和 PL-3 钢筋应变远高于试件 PL-1,但是二者钢筋应变幅却低于 PL-1,且 50 万次疲劳加载后 PL-2 受拉钢筋应变约是 PL-1 的 1.5 倍,而其应变幅约是 PL-1 的 64%,且 200 万次疲劳加载后 PL-2 钢筋应变幅未见增长.可见 UHTC 的存在使钢筋应变幅维持在了一个相对较低的稳定水平,这些对试件的疲劳寿命都是有益的.而相比于钢筋应变,钢筋应变幅是影响钢筋疲劳寿命的重要因素.

表 4 受拉钢筋应变及应变幅分析

Tab. 4 Strain and strain amplitude of steels in specimens

试件	50 万次疲劳加载后最大应变/ 10^{-6}	50 万次疲劳加载后应变幅/ 10^{-6}	200 万次疲劳加载后最大应变/ 10^{-6}	200 万次疲劳加载后应变幅/ 10^{-6}
PL-1	1 271	550	—	—
PL-2	1 870	352	1 900	323
PL-3	2 930	406	3 478	406

分析 UHTC 试件应变幅较小的原因,主要是由于 UHTC 材料受拉应变强化特征造成的.从图 3 可以看出,UHTC 材料受拉时具有长达 5%~6%的应变强化阶段,这一水平与钢材相当.相比于普通混凝土梁,当底部开裂后,受拉区的 UHTC 材料未退出工作,仍与钢筋共同承受拉力,而且其应变强化特性使其能持续不断地替钢筋分担更多的拉力,因而钢筋应变呈现平稳趋势,甚至出现应变幅值减小的趋

势.在加大疲劳荷载后,裂缝进一步开展,钢筋和 UHTC 承受的拉力越来越大,应变迅速增长,最终导致钢筋拉断破坏.

2.3.5 疲劳寿命差异分析

3 个试件的疲劳寿命存在很大差异.如前文所述,主要是由于钢筋在疲劳加载过程中的应力幅(应变幅)的不同造成的.

此外,相比于普通混凝土,UHTC 材料所具备的应变强化特性使其能更好地与钢筋发挥协同工作能力,且在持续疲劳加载过程中,由于 UHTC 裂缝比普通混凝土更加密集均匀,使受拉钢筋应变沿长度方向的分布更加均匀.这些都能有效控制钢筋应变幅维持在一个相对较低的稳定水平,减缓应变幅的增长甚至出现应变幅值减小的现象(图 16),同时也降低了钢筋初始缺陷处产生应力集中的可能性,从而减缓了钢筋在疲劳荷载作用下的疲劳损伤累积.

另外,由于 UHTC 材料没有采用粗骨料,更加密实的基体和较低的总孔隙率很大程度上降低了基体内部初始缺陷和微裂缝存在的可能,且内部分布的 PE 纤维也在拔出和拔断的过程中消耗着能量.这些因素都有利于减缓试件钢筋应变幅的增长,提高桥面连续构造的疲劳寿命.

3 结论

本文通过 UHTC 材料用于桥面连续构造节点的疲劳试验,可以得出以下结论:

(1) 在静力荷载和疲劳荷载作用下,UHTC 材料表现出了明显的多缝开裂和延性破坏特征.

(2) 在本试验条件下,采用 UHTC 材料的桥面连续构造疲劳寿命是混凝土桥面连续构造疲劳寿命的 3 倍以上,将 UHTC 材料用于桥面连续构造能够有效解决普通混凝土的耐久性问题.

(3) 相同荷载作用下,相比于普通混凝土试件,UHTC 材料能有效减缓试件钢筋应变幅的增长,提高桥面连续构造的疲劳性能.

(4) 疲劳荷载作用下,UHTC 材料的桥面连续构造的刚度变化和普通混凝土材料发展趋势一致,且采用 UHTC 材料能够有效减缓桥面连续构造在疲劳荷载作用下的刚度退化,提高桥面连续构造的疲劳寿命.

参考文献:

- [1] 黄遥. 浅谈钢筋砼简支桥梁常见病害及处治措施[J]. 工程经济, 2014(6): 56.
HUANG Yao. Introduction to general damage of simply supported reinforced concrete bridges and treatment measures [J]. Engineering Economy, 2014(6): 56.
- [2] MAALEJ M, LI V C. Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members for improved durability[J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(2): 167.
- [3] WEIMANN M B, LI V C. Hygral behavior of engineered cementitious composites (ECC)/ vergleich der hygri-schen eigenschaften von ECC mit beton[J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2003, 9(5): 513.
- [4] LEPECH M, LI V C. Durability and long term performance of engineered cementitious composites (ECC)[C]// International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications. Honolulu: RILEM Publications SARL, 2005: 165-174.
- [5] ROKOGO K, KANDA T. Recent HPFRCC R&D progress in Japan [C] // International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications. Honolulu: RILEM Publications SARL, 2005: 23-26.
- [6] KUNIEDA M, ROKUGO K. Recent progress on HPFRCC in Japan [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 19.
- [7] LI V C. Bendable composites: ductile concrete for structures [J]. Structure, 2006, 7: 45.
- [8] KOJIMA S, SAKATA N, KANDA T, *et al.* Application of direct sprayed ECC for retrofitting dam structure surface-application for Mitaka-Dam[J]. Concrete Journal, 2004, 42(5): 135.
- [9] GILANI A, JUNTUNEN D. Link slabs for simply supported bridges; incorporating engineered cementitious composites [R]. Michigan: Michigan Department of Transportation, 2001.
- [10] LI V C, FISCHER G, KIM Y, *et al.* Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites [R]. Michigan: Michigan Department of Transportation, 2003.
- [11] KIM Y Y, FISCHER G, LI V C. Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite[J]. Structural Journal, 2004, 101(6): 792.
- [12] ALISSA K, GREGORY A K, GLORIA E H. Integrated life-cycle assessment and life-cycle cost analysis model for concrete bridge deck applications[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2008, 14(3): 214.
- [13] SABER A, ALETI A R. Behavior of FRP link slabs in jointless bridge decks [EB/OL]. [2017-08-16]. <http://www.docin.com/p-1458660559.html>.
- [14] XU S L, LIU W. Experimental study on flexural fatigue property of ultra-high toughness cementitious composites[C]// Advanced Materials Research. Shenzhen: Trans Tech Publications, 2011: 1369-1378.
- [15] 徐世焯, 刘问. 超高韧性水泥基复合材料疲劳损伤模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 1.
XU Shilang, LIU Wen. Fatigue damage model test of ultra-high toughness cementitious composites [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 1.
- [16] 刘问, 徐世焯, 李庆华. 等幅疲劳荷载作用下超高韧性水泥基复合材料弯曲疲劳寿命试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1): 119.
LIU Wen, XU Shilang, LI Qinghua. Study on flexural fatigue life of ultra-high toughness cementitious composites under constant amplitude cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(1): 119.
- [17] 刘问, 徐世焯, 李庆华. 后浇 UHTCC 既有混凝土复合梁弯曲疲劳性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 409.
LIU Wen, XU Shilang, LI Qinghua. Experimental study on flexural fatigue property of existing concrete beams restricted by post-poured UHTCC layer [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(2): 409.
- [18] 张志刚. 钢桥面高延性水泥基材料铺装层自愈机理与疲劳损伤研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHANG Zhigang. Research on the self-healing mechanism and fatigue damage of ECC applying on steel bridge deck overlay [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [19] 陆洲导, 林晨旭, 余江滔, 等. 可用于无钢筋建造的超强超韧水泥基复合材料[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 880.
LU Zhoudao, LIN Chenxu, YU Jiangtao, *et al.* High strength ultra-high ductile cementitious composite developed for steel-free construction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(6): 880.
- [20] YU K, WANG Y, YU J, *et al.* A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. Construction and Building Materials, 2017(137): 410.
- [21] JSCE. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC) [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 钢筋混凝土用钢 第2部分: 热轧带肋钢筋: GB1499.2—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel for the reinforcement of concrete-part 2: hot rolled ribbed bars; GB1499.2—2007 [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [23] QIAN S, LEPECH M D, KIM Y Y, *et al.* Introduction of transition zone design for bridge deck link slabs using ductile concrete[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(1): 96.
- [24] 同济大学航空航天与力学学院基础力学教学研究部. 材料力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
Department of Basic Mechanics, School of Aerospace and Mechanics, Tongji University. Material mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.