

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808030

预应力 RPC - NC 叠合梁弯曲疲劳性能试验分析

季文玉, 王 珏, 李旺旺

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为研究预应力活性粉末混凝土(RPC) - 普通混凝土(NC)叠合梁的弯曲疲劳性能,以中国铁路32 m跨度T型梁为原型,设计并制作了4根完全相同的缩尺模型RPC - NC叠合梁,其中1根梁进行静载试验另外3根梁进行等幅疲劳试验.对试验梁在不同疲劳加载循环下的正截面应变分布、受压区NC应变变化、裂缝发展、疲劳挠度及刚度发展的变化规律进行了分析,并将疲劳加载后未发生疲劳破坏的叠合梁、未经历疲劳加载的叠合梁以及相同结构尺寸和配筋情况下的普通混凝土梁的静力弯曲性能进行对比.结果表明:和普通混凝土适筋梁相同,RPC - NC叠合梁的疲劳破坏由非预应力纵筋疲劳断裂引起;在疲劳荷载作用下,截面应变沿截面高度始终近似呈线性分布,RPC - NC叠合梁正截面变形符合平截面假定;疲劳加载结束后,未发生破坏的RPC - NC叠合梁和疲劳加载前相比延性有所下降,但仍大于未经历疲劳加载的普通混凝土梁.根据试验结果,拟合得到试验梁与疲劳加载循环次数有关的刚度退化公式,可为RPC - NC叠合梁的设计提供一定的参考.

关键词: 活性粉末混凝土;普通混凝土;叠合梁;弯曲疲劳试验;疲劳性能

中图分类号: TU378.2

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2019)06 - 0064 - 07

Experimental analysis on bending fatigue performance of prestressed RPC - NC composite beam

Ji Wenyu, Wang Jue, Li Wangwang

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To study the flexural fatigue performance of prestressed reactive powder concrete (RPC) - normal concrete (NC) composite beams, four identical reduced-scale model beams were designed and produced on the basis of a 32 m span T-girder of Chinese railway. One of the beams suffered static load and others were under bending fatigue test. Strain distribution in normal section, strain variation in compressed NC, crack propagation, and the development of fatigue deflection and stiffness were analyzed. Furthermore, flexural property of the composite beams without failure after fatigue loading were compared with the composite beams that did not experience fatigue loading and the NC beams with identical structural size and reinforcement condition. Results show that fatigue failure of prestressed RPC - NC composite beams was caused by the fatigue fracture of non-prestressed longitudinal bars, which was the same as balanced-reinforced NC beam. Strain in normal section was always approximately linear with the height of the section under fatigue load, which means the plane section assumption can be applied to prestressed RPC - NC composite beams. Flexural ductility of the composite beams without failure after fatigue loading declined compared with the composite beam before fatigue loading, while it was still greater than NC beam. Stiffness degradation formula of test beams related to fatigue loading cycles was obtained by fitting experimental data, which can be a reference for the design of prestressed RPC - NC composite beams.

Keywords: reactive powder concrete; normal concrete; composite beam; bending fatigue test; fatigue performance

RPC是具有高抗拉、压性能及优异的耐久性能的新型高性能混凝土材料^[1-3].自问世至今,已有大量关于其工程应用方面的研究^[4-8].然而RPC受到制作工艺^[9]和原材料造价昂贵等因素影响,导致其仍未能大量应用于实际工程^[10].RPC - NC叠合梁是对RPC梁进行工厂预制,然后以RPC为底模在

其上现场浇筑NC^[11],该结构充分利用了NC较高的抗压强度,同时发挥了RPC良好的抗拉性能和耐久性能,使桥梁结构服役过程中的疲劳性能及耐久性能得到明显提升,综合利用两种混凝土材料特性的同时节省了工程造价,有利于RPC在实际工程中的推广使用.

Habel等^[12-14]研究了超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)和NC叠合梁在不同UHPFRC厚度、配筋方式和静载体系下的弯曲性能,试验发现该叠合梁的整体受力性能良好,叠合面未出现脱黏现象,

收稿日期: 2018 - 08 - 06

基金项目: 国家自然科学基金(51278040);

教育部中央高校基本科研业务费项目(2017YJS132)

作者简介: 季文玉(1960—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王 珏,15115254@bjtu.edu.cn

UHPFRC 提高了其抗弯承载力和刚度,且提高抗弯承载力最有效的方式是将纵筋布置在 UHPFRC 层中.季文玉等^[11,15]对预应力RPC-NC叠合梁的弯曲性能与RPC高度、配筋指数、预应力比率间的关系进行了试验研究,结果表明其开裂荷载和极限荷载较NC梁有所提高,抗弯位移延性明显优于NC梁,且随RPC高度的增加而提高.

本文通过3根预应力RPC-NC叠合梁的等幅弯曲疲劳试验,研究疲劳荷载下叠合梁的破坏形式和疲劳性能退化特点,及其经历循环加载后的静力弯曲性能.

1 试验概况

1.1 模型梁设计

模型梁以普通铁路32 m后张法简支T梁为原型,跨度32.0 m,梁长32.6 m,高度2.5 m,标准图号为专桥(2012)2101.根据相似理论,采用1:8的缩尺比例得到模型梁长4.4 m,试验跨度4.0 m,梁高0.5 m,翼缘宽度0.4 m,腹板厚度0.12 m,RPC高度0.36 m.4根模型梁的结构尺寸和配筋方式完全相同,模型梁截面见图1.

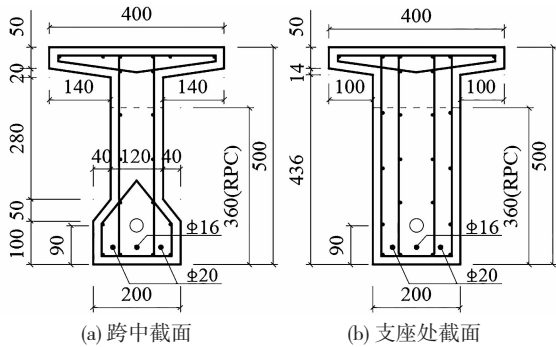


图1 模型梁截面(mm)

Fig. 1 Cross section of model beams (mm)

1.2 模型梁制作

RPC配合比,水泥:硅粉:碎石:粗砂:中砂:细砂:钢纤维:减水剂:水=624:178:547:225:448:112:120:10:153,单位kg/m³.水泥为42.5普通硅酸盐水泥,比表面积340 m²/kg;硅粉平均粒径为0.31 μm,比表面积1.431 × 10⁴ m²/kg;碎石粒径5~10 mm;粗砂粒径0.63~1.25 mm,中砂粒径0.315~0.63 mm,细砂粒径0.16~0.315 mm;钢纤维为镀铜圆形短细钢纤维,直径0.2 mm,长度12~15 mm,抗拉强度为2 860 MPa;减水剂为聚羧酸高性能减水剂,减水率35%;水为日常饮用水.试验梁中的普通混凝土采用C50混凝土,按常规方法制备.

模型梁配有2根Φ20 mm和1根Φ16 mm的纵向钢筋,非预应力纵筋和箍筋均采用HRB335级钢

筋,屈服强度为443 MPa,极限强度为588 MPa;钢绞线采用3 × 7 Φ5钢绞线,屈服强度为1 810 MPa,极限强度为1 975 MPa.钢绞线采用直线布置,张拉后进行孔道灌浆,有效张拉应力为1 136 MPa,试验梁的预应力度为0.68.

模型梁通过二次浇筑制作完成.首先绑扎钢筋笼,组合钢模板,浇筑下层RPC,令浇筑面保持自然粗糙状态,见图2,然后进行72 h高温蒸养,温度保持在75 ℃.蒸养结束后对RPC上表面进行洒水处理,保持叠合黏结面湿润,浇筑上部NC,再进行7 d整体浇水养护,最后进行28 d自然养护.



图2 模型梁浇筑

Fig. 2 Construction of model beams

浇筑模型梁的同时,每根梁预留的RPC试块为:3个100 mm × 100 mm × 100 mm的立方体试块,6个100 mm × 100 mm × 300 mm的轴心抗压试块,3个100 mm × 100 mm × 400 mm的抗折试块;每根梁预留的NC试块为:3个150 mm × 150 mm × 150 mm的立方体试块,6个150 mm × 150 mm × 300 mm的轴心抗压试块,3个100 mm × 100 mm × 400 mm的抗折试块,以上试块与模型梁在同条件下养护.混凝土材料基本力学性能见表1.

表1 混凝土材料基本力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of the concretes

材料	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
RPC	136.51	111.29	15.40	45.96
NC	67.32	60.52	4.60	36.86

1.3 试验装置及测点布置

试验加载装置及测点布置示意图见图3,模型梁为简支,试验采用两点对称加载.所有试验均在北京交通大学交通运输部重点实验室MTS电液伺服加载系统上进行.

为测量RPC和NC的应变值,分别于模型梁跨中顶、底面与侧面,以及两个加载点位置处的梁侧面沿梁高布置应变片;每隔一定疲劳循环次数后通过DJCK-2裂缝观测仪对模型梁的最大疲劳裂缝宽度进行测量;在模型梁跨中、加载点和支座位置布置位移计来获取模型梁的竖向变形.

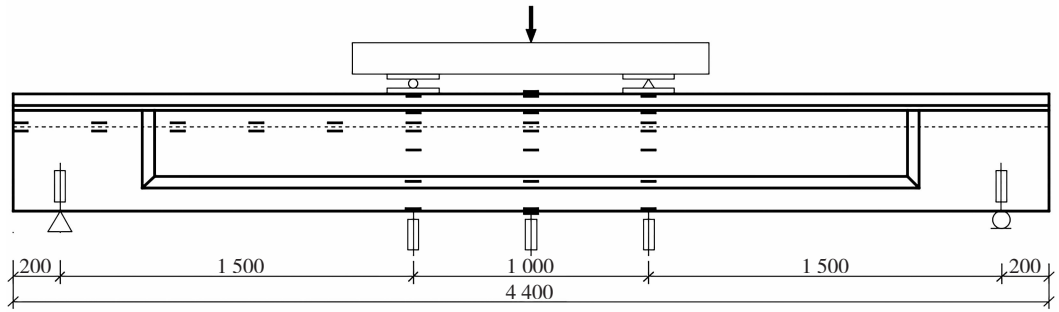


图 3 试验加载装置及测点布置示意 (mm)

Fig. 3 Fatigue testing apparatus and the arrangement of test points (mm)

1.4 加载方案

本文共有 4 根预应力 RPC-NC 叠合模型梁,其中静载试验梁 1 根,编号为 DHL-S,通过弯曲试验确定试验梁的静力极限荷载 P_u ;等幅疲劳试验梁 3 根,为减小混凝土材料收缩徐变对疲劳试验结果的影响,试验时所有梁的龄期均在 6 个月以上.模型梁疲劳试验加载方案及结果见表 2,其中,梁 DHL-F1

的疲劳上、下限荷载的选取根据桥梁以中-活载为疲劳上限荷载、恒载为疲劳下限荷载为原型,基于相似理论模拟原型梁跨中截面应力状态,计算得到疲劳上限荷载 P_{max} 为 243 kN,疲劳下限荷载 P_{min} 为 137 kN.此外,为比较不同疲劳荷载幅 ΔP 对试验梁疲劳性能的影响,取梁 DHL-F2 的 ΔP 为 200 kN,梁 DHL-F3 的 ΔP 为 300 kN.

表 2 疲劳试验加载方案及结果

Tab. 2 Fatigue loading scheme and the results

梁号	P_{max}/kN	P_{min}/kN	$\Delta P/\text{kN}$	P_{max}/P_u	P_{min}/P_u	破坏特征
DHL-S	874			1.00		非预应力钢筋屈服,NC 混凝土压碎
DHL-F1	243	137	106	0.28	0.16	疲劳 250 万次后,静载压坏
DHL-F2	337	137	200	0.39	0.16	疲劳 244 万次后,静载压坏
DHL-F3	374	74	300	0.43	0.08	93 万次时,非预应力钢筋疲劳断裂

疲劳加载采用正弦荷载,考虑到加载系统和模型梁试验要求,加载频率取 3 Hz.加载过程中每隔一定循环次数停机进行以疲劳上限荷载为最大值的单调静载试验,若模型梁经过 240 万次疲劳循环荷载未发生疲劳破坏,则停机进行弯曲性能试验.

2 结果与分析

2.1 试验现象与疲劳破坏形态

梁 DHL-F1、DHL-F2 经历 240 万次疲劳循环加载后并未出现破坏,最终停止疲劳加载时的循环次数分别达到 250 万次和 244 万次,梁 DHL-F3 经历 93 万次循环加载后梁内非预应力纵筋发生疲劳断裂.

图 4 为 3 根梁的疲劳裂缝发展情况.模型梁在循环加载初期,受压区普通混凝土应变、裂缝及挠度发展增加显著,裂缝宽度和数量增长迅速,裂缝间距迅速减小;随后各变量增速相对变缓,进入稳定发展阶段.继续进行疲劳加载,梁 DHL-F1 的疲劳裂缝仅分布在跨中纯弯段,裂缝出现数量较少、间距较大,裂缝长度较短且宽度较小;梁 DHL-F2 的受弯裂缝和弯剪裂缝出现较多,裂缝间距分布较密,且疲

劳循环加载约从 200 万次开始加载点下方的一条主裂缝宽度增长明显加快;梁 DHL-F3 的裂缝在循环加载下发展充分,疲劳加载过程中可以明显听到纤维不断被拔出的声音.循环加载近 93 万次时,加载点附近的一条主裂缝宽度增长非常迅速,并很快向梁顶面延伸,主裂缝两侧开裂面在疲劳加载下发生摩擦,导致部分 RPC 呈粉末状脱落,稍后伴随一声巨响,该主裂缝处的一根非预应力钢筋发生疲劳断裂,随即停止疲劳加载.梁体表面温度较高,裂缝处清晰可见一端已拔出的钢纤维以及两端仍埋置在基体混凝土中起到桥接作用的钢纤维.此时梁内预应力钢绞线仍未拉断,受压区 NC 与叠合面均未见破坏,试验梁整体未出现断裂失效,仍能承受一定荷载,梁 DHL-F3 疲劳破坏时的主裂缝形态见图 5.

与普通钢筋混凝土适筋梁相同,预应力 RPC-NC 叠合梁的疲劳破坏由非预应力筋的疲劳断裂导致:RPC 开裂引起裂缝处非预应力筋的应力增大,且非预应力筋与 RPC 间的黏结性能随疲劳循环次数增长而不断退化,非预应力筋有效面积逐渐减小,疲劳残余应力逐渐增加,最终当非预应力筋的应力达到其极限强度时发生断裂.

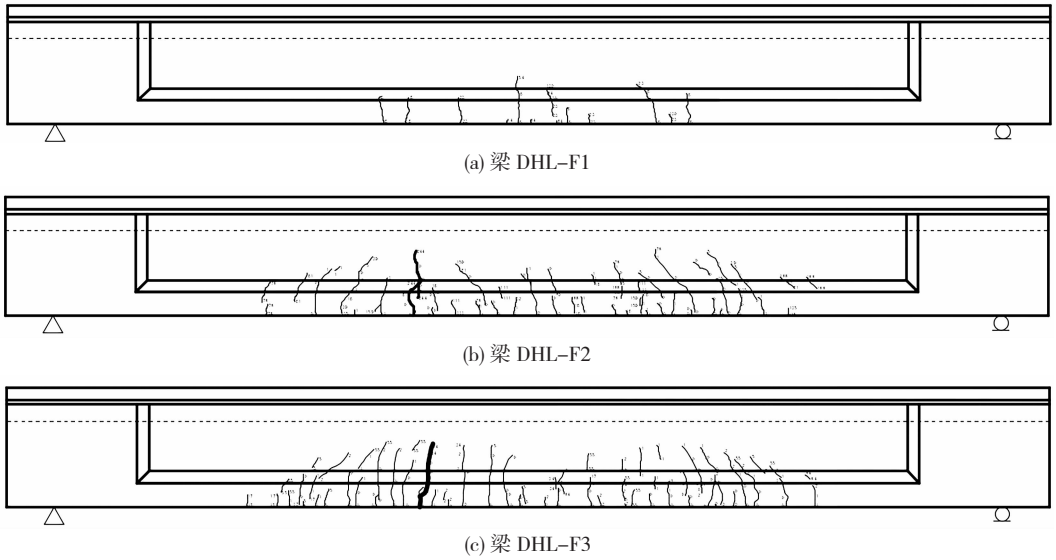


图 4 试验梁疲劳裂缝分布示意

Fig. 4 Fatigue crack pattern of test beams

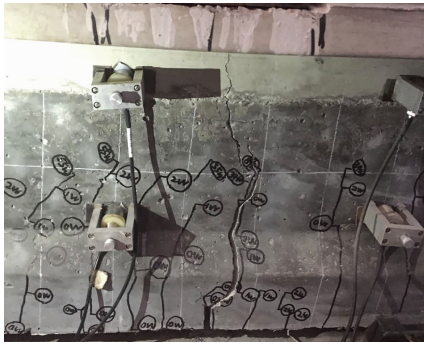


图 5 梁 DHL-F3 主裂缝形态

Fig. 5 Main crack pattern of DHL-F3

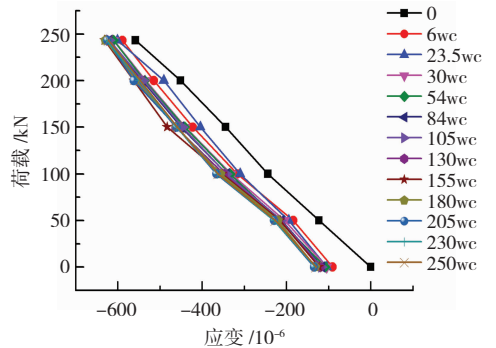
2.2 受压区 NC 应变变化

图 6 为经历不同疲劳循环次数后受压区 NC 应变与荷载间的关系. 由于疲劳荷载作用下受压区 NC 中应力水平相对较低, NC 处于弹性受力阶段, 荷载-应变曲线基本呈线性.

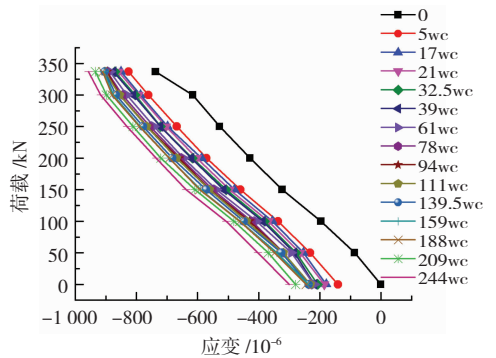
试验梁受压区 NC 的荷载-应变曲线中, 荷载为零时对应应变在初次加载下为零, 此后随疲劳循环次数的增加逐渐增长, 表明疲劳加载下 NC 产生了累积残余应变. 梁 DHL-F1 和 DHL-F2 受压区 NC 的累积残余应变在 0~6 万次内增长较快, 此后保持非常缓慢的增长; 梁 DHL-F3 受压区 NC 的累积残余应变在 2.5 万次内增加明显, 随后以较小增量基本呈稳定增长.

2.3 正截面疲劳应变分布

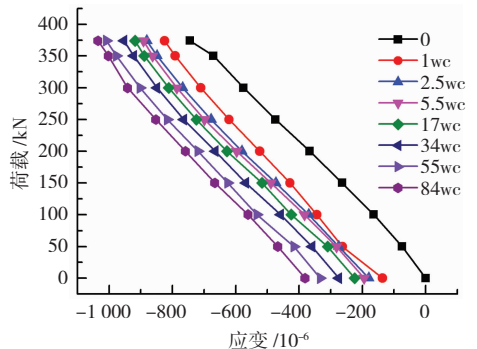
试验梁在不同疲劳循环加载下的正截面应变分布见图 7. 随着疲劳循环次数的增加, 试验梁纯弯段中和轴高度变化不明显, 截面应变随截面高度始终近似呈线性分布, 故平截面假定这一基本假设可以应用于承受疲劳循环荷载的 RPC-NC 叠合梁的正截面计算分析中.



(a) 梁 DHL-F1



(b) 梁 DHL-F2



(c) 梁 DHL-F3

图 6 受压区 NC 荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves of NC in compression zone

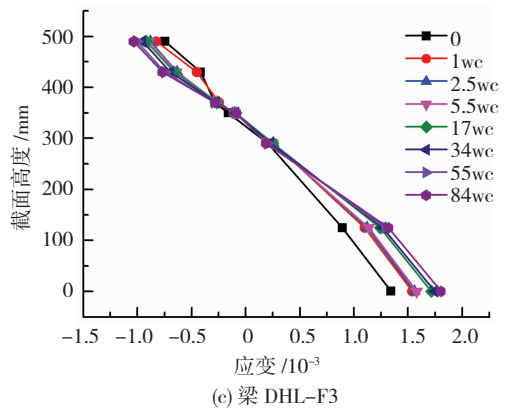
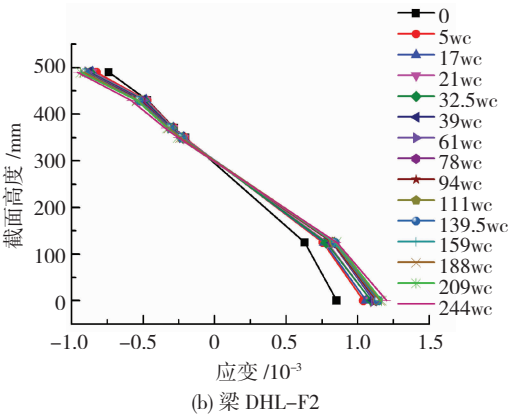
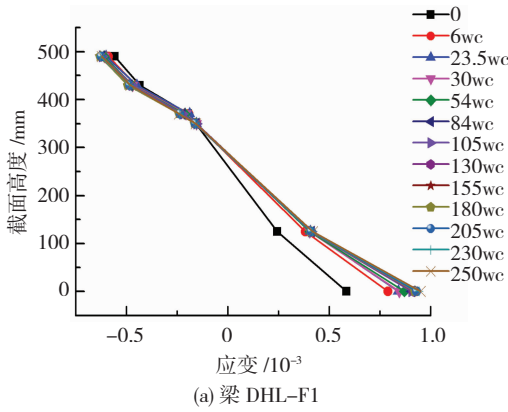


图 7 试验梁正截面应变分布曲线

Fig.7 Strain distribution in the normal section of test beams

2.4 疲劳裂缝宽度

图 8 为试验梁最大裂缝宽度随疲劳循环次数增加的发展曲线. 梁 DHL - F1 在首次疲劳加载下未开裂, 加载至 6 万次时, 最大裂缝宽度增长至 0.07 mm, 随后最大裂缝宽度增长非常缓慢, 250 万次时达到 0.14 mm, 为肉眼不可见裂缝; 梁 DHL - F2 的最大裂缝宽度在 5 万次循环内增长迅速, 此后增长速度随循环次数增加而逐渐加快, 244 万次时最大裂缝宽度达到 0.45 mm; 梁 DHL - F1 和 DHL - F2 的最大裂缝宽度变化基本呈两阶段发展. 梁 DHL - F3 的最大裂缝宽度在 5.5 万次循环内迅速增加, 稍后基本保持稳定, 但 17 万次后增速明显逐渐加快, 至 84 万次时最大裂缝宽度达 0.80 mm, 梁 DHL - F3 的裂缝宽度变化呈三阶段发展. 总体来看, 同一疲劳循环次

数下, 最大疲劳裂缝宽度随疲劳上限荷载的增加而增大.

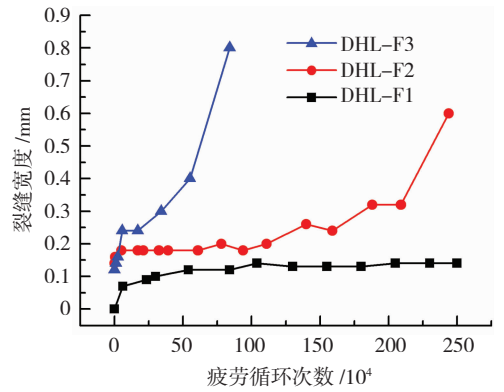


图 8 最大裂缝宽度 - 疲劳循环次数曲线

Fig.8 Maximum crack width versus the number of fatigue cycles

2.5 跨中挠度与刚度变化

试验测得随着疲劳循环次数增加, 3 根梁的荷载 - 跨中挠度曲线见图 9.

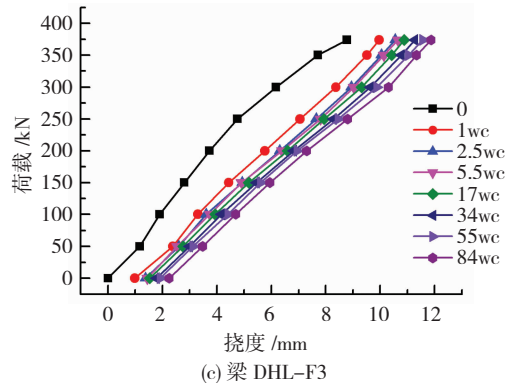
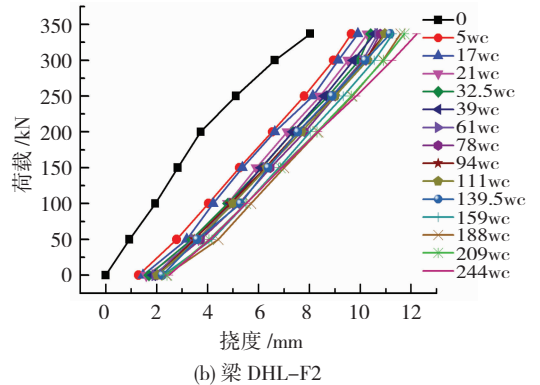
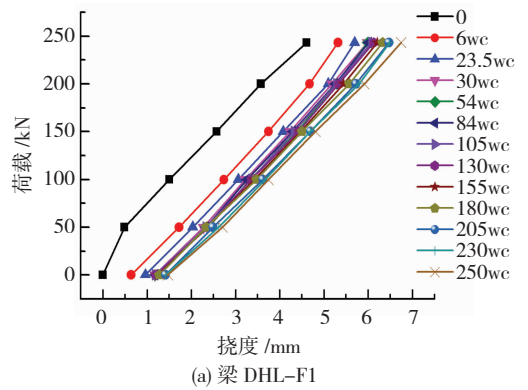


图 9 荷载 - 跨中挠度曲线

Fig.9 Load versus deflection of the mid-span

经历不同疲劳循环次数后,试验梁的荷载-跨中挠度曲线均基本保持线性,且曲线斜率随着循环次数增加有减小的趋势,表明其抗弯刚度在疲劳荷载作用下逐渐降低.疲劳荷载为零时对应的累积残余挠度是试验梁在疲劳加载过程中产生的不可恢复的变形,从图 9 可知,在第一阶段疲劳加载下试验梁的累积残余挠度增长迅速,之后随循环次数的增加缓慢增长.

疲劳上限荷载作用下的挠度值随循环加载次数变化的曲线见图 10.试验梁的最大挠度在第一阶段循环加载中增长较快,抗弯刚度在这一阶段明显降低;第二阶段中,试验梁的最大挠度随循环次数的增加基本保持稳定增长,且增长速率随疲劳上限荷载的增加而增大.

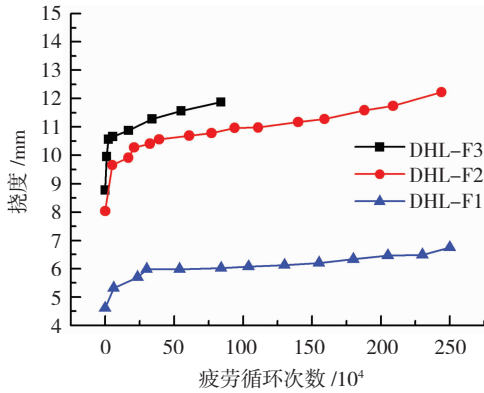


图 10 峰值挠度 - 疲劳循环次数曲线

Fig. 10 Maximum deflection of the mid-span versus the number of fatigue cycles

随着疲劳循环次数的增加,叠合梁刚度逐步下降,挠度逐渐增长,刚度退化系数 λ 可表示为^[16]

$$\lambda = \frac{B_N}{B_1} = \frac{f_1}{f_N} \quad (1)$$

式中: B_1 和 f_1 分别为第 1 次疲劳循环加载后叠合梁的刚度和挠度, B_N 和 f_N 分别为第 N 次疲劳循环加载后叠合梁的刚度和挠度.根据试验数据拟合得到

$$\lambda = 1.1785 - 0.0739 \lg N, \quad (2)$$

式中 N 为疲劳循环次数.

3 根梁的刚度退化系数与疲劳循环次数间的关系以及式(2)曲线见图 11,可知拟合曲线和试验数据吻合较好.

2.6 疲劳试验后静力性能分析

梁 DHL-F1 和 DHL-F2 经历超过 240 万次等幅疲劳循环后均未发生疲劳破坏,结束疲劳加载后进行静载弯曲破坏试验.静载试验中,试验梁的叠合面始终未出现滑移或撕裂等破坏形式,叠合面黏结性能良好.图 12 为疲劳试验后的梁 DHL-F1、DHL-F2 和梁 DHL-S 的静力荷载-挠度曲线.

梁 DHL-S 的屈服荷载为 606 kN,极限荷载为

874 kN;梁 DHL-F1 经历 250 万次疲劳循环加载后的屈服荷载为 600 kN,极限荷载为 800 kN,和未经疲劳加载的试验梁相比,屈服荷载和屈服前刚度无明显变化,极限荷载和极限挠度有所减小;梁 DHL-F2 经历 244 万次疲劳循环加载后的屈服荷载为 500 kN,极限荷载为 650 kN,和未经疲劳加载的试验梁相比,屈服荷载和屈服前刚度有所降低,极限荷载和极限挠度明显减小.可知疲劳加载后试验梁的极限荷载比屈服荷载降低更显著,疲劳上限荷载越大,疲劳后剩余抗弯承载性能退化越明显.

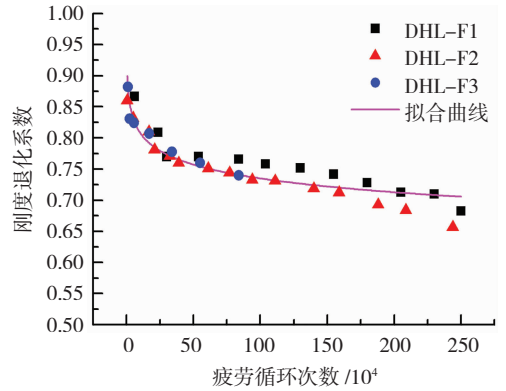


图 11 刚度退化系数 - 疲劳循环次数曲线

Fig. 11 Stiffness degradation coefficient versus the number of fatigue cycles

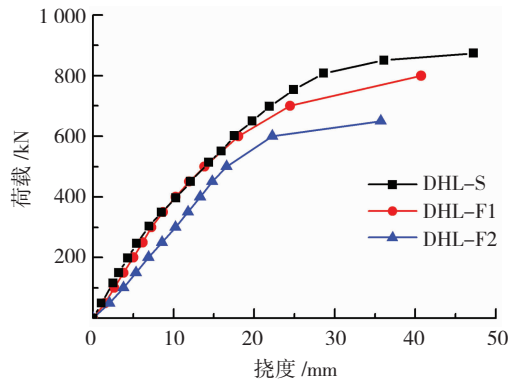


图 12 疲劳试验后荷载 - 挠度曲线

Fig. 12 Load versus deflection of the mid-span after fatigue test

将疲劳加载后的梁 DHL-F1、DHL-F2,静载试验梁 DHL-S 及文献[15]中与本文试验梁结构尺寸和配筋方式完全相同的预应力普通混凝土梁的静力弯曲性能进行对比,见表 3.

表 3 试验梁静力弯曲性能对比

Tab. 3 Comparison of static flexural property of test beams

梁号	屈服荷载/kN	屈服挠度/mm	极限荷载/kN	极限挠度/mm	抗弯位移延性系数
DHL-S	606	17.84	874	47.27	2.650
DHL-F1	600	18.06	800	40.75	2.256
DHL-F2	500	16.57	650	35.71	2.155
NC-S	595	23.28	731	44.23	1.900

可知经历疲劳加载后叠合梁的抗弯位移延性系数降低,疲劳上限荷载越大抗弯位移延性系数降低越明显,但疲劳加载后叠合梁的抗弯位移延性系数仍大于未经历疲劳加载的预应力普通混凝土梁。

3 结 论

1)本文中 3 根试验梁 DHL - F1、DHL - F2 和 DHL - F3 分别经历 250、244 和 93 万次疲劳循环加载,梁 DHL - F3 发生疲劳破坏,由梁内非预应力钢筋的断裂引起,和普通钢筋混凝土适筋梁的疲劳破坏模式相同.疲劳加载阶段及之后的静载破坏阶段中,3 根梁的叠合面均未出现破坏,表明 RPC - NC 叠合面不会成为导致叠合梁失效的薄弱环节。

2)随疲劳循环次数的增加,RPC - NC 叠合梁正截面应变沿梁高方向的分布变化不大,疲劳加载过程中基本保持线性,因此可以将平截面假定应用于疲劳荷载下 RPC - NC 叠合梁的正截面计算中。

3)中 - 活载作用下,模型梁在经历 250 万次等幅疲劳循环后的最大裂缝宽度仅为 0.14 mm,屈服荷载和屈服前刚度无明显变化,极限荷载降低 8.47%,抗弯位移延性系数降低 14.87%。

参 考 文 献

[1] 安明喆,杨志慧,余自若,等. 活性粉末混凝土抗拉性能研究[J]. 铁道学报,2010,32(1):54
AN Mingzhe, YANG Zhihui, YU Ziruo, et al. Experimental study on the tensile performance of reactive powder concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 54. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2010.01.010

[2] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 29. DOI:10.1016/j.cemconres.2013.11.002

[3] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under direct tensile loading [J]. Cement & Concrete Composites, 2014, 48:53. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015

[4] AHMAD S, ZUBAIR A, MASLEHUDDIN M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99: 73. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010

[5] NOSHIRAVANI T, BRÜHWILER E. Rotation capacity and stress redistribution ability of R - UHPFRC - RC composite continuous beams: an experimental investigation[J]. Materials and Structures, 2013, 46: 2013. DOI: 10.1617/s11527-013-0033-5

[6] HUYNH L, FOSTER S, VALIPOUR H, et al. High strength and reactive powder concrete columns subjected to impact: experimental investigation[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 153. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.026

[7] 李莉,郑文忠. 活性粉末混凝土连续梁塑性性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(2):193
LI Li, ZHENG Wenzhong. Experimental study on plastic property of reactive powder concrete continuous beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 193. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2010.02.005

[8] 邓宗才,袁常兴. 高强钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(3):69
DENG Zongcai, YUAN Changxing. Experimental study on bond capability between high strength rebar and reactive powder concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 69. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2014.03.011

[9] MOSTOFINEJAD D, NIKOO M R, HOSSEINI S A. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 754. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.082

[10] 郑文忠,吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015,36(10):45
ZHENG Wenzhong, LV Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 45. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.10.006

[11] 季文玉,李旺旺,过民龙,等. 预应力 RPC - NC 叠合梁挠度试验及计算方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(1):130
JI Wenyu, LI Wangwang, GUO Minlong, et al. Experimentation and calculation methods of prestressed RPC - NC composite beam deflection [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 130. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgxb20161204

[12] HABEL K. Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete[D]. Lausanne: Universität Karlsruhe, 2004

[13] HABEL K, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Time dependent behavior of elements combining ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete [J]. Materials and Structures, 2006,39:557. DOI: 10.1617/s11527-005-9045-0

[14] HABEL K, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Structural response of elements combining ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes and reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132: 1793. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:11(1793)

[15] 季文玉,李旺旺,王珏. 预应力 RPC - NC 叠合梁抗弯延性试验分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(6):21
JI Wenyu, LI Wangwang, WANG Jue. Experimental analysis on flexural ductility of prestressed RPC - NC composite beam [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6):21. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201606036

[16] 罗小勇,陈跃科,邓鹏麟. 无粘结部分预应力混凝土梁的疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(3):100
LUO Xiaoyong, CHEN Yueke, DENG Pengqi. Experimental study on fatigue properties of unbounded partially prestressed concrete (UPC) beams[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 100. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.03.013