

文章编号:1001-4888(2015)03-0269-06

湿热环境下钢纤维聚合物结构 混凝土疲劳性能的实验研究*

黄培彦, 廖忻, 周昊, 陈钟松

(华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

摘要: 为改善普通高强混凝土的抗裂及耐久性能,本课题组研发了一种新型钢纤维聚合物结构混凝土(SFPSC),并应用于大跨度桥梁上部结构。为了进一步探讨该类新材料的环境疲劳/耐久性能,考虑我国南方和沿海地区桥梁服役时的湿热环境影响,设计了不同的湿热条件(室温大气环境、50℃和80%R·H、50℃和90%R·H)对SFPSC试件进行预处理后,实施了三点弯曲疲劳实验,获得了SFPSC的应力-疲劳寿命(S-N)曲线,并给出了其疲劳方程。研究表明,湿热环境对SFPSC的疲劳性能影响较大,高温高湿会导致其疲劳寿命降低。

关键词: 钢纤维聚合物结构混凝土; 湿热环境; 疲劳性能

中图分类号: U446.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-266

0 引言

连续刚构/连续梁桥跨径大并长期处于湿热、盐雾、冻融等恶劣的服役环境下,以致普遍出现局部结构开裂或者跨中过度下挠等病害^[1-3],从而影响整个结构的耐久性和安全性。工程实践表明,仅依靠提高普通高强混凝土的强度,并不能根除上述病害,而需要寻求抗裂及抗疲劳性能更好的新材料。为此,钢纤维混凝土凭借其优越的抗裂性能,已逐渐在各类建筑结构中得到了应用^[4,5]。然而,目前的钢纤维混凝土的抗裂及抗疲劳性能还不足以满足桥梁局部结构的耐久性要求。而且,为了在我国南方和沿海地区的桥梁结构中应用钢纤维混凝土材料,需要探讨湿热环境对该类材料疲劳/耐久性能的影响。但是,目前有关湿热环境对钢纤维混凝土疲劳/耐久性能的影响研究还未见报道。

为了开发出既强又韧的结构混凝土,并将其应用于我国南方和沿海地区的桥梁结构,本课题组对已有自主知识产权的“钢纤维增强聚合物改性混凝土”^[6]进行了二次开发,研发出了一种新型复合材料“钢纤维聚合物结构混凝土(SFPSC)”,并对其断裂韧性及疲劳性能进行了初步的探讨^[7-9]。本文在此基础上,考虑我国南方和沿海地区桥梁服役时的湿热环境影响,对其环境疲劳/耐久性能进行实验研究。

1 湿热环境下 SFPSC 的疲劳实验

由于本课题组所研发的钢纤维聚合物结构混凝土材料(SFPSC)已应用于广东省内某特大桥主桥的箱梁结构中,为了探明该材料在所服役环境下的疲劳性能,本文采取实验研究的方法,模拟该特大桥的高温高湿环境,在3种环境条件(室温大气环境、50℃和80%R·H、50℃和90%R·H)和多级荷载作

* 收稿日期:2014-12-31; 修回日期:2015-03-30

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:11132004)、广东省交通运输厅科技计划项目(编号:科技-2013-02-028)

通讯作者:黄培彦(1952-),博士,教授,博导。主要研究方向:疲劳与断裂、实验力学、结构耐久性、桥梁评估与加固。

Email: pyhuang@scut.edu.cn

用下,对 SFPSC 实施环境疲劳实验。

1.1 材料及试件

按照上述特大桥箱梁结构的强度要求,为了使 SFPSC 能够在实际工程中取得更好的应用效果,以 C55 混凝土为基准配合比,并满足其抗压强度基本与 C55 混凝土一致的要求,对钢纤维和聚合物乳胶的掺量进行了配合比设计。综合考虑了结构强度的要求以及合成材料的施工性如流动性(坍落度)、经济性等因素,最终确定本次 SFPSC 的配合比是在基准配合比“ $w(\text{水泥}) : w(\text{砂}) : w(\text{碎石}) : w(\text{水}) : w(\text{减水剂}) = 1 : 1.493 : 2.432 : 0.321 : 0.012$ ”的基础上,掺入 0.58wt% 的钢纤维以及水泥的 1.3 wt% 的聚合物乳胶。按照上述配合比制作 SFPSC 试件,并对其进行了抗压和抗折实验,实验结果如表 1 所示。由表 1 可知,按照上述配合比制作的 SFPSC,完全符合该桥梁工程的要求。

表 1 SFPSC 的抗压和抗折实验结果

Tab. 1 Testing results of compression and bending for SFPSC

钢纤维掺量 (wt%)	聚合物乳胶 掺量(wt%)	抗压强度(MPa)		抗折强度(MPa)	
		7d	28d	7d	28d
0.580	0.013	68.2	70.1	7.10	8.68

为了对 SFPSC 的环境疲劳性能进行探讨,本研究又按照相关试验规程的规定^[10],制作了 24 根 SFPSC 三点弯曲梁试件,其尺寸为 $150 \times 150 \times 450$ mm,如图 1 所示。各试件的编号如表 2 所示。

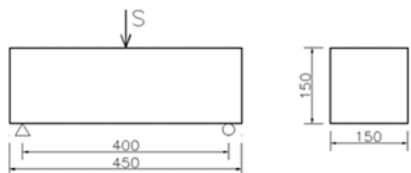


图 1 SFPSC 三点弯曲梁

Fig. 1 Three-point bending beam of SFPSC

1.2 实验方法及装置

为了探讨湿热环境预处理对试件疲劳寿命的影响,本次实验分为两部分:

(1) 室温大气(实验室)环境下的疲劳实验方法

实验室环境下的疲劳实验,即试件不经过湿热环境预处理,养护结束后便在实验室环境下进行的疲劳实验,按照载荷水平(应力水平) S_R 的不同 ($S_R = 0.70, 0.75, 0.80$) 将试件分成了 3 组进行疲劳实验。

(2) 湿热环境预处理后的疲劳实验方法

参照国家标准^[10]中规定的环境预处理方法,SFPSC 试件的湿热环境预处理及疲劳实验方法分为以下两种:1)利用可编程恒温恒湿试验机,按照图 2(a)所示方法对 7 个试件先进行温度为 50°C 和相对湿度为 $80\% \text{ R} \cdot \text{H}$ 的湿热预处理,然后将应力水平分为 3 级,即 $S_R = 0.65, 0.70, 0.75$ (相应的最大载荷分别为 26.2kN, 28.3kN, 30.3kN),在室温大气环境中实施三点弯曲疲劳实验;2)利用可编程恒温恒湿试验机,按照图 2(b)所示方法对 7 个试件先进行温度为 50°C 和相对湿度为 $90\% \text{ R} \cdot \text{H}$ 的湿热预处理,然后将应力水平分为 4 级,即 $S_R = 0.60, 0.65, 0.70, 0.75$ (相应的最大载荷分别为 24.2kN, 26.2kN, 28.3kN, 30.3kN),在室温大气环境中实施三点弯曲疲劳实验。

不管哪部分疲劳实验,为了在相同的载荷下能够方便地比较在不同环境下试件的疲劳寿命,探讨湿热环境预处理对疲劳寿命的影响,在设定载荷水平(应力水平) S_R 时,都是以室温大气(实验室)环境下试件的极限承载力 $P_u = 40.6\text{kN}$ 为计算依据,而不参照湿热环境预处理后试件的极限承载力 ($P'_u = 37.5\text{kN}$)。

所有 SFPSC 试件的疲劳实验都在 MTS810 材料试验系统上进行,采用三点弯曲加载方式,波形为正弦波,应力比 $R=0.1$,加载频率为 10Hz,采用力控制模式。疲劳实验中,载荷、位移的采集频率为 100Hz。当试件在某一应力水平下经过 $N=2 \times 10^6$ 次循环加载后仍不破坏,则认为它在该应力水平下具有无限寿命。而 $N=2 \times 10^6$ 所对应的应力水平则被称之为 SFPSC 试件的疲劳极限。

2 湿热环境下 SFPSC 的疲劳性能

按照上述 3 种实验方法对 SFPSC 试件进行了疲劳实验,主要实验结果列于表 2。对于未进行湿热

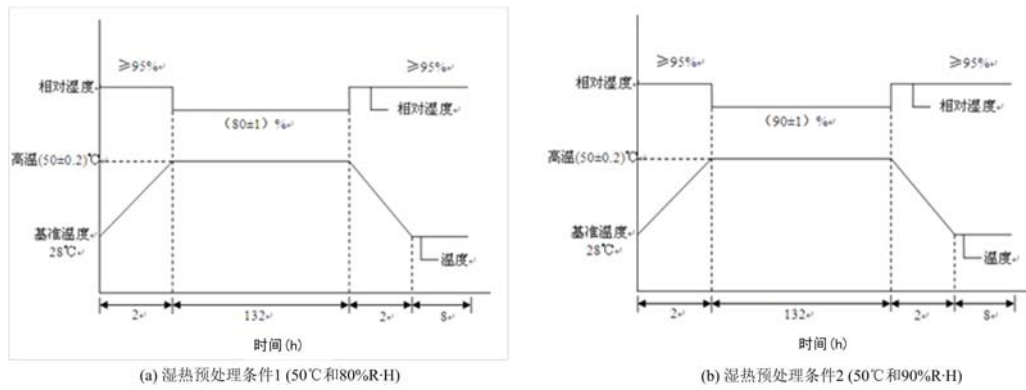


图 2 湿热环境预处理方法

Fig. 2 Environmental pretreatment methods for SFPSC specimens

处理以及经过湿热预处理的试件,其疲劳断口形貌分别如图 3 和图 4 所示。比较该两图可知,试件经过高温高湿预处理后,断口比较整齐,呈脆性断口的形貌(图 4),即其破坏模式是脆性断裂。这表明经过高温高湿预处理后,SFPSC 试件的疲劳寿命将会降低。

表 2 SFPSC 试件的疲劳实验条件和实验结果

Tab. 2 Fatigue testing conditions and results for SFPSC specimens

试件编号	应力水平	最大载荷(kN)	实验环境	疲劳寿命(cycles)
A-1	0.70	28.3	室温大气环境	$>2 \times 10^6$
A-2				$>2 \times 10^6$
A-3				825900
A-4	0.75	30.3	室温大气环境	293288
A-5				328362
A-6				350006
A-7				$>2 \times 10^6$
A-8	0.8	32.3	室温大气环境	24101
A-9				35680
A-10				36068
B-1	0.65	26.2	50°C, 80% R·H	$>2 \times 10^6$
B-2				1800031
B-3	0.70	28.3	50°C, 80% R·H	63470
B-4				207900
B-5				157413
B-6	0.75	30.3	50°C, 80% R·H	92486
B-7				50936
C-1	0.60	24.2	50°C, 90% R·H	$>2 \times 10^6$
C-2				1784833
C-3	0.65	26.2	50°C, 90% R·H	166591
C-4				186596
C-5	0.70	28.3	50°C, 90% R·H	7940
C-6				1960
C-7	0.75	30.3	50°C, 90% R·H	163



图3 未进行湿热处理的试件断口

Fig. 3 Fracture photograph of specimen untreated with hot-wet environment



图4 经过湿热处理的试件断口

Fig. 4 Fracture photograph of specimen treated with hot-wet environment

SFPSC 试件的应力(水平)–疲劳寿命(S–N)实验曲线如图5所示。由表2和图5可知,在同一环境条件下,试件的疲劳寿命会随着应力水平的提高而降低;对于同一应力水平,经过湿热预处理后试件的疲劳寿命比室温大气环境下的低;在相同实验温度下,试件的疲劳寿命会随着环境湿度的增大而降低。另外,SFPSC 试件的疲劳寿命具有较大的分散性。究其原因,可认为主要是试件制作时钢纤维和聚合物乳胶的掺入使得混凝土的搅拌难度增大,造成钢纤维分布不均匀所致。

对表2和图5所示疲劳实验数据进行回归,可得到下列各种环境下 SFPSC 试件的疲劳方程:

$$S = 1.0585 - 0.0575 \lg N \quad (\text{室温大气环境}) \quad (1)$$

$$S = 1.0512 - 0.0644 \lg N \quad (50^\circ\text{C}, 80\% \text{ R} \cdot \text{H}) \quad (2)$$

$$S = 0.8291 - 0.0356 \lg N \quad (50^\circ\text{C}, 90\% \text{ R} \cdot \text{H}) \quad (3)$$

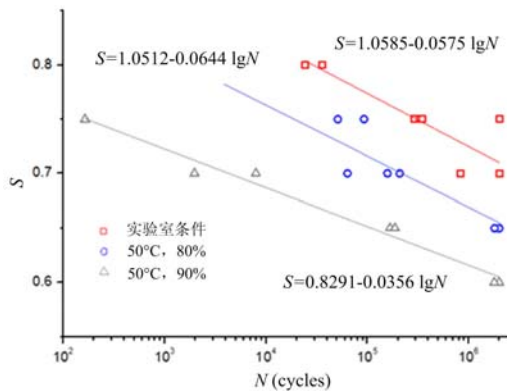


图5 不同实验环境下 SFPSC 试件的 S–N 曲线

Fig. 5 S–N curves of SFPSC specimens under different testing environment

由式(1)~式(3),可分别推定实验室环境下、50°C和80% R·H、50°C和90% R·H环境下 SFPSC 试件的疲劳极限分别为0.698, 0.645和0.605,即湿热预处理会使 SFPSC 试件的疲劳极限降低。与实验室环境下的推定结果相比,经过50°C和90% R·H的湿热环境预处理后,试件的疲劳极限降低了13.3%。

湿热环境使 SFPSC 的疲劳强度/疲劳寿命降低的影响机制可理解为:1)温度的升高对聚合物乳胶会起到软化作用,从而降低其与其它组成材料的粘结强度;2)温度的升高会使素混凝土中的水分蒸发,形成新的内部空隙和裂纹,并使粗骨料和水泥浆体产生变形差和内应力,导致其强度降低;3)湿度的增大会使混凝土产生吸湿应力,加速其破坏;4)湿度的增大也会使聚合物乳胶的粘性降低;5)在高温高湿的环境下,温度和湿度的负面影响还会产生交互作用效应。由于这些影响,最终导致 SFPSC 试件变脆(如图4所示),抗疲劳性能下降。

3 结论

本文考虑我国南方和沿海地区桥梁服役时的湿热环境影响,对本课题组研发的新型材料“钢纤维聚合物结构混凝土(SFPSC)”的环境疲劳性能进行了实验研究,得到如下结论:

1) 湿热环境对 SFPSC 试件的疲劳性能影响较大。在相同的应力水平条件下,湿热环境越恶劣, SFPSC 的疲劳寿命会越低;

2) 通过环境疲劳实验,并对疲劳实验数据进行回归分析,得到了不同实验环境下 SFPSC 的 S—N 曲线及其疲劳方程;

3) 由 SFPSC 的疲劳方程可推定在不同实验环境下 SFPSC 的疲劳极限。与实验室环境下的推定结果相比,经过 50℃和 90% R·H 的湿热环境预处理后,试件的疲劳极限降低了 13.3%。这表明采用钢纤维聚合物结构混凝土进行桥梁结构的抗疲劳/耐久性设计时,应充分考虑服役环境对材料性能的影响。

参考文献:

- [1] 王法武,石雪飞. 大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制研究[J]. 公路, 2006(8): 72—76 (Wang Fawu, Shi Xuefei. Study on the control of long-term deflection of long-span prestressed concrete girder bridge [J]. Highway, 2006, (8): 72—76(in Chinese))
- [2] Chiu H S, Chern J C, Chang K C. Long-term deflection control in cantilever prestressed concrete bridges I: control method [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(6): 489—494.
- [3] 谢峻, 王国亮, 郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 47—50 (Xie Jun, Wang Guoliang, Zheng Xiaohua. The research status of long-term deflection problem for long-span prestressed concrete box girder bridges [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2007, 24(1):47—50 (in Chinese))
- [4] 赵亮平, 高丹盈, 朱海堂. 钢纤维对混凝土强度和韧性的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(6):29—32 (Zhao Liangping, Gao Danreng, Zhu Haitang. The influence of steel fiber on concrete strength and toughness [J]. Journal of North China Institute of Water Resources and Hydropower, 2012, 33(6): 29—32(in Chinese))
- [5] Lee H H. Shear strength and behavior of steel fiber reinforced concrete columns under seismic loading [J]. Engineering Structures, 2007, 29(7):1253—1262.
- [6] 罗立峰, 钟鸣, 黄培彦 等. 钢纤维增强聚合物改性混凝土及其制备方法[P]. 中国发明专利, 专利号: ZL200410026780.3, 2006. 7. 19 (Luo Lifeng, Zhong Ming, Huang Peiyan, et al. Steel fiber reinforced polymer modified concrete and its preparation method [P]. The Chinese Invention Patent, Patent No. ZL200410026780.3, 2006. 7. 19(in Chinese))
- [7] 胡若邻, 黄培彦. 钢纤维增强聚合物改性高强混凝土断裂韧性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(6): 963—970 (Hu Relin, Huang Peiyan. Experimental study on fracture toughness of steel fiber reinforced polymer modified high strength concrete [J]. Journal of Applied Basic and Engineering Science, 2011, 19(6): 963—970(in Chinese))
- [8] 郑顺潮, 黄培彦, 郭馨艳. 钢纤维聚合物高强混凝土疲劳性能的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(1): 1—7 (Zheng Shunchao, Huang Peiyan, Guo Xinyan. Experimental study on fatigue performance of steel fiber polymer high strength concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(1): 1—7(in Chinese))
- [9] 郑顺潮, 黄培彦, 郭馨艳 等. 钢纤维聚合物高强混凝土的温度疲劳性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 88—92 (Zheng Shunchao, Huang Peiyan, Guo Xinyan, et al. Thermal fatigue performance of steel fiber polymer high-strength concrete [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(9): 88—92(in Chinese))
- [10] GB/T 1446—2005. 国家标准: 纤维增强塑料性能试验方法总则[S], 2005 (GB/T 1446—2005. National Standards: General for Test Method of Fiber Reinforced Plastic Performance[S], 2005(in Chinese))

Experimental Study of Fatigue Performance of Steel Fiber Polymer Structural Concrete in Hot-Wet Environment

HUANG Pei-yan, LIAO Xin, ZHOU Hao, CHEN Zhong-song

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve cracking resistance and durability of ordinary high strength concrete, a new material named “steel fiber polymer structural concrete (SFPSC)” was developed by this research group and is already applied in the superstructure of large-span bridge. In order to get further insight into the fatigue/durability properties of this new material in hot-wet environment in the southern parts and coastal areas of China, different hot-wet environmental conditions were designed (room temperature & atmospheric environment, 50°C & 80% R·H, 50°C & 90% R·H etc.), and three-point bending fatigue experiment was carried out for SFPSC specimens subjected to pretreatment. Stress-fatigue life (S—N) curve and fatigue equation of SFPSC were obtained. Results show that hot-wet environment has great effect on fatigue properties and durability of SFPSC, and high temperature and humidity can lead to fatigue life reduction.

Keywords: steel fiber polymer structural concrete (SFPSC); hot-wet environment; fatigue performance