

文章编号: 1001-4888(2011)01-0001-07

钢纤维聚合物高强混凝土疲劳性能的实验研究^{*}

郑顺潮, 黄培彦, 郭馨艳

(华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

摘要: 钢纤维聚合物高强混凝土(SPHC)是本课题组最近研发的新型混凝土桥梁结构材料。为了探明 SPHC 的疲劳性能,本文采用对比分析的方法,对实桥上应用的 SPHC 及其静力学性能相近的 C60 混凝土的疲劳性能展开实验研究,得到了这两种材料的 S-N 实验曲线。研究结果表明,与 C60 混凝土相比,SPHC 材料由于掺入了钢纤维和聚合物乳胶,增加了韧性及抗裂性能,使其抗疲劳性能得到了大幅度的提高。该新材料的实桥应用,将有效地提高桥梁结构的疲劳寿命。

关键词: 钢纤维聚合物高强混凝土(SPHC); 疲劳性能; C60 混凝土; 桥梁结构

中图分类号: O346.1; U441.6 **文献标识码:** A

0 引言

混凝土材料的准脆性,决定了它不具有良好的抗裂及抗疲劳性能。为了能使混凝土增强、增韧,人们研发了多种混凝土复合材料,例如钢纤维混凝土^[1-4]、聚合物混凝土^[5]等。钢纤维的掺入能使混凝土增强,聚合物的掺入能使混凝土增韧,如将两者合理地配合使用,则有可能研发出既强又韧的新型混凝土。按照这一思路,几年前作者所在课题组研发了“钢纤维增强聚合物改性混凝土(发明专利号: ZL200410026780.3)”,并在公路桥梁的桥面铺装工程中得到了很好的应用^[6-8]。然而,钢纤维增强聚合物改性混凝土属于低强度铺装材料,无法应用于高强度混凝土结构中。为此,本课题组又对钢纤维增强聚合物改性混凝土进行二次开发,研发了钢纤维聚合物高强混凝土(SPHC),并应用于大跨度混凝土连续刚构桥主桥的箱梁中。

连续刚构桥主桥箱梁是其上部受力构件,箱梁的疲劳性能决定了该座桥梁的安全性及耐久性。为了确保箱梁(结构)的疲劳性能,首先要探明所使用材料的疲劳性能。为此,本文采用对比分析的方法,对实桥的箱梁中应用的 SPHC 材料及其静力学性能相近的 C60 混凝土的疲劳性能展开实验研究。

1 实验材料及试件

本次实验使用两种材料:C60 混凝土、与 C60 混凝土的静力学性能相近的钢纤维聚合物高强混凝土(SPHC)。其中,C60 混凝土采用标准配合比设计。

关于 SPHC 材料的配合比设计,首先按照结构强度的要求,再考虑钢纤维的掺量、水灰比、砂率、单位体积用水量、胶凝材料用量等,兼顾合成材料的施工性如流动性(坍落度)、经济性等,最终确定本次 SPHC 材料的配合比是在基准配合比“w(水泥):w(砂):w(碎石):w(水):w(减水剂)=1:1.346

^{*} 收稿日期: 2010-09-04; 修回日期: 2010-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672060,51078145)和广东省自然科学基金重点项目(9251064101000016)资助

通讯作者: 黄培彦(1952-),男,博士,教授,主要从事疲劳与断裂力学、桥梁评估与加固技术研究。E-mail: pyhuang@scut.edu.cn

: 1.86 : 0.287 : 0.014”的基础上,掺入 0.64wt% 的钢纤维、以及 0.015wt% 的聚合物乳胶。

各实验材料的具体情况如下:广州珠江粤秀牌 P. II 42.5R 水泥;砂为西江水洗天然中砂,细度模数为 2.3;肇庆四会大旺恒运石场生产的 5~25mm 花岗岩碎石;上海真强纤维有限公司的压痕形钢纤维,规格为 $0.3 \times 1 \times 30$ mm,长径比为 48.5,抗拉强度 810MPa;聚合物采用德国瓦克化学公司生产的 VIN-NAPAS RE5010N 水泥改性专用丁苯乳胶,一种遇水可再分散醋酸乙烯酯/乙烯共聚胶粉;广东柯杰外加剂科技有限公司 KJ-JS 聚羧酸高性能减水剂。

试件的制作过程如下:根据配合比先将粗、细集料、钢纤维投入搅拌机干拌 2min;加入水泥再搅拌 2min;然后加水、减水剂溶液和聚合物乳胶,湿拌 3min 左右,至拌合物比较均匀后把混凝土放入模具中,用振捣棒振捣 2min 后放入养护室 1 天后脱模,再养护至 28 天。

按照上述配合比设计和制作的 SPHC 的抗压强度(实验值)如表 1 所示。

疲劳试件采用三点弯曲梁(图 1),其尺寸为 $150 \times 150 \times 450$ mm。其中,C60 混凝土试件 7 根,SPHC 试件 12 根,各试件编号如表 2 和表 3 所示。

表 1 SPHC 抗压强度实验结果

Tab. 1 Test results of pressure strength of SPHC

钢纤维掺量 (wt%)	聚合物乳胶掺量 (wt%)	抗压强度(MPa)		
		3d	7d	28d
0.64	0.015	58.0	66.8	79.9

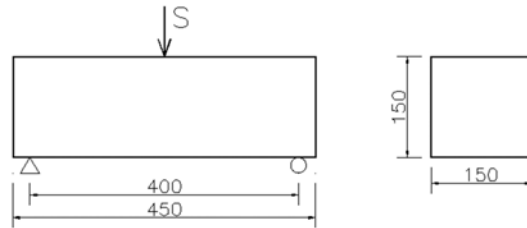


图 1 疲劳实验用三点弯曲梁

Fig. 1 Three-point bending beam for fatigue test

表 2 C60 混凝土疲劳实验条件及实验结果

Tab. 2 Test conditions and results for C60 concrete

试件编号	应力水平	最大载荷(kN)	应力比	疲劳寿命
C1	0.40	17.3	0.1	>2000000
C6	0.50	20.7	0.1	>2000000
C7	0.52	22.5	0.1	157369
C4	0.60	26.0	0.1	6547
C5				841615
C2	0.65	27.5	0.1	464
C3				6645

表 3 SPHC 疲劳实验条件及实验结果
Tab. 3 Test conditions and results for SPHC

试件编号	应力水平	最大载荷(kN)	应力比	疲劳寿命
F1	0.60	25.7	0.1	>2000000
F2	0.65	27.8	0.1	>2000000
F3				>2000000
F4				2744101
F5	0.70	30.0	0.1	782862
F6				197127
F7				46627
F8	0.80	34.0	0.1	115035
F9				254604
F10				290008
F11				35806
F12				—

2 实验方法及装置

对于 SPHC 试件,按照施加载荷水平(应力水平) S_R 的不同($S_R=0.60, 0.65, 0.70, 0.80$),将试件分成了 4 组。除了 $S_R=0.60$ 外,每组试件数量不少于 3 根。对每一组最少试件数量,应用概率分析方法进行检验。对不满足检验要求的组别,将增补试件数量,直到通过检验为止。

实验系统由 MTS810 试验机和 Wavebook516E 动态应变仪组成。疲劳实验采用三点弯曲加载方式,波形为正弦波,加载频率为 10Hz,应力比 $R=0.1$,采用力控制模式。试验中,MTS 测试系统自动记录载荷、试件的跨中挠度(位移)、载荷循环数等实验数据,每一循环记录 8 组数据;应变采集系统自动记录混凝土的应变数据,采集频率为 100Hz。

一般情况下,如果循环次数达到 2×10^6 ,试件仍未破坏将停止试验。这是因为按照有关土木行业规范的规定,如果试件经过 2×10^6 次循环加载后仍不破坏,则认为它可承受无限次循环载荷,即具有无限寿命。

作为对比实验,即对于 C60 混凝土试件,将 7 根试件按照 5 级载荷水平进行分组,如表 2 所示。其疲劳实验方法与 SPHC 试件的相同。

3 疲劳寿命分析

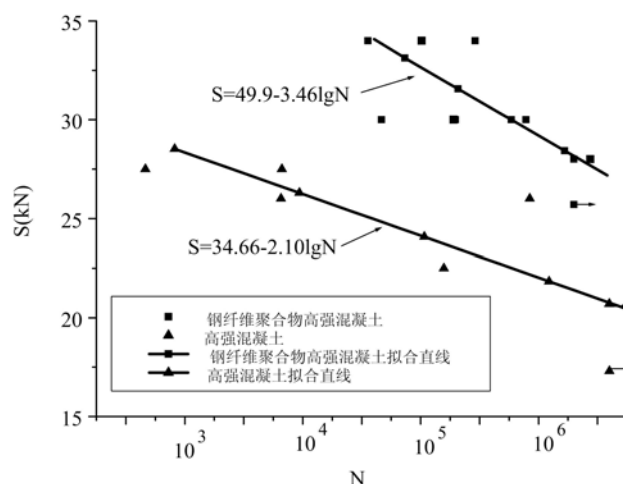
3.1 S—N 实验曲线

两种材料的疲劳实验结果分别示于表 2 和表 3。它们的 $S_{max}-N$ 实验曲线如图 2 所示。由图 2 可知,新材料(钢纤维聚合物高强混凝土,SPHC)的实验曲线完全在 C60 混凝土的 S—N 曲线之上方。也就是说,新材料 SPHC 的疲劳寿命比 C60 混凝土的高得多(例如:当 $S_{max}=29.2\text{kN}$ 时,C60 混凝土的疲劳寿命不够 7 周次,而新材料则为 2×10^6 周次)。

新材料 SPHC 的疲劳寿命(对数值)与最大载荷值 S_{max} 之间有近似的线性关系。采用最小二乘法对其进行线性回归分析,可得到新材料 $S_{max}-N$ 曲线的表达式为:

$$S_{max} = 49.9 - 3.46\lg N \tag{1}$$

根据有关规范对疲劳极限的定义,将 $N=2 \times 10^6$ 代入式(1),即可推定新材料的疲劳极限约为 28.1kN。而由静载实验结果可知,新材料的极限承载力为 42.75kN,因此,SPHC 的疲劳极限约为其极限承载力的 65.7%。

图2 SPHC 和 C60 混凝土的 $S_{\max}$ — N 实验曲线Fig.2 $S_{\max}$ — N test curves for SPHC and C60 concrete

类似地,7 根 C60 混凝土试件的疲劳寿命(对数值)与载荷峰值之间也有较好的线性关系,其 $S_{\max}$ — N 曲线可以描述为:

$$S_{\max} = 34.66 - 2.10 \lg N \quad (2)$$

同理,将 $N=2 \times 10^6$ 代入式(2),可推定出 C60 混凝土的疲劳极限约为 21.4kN。由此可知,新材料 SPHC 的疲劳极限是 C60 混凝土的 131.3%,即新材料的疲劳极限比 C60 混凝土提高了 31.3%,这对桥梁结构的抗疲劳性能及其耐久性能将是一个很大的贡献。

3.2 SPHC 的微观增韧机理浅析

3.1 节的分析结果表明,虽然 SPHC 和 C60 混凝土的强度相近,但 SPHC 的疲劳性能要好得多。究其原因,应该与钢纤维、聚合物乳胶的增韧机理有关。关于钢纤维对混凝土的增韧作用已得到较多研究的证实,为此,本研究采用扫描电镜分析的方法只对 SPHC 中聚合物乳胶的增韧机理作一初步探讨。

3.2.1 聚合物乳胶对混凝土水化产物的影响

图 3 所示的扫描电镜照片从微观上显示了聚合物乳胶对混凝土水化产物的影响。

从图 3 中可见,未掺乳胶的混凝土中水化产物有大量的针状钙矾石晶体(图 3(a))和絮状 C-S-H 凝胶(图 3(b)),水化产物之间较多的孔隙,而且孔隙之间的连接很少,水化产物之间的结合比较松散,在水化产物中还有一些较大的空穴,浆体的表面还可以看到一些纵横交错的微裂纹。加入聚合物乳胶后,可以看到水化产物的结构更致密,微裂纹明显减少,聚合物乳胶膜状物填充或连接在水泥水化产物的缝隙或空穴之间(图 3(c))。

文献[9]认为当聚灰比较小(0.04~0.08)时,聚合物乳胶以颗粒形状或较小的片状膜附着在水泥凝胶或未水化的粒子之间,由于聚合物乳胶掺量较少,其在水泥石中未能大面积成膜,仅以分散相的形式填充在水泥水化产物的缝隙中,阻断孔隙通道,提高了水泥凝胶体的致密性。聚合物网络的弹性模量较水泥浆体的弹性模量低,能够使硬化水泥浆体的韧性得到提高,改善砂浆的变形协调能力,柔韧性能够改善。由于有聚合物的填充和粘连,从而减少干缩裂缝的形成,使得材料的抗疲劳断裂性能得到提高。本研究中混凝土掺入聚合物乳胶的量比较少,仅为胶凝材料的 1.5%,故未能在水泥石中大面积成膜,仅以分散相的形式填充在水泥水化产物的缝隙中,阻断孔隙通道,提高了水泥凝胶体的致密性。这与文献[9]的分析结果是一致的。

3.2.2 聚合物乳胶对钢纤维与基体界面的影响

图 4 为未掺聚合物乳胶与掺入 1.5% 乳胶的试样在拔出钢纤维后基体的 SEM 照片。从该图中可见,两个样品的界面都比较光滑,即使是拔出纤维后,界面也不是凹凸不平,说明基体的产物并没有粘附在钢纤维周围,并随着钢纤维的拔出而带走。这与文献[9]中的研究结果有出入:掺与不掺入聚合物其纤维的表面是不一样的,掺入聚合物的纤维表面粘附有基体,界面处纤维与基体形成一体。文献[9]中

掺入的聚合物含量是比较高的,为水泥用量的 15%。当聚灰比较高(0.10~0.20)时,水泥凝胶、水化产物形成连续的网状结构,聚合物粘附在水泥石表面也形成了一个连续的三维空间网状结构。两种网络互相缠绕在一起,形成一个整体结构。聚合物附着在水泥凝胶或粒子表面并相聚成膜,填充毛细孔,形成紧密堆积^[10]。然而,由于聚合物乳胶的成本较高,大量掺入会使混凝土的成本大幅度提高,因此本研究中乳胶的掺入量较少(为水泥用量的 1.5%)。低掺量的乳胶并不能在水泥基体中形成聚合物网膜,仅以分散相填充到水泥水化产物的缝隙中,并未能与水泥基体在界面层中互成连续相,未能改善钢纤维(或集料)与水泥石之间的界面,使其界面层得到强化。也就是说,当聚合物乳胶含量较少时,拟通过增强钢纤维与基体的界面层来提高该材料的疲劳性能的效果不明显。

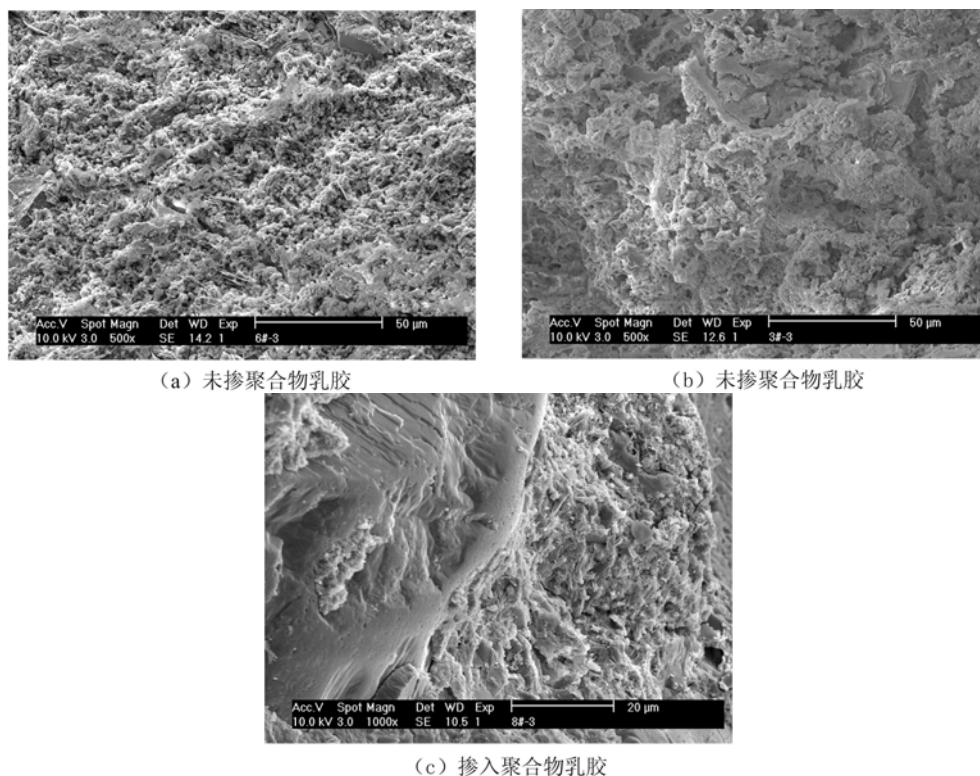


图 3 聚合物乳胶对混凝土水化产物的影响

Fig. 3 Effect of polymer content on hydration products of concrete

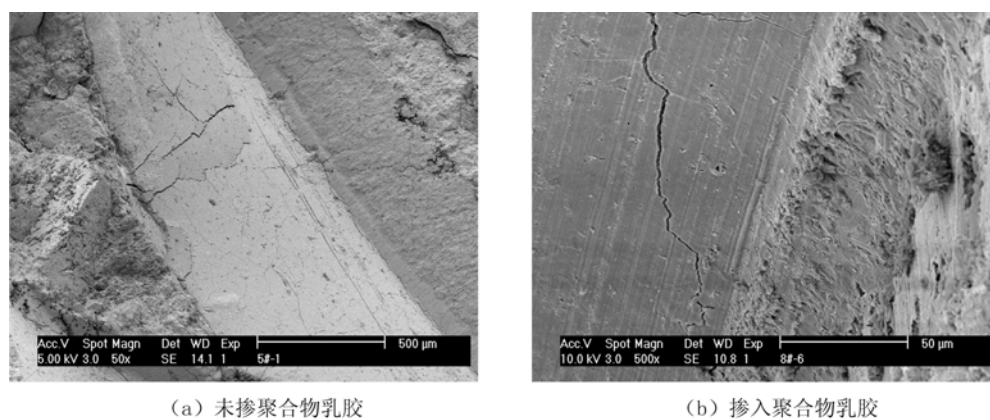


图 4 钢纤维与混凝土界面的 SEM 照片

Fig. 4 SEM Photograph of interface between steel fiber and concrete

4 结 论

通过对本课题组最近研发的新型混凝土桥梁结构材料——钢纤维聚合物高强混凝土 (SPHC)、以及与其强度相仿的 C60 高强混凝土的对比疲劳实验研究,探讨了 SPHC 的疲劳性能;通过采用扫描电镜分析的方法对 SPHC 中聚合物乳胶的增韧、抗裂机理作了初步探讨。研究结果表明,与 C60 混凝土相比,SPHC 具有优异得多的抗疲劳性能。这是因为在普通混凝土中掺入适量的钢纤维和聚合物乳胶后,会使原有材料的韧性得到明显的改善,从而大幅提高其抗疲劳性能。SPHC 作为新型结构材料应用于混凝土桥梁主体结构,将有效地提高桥梁结构的疲劳寿命。

然而,由于目前的数据积累还不够,还不能提供设计用的 $S-N$ 曲线。为此,本课题组正在展开进一步的系统而深入的研究。

参考文献:

- [1] Almansa E M, Canovas M F. Mix Design of Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. *Materiales De Construcción*, 1997, 47 (247-48): 11—26.
- [2] Singh S P, Kaushik S K. Flexural Fatigue Analysis of Steel Fiber-reinforced Concrete [J]. *Aci Materials Journal*, 2001, 98, (4): 306—312.
- [3] Lee H H. Shear Strength and Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Columns Under Seismic Loading [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29, (7): 1253—1262.
- [4] 易成, 沈世钊, 谢和平. 局部高密度钢纤维混凝土弯曲疲劳损伤演变规律 [J]. *工程力学*, 2002, 19 (5): 1—6 (YI Cheng, SHEN Shizhao, XIE Heping. Damage and Its Evolution for Partially High Percentage fiber Reinforced Concrete under Flexural Fatigue [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19 (5): 1—6 (in Chinese))
- [5] 于英华, 胡晓军, 徐平. 钢纤维聚合物混凝土单轴抗压应力—应变关系 [J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2003, 22 (3): 389—391 (YU Yinghua, HU Xiaojun, XU Ping. Stress-strain model of steel fiber polymer concrete under single-axis compressure [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2003, 22 (3): 389—391 (in Chinese))
- [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, 2006-7-23 (LUO Lifeng, ZHONG Ming, HUANG Peiyan, et al. Steel fiber reinforced polymer concrete and preparation method [P]. China Patent: No. ZL200410026780. 3, 2006-7-23 (in Chinese))
- [7] 罗立峰, 周建春, 黄培彦. 聚合物钢纤维混凝土的增强机理分析 [J]. *复合材料学报*, 2002, 19 (3): 46—50 (LUO Lifeng, ZHOU Jianchun, HUANG Peiyan. Reinforced Mechanism with the Polymer Latex Added in the Steel Fibre Reinforced Concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19 (3): 46—50 (in Chinese))
- [8] 刘逸平, 黄小清, 汤立群, 罗立峰. 新型混凝土桥面铺装材料的冲击力学性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27 (3): 217—222 (LIU Yiping, HUANG Xiaoqing, TANG Liqun, LUO Lifeng. Experimental study on impact behaviors of a new kind of pavement material for concrete bridge deck [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27 (3): 217—222 (in Chinese))
- [9] 乔渊, 李运北, 李春亮. 可再分散聚合物乳胶粉对水泥砂浆微结构性能作用的研究 [J]. *新型建筑材料*, 2006, (7): 4—8 (QIAO Yuan, LI Yunbei, LI Chunliang. Study on effect of re-dispersible polymer emulsion powder on microstructure of cement mortar [J]. *New Building Materials*, 2006, (7): 4—8 (in Chinese))
- [10] 许贤敏, 王晓硕. 钢筋混凝土梁修补方法的比较 [J]. *吉林建材*, 2004, (4): 44—51 (Xu Xianmin, Wang Xiaoshuo. Comparison of repairing methods for reinforced concrete beam [J]. *Jilin Building Materials*, 2004, (4): 44—51 (in Chinese))

Experimental Study of Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Polymer High Strength Concrete

ZHENG Shun-chao, HUANG Pei-yan, GUO Xin-yan

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

Abstract: Steel fiber reinforced polymer high strength concrete (SPHC), a new type of concrete bridge material, was recently developed by our research group. In order to clarify the fatigue performance of SPHC, comparative analysis method was adopted to experimentally study SPHC applied in a real bridge and the C60 concrete that has similar static mechanical properties as SPHC. Furthermore, experimental S—N curves of above mentioned two materials were obtained. Results show that comparing with C60 concrete, the fatigue performance of SPHC material has greatly enhanced. Its toughness and crack resistance increase due to the incorporation of steel fiber and polymer latex. The application of this new material will effectively improve the fatigue life of bridge structure.

Keywords: steel fiber reinforced polymer high strength concrete (SPHC); fatigue performance; C60 concrete; bridge structure