

文章编号:1673-2049(2008)02-0064-04

耐碱玻璃纤维及其混杂纤维混凝土的 弯曲疲劳特性

邓宗才

(北京工业大学 建筑工程学院,北京 100022)

摘要:研究了玻璃纤维、有机纤维及混杂纤维增强混凝土的弯曲疲劳特性。试验结果表明:耐碱玻璃纤维对疲劳性能的改善效果优于聚丙烯纤维;当玻璃纤维掺量为 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,玻璃纤维混凝土疲劳强度比素混凝土提高 24%;玻璃纤维与有机纤维混杂使用后,构件的弯曲疲劳性能有了较为显著的改善,玻璃纤维掺量 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 与有机纤维掺量 $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 混掺时,混杂纤维混凝土疲劳强度比素混凝土提高 35.0%,即混杂纤维能充分发挥各种纤维的优势,对改善混凝土的疲劳性能比单掺玻璃纤维和有机纤维的作用都显著。

关键词:玻璃纤维;有机纤维;混杂纤维;疲劳特性;纤维混凝土;粉煤灰;生态混凝土

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

Flexural Fatigue Behavior of Alkali-resistant Glass Fiber and Its Hybrid Fibers Reinforced Concrete

DENG Zong-cai

(School of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The flexural fatigue properties of glass fiber, organic fiber, and hybrid fibers reinforced concrete were studied. The test results show that alkali-resistant glass fiber can improve fatigue behavior of concrete; glass fiber has better effect on improving the fatigue behavior than polypropylene fiber. When the glass fiber concentrations are $2.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, the flexural fatigue strength of concrete with glass fiber is 24% larger than that of plain concrete; when glass fiber and organic fiber concentrations are respectively $2.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, the flexural fatigue strength of hybrid fiber reinforced concrete is 35.0% larger than that of plain concrete; ie, hybrid fiber will have advantages of all kinds of fibers, which has more effect to improve the fatigue behavior of concrete than alone used glass fiber or organic fiber to concrete.

Key words: glass fiber; organic fiber; hybrid fiber; fatigue property; fiber reinforced concrete; fly ash; ecological concrete

0 引言

目前关于聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维增强混凝土的研究较多^[1-7],但关于耐碱玻璃纤维(AFR-

HD12)增强混凝土的研究很少。耐碱玻璃纤维相对于聚丙烯纤维等存在着许多优点:①弹性模量 70 GPa,是聚丙烯纤维的 10 多倍;强度 2 000 MPa,是聚丙烯纤维的 5 倍多。②由于玻璃纤维的弹性模

收稿日期:2008-01-15

基金项目:北京市自然科学基金项目(8082002)

作者简介:邓宗才(1961-),男,陕西扶风人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengzc@bjut.edu.cn。

量、强度较高,因此不但对混凝土早期塑性抗裂有作用,还对固化了的混凝土有增强增韧作用。③玻璃纤维与混凝土界面黏结性能良好,均为无机材料。④玻璃纤维很容易分散,分散性比碳纤维等柔性纤维好,玻璃纤维混凝土的均匀性好,试验数据的离散性小。⑤玻璃纤维混凝土密度大,结构表面无纤维毛,对机场、道面的拉毛处理很有利。⑥玻璃纤维若用于桥面铺装层等薄形结构,对改善混凝土桥梁抗裂性能,阻止裂缝扩展有一定的效果。

本文中笔者研究了耐碱玻璃纤维与有机纤维混杂使用的情况,同时分别研究了耐碱玻璃纤维、有机纤维混凝土的疲劳寿命,以及二者混杂使用情况下的疲劳性能。在试验基础上建立的纤维混凝土弯曲疲劳方程,可供设计及施工参考。

1 弯曲疲劳试验

1.1 纤维材料性能及混凝土配合比

耐碱玻璃纤维的尺寸和性能见表 1。

表 1 耐碱玻璃纤维的尺寸和性能

Tab. 1 Performances and Sizes of Alkali-resistant Glass Fiber

密度/ (g·cm ⁻³)	长度/ mm	直径/ μm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
2.70	12	14	1 700	7.2

耐碱玻璃纤维由上海汇城建筑装饰有限公司提供。混凝土配合比为:水 173 kg·m⁻³,水泥 278 kg·m⁻³,1 级粉煤灰 70 kg·m⁻³,人工砂 677 kg·m⁻³,人工石子 1 190 kg·m⁻³(粒径 5~20 mm)。水泥为 P.O 32.5 硅酸盐水泥。减水剂质量为水泥质量的 0.4%。纤维质量掺量见表 2。

表 2 试件的纤维掺量

Tab. 2 Fiber's Contents of Specimens

试 件	耐碱玻璃纤维 掺量/(kg·m ⁻³)	有机纤维 掺量/(kg·m ⁻³)	型 号
素混凝土	0.0	0.0	
耐碱玻璃纤维 混凝土(GFC2.7)	2.7	0.0	ARF-HD12
有机纤维混凝土 (UFC1.3)	0.0	1.3	UF500
玻璃纤维与 有机纤维混凝土 (GFC2.7+UFC1.3)	2.7	1.3	

1.2 纤维混凝土拌和方法

耐碱玻璃纤维的搅拌方法:将基料、水泥和水一起搅拌均匀,后加纤维再搅拌 27~32 s,这样纤维分散性良好。

1.3 纤维混凝土试件

弯曲疲劳试验的试件用 150 mm×150 mm×550 mm 的模具浇注。试件浇注 24 h 后脱模,在标准养护室养护 32 d 开始疲劳试验,试验前 17 h 从养护室取出晾干。

1.4 试验方法

(1)用跨度 450 mm 的 4 点梁做弯曲疲劳试验。弯曲疲劳试验前先测得混凝土的各种配合比,取至少 3 个试件在静载破坏时的最大荷载,求得每个试件静载弯曲强度,再求得平均弯曲强度值,作为疲劳加载的依据,即

$$f_t = \frac{1}{3}(f_{t1} + f_{t2} + f_{t3}) \tag{1}$$

式中: f_t 为纤维混凝土平均弯曲强度; f_{t1} 、 f_{t2} 、 f_{t3} 为同一组 3 个试件的弯曲强度。

由于混凝土的离散性对疲劳试验结果影响大,为了准确确定混凝土的平均弯曲强度,在混凝土的拌和、试件成型、养护等方面严加控制,尽可能减少混凝土弯曲强度的离散性,测得用于疲劳试验的试件的真实弯曲强度,以此作为疲劳加载的依据。

(2)将疲劳加载应力水平 s 定义为实际加载应力与静载弯曲强度的比值,即

$$s = \sigma_w / f_t \tag{2}$$

式中: σ_w 为按照实际疲劳加载荷载计算得到的弯曲应力。

(3)疲劳试验加载最小荷载 P_{\min} 为最大荷载 P_{\max} 的 10%,疲劳循环特征值为

$$\rho = P_{\min} / P_{\max} \tag{3}$$

本次试验取疲劳循环特征值 $\rho=0.1$ 。

(4)疲劳试验过程:先对梁预加 100 N 的荷载,反复几次,以消除因接触不良造成的误差。待机器及仪表运转正常后,开始疲劳试验。正弦波加载,频率为 5~10 Hz。

(5)试验数据统计与分析:疲劳试验结果的离散性较大,应按照数理统计的方法处理试验结果。对于离散性特别大的说明原因,在疲劳方程回归中不予采用。

2 试验结果及讨论

2.1 弯曲疲劳寿命

素混凝土及纤维混凝土弯曲疲劳次数见表 3。

2.2 静载弯曲强度

素混凝土抗弯强度为 3.60 MPa。玻璃纤维掺量为 2.7 kg·m⁻³ 时,纤维混凝土弯曲强度为

表 3 弯曲疲劳试验结果

Tab. 3 Results of Flexure Fatigue Test

试 件	平均最大 静载/kN	弯曲强度/ MPa	应力幅值	疲劳次数/ 10 ⁴
素混凝土	27.1	3.60	0.540	188.700
			0.550	180.100
			0.550	174.000
			0.600	64.700
			0.670	16.500
			0.700	8.100
			0.750	1.730
			0.800	1.400
			0.850	0.194
			0.875	0.172
			0.900	0.080
			0.900	0.100
耐碱玻璃 纤维混凝土 (GFC2.7)	29.0	3.86	0.600	200.000
			0.600	200.000
			0.620	200.000
			0.625	189.000
			0.670	142.000
			0.700	41.200
			0.710	21.040
			0.750	32.800
			0.800	2.400
			0.850	0.354
有机纤维混凝土 (UFC1.3)	28.4	3.76	0.550	189.000
			0.600	95.000
			0.670	28.400
			0.700	11.500
			0.800	2.210
			0.850	0.270
			0.875	0.200
			0.900	0.070
玻璃纤维与有机 纤维增强混凝土 (GFC2.7+UFC1.3)	30.1	4.00	0.600	200.000
			0.600	200.000
			0.630	200.000
			0.650	200.000
			0.670	154.000
			0.700	43.210
			0.710	25.400
			0.750	39.100
			0.800	2.600
			0.850	0.361
			0.875	0.330
			0.900	0.103

3.86 MPa。玻璃纤维混凝土弯曲强度比素混凝土

提高 7%。

有机纤维掺量为 1.3 kg·m⁻³时,纤维混凝土弯曲强度为 3.76 MPa。有机纤维掺量 1.3 kg·m⁻³与玻璃纤维掺量 2.7 kg·m⁻³混掺时,纤维混凝土弯曲强度为 4.00 MPa,比素混凝土提高 11%。

2.3 弯曲疲劳强度

疲劳强度是指梁能够承受 200×10⁴ 次疲劳荷载作用而未发生破坏的最大疲劳应力值。要获得疲劳强度需做较多的试验,应力水平由低向高逐步提高,从而获得疲劳强度。

由表 3 可以看出:素混凝土疲劳 200×10⁴ 次时的疲劳应力幅最大值为 0.535~0.540。耐碱玻璃纤维掺量为 2.7 kg·m⁻³时,纤维混凝土疲劳 200×10⁴ 次的疲劳应力幅最大值为 0.620。玻璃纤维掺量 2.7 kg·m⁻³与有机纤维掺量 1.3 kg·m⁻³混掺时,纤维混凝土疲劳 200×10⁴ 次时的疲劳应力幅约为 0.650。

混凝土中掺入耐碱玻璃纤维后,可改善其疲劳性能。素混凝土能够疲劳 200×10⁴ 次以上的最大弯曲应力约为 1.92 MPa;耐碱玻璃纤维掺量为 2.7 kg·m⁻³时,纤维混凝土能够疲劳 200×10⁴ 次以上的最大弯曲应力为 2.39 MPa。耐碱玻璃纤维混凝土的弯曲疲劳强度比素混凝土提高约 24%。

玻璃纤维掺量 2.7 kg·m⁻³与有机纤维掺量 1.3 kg·m⁻³混掺时,纤维混凝土疲劳强度为 2.60 MPa,比素混凝土提高 35.0%。由此可见,当耐碱玻璃纤维与有机纤维混杂使用时,提高了玻璃纤维混凝土的疲劳强度。

文献[8]的研究表明:当混凝土中掺入体积分数为 0.067%~0.100%的聚丙烯纤维时,其弯曲疲劳强度比素混凝土提高 1%~5%。耐碱玻璃纤维混凝土的弯曲疲劳强度比聚丙烯纤维混凝土稍高。耐碱玻璃纤维与有机纤维混杂使用时,对改善混凝土疲劳性能效果更好。

2.4 弯曲疲劳方程

为了便于与其他研究成果进行比较和工程应用,将纤维混凝土疲劳方程汇总,见表 4。由表 4 中的相关系数 R² 可以看出,所建立的弯曲疲劳方程与试验值相关性良好。

3 结 语

(1)耐碱玻璃纤维可以均匀地分散在混凝土中,玻璃纤维加入后搅拌时间不宜过长。耐碱玻璃纤维混凝土和易性及施工性良好。

表 4 纤维混凝土弯曲疲劳方程

Tab. 4 Flexural Fatigue Equations for Fiber Reinforced Concrete

试 件	疲劳方程
素混凝土梁	$\lg N=12.46-9.443s(R^2=0.994)$
耐碱玻璃纤维混凝土 (GFC2.7)	$\lg N=14.67-11.71s(R^2=0.950)$
有机纤维混凝土 (UFC1.3)	$\lg N=13-9.96s(R^2=0.952)$
混杂纤维混凝土 (GFC2.7+UFC1.3)	$\lg N=14.99-12.063s(R^2=0.950)$

注:N 为疲劳次数。

(2)当耐碱玻璃纤维掺量为 $2.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,耐碱玻璃纤维混凝土的弯曲疲劳强度比素混凝土提高约 24%。

(3)当耐碱玻璃纤维与有机纤维混杂使用时,对提高纤维混凝土疲劳强度效果更加明显。玻璃纤维掺量 $2.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 与有机纤维掺量 $1.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 混掺时,混杂纤维混凝土疲劳强度比素混凝土提高 35.0%,即较高弹性模量的玻璃纤维与中等模量有机纤维混杂使用,将充分发挥各种纤维的优势,显著提高混凝土的疲劳寿命。

参考文献:

References:

[1] 赵国藩,彭少民,黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

ZHAO Guo-fan, PENG Shao-min, HUANG Cheng-kui. Structures of Steel Fiber Reinforced Concrete[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,1999.

[2] 邓宗才,何唯平,张国庆. 聚丙烯腈纤维对混凝土早期抗裂性能的影响[J]. 公路,2003(7):163-165.

DENG Zong-cai, HE Wei-ping, ZHANG Guo-qing. Effects of Polyacrylonitrile Fiber on Early Cracking Properties of Concrete[J]. Highway,2003(7):163-165.

[3] 邓宗才,王璋水,张国庆,等. 改性腈纶纤维混凝土梁的弯曲疲劳特性[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(11):1550-1553.

DENG Zong-cai, WANG Zhang-shui, ZHANG Guo-qing, et al. Flexural Fatigue Behavior of Polyacrylonitrile Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2003,43(11):1550-1553.

[4] 张全林. 层布式钢纤维路面混凝土弯曲疲劳性能试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2002.

ZHANG Quan-lin. Experimentation on the Flexural Fatigue Behavior of Layer Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2002.

[5] NEMKUMAR B, CHENG Y. Shrinkage Cracking in Polyolefin Fiber-reinforced Concrete[J]. ACI Materials Journal,2000,97(4):432-437.

[6] NAGABHNSHANAM M. Fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete [C]//TRB. Transportation Research Record 1226. Washington DC:TRB,1989:36-47.

[7] JOHNSON C D. Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete for Repair and Restoration of Highway Bridges in Alberta [C]//TRB. Transportation Research Record 1226. Washington DC:TRB,1989:6-7.

[8] NUNNA P, RAMAKRISHNAN V. Performance Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concretes [C]//TRB. Proceeding of the 72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB,1993:10-14.

《建筑科学与工程学报》被美国《化学文摘》、《剑桥科学文摘》等国际权威检索系统收录

由于《建筑科学与工程学报》的学术质量及国际影响力大幅度提高,已被美国《化学文摘》、《剑桥科学文摘》以及波兰《哥白尼索引》收录。美国《化学文摘》(Chemical Abstracts,CA)创刊于 1907 年,由美国化学文摘服务社(CAS)编辑出版,是涉及学科领域最广、收集文献类型最全、提供检索途径最多、部卷也最为庞大的一部著名的世界性检索工具。美国《剑桥科学文摘》(Cambridge Scientific Abstracts,CSA)是基于网络服务的文献信息检索系统,包括 60 多个数据库,覆盖的学科范围包括:生命科学、水科学与海洋学、环境科学、计算机科学、材料科学以及社会科学,检索结果为文献的题录文摘信息。