

钢纤维混凝土力学性能试验研究

杨 勇,任青文

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为有效利用钢纤维混凝土,对钢纤维混凝土的抗压强度、抗弯强度、弹性模量和断裂能等进行了试验研究.结果表明:钢纤维混凝土立方体的抗压强度、抗弯强度随着钢纤维掺量的增加而增大;在钢纤维掺量不变的情况下,钢纤维混凝土的抗压弹性模量会随着龄期的增加而提高,钢纤维对混凝土的阻裂作用很明显,而对混凝土起裂的限制作用不明显;在混凝土初凝之前,无论是普通混凝土还是钢纤维混凝土,内部温度的变化规律与外界温度的变化规律不同,并且此阶段混凝土内部应变的变幅很大,普通混凝土应变的变幅要比钢纤维混凝土应变的变幅大得多;在混凝土初凝之后,无论是普通混凝土还是钢纤维混凝土,内部温度的变化规律与外界温度的变化规律相同,并且此阶段混凝土内部应变的变幅很小.

关键词:混凝土;钢纤维;力学性能;温度;应变

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2006)01-0092-03

由于混凝土本身抗拉强度低,混凝土结构在受拉区会出现裂缝.这些裂缝会加速混凝土的碳化,而且混凝土结构的承载力和使用寿命会随着裂缝的扩展而下降.与普通混凝土相比,钢纤维混凝土具有抗拉、抗弯、抗剪强度高的优点,并会显著改善混凝土抗裂性能、韧性、抗冲击性能及耐久性等^[1-7].因此,有关设计单位建议在南水北调一些关键工程的抽水站流道中采用钢纤维混凝土,以提高工程的整体质量.为了保证施工的安全和质量以及钢纤维混凝土的有效利用,笔者对钢纤维混凝土的力学性能进行了试验研究.本文主要介绍和分析试验研究结果.

1 试验概况

试验中所采用的钢纤维为上海贝卡尔特-二钢有限公司生产的型号为 RC—80/60—BN 的钢丝切断型钢纤维,水泥为南京宁峰水泥厂生产的普通 32.5 级水泥,骨料最大粒径为 20 mm,混凝土的配比为水泥 423 kg/m³,黄沙 605 kg/m³,碎石 1 176 kg/m³,水 224 kg/m³,水灰比为 0.53.

立方体抗压强度计算公式为
$$f_{cc} = P/A \quad (1)$$

式中: f_{cc} ——抗压强度; P ——破坏荷载; A ——试件承压面积.

立方体抗弯强度计算公式为
$$f_l = Pl/(bh^2) \quad (2)$$

式中: f_l ——抗弯强度; l ——支座间距(即跨度), $l = 3h$; b ——试件截面宽度; h ——试件截面高度.

静力抗压弹性模量计算公式为
$$E_c = \frac{P_2 - P_1}{A} \frac{L}{\Delta L} \quad (3)$$

式中: E_c ——静力抗压弹性模量; P_2 ——40% 的极限破坏荷载; P_1 ——应力为 0.5 MPa 时的荷载; ΔL ——应力从 0.5 MPa 增加到 40% 破坏应力时的试件变形值; L ——测量变形的标距.

断裂能计算公式为^[8]
$$G_F = \frac{1}{b(h - a_0)} \int_0^{\delta_{\max}} p d\delta \quad (4)$$

式中: G_F ——断裂能; p ——荷载; a_0 ——裂缝深度; δ ——试件中线位移; $\delta_{\max}$ ——试件中线最大位移.

由式(4)还可导出断裂能随试件中线位移变化的断裂能曲线计算公式

$$G_{Fv} = \frac{1}{b(h - a_0)} \int_0^{\delta} p d\delta \quad (5)$$

2 试验结果及分析

2.1 立方体抗压强度试验

试件有不掺钢纤维和钢纤维掺量分别为 15 kg/m^3 、 30 kg/m^3 、 50 kg/m^3 4 种,试件尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,龄期为 28 d.从试验结果可知 4 种试件的混凝土轴心抗压强度分别为 24.1 MPa、28.3 MPa、29.7 MPa、30.2 MPa.由此可见,提高钢纤维的掺量,可有效地提高混凝土的抗压强度.

2.2 抗弯强度试验

试件有不掺钢纤维和钢纤维掺量分别为 15 kg/m^3 、 30 kg/m^3 、 50 kg/m^3 4 种,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,龄期为 28 d.从试验结果可知 4 种试件的混凝土抗弯强度分别为 3.32 MPa、3.40 MPa、4.07 MPa、6.21 MPa.由此可见,提高钢纤维的掺量,可有效地提高混凝土的抗弯强度.

2.3 静力抗压弹性模量试验

试件中的钢纤维掺量为 30 kg/m^3 ,试件尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,龄期分别为 3 d、7 d、14 d、21 d、28 d.用电阻应变仪测量变形,电阻应变片的标距为 100 mm.应变采集系统采用 DH3816 多通道静态电阻应变仪,数据采集由计算机自动完成.从试验结果可知,当钢纤维掺量为 30 kg/m^3 时,对应于 3 d、7 d、14 d、21 d、28 d 龄期的抗压弹性模量分别为 15.4 GPa、18.1 GPa、20.8 GPa、24.5 GPa、24.7 GPa.由此可见,在钢纤维掺量不变的情况下,钢纤维混凝土的抗压弹性模量会随着龄期的增加而提高.

2.4 断裂能测试试验

试件有不掺钢纤维和钢纤维掺量分别为 15 kg/m^3 、 30 kg/m^3 、 50 kg/m^3 4 种,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,支距为 300 mm,预制裂缝深度为 40 mm,龄期为 28 d.从试验结果可知 4 种试件的断裂能分别为 195.6 Pa·m、3 481.2 Pa·m、4 688.4 Pa·m、10 197.7 Pa·m.这说明,在混凝土中增加钢纤维的掺量,会显著提高混凝土的断裂能.这说明钢纤维混凝土有非常明显的阻裂作用.

图 1 比较了无钢纤维混凝土及钢纤维掺量为 15 kg/m^3 时混凝土断裂能随位移的变化情况.从图 1 可以看出:试件变形位移较小时,混凝土中掺加钢纤维并不能增加断裂能的数值;只有当试件变形位移较大时,混凝土中掺加钢纤维才能有效地增加断裂能的数值.这也说明钢纤维对混凝土的起裂限制作用不明显.

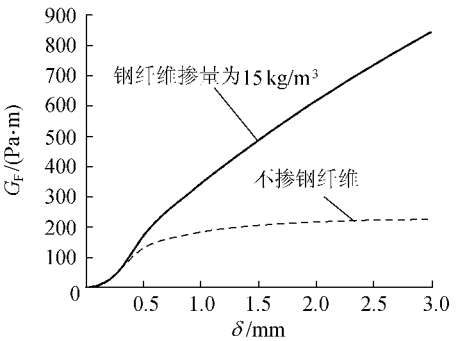


图 1 断裂能与位移的关系曲线
Fig.1 Fracture energy curve

2.5 小结构模型试验

小结构模型试验采用了 2 种相同的超静定平板结构,一种为普通混凝土结构,另一种为钢纤维掺量为 30 kg/m^3 的结构.配比与以上试件相同.

测试传感器均采用振弦式传感器.其中应变计为 EBJ30—C 型,温度传感器为 WR—II 型.模型尺寸及传感器布置如图 2 所示.环境温度测点布置在模型纵向对称线的下部.

由试验结果知:在混凝土浇筑完成至初凝之前,无论是普通混凝土还是钢纤维混凝土,由于混凝土内部的物理和化学反应,混凝土内部的温度变化表现出与外界环境温度不同的变化规律.当环境温度降低时,混凝土内部的温度反而上升.如在浇筑完成之后的第 1 天,当环境温度由 4.0°C 变化到 6.5°C 时,普通混凝土内部 3 个测点温度变化的范围分别为 $8.6 \sim 10.5^{\circ}\text{C}$ 、 $7.1 \sim 10.2^{\circ}\text{C}$ 、 $7.3 \sim 10.7^{\circ}\text{C}$,钢纤维混凝土内部 3 个测点温度变化的范围分别为 $7.6 \sim 10.7^{\circ}\text{C}$ 、 $7.8 \sim 12.1^{\circ}\text{C}$ 、 $7.4 \sim 11.7^{\circ}\text{C}$.而此阶段混凝土内部应变的变幅很大,并且普通混凝土应变的变幅比钢纤维混凝土应变的变幅大得多.如普通混凝土内部 3 个测点应变的变化范围分别为 $0 \sim 23 \times 10^{-6}$ 、 $0 \sim 63 \times 10^{-6}$ 、 $-1 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6}$,钢纤维混凝土内部 3 个测点应变的变化范围分别为 $0 \sim 19 \times 10^{-6}$ 、 $-13 \times 10^{-6} \sim 0$ 、 $0 \sim 30 \times 10^{-6}$.在混凝土初凝之后,无论是普通混凝土还是钢纤维混凝土,内部的温度表现出与外界环境温度相同的变化规律.如在浇筑完成之后的第 11 天,当环境温

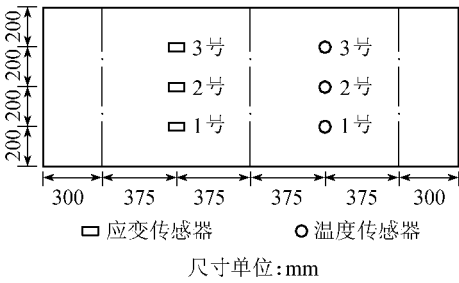


图 2 模型尺寸及传感器布置
Fig.2 Structural model and sensor arrangement

度由 2.2°C 变化到 4.9°C 时,普通混凝土内部 3 个测点温度的变化范围分别为 $2.5 \sim 3.6^{\circ}\text{C}$ 、 $3.3 \sim 4.1^{\circ}\text{C}$ 、 $2.8 \sim 4.4^{\circ}\text{C}$,钢纤维混凝土内部 3 个测点温度的变化范围分别为 $2.5 \sim 3.8^{\circ}\text{C}$ 、 $2.8 \sim 3.7^{\circ}\text{C}$ 、 $3.2 \sim 4.2^{\circ}\text{C}$ 。而此阶段混凝土内部应变的变幅都很小,并且普通混凝土应变的变幅与钢纤维混凝土应变的变幅一致。如普通混凝土内部 3 个测点应变的变化范围分别为 $71 \times 10^{-6} \sim 74 \times 10^{-6}$ 、 $114 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$ 、 $73 \times 10^{-6} \sim 77 \times 10^{-6}$,钢纤维混凝土内部 3 个测点应变的变化范围分别为 $68 \times 10^{-6} \sim 72 \times 10^{-6}$ 、 $50 \times 10^{-6} \sim 53 \times 10^{-6}$ 、 $74 \times 10^{-6} \sim 78 \times 10^{-6}$ 。

3 结 论

- a. 钢纤维混凝土立方体抗压强度、抗弯强度随着钢纤维掺量的增加而增大。
- b. 在钢纤维掺量不变的情况下,钢纤维混凝土的抗压弹性模量随着龄期的增加而提高。
- c. 在混凝土中增加钢纤维的掺量,会显著地提高混凝土的断裂能。这说明钢纤维混凝土有非常明显的阻裂作用。但从混凝土断裂能随位移的变化曲线可以看出:当试件变形位移较小时,在混凝土中掺加钢纤维并不能增加断裂能的数值;只有当试件变形位移较大时,在混凝土中掺加钢纤维才能有效地增加断裂能的数值。这也说明钢纤维对混凝土起裂的限制作用不明显。
- d. 在混凝土初凝之前,无论是普通混凝土还是钢纤维混凝土,内部温度都表现出与外界环境温度不同的变化规律,并且混凝土内部应变的变幅很大,普通混凝土应变的变幅比钢纤维混凝土应变的变幅大得多;在混凝土初凝之后,无论是普通混凝土还是钢纤维混凝土,内部的温度都表现出与外界环境温度相同的变化规律,并且此阶段混凝土内部应变的变幅都很小。

参考文献:

- [1] 高丹盈,刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994:51-155.
- [2] 赵挺生,方东平,顾祥林. 施工期现浇混凝土结构的受力特性[J]. 工程力学,2004,21(2):62-68.
- [3] LIU X L, CHEN W F, BROWMAN M D. Construction load analysis for concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(5):1019-1036.
- [4] LEE H M, LIU X L, CHEN W F. Creep analysis of concrete buildings during construction[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(10):3135-3148.
- [5] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报,2001,34(3):41-46.
- [6] 张建仁,王海臣,杨伟军. 混凝土早期抗压强度和弹性模量的试验研究[J]. 中外公路,2003,23(3):89-92.
- [7] 程秀菊,朱为玄. 钢纤维混凝土 K_{IC} 计算公式初探[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):452-454.
- [8] 程庆国,高路彬. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1999:109-133.

Experimental study on mechanical performance of steel fibre reinforced concrete

YANG Yong, REN Qing-wen

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :An experimental study was performed on the compressive strength, flexural strength, elastic modulus, and fracture energy of steel fibre reinforced concrete from an angle of effective utilization of this kind of concrete. Some conclusions are drawn: the compressive strength and flexural strength of cubic specimens of steel fibre reinforced concrete increase with the dosage of steel fibre; without change of dosage of steel fibre, the elastic modulus of steel fibre reinforced concrete increases with the concrete age; steel fibre reinforced concrete is of obvious function in cracking resistance, but there is no obvious function in avoidance of cracking; for both common concrete and steel fibre reinforced concrete, the variation of the internal temperature is different from that of the external temperature before the initial set of concrete, and the internal strain of both two kinds of concrete is great, and, in general, the variation of strain of common concrete is much greater than that of the steel fibre reinforced concrete; after the initial set of concrete, the variation of the internal temperature of both two kinds of concrete is similar to that of the external temperature, and the variation of the internal strain is relatively small.

Key words :concrete; steel fibre; mechanical performance; temperature; strain