

钢纤维混凝土结构温度应力特性

杨 勇 梅明荣 王山山 关战伟 任青文

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 通过早期水化热及外界温度影响下的钢纤维混凝土模型试验, 得出钢纤维混凝土比普通混凝土具有更好的热传导性, 可以减小钢纤维混凝土内部的温度梯度, 进而降低表面应力的结论。在试验的基础上进一步通过有限元数值模拟, 计算钢纤维混凝土在不同热导率下的温度及温度应力, 给出了钢纤维混凝土热导率与温度梯度和温度应力之变化关系。数值计算结果表明, 钢纤维混凝土热导率变大, 结构内部温差变小, 温度应力减小, 验证了模型试验所得的结论, 表明了钢纤维混凝土的实际抗裂作用。

关键词 钢纤维混凝土 热导率 温度应力 有限元法

中图分类号: TV339

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2007)01-0021-03

Study on thermal stress properties of steel-fiber concrete//YANG Yong, MEI Ming-rong, WANG Shan-shan, GUAN Zhan-wei, REN Qing-wen(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Model tests on the thermal stress properties of steel-fiber concrete under influences of hydration heat at the early stage and external temperature were performed. It is concluded that the steel-fiber concrete is of high thermal conductivity as compared with ordinary concrete, which is helpful for steel-fiber concrete to reduce its internal temperature gradient, and further to decrease the thermal stress in the surface. By use of FEM model, the temperature and thermal stress of steel-fiber concrete with different thermal conductivity were calculated, and the relationships between thermal conductivity, temperature gradient, and thermal stress were obtained. The calculated results show that, the higher the thermal conductivity, the smaller the difference between internal temperatures and the smaller the thermal stress. The numerical result accords with that of the model test, and the research demonstrates the anti-cracking function of steel-fiber concrete.

Key words: steel-fiber concrete; thermal conductivity; thermal stress; FEM

关于钢纤维混凝土(SFRC)的力学及其抗裂性能国内外学者已做了大量的研究^[1],得到了许多有价值的研究成果,为SFRC在结构工程中的推广使用起到了很好的作用。但这些成果对SFRC的热性能研究则很少涉及。事实上,钢纤维在混凝土中呈乱向分布,不仅增强了钢纤维与混凝土基体界面间的黏结力、改善了混凝土的韧性,同时还增加了SFRC的热传导性能。笔者通过钢纤维混凝土以及普通混凝土(OPC)两个墩墙结构的模型试验后发现,SFRC的导温性能好于OPC,在SFRC结构内不会形成过大的温度梯度,这有助于降低温度应力,特别是结构的表面应力;模型试验的应变测试结果也证实了SFRC的温度应变小于OPC,这样可在一定程度上减小由于温度应力引起的开裂尤其是表面裂缝。这个结论是显而易见的却往往容易被忽略。文

献2-3对SFRC路面板结构的温度应力进行了分析,但并未对SFRC本身的温度及温度应力特性进行深入的探究。笔者在前期试验研究的基础上,采用有限元数值方法,以一个由SFRC和OPC两种材料组合的混凝土平板为例,讨论钢纤维混凝土在水泥水化热作用下早期温度及温度应力,研究SFRC在各种不同热导率下所表现出的温度应力特性,从而给出SFRC热导率与温度梯度和温度应力的变化关系,进一步验证了SFRC的热传导性能在混凝土结构表面抗裂中的作用。

1 试验成果简介

1.1 材料配比试验模型

水泥为普通C30水泥,骨料最大粒径20mm。混凝土的配比为水泥423 kg/m³,黄沙605 kg/m³,碎

石 1176 kg/m³ 水 224 kg/m³。水灰比为 0.53。钢纤维采用钢丝切断型,型号为 RC-80/60-BN,掺量为 30 kg/m³。

图 1 为两个混凝土墩墙试验模型示意图(一为 SFRC,另一为 OPC)。传感器均采用振弦式传感器。应变计为 EBJ30-C 型,温度传感器为 WR-II 型。应变计测量沿板长方向的变形。试验步骤如下:在一个老混凝土基础上,一次浇筑完成 1500 mm × 150 mm × 800 mm(长 × 宽 × 高)的墩墙。所埋设的温度和应变传感器 2 h 后测读第一个读数,以后由仪器控制每隔 2 h 自动进行量测。整个测试过程持续 30 d,在第 3 天拆去模板。在测试墩墙结构内的物理量的同时,记录当时的环境温度。

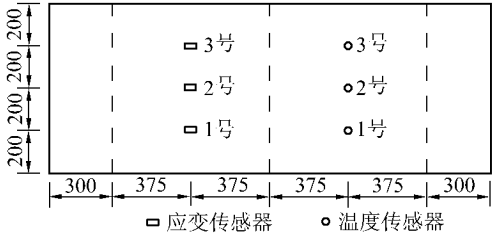


图 1 试验模型尺寸及传感器布置示意图(单位:mm)

1.2 试验成果

图 2 为 2 号测点温度传感器测得的温度变化过程线。从图中可以发现,测点温度不论是上升到最高点,还是下降到最低点,SFRC 的值都大于 OPC 的值,说明 SFRC 的传热效果比 OPC 好。因为钢纤维钢材是一种良导体,掺入混凝土中有助于提高导热性。另一方面,根据传热学原理,对于像混凝土这样的多孔介质材料,其热导率与密度、湿度和温度有关,密度增加时,孔隙减小,热导率将增大。掺了钢纤维的混凝土正是这种情形。在本试验中 SFRC 的密度仅比 OPC 的增加 1.2%,但最大温升值却增加 13%。

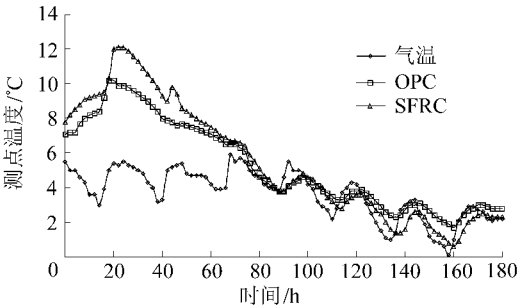


图 2 2 号测点第 0~180 h 温度过程线

表 1 列出了各测点最高温度、最低温度及对应的时间,从中可以看出,在降温达到最低值时(第 7 天左右),OPC 结构的温度梯度大于 SFRC,其中 OPC 相邻两点最大温差为 1.5℃,而 SFRC 则为 0.4℃。一般认为,混凝土温度应力与约束、温度梯度等因素

有关^[4]。上述 SFRC 和 OPC 墩墙结构所处的约束条件、温度边界条件是相同的,而温差相差却很大,因此可以肯定,OPC 墩墙结构内的应力较大。应变试验成果也证实了这一点。图 3 为 3 个应变传感器给出的应变随时间的变化过程。SFRC 与 OPC 的差别十分明显(SFRC 各测点的应变都在 OPC 对应各测点之下方),其中中点 2 号点差别最大,OPC 在第 7 天左右的最大应变为 130×10^{-6} ,到第 30 天的应变为 80×10^{-6} ,而 SFRC 在第 7 天左右的最大应变仅为 64×10^{-6} ,到第 30 天的应变为 10×10^{-6} 。从应变最大值来看,SFRC 比 OPC 对应值小了近一半。1 号点由于接近下面的基础约束,其变形最小,而 3 号点接近自由表面,但变形也不大。

表 1 各测点最高温度、最低温度及对应的时间

材料名称	测点	最高温度		最低温度	
		$T_{max}/^{\circ}C$	t/h	$T_{min}/^{\circ}C$	t/h
SFRC	3 号点	11.7	22	1.0	160
	2 号点	12.1	22	0.6	160
	1 号点	10.8	20	0.3	160
OPC	3 号点	10.7	22	0.6	160
	2 号点	10.2	18	1.7	160
	1 号点	10.5	18	0.2	160

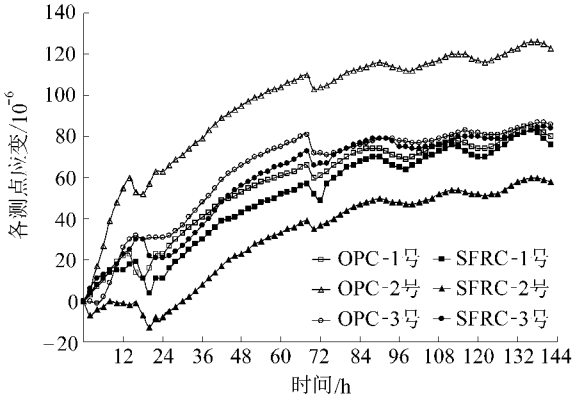


图 3 墩墙各测点前 0~144 h 实测应变过程线

试验结果表明,SFRC 的导温性能要好于 OPC,其中所掺的乱向钢纤维成分改善了混凝土的导温性能,从而不会形成过大的温度梯度,有助于降低温度应力。

2 数值计算分析

2.1 计算模型

为了验证模型试验所得结论的正确性,采用现行的混凝土温度应力理论研究 SFRC 的热导率与应力的关系。以一个 2 m × 2 m、上下分别为 SFRC 和 OPC 组合的混凝土平板,其中下层 OPC 厚 0.4 m,上层 SFRC 厚 0.2 m,模拟该平板在施工后 30 d 内温度与温度应力的变化规律,考察其表面应力是否随 SFRC 的导温性能增大而变小。设混凝土平板的水化热绝热温升为 40℃。温度边界条件是:底面为绝

热边界,四周侧面及上表面为已知温度边界,取外界温度为 0°C 。力学边界条件为除底面固定外,其余为自由边界。考虑对称性,取 $1/4$ 作为计算对象(图4),其中 A,B 为平板中心的上下两点。有关混凝土温度及温度应力的理论与计算方法参见文献[4],利用有限元数值模型可以方便快捷地模拟出相关参数变化对SFRC内部温度及温度应力的影响规律。

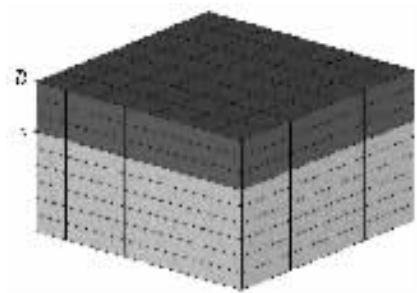


图4 计算模型示意图

2.2 热力学参数

普通混凝土材料的热性能参数可根据经验公式^[4]算出,其中热导率(导热系数) $\kappa = 2.454 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;混凝土比热容 $c = 0.986 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$;混凝土密度 $\rho = 2428 \text{ kg/m}^3$;绝热温升 $Q_c = 95760 \text{ kJ/kg}$ 。由于钢纤维材料本身在混凝土单位体积中所占的比例很小,因此按常规的经验公式计算所得的SFRC几项重要的热性能与普通混凝土相差无几。混凝土绝热温升是由水泥水化所产生的,而钢纤维并不参与水化反应,其绝热温升就是OPC的绝热温升。事实上,按上述常规的经验公式确定SFRC的热力学参数不尽合理,有文献认为:对于固体无定形材料的混合物,测量得到的热导率是表观热导率,它除了取决于不同组分的热导率和容积百分比之外,还取决于空隙间的对流和辐射换热^{[5]17-18}。在多孔保温材料或建筑材料内,热量的传递是导热、对流换热和辐射换热的综合结果^{[5]388-392}。实验证明,SFRC由于所掺钢纤维的导热性及其分布和取向,其整体导热性能比OPC有较大的提高。但是,现阶段关于SFRC的导热性能尚没有明确的结论,特别是导热性能随钢纤维掺率的关系。为此,笔者取SFRC的热导率为OPC的1,1.2,1.5,1.8,2倍,研究SFRC在各种不同热导率下所表现的温度应力特性,从而给出SFRC热导率与温度梯度和温度应力之变化关系。

2.3 计算成果

数值模拟可通过等值线图展现温度以及应力、应变在结构中的分布规律。由于不同时刻、不同热导率的计算结果较多,为节省篇幅,在此只给出综合分析结果。

图5显示了钢纤维混凝土层中心 A 点与表面 B

点温差值在各典型时刻随热导率倍数变化的关系,图例2d表示浇筑第2天混凝土平板 A 点和 B 点的温差随热导率倍数的变化,1d,...,7d等类推。可以看出,在早期混凝土水化热升温过程中,SFRC的热导率对 A,B 两点温差影响较大。例如:当SFRC的热导率与下层OPC相同时温差为 7.3°C ,而当SFRC的热导率为下层OPC的2倍时,其温差只有 4.3°C 。当水化热散尽后,上述影响就大为减弱了,图示基本没有差别。这表明,热导率变大,散热速度加快,温差就变小,反之亦然。

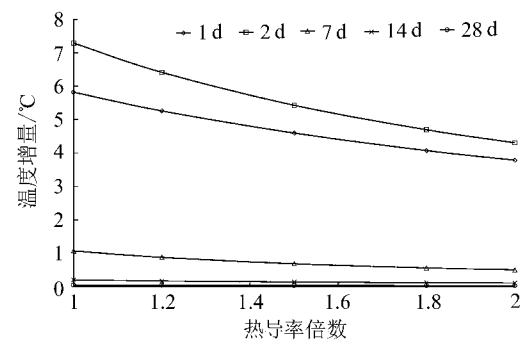


图5 SFRC温差随热导率倍数变化曲线

图6显示了钢纤维混凝土层中心 A 点与表面 B 点应力差值在各典型时刻随热导率倍数变化的关系。早期升温过程中,SFRC层内处于膨胀阶段,所得的应力为压应力,曲线处在横轴的下方,后期降温过程则变为收缩过程,应力为受拉状态。从图中发现,随着热导率增大,20cm厚SFRC层内应力差值变小,2倍热导率时的应力差值减小近 0.3 MPa 。通过对 A,B 两点应力时程线分析(图7),发现1.5倍热导率下的应力值可以下降约50%,这对于仅有60cm厚的钢纤维混凝土与普通混凝土组合板而言,应力削减幅度是可观的。由此进一步验证了SFRC热导率变大有助于降低温度应力。图7中图例Ak1.5表示 A 点1.5倍率下的应力时程线,Bk1.5表示 B 点1.5倍率下的应力时程线。内部点由压变拉,而表面点由拉变压的特征是符合混凝土水化热引起的温度应力性质的。

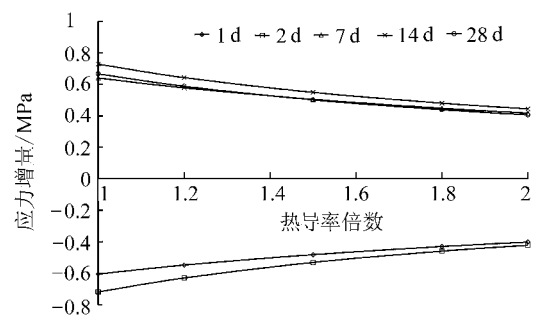


图6 SFRC应力差值随热导率倍数变化曲线

(下转第41页)

社,1994:342-345.

[18] 郭琰,倪汉根.旋流式竖井溢洪道的过流能力及蜗室与锥形渐缩段的水力特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(1):97-105.

[19] 郭琰,倪汉根.旋流式竖井溢洪道竖井的水流特性研究[J].水动力学研究与进展:A辑,1995,10(2):146-154.

[20] 牛争鸣,李建中,陈运生,等.竖井进流水平旋转内消能泄水道的空化特征[J].水利学报,1998(增刊):44-49.

[21] 牛争鸣,孙静,章晋雄.竖井进流水平旋转内消能泄水道的泄流特性研究[J].水利学报,2002(1):61-69.

[22] 牛争鸣,孙静,张鸣远.竖井进流水平旋转内消能泄水道壁面压力分布规律[J].水力发电学报,2002(4):71-80.

[23] 牛争鸣,孙静,张鸣远.竖井进流水平旋转内消能泄水道空腔直径的变化规律[J].水利学报,2003(1):31-37.

[24] 牛争鸣,孙静,程庆迎.竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布与消能率的试验研究[J].水力发电学报,2003(1):61-69.

[25] 孙静,牛争鸣,章晋雄.竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布的试验研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,18(2):240-247.

[26] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道空腔环流的能量特性[J].西安交通大学学报,2004,38(7):741-745.

[27] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道空腔环流的旋流特性[J].水力发电学报,2004(3):102-106.

[28] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转空腔环流的壁面应力[J].应用力学学报,2004,21(4):110-114.

[29] 牛争鸣,贺立强,汪振.下水水位对水平旋转内消能泄水道水力特性的影响[J].水利学报,2005,36(10):1213-1218.

[30] 周恒,陈念水.公伯峡水电站调整泄水建筑物布置和规模研究论证报告[R].西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,2001.

[31] 周恒,陈念水.黄河公伯峡水电站利用导流洞改建为旋流消能泄洪洞专题研究报告[R].西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,2002.

[32] 洪摘.“公伯峡水电站导流洞改建为竖井旋流式内消能泄洪洞”问题的研究[D].西安:西安理工大学,2003.

[33] 曹双利.旋流条件下通气孔的通气量与环流空腔内的气体压强的变化规律[D].西安:西安理工大学,2005.

[34] 安丰勇.水平旋流内消能泄洪洞的阻塞效应研究[D].西安:西安理工大学,2005.

[35] 贺立强.公伯峡水平旋流式泄洪洞试验研究与运行方式优化[D].西安:西安理工大学,2006.

[36] 牛争鸣,孙静,洪摘,等.水平旋转内消能泄洪洞内气体压强的变化规律[J].水动力学研究与进展:A辑,2006,21(4):526-532.

[37] 牛争鸣,张宗孝,洪摘,等.通气对水平旋转内消能泄洪洞水力特性的影响[J].长江科学院院报,2006,23(5):1-5.

[38] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道的流态序列、分区特性及临界条件[J].水动力学研究与进展:A辑,2005,20(1):14-18.

(收稿日期 2006-01-26 编辑 熊水斌)

(上接第 23 页)

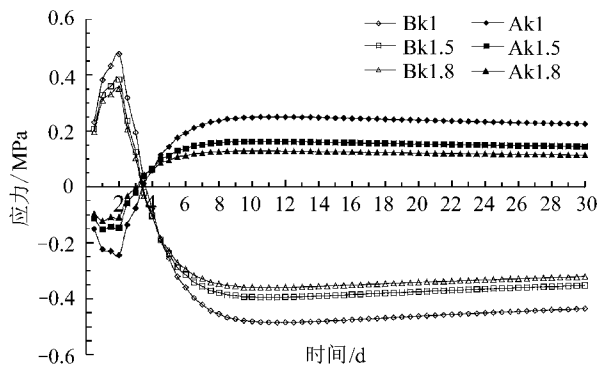


图 7 SFRC 温度应力过程线

3 结 论

通过计算分析,得出了钢纤维混凝土在早期水化热及外界温度影响下的温度及应变规律:

a. 数值计算的规律与试验所得到的规律完全一致。从应力最大值来看,SFRC 只有 OPC 的一半,SFRC 的抗变形能力要强于 OPC。

b. 从本例来看 SFRC 内的温差及其应力差与 SFRC 的导热性能接近线性反比关系。热导率变大,

温差就变小,应力随之变小。

c. 钢纤维混凝土抗裂性能的提高,既有力学方面的因素也有热力学方面的因素。应在实际应用中把握这一特性。

d. 下一步笔者准备对 SFRC 在钢纤维不同掺率下的导热性能进行试验研究,以明确热导率与钢纤维掺率的实际关系。

参考文献:

[1] 程庆国,高路彬,徐蕴贤,等.钢纤维混凝土理论及应用[M].北京:中国铁道出版社,1999:50-63.

[2] 邵宝东,程赫明,文宏光.钢纤维混凝土路面结构温度应力的有限元分析[J].河南科技,2002,20(6):688-692.

[3] 倪铁权,王雪亮,李海波.层布式钢纤维混凝土路面温度应力分析[J].国外建材科技,2005,26(1):33-35.

[4] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999:15-17.

[5] 罗棣庵.传热应用与分析[M].北京:清华大学出版社,1989.

(收稿日期 2005-09-22 编辑 马敏峰)