

文章编号:1673-2049(2014)01-0044-06

高温下高强混凝土导热系数反演及其变异性

肖建庄,李志卫

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:为研究高温下高强混凝土(HSC)的导热系数,对 6 种工况下的高强混凝土试件进行了高温试验,得到不同高温下高强混凝土的内部温度场。基于一维热传导理论和实测温度,利用差分原理推导的离散温度点表示的导热系数计算公式,反演分析了高温下高强混凝土的导热系数,并分析了高温下导热系数的变化规律及变异性;最后建立了高温下高强混凝土导热系数的计算公式。研究表明:高温下高强混凝土内部的温度变化可以分为 3 个阶段,高温下高强混凝土的导热系数随着温度的升高而逐渐降低,但是在 200 ℃~400 ℃时出现反弹现象,500 ℃后趋于稳定;利用所建立的导热系数公式计算的温度场与相关文献中试验结果吻合较好。

关键词:高强混凝土;高温;导热系数;反演;变异性;拟合曲线

中图分类号:TU111

文献标志码:A

Back-analysis and Variability of Thermal Conductivity of High-strength Concrete Under High Temperatures

XIAO Jian-zhuang, LI Zhi-wei

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the thermal conductivity of high-strength concrete (HSC) under high temperatures, the high temperature experiments for six types of HSC specimens were conducted and the internal temperature fields of HSC under different high temperatures were recorded. The calculation formulae of thermal conductivities of HSC under high temperatures were derived based on the back-analysis of one dimension heat conduction theory, measured temperatures and the equation for thermal conductivity expressed by discrete temperature values derived by difference principles. Meanwhile, the changing regularities and variability of the thermal conductivity under high temperatures were analyzed. At last, the calculation formulae for the thermal conductivity of HSC under high temperatures were established. The study results show that the internal temperature variation of HSC under high temperatures can be divided into three phases. The thermal conductivity under high temperatures of HSC will decrease with the increasing of temperature. But the thermal conductivity rebounds at 200 ℃-400 ℃ and tends to stabilize when the temperature is beyond 500 ℃. The temperature fields calculated by the proposed formulae are in good agreement with those of other test results in relative literature.

Key words: high-strength concrete; high temperature; thermal conductivity; back-analysis; variability; fitted curve

收稿日期:2014-01-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB719703)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

0 引言

由于高强混凝土(HSC)比普通混凝土具有更高的强度和更好的耐久性,近年来在土木工程中得到了大量应用^[1];同时,很多混凝土工程需要考虑防火防灾,因而 HSC 的抗火性能越来越引起人们的重视。导热系数是研究火灾中混凝土结构高温反应的基础,各国专家对导热系数进行了测定^[2-4],这些导热系数都是通过对普通混凝土的试验所得。针对 HSC 导热系数的研究较少,只有文献[5],[6]中分别通过试验和理论推导对 HSC 的导热系数进行了分析,而 2 篇文献所研究的结果存在一定的差异。

随着温度的升高,混凝土材料会发生一系列的物理和化学变化,导热系数随之改变,只有确定了高温下混凝土的导热系数才能准确计算高温对混凝土结构的影响。目前试验和理论方法都难以完全考虑实际工程中混凝土复杂的细观结构,HSC 导热系数还有待进一步的研究。本文中笔者采用试验与理论相结合的方法,首先测量高温下 2 种强度 HSC 的温度场,然后反演计算高温下 HSC 的导热系数,以期对混凝土导热系数的研究开辟一条新途径。

1 理论基础

1.1 传热学基本理论

热量传递有 3 种基本方式:热传导、热对流和热辐射。热传导遵循傅里叶定律

$$q = \lambda \text{grad } T \quad (1)$$

式中: q 为热流密度; λ 为导热系数; $\text{grad } T$ 为温度梯度。

热对流的基本计算式是牛顿冷却公式

$$q = h(T_w - T_f) \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数; T_w , T_f 分别为壁面温度和流体温度,在本文试验中分别代表混凝土表面和炉中空气的温度。

可以通过斯蒂芬-波尔兹曼方程来计算热辐射

$$\Phi = \epsilon_1 A_1 \sigma [(T_1 + 273)^4 - (T_2 + 273)^4] \quad (3)$$

式中: Φ 为热流量; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常量,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$; A_1 为辐射面 1 的面积; ϵ_1 为辐射率(黑度); T_1 , T_2 分别为辐射面 1 和辐射面 2 的温度,在本文试验中分别代表炉壁和混凝土表面的温度。

1.2 导热系数反演理论

一维瞬态热传导方程为^[7-8]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

式中: a 为导温系数, $a = \frac{\lambda}{\rho C}$, ρ 为密度, C 为比热容; θ 为绝热温升; t 为时间; T 为温度。

忽略混凝土自身的热量,则式(4)中 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ 。沿热量传播的方向布置 3 个热电偶,分别记作 $i-1$, i , $i+1$,间距为 h_{i-1} 和 h_i ,如图 1 所示。根据差分原理,用离散的温度值代替连续的温度变化并忽略截断误差,由中心差分原理可知

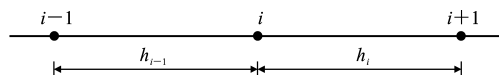


图 1 热电偶布置

Fig. 1 Arrangement of Thermocouples

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{i+\frac{h_i}{2},t} = \frac{1}{h_i} (T_{i+1,t} - T_{i,t}) \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{i-\frac{h_{i-1}}{2},t} = \frac{1}{h_{i-1}} (T_{i,t} - T_{i-1,t}) \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{i,t} = \frac{2}{h_{i-1} + h_i} \left[\frac{1}{h_i} (T_{i+1,t} - T_{i,t}) - \frac{1}{h_{i-1}} (T_{i,t} - T_{i-1,t}) \right] \quad (7)$$

用向后差分方法计算 $\frac{\partial T}{\partial t}$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,t} = \frac{1}{\Delta t} (T_{i,t} - T_{i,t-\Delta t}) \quad (8)$$

由式(4)~(8)得到利用差分原理表示的热传导计算公式为

$$\frac{1}{\Delta t} (T_{i,t} - T_{i,t-\Delta t}) = \frac{2a}{h_{i-1} + h_i} \left[\frac{1}{h_i} (T_{i+1,t} - T_{i,t}) - \frac{1}{h_{i-1}} (T_{i,t} - T_{i-1,t}) \right] \quad (9)$$

式中: $T_{i-1,t}$, $T_{i+1,t}$ 分别为距试件表面 33 mm 的热电偶 $i-1$, $i+1$ 处的温度, $T_{i-1,t} = T_{i+1,t}$; $T_{i,t}$ 为试件中心处的温度; $h_{i-1} = h_i = 42 \text{ mm}$ 。

热电偶位置确定后, h_{i-1} , h_i 为定值,只需要记录热电偶在 t , $t - \Delta t$ 时刻的温度即可根据式(9)反演计算导温系数 a ,从而求出导热系数 λ

$$\lambda = \rho Ca \quad (10)$$

2 高温试验

2.1 试验材料

本试验有 2 种强度的 HSC,用 L(低强度)和 H(高强度)表示。采用“双掺法”配制 HSC,配合比如表 1 所示。试验材料:L 系列和 H 系列分别采用 42.5R 和 52.5R 普通硅酸盐水泥;硅粉为 900 级微硅粉;矿渣微粉为 S95 级磨细高性能矿渣微粉;L 系

表 1 HSC 配合比

Tab. 1 Mix Proportions of HSC

混凝土 系列编号	各材料用量/(kg·m ⁻³)						
	水泥	硅粉	矿渣微粉	碎石	砂	水	减水剂
L	413	0	138	1 046	614	182	2.134
H	406	29	145	1 115	655	136	14.500

列和 H 系列分别采用粒径为 5~20 mm 和 5~25 mm 连续级配硅质碎石;砂为细度模数为 2.7 的中砂;水为自来水;减水剂(SL)为聚羧酸超塑化剂,含固量(质量分数)为 40%,减水率为 30%。

试件尺寸为 150 mm×400 mm×600 mm,在试件厚度方向分别距表面 5,33 mm(纵筋处)和 75 mm(中心处)预先放置热电偶,HSC 试件如图 2 所示,其中的浅槽是为了高温后的其他性能研究。在标准养护室中放置 28 d,然后在室内自然烘干 60 d 左右进行高温加热。试验时的混凝土强度分别为 64.7 MPa(L 系列)和 94 MPa(H 系列)。试件经历的最高温度用阿拉伯数字表示,如 L-200 表示强度较低的混凝土,经历最高温度为 200 ℃的试件。2 种强度的 HSC 各有 3 个预定目标最高温度(200 ℃,400 ℃,800 ℃),因此共有 6 种工况。

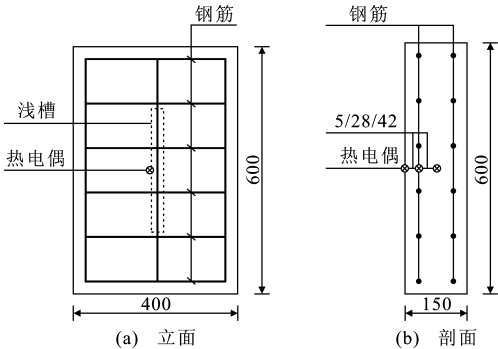


图 2 HSC 试件(单位:mm)

Fig. 2 HSC Specimen (Unit:mm)

2.2 升温制度

高温试验在同济大学抗火实验室进行,采用电炉加热方式,为防止混凝土爆裂损坏炉壁上的电阻丝,将试件装入铁笼中,如图 3 所示。升温速率为 5 ℃·min⁻¹,达到预定目标温度(200 ℃,400 ℃,800 ℃)后保持温度恒定,直到试件中心与预定目标温度的相对温差小于 10%时停止高温试验。

2.3 实测升温曲线

每种高温工况记录试件 3 个不同位置的温度,不同工况下的温度曲线如图 4 所示。由图 4 可见,6 种工况 HSC 内部的升温趋势基本相同,升温过程大致可以分为 3 个阶段:①初始阶段温度缓慢升高,



图 3 高温炉

Fig. 3 High Temperature Furnace

这是因为式(2)中 T_w 和 T_f 以及式(3)中 T_1 和 T_2 都相差不大,热对流和热辐射有限,此外,混凝土中的自由水蒸发吸收了部分热量,导致升温较慢;②在 60~240 min 之间,温度快速升高,这是因为 T_w , T_f 以及 T_1 , T_2 相差变大,热对流和热辐射增大,混凝土试件快速吸热;③大约 240 min 后,升温速率逐渐减小,而且很难达到预定目标最高温度(200 ℃,400 ℃,800 ℃)。这是因为 T_w 接近 T_f , T_1 接近 T_2 ,混凝土基本不再从外界(炉膛)吸收热量。对不同的预定目标最高温度来说,预定目标最高温度越低,混凝土吸收热量越慢,混凝土试件的温度梯度越小。

3 高温下的导热系数

3.1 高温下导热系数的反演计算

HSC 试件宽度(400 mm)和高度(600 mm)都大于 2 倍的厚度(150 mm),因此把传热过程近似看作沿厚度方向的一维热传导问题。在加热过程中试件 H-800 表面发生局部爆裂,距试件表面 5 mm 的温度可能会受到影响,而内部的混凝土完好。假设距试件表面 33 mm 的温度与对称位置(距另一侧试件表面 33 mm)的温度相同,以这 2 个相同的温度以及试件中心处的温度为离散温度点,混凝土的温度取 3 个点的平均值。采用式(9),(10)计算导热系数 λ ,其中,L 系列和 H 系列的 HSC 密度 ρ 分别取 2 400,2 500 kg·m⁻³,比热容 c_c 随温度变化^[3]

$$c_c=900+80\frac{T}{120}-4(\frac{T}{120})^2$$
$$20\text{ }^{\circ}\text{C}\leqslant T\leqslant 1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}\tag{11}$$

试验初期设备运行还不稳定,而且温度未传入试件内部,难以对导热系数做正确计算。因此,从 50 ℃开始分别采用时间间隔 $\Delta t=5,10,20\text{ min}$ 进行试件 L-800 和试件 H-800 两种工况的导热系数

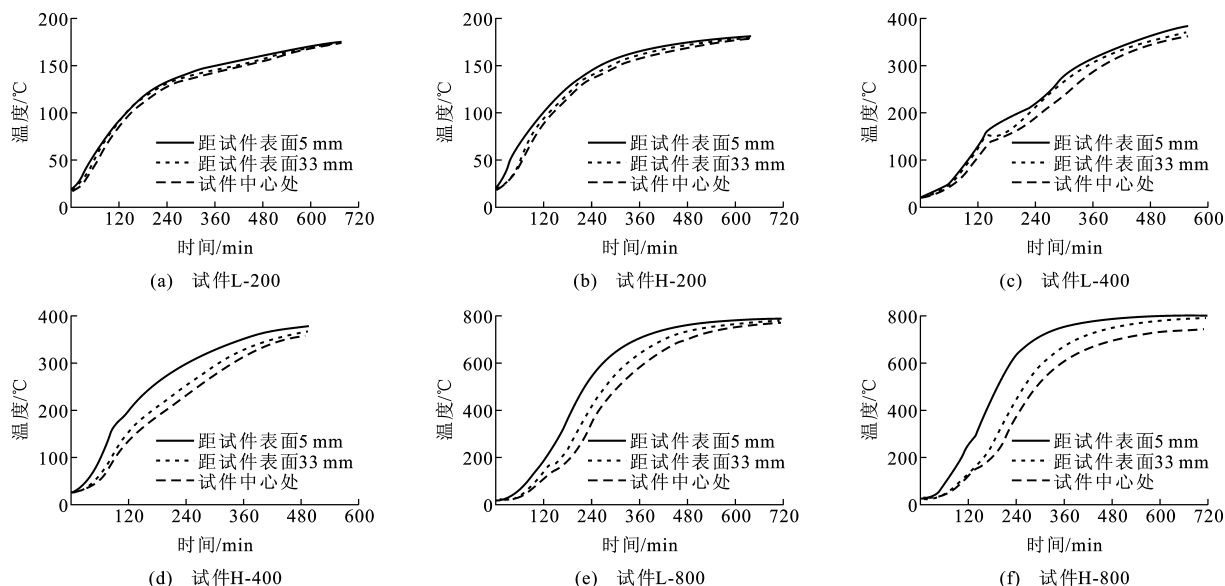


图4 不同工况下的温度曲线

Fig. 4 Temperature Curves of Different Cases

计算,计算结果如图5所示。

由图5可以看出,高温下2种HSC的导热系数均随温度的升高呈现降低的趋势,温度为200 °C~400 °C时,导热系数有少量的反弹增加,这可能是因为混凝土中的吸附水迁移使得水泥胶体硬化^[9]。另一方面,在试验过程中观察到炉顶通风口有水汽冒出,当混凝土内部温度在80 °C左右时(此时混凝土表面温度已超过100 °C)开始出现水汽,在温度为220 °C时水汽基本消失。水汽消失时的温度与混凝土导热系数反弹增加时的温度相同,此时自由水完全蒸发,不再吸收热量,更多的热量传入试件中心处,表现为混凝土的导热系数增大。

当温度 $T < 500$ °C时,H系列的导热系数略大于L系列,500 °C后,2种HSC的导热系数基本相同并趋于稳定。对L系列和H系列来说,不同时间间隔计算的导热系数基本相同,时间间隔对反演结果影响不大。本文中采用 $\Delta t = 10$ min进行HSC导热系数的反演计算。

6种不同工况下的导热系数对比如图6所示。由图6可知,不同工况的HSC计算所得到的导热系数变化趋势相同,但是与800 °C时的计算结果相比,200 °C,400 °C时计算的导热系数变化幅度更大。由此可见,外界温度的变化过程也会对高温下导热系数的计算产生影响。

3.2 导热系数的变异性分析

各国专家已经对高温下普通混凝土的导热系数进行了一定的研究,但是导热系数的统计规律(均值、标准差和变异系数)鲜有文献报道。导热系数是

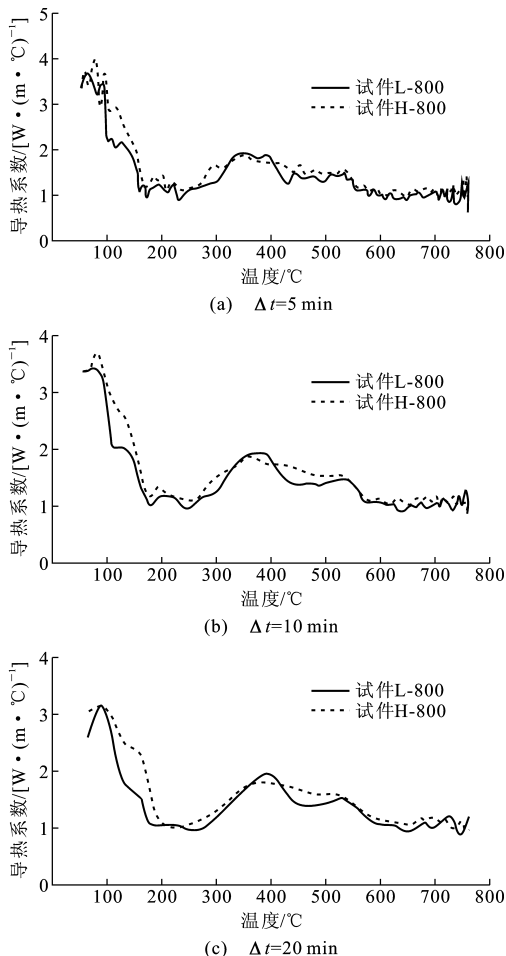


图5 不同时间间隔下的导热系数对比

Fig. 5 Comparisons of Thermal Conductivity Under Different Time Intervals

混凝土结构在火灾中可靠度分析和安全评价的基础,应该引起重视。由第3.1节中可知,混凝土的强

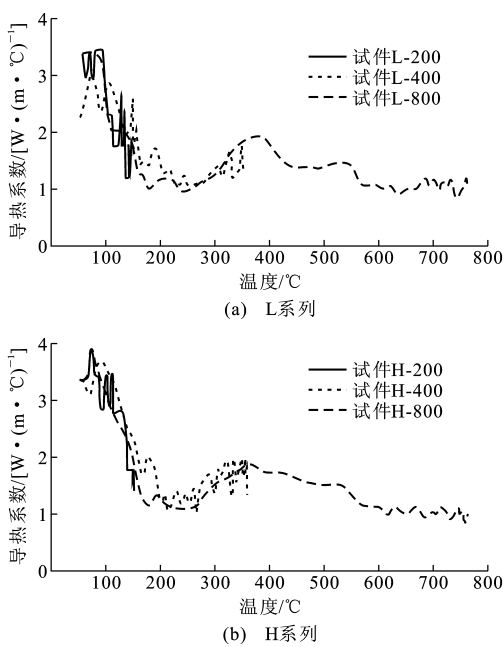


图 6 不同工况下的导热系数对比
Fig. 6 Comparisons of Thermal Conductivity Under Different Cases

度、升温过程等都会对导热系数反演分析产生不确定的影响。根据此次试验的特点,进行不同工况下导热系数的变异性分析,统计数据见表 2。导热系数的平均值在 $1\sim3\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 之间,500 $^\circ\text{C}$ 后基本保持稳定,这与文献[2]中的导热系数变化趋势类似。由标准差和变异系数的变化规律可知,20 $^\circ\text{C}\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 时,HSC 导热系数的变异性较大,随着温度的升高,导热系数的变异性有降低的趋势。

4 高温下 HSC 导热系数的拟合公式

4.1 导热系数的计算公式

由第 3.2 节中的分析可知,500 $^\circ\text{C}$ 以上时 HSC 导热系数变化不大,现假设超过 700 $^\circ\text{C}$ 后导热系数不再变化,同时亦假设 100 $^\circ\text{C}$ 以下导热系数保持恒定。根据表 2 中导热系数的平均值和上述的 2 个假设进行高温下 HSC 导热系数的拟合,拟合曲线见图 7,拟合公式为

$$\lambda_c = \begin{cases} 3.082 & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 100\text{ }^\circ\text{C} \\ -0.417 + 0.004\ 88T + \frac{30\ 109.091}{T^2} & 100\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 300\text{ }^\circ\text{C} \\ 28.15 - 0.063T + 2.7 \times 10^{-8} T^3 + 9.663 \ln(T) - \frac{364.271}{\ln(T)} & 300\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 700\text{ }^\circ\text{C} \\ 1.01 & T > 700\text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

表 2 不同工况下混凝土导热系数的统计参数
Tab. 2 Statistical Parameters for Concrete Thermal Conductivity Under Different Cases

试件编号	不同温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 下的导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$						
	100	200	300	400	500	600	700
L-200	2.748						
L-400	2.983	1.636	1.378				
L-800	2.732	1.166	1.257	1.792	1.405	1.055	1.162
H-200	3.279						
H-400	3.623	1.174	1.367				
H-800	3.126	1.273	1.526	1.741	1.521	1.117	1.051
平均值	3.082	1.312	1.382	1.767	1.463	1.086	1.107
标准差	0.340	0.221	0.110	0.036	0.082	0.044	0.078
变异系数	0.110	0.169	0.080	0.020	0.056	0.040	0.071

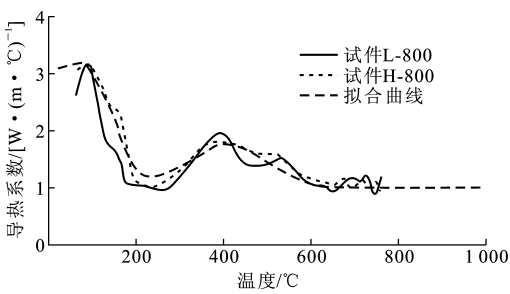


图 7 导热系数拟合曲线与反演结果对比
Fig. 7 Comparisons Between Fitted Curve and Back-analysis Results of Thermal Conductivity

4.2 算例分析

根据第 4.1 节中拟合的 HSC 导热系数计算公式,采用 ABAQUS 有限元软件对文献[10]中的火灾中 HSC 剪力墙的温度场进行分析:共有 4 榀 150 mm 厚的剪力墙,混凝土圆柱体强度为 66 MPa,按照 ISO 834-1:1991 标准升温曲线^[11]对剪力墙进行单面加热,记录受火面、中部和背火面的温度。在 ABAQUS 软件中定义的计算参数如下:混凝土单元为三维实体单元 DC3D8;受火面和背火面的对流换热系数分别为 $25,4\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ^[3];受火面综合辐射率为 0.7^[3];斯蒂芬-波尔兹曼常量为 $5.67 \times 10^{-8}\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)^{-1}$;初始温度为 20 $^\circ\text{C}$ 。

HSC 剪力墙温度场的试验结果与模拟结果的对比如表 3 所示。在试验过程中混凝土的温度存在不确定性,如 L150-66-1,IL150-66-2 两榀剪力墙在 $t=30\text{ min}$ 时的表面温度相差 72 $^\circ\text{C}$,这主要与燃气输送的不稳定性有关^[10]。对于混凝土这样的复合材料来说,材料组成、制备工艺以及试验设备等条件都会对其导热系数产生影响,要想得到准确的导热系数是很困难的。采用本文反演计算得到的导热系数计算 HSC 剪力墙温度场的结果与试验结果吻合

表 3 HSC 剪力墙温度场试验结果与模拟结果的对比

Tab.3 Comparisons Between Test Results and Simulated Results of Temperature Fields of HSC Shear Walls

剪力墙编号	不同 HSC 剪力墙位置的温度/℃					
	受火面		中部		背火面	
	30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min
IL150-66-1	789	895	52	101	14	33
L150-66-1	789	895	59	104	20	53
IL150-66-2	717	872	43	98	16	35
L150-66-2	756	897	50	102	24	48
计算值	714	877	62	126	27	61

较好,因此式(12)可以作为高温下 HSC 的导热系数计算公式。

5 结 语

(1)根据 HSC 内部升温情况,高温下 HSC 的升温过程可分为 3 个阶段:初始阶段温度缓慢升高;第 2 阶段温度快速升高;最后阶段升温速率减小,混凝土温度接近,但是很难达到环境温度。

(2)高温下 HSC 导热系数的平均值在 $1\sim 3\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ 之间。随着温度的升高而降低,500℃后基本保持稳定。但是温度 200℃~400℃时,导热系数有少量的反弹增加。

(3)随着 HSC 强度的增大,高温下 HSC 的导热系数有增大的趋势。

(4)HSC 导热系数的变异性在温度为 20℃~200℃时较大,随着温度的升高,导热系数的变异性有降低的趋势。

(5)反演得到高温下 HSC 导热系数的拟合公式(12),可以用于火灾作用下 HSC 结构的温度场分析。

参考文献:

References:

[1] XIAO J Z,KÖNIG G. Study on Concrete at High Temperature in China—An Overview[J]. Fire Safety Journal,2004,39(1):89-103.

[2] LIE T T,DENHAM E M A. Factors Affecting the Fire Resistance of Circular Hollow Steel Columns

Filled with Bar-reinforced Concrete[R]. Ottawa:National Research Council Canada,1993.

[3] EN 1992-1-2;2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design[S].

[4] 陆洲导. 钢筋混凝土梁对火灾的反应研究[D]. 上海:同济大学,1989.

LU Zhou-dao. The Responses of Reinforced Concrete Beams Under Fire[D]. Shanghai: Tongji University, 1989.

[5] KODUR V K R,SULTAN M A. Effect of Temperature on Thermal Properties of High-strength Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003,15(2):253-259.

[6] 任红梅. 高性能混凝土剪力墙火灾反应理论分析与抗火设计[D]. 上海:同济大学,2006.

REN Hong-mei. Fire Response and Fire Resistance Design of HPC Shear Walls[D]. Shanghai: Tongji University,2006.

[7] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

ZHU Bo-fang. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete[M]. Beijing: China Water and Power Press,1999.

[8] 宋志文,肖建庄,赵 勇. 基于试验测定的混凝土热工参数反演计算[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010,38(1):35-38.

SONG Zhi-wen, XIAO Jian-zhuang, ZHAO Yong. Back-analysis of Concrete Thermal Parameters Based on Experimental Measurements[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2010,38(1):35-38.

[9] CHENG F P,KODUR V K R,WANG T C. Stress-strain Curves for High Strength Concrete at Elevated Temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2004,16(1):84-90.

[10] CROZIER D A,SANJAYAN J G. Tests of Load-bearing Slender Reinforced Concrete Walls in Fire [J]. ACI Structural Journal,2000,97(2):243-251.

[11] ISO 834-1:1991, Fire-resistance Tests—Elements of Building Construction—Part 1:General Requirements [S].

