

基于实体监测的混凝土导热系数分析

邓春林¹, 范洪浩^{2,3}, 熊建波¹, 范志宏¹, 邓珠波¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室, 广东 广州 510230;
2. 衢州市港航管理局, 浙江 衢州 324000; 3. 衢州市衢江航运开发工程项目建设指挥部, 浙江 衢州 324000)

摘要: 大体积混凝土内部温度场与裂缝息息相关, 混凝土导热系数是分析温度场最重要的参数。调研了导热系数试验方法, 包括: 圆柱体法、防护热板法、热流计法, 各种方法测得的导热系数介于 0.37 ~ 3.99 W/(m·K)。根据安仁铺船闸输水廊道侧墙混凝土温度监测结果, 将混凝土构件简化为圆柱体进行导热系数计算, 得到混凝土整体的导热系数为 0.23 W/(m·K)。利用计算得到的导热系数进行有限元模拟, 计算结果与实际监测结果基本吻合。

关键词: 混凝土; 导热系数; 有限元; 防护热板法; 热流计法

中图分类号: TU 528.3 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)03-0132-04

Thermal conductivity of concrete based on in-situ monitoring

DENG Chun-lin¹, FAN Hong-hao^{2,3}, XIONG Jian-bo¹, FAN Zhi-hong¹, DENG Zhu-bo¹

(1. Key Laboratory of Harbor and Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Quzhou Port and Waterway Management Bureau, Quzhou 324000, China;
3. Qujiang Shipping Development Project Construction Headquarters of Quzhou, Quzhou 324000, China)

Abstract: The temperature distribution is closely related to the crack of large volume concrete, and the thermal conductivity of concrete is the most important parameter for the analysis of the temperature distribution. This paper investigates the test method of thermal conductivity, including the cylinder method, guarded hot plate method, and heat flow meter method, and the test results are between 0.37 ~ 3.99 W/(m·K). According to the temperature monitoring results of Anrenpu lock, we simplify the component as a cylinder for the calculation of thermal conductivity, and the calculated thermal conductivity is 0.23 W/(m·K). The calculated thermal conductivity is used for finite element simulation of temperature distribution inside the component, and the calculated results coincide well with the actual monitoring results.

Keywords: concrete; thermal conductivity; finite element; guarded hot plate method; heat flow meter apparatus

混凝土浇筑后, 由于内外温差和季节温差的作用, 结构内将产生可观的温度应力, 超过混凝土抗拉强度时将出现裂缝, 因此非常有必要研究混凝土浇筑后内部温度场。要分析混凝土结构的温度场, 就要了解混凝土材料的各热工参数: 导热系数、比热容、线膨胀系数等。

由于混凝土比热容、线膨胀系数的变异相对

较小, 导热系数是分析混凝土结构的温度场的重要参数。导热系数是指在稳定传热条件下, 1 m 厚的材料, 两侧表面的温差为 1 °C, 在 1 s 内, 通过 1 m² 面积传递的热量, 单位为 W/(m·K)。

本文调研了导热系数试验方法, 包括: 圆柱体法、防护热板法、热流计法, 分析了导热系数室内试验结果。根据安仁铺船闸输水廊道侧墙混

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 邓春林 (1982—), 男, 高级工程师, 从事混凝土裂缝控制工作。

凝土温度监测结果,按照圆柱体法进行侧墙混凝土导热系数的反演分析。利用计算得到的导热系数进行有限元模拟,对比中心点的计算温度与实际监测温度,验证了反演分析得到的导热系数的准确性。

1 导热系数测试方法

导热系数的测量方法主要包括球体法^[1]、圆柱体法、防护热板法、热流计法等。球体法目前应用较少,圆柱体法、防护热板法、热流计法均是现行规范中的试验方法。

1.1 圆柱体法

水工混凝土试验规程^[2]规定,混凝土导热系数的测试试件为 $\phi 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的圆柱体,试验前将试件加热至 $60 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后迅速移入 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的恒温冷却水域,每隔 5 min 测试一次试件中心温度和水域温度,直到试件中心温度与水域温度相差 $3 \sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为止(一般为 1 h 左右)。以时间 t 为横坐标,以 $\ln\theta$ 为纵坐标,根据 $\ln\theta=f(t)$ 曲线求得斜率 m ,即为降温速率 ($^{\circ}\text{C/h}$),计算公式为:

$$m=\frac{\ln \theta_a-\ln \theta_b}{t_b-t_a} \tag{1}$$

试件的形状系数 K 按下式计算:

$$K=\frac{1}{(2.404\ 8/R)^2+(\pi/L)^2} \tag{2}$$

式中: R 为试件的半径(m); L 为试件的高度(m)。

混凝土的导温系数 α 为:

$$\alpha=Km \tag{3}$$

混凝土导热系数 λ 与导温系数 α 的关系为^[3,4]:

$$\lambda=\frac{\alpha c\rho}{3\ 600} \tag{4}$$

式中: λ 为导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]; c 为混凝土的比热 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$]; ρ 为混凝土的密度 (kg/m^3)。

1.2 防护热板法

防护热板法^[5]包括两种形式:双试件装置和单试件装置。在双试件装置中,两个几乎相同的试件中夹一个加热单元,试件的外侧各设一个冷却单元。热流由加热单元分别经两侧试件传给两侧的冷却单元。单试件装置中加热单元的一侧用绝热材料和背防护单元代替试件冷却单元。

试件尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,每一试验因素成型 3 块,成型后于温度 $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 95% 以上的环境养护 28 d。试验过程中,环境保持干燥状态避免湿度对混凝土导热系数的影响,冷热板温度梯度控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。因为试件两个表面存在温差时,必然会引起水分的迁移和重新分布,所以稳态法不宜测定潮湿材料的导热系数。导热系数的计算公式为:

$$\lambda=\frac{\Phi\delta}{\Delta tS} \tag{5}$$

式中: λ 为导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; Φ 为通过平壁的热流量(W); S 为壁面积(m^2); δ 为壁厚(m); Δt 为壁两侧表面的温差 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.3 热流计法

试验采用的仪器和设备有稳态导热仪、烘箱、稳压器。稳态导热仪主要由加热板、冷板、测量仪表、量热仪表、计时器等组成。混凝土导热系数按照《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法》^[6]的规定进行测试。

2 导热系数试验结果文献分析

不同文献导热系数的测试结果见表 1。

表 1 相关文献中混凝土导热系数					
材料类型	水灰比	胶凝材料用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	骨料种类	试验方法	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
普通混凝土 ^[4]	0.5	160	石英岩	圆柱体法	2.07
普通混凝土 ^[4]	0.5	160	花岗岩	圆柱体法	2.77
普通混凝土 ^[4]	0.5	160	玄武岩	圆柱体法	3.99
普通、高强混凝土 ^[7]	0.27~0.43	530~600		防护热板法	1.35~1.70
普通混凝土 ^[8]					1.11~1.50
普通混凝土 ^[9]	0.42	约 400		防护热板法	1.3~1.7
普通混凝土 ^[10]	0.45	310	再生骨料	热流计法	0.37~0.53

研究表明, 各种因素对混凝土导热系数影响的显著性大小依次为: 干湿状态、温度、骨料体积分数、骨料类型、钢筋体积分数、水灰比、掺合料种类。所有文献基本一致认为, 当混凝土从干燥状态转变为饱水状态时, 其导热系数显著提高。但是不同文献中温度对导热系数的影响则存在差异, 肖建庄^[7]认为, 温度从 25 ℃ 提高到 80 ℃, 导热系数从 1.68 W/(m·K) 降低至 1.49 W/(m·K); 而盛谦^[8]则认为, 温度从 45 ℃ 提高到 65 ℃, 导热系数从 1.11 W/(m·K) 升高至 1.33 W/(m·K)。总体来说, 以上文献中普通混凝土的导热系数介于 0.37 ~ 3.99 W/(m·K)。相关研究的差异达到 10 倍, 在进行有限元计算时, 导热系数的取值成了较大的难题。

3 现场监测及导热系数分析

衢州安仁铺船闸输水廊道侧墙单层浇筑厚度为 3.5 m, 长边和短边尺寸为 10.5 m 和 9.5 m, 混凝土强度等级为 C25, 水胶比为 0.44, 胶凝材料用量为 348 kg/m³。侧墙浇筑在厚度为 3 m、强度等级为 C25 的混凝土上, 侧墙模型见图 1。在图 1 中 A-A 截面埋设 6 个温度传感器 D1、D2、D3、D4、D5、D6 (图 2)。在浇筑后 0 ~ 45 d 内, 大约每隔 2 h 左右监测一次各点的温度。根据监测数据采用圆柱体法推导了混凝土的导热系数, 并将计算所得的导热系数用于有限元计算。

3.1 基于实际监测数据的混凝土导热系数推导

截取了 D3、D6 监测点降温阶段的监测结果 (表 2)。根据初步有限元计算结果, 混凝土内部 A-A 截面上的温度梯度基本上呈圆形分布, 圆心位于 D6 监测点位置。因此把图 1 中混凝土块体简化为底面平行于 A-A 平面、高度为 9.5 m 的圆柱体。由于表面点受环境温度影响较大, D1、D2 点监测数据对于计算混凝土内部的导热系数参考价值不大, 因此以 D3 点作为圆柱体表面点, 以 D6 为中心点, 将块体简化为半径 R 为 1.2 m、高度为 9.5 m 的圆柱体 (图 2)。利用 2.1 节圆柱体法的相关方法计算混凝土的导热系数, 计算结果见表 2。

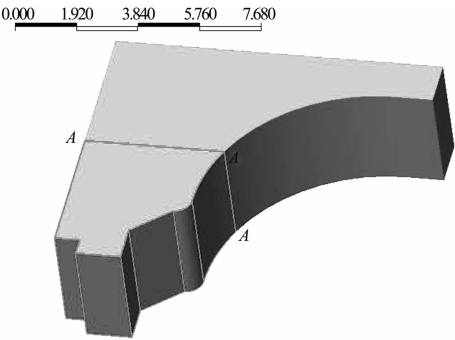


图 1 廊道侧墙混凝土

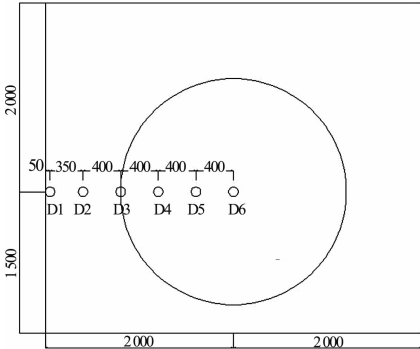


图 2 A-A 截面传感器和简化圆柱体 (单位: mm)

表 2 D3、D6 温度监测结果

时间/h	温度/℃		θ (D6-D3)/℃	$\ln\theta/℃$
	D3	D6		
216	55.8	65.2	16.70	2.24
241	53.7	63.5	17.60	2.28
265	51.4	61.8	18.60	2.34
290	49.2	60.1	19.30	2.39
312	47.6	58.5	18.20	2.39
354	44.8	55.8	18.10	2.40
402	41.7	52.7	17.30	2.40
457	39.2	49.0	14.80	2.28
505	37.7	46.3	12.80	2.15
530	37.2	45.0	11.30	2.05
570	36.7	43.2	9.00	1.87
608	36.4	41.8	8.20	1.69
640	35.5	40.8	8.50	1.67
680	34.4	39.7	8.30	1.67
720	33.6	38.7	8.50	1.63
760	32.8	38.0	8.40	1.65
800	32.1	37.5	8.90	1.69
840	31.7	37.0	8.40	1.67
880	31.4	36.6	7.80	1.65
920	31.3	36.1	16.70	2.24
1 080	29.4	33.7	17.60	2.28

以 $\ln\theta$ 为纵坐标、 t 为横坐标作图, 见图 3。

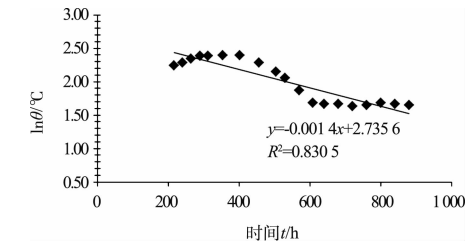


图 3 $\ln\theta$ 与时间 t 的函数关系

根据图 3 的拟合结果, 式 (1) 中降温速率 $m=0.0014\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。根据式 (2) 计算圆柱体的形状系数 $K=0.2424\text{ m}^2$, 根据式 (3) 计算导温系数 $\alpha=0.000336\text{ m}^2/\text{h}$, 根据式 (4) 计算导热系数 $\lambda=0.23\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

根据实际监测结果推导的导热系数值比相关文献给出的结果均小, 导热系数与表 1 中热流计法测得的导热系数比较接近, 比防护热板法和圆柱体法的测试结果要小很多, 热流计法的测试结果更能真实反映大体积混凝土的导热系数。

3.2 混凝土内部温度有限元分析

为了验证 3.1 节反演分析得到的混凝土导热系数的可靠性, 采用 MIDAS FEA 软件进行图 1 中整个构件的有限元模拟, 设置导热系数参数分别为 0.24、0.83、2.36 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 提取中心点 D6 的计算结果, 并与实际监测结果对比 (图 4)。

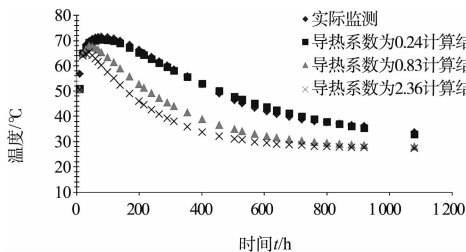


图 4 不同导热系数的模拟结果与监测结果对比

从图 4 可以看出, 导热系数设为 0.24 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时, 混凝土中心点 D6 的计算降温速率与监测结果基本一致; 导热系数设为 2.36 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时, 混凝土降温速率比监测结果大很多。

4 结语

- 1) 采用圆柱体法、防护热板法、热流计法等室内试验方法测得的混凝土导热系数为 0.37 ~ 3.99 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 偏差达到 10 倍。
- 2) 根据现场温度监测结果, 反演分析得到 C25 混凝土导热系数为 0.23 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。
- 3) 采用热流计法测得的混凝土导热系数与现场数据反演分析的导热系数比较接近, 热流计法测试结果更能真实反映大体积混凝土的导热系数。
- 4) 将混凝土导热系数设为 0.24 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 进行有限元分析的结果与实际监测结果基本一致。

参考文献:

[1] 大连工学院水工研究室. 大型混凝土试件的导温、导热系数试验[J]. 大连理工大学学报, 1966: 25-35.

[2] SL352—2006 水工混凝土试验规程[S].

[3] 赵玉青, 邱攀, 邢振贤, 等. 大体积混凝土导热系数反演分析[J]. 人民长江, 2011(3): 61-63.

[4] 左仁芬, 贾兆武. 水工混凝土热学性能试验初探[J]. 陕西水力发电, 1989(1): 21-30.

[5] GB 10294—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法[S].

[6] GB 10295—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法[S].

[7] 肖建庄, 宋志文, 张枫. 混凝土导热系数试验与分析[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 17-21.

[8] 盛谦. 混凝土导热系数试验研究[J]. 大众科技, 2009(8): 78-80.

[9] 刘卫东, 田波, 侯子义. 混凝土导热系数试验研究[J]. 中外公路, 2012, 32(1): 226-229.

[10] 再生混凝土导热系数试验与分析[J/OL]. 建筑材料学报, <http://www.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20141217.1546.121.html>.

(本文编辑 武亚庆)