

文章编号:1673-9469(2011)03-0017-04

## 引气混凝土导热系数试验与分析

李磊<sup>1</sup>, 刘卫东<sup>1,2</sup>, 李栖彤<sup>1</sup>, 赵国良<sup>1</sup>

(1.河北工业大学,天津 300401;2.交通运输部公路科学研究院,北京 100088)

**摘要:**为了研究引气混凝土材料的导热系数,利用基于护热板法的导热仪(DRH)测试了各种试件的导热系数,探讨了骨料含量、砂率、水灰比、粉煤灰掺量、含气量等影响混凝土导热系数的因素。根据试验结果可知,水灰比、含气量是影响混凝土导热系数的主要因素,骨料、砂率、粉煤灰掺量对导热系数也有一定的影响。

**关键词:**引气混凝土;导热系数;稳态法;骨料含量

**中图分类号:** U414

**文献标识码:** A

## An experimental study on thermal conductivity of air-entraining concrete

LI Lei<sup>1</sup>, LIU Wei-dong<sup>1,2</sup>, LI Qi-tong<sup>1</sup>, ZHAO Guo-liang<sup>1</sup>

(1. Hebei University of Technology, Tian jin 300401, China; 2. Research Institute of highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to research the thermal conductivity of the air-entraining concrete, influencing factors such as aggregate content, sand ratio, fly ash content and air content on thermal conductivity of air-entraining concrete are quantitatively investigated by DRH—that is, a conductivity Apparatus of Guarded-Hot-Plate. The experimental results show that water-cement ratio and air content are the main factors of thermal conductivity of the air-entraining concrete. In addition, aggregate content, sand ratio, and fly ash content also does have an effect on the thermal conductivity to an extent.

**Key words:** air-entraining concrete; thermal conductivity; steady-state method; aggregate content

引气混凝土是在普通混凝土中添加了一定剂量的引气剂,引气剂可以明显提高混凝土的抗渗性、抗冻性、抗盐冻腐蚀性。引气剂引入微小、均匀的气泡有效抑制了毛细作用,从而提高抗渗性,这些微小的气孔可以释放冰胀压力,避免混凝土内部产生微损伤。因而,在我国西北、东北等严寒地区道路工程中常使用引气混凝土,另外,引气混凝土由于存在微小的气泡对混凝土的导热系数也有一定程度的影响。研究表明,影响普通混凝土导热系数的主要因素有:骨料类型、骨料含量、干湿状态及孔隙率<sup>[1-4]</sup>等,一些学者对不同混凝土的导热系数进行了研究如文献[5]研究了普通混凝土、高强混凝土、再生混凝土以及配筋混凝土的导热系数,然而对引气混凝土的导热系数研究较少,因此有必要对引气混凝土的导热系数进行系

统研究。

### 1 引气混凝土导热系数试验

#### 1.1 试验原理

根据 Fourier 传热方程(一维传热),厚度  $\delta$  为无限大的混凝土板,在单位时间内通过的热量与板的厚度成反比,与上下表面层的温度梯度成正比,与上下表面的面积成正比,且与材料本身的导热系数相关。通过板的热量为

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t S \quad (1)$$

式中  $\Phi$ —通过混凝土板的热流量, W;  $S$ —壁面积,  $m^2$ ;  $\delta$ —为壁厚, m;  $\Delta t$ —壁两侧表面的温差,  $^{\circ}C$ ;  $\lambda$ —导热系数,  $W/(m \cdot K)$ 。

收稿日期:2011-06-10

作者简介:李磊(1985-),男,河南商丘人,硕士研究生,从事结构工程的研究。

由上式可得到导热系数的表达式为

$$\lambda = \frac{\delta \Phi}{\Delta t S} \tag{2}$$

1.2 原材料

水泥:北京生产的拉法基普通硅酸盐水泥 42.5,细度 3.6,初、终凝时间为 85 min、135 min。其他参数均满足规范要求。

粉煤灰:采用北京一级粉煤灰,其技术参数满足规范要求。

细集料:秦皇岛市沙场,细度模数 2.8,中砂,表观密度 2 600 kg/m<sup>3</sup>。

粗集料:最大粒径 19 mm,采用二种粒径的石灰岩集料,表观密度 2 800 kg/m<sup>3</sup>。

减水剂:FDN 萘系减水剂,推荐参量 0.1% ~ 1%,减水率 15% ~ 25%;引气剂为 KJ - 70A 高效引气减水剂。

水:饮用自来水。

1.3 制备试验

试件不平整产生的接触热阻会给测量数据带来相当大的误差,因此,制作了专门的试模试验测试的 2 个平面用钢模,充分保证了平整度。试件尺寸为 30 cm × 30 cm × 5 cm,每一试验因素成型 3 块,成型后于温度 20℃ ± 2℃,湿度为 95% 以上的标准养护室养护 28 d。引气混凝土的基准掺量较小,考虑到混凝土是多相体系,若基准引气量掺量过大,影响试验因素分析。其各配合比如表 1 所示。

1.4 试验方法

混凝土导热系数按照 GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》测定。试验温度 25℃,环境保持干燥状态避免湿度对引气混凝土导热系数的影响,冷板温度设置为 25℃,热板温度 35℃,冷热板温度梯度为 10 k。

表 1 引气混凝土导热系数配合比  
Tab.1 The thermal conductivity of air - entraining concrete mix

| 水胶比 | 试验参数 | 试件编号 | 砂率   | 胶凝材料  | 水   | 水泥      | 细集料   | 粗集料   | 减水剂  | 引气剂   |
|-----|------|------|------|-------|-----|---------|-------|-------|------|-------|
| 0.4 | 骨料含量 | C-1  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | C-2  | 0.36 | C     | 180 | 450     | 656   | 1 167 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | C-3  | 0.36 | C     | 220 | 550     | 585   | 1 040 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | C-4  | 0.36 | C     | 260 | 650     | 513   | 913   | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | C-5  | 0.36 | C     | 300 | 750     | 442   | 786   | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 | 砂率   | S-1  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 710   | 1 262 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | S-2  | 0.40 | C     | 140 | 350     | 786   | 1 179 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | S-3  | 0.44 | C     | 140 | 350     | 862   | 1 097 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | S-4  | 0.48 | C     | 140 | 350     | 936   | 1 015 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | S-5  | 0.52 | C     | 140 | 350     | 1 012 | 934   | 0.4% | 0.01% |
| 0.3 | 水灰比  | w-1  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 728   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | w-2  | 0.36 | C     | 155 | 310     | 726   | 1 290 | 0.4% | 0.01% |
| 0.5 |      | w-3  | 0.36 | C     | 170 | 283     | 719   | 1 279 | 0.4% | 0.01% |
| 0.6 |      | w-4  | 0.36 | C     | 185 | 264     | 711   | 1 263 | 0.4% | 0.01% |
| 0.7 |      | w-5  | 0.36 | C     | 135 | 450     | 701   | 1 246 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 | 粉煤灰  | F-1  | 0.36 | C + F | 140 | 35/315  | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | F-2  | 0.36 | C + F | 140 | 105/245 | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | F-3  | 0.36 | C + F | 140 | 175/175 | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | F-4  | 0.36 | C + F | 140 | 245/105 | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | F-5  | 0.36 | C + F | 140 | 315/35  | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 | 含气量  | Y-1  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.01% |
| 0.4 |      | Y-2  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.02% |
| 0.4 |      | Y-3  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.03% |
| 0.4 |      | Y-4  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.04% |
| 0.4 |      | Y-5  | 0.36 | C     | 140 | 350     | 727   | 1 294 | 0.4% | 0.05% |

注:1、C-水泥,F-粉煤灰;2、水、水泥、粗集料、细集料的单位均为 kg/m<sup>3</sup>,减水剂与引气剂掺量为胶凝材料的百分比。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 骨料含量对导热系数的影响

干燥环境下,骨料含量对引气混凝土导热系数的影响如图1所示,随着骨料的增加,混凝土的导热系数也增大。混凝土的导热系数依靠混凝土材料中粗骨料、砂浆、水及气体组成的多相体系传递热量,而粗骨料的导热系数大于砂浆、水及气体。一般花岗岩的导热系数在  $2.50 - 2.65 \text{ w/(m}\cdot\text{k)}$ <sup>[6]</sup>,文献[7]中的花岗岩在  $21^\circ\text{C}$ 时导热系数为  $2.511 \text{ w/(m}\cdot\text{k)}$ ,在  $32^\circ\text{C}$ 导热系数高达  $11.658 \text{ w/(m}\cdot\text{k)}$ ,由此可见测试温度直接影响到粗集料的导热系数。水导热系数较小,在  $20^\circ\text{C}$ 导热系数仅为  $0.521 \text{ w/(m}\cdot\text{k)}$ <sup>[4]</sup>。空气的导热系数更小, $0^\circ\text{C}$ 时仅为  $0.022 \text{ w/(m}\cdot\text{k)}$ 。

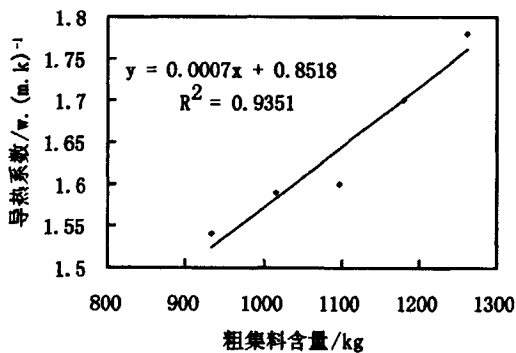


图1 骨料含量对导热系数的影响

Fig.1 The effects of aggregate content on thermal conductivity

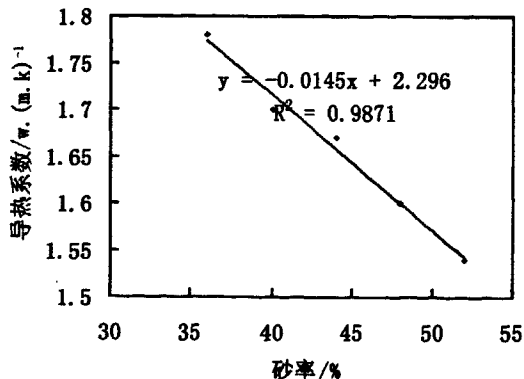


图2 砂率对导热系数的影响

Fig.2 The effects of sand ratio on thermal conductivity

### 2.2 砂率对导热系数的影响

混凝土的导热系数随着砂率的增大,导热系

数逐渐减小如图2所示。适量的砂能够使混凝土填充密实,混凝土越密实,空气及水所占的比例小,导热系数就大,但是砂含量过大时在水泥用量及水灰比相同的情况下,砂的量越大,需要的包裹砂浆的水泥会增加,因此过多的砂浆会导致引气混凝土内部疏松,孔隙增加。另外砂本身的导热系数小于混凝土中粗集料的导热系数,因此砂含量越大,导热系数越小。

### 2.3 水灰比对导热系数的影响

水灰比不同的引气混凝土在干燥条件下的导热系数如图3所示。由图3可知,引气混凝土导热系数随着水灰比的增加而降低。主要原因如下:(1)水泥导热系数在  $21^\circ\text{C}$ 导热系数为  $1.063$  和水的导热系数相比相差悬殊,因此水灰比越小,混凝土导热系数越大。(2)干燥试验条件下,水灰比越高,则引气混凝土孔隙越大,导热系数相应越小。

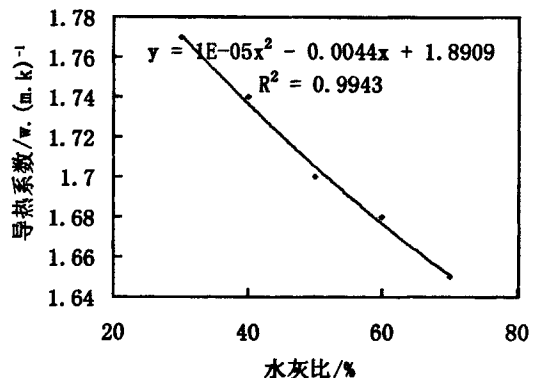


图3 水灰比对导热系数的影响

Fig.3 The effects of  $m_w/m_c$  on thermal conductivity

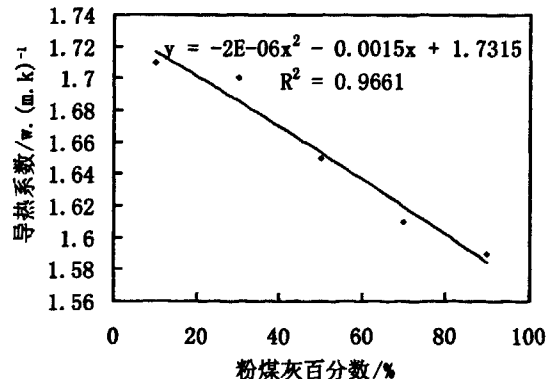


图4 粉煤灰对导热系数的影响

Fig.4 The effects of fly ash on thermal conductivity

## 2.4 粉煤灰对导热系数的影响

在试验其他条件完全相同的情况下,粉煤灰取代混凝土的百分率分别为:10%、30%、50%、70%、90%其导热系数相应的减小如图4所示。根据图4可以看出在取代量为10%、30%时,引气混凝土导热系数的变化不是很大,即粉煤灰掺量的比例较小时对混凝土导热系数影响较小。当粉煤灰的量超过30%后,引气混凝土导热系数明显下降。

## 2.5 含气量对导热系数的影响

随着含气量的提高引气混凝土的导热系数而减小如图5所示。含气量从2.8%上升到3.3%,混凝土导热系数分别为 $1.73 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ 、 $1.68 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ ,导热系数降低了2.9%。含气量在4%左右对混凝土导热系数的影响不是很明显,一般来说混凝土的含气量会对其强度产生一定的影响,但是在严寒地区的水泥混凝土路面气体的引入极大提高了混凝土的抗盐冻、腐蚀性的影响远远大于因引气而导致的强度降低,另外,寒区道路的引气混凝土面层在一定程度上可以减少外界热源对路基冻土层的影响。

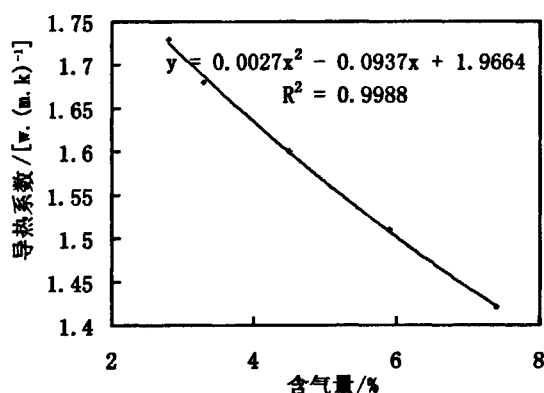


图5 含气量对导热系数的影响

Fig. 5 The effects of gas content on thermal conductivity

引气混凝土的导热系数不仅与混凝土的含气量相关,还与气孔尺寸、气孔的分布有关系。在含气量相同的情况下,随着气孔尺寸减小,气孔数量增多,一般来说气孔尺寸的变小空气对流幅度也相应变少,这导致对流传热效率降低,而气孔数量的增多导致内部气孔壁表面积增加,即增加混凝土固体的反射面,使辐射传热效率降低。因此引气混凝土的导热系数降低。所以含气量较高时,气孔尺寸越小,越有利于减小引气混凝土的导热

系数<sup>[8]</sup>。因此建议在满足强度要求下尽可能提高混凝土的含气量已达到混凝土的耐久性及改善引气混凝土的隔热保温作用。

## 3 结论

1)骨料对引气混凝土导热系数有一定的影响,在骨料类型相同的情况下,随着骨料含量的增加,引气混凝土的导热系数逐渐增大。

2)在水灰比、水泥用量相同的情况下,引气混凝土的导热系数随着砂率的提高而降低,水灰比对引气混凝土导热系数影响较大。

3)在砂率相同的情况下,水灰比提高引气混凝土的导热系数降低,因此对于引气混凝土在保证混凝土工作性能的前提下,可适当降低其水灰比。

4)粉煤灰的掺量较小时,对引气混凝土导热系数影响不大,当掺量超过30%时,对引气混凝土导热系数影响显著。引气混凝土适量添加粉煤灰提高混凝土的耐久性和工作性能,同时也降低工程的造价。

5)含气量对引气混凝土导热系数影响较大,在混凝土配合比相同的情况下,引气混凝土导热系数随着含气量的增加而降低。在保证强度的前提下,可适当提高引气混凝土的含气量。

## 参考文献:

- [1] CAMPBELL ALLEN D, THORNE C P. The thermal conductivity of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1963, 15 (43):39-48.
- [2] HARMATHY T Z. Thermal properties of concrete at elevated temperatures [J]. Journal of Materials, 1970, 5 (1):47-74.
- [3] MARSHALL A L. The thermal properties of concrete [J]. Building Science, 1972 (7):167-174.
- [4] KOOK - HAN K, SANG - EUN J, JIN - KEUN K, et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33 (3):363-371.
- [5] 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.
- [6] Japan Concrete Institute. The measuring methods of conductivity, diffusivity, and specific heat of concrete and their application[J]. Jpn Concr Inst Mass Concr Div, 1982:11-14.
- [7] 张枫,肖建庄,宋志文,等.混凝土导热系数的理论模型及其应用[J].商品混凝土,2009(2):23-25.
- [8] 周顺鄂,卢忠远,严云.泡沫混凝土导热系数模型研究[J].材料导报,2009,23(3):69-74.

(责任编辑 刘存英)