

[文章编号] 1003—4684(2022)01-0077-04

# 低温下混凝土线膨胀系数理论与试验研究

周 鹏,李 扬,游 凡

(湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068)

[摘 要] 自制混凝土、水泥砂浆及石灰石试块,针对混凝土线膨胀系数,采用 Mori Tanaka 方法和电阻应变计法进行理论推导和试验研究。通过对比实测的混凝土线膨胀系数值与理论推导值发现:低温下混凝土线膨胀系数介于水泥砂浆与石灰石之间,混凝土中粗骨料和含水量对这一现象产生显著影响;理论值曲线与试验值曲线趋势大致相同,其系数值随温度的降低逐渐减小;在 $-80^{\circ}\text{C}$  以内,混凝土线膨胀系数理论值与试验值相差较小,吻合度较高。

[关键词] 混凝土;线膨胀系数;电阻应变计;理论推导

[中图分类号] TU502 [文献标识码] A

LNG 储罐建造、可燃冰开采、寒冷地区房屋建设等。随着混凝土在低温环境下的运用愈加广泛,开展低温下混凝土的相关热力学性能研究具有重大的现实意义。而线膨胀系数表征材料随温度变化的伸缩性能,是影响结构耐久性的重要因素之一。对此,国内外针对线膨胀系数进行了相关研究。

Maruyama<sup>[1]</sup>通过水浴加热,在 $60^{\circ}\text{C}$ 内用激光位移计读取混凝土的变形量,确定混凝土的线膨胀系数。Lucie Zuda<sup>[2]</sup>将试件制作成棒状,采用陶瓷杆引伸法测量试件长度的变化。Siddiqui MS 等<sup>[3]</sup>对不同类型骨料进行研究,发现混凝土的线膨胀系数随所含骨料的线膨胀系数的改变而改变。Yeon J 等<sup>[4]</sup>设置不同湿度的混凝土试件,得出当相对湿度在 $70\%\sim 80\%$ 之间时材料线膨胀系数最大,且对材料水泥浆体的影响大于混凝土。芦琴等<sup>[5]</sup>基于混合率计算材料线膨胀系数,结果表明线膨胀系数值与产生的温度应力大小成正比。

尽管相关研究很多,但大多数实验变温区间较小或直接采用了专业仪器测量。而直接测量极端温度下混凝土线膨胀系数所需仪器成本极高。为探索一种经济适用的研究方法,本文提出了 Mori Tanaka 方法和电阻应变计法<sup>[6]</sup>进行线膨胀系数的理论推导和试验研究。

## 1 实验设计

### 1.1 试件制作

水泥砂浆试件质量配合比为水泥:水:砂=1:0.4:1.86,尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ;石材原料为石灰岩,切割尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ;混凝土质量配合比水泥:砂:石子:水:外加剂:矿粉为1:2.45:3.25:0.45:0.029:0.46,骨料级配良好;石英玻璃尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 。具体测点布置及试件用途如表 1 所示。

表 1 试件详情

编号	类型	尺寸	个数	应变片布置	用途
A1	水泥砂浆	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	3	相邻两面横、纵向布置	弹性模量及泊松比
A2	水泥砂浆	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	1	相邻两面横、纵向布置	不加压,对照组
A3	水泥砂浆	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	3	一面中间布置	线膨胀系数
B1	石材	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	3	相邻两面横、纵向布置	弹性模量及泊松比
B2	石材	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	1	相邻两面横、纵向布置	不加压,对照组
B3	石材	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	3	一面中间布置	线膨胀系数
C1	混凝土	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	3	一面中间布置	线膨胀系数
C2	混凝土	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	1	无	测温
D1	石英玻璃	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$	1	一面中间布置	线膨胀系数

[收稿日期] 2021-01-07

[基金项目] 国家自然科学基金(51508171);湖北省自然科学基金(2020CFB860)

[第一作者] 周 鹏(1997—),男,湖北荆州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为超低温下材料性能

1.2 试验过程与方法

1.2.1 线膨胀系数测试 在混凝土、水泥砂浆、石材及石英玻璃相应位置粘贴尺寸为 120 mm×40 mm低温应变片,位置如表 1 所示。因石英玻璃受温度作用变形极小,故将其作为标准件。同时,额外设置一个混凝土试件,在其中间部位钻孔,埋入 PT3W 型热电偶,测试试件中心位置温度,以确保所有试件被冻透,达到预定温度。试件测点上的低温应变片采用 1/4 桥路连接,连接的导线与数据采集仪相连。最后,将试件放入低温试验箱内进行深冷处理。

本试验采用电阻应变计测试方法,设定的标准温度为 20℃。通过低温应变片读出试件在低温下的热输出,然后根据下式对实验数据进行处理,进而得到试件的线膨胀系数:

$$\alpha_1 = \alpha_2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2) / \Delta T \tag{1}$$

式中:  $\alpha_1$  为待测试件的线膨胀系数,℃<sup>-1</sup>;  $\alpha_2$  为标准件的线膨胀系数,℃<sup>-1</sup>[7];  $\epsilon_1$  为待测试件的热输出;  $\epsilon_2$  为标准件的热输出;  $\Delta T$  为温度差值。

1.2.2 弹性模量计算 在水泥砂浆、石材相应位置粘贴低温应变片,位置如表 1 所示。同时,设置一个试件,实时测温且不加荷载。试件测点上的应变片均采用 1/4 桥路与低温导线连接,导线另一端连接采集仪。然后放入低温箱,箱底具有荷载加载装置,对试件进行加荷,如图 1 所示。



图 1 装置图

结合电阻应变片工作原理,测量不同温度下试件的弹性模量。从常温变温至某一温度  $T_i$  时,将加载时实际输出的应变减去该温度下未加载的应变值,此差值正是待测试件在固定荷载作用下引起的应变值,即:

$$\Delta \epsilon_{T_i} = \epsilon_{2T_i} - \epsilon_{1T_i} = \epsilon_{MT_i} \tag{2}$$

式中:  $\epsilon_{MT_i}$  为  $T_i$  温度下的力引起的应变;  $\epsilon_{1T_i}$  为  $T_i$  温度下未加载时的应变值;  $\epsilon_{2T_i}$  为  $T_i$  温度下加载时的应变值。

设定试件受力截面面积为  $A$ ,则在配重荷载  $N$  的作用下,温度为  $T_i$  时的混凝土弹性模量  $E_{T_i}$  为

$$E_{T_i} = \frac{N}{A \Delta \epsilon_{T_i}} \tag{3}$$

同理,通过上述方法测出加载与未加载条件下水泥

砂浆、石材表面横向与纵向的应变片的应变值,得到不同温度下材料的泊松比,即:

$$\sigma_{T_i} = \frac{\Delta \epsilon_{hT_i}}{\Delta \epsilon_{zT_i}} \tag{4}$$

式中:  $\sigma_{T_i}$  为  $T_i$  温度下材料泊松比;  $\Delta \epsilon_{hT_i}$  为  $T_i$  温度下横向应变;  $\Delta \epsilon_{zT_i}$  为  $T_i$  温度下纵向应变。

1.3 试验结果与分析

图 2 为混凝土、水泥砂浆和石材在低温下各项热力学参数随温度变化曲线。除混凝土线膨胀系数曲线外,水泥砂浆、石材的热力学参数曲线均取三个试件测试值的平均值作图。

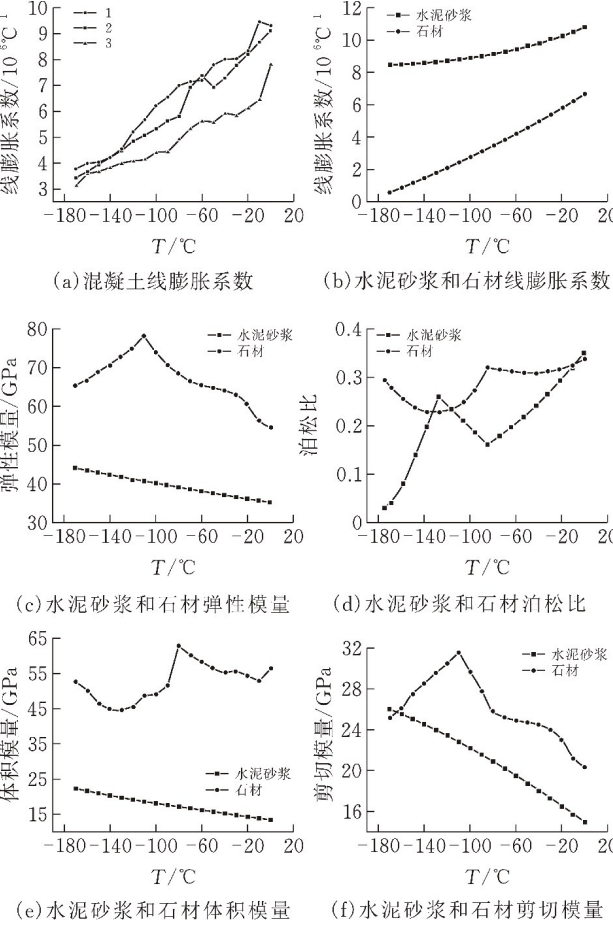


图 2 材料热力学参数曲线

由图 2 可知:混凝土、水泥砂浆、石材的线膨胀系数基本随温度的下降而降低。在三类材料中,线膨胀系数水泥砂浆大于混凝土大于石灰石。而钱春香[8]的相关研究也证明了这一点;对于弹性模量,由于水泥砂浆和石材孔隙中的水份因温度降低凝结成冰填充了孔隙,提高了材料整体的强度。故其值大体上随着温度的下降而升高。又因水泥砂浆材料本身含水量较石材多,所以强度提高得更明显;对于泊松比,由于低温下孔隙愈加密实、发生变形逐渐困难,因此两种材料相较常温,值都有所下降。

体积模量  $K$  用来反映构件的体应变与平均应力之间的关系。其与弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  之间有

关系：

$$K=\frac{E}{3(1-2\mu)}\tag{5}$$

剪切模量  $G$  反映材料在弹性变形范围内,剪切应力与应变的比值。其与弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  之间有关系：

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)}\tag{6}$$

将弹性模量与泊松比的值代入上式,得到体积模量与剪切模量的曲线,如图 2e、f。

2 理论方法研究混凝土线膨胀系数

假定混凝土是由骨料和砂浆基质组成的二相复合材料,用 Mori Tanaka 的混凝土宏观有效剪切模量,推导混凝土的线膨胀系数。用下标 0 和 1 分别表示砂浆基质和骨料,运用 Mori-Tanaka 法,混凝土的有效体积模量  $\bar{k}$  和剪切模量  $\bar{\mu}$  分别为：

$$\bar{k}=k_0+\frac{\varphi_1(k_1-k_0)}{1+\gamma_k(1-\varphi_1)\left(\frac{k_1}{k_0}-1\right)}\tag{7}$$

$$\bar{\mu}=\mu_0+\frac{\varphi_1(\mu_1-\mu_0)}{1+\gamma_\mu(1-\mu_1)\left(\frac{\mu_1}{\mu_0}-1\right)}\tag{8}$$

式中： $\gamma_k=(1+\nu_0)/3(1-\nu_0)$ ， $\gamma_\mu=(8-10\nu_0)/15(1-\nu_0)$ ， $\nu_0$  表示砂浆的泊松比； $\mu_0$  和  $k_0$ ， $\mu_1$  和  $k_1$  分别表示砂浆和骨料的剪切、体积模量； $\varphi_1$  表示骨料的体积分数。

设  $s$  为混凝土柔度系数、 $s_0$  和  $s_1$  分别为砂浆和骨料的柔度系数、应力局部化张量为  $B$ ，则  $\bar{\underline{\alpha}}=\langle\underline{\alpha};B\rangle$  为混凝土有效线膨胀系数、 $\bar{s}=\langle s;B\rangle$  为混凝土有效柔度系数。经相应变换后得：

$$\bar{\underline{\alpha}}=\langle\underline{\alpha}\rangle+(\bar{s}-\langle s\rangle): (s_1-s_0)^{-1}:(\underline{\alpha}_1-\underline{\alpha}_0)\tag{9}$$

当混凝土的弹性为各向同性时,可以得到：

$$\bar{\underline{\alpha}}=\langle\underline{\alpha}\rangle+\frac{\left(\frac{1}{\bar{k}}-\left\langle\frac{1}{k}\right\rangle\right)\left(\underline{\alpha}_1-\underline{\alpha}_0\right)}{\left(\frac{1}{k_1}-\frac{1}{k_0}\right)}\tag{10}$$

$$Tr\bar{\underline{\alpha}}=Tr\langle\underline{\alpha}\rangle+\left(\frac{1}{\bar{k}}-\left\langle\frac{1}{k}\right\rangle\right)\cdot\frac{Tr(\underline{\alpha}_1-\underline{\alpha}_0)}{\left(\frac{1}{k_1}-\frac{1}{k_0}\right)}\tag{11}$$

式中： $\bar{\underline{\alpha}}$  为  $\underline{\alpha}$  的偏量， $\underline{\alpha}=\underline{\alpha}-\frac{1}{3}\sigma Tr \underline{\alpha}$ ，其中  $\sigma$  为单位二阶张量； $Tr \underline{\alpha}$  为该张量主对角线分量之和； $\langle \rangle$  表示该值下砂浆与石材的平均值； $\bar{k}$  采用有效体积模量计算。

若混凝土线膨胀系数张量为各向同性,则根据式(11)可得：

$$\bar{\alpha}=\langle\alpha\rangle+\frac{\left(\frac{1}{\bar{k}}-\left\langle\frac{1}{k}\right\rangle\right)\left(\alpha_1-\alpha_0\right)}{\left(\frac{1}{k_1}-\frac{1}{k_0}\right)}\tag{12}$$

其中骨料的体积分数为 37%，将上述砂浆和石材热力学参数代入公式中求解,得到混凝土线膨胀系数理论值。经计算,超低温下混凝土各温度点的线膨胀系数理论值与试验值曲线如图 3 所示。

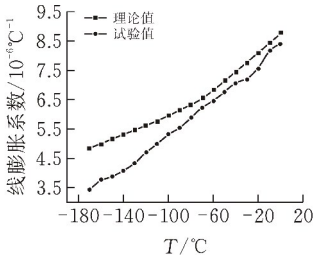


图 3 低温混凝土线膨胀系数理论值与试验值

本文通过试验研究和理论公式推导两种方法,求得混凝土在超低温下的热膨胀系数,由图 3 可知：试验所得平均线膨胀系数曲线与理论推导线膨胀系数曲线趋势大致相同。随着温度的降低而逐渐下降,与温度基本呈线性关系;理论值曲线较试验值曲线整体更为平缓;在  $-170^{\circ}\text{C}$  时,二者差值最大,理论值较试验值高出近 40%。而在  $-80^{\circ}\text{C}$  以内,二者相差不超过 15%，吻合度较高。

而试验值整体较理论值偏小是因为：在混凝土中,粗骨料自身的强度高于水泥砂浆,其在低温下发生冷缩较水泥砂浆更困难。在水泥砂浆收缩时,粗骨料会抑制水泥砂浆的变形;且在混凝土试件制备过程中,由于粗骨料的加入,配比时会添加一定量的水份。试件水含量的增加导致细小的毛细孔在低温下也完全被冰填充,因此减小了试件的变形。而这一系列的细观反应与理论推理割裂。所以在一定的范围内,理论值与试验值极为接近,但随着温度区间的继续扩大,二者的差值也将随之增大。

3 结论

对极端温度环境下混凝土的线膨胀系数进行研究,得到如下结论：

- 1)在低温下,水泥砂浆线膨胀系数大于混凝土大于石灰石。而试件所含粗骨料和含水量对这一现象产生显著影响。
- 2)混凝土线膨胀系数理论值曲线与试验值曲线趋势大致相同,其系数值随温度的降低逐渐减小。
- 3)混凝土试件试验值离散性较大,后期需通过大量试验得到更精确的数据。在  $-80^{\circ}\text{C}$  以内,混凝土线膨胀系数理论值与试验值相差较小,吻合度较高。

[ 参 考 文 献 ]

[1] MARUYAMA I, TERAMOTO A. Impact of time-de-pendant thermal expansion coefficient on the early-age volume changes in cement pastes[J]. Cement and Concrete Research,2011,41(4):380-391.

[2] ZUDA L, CEMY R. Measurement of linear themal expansion coefficient of alkali-activated aluminosilicate comp osites up to 1000 C[J]. Cement & Concrete Composites, 2009,31(4):263-267.

[3] SIDDIQUI MS,FOWLER DW. A systematic optimization technique fbr the coefficient of thermal expansion of Portland cement concrete [J]. Construction and Building Materials,2015,88: 204-211.

[4] YEON J,CHOI S,WON M. Effect of relative humidity on coefficient of thermal expansion of hardened cement paste and concrete[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2009,2113(1): 83-91.

[5] 芦琴,朱显鸽,惠亚芳.热膨胀系数对混凝土温度应力的影响[J]. 水电能源科学,2010, 28 (8):106-170.

[6] 李燕勇.几种材料大试样低温膨胀系数测试及研究[J]. 低温与超导,1996,24(1):49-52.

[7] 顾琢如.玻璃低温膨胀系数的测定[J]. 光学机械, 1980(5) :44-48.

[8] 钱春香,朱晨峰. 骨料粒径对混凝土热膨胀性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 18-22.

Theoretical and Experimental Study on Linear Expansion Coefficient of Concrete at Low Temperature

ZHOU Peng, LI Yang, YOU Fan

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068,China)

**Abstract:**According to the linear expansion coefficient of concrete, Mori Tanaka method and resistance strain gauge method were used to carry out theoretical derivation and experimental study on self-made concrete, cement mortar and limestone test blocks. It is found that the linear expansion coefficient of concrete is between cement mortar and limestone at low temperature by comparing the measured linear expansion coefficient of concrete with the theoretical value. Coarse aggregate and water content in concrete have significant influence on this phenomenon; The trend of the theoretical value curve is roughly the same as that of the experimental value curve, and the coefficient value decreases with the decline of temperature; Within -80℃ , there is little difference between the theoretical and experimental values of linear expansion coefficient, and the coincidence degree is high.

**Keywords:** concrete; coefficient of linear expansion; resistance strain gauge; theoretical derivation

[责任编辑:裴 琴]