

# 温度作用下UHPC + AC复合试件的变形规律

毛 惺<sup>1</sup>, 聂忆华<sup>1\*</sup>, 钟世雄<sup>1</sup>, 刘福财<sup>2</sup>, 肖 敏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>广东盖特奇新材料科技有限公司, 广东 清远

收稿日期: 2023年5月14日; 录用日期: 2023年6月4日; 发布日期: 2023年6月15日

## 摘 要

基于道路及相关材料发展现状, 提出UHPC + AC复合式路面, 制作UHPC + AC复合试件并进行温度变形试验。研究分析发现复合试件AC层与UHPC层在20℃至-20℃低温下收缩, 20℃至60℃高温下膨胀, 温度变形集中在试验前2 h; 对于试件温度收缩系数: AC层 > UHPC层, 低温环境 > 高温环境; 给出复合试件变形结果 $L_s$ , 实验时间 $t$ 与试件原始尺寸 $L$ 的拟合公式, 可以较好地预测复合试件温度变形结果; 而在-20℃ + 60℃温度循环条件下, 在每轮温度循环后, AC层与UHPC层均产生残余变形, 逐渐收缩, 且AC层收缩量大于UHPC层。同时试验未发现复合试件产生由温度变形差异导致的裂缝, 表明复合试件温度协调变形符合路面使用要求。研究结论为UHPC + AC复合式路面的设计和维护提供理论依据。

## 关键词

UHPC + AC, 复合试件, 温度, 变形规律

# Deformation Law of UHPC + AC Composite Specimens under the Effect of Temperature

Xin Mao<sup>1</sup>, Yihua Nie<sup>1\*</sup>, Shixiong Zhong<sup>1</sup>, Fucui Liu<sup>2</sup>, Min Xiao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>Guangdong Gaiteqi New Materials Technology Co., Ltd., Qingyuan Guangdong

Received: May 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 4<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on the development status of road and related materials, UHPC + AC composite pavement is

\*通讯作者。

文章引用: 毛惺, 聂忆华, 钟世雄, 刘福财, 肖敏. 温度作用下 UHPC + AC 复合试件的变形规律[J]. 土木工程, 2023, 12(6): 737-745. DOI: 10.12677/hjce.2023.126083

proposed, UHPC + AC composite specimens are made and temperature deformation tests are conducted. The study and analysis found that the composite specimen AC layer and UHPC layer shrink at 20°C~20°C low temperature, expand at 20°C~60°C high temperature, and the temperature deformation is concentrated in the first 2 h of the test; for the temperature shrinkage coefficient of the specimen: AC layer > UHPC layer, low-temperature environment > high-temperature environment. The fitting formula between the deformation results  $L_s$  of the composite specimen, the experimental time  $t$ , and the original size  $L$  of the specimen can effectively predict the temperature deformation result of the composite specimen; and under the temperature cycling condition of -20°C + 60°C, after each round of temperature cycling, the AC layer and UHPC layer both produce residual deformation and gradually shrink, and the shrinkage of AC layer is larger than that of UHPC layer. At the same time, the test did not find that the composite specimen produced cracks caused by the difference in temperature deformation, indicating that the temperature-coordinated deformation of the composite specimen met the requirements of pavement use. The research conclusions provide theoretical basis for the design and maintenance of UHPC + AC composite pavement.

## Keywords

UHPC + AC, Composite Specimens, Temperature, Deformation Law

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

超高性能混凝土(UHPC)的各项性能几乎全面超越普通的水泥混凝土,综合性能非常全面[1] [2],最重要的是满足道路层位高模量、抗疲劳、封水的要求,同时 UHPC 是一种非常适合做预制构件的材料,也满足快速施工与维修改造高级路面的铺筑要求。因此提出 UHPC + AC 复合式沥青路面结构,其中 UHPC 作为下面层主要起承重作用,表面 AC 层主要起功能作用。

公路路面的使用寿命以年为单位,考虑到公路路面的实际使用情况,需要承受每年温度的周期性变化,特别是某些特殊地区,每一天白昼黑夜气温相差极大,随着使用环境温度的变化面层的温度也会随之产生周期性的变化。由于混凝土是一种不可塑性材料,当温度发生变化时会产生明显的收缩、膨胀的温度变形[3]。而复合式路面相比普通水泥或沥青路面温度变形更加严重,容易产生更大的干缩和温缩裂缝,其开裂机理应同时从两种材料的温度响应特性综合考虑。国内外研究从材料的温缩系数、自身特性、环境温度以及荷载条件等多个方面进行分析,得到了大量的研究结论[4]。如鲍宇[5]从路面结构、温度变化、路面破坏状态等角度出发对寒冷地区沥青路面裂缝产生的原因做出了论述,并对沥青路面温缩裂缝的产生进行了机理分析,提出了沥青路面温缩裂缝的修补办法;蒋青春[6]对复合材料的破坏机理进行分析,结果表明:在行车荷载和温度变化循环作用下,由于水泥胶浆材料特性,与其他材料变形不一致,结构容易水泥胶浆材料与其他材料的接触面产生裂缝并不断扩展,最终出现开裂;陈华[7]以沥青的品种、含量以及环境温度为分析对象,分析不同因素对水工沥青低温线收缩系数的影响。研究结果为增强水工沥青混凝防渗性能提供了参考;张怀志等[8]研究水泥质量分数、级配和拌和方式对水泥稳定碎石材料温缩性能的影响。优化应变片法并建立微晶玻璃补偿的高精度温缩系数测量方法。

从已有研究现状来看,对于路面温度变形的研究,研究方法较为丰富,但研究的路面结构往往比较单一,局限于水泥或者沥青路面。因此,本文制作 UHPC + AC 复合试件并开展温度变形试验,设置 20°C 至-20°C 低温,20°C 至 60°C 高温,-20°C + 60°C 温度循环三种试验环境,汇总数据,比较不同温度作用下

复合试件 AC 层、UHPC 层产生的变形, 得到复合试件的温度变形规律, 给 UHPC + AC 复合路面结构设计提供参考。

## 2. 试验描述

UHPC + AC 复合试件的 AC 层, 参考规范[7]采用 AC-13, 由 70#道路石油沥青、石灰岩碎石、矿粉组成, 油石比为 5.04%; UHPC 材料由广东盖特奇新材料科技有限公司研制提供, 主要成分为水泥、复合掺合料、石英砂、高效减水剂、碎石、钢纤维等; 界面处理方式为粘结层(改性乳化沥青 1 kg/m<sup>2</sup>) + 嵌石(9.5~13.2 mm 嵌石粒径、50%撒布面积), 并最终利用车辙仪轮碾成型 UHPC + AC 复合试件。

试验具体步骤如下:

1) 试验前, 将复合试件切割为 300 mm\*100 mm\*80 mm 的 UHPC + AC 小型复合试件并进行预处理。清理试件表面, 保证表面平整, 分别 AC 层和 UHPC 层确定测量位置, 在初始温度 20℃ 下保温并记录试件初始长度。

2) 试验时, 将试件放入试验架上并固定, 测量方法为仪表法。其中低温温度选择-20℃, 高温温度选择 60℃, 将试件连同试验架一起放入烘箱中, 分别在保温 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 16 h, 20 h, 24 h 后分别记录 AC 层和 UHPC 层的结构变形情况, 测量读数时间不得超过 30 s, 以免影响试验效果。根据试验结果计算各面层的收缩系数, 计算公式如下所示。

$$\alpha = \frac{\Delta S}{L * \Delta T} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为温度收缩系数, 1/℃;  $\Delta S$  为试件在温度变化范围内的位移变化, cm;  $L$  为试件初始长度, cm;  $\Delta T$  为温度变化值, ℃。

3) 将复合试件干净, 表面打磨平整, 利用高低温交变箱进行温度循环。试验过程中冰冻温度采用 -20℃, 冰冻时间设定为 4 h; 融化温度采用 60℃, 融化时间设定为 6 h, 每经历一次冰冻或融化后对试件进行测量, 同样需要保证测量读数时间不得超过 30 s, 以免影响试验效果。

## 3. 复合试件温度变形规律

### 3.1. 低温下的变形规律

**Table 1.** Tab of shrinkage coefficients of composite specimens from 20℃ to -20℃

**表 1.** 20℃至-20℃复合试件收缩系数表

试件	AC 层	UHPC 层
试件 1	2.588E-05	2.042E-05
试件 2	2.426E-05	2.084E-05
试件 3	2.678E-05	1.752E-05
试件 4	2.010E-05	1.670E-05
试件 5	2.339E-05	1.712E-05
试件 6	2.836E-05	1.752E-05
试件 7	2.341E-05	1.877E-05
试件 8	2.509E-05	1.961E-05
试件 9	2.422E-05	1.878E-05
平均值	2.461E-05	1.859E-05

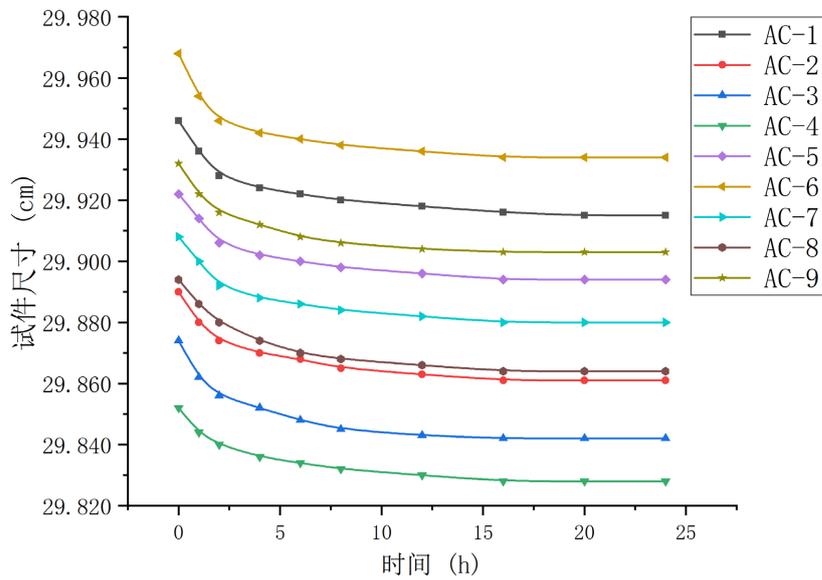


Figure 1. AC layer deformation at -20°C

图 1. -20°C 下 AC 层变形

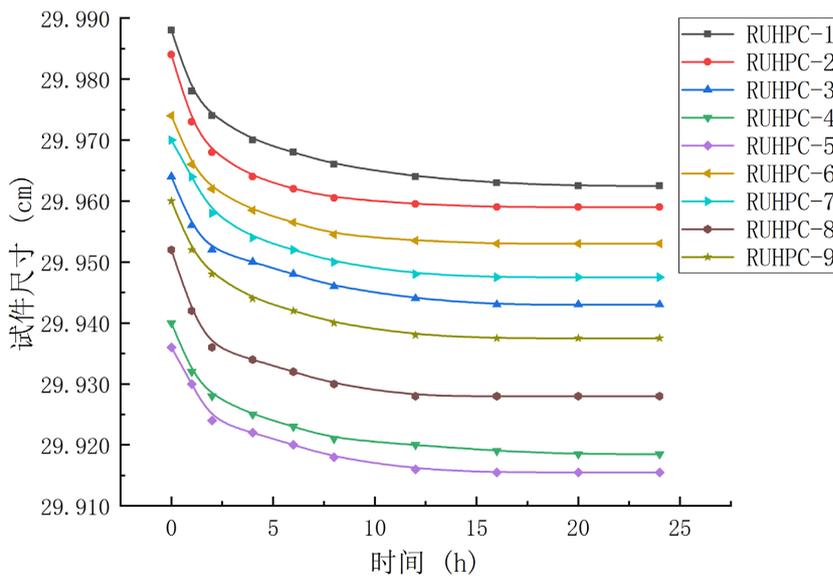


Figure 2. UHPC layer deformation at -20°C

图 2. -20°C 下 UHPC 层变形

对 9 个 UHPC + AC 复合试件展开低温变形试验，初始试验环境温度为 20°C，低温试验温度考虑到北方沥青路面实际使用情况降低到 -20°C，其中复合试件 AC 层，UHPC 层的变形结果见图 1、图 2，收缩系数见表 1 所示。

由试验数据可以总结低温环境下 UHPC + AC 复合试件变形规律：

1) 由 20°C 至 -20°C，AC 层和 UHPC 层在低温环境下均不断收缩，且二者变化规律相似，在前 2 h 收缩变化迅速占到总收缩量的 50~60% 左右，随着时间增加，试件收缩变形趋势不断减小。

2) 低温条件，在复合试件上下层相互约束下，AC 层平均变形量(2.944E-02 cm) > UHPC 层平均变形量(2.228E-02 cm)，AC 层低温收缩系数(-2.461E-05)大于 UHPC 层(-1.859E-05)。

3) 利用 Origin 对 20℃至-20℃下对 AC 层变形结果( $L_{S1}$ )、UHPC 层变形结果( $L_{S2}$ ), 实验时间  $t$  与试件原始尺寸  $L$  之间进行多元线性拟合。同时对试验数据以及拟合方程进行方差和协方差分析, 取公式的置信度为 0.05 时, 拟合公式的 F 检验是显著的, 拟合结果较好。由式(2)、式(3)可以预测复合试件 AC 层、UHPC 层变形随试验时间变化的结果。

$$L_{S1} = 2.667 + 4.889E - 4t + 0.911L, R^2 = 0.951 \quad (2)$$

$$L_{S2} = 1.615 - 7.063E - 4t + 0.946L, R^2 = 0.942 \quad (3)$$

### 3.2. 高温下的变形规律

对 9 个 UHPC + AC 复合试件展开试验, 初始环试验境温度为 20℃, 高温试验温度考虑到南方沥青路面实际使用情况提高到 60℃, 其中复合试件 AC 层与 UHPC 层的变形结果见图 3、图 4 所示, 收缩系数见表 2。

**Table 2.** Tab of shrinkage coefficients of composite specimens from 20℃ to 60℃  
**表 2.** 20℃至 60℃复合试件收缩系数表

试件	AC 层	UHPC 层
试件 1	1.302E-05	1.260E-05
试件 2	1.554E-05	1.007E-05
试件 3	1.304E-05	1.133E-05
试件 4	1.261E-05	1.258E-05
试件 5	1.515E-05	1.091E-05
试件 6	1.346E-05	9.644E-06
试件 7	1.347E-05	9.231E-06
试件 8	1.471E-05	1.006E-05
试件 9	1.261E-05	1.174E-05
平均值	1.302E-05	1.091E-05

试验数据可知高温环境下 UHPC + AC 复合试件变形规律:

1) 由 20℃至 60℃, AC 层和 UHPC 层在高温环境下均不断膨胀变形, 且二者变化规律相似: 在前 2 h 膨胀变形迅速, 占到总变形量的 60%左右, 随着时间的增加, 到试验后段, 试件膨胀变形趋势不断减小近似线性变化。

2) 高温条件下, 复合试件变形发展规律与低温环境下接近, 但变形量不如低温环境下复合试件收缩变形量。在上下层相互约束下, AC 层平均变形量(1.633E-02 cm)约为 UHPC 层平均变形量(1.301E-02 cm)的 1.24 倍, AC 层高温收缩系数(1.369E-05)略大于 UHPC 层收缩系数(1.091E-05), 均远小于低温收缩系数。可以明显看出 UHPC 层明显较 AC 层受温度作用影响小, 更加稳定。

3) 利用 Origin 对 20℃至 60℃下对 AC 层变形结果( $L_{S3}$ )、UHPC 层变形结果( $L_{S4}$ ), 实验时间  $t$  与试件原始尺寸  $L$  之间进行多元线性拟合。同时对试验数据以及拟合方程进行方差和协方差分析, 取公式的置信度为 0.05 时, 拟合公式的 F 检验是显著的。由式(4)、式(5)可以预测复合试件 AC 层, UHPC 层结构变形随试验时间变化的结果。

$$L_{S3} = 2.667 + 4.889E - 4t + 0.911L, R^2 = 0.951 \quad (4)$$

$$L_{s4} = 0.843 + 3.983E - 4t + 0.946L, R^2 = 0.968 \quad (5)$$

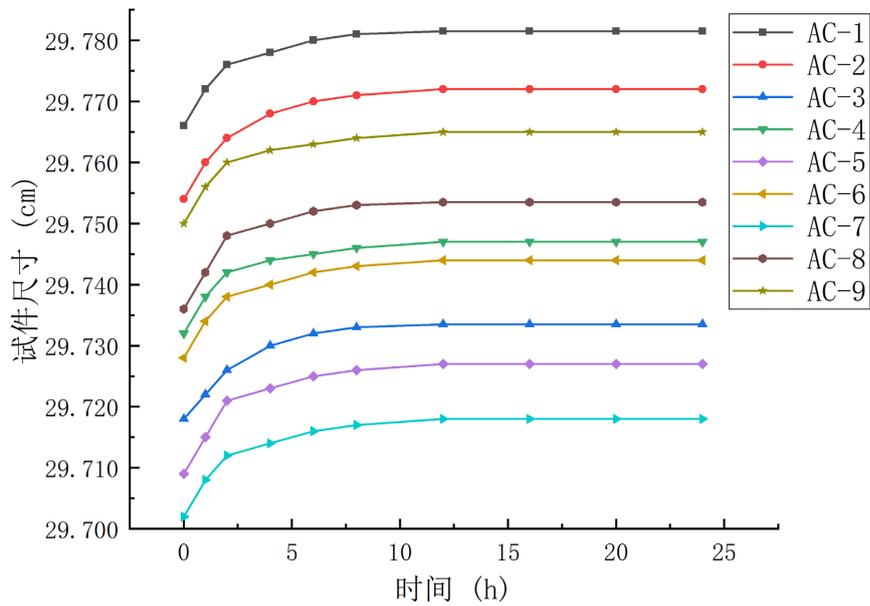


Figure 3. AC layer deformation at 60°C  
图 3. 60°C下 AC 层变形

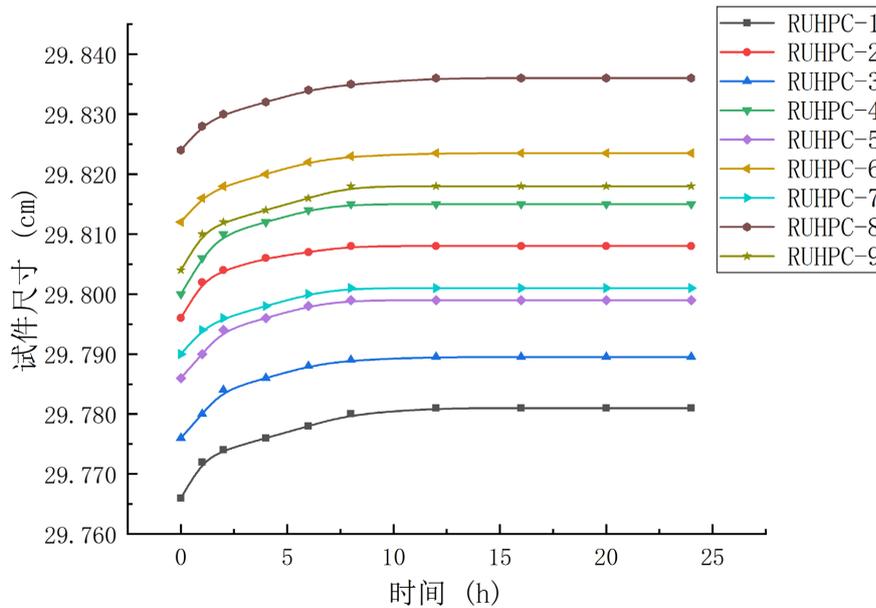


Figure 4. UHPC layer deformation at 60°C  
图 4. 60°C下 UHPC 层变形

### 3.3. 温度循环下的变形规律

对 9 个 UHPC + AC 复合试件展开温度循环变形试验，试验初始试验环境温度为 20°C，参考了相关文献资料以及高温、低温路面结构变形试验，循环冰冻温度采用 -20°C，融化温度采用 60°C。复合试件 AC 层，UHPC 层的结构变形结果见图 5~图 8 所示。

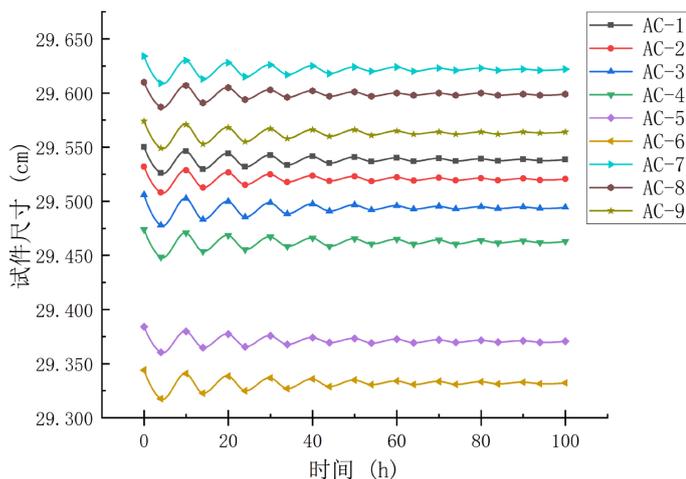


Figure 5. AC layer deformation under temperature cycling

图 5. 温度循环下 AC 层变形

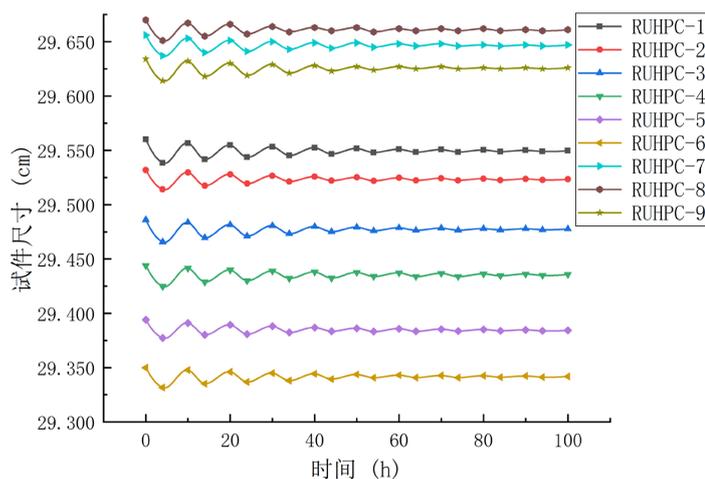


Figure 6. UHPC layer deformation under temperature cycling

图 6. 温度循环下 UHPC 层变形

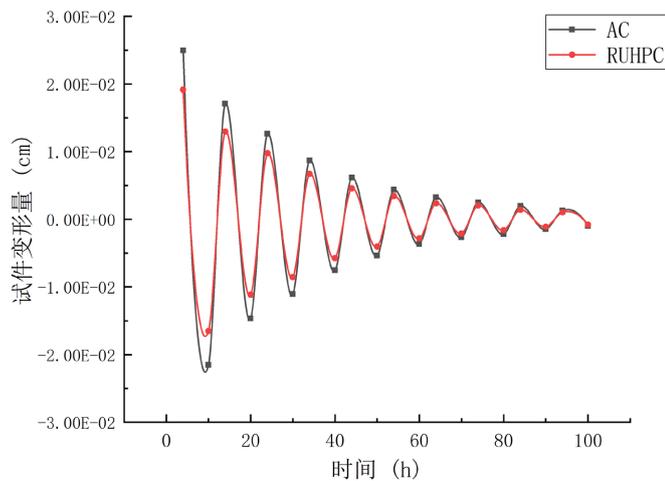
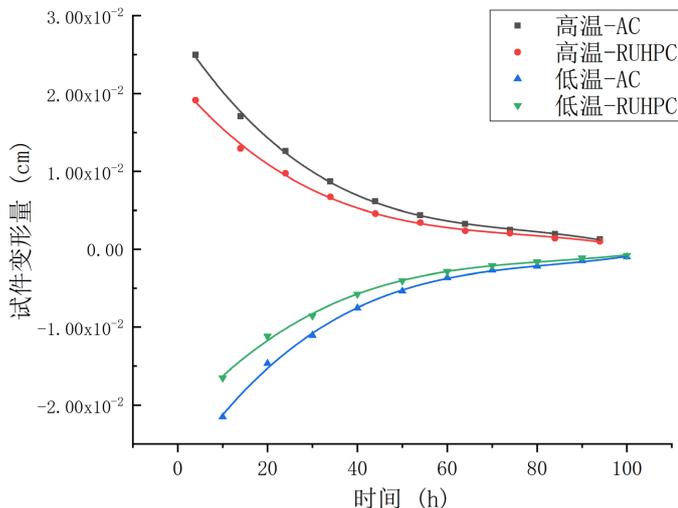


Figure 7. Deformation of upper and lower layers of C composite specimen under temperature cycling

图 7. 温度循环下复合试件上下层变形量



**Figure 8.** Fitted deformation of composite specimen under temperature cycling  
**图 8.** 温度循环下复合试件变形量拟合

由图 5~图 8 可知温度循环下 UHPC + AC 复合试件变形规律:

1) 当试验温度下降时, 试件开始收缩, 当试验温度上升时, 试件开始膨胀。这与常见的混凝土冻融循环变形规律试验结果不同。这是因为在常见的混凝土冻融循环试验, 将混凝土试件放入相应溶液浸泡, 在试验过程中随着温度的降低, 试件孔隙内的自由水逐渐结冰体积变大导致基体应变逐渐增大, 试件膨胀, 温度升高后, 孔隙内水开始融化, 膨胀造成的局部应力集中减弱, 混凝土基体应变也开始逐渐减少, 试件开始收缩。而本次温度循环试验并没有将试件进入液体中, 干燥后存在于混凝土大孔中的自由水基本蒸发殆尽, 仅浆体毛细孔中残存部分毛细孔水, 而难以排出的孔径低于 3 nm 的凝胶水在 0℃~-165℃ 是不结冰的[9]。进一步分析, 虽然当试验温度下降时, 试件开始收缩, 当试验温度上升时, 试件开始膨胀, 但试件变形曲线包络线随着温度循环次数的增加而降低, 这也就是说, 每一个循环结束, 试件并不会回复到原样, 上下层都有残余变形产生。

2) 相同温度循环时间段, AC 层的平均变形量均大于 UHPC 层平均变形量; 同样经历 10 次温度循环后, AC 层的平均变形量(0.116E-02 cm)也大于 UHPC 层平均变形量(0.089E-02 cm)。这主要是由于 UHPC 相对沥青混凝土孔隙较小, 结构更加致密稳定, 温度耐久性更好。

3) 对复合试件变形量曲线的包络线即温度循环中高温和低温下 AC 层、UHPC 层变形量进行多项式拟合分析见图 8 所示, 得到拟合方程见式(6)~(9), 由  $R^2$  可知拟合程度极好。

$$y_1 = -0.008 \ln X + 0.037, R^2 = 0.990 \quad (6)$$

$$y_2 = -0.006 \ln X + 0.028, R^2 = 0.989 \quad (7)$$

$$y_3 = -0.007 \ln X - 0.032, R^2 = 0.989 \quad (8)$$

$$y_4 = -0.005 \ln X - 0.024, R^2 = 0.989 \quad (9)$$

#### 4. 小结

本文以 UHPC + AC 复合试件为对象, 研究 AC 层与 UHPC 层在低温、高温以及温度循环作用下的变形规律, 通过分析实验数据, 在排除外界其他干扰下, 复合试件的变形更多是温度变化导致的, 可以得到如下结论:

1) UHPC + AC 复合试件在低温条件下收缩, 高温条件下膨胀, 温度变形集中在试验前 2 h, 其中 AC 层变形量及温度收缩系数均大于 UHPC 层。

2) 对复合试件温度变形结果  $L_s$ , 实验时间  $t$  与试件原始尺寸  $L$  之间进行多元线性拟合, 拟合程度较好, 可以预测复合试件上下层温度变形随试验时间变化的结果。

3) 在每一完整温度循环后, 复合试件上下层均有残余收缩变形, 且 AC 层收缩变形量大于 UHPC 层, 其中低温和高温阶段下 AC 层、UHPC 层变形量均随温度循环次数呈对数减小。

4) 在较大试验温差下, AC 层与 UHPC 层温度收缩系数、温度循环变形量均相差 20% 左右, 试验未发现复合试件产生由温度变形差异导致的裂缝, 表明复合试件温度协调变形符合路面使用要求。

## 基金项目

湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30259)。

## 参考文献

- [1] Li, J.Q., Wu, Z.M., Shi, C.J., *et al.* (2020) Durability of Ultra-High Performance Concrete—A Review. *Construction and Building Materials*, **255**, Article ID: 119296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- [2] 杨成军, 李锡松, 韦建孙, 韦琛, 余杨赞. 超高性能混凝土标准发展现状分析[J]. 广东建材, 2022, 38(5): 42-46.
- [3] 刘克非, 李宇峙, 彭兴旺. 环氧树脂混凝土温度收缩性能的试验研究[J]. 中外公路, 2008(1): 174-177.
- [4] 程于航. 冷热循环作用下半柔性复合路面开裂演变规律研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021. <https://doi.org/10.27671/d.cnki.gcjtc.2021.000069>
- [5] 鲍宇. 北方寒冷地区沥青路面温缩裂缝及防治方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
- [6] 蒋青春. SFP-13 半柔性混合料设计及抗裂性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [7] 陈华. 水工沥青混凝土低温收缩系数影响因素的试验研究[J]. 江西建材, 2020(10): 18-19+24.
- [8] 张怀志, 杨帆, 杨野. 不同类型水泥稳定碎石温缩系数对比试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 323-329.
- [9] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1133-1138. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.2012.08.007>