DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2024.06.009

**文章编号:**1671-2579(2024)06-0090-08

# 蒸养条件下超高性能混凝土收缩试验研究

李兵<sup>1</sup>,杨腾宇<sup>2</sup>,方昌乐<sup>3</sup>,罗滋润<sup>3\*</sup>,李传习<sup>3</sup>,谭珂<sup>1</sup>

(1.佛山市建盈发展有限公司,广东佛山 528000; 2.佛山市交通科技有限公司,广东佛山 528000;3.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**确定UHPC 自收缩是分析钢-UHPC 组合桥面板收缩效应的重要基础。为此,基于某工程拟用的UHPC 材料,制 作了3批UHPC 自收缩试件,每批制作3个试件。通过测试试件养护过程中的应变及温度,得到UHPC 自收缩应变-龄期曲线、试件温度-龄期曲线,探讨了该UHPC 收缩应变发展及变化规律。根据试验结果,结合 Tazawa & Miyazawa 收缩预测模型和阿伦尼乌斯温度效应经验公式,通过引入等效时间,拟合得到适用于UHPC 自收缩的预测模型。基 于试验结果的回归分析,得出了修正模型的各项系数。结果表明:时间零点至试件温度升到 90 ℃期间的收缩占蒸养 期间全部收缩的 42%,而后保持 90 ℃蒸养的 48 h 内自收缩不仅能发展至蒸养期间总收缩的 95% 以上,而且收缩应变曲 线会在此期间逐渐趋于平稳。UHPC 在等效 20 ℃密封养护条件下,其自收缩会在时间零点后 40 d左右基本发展完成。 **关键词:**桥梁工程;UHPC 自收缩;等效时间;时间零点;自收缩预测模型

**中图分类号:**U414 文献标志码:A

# Experimental Investigation on Shrinkage Effect of Ultra-High Performance Concrete under Steam Curing

#### LI Bing<sup>1</sup>, YANG Tengyu<sup>2</sup>, FANG Changle<sup>3</sup>, LUO Zirun<sup>3\*</sup>, LI Chuanxi<sup>3</sup>, TAN Ke<sup>1</sup>

(1. Foshan Jianying Development Group Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China; 2. Foshan Transport Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China; 3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China.)

Abstract: Determining the free shrinkage of UHPC is an important basis for analyzing the shrinkage effect of steel UHPC composite bridge deck. Therefore, based on the UHPC materials to be used in a project, three batches of UHPC free shrinkage specimens were made, and three specimens were made in each batch. By testing the strain and temperature of specimens during curing, the free shrinkage strain-age curve and temperature-age curve of UHPC were obtained. The development and variation law of UHPC shrinkage strain are discussed. Based on the experimental results, the equivalent time is introduced on the basis of Arrhenius empirical formula, and a modified model of free shrinkage is proposed. Finally, based on the regression analysis of the test results, the coefficients of the modified model are obtained. The results show that the shrinkage from time zero to the point that temperature rise to 90 °C accounts about 42% of the total shrinkage during steam curing, and then the free shrinkage developed to more than 95% of the total shrinkage during steam curing within 48 hours after steam curing with 90 °C. and the shrinkage strain curve will gradually stabilize during this period. And under the equivalent sealing curing condition of 20 °C, the free shrinkage of UHPC will be basically completed about 40 days after time zero.

Keywords: bridge engineering; UHPC free shrink; ageequivalent time; time-zero; autogenous predictive model

**收稿日期:**2023-11-17(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078059);湖南省交通科技项目(编号:202016)

作者简介:李兵,男,硕士,高级工程师.E-mail:libing-0401@163.com

<sup>\*</sup>通信作者:罗滋润,男,硕士.E-mail:2869994398@qq.com

# 0 前言

超高性能混凝土(以下简称UHPC)的优异性能<sup>[1]</sup> 使其适用于轻质、薄壁结构,如大跨度桥梁的桥面板、 薄壁箱梁、屋顶等结构<sup>[24]</sup>。UHPC基于最紧密堆积原 理级配,并添加钢纤维而成,具有较低的水胶比(≪ 0.2)。UHPC胶凝材料因水化反应使得内部产生许多 处于半饱和状态的毛细管。UHPC构件截面尺寸相对 较小,加之毛细管的张力作用,使得其存在较大的自收 缩,进而导致UHPC结构易形成早期收缩裂缝<sup>[5-8]</sup>。

在常规混凝土收缩方面,国内外学者进行了大 量研究。普通混凝土具有较高的水胶比,内部空隙 较大,在干燥环境下水泥基材料的水分会逐渐向外 迁移。因此,普通混凝土的干燥收缩占比较大,而自 收缩占比较小。但UHPC水胶比较低、内部结构致 密、孔隙率较低,使得水分难以向外迁移,所以 UHPC的干燥收缩较小,自收缩占比较大<sup>[3]</sup>。故普通 混凝土的收缩模型不适用于UHPC。冉国建等<sup>[9]</sup>测 定了混凝土在干燥养护、塑料薄膜包裹养护和涂刷 养护剂养护下的收缩变形情况,并指出合适的养护 能大大降低混凝土收缩,且混凝土收缩在15d左右 能基本完成。在UHPC方面,徐翔波等<sup>[10]</sup>通过测定 不同养护条件下(常温养护、蒸汽养护、蒸压养护) UHPC的微观结构和力学性能,指出热处理加速了 UHPC的水化过程且提高了材料的密实度,而在标 准养护下若要达到与热处理相应的强度则会花费较 长的养护时间。由上述可知,蒸汽养护(90℃以上) 是对 UHPC 的最佳养护方式,且 UHPC 收缩主要包 括自收缩和干燥收缩,而蒸养条件下UHPC干燥收 缩又近乎为零,因此自收缩是导致其早期开裂的主 要原因[11-12]。

UHPC 的收缩预测模型也按养护条件分为多种,在标准养护情况下 UHPC 的总收缩主要包括自收缩和干燥收缩,因此预测模型也一般由自收缩和干燥收缩两部分组成。刘丹<sup>[13]</sup>在结合 UHPC 内部相对温度、水化程度、孔结构分布和力学性能的基础上对 UHPC 的收缩机理进行分析,并分别建立了自收缩、干燥收缩等收缩预测模型;罗霞等<sup>[14]</sup>则对密闭条件下 UHPC 的收缩进行试验研究以排除干燥收缩造成的影响。国内外各规范也给出了推荐的混凝土自收缩预测模型<sup>[15-18]</sup>,但 UHPC 的收缩机理不同于普通

混凝土,故其自收缩预测模型也势必与普通混凝土 不同;Dilger等<sup>[19]</sup>在结合普通混凝土收缩预测模型的 基础上通过修正系数给出了纤维增强混凝土的自收 缩预测公式;刘松泰<sup>[20]</sup>和 Yoo等<sup>[21]</sup>对比了不同的 UHPC 自收缩预测模型,通过引入等效时间的概念 提出了适用于蒸汽养护条件下的UHPC 自收缩预测 模型;李传习等<sup>[22]</sup>在 Yoo等提出的等效时间与时间 零点的基础上,应用时变止效应方法顺利求解了养 护过程中UHPC 的弹性模量和足尺组合桥面板的收 缩应力,验证了Yoo等理念的可行性。

根据不同适用情况,前述 UHPC 自收缩计算模 型都有区别,各学者也因地制宜地根据所用UHPC 及养护情况对计算模型进行了修正。本文依托的佛 山市富龙西江特大桥为双塔双索面混合梁特大斜拉 桥,其中跨及次边跨主梁为钢-UHPC轻型组合梁,全 宽41.4 m、中心梁高3.5 m,组合桥面板采用8 mm平 钢板+15 cmUHPC 层的新型组合体系。钢-UHPC 轻型组合梁的钢箱梁横隔板及纵隔板分别通过宽 600 mm 和宽 500 mm 翼缘钢板上的剪力钉与桥面 UHPC层连接,桥面8mm底钢板则通过PBL剪力键 连接 UHPC 层。其 UHPC 收缩引起的钢-UHPC 组 合板效应与UHPC材料收缩性能紧密相关。钢纤维 掺量、混凝土配合比、收缩剂、减缩剂及膨胀剂的掺 量等均会影响 UHPC 的收缩性能,本文所用的 UHPC强度较高,配合比与前述文献有明显不同,因 此其收缩规律与其他UHPC也必然会有差异。目 前,现有混凝土自收缩的预测模型多在Tazawa & Mivazawa 的模型基础上修正得到,该模型计算公式 形式简单、易于理解,但其仅考虑了水灰比对自收缩 的影响,未考虑内部温度和湿度变化对其的影响,所 以不适用于水胶比较低的UHPC,需要对该模型进 行进一步的修改。为此,本文将围绕实桥所用 UHPC开展自收缩试验,通过对蒸养过程中UHPC 自收缩--龄期曲线及密闭空间温度--龄期曲线进行分 析,并在阿伦尼乌斯经验公式的基础上引入等效时 间,提出适用于该种UHPC的自收缩预测模型,用于 指导工程设计。

# 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验采用富龙西江特大斜拉桥钢-UHPC组合梁

所用的UHPC。UHPC由预混料(包括水泥、石英砂、矿粉、硅灰)、水、减水剂及外加剂组成,水胶比为0.16,质量配合比为:预混料:水:减水剂:其他外加剂=1:0.073:0.016:0.001。钢纤维采用长13 mm、长径比为65的平直型钢纤维,其体积掺量为2.3%。

参考《活性粉末混凝土》(GB/T 31387--2015)<sup>[23]</sup>及《超高性能混凝土基本性能试验与方法》 (T/CBMF 37-2018)<sup>[24]</sup>,与自收缩试件同步浇筑了 100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件、100 mm× 100 mm×400 mm的棱柱体试件、100 mm×100 mm× 300 mm的棱柱体试件以及 368 mm×50 mm×50 mm 的狗骨头试件(标距100mm)分别用于测定UHPC 材料的抗压、抗折、轴心抗压和轴心抗拉强度,材料 性能试验共有6组(每个试验组都包含以上4个子 试验,每个子试验均浇筑6个试件,结果取平均值), 分别命名为 Sp-1 至 Sp-6, 其中 Sp-1、Sp-2 对应第 一次自收缩试验, Sp-3、Sp-4对应第二次自收缩试 验,Sp-5、Sp-6对应第三次自收缩试验,同一次自收 缩试验要做两批材性试验(由两组人员同时进行) 的原因是避免试验手法对试验结果的误差。测试结 果如表1所示。材性试件的养护方式同自收缩试件 (见1.2)。

表 1 UHPC 材料性能试验结果 Table 1 Test results of UHPC material properties

试件	立方体抗压 强度 <i>f</i> <sub>cu</sub> /MPa	抗折强度 <sub>ff</sub> /MPa	轴心抗压强 度 <i>f</i> c/MPa	轴心抗拉强 度 <i>f</i> <sub>t</sub> /MPa
Sp-1	184.3	48.7	145.6	10.6
Sp-2	176.9	44.5	159.7	10.9
Sp-3	186.3	46.3	160.6	12.4
Sp-4	181.6	48.5	153.6	11.2
Sp-5	178.3	51.9	155.9	10.7
Sp-6	184.3	53.5	157.8	11.3
平均值/MPa	181.9	48.9	155.7	11.2
变异系数/%	4.60	0.09	7.40	13.10

## 1.2 试验装置及测试方案

在蒸养环境下,UHPC的自由收缩基本不包含 干燥收缩,以自收缩为主,因此所测的自收缩数据可 以直接视为其自收缩并进行分析。目前,UHPC自 收缩的测试方法主要为非接触法<sup>[25]</sup>。参考《普通混 凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[26]</sup>、《纤维混凝土试验方法标准》 (CCES 13:2009)<sup>[27]</sup>,本试验采用非接触式混凝土收 缩变形测定仪测定UHPC材料自收缩率。试验装置 如图1所示。该仪器配置的温度传感器能够同步采 集蒸养过程中密闭环境的温度数据,而由于自收缩 试件的尺寸为515 mm×100 mm×100 mm,体积较 小,可以将密闭环境的温度视作试件芯部温度。



图 1 非接触式混凝土收缩变形测定仪示意图(单位:mm) Figure 1 Touch-free shrinkage measurement instrument of concrete (unit:mm)

试验时通过涂抹润滑油与加垫四氟乙烯薄板来 减少钢模与UHPC间的摩擦,将待测试UHPC混合 料倒入模具后依次将反射标靶、传感器固定器固定 好并开启测试主机,输入标距和采集间隔(本试验为 1h)后即可开始测量。测试时固定于模具两端的电 涡流传感器会自动定时对埋入UHPC的相应侧标靶 进行位移测量,精确量出UHPC的收缩或者膨胀变 形,测试在关闭蒸养机后12h结束。

试件养护方式为:浇筑完成后用塑料薄膜密封, 室温养护待试件成型,该阶段由于水泥水化反应剧 烈,导致试件温度上升,待试件温度上升至顶点再降 回室温时拆模(根据浇筑时当天气温,该阶段历时 20~30 h),拆模后立刻放入密闭空间内进行蒸汽养 护(蒸汽养护分为3个阶段:①升温阶段,从开启蒸 养机至环境温度升至90℃,此过程历时4~6 h;②恒 温阶段,从环境温度达到90℃起,标志蒸养正式开 始,此时蒸养机供热速率保持不变,密闭空间内的温 度与试件温度基本不变,历时48 h;③自然降温阶 段,关闭蒸养机后待试件降温至常温即可,历时12~ 16 h)。

本试验共进行了3批UHPC自收缩试验,同一天 进行浇筑,室温为28℃,每批浇筑3个试件,收缩应变 的结果取每批3个试件的平均值,3批试件平均值分 别编号为F1、F2、F3。 第6期

# 2 试验结果及分析

#### 2.1 时间零点的确定

直接测得的收缩应变,需进行温度修正方能得 到实际收缩值。修正公式如下:

 $ε = (ε_1 - ε_0) + (T_1 - T_0)(F_s - F_c)$  (1) 式中: ε为实际收缩值; ε<sub>1</sub>为当前应变值; ε<sub>0</sub>为初始应变 值; T<sub>1</sub>为当前温度值; T<sub>0</sub>为初始温度值; F<sub>s</sub>为钢模板线 膨胀系数,取12.2×10<sup>-6</sup>/°C; F<sub>c</sub>为结构体线膨胀系 数,按文献[28-29]取11.0×10<sup>-6</sup>/°C。值得说明的是, 虽然 UHPC 的热膨胀系数会受到温度的影响,但是 根据法国规范<sup>[30]</sup>, UHPC 的热膨胀系数在200 °C以上 时会随温度升高而发生很大变化,而在200 °C以内 时,热膨胀系数的大小变化不明显,90 °C与20 °C的差 值为0.5%~1.5%。

UHPC的自收缩测试结果与测试起点确定存在 直接关系<sup>[34,22]</sup>。Yoo等<sup>[4]</sup>指出文献[31]中使用 UHPC初凝或者终凝时间点作为自收缩的起点的方 法并不适合UHPC,并提出了一个"时间零点"作为 测量混凝土自收缩的时间起点,同时认为用UHPC 水化早期的应变与温度之间偏离点作为"时间零点" 最合适。本文采用了这种方法。

图 2 为 3 批试件浇筑成型后密闭空间温度及应 变平均值随时间的变化曲线(每批 3 个试件的测试结 果取平均值)。

由图2可知:在浇筑完成初期,即时间零点之前, 温度与应变呈负相关性。但在开始蒸养1h后,出现 了Yoo等<sup>[4]</sup>提出的温度与应变的偏离点(自收缩时间 零点),即温度上升,UHPC反而收缩。后续蒸养过 程应变曲线均以该偏离点作为起点。

#### 2.2 UHPC 自收缩

图 3为 UHPC 自收缩平均值和温度随龄期的变化曲线。

由图 3 可知: UHPC 自收缩曲线大致可分为 3 个 阶段:

(1)升温阶段,在此阶段各组试件由于蒸养而迅速升温至90℃以上(由于试验当天外界温度不同, F1、F2、F3试件达到90℃的龄期分别为4h、5h、6h; 且蒸养时的最高恒温温度分别为96℃、98℃、94℃, 而温度不断上升加速了UHPC基体中掺合料的二次 水化反应,从而导致收缩迅速发展,此阶段的累积收



Figure 2 Initial shrinkage and temperature behaviors measured from strain gauge

缩应变占蒸养阶段收缩总值的42.2%~53.9%。

(2)恒温阶段,此阶段各试件的温度都超过 90℃且趋于稳定,养护进入恒温48h阶段,试件的 收缩应变变化也在此阶段的中后期变得平缓。根据 各试件达到的最高恒温温度,其累积收缩应变发展 的快慢也不同,温度较高的试件发展得较快。恒温 阶段温度最高的为F2批次,试件温度达到了98℃, 其在龄期30h左右UHPC基体内部水化反应基本 停止,此时的累积收缩应变占蒸养阶段总收缩应变 的96%,到龄期53h关闭蒸养机时应变也只增长了 11×10<sup>-6</sup>。恒温阶段温度最低的F3批次(94℃)在



(c) F3 批次试件收缩应变平均值及密闭空间温度





龄期40h时收缩应变变化曲线才平缓下来,但其在 此时的累积收缩应变也占蒸养阶段总收缩应变的 95%。且各批试件的最终自收缩数值相差在20× 10<sup>-6</sup>以内,说明温度的提高仅加快了UHPC收缩发 展进程,对UHPC的收缩数值并没有明显影响。

(3)降温阶段,各试件在龄期53h时关闭蒸养机,然后待试件自然降温12h。3批试件在此阶段内的UHPC收缩应变增长值为18×10<sup>-6</sup>~27×10<sup>-6</sup>。由于浇筑完成后试件立即采用密封处理,直至拆模, 且蒸汽养护的情况下不会有干燥收缩,因此,所测的收缩均为UHPC的前期自收缩。将3批次试件蒸养 期间所测得自收缩应变取平均值后得出本试验所用 UHPC的自收缩约为726×10<sup>-6</sup>。

# 3 UHPC 自收缩计算公式探讨

### 3.1 现有混凝土自收缩计算公式

由于收缩应变自混凝土浇筑起就一直在发展, 而试验中仅能测量一段时间内的收缩,这样往往只 能得到某一段时间内的收缩应变,因此有必要拟合 一个能随着时间推移连续预测收缩应变的模型。目 前大多数计算公式均是在Tazawa&Miyazawa的模 型<sup>[16]</sup>基础上进行修正得到,Tazawa&Miyazawa模型 的计算公式如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{as}}(t) = \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{as}^{\infty}} \boldsymbol{\beta}(t) \tag{2}$$

其中,当
$$0.2 \leqslant \frac{W}{B} \leqslant 0.5$$
时,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{asoo} = \begin{cases} -3\,700 \exp\left(-7.2\frac{W}{B}\right) & 0.2 \leqslant \frac{W}{B} \leqslant 0.5 \\ 80 & 0.5 < \frac{W}{B} \end{cases}$$
(3)

$$\beta(t) = 1 - \exp\left[-\alpha(t - t_s)^b\right] \tag{4}$$

式中:t为当前龄期; $t_s$ 为初始龄期; $\epsilon_{as}(t)$ 为龄期t时 刻的自收缩值; $\gamma$ 为与水泥类型有关的系数,对于 式(2)按普通波特兰水泥取1.0,目前暂无UHPC相 对应的取值; $\epsilon_{asco}$ 为混凝土最终自收缩值; $\beta(t)$ 为自 收缩随龄期的发展函数;W/B为水胶比; $\alpha$ 、b为自收 缩过程特征的回归系数,可以通过试验确定。

该模型的计算公式较简单,且其采用的各影响 因素相乘的形式以及幂指函数形式都能较好地符合 混凝土自收缩先急后缓的发展趋势。但其仅考虑了 水灰比对于自收缩的影响情况,未考虑内部温、湿度 变化的影响,不适用于UHPC(水胶比较低)。本文 通过对此模型进行修改,提出适用于UHPC的自收 缩预测模型。

#### 3.2 UHPC 自收缩预测模型

UHPC反应速率随温度的不同而变化,进而影响其收缩测值,因此有必要引进等效时间用于考虑 温度效应。Hashida等<sup>[29]</sup>曾采用阿伦尼乌斯经验公 式用于考虑温度效应,计算公式如下:

$$t_{\rm e} = \int_{0}^{t} \exp\left[\frac{E_{\rm a}(T)}{R} \left(\frac{1}{T_{\rm ref} + 273} - \frac{1}{T_{\rm t} + 273}\right)\right] dt$$
(5)

据回归得出。

式中: $E_{a}(T)$ 为活化能,可根据ASTM C1074<sup>[32]</sup>确定, 为40000 J/mol; R为理想气体常数,取8.315 J/(mol•K);  $T_{ref}$ 为参考温度,取20℃; $T_t$ 为当前实际温度。采用 $t_e$ 替换式(4)中的*t*来做到温时等效。

本试验以时间零点作为自收缩的开始点,所以 式(4)中的t。也可用0代替。根据上述条件,通过最小 二乘法的非线性回归分析拟提出的修正后预测模型 如下.

将本文中3批自收缩试件不同时刻的等效龄期及  $\left| \left[ 1 - \exp(-c \cdot t_{\rm e}) \right] \right|$ 收缩值代入式(6),经回归分析可得不同的 $a_b_c$ 的值。 0 -100-100-100实测值 实测值 实测值 -200模型预测值 -200 -200模型预测值 模型预测值 -300-300-300  $10^{-6}$  $10^{-6}$ -400回後日 -400-400回逐/ -500-500-500-600 -600 -600 -700-700 -700-800-800-800 0 10 20 30 40 50 60 70 20 30 40 50 70 10 20 30 40 50 70 0 10 60 0 60 龄期(从时间零点开始)/d 龄期(从时间零点开始)/d 龄期(从时间零点开始)/d (a) F1 批次试件 (b) F2 批次试件 (c) F3 批次试件

图4 各试件试验值与模型预测值

Figure 4 Measured value and predicted value of each specimen

各预测模型的a、b、c取值及3批试件预测模型系 数平均值见表2。

表2 预测模型系数 Table 2 Coeffocient of prediction model

编号	а	b	С	$R^2$
F1	-1 331.215	-3.707	-0.372	0.981
F2	-1228.174	-3.114	-0.401	0.991
F3	-1276.791	-3.056	-0.355	0.991
平均值	-1278.727	-3.292	-0.376	

从图4和表2可以看出,3批自收缩试件的收缩 应变实测值与模型预测值拟合情况良好,3批试件 的拟合模型 $R^2$ 都达到了0.98以上,且3批试件回归 得来的各项系数相差不大。将之前各批次试件水化 反应基本停止的龄期(F1、F2、F3批次试件分别为 时间零点后35h、30h、40h)转换成等效龄期后,分 别为40.13 d、38.59 d、41.16 d,说明若在20℃下密封 养护,本试验所用UHPC的自收缩会在时间零点后 40 d 左右基本完成。而提高养护温度则会加快 进程。

#### 结论 4

(1)本试验所用UHPC的自收缩约为 $726 \times 10^{-6}$ , 从时间零点至试件温度达到 90 ℃期间其自收缩能发 展至蒸养期间总收缩的42%以上,保持90℃以上蒸 养48h后UHPC的自收缩能完成95%以上,蒸养仅 加快了收缩的发展进程,蒸养温度越高自收缩发展 完成所需时间越短。

式中: $\epsilon_{as}(t_{e})$ 为换算等效龄期后 $t_{e}$ 时刻的自收缩值:a

为综合影响系数(包括骨料粒径、活性掺合料、钢纤

维种类和掺量以及水泥品种的影响):b为水胶比及

外加剂的影响系数;c为自收缩过程中曲线发展特征

的回归系数。式中a、b、c都可以通过试验所测的数

图(龄期为从时间零点开始等效20℃的养护天数)。

图 4 为 3 批试件试验值与回归值随龄期的对比

(2)将"时间零点"作为自收缩起点,有效规避了 将流动状态的早期收缩归于材料自收缩,避免了 UHPC自收缩估算偏大的情况。等效时间的引入则 消除了UHPC 自收缩预测模型中温时不等效的情况, 能在同一尺度下反映各试件收缩应变的发展规律。

(3) 最终回归所得 UHPC 收缩预测模型的计算 值与实测值拟合良好(a=-1278.727,b=-3.292, *c*=-0.376), Tazawa & Miyazawa 模型可作为 UHPC 自收缩计算模型。UHPC养护期间,任意时刻的自 收缩数值可由龄期与养护温度得到。根据预测模型 推算,本文所用UHPC在等效20℃下密封养护时,其 自收缩在时间零点后40d左右能基本发展完全。



#### 参考文献:

#### **References:**

- [1] 李良,钟镇鸿,周志成,等.超高性能混凝土 UHPC 力学性 能及应用介绍[J].混凝土世界,2018(9):56-62.
   LI Liang, ZHONG Zhenhong, ZHOU Zhicheng, et al. The mechanical properties and applications of ultra-high performance concrete[J].China Concrete,2018(9):56-62.
- [2] 张杰,蔺鹏臻.UHPC加固钢筋混凝土简支梁后可靠度分析[J].中外公路,2023,43(5):72-77.
   ZHANG Jie, LIN Pengzhen. Reliability analysis of RC simply supported beams strengthened by UHPC[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(5):72-77.
- [3] YOO D Y, SHIN H O, LEE J Y, et al. Enhancing cracking resistance of ultra-high-performance concrete slabs using steel fibres[J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67 (10):487-495.
- [4] YOO D Y, BANTHIA N, YOON Y S. Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiberreinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2015,64:27-36.
- [5] 聂建国.我国结构工程的未来:高性能结构工程[J].土木 工程学报,2016,49(9):1-8.
   NIE Jianguo.The future of structural engineering in China: High-performance structural engineering[J]. China Civil Engineering Journal,2016,49(9):1-8.
- [6] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用
  [J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
  SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 1-13.
- [7] 李传习,周佳乐,柯璐,等.配筋UHPC矩形梁抗扭承载性
   能试验与计算方法[J].中国公路学报,2021,34(8):118-131.

LI Chuanxi, ZHOU Jiale, KE Lu, et al. Experimental investigation and calculation of the torsional capacity of reinforced UHPC rectangle beams[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(8):118-131.

[8] 李传习,聂洁,潘仁胜,等.水胶比对超高性能混凝土施工 与力学性能的影响[J].土木与环境工程学报(中英文), 2020,42(4):164-174.

LI Chuanxi, NIE Jie, PAN Rensheng, et al. Effect of water-

to-binder ratio on construction and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2020,42(4):164-174.

[9] 冉国建,姜怡林,吴昊南,等.养护方式对混凝土收缩性能的影响[C]//2021年工业建筑学术交流会论文集(下册). 北京,2021:838-841,937.

RAN Guojian, JIANG Yilin, WU Haonan, et al. Effect of curing method on the shrinkage performance of concrete [C]//2021 Industrial Building Academic Exchange.Beijing, 2021:838-841,937.

[10] 徐翔波,于泳,金祖权,等.养护制度对超高性能混凝土微观结构和力学性能影响的研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2021,40(9):2856-2870.

XU Xiangbo, YU Yong, JIN Zuquan, et al. Review on effects of microstructure and mechanical properties of ultra-high performance concrete by curing regimes[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(9):2856-2870.

[11] 李家和,刘铁军,欧进萍.高性能混凝土的自收缩与干燥 收缩[C]//中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员 会第五届学术讨论会,2004.

LI Jiahe, LIU Tiejun, OU Jinping. Self-shrinkage and dry shrinkage of high performance concrete[C]//The fifth Symposium of High Strength and High Performance Concrete Committee of China Civil Engineering Society, 2004.

- [12] 陈宝春,李聪,黄伟,等.超高性能混凝土收缩综述[J].交通运输工程学报,2018,18(1):13-28.
  CHEN Baochun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2018,18(1):13-28.
- [13] 刘丹.不同养护制度下活性粉末混凝土早期收缩的模型研究[D].北京:北京交通大学,2017.
  LIU Dan. Research on the early shrinkage-age model of reactive powder concrete in different curing conditions[D].
  Beijing:Beijing Jiaotong University,2017.
- [14] 罗霞,韦建刚,李聪,等.密闭条件下UHPC的收缩性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(4):830-842.
  LUO Xia, WEI Jiangang, LI Cong, et al. Experimental investigations of the shrinkage behavior of sealed UHPC
  [J].Journal of Basic Science and Engineering,2018,26(4): 830-842.
- [15] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete[C]// Proc.of Int.Workshop,London:E& FN Spon,1998:269-280.

- [16] KORDINA K R, MANCINI G, SCHÄFER K, et al. Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance (Second edition Volume 4) [M]. fib. The International Federation for Structural Concrete.2010.
- [17] 赵辛玮,肖汝诚,孙斌,等.常温养护型超高性能混凝土
   组合桥面板收缩性能研究[J].中外公路,2020,40(3):
   100-107.
   ZHAO Xinwei,XIAO Rucheng,SUN Bin, et al. Study on

shrinkage performance of composite bridge deck with ultra-high performance concrete cured in normal temperature[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(3):100-107.

- [18] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage and temperature effect in concrete structures[R]. Detroit: ACI, 1992.
- [19] DILGER W H, WANG C. Creep and shrinkage of highperformance concrete[C]//SP-194: The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects.American Concrete Institute,2000.
- [20] 刘泰松.活性粉末混凝土的收缩理论和试验研究[D].北 京:北京交通大学,2008.

LIU Taisong.Study of reactive powder concrete shrinkage theory and experimental research[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2008.

- [21] YOO D Y, KIM S, KIM M J. Comparative shrinkage behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under ambient and heat curing conditions[J]. Construction and Building Materials,2018,162:406-419.
- [22] 李传习,方昌乐,张永明,等.新型组合桥面板UHPC收缩 效应足尺试验[J].中国公路学报,2023,36(6):94-106.
  LI Chuanxi,FANG Changle,ZHANG Yongming, et al.Full-scale experiment on UHPC shrinkage effect of innovative composite bridge deck[J].China Journal of Highway and Transport,2023,36(6):94-106.
- [23] 清华大学.活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S].北京: 中国标准出版社,2015.
  Tsinghua University. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S].Beijing:Standards Press of China,2015.
- [24] 清华大学,江西贝融循环材料股份有限公司,南京倍立 达新材料系统工程股份有限公司.超高性能混凝土基本 性能试验与方法:T/CBMF 37—2018[S].北京:中国建材 工业出版社,2018.

Tsinghua University, Jiangxi Beirong Recycling Materials Co., Ltd., Nanjing Beilida New Materials System Engineering Co., Ltd.. Fundamental characteristics and testmethods of ultra-high performance concrete :T/CBMF 37—2018[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2018.

- [25] 鲁亚,闵洋洋,刘华明,等.超高性能混凝土(UHPC)的收缩 测试方法研究[J].混凝土世界,2020(6):50-54.
  LU Ya, MIN Yangyang, LIU Huaming, et al. Study on shrinkage testing method of ultra-high performance concrete (UHPC)[J].China Concrete,2020(6):50-54.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性 能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北 京:中国建筑工业出版社,2010.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010

- [27] 大连理工大学.纤维混凝土试验方法标准:CCES 13: 2009[S].北京:中国计划出版社,2009.
  Dalian University of Technology. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CCES 13: 2009[S]. Beijing: China Academy of Building Research,2009.
- [28] 黄政宇,胡功球.热养护过程中超高性能混凝土的收缩 性能研究[J].材料导报,2016,30(4):115-120.
  HUANG Zhengyu, HU Gongqiu. Research on the shrinkage performance of ultra high performance concrete during heat curing[J]. Materials Review, 2016, 30(4): 115-120.
- [29] HASHIDA H, YAMAZAKI N. A study on composed deformation of autogenous shrinkage and thermal expansion due to heat of hydration in high-strength concrete[J]. Concrete Research and Technology, 2002, 13 (1):25-32.
- [30] BFUP AFGC. Ultra high performance fibrereinforcedconcretes recommandations[S]. France: AFGC Working Group,2013.
- [31] TAZAWA E I. Autogenous shrinkage of concrete[M]. London:E&F N Spon,1999.
- [32] INTERNATIONAL A. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method[S].ASTM,2011.