

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.03.015

【全国病险水库安全评估及除险加固技术前沿研讨会 论文精选】

# 养护环境对混凝土早期收缩性能的影响

窦国竞<sup>1,2</sup>, 张雷<sup>2</sup>, 王中林<sup>1,2</sup>, 刘志伟<sup>1,2</sup>, 王志华<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 针对养护环境对混凝土早期收缩性能的影响, 采用接触式立式混凝土收缩仪开展混凝土早期自由收缩试验, 研究了不同温度(10 °C、20 °C、40 °C)和湿度(RH60%、RH90%)对混凝土早期收缩性能的影响规律。试验结果表明: (1) 温度对混凝土收缩影响规律明显。在1 d龄期内, 无论相对湿度高低, 混凝土收缩率都会随着温度的升高而升高; 在14 d龄期内, 温度升高会增大混凝土的前期收缩变形, 但对长期变形有减小作用, 且在湿度值越大的情况下温度提升对混凝土收缩影响越明显, 升温过快或过高使混凝土早期迅速发生水化反应, 产生更多水化产物, 形成稳定结构抵抗后期变形。(2) 湿度对混凝土收缩影响规律明显。在1 d龄期内, 在环境温度10 °C和20 °C条件下, 混凝土收缩率随着湿度的增加而增加, 说明湿度有利于混凝土早期水化反应; 在14 d龄期内, 混凝土在RH60%条件下收缩率明显大于RH90%条件下收缩率, 且随着龄期的增加, 湿度差异对混凝土收缩率影响作用逐渐增强。

**关键词:** 混凝土; 温度; 湿度; 早龄期; 自由收缩

中图分类号: TV32

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0262-06

## Effect of curing environment on early shrinkage performance of concrete

DOU Guo-jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, WANG Zhong-lin<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-wei<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In view of the influence of curing environment on the early shrinkage performance of concrete, the early free shrinkage test of concrete was carried out by using the contact type vertical concrete shrinkage meter. The effects of different temperatures (10 °C, 20 °C, 40 °C) and humidity (RH60%, RH90%) on the early shrinkage performance of concrete were studied. The results showed that: (1) The effects of temperature on concrete shrinkage is obvious. In 1-day age, regardless of the relative humidity, the shrinkage rate of concrete will increase with the increase of temperature. At 14 days of age, the increase of temperature will increase the early shrinkage deformation of concrete, but reduce the long-term deformation. Moreover, the higher the humidity value is, the more obvious the effect of temperature rise on concrete shrinkage will be. If the temperature rises too fast or too high, the hydration reaction will occur quickly in the early stage of concrete, and more hydration products will be produced to form a stable structure to resist the late deformation. (2) The effects of humidity on concrete shrinkage is obvious. In 1-day age, under the ambient temperature of 10 °C and 20 °C, the shrinkage rate of concrete increases with the increase of humidity, indicating that humidity is beneficial to the early hydration of concrete. At 14 days of age, the shrinkage of concrete under RH60% condition is significantly greater than that under RH90% condition, and with the increase of age, the effect of humidity difference on the shrinkage rate of concrete is gradually strengthened.

**Key words:** concrete; temperature; humidity; early age; free shrinkage

## 0 研究背景

混凝土具有许多优良特性, 包括容易成型、强

度大以及耐久性等, 这些特性使其在水利水电工程和土木工程中广泛应用, 成为耗量最大的一类建筑材料。而大型建筑设施置于西部地区或是高纬度地

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779101, U1965110); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX20\_0160, SJ CX20\_0161); 中央高校基本科研业务费(学生项目)(B200203190, B200203191)。

作者简介: 窦国竞(1997—), 男, 江苏邳州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水工结构材料。E-mail: 577034792@qq.com。

区, 以及海洋环境中时, 冻融和盐侵蚀也会侵蚀混凝土, 恶劣环境下施工及养护问题也尤为突出, 这些不利条件对混凝土使用寿命造成巨大影响<sup>[1-3]</sup>。所以, 现在首要的问题就是增强混凝土耐久性以及提升混凝土质量。

收缩是引起混凝土开裂的起始原因, 除此之外, 徐变、弹性模量、抗拉强度这些因素也会促使混凝土开裂。高性能混凝土需要用的胶凝材料比低性能混凝土多, 它的水胶比低于其他类型的混凝土, 因此内部水分缺失, 导致混凝土较大的自收缩<sup>[4]</sup>; 干燥环境下混凝土内部水分也会持续损耗, 导致干燥收缩的发生; 普通混凝土的收缩变形只有高性能混凝土的二分之一, 因此高性能混凝土在早期发生较大的收缩<sup>[5]</sup>。混凝土早期开裂会产生较多工程问题, 人们对混凝土的裂缝防治更加关注, 而养护环境对混凝土收缩性能的影响尤为突出, 故本文研究了不同温湿度条件下混凝土早期收缩性能变化规律, 为制定防缩措施提供理论依据。

## 1 试验内容及方法

### 1.1 原材料

试验中使用的胶凝材料为新乡市新星水泥厂生产的P.O 42.5水泥, 满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)要求, 其参数见表1; 试验选用粒径为5~10 mm、10~20 mm的单级配玄武岩碎石作为粗集料原材料, 混合后满足《建设用碎石、卵石》(GB/T 14685—2011)5~20 mm连续级配要求, 如表2所示; 试验细集料选择厦门艾思欧标准砂有限公司按照GB/T 17671—1999生产的标准砂, 砂子的级配满足《建设用砂》(GB/T 14684—2011)要求; 水为自来水。

表1 水泥物理和力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

初凝/ min	终凝/ min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
160	210	5.7	8.5	28.8	61.9

表2 粗骨料级配

Table 2 Grading of coarse aggregate

筛孔尺寸/mm	累计筛余/%
<2.36	98.8
2.36	96.3
4.75	94.1
9.50	69.6
16.00	0.0

### 1.2 配合比

试验用混凝土配合比如表3所示, 强度等级为C30。

表3 混凝土配合比

Table 3 Proportions of concrete mix

标号	水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	水/(kg/m <sup>3</sup> )	石子/(kg/m <sup>3</sup> )	砂/(kg/m <sup>3</sup> )
C30	325	185	1 228	662

### 1.3 试验方案

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009), 采用接触法-立式混凝土收缩仪测定混凝土收缩性能, 试验装置见图1。试件尺寸为100 mm×100 mm×515 mm。浇筑完成后在温度(20±2) °C、相对湿度95%以上的标准养护室内养护。带模养护1 d后, 取出试块并置于环境模拟箱中进行测量, 为获得更加直观全面的规律图, 采用实时采集数据数字式千分表, 并通过计算机程序同步记录, 采集频率为10 min。温湿度环境模拟箱设定的环境参数如表4所示。



图1 收缩试验装置

Fig. 1 Apparatus for shrinkage test

表4 混凝土收缩试验养护环境参数

Table 4 Parameters of curing environment in concrete shrinkage test

养护条件编号	温度/°C	相对湿度/%
10 °C-60%RH	10	60
10 °C-90%RH	10	90
20 °C-60%RH	20	60
20 °C-90%RH	20	90
40 °C-60%RH	40	60
40 °C-90%RH	40	90

收缩率计算方程式如式(1)所示:

$$\epsilon_{sh,t} = \frac{L_0 - L_t}{L} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_{sh,t}$  为  $t$  时刻混凝土收缩率;  $L_0$  为  $t_0$  时刻千

分表数, mm;  $L_t$  为  $t$  时刻千分表数, mm;  $L$  为混凝土试件长度, mm, 本文取 515 mm。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 温度对混凝土收缩性能的影响

相对湿度60%和90%条件下,不同温度在14 d龄期内混凝土早期收缩试验结果如图2所示。

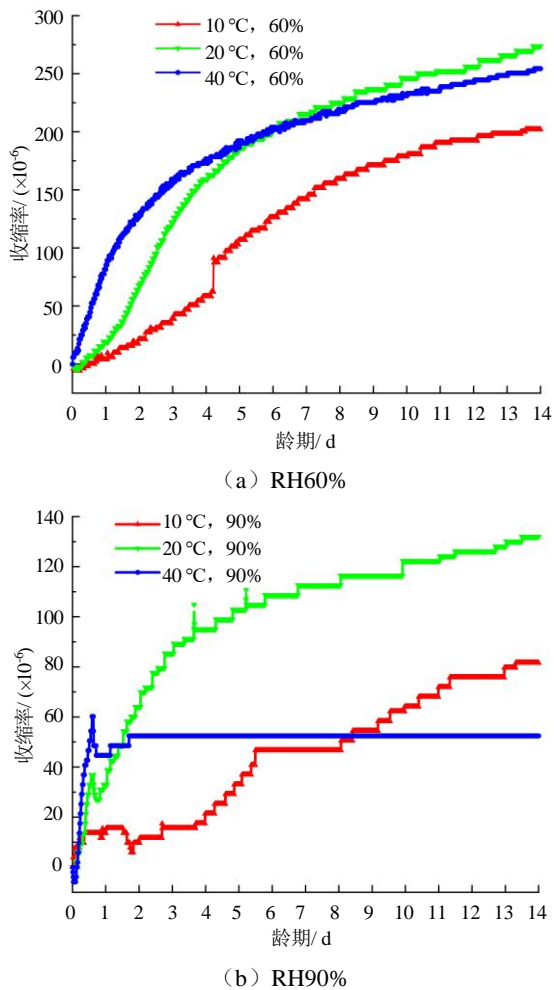


图2 温度对C30混凝土收缩性能的影响

Fig. 2 Effect of temperature on shrinkage performance of C30 concrete

如图2(a)所示,各组混凝土在测量龄期内收缩率都表现出不断上升增长的趋势,当温度20°C和40°C时,后者温度使得混凝土收缩率在5 d前提高幅度较大,在6 d之后增幅逐渐减少且趋于稳定并低于20°C条件下收缩率,20°C条件下还在继续发生收缩。10°C条件下混凝土在整个龄期内的收缩率明显低于其他两组。40°C条件下混凝土14 d收缩率比10°C条件下提高了26%,20°C条件下混凝土14 d收缩率比40°C和10°C条件下分别提高了7.6%、35.6%。40°C温度环境对混凝土收缩率有很大的影

响,高温环境会改变混凝土的收缩趋势,同另外两个温度相比较,其早期发展速率较快,收缩持续快速至6~8 d,此后的龄期里变化不大,40°C条件下混凝土3 d收缩率为14 d的61%。

究其原因,当温度过高时,水分子的扩散速度不断加快,前期的干燥收缩程度较大,所以会消耗较多的水分,因此后期就不那么明显。升温幅值影响混凝土的水化反应,早期的快速水化反应生成大量的水化产物,由此建立了相对稳固的结构,可以很好地抵御后期变形。高温很大程度上加大了混凝土前期的收缩率,同时也减少了混凝土的长期变形,低温环境虽然使前期混凝土收缩较小,但过程缓慢持续时间长,且明显有超过高温环境下混凝土收缩率的趋势。

如图2(b)所示,3种条件下1 d龄期内混凝土收缩率增长幅度都较快,但在发生不同程度的膨胀之后,40°C条件下混凝土收缩趋于稳定,10°C和20°C条件下持续增长,20°C环境温度下混凝土产生更大的收缩速率和收缩量。10°C条件下混凝土14 d收缩率比40°C条件下提高了55.7%,20°C条件下混凝土14 d收缩率比10°C和40°C条件下分别提高了61.8%、151.9%。

高温高湿环境下,并没有显著提高混凝土的收缩值。3种温度条件下不同组的混凝土收缩发展趋势有明显的差异,且40°C条件下的收缩变化情况最为特殊,另外两组混凝土在14 d龄期内收缩均保持渐进趋势。温度20°C时,混凝土14 d龄收缩率为 $132 \times 10^{-6}$ ;而对40°C的高温环境下,混凝土干燥收缩在早期快速增长,之后的龄期里变化不大,在40°C的条件下混凝土的14 d龄期收缩率为 $52.4 \times 10^{-6}$ 。

结合实际工程情况,高温高湿的环境是最有利于混凝土水泥水化反应的进行,但同时也要注意因高温环境导致周围环境水分的蒸发损失,混凝土内部水分加速向外迁移的风险,在夏季高温环境下施工的前提,应加大水分的保湿工作,尤其对于1 d龄期内,混凝土的收缩剧烈,如不做好保湿工作会加大后期开裂的可能性。同时应适当延长喷洒水的工期时长,保证周围环境水分的充足。

### 2.2 湿度对混凝土收缩性能的影响

当环境湿度差异较大的时候,混凝土的收缩变形趋势会发生较大变化,以10°C、20°C和40°C恒温条件为实验环境,进行自由收缩试验,以此展示湿度条件对混凝土早期收缩性能的影响,如图3所示。

如图3(a)所示,环境温度10°C时,从14 d龄期内整体曲线发现,混凝土在RH60%条件下的收缩率

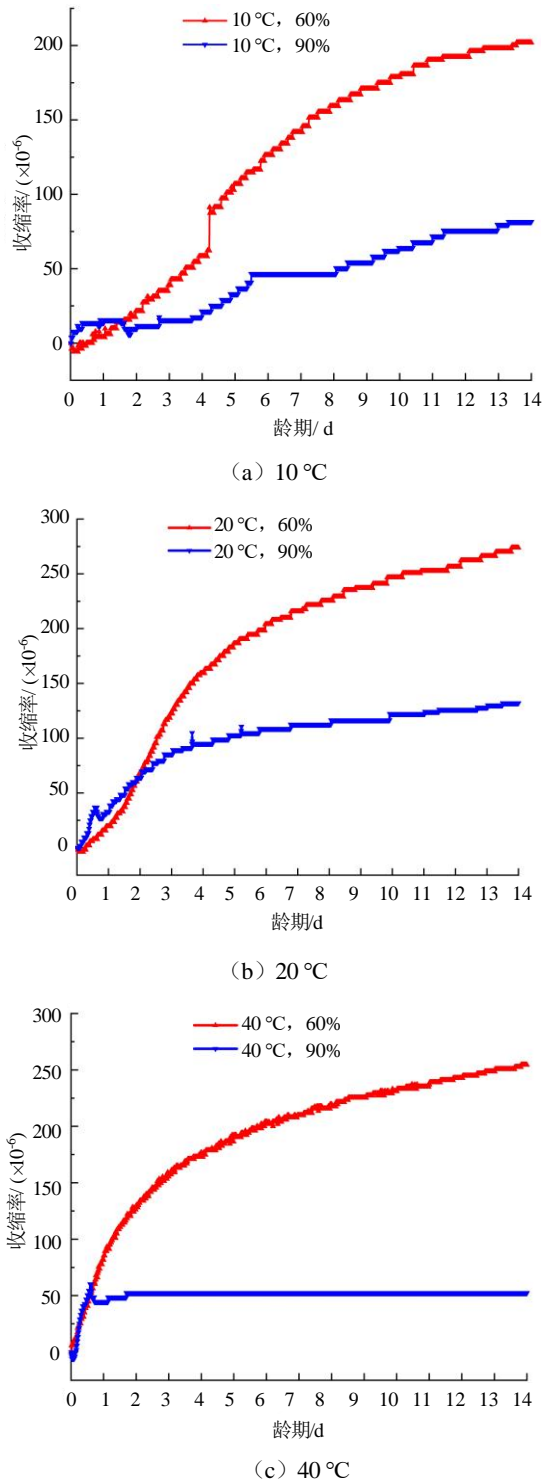


图3 湿度对C30混凝土收缩性能的影响

Fig. 3 Effect of humidity on shrinkage performance of C30 concrete

明显大于RH90%条件下收缩率, 14 d龄期收缩差值为 $120.3 \times 10^{-6}$ 。且RH90%条件下的混凝土收缩发展比较缓慢, 有持续收缩趋势, RH90%条件下的混凝土收缩在前12 d发展较快, 但在此之后收缩减缓。

如图3 (b) 所示, 环境温度20 °C时, 混凝土在RH60%条件下的收缩率明显大于RH90%条件下的

收缩率。伴随龄期的增加, 湿度差异会加大对混凝土收缩率的影响, 14 d龄期收缩差值为 $141.8 \times 10^{-6}$ , 前三天混凝土早期收缩发展趋势和增长幅度相近, 但在RH90%条件下混凝土在第一天内出现膨胀现象, 并随着龄期的增长而后混凝土发生缓慢持续的收缩。分析其原因, 混凝土外部环境湿度影响着内部水分的含量, 尤其对自由水的影响最为明显, 混凝土初始状态下含有大量的自由水, 排除填充孔隙, 依旧有很多水分剩余, 就算是在非常干燥环境中失水, 混凝土也可以保持内部的相对湿度。伴随水化反应, 混凝土孔结构变得细密, 小孔增加, 自由水在干燥过程损失, 抑或是在水化反应转化成结构水, 这些情况都会使得内部相对湿度降低, 由此导致收缩量增加。

如图3 (c) 所示, 环境温度40 °C时, 不同湿度对各组混凝土收缩率影响差异大, 其中RH60%湿度下的收缩影响最大, 早期与在RH90%条件下收缩情况相近, 但在1 d龄期后差距逐渐拉大, 且RH60%条件下发展更快, RH90%条件下混凝土收缩率逐渐趋于稳定, 且14 d龄期的收缩率远大于RH90%, 约相差385.5%。环境温度为40 °C时, 混凝土14 d龄期收缩差值为 $202 \times 10^{-6}$ 。

高温条件下不同湿度在早龄期对混凝土的收缩影响不是很明显, 但随着龄期的增加, 同时加上湿度大的共同作用, 有利于混凝土的水化进程, 形成稳定的结构来抵抗后期的变形。

结合实际工程情况, 无论在何种温度环境条件下, 后期湿度的降低都不利于混凝土收缩, 一方面加大收缩率, 另一方面会延长收缩时间, 加重后期因收缩而产生的开裂, 所以在混凝土工程脱模养护后应进行相关保湿工作, 在浇筑混凝土后可以铺盖杂草或者布料等等, 喷洒水分保持混凝土表面湿润状态, 尤其高温天气下, 初凝就要进行洒水养护, 还要做好防暴晒工作。

### 2.3 混凝土不同龄期收缩量对比

收缩试验环境为10 °C、RH60%, 20 °C、RH60%, 40 °C、RH60%, 10 °C、RH90%, 20 °C、RH90%, 40 °C、RH90%, 不同环境条件下各组混凝土的1 d、3 d和 14 d龄期总收缩变形对比, 如图4、5所示。

由图4可知, 在相同相对湿度90%不同温度条件下, 混凝土14 d总收缩量的差异最为突出, 说明在RH90%情况下温度的变化对混凝土收缩的影响较大, 且在温度为20 °C时收缩差异越明显; 相反, 在相同相对湿度60%不同温度条件下, 混凝土14 d总收

缩量相差不大,但在1 d和3 d早龄期内收缩差异较大,可见在RH60%情况下温度的变化对混凝土1 d早龄期收缩影响较大,且温度越高收缩越明显。

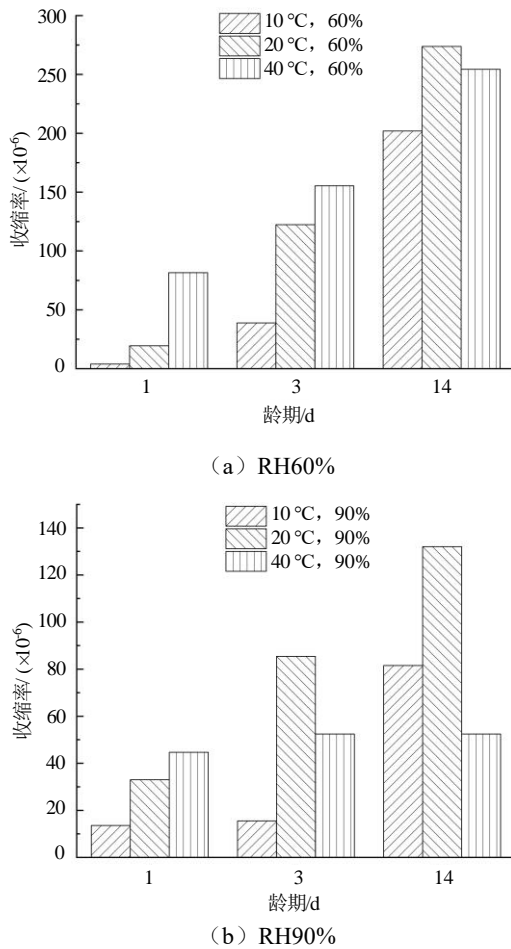


图4 温度对C30混凝土不同龄期收缩性能的影响

Fig. 4 Effect of temperature on shrinkage performance of C30 concrete at different ages

由图5可知,在相同温度40 °C不同湿度条件下,混凝土14 d总收缩量的差异较为明显,相差约385.5%,说明在40 °C情况下湿度的变化对混凝土总收缩的影响较大,且湿度越低收缩总量越大,在1 d、3 d龄期内规律相同;在相同温度20 °C不同湿度条件下,混凝土14 d总收缩量的差异与在40 °C情况下类似,即差异较大,相差约为107.4%,且湿度越低收缩总量越大,在1 d、3 d龄期内差异不明显,收缩量大致成相同趋势;在相同温度10 °C不同湿度条件下,混凝土14 d总收缩量差异同样明显,相差约147.4%,且湿度越低收缩总量越大,在1 d、3 d龄期内差异不明显。

总体来看在相同湿度条件下,不同温度对混凝土收缩影响随着湿度的增大而变大;相同温度条件下,湿度变化是影响混凝土收缩的重要因素,说明在温度一定的条件下,应重点控制湿度值,且提高

环境湿度对混凝土收缩变形有利。

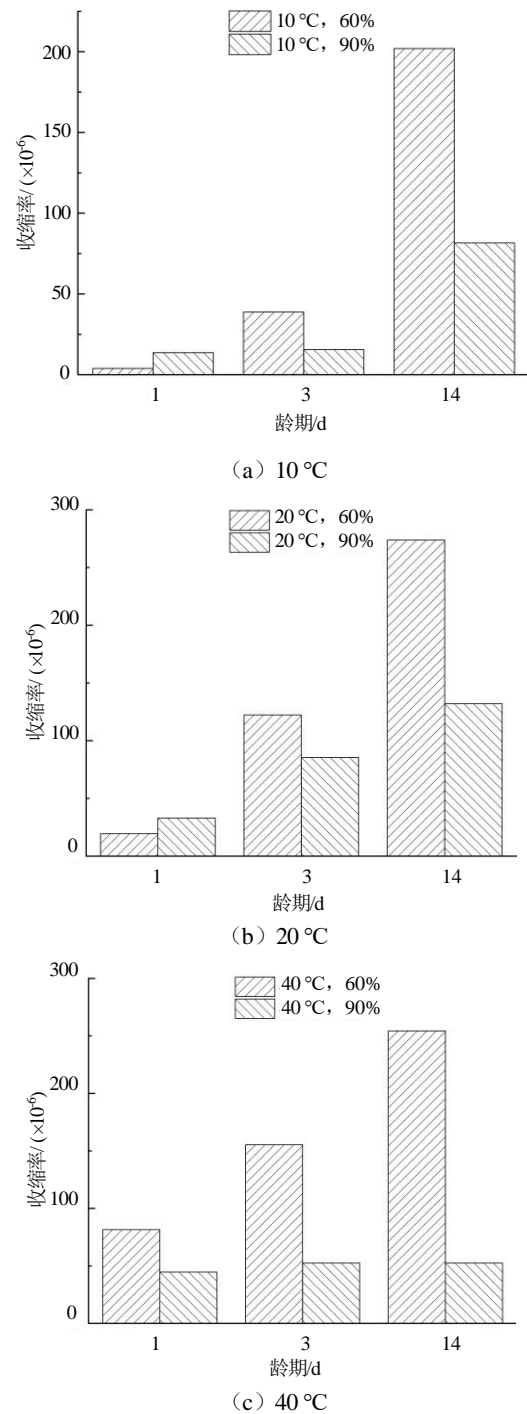


图5 湿度对C30混凝土不同龄期收缩性能的影响

Fig. 5 Effect of humidity on shrinkage performance of C30 concrete at different ages

各组混凝土1 d、3 d龄期内收缩率占总收缩变形的比例如表5、6所示。

由表5和表6可知,在相对湿度一定的情况下,混凝土1 d龄期内收缩率占总收缩率的比例随龄期(3 d)的增长而增大,且在RH60%条件下变化幅度较大,各组混凝土在不同温度条件下不同龄期占14 d龄期总收缩率的比例随龄期1 d增加到3 d分别

为1.9%~19.2%、7.1%~44.7%、32.1%~61.0%，由此得出在相对湿度较低的情况下，混凝土前期的收缩变形较大，且温度越高占比越大，40℃、RH60%条件下混凝土3 d龄期收缩率占14 d龄期总收缩率的比例为61.0%。

表5 混凝土1 d龄期内收缩率占总收缩率比例

Table 5 The proportion of concrete shrinkage rate in total shrinkage rate of 1-day age

	10 °C	20 °C	40 °C
RH60%	3.9/201.9	19.4/273.8	81.6/254.4
	1.9%	7.1%	32.1%
RH90%	13.6/81.6	33.0/132.0	44.7/52.4
	16.7%	25%	85.3%

表6 混凝土3 d龄期内收缩率占总收缩率比例

Table 6 The proportion of concrete shrinkage rate in total shrinkage rate of 3 days age

	10 °C	20 °C	40 °C
RH60%	38.8/201.9	122.3/273.8	155.3/254.4
	19.2%	44.7%	61.0%
RH90%	15.5/81.6	85.4/132.0	52.4/52.4
	19.0%	64.7%	100%

### 3 结 论

(1) 研究了C30混凝土在不同温度(10℃、20℃、40℃)和湿度(RH60%、RH90%)条件下混凝土早期收缩变化规律。试验表明，温度对混凝土收缩影响规律明显：在1 d龄期内，无论相对湿度高低，混凝土收缩率都会随着温度的升高而升高，且在60%湿度环境下尤为明显；而对于14 d龄期内，高温增大了混凝土前期收缩变形，但对长期变形有减小作用，且在湿度值越大的情况下温度提升对混凝土收缩影响较为明显，升温过快或过高使混凝土早期迅速发生水化反应，产生更多水化产物，形成稳定结构抵抗后期变形。

(2) 试验表明，湿度对混凝土收缩影响规律明

显：在1 d龄期内，在环境温度10℃和20℃下，混凝土收缩率随着湿度的增加而增加，说明在湿度较大条件下有利于混凝土早期水化反应；而对于14 d龄期内，混凝土在RH60%条件下收缩率明显大于RH90%条件下收缩率，且随着龄期的增加，湿度差异对混凝土收缩率影响作用逐渐增强。

本文选自“全国病险水库安全评估及除险加固技术前沿研讨会”征集论文，会议旨在探讨病险水库评估方法以及除险加固新技术、新措施，推进病险水库除险加固工作、提高防灾和供水保障能力，会议于2021年5月26—27日在杭州召开。

本期刊登其中两篇精选论文。

### 参考文献

- [1] 王英华, 等. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [2] 尹延国, 胡献国. 水工高强混凝土抗磨耐蚀性试验研究[J]. 水利水电技术, 1998, 29(12): 51-52.  
YIN Yan-guo, HU xian-guo. Experimental study on abrasion and corrosion resistance of hydraulic high strength concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(12): 51-52.
- [3] CHO T. Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method[J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(12): 2031-2040.
- [4] HOLT E. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(3): 464-472.
- [5] DAVID W M, RICHARD E W, D S L. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 35(5): 918-925.