

# 不同水灰比混凝土自干燥试验

黄耀英, 蔡忍, 刘钰, 肖磊, 周勇

(三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为研究不同水灰比水工混凝土和高性能混凝土内部自干燥效应,对水灰比 0.33、0.41、0.50 的水工混凝土试件和 0.30、0.40、0.50 的高性能混凝土试件进行密封包裹,并开展持续 3 个月的内部相对湿度监测。试验结果表明,在密封状态下,水工混凝土和高性能混凝土内部相对湿度均存在两个时期,即湿度饱和期和湿度下降期;随着水灰比的减小,湿度饱和期持续的时间逐渐减小;相同水灰比下,高性能混凝土的内部相对湿度比水工混凝土的内部相对湿度下降快,湿度饱和期持续时间更短。在密封状态下,0.50 水灰比的水工混凝土的内部相对湿度基本无下降;但 0.41 水灰比的水工混凝土存在缓慢的自干燥效应。当混凝土缓慢失水干燥时,混凝土将会出现缓慢收缩,这为解析洛渡特高坝工程扣除温度分量的无应力计变形测值长期不稳定的机制提供了一种新思路。

**关键词:**水工混凝土;高性能混凝土;相对湿度;自干燥效应;水灰比

**中图分类号:**TU528.36

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2018)05-0065-06

**Discussion on self-drying test of concrete with different water-cement ratios//HUANG Yaoying, CAI Ren, LIU Yu, XIAO Lei, ZHOU Yong (College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)**

**Abstract:** To investigate the internal self-drying effects of hydraulic concrete and high-performance concrete with different water-cement ratios, the ratios are set to be 0.33, 0.41, 0.51 for hydraulic concrete and 0.30, 0.40, 0.50 for high-performance concrete. The concrete specimens were sealed and the internal relatively humidity inside was monitored for three months. The test results show that the internal relative humidity for both hydraulic and high-performance concrete in the sealed state has two periods, namely the humidity saturation period and the humidity drop period. As the water-cement ratio decreases, the duration of the humidity saturation period gradually decreases. The drop rate of the relative humidity for high-performance concrete is higher than that for hydraulic concrete with the same water-cement ratio, and the duration of humidity saturation period for the former is shorter. The internal relative humidity of hydraulic concrete with the water-cement ratio 0.5 in the sealed state does not drop substantially but with the water-cement ratio 0.41, it drops slowly due to the self-drying effect. When the concrete dries gradually, it shrinks slowly, which provides a new idea to analyze the long-term instability mechanism for the strain with the deduction of temperature strain, called the no-stress-gauge strain in the Xiluodu ultra-high dam project.

**Key words:** hydraulic concrete; high performance concrete; relative humidity; self-drying effect; water-cement ratio

非荷载因素是引起混凝土结构开裂的重要驱动因子。非荷载因素包括温度应变、湿度应变和自生体积应变等<sup>[1-3]</sup>。对于混凝土湿度应变而言<sup>[4]</sup>,一方面当混凝土结构拆模后,由于环境湿度小于混凝土内部湿度,水分蒸发使混凝土表面湿度降低,从而产生收缩应变,这种收缩通常称为干燥收缩(简称干缩);另一方面是在绝湿状态下,由于胶凝材料水化,吸收混凝土毛细管中的水分,造成湿度降低引起的收缩应变,这种收缩通常称为自干燥收缩(简称

自收缩)。混凝土结构在干缩或自收缩作用下均容易引起开裂,这将严重影响混凝土结构的安全性和耐久性,因此研究混凝土内部湿度变化规律具有重要的意义。

由于高性能混凝土具备高工作性、高强度和高耐久性等特点,近年来,高性能混凝土逐渐在工程中得到广泛应用。工程实践表明,高性能混凝土由于水灰比低,存在明显的自干燥现象,导致混凝土早期开裂风险大<sup>[5-6]</sup>。针对这个问题,关于高性能混凝土

内部相对湿度监测试验目前已有大量的文献报道。蒋正武等<sup>[7]</sup>研究了0.2、0.4、0.6、0.8的水胶比对比高性能混凝土自干燥引起自身相对湿度变化的影响,结果表明,当水胶比低于0.4时,混凝土内部相对湿度下降的速率较快,自干燥现象明显,尤其在早期更为明显;Shen等<sup>[8]</sup>为减轻高性能混凝土自干燥作用导致混凝土早期开裂,采用内部固化和超吸收聚合物来缓解高性能混凝土的收缩,并提出超吸收聚合物内固化的早期混凝土相对湿度预测模型;黄瑜等<sup>[9]</sup>分析对比了高强混凝土在密封和裸露的状态下,其内部相对湿度发展特征,研究显示,处于密封状态的高强混凝土内部相对湿度下降的速率更快,自干燥现象更明显;Han等<sup>[10]</sup>对掺入预浸轻骨料的高强混凝土在28d的内部相对湿度研究,发现早龄期混凝土存在明显的自干燥现象。

然而在实际大坝工程中,混凝土内部相对湿度的监测未得到足够重视。例如基于水工大体积混凝土内埋设的无应力计测值反演热膨胀系数和分离自生体积变形时,认为大体积混凝土的内部湿度变化很小,因此忽略由此引起的湿度变形<sup>[11-12]</sup>。随着西部大开发的深入进行,在我国西南和西北兴建了小湾、溪洛渡、白鹤滩等系列300m级特高拱坝,这对混凝土的强度等级要求很高。水胶比0.3~0.4的高强水工混凝土在这些大坝工程上逐渐得到应用,但是对于这些高强水工混凝土,能否忽略湿度变形尚未见文献报道。目前关于水工混凝土湿度的研究,主要集中在混凝土与外界湿度交换引起的干缩应变,而且这些研究以数值计算为主,而关于水工混凝土湿度试验目前报道很少。如马跃先等<sup>[13]</sup>结合水闸工程采用有限单元法进行了湿度场及应力场计算;刘有志<sup>[14]</sup>基于湿度场分别从宏观和细观的角度对混凝土非稳定湿度及干缩应力场进行了仿真计算;牛道昌<sup>[15]</sup>分析了我国水利工程所处地区的空气湿度变化对水工混凝土内部相对湿度的影响;梁建文<sup>[16]</sup>基于湿度场仿真计算,对水工薄壁混凝土结构干缩开裂的机理进行了分析。由于缺乏湿度试验数据和参数,上述湿度场计算值的合理性难以判断。此外,由于高性能混凝土的配合比与水工混凝土不同,不能简单地将高性能混凝土内部湿度试验结果用于水工混凝土,因此有必要对水工混凝土内部进行湿度监测试验,并与高性能混凝土内部湿度监测试验结果进行对比。

针对上述问题,本文在前人研究的基础上,设计开展不同水胶比的水工混凝土和高性能混凝土内部相对湿度监测试验,研究水工混凝土和高性能混凝土内部相对湿度的变化规律,探究高强水工混凝土

是否存在明显的自干燥效应。

## 1 水工混凝土和高性能混凝土湿度试验

### 1.1 试验方案

水工混凝土和高性能混凝土内部湿度试验在三峡工程所在地宜昌地区开展。宜昌地区属亚热带季风湿润气候,夏季平均气温超过28℃,相对湿度为80%左右;而在冬季平均气温只有10℃,相对湿度为70%左右。试验选在一月份进行。为了考察不同水胶比水工混凝土的自干燥规律,结合我国西南某典型混凝土高拱坝工程泄洪洞龙落尾段、大坝基础约束区和非基础约束区等不同部位的混凝土配合比,设计了水灰比分别为0.33、0.41、0.50的3种不同水工混凝土,分别记为S1、S2和S3;对于高性能混凝土内部自干燥试验,参考文献<sup>[7]</sup>,设计了水灰比分别为0.30、0.40和0.50的3种不同高性能混凝土,分别记为S4、S5和S6,具体配合比如表1所示。由表1可见,由于高性能混凝土具有高工作性、高强度和高耐久性等特点,其水泥掺量远比水工混凝土的水泥掺量高。试验采用温湿度传感器监测混凝土试件内部相对湿度变化历程,1~3号温湿度传感器分别监测S1~S3水工混凝土内部相对湿度,4~6号温湿度传感器分别监测S4~S6高性能混凝土内部相对湿度,根据传感器的编号对相应的混凝土试件进行编号,7号温湿度传感器用于监测实验室环境的温湿度。

表1 水工和高性能混凝土的配合比

编号	水灰比	减水剂/%	单位体积用量/(kg·m <sup>-3</sup> )				
			水泥	水	砂	小石	中石
S1	0.33	2.555	365	121	751.85	558.52	837.78
S2	0.41	1.742	268	110	744.80	604.86	907.30
S3	0.50	1.716	264	132	761.26	561.09	886.64
S4	0.30	9.000	600	180	680.00	0	1020.00
S5	0.40	5.000	500	200	660.00	0	990.00
S6	0.50	1.430	400	132	564.00	0	1046.00

根据混凝土试件水灰比的不同,将混凝土试件内部相对湿度监测分为两个阶段,第一阶段对S1~S6混凝土试件持续监测70d的自干燥效应;第二阶段对高水灰比S2和S3的水工混凝土(水灰比分别为0.41和0.50)和高水灰比S6的高性能混凝土(水灰比为0.50)再持续监测20d的自干燥效应,然后再进行对比分析。

### 1.2 试验材料和监测仪器

试验采用华新牌P·O·42.5水泥;粗骨料为花岗岩碎石,小石粒径为5~20mm,中石粒径为20~40mm;细骨料为长江宜昌段细砂,细度模数为2.03;减水剂选用聚羧酸高性能减水剂;水为自来水。

温湿度传感器采用大连北方测控工程有限公司生产的 DB485 型传感器,相对湿度测量范围为 0 ~ 100%,误差为  $\pm 1\%$ ;温度测量范围为  $-40 \sim 120^{\circ}\text{C}$ ,误差为  $\pm 0.5\%$ 。温湿度传感器探头(图 1)通过 RS-485 总线型温湿度变送器(图 2)与计算机连接,使用北方测控温湿度监测系统对温湿度数据进行采集和存储,可实现多点同时监测。

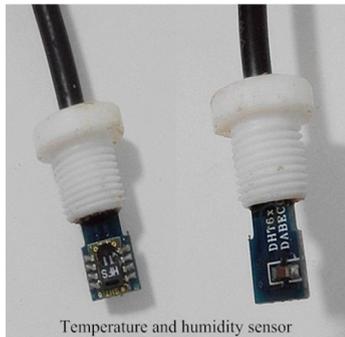


图 1 温湿度传感器探头



图 2 温湿度传感器变送器

### 1.3 混凝土湿度试验步骤

**步骤 1** 试验准备。按湿度试验使用的混凝土配合比准备原材料、PVC 管和成型试件所需的模具,与此同时,对温湿度传感器进行率定。PVC 管两端开口光滑平整,长度为 100 mm,外径为 20 mm,壁厚为 2 mm,并在 75 mm 处做好标记;模具采用内尺寸为 150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm 的立方体塑料模具。

**步骤 2** 混凝土试件成型。待混凝土试件浇注、振捣完成后,将 PVC 管植入 150 mm 立方体试件的几何中心处(植入深度 75 mm),接着抹平试件的上表面的浆体,并用铝棒封堵 PVC 管上端口,并在上表面覆盖一层薄膜保湿。待混凝土终凝后,PVC 管即固定在试件中。

**步骤 3** 将试件搬至标准养护室中养护 1 d 后进行拆模,并立即用双层锡箔纸对试件进行密封包裹(图 3)。由于混凝土表面近似绝湿状态,故可认为混凝土内部湿度变化基本由自干燥效应引起。

**步骤 4** 把混凝土试件搬至湿度监测室,缓慢拔出封堵 PVC 管上端口的铝棒,用海绵吸出残留在



图 3 采用锡箔纸包裹的混凝土试件

塑料管底端的浆体后再缓慢插入温湿度传感器,温湿度传感器测头距塑料管底约 1 mm,然后用隔离塞对 PVC 管进行密封并涂抹黄油,防止隔离塞与 PVC 管间的缝隙与外界发生湿度交换(图 4)。

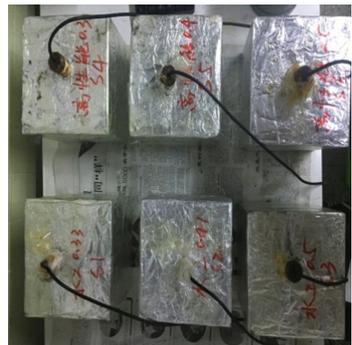


图 4 混凝土内部相对湿度监测

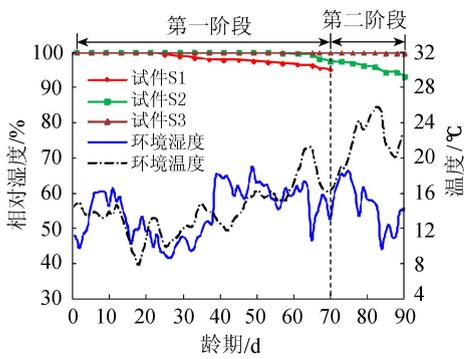
**步骤 5** 按混凝土内部湿度试验方案进行湿度试验,直至试验结束。

## 2 试验结果与讨论

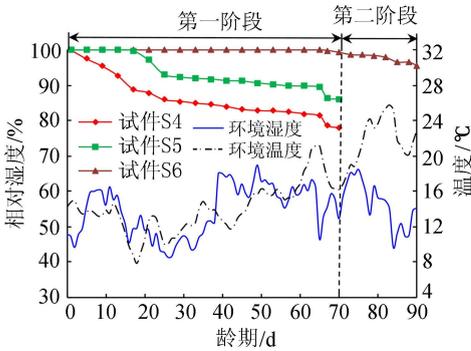
### 2.1 水工混凝土内部相对湿度变化曲线

图 5 为不同水灰比水工混凝土和高性能混凝土在密封状态下内部相对湿度随龄期的变化曲线,图 6 为不同水胶比的水工混凝土和高性能混凝土内部相对湿度随龄期的变化曲线,在图 5 和图 6 中,还给出了试验室的环境温湿度曲线。试验期间,试验室的环境相对湿度为 41.31% ~ 67.39%,均值为 54.35%;环境温度为 7.83 ~ 21.16 $^{\circ}\text{C}$ ,均值为 14.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

由图 5(a)可见,不同水灰比的水工混凝土内部相对湿度变化历程基本相似,均可分为两个时期<sup>[17]</sup>。第一个时期为相对湿度的饱和期(相对湿度维持在 100%),但是不同水灰比的水工混凝土湿度饱和期持续时间不同。试验表明,水灰比越高,湿度饱和期持续时间越长,水灰比为 0.33、0.41 和 0.50 的水工混凝土湿度饱和期分别持续了 22 d、56 d 和 65 d。第二个时期为湿度下降期,随着水化反应不断消耗水分,相对湿度逐渐下降,混凝土内部相对湿



(a) 水工混凝土试件



(b) 高性能混凝土试件

图5 试件内部相对湿度变化

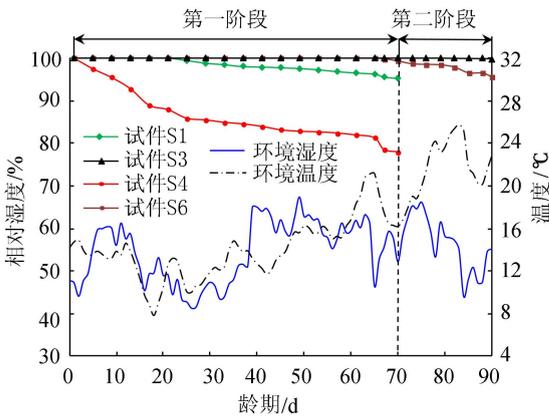


图6 试件内部相对湿度变化曲线

度进入湿度下降期。当第一阶段自干燥效应监测结束时(70 d),水灰比为0.33、0.41和0.50的水工混凝土试件内部相对湿度分别降至94.85%、97.03%和99.89%。由此可见,0.33水灰比的混凝土试件湿度饱和期较短,自干燥作用较明显;对于0.41水灰比的混凝土试件,虽然湿度饱和期较长,但仍有缓慢的自干燥效应;0.50水胶比的混凝土试件湿度饱和期长且无明显的自干燥作用,相对湿度基本维持在100%。当70 d的自干燥效应监测结束时,对高水灰比0.41和0.50的水工混凝土再持续20 d的自干燥效应监测。当自干燥效应监测持续到90 d时,水灰比0.41和0.50的水工混凝土试件内部相对湿度分别降至93.26%和99.86%。由此可见,随着龄期的增长,0.41水灰比的水工混凝土试件自干燥效

应更加明显,湿度下降的程度更大;对于0.50水灰比的混凝土试件仍然无明显的自干燥效应,内部相对湿度几乎维持在100%。这也说明,本次试验混凝土试件包裹的密封性良好,试件内部几乎没有与外界环境发生湿度交换,试件内部相对湿度变化基本由自干燥效应引起。

由图5(b)可见,0.30、0.40和0.50水灰比的高性能混凝土湿度饱和期分别维持了3 d、16 d和63 d,均比相对应的水工混凝土的湿度饱和期短。当第一阶段70 d的自干燥效应监测结束时,0.30、0.40和0.50水灰比的高性能混凝土内部相对湿度分别降至77.92%、86.13%、98.54%。第一阶段的自干燥效应监测结束后(70 d),对0.50水灰比的高性能混凝土再持续20 d的自干燥效应监测,当第二阶段监测结束时(90 d),0.50水灰比的高性能混凝土内部相对湿度降至96.5%。

由图6可见,由于高性能混凝土的水泥掺量高,对于相同水灰比,高性能混凝土的自干燥效应比水工混凝土的自干燥效应更加明显,湿度下降更快。当第一阶段70 d自干燥效应监测结束后,进入第二阶段时,0.50水灰比的高性能混凝土内部相对湿度仍存在缓慢的自干燥作用,而0.50水灰比的水工混凝土内部相对湿度基本无变化,维持在100%。

## 2.2 自干燥引起混凝土内部湿度变化的机理分析

混凝土试件在浇注成型的初期,内部有大量自由液态水存在且形成连通的水膜网络,因此混凝土试件内部相对湿度为100%。由于混凝土试件密封包裹,随着龄期的增长,混凝土试件内部未水化的水泥继续水化反应,混凝土逐渐硬化,此时水泥水化反应引起的化学减缩致使混凝土内部形成许多独立毛细孔,毛细孔逐渐增多并相互连通,于是毛细孔处于不饱和状态,混凝土试件内部相对湿度降低<sup>[7]</sup>,即混凝土内部相对湿度进入湿度下降期。

水灰比越大,混凝土试件的用水量越多而水泥用量越少,在水泥水化反应过程中,由于混凝土试件内部自由水消耗的速率较低,留存在试件内未参与水化反应的自由液态水较多,又由于密封包裹的试件与外界环境基本没有湿度交换,因此试件内部相对湿度下降的速率小,表现为试件湿度饱和期长;水灰比小时,与之相反。

相对相同水灰比的水工混凝土而言,高性能混凝土的水泥用量大,在水泥水化过程中,由于试件未水化的水泥颗粒多,而试件内部可提供继续水化反应的自由液态水较少,这就导致高性能混凝土的湿度饱和期较水工混凝土短,内部相对湿度下降的速率较水工混凝土大,自干燥作用更明显。

## 2.3 讨论

从上述试验结果可见,0.41 水灰比的水工混凝土存在缓慢的自干燥效应。当混凝土缓慢失水干燥时,混凝土将会出现缓慢收缩。文献[18]曾对溪洛渡拱坝坝体基础约束区的混凝土无应力计测值进行了分析,其埋设的无应力计由一支应变计和一个双层铁皮套筒组成。其中,无应力桶高 500 mm,开口直径为 500 mm,底面直径为 200 mm。由于无应力计尺寸较小,在现场埋设时,一般会剔除 40 mm 以上的粗骨料,因此,无应力计桶内混凝土近似于本次试验的混凝土级配。

文献[18]对监测结果进行分析时,假设混凝土内湿度变化很小,忽略湿度变形,进而通过建立无应力计测值统计模型,分离出温度变形和自生体积变形,分析表明溪洛渡大坝混凝土的自生体积变形呈缓慢收缩趋势,持续 2000 d 后仍未完全收敛。由上述水工混凝土湿度试验可见,由于溪洛渡拱坝坝高库大,其基础约束区混凝土的水胶比仅为 0.41,这种混凝土由于水泥水化反应存在缓慢的自干燥现象,从而出现缓慢收缩的湿度变形。因此,扣除温度分量的无应力计测值实际上是自生体积变形和自干燥引起的湿度变形的混合值;另外,由于该特高拱坝混凝土粉煤灰掺量高(35%),导致自干燥现象减慢,但持续时间更长。综上所述,0.41 水灰比的水工混凝土自干燥现象的发现,为解析溪洛渡特高坝工程扣除温度分量的无应力计变形测值长期不稳定的机制提供了一种新思路。

## 3 结论

a. 在密封状态下,水工混凝土和高性能混凝土内部相对湿度均存在两个时期,即湿度饱和期和湿度下降期;随着水灰比的减小,湿度饱和期持续的时间逐渐减小,内部相对湿度下降的速率逐渐加大;由于高性能混凝土的水泥掺量高,相同水灰比下,高性能混凝土的内部相对湿度下降比水工混凝土快,湿度饱和期持续时间更短。

b. 在密封状态下,0.50 水灰比的水工混凝土的内部相对湿度基本无下降;而对于 0.50 水灰比的高性能混凝土,由于水泥掺量高,内部未水化的水泥较多,随着龄期的增长,水泥水化会不断进行,仍存在缓慢的自干燥现象。

c. 在密封状态下,0.41 水灰比的水工混凝土存在缓慢的自干燥效应。当混凝土缓慢失水干燥时,混凝土将会出现缓慢收缩,从而为解析西南某特高坝工程扣除温度分量的无应力计变形测值长期不稳定的机制提供了新思路,即低水胶比混凝土的使用,

将会引起持续缓慢自干燥,从而导致持续自干燥收缩变形。建议在进行低水胶比的高强水工混凝土应力应变分析时,考虑混凝土内部存在的自干燥效应及其引起的干燥收缩应变。

## 参考文献:

- [1] 王国杰,郑建岚. 混凝土结构早龄期应力相关应变现场监测与分析[J]. 工程力学,2009,26(9),61-66. (WANG Guojie, ZHENG Jianlan. In situ monitoring and analysis for stress-dependent strains of early age concrete structures[J]. Engineering Mechanics,2009,26(9),61-66. (in Chinese))
- [2] 徐世焯,葛唯. 硅灰和石灰石粉对碾压混凝土抗裂性能的影响[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3):54-59. (XU Shilang, GE Wei. Effect of silica fume and limestone powder on crack resistance property for roller compacted concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(3):54-59. (in Chinese))
- [3] 陈昌礼,陈荣妃,颜少连,等. 长龄期 MgO 混凝土自生体积变形与水泥基材料压蒸膨胀变形的关联性[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):90-94. (CHEN Changli, CHEN Rongfei, YAN Shaolian, et al. Relationship between autogenous volume deformation of long-age MgO-mixed concrete and autoclave-treated expansive deformation of cement-based materials[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):90-94. (in Chinese))
- [4] SEMION Z, KONSTANTIN K. Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete [J]. Construction and Building Materials,2017,144:311-316.
- [5] 蒋正武,孙振平,王新友,等. 国外混凝土自收缩研究进展评述[J]. 混凝土,2001(4):30-33. JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Xingyou, et al. Research on pump delivered alkali-slag concrete and its application [J]. Concrete,2001(4):30-33. (in Chinese))
- [6] WANG Yajun, WANG Jianjun, GUO Changying, et al. Study on cracking control of high performance concrete at early age[J]. Advanced Materials Research,2013,641/642:504-507.
- [7] 蒋正武,孙振平,王培铭. 高性能混凝土自身相对湿度变化的研究[J]. 硅酸盐学报,2003,31(8):771-779. (JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Peiming. Study on autogenous relative humidity change in high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society 2003,31(8):771-779. (in Chinese))
- [8] SHEN Dejian, WANG Minliang, CHENG Ying, et al. Prediction of internal relative humidity in concrete modified with super absorbent polymers at early ages[J]. Construction and Building materials,2017,149:543-552.

- [ 9 ] 黄瑜, 祈鋈, 张君. 早龄期混凝土内部湿度发展特征 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(3): 310-312. (HUANG Yu, QI Kun, ZHANG Jun. Development of internal humidity in concrete at early ages[J]. Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences), 2007, 47(3): 771-779. (in Chinese))
- [ 10 ] HAN Yudong, ZHANG Jun, LUOSUN Yiming, et al. Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high concrete slabs [J]. Construction and Building Materials. 2014, 60(2): 41-49.
- [ 11 ] 储海宁. 混凝土坝内部观测技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [ 12 ] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [ 13 ] 马跃先, 陈晓光. 水工混凝土湿度场及干缩应力研究 [J]. 水利发电学报, 2008, 27(3): 39-42. (MA Yuexian, CHEN Xiaoguang. Research on humidity and drying shrinkage stresses of hydraulic concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 27(3): 39-42. (in Chinese))
- [ 14 ] 刘有志. 水工混凝土温控和湿控防裂方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [ 15 ] 牛道昌. 水工混凝土干缩与裂缝的关系[J]. 水利水电工程设计, 1995, 14(4): 44-50. (NIU Daochang. Relationship between shrinkage and cracks of hydraulic concrete[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 1995, 14(4): 44-50. (in Chinese))
- [ 16 ] 梁建文, 刘有志, 张国新, 等. 水工薄壁混凝土结构湿度及干缩应力非线性有限元分析[J]. 水利水电技术, 2007, 38(8): 38-40. (LIANG Jianwen, LIU Youzhi, ZHANG Guoxin, et al. Non-linear FEM analysis on moisture field and shrinkage stress of thin-walled hydraulic concrete structures [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(8): 38-40. (in Chinese))
- [ 17 ] 张君, 侯东伟, 高原. 混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因[J]. 清华大学学报, 2010, 50(9): 1321-1324. (ZHANG Jun, HOU Dongwei, GAO Yuan. Uniform driving force for autogenous and drying shrinkage of concrete [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9): 1321-1324. (in Chinese))
- [ 18 ] 李波, 周恒, 胡蕾等. 溪洛渡高拱坝运行初期应力应变监测资料分析[J]. 水力发电, 2017, 43(7): 108-111. (LI Bo, ZHOU Heng, HU Lei, et al. Stress-strain monitoring data analysis of Xiludu high arch dam in early operation period [J]. Water Power, 2017, 43(7): 108-111. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-05-16 编辑: 郑孝宇)

(上接第 42 页)

- [ 7 ] BULL J W. Life cycle costing for construction [M]. [S. I.]: Blackie Academic & Professional, 1993.
- [ 8 ] FRANGOPOL D M. Life-cycle cost analysis for bridges [C]//FRANGOPOL D M. Bridge Safety and Reliability. [S. I.]: American Society of Civil Engineers, 1999: 210-236.
- [ 9 ] DAS P C. Prioritization of bridge maintenance needs [C]//FRANGOPOL D M. Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems. [S. I.]: American Society of Civil Engineers, 2015: 26-44.
- [ 10 ] MIYAMOTO A, KAWAMURA K, NAKAMURA H. Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2000, 15(1): 45-55.
- [ 11 ] LIU M, DAN M F. Bridge annual maintenance prioritization under uncertainty by multiobjective combinatorial optimization [J]. Computer-Aided Civil & Infrastructure Engineering, 2010, 20(5): 343-353.
- [ 12 ] ABAZA K A. Optimum flexible pavement life-cycle analysis model [J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(6): 542-549.
- [ 13 ] KONG J S, DAN M F. Cost-reliability interaction in life-cycle cost optimization of deteriorating structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1704-1712.
- [ 14 ] 陆春华, 袁思奇. 基于时变可靠度的锈蚀混凝土结构全寿命成本模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 71-78. (LU Chunhua, YUAN Siqu. Life-cycle cost model of corroded concrete structures based on time-varying reliability [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2017, 34(2): 71-78. (in Chinese))
- [ 15 ] DAN M F, ESTES A C. Lifetime bridge maintenance strategies based on system reliability [J]. Structural Engineering, 1997, 7(3): 193-198.
- [ 16 ] CADY P D. Inflation and highway economic analysis [J]. American Society of Civil Engineers, 1983, 109(5): 631-639.
- [ 17 ] 胡江碧, 刘妍, 高玲玲. 桥梁全寿命周期费用折现率分析[J]. 公路, 2008, 52(9): 363-367. (HU Jiangbi, LIU Yan, GAO Linlin. Analysis of discount rate of bridge life-cycle cost [J]. Highway, 2008, 52(9): 363-367. (in Chinese))
- [ 18 ] 王鹏, 陈得宝, 邹锋, 等. 引导小生境回溯优化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(21): 126-131. (WANG Pen, CHEN Debao, ZOU Feng, et al. Guidance and niching backtracking search optimization algorithm [J]. Computer Engineering & Applications, 2017, 53(21): 126-131. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-05-07 编辑: 骆超)