

高渗透水压力环境下混凝土湿度响应试验研究

张国辉¹,倪新兰¹,陈现帆¹,严 状¹,李宗利²

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:基于自主研发的高渗透水压力加载试验系统,研究了3种强度等级混凝土在4种不同高渗透水压力持续作用3、10、24、72、240 h后混凝土含水率变化规律,通过压汞法测定了高渗透水压力作用下的混凝土孔隙结构特征,揭示了不同水压力作用下混凝土含水率演化的微观机理,并构建了混凝土在不同水压力作用下的含水率预测方程。结果表明:高渗透水压力作用下混凝土含水率随作用时间的延长而快速增大,渗透水压力越高,混凝土强度等级越低,混凝土到达饱和状态所需时间越短,饱和含水率越高;1、2、3 MPa 渗透水压力下的 C15 混凝土饱和含水率分别为 0 MPa 条件下的 1.12、1.13、1.19 倍。

关键词:混凝土;含水率;渗透水压力;孔隙结构

中图分类号:TV431

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0055-05

Experimental study on humidity response of concrete under high-permeability water pressure environment// ZHANG Guohui¹, NI Xinlan¹, CHEN Xianfan¹, YAN Zhuang¹, LI Zongli² (1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on a self-developed high-permeability water pressure loading test system, the moisture content change law of three different strength grades of concrete under four different high-permeability water pressure environments after continuous exposure for 3, 10, 24, 72, and 240 hours was studied. The pore structure characteristics of concrete under high-permeability water pressure environments were measured using the mercury intrusion porosimetry, revealing the microscopic mechanism of water content evolution in concrete under different water pressures. A prediction equation for concrete moisture content under different water pressure was constructed. The results show that the concrete moisture content increases rapidly with the extension of the exposure time under the high-permeability water pressure. The higher the permeable water pressure and the lower the concrete strength grade, the shorter the time required for the concrete to reach saturation and the higher the saturation moisture content. The saturation moisture contents of C15 concrete under 1, 2, and 3 MPa permeable water pressures are 1.12, 1.13 and 1.19 times that under 0 MPa, respectively.

Key words: concrete; moisture content; permeable water pressure; pore structure

混凝土结构部分或全部表面经常与水接触,如大坝、过河桥梁的基础及墩台、深海平台基础及涉水港口建筑物等。部分混凝土结构所处服役环境的水压力较小,如浪溅、降雨以及低水头浸泡等,可视为无压水环境。另一部分混凝土结构所处的水环境压力较高,如高坝的坝踵部位,为高压水环境。由于混凝土材料本身的非均质性,其内部不可避免地存在微观孔隙和断续裂纹。在无压自由水环境中,通过混凝土孔隙和裂纹的毛细吸附力将液态水吸入混凝土内部。在高压水环境中,压力水在混凝土结构微裂

纹内运动,给裂纹的表面施加水力荷载,从而产生劈裂力,会加速混凝土微裂纹的扩展和贯通。微裂纹张开宽度的增大促进了水的进入及裂纹的进一步扩展,裂纹的扩展又导致渗透系数增大,水的入渗加快,混凝土内部湿度迅速增大^[1-3]。

现有研究表明,混凝土内部湿度的大小对其力学特性存在显著影响^[4-6]。例如:Deng等^[7]发现含水率的大小对混凝土的破坏形态有显著影响,当含水率小于10%时,混凝土试件的破坏呈明显的脆性破坏并伴有较大的劈裂声;孟琪等^[8]研究表明,随

基金项目:云南省基础研究计划面上项目(202201AT070104,202401AT070338)

作者简介:张国辉(1988—),男,副教授,博士,主要从事水工结构工程研究。E-mail:zgh_water@kust.edu.cn

通信作者:李宗利(1967—),男,教授,博士,主要从事水工结构工程研究。E-mail:bene@nwsuaf.edu.cn

着试件含水率的增大,混凝土的蠕变劲度呈逐渐减小趋势,最大降低了 44.49%;刘恒杰等^[9]研究表明,饱和混凝土试件断裂过程区宽度较干燥试件最大增大 20.8%;王圣程等^[10]开展了单轴压缩下不同含水率水泥混凝土的能量演化特征研究,发现随着混凝土含水率的增大,混凝土的刚度、相对抵抗变形和破坏的能力逐步下降。以上研究表明混凝土含水率对其物理力学特性的影响不可忽略,且混凝土含水率演化规律研究是湿态混凝土力学特性影响研究的基础。此外,张国辉等^[11]研究了混凝土含水率受其强度等级、最大骨料粒径、试件尺寸、浸泡时间的影响规律,并建立了不同混凝土试件湿度随吸水时间变化的预测方程。蒋建华等^[12]开展了再生粗骨料取代率、粉煤灰掺量和再生粗骨料初始含水率对再生混凝土吸湿过程影响的试验研究,进而建立了人工恒定大气温湿度条件下再生混凝土湿度响应的预测模型。刘军等^[13]研究表明,混凝土内部与外界环境湿度差越大,湿度变化速率越大,且湿度梯度随着湿度响应过程的发展而减小。柯杨等^[14]开展了轻骨料混凝土早龄期湿度扩散试验研究,得到水灰比、粗骨料体积比和级别对混凝土内部的湿度扩散规律有明显影响的结论。谭聪等^[15]研究表明,混凝土强度等级越高,吸水速率越慢,达到饱和状态所需的时间越长,总吸水量越少,吸水系数越小。

不同渗透水压力下的混凝土含水率研究是水压力环境下混凝土力学特性影响研究的基础,目前多集中于无压自由水环境下的含水率变化规律研究。由于高渗透水压力作用下混凝土存在微裂纹、孔隙的变化过程,其内部湿度分布势必与自由水环境存在显著差异,且高渗透水压力环境下混凝土内部湿度的变化为内部微裂隙演化的间接体现。本文基于自主研发的高渗透水压力加载试验设备,开展 4 种不同水压力环境下 3 种强度等级混凝土的含水率演化规律研究,并基于压汞法研究高渗透水压力作用下混凝土内部微观孔隙结构演化规律,以期为进一步探究不同水压力环境下混凝土力学特性演化规律提供参考。

1 试验材料与设备

1.1 试验材料

水泥采用 32.5R 级普通硅酸盐水泥,安定性合格,初凝时间为 4.2 h,终凝时间为 5.3 h,28 d 抗压强度为 48.58 MPa。砂子采用天然河砂,为细度模数 2.43 的中砂,级配良好,含泥量满足要求,表观密度为 2590 kg/m³,堆积密度为 1540 kg/m³,有害物质含量均在规定值以下。粗骨料为天然卵石,最大骨料

粒径为 40 mm,两级配 5~20 mm、20~40 mm,含泥量为 0.6%,表观密度为 2 650 kg/m³,堆积密度为 1 563 kg/m³。拌和用水为自来水。混凝土试件为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件,标准养护,拌和过程按 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》进行,其配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

强度等级	水灰比	原材料用量/(kg/m ³)				
		水	水泥	砂	小石	中石
C15	0.65	158	243	729	709	709
C20	0.55	150	273	685	685	615
C30	0.42	165	391	581	646	646

1.2 试验设备

干燥设备采用全自动电热鼓风干燥箱,温度调控范围为室温至 300℃,温度均匀性≤±2%,温度波动为±1℃。称量设备采用高精度电子天平,精度为 0.1 g,最大称量范围为 10 kg。试验采用自主研发设计的渗透水压力加载试验系统,并经过压力容器检验检测合格,如图 1 所示。系统能够提供的最大水压力为 4.0 MPa,水压力精度为±0.01 MPa。系统包括 1 个加压容器(A)和 2 个恒压容器(B、C)。加压容器与恒压容器通过高压管道连接,加压容器设置高压安全阀,压力超过设定值即自动泄压。通过加压泵向加压容器增压,通过高压管道将压力传递至恒压容器,使恒压容器达到预设水压力。将混凝土试件放入恒压容器,并重新紧固恒压容器法兰盘,确保密封,达到预设水压力及作用时间后泄压,取出混凝土试件,即完成混凝土试件的高渗透水压力加载过程。



图 1 高渗透水压力加载试验系统

2 试验方法

试验控制因素为混凝土强度等级、水压力和水压力作用时间,混凝土强度等级设置为 C15、C20、C30,水压力设置为 0、1、2、3 MPa,水压力作用时间设置为 3、10、24、72、240 h。标准对照组为无压自由水环境下的混凝土吸水试验。混凝土试件经过标准养护后,放入电热鼓风干燥箱进行干燥。干燥控制条件采用 Zhang 等^[16]研究确立的最佳干燥工艺控制条件,即 105℃持续干燥 120 h 直至试件质量恒定

达到干燥状态。待试件自然冷却后,记录各试验组在完全干燥状态下的试件质量 m_0 。将完全干燥的混凝土试件按照预设水压力及作用时间分组放入水压力加载试验系统。对于标准对照组,将干燥试件放入恒压容器后,加水并使水面刚好没过试件顶部,不施加水压力,达到预定作用时间后取出称量;其余试验组达到预设水压力及作用时间后,再次称量各试验组的试件质量 m_i 。通过混凝土不同水压力作用后与干燥状态的质量差异,得到不同水压力作用后混凝土含水率,各试验组含水率为 3 块试件的平均值。含水率 ρ_i 按下式计算:

$$\rho_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

3 结果与分析

通过间歇记录不同水压力作用不同时间后的试件吸水质量,共获取 12 个试验组的吸水质量数据,得到 C15、C20、C30 混凝土在 0、1、2、3 MPa 的水压力下,作用 3、10、24、72、240 h 后其内部含水率随水压力和作用时间的变化规律(图 2)。

由图 2 可知,相同作用时间下,各强度等级混凝土在 0 MPa 无压自由水环境下的含水率均明显低于高渗透水压力环境下的含水率。例如,C15 混凝土在 1、2、3 MPa 渗透水压力下的饱和含水率分别为 0 MPa 条件下的 1.12、1.13、1.19 倍。无压自由水环境下 C15、C20、C30 混凝土在作用前期的 24 h 内,含水率呈近似线性快速增长,随着作用时间的延续,含水率变化极为缓慢,待作用 240 h 后混凝土达到

近似饱和状态。混凝土在 1、2、3 MPa 的高渗透水压力作用下,其内部含水率在作用时间 3 h 内含水率迅速增大,随着水压力作用时间延长至 24 h 后,含水率的增长幅度变缓,达到近似饱和所需时间约为 72 h。例如,高渗透水压作用时间为 3 h 时,C20 混凝土在 1、2、3 MPa 的水压力作用下,含水率已分别达到其饱和含水率的 89.21%、92.34%、91.36%,而无压自由水条件下 C20 混凝土 3 h 含水率仅为饱和含水率的 38.24%。相同水压力作用时间和强度等级条件下,渗透水压力越高,其饱和含水率越高。例如,C15 混凝土在 3 MPa 水压力下的饱和含水率分别是 0、1、2 MPa 的 1.19、1.06、1.05 倍。相同作用时间和渗透水压力条件下,混凝土强度等级越高,其饱和含水率越低。例如 C20、C30 混凝土 3 MPa 水压力作用 240 h 后的含水率分别为 C15 混凝土的 94.81%、96.31%。

将 0、1、2、3 MPa 水压力下作用 3 h 后的 C20 混凝土试件劈开,分析混凝土内部湿度的分布状态,图 3 为不同水压力作用下的混凝土内部水分分布图。由图 3(a)可知,无压自由水环境作用 3 h 条件下混凝土试件仅边缘区域存在约 20 mm 的水分分布,试件中心区域为干燥区。由图 3(b)(c)(d)可知,1、2、3 MPa 水压力作用 3 h 后混凝土试件内部均已存在水分分布,验证了 1、2、3 MPa 高渗透水压力作用 3 h 后 C20 混凝土含水率分别已达饱和含水率的 89.21%、92.34%、91.36%这一研究结论,同时说明无压自由水环境下混凝土主要依靠毛细吸水,吸水速率较为缓慢,而在高压水环境中液态水被沿混

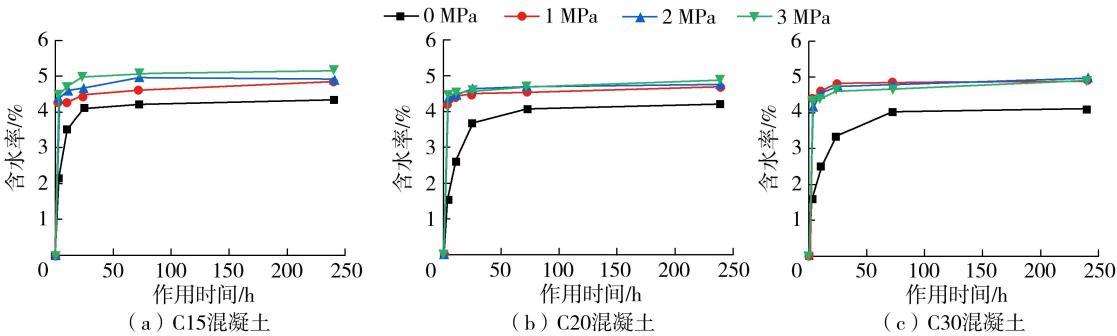


图 2 不同水压力作用下的混凝土含水率变化曲线

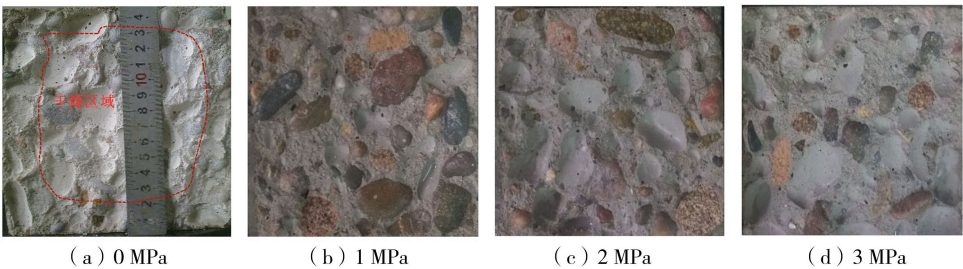


图 3 不同水压力作用下混凝土内部水分分布(作用时间 3 h)

凝土活性孔隙和微裂纹快速压入混凝土内部。

采用非线性函数拟合得到强度等级为 C15、C20、C30 混凝土在 0、1、2、3 MPa 的渗透水压力分别作用 3、10、24、72、240 h 后含水率的预测公式(式(2))。表 2 为预测公式的常数取值及相关系数 R^2 。由表 2 可知,不同渗透水压力下混凝土含水率预测公式相关系数均大于 0.95,表明不同渗透水压力的预测公式具有良好的相关性,可为后续不同渗透水压力条件下混凝土力学特性研究的含水率分析提供依据。

$$\rho_i = A_0 + A_1 e^{-t/A_2} \tag{2}$$

式中 A_0 、 A_1 、 A_2 为拟合公式的常数,其取值见表 2。

表 2 式(2)常数取值及相关系数

强度等级	水压力/MPa	A_0	A_1	A_2	R^2
C15	0	3.99	3.74	10.31	0.99
	1、2、3	4.55	4.48	3.46	0.99
C20	0	4.09	3.93	9.50	0.98
	1、2、3	4.48	4.44	3.16	0.99
C30	0	3.99	4.09	4.20	0.96
	1、2、3	4.73	4.61	4.77	0.99

为进一步揭示不同渗透水压力环境下混凝土含水率演化的微观机理,采用压汞法检测高渗透水压力作用前后的混凝土孔隙结构参数。考虑到混凝土材料的非均质性及测试结果的代表性,在 3 块 C20 混凝土试件的中心及边缘位置分别钻取直径约为 10 mm、高 20 mm 的 3 个试样,即高渗透水压力作用前的压汞法测试试样为 6 个。混凝土试件中心区域 3 个试样平均值为中心区域孔隙参数,试件边缘区域 3 个试样的平均值为边缘区域孔隙参数,混凝土试件整体孔隙参数为中心与边缘区域孔隙参数的平均值。高渗透水压力作用后的孔隙测试方法相同。基于上述孔隙测试方法,分别测试 C20 混凝土在 3 MPa 渗透水压力作用前后的孔隙结构。检测设备采用美国 MICROMERITICS 公司生产的 AutoPore IV 9500 全自动压汞仪,测定程序严格按照 GB/T 21650.1—2008《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度法 第 1 部分:压汞法》执行。分析压汞试验数据,得到高渗透水压力作用前后的孔隙特征参数,如表 3 所示。

由表 3 可知,高渗透水压力作用后,混凝土总孔

表 3 高渗透水压力作用前后混凝土孔隙结构参数

水压力/MPa	取样位置	各孔径范围的孔隙率/%				平均孔径/nm	平均孔隙率/%
		凝胶孔 (<10 nm)	过渡孔 (10~100 nm)	毛细孔 (100~1 000 nm)	大孔 (>1 000 nm)		
0	试件边缘	0.66	3.50	3.16	1.39	33.61	8.38
	试件中心	0.57	3.62	2.42	1.45		
3	试件边缘	0.38	4.92	4.31	1.38	52.77	9.89
	试件中心	0.26	2.93	4.07	1.52		

隙率及平均孔径均有所提高,混凝土经 3 MPa 的水压力作用 240 h 后总孔隙率及平均孔径分别为无压自由水环境下的 1.18、1.57 倍。高渗透水压力环境下,压力水在微裂纹内运动,给裂纹的表面施加水力荷载,产生了劈裂力,相当于楔体的“楔入”作用,加速了混凝土微裂纹的扩展和贯通^[17],导致高渗透水压力作用后平均孔隙率及孔径均显著增大。随着微裂纹张开宽度的增大,外界水通过表面裂纹渗入到混凝土内部的阻力减小,促进了水的进入及微裂纹的进一步扩展,导致高渗透水压力作用后混凝土饱和含水率显著高于无压自由水环境下的饱和含水率。3 MPa 渗透水压力下 C20 混凝土孔隙率及饱和含水率分别为无压自由水环境下的 1.18、1.16 倍,其含水率增幅与孔隙率增幅是基本对应的。各孔径范围孔隙率表现为过渡孔、毛细孔、大孔的孔隙率均有不同幅度的增大,分别为水压力作用前的 1.10、1.50、1.02 倍,但孔径为 10 nm 以内的凝胶孔孔隙率较高渗透水压力作用前降低了 47.97%,其原因在于小孔径范围的部分凝胶孔在渗透水压力作用下扩展为更大孔径范围的过渡孔及毛细孔,且主要转化为过渡孔。

4 结 论

- a. 不同水压力作用下的混凝土含水率变化趋势基本相似,作用前期呈近似线性快速增长,随水压力作用时间的延续,含水率增速逐渐变缓直至达到饱和状态。无压自由环境下混凝土达到饱和状态所需时间为 240 h,显著大于高渗透水压力作用下达到饱和状态所需时间,高渗透水压力环境下混凝土经 72 h 即可达到饱和状态。
- b. 高渗透水压力作用下混凝土含水率增速及饱和含水率均显著高于其在无压自由水环境下,3 MPa 水压力下 C15 混凝土饱和含水率为无压水环境下的 1.19 倍。渗透水压力越高,其饱和含水率越高,混凝土强度等级越高,其饱和含水率越低。
- c. 高渗透水压力作用后混凝土总孔隙率及平均孔径均有所提高,各孔径范围孔隙率表现为过渡孔、毛细孔、大孔的孔隙率均有不同幅度的增大,但凝胶孔孔隙率较高渗透水压力作用前有所降低。高渗透水压力导致混凝土小孔径凝胶孔扩展转化为过

渡孔,高渗透水压力作用下混凝土孔隙存在孔径与孔隙数量的综合变化。

参考文献:

[1] 甘磊,沈振中,徐力群.多场耦合作用下高混凝土坝水力劈裂研究综述[J].水利水电科技进展,2013,33(2):87-94. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XU Liqun. Review on hydraulic fracture in high concrete dam under multi-field coupling conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):87-94. (in Chinese))

[2] XU Lei, JIANG Lei, HUANG Yefei, et al. An efficient approach for mesoscale fracture modeling of fully-graded hydraulic concrete[J]. Water Science and Engineering, 2022,15(4):337-347.

[3] 甘磊,吴健,马泽锴.高混凝土重力坝坝踵裂缝水力劈裂特性分析[J].水利水电科技进展,2020,40(6):23-27. (GAN Lei, WU Jian, MA Zekai. Analysis of hydraulic fracturing characteristics of cracks in a high concrete gravity dam heel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(6):23-27. (in Chinese))

[4] 钟卓,黄乐鹏,张恒.混凝土内部湿度场与自约束应力场的研究[J].硅酸盐通报,2021,40(8):2609-2621. (ZHONG Zhuo, HUANG Lepeng, ZHANG Heng. Research on humidity field and self restraint stress field in concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (8):2609-2621. (in Chinese))

[5] 孙敏,朱浩然,庄伟.温度和湿度对 P-CNT 自感知混凝土压敏性的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):72-78. (SUN Min, ZHU Haoran, ZHUANG Wei. Effect of temperature and humidity on the pressure sensitivity of P-CNT self-sensing concrete [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3): 72-78. (in Chinese))

[6] 覃源,梁达,王玉龙,等.冷缝存在条件下混凝土力学性能试验研究[J].排灌机械工程学报,2023,41(7):677-681. (QIN Yuan, LIANG Da, WANG Yulong, et al. Experimental study on mechanical properties of concrete with cold joints[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(7):677-681. (in Chinese))

[7] DENG Chunling, CAI Weiqun, YIN Jian, et al. Influence of moisture content on mechanical properties of autoclaved aerated concrete [J]. International Journal of Transportation Engineering and Technology,2019,5(4):97-102.

[8] 孟琪,刘传孝,李想,等.不同含水率混凝土的分级加载蠕变试验研究[J].矿业研究与开发,2018,38(4):61-65. (MENG Qi, LIU Chuanxiao, LI Xiang, et al. Study on the creep characteristics of concrete with different moisture contents under step loading [J]. Mining Research and Development,2018,38(4):61-65. (in Chinese))

[9] 刘恒杰,李宗利,谭聪,等.不同含水率混凝土断裂过程

声发射试验研究[J].工程科学与技术,2020,52(6):153-161. (LIU Hengjie, LI Zongli, TAN Cong, et al. Experimental study on influence of different moisture contents on fracture acoustic emission characteristics of concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52 (6):153-161. (in Chinese))

[10] 王圣程,姜慧,禄利刚,等.单轴压缩下不同含水率水泥混凝土的能量演化特征[J].混凝土与水泥制品,2018(7):24-27. (WANG Shengcheng, JIANG Hui, LU Ligang, et al. Energy evolution characteristic on cement concrete with different water content under uniaxial compression [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(7):24-27. (in Chinese))

[11] 张国辉,李肖杭,魏海.水环境下的混凝土湿度影响因素试验[J].水利水电科技进展,2019,39(6):51-55. (ZHANG Guohui, LI Xiaohang, WEI Hai. Experimental study on concrete humidity under water environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(6):51-55. (in Chinese))

[12] 蒋建华,吴琦,付用全,等.掺粉煤灰再生混凝土吸湿过程与预测模型研究[J].建筑材料学报,2022,25(3):248-255. (JIANG Jianhua, WU Qi, FU Yongquan, et al. Moisture absorption process and prediction model of recycled concrete mixed with fly ash [J]. Journal of Building Materials,2022,25(3):248-255. (in Chinese))

[13] 刘军,李尚霖,钟道君,等.复杂环境下混凝土结构内湿度微环境的特征及响应规律[J].混凝土,2021(2):17-19. (LIU Jun, LI Shanglin, ZHONG Daojun, et al. Characteristics and response law of humidity microenvironment in concrete structures in complex environment [J]. Concrete,2021(2):17-19. (in Chinese))

[14] 柯杨,张鹭,田水,等.轻骨料混凝土早龄期湿度扩散试验研究[J].混凝土,2020(8):88-92. (KE Yang, ZHANG Lu, TIAN Shui, et al. Experimental study on moisture diffusion of lightweight aggregate concrete at early age [J]. Concrete,2020(8):88-92. (in Chinese))

[15] 谭聪,李宗利,韩进生,等.不同强度等级和尺寸混凝土自由吸水规律研究[J].混凝土,2019(11):34-38. (TAN Cong, LI Zongli, HAN Jinsheng, et al. Study on free absorption of concrete with different strength grades and sizes [J]. Concrete,2019(11):34-38. (in Chinese))

[16] ZHANG Guohui, LI Zongli, ZHANG Linfei, et al. Experimental research on drying control condition with minimal effect on concrete strength [J]. Construction and Building Materials,2017,135:194-202.

[17] 甘磊,沈心哲,王瑞,等.单裂缝混凝土结构水力劈裂试验[J].水利水电科技进展,2017,37(4):30-35. (GAN Lei, SHEN Xinzhe, WANG Rui, et al. Hydraulic fracturing test of concrete structures with single crack [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (4):30-35. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-07 编辑:俞云利)