

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230074

基于声发射的混凝土热力耦合损伤特性研究

宿 辉^{1,2}, 栾亚伟^{1,2}, 胡宝文^{1,2}, 马秋娟^{1,2}

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056021; 2. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056021)

摘要: 为研究在 100 °C 内热力耦合因素对水利工程混凝土材料损伤特性的影响规律, 采用自主设计的温度控制装置对混凝土试件施加并稳定目标温度, 利用无损监测声发射技术(AE)监测不同温度环境下混凝土单轴压缩试验全程。探究了 5 种不同温度下混凝土破坏过程中 AE 振铃计数及幅值变化情况, 并根据振铃计数与应力的变化关系建立了热力耦合下混凝土损伤本构模型。结果表明, 累计振铃计数在 100 °C 较 20 °C 下提高了 5.25 倍, 幅值在加载后期较前期提高 20~40 dB, 累计振铃计数和幅值分别从损伤事件数量和损伤剧烈程度表现出温度越高, 损伤事件数量越多, 损伤程度越剧烈。所建损伤本构模型证明了温度的提高会增加混凝土的损伤程度, 为理解热力耦合对混凝土材料损伤影响规律提供了理论参考。

关键词: 热力耦合; 混凝土; 单轴压缩; 声发射; 温度; 损伤特性

中图分类号: TV431⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0158-05

1 引言

十三五期间, 混凝土材料在工程应用中达到了顶峰, 混凝土材料的性能直接影响工程的安全性, 而热力耦合因素严重影响混凝土的力学特征^[1]。因此, 研究热力耦合对混凝土损伤影响十分必要。目前, 针对热力耦合对混凝土损伤的影响, 主要从微观和宏观两个角度开展了大量研究^[2]。微观角度主要利用工业 CT 和扫描电子显微镜(SEM)等仪器对混凝土损伤后的形貌、孔隙率及裂纹发展进行测定研究^[3]。如苗艳春等^[4]利用 X-CT 研究了高温对混凝土的损伤情况, 观察了混凝土试件随温度变化内部裂纹发展变化过程, 但 X-CT 分辨率的高低与试件尺寸之间的矛盾阻碍了其在混凝土损伤研究中的发展。基于此, 从宏观角度对热力耦合影响混凝土损伤特性进行研究。声发射(AE)技术能够准确地监测物体的动态损伤过程, 能实时监测内部损伤信息^[5]。陈波等^[6]利用 AE 技术研究了混凝土冻融后的损伤特性, 发现振铃计数和幅值在整个加载过程中具有明显的规律性。另外, 考虑到热力耦合物理试验的难度, 利用软件模拟研究了混凝土在热力耦合作用下的损伤。目前对温度在 100 °C 以内的

物理试验研究较少, 且集中于高温影响混凝土冷却后, 对高温和单轴试验同时进行研究较少。鉴于此, 本文利用自主研发的温度控制装置结合 AE 技术细化温度梯度间隔, 通过获取 AE 振铃计数和幅值特征参数, 建立热力耦合下混凝土损伤本构模型, 并进一步分析其对混凝土损伤特性的影响, 旨在为评价热力耦合对混凝土损伤特性的影响提供参考。

2 研究方法

2.1 试样制备

试验配置尺寸为 100 mm × 100 mm × 200 mm 的 C30 混凝土试样, 水泥为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥, 粗骨料为 5~15 mm 连续级配的碎石, 细骨料为筛选后的河砂, 粉煤灰为 II 级粉煤灰, 混凝土配合比中水胶比为 0.42, 水、水泥、粉煤灰、粗骨料、砂、减水剂分别为 198、424、47、1 186、582、1.2 kg/m³。将试件置于温度 20 °C、湿度 95% 的养护箱中养护 28 d。

2.2 试验仪器

加载系统为 TAW-2000 微机伺服三轴试验机, 加载方式为位移控制, 加载速率为 0.1

收稿日期: 2023-01-15, 修回日期: 2023-02-12

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2019402256, E2020402087)

作者简介: 宿辉(1972-), 男, 博士, 教授、博导, 研究方向为水工结构和水工材料, E-mail: suh-26@163.com

通讯作者: 胡宝文(1984-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水工结构和水工材料, E-mail: hubaowen1984@gmail.com

mm/min。高温控制装置是自主研发的能给混凝土试件施加温度边界的高温施加装置,经过多次试验验证该装置满足试验要求,见图 1。声发射系统采用 PCI-2 型多通道高速采集声发射试验仪,频率带宽范围为 10~110 kHz,声发射阈值 45 dB,传感器共 6 个,布置见图 2。

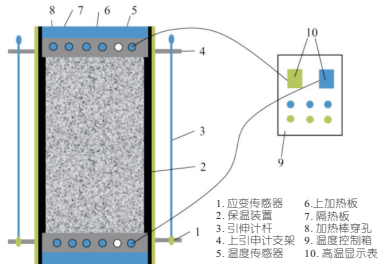


图 1 高温控制装置

Fig. 1 High temperature control

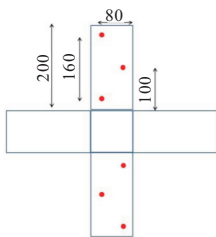


图 2 声发射定位图(单位:mm)

Fig. 2 Acoustic emission locator map

2.3 试验方案

将养护好的试件取出置于 TAW-2000 微机伺服三轴试验机上,利用自主研发的高温控制装置使混凝土试件分别达到目标温度 20、40、60、80、100 °C 并维持目标温度,然后开始单轴压缩试验,同时使用 AE 技术对混凝土加载全程进行监测,采集混凝土 AE 振铃计数、幅值等信息。

3 试验结果分析

3.1 基于 AE 的热力耦合下混凝土损伤演化分析

3.1.1 热力耦合下振铃计数演化特征分析

根据加载过程中的应力应变曲线,将混凝土加载全程大致划分为压密阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段,见图 3。压密阶段混凝土微裂纹闭合,在弹性阶段应力应变增长近似于线性,在弹塑性阶段裂纹扩展较为迅速,在破坏阶段试件会发生宏观破坏。

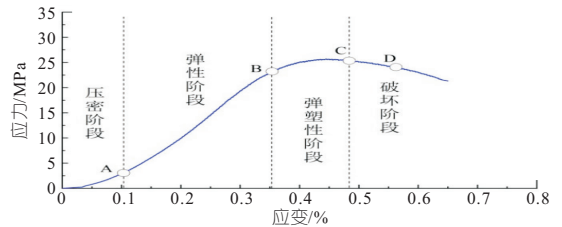


图 3 应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve

WANG S R 等^[7]通过 AE 监测了混凝土材料损伤全过程,发现 AE 的特征参数振铃计数能有效反映混凝土材料内部损伤变化情况。因此,将混凝土试件的振铃计数与其应变变化情况结合起来,见图 4。结合图 3 中应力应变曲线可看出,不同温度下混凝土应力—应变—振铃计数曲线大致可分为四个阶段:①压密阶段(OA 段)。加载初期应力开始增大但增速较慢,此时混凝土内部微小裂隙大多逐渐被压密;另外,此时试件变形逐渐增大,振铃计数逐渐增多,出现一个微小波峰,但其数值在 100 次以内,振铃计数随温度的提高而增加,说明温度越高造成混凝土初始损伤越大。②弹性阶段(AB 段)。随着应力逐渐增加,不同温度下试件未出现宏观裂纹。一些微小裂隙继续发展引起部分 AE 信号产生,此时所产生的 AE 信号数值偏小且变化不明显。不同温度试件振铃

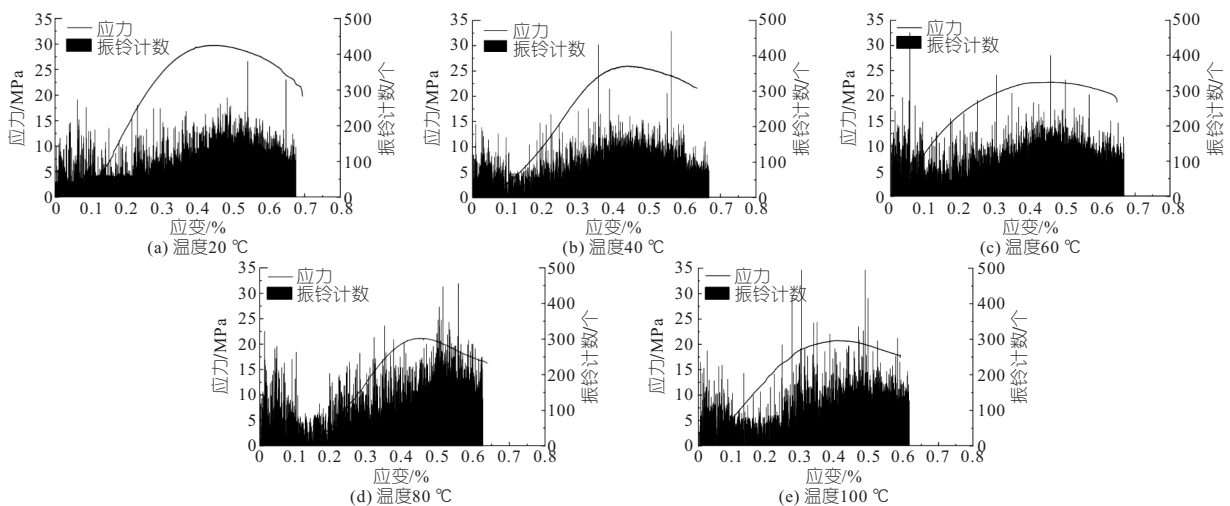


图 4 不同温度下应力、应变、振铃计数变化关系

Fig. 4 Relationship between stress, strain and ringing count changes at different temperatures

计数几乎无明显变化,振铃计数进入一个相对稳定的平静期,与压密阶段相比有一定的下降趋势。
 ③塑性阶段(BC段)。进入塑性阶段后,应力增长幅度开始降低,试件内部产生较多的微破裂,但此时产生的裂纹变化和混凝土结构破坏不可逆。另外,通过观察此时的振铃计数变化发现,振铃计数较之前阶段数值出现了明显增加,这也说明试件在塑性阶段产生 AE 信号较多,混凝土内部产生的损伤数量较多,程度较为严重。温度越高振铃计数的个数越多,试件在此时发生破坏所产生的能量较高,这也是使此时 AE 振铃计数发生突增的一个重要因素。
 ④破坏阶段(CD段)。此时应力变化不大,前期裂纹扩展的积累在破坏阶段达到一定程度,出现了突然贯穿混凝土试件的现象。甚至在贯穿的瞬间存在微小碎片从混凝土整体上脱落的现象,此时不同温度试件均产生了明显的宏观变化,这也导致振铃计数增大至整个加载过程的峰值,在温度较高时(80、100 °C)试件裂纹贯穿瞬间有热蒸汽产生现象,说明高温所引起的水汽压力也会引起混凝土破坏。

由图 4 可知,随着温度提高,峰值应力不断下降,说明温度越高的混凝土试件承载能力越低,温度越高对混凝土损伤的影响越严重。分析整个加载过程中温度对 AE 振铃计数的影响,累计振铃计数与不同温度试件柱状图见图 5。由图 5 可得,不同温度下振铃计数的变化不同,说明温度会

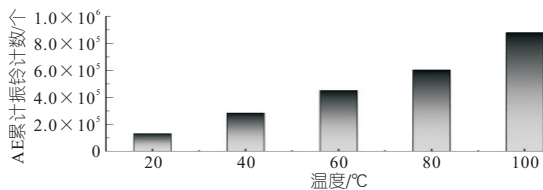


图 5 累计振铃计数随温度变化

Fig. 5 Cumulative ringing count as a result of temperature change plot

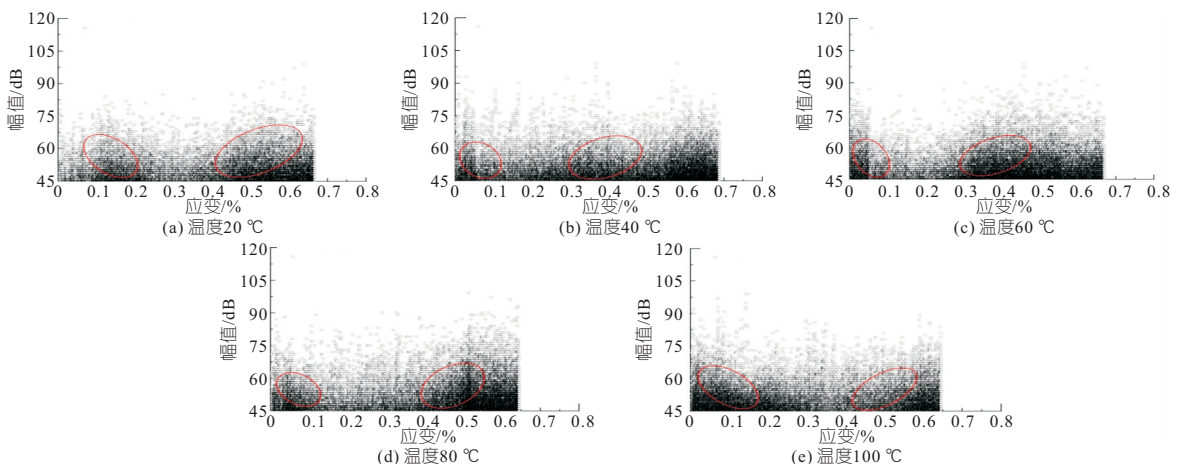


图 6 不同温度下幅值与应变关系图

Fig. 6 Plot of amplitude and strain at different temperatures

对混凝土结构产生巨大影响,不同温度所引起的混凝土内部结构变化不一致,温度越高所引起的损伤越严重,进而导致 AE 累计振铃计数的增加。

3.1.2 热力耦合下幅值演化特征分析

声发射参数的幅值可以代表混凝土加载过程中损伤的强烈程度,不同温度下混凝土在单轴加载过程中幅值与应变关系见图 6。幅值在试件整个加载过程中出现了两次集中区域,分别为加载前期和后期,第一次幅值数值集中在 45~55 dB 之间,原因为试件原始存在的微小裂隙被逐渐压密,但此时试件完整度不会被破坏;第二次幅值数值集中在 55~70 dB,数值较前期有所增加,原因为此时所造成的裂纹尺寸较大,损伤程度更为强烈,幅值在加载后期较前期提高 20~40 dB。另外,目标温度设置的越高,所监测的幅值数值整体越高,这说明温度会增加混凝土试件的损伤程度,幅值表现出的规律特征与振铃计数在一定程度上具有一致性。

3.2 热力耦合下混凝土损伤因子变化情况

陈波等^[6]将混凝土进行单轴压缩试验,发现应力 σ 与累计振铃计数 N 之间存在以下关系:

$$N = a\sigma^b e^{c\sigma} \quad (1)$$

式中, a 为积分常量; b 、 c 均为混凝土损伤相关系数; σ 为应力。

纪洪广等^[8]发现混凝土损伤变量 D_z 与其累计振铃计数 N 之间存在线性关系,即:

$$D_z = kN \quad (2)$$

式中, k 为比例系数。

由于在单轴压缩前,对混凝土试件施加到目标温度,这段时间温度对混凝土的损伤不可忽略,因此混凝土的损伤变量 D 计算公式为:

$$D = D_T + D_z = D_T + kN \quad (3)$$

式中, D_T 为前期温度引起的损伤变量。

混凝土力学性能能够表示混凝土内部损伤程度,损伤变量定义为:

$$D = 1 - E(\sigma)/E_0 \quad (4)$$

式中, $E(\sigma)$ 为受压过程中不同应力状态下混凝土动弹性模量; E_0 为受压前初始动弹性模量。

热力耦合作用下混凝土损伤本构模型为:

$$\sigma = E_0 \epsilon (1 - D_T - D_Z) \quad (5)$$

式中, ϵ 为应变。

以 20 °C 试件为例,建立混凝土损伤本构模型,将试验所得应力与累计振铃计数根据式(1)进行拟合分析,可得 a 、 b 、 c ,拟合结果,见图 7。将图 7 拟合得到的 a 、 b 、 c 代入式(5),与试验得到的应力-应变曲线进行拟合,见图 8,可得 E_0 、 k 、 D_T 。即得单轴压缩下混凝土损伤本构模型。进而可求其他 4 种温度损伤本构模型中 k 、 D_T 值,见表 1。

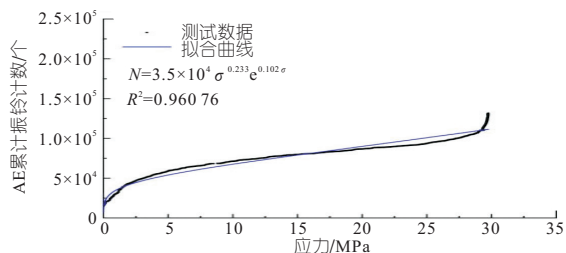


图 7 20 °C 累计振铃计数与应力拟合曲线

Fig. 7 20 °C cumulative ringing count and stress fitting curve

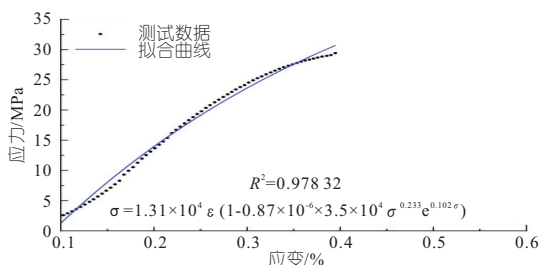


图 8 20 °C 应力应变拟合曲线

Fig. 8 20 °C stress-strain fitting curve

表 1 热力耦合下损伤本构模型参数值

Tab. 1 Damage constitutive model parameter values at different temperatures

温度/°C	D_T	k	本构模型
20	0	0.75×10^{-5}	$\sigma = 1.31 \times 10^4 \epsilon (1 - 0.75 \times 10^{-5} N)$
40	0.015	0.35×10^{-5}	$\sigma = 8.42 \times 10^3 \epsilon (1 - 0.015 - 0.35 \times 10^{-5} N)$
60	0.032	0.22×10^{-5}	$\sigma = 7.97 \times 10^3 \epsilon (1 - 0.032 - 0.22 \times 10^{-5} N)$
80	0.053	0.17×10^{-5}	$\sigma = 7.35 \times 10^3 \epsilon (1 - 0.053 - 0.17 \times 10^{-5} N)$
100	0.086	0.11×10^{-5}	$\sigma = 6.26 \times 10^3 \epsilon (1 - 0.086 - 0.11 \times 10^{-5} N)$

根据式(5)损伤本构模型及表 1,探究 20、40、60、80、100 °C 共 5 种温度下热力耦合对混凝土试件的损伤演化过程,结果见图 9。

损伤变量 D 代表了混凝土损伤的发展情况,在损伤发生前, D 值为零,当裂纹逐渐产生时,损

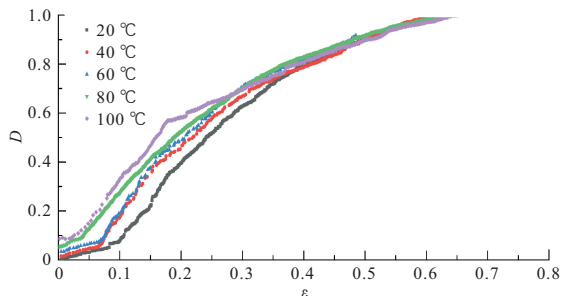


图 9 5 种不同温度下损伤演化过程

Fig. 9 Damage evolution at 5 different temperatures

伤变量也逐渐增加。由图 9 可看出,试件的温度越高,混凝土初始损伤变量数值越大,对混凝土损伤造成的影响越严重,这是因为温度的升高引发了混凝土内部颗粒的膨胀变形,从而加重混凝土损伤。不同温度下损伤变量随应变的增加逐渐增大,前期损伤变量增长缓慢,是因为此时处于压密、弹性阶段,主要是微裂孔隙被压密,破坏程度较小,后期损伤变量趋于稳定且接近于 1,是因为此时逐渐达到破坏阶段,微小裂纹逐渐增多,发展成大裂纹并最后形成贯通。建立的损伤本构模型,可以定量反映不同温度下热力耦合对混凝土在加载过程中损伤变化发展过程,以及对损伤变量的影响。

4 结论

a. 自主研发的温度控制装置降低了混凝土热力耦合物理试验的难度。不同温度下振铃计数和幅值变化不同,累计振铃计数在 100 °C 较 20 °C 下提高了 5.25 倍,幅值在加载后期较前期提高 20~40 dB,表现出温度越高,损伤事件数量越多,损伤程度越剧烈。

b. 根据累计振铃计数与应力应变关系建立的损伤本构模型,可实现对混凝土损伤变化的定量分析,表明损伤变量前期增长缓慢,后期趋于稳定且接近于 1,温度越高初始损伤变量数值越大,为理解热力耦合对混凝土损伤过程分析提供了指导。

参考文献:

[1] 王丹净. 浸水时间对塑性混凝土力学与声发射特征的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 156-159.
 [2] 白卫峰, 沈望鑫, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的混凝土应力-应变行为[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 551-561.
 [3] 过震文, 刘小方, 段昕智, 等. 超高性能混凝土在环境温度变化下的力学性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3495-3503.
 [4] 苗艳春, 张玉, SELYUTINA N, 等. 基于 X-CT 的高

温后再生保温混凝土损伤分析[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2829-2843.

[5] BAI Y J, SU H, BAI Y, et al. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method[J/OL]. Journal of building engineering, 2022, 57: 104906.

[6] 陈波, 袁志颖, 陈家林, 等. 冻融循环后蒸汽养护混凝土的损伤一声发射特性研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 143-149.

2023, 26(2): 143-149.

[7] WANG S R, WU X G, YANG J H, et al. Acoustic emission characteristics and dynamic damage constitutive relation of shale-ceramsite concrete subjected to loading tests[J]. Journal of materials in civil engineering, 2020, 32(8): 04020202.

[8] 纪洪广, 刘翔宇, 曾鹏, 等. 高强混凝土单轴压缩声发射频率特征试验研究[J]. 应用声学, 2016, 35(3): 248-254.

Analysis of Damage Characteristics of Concrete Thermodynamic Coupling Based on Acoustic Emission

SU Hui^{1,2}, LUAN Ya-wei^{1,2}, HU Bao-wen^{1,2}, MA Qiu-juan^{1,2}

(1. School of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China;
2. Key Laboratory of Smart Water Conservancy of Hebei Province, Handan 056021, China)

Abstract: In order to understand the influence of thermodynamic coupling factors on the damage characteristics of hydraulic engineering concrete materials within 100 °C, the temperature of concrete specimens is applied and stabilized by self-designed temperature control device, and non-destructive monitoring acoustic emission technology (AE) is used to monitor the uniaxial compression of concrete under different temperature environments. The AE ringing count and amplitude change during concrete failure at five different temperatures are explored, and the constitutive model of concrete damage under thermodynamic coupling is established according to the relationship between ringing count and stress. The results of the cumulative ringing count and amplitude show that the higher the temperature, the higher the number of damage events, the more severe the degree of damage, respectively, the cumulative ringing count increases by 5.25 times at 100 °C compared with 20 °C, and the amplitude can be increased by 20-40 dB in the late loading stage compared with the previous stage. The established damage constitutive model shows that the increase of temperature will increase the degree of damage of concrete, which provides a theoretical reference for understanding the influence of thermodynamic coupling on the damage of concrete materials.

Key words: thermodynamic coupling; concrete; uniaxial compression; acoustic emission; temperature; damage characteristics



(上接第 157 页)

[2] 谢同. 多龄期加卸荷大坝混凝土徐变泊松效应试验研究及数值计算反馈[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.

[3] HUANG Y Y, YUAN B, XIAO L. Studies on the wet expansion deformation of hydraulic concrete with fly ash under non-standard temperatures[J]. Case studies in construction materials, 2018, 8(1): 392-400.

[4] 黄耀英, 丁宇, 周勇, 等. 水胶比因素影响下水工混凝土湿胀变形试验与模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 102-111.

[5] 电力行业水电施工标准化技术委员会. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150-2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

[6] 黄国兴, 惠荣炎, 王秀军. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[7] 糜凯华, 武亮, 吕晓波, 等. 三维球形随机骨料混凝土细观数值模拟[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 124-128.

[8] 邱永荣. 混凝土硬化损伤的细观模拟方法研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2017.

[9] 朱伯芳. 混凝土热学力学性能随龄期变化的组合指数公式[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 1-7.

[10] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

Numerical Feedback Under Mesoscale Based on Tension/Compression Creep Test of Hydraulic Concrete in Water

SHAO Cheng-yu¹, FANG Guo-bao², XU Xiao-feng³, HUANG Yao-ying¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430000, China;
3. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: In view of the lack of research on the creep characteristics of hydraulic concrete in water from mesoscale scale, a meso-finite element model of concrete specimen of "aggregate-mortar-transition layer" was established. Based on the test data of tensile and compressive creep in water, the method of "orthogonal design-neural network-meso-finite element calculation" was adopted to implement the inversion analysis of the tensile and compressive specific creep of hydraulic concrete specimens at mesoscale. Finally, the relationship between tensile and compressive specific creep of hydraulic concrete and mortar was compared. The results show that the variation law of tension creep degree of hydraulic concrete in water is similar to that in sealed. The creep degree of mortar water is 2.4 times of hydraulic concrete water under conditions of tensile and compressive creep.

Key words: hydraulic concrete; creep in water; microscopic finite element model; mortar creep degree; optimized inversion