

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222590

细观尺度下水工混凝土水中拉压徐变试验数值反馈

邵成羽¹, 方国宝², 徐小枫³, 黄耀英¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430000;
3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 针对目前尚缺少从细观尺度研究水工混凝土水中徐变特性的问题, 通过建立骨料—砂浆—过渡层的混凝土试件细观有限元模型, 基于水工混凝土水中拉伸、压缩徐变试验数据, 采用正交设计—神经网络—细观有限元计算相结合的方法, 反演了水工混凝土试件细观尺度下砂浆的拉伸、压缩徐变度, 最后对比分析了水工混凝土和砂浆拉伸、压缩徐变度的关系。结果表明, 水工混凝土水中状态与密封状态下拉压徐变度变化规律相似; 不论拉伸徐变还是压缩徐变, 砂浆水中徐变度约为水工混凝土水中徐变度的 2.4 倍。

关键词: 水工混凝土; 水中徐变; 细观有限元计算; 砂浆徐变度; 优化反演

中图分类号: TV43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0154-04

1 引言

由于运行期的水工混凝土建筑物将经常性或周期性地受到水的作用, 导致水泥凝胶体吸水后将使混凝土产生湿胀应变, 从而改变混凝土的应变甚至应力状态, 因此研究水工混凝土水中徐变特性具有重要意义。由于在细观尺度下能有效地考虑混凝土各组成部分的多相特征和相互作用及其对混凝土宏观性能的影响, 因此目前从细观尺度进行混凝土徐变试验数值反馈已有一些研究^[1-2]。此外, 针对混凝土水中湿胀应变亦开展了相关研究工作^[3-4]。然而, 由于混凝土水中徐变试验相对复杂, 迄今尚无从细观尺度进行水工混凝土水中徐变试验数值反馈分析的报导。为此, 本文基于水工混凝土水中拉伸、压缩徐变试验数据, 通过建立混凝土试件细观有限元模型, 反演得到混凝土试件细观尺度下砂浆拉伸、压缩徐变度, 进而对比混凝土和砂浆徐变度的关系。

2 混凝土细观尺度下砂浆徐变度反演分析原理

采用正交设计—神经网络—细观有限元计算

相结合的方法反演混凝土细观尺度有限元模型中砂浆徐变度, 具体步骤如下。

步骤 1 结合混凝土拉伸、压缩徐变度实测值, 采用优化算法辨识获得混凝土徐变度表达式参数, 作为砂浆徐变度表达式参数的初始值, 然后选定参数取值范围, 采用合适的正交表构造砂浆徐变度参数组合。其中, 优化辨识混凝土徐变度表达式参数的数学模型为:

$$\begin{cases} \min f(X) = \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_N} \sum_{t=\tau}^b [C'(t, \tau) - C(t, \tau)]^2 \\ \text{s. t. } x_i > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $C'(t, \tau)$ 、 $C(t, \tau)$ 分别为龄期 τ 加载, 持荷至 t 时刻的混凝土徐变度计算值、实测值, 10^{-6} /MPa; $\tau_1 \sim \tau_N$ 均为加载龄期; $t - \tau$ 为持荷时间; x_i 为徐变度待反演参数。

步骤 2 将构造的砂浆徐变度参数组合逐一输入细观有限元模型, 分析获得对应的混凝土试件计算徐变度; 结合混凝土试件实测徐变度, 由下式计算获得相应的误差:

$$\delta_{\text{cp(ts)}}(t, \tau) = \sum_{t=\tau}^b [C'_{\text{cp(ts)}}(t, \tau) - C_{\text{cp(ts)}}(t, \tau)] \quad (2)$$

式中, $\delta_{\text{cp(ts)}}$ 为混凝土试件实测徐变度与计算徐变度累计误差, 下标 cp 表示压缩徐变、ts 表示拉伸徐变; τ 为试验加载龄期, 取 $\tau = 14, 28, 60$ d; $t - \tau$

收稿日期: 2022-12-15, 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179135, 51779130)

作者简介: 邵成羽(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工混凝土耐久性, E-mail: 1427324042@qq.com

通讯作者: 黄耀英(1977-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水工结构安全监控, E-mail: huangyaoying@sohu.com

为徐变持荷过程中的典型时刻, b 为时刻数, 取 $b=8$, 即 $t-\tau$ 分别取 1、3、5、7、14、21、28、30 d。

基于砂浆徐变度参数组合和相应的误差构建学习样本。

步骤 3 将 $\delta_{cp(t_s)}$ 作为训练样本的输入, 将对应的砂浆徐变度参数组合作为输出, 经归一化处理输入神经网络模型进行训练, 若精度较差, 返回步骤 1。

步骤 4 将不同加载龄期的“最优”砂浆徐变度参数的混凝土徐变计算值与实测值之间的累计误差归一化处理, 输入训练好的神经网络模型, 再对输出值进行反归一化后, 获得“最优”砂浆徐变度参数。

步骤 5 将反演获得的砂浆徐变度参数输入到混凝土试件细观有限元模型中进行数值计算, 若计算值与实测值精度满足要求, 则优化反演获得计算参数合理, 否则, 返回步骤 1。

参数反演流程见图 1。

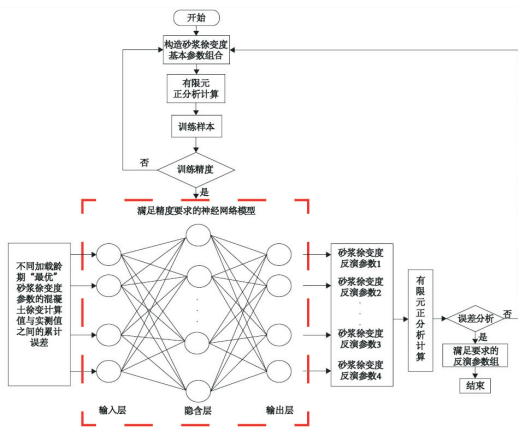


图 1 砂浆徐变度参数反演流程

Fig. 1 Inversion flow of mortar creep degree parameters

3 水工混凝土水中拉伸压缩徐变试验

本次徐变试验基于某混凝土高坝工程的坝体混凝土配合比, 并结合试验条件, 设计了水胶比为 0.5、粉煤灰掺量 35% 的 C30 二级配混凝土配合比。共设计 3 个加载龄期 (14、28、60 d), 由于水中混凝土徐变试验耗时长、耗费高, 为此每个加载龄期均成型 1 个拉伸、压缩、补偿试件 (15 cm × 15 cm × 50 cm) 和 3 个标准立方体试件。标准立方体试件按《水工混凝土试验规程》^[5] 所述棱柱体抗拉和抗压强度计算方法, 通过 0.7 的折算系数换算获得相同加载龄期的棱柱体试件的抗压强度, 然后按 0.3 的应力水平, 计算获得拉伸、压缩加载的荷载值。相关研究表明, 混凝土试件持荷 20 d 徐变约占持荷 180 d 徐变的 50%^[6], 故本次试验

持荷时间为 30 d。水中拉伸、压缩徐变试验见图 2。

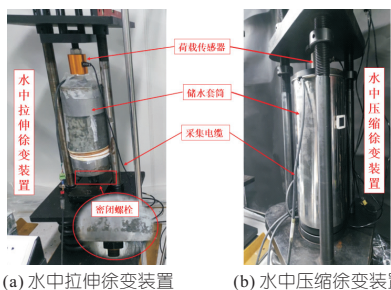


图 2 混凝土试件水中拉伸、压缩徐变试验示意图
Fig. 2 Schematic diagram of tensile and compressive creep tests of concrete specimen in water

4 水工混凝土细观尺度水中力学参数优化反演

4.1 混凝土试件细观有限元模型

本次徐变数值计算将混凝土看作由粗细骨料、砂浆及二者之间的界面过渡层组成的三相复合材料。由于在数值计算中粗骨料形状对于整体弹性模量影响较小, 因此将混凝土的骨料假定为圆形颗粒。首先根据 Walraven 公式确定骨料颗粒数, 建立二维骨料库; 然后根据 Monte-Carlo 法将骨料随机投放在混凝土细观模型中, 并将有限元网格投影到该结构上^[7]; 接着根据单元的位置赋予其相应的材料属性; 最后得到 15 cm × 50 cm 的随机骨料分布模型。在数值计算时, 很难做到采用“微米”量级的单元尺度作为混凝土过渡层细观有限元计算分析的尺度, 因此本次建立的细观有限元模型界面过渡层厚度取 0.5 mm。借助 MSC. Marc 软件建立的混凝土试件二维细观有限元模型见图 3。

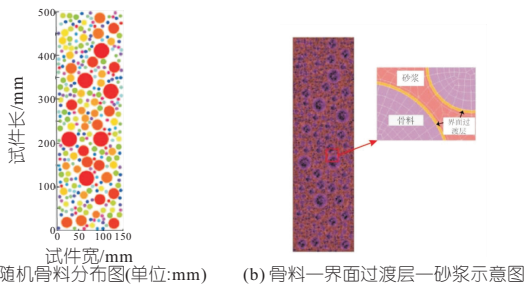


图 3 混凝土试件二维细观有限元模型

Fig. 3 Two-dimensional meso-finite element model of concrete specimen

4.2 混凝土试件加荷阶段弹性力学参数优化反演

4.2.1 砂浆弹性模量参数反演

考虑计算的复杂性及已有研究成果^[2], 本次砂浆弹性模量反演假设过渡层和砂浆弹性模量相同^[8], 花岗岩骨料弹性模量均取 50 GPa。基于混凝土试件在加载时的应力—应变关系, 结合混凝土

土试件二维细观有限元模型,反演得到 14、28、60 d 的砂浆弹性模量分别为 19.5、26.9、32.0 GPa。

4.2.2 砂浆组合指数式弹性模量参数辨识

由于砂浆弹性模量随龄期的增长而增加,所以本文采用组合指数式^[9]描述砂浆弹性模量的增长规律,即:

$$E(\tau) = \sum_{i=1}^2 E_i (1 - e^{-m_i \tau}) \quad (3)$$

式中, $E(\tau)$ 为砂浆的弹性模量, GPa; E_i 、 m_i 均为待定参数。

结合 3 个不同龄期砂浆弹性模量反演值,采用优化算法容易辨识砂浆弹性模量组合指数式参数分别为 $E_1 = 19.785$ GPa、 $m_1 = 0.020$ 、 $E_2 = 19.860$ GPa、 $m_2 = 0.815$ 。

4.3 混凝土试件水中持荷阶段砂浆徐变度优化反演

为获取水中持荷阶段砂浆徐变度,基于水中持荷阶段混凝土实测徐变度,采用正交设计—神经网络—细观有限元计算结合的方法反演砂浆徐变度。

4.3.1 砂浆徐变度表达式参数初始值获取

在混凝土坝工程中,常用八参数徐变度模型来描述混凝土徐变,且由于混凝土和砂浆徐变特性相似^[10],为此仍采用 8 参数徐变度模型来描述砂浆徐变规律,即:

$$C(t, \tau) = \sum_{i=1}^2 (f_i + g_i \tau^{-p_i}) [1 - e^{-r_i(t-\tau)}] \quad (4)$$

式中, f_i 、 g_i 、 p_i 、 r_i 均为待确定系数。

在未知混凝土水中砂浆徐变度时,将试验获得的混凝土实测徐变度作为砂浆徐变度的初始值,基于 Matlab(R2019a),采用鲸鱼算法优化辨

识后的混凝土水中压缩、拉伸徐变度表达式参数值见表 1。

表 1 混凝土水中压缩、拉伸徐变度表达式参数反演值

Tab. 1 Parameter inverse values of compression/tension specific creep of concrete in water

参数	f_1	g_1	p_1	r_1	f_2	g_2	p_2	r_2
压缩	1.318	747.500	1.477	0.83	20.330	0.747	1.462	0.088
拉伸	1.270	35.995	0.313	1.95	0.002	5.747	0.673	0.072

将优化辨识获得的混凝土徐变度 8 个参数反演值作为砂浆徐变度表达式参数初始值,进行后续砂浆徐变度参数反演。

4.3.2 砂浆徐变度参数优化辨识

(1)待反演参数取值范围与参数组合。由于 f_1 、 g_1 、 p_1 、 r_1 、 f_2 、 g_2 、 p_2 、 r_2 为砂浆徐变度表达式的待定参数,考虑计算量较大,参考现有结果^[2],假设粗骨料为完全线弹性体,忽略粗骨料的徐变变形,以式(3)进行计算,同时假设界面过渡层的徐变度与砂浆相同。

结合表 3 获得砂浆徐变度表达式的参数初始值,在此基础上给出 f_1 、 g_1 、 p_1 、 r_1 、 f_2 、 g_2 、 p_2 、 r_2 取值范围。结合正交设计表 $L_{32}(8^4)$ 和各待反演参数的取值范围拟定了 32 种不同的参数组合,待反演参数组合见表 2。

(2)混凝土拉伸、压缩徐变度计算值获取。3 种不同加载龄期下的细观有限元计算模型中,除了模型顶端施加的应力不同外,其余边界条件均相同,即模型的底端施加完全位移约束,两侧为自由边界。参考文献[10],将每一种加载龄期下的参数正交设计组合输入到细观有限元模型中,即可计算获得混凝土水中拉伸、压缩徐变度计算值 C'_{ts} 、 C'_{cp} 。计算结果见表 3。

表 2 砂浆压缩、拉伸徐变待反演参数正交设计组合

Tab. 2 Orthogonal design combination of mortar compression and tensile creep parameters to be inverted

参数组合	f_1	g_1	p_1	r_1	f_2	g_2	p_2	r_2
1	0.659(0.635)	373.750(1.998)	1.182(0.250)	0.664(1.560)	10.165(0.001)	373.750(373.750)	1.170(0.538)	0.070(0.058)
2	0.659(0.635)	373.750(17.998)	1.379(0.292)	0.775(1.820)	30.495(0.004)	1 121.250(1 121.250)	1.559(0.718)	0.094(0.077)
3	0.659(0.635)	622.917(29.996)	1.575(0.334)	0.996(2.340)	10.165(0.001)	622.917(622.917)	1.559(0.718)	0.106(0.086)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	1.976(1.905)	872.083(41.994)	1.379(0.292)	0.664(1.560)	30.495(0.004)	872.083(872.083)	1.365(0.628)	0.070(0.058)
31	1.976(1.905)	1 121.250(53.993)	1.575(0.334)	0.885(2.080)	10.165(0.001)	373.750(373.750)	1.365(0.628)	0.082(0.067)
32	1.976(1.905)	1 121.250(53.993)	1.772(0.367)	0.996(2.340)	30.495(0.004)	1 121.250(1 121.250)	1.754(0.808)	0.106(0.086)

注:括号内数据为拉伸徐变待反演参数。

表 3 混凝土水中拉伸、压缩徐变度计算值

Tab. 3 Calculation values of tensile and compressive specific creep of concrete in water $10^{-6}/\text{MPa}$

样本数	$C'_{ts}(t,14)$	$C'_{ts}(t,28)$	$C'_{ts}(t,60)$	$C'_{cp}(t,14)$	$C'_{cp}(t,28)$	$C'_{cp}(t,60)$
1	32.55	23.67	16.94	-17.11	-15.41	-9.24
2	58.75	37.70	23.60	-22.60	-16.09	-13.66
3	37.80	24.82	15.99	-12.93	-7.80	-5.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	57.86	39.96	27.14	-28.39	-18.60	-14.56
31	33.06	23.58	16.64	-22.80	-12.06	-7.69
32	53.04	33.45	20.68	-21.03	-15.48	-13.77

阶段内混凝土拉伸、压缩徐变度计算值和实测值累计误差作为每种参数组合下的训练样本。3 种加载龄期下的压缩、拉伸徐变度计算值与实测值累计误差 δ_{cp} 与 δ_{ts} 见图 4。

将混凝土拉伸、压缩徐变度计算值与实测值累计误差作为输入,待反演参数 f_1 、 g_1 、 p_1 、 r_1 、 f_2 、 g_2 、 p_2 、 r_2 作为输出,建立本次砂浆徐变度表达式参数反演神经网络。使用 Matlab(R2019a)

(3)学习样本训练。将 3 种加载龄期下持荷

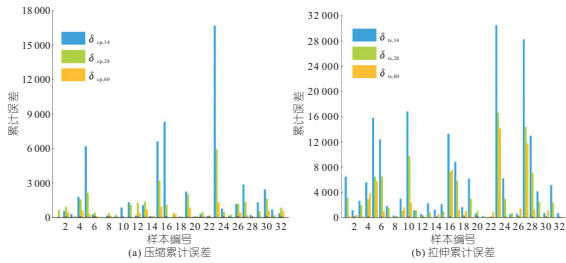


图 4 压缩、拉伸徐变度计算值与实测值累计误差

Fig. 4 Cumulative error between calculated and measured values of compression and tensile creep

中的神经网络工具箱, 将训练样本归一化处理输入到 BP 神经网络模型中进行训练, 直至迭代后所得均方误差降至 0.01 以下。由此分别建立混凝土水中压缩、拉伸徐变度计算值与试验值累计误差平方和与砂浆徐变参数之间的非线性映射关系。

(4) 参数反演结果。理论上, 不同加载龄期的“最优”砂浆徐变参数对应的混凝土有限元计算值与实测值之间的累计误差为 0, 因此将 $\delta(t, 14) = 0, \delta(t, 28) = 0, \delta(t, 60) = 0$ 输入到训练好的神经网络模型, 即可获得待反演的砂浆徐变度表达式参数, 结果见表 4。

表 4 砂浆拉伸压缩徐变度参数反演结果

Tab. 4 Inversion results of mortar tensile and compressive creep parameters

参数	f_1	g_1	ρ_1	r_1	f_2	g_2	ρ_2	r_2
反演值(压缩)	0.707	1 158.442	1.609	0.788	16.868	850.841	1.712	0.070
反演值(拉伸)	2.425	27.373	0.301	2.646	0.003	1 131.075	0.802	0.079

(5) 砂浆徐变度反馈分析。将表 4 中反演获得的砂浆徐变度表达式参数输入到细观有限元模型中进行正分析计算, 获得 3 种加载龄期下混凝土水中拉伸、压缩徐变度计算值。混凝土水中拉伸、压缩徐变度计算值与实测值的对比见图 5。由图 5 可知, 混凝土水中拉伸、压缩计算值略大于实测值, 但总体上看, 混凝土水中拉伸、压缩计算值与实测值相差较小。水中拉伸、压缩徐变度计算值与实测值均方根误差分别约为 1.14~2.85、0.70~0.93, 复相关系数均大于 0.95。说明本次反演获得的砂浆徐变参数有效。

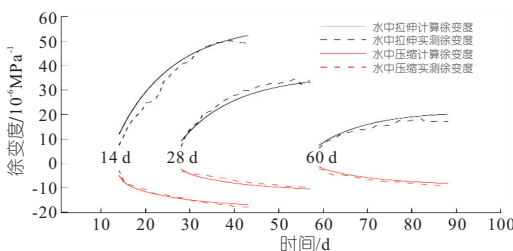


图 5 混凝土水中拉伸、压缩徐变度实测值与计算值对比

Fig. 5 Comparison of measured and calculated values of tensile and compressive specific creep of concrete in water

4.3.3 砂浆水中徐变度与混凝土水中徐变度对比分析

结合反演获得的混凝土水中实测徐变度, 即砂浆徐变度表达式参数初始值, 对比分析混凝土和砂浆水中拉伸、压缩徐变度, 见图 6。

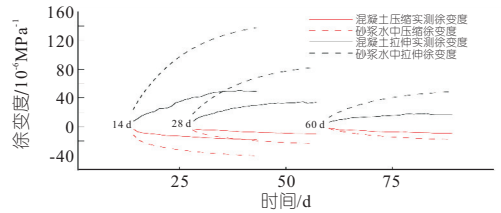


图 6 混凝土和砂浆水中徐变度对比

Fig. 6 Comparison of specific creep of concrete and mortar in water

由图 6 可知: ①砂浆水中拉伸徐变度与压缩徐变度比值约为 3.01~3.46, 对比文献[2]结果, 容易得到砂浆水中压缩徐变度与砂浆密封压缩徐变度比值约为 0.73~0.78。砂浆水中徐变度结果印证了水中砂浆徐变依然具有与水中混凝土相似的徐变特性, 同样表现为随持荷时间的增大而增大并逐渐趋于稳定, 且徐变度值随加载龄期的增大而减小。②对于持荷 30 d 时的拉伸徐变度和压缩徐变度, 水中砂浆徐变度计算值略大于混凝土徐变度实测值, 大致呈 2.4 倍数量关系, 相对结合密封混凝土试件徐变得到的砂浆和混凝土徐变度比值 2.5^[2] 略偏小。究其原因因为本次采用的粗骨料为花岗岩, 在荷载作用下的徐变小, 为此忽略了粗骨料的徐变, 此时荷载作用下的混凝土试件, 由于无徐变的粗骨料占据了混凝土试件的体积及在砂浆徐变变形时粗骨料的“阻滞”作用, 导致混凝土的总体徐变小于砂浆的徐变。

5 结论

a. 混凝土水中徐变度表现为随持荷时间的增大而增大并逐渐趋于稳定, 并随加载龄期的增大而减小, 与密封状态下水工混凝土拉压徐变度变化规律相似。

b. 由于无徐变的粗骨料占据了荷载作用下混凝土试件的体积, 且在砂浆徐变变形时, 受粗骨料的“阻滞”作用的影响, 混凝土的总体徐变小于砂浆的徐变, 大致呈 2.4 倍数量关系。

参考文献:

[1] WANG Y F, XU Q, CHEN S H. Approaches of concrete creep using meso-mechanics: numerical simulation and predictive model[J]. Modelling and simulation in materials science and engineering, 2019, 27:055012.

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.

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