

基于实测徐变的水工混凝土细观力学参数反演

何一洋¹, 黄耀英¹, 谢同², 李泽鹏¹, 丁胜勇¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡新能源阳江发电有限公司, 广东 阳江 529599)

摘要: 现有混凝土细观力学参数反演分析一般是基于实测轴向应变进行, 而荷载作用下的混凝土试件存在明显的泊松效应, 因此联合实测纵、横向应变优化反演的力学参数更能反映材料的真实性能。首先开展了不同加载龄期的水工混凝土单轴压缩徐变泊松比试验, 然后基于加荷和持荷阶段的实测纵、横向应变, 采用“正交设计-神经网络-细观有限元模型”相结合的方法, 反演获得了骨料与砂浆的弹性力学参数; 进而将混凝土实测徐变度作为砂浆徐变度的初始值, 反演获得持荷阶段砂浆徐变度及徐变泊松比; 最后对比分析了反演获得的砂浆徐变度和混凝土徐变度。结果表明: 骨料、砂浆的力学参数与混凝土力学参数存在差异, 基于实测应变反演获得的骨料、砂浆弹性泊松比在 0.13~0.20 之间, 砂浆徐变泊松比为 0.125; 相同加载龄期下, 砂浆的徐变特性与混凝土的徐变特性相似且砂浆的徐变度要大于混凝土的徐变度, 反演获得的砂浆徐变度约为混凝土徐变度的 2.5 倍。

关键词: 水工混凝土; 细观力学参数; 参数反演; 徐变度; 泊松比; 弹性模量

中图分类号: TV315

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0163-08

Inversion analysis of meso-mechanical parameters of hydraulic concrete based on measured creep change

HE Yiyang¹, HUANG Yaoying¹, XIE Tong², LI Zepeng¹, DING Shengyong¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Three Gorges New Energy Yangjiang Power Generation Co., Ltd., Yangjiang 529599, China)

Abstract: The existing inversion analysis of the mesoscopic mechanical parameters of concrete is generally based on the measured axial strain; however, concrete specimens usually show obvious Poisson effect under loads. So, the mechanical parameters optimized by the combination of measured longitudinal and transverse strain inversion can better reflect the real performance of the material. Here, the uniaxial compression creep Poisson's ratio test of hydraulic concrete with different loading ages was conducted, and then the elastic parameters of aggregate and mortar were inverted using the combined method of "orthogonal design - neural network - mesoscopic finite element model", based on the measured longitudinal and transverse strains of the loading and load holding stages. Then, the measured creep variability of concrete was taken as the initial value of the mortar, and the creep variability and the creep Poisson's ratio of the mortar at the load holding stage were obtained by inversion. Finally, the creep variability of mortar and the creep variability of concrete obtained by inversion were compared and analyzed. The results show that there is a difference between the mechanical parameters of aggregate & mortar and concrete, the elastic Poisson's ratio of aggregate and mortar obtained from measured strain inversion is between 0.13 and 0.20, and the creep Poisson's ratio of mortar is about 0.125; under the same loading age, the creep characteristics of mortar are similar to that of concrete and the creep variability of mortar is larger than that of concrete, which is about 2.5 times greater according to this research.

Key words: hydraulic concrete; meso-mechanical parameter; parameter inversion; creep variability;

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179135, 51779130)

作者简介: 何一洋(1997—), 男, 浙江兰溪人, 硕士研究生, 研究方向为水工程安全监控。

通讯作者: 黄耀英(1977—), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工程长效服役实验、数值计算及调控等方面的研究工作。

Poisson's ratio; elastic modulus

1 研究背景

对于混凝土工程而言,拉、压应力作用下的混凝土在不同方向的应变存在相互作用,即泊松效应。具体而言,混凝土材料在轴向荷载作用下,既产生纵向应变也产生横向应变,横向应变与纵向应变之比即为泊松比,对于弹性应变而言即为弹性泊松比,对于徐变应变而言则为徐变泊松比^[1-2]。目前广泛使用的弹性徐变计算理论和方法中隐含了如下假设:弹性泊松比、徐变泊松比和有效徐变泊松比相等。然而,这种假设是存在争议的。因此,在进行徐变数值模拟时,有必要基于纵、横向实测应变反演混凝土的力学参数。

按照尺寸特征,可将混凝土内部结构分为纳观层次(小于 10^{-9} m)、微观层次($10^{-9} \sim 10^{-6}$ m)、细观层次($10^{-6} \sim 10^{-1}$ m)、宏观层次(大于 10^{-1} m)4个层次^[3]。由于细观尺度是多尺度研究的中间环节,是贯通微观和宏观分析的桥梁,因此,对混凝土进行细观层次的分析是进行混凝土力学特征研究的一个重要方向。近年来伴以数值方法模拟混凝土细观结构及其与宏观力学性能关系的细观力学方法逐渐发展起来^[4-6],并在混凝土徐变数值模拟领域得到了广泛应用。如陈松等^[7]考虑混凝土中可蒸发水分,开展了循环荷载下的混凝土细观尺度徐变数值计算;王岩^[8]基于混凝土细观尺度的数值模型,对不同应力水平下高强混凝土的徐变过程进行了数值模拟分析;唐云清等^[9]以均质连续介质为假设建立高强混凝土多孔介质徐变数值模型,获得了高强混凝土在双轴应力状态下的徐变发展规律。总体上看,基于细观力学数值模拟的方法可较全面地反映混凝土的徐变特性,但是在细观尺度下进行数值计算时,混凝土宏观力学参数与细观力学参数之间存在高度非线性关系,无法用精确的数学表达式表示,多数情况下是依靠经验值或通过开展数值力学试验得出^[10],由此导致给定的参数难以精确反映混凝土的真实性能,而基于实测数据反演得到的参数更能体现材料的各项性能。目前,在宏观尺度上基于实测资料对混凝土的徐变特性进行反演分析已有文献报道,如黄耀英等^[11]基于施工期应变计组和无应力计实测应变反演获得了大坝混凝土实际徐变度。但是在室内条件下、通过联合实测纵向和横向应变,反演细观尺度下混凝土力学参数与砂浆徐变度的研究至今尚未见报道。为此,本文基于典型加载龄期下的水工混凝土轴向和横向徐变试验数据,反演分析

细观尺度下混凝土的力学参数与砂浆徐变度。

2 混凝土细观尺度下砂浆徐变度优化反演基本原理

当进行混凝土细观尺度下砂浆徐变度反演时,设在荷载作用下,在典型加载龄期 τ 下混凝土纵、横向徐变度实测值为 C_V^m 、 C_H^m ,采用数值方法(如有限元法)计算获得的细观尺度下混凝土纵、横向徐变度计算值为 C_V^c 、 C_H^c ,以实测值与计算值之间的累计误差 δ_V 和 δ_H 为目标函数,由此建立混凝土细观尺度下砂浆徐变度优化反演数学模型如下:

$$\begin{cases} \delta_V(t, \tau) = \sum_{t-\tau=1}^b [C_V^c(t, \tau) - C_V^m(t, \tau)] \\ \delta_H(t, \tau) = \sum_{t-\tau=1}^b [C_H^c(t, \tau) - C_H^m(t, \tau)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C^c(t, \tau)$ 、 $C^m(t, \tau)$ 分别为加载龄期 τ 在时间 t 的混凝土徐变度计算值与实测值, 10^{-6} /MPa; τ 为加载龄期, d; $t - \tau$ 为持荷时间, $t - \tau = 1 \sim b$, d。

本文采用“正交设计-神经网络-细观有限元模型”相结合的方法反演混凝土细观尺度下有限元模型中的砂浆徐变度,具体步骤如下:

步骤1:砂浆徐变度初始值确定。结合典型加载龄期下混凝土纵、横向徐变度实测值,选取水工混凝土徐变度模型,采用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)辨识获得混凝土徐变度表达式参数,将其作为砂浆徐变度表达式参数的初始值。其中,基于实测徐变度优化辨识混凝土徐变度表达式参数的数学模型为:

$$\begin{cases} \min f(X) = \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_N} \sum_{t-\tau=1}^b [C^c(t, \tau) - C^m(t, \tau)]^2 \\ \text{s. t. } x_i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tau_1 \sim \tau_N$ 为加载龄期, d; $t - \tau$ 为持荷时间, d; x_i 为徐变度待反演参数,其余符号含义同前。

步骤2:参数组合构造。由于砂浆的徐变度曲线与混凝土的徐变度曲线具有相似性^[12],采用辅助数值计算确定待反演砂浆徐变度参数的取值范围,进而选择合适的正交设计表,构造获得数值计算的待反演参数组合。

步骤3:学习样本的构建。将构造好的参数组合输入细观有限元模型中,计算获得不同参数组合下的混凝土纵、横向徐变度计算值。

步骤4:学习样本的训练。将细观有限元模型计

算获得的混凝土纵、横向徐变度计算值与实测值累计误差 δ_v 和 δ_h (公式(1)) 作为训练样本的输入,将待反演参数组合作为输出,经归一化处理输入至神经网络模型进行训练和检验,若精度较差,需要重新构造学习样本,重复步骤 2 ~ 4,直到训练和检验精度满足要求,获得合理的神经网络模型。

步骤 5:混凝土细观力学参数反演。将不同加载龄期下的混凝土纵、横向徐变度计算值与实测值的

累计误差 δ_v 和 δ_h 取最小值后,代入到训练好的神经网络模型中,即可获得待反演的材料参数。

步骤 6:反演参数的验证。将反演获得的计算参数输入到细观有限元模型中进行反馈分析,若计算值与实测值精度满足要求,即可认为优化反演获得的计算参数合理,反之重复上述步骤。

基于“正交设计-神经网络-细观有限元模型”相结合的参数优化反演流程图如图 1 所示。

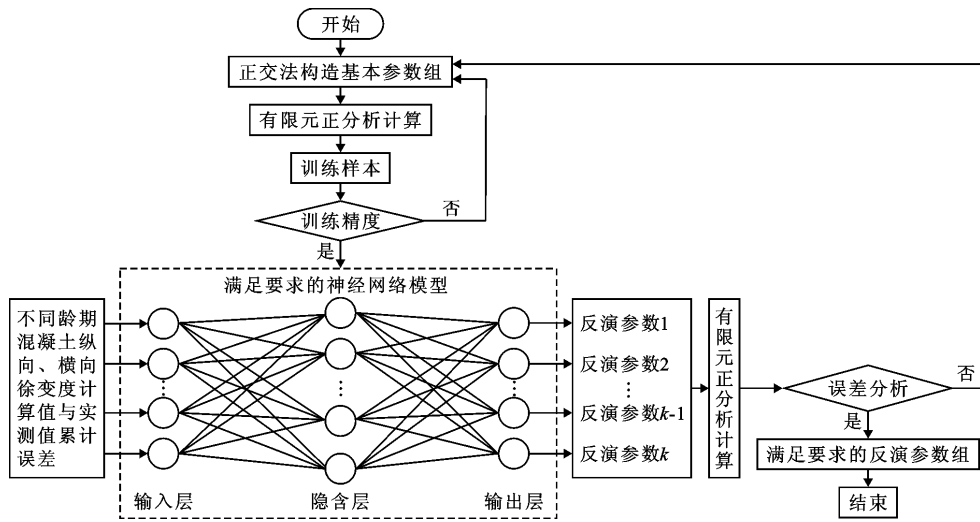


图 1 混凝土细观尺度下力学参数优化反演流程

3 水工混凝土压缩徐变泊松比试验

3.1 混凝土原料及配合比

本次徐变泊松比试验使用的原材料如下:水泥为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰为二级 F 类粉煤灰;试验用水为实验室自来水;细骨料为细度模数为 2.03 的级配细砂;粗骨料选用粒径为 5 ~ 40 mm 的花岗石碎料,在试验之前采用 20 mm 孔径筛进行筛分,获得粒径为 5 ~ 20 mm 的小石和粒径为 20 ~ 40 mm 的中石,同时根据规范的要求,均使得试验所用骨料保持为饱和面干状态;减水剂为聚羧酸盐。二级配混凝土配合比见表 1。

表 1 徐变泊松比试验混凝土配合比 kg/m^3

水泥	水	粉煤灰	砂子	小石	中石	减水剂
171.60	132.00	92.40	761.26	591.10	886.64	1.72

3.2 单轴压缩徐变泊松比试验

本次单轴压缩徐变泊松比试验设计加载龄期为 3、14、28、60 d 共 4 组试验,每组试验均成型 1 个加载试件,1 个补偿试件,3 个标准立方体试件。每个徐变加载试件和补偿试件中均需要埋设纵向和横向 2 支

应变计,应变计在模具内的布置原则为:纵向应变计布置于模具的几何中心,横向应变计垂直于纵向应变计并与其相邻。对加载试件测量徐变加荷过程中的总应变;补偿试件则被放置在相同试验环境中对其测量全过程的自由体积应变;标准立方体试件则被用于折算徐变加载试件的极限抗压强度。试验方案如表 2 所示,纵、横向应变计埋设方式如图 2 所示。

表 2 单轴压缩徐变试验方案

加载龄期/d	试件尺寸/cm	持荷时间/d	试件数量
3	15 × 15 × 50	30	每组 1 个加载试件、1 个补偿试件、3 个立方体试件
14			
28			
60			

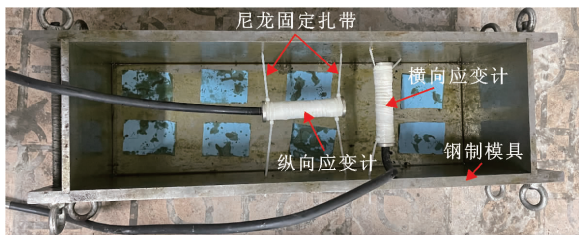


图 2 单轴压缩试件模具内预埋应变计实物图

计算不同龄期混凝土试件加荷与持荷阶段的弹性模量、泊松比,结果如表 3 所示;混凝土试件加荷

阶段的弹性模量和泊松比随加载龄期的变化如图 3 所示。

表 3 不同加载龄期混凝土试件加荷与持荷阶段的弹性模量、泊松比

加载龄期/d	立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	单轴施加纵向荷载/kN	加荷阶段弹性模量/GPa	加荷阶段弹性泊松比 ν_{el}^U	持荷阶段徐变泊松比 ν_c^U	持荷 30 d 徐变应变/ 10^{-6}	
							纵向 ε_{c-V}	横向 ε_{c-H}
3	13.0	9.1	81.9	27.3	0.140	0.205	-154	29
14	21.6	15.1	102.1	28.7	0.206	0.158	-146	19
28	25.9	18.1	122.1	34.5	0.135	0.109	-141	16
60	29.6	20.7	139.9	38.1	0.159	0.111	-99	9

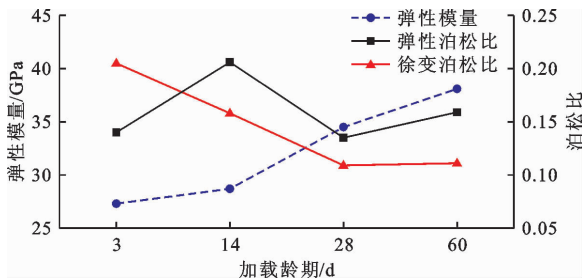


图 3 混凝土试件加荷阶段弹性模量和泊松比随加载龄期的变化

由表 3 和图 3 可知,混凝土的弹性模量整体上随着加载龄期的增长而增大。弹性泊松比与徐变泊松比随加载龄期的变化趋势有所差异。相同加载龄期下,加荷、持荷阶段的泊松比一般存在 $\nu_{el}^U > \nu_c^U$,即弹性泊松比大于徐变泊松比。

4 水工混凝土细观力学参数优化反演

4.1 混凝土试件细观有限元模型

本次细观有限元数值计算中将混凝土看作是由骨料、砂浆以及二者之间的界面过渡层组成的三相复合材料,采用随机骨料模型进行细观数值模拟。由于水胶比为 0.5 时,不同龄期(7、28、60 d)情况下,粗骨料的形状对于水工混凝土的抗压强度影响较小^[13-14],因此为简化起见,将混凝土中的骨料颗粒假定为圆形。首先根据 Walraven 公式确定骨料颗粒数,建立二维骨料库^[15-16];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^[17];再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。在进行数值计算时,难以做到采用“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,因此本次有限元模型中界面过渡层的厚度取为 0.5 mm^[18]。采用等参四边形单元进行网格剖分。混凝土试件二维细观有限元

模型如图 4 所示。

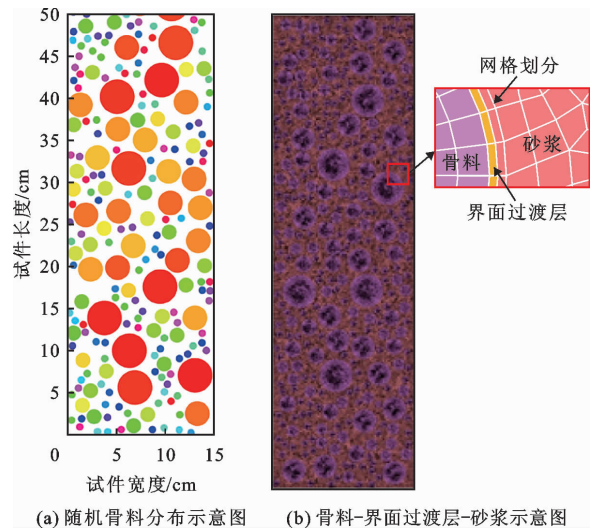


图 4 混凝土试件二维细观有限元模型示意图

4.2 混凝土试件加荷阶段弹性参数优化反演

4.2.1 骨料及砂浆弹性参数反演 在反演砂浆徐变度前,需要确定混凝土各个组成部分的计算参数,对于数量众多的计算参数,基于试验值进行参数反演是一种较为理想且高效的参数获取方法。考虑到本次混凝土单轴压缩徐变泊松比试验的应力比为 0.3,并参考已有的文献,假设骨料、砂浆和界面过渡层均为弹性材料,界面过渡层的弹性模量和泊松比与砂浆相同^[19],进而基于各加载龄期下的混凝土实测加载应力-应变进行骨料、砂浆的弹性模量与弹性泊松比反演分析,其原理与细观尺度下砂浆徐变度优化反演相类似。反演结果见表 4。

由表 4 可知,砂浆的弹性模量随龄期增长而增大;骨料、砂浆的弹性泊松比为 0.13~0.20;除 60 d 加载龄期骨料弹性泊松比与砂浆弹性泊松比相差大于 0.03 外,其余加载龄期下,加荷阶段混凝土的弹性泊松比与骨料、砂浆的弹性泊松比差异较小。

表4 不同加载龄期混凝土试件骨料、砂浆弹性力学参数反演结果

加载龄期/d	骨料弹性模量/GPa	骨料弹性泊松比	砂浆弹性模量/GPa	砂浆弹性泊松比
3	50.0	0.130	18.3	0.131
14	50.0	0.200	19.5	0.200
28	50.0	0.130	26.9	0.135
60	50.0	0.130	32.0	0.168

4.2.2 砂浆弹性模量表达式参数辨识 骨料、砂浆的弹性力学参数反演结果表明,砂浆的弹性模量随加载龄期的增长而增大。为此采用组合指数公式^[20-21]来描述砂浆的弹性模量随龄期的变化,其表达式如下:

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

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

结合表4中不同加载龄期下砂浆的反演值,采用粒子群(PSO)优化算法容易辨识获得砂浆弹性模量组合指数式(公式(3))的最佳参数,如表5所示。

表5 砂浆弹性模量组合指数式模型参数

E_1 /GPa	m_1	E_2 /GPa	m_2
18.914	0.020	18.843	0.815

4.3 混凝土试件持荷阶段砂浆徐变度优化反演

为了获取持荷阶段砂浆徐变度,以下基于持荷阶段混凝土的实测徐变,采用“正交设计-神经网络-细观有限元模型”相结合的方法反演砂浆徐变度和徐变泊松比。

4.3.1 砂浆徐变度表达式参数初始值获取

(1) 实测徐变度获取。考虑到加载龄期为3d的试验组为早龄期单轴压缩徐变试验,因此本次基于混凝土实测徐变度进行细观徐变数值计算反馈时,重点针对加载龄期为14、28、60d的试验组。单轴应力状态下压缩徐变度计算公式如下:

$$C = \frac{\varepsilon_c}{\sigma} \quad (4)$$

式中: C 为混凝土徐变度, 10^{-6} /MPa; ε_c 为混凝土实测徐变应变, 10^{-6} ; σ 为单轴压缩徐变试验加载应力,MPa。

对于考虑泊松效应的单轴压缩徐变试验而言,当公式(4)中的 ε_c 分别取实测纵向徐变应变 ε_{c-V} 和实测横向徐变应变 ε_{c-H} 时,可计算得到纵向徐变度 C_V 和横向徐变度 C_H 。将加载龄期为14、28和60d的纵、横向徐变应变与加载的应力(见表3)分别代入

公式(4)中,计算获得不同加载龄期下混凝土的纵、横向徐变度。

(2) 徐变度表达式选取。目前混凝土坝工程中常采用多项指数函数式的徐变预测模型,赵庆新等^[12]研究表明,砂浆的徐变度曲线与混凝土的徐变度曲线具有高度的相似性,为此,采用8参数徐变度模型^[22]来反映砂浆的徐变度,即:

$$C(t, \tau) = \sum_{i=1}^2 (f_i + g_i \tau^{-p_i}) [1 - e^{-r_i(t-\tau)}] \quad (5)$$

式中: $C(t, \tau)$ 为混凝土加载龄期为 τ 、持荷至 t 时刻的徐变度, 10^{-6} /MPa; τ 为加载龄期,d; $t - \tau$ 为持荷时间,d; f_i 、 g_i 、 p_i 、 r_i 为待确定系数。

(3) 砂浆徐变度参数初始值确定。由于混凝土中砂浆徐变度未知,将本次试验获得的混凝土实测徐变度作为砂浆徐变度的初始值。具体来说,以14、28和60d 3个加载龄期下混凝土纵向徐变度实测值与计算值的残差平方和(公式(2))作为目标函数,由此建立混凝土8参数徐变度模型参数优化辨识的数学模型。采用粒子群(PSO)优化算法对所建数学模型进行求解,设置粒子维度 D 为8、粒子 X 的位置区间为 $[0, 90]$,群体规模 N 为24,最大迭代次数为1000,初始权重 $w_{\max}$ 取0.9,最终权重 $w_{\min}$ 取0.4,终止算法的迭代阈值为250次,终止算法的精度设置为 1×10^{-12} 。经优化辨识获得混凝土8参数徐变度参数,并将其作为细观尺度下砂浆徐变度初始值,各参数如表6所示。

4.3.2 砂浆徐变度模型参数优化辨识

(1) 待反演参数取值范围与参数组合。考虑到细观尺度的砂浆徐变度参数反演分析的计算量较大,为此做如下假设:①忽略骨料的徐变变形^[19];②假设3个加载龄期下砂浆的徐变泊松比相同,且不随持荷时间的增大而变化;③界面过渡层的徐变特性与砂浆相同。此时,待反演的参数为砂浆徐变度的8个参数(f_1 、 g_1 、 p_1 、 r_1 、 f_2 、 g_2 、 p_2 、 r_2)和砂浆徐变泊松比(ν)。

以表4中反演获得的细观尺度下骨料的弹性模量和泊松比作为骨料的力学参数。基于加载阶段实测弹性应变反演获得的砂浆弹性泊松比表明,其与混凝土加荷阶段的弹性泊松比差异相对较小,因此,参考表3中基于持荷阶段获得的混凝土徐变泊松比,给出砂浆徐变泊松比(ν)的取值范围;结合4.3.1节中采用粒子群(PSO)算法获得的砂浆徐变度表达式的初始值,给出8个参数的取值范围。采用正交设计表 $L_{32}(9^4)$ 和各待反演参数的取值范围拟定了32种不同的参数组合,如表7所示。

表 6 砂浆 8 参数徐变度表达式各参数初始值

参数	f_1	g_1	p_1	r_1	f_2	g_2	p_2	r_2
初始值	3.012	66.014	0.742	0.575	2.875	85.000	0.568	0.063

表 7 砂浆徐变待反演参数正交设计组合

组合编号	f_1	g_1	p_1	r_1	f_2	g_2	p_2	r_2	ν
1	0.6	198.0	0.98	0.4	6.0	320	1.0	0.084	0.084
2	0.6	198.0	1.40	1.0	0.6	224	0.4	0.048	0.192
3	0.6	145.2	0.98	0.1	4.2	112	0.4	0.048	0.240
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
30	6.0	99.0	0.98	0.7	4.2	224	0.1	0.084	0.192
31	6.0	52.8	0.98	1.0	6.0	64	0.7	0.048	0.144
32	6.0	198.0	0.14	0.7	0.6	320	0.4	0.120	0.144

(2)混凝土纵、横向徐变度计算值获取。混凝土细观徐变有限元计算与混凝土宏观徐变有限元计算原理类似,不再赘述,具体参见文献[21]。在 3 个不同加载龄期下的混凝土细观有限元计算模型中,除了模型顶端施加的压应力不同外,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。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,即可获得相应的纵、横向混凝土试件的徐变度计算值 C_V^c 和 C_H^c 。计算结果如表 8 所示。

(3)学习样本训练。由于本次砂浆徐变参数反演涉及 3 个不同加载龄期及其相应的持荷过程,因此在获取训练样本时,计算每种加载龄期下持荷阶段内混凝土纵、横向徐变度计算值和实测值之差,将其作为每种参数组合下的训练样本。不同加载龄期的纵、横向徐变度计算值与实测值的累计误差 δ_V 和 δ_H 计算结果如表 9 所示。

将表 9 中混凝土纵、横向徐变度计算值与实测值之差作为输入,表 7 中对应的 $f_1 \sim r_2, \nu$ 作为输出,

建立起本次砂浆徐变度表达式参数反演的神经网络。使用 MATLAB 中的神经网络工具箱,将训练样本归一化处理后输入到 BP 神经网络模型中进行训练,训练至神经网络模型精度达到预期,迭代后均方误差小于 0.01。由此建立起了混凝土纵、横向徐变度计算值与实测值累计误差与砂浆徐变度表达式参数之间的映射关系。

(4)参数反演结果。为了获得适用于不同加载龄期的“最佳”砂浆徐变参数,则须使 3 个加载龄期下的 δ_V 和 δ_H 均取最小值。令 δ_V 和 δ_H 均为 0,输入到训练好的神经网络模型中即可获得待反演的砂浆徐变度表达式参数,结果如表 10 所示。

(5)砂浆徐变度反馈分析。将表 10 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 个加载龄期下混凝土纵、横向徐变度计算值。混凝土试件纵、横向徐变度计算值与实测值的对比如图 5 所示,3 种不同加载龄期下纵向、横向徐变度计算值与实测值之间的拟合效果如表 11 所示。

表 8 不同加载龄期混凝土试件纵、横向徐变度计算值

$10^{-6}/\text{MPa}$

组合编号	$C_V^c(t,14)$	$C_H^c(t,14)$	$C_V^c(t,28)$	$C_H^c(t,28)$	$C_V^c(t,60)$	$C_H^c(t,60)$
1	-92.131	14.494	-54.477	7.796	-33.893	6.006
2	-118.610	26.020	-87.469	18.156	-78.683	16.332
3	-79.233	19.646	-58.130	13.658	-43.555	10.227
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
30	-331.719	72.570	-306.120	65.088	-285.325	60.864
31	-51.842	9.897	-41.945	7.415	-36.496	6.446
32	393.241	64.589	284.987	71.259	210.362	39.656

表 9 不同加载龄期混凝土纵、横向徐变度计算值与实测值累计误差

样本数	$\delta_v(t,14)$	$\delta_H(t,14)$	$\delta_v(t,28)$	$\delta_H(t,28)$	$\delta_v(t,60)$	$\delta_H(t,60)$
1	75.754	-11.254	74.355	-6.839	49.896	-2.902
2	49.275	0.272	41.362	3.521	5.106	7.424
3	88.652	-6.103	70.702	-0.977	40.234	1.319
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
30	-163.834	46.822	-177.289	50.453	-201.537	51.956
31	116.043	-15.851	86.887	-7.220	47.293	-2.462
32	225.356	90.337	156.155	85.894	126.573	48.564

表 10 砂浆 8 参数徐变度表达式各参数反演结果

参数	f_1	g_1	p_1	r_1	f_2	g_2	p_2	r_2	ν
反演值	2.943	80.026	0.545	0.936	1.976	229.274	0.524	0.085	0.125

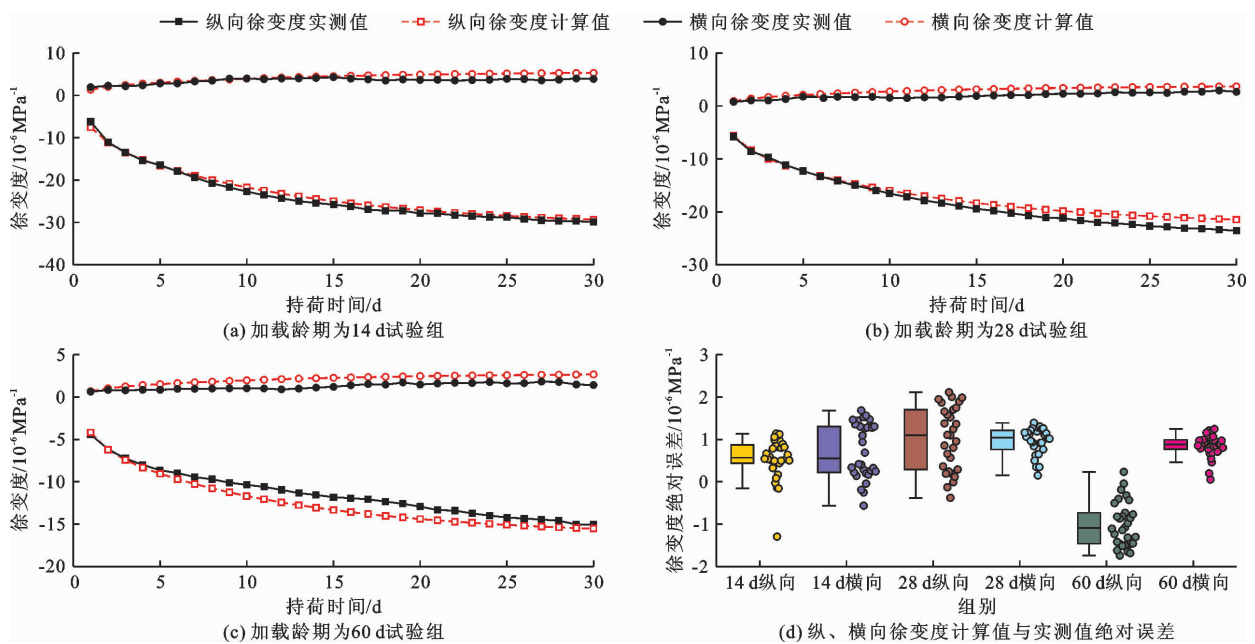


图 5 不同加载龄期混凝土试件纵、横向徐变度实测值与计算值对比

表 11 不同加载龄期混凝土试件纵、横向徐变度计算值与实测值拟合结果分析

拟合参数	纵向徐变度			横向徐变度		
	14 d	28 d	60 d	14 d	28 d	60 d
相关系数 r	0.998	0.997	0.989	0.823	0.913	0.885
均方误差 MSE	0.535	1.601	1.288	0.930	0.994	0.789

由图 5 和表 11 可知,3 个加载龄期下混凝土纵向徐变度计算值与实测值的相关系数(r)均大于 0.98,均方误差(MSE)除 28 d 加载龄期外,均小于 1.5;3 个龄期下混凝土横向徐变度计算值与实测值的相关系数(r)均大于 0.82,均方误差(MSE)均小于 1.0。总体上看,3 个加载龄期下混凝土纵、横向徐变度的计算值与实测值相差较小,本次反演获得

的砂浆徐变参数是有效的。

4.3.3 砂浆徐变与混凝土徐变对比分析 由于混凝土横向徐变度较小,因此以其纵向徐变度为例,将 4.3.1 节混凝土纵向实测徐变度与细观尺度下砂浆徐变度反演值进行对比,如图 6 所示。

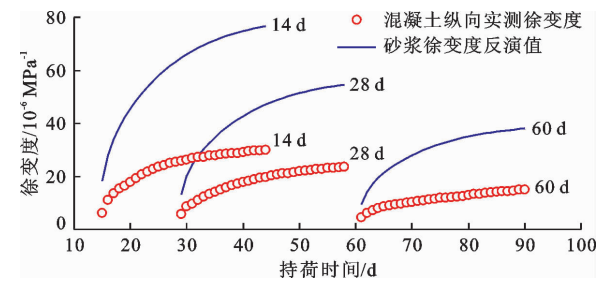


图 6 不同加载龄期混凝土试件纵向徐变度实测值与砂浆徐变度反演值对比

图 6 中的结果表明:

(1) 混凝土中砂浆的徐变特性与混凝土的徐变特性相似,两者徐变度同样表现为随持荷时间的增长而增大并最终逐渐趋于稳定,且随加载龄期的增大而减小。

(2) 砂浆的徐变度大于混凝土整体的实测徐变度,且大约呈 2.5 倍的数量关系。文献[12]指出:在相对湿度(60±5)%下,砂浆徐变度与混凝土徐变度的比值约在 2.7~3.0 的范围内,本文得出两者的倍数关系与该范围相近。其原因为:本文试验采用的粗骨料为花岗岩,其在荷载作用下的徐变较小,因而本文忽略了粗骨料的徐变,此时在荷载作用下,由于混凝土试件中无徐变的粗骨料占据了混凝土试件的体积,以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

本文基于典型加载龄期下的单轴压缩徐变试验加荷与持荷阶段实测应变,反演了混凝土细观有限元模型中的弹性参数与砂浆徐变度。首先基于加荷阶段的实测弹性应变,反演获得骨料与砂浆的弹性模量和弹性泊松比,然后采用“正交设计-神经网络-细观有限元模型”相结合的方法优化反演获得持荷阶段砂浆的徐变度及徐变泊松比,最后对反演获得的砂浆徐变度进行反馈分析。得到的主要结论如下:

(1) 基于加载阶段的实测应力-应变反演获得的骨料、砂浆弹性泊松比为 0.13~0.20。总体上看,各加载龄期下,砂浆弹性泊松比与混凝土加荷阶段的弹性泊松比、骨料弹性泊松比存在差异,但差异相对较小。

(2) 基于持荷阶段的实测应力-应变反演获得的砂浆徐变度为混凝土徐变度的约 2.5 倍,砂浆徐变度表现为随持荷时间的增长而增大并最终趋于稳定,且随加载龄期的增长而减小,反演所得的砂浆徐变泊松比为 0.125。

参考文献:

- [1] MEHTA P K, MONTEIRO J M. Concrete microstructure properties and materials[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2013.
- [2] HUANG Yaoying, XIE Tong, DING Yu, et al. Comparison of tensile and compressive creep of hydraulic concrete considering loading/unloading under unified test conditions[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122763.
- [3] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Materials Science and Engineering, 1985, 68(2): 239-248.
- [4] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报,2004,35(10):27-35.
- [5] 杨豪,魏玉峰,潘远阳. 颗粒长轴比对粗粒土抗剪强度影响的细观机理[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):234-239+253.
- [6] 胡俊,王杰,李兆瑞,等. 基于随机骨料模型的 EPS 混凝土细观力学特性分析[J]. 应用力学学报,2017,34(4):802-808+824.
- [7] 陈松,王岩,宁聪. 循环荷载下混凝土徐变特性的宏观分析[J]. 材料导报,2016,30(12):153-157+162.
- [8] 王岩. 细观尺度下不同应力水平作用的高强混凝土徐变过程数值模拟[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
- [9] 唐云清,柯敏勇,李霄琳,等. 高强混凝土双轴徐变数值模拟及试验验证[J]. 水利水运工程学报,2013(6):29-35.
- [10] 袁周祥. 基于随机骨料模型的混凝土细观结构与力学特征关联性分析[D]. 邯郸:河北工程大学,2019.
- [11] 黄耀英,郑宏,周宜红. 基于实测应变反演大坝混凝土实际徐变度[J]. 水利水运工程学报,2012(6):44-50.
- [12] 赵庆新,佟建楠,孔才华,等. 水泥净浆-砂浆-混凝土的徐变相关性[J]. 燕山大学学报,2014,38(1):66-71.
- [13] 黄伟,丁宇,吕柏颖,等. 粗骨料形状对水工混凝土强度性能影响试验研究[J]. 水力发电,2020,46(8):104-108+113.
- [14] 田梦云,张恩,曹瑞东,等. 基于细观尺度的混凝土单轴力学性能仿真计算分析[J]. 应用力学学报,2020,37(3):975-981+1384.
- [15] 杨华,李宗利,惠弘毅. 基于随机骨料模型的混凝土弹性模量预测研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(2):100-105.
- [16] 屈瑾,姜宗科,刘兆松. 基于细观层次的混凝土随机骨料建模[J]. 长江科学院院报,2015,32(4):129-132+138.
- [17] 丁建新,陈胜宏. 全级配混凝土细观力学网格划分的单元切割法与等效弹模的计算[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(5):641-647.
- [18] DU Xiuli, JIN Liu, MA Guowei. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 66:5-17.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.