

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221434

硫酸盐腐蚀作用下水工混凝土的细观损伤本构模型

张 娜¹,李 慧²,何 凯³

(1. 柳州工学院土木建筑工程学院, 广西 柳州 545616; 2. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061;
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 水工混凝土的力学性能是影响水利工程设施稳定性的重要因素。采用力学试验与理论分析相结合的方法建立考虑硫酸盐腐蚀效应的细观损伤本构模型。结果表明,硫酸盐腐蚀提高了混凝土破坏后的损伤程度;随着腐蚀时间增加,抗压强度和弹性模量呈指数型衰减规律,破坏应变呈增大趋势;由试验结果求解了形状参数 m 和尺度参数 ϵ_0 ,进而求解了考虑硫酸盐腐蚀影响的细观损伤本构模型;通过实测试验数据验证了采用理论模型预测应力—应变关系的合理性。提出的本构模型可为水工混凝土力学行为的预测提供参考。

关键词: 水工混凝土; 硫酸盐腐蚀; 力学行为; 细观损伤; 本构模型

中图分类号: TV431; TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0126-04

1 引言

近年来,随着国家大型水利水电工程的建设,水工混凝土在各项水利设施(大坝、堤防、闸坝、河渠与渡槽等)中应用广泛^[1]。在水利工程设施运行过程中,水环境的腐蚀效应是导致水工混凝土材料性能退化、使用寿命缩短和结构性能下降的直接原因之一^[2]。硫酸盐离子是一种最常见的水化学腐蚀性离子。硫酸盐溶液通过一系列化学反应、离子传输与力学损伤的复杂综合作用使得混凝土水化产物发生分解,严重影响了构件的力学行为,造成水工结构的安全隐患与经济损失^[3]。由于硫酸盐的腐蚀效应,水工混凝土细观结构的损伤不断累积,使得材料出现显著的宏观结构破损,最终导致荷载作用下的力学特性发生劣化^[4]。目前,关于混凝土在硫酸盐腐蚀下的力学性能的研究成果较丰富,但关于硫酸盐腐蚀效应下混凝土应力—应变关系与本构模型的研究还比较罕见。鉴此,本文对水工混凝土试件进行 0~180 d 时间内的硫酸盐溶液浸泡试验,然后开展单轴压缩试验测试应力—应变曲线,最后提出考虑硫酸盐腐蚀时间的细观损伤本构模型,旨在进一步提高对水工混凝土力学行为劣化机理的认识。

2 试验方法

2.1 试样制备

采用级配碎石、天然砂、粉煤灰、水泥和外加剂制备水工混凝土,配合比见表 1。减水剂与引气剂浓度分别为 0.8%、0.02%。其中,级配碎石经过破碎筛分后的粒径范围在 4.75~22.50 mm 之间。凝胶材料采用 P. O 42.5 硅酸盐水泥与粉煤灰,水泥基本工作性能指标见表 2。粉煤灰采用燃煤发电厂生产的 II 级粉煤灰。按《水工混凝土试验规程》(DL / T 5150-2017)^[5]制备试件,采用 0.45 的水灰比拌和砂浆、浇筑与振捣,制备成轴向长度为 100 mm,端面边长为 50 mm 的标准试件,将脱模后的试件置于养护箱中按标准条件养护,养护后取出测试力学指标。

表 1 水工混凝土材料的配合比

Tab. 1 Mix ratio of material in concrete

物料	单位质量/(kg·m ⁻³)	物料	单位质量/(kg·m ⁻³)
碎石	1 335	水泥	280
砂	750	水	180
粉煤灰	120		

表 2 水泥的基本性能指标

Tab. 2 Performance parameters of cement

指标	取值	指标	取值
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	390	坍落度/mm	88
初凝时间/min	173	抗压强度/MPa	35.8(7 d)
终凝时间/min	320		45.5(28 d)

2.2 试验方法

采用浸泡法进行混凝土试件的水化学腐蚀试

收稿日期: 2022-07-13, 修回日期: 2022-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078079); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY60017)

作者简介: 张娜(1989-), 女, 硕士、讲师, 研究方向为非概率可靠度、新型建筑材料, E-mail: 2f6593@163.com

验,将试件放置在质量分数为 5% 的 Na_2SO_4 溶液中浸泡并计时。最后将试件取出,擦拭干净后放在室温条件下风干。采用单轴压缩测试仪进行单轴压缩试验,试验实时加载速率控制为约 0.15 MPa/s,从试验中获得峰值强度和弹性模量作为衡量静载下材料力学性能的参数。

3 试验结果与分析

3.1 宏观力学特性

开展水工混凝土的单轴压缩试验,并拍照记录试件的表观破坏状态,结果见图 1。可以看出,随着 Na_2SO_4 溶液腐蚀时间的增加,试件破坏状态变化明显。如图 1 所示,未经腐蚀的试件破坏后的开裂现象不明显,整体性较好;浸泡时间为 30 d 时,试件破坏后的表面裂隙数量增多,长度也有所增加;浸泡时间为 60 d 的试件发生破坏后的裂隙贯通,且宽度明显变大,表面开始掉渣;当浸泡时间为 90 d 时,试件表面有大量碎片掉落,结构完整性明显下降;浸泡 180 d 后,破坏试件出现明显结构性损坏,试件沿斜裂缝破坏,砂浆的水化产物分解剥蚀。试件的破坏现象说明硫酸盐的腐蚀作用对混凝土内部的水泥砂浆硬化体影响显著,使得破坏后的结构完整性明显下降。

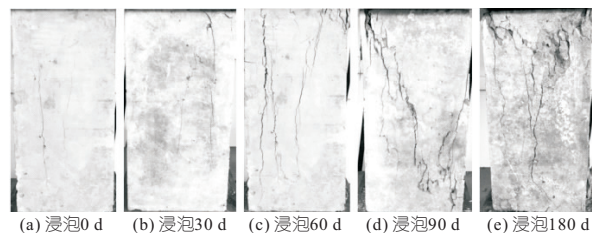


图 1 压缩后的试件破坏状态

Fig. 1 Failure states of samples after compression

不同腐蚀时间后的应力—应变曲线见图 2。按照应力的变化规律应力—应变曲线大致可分为线弹性变形、塑性变形和应变软化阶段。在线弹性阶段,轴向应力随应变增长呈直线上升,此阶段未出现明显结构破损;塑性变形阶段的应力增长速率明显减小,且在直线末端达到峰值;应变软化

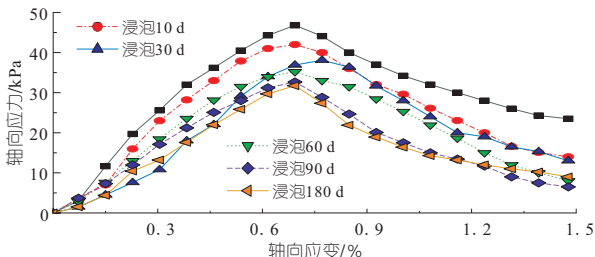


图 2 混凝土的应力—应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of specimens

阶段的应变快速增长,应力下降,试件发生结构性破坏。根据单轴压缩试验得到的应力—应变曲线,计算了水工混凝土试件的弹性模量 E ,提取应力峰值点的纵坐标作为峰值强度 s_u ,横坐标作为破坏应变 ϵ_b 。不同腐蚀时间的峰值强度和弹性模量的结果见图 3。可以看出随着腐蚀时间的增加,弹性模量和峰值强度逐渐降低,且在 30~90 d 的时间范围内变化较快,在 90~180 d 时间范围间的变化速率明显降低。经过数据拟合,发现随着腐蚀时间的增加,混凝土峰值强度和弹性模量与腐蚀时间之间近似呈指数型衰减函数关系,说明腐蚀损伤程度的累积使得混凝土强度和变形性能变差。

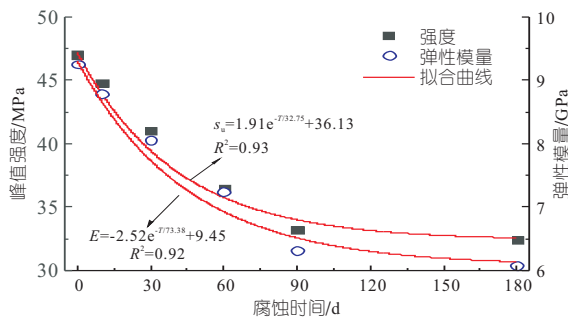


图 3 力学参数与腐蚀时间的关系曲线

Fig. 3 Mechanical parameter-time curves

3.2 微观损伤机理

对不同硫酸盐腐蚀时间的水工混凝土试件开展扫描电镜试验,得到 SEM 图像见图 4。在硫酸盐腐蚀作用下,混凝土中水泥砂浆硬化体的微观形态变化显著。随着腐蚀时间的增加,砂浆内部裂隙逐渐扩大,水化硅酸钙 C-S-H 凝胶发生分解流失,且分解程度随浸泡时间的增加而逐渐提高。微观图像的变化特征表明由于硫酸盐腐蚀效应,水工混凝土的水泥砂浆致密程度降低,骨料间的结构软弱面不断扩大,部分水化硅酸钙凝胶体分解脱离骨料,造成黏结性能变差。因此,水泥砂浆结构的硫酸盐腐蚀损伤是水工混凝土力学性能劣化的微观机理。

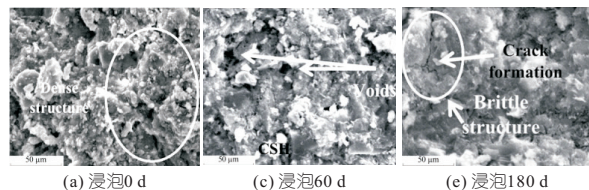


图 4 混凝土内部水泥砂浆的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of cement pastes in concrete

4 考虑腐蚀影响的本构模型

4.1 本构模型构建

杆链模型是用于模拟混凝土、岩石和充填体

等脆性材料在荷载作用下的损伤演化规律的力学模型,反映了脆性材料内部应力重分布与结构性损伤演化之间的相互作用^[6]。该本构模型假设试件由微单元通过相互平行、等间距的弹脆性杆件连接,结构损伤通过杆链的断裂进行模拟。在脆性材料出现宏观裂纹前,每个微单元均可能发生损伤,而断裂是随机的,在出现宏观裂纹后,结构破损集中在材料的软弱区域。杆链模型的有效截面积 A_D 为:

$$A_D = \sum_{i=1}^N H(\epsilon - \delta_i) A_i \quad (1)$$

式中, N 为杆单元数; H 为单位阶跃函数; ϵ 为轴向应变; $\delta_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为杆链中前 i 根杆断裂时的极限应变; A_i 为前 i 根杆的截面积。

在杆链本构模型分析中,定义 $D(\epsilon) = A_D/A$ (A 为杆链模型的初始截面积) 为材料的损伤变量,其应力 $\sigma(\epsilon)$ 可表示为:

$$\sigma(\epsilon) = E_0 \epsilon [1 - D(\epsilon)] \quad (2)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时,混凝土试件可视为连续体,则 $D(\epsilon)$ 可表示为:

$$D(\epsilon) = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N H(\epsilon - \delta_i) dA_i = \int_0^\epsilon f(x) dx \quad (3)$$

式中, E_0 为初始弹性模量; δ_i 为杆链中前 i 根杆断裂时的极限应变; $f(x)$ 为适用于本构模型的失效概率密度函数,若能确定该分布函数的具体形式,则可获取试件的损伤变量形式。

根据现有强度理论分析方法,假设试件的细观损伤发生断裂过程中的应变服从相应的威布尔概率分布,则损伤变量 $D(\epsilon)$ 可表示为:

$$D(\epsilon) = \int_0^\epsilon p(\epsilon) d\epsilon = 1 - \exp[-(\epsilon/\epsilon_0)^m] \quad (4)$$

式中, $p(\epsilon)$ 为概率函数; ϵ_0 为尺度参数; m 为形状参数。

提出的细观损伤本构模型可表示为:

$$\sigma(\epsilon) = E\epsilon \exp[-(\epsilon/\epsilon_0)^m] \quad (5)$$

式中, E 为混凝土弹性模量。

对式(5)取对数,可得:

$$-\ln[\sigma(\epsilon)/(E\epsilon)] = (\epsilon/\epsilon_0)^m \quad (6)$$

取 $\epsilon = \epsilon_m$, 并结合 $\sigma(\epsilon_m) = s_u = E\epsilon_m (s_u$ 为峰值强度; ϵ_m 为破坏应变), 得到形状参数 m 、尺度参数 ϵ_0 的表达式。

根据方程的边界条件和数据拟合获得参数 m 、 ϵ_0 的表达式为:

$$\begin{cases} m = [\ln(E\epsilon_m/s_u)]^{-1} \\ \epsilon_0 = \epsilon_m / (1/m)^m \end{cases} \quad (7)$$

4.2 本构模型验证

将计算结果代入式(7), 计算出本构模型的自

由参数 m 、 ϵ_0 。经过不同腐蚀时间后试件的峰值强度、弹性模量和峰值应变的实测数据见表 3。可以看出,随着腐蚀时间的增加,水工混凝土的峰值强度和弹性模量逐渐降低,相应的峰值应变逐渐增加。

表 3 模型参数的实测结果

腐蚀时间/d	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变/%
0	47.25	8.12	0.65
30	43.12	7.25	0.68
60	39.84	6.85	0.69
90	36.58	6.58	0.71
180	35.35	6.31	0.72

参数 m 、 ϵ_0 的计算是确定本构模型的关键步骤。由单轴压缩试验得到了弹性模量、峰值强度和峰值应变,代入式(7)确定参数 m 、 ϵ_0 , 结果见图 5。随着硫酸盐腐蚀时间 t 的增加, m 值逐渐下降而 ϵ_0 值逐渐增加。根据对模型参数与腐蚀时间关系函数进行数据拟合, 结果见图 5。通过求解参数 m 、 ϵ_0 与 t 之间的关系, 即可得到不同腐蚀试件条件下的模型参数方程, 进而建立考虑硫酸盐腐蚀影响的细观损伤本构模型。

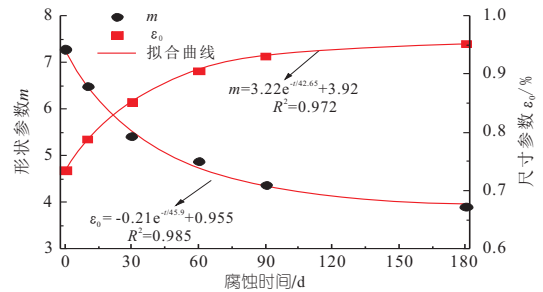


图 5 模型参数与腐蚀时间的关系

Fig. 5 Relationship between modeling parameters and corrosion time

由图 5 可知,随着腐蚀时间 t 的增加,形状参数 m 逐渐减小,尺度参数 ϵ_0 逐渐增大,反映出脆性材料的延性随着腐蚀程度增加而逐渐增大,即塑性变形逐渐增大。此现象与实测的应力—应变关系曲线相吻合。由此可以获得不同腐蚀时间条件下的水工混凝土细观损伤本构方程为:

$$\sigma = E\epsilon \exp[-(\epsilon_c/\epsilon_0(t))^{m(t)}] \quad (8)$$

将实测数据和相关参数代入式(8), 得到拟合应力—应变曲线, 将拟合曲线与实测数据进行对比分析, 结果见图 6。可以看出,在单轴压缩试验中,随着应变的增加,拟合曲线与测试曲线均呈先上升后下降,最后趋于稳定,且上升和下降阶段的曲线均比较吻合,由试验结果验证表明,细观损伤本构模型可准确预测应力—应变曲线,且能合理反映水工混凝土力学行为受硫酸盐腐蚀的影响规律。

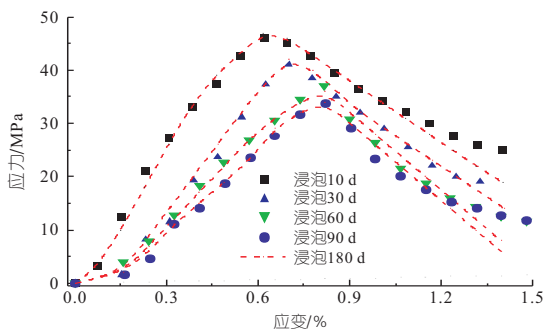


图 6 细观损伤本构模型的预测结果

Fig. 6 Predicting results of microscopic damage constitutive model

5 结论

a. 随硫酸盐腐蚀时间增加,水工混凝土在单轴压缩破坏后的破损程度逐渐提高,峰值强度和弹性模量也明显降低,说明力学性能发生了显著劣化。

b. SEM 图像表明硫酸盐腐蚀使得水工混凝土内部的水泥硬化砂浆出现裂隙,水化硅酸钙凝

胶分解,最终导致宏观力学性能劣化。

c. 基于试验结果构建了考虑腐蚀时间影响的细观损伤本构模型,根据模型绘制的拟合曲线准确地预测了水工混凝土应力—应变关系的发展规律。

参考文献:

- [1] 郑霞忠,肖玲,张光飞. 水利水电工程施工安全管理与安全控制[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 103-104, 22.
- [2] 李涛峰,张多新. 腐蚀冻融耦合循环作用下碳纤维混凝土抗压强度性能试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 143-145.
- [3] 杨绿峰,蔡荣,余波. 海洋大气区混凝土表面氯离子浓度的形成机理和多因素模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 46-55.
- [4] 牛荻涛,王家滨,马蕊. 干湿交替喷射混凝土硫酸盐侵蚀试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 82-89.
- [5] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T5150-2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [6] 贾明晓,周玉龙,刘祖军,等. 混凝土宏细观本构模型研究进展[J]. 混凝土, 2019(1): 52-56.

Mesoscopic Damage Constitutive Model of Hydraulic Concrete Under Sulfate Corrosion

ZHANG Na¹, LI Hui², HE Kai³

(1. School of Civil Engineering, Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou 545616, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The mechanical properties of hydraulic concrete are an important influencing factor on the stability of hydraulic engineering facilities. A fine damage intrinsic structure model considering the effect of sulfate corrosion was established using a combination of mechanical experiments and theoretical analysis. The results show that the effect of sulfate corrosion increases the damage degree of concrete after damage. With the increase of corrosion time, the compressive strength and elastic modulus show an exponential decay law, and the damage strain tends to increase. From the experimental results, the shape parameter m and scale parameter ϵ_0 are calculated. Besides, the mesoscopic damage constitutive model considering the effect of sulfate corrosion is solved. The reasonableness of the theoretical model for predicting the stress-strain relationship was verified by experimental data. The constitutive model proposed in this study can provide scientific reference for the accurate prediction of mechanical behavior of hydraulic concrete.

Key words: hydraulic concrete; sulfate corrosion; mechanical behavior; meso damage; constitutive model

(上接第 54 页)

Regional Water Resource Security Evaluation Based on Sparrow Search Algorithm Optimized Support Vector Machine

CAO Jing-chun, LU Min

(College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Aiming at the evaluation of water resources security in China, combined with the characteristics that support vector machine (SVM) has good classification effect on small samples and nonlinear problems, the sparrow search algorithm (SSA) was used to optimize the penalty factor (C) and kernel function parameters (g) of the SVM. The support vector machine model optimized by the sparrow search algorithm (SSA-SVM) was used for regional water resources security assessment. A case study was carried out in a certain area of Luoyang City. The results show that the evaluation grade obtained by SSA-SVM method and T-S fuzzy neural network method are basically consistent, the SSA-SVM model has the characteristics of fast searching speed, and not easy to fall into local optimum, which can be used for regional water resources security evaluation.

Key words: sparrow search algorithm; parameter optimization; water resources security; support vector machine