

岩石与混凝土蠕变行为研究进展：实验方法、数值模拟与工程适用性综述

谭正林, 李庆文

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月13日

摘 要

岩石与混凝土蠕变作为典型的时间依赖性力学行为, 对深部地下工程和土木结构的长期变形与安全具有重要影响。随着工程规模扩大和环境复杂化, 传统基于短期强度的分析方法已难以满足长期安全评估需求, 蠕变效应逐渐成为工程稳定性分析中的关键问题。本文系统综述了岩石与混凝土蠕变研究的主要进展, 重点从实验研究、数值模拟方法、蠕变本构模型及其工程适用性等方面进行评述。总结了单轴、三轴及多因素耦合蠕变试验在蠕变阶段划分、长期强度判定和损伤演化机制揭示方面的研究成果; 对有限元法、有限差分法和离散元法等数值模拟方法及典型蠕变模型进行了对比分析, 评估其在长期变形预测中的适用条件与局限性; 进一步探讨了基于损伤力学、微观机制及机器学习方法在复杂工况下蠕变预测中的应用潜力。研究表明, 蠕变分析正由经验模型向多尺度、多场耦合和数据驱动方向发展, 但模型的可解释性与工程适用性仍需进一步提升。本文可为岩体与结构工程的长期稳定性分析及蠕变模型选取提供参考。

关键词

蠕变, 本构模型, 数值模拟

Research Progress on Creep Behavior of Rocks and Concrete: Experimental Methods, Numerical Simulation, and Engineering Applicability

Zhenglin Tan, Qingwen Li

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: January 10, 2026; accepted: February 2, 2026; published: February 13, 2026

文章引用: 谭正林, 李庆文. 岩石与混凝土蠕变行为研究进展: 实验方法、数值模拟与工程适用性综述[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 127-135. DOI: 10.12677/hjce.2026.152032

Abstract

This Rock and concrete creep, as typical time-dependent mechanical behaviors, play a critical role in the long-term deformation control and safety of deep underground engineering and civil structures. With the increasing scale of engineering projects and the growing complexity of service environments, conventional analysis methods based primarily on short-term strength are no longer sufficient for long-term safety assessment, and creep effects have become a key issue in engineering stability analysis. This paper systematically reviews the major research advances in rock and concrete creep, with a focus on experimental investigations, numerical simulation approaches, creep constitutive models, and their engineering applicability. The achievements of uniaxial, triaxial, and multi-factor coupled creep tests in identifying creep stages, determining long-term strength, and elucidating damage evolution mechanisms are summarized. Typical numerical methods, including the finite element method, finite difference method, and discrete element method, as well as representative creep models, are comparatively analyzed, and their applicability and limitations in long-term deformation prediction are evaluated. Furthermore, the potential of creep prediction under complex conditions based on damage mechanics, micromechanical mechanisms, and machine-learning approaches is discussed. The review indicates that creep analysis is evolving from empirical modeling toward multi-scale, multi-field coupling and data-driven frameworks; however, the interpretability and engineering applicability of existing models still require further improvement. This work provides a useful reference for long-term stability analysis of rock masses and structures, as well as for the selection of appropriate creep models in engineering practice.

Keywords

Creep, Constitutive Model, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着地下空间开发强度的不断加大以及工程年限的持续延长,岩体与混凝土等工程材料在长期荷载作用下所表现出的蠕变变形问题日益凸显[1]。在深埋隧道、地下洞室、矿山工程、核废料处置以及大型混凝土结构等工程中,蠕变效应不仅会引起结构变形的持续累积和内力重分布,还可能诱发时效破坏与安全性能退化,逐渐成为制约工程长期稳定性与耐久性的关键因素[2] [3]。因此,深入认识工程材料的蠕变机理并建立可靠的长期变形预测方法,对于工程设计优化、风险评估及运行管理具有重要意义。

围绕岩石蠕变行为,国内外学者开展了大量实验研究。通过单轴、三轴以及多级加载等试验手段,系统揭示了岩石蠕变过程的阶段性特征,并阐明了应力水平在控制长期变形演化和破坏模式中的主导作用。随着试验与测试技术的不断进步,温度、含水状态和化学环境等多因素耦合条件逐渐被引入蠕变试验研究,同时结合显微观测和声发射等手段,使相关研究由以往的宏观现象描述逐步向损伤演化机理层面深化。然而,受制于试验周期长、试样尺度有限及工况可控性不足等因素,现有实验研究成果在长期预测能力和工程尺度推广方面仍存在一定局限。为弥补实验研究的不足,数值模拟方法逐渐成为研究蠕变行为的重要技术手段。通过将蠕变本构模型嵌入有限元、有限差分和离散元等数值计算框架中,研究

者能够对岩体和结构在长期荷载作用下的变形演化过程进行系统分析[4]。目前已发展出多种经验型、黏弹塑性型和损伤演化型蠕变模型, 但不同模型在理论假设、参数构成及预测精度等方面差异显著, 其适用范围和工程可靠性仍有必要进行系统比较与评估。与此同时, 在混凝土蠕变研究领域, 随着材料组成日趋复杂以及工程环境不断多样化, 传统基于经验回归的蠕变预测模型在泛化能力和预测精度方面逐渐显现不足。近年来, 机器学习等数据驱动方法被引入混凝土蠕变预测研究, 通过挖掘多因素之间的非线性关联关系, 为复杂工况下的蠕变分析提供了新的研究思路[5]-[7]。然而, 这类方法在模型可解释性、工程适用性以及极端工况外推能力等方面仍需进一步验证。

基于上述研究背景, 本文对岩石与混凝土蠕变研究领域的实验方法、数值模拟技术、蠕变模型及其工程适用性进行系统综述, 力求在梳理研究脉络的基础上总结主要认识, 并对未来发展方向进行讨论, 以为相关工程的长期安全评估及蠕变理论研究提供参考。

2. 岩石蠕变实验研究进展

岩石蠕变特性的实验研究是揭示岩体长期变形与时效破坏机理的基础, 也是开展深部地下工程稳定性分析与寿命评估的重要支撑。围绕不同应力环境, 国内外学者基于单轴压缩试验、三轴压缩试验及其改进形式, 对岩石蠕变行为进行了大量系统研究, 逐步形成了较为完整的实验认知体系[8]。

在常规单轴与三轴蠕变试验基础上, 研究者通过多级加载、分级卸载及长时恒载试验, 深入分析了岩石在不同应力路径下的蠕变响应特征。试验结果普遍表明, 岩石蠕变过程具有显著的阶段性特征, 可划分为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三个阶段。其中, 应力水平是控制蠕变演化模式的关键因素: 当应力低于岩石长期强度时, 蠕变变形以衰减型为主, 变形速率随时间逐渐降低并趋于稳定; 而当应力接近或超过长期强度阈值后, 材料内部损伤不断累积, 最终诱发加速蠕变并导致宏观破坏。这一规律为长期强度判定及工程安全裕度评估提供了重要实验依据。

为更真实地模拟工程环境条件, 近年来蠕变试验逐步向多因素耦合方向发展。除应力条件外, 温度、含水状态和化学环境等因素对岩石蠕变特性的影响受到广泛关注。高温蠕变试验表明, 温度升高不仅会显著提高岩石的蠕变速率, 还会降低其弹性模量和长期强度, 加速内部损伤演化过程; 含水状态则通过削弱颗粒间胶结力、促进裂隙扩展, 对蠕变变形产生放大效应。这类多场耦合试验对于深埋隧道、核废料处置库及地热开发等工程问题具有重要现实意义。

与此同时, 试验尺度与加载方式对蠕变结果的影响也逐渐引起重视。实验研究发现, 试样尺寸、加载速率及加载历史均可能改变岩石的蠕变响应特征, 表现出一定的尺度效应和路径依赖性。这在一定程度上限制了室内试验结果向工程尺度的直接推广, 也促使研究者开始关注室内试验、原位试验与长期监测数据之间的对比与融合。

在微观层面, 随着高分辨率测试技术的发展, 岩石蠕变过程中的损伤演化机制得到了更为深入的揭示。通过扫描电子显微镜(SEM)、X射线CT、声发射监测等手段, 研究者能够从颗粒接触破坏、微裂纹萌生与扩展等角度, 系统分析蠕变变形的微观起源。相关研究表明, 宏观蠕变阶段划分与微裂纹演化过程具有较好的对应关系, 稳态蠕变阶段主要表现为微裂纹的稳定扩展, 而加速蠕变阶段则对应裂纹的快速贯通与损伤局部化。这些发现为基于损伤力学和统计损伤理论的蠕变模型提供了重要实验支撑。具体见表1。

总体来看, 岩石蠕变实验研究已从单一应力条件下的宏观现象描述, 逐步发展为多因素耦合、宏微观结合的系统研究体系。但受试验周期长、条件控制复杂等因素制约, 现有实验成果在长期预测能力和工程适用性方面仍存在一定不足。未来研究有必要进一步加强长时蠕变试验、多尺度实验数据融合以及原位观测手段的应用, 为岩石蠕变理论模型和工程分析方法的完善提供更加可靠的实验基础。

Table 1. Comparison of experimental methods and major findings in rock creep studies
表 1. 岩石蠕变实验研究方法与主要发现对比

实验类型	试验条件	主要测试参数	蠕变特征	关键发现	适用范围
单轴压缩蠕变试验[9]	常温常压, 分级加载	轴向应力、轴向应变、时间	三阶段蠕变曲线(减速 - 稳态 - 加速)	确定长时间强度阈值, 低应力下呈现衰减蠕变	软岩、中等强度岩石
三轴压缩蠕变试验[10]	不同围压(5~30 MPa), 多级轴向应力	轴向应变、径向应变、体积应变	围压抑制加速蠕变, 提高长期强度	围压增加使蠕变速率降低, 延长稳态蠕变时间	深部岩体工程
高温蠕变试验[11]	温度 20℃~800℃, 恒定应力	温度、应变、蠕变速率	温度升高加速蠕变进程	温度每升高 100℃, 蠕变速率增加 1~2 个数量级	地热工程、核废料处置
循环加卸载蠕变试验[12]	应力循环变化, 不同频率	滞回环面积、残余应变	累积损伤效应显著	加载历史影响蠕变特征, 损伤不可逆	动态荷载工程
微观观测试验[13]	SEM、CT 扫描、声发射监测	微裂纹密度、孔隙率、声发射事件	微裂纹扩展与宏观变形相关	稳态蠕变阶段微裂纹缓慢增长, 加速阶段快速贯通	损伤机理研究

3. 岩石蠕变数值模拟研究

3.1. 岩石蠕变数值模拟研究现状

数数值模拟方法为岩石蠕变行为研究提供了重要技术手段, 能够在时间尺度、空间尺度及工况可控性方面有效弥补室内试验的不足, 在蠕变机理分析、长期变形预测及工程设计优化中发挥着不可替代的作用。目前, 岩石蠕变数值分析中常用的方法主要包括有限元法(Finite Element Method, FEM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)以及离散元法(Discrete Element Method, DEM)等, 不同方法在理论假设、计算效率及适用问题类型方面各具特点[14]-[16]。

在连续介质假定下, FEM 和 FDM 通过引入时间相关蠕变本构模型, 能够较为高效地模拟岩体在长期荷载作用下的变形演化过程, 因而被广泛应用于地下洞室、隧道及边坡等工程的长期稳定性分析。其中, 本构模型的合理选取与实现方式是影响数值结果可靠性的关键。早期研究多采用 Burgers 模型、Nishihara 模型及其改进形式, 通过弹性、黏性与塑性元件的组合描述岩石的瞬时变形与稳态蠕变行为。这类模型结构简洁、参数数量有限, 便于在工程软件中实现和推广, 但其物理内涵相对简化, 在复杂应力路径、多级加载及加速蠕变阶段往往存在适用性不足的问题。

为提升模型对非线性蠕变行为的描述能力, 研究者逐步将损伤力学理论引入蠕变本构建模中, 发展了多种考虑损伤演化的蠕变模型。该类模型通过引入损伤变量, 刻画岩石在长期加载过程中因微裂纹扩展、孔隙结构演化等引起的力学性能退化过程, 从而能够较好地反映蠕变速率随时间加快的非线性特征, 尤其在加速蠕变及临近破坏阶段具有明显优势。在数值实现层面, 这类模型通常需要通过用户子程序进行二次开发, 其实现难度与所采用的软件平台密切相关。

在商业软件中, ABAQUS、FLAC3D 和 PFC 是岩石蠕变研究中应用较为广泛的代表性平台。ABAQUS 依托 UMAT 或 CREEP 子程序, 可实现复杂蠕变本构模型的灵活嵌入, 适合处理连续介质条件下的多场耦合问题, 但其开发过程对张量运算、隐式积分算法及收敛控制要求较高, 参数演化不当易导致数值不稳定。FLAC3D 基于显式差分框架, 通过 FISH 语言实现蠕变模型的二次开发, 在处理大变形和渐进破坏问题时具有较强稳定性, 但在高阶本构模型实现及多参数反演方面仍存在一定限制。

相比之下, PFC 采用离散元方法, 通过颗粒接触模型和黏结演化规则直接反映微裂纹萌生与扩展过程, 适于从细观层面研究蠕变与损伤机制, 但其参数标定过程复杂、计算成本较高, 限制了在大尺度工程问题中的直接应用。

在细观尺度层面, 基于微观机制的数值模拟方法近年来逐渐受到重视。除离散元法外, 晶体塑性有限元方法(Crystal Plasticity FEM, CPFEM)也被引入岩石蠕变研究中, 用于模拟多晶岩石在晶粒尺度上的时效变形行为。通过考虑晶体取向、晶界滑移及位错演化等微观机制, 该方法为从材料内部结构层面解释宏观蠕变现象提供了新的思路, 但其对材料结构信息和计算资源的要求较高, 目前主要应用于机理分析与模型验证阶段。不同数值方法及本构模型的特点与适用范围对比如表 2 所示。

Table 2. Comparison of numerical simulation approaches and constitutive models for rock creep

表 2. 岩石蠕变数值模拟方法与本构模型对比

数值方法	本构模型类型	模型参数	优势	局限性	典型应用
有限元法(FEM) [17]	Burgers 模型	弹性模量 E_1 、 E_2 , 粘性系数 η_1 、 η_2	参数少, 物理意义明确, 易于标定	无法描述加速蠕变和破坏过程	稳态蠕变分析, 隧道长期变形预测
有限元法(FEM) [18]	Nishihara 模型	弹性模量、粘性系数、屈服应力	可描述粘弹塑性蠕变, 考虑屈服特性	加速蠕变精度不足	岩盐储库、软岩巷道支护设计
有限元法(FEM) [19]	损伤蠕变模型	弹性参数、粘性系数、损伤演化参数	描述全过程蠕变, 反映材料劣化	参数多, 标定困难, 计算量大	边坡长期稳定性、岩爆预测
离散元法(DEM) [20]	颗粒接触模型 + 粘结蠕变	接触刚度、粘结强度、蠕变系数	可模拟裂纹扩展和破坏过程	计算效率低, 参数与宏观对应关系复杂	节理岩体蠕变、微观机理研究
有限差分法(FDM) [21]	经验蠕变方程	时间硬化或应变硬化参数	计算效率高, 适用大规模工程	模型适用性受限, 外推能力弱	矿柱长期稳定性、地基沉降
多场耦合(FEM) [22]	热 - 力耦合蠕变模型	热力学参数、蠕变参数	考虑温度影响, 适用高温环境	耦合参数测试难度大	核废料地质处理、地热开采

在工程实践中, 数值模拟已成为分析岩体长期稳定性的重要工具。通过将蠕变本构模型引入有限元或有限差分计算程序, 可以较为直观地再现地下洞室、隧道围岩及边坡在长期荷载作用下的变形演化过程, 揭示应力重分布和损伤累积的时序特征, 为支护设计与服役寿命评估提供定量依据。但需要指出的是, 现有蠕变模型大多建立在常温、常压或中低应力试验基础之上, 当工程环境进入超高温、超高围压或深部强约束状态时, 其预测能力往往明显下降。在高温条件下, 矿物热损伤、微裂隙快速扩展及扩散蠕变等过程难以通过传统黏弹塑性框架准确描述; 而在高应力环境中, 岩体由脆性向延性转化、非线性损伤加速演化等行为也常超出经验模型的适用范围, 导致长期变形被低估甚至数值计算失稳。

随着工程条件日益复杂, 多场耦合数值模拟逐渐成为岩石蠕变研究的重要发展方向。热 - 力、水 - 力及化学 - 力耦合模型的引入, 使得数值分析在一定程度上能够反映高温、高渗流和化学侵蚀等因素对蠕变行为的影响。然而, 在极端工况下, 不同物理场之间的耦合机制尚未得到充分认识, 相关参数的演化规律和尺度效应仍存在较大不确定性, 这在一定程度上限制了模型的工程可靠性。总体来看, 岩石蠕变数值模拟正由单一模型和单尺度分析向多模型融合、多尺度耦合以及智能化方向发展, 如何在保证计算效率的同时兼顾物理合理性与工程可用性, 仍是当前亟需突破的关键问题。

3.2. 蠕变模型对比与工程适用性评价

岩石蠕变模型是连接实验研究、数值分析与工程应用的关键纽带, 其合理性直接影响长期变形预测结果及工程安全评估的可靠性。由于岩石材料结构复杂、环境多变, 不同类型蠕变模型在理论假设、参数构成和适用范围等方面均存在显著差异。因此, 从工程应用角度对现有蠕变模型进行系统比较与评价, 对于指导模型选取和提升预测可信度具有重要意义[23]。

从建模思路上看, 现有岩石蠕变模型大致可分为经验型模型、黏弹塑性模型、损伤演化模型以及基于微观机制的模型等。经验型模型以 Burgers 模型、Kelvin 模型和 Nishihara 模型为代表, 通常通过弹性元件、黏性元件及塑性元件的组合, 描述岩石在长期荷载作用下的时间相关变形行为。这类模型结构清晰、参数数量较少, 易于通过室内试验数据进行反演, 在工程实践中具有良好的可操作性, 因而被广泛应用于隧道、地下洞室和边坡等工程的长期变形分析。然而, 其物理内涵相对简化, 难以全面反映复杂应力路径、多级加载及空间效应对蠕变行为的影响, 特别是在加速蠕变阶段, 往往难以准确刻画变形突变特征。

黏弹塑性模型在经典经验模型的基础上引入屈服准则或塑性元件, 使模型能够描述应力超过长期强度后的不可恢复变形过程。这类模型在模拟初始蠕变和稳态蠕变阶段方面具有一定优势, 对岩体在中低应力水平下的长期变形分析较为适用。然而, 其对加速蠕变阶段的描述仍在较大程度上依赖经验参数调节, 模型在不同岩性和工况下的通用性有限, 工程预测结果的不确定性仍然存在。

近年来, 考虑损伤演化的蠕变模型逐渐成为研究热点。该类模型通过引入损伤变量, 将微裂纹萌生、扩展及结构劣化等内部演化过程纳入本构关系中, 能够较好反映蠕变速率随时间加快的非线性特征, 尤其在描述加速蠕变及临近破坏阶段方面表现出明显优势。从工程适用性角度看, 损伤型蠕变模型更适用于深部地下工程、高地应力环境或对长期稳定性要求较高的工程结构分析[24]-[26]。然而, 其模型形式相对复杂、参数数量较多, 对试验数据完整性和参数标定精度要求较高, 在工程推广中仍面临计算效率和参数不确定性等问题。

基于微观机制的蠕变模型则从细观尺度出发, 借助离散元法、晶体塑性理论或多尺度方法, 揭示颗粒接触破坏、裂纹演化及晶体滑移等过程对宏观蠕变行为的影响。这类模型在理论上具有较强的物理解释能力, 可为宏观蠕变模型的改进提供重要依据, 但其建模过程复杂、计算成本较高, 目前主要应用于机理研究和特定工况分析, 尚难直接用于大尺度工程的常规计算。

综合工程实践需求, 各类蠕变模型在适用性上呈现出明显的层次性特征。经验型和黏弹塑性模型因其形式简洁、计算稳定, 更适合用于常规工程的初步分析和长期变形趋势预测; 损伤演化模型在高应力、高风险工程中具有更高应用价值, 可为极限状态分析和安全评估提供更可靠依据; 而微观机制模型则主要服务于理论深化和模型校核, 为建立统一的多尺度蠕变描述框架奠定基础。

总体而言, 目前尚不存在一种能够在所有工程条件下同时兼顾精度、效率和通用性的岩石蠕变模型。未来研究应在实验观测与数值模拟相结合的基础上, 进一步明确模型参数的物理意义, 提高模型可解释性; 同时, 通过多模型融合和多尺度耦合, 在保证工程计算效率的前提下, 不断提升蠕变模型对复杂工况的适应能力, 为岩体工程的长期安全运行提供更加可靠的理论支撑。

4. 机器学习在混凝土蠕变预测中的应用

混凝土蠕变作为一种典型的时间依赖性力学行为, 对结构长期变形演化、内力重分布及服役安全性具有重要影响, 在大跨度结构、高层建筑及长期承载工程中尤为突出。长期以来, 混凝土蠕变预测主要依赖 ACI 209、CEB-FIP 和 GL2000 等经验或半经验模型, 该类模型基于大量试验数据统计回归建立, 在常规工程条件下具有一定适用性。然而, 当工程条件涉及多因素耦合、非线性演化或复杂环境作用时, 传统模型在预测精度和泛化能力方面逐渐暴露出局限性[27]-[29]。

随着混凝土材料体系的不断发展以及工程工况复杂程度的提升，单一经验公式已难以全面反映配合比参数、养护条件、加载历史及环境因素对蠕变行为的综合影响。在此背景下，机器学习方法凭借其数据驱动和非线性建模优势，被逐步引入混凝土蠕变预测研究。相关研究表明，机器学习模型能够通过多维输入变量的学习，有效刻画蠕变变形与材料组成、加载条件及环境因素之间的复杂映射关系，在不同配合比和服役环境下展现出较高的预测精度与稳定性。

在机器学习建模过程中，特征工程是影响预测性能的关键环节之一。输入参数的选取与构造直接决定了模型对蠕变机理信息的感知能力。已有研究普遍将水泥类型、水灰比、骨料特性、加载龄期、应力水平、环境湿度与温度等作为基础输入特征，但不同特征对蠕变预测的敏感性存在显著差异。合理的特征筛选与组合不仅有助于提高模型预测精度，还能够减少冗余信息引起的过拟合风险。部分研究通过特征重要性分析、相关性分析或降维方法，识别对蠕变响应起主导作用的关键参数，从而在保证预测精度的同时提升模型的稳定性与工程适用性。

在具体算法应用方面，人工神经网络、支持向量机、随机森林以及 XGBoost 等方法已被广泛用于混凝土蠕变预测研究。其中，人工神经网络因其良好的非线性逼近能力，在蠕变预测领域应用较为成熟，整体预测精度普遍优于传统经验模型；随机森林和 XGBoost 等集成学习方法通过多模型协同，有效提高了预测结果的鲁棒性和抗过拟合能力，在多源数据和复杂工况条件下表现出更优的综合性能(见表 3)。然而，这类模型大多属于“黑箱模型”，其预测结果难以直接对应具体的物理过程，限制了其在工程设计和规范制定中的进一步应用。

Table 3. Comparison of machine learning applications in concrete creep prediction
表 3. 机器学习方法在混凝土蠕变预测中的应用对比

机器学习方法	输入参数	数据集规模	主要发现	预测精度(R ²)
ANN, SVM, RF [30]	水灰比、水泥类型、骨料特性、加载龄期、环境条件等	大型数据库	机器学习模型优于传统经验公式，ANN 表现最佳	>0.90
ANN, GBDT, XGBoost [31]	配合比参数、养护条件、加载条件、时间因素等	多源数据集	集成学习方法提高预测稳定性，XGBoost 综合性能优异	0.85~0.95
机器学习方法	输入参数	数据集规模	主要发现	预测精度(R ²)

针对机器学习模型物理可解释性不足的问题，近年来物理信息神经网络(Physics-Informed Neural Networks, PINN)逐渐受到关注。该方法通过将蠕变本构关系、平衡方程或演化约束条件引入损失函数，使模型在数据拟合的同时满足基本力学规律，从而在一定程度上克服纯数据驱动模型缺乏物理约束的缺陷。对于混凝土蠕变问题，PINN 可通过引入经典蠕变模型形式或应变 - 应力演化关系，对神经网络预测结果进行物理约束，不仅有助于提升模型在小样本条件下的泛化能力，也为解释模型预测结果提供了力学依据。这种“数据驱动 - 力学约束”相结合的建模思路，为机器学习方法在蠕变分析中的工程化应用提供了新的发展方向。

总体而言，机器学习方法为混凝土蠕变预测提供了一种有益的补充手段，但其可靠应用仍依赖于高质量试验数据支撑以及合理的物理约束引入。未来研究应进一步加强特征工程与力学机理之间的关联分析，推动物理约束机器学习模型在实际工程中的验证与应用，从而实现预测精度、可解释性与工程适用性的协同提升。

5. 结论

本文围绕岩石与混凝土蠕变问题，从实验研究、数值模拟方法、蠕变模型对比及新型数据驱动方法

等方面,对国内外研究成果进行了系统综述与综合分析,主要结论如下:

(1) 岩石蠕变实验研究已形成较为成熟的认识框架,单轴与三轴蠕变试验揭示了蠕变过程的阶段性特征及长期强度控制规律;多因素耦合试验和微观观测技术的发展,使宏观变形与微观损伤演化之间的内在联系得到更为清晰的阐释,但试验周期和尺度效应仍限制了成果的工程外推能力。

(2) 数值模拟方法在岩石蠕变分析中发挥着核心作用。基于有限元和有限差分方法的连续介质模型适合工程尺度长期变形分析,而离散元和多尺度方法在揭示裂纹演化和破坏机理方面具有独特优势。不同数值方法在计算效率、物理表达和工程适用性方面各具特点,需要根据具体工程问题合理选取。

(3) 蠕变本构模型在工程应用中呈现明显的层次性特征。经验型和黏弹塑性模型因结构简洁、参数易得,适合常规工程分析;损伤演化模型在高应力和高风险工程中更具优势,但其参数标定和计算复杂性仍是制约因素;基于微观机制的模型主要服务于理论研究和模型发展。

(4) 在混凝土蠕变研究中,机器学习方法在预测精度和非线性建模方面表现出显著优势,为传统经验模型提供了有益补充。但其工程应用仍面临数据规模不足、模型可解释性有限和外推能力有待验证等问题。

综上所述蠕变研究正由单一模型和经验分析向多尺度、多场耦合及智能化方向发展。未来研究应加强实验数据积累与共享,推动物理机理与数据驱动方法的深度融合,并在保证计算效率的前提下提升模型的工程适用性和可靠性,从而为岩体与结构工程的长期安全运行提供更加坚实的理论基础。

参考文献

- [1] 张向东,李永靖,张树光,等.软岩蠕变理论及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2004(10):1635-1639.
- [2] 王来贵,何峰,刘向峰,等.岩石试件非线性蠕变模型及其稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004(10):1640-1642.
- [3] 杨峰.高应力软岩巷道变形破坏特征及让压支护机理研究[D]:[博士学位论文].北京:中国矿业大学,2009.
- [4] 冒海军,杨春和,刘江,等.板岩蠕变特性试验研究与模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2006(6):1204-1209.
- [5] 徐涛,林皋,唐春安,等.拉伸载荷作用下混凝土蠕变-损伤破坏过程数值模拟[J].土木工程学报,2007(1):28-33.
- [6] Gao, P., Ye, G., Huang, H., Qian, Z., Schlangen, E., Wei, J., et al. (2022) Incorporating Elastic and Creep Deformations in Modelling the Three-Dimensional Autogenous Shrinkage of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, **160**, Article ID: 106907. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106907>
- [7] 郭少华.混凝土蠕变损伤分析模型[J].西安建筑科技大学学报,1995(3):299-303.
- [8] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007(6):1081-1106.
- [9] 赵宝云,刘东燕,郑颖人,等.红砂岩单轴压缩蠕变试验及模型研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):744-747.
- [10] 陈卫忠,谭贤君,吕森鹏,等.深部软岩大型三轴压缩流变试验及本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1735-1744.
- [11] 赵阿兴,施良骐,崇秀兰.一种岩石单轴高温抗压强度、变形性质和蠕变实验方法介绍[J].力学与实践,1987(S1):142-146.
- [12] 贺其.红砂岩单轴加卸载蠕变特性试验研究[D]:[硕士学位论文].抚州:东华理工大学,2016.
- [13] 任建喜.单轴压缩岩石蠕变损伤扩展细观机理CT实时试验[J].水利学报,2002(1):10-15.
- [14] Li, Q., Li, W., Pan, C., Xu, M., Gu, S., Zhang, S., et al. (2025) Influence of CFRP Jackets Stiffness on the Performance of Coal Cylinders: 3D PFC-FLAC Coupled Numerical Investigation. *Construction and Building Materials*, **481**, Article ID: 141538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141538>
- [15] 曹日跃.深部软弱煤岩围岩变形及松动圈随时间演化规律研究[D]:[硕士学位论文].合肥:安徽建筑大学,2017.
- [16] 徐盼.深部软弱煤岩巷道松动变形随时间演化规律分析[D]:[硕士学位论文].合肥:安徽建筑大学,2016.
- [17] 储昭飞.流变软岩中隧道支护-围岩相互作用关系研究[D]:[博士学位论文].北京:北京交通大学,2018.
- [18] 徐素国.层状盐岩矿床油气储库建造及稳定性基础研究[D]:[博士学位论文].太原:太原理工大学,2010.
- [19] 陈生水,郑澄锋,王国利.膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J].岩土工程学报,2007(6):795-799.

- [20] 杨松林, 张建民, 黄启平. 节理岩体蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2004(8): 1225-1228.
- [21] Díaz Flores, R., Hellmich, C. and Pichler, B. (2025) Nonlinear Creep of Concrete: Stress-Activated Stick-Slip Transition of Viscous Interfaces and Microcracking-Induced Damage. *Cement and Concrete Research*, **191**, Article ID: 107809. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107809>
- [22] 唐春安, 马天辉, 李连崇, 等. 高放废料地质处置中多场耦合作用下的岩石破裂问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S2): 3932-3938.
- [23] 李树清. 深部煤巷围岩控制内、外承载结构耦合稳定原理的研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [24] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大理岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(10): 2153-2159.
- [25] 杨秀荣, 姜谟男, 江宗斌. 含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 167-174.
- [26] 陈亮, 刘建锋, 王春萍, 等. 不同温度及应力状态下北山花岗岩蠕变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1228-1235.
- [27] 冯德成, 吴刚. 混凝土结构基本性能的可解释机器学习建模方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 228-238.
- [28] 王丽苹, 高瑞贞, 张京军, 等. 基于卷积神经网络的混凝土路面裂缝检测[J]. 计算机科学, 2019, 46(S2): 584-589.
- [29] 张书颖, 陈适之, 韩万水, 等. 基于集成学习的FRP加固混凝土梁抗弯承载力预测研究[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 245-256.
- [30] Albert, C., Isgor, O.B. and Angst, U. (2022) Exploring Machine Learning to Predict the Pore Solution Composition of Hardened Cementitious Systems. *Cement and Concrete Research*, **162**, Article ID: 107001. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107001>
- [31] Liang, M., Chang, Z., Wan, Z., Gan, Y., Schlangen, E. and Šavija, B. (2022) Interpretable Ensemble-Machine-Learning Models for Predicting Creep Behavior of Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **125**, Article ID: 104295. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104295>