

水环境下岩石蠕变特性及本构模型研究综述

石棋军

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年8月6日; 录用日期: 2023年8月27日; 发布日期: 2023年9月7日

摘要

岩石的重要力学特性之一是蠕变, 而水又是影响岩石的蠕变力学性能的一个关键因素。本文主要阐述了近年来国内外学者对岩石在水环境下进行的蠕变试验和本构方程方面的研究成果, 并对未来的岩石蠕变及本构方程研究方向进行了展望。

关键词

岩石, 蠕变试验, 本构方程, 水环境

Research Review on Creep Characteristics and Constitutive Model of Rock under Water Environment

Qijun Shi

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Aug. 6th, 2023; accepted: Aug. 27th, 2023; published: Sep. 7th, 2023

Abstract

One of the important mechanical properties of rocks is creep, and water is a key factor affecting the creep mechanical properties of rocks. In this paper, the research results of creep test and constitutive equation of rock in water environment carried out by domestic and foreign scholars in recent years are mainly described, and the research direction of rock creep and constitutive equation in the future is prospected.

Keywords

Rock, Creep Test, Constitutive Equation, Water Environment

Copyright © 2023 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

随着我国经济实力的快速发展,如地下洞室、大型水电站、道路桥梁等基础工程开始大规模建设,在建设这些大工程中,水环境中岩土工程类问题急需解决,水对岩石的作用对岩土类工程的时效变形和稳定性有着举足轻重的地位,因此这类问题成为国内外学者的关注重点。水会对岩体产生膨胀-崩解、泥化、润滑、软化等作用,岩石遇到水后,会引起岩体矿物的胶结程度、裂纹的扩展情况以及矿物成分、颗粒结构的改变,最终让岩石的物理性质降低,使岩体的强度变弱。随着岩体遇水时间的增长,岩体存在的孔隙,会让水在其中进行扩散,在应力作用下岩体将产生损伤,从而导致岩体发生蠕变力学行为,影响岩体的蠕变特性,具体表现在:岩体的粘滞系数、长期强度、弹性模量、峰值强度等都有所减弱。鉴于水对岩土工程的影响,目前国内外学者对遇水条件下的岩石安全问题做了一系列的研究,主要进行的室内试验研究,对水环境下的岩石变形、破坏、蠕变及本构方程进行试验分析。

2. 岩石蠕变特性的研究现状

岩石的蠕变试验研究,国内外学者研究成果丰富。朱合华[1]以任胡岭隧道岩石为研究对象,对岩样进行室内单轴压缩蠕变试验,研究了不同含水状态下岩石的蠕变力学性能。黄小兰[2]对泥岩进行不同含水条件下的强度试验和蠕变试验,结果表明岩石的强度和弹性模量随着含水率的增长而递减。刘洪磊[3]对砂岩开展了不同含水状态下的分级加载蠕变试验,得出在分级加载蠕变中含水率的增加会加大损伤演化的影响。李轴[4]开展了花岗岩在饱水-风干状态下流变特性的试验研究,发现含水率对岩石的物理性质和力学参数有着很大的影响。姜永东[5]选用砂岩、页岩这两种岩石开展干湿循环条件下的单轴压缩实验,得出随着干湿循环次数的增加会加大岩石力学性质的弱化作用。李男[6]对含水状态不同的砂岩进行了剪切蠕变试验,得出了水能够增大砂岩的蠕变应变量和蠕变应变速率,并降低蠕变破坏强度值。杨彩红[7]通过对不同含水状态页岩岩样三轴蠕变实验,得出了含水率会加大岩石蠕变行为。邵珠山[8]通过对干燥状态及饱和含水状态石英砂岩进行单轴分级加载蠕变试验,得出蠕变过程蠕变参数与声波之间的联系。王萍[9]对岩石进行不同含水率下三轴蠕变实验,从试验结果得到泥页岩的蠕变是非线性的;并且随含水率和应力水平的提高,应力应变的非线性程度也增大。邓华锋[10]进行了考虑浸泡-风干循环和水压力升降变化的水-岩作用试验。结合 SEM 电镜扫描,得出了水-岩作用次数的增加会加大岩石的蠕变行为。

余成学[11]通过高孔隙水压力作用对于岩石的蠕变试验研究,在高孔隙水压条件下岩石的蠕变破坏机制。杨红伟[12][13]对细粒砂岩进行了蠕变试验,研究了应力和逐级加载水压力两个条件耦合作用下的蠕变形。黄书岭[14]对大理岩三轴蠕变试验,发现了应力和孔隙水压耦合条件下的脆性岩石的时效特征和破坏时效机制。李勃[15]以砂岩为研究对象,通过砂岩的微观结构和物理力学参数的变化,发现了水对砂岩蠕变速率的影响。肖欣宏[16]对泥岩进行了蠕变试验,研究了不同水压条件下,在应力长期作用下的泥岩

蠕变力学特性。阎岩[17]对多孔隙石灰岩进行了流变试验,研究了不同应力及水压作用下岩石试件的流变力学特性。陈英[18]对裂隙大理岩进行水环境下的岩石蠕变试验,探究水压如何影响岩石蠕变过程中的长期强度,通过岩石的破坏形态分析了裂隙大理岩破坏机制。杨超[19]对单裂隙砂岩开展不同角度下和不同应力区间下的单轴压缩蠕变试验,得出了裂隙硬岩与完整岩石蠕变特性间的相关关系。苏荣华[20]等采用试验、理论、数值模拟相结合的方法,分析了端部效应的有无,对砂岩在蠕变过程的应力、应变及塑性区分布特征的影响。韩庚友[21]等对二云石英片岩进行夹角方向与片里面不同角度条件下的单轴压缩蠕变试验。通过研究不同加载方向的蠕变规律;发现了片理面对二云石英片岩蠕变的影响规律。姚华彦[22]对干湿循环下砂岩的单轴和三轴蠕变试验研究,分析了水岩作用下的砂岩蠕变速率及蠕变变形特性。于超云[23]对非饱和红砂岩试件开展了单轴压缩蠕变试验,在不同应力和水共同作用条件下研究了瞬时应变、蠕变应变、稳态速率,应变率和破坏时间与初始含水率的关系。王子娟[24]对砂岩进行了力学实验,得到砂岩的各个力学参数随干湿循环次数的变化规律,发现了“饱和”含水状态下的岩样比“干燥”含水状态下的岩样有着更明显的变化规律,即“饱和”状态下到“再干燥”的含水状态变化使得岩石的力学性能有一定的恢复。综上所述,岩石含水量对于岩石蠕变力学特征有着重大影响,对于含水量对岩石蠕变的影响,常用的方法是:干燥岩石试样和饱水岩石试样,两种极端含水状态下的蠕变特性对比,定性的分析水的岩石蠕变的影响,对于干湿循环和水流影响下的岩石蠕变性质,常规方法是利用岩石全自动流变伺服试验机,分析水对岩石蠕变变形和渗透特性的影响。对于岩石蠕变特性的研究,多是从含水率、不同含水状态、不同水-岩循环、不同的应力及加载方向、水压等单一或者两个工况下的研究。对于三种工况以上的耦合条件下的岩石蠕变特性研究还是很薄弱,因此研究三种工况以上耦合条件下的岩石力学性能,并建立适合多场耦合的岩石蠕变本构模型有着重要意义。而且处于水环境下的岩石工程,往往也受到水中化学离子的影响,所以,考虑这些水中化学离子对岩石蠕变性质的影响也是重要研究方向之一。

3. 岩石本构模型研究现状

吴秀仪[25]对 Burgers 模型进行了修正,通过把非线性黏滞阻尼器与塑性元件并联,然后串联在 Burgers 模型从而得到了修正的岩石本构模型。宋勇军[26]研究水对炭质板岩蠕变特性的影响,并采用 Burgers 流变模型串联一个非线性黏弹塑性元件来描述炭质板岩的蠕变规律和特性。刘东燕[27]开展了高围压高孔隙水压作用下砂岩蠕变试验,通过砂岩的蠕变曲线,推导了一个二元件黏塑性模型的非线性本构关系,通过将三元件广义 Kelvin 模型和二元件非线性黏塑性模型进行串联,组成一个新的非线性黏弹塑性蠕变模型。杨秀荣[28]对不同含水率的岩石蠕变规律进行了对比分析,揭示了含水率对岩石蠕变的弱化作用。引入时效劣化效应和含水弱化效应建立岩石损伤本构模型。许腾[29]对于岩石在蠕变中会受到含水损伤和时效损伤,通过引入时效损伤 D_t 和含水损伤 D_w , 建立了含水弱化的变参数流变模型。刘小军[30]关注到含水状态变化对岩石力学性质的劣化效应,运用含水状态与蠕变参数的数学关系和损伤理论的分析,得到各蠕变参数的损伤演化方程,得到了含水劣化效应的浅变质板岩蠕变本构模型。欧阳蕊灿[31]将 Hook 体、Kelvin 体、Bingham 体与新的非线性黏塑性体进行串联构成一个可以描述蠕变加速阶段的新非线性黏弹塑性蠕变模型。王俊光[32]运用室内试验与理论分析结合的方法探讨了在渗透水压力条件下软岩的蠕变特性,新建了一个有着渗透水压力的变参数的软岩损伤蠕变模型。吕洪淼[33]通过水岩耦合作用下的流变试验,分析了砂岩在多种条件耦合下的蠕变变形规律及破坏机理。建立可以较好地描述岩石加速蠕变阶段的新型蠕变本构模型。陈陆望[34]在蠕变模型中引入含水开关与蠕变损伤阈值,在蠕变损伤中考虑含水弱化从而构思一个新的本构关系,然后建立了一个岩石含水蠕变损伤模型。邓华锋[35]在蠕变本构模型中考虑浸泡-风干循环岩石的损伤效应,并将压密段的影响作为思考中心,分段建立了浸泡-风干下砂岩的

统计损伤本构方程。曹树刚[36]将粘滞系数修正为非线性,建立了一个能较好地反映岩石的非衰减蠕变特性的本构模型。王军保[37]对灰质泥岩进行了三轴压缩蠕变试验,并采用6元件的组合方法扩展 Burgers 模型,且反演了灰质泥岩的蠕变参数。刘泉[38]按照傅里叶级数展开方法推导了 Burgers 模型在梯形循环荷载作用下的轴向蠕变方程。魏心声[39]对蠕变曲线通过修正的非线性西原蠕变模型进行辨识,同时将一维蠕变模型扩展为考虑围压影响的三维蠕变模型。魏尧[40]进行了不同冻结温度下砂岩的蠕变力学实验,基于试验结果构建了冻结砂岩蠕变损伤本构模型。宋勇军[41]将一个非线性粘塑性体串联在 Burgers 流变模型上,建立一个可以描述适合描述炭质板岩蠕变特点的 Burgers 非线性粘弹塑性蠕变本构模型。上述的岩石本构模型大致可以分为三类:经验流变模型、元件组合模型、采用非线性元件和损伤力学、内时理论、断裂力学等理论建立的岩石流变本构模型。经验流变模型可以描述岩石衰减流变阶段和稳态流变阶段,但对于加速流变阶段却无法准确的描述并且对于岩石内部的流变机理及特征也无法反映,然而对于大多数的岩土工程,岩石加速流变阶段和岩石内部流变机理及特征是无法回避的问题,因此这种模型目前较少使用。元件组合模型通过圣维南体(S)、虎克体(H)、牛顿体(N)等基本元件的组合来模拟岩石的流变力学特征,能灵活简洁的描述岩石的流变变形并且也能用于实际工程的数值分析,因此该模型在岩石流变特性研究中应用较广。但元件模型同样有着其缺陷,元件模型通过元件的线性组合而成,仅能对岩石的衰减流变和稳态流变进行描述,对于岩石的加速流变也无法描述。于是,为了解决岩石的加速流变的问题,在元件模型的基础上引入能描述岩石加速流变性质的非线性元件,从而构建了广义的非线性元件模型。但在工程实际中,由于岩石处于环境十分复杂,为了研究复杂环境中岩石的流变性质必须结合损伤力学、内时理论、断裂力学等理论来构建合适的岩石本构模型。

4. 基于岩石蠕变研究边坡稳定性的研究现状

秦哲[42]对不同干湿循环次数的岩样进行了三轴蠕变试验。通过分析干湿循环的岩石蠕变数据,探究水岩作用对边坡岩石的蠕变性质变化对边坡稳定性的影响。刘新荣[43]对“饱水-风干”水-岩循环下的砂岩进行了室内试验,通过试验得出水对砂岩的(黏聚力 c , 内摩擦角 φ)的弱化规律,并揭示了水-岩循环作用对岸坡稳定性的影响。余志刚[44]研究水位升降对岩石蠕变的影响,揭示了水位条件变动条件下岸坡岩体变形位移、稳定安全系数的影响规律。杨彩红[45]以岩石蠕变模型理论为基础,结合边坡岩石的破坏机制,引进一种非牛顿黏滞体模型来模拟岸坡的稳定性。张景昱[46]基于水压力升降变化和“饱和-风干”循环水-岩作用的试验结果,建立水-岩作用了岩体强度蠕变本构模型,并对库岸边坡的稳定性进行了模拟。王闰超[47]建立了适用于巴东组泥岩的非线性蠕变本构模型,对新建的蠕变本构模型进行了程序的二次开发和验证,并用此程序对边坡在支护前后的稳定性进行了分析。徐达[48]将一种新的非线性黏壶元件和裂隙塑性体等非线性元件组合,建立新的非线性流变元件本构模型。基于新的本构模型对夜郎河持大桥拱座基础处顺层岩质边坡进行数值模拟,比较分析瞬时状态和流变状态下边坡的稳定性。莫至坤[49]在西原模型的基础上串联一个非线性阈值元件,建立了可以全面描述岩石蠕变全过程特性的非线性蠕变模型并模拟了水位升降条件下库岸边坡的蠕变变形及应力场演化。朱雷等[50]提出了一种滑坡稳定性评价方法,研究了滑坡力学参数与稳定性的动态变化过程。上述关于边坡稳定性的研究是基于边坡岩石所处环境对岩石流变性质的影响作为基础的,因此建立合适边坡岩石的非线性本构模型十分重要。对于涉水的边坡,还应该结合损伤理论等理论基础,考虑水-岩作用对岩石流变性质的劣化作用,结合岩石室内流变试验结果设计出合适的非线性元件与现有的元件模型进行组合,从而构建能较好描述涉水边坡岩石的流变行为的本构模型,结合现有的数值模拟平台对构建的本构进行二次开发,从而达到研究边坡稳定性的目的。对于处于特殊环境的边坡岩石,研究重点应该放在构建合适的非线性元件,如巴东组泥岩、红层砂岩的非线性元件的构建,有着合适的非线性元件才能更好的描述岩石的流变性质,从而构建

合适本构模型进行边坡稳定性研究。

5. 结论与展望

水环境下, 岩石的蠕变研究得到了很大的发展, 也取得了丰富的成果, 一些学者也有比较新颖的理论观点。但是, 大部分的蠕变试验仅仅考虑一个因素或者两个因素下的蠕变特性, 对于多种因素影响下的蠕变特性研究较少。在现实的岩土工程的实践里, 岩体的蠕变现象是在温度, 围压, 水, 地应力等耦合条件下发生。所以, 未来的蠕变试验和蠕变本构模型研究方向和研究重点主要集中在:

- (1) 构建温度 - 水流 - 应力 - 化学多条件下的分析方法与岩石本构模型。
- (2) 综合考虑温度 - 水流 - 应力 - 化学多条件下的耦合过程或者耦合效应。
- (3) 温度 - 水流 - 应力 - 化学多条件耦合下的智能化研究。

参考文献

- [1] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(12): 1791-1796.
- [2] 黄小兰, 杨春和, 刘建军, 何翔, 陈剑文, 段翔. 不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2): 3477-3482.
- [3] 刘洪磊, 宋旭, 牛雷雷, 等. 不同含水状态砂岩分级加载蠕变变形特性研究[J]. 金属矿山, 2021(11): 25-32.
- [4] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(10): 1673-1677.
- [5] 姜永东, 阎宗岭, 刘元雪, 等. 干湿循环作用下岩石力学性质的实验研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(5): 104-106+110.
- [6] 李男, 徐辉, 胡斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 439-443.
- [7] 杨彩红, 王永岩, 李剑光, 等. 含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007(7): 695-699.
- [8] 邵珠山, 靳冬冬, 陈浩哲, 等. 含水状态对石英砂岩单轴分级蠕变性能影响研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 1839-1845.
- [9] 王萍, 屈展, 黄海, 等. 含水状态下硬脆性泥页岩蠕变特性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 66-71.
- [10] 邓华锋, 支永艳, 段玲玲, 等. 水-岩作用下砂岩力学特性及微细观结构损伤演化[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3447-3456.
- [11] 余成学, 崔旋. 高孔隙水压力对岩石蠕变特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1603-1609.
- [12] 杨红伟, 许江, 彭守建, 等. 孔隙水压力分级加载砂岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 365-370.
- [13] 杨红伟, 许江, 彭守建, 等. 孔隙水压力作用下岩石蠕变及损伤特性实验[J]. 宜宾学院学报, 2015, 15(12): 1-5.
- [14] 黄书岭, 冯夏庭, 周辉, 等. 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3441-3446+3451.
- [15] 李勃, 刘长武, 谢辉, 等. 水压环境下砂岩蠕变特性试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(S1): 119-124.
- [16] 肖欣宏, 王静, 谢小帅, 等. 水岩作用下红层泥岩蠕变特性[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 96-101+109.
- [17] 阎岩, 王恩志, 王思敬, 等. 岩石渗流-流变耦合的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2095-2103.
- [18] 陈英, 谢辉, 杨俊, 等. 真实水压作用下裂隙大理岩蠕变特性试验研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 149-157.
- [19] 杨超, 许轩, 王乐华, 孙钱程, 王瑞红. 不同特征应力区间单裂隙砂岩与完整岩石蠕变特性的相关关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(7): 1347-1357.
- [20] 苏荣华, 马志远, 薛佳琪. 端部效应对砂岩单轴压缩蠕变特性影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 27-34.
- [21] 韩庚友, 王思敬, 张晓平, 王彦兵, 赵国斌, 马超锋. 分级加载下薄层状岩石蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2239-2247.
- [22] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3704-3708+3714.
- [23] 于超云. 水对岩石力学性质影响的试验及数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.

- [24] 王子娟. 干湿循环作用下砂岩的宏细观损伤演化及本构模型研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [25] 吴秀仪, 刘长武, 沈荣喜, 等. 水压与外力共同作用下的岩石蠕变模型[J]. 西南交通大学学报, 2007(6): 720-725.
- [26] 宋勇军, 雷胜友, 邹翀, 等. 干燥与饱水状态下炭质板岩蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 619-625+664.
- [27] 刘东燕, 蒋海飞, 李东升, 等. 高围压高孔隙水压作用下岩石蠕变特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 1916-1923.
- [28] 杨秀荣, 姜谱男, 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.
- [29] 许腾, 任思玉, 樊成, 等. 基于变参数的含水岩石弱化流变模型研究[J]. 中国科技论文, 2018, 13(1): 70-77.
- [30] 刘小军, 刘新荣, 王铁行, 等. 考虑含水劣化效应的浅变质板岩蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2384-2389.
- [31] 欧阳蕊灿, 王卫军, 袁超. 考虑孔隙水压的岩体蠕变本构模型[J]. 矿业工程研究, 2022, 37(2): 1-8.
- [32] 王俊光, 金岍, 梁冰, 等. 渗透水压力作用下软岩蠕变特性及变参数蠕变模型[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 120-125.
- [33] 吕洪淼, 林晓楠. 水岩耦合作用下岩石黏弹塑性分析及屈服准则研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 107-112.
- [34] 陈陆望, 李圣杰, 陈逸飞, 等. 岩石含水蠕变损伤模型的开发与应用[J]. 固体力学学报, 2018, 39(6): 642-651.
- [35] 邓华锋, 胡安龙, 李建林, 等. 水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 631-639.
- [36] 曹树刚, 边金, 李鹏. 岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(5): 632-634.
- [37] 王军保, 刘新荣, 王铁行. 灰质泥岩蠕变特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 770-775.
- [38] 刘泉. 低频循环荷载作用下盐岩蠕变特性及本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [39] 魏心声. 秦巴山区云母石英片岩蠕变力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [40] 魏尧. 西部白垩系饱和和冻结砂岩蠕变损伤力学特性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [41] 宋勇军. 干燥和饱水状态下炭质板岩流变力学特性与模型研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [42] 秦哲, 付厚利, 程卫民, 等. 水岩作用下露天坑边坡岩石蠕变试验分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 85-89.
- [43] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. 水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 613-616+627.
- [44] 余志刚, 莫勇刚, 蒋博林, 等. 水位升降速度对岩质岸坡变形及稳定性的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(12): 142-147.
- [45] 杨彩红, 王永岩, 李剑光. 水对边坡力学系统稳定性的影响[J]. 煤矿开采, 2007(1): 8-10+13.
- [46] 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等. 考虑水-岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1851-1858.
- [47] 王闫超. 巴东组泥岩蠕变力学特性及边坡变形与支护的时效性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [48] 徐达. 红层岩石蠕变特性及其非线性本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [49] 莫至坤. 干湿循环作用下水电工程高边坡长期变形分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [50] 朱雷, 黄润秋, 王小群, 等. 基于滑带强度参数动态演化的滑坡稳定性研究[J]. 岩力学, 2015, 36(增刊 2): 431-437.