

# 兰州黄土路堑边坡冲刷和干湿循环研究的文献综述

何冰航

兰州交通大学, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年4月9日; 录用日期: 2022年4月30日; 发布日期: 2022年5月11日

---

## 摘要

本文综述主要对目前查阅的部分较有代表性的关于路堑边坡, 边坡冲刷, 边坡干湿循环方面的论文的研究方法, 研究成果进行一个简单性总结。通过展示这些研究者对于边坡, 路堑, 降雨, 干湿循环的研究问题的提出以及通过对这些研究问题的解决思路和具体的试验方法, 来对兰州地区黄土路堑边坡的研究方向和研究方法提供一些参考。

## 关键词

边坡, 路堑, 黄土, 干湿循环, 降雨冲刷

---

# A Literature Review on Slope Erosion and Dry-Wet Cycles in Loess Cut Slope in Lanzhou

Binghang He

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2022; published: May 11<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

This literature review summarises the research methods and findings of some of the more representative papers in the areas of cut slope, slope erosion, and slope dry-wet cycles that have been reviewed thus far. This paper provides some reference on the direction of research and research methods on cut slopes in the Lanzhou area by presenting the research questions posed by these

researchers on slope, cutting, rainfall, and dry-wet cycles, as well as the solutions to these research questions and specific experimental methods.

## Keywords

Slope, Cutting, Loess, Dry-Wet Cycles, Rainfall Erosion

Copyright © 2022 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

黄土地区一般为干旱半干旱区,在此地区建设的黄土路堑处于不断的降雨蒸发干湿循环的过程中,路堑浅层原状土的孔隙不断扩大,其土体物理性质发生不可逆转的变化,使得岩土体强度参数不断弱化。而降雨冲刷则直接造成了边坡的水土流失,其中尤以细沟侵蚀为主,所谓细沟侵蚀即在降雨冲刷作用下坡面形成了细小沟道,汇集沿坡留下的水流形成径流,径流对细沟内的沟壁、沟底和沟头进行的坡面土壤冲散、冲蚀和搬运的过程。随着不断的干湿循环对坡面土体形成的弱化作用的累积,使得冲刷不断加剧,最终将导致坡面破坏。所以,研究降雨蒸发干湿循环和降雨冲刷对黄土路堑边坡土体的影响对于黄土路基边坡对冲刷防护设计、防治,浅层土流失和边坡失稳等都具有重要的实际意义和理论价值。而目前,国内外的学者针对这个问题的每个部分(路堑,冲刷,干湿循环)的各种问题进行了多样的研究,本人希望通过此文献综述总结各位前辈的研究,以期获得在这些方面的研究经验,并对兰州降雨蒸发干湿循环对黄土路堑边坡的影响的研究提供帮助。

## 2. 黄土路堑边坡相关研究

路堑,指的是通过开挖天然地面做成的路基。其主要作用为缓和道路纵坡或越岭线穿越岭口控制标高。路堑通过的地层,在长期的生成和演变过程中,一般具有复杂的地质结构。路堑边坡处于地壳表层,开挖暴露后,受各种条件与自然因素的作用,容易发生变形和破坏,应慎重对待。特别要注意处理好深路堑的设计,这是一项较复杂的技术问题。路堑边坡设计主要是确定断面形式和边坡坡度等问题,而路堑按通过的地层一般分为土质路堑和石质路堑。

而由于路堑是由原状土开挖得成,路堑边坡都具有一定的复杂性,无论是现场试验,模型试验,还是数值模拟。都得在不破坏(或者是有效模拟)原状土性质的情况下考虑多因素进行研究。从50年代开始,国内就已经对我国特有的黄土边坡进行研究,唐山铁道技术学院地质教研组[1]在《黄土路堑边坡问题》中根据我国黄土地层分布、成因类型、地貌特征、黄土岩性及物理力学性质、以及各类黄土的破坏特征,初步讨论了黄土路堑边坡的坡度和高度,根据黄土类型、层位条件、气候特征设计了黄土路堑边坡横断面的各种形式。探究了黄土路堑边坡变形种类及影响边坡稳定性的各项因素。赵学孟[2]于1957年发布的《黄土路堑边坡稳定性的初步研究》中初步分析了黄土地区的调查资料,研究了黄土边坡的破坏类型,及引起破坏的主要自然因素。得出结论为:粉质壤土的边坡一般是稳定的,不发生滑塌;土壤中碳酸钙含量极小,粘土粒含量多而节理发达者则易剥落;粗粉粒(>80%)的粉粒抗冲刷力极弱,在此种土坡上最易形成冲灌陷穴。南京大学的罗国焯等人[3]在70年代《关于边坡稳定性研究中的新构造分析方法》中认为,区域稳定性即构造稳定性,是以活动性断层的研究和评价为基础的。断层的活动性,将以地震、

小错动和蠕动的形式影响工程的稳定性。八十年代初西安公路科学研究所的赵学勤等人于针对黄土边坡的特点提出裂隙圆弧法。该方法认为,黄土中由于垂直节理的存在,以及高陡边坡坡脚受到很大的自重应力,发生不均匀变形等现象,都会导致坡顶出现成组的拉力裂隙。裂隙的平面分布呈与边坡坡肩线平行的圆弧状。目前来说,路堑边坡研究方法可分为可靠度分析法和确定性分析法两类。可靠度分析法适用于在特定条件下分析影响边坡稳定性的不确定因素,并得出边坡达到某一储备安全系数的概率,目前在国内外常用方法有:次二阶矩法、蒙特卡罗模拟法、响应面法等。确定性分析方法依据分析理论及采用手段的不同,可大致分为三种方法:极限平衡法、极限分析法及数值分析法。

随着我国的不断发展和对西部的大力开发,在黄土高原上开挖而形成的路堑边坡不断的出现并投入使用,对于黄土路堑各个方面的研究在近期内也不断的重视起来。胡晋川[4]等人依托阎良-禹口高速公路高边坡工程,对原状土黄土阶梯路堑边坡模型进行了离心试验以研究高边坡的变形发展过程和破坏特征。并采用有限元分析软件 ANSYS 对阶梯状高路堑边坡进行稳定性分析,通过对比分析深入研究了黄土公路阶梯状高路堑边坡的破坏特征以及稳定性。赵兴凯[5]将位于半干旱黄土区的吴起县作为代表性研究区,以陡峭路堑边坡为主要研究对象,通过大量现场实验和抽样调查的方式研究了半干旱区路堑边坡分布及侵蚀特征,采用对比试验探明半干旱黄土区路堑边坡植被构建方法,最终证实路堑边坡进行植被恢复重建的必要。陈洪江[6]等人分析了降雨对黄土边坡稳定性的不利影响,提出了考虑降雨作用的黄土边坡稳定分析方法,并以山西省临离高速公路第三合同段 k70+465 处为工程背景,运用非饱和土强度理论和有限元强度折减法进行数值模拟分析,研究了降雨强度、降雨时长、雨型和土体渗透系数对边坡稳定性的影响,从而揭示边坡受降雨作用下的瞬态变化过程。

总的来说,数值模拟可以程序可以模拟出路堑原状土的各种形式,通过非饱和土渗流计算和有限元强度折减法耦合,在短时间内得到路堑边坡的破坏滑动面和强度储备安全系数,并且可以进行位移的预测。通过现场试验,室内试验和数值模拟三种方法对黄土路堑边坡进行研究,再通过统计学等多种方法对工程实际存在的黄土边坡现状进行总结归纳,可以对黄土路堑进行有效分析。

### 3. 黄土边坡冲刷相关研究

黄土高原土层深厚,土体多为接触式支架结构,多孔松散,且植被稀少,抗冲刷能力较差,且长期以来人类滥垦、滥伐,对土地不合理利用,破坏了生态环境,再加上暴雨集中,致使黄土高原已经成为我国乃至世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区之一。近年来由降雨径流所造成的水力侵蚀引发了大量的坡面泥石流和坡面深度冲刷,造成了严重的水土流失,边坡冲刷破坏的问题非常严重,给人民的生活和行车安全带来了严重威胁。

边坡冲刷是指,在降雨和坡面水流的共同作用下,边坡表面遭到破坏,从而导致坡面表层土体颗粒及其他地面组成物质被分散、剥离和搬运的现象。它是一个复杂、连续的过程,在降雨过程中坡面一般会经历雨滴溅蚀、面蚀、沟蚀、洞穴侵蚀等阶段,再加上黄土垂直节理发育,极易渗水,如果任其发展,会引起滑坡、泥石流等灾害的发生。边坡冲刷是一个比较严重的问题,所以国内外的很多学者都对这个问题进行过研究: Wischmeier 和 Smith 在 1978 年提出的通用土壤流失公式(USLE)公式,该公式在预报侵蚀和设计抗侵蚀措施方面有广泛的应用价值,但用于预测土壤流失的误差可能高达 400%。在研究侵蚀的理论模型上,1985 年到 1900 年美国进行 WEPP (Water Erosion Prediction Project)的设计工作,其目的是创新模型以预测及防止土壤侵蚀。不过这些研究的坡面都相对较缓。国内学者也从不同侧面对边坡冲刷的理论研究也进行了相关研究。长安大学的沈波等[7]、张擎等[8]针对黄土边坡的冲刷问题开展了模型试验,根据观测资料分析了坡长、压实度、坡角等因素对黄土路堑边坡冲刷的影响;不过上述研究集中与经验模型,难以概括整个边坡冲刷的情况。李志刚、王春辉[9]在分析溅击和径流形成过程的基础上重

点描述了坡面径流力的计算方法及影响边坡冲刷的主要因素,初步分析了公路边坡水蚀冲刷产生的机理。罗斌等[10]从坡面流剪力和流速入手,建立了坡面冲刷的理论表达式并探究了边坡发生冲刷的条件。刘建明[11]同样利用能量原理,推导出了水力冲刷下土的冲刷量计算模型;李志刚等[12]在分析边坡径流水力学基础上,得出了降雨、路基横坡、路基高度等与冲刷临界高度的函数关系。不过黄土边坡冲刷因为各种因素的影响,是一个非常复杂且多变的研究课题,还需要进行进一步的研究。

而具体到冲刷研究和试验进行的过程上,降雨等气候条件很难在现场上进行直接控制,所以在实际试验的过程中,必须得进行模拟降雨或者是降雨边坡双重模拟。同时,如何判定边坡的抗冲刷能力,观察边坡在冲刷中的变形也是研究的要点。甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所[13]采用 Valentin (1978) 和 Asseline (1984)设计的降雨模拟装置,选择在兰州市南郊皋兰山的坡度较大、地面类型不同的三种坡地的黄土坡地上进行了一系列降雨模拟试验,以便评价雨水的入渗及水土流失情况。吴谦[14]等的研究中不仅是进行了降雨冲刷边坡试验,同时通过三维颗粒流软件 PFC3D 来对整个试验过程进行模拟,由此能够确定降雨冲刷对黄土边坡产生的影响情况。王鲜[15]等在其研究中采用了中科院水土保持研究所的仰喷式模拟降雨机来对降雨对黄土边坡冲刷情况进行模拟,针对四种不同坡率的黄土边坡坡面冲刷侵蚀情况进行了较为深入的探究,并探讨了导致坡面冲刷侵蚀破坏的三个机制,分别是吸水软化、降雨冲刷以及面沟切割机制。

综上所述,现有的黄土边坡冲刷研究的办法主要是进行模拟降雨或者是放水的方式冲刷边坡。通过对自然条件下边坡冲刷进行一定的简化与强调,再根据研究需求来实际的设计和制造所需要的降雨(放水)装置。由于冲刷过程很快,水流很急,在试验进行中边坡形状往往会发生高烈度的变化,所以需要精确的把握试验过程中的各种数据和图像资料的收集,再根据目前已有的研究成果来分析试验结果,从而得到背后的规律。

#### 4. 降雨相关研究

边坡所在地区的降雨情况对于边坡冲刷有着决定性的影响,根据现有研究可将降雨分为两类,即:非侵蚀性降雨与侵蚀性降雨。Wishmeier [16]通过对美国的年降雨进行统计分析,得出若某次降雨在 15 min 内降雨量达到或超过 6.4 mm,即可能成为侵蚀性降雨,在著名的通用土流失方程(USLE)和修正通用土流失方程(RUSLE)中皆应用了这一标准。在谢云、刘宝元[17]则是对陕西小流域的降雨过程资料进行了研究分析,建立了 12 mm 的黄土高原地区坡面侵蚀性降雨量标准,梁越、焦菊英[18]以降雨量和产沙累计比例拟合了黄土高原 20 个小流域多年的数据,认为黄土高原小流域产沙性降雨雨量标准应在 7.48~33.51 mm 范围内,且大部分小流域产沙性降雨标准要大于坡面侵蚀性降雨标准。我国侵蚀性降雨的平均值为 10 mm,但是由于我国各地自然条件和水土保持综合治理的情况不同,因此不同地区侵蚀性降雨标准差异较大。

而本文综述撰写与兰州地区,如若想开展关于边坡冲刷的研究工作,那就必须弄清兰州地区的降雨情况。马乾[19]采用了 Mam-Kendall 非参数检验, M-K 突发检验和 Morlet 小波分析等方法针对兰州地区 1951~2016 年 55 年的降雨情况和降雨变化进行了总结,得出兰州 69 年间降雨变化较为稳定,且降雨主要集中于 7~9 月;雨量上则主要以小雨为主,中雨较少,大暴雨屈指可数。朱晓霞[20]等人于 2019 年进行了研究。此研究在收集 1985~2015 年兰州市降雨型黄土滑坡历史数据的基础上,运用反距离权重插值(IDW)和核密度估算(KDE)方法揭示了降雨引发黄土滑坡的时空分布规律,并根据雨量设定了兰州降雨滑坡危险等级。

研究兰州边坡受降雨影响问题,一方面是要弄清兰州降雨特点,掌握其降雨量、降雨强度、降雨历时和雨滴特征等降雨特征。另一方面要将降雨特征和边坡冲刷、干湿循环等相关的黄土边坡研究进行结合,才能获得最好的研究效果。



## 5. 干湿循环作用下边坡相关研究

甘肃处于干旱 - 半干旱地区, 在此环境下发育的黄土常具有疏松多孔、对水敏感的特性。西北黄土地区降雨量小, 雨水多因地表径流流失, 入渗深度浅; 气候干旱, 空气湿度低, 蒸发速度快, 入渗水分常在雨后蒸发散失, 难以累积, 这就形成了一种特殊的干湿循环。而这样不断的干湿循环的过程中, 边坡表层土体的物理性质不断弱化, 最终威胁到黄土边坡整体的安全。

对于边坡干湿循环的研究通常和冲刷研究共同进行, 以边坡干湿循环为主的研究相对较为少见, 下面是一些典型的研究成果: 王国利等[21]通过离心机试验研究了干湿循环条件下膨胀土边坡的变形及稳定性, 分析了裂缝的发育过程和边坡失稳的原因。曹玲等[22]研究了干湿循环作用下三峡库区滑带土的强度特性, 并由此分析了千将坪滑坡的原因。刘义虎[23]等通过 8 组路基模型试验对干湿作用下膨胀土路基的破坏机理、破坏形式进行了研究, 并对不同的干湿循环顺序进行了对比。殷宗泽[24]等深入讨论了干湿循环造成的裂隙对膨胀土边坡稳定的影响, 分析了裂隙的产生、裂隙影响边坡稳定性的机理, 并提出了膨胀土边坡的加固方法和稳定性分析方法。崔激等[25]将膨胀土在干湿循环下的膨胀规律进行了试验研究, 并将其规律应用到膨胀土边坡稳定分析中。曾胜等[26]对红砂岩边坡在降雨及干湿循环下的稳定性进行了试验和理论分析。周健等[27]进行了膨胀土边坡模型试验。赵金刚[28]对膨胀土填方边坡进行了现场模型试验和数值模拟, 研究了降雨 - 蒸发循环作用下膨胀土填方边坡的裂隙发育规律和边坡破坏机理。张雅慧等[29]对黏性土在不同含水率和干湿循环次数下的抗剪强度参数进行了试验研究, 并将试验结果应用于边坡稳定性计算。郭威[30]对长沙高速路堤填料进行了干湿循环模拟试验, 并分析了路堤边坡的稳定性。朱泽勇等[31]对干湿循环作用下的模型红土边坡进行了为期一年半的监测, 探讨了干湿交替导致红土边坡破坏的破坏特征和机理。

从上文可以看出, 边坡干湿循环的研究主要集中于膨胀土边坡上, 由于黄土边坡相对于多雨的其他土体边坡受到单次干湿循环作用影响相对较小, 然而黄土边坡长期受到不断的降雨蒸发干湿循环的影响, 使得边坡表土的工程性质不断的弱化, 最终在大雨、暴雨的冲刷作用下导致表层土体滑动, 产生严重的水土流失, 甚至是滑坡、崩塌和泥石流这样的地质灾害, 所以关于黄土边坡受干湿循环影响的研究也是不可或缺的。潘振兴[32]等人以不同含水率的原状黄土为对象进行了不同次数的干湿循环试验, 并使用核磁共振技术来监测黄土内部裂隙发展的损伤演化, 结果表明在干湿循环过程中, 土体内部的集、散动态变化引发了黄土损伤, 而黄土内部微小孔隙随干湿循环次数的增加逐渐向大的微小孔隙过度, 同时新生孔隙开始产生。孙志杰[33]等人对山西省黄土在干湿循环作用下的变形情况进行了研究, 以对降雨干燥时对边坡破坏进行提前预防, 设计了可控降雨强度和干燥强度的模型箱, 并采用光纤光栅技术, 对不同工况下干湿循环各阶段边坡坡表进行监测对黄土边坡坡表变形演化规律进行分析。杜京房[34]等人为了研究干湿循环和降雨叠加作用对边坡稳定性的影响, 对太原市迎泽区黄土边坡进行了干湿循环试验, 并采用数值模拟软件计算边坡稳定系数。研究指出, 当降雨量一致时, 将降雨作用与干湿循环相结合来进行研究, 与单纯针对降雨作用这一因素进行研究相比, 前者所获得的安全系数降低了 47%, 与此同时, 边坡破坏时间会提前。

目前, 对于黄土路堑边坡受干湿循环作用影响的研究基本可以分为 2 类: 一类是原状黄土土体性质受干湿循环作用的影响研究, 另一类对干湿循环对路堑边坡整体或部分稳定性的影响研究, 两种类型的研究都取得了一定的研究成果。但是对比膨胀土边坡受干湿循环作用的研究就可以发现, 黄土边坡的此类研究还有很大的空间。

## 6. 结论

通过对上述论文的介绍和总结, 本人对路堑, 边坡冲刷, 边坡干湿循环该如何进行研究提出自己的

建议。

在路堑的研究上, 由于路堑是天然土体开挖而成, 在对路堑进行的过程中, 首选现场试验。而如若没有条件进行现场试验时, 可以使用模型试验和数值模拟结合分析进行代替, 在路堑模型试验过程中, 需要对制作工艺和模型边界进行严格控制, 以避免天然土体遭受扰动, 影响研究成果。而数值模拟则可以较好的模拟天然土体的物理性质, 对模型试验的成果进行补充。两者结合可以使得路堑的研究更加的全面具体。

在边坡冲刷的研究上, 首先要构建边坡冲刷模型, 制作降雨系统, 变形监测系统和泥沙收集系统, 在冲刷试验进行的过程中需对不同的坡率的边坡进行对比试验, 同时, 冲刷试验要尽量结合当地的降雨情况, 控制好冲刷时的降雨强度和降雨时长, 以保证成果的有效性和严谨性, 最后还需要确定如何量化边坡冲刷的程度。一般是通过边坡冲刷时的径流携沙量和边坡受冲刷所造成的变形来判断边坡冲刷的程度。同时, 此文献综述还对兰州地区有关边坡的降雨情况进行了总结: 兰州边坡冲刷破坏在夏季, 秋季的连日阴雨的作用下发生的可能性最高, 这一情况从过去到现在并没有太大的改变, 因此在进行冲刷实验时, 可以将连日阴雨的冲刷组设置成重点观察组, 以较好模拟兰州降雨情况。

在干湿循环的研究中, 数值模拟是一种较好的方法, 可以快速准确的对不同条件边坡的干湿循环情况进行多次模拟。但是甘肃黄土边坡地处干旱 - 半干旱地区, 长期的演化使得不同深度的原状黄土土层土体性质有较大差异, 所以黄土路堑边坡受干湿循环影响问题较为特殊和复杂, 必须进行室内或现场试验。在干湿循环实验中, 需要结合当地的气象情况, 模拟出当地干湿循环的状态, 并且通过如传感器在内的多种方法对边坡内部各项数据进行监测, 即可以保证模型边坡完整的进行了干湿循环, 又可以得出边坡土体内部的各项性质的变化趋势。

## 参考文献

- [1] 唐山铁道技术学院地质教研组. 黄土路堑边坡问题[J]. 唐山铁道学院学报, 1959(2): 1-28.
- [2] 赵学孟. 黄土路堑边坡稳定性的初步研究[J]. 同济大学学报, 1957(2): 99-110.
- [3] 罗国焯, 王培清, 蔡钟业, 等. 关于边坡稳定性研究中的新构造分析方法[J]. 工程勘察, 1981(3): 26-29.
- [4] 胡晋川, 谢永利, 王文生. 黄土公路阶梯状高路堑边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3093-3100.
- [5] 赵兴凯. 半干旱黄土路堑边坡表土干化及植被构建研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [6] 陈洪江, 韩珠峰, 周春梅, 等. 降雨条件下黄土路堑高边坡稳定性分析[J]. 公路, 2017, 62(2): 6-11.
- [7] 沈波, 艾翠玲, 徐岳, 等. 公路路基压实黄土坡面人工降雨侵蚀试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 11-14.
- [8] 张擎, 沈波, 艾翠玲. 黄土路基坡面侵蚀影响因素试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 20-22.
- [9] 李志刚, 王春辉. 公路边坡冲刷机理初探[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(3): 43-45.
- [10] 罗斌, 王秉纲, 胡厚田, 等. 路基边坡坡面冲刷基本理论[J]. 公路交通科技, 2002, 19(4): 27-29.
- [11] 刘建民. 基于能量法的路堤边坡冲刷量计算模型研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 21-24.
- [12] 李志刚, 张新宇. 基于能量法的土工构造物路堤边坡冲刷量计算模型研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 122-124+136.
- [13] 王靖泰, 陈瑾, M. 塔捷亚娜, 等. 兰州附近黄土坡地的降雨模拟试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993(3): 44-52.
- [14] 吴谦, 王常明, 宋朋燃, 等. 马栋和黄土陡坡降雨冲刷试验及其三维颗粒流流 - 固耦合模拟[J]. 岩土力学, 2015, 26(3): 41-45.
- [15] 王鲜, 倪万魁, 刘海松, 等. 黄土边坡坡面降雨冲刷破坏机制模拟试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 41-45.

- [16] Wischemier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture Handbook, No. 537, Washington DC.
- [17] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [18] 梁越, 焦菊英. 黄土高原小流域产沙性降雨标准分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 8-14.
- [19] 马乾. 兰州市降雨的变化规律及其分布特征[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州财经大学, 2019.
- [20] 朱晓霞, 张力, 杨树文. 降雨引发的兰州黄土滑坡时空规律分析和临界降雨量预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 24-31.
- [21] 王国利, 陈生水, 徐光明. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2005(4): 6-10.
- [22] 曹玲, 罗先启. 三峡库区千将坪滑坡滑带土干—湿循环条件下强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 93-97.
- [23] 刘义虎, 杨果林, 黄向京. 干湿循环作用下水对膨胀土路基破坏机理的试验研究[J]. 中外公路, 2006, 26(3): 30-35.
- [24] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.
- [25] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 24-27.
- [26] 曾胜, 李振存, 韦慧, 等. 降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1536-1540+1559.
- [27] 周健, 徐洪钟, 胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 152-156.
- [28] 赵金刚. 降雨-蒸发循环作用下膨胀土填方边坡稳定性及机理研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2013.
- [29] 张雅慧, 胡斌, 秦雨樵, 等. 含水率和干湿循环对人工填土边坡稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2014, 32(8): 65-67+99.
- [30] 郭威. 干湿循环对长沙高速典型填料影响及路堤边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [31] 朱泽勇, 贺桂成, 李丰雄, 等. 干湿交替条件下红土边坡破坏机理试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 35(2): 73-77.
- [32] 潘振兴, 杨更社, 叶万军, 等. 干湿循环作用下原状黄土力学性质及细观损伤研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1186-1192.
- [33] 孙志杰, 苗鹏勇. 干湿交替环境下黄土边坡坡表变形演化规律模型试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 117-123.
- [34] 杜京房, 仝飞. 干湿循环与降雨对黄土边坡稳定性的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(4): 783-791.