

# 特殊土与边坡技术发展综述

孔令伟<sup>1</sup> 陈正汉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北武汉 430071;

2. 后勤工程学院, 重庆 400041)

**摘要:** 简要介绍国内外特殊土与边坡研究的总体态势, 重点综述近年来我国在湿陷性黄土、膨胀土与红黏土等典型特殊土的基本性质与工程实践研究现状, 评述土质边坡研究取得的主要研究进展, 并指出当前特殊土与边坡研究领域存在的主要问题, 提出今后研究的主要趋势, 文末列出了较详细的有关文献。

**关键词:** 特殊土; 边坡; 湿陷性黄土; 膨胀土; 红黏土

**中图分类号:** TU44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2012)05-0141-21

## Advancement in the techniques for special soils and slopes

Kong Lingwei<sup>1</sup> Chen Zhenghan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** A brief introduction is provided on the overall trend of the global-wide research on special soils and slopes with a particular emphasis on the state of the practice in China on basic properties and engineering countermeasures for typical special soils such as collapsible loess, expansive soil and red clay. Recent achievements are pointed out as well as the major remaining problems in the field of special soils and slopes. The future research direction is also identified and a long list of relevant references is provided in the end of the paper.

**Keywords:** special soil; slope; collapsible loess; expansive soil; red clay

**E-mail:** lwkong@whrsm.ac.cn

## 引 言

我国广袤的国土上广泛地分布着湿陷性黄土、膨胀土、红黏土、多年冻土与盐渍土等特殊土类, 不仅表现出明显的区域性分布、独特的结构性效应, 还表现出其工程特性对水分迁移变化的敏感性、对温度变化的不稳定性、物理与力学特性的不一致性等, 这些都诱发其力学性状具有变动性, 在岩土工程的勘察与设计中都把其归结为岩土工程灾害易发多发的不良工程地质现象, 强调需要采取有效处理措施预防工程灾害发生。事实上, 土的物质源于岩石的风化, 物理风化影响土颗粒的大小, 化学风化影响土颗粒的矿物成分, 这都与气候条件相关; 而沉积环境与演化历史则对土颗粒之间排列形式与联结特征产生重要影响。作为一种应用最广泛的工程材料, 土的工程性能的决

定性内在要素与其他材料一样始终和其物质成分、结构特征及形成过程相关联, 这也正是土质学进行土性分析的基本出发点<sup>[1]</sup>。长期以来, 我国学者围绕各类特殊土的结构性、水敏性、热敏性或动力特性等开展了卓有成效的研究, 多位学者从各个角度与层面总结了特殊土的工程特性、理论模型、分析方法与测试技术的新进展<sup>[1-6]</sup>。地基处理学术委员会 2004 年在其成立 20 周年之际, 又组织同仁系统地总结了各种特殊土地基的地基处理技术<sup>[7]</sup>; 2008 年在北京召开的第一届全国岩土本构理论研讨会上, 专门设立特殊土的本构模型专题进行了深入研讨; 2009 年在西安召开了全国西部特殊土与工程学术研讨会, 深入探讨了特殊土力学与工程技术领域的发展趋势。国际上, 自 1995 年在法国巴黎召开第一届国际非饱和土学术会议以来, 又相继在中国北京(1998 年)、巴西累西菲(2002 年)、美国亚利桑那(2006 年)和西班牙巴塞罗那(2010 年)召开了一系列国际非饱和土会议, 研究对象多为特殊土。此外, 先后在英国诺丁汉(2003 年)、塞浦路斯法马古斯塔(2005 年)、马来西亚吉隆坡(2006 年)、澳大

基金项目: 国家自然科学基金(10872210)

作者简介: 孔令伟, 博士, 研究员

收稿日期: 2011-09-28

利亚阿德莱德(2010年)也召开了系列问题土(Problematic Soils)国际会议。可以说,发展特殊土的理论和技术是国内外岩土界研究的重要领域。

边坡稳定作为土力学三大经典问题之一,无论天然边坡还是人工边坡,在各种自然地质作用和人类活动等因素的影响下,边坡一直处于不断地发展和变化之中,常以发生滑坡为主要形式引发工程灾害。近年来,我国学者对边坡稳定性分析方法作了大量深入的理论探讨<sup>[8-13]</sup>,并系统总结了土质边坡进行稳定分析的原理和方法<sup>[14]</sup>。2008年第十届国际滑坡与工程边坡会议在西安召开,研讨内容涵盖边坡模型分析与预测、机理研究、监测与预警、地震、气候、水文地质影响滑坡、边坡稳定与防治工程、滑坡风险评价与管理等各个方面,充分展现了我国在滑坡研究和灾害治理方面取得的业绩。由于滑坡产生的条件、作用因素、运动机理的多样性、多变性和复杂性,预测的困难,治理费用的昂贵,特别是随着我国各类基础设施的大规模兴建,形成了滑坡的一个高发期,且总体上呈逐年加重的趋势。应该说,边坡是当今岩土领域的热点和难点研究课题。

第十一届全国土力学及岩土工程学术会议提交特殊土与边坡主题的论文共94篇,其中各类特殊土45篇,边坡49篇,涉及到土力学与岩土工程的方方面面。由于特殊土种类多,在相关土类已有系统综述<sup>[5-6]</sup>,边坡涉及面广,本文仅评述几种典型特殊土与土质边坡主要研究进展。

## 1 黄土力学与工程的研究现状和前沿课题

我国是世界上黄土最为发育的地区,分布广、厚度大、地层完整、地貌类型多且复杂。对黄土的研究由最初的基本性质、强度变形等在广度和深度上的变化规律研究,发展到黄土微结构特征、微结构与黄土结构强度及湿陷性的相关性、黄土在静动荷载作用下的应力应变关系和不同湿度密度条件下的振陷与动强度特性等诸多方面<sup>[2,15]</sup>。近年来,黄土地区基本建设数量剧增,规模空前,工程场地从低阶地向高阶地推进,工程活动改变了其应力环境和水环境,加之黄土地区地震频繁,遇到了一系列颇具挑战性的新课题。

### 1.1 大厚度自重湿陷性地基处理深度和剩余湿陷量的合理控制

所谓大厚度湿陷性黄土地基,是指厚度超过15m以至深不见底的湿陷性黄土地基。由于上覆压力的

增大,不仅 $Q_3$ 黄土具有湿陷性,而且 $Q_2$ 黄土也具有湿陷性。但目前黄土规范主要针对厚度不超过15m的黄土地基。按黄土规范,对甲类建筑要求消除全部湿陷量,若使用桩基础则要求穿越湿陷性黄土层,持力层太深,桩的长度大增,造价很高,下部桩段也不一定起作用;对乙类建筑,要求剩余湿陷量 $\leq 15\text{cm}$ ;对丙类建筑,要求剩余湿陷量 $\leq 20\text{cm}$ 。上述规定未能覆盖大厚度湿陷性黄土地基,究竟处理多深才能保证建筑物的安全?剩余湿陷量留多少才算合理?对大厚度黄土地基是否唯桩才行?这些都应当深入研究<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 大厚度湿陷性黄土地基的处理方法

目前处理深厚湿陷性黄土地基主要有4种方法:高能强夯、灰土/素土挤密桩、DDC(孔下动力夯实法)和预浸水。第一种方法处理深度在10m以内,第二种方法处理深度在15m以内,第三种方法处理深度可达30m,第四种方法原则上处理深度没有限制,造价低,但工期和停水后的疏干期长,且总的大面积预浸水试验数量仍然偏少,尚难以形成具较广普适性的认知。发展效率高、工期短、质量可靠的大厚度湿陷性黄土地基处理方法是一项重要任务。

### 1.3 自重湿陷性黄土场地中桩的摩阻力计算

按黄土规范,在自重湿陷性黄土场地,除不计自重湿陷性黄土层内的桩长按饱和状态下的正侧阻力计算外,尚应扣除桩侧的负摩阻力。文献<sup>[16]</sup>认为目前黄土规范对桩侧负摩阻力的规定主要适用于单桩中的短桩,对工程中的多数情况则过分夸大了负摩阻力的不利作用。虽然有学者对大厚度湿陷性黄土场地的负摩阻力有所研究,并对含有自重湿陷性黄土夹层的场地上群桩负摩阻力提出了计算方法<sup>[17-18]</sup>,但是单桩、多桩、群桩和长桩、短桩等的桩侧负摩阻力有何不同,如何考虑才比较合理,尚未有系统的共识。

针对自重湿陷性黄土场地中的桩基在地震作用下是否会产生负摩阻力的问题,王兰民等<sup>[19]</sup>开展了现场爆炸模拟试验研究,认为地震诱发黄土震陷时的桩基负摩阻力不容忽视,应当在桩基设计时加以考虑。

### 1.4 黄土高边坡的静动力稳定性

黄土地区是地震发生频繁的地区,烈度高,常引起的巨型滑坡和面积滑坡群,甚至倾角为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 的边坡也会失稳、震酥,亦可能发生饱和黄土的震陷和液化;灌溉导致地下水位上升也能引发大量滑坡。关于黄土的动力特性及工程抗震已有大量研究<sup>[20-21]</sup>,但尚未形成共识。在研究方法上,如何既借鉴土动力学中通常对砂土的研究,又考虑黄土的特殊性,即结构性、欠压密性、非饱和性以及由此表现出的各向异性与对水作用的特殊敏感性;如何既重视静、动力作用,

又更重视水作为广义作用力以及水与静、动力作用不同路径组合的影响,这些都值得深究。以往对黄土高边坡的稳定分析未考虑吸力的影响,应予以加强<sup>[22]</sup>。

此外,应加强不同年代黄土的稳定坡比、黄土高边坡的极限坡高及分级、适用于黄土高边坡的支护技术、高速远滑距黄土滑坡的成因与能量耗散机制及其预报等方面的研究。

### 1.5 原状非饱和和湿陷性黄土的本构关系与增湿变形

原状非饱和黄土具有较高的基质吸力和显著的结构性,在力和水的共同作用下具有湿陷性,其本构关系必须能反映这些特性。研究者近几年来在这一研究领域取得了诸多进展,如从土力学观点出发,提出了黄土的综合结构势概念,建立了黄土的结构性模型<sup>[23-24]</sup>;在复合损伤概念基础上,提出黄土的二元介质模型<sup>[25]</sup>;利用 CT-三轴试验,研究了  $Q_3$  和  $Q_2$  黄土在加载和湿陷过程中细观结构的演化规律,建立了基于细观结构变化的本构模型<sup>[26-27]</sup>。但上述模型,参数都比较多,需要简化。

考虑到黄土增湿并不一定达到饱和,存在黄土间歇湿陷的问题,业已研究了不同含水率下的增湿变形规律,并系统分析了黄土增湿变形性状<sup>[28-29]</sup>。但从本质上看,增湿变形就是非饱和黄土的本构关系问题,用非饱和土力学的理论和方法研究黄土是发展黄土力学的一个新趋向<sup>[2,28]</sup>。

### 1.6 支护结构上的土压力计算理论

随着黄土地区高层建筑深基坑工程和高切坡工程日益增多,支护工程费用急剧增加。土压力是作用在深基坑和高边坡的支护结构上的主要荷载。但原状黄土通常处于非饱和状态,吸力较大,结构性强,直立性好,按传统土压力理论计算的主动土压力过于保守。有关原状黄土土压力的计算理论有待研究,目前已在现场测试和细观结构方面进行了有益的探讨<sup>[30-32]</sup>,但距离实际工程设计直接应用尚有待深入研究。

### 1.7 黄土湿陷变形的实用计算方法

迄今共提出三种方法:规范方法、弦线模量法和以本构关系为基础的数值方法。规范法以单向湿陷系数为依据,不能反映应力状态和侧向挤出变形对湿陷变形的影响。弦线模量法把弹性理论与现场载荷试验相结合,是一种半理论半经验的方法,经大量工程验证,实测值与估算值比较一致<sup>[33]</sup>;但载荷试验的影响深度有限,变形与应力状态的关系不够明确,故该法的理论基础有待加强。陈正汉等根据洛川黄土的三轴浸水试验结果,提出了湿陷准则、三个广义湿

陷系数(包括湿陷体应变、湿陷偏应变和湿陷应变罗德角)和描述湿陷变形的非线性本构关系<sup>[34-35]</sup>,不仅能考虑球应力、偏应力与湿陷体应变、湿陷偏应变之间的交叉效应,还能反映黄土在湿陷过程中原有结构破坏、新的结构形成、软硬化相伴而生的结构变化规律,用其计算兰州钢厂的现场载荷浸水试验,其结果与实测湿陷量及其分布规律吻合很好<sup>[34]</sup>。以更复杂的本构模型为基础计算黄土的湿陷变形需要采用有限元法,在确定参数和计算透明度等方面有待改进。

## 2 膨胀土研究进展

近年来,除对膨胀土的判别分类方法进行探讨外,研究主线还是围绕膨胀土基本特性、试验方法、理论模型与灾害处治技术开展工作,总体动向是从非饱和土力学角度研究其强度、变形与渗流特性呈现主流趋势,重视模型试验与现场的长期试验研究,裂隙性的定量分析与描述明显增多,本构模型与数值模拟方法呈现多样化,半封闭为主新型柔性防护应用进一步扩大,且灾害处置紧密结合实际工程。但对埡坡超固结水平应力释放特征有效测试与定量分析,以及胀缩性-裂隙性-超固结性互馈机制研究还鲜见报道。

### 2.1 膨胀土的胀缩性

胀缩性是膨胀土工程病害的主要根源,其基本问题涉及胀缩机理、影响胀缩特性的因素、胀缩的各向异性等。其中,干密度、含水率、压力等因素对其胀缩影响规律已形成共识,已有人提出用物理化学中的渗透压理论及吸力势解释膨胀土的胀缩本质<sup>[1,36]</sup>。

在干湿循环的影响方面,研究者开展了大量的干湿循环对膨胀土变形的影响试验研究,认为胀缩变形并不可逆;基于在实际气候条件下,膨胀土含水率变化速率存在明显差异而引起其裂隙拓展与闭合性状不同,孔令伟等研究了脱湿速率影响下膨胀土的胀缩特性,分析了收缩方式对其变形与强度特征的影响,并论证出吸湿速率对胀缩特性的影响规律<sup>[37-39]</sup>。

在胀缩的各向异性方面,谢云等开展了南阳重塑膨胀土的三向膨胀力试验,指出三向膨胀力不等且水平膨胀力小于竖向膨胀力,湿胀干缩使其膨胀力降低,第一次干湿循环后膨胀力减小最多,膨胀力与位移呈对数关系<sup>[40]</sup>;姚志华等进行了无约束条件下的3次湿干循环试验,再对湿干循环后的裂隙膨胀土进行了控制围压和偏应力为常数的 CT-三轴浸水试验<sup>[41]</sup>。

研究工作已从单向胀缩到三向胀缩、从单纯吸湿和脱湿到干湿循环、从单一脱湿和吸湿到可控速率脱湿和吸湿、从均匀收缩到不均匀收缩不断深入,沿着

膨胀土在自然蒸发蒸腾和降雨吸湿的实际状态逼近。

## 2.2 膨胀土的强度特性

膨胀土的强度不仅存在尺寸效应,更具有显著的变动性与衰减特性,主要受裂隙性、含水率、干密度、吸力状态与应力历史等制约。孔令伟等认为裂隙发育的原状膨胀土工程性状同时受其含水率与裂隙性的双重影响,强度增减取决于是何种因素起主导作用;而击实膨胀土承载强度随其含水率的变化规律类似于击实曲线,但其峰值含水率大于最优含水率,并非压实度最大时承载强度也最大,主要取决于浸水膨胀后的含水率与干密度以及结构所处状态<sup>[42-43]</sup>。谭罗荣等则认为凝聚力主要与滑裂面土层的含水量有关,而内摩擦角主要与裂隙面上扁平颗粒的定向度有关,通过大量膨胀土的强度指标与含水量及干密度的试验关系,提出了一个简单实用公式<sup>[44]</sup>。针对脱湿速率、吸湿速率、干湿循环及次数、水化作用时间和温度对膨胀土强度的影响,也开展了诸多试验研究,并建立了其影响规律的经验公式<sup>[37-39,45-46]</sup>。罗冲等研究了不同约束状态下膨胀土膨胀后的强度特性,认为约束条件的解除过程也就是其强度迅速衰减的过程<sup>[47]</sup>。

用非饱和三轴仪研究膨胀土的强度特性已十分普遍。詹良通等<sup>[48]</sup>系统研究了吸力变化对非饱和膨胀土变形和抗剪强度特性的影响,认为吸力对抗剪强度的贡献可归结为使得土体中粒间有效应力增加与对土体剪胀势的贡献两种不同的机理。徐彬等<sup>[49]</sup>通过直剪和三轴试验研究了新乡膨胀土由无裂隙天然非饱和状态到裂隙充分发展的饱和状态过程中强度的影响因素和变化规律,指出含水率和裂隙对强度的影响较大,密度的影响较小。孔令伟<sup>[50]</sup>等类比分析了非饱和和原状膨胀土、石灰改良膨胀土与重塑膨胀土变形及强度特性的差异性。

关于膨胀土的抗剪强度理论,沈珠江曾指出双变量强度公式存在不足,从试验拟合的角度用广义吸力代替基质吸力,并认为广义吸力与强度之间不是简单的线性关系,提出双曲线关系式<sup>[51]</sup>;卢肇钧等提出非饱和土抗剪强度有真凝聚力、摩擦强度和吸附强度三个组成部分,提出用线性关系描述膨胀土的强度<sup>[52]</sup>;杨庆等把膨胀力与初始含水量相联系,采用初始含水量描述其吸附强度<sup>[53]</sup>;孔令伟等从非饱和土的吸附强度与吸力并非呈现线性变化关系出发,认为无需一定追求线性化的表达式,吸附强度随吸力的变化规律可用幂乘函数表述,大量非饱和直剪试验与三轴试验结果证实采用这种简单的经验曲线拟合切实可行<sup>[37,54]</sup>。

目前对有效内摩擦角是否随吸力变化还未形成共识,如何体现裂隙发展在膨胀土强度公式中的影响

作用尚需深入考虑。

## 2.3 膨胀土的渗透特性

膨胀土裂隙的存在为降雨入渗提供了便利通道,当处于低含水量高吸力状态时,膨胀土中的雨水入渗过程与非饱和土力学所描述的情况差别很大,此时已不能用连续介质理论来描述。现场试验表明,低含水量时膨胀土原位渗透系数的量级在砂性土的量级范围之内,具有强透水性,表明膨胀土的裂隙性会极大地影响其渗透性,降雨入渗和蒸发蒸腾过程中膨胀土所表现的渗透特性不同<sup>[55-56]</sup>。李雄威等采用常水头渗透试验方法研究膨胀土裂隙渗透特性,发现土样初始渗透系数最大,随后随着时间的延续,渗透系数逐渐降低并趋于稳定,建议用初始渗透系数反映土体裂隙的分布特性<sup>[57]</sup>。张家俊<sup>[58]</sup>通过室内试验研究了南阳膨胀土在反复干湿循环作用下的渗透特性,认为影响膨胀土体渗透特性的关键因素是试样中贯通渗径的裂隙长度。袁俊平等<sup>[59]</sup>建立了考虑裂隙的非饱和膨胀土边坡入渗的数学模型。

膨胀土的渗透性与裂隙性紧密相关,对其渗透特性的研究必须与裂隙的发生、发展和闭合过程相联系,不能单纯的建立在非饱和土力学的渗透理论上,膨胀土的渗透性研究必须体现其独特个性特征。

## 2.4 膨胀土的结构特征与本构模型

### 2.4.1 膨胀土的结构特征

多裂隙性是膨胀土的主要宏观结构特征,目前对其定量化描述与演化规律已取得进展。卢再华等对南阳原状膨胀土不同吸力下的三轴剪切试验表明,原生裂隙和软弱面是决定其强度的主要因素<sup>[60]</sup>。袁俊平等利用远距光学显微镜对重塑膨胀土中在自然风干条件下的裂隙发展变化进行了动态定量观测,发现裂隙图像的灰度熵可很好地表征裂隙的发育发展程度<sup>[59]</sup>。李雄威等<sup>[57]</sup>通过室外数码成像,用二值化像素统计方法对原状膨胀土表面裂隙率与含水量的关系进行了量化。张家俊<sup>[58]</sup>利用光栅图像矢量化技术对室内试验干湿循环作用下膨胀土的裂隙图像进行处理,探讨了其裂隙演化规律。现有的研究多以裂隙的平面定量描述方法为主,涉及三维描述方法还刚刚起步,特别是深度方向的裂隙描述很难定量,相关研究较少。

采用 CT 技术定量研究膨胀土的细观结构变化规律已为建立土的结构演化方程和结构性本构模型提供了依据。如卢再华等<sup>[61]</sup>应用 CT-三轴系统研究了膨胀土在多种应力路径和水分变化过程中的细观结构演化,表明 CT 技术可深化其细观结构性的认识。陈正汉等<sup>[26]</sup>依据 CT 数据,定义了描述膨胀土细观结

构的定量指标,提出了在多种工况下的微观结构演化方程。姚志华等<sup>[41]</sup>对湿干循环后的裂隙膨胀土进行了控制围压和偏应力为常数的 CT - 三轴浸水试验,定义了结构修复参数,提出了三轴浸水过程中的土样结构修复演化方程。至于膨胀土微观结构,采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、压汞仪(MIP)等测试技术,并结合数字化图像处理技术已有许多积累<sup>[1]</sup>,业已发展到定量研究阶段。但迄今对从宏观、细观到微观的跨尺度一体化研究与多尺度关联理论方法还涉及不多。

#### 2.4.2 膨胀土的本构模型

膨胀土是典型的非饱和土,目前提出的膨胀土本构模型主要是在非饱和土本构模型基础上不断改进而形成。陈正汉等<sup>[62]</sup>提出了一个较完整的非饱和土非线性模型,该模型可看作是饱和土的邓肯-张模型的推广;谢云等<sup>[63]</sup>在此基础上,通过对土性参数的修正和考虑温度本身引起的土的变形,提出了考虑温度影响的膨胀土抗剪强度公式,建立了考虑温度效应的重塑非饱和膨胀土的本构模型,分析了温度对土的强度和变形的影响,研究了模型参数的变化规律。

非饱和土弹塑性模型(BBM)为 Alonso 等人提出,但不能描述膨胀土的湿胀变形。Gens 和 Alonso 将膨胀土的变形分为宏观层次和微观层次,提出了适用于膨胀性非饱和土的框架性模型(G-A 模型),Alonso 对框架性模型进行了具体化,建立了膨胀性非饱和土的弹塑性本构模型(BExM)。卢再华等<sup>[60,64]</sup>对 G-A 模型做了简化与改进,并将裂隙膨胀土分为无损土部分和损伤土部分,借鉴复合损伤理论和扰动状态概念,建立了非饱和膨胀土的弹塑性损伤模型;曹雪山<sup>[65]</sup>改进了 BExM 模型参数的确定方法。但在 BExM 系列模型中,其微观参数及微宏观变形的转换关系确定非常困难,普通试验无法量测到微观层次的变形,模型参数较难确定,虽然可以预测土的变形和强度与定性描述膨胀土的胀缩特性,但都不能预测非饱和土的水力滞回特性,难以描述非饱和土持水特征与力学特性的耦合效应。

关于非饱和土水力-力学特性耦合的弹塑性模型,Wheeler 等<sup>[66]</sup>最早建议了一个能够统一描述非饱和土力学与水力滞后特性的弹塑性模型框架,但得出的屈服应力随吸力的增大而减小,与试验结果不符;缪林昌<sup>[67]</sup>推导出能够考虑饱和度变化的非饱和土本构方程。孙德安等<sup>[68-69]</sup>建立了非饱和土水力与力学性质耦合的弹塑性本构模型,韦昌富等<sup>[70]</sup>提出了一个塑性变形和水力滞后耦合的非饱和土本构模型。上述非饱和土水力-力学特性耦合的弹塑性模型基于 BBM

的框架,很难准确描述膨胀土干湿循环过程中的湿胀干缩效应,也难以描述毛细滞回对变形及其强度的影响。迄今对膨胀土水力-力学特性耦合的研究很少,孙德安等<sup>[71]</sup>开发和建立了可预测膨胀性非饱和土的水力特性和应力应变关系的弹塑性本构模型,但该模型不能模拟吸力循环下的滞回特性。应该说,目前膨胀土水力和力学特征的耦合性还尚不十分清楚。

由此可见,膨胀土的本构模型研究经历了在非膨胀性非饱和土本构模型基础上,加入水力-力学耦合、温度和膨胀性影响的发展过程。非膨胀性非饱和土弹塑性本构模型(如 BBM)不能描述膨胀土的胀缩特性,膨胀性弹塑性模型(如 BExM)较复杂,也不能统一考虑水力与力学特性的耦合;而非饱和土水力-力学特性耦合的弹塑性模型大多基于 BBM 的框架,很难准确描述膨胀土干湿循环过程中的湿胀干缩效应。

### 2.5 膨胀土的模型试验和大型现场试验研究

#### 2.5.1 物理模型试验

武明等<sup>[72]</sup>采用模型试验研究了土工格栅约束膨胀变形的效果与作用厚度。杨果林等<sup>[73]</sup>通过路基模型试验,研究压实膨胀土路基在积水、阴天、日照和降雨 4 种不同气候条件下路堤土温、含水量和土压力的变化规律。王年香等<sup>[74-75]</sup>研究了挡土墙、桩等与膨胀土地基的相互作用,模拟膨胀土地基浸水膨胀变形,得出深层浸水条件下膨胀土地基膨胀变形和含水率变化规律。汪明元<sup>[76]</sup>通过拉拔试验,对土工格栅与膨胀土的界面特性进行了研究。

#### 2.5.2 离心模型试验

围绕膨胀土边坡失稳的破坏机理,陈生水等<sup>[77]</sup>通过离心模型试验,研究了干湿循环下膨胀土边坡的变形和稳定性,分析了裂缝的发生和发展过程以及水分入渗对膨胀土边坡稳定性的影响;并针对稳定的新开挖膨胀土边坡随着时间推移发生失稳破坏的现象开展了试验研究,发现根本原因是由干湿循环所导致。徐光明等<sup>[78]</sup>完成了不同坡度的膨胀土开挖边坡离心模型试验,指出单纯放缓边坡坡度并不是防治这种破坏的最有效措施,重要的是做好隔水防水等处治工作;杨海鸣等<sup>[79]</sup>则研究了路基高度、拼接台阶断面尺寸、新路基边坡率等因素对新老路线的列车安全运营和路基稳定性的影响。程永辉等<sup>[80]</sup>开展了衬砌、换填黏性土+衬砌、土工格栅回填弱膨胀岩+衬砌 3 种处理方案的离心模型试验,并比较了换填黏性土不同厚度的影响。邢义川等<sup>[80]</sup>根据渠道地基的运行特点,对浸水条件下的膨胀土渠道地基进行离心模拟试验。

#### 2.5.3 大型现场试验

包承纲等<sup>[3]</sup>在南水北调中线工程渠道附近进行了

大型人工降雨试验,针对膨胀土地区边坡滑动形态具有浅层性和牵引性的特征,分析了失稳机理和原因,提出了有针对性的防治对策建议;詹良通<sup>[81]</sup>等在湖北枣阳市七方镇的大岗坡引唐提灌工程二级泵站处进行了膨胀土边坡人工降雨试验,布置有测斜管、沉降标、土压力盒等观测仪器,监测其变形和应力变化;试验区还布置有热传导探头、张力计、体积含水率探头等,监测降雨期间坡面的吸力与含水量变化。

黄绍铿等<sup>[82]</sup>在南宁市郊的一个天然膨胀土坡建立综合观测站,对不同深度的土层吸力、含水量、垂直向变形及气象进行了历时 2 年多的监测。龚壁卫、王钊等<sup>[83-84]</sup>在湖北枣阳七方镇的大岗坡引唐提灌工程二级泵站处采用了张力计、热传导探头及滤纸法吸力量测技术,对填方与挖方坡段不同深度位置土体吸力进行了为期 2 个月的观测。吴礼舟等<sup>[85]</sup>在湖北某膨胀土开挖边坡埋设热传导和含水量探头,以观察开挖边坡吸力和饱和度的变化规律,并与自然边坡的吸力和饱和度监测结果进行比较。

孔令伟等<sup>[55]</sup>在广西南宁地区建立了缓坡、陡坡与坡面种草 3 种类型膨胀土边坡的原位监测系统,采用小型气象站、土壤含水率 TDR 系统、烘干法、温度传感器、测斜管、沉降板和双环渗透仪等仪器和方法,跟踪测试了边坡含水率、温度、变形等随气候变化的演化规律;在此基础上,李雄威等<sup>[86-88]</sup>利用业已建立的边坡原位监测系统和设立的小型气象站,采取多种手段跟踪测试了膨胀土含水率、胀缩变形、变形模量和渗透特性随气候变化的演化规律,并深入分析了膨胀土壅坡雨水入渗速率与其初始含水率和降雨强度的相关关系。

上述模型试验和现场试验主要针对边坡工程,同时也会涉及土与结构物的共同作用,主要考虑多雨、炎热的气候条件以及极度干旱和连续降雨等极端气象环境。多场耦合与极端气象环境下膨胀土边坡的响应性状及其防护结构的相互作用已成研究的热点。

## 2.6 膨胀土边坡稳定性分析

膨胀土边坡失稳具有浅层性、牵引性、反复性、长期性、季节性、方向性等特征,目前采用的定量评价方法为极限平衡法和数值分析法。姚海林等开展了考虑膨胀土裂隙性的边坡稳定性分析,并对暂态饱和-非饱和渗流的情况下进行了参数研究,指出裂隙的存在对边坡中孔隙水压力和体积含水量分布及边坡稳定性有较大影响<sup>[89]</sup>。王文生等<sup>[90]</sup>针对弧面渐进破坏型膨胀土边坡,基于极限平衡法提出了可以满足施工初期或设计阶段精度要求的简便分析方法;黄润秋等基于极限平衡理论,讨论了吸力、分层及其边坡表层裂

隙对非饱和膨胀土边坡稳定性的影响<sup>[91]</sup>;殷宗泽等提出了一种以条分法为基础的近似反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法,具有实用性<sup>[92]</sup>。

采用数值方法分析膨胀土边坡的破坏模式、机理与安全系数具有显著优势。袁俊平等<sup>[59]</sup>用有限元数值方法分析了边坡地形、裂隙位置、裂隙开展深度及裂隙渗透特性等对边坡降雨入渗的影响;陈铁林等<sup>[93]</sup>分析了降雨入渗条件下全填筑和全开挖膨胀土路基变形的特征,获取了浸水后膨胀土路基内塑性区的发展过程;刘观仕等<sup>[94]</sup>利用平面应变有限元方法,分析了路面因路基土湿化膨胀和行车荷载作用所产生的不均匀变形性状;卢再华等<sup>[64]</sup>以提出的非饱和和膨胀土弹塑性损伤本构关系和弹塑性损伤固结模型为基础,设计了有限元程序 UESEPC,分析了非饱和膨胀土边坡在开挖和气候变化条件下逐渐发生失稳滑动的现象及其机理;陈建斌等<sup>[56]</sup>采用热湿耦合非等温流方程,结合实际蒸发和植物蒸腾的边界条件,通过考虑水分迁移所引发的非饱和土应力变形行为,建立了大气-非饱和土相互作用模型,采用理想弹塑性模型分析了在气候变化条件下,不同坡比和不同覆盖工况下非饱和膨胀土边坡的各种动态响应。其他数值方法方面,汪明元等<sup>[95]</sup>采用强度折减法分析了膨胀土边坡稳定性,并模拟了土工格栅加筋效果;黄润秋等<sup>[96]</sup>采用快速拉格朗日法研究了膨胀土路堑边坡浅表风化层、裂隙性及时间效应对滑坡机理及稳定性的影响。

针对膨胀土加固边坡的稳定性分析,李雄威<sup>[97]</sup>在考虑膨胀土湿热耦合性状和裂隙分布的基础上,结合植被的生理特征和力学特性,深入研究了植被护坡机理,讨论了浆砌片石和框锚结构防护系统的工作特性,并分析了锚杆框架梁的加固效果及坡率对膨胀土路堑边坡的影响;蔡剑韬等<sup>[98]</sup>探讨了土工格栅加筋开挖料处理膨胀土渠坡问题,论证了土工格栅与膨胀土的界面参数、土工格栅拉伸模量及回填土的强度等设计参数对吸湿条件下加筋效果的影响;梅国雄<sup>[99]</sup>运用邓肯 E- $\nu$  模型对抗滑桩加固膨胀土滑坡进行了有限元数值仿真,分析了湿化作用对加固后边坡的应力分布、抗滑桩应力与变形的影响。

数值分析方法已由单纯的雨水入渗、水分迁移、土体强度衰减发展到裂隙动态描述、多场耦合以及复杂边界条件等方面,但考虑影响因素并非越多越好,应抓住重点,以有效解决主要问题并方便实用为宗旨。

## 2.7 膨胀土工程处置技术

膨胀土处置的方法较多,加固技术也在逐渐发展,目前基本解决了工业与民用建筑所遇到的问题,但针对路基、边坡的加固与整治尚存在诸多病害。孔



令伟等结合我国大量工程实践的应用效果,从加固机理、适用范围与施工技术几方面对膨胀土地基处理技术进行了总结<sup>[100]</sup>。近年来主要针对高速交通与水利工程在压实控制、土质改良、包边封闭处理、土工合成材料应用与边坡支护等方面进行了大量工程实践。如通过分析膨胀土的 CBR 值随其膨胀潜势等级、含水量、压实功的变化规律和击实曲线的异同点,认为膨胀土路堤填筑除应考虑压实度与 CBR 值要求外,尚需考虑胀缩总率影响,提出膨胀土填筑含水量宜按较最佳含水量稍大并略低于塑限,干密度较最大干密度略低的标准控制方法,弱膨胀土可直接用来填筑上、下路堤<sup>[42-43]</sup>;在非浸水路堤地段,采用中膨胀土路堤石灰土包边处治方案,即路堤四周用石灰土包边处理与中间直接填筑中膨胀土,其可行性已为室内外试验所验证<sup>[100-101]</sup>;在以弱膨胀土为主、个别地段夹杂有中膨胀土的地段,采用膨胀土+石灰土+土工网分层填筑技术,即用弱膨胀土和石灰土交叉分层填筑上、下路堤,土工网作为路堤包边加强层,其有效性亦为原位试验与稳定性评估所证实<sup>[102-103]</sup>;结合试验路段确定施工工艺、控制参数与方法,通过改进配比将常用于底基层填筑的石灰砂砾土应用于上路床填筑<sup>[104]</sup>。

近年来,长江科学院在国家科技支撑计划项目的支持下,全面系统地开展了南水北调中线膨胀土(岩)地段渠道破坏机理和处理技术研究。其中,在南阳试验段的中膨胀土区布置了 7 个试验区,分别研究黏性土换填、换填水泥改性土、土工袋包裹中膨胀土开挖料回填、土工格栅包裹中膨胀土开挖料回填、复合土工膜保护措施,并设立了裸坡试验区。边坡表层为非膨胀土或水泥、土工袋、土工格栅改性土试验区均可视为“压重”方案处理,在 2 年运行期的大气降雨作用下,右坡变形较小,但左坡均产生了较大水平变形,认为压重方案处理的膨胀土边坡仍然存在稳定问题,有必要对裂隙强度控制下边坡稳定处理措施、膨胀土渠坡的长期稳定性等问题进一步研究<sup>[105]</sup>。

膨胀土边坡防护大多是表水防护、坡面防护与支挡防护三种方法结合使用,应用土工合成材料整治膨胀土路基基床与边坡浅层失稳已十分普遍,但对土工合成材料与土体相互作用的分析方法,尤其是其相互作用对土工合成材料变形的影响、土工合成材料长期使用性能与效果的合理评估还值得进一步探讨。在实际工程中,加强刚性法和柔性法的结合使用,尤其是以半封闭为主的新型柔性防护措施,特别是工程与植物防护结合的综合防护体系研究亦需深入,且应重点强化对中至强等级膨胀土堑坡的护坡技术方案与机制分析研究工作。

在膨胀土的各种土质改良法中,普遍存在如何能使添加剂均匀改良膨胀土与快速准确进行掺入料计量问题。因此,除需继续研究各种改良新方法(如膨胀土生态改性剂),类比物理改良法、化学改良法与综合改良法在不同工况下的适宜性与经济性外,加强其施工工艺的研究也十分必要。

除上述研究外,随着高速铁路的蓬勃发展,膨胀土及其改良土的动力特性备受关注<sup>[106-108]</sup>,主要以动三轴试验为主,现场测试也积累了一定数据,初步考虑了气候影响下膨胀土路基增湿对动力性能的影响,但理论模型与分析方法研究相对滞后,尚需加强。

### 3 红黏土研究现状与主要问题

红黏土的工程性质独特,具有不良物理性质与较好的力学特性;在被普遍认为是良好天然地基和较好路基填料的同时,却因其胀缩性、裂隙性与分布不均匀性等问题而存有很大的工程隐患,要求工程上给予单独的研究和评价处理。1994 年在第七届全国土力学及基础工程学术会议的综合报告-区域性土中<sup>[109]</sup>,对红黏土的研究进展进行了总结。检索十几年来的文献资料,发现与膨胀土的论文数量差距甚远,原因可能是一段时期以来有些地区从红黏土具有较高的自由膨胀率和胀缩总率为依据,将红黏土命名为膨胀土或膨胀性红黏土,从而采用类似膨胀土的方法进行设计与施工,导致红黏土研究工作和工程建设需求的驱动力相对不够强劲,多侧重其不利因素可能诱发的病害预防,而关注发挥其有利因素的应用潜能则不足。

#### 3.1 红黏土成因与微观结构特征

关于红黏土的成因研究,以往提出的代表性观点主要有:岩溶堆积成土观点、喀斯特成土作用说、碳酸盐岩黏土化观点、酸不溶物(准)原地堆积风化成土观点。目前仍然存在争议,如认为碳酸盐岩上覆红黏土并不是“碳酸盐岩风化壳”,而是由可溶性岩石经搬运-堆积作用在古岩溶面上形成的堆积物;又如认为碳酸盐岩地表岩溶作用和红土化作用是红黏土特殊成因中的两种最重要的地质作用<sup>[110]</sup>。从上述认识中,可以认为红黏土成因中有两个最主要的阶段,分别是以母岩经受岩溶的特殊地质作用阶段和溶蚀残余物经受红土化的特殊地球化学作用。

红黏土的微观结构与其红土化密切相关,其微观结构具有多层次特征,造成了红黏土发育孔隙,以小孔隙与微孔隙为主,同时也形成了一定的大孔隙与中孔隙。根据不同的微结构层次可以将红黏土的孔隙分为聚集体内孔隙、聚集体之间孔隙、被胶结物分割

所形成的聚合物之间孔隙与溶蚀孔隙四类。孔令伟等借用冷冻干燥备样与压汞仪测试手段,分析了不同干密度与含水率红黏土的孔隙结构特征,并类比了原状样与击实样的异同<sup>[111-112]</sup>;崔德山等通过氮吸附方法研究了 ISS 改良添加剂对红黏土微观孔隙的影响<sup>[113]</sup>。

红黏土的强度主要由游离氧化铁形成的胶结作用和颗粒间特殊的连接形式起的作用所决定已形成共识,但游离氧化铁的胶结作用会随环境因素变化而变化,且起胶结作用的只是其中的一部分,存在有效胶结现象<sup>[1]</sup>。目前,对胶结物的赋存状态尚有不同观点,大多认为是以包膜和桥的形式存在,而有人则认为是以极细的黏胶颗粒分布于土骨架颗粒表面或颗粒之间,具有独立的胶粒特性,并据此提出了一种凝胶胶结结构模型<sup>[1]</sup>。此外,一些学者分别针对不同地区红黏土,采用微观试验结果分析了其工程地质特性,加深了对土性的认识<sup>[114]</sup>。

目前对红黏土工程特性的微观机理论证仍然主要停留在定性解释与分析层面,如何进行定量评价还需要开展更深入的探讨。

### 3.2 红黏土力学性状的胀缩及裂隙效应

对红黏土的基本物理力学特性已有较清晰的认识,积累了丰富的参数资料。针对含水量与裂隙性对其工程特性的影响,赵颖文等<sup>[115-117]</sup>指出原状红黏土样经不同脱湿阶段的力学指标与胀缩性能在较高含水量范围内受吸力控制,在较低的含水量范围内主要受控于裂隙性;而击实红黏土的胀缩性能主要由含水量决定,同时受干密度的影响;并指出红黏土与膨胀土虽然在一些物理指标与胀缩特性具有相似之处,但其力学特性与水敏性特征具有明显的差异。黄质宏等通过对裂隙发育红黏土进行力学试验,提出了裂隙红黏土力学性质评价时应注意的事项,认为应力路径对红黏土强度指标与变形特征有较大的影响<sup>[118-119]</sup>。钱征宇<sup>[120]</sup>发现坚硬和硬塑状态的红黏土层在干旱气候条件下,坡面开挖后裂隙的发生和发展迅速,新开挖坡面数日内可被收缩裂隙切割得支离破碎,认为失水收缩引起工程病害的本质是因开裂引起强度的衰减。

红黏土地处雨旱交替频繁地区,开展吸力、温度与裂隙等变化对其工程特性影响的研究十分必要。谈云志等从非饱和土力学角度研究了压实红黏土的强度特性、湿化变形与水分传输的毛细效应<sup>[121-122]</sup>;欧孝夺等探讨了红黏土和膨胀土的抗剪强度指标与温度之间的相关关系,指出其热效应影响趋势相似,但红黏土的热力学特性较为敏感<sup>[123]</sup>;柏巍<sup>[124]</sup>通过模拟

红黏土裂隙的方法,开展了裂隙深度、长度、宽度、角度以及数量等参数对其电导特性的影响试验,分析了裂隙参数对红黏土电导特性影响敏感性,并探讨了用红黏土电导特性定量评价裂隙特征及演化规律的可能性。

总体上看,研究工作尚处于起步阶段,需要加强红黏土胀缩性与裂隙性的耦合互馈机理及定量描述方法、湿热耦合作用下的力学响应与灾害防治技术、典型气候条件与地段的红黏土现场试验研究。

### 3.3 红黏土地层的不均匀性与地基承载力

红黏土多覆盖于岩溶发育的基岩之上,土层厚度在水平方向变化很大,构成不均匀地基;在天然竖向剖面上,土层往往呈现上硬下软状态,这必然对工程建设产生较大的影响。现有的研究聚焦于分析水平方向厚度起伏变化与竖向剖面上物理力学指标的变化性状,统计分析工作较多。柏巍<sup>[125-126]</sup>等通过平板载荷试验与旁压试验获得了湖南某高速公路的红黏土地基承载力和变形模量值,发现在横向较小的范围内呈现较大幅度的变化,在垂向上则呈现先增大再减小的变化趋势;并采用可拓综合评测方法对红黏土地基承载力进行预测。廖义玲等讨论了中国南方红黏土工程属性的变化规律,强调在工程实践中,需要特别重视调查红黏土厚度的突变,以免产生不均匀沉降;分析红黏土中是否存在软土层,以防护可能所处的不利条件对软土与工程性质较差的岩土接触面带来不利影响,如抽取地下水改变水动力条件后,在岩土界面处产生较大动水压力使疏松的界面土层稳定性破坏而产生地面塌陷及土洞等灾害问题<sup>[127]</sup>。

在确定红黏土地基承载性能与变形计算参数时,如何评价其裂隙发育程度、上硬下软垂直分带性与厚薄不均水平起伏性的影响,以及在构筑物基础选型与地基处理方法中兼顾考虑,实为红黏土地基承载潜能充分发挥的瓶颈问题;目前以有限厚度、溶槽石芽相间处地基土的应力分布与变形特征为基础,以便于进行不均匀地基相应条件的定量评价还研究不多;迄今对红黏土地基沉降稳定监测历时不长,即使是在建筑行业也多为建成后半年至一年,需重视在荷载作用下的应力、变形及破坏机制时效性研究,以及加长沉降观测周期,以揭示地基承载潜能极限与适用范围。

红黏土路基的压实标准与便利施工问题长期困扰工程界,规范建议对于高含水量黏性土的压实问题,原则同意适当降低压实标准,但未提出明确的控制指标。谈云志等<sup>[128]</sup>针对某高速公路红黏土,从其强度(CBR值)、压缩性、胀缩性、渗透性等指标随压实度变化的规律着手,探讨了压实度降低的方法和标准



建议,但是否具有推广意义还需进一步积累,也需要结合气候变化跟踪测试路基不同层位的湿度变化与长期稳定性评估进行验证。

## 4 土质边坡研究现状浅析

从总体上看,近年来的边坡研究正从二维稳定性分析逐步向更加符合真实状况的三维分析迈进,由地震引发的边坡灾害而产生的动力稳定性分析方法与理论逐步完善,室内模拟测试技术向趋于反映边坡原型真实状态与响应的方向发展;边坡防治与防护措施不断规范化与标准化,也越来越重视对环境的保护。同时,随着相关高新技术及其产品的出现与应用,边(滑)坡的监测技术正由过去的简易人工观测向着自动化、高精度及远程监控方向发展,并在滑坡的灾害预警预报方面出现了许多新的思路与方法。

### 4.1 坡稳定性分析

#### 4.1.1 边坡静力稳定性分析

极限平衡法是迄今发展最为完善与应用最普遍的方法,目前侧重于对各种经典方法的数值算法和收敛性与由二维扩展至三维等问题分析上<sup>[9-14]</sup>,并以此为基础研究极限平衡的通用条分法。陈祖煜等<sup>[14]</sup>提出计算步骤简单、理论基础更为严密,同时收敛性较好的三维极限平衡分析方法。朱大勇等<sup>[11]</sup>提出了满足平衡条件的准严格法和严格法的三维极限平衡条分法。郑宏等<sup>[12]</sup>则在二维无条分法的基础上,实现了满足所有平衡条件的三维极限平衡无条分法。临界滑裂面的搜索方法有多种,各种优化方法在搜索最危险滑面中的应用近年来得到了快速发展,但在实际工程领域中的应用还很有限。边坡稳定三维分析方法目前还未形成较成熟的安全系数求解和临界滑面搜索定位方法,大部分成果还只局限于研究领域,远不能满足工程实际的需要<sup>[129]</sup>。

与极限平衡条分法不同,极限分析法具有严格的理论基础。殷建华等<sup>[130]</sup>将刚体有限元法与极限分析上限解法相结合,求解了考虑孔隙水压力条件下土坡稳定的安全系数,丰富了有限元极限分析方法。陈祖煜等则在二维多块体极限分析上限解的基础上,引入两个重要假定,提出了一种构造任意形状滑动面 and 进行临界滑面搜索的最优化算法<sup>[14]</sup>,孙平<sup>[131]</sup>在此基础上,提出了建立在非关联流动法则基础上的三维极限分析法。极限分析法建立在材料理想刚塑性、微小变形以及相关流动法则三个基本假定基础上,但要描述实际岩土材料的本质属性,并全面满足静力方程、运动方程与相应边界条件的解答则不现实。

由于有限元强度折减法的边坡安全系数求解与其失稳判据密切相关,且计算过程中能够得出边坡体的破坏过程及其临界状态时边坡体的应力与变形信息,近年来成为研究热点,并深入探讨了其失稳判别标准和临界滑面的确定方法。郑宏<sup>[132]</sup>通过理论证明在对强度参数进行折减的同时,还应对弹性模量和泊松比同时进行相应的调整。郑颖人等深入研究了有限元强度折减法的计算精度及其影响因素与边坡破坏判据,并提出了基于强度折减的极限分析有限元法<sup>[133-134]</sup>。除有限元方法外,还发展了诸如非连续方法和非确定性方法等其他数值方法<sup>[135]</sup>。而与上述方法均不同的是,葛修润<sup>[9]</sup>则提出了一种新的边坡稳定性分析方法“矢量和法”,即可与有限元、边界元、离散元等数值分析方法相结合,也可与极限平衡法相结合,近年来得到了一定的发展<sup>[136]</sup>。

应该说,边坡静力稳定性分析的各类方法均得到了不同程度的发展,但各类方法均有其各自的适用条件。极限平衡法还不同程度的存在数值收敛问题<sup>[135]</sup>,对较复杂土层及土工结构加固的边坡,计算较困难;极限分析法的基本假定与岩土材料特性不符,采用非线性屈服准则的有限元极限分析方法可能是该法进一步发展的方向;有限元法影响因素众多,很难给出其统一的通用标准,还有待于完善。因此,根据边坡破坏力学机制、变形破坏模式来选取适宜的分析方法才是稳定性评价的基本前提,采用综合性的方法分析实际工程中边坡稳定性是当前和今后发展的主要趋势。

#### 4.1.2 边坡地震稳定性分析

边坡地震稳定性分析与静力学分析方法存在较大的差别,沈建等曾对其进行过系统评述<sup>[137]</sup>。拟静力法已编入我国的有关规范中,Sarma法是较早考虑地震对边坡稳定性影响的拟静力刚体极限平衡法,目前的各种极限平衡方法大都借鉴此法来考虑地震对边坡稳定性的影响,但该方法不能考虑地震的时程特征。张林等<sup>[138]</sup>将地震时程特征与拟静力法结合,发展了考虑动荷载时程的极限平衡分析法。拟静力法虽然简单实用,但其缺陷也非常明显,关键是未能考虑地震动的频谱特性和持时影响。

由于拟静力法无法反映破坏面的相关变形信息,Newmark提出了有限滑动位移思想。祁生林等<sup>[139]</sup>基于剩余推力法,结合有限滑动位移法,提出了一种简单的计算地震动力永久位移的方法。Newmark滑块法对材料刚塑性的假设与实际不符,屈服加速度不是常量,土体强度在振动时也可能减小,针对这些不足提出了改进方法<sup>[140]</sup>。基于地震有限变形的分析方法

有逐步综合概率法研究的趋势,一些基于概率理论的半经验法在实践中得到有效的应用<sup>[137]</sup>。此外,基于滑体动力响应与地震动力响应相互耦合的耦合算法,揭示了地震永久变形的本质,也得到进一步的发展<sup>[137]</sup>。

数值方法能够较真实的模拟边坡在地震动作用过程中的动力特征和破坏机理,吴兆营等<sup>[141]</sup>通过静、动力有限元非线性分析,提出了一种根据安全系数时程进行稳定性判定的设想。刘汉龙等<sup>[142]</sup>根据有限元静、动力分析计算出每一时刻的边坡稳定安全系数,提出用最小平均安全系数进行稳定性评价的构想。有限元法已经成为岩土体动力分析中重要分析方法之一。FLAC 适宜于求解非线性大变形问题,也是研究边坡地震稳定性较好的数值工具,但其用于土质边坡地震稳定性的研究还相对较少。

边坡地震稳定性分析需要重点研究边坡体动态响应规律、破坏准则与影响深度的定量描述。

#### 4.2 边坡模型试验

研究边坡失稳破坏模式与形成机理的室内模型试验主要有降雨模型试验、离心机模型试验、振动台模型试验及离心机振动台试验等方法。为研究降雨型滑坡的形成机理,在室内自制人工降雨系统,较系统的研究了降雨与边坡失稳的关系及破坏规律。林鸿州等根据人工降雨边坡物理试验模型给出合适的雨量预警参数<sup>[143]</sup>;贾官伟等<sup>[144]</sup>对边坡在水位变化及水分入渗等情况下的响应进行了研究。人工降雨下的边坡物理模型试验在一定程度上揭示了水作用下边坡破坏的机理,但并不能模拟真实应力水平下边坡塑性区的开展及破坏过程,土工离心机模型试验可以克服这一缺点,因而得到了广泛的研究。孟庆山等<sup>[145]</sup>开展了高速公路高填方路堤拼接离心模型试验研究,验证了压实度提高及填料改性能够减小路堤的差异沉降,并对其机理进行了分析。张嘎等<sup>[146]</sup>进行了土工织物加筋土坡的离心模型试验,得出土工织物对边坡变形及破坏的影响规律。

人工降雨与离心机相结合的方法目前已成为室内研究边坡破坏机制的重要发展趋势。钱纪芸等<sup>[147]</sup>设计了人工降雨系统下的离心模型试验,分析了降雨对边坡稳定性的影响机制。除降雨外,地震作用是导致边坡失稳的另一个重要诱因。振动台试验因其可灵活考虑振幅、方向等,很多学者利用该方法对边坡进行了较深入的研究。徐光兴等<sup>[148]</sup>设计并完成了1:10比尺的边坡大型振动台模型试验,研究地震作用下边坡动力特性与动力响应规律。为研究地震作用下加筋边坡的动力响应,孔宪京等<sup>[149]</sup>利用振动台进行了一系列大尺寸边坡模型试验,再现了地震时边坡

的破坏过程,揭示了边坡在地震作用下的失稳机制。动力离心模型试验技术被公认是目前研究岩土工程地震问题最有效、最先进的研究方法和试验技术。张建民等<sup>[150]</sup>进行了电液伺服控制离心机振动台系统的研制,于玉贞等则利用离心机振动台在抗滑桩加固砂土边坡的抗震效果及桩土相互作用规律方面进行了系统的研究<sup>[151]</sup>。

随着离心机种类的增加、试验尺寸加大以及模拟技术水平的提高,其研究将会有更为深入的进展。

#### 4.3 边坡灾害防治技术

影响边坡稳定的因素不但包括坡体本身的力学性质、软弱结构面、裂隙以及地质作用等内部因素外,还包括渗水浸泡、降雨、地下水位升高、超载、坡脚开挖、爆破震动以及地震等因素,边坡失稳大多是上述多种因素共同作用的结果,有针对性的选择合理经济的防治措施十分重要。王恭先<sup>[152]</sup>从总体上阐述了我国滑坡防治中的关键技术及处理方法,并提出了滑坡防治的若干原则,如以预防为主,防重于治。治理强调统一考虑边坡稳定的各影响因素,并且要根据各影响因素所起的作用,按照有先有后、有主有次、有选择性的对滑坡进行综合防治。

边坡防护除采取排水、抗滑、支挡、改良等工程类防护或加固措施外,往往还同时使用植物类防护来起到防表土冲刷、固坡和美化环境的效果。目前已形成各行业的边坡勘察设计规范,对各类工程中的边坡防治防护工作基本上做到了有据可依。各类边坡防治与防护措施可大致划分为工程类、植物类和综合类三种。其中,工程措施主要有排水、坡面防护、支挡以及注浆加固等,由于措施的多样性,如何对其方案比选与技术参数优化已成为应用研究的重点之一<sup>[153]</sup>。

针对不同地区的边坡土质和气候条件,已系统研究了植物固坡与防护的机理以及各自的适用范围,并提出了适合当地的植物防护形式和施工方法。但受植物类防护只能防止坡面冲蚀和表层土体溜塌所限,植物固坡必须在边坡稳定的基础上使用,或者与工程防护组合使用。

综合类措施是许多重大工程边坡防护的主流方案,但对其定量的共同作用机理与评价方法以及成套的设计、施工、验收标准尚未建立。此外,各种组合措施方案的比选与优化同样是工程应用的关注焦点。

#### 4.4 边坡监测与灾害预测预警技术

##### 4.4.1 边坡监测技术

边坡的监测技术多种多样,传统方法如大地测量、简易观测等方法已比较成熟,并能基本满足实际需要,但在数字化、自动化方面则存在明显缺陷。新

兴的同轴电缆、光纤等材料为边坡稳定的实时与长期高效的监测提供了技术支撑,在监测中将发挥越来越重要的作用。梁志刚等<sup>[154]</sup>在室内研究同轴电缆的剪切变形对 TDR 波形的影响下,提出了该技术应用于滑坡现场监测的方法,通过现场监测利用该技术可准确确定滑动面位置。王宝军等<sup>[155]</sup>为解决光纤实际应用中易断、变形不协调等问题,将其植入常用的土工合成材料,通过室内小比例尺模型试验初步验证了该方法应用于土质边坡变形监测的可行性。裴华富等探讨了光纤光栅、布里渊光时域分析和低相干干涉的光纤传感技术等在现场监测的应用,实现了边坡位移及支护结构的应力变形自动化监测<sup>[156]</sup>。目前,光纤传感技术还多处于室内模型试验阶段,在实际边坡监测中应用尚不多,但具有良好的应用前景。

以 GIS 为平台,以 GPS 和 RS 为数据采集方法的 3S 空间远程自动监测系统逐渐成为灾害监测的重要技术方法,而 GPS 系统在边坡工程监测中得到了比较深入和成熟的应用。王威<sup>[157]</sup>等对基于 GIS 技术的滑坡监测及预警系统进行了较深入的研究。合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)是近年来国际遥感界的研究热点,它不但可以及时监测滑坡的发生,同时还可以有效评估滑坡的灾害及风险,我国对其在滑坡监测中的研究尚处于起步阶段<sup>[158]</sup>。此外,近景摄影测量法、激光技术、瑞利面波法、测量机器人等也开始应用到边坡监测和滑坡预测中<sup>[159-160]</sup>。

运用新兴的“3S”及 InSAR 技术进行边坡监测和地质灾害预报已越来越受到重视,但如何以 GIS 为平台,依靠其数据处理分析功能,对滑坡影响因素的遥感影像特征分析、滑坡形成条件及影响的 GIS 空间分析,以及如何实现 GPS 及 InSAR 监测数据与 GIS 系统的实时共享,并进行滑坡位移等要素的跟踪和预报,则是进行技术集成应用中需要解决的重点课题。

#### 4.4.2 边坡灾害的预警预报技术

基于变形监测资料及滑坡敏感因子等,借助多种新兴技术,形成滑坡预警预报系统是减灾防灾的重要方向。刘传正等<sup>[161]</sup>初步建成了四川雅安地质灾害监测预警试验区,根据降雨资料的反演结果表明“危险度”可作为预警指数。王东<sup>[162]</sup>选取黄土地区西气东输重点地段为研究区域,研发了黄土地区滑坡预警模型和监测预警系统,初步达到了滑坡监测预警的目的。田宏岭<sup>[163]</sup>以重庆万州区为例,研发了以降雨资料为基础,适合基层减灾防灾工作的降雨滑坡预警平台系统,并进行了初步验证与应用。随着 GIS 等在滑坡预警预报方面的应用,在总结前人成果的基础上已形成共识,认为需通过岩土力学、工程地质和气象学

的整合研究才能够提高滑坡预警预报的准确率<sup>[164]</sup>。谭万鹏等<sup>[165]</sup>提出了动态、多手段、全过程的滑坡预警预报的研究思路。殷坤龙等利用 MapGIS 软件平台进行二次开发,建立了基于 ArcGIS 的滑坡灾害信息管理系统和实时预警发布系统<sup>[166]</sup>。但目前尚未形成精确的边坡灾害预警预报系统,还主要依靠现场监测和经验进行预测。

## 5 结语

我国特殊的地理位置跨越寒带、寒温带、温带、亚热带和热带各个气候带,各类特殊土分布具有得天独厚的优势,地质环境复杂多变性致使边坡失稳破坏频发。伴随着我国工业化和城镇化的历史进程,各类重大工程建设高潮迭起,为开展特殊土与边坡研究创造了十分有利的条件。在过去的岁月里,我国在特殊土与边坡研究中已积累了极为丰富的经验与技术资料,取得了一批有影响力的研究成果,并在国际岩土界占有一席之地。相信在未来的理论研究与工程实践中,我国在该领域会取得更多更好的创新成果,推动土力学学科的发展,促进岩土工程的技术进步,为国家各类基础设施建设提供强有力的科技支撑。

致谢:本文在撰写过程中,王恭先研究员、王勇博士、李雄威博士与谈云志博士提出了宝贵意见,谨表感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 谭罗荣,孔令伟.特殊岩土工程土质学[M].北京:科学出版社,2006
- [2] 谢定义.试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J].岩土工程学报,2001,23(1):3-13(Xie Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(1):3-13(in Chinese))
- [3] 包承纲.非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J].岩土工程学报,2004,26(1):1-15(Bao Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(1):1-15(in Chinese))
- [4] 陈正汉,孙树国,方祥位,等.非饱和土与特殊土测试技术新进展[J].岩土工程学报,2006,28(2):147-169(Chen Zhenghan, Sun Shuguo, Fang Xiangwei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(2):147-169(in Chinese))
- [5] 马巍,金会军.正在变暖的地球上的多年冻土——2008年第九届国际冻土大会(NICOP)综述[J].冰川冻土,

- 2008, 30 (5): 843-854 (Ma Wei, Jin Huijun. Permafrost on a warming planet—summary review of the Ninth International Conference on Permafrost in 2008 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30 (5): 843-854(in Chinese))
- [6] 胡昕,张希宏,刘厚健. 盐渍土工程特性的研究现状与展望[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2011,47(S):54-57 (Hu Xin, Zhang Xihong, Liu Houjian. Recent development and prospects of engineering properties of saline soils[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 2011,47(S):54-57(in Chinese))
- [7] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [8] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1-11 (Chen Zuyu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (1): 1-11(in Chinese))
- [9] 葛修润. 岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时 X 射线 CT 扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 1-20(Ge Xiurun. Deformation control law of rock fatigue failure, real-time X-ray CT scan of geotechnical testing, and new method of stability analysis of slopes and dam foundations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 1-20(in Chinese))
- [10] 朱大勇,钱七虎. 三维边坡严格与准严格极限平衡解答及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1513-1528 (Zhu Dayong, Qian Qihu. Rigorous and quasi-rigorous limit equilibrium solutions of 3D slope stability and application to engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (8): 1513-1528(in Chinese))
- [11] 朱大勇,丁秀丽,钱七虎. 一般形状边坡三维极限平衡解答[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1460-1464(Zhu Dayong, Ding Xiuli, Qian Qihu. Three-dimensional limit equilibrium solution to generalized-shaped slope stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1460-1464(in Chinese))
- [12] 郑宏. 严格三维极限平衡法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1529-1537 (Zheng Hong. A rigorous three-dimensional limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (8): 1529-1537(in Chinese))
- [13] 郑宏,周创兵. 三维边坡稳定性的整体分析法及其工程应用[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 2009, 39(1): 23-28
- [14] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003(Chen Zuyu. Soil slope stability analysis—theory, methods and programs[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003 (in Chinese))
- [15] 邢义川. 黄土力学性质研究的发展和展望[J]. 水力发电学报, 2000(4): 54-65 (Xing Yichuan. Development and looking ahead of loess mechanics [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000(4): 54-65(in Chinese))
- [16] 汪国烈. 对湿陷性黄土场地地震作用工程影响的几点看法[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 96-98(Wang Guolie. Some opinions on effect of engineering under earthquake action in site of collapsible loess [J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 96-98(in Chinese))
- [17] 黄雪峰,张广平,姚志华,等. 大厚度自重湿陷性黄土湿陷变形特性水分入渗规律及地基处理方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 100-108 (Huang Xuefeng, Zhang Guangping, Yao Zhihua, et al. Research on deformation, permeability regularity and foundation treatment method of dead-weight collapse loess with heavy section [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2): 100-108(in Chinese))
- [18] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338-346 (Huang Xuefeng, Chen Zhenghan, Ha Shuang, et al. Research on beating behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (3): 338-346(in Chinese))
- [19] 王兰民,孙军杰,黄雪峰,等. 黄土场地震陷时桩基负摩阻力的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 341-348 (Wang Lanmin, Sun Junjie, Huang Xuefeng, et al. Field tests on negative skin friction along piles caused by seismic settlement of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 341-348(in Chinese))
- [20] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003 (Wang Lanmin. Loess dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003(in Chinese))
- [21] 王恭先. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004
- [22] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312 (Xu Zhangjian, Lin Zaiguan, Zhang Maosheng. Loess in China and loess landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312(in Chinese))
- [23] 谢定义,齐吉琳,张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35-41 (Xie Dingyi, Qi Jilin, Zhang Zhenzhong. A constitutive laws considering soil structural properties [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 35-41(in Chinese))

- [24] 邵生俊,陶虎,许萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 42-50(Shao Shengjun, Tao Hu, Xu Ping. Discussion on research of mechanical characteristics of loess considering structural behavior and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 42-50(in Chinese))
- [25] 沈珠江. 二元介质模型在黄土增湿变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 129-134 (Shen Zhujiang. Application of binary medium model in deformation analysis of loess during wetting [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 129-134 (in Chinese))
- [26] 陈正汉,方祥位,朱元青,等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 1-11 (Chen Zhenghan, Fang Xiangwei, Zhu Yuanqing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 1-11(in Chinese))
- [27] 朱元青,陈正汉. 原状  $Q_3$  黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT-三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1219-1228 (Zhu Yuanqing, Chen Zhenghan. Experimental study on dynamic evolution of meso-structure of intact  $Q_3$  loess during loading and collapse using CT and triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1219-1228(in Chinese))
- [28] Chen Zhenghan, Huang Xuefeng, Xing Yichuan, et al. On engineering properties and mechanics theory of loess [C]//Proceedings of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils. Beijing: Science Press, 2007: 69-84
- [29] 邢义川,汪小刚,张爱军,等. 非饱和特殊土增湿变形理论及在渠道工程中的应用 [R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2009
- [30] 黄雪峰,李佳,崔红,等. 非饱和和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 500-506 (Huang Xuefen, Li Jia, Cui Hong, et al. Distribution characteristics of earth pressure for unsaturated intact loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 500-506 (in Chinese))
- [31] 李加贵,陈正汉,黄雪峰,等. 原状非饱和  $Q_3$  黄土的土压力原位测试和强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 433-440 (Li Jiagui, Chen Zhenghan, Huang Xuefeng, et al. In-site test on earth pressure and saturating collapse test for unsaturated loess  $Q_3$  on high slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 433-440(in Chinese))
- [32] 李加贵,陈正汉,黄雪峰,等.  $Q_3$  黄土侧向卸荷时的细观结构演化及强度特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1084-1091 (Li Jiagui, Chen Zhenghan, Huang Xuefeng. CT-triaxial shear tests on the meso-structure evolution and strength of unsaturated loess  $Q_3$  during unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1084-1091(in Chinese))
- [33] 焦五一,赵树德,郭志恭,等. 弦线模量原理和黄土增湿的计算软件[C]//中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册). 重庆:重庆大学出版社, 2007: 606-614
- [34] 陈正汉,刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1-12 (Chen Zhenghan, Liu Zudian. Mechanism of collapsible deformation of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 1-12(in Chinese))
- [35] 陈正汉,许镇鸿,刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报, 1986, 19(3): 86-94 (Chen Zhenghan, Xu Zhenghong, Liu Zudian. Some problems on the collapsed of collapsible loess[J]. China Civil Engineering Journal, 1986, 19(3): 86-94 (in Chinese))
- [36] Tan Luorong, Kong Lingwei. Study of swelling-shrinkage regularity of montmorillonite crystal and its relation with matric suction [J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2001, 44(6): 498-507
- [37] 孔令伟,李雄威,郭爱国,等. 脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 335-340 (Kong Lingwei, Li Xiongwei, Guo Aiguo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 335-340 (in Chinese))
- [38] 冯欣,孔令伟,郭爱国. 不均匀收缩方式对膨胀土工程性状影响试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 208-213 (Feng Xin, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Experimental study of impact of non-uniform shrinkage on engineering behaviors of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 208-213(in Chinese))
- [39] 李雄威,郭爱国,孔令伟,等. 吸湿速率对膨胀土工程性状影响的分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2008, 35(11): 154-157 (Li Xiongwei, Guo Aiguo, Kong Lingwei, et al. Preliminary analysis of expansive soil engineering behavior considering the effect of wetting rate[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2008, 35(11): 154-157(in Chinese))
- [40] 谢云,陈正汉,孙树国,等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1636-1642 (Xie Yun, Chen Zhenghan, Sun Shuguo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of remolded expansive clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1636-1642(in Chinese))
- [41] 姚志华,陈正汉,朱元青,等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中细观结构变化的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 68-76 (Yao Zhihua, Chen Zhenghan,

- Zhu Yuanqing, et al. Meso-structural change of remolded expansive soils during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 68-76 (in Chinese))
- [42] Kong Lingwei, Guo Aiguo. Bearing strength and swelling behavior of Jingmen expansive soil[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 12(2): 441-450
- [43] 孔令伟, 郭爱国, 陈善雄, 等. 膨胀土的承载强度特征与机制[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 54-61 (Kong Lingwei, Guo Aiguo, Chen Shanxiong, et al. Characteristics and mechanism of bearing strength of expansive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 54-61(in Chinese))
- [44] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1009-1013 (Tan Luorong, Kong Lingwei. Study on strength behavior of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1009-1013 (in Chinese))
- [45] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207-209 (Gong Biwei, Zhou Xiaowen, Zhou Wuhua. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 207-209 (in Chinese))
- [46] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3193-3198 (Li Xiongwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3193-3198(in Chinese))
- [47] 罗冲, 殷坤龙, 周春梅, 等. 膨胀土在不同约束状态下的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 635-638 (Luo Chong, Yin Kunlong, Zhou Chunmei, et al. Testing study on expansive soil in different restrained conditions [J]. Rock and Soil Mechanics. 2007, 28(3): 635-638 (in Chinese))
- [48] 詹良通, 吴宏伟. 吸力对非饱和膨胀土抗剪强度及膨胀特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 82-87 (Zhan Liangtong, Ng Charles W W. Effect of suction on shear strength and dilatancy of an unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 82-87(in Chinese))
- [49] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50 (Xu Bin, Yin Zongze, Liu Shuli. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44-50(in Chinese))
- [50] 孔令伟, 周葆春, 白颖, 等. 荆门非饱和和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3036-3042 (Kong Lingwei, Zhou Baochun, Bai Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3036-3042(in Chinese))
- [51] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000 (Shen Zhujiang. Theoretical soil mechanics [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000(in Chinese))
- [52] 卢肇钧. 非饱和土抗剪强度的探索研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(2): 10-16 (Lu Zhaojun. Explorations on the suctional shear strength of unsaturated soils [J]. China Railway Science, 1999, 20(2): 10-16 (in Chinese))
- [53] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420-425 (Yang Qing, Zhang Huizhen, Luan Maotian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425(in Chinese))
- [54] 陈伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 吸力对弱膨胀土强度贡献的试验研究与预测分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1783-1787 (Chen Wei, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Experimental study and predictive analysis of contribution of matrix suction to shear strength of weak expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1783-1787(in Chinese))
- [55] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065-1073 (Kong Lingwei, Chen Jianbin, Guo Aiguo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065-1073(in Chinese))
- [56] 陈建斌, 孔令伟, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 674-682 (Chen Jianbin, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Numerical simulation of dynamic response of expansive soil slope to atmospheric conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 674-682 (in Chinese))
- [57] 李雄威, 孔令伟, 冯欣, 等. 非饱和膨胀土裂隙扩展性状与工程效应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(6): 75-80 (Li Xiongwei, Kong Lingwei, Feng Xin, et al. Fissure propagation behavior and engineering effects of unsaturated expansive soil [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(6): 75-80 (in Chinese))
- [58] 张家俊. 干湿循环下膨胀土裂隙、体变与渗透特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010 (Zhang Jiajun. Study of the fissures, volume change and permeability of expansive soil under wetting and drying cycles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010(in Chinese))
- [59] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究



- [D]. 南京: 河海大学, 2003 (Yuan Junping. Generalized model of fissures distribution & slope stability analysis for unsaturated expansive soils [D]. Nanjing: Hohai University, 2003 (in Chinese))
- [60] 卢再华, 陈正汉, 曹继东. 原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 339-342 (Lu Zaihua, Chen Zhenghan, Cao Jidong. A study on the strength and deformation characteristics and the constitutive model of natural expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 339-342(in Chinese))
- [61] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417-422 (Lu Zaihua, Chen Zhenghan, Pu Yibin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 417-422(in Chinese))
- [62] 陈正汉, 周海清, Fredlund D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603-608 (Chen Zhenghan, Zhou Haiqing, Fredlund D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 603-608(in Chinese))
- [63] 谢云, 陈正汉, 李刚. 考虑温度影响的重塑非饱和膨胀土非线性本构模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1937-1942 (Xie Yun, Chen Zhenghan, Li Gang. Thermo-nonlinear model for unsaturated expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1937-1942 (in Chinese))
- [64] 卢再华, 陈正汉, 方祥位, 等. 非饱和膨胀土的结构损伤模型及其在土坡多场耦合分析中的应用[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(7): 781-788 (Lu Zaihua, Chen Zhenghan, Fang Xiangwei, et al. Structural damage model of unsaturated expansive soil and its application in multi-field couple analysis on expansive soil slope[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(7): 781-788(in Chinese))
- [65] 曹雪山. 非饱和膨胀土的弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 832-836 (Cao Xueshan. Elastoplastic constitutive model of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 832-836(in Chinese))
- [66] Wheeler S J, Sharma R S, Buisson M. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils [J]. Geotechnique, 2003, 53(1): 41-54
- [67] 缪林昌. 非饱和土的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 855-860 (Miao Linchang. Research of constitutive model of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 855-860(in Chinese))
- [68] Sun D, Sheng D, Sloan S W. Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soils [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(3): 212-221
- [69] Sun D A, Sheng D, Xiang L, et al. Elastoplastic prediction of hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils under undrained conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(6): 845-852
- [70] Wei C F, Dewoolkar M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables [J]. Water Resources Research, 2006, 42(7): 1-16
- [71] 孙德安, 孙文静, 孟德林. 膨胀性非饱和土水力和力学性质的弹塑性模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1505-1512 (Sun De'an, Sun Wenjing, Meng Delin. Elastoplastic modelling of hydraulic and mechanical behaviour of unsaturated expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1505-1512(in Chinese))
- [72] 武明, 严园. 用封闭法填筑弱膨胀土路堤技术[C]//膨胀土处治理论、技术与实践. 北京: 人民交通出版社, 2004: 316-324
- [73] 杨果林, 刘义虎, 黄向京. 膨胀土处治理论与工程建造新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008
- [74] 王年香, 顾荣伟, 章为民, 等. 膨胀土中单桩性状的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 56-60 (Wang Nianxiang, Gu Rongwei, Zhang Weimin, et al. Model tests on behaviour of single pile in expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 56-60(in Chinese))
- [75] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 膨胀土挡墙侧向膨胀压力研究[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 580-587 (Wang Nianxiang, Zhang Weimin, Gu Xingwen, et al. Lateral swelling pressure of expansive soil acting on retaining wall due to inundation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 580-587 (in Chinese))
- [76] 汪明元. 土工格栅与膨胀土的界面特性及加筋机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009 (Wang Mingyuan. Research on the Behaviors at interface between geogrids and expansive soils and the reinforcement mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009(in Chinese))
- [77] 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, 29(6): 795-799 (Chen Shengshui, Zheng Chengfeng, Wang Guoli. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 795-799(in Chinese))
- [78] 徐光明, 王国利, 顾行文, 等. 雨水入渗与膨胀性土边坡稳定性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 270-273 (Xu Guangming, Wang Guoli, Gu Xingwen, et al. Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration [J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 270-273(in Chinese))
- [79] 杨海鸣, 宫全美, 周顺华. 膨胀土地区铁路路基拼接离心试验分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2008, 29(1): 110-114 (Yang Haiming, Gong Quanmei, Zhou Shunhua. The analysis of centrifugal modeling test of railway bed conjunction to expansive soil [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2008, 29(1): 110-114 (in Chinese))
- [80] 程永辉, 李青云, 龚壁卫, 等. 膨胀土渠坡处理效果的离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 42-46, 51 (Cheng Yonghui, Li Qingyun, Gong Biwei, et al. Research of centrifuge modeling test on expansive clay slopes treatment effects [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(11): 42-46, 51(in Chinese))
- [81] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151-158 (Zhen Liangtong, Ng Charles W W, Bao Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151-158(in Chinese))
- [82] 黄绍铿, 柯尊敬, 范秋雁, 等. 天然膨胀土边坡现场气象、吸力、含水量、土层变形综合观测[C]//中加非饱和土学术研讨会论文集. 武汉: 中国土木工程学会土力学与基础工程分会, 1994
- [83] 龚壁卫, 包承纲, 刘艳华, 等. 膨胀土边坡的现场吸力量测[J]. 土木工程学报, 1999, 32(1): 9-13 (Gong Biwei, Bao Chenggang, Liu Yanhua, et al. Observation of the suction in expansive soils slope [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(1): 9-13(in Chinese))
- [84] 王钊, 龚壁卫, 包承纲. 鄂北膨胀土坡基质吸力的量测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 64-67 (Wang Zhao, Gong Biwei, Bao Chenggang. Measurement of matrix suction of expansive soil slope in Northern Hubei [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 64-67 (in Chinese))
- [85] 吴礼舟, 黄润秋. 膨胀土开挖边坡吸力和饱和度的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 970-973 (Wu Lizhou, Huang Runqiu. Study on suction and saturation of excavated expansive soil slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 970-973(in Chinese))
- [86] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土堑坡雨水入渗速率的影响因素与相关性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1291-1296 (Li Xiongwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Effects and correlation analysis of infiltration velocity of expansive soil cut slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1291-1296(in Chinese))
- [87] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 气候影响下膨胀土工程性质的原位响应特征试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2069-2074 (Li Xiongwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Field response characteristic test of expansive soil engineering behavior under effect of atmosphere [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2069-2074 (in Chinese))
- [88] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土堑坡变形的湿热耦合效应及其与降雨历时的关系[J]. 公路交通科技, 2009, 26(7): 1-6 (Li Xiongwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Moisture-heat coupling effect of expansive soil cut slope deformation and relationship between deformation and raining time [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(7): 1-6(in Chinese))
- [89] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1034-1039 (Yao Hailin, Zheng Shaohe, Li Wenbin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1034-1039(in Chinese))
- [90] 王文生, 谢永利, 梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式和稳定性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(1): 20-24 (Wang Wensheng, Xie Yongli, Liang Junlin. Classification of expansive clay slope on road cutting [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 20-24(in Chinese))
- [91] 黄润秋, 吴礼舟. 非饱和膨胀土边坡稳定性分析[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 129-133 (Huang Runqiu, Wu Lizhou. Stability analysis of unsaturated expansive soil slope [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 129-133(in Chinese))
- [92] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454-459 (Yin Zongze, Xu Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 454-459(in Chinese))
- [93] 陈铁林, 米占宽, 陈生水. 膨胀土路基变形的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 137-140 (Chen Tielin, Mi Zhankuan, Chen Shengshui. Numerical simulation of deformation of expansive soil roadbed [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 137-140(in Chinese))
- [94] 刘观仕, 孔令伟, 郭爱国, 等. 大气影响下膨胀土包边路堤变形性状研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1397-1401 (Liu Guanshi, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Deformation behaviors of medium expansive soil embankment covered by lime-treated soils subjected to weather influence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1397-1401(in Chinese))
- [95] 汪明元, 徐晗, 杨洪, 等. 非饱和膨胀土边坡破坏机理与

- 稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 151-153, 158 (Wang Mingyuan, Xu Han, Yang Hong, et al. Analysis methods of unsaturated expansive soils slope [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 151-153, 158 (in Chinese))
- [96] 黄润秋, 吴礼舟, 胡瑞林. 膨胀土路堑边坡的滑坡机理分析[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1578-1583 (Huang Runqiu, Wu Lizhou, Hu Ruilin. Mechanical analysis of cut slope failures in expansive soil areas [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1578-1583 (in Chinese))
- [97] 李雄威. 膨胀土湿热耦合性状与路堑边坡防护机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008 (Li Xiongwei. Study on the moisture-heat coupling behavior of expansive soil and the mechanism of cut slope protection [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008 (in Chinese))
- [98] 蔡剑韬, 汪明元, 周小文, 等. 吸湿条件下土工格栅加筋膨胀土边坡稳定分析[J]. 人民长江, 2008, 39(11): 84-88
- [99] 梅国雄, 张帆, 韦杰, 等. 抗滑桩加固膨胀土滑坡的有限元湿化分析[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2010, 24(2): 130-133 (Mei Guoxiong, Zhang Fan, Wei Jie, et al. Analysis of the expansive soil slope on anti-slide pile with finite element method [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 24(2): 130-133 (in Chinese))
- [100] 龚晓南. 地基处理技术发展展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2004: 448-465
- [101] 刘观仕, 孔令伟, 陈善雄. 襄荆高速公路膨胀土路堤填筑施工工艺试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 961-964 (Liu Guanshi, Kong Lingwei, Chen Shanxiong. Construction technique tests on embankment built with mid-expansive soil for Xiang-Jing expressway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 961-964 (in Chinese))
- [102] 孔令伟, 张世飏, 郭爱国, 等. 膨胀土路堤分层交错填筑处治效果原位试验研究[C]// 第三届全国公路科技创新高层论坛论文集. 上卷. 北京: 人民交通出版社, 2006: 37-43
- [103] 胡明鉴, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于强度分区的膨胀土路堤稳定性及土工格栅处治效果分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1861-1865 (Hu Mingjian, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Expansive soil embankment stability and geogrid treatment effect analysis with strength zoning method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1861-1865 (in Chinese))
- [104] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰稳定均匀级配砾石土的路用性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5641-5647 (Guo Aiguo, Kong Lingwei, Hu Mingjian, et al. On the pavement performance test of stabilized uniformly-graded gravel soil with lime [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5641-5647 (in Chinese))
- [105] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 102-111 (Cheng Zhanlin, Li Qingyun, Guo Xiling, et al. Study on the stability of expansive soil slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(10): 102-111 (in Chinese))
- [106] 杨永平, 周顺华. 合-宁客运专线膨胀土不同高度路堤动力特性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1403-1406 (Yang Yongping, Zhou Shunhua. Analysis of vibration character of expansive soil embankments with different heights of He-Ning High-speed Railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1403-1406 (in Chinese))
- [107] 白颢, 孔令伟. 固结比对石灰土动力特性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1590-1594 (Bai Hao, Kong Lingwei. Experimental research on influence of consolidation ratio on dynamic characteristics of lime-treated soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1590-1594 (in Chinese))
- [108] 兰常玉, 薛鹏, 周俊英. 粉煤灰改良膨胀土的动强度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增1): 79-81
- [109] 顾安全, 高岱, 楚华栋. 区域性土[C]// 中国土木工程学会第七届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 8-18
- [110] 谈云志. 压实红黏土的工程特征与湿热耦合效应研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009 (Tan Zhiyun. Study on engineering characteristics and moisture-heat coupling effect of compacted laterite soil [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese))
- [111] Kong L W, Guo A G, Zhao Y W, et al. Influence of moisture content on porosity features of red clay [C]// Proceedings of an International Symposium on Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Leiden: A. A. Balkema Publishers, 2005: 419-424
- [112] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1427-1430 (Tan Yunzhi, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1427-1430 (in Chinese))
- [113] 崔德山, 项伟. ISS加固红色黏土的孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3096-3100 (Cui Deshan, Xiang Wei. Pore diameter distribution test of red clay treated with ISS [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,

- 31(10):3096-3100(in Chinese))
- [114] 熊探宇,张永双,曲永新,等. 滇西北红黏土的工程地质特性及其灾害效应[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1894-1899 (Xiong Tanyu, Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, et al. Engineering geological characteristic and geohazard effects of red clay in northwestern Yunnan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11):1894-1899(in Chinese))
- [115] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568-572 (Zhao Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 568-572(in Chinese))
- [116] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369-373 (Zhao Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 369-373(in Chinese))
- [117] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等. 典型红黏土与膨胀土的对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2593-2598 (Zhao Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2593-2598(in Chinese))
- [118] 黄质宏,朱立军,廖义玲,等. 裂隙发育红黏土力学特征研究[J]. 工程勘察, 2004(4): 9-12, 38 (Huang Zhihong, Zhu Lijun, Liao Yiling, et al. Study on mechanical properties of red clay with will-developed fissures [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004(4):9-12,38(in Chinese))
- [119] 黄质宏,朱立军,廖义玲,等. 不同应力路径下红黏土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2599-2603 (Huang Zhihong, Zhu Lijun, Liao Yiling, et al. Mechanical properties of red clay under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2599-2603(in Chinese))
- [120] 钱征宇. 红黏土地区铁路工程的主要技术问题及其对策[J]. 中国铁路, 2007(2): 41-45 (Qian Zhengyu. The main technical problems and the countermeasures of railway projects in red clay area [J]. Chinese Railways, 2007(2):41-45 (in Chinese))
- [121] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 压实红黏土水分传输的毛细效应与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2289-2294 (Tan Yunzhi, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Capillary effect of moisture transfer and its numerical simulation of compacted laterite soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2289-2294(in Chinese))
- [122] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 压实红黏土的湿化变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 483-489 (Tan Yunzhi, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Experimental study on wetting deformation of compacted laterite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 483-489(in Chinese))
- [123] 欧孝夺,吴恒,周东. 广西红黏土和膨胀土热力学特性的比较研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1068-1072 (Ou Xiaoduo, Wu Heng, Zhou Dong. Comparative study on thermodynamics characteristics of red clay and expansive soils in Guangxi [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1068-1072(in Chinese))
- [124] Bai Wei, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Experimental investigation and sensitivity analysis for the effects of fracture parameters to the conductance properties of laterite [C]//Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010:793-799
- [125] 柏巍,孔令伟,郭爱国,等. 红黏土地基承载力和变形参数的空间分布特征分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增2): 164-169 (Bai Wei, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Research on distribution characteristics of bearing capacities and deformation parameters of laterite ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 164-169(in Chinese))
- [126] 柏巍,万智. 红黏土地区地基承载力的可拓综合评测方法[J]. 公路, 2010(7): 85-90 (Bai Wei, Wan Zhi. Extension comprehensive prediction method for evaluation of subgrade bearing capacity of red clay area [J]. Highway, 2010(7): 85-90(in Chinese))
- [127] 廖义玲,贺珺,秦刚,等. 中国南方红黏土工程属性的变化规律[J]. 贵州科学, 2008, 26(4): 53-58 (Liao Yiling, He Jun, Qin Gang, et al. The changing law of engineering characteristics of red clay in south China [J]. Guizhou Science, 2008, 26(4): 53-58(in Chinese))
- [128] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851-855 (Tan Yunzhi, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):851-855(in Chinese))
- [129] Chen Z Y, Yin J H, Wang Y J. The three-dimensional slope stability analysis: recent advances and a forward look [C]//Advances in Earth Structures: Research to Practice. New York: ASCE, 2006: 1-42
- [130] 殷建华,陈健,李焯芬. 考虑孔隙水压力的土坡稳定性的刚体有限元上限分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 273-277 (Yin Jianhua, Chen Jian, Lee C F. A rigid finite element method for upper bound limit analysis of soil slopes subjected to pore water pressure

- [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3):273-277(in Chinese))
- [131] 孙平. 基于非相关联流动法则的三维边坡稳定极限分析[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2005(Sun Ping. A 3-D limit analysis method for slope stability considering the non-associated flow rule[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2005(in Chinese))
- [132] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报,2002, 24(5): 626-628 (Zheng Hong, Li Chunguang, Lee C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626 - 628(in Chinese))
- [133] 郑颖人,赵尚毅,孔位学,等. 极限分析有限元法讲座——I 岩土工程极限分析有限元法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 163-168 (Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Kong Weixue, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 163-168(in Chinese))
- [134] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 极限分析有限元法讲座——II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学,2005, 26(2): 332-336 (Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Zhang Yufang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332-336 (in Chinese))
- [135] 方建瑞,朱合华,蔡永昌. 边坡稳定性研究方法与发展[J]. 地下空间与工程学报,2007, 3(2): 343-349 (Fang Jianrui, Zhu Hehua, Cai Yongchang. Advancement and methods of the slope stability research [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 343 - 349(in Chinese))
- [136] 郭明伟,葛修润,李春光,等. 边坡和坝基抗滑稳定分析的三维矢量和法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1):8-20( Guo Mingwei, Ge Xiurun, Li Chunguang, et al. Three-dimensional vector sum method employed in slope and dam foundation stability analyses and its applications to practical engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010, 29(1):8-20(in Chinese))
- [137] 沈建,陈新民,魏平. 土质边坡地震稳定性研究进展[J]. 水运工程,2009(6): 40-46 (Shen Jian, Chen Xinmin, Wei Ping. Review of study on seismic stability of soil slopes [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(6): 40-46(in Chinese))
- [138] 张林,林从谋. 爆破震动对土质边坡动力稳定性影响研究[J]. 岩土力学,2005, 26(9): 1499-1501 (Zhang Lin, Lin Congmou. Study about soil slope dynamic stability due to blasting vibration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1499-1501(in Chinese))
- [139] 祁生林,祁生文,伍法权,等. 基于剩余推力法的地震滑坡永久位移研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 63-68 (Qi Shenglin, Qi Shengwen, Wu Faquan, et al. On permanent displacement of earthquake induced slide based on residual pushing force method [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12 ( 1 ): 63-68 (in Chinese))
- [140] Kramer S L, Lindwall N W. Dimensionality and directionality effects in Newmark sliding block analyses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 ( 3 ): 303-315
- [141] 吴兆营,薄景山,刘红帅,等. 岩体边坡地震稳定性动态安全系数分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 237-241 (Wu Zhaoying, Bo Jingshan, Liu Hongshuai, et al. A method for evaluating dynamic safety factor rock slope seismic stability analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(3): 237-241(in Chinese))
- [142] 刘汉龙,费康,高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学,2003, 24(4): 553-556 (Liu Hanlong, Fei Kang, Gao Yufeng. Time history analysis method of slope seismic stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 553-556 (in Chinese))
- [143] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(1): 198-204 (Lin H C, Yu Yuzhen, Li Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198-204(in Chinese))
- [144] Jia G W, Zhan T L T, Chen Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels[J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 92-103
- [145] 孟庆山,孔令伟,郭爱国,等. 高速公路高填方路堤拼接离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 580-586 (Meng Qingshan, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Centrifugal modeling test study on high-embankment widening of highway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(3):580-586(in Chinese))
- [146] 张嘎,王爱霞,张建民,等. 土工织物加筋土坡变形和破坏过程的离心模型试验[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008, 48(12): 2057-2060 (Zhang Ga, Wang Aixia, Zhang Jianmin, et al. Centrifuge modeling of the failure of geotextile-reinforced slopes [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2008, 48(12): 2057-2060(in Chinese))
- [147] 钱纪芸,张嘎,张建民. 降雨条件下土坡变形机制的离心模型试验研究[J]. 岩土力学,2011, 32(2): 398-

- 402, 416 (Qian Jiyun, Zhang Ga, Zhang Jianmin. Centrifuge model tests for deformation mechanism of soil slope during rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 398-402, 416(in Chinese))
- [148] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624-632 (Xu Guangxing, Yao Lingkan, Gao Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624-632(in Chinese))
- [149] 孔宪京,李永胜,邹德高,等. 加筋边坡振动台模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 152-157 (Kong Xianjing, Li Yongsheng, Zou Degao, et al. Shaking table model tests on soil slope reinforced with geo-grid [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 152-157(in Chinese))
- [150] 张建民,于玉贞,濮家骝,等. 电液伺服控制离心机振动台系统研制[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 843-845 (Zhang Jianmin, Yu Yuzhen, Pu Jialiu, et al. Development of a shaking table in electro-hydraulic servo-control centrifuge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 843-845(in Chinese))
- [151] 于玉贞,邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1320-1323 (Yu Yuzhen, Deng Lijun. Centrifuge modeling of seismic behavior of slopes reinforced by stabilizing pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1320-1323(in Chinese))
- [152] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3818-3827 (Wang Gongxian. Key technique in landslide control and its handling measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3818-3827 (in Chinese))
- [153] 孟庆山,孔令伟,陈能远,等. 桩锚挡墙联合支护残积土边坡离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3379-3384, 3396 (Meng Qingshan, Kong Lingwei, Chen Nengyuan, et al. Centrifugal model test on slope supporting with pile-anchor combined retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3379-3384, 3396(in Chinese))
- [154] 梁志刚,陈云敏,陈仁朋,等. 同轴电缆电磁波反射技术监测滑坡研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 453-458 (Liang Zhigang, Chen Yunmin, Chen Renpeng, et al. Study on applications of coaxial-cable electromagnetic wave reflection technique in monitoring slope stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 453-458(in Chinese))
- [155] 王宝军,李科,施斌,等. 边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 325-332 (Wang Baojun, Li Ke, Shi Bin, et al. Simulation experiment for distributed fiber monitoring on deformation of soil slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 325-332(in Chinese))
- [156] 裴华富,殷建华,朱鸿鹄,等. 基于光纤光栅传感技术的边坡原位测斜及稳定性评估方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1570-1576 (Pei Huaifu, Yin Jianhua, Zhu Honghu, et al. In-situ monitoring of displacements and stability evaluation of slope based on fiber bragg grating sensing technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1570-1576(in Chinese))
- [157] 王威,王水林,汤华,等. 基于三维 GIS 的滑坡灾害监测预警系统及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3379-3385 (Wang Wei, Wang Shuilin, Tang Hua, et al. Application of 3-D GIS to monitoring and forecast system of landslide hazard [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3379-3385(in Chinese))
- [158] 涂鹏飞,岑仲阳,谌华. 应用重轨星载 InSAR 技术监测三峡库区滑坡形变探讨[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(6): 886-890 (Tu Pengfei, Cen Zhongyang, Chen Hua. Monitoring landslides deformation in Three Gorges reservoir area by using the repeat-pass spaceborne InSAR [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(6): 886-890(in Chinese))
- [159] 高杰. 激光与 CCD 技术在边坡远程监测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010 (Gao Jie. A research on laser and CCD technology application of slope remote monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010 (in Chinese))
- [160] 易庆林,卢书强,何祥. 测量机器人在滑坡应急监测中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(20): 62-63
- [161] 刘传正,李云贵,温铭生,等. 四川雅安地质灾害时空预警试验区初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 20-30 (Liu Chuanzheng, Li Yungui, Wen Mingsheng, et al. Study on early warning test field for geo-hazards in Ya'an region, Sichuan Province of China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(4): 20-30(in Chinese))
- [162] 王东. 黄土地区滑坡地质灾害监测预警系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009 (Wang Dong. Study on landslide geological hazards monitoring and warning system in the loess region [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009(in Chinese))
- [163] 田宏岭. 降雨滑坡预警平台系统研究[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2007 (Tian Hongling. Study on the platform of rainfall-induced landslide prediction system [D]. Chengdu: Institute of



Mountain Hazards and Environment, CAS, 2007 (in Chinese))

- [164] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 坡地地质灾害的减灾策略——以降雨预警基准为例[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 490-495 (Lin H C, Yu Yuzhen, Li Guangxin, et al. Mitigation of landslide hazards: case study of rainfall warning criteria [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 490-495(in Chinese))
- [165] 谭万鹏,郑颖人,陈卫兵. 动态、多手段、全过程滑坡预警预报研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(1):

106-111 (Tan Wanpeng Zheng Yingren Chen Weibing. Studies on the land-slope forecast and early warning by more means in full dynamic discourse [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(1): 106-111(in Chinese))

- [166] 殷坤龙,陈丽霞,张桂荣. 区域滑坡灾害预测预警与风险评估[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 85-97 (Yin Kunlong, Chen Lixia, Zhang Guirong. Regional landslide hazard warning and risk assessment [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 85-97 (in Chinese))

孔令伟(1967-),男,博士,研究员。主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。

陈正汉(1947-),男,博士,教授。主要从事岩土工程教学、非饱和土力学与特殊土力学的研究。

(上接第 140 页)

- [41] 王克忠,李仲奎,王爱民,等. 浅埋暗挖地铁站厅洞室开挖过程物理模型试验及土体变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 2715-2720 (Wang Kezhong, Li Zhongkui, Wang Aimin, et al. Study on physical model test and deformation law of surrounding soil for shallow metro station chamber [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27

(S1): 2715-2720(in Chinese))

- [42] 房倩,张顶立. 浅埋暗挖地铁车站下穿既有线结构施工方法研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 71-77 (Fang Qian, Zhang Dingli. Study on the shallow tunnel construction methods for a new-built subway station passing through the bottom of the existing subway [J]. China Railway Science, 2007, 28(5): 71-77 (in Chinese))

滕延京(1949-),男,硕士,研究员。主要从事地基基础工程技术研究工作。

宫剑飞(1970-),男,博士,研究员。主要从事地基基础工程技术研究工作。

李建民(1980-),男,博士,工程师。主要从事地基基础工程技术研究工作。