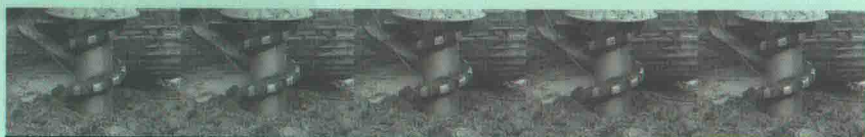


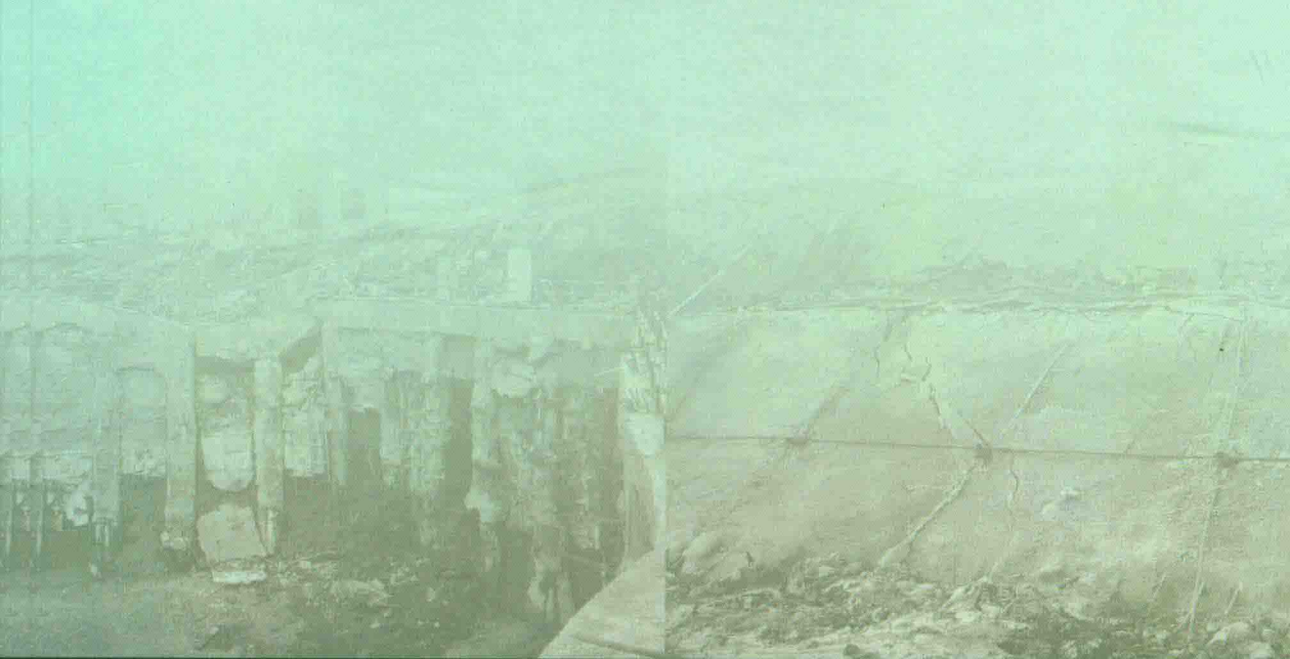
岩土工程技术创新与实践丛书



膨胀土场地基坑支护 设计方法研究

STUDY ON DESIGN METHOD OF FOUNDATION PIT SUPPORT
IN EXPANSIVE SOIL FIELD

康景文 郭永春 颜光辉 王 新◎著



中国建筑工业出版社

岩土工程技术创新与实践丛书

膨胀土地基坑支护设计方法研究

康景文 郭永春 颜光辉 王 新 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

膨胀土地基坑支护设计方法研究/康景文等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 5
岩土工程技术创新与实践丛书
ISBN 978-7-112-23385-4

I. ①膨… II. ①康… III. ①膨胀土-基坑-坑壁支撑-研究
IV. ①TU46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 039223 号

本书通过对膨胀土基坑失效失稳案例的调查和经验总结, 从基坑支护结构受力以及边坡变形情况的实际状态出发, 基于典型膨胀土基坑模型试验、湿度场理论、工程监测结果, 以现行基坑设计方法进行反分析, 对膨胀土水-土理论、坡体、膨胀土强度衰减特征、基坑坡体湿度场分布、膨胀土土压力计算理论等主要内容进行系统研究, 提出了膨胀土基坑支护设计理论和计算方法, 经工程实践验证研究形成的设计方法的可靠性和可行性, 完善了膨胀土基坑支护设计理论及方法。

本书可供建筑与市政基础设施等领域的设计、施工和检测技术人员使用, 也可供科研、教学和管理人员参考。

责任编辑: 王 梅 杨 允 辛海丽
责任校对: 王 烨

岩土工程技术创新与实践丛书

膨胀土地基坑支护设计方法研究

康景文 郭永春 颜光辉 王 新 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 $\frac{1}{4}$ 字数: 504 千字

2019 年 5 月第一版 2019 年 5 月第一次印刷

定价: 76.00 元

ISBN 978-7-112-23385-4
(33689)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

《岩土工程技术创新与实践丛书》

总 序

由全国勘察设计行业科技带头人、四川省学术和技术带头人、中国建筑西南勘察设计院有限公司康景文教授级高级工程师主编的《岩土工程技术创新与实践丛书》即将陆续面世，我们对康总在数十年坚持不懈的思考、针对热点难点问题的研究与总结的基础上，为行业与社会的发展做出的积极奉献表示衷心的感谢！

该《丛书》的内容十分丰富，包括了专项岩土工程勘察、岩土工程新材料应用、复合地基、深大基坑围护与特殊岩土边坡、场地形成工程、工程抗浮治理、地基基础鉴定与纠倾加固、地下空间与轨道交通工程监测等，较全面地覆盖了岩土工程行业近 20 年来为满足社会经济的不断发展创造科技服务价值的诸多重要方面，其中部分工作成果具有显著的首创性。例如，近年我国社会经济发展对超大面积人造场地的需要日益增长，以解决其所引发的岩土工程问题为目标，以多年企业与高校联合开展的系列工程应用研究为基础，对场地形成工程的关键技术研究填补了这一领域的空白，建立起相应的工程技术体系，其在场地形成工程所创建的基本理念、系统方法和关键技术的专项研究成果是对岩土工程界及至相近建设工程项目的一项重要贡献。又如，面对城市建设中高层、超高层建筑和地下空间对地基基础性能和功能不断提高的需求，针对与之密切相关的地基处理、工程抗浮和深大基坑围护等岩土工程问题，以实际工程为依托，通过企业研发团队与高校联合开展系列课题研究，获得的软岩复合地基、膨胀土和砂卵石层等不同地质条件下深大基坑围护结构设计、地下结构抗浮治理等主要技术成果，弥补了这一领域的缺陷，建立起相应的工程技术体系，推进了工程疑难问题的切实解决，其传承与创新的工作理念、处理工程问题的系统方法和关键技术成果运用，在岩土工程的技术创新发展中具有显著的示范作用。再如，随着社会可持续发展对绿色、节能、环保等标准要求加速提高，在工程建设中积极采用新型材料替代生产耗能且污染环境的钢材已成为岩土工程师新的重要使命，针对工程抗浮构件、基坑支护结构、既有建筑加固和公路及桥梁面层结构增强等问题解决的需求，以室内模型试验成果为依据，以实际工程原型测试成果为验证支撑，对玄武岩纤维复合筋材在岩土工程中的应用进行深入探索，建立起相应的工程应用技术方法，其技术成果是岩土工程及至土木工程领域中积极践行绿色建造、环保节能战略所取得的一个创新性进展。

借康景文主编邀约拟序之机，回顾和展望“岩土工程”与“岩土工程技术服务”以及其在工程建设行业中的作用和价值发挥，希望业界和全社会对“岩土工程”的认知能够随着技术的创新与实践而不断地深入和发展，以共同促进整个岩土工程技术服务行业为社会、为客户继续不断创造出新的更大的价值。

岩土工程 (geotechnical engineering) 在国际上被公认为土木工程的一个重要基础性的分支。在工程设计中,地基与基础在理念上被视为结构(工程)的一部分,然而与以钢筋混凝土和钢材为主的结构工程之间确有着巨大的差异。地质学家出身、知识广博的一代宗师太沙基,通过近 20 年坚持不懈的艰苦研究,到他不惑之年所创立的近代土力学,已经指导了我们近 100 年,其有效应力原理、固结理论等至今仍是岩土工程分析中不可或缺的重要基础。太沙基教授在归纳岩土工程师工作对象时说“不幸的是,土是天然形成而不是人造的,而土作为大自然的产品却总是复杂的,一旦当我们从钢材、混凝土转到土,理论的万能性就不存在了。天然土绝不会是均匀的,其性质因地而异,而我们对其性质的认知只是来自于少数的取样点 (Unfortunately, soils are made by nature and not by man, and the products of nature are always complex...As soon as we pass from steel and concrete to earth, the omnipotence of theory ceases to exist. Natural soil is never uniform. Its properties change from point to point while our knowledge of its properties are limited to those few spots at which the samples have been collected)”。同时他还特别强调岩土工程师在实现工程设计质量目标时必须考虑和高度重视的动态变化风险:“施工图只不过是许愿的梦想,工程师最应该担心的是未曾预测到的工作对象的条件变化。绝大多数的大坝破坏是由于施工的疏漏和粗心,而不是由于错误的设计 (The one thing an engineer should be afraid of is the development of conditions on the job which he has not anticipated. The construction drawings are no more than a wish dream.the great majority of dam failures were due to negligent construction and not to faulty design)”。因此,对主要工程结构材料(包括岩土)的材料成分、几何尺寸、空间分布和工程性状加以精准的预测和充分的人为控制的程度的差异,是岩土工程师与结构工程师在思考方式、技术标准和工作方法显著不同的主要根源。作为主要的建筑材料,水泥发明至今近 195 年,混凝土发明至今近 170 年,钢材市场化也近百年,我们基本可以通过物理或化学的方法对混凝土、钢材的元素及其成分比例的改变加以改性,满足新的设计性能(能力)的需要,并进行可靠的控制;相比之下,天然形成的岩土材料,以及当今岩土工程师必须面对和处理、随机变异性更大、由人类生活或其他活动随机产生和随机堆放的材料——如场地形成、围海造地和人工岛等工程中被动使用的“岩土”(包括各类垃圾),一是材料成分和空间分布(边界)的控制难度更大,其尺度远远大于由钢筋混凝土或钢结构组成的工程结构体;二是这些非人为预设制作、组分复杂的材料存在更大的动态变异特性,会因气候条件、含水量、地下水等条件变化和场地的应力历史的不同而不同。从这个角度,岩土工程师通常需要面对和为客户承担更大的风险,需要综合运用地质学、工程地质学、水文学、水文地质学、材料力学、土力学、结构力学以及地球物理化学等多学科、跨专业的理论知识,借助岩土工程的分析方法和所积累的地域工程实践经验,为建设开发项目提供正确、恰当的解决方案,并选用适用的检测、监测方法加以验证,以规避在多种动态变化的不确定性因素下的工程风险损失。这是岩土工程师们为客户创造的最首要和最基本的价值,并且随着建

成环境的日益复杂和社会对可持续发展要求的不断强化,岩土工程师还要特别注意规避对建成环境产生次生灾害和对自然环境质量造成破坏的风险。岩土工程师这种解决问题的方法和过程,显然不同于结构工程中主要依靠的力学(数学)计算和逻辑推理,是一种具有专业性十分独特的“心智过程”,太沙基将其描述为“艺术”或“技艺”(Soil mechanics arrived at the borderline between science and art. I use the term “art” to indicate mental processes leading to satisfactory results without the assistance of step-for-step logical reasoning.)。

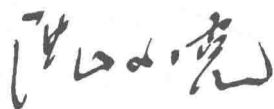
岩土工程技术服务 (geotechnical engineering services 或 geotechnical engineering consultancy activities 或 geotechnical engineers) 在国际也早已被确定为标准行业划分 (SIC: Standard Industry Classification) 中的一类专业技术服务,如联合国统计署的 CPC86729、美国的 871119/8711038、英国的 M71129。以 1979 年的国际化调研为基础,由当年国家计委、建设部联合主导,我国于 1986 年开始正式“推行‘岩土工程体制’”,其明确“岩土工程”应包括岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程治理、岩土工程检测和岩土工程监理等与国际接轨的岩土工程技术服务内容。经过政府主管部门及行业协会 30 多年的不懈努力,我国市场化的岩土工程技术服务体系基本建立起来,其包括技术标准、企业资质、人员执业资格及相应的继续教育认定等,促使传统的工程勘察行业实现了服务能力和产品价值的巨大提升,“工程勘察行业”的内涵已发生了显著的变化,全行业(包括全国中央和地方的工程勘察单位、工程设计单位和科研院所)通过岩土工程技术服务体系,为社会提供了前所未有、十分广泛和更加深入的专业技术服务价值,创造了显著的经济效益、环境效益和社会效益,科技水平和解决复杂工程问题的能力获得大幅度的提升,满足了国家建设发展的时代需要。从这个角度,可以说伴随我国改革开放推行的“岩土工程体制”,是传统勘察设计行业在实现“供给侧结构性改革”的最大驱动力。

《岩土工程技术创新及实践丛书》所介绍的工作成果,是按照岩土工程的工作方法,基于前瞻性的分析和关键问题及技术标准的研究所获得的体系性的工作成果,对今后的岩土工程创新与实践具有重要的指导意义和借鉴的价值。

因此,由于岩土工程的地域、材料的变异性和施工质量控制的艰巨性,希望广大同仁针对新的需要(包括环境)继续开展基于工程实践的深入研究,不断丰富和完善岩土工程的技术体系以及市场管理体系。这些成果是岩土工程工作者通过科技创新和研究服务于社会可持续发展专项新需求的一个方面,岩土工程及环境岩土工程 (geo-environmental engineering) 在很多方面应当和必将发挥越来越大的作用,在满足社会可持续发展和客户日益增长新需求的进程中使命神圣、责任重大,正如由中国工程院土木、水利与建筑工程学部与深圳市人民政府主办、23 位院士出席的“2018 岩土工程师论坛”的大会共识所说:“岩土工程是地下空间开发利用的基石,是保障 21 世纪我国资源、能源、生态安全可持续发展的重要基础领域之一;在认知岩土体继承性和岩土工程复杂多变性的基础上,新时期岩土工程师应创新理论体系、技术装备和工作方法,发展智能、生态、可持续岩土工程,

服务国家战略和地区发展。”

《岩土工程技术创新与实践丛书》中的工作成果既是经过实际项目建设实践验证和考验的理论及方法的创新，也是时代背景下的岩土工程与其他科学技术的交叉融合，既为项目参与者提供基础认识，又为岩土工程领域专业人员提供研究思路、研究方法，同时也为工程建设实践提供了宝贵的经验。我相信有许多人和我一样，随着《岩土工程技术创新与实践丛书》的陆续出版，将会从中不断获得有价值的信息和收益。



中国勘察设计协会

副理事长兼工程勘察与岩土分会会长

中国土木工程学会

土力学及岩土工程分会副理事长

全国工程勘察设计大师

2018年12月28日

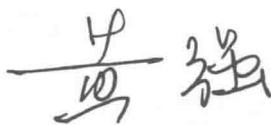
序

我国基坑工程技术发展已有 30 多年，但基本不涉及特殊土。膨胀土在世界范围内分布极广，我国是膨胀土分布最广的国家之一，本书对膨胀土基坑进行了专门研究，这对我国及世界膨胀土基坑理论与实践具体重大意义。

基坑工程设计方法是工程实践的总结，1999 年发布的《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120—1999 总结了我国前十年基坑工程的三大技术原则（“三原则”）：稳定性决定支护结构的嵌固深度、土压力理论是支护结构附加荷载的经验公式、弹性支点法是支护结构内力与变形计算的基本方法。“三原则”可称为基坑工程基本理论，一直指导着我国近 20 年来的基坑工程实践。

基坑工程技术“三原则”指引下的基坑工程安全等级、附加荷载计算、安全系数确定、稳定性分析方法、弹性支点法的 m 取值既独立又关联，牵一发而动全身。本书基于“三原则”，通过资料搜集和现场调查，分析了膨胀土基坑的变形或破坏模式和影响因素，基于土工试验、室内模型试验、现场模型试验、足尺寸原型试验和工程实地测试结果，对膨胀土基坑的膨胀力特征和支护结构设计方法进行了系统的研究，并通过工程实践对取得的成果进行了应用和验证。是目前对于膨胀土基坑工程的最全面研究与应用成果。

《膨胀土地基坑支护设计方法研究》中的研究成果既有实际项目建设实践也有模型试验研究成果；既为项目参与者提供基础认识，又为其他特殊土基坑工程研究人员提供思路与方法，同时也为我国基坑工程实践提供了宝贵的经验。感谢我的老朋友康景文及其团队数十年坚持不懈的思考、针对热点难点问题的研究与总结，为行业与社会的发展做出的积极奉献。



中国 BIM 发展联盟理事长

住房和城乡建设部强制性条文协调委员会常务副主任

中国工程建设标准化协会副理事长

2019 年 1 月 19 日

著者序

膨胀土以其显著的吸水膨胀和失水收缩特性而得名。在世界范围内分布极广，迄今已发现存在膨胀土的国家达 40 余个。我国是膨胀土分布最广的国家之一，尤其在北京—西安—成都一线东南、杭州—广州一线西北的广大区域内分布最为普遍。

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩性的地质体，黏粒成分主要由强亲水性矿物蒙脱石与伊利石组成。膨胀土吸水膨胀、失水收缩并且反复变形的性质，以及土体中杂乱分布的裂隙，对建筑物尤其是对地基、基坑以及边坡等都有严重的破坏作用，特别是所产生的变形破坏作用往往具有长期潜在的危险性。基坑工程和边坡工程中的膨胀土危害问题尤其突出，很多基坑工程和边坡工程在施工期与运行期发生过严重的滑移变形甚至破坏，为此耗费了巨大的工程费用进行综合性治理。

膨胀土问题已受到岩土工程科学工作者和岩土工程师们普遍的关注，从不同的角度、针对不同的工程问题、采用不同的途径进行了试验和理论的探索；工程实践中进行了多方面的专门性研究，力图通过不同的理论与方法来解释和论证其工程性质，并针对不同的工程问题提出了有效的预防与控制措施，获得了很多的可贵成果和成功经验。

基坑工程中的膨胀土问题，无论从其影响范围、重要性和复杂性，以及问题研究的深度和广度来说，都可说是目前岩土工程界和岩土工程师比较关注的一类问题。为此，结合基坑工程中涉及的膨胀土问题，我们针对膨胀土工程性质、膨胀机理理论以及膨胀土基坑工程设计方法等开展了系统的专题研究，并进行了基坑变形破坏的原型试验及监测。本书即系作者在这些研究成果全面系统总结分析的基础上，吸取国内外有关膨胀土工程的理论与先进技术成果，探讨和系统阐述膨胀土基坑工程设计方法的技术著作。

在膨胀力计算理论研究方面，很多研究者对膨胀土工程设计计算中膨胀荷载计算问题进行了研究并取得了一定的研究成果，但是现有膨胀力计算理论尚不能直接应用于工程实践。另外，在现行的各种技术规范中，对膨胀土勘察技术有专门规定，通过膨胀土工程性质研究为膨胀土地基基础设计与施工提供了依据，但这些规定中均未见到明确体现膨胀土基坑工程的岩土设计理论和计算方法的具体要求。现实工程中，膨胀土基坑工程主要是在一般黏性土的基础上，依据勘察报告提供的性能指标和参数结合工程经验进行设计，这也是目前成都地区乃至全国范围内的膨胀土基坑失效或支护结构“过剩”的主要原因。因此，膨胀土基坑支护结构的设计方法仍需要进行较为深入的研究。

本书通过资料搜集和现场调查，分析了膨胀土基坑的变形或破坏模式和影响因素，基于土工试验、室内模型试验、现场模型试验、足尺寸原型试验和工程测试结果，对膨胀土基坑的膨胀力特征和支护结构设计方法进行了系统的研究，并通过工程实践对取得的成果进行了运用和验证。主要特色内容包括以下方面：

（一）通过对现行技术标准规定的膨胀特性参数试验测试饱和条件下的最大膨胀潜势不能直接应用于设计计算的分析，研制了专用单轴和三轴试验装置，对膨胀土含水率连续

变化的膨胀参数进行测试。在对比多种试样方法和试验装置获得的膨胀力以及膨胀率试验结果的基础上,提出了膨胀率与含水率间的拟合方程和膨胀力的简明计算方式;针对现行规范对膨胀土土-水关系曲线以及渗透系数尚缺少相关规定的现状,基于瞬时剖面法原理研制了一套非饱和渗流试验装置,对膨胀土的土-水特征曲线与非饱和渗透系数进行试验研究,得到了土-水特征曲线可呈幂函数关系方程和非饱和渗透系数可采用 VG 模型进行拟合的结论;针对现行规范中天然及饱和状态的抗剪强度测试结果不完全适用于实际基坑工程应力场分布分析的问题,通过对膨胀土抗剪强度与含水率关系的试验研究,得到了膨胀土内摩擦角、黏聚力随着含水率的增加而降低,两者关系可以采用拟合曲线进行模拟的成果。

(二) 针对现行规范提供的特定地区的大气影响深度和急剧影响深度经验取值存在局限性以及不能普遍适用于不同地区的具体工程等问题,通过测试成果建立了降雨入渗深度与降雨时长、降雨强度、坡体坡度、渗透系数、裂隙深度等的关系,得到了入渗深度的多元线性回归计算模型,提出膨胀土基坑长时间暴雨工况下入渗深度的定性计算方法。

(三) 针对现行规范中支护设计的膨胀力计算,根据试验指标或当地经验确定且未有明确的确定方法现状,从湿度场理论出发,结合膨胀土强度指标随含水率变化的规律,提出了实用型膨胀土弹塑性本构模型,得到了膨胀土基坑膨胀力的分布特征;针对现行的膨胀土基坑支护设计是建立在经典朗金土压力理论的基础上且对于位移需要控制变形的膨胀土基坑不适用的问题,通过极限平衡状态、非极限状态应力摩尔圆分析,推导了非极限位移条件下抗剪强度参数的确定方式,并结合微层力学分析、静力平衡、莫尔强度理论等方法提出了非极限位移条件下膨胀土基坑主动与被动土压力的计算方法。

(四) 采用朗肯经典土压力理论和研究提出的膨胀土土压力理论以及考虑膨胀作用的数值模拟,分别对不同形式支护结构实际基坑工程进行计算并与现场测试结果对比分析,得到朗肯土压力理论计算变形较小,但是膨胀土土压力理论以及考虑膨胀作用的数值模拟结果与现场测试结果相近的结论。

(五) 通过理论分析、数值计算、现场监测等方法,对膨胀土深基坑分层开挖对既有地铁设施结构变形控制的效果进行分析研究,得到了膨胀土基坑实际的变形值比设计值大、超出预警值但未超出设计控制限值以及地铁设施结构虽出现一定的变形但稳定状态在可控范围内等结论,表明研究成果可以达到对膨胀土基坑变形以及既有地铁设施结构变形有效控制的目标。

(六) 依据研究成果,通过数值模拟的手段和工程实践,对膨胀土基坑支护结构设计开展了一系列的改进实践研究,如玄武岩纤维复合筋材岩土锚固技术、高压旋喷扩大头锚索技术和不同施工因素影响等改进设计,以及考虑裂隙性膨胀土基坑状态影响分析。通过膨胀土基坑设计改进的研究,为以后的膨胀土基坑支护设计提供了有益的参考。

参与本书编写的还有中国建筑西南勘察设计研究有限公司符征营、陈海东、代东涛、贾鹏、黎鸿、杨致远、崔同建、章学良、罗宏川、付斌桢等高级工程师、胡熠博士、纪智超工程师和钟静工程师,西南交通大学谢强教授及其研究团队。

在本书编写过程中,还得到了成都四海岩土工程有限公司廖新北总经理、岳大昌总工程师和许帆高级工程师,以及四川省川建勘察设计院刘晓东总工程师、聂浩帆高级工程师等的大力支持。

中国勘察设计协会副理事长、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会副理事长、全国工程勘察设计大师沈小克先生和中国 BIM 发展联盟理事长、国家基坑工程技术标准奠基人黄强研究员为本书作序，是作者莫大的荣幸。

借此机会，向付出艰辛劳动的参编人员和提供基础材料及工作成果的全体同事和同行致以崇高的敬意和衷心的感谢！

著者

2018 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 膨胀土的基本特性	2
1.3 膨胀土分布及其地质成因	3
1.4 膨胀土国内外研究概况	5
1.5 膨胀土基坑工程问题	9
1.6 本章小结	10
第2章 膨胀土基坑事故调研分析	12
2.1 概述	12
2.2 调查工点的分布特点	12
2.3 悬臂桩支护膨胀土基坑事故剖析	17
2.4 桩锚支护膨胀土基坑事故剖析	21
2.5 土钉支护膨胀土基坑事故剖析	25
2.6 膨胀土基坑变形破坏特点及其影响因素	27
2.7 本章小结	32
第3章 现行支护设计方法及膨胀土基坑适用性研究	33
3.1 概述	33
3.2 现行基坑支护设计思路和原则	33
3.3 悬臂桩支护结构设计及施工控制要点	34
3.4 锚拉支护结构设计及施工控制要点	39
3.5 土钉支护结构设计及施工控制要点	47
3.6 其他常用支护结构设计及施工控制要点	51
3.7 现行支护设计方法适用性的问题	59
3.8 本章小结	60
第4章 膨胀土力学特性变化规律试验研究	61
4.1 概述	61
4.2 膨胀土膨胀性与强度衰减关系的研究现状	61
4.3 膨胀性能参数测定改进试验	64

4.4	吸水过程膨胀力变化规律	72
4.5	吸水过程膨胀率变化规律	75
4.6	吸水过程渗透系数变化规律	78
4.7	不同含水率条件下膨胀土强度变化	81
4.8	本章小结	82
第5章	基于降雨入渗深度的膨胀力分布研究	83
5.1	概述	83
5.2	膨胀土基坑降雨入渗特征室内模型试验研究	83
5.3	膨胀土基坑降雨入渗特征现场试验研究	92
5.4	膨胀土基坑降雨入渗特征估算方法	95
5.5	基于降雨入渗规律的膨胀力确定	99
5.6	本章小结	110
第6章	膨胀土基坑非极限状态土压力研究	112
6.1	概述	112
6.2	膨胀土基坑非极限土压力研究	112
6.3	膨胀土基坑非极限土压力理论方法验证分析	126
6.4	本章小结	129
第7章	膨胀土基坑勘察与支护设计方法研究	131
7.1	概述	131
7.2	膨胀土基坑工程勘察与支护原则	131
7.3	膨胀土场地勘察方法	134
7.4	膨胀土基坑设计参数的试验方法	139
7.5	膨胀土侧向膨胀力计算	149
7.6	支护结构计算方法	150
7.7	本章小结	151
第8章	膨胀土基坑土钉支护工程实践	153
8.1	概述	153
8.2	工程概况	153
8.3	基坑支护设计	154
8.4	土钉支护效果的数值模拟预测研究	155
8.5	土钉支护效果的现场监测试验	160
8.6	实测与数值分析对比分析	167
8.7	土钉支护施工关键技术	169
8.8	设计主要控制要素	172

8.9 本章小结	174
第9章 膨胀土基坑不同类型排桩支护工程实践	176
9.1 概述	176
9.2 监测试验概况	176
9.3 排桩+锚索支护效果分析	180
9.4 双排桩支护效果分析	184
9.5 排桩+锚索+斜撑支护效果分析	190
9.6 双排桩+斜撑支护效果分析	196
9.7 本章小结	203
第10章 膨胀土基坑复杂围护体系工程实践	205
10.1 概述	205
10.2 基坑开挖及支护概况	205
10.3 复杂围护体系基坑变形监测研究	207
10.4 复杂围护体系基坑数值模拟研究	213
10.5 膨胀土基坑复杂围护体系支护效果分析	226
10.6 本章小结	230
第11章 膨胀土基坑支护结构改进实践	232
11.1 概述	232
11.2 玄武岩纤维复合筋材在膨胀土基坑支护中应用实践	232
11.3 高压旋喷扩大头锚索技术在膨胀土基坑中应用实践	237
11.4 考虑降雨、施工动荷载影响的基坑支护结构改进实践	242
11.5 考虑裂隙性膨胀土基坑土压力改进计算	254
11.6 本章小结	267
第12章 代表性研究成果	268
成果1: 成都黏土地区支护式基坑事故的分析	268
成果2: 成都某膨胀土基坑边坡失稳机理分析	272
成果3: 膨胀性黏土不稳定斜坡变形成因机制及防治措施	276
成果4: 柔性支护黏性土基坑非极限被动土压力研究	280
成果5: 基于摩尔-库仑准则的膨胀土弹塑性本构模型及其数值实现	283
成果6: 玄武岩纤维复合筋材在岩土工程中的应用研究	287
成果7: 基于灰色理论的膨胀土场地基坑支护结构变形预测	290
成果8: 基坑支护加固装置	292
成果9: 一种锚拉内支撑组合基坑支护结构	294
成果10: 一种玄武复合筋材基坑支护桩	295

成果 11：一种玄武岩复合筋材锚杆格构梁支挡结构 297

成果 12：疏墩增强型土钉墙基坑支护结构 298

成果 13：微型锚拉桩与土钉墙联合支挡结构 300

成果 14：一种应力释放型钢筋箍笼砂井基坑降水装置 302

参考文献 303

编后话 306

第1章 绪 论

1.1 概述

近年来,随着经济建设的持续快速发展,城市建设的规模逐步向外扩展,不断辐射到传统未开发的工程区域,出现大量新的岩土工程问题。高层重型建筑物逐步出现,对基础工程深基坑的稳定性及地基基础的承载能力均提出了更高的要求。膨胀土在我国分布范围极广,云南、贵州、四川、广西、河北、河南、湖北、陕西、安徽和江苏等 20 多个省、市、自治区均有不同范围的分布,总面积在 10 万 km^2 以上。在膨胀土地区开展工程建设,面临建筑开裂、地基变形、边坡失稳等潜在的危险,对于基坑工程来说,尤其是长大深基坑工程,膨胀土的问题则更为严重,也更难处理。2006 年~2017 年的十年间成都膨胀土地区就有多处基坑发生了不同程度的失稳破坏。大部分基坑出现变形过大、坡脚软化、悬臂桩倾斜、甚至整体破坏的现象;少部分基坑,由于开挖深度较大、周边环境复杂(如临近地铁),变形控制较高,在多种支护结构类型组合或复合支护结构体系围护下,支护效果较为明显,保证了膨胀土基坑工程的正常施工,但过强的支护体系导致工程材料的浪费以及造价的提高,降低了工程建设的经济性。这些工程案例引起了学者和工程师的高度关注,开展了大量的理论分析、试验研究和工程实践,并取得了不少有价值的成果和经验,内容涵盖了非饱和土理论、膨胀土的判别与分类、膨胀土的工程性质、膨胀土地区的勘察技术、防护与加固技术、建(构)筑物地基与基础处治技术、膨胀土地区生态环境保护技术等等。然而,现阶段研究的相关结论中对于膨胀土基坑失稳的原因众说纷纭,设计人员仍只是依靠工程经验进行工程设计,并没有许多理论和现场数据支持。现行的岩土工程勘察规范(如:《岩土工程勘察规范》GB 50021—2011(2009 年版)、《水利水电工程地质勘察规范》GB 50487—2008、《铁路工程特殊岩土勘察规程》TB 10038—2012、《公路工程地质勘察规范》JTG C—2011 等)和膨胀土地区建筑设计施工技术规范(如:《膨胀土地区建筑技术规范》GB 50112—2013、《广西膨胀土地区建筑勘察设计施工技术规范》DB45/T 396—2007、《云南省膨胀土地区建筑技术规范》DBJ53/T—83—2017 等)中均未见到明确体现膨胀土设计理论和计算方法的具体要求。这也间接地导致了基坑开挖后,大量的膨胀土基坑出现不明原因的变形过大、坡脚软化、悬臂桩倾斜、甚至整体破坏的现象,严重影响了膨胀土地区的工程建设。

针对膨胀土基坑支护措施,人们在工程实践中积累了大量经验,但对各种支护措施的效果和作用机理并不完全明白。对于一个基坑,什么样的支护方案合理、经济、有效?亦缺乏理论指导。现阶段,多种多样的支护结构类型及复合支护体系,例如悬臂桩、双排桩、土钉、预应力锚索、内支撑及其不同组合形式等已经在膨胀土深基坑工程中得到了广泛应用

与尝试。大量的工程实践表明,一些支护结构如悬臂桩等由于不能有效防治膨胀土边坡变形而出现工程事故,另外一些如桩锚支护、双排桩等虽然保证了膨胀土基坑工程的正常施工,但是由于对其支护效果没有清晰地认识和预判,同样会造成潜在风险和工程造价的提高。

目前,膨胀土基坑的支护设计主要是在一般黏性土的基础上,依据勘察报告提供的性能指标和参数结合工程经验进行设计,缺乏理论依据和实践支持,由此可见,对膨胀土基坑工程设计存在不足,这也是目前全国范围内的膨胀土基坑变形甚至失效或支护结构“过剩”的主要原因。工程实践亟须解决膨胀土基坑支护设计的理论支撑和技术方法,因此,开展膨胀土基坑支护设计理论及设计计算方法等的研究具有必要性和工程实用价值。

工程建设中膨胀土问题,历经了几十年的研究,从早期的膨胀土试验方法的探索,到全面的膨胀土基础性研究,再到近年的以膨胀土基坑工程治理为背景的科技攻关,已较多的是在宏观方向上取得了进展。然而,随着“十三五”国家立足区域发展总体战略、“一带一路”建设的推进,全国城市工程建设发展及规模将大幅跃升,膨胀土理论和工程实践问题的解决将是岩土工程界以及城市防灾减灾等所面临的主要问题。

1.2 膨胀土的基本特性

关于膨胀土,国际上曾在 20 世纪 60、70 年代进行了一次讨论,有学者将具有吸水膨胀、失水收缩,以及对工程产生膨胀变形破坏作用的黏性土归类为膨胀土。也有学者认为,膨胀土是裂隙特别发育,并具有特定形态裂隙的黏性土,因而,将其定为“裂土”。1969 年第二届国际膨胀土会议上,首次系统讨论了有关膨胀土的定义,比较一致的认识是,膨胀土是一种矿物成分特殊,对湿度状态反应敏感,遇水膨胀变形,失水收缩开裂,并且产生较大膨胀力的黏性土。在随后多年的研究中,岩土工程师逐渐认识并归纳出膨胀土的基本特性:

1. 胀缩性

膨胀土吸水体积膨胀,使其上建筑物隆起,如膨胀受阻即产生膨胀率;失水体积收缩,造成土体开裂,并使其建筑物下沉。膨胀土的缩陷与液限含水率的收缩量称为极限胀缩潜势。膨胀土的胀缩性主要受其黏土矿物成分及含量控制,而外界的湿度变形仅仅是提供了胀缩变形的环境。土中有效蒙脱石含量越多,胀缩潜势越大,膨胀力越大。土的初始含水率越低,膨胀量和膨胀力越大。影响膨胀土胀缩性的因素有矿物成分、颗粒组成、初始含水量、压实度及附加荷重等。其中除了矿物成分和颗粒组成的内因因素影响外,初始含水量、压实度及附加荷重的外因因素影响也很大。不同地区的膨胀土由于土质、气候和生存环境等因素,所表现出的胀缩性有一定的区别,据统计,云南、河北、陕西、山西局部地区等地膨胀土的自由膨胀率偏高,其自由膨胀率平均值均大于 90%,而湖南、安徽、江苏等地的自由膨胀率平均值低于 65%,湖北、四川、贵州等地的自由膨胀率平均值为 65%~90%。此外,云南、广西膨胀土的缩限含水率明显高于其他地区。

2. 崩解性

膨胀土浸水后体积膨胀,在无侧限条件下发生吸水湿化。不同类型的膨胀土其崩解性是不一样的,强膨胀土浸入水中后,几分钟内就很快完全崩解;弱膨胀土浸入水中后,则需经过较长时间才能逐渐崩解,且有的崩解不完全。此外,膨胀土的崩解特性还与试样的