

黄河下游堤防淤筑工程 安全保障理论与实践

沈细中 张俊霞 兰雁 唐华 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

黄河下游堤防淤筑工程 安全保障理论与实践

沈细中 张俊霞 兰雁 唐华 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书针对黄河堤防土体非饱和特性显著且参数变异性大，渗透系数率定困难，淤筑工程技术理论基础缺乏等问题，率定了黄河堤防土体概率模型，修正了非饱和土土水特征与主应力差公式，集成了数值分析软件包，开发了堤防工程数据库，提出了堤顶宽度与淤筑高度的随机分析方法，得出了淤区立体网状排水、围堰柔性生态防护、纵向裂缝防治关键技术，建立了堤防工程安全评价预测模型，提出了集政策法规、工程技术、应急预警保障、公众参与于一体的堤防工程综合安全保障运行机制，为黄河防洪减灾、工程规划设计、建设管理提供强有力的科技支持。

本书可供从事堤防工程设计、施工、管理的工程技术人员阅读参考，也可作为相关领域高校师生的参考资料。

图书在版编目（C I P）数据

黄河下游堤防淤筑工程安全保障理论与实践 / 沈细中等编著. — 北京：中国水利水电出版社，2015. 5
ISBN 978-7-5170-3205-2

I. ①黄… II. ①沈… III. ①黄河一下游—堤防—安全管理—研究 IV. ①TV871.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第115132号

书 名	黄河下游堤防淤筑工程安全保障理论与实践
作 者	沈细中 张俊霞 兰雁 唐华 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.25印张 267千字
版 次	2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南及山东 9 个省（自治区），是我国第二大河流，流域总面积 79.5 万 km^2 ，截至 2007 年，黄河下游临黄 I 级堤防长 1371.227km，河道长 786km，滩区居住人口 189.5 万人。随着国民经济的迅猛发展，黄淮海平原成为了我国重要的粮食、经济、文化教育基地，特殊的水沙塑造了黄河下游举世瞩目的“二级悬河”，黄河下游 1371km 堤防不仅肩负着整个黄淮海平原的防洪安全，甚至对我国国民经济发展与整体稳定都负有重任。堤防淤筑工程作为黄河下游最重要的第一道防线，举足轻重的防洪地位世界共瞩。

1996 年之后，黄河下游堤防淤筑工程规划建设秉承和发扬了多泥沙河流“宽河固堤”的治河理念，规划保护能力、建设格局、建设规模等发生了巨大的变化。面对新一轮大规模堤防工程建设，黄河下游堤防淤筑工程安全关键技术的理论性、系统性、科学性亟待提高。特别是，黄河堤防设计多年来仍以饱和土理论为主，采用的参数概化法不符合黄河堤防土体特点；缺少先进的现场监测设备与数值分析系统导致基础资料缺乏，量化分析能力低；传统的施工与管理技术严重制约了堤防淤筑工程现代化与信息化的进程；施工过程中大量深层裂缝的出现表明淤筑工程技术对堤防安全影响及量化分析仍为空白，排水不畅、围堰坍塌及堤身裂缝等难题无以解决；我国至今仍没有堤防安全评价导则，安全评价无据可依，严重影响工程管理与质量。因此，根据堤防淤筑工程特点，利用渗流与非饱和土力学、概率论、信息技术等多学科交叉深入研究十分迫切，意义重大。

本书在黄河科技工作者对黄河淤筑工程设计、施工、管理方面前期研究的基础上，立足于黄河堤防淤筑工程特点，通过 8 年持续研究，运用渗流与非饱和土力学、概率论、信息技术等多学科有机交叉，针对基础理论研究存在的堤防土体非饱和特性显著且参数变异性大，渗透系数率定困难，以及淤筑工程技术理论基础缺乏等问题，建立黄河堤防土体参数概率模型，实现了土体随机性与非饱和土强度理论的突破，推动了土体概率模型与非饱和土土水特征与主应力差公式等在淤筑工程中的实质性应用；针对基础资料缺乏、指标体系不全面等问题，建立系统的黄河下游堤防工程历史险情、土质参数与

安全监测指标体系与数据库，开发集成了监测数据后处理系统和堤防淤筑工程数值分析系统，提升了量化分析能力与效率；针对堤防淤筑工程存在的指标设计、裂缝防治、淤区排水、围堰防护与安全评价等技术难题，利用随机分析、非饱和流固耦合理论等，提出了指标设计方法、裂缝成因及防治技术、淤区排水与围堰防护技术、安全评价模型，突破了制约工程设计、施工与管理的技术瓶颈，以黄河险情分析为基础，构建了集政策法规、工程技术、应急预警保障、公众参与于一体的堤防工程综合安全保障运行机制，形成了一整套黄河下游堤防淤筑工程安全关键技术体系，使长期困扰工程界的淤筑技术难题得到定量化的科学解释，为工程建设与管理提供了强有力的科技支撑。

本书合著完成，黄河水利科学研究院江恩惠、冷元宝、汪自力、宋万增编写第1章；黄河水利科学研究院李莉、杨小平、马卫东、郑军、孟献颖、王笑冰、李海晓、刘巍巍、常芳芳、李娜、杨浩明、董成会，河南黄科工程技术检测有限公司刘小彦、王现华、张全喜、王涛、陈康康、白金辉、成金帅、牛圣舒编写第2章；黄河水利科学研究院沈细中，焦作黄河河务局李怀志、侯志毅、魏海生，黄河水利委员会新闻宣传出版中心王静琳编写第3章；黄河水利科学研究院兰雁、张敏、董国涛，黄河水利委员会建管中心李建军，黄河勘测规划设计有限公司张权伟、姚振国编写第4章；南昌大学刘小文，中国水利水电科学研究院解家毕，黄河水利科学研究院张俊霞、杨文丽编写第5章；黄河水利科学研究院唐华编写第6章；黄河水利科学研究院常向前，洛阳理工学院何怡编写第7章；黄河水利委员会新闻宣传出版中心张再厚提供了封面、封底图片。编写过程中，得到了水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心、黄河水利委员会基本建设工程质量检测中心、黄河水利委员会建管局、黄河水利委员会山东黄河河务局、黄河水利委员会规划计划局、水利部黄河泥沙重点实验室等单位及同志的全力支持。参考并引用了黄河下游防洪工程规划与设计、施工与管理等资料；引用了国内外大量专家学者的科技成果。本书得到了国家自然科学基金重点项目（编号：60934009）与水利部“948”项目（合同号：200708、201124）经费的资助，在此一并表示最诚挚的谢意。

限于我们的水平和经验，书中难免有疏漏与不妥之处，敬请读者批评指正，相关意见与建议请发电子邮件至 shenxz@126.com。

作 者

2014年11月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 黄河下游堤防淤筑工程特点	1
1.2 黄河下游堤防淤筑工程存在的问题	2
2 黄河下游堤防淤筑工程材料特性研究	4
2.1 黄河下游堤防淤筑工程材料特性研究现状	4
2.2 黄河下游堤防淤筑工程土体渗透随机性研究	6
2.3 黄河下游堤防淤筑工程土体非饱和土强度特性研究	16
3 堤防淤筑工程数据库与数值分析系统开发	35
3.1 堤防淤筑工程数据库与数值分析系统开发现状	35
3.2 堤防淤筑工程监测数据获取与后处理开发	38
3.3 堤防工程数据库建设	48
3.4 堤防淤筑工程数值分析软件包集成与开发	61
4 黄河下游堤防淤筑工程设计关键技术研究	68
4.1 堤防淤筑工程设计关键技术研究现状	68
4.2 黄河下游淤筑工程堤顶宽度指标研究	69
4.3 黄河下游淤筑工程淤筑高度指标研究	78
4.4 堤防淤筑工程设计关键技术应用	83
5 黄河下游堤防淤筑工程施工关键技术研究	84
5.1 堤防淤筑工程施工关键技术研究现状	84
5.2 堤防淤筑工程裂缝成因分析	87
5.3 黄河下游堤防淤筑工程裂缝防治技术研究	99
5.4 黄河下游堤防淤筑工程淤筑排水技术研究	102
5.5 黄河下游堤防淤筑工程围堰柔性生态防护技术研究	119
6 黄河下游堤防淤筑工程管理关键技术研究	146
6.1 堤防淤筑工程管理关键技术研究现状	146
6.2 堤防淤筑工程安全评价模型建立	147

6.3 堤防淤筑工程安全评价模型验证与应用	149
6.4 黄河防洪工程安全保障机制初步研究	158
7 结语	165
参考文献	168

1 绪 论

1.1 黄河下游堤防淤筑工程特点

黄河为我国第二大河流，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南及山东 9 个省（自治区）。截至 2007 年，黄河下游临黄 I 级堤防长 1371.227km，河道长 786km，流域总面积 79.5 万 km^2 ，滩区居住人口 189.5 万。特殊的水沙塑造了黄河下游举世瞩目的“二级悬河”；历史上因堤防决口给广大黄淮海平原人民生命财产造成巨大损失。人民治黄以来，党和国家高度重视，曾 4 次加高加固黄河堤防，为确保 60 余年伏秋大汛不决口做出了重大贡献。随着国民经济的迅猛发展，黄淮海平原成为了我国重要的粮食、经济、文化教育基地，黄河下游 1371km 堤防不仅肩负着整个黄淮海平原的防洪安全，甚至对我国国民经济发展与整体稳定都负有重任。堤防淤筑工程作为黄河下游最重要的第一道防线，举足轻重的防洪地位世界共瞩。随着黄河下游两岸经济蓬勃发展，黄河下游堤防淤筑工程建设翻开了崭新的一页。

黄河下游堤防淤筑工程是在原有堤防的基础上，实施堤身帮宽、堤顶硬化、围堰修筑及淤区吹填而成（图 1.1、图 1.2）。黄河堤防淤筑工程全部就地取材，直接抽取河道内泥沙，用淤筑的方式建设。与其他江河堤防临水运行不同，黄河下游大部分堤防常年不靠水；与其他黏土填筑堤防不同，作为“国堤”的黄河堤防是在历代民埝上续建，基础极为薄弱（底基多为秸料），内部材料组成复杂，质量参差不齐，隐患险点众多，土体非饱和特性显著，参数变异性大，渗透系数率定困难。受“滚河”“斜河”“横河”等影响，临河堤身遭受淘刷，堤脚形成冲坑，严重威胁堤防安全。

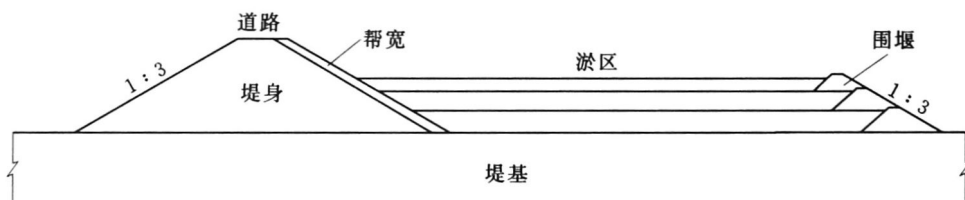


图 1.1 黄河下游堤防淤筑工程标准断面图

堤防淤筑工程在黄河下游大规模全面推进。黄河堤防淤筑建设的工程量巨大、战线长，据《黄河流域防洪规划》，截至 2008 年 10 月，黄河下游仍有 442.6km 堤防淤筑工程尚待实施，任务非常艰巨，因此，广泛采用大规模、集中性、高强度机械化施工，如：2002 年 7 月至 2005 年 6 月期间，山东及河南段一期工程项目包括：堤防帮宽、机淤固堤、险工改建、防护坝、堤顶道路、防浪林和管护基地等共 7 类 72 个项目，涉及堤线长 1000 多 km，动用土方挖掘机、推土机、起重机及碾压机等重型机械进行交叉施工，完



图 1.2 黄河下游堤防淤筑工程建成图

成土方 1.4 亿 m^3 ，石方 76 万 m^3 ，迁安 2.6 万人，拆迁 75 万 m^2 ，征地 2200 万 m^2 等。2012 年以来，山东及河南段二期防洪工程继续大规模全面推进。

总之，黄河下游堤防淤筑工程具有水文、地质及运行条件的独特性、材料的特殊性及时期工程建设的集中性，从而诱发的工程问题具有特殊性、复杂性与多样性。

1.2 黄河下游堤防淤筑工程存在的问题

1996 年之后，黄河下游堤防淤筑工程规划建设秉承和发扬了多泥沙河流“宽河固堤”的治河理念，规划保护能力、建设格局、建设规模等发生了巨大的变化。面对新一轮大规模堤防工程建设，黄河下游堤防淤筑工程安全关键技术的理论性、系统性、科学性亟待提高，新形势、新时期的黄河下游堤防淤筑工程设计、施工与管理等方面存在以下问题。

(1) 基础理论与应用基础研究方面。与以往常规的饱和土力学、稳定渗流理论相比，黄河堤防淤筑工程土体呈现显著的非饱和特性和变异性。目前，土体概率模型、非饱和土土水特征和强度理论等基础理论方面研究不足，缺少先进的现场监测设备与数值分析系统导致基础资料缺乏，量化分析能力低；数据库指标体系、数值分析软件包及安全评价模型等应用基础研究薄弱，不能为堤防淤筑工程设计、施工与管理关键技术研究提供必要的理论依据和技术支撑。

(2) 设计方面。黄河下游河道为“地上悬河”，大部分堤段常年不靠水，黄河堤防隐患众多，堤身淘刷，堤脚冲坑，土体多为非饱和土，黏聚力低，变异性大，设计指标影响因素众多。黄河堤防设计多年来仍以饱和土理论为主，采用的参数概化法不符合黄河堤防土体参数变异性大的特点，堤顶宽度和淤筑高度的设计指标难以合理确定。

(3) 施工方面。与以往黄河下游淤筑工程规模小、历时长、低强度分散施工方式不同，2002 年以来，淤筑工程大规模、全面推进，集中性、高强度、机械化淤筑施工造成淤区排水不畅，水分渗入堤身，导致堤身土体强度降低，堤身开裂、围堰失稳等问题，严重影响工程的进度、质量与安全。

(4) 管理方面。与长系列大坝安全监测资料及成熟的大坝安全评价模型相比，黄河堤防淤筑工程稳定影响因素复杂，相关性强，失稳破坏具有突变性，目前缺乏全面、系统、



可靠的监测资料，我国至今没有堤防安全评价导则，安全评价无据可依，淤筑施工速率调控、运行安全评价缺乏必要的技术支撑，施工过程中大量深层次裂缝的出现表明淤筑工程技术对堤防安全影响及量化分析仍为空白，堤身裂缝等难题无法解决，落后的管理技术与手段严重制约了工程管理现代化与信息化的进程。

鉴于其工程水文地质及运行条件的独特性、材料的特殊性、新时期工程建设的集中性，引发工程问题的特殊性、复杂性和多样性，因此，需针对黄河下游堤防淤筑工程的特点，利用渗流与非饱和土力学、概率论、信息技术等多学科交叉深入开展相关基础理论与应用基础、关键技术研究，突破堤防淤筑工程指标设计、淤区排水、围堰防护、安全监测与评价、裂缝防治等技术瓶颈，解决设计、施工与管理等关键技术难题。

2 黄河下游堤防淤筑工程材料特性研究

与其他江河堤防临水运行不同,黄河下游大部分堤防常年不靠水;与其他黏土填筑堤防不同,黄河堤防是在历代民埝上续建,基础极为薄弱(底基多为秸料),内部材料组成复杂,质量参差不齐,隐患险点众多,土体非饱和特性显著,参数变异性大,渗透系数率定困难,目前采用的参数概化法不符合黄河堤防土体特点。基质吸力和净围压是影响非饱和土强度的主要因素,目前土体非饱和特性研究仅考虑了基质吸力或净围压影响,与实际情况不符。土体材料特性研究的滞后,不能为堤防淤筑工程设计、施工与管理关键技术研究提供必要的理论依据和技术支撑。

引入能反映土体参数统计特征的随机分析理论,采用概率统计分析及室内外试验等手段,研究黄河堤防土体参数分布特征,建立黄河堤防土体的概率函数模型。黄河下游堤防土体非饱和特性显著,基质吸力和净围压是影响非饱和土强度的主要因素,应用英国 GDS 非饱和仪,开展基质吸力与净围压共同作用下的非饱和土土水特征及力学强度特性试验,揭示了基质吸力与净围压对堤防土体非饱和特性的影响规律,建立了非饱和土土水特征与主应力差公式。黄河堤防土体参数概率模型、非饱和土土水特征与主应力差公式的建立,实现了土体随机性与非饱和土强度理论的突破,推动了土体概率模型与非饱和土土水特征与主应力差公式等在淤筑工程中的实质性应用。

2.1 黄河下游堤防淤筑工程材料特性研究现状

2.1.1 堤防淤筑工程土体渗透随机性研究现状

随机性分析与研究在岩土工程领域中开始的相对较晚,国外最早起始于 20 世纪 60 年代,这一时期以 Lumb P^[1,2]、松尾埝^[3]、Meyerhof G G^[4]等为代表开始了对土体性能统计分析的初步研究;此后,这些概率理论和随机模型被国内外学者所引用,近些年来在土坡稳定的可靠性方法和计算方面进行了较多的研究,在国外的河流堤防工程治理中已得到了一定的应用,但是在我国黄河下游堤防淤筑工程应用中,国外学者关注较少,没有成熟的经验与方法可以借鉴。

国内专家学者在土体渗透随机性理论研究方面,已开展了较多的研究工作^[5]。如以东北大学胡小荣^[6]等应用地质统计学原理并结合随机有限元中心点离散法、局部平均离散法、插值法三种较常用的随机场离散方法,对岩土力学参数随机场的离散进行了研究;河海大学王飞^[7]等基于一阶 Taylor 随机有限元法,推导出相应的渗流响应量的随机响应公式,进而实现了三维稳定渗流场随机有限元分析。胡小荣等应用地质统计学原理通过对随机场作空间变异性分析来获得随机场的空间结构特征对土体参数随机性进行了研究,既把



土体参数视为随机变量或随机场,但是缺少对土体渗透性参数随机性的考虑。王飞等在土体渗透性参数随机性方面做出大量的理论研究,但是没有具体应用到实际工程中,并且没有结合黄河下游堤防工程渗透性参数的具体特征。

土体渗透随机性应用研究方面,以核工业第二研究设计院建筑所梁万顺^[8]等对核电厂结构地基土参数随机性进行了分析研究;长江科学院李少龙^[9]等在汉江遥堤典型堤段对堤后表层土取样进行渗透性试验,分析了土体渗透系数的随机性和结构性的空间变异特征。梁万顺和李少龙等主要在土体渗透性参数随机性应用方面做出了较大的研究成果,但仅结合具体位置的土体渗透性质做了应用性研究,没有把黄河下游堤防临界坡降作为随机变量进行研究分析,并且没有考虑黄河下游堤防土体渗透性参数随机性较大等特点。

黄河堤防建设工程量巨大、战线长,淤筑材料全部就地取材,直接抽取河道内泥沙,用淤筑的方式建设。黄河堤防是在历代民埝上续建,基础极为薄弱(底基多为秸料),内部材料组成复杂,参数变异性大。黄河下游大部分堤段常年不靠水,难以通过原型观测资料率定土层渗透系数,需针对黄河堤防工程材料的特点,引入能反映土体参数统计特征的随机分析理论,采用概率统计分析 & 室内外试验等手段,研究黄河堤防土体参数分布特征,建立黄河堤防土体的概率函数模型。因此,深入研究黄河下游区域土性参数统计特征,确定渗透系数和临界坡降的随机概率分布规律,是目前黄河下游堤防工程土体参数随机性研究的热点与重点。

2.1.2 堤防淤筑工程非饱和土强度特性研究现状

在国外对于非饱和土,常用的强度理论为 Bishop 理论(1959)和 Fredlund 理论(1988)。Bishop 理论依据 Terzaghi 饱和土的有效应力原理和实验研究,通过引入有效应力参数提出了非饱和土的有效应力公式,在此基础上根据 Mohr - Coulomb 强度理论公式得到了非饱和土的抗剪强度公式。Fredlund 理论根据非饱和土的双应力变量理论,提出非饱和土抗剪强度理论公式。在强度参数 χ 值的确定方面,大部分研究都围绕着 χ 与饱和度 S_r 之间的关系展开,Jennings 和 Burland 通过进行各种土的压缩试验得出,当土体饱和度高于某一值时,Bishop 强度理论公式才实用。但是由于 χ 与土的结构性联系更为紧密,所以在 χ 与体变参数(如饱和度)之间并不存在唯一性。

在堤防工程非饱和土力学强度特性理论探讨方面,我国沈珠江^[10]将非饱和土中所有原因产生的作用力用广义吸力表述,并强调了结构吸力在提高土的强度方面的重要性,提出了非饱和土强度的双曲线模型。卢肇钧、缪林昌和殷宗泽、党进谦和李靖等^[11-13]对膨胀土及黄土这两种典型的非饱和土进行了研究,提出了相应的抗剪强度公式。汤连生^[14]通过对非饱和土粒间吸力的研究,对非饱和土抗剪强度理论进行了解释。陈敬虞^[15]在参阅了中、外文相关资料的基础上,总结了非饱和土抗剪强度理论的研究成果,以上专家在非饱和土力学强度理论探讨方面做了深入的探讨,提出了非饱和土抗剪强度有待进一步研究的相关理论问题。但是还没有开展针对黄河堤防工程的典型非饱和土体特性试验,黄河堤防堤身土体的非饱和强度特性变化规律有待进一步探讨。



在堤防工程非饱和土力学强度特性应用研究方面,李孝平^[16]等提出了 GDS 三轴仪的非饱和土试验操作方法,并应用 GDS 三轴仪研究了某高心墙堆石坝非饱和土填料的强度特征,得到了该土样的抗剪强度参数。龚壁卫^[17]论述了非饱和土抗剪强度理论及其简化计算方法,并从膨胀土的破坏机理、变形特点和强度特征出发,探讨了膨胀土渠坡工程处理措施和处理原则,为南水北调中线工程膨胀土渠段的设计和施工开拓了新的思路。李孝平、龚壁卫等对堤防工程非饱和土力学强度特性应用进行了研究,利用改进的非饱和三轴仪对堤防非饱和土体土水特征及力学强度试验开展研究。但是,缺少针对黄河堤防工程非饱和低液限黏土在外荷作用下非饱和土水特征曲线及其变化规律的分析,试验研究不足、研究成果不系统等制约黄河堤防工程数值仿真技术的发展。

目前,国内对黄河下游堤防工程非饱和土力学强度研究较少,张先起^[18]等利用国内改进的 FSY—1 型非饱和三轴仪对黄河堤防非饱和土体土水特征及力学强度试验开展研究,对黄河堤防非饱和土体的力学特性进行尝试性的探索,但限于仪器性能,仅提出堤防非饱和土固结排水强度指标,堤防非饱和土强度指标体系尚待完善。中国科学院岩土所的李永乐和华北水利水电学院的刘汉东等^[19]开展了黄河堤防非饱和土土水特性试验研究,模拟工程中非饱和土体的实际受力状态,利用改进的非饱和土三轴仪对黄河堤防工程非饱和土在不同围压条件下的土水特性进行了试验研究,分析了黄河堤防工程非饱和土体在外荷作用下土水特征曲线及其变化规律。但尚未建立黄河堤防非饱和低液限黏土的土水特征与强度计算公式。

黄河下游大部分堤段常年不靠水,土体非饱和特性显著,基质吸力和净围压是影响非饱和土强度的主要因素,目前土体非饱和特性研究仅考虑了基质吸力或净围压影响,与实际情况不符。因此,需针对黄河堤防土体的特点,应用非饱和仪开展黄河堤防工程的典型非饱和土体特性试验,系统分析黄河堤防堤身土体的非饱和强度特性变化规律,建立黄河堤防非饱和低液限黏土的土水特征与强度等计算公式,从而推动非饱和土力学在黄河堤防工程中的应用。

2.2 黄河下游堤防淤筑工程土体渗透随机性研究

2.2.1 土体参数统计分析

黄河下游堤防及淤区位于黄河冲积扇平原上,黄河冲积扇的形成基本上是以近代河床为背轴向两岸不断扩展,逐渐形成黄河冲积扇。据现有的一些资料及黄河沿岸深层钻孔资料分析,沿黄堤防一带,其土层沉积规律一般以河床相和漫滩相交错沉积为主。从开封、兰考至山东境内的河段,自地表深 80m 范围内,其地层沉积基本上为近代黄河冲积岩性,一般上部以砂壤土、粉砂、极细砂为主,厚度 10~30m,下部则以粉砂、砂土为主,夹黏性土层,常含有细砾,厚度为 50~70m,分布很不均匀。80m 以下厚层黏性土夹砂层或黏土与砂层互层为主。黄河堤防及淤区的土性主要以壤土、砂壤土、粉土为主,主要是新中国成立后四次大复堤填筑而成。



2.2.1.1 堤防土体组成及分类

根据试验资料^[20],黄河下游堤防土性参数统计见表2.1。表2.1中不同土类的土性参数试验组数很不均匀,有的土类(如黏土、壤土等)试验组数达数百组,而有的土类(如极细砂、砂土等)试验组数才十几组甚至有的土性指标才几组。在对文献资料统计分析前,根据“去伪存真”的原则,对一些不合乎规范的数据进行了删除处理;而对于极细砂、砂土,由于受数据少的限制以及考虑到在以后渗流稳定可靠度分析中的影响而没有做很大处理。尽管文献中资料存在以上问题,但其资料全面,较完整地反映了黄河下游区域各种土质的工程特性情况,仍具有较大的应用价值。

2.2.1.2 土体参数统计

根据对黄河下游区域土的物理力学性质的统计,可以将土大体分为黏土、壤土、砂壤土、粉土、粉砂、极细砂以及砂土等七大类。每类土都有其独特的工程特性,其土性参数也有很大的不同,统计分析情况见表2.1。因资料中仅给出了每类土的数批(每批中有数组)数据的均值及标准差等指标,需要把每类土的数批数据的均值及标准差等指标合并起来,以得到每类土总体数据的均值及标准差等指标,在合并计算的过程中,引用以下两个公式。

1. 均值的合并计算公式

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (2.1)$$

式中: $\bar{x}$ 为总体数据的平均值; $\bar{x}_i$ 为第 i 批数据的平均值; n_i 为第 i 批数据的个数; k 为数据的批数。

2. 标准差的合并计算公式

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i - 1) \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i^2 - (\sum_{i=1}^k n_i) \bar{x}^2}{\sum_{i=1}^k n_i - 1} \quad (2.2)$$

式中: σ 为总体数据的标准差; σ_i 为第 i 批数据的标准差。

2.2.1.3 土体性质分析

黄河下游7类土的情况见表2.1。黄河土质的复杂性,也在于土层组成往往由这7类土中的某几类土混合而成,其性质具有更大的随机性。从大的方面,可以把黄河下游的土分为黏性土与无黏性土。黏性土通常是指液限 $w_L > 26\%$, 塑性指数 $I_P > 4 \sim 7$, 黏粒含量一般大于10%的土。根据这一标准,黏性土包括黏土与壤土,无黏性土包括砂壤土、粉土、粉砂、极细砂、砂土。把黄河下游区域的土分为黏性土与无黏性土,能更好地利用黏性土与无黏性土的指标经验公式,从宏观上了解土的共性。



表 2.1 黄河下游堤防土性参数统计表

土性	指标类别	颗粒级配/%						天然状态下的基本物理性指标						土粒比重	渗透系数 ×10 ⁻⁵ (cm/s)
		砂						不均匀系数 C _u	含水率 /%	湿密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	孔隙比	饱和度 /%		
		2~ 0.5mm	0.5~ 0.25mm	0.25~ 0.1mm	0.1~ 0.075mm	粉粒 0.075~ 0.005mm	黏粒 ＜0.005 mm								
黏土	总组数			20	337	337	337		448	444	447	200	174	80	116
	平均值			2.1	10.6	45.1	44.2		32.8	1.868	1.412	0.912	92.3	2.745	3.819
	标准差σ			5.41	4.50	10.33	11.13		5.54	0.07	0.11	0.16	5.02	0.07	17.63
壤土	总组数			17	479	479	479	22	787	785	806	430	386	125	151
	平均值			0.9	26.0	54.8	19.1	14.0	25.6	1.941	1.547	0.751	90.1	2.721	5.092
	标准差σ			2.18	13.02	12.01	5.88	10.63	4.81	0.08	0.11	0.13	6.81	0.02	13.57
砂壤土	总组数	92	96		402	402	402	32	418	418	423	166	152	69	105
	平均值	0.0	0.1	1.7	31.3	61.5	6.8	5.4	25.0	1.892	1.515	0.780	84.5	2.710	15.752
	标准差σ	0.10	0.65	7.20	15.05	15.32	3.06	2.22	4.01	0.09	0.09	0.11	12.41	0.02	54.30
粉土	总组数			15	139	139	139	2	136	138	140	62	55	9	29
	平均值			0.3	34.1	64.9	1.0	3.0	25.4	1.845	1.472	0.819	82.0	2.700	32.56
	标准差σ			1.29	10.75	10.73	1.00	1.41	3.31	0.10	0.07	0.10	10.30	0.01	75.19
粉砂	总组数	39	39	39	135	135	94	12	150	150	150	48	45	31	68
	平均值	0.8	7.1	28.1	55.1	33.3	0.5	4.5	21.7	1.846	1.512	0.684	85.3	2.697	32.770
	标准差σ	1.93	13.89	26.37	18.31	14.51	0.83	2.15	6.03	0.19	0.13	0.15	11.16	0.02	43.35
极细砂	总组数	10	10	10	22	22	22	2	25	25	25	10	8	6	19
	平均值	3.9	24.5	28.7	51.8	7.9	0.7	4.0	13.6	1.646	1.431	0.632	73.5	2.670	111.60
	标准差σ	5.40	25.06	25.13	50.19	10.37	1.17	1.41	9.67	0.75	0.62	0.18	22.50	0.01	210.08
砂土	总组数				16	16	16		16	16	16	2	2		26
	平均值				37.4	61.6	1.1		22.1	1.831	1.500	0.725	88.5		230.00
	标准差σ				23.21	22.33	1.39		6.53	0.13	0.08	0.14	16.26		108.0



2.2.2 渗透系数概率模型

2.2.2.1 渗透系数概念

土体孔隙中的自由水在重力作用下发生运动的现象称为水的渗透。渗透系数 k ，也称水力传导系数，是一个重要的渗流参数。根据达西定律，当水力坡降 $J=1$ 时，渗透系数在数值上等于渗透速度，常用单位 cm/s 或 m/d 表示。

渗透系数与土的性质如粒度成分、矿物成分、颗粒排列、充填状况、结合水膜厚度、土的结构构造等有关，也和液体的物理性质有关。影响渗透系数的因素很多，由于土的组成及其性质极其复杂，同一种土质，其渗透系数也具有很大的随机性，把渗透系数作为随机变量进行分布规律的研究具有重要意义。

2.2.2.2 渗透系数统计特征

1. 渗透系数对数均值及对数标准差的转换

根据资料中每一类土数批（每一批中有数组）数据的均值和标准差，把每一批数据的均值和标准差转换为对数均值和对数标准差，在转换中利用下列转换公式：

$$\mu_{\ln x} = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1 \right) \tag{2.3}$$

$$\sigma_{\ln x}^2 = \ln \left(\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1 \right) \tag{2.4}$$

式中： μ_x 为数据 x 的均值； σ_x 为数据 x 的标准差； $\mu_{\ln x}$ 为数据 x 的对数均值； $\sigma_{\ln x}$ 为数据 x 的对数标准差。

在进行各类土渗透系数总体数据的对数均值及对数标准差转换计算中有两种算法。一种是先求总体数据的均值及标准差，然后直接利用公式进行转换；另一种是求出每批数据的对数均值及对数标准差后，利用加权平均的办法计算；两种算法的总体对数均值基本相等，但标准差存在一定的差异，理论上前一种算法更为合理，因此数据转换表中，总体对数均值及对数标准差都是利用前一种算法而得。转换结果见表 2.2。

表 2.2 渗透系数转换统计表

土性	批数	组数	均值×10 ⁻⁵ /(cm/s)	标准差×10 ⁻⁵ /(cm/s)	对数均值	对数标准差
黏土	1	24	2.47	6.53	-11.65	1.44
	2	20	8.80	34.32	-10.93	1.67
	3	21	3.06	5.24	-11.08	1.27
	4	21	5.88	20.47	-11.03	1.60
	5	30	0.66	1.30	-12.31	1.26
	总计	116	3.82	17.63	-11.73	1.76
壤土	1	26	7.44	15.09	-10.34	1.28
	2	13	5.65	18.90	-11.03	1.58
	3	13	5.94	9.36	-10.36	1.12
	4	13	5.96	9.93	-10.39	1.15



续表

土性	批数	组数	均值 $\times 10^{-5}$ /(cm/s)	标准差 $\times 10^{-5}$ /(cm/s)	对数均值	对数标准差
壤土	5	17	1.98	3.80	-11.60	1.24
	6	34	3.79	7.59	-10.99	1.27
	7	35	5.28	17.82	-11.11	1.59
	总计	151	5.09	13.57	-10.93	1.45
砂壤土	1	14	12.67	20.47	-9.62	1.13
	2	48	4.54	8.77	-10.48	1.25
	3	8	27.59	74.55	-9.25	1.45
	4	7	13.79	14.99	-9.28	0.88
	5	28	33.63	92.09	-9.37	1.46
	总计	105	15.75	54.30	-10.03	1.60
粉土	1	4	14.73	27.06	-9.56	1.21
	2	16	51.26	96.55	-8.33	1.23
	3	4	8.65	7.57	-9.64	0.75
	4	5	6.13	2.36	-9.77	0.37
	总计	29	32.56	75.19	-8.95	1.36
粉砂	1	12	62.89	34.79	-7.50	0.52
	2	3	86.32	131.76	-7.66	1.10
	3	38	20.79	23.98	-8.90	0.92
	4	15	29.09	11.26	-8.21	0.37
	总计	68	32.77	43.35	-8.53	1.00
极细砂	1	2	213.35	266.79	-6.62	0.97
	2	2	83.17	115.72	-7.63	1.04
	3	9	154.40	257.39	-7.14	1.33
	4	6	22.97	25.73	-8.78	0.90
	总计	19	111.60	210.08	-7.55	1.23
砂土	1	23	252.00	94.60	-6.96	1.04
	2	3	66.50	41.43	-7.48	0.57
	总计	26	230.60	108.0	-6.17	0.45

2. 渗透系数分布规律

根据速宝玉等对江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数概率分布规律的研究结果可知^[20]，混凝土坝芯样渗透系数符合对数正态分布统计特性论。同时，根据资料^[21]，用 χ^2 检验法分析了黄河堤防淤区渗透系数分布规律，其渗透系数符合对数正态分布统计的特性。因此，可以认为黄河下游堤防每一类土的渗透系数均符合对数正态分布的统计特性，亦或在进行可靠性分析时假设其为对数正态分布。