

NANSHUI BEIDIAO ZHONGXIAN YANTU GONGCHENG
ZHILIANG YU ANQUAN BAOZHANG LILUN YU SHIJIAN

南水北调中线岩土工程 质量与安全保障理论与实践

张敏 董成会 杨浩明 罗立群 刘巍巍 等 编著

非
外
借

 黄河水利出版社

国家重点研发计划课题(编号:2017YFC1501202)

国家自然科学基金项目(编号:51509104、60934009)

水利部项目(编号:SF-201711)资助

南水北调中线岩土工程质量与 安全保障理论与实践

张敏 董成会 杨浩明 罗立群 刘巍巍等编著



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书针对南水北调中线岩土工程中存在的检测技术难题,开展了超大粒径粗粒土渗透检测装置、低透水性塑性防渗墙渗透检测装置及逆止阀/排水管道水密性检测装置开发,解决了工程检测技术难题;针对南水北调中线工程中土工膜广泛应用但缺乏理论和试验研究的情况,开展了弹塑性损伤条件下土工膜抗渗特性试验研究和复合土工膜老化预测模型研究;针对南水北调中线岩土工程地质条件特殊和工况复杂多变,开发了可移动式边坡工程安全监测模块,提出了边坡稳定安全系数计算模型和安全预测评估的信息融合方法,为边坡稳定分析安全评价提供科学依据。

本书可供从事土木工程、水利工程、岩土工程检测和监测技术人员阅读参考,也可作为相关领域高校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调中线岩土工程质量与安全保障理论与实践/
张敏等编著. —郑州:黄河水利出版社,2018. 11

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1722 - 4

I. ①南… II. ①张… III. ①南水北调 - 岩土工程 -
工程质量 - 安全管理 IV. ①TV68

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 274636 号

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclchs@126.com

承印单位:河南瑞之光印刷股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:12.25

字数:283 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 12 月第 1 版

印次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定价:42.00 元

前 言

南水北调工程的实施,在党中央、国务院的重视和关怀下,有关部门和单位做了大量的调查、研究、勘测、规划、设计及反复论证工作,历时 50 年,经过近百种方案比选后,提出了从长江下游、中游、上游分别引水的南水北调东、中、西三条调水线路。南水北调工程深受各级领导和国内外各界人士的广泛关注。南水北调中线一期工程总干渠全长约 1 400 余 km(含天津干线约 155 km),是从长江最大支流汉江中上游的丹江口水库调水,在丹江口水库东岸河南省淅川县九重镇境内的工程渠首开挖干渠,经长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口,沿华北平原中西部边缘开挖渠道,在荥阳通过隧道穿过黄河,沿京广铁路西侧北上,自流到北京市颐和园团城湖的输水工程。一期工程建成后年调水 95 亿 m^3 。南水北调中线工程横穿长江、淮河、黄河、海河四大流域,涉及十余个省(自治区、直辖市),输水线路长,穿越河流多,工程涉及面广,经济效益与社会效益巨大,包含水库、湖泊、运河、河道、大坝、泵站、隧洞、渡槽、暗涵、倒虹吸、PCCP 管道、渠道等水利工程,是一项规模宏大、投资巨额、涉及范围广、影响十分深远的战略性基础设施。

南水北调中线工程主要工程地质问题有膨胀岩土边坡稳定问题、黄土装土湿陷问题、饱和沙土地震液化问题、煤矿采空区的变形稳定问题、渠道衬砌抗浮稳定问题、水(泥)石流对渠道安全影响问题、基坑涌水涌沙问题、渠道渗漏问题、浸没和次生盐碱化问题等。南水北调中线岩土工程中比较突出的问题有:新型材料塑性防渗墙渗透系数低,目前没有合适的测试装置;工程中存在超大粒径粗粒土,缺乏相应渗透系数测试仪器;逆止阀水密性测试存在测试环境复杂、荷载施加困难、观测周期长、测量精度低、样品容易破坏等问题;复合土工膜老化与寿命预测难题;中线工程挖方填方工程多,存在多处边坡工程,需要进行安全监测与稳定性评价,目前普遍采用的集中式监测技术存在传感器引线多、线缆间干扰严重、精度受限、安全评价模型与方法有待改进等。

针对南水北调中线岩土工程相关问题,本书在对工程现状开展需求调研的基础上,主要完成了以下工作:针对新型材料塑性防渗墙渗透系数低,目前没有合适的测试装置的问题,基于低透水性塑性防渗墙的渗透特性分析,设计了渗透系数小于 10^{-6} cm/s 的低透水性塑性防渗墙测试仪器,并提出了相应的测试方法,可供低透水性塑性防渗墙渗透试验与质量检测时参考。针对工程中存在超大粒径粗粒土,基于超大粒径粗粒土渗透特性分析,设计了 $60 \text{ mm} \leq d_{85} \leq 100 \text{ mm}$ 的渗透系数测试仪器。设计了逆止阀水密性测试仪器,并提出了相应的测试方法,可供逆止阀、给水排水管道水密性试验与质量检测时参考。在对土工膜防渗工程应用情况调研的基础上,结合工程实际情况,改进试验设备,开展土工膜不同弹塑性损伤条件下抗渗特性试验,总结土工膜渗透系数和耐静水压变化规律,建立应变、厚度与土工膜渗透系数和耐静水压相关关系函数。开展了复合土工膜自然气候老化、热老化及湿热老化三种情况下的老化试验;针对目前堤防工程监测系统存在系统造价高、设备管理困难、数据传输不便等问题,开发具备可移动、数据精度高、集成度高、成本低、节

能环保等优点的可移动式堤坝工程安全监测模块,研发适用于可移动式堤坝工程安全监测模块的数据后处理软件。针对边坡稳定与浸润面变化及材料密实度密切相关,材料参数为常量的边坡安全系数计算模型,不能反映水位变化及材料密实度对边坡安全的影响,开发出内摩擦角、黏聚力随着含水率的变化而产生变化的边坡稳定性分析程序。针对当参数具有随机不确定性等情况,基于 pignistic 概率给出了一种新的边坡稳定性评估方法。

本书共分8章:第1章绪论主要介绍了南水北调中线岩土工程相关技术动态;第2章主要介绍了南水北调中线岩土工程质量检测关键技术,主要包括超大粒径粗粒土渗透检测技术、低透水性塑性防渗墙渗透检测技术和逆止阀/排水管道水密性检测技术;第3章、第4章主要开展了弹塑性损伤条件下土工膜抗渗特性试验研究和复合土工膜老化预测模型研究;第5章开展了可移动式边坡工程安全监测模块开发;第6章建立了材料物性变化下边坡工程安全系数计算模型;第7章开展了随机与模糊参数下边坡工程安全预测评估的信息融合方法研究;第8章对全书进行了概述和总结。

本书由河南黄科工程技术检测有限公司成金帅、黄河水利科学研究院郭欣伟编写第1章、第2章,由黄河水利科学研究院张敏、罗立群编写第3章、第4章,由黄河水利科学研究院杨浩明、刘巍巍编写第5章、第8章,由黄河水利科学研究院董成会编写第6章、第7章;全书由张敏、罗立群统稿,刘巍巍、郭欣伟校对。

本书在编著过程中得到了黄河水利科学研究院工程力学研究所岩土工程研究室全体同志、杭州电子科技大学文成林教授、南昌大学刘小文教授、华北水利水电大学硕士生牛亚宁等的热心帮助与大力支持;编写过程中,参考并引用了国内外大量专家学者的科技成果。本书得到了国家重点研发计划课题“膨胀土岸坡和堤坝渗透失稳监测预警(编号:2017YFC1501202)”,国家自然科学基金项目“黄河坝岸散抛根石水流冲刷机理研究(编号:51509104)”“面向大型工程安全预测与评估的信息融合方法(编号:60934009)”,水利部项目“防渗墙及低渗透性材料渗透系数测试系统技术示范(编号:SF-201711)”的资助并引用了部分成果,在此一并表示最诚挚的谢意。

限于作者的水平和经验,本书尚有不妥之处,敬请读者批评指正,相关意见与建议请发电子邮件至 zhangmin2000203@163.com。

编者
2018年11月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 南水北调中线岩土工程质量检测技术动态	(1)
1.2 南水北调中线土工合成材料抗渗与老化测试技术动态	(3)
1.3 南水北调中线边坡工程安全监测技术动态	(5)
1.4 南水北调中线边坡工程安全评价技术动态	(8)
第2章 南水北调中线岩土工程质量检测关键技术研究	(9)
2.1 超大粒径粗粒土渗透检测技术研究	(9)
2.2 低透水性塑性防渗墙渗透检测技术研究	(14)
2.3 逆止阀/排水管道水密性检测技术研究	(18)
2.4 小 结	(24)
第3章 南水北调工程弹塑性损伤条件下土工膜抗渗特性试验	(25)
3.1 概 述	(25)
3.2 土工膜双向拉伸试验设备改造及试验样品优化	(27)
3.3 土工膜拉伸试验	(30)
3.4 土工膜抗渗特性试验	(36)
3.5 塑性变形条件下土工膜渗透系数和耐静水压变化规律	(41)
3.6 小 结	(53)
第4章 南水北调工程复合土工膜老化预测模型研究	(54)
4.1 南水北调中线典型工程段鹤壁Ⅲ标复合土工膜应用情况	(54)
4.2 复合土工膜老化试验方法与表征方法	(59)
4.3 复合土工膜老化试验	(61)
4.4 复合土工膜使用寿命预测模型	(81)
4.5 复合土工膜老化对南水北调工程安全的影响分析	(89)
4.6 小 结	(97)
第5章 可移动式边坡工程安全监测模块开发	(98)
5.1 概 述	(98)
5.2 模块需求分析	(99)
5.3 模块总体结构设计	(100)
5.4 模块研发	(102)
5.5 数据后处理软件研发	(114)
5.6 模块测试	(135)
5.7 小 结	(148)

第6章 材料物性变化下边坡工程安全系数计算模型研究	(149)
6.1 概 述	(149)
6.2 基于材料物性变化的边坡土体强度指标计算公式	(149)
6.3 边坡工程安全系数计算模型研究	(152)
6.4 基于 GeoStudio 与 C#的边坡工程安全系数计算程序开发	(153)
6.5 基于 c 、 φ 值随含水率变化的边坡稳定性分析案例	(159)
6.6 小 结	(160)
第7章 随机与模糊参数下边坡工程安全预测评估的信息融合方法	(161)
7.1 概 述	(161)
7.2 随机参数下基于证据理论可传递信度函数的边坡工程稳定性分析 方法研究	(162)
7.3 模糊参数下基于随机集上、下概率的边坡工程稳定性分析方法	(169)
7.4 小 结	(176)
第8章 结 语	(177)
参考文献	(180)

第1章 绪论

1.1 南水北调中线岩土工程质量检测技术动态

1.1.1 超大粒径粗粒土渗透系数测定技术方面

粗粒土是按工程分类标准定名的一类土,按现行国家标准、水利部行业标准把粒径在 $0.075 \sim 60 \text{ mm}$ 且含量大于50%的土划分为粗粒土,习惯用固定粒径 5 mm 作为粗粒土的粗、细料的分界。近年来,南水北调等大型水利工程建设中,由于工程战线长,施工用料需求巨大,就地取材成为重要手段。南水北调工程沿线区域的土料,粒径小的粗颗粒土量较少,大多为粒径超过 60 mm 但小于 100 mm 的超大粒径粗粒土,即 $60 \text{ mm} \leq d_{85} \leq 100 \text{ mm}$ (d_{85} 是指填料中颗粒含量小于85%时的直径)。试验表明,超大粒径粗粒土经过正确的配比,可以达到工程用料的要求。目前,常用的室内测定土体渗透系数的仪器主要有70型渗透仪、南55型渗透仪和垂直渗透变形仪等,其内径多为 200 mm 和 300 mm ,根据《土工试验规程》(SL 237—1999)的规定,应按仪器内径大于试样粒径特征值 d_{85} 的5倍选择仪器。因此,现有的设备能够测试的粒径范围有限, d_{85} 不超过 60 mm 。张福海(2006)研制出内径 300 mm 的粗颗粒土渗透系数及土体渗透变形测试仪,测定了卵石夹粉土的垂直渗透系数和临界水力梯度;郑瑞华(2007)研制了直径为 600 mm 和 305 mm 垂直方向的大型无黏性土渗透仪,并对积石峡水利枢纽面板坝的垫层料、过渡料进行了试验;马凌云(2009)对粗粒土渗透特性试验系统的改进,满足对超高面板坝渗流试验的要求,但其试样的直径为 300 mm ;何建新(2010)设计大型水平渗透试验装置,开展了无黏性粗粒土大型水平渗透试验研究;王俊杰、陈春鸣(2013)采用自制渗透仪器开展了粗粒土渗透系数影响因素试验研究,但试样直径为 315 mm ;朱国胜(2012)开展了宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究。由于之前在水利工程中使用超大粒径粗粒土非常少,同时在水利工程中使用该类土料时,需配比较多的黏性土小颗粒,加之试样尺寸较大,试样很难进行排气饱和,因此目前还没有超大粒径粗粒土($60 \text{ mm} \leq d_{85} \leq 100 \text{ mm}$)渗透性能的测试仪器和成熟的测试方法。随着南水北调等大型工程的建设,超大粒径粗粒土在工程中的应用会越来越广泛,研制一套能对超大粒径粗粒土渗透特性进行测试的仪器,是非常有必要的。需针对超大粒径粗粒土的工程特性,合理选取测试筒直径,优化排气与加压方法,开发超大粒径粗粒土渗透系统测定装置,可为工程试验与质量控制提供技术支持。

1.1.2 塑性防渗墙渗透指标测定技术方面

随着水利工程的迅猛发展,出现了多种适宜用于防渗墙工程的材料,且其渗透系数大

多小于 10^{-6} cm/s,其中南水北调中线工程中塑性防渗墙应用较多,采用目前的试验方法检测困难。目前,防渗墙渗透性能的室外试验方法主要有物探法、土工试验法。物探法仍处于探索阶段,主要有高密度电法、地质雷达法、可控源音频大地电磁测深法、面波法、工程 CT 法等,在堤防、大坝坝基、隧道等防渗墙检测中已有初步的应用,主要用于定性评价。土工试验法包括现场与室内试验方法,其中现场试验主要有注水法、压水法、围井法等,可用于定量评价;室内试验方法多采用渗透仪,主要有 70 型渗透仪、南 55 型渗透仪和垂直渗透变形仪等,其渗透系数的测定范围大于 10^{-6} cm/s。张虎元(2011)采用美国 HUMBOLDT 公司生产的 HM-4160A 型柔性壁渗透仪,开展了膨润土改性黄土衬里防渗性能室内测试与预测;姚坤(2011)研制了混凝土防渗墙渗透试验装置,但仅限用于塑性混凝土防渗墙;李建军(2012)研制了泥浆渗透试验仪,可开展防渗墙粗粒土槽孔泥皮的抗渗性试验。随着水利工程的迅猛发展,出现了多种适宜用于防渗墙工程的材料,且其渗透系数大多小于 10^{-6} cm/s,试验时对压力控制、接触面防渗、测试精度等要求更高,目前还没有测试多种低渗透性能塑性防渗墙的仪器和成熟的测试方法。随着新型材料塑性防渗墙的广泛应用,研制一套能对多种塑性防渗墙渗透特性进行测试的仪器,是非常有必要的。需针对新型低透水性塑性防渗墙的工程特点、材料特性以及渗流理论,改进样品夹持器,合理配置水压力控制系统,开发塑性防渗墙渗透指标测定装置,从而为塑性防渗墙工程试验与质量控制提供技术支持。

1.1.3 逆止阀/排水管道水密性测定技术方面

在水利、生物、环境等工程建设中,沟、渠、岸坡以及其他一些工程结构常常会面临地下、地表以及其他方面的给水排水问题,需大量的给水排水阀门,南水北调中线工程中逆止阀/排水管道应用较多。密封性是容器满足特定功能的基本指标,逆止阀的水密性测试指标中,加载水压时阀门保证逆向不渗漏的压力值测量方法与给水排水管道的水密性测试方法相近,部分专家开展了容器的密封性能测试研究,如给水排水管道多采用气压法或水压法测试其水密性,周志钢(2005)提出模块化可编程控制器测定氢冷发动机的密封油系统状态, Richard Turcotte(2005)提出了测定容器最小燃烧压力的试验方法, Michael Fox(2008)提出了压力容器孔口阻力的测量方法, Lixiao Li(2012)研究了微细观结构的水密性能,孙海波(2013年)提出了盾构机主轴承密封系统的静态建压测试方法,许国康(2013)提供了航空产品整体油箱的先进检漏技术及其实施方案。也有部分逆止阀密封性能的研究成果,如阎耀保(2013)基于气动潜孔锤用气动逆止阀的密封特性分析,提出了优化方案,逆止阀的水密性测试多采用现场试验,存在现场测试复杂、荷载施加困难、观测周期长、测量精度低、样品容易破坏等问题,目前还没有室内测试逆止阀水密性的仪器和成熟的测试方法。随着生物、环境、水利等工程的迅猛发展,多数新型材料逆止阀的广泛应用,研制一套能室内测试逆止阀水密性的仪器,是非常有必要的。

1.2 南水北调中线土工合成材料抗渗与老化测试技术动态

1.2.1 土工膜材料力学特性测试技术方面

国内外学者在土工膜应力—应变关系方面做了大量的研究工作, Giroud 用窄条拉伸试验方法研究了土工膜的应力—应变关系; Merry 等通过液胀多轴拉伸试验得到双曲线形式的土工膜应力—应变关系方程; Zhang 等分别用不同试验方法给出了各种形式的基于拉伸应变速率的土工膜应力—应变关系黏弹性模型, 但这些模型都比较复杂, 模型参数计算也不方便, 需要进行专门的试验, 所以并未成为工程师们设计时所能采用的实用模型; Wesseloo 等用宽条拉伸试验方法得到了基于应变率的土工膜应力—应变关系分段函数模型; Giroud 通过理论分析指出土工膜泊松比并非常数, 而是随着延伸率的增加不断降低, 并推导出土工膜泊松比随应变变化的数学表达式。通过总结可以发现上述有关土工膜力学特性的研究成果虽然较多, 但所采用的试验方法主要有两类, 即条带拉伸试验和液胀多轴拉伸试验。条带拉伸试验又分为单向窄条拉伸试验和单向宽条拉伸试验。为了模拟土工膜在实际应用中的复杂受力情况, 张思云等采用十字形试样对 PE 土工膜进行了双向拉伸试验研究, 探索土工膜在双向拉伸与单向拉伸条件下力学性质的差别。任泽栋等提出了薄壁圆筒双向拉伸测试方法, 并利用有限元软件中的线弹性模型对相同位移荷载条件下的各种试验方法进行数值模拟。为了探索和比较不同种类的土工合成材料在双向受力情况下的力学性能, 张思云等选取聚乙烯 (PE) 土工膜和聚丙烯 (PP) 非织造土工布进行单向和双向拉伸试验。吴云云等就双向拉伸试验的试样制取、变形量测以及厚度测定进行了有关探讨。

1.2.2 土工膜水力学特性测试技术方面

国外主要采用柔性壁渗透仪对低渗透性的材料进行渗透性能试验, 其中利用柔性壁渗透仪研究黏土衬垫的防渗性能已经很成熟, 不同尺寸缺陷的聚乙烯土工膜渗透系数的变化规律以及高密度聚乙烯缓慢开裂对复合衬垫防渗效果的影响均已得到广泛研究。目前, 土工膜防渗在我国虽然得到了广泛的应用和发展, 但对土工膜实际运行状态下水力学特性的研究尚不够深入, 现有的试验和理论研究多基于未受力土工膜 (完好土工膜) 的水力学特性研究。刘让同等通过对非织造复合土工膜微观结构的分析, 阐述了非织造复合土工膜的水渗透破坏机制。白建颖等通过理论分析及试验数据得出渗透性能中水头差及流速的关系式, 并对测试标准取值方法提出建议。刘桂英等讨论了目前土工膜、复合土工膜渗透性能 (蒸汽透湿系数、渗透系数、耐静水压) 的三种试验方法。姜海波对大面积土工膜防渗体渗透系数进行了研究。张光伟等以高密度聚乙烯复合土工膜为试验材料, 从微观结构上揭示了渗透系数变化的原因。张书林针对土工膜试样过水面积和水压力大小等因素对测试时间的影响进行研究分析, 通过最优化配置, 给出了不同渗透系数的测定条件建议。现有土工膜水力学特性试验方法的缺陷及局限性导致土工膜试验过程中的抗渗性能与实际运行性能不一致。为揭示土工膜实际运行中的渗透变形特性, 准确预测土工

膜受力后抗渗性能及安全度,有必要探索弹塑性损伤条件下土工膜抗渗特性试验方法,对最接近其运行形态的抗渗性能进行系统深入的研究。

1.2.3 复合土工膜老化试验研究方面

土工合成材料一旦发生老化,其强度等特性会发生不同程度的下降,当其性能下降至一定程度时,必然影响工程的正常运行与功能发挥,用力学性能衰减规律评价其使用寿命是最可靠的方法之一。Rollin 等(1994)对用于垃圾填埋场大约7年的高密度聚乙烯土工膜进行了研究,指出考虑室外自然老化与人工加速老化结果之间的相关性时,必须考虑温度的影响。R. Kerry Rowe 等(2014)通过五种不同温度(55℃、65℃、70℃、75℃、85℃)下的室内老化试验,研究了高密度聚乙烯土工膜厚度对土工膜使用寿命的影响,指出在其他条件完全相同的情况下,可以通过增加土工膜厚度来延长土工膜使用寿命。甘采华等(2007)为了了解土工合成材料的抗紫外线老化的能力,对土工合成材料进行了室外现场模拟老化试验,得到了材料抗拉强度随老化时间变化的规律。对于土工合成材料的老化试验,在室内老化试验研究方面,侧重于考察直接暴露在自然环境条件下土工合成材料老化性能的研究,室内加速条件主要考虑紫外线、温度的影响;在室外老化试验研究方面,也主要考察直接暴露在自然环境条件下的土工合成材料老化性能的研究,对于覆盖有保护层的情况研究虽然有所涉及,但针对性不强,与实际工程结合不密切。因此,模拟工程实际应用环境,开展土工合成材料的室内加速老化试验研究应受到足够重视。

1.2.4 复合土工膜老化预测模型研究方面

通常情况下复合材料的寿命预测都是基于实验室加速老化试验进行的,利用时间—温度之间的关系,从而确定土工合成材料的使用寿命。在塑料行业,人们很早就开始关注人工气候老化和大气老化的相关性以及使用寿命的预测,早期的工作是由 Reinhardt 等(1958)提出的解析方法无法准确描述人工加速老化和大气自然老化的相关性,更无法应用于预测塑料的使用寿命。在 Reinhardt 的解析方法基础上,又产生了一种化学的方法,定性地描述了材料的老化性能和曝露前材料的化学组成之间的关系,大多用于材料开发领域以研究和评价不同的添加剂、防老剂对材料耐久性的影响。Langshaw(1960)提出了可以称之为寿命函数法的方法,给出了一个老化速率的一般方程,但是不能反映曝露条件与塑料性能变化之间真正的数学关系。Yu. V. Suvorova 等(2010)研究了不同应力条件下,土工合成材料延伸率随时间的变化规律,选取俄罗斯 Rabotnov 非线性公式评估时间和应力对土工合成材料拉伸性能影响,试验结果表明,这种评估分析方法可以用于一定压力作用下土工合成材料耐久性能的预测。尚建丽等(2011)建立了 EPDM(三元乙丙橡胶)防水卷材使用寿命模型,对其使用寿命进行预测。在老化预测模型研究方面,基于热老化加速试验成果进行外推计算,从而得到材料预估寿命,是目前较为常用的方法,通过湿热老化加速试验预估材料寿命尚无成熟经验。然而南水北调工程渠道防渗中,影响土工合成材料老化性能的因素,更多涉及温度、水分等因素。因此,模拟实际应用环境,开展室内湿热老化加速试验,据此建立复合土工膜使用寿命预测模型更为必要。

1.2.5 复合土工膜数值分析研究方面

南水北调工程中,渠道是输配水的主要载体,而复合土工膜作为渠道防渗材料,它与垫层材料界面力学特性决定着渠道土工膜防渗结构稳定性以及整个渠道的安全性。柳青祥等(2003)根据三维有限元法计算出大坝不同高程的应力应变以及复合土工膜的受力及变形,依据室内试验值,提出大坝工程应采用的土工膜厚度及质量密度,并对复合土工膜在不同坡度坝面铺设时的抗滑稳定性进行了计算。尚层(2012)在总结前人研究成果的基础上,从复合土工膜结构角度出发,结合实际工程,采用 ABAQUS 大型通用软件,对土石坝复合土工膜防渗斜墙在不同条件下(锚固形式、坝高、摩擦系数和坝坡)的应力变形进行了三维有限元数值计算,得到了土石坝复合土工膜防渗斜墙应力变形的特点和规律。吴俊杰等(2013)为了解全库盘防渗复合土工膜的应力应变特性,结合新疆某山前倾斜平原全库盘防渗复合土工膜堆石坝,采用三维非线性有限元进行应力应变分析,对库盘防渗复合土工膜进行了安全评价。多数学者采用有限单元法/有限差分法对复合土工膜加固大坝方案进行分析与研究,得出了相应的应力与稳定性分析规律,但其研究成果多针对大坝,且考虑因素相对单一。对于南水北调工程而言,输水建筑物主要为渠道,其结构和功能与大坝尚有较大区别,且需考虑的影响因素也相对较多,因此开展复合土工膜老化对南水北调渠道安全影响的数值分析具有较强的理论意义与实用价值。

1.3 南水北调中线边坡工程安全监测技术动态

水利工程安全监测技术最早是从19世纪90年代从大坝监测发展而来,到20世纪50年代以来快速发展,自动化程度逐渐提高,迅速发展水利枢纽、堤防工程、水闸、渠道等工程中。欧美等发达国家在水利工程自动化监测技术方面的研究较为成熟,涌现了众多研究成果。从其发展过程来看,监测数据采集系统都是由集中式采集向分布式采集方向发展,其核心部件——量测控制单元(MCU)多采用模块化结构,极大方便了系统的集成和维护;而监测数据的采集与传输方式沿着人工测量—有线—无线的路径发展;同时,监测设备的自动化程度也逐步提高,设备控制软件的功能更加全面。

1.3.1 监测数据采集系统研究方面

意大利在 Chotas 坝上安装了集中式数据采集仪,并在此基础上进一步研制了 GPDAS 分布式数据采集系统;美国基美星(Geomation)公司的2300型分布式监测系统可远程控制测量、通信及数据分析等功能,测量单元、网络监控站及传感器可以进行相互通信,并基于此推出了新型的2380MCU(监测单元)。美国 DGSi 公司研制 Logger 监测数据系统,实现了监测设备的模块化设计,按照传感器数量与信号类别设计了不同型号的采集模块,且可以自由扩展;加拿大 Roctest 公司开发的 Senslog1000x 安全监测数据自动采集系统,实现了数据采集模块对各类信号的兼容,并且可扩展到255个采集通道,满足大型工程的监测需求;美国基康公司近年来推出了低功耗小型数据采集仪,可最多连接6个传感器,具备远程无线传输功能,但仅兼容基康品牌的振弦式传感器,测量项目包括渗压、土压力与

水位等。此外,分布式光纤传感技术也逐步应用于数据采集系统。我国的水利工程监测起步较晚,相比于欧美发达国家仍有一定差距。国内目前比较先进的系统主要是大坝监测自动化系统,包括南京水利水电自动化研究所(南瑞集团)研发的 DAMS 型大坝安全监测自动化系统、西北勘察设计院推出的 LN 型大坝安全监测自动化系统等。近年来国内学者在大坝自动化监测方面取得了较多研究成果:重庆大学的廖海洋等基于嵌入式技术和 GPRS 无线网络技术,提出了一种新型多参数微型水质监测系统,可以实现水体化学成分的实时和远程监测;南昌大学的陈伟慧等基于嵌入式技术研究了污水多参数监测系统,实现了污水 pH、化学需要量、排放量等参数的远距离监测;刘建林等利用 linux 系统与嵌入式技术,研究大坝安全监测系统数据集中器,优化了数据存储方式,提高了数据传输效率。与大坝监测自动化的研究相比,国内针对堤防监测系统的研究较少,黄河水利委员会于 2011 年与荷兰 AGT 公司在黄河下游防洪工程焦作温县段开展堤防工程险情预警预报系统的试点建设,用于观测长距离堤段的整体变形情况,并搭建了自动化数据采集系统;长江水利委员会周小文等在长江谏家矶地区堤防开展试验,建立了 DSEWS 监测系统,实现了渗透压力与变形数据的自动监测;黄河水利科学研究院岩土力学与工程研究团队基于水利部“948”项目,引进吸收美国 AGI 边坡监测系统并进行二次开发,研究了国产传感器的替代方案,实现了监测数据的自动采集、无线传输、多模式预警、人机自由交互等功能,在山东德州黄河放淤固堤工程、河南焦作黄河放淤固堤工程、长江堤防张家港段开展监测试验,结合试验经验对仪器设备进行了优化升级,在此基础上申请了 2 项发明专利。但对于战线长、断面多、测点分散的堤坝工程安全监测,现有主流产品存在系统造价高、设备安装复杂、设备管理困难等问题,使得堤坝工程的安全监测普及程度较低。

1.3.2 监测数据通信与传输技术研究方面

大型工程的监测自动化发展过程与数据传输技术的发展息息相关,最初的传感器监测数据依靠人工采集,随着通信技术的发展,先后出现了以串口通信、同轴电缆、光纤等为代表的有线传输技术和以蓝牙、Wi-Fi、GPRS 等为代表的无线传输技术。串口通信是计算机上一种非常通用的设备通信协议,由美国工业电子联盟(EIA)制定,常见的标准接口有 RS485 和 RS232,其优点是传输线路少,但受制于低速串行单端标准,数据传输效率低且容易受到干扰。同轴电缆技术由于其很好的屏蔽特性,密织网状导体能够有效隔离外界电磁干扰,有较好的噪声抑制特性,传输距离也远超串口通信,可以达到数百米至上千米,传输速率也较串口通信快很多,香港理工大学的殷建华教授和浙江大学的陈云敏教授在边坡监测中,利用同轴电缆技术进行 TDR(时间域反射仪)测量,取得了良好的效果。光纤技术与同轴电缆结构相似,具备信号衰减小、传输速率快、不易受到电磁干扰等优势,武汉理工大学的姜德生院士、中国地质科学院的周策等将其成功应用于宜万铁路、湖北秭归、巴东县和重庆巫山县等边坡监测中,但由于配套模块设备和架设成本较高,该技术尚未在监测系统中广泛推广。蓝牙技术是由爱立信公司研发并制定的一种全球性的小范围无线通信技术,蓝牙网络提供点对点、点对多点的无线连接,在一个任意的有效通信范围内,所有设备遵循同等的工作方式,传输效率很高,同时设备是可移动的,组网十分方便,但受制于技术原理,信号覆盖范围小,有效传输距离仅在 10 m 左右,植入成本较高,功耗

较大。Wi-Fi 是一种允许电子设备连接到一个无线局域网的技术,通常使用 2.4 G UHF 或 5 G SHF ISM 射频频段,该技术具备使用便捷、组网成本低、传输速率快等特点,在世界范围内广泛应用。但 Wi-Fi 的使用依赖于网络基站,并不完全适用于通信条件较差的野外监测。GPRS 技术(通用分组无线服务技术)是 GSM 移动电话技术的延续,GPRS 以封包(Packet)式来传输,数据传输价格便宜,传输速率也较快,我国与欧美国家在 GPRS 基站的建设方面较为完善,GPRS 信号能够辐射到我国大部分领土,使用较为方便;同时,GPRS 网络引入了分组交换和分组传输的概念,使得数据传输效率大大提高,国内外众多学者在边坡、水库、桥梁、隧洞等众多工程监测中采用 GPRS 技术实现监测数据的无线传输,研究成果较为丰富。通信技术的迅速发展为监测系统提供了多种数据传输技术,极大地提高了数据传输速率与数据的准确性,而目前国内外主流品牌工程监测系统主要采用一体化设计,传感器与监测主机一般采用电缆传输或单线 GPRS 传输,对于传感器与监测主机之间设置传输与转换模块的研究较为缺乏,在针对堤防工程战线长、断面多、测点分散等特殊的工程情况时,数据传输的精度及传输效率较差,阻碍了监测设备的推广与应用。

1.3.3 人机交互技术研究方面

随着信息技术的发展和数字化产品的普及,嵌入式系统因其专业性强、系统精简、可靠性好等优点逐步应用到监测仪器的研发中。基于嵌入式技术的监测系统将应用程序、操作系统和处理器集成在一起,功能强大、集成度高。但嵌入式系统本身不具备自主开发能力,用户通常无法对其中的程序功能进行修改,随着信息化技术的逐步发展,人机交互技术在嵌入式系统中得到了广泛的应用。人机交互技术是指通过计算机自带的输入、输出设备,通过有效的方式实现人和计算机之间的对话的技术,是认知学、理学、人机工程学、多媒体技术等密切相关的综合学科。20 世纪 60 年代以来,人机交互技术经历了三个阶段:纯手动控制—命令控制语言—图形用户界面,图形用户界面(GUI, Graphical User)以其丰富的图形图像信息,直观的表达方式与用户交互,以此为基础开发的软件系统简洁、美观、方便好用,更具人性化,已被越来越多的领域所采用。目前主流的嵌入式图形用户界面开发平台包括 MINI-GUI、MicroWindows、OpenGUI 以及 Tiny - X,20 世纪 90 年代以来基于上述平台国外公司开发了一批专业的组态软件,如美国 Wonderware 公司推出的 Intouch、Iteltion 公司的 FIX、德国 SIMATIC 公司的 WinCC 等,但以上软件均只适用于 PC 机,进入 21 世纪国内外研发了众多基于嵌入式操作系统的人机交互界面产品,它们都拥有自己的上位机组态软件。例如,威纶通公司的 Easy Builder 软件、台达公司的 Screen Editor 软件以及富士公司的 UG00S-CW 软件。随着工程技术的发展与各行业不同的需求,人机交互界面的发展趋于多元化,包括界面潮流化、设备智能化、品牌自主化、平台嵌入化、通信全局化以及节能环保化。

1.4 南水北调中线边坡工程安全评价技术动态

1.4.1 材料物性变化下边坡工程稳定安全系数计算模型方面

稳定性分析是边坡安全监控系统的重要组成部分,是边坡工程安全管理的关键。目前,国内外边坡稳定分析与安全评价时,基本上是考虑水位、温度及时效等因素的影响,建立统计模型、确定性模型和混合模型来进行分析与评价,其中经验公式法、有限单元法等是常用的方法。土的抗剪强度指标是地基承载力、土坡和路基稳定性评价的基础。许多实际工程的边界条件非常复杂,求解和测定孔隙水压力异常困难,大部分工程设计中主要采用总应力强度指标。实际上,土的抗剪强度由有效应力决定,并随着剪切面上法向有效应力或孔隙水压力的改变而变化。法向有效应力或孔隙水压力与试样在整个试验过程中孔隙水压力的消散程度有关,土的抗剪强度应该采用有效应力法来计算。目前的边坡工程稳定安全系数计算模型未考虑浸润面及材料物性指标变化的影响,与实际情况不符,影响分析精度。目前,基于有效应力强度指标的非饱和土抗剪强度变化规律的研究成果,多集中于非饱和土黏聚力、内摩擦角受含水率的影响,而较少考虑密度的影响;目前尚未建立基于含水率与干密度的非饱和土有效应力强度计算公式。在分析非饱和土强度理论的基础上,从土的有效应力强度出发,利用常规三轴仪开展不同含水率、干密度组合的黏土CD试验,探讨含水率及干密度对黏土抗剪强度的影响,得出了干密度、含水率与土体有效抗剪强度之间的相关关系;引入干密度、含水率影响函数,建立考虑土体干密度与含水率影响的边坡工程稳定安全系数计算模型,从而考虑水位变化及材料物性对边坡工程安全的影响。

1.4.2 随机与模糊参数下边坡工程安全预测评估方面

影响边坡稳定性的因素主要有内在因素和外部因素两方面,内在因素包括组成边坡的地貌特征、岩土体的性质、地质构造、岩土体结构、岩体初始应力等。外部因素包括水的作用、地震、岩体风化程度、工程荷载条件及人为因素。内在因素对边坡的稳定性起控制作用,外部因素起诱发破坏作用。但是由于受客观条件和人类认识自然能力的限制,并且参数在实际情况中是动态变化的,所以参数的取值往往呈现出多种形式的不确定性,对于某些输入参数,可将其建模为随机变量,所以以基于概率统计的方法已经在边坡稳定性评估中得到深入的研究,并逐渐发展形成了概率岩土学,但边坡模型往往较为复杂,用概率分析方法无法直接得出确定的解析形式,只能通过一些数值分析的方法对评估结果进行近似,如蒙特卡罗法等,但是这些方法也存在着很多不足:蒙特卡罗法是根据稳定性判别函数输入参数的统计值,由判别函数表达式求得输出函数值的随机样本。如此重复,得到达到预期精度的仿真次数 N ,并得到 N 个相对独立的函数样本值,利用这些样本值求得输出函数的概率统计信息,据此判断边坡是否稳定。蒙特卡罗法最大的不足是计算量较大,一般要达到上百万次。如何加快边坡稳定性分析效率与精度是边坡稳定性分析的重点与难点。

第2章 南水北调中线岩土工程 质量检测关键技术研究

2.1 超大粒径粗粒土渗透检测技术研究

2.1.1 概述

粗颗粒土指的是粒径大于0.075 mm且小于60 mm的颗粒,粗粒土属于典型的非均质多孔介质,由高渗透性的卵石、砾石和低渗透性的砂、土复合而成。粗粒土作为一种天然建筑材料分布广泛、储量丰富。由于其具有压实性能好、透水性强、填筑密度大、强度高、变形小等工程特性,在水利、交通、建筑等工程中常作为坝基、堤基、路基、屋基的填料。由于粗粒土的构成成分与级配不同,其渗透性能差距非常大,渗透破坏是工程出险的主要原因之一,因此在工程中采用的粗粒土料需要进行其渗透性能的测试。近年来,南水北调等大型水利工程建设中,由于工程战线长,施工用料需求巨大,就地取料尤为重要。南水北调工程沿线区域的土料,粒径小的粗颗粒土量较少,大多为粒径超过60 mm但小于100 mm的超大粒径粗粒土,即粒径 $60\text{ mm} \leq d_{85} \leq 100\text{ mm}$ 。试验表明,超大粒径粗粒土经过正确的配比,可以达到工程用料的要求,但其粒径超过了现有粗粒土渗透系数测定装置的测定范围,目前没有合适的超大粒径粗粒土渗透系数测定装置与方法。

目前,常用的室内测定土体渗透系数的仪器主要有70型渗透仪、南55型渗透仪和垂直渗透变形仪等,其内径多为200 mm和300 mm,根据《土工试验规程》(SL 237—1999)的规定,应按仪器内径大于试样粒径特征值 d_{85} 的5倍选择仪器。因此,现有的设备能够测试的粒径范围有限, d_{85} 不超过60 mm。张福海(2006)研制出内径30 mm的粗颗粒土渗透系数及土体渗透变形测试仪,测定了卵石夹粉土的垂直渗透系数和临界水力梯度;郑瑞华(2007)研制了直径为600 mm和305 mm垂直方向的大型无黏性土渗透仪,并对积石峡水利枢纽面板坝的垫层料、过渡料进行了试验;马凌云(2009)对粗粒土渗透特性试验系统的改进,满足对超高面板坝渗流试验的要求,但其试样的直径为300 mm;何建新(2010)设计大型水平渗透试验装置,开展了无黏性粗粒土大型水平渗透试验研究;王俊杰(2013)等采用自制渗透仪器开展了粗粒土渗透系数影响因素试验研究,但试样直径小于315 mm。由于之前在水利工程中使用超大粒径粗粒土非常少,同时在水利工程中使用该类土料时,需配比较多的黏性土小颗粒,加之试样尺寸较大,试样非常难以进行排气饱和,因此目前还没有超大粒径粗粒土($60\text{ mm} \leq d_{85} \leq 100\text{ mm}$)渗透性能的测试仪器和成熟的测试方法。随着南水北调等大型工程的建设,超大粒径粗粒土在工程中的应用会越来越广泛,研制一套能对超大粒径粗粒土渗透特性进行测试的仪器,是非常有必要的。

针对超大粒径粗粒土的工程特性,合理选取测试筒直径,优化排气与加压方法,开发

超大粒径粗粒土渗透系统测定装置,并提出了相应的测试方法,为工程试验与质量控制提供技术支持。

2.1.2 测定装置

超大粒径粗粒土渗透系数测定装置包括测试筒、自动加压系统、测压管、量筒(见图 2-1、图 2-2)。

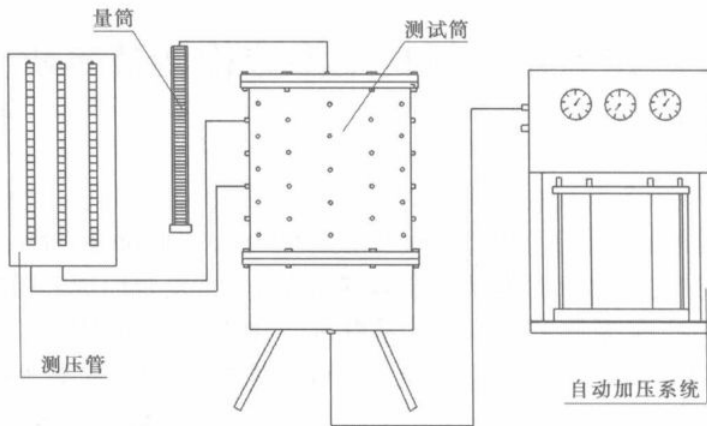


图 2-1 超大粒径粗粒土渗透系数测定装置示意图

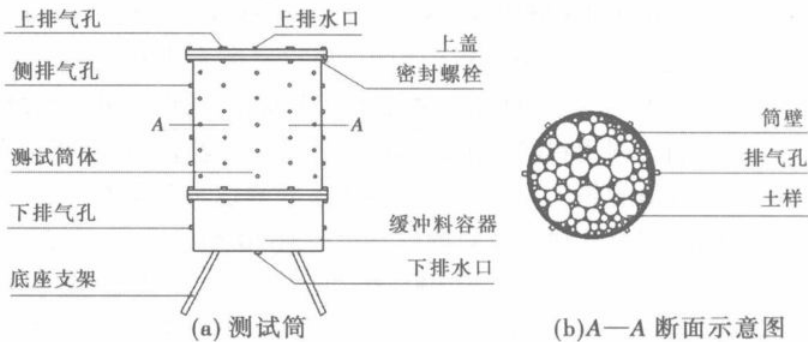


图 2-2 测试筒示意图

2.1.2.1 测试筒

测试筒由底座支架、缓冲料容器、筒身和上盖组成。其中,缓冲料容器支撑在底座支架上部,缓冲料容器的侧壁设置有下列排气孔,下部设有下过水口;缓冲料容器上部与筒身通过密封螺栓连接,筒身上设置多个筒壁测压排气孔,每个筒壁测压排气孔设有阀门;筒身上部通过密封螺栓与上盖连接,上盖的上端设有上过水口和上排气孔;自动加压系统与下过水口连通,测压管与筒壁排气孔连通。

筒内填充待测粗粒土料,筒内径 500 mm。筒顶和筒底有入、出水口及排气孔。筒壁设有多个测压孔,筒壁上附有渗透压力测压管。进行土体排气饱和时,筒壁测压孔可作为排气孔,可与筒顶和筒底的排气孔共同加速排气。

2.1.2.2 液体(水)自动加压系统

自动加压系统由加压泵产生加压液体,经过压力控制系统,由加压软管输送到试样