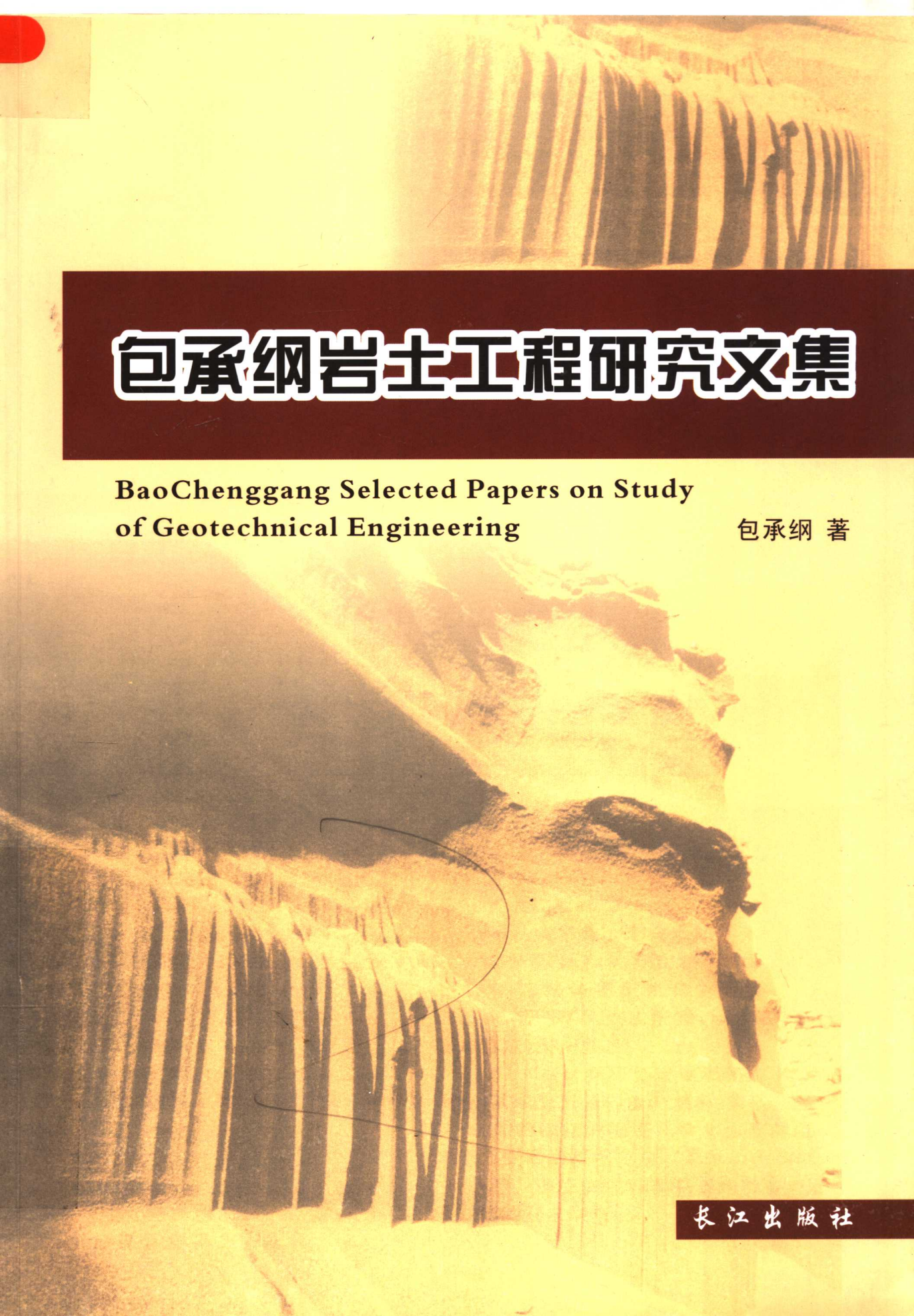




包承纲岩土工程研究文集

BaoChenggang Selected Papers on Study
of Geotechnical Engineering

包承纲 著

长江出版社

TU4-53/15

2007

包承纲岩土工程研究文集

BaoChenggang Selected Papers on Study
of Geotechnical Engineering

包承纲 著

长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

包承纲岩土工程研究文集/包承纲著. — 武汉: 长江出版社, 2007.1

ISBN 978-7-80708-247-7

I. 包… II. 包… III. 岩土工程—文集 IV. TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 004369 号

包承纲岩土工程研究文集

包承纲 著

责任编辑: 张艳艳

装帧设计: 刘斯佳

出版发行: 长江出版社

地 址: 武汉市解放大道 1863 号

邮 编: 430010

E-mail: cjpub@vip.sina.com

电 话: (027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销: 各地新华书店

印 刷: 武汉中远印务有限公司

规 格: 787mm×1092mm

1/16

39.75 印张

930 千字

版 次: 2007 年 12 月第 1 版

2007 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-80708-247-7/TV · 55

定 价: 85.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

序

包承纲教授是我国知名的土力学专家。近 50 年来,他的科研产出颇丰,有一大批科研成果报告、上百篇学术论文和多部专著问世。这部文集中收录的 66 篇论文,反映了他专业和管理工作的主要成果,是他几十年从事水利工程和岩土工程的试验研究、设计、施工、监测等科技和管理工作的主要结晶。论文的内容从基础理论到工程科研,从计算分析到试验研究,从膨胀土、非饱和土到砾石土料、土工合成材料,从可靠度到离心机,从科研到管理,涉足的专业领域和范围是很广泛的。

包承纲教授学风严谨,科学求实。他的每一篇论文都有着翔实的内容、可靠的数据,经过合理分析后,提出科学的结论及合理的建议。他具有扎实的理论功底、优良的专业素质和敏锐的专业敏感性,在多年的科研实践中,主动积极地不断吸收国内外的先进技术和经验。20 世纪 80 年代初,他作为改革开放初期赴美的高级访问学者学成归来后,在各项研究工作中大力创新,尤其是在非饱和土研究、工程可靠度研究、离心机模拟试验技术、土工合成材料工程应用等领域始终站在科技前沿,是这些领域的主要学科带头人。他作为课题负责人在主持并参与“六五”、“七五”、“八五”、“九五”及“十五”科技攻关的多个课题的研究工作中发挥了重要作用,取得了一批有突破性的重要成果,大大提高了这些研究领域的学术和技术水平,他本人也成为了岩土工程界有相当高知名度的专家。

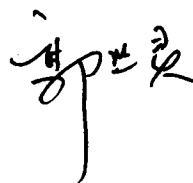
岩土专业是水利事业中不可或缺的重要专业之一,也是一个实践性很强的专业。由于治水、治江事业的需要,长江科学院在成立之初就设立了这一专业,并使之随着治江事业的不断深入而发展。在服务于治江事业工程建设的科技工作中,包承纲教授以高度的责任感始终非常注重解决工程问题。这部文集中有相当部分是与工程有关的科技论文就充分证明了这一点,如结合丹江口水利枢纽工程开展的砾石土工程特性研究;三

峡工程二期深水高土石围堰中的填料特性、风化砂抛填密度、堰体结构应力应变及防渗分析等研究;南水北调中线工程中穿黄隧洞土压力,膨胀土渠道边坡稳定等问题的研究;长江堤防加固工程中的一些技术问题的研究等。通过这些工程问题的研究和解决,显示了包承纲教授作为一名杰出岩土工程师的才能。

为了打造一支高素质、高水平的专业科技团队,包承纲教授十分重视对年青人的培养。他带出多名硕士、博士研究生;由他引进门或在他的培养下,一大批中青年专业人才迅速成长起来,有的成为技术骨干,有的成为学科(学术)带头人,有的已在岩土工程界崭露头角。我就是在20多年前,被包承纲教授领进岩土工程专业这个大门的。怀着对包承纲教授的尊敬和感激,我写出这篇序言。

今天,包承纲教授虽已年过七十,但仍在工作着,研究着,仍在不断地拿出新的成果,我们由衷地希望并祝福他健康、幸福、快乐!

长江科学院院长



2007年9月



作者简介

包承纲，1935年11月生，浙江宁波人。1958年毕业于北京清华大学水利工程系，1981年至1983年，作为高级访问学者在美国俄亥俄州立大学师从于国际著名土力学专家吴天行教授。1999年至2000年，作为访问学者在香港科技大学和吴宏伟教授一起从事非饱和土特性的合作研究。

在50余年来的科技、工程和教学生涯中曾亲身参与密云水库、三峡工程和南水北调（中线）工程等10多项大中型水利工程的科研和设计工作，此外，还参与了若干机场和高速公路的建设工作。

与此同时，结合工程需要，在土力学若干前沿领域中潜心研究，如非饱和土和膨胀土的研究、岩土工程可靠度分析、离心模拟技术、土工合成材料工程应用、软基处理技术等，发表论文100多篇，获省部级科技进步奖和中国科协优秀论文奖9项。是我国在这些研究领域的代表性人物之一。

在完成科研工作的同时，作者还在河海大学、浙江大学、浙江大学宁波理工学院等高等院校从事部分教学和博士、硕士研究生的指导工作。本文集中的部分论文就是与研究生们共同完成的。

多年来，包承纲活跃于国内和国际土工界的多个场所，曾任中国水利学会理事，中国水利学会、中国土木学会、中国力学学会有关专业委员会（分会）常务理事或理事，中国土工合成材料工程协会理事长，国际土工合成材料学会理事和中国委员会主席，曾4次应邀在国际有关学术会议上作特邀报告或专题报告，多次赴美、日、韩、新等国和台、港地区讲学。

前 言

本文集收集了作者自 1958 年参加工作以来至今,在岩土工程(Geotechnical Engineering)领域所发表的部分论文。这些论文主要是作者在 50 余年的工作经历中,结合所接触的工程实践进行研究的成果。在学术上,因所研究的课题大部分针对国内若干大型工程建设中的关键技术,应用当时国际与国内有关该领域中的一些新理论和新方法,去解决这些工程中的疑难问题,其中有不少是岩土领域中的前沿性课题,这些成果大部分已用于工程实际,取得了良好的经济效益和社会效益,并且在实践中又进一步完善和发展了这些新的理论和方法,因此,该文集的内容具有一定的实用性和创新性。

在研究过程中,曾得到国内的大家和国外某些专家的指导、帮助,并与他们共同参与试验研究,作者对他们表示深深的谢意!

同时,在本文集中,有不少文章是作者与研究生们共同完成的。除在文中已署上他们的姓名,以表示尊重外,在此对他们的辛勤劳动和贡献表示感谢!

在本文集编辑过程中,得到长江水利委员会科学技术委员会的领导和长江科学院及水利部岩土工程重点实验室的领导和同事们(郭熙灵院长、程展林主任、李青云所长、饶锡保所长等)的关心、支持和帮助,没有他们的热心支持,本文集的出版是不可能的。在此,作者十分感激。

作者还特别感激丁金华高级工程师等花了许多宝贵的时间和精力,在编辑、出版、校对、绘图等方面的特别贡献。没有他(她)们的无私奉献劳动,本文集的出版也是很困难的。另,本书封面、封底及书中图片引自《三峡工程二期围堰理论与实践》一书。

由于作者学识有限,水平不高,所收集的论文中恐有不当之处,敬请同行专家和读者指正。

包咏刚

2007 年新年于长江科学院土工所

目 录

三峡二期高土石围堰

二期围堰建设中若干关键技术问题的解决	2
二期围堰填料的工程特性研究和深水抛填密度离心模拟试验	12
围堰填料的应力和变形关系研究	20
二期围堰的应力应变分析	28
1998 年汛期二期围堰防渗墙应力和变形	46
数值计算对三峡二期围堰建设的作用	51
地震作用下三峡围堰砂土液化及堰体动力稳定性	58
Yangtze three gorges project:testing of filling materials & structural numerical analysis for its stage 2 cofferdam	64

南水北调中线穿黄工程和膨胀土边坡研究

南水北调(中线)工程若干岩土问题研究	73
南水北调穿黄隧洞衬砌土压力离心试验研究	88
南水北调中线工程膨胀土渠道边坡的稳定问题及防治对策	92
膨胀土裂隙性研究	97
刁南灌区膨胀土滑坡的监测和分析	107
豫西南膨胀土的工程特性和渠道边坡的稳定问题	114
Some properties of shear strength on Nanyang expansive clay	124

非饱和土特性研究

非饱和土的性状及膨胀土边坡的稳定问题	131
非饱和土的应力应变关系和强度特性	154
非饱和土性状及其与工程问题的联系	160
降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测	172
Some thoughts and studies on the prediction of slope stability in expansive soils	183

Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils	210
The practical equation for the prediction of shear strength of unsaturated soils	251

土料特性研究与堤坝工程

砾石土填料工程性质研究	259
用土工方法研究青山软层的抗剪强度	288
关于土的残余强度及其与工程问题的联系	296
风化砂、淤积砂的动力特性	309
长江堤防加固工程中的一些技术问题	315
Technique of dike construction and its development in China	319

岩土工程可靠度研究

谈岩土工程概率分析法中的若干基本问题	326
关于岩土工程的可靠度问题	331
可靠度分析方法在岩土工程中的应用	340
地基工程可靠度分析的一般理论	349
关于地基可靠度分析方法的建议	367
岩土工程可靠度分析中的土性随机场模型	371
土性相关距离和相关范围的概念及其计算方法的研究	379
改进 JC 法及其在土工可靠度计算中的应用	388
随机场理论在重力式码头地基承载力计算中的应用	393
贝叶斯定理及其在三峡工程中的应用	401
关于孔间地质随机特征的统计推断	410
The probabilistic analysis of settlement for loads on multi-layered subsoils	417

土工合成材料工程应用

我国土工合成材料应用概况	430
我国土工合成材料应用技术发展的若干评述	436
软基和吹填土上加筋堤的离心模型试验及有限元分析	441
土工合成材料在护岸工程中的应用	447
土工合成材料界面特性的研究和试验验证	453

Testing studies on a reinforced soft foundation with geotextile	466
Application of geofabric in embankment engineering of Yangtze River	472
Study on the interaction behavior of geosynthetics and soil in China	478
Application of a large strain gauge to measure the deformation of composite geomembrane in the three gorges project cofferdam	493

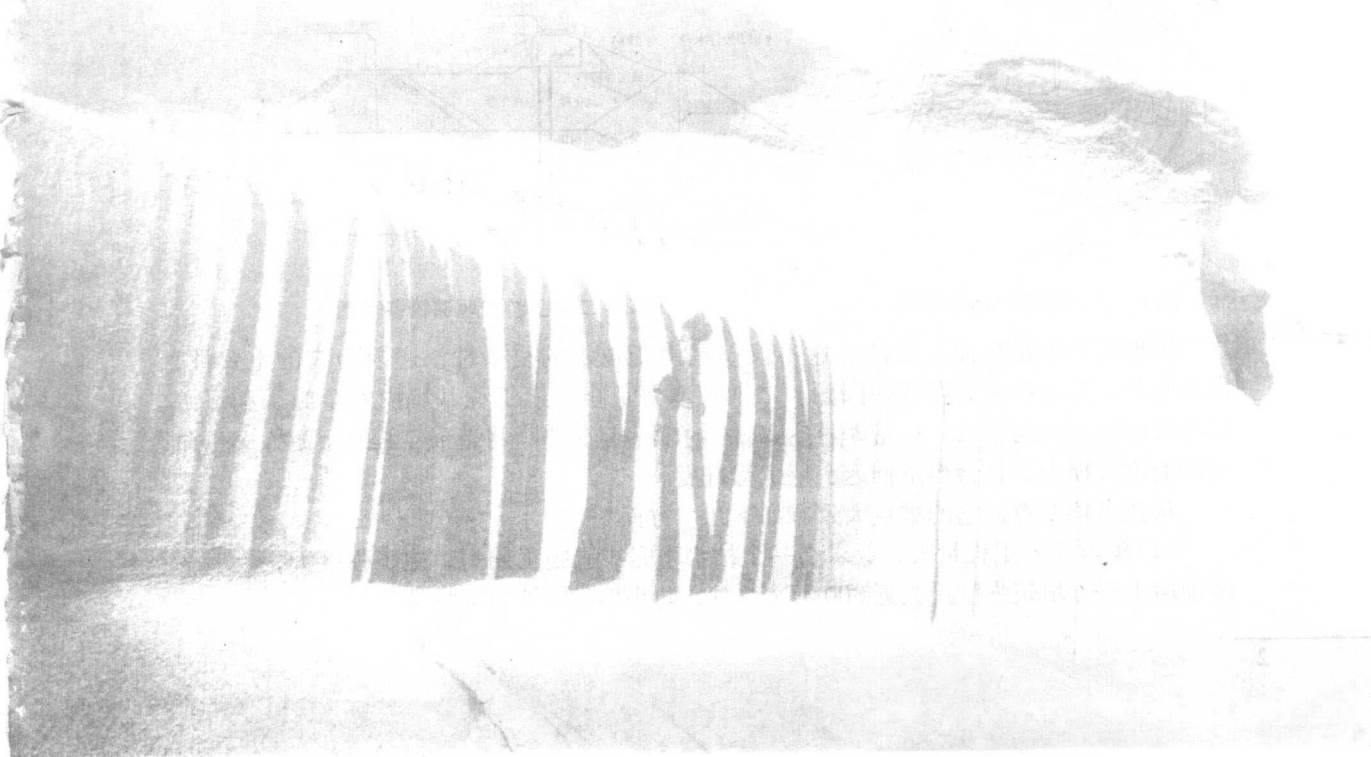
土工离心模拟技术

我国离心模拟试验技术的现状和展望	500
土力学的发展和土工离心模拟试验的现状	506
离心模拟技术及其在岩土工程中的应用	514
离心试验技术在土石坝工程中的应用	522
梁柱式海洋平台基础与土相互作用的离心模型试验	530
隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究	536
二期围堰断面形式离心模型试验验证及粗粒料相似规律研究	542
长江三峡库区黄腊石滑坡的稳定性研究	553

其他

也谈工程规范	565
20 世纪土力学的回顾和未来发展趋势的预测	568
土力学在我国水利领域中的进展	575
深圳机场场道工程地基沉降分析	588
深基坑开挖中的若干重要问题	597
基坑支护中土钉墙的仿真数值计算	605
关于崩岸研究和预测方面的一些意见	609
关于环境岩土工程的若干问题	614
The soft foundation improvement of runway of Shenzhen airport	620

三峡二期高土石围堰



二期围堰建设中若干关键技术问题的解决

摘要 三峡工程二期围堰是兴建河床建筑物的根本保证,也是工程的关键技术项目。为此在工程实施前及施工中,对围堰填料的性质、防渗材料性质、堰基粉细砂和覆盖层的特性及施工方法等都进行了大量的科学研究工作,解决了关键性的问题,得到了相当高水平的成果。

关键词 风化砂;柔(塑)性混凝土防渗墙;新淤粉细砂;液化及渗透

1 二期围堰的概况和存在的问题

二期围堰的设计和施工是三峡工程的重大关键技术项目,它由上、下游两座围堰组成(见图1),是三峡工程中重要的和最具有挑战性的建筑物之一。

上游围堰堰顶全长1440m,最大高度为82.5m,运用期长达5年,实际上是一座大型土石坝工程。堰址河床有厚达10m的砂砾石层和最大厚度达18m的新淤积粉细砂层。基岩系闪云斜长花岗岩。风化壳厚达40m左右,在风化壳内含有一定数量未风化的球状块体,直径为1~3m,它们堆积在河床覆盖层中,形成架空的块球体夹砂层,透水性很强。围堰形式最终选定为在风化砂和石渣填筑的堰体内打混凝土防渗墙的方案。图2为上游围堰深槽部位典型断面图。

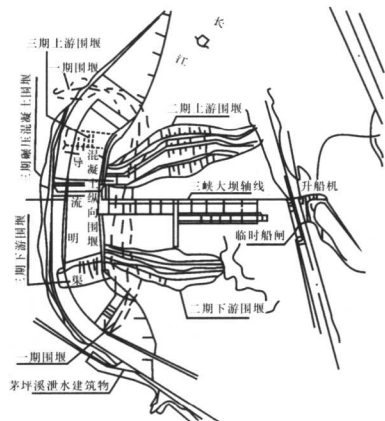


图1 二期导流平面布置图

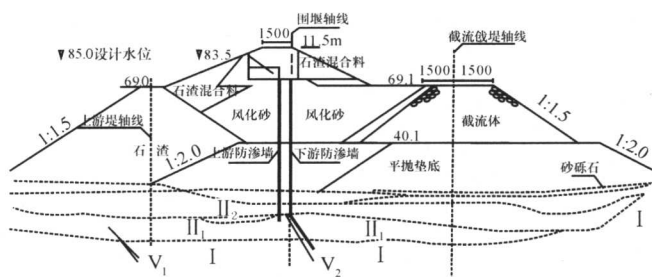


图2 二期上游围堰深槽断面图

围堰的难度是显而易见的,这不仅仅是由于技术的复杂性,还因为它的重要性,以及与长江航运关系等特殊的问题。二期围堰要负担二期工程基坑内安全施工和下游城乡及居民安全的重任,拦蓄库容达20亿 m^3 。一旦失事,将造成工程及下游人民生命财产的重大损失,且会严重推迟三峡工程进度。

从技术角度看,它的难点大致有如下几个方面:

(1)围堰高,工程量大,要求在一个枯水季完成。施工期短,施工强度大,上、下游围堰土石方填筑强度最大近300万 m^3 /月,防渗墙约1.5万 m^3 /月。

(2) 施工水深达 60m, 2/3 以上的堰高位于日常水位以下, 施工难度很大。

(3) 堰基地质情况复杂, 覆盖层中有较厚且疏松的粉细砂层。两侧滩地存在着残积块球体夹砂层, 透水性强, 防渗处理困难, 河床基岩面起伏较大, 专山珠基岩深槽槽深 7m。侧边坡很陡, 超过 70°, 给防渗墙嵌入基岩带来很大困难。

(4) 防渗土料缺乏, 可利用的堰体风化砂填料性质较差, 故堰体变形较大, 防渗墙的工作条件恶劣。

(5) 由于截流水深, 流量大, 增加了截流难度。为此, 为减小水深而采取的平抛垫底等措施, 给围堰建设带来一些新问题, 增加了打防渗墙的困难。

为解决上述几个方面的难点, 有多达三四十个技术课题需要研究, 其中砂是以往国外很少遇到过的难题, 这就使二期围堰成为三峡工程中多方关注和担心的焦点之一, 也是对科技人员的一个巨大挑战。

总的说来, 二期围堰的课题可以概括为下述五个方面:

(1) 填料特性研究。

填料包括风化砂、石渣、风化砂与黏性土混合料、反滤材料等。其中风化砂在 60m 水深中抛填密度, 将是围堰设计首先要解决的问题。

(2) 围堰的结构形式研究

在复杂的地质情况和基岩面地形起伏的条件下, 在填料种类基本已定的前提下, 围堰的结构形式在大的方面没有很多选择的余地, 这就是风化砂和石渣堰体, 中间设混凝土防渗墙结构, 但是堰体断面的布置, 尤其是 60m 水下部分的布置可以有很多方案, 如何设计一个既安全又经济合理的断面是一个十分值得研究的问题。

(3) 防渗材料的研究

由于堰体填料的性质, 可以预见二期围堰的变形将较大, 用什么材料建造防渗墙, 很值得研究。作为一个运用期较长的临时建筑物, 采用易建、易拆、有一定寿命的新材料将是合理的选择。

(4) 堰基粉细砂层和覆盖层的特性和处理

粉细砂层是由于葛洲坝工程回水而新近沉积在堰址的。它的抗液化能力弱, 渗透稳定性和动力强度以及由此引起的对围堰稳定性的影响是值得注意的。

(5) 施工方法和快速施工设备研究

二期围堰的施工有很多特点, 如在 60m 水下施工, 在 70 多 m 深风化砂堰体中打防渗墙, 块球体处理, 等等。与此相关的课题有堰体加密措施, 打防渗墙的方法和机具, 块球体夹层的防渗问题等。至于快速施工设备, 本文仅将简单提及。

2 二期围堰关键技术的研究和工程实施

三峡二期围堰的研究工作最早始于 1958 年, 当时提出过许多方案, 并对首当其冲的课题——60m 水深下风化砂抛填体的密度进行了现场抛填试验。20 世纪 80 年代以来, 对二期围堰方案进行过重点研究, 并先后与美、加、意等国进行过合作与咨询。1958 年结合三峡工程论证提出过三个对比方案, 1987 年开始的“七五”攻关和 1992 年正式启动的“八五”攻关是对二期围堰进行深入研究的主要阶段。这两次攻关研究, 基本上解决了所存在的关键技术问题, 并分别为初步设计和单项技术设计提供了主要

技术依据和有关参数,使二期围堰的方案得以成立。在其后,当围堰进入实施阶段,结合实际条件的变化,又进行了补充研究和施工科研工作,使围堰建设方案更趋完善。

二期围堰于1996年11月开始预进占段的填筑,1997年11月大江截流,12月底上游围堰填筑到73m高程的防渗墙施工平台,1998年4月20日上游第一道防渗墙封闭,6月30日上游第二道防渗墙完建,其间5月20日,上游围堰度汛子堰达83.5m高程,可以抵挡20年一遇洪水。1998年9月15日上游围堰全线达到88.5m设计高程。下游围堰也于8月15日达到设计高程81.5m,围堰内基坑抽水自1998年6月下旬开始,当时上游围堰第二道防渗墙尚在施工。7月下旬,基坑抽水至40m高程,9月15日基坑抽干。1998年10月,围堰完建。

围堰在1998年汛期经受了长江8次洪峰的考验,最大流量达 $61000\text{m}^3/\text{s}$ 。相应围堰上游最高水位为77.8m,围堰工作正常。在围堰完建且基坑抽干后,发现漏水量很小,仅50L/s左右,为设计预计漏水量的1/10,说明围堰质量优良。

从1985年开始至1999年,二期围堰在长达15年的研究历程中,有许多经验和体会是值得回顾和总结的。

3 围堰设计中“柔”的指导思想

三峡二期围堰设计是一种新的探索,以往土坝和围堰建设中很少遇到类似的建坝条件。如填料必然是风化砂的石渣废料,在60m水深中抛填施工;由于缺乏黏性土料,防渗结构需采用混凝土或其他人工材料等。

1959年为研究风化砂水下抛填密度,在坝址右岸石板溪拦沟蓄水。进行了6.0m水深下人工挑土的现场抛填试验,所得的干密度很低,仅 $1.40 \sim 1.45\text{g}/\text{cm}^3$,按此计算混凝土防渗墙顶部的水平位移达1.2m左右,墙的应力应变的状况不佳,设计方案难以过关。在20世纪80年代,由于该问题的存在,围堰方案的研究困惑多年,难以取得有意义的进展。“七五”攻关后期,长江科学院建议用离心模型试验技术来解决这个难题,取得了良好的近似值,该值后来又进一步为二期围堰的实践所验证,按此确定的干密度达 $1.67 \sim 1.75\text{g}/\text{cm}^3$,大大高于6m水深下的现场试验值。此项成果为初步设计提供了重要的技术基础。

进入20世纪90年代以来,二期围堰的方案是围绕“五个因素十个字”的分析比选而进行的,这就是“刚柔”、“单双”、“高低”、“厚薄”和“先后”。

所谓“刚柔”,就是墙体材料是选用刚性混凝土还是柔性混凝土材料。这是一个很关键的问题。所谓“单双”,就是围堰的深槽段防渗墙高近80m,该段围堰是采用单道墙,抑或双道墙。所谓“高低”,就是防渗墙是全部采用混凝土墙,还是墙上部接土工合成材料防渗,以降低墙的高度。前者即为“高墙”,后者则为“低墙”。所谓“厚薄”是指墙厚多少才能满足应力应变的要求。“先后”是指在双墙方案中上游第一道墙是先打还是后打,因为该问题涉及围堰的加荷路径问题,对墙体的位移和应变状况会有很大的影响。同时,该问题也涉及两墙间的水位控制问题。

上述几个因素的研究成为“八五”攻关的主要内容,也是技术设计中的重点内容之一,所需要用的技术手段是有限元计算分析和试验研究,以及与现场测试的互相验证,研究条件力求与施工一致,并以施工实况为依据进行追踪分析或反馈分析,因此

研究的针对性和真实性都是很强的。

二期围堰所选用的混凝土防渗墙形式, 本来在我国已有很多的经验, 但是堰体松散和防渗墙超深等特点使问题变得复杂起来。应力应变有限元分析的成果表明, 墙体下端部分区域应力水平超过 1.0, 且上下游贯穿(如图 3 阴影区), 这样安全性就难以保证。为此曾从几个方面考虑改善的措施:

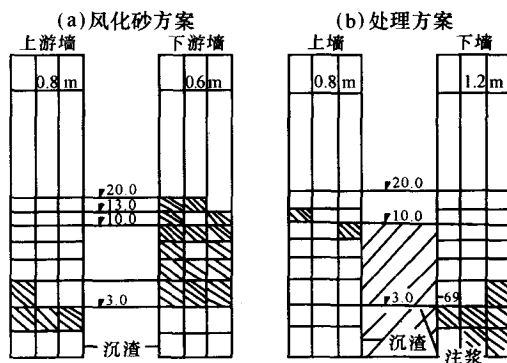


图 3 高双墙方案破坏单元位置及应力(允许抗压 15MPa, 抗拉 1.5MPa)

(1) 设法加密堰体。为此在坝址现场进行了振冲法和爆振(爆夯)法加密风化砂填筑体的试验, 均获得了肯定的结果。据测定, 两者加固后的相对密度可达 0.70 以上。但是施工中专门增加一道堰体加密工序, 将会占用直线工期, 在如此紧张的施工强度下是否允许, 不得而知。

(2) 增加墙体材料的刚度和强度, 以“固体强身”来抵抗大的应力和变形, 降低应力水平。这种思路有一定效果, 墙体内部的应力状况确有一定的改善, 方案也可大致成立。个别部位过高的应力水平(墙下端附近 10m)可以通过一定的结构措施(如加钢筋笼等)解决。鉴于此, 上游围堰防渗墙建议采用双、高、刚墙方案。这是当时设计和研究中的主导思想。虽然当时也在进行塑性混凝土墙的计算分析和柔性墙材料的研究, 但是发现, 由于它的弹模的降低还不如它的强度降低得更快, 因此应力水平达到 1.0 的塑性区范围不仅没有减小, 反而增大了, 这样塑性墙方案看来也没有解决问题。因此, 在当时, 柔性材料的研究还没有放在主导地位加以研究。高刚性墙方案仍是设计的主导思想。

然而, 高刚性墙的方案仍遗留下许多问题。如高标号的混凝土(要求弹模大于 $2.2 \times 10^4 \text{ MPa}$) 在防渗墙施工中能否达到? 墙下部加钢筋笼在施工中是否现实? 特别值得提出的是在当时还有一个很重要的概念在计算中逐渐被认识到了, 这就是防渗墙的水平位移其实主要决定于堰体的变形, 单纯地增大材料的刚度与强度对减小墙体的变形作用甚微, 如表 1 所示。既然如此, 不如干脆采用柔性的墙材以增加其适应变形的能力。减轻人们对墙体因刚性过大而裂开的顾虑。与此同时, 墙体的应力也将大幅度地降低, 如图 4 所示。但重要的是, 柔性墙材的性能必须进一步改善, 其关键是研制一种“高强低弹”的柔性材料, 以降低墙体底部的应力水平。这样, 二期围堰的方案就转到以“柔”为主的思想上来, “柔”性混凝土材料的研究也就成为矛盾的焦点之一。为此在“八五”攻关期间, 投入了很大的力量对此进行研究, 并取得了优秀的成果。

表 1

不同墙材的水平位移比较

墙材	堰体最大水平位移	上游墙水平位移	下游墙水平位移
塑性墙 ($E < 1000\text{MPa}$)	51.0	30.2	10.4
刚性墙 ($E > 1.8 \times 10^4\text{MPa}$)	51.0	29.5	9.6

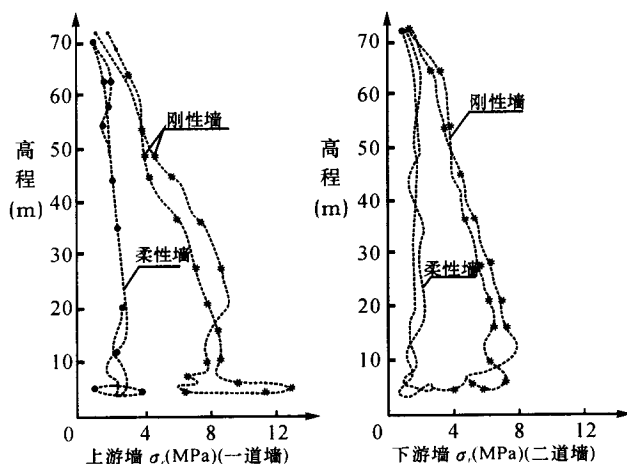


图 4 柔、刚性墙方案的墙体应力分布(墙厚 1.0m, 水头 1/2 ~ 1/3)

根据计算, 当 28d 的抗压强度 $R_{28} = 4\text{MPa}$ 和初始模量 $E_f < 1000\text{MPa}$ 时, 墙内的应力水平基本上可以在允许范围内, 应力值较低, 剪应变和拉应变也小于允许值, 对于这种材料, 标志其“高强低弹”性能的“模强比”指标在 250 以内, 这个指标值与国际上的同类材料相比, 也是比较先进的。

1995 年底, 当“八五”攻关结束时, 符合上述要求的风化砂柔性材料和塑性混凝土已研制出来, 经在一期围堰工程中使用及以后的二期围堰滩地部分使用, 施工性能良好, 造价比常态混凝土低廉, 很受施工单位的欢迎。只要在浇筑现场对配合比根据来料情况加以适当调整, 其质量可以保证, 容易达到规定的要求。

因此, “柔”的思路是适合二期围堰特点的。可以认为, 由“刚”的思路到“柔”的思路是二期围堰建设中的一个跨越。对于二期围堰的成功和优化, 起了重要的作用。这是经过长达 10 年历程, 从研究的实践中总结出来的。

二期围堰“柔”的思想还体现在其他方面。曾经有人对下游围堰一道 1.0m 厚的防渗墙是否过于单薄有些顾虑, 当时有两种措施可以考虑。一是紧贴墙的背水面增加一道高喷墙, 但它较为“刚”性; 另一是继续走“柔”的思路, 适当加厚“柔”性防渗墙以增加其安全度。前一措施将会改变防渗墙“柔”的特点, 而且施工中也会带来一定的副作用。因此, 经过研究设计决定采用后一措施, 该项措施还具有省工省时的优点, 促进了下游围堰按时顺利地建成。

应当指出, 二期围堰建设中“柔”的思路是基于堰体密实度不高, 堰体变形较大而产生的。若施工中有可能会加大堰体的密度, 即使是部分堰体的密度(如墙两侧部位)则也应予力争, 以便减轻墙体的负担。实际施工中确实进行了堰体的局部振冲加密, 它将有助于减小围堰的水平变形, 使围堰更加安全。同时, 它还可以减小防渗墙钻孔

成槽过程中坍孔的可能性。

4 二期围堰建设中的科学研究

前已叙及,二期围堰的两次国家重点科技攻关,以及施工阶段的科研工作,均取得了重大成果,为初步设计技术设计及施工中某些技术问题的解决奠定了基础,其意义和价值是很大的。在二期围堰施工过程中,各项科研工作始终没有停止,而是紧密结合设计和施工的新情况,不断地进行跟踪研究,为工程的决策和优化提供新的依据。在这里,“科学技术是第一生产力”的论断得到了充分体现。

下面简单介绍主要课题的研究情况及其意义。

4.1 填料性能研究

4.1.1 风化砂和石渣混合料的特性

风化砂是工程开挖出来的废料,用于围堰填筑不仅就地取材造价低廉,且废物利用有利环保,故具有良好的经济效益和社会效益。但以往对风化砂研究很少,对它的力学特性和压实性质知之不多,尤其是颗粒的易碎性和不稳定性将会给长期运用带来什么影响值得关注。根据物理性质和强度、压缩性、渗透性和渗透稳定性以及压实性等项试验研究,表明风化砂和石渣以及它们的混合料均可作为围堰填料,其长期性能也变化不大,多种力学性试验为围堰的应力应变分析提供了必要的参数。

4.1.2 粗粒料的大型试验

风化砂和石渣中含有许多粗颗粒,有的粒径很大,为此需配备大尺寸试样的仪器。为二期围堰试验而研制的仪器包括:大型三轴仪($\phi 50\text{cm}$ 和 $\phi 30\text{cm}$)、大型击实仪($\phi 50\text{cm}$)、大型渗压固结仪(叠环式,环间有弹性橡胶圈,试样直径 50cm ,高 100cm ,可以进行压缩和渗透试验)和大型平面应变剪切仪。后者是一种新的试验设备,它的受力情况更接近堤坝的实际工作状态,因此所取得的强度特性更真实。试样尺寸有两种,各为 $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 20\text{cm}$ 和 $80\text{cm} \times 80\text{cm} \times 40\text{cm}$,在国内尚属首创,在国际上同样的规模也仅有两台。这些仪器所做的试验为设计提供了更为合理可靠的参数。

4.1.3 风化砂颗粒的破碎特性及其力学性质

由于围堰较高,应力较大,而风化砂颗粒比较软弱,当经受压力和剪力时易破碎,从而影响力学特性。颗粒破碎与力学性质的关系在土力学中是一个新课题,这不仅对三峡工程有价值,而且在当前面板堆石坝风行的潮流下也具有普遍的意义。研究表明,风化砂的剪切破碎率达20%以上,破碎分量可以看作一个强度分量,它与剪胀强度分量存在着互为消长的关系。研究中改进了Lowe的能比方程,使该公式中包含破碎分量项,这样就加深了对粗颗粒材料强度特性的认识,使有关参数更具有充分的依据。

4.1.4 水下抛填风化砂的密度和坡角的研究

前已强调,风化砂抛填体的密度研究是一个十分重要而又困难的问题,采用离心模拟技术解决这个问题属于首创,国内外从未进行过。它的方法简便,花钱很少,而成果比较合理,据此提供的风化砂密度和水下稳定坡角可以大大简化围堰断面结构和工程量,