



# 水利水电工程

## 科研与实践

SHUILI SHUIDIAN GONGCHENG KEYAN YU SHIJIAN

主 编 杨天生 梁永立 张力忠 闵京声

黄 河 水 利 出 版 社

水利部天津水利水电勘测设计研究院科学研究所



# 水利水电工程科研与实践

主 编 杨天生 梁永立 张力忠 闵京声

TU-12

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书主要收集了水利部天津水利水电勘测设计研究院科学研究所近二十年的主要科研技术成果,结合具体的大、中型水利水电工程项目,从水工、泥沙、观测、材料、岩石、水机及施工等专业领域角度,系统地介绍了最新的技术成果和基本经验。

本书专业性、实用性强,可供水利水电工程建设勘察、设计、施工、科研等部门的工程技术人员、管理人员及教学人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程科研与实践/杨天生等主编. — 郑州:  
黄河水利出版社, 2002. 9

ISBN 7-80621-576-X

I. 水… II. 杨… III. ①水利工程—科技成果—  
中国②水利发电工程—科技成果—中国 IV. TV-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 046339 号

---

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

印张:23.25

字数:537 千字

印数:1—1 100

版次:2002 年 9 月第 1 版

印次:2002 年 9 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 7-80621-576-X/TV·277

定价:54.00 元

# 《水利水电工程科研与实践》

## 编辑委员会

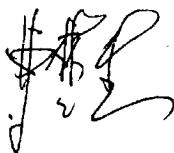
|      |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 名誉主任 | 王宏斌 |     |     |     |
| 主任   | 刘德堂 |     |     |     |
| 副主任  | 陈志达 | 谢熙曦 |     |     |
| 委员   | 杨天生 | 梁永立 | 张力忠 | 闵京声 |
|      | 朱化广 | 何成连 | 金琼  | 王建国 |
|      | 刘志国 | 张玉峰 | 侯保俊 | 梁晋平 |
|      | 张俊杰 | 张振安 | 狄旭光 | 赵玺  |
|      | 樊晋生 |     |     |     |

# 序

随着我国水利水电建设事业的迅速发展,加强科学试验的研究与重视科技成果的推广是很有必要的。《水利水电工程科研与实践》汇集了水利部天津水利水电勘测设计研究院科学研究所近二十年来部分有代表性的论文。这部文集结合具体的大、中型水利水电工程项目,从水工、泥沙、观测、材料、岩石、结构、水机及施工等专业领域,介绍了具有较高价值的技术成果和基本经验,特别是在水库观测资料的分析技术、混凝土快速测强技术、水力过流部件抗磨蚀涂层和重力坝 CAD 软件开发研究及应用等方面取得了重大突破,填补了我国这些方面的空白,获得了国家科技进步奖或国家发明奖,并在国内外多项水利水电工程中得到应用。

本文集的作者大多与我共事多年,很多都是多年从事水利水电工程研究工作的杰出的专家和科技工作者,他们紧密联系实际,跟踪科技前沿,卓有成效地解决了许多工程的重大技术问题,完成了三门峡、潘家口、万家寨、引黄入晋、引滦入津、石漫滩、永定河、南水北调、龙口、大柳树、沙坡头等大、中型水利水电工程试验和研究工作,取得了许多有价值的科研技术成果,大部分成果已被采用,在解决工程的规划、设计及工程的施工和运行等重大技术问题方面取得了良好的效果,具有显著的经济效益和社会效益。

《水利水电工程科研与实践》的出版,令人欣喜。文集中介绍的技术成果和基本经验,都是工程设计、施工、运行的重要专题,给出的成果很多具有理论创新和技术创新,有利于工程设计和科研水平的进一步提高。她的问世,将会给我国水利水电工程建设的规划、设计、施工、管理以及大专院校的师生提供有益的借鉴和启示。



2002 年 6 月 11 日

# 目 录

|                                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| 序 .....                         | 曹楚生                 |
| 滇池草海清污堆泥场土工管围埝现场试验 .....        | 黄启明 林 森(1)          |
| 引黄入晋工程南干线一级泵站进水系统优化研究 .....     | 李善岩(13)             |
| 某工程河道截流水工试验研究 .....             | 滕淑兰(17)             |
| 万家寨水利枢纽二期截流原型观测 .....           | 王庆新(21)             |
| 通气减蚀设施通气量问题研究 .....             | 夏毓常(27)             |
| 原型与模型若干水力特性对比分析 .....           | 夏毓常 张黎明(32)         |
| 工程水力学计算中几个问题 .....              | 轩书汉(43)             |
| 抽水蓄能电站设计中的水力学问题 .....           | 白世录(47)             |
| 海河干流葛沽河段治理的试验研究 .....           | 张黎明 王极红 王利达(53)     |
| 水电站泄流排沙建筑物的布置和规模的探讨 .....       | 张黎明(59)             |
| 河工模型相似设计及特殊处理技术 .....           | 白世录 于荣海(65)         |
| 冲淤平衡稳定渠道的优化设计 .....             | 徐国宾(71)             |
| 冰水力学及冰工程设计中若干问题 .....           | 白世录 张力忠 马喜祥(77)     |
| 漳河游荡性河段整治工程试验研究 .....           | 张力忠 韦有忠 王英伟 宋敬贤(86) |
| 漳卫新河口口段冲淤变化及治理途径的探讨 .....       | 曹 辉 张力忠(94)         |
| 太原市汾河河道治理工程泥沙模型试验研究 .....       | 徐国宾 张力忠 梁永立(101)    |
| 永定新河冲淤变化及发展趋势的分析 .....          | 梁永立 刘英泉(107)        |
| 北方河口挡潮闸规划设计的探讨 .....            | 王文治 张力忠 梁永立(114)    |
| 永定新河纳潮冲淤可行性分析 .....             | 梁永立(121)            |
| 引黄工程总干线首部和申同嘴水库水力过渡过程数值模拟 ..... | 王英伟 潘德嘉(127)        |
| 大坝渗流安全监测技术研究 .....              | 赵志仁 张力忠(137)        |
| 根据现场测试数据鉴定大坝观测系统的可靠性 .....      | 赵志仁(144)            |
| 大坝安全监测系统设计的可靠度分析 .....          | 张晏明 郭怀志(150)        |
| 水工钢筋混凝土结构实测钢筋应力的分析与计算 .....     | 赵志仁 朱化广(156)        |
| 引滦工程输水隧洞安全监测设计方案研究 .....        | 张晏明(163)            |
| 万家寨引黄入晋工程一级泵站安全监测设计 .....       | 朱化广 何利华(167)        |
| 南水北调东线穿黄探洞安全监测与评价 .....         | 朱化广 方仲实(172)        |
| 三门峡溢流坝原型应变及应力分析与安全评价 .....      | 赵志仁 朱化广 吴百进(178)    |
| 位山穿黄探洞应急加固对黄河大堤安全监测分析 .....     | 朱化广 何利华 周建龙(186)    |
| 微机重力坝 CAD 系统 .....              | 莘志宏 王建国(191)        |
| 碾压混凝土抗冻性的试验研究 .....             | 王足献(196)            |

## SI-LBP 复合膨胀防水剂在引黄工程的应用

|                            |     |     |     |              |
|----------------------------|-----|-----|-----|--------------|
| .....                      | 张振安 | 杨天生 | 金 琼 | 王 璞(202)     |
| 超低热补偿收缩混凝土配制及性能研究.....     | 杨天生 | 张玉峰 | 金 琼 | 王足献(206)     |
| 引黄入卫工程应用特细砂混凝土的研究.....     | 杨天生 |     | 金 琼 | (211)        |
| TK 聚合物修补砂浆研究及应用 .....      | 杨天生 | 替志斌 | 郭宏盛 | 贾文利(220)     |
| 石漫滩水库全断面碾压混凝土研究.....       |     |     | 樊秀英 | 杨天生(224)     |
| 万家寨水利枢纽工程坝体混凝土试验研究.....    | 杨天生 | 姜 飏 | 许颜军 | 金 琼(230)     |
| 高强抗冲磨铁矿石混凝土在万家寨工程应用        |     |     |     |              |
| .....                      | 杨天生 | 金 琼 | 褚亚卿 | 姜 飏(240)     |
| 引黄入晋工程混凝土试验研究.....         |     |     | 金 琼 | 狄旭光(245)     |
| 复杂应力状态下混凝土的强度估计.....       |     |     |     | 陈志达(250)     |
| 短期荷载下混凝土的一个一般破坏强度判据.....   |     |     |     | 陈志达(255)     |
| 潘家口坝址混凝土与岩体抗剪断试验成果分析.....  | 吴跃进 |     |     | 曹楚生(261)     |
| 万家寨水利枢纽工程坝基层间剪切带剪力研究.....  | 李玉贵 |     |     | 吴跃进(266)     |
| 现场岩石试验自动化采集系统.....         |     |     |     | 贾文利(271)     |
| 非金属抗磨蚀保护层磨蚀规律、应用和效益        |     |     |     |              |
| .....                      | 王志高 | 张可立 | 张剑新 | 闵京声 王晓红(274) |
| 水轮机磨蚀成因探讨.....             |     |     | 顾四行 | 闵京声(287)     |
| 抽黄水泵泥沙磨损及其对策.....          |     |     | 闵京声 | 顾四行(298)     |
| 模型沙选择及对水轮机特性影响的试验研究        |     |     |     |              |
| .....                      | 由彩堂 | 姚 光 | 何成连 | 闵京声(305)     |
| 计算机动态信号检测分析系统应用与实践         |     |     |     |              |
| .....                      | 何成连 | 由彩堂 | 董 盛 | 刘翠兰等(313)    |
| 三峡模型机组常规与窄高尾水管试验研究         |     |     |     |              |
| .....                      | 由彩堂 | 何成连 | 姚 光 | 闵京声等(318)    |
| 天湖水电站水轮机现场效测及优化调度.....     | 何成连 | 黄桂京 | 由彩堂 | (323)        |
| 潘家口电站混流可逆式机组模型甩负荷试验分析..... | 由彩堂 | 黄桂京 | 何成连 | (327)        |
| 天津市宁车沽防潮闸闸门启闭力测试及分析        |     |     |     |              |
| .....                      | 何成连 | 王大实 | 赵有鑫 | 宋超格(332)     |
| 压力灌浆在 TBM 掘进洞段加固围岩中的施工     |     |     |     |              |
| .....                      | 赵 玺 | 章跃林 | 马延臣 | 李庆铁(337)     |
| TBM 掘进洞段缺陷处理施工 .....       | 张俊杰 | 章跃林 | 马延臣 | 李庆铁(343)     |
| 双护盾全断面掘进机在断层破碎带施工.....     | 梁晋平 | 史国珍 | 刘 波 | (351)        |
| 双护盾全断面掘进机在溶洞段施工.....       | 梁晋平 | 史国珍 | 刘 波 | (355)        |
| 浅谈业主对工程参与方质量控制.....        |     |     |     | 樊晋生(358)     |
| 后记.....                    |     |     |     | (361)        |

# 滇池草海清污堆泥场土工管围埝现场试验

黄启明 林 森

## 一、工程概况

滇池已被列为国家亟待整治的三大湖泊之一。政府部门要求加大力度,采取各项有效措施,净化水域,净化空气,重现碧水蓝天。滇池清污主要是利用挖泥船吸除污染底泥,再通过输泥管送到湖滨的堆泥场排水沉淀。由于滇池附近地质普遍存在湖相沉积淤泥,在以往利用土、石、混凝土等传统建材修建堆泥场的围堰时,庞大的抛石基础和土石堰体使得开山挖地和大量运输造成环境和景观资源破坏。而且由于城区不断发展及避免占用农田使得堆泥场地越加紧张,多数堆泥场是在一期做过的堆泥场上二次堆泥,给围堰的修建增加了困难。因此采用先进技术,安全、经济、有效地解决上述问题,是我们面临的紧迫任务。近二三十年发展起来的土工合成材料技术为此开辟了一条经济、高效、料源丰富的新途径。

土工合成材料是以高分子聚合物为原料在工厂制造的用于岩土工程的各种产品,初步统计,品种达 600 种以上。它们具有反滤、排水、隔离、加筋、防护和防水等功能,能解决岩土工程中经常遇到的涉及土体稳定、变形和渗流方面的三大问题。土工合成材料在水利、交通、铁道、建筑、环保以及军事工程等领域都已得到广泛应用。其中土工管袋(geotube)和土工包(geocontainer)则是产品家族中的新秀,它特别适用于疏浚环保。土工管是以高强、抗老化的有纺土工织物缝制成的滤水长管袋,直径通常为 1~5m,长度按要求确定。

土工管袋施工装置如图 1 所示。为了控制进液压力及流量,需要管线上配装所需的压力表。

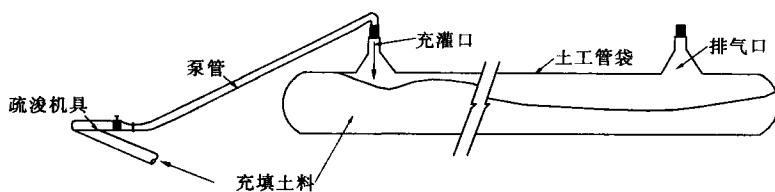


图 1 土工管袋装置图

表 1 中列出土工管袋在国外应用工程的众多成功实例,但在我国应用却较少。为摸索经验以便推广应用,故进行本次现场试验。围堰结构主要在一期吹填淤泥面上用有纺土工织物做加筋土垫层作为管袋基础,在其上用湖底淤泥充填土工管袋构筑堰体。其试验的主要目的在于:

(1)对土工管袋和有纺土工织物加筋土垫层基础的现场施工进行全面观测,掌握正确的施工步骤,获取各项必要的技术参数,验证设计的合理性。

(2)观测土工管袋和加筋土垫层基础以及原地基在施工过程中和完建后的变形与稳定性。

(3)检测土工管袋在排水固结过程中对充灌物的净化效果。

表 1 土工管袋工程举例

| 工程地点和年份                                       | 充管数量和材料                                       | 用 途                                                                                                      |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Destin, Florida<br>1991                       | 4 条管, 各长 63m, 宽 1.5m, 水力<br>充砂                | 建造丁坝                                                                                                     |
| Gaillard Island, Alaba-<br>ma<br>1992         | 4 条管, 各长 150m, 宽 3.7 ~<br>4.6m, 水力充灌细粒料       | 建人工岛; 检验全都用细粒料(粒径小于<br>0.075mm)充管筑堤的可行性, 试验获得成<br>功; 土料固结后的干密度为 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ , 管<br>高为原高的一半 |
| Avalon Beach,<br>New Jersey<br>1994           | 4 条管, 长 152 ~ 183m, 宽 3.7m,<br>水力充灌砂          | 作为临时性防浪的廉价堤, 后来建永久性<br>堤防                                                                                |
| Amelia Island,<br>Florida                     | 管长 1 067m, 宽 3.7m, 高 1.5m,<br>水力充灌砂           | 作丁坝, 伸入大西洋, 用于海滩防冲                                                                                       |
| Bay Town,<br>Tennessee<br>1994                | 管长 914m, 水力冲填砂                                | 作防浪堤                                                                                                     |
| Smith Island,<br>Baltimore District<br>1994   | 管长 914m, 宽 3.7m, 高 1.2 ~<br>1.5m              | 改良湿地, 防止冲刷                                                                                               |
| Hurricane Hugo,<br>Charleson District<br>1991 | 土工袋, 175 个, 每个 $9.2 \sim$<br>$11.5\text{m}^3$ | 堤防溃决, 用卡车投放堵口                                                                                            |
| Red Eye Crossing,<br>Louisiana<br>1994        | 土工袋, 筑堤, 长 2 134m                             | 6 道堤防, 长 183 ~ 518m; 为防止河道被<br>淤, 筑堤减少淤积疏浚量; 其中 3 道堤共用<br>556 个袋                                         |

## 二、试验场地地基及土质情况

### (一)地基土层分布

试验场地原为清淤一期工程的淤泥堆场, 现淤泥表面已干涸、开裂, 根据地质勘察该处地层自上而下如下:

- ①<sub>1</sub> 淤泥填土:黑色,上部干裂,下部流塑,层底深度 1.35m;
- ①<sub>2</sub> 粘土填土:红色,可硬塑,层底深度 2.2m;
- ①<sub>3</sub> 碎石填料:红色,石灰岩碎石,稍密,层底深度 3.8m;
- ②<sub>1</sub> 淤泥:顶部黑色泥炭质土,下部为灰色,流塑夹软塑,含腐草;
- ②<sub>2</sub> 高压缩性土层:层底深度 8.8m;
- ③ 粉土:灰色,很湿,稍密,层底深度 10.5m;
- ④ 中砂:绿灰色,饱和,稍密,含胶结块,层底深度 12.0m;

根据本工程具体情况,应力涉及的土层为①与②层,其主要力学特性如表 2 所列。

表 2 土的物理力学性试验成果表

| 地层<br>编号       | 岩性<br>描述       | 取样深度<br>/m | 容重<br>$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 密度<br>$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 饱和度<br>$S_r/\%$ | 孔隙比<br>$e$ | 天然<br>含水率<br>$W/\%$ | 液限<br>$W_L/\%$ | 塑限<br>$W_P/\%$ | 塑性<br>指数<br>$I_P$ | 液性<br>指数<br>$I_L$ | 压缩系数<br>$d_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$ | 抗剪强度指标      |              |
|----------------|----------------|------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|------------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------|--------------|
|                |                |            |                                            |                                          |                 |            |                     |                |                |                   |                   |                                   | $C$<br>/kPa | $\phi$<br>/° |
| ① <sub>1</sub> | 淤泥             | 0.6~0.8    | 14.2                                       | 2.68                                     | 95              | 2.70       | 96                  | 82             | 46             | 36                | 1.39              | 2.65                              | 1.1         | 3.0          |
| ① <sub>2</sub> | 人工<br>填土<br>粘土 | 1.0~1.2    | 16.6                                       | 2.92                                     | 84              | 1.53       | 44                  | 59             | 37             | 22                | 0.32              | —                                 | —           | —            |
|                |                | 1.1~1.2    | 17.4                                       | 2.92                                     | 84              | 1.32       | 38                  | 57             | 34             | 23                | 0.17              | 0.34                              | 69.3        | 10.1         |
|                |                | 2.5~2.7    | 17.52                                      | 2.93                                     | 88              | 1.36       | 41                  | 61             | 37             | 24                | 0.17              | 0.61                              | 48.9        | 6.3          |
|                |                | 平均值        | 17.2                                       | 2.92                                     | 85              | 1.40       | 41                  | —              | —              | 23                | 0.22              | 0.48                              | 59.1        | 8.2          |
|                |                |            |                                            |                                          |                 |            |                     |                |                |                   |                   |                                   |             |              |
| ① <sub>3</sub> | 人工<br>填土<br>碎石 | 3.5~3.7    | —                                          | —                                        | —               | —          | —                   | —              | —              | —                 | —                 | —                                 | —           | —            |
| ②              | 淤泥             | 2.6~2.8    | 16.0                                       | 2.73                                     | 94              | 1.71       | 59                  | 66             | 35             | 31                | 0.77              | 1.70                              | 11.7        | 0.6          |
|                |                | 3.5~3.7    | 16.4                                       | 2.74                                     | 97              | 1.66       | 59                  | 61             | 33             | 28                | 0.93              | 1.57                              | —           | —            |
|                |                | 4.3~4.5    | 15.6                                       | 2.73                                     | 93              | 1.87       | 64                  | 65             | 34             | 31                | 0.97              | 1.82                              | 8.2         | 0.3          |
|                |                | 5.3~5.5    | 18.1                                       | 2.77                                     | 100             | 1.19       | 43                  | 46             | 26             | 20                | 0.85              | 0.85                              | 19.4        | 1.6          |
|                |                | 6.3~6.5    | 17.1                                       | 2.65                                     | 95              | 1.23       | 44                  | 43             | 25             | 18                | 1.06              | 0.90                              | 14.6        | 2.3          |
|                |                | 4.5~4.7    | 13.0                                       | 2.24                                     | 88              | 2.22       | 87                  | 94             | 55             | 39                | 0.82              | 2.3                               | —           | —            |
|                |                | 5.7~6.0    | 11.1                                       | 1.72                                     | 96              | 4.08       | 228                 | 227            | 134            | 93                | 1.01              | 5.75                              | 27.9        | 1.8          |
|                |                | 6.7~6.9    | 15.0                                       | 2.68                                     | 100             | 2.38       | 89                  | 91             | 43             | 48                | 0.96              | 2.23                              | 8.2         | 2.1          |
|                |                | 7.7~7.9    | 14.2                                       | 2.65                                     | 97              | 2.75       | 101                 | 93             | 53             | 40                | 1.2               | 2.97                              | 4.6         | 1.9          |
|                |                | 8.7~8.9    | 15.2                                       | 2.66                                     | 99              | 2.17       | 81                  | 76             | 42             | 34                | 1.15              | 2.49                              | 16.5        | 1.1          |
|                |                | 9.5~9.7    | 18.1                                       | 2.68                                     | 96              | 1.03       | 37                  | 34             | 22             | 12                | 1.25              | 0.6                               | 7.1         | 10.5         |
|                |                | 计件数        | 11                                         | 11                                       | 11              | 11         | 11                  | —              | —              | 11                | 11                | 11                                | 9           | 9            |
|                |                | 范围值        | 11.1~                                      | 1.72~                                    | 88~             | 1.03~      | 37~                 | —              | —              | 12~               | 0.77~             | 0.6~                              | 4.6~        | 0.3~         |
|                |                |            | 18.1                                       | 2.77                                     | 100             | 4.08       | 228                 |                |                | 39                | 1.25              | 5.75                              | 27.9        | 10.5         |
|                |                | 平均值        | 15.4                                       | —                                        | 96              | 2.02       | 78                  | —              | —              | 35                | 1.00              | 2.11                              | 13.1        | 2.4          |
| ③              | 粉土<br>夹粉<br>砂  | 7.2~7.4    | 18.6                                       | 2.69                                     | 90              | 0.87       | 29                  | 28             | 23             | 5                 | —                 | 0.35                              | 21.4        | 21.0         |
|                |                | 8.2~8.4    | 19.1                                       | 2.68                                     | 90              | 0.77       | 26                  | 24             | 19             | 5                 | —                 | 0.31                              | 29.6        | 16.5         |
|                |                | 9.8~10.0   | 18.7                                       | 2.66                                     | 96              | 0.86       | 31                  | 28             | 21             | 7                 | —                 | 0.42                              | 10.3        | 24.9         |
|                |                | 10.5~10.7  | 18.3                                       | 2.68                                     | 92              | 0.93       | 32                  | 30             | 22             | 8                 | —                 | 0.47                              | 18.2        | 17.5         |
|                |                | 平均值        | 18.7                                       | 2.68                                     | 92              | 0.86       | 30                  | —              | —              | 6                 | —                 | 0.39                              | 19.9        | 20.0         |



表 4 SI 土工管袋材料物理力学性指标(1<sup>#</sup>土工管袋 GEOTEX10×10 高性能机织土工织物)

|      | 特 性                                    | 试验方法        | 数 值         |
|------|----------------------------------------|-------------|-------------|
| 力学性  | 宽条抗拉强度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$  | ASTM D—4595 | 178×178     |
|      | 宽条延伸率/%                                | ASTM D—4595 | 10×10       |
|      | 宽条拉伸@2%/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ | ASTM D—4595 | 26.2×35     |
|      | @5%/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$     | ASTM D—4595 | 70×78       |
|      | @10%/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$    | ASTM D—4595 | 148.9×157.6 |
|      | 梯形撕裂强度/N                               | ASTM D—4533 | 3 560×3 560 |
|      | 刺破强度/N                                 | ASTM D—4833 | 1 780       |
| 水力学性 | 表观孔径(AOS)/mm                           | ASTM D—4751 | 0.25        |
|      | 渗透系数/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$    | ASTM D—4971 | 0.01        |
|      | 耐久性抗紫外线(500h 后强度保留百分比)/%               | ASTM D—4355 | 80          |
|      | 管径/m                                   | —           | 3.0         |
|      | 长度/m                                   | —           | 54.0        |

表 5 SI 土工管袋材料物理力学性指标(2<sup>#</sup>土工管袋 GEOTEX4×6 高性能机织土工织物)

|      | 特 性                                    | 试验方法        | 数 值         |
|------|----------------------------------------|-------------|-------------|
| 力学性  | 宽条抗拉强度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$  | ASTM D—4595 | 71×107      |
|      | 宽条延伸率/%                                | ASTM D-4595 | 14×9        |
|      | 宽条拉伸@2%/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ | ASTM D—4595 | 7.1×17.8    |
|      | @5%/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$     | ASTM D—4595 | 17.8×39     |
|      | @10%/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$    | ASTM D—4595 | 41×80       |
|      | 梯形撕裂强度/N                               | ASTM D—4533 | 1 133×1 359 |
|      | 刺破强度/N                                 | ASTM D—4833 | 1 178       |
| 水力学性 | 表观孔径(AOS)/mm                           | ASTM D—4751 | 0.425       |
|      | 渗透系数/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$    | ASTM D—4971 | 0.01        |
|      | 耐久性抗紫外线(500h 后强度保留百分比)/%               | ASTM D—4355 | 80          |
|      | 管径/m                                   | —           | 3.0         |
|      | 长度/m                                   | —           | 54.0        |

(2)铺设规格  $150\text{g}/\text{m}^2$  的有纺土工织物于地面。

(3)在有纺土工织物上铺 30cm 粘土,在粘土中部铺设 6m 长竹筋,竹筋间距 20cm,夯实土层后将有纺土工织物包裹过来,形成加筋土垫层。

(4)在加筋土垫层上作 30cm 以有纺土工织物包裹的 30cm 碎石垫层,以利于排水。

(5)在碎石垫层上部两侧边缘作两排碎石袋,以稳定管袋位置。

(6)在基础四周开挖排水沟,沟内衬砌土工膜加快排水,防止基础的不均匀沉降。排水沟在基础两侧开挖,沿基础纵向各挖一条,距基础 30cm,沟长 60m,宽 30cm,深 25~35cm。在基础靠近吹填区中心一侧每 10m 开挖一条垂直于纵向排水沟的横向排水沟,将水排到距基础 20m 以外的区域。

(7)设置土工布管袋固定绳索,控制管袋位置和位移。在基础两侧打设固定桩,桩上系固定绳索,桩间距 3m。

### (三)土工管袋稳定分析

#### 1. 水平抗滑稳定性校核

按传统方法计算,公式如下:

$$F_s = \frac{F_r}{F_a} \quad (1)$$

式中, $F_s$  为安全系数,要求不小于 1.3; $F_r$  为水平抗滑阻力; $F_a$  为水平推力。

$F_r$  由土工管袋底与其下垫层界面的摩擦力和粘着力提供,应按下式计算:

$$F_r = W \cdot f + C_a \cdot B \quad (2)$$

式中, $W$  为每延米长土工管袋连同充灌土重量,取为 49.4kN/m; $f$  为上述界面的摩擦系数(有纺织物与有纺织物间摩擦系数),保守值取为 0.3; $C_a$  为界面粘着力,取为 13.1kPa; $B$  为土工管袋接地宽度,为 3m。

$F_a$  由管后淤泥土的主动土压力引起:

$$F_a = 0.5K_a\gamma H^2 \quad (3)$$

式中, $K_a$  为主动土压力系数, $\gamma$  为淤泥容重,按 14kN/m<sup>3</sup> 计(湿重); $H$  为淤泥充灌高度, $H=1.5\text{m}$ ; $K_a$  值按下式计算:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (4)$$

$\phi$  值为淤泥摩擦角,最低值为 2.4°,故有:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 2.4^\circ/2) = 0.92$$

平面抗滑安全系数按式(1)有:

$$\begin{aligned} F_s &= \frac{49.4 \times 0.3 + 13.1 \times 3}{0.5 \times 14 \times 1.5^2 \times 0.92} \\ &= 3.73 > 2 \end{aligned}$$

可见平面抗滑稳定是安全的。

#### 2. 深层抗滑稳定性校核

根据地质勘探资料表 1 所列土层的物理特性,将各土层的  $C$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$  及平均层厚作为计算依据,荷重考虑管袋、充填工况堆泥场水位,加筋土基础垫层、原一期工程土石围堰,边界条件考虑原一期工程土石围堰以外 10m 平地及外侧的湖水水位。

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| 土工管袋充灌料(湿土) | 14kN/m <sup>3</sup> |
| 土工管袋垫层      | 16kN/m <sup>3</sup> |
| 一期围堰        | 17kN/m <sup>3</sup> |

按传统的圆弧滑动条分法计算,安全系数  $F_s$  的计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sum C \cdot l + \sum N \cdot \tan \phi}{\sum T} \quad (5)$$

式中,  $c$ 、 $\phi$  为滑弧面上土的粘聚力的内摩擦角;  $l$  为每一土条底弧长度;  $N$  为每一土条作用于底弧上的法向力;  $T$  为每一土条作用于底弧上的切向力;  $F_s$  为安全系数, 一般要求不小于 1.3。

具体计算利用计算机程序进行:

$$\text{得 } F_s = 1.34 > 1.3$$

可见深层抗滑稳定是安全的。

### 3. 地基承载力验算

地基承载力安全系数按下式计算:

$$p = \frac{P}{b} \quad (6)$$

$$F_s = \frac{Q}{P} \quad (7)$$

式中,  $F_s$  为安全系数, 一般应不小于 2;  $p$  为垫层下地基接触压力;  $P$  为充泥后土工管袋与垫层合重;  $b$  为垫层宽度, 本情况为 5.5m;  $Q$  为地基承载力, 实测最小值为 40kN/m<sup>2</sup>。

由此可算得:

$$p = \frac{49.4 + 9.6 \times 5.5}{5.5} = 18.58 (\text{kN/m}^2)$$

$$F_s = \frac{40}{18.58} = 2.15 > 2.0$$

故承载力满足要求。

## (四) 管袋内土体固结估算

### 1. 估算理论

鉴于二维固结计算十分复杂, 土工管袋内沉积土体的固结速率按一维固结理论计算, 固结土层的厚度应基本不变, 固结使土层厚度减小, 计算中忽略不计。在本试验中, 管内土面高程系未知量, 初步假设泥浆成土时的初始土层厚为 1.7m, 而固结完成时的厚度为 1.5m (一般固结完成后的土层厚约为管直径的一半, 即 1.5m)。为此, 计算土层厚假设为上述二者之半, 即按下式计算  $(1.7 + 1.5) \div 2 = 1.6(\text{m})$ 。

### 2. 固结系数 $C_v$

固结时间的长短决定于管内土的固结系数  $C_v$  的大小。为了力求计算符合实际, 委托某测试研究所对管内土料进行了固结试验。考虑管内土体在自重下完全固结后的干容重  $\gamma$  不会太高 (按经验最高约为 13kN/m<sup>3</sup>), 故建议试样干容重控制为 11, 12, 13kN/m<sup>3</sup>。固结荷载定为 50kPa, 按常规的平方根  $t$  法确定上述荷载下的  $C_v$  值, 该研究所提供的试验成果如表 6。

管内土料固结时间计算结果如表 7 所示。固结时理论上管袋是上下双面排水, 上述固结是指管中土在自重下的固结, 其稳定容重大约为 13kN/m<sup>3</sup>。如果要求  $\gamma_d = 13\text{kN/m}^3$  土的固结度达到 90%, 相应的时间亦仅 27.3d。实际固结时可能介于双面排水和单面排

水中间情况。其实,针对土工管用于筑堰而论,管内土的固结程度并无重要意义。因为在水利工程中就有以橡胶坝挡水的成功先例。

表 6 管内土的固结系数

| 干容重 $\gamma_d/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 荷重等级 $P/\text{kPa}$ | 固结系数 $C_v/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ |
|--------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| 11.0                                       | 0~50                | $3.97\times 10^{-3}$                     |
| 12.0                                       | 0~50                | $3.15\times 10^{-3}$                     |
| 13.0                                       | 0~50                | $2.30\times 10^{-3}$                     |

表 7 管内土料不同固结度时所需时间 d

| 土料干容重<br>$\gamma_d/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 固结度(双面排水, $H=0.8\text{m}$ )/% |      |      | 固结度(单面排水, $H=1.6\text{m}$ )/% |    |      |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|------|------|-------------------------------|----|------|
|                                                 | 60                            | 70   | 80   | 60                            | 70 | 80   |
| 11.0                                            | 5.3                           | 7.5  | 10.5 | 21.2                          | 30 | 42.0 |
| 12.0                                            | 6.7                           | 9.5  | 13.3 | 26.8                          | 38 | 53.2 |
| 13.0                                            | 9.2                           | 13.0 | 18.3 | 36.8                          | 52 | 73.2 |

但土工管在保证稳定的前提下,出现一个新问题,即随着管中土的固结,管顶高程将有所降低。考虑这个因素,设计中选用的直径为 3m。根据国外大量充管经验,土固结后管高约为管径的一半,即 1.5m,这正满足设计要求的高度。为此,通过连续观测,发现管顶高程不足,及时补充充灌,直至达到要求为止。

此外,管袋围堤的线路较长,从头到尾系连续充灌。待一轮充实,再回到充灌起点,估计历时已近一月。为此,充灌二、三轮后,管中土的固结度将会达到 90%。

综上所述,设计计算成果充分证明,土工管用作环保疏浚围埝建设和条件相似的城市内河治理等,在技术上都是可行的。

四、土工管袋充灌施工

根据施工的基本工序分述如下:

(一)IMS4010 挖泥船性能

疏浚充管采用美国制造的 IMS4010 挖泥船。该船具有搬迁灵活,工作效率高等特点。采用的半封闭绞吸结构。在泥罩内搅拌的泥浆能及时排放泵走,避免对水的二次污染。IMS4010 挖泥船配备了多种挖泥头,适合不同土质的挖掘要求。其挖深、排压可以准确控制,工作时可抗 5~6 级风浪,广泛用于河道挖土及清淤等。本工程对两种脱水土工管进行了充灌试验,取得了预期效果。

(二)地基准备

按试验大纲要求,两个试验管袋的地基处理采用两种方式:简单处理和不做处理。

1. 简单处理

1# 试验管袋基础使用  $\phi 10\text{cm}$ 、长 1.3m 木桩插入原吹填区软基中,共打桩 110 根,呈梅花状布设,纵向间距为 1.5m,横向间距 1.0m。桩顶铺竹排保护。

根据测量结果,本区域内地面高差为 40cm,使用土加碎石的混合土进行地面找平,在找平层上面铺放有纺织物一层。形成加筋垫层,其中土层厚 40cm,碎石厚 20cm,1<sup>#</sup>管袋基础距原吹填区地面最高处为 1m。

## 2. 地基不做处理

2<sup>#</sup>管袋直接在原地面上铺设有纺织物一层,将地面找平再铺有纺织物一层,用袋装碎石垒砌管袋槽,整个基础距原吹填区地面高处为 50cm。

## 3. 铺设土工管袋

土工管袋重量较轻,人工运输及铺放。

## 4. 开挖排水沟

1<sup>#</sup>管袋在第一次充灌前仅在原围埝与管袋间做排水沟一条,另一面没做排水沟。充灌后发现管袋排出水冲刷基础垫土,引起局部沉降,又加铺排水织物。

2<sup>#</sup>管袋排水沟吸取了 1<sup>#</sup>袋的经验,沿管袋两侧均挖有排水沟,在排水沟内铺设塑料薄膜。

## 5. 土工管袋充灌

5月10日,1<sup>#</sup>管袋第一次充灌仅 3min,在管袋拐角处发生滑落,停机后重新固定管袋,到 5月29日共充灌 25次,累计充灌时间 2.32h,管内充泥约 200m<sup>3</sup>。根据充灌机具的性能 800m<sup>3</sup>/h 流量及管袋存泥,推算出充灌管袋的泥浆浓度约为 10%。泥浆粒径分布是:粒径 0.075mm 以上的占 38%,0.075~0.05mm 的占 24%,0.05mm 以下的占 38%。

2<sup>#</sup>管袋从 5月24日起充灌,共充灌 15次,浓度约 12.3%,累计充灌时间 2.12h,管内充泥约 216m<sup>3</sup>,泥土粒径同 1<sup>#</sup>管。

# 五、施工观测与测试

## (一)观测与成果

### 1. 观测目的和方法

为及时掌握管袋的充高和变形,以便随时了解其工作状况,必要时采取适当措施,充灌过程中进行了系统观测。

观测采用了水准仪和塔尺观测管袋整体变形趋势,以卷尺和长直尺量出管袋实际升高和下降变化。

观测在每次充管前和刚刚完成充管暂停时进行。在不进行充管的工作日里,每日 06:00,12:00,18:00 时进行观测。

### 2. 充管过程

1<sup>#</sup>管与 2<sup>#</sup>管的充灌时间与数据列于表 8。充灌机具的生产率为 800m<sup>3</sup>/h。

## (二)水质分析

为了检测土工管有纺土工织物的过滤功能,特请环保监测中心协助进行了水质分析测试。结果见表 9。

现针对表 9 作如下说明:

(1)表中草海水 1 和草海水 2 指 5月11日草海内未经疏浚扰动情况下的两组供分析

试验的疏浚区湖水水样。

表 8 土 工 管 充 灌 时 各 项 记 录

| 充管数据                  | 1#管         | 2#管          |
|-----------------------|-------------|--------------|
| 充管时间/月·日              | 5·10~5·31   | 5·24~5·31    |
| 观测天数/d                | 21          | 11           |
| 充管次数/次                | 25          | 15           |
| 累计充管时间/h              | 2.5         | 2.2          |
| 单次充管最长时间/min          | 15          | 21           |
| 充管日平均日升高/m            | 0.91        | 1.78         |
| 充管达最大高度/m             | 1.85        | 2.00         |
| 管袋最终尺寸(B×H×L)/m       | 3.6×1.55×54 | 3.7×1.625×54 |
| 充管浆液体积/m <sup>3</sup> | 2 024       | 1 760        |
| 估计浆液浓度/%              | 9.92        | 12.3         |

表 9 水 样 检 测 成 果 mg·L<sup>-1</sup>

| 取样<br>日期   | 水样<br>类别 | 水中元素含量 |                      |                      |      |      |       |       |       |      |        |       |
|------------|----------|--------|----------------------|----------------------|------|------|-------|-------|-------|------|--------|-------|
|            |          | 色度     | 悬浮物                  | cod <sub>Cr</sub>    | 总磷   | 总氮   | 砷     | 总铬    | 铜     | 铅    | 镉      | 锌     |
| 2000. 5.11 | 草海水 1    | 10     | 35.0                 | 68.5                 | 0.82 | 10.0 | 0.051 | 0.065 | 0.158 | 0.04 | 0.005  | 0.184 |
|            | 草海水 2    | 10     | 33.0                 | 72.5                 | 0.98 | 10.5 | 0.048 | 0.024 | 0.116 | 0.04 | 0.006  | 0.151 |
|            | 进袋水      | 40     | 8.37×10 <sup>3</sup> | 9.05×10 <sup>3</sup> | 294  | 71.2 | 2.77  | 3.63  | 92.4  | 61.4 | 11.6   | 134   |
|            | 出袋水 1    | 20     | 326                  | 95.9                 | 3.35 | 43.8 | 0.313 | 0.098 | 0.310 | 0.68 | 0.054  | 0.687 |
|            | 出袋水 2    | 20     | 140                  | 71.8                 | 1.43 | 40.8 | 0.311 | 0.077 | 0.131 | 0.34 | 0.016  | 0.369 |
| 2000. 5.16 | 出袋水 1    | 15     | 60.7                 | 43.3                 | 3.51 | 40.2 | 0.027 | 0.041 | 0.047 | 0.11 | <0.005 | 0.685 |
|            | 出袋水 2    | 15     | 68.3                 | 49.9                 | 3.80 | 42.6 | 0.024 | 0.053 | 0.047 | 0.11 | <0.005 | 0.560 |

(2)表中进袋水指由疏浚机械抽取的泥浆水进入土工管袋的水样,取自管袋进水口。

(3)表中出袋水 1 和出袋水 2 指底泥经疏浚搅拌后的污泥水灌入土工管后开始排水时的水样,持续时间为 3min。随即变清,水质与 5 月 16 日水样同,持续稳定。

(4)5 月 16 日编号 1 与 2 的出袋水指 5 月 11 日灌入的污泥水经几日后排出水的两个平行试样。

从上述明显看出,土工管的物理过滤效果极为突出,悬浮物的含量通过土工管呈几十倍减少。其化学过滤与进袋水相比,总体上可淡化原含有害元素。TN、TP 及砷、铜、铅等普遍下降,这是因为滇池的有害元素大部分包含在底泥中,经疏浚扰动进入原水体中,排水过滤时被土工管袋成功拦截所致。