

土石坝坝体和 库区土工膜防渗体的

力学特性、结构稳定及 施工技术研究

侍克斌 姜海波 王 健 李玉建 著
魏 东 李文国 张 军 尚 层



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土石坝坝体和库区土工膜防渗体的力学特性、结构稳定及施工技术研究

侍克斌 姜海波 王 健 李玉建 著
魏 东 李文国 张 军 尚 层



内 容 提 要

本书研究了土工膜与砂、砂砾石、苯板等的摩擦特性和土石坝复合土工膜防渗体的力学特性，进行了在库水位正常和骤降情况下、在寒冷地区坝坡具有冰压（推）力、冰拔和冰下拉力的情况下、在综合考虑冰和风浪荷载情况下土石坝斜墙土工膜防渗体的应力应变计算和抗滑稳定分析，研究了库盘土工膜防渗体的局部抗裂机理、整体渗透系数和库区大面积土工膜防渗体的机械化施工方法等。

本书可供水利工程、土木工程及相关专业领域的设计、施工、管理、科研和教学人员使用与参考。

图书在版编目（C I P）数据

土石坝坝体和库区土工膜防渗体的力学特性、结构稳定及施工技术研究 / 侍克斌等著. — 北京：中国水利水电出版社，2013. 1

ISBN 978-7-5170-0627-5

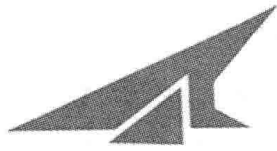
I. ①土… II. ①侍… III. ①土石坝—坝体—复合土工膜—防渗体—研究 IV. ①TV640. 31

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第022367号

书 名	土石坝坝体和库区土工膜防渗体的力学特性、 结构稳定及施工技术研究
作 者	侍克斌 姜海波 王健 李玉建 魏东 李文国 张军 尚层 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 15 印张 333 千字
版 次	2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	45.00 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

近几十年来，土工膜已广泛地用于土石坝和水库库区的防渗工程。

随着在工程中应用的日趋增多和时间积累，土工膜防渗体在设计、施工和运行管理中，已逐渐暴露出一些基础理论和关键技术方面的问题。例如：怎样较精确地测定柔性的土工膜与散粒体、苯板等垫层材料的摩擦角和凝聚力？作为土石坝心墙、斜墙的土工膜防渗体在施工和运行期的应力应变情况怎样？当土石坝中的土工膜斜墙防渗体设计较陡时，在水库正常运行和水位骤降时其结构稳定情况怎样？在寒冷地区如何兼顾考虑土工膜防渗体的冻胀、冰推、冰拔、冰下拉与风浪的掏刷问题？在施工和运行期怎样防止土工膜防渗体的破损？土石坝设计中，土工膜防渗体的实际渗透系数 K 应怎样确定？对大面积的土工膜防渗体施工，如何提高机械化程度以确保施工质量和加快施工进度等。

针对上述问题，本书首先依托自行研发的国家发明专利产品“非散粒体材料摩擦角测定仪”（公布专利号：ZL200510079351.7）及常规的 YZY—1 型土工合成材料测定仪，分别对土工膜（光面膜和复合膜）与不同含水量散粒体（砂、土、砂砾石混合料）、苯板等的摩擦角和凝聚力进行了测定和对比分析；接着对土石坝复合土工膜防渗心墙和防渗斜墙的力学特性进行了研究，并重点研究了不同坝高、不同摩擦系数和不同坝坡对复合土工膜防渗斜墙应力应变的影响；然后进行了土石坝斜墙复合土工膜防渗体的有限元抗滑稳定分析，并重点分析研究了库水位骤降情况下和寒冷地区在冰压（推）力、冰拔和冰下拉情况下土石坝斜墙土工膜防渗体的稳定情况；最后在综合考虑冰和风浪荷载的情况下，结合恰拉水库运行中实际破坏及修复后的情况，对该土石坝斜墙土工膜防渗体进行了应力及稳定分析计算。本书研究的另一部分内容是针对大面积库区防渗体的施工和运行，首先研究了库盘土工膜防渗体的局部抗裂问题；接着研究了考虑施工、运行过程中土工膜局部损坏后的整体渗透系数问题；然后研究分析了库区常规大规模土工膜防渗体在机械化施工中遭破坏的原因；最后依托自行研发的库区大规模土工膜防渗体施工的关键机械之一，国家发明专利产品“移动支架式筛分机”（公布专利号：ZL201010203937.0），对既能保证质量、又能提高效率的库区大面积土工膜防

渗体施工方法进行了较为系统的研究。

感谢新疆胜利水库（中型，坝体、全库区土工膜防渗，铺膜面积 389.2 万 m^2 ）、恰拉水库（大型，土工膜斜墙防渗加土工膜水平铺盖，其中水平铺盖为 22~25 倍坝前水头）、多浪水库（同恰拉水库）、呼图壁青年渠首（上坝为土工膜心墙防渗）建设管理局（处）和新疆生产建设兵团水电勘测设计院、新疆方汇水电勘测设计公司、葛洲坝新疆水电工程建设总公司、四川黑龙潭水电工程建设公司所提供的研究实践平台和大力支持！本书的撰写参阅和调研了大量这些水库的设计、施工和运行资料，并参考了大量前人的研究文献。

由于作者水平有限，书中难免存在不适及错误之处，敬请读者批评指正。

作者

2012 年 10 月于乌鲁木齐

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 传统防渗体	2
1.2 新型土工膜防渗体	3
第 2 章 土石坝坝体和库区土工膜防渗体结构的类型及特点	6
2.1 土工膜防渗斜墙	6
2.2 土工膜防渗心墙	11
2.3 库盘土工膜防渗体	14
第 3 章 土工膜、苯板的基本特性与功能	20
3.1 土工膜材料的种类、特性及主要功能	20
3.2 苯板材料的种类、特性及主要功能	22
第 4 章 土工膜与砂垫层、保护层结构面的摩擦试验研究	24
4.1 试验设备	24
4.2 试验材料	25
4.3 试验方法	26
4.4 试验原理	28
4.5 试验结果	28
4.6 试验结果分析	38
第 5 章 复合土工膜与粗粒料垫层、保护层结构面的摩擦试验研究	42
5.1 试验设备	42
5.2 试验材料	43
5.3 试验方案	43
5.4 试验原理	43
5.5 试验方法	44
5.6 试验结果	45
5.7 试验结果分析	53
第 6 章 苯板与土工膜、砂土垫层材料的摩擦试验研究	56
6.1 试验设备	57
6.2 试验材料	57

6.3	试验原理	57
6.4	试验方法	57
6.5	试验结果	58
6.6	试验结果分析	65
第 7 章	土石坝复合土工膜防渗心墙的力学特性研究	68
7.1	概述	68
7.2	三维土工格栅单元	68
7.3	工程实例分析	70
第 8 章	土石坝坝体复合土工膜防渗斜墙的力学特性研究	80
8.1	概述	80
8.2	工程实例分析	80
8.3	有限元计算成果及讨论	82
第 9 章	不同坝高对土石坝复合土工膜防渗斜墙应力应变的影响	85
9.1	概述	85
9.2	50m 的中坝对复合土工膜应力变形的影响	85
9.3	100m 的高坝对复合土工膜应力变形的影响	92
9.4	计算结果分析	99
第 10 章	不同摩擦系数对土石坝复合土工膜防渗斜墙应力变形的影响	100
10.1	概述	100
10.2	低坝条件下不同摩擦系数对复合土工膜应力变形的影响	100
10.3	中坝条件下不同摩擦系数对复合土工膜应力变形的影响	103
10.4	高坝条件下不同摩擦系数对复合土工膜应力变形的影响	107
10.5	计算结果分析	112
第 11 章	不同坝坡对复合土工膜防渗斜墙应力变形的影响	113
11.1	概述	113
11.2	中坝条件下不同坝坡对复合土工膜应力变形的影响	113
11.3	高坝条件下不同坝坡对复合土工膜应力变形的影响	118
11.4	计算结果分析	122
第 12 章	土石坝斜墙复合土工膜防渗体的有限元抗滑稳定分析	123
12.1	概述	123
12.2	土石坝坝体复合土工膜斜墙防渗体的抗滑稳定机理	123
12.3	工程实例分析	124
第 13 章	库水位骤降时土石坝斜墙土工膜防渗体的稳定分析	131
13.1	概述	131
13.2	有效应力法	132

13.3	孔隙水压力的计算方法	132
13.4	折线法	133
13.5	工程算例	135
第 14 章	冰压力作用下土石坝斜墙土工膜防渗体稳定分析	137
14.1	概述	137
14.2	护坡稳定分析	137
14.3	土工膜防渗结构稳定分析	139
14.4	算例	140
第 15 章	考虑冰拔和下拉时土石坝斜墙土工膜防渗体的稳定分析	142
15.1	概述	142
15.2	护坡受冰拔作用时的稳定分析	142
15.3	护坡受冰拔作用时的算例	144
15.4	护坡受冰下拉作用时稳定分析	144
15.5	护坡受冰下拉时的算例	145
第 16 章	考虑冰和波浪荷载时土石坝斜墙土工膜防渗体的应力及稳定分析	146
16.1	概述	146
16.2	恰拉水库坝护坡破坏原因分析	146
16.3	斜墙复合防渗体抗滑稳定性分析	149
16.4	考虑风浪作用下复合防渗体的稳定分析	151
16.5	考虑冰推作用复合防渗体的抗滑稳定分析	158
16.6	恰拉水库斜墙复合防渗体的修复方案	167
第 17 章	库盘局部土工膜防渗体抗裂研究	168
17.1	概述	168
17.2	库盘局部土工膜撕裂机理分析	169
17.3	库盘局部土工膜撕裂强度分析	170
17.4	撕裂强度影响因素分析	176
17.5	工程措施	178
第 18 章	库盘大面积土工膜防渗体渗透系数研究	179
18.1	概述	179
18.2	土工膜的渗透量和渗漏量	179
18.3	库盘大面积土工膜防渗体渗透系数的计算方法	181
18.4	工程实例分析	183
第 19 章	库盘土工膜防渗体在机械化施工过程中的破坏分析	187
19.1	土工膜的定义、功能及性质	187
19.2	土工膜防渗体的结构	192
19.3	机械化施工对土工膜的破坏类型	193

第 20 章 库盘土工膜防渗体机械化施工方法研究 196

20.1 概述 196

20.2 土工膜防渗体施工工艺流程 196

20.3 土工膜防渗体机械化施工方法 197

第 21 章 流水作业 203

21.1 流水作业原理 203

21.2 流水作业组织 207

第 22 章 库盘土工膜防渗体机械化施工流水作业 209

22.1 概述 209

22.2 新疆胜利水库土工膜防渗工程介绍 210

22.3 土工膜防渗体施工流水作业的组织方法及步骤 214

22.4 土工膜防渗体施工流水作业步距的确定 217

参考文献 218

第 1 章 绪 论

土石坝泛指由当地土料、石料或土石混合料经过抛填、碾压等方法堆筑成的挡水坝。当坝体材料以当地土料和砂、砂砾、卵砾为主时称土坝，以石渣、卵石、爆破石料为主时称堆石坝，当两类当地材料均占相当比例时称土石混合坝。

土石坝是世界上最古老的坝型之一，有着悠久的建造历史。据统计，全世界超过 15m 的土石坝共有 29000 余座，仅在中国就有 15000 余座。世界上建成的最高的土石坝是苏联的努列克心墙堆石坝，坝高 300m。由于土石坝具有对地基要求宽松、施工简单方便、适应性强、抗震性能良好、工作可靠、寿命长、管理简便等优点，成为了世界上应用最广的坝型。

土石坝被广泛采用并不断发展，得益于它的以下优点。

(1) 经济效益好。在同等条件下，土石坝的坝体方量虽然比混凝土重力坝大 4~6 倍，但其单价仅为混凝土的 $1/20 \sim 1/15$ ，虽然土石坝工程的泄洪、导流、发电等建筑物的工程量一般比混凝土重力坝大，但是地基处理工程量要小得多。方案论证和实践对比证明，土石坝工程的综合性指标比混凝土重力坝优越。

(2) 大型施工机械的发展使施工机械化程度更高，施工中配合采用新的工艺流程，可提高施工效率和质量。

(3) 土石坝的设计质量和安全可靠性和在不断提高，得益于岩土力学理论、测试手段和电算技术的发展。

(4) 土石坝大多材料可就地选取，有利于挖填平衡和节约资金。

(5) 土石坝对各种地形、地质条件的适应性较大，对于不良的地基，经处理后一般均可修建土石坝。

(6) 能适应不良气候条件，一般土石坝可以在严寒低温或炎热多雨的地区建造。

(7) 抗震性能较好。

(8) 土石坝工程的导流、泄洪问题随着施工机械、施工技术和导流技术的发展（如坝体临时断面过水导流、高围堰导流等）已得到较好解决。

(9) 运行费用低廉。按现代技术精心设计，严格施工的土石坝，安全可靠，而且寿命长久，运行通常只有护坡需要维修。

随着土石坝工程的发展和新型材料的兴起，土石坝的传统防渗体如土料防渗、混凝土面板防渗、沥青混凝土防渗得到了不断的革新，同时也出现了一些新的防渗体型式，如土工膜防渗以及膜土联合防渗等。



1.1 传统防渗体

1. 土料防渗体

采用土料防渗的土石坝包括心墙坝、斜墙坝和均质坝等。防渗土料是选定土料防渗土石坝的决定性条件。不同地区土质不尽相同,加上气候冷暖、雨水多少的差异,给防渗土料的选用、施工方式及质量保证带来不少难题。结合不同地区的特定条件,经过不断的工程实践,对不同土料采取相应的措施,已取得了不少成功经验:如对分散性土可加石灰或水泥使其改性,并做好反滤;对于膨胀性土要求在一定范围内,在其临界压力值附近,采用非膨胀性土以保持其足够的压强;云南云龙工程,心墙土料为多种土体团粒结构,干密度差别大,最优含水量相差也很大,采用混合使用方法较好地解决了该问题;黄土类土通过加强压实功能,在黄河小浪底工程斜心墙中得到了成功应用;鲁布革工程采用风化土料土石坝心墙,拓宽了防渗土料种类的范围。

随着工程技术的发展,土料防渗体也已从过去单一的黏性土发展至风化石、砾质土、掺砾料,但能否做高土石坝的防渗体,其抗渗性能及渗流稳定是关键性问题之一。

2. 混凝土面板防渗体

20世纪80年代我国开始建设混凝土面板堆石坝,起点较高,发展速度非常快。目前,我国高达百米级的混凝土面板堆石坝已有很多座,一部分已接近200m级,甚至超过200m。如已建浙江珊溪混凝土面板堆石坝,利用开挖石料筑坝,最大坝高132.5m;云南茄子山混凝土面板堆石坝坝体填料为花岗岩石料,最大坝高107m;黄河公伯峡混凝土面板堆石坝,设计地震烈度为8度,最大坝高达133m;已建成的天生桥一级电站面板堆石坝,最大坝高178m;已建的湖北清江水布垭混凝土面板堆石坝,最大坝高已达233m。

混凝土面板堆石坝是以堆石为主体材料,用混凝土面板作为防渗体的一种土石坝。一般认为堆石坝于1870年发源于美国,最初是抛填堆石,用木面板、钢面板等做防渗体,到1900年混凝土面板堆石坝才成为一种典型的土石坝。中国最早的堆石坝是1957年建成的四川狮子滩工程,为混凝土重力墙式抛填堆石坝,最大坝高52m;最早的混凝土面板堆石坝是1966年建成的贵州百花水电站大坝,最大坝高48.7m。

混凝土面板堆石坝的防渗体系由地基灌浆帷幕或混凝土防渗墙、混凝土趾板、混凝土面板及各种接缝止水所组成。坝体防渗体主要为混凝土面板,有整体式、分离式和条块式等几种。面板混凝土需具有较高的抗渗性能、抗冻性和耐久性,并有一定的强度要求,以保证防渗的可靠性。混凝土面板与趾板连接部位的周边缝及面板条块间的垂直缝,以及各种水平缝,都是防渗系统中的薄弱环节。混凝土面板的特点是长而薄,易产生裂缝。裂缝产生的原因有堆石体在自重和水压力作用下的变形、混凝土的温度应力和干缩等。由温度、湿度等环境因素变化引起混凝土收缩,受到基础约束而在混凝土内诱发拉应力,或自重与水压力作用下的变形在面板中产生拉应力,是促使面板裂缝的破坏力,是面板裂缝的外因。混凝土自身性能和质量决定混凝土的抗裂能力,这是内因。破坏力大于抗裂能力时,混凝土就会发生裂缝。因此,防裂措施可归结为提高其自身的抗裂能力,并尽量减少环境因素引发的破坏力。



3. 沥青混凝土防渗体

沥青混凝土是一种沥青和碎石的混合料,渗透系数很小,并具有一定的柔性,适应变形的能力较强。作为土石坝的防渗体,可以将沥青混凝土铺在其上游坡或在坝内设置沥青防渗墙来达到止水的目的。沥青混凝土防渗土石坝包括心墙坝、斜墙坝和沥青混凝土面板坝,但应用较广泛的是沥青混凝土心墙坝和面板坝。全世界目前已建成的沥青混凝土面板坝有 20 多座、心墙坝 70 多座。我国沥青混凝土防渗技术起步较晚,20 世纪 70 年代,建成了甘肃党河水库沥青混凝土心墙砂砾石坝、吉林白河沥青混凝土心墙坝等,此后又建成了辽宁碧流河水库和湖北车坝水库等沥青混凝土防渗工程。施工机械是水工沥青混凝土技术发展的关键,高度的机械化施工决定了防渗体施工的高质量、高速度和高效率。

沥青混凝土防渗面板结构有两种:一种称为简式结构或单防渗层结构,另一种称为复式结构或三明治式防渗结构。简式结构由一层防渗层所组成。复式结构有两层防渗层,是在特殊工程条件下采用的一种结构型式,其构造特点是:排水层可排出第一层防渗层的渗漏水,当第一层遭到破坏时,第二层防渗层承担防渗任务。沥青混凝土面板与混凝土面板相比有很多优点,特别是抗裂性能较好,尤为工程界所青睐。沥青混凝土施工工艺和沥青混凝土施工设备技术等方面存在的诸如沥青混凝土的环境问题、沥青混凝土面板的斜坡稳定性问题、沥青混凝土面板的低温抗裂问题和沥青混凝土面板的机械化施工问题正在逐步得到解决。

1.2 新型土工膜防渗体

土工膜是近几十年发展起来的新型建筑材料。土工膜具有很好的不透水性,其渗透系数约为 $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$,是理想的防渗材料。土石坝防渗所用的土工膜可铺设于坝体上游面作斜墙,也可铺设于坝体中央作心墙。它具有重量轻,运输量小,铺设方便,节省造价,缩短工期等优点,当然也存在易在施工中破损,易被坝体和库区尖棱石子刺破等安全方面的问题。

1. 国外土工膜用于土石坝防渗的情况

目前,世界上采用土工膜防渗的最高土石坝是西班牙 1948 年建成的 Poza de Los Romas 坝,该坝最大坝高 97m,上游坝面为 8m 厚的砌石,砌石面坡度为 1:1.30,砌石表面用混凝土和砂浆抹平,然后铺聚氯乙烯土工膜,下半部膜厚 2.0mm,上半部膜厚 1mm。在聚氯乙烯土工膜面上再涂沥青作保护层,并在其上铺钢筋网喷混凝土作为上游护坡,以抵御波浪冲刷,防止紫外线照射和风雨侵蚀。此坝运行良好,现已加高至 134m。

葡萄牙于 1955 年建成的帕尔德拉 (Paradela) 混凝土面板堆石坝,最大坝高 110m,由于用抛投法填筑,变形很大,以致部分混凝土面板拉裂,局部挤碎,渗漏水量为 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。1981 年水库放空,在 1:1.30 的上游坡面板上铺设了 72842 m^2 的含沥青合成橡胶。铺设时,由坝顶上的卷扬机牵引一种小型刷贴机在坝面上缓缓向上拖行,合成橡胶膜卷被打开,并刷人造胶乳沥青混合液,将膜粘贴在混凝土面板上,膜之间有 10cm 宽的黏结边搭接。为防止臭氧破坏和紫外线照射老化,在坝顶以下 25m 的水位升降变动区内,橡胶膜面涂了油漆,不再用其他材料保护。修复工作在 3 个月内完成,花费 80 万美元。



修补效果很好, 修补后渗漏水量只有 1.51L/s , 从此该水库能够正常运行。

法国在 1968~1990 年修建了 17 座高 $10\sim 28\text{m}$ 的土工膜防渗体堆石坝, 如 Codole 坝, 高 28m ; Ospedale 坝, 高 26m ; MasDarmand 坝, 高 21m ; Neris 坝, 高 18m ; LaLande-chitelet 坝, 高 17m 等。这些坝有些是用坚硬砂岩、玄武岩碎石块石料填筑的, 用小型振动碾压实, 上游面用粒径 $25\sim 50\text{mm}$ 的卵石铺平, 并浇沥青抹平, 再铺复合土工膜, 膜上面浇筑 14cm 厚的钢筋网混凝土或铺预制混凝土板护坡, 上游坝坡为 $1:1.70$ 左右。若上游用堆石护坡或是干砌石护坡, 则坝坡为 $1:2.5$ 左右。复合土工膜两面是 $200\sim 300\text{g/m}^2$ 的土工织物, 与中间厚 2mm 聚氯乙烯膜或厚 $1\sim 1.5\text{mm}$ 氯丁橡胶膜热压或黏结在一起; 也有些坝用页岩或风化玄武岩碎石块石料填筑, 用 2.5t 小型振动碾或压路机压实, 在加筋沥青土工膜(无土工织物)上下两面用页岩碎石保护, 再在上游坝面设抛石护坡, 坝坡为 $1:2.5\sim 1:3.0$ 。

苏联在 1970 年建成的阿特巴申坝, 是土工膜作为心墙防渗的砂砾石坝, 最大坝高 79m , 上游坝坡坡度为 $1:2.5$, 采用不排干基坑深水筑坝的施工方法。上下游坝趾为抛石戗堤, 截流后上下游间基坑水深 30m , 在其间抛填砂砾石, 在中央部位抛填较粗颗粒砂卵石以便灌浆。抛填至水面后, 在坝轴线部位建混凝土廊道, 在廊道内进行砂卵石水泥灌浆, 以上坝体采用普通干地施工方法填筑砂砾石。在廊道顶部中央部位向上铺设 3 层厚 0.6mm 的聚乙烯土工膜, 随着砂砾石坝体同步向上升高, 3 层膜铺成松弛折皱状, 直至坝顶。膜的上下游填筑厚 1m 的粗砂作为过渡层, 以免砾石顶破土工膜。此坝已正常运行 41 年, 左岸山边有些漏水, 是膜与岸坡连接时有些缺陷所致。

2. 国内土工膜用于土石坝防渗的情况

20 世纪 80 年代以来, 我国采用土工膜防渗的土石坝、煤灰坝、尾矿坝飞速发展, 已经有 1000 余座, 包括新建的土石坝、病险土石坝除险加固、库盘防渗、上游铺盖防渗、施工土石围堰等。比较典型的有以下几点。

江西省钟吕水电站, 大坝最大坝高 51m , 坝顶长 255m , 坝顶宽 5m , 上游坝坡 $1:1.5$, 铺复合土工膜防渗, 下游坝坡 $1:1.4$ 。由于坝坡较陡, 如果直接铺复合土工膜, 则抗滑稳定性不能满足要求, 故先在坝坡面浇 6cm 无砂混凝土, 并在无砂混凝土面上抹水泥砂浆, 然后立即铺设复合土工膜, 上面压砂袋 4 小时, 使复合土工膜黏结牢固。复合土工膜上面现浇混凝土板护坡, 混凝土的砂浆渗入土工织物, 胶结牢固。经试验, 复合土工膜与下面砂浆的黏结力为 $0.1\sim 0.2\text{MPa}$, 与上面现浇混凝土的黏结力为 0.2MPa , 保证了施工期和水库水位降落时坝坡的稳定性。

新疆天山北麓木垒县境内博斯塘水库, 为山区拦河水库 [小 (1) 型], 坝型为复合土工膜防渗斜墙堆石坝, 坝轴线长 186m , 最大坝高 37m , 坝顶宽 5m , 上游坝坡 $1:1.65$, 下游坝坡分 $1:1.45$ 和 $1:1.50$ 两级。坝址两岸基岩裸露, 岩性为安山岩, 较坚硬, 抗风化能力强。河床砂砾石层厚 $12\sim 14\text{m}$, 下部为安山岩。溢洪道位于右坝肩山脊垭口处, 为正槽开敞式。筑坝材料大部分采用溢洪道开挖爆破出的安山岩岩渣, 不足部分采用河床砂砾石料, 主要用于填筑下游坝坡浸润线上部的干燥区。坝基防渗采用混凝土防渗墙。坝体上游坡铺设的复合土工膜与坝基混凝土防渗墙及两坝肩混凝土趾板锚固在一起, 共同形成坝体的防渗系统。土工膜下部为水泥砂浆垫层, 上部为混凝土板护坡。



西霞院水利枢纽是黄河小浪底水利枢纽配套工程,坝址位于河南省洛阳市吉利区南陈村(北岸)和孟津县的西霞院村(南岸),坝型为土石坝,最大坝高 20.0m,坝顶宽 8m,坝顶长约 2600m,坝体采用砂砾石填筑和复合土工膜斜墙结构防渗,坝上游设壤土水平防渗铺盖与土工膜斜墙结构相连。

新疆胜利水库是一座坝体及全库盘土工膜防渗的注入式丘陵水库,最大坝高 18.1m,主坝长 198.1m,副坝长 1875m,坝顶宽度为 5m,库区最大水深为 21m,库容为 $2.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。库盘中部低凹处部分覆有厚约 2m 左右的冲洪积粉质壤土,渗透系数为 $2.17 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,其下部和其余库盘均由巨厚的砾粗砂和砂砾石构成,渗透系数为 $5.41 \times 10^{-3} \sim 1.16 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,因此,库区渗漏是本工程的主要地质问题。根据库盘的地形和地质特点,库区土工膜防渗体分两期施工:一期铺设光面土工膜 256 万 m^2 ;二期铺设土工膜(光面土工膜和复合土工膜) 133 万 m^2 ,其中铺设复合土工膜 30.6 万 m^2 。本工程土工膜铺设总面积为 389 万 m^2 ,居国内同类工程之首。胜利水库库盘防渗体分为 4 层,由下至上分别为:20cm 厚的砂垫层;0.5mm 厚的土工膜及复合土工膜(规格为 $200\text{g}/\text{m}^2/\text{PE}0.5/200\text{g}/\text{m}^2$)层;20cm 厚的砂垫层;30cm 厚的砂砾石防护层。水库建成后运行良好,库区渗漏的地质问题得到了解决。

浙江省小岭头堆石坝,最大坝高 36m,上、下游坝坡 1:1.3。堆石体的上游面填筑小块径堆石过渡层,水平厚 3m,其上为粒径 1~100mm 的碎石垫层,水平厚 1.0m,然后浇筑 6cm 厚的无砂混凝土,其上再铺设复合土工膜,该复合土工膜用 0.5mm 厚的聚氯乙烯膜与 $250\text{g}/\text{m}^2$ 及 $400\text{g}/\text{m}^2$ 土工织物热压而成,最后在复合土工膜表面铺 10cm 厚预制混凝土板护坡。坝体上游坝趾部位开挖至强风化泥岩底部,浇筑混凝土防渗墙,复合土工膜锚固于混凝土墙内。

第 2 章 土石坝坝体和库区土工膜防渗体结构的类型及特点

按土工膜在土石坝坝体和库区中的防渗布置型式及位置，可以将土工膜防渗体分为三种类型：一种是铺设在坝体的上游面，作为防渗斜墙使用，其基本的结构型式见图 2-1；另一种是铺设在坝体的中央，作为防渗心墙使用，其基本的结构型式见图 2-2；还有一种是在全库区铺设，形成整个库区的封闭式防渗体系，或在地质条件薄弱的部分库区铺设，形成部分库区的防渗体系，或沿坝体上游坡脚向前延伸铺设作为水平防渗铺盖，形成坝基的防渗体系。上述类型的第一种称为土工膜防渗斜墙；第二种称为土工膜防渗心墙；第三种称为库盘土工膜防渗体。下面就按照这种划分形式，对不同土工膜防渗体的结构及特点进行详细介绍。

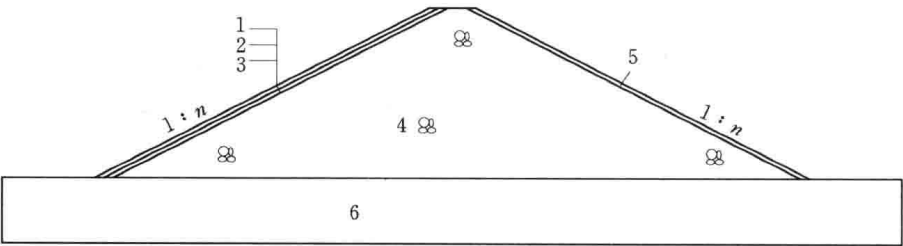


图 2-1 土工膜防渗斜墙坝基本结构形式图

1—保护层；2—土工膜；3—垫层；4—筑坝材料；5—下游护坡；6—坝基

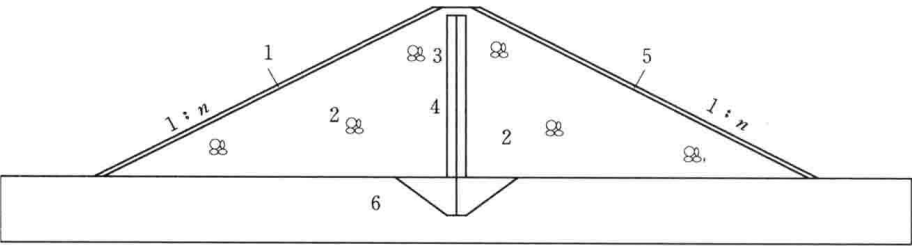


图 2-2 土工膜防渗心墙坝基本结构形式图

1—上游护坡；2—筑坝材料；3—土工膜心墙；4—保护层；5—下游护坡；6—坝基

2.1 土工膜防渗斜墙

图 2-1 是土石坝中土工膜防渗斜墙最基本的结构形式，当然也有其他复杂的结构形式，但它们都是从最基本的防渗结构形式演化而来的。通常，土石坝中的土工膜斜墙防渗



体自上而下由三部分组成：保护层、土工膜（光面土工膜或复合土工膜）防渗层和垫层，有时垫层也称支持层，如图 2-1 所示。设计土石坝的土工膜防渗斜墙时，应根据当地的气象、水库规模、建筑材料获取的难易程度等来确定保护层和垫层。

通常的保护层有：预制混凝土板、现浇混凝土板、钢筋（丝）网混凝土板、干砌块石、浆砌块石和土石料等。以上这些保护层如果要铺设在光面土工膜上，往往需要设上垫层，其作用是保护光面土工膜不被磨损或刺破；如果将干砌块石和浆砌块石以外的这些保护层直接铺设在复合土工膜上，也可不设上垫层。对于光面土工膜，上面没有土工织物的保护，可先铺设一定厚度的砂、砂浆或苯板（太厚须考虑其浮力问题）作为上垫层，也可先喷沥青砂浆，或浇筑薄层（厚度约 4cm 左右）无砂混凝土作为垫层，然后铺预制混凝土板或现浇混凝土板等保护层，混凝土板的面积和厚度应通过计算确定，在混凝土面板上还应预留一些排水孔，混凝土面板的板间缝一般应填塞经防腐处理的木条、高压闭空板、苯板或聚氨酯密封膏进行处理；如果采用干砌块石和浆砌块石作保护层，因块石重量大且棱角尖锐，不宜与光面土工膜或复合土工膜直接接触，在复合土工膜的土工织物上可以铺设粒径小于 4cm 的砂砾石垫层，厚度一般在 15~60cm 左右，再在其上做干砌块石或浆砌块石保护层；在光面土工膜上，可浇筑细粒无砂水泥混凝土或细粒无砂沥青混凝土做垫层，厚度约 8cm，或先后各铺 15~30cm 厚的砂和砂砾石层，再在其上做干砌或浆砌块石作保护层。

对于膜下垫层（支持层），工程中通常分为两层：过渡层和垫层，两层合称为支持层。当坝体填筑到一定高度，将坝体上游面基本整平后，铺设碎石过渡层，过渡层的最大粒径为 15cm 左右，最小粒径为 4cm 左右，也可以是最大粒径小于 15cm 的混合料，厚度一般在 30~150cm 左右。过渡层上的垫层料最大粒径一般小于 4cm，当土石坝中采用复合土工膜斜墙进行防渗时，对下垫层的粒径等要求可以放松一些，即垫层料的粒径可以粗一些，如对于由 200~400g/m² 的土工织物和光面土工膜组成的复合土工膜来说，可用粒径小于 4cm 的砂砾石或碎石混合料作为下垫层，厚度一般为 15~40cm；当采用光面土工膜或膜的下部为光面时，还应在粒径小于 4cm 的砂砾石或碎石垫层上铺设 15~30cm 厚的砂层以保护光面膜；对于填筑料较细，上游坝面有冻胀性土的坝体，在寒冷地区还应考虑土工膜的冻胀破坏问题，膜下垫层一般为一定厚度的砂砾石、砂或苯板作为下垫层，此时的膜下垫层还起到了排水和保温作用。

膜下垫层料均须（用振动碾）压实，同时，坝体填筑料、过渡层以及垫层料也要基本上符合反滤的要求，即各层之间要符合层间系数的要求，即

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 7 \sim 10 \quad (2-1)$$

式中： D_{15} 为下游层坝体填筑料的计算粒径，即单位体积内小于该粒径的料按重量计占该层填筑料总量的 15% 时所对应的粒径； d_{85} 为上游层坝体填筑料的计算粒径，即单位体积内小于该粒径的料按重量计占该层填筑料总量的 85% 时所对应的粒径；7~10 为层间系数的取值范围，对于粗糙多棱角的料用大值，反之用小值。

下面就介绍一些国内外有特色的工程实例来说明土工膜防渗斜墙在土石坝工程中的应用。



1. 尼日利亚的 Jibiya 坝

Jibiya 坝位于尼日利亚北部,最大坝高 22.5m,坝顶长 3600m,坝址处于沙漠地带。河床两岸表层为风成砂,厚 5~10m,坝料中小于 0.075mm 粒径的含量占 5%~25%,渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ cm/s,内摩擦角为 30° 。河床外露地层与两岸基本相同。河床下层为厚 1.0~3.0m 的冲积层,多为含砾黏土,渗透系数为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/s。基岩为片麻岩和闪长岩,风化层厚度在 10m 以上,以下为裂隙岩层,厚度在 10~30m,下部为坚硬片麻岩。筑坝材料采用风成砂,碾压铺土厚 40cm,压实含水量为 8%±2%,设计干密度为 19kN/m³,为最大干密度的 97%,设计内摩擦角为 36° 。坝的上游趾部浇筑塑性混凝土防渗墙达到风化基岩。上游坝坡为 1:3.0,铺设复合土工膜作为防渗斜墙,膜上现浇厚 8cm 的混凝土面板作保护层,膜下铺设小粒径碎石作为垫层。下游坝坡为 1:2.5,其上直接铺设土工织物,再铺设粒径为 25~150mm 的碎石作护坡,下游坝坡脚设堆石体排水。坝体断面图详见图 2-3。

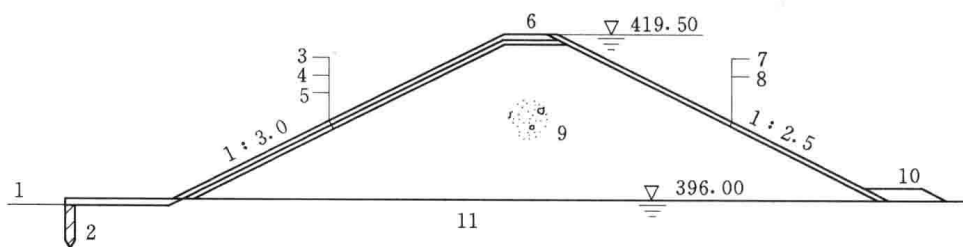


图 2-3 尼日利亚 Jibiya 坝断面图

1—土工膜水平铺盖;2—塑性混凝土防渗墙;3—现浇混凝土板护坡;4—复合土工膜;5—垫层;6—碎石路面;7—碎石护坡;8—土工织物;
9—压实风成砂;10—碎石排水体;11—坝基含砾黏土层

2. 钟吕水库复合土工膜防渗斜墙堆石坝

钟吕水库位于江西省婺源县境内乐安河支流上,是一座跨小流域开发,以发电为主、兼顾灌溉、供水、防洪及养殖业等综合利用的中型水利枢纽工程。坝址以上控制集雨面积 33.0km²,最大坝高 52.0m,正常蓄水位 276.00m,相应死水位 248.00m,校核洪水位 (100 年一遇) 278.11m,设计洪水位 (50 年一遇) 276.68m,总库容 2.145×10^7 m³,调节库容 1.738×10^7 m³,电站装机 2×3200 kW,年发电量 1.456×10^7 kW·h。

钟吕大坝原初步设计推荐黏土心墙堆石坝,由于当地黏土缺乏且分散,土料质量差,含水量过高,难以达到设计要求,且土石填筑量约 3.3×10^5 m³,施工干扰大,工期严重拖后,影响工程效益的发挥。经向河海大学顾淦臣教授等省内外专家咨询。经批复,采用复合土工膜防渗斜墙堆石坝。

大坝布置根据坝址地形、地质条件,调整坝轴线,使复合土工膜锚固在趾板上,处于有利于防渗的位置。针对右坝肩鼻形长条山体较单薄,将复合土工膜延伸至右岸山坡上,作铺盖处理,这样有利于右坝肩的防渗和稳定。溢洪道布置在左坝肩。

大坝采用复合土工膜斜墙防渗,最大坝高 52.0m,坝顶宽 5.0m,坝顶设高 4.2m 的钢筋混凝土 L 形防浪墙,墙顶高程为 279.7m,上游坝坡为 1:1.5,下游坝坡为 2 级变