

ICS 27.140

P 59

备案号: 46535—2014

NB

中华人民共和国能源行业标准

P

NB / T 35027 — 2014

水电工程土工膜防渗技术规范

Technical code for geomembrane-based
anti-seepage of hydropower projects

2014-06-29 发布

2014-11-01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准

水电工程土工膜防渗技术规范

Technical code for geomembrane-based
anti-seepage of hydropower projects

NB / T 35027 — 2014

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2014 年 11 月 1 日

中国电力出版社

2014 北 京

中华人民共和国能源行业标准
水电工程土工膜防渗技术规范
Technical code for geomembrane-based
anti-seepage of hydropower projects
NB / T 35027 — 2014

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷

*

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 3.25 印张 78 千字
印数 0001—3000 册

*

统一书号 155123 · 2228 定价 **27.00** 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

国家能源局

公 告

2014 年 第 4 号

按照《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）的规定，经审查，国家能源局批准《核电厂核岛机械设备材料理化检验方法》等164项行业标准（见附件），其中能源标准（NB）158项和电力标准（DL）6项。现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2014 年 6 月 29 日

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
105	NB/T 35027— 2014	水电工程土 工膜防渗技 术规范			2014-06-29	2014-11-01
...						

前 言

根据《国家能源局关于下达 2011 年能源领域行业标准制(修)订计划的通知》(国能科技〔2011〕27 号)的要求,规范编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国内外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,制定本规范。

本规范的主要技术内容是:材料及其性能指标、结构布置设计、防渗层结构和水力计算、施工、安全监测与运行管理。

本规范由国家能源局负责管理,由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理,由能源行业水电勘测设计标准化技术委员会负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送水电水利规划设计总院(地址:北京市西城区六铺炕北小街 2 号,邮编:100120)。

本规范主编单位:水电水利规划设计总院

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国水利水电第十二工程局有限公司

本规范主要起草人员: 周建平 张春生 党林才 李秋生

杨泽艳 何世海 徐建军 黄 维

吴毅瑾 李洪林 王樱峻 李富春

本规范主要审查人员: 王柏乐 李仕胜 吴亚军 吴鹤鹤

黄晓辉 吴晓铭 艾永平 包承纲

束一鸣 李岳军 吕明治 吴关叶

王君利 熊文清 汪荣大 范福平

李 云

目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	4
4	材料及其性能指标	6
4.1	一般规定	6
4.2	土工膜的性能	6
4.3	土工膜的选择	8
5	结构布置设计	10
5.1	一般规定	10
5.2	防渗结构型式	10
5.3	土工膜厚度	11
5.4	防渗层布置	12
5.5	防渗层连接	13
5.6	下支持层	14
5.7	上保护层	16
5.8	排水、排气	16
6	防渗层结构和水力计算	18
6.1	土工膜厚度计算	18
6.2	水力计算	18
6.3	稳定计算	20
7	施工	21
7.1	一般规定	21
7.2	下支持层施工	22
7.3	防渗层施工	22

NB / T 35027 — 2014

7.4	接缝质量检测	25
7.5	上保护层施工	26
7.6	排水、排气结构施工	27
8	安全监测与运行管理	28
8.1	安全监测	28
8.2	运行管理	28
附录 A	土工膜厚度计算	30
附录 B	膜后排水层排渗能力核算	39
附录 C	土工膜防渗结构的稳定分析	42
附录 D	防渗结构连接方式	45
	本规范用词说明	49
	引用标准名录	50
附：	条文说明	51

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	2
3	Basic requirement.	4
4	Material and its performance indicators	6
4.1	General requirement	6
4.2	Performance of geomembrane	6
4.3	Selection of geomembrane	8
5	Design of structural arrangement	10
5.1	General requirement	10
5.2	Type of impervious structure	10
5.3	Thickness of geomembrane	11
5.4	Layout of impervious layer	12
5.5	Connection of impervious layer	13
5.6	Lower support course	14
5.7	Upper preprotective layer	16
5.8	Drainage and exhaust	16
6	Structure calculations of impermeable layer	18
6.1	Calculation of geomembrane thickness	18
6.2	Hydraulic calculation	18
6.3	Stability calculation	20
7	Construction	21
7.1	General requirement	21
7.2	Construction of lower support course	22
7.3	Construction of impervious layer	22

NB / T 35027 — 2014

7.4	Quality detection of joints	25
7.5	Construction of upper protective layer	26
7.6	Construction of drainage and exhaust structures	27
8	Safety monitoring and operation management	28
8.1	Safety monitoring	28
8.2	Operation managment	28
Appendix A	Calculation of geomembrane thickness	30
Appendix B	Drainage capacity calculation of drainage layer behind geomembrane	39
Appendix C	Stability analysis of geomembrane impermeable structure	42
Appendix D	Connection of impermeable structure	45
	Explanation of wording in this code	49
	list of normative standards	50
	Addition: Explanation of provisions	51

1 总 则

1.0.1 为统一水电工程土工膜防渗设计、施工和管理方面的技术要求，确保工程质量，做到技术先进、经济合理、安全适用，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于新建和加固改建的水电工程（含抽水蓄能工程）的永久性或临时性建筑物防渗。

1.0.3 本规范适用于防渗水头不大于 70m 的工程，防渗水头大于 70m 的土工膜防渗工程，应进行专门研究。

1.0.4 本规范规定了水电工程土工膜防渗的防渗级别划分、材料选择及其性能指标、防渗层结构设计和计算、施工工艺、质量检测、安全监测、运行管理等技术要求。

1.0.5 水电工程土工膜防渗设计，除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 土工合成材料 geosynthetics

工程建设中应用的与岩土体接触的土工织物、土工膜、土工复合材料、土工特种材料等聚合物产品的总称。

2.0.2 土工织物 geotextile

透水性土工合成材料（又称土工布）。按制造方法不同，分为织造型土工织物和非织造型土工织物。

织造型土工织物：由纤维纱或长丝按一定方向排列机织的土工织物。

非织造型土工织物：由短纤维或长丝按随机或定向排列制成的薄絮垫经机械结合、热粘或化粘而成的织物。

2.0.3 土工膜 geomembrane

由聚合物或沥青制成的一种相对不透水膜。聚合物土工膜在工厂采用吹塑法、压延法或涂刷法制造；沥青土工膜采用合成纤维或织物喷涂或浸渍沥青形成。

2.0.4 复合土工膜 composite geomembrane

由聚合物土工膜与土工织物加热压合或粘合而成的组合物。

2.0.5 加筋土工膜 reinforced geomembrane

在聚合物中加入土工织物等生产的土工膜。

2.0.6 糙面土工膜 roughed face geomembrane

在土工膜表面加上糙纹，以达到增大摩擦系数的目的，以方便在斜面防渗等工程中施工。糙面土工膜可分为单糙面土工膜、双糙面土工膜等。

2.0.7 土工席垫 3D fiber mattress

三维透水和抗刺的聚合物网垫。

2.0.8 土工网 geonet

二维的由条带部件在结点连接而成有规则的网状土工合成材料。

2.0.9 土工排水管 geotextile drain pipe

由三维透水聚合物塑料管外包土工织物构成的排水管。

2.0.10 土工排水板（带） geotextile drain belt

由不同凹凸截面形状、具有连续排水槽的合成材料芯材，外包无纺土工织物构成的复合排水材料。

2.0.11 拉伸强度 tensile strength

标准试样拉伸发生断裂时或断裂前能承受的最大拉力。

2.0.12 断裂伸长率 rupture elongation

标准试样拉伸断裂时的应变。

2.0.13 撕裂强度 tearing strength

标准试样沿规定的切口逐渐扩展裂口至整个试样的过程中出现的最大撕裂力。

2.0.14 胀破强度 burst strength

在标准试样的垂直方向上施加液压，使试样扩张直至破坏达到的最大液压。

2.0.15 CBR 顶破强度 CBR burst strength

直径为 50mm 的圆柱顶杆垂直顶入试样过程中的最大顶压力。

2.0.16 刺破强度 puncture resistance

直径为 8mm 的刚性顶杆垂直刺入试样过程中的最大刺破力。

2.0.17 摩擦强度 friction resistance

用直剪法或拉拔法测得的土工膜与上、下界面材料间的抗剪强度。

2.0.18 垂直渗透系数 vertical coefficient of permeability

水流垂直于土工织物平面水力梯度等于 1 时的渗透流速。

2.0.19 水平渗透系数 level coefficient of permeability

水流沿土工织物平面水力梯度等于 1 时的渗透流速。

2.0.20 抗渗强度（耐静水压力） impervious strength

标准试样破坏或试样渗漏时的最大水压力。

3 基 本 规 定

- 3.0.1** 水电工程土工膜防渗设计应与工程建筑物的设计阶段相适应，达到安全可靠、经济合理、技术先进的要求。
- 3.0.2** 水电工程选择土工膜防渗方案，应根据建筑物多种防渗方案经技术经济综合比较后确定。
- 3.0.3** 土工膜防渗材料的选择应综合考虑工程使用年限、工作环境、施工条件等因素后确定。
- 3.0.4** 下列水电工程部位可选用土工膜防渗结构：
- 1 土石坝（堤）上游面、直心墙、斜心墙。
 - 2 面板堆石坝、砌石坝、混凝土坝（含碾压混凝土坝）上游面的防渗或防渗修复。
 - 3 水库库底、库岸的防渗。
 - 4 土石坝加高。
 - 5 围堰防渗。
 - 6 水工隧洞、渠道防渗衬砌。
- 3.0.5** 土工膜防渗结构应根据防渗对象、防渗水头、失事危害程度的不同划分防渗级别，当其对应的防渗级别属不同级别时，应取其中最高的级别。水电工程土工膜防渗结构防渗级别应按表 3.0.5 的规定划分。

表 3.0.5 水电工程土工膜防渗结构防渗级别划分

防渗级别	防 渗 对 象	防渗水头 h (m)	失事危害程度
1	(1) 常规水电站 1、2 级挡水建筑物 (2) 大(2)型及以上抽水蓄能电站上、下水库(含大坝、库盆) (3) 环境或其他有特殊要求的工程	$h \geq 50$	失事后损失巨大或影响十分严重

续表 3.0.5

防渗级别	防 渗 对 象	防渗水头 h (m)	失事危害程度
2	(1) 常规水电站 3 级挡水建筑物 (2) 中型抽水蓄能电站上、下水库 (3) 2 级以上水工隧洞、渠道	$30 \leq h < 50$	失事后损失大或 影响严重
3	(1) 3、4 级临时性水工建筑物 (2) 4、5 级挡水建筑物 (3) 3 级以下水工隧洞、渠道	$10 \leq h < 30$	
4	其他水工建筑物	$h < 10$	

注：表中工程等别和建筑物级别应符合现行行业标准《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180 的有关规定。

4 材料及其性能指标

4.1 一般规定

4.1.1 制造土工膜的基本材料应选用透水性低的聚合物，掺加一定含量的增塑剂、抗老化剂、润滑剂等外加剂，以调整土工膜的物理性能、改善土工膜的耐久性和施工性能。

4.1.2 水电工程中宜选用合成树脂类的聚乙烯土工膜（PE）、聚氯乙烯土工膜（PVC）等。

4.1.3 水电工程宜选用吹塑法、压延法生产的土工膜，以保证其品质均一，渗透系数小。

4.1.4 为适应强度、变形和稳定的需要，可采用土工织物复合、加筋、表面加糙的土工膜。

4.2 土工膜的性能

4.2.1 防渗工程中土工膜性能包括其本身的特性和与其周边结构物相互作用的特性。

4.2.2 土工膜本身的特性检测包括以下主要项目：

- 1 物理性能：单位面积质量、厚度、密度。
- 2 力学性能：拉伸强度、断裂伸长率、撕裂强度、胀破强度、顶破强度、刺破强度。
- 3 水力学性能：渗透系数、抗渗强度。
- 4 耐久性：抗老化性、抗化学腐蚀性。

4.2.3 土工膜与其周边结构物相互作用的特性检测主要包括摩擦强度、耐水压力。

土工膜与其周边结构物相互作用的特性检测宜模拟工程实际

条件进行，并分析工程实际条件对其测定值的影响。

4.2.4 拟采用的土工膜产品，应根据防渗级别和防渗方案的特点进行必要的特性检测，土工膜特性检测项目应按表 4.2.4 的规定确定。

表 4.2.4 土工膜特性检测项目表

检测项目	防 渗 级 别		
	1 级	2 级	3 级、4 级
单位面积质量	√	●	—
厚度	√	√	√
拉伸强度	√	√	●
断裂伸长率	√	√	●
撕裂强度	√	●	●
胀破强度	√	●	—
顶破强度	●	—	—
刺破强度	√	●	—
渗透系数	●	●	—
抗渗强度	√	√	—
抗老化性	√	●	—
抗化学腐蚀性	●	●	●
摩擦强度	●	●	—
耐水压力	√	●	—
“√”为必测项目；“●”为根据工程具体需要确定的检测项目；“—”为不需测定项目。			

注：对于 1、2 级斜坡面防渗结构，摩擦强度为必测项目。

4.2.5 水电防渗工程中土工膜应具有很好的抗渗透性、抗变形能力和耐久性。各级建筑物采用聚乙烯的性能指标应符合现行国家标准《土工合成材料 聚乙烯土工膜》GB/T 17643 的有关规定，

采用聚氯乙烯土工膜的性能指标应符合现行国家标准《土工合成材料 聚氯乙烯土工膜》GB/T 17688 的有关规定。其他类型土工膜的性能指标可按现行国家标准《土工合成材料 聚乙烯土工膜》GB/T 17643、《土工合成材料 聚氯乙烯土工膜》GB/T 17688 的有关规定确定。

有供、饮水功能的水电工程土工膜的性能指标应符合国家现行标准的有关规定。

4.2.6 复合土工膜的性能指标,应根据选用的复合土工膜的结构、材料的种类与规格等具体情况选择。

4.3 土工膜的选择

4.3.1 应根据工程的使用年限、工作环境、施工条件选择土工膜品种。对于有侵蚀性的工程,应根据侵蚀性液体的性质,选择对该种液体有良好抗侵蚀性的土工膜。

4.3.2 土工膜防渗层材料的选择应符合以下要求:

1 用于水库库底、坝(岸)坡等铺设与焊接条件较好的防渗层材料,可选择聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)、氯磺化聚乙烯(CSPE)等土工膜。

2 土工膜用于垂直防渗或焊接施工条件较差时,宜选择聚氯乙烯(PVC)、氯化聚乙烯(CPE)、氯磺化聚乙烯(CSPE)和三元乙丙(乙烯/丙烯/二烯共聚物, EPDM)等易于粘接、嵌固连接的土工膜。

3 复合土工膜幅宽两端边道需预留 80mm~100mm 的光膜,以进行连接(焊接、粘接)施工,对于厚度较厚(超过 1.0mm)的聚乙烯复合土工膜,因复合加热时边道易产生变形,不易保证焊接质量,应谨慎采用。

4 同一个区域宜选用同一种材质的土工膜。膜与膜连接时,膜厚度不宜差别过大。

4.3.3 土工膜的厚度应根据基层条件、工作水头、工作环境、所

选用的土工膜性能，通过计算并结合工程类比确定。

4.3.4 承受高应力的土工膜防渗层，宜采用加筋土工膜。为增加土工膜的摩擦系数，可采用复合土工膜或表面加糙的土工膜。

5 结构布置设计

5.1 一般规定

5.1.1 土工膜防渗结构的范围、型式选择应根据工程总体布置的要求和工程区水文气象、地形地质等自然条件研究确定。

5.1.2 土工膜防渗结构应包括下支持层、土工膜防渗层、上保护层。

5.1.3 土工膜防渗层型式可分为单层防渗、双层防渗、组合防渗。

5.1.4 土工膜防渗层布置可分为水平防渗、垂直防渗、斜坡面防渗。

5.2 防渗结构型式

5.2.1 水电工程宜选择单层防渗，在防渗层所需要的土工膜材料很厚或对渗漏有极其严格的要求时可采用双层防渗或组合防渗型式。

5.2.2 单层防渗结构包括下支持层、土工膜防渗层、上保护层（图 5.2.2-1、图 5.2.2-2）。

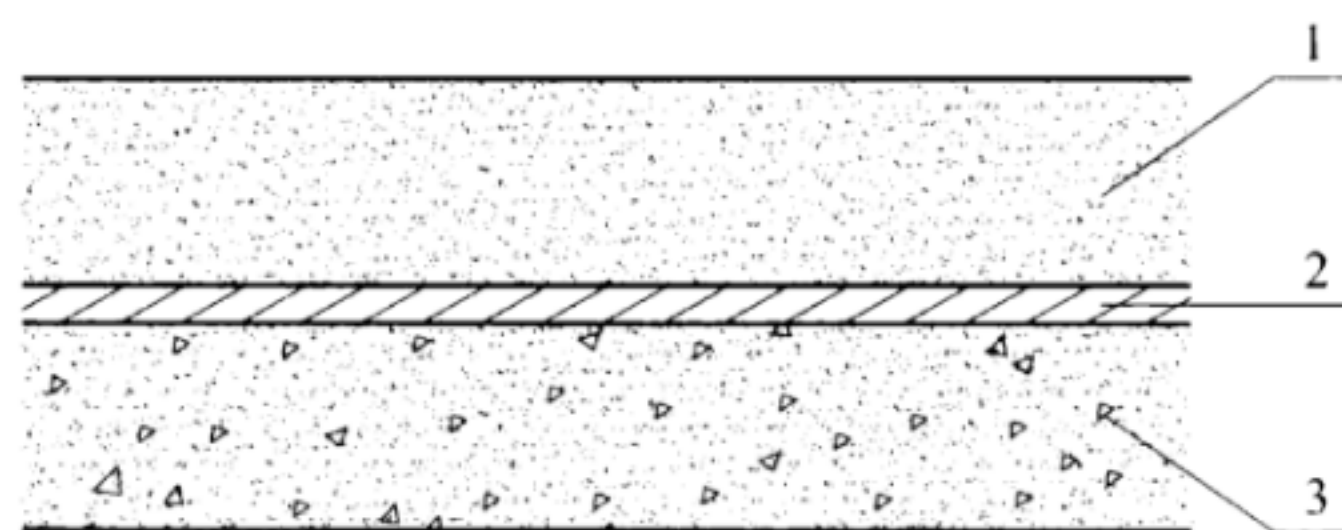


图 5.2.2-1 水平单层防渗结构

1—上保护层；2—土工膜；3—下支持层

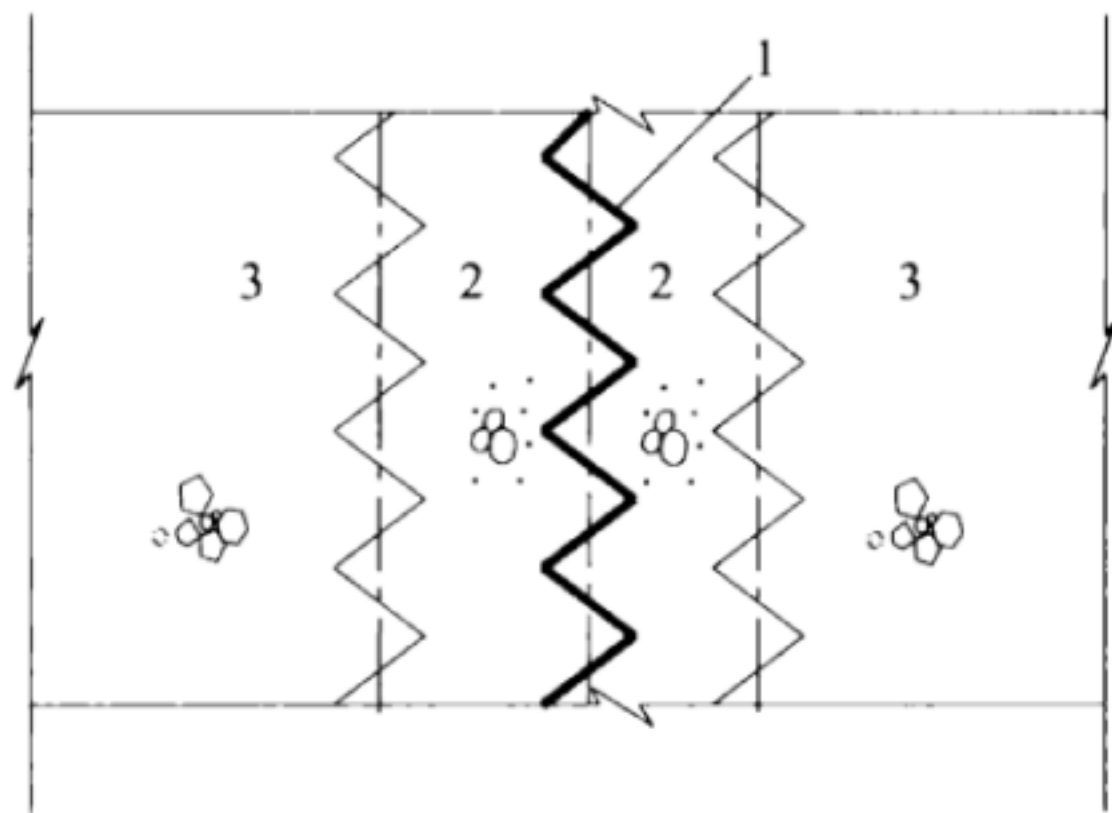


图 5.2.2-2 心墙单层防渗结构
1—土工膜；2—垫层料；3—反滤料

5.2.3 双层防渗结构的两层土工膜防渗层之间应设置排水层（图 5.2.3）。排水层可采用小粒径的碎石（卵石）和砂的混合料，必要时可加设土工排水管、土工席垫、土工网等。排水层厚度选择应满足排水能力要求，并考虑排水层施工时机械设备不损伤下层土工膜，粒状材料排水层厚度不宜小于 50cm。

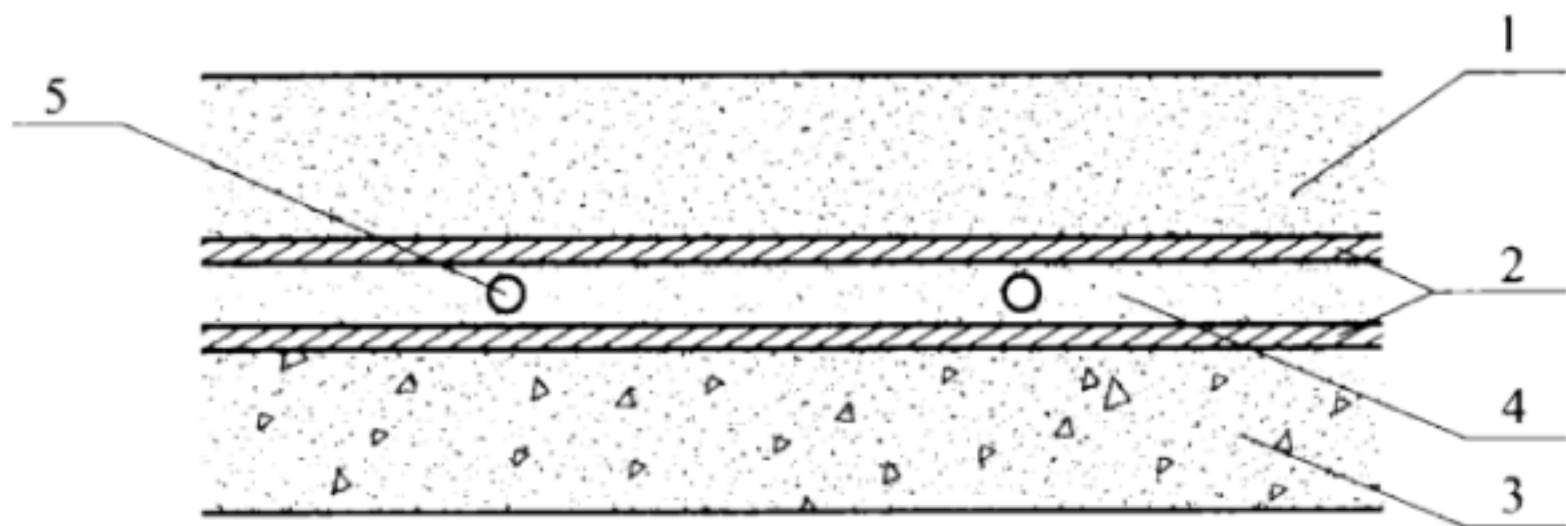


图 5.2.3 双层防渗结构
1—上保护层；2—土工膜；3—下支持层；4—排水垫层；5—排水管

5.2.4 组合防渗结构是由一层防渗土工膜和一层低渗透性材料（常采用黏土）组合而成的防渗结构。土工膜与低渗透性材料之间不应设排水层。

5.3 土工膜厚度

5.3.1 土工膜厚度应根据作用水头、下支持层最大粒径、膜的应力和变形几何特征按本规范第 6 章及附录 A 的有关规定估算理论

计算厚度，并根据具体工程条件，按下式估算土工膜厚度：

$$H=Kt \quad (5.3.1)$$

式中： H ——土工膜设计厚度，mm；

t ——土工膜理论计算厚度，mm；

K ——土工膜膜厚安全系数，1级防渗结构取8~12，2级防渗结构取6~10，3级防渗结构取4~8，4级防渗结构取3~6。

5.3.2 3级及以上防渗结构土工膜厚度应不小于0.5mm。

5.4 防 渗 层 布 置

5.4.1 水平防渗布置应符合下列要求：

1 水库库底防渗、坝基上游防渗铺盖等均可采用土工膜水平防渗层。

2 坝基为透水性砂砾石基础时，上游采用土工膜防渗铺盖的长度，应使坝基渗透坡降和渗流量限制在国家现行标准规定的允许值范围内。

5.4.2 垂直防渗布置应符合下列要求：

1 垂直挡水的混凝土体（坝、墙、池壁）表面、土石坝心墙、围堰心墙、透水层埋深较浅的地基，可采用土工膜垂直防渗结构。

2 混凝土体表面的土工膜垂直防渗层，应与结构进行粘接、锚固或嵌固固定。土石坝（堰）体内及地基垂直防渗层可利用两侧填土（填料）固定。

5.4.3 斜坡面防渗布置应符合下列要求：

1 抽水蓄能电站水库库岸、土石坝（堤）上游坡面及水池和渠道迎水斜坡面，可采用土工膜斜坡面防渗结构。

2 斜坡的坡度选择需要考虑建筑物边坡稳定性、土工膜防渗层稳定性、施工方便性等因素确定，坡度不宜陡于1:1.5，坡顶处应可靠锚（嵌）固，斜坡段土工膜应采取结构措施满足稳定需要。

坡高大于 30m 时，坡面宜设置马道，马道高差宜为 15m~20m，宽 2m~3m。

3 斜坡顶因条件限制只能与透水结构相接时，膜顶边高程应满足现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 有关对防渗体顶部高程的超高规定。

5.4.4 对土工膜与刚性结构连接部位、地形突变和转角衔接处等变形差较大部位，应采取适应变形的结构措施。

5.5 防 渗 层 连 接

5.5.1 防渗土工膜幅与幅之间连接可采用热熔焊接法焊接、化学粘结剂粘接或嵌固锚接，聚乙烯（PE）土工膜粘接性能差，不适合粘接。

5.5.2 土工膜的接缝设计应使接缝数量最少，主接缝方向宜平行于大主拉应力方向。

库底水平防渗层土工膜的摊铺方向宜与大坝轴线方向一致，土工膜与其他周边混凝土防渗结构连接处，卷材摊铺方向应为该结构长度延伸方向。

5.5.3 1、2 级防渗结构土工膜采用热熔焊接时，应采用双缝焊接，以便充气检测。

5.5.4 土工膜与地基、混凝土刚性结构之间可采取嵌固、螺栓锚固、预埋件焊接或压覆连接。土工膜连接方式应符合下列要求：

1 土工膜与黏土地基嵌固连接。土工膜与黏土地基相连时可采取开挖槽形结构，将土工膜埋入其中，实现嵌固连接，槽的尺寸大小应根据土工膜承受的拉力大小确定，且埋入长度应不小于 100cm。

2 土工膜与透水地基下岩基连接。砂砾石透水地基覆盖层厚度不大，其下为岩基时，可采取埋入式连接，通过分期浇筑的混凝土基座嵌固土工膜，土工膜嵌入基座长度应不小于 80cm。

3 土工膜与连接板、趾板、岩石上混凝土基础的螺栓锚固连接。面板堆石坝坝前库底采用土工膜水平防渗时，土工膜可通过混凝土连接板与面板连接。土工膜与连接板、趾板等混凝土基础结构可采用螺栓锚固连接，混凝土条形结构宜不分或少分结构缝。1 级防渗结构还应通过现场压水试验，以检验螺栓锚固连接的防渗效果。

4 土工膜与连接板、趾板、岩石基础的土工合成材料埋件焊接（粘接）连接。土工膜与连接板、趾板等混凝土基础结构可采用焊接或粘接的方法连接，其方法是在混凝土结构中沿连接方向，预埋与膜材相同材料的基础埋件，通过热熔焊接或粘接的方法连接土工膜和土工合成材料埋件。

5 土工膜与混凝土廊道及混凝土防渗墙等结构连接。土工膜与混凝土廊道及混凝土防渗墙连接，可利用其结构二期混凝土对连接处进行压覆。与土工膜相连接的廊道结构分缝止水材料宜与土工膜同材质。

6 土工膜分幅嵌固锚接。防渗级别高或防渗可靠性要求高、范围大的土工膜坡面防渗结构，可采取土工膜分幅嵌固锚接形式，以提高防渗层抗滑稳定性，方便运行期检查、维护。逐幅施工嵌固，幅宽可选择 9m~12m。其方法是将幅与幅之间接头嵌固于一期混凝土槽内，连接处覆盖同材料土工膜，膜与膜之间进行焊接或粘接，设置土工膜结构分区。

7 土工膜与坝顶结构连接。坝顶、堤顶等高出常水位部位的土工膜与周边结构的连接，可采取压覆、嵌固、锚固等方式。

5.6 下 支 持 层

5.6.1 下支持层的作用是均化受力和排出防渗层膜下渗水。下支持层的形式应根据天然基础条件、防渗级别和所用土工膜特性进行确定。

5.6.2 土质地基、砂砾石土地基作为下支持层，应符合下列要求：

1 天然透水地基（砂砾石土层），清除表层大颗粒，经平整后可直接作为支持层，在其上铺设土工膜防渗层。

2 天然土质地基应先在整平的基础上铺 20cm~40cm 厚的透水料垫层，再铺设土工膜防渗层。

3 1、2 级防渗结构应在土工膜下加铺一层非织造型土工织物，以加强防刺保护。

5.6.3 堆石体（坝体）、库底填渣基础。堆石体（坝体）和库底填渣基础，下支持层应包括下垫层和过渡层，并符合下列要求：

1 垫层和过渡层厚度与膜上水头、基础堆石或填渣厚度相关，水头高、填渣厚，则支持层厚度大，库底填渣上可取过渡层厚 80cm~240cm，垫层厚 30cm~80cm。

2 过渡层宜采用粒径 $\leq 30\text{cm}$ 的填筑料，分层碾压密实。过渡层应满足现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 的有关规定。

3 垫层料应级配良好，最大粒径选取与膜厚、水头大小等有关，宜采用小于 20mm 的碎石（卵石）与砂的混合料，经碾压密实。垫层料与过渡料之间应满足反滤要求。

4 1、2 级防渗结构应在土工膜下加铺一层非织造型土工织物，以加强防刺保护。

5 库底填渣厚度较大时，为避免沉降产生过大的土工膜应力，宜采取预留沉降的填筑体形。

6 土工膜心墙可采用“之”字形曲折铺设，铺设在碾压密实的垫层稳定坡面上。

5.6.4 混凝土、岩石基础作为下支持层，应符合下列要求：

1 混凝土基础上设置土工膜防渗层，可不设下支持垫层，但应对凸起、凹坑等部位进行修平处理，修圆半径不小于 50cm。根据防渗级别和处理效果可增设一层非织造型土工织物支垫。

2 岩石基础（库岸开挖边坡、库底基础）上的防渗层，宜设置排水垫层。

5.7 上 保 护 层

5.7.1 土工膜上保护层的作用主要是防止或减少不利环境因素包括光照老化、流水、冰冻、动物损伤、施工期坠物、风吹覆等影响。上保护层的型式选择应根据防渗层型式、防渗层的工作环境、检修、维护和施工的方便性等确定。

5.7.2 上保护层设置应满足抗滑稳定和抗浮稳定要求。

5.7.3 土工膜上保护层宜由上垫层和防护层组成，上垫层作用主要是防止施工期或防护层施工时损伤土工膜。上保护层应符合下列要求：

1 上垫层宜采用土工织物（单位面积质量为 $200\text{g/m}^2 \sim 500\text{g/m}^2$ ）或塑料板。

2 防护层可采用砂土、碎（卵）石土、混凝土板、浆砌块石、干砌块石、土工砂袋等。

3 位于水库死水位以下的库底防渗层，当死水位深度大于5m、水流流速较小时，上保护层设置可简化，柔性材料垫层可采用土工织物，压覆层可采用土工砂袋、混凝土预制块、块石等间隔布置，不宜设置土、石类材料全面积压覆。

4 土、石类防护层厚度除应满足环境保护厚度要求外，宜为30cm~150cm，必要时还应满足施工机械作业要求。

5 坝体表面防渗层宜根据水库区水位运行特点、漂浮物情况，设置保护层（防老化、防冻、防撞）。

6 防渗级别为3级、4级工程，经技术论证，可不设上保护层。

5.8 排 水、排 气

5.8.1 有排水要求的土工膜防渗工程，膜下支持层级配应满足排水能力和水力计算的要求，在支持层排水能力不足时，可采用碎石盲沟、土工排水管、无砂混凝土管、复合排水网、土工织物等

引流。水库底土工膜防渗层下设置的排水体系，应通过廊道等排水通道引至坝下。

5.8.2 坝前土工膜水平防渗铺盖，以及防渗系统不封闭、仅起延长渗径作用的土工膜防渗层下不应设排水系统。

5.8.3 土石坝（堤）挡水面采用土工膜防渗层，膜后采用土工织物排渗时，应进行排渗能力核算。

5.8.4 混凝土坝上游贴土工膜时，土工膜后可视需要设排水层。

5.8.5 膜下排水结构一般兼有排气功能，水电工程土工膜防渗结构不宜采用止回阀排气结构，施工期排气应通过调整施工工艺措施解决。

6 防渗层结构和水力计算

6.1 土工膜厚度计算

6.1.1 土工膜厚度应根据作用水头，膜下支持层可能产生的裂缝宽度，膜的应变和强度等可按本规范附录 A 的规定估算。

6.1.2 斜坡面上的 1 级防渗结构宜采用有限元法复核土工膜的应力和变形。

6.2 水 力 计 算

6.2.1 完好的土工膜的渗透量可按下式计算：

$$Q_g = k_g i A = k_g \frac{H_w}{T_g} A \quad (6.2.1)$$

式中： Q_g ——土工膜的渗透量， m^3/s ；

k_g ——土工膜的渗透系数， m/s ；

i ——水力梯度；

H_w ——土工膜上下水头差， m ；

A ——土工膜的渗透面积， m^2 ；

T_g ——土工膜的厚度， m 。

6.2.2 土工膜上、下为透水介质，且缺陷尺寸大于土工膜的厚度时，通过缺陷的渗漏量可近似按孔口自由出流计算，可按下式计算：

$$Q = \mu A \sqrt{2gH_w} \quad (6.2.2)$$

式中： Q ——土工膜缺陷引起的渗漏量， m^3/s ；

A ——土工膜缺陷孔的面积总和， m^2 ；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

H_w ——土工膜上下水头差, m;

μ ——流量系数, 一般取 0.60~0.70。

6.2.3 土工膜防渗系统应进行膜后排渗能力核算。核算针对膜下排水层材料导水能力进行。排水层材料导水率 θ_a 应满足式 (6.2.3-1) 的要求。排水层材料尚应满足反滤准则, 土工织物排水层反滤设计应符合现行国家标准《土工合成材料应用技术规范》GB 50290 的有关规定。

$$\theta_a \geq F_s \theta_r \quad (6.2.3-1)$$

$$\theta_a = k_h \delta \quad (6.2.3-2)$$

$$\theta_r = \frac{q_i}{J_g} \quad (6.2.3-3)$$

式中: θ_a ——排水层导水率, m^2/s ;

θ_r ——排水所需导水率, m^2/s ;

δ ——排水层的厚度, m;

k_h ——排水层平面渗透系数, m/s;

q_i ——单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$;

J_g ——排水层两端的水力梯度;

F_s ——排渗安全系数, 一般可取 3~5, 1、2 级防渗结构取 5。

6.2.4 土石坝上游水位骤降时, 坝体内部分水量将流向上游, 沿排水层顺流至坡底, 应先估算来水量, 自上而下核算各段排水层的导水率。具体计算方法可按本规范附录 B 的有关规定执行。对 1、2 级防渗结构, 宜采用有限元法计算确定土石坝渗流场的各种渗流要素。

6.2.5 土工膜防渗铺盖的合理长度, 应使地基渗透坡降和渗流量限制在允许值内, 可采用公式法进行渗流计算确定, 复杂地基及重要工程宜采用有限元法计算。

6.3 稳 定 计 算

6.3.1 土工膜防渗的斜墙土石坝，除应进行沿有关部位的坝坡和坝基抗滑稳定分析外，还应沿土工膜和土的接触面进行抗滑稳定分析。

6.3.2 土工膜和土的接触面之间控制稳定的有施工期（包括竣工时）、稳定渗流期、水位降落期和正常运用遇地震四种工况，应分别计算其抗滑稳定性。最小安全系数应符合现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 的有关规定。

6.3.3 土工膜和土的接触面稳定分析应采用刚体极限平衡法。稳定计算方法可按现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 的有关规定执行。3 级及以下防渗结构的水位降落期工况可按本规范附录 C 的方法计算。

7 施 工

7.1 一 般 规 定

7.1.1 土工膜防渗工程施工前应做好以下准备工作：

- 1 编制施工技术方案并对施工人员进行技术交底。
- 2 根据工程结构和设计要求，绘制土工膜铺设顺序和分区分块图。
- 3 清除铺设场地范围内各种锥形、尖锐杂物。
- 4 作业范围周边应做好安全防护围挡。
- 5 连接、检测、修补人员均经过专项培训，并考核合格。

7.1.2 土工膜在储运中，应有防紫外线辐射的外包装，应保证土工膜不破损、不沾污、不受潮、防雨淋。

7.1.3 每卷土工膜应有醒目的标志牌，标志内容包括：生产企业名称和地址、产品名称、产品代号、产品等级、产品规格、生产批号、执行的标准号、生产日期、卷长和净重、检验合格证。

7.1.4 土工膜在现场应存放在通风干燥处，不得遭受日光照射，并远离热源。存储期限从生产之日起不超过一年。

7.1.5 土工膜使用前应查验产品的检测试验报告。1、2 级土工膜防渗结构，施工前应对土工膜的外观、厚度、拉伸强度、断裂伸长率进行抽样检测。同一批次产品抽样率应不少于交货卷数的 5%，且最少不低于 1 卷。试验方法应符合国家现行标准的有关规定。

7.1.6 土工膜施工宜在 5℃ 以上、35℃ 以下，风力 5 级以下并无雨、无雪、无沙尘天气进行。若遇特殊环境需要施工，应在正式施工前进行工艺试验，并采取有效的防护措施。

7.1.7 施工工序安排应符合以下规定：

- 1** 土工膜的施工应在下支持层结构验收合格后进行。
- 2** 进行下道工序或相邻部位施工时，应对完工部位的土工膜妥善保护。
- 3** 在铺设开始后，严禁在可能危害土工膜安全的范围内进行开挖、放炮、凿洞、电焊、燃烧、排水、运输等交叉作业。

7.1.8 土工膜焊接前，应对已铺设土工膜的外观质量进行 100% 检查，不符合要求的土工膜不得使用。

7.1.9 土工膜施工质量评定应按国家现行标准的有关规定执行。

7.2 下支持层施工

7.2.1 砂砾石、级配碎石垫层应满足设计要求，表层无大粒径颗粒集中。

7.2.2 天然土质地基内的植物根等杂物必须清除至其表面 15cm 以下。天然土质地基存在对土工膜有影响的特殊菌类时，应用土壤杀菌剂处理。

7.2.3 砂砾石、碎石垫层和天然土质地基，应在土工膜铺设前按设计要求碾压密实。

7.2.4 混凝土、岩石基础，须对凸起、凹坑、裂缝等部位应进行修平或填补处理，修圆半径应符合设计要求。下支持层表面不平整度不应大于 3cm。

7.2.5 下部土工织物宜采用平搭法、丁缝法连接。平搭法搭接宽度应不小于 25cm。丁缝法搭接宽度应不小于 10cm，搭接头宜位于土工织物底部。土工膜摊铺前，应清除夹杂在织物中的断针头等尖锐物。

7.3 防渗层施工

7.3.1 防渗层施工应具备下列条件：

- 1** 下支持层、排水排气系统完成并验收合格。

- 2 已进行下料分析, 已绘制土工膜拼接详图。
- 3 土工膜铺设、拼接、锚固工艺参数已确定。
- 4 土工膜及辅助材料均经过检测, 质量合格。
- 5 土工膜临时保护措施已落实。

7.3.2 土工膜铺设施工应符合以下要求:

- 1 应按设计确定的顺序和方向分区、分块铺设。纵向接缝应设在平面处。
- 2 宜采用人工配合卷扬机、专用运输小车等铺设。
- 3 膜块间的接缝, 应为 T 形, 不得做成十字形。幅间接缝错开距离不小于 50cm。
- 4 铺设时, 应平顺、松弛适度, 与下支持层贴实, 不宜褶皱、悬空。特殊部位需要褶皱布置时, 应另作专项处理。
- 5 应随铺随压, 在膜的边角处每隔 2m~5m 放 1 个 20kg~30kg 的砂袋压重。
- 6 坡面铺设时, 土工膜在坡顶和坡底应予固定, 临时压重物不应在坡面上滚动下滑。
- 7 铺设时, 应根据当地气温变化幅度和产品说明书要求留足余幅, 以便拼接和适应气温变化。
- 8 垂直心墙防渗土工膜垂直方向宜采用“之”字形布置施工, 褶皱高度应与两侧回填料厚度相同。混凝土表面垂直防渗土工膜应紧贴混凝土面布置, 固定方法应符合设计要求。

- 9 土工膜应随铺随检查其外观质量, 标识、记录并修补检查出的轻微缺陷。土工膜外观存在质量缺陷, 应按设计要求处理。
- ### 7.3.3 土工膜应按设计要求的方法进行连接, 施工工艺参数通过试验确定。

7.3.4 采用粘接连接方式的土工膜应符合以下要求:

- 1 粘接前应将待粘面去污、干燥。
- 2 复合土工膜的布与膜需分开时, 应先用脱膜剂将其脱离, 并待脱膜剂挥发干燥后涂胶粘合。

3 粘接时, 应将粘接部位土工膜贴合平整。

4 接缝粘接强度不得小于母材强度的 85%。

5 粘接接缝 2h 内不得承受任何拉力。

7.3.5 采用焊接连接方式的土工膜应符合以下要求:

1 焊接型式宜采用缝宽 $2\times 10\text{mm}$ 的双焊缝搭焊。跨沟槽、转角等特殊部位及修补可采用单焊缝焊接。

2 焊接应采用自动调温、调速的焊机。焊接过程中, 应针对环境条件的改变及时调整焊接参数。

3 焊接前, 应在现场进行小样条试焊, 初步确定焊接的温度和速度。试焊成品应在现场进行张拉检验, 接缝焊接强度应不低于母材强度的 85%。

4 焊接前应将焊缝搭接面清洁干净, 做到无水、无尘、无垢。上下层接缝应平行对正。

5 焊缝部位上、下膜应熔结为一个整体, 不应有虚焊、漏焊。

6 焊接接缝 2h 内不得承受任何拉力。

7.3.6 T 形接头宜加盖圆形补丁方式处理。补丁材质与主膜相同, 直径不小于 25cm。补丁应与主膜采用粘接或焊接连接。

7.3.7 土工膜母材缺陷应修补。针眼、孔洞、碳化部位可采用补丁修补, 虚焊、漏焊可重新焊接或粘接。补丁修补采用与主膜同材质的土工膜。

7.3.8 土工膜与混凝土、基岩等锚固施工应符合以下要求:

1 锚固结构型式应符合设计要求。

2 锚固螺栓轴线、间距偏差应控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内。锚固部位止水片材应连接平顺、螺母紧固力应满足设计要求。锚固件与土工膜接触部位应加衬垫保护。

3 锚固部位土工膜两侧的填料应填压密实。

7.3.9 土工膜施工应符合下列要求:

1 施工范围严禁烟火, 加热工器具应设置隔热装置。

2 无关人员不得进入施工作业范围, 作业人员禁止穿钉鞋、

高跟鞋及硬底鞋在土工膜上踩踏。

3 拼接、检测、修补等设备、工器具使用完毕不得直接放置在土工膜上。

4 铺设土工膜时，严禁折压。

5 低温时段焊接时，焊缝应及时保温覆盖。

6 上保护层施工应在土工膜施工完成并验收合格后及时跟进，若不具备条件应采用临时保护措施。

7.3.10 复合土工膜上下层土工织物宜采用丁缝法连接。若采用热熔粘接应通过试验确定。

7.4 接 缝 质 量 检 测

7.4.1 土工膜连接后，应及时对全部接缝、接缝结点和修补部位的接缝质量进行检测。

7.4.2 接缝质量检测应随施工进度同步进行。

7.4.3 土工膜外观、接缝、锚固质量均应检测，检测率应符合设计要求。

7.4.4 目测法、充气法、真空法是土工膜接缝和 T 形接头质量检测的基本方法。所有接缝应采用目测法 100%检查，并可选择充气法、真空法、抽样法和压力箱法抽样检测，也可采用电火花法或超声波法检测。

检测设备可采用气压式检测仪、真空检测罩、压力箱、拉伸仪、电火花金属刷、超声波发射仪。

7.4.5 接缝质量检测方法应符合下列要求：

1 目测法。检查接缝是否漏焊，拼接是否清晰、均匀，是否有烫损、褶皱、夹渣、气泡、漏点、熔点或焊缝跑边。接缝及检测出的质量缺陷或有怀疑的部位均应进行定位测绘和标记，并分别编号、详细记录。

2 充气法。双道焊缝采用充气正压检测。充气压力根据膜厚宜控制在 0.10MPa~0.25MPa、保压 1min~5min。压力无下降，

表明焊缝检漏合格。

3 真空法。T 形接头及缺陷修补部位采用真空法进行检测，抽真空至负压 0.02MPa~0.03MPa，静观 30s，负压无明显下降，接缝部位密封液不起泡即为合格。

4 电火花法。对单焊缝可采用电火花检测。焊缝检测时，以检测仪金属刷之间不发生火花为合格。

5 超声波法。焊缝可采用超声波进行检测。检测时，以超声波发射仪荧光屏显示结果为判定标准。

6 抽样法。抽样法进行室内拉伸试验。试验时，每 1000m²~2000m²取一现场接缝试样进行拉伸试验，以接缝强度不小于母材强度的 85%为合格。

7 压力箱法。锚固结构采用压力箱进行渗漏检测。压力箱加水加压至设计水压，稳定压力达到设计要求时间，水压未降低则判定质量合格。

7.4.6 检测完毕，应对检测时所做的充气打压穿孔用挤压焊接法修补。

7.4.7 检测过程及结果应详细记录并标识在施工图上，且在土工膜检测部位醒目标识。

7.4.8 接缝质量检测结果不合格，应按要求处理，并对处理部位进行复检。

7.5 上保护层施工

7.5.1 土工膜铺设及连接施工结束并验收合格后，应及时进行上保护层施工。

7.5.2 上保护层结构型式、各项技术指标应满足设计要求。

7.5.3 土工织物宜采用丁缝法连接。

7.5.4 采用土石料结构，铺料应单边推进，依次进占摊铺，卸料高度不超过 50cm。施工机械设备不得在土工膜上直接碾压；保护层材料搬运、摊铺、碾压设备型号应通过生产试验确定。与土工

膜直接接触的土石料不得夹杂任何有损土工膜的尖锐物、块石、预制棱体等。

7.5.5 坡面保护层应自下而上、分区分块依序进行施工。

7.5.6 禁止使用损伤土工膜的工具。材料及工器具须轻拿轻放，不得高抛或投掷。

7.6 排水、排气结构施工

7.6.1 排水、排气结构型式应符合设计要求。

7.6.2 排水、排气结构施工应按国家现行标准的有关规定执行。

8 安全监测与运行管理

8.1 安全监测

8.1.1 安全监测设计应符合下列原则：

- 1 土工膜防渗层宜进行渗流、材料老化状态监测。
- 2 采用土工膜防渗的水工建筑物监测应按相应规范进行。

8.1.2 渗流监测应符合下列原则：

1 1、2 级土工膜防渗结构应设置一定数量的膜下渗流监测设施，主要观测内容是膜下渗压和渗漏量。3、4 级防渗结构可根据需要确定是否设置渗流监测，或结合主体建筑物监测设置一定数量的渗流监测设施。

2 土工膜膜下渗压观测设施可埋设在下垫层或底部混凝土、基岩基础内。

3 渗漏量监测宜结合防渗范围分区进行。

8.1.3 对 1、2 级土工膜防渗结构，应在与土工膜防渗层工作环境相同的部位，预置一定数量相同材质的土工膜，定期检测其老化状态。

8.2 运行管理

8.2.1 对于 1、2 级土工膜防渗工程运行管理，应符合下列要求：

- 1 按工程观测运行规定，定期观测土工膜防渗层下的渗漏量、水位变化。
- 2 定期检验水质。
- 3 及时对渗漏异常现象进行分析，研究和落实需采取的处理措施。

4 应定期检测、对比分析预置土工膜材料的特性,做出安全性评价。检测周期宜为每隔 5 年一次。材料性能变化较大时(变化幅度达 20%~30%以上),应增加检测频次和范围。

8.2.2 对于 3、4 级土工膜防渗工程运行管理,可根据工程具体情况制定。

8.2.3 应积累工程运行管理资料,建立土工膜防渗工程运行管理技术档案。

附录 A 土工膜厚度计算

A.0.1 薄膜理论公式。将薄膜张在边界上,如图 A.0.1-1 所示。受均匀水压力 p (单位面积的力),膜发生挠曲变位 $w(x, y)$,并受到均匀拉力 T (单位长度的力)。此时形成膜的平衡表面。根据微元各边的拉力在 w 轴方向的投影之和与水压力 $pdx dy$ 平衡的条件,从图上的力系就可得到如式 (A.0.1-1) 所示偏微分方程:

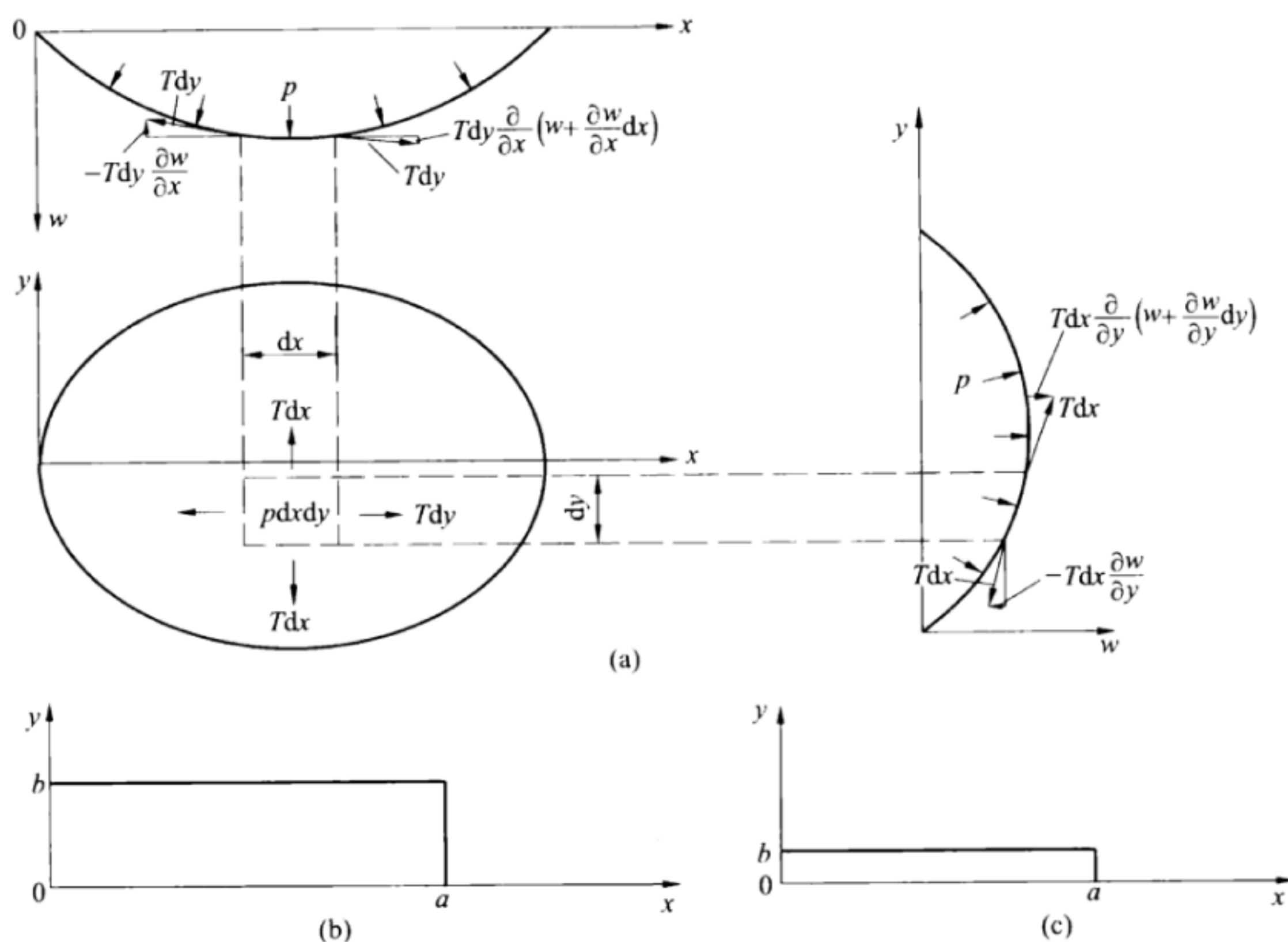


图 A.0.1-1 薄膜变形原理图

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -\frac{p}{T} \quad (\text{A.0.1-1})$$

注意: 式中的 T 与 p 均为常量, 各边界上的变位 $w = 0$ 。

由边界条件, 便可求得此偏微分方程式的解。另外, 用基于变分原理的近似计算方法——瑞利-里兹 (Rayleigh-Ritz) 方法, 取代平衡方程和边界条件, 不必解偏微分方程, 可比较简单地求得解答。下面对应用 Rayleigh-Ritz 方法推求变位函数 w 作一简述。

如果膜的边界是矩形, 如图 A.0.1-1 (b) 所示, 边长为 a 和 b 。根据虚位移原理, 在薄膜的平衡表面上, 位能的变分等于外部压力所做的虚功, 即:

$$\delta \left\{ \frac{T}{2} \int_0^a \int_0^b \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \right\} = \int_0^a \int_0^b p dx dy \delta w \quad (\text{A.0.1-2})$$

设变位函数 w 的近似解取下面的形式:

$$w(x, y) = \sum_{k=1,3}^{2n-1} \sum_{L=1,3}^{2n-1} C_{kL} \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{L\pi y}{b} \quad (\text{A.0.1-3})$$

当 $x=0$, $x=a$, $y=0$, $y=b$ 时, w 都等于 0, 可见所假设的变位函数 w 满足位移边界条件, 故将上式作为变位函数是适当的。其中只有 C_{kL} 是待定的系数。

将式 (A.0.1-3) 代入式 (A.0.1-2) 并积分, 得:

$$\frac{T}{2} \delta \sum_{k=1,3}^{2n-1} \sum_{L=1,3}^{2n-1} C_{kL}^2 \left(\frac{k^2 \pi^2}{a^2} + \frac{L^2 \pi^2}{b^2} \right) \frac{ab}{4} - p \delta \sum_{k=1,3}^{2n-1} \sum_{L=1,3}^{2n-1} C_{kL} \frac{4}{kL} \frac{ab}{\pi^2} = 0$$

令上式为 $\delta F=0$, 则:

$$\delta F = \frac{\partial F}{\partial C_{kL}} \delta C_{kL} = 0$$

即:

$$\frac{\partial F}{\partial C_{kL}} = 0$$

由此得

$$C_{kL} = \frac{16p}{T} \frac{a^2 b^2}{\pi^2 (k^2 b^2 + L^2 a^2) kL} \quad (\text{A.0.1-4})$$

将式 (A.0.1-4) 代入式 (A.0.1-3), 便可得膜表面的变位分布。

1 张在正方形边界上的膜, $a = b$, 在对称轴上, 即 $x = \frac{a}{2}$ 线上, 伸长量最大, 此线上的变位为:

$$w\left(\frac{a}{2}, y\right) = \frac{8pa^2}{T\pi^4} \left(0.933 \sin \frac{\pi y}{a} + 0.054 \sin \frac{3\pi y}{a} \right)$$

此线上薄膜伸长变形曲线的长度为:

$$L = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dy} \right)^2} dy \approx a \left(1 + \frac{14.4p^2a^2}{T^2\pi^6} \right) \quad (\text{A.0.1-5})$$

由式 (A.0.1-5) 可知, 正方形边界上的膜, 在 $x = \frac{a}{2}$ 线上, 拉应变为:

$$\varepsilon = \frac{14.4p^2a^2}{T^2\pi^6} \quad (\text{A.0.1-6})$$

即拉力为:

$$T = 0.122pa / \sqrt{\varepsilon} \quad (\text{A.0.1-7})$$

式中: T ——单位宽度膜的拉力, kN/m;

p ——膜上作用的水压力, kPa;

a ——正方形膜的边长, m;

ε ——膜的拉应变, %。

2 张在圆形边界上的膜, 在直径方向, 即 $x = \frac{a}{2}$ 线上, 拉应力最大, 为:

$$T = 0.11pa / \sqrt{\varepsilon} \quad (\text{A.0.1-8})$$

式中: a ——圆的直径, m。

其他符号与前同。

3 长条缝上的膜, 即 $a \gg b$, 见图 A.0.1-1 (c), 在垂直于长条方向, 即垂直于 x 轴时, 拉应力最大, 为:

$$T = 0.204 \frac{pb}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (\text{A.0.1-9})$$

式中： b ——预计膜下地基可能产生的裂缝宽度，m。

其他符号与前同。

聚氯乙烯膜、氯乙烯膜、氯丁橡胶膜的抗拉试验得到的拉应力-拉应变关系曲线表明，拉应力随着拉应变的增大而增大，一般呈双曲线关系：

$$T = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (\text{A.0.1-10})$$

试验得到的关系曲线与土工膜应力-应变关系曲线趋势相反。因此，计算土工膜的厚度，可根据荷载和接触颗粒孔隙（缝）等因素代入式（A.0.1-7）～式（A.0.1-9），绘制 T - ε 图，如图 A.0.1-2 所示。在同一图中绘出选用土工膜的试验曲线。交点对应的应变 ε_1 、 ε_2 分别为裂缝宽度为 b_1 、 b_2 （或 a_1 、 a_2 ），拉力为 T_1 、 T_2 时的拉伸应变。此点拉应力与拉应变，既符合所选土工膜的应力-应变关系，也符合该材料在此颗粒级配条件下发生变形的实际。

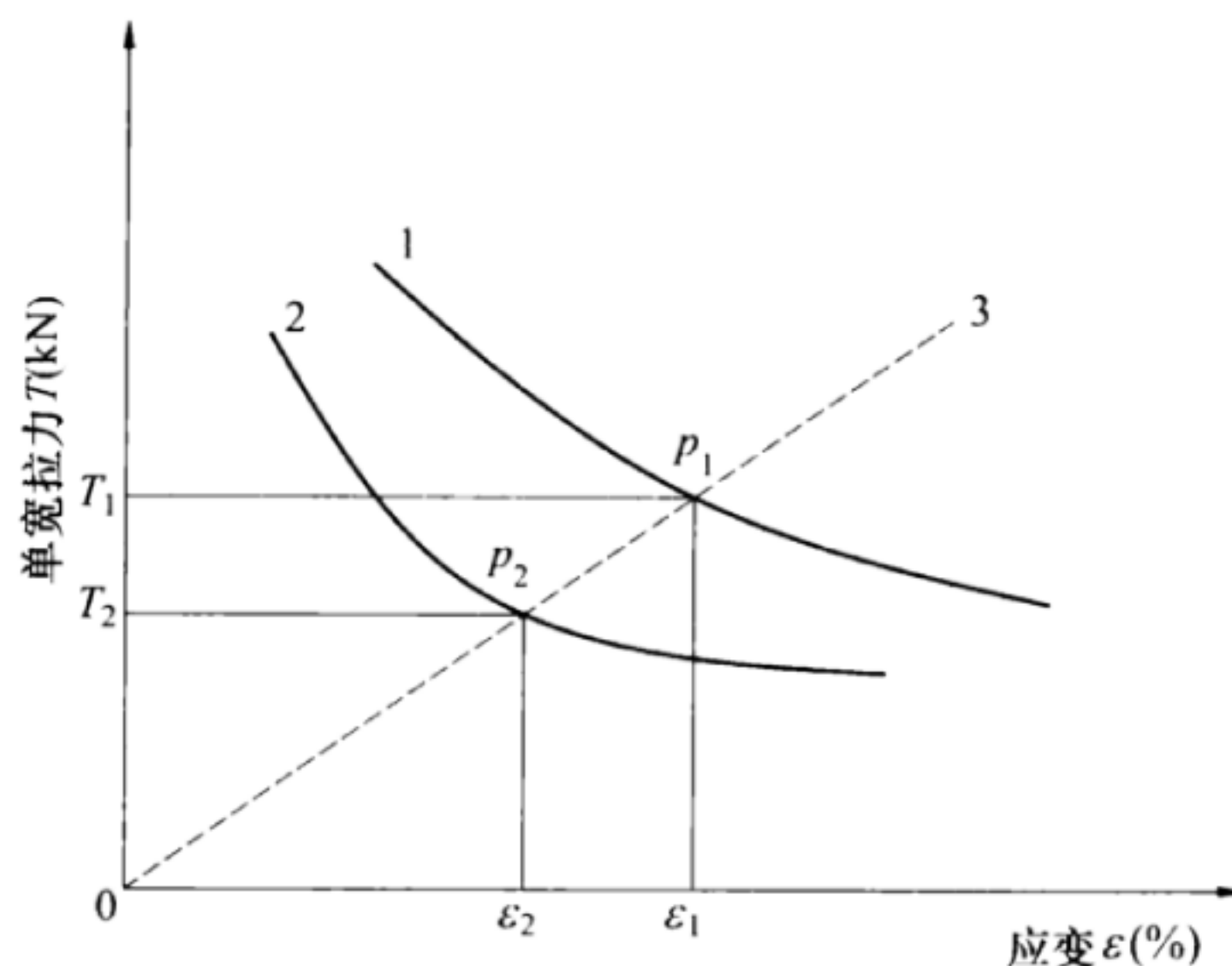


图 A.0.1-2 土工膜应力-应变关系

1— b 曲线；2— b_2 曲线；3—选用土工膜的试验曲线

如果选用土工膜的极限抗拉强度为 T_f ，相应应变为 ε_f ，则安全系数 K 分别为：

$$K = \frac{T_f}{T}$$

$$K = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon} \quad (\text{A.0.1-11})$$

(T 、 ε 分别为 T_1 或 T_2 ， ε_1 或 ε_2)

A.0.2 苏联的经验公式

1987 年，苏联出版的《土坝设计》介绍了聚合物膜厚度的计算公式：

$$t = 0.135 E^{1/2} \frac{pd}{[\sigma]^{3/2}} \quad (\text{A.0.2-1})$$

式中： $[\sigma]$ ——薄膜的允许拉应力，MPa；

E ——在设计温度下薄膜的弹性模量，120MPa；

p ——薄膜承受的水压力，MPa；

d ——与膜接触的土、砂、卵石层的最粗粒组的最小粒径，mm；

t ——薄膜的厚度，mm。

用式 (A.0.2-1) 计算出来的膜较厚时，即当 $t > \frac{1}{3}d$ ，则改用下式计算：

$$t = 0.586 \frac{p^{1/2}d}{[\sigma]^{1/2}} \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中符号的意义和单位与式 (A.0.2-1) 相同。

如果式 (A.0.2-2) 算出的膜厚 $t < \frac{1}{3}d$ ，则采用 $\frac{1}{3}d$ 。

苏联的经验公式不能直接用于复合土工膜及窄长缝上膜的厚度的计算。

苏联水工科学研究所提出的聚乙烯薄膜的允许拉应力和弹性模量参考值见表 A.0.2-1。

表 A.0.2-1 聚乙烯薄膜的允许拉应力和弹性模量参考值

温度 (°C)	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15
允许拉应力 [σ] (MPa)	2.16	2.26	2.45	2.65	2.75	2.94	3.04	3.24	3.43	3.63
弹性模量 E (MPa)	38.1	41.2	45.7	50.3	56.3	65.9	79.1	96.1	117.7	140.3
温度 (°C)	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	
允许拉应力 [σ] (MPa)	3.92	4.12	4.32	4.71	5.10	5.30	5.49	5.98	6.57	
弹性模量 E (MPa)	167.8	204.0	237.4	292.3	335.5	386.5	438.5	486.6	507.2	

A.0.3 Giroud 公式

Giroud 研究了均布荷载作用下铺在窄长缝上膜的计算公式，基本假设是膜受力后的变形为圆弧。圆弧曲率半径为 r ，最大挠度为 h ，缝槽的宽度为 b ，见图 A.0.3。圆弧一半的圆心角为 θ ，圆弧微段 ds 的圆心角为 $d\alpha$ ，与 oy 的夹角为 α ，则 ds 段水压力的竖向分量 $dp_v = pdscos\alpha = prd\alpha cos\alpha$ 。半个圆弧上水压力的竖向分量为：

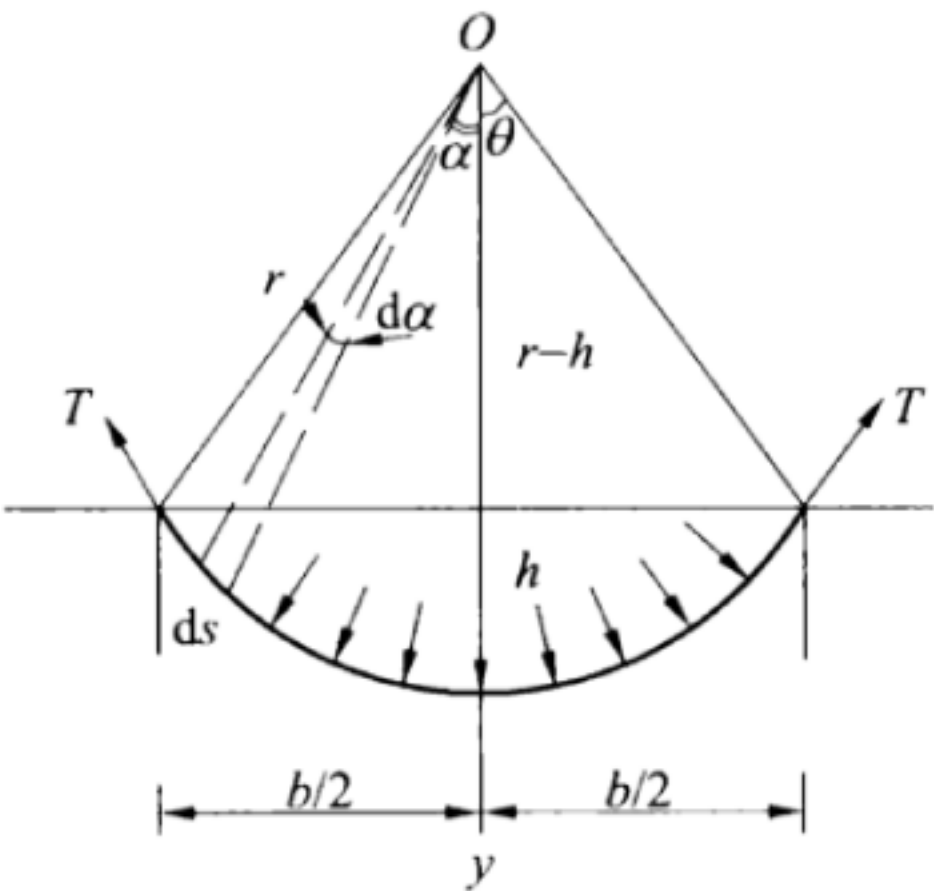


图 A.0.3 假定挠曲线为圆弧受力示意图

$$p_v = \int_0^\theta pr \cos \alpha d\alpha = pr \sin \theta$$

p_v 与拉力 T 的竖向分量 $T \sin \theta$ 相平衡, 得

$$T = pr$$

又由几何关系 $r \cos \theta = r - h$, $r \sin \theta = \frac{b}{2}$, 便可解得

$$r = \frac{b}{4} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right)$$

代入上式得到

$$T = \frac{1}{4} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right) pb \quad (\text{A.0.3-1})$$

半个弧长等于 $r\theta$, θ 以弧度计。 $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{b}{2} / r \right)$, 将 r 代入, 得到

$$\text{半个弧长} = \frac{b}{4} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right) \sin^{-1} \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right)}$$

膜 (或土工织物) 的相对延伸率为 $\varepsilon = \left(\text{半个弧长} - \frac{b}{2} \right) / \frac{b}{2}$, 将上式代入即得

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right) \sin^{-1} \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right)} - 1 \quad (\text{A.0.3-2})$$

其中 $\sin^{-1} \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{2h}{b} + \frac{b}{2h} \right)}$ 以弧度计。

以若干个 $2h/b$ 代入式 (A.0.3-1) 计算若干个 T , 用式 (A.0.3-2) 计算若干个 ε , 绘制 $T-\varepsilon$ 图, 在同一图中绘出选用土工膜的试验曲线, 用曲线交会法计算膜厚。

Giroud 公式适合计算置于长条缝上的土工膜，Giroud 假定挠度曲线为圆弧，因而所求的 T 是箍应力。

A.0.4 美国 GSI 计算方法

美国土工材料研究所 (GSI) 推荐采用如下公式进行膜厚计算：

$$T = \sigma_a t \quad (\text{A.0.4-1})$$

式中： σ_a ——土工膜允许应力，kPa；

t ——土工膜的厚度，m；

T ——土工膜允许抗拉强度，kN/m。

T 分解为水平和垂直向两部分（图 A.0.4），由水平向力的平衡，可得：

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ T \cos \beta &= F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT} \\ T \cos \beta &= \sigma_n \tan \delta_n x + \sigma_n \tan \delta_L x + 0.5 \left(\frac{2T \sin \beta}{x} \right) x \tan \delta_L \end{aligned} \quad (\text{A.0.4-2})$$

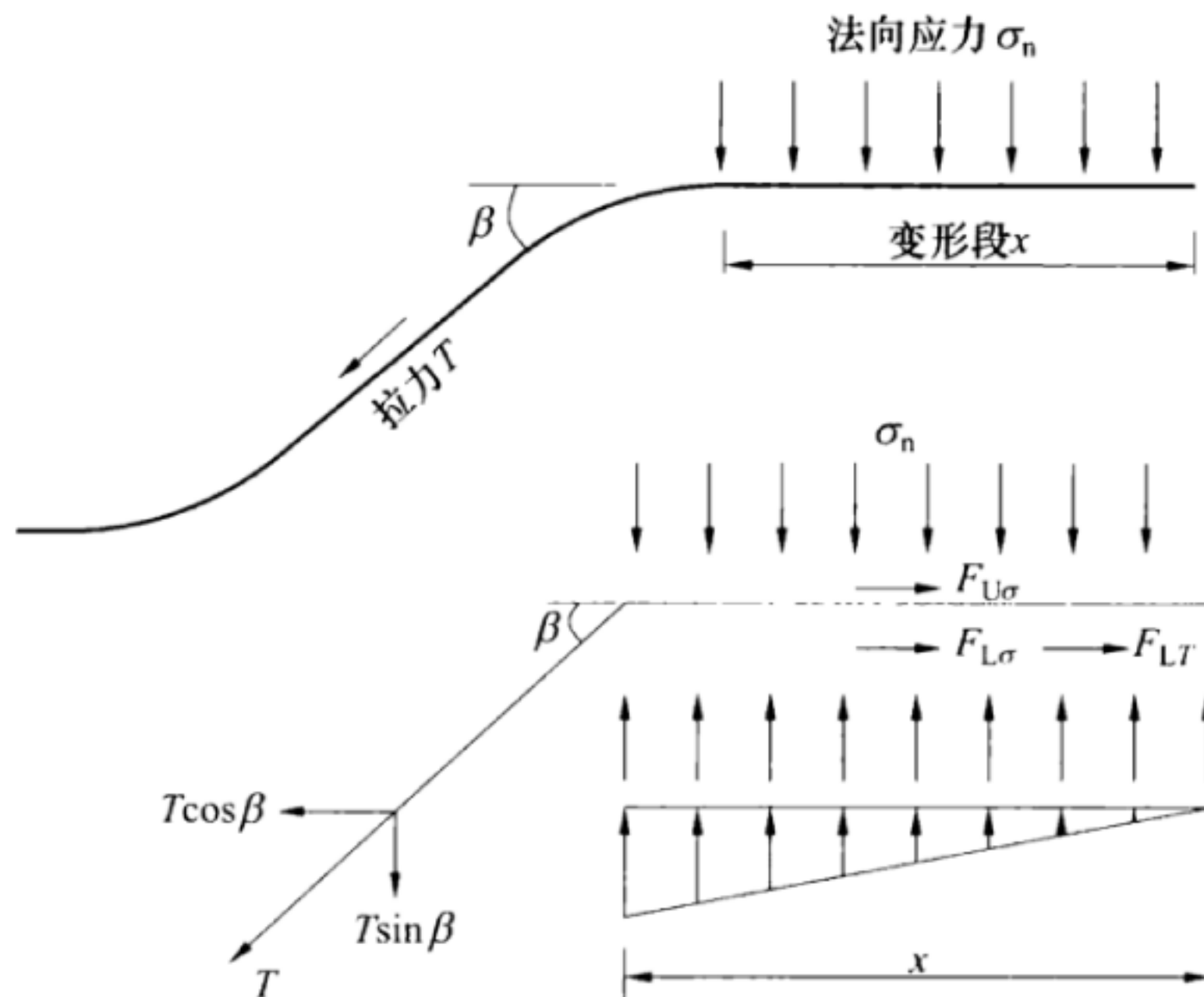


图 A.0.4 土工膜厚度计算模型

$$T = \frac{\sigma_n x (\tan \delta_n + \tan \delta_L)}{\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_L} \quad (\text{A.0.4-3})$$

将式 (A.0.4-3) 代入式 (A.0.4-1), 可得:

$$t = \frac{\sigma_n x (\tan \delta_U + \tan \delta_L)}{\sigma_a (\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_L)} \quad (\text{A.0.4-4})$$

式中: σ_n ——水荷载 (填埋物) 产生的应力, kPa;

x ——引起土工膜变形段的长度, m, 一般取 0.015m~0.1m;

δ_U ——土工膜和上部物质的剪切角度, ($^\circ$);

δ_L ——土工膜和下部物质的剪切角度, ($^\circ$);

β ——引起土工膜张力的沉降角度, ($^\circ$);

$F_{U\sigma}$ ——土工膜和上部物质的剪力, kN/m;

$F_{L\sigma}$ ——土工膜和下部物质的剪力, kN/m;

F_{LT} ——由 T 的垂直分量引起的剪力, kN/m。

B.0.3 土工织物等排水层要求的导水率 θ_r 按下式计算：

$$\theta_r = \frac{q_i}{J_g} \quad (\text{B.0.3-1})$$

$$J_g = \sin \alpha \quad (\text{B.0.3-2})$$

式中： q_i ——单宽流量，由式（B.0.2-3）算得， $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ；

J_g ——来水沿排水层渗流的水力梯度；

α ——土坝上游坡角。

B.0.4 土工织物等排水层实际提供的导水率 θ_a 按式（B.0.4）计算：

$$\theta_a = k_h \delta \quad (\text{B.0.4})$$

式中： k_h ——土工织物、排水垫层、排水管网等沿平面的渗透系数， m/s ，但非织造土工织物系蓬松材料，其厚度及渗透系数随压力而变化，故应先通过试验求得土工织物的导水率与压力的关系（ $\theta-p$ ），以备查用，见图 B.0.4；

δ ——排水层厚度， m 。

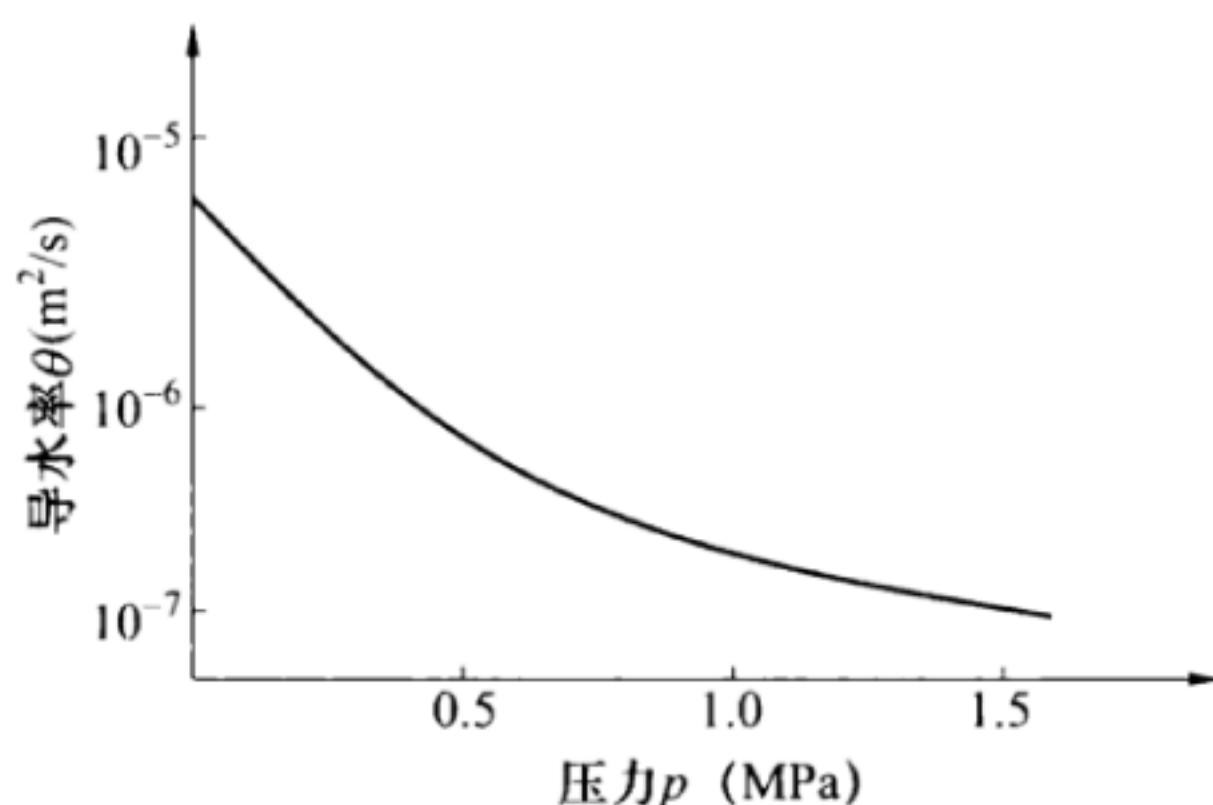


图 B.0.4 土工织物压力与导水率关系示意图

B.0.5 排水能力评价。比较各层的 θ_r 与 θ_a ，要求每层 $\theta_a > \theta_r$ ，并有适当的安全系数。

B.0.6 计算可按表 B.0.6 所示程序进行。

表 B.0.6 排水层排水核算表

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
分层号	平均水头 h_i (m)	平均渗径 l_i (m)	水力梯度 J_i	分层流量 Δq_i [m ³ / (s • m)]
(6)	(7)	(8)	(9)	
累计流量 q_i [m ³ / (s • m)]	要求的 $\theta_r = \frac{q_i}{\sin \alpha}$ (m ² /s)	如排水层为土工织物, 则计算其所受压力 p_a (kPa)	提供的 $\theta_a = k_h \delta$ (m ² /s)	

附录 C 土工膜防渗结构的稳定分析

C.1 计 算 条 件

C.1.1 水位骤降，核算保护层（包括防护层和上垫层）与土工膜之间的抗滑稳定性。

C.1.2 保护层的透水性有良好和不良两种情况。

C.1.3 保护层断面有等厚度和变厚度（自上而下逐渐增厚，呈楔形）两种情况。

C.2 计 算 方 法

C.2.1 采用极限平衡法。

C.2.2 保护层透水性不良时，采用容重变化法计及层内孔隙水压力影响，即降前水位以上土料及护坡采用湿容重；计算滑动力时，降前水位与降后水位之间用饱和容重，降后水位以下用浮容重；计算抗滑力时，降前水位以下一律用浮容重。土的抗剪强度采用有效指标 c' 和 ϕ' 。

C.3 等 厚 度 保 护 层

C.3.1 保护层透水性良好，若不计保护层与土工合成材料交界面凝聚力，安全系数 F_s 应按式（C.3.1）计算：

$$F_s = \frac{\tan \delta}{\tan \alpha} \quad (\text{C.3.1})$$

式中： δ ——上垫层土料与土工膜之间的摩擦角；

α ——土工膜铺放坡角。

C.3.2 保护层透水性不良，若不计保护层与土工合成材料交界面

凝聚力，安全系数 F_s 应按式 (C.3.2) 计算：

$$F_s = \frac{\gamma'}{\gamma_{\text{sat}}} \frac{\tan \delta}{\tan \alpha} \quad (\text{C.3.2})$$

式中： γ' 、 γ_{sat} ——保护层的浮容重和饱和容重， kN/m^3 。

等厚保护层见图 C.3.1。

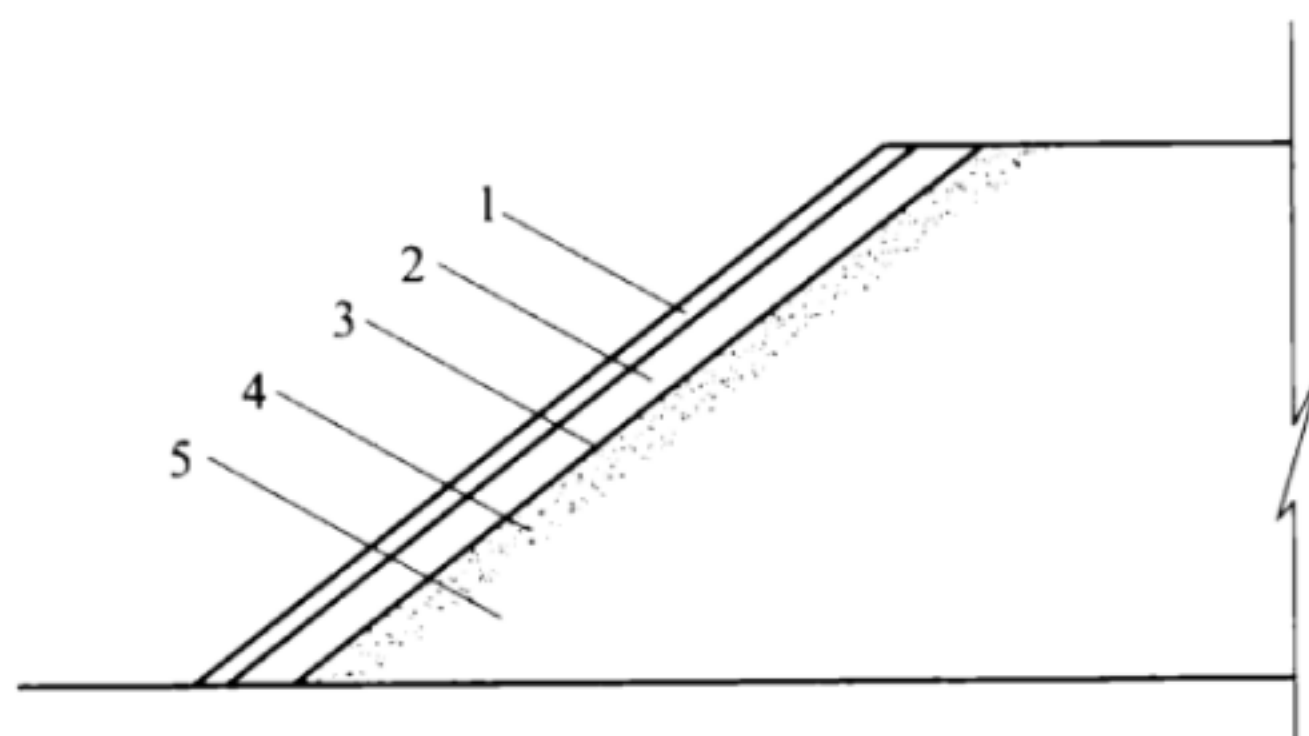


图 C.3.1 等厚保护层

1—防护层；2—上垫层；3—土工膜；4—下垫层；5—堤坝体

C.4 不等厚保护层

C.4.1 保护层透水性良好，安全系数 F_s 应按式 (C.4.1) 计算：

$$F_s = \frac{W_1 \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi_1 + W_2 \tan(\beta + \varphi_2) + c_1 l_1 \cos \alpha + c_2 l_2 \cos \beta}{W_1 \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (\text{C.4.1})$$

式中： W_1 、 W_2 ——主动楔 $ABCD$ 和被动楔 CDE 的单宽重量， kN/m ；

c_1 、 φ_1 ——沿 BC 面上垫层土料与土工膜之间的黏聚力 (kN/m^2) 和内摩擦角 ($^\circ$)；

c_2 、 φ_2 ——保护层土料的黏聚力 (kN/m^2) 和内摩擦角 ($^\circ$)；

α 、 β ——坡角；

l_1 、 l_2 —— BC 和 CE 的长度， m 。

保护层如为透水性材料， $c_1=c_2=0$ 。

C.4.2 保护层透水性不良

按式 (C.4.1)，依据上述容重变化法计算，分子上的 W 应按单宽浮容重，分母上的 W 应按单宽饱和容重计算。

降后水位至 D 点时 (图 C.4.2)，将属最危险情况。

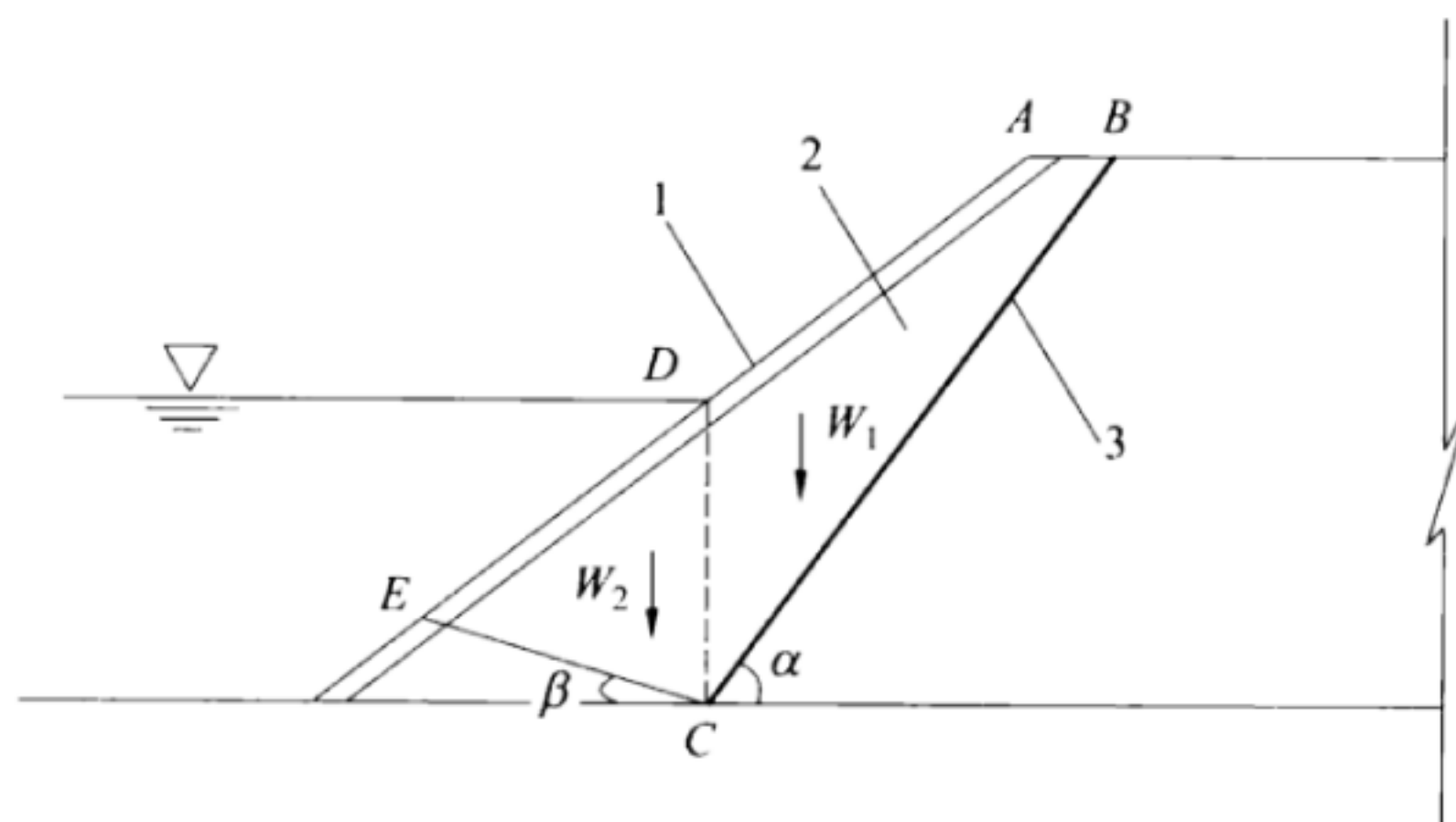
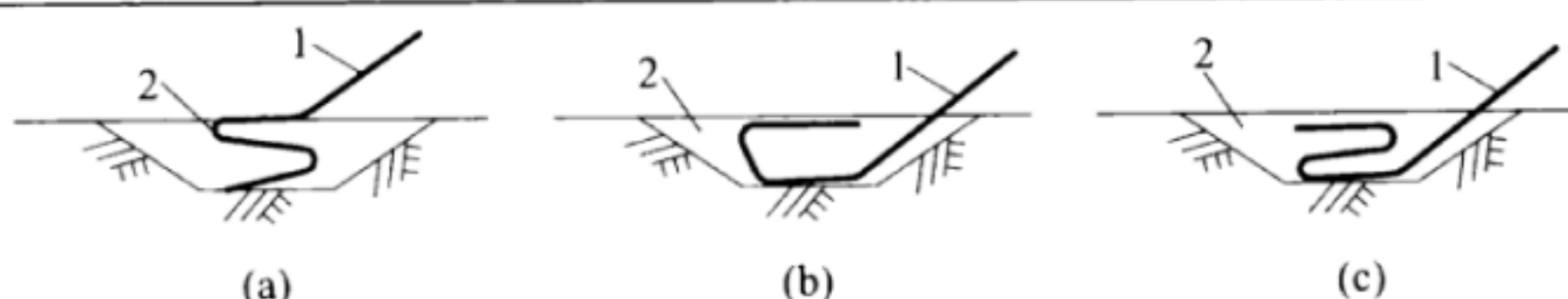
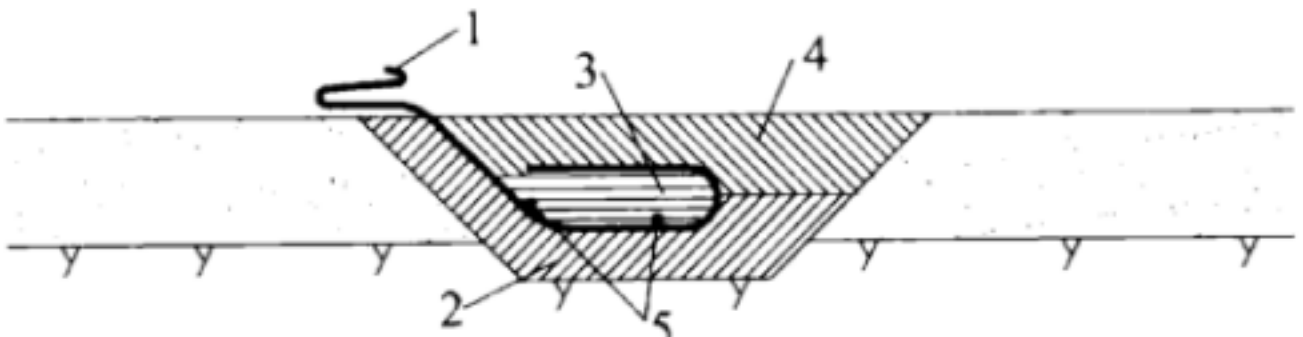
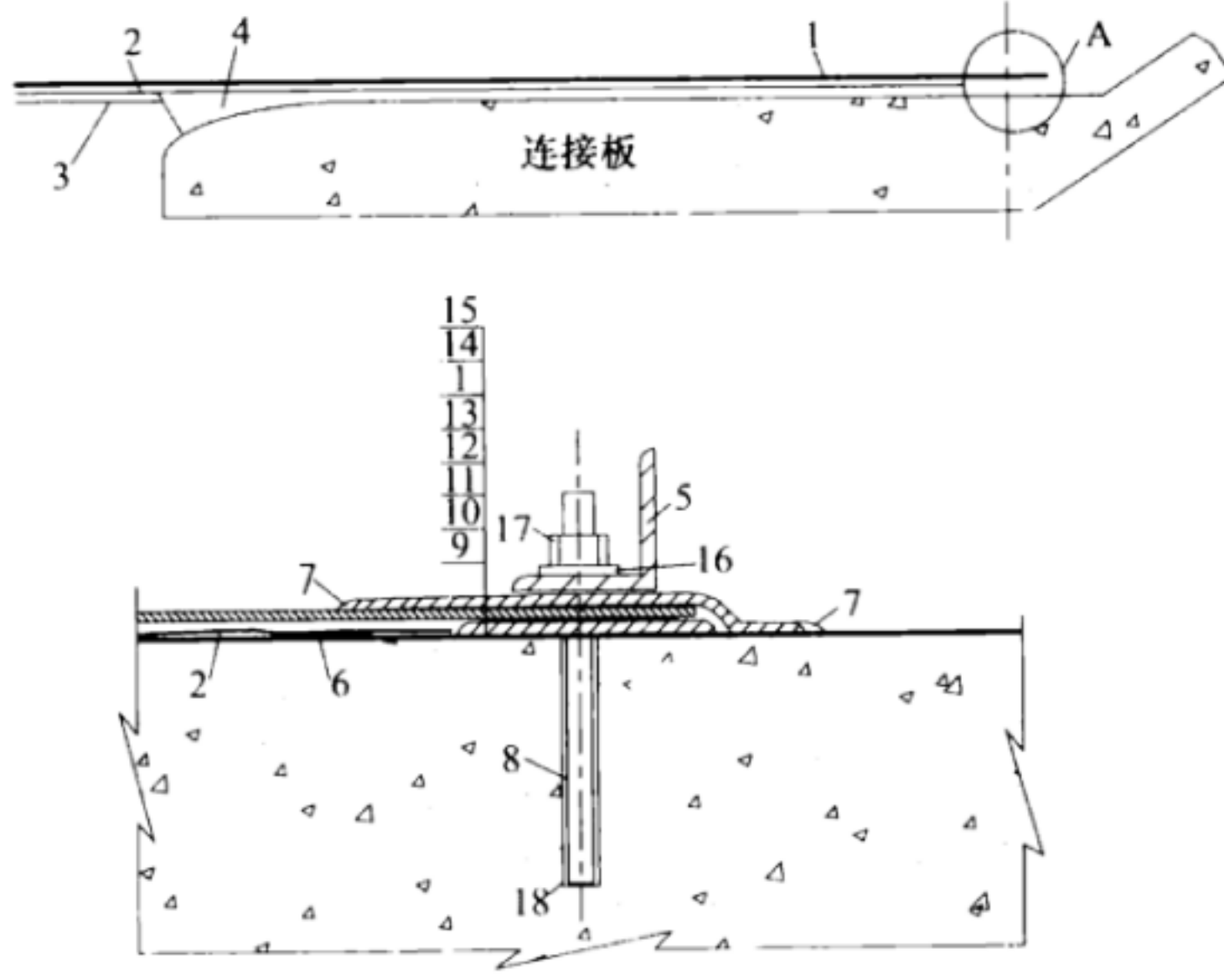


图 C.4.2 不等厚保护层

1—防护层；2—土垫层；3—土工膜

附录 D 防渗结构连接方式

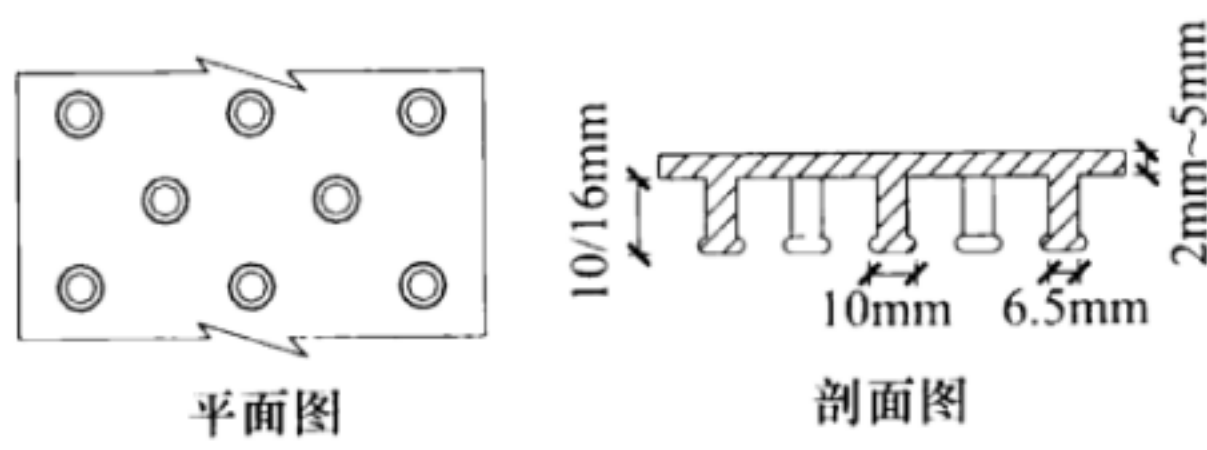
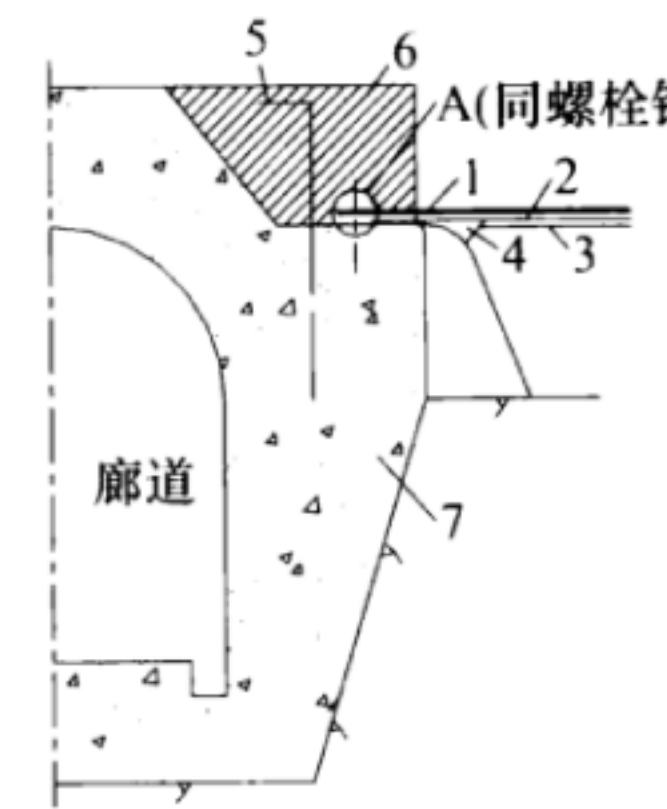
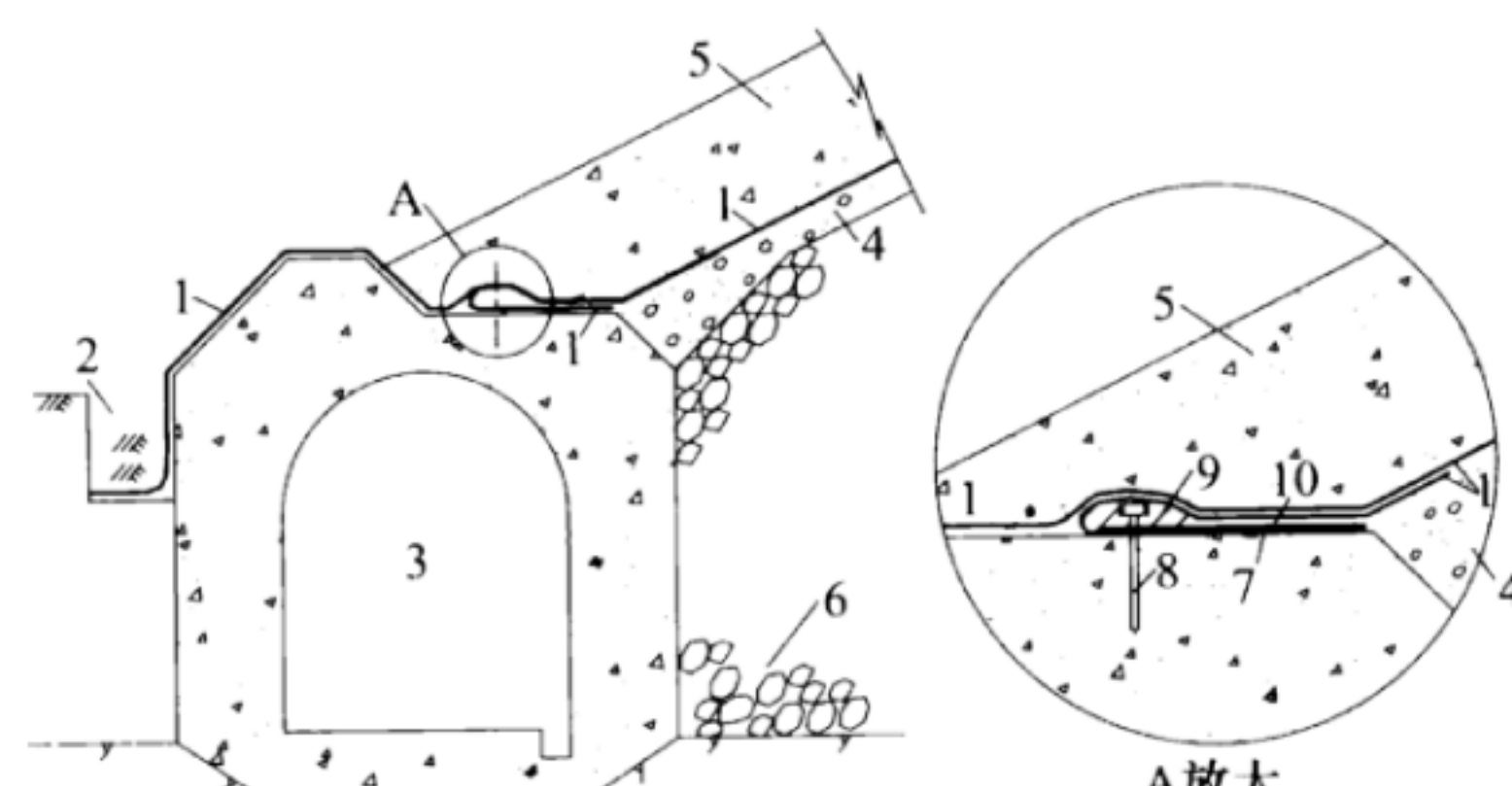
表 D 防渗结构连接方式

连接方式	示意图
土工膜与黏土地基嵌固连接	<div><p>(a) (b) (c)</p><p>1—土工膜；2—回填黏土。</p></div>
土工膜与基下岩基连接	<div><p>1—土工膜；2—一期混凝土；3—二期混凝土；4—三期混凝土；5—钢筋</p></div>
土工膜与连接板、防渗墙的螺栓锚固连接	<div><p>连接板</p><p>A放大</p><p>1—土工膜；2—土工布；3—土工席垫；4—粗砂；5—角钢；6—土工布与混凝土胶粘；7—封边剂；8—螺杆；9—防渗底胶 2 道；10—塑性止水材料找平层；11—防渗底胶 2 道；12—防渗胶条；13—防渗底胶 2 道；14—防渗底胶 2 道；15—橡胶盖片；16—弹簧垫片；17—螺母；18—锚固剂</p></div>

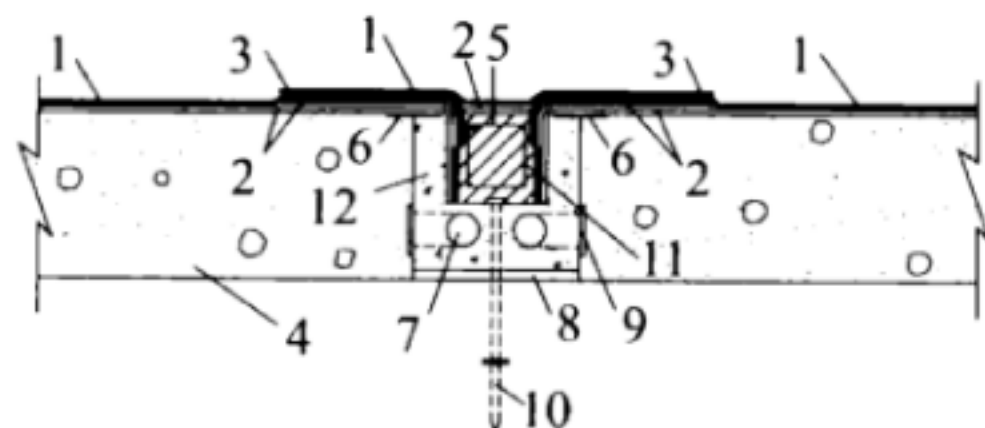
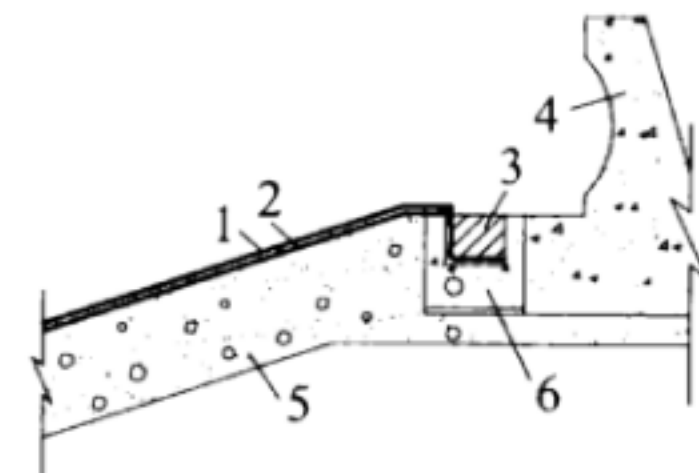
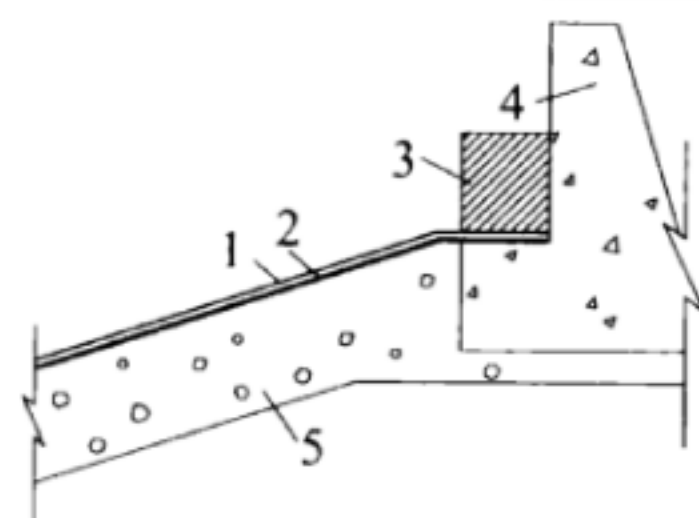
续表 D

连接方式	示 意 图
土工膜与趾板的螺栓锚固连接	<div data-bbox="716 605 1644 1270"></div> <p>1—土工膜；2—土工布；3—土工席垫；4—粗砂；5—土工布与混凝土胶粘；6—焊接；7—塑性填料；8—橡胶盖片（土工膜上下各1层）；9—槽钢；10—螺母；11—垫板；12—角钢；13—螺杆；14—二期混凝土；15—螺栓</p>
土工膜与岩石上混凝土基础的螺栓锚固连接	<div data-bbox="877 1525 1467 1982"></div> <p>1—土工膜；2—橡胶垫片；3—槽钢；4—锚栓；5—混凝土；6—锚杆</p>
土工膜与连接板、趾板、基础埋件的焊接	<div data-bbox="569 2133 1766 2466"></div> <p>1—土工材料埋件；2—塑料垫片；3—土工膜；4—土工布；5—粘结；6—混凝土；7—热熔焊接</p>

续表 D

连接方式	示意图
土工膜与连接板、趾板、基础埋件的焊接	 <p style="text-align: center;">预埋件大样图</p>
土工膜与廊道连接方式(一)	 <p style="text-align: center;">1—土工膜；2—土工布；3—土工席垫；4—粗砂；5—插筋； 6—廊道二期混凝土；7—廊道一期混凝土</p>
土工膜与廊道连接方式(二)	 <p style="text-align: center;">1—土工膜；2—黏土嵌固槽；3—廊道；4—过渡层；5—上保护层； 6—堆石体；7—2层橡胶片；8—锚栓锚固系统；9—柔性止水填料； 10—加强土工膜</p>

续表 D

连接方式	示意图
土工膜分幅嵌固锚接	 <p>1—土工膜；2—土工布；3—焊接或粘结；4—垫层；5—回填混凝土； 6—缝面盖片；7—排水管；8—砂浆垫层；9—滤网；10—锚栓； 11—钢筋；12—混凝土预制件</p>
土工膜与坝顶结构连接方式（一）	 <p>1—土工膜；2—土工布；3—回填混凝土；4—防浪墙混凝土； 5—垫层；6—混凝土预制件</p>
土工膜与坝顶结构连接方式（二）	 <p>1—土工膜；2—土工布；3—混凝土压覆；4—防浪墙混凝土； 5—垫层</p>

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词,说明如下:

- 1) 表示很严格,非这样做不可的:
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- 4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定(要求)”或“应按……执行”。

引 用 标 准 名 录

- 《土工合成材料应用技术规范》 GB 50290
- 《土工合成材料 聚乙烯土工膜》 GB/T 17643
- 《土工合成材料 聚氯乙烯土工膜》 GB/T 17688
- 《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》 DL 5180
- 《碾压式土石坝设计规范》 DL/T 5395

中华人民共和国能源行业标准

水电工程土工膜防渗技术规范

NB / T 35027 — 2014

条 文 说 明

制 定 说 明

《水电工程土工膜防渗技术规范》NB/T 35027—2014，经国家能源局 2014 年 6 月 29 日以第 4 号公告批准发布。

本规范编制过程中，编制组结合已建抽水蓄能电站土工膜防渗工程的研究成果和设计、施工、运行管理实践，调研了国内外土工膜防渗技术研究和应用成果，总结了土工膜防渗工程在选材、结构设计、施工工艺等方面的经验和技术要求、质量监测和控制要求等，吸收了近年来水电工程土工膜防渗技术方面所取得的科技成果，并向有关设计和科研单位征求了意见。

为便于广大设计、施工、科研和学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，本规范编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据，以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目 次

1 总则54

4 材料及其性能指标56

4.1 一般规定.....56

4.2 土工膜的性能61

4.3 土工膜的选择65

5 结构布置设计69

5.1 一般规定.....69

5.2 防渗结构型式74

5.3 土工膜厚度74

5.4 防渗层布置77

5.5 防渗层连接77

5.7 上保护层.....80

5.8 排水、排气81

6 防渗层结构和水力计算82

6.1 土工膜厚度计算.....82

6.2 水力计算.....84

6.3 稳定计算.....87

7 施工92

7.1 一般规定.....92

7.2 下支持层施工92

7.3 防渗层施工92

7.4 接缝质量检测93

8 安全监测与运行管理94

8.1 安全监测.....94

1 总 则

1.0.3 本条主要适用于土工膜作为主体防渗的工程。根据国内外已有工程经验，在下部支持结构、周边连接等稳妥可靠的情况下，70m 以下水头的土工膜作为主体防渗的工程技术已较为成熟。

土工膜用于大坝防渗始于 20 世纪 50 年代末期，1959 年意大利的 Contrada Sobeta 堆石坝使用聚异丁烯合成橡胶薄膜，1960 年捷克的 Dobsina 堆石坝使用聚氯乙烯膜，加拿大 Terzaghi 工程则在趾板上采用土工膜防渗。从 1971 年开始，土工膜还用于大坝修复改造，如捷克的 Obecnice 土坝和意大利的 Lago Baitone 重力坝。据国际大坝委员会（ICOLD，1981 年）统计，至 1978 年，已有 24 座大坝用土工膜防渗，其中 23 座是填筑坝，1 座是重力坝。随后土工膜的应用进入快速发展时期，据 ICOLD（2003 年）统计，世界上共有 232 座大坝使用了土工膜防渗。

国外现已成功应用于西班牙 1984 年建成的 Poza de Los Ramos 堆石坝，坝高 97m；阿尔巴尼亚 1996 年建成的博维拉（Bovilla）堆石坝上游面防渗，坝高 91m。

我国自 1965 年在桓仁大头坝的裂缝处理中使用聚氯乙烯沥青膜防渗以来，已成功应用于四川宁南县竹寿水库土石坝 60.2m 高的土工膜与心墙组合防渗（1995 年）、汉江王甫洲水利枢纽大坝和库底土工膜防渗（1999 年）、黄河西霞院工程土石坝上游面土工膜防渗（2007 年）、四川仁宗海水电站堆石坝上游面土工膜防渗（2008 年）。

国内外抽水蓄能电站使用土工膜防渗的有日本今市抽水蓄能电站上水库（1990 年）、冲绳海水蓄能电站上水库（1999 年）、山东泰安抽水蓄能电站上水库（2006 年）等。

土工膜也越来越多地被碾压混凝土坝的修复和新建采用。截至 2003 年，世界上有 27 座碾压混凝土坝使用了土工膜防渗，其中 24 座碾压混凝土坝土工膜被用于上游面板的防渗，3 座大坝用作铺设在收缩缝或新裂缝上的外部止水。哥伦比亚 2002 年建成的 188m 高的米尔 1 号（Miel 1）是采用土工膜防渗最高的碾压混凝土坝。

4 材料及其性能指标

4.1 一般规定

4.1.1 制造土工膜的基本材料为透水性低的聚合物颗粒，掺加一定含量的外加剂，通常为增塑剂、抗老化剂、杀菌剂、各类稳定剂等。这些外加剂起不同的作用，但不改变基本材料的低透水性。加入增塑剂可使聚氯乙烯土工膜变得柔软，在聚乙烯中加入炭黑可提高土工膜的抗老化性；掺入铅盐、钡、钙、镉和锌等衍生物可提高抗热、抗光照的稳定性；加入滑石等润滑剂有助于改善操作性；掺入杀菌剂可防止细菌破坏等。

4.1.2 根据土工膜聚合物原材料的不同，在防渗工程中主要采用合成树脂类和合成橡胶类土工膜。合成树脂类土工膜主要有聚乙烯土工膜（PE）、聚氯乙烯土工膜（PVC）、氯化聚乙烯土工膜（CPE）。聚乙烯土工膜主要分为低密度土工膜（LDPE）、高（中）密度土工膜（HDPE）。合成橡胶类土工膜主要有氯磺化聚乙烯（CSPE，俗称海普龙）土工膜、三元乙丙（EPDM）土工膜。

以 1995 年土工膜在北美的 7500 万 m^2 的销量为例，高密度聚乙烯（HDPE）膜销量为 3000 万 m^2 ，占 40%；低密度（线性低密度）聚乙烯膜销量为 1900 万 m^2 ，占 25%；聚氯乙烯（PVC）膜销量为 1500 万 m^2 ，占 20%；氯磺化聚乙烯（CSPE）膜销量为 400 万 m^2 ，占 5%；柔性聚丙烯（FPP）膜销量为 400 万 m^2 ，占 5%；其他占 5%。日本的情况类似，而 PVC 用量略多。在前苏联的工程中，多用 PE 土工膜。

P.Sembenelli 在 1998 年统计了建设的 83 个采用土工膜防渗的堆石坝，其中 33 个使用 PVC 膜，美国仅 3 例，欧洲使用 PVC 相对较多。

由此可见，用于防渗工程的土工膜材料主要是聚乙烯（PE）和聚氯乙烯（PVC）两种，而以聚乙烯（PE）膜居多。

使用较多的几种土工膜的聚合物特性如下：

聚乙烯（PE）是由乙烯聚合而成的高分子聚合物，有低分子量、高分子量两种。低分子量的一般是无色、无味、无毒的液体，相对密度约为 0.92。高分子量是乳白蜡状固体粉末。由不同制法可得不同相对密度（0.92~0.96）和不同物理机械性能的产品。相对密度高的，其机械强度、熔点和硬度等都比密度低的高。聚乙烯具热塑性，在常温下不溶于一般溶剂中，但在脂肪烃、芳香烃和卤代烃中长时间接触时能溶胀，在 70℃ 以上时可稍溶于甲苯、醋酸等中。

聚氯乙烯（PVC）是氯乙烯聚合而成的高分子聚合物，有低分子量、高分子量两种。为白色或浅黄色粉末，相对密度约为 1.4。低分子量的易溶于酮类、酯类和氯代烃类溶剂；高分子量的则难溶解。聚氯乙烯具有很好的耐化学腐蚀性，但热稳定性和耐光性较差，在 140℃ 开始分解出氯化氢，在制造时需加稳定剂。根据制造时加增塑剂的多少，可制成软质和硬质塑料。

氯化聚乙烯（CPE）是氯与乙烯发生化学反应所生成的一种聚合物。

氯磺化聚乙烯（CSPE）（俗称海普龙 Hypalon）是乙烯与氯和二氧化硫发生化学反应所生成的一种聚合物。

4.1.3 土工膜制造方式主要分为吹塑法、压延法和涂刷法。吹塑法是将熔化的聚合物通过模具制成土工膜，膜厚为 0.25mm~4mm；国内生产幅宽较大的膜多采用吹塑法。压延法是将热塑性聚合物通过一系列热滚压成土工膜，膜厚为 0.25mm~4mm。吹塑法、压延法生产的土工膜质地较均一，质量稳定，渗透系数小，工程上选用较多。涂刷法是将熔化的聚合物均匀地涂在纸或滚筒上，等聚合物冷却后揭下来形成土工膜。目前涂刷法生产的土工膜均匀性较差，耐水压力低，渗透系数大，选用时需慎重。

4.1.4 复合土工膜是土工复合材料的一种，在国家相关标准中，土工膜和复合土工膜是分属不同类别的土工合成材料。目前，水利水电工程中应用较多的复合土工膜是将聚合物膜与针刺土工织物加热压合或用粘结剂粘接的，中间的膜材料有聚乙烯膜、聚氯乙烯膜、氯化聚乙烯膜等，土工织物为聚酰胺纤维、聚酯纤维等非织造针刺土工织物。按结构分有一布一膜、二布一膜、一布二膜、二布二膜、多布多膜等复合土工膜等。

复合土工膜的主要特性为：土工织物可提高膜下排水排气能力，土工织物可对土工膜起加筋和保护作用，土工织物增加滑稳定，土工织物限制土工膜的缺陷扩大并减小渗漏量的作用。

复合土工膜中土工织物具有提高排水作用，以排出膜背后的渗透水或孔隙水及气体，防止膜被水和气抬起而失稳，当地基为土基时还可加速下面的软土排水固结。

土工织物对土工膜起保护作用，防止土工膜被接触的卵石、碎石刺破和铺设时被人和机械压坏，也可防止运输时损坏。因此，复合土工膜作为防渗材料时，能够降低膜上、膜下的垫层的施工工艺要求。

复合膜的力学性能比单膜有较大提高，其破坏应变虽不如单膜的大，但仍远大于土体的破坏应变，因而有较强的适应各种情况的能力，如重物冲击、临时性的局部荷载等。美国的冲击杆刺破比较试验表明，复合土工膜的抗刺破能力比单膜抗刺破能力提高很多，试验结果见表 4-1。

表 4-1 厚 0.75mm 复合土工膜抗刺破比较试验

聚合物膜	刺 破 力 N			
	土工膜	上面有土工织物	双面有土工织物	下面有土工织物
聚氯乙烯 (PVC)	350	655	770	700
高密度聚乙烯 (HDPE)	289	778	1400	701

长江科学院为三峡工程所做的研究也表明,复合土工膜的强度和防渗性能要优于单一膜和土工织物两者简单叠加的性能,其优良的程度与膜和织物之间复合的紧密程度密切相关。

土工织物对土工膜起到加筋和保护作用,若膜一旦被刺破,织物可防止膜的破绽被扩大并起到限制渗流的作用,在土工膜破损后不会造成较大的渗漏损失。

复合土工膜具有反滤排水功能。由于土工膜不可避免地总会有一些缺陷,如生产过程中造成的不均匀性,或施工中机械刺破形成的漏洞等,此时膜一侧的土工织物能够起到反滤排水作用,从而维护了保护层的稳定。如复合土工膜是铺在透水性不强的坝体表层上,土工织物与坝后的排水通道相连接,则膜下的土工织物可以迅速消除库水位骤降时在膜后形成的水位差,避免土工膜被水压力顶起的危险。即使聚合物膜发生破损,由于土工织物的水力阻力,能够限制一定量的漏水。日本 Fukuoka 曾作过土工膜破损渗透试验,试验用土工膜为 1mm 厚的 PVC,将膜穿孔和切口两种形式破坏,穿孔直径分别为 $\phi=2\text{mm}$ 、 10mm 、 20mm 、 100mm ,切口长度分别为 $l=20\text{mm}$ 、 100mm 。将此破坏的膜覆盖在地基上,做了无土工织物和有土工织物保护的对比试验。所用土工织物为 450g/m^2 针刺土工织物,该织物在 40kPa 下 $k=5\times 10^{-2}\text{cm/s}\sim 10^{-1}\text{cm/s}$ 。试验成果见表 4-2。

表 4-2 土工膜破损漏水试验

序号	试验情况	穿孔直径 ϕ 切口长度 l (mm)	地基土渗透 系数 $k=A\times 10^{-5}\text{cm/s}$	渗漏量 Q (cm^3/s)	
				水压力 $p=200\text{kPa}$	水压力 $p=400\text{kPa}$
1	膜穿孔, 无土工织 物保护	$\phi=2$	$A=2.1$	10.7	18.5
2		$\phi=10$	$A=4.5$	40.0	57.1
3		$\phi=20$	$A=2.6$	17.5	50.0

续表 4-2

序号	试验情况	穿孔直径 ϕ 切口长度 l (mm)	地基土渗透 系数 $k=A \times 10^{-5} \text{cm/s}$	渗漏量 $Q \text{ cm}^3/\text{s}$	
				水压力 $p=200\text{kPa}$	水压力 $p=400\text{kPa}$
4	膜穿孔, 有土工织 物保护	$\phi=2$	$A=8.1$	0.25	0.31
5		$\phi=10$	$A=2.0$	0.13	0.54
6		$\phi=20$	$A=3.9$	1.80	2.60
7		$\phi=100$	$A=5.0$	28.1	52.6
8	膜切口, 有土工织 物保护	$l=20$	$A=1.6$	0.38	0.60
9		$l=100$	$A=3.7$	24.0	58.8

注：资料引自《土工合成材料工程应用手册（第二版）》。

单膜与土之间的摩擦力较小，常是滑动的薄弱面，复合土工膜外层的土工织物与砂石料的摩擦系数较大，可以减少与土料之间的接触滑动。当用于坝面或坡面防渗时，选用复合土工膜是比较合适的。

为增加土工膜与下垫层间的摩擦力，也可以采用表面加糙起皱的土工膜。国外有较多的定型产品，见图 4-1，近年来国内也有生产。

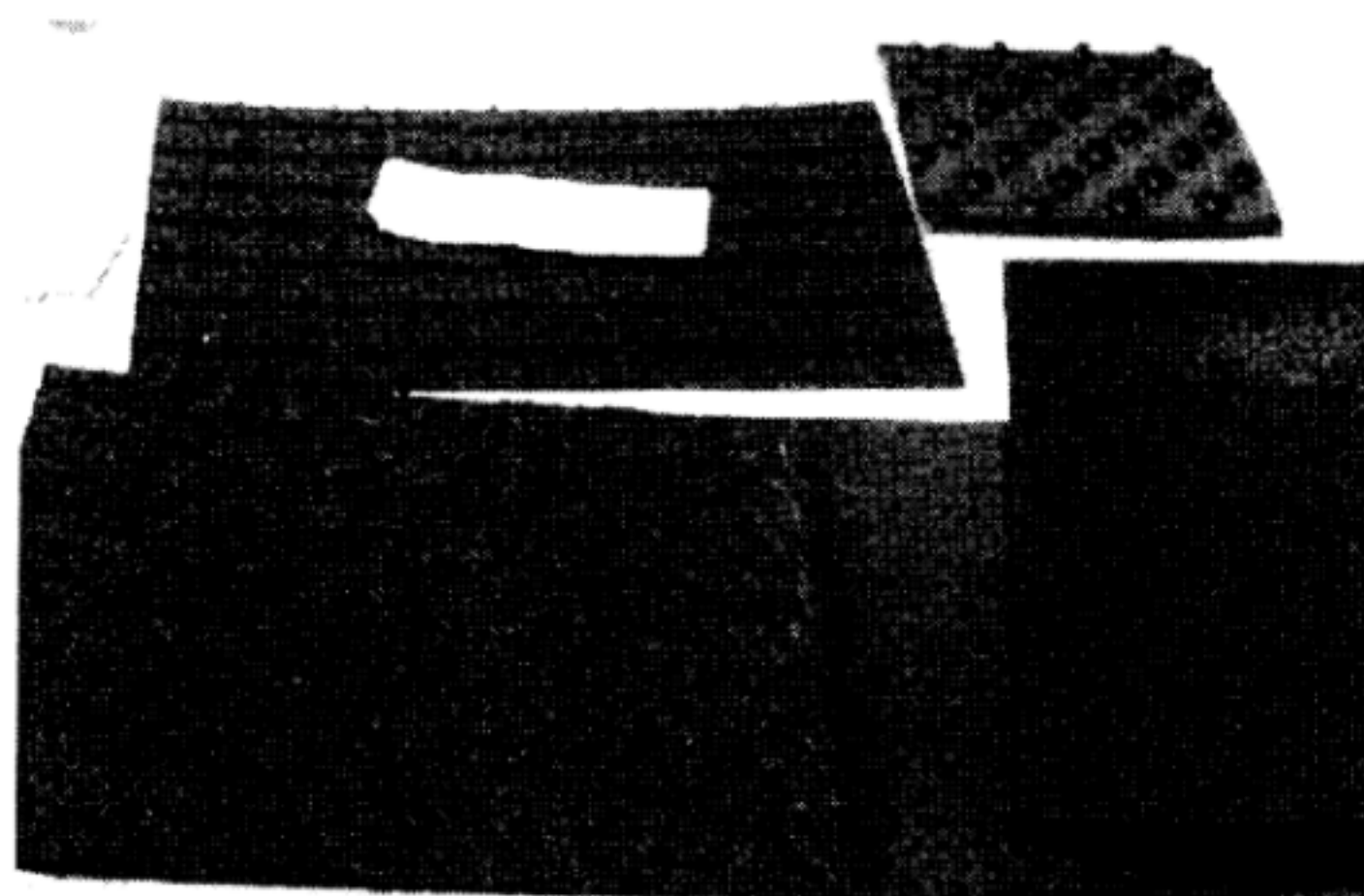


图 4-1 国外一些表面加糙的土工膜产品

4.2 土工膜的性能

4.2.5 聚合物土工膜具有很好的弹性，拉伸断裂时伸长率可达到200%~700%，拉断强度为8MPa~18MPa。

土工膜具有很好的不透水性，能够承受很大的水压力，是一种理想的防渗材料。满足质量要求的土工膜的渗透系数一般为 $10^{-13}\text{cm/s} \sim 10^{-11}\text{cm/s}$ 。作为防止水库渗漏，则可基本认为是不透水的。若为了防止有毒液体、工业废料等渗漏，则还应提出更高的要求。土工膜的渗漏主要是通过缺陷渗漏的，缺陷包括孔洞、接缝缺陷、施工破坏等。

土工膜能承受较大的水压力，当水压力过大时，土工膜在支承层颗粒孔隙处压破而击穿。表 4-3 为苏联全苏水工科学研究所对铺在不同级配砂卵石层上试验的击穿水头。可见颗粒级配愈好，耐水压性能愈强，颗粒愈细，耐水压力愈强。

表 4-3 聚乙烯膜击穿水压力水头

膜下土各种粒径含量 (%)										击穿水头 (m)	
粒径 (mm)	50~30	30~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25	膜厚 (mm)	
										0.25	0.65
	100									60	100
		2.1	58.1	32.9	6.9					82	
		100									130
			100							100	170
			46.5	52.4	1.1						215
	20.4	16.3	16.3	10.0	4.1	6.1	6.1	6.1	14.6	200	

注：资料引自《土工合成材料工程应用手册（第二版）》。

土工膜的耐久性是工程技术人员最关注的问题。聚合物土工膜的损坏原因可能由于：① 反聚合作用和分子断裂使聚合物分

解，因而失去聚合物的物理性能和发生软化；② 失去增塑剂和辅助成分使聚合物硬化发脆；③ 液体浸渍而膨胀甚至溶解，因而降低力学性质增大渗透性；④ 液体浸渍或接缝应力过高而使接缝拉开。

损害聚合物的主要因素有：光、氧、臭氧、热、水分、有害气体（ NO_2 和 SO_2 等）、溶剂、低温、应力和应变、酶和细菌等微生物。其中最重要的是阳光中紫外线辐射的影响。

太阳光中的紫外线是影响高分子材料老化的主要原因，大多数聚合物对紫外线很敏感，会使聚合物分解。在聚合物中掺入炭黑或二氧化钛（ TiO_2 ）粉粒，可有效地抵抗紫外线分解。一般情况下，聚乙烯（PE）土工膜的炭黑掺量占其质量的 2%~3%，研究表明，为了保护聚乙烯免受紫外线破坏，炭黑掺量超过 3%是不必要的，而且会对土工膜的力学性能产生不利影响。这些粉粒对聚合物没有任何化学作用，只起物理作用，即阻挡紫外线，从而保护聚合物。因此重要的是炭黑粉粒必须均匀分布。美国 GSI 将土工膜切成很薄的薄片，放在显微镜下，观察炭黑的分布情况，按炭黑分布的均匀程度将其分为 5 个等级，属于 1~2 级为合格，见图 4-2。

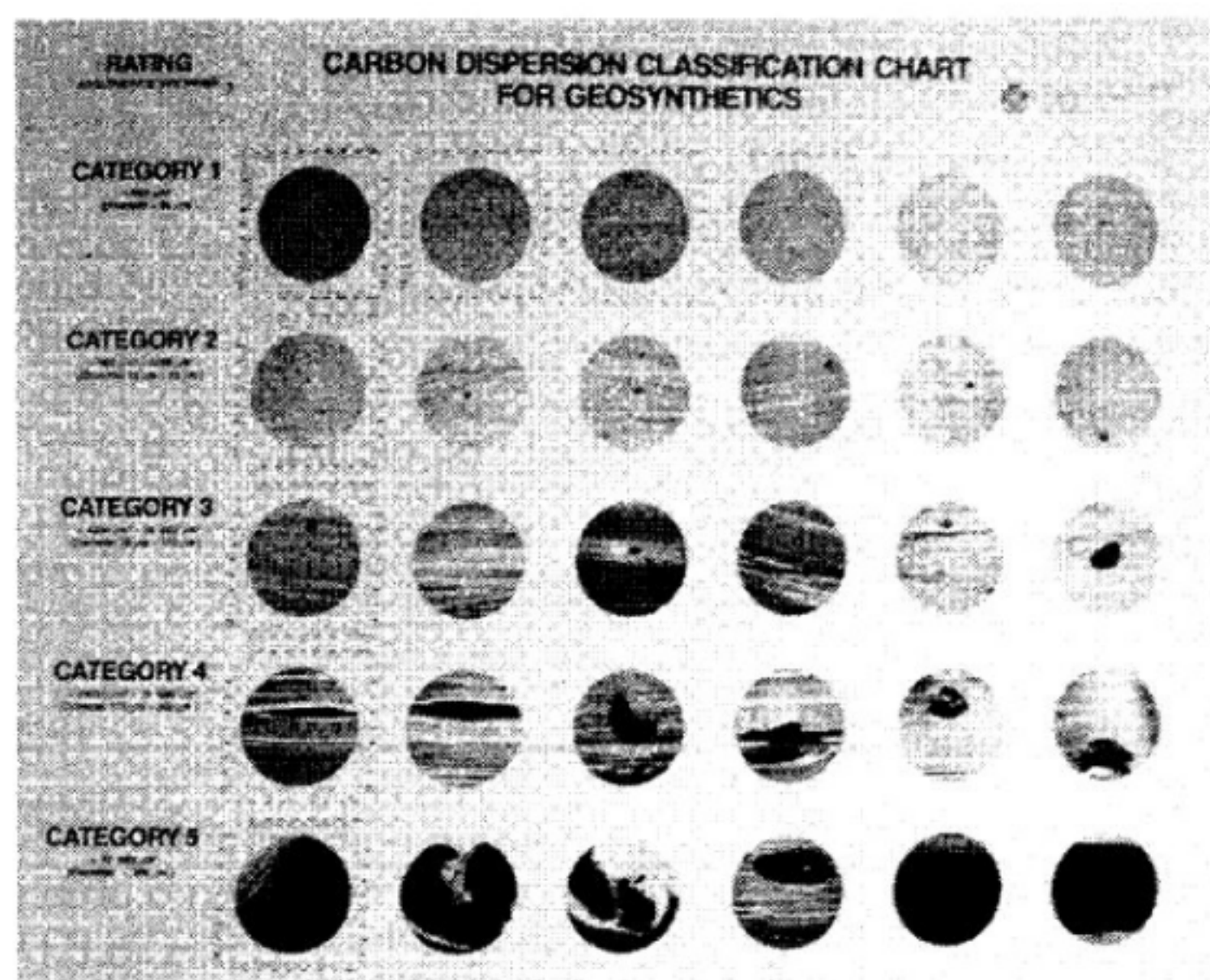


图 4-2 GSI 炭黑分布均匀程度的等级划分

热在高分子材料老化中的主要作用是加速其他因素引起的降解过程，表现为材料的强度和伸长率下降。聚合物的力学性能随温度的不同而发生变化，温度降低，聚合物的柔性降低、质地变脆。温度升高对聚氯乙烯（PVC）土工膜有较大的影响，因为温度升高会加速其增塑剂的挥发。其结果是使暴露在阳光下的 PVC 土工膜变硬，并且最终变脆。另外，增塑剂的损失还使 PVC 土工膜收缩。即使用高质量的增塑剂制造的土工膜，当它直接暴晒在炎热气候的阳光下，只要 3~5 年，就会变得非常脆（Giroud, 1984）。因此对于需要长期使用的 PVC 土工膜，上面必须有覆盖层。

美国、南非和纳米比亚从 20 世纪 60 年代起就较为广泛地采用 PVC 和 PE 薄膜作衬砌和堤坝防渗层，并进行试验室研究和野外试验，得到以下结论：不论在寒冷地区、干热地区，土工膜的强度和伸长率都变化甚微。国外的专家认为，恶劣大气中暴露 HDPE 膜使用寿命至少 20 年；又根据有关实测资料，埋设在坝内的 PE 膜在 15 年中，抗拉强度只降低 5%，极限伸长率只降低 15%。因而可以推估，土石保护下的薄膜使用寿命可达 60 年（按伸长率估算），或 180 年（按强度估算）。

苏联对聚乙烯膜的试验研究及观测认为，埋在土中和水下的土工膜使用寿命可达 50 年，并将此结论采纳到《土石坝应用聚乙烯防渗结构须知》（BCH07-74）的条文中。

一般情况下，PVC 土工膜含有 2/3 的 PVC 和 1/3 的增塑剂。增塑剂是一种时常呈溶剂状的材料，它结合在塑料或橡胶中，能加强塑料或橡胶的和易性、柔性或伸长性。增塑剂的某些成分是挥发性的，并且可随着时间的推移从 PVC 土工膜中逸出，从而使土工膜变硬。PVC 土工膜的耐久性，取决于其增塑剂的稳定性和防渗结构层的设置。

意大利 Lago Miller 坝 1976 年采用 2.0mm 厚的 PVC 土工膜在坝上游面防渗（1500m²），不设防护层，直接暴露于空气中，

运行 19 年后，其中塑性物质含量减少 28%，变得稍硬，其抗拉强度变大，延伸率减小，进行水蒸气的扩散试验发现渗透系数基本保持为常数 $2 \times 10^{-13} \text{m/s} \sim 1 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 。

日本 Imaichi 抽水蓄能电站上水库库底采用 PVC 土工膜防渗，防渗面积为 19.5 万 m^2 ，最大水深 40m。通过对土工膜耐久性的试验，0.85mm 厚的土工膜 10 年后增塑剂流失量为 24.7%，1.2mm 厚的土工膜 10 年后增塑剂流失量为 10.6%，而通常认为在土工膜的设计寿命内增塑剂流失量不应超过 30%，土工膜耐久性试验成果见图 4-3。为改善耐久性能和提高抗穿刺性能，并使软膜的增塑剂流失量减少，因此选用 1.5mm 厚的 PVC 土工膜，认为可以满足 50 年的设计寿命内增塑剂损失不会超过 30%，根据运行后的实测数据，10 年后增塑剂损失仅 5.5%。

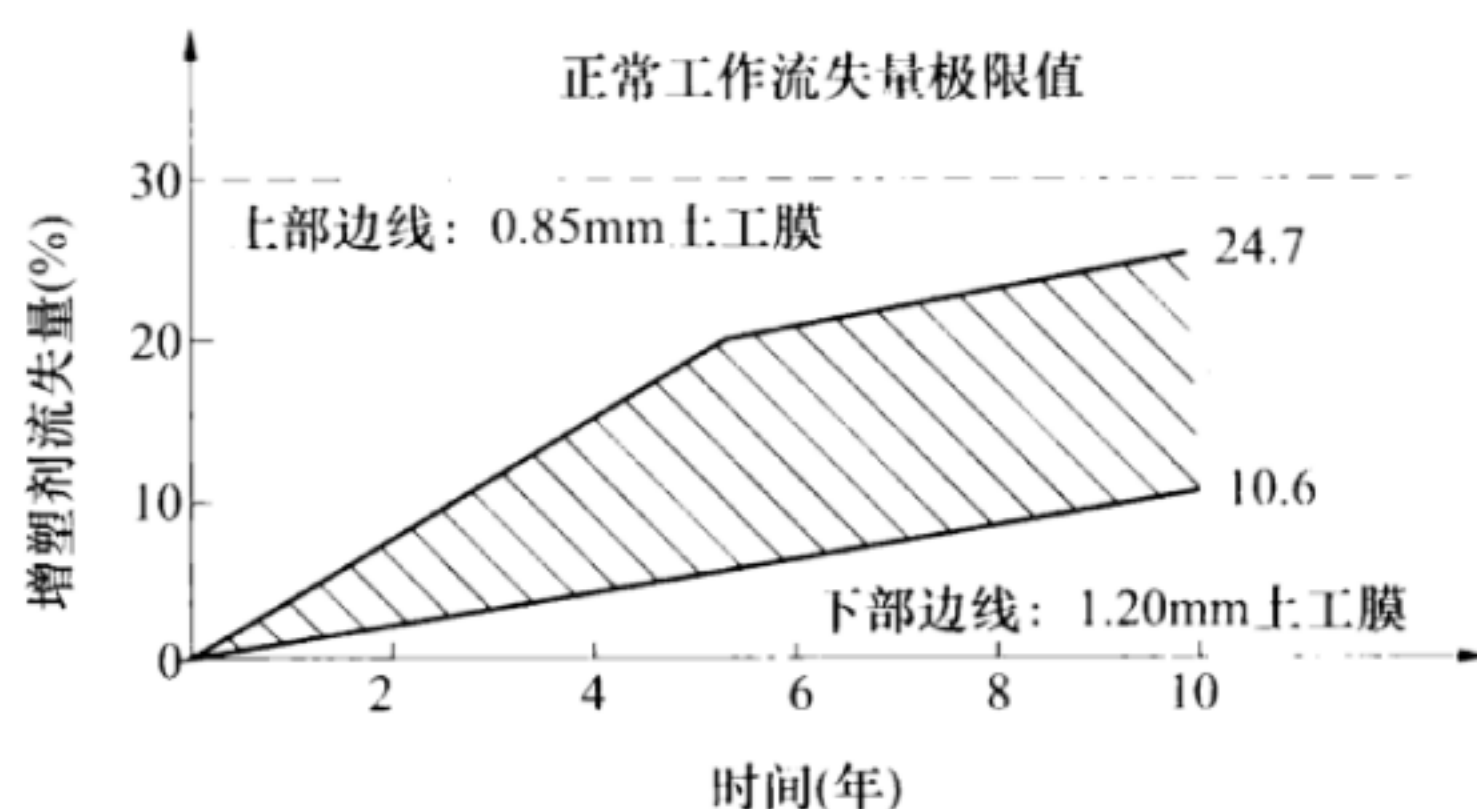


图 4-3 Imaichi 上水库 PVC 土工膜耐久性试验成果

因此，只要采取适当的工程措施，土工膜的使用寿命是有保证的。

另外，苏联规定用于永久和临时的水利工程防渗的土工膜物理力学性能要求可供选择时参考。规定要求：密度 ρ 不低于 9.2kN/m^3 ；破坏拉应力 σ 不低于 10MPa ；断裂伸长率 ϵ 不低于 300%；弹性模量 E 不低于 70MPa ；抗冻性（脆性温度）不低于 -60°C ；所采用的稳定剂的效能应不低于掺入聚乙烯中的 2% 炭黑的效能。

4.2.6 复合土工膜的规格较多，性能指标差异也很大，应根据选用的复合土工膜的结构，材料的种类、规格等具体情况，选用合适的性能指标。《土工合成材料非织造布复合土工膜》GB/T 17642—2008 列出的聚乙烯（PE）复合土工膜强度要求可供参考（见表 4-4）。

表 4-4 聚乙烯复合土工膜强度要求

标称断裂强度（kN/m）≥	5	7.5	10	12	14	16	18	20
纵横向断裂强度（kN/m）≥	5.0	7.5	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
CBR 顶破强力（kN）≥	1.1	1.5	1.9	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2
纵横向撕破强力（kN）≥	0.15	0.25	0.32	0.40	0.48	0.56	0.62	0.70

4.3 土工膜的选择

4.3.2 以不同的高分子聚合物制造而成的土工膜的特性随其类别、制作方法、产品类型的不同而呈现出各自不同的特性，在工程中应用较多的几种主要的土工膜的基本材料性能比较见表 4-5。

表 4-5 几种土工膜基本材料性能的比较

材料性能	氯化 聚乙烯 CPE	高密度聚 乙烯 HDPE	聚氯乙烯 PVC	氯磺化聚 乙烯 CSPE	耐油聚氯 乙烯 PVC-OR
顶破强度	好	很好	很好	好	很好
撕裂强度	好	很好	很好	好	很好
延伸率	很好	很好	很好	很好	很好
耐磨性	好	很好	好	好	—
低温柔性	好	好	较差	很好	较差
尺寸稳定性	好	好	很好	差	很好

续表 4-5

材料性能	氯化 聚乙烯 CPE	高密度聚 乙烯 HDPE	聚氯乙烯 PVC	氯磺化聚 乙烯 CSPE	耐油聚氯 乙烯 PVC-OR
最低现场施工温度	-12℃	-18℃	-10℃	5℃	5℃
渗透系数 (m/s)	10^{-14}	—	7×10^{-15}	3.6×10^{-14}	10^{-14}
极限铺设边坡	1:2	垂直	1:1	1:1	1:1
现场拼接	很好	好	很好	很好	很好
热力性能	差	—	差	好	好
粘结性	好	—	好	好	好
最低现场粘结温度	-7℃	10℃	-7℃	-7℃	5℃
相对造价	中等	高	低	高	中等

注：资料引自《土工合成材料工程应用手册（第二版）》。

从土工膜材料的基质上归类：聚氯乙烯（PVC）、耐油聚氯乙烯（PVC-OR）属于非结晶型热塑性塑料；聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）属于结晶型热塑性塑料；氯化聚乙烯（CPE）和氯磺化聚乙烯（CSPE）等属于热塑性弹性材料。

热塑性塑料（包括结晶型和非结晶型）对温度敏感，都可以进行焊接。非结晶型热塑性塑料对某些溶剂敏感，可采用溶剂来粘接；反之，结晶型热塑性塑料的化学阻抗性高，对溶剂不敏感，故而不能采用溶剂粘接。其中聚乙烯（PE）的熔点为 125℃～135℃，聚氯乙烯（PVC）的熔点为 200℃～210℃，PVC 膜的焊接施工性能比 PE 膜稍差。合成橡胶对温度不太敏感，不能进行焊接，而且对溶剂的敏感性也不高，粘接困难。热塑性弹性材料，当它们是新鲜的材料时，是热塑性材料，这时能够利用热焊或溶剂粘接，经过一定时间后（例如一年，时间的长短取决于环境条件），热塑性弹性材料，就会硬化为合成橡胶，以致对热与溶剂的敏感性大大减小，热塑性弹性材料的土工膜，在设置后要进行修

补是比较困难的。

用非结晶型热塑性塑料、热塑性弹性材料或合成橡胶做成的土工膜，即使用土工布加筋，也都是很柔软的。而用结晶型热塑性塑料做成的土工膜比较硬。

山东泰安抽水蓄能电站防渗土工膜为 1.5mm 厚的 HDPE 膜，根据选材阶段请国内多个厂家进行的复合膜生产试验，HDPE 膜在加热后与土工布复合过程中，边道变形、翘曲严重，使得焊接难以进行。另外，由于两面都粘覆土工布后，对于生产过程中膜上的质量缺陷，难以凭肉眼检查发现，对于建设者（使用方）的质量控制易带来盲区。图 4-4 为复合土工膜皱边现象的照片。

PE 土工膜粘结性能差，一般采用焊接、机械连接（螺栓、金属构件锚固）、嵌固连接形式。因此，在选材时应结合防渗层的连接形式考虑材料的选用。图 4-5 为 PE 光膜焊接施工照片。



图 4-4 复合土工膜皱边现象

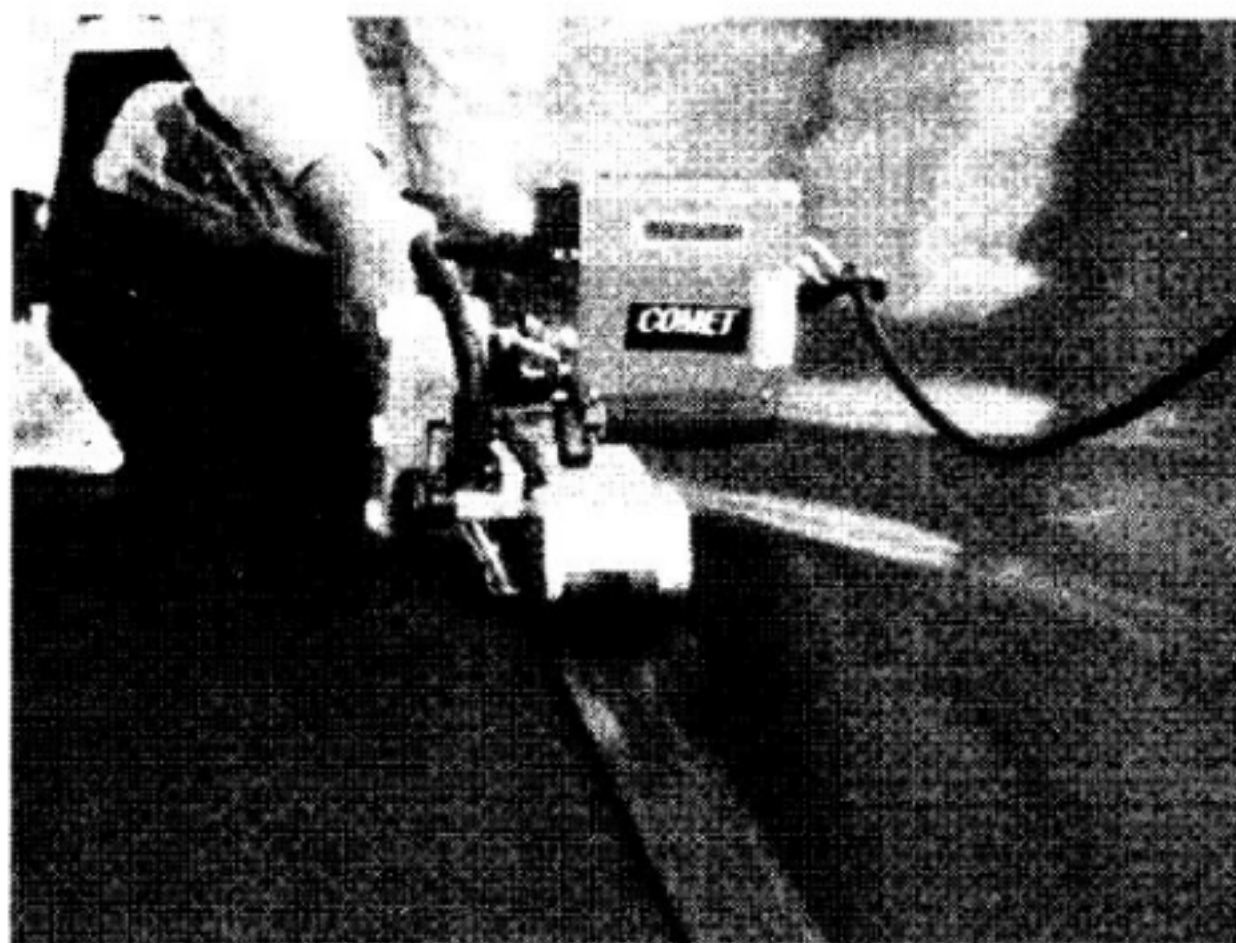


图 4-5 PE 光膜焊接施工

四川田湾河仁宗海电站（装机容量为 240MW）水库大坝，坝型为堆石面板坝，坝面采用复合土工膜防渗，复合膜为两布一膜，规格为 $400\text{g}/\text{m}^2/\text{HDPE}1.2\text{mm}/400\text{g}/\text{m}^2$ ，其表面用厚 12cm 的预制混凝土扣板保护。施工过程中未见有复合膜周边起皱报道。该坝上游坝坡为 1:1.8，防渗最大高度 44m。

4.3.3 在土工膜厚度计算中，一般仅考虑用耐水压力击破确定膜

厚。而土工膜在运输搬运、施工、使用中，还会有其他因素使土工膜产生破损和老化，所以膜厚的确定还应考虑这些因素。由于根据水压力大小用理论计算的膜厚一般较小，实用时需留有较大的安全系数。

4.3.4 土工织物可分为织造型土工织物和非织造型土工织物。复合土工膜一般采用土工膜和非织造型土工织物加热压合或用胶粘剂粘合。非织造土工织物标称断裂强度为 $4.5\text{kN/m} \sim 50\text{kN/m}$ ，宽度一般为 $2\text{m} \sim 18\text{m}$ ，质量一般从 $100\text{g/m}^2 \sim 1000\text{g/m}^2$ 不等。非织造型土工织物的等效孔径为 $0.05\text{mm} \sim 0.20\text{mm}$ ，土工织物渗透系数 k 为 $10^{-3}\text{cm/s} \sim 10^2\text{cm/s}$ 。无纺土工织物在平面内也是导流的，以土工织物的平面渗透系数乘以其厚度表示，厚的针刺无纺布的导水率较高，适宜用作排水体。由于长丝纺粘针刺非织造型土工织物具有孔隙率高、渗透性大、反滤排水性能佳的特点，在水利水电工程中应用很广。大中型水利水电工程使用的复合土工膜中土工织物的规格多采用 $300\text{g/m}^2 \sim 500\text{g/m}^2$ 。

5 结构布置设计

5.1 一般规定

5.1.1 对于中、低高度的土石坝，堤、渠道等水工建筑物，采用土工膜防渗，或采用土工膜进行防渗改造的工程实例，国内应用较多，基本上各省都有，工程规模基本为中、小型，防渗水头大多在30m以下，所用土工膜（或复合土工膜）厚度也大多在1mm以下。

山东泰安抽水蓄能电站为国内大型水电工程首次采用土工膜进行水库防渗，该工程电站装机容量为1000MW，上水库库底采用1.5mm厚的HDPE土工膜防渗，防渗范围为16万 m^2 （约占上水库库底面积的50%），正常运行防渗水头为11m~35m。根据运行6年的监测，库底防渗区总渗漏量为2L/s~4L/s，并且主要是由库底廊道伸缩缝渗水产生，土工膜防渗区基本无渗漏。该工程所进行的防渗方案比较，土工膜防渗比混凝土面板防渗造价节省约200元/ m^2 ，比沥青混凝土防渗节约投资更可观。实际施工节省工期为4~6个月，并且适应地基变形能力强，泰安工程库底填渣最大厚度达50m。其经济性和防渗效果均较好。泰安蓄能上水库土工膜防渗区蓄水前、后见图5-1和图5-2。



图 5-1 泰安蓄能上水库土工膜
防渗区蓄水前



图 5-2 泰安蓄能上水库蓄水后

根据 ICOLD（国际大坝委员会）统计的数据，截至 2003 年 6 月，全球范围有超过 232 座大坝采用土工膜防渗。在国内土工膜用于新建混凝土坝上游面防渗或有缺陷的混凝土坝上游面防渗处理应用不多。但在国外（根据丰满大坝加固方案研究中国水科院所进行的调查）仅欧洲最大的防渗材料制造商瑞士 CARPI 公司，在全世界范围内就承担了 56 座混凝土大坝（新建和改造）采用 PVC 复合柔性防渗材料进行大坝上游面防渗，特别是碾压混凝土坝和混凝土坝防渗改造。如哥伦比亚 Miel I RCC 大坝，坝高 188m；意大利 Alpe Gera 坝，坝高 174m；冰岛 karahnjukar 土石坝，最大坝高 196m；印度尼西亚的 Balambano RCC 大坝，坝高 99.5m；蒙古 TaishirRCC 大坝（2007 年施工），坝高 50m，该坝所处地区极端最低气温达到 -51.5°C ，极端最高气温达到 $+39^{\circ}\text{C}$ ，气候条件恶劣。

以下为一些采用土工膜成功修补大坝防渗的工程实例。

1 意大利 LAGO NERO 大坝修复前、修复 27 年后状况对比，见图 5-3 和图 5-4。

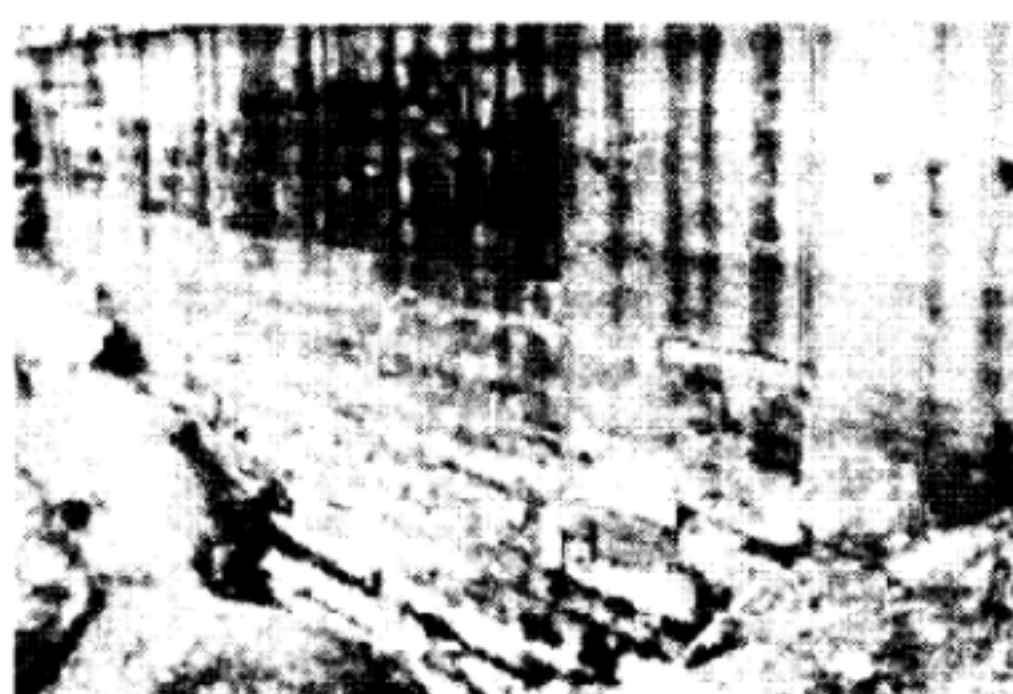


图 5-3 1980 年，大坝修复前，表层混凝土剥蚀情况



图 5-4 2007 年，修复 27 后上游坝面

2 意大利 LARECCHIO 大坝修复前情况及修复后效果对比见图 5-5 和图 5-6。照片可以看出修复前大坝表面混凝土质量低劣，平整度极差，但 CARPI 还是成功为其安装了柔性防渗材料，目前为止，大坝运行良好，后期几乎无需任何维护。



图 5-5 修复前远景照片



图 5-6 修复后蓄水期照片

3 意大利 CIGNANA 大坝修复前及修复 19 年后状况对比见图 5-7 和图 5-8。大坝修复前混凝土质量差、强度低，上游坝面混凝土已经出现严重剥落，CARPI 公司在大坝上游面成功安装柔性防渗材料之后，大坝状况明显好转，至今大坝已安全运行 19 年，几乎没有经过任何维修，为此，CARPI 公司还得到了业主的特别表彰。

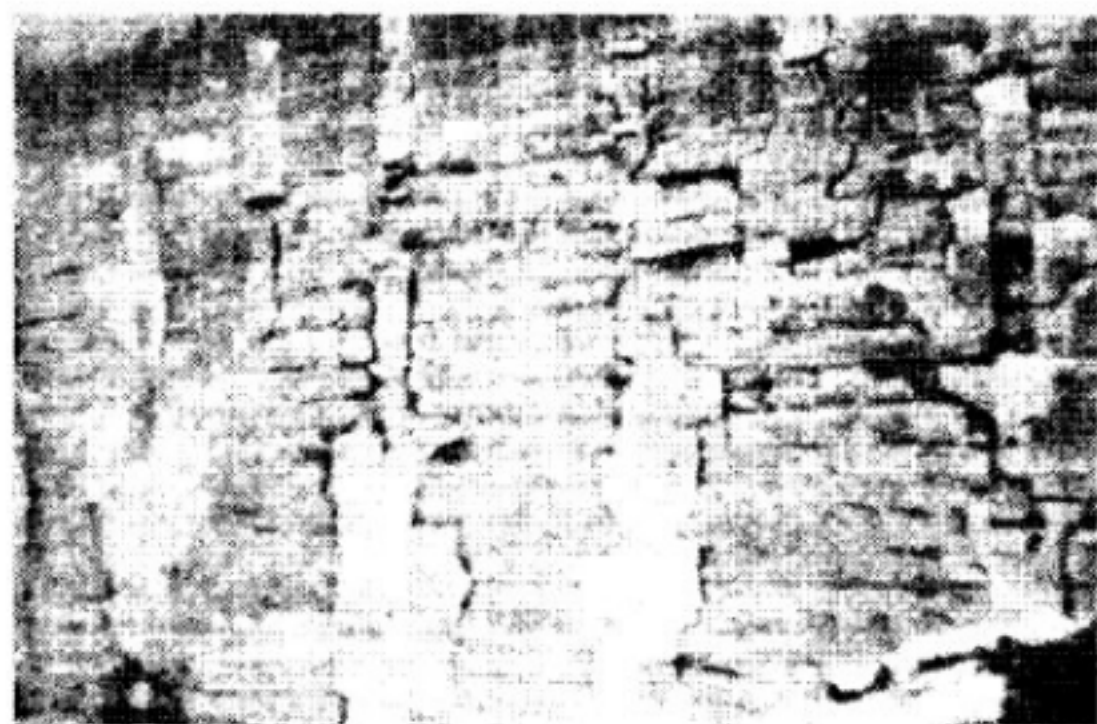


图 5-7 修复前大坝表面局部照片

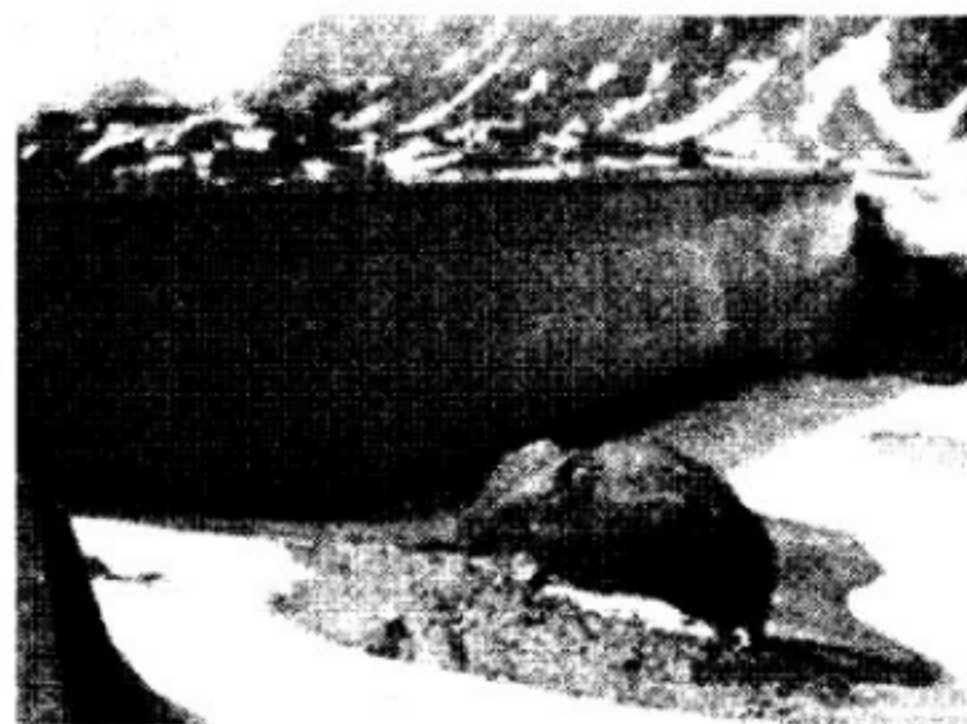


图 5-8 修复 19 年后大坝表现良好

4 美国 SALT SPRINGS 面板堆石坝修复前坝面已严重毁坏（见图 5-9），CARPI 公司对大坝进行了最简化的表面处理，在施工一期，安装 PVC 柔性防渗材料已经完好无损地附和粗糙的大坝表面（见图 5-10、图 5-11），并且能够很好地防止渗水，修补后大坝渗漏量减少了 90% 以上，低于允许渗漏量。此次施工期安排在两个冬季，水库水位较低时进行，没有影响发电。



图 5-9 大坝修复前坝面照片

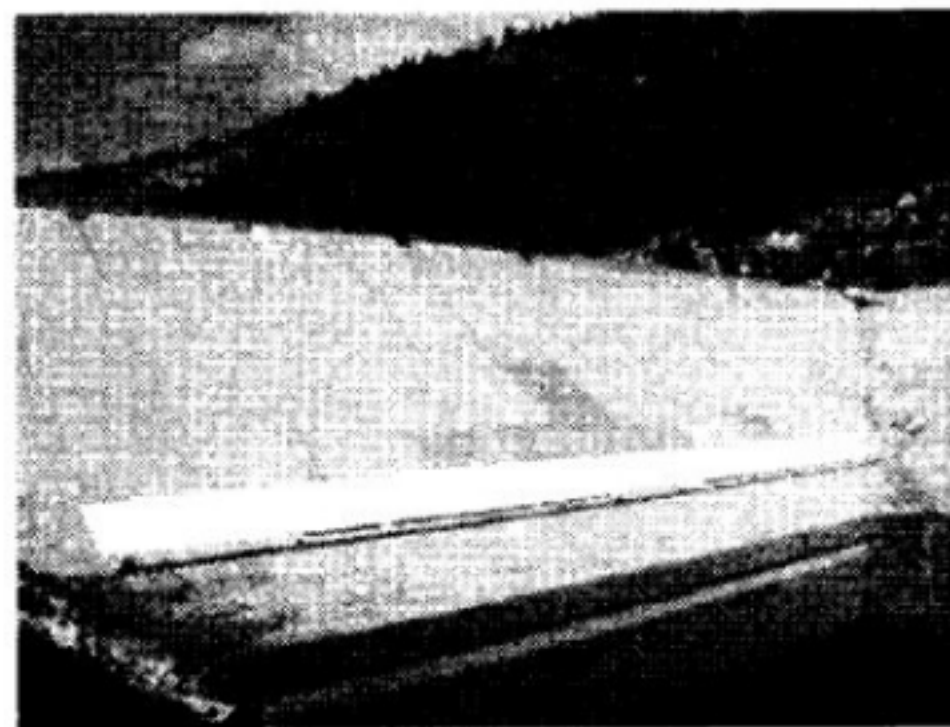


图 5-10 水平安装柔性防渗材料

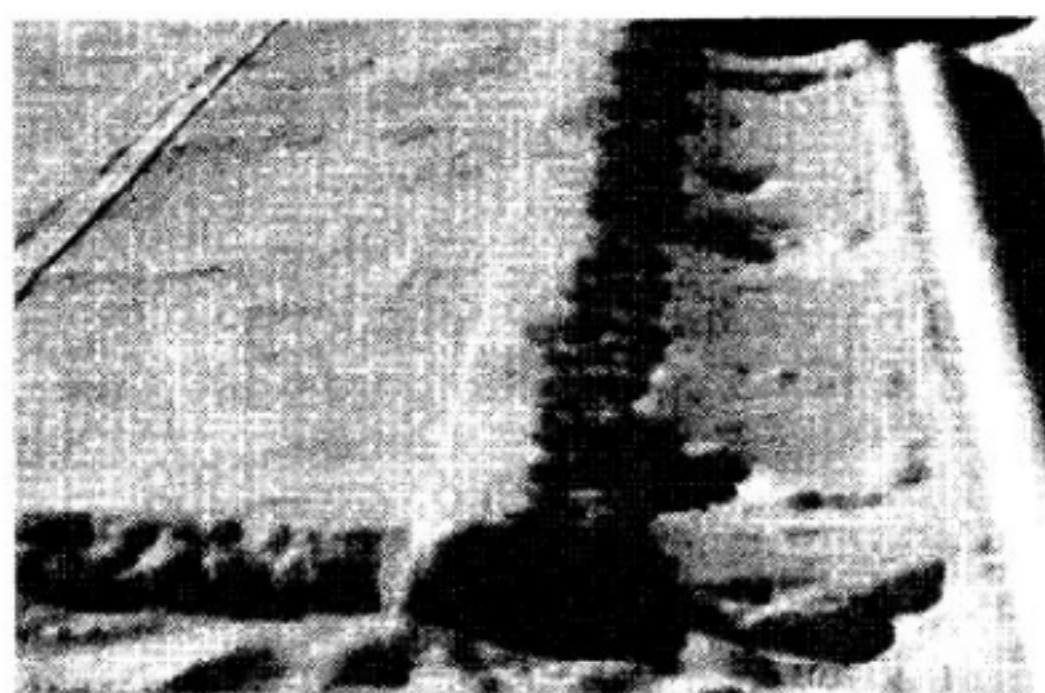


图 5-11 柔料完好附着在粗糙的坝面上

5 印度的 KADAMPARAI 大坝是一座抽水蓄能水电站，总装机容量为 400MW。1999 年，大坝出现渗漏现象，曾在大坝上游面进行局部修补填充及水下化学处理等方式进行防渗（见图 5-12），但在 2004 年大坝出现严重的渗漏现象，渗流量已达到了 38 000L/min。在 CARPI 公司对其安装了 PVC 柔性防渗系统后，2005 年，渗流量减小到 30L/min（见图 5-13）。

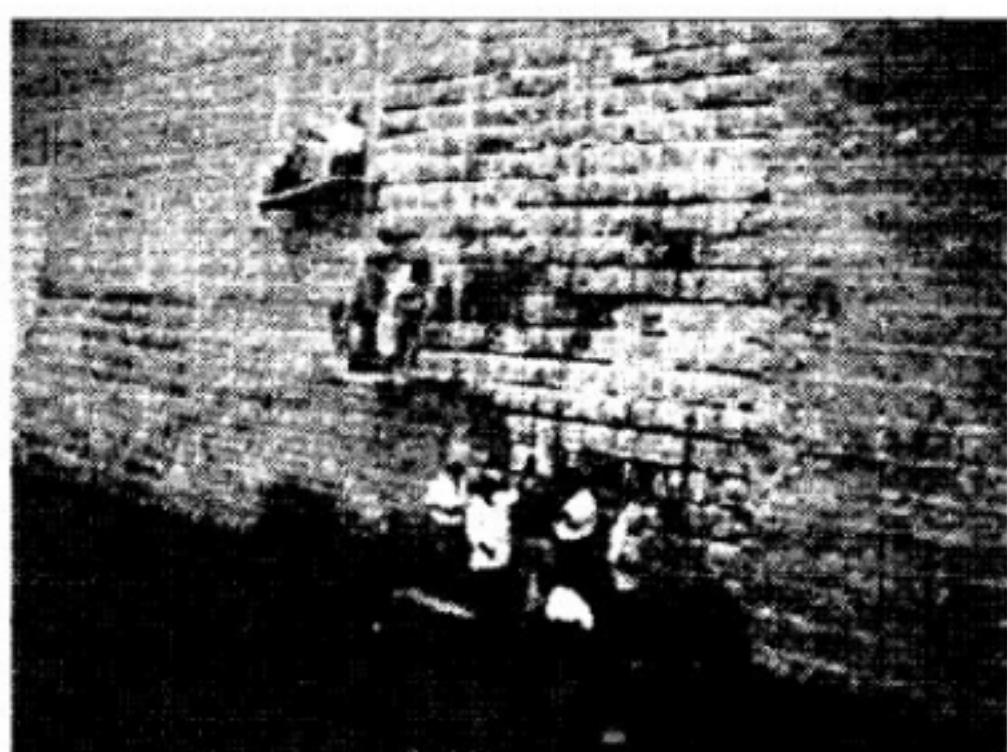


图 5-12 上游面进行局部修补填充

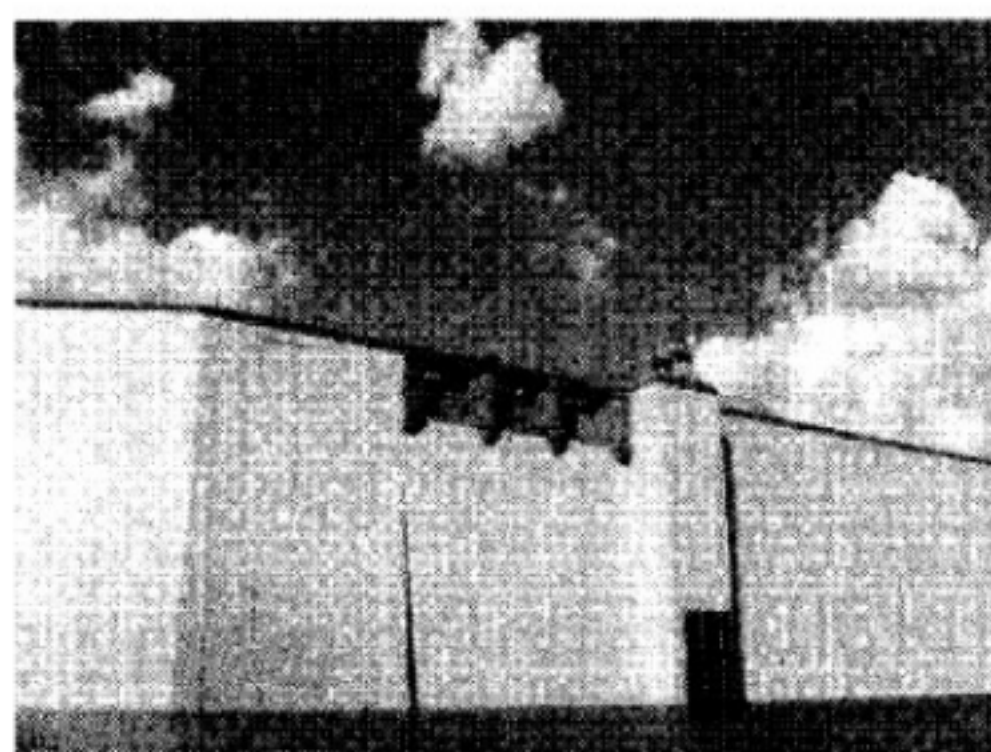


图 5-13 柔性防渗后全景照片

6 法国 Chartrain 大坝修复前情况及修复后效果对比见图 5-14 和图 5-15。

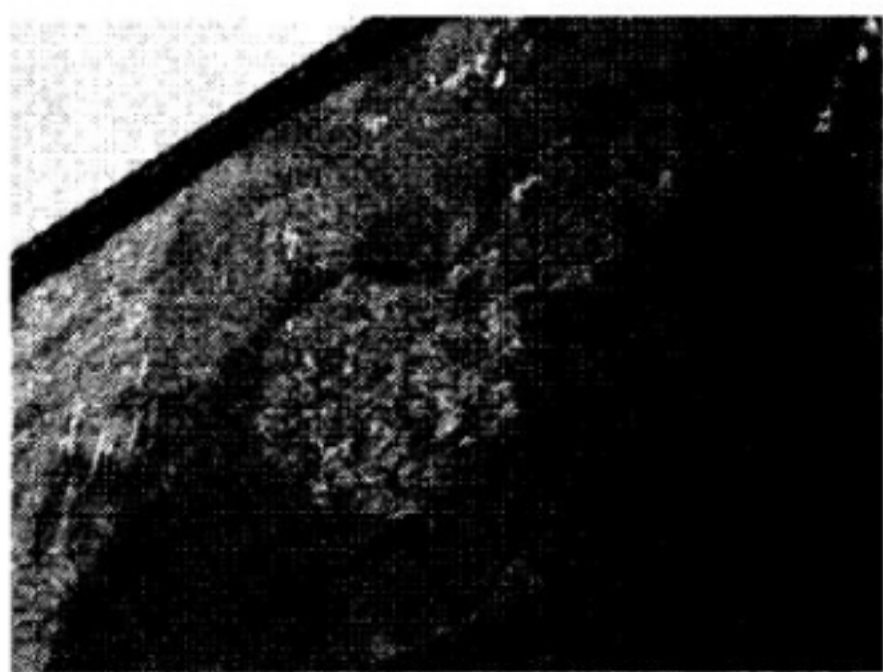


图 5-14 大坝修复前坝面局部照片



图 5-15 大坝修复后整体照片

7 保加利亚 BELI ISKAR 大坝修复前情况及修复后效果对比见图 5-16 和图 5-17。

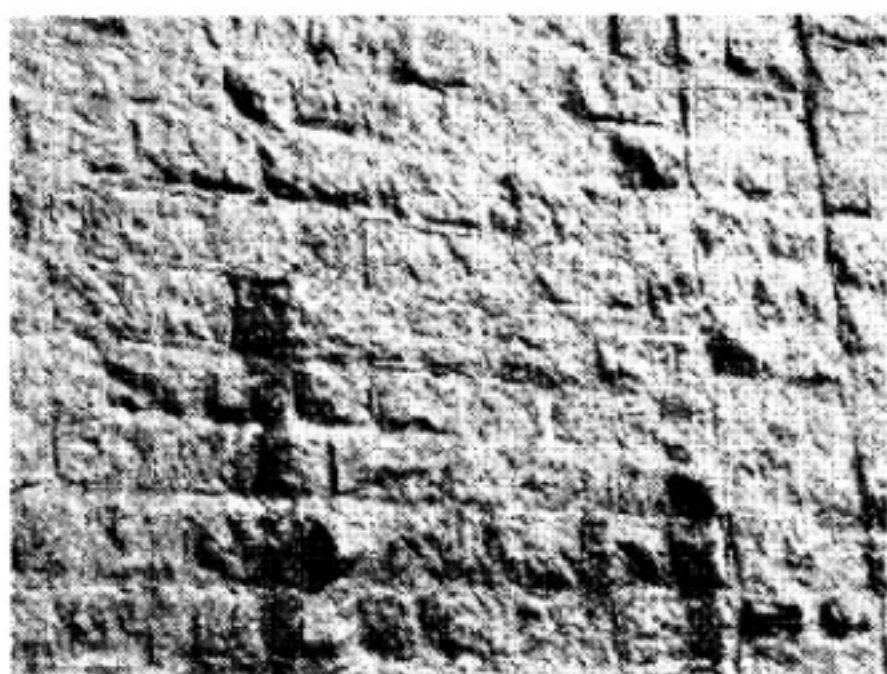


图 5-16 大坝修复前坝面局部照片

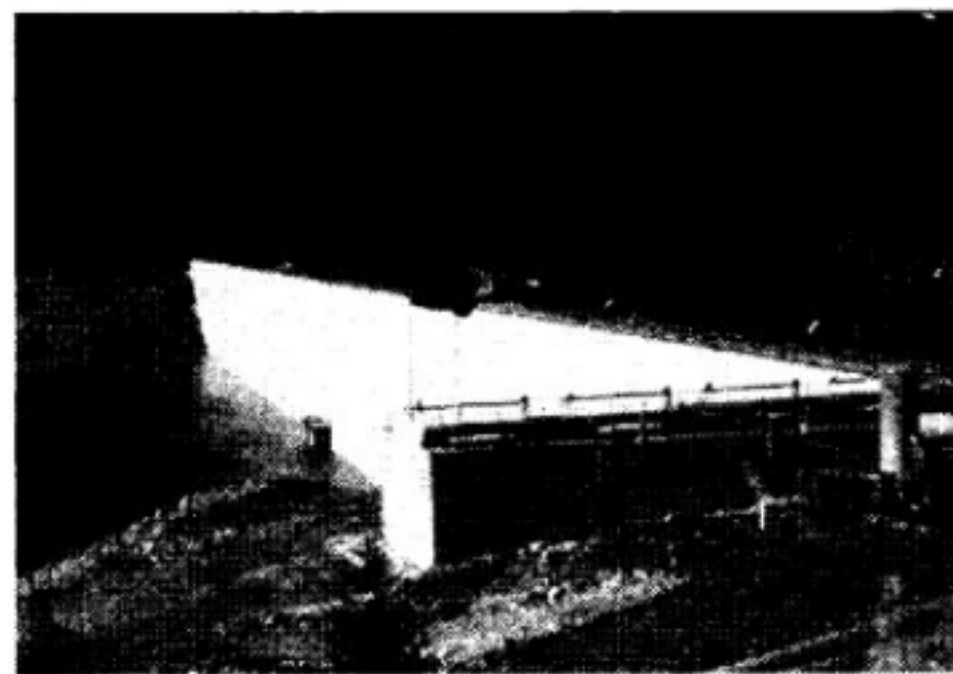


图 5-17 大坝修复后整体照片

8 葡萄牙 Covao do Ferro 大坝修复前坝面情况及修复后效果对比见图 5-18 和图 5-19。



图 5-18 修复前坝面局部照片

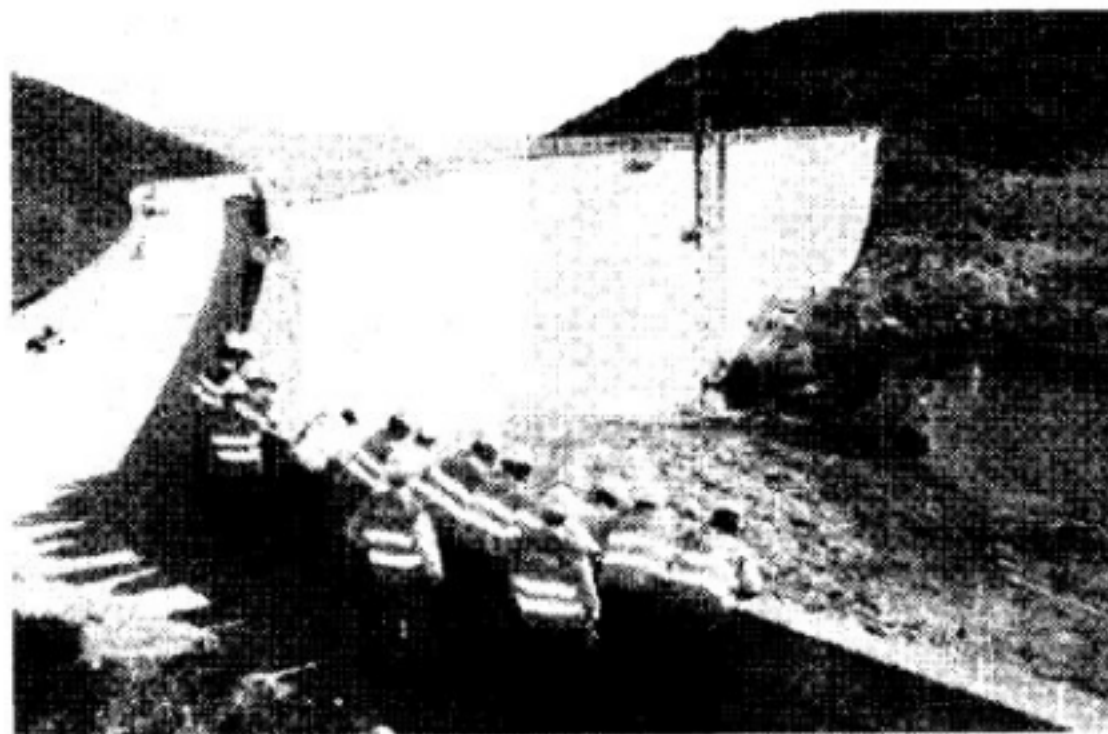


图 5-19 修复后的照片

5.2 防 渗 结 构 型 式

5.2.1 根据美国垦务局的资料，在水坝的上游面还未见到采用土工膜双层防渗的先例。根据调查，国内外土工膜的生产厚度最大可达 4mm 及以上，但由于土工膜焊接机械的最大焊接厚度为 5mm~10mm，厚度过大焊接困难、难以形成质量合格的焊缝。当采用 3mm 厚土工膜时，直线连接处缝厚度为 6mm，丁字形连接处焊缝厚度达 9mm，国内采用土工膜防渗的水电、水利工程鲜有膜厚超过 2mm，即使在国外使用超过 3mm 的土工膜防渗也为少见。尤其对于 PE 膜，该类膜因其硬度大只能采用焊接或机械连接，随着膜厚的增加，硬度增大，当膜厚超过 2.5mm 时，由于其柔韧性差，施工已较困难，连接部位的防渗可靠性降低。对于 PVC 膜，由于其柔性大，可以采用焊接、粘结、机械连接，其连接质量易于保证，根据国外的使用经验，PVC 膜常使用的最大厚度略大于 PE 类膜。

5.2.2 双层防渗的主要作用是减少渗漏量，一般用于对渗漏量控制极其严格的工程，如垃圾填埋场、工业废水废液处理场等，渗漏液将会对环境造成严重影响。利用海水的抽水蓄能电站，其上水库对防渗系统要求也应较严格，否则海水渗入山体，对山体水环境和生态环境也会造成严重影响。

5.2.3 土工膜组合防渗方案也常用在废物处理堆储场上。废物处理堆储场多采用 GCL（膨润土垫，厚约 5cm）代替黏土作为防渗材料。对于在坝体上组合式防渗方案应谨慎使用，若膜下低渗透性层因膜的破损渗漏变成饱和状态，在库水位急剧下降时，土工膜防渗层受水头反压，易顶起或失稳。低渗透层下方的排水尤为重要。

5.3 土 工 膜 厚 度

5.3.1 安全系数的取值参考了以下资料：

- 1 《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》SL/T 225 规定,对于铺盖土工膜防渗厚度,其拉力和应变的安全系数 $F_s=4\sim 5$,如不满足,应选择较厚膜。
- 2 《聚乙烯(PE)土工膜防渗工程技术规范》SL/T 231 规定,采用试验法确定膜厚度时,拉应力和拉应变的安全系数可取 $4\sim 5$ 。
- 3 根据土工合成材料设计手册,苏联全苏水工研究院建议允许拉应力采用极限拉应力的 $1/5$,即安全系数为 5 。
- 4 美国垦务局 1994 年的设计标准,对于土工膜应用于防渗工程未明确规定膜厚安全系数,倾向于采用试验后按条件凭经验确定。
- 5 2003 年 4 月中国水电顾问集团组织的土工膜防渗技术考察团对美国土工合成材料研究所(GSI)进行的技术交流资料指出:美国的做法是对于重要的工程选材,根据基本功能要求并据此做模型试验,确定工程所需的正确数值及材料本身允许的数值,并用上述数据计算安全系数,验算安全系数是否在允许范围内,如果需要则对设计做适当修改。土工膜设计的安全系数一般取 $3\sim 10+$,GSI 推荐按照工程的重要性程度和建筑物的功能(永久、临时)进行分类采用,见表 5-1。

表 5-1 GSI 推荐按工程的重要性程度和建筑物的功能分类表

重要性程度划分	临时工程	永久工程
不重要	中等值	高 值
重 要	高 值	很高值

6 根据欧洲、美国、日本的众多工程土工膜应用经验,均倾向于采用厚膜,一般在 1mm 以上,最厚达 5mm。土工膜用于防渗时,根据理论计算往往膜厚很小,采用不同的计算公式,膜厚相差较大,如山东泰安抽水蓄能工程采用不同的方法计算膜厚为

0.1mm~0.7mm，实际选择 1.5mm。

7 借鉴以上经验，本规范对于膜厚安全系数按照防渗级别进行划分，在应用时，还要结合防渗范围（如防渗面积很大时）及经济性进行试验、分析采用。

表 5-2 列出了一些工程选用的土工膜参数情况。

表 5-2 一些工程选用的土工膜参数

工程名称	工程地点	完工年份	坝高/水头 (m)	土工膜参数
水口水电站上游 围堰	福建	1990	26.55	0.8mmPVC
今市抽水蓄能电 站上水库	日本	1990	40	1.5mmPVC
竹寿水库大坝	四川	1995	60.22	0.55mmPVC
博维拉 (Bovilla) 大坝	阿尔巴尼亚	1996	91	3.0mmPVC
王甫洲水利枢纽 大坝和库底	湖北	1999	10	0.5mmPE
冲绳海水蓄能电 站上水库	日本	1999	20	2.0mmEPDM
泰安抽水蓄能电 站上水库	山东	2006	35.8	1.5mmHDPE
西霞院工程大坝	河南	2007	20.2	0.6~ 0.8mmPE
仁宗海水电站 大坝	四川	2008	44	1.2mmHDPE
锦屏一级水电站 上游围堰	四川	2008	44	0.5mmPE
溧阳抽水蓄能电 站上水库	江苏	在建	51.64	1.5mmHDPE

5.4 防 渗 层 布 置

5.4.2 土工膜用于透水层地基垂直防渗时，受施工因素限制，最大深度一般不超过 20m。透水层地基厚度大于 20m 时常采用混凝土防渗墙，其上部可接土工膜防渗。

土工膜柔性防渗系统可以安装在粗糙但稳固的坝面上。一般来说，表面处理清除坝面上不稳定物质，用混凝土回填或置换必需的部位（蜂窝、狗洞、大裂缝、冻融区等），修整那些多余的且不适合土工膜材料安装的部位。

柔性防渗系统的安装范围很广，根据瑞士 CARPI 公司的资料，对于上游面混凝土破坏严重、平整度很低的大坝，都成功安装了柔性防渗系统，防渗效果显著，并且基本不需要后期维护。这也充分证明了 PVC 柔性防渗材料具有良好的防穿刺能力和拉伸性能。

5.4.4 土工膜与刚性结构连接部位、地形突变处和转角衔接部位，往往变形差较大，应采取适应变形的结构措施，保证结构安全。土工膜与刚性结构连接部位是土工膜防渗的薄弱环节，需研究采用合理的锚固型式，泰安抽水蓄能电站上水库、今市抽水蓄能电站上水库土工膜均采用了两次锚固的型式，以保证锚固的有效性。对于地形突变，应采取适应开挖或回填等工程措施改善地形突变的程度。一些工程设置了土工膜伸缩节以适应变形，但河海大学等单位研究表明，褶皱式伸缩节在水（土）压力作用下不易展开，难以起到设置伸缩节的预期效果。应根据工程实际条件，研究合理的伸缩节型式，并宜采用试验进行验证。西霞院工程对空腔式伸缩节型式进行了研究。

5.5 防 渗 层 连 接

5.5.4 土工膜与地基、周边刚性结构的连接形式按本规范附录 D 的规定执行。各种连接形式的典型工程实例为：

1 山东泰安抽水蓄能电站库底土工膜防渗结构,膜与膜采用双焊缝焊接,土工膜与连接板、库岸趾板、廊道等采用角钢压覆、螺栓锚固的机械连接方式,见图 5-20 和图 5-21。

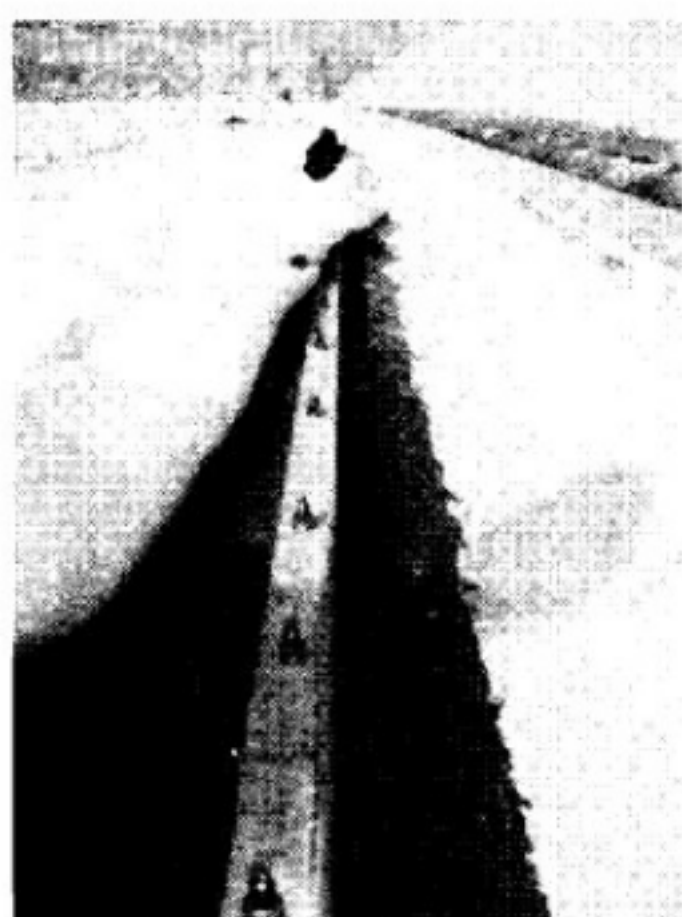


图 5-20 土工膜周边机械连接

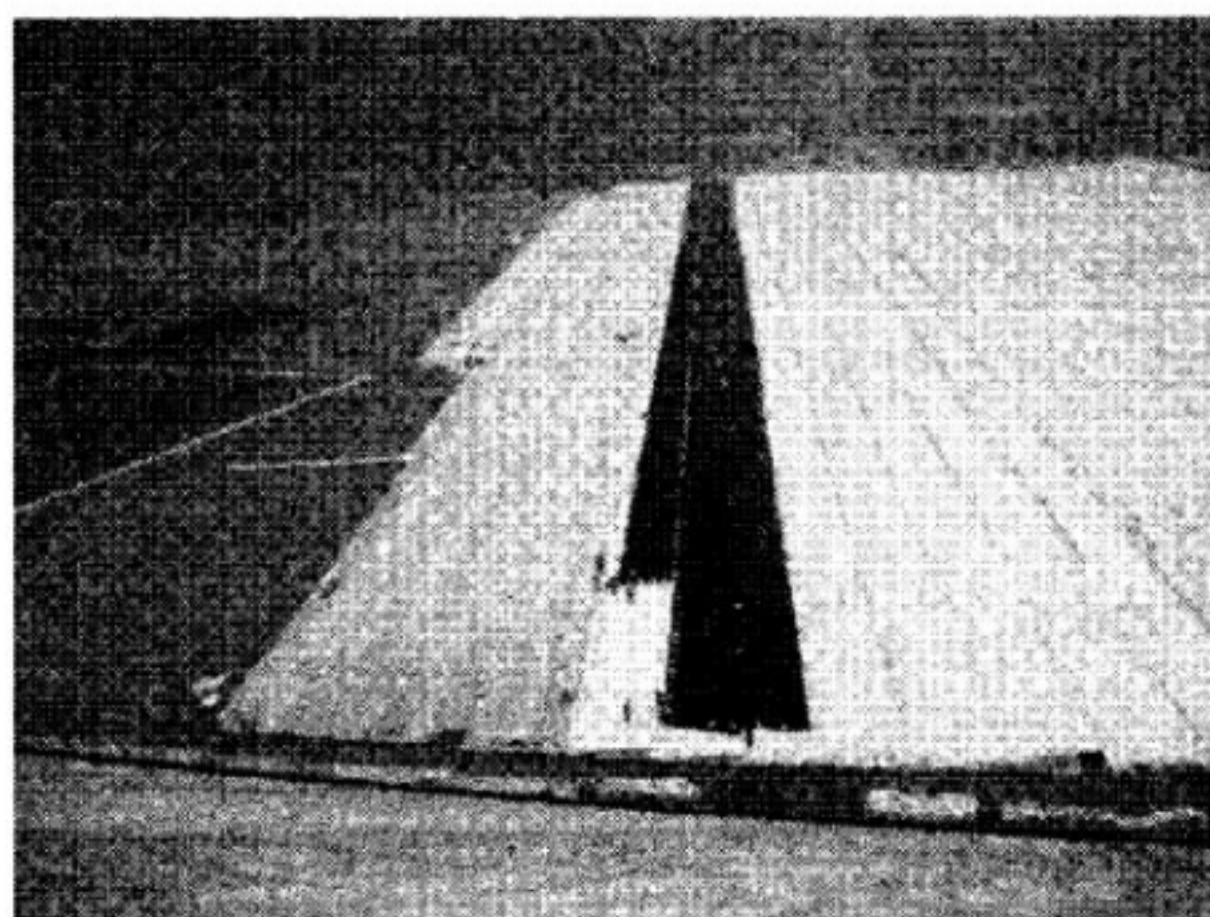


图 5-21 土工膜施工全景

2 采用嵌固连接形式的典型工程为日本冲绳海水抽水蓄能电站,该工程装机容量为 30MW,是首次采用海水循环的抽水蓄能电站,上水库有效库容为 56 万 m^3 ,工作水深为 20m,斜坡面防渗面积为 41 700 m^2 ,底面防渗面积为 9400 m^2 。为防止海水渗漏造成水量损失并影响上水库周边的自然生态环境,故上水库防渗设计要求严格。因此选择具有较柔软和较强耐久性的 EPDM (乙烯-丙烯-二烯共聚物) 作为上水库防渗层的防渗材料,EPDM 膜厚 2mm,见图 5-22~图 5-25。

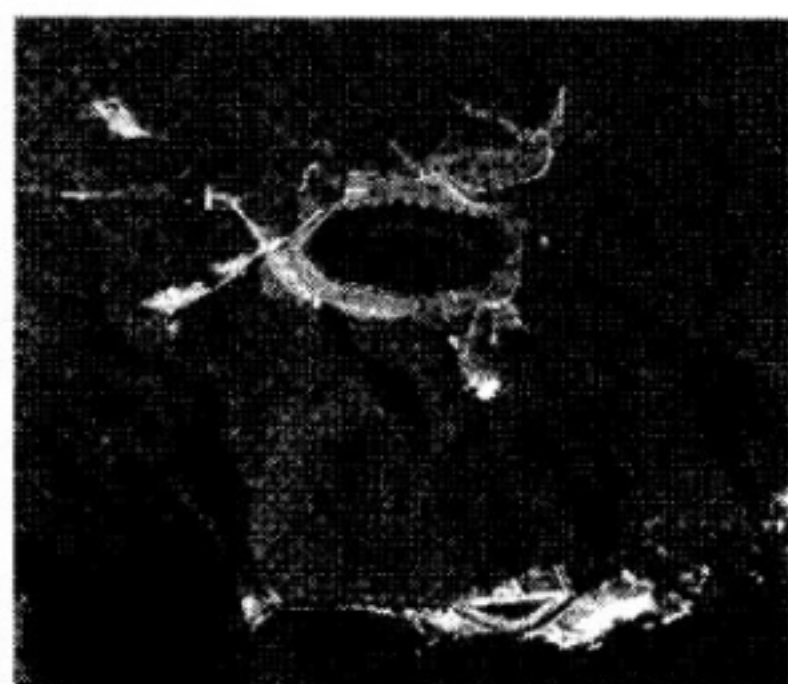


图 5-22 日本冲绳海水蓄能电厂

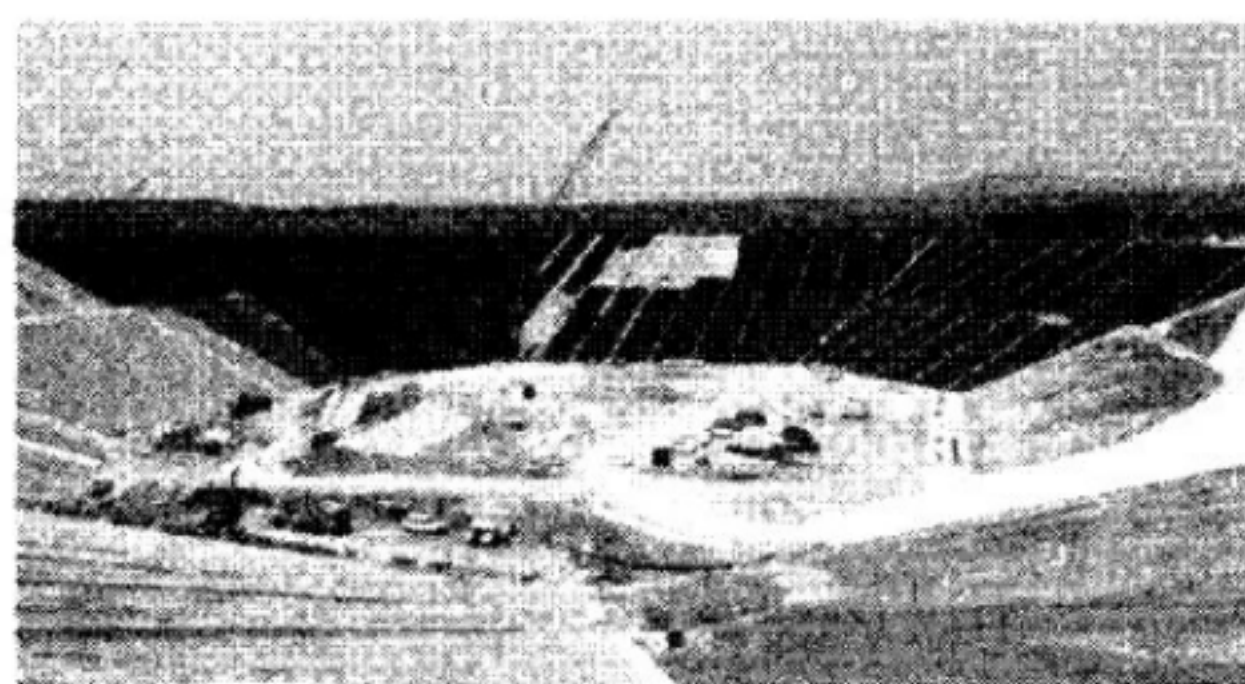


图 5-23 上水库土工膜施工

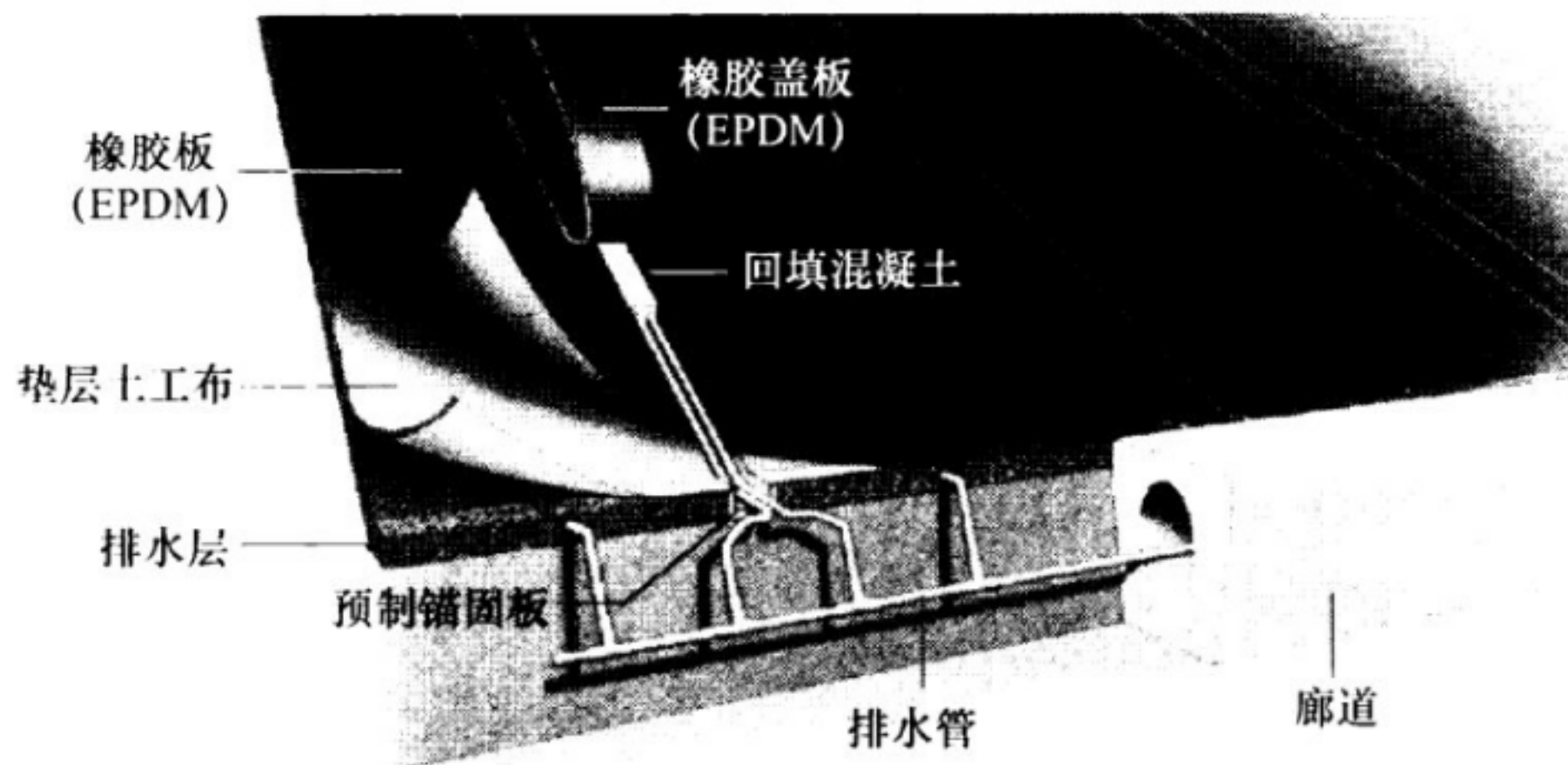


图 5-24 防渗层的结构图

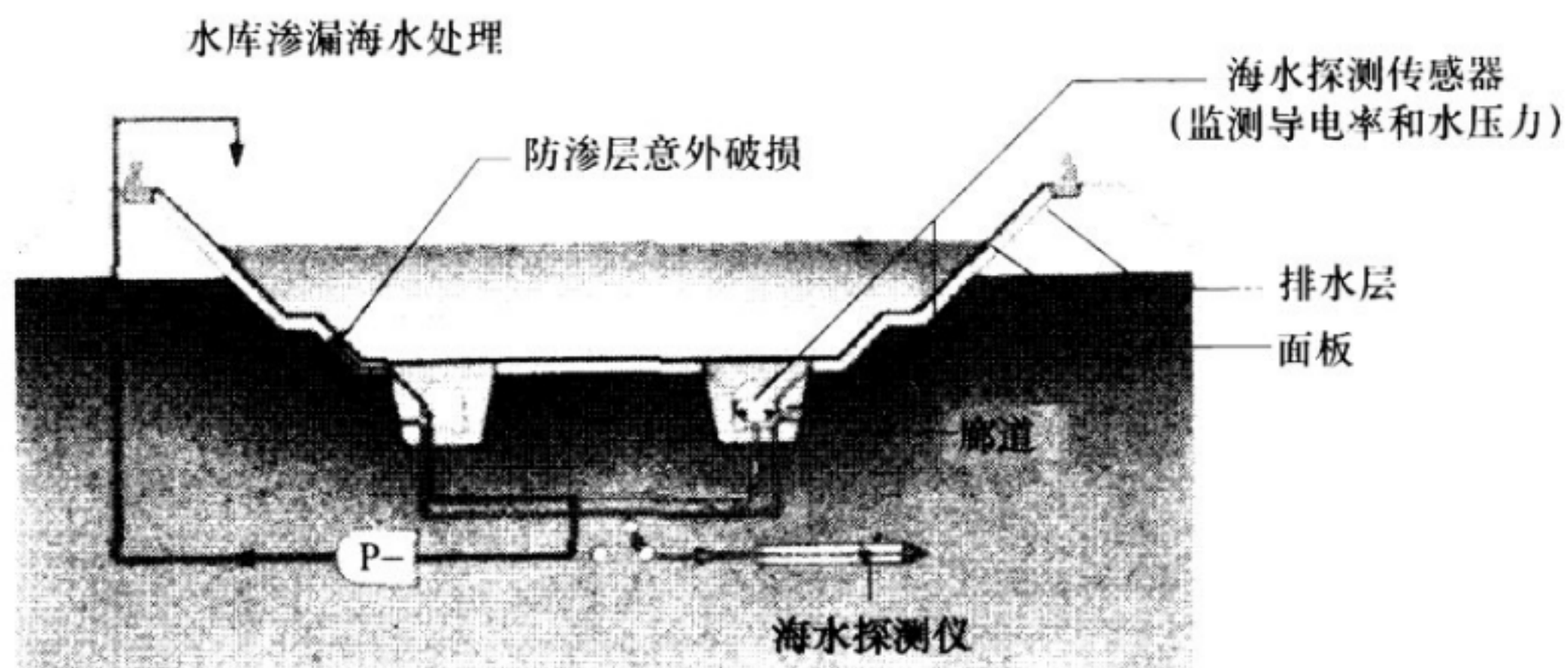


图 5-25 上水库剖面示意图

3 土工膜之间采用机械连接的典型实例如本规范第 5.1.1 条文说明国外的混凝土坝改造工程。当选择植入式锚固时，主承包商可以在浇筑 RCC 墙时同时将 U 形构件植入，这样安装整个防渗系统的时间较短，但是如果不能正确植入，则会不可避免地增加额外费用和时间。而选用外露式构件的优点是不会依赖主承包商的安装技能和速度，并且对浇筑混凝土等土建工程的质量要求也会相对少些。其连接形式见图 5-26。

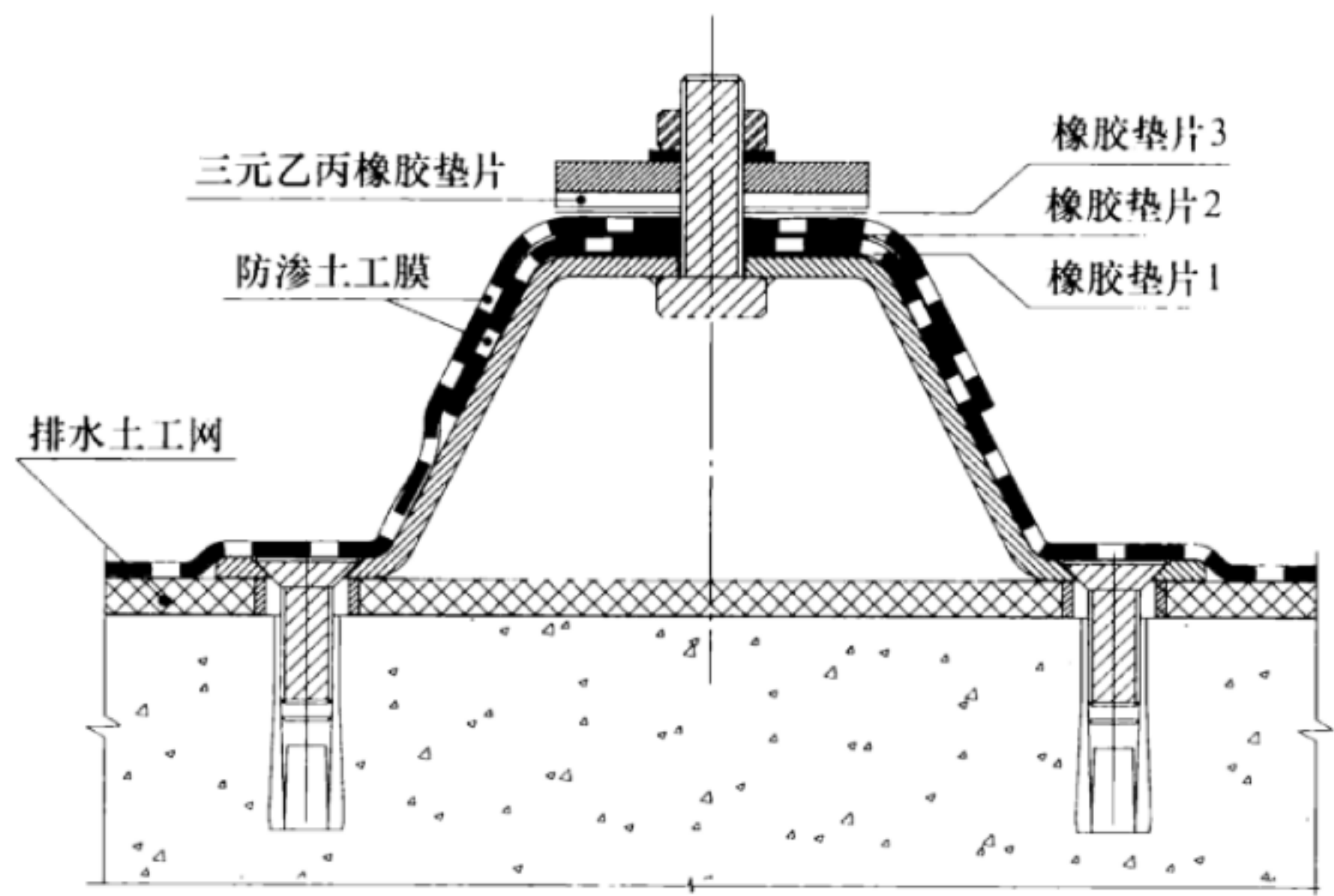


图 5-26 水上安装 PVC 采用的锚固系统示意图

水下锚固系统的外形结构参见图 5-27。在图示装置中，将两层叠置的 PVC 柔性防渗材料的夹紧固定的系统本身具有防水性，不需要额外采用 PVC 压条。其结构是通过两个构件相配合， Π 形构件的收缩可以起到 PVC 复合防渗系统的紧固和排水作用。

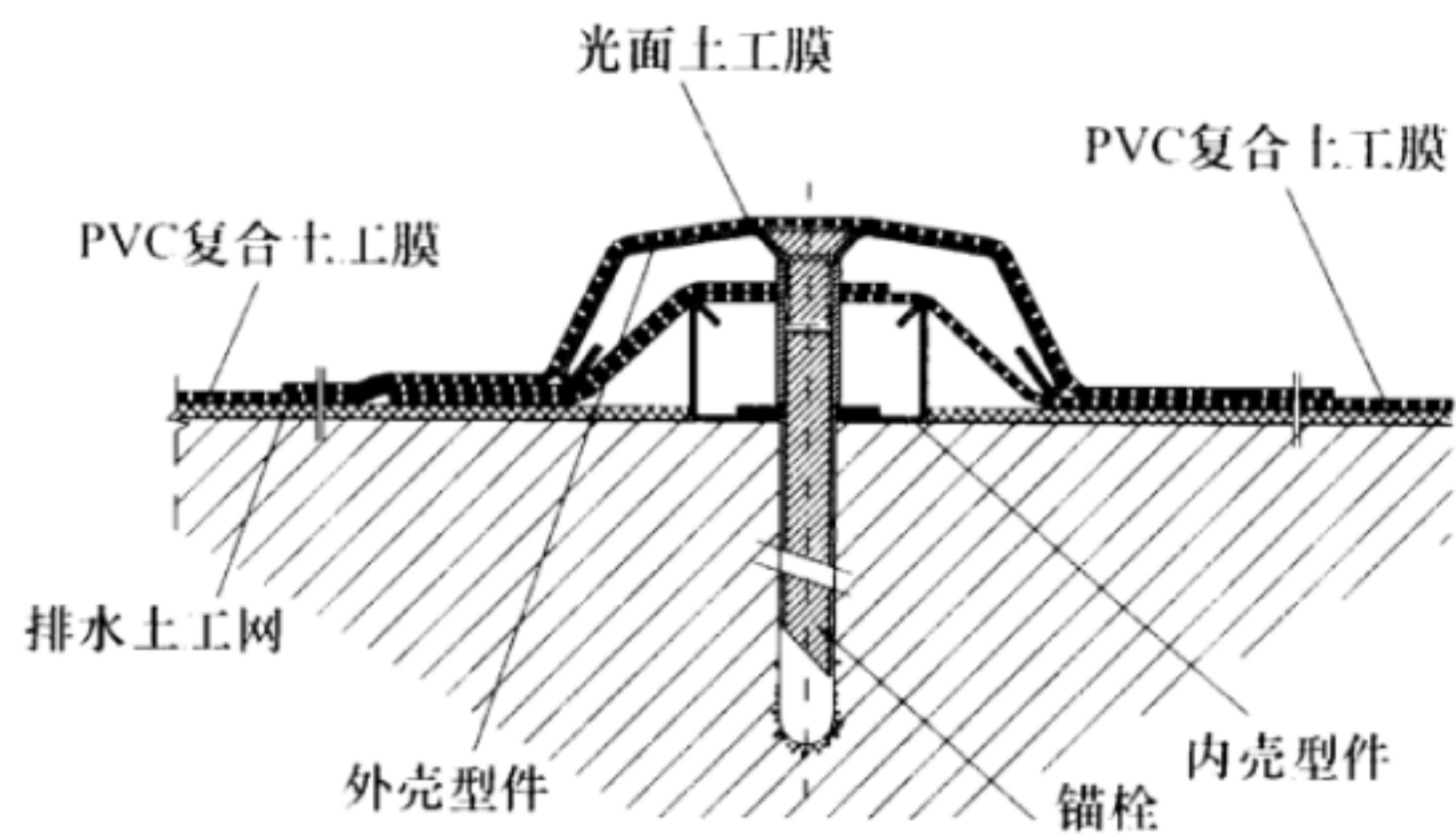


图 5-27 水下锚固系统外形结构图

5.7 上保护层

5.7.1 上保护覆压层的作用较多，主要包括防止太阳光直照，减少紫外线照射老化，减少夏季阳光直射或冬季冰冻产生的大量伸

缩，损伤连接结构；防止人类或动物（如动物夜间通过土工膜到水边饮水等）损伤土工膜；防止水库漂浮物撞击土工膜；防止施工期坠物损坏土工膜；防止施工期大风吹覆土工膜。因此，对于水电土工膜防渗工程，除用于库底防渗外，一般都设置上保护层。

位于水库死水位以下的库底防渗层，当死水位深度大于 5m、水流流速较小时，由于土工膜不需进行紫外线防护，运行中的损害也很小，衬层也不需要压实防止漂浮，上保护层设置可简化。由于土工膜上卧保护层分层多、施工复杂（因为要筛分剔除粒径 $\geq 3\text{mm}$ 的颗粒），施工过程中的施工机械容易损伤下卧土工膜，根据 Nosko 对土工合成物的研究，大多数的破损孔都是在有泥土层覆盖的地方出现（统计占 73%），而不是平常认为的在接缝处，这说明是在施工泥土层覆盖的机械施工损伤所致。而且如果设置砂石类保护层，若土工膜存在渗漏点则寻找及维修非常困难。因此不宜设置土、石类材料全面积压覆。

土工膜防止被风扬起的覆盖厚度，根据理论计算只需上部有 12.5cm 深度的水或 6cm 厚的刚性保护层（如混凝土板），即可防止被 160km/h 的风扬起。山东泰安抽水蓄能电站库底防渗土工膜上保护层仅采用 500g/m^2 的涤纶针刺土工织物，压重采用土工织物袋装砂，单只重 30kg，间距约为 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ 。

5.8 排水、排气

5.8.2 当采用双层防渗结构或膜下黏土层含水量很高时，在高温季节铺设土工膜，受阳光照射，膜下存在施工期排气问题，常采取的做法是通过一边铺设防渗层，一边提早完成上覆盖压重的方法予以解决。止回阀排气法因结构本身易形成渗漏通道，应尽量避免采用。

对于一般的水电工程土工膜防渗结构，国内外通常的做法是设置排水层。膜下排水层可以起到排气作用。

6 防渗层结构和水力计算

6.1 土工膜厚度计算

6.1.1～6.1.2 土工膜的厚度主要由防渗和强度两个因素决定。对一般水利水电工程而言，由于土工膜渗透系数很小，渗漏量的大小往往不是一个关键问题。决定膜厚的主要是后者，当土工膜支撑材料为粗颗粒时，在水压力作用下，土工膜在颗粒孔隙中变形及产生顶破，或被尖锐的棱角所穿刺（图 6-1）。目前，防渗膜均以顶破时产生的抗拉强度加以设计。铺在颗粒地层或缝隙上的土工膜受水压力荷载时的厚度主要有下述四种计算方法，可根据工程实际情况选用合适的计算方法：① 顾淦臣薄膜理论公式；② 苏联的经验公式；③ J.P.Giroud 近似计算方法（1982 年）；④ 美国 GSI（土工材料研究所）算法。

计算公式见本规范附录 A。苏联建议的计算公式直接与颗粒粒径相关，薄膜理论公式和 J.P.Giroud 近似计算方法所建议的计算公式均以颗粒间的孔隙直径加以表示。颗粒间的孔隙直径的选取直接影响着土工薄膜内所产生的张应力，Giroud 建议孔隙直径 $a=0.4d$ （ d 为支撑材料颗粒直径），即表示与薄膜相接触的支撑材料为一颗粒最松散（正方形）排列时的圆孔直径，即 $(\sqrt{2}-1)d=0.4d$ ；顾淦臣建议 $a=\frac{1}{5}d$ ，表示与薄膜相接触的支撑材料为均一颗粒最紧密（菱形）排列时的孔隙直径，即 $\frac{2-\sqrt{3}}{\sqrt{3}}d=0.155d\approx 0.2d$ ；南京水利科学研究院陶同康则建议取两者平均值。当然，土工膜下孔隙尺寸也可根据工程实际情况确定。

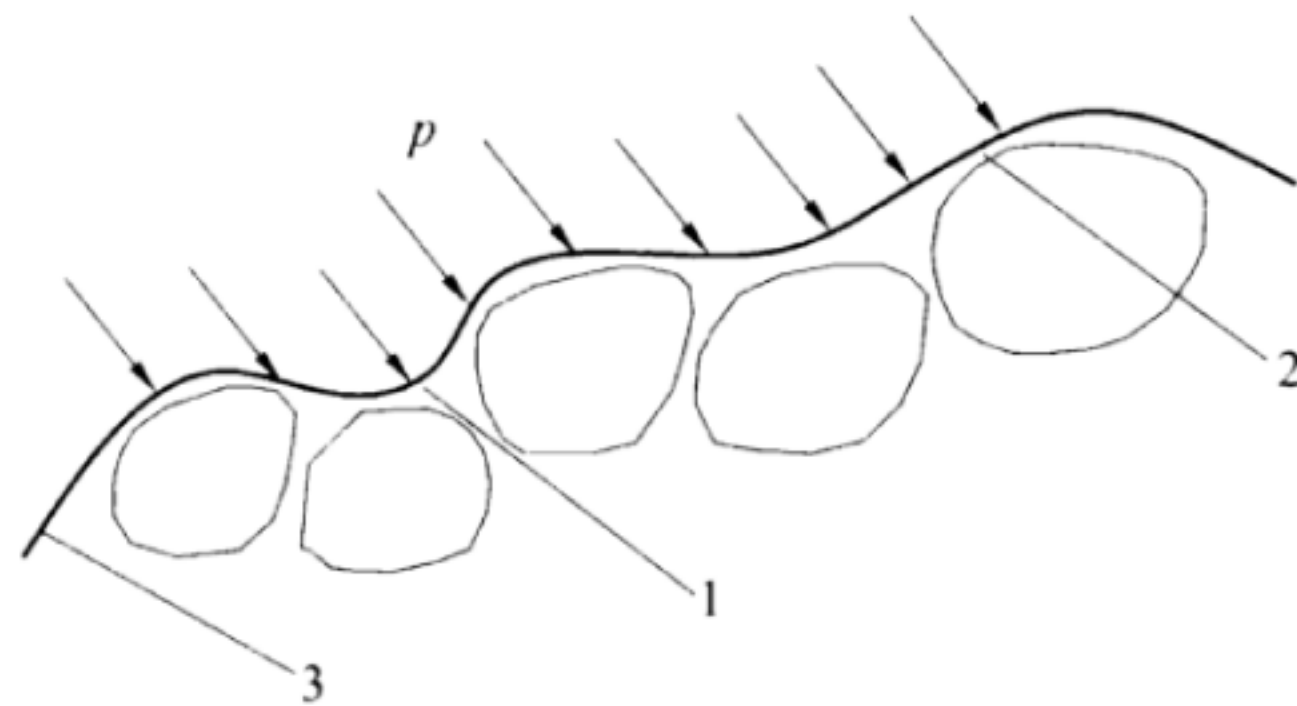


图 6-1 土工膜顶破及刺穿示意图

1—顶破；2—刺穿；3—土工膜

当支撑土工膜的结构物产生了显著的变形，土工膜也可能被拉裂或撕裂而导致防渗失效。因此，对于较高的土石坝及库底填渣结构，由于蓄水后会产生较大变形，尚宜采用以应力应变为基础的有限元法复核膜厚，即用有限元法得出土工膜的工作应变 ϵ_g ，并从土工膜拉伸曲线上查得对应的工作拉力 T_g 。分别与土工膜所能提供的最大应变 ϵ_{\max} 、最大拉力 T_{\max} 相比，可求得各自的安全系数 $F_s = \frac{T_{\max}}{T_g}$ ， $F_\epsilon = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_g}$ 。该法也可应用于各种情况下土工膜厚度的

的计算。有限元计算土工膜膜厚度已在一些工程中得到应用，总的来说，应用还不普遍，但将其与其他方法的计算成果进行对比，分析土工膜的应力应变情况，不失为一种好的途径。

在一般情况下，理论计算得到的厚度常常较薄，原因是理论计算是依据简化条件，公式中包含了很多假定，譬如膜下挠曲的大小与形状是带有任意性的假定；公式也并不能完全反映诸多涉及膜安全的因素。如施工影响、尖角颗粒刺穿、土工膜本身的渗漏特性、土工膜的不均匀性和缺陷；此外，土工膜聚合物中增塑剂的流失也与膜厚有关；膜的抗冲击能力也随膜厚度增加而提升，1.5mm厚的膜比1.0mm厚的膜在耐久性和抗刺穿性能上有显著改善。所以理论公式计算的膜厚是最低要求，实际工程中，可先采用理论计算，并结合工程经验确定膜厚，对重要工程尚应采用设

计的垫层料对选用的土工膜进行耐压模型试验。

6.2 水 力 计 算

6.2.1 土工膜属于非孔隙介质，严格说来，达西定律是不适用的，对于水通过土工膜的输移机理至今有不同观点，但基本同意水可通过扩散方式通过土工膜，动力既可以是膜两侧的水头差，也可以是两侧液体的温度差。

目前，实用中仍采用达西定律描述在水力梯度作用下液体通过土工膜的渗透规律。实验室测得的土工膜的渗透系数大多可达到 $1 \times 10^{-12} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ ，土工膜的渗透系数不是一个固定值，其随所承受的正压力而变化，有关试验研究成果表明：当压力较低时，渗透系数随压力的增加而加大；当压力较高时，渗透系数随压力的增加而减小。故中间存在一个特定压力，对应于最大的渗透系数。关于渗透系数随压力的变化有以下解释：随着压力增加，使渗透系数加大因素有：① 土工膜存在微细的通道，有些是在制造过程中产生，有些则是在一定压力下被冲破而产生，故随着压力增加渗流通道有增多和扩大的趋势；② 随着压力增加，土工膜的厚度逐渐变薄，水力梯度增加。同时，存在使渗透系数减小的因素有：① 由于土工膜的压缩性，土工膜的微细通道有缩小以致封闭的趋势；② 土工膜的厚度逐渐变薄，土工膜的压实导致液体在土工膜中的扩散更加困难。由上述可知，随着压力增加，渗透系数同时存在两种相反的趋势，在持续加压过程中，开始前者占优，后来后者占优。

6.2.2 经土工膜渗漏主要有两种途径：一种是通过完整无损土工膜的渗透；另一种是经土工膜缺陷的渗流。缺陷包括针孔和孔洞。针孔指孔的直径明显小于膜厚的小孔，早期的产品有大量针孔，随着制造工艺提高和聚合物合成技术改进，现在产品的针孔已较少。孔洞指孔的直径约等于或大于土工膜的厚度。孔洞主要由施工中产生，包括：① 土工膜接缝焊粘结不实，成为具有一定长度

的窄缝；② 施工搬运过程的损坏；③ 施工机械和工具的刺破；④ 基础不均匀沉降使土工膜撕裂；⑤ 水压将土工膜局部击穿。合理设计可基本不出现后两项缺陷，合理施工可减少前三项的缺陷，人力施工一般比机械施工缺陷少。施工缺陷出现的偶然性很大，且不易发现。

Giroud 根据国外六项工程渗漏量实测数据的统计分析得出，施工产生的缺陷，约 4000m^2 出现一个。孔洞的大小与施工条件密切相关，接缝不实形成的缺陷，尺寸的等效孔径一般为 $1\text{mm}\sim 3\text{mm}$ ；对于特殊部位（与附属建筑物的连接处）可达 5mm 。其他一些偶然因素产生的土工膜缺陷的等效直径为 10mm ，并提出缺陷的等效直径为 2mm 的孔称为小孔，可代表接缝缺陷所引起的；直径为 10mm 的孔称为大孔，可代表一些偶然因素引起的。

针孔因其甚小，渗流量不大，一般可略而不计，如果要估算，建议按管流考虑，用下列泊谟叶公式（Poiseuille）进行：

$$q = \pi \rho g H_w d^4 / (128 \eta T_g) \quad (6-1)$$

式中： q ——经针孔的流量， m^3/s ；

H_w ——土工膜上下水头差， m ；

T_g ——土工膜的厚度， m ；

d ——针孔直径， m ；

ρ ——水的密度， kg/m^3 ；

η ——动力黏滞系数， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ；

g ——重力加速度， m/s^2 。

孔洞渗流量可根据土工膜上、下接触材料的渗透性分别估算。Brown 等的试验结果表明，如果土工膜膜下土层的 $k_s > 10^{-3}\text{m}/\text{s}$ ($10^{-1}\text{cm}/\text{s}$)，可以假设为无限透水，对通过土工膜上孔的渗漏量的影响不明显。此时可应用 Bernoulli 孔口自由出流公式估算。应该指出：由于针孔和孔洞数目很难确定，孔口渗漏不完全是自由

出流等原因，计算是比较粗略的，因此，计算时可根据实际情况适当留有余地，并应加强工程监测。

以上所述均针对单层防渗膜的情况，对于组合防渗系统，这种情况的渗流是液体先通过土工膜孔洞，然后液体在膜与垫层之间的空间内侧向运动一定距离，最后流入低透水性土而从土中渗漏，故渗漏量的大小与膜和垫层间的接触质量有关，计算方法有精确解析法和简化的 Giroud 近似法两种，这里仅对 Giroud 法简要述及，解析法可参考《土工合成材料工程应用手册》等有关文献进行计算。组合防渗系统多应用在防渗要求严格的垃圾废物填埋场。

Giroud 近似法：

1 一般情况。Giroud 通过理论分析和近似处理，导出了适合于防渗土层 $i_s = \frac{H_w + H_s}{H_s} > 1.0$ 一般情况组合防渗系统缺陷渗漏量计算的经验公式。

1) 接触良好：铺设好的土工膜皱褶很少，低透水性垫层经过压实，具有光滑表面。

$$Q = 0.21 i_{\text{avg}} a^{0.1} H_w^{0.9} k_s^{0.74} \quad (6-2)$$

$$R = 0.26 a^{0.05} H_w^{0.45} k_s^{-0.13} \quad (6-3)$$

2) 接触不良：土工膜有一定皱褶，垫层未良好压实，土面不光滑。

$$Q = 1.15 i_{\text{avg}} a^{0.1} H_w^{0.9} k_s^{0.74} \quad (6-4)$$

$$R = 0.61 a^{0.05} H_w^{0.45} k_s^{-0.13} \quad (6-5)$$

对于圆形孔缺陷：

$$i_{\text{avg}} = 1 + H / [2H_s \ln(R / r_1)] \quad (6-6)$$

式中： i_{avg} ——平均水力坡降；

R ——土工膜下面土内渗透区域的半径，m；

a ——土工膜上孔的面积, m^2 ;

r_1 ——土工膜上圆形孔的半径, m ;

H_w ——土工膜上水头, m ;

k_s ——土工膜下面土层渗透系数, m/s ;

H_s ——土工膜下面低渗透性土层的厚度, m 。

2 当 $H_w \ll H_s$ 时, $i_s \approx 1.0$, 则:

1) 接触良好:

$$Q = 0.21a^{0.1}H_w^{0.9}k_s^{0.74} \quad (6-7)$$

2) 接触不良:

$$Q = 1.15a^{0.1}H_w^{0.9}k_s^{0.74} \quad (6-8)$$

应注意: 上面的公式均为经验公式, 两侧量纲不统一。

6.2.3 排水层可采用土工织物、碎石垫层、排水管网等, 当采用土工织物作为排水层时, 其透水能力与孔隙大小、分布情况及厚度有关。影响这三个条件的因素除制造工艺和单位面积质量外, 还有很重要的一个因素即土工织物所承受的法向压力大小, 在压力增大时, 织物因被压缩, 孔隙率与渗透性均将变小。因此, 在排水设计中应当考虑在实际荷载作用下的变化情况, 并给予足够安全度。排水层尚应满足反滤准则, 即保土性、透水性及防堵性要求。土工织物排水层反滤准则可按现行国家标准《土工合成材料应用技术规范》GB 50290 的有关规定执行。

6.3 稳 定 计 算

6.3.1 土工膜斜坡防渗靠近上游坡面, 土工膜与坝体之间的摩擦系数一般小于坝体的内摩擦系数, 因此, 需要计算土工膜与保护层、土工膜与支持层或坝体之间的抗滑稳定性。如果支持层是透水的, 那么土工膜与支持层之间不会有水的滞留, 并由于防渗膜承受上游水压, 使膜与膜后支持层之间产生较大的抗滑阻力, 再

加上膜与坝体的连接固定等因素，膜与膜后支持层之间稳定性一般好于土工膜与膜上保护层之间的稳定性。因此，通常稳定性验算总是针对土工膜与保护层之间进行。

应特别指出：若土工膜后的土层中水位较高，则有可能使得土工膜隆起，并会造成上游坡失稳，故应做好膜下排水层，将滞留水引到排水管道中排除。

6.3.2 一般情况下，水位骤降是最危险工况。

6.3.3 土工膜和土的接触面稳定分析的方法有两大类，一类是传统的刚体极限平衡法；另一类是有限元数值分析法。刚体极限平衡法简单，有丰富的工程实践基础，有限元法在理论上更能反映出土工膜的工作状况及膜体对整个坝体的应力及变形的影响，对重要工程可采用这种方法验算。但目前有限元法在制定抗滑安全系数标准等方面尚不成熟，同时，由于土工膜的厚度很薄，在计算中模拟较困难，再者，实际工作条件下土工膜的应力应变关系，尤其是荷载长期作用下的应力应变关系也需进一步研究。因此，目前有限元法应用经验不多，只能作为刚体极限平衡法的补充。

附录 C 等厚度保护层稳定分析中有以下假定：① 采用无限长坡分析。若保护层的厚度远小于坝坡长度，则这种处理是合适的，且偏于安全。② 水位骤降时，不透水保护层内水位不随之下落，且近似认为渗透力方向与坝坡平行。③ 黏聚力 $c=0$ 。一般情况下，除土工格栅与土之间的黏聚力较大外，土与土工合成材料间的黏聚力一般较小，常常可以忽略不计。

不等厚保护层稳定分析采用滑楔法分析，将下滑力和阻滑力分解成水平分力，然后计算安全系数，这是一种仅满足静力平衡的方法，在某些情况下安全系数与正确值相差较大。因此，对于 1、2 级防渗结构可采用满足力和力矩平衡的摩根斯顿-普赖斯 (Morgenstern-Price) 等方法计算。

不等厚保护层水位骤降时，采用容重变化法计算，该法计算简便，在中小工程中常用，考虑目前土工膜较多地应用于中小型

工程的现状，故仍列入本规范附录中。但有时容重变化法会造成相当大的误差，因此，对于 1、2 级防渗结构应按现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 的有关规定进行水位降落期的稳定计算。

稳定分析时，土工膜与其他材料之间的摩擦特性是一个重要的设计控制指标。根据一些研究成果，土工膜的摩擦特性有以下 4 个特点：

1 界面上的剪切力与位移之间为非线性关系，受所接触土料变形的影响，在峰值点以前的应力与位移关系基本上符合双曲线关系。

2 界面上的峰值摩擦阻力与正应力呈直线关系（通过原点），其斜率为 $\tan\delta$ ， δ 为土工膜与该材料的摩擦角。

3 摩擦角的大小与膜材料的界面特性有关，光面膜与土之间的摩擦系数最小。

4 在一般情况下，水下摩擦角比干燥时小 $2^\circ \sim 5^\circ$ 。

表 6-1～表 6-5 所列数据（引自《水利工程土工合成材料应用技术》），可供设计参考。

表 6-1 土工膜与其他材料之间的摩擦角（°）

土工膜	砂			土工织物				混凝土	
	I $\phi=30^\circ$	II $\phi=28^\circ$	III $\phi=26^\circ$	针刺 C2600	热粘 Typer3401	丙纶纺 织 Polyfil terx	丙纶编 织 500s	室内 试验	现场 试验
PVC (粗)	27		25	23	20	11	28		
PVC (光)	25		21	21	18	10	24	16.7	13.5
CSPE	25	21	23	15	21	9	13		
HDPE	18	18	17	8	11	6	10		

表 6-2 聚乙烯膜、土工织物与土、砂、混凝土之间的摩擦系数
(成都科技大学)

土工合成材料		黏土		砂壤土		细砂		粗砂		混凝土块		聚乙烯膜 0.05mm		聚乙烯膜 0.12mm	
		干	湿	干	湿	干	湿	干	湿	干	湿	干	湿	干	湿
聚乙烯膜	0.06mm	0.14	0.13	0.17	0.19	0.22	0.23	0.15	0.16	0.27	0.27	0.15	0.14	0.19	0.16
	0.12mm	0.14	0.12	0.22	0.24	0.34	0.37	0.28	0.30	0.27	0.27	0.15	0.14	0.14	0.13
土工织物	250g/m ²	0.45	0.41	0.40	0.43	0.35	0.37	0.35	0.37	0.39	0.41	0.15	0.14	0.14	0.13
	300g/m ²	0.48	0.45	0.47	0.46	0.54	0.55	0.44	0.43	0.40	0.41		0.10	0.15	0.14

表 6-3 土工膜、土工织物与土、砂的摩擦角 φ (°) 与
黏聚力 c (kPa) (Williams.N.D)

材 料	粉质黏土		黏质粉土		黏土		砂质黏土		山砂		河砂		土工织物	
	c	φ	c	φ	c	φ	c	φ	c	φ	c	φ	c	φ
土与土	9	38	12	34	20	23	2	21	0	40	0	36		
氯化聚乙烯	8	38	3	24	13	17	10	19	0	10	0	27	0	23
高密度聚乙烯	8	26	2	23	14	15	14	15	0	18	0	18	0	11
聚氯乙烯	9	38	4	23	14	16	12	17	0	25	0	20	0	19
聚乙烯橡胶	8	22	9	24	10	9	9	17	0	25	0	21	0	16
土工织物	4	32		32	14	30	10	22	0	30	0	26	0	20

表 6-4 土工膜与土工织物、土工格栅之间的
摩擦系数 (Williams.N.D)

土工膜	聚酯短纤维非针刺土工织物 (Tremira2125) 强度 25kN/m	经向聚丙烯、纬向聚酯织物 (Geolon1500)强度: 经 193kN/m 纬 490kN/m	中密度 PE 格栅 (Tensar DN3W) 强度: 44kN/m	尼龙热粘褥垫排水 (Enkadrain) 强度: 纵 16kN/m 横 9.5kN/m
HDPE	0.179	0.165	0.266	0.161
PVC	0.326	0.361	0.261	0.311
Hypalon	0.302	0.359	0.322	0.439

表 6-5 聚氯乙烯、合成橡胶、土工织物与粗砂、砾石、
混凝土板之间的摩擦系数

材料	0.7mm 砂	3mm 砾石	5mm 砾石	10mm 砾石	混凝土板
聚氯乙烯或 合成橡胶	0.532~0.700	0.554~0.754	0.625~0.810	0.649~0.839	0.213~0.240
土工织物	0.488~0.531	0.488~0.554	0.510~0.577	0.532~0.625	

7 施 工

7.1 一 般 规 定

7.1.1 施工记录应包括铺设、焊接、检测、修补等各项内容，记录表格的格式可根据实际需要进行设计。

土工膜施工质量直接关系到水电工程的防渗安全，操作人员的素质对土工膜的施工质量起着关键作用。因此，土工膜施工的操作人员必须要经过培训、考核合格。

培训对象：主要包括连接、修补、检测人员。

培训内容：土工膜质量检查和合格判定标准的认识，土工膜连接、修补设备的操作原理和操作规程，检测设备的操作原理和注意事项、合格标准，各类质量问题的描述和分析、判定。

7.1.6 根据施工经验，土工膜最低在 -18°C 以上可焊接，但土工膜在低温环境焊接后若不及时对焊缝保温，温度骤降容易导致焊缝脆断。环境温度过高，土工膜受高温影响变形量大，施工难以操作。因此，建议土工膜室外焊接环境温度在 5°C 以上、 35°C 以下。若遇特殊环境需要施工，应在施工前进行工艺试验，并采取适当的防护措施。

7.2 下 支 持 层 施 工

7.2.4 下支持层表面是否平整影响到土工膜铺设质量。平整度采用 2m 靠尺进行检测。

7.3 防 渗 层 施 工

7.3.3 土工膜一般采用热压硫化法、粘接法、焊接法连接，具体

连接方法应由设计确定。不同的施工环境，土工膜施工工艺参数也不同，因此需要通过试验确定。土工膜热压硫化法一般适用于工厂内作业。土工膜在现场一般采用焊接法和粘接法。焊接法有热焊接法（热室气焊接法、热楔体焊接法、热合焊接、挤压焊接）和超声焊接法。PE 膜一般不宜采用粘接法连接。不同的施工环境，土工膜施工工艺参数也不相同，需要通过现场试验确定。

7.3.5 土工膜焊接前，现场须选择长度不小于 1m 的小样条试验。通过试验，确定在当前环境条件下焊机的最佳行走速度、焊接压力、焊接温度。当环境条件特别是环境温度发生变化时，应重新进行小样条试验。

7.3.6 为保证 T 形接头处相邻三条接缝能与补丁封闭连接，补丁直径不宜小于 25cm。当 T 形接头部位补丁接缝采用圆形负压真空罩检测时，补丁直径应小于真空罩尺寸。

7.3.8 为减小螺栓与锚固土工膜间的孔隙、减少锚固部位的渗水，规定锚固螺栓轴线、间距偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内。螺栓一般进行拉拔检测，螺母紧固力通过扭力扳手进行检测。螺栓拉拔力、螺母紧固力均由设计确定。

7.4 接 缝 质 量 检 测

7.4.4 土工膜接缝检测方法分有损检测（充气法、剪切、剥离）、无损检测（目测法、真空法、电火花法、超声波法、压力箱法）。为减少土工膜的破坏和修补，现场一般采用无损检测。土工膜与混凝土、基岩等结构锚固可采用压力箱法进行检测。

8 安全监测与运行管理

8.1 安 全 监 测

8.1.2 根据水电水利规划设计总院土工膜防渗专题研究调研小组进行的国外调研，美国、日本等土工膜防渗工程均未见开展土工膜防渗层进行应变、应力状态监测的先例，主要进行了土工膜渗漏量、渗流和老化状态监测。土工膜防渗层结构一般面积大，单点的应变、应力状态对防渗层的工作状态代表性非常有限。国外对土工膜破坏工程的实例调查，其主要是局部破坏占绝大多数，尤其是在连接部位的损坏，如随下支持层的破坏，扩展后影响较大。

我国湖北汉江王甫洲水利枢纽堤坝土工膜防渗工程，曾开展过土工膜应变观测设计和试验，观测表明在施工土工膜上保护砂垫层期间应变值上升 1.7%~2.3%，浇筑垫层上混凝土护坡期间应变值上升约 1.7%，水库蓄水初期应变上升 0.07%~0.13%，其变化值很小。

土工膜材料具有很高的延伸率，并且 PE 土工膜材料具有对粘结材料的不亲和性，应变仪器难以和其粘接后准确进行量测工作。

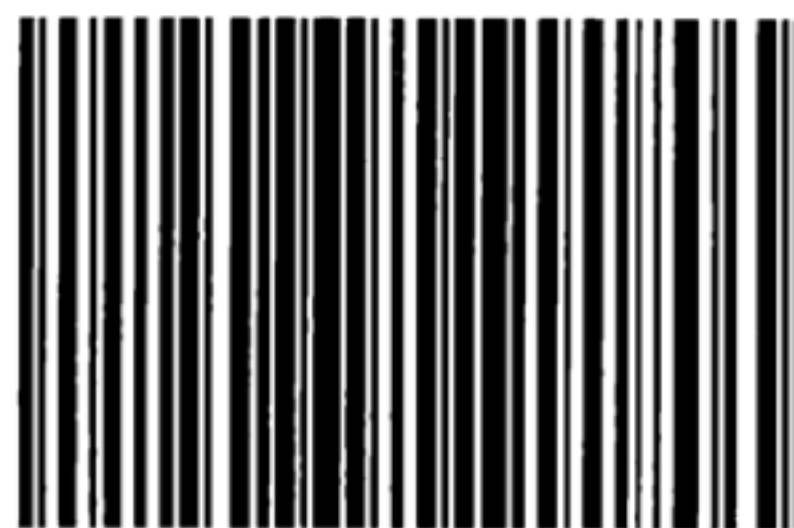
因此，本规范推荐主要进行渗流和土工膜性能老化监测，满足实现安全监测的要求。



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



155123.2228

定价：27.00 元