

DOI: 10.11779/CJGE2016S1001

# 中国水库大坝土工膜防渗技术进展

束一鸣<sup>1</sup>, 吴海民<sup>1</sup>, 姜晓桢<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 中国自 1980s 建设土工膜防渗的大坝水库以来, 历经 30 多年的实践, 建成一批具有代表性的工程; 国内对 PE、PVC 材质防渗土工膜的主要物理力学特性已经掌握, 对防渗膜的结构运行特性研究已取得初步成果, 基于基础力学的设计方法得到普遍应用, 防渗膜结构数值模拟分析水平已有较大提高, 防渗土工膜结构施工工艺趋于成熟, 最近实施的相关设计规范对膜防渗大坝高度的限定基本解除。

**关键词:** 水库; 大坝; 土工膜防渗; 应用原理; 设计计算方法; 施工工艺

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)S1 - 0001 - 09

**作者简介:** 束一鸣(1952 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构方面的科研和教学工作。E-mail: shym@hhu.edu.cn。

## The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China

SHU Yi-ming<sup>1</sup>, WU Hai-min<sup>1</sup>, JIANG Xiao-zhen<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Engineering

Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A series of representative projects of reservoirs and dams with impermeable barrier of geomembrane have been built through the continuing practice for more than 30 years since the 1980s in China. Up to now, the main physical and mechanical characteristics of PE and PVC geomembranes have been known well. The basic achievements have been gained on characters of structure with impermeable barrier of geomembrane. The design approaches based on the basic mechanics have been applied. The analysis ability of digital simulation have been strengthened, and the construction technology has been improved on structure with impermeable barrier of geomembrane. The limitation of height of dams constructed by impermeable barrier of geomembrane has been basically relieved the latest codes and specifications.

**Key words:** reservoir; dam; geomembrane barrier; application principle; design and approach; construction technology

## 0 引 言

土工膜为高分子聚合物制成的薄膜, 主要有塑料类和橡胶类, 实际应用绝大多数为塑料类, 用于水库大坝防渗工程主要是聚氯乙烯 (PVC) 膜和聚乙烯 (PE) 膜, 渗透系数一般为  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  cm/s, 极限延伸率在 300% 以上, 比重在 0.9~1.3 之间, 具有防渗性能高、适应变形能力强、施工简捷、造价低等特点, 是具有强劲竞争力的水利水电工程防渗材料。中国应用土工膜作为水库大坝防渗主体兴起于 20 世纪 80 年代, 此前一二十年主要用于大坝防渗加固工程。20 世纪 80 年代至 90 年代上半叶, 土工膜以 PVC 膜为主, 其后以 PE 膜为主。PE 膜具有质轻、幅宽、价低的优势, 但厚度大于 1 mm 以上显硬, 难以适应复杂运行与复杂施工条件。

与同样兴起于 20 世纪 80 年代、已达到国际先进水平的中国混凝土面板堆石坝和碾压混凝土重力坝及

拱坝筑坝技术不同, 由于国际专利保护及缺乏系统深入的国际技术交流, 中国土工膜防渗大坝筑坝技术在硬、软环境相对不甚完备的条件下摸索实践、持续前行

## 1 土工膜防渗应用原理研究

尽管中国对库坝防渗膜的应用机理研究尚未达到系统的程度, 但长期以来一直从未停顿。从 20 世纪 80 年代开始, 一些研究机构除了对防渗膜的物理力学性能进行测试研究外, 对应用原理也开展了较为深入的研究。

(1) 阶段性梳理、总结

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379069, 51409083); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

收稿日期: 2015 - 11 - 30

在 20 世纪 80 年代, 结合长江三峡工程围堰的前期研究, 对当时国外土工膜防渗大坝的应用及其原理进行了较为系统的梳理和归纳<sup>[1-3]</sup>, 为中国水库大坝土工膜防渗工程兴起提供了应用理论基础; 1994 年出版《土工合成材料应用手册》, 其中关于库坝土工膜防渗工程, 从理论到实践均较为贴切地反映当时的实际技术水平<sup>[4]</sup>, 2000 年又增添新的内容再版<sup>[5]</sup>; 新世纪初, 对国内经过了近二十年发展的库坝土工膜防渗工程技术进行了梳理、总结<sup>[6-7]</sup>, 发挥了承前启后的作用; 2015 年综述了国内外高面膜堆石坝工程技术发展, 对关键技术问题进行归纳、提炼, 为国内高面膜堆石坝发展提供支持<sup>[8]</sup>。

### (2) 土工膜材料特性研究

在 20 世纪 80 年代, 结合长江三峡工程围堰的前期研究, 对高强度的加筋合成橡胶土工膜的物理力学性能开展试验研究<sup>[9]</sup>; 20 世纪 90 年代中国土工膜的品种趋多, 塑料类复合膜应用普遍, 一些研究机构对不同膜型的物理力学特性及其与不同接触材料的界面特性进行了试验, 取得较多测试成果<sup>[10]</sup>; 1993 年由试验获知, 由于膜与织物的变形模量、特征延伸率不同以及两者的复合牢固度不同, 复合膜表现出完全不同的性能。当牢固度为适当值时, 就表现出拉伸变形的“蝉脱壳”效应, 即复合膜最终可获得纯塑料膜的极限伸长率, 十分适合施工期和运行期不同受力变形需求<sup>[11]</sup>; 1998 年试验研究表明, 复合土工膜中布和膜的复合紧密程度对其力学特性有显著的影响, 其中对拉伸特性影响最大, 顶破特性次之, 而对梯形撕裂强度的影响较小; 复合土工膜中膜的变形率对复合土工膜的抗液胀性能产生正相关影响, 而膜的强度和厚度的相关性很小<sup>[12]</sup>。21 世纪初通过对受顶胀面积不同的土工膜与受损伤程度不同的土工膜的液胀试验, 归纳了相应的经验公式<sup>[13-14]</sup>。

### (3) 土工膜防渗结构特性研究

21 世纪 10 年代, 研制了平面双向拉伸试验仪和筒形双向拉伸试验仪, 为面膜堆石坝在运行时面膜处于双向拉伸状态的研究提供平台<sup>[15-16]</sup>, 试验表明, 同一变量下, 双向拉伸的变形模量大于单向拉伸值; 特征应变变量双向拉伸值小于单向拉伸值<sup>[17]</sup>, 以单向拉伸的各项指标去评价双向拉伸状态将逐步改变。

2015 年采用渗透、抗压、抗弯折、直剪试验及局部结构模型试验等方法对拟作为土工膜新型垫层的聚合物透水混凝土的透水性能、基本力学特性、界面抗剪强度及适应坝体变形能力等工程特性进行了研究, 并与水泥无砂混凝土垫层材料的工程特性比对分析表明, 聚合物透水混凝土除具有较高强度和透水性外, 还具有较低的弹性模量和显著的韧性特征, 作为防渗

膜垫层更能适应坝体变形, 避免产生垫层裂缝<sup>[18]</sup>。

通过 130 m×80 m 模拟平原水库不同运行工况时库盘膜下水气状况的监测, 论证了库盘防渗膜浮起失稳的可能性及其排水排气的应对措施<sup>[19]</sup>; 通过研制专用气胀试验装备模拟库盘膜防渗的平原水库初蓄水时土工膜缺陷渗漏引起膜下非饱和土层中孔隙气体聚集、上升, 验证了防渗膜局部隆起变形的气胀现象<sup>[20]</sup>; 基于孔隙中水气二相流的非饱和土固结理论方程, 经假设简化编制的三维有限元程序可进行模拟库盘防渗膜下水气变迁的计算<sup>[21]</sup>; 为解决此类工程问题发生, 正在尝试研制特殊配方可疏导“气爆”现象具有“逆止阀”功能的防渗膜; 2015 年研制了土工膜与逆止阀连接部位拉伸试验与整体密闭性质量检测的装置, 测试表明, 用于南水北调东线某调节水库防渗膜以螺栓连接逆止阀型式可靠, 连接部位强度大于土工膜材料本体强度<sup>[22]</sup>。

## 2 土工膜防渗设计计算方法

### (1) 抗渗设计计算

20 世纪八、九十年代, 水库、土坝防渗加固中坝面铺膜延伸为铺盖的防渗型式采用较多, 1993 年针对复合土工膜坝面铺盖防渗, 从铺盖和透水地基界面的接触冲刷概念出发, 导出了极限铺盖长度和渗流量的计算公式, 根据薄膜理论建立了复合土工膜在其法向应力作用下的顶破强度计算公式<sup>[23-24]</sup>, 2001 年在考虑坝面防渗膜覆土的基础上持续了相关研究<sup>[25-26]</sup>。

20 世纪 90 年代至 21 世纪初, 针对环境工程中低水头防渗膜缺陷渗漏建立了不同透水性垫层的渗流量计算公式、采用非饱和渗流有限元方法分析防渗膜缺陷渗漏膜后的渗流场可供类似工况的库坝防渗膜渗漏分析借鉴<sup>[27-29]</sup>; 通过水力顶破试验归纳了不同垫层颗粒空隙尺寸、PE 膜厚度与液胀极限荷载之间的关系<sup>[30]</sup>; 不同厚度的多种 PE 和 PVC 膜在不同孔径、不同划痕损伤程度工况下的水力顶破试验表明, 膜的液胀强度随着膜的损伤程度增大而减小, 膜的切线变形模量减小, 而最大应变并不随之减小; 得出不同损伤程度的土工膜液胀强度<sup>[31]</sup>。

在 21 世纪 10 年代, 采用概率分析方法展开对坝面垫层上防渗膜受水力顶胀作用进行风险评价的探索<sup>[32-33]</sup>。

### (2) 变形计算与设计措施

基于工程力学、土力学和水力学原理考量防渗膜在结构中的性态及其评价是设计方法的核心内容, 尽管中国在这方面研究还不够全面、深入, 但在不断地进步。

20 世纪 80 年代~20 世纪 90 年代, 1988 年以前对

膜防渗土石结构开展了二维有限元数值计算分析<sup>[34]</sup>；1992 年基于液胀原理的建立了坝面防渗膜厚度计算方法<sup>[35]</sup>，1998 年《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T225—1998) 以折减系数方法给出包括土工膜在内的土工合成材料的设计强度<sup>[36]</sup>。

在 21 世纪初，2004 年阐述了高水头面膜堆石坝防渗膜的夹具效应，防渗膜在平均意义上足以适应最多约为坝高 1% 的坝体位移量，但在周边锚固部位，由于周边基岩或混凝土结构位移量很小，防渗膜随坝体位移在锚固的极小空间内发生相对较大的变形，相当于两个相互靠近的夹具拉伸防渗膜一样，极易产生破坏<sup>[37-38]</sup>，即所谓“夹具效应”；2006 年论述了防渗膜在坝面的变形量应该由防渗膜随坝体位移产生的变形叠加上局部液胀变形的概念<sup>[39]</sup>；防渗膜的温度应力及应力松弛评价研究结果可供工程设计参考<sup>[40]</sup>。

在 2010s，对“夹具效应”的试验论证、原理分析与措施设计的研究持续进展<sup>[41]</sup>；给出了可同时考量坝面防渗膜随坝体位移产生的变形与局部液胀变形以及坝面防渗膜“夹具效应”的数值计算方法<sup>[42]</sup>。

### (3) 稳定设计计算

水库大坝防渗膜的稳定主要涉及坝面防渗膜的抗滑稳定和库盘防渗膜气液顶托抗浮稳定，主要基于极限平衡原理进行分析。

1988 年在文献论述的基础上，建立了坝面防渗膜稳定计算方法<sup>[2]</sup>；2008 年考虑北方寒冷地区冬季水库库面冰层对坡面防渗膜的稳定产生影响，设计计算实践中计入了较大冰压力对坡面防渗膜稳定的作用<sup>[43]</sup>；2010 年在垫层料与复合膜间剪切特性试验基础上，以数值计算方法分析探讨了考虑膜垫层的孔隙水压力对复合膜抗滑稳定性的影响<sup>[44]</sup>；2011 年采用三维数值计算方法模拟涉及坝面防渗膜稳定的界面性态<sup>[45-46]</sup>，2012 年进行了考虑坝面防渗膜界面应变软化特性的稳定研究<sup>[47]</sup>。

## 3 土工膜防渗施工工艺

水库大坝膜防渗工艺具有鲜明的实践性，通过一些具体的工程取得发展，也与当前的建设水平相向而行。

### (1) 铺设工艺

1985 年结合长江三峡围堰工程前期研究，提出了导流明渠快速建造闭气围堰的预埋整幅高强度加筋膜浮起方案的初步工艺<sup>[48]</sup>；2009 年四川田湾河仁宗海面膜堆石坝总结提出了防渗膜非颗粒垫层（支持层）表面处理的工艺、坝基锚固膜与坝面膜幅间错开拼接的工艺、坡陡及风大环境下铺膜防止膜被大风吹动的工艺措施<sup>[49]</sup>。

### (2) 拼接工艺

1993 年云南毛家村土坝防渗完善工程总结了日温差较大地区 PVC 复合膜的现场焊接、现场粘接的工艺，并从现场膜拼接质量控制角度明确指出，即使厚薄不均的膜的厚度大于设计值也不应被允许<sup>[50]</sup>；2007 年黄河西霞院面膜土石坝工程总结提出了厚 0.8 mm 和 0.6 mm 的 PE 膜的焊接温度与环境温度之间的关系曲线、非理想环境下膜焊接的工艺措施、非矩形拼接的复合膜制造工艺<sup>[51]</sup>（3）锚固工艺。

2005 年山东泰安抽水蓄能电站上库库盆膜防渗工程总结提出了膜与混凝土结构锚固的一整套工艺，包括合适的钻孔设备、刚性锚固材料、弹性止水材料、柔性密封材料等，并且总结了现场试验与测试方法<sup>[52]</sup>。

## 4 土工膜防渗原型观测技术

由于防渗膜的变形量比混凝土大得多等原因，防渗膜原型观测技术进步相对比较滞后，开展防渗膜原型观测的工程为数不多。

### (1) 大应变计研制

为满足作为柔性材料的防渗膜的较大变形的原型观测需求，1998 年国内研制了应变量程达 15%~20% 的大变形应变计及相应的胶接材料<sup>[12]</sup>，为大坝水库膜防渗结构原型观测提供了相对便利的条件。

### (2) 防渗膜变形原型观测

1998 年长江三峡工程二期围堰埋设于上游围堰不同高程的 18 支土工膜应变计，有 10 支土工膜应变计均测得 11%~19% 的大应变值，埋设于 0+500 子堰和 0+930 的应变计，在 2000 年和 2001 年夏季汛期中及汛期后，有些监测点的应变陡增到 16%~20% 之间。该工程防渗膜的应变监测结果不仅与围堰构筑时的加载速率相关，并与围堰拆除时所发现的变形情况相吻合<sup>[53]</sup>。

1999 年汉江王甫洲水利枢纽膜防渗工程总结了防渗膜原型观测仪器的布设工艺，设置了 8 个观测断面，共布置复合膜应变计 30 支、复合膜膜下气压计 6 支。由于王甫洲水利工程属低水头工程，所以复合膜累计最大变形量在 3% 以内，且其中最大变形量部分并不发生在蓄水后，而产生于膜上覆盖保护层的施工期；经历过 2 次蓄放水后，膜下气压计压力的增加值为 1 kPa<sup>[54]</sup>，王甫洲工程防渗膜原型观测的有效时段虽短，但其倡导意义较大。

## 5 典型工程

中国已建的具有代表性的膜防渗大坝、水库工程在一定程度上反映了中国这方面的工程技术水平。

### 5.1 四川田湾河仁宗海面膜堆石坝

四川田湾河梯级水电站仁宗海面膜堆石坝，为大

二型工程的1级建筑物。坝顶高程2934 m,坝高56 m,上游坝坡1:1.8,在厚6 cm的无砂混凝土支持层上铺400 g·m<sup>-2</sup>/2 mm/400 g·m<sup>-2</sup>的HDPE复合膜防渗,面积6万m<sup>2</sup>,复合膜上为面积45 cm×45 cm厚12 cm的互扣预制混凝土板护坡。

复合膜与坝顶混凝土防浪墙、坝基混凝土防渗墙、两岸混凝土趾板的连接采用锚固方式。例如与混凝土防渗墙的锚固,中间为镀锌锚栓+槽钢为主、两侧为镀锌膨胀螺栓+角钢为辅的结构,见图1<sup>[55]</sup>。

该工程同样重视施工工艺:铺膜前先将无砂混凝土支持层上的凹坑抹平、将凸点用角磨机磨平;因坡陡风大而改坝面砂袋压膜为槽钢压膜;避免高原早晚温差影响膜的拼接质量而限定膜焊接施工的时段;控制锚固在混凝土防渗墙上的防渗膜与坝面防渗膜的拼接不在同一高程上,见图2。工程于2004年开工,2009年建成蓄水。

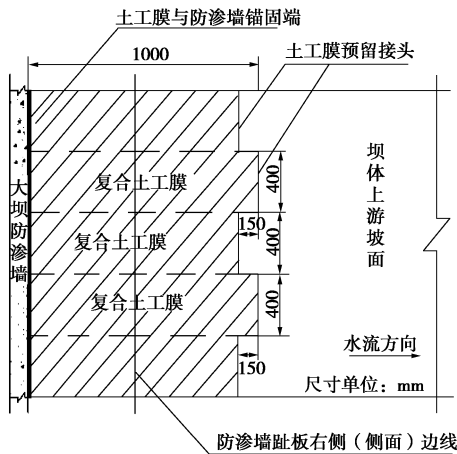


图1 防渗膜与混凝土防渗墙的连接

Fig. 1 The connection between geomembrane and impervious concrete barrier

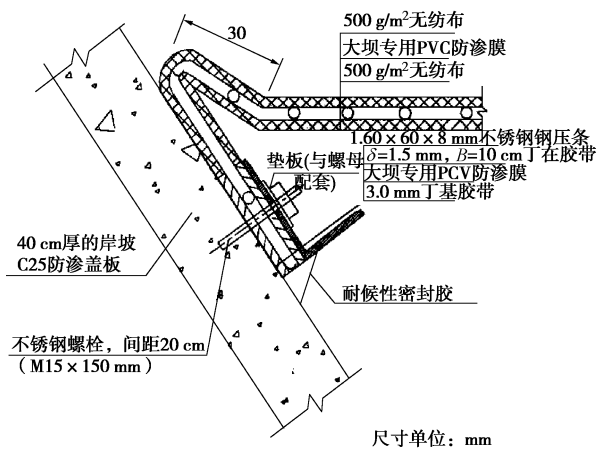


图2 坝基锚固防渗膜与坝面防渗膜的幅间错开连接

Fig. 2 The concavo-convex joints of Geomembranes between on impervious concrete barrier side and on dam face side

该工程特点: 为中国已建最高的面膜堆石坝; 虽

不在大江大河上, 但为大型工程的一级建筑物, 且建在近3000 m高程的高原上; 不仅精心设计, 而且重视施工工艺; 采用厚2 mm的HDPE膜, 施工中操作难度较大。

### 5.2 四川甘孜华山沟芯膜/砾质土心墙堆石坝

位于四川大渡河上游一级支流上的华山沟水电站堆石坝, 坝高69.5 m, 上游坝坡1:1.7, 下游坝坡1:1.6, 最底部一级坝坡稍缓。采用复合土工膜与砾质土心墙组合防渗型式, 砾质土心墙顶厚为3 m, 下部厚24 m, PVC复合土工膜为500 g·m<sup>-2</sup>/2 mm/500 g·m<sup>-2</sup>, 位于心墙上游侧。防渗系统两侧设过渡层3.0 m, 心墙底部坝基设钢筋混凝土垫座。坝基覆盖层厚79~98 m, 覆盖层主要由粉质壤土、粉质壤土夹砂砾(卵)石、砂砾(卵)石及粉质壤土夹砾(卵)石及漂石等组成, 下伏基岩为二迭系上统大包组(P2d)蚀变玄武岩。坝区地震基本烈度为Ⅷ度, 属强震地区。钢筋混凝土垫座下接混凝土防渗墙, 防渗墙厚度为1.0 m, 防渗墙两端嵌入基岩, 河床中间部分为悬挂式防渗墙, 防渗墙最大深度为57.8 m, 达相对不透水的粉质黏土层。复合土工膜与周边混凝土结构的连接锚固型式见图3<sup>[56]</sup>。

大坝防渗方案曾考虑采用黏土心墙和沥青混凝土心墙。黏土料不仅运距远、跨越铁道, 且需侵占大量农田, 雨季工期延滞; 沥青混凝土冬季施工需加热保温, 质量难以保证, 且造价高。因地质勘探主要集中在大坝心墙部位, 为避免补充上游坝趾部位的地质勘探资料, 放弃了面膜堆石坝方案, 采用了施工干扰大的芯膜堆石坝方案。工程于2011年建成, 运行正常。

该氯丁橡胶垫板与防渗墙接触的部分墙面涂沥青乳液

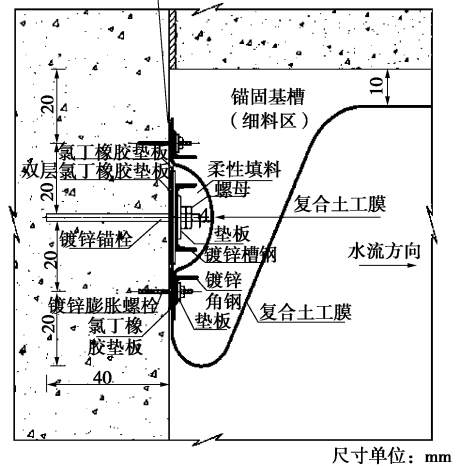


图3 PVC复合膜与周边混凝土结构连接锚固型式

Fig. 3 The type of anchoring PVC geomembrane on impervious concrete barrier

该工程特点: 是中国最高的芯膜堆石坝, 又因气

候、地理等条件限制而突破设计规范的高堆石坝; 面膜型式优于芯膜型式的设计思路明晰; 采用厚 2 mm 的 PVC 复合膜符合适应高坝变形需求; 复合膜与岸坡、坝基混凝土防渗墙等锚固连接措施合理。

### 5.3 山东德州大屯平原水库

即将竣工的南水北调东线山东德州大屯平原水库占地面积 6.49 km<sup>2</sup>, 最大库容 5209 m<sup>3</sup>。库区地下水位以上土层平均饱和度 86.9%~94.0%, 地下水位类型为第四系孔隙潜水, 贮存于砂壤土、裂隙黏土的裂隙和粉细砂、中细砂的孔隙中, 地下水位埋深一般 1.1~1.8 m, 库内水位最大变幅达 3~4 m。坝址各土层渗透系数 0.089~13.6 m/d, 属于中等一强透水性, 无相对不透水层。经过与“垂直防渗”和“垂直+水平组合防渗”方案进行综合经济技术比较后, 采用全库盘铺膜防渗方案。围坝总长 8914 m, 为 2 级建筑物, 最大坝高 14.15 m, 迎水坡 1:2.75, 坝面铺设 200 g·m<sup>-2</sup>~2/0.5 mm/200 g·m<sup>-2</sup> 的 PE 复合膜防渗, 全库盘防渗所铺设的土工膜规格与坝面防渗膜相同, 只是聚酯长丝无纺布与 PE 膜分离。为防止库盆防渗膜由于气胀破坏, 在膜上设置压重覆土厚 0.9 m、间距 150 m 设置逆止阀, 膜下间距 75 m 设置排气盲沟<sup>[19]</sup>。

该工程特点: 为目前对膜下土体中水气变迁影响防渗膜抗浮稳定问题开展研究最深入的全坝面、全库盘土工膜防渗的大型地上平原水库工程, 包括开展室内试验、现场试验、数值模拟等项研究。

### 5.4 山东泰安抽水蓄能上库库盘防渗

泰安抽水蓄能电站上水库位于泰山南麓横岭北侧的樱桃园沟内, 工程规模为一等大(1)型工程, 混凝土面板堆石坝, 坝高 100 m, 库盆因强风化石渣填方深度 0~43 m 不等, 为适应不均匀沉降, 采用 300 g·m<sup>-2</sup>/1.5 mm/300 g·m<sup>-2</sup> 的压延法一次复合的 HDPE 复合膜作为库盘防渗体, 计 16 万 m<sup>2</sup>。与库盘防渗采用钢筋混凝土面板相比, 直接投资 0.3 亿元以上, 与沥青混凝土防渗体相比, 节约投资 1 亿元以上, 且施工简便快捷, 膜防渗体施工期仅 3 个月<sup>[57-58]</sup>。

在复合膜与廊道、连接板、趾板等混凝土结构连接锚固工艺的关键施工环节上, 通过现场对比试验, 选择合适的锚固造孔机具及技术性价比优良的锚孔化学锚固剂、确定不锈钢刚性锚固件和弹性止水件及柔性密封剂的规格; 并通过现场承载和防渗检测试验以及大面积施工后的质量抽检保证防渗体的有效可靠。

主体土建工程于 2001 年 7 月开工, 2005 年 5 月蓄水。

该工程特点: 在尚无成熟的设计、施工经验的情况下, 采用科技型施工方式, 通过现场试验选择并完善施工工艺, 是膜防渗水库工程精心施工的范例。

## 6 结 语

中国水库大坝土工膜防渗技术经过 30 多年的探索和实践, 取得了长足进步。

对 PE、PVC 等材质的纯膜和复合膜的主要物理力学特性已经掌握; 对防渗膜的结构运行特性诸如双向受拉特性、坝面周边锚固处夹具效应、与新型垫层材料的界面稳定特性、膜下土体水气变迁对抗浮稳定的影响等项研究已取得初步成果; 基于材料力学、土力学的常规设计方法得到普遍应用; 基于三维有限元分析的防渗膜结构的变形计算水平已有较程度的提高; 防渗膜的坝面铺设、周边锚固、现场拼接工艺正在逐渐趋于成熟; 防渗膜的现场原型观测已经起步, 并越来越得到重视; 完全由中国设计施工的芯膜堆石坝的高度和全库盘膜防渗的水头已处于国际前列; 由国际承包商参与防渗膜结构施工的面膜堆石坝的高度也已处于国际前列<sup>[8]</sup>; 由土工膜主体防渗的碾压混凝土坝有待实践。笔者以前后两个规范对采用膜防渗大坝高度的规定作为本综述的总结: 2001 年实施的《碾压式土石坝设计规范》<sup>[59]</sup>规定“3 级低坝经过论证可采用土工膜防渗体坝”, 2014 年实施的《水电工程土工膜防渗技术规范》<sup>[60]</sup>规定“本规范适用于防渗水头不大于 70 m 的工程, 防渗水头大于 70 m 的土工膜防渗工程, 应进行专门研究”。中国投资、设计建造的高于 70 m 的土工膜防渗高坝已有 2 座, 分别为 2011 年建成的 79.5 m 的四川华山沟芯膜堆石坝和即将建成 87 m 的老挝南欧江六级面膜堆石坝。

### 参考文献:

- [1] 顾淦臣. 土工薄膜在坝建设中的应用[J]. 水力发电, 1985, 11(10): 43 - 50. (GU Gan-chen. The application of geomembrane in dams construction[J]. Water Power, 1985, 11(10): 43 - 50. (in Chinese))
- [2] 顾淦臣. 土工薄膜防渗结构述评[J]. 河海大学学报, 1988, 16(S1): 11 - 34. (GU Gan-chen. Review of anti-seepage structure with geomembrane [J]. Journal of Hohai University, 1988, 16(S1): 11 - 34. (in Chinese))
- [3] 束一鸣, 顾淦臣. 土工膜防渗土石坝及围堰在中国的进展[J]. 河海大学学报, 1990, 18: 43 - 48. (SHU Yi-ming, GU Gan-chen. The progress of dams and cofferdams with geomembrane in china[J]. Journal of Hohai University, 1990, 18: 43 - 48. (in Chinese))
- [4] 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. (The application manual of geosynthetics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994. (in Chinese))

- Chinese))
- [5] 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 123 - 126. (The application manual of Geosynthetics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 123 - 126. (in Chinese))
- [6] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评[J]. 水利水电技术, 2002, **33**(12): 26 - 32. (GU Gan-chen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, **33**(12): 26 - 32. (in Chinese))
- [7] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评(II) [J]. 水利规划设计, 2001(3): 45 - 51. (GU Gan-chen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure(II)[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, **34**(1): 55 - 61. (in Chinese))
- [8] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 高面膜堆石坝发展的需求与关键技术[J]. 水利水电科技进展, 2015, **35**(1): 1 - 9. (SHU Yi-ming, WU Hai-min, JIANG Xiao-zhen, et al. Need and key technology on development of high membrane faced rockfill dam:key technology of high membrane faced rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, **35**(1): 1 - 9. (in Chinese))
- [9] 蔡跃波, 谢年祥. 加筋氯丁橡胶力学性能及胶接工艺试验研究[J]. 河海大学学报, 1988, **16**(增刊 1): 35 - 57. (CAI Yue-bo, XIE Nian-xiang. Experimental study on reinforced neoprene bonding technology and mechanical properties[J]. Journal of Hohai University, 1988, **16**(S1): 35 - 57. (in Chinese))
- [10] 陶同康, 鄢俊, 于龙. 复合土工薄膜的隔热特性[J]. 水利水运科学研究, 1997(1): 11 - 17. (TAO Tong-kang, YAN Jun, YU Long. Thermal insulating Property of geotextile/geomembrane composite[J]. Hydro-Science and Engineering, 1997(1): 11 - 17. (in Chinese))
- [11] 束一鸣. 防渗土工膜工程特性的探讨[J]. 河海大学学报, 1993, **21**(4): 1 - 6. (SHU Yi-ming. Engineering characters of geomembrane[J]. Journal of Hohai University, 1993, **21**(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [12] 任大春, 张伟, 吴昌瑜, 等. 复合土工膜的试验技术和作用机理[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(1): 10 - 13. (REN Da-chun, ZHANG Wei, WU Chang-yu. et al Testing techniques and functional mechanism of composite geomembranes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(1): 10 - 13. (in Chinese))
- [13] 束一鸣, 叶乃虎. LDPE 土工膜液胀极限荷载的工程仿真实验[J]. 水利水电科技进展, 2003, **23**(5): 1 - 3. (SHU Yi-ming, YE Nai-hu. Simulation test for Mullen burst limit load of LDPE geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, **23**(5): 1 - 3. (in Chinese))
- [14] 束一鸣, 潘江. 损伤土工膜液胀强度试验研究[J], 水利水电科技进展, 2005, **25**(6): 34 - 36. (SHU Yi-ming, PAN Jiang. Mullen strength experiment on damaged geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, **25**(6): 34 - 36. (in Chinese))
- [15] 束一鸣, 吴海民, 林刚, 等. 土工合成材料双向拉伸蠕变测试仪器: 中国, 201019026078.X[P]. 2011-04-11. (SHU Yi-ming WU Hai-min LIN Gang Biaxial tensile creep testing machine for geosynthetics :china, 201019026078.X[P]. 2011-04-11. (in Chinese))
- [16] 姜晓桢, 束一鸣, 吴海民, 等. 土工膜内压薄壁圆筒试样双向拉伸试验装置及试验方法: 中国, 201210117437.4[P]. 2014-05-07. (JIANG Xiao-zhen, SHU Yi-ming, WU Hai-min, et al. Geomembrane internal pressure thin-wall cylinder sample biaxial tensile test apparatus and test method: China, 201210117437.4[P]. 2014-05-07. (in Chinese))
- [17] 吴海民, 束一鸣, 曹明杰, 等. 土工合成材料双向拉伸多功能试验机的研制及初步应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 170 - 175. (WU Hai-min, SHU Yi-ming, CAO Ming-jie, et al. Development and application of multi-functional biaxial tensile testing machine for geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 170 - 175. (in Chinese))
- [18] 吴海民, 束一鸣, 滕兆明, 等. 高堆石坝面膜防渗体非散粒体垫层工程特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, **35**(1): 29 - 37. (WU Hai-min, SHU Yi-ming, TENG Zhao-ming, et al. Experimental research on engineering property of non-granular cushion for high membrane faced rock fill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water, 2015, **35**(1): 29 - 37. (in Chinese))
- [19] 刘霞, 田汉功. 大屯水库库盘铺膜关键技术试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, **9**(6): 110 - 152. (LIU Xia, TIAN Han-gong. key technologies for laying membrane on datun reservoir plate[J]. South-to-North Water science & Technology . 2011, **9**(6): 110 - 152. (in Chinese))
- [20] 李旺林, 李志强, 魏晓燕, 等. 土工膜缺陷渗漏引起气胀的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1161 - 1165. (LI Wang-lin, LI Zhi-qiang, WEI Xiao-yan, et al. Air expansion caused by leakage water resulting from geomembrane

- defects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1161 - 1165. (in Chinese))
- [21] 张 凯, 刘斯宏. 土工膜防渗平原水库膜下气场数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(5): 97 - 100. (ZHANG Kai, LIU Si-hong. Numerical simulation of air field under geomembrane in antiseepage plain reservoir[J]. South-to-North Water Science & Technology, 2012, **10**(5): 97 - 100. (in Chinese))
- [22] 王 昊, 于福春, 王兴菊. PE 土工膜与逆止阀连接部位拉伸试验及质量检测[J]. 水电能源科学, 2015, **33**(1): 96 - 98. (WANG Hao, YU Fu-chun, WANG Xing-ju. Test and quality inspection on connection part of PE geomembrane and clapped valve[J]. Water Resources and Power, 2015, **33**(1): 96 - 98. (in Chinese))
- [23] 陶同康. 复合土工薄膜及其防渗设计[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(2): 31 - 39. (TAO Tong-kang. Design of impervious layer for embankment dam with geotextile geomembrane composites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(2): 31 - 39. (in Chinese))
- [24] 顾淦臣. 关于“复合土工薄膜及其防渗设计”一文的讨论[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(5): 97 - 100. (GU Gan-chen. The Discussion about design of impervious layer for embankment dam with geotextile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(5): 97 - 100. (in Chinese))
- [25] 鄢 俊, 李定方, 陶同康. 土工膜的架空强度[J]. 水利水电工程学报, 2001(2): 42 - 45. (YAN Jun, LI Ding-fang, TAO Tong-kang. Strength of overlying voids of geomembrane[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(2): 42 - 45. (in Chinese))
- [26] 鄢 俊, 陶同康, 李定方. 土工膜防渗层结构优化设计[J]. 水利水电工程学报, 2001(4): 45 - 48. (YAN Jun, TAO Tong-kang, LI Ding-fang. Optimum design of a geomembrane aniseepage layer[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(4): 45 - 48. (in Chinese))
- [27] 吴景海, 陈 环. 土工膜防渗层渗漏流量的计算[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(2): 93 - 99. (WU Jing-hai, CHEN Huan. The calculation of geomembrane impervious cushion seepage leakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(2): 93 - 99. (in Chinese))
- [28] 束一鸣. 土工膜连接和缺陷渗漏量计算与缺陷渗漏影响[J]. 人民长江, 2002, **33**(3): 26 - 28. (SHU Yi-ming. The calculation of geomembrane connection and defect seepage leakage and seepage leakage's influence[J]. Yangtze River, 2002, **33**(3): 26 - 28. (in Chinese))
- [29] 沈振中, 姜 沅, 沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报, 2009, **40**(9): 1091 - 1095. (SHEN Zhen-zhong, JIANG Hang, SHEN Chang-song. Numerical simulation of composite geomembrane defect leakage experiment based on saturated-unsaturated seepage theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(9): 1091 - 1095. (in Chinese))
- [30] 束一鸣, 叶乃虎. LDPE 土工膜液胀极限荷载的工程仿真实验[J]. 水利水电科技进展, 2003, **23**(5): 1 - 3. (SHU Yi-ming, YE Nai-hu. Simulation test for mullen burst limit load of LDPE geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water, 2003, **23**(5): 1 - 3. (in Chinese))
- [31] 束一鸣, 潘 江. 损伤土工膜液胀强度试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, **25**(6): 34 - 36. (SHU Yi-ming, PAN Jiang. Mullen strength experiment on damaged geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water, 2005, **25**(6): 34 - 36. (in Chinese))
- [32] JIANG Xiao-zhen, SHU Yi-ming. Probabilistic analysis of random contact force between geomembrane and granular material[J]. Journal of Central South University, 2014, **21**(8): 3309 - 3315.
- [33] JIANG Xiao-zhen, SHU Yi-ming, ZHU Jun-gao. Probabilistic analysis of geomembrane puncture from granular material under liquid pressure[J]. Journal of Central South University, 2013, **20**(11): 3256 - 3264.
- [34] 束一鸣, 顾淦臣. 土工薄膜中央防渗土石坝有限元分析[J]. 河海大学学报, 1988, **16**(增刊 1): 79 - 91. (SHU Yi-ming, GU Gan-chen. The FEM analysis of the rockfill dam using geomembrane as central barrier[J]. Journal of Hohai University, 1988, **16**(S1): 79 - 91. (in Chinese))
- [35] 顾淦臣. 承压土工膜厚度计算的研究[C]// 全国第三届土工合成材料学术会议论文集. 天津: 天津大学出版社, 1992: 249 - 257. (GU Gan-chen. Study on the calculation of geomembrane baring pressure [C]// Proceedings of the National Conference on third GEO-synthetic Materials. Tianjin: Tianjin University Press, 1992: 249 - 257. (in Chinese))
- [36] SL/ T225—1998 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S]. 1998. (SL/ T225—1998 Standard for application of geosynthetics in hydraulic and hydro-power engineering[S]. 1998. (in Chinese))
- [37] SHU Yi-ming, LI Yong-hong. Design principles for high head earth-rock dams with geomembranes[C]// Dam safety

- problems and solutions-sharing experience, ICOLD 72nd Annual meeting Proceedings. Seoul, INTERCOM Convention Services, Inc. 2004: 628 - 639.
- [38] 花加凤, 束一鸣, 张贵科, 等. 土石坝坝面防渗膜中的夹具效应[J]. 水利水电科技进展, 2007, **27**(2): 66 - 68. (HUA Jia-feng, SHU Yi-ming, ZHANG Gui-ke, et al. Clamping effect in geomembranes used for seepage control of upstream surface of earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, **27**(2): 66 - 68. (in Chinese))
- [39] 束一鸣, 李永红. 较高土石坝膜防渗结构设计方法探讨[J]. 河海大学学报, 2006, **34**(1): 60 - 64. (SHU Yi-ming, LI Yong-hong. Design of impervious structure with geomembrane for high earth-rock dams[J]. Journal of Hohai University, 2006, **34**(1): 60 - 64. (in Chinese))
- [40] 许四法, 杨 杨, 洪 波. HDPE 土工膜温度应力及其应力松弛评价[J]. 东南大学学报, 2006, **36**(5): 820 - 824. (XU Si-fa, YANG Yang, HONG Bo. Evaluation of temperature stress and stress relaxation properties of HDPE sheet[J]. Journal of Southeast University 2006, **36**(5): 820 - 824. (in Chinese))
- [41] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 高面膜堆石坝的夹具效应机制与消除设计方法[J]. 水利水电科技进展, 2015, **35**(1): 10 - 15. (SHU Yi-ming, WU Hai-min, JIANG Xiao-zhen, et al. Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rockfill dam and eliminating approach[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, **35**(1): 10 - 15. (in Chinese))
- [42] 姜晓桢, 束一鸣. 高面膜堆石坝防渗结构受力变形数值分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2015, **35**(1): 23 - 27. (JIANG Xiao-zhen, SHU Yi-ming. Numerical analysis of impermeable structure force-deformation of high membrane faced rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, **35**(1): 23 - 27. (in Chinese))
- [43] 何 强, 魏 东, 侍克斌, 等. 当静冰压力很大坝体土工膜防渗结构的稳定分析[J]. 小水电, 2008, **140**(2): 20 - 21. (HE Qiang, WEI Dong, SHI Ke-bin, et al. Stability analysis of geomembrane antiseepage structure under high static ice pressure[J]. Small Hydro Power, 2008, **140**(2): 20 - 21. (in Chinese))
- [44] 姜海波, 侍克斌. 坝坡复合土工膜防渗体的抗滑稳定分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, **21**(6): 15 - 18. (JIANG Hai-bo, SHI Ke-bin. Stability analysis against slide of anti-seepage structure in dams slope with composite geomembrane[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, **21**(6): 15 - 18. (in Chinese))
- [45] WU Hai-min, SHU Yi-ming, ZHU Jun-gao. Implementation and verification of interface constitutive model in FLAC3D[J]. Water Science and Engineering, 2011, **4**(3): 305 - 316.
- [46] WU Hai-min, SHU Yi-ming, CHENG Fang. Research and prospect on numerical simulation of geosynthetic-soil interaction[C]// International Workshop on Architecture, Civil & Environmental Engineering. Lushan, 2011.
- [47] WU Hai-min, SHU Yi-ming. Stability of geomembrane surface barrier of earth dam considering strain-softening characteristic of geosynthetic interface[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, **16**(7): 1123 - 1131.
- [48] 束一鸣, 顾淦臣, 向大润. 长江三峡二期围堰土工膜防渗结构前期研究[J]. 河海大学学报, 1997, **25**(5): 71 - 74. (SHU Yi-ming, GU Gan-chen, XIANG Da-run. Study on geomembrane for impervious structure of second-stage cofferdam of the Three Gorges Project[J]. Journal of Hohai University, 1997, **25**(5): 71 - 74. (in Chinese))
- [49] 忘海洋. 仁宗海水库电站大坝上游坡面复合土工膜防渗工程施工技术[J]. 吉林水利, 2010, **343**(12): 66 - 70. (The upstream slope composite geomembrane anti-seepage construction technology of renzonghai reservoir dam[J]. Jilin Water Resources, 2010, **343**(12): 66 - 70. (in Chinese))
- [50] 束一鸣. 用复合土工膜完善土坝防渗的实践[J]. 人民长江, 2002, **33**(9): 27 - 29. (SHU Yi-ming. Practice of improving earth dam seepage prevention by composite geomembrane[J]. Yangtze River, 2002, **33**(9): 27 - 29. (in Chinese))
- [51] 束一鸣, 张利新, 袁全义, 等. 西霞院反调节水库土石坝膜防渗工艺[J]. 水利水电科技进展, 2009, **29**(6): 70 - 73. (SHU Yi-ming, ZHANG Li-xin, YUAN Quan-yi, et al. Geomembrane seepage control techniques of xixiayuan earth-rock dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, **29**(6): 70 - 73. (in Chinese))
- [52] 何世海, 吴毅谨, 李洪林. 土工膜防渗技术在泰安抽水蓄能电站上水库的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, **29**(6): 78 - 82. (HE Si-hai, WU Yi-jin, LI Hong-lin. Application of geomembrane in seepage control technique in upper reservoir of Tai'an pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, **29**(6): 78 - 82. (in Chinese))
- [53] 龚履华, 李青云, 包承纲. 土工膜应变计的研制及其应用(II)[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 2035 - 2040. (GONG



- Lu-hua, LI Qing-yun, BAO Cheng-gang. Development of geomembrane strain gauge and its application (II): application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 2035 - 2040. (in Chinese))
- [54] 冯 俐. 汉江王甫洲坝堤复合土工膜防渗工程原型观测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, **27**(6): 59 - 62. (FENG Li. The prototype observation of han jiang wang fu zhou dam with composite geomembrane antiseepage project[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, **27**(6): 59 - 62. (in Chinese))
- [55] 褚清帅. 仁宗海水库大坝 HDPE 复合土工膜施工技术[J]. 四川水力发电, 2011, **30**(5): 32 - 35. (CHU Qing-shuai. HDPE compound geomembrane construction technique of renzonghai dam[J]. Sichuan Water Power, 2011, **30**(5): 32 - 35. (in Chinese))
- [56] 李冬凤. 浅谈华山沟水电站大坝 PVC 复合土工膜防渗心墙的施工[C]// 全国第十二次防水材料技术交流会论文集. 青岛, 2010: 237 - 241. (Discussion about huashangou dam pvc compound geomembrane impervious core wall construction[C]// Proceedings of the National Conference on 12th Waterproof Material. Qingdao, 2010: 237 - 241. (in Chinese))
- [57] 邢小平. 泰安抽水蓄能电站上水库复合土工膜施工技术研究[J]. 水力发电, 2003, **29**(4): 41 - 44. (XING Xiao-ping. Study on the construction technology of compound geomembrane for the upper reservoir of Tai'an Pumped-storage Power Project[J]. Water Power, 2003, **29**(4): 41 - 44. (in Chinese))
- [58] 李岳军, 周建平, 何世海, 等. 抽水蓄能电站水库土工膜防渗技术的研究和应用[J]. 水力发电, 2006, **32**(3): 67 - 70. (LI Yue-jun, ZHOU Jian-ping, HE Shi-hai, et al. Study on and application of geotech-membrane in the leakage prevention works of reservoirs of the pumped storage power station[J]. Water Power, 2006, **32**(3): 67 - 70. (in Chinese))
- [59] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 2001. (SL274—2001 Design code for rolled earth-rock fill dams[S]. 2001. (in Chinese))
- [60] NB/T-35027—2014 水电工程. 土工膜防渗技术规范[S]. 2014. (NB/T-35027—2014 Technical code for application of geosynthetics-based anti-seepage of hydropower projects[S]. 2014. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)