

我国水库大坝土工膜防渗工程进展

束一鸣

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为促进我国水库大坝土工膜防渗工程的健康、快速发展,对其发展历程进行回顾、梳理。总结了将土工膜用于水库大坝防渗的优点,即防渗性能高、适应变形性强、施工方便、质量易于控制、工程整体造价低。指出尽管已建成的大中型土工膜防渗工程运行正常,但土工膜仅在我国中小型工程中应用广泛。通过对比国内外水库大坝土工膜防渗工程的发展现状,分析了国内外发展差距较大的原因,即缺乏国际交流的外部环境,缺乏自主研发的内部动力,以及缺乏规范的适时认可。认为随着建设经验和技术储备的积累,科技成果传播的畅通迅速,从业人员对该项技术的认识深入,我国水库大坝土工膜防渗工程具有较大的经济、社会效益潜在优势。

关键词:土工膜;大坝及水库防渗;加固工程;新建工程;耐久性

中图分类号:TV640.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0020-07

Progress in geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams in China//SHU Yiming(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The development processes of geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams in China are reviewed, and the advantages of geomembranes are summarized, including good performance in seepage prevention, high adaptability to deformation, convenience in construction and quality control, and low cost. It is pointed out that, although geomembranes have been normally operating in some existing large- and medium-scale projects, they have been only widely used in medium- and small-scale projects in China. An comparative analysis of the development status of geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams shows a large gap between the developments in geomembranes in China and abroad, which is attributed to the lack of an external environment for international communication, the lack of domestic motivation for research and development of techniques, and the lack of timely acceptance of professional specifications in China. It is suggested that, with the accumulation of construction experience and techniques, rapid spread of scientific and technical achievements, and in-depth understanding of related techniques, geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams will have potential advantages and generate significant economic and social benefits.

Key words: geomembrane; seepage prevention in dam and reservoir; reinforcement project; new construction project; durability

由高分子聚合物制成的土工膜和复合土工膜质轻柔软而易于施工,渗透系数小而防渗性能佳,延伸率大而适应结构变形,因此将其用于水库大坝防渗工程是合乎情理的。用于水库大坝防渗工程的土工膜以塑料类为主,主要为聚氯乙烯膜(PVC膜)和聚乙烯膜(PE膜)。一般高水头大坝所用的防渗膜较厚,而厚度大于1mm的PE膜较硬,难以适应复杂施工,因此工程中趋于选择PVC膜。我国水库大坝土工膜防渗工程自20世纪80年代以来逐渐增多,工程规模逐渐增大,与黏土、混凝土、钢材等水利工程传统建材相比,土工膜作为水库大坝的防渗构件还有较大的发展空间。国际上,200m级的大坝采用无保护层的裸

露土工膜防渗已有约20年,突破了“高分子防渗膜易老化、不耐用”习惯思维的约束。与此相比,我国水库大坝土工膜防渗工程历经三四十年的发展,已逐渐在水利水电工程中占有一席之地,但发展相对滞缓。因此有必要对我国水库大坝土工膜防渗工程的发展历程进行回顾和梳理,以促进其健康、快速发展。

1 国内水库大坝土工膜防渗工程发展历程及特点

1.1 土工膜防渗起源于加固工程

a. 辽宁桓仁水库为大(1)型工程,库容34.6亿m³,大坝为混凝土单支墩大头坝,坝高78.5m,因裂缝漏

水于1967年采用2层厚度为1 mm的沥青聚合物膜粘贴锚固在上游坝面进行防渗加固^[1]。这是我国大陆第一座用土工膜防渗加固的大坝,使用了较低端的沥青聚合物膜。

b. 陕西省西骆峪水库兴建于1958年,1970年正式投入使用。由于地质问题导致水库渗漏严重,渗漏量有时达到蓄水量的近1/2。库区发现塌坑156个,不规则裂缝200余条。1978年库区铺设3层厚度为0.06 mm的PE膜防渗,共铺膜25万m²,占库底面积的50.5%,总投资78万元,1980年5月底完工,水库恢复正常运行^[2]。该工程在我国大陆尚缺乏专业土工膜的年代将农用膜作为替代品大量应用于水库库盘防渗。

c. 云南省李家菁砂壤土均质土坝为一中型工程,1956年始建,由于碾压不密实,导致漏水严重,1987年进行防渗处理并加高至35 m,在1:3的上游坝面上铺设规格为(400 g/m²)/0.15 mm/(400 g/m²)的两布一膜型复合膜(400 g/m²的PET织物,0.15 mm厚的PE膜,以及400 g/m²的PET织物,下同),复合膜上面用预制混凝土板作为护坡,复合膜底部埋置在砂卵石地基的黏土截水槽内。下游趾贴坡块石排水体的内侧铺设无纺织物作为反滤层。共铺设复合膜17000 m²,无纺织物3000 m²,比黏土防渗方案节省造价25%,且防渗效果佳^[3]。该工程的特点:①在膜防渗主要用于土坝加固工程的年代里,将膜防渗应用于土坝加高工程中,具有一些新建工程的特色;②为我国第一座高度超过30 m以专用复合土工膜进行防渗加固的面膜土石坝。

d. 河北临城水库黏土斜墙土石坝高31 m,上游坝坡1:2.5。工程始建于1958年8月,1960年12月竣工,总库容为1.62亿m³,为大(2)型工程。蓄水后下游坝面先后出现程度不同的裂缝共计154条,坝面形成8条渗漏通道,渗漏量达0.8~0.9 m³/s,不仅水量损失严重,而且威胁大坝安全。1990年在坝面铺设74000 m²的1 mm/(300 g/m²) PVC一布一膜型复合膜,土工织物面与黏土斜墙接触,PVC面上铺砂,再铺碎石,表面为干砌块石护坡,加固后运行正常^[4]。该工程的特点是第一次将坝面膜防渗加固应用于大型土石坝工程中。

e. 湖南东江混凝土双曲拱坝高157 m,底宽35 m,宽高比0.223,坝顶高程294 m,1991年建成,为当时最高的双曲拱坝。施工中死水位以下部位产生一些较为严重的裂缝,有些裂缝延伸到上游坝面,除采用结构措施处理外,还在拱坝上游面用氯丁胶粘贴面积为2239.5 m²、厚度为1.5~2.0 mm的氯丁橡胶膜和氯化丁基橡胶膜,膜与混凝土间的抗剪切

扯离应力为0.85 MPa,抗剥离应力为0.22 MPa,平均单价为62元/m²,施工速度快,造价低^[5]。该工程的特点是在新建混凝土坝施工中直接采用土工膜作防渗处理。

f. 主要为西安市供水的石砭峪水库为一中型工程,坝高85 m。1971年用定向爆破法将堆石筑坝至高程705 m,该高程以上30 m坝体采用人工搬运坝体轮廓线外的爆破块石进行堆筑。1980年初,即坝体堆石体完成9年后施工沥青混凝土斜墙,蓄水后漏水严重,且1993年7月27日在高程690~698 m的沥青混凝土斜墙处出现了4.5 m×4.0 m的塌坑,冲走大量块石,修复后水位长期控制在700 m高程以下运行(坝顶高程735 m),给西安市的供水造成严重影响。2001年5月完成(700 g/m²)/1 mm/(700 g/m²) PVC复合膜的坝面防渗加固工程,工期8个月,比原来设置混凝土防渗墙的方案节省7000万元,且施工简便^[6]。该工程至今仍为我国大陆以面膜形式加固的最高堆石坝。

g. 青海省海东地区互助县本坑沟水库位于湟水河的二级支流上,高程2500 m以上,水库以灌溉、防洪为主,大坝为黏土心墙坝,坝高45 m,上游坝坡1:3,蓄水后坝体及坝肩出现渗漏。2006年9月完成(700 g/m²)/(0.3~0.4 mm)一布一膜型复合膜坝面防渗加固工程,复合膜顶部与防浪墙连接,左右岸锚固在弱风化基岩上,底部锚固在混凝土防渗墙顶的墙帽上^[7]。该坝地处我国高原寒冷地区,是我国中小型水库大坝采用土工膜防渗加固措施方兴未艾数十年的一个缩影。

综上所述:①我国水库大坝土工膜防渗加固工程自1967年算起至今已48年,尤其在最近数年的全国中小型水库土石坝加固工程中,土工膜防渗加固方案具有较强的竞争力。②用于大型混凝土坝坝面防渗加固始于1960s,用于大型土石坝坝面防渗加固始于1990s,相对滞后。原因为混凝土坝的防渗加固只是局部处理,而土石坝一般为整个坝体甚至还包括库盘的防渗加固,不仅工程量大,而且关乎整个工程安全。③土工膜防渗加固工程的发展遵循由易到难的规律,例如对于土石坝,先用于库盘防渗,然后用于坝面防渗。

1.2 土工膜防渗永久工程与临时工程并举

1980s后期至1990s初期以后,国内相继建造了相当数量的中等高度(坝高30 m以上)的土工膜防渗大坝及水库,与此同时,许多大型工程的围堰采用土工膜防渗形式。

a. 广西柳州和平水电站田村堆石坝,坝高48 m,原设计为黏土心墙堆石坝,堆石料为砂岩和风

化砂岩,1989年4月填筑到10 m高度时,由于连日阴雨且6月将入主汛,心墙必须填筑到25 m高度才能度汛,原计划难以实现。只能在心墙部位改填风化料,其上游侧设置土工膜防渗。采用了维涤织物涂聚氯乙烯的复合膜,织物厚0.6 mm,涂膜厚3 mm,1990年建成,工期比原计划缩短1年,大坝至今运行正常^[8]。该坝是我国第一座高度大于30 m的“芯膜”(类比于黏土心墙)堆石坝。

b. 浙江小岭头堆石坝,坝高36 m,上下游坝坡均为1:1.3,在上游无砂混凝土垫层上铺设(250 g/m²)/0.5 mm/(400 g/m²)的PVC复合膜,保护层(护坡)为10 cm厚的预制混凝土板,1991年开工,1994年建成蓄水^[9]。该坝是我国第一座坝高超过30 m的“面膜”(类比于混凝土面板)堆石坝。

c. 甘肃酒泉夹山子水库,坝高32.5 m,坝顶长720 m,坝左右两岸防渗长度1700 m,库底防渗面积56.6万m²,库盘及两岸均分别采用厚0.2~0.4 mm的PE复合膜防渗,膜自下而上在坝面铺设26 m,与黏土斜墙连接。该水库工程1988年开工,1995年竣工蓄水^[10],是我国第一座膜防渗面积超过50万m²的水库;同时也标志着比较低端的玻璃丝沥青膜退出西部水库库盘防渗工程。

d. 温泉水库为库容2.55亿m³的大型工程,地处昆仑山区深处,海拔3900 m以上,年平均气温-2.9℃,极端最低气温-40℃,最高气温25.5℃,处于典型的高原干旱寒冷气候条件下,土壤最大冻深3.13 m。砾石大坝高17.5 m,采用上游面(200 g/m²)/0.6 mm/(250 g/m²)复合土工膜防渗,1993年8月开始蓄水,1996年年底竣工^[11-12]。该坝为我国地处近4000 m高程的土工膜防渗大坝,对高寒地区缺土或不适宜土料施工的大坝防渗体材料选择具有启示作用。

e. 陕西神木采兔沟水库是以供水为主的中型工程,大坝为面膜砂坝,坝高33.8 m。工程位于毛乌素沙漠南缘、黄河支流秃尾河的中游,库区两岸为沙漠地貌,最大冻土深度146 cm。坝体以附近沙漠砂料填筑,坝上游面与坝趾前200 m库盆及两岸采用(300 g/m²)/0.5 mm/(300 g/m²)PE复合膜防渗;上游坝坡1:3.0及1:3.5,现浇4 m×4 m、厚度为18 cm的C25混凝土板护坡;下游坝坡1:2.5及1:2.75,采用菱形布置的现浇9.25 m×9.25 m的C25混凝土网格骨架,植物护坡。2006年8月1日开工建设大坝主体土方及防渗工程,2007年10月底完成,工程于2010年蓄水。该工程的特点是在沙漠地带就地取砂筑坝,以复合膜用作坝面、库盆及库岸防渗的供水水源工程。

f. 从1980 s至今,土工膜作为大型工程围堰的防渗体一直方兴未艾。如长江三峡工程二期上游围堰(高88.5 m)、福建闽江水口水电站二期上游围堰(高48 m)均采用混凝土防渗墙防渗,墙顶以上20 m高度内采用复合“芯膜”防渗形式^[13]。已建的长江干流上的溪洛渡工程下游围堰、向家坝等大型工程的围堰也采用复合膜作为塑性混凝土防渗墙顶部的防渗体;待建的诸如双江口等大型工程的高围堰也将采用土工膜防渗形式。可见,土工膜防渗已成为高围堰上部防渗的主流形式。

1.3 新建大型土工膜防渗工程寥若晨星

尽管从1980 s至今已涌现了大量中小型新建土工膜防渗大坝及水库,但新建的大型工程却依稀可数。

a. 湖北王甫洲水利枢纽为平原低水头综合利用工程,水库总库容3.1亿m³,为大(2)型工程。河道两岸围堤长12.6 km,最大堤高13 m。围堤原设计为黏土心墙与铺盖防渗,后考虑附近土料属膨胀性黏土,且运距远,为方便施工、缩短工期、降低造价而改用土工膜防渗方案。砂砾石堤体迎水坡坡度为1:2.75,坡面铺设(200 g/m²)/0.5 mm/(200 g/m²)PE复合膜32.4万m²,下部接0.5 mm/(200 g/m²)一布一膜PE复合膜铺盖(长30~105 m,面积为75.4万m²),复合膜防渗面积合计为107.8万m²。堤面采用现浇混凝土护坡,铺盖采用厚1 m的砂砾石作保护层。工程于1998年5月开工,1999年3月完工。该工程节省平均运距为18 km的黏土用量165万m³,减少了土料场征地,避免了修建运输道路,缩短工期2/3;除此之外,节省直接费用约1500万元^[14]。该工程是复合膜防渗面积超过100万m²的大型工程,为采用膜防渗方案,将该大(2)型工程的挡水建筑物降级为3级建筑物,以满足“3级建筑物低坝经过论证可采用土工膜防渗体坝”^[15]的规定。

b. 目前唯一建于大江大河干流上的大型面膜土石坝为黄河干流西霞院土石坝,为小浪底水利枢纽的配套工程,该坝于2007年建成蓄水。

c. 第一座坝高大于50 m的大型面膜堆石坝为四川田湾河梯级水电站仁宗海面膜堆石坝,坝高56 m,为大(2)型工程的1级建筑物,2009年建成蓄水。

d. 山东泰安抽水蓄能电站上库是第一座库盆采用土工膜防渗形式的大(1)型工程,装机容量100万kW,上库坝高100 m,上水库主体土建工程于2001年7月开工,2005年5月建成蓄水。

e. 江苏溧阳抽水蓄能电站是目前在建的库盆

土工膜防渗水头最大的抽水蓄能电站,工程装机容量 150 万 kW,为大(1)型工程,上水库坝高 165 m,2008 年底开工,预计 2015 年建成发电。

2 代表性土工膜防渗库坝工程

2.1 大江大河上的大型工程

西霞院土石坝工程位于黄河小浪底水利枢纽工程下游 16km 的黄河干流上,为小浪底工程的反调节水库和配套工程,为大(2)型工程。挡水建筑物由土石坝段、泄水闸段和发电厂房坝段组成,其中土石坝段长 2 609 m,高 20.2 m,上游坝坡为 1 : 2.75,下游坝坡为 1 : 2.25。由于工程地处河南洛阳市,若采用黏土心墙土石坝方案,需征用周围大量耕地,不仅造价高,而且对生态环境造成破坏。尽管规范^[15]规定“3 级低坝经过论证可采用土工膜防渗体坝”,但该工程还是采用(400 g/m²)/0.8 mm/(400 g/m²)和(400 g/m²)/0.6 mm/(400 g/m²) PE 复合膜的面膜防渗形式^[16-17]。

为保证工程质量,业主除派驻复合膜监造外,还与供货厂商一起改进弯曲坝段复合膜的制造工艺;在施工阶段,对土工膜与底部混凝土防渗墙、土工膜与河床侧混凝土导墙的锚固及铺设方式进行完善,通过渗透试验证明锚固方法有效可靠^[18]。12.8 万 m² 的土工膜施工从 2006 年 3 月开始,2007 年 12 月完成。蓄水运行 1 年后,对防渗膜进行检查,结果表明土工膜运行可靠。该工程建于大江大河干流上且膜防渗坝长度长,是重视复合膜制造质量、严控现场施工工艺和施工质量的成功范例。

2.2 较高面膜堆石坝工程

四川田湾河梯级水电站仁宗海面膜堆石坝,为 1 级建筑物。坝顶高程 2 934 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/m²)/2 mm/(400 g/m²)的 HDPE 复合膜防渗,面积为 6 万 m²,复合膜上为面积 45 cm×45 cm、厚度 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,与混凝土防渗墙的锚固以镀锌锚栓+槽钢为主,两侧以镀锌膨胀螺栓+角钢为辅^[19]。

该工程于 2004 年开工,2009 年建成蓄水,是我国已建最高的面膜堆石坝;虽不建设在大江大河上,但建筑物级别高,且建在高程近 3 000 m 的高原上;不仅重视设计,而且重视施工工艺;采用厚 2 mm 的 HDPE 膜,施工操作难度较大。

2.3 较高“芯膜”堆石坝工程

云南楚雄州空龙河上的塘房庙水库,海拔 2 400 m,位于寒冷山区。大坝在初步设计阶段采用黏

土心墙堆石坝,因当地心墙土料天然含水量比最优含水量高 8.7%,而当地气候又不适宜土料翻晒和施工,施工图设计阶段改为“芯膜”堆石坝形式。最大坝高 53 m,属中等高度坝,上下游坝坡均为 1 : 1.8。复合防渗土工膜在坝内由下而上呈“之”字形铺设,土工膜向上下游两侧方向依次为风化砂过渡料、碎石过渡层、堆石料,下游风化砂和碎石之间设土工织物反滤^[20]。

该坝 2000 年建成,为我国当时最高的“芯膜”堆石坝,是在当地缺乏适宜防渗土料情况下采用膜防渗结构的堆石坝。

2.4 抽水蓄能电站上库库盆膜防渗工程

溧阳抽水蓄能电站装机容量 150 万 kW,上水库大坝为高 165 m 的面板堆石坝。库盆填渣厚度 0 ~ 70 m 不等,不均匀沉降大,防渗要求高,经过比选采用土工膜与黏土组合防渗,结构布置从上至下依次为碎石护面层(厚 0.3 m)、黏土防渗层(厚 4.5 m)、HDPE 土工膜(厚 1.0 mm)、砂垫层(厚 0.5 m)、第 1 层反滤层(厚 0.5 m)、第 2 层反滤层(厚 0.5 m)以及过渡层(厚 1.0 m)。

将反滤层与过渡层作为膜下排气排水层,并将库底开挖区与回填区的排水分开布置。将开挖区的排水再次分成 8 个区,在每个排水区铺设间距为 15 m 的主、次排水管,主排水管与排水观测廊道相通,渗漏水下渗后经过大坝底部排水层汇集到坝脚外量水堰^[21]。该水库是我国第一座库盆用土工膜与黏土组合防渗的抽水蓄能电站上水库。

2.5 平原水库工程

1990 s 以来,山东省为调蓄供水建设了许多平原水库,如德州的丁东水库^[22]、济南的鹊山水库^[23]、东营的纯化水库^[24]等,均采用复合膜防渗形式。纯化水库土坝坝高 12 m,坝面和铺盖均采用(300 g/cm²)/0.3 mm/(200 g/cm²) PE 复合膜,坝基截渗采用 0.3 mm 厚 PE 膜;丁东水库坝高 9 m,坝面延伸至库盘 60 m 再连接垂直截渗 8.5 m,均采用 0.22 mm/(380 g/cm²)一布一膜型复合膜;而鹊山水库的坝基截渗深度 8 ~ 11 m。此类水库采用的复合膜防渗形式与黏土斜墙+黏土铺盖或黏土心墙+混凝土防渗墙等传统防渗形式相比,具有施工简便、工期短、造价低的特点。

3 土工膜防渗工程国内外发展差距及其原因

3.1 国内外发展现状对比

3.1.1 膜防渗碾压混凝土坝

国外已有 34 座碾压混凝土坝采用整坝面膜防渗系统,其中 19 座为覆盖型,15 座为裸露型,且裸

露型已成为发展趋势^[25]。2002 年哥伦比亚建成高 188 m 的 Miel I 坝^[26]和美国 2003 年建成高 97 m 的 Olivenhain 坝^[27]均采用更加先进的坝面“膜+排水”渗控系统,使碾压混凝土坝体内的渗透压力基本消失,坝体成为名副其实的支撑体;Olivenhain 坝采用了具有土工网的复合排水系统,成为排除渗入膜后重力水的“高速公路”。

我国仅有 1994 年建成的河北温泉堡碾压混凝土拱坝(坝高 48 m)做了在坝面下部 17.5 m 高度范围内粘贴复合土工膜进行防渗的尝试,蓄水后检查发现土工膜防渗效果良好^[28-29]。

3.1.2 膜防渗堆石坝

1993 年建成的法国 Figari 坝(坝高 35 m,上游坝坡 1:1.7)、2000 年建成的 Ortolo 坝(坝高 37 m,上游坝坡 1:1.7)、2000 年建成的 La Galaube 坝(坝高 43 m,上游坝坡 1:2)均采用现浇厚 10 cm 以上的聚丙烯(PP)加筋混凝土板护坡,在防渗膜与现浇混凝土板之间为较厚的无纺布物^[30]。

1996 年建成的阿尔巴尼亚 Bovilla 坝,坝高 91 m,坡度 1:1.6,采用复合膜坝面防渗结构。复合膜垫层为喷水泥浆的砾石层,垫层上铺设 3 mm/(700 g/m²)一布一膜型 PVC-PET 复合膜,膜上铺设 800g/m²PP 无纺布物,一方面防止浇筑混凝土板(护坡)对膜造成损伤,另一方面 PP 纤维可起到加筋素混凝土的作用。现浇混凝土板 6m×3 m(顺坡向长×坝轴线向长),坝上部厚 20 cm,坝下部厚 30 cm;膜的周边锚固在混凝土趾板上^[31]。

从坝高角度看,我国的膜防渗堆石坝(土石坝)相比国外差距并不大,但设计水平、施工装备、施工工艺、施工人员业务水平等还有待提高^[32]。

3.1.3 其他坝型

国际上,膜防渗技术已应用于混凝土重力坝、混凝土拱坝、混凝土支墩坝的整个坝面防渗系统的修复和接缝的处理。奥地利的 Kölnbrein 双曲拱坝(坝高 200 m)、意大利的 Alpe Gera 混凝土重力坝(坝高 174 m),均在坝面承受最大水头处用土工膜进行防渗加固。

据 ICOLD(国际大坝委员会)2010 年统计,采用膜防渗进行加固的混凝土重力坝有 32 座(其中防渗膜裸露结构 31 座),混凝土支墩坝 3 座(均为膜裸露结构),混凝土拱坝 8 座(其中防渗膜裸露结构 4 座),混凝土连拱坝 9 座(均为防渗膜裸露结构)。我国采用现代土工膜对混凝土坝或砌石坝进行防渗加固尚处于起步阶段。

值得注意的是,上述工程采用防渗膜裸露结构意味着防渗膜无保护层,全裸在阳光下、空气中或水

中,其裸露工作寿命将与混凝土材料匹配,这是革命性的技术进步,完全颠覆了“土工膜易老化、适用于临时工程”的传统观念。

3.2 国内外发展差距缘由

我国膜防渗加固仅限于土石坝,鲜见混凝土坝;新建大型工程面膜防渗结构很少用于高坝工程中,多见高围堰工程中。膜防渗堆石坝多数为 30 m 以下的低坝,从 1990s 上半叶的坝高 36 m 至 2000s 下半叶的坝高 56 m,从小流域小支流走向大江大河,从大型工程的围堰到大型工程的大坝,花了约 20 年时间。总体而言,我国膜防渗堆石坝起步较早,发展滞缓,梳理主要影响因素如下:

a. 缺乏国际交流的外部环境。同样兴起于 1980s 的钢筋混凝土堆石坝和碾压混凝土坝在我国发展迅猛,筑坝高度和筑坝技术已处于国际领先地位,其中也得益于频繁而深入的国际技术交流。而膜防渗高土石坝技术,一些国外承包商申请了专利保护,从材料供应、结构设计、施工建造实行一条龙承包,具体的技术与建造经验不作交流,只作一般的报道。

b. 缺乏自主研发的内部动力。在缺少深入国际交流的背景下,需要从材料的细观结构、宏观特性、制造工艺、工程设计方法、施工工艺等方面对高分子聚合物土工膜进行全方位的认知和掌握,在国内知识产权保护机制尚在完善的背景下,欠缺自主研发的动力。

c. 缺乏规范的适时认可。早期水库大坝膜防渗工程不多,工程经验积累不足,相关设计规范作出“3 级低坝经过论证可采用土工膜防渗体坝”^[15]的规定可以理解,而在一些大型工程相继突破规范建成且运行正常的情况下仍长期维持苛刻的规定条款,客观上滞缓了我国土工膜防渗工程的发展。

4 水库大坝土工膜防渗工程发展前景

a. 在面广量大的中小型工程中将得到蓬勃发展。1998 年长江特大洪水后的堤防加固工程广泛采用膜防渗方案,在较大规模的中小型水库大坝加固工程中,土工膜防渗加固措施同样被广泛采用,一些新建中小型水库大坝仍较多采用土工膜防渗方案。随着中西部区域经济的快速发展,国家和地方对水利工程的投入将日益增多,而性价比高的膜防渗结构将是这些面广量大的地方中小型水利工程的热门选择。

b. 在深覆盖层大中型工程中具有竞争优势。在深覆盖层、高地震烈度、缺少合适黏土(或取土严重影响生态环境)的坝址建堆石坝或以软岩筑堆石

坝时,钢筋混凝土面板堆石坝与黏土心墙堆石坝方案将受到限制,而适宜较大变形、质量易于控制、造价相对经济、运输及施工相对方便的土工膜防渗方案具有较大的竞争优势。

c. 经验的积累将使建设土工膜防渗工程成为常态。在我国水库大坝工程建设中,土工膜防渗工程的挑战与机遇并存,随着建设经验与技术储备的积累,大中型水库大坝在方案比选时将会顺理成章地选择膜防渗结构。2014 年发布实施的《水电工程土工膜防渗技术规范》^[33]总则规定“防渗水头大于 70 m 的土工膜防渗工程,应进行专门研究”,表明工程界对土工膜水库大坝防渗工程的信心大增。

5 结 语

我国水库大坝土工膜防渗工程起源于 20 世纪 60 年代的大坝加固工程,兴起于 20 世纪 80 年代的新建大坝工程,长期在中小型工程中实践并积累经验。在为数不多的大型工程中应用,大多是因其他防渗形式的技术经济指标低而不得不突破规范规定的无奈之举。由于新建高坝大库的土工膜防渗工程长期游离于主流形式以外,以至于相当多的从业人员至今仍持有 20 世纪八九十年代关于“土工膜易老化、不耐用”的惯性思维,而国际上 200 m 级的高坝采用裸露土工膜防渗形式至今已 10 多年。可见,在信息传播交流迅速、广泛的今天,仍存在着接受信息、认知信息滞后的问题。土工膜防渗客观上具有技术、经济、社会等多方面优势,预测我国水库大坝土工膜防渗工程将由拾遗补漏的边缘进入具有竞争优势的主流之中。

参考文献:

[1] 顾淦臣. 土工薄膜在坝工建设中的应用[J]. 水力发电, 1985, 11 (10): 43-50. (GU Ganchen. Application of geomembrane in dam construction [J]. Water Power, 1985, 11 (10): 43-50. (in Chinese))

[2] 王景佑. 塑料薄膜在西骆峪水库铺盖防渗工程中的应用[J]. 水利水电技术, 1987, 18 (2): 235-238. (WANG Jingyou. Application of plastic geomembrane for seepage control in Xiluoyu Reservoir Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987, 18 (2): 235-238. (in Chinese))

[3] 陶同康,唐仁楠. 复合土工薄膜在李家箐土坝坝面的防渗应用[J]. 水利水运科学研究, 1991 (4): 429-434. (TAO Tongkang, TANG Rennan. Application of geomembrane/geotextile composite in impervious lining system of Lijiaqing Earth Dam [J]. Hydro-Science and Engineering, 1991 (4): 429-434. (in Chinese))

[4] 赵志清. 土工膜在我国水利防渗的首次应用[J]. 中国

建材防水材料, 1991 (3): 16-18. (ZHAO Zhiqing. Basic application of geomembrane for seepage control system in China [J]. China Building Waterproofing, 1991 (3): 16-18. (in Chinese))

[5] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评(续)[J]. 水利规划设计, 2001 (3): 45-51. (GU Ganchen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001 (3): 45-51. (in Chinese))

[6] 钟家驹. 石砭峪沥青混凝土面板坝除险加固[J]. 陕西水利水电技术, 2005 (1): 18-23. (ZHONG Jiaju. Reinforcement of asphalt concrete faced rockfill dam at Shibianyu [J]. Shanxi Hydropower Engineering, 2005 (1): 18-23. (in Chinese))

[7] 赵刚. 土工合成材料在本坑沟水库除险加固中的应用[J]. 现代农业科技, 2011 (9): 281-282. (ZHAO Gang. Application of geosynthetics in reinforcement of Benkenggou Reservoir [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011 (9): 281-282. (in Chinese))

[8] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评[J]. 水利规划设计, 2001 (2): 49-57. (GU Ganchen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001 (2): 49-57. (in Chinese))

[9] 王高明. 小岭头水库堆石坝复合土工膜防渗坝面的设计与施工[J]. 防渗技术, 1995, 1 (2): 29-34. (WANG Gaoming. Design and construction of seepage-proof compound geomembrane surface of the rock-fill at Xiaolingtou Reservoir [J]. Technique of Seepage Control, 1995, 1 (2): 29-34. (in Chinese))

[10] 阎兴武,周学敏. 夹山子水库塑膜防渗施工技术[J]. 防渗技术, 1996, 2 (4): 35-38. (YAN Xingwu, ZHOU Xuemin. The engineering technique of construction for controlling seepage with plastic film in Jiashanzi Reservoir [J]. Technique of Seepage Control, 1996, 2 (4): 35-38. (in Chinese))

[11] 黄海玲,高世荣,彭育会,等. 温泉水库坝体复合土工膜防渗工程设计[J]. 防渗技术, 1996, 2 (2): 22-27. (HUANG Hailing, GAO Shirong, PENG Yuhui, et al. Design on impermeable composite geomembrane used in Dam of Wenquan Reservoir [J]. Technique of Seepage Control, 1996, 2 (2): 22-27. (in Chinese))

[12] 马正海. 高寒坝体复合土工膜防渗施工技术[C]//中国大坝协会 2014 年学术年会论文集: 高坝建设与运行管理的技术进展. 贵阳: 中国大坝协会, 2014: 664-668.

[13] 葛益恒,刘秀英,黄保东. 水口水电站堆石围堰土工膜防渗心墙设计[J]. 水力发电, 1992 (2): 20-25. (GE Yiheng, LIU Xiuying, HUANG Baodong. Design on geomembrane cored rockfill cofferdam in Shuikou Hydropower Station [J]. Water Power, 1992 (2): 20-25. (in Chinese))

[14] 冯俐. 复合土工膜在王甫洲水利枢纽中的应用[J]. 人

- 民长江,1999,30(7):12-14. (FENG Li. Application of composite geomembrane in Wangfuzhou Hydro-junction [J]. Yangtze River,1999,30(7):12-14. (in Chinese))
- [15] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S].
- [16] 代巧枝,田华祥,郑春洲. 西霞院水库大坝设计[J]. 河南水利,2004(6):46-47. (DAI Qiaozhi,TIAN Huaxiang,ZHENG Chunzhou. Dam design of Xixiayuan Reservoir [J]. Henan Water Resources,2004(6):46-47. (in Chinese))
- [17] 刘宗仁,张国兰,王登科. 西霞院反调节水库复合土工膜斜墙砂砾石大坝防渗施工技术[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):74-77. (LIU Zongren,ZHANG Guolan,WANG Dengke. Anti-seepage technique for sand-gravel dam with compound geomembrane inclined wall of Xixiayuan Counter Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2009,29(6):74-77. (in Chinese))
- [18] 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 Yiming,ZHANG Lixin,YUAN Quanyi, 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))
- [19] 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 Qingshuai. Construction technique on HDPE composite geomembranes at Renzonghai Dam [J]. Sichuan Water Power,2011,30(5):32-35. (in Chinese))
- [20] 顾淦臣,沈长松,朱晟,等. 塘房庙复合土工膜心墙堆石坝的设计、施工和应力应变有限元分析[J]. 水力发电学报,2004,23(1):21-26. (GU Ganchen, SHEN Changsong,ZHU Sheng, et al. Design & construction and stress strain analysis by FEM for Tangfangmiao Rockfill Dam with composite geomembrane core[J]. Water Power Journal,2004,23(1):21-26. (in Chinese))
- [21] 宁永升,冯树荣,胡育林,等. 土工膜黏土组合防渗在溧阳抽水蓄能电站中的应用[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):83-86. (NING Yongsheng,FENG Shurong,HU Yulin, et al. Application of composite seepage prevention of geomembrane and clay in Liyang Pumped Storage Power Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2009,29(6):83-86. (in Chinese))
- [22] 李宝龙,施佩歆,商景华. 土工膜在丁东水库防渗工程中的应用[J]. 防渗技术,1998,4(4):31-33. (LI Baolong, SHI Peixin, SHANG Jinghua. Application of geomembrane in seepage control of Dingdong Reservoir [J]. Technique of Seepage Control,1998,4(4):31-33. (in Chinese))
- [23] 姜克春,尹正平,刘战军. 土工膜在鹁山调蓄水库防渗工程中的应用[J]. 山东水利,2002(4):22-23. (JIANG Kechun, YIN Zhengping, LIU Zhanjun. Application of geomembrane in seepage control of Queshan Regulating Reservoir[J]. Shandong Water Resources,2002(4):22-23. (in Chinese))
- [24] 戚瑞安. 平原水库深水高坝防渗施工技术研究[J]. 中国水利,2006(10):47-48. (QI Ruian. Studies on seepage prevention technology in the construction of deep-water high dam in plain areas [J]. China Water Resources,2006(10):47-48. (in Chinese))
- [25] The International Commission on Large Dams. Geomembrane sealing systems for dams: design principles and return of experience [R]. Paris: International Commission on Large Dams,2010.
- [26] MARULANDA A,CASTRO A,RUBIANO N R. Miel I: a 188 m high RCC dam in Colombia[J]. The International Journal on Hydropower & Dams,2002,9(3):76-81.
- [27] KLINE R. Design of roller-compacted concrete features for Olivenhain Dam [C]//Proceedings of 22nd USSD conference: Dams Innovations for Sustainable Water Resources. Denver: United States Society on Dams,2002:23-34.
- [28] 杨凤臣,王义丰,高建中,等. 温泉堡水库碾压混凝土拱坝设计与运行[C]//96' 碾压混凝土筑坝技术交流会论文集. 北京:中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝专业委员会,1996:256-260.
- [29] 高建中,景书达. 温泉堡水库碾压混凝土拱坝防渗设计与运行[J]. 水利水电技术,1998,29(7):22-23. (GAO Jianzhong,JING Shuda. Seepage prevention design and operation of RCC arch dam of Wenquanbao Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1998,29(7):22-23. (in Chinese))
- [30] CAZZUFFI D, GIROUD J P, SCUERO A, et al. Geosynthetic barriers systems for dams, keynote lecture [C]//PALMEIRA E M. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics. Guarujá, Brazil: Brazilian Chapter of the International Geosynthetics Society,2010:115-163.
- [31] SEMBENELLI P, SEMBENELLI G, SCUERO A M. Geosynthetic system for the facing of Bovilla Dam [C]//Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics. Roseville, Minnesota: Industrial Fabrics Association,1998:1099-1106.
- [32] 束一鸣,吴海民,姜晓桢. 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 Yiming,WU Haimin,JIANG Xiaozhen. Need and key technology on development faced rockfill dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2015,35(1):1-9. (in Chinese))
- [33] NB/T 35027—2014 水电工程土工膜防渗技术规范[S].

(收稿日期:2015-07-15 编辑:骆超)