

高坝与泄水建筑物表面防护与缺陷修复新型结构及应用

孙志恒、徐耀、李萌 夏世法

中国水利水电科学研究院 北京中水科海利工程技术有限公司

摘要: 针对高坝与泄水建筑物表面防护与缺陷修复存在的难题, 本文介绍了三项大坝与泄水建筑物表面防护与缺陷修复新型结构, 提出了满足工程要求的结构与材料设计指标, 解决了寒冷地区高面板坝锚固型卷材表止水结构易发生冰拔或冰压破坏、特高拱坝高压水劈裂、寒冷地区混凝土坝水位变化区冻融剥蚀破坏、泄水建筑物高速水流冲磨破坏等工程问题。

关键词: 高坝与泄水建筑物、表面防护及缺陷修复、新型结构

1 研究背景

我国是世界上水库大坝最多的国家, 这些水库大坝在发挥综合效益的同时, 也存在安全风险。特别是高坝大库一旦出现事故甚至溃坝失事, 可能造成巨大生命财产损失。我国坝高 100m 以上的高坝数量居世界第一, 确保这些高坝安全事关国计民生, 具有重大意义。国内外高面板坝严重渗漏 (如四川布西、湖南白云)、高拱坝坝踵开裂漏水 (如奥地利科恩布莱恩)、寒冷地区混凝土坝水位变化区冻融剥蚀 (河北潘家口、甘肃海甸峡)、泄水建筑物冲刷破坏 (如美国奥罗维尔) 等事故的发生在造成巨额经济损失的同时也表明, 高坝及泄水建筑物的安全问题尚未得到根本解决。为此, 开发了多项大坝与泄水建筑物表面防护与缺陷修复新型结构, 提出了满足工程要求的结构与材料设计指标, 解决了寒冷地区高面板坝锚固型卷材表止水结构易发生冰拔或冰压破坏、特高拱坝高压水劈裂、寒冷地区混凝土坝水位变化区冻融剥蚀破坏、泄水建筑物高速水流冲磨破坏等难题, 成果已成功应用于云南梨园、新疆卡拉贝利等新建高面板坝与青海纳子峡、四川布西等已建高面板坝的表止水修复、云南小湾高拱坝上游面防渗、河北潘家口和甘肃海甸峡等混凝土坝冻融破坏修复、以及青海李家峡、四川柳洪等水利水电工程的泄水建筑物抗冲磨防护等领域。

2 大坝表面防护与缺陷修复新型结构

2.1 混凝土面板接缝涂覆型柔性盖板止水结构

混凝土面板坝具有适应性强、工期短、造价低、就地取材、无需取粘土防渗等经济、环保优势, 在国内外得到广泛应用。混凝土面板接缝表层止水普遍采用三元乙丙橡胶板等防水卷材通过锚固作为防护盖板, 但存在盖板与混凝土面板之间有缝隙、压条及锚栓易锈蚀、水位变化区盖板容易受冰拔或冰压破坏等缺陷 (图 1),

影响了接缝止水的安全性与耐久性，造成面板坝防渗安全风险。为此，提出了涂覆型柔性盖板止水结构（图 2），该结构将 SK 单组分聚脲刮涂在填料和混凝土面板表面，形成全封闭的柔性防渗涂层，与混凝土面板粘接成一体，既为一道独立止水，又可保护下部填料（第二道止水），显著提高了面板坝接缝止水的安全性与耐久性。

通过室内外试验，对涂覆型柔性盖板的材料特性与结构性能进行了系统研究，提出了满足高面板坝接缝三向大变形和高水压下止水要求的防渗型 SK 单组分聚脲技术指标（表 1）及涂层厚度设计指标。研发了专用潮湿型界面剂，可渗入混凝土基面，保障了聚脲涂层与混凝土面板的强粘接，粘接强度达到 2.5MPa 以上。2007 年开始在北京十三陵抽蓄电站上库面板进行 SK 单组分聚脲的粘接强度及耐久性测试，目前已跟踪检测 12 年，涂层无损坏、与混凝土基面粘接良好。

涂覆型柔性盖板止水结构具有表面防护可靠、防渗及耐久性好、易于施工等优势，与锚固型卷材止水结构的优缺点比较见表 2。2014 年首次大规模应用于坝高 155m 的梨园面板坝（图 3），经过五年多运行，止水效果良好，最大渗漏量仅 20 多 L/s，远小于同期建设的坝高 146m 的甲岩（>100L/s）等 150m 级面板坝。现已成功应用于卡拉贝利等新建高面板坝以及布西等已建高面板坝的表止水修复。

表 1 SK 单组分聚脲的主要技术指标

项目	防渗型	抗冲磨型	项目	防渗型	抗冲磨型
拉伸强度, MPa	≥15	≥20	粘结强度（潮湿面）, MPa	≥2.5	≥2.5
扯断伸长率, %	≥350	≥200	抗冲磨强度, h/（kg/m ² ）	≥20	≥25
撕裂强度, kN/m	≥40	≥60	低温弯折性, °C	≤-45	≤-45
硬度, 邵 A	≥50	≥80	吸水率, %	<5	<5

表 2 涂覆型柔性盖板止水与锚固型卷材止水的优缺点比较

序号	内容	锚固型卷材止水	涂覆型柔性盖板止水
1	设计理念	仅作为填料保护层	既为填料保护层，又是一道独立止水层
2	施工工艺	安装工艺较复杂，接头质量难控	涂刷工艺简单、快速，无接头
3	周边止水效果	盖板两侧不易压实、止水效果差	涂层与混凝土牢固粘接，周边止水效果好
4	适应变形能力	盖板柔性大，适应大变形	盖板柔性大，适应大变形
5	耐久性	三元乙丙板盖板耐老化较好，但压条及锚栓易发生锈蚀	单组分聚脲耐老化好，无压条及锚栓发生锈蚀的问题
6	与周边缝搭接	周边缝与面板接缝之间搭接困难，存在搭接缝	周边缝与面板接缝之间无搭接缝
7	与面板连接	需要在面板上钻孔，锚固连接	与面板粘接，对面板无损坏
8	寒冷地区	水位变化区盖板及压条易被冰拔坏	水位变化区涂层与冰不粘，防护效果好



图1 锚固型卷材止水典型破坏

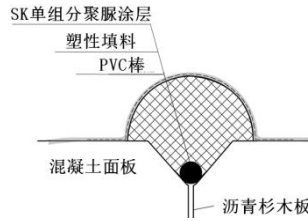


图2 涂覆型柔性盖板止水结构

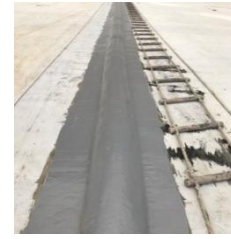


图3 梨园大坝接缝止水

针对寒冷地区面板坝锚固型卷材表止水结构易发生冰拔或冰压破坏等难题，提出了平覆型柔性盖板止水结构（图4），该结构将涂覆型柔性盖板止水结构中凸起的形状改为“平覆型”，即面板接缝V型槽内的填料与混凝土面齐平，将SK单组分聚脲平铺在填料和两侧混凝土表面。室内外试验结果表明，SK单组分聚脲在 -45°C 低温下仍具有良好柔性，扯断伸长率大于100%，而且与冰不粘，具有良好的抗冻性。图4中V型槽顶部的填料宽度为 L ，两侧的聚脲与面板混凝土之间设置可参与变形的柔性胶结层 L_1 以及与面板混凝土牢固粘接的刚性粘接层 L_2 ，设置柔性胶结层 L_1 延长了聚脲涂层的可变形宽度 $(L+2L_1)$ ，提高了表止水结构适应变形的能力。通过室内外试验，研究提出了满足寒冷地区高面板坝接缝止水要求的柔性胶结层 L_1 和刚性粘接层 L_2 的设计指标。2017年应用于坝高117.6m的纳子峡面板坝水位变化区破损的锚固型卷材止水结构修复（图5），修补后运行三年来效果良好。

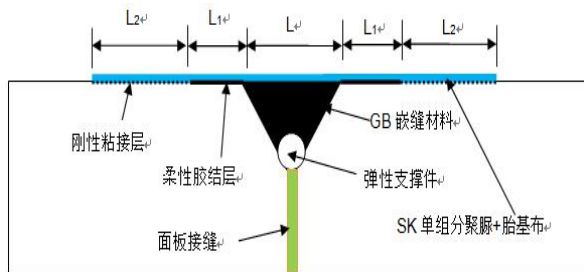


图4 平覆型柔性盖板止水结构



图5 纳子峡面板接缝止水修复

2.2 高拱坝上游面柔性复合防渗结构

国内外的工程实践及研究表明，坝高超过200m的特高拱坝坝踵部位因施工期属于强约束区，运行期应力复杂，可能会在基础或坝体部位出现裂缝，而坝踵部位的裂缝有可能会因为高压水作用发生水力劈裂而进一步扩展，甚至使防渗帷幕拉裂，影响工程安全运行。如奥地利的科恩布莱恩高拱坝曾发生过坝踵严重开裂漏水，修补加固极为艰难且费用巨大。为此，发明了特高拱坝上游面柔性复合防渗结构（图6）。柔性复合防渗结构的内层为粘贴GB塑性止水板，外层为在GB塑性止水板上

喷涂的 SK 聚脲防渗涂层。通过将 GB 塑性止水板网格布置及 SK 聚脲与混凝土之间良好的粘接，保证了 GB 塑性止水板复合 SK 聚脲防渗涂层能与混凝土坝面成为一体。该柔性复合防渗结构一方面可适应裂缝附近的大变形，防止裂缝附近外层的 SK 聚脲防渗涂层因变形而变薄，另一方面在高压水作用下 GB 塑性止水材料可流入填充混凝土裂缝，起到进一步的防渗保护作用。通过仿真模型试验，提出了 3mm 厚 GB 塑性止水板+4mm 厚 SK 聚脲防渗涂层的设计指标。仿真模型试验结果证明，该柔性复合防渗结构在 300m 水头作用下坝踵混凝土开裂 8mm 时，可防止高压水劈裂。

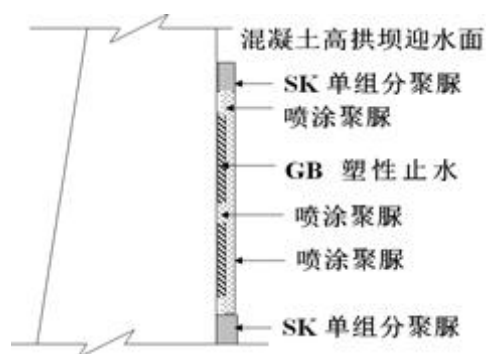


图 6 柔性复合防渗结构



图 7 小湾高拱坝上游面柔性复合防渗结构

2008~2009 年首次成功应用于坝高 294.5m 的云南小湾高拱坝上游面诱导缝附近以及踵高拉应力区域（图 7），防渗面积达 2 万 m^2 ，很好地解决了小湾高拱坝诱导缝及可能出现的裂缝渗漏问题，经过十余年运行，小湾高拱坝基础廊道干燥，总渗漏量仅为 2.4L/s，远小于格鲁吉亚英古里 ($>800L/s$) 等国际同类工程。与传统土工膜防渗结构相比，柔性复合防渗结构体系强度高、适应变形能力强、防渗性好、安全可靠，解决了特高拱坝运行期高压水劈裂难题，显著提高了大坝安全度。

针对寒冷地区混凝土坝迎水面冻融剥蚀破坏以及混凝土坝因施工质量缺陷造成渗漏等问题，提出了在混凝土坝上游面增设 SK 单组分聚脲复合胎基布涂层防护结构。室内外试验结果表明，SK 单组分聚脲不仅本体具有良好的抗冻性，不抗冻的混凝土试件涂刷 SK 单组分聚脲后冻融循环 300 次条件下无破损，防冻融效果好。该防护结构应用于河北潘家口（图 8 为处理前，图 9 为处理后）、甘肃海甸峡（图 10 为处理前，图 11 为处理后）、吉林松月等混凝土坝冻融破坏修复，起到了防渗、防冻融破坏及提升混凝土耐久性的综合效果。



图8 潘家口下库混凝土坝冻融剥蚀情况



图9 潘家口下库混凝土坝冻融剥蚀处理后情况



图10 海甸峡混凝土坝冻融剥蚀情况



图11 海甸峡混凝土坝冻融剥蚀处理后情况

2.3 抗推移质冲磨撞击破坏多层复合防护结构

磨损冲击破坏是泄水建筑物常见问题之一，尤其水流流速高、挟带砂石推移质时，破坏现象更为严重，影响工程安全。伸缩缝因易发生止水失效、适应变形能力不足等缺陷，在高速水流冲刷下伸缩缝两侧混凝土常常发生破坏，是泄水建筑物的薄弱部位。为此，提出了泄水建筑物伸缩缝新型防护结构（图 12），该结构由伸缩缝内填充的高弹性抗冲磨砂浆及表面涂刷 SK 单组分聚脲复合胎基布涂层共同组成，既能同时承受内、外水压力以及适应伸缩缝大变形的要求，又能抵抗高速水流冲刷。

通过室内外试验，研究了 SK 单组分聚脲涂层在不同流速下的防护能力，提出了满足高速含砂水流冲刷要求的抗冲磨型 SK 单组分聚脲主要技术指标（表 1）及其涂层厚度设计指标。试验结果表明，在 40m/s 高速含砂水流冲刷条件下，抗冲磨型 SK 单组分聚脲较 C60 混凝土耐冲磨提高 50 倍以上，抗冲磨效果良好。

表 3 高弹性抗冲磨砂浆的主要技术指标

项目	指标	备注	项目	指标	备注
拉伸强度, MPa	≥3.0	23°C, 28 天	耐冲击性能	>10000 次	参照环氧砂浆规范
粘结强度, MPa	>2.0	涂界面剂	耐老化性能	大于 30 年	
抗冲磨强度, h/(kg/m ²)	>2.5	流速 40m/s	低温柔性	柔性	-40°
拉伸率, %	10%~15%	根据配比不同可以调整	/	/	/

研制的高弹性抗冲磨砂浆，是将抗冲磨型 SK 单组份聚脲通过适当加入少量触变剂，与特种砂料混合制成一种具有高弹性的抗冲磨砂浆，并通过改良的施工工艺，克服了修补厚度受限和表面难以整平等施工难题，形成了一种新型的混凝土薄层抗推移质冲磨材料，其主要技术指标见表 3。该材料具有极佳的弹性、高强度、高抗冲磨性和耐老化性，解决了混凝土薄层修补易遇到的开裂、粘接面脱空、不耐冲击、老化等难题。相比于传统的聚合物水泥砂浆和环氧砂浆等修补材料，突出优点是弹性好、伸长率大、抗冲击能力强，尤其在水工混凝土抗冲磨部位的浅层破坏修补时，修补效果更好。同时，该材料具有良好的低温性能，在-45°C低温时依然能保持一定的柔性，可适用于寒冷地区的泄水建筑物修补工程。

伸缩缝新型防护结构以及抗冲磨型 SK 单组分聚脲已成功应用于青海李家峡(图 13) 和龙羊峡、浙江新安江、新疆喀拉塑克等工程的泄水建筑物表层抗冲磨防护。

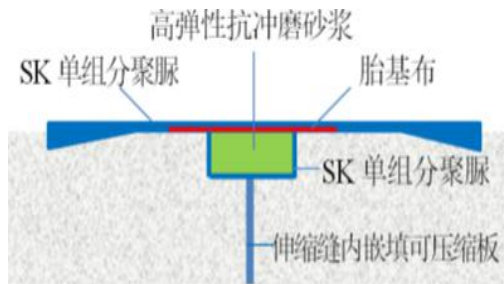


图 12 伸缩缝新型防护结构



图 13 李家峡溢洪道抗冲磨防护

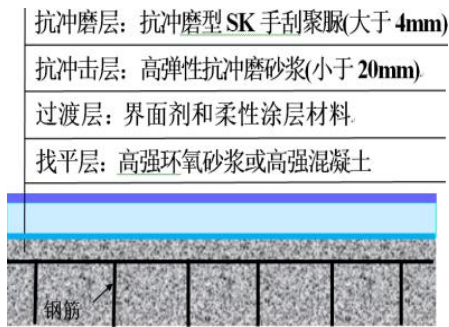


图 14 抗冲磨多层复合防护结构



图 15 柳洪水电站泄水闸底板修复

当高速水流中挟带砂石推移质时，砂石随高速水流运动在泄水建筑物表面呈滑动、滚动或跳跃状态前进，除滑动磨损外，还存在冲击式锤击破坏。破坏后的混凝土表面常严重凸凹不平，有较大冲击坑槽及线性沟槽，必须对破损的过流面混凝土部位进行修复。为此，提出了抗推移质冲磨破坏的多层复合防护结构（图 14），包括找平层、过渡层、抗冲击层及抗冲磨层。找平层为高强环氧砂浆或高强混凝土，用于回填冲蚀坑，找平及恢复原结构；过渡层为界面剂和柔性涂层材料，均匀涂刷于找平层的表面，用于保证抗冲击层材料与其下方的找平层材料良好粘接；抗冲击层为高弹性抗冲磨砂浆，用于吸收推移质石块冲击式锤击所产生的锤击能量；抗冲磨层为抗冲磨型 SK 单组分聚脲，用于防止推移质石块对其下方的抗冲击层的磨损，同时也可以吸收泄水时推移质对底板产生的部分锤击能量。

多层复合防护结构通过“以柔克刚”的设计思路，吸收跳跃式推移质石块对过流面的强大冲击力，有效解决了泄水建筑物高速水流推移质冲磨撞击破坏难题。2016 年首次应用于四川柳洪水电站泄水闸底板混凝土推移质（砂石最大粒径 70cm）冲磨破坏修复（图 15），已经受四年汛期泄水考验（图 16 和图 17），抗冲磨防护效果良好。



图 16 柳洪水电站泄水闸 2016 年汛期泄水



图 17 泄洪后闸室底板完好

3 结语

针对高坝与泄水建筑物表面防护与缺陷修复的难题,本文提出了混凝土面板接缝涂覆型柔性盖板止水结构、高拱坝上游面柔性复合防渗结构和抗推移质冲磨撞击破坏多层复合防护结构,并成功应用到高面板坝接缝止水防渗、高混凝土坝表面防渗、防冻融及耐久性防护、泄水建筑物抗冲磨防护等领域的上百座水利水电工程,为高坝与泄水建筑物的耐久性安全提供了保障。

参考文献

- [1] 孙志恒 李萌 SK 柔性防护涂料在伸缩缝及裂缝快速修复中的应用[J].大坝与安全 2011.1.
- [2] 孙志恒 关遇时 鲍志强 喷涂聚脲弹性体技术在尼尔基水利工程中的应用.水力发电,2006.9
- [3] 孙志恒 喻建清 300m 级拱坝喷涂聚脲防渗仿真模型试验及应用 水利水电科技进展 2009.6 Vol.29
- [4] 白书亚 晁兵 田云生 谢谦 钢筋混凝土表面复合涂层防护技术的研究进展 现代涂料与涂装 2010 年 12 月
- [5] 徐晶 刘国军 刘素花等 水性防腐涂料的研究进展 现代涂料与涂装 2010 年 12 月
- [6] 孙志恒 朱德康 王健平等 富春江水电站溢流面表面抗冲磨防护试验[J].水利水电技术,2013.9.
- [7] 孙志恒 邱祥兴 张军 面板坝接缝新型防护盖板止水结构试验[J].水力发电,2013,39(10):
- [8] 杨伟才 孙志恒 高拱坝迎水面聚脲涂层防渗结构动力变形性能试验研究 水利水电技术 2016 年 12 月
- [9] SUN Zhiheng XU Yao Xiong Haihua Development of a new flexible waterstop structure for CFRD joints, Hydropower & Dam, Volume twenty Three, Issue two.2016 (2):90-93.
- [10] 孙志恒 李敬玮 赵波 SK 单组分聚脲耐老化试验研究 水力发电 2016.9 (第 42 卷第 9 期)
- [11] 孙志恒 孙祥 吴娱 李萌 泄水建筑物推移质冲磨破坏修复技术 水力发电 2017 年 7 月
- [12] 马宇 孙志恒 单组分聚脲材料在寒冷地区某大坝溢流面防护中的应用 中国水利水电科学研究院学报 2017 年第一期
- [13] 孙志恒 宋兴鹏 耐久性防护材料进展及其在水利水电工程中应用 《中国水利学会 2018 年学术年会论文集》 中国水利水电出版社 2018 年 12 月
- [14] 孙志恒 李季 费新峰 寒冷地区混凝土面板接缝表层平覆型柔性止水结构 水力发电 2019.5