

防渗毯在北方河道设计中的应用研究

尤晓慧 张红 樊兆航 曹俊奕 罗嘉西

南京水科院瑞迪科技集团有限公司 江苏 南京 210029

摘要: 随着人口增长和气候变化,全球水资源问题持续加剧,我国北方地区因自然因素和人为因素等影响,水资源匮乏已成为制约区域经济社会发展的重要因素。本文针对北方地区水资源匮乏问题,探讨防渗毯在河道设计中的应用。通过分析北方水资源现状及河道渗漏问题,阐述防渗毯的工作原理和特性,重点研究防渗毯在北方河道设计中的具体应用,为未来防渗毯在北方河道设计中的推广应用提供依据。

关键词: 北方河道;水资源;防渗技术;河道设计

引言

河道作为水资源的重要载体,其渗漏问题严重影响了水资源的有效利用。近年来,防渗毯作为一种新型防渗材料,在水利工程中得到了广泛应用。本文旨在探讨防渗毯在北方河道设计中的应用,以期为提高水资源利用率、缓解北方水资源短缺问题提供参考。

1 北方水资源现状及河道渗漏问题

北方地区水资源总量不足,人均水资源占有量远低于全国平均水平。随着经济社会发展和人口增长,水资源供需矛盾日益突出,水资源现状面临严峻挑战。地区年均降雨量约为400-600毫米,且分布不均,主要集中在夏季,导致季节性干旱频发,同时,蒸发量高,年均蒸发量在1200-2000毫米之间,远超降雨量,加剧了水资源短缺。此外,地表水和地下水的渗漏问题显著,河道作为水资源的重要载体,其渗漏问题进一步加剧了水资源短缺,据统计,北方地区河道渗漏量可达到总流量的20%-30%,严重影响了水资源的有效利用。

河道渗漏不仅造成水资源浪费,还会引发一系列生态环境问题。渗漏导致地下水位上升,将土壤中的盐分带到表层,水分蒸发后盐分滞留,引起土壤盐碱化,盐分积累破坏土壤结构,降低透气性和透水性,影响植物生长。同时,渗漏导致河道水量减少,使一些对水量敏感的物种难以生存,影响沿岸生态系统,破坏生物多样性,水量减少还会减缓水体流动,使污染物浓度上升,水质恶化,增加水体富营养化风险,引发藻类大量繁殖,破坏生态平衡^[1]。

2 防渗毯的工作原理及特性

防渗毯是一种新型土工合成材料,是由短丝土工布及编织布,把膨润土颗粒固定在两层土工布之间,所以我们

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号Y923015、Y323001)

常称为膨润土防渗毯,膨润土防渗毯因其优质的防渗防水性能在河道防渗、人工湖、水利工程中广泛应用。

2.1 防渗毯的工作原理

防渗毯主要工作原理是通过形成连续、致密的防渗层,阻止水分渗透。

防渗毯的核心材料是钠基膨润土,其主要成分为蒙脱石矿物,当钠基膨润土遇水时,层间钠离子(Na^+)会与水分子结合形成双层水化壳,导致体积膨胀至原体积的15-17倍,形成致密的胶状防水层。这种膨胀特性使膨润土颗粒填充防渗毯内部的纤维间隙,有效阻断水的渗透通道,渗透系数可低至 10^{-9}cm/s 。

防渗毯通常由三层组成:上层为无纺布(透气过滤层)、中层为钠基膨润土颗粒,下层为编织布(支撑层)。针刺工艺将膨润土颗粒固定在纤维结构中,形成稳定的三维网路,当水分接触膨润土时,膨胀形成的胶体不仅封闭自身空隙,还能通过无纺布的过滤作用防止颗粒流失,同时编织布提供机械支撑,增加整体抗拉强度。

防渗毯具有独特的自修复能力,若因外力(如根系穿刺或机械损伤)产生孔洞,周围膨润土颗粒会随水分迁移至破损区域,重新膨胀并填补缝隙,恢复防渗完整性,使其在复杂环境中具有长期稳定性。

2.2 防渗毯的主要特性

钠基膨润土具有高密实性与低渗透性,膨润土在水压下形成厚度约3mm的高密度隔膜,其透水性仅为 $5\times 10^{-11}\text{m/s}$,相当于30cm厚天然黏土密实度的100倍,可有效抵御静水压达1.0MPa。膨润土为天然有机材料,具有良好的耐久性,能抵抗紫外线、化学腐蚀和生物侵蚀,使用寿命与工程结构同步,且不受冻融循环影响,可在-20℃至40℃环境下施工,此外,防渗毯还具有较强的抗拉强度和延伸率,减少开裂风险,其柔韧性可适应地基不均匀沉降,搭接部位错动时仍能保持防渗效果。防渗毯无需加热或黏贴,仅

需通过膨润土粉、钉子和垫圈固定,幅宽可达6米,大幅度减少接缝梳理,提升施工效率^[2]。

3 防渗毯在北方河道设计中的应用

3.1 防渗毯的设计原则

在北方河道设计中应用防渗毯时,应综合考虑气候特征、生态保护、防洪排涝需求及工程耐久性等多方面因素。以下是其需遵循的设计原则:

3.1.1 气候适应性原则

北方地区冬季严寒,冻融循环频繁,需考虑低温对防渗毯性能的影响,选用钠基膨润土含量 $\geq 4.5\text{kg}/\text{m}^2$ 的高规格防渗毯,其膨胀率在 -20°C 环境下仍能保持85%以上,避免冻胀破坏结构完整性。防渗毯施工需避开冬季,防止膨润土未完全水化前遭遇冻结,建议在5-10月气温高于 5°C 时作业。河道边坡需增设砂砾保护层,缓冲冻胀应力,坡脚设置排水盲沟,避免冰层挤压导致防渗毯位移。

3.1.2 生态协调性原则

北方河道多位于生态脆弱区,防渗毯的应用需平衡防渗与生态修复需求。可采用“防渗+导渗”复合设计,河道底部敷设防渗毯阻断垂直向渗漏,两侧保留天然透水层维持横向生态补水功能。防渗毯上层可覆盖种植土并结合景观设计撒播草籽,利用针刺无纺布孔隙供植物根系穿透,形成生态边坡,提升河道自净能力。每隔一定的距离可以考虑取消防渗毯的敷设,设置为砾石生态岛,保留河道生物通道,为底栖生物提供栖息空间。

3.1.3 防洪排涝强化原则

北方河道汛期水流湍急,需确保河道防渗系统与河道防洪排涝结构协同作用。防渗毯的锚固需保证其稳定性,抵御洪水洪水的冲刷。防渗毯末端与河道边坡可采用“U型地锚+防滑钉”双重固定,锚固间距 $\leq 1.5\text{m}$,抗拉强度 $\geq 8\text{KN}/\text{m}$,此外,还可采用沟槽锚固,根据防渗土工膜的使用条件和受力情况,挖合适宽度和深度的锚固沟,一般宽度为0.5-1.0m,深度0.5-1.0m,挖好锚固沟后,将防渗毯铺设在锚固沟里并回填土压实。防渗毯末端与混凝土护岸可采用射钉锚固,使用射钉枪将射钉打入混凝土中,然后用压条固定防渗毯,压条多为不锈钢材质,宽度大于2cm,厚度大于2mm,射钉之间的距离应不小于0.4m,压条暴露部位进行防腐,防锈处理。

3.2 防渗毯的施工工艺

3.2.1 施工工艺流程

防渗毯的施工需遵循“基层处理→材料验收→定位铺设→接缝处理→锚固固定→保护层施工”的标准化流程,具体如下:

基层处理:对场地进行平整,清除河道基底碎石、树根等尖锐物。防渗毯放置的基础层,当为黏性土时,基础层压实度不应小于90%,当为无黏性土时,基础层相对密度不应小于0.6,平整度偏差 $\leq 30\text{mm}/2\text{m}$ 。在地下水位较高区域(如北方盐碱地),沿河道纵向开挖盲沟,填充级配砾石(粒径5-20mm),防止地下水顶托破坏防渗层。对软弱地基采用预压法(荷载 $\geq 80\text{kPa}$)处理,沉降量控制在5%以内。

材料验收与准备:现场抽检膨润土单位面积质量($\geq 4.8\text{kg}/\text{m}^2$)、针刺密度($\geq 200\text{刺}/\text{m}^2$)及渗透系数($\leq 5\times 10^{-11}\text{m}/\text{s}$),指标应符合《钠基膨润土防水毯应用技术规程》(T/CECS 562-2018)的相关要求。防渗毯需架空存放,覆盖防雨布,避免阳光直射导致膨润土提前水化。

定位铺设:防渗毯应顺水流方向铺设,弯道部位采用扇形裁切法减少褶皱,铺设时将无纺布面朝向迎水面,编织布面接触基层。河道坡度 $> 1:3$ 时,采用“自上而下”滚铺法,每铺5m用沙袋临时固定。

接缝与锚固处理:防渗毯铺设需注意接缝处理和搭接宽度,基础层良好时,搭接宽度不应小于300mm,软弱基础部分搭接宽度不应小于500mm。在搭接部位的上下两层钠基膨润土防渗毯中间,应均匀撒上 $0.6\text{kg}/\text{m}^2-2.0\text{kg}/\text{m}^2$ 膨润土粉,斜坡上搭接部位两层钠基膨润土防渗毯中间宜采用膨润土胶泥。接缝处通常采用热熔焊接或胶粘剂粘接,确保接缝强度不低于防渗毯本体。

保护层施工:防渗毯上应设置保护层,保护层宜采用素土,保护层压实度不应小于80%,根据工程需求和功能等不同,保护层厚度不应小于300mm。对于有抗冲要求的部位,保护层上应增设防冲保护措施,并采用防止保护层渗透破坏的措施。对于有种植要求的部位,应设置满足种植土厚度要求的种植土层。水位变化较大且地下水位较高时,在防渗毯下应设置排水装置以降低外水压力或采取抗浮措施。

3.2.2 施工注意事项

防渗毯施工环境温度宜在 $5-35^\circ\text{C}$,风速 > 6 级或雨雪天气立即停工,已铺设区域用PE膜临时覆盖。铺设后48小时内需完成保护层施工,防止膨润土因暴晒失水或雨水过度浸泡。每日施工后使用电导率仪检测接缝区域(电导率差值 $\leq 10\%$),发现渗漏点及时注浆修补。施工机械限定在作业带内,避免碾压河道原生植被,生态敏感区采用可降解纤维锚杆减少对土壤微生物的干扰。铺设完成后每 1000m^2 取3个点位进行真空盒检测(负压 -53kPa ,持压2min),无气泡产生为合格。防渗毯的长

期监测可通过安装渗漏预警系统（电极式传感器），定位精度达±0.2m，数据可实时上传管理平台。

3.3 防渗毯的维护管理

防渗毯作为河道、水利工程中的核心防渗屏障，其长期性能的稳定直接关系工程安全和生态效益，防渗毯的维护管理对于确保其长期性能至关重要。目前防渗毯的维护管理主要有以下方式及重点。

定期巡查是维护管理的重要内容，每月1次人工巡检，重点检查锚固点、接缝、植被覆盖区及人为活动频繁区域，记录裂缝宽度，膨润土流失量及保护层完整性。每年汛期前后开展真空盒监测，电火花检测，覆盖100%接缝区域，渗漏点定位精度达±0.3m。每5年钻孔取样，分析膨润土膨胀指数，蒙脱石含量，全面评估材料老化程度。此外，可以通过智能监测系统进行监测。沿防渗毯纵向50m植入光纤传感器，实时监测应变和温度，通过算法预测潜在破损。在防渗毯两侧布设电极阵列，电位差大于15mv时自动报警，渗流路径识别准确率大于95%。搭载热红外相机和高清摄像头，季度性扫描河道，识别温度异常区域机械损伤。未来防渗毯可结合数字孪生系统，构建BIM+GIS可视化模型，模拟材料老化规律，实现预测性维护，研发自修复材料，当防渗毯破损时自动释放修复材料修补裂缝^[3]。

4 防渗毯在北方河道应用中的案例分析

河道工程不仅承载着防洪排涝的基础功能，更肩负着构建蓝绿交织的生态水网，实现水资源可持续利用的战略使命。然而，北方河道由于降雨总量较小，蒸发量、渗漏量大等因素，地区可转化为地表水资源量极其有限，年均降雨量约为480毫米，降水年内分布不均，80%以上集中在汛期，且年际间变化很大，多年平均蒸发量约1700毫米，受气温影响，年内变化显著，考虑到北方地区水资源短缺，河道水系应根据地质条件做好防渗处理。

以北方某河道为例，该水系全长约2.38公里，根据岩土工程勘察报告，水系开挖土层基本位于粉土层，垂直渗透系数为 $2.58 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，水平渗透系数为 $2.87 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ，渗透性分级为中等透水，工程采用钠基膨润土防渗毯进行全河段防渗处理，减少渗漏损失。河道底部整体铺设防水

毯，膨润土防水毯以下建基面整平（压实度 ≥ 0.90 ），膨润土防水毯以上，有种植区域，覆300mm种植土和300mm素土并夯实（压实度 ≥ 0.91 ）；无种植区域，覆600mm素土并夯实（压实度 ≥ 0.91 ），主河槽上口两侧设置梯形锚固沟，底宽0.5m，深0.6m，坡比1:1，待膨润土防水毯垫铺设后，再用回填土覆盖压实。河道设计采用膨润土防渗毯工艺，膨润土防渗毯系数为 $1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，近期为 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，即3m/a，远期渗漏趋于稳定取 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ，即0.3m/a。施工过程中，严格控制基础面平整度和防渗毯铺设质量，接缝采用双焊缝焊接，并进行气密性检测。工程完工后，渗漏趋于稳定，河道渗漏量减少，显著提高了水资源利用率^[4]。

与传统防渗相比，防渗毯具有施工简便、防渗效果显著、使用寿命长等优势。然而，防渗毯的应用也存在一些问题。首先，初期投资成本较高，可能影响其在一些地区的推广应用。其次，防渗毯的铺设对基础面要求较高，增加了施工难度和成本。

结语

防渗毯在北方河道设计中的应用研究表明，该技术能有效减少河道渗漏，提高水资源利用率，对缓解北方水资源短缺问题具有重要意义。防渗毯具有优异的防渗性能、耐久性和适应性，是河道防渗工程的理想选择。然而，其应用也面临初期投资高、施工要求严格等挑战。未来研究应着重于降低防渗毯成本、优化施工工艺，并加强长期性能监测，以促进防渗毯在北方河道设计中的广泛应用。

参考文献

- [1]杨玲,周志华,李广志.膨润土防渗毯施工技术分析与探讨[J].北京水务,2008.(2):36-39.
- [2]王帅,朱清民.浅谈膨润土防水毯在水利工程中的应用[J].科技信息,2009(20):16-17.
- [3]孔晓武.膨润土防水毯在水利防渗工程中的关键技术与应用[J].河南水利与南水北调,2024.09(13):87-88.
- [4]沈承秀.新型环保防渗材料—钠基膨润土防水毯在城市生态水利工程中的应用[J].水利水电技术,2007.10(02):96-97