

新型土工合成材料在堤防防渗施工中的效果对比分析

刘 涛 张松艳

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 南阳 473000

【摘 要】：堤防防渗层需要阻断渗流，也要适应堤身沉降、坡面变形和施工接缝。复合土工膜、膨润土防水毯及喷涂型聚合物复合材料在渗透性能、延伸能力、基层适应性、接缝方式和维修条件上存在差异。围绕材料本体、界面摩擦、接缝可靠性和缺陷检测建立对比维度，分析三类材料在砂质堤基、变形敏感区、狭窄节点及水位波动条件下的适用边界，并提出基层验收、铺设焊接、锚固过渡、保护层施工和完整性复核方法。材料选择不能只比较名义渗透系数，还应考察施工损伤和长期变形后的整体防渗效果。

【关键词】：土工合成材料；堤防防渗；复合土工膜；效果对比

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.018

引言

土工合成材料具有薄层、连续和施工速度快等特点，已用于堤身斜墙、水平铺盖、垂直防渗及穿堤建筑物过渡部位。不同材料的防渗机理并不相同：土工膜依靠完整膜体阻水，复合膜还利用织物增强与保护，膨润土毯依靠颗粒吸水膨胀形成低渗透层，喷涂复合层则依靠基层附着和连续成膜。实验室指标合格并不代表现场铺设后仍保持完整，基层尖物、焊缝缺陷、锚固滑移和保护层碾压都可能改变结果。

1 堤防防渗对土工合成材料的性能要求

堤防防渗层承受的不是单一静水压力，还包括堤身沉降、坡面剪切、水位涨落、施工荷载和温度变化。材料需具备足够的抗渗、拉伸、延伸、顶破和耐久性能，界面还要维持稳定摩擦，避免沿坡滑移。防渗层穿过齿槽、压脚、排水体及建筑物连接处时，几何转折会产生应力集中。水利工程用土工膜设计应把材料选择与施工导流、基础条件共同考虑^[1]。对比方案应先明确布置形式、设计水头、基层粒径、允许变形和保护层工艺，再比较材料指标。若只按单位面积价格选择，可能忽略搭接损耗、焊接设备、膨润土保护、基层处理和后期检测成本，使低价材料在现场形成更高的质量风险。

2 新型土工合成材料的防渗机理

2.1 复合土工膜的膜体阻水与织物增强

复合土工膜由聚乙烯等膜材与一层或两层土工织物复合。膜体承担主要阻水功能，织物提高抗拉、抗顶破能力并减轻基层颗粒直接刺伤。材料沿卷幅方向与横向的力学性能可能不同，铺设方向应结合堤坡主变形方向和施工展开条件确定。膜厚、复合剥离强度、幅宽和表面缺陷是进场检查重点。聚氨酯等新型复合方式可改善层间结合和柔韧性^[2]。但工程采用时仍要核实材料标准、耐水与老化资料。复合层一旦剥离，织物吸

水后可能沿缺陷扩散，表面湿痕不一定对应膜体孔洞位置。接缝通常需剥离或留边后焊接膜层，织物再搭接保护，不能把织物缝合当作膜体密封。

2.2 膨润土防水毯的水化膨胀与自愈

膨润土防水毯由钠基膨润土夹持在土工织物之间，遇水后颗粒膨胀并在约束条件下形成低渗透胶体。它对细小穿刺具有一定自愈能力，搭接可利用膨润土粉或密封胶加强，复杂节点施工较灵活。其性能依赖充分约束、连续搭接和适宜水化环境；坡面保护层松散、上覆压力不足时，膨润土可能自由膨胀后被水流带走。高盐、含钙水或反复干湿循环也可能影响膨胀状态。运输和铺设期间必须防止提前水化，雨前不能大面积展开。毯体接缝顺水方向布置，上幅压下幅，坡顶锚固后自上而下铺设。穿堤管、混凝土边界和阴阳角需增铺附加层，单靠主幅搭接难以覆盖三维变形。

2.3 喷涂或涂覆型复合防渗层的连续成膜

喷涂聚合物、聚氨酯复合膜等材料可在混凝土、金属或局部土工织物基层上连续成膜，适合狭窄节点、异形构件和原有防渗层修补。其优势是减少预制卷材搭接，并能顺应细部几何形状；限制在于基层含水、粉尘、温度和粗糙度对附着力影响明显，现场膜厚均匀性依赖设备与操作。涂层一次过厚会出现气泡或固化不均，过薄则难以抵抗针孔和基层裂缝。堤身大面积土坡若缺少稳定基层，喷涂层容易随表土松动而破坏，因此更适合作为节点增强或与织物复合使用。质量验收需记录材料批次、配比、喷涂压力、环境条件、湿膜或干膜厚度，并用附着与针孔检测验证。

3 防渗效果与施工适应性对比

3.1 抗渗和变形适应能力对比

完整土工膜的本体渗透率低，对较高水头下的阻水效果明

确,但单个针孔或焊缝通道会使局部渗漏集中;复合织物能减少施工刺伤,却不能修复已贯通膜体的缺陷。膨润土毯的整体渗流路径较分散,细小孔洞可在充分约束和适宜水质下自愈,但搭接张开或水化物被冲刷时防渗能力下降。喷涂复合层在复杂节点可形成连续覆盖,基层裂缝宽度超过材料延伸能力后仍会开裂。变形敏感堤段应比较材料断裂伸长、接缝伸长和界面滑移,而非只看母材拉伸。复合土工膜在围堰、水库和渠道工程中的应用说明其效果高度依赖接缝与保护层施工^[3]。设计可设置模拟基层错台或拉伸的节点试验,观察接缝是否先于母材失效。

评价材料在堤坡上的适应性还要考虑界面摩擦。复合膜织物表面通常比光面膜具有更高摩擦,但织物吸水、沾泥或复合剥离后参数会变化;膨润土毯水化后界面状态也不同于干态。坡面防渗层上覆土施工时,推土方向和落料高度可能产生向下拖拽,若锚固槽尚未稳定,材料会在坡脚起皱。对比试验应分别采用设计基层和保护层材料,在干燥与可能的湿润条件下检查界面剪切,并把施工机械荷载纳入稳定分析。材料具有较大断裂伸长并不等于接缝能够同步伸长,焊缝、搭接和锚固三处取最不利者作为变形边界。

3.2 基层适应、铺设效率与接缝质量对比

复合土工膜卷幅大、机械展开效率高,基层必须平整密实并清除尖石、树根和硬质杂物;坡面转折过急时容易架空。焊接质量可采用试焊、充气、真空或剥离试验检查,缺陷定位相对明确。膨润土毯较厚,对轻微基层不平整的容忍度较高,搭接工艺不需热焊,但材料自重大,吊运和坡面固定要求更高,雨雪天气施工窗口较窄。喷涂材料不需大幅展开,异形节点效率较高,大面积施工则受基层干燥和喷涂设备制约。渠道和水利工程实践表明,复合膜铺设质量与基层、搭接和保护施工紧密相关^[4]。方案比较应按每千平方米统计基层处理、铺设、接缝检测和返修工时,不能只比较展开速度。

3.3 耐久、检测与维修条件对比

埋设后的土工膜免受紫外线,但会受到化学介质、温度、应力和微生物环境长期作用。复合膜缺陷可在施工阶段检测,保护层完成后定位和修补难度增加;维修常需开挖到膜面。膨润土毯对穿刺有一定适应性,长期性能受约束、离子交换和反复水化影响,渗漏位置也可能与表面出水点偏离。喷涂层暴露使用时需验证耐候性,埋设节点则要保证保护层不与涂层粘连破坏。可维护性取决于防渗层埋深、堤坡通行和水位调度。对需要频繁检修的穿堤建筑物连接区,可把可视、可测和局部重做作为重要权重;长期深埋的主体堤段则优先考虑材料耐久和施工阶段一次验收可靠性。材料防渗机理对比见图1。

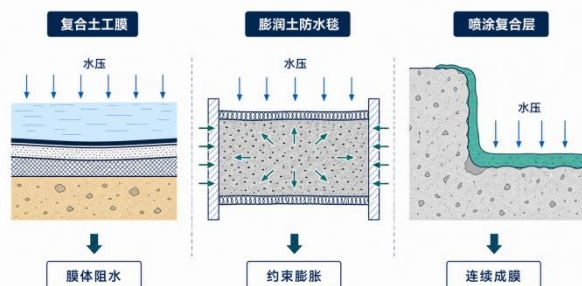


图1 三类土工合成防渗材料机理对比

4 不同堤防场景下的材料选择

4.1 砂质堤基与大面积斜墙防渗

砂质堤基颗粒迁移和不均匀沉降风险较高,大面积斜墙通常需要连续性强、可机械铺设且接缝可检测的材料。复合土工膜配合整平层、排水层和保护层可形成明确的防渗体系,底部与齿槽或水平铺盖可靠连接。砂粒较粗或存在尖角时,增加土工织物保护并控制压实机械距膜面的最小覆土厚度。现有砂堤防渗应用表明,膜体布置需与堤基处理和锚固共同设计^[5]。若堤身预计发生较大差异沉降,节点预留松弛量并采用弧形过渡,不能把膜材拉紧固定。膨润土毯可用于局部加强,但在长坡铺设时需充分验证界面稳定和上覆约束。喷涂层不宜直接承担松散砂坡的大面积主体防渗。

4.2 变形敏感区与穿堤建筑物节点

堤防与闸涵、泵站、管道连接处材料刚度突变,沉降差和温度变形集中。节点宜采用柔性主防渗层加附加增强层,转角做圆弧或倒角,锚固槽与混凝土表面密封形成连续路径。复合膜在规则大面保持连续,靠近异形构件时预留展开余量;膨润土毯可贴合局部几何,并用颗粒或密封膏处理螺栓和穿孔;喷涂复合材料适合封闭难以热焊的细部,但要与主膜做经验证的搭接。不同材料的连接不能凭现场经验临时决定,应制作足尺样板,完成拉伸、剥离或水密检查。节点施工结束后测绘隐蔽位置,记录各层搭接和锚固尺寸,为渗漏排查保留准确坐标。

穿堤管道周边应避免把防渗层直接绷紧在管壁上。可在管周设置柔性过渡和附加环带,使堤身沉降时材料有可展开余量;管壁密封区先清除锈蚀、浮浆和油污,材料与金属或混凝土的粘结工艺经样板确认。变形缝两侧分别锚固,跨缝层按设计形成褶皱或可伸缩构造,不用刚性密封膏填死全部位移空间。闸涵翼墙与堤坡交界处保护层厚度变化大,回填时采用小型设备分层压实,禁止机械贴近防渗层转向。施工测量记录除标出平面坐标外,还需标明高程、主膜与附加层的先后顺序及材料批次,后期出现渗流异常时可据此选择最小开挖范围。

5 堤防防渗施工质量控制

5.1 进场检验与基层验收

材料进场按生产批次核对规格、幅宽、膜厚、单位面积质量、力学性能和外观,卷材边缘破损、复合剥离、膨润土分布不均或包装受潮单独隔离。抽样覆盖不同卷号,样品避免来自人为挑选的完好端部。储存区平整防水,卷材按要求堆放,膨润土毯增加防雨措施。基层验收记录压实、平整、坡比、含水量和杂物清理,发现尖石、树根、孔洞及陡坎先处理。复合土工膜防渗施工质量控制强调基层与铺设准备^[6]。基层验收后尽快铺设,间隔期间降雨、车辆碾压或冻融导致状态变化时重新检查。施工道路和卷材展开区分离,机械不得在裸露防渗层上转向或急停。

5.2 铺设、接缝、锚固与保护层施工

铺设按设计方向展开,保留适度松弛,气温较高时防止膜面过度膨胀,低温时避免强行拉伸。热焊前清洁、干燥接缝,按当日温度和风速完成试焊,试样通过后固定焊接参数。双焊缝逐条编号并检测,修补片边缘圆滑且覆盖缺陷范围。膨润土毯搭接宽度、附加粉用量和固定点按方案执行,提前水化区域更换而非晾干继续用。坡顶锚固槽在铺设后及时回填夯实,坡脚与排水体连接避免形成渗流短路。保护层从已覆盖区域向前推进,控制落料高度和设备荷载;发现卷材隆起、位移或破损立即停工。每完成一个作业单元即检查并绘制接缝图,不等全段覆盖后集中补资料。防渗施工质量链见图2。

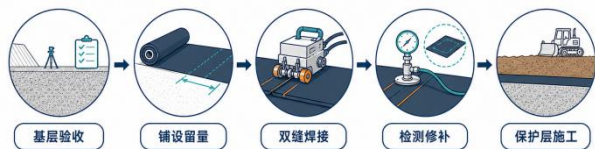


图2 土工合成防渗层施工质量控制流程

参考文献:

- [1] 王艳,曹林佳.水利工程用土工膜材料与施工导流方案优化设计[J].粘接,2026,53(3):755-758.
- [2] 李翠玲,蒋冬阳,蒋学行.新型聚氨酯复合土工膜的制备方法研究[J].新型建筑材料,2020,47(8):167-169.
- [3] 宋雷.复合土工膜防渗技术在锦凌水库围堰工程中的应用[J].地下水,2019,44(4):254-256.
- [4] 王海民.复合土工膜在水利工程渠道防渗施工中的运用研究[J].黑龙江科技信息,2015,(25):203.
- [5] 宋德崇.复合土工膜防渗技术在灌渠改造工程中的应用[J].水利科技与经济,2015,21(5):113-114.
- [6] 徐天下.防渗复合土工膜在水利工程中的施工及质量控制探析[J].中国高新技术企业,2015,(10):131-132.

5.3 完整性检测、渗流监测与缺陷处置

施工阶段的完整性检查包括外观、接缝无损检测、抽样剥离或剪切试验及节点水密验证。检测设备每天核查,缺陷以坐标和焊缝编号定位,修补后重新检测。保护层完成后检查沉陷、滑移和异常湿斑,并利用测压管、渗流量或堤后出逸点观察运行趋势。首次蓄水或水位快速变化阶段加密监测,将水位、降雨和渗流响应放在同一时间轴。渗流异常时先排除排水系统堵塞、地表水和仪器漂移,再结合施工接缝图缩小范围。需要开挖修补时分层剔除保护层,避免扩大损伤;修补材料与原层相容,边界搭接经复验后恢复。缺陷原因进入同类节点复查,不能只修一个漏点。

接缝检测结果按施工班组、焊机和时间段统计,若某一时段缺陷率集中上升,应追查温度、风速、焊机参数和操作人员,而不是逐条补焊后继续覆盖。保护层施工前由铺设、检测和监理三方共同移交,未检接缝、临时压重和工具杂物必须清零。运行期渗流量出现变化时,结合库水位滞后关系判断;降雨后短时增加可能来自表面入渗,随水位持续增长且测压同步抬升则需重点检查防渗层。修补开挖完成后先检查缺陷形态,区分基层刺破、接缝脱开、材料老化或保护层拖移,处置措施针对根因。复原保护层后恢复监测,并经历至少一次代表性水位变化再评价修补效果。

6 结语

新型土工合成材料在堤防防渗中的效果取决于材料机理与工程场景是否匹配。复合土工膜适合大面积连续铺设且接缝可检测的主体防渗;膨润土毯对复杂基层和细小穿刺具有一定适应性,但依赖约束和水化环境;喷涂复合层便于处理异形节点,却对基层和施工参数更敏感。选材时应把变形、界面稳定、施工窗口、缺陷检测和维修可达性纳入同一评价。基层验收、接缝编号、保护层控制和运行渗流监测连续衔接,才能使实验室材料指标转化为堤防整体防渗能力。材料比较结果还应落实到设计图、施工样板和验收项目中,明确主体大面、异形节点和维修区分别采用何种材料及连接方式;若运行水质、堤身变形或保护层条件发生变化,应重新核对原选材边界,不能继续沿用已不适合的原有对比结论,并应重新验证。结合工况动态优化选材方案,全流程管控保障堤防防渗长效稳定。