水利工程堤防防渗施工技术的应用

陈晗 穆琳

河南省豫东水利保障中心，中国·河南 开封 475000

摘要：堤防属于水利工程所涉体系中的基本构成部分，其防渗状况对整个工程的安全及所处区域的防洪能力是直接制约因素。堤防发生渗漏是水利工程里最普遍、最危险的一类病害，如不能加以有效治理就可能造成管涌、滑动或堤坝溃决诸项事故。文中对堤防渗漏的成因和危害作较完整的归纳说明，将劈裂灌浆、高压喷射灌浆、混凝土防渗墙、土工膜防渗以及复合防渗诸种方法纳入考察范围，分别论述其工艺要点、技术特征及适合使用的情形，又结合选型标准、施工质量及后期维护提出总体性建议，力求以理论和实际两方面内容对水利工程堤防的防渗作可行性的指导。

关键词：水利工程；堤防；防渗施工技术；灌浆技术；防渗墙；质量控制

Application of Seepage Control Construction Technologies in Water Conservancy Dams

Chen Han, Mu Lin

Henan East Water Conservancy Security Center, China Henan Kaifeng 475000

Abstract: Embankments are a fundamental component of the systems involved in water conservancy projects, and their impermeability directly determines the safety of the entire project and the flood defence capacity of the surrounding area. Seepage in embankments is one of the most common and dangerous types of defects in water conservancy projects; if not effectively controlled, it may lead to incidents such as piping, slippage or embankment breaches. This paper provides a comprehensive summary of the causes and hazards of embankment seepage, examining various methods including split grouting, high-pressure jet grouting, concrete impermeable walls, geomembrane waterproofing and composite waterproofing, discussing their key technical aspects, technical characteristics and suitable applications. Furthermore, it offers comprehensive recommendations regarding selection criteria, construction quality and long-term maintenance, aiming to provide practical guidance on embankment waterproofing in water conservancy projects through a combination of theoretical and practical considerations.

Keywords: Water conservancy engineering; Embankment; Seepage control construction technology; Grouting technology; Cutoff wall; Quality control

0 引言

水利工程应视为国家基本建设中不可或缺的一环，堤防所承担的防洪功能要求其具有良好防渗性。由于建设时间较早或所涉地质较复杂，堤防出现渗漏的概率较大，由此既损失水量又易产生管涌、流土一类的渗透病害，甚至发生溃堤现象，危害百姓生命财产。所以防渗技术的选择必须是科学的。现在已有灌浆法、防渗墙、土工材料诸项成熟的防渗手段，材料与工艺均获较大发展。本文从渗漏成因出发，就有关施工技术作一归纳说明（含原理、做法、使用要点），将分析结果用于工程实际的指导或参考。

1 堤防渗漏的成因与危害分析

1.1 堤防渗漏的主要成因

堤防发生渗漏是由很多因素共同促成的，有关成因应结合地质状况、工程本身及运行管理来分别加以说明。

（1）有关地质条件的论述。堤防所依据的基础地质状况是其渗透稳定性的基本要素。如果堤基内有砂砾石层（透水性强）或粉细砂层乃至岩溶构造，那么上下游水头差就很容易促成集中式渗漏通道。对于堤基和透水层相接的区域来说，接触面上的非均质现象多为渗漏的有利路径。另外像古河道、深埋洼地这类地质缺陷在堤基中出现时，也常常是渗漏的诱发性因素。

（2）所讨论的是工程质量问题。当堤防施工所用材料未达到适当密实度或级配不好、接合面没有正确处理时，堤身中就可能出现渗透弱点。特别是新旧堤体交界处或填筑各层相接的位置因施工时间、压实要求有别而难以完全结合，是渗漏较易发生的地段。同时施工时发现的蚁穴、

兽洞类隐患如不加以清除，亦可能构成集中渗水、渗漏的通道。

（3）所称的运行管理因素。堤防如要长期使用，就须面对水位上下、干湿交替或冻融循环这类自然现象，此时堤身土体本身即开始劣化，其孔隙比有上升、渗透性增大的倾向。白蚁或鼠类进入堤内之后往往造成空隙、走道，对渗漏形成促进作用。而超设计标准的洪水或者人造成的堤防损害，亦是使堤防发生或加重渗漏的极为重要的诱发因素。

1.2 堤防渗漏的危害机理

堤防渗漏的危害主要体现在以下几个方面：

（1）所称的渗透破坏。若堤身或堤基中渗流所对应的水力梯度达到临界程度，土体内细颗粒即会因渗流力而流失，产生管涌或流土。管涌是突然发生、迅速扩展的现象，它出现后如未作处理，往往很快促成完整的渗漏通路，使堤防失去支撑、发生溃决的情况。

（2）堤身本身已出现结构劣化。若长期有渗流发生，堤身所含的可溶性盐将随水而解、被运走，土体趋向松散、强度变弱。此时渗流所带的微小颗粒又常堆积于下游坡面（作为反滤层），渗流状态因而有所改变，局部的渗透破坏也更易发展起来。

（3）应把水资源浪费及生态影响纳入考虑范围。就堤防渗漏而言，所失水量在干旱区域是主要问题，此时水利工程不能很好发挥调蓄功能，而渗漏本身又会干扰地下水分布，危害邻近生态状况。

2 堤防防渗施工技术体系

堤防工程属于基本的水利设施，所涉及的安全及稳定问题对人民的生命财产和区域经济都很重要。从长期使用角度看，堤防因土体太透水、构造有缺陷或本身不牢而出现渗漏、管涌乃至溃决类的险情是常见现象。所以要将防渗处理当作堤防加固、维护中的一项重点来对待。目前有关堤防防渗的施工已有较完整的、行之有效的技术方法，即劈裂灌浆法、高压喷射灌浆法、混凝土防渗墙法、土工膜防渗法及复合式防渗诸项技术。下面按类予以说明。

2.1 劈裂灌浆技术

劈裂灌浆法在堤防所用的各种防渗技术中是较常用的一种。按基本原理来说，应将一定压力的浆液送入堤体内部，使浆液压力达到土体抗劈裂强度以上，此时浆液便依最小主应力走向切开土层、沿堤轴线构成连续泥浆帷幕，对所遇渗流作出比较完整的阻隔性控制。

具体施工流程为：应先以设计所定的间距将灌浆孔布置于堤身相应的位置，再从孔口压注浆液。此时若孔中压力已等于或大于堤土的劈裂临界值，土体即被劈裂，所注浆液能沿裂缝形成脉体或板体的浆脉构造。继续按此方式注浆下去，各相邻浆脉会彼此靠近、连接，最后成为完整的防渗性带状体。

所用的技术以设备简单、操作容易、造价不高、对原堤体干扰少为特点，尤其适合用来做均质土堤及黏性土堤的防渗处理。不过它对堤身内土体的均匀性有一定依赖——如果堤中砾石、块石太多，浆液就难以很好劈裂、不能顺利地扩散开来。有关灌浆的各种参数（所施压力、浆液组成、注浆分量等）应按土体实际性能合理安排，否则可能出现浆液浪费、劈裂不足或某处压力过分集中等缺陷。

就施工工艺而论，“逐孔灌注、少灌多复”是所采用的基本原则，即把各灌浆孔的注浆分成若干次、用较小量的浆料来做，促使浆液均匀地劈开土体、顺利扩散。此时灌浆的压力多为低值，不追求对堤身作高强度的触动或强制性的改变。

2.2 高压喷射灌浆技术

所称的高压喷射灌浆是把高压水泥浆液用射流作用于土体（即切割或搅拌它），让浆液和土质结合、硬化后得到强度较高又防渗的固结体。按喷射所用介质及方法而论，有关工艺可划为单管法、二重管法或三重管法诸种类型。

其工作原理是：所用水泥浆液要以高压（20～40MPa）送入泵中，再经特制喷嘴作高速喷射。高速射流因有巨大能量而能切开、捣碎并搅动邻近的土层，促使土粒同浆液充分结合。若同时让喷杆上升或转动，就可得到圆柱形或板状的固结体。多个这类固结体彼此衔接时，便形成完整的防渗性帷幕。

所用的技术对地层适应性好、固结体形态可调、防渗性能突出，特别适合处理含粗粒（如砾石、砂）的地层。同劈裂灌浆相比，高压喷射灌浆得到的固结体强度更大、构造更完整、防渗效果较可靠。不过这种工艺要使用较复杂的设备，耗能多、费用亦较高。

对于所讨论的施工方法来说，喷射压强、上升速率、旋转速度和浆液比例都属于关键参数。若压力太低，固结体的直径就小、相邻部分不易结合；如压力太高又会浪费浆料或干扰堤身结构本身。所以要借助现场试验来选定各项参数的合适搭配，以保证成墙效果。

2.3 混凝土防渗墙技术

所谓混凝土防渗墙技术就是把连续的混凝土墙放在堤

体或堤基里，借以切断渗流路线、达到良好防渗目的。按现有技术水平来说，它对堤防的防渗是最有效、最可信赖的办法，多用于重要大型堤防工程。

目前所称的主要施工方法是薄型抓斗成墙法及锯槽、射水、铣削诸法。按使用场合来说，薄型抓斗法适合做深度不大（通常 <30m）的防渗墙，用具少、造价低；若要处理较深墙体（超过 60m）就应采用锯槽或液压铣削方式，此时成墙精确、连续、质量较可靠。

一般所用墙体的厚度是 20～40cm，材料基本为普通混凝土或塑性混凝土。后者的和易性好、自密实性佳、弹性模量较低，对地基变形较宽容，适合用来做深槽结构。防渗墙要达到一定深度：透水层被切断之后还要有 1～2m 不透水岩层作为嵌入部分，才可保证密封。

该技术优点突出：防渗效果可靠、墙体强度高、耐久性好，可应对各种复杂地质条件。但其缺点也明显：施工周期长、造价高、对施工场地要求严格，且成槽过程可能对堤身稳定性产生短期影响，需配合实时监测与支护措施。

2.4 土工膜防渗技术

土工膜防渗技术利用高分子聚合物制成的不透水薄膜（如 HDPE、PVC、LLDPE 等）铺设于堤防迎水面或堤身内部，形成人工防渗层。其核心在于利用土工膜极低的渗透系数（通常≤ 1×10?12cm/s），构建连续不透水屏障。

当铺设于迎水面时，可有效阻止库水向堤体入渗；当埋设于堤身内部时，则可截断既有渗流通道。该技术施工速度快、防渗效率高、适应变形能力强，特别适用于堤防加高、应急抢险或老旧堤防改造工程。

然而，土工膜对基面平整度要求极高，基底需清除尖锐物、树根等，以防刺破膜体。此外，其耐久性受紫外线、温度变化、化学腐蚀等环境因素影响较大，外露使用时必须设置保护层（如砂垫层、混凝土板等）。锚固与接缝处理亦是关键——常采用热熔焊接或胶粘连接，并辅以检漏测试，确保整体密封性。

2.5 复合防渗技术

若堤防的病害较复杂、所遇地质又多种多样，单独使用某种防渗方法未必够理想。这时复合防渗便成为可行思路：用两到三种防渗措施配合起来，使各自优点互补，形成多层防护体系。

常见组合形式包括：所用方法有：灌浆 + 防渗墙、土工膜 + 灌浆、土工膜 + 防渗墙。以主要堤段为例，可先布置混凝土防渗墙做基本的防渗构造，又在该墙的上下游面采用劈裂灌浆或高压旋喷灌浆一类工艺，把墙同老堤之间可能的间隙填满，构成“刚柔结合、内外兼顾”复合形式。

所提技术方案是高强度、高可靠又较经济的手段，防渗效果比单用一种方法好。不过要使它真正奏效应有合理的安排、精确的施工设计。应对各项技术本身、先后次序、彼此干扰乃至长期配合做系统分析，将数值结果和实地资料结合来选定组合形式，以达到全系统在安全、效率、成本上都较优的状态。

3 防渗施工技术的选择原则与应用要点

3.1 技术选择原则

对堤防所用的防渗施工技术要从工程本身的安全、地质现实、资金及可操作性诸方面来考察，按这四点确定原则：

（1）安全性优先：对所采用的技术要提出清楚要求：即其应有助于控制、甚至完全根除渗漏现象，不使堤防在设计洪水时失稳。有关防渗的成效要以规范及安全准则为准，不得因省钱而削减安全余量。

（2）要按具体情况、适当选择：所用防渗技术各有其适用条件，堤防的地质、构造、渗漏种类以及漏情轻重都应作为选型时的参考因素。一般说来，均质黏土堤可考虑劈裂灌浆法；若遇到砾石地层或者高度渗漏的情况，高压喷射灌浆、混凝土防渗墙是较佳方案。

（3）经济合理：应把安全性、适用性作为基本前提，对各项方案所涉建设费、施工时间与日后运行费作完整对照分析，选择全周期综合效益最好的技术。

（4）施工可行：对实际的作业场地、已有设备及气候、季节诸项限制应作完整分析，所提方案要能顺利落实、有可靠的操作基础。

3.2 各类技术的应用要点

（1）劈裂灌浆：布孔要按所遇渗漏通道的实际情况来安排，一般用梅花形、矩形方式布设，孔距由现场试验决定；所用浆液多是黏土类或水泥 - 黏土复合物，浓度按堤体渗透状态作相应调节；施工上应对灌浆压强及注浆量加以限制，避免冒浆、伤堤现象。

（2）高压喷射灌浆：要按工艺要求做试验以确定最宜用的喷射参数及浆液比例；所喷部位应作匀速的上下移动和旋转，使固结体完整、均匀；遇到大渗漏区时可用两管或更多管同时喷射，把密实度及防渗效果提上一档。

（3）混凝土防渗墙：墙体的轴线及深度要根据渗流分析来定，才有利于截断主要渗流路线；开槽要特别注意垂直精度，所用泥浆应能防止塌孔；混凝土宜为和易、抗渗型材料，施工上要保证连续浇筑，不许有断面缺料或夹泥

现象。

（4）土工膜防渗：有关基面的整平及验收应在铺设之前做好；所用搭接宽度要按设计确定，焊缝要经过气密性或电火花检验；堤顶、边坡这类易损区要有防护层（不许被刺穿或老化）；膜的下游侧应配置排水构造，所用水压不宜造成鼓胀性破坏。

4 防渗施工质量控制与管理

4.1 施工过程质量控制

堤防防渗施工所涉的质量控制对工程的防渗效果是根本性的保证，要贯穿全过程。有关原材料应作严格把关：水泥、黏土类灌浆材料要按标准选配、经进场检查；所用土工膜要核对其各项物理力学性质是否达到设计要求。施工参数亦要予以精确控制：灌浆压力、注浆体积及高压工艺参数、防渗墙的混凝土比例都应根据设计或试验结果来定，不得任意改动，同时要完整地记载施工各阶段情况，以利质量分析或问题查证。最后按步骤实施过程检测：灌浆时即时观察压力、流量对灌入效果作判断；防渗墙可用超声法或钻探法考查其整体状态；土工膜安装完毕即应测试焊缝气密性，不使渗水成为可能。

4.2 竣工验收与效果评价

完成防渗工程之后要对效果作系统性考察。一般用注水、抽水或围井方式做现场渗透试验，配合地球物理调查、钻孔采样诸项方法来求得防渗体所涉的渗透系数和实际渗流量，将有关数值同施工前资料比较，得出合理结论。若某部分不符合设计指标，必须查清具体原因，迅速提出补救办法，防止因局部缺陷而影响堤防整体上所应达到的安全水平。

4.3 后期运行管理与维护

防渗工程要取得长久效果不能只靠施工本身，还应有良好的运维安排。宜将巡查及监测纳入常规制度，特别注意防渗体同堤身连接处或穿堤构造物所占的区域。渗流异状发生后要快查、快判、快处理。有关土工膜类有机材料的防渗部分，要按期看护膜面、修补裂痕；若采用灌浆体或防渗墙作永久性处理，亦要持续地分析其状态变化，适时加以补强，使堤防的防渗能力不因时间而衰退。

5 结语

堤防所用的防渗施工技术属于水利工程安全运行中的关键技术。文中对劈裂灌浆、高压喷射灌浆、混凝土防渗墙、土工膜防渗或复合防渗诸项基本方法作较完整的归纳，说明其原理、工艺以及实际应用的要点，再结合技术本身、施工质量及使用后的管理做总体的思考与分析。

现在堤防防渗所用的施工技术是按精细化、智能化、绿色化思路来发展的。各类新式灌浆材料及控制装置、自动化的防渗墙施工方法都已开始应用，对堤防防渗来说是技术手段上的一大丰富。从长远看，有必要把防渗机理弄清楚，把有关施工的标准订全，将先进材料与技术加以推广，使堤防防渗达到较高水平，由此保证水利设施在安全状态下运行、取得长期的发展效益。

参考文献：

[1] 张建华. 水利工程堤防防渗技术研究与应用[J]. 水利技术监督，2022(3):45-48.

[2] 李明辉，王志强. 高压喷射灌浆技术在堤防防渗中的应用研究[J]. 人民长江，2021,52(8):178-182.

[3] 陈国庆. 混凝土防渗墙施工技术在大型堤防工程中的应用[J]. 水利水电技术，2020,51(6):112-116.

[4] 刘海波，赵文忠. 土工膜防渗技术在堤防加固工程中的应用探讨[J]. 水利规划与设计，2022(5):89-92.

[5] 王建民. 堤防渗流控制与防渗技术综述[J]. 水利学报，2019,50(10):1256-1268.