

# 软土地区防洪堤岸防护技术及工程实践探讨

陈定念

浙江华安泰工程集团有限公司 浙江 温州 325200

**摘要:** 软土地区因其高含水率、低强度、高压缩性等不良工程特性,对防洪堤岸工程的稳定性、耐久性和安全性构成严峻挑战。本文系统梳理了软土的基本工程特性及其对堤岸结构的影响机制,归纳总结了当前主流的软土地区堤岸防护技术体系,包括地基处理技术、结构型式优化、生态防护措施以及智能监测手段。在此基础上,结合典型案例,深入分析不同技术在实际应用中的适用条件、施工要点与效果评价。最后,针对当前技术存在的不足,提出未来软土堤岸防护技术的发展方向,包括绿色低碳化、智能化融合与韧性提升等,以期为我国软土地区防洪减灾体系建设提供理论支撑与工程参考。

**关键词:** 软土; 防洪堤岸; 地基处理; 生态防护; 工程实践; 稳定性分析

## 引言

我国东南沿海、长江中下游、珠江三角洲及部分内陆湖沼地区广泛分布着深厚软土层。这些区域经济发达、人口密集,同时也是洪涝灾害频发地带。防洪堤岸作为抵御洪水侵袭的第一道防线,其安全稳定直接关系到人民生命财产安全和社会经济发展。然而,软土具有天然含水率高(通常大于40%)、孔隙比大(常大于1.0)、压缩性强、抗剪强度低、渗透性差等特点,在荷载作用下易产生过大沉降、侧向位移甚至整体失稳,严重威胁堤岸结构的安全。近年来,随着极端气候事件频发,防洪标准不断提高,传统堤岸设计与施工方法在软土地区面临诸多挑战。如何有效解决软土地基承载力不足、堤身沉降控制困难、边坡稳定性差等问题,成为水利工程领域亟待攻克的技术难题。

## 1 软土工程特性及其对堤岸稳定性的影响

### 1.1 软土的物理力学特性

软土主要指淤泥、淤泥质土及部分冲填土,其典型特征包括:(1)高含水率与高孔隙比:天然含水率常超过液限,孔隙比普遍大于1.0,甚至可达2.0以上,导致土体结构松散。(2)低抗剪强度:不排水抗剪强度( $C_u$ )通常小于15kPa,内摩擦角 $\phi$ 接近 $0^\circ$ ,承载能力极低。(3)高压缩性:压缩系数 $a_{1-2}$ 常大于 $0.5\text{MPa}^{-1}$ ,属高压缩性土,在荷载作用下易产生显著沉降。(4)低渗透性:水平与垂直渗透系数均较小( $10^{-7}\sim 10^{-9}\text{cm/s}$ ),固结排水缓慢,长期沉降问题突出。(5)触变性与流变性:扰动后强度显著降低,且在持续荷载下产生蠕变变形。

### 1.2 对堤岸工程的影响机制

上述特性对堤岸工程造成多方面不利影响:堤身自重及水压力易导致地基发生剪切破坏,引发滑坡或整体

失稳。堤身沉降量大且历时长,易造成堤顶开裂、防渗体破坏,影响防洪功能。软土抗剪强度低,堤岸边坡在洪水冲刷或地震作用下易发生浅层或深层滑动。快速填筑易诱发地基失稳,需严格控制加载速率<sup>[1]</sup>。软土的流变特性导致堤岸在服役期内持续变形,影响结构耐久性。因此,软土地区堤岸工程必须采取针对性的地基处理与结构防护措施。

## 2 软土地区防洪堤岸防护关键技术体系

### 2.1 地基处理技术

地基处理是确保软土地区堤岸工程成败的核心环节。针对软土的不同厚度、分布范围及工期要求,工程实践中发展出多种有效技术。排水固结法通过在软土中设置竖向排水通道(如塑料排水板或砂井),并施加预压荷载(堆载或真空负压),显著加速孔隙水排出和土体固结,从而提高地基强度与模量。其中,真空联合堆载预压技术因其能同时提供双向排水路径和更高有效应力,可将固结周期缩短30%至50%,已在长三角、珠三角等地区广泛应用。对于承载力要求更高或工期紧迫的工程,复合地基法成为优选方案,通过在软土中植入水泥搅拌桩、碎石桩或高压旋喷桩,形成桩-土共同受力体系,大幅提高承载力并有效控制沉降。水泥土搅拌桩因施工便捷、成本适中且对环境扰动小,成为当前主流选择,但需合理设计桩长、桩距及置换率,避免上部结构“刺入”桩间土导致失效。对于浅层软土(厚度小于3米),换填法简单直接,即将软弱土层挖除后回填砂砾、灰土或轻质材料。近年来,采用EPS(聚苯乙烯泡沫)等超轻质填料进行换填或部分替代传统填土,可显著降低附加应力,有效抑制沉降,特别适用于对变形敏感的城市滨水区域<sup>[2]</sup>。此外,加筋技术通过铺设土工格栅

或土工布,增强地基的整体性和抗剪能力,常作为辅助手段与其他方法联合使用,提升综合加固效果。

## 2.2 堤岸结构型式优化

在完成地基处理的基础上,堤岸结构型式的合理选择与优化对提升整体稳定性至关重要。在用地条件允许的区域,缓坡式堤岸因其较低的边坡角度(通常1:3至1:5)能有效减小滑动力矩,增强抗滑稳定性,且便于实施生态护坡,成为优先选项。然而,在城市建成区或土地资源紧张的地段,直立式或半直立式挡墙结构则更具优势。此类结构通常采用钢筋混凝土L型挡墙、扶壁式挡墙等形式,占地面积小,但对地基承载力要求高,且必须配套完善的排水系统,以防止墙后水压力积聚导致倾覆或滑移。为兼顾工程安全与生态功能,组合式结构日益受到青睐,例如上部采用植草生态护坡以消能固土,下部设置混凝土挡墙或格宾石笼以抵抗强水流冲刷。此外,轻型结构理念也逐步推广,通过使用加气混凝土砌块、空心砌块或轻质土工合成材料构筑堤身,可在保证结构功能的同时显著减轻自重,从而降低对软土地基的附加荷载,进一步控制沉降变形。

## 2.3 生态防护技术

随着生态文明建设的深入推进,传统硬质护岸因割裂水陆生态系统、破坏生物栖息地等弊端而逐渐被生态防护技术所替代。植被护坡是最基础的生态措施,通过种植根系发达、耐水湿的草本或灌木(如狗牙根、杞柳、芦苇等),利用植物根系网络固结表层土壤,减缓地表径流速度,吸收波浪能量,实现防冲、固土与绿化的多重目标,适用于水流较缓的河湖岸段。为进一步提升初期防护能力,生态袋或植生带技术被广泛应用,即将富含种子和养分的土壤装入可降解的土工织物袋中,垒砌成坡面,既能在施工后立即提供物理防护,又能在植被生长后自然降解,实现从工程防护到生态恢复的平稳过渡<sup>[3]</sup>。格宾网箱与雷诺护垫则代表了柔性生态结构的典范,由镀锌或覆塑钢丝编织成网状容器,内部填充块石,具有良好的透水性、柔韧性和适应地基变形的能力,同时其孔隙为水生生物提供了栖息空间,促进了河流生态系统的修复。多孔混凝土或生态混凝土技术则通过特殊配比形成大量连通孔隙,既具备一定的结构强度,又能支持植物生长或微生物附着,实现了工程刚性与生态柔性的有机统一。

## 2.4 智能监测与预警系统

现代防洪堤岸工程已从“被动防御”转向“主动防控”,智能监测与预警系统成为保障工程全生命周期安全的关键支撑。通过在堤身及地基关键部位布设静力水

准仪、GNSS接收机或利用星载InSAR技术,可实现对堤岸沉降与水平位移的毫米级实时监测,及时捕捉异常变形趋势。同时,埋设渗压计、测斜管和温度传感器,能够动态监控堤基渗流场变化,有效识别潜在的管涌、流土等渗透破坏风险。结构健康监测方面,则通过应变计、裂缝计等传感设备评估混凝土或砌体结构的受力状态与损伤演化<sup>[4]</sup>。更为重要的是,这些多源异构数据可通过物联网平台集成,并与水文、气象预报信息联动,构建数字孪生模型,实现对堤岸安全状态的动态评估、风险预测与智能预警,为应急决策提供科学依据,极大提升了防洪体系的韧性与响应效率。

## 3 典型工程实践案例分析

### 3.1 案例一:太湖流域某城市防洪堤加固工程

该工程位于太湖流域一重要城市,堤段全长约5.2公里,地基为10至15米厚的淤泥质黏土,天然含水率高达58%,不排水抗剪强度仅为8kPa,原有堤身因长期沉降已出现多处裂缝,防洪能力严重不足。针对这一情况,工程采用了“真空预压+轻质填筑+生态护面”的综合技术路线。首先,在堤基范围内插设间距1.2米的塑料排水板,并施加80kPa的真空负压进行为期6个月的预压处理,有效加速了软土固结。随后,堤身主体采用容重不超过1.0kN/m<sup>3</sup>的EPS轻质块体进行填筑,大幅降低了对下卧软土的附加应力,并在顶部覆盖0.8米厚种植土以支持绿化。迎水坡面铺设雷诺护垫并辅以草籽喷播,背水坡则采用三维土工网垫结合狗牙根种植。工程实施后,监测数据显示地基固结度超过90%,工后沉降控制在5厘米以内,堤岸整体稳定安全系数达到1.35以上,满足规范要求。更为可喜的是,生态措施成效显著,堤岸沿线植被覆盖率高,水鸟与鱼类活动频繁,实现了防洪安全与生态修复的双赢。

### 3.2 案例二:珠江三角洲某滨海新区海堤工程

该新建海堤位于珠江口某滨海新区,全长8.7公里,面临深厚软土(18至25米)与频繁台风风暴潮的双重挑战。为确保海堤在极端海洋环境下的长期稳定,工程采用了高强度复合地基与刚性结构相结合的方案。具体而言,在堤基区域施工了直径500毫米、长度20米、间距1.5米的水泥搅拌桩,形成高承载力的复合地基,有效解决了软土承载力不足的问题。堤身主体采用L型钢筋混凝土挡墙结构,后方回填中粗砂以提供反压并利于排水。迎水面铺设带有消能槽的高性能混凝土预制块,并在堤脚设置抛石防冲槽以抵御波浪淘刷。为实现精细化管理,工程同步部署了智能监测系统,包含12个GNSS监测点和8组渗压计,实时回传结构变形与渗流数据。

2023年,该海堤成功经受了“海葵”台风的考验,实测浪高达4.2米,但结构完好无损,监测数据表明最大沉降仅为12厘米,未发现异常渗流现象,充分验证了技术方案的可靠性。

### 3.3 案例三:长江中游某湖泊圩堤生态化改造

该圩堤位于长江中游一重要湖泊周边,原为老旧土堤,软土层厚6至8米,防洪标准仅为10年一遇,且生态环境退化严重。改造工程以“安全提升、生态修复、智慧管理”为核心目标。在结构安全方面,对局部薄弱堤段采用微型桩结合注浆进行加固,提升局部承载力;在全线推行生态化理念,迎水坡采用格宾网箱填充本地块石,并在其缝隙中种植芦苇等挺水植物,既增强了抗冲能力,又重建了湿地生境;背水坡则结合海绵城市理念,设置雨水花园与透水步道,实现雨水的自然积存与净化。同时,项目建立了基于物联网的智慧堤防管理平台,整合水位自动站、视频监控与移动巡查数据,实现风险隐患的闭环管理。改造完成后,圩堤防洪标准提升至50年一遇,湖泊水质明显改善,生物多样性显著恢复,该项目也因此被列为省级生态水利示范工程,为同类地区提供了可复制、可推广的经验。

## 4 技术挑战与发展趋势

### 4.1 挑战

尽管现有技术在软土堤岸工程中取得了显著成效,但仍面临若干深层次挑战。首先,对软土在气候变化与长期荷载耦合作用下的流变机理认识尚不充分,导致工程长期性能预测存在较大不确定性。其次,生态防护措施虽广受推崇,但其水力稳定性、耐久性及与工程结构的协同工作机制缺乏系统研究,相关设计标准与评价体系亟待完善。再次,传统地基处理工法如水泥搅拌桩依赖大量水泥,碳排放高,与国家“双碳”战略目标存在冲突。最后,在应对超强台风、特大暴雨等超标准极端事件时,现有堤岸结构的韧性与冗余度仍显不足。

### 4.2 趋势

在绿色低碳方面,应大力推广矿渣、粉煤灰等工业

固废替代水泥,探索微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)等生物固化新技术,并鼓励使用再生骨料和可降解材料,从源头降低工程碳足迹。在智慧融合方面,需深化BIM、GIS与物联网技术的集成应用,构建覆盖规划、设计、施工、运维全周期的数字孪生平台,实现堤岸状态的“可感、可知、可控”。在韧性提升方面,应研发具备自适应变形能力或自修复功能的新型材料与结构,如形状记忆合金加筋土、微胶囊自愈合混凝土等,增强堤岸在极端灾害下的生存与恢复能力。同时,加快制定涵盖生态-工程协同设计、绿色施工、智能监测等内容的技术标准与规范,推动行业高质量发展。

## 5 结语

软土地区防洪堤岸工程是一项复杂的系统工程,需综合考虑地质条件、水文特征、生态需求与社会经济因素。本文研究表明:地基处理是保障堤岸稳定的基础,应根据软土厚度、工期、成本等因素优选技术方案,复合地基与排水固结法仍是主流;结构型式应因地制宜,轻型化、组合化趋势明显,兼顾安全与功能;生态防护技术不仅改善环境,还能提升堤岸整体稳定性,是未来发展方向;智能监测与数字孪生技术为堤岸全生命周期安全管理提供有力支撑;面向“双碳”目标与气候变化,绿色、智慧、韧性将成为软土堤岸防护技术的核心关键词。未来,应加强多学科交叉融合,推动新材料、新工艺、新理念在软土堤岸工程中的创新应用,构建安全、生态、智慧、可持续的现代防洪体系。

## 参考文献

- [1]简学兴.水利工程中软土地基处理技术与要点管理[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(32):190-192.
- [2]范南春.软土地基城市防洪堤技术方案研究及实施[J].河南水利与南水北调,2017,46(09):58-59.
- [3]王红东.水利工程施工中软土地基处理技术应用分析[J].地下水,2025,47(05):266-267+289.
- [4]李雨才.水利工程施工中软土地基处理技术的研究与应用[J].中国设备工程,2025,(S2):266-269.