

软土地基条件下防洪堤防基础设计优化研究

张辉

塔城水利设计研究院有限公司, 中国·新疆 塔城 834700

摘要: 在气候变化加剧与极端水文事件频发的宏观背景下, 防洪堤防作为保障流域安全的关键基础设施, 其建设质量直接关系到人民生命财产安全与社会经济稳定。我国沿海及江河中下游地区广泛分布着高含水率、低强度、大压缩性的软土地基, 这为堤防工程的基础设计带来了严峻挑战。传统设计方法往往难以兼顾安全性与经济性的平衡, 易导致工后沉降过大、边坡失稳或抗震性能不足等问题。本文系统综述了软土地基条件下防洪堤防基础设计的理论演进、技术瓶颈与优化路径。文章首先剖析了软土流变特性与堤防荷载耦合作用下的地基响应机制, 揭示了现行规范在处理复杂边界条件时的局限性; 其次, 深入探讨了从单一加固向复合地基协同承载转变的设计理念革新, 以及基于可靠度与全寿命周期的多目标优化模型构建; 再次, 梳理了新型轻质填料、智能化监测反馈及生态化护岸等前沿技术在基础优化中的集成应用。

关键词: 软土地基; 防洪堤防; 基础设计; 复合地基; 多目标优化; 全寿命周期

Optimization Study on Foundation Design of Flood Control Dikes under Soft Soil Conditions

Zhang Hui

Tacheng Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., China Xinjiang Tacheng 834700

Abstract: Against the backdrop of intensified climate change and frequent extreme hydrological events, flood control dikes—key infrastructure for ensuring basin safety—directly affect public life, property security, and socioeconomic stability. High water content, low strength, and high compressibility characterize soft soil foundations widely distributed in coastal and mid-to-lower reaches of rivers across China, posing significant challenges to dike foundation design. Traditional design methods often struggle to balance safety and economy, frequently resulting in excessive post-construction settlement, slope instability, or inadequate seismic performance. This paper systematically reviews the theoretical evolution, technical bottlenecks, and optimization pathways for foundation design of flood control dikes under soft soil conditions. First, it analyzes the interaction between soft soil rheological behavior and dike loading, revealing limitations of current codes in handling complex boundary conditions. Second, it explores innovative design concepts shifting from single reinforcement to collaborative load-bearing by composite foundations, as well as the development of multi-objective optimization models based on reliability and full lifecycle assessment. Finally, it summarizes the integrated application of advanced technologies—including lightweight fill materials, intelligent monitoring and feedback systems, and ecological bank protection—in foundation optimization.

Keywords: Soft soil foundation; Flood control dike; Foundation design; Composite foundation; Multi-objective optimization; Full lifecycle

0 引言

防洪堤防是人类抵御洪水灾害最古老也最有效的工程手段之一。随着国家水网建设的深入推进与生态文明理念的全面践行, 堤防工程的功能定位已从单纯的“挡水屏障”拓展为集防洪保安、生态修复、景观休闲于一体的综合性线性基础设施。然而, 这一转型对基础设计提出了更高要求。特别是在长江三角洲、珠江三角洲及东南沿海等经济发达但地质条件复杂的区域, 堤防多修建于深厚软土层之上。这类土体具有触变性、流变性及显著的各向异

性, 在堤身自重、水位骤降、地震动及波浪冲击等多重荷载耦合作用下, 极易发生剪切破坏、过量沉降或液化失稳。历史上因软基处理不当导致的堤防溃决事故屡见不鲜, 造成了惨痛的生命财产损失与生态灾难。尽管近年来地基处理技术取得了长足进步, 但在实际工程中, “重上部轻基础”“重施工轻设计”“重短期稳定轻长期性能”的思维惯性依然存在。许多项目仍沿用简化经验公式进行地基承载力验算, 忽视了软土的时间效应与空间变异性; 加固方案选择缺乏系统性比选, 常出现过度处理造成浪费或处理不

足埋下隐患的两极分化现象；设计与监测脱节，无法根据施工期实测数据动态调整参数，导致优化滞后。因此，亟需立足软土力学本质，融合现代计算理论、智能算法与绿色建材，构建一套科学、精准、可持续的堤防基础设计优化体系。本文将从问题机理、方法革新与技术集成三个维度展开综述，以期破解软基堤防设计难题提供系统性思路。

1 软土地基与堤防荷载耦合响应的复杂性及设计瓶颈

准确认知软基-堤防系统的相互作用机制，是实现设计优化的逻辑起点。当前设计实践中的诸多困境，根源在于对这一系统复杂性的简化处理与认知偏差。

1.1 软土流变特性与时间依赖型失效风险

软土的力学行为并非瞬时弹性或理想弹塑性，而是表现出显著的蠕变与应力松弛特征。在堤防长期恒定荷载作用下，即使初始应力低于屈服强度，土体仍会因粘滞流动产生持续变形，导致工后沉降远超主固结沉降预测值。更危险的是，这种流变可能引发渐进式剪切带发育，使安全系数随时间缓慢衰减，最终在无预警情况下突发失稳。现行设计规范多采用总应力法或有效应力法进行稳定性验算，但未充分考虑时间因素对强度的削弱效应。例如，某河口堤防竣工时安全系数满足规范要求，却在运行五年后因软土蠕变累积而发生局部滑塌。这表明，仅靠静态极限平衡分析无法捕捉软基堤防的长期风险。设计优化必须引入考虑时间效应的本构模型与长期稳定性评价方法，将“瞬时安全”升级为“全寿命期安全”。

1.2 多重荷载耦合下的非线性响应与不确定性

堤防基础承受的荷载远非简单的竖向均布压力。水位快速升降产生的孔隙水压力梯度、波浪周期性冲击引起的动力附加应力、地震作用下的循环剪切以及温度变化导致的热胀冷缩，共同构成了复杂的荷载谱系。这些荷载与软土的相互作用呈现强非线性：例如，水位骤降时，若排水不畅，超静孔压消散滞后，有效应力降低，抗剪强度骤减；而波浪反复加载则可能诱发软土软化甚至液化。传统设计常将各类荷载独立验算再叠加，忽略了耦合放大效应。此外，软土参数的空间变异性极大，勘察点之间的未探明软弱夹层或透镜体可能成为控制性薄弱环节。基于确定性参数的设计无法量化这种不确定性带来的风险敞口。优化设计需采用概率极限状态方法，结合随机场理论刻画土性空间变异，并通过多物理场耦合模拟真实工况下的系统响应。

1.3 现行规范体系的适用性局限与创新需求

现有堤防设计规范主要基于大量工程经验与简化理论，适用于一般地质条件。但在面对超深软基、超高堤防或特殊环境（如污染场地、生态敏感区）时，规范的保守性或粗糙性便暴露无遗。例如，规范推荐的桩基负摩阻力计算方法未考虑软土固结过程中的时效演化；对复合地基置换率的确定缺乏针对堤防线状荷载特点的修正；对生态护岸与地基处理的协同设计要求几乎空白。这种“一刀切”的标准体系抑制了技术创新与因地制宜的优化空间。同时，规范更新速度滞后于新材料、新工艺的发展，导致先进成果难以合法合规地应用于工程实践。因此，推动规范修订与建立补充技术指南势在必行，同时也呼唤设计师在遵循基本原则的前提下，勇于开展基于性能的设计探索，通过原型试验、数值验证与专家论证弥补规范空白。

2 基础设计优化理论与方法的范式转型

突破传统设计瓶颈，关键在于实现从经验主导到科学驱动、从单目标到多目标、从静态到动态的方法论跃迁。

2.1 从单一加固到复合地基协同承载的理念革新

过去软基处理常追求“彻底改良”，试图将软土完全替换或固化，成本高昂且环境影响大。现代优化理念强调“与软土共处”，通过桩、土工合成材料、排水体等增强体与原状土形成协同工作体系，发挥各自优势。例如，刚性桩承担大部分竖向荷载，减少沉降；土工格栅提供水平约束，提高整体稳定性；塑料排水板加速固结，缩短工期。优化核心在于合理匹配各组分刚度、间距与布置形式，使系统效能最大化而非单个构件最强。这需要精细化的数值模拟与现场试验验证，避免盲目套用经验公式。同时，应重视界面效应——桩土接触面、加筋体与填土界面的力学行为往往是系统薄弱环节，也是优化潜力所在。通过改进连接构造、选用高性能界面材料，可显著提升复合地基的整体性与耐久性。

2.2 基于可靠度与全寿命周期的多目标优化模型构建

堤防基础设计本质是在安全、经济、工期、环境与生态等多重目标间寻求最优解。传统设计以安全系数为唯一判据，忽视其他维度的权衡。现代优化引入可靠度指标统一量化安全风险，并结合全寿命周期成本分析，综合考虑建设投入、运维费用、失效损失与环境外部性。在此基础上，建立多目标优化模型，运用遗传算法、粒子群优化等智能算法搜索帕累托最优解集，供决策者根据偏好选择。例如，在生态敏感区，可适当提高造价换取更低的环境扰动；在城市近郊，则可牺牲部分经济性以满足更高的景观

与亲水需求。该模型还需嵌入不确定性分析模块,评估气候变迁、材料老化等因素对长期性能的影响,确保优化方案的鲁棒性。这种系统化、量化的决策支持工具,是实现科学化、精细化设计的必由之路。

2.3 动态反馈设计与信息化施工的深度融合

软土性质的高度不确定性决定了“一次设计定终身”的模式必然失效。优化设计必须是开放的、迭代的。依托物联网传感器、无人机巡检与 bim 平台,构建覆盖勘察、设计、施工、运维全过程的数字孪生系统。施工期实时采集沉降、孔压、位移等数据,与设计预测对比,一旦发现偏差立即触发预警并启动参数反演,动态调整后续施工方案或补强措施。例如,某海堤工程通过监测发现实际固结速率慢于预期,及时调整堆载预压计划,避免了工期延误与后期超标沉降。这种“监测-分析-反馈-优化”闭环机制,将设计从纸上蓝图变为活的过程,极大提升了应对不确定性的能力。未来,随着人工智能与大数据技术的成熟,系统将具备自学习能力,能从海量历史数据中提炼规律,自动推荐最优调整策略,真正实现智慧设计。

3 关键技术集成与未来发展方向

理论与方法的落地,离不开具体技术的支撑。当前,一批创新材料与工艺正推动软基堤防基础设计迈向新高度。

3.1 新型轻质填料与资源化利用技术的应用拓展

减轻堤身自重是从源头降低软基负担的根本途径。泡沫混凝土、eps 块体、工业废渣轻质骨料等新型轻质填料,密度仅为普通填土的三分之一至二分之一,可显著减小基底压力与沉降量。尤其泡沫混凝土兼具轻质、自立、透水性好等优点,特别适用于软基上的加宽改建与桥头跳车治理。同时,疏浚淤泥、建筑再生骨料等废弃物的资源化利用,既解决了处置难题,又降低了工程碳足迹。优化关键在于材料性能的稳定性控制与长期耐久性评估。需建立针对不同来源再生材料的分级标准与配合比设计方法,并通过加速老化试验验证其在湿热、冻融、化学侵蚀等环境下的性能衰减规律。此外,轻质填料与传统填料的过渡段设计亦需谨慎处理,防止差异沉降引发裂缝。

3.2 智能化监测与数字孪生驱动的全生命周期管理

前述动态反馈设计依赖于强大的感知与分析能力。新一代监测系统正从点式测量向分布式、立体化、实时化演进。光纤光栅传感网络可连续获取数公里堤段的应变与温度场;insar 遥感技术能毫米级精度反演大范围地表形变;水下机器人则实现对护脚与河床冲刷的无损检测。这些数据汇入数字孪生平台,与地质模型、结构模型、水文模型

深度耦合,形成虚实映射的智能体。平台不仅能诊断当前状态,更能预测未来演化趋势,模拟不同维护策略的效果,辅助制定最优管养决策。例如,通过模拟预判某段堤防在未来十年内的沉降发展曲线,提前安排预防性加固,避免突发性险情。这种全生命周期的智能化管理,是保障软基堤防长治久安的技术基石。

3.3 生态化基础设计与生物多样性保护的协同增效

新时代堤防不仅要“牢”,更要“绿”。传统硬质护岸割裂了水陆生态联系,加剧了岸坡侵蚀。生态化基础设计强调将工程结构与自然过程融合:采用多孔混凝土、石笼、植被毯等透水性材料,为水生生物提供栖息地;设置缓坡、台阶、湿地等多样化生境,促进物种交换;利用植物根系固土净水,替代部分人工加固。优化难点在于平衡生态功能与结构安全。需开展跨学科研究,量化植被覆盖度、根系密度与抗冲刷能力的关系,建立生态-力学耦合设计准则。同时,应选择适应本地气候水文条件的乡土物种,避免外来种入侵。在软基区,还需特别注意生态措施对地基排水与稳定的影响,例如,避免在排水不畅区域种植耗水量大的乔木,以免加剧不均匀沉降。唯有实现工程安全与生态健康的共赢,堤防才能真正成为人与自然和谐共生的纽带。

4 结语

软土地基条件下的防洪堤防基础设计优化,是一项融科学性、艺术性与责任性于一体的系统工程。它超越了单纯的技术计算,触及人类如何与脆弱大地共处的深层命题。当我们不再视软土为必须征服的对手,而是理解其呼吸与脉动的生命体;当我们的设计不再执着于绝对的刚性与永恒,而是学会在柔韧中积蓄力量,在适应中寻求持久;当每一方填料、每一根桩基、每一片护岸都承载着对安全的敬畏、对资源的珍惜与对生命的关怀,堤防便不再是冰冷的混凝土长墙,而成为大地肌理中温暖而坚韧的脉络。前路依然充满未知与挑战,气候变化带来的不确定性、新材料应用的长期验证、多学科交叉的深度磨合,都需要我们以谦逊之心持续探索。但只要我们的坚守科学精神、秉持系统思维、怀抱人文温度,就一定能在软基之上筑起既坚不可摧又生机盎然的守护之堤。这不仅是对工程技艺的锤炼,更是对文明韧性的锻造——让每一道堤防都成为人与自然和解的见证,让每一次洪峰过境都化作对智慧与良知的礼赞。在守护家园的道路上,我们终将明白:真正的坚固,源于对自然的深刻理解与温柔相待。

参考文献:

[1] 陈东海, 张开伟, 许沿. 堤防填筑荷载下地基土体

变形特征试验研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(12): 28-32.

[2] 张华衍. 松木桩在涵闸软基处理中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2010(12): 68. DOI:10.13612/j.cnki.cntp.2010.12.084.

[3] 马志豪. 海洋环境条件下水闸服役风险分析[D]. 扬州大学, 2023. DOI:10.27441/d.cnki.gyzdu.2023.001538.

[4] 熊乔珍. 复杂地质条件下河堤防护工程防洪现状及复合加固措施研究[J]. 陕西水利, 2025(10): 73-76. DOI:10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2025.10.037.

[5] 李灿, 徐静. 道路景观工程对既有防洪堤安全性影响的评估[J]. 浙江水利科技, 2020, 48(3): 30-33. DOI:10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2020.03.009.