

扬中堤防软基处理的施工方法

许健勇

上海市水利工程集团有限公司, 上海 201612

DOI:10.61369/ETQM.2026040003

摘 要 : 软土地基不良工程性质对堤防工程造成挑战。对扬中地区堤防工程用于软基处理的换填、排水固结、强夯、化学固结及挤淤等软基处理方法进行系统研究, 结合工程实际提出在软土层处采用严格控制为主的综合处理方法, 具有很好的指导意义。

关 键 词 : 扬中堤防; 软基处理; 施工

Construction Methods for Soft Foundation Treatment of Yangzhong Embankment

Xu Jianyong

Shanghai Water Conservancy Engineering Group Co., LTD., Shanghai 201612

Abstract : The poor engineering nature of soft soil foundation poses challenges to embankment projects. A systematic study was conducted on the soft foundation treatment methods such as replacement and filling, drainage consolidation, dynamic compaction, chemical consolidation and silt squeezing used in the embankment projects of Yangzhong area. Combined with the actual engineering situation, a comprehensive treatment method mainly based on strict control was proposed at the soft soil layer, which has very good guiding significance.

Keywords : Yangzhong embankment; soft foundation treatment; construction

引言

软土地基广泛分布于我国沿海、沿江和湖泊中, 不良的工程性质对堤防工程建设极为不利。扬中地处长江中下游, 堤防基本建于软土基础上, 软土含水量高, 压缩性大, 抗剪强度弱, 透水性差, 对堤防稳定和安全影响较大, 当荷载作用下软土地基发生较大沉降和不均匀变形, 堤防易开裂、渗漏甚至失稳, 严重危害防洪安全, 因此选择合理的软基处理方法对堤防工程质量和长期稳定尤为重要^[1]。

一、堤防软基处理的关键技术方法

(一) 换填处理法

换填法是一种较为传统的浅层软基处理方法, 可应用于软土埋藏浅(小于3m)处, 原理是挖去基础底面下一定深度内的软弱土层, 回填强度高、压缩性低的砂、碎石或石渣, 形成人工持力层, 提高地基承载力, 减少沉降量, 加强地基稳定性, 首先需测量放样确定开挖范围, 清除草木残株、有机土等不适宜材料, 开挖时要根据软土分布分层分段, 避免坑壁坍塌^[2]。

回填材料选用较好的砂砾料或碎石分层填筑, 每层厚度一般20-30cm, 用机械或人工进行充分压实, 关键质量控制点有填料质量、分层压实度、换填厚度等。换填法分为砂垫层、碎石垫层、素土垫层等, 砂垫层同时可以起到排水作用, 加快下卧软土层的固

结。当软土厚度较大时可与其他方法如排水固结法组合使用。

(二) 排水固结法

排水固结法主要针对软土透水性差、固结时间长, 通过竖向排水通道设置和施加预压荷载, 加速孔隙水排出, 进行土体固结, 是扬中地区较为深厚的软土地基处理中常用的排水固结方法之一。

1. 砂井排水法

砂井排水法通过在软土层中按照一定距离打设砂井形成竖向排水通道, 加快孔隙水排出, 砂井直径一般为30-50cm, 间距根据软土性质和工程需求确定, 通常为砂井直径的8-10倍, 砂井顶部应铺设水平排水砂垫层, 将排出的水排入排水沟内。适用于软土层较厚透水性较差的情况, 可有效加快地基固结, 提高地基的抗剪强度^[3]。

2. 真空预压法

真空预压法是一种较为先进的排水固结方法，主要利用抽真空在加固区域形成负压，以大气压力作为预压荷载，促进土体排水固结，该方法不需要堆载材料，时间短，造价低，噪音低，适用于大面积软基处理。施工时在加固区表面铺设砂垫层、水平排水管，并安装密封膜形成封闭系统，抽真空设备持续抽气，膜下真空度一般在80kPa以上。真空预压期一般为4~6个月，期间应实时监测，根据沉降、孔隙水压力等参数调整工艺参数^[4]。

（三）强夯法

强夯法也称为动力固结法，是利用重锤从高（6~20m）自由落下产生巨大冲击能来强制夯实软土地基。有些灵敏度高的软土，用传统的强夯法可能会造成土体破坏，所以较多地采用轻夯多遍，即低夯击能，多夯击遍，减少对土体的扰动。施工前应试夯确定合适的夯击能、夯点间距和夯击次数^[5]。

夯点按正方形或梅花形布置，间距为锤的2.5~3.5倍，每遍夯击后推平夯坑，间隔1~2周再进行下一遍夯击，使超静孔隙水压力消失。收锤标准：夯坑周围不出现明显隆起；侧向位移不超过大；后一击夯沉小于前一击；每遍夯沉量不超过60cm。强夯处理后，地基承载力提高2~5倍，能减少工后沉降。该方法快，成本低，适用于大面积的回填土、砂土和低饱和度粉土，但对于饱和和软粘土应慎用^[6]。

（四）化学固结法

化学固结法是指在软土地基中注入或搅拌化学固化材料，通过物理化学反应改善土体性质的软基处理方法，主要有深层搅拌法、高压旋喷法、灌浆法等。

1. 深层搅拌法

深层搅拌法是采用机械将固化剂（水泥或石灰）与原位软土强制搅拌，即形成水泥土桩或连续墙，固化剂与土颗粒发生水解、水化反应和碳酸化反应生成凝胶物质，强化土粒之间的连接，增加土的强度、稳定性。施工时应控制搅拌速度、喷浆压力、固化剂掺量，以保证搅拌均匀性和固化效果^[7]。

2. 高压旋喷法

高压旋喷法是指将钻机带特殊喷嘴注浆管安装至一定深度后，高压（20~40MPa）喷射固化浆液，冲击破坏土体结构，使浆液与土颗粒混合而成旋喷桩，按喷射方式可分为单管法、双管法、三管法，旋喷桩直径一般为0.5~1.2m，强度1~5MPa，用于处理淤泥、粘性土和粉土等软土地基^[8]。

（五）挤淤法

挤淤法是指通过外力把软土挤开，使用强度高的材料置换软弱土体，主要有抛石挤淤法和爆破挤淤法。

1. 抛石挤淤法

抛石挤淤法是指将一定量和粒径的块石抛在要处理的淤泥地基上，借助块石自身之力挤开淤泥，然后进行置换。块石直径不宜小于30cm，选用不易风化的硬质石料。施工时采用进占法，堤

心推向两侧，用挖掘机整平碾压直至稳定，适用于流塑的淤泥或淤泥质土地基施工，具有施工简便、造价低的优点^[9]。

2. 爆破挤淤法

爆破挤淤法是指埋设在淤泥中的药包爆炸瞬间排开淤泥，形成空腔，抛石体充填空腔后进行泥石置换，爆破挤淤深度可达十几米，适用于淤泥厚度较深处理，包括堤头爆填、侧向爆填、坡脚爆夯，施工时需控制好药包位置、装药量和起爆时间^[10]。

表1 不同软基处理方法的适用条件比较

处理方法	适用土层	处理深度	工期	主要特点
换填法	浅层软土	<3m	短	施工简单，成本低
排水固结法	淤泥、淤泥质土	5~20m	较长	固结效果好，应用广
强夯法	砂土、回填土	3~8m	短	施工快，造价低
深层搅拌法	淤泥、粘性土	5~15m	中等	形成复合地基，强度高
抛石挤淤法	流塑态淤泥	3~10m	短	施工简单，石料丰富地区适用
爆破挤淤法	深厚淤泥	>10m	短	深度大，工期短

二、案例分析

（一）案例工程背景与地质条件

江苏省长江堤防应急治理工程(2025年度)扬子河至石城段堤防工程是提高长江干流防洪能力的除险加固工程。

本例为该工程桩号36+910 ~ 41+854处，本段堤防位于长江感潮河段，堤防防洪标准为100年一遇，堤防工程等级为2级，主要建设内容为堤防挡浪墙接高、护坡恢复、堤顶防汛道路拆建与新建。该段堤防工程地质条件为加固方案与施工方法的依据，根据施工图设计资料，其位于长江三角洲平原区，地貌属新三角洲与江心洲，地层结构复杂，自上而下主要分布于下列地层中：

①层(Q₄m):灰黄、黄灰、灰色重粉质壤土、粉质黏土，杂砂壤土，主要堤身填土，局部为耕作土，堤身表层多为混凝土路面，路面以下多含碎石块。全场地分布，层厚不均匀，厚约0.5 ~ 6.0m。堤身较厚，多不饱和，土质不均。

②层(Q₄al-p₁):黄灰、灰褐色重粉质壤土，夹砂壤土薄层。主要为原地表土。场地大部分分布，层厚较0.5 ~ 4.6m。

③层(Q₄al-p₁):灰色淤泥质重粉质壤土、粉质黏土，夹砂壤土薄层，局部互层，偶含腐殖质。场地普遍分布，局部厚度较大，层厚0.9 ~ 20.6m。

③'层(Q₄al-p):灰色重粉质砂壤土，夹壤土薄层，近互层。主要呈透镜体状分布于③层中，层厚0.5 ~ 5.8m。

③1层(Q₄al-p₁):灰色淤泥质重粉质壤土，夹砂壤土薄层，局部互层，场地局部分布，层厚0.7~10.3m。

③1层(Q₄al-p₁):灰色重粉质砂壤土夹壤土薄层，互层状。主

要呈透镜体状分布于③1层中，层厚0.8 ~ 5.8m。

④1层 (Q_{4al-p}):灰色重粉质砂壤土，夹壤土薄层，局部互层，场地局部分布，层厚0.5 ~ 12.7m。

④2层 (Q_{4al-p}):灰色轻粉质砂壤土、粉砂，偶夹壤土薄层，含云母片。场地局部分布，层厚1.1~8.0m。

⑤层 (Q_{4l}-P):灰色淤泥质重粉质壤土，夹砂壤土薄层，局部互层，场地局部分布，层厚0.4~25.2m。

⑦层 (Q_{4al-p}1):灰色重、轻粉质砂壤土，偶夹壤土薄层，含云母片。场地局部分布，最大揭示厚度10.95m。

⑧层 (Q_{4a1-p}P):黄灰、灰褐色重粉质壤土、粉质黏土。场地零星揭示，最大揭示厚度4.6m。

⑨层 (Q_{4al-p}1):黄灰色轻粉质砂壤土、粉砂，偶夹壤土薄层，含云母片。场地零星揭示，最大揭示厚度6.0m。该层土呈灰色，软~流塑状态，具有高含水量、高压缩性、低强度和弱透水性的典型软土特征。勘察揭示其层厚变化大，在0.9m至20.6m之间，局部厚度巨大，是影响堤防稳定与变形的关键土层。

其下分布有③’、④₁、④₂、⑤、⑦等夹砂壤土、粉砂或淤泥质土的交互层。

表2 工程区主要软土层（第③层）物理力学参数一览表			
参数名称	单位	数值范围 / 建议值	工程特性评价
天然含水率 (ω)	%	36.3	极高，土体接近流塑状态
干密度 (ρ _d)	g/cm ³	1.35	较低，土体疏松
孔隙比 (e)	—	约0.99 (推算)	较大，压缩性高
直快剪粘聚力 (c)	kPa	13.2	极低，抗剪能力差
直快剪内摩擦角 (φ)	°	7.1	极低，抗剪能力差
压缩系数 (a ₁₋₂)	MPa ⁻¹	0.533	高压缩性
压缩模量 (Es)	MPa	3.79	低，易产生较大沉降
渗透系数 (k)	cm/s	4.45 × 10 ⁻⁵	透水性弱，排水固结慢
标贯击数 (N)	击	4	土体极其软弱
允许承载力 (f _a)	kPa	70	承载力极低

由上表可知，该段堤防地基中③层淤泥质土工程性质十分差，属于高硬度地基。受堤防加高培厚、新建挡浪墙等附加荷载作用，容易造成工后沉降和整体稳定过大，故施工时必须采取相应措施，保证堤防工程施工期和运行期的安全。

（二）软基处理综合技术应用分析

本工程设计施工并未确定某一专项软基处理工法，但是设计与施工方案极其融合了软基处理的理念，通过一系列综合工程措施有效的应对了软土地基带来的问题。主要技术应用方面包括：

1. 基于应力路径控制的堤身填筑与加载策略

对于在较为软土地基上的堤防工程，控制加载速率是防止地基失稳的关键。虽然该工程并未明确加载分步，但其施工组织设计选择将主体工程在非汛期（2025年10月至2026年2月）施工，该期间长江水位较低（施工期设计水位为非汛期10年一遇高潮位4.14m），相应减小临水侧的静水压力，有利于堤防（背水侧）的稳定性。利用水文条件进行施工的时序安排其本质上是地基应力状态的“自适应”加载方法。

2. 堤身结构改良与置换处理

清基、堤身填筑质量控制：需进行堤防填筑基面清理，清除

软弱表土，控制填筑质量，填筑土料压实度不小于0.93，分层厚度30cm，含水量控制在最优含水量内。

基本原理是将堤身填土作为一种人工“优质持力层”，并通过施加高标准压实度，提高其自身强度及刚度，分担均匀传递下部荷载，减小软基附加应力。反滤与排水设置：堤防迎水侧护坡结构层设置10cm中粗砂垫层、15kN/m土工布垫层，此层不仅起反滤防冲刷作用，且堤身与地基间形成水平向排水通道，加速堤身内及浅地基排水，加速土体固结提高强度。

3. 关键部位的结构性加固

（1）挡浪墙基础：新建或拆建的混凝土挡浪墙采用扩大底板（如墙高1.9m，底板宽1.5m），扩散墙身向下的竖向压力，降低基底压力，适用于地基承载力小的情况；同时墙后回填土压实度需大于0.93，防止回填质量欠佳，造成不均匀沉降导致过大的侧向土压力。

（2）刚性护坡及限制变形：恢复建设迎水坡采用15cm厚C30现浇混凝土护坡，这样连续、整体的刚性护面层不仅可以抵抗波浪冲刷，还能约束堤身表面土体，限制浅层变形，与垫层、土工布形成增强体。

表3 本工程应对软基的关键设计与施工控制指标		
控制项目	设计或施工要求	技术目的与作用
堤身 / 墙后填筑压实度	≥ 0.93	提高堤身自身强度与刚度，形成良好持力层，减少变形。
填筑分层厚度	≤ 30 cm	确保每层土料得以充分压实，避免内部软弱夹层。
施工期水位控制	非汛期施工（低水位）	降低临水侧孔隙水压力，提高施工期堤坡稳定性。
护坡垫层设置	砂垫层 + 土工布	形成水平排水反滤层，加速浅层固结，防止渗流破坏。
挡浪墙基底形式	扩大底板（宽1.5m）	扩散基底应力，适应软基低承载力特性。
稳定性验算安全系数	满足规范允许值	通过瑞典圆弧法严格验算施工期、水位骤降等多种工况，确保整体稳定。

三、结语

总而言之，对于扬中地区软土地基具备较强的软基处理能力，因此，堤防工程的建设应采用设计合理、控制严格的综合性技术策略，通过选择加载时序、加强堤身结构质量、设置辅助排

水、采取适应型基础形式等措施消除软基的沉降与稳定风险。由此可见，以加固提升为主的堤防工程综合处理，对于安全、经济、高效发挥作用非常有益，适用于其他地区的防洪工程建设。随着材料和监控技术的发展，软基处理将会更加精准。

参考文献

- [1] 杨声玉. 针对堤防工程中堤基处理的河道治理方法研究 [J]. 水利科技与经济, 2025, 31 (07): 129-133.
- [2] 方结云, 任佳丽, 陈航. 深厚软基堤防险情原因分析及加固方案研究 [J]. 人民长江, 2025, 56 (S1): 200-205.
- [3] 何敏, 张华伟, 陈航, 等. 考虑填筑过程的软基堤防破坏机制和沉降特性 [J]. 人民长江, 2025, 56 (S1): 249-256.
- [4] 殷兰霞, 陈宇啸. 堆载预压法与真空预压法处理堤防软基效果对比 [J]. 人民长江, 2025, 56 (S1): 257-260.
- [5] 赵吉现, 闫既刚. 软基处理技术在河道堤防工程中的应用与改进策略 [J]. 城市建筑空间, 2025, 32 (S1): 235-236.
- [6] 朱传青. 厚软基圩堤单轴搅拌桩截渗墙施工技术研究 [J]. 中国水能及电气化, 2024, (10): 12-16.
- [7] 胡从超. 不同软基处理加固方案在生态堤建设工程的经济比选研究 [J]. 珠江水运, 2024, (17): 35-38.
- [8] 赵辉. 珠海市航空产业园堤防工程软基加固处理设计与施工 [J]. 水电与新能源, 2024, 38 (07): 51-55.
- [9] 王虎. 软基堤防工程中塑料排水板排水固结方案设计 [J]. 湖南水利水电, 2024, (03): 103-106.
- [10] 郭显顶, 韦禹琛. 软基堤防整体抗滑稳定计算研究 [J]. 陕西水利, 2024, (02): 133-136.