

# 水利防汛排涝工程软基强夯施工技术研究

文 / 李洪卫 滨州市城乡水务发展服务中心

杜晓梦 滨州市城乡水务发展服务中心

**摘要:** 本研究旨在解决水利防汛排涝工程中软土地基处理的问题,采用软基强夯施工技术进行加固。通过现场生产性试验,对软基进行不同能级、不同夯击次数的强夯处理,并对处理后的地基承载力、压缩模量、夯沉量等参数进行监测与分析。结论显示,软基强夯施工技术能够显著提高软土地基的承载力、压缩模量等关键指标。有效消除了软土地基的沉降隐患,增强了地基稳定性,为水利防汛排涝工程提供了可靠的技术支持。

**关键词:** 水利工程; 防汛排涝; 软基强夯; 压缩模量; 地基承载力

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.079

## 前言

随着我国水利基础设施建设的快速发展,防汛排涝工程在保障人民生命财产安全方面发挥着重要作用。软土地基由于其低强度、高压缩性和不均匀沉降的特性,给工程带来了极大的挑战。软基强夯施工技术作为一种有效的地基处理方法,能够显著改善软土地基的工程性质。本研究针对水利防汛排涝工程软基处理的需求,探讨软基强夯施工技术的应用效果,以期为类似工程提供参考和借鉴。

### 一、地基处理方案

#### (一) 开挖回填法

顾名思义,是指将软土层开挖至设计深度,然后采用适当的回填材料进行分层回填并压实,以达到提高地基承载力和减少地基沉降的目的。首先,开挖回填法能够有效地去除软土层,降低地基的压缩性。软土层由于其含水量高、强度低、压缩性大,往往导致地基承载能力不足。通过开挖,可以将这部分不稳定的软土层移除,为后续的回填和压实创造条件<sup>[1]</sup>。其次,回填材料的选择具有灵活性,可以根据工程需求和地质条件,选用砂石、砂土、砾石等不同类型的材料进行回填,以优化地基性能。这些材料具有良好的透水性和压实性,有利于提高地基的稳定性和抗渗性。

在施工过程中,开挖回填法的实施步骤如下:①进行现场勘察,确定软土层的分布范围和深度,制定合理的开挖方案。②按照设计方案进行开挖,注意开挖过程中的排水和边坡稳定问题。③对开挖后的基底进行清理和平整,为回填做好准备。④采用分层回填的方式,每层厚度控制在300-500mm,采用振动压路机或夯实机进行压实,确保回填材料的密实度。⑤对回填后的地基进行质量检测,包括压实度、承载力和沉降观测等,确保满足设计要求。

#### (二) 振冲置换法

振冲置换法的施工原理是利用振冲器的振动和喷水作用,在软土层中形成孔洞,并在振动和水流的共同作用下,将孔洞周围的软土搅动,然后及时回填碎石或砂石等骨料,通过振动密实,使骨料与软土混合,形成复合地基。这种方法具有以下优点:振冲置换法能够显著提高软土地基的承载能力。通过置换,软土层中的薄

弱部分被硬质骨料所取代,从而提高了地基的整体强度<sup>[2]</sup>。该方法具有良好的排水性能,有利于加快软土的固结速度,减少地基沉降;振冲置换法施工速度快,效率高,适用于大面积软基处理。

在实施振冲置换法时施工步骤如下:①先进行现场勘察和试验,确定振冲参数,如振冲器功率、水压、振冲深度和间距等。②按照设计要求进行振冲孔布置,并启动振冲器进行作业。③在振冲过程中,实时监控振冲深度和水质,确保施工量。④随着振冲器的提升,及时回填骨料,并进行振动密实。⑤对处理后的地基进行压实度、承载力和沉降等指标的检测,以确保满足设计要求。

#### (三) 灌浆固结法

灌浆固结法的施工原理是利用专用的灌浆设备,将水泥、石灰、化学浆液等材料配制成的浆液,通过钻孔注入软土层中。浆液在土层中通过渗透、劈裂、挤压等作用,与土体混合,形成具有一定强度和刚度的固结体,从而达到加固地基的目的。灌浆固结法适用于各种类型的软土地基,特别是对于厚度较大、渗透性较差的软土层,能够有效提高其承载能力和抗渗性能。灌浆材料多样,可根据工程需求和地质条件选择合适的浆液,施工灵活性较高<sup>[3]</sup>。灌浆固结法施工过程中对周边环境影响较小,有利于环境保护。

灌浆固结法的施工步骤主要包括:①前期勘察,确定灌浆参数;②钻孔布置,根据设计要求进行钻孔;③浆液配制,按照确定的配比制备浆液;④灌浆作业,通过灌浆泵将浆液注入土层;⑤灌浆结束后,进行封孔处理。在整个施工过程中,需严格控制灌浆压力、浆液流量和灌浆范围,确保灌浆效果。

#### (四) 强夯法

强夯法的施工原理是利用起重机械将大吨位夯锤提升至一定高度,然后释放夯锤,使其自由落下,对地基产生巨大的冲击能。这种冲击能使得土体在瞬间产生很大的应力,从而使土颗粒间的空隙减小,土体变得更加密实。强夯法适用于各种类型的软土地基,尤其是对于饱和度较高、渗透性较差的土层,能够取得良好的加固效果。强夯法施工设备简单,操作方便,施工速度快,工程造价相对较低。强夯法加固深度大,加固效果显

著,能有效提高地基的承载能力和抗液化能力。

强夯法的施工步骤主要包括:①前期勘察,确定夯击能、夯点布置等参数;②现场试验,验证夯击参数的合理性;③正式施工,按照确定的夯击参数进行夯击作业;④夯后检测,评估加固效果。在施工过程中,需严格控制夯击能、夯击次数和夯击范围,确保加固质量。

## 二、工程概况

本文所研究的水利防汛排涝工程位于我国某沿江平原地区,该地区地势低平,河网密布,汛期受洪水影响较大,因此,建设一座高效可靠的防汛排涝工程对于保护当地人民群众生命财产安全、促进地区经济发展具有至关重要的意义。工程主要包括堤防加固、排涝泵站新建、河道疏浚及配套工程等,其中,软基处理是工程建设重点和难点。以下是工程概况的详细介绍:

工程区地貌单元主要为冲积平原,地表广泛分布第四纪松散沉积物,土层以粉土、粉质黏土和淤泥质土为主,土体结构松散,压缩性高,抗剪强度低,地基承载力不足,直接在这样的软土地基上建设防汛排涝工程,存在较大的安全隐患。因此,必须对软基进行有效的加固处理,以确保工程基础的稳定性和耐久性。

工程区气候属于亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,尤其在汛期,降雨集中,容易形成洪涝灾害。工程设计标准中,防洪标准按照50年一遇洪水位进行设计,排涝标准按照20年一遇洪水位进行设计,工程等别为II等,主要建筑物级别为2级。工程总占地面积约为17.23平方公里,堤防总长度为35.427公里,排涝泵站设计流量为12.7立方米/秒。

## 三、地基处理技术要求

在对工程进行前期勘察的过程中发现堤防上下游地基差异较大,采用单一的地基处理技术不能满足工程质量要求。因此本文研究对象针对不同区域地基差异采用开挖回填技术、振冲置换技术、灌浆固结技术以及强夯法四种技术综合处理,确保经过处理的地基符合设计标准,保障工程的安全性。

### (一) 开挖回填技术要求

针对工程中游C段(17.721km~21.639km段),因本段地基土层较浅,软弱土层易于识别和清除。在开挖过程中,严格按照设计图纸进行,确保开挖深度和范围满足设计要求。由于工程区土层特殊性,开挖时特别注意对软弱土层的识别和处理,避免超挖或欠挖。对于开挖出的软弱土层,需彻底清除,并妥善处理,防止其对环境造成污染<sup>[4]</sup>。本工程选用级配良好、质地坚硬、水稳定性强的砂石料作为回填材料。回填材料的技术参数符合设计要求,回填土料密度在 $1.5\sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,抗压强度在 $15\sim 25\text{MPa}$ 之间,渗透系数小于 $1\times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 。

在回填施工过程中,应采用分层回填、分层压实的施工方法。每日回填量控制在 $250\sim 600\text{m}^2$ 。采用层压法进行压实,每层回填厚度应根据材料和施工机械确定,一般不超过300mm。压实过程中,应控制压实次数和压实机械的重量,确保回填土的压实度达到设计要求。对于特殊部位,如堤防与排涝泵站的连接段,应采取特殊压实措施,确保回填土的密实度。

### (二) 振冲置换技术要求

针对下游E段(29.762km~35.427km段)勘察数据显示,此工程区软土层厚度约为 $5\sim 10\text{m}$ ,天然水含量在 $40\%\sim 60\%$ 之间,地基承载力不足 $80\text{kPa}$ ,因此,该段地基土层需要提高抗液化能力和承载能力。

首先应选择合适的振冲器,其功率应不低于 $30\text{kW}$ ,确保能够穿透软土层,达到设计处理深度。其次根据工程设计要求,振冲间距应控制在 $2.5\sim 3.0\text{m}$ ,振冲孔布置呈梅花形,以确保地基处理效果的均匀性<sup>[5]</sup>。振冲深度应至少达到软土层底部,本案例中振冲深度略大于 $6\text{m}$ 为宜,以确保复合地基的稳定性。

振冲置换过程中,提升速度应控制在 $0.5\sim 1.0\text{m}/\text{min}$ ,水量应根据土层特性和现场试验结果调整,一般控制在 $200\sim 300\text{L}/\text{min}$ ,回填材料选用粒径为 $20\sim 50\text{mm}$ 的碎石,回填率不低于 $1:1.2$ ,以确保与原土体充分混合,形成复合地基。

施工完成后,应进行质量检测,包括静载试验、动力触探试验等,以验证地基承载力是否达到 $120\text{kPa}$ 的设计要求,土体密实度是否满足工程标准。

### (三) 灌浆固结技术要求

在本工程中,因中上游B段(11.392km~17.721km段)和中下游D段(21.639km~29.762km),地基土层中含有大量的细粒土,需要用灌浆固结法提高地基整体稳定性、减少地基沉降量,提高地基承载力。因而采用使用与处理深层软土地基的灌浆固结法。

根据地质勘察报告,工程区软土层厚度约为 $8\sim 15\text{m}$ ,主要成分为粉质黏土和淤泥质土,天然含水量高达 $50\%\sim 70\%$ ,地基承载力仅为 $40\sim 60\text{kPa}$ 。因此,灌浆固结施工前,需进行现场试验,确定适宜的灌浆材料和配比,确保灌浆液能够有效渗透土体并固结<sup>[6]</sup>。其次,根据工程需求进行灌浆孔布置,采用正方形网格,孔距和排距控制在 $2\sim 3\text{m}$ ,灌浆深度应穿透软土层,进入下部较硬土层至少 $1\text{m}$ ,以确保固结效果。

在灌浆过程中,灌浆压力是关键参数,应根据土层特性和现场试验结果确定,一般控制在 $0.5\sim 1.0\text{MPa}$ 。灌浆材料的选用应优先考虑水泥浆,水灰比控制在 $0.8\sim 1.5$ 之间,必要时可添加适量的外加剂以提高固结效果。

### (四) 强夯法技术要求

在上游A段(0km~11.392km段)勘查中发现地基土层含有大量粉质黏土和低饱和度黏土,可以采用强夯法利用高能量的夯击作用,可以有效提高地基的密实度和承载力,减少地基沉降。

本工程段软土层厚度约为 $4\sim 8\text{m}$ ,主要由粉土、粉质黏土组成,地基承载力仅为 $55\sim 75\text{kPa}$ 。因此在强夯施工前,需进行实验夯击,以确定最佳夯击能量和夯点布置位置。试验夯击采用夯击能为 $1000\sim 1500\text{kN}\cdot\text{m}$ 的夯锤,通过现场试验确定夯点间距为 $7\text{m}$ ,正方形布置。

强夯施工时,首次夯击采用低能量满夯,以确保土体初步密实,减少后续高夯击能量时土体的隆起和侧向位移<sup>[7]</sup>。正式夯击时,夯击次数应控制在 $8\sim 10$ 次,最后两击的平均夯沉量差值不大于 $50\text{mm}$ ,以确保夯击效果。

#### 四、强夯生产性试验

##### (一) 生产性试验的施工工艺

生产性试验施工工艺参数配置见下表1。

表1 生产性试验施工工艺参数表

分类数值	夯击次数 (/次)	夯击能量 (/J)	夯击间距 (/m)	夯击孔径 (/m)	夯击深度 (/m)
最大值	7	10000	2.0	0.4	7
最小值	11	15000	3.5	0.7	15

夯实设备选用起升动力为自由落体履带式夯击起重机。夯击锤采用圆柱形自动脱钩夯击锤。

##### (二) 强化实验区布置

在实验区内选择闸室5号块作为强夯实验区，夯击锤采用20t自圆圆柱脱形钩提升高度达4.9m。试夯区面积为25m×25m，夯点采用梅花形布置，夯点间距为5m×5m，这样布置可以有效地覆盖整个试验区，确保加固效果均匀。此外，实验区边缘设置了5m的缓冲区，以减少边界效应的影响。在实验区布置时，还考虑了地下管线和周边建构筑物的安全距离，确保强夯施工不会对周边环境造成不利影响。通过这样的布置，实验区能够为强夯施工参数的优化提供准确的数据支持，为后续工程的大规模强夯施工提供科学依据。

##### (三) 强化实验区检测

结合工程概况，本案例中水利防汛排涝工程的强夯生产性试验在实验区完成后，进行了系统的检测工作。实验区位于软土层较厚的区域，土层主要为粉质黏土，厚度约为9m，原始地基承载力为50kPa。检测工作主要包括以下几个方面：①采用静载试验对加固后的地基进行承载力检测，检测点分布在实验区的不同位置，共设置5个检测点，每个点进行3次试验，结果显示地基承载力普遍提高至120kPa以上。②瑞利波检测，以评估土体的均匀性和密实度，检测结果表明波速有明显提升，平均波速达到200m/s。③夯沉量观测，通过测量夯点最终夯沉量，发现平均夯沉量达到60cm，表明土体得到了有效压实，图1展示了夯击次数与累计沉降量之间关系。这些检测数据不仅验证了强夯施工的效果，也为后续工程提供了宝贵的参考数据，确保了工程质量和安全。

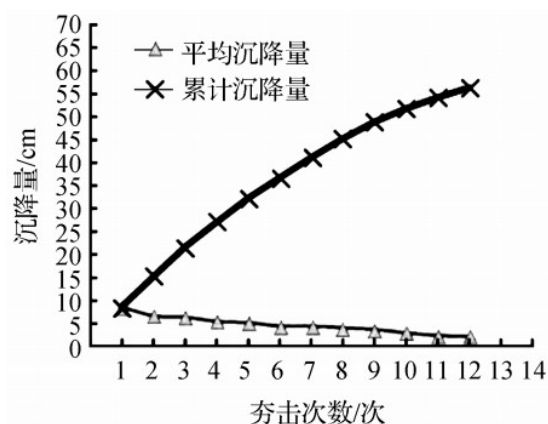


图1 点夯累计沉降量与夯击次数的关系图

##### (四) 实验区实验检测结论

施工效率方面，每日夯击次数通常在300~400次之间，同时适当搭配挖掘机、推土机和压路机等大型施工机械。施工质量方面，施工后地表平整度在1%~5%之间，符合预计要求，无明显凹凸不平现象。土方密实度在97%以上，超过设计要求95%的预期密实度。回填厚度均匀，强夯夯实效果中孔隙度小于10%，水平变形不超过2mm，垂直沉降在7mm以下，平均土方含水量为13%。

根据以上结果可以认为，实验基本参数符合预期标准，7~11次夯击可以达到设计沉降值要求。但应注意单次夯击下沉量的变化情况，5m×5m区间夯击区间的夯击能量受间距影响较大，导致夯间土朝侧向密实，进而表层硬化现象显著。

##### (五) 强夯施工效果

本水利防汛排涝工程的强夯生产性试验结果表明，强夯施工在软基处理上取得了显著效果。工程区域软土层厚度平均为7米，主要由粉土和粉质黏土组成，原始地基承载力仅为55kPa。经过强夯处理后，施工效果如下：首先，地基承载力得到显著提升，平均达到了125kPa，比处理前提高了约130%；其次，土体的压缩模量由原来的2.5MPa提升至6.0MPa以上，增强了地基的抗变形能力；再次，通过夯沉量监测，发现土体的平均夯沉量为60cm，表明土体的密实度和均匀性得到了大幅改善。

##### 结束语

本文通过对水利防汛排涝工程软基强夯施工技术的研究，验证了强夯法在软土地基处理中的有效性。研究成果为软土地基处理提供了新的思路和方法，对于提高水利防汛排涝工程的建设质量和使用寿命具有重要意义。然而，强夯施工技术在实际应用中还需考虑地质条件、施工工艺等多方面因素，未来的研究将继续深化，以期进一步完善强夯技术在软基处理中的应用。

##### 参考文献

- [1] 范玮. 排涝泵站的软基处理方案研究[J]. 云南水力发电, 2024, 40(04): 152-155.
- [2] 吴晗, 李刚, 张杰. 安徽省大沙河排涝站水泥搅拌桩施工技术[J]. 水利水电快报, 2023, 43(S1): 43-46.
- [3] 高玮. 排涝泵站的施工探讨[J]. 工程技术研究, 2023, 16(04): 115-116.
- [4] 刘建玲. 古镇二明窰排涝泵站主厂房软基处理工程设计[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 16(22): 14-16.
- [5] 王大川, 罗涛, 曹伟, 等. 广州铁路新客站地区配套水利工程——周边水系工程工程设计浅议要点[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 18(21): 30-31.
- [6] 陈启庆. 富湾排涝泵站穿堤涵软基处理设计[J]. 广东水利水电, 2022, 16(02): 51-53.
- [7] 邓俊成. 粉喷桩在孟楼河排涝闸工程中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 18(11): 50-51.