

软土地基市政施工处理技术研究

宋玉新

沧州市市政工程股份有限公司 河北 沧州 061000

摘要:软土具备高含水、高压缩、低抗剪、低渗透特质,城区软基易引发道路开裂、基坑坍塌、管线损毁等工程问题,叠加城区场地狭窄、管线密布、环保工期双重约束,施工管控难度极大。本文分析软土工程特性、施工危害与管控难点,剖析排水固结、换填垫层、复合桩基、化学注浆四大工艺原理,制定全过程质量管控、病害防治方案,提出绿色微创施工优化策略,为城市软土地基市政施工提供可行技术参考。

关键词:软土地基;市政施工;处理技术

引言:我国长三角、珠三角等滨水城市软土分布广泛,市政道路、管网、桥梁工程建设中,软土地基处置成为施工重难点。天然软土结构稳定性差,受施工扰动易变形失稳,传统地基工艺无法适配城区狭小作业空间、降噪减排、工期紧缩施工要求。为解决沉降超标、构筑物扰动等施工痛点,本文结合市政施工工况,梳理主流软基处理技术,优化施工管控体系,提升软基加固质量与工程施工安全性。

1 市政工程软土地基基础理论及工程危害分析

1.1 市政工程软土地基核心特性

(1) 软土物理力学基础特性:软土天然含水率高(常大于液限)、孔隙比大于1.0、压缩模量低、抗剪强度小,且具有高灵敏度和触变性,受施工扰动后强度显著衰减,易引发地基局部失稳与过大变形。(2) 软土高压缩性、低渗透性水文特征:高压缩性使软土在荷载作用下产生持续大幅沉降;低渗透性(渗透系数一般小于 10^{-6}cm/s)导致排水固结极为缓慢,孔隙水压力长时间难以消散,严重影响地基处理工期并增大工后沉降风险^[1]。(3) 市政场景软土地基区域分布特点:主要分布于滨海、三角洲、湖沼及河谷漫滩,如长三角、珠三角等城市密集区;软土层厚度变化大、常呈透镜体状分布,空间不均匀性突出,给场地勘察与差异沉降控制带来较大困难。

1.2 软土地基对市政施工工程的负面影响

(1) 引发路基不均匀沉降、路面开裂病害:软土固结速率差异造成路基不均匀沉降,路面结构因此产生纵向、横向裂缝及错台,破坏路面平整度,加剧行车荷载的疲劳损伤,严重影响道路使用品质与行车安全。(2) 诱发管网基坑滑移、边坡坍塌安全隐患:软土强度低、

灵敏度高,基坑开挖时易发生坑底隆起、侧壁滑移及边坡整体坍塌,直接威胁施工人员安全,并常导致邻近地下管线破损、建筑物倾斜等次生灾害。(3) 降低市政道路、桥梁承台结构使用寿命:软基工后沉降过大会引发桥头跳车、承台不均匀受力及上部结构开裂,显著降低结构承载能力和耐久性,缩短道路、桥梁等市政基础设施的服役年限,加速设施整体性能劣化。

1.3 市政软土地基施工管控核心难点

(1) 城区施工场地受限,大型设备布设困难:市政工程位于建成区,空间狭窄、建筑密集,强夯机等重型设备进出及转场受限,常规工艺难以实施。(2) 地下管线繁杂,地基加固易扰动构筑物:给排水、燃气、电力等管线错综复杂,软基处理引起的土体位移、振动或挤土效应易破坏管线,风险管控要求极高。(3) 工期紧凑、环保约束多,传统工艺适配性差:市区受夜间噪声、泥浆排放、扬尘等环保限制,且工期压力大;堆载预压等传统工艺周期长、污染重,需发展组合型新工艺。

2 主流市政软土地基施工处理技术及工艺原理

2.1 排水固结类软土地基处理技术

(1) 塑料排水板施工工艺流程:场地平整→铺设下层砂垫层→测量放样定出板位→插板机就位并安装排水板→振动或静压将排水板打入设计深度(穿透软土层)→拔出套管,切割板头并埋入砂垫层→铺设上层砂垫层→连接排水系统并施加预压荷载^[2]。全过程需控制垂直度偏差不大于1.5%,确保排水通道连续。(2) 真空预压加固技术施工原理:在软基表面铺设砂垫层和密封膜,膜下埋设滤管并与真空泵相连。启动真空泵抽气,使膜下形成负压(通常80~90kPa)。该负压通过

排水板传递至深层软土,迫使孔隙水向排水板渗流并汇入砂垫层排出地表。土体孔隙水压力消散,有效应力增加,在不需堆载的情况下实现软土固结压缩,加速沉降稳定。(3)排水固结技术市政施工适配优势:施工无剧烈振动和冲击,噪声低,对周边居民及建筑物干扰小;处理深度大(可达20~30m),适用于大面积市政道路、广场及场地软基;真空预压可单独使用,也可与堆载联合,显著缩短工期;工后沉降控制效果稳定,能满足市政工程差异沉降严苛要求。

2.2 换填垫层地基处理施工技术

(1)砂石垫层换填施工工艺要点:挖除软弱土层至持力层,基底整平并碾压密实;分层铺填级配良好的砂石料(最大粒径不大于垫层厚度2/3,含泥量<5%),每层虚铺厚度250~300mm;采用振动碾或平板振捣器压实,压实系数不低于0.95;垫层顶面宽出基础边缘不少于300mm,以扩散附加应力。施工中控制填料含水率在最优值 $\pm 2\%$ 范围。(2)灰土垫层分层压实施工管控标准:灰土配合比(体积比)宜为2:8或3:7,土料选用粉质黏土,石灰块消解3天以上并过筛;分层铺摊厚度150~200mm,采用压路机或蛙式夯压实,压实系数 ≥ 0.95 ;每层检测干密度,取样点每100m²不少于1处;严禁雨天施工,已填筑层若遇雨淋须挖除重做^[3]。(3)浅层软土路基换填技术适用工况:软土层厚度 $\leq 3\text{m}$ 、埋深浅且地下水位较低的路基、管道基础及小型构筑物地基;换填法设备简单、作业速度快,可充分利用当地砂石或灰土材料,成本低廉;特别适用于城区零星软土处理、局部路基病害修补及既有道路快速加固。

2.3 复合地基加固施工技术

(1)水泥搅拌桩软土加固施工技术:采用深层搅拌机将水泥(或水泥浆)与软土强制搅拌,通过水泥水化、离子交换及硬凝反应,形成具有一定强度和水稳定性的水泥土桩体。常用湿法(浆喷)和干法(粉喷),水泥掺量一般为12%~20%(占被加固土质量),桩体28d无侧限抗压强度可达0.8~1.5MPa,桩径500~700mm,桩间距1.0~1.5m。(2)CFG桩复合地基市政施工工艺:长螺旋钻机成孔至设计深度→泵压灌注水泥粉煤灰碎石混合料(碎石、砂、水泥、粉煤灰,掺适量外加剂)→边灌注边匀速提棒成桩→清除桩头浮浆→铺设200~300mm厚碎石褥垫层。桩径400~600mm,桩间距1.0~1.5m,混合料坍落度160~200mm,成桩28d后进行低应变检测及单桩承载力试验^[4]。(3)桩体复合地基承载力提升机理:桩体弹性模量远高于桩间软土,荷载作用下桩顶产生应力集中,通过桩侧摩阻力和桩端

阻力将荷载传递至深层稳定持力层;褥垫层调整桩土应力比(一般3~6),使桩间土承载力得以发挥,桩土协同变形、共同承载。复合地基承载力可比天然软基提高1.5~3倍,有效控制沉降。

2.4 化学注浆软土地基改良技术

(1)压力注浆施工参数设计:浆液常用水泥-水玻璃双液浆(体积比1:0.3~1:0.6)或改性水玻璃单液浆,水灰比0.6~1.0,凝胶时间30s~5min可调。注浆压力0.2~1.5MPa,扩散半径0.5~1.0m,注浆速度20~50L/min,单孔注浆量根据地层孔隙率及处理范围通过公式计算确定。正式施工前应进行现场注浆试验优化参数。(2)浅层、深层分区注浆施工流程:浅层(深度 $\leq 5\text{m}$)采用花管静压注浆,布孔间距1.0~1.5m,自下而上分段注浆,每段注浆长度0.5~1.0m;深层(5~15m)采用钻机引孔后下注浆管,分段止水、定量注浆。施工顺序先外围封边孔注浆形成封闭帷幕,再内部加密孔注浆;每段达到设计压力后稳压3~5min方可终止。(3)注浆技术城区狭小场地施工优势:注浆设备轻便、占地面积小,可在室内、地下管线间隙或狭窄巷道中灵活作业;施工不产生明显振动和噪声,夜间施工受限小;浆液填充土体孔隙,既能提高强度又能降低渗透性,兼顾加固与防渗双重效果;对周边既有建筑物和管线扰动极低,是城区狭小空间软基处理的优选工艺。

3 市政软土地基施工质量控制、病害防治与优化策略

3.1 软土地基施工前期筹备与方案优化

(1)施工现场地质勘察与土体参数检测:布设勘探孔查明软土层厚度、分布范围及透镜体状况,取样测定天然含水率、孔隙比、压缩模量、抗剪强度及灵敏度等核心指标;同时进行原位十字板剪切试验和静力触探,获取准确的地基承载力参数,为工艺选型提供依据。(2)结合市政工程类型优选地基处理工艺:道路工程优先选用排水固结或复合地基,以控制工后沉降;管网基坑周边宜采用化学注浆或水泥搅拌桩,减少对邻近管线扰动;桥梁承台软基可选用CFG桩或高压旋喷桩,确保承载力与整体稳定性。工艺选型需综合造价、工期及环保约束。(3)施工专项方案与城区安全防护编制:针对市政工程周边环境特点,制定地基处理专项施工方案,明确监测布点与预警值;编制管线保护、交通疏导及防扰民措施;设置应急抢险预案(如突涌、塌陷、管线破损),报监理及业主审批后严格执行。

3.2 各施工工艺全过程质量管控要点

(1)桩基、注浆施工原材料质量管控:水泥搅拌桩

采用 PO42.5 级及以上水泥, 严禁受潮结块; CFG 桩碎石含泥量不大于 3%, 粉煤灰细度符合 II 级要求; 注浆浆液按配合比拌制, 水灰比误差不超过 ± 0.05 , 双液浆凝胶时间通过现场试配确定, 每批材料见证取样送检。(2) 施工过程沉降、位移实时监测管控: 在软基处理区及周边布设地表沉降标、深层沉降仪和测斜管, 塑料排水板施工期间每日监测沉降速率, 真空预压阶段要求沉降速率连续 5d 不大于 2mm/d 方可卸载; 邻近管线及建筑物布设位移观测点, 位移超阈值(一般 10mm)立即停止施工并调整工艺参数。(3) 分层施工压实度、桩身完整性验收管控: 换填垫层每层压实后采用灌砂法检测压实度, 压实系数不低于 0.95; 水泥搅拌桩成桩 7d 后进行轻便触探检验桩身均匀性, 28d 进行钻芯取样和单桩承载力试验; CFG 桩采用低应变检测桩身完整性, 抽检率不低于总桩数的 10%^[5]。

3.3 施工常见病害及针对性防治措施

(1) 地基加固不均匀、后期沉降超标防治措施: 塑料排水板间距加密或增设排水砂沟, 确保排水通道畅通; 真空预压膜下真空度维持 80kPa 以上, 发现漏气及时修补; CFG 桩施工中控制提棒速率, 避免断桩; 对沉降超标区域及时进行补充注浆或桩间土加固, 并延长预压时间。(2) 施工扰动周边管线、道路病害处置方案: 施工前采用探地雷达精准定位管线, 设置保护隔离桩或注浆加固管周土体; 若发生管线变形或破裂, 立即停用并通知产权单位, 采用快干水泥封堵或更换管段; 道路开裂采取灌缝或注浆抬升, 严重时局部破除修复并加强基层。(3) 雨季软土施工土体软化问题防控手段: 雨季前挖好截水沟和排水盲沟, 保持场地排水通畅; 垫层材料覆盖防水布, 暂停真空膜上开槽作业; 水泥搅拌桩施工时增加水泥掺量 1%~2%, 注浆液中掺入早强剂; 雨后及时晾晒或掺灰处理软化表层土, 严禁在浸泡状态下碾压施工。

3.4 绿色节能型软土地基施工优化策略

(1) 建筑垃圾再生垫层低碳施工优化: 将拆除旧

路、建筑废弃物经破碎筛分后制成再生骨料, 用于换填垫层或褥垫层, 替代天然砂石; 再生料压实性能良好, 每万立方米可减少碳排放约 20 吨; 施工中控制含杂率, 定期检测粒径级配和压碎值, 确保垫层承载力满足设计要求。(2) 低扰动微创施工工艺改良方案: 采用高压旋喷微桩(桩径 200~300mm)替代大直径搅拌桩, 减小挤土效应; 推广应用静压植桩、螺旋钻低噪声成孔技术, 避免强振; 引入微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)浅层注浆技术, 菌液养护时间短、扰动极低, 特别适用于历史街区或管线密集区软基处理。(3) 适配市政文明施工、降噪降污管控办法: 施工机械加装消声器和减振底座, 夜间 22:00 后停止高噪声作业; 泥浆循环系统采用封闭式泥浆箱, 废浆经压滤处理后外运; 真空泵排水经三级沉淀池处理达标后排入市政管网; 场地设置喷淋降尘系统, 运输车辆密闭加盖, 实现绿色文明施工。

结束语

本文结合市政城区施工独有特点, 系统梳理软土地基病害、施工难点与四类核心处理工艺, 配套完善前期勘察、过程质控、病害治理全套措施, 贴合绿色施工要求提出再生骨料、微创注浆改良方案。市政软基施工需因地制宜匹配工艺, 依托动态监测规避施工风险。后续可推进多工艺组合应用, 优化微创低碳施工技术, 进一步平衡工程造价、施工工期与地基加固效果。

参考文献

- [1] 刘鑫. 市政道路软土路基分层填筑与地基沉降控制施工技术优化[J]. 市政技术, 2024, 42(8): 112-115.
- [2] 肖铭镇. 滨海区域市政综合管廊软土地基复合支护与加固施工工艺[J]. 居业, 2024, 5(9): 34-36.
- [3] 高连琳, 马晓羊. 市政基坑周边软土地基扰动变形及施工防控技术[J]. 城市建筑, 2024, 21(4): 230-232.
- [4] 李柏松. 市政路桥工程软土地基换填法+注浆法联合施工技术应用[J]. 中国住宅设施, 2024, 19(5): 137-139.
- [5] 周磊. 真空预压+堆载预压复合工艺在市政软土地基处理中的实践[J]. 施工技术, 2023, 52(12): 89-92.