

沿海软土地基市政道路路基处理施工工艺与边坡、基坑安全防护工程实践

王印武¹ 王丹锋²

1. 宁波市天庆建设有限公司 浙江 宁波 315000

2. 吉林省安金环境安全技术有限公司 吉林 长春 130000

摘要:沿海软土高含水、低强度,市政施工易发沉降、滑移等病害。本文结合滨海工程实践,系统梳理软基预处理、换填加固、复合地基及沉降控制工艺,总结边坡基坑支护、防水防渗及动态监测技术,并从责任制、作业票、交底培训、危险源管控、应急演练及文明施工等维度构建安全管控体系。通过优化施工参数,有效控制路基沉降与基坑变形,保障质量安全,可为同类软基工程提供参考。

关键词:沿海软土地基;路基处理;边坡基坑防护;安全管控体系;工程实践

引言:沿海地区海积软土分布广泛,土体力学性能差、固结周期长,叠加海水侵蚀、潮汐波动等恶劣工况,给市政道路路基施工、边坡及基坑防护带来诸多技术难题,极易引发路面开裂、基坑渗漏、结构失稳甚至坍塌滑坡等安全质量事故。为攻克软基施工安全痛点,本文依托实际滨海道路工程,针对性研究软基处理核心工艺与边坡基坑安全防护技术,构建覆盖全员责任、过程管控与应急响应的安全管控体系,旨在从技术与管理双维度解决软基施工难题,提升沿海市政工程建设的安全性与耐久性。

1 沿海软土地基工程特性与施工安全难点分析

1.1 沿海软土基本物理力学特性

(1)高含水率、高孔隙比、低强度的土体基本特征。沿海软土天然含水率普遍高于液限,孔隙比常大于1.0,呈流塑~软塑状态,天然承载力低,灵敏度高,受扰动后强度急剧衰减,结构性强但破坏后不可恢复。(2)压缩性高、渗透性差、固结周期长的力学特性。软土压缩系数大,次固结变形显著;渗透系数多在 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{cm/s}$ 量级,排水固结缓慢,路堤荷载下主固结往往持续数年,工后沉降控制难度极大^[1]。(3)流变特性与不均匀沉降发育规律。软土具有显著蠕变效应,在恒定荷载下持续变形;加之厚度分布不均、夹砂层或透镜体发育,差异沉降突出,易引发路面开裂、桥头跳车等结构病害。

1.2 软土地基市政道路施工核心安全难点

(1)路基填筑过程中失稳滑移与变形失控风险。分层填筑速率难以把控,填筑过快导致地基土中孔隙水压力骤升、有效应力降低,极易引发整体滑移或侧向挤出;堆载预压周期长,沉降观测反馈滞后,动态调整困

难。(2)开挖与支护阶段坍塌、隆起、渗漏频发。软土灵敏度高,基坑开挖扰动易导致坑壁变形、基底隆起甚至管涌;潮汐水位涨落加剧渗流作用,止水帷幕缺陷时即引发涌水涌砂,严重时造成基坑失稳。(3)海水侵蚀与干湿循环加剧结构劣化。地下水位频繁波动,干湿交替使土体开裂、强度衰减;海水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 侵蚀水泥材料及钢筋,降低支护结构长期耐久性,增加后期安全风险。

2 沿海软土地基市政道路路基核心处理施工工艺

2.1 软基预处理施工工艺

(1)施工准备与排水降水。清表后开挖排水沟降低含水率;补充钻探复核软土厚度及夹层分布;精确放样并标定搅拌桩机、真空泵、插板机等设备。(2)表层处理。表层软土 $< 3\text{m}$ 时抛填不易风化片石挤淤整平;砂垫层用中粗砂压实形成排水坡;土工格栅垂直轴线铺设,搭接 $\geq 20\text{cm}$,U型钉固定,严禁折叠扭曲。(3)排水固结预处理。塑料排水板静压沉设,严禁扭结断裂,板头外露 $\geq 30\text{cm}$ 并弯折埋入砂垫层;真空预压密封膜四周压入密封沟,膜下真空度稳定维持 $\geq 80\text{kPa}$,满载预压按沉降速率控制,实测连续5天 $< 2\text{mm/d}$ 时卸载。

2.2 分层换填与轻质填料加固工艺

(1)浅层软土换填施工。挖除软土至持力层后分层回填级配良好的砂砾或碎石,松铺厚度不超过 30cm ,重型压路机碾压,压实度不低于93%。(2)泡沫混凝土轻质填筑。容重控制在 $5 \sim 8\text{kN/m}^3$,现浇泵送分层浇筑,单层厚度不超过 0.6m ,下层初凝后方可浇筑上层;相邻段高差控制不大于 50cm ,避免附加应力引发地基失稳^[2]。(3)质量管控。填料含水率控制在最优含水率 $\pm 2\%$,灌

砂法检测压实度,每1000m²不少于3个测点。

2.3 深层软基复合地基加固工艺

(1) 水泥搅拌桩。采用四喷四搅工艺,水灰比0.45~0.55,水泥掺量12%~20%;桩机就位偏差不大于5cm,垂直度偏差不超过1%,下沉提升速度0.5~1.0m/min,喷浆压力0.4~0.6MPa^[3]。(2) 粉体喷射桩。压缩空气喷射水泥粉,每米喷粉量误差不大于±5%;根据电流变化动态调整转速与提升速度,确保桩体均匀连续。(3) 桩土协同受力。成桩28天后抽芯检验,桩身无侧限抗压强度≥0.8MPa;桩顶铺设30~50cm碎石褥垫层,压实度不低于90%。

2.4 路基沉降精细化控制工艺

(1) 分级堆载预压。按设计荷载分级施加,每级静置至固结度达85%以上方可施加下一级;布设沉降板、位移边桩,加载期每日观测2次。(2) 填筑速率管控。日填筑速率控制为水平位移≤5mm/d、沉降≤10mm/d,超标时立即停止加载并坡脚反压;差异沉降较大时补压或局部超载预压修正。(3) 成型路基养护。设置永久性沉降观测标,运营期结合InSAR或分层沉降仪长期跟踪,超标时及时注浆补强或桥头搭板过渡。

3 沿海软土市政道路边坡基坑安全防护与安全管理

3.1 软土路基边坡稳定防护技术

(1) 边坡分级开挖与放坡。每级高度3~5m,平台宽度不小于2m,综合坡比缓于1:1.5;自上而下分层开挖,严禁掏底施工,每级开挖后及时支护。(2) 锚杆框架与喷锚支护。锚杆采用HRB400钢筋,M30水泥砂浆注浆,压力0.5~1.0MPa,锚头与C30框架梁锁定;喷锚喷射混凝土厚度≥80mm,挂φ6钢筋网,网距200mm。(3) 边坡排水与防冲刷。坡顶设截水沟,坡面布泄水孔(间距3~5m,梅花形),坡脚设排水沟;骨架护坡植草或浆砌片石防护。

3.2 深基坑开挖与支护安全施工工艺

(1) 分层分段开挖。遵循“分层、分段、对称、限时”原则,每层厚度不超过2m,分段长度不大于20m;机械开挖预留30cm人工清底,暴露面24h内完成支撑与垫层跟进。(2) 钢板桩与排桩支护。钢板桩振动锤沉桩,垂直度偏差不大于1%,锁口咬合紧密;排桩桩位偏差不大于5cm,桩顶冠梁整体浇筑形成闭合围护体系。(3) 内支撑体系。钢支撑预加轴力按设计值70%~80%施加,轴线水平偏差小于3cm;钢腰梁传力均匀,节点固结牢固^[4]。

3.3 基坑防水与地下水防控技术

(1) 降水截水止水。井点降水结合坑内明排,降水深度控制坑底以下0.5~1.0m;水泥土搅拌桩止水帷幕搭接长度不小于200mm,伸入隔水层不少于2m。(2) 潮汐防渗堵漏。高潮位加强水位差监测,帷幕薄弱处采用水泥-水玻璃双液注浆快速堵漏,压力0.3~0.5MPa,凝固时间30~90s;施工缝预埋遇水膨胀止水条。(3) 积水排放与水位监测。坑底设集水坑与排水沟(坡度0.3%~0.5%),备用排水泵流量不小于计算渗流量1.2倍;水位监测孔沿基坑周边布设,潮汐时段加密至每2小时1次。

3.4 边坡基坑动态监测与安全预警体系

(1) 边坡位移沉降监测。坡顶位移监测点间距10~15m,施工期每日1次,雨后加密;裂缝宽度变化超2mm即启动巡查。(2) 基坑变形与支撑应力监测。深层位移采用测斜管,基底隆起布设沉降标,支撑轴力采用振弦式轴力计实时采集;开挖阶段每日2次,支撑拆装时连续监测。(3) 三级预警与应急处置。按累计位移达控制值70%、85%、95%分别设定黄、橙、红三级预警,险情15min内启动响应,1h内完成初步处置。

3.5 安全管控体系与现场文明施工管理

(1) 安全生产责任制分层落实。成立安全生产领导小组,项目经理为第一责任人,逐级签订责任书,明确技术、施工、监测等岗位安全职责,实行“一岗双责”与月度安全绩效考核。(2) 安全技术交底与教育培训全覆盖。开工前编制专项方案并组织专家论证,逐级交底至班组及作业人员,涵盖软土突陷、基坑坍塌、机械伤害等风险防控要点;进场人员须经三级安全教育考核合格上岗,特种作业持证率100%,每月开展不少于2次专项培训及警示教育。(3) 重大危险源公示与过程管控。针对真空预压塌陷、基坑失稳、起重吊装、潮汐倒灌等建立危险源清单,现场张挂公示牌并每日巡查;对基坑支护、降水系统、临电设施等实行条件验收与作业票管理,作业前安全条件确认,验收合格方可施工。(4) 应急预案编制、演练与快速响应。制定坍塌、滑坡、管涌、管线破损等专项应急预案,明确组织架构、物资储备与处置流程;每季度不少于1次综合演练,每月开展桌面推演与操作训练,响应时间≤15min,物资储备满足抢险需求。(5) 现场安全文明施工常态化管理。施工区域全封闭围挡,设置警示标志与夜间警示灯;临时用电执行三级配电两级保护,电缆穿管或架空敷设;便道硬化,车辆冲洗降尘;材料分区堆码标识清晰,危险品专库存放双人双锁;建立每日班前晨会与工完场清制度,定期开展评比考核。

4 工程实践应用与安全效果分析

4.1 依托工程概况

(1) 工程位于东南沿海某市滨海新区,海积平原地貌,地下水位埋深0.8~1.5m。软土为海积淤泥质粘土,厚度8~18m,含水率55%~82%,孔隙比1.2~1.8,不排水抗剪强度12~18kPa,分布不均匀,局部夹粉砂薄层。(2) 道路全长3.6km,路基宽度40m,填方高度2.5~4.0m;塑料排水板+真空预压处理深层软基,浅层换填结合泡沫混凝土减载,最大基坑深8.2m,钢板桩+内支撑支护,边坡坡比1:1.75并辅以锚杆框架防护。

4.2 现场施工工艺与安全管控落地应用

(1) 软基处理工艺实施与参数优化。排水板穿透软土层,间距1.2m正方形布置,真空度维持82~88kPa,满载110天后沉降速率降至1.8mm/d卸载;夹砂层区段加密排水板至间距0.9m,搅拌桩水灰比调至0.48,提升转速至45r/min。(2) 边坡基坑安全技术实施。边坡分级开挖(每级4m),及时施作锚杆框架梁并植草;基坑分层开挖厚度1.5~1.8m,钢板桩垂直度偏差 $\leq 0.8\%$,内支撑轴力按设计70%施加,止水帷幕搭接 $\geq 200\text{mm}$ 。(3) 安全管理执行情况。共签订安全各级责任书26份,签订覆盖率达100%。组织安全技术交底42场次,三级安全教育考核覆盖326人次;公示重大危险源8项,开展条件验收56次;编制应急预案6项,组织综合演练3次、桌面推演12次,响应时间平均12min。

4.3 施工质量与安全效果检测分析

(1) 搅拌桩28天强度均值1.2MPa,复合地基承载力145kPa;工后沉降最大62mm,平均48mm,差异沉降 $\leq 1/300$ 。(2) 坡顶水平位移累计最大22mm(预警值30mm),深层测斜最大位移15mm;基坑周边地表沉降最大18mm,坑底隆起12mm,支撑轴力均在设计值75%以内,全程无渗漏滑移险情。(3) 安全管控效果:全周期排查安全隐患5项,整改5项,整改率100%;未发生人员伤亡及重大设备事故,预警响应处置率100%;安全生产标准化考评优秀,工伤事故同比下降100%。

4.4 施工常见问题与安全管控改进

(1) 典型问题梳理。真空预压膜下局部漏气致真空度波动至65kPa;搅拌桩在粉砂夹层区电流异常增大、局部水泥掺量不足;潮汐高水位期基坑侧壁轻微渗水;个别作业人员安全意识不足,临边防护临时拆除后未及时恢复。(2) 工艺优化与安全改进。漏气处采用双层密封膜+黏土密封沟并增设压膜袋装砂;粉砂层增加预钻孔并加大喷粉量5%;渗水点壁后注浆封堵,潮汐时段降水深度增至1.5m,后续工程止水帷幕改用三轴搅拌桩。(3) 安全管理改进。增设安全巡逻员轮值制度,严格执行作业票制度,强化临边洞口防护恢复检查;将潮汐渗水纳入重大危险源动态管控清单,增加高潮位时段监测频次;建立违章行为即时通报与连带考核机制,持续开展班前安全交底与风险预判活动。

结束语

本文针对沿海软土工程特性与施工难点,集成软基处理、边坡及基坑防护技术体系,并构建覆盖责任落实、作业票、交底培训、危险源管控、应急演练及文明施工的全方位安全管理体系。工程实践验证了技术与管理双控的有效性。针对真空预压漏气、夹层成桩缺陷、潮汐渗水及管理薄弱环节提出优化方案,实现质量与安全双目标。成果有效解决沿海软基道路施工核心难题,对同类滨海市政工程标准化、安全化施工具备良好借鉴价值。

参考文献

- [1]黄俊伟.滨海市政道路软基处理新工艺及基坑边坡协同防护技术[J].广东土木与建筑,2025,32(2):56-60.
- [2]张恒,刘阳.沿海软土地区道路边坡滑移成因及加固施工技术优化[J].公路工程,2023,48(4):189-194.
- [3]李建峰.深厚淤泥质软土基坑开挖变形特征及安全防护技术研究[J].土木工程,2024,13(7):122-124.
- [4]王浩,林强.滨海软土市政道路路基综合处理及边坡稳定性控制[J].中外公路,2024,44(3):45-50.