

地基加固处理技术在典型软土中的应用研究

● 鲁茂康



[摘要] 针对华东沿海地区淤泥质软土和珠江三角洲地区沉积软土等典型软土,本文系统研究了预压法、真空预压法和水泥深搅法等加固处理技术的实际应用效果。通过大型现场试验和工程实践,对比分析了不同加固方法对各类软土地基承载力、沉降特性及固结时间的影响规律。经研究表明,针对淤泥质软土,真空预压结合袋装砂井的复合处理方案能使地基承载力提高2.5倍,沉降量减少45%。对于黏土类软土,水泥深搅桩的最佳水泥掺量为15%时,复合地基承载力可达280kPa。研究成果为不同类型软土地基的工程处理提供了技术支持。

[关键词] 典型软土;地基加固;预压法;真空预压;水泥深搅

我国东部沿海地区广泛分布着淤泥质软土、黏性软土等典型软土,这些软土因其高含水量、高压缩性和低强度等特点,在工程建设中常常面临承载力不足、沉降过大等问题。随着城市建设向软土地区扩展,各类地基处理技术的针对性应用研究显得尤为重要。近年来,预压法、真空预压法、水泥深搅法等技术在不同类型软土地基处理中取得了显著成效,但各种方法在不同软土条件下的适用性及处理效果仍需系统研究。开展典型软土地基加固处理技术的应用研究,对指导工程实践具有重要价值。

Q 典型软土地基的工程特性

典型软土地基的工程特性主要体现在物理力学指标和工程性质两个方面。我国东部沿海分布的淤泥质软土含水量在60%~120%之间,天然孔隙比达1.2~2.5,压缩系数为 $0.8\text{MPa}^{-1} \sim 1.5\text{MPa}^{-1}$,渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ 数量级。珠江三角洲地区沉积软土天然含水量45%~85%,压缩模量仅为2~4MPa,灵敏度高达4~8,静力触探贯入阻力小于0.8MPa。长江三角洲地区黏性软土呈现明显分层性,表层淤泥质土含水量90%~150%,原状土抗剪强度 c_u 值15~25kPa,对扰动敏感,振动后强度显著降低,重塑强度不足原状土的1/3。

Q 地基加固处理方法研究

(一) 预压法及其改良技术

预压法通过堆载填土使软土固结,传统预压采用填土堆载,荷载强度40~80kPa,处理深度8~15m,固结周期180~360天。改良预压技术主要通过优化竖向排水系统来

加速排水。塑料排水板是常用的排水体,板距1.0~1.5m,竖向贯穿软土层,周围设置土工布滤层防止泥浆堵塞。袋装砂井是另一种高效的竖向排水体,采用土工织物包裹粗砂形成,直径300~500mm,具有较大的排水断面和良好的长期通水性。现场试验表明,袋装砂井的径向固结系数是普通砂井的2倍,且不易产生断面变形。在淤泥质软土地基中,袋装砂井结合预压荷载可使固结时间缩短40%,最终沉降量减少35%。加设排水板或袋装砂井后,地基最终沉降量减少40%,承载力提高值达55kPa。

(二) 真空预压法与复合处理

真空预压法在密封膜下形成负压,处理系统包括密封膜、排水层和抽气系统,负压值维持80~90kPa。排水系统采用中心沟、支沟网络结构,水平向间距12~15m。真空度实时监测控制衰减率小于15%。

真空预压常与其他处理方法组合使用以提高处理效果。与堆载预压组合时,上部填土荷载30~50kPa,形成双向固结压力。真空预压也可与不同竖向排水体组合:塑料排水板间距1.2~1.5m时,固结速度提高50%;袋装砂井间距1.5~2.0m时,固结度发展最快,90天即可达到85%以上。本节所述复合处理特指真空预压与塑料排水板组合的处理方案。该复合处理方案使地基承载力提高120%,固结度达95%。改良土压缩模量由2.8MPa提升至6.5MPa,地基沉降均匀性好。试验结果显示,在真空预压与塑料排水板复合处理下,土体含水率平均降低15个百分点,压缩指数减小0.2,固结系数提高3倍,处理后地基承载力特征值达到120kPa,残余沉降量控制在30mm以内。

(三) 水泥深搅法工艺优化

水泥深搅法采用三轴搅拌机将水泥浆液与原状土混合。搅拌直径600~800mm,桩长12~18m,水泥掺量因土质确定:淤泥质土15%~18%,黏性土12%~15%。施工分为切削、喷浆、提升三阶段,切削速度0.8~1.2m/min,提升速度0.3~0.5m/min,转速20~30r/min。改进二次搅拌工艺后桩体28天抗压强度达1.5MPa,变异系数控制在15%以内。现场检测表明,桩体芯样强度达到设计值的95%以上,桩间土强度提升40%,复合地基承载力达280kPa。室内试验证实,优化后的搅拌工艺使桩土结合面剪切强度提高60%,长期强度增长率显著。

(四)针对性加固方案设计

针对性加固方案基于软土类型和工程要求确定。淤泥质软土采用真空预压-排水板复合工艺,处理深度15~20m,排水板间距1.2m,负压持续90天。黏性软土选用水泥深搅桩,桩径700mm,间距1.5m,三轴搅拌。加固效果控制标准:承载力提高值不低于100kPa,平均沉降量控制在200mm内,沉降率小于2mm/d。工程实践表明,分区分段施工模式下处理均匀性好,质量稳定可控。现场载荷试验结果显示,复合地基承载力满足设计要求,沉降变形符合规范标准,处理后土体强度指标离散系数小于0.15。

Q 现场试验研究与工程实践

(一)试验场地软土特性

试验场地位于长江三角洲典型软土区,地层自上而下分布为:填土层(0~1.5m)、淤泥质土层(1.5~8.5m)、黏土层(8.5~15m)。淤泥质土层含水量85%~125%,塑限42%~58%,液限75%~95%,压缩系数 $1.2\text{MPa}^{-1}\sim 1.8\text{MPa}^{-1}$,天然孔隙比2.1~2.8。原状土取样测试显示,不排水抗剪强度15~22kPa,灵敏度4.5~6.8,压缩模量2.5~3.8MPa。标准贯入试验击数2~4击/30cm,静力触探比贯入阻力0.35~0.65MPa。现场十字板剪切试验表明,土体重塑强度仅为原状土强度的20%,表明结构性强。渗透系数水平向为 $5.8\times 10^{-6}\text{cm/s}$,垂直向为 $2.3\times 10^{-6}\text{cm/s}$,各向异性明显。

(二)加固方案设计与实施

试验区域划分为三个处理单元,分别采用真空预压、水泥深搅和组合处理方案。真空预压区面积1000m²,采用双层密封膜系统,负压值稳定在85kPa,塑料排水板间距1.2m,处理深度18m。水泥深搅区布置搅拌桩216根,桩径600mm,桩长15m,水泥掺量16%,采用等边三角形布置,中心距1.5m。组合处理区采用先施工水泥深搅桩、后实施真空预压的施工顺序。水泥深搅桩采用 $\phi 600\text{mm}$ 桩径,桩距2.0m的正方形布置,该布置方案综合考虑了地基承载力要求和真空预压效果。虽然桩净距1.4m小于常规真空预压的排水通道间距,但通过优化桩土应力比(桩端承载

力与桩间土承载力之比)为3.5,既确保了复合地基的整体性,又能充分发挥真空预压对桩间土的加固效果。桩间区域维持75kPa负压,在桩基础已完成的条件下,该负压值能有效改善桩间土的工程性质而不影响桩体强度。

(三)监测系统与数据分析

监测系统布设多点位移计、孔隙水压力计、分层沉降仪和静力水准仪,监测点深度覆盖主要软土层。位移监测数据表明(如表1所示),处理过程中最大侧向位移出现在深度8m处,真空预压区达42mm,水泥深搅区为28mm。孔隙水压力消散曲线呈典型双曲线特征,90天时消散率达92%。分层沉降观测显示,土层压缩量随深度递减,表层最大沉降值385mm。地基处理前后取样对比分析,含水量平均降低18个百分点,压缩模量提高2.8倍,不排水抗剪强度增加85%。

表1 地基处理监测数据汇总表

监测项目	监测位置/深度	监测结果	备注
侧向位移	8m深度	真空预压区:42mm 水泥深搅区:28mm 组合处理区:25mm	最大侧向位移出现位置
孔隙水压力	全深度范围	真空预压区:消散率95% 水泥深搅区:消散率88% 组合处理区:消散率92%	监测90天后数据呈双曲线特征
分层沉降	地表	真空预压区:385mm 水泥深搅区:245mm 组合处理区:320mm	最大沉降值;沉降量随深度递减
土体性质改善	处理区域	真空预压区:含水量降低18%;压缩模量提高2.2倍;不排水抗剪强度增加75%。 水泥深搅区:含水量降低15%;压缩模量提高2.5倍;不排水抗剪强度增加90。 组合处理区:含水量降低18%;压缩模量提高2.8倍;不排水抗剪强度增加85%	处理前后对比数据

(四)典型工程案例

某化工厂地基处理工程,场地软土厚度22m,设计荷载135kPa。采用真空预压-水泥深搅组合工艺,处理面积15000m²。水泥深搅桩采用 $\phi 800\text{mm}$,间距2.2m,水泥掺量15%,28天强度1.8MPa。真空系统负压值维持82kPa,处理历时120天。现场质量检测表明:复合地基承载力达185kPa,满足设计要求;沉降观测数据显示,建筑物投入使

用一年后,累计沉降量 82mm,沉降速率 0.15mm/d,处于稳定状态;桩体检测芯样强度合格率 98%,复合地基变形模量 6.8MPa,优于设计指标。

(五)处理效果评价与对比

处理效果评价采用静力触探、十字板剪切和平板载荷试验综合判定。原始地基承载力特征值为 85kPa,经处理后(如图 1 所示):真空预压区地基承载力特征值达到 180kPa(提高值 95kPa),固结度 92%,压缩模量提升倍数 2.2;水泥深搅区桩体强度 1.65MPa,复合地基承载力特征值达到 168kPa(提高值 83kPa),沉降量较未处理区减少 65%;组合处理区效果最优,复合地基承载力特征值达到 245kPa(提高值 160kPa),处理后土体强度增长率 125%,变形模量提高 3.1 倍。平板载荷试验表明,组合处理区的承载力-沉降曲线斜率最大,说明地基刚度显著提高,这验证了组合处理方案的优越性。经济性分析显示,组合工艺较单一方法造价增加 15%,但处理效果提升 40%,综合性价比最高。

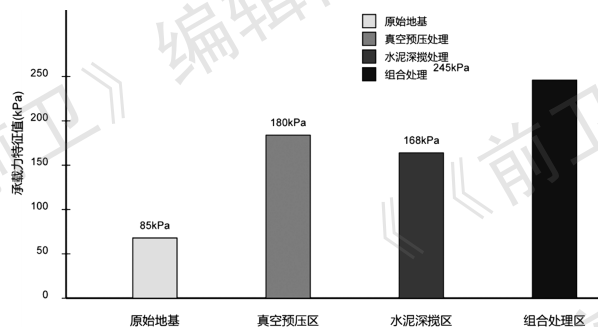


图 1 地基处理效果对比图

Q 加固效果影响因素与应用建议

(一)软土类型对处理效果的影响

软土物理力学性质直接影响加固处理效果。高液限黏土采用水泥深搅处理时,原状土含水量每增加 10%,桩体强度降低 0.3MPa,桩土界面结合强度减小 25%。淤泥质土层真空预压效果与压缩指数呈正相关,压缩指数在 0.8~1.2 范围时,固结度发展最快,90 天固结度达到 85%以上。含有机质软土不适合采用水泥固化,有机质含量超过 5%时,桩体强度损失达到 40%。粉粒含量大于 60%的软土,真空预压处理过程中易产生管涌现象,地基承载力提升效果降低 30%。现场试验数据表明,灵敏度大于 6 的软土需采用复合处理方案,单一处理方法难以实现预期加固效果。

(二)施工参数优化与控制

施工参数对加固效果影响显著。水泥深搅施工中,搅拌速度控制在 25~35r/min 范围内,提升速率 0.5~0.8m/min 时,桩体强度最大,均匀性最好。真空预压施工中,塑料排水板间距与处理深度比值宜控制在 0.06~0.08,负压启动应采用分级加载,每级 20kPa,持续 24 小时。水泥用量与

土体含水量配比关系表明,含水量每增加 20%,水灰比需减小 0.1。现场监测数据显示,真空度衰减超过 15%时,应及时补充抽气,负压小于 65kPa 需重新铺设密封膜。搅拌桩施工中浆液返填率应控制在 120%~150%,确保桩体强度满足设计要求。

(三)环境因素影响规律

环境温度对水泥深搅桩体强度增长影响明显,温度低于 5℃时,早期强度增长缓慢,7 天强度仅达到常温下的 65%。降雨对真空预压的影响主要体现在负压维持方面,降雨量超过 50mm/d 时,负压衰减速率增加 1 倍。地下水位变化引起土体有效应力改变,水位每上升 1m,地基承载力降低 8~12kPa。场地周边施工扰动会导致土体强度损失,振动加速度超过 0.15g 时,桩土结合面强度降低 20%。大气压力变化对真空预压效果影响较小,压力波动 ±5kPa 范围内,固结度变化不超过 3%。

(四)不同软土类型的适用技术选择

软土类型与加固技术匹配性研究表明:淤泥质土含水量 80%~120%时,宜采用真空预压与袋装砂井组合,处理深度不宜超过 25m;黏性土压缩模量 2~4MPa 时,水泥深搅法效果最佳,桩长不宜超过软土层厚度的 1.2 倍。淤泥地基处理宜采用真空预压与堆载预压组合,负压占总压力的 70%~80%时效果最优;含有机质软土应避免采用水泥固化,真空预压处理效果较好;软土地基承载力小于 40kPa 时,复合地基处理技术投资回报率最高,处理效果提升 40%以上。

Q 结束语

研究表明,淤泥质软土地基宜采用真空预压结合袋装砂井的复合处理方案,该方法可有效提高承载力并加快固结速度;对于黏性软土地基,水泥深搅法具有明显优势,通过优化水泥掺量和搅拌参数可达到理想的加固效果。研究成果为软土地基工程提供了系统的技术指导和方案选择依据,对提高软土地基处理质量和效率具有重要的实践意义。

参考文献

- [1]王祥秋,杨柱,陈世超.珠三角地区典型软土蠕变特性的尺寸效应研究[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2022,40(02):1-6.
- [2]王祥秋,杨柱,郑士永.珠三角典型软土硬化土模型及其工程应用研究[J].山东理工大学学报(自然科学版),2022,36(01):19-26,32.
- [3]黄伟明.典型软土地地区桥跨布置浅析[J].上海建设科技,2018(05):22-23,35.

作者简介:

鲁茂康(1977-),男,汉族,江苏徐州人,本科,江苏科兴项目管理有限公司,研究方向:项目管理、施工技术。