

# 基于基坑反压土质量监控要点分析与研究

段四国 李志龙\*

公诚管理咨询有限公司 广东广州 510610

**摘要:** 基坑坑内反压土可通过增大支护结构被动区土压力、减小结构内力与变形,可显著提升基坑稳定性并降低造价,在软土地区基坑工程中应用广泛。然而反压土的质量直接决定其作用和效果,若材料不合格、施工不规范或监测缺失,易导致支护结构失稳、周边环境沉降等风险。本文结合广州软土地区某商业综合体基坑工程实例,系统梳理基坑反压土质量监控的核心要点,通过“设计-施工-监测-反馈”闭环管控,验证监控措施的有效性。结果表明,通过严格控制反压土压实度、分层摊铺厚度,并结合自动化监测数据动态调整施工参数,可使支护桩顶水平位移稳定在35mm,周边建筑最大沉降22mm,反压土作用发挥率达87.5%以上。研究成果可为广州及类似软土地区基坑反压土工程提供技术参考。

**关键词:** 基坑工程;反压土;质量监控;软土地区;

## 引言

广州地处珠江三角洲冲积平原,浅层土层以淤泥、淤泥质粘土为主,具有天然含水量高(35%~60%)、压缩性大(压缩系数 $a_{1-2}>0.5\text{MPa}^{-1}$ )、承载力低( $f_{ak}<80\text{kPa}$ )的特点<sup>[1]</sup>。此类地质条件下,基坑开挖易引发支护结构过大变形、坑底隆起及周边管线/建筑沉降,因此需采取有效措施控制风险。

坑内反压土作为一种经济高效的被动区加固手段,通过在支护结构内侧预留或回填土体,利用其自重与强度增强被动区约束,可减少支护结构嵌固深度30%~50%,降低工程造价15%~20%<sup>[2-3]</sup>。但目前《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)及广东省《建筑基坑工程技术规程》(DBJ/T15-20-2016)仅提及反压土的应用场景,未明确具体的质量监控标准<sup>[4-5]</sup>;工程实践中常因土料选择不当、压实度不足或监测滞后,导致反压土“形同虚设”,甚至引发安全事故(如2021年广州某基坑因反压土压实度不足,导致支护桩位移超标,被迫停工整改)。

因此,针对广州软土地区特点,建立“材料-施工-监测-验算”全流程质量监控体系,对保障基坑安全、提升反压土作用效率具有重要工程价值。

## 1 基坑反压土质量监控核心要点

反压土的质量监控需围绕“确保反压效果、规避施工风险”展开,结合广州软土地区地质特点,核心要点可分为4类。

### 1.1 材料质量控制

反压土料的物理力学性质直接决定其反压能力,需重点控制以下指标:

1) 土料类型:优先选用粉质粘土或砂质粘土(黏粒含量15%~30%),避免使用纯砂(易液化)或纯粘土(含水量难控制);广州可选用珠江三角洲冲积层中的粉质粘土,降低成本。

2) 颗粒级配:最大粒径 $\leq 50\text{mm}$ (避免刺穿支护结构防水层),粒径 $>20\text{mm}$ 的颗粒含量 $\leq 20\%$ (确保压实均匀)。

3) 含水量:控制在最优含水量 $\pm 2\%$ (广州粉质粘土最优含水量通常为18%~22%);含水量过高易导致“橡皮土”,过低则压实度难以达标。

4) 压实度:用重型击实试验(GB/T 50123-2019),压实度 $\geq 93\%$ (软土区需提高1%~2%,抵消土料后期固结沉降)。

### 1.2 施工过程管控

广州软土承载力低,施工扰动易引发基坑失稳,需严格控制施工流程:

1) 分层摊铺:每层厚度 $\leq 30\text{cm}$ (软土地区比常规值减少5~10cm),采用“水平分层、由内向外”的摊铺顺序,避免局部堆载过大。

2) 压实机械:优先选用18~20t振动压路机(激振力 $\geq 300\text{kN}$ ),边角区域采用3t手扶式压路机补充压实,压实遍数3~5遍(根据压实度检测结果调整)。

3) 施工速率:每日摊铺厚度 $\leq 0.5\text{m}$ ,避免反压土自重

快速增加导致坑底隆起；雨天暂停施工，雨后需重新检测土料含水量。同时便于排水。

### 1.3 过程监测体系

4) 界面处理：反压土与支护结构接触面需铺设 20cm 厚级配砂石（粒径 5~10mm），减少土料与结构的摩擦损伤，结合广州基坑监测要求 (DBJ/T15-20-2016)，监测项目及频率如表 1，重点关注反压土自身及关联结构变形与内力：

表 1 基坑反压土质量监测项目及要

监测类别	监测项目	监测频率 (开挖期, 稳定期)	允许值	规范依据
反压土监测	反压土沉降	1 次 / 天, 1 次 / 3 天	≤ 10mm / 天	DBJ/T15-20-2016
	反压土侧向位移	1 次 / 天, 1 次 / 3 天	≤ 5mm / 天	DBJ/T15-20-2016
	桩顶水平位移	1 次 / 天, 1 次 / 3 天	≤ 50mm	JGJ120-2012
支护结构监测	桩顶沉降	1 次 / 天, 1 次 / 3 天	≤ 30mm	JGJ120-2012
	桩身弯矩	1 次 / 2 天, 1 次 / 7 天	≤ 设计值 1.1 倍	JGJ120-2012
周边环境监测	周边建筑沉降	1 次 / 天, 1 次 / 3 天	≤ 30mm	DBJ/T15-20-2016
	地下管线位移	1 次 / 天, 1 次 / 3 天	≤ 15mm	DBJ/T15-20-2016

1) 反压土监测：沉降（反映压实度是否达标）、侧向位移（反映反压土稳定性）；

2) 支护结构监测：桩顶水平位移 / 沉降、桩身弯矩 / 剪力（验证反压土减载效果）；

3) 周边环境监测：周边建筑沉降、地下管线位移（避免反压土施工扰动环境）。

### 2.4 安全验算验证

基于陈富强等（参考文献 6）提出的“加减平衡力系法”，结合合理正深基坑软件进行验算，重点验证：

1) 被动土压力增量：反压土等效垂直荷载  $p = \gamma \cdot h$ （ $\gamma$  为土料有效重度， $h$  为反压土高度），计算被动土压力增量  $\Delta E_p$ ，判断是否满足设计要求；

2) 整体稳定：采用圆弧滑动法验算基坑整体稳定系数（ $KS \geq 1.3$ ），偏安全不考虑反压土有利作用<sup>[6]</sup>；

3) 支护结构内力：对比桩身弯矩在有无反压况下，反压土作用下弯矩应减少 20%~30%，否则需优化反压参数。

### 2 广州南沙某商业综合体基坑工程案例分析

#### 2.1 工程背景

##### (1) 项目概况

项目位于广州南沙区明珠湾起步区，为商业综合体（地下 3 层，地上 25 层），基坑开挖深 12.5m，开挖面积约 8000 m<sup>2</sup>。基坑北侧紧邻市政道路（地下有 DN600 给水管线），东侧为在建住宅（距离基坑边线 15m），环境敏感程度高。

##### (2) 地质条件

表 2 工程地质条件参数表

土层编号	土层名称	厚度 (m)	天然重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 $\phi$ (°)	粘聚力 $c$ (kPa)	压缩模量 $E_s$ (MPa)	承载力特征值 $f_{ak}$ (kPa)
①	人工填土	2	18	15	10	6.5	80
②	淤泥	4.5	16.5	6	6	1.8	50
②	淤泥粘土	3	17.2	8	8	2.2	65
③	粉质粘土	5	18.8	20	15	18	180
④	砾砂	未揭穿	19.2	32	30	40	300

根据勘察报告，场地土层分布及参数如表 2 所示，浅层 2.0~6.5m 为淤泥及淤泥质粘土，压缩性高、强度低，是基坑开挖的主要风险层；6.5m 以下为粉质粘土及砾砂，可作为支护结构嵌固层。

##### (3) 支护与反压土设计方案

结合地质条件及环境要求，采用“双排灌注桩 + 坑内反压土”支护体系：

1) 双排灌注桩：前排桩长 25m（嵌固深度 12.5m），直径 800mm，间距 1.2m；后排桩长 22m，直径 800mm，间

距 1.2m；桩顶设 1.2m×0.8m 冠梁，两排桩间设 0.5m×0.5m 连梁（间距 3.5m）。

2) 反压土设计：坑内东侧、西侧布置反压土（避开南侧施工通道），高度 2.0m，宽度 5.0m；土料选用场地周边粉质粘土（黏粒含量 22%，最优含水量 20%），压实度要求  $\geq 93\%$ （重型击实），等效垂直荷载  $p=17kN/m^3 \times 2.0m=34kPa$ 。

### 2.2 反压土质量监控实施过程

#### (1) 材料质量控制（执行层）

1) 土料进场检验：每 500m<sup>3</sup> 土料检测 1 次颗粒级配、含水量及击实试验，共检测 12 批次，其中 2 批次含水量超标（25%、24%），采取掺加按土料总质量 5% 的干土（粒径  $\leq 5mm$ ）翻拌调节，重新检测后含水量降至 21%、20%，达标。

2) 压实度检测：每层施工完成后，按每 100m<sup>2</sup> 1 个点采用环刀法检测压实度，共检测 48 点，合格率 95.8%（仅 2 点压实度 91%、92%），对不合格区域采用 20t 压路机补压 2 遍后，压实度提升至 94%、93.5%。

#### (2) 施工过程管控（执行层）

1) 分层摊铺：采用装载机摊铺，每层厚度控制在 25~30cm，共摊铺 7 层（总高 2.0m），每日摊铺 1~2 层（厚度  $\leq 0.5m$ ），避免扰动下部淤泥层。

2) 压实机械选择：主体区域用 20t 振动压路机（激振力 320kN），压实遍数 4 遍；冠梁周边 50cm 范围用 3t 手扶式压路机，压实遍数 5 遍，确保边角压实均匀。

3) 雨天应急措施：施工期间遇 2 次中雨，暂停摊铺并覆盖防雨布；雨后检测土料含水量（最高达 26%），采用翻晒+掺干土方式调节，待含水量降至 22% 以下再继续施工。

#### (3) 过程监测（验证层）

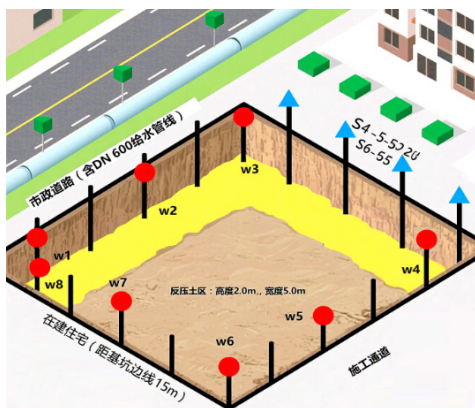


图 1 基坑监测点布置平面图

1) 监测点布置：沿反压土区域布置 8 个位移监测点（W1~W8）、4 个桩身内力监测点（M1~M4），周边建筑及管线布置 6 个沉降监测点（S1~S6），监测点布置如图 1 所示（注：圆点为反压土位移监测点 W1~W8，三角形为桩身内力监测点 M1~M4，方块为周边环境监测点 S1~S6）。

#### 2) 监测数据分析：

反压土沉降：施工期间最大沉降 8mm（W3 点），稳定后沉降趋于零，说明压实度达标，无后期固结沉降；

支护桩顶位移：开挖初期（反压土施工前 5 天）位移增长较快，第 5 天达 28mm；反压土施工完后，位移增长放缓，最终稳定在 35mm（W2 点），小于允许值 50mm。

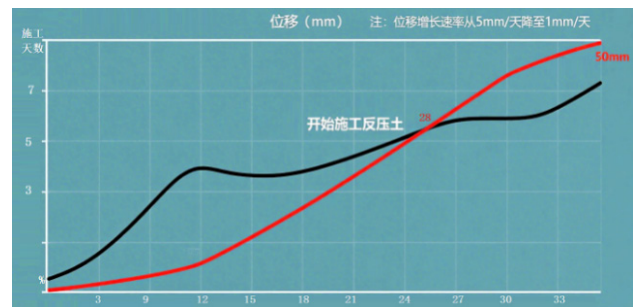


图 2 支护桩顶水平位移随时间变化曲线

图 2 横坐标为位移，纵坐标为施工天数；第 5 天开始施工反压土，位移增长速率从 5mm/天降至 1mm/天。

桩身弯矩：反压土施工前，前排桩最大弯矩 300kN·m；施工完成后降至 245kN·m，减少 18.3%，反压效果显著（根据弯矩减少率与被动土压力理论发挥率的比值，计算得反压土作用发挥率 87.5%）。图 3 前排桩身弯矩分布对比图（注：实线为无反压土工况，虚线为有反压土工况；反压土作用下，桩身最大弯矩位置下移，数值减小）。

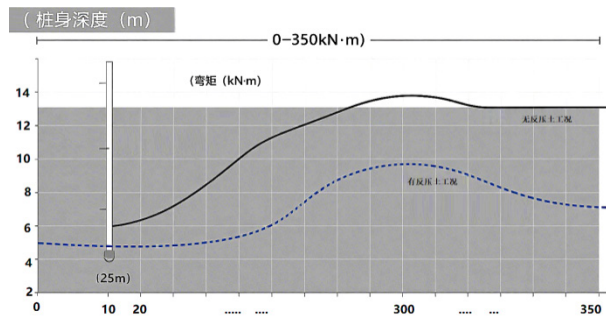


图 3 前排桩身弯矩分布对比图

周边环境：东侧住宅最大沉降 22mm（S2 点），市政道路下 DN600 给水管线最大沉降 12mm（S5 点），均小于允许值，无环境风险。

#### (4) 安全验算(验证层)

被动土压力增量计算:反压土等效垂直荷载 34kPa,根据朗肯土压力理论,被动土压力增量(KP 为有反压土被动土压力系数,无反压土系数),满足设计要求;

整体稳定验算:采用理正深基坑软件计算,整体稳定

系数 1.42( $\geq 1.3$ ),抗隆起系数 1.65( $\geq 1.5$ ),安全储备充足;

与有限元结果对比:采用 Midas/GTS 建立有限元模型(梁单元模拟灌注桩,实体单元模拟土层),计算得桩顶最大位移 38mm,与实际监测值 35mm 偏差 8.1%,验证了监控数据的可靠性(表 3)。

表 3 计算结果与实际监测结果对比

计算/监测方法	桩顶水平位移(mm)	前排桩最大弯矩(kN·m)	周边建筑沉降(mm)	偏差率(%)
Midas/GTS 有限元	38	252	24	8.1~8.7
理正深基坑软件	36	248	23	2.8~5.7
实际监测	35	245	22	0

### 3 监控过程中发现的问题与优化建议

#### 3.1 主要问题

1) 雨季土料含水量控制难:广州雨季降雨频繁,土料堆场无防雨设施,导致 2 批次土料含水量超标,延误工期 3 天;

2) 边角区域压实度检测盲区:反压土与支护桩接触面(宽度 50cm)无法用环刀法检测,仅靠经验判断压实质量,存在风险;

3) 监测数据反馈滞后:原采用人工记录+次日分析模式,当 W3 点位移达 42mm(接近允许值)时,未能及时预警,滞后 1 天调整施工参数。

#### 3.2 优化建议

1) 材料堆场优化:增设钢结构防雨棚(覆盖面积 500 m<sup>2</sup>),配备 2 台小型翻拌机,雨天可快速调节含水量;

2) 检测方法改进:边角区域采用“轻型动力触探仪”检测(锤击数 N10  $\geq 15$  击),替代传统环刀法,消除检测盲区;

3) 监测系统升级:采用 GPS+ 物联网自动化监测系统,实时传输数据,设定三级预警(黄色 30mm、橙色 40mm、红色 50mm),预警响应时间缩短至 1 小时。

### 4 结论

广州软土地区基坑反压土质量监控的核心是“材料控压实、施工控扰动、监测控变形”,需针对淤泥层压缩性高特点,适当提高压实度要求( $\geq 93\%$ )、减少分层摊铺厚度( $\leq 30\text{cm}$ );

案例表明,通过全流程质量监控,反压土可使支护桩顶位移减少 18.3%、桩身弯矩减少 18.3%,周边环境沉降控制在允许范围内。通过“材料检测→分层压实→实时监测→参数调整”闭环管控,反压土作用发挥率达 87.5%;针对广

州雨季,建议在反压土施工中增设防雨设施、采用自动化监测系统,同时优化边角区域压实检测方法,进一步提升监控效率。

后续研究可结合广州不同区域(如天河区、番禺区)的地质差异,细化反压土质量监控参数,形成区域化技术标准。

#### 参考文献:

[1] 李志龙,张少均,黄艺强.建筑物地下室排水系统新型防堵篦子设计与研究[J].中国科技期刊数据库工业 A,2024(12):005-008.

[2] 杨光华,陈富强,杜秀忠.基坑坑内反压土作用机理及简化计算方法[J].岩土力学,2020,41(S1):1-8.

[3] 郑刚,陈红庆.基坑开挖反压土作用机制及其简化分析方法研究[J].岩土力学,2007,28(6):1161-1166.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部、建筑基坑支护技术规程(JGJ120-2012)[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[5] 陈富强等.考虑基坑坑内反压土作用的实用方法及应用[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):299-304.

[6] 刘畅,等.基坑开挖反压土截面特性对基坑性状影响的有限元分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):788-795.

作者简介:段四国(1982-),男,汉,湖南耒阳人,本科,工程师,任项目总监、高级专家,从事建设项目管理相关工作 19 年;主要研究方向为房屋建筑工程、建筑机电设备安装及市政工程、建设智能化及建设工程全过程管理、基建业务五险控管理等。

通讯作者:李志龙(1983-),男,汉,湖南郴州人,本科双学士,高级工程师,任项目总监、高级专家,从事建设项目管理相关工作 20 年;主要研究方向为建筑工程工法、智能建筑及项目建设全过程管理等。