

岩土工程施工中深厚软土深基坑开挖支护研究

赵晓飞 卜烜靖

中南勘察基础工程有限公司 湖北 武汉 430081

摘要:深厚软土地区深基坑工程面临地层强度低、压缩性高、灵敏度高、蠕变性强等特殊工程地质条件,开挖卸荷引发的围护结构变形、坑底隆起、周边地表沉降及土体流变效应等问题尤为突出。本文系统分析了深厚软土层工程特性对深基坑稳定性的影响机制,梳理了适用于深厚软土条件的各类支护结构体系及其力学特征,探讨了考虑土体流变与固结耦合作用的设计计算方法,提出了施工全过程变形控制与风险预控策略。研究表明,深厚软土深基坑支护需综合采用“强桩、深墙、内撑、加固”的组合模式,注重时空效应与分层分块开挖原则,建立动态反馈设计体系。本文为类似地层条件下深基坑工程的设计与施工提供了理论参考。

关键词:深厚软土;深基坑;支护结构;变形控制;时空效应

引言

随着城市化加速,地下空间开发规模扩大,深基坑工程日益增多。在我国沿海、沿江及湖泊沉积区广泛分布厚度超20m甚至50m以上的深厚软土(如长三角海相淤泥质黏土、珠三角及渤海湾软土),其天然含水率高($>40\%$)、孔隙比大(>1.0)、高压缩性、低强度、差渗透性、高灵敏度,给深基坑开挖与支护带来严峻挑战。核心问题包括:开挖卸荷引起的大变形控制、围护结构内力与位移的时空演化、坑底隆起对周边环境的影响、软土流变导致的长历时位移增长,以及复杂的桩-土相互作用。尽管工程实践积累丰富经验,但深厚软土引发的围护结构倾覆、踢脚破坏、坑底管涌及周边管线建筑差异沉降超标等事故时有发生。因此,深入探究深厚软土深基坑开挖支护的关键技术,建立科学的设计计算与施工控制方法,具有重要理论意义与工程应用价值。

1 深厚软土的工程特性及其对深基坑的影响

1.1 深厚软土的物理力学特征

深厚软土通常指厚度超过20m、以淤泥、淤泥质土、软塑至流塑状黏性土为主的地层。其物理力学指标呈现以下典型特征:天然密度 $\rho = 1.60 \sim 1.80 \text{ g/cm}^3$,天然含水率 $w = 40\% \sim 80\%$,液限 $w_L = 35\% \sim 60\%$,塑性指数 $I_P = 15 \sim 25$,孔隙比 $e = 1.0 \sim 1.8$,压缩模量 $E_s = 1.5 \sim 4.0 \text{ MPa}$,固结快剪黏聚力 $c = 5 \sim 15 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 2^\circ \sim 10^\circ$,不排水抗剪强度 $c_u = 10 \sim 30 \text{ kPa}$,灵敏度 $S_t = 3 \sim 8$ 。高灵敏度意味着土体结构受扰动后强度急剧衰减,流变特性显著,次固结系数 C_α 可达 $0.01 \sim 0.03$ 。

1.2 软土深基坑的主要失稳模式

(1) 围护结构整体倾覆或踢脚破坏。由于软土被动区抗力不足,当插入比偏小时,围护墙底发生向坑内的转动位移,严重时导致墙体折断。(2) 坑底隆起破坏。软土压缩性高,开挖卸荷后坑底土体回弹与塑性流动交替发生,若抗隆起安全系数不足,将引发过大隆起量甚至基底失稳^[1]。(3) 管涌与流土破坏。软土中夹有粉细砂薄层时,承压水作用下易发生渗透破坏,坑底出现涌水涌砂。(4) 围护墙侧向位移过大。软土水平抗力系数小,墙后主动土压力与墙前被动抗力不均衡,导致墙顶或墙体中部产生厘米级甚至分米级水平位移。(5) 坑周地表沉降超限。由于墙后土体沉降槽开展,邻近建筑物及地下管线遭受附加变形荷载。(6) 长期蠕变变形。软土流变特性使基坑变形在开挖结束后仍持续增长,可达短期变形的30%~50%。

1.3 深厚软土对支护结构的特殊要求

与传统地层相比,深厚软土深基坑对支护体系提出了更高要求:一是支护结构需具备足够的刚度和嵌固深度,以抵抗软土侧向挤压;二是需设置可靠的被动区加固措施,提高坑底土抗力;三是需重视时空效应,严格控制无支撑暴露时间;四是需考虑土-结构相互作用的时间依赖性;五是需建立全面的变形监测与预警系统,实现信息化施工。

2 适用于深厚软土的深基坑支护结构体系

2.1 地下连续墙支护技术

地下连续墙凭借其整体刚度大、防渗性能好、墙体质量可靠、可兼作地下室外墙等优势,成为深厚软土深基坑最常用的围护形式。墙厚一般为600~1200mm,混凝土强度等级C30~C40,插入比宜控制在0.8~1.2。对于超深基坑(开挖深度 $>20\text{m}$),可采用T形、工字形等

异形断面或设置加劲肋提高抗弯刚度。地连墙槽段接头需采用高精度接头管或铣削接头,确保接缝止水效果。在软土中成槽时,需控制泥浆比重(1.05~1.15)和黏度(20~30s),防止槽壁坍塌。

2.2 钻孔灌注桩排桩加止水帷幕

当基坑深度小于15m时,可采用钻孔灌注桩排桩结合水泥土搅拌桩止水帷幕的组合方案。灌注桩直径 $\phi 600 \sim \phi 1000\text{mm}$,桩间距为桩径的1.2~1.5倍,桩顶设置钢筋混凝土冠梁。止水帷幕多采用三轴水泥土搅拌桩,桩径 $\phi 650 \sim \phi 850\text{mm}$,搭接长度不小于200mm,桩底应进入相对不透水层不少于2m。该方案造价低于地连墙,但整体刚度有限,适用于变形控制要求中等的情况。

2.3 型钢水泥土搅拌墙(SMW工法)

SMW工法通过三轴搅拌桩机在软土层中形成连续水泥土墙体,并在桩体凝固前插入H型钢,形成兼具挡土与止水功能的复合结构。该工法施工速度快、造价较低、型钢可回收,适用于开挖深度12~18m的软土基坑。搅拌桩桩径 $\phi 650 \sim \phi 850\text{mm}$,型钢间距一般为600~1200mm,型钢型号根据弯矩大小选取H400×200至H700×300。需注意软土中搅拌桩成桩质量易受均匀性影响,型钢插入定位要求高。

2.4 内支撑系统

深厚软土深基坑不宜采用锚杆支护(软土锚固力低且蠕变大),因此内支撑成为最可靠的水平承力体系。内支撑形式包括钢筋混凝土支撑和钢管支撑两类。钢筋混凝土支撑刚度大、变形小,适用于对变形控制严格的基坑,可设置角撑、对撑、边桁架及圆环支撑等形式。钢管支撑架设速度快、可施加预应力,适用于分层开挖工况^[2]。支撑竖向间距一般为3~5m,首道支撑距地表1~2m。对于宽度超过50m的大型基坑,宜设置格构柱作为临时立柱,减小支撑跨度。

2.5 被动区加固技术

为提高坑底软土抗力、控制隆起与墙趾位移,被动区加固是深厚软土基坑的必备措施。常用方法包括:高压旋喷桩、水泥土搅拌桩、注浆加固等。加固深度一般为坑底以下3~8m,加固宽度为坑内0.5~2倍开挖深度。可采用满堂加固、裙边加固或抽条加固等形式。满堂加固整体性好但造价高,抽条加固可形成“桩-土”复合承载体系,工程应用广泛。加固后土体无侧限抗压强度应达到0.5~1.0MPa,水平抗力系数提高2~3倍。

3 考虑软土特性的支护设计计算方法

3.1 常规设计方法的适用性分析

目前深基坑设计常用方法包括等值梁法、弹性地基

梁法(m法、K法、C法)以及有限元法。对于深厚软土,等值梁法假定土压力分布简单,无法反映开挖过程效应及软土流变,仅适用于初步估算。弹性地基梁法将围护结构视为弹性梁,土体抗力以弹簧模拟,通过m值(地基水平抗力系数的比例系数)反映软土特性。软土的m值很小,一般取500~2000kN/m⁴,仅为砂性土的1/5~1/10。传统设计规范推荐的m值在深厚软土中偏大,需通过现场水平载荷试验确定。有限元法能够模拟复杂边界、分层开挖、多道支撑及土-结构相互作用,是精细设计的必要手段,但其计算精度依赖于合理的本构模型与参数选取。

3.2 流变与固结耦合作用的理论模型

软土具有显著的时间依赖性变形特征,表现为固结效应与流变效应的耦合。经典力学中,可采用Merchant模型或Burgers模型描述软土蠕变行为。对于深基坑工程,总变形可分解为:瞬时弹性变形、固结压缩变形(主固结)和流变变形(次固结)。开挖卸荷导致负孔隙水压力消散,引发固结沉降;同时土骨架黏性流动产生蠕变位移。建议采用修正剑桥模型与时间硬化蠕变法则耦合的弹黏塑性本构,通过ABAQUS、PLAXIS等软件实现数值分析^[3]。参数获取需依赖三轴排水蠕变试验,典型软土的蠕变系数为0.005~0.02。工程实践中,可将设计阶段的短期计算位移乘以1.2~1.5的流变放大系数,作为长期变形预估。

3.3 抗隆起稳定性与插入比确定

深厚软土基坑的抗隆起稳定性是控制设计的核心指标。现行规范推荐采用Terzaghi抗隆起验算公式或Prandtl极限平衡法,但二者均基于刚性基础假定,未充分考虑围护墙嵌固作用。改进方法采用圆弧滑动法或地基承载力模式,引入被动区加固提高系数。安全系数要求:一级基坑 $F_s \geq 2.2$,二级基坑 $F_s \geq 1.9$,三级基坑 $F_s \geq 1.6$ 。围护墙插入比 $\varepsilon = H_d/H_e$ (H_d 为嵌固深度, H_e 为开挖深度),软土中一般取0.8~1.5。当开挖深度超过10m时,插入比不宜小于1.0;若坑底采用满堂加固,插入比可降至0.6~0.8。

3.4 坑底隆起量预估方法

坑底隆起量计算可采用经验公式法、分层总和法或有限元法。经验公式多基于软土地区实测数据回归,如上海地区经验公式: $\delta = 0.03H_e + 0.2$ (单位cm)。分层总和法按回弹模量分层计算,回弹模量约为压缩模量的2~4倍。有限元法可考虑开挖卸荷路径,采用邓肯-张模型或修正剑桥模型。需注意,软土中坑底隆起呈现不均匀性,基坑中部隆起量最大,墙趾附近因摩擦约束隆起

较小。控制隆起的主要措施包括：被动区加固、设置抗拔桩、加大插入比、分块对称开挖。

4 施工关键技术与变形控制策略

4.1 时空效应原理及其应用

软土具有触变性和流变性，基坑暴露时间越长、开挖尺寸越大，变形越显著。时空效应原理指出：软土基坑变形与无支撑暴露时间、开挖长度、分段厚度直接相关。据此应遵循“分层、分段、对称、平衡、限时”的开挖原则。每层开挖厚度宜控制在2~3m，每个开挖段长度 $\leq 20\sim 30\text{m}$ ，每道支撑从开挖到施加预应力时间控制在16~24h内。对于宽度 $> 30\text{m}$ 的基坑，应采用盆式开挖，预留土堤抑制围护墙变形。纵向长条基坑宜分段跳挖，每段长20~25m。

4.2 降排水与防渗措施

深厚软土中往往夹有透镜体状砂层，需高度重视承压水问题。降水方案可采用轻型井点、喷射井点或深井降水。井点管长度应深入坑底以下5~8m。关键防渗措施为：地下连续墙或搅拌桩帷幕需进入相对隔水层不少于2m，若软土下伏强透水层，且承压水头高于坑底，需进行抗突涌验算。坑内明排结合盲沟系统及时疏干表层滞水^[4]。需严格控制降水速率，避免土体固结沉降过大。监测内容包括坑内外水位、出水量、含砂量等。

4.3 土方开挖与支撑配合

支撑与土方开挖的配合流程直接决定基坑变形水平。典型流程为：开挖至首道支撑底标高→施工首道支撑→待混凝土强度达80%后开挖第二层→架设第二道支撑→依次进行。采用钢支撑时，需施加预加轴力，一般为设计轴力的30%~70%，并定期复加。钢筋混凝土支撑的养护时间在软土中不得少于7天（气温高于15℃）或10天（气温低于15℃）。开挖机械严禁碰撞支撑及立柱，坑底预留30cm人工清土，避免对软土过度扰动。

4.4 施工监测与动态反馈

深厚软土深基坑必须建立三维立体监测网络，监测项目包括：围护墙顶水平位移及沉降、墙体深层水平位

移（测斜）、支撑轴力、立柱沉降、坑底隆起、周边地表沉降、建筑物及管线变形、地下水位等。监测频率：开挖阶段每天1~2次，支撑阶段每天1次，底板浇筑后每3天1次。预警值设定：墙顶水平位移累计30~50mm或速率5mm/d，轴力超过设计值80%。实施动态反馈流程：监测数据→分析预警→调整挖撑参数→优化后续工况。信息化施工可将变形控制在设计允许范围内。

5 结语

深厚软土具有高含水率、低强度、高压缩性与强流变性，易导致深基坑围护结构大变形、坑底隆起及周边沉降超限等问题，支护设计须充分考虑时空效应与流变固结耦合作用。可靠体系以地下连续墙、SMW工法或灌注桩排桩加止水帷幕为主，配合内撑及坑底被动区加固（抽条或裙边），插入比取0.8~1.5，软弱土层中取上限。设计计算宜采用弹性地基梁法结合有限元分析，选用修正剑桥模型等模拟软土流变，抗隆起安全系数（一级基坑 ≥ 2.2 ）及隆起量预估应综合经验与数值方法。施工须严格执行时空效应原则：每层开挖2~3m、每段20~30m、支撑暴露16~24h，降排水防承压水突涌，支撑施加预加力，并建立位移、轴力、水位、沉降的全方位监测体系，实施信息化施工。预应力鱼腹梁钢支撑、泡沫混凝土轻质回填、自动化监测等新技术提供了更多选择，未来应研发考虑软土各向异性与损伤演化的本构模型，提高变形预测精度。

参考文献

- [1]王正帅,许涛涛,陈帅.深厚软土深基坑开挖支护技术在岩土工程施工中的应用探究[J].石材,2026,(4):120-122.
- [2]罗劲松.岩土工程施工中深厚软土深基坑开挖支护技术[J].建筑技术开发,2023,50(12):172-174.
- [3]樊伟.深厚软土地基深基坑支护设计与实践[J].中华建设,2026,(2):108-110.
- [4]柴其忠.深厚软土中高层建筑深基坑支护施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):34-36.