软土深基坑开挖支护施工技术及变形控制研究

孙会朋
青岛市崂山区人民政府王哥庄街道办事处，山东 青岛 266100

[摘要]在软土地区开展深基坑施工时，常面临地下水位高、土体强度不足、土层压缩性强等问题，基坑开挖过程中，围护结构侧向位移和基坑周边地面沉降容易超过规范允许值。结合山东滨海地带与冲积平原的地质特点，当地软土分布范围广、土层厚度起伏大，岩土整体工程性能较差。基于这一区域背景，文章梳理总结了软土深基坑常用支护施工技术以及基坑变形的控制方法，并且把“先撑后挖、分层分段、对称限时、快速封闭”作为施工核心原则，逐一梳理土方开挖、内支撑安装、地下水处理、坑底封底等关键工序的控制要点。此外，还建立多项目监测体系，监测内容涵盖围护结构水平位移、土体深层位移、地表沉降、支撑轴力与地下水位，搭配分级预警规则和信息化施工管理方案。

[关键词]软土；深基坑；支护结构；变形控制；监测预警；信息化施工
DOI：10.33142/ec.v9i11.20738 中图分类号：TU445 文献标识码：A

Research on Excavation and Support Construction Technology and Deformation Control of Soft Soil Deep Foundation Pit

SUN Huipeng
Wanggezhuang Sub district Office of Qingdao Laoshan District People's Government, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract: When carrying out deep foundation pit construction in soft soil areas, problems such as high groundwater level, insufficient soil strength, and strong soil compressibility are often faced. During the excavation process of the foundation pit, the lateral displacement of the retaining structure and the ground settlement around the foundation pit are prone to exceed the allowable values of the specifications. Combining the geological characteristics of the coastal areas and alluvial plains in Shandong, the local soft soil has a wide distribution range, large fluctuations in soil layer thickness, and poor overall geotechnical engineering performance. Based on the background of this region, the article summarizes the commonly used support construction techniques for soft soil deep foundation pits and the control methods for pit deformation. The core principles of construction are "support before excavation, layering and segmentation, symmetrical time limit, and rapid closure", and the control points of key processes such as earthwork excavation, internal support installation, groundwater treatment, and pit bottom sealing are sorted out one by one. In addition, a multi project monitoring system has been established, covering horizontal displacement of enclosure structures, deep soil displacement, surface settlement, supporting axial force, and groundwater level, with graded warning rules and information-based construction management plans.

Keywords: soft soil; deep foundation pit; supporting structure; deformation control; monitoring and early warning; information technology construction

引言

随着城市地下空间不断开发建设，深基坑工程会碰到淤泥质软土层，土体天然含水量高、孔隙比大，不仅压缩性高、抗剪强度偏低，而且透水能力弱，地基承载力有限，土体还具备较强触变性[1]。一旦基坑开挖卸除土压力，容易出现围护侧向变形、坑底土体隆起和周边地面沉降。而山东环渤海沿岸、鲁北冲积平原广泛分布全新世滨海与三角洲软土，大多发育在海湾、潟湖和河口区域，土层厚度一般在 1～10m，部分区域厚度更大，土体以饱和黏土、淤泥、淤泥质粉土为主，具有高含水、高压缩、低强度的特征[2]。现有工程监测数据表明，软土基坑在支护施工阶段产生的土体水平位移，占到整个施工周期总位移的 27.82%～76.68%，平均值为 57.49%，这也说明变形管控必须贯穿支护施工、土方开挖、降水作业全过程[3]。因此，合理选择支护方案、严格管控开挖工序、建立完备的监测预警体系，是保障软土深基坑施工安全、保护基坑周边建构筑物与环境的核心手段。

1 软土区域分布及深基坑变形机理

1.1 软土的工程特性与区域分布

山东软土大多集中在滨海平原、冲积平原以及河口三

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

角洲地带，沉积类型主要为滨海相、潟湖相、三角洲相，部分区域是冲积与海积交替堆积形成。这类土层以淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、淤泥质粉土为主，普遍含水量高、孔隙比较大，压缩性强而抗剪强度偏低，土体基本处于饱和或接近饱和状态，透水能力很差。但受沉积环境影响，山东各地软土的力学性能差别很大。浅水区域陆源泥沙补给充足，土颗粒相对更粗，土体强度会更高；而深水区域外来泥沙少，土颗粒细小，不仅强度低、压缩性高，土体蠕变变形也十分明显。另外，部分滨海与河口地区的软土常以层状、透镜体形式分布，厚度起伏大，地层软硬交错；不过软土层下方一般会有承载力较好的粉质黏土或者中粗砂层，这就给支护嵌固深度选取、基坑稳定性验算增加了不小难度。山东省典型滨海相及三角洲相软土的主要物理力学性质指标范围见表 1。

表 1　山东省典型软土主要物理力学性质指标

指标	典型范围
天然含水量 ω/%	35～55
孔隙比 e	1.0～1.5
液性指数 IL	0.8～1.2
压缩系数 a1-2/MPa-1	0.6～1.2
粘聚力 c/kPa	8～20
内摩擦角 φ/（°）	5～12
压缩模量 Es/MPa	2～5
渗透系数 k/（cm/s）	10-7～10-5

注：表中数据依据山东省滨海相、三角洲相软土地区工程勘察资料的常见范围整理，具体工程应按现场勘察结果取值。

1.2 软土深基坑变形机理

在软土地层开展深基坑开挖时，坑内土体被挖除卸荷，会造成围护墙两侧土压力不平衡，围护结构就会向基坑内部产生水平位移，同时坑底土体卸荷后还会出现回弹隆起。由于软土灵敏度高、抗剪强度弱，变形量会随着开挖深度增加、基坑敞露时间变长不断累积。围护结构的水平位移沿深度方向呈现鼓肚状，中间位移大、上下两端小，最大位移一般出现在开挖面附近的软土层中。基坑外侧地表沉降主要集中在坑边一定范围内，沉降曲线呈凹槽形[4]。而深厚软土区域如果存在承压水层，虽然为了防止坑底突涌需要采取承压水降压降水措施，但降水又会引起坑外侧土体固结沉降，进而进一步扩大基坑施工对周边环境的影响范围。软土深基坑开挖过程中围护结构水平位移与坑外地表沉降的典型分布规律见图 1。

软土深基坑变形受支护、支撑、开挖、地下水等因素影响；支撑架设滞后、基坑暴露过久为主要人为诱因，施工重点管控。

2 软土深基坑支护方案比选

2.1 常用支护形式及其适用条件

软土深基坑支护选型需综合开挖深度、平面尺寸、周边环境、水文地质、施工及经济条件，软土常用支护形式及适用条件见表 2。

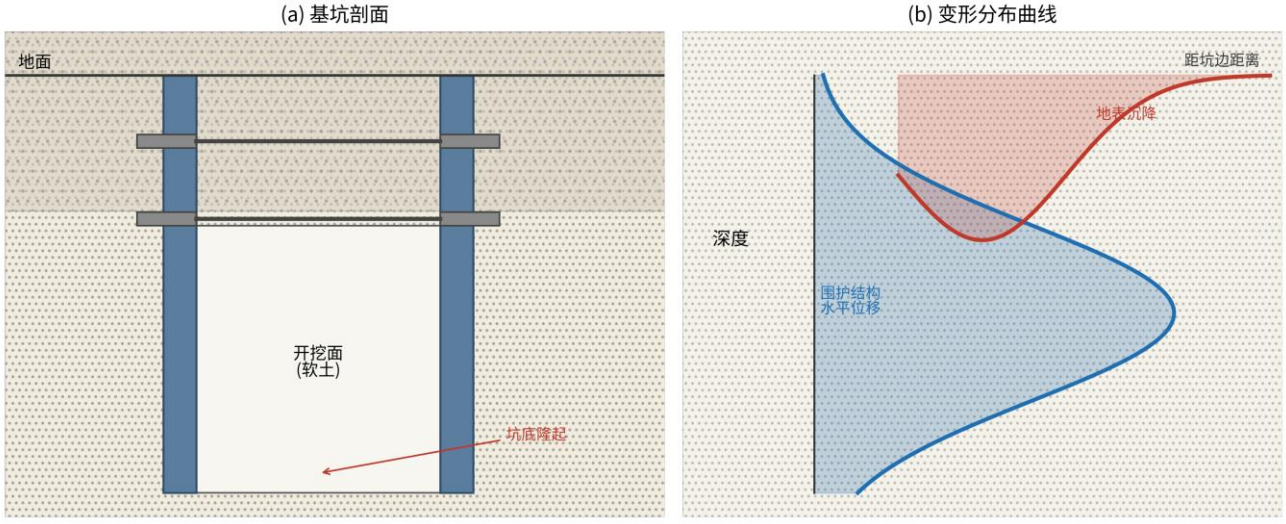


图 1　软土深基坑变形典型分布规律示意

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 2 软土深基坑常用支护形式及适用条件

支护形式	刚度/止水性能	适用开挖深度	主要特点	适用条件
放坡开挖	无	≤4～6m（分级）	施工简便、造价低	场地开阔、软土浅薄、周边无重要建（构）筑物
土钉墙/复合土钉墙	刚度小、无止水	≤10m（复合可至 12m）	施工快、造价低	地下水位以上黏性土、粉土、砂土，对变形要求不高
水泥土重力式挡墙	刚度较小、有止水	≤6～7m	集挡土止水于一体	软土较浅、开挖深度较小、对变形要求一般
排桩+内支撑（桩撑）	刚度较大、需另设止水帷幕	10～20m	刚度大、变形控制好	软土深厚、周边环境敏感、变形控制要求高
型钢水泥土搅拌墙（SMW 工法）	刚度较大、兼有止水	10～20m	止水性能好、可回收型钢	软土、粉土、砂土，需止水的深基坑
地下连续墙+内支撑	刚度大、兼有止水	≥15m	刚度大、止水好、可兼作永久结构	超深基坑、紧邻重要建（构）筑物、变形控制极严

软土深基坑组合支护体系构成

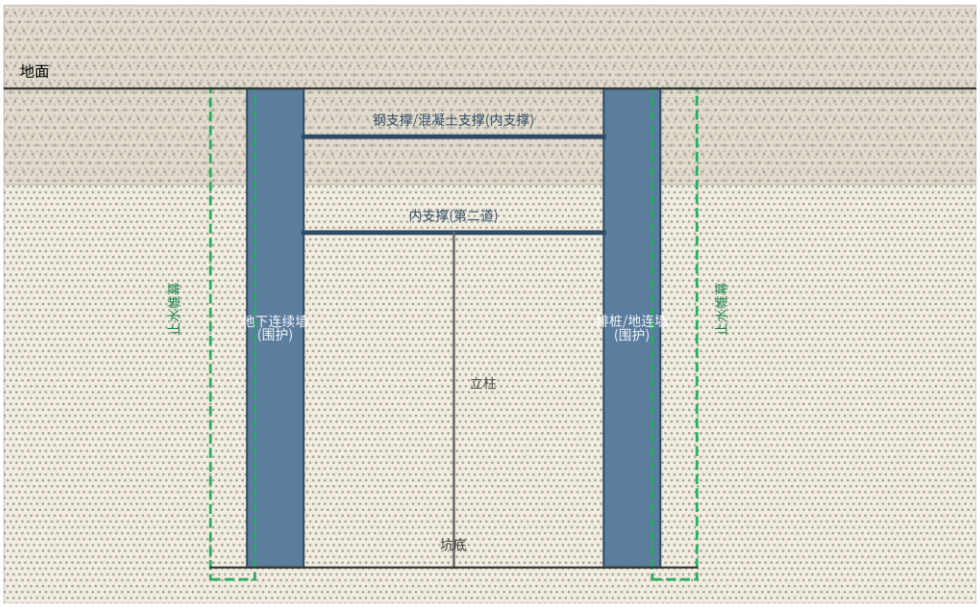


图 2 软土深基坑组合支护体系典型构成示意

软土深基坑优先选用桩撑、地连墙、型钢水泥土搅拌墙等高刚度支护。深基坑紧邻建构筑物或管线时宜采用地连墙。深度适中、环境条件允许的基坑，排桩+内支撑兼顾安全与经济。

2.2 支护形式选择原则

软土深基坑支护形式的选择应遵循“安全可靠、经济合理、环境影响可控、施工可行”的原则[5]。选定时应先依据基坑侧壁安全等级确定支护结构的变形控制目标；再结合水文地质条件判断是否需要隔断或降低承压水，从而确定支护结构的止水要求；随后综合基坑平面形状、开挖深度与周边环境确定支护刚度和支撑道数。对软土深厚、周边敏感的区域，宜采用“围护结构＋内支撑＋止水帷幕”的组合体系，必要时在不同区域根据开挖深度和变形要求分区采用桩撑、桩锚等不同支护形式，以兼顾安全与造价[6]。图 2 给出了软土深基坑“围护结构＋内支撑＋止水帷幕”组合支护体系的典型构成示意。

3 软土深基坑开挖与支护施工技术

3.1 总体施工组织原则

软土深基坑施工必须遵循先撑后挖、分层分段、对称平衡、限时开挖、快速封闭的施工原则。软土地基变形会随着时间持续发展，依靠合理的施工计划，尽量减少基坑土体裸露的时间，以此减小时间和空间因素带来的土体变形影响。内支撑施工一定要遵守先施工支撑、再开挖土方的工序，严禁出现超挖问题。但如果遇到面积大、深度大的软土基坑，优先采用分区、分块跳挖的方式，减少单次开挖对支护结构产生的扰动，同时在相邻开挖区块之间保留土墩，保证整个支护结构稳定。

3.2 土方开挖施工技术

土方开挖和支撑架设两项工作要同步配合开展，采用分层、分段、对称、限时开挖的方式。开挖分层厚度要根据支撑布置层数来确定，当土方挖到支撑设计标高后，马上安装支撑并施加预应力，之后才能开挖下一层土，缩短

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

土体缺少支撑的暴露时间。软土基坑采用机械开挖为主、人工清底为辅的方式，保证开挖面平整。坑底设计标高以上要预留一层土，改用人工清理，降低坑底土体扰动。基坑周边的大型施工设备、重载车辆，需要划定固定停放和作业范围，严格控制外部附加荷载，避免围护结构变形持续变大。

3.3 内支撑施工与预加力控制

内支撑主要用来传递水平土压力，限制围护结构产生变形。混凝土支撑采用分区跳仓浇筑工艺，能够减小温度应力。钢支撑的管控重点是预应力，钢支撑安装到位后要及时复加预应力，弥补温度变化、荷载作用带来的预应力损失。如果夏季高温环境下施工钢支撑，需要配套降温手段，削弱温度应力带来的不利影响。支撑拆除不能单独安排，和主体结构施工统一规划，采用换撑方法分段拆除，保证拆撑全过程基坑支护体系安全稳定。

3.4 地下水控制技术

山东滨海以及冲积平原区域的软土场地地下水位普遍较高，部分地层还有承压水层。地下水管控坚持按需降水、尽量少降水的思路，优先施工止水帷幕，切断基坑内外的水体连通通道。围护结构无法隔断承压水，需要根据抗突涌计算结果，实施减压降水。结合土层渗透能力和降水深度，选用管井、真空井点等降水方法，确保基坑内部水位低于坑底至少 0.5m。降水施工期间，不间断监测坑内外水位、坑外地表沉降，防止降水过多，造成坑外地层固结沉降超出限值，如果变形超标，必要时设置回灌系统，控制周边环境变形。

4 软土深基坑变形控制与监测

4.1 变形控制措施

软土地区深基坑的变形管控，结合支护方案、现场施工、实时监测三个维度统筹管控。在支护设计上，可以提高围护结构自身刚度、增加入土嵌固深度，合理布置支撑并做好预应力施加。也可根据工况选用双排桩、型钢水泥土搅拌墙这类形式，以此限制围护墙体的水平位移。而面对软土层厚、开挖深度大的基坑，采用多级支护、倾斜桩等新工艺，进一步控制土体变形。施工环节，坚持分层、分块、对称且限时开挖，挖完后要尽快架设支撑、封闭坑底。同时降水工作也要科学实施，严格管控承压水的降深。还能利用水泥土搅拌桩、垫层换填等方法加固坑底软土，提高坑底抗隆起性能，减少坑底土体回弹。此外，建立一套完整监测体系，覆盖围护结构、支撑内力、地下水位以及周边建构筑物。依托监测数据开展信息化施工，一旦监测发现变形超出预警值，立刻调整开挖节奏、补张支撑预应力或是采取应急加固措施，动态处置基坑风险。

4.2 变形监测体系设计

软土深基坑监测项目应依据基坑设计安全等级和周边环境条件确定。监测项目主要包括围护结构（边坡）顶部水平位移、竖向位移，围护结构深层水平位移（测斜），支撑轴力，坑外地表沉降，坑底隆起，地下水位，以及周边建筑、管线、道路的沉降与位移等。监测点布置应能反映监测对象的实际状态及其变化趋势，围护墙顶部水平与竖向位移监测点沿基坑周边布置，水平间距不宜大于 20m，每边监测点数目不宜少于 3 个；深层水平位移测斜管宜布置在基坑各侧边中部及阳角等变形关键部位；周边地表沉降监测断面宜沿基坑边垂直方向布置，并延伸至基坑影响范围以外。软土深基坑典型监测断面布置示意见图 3。

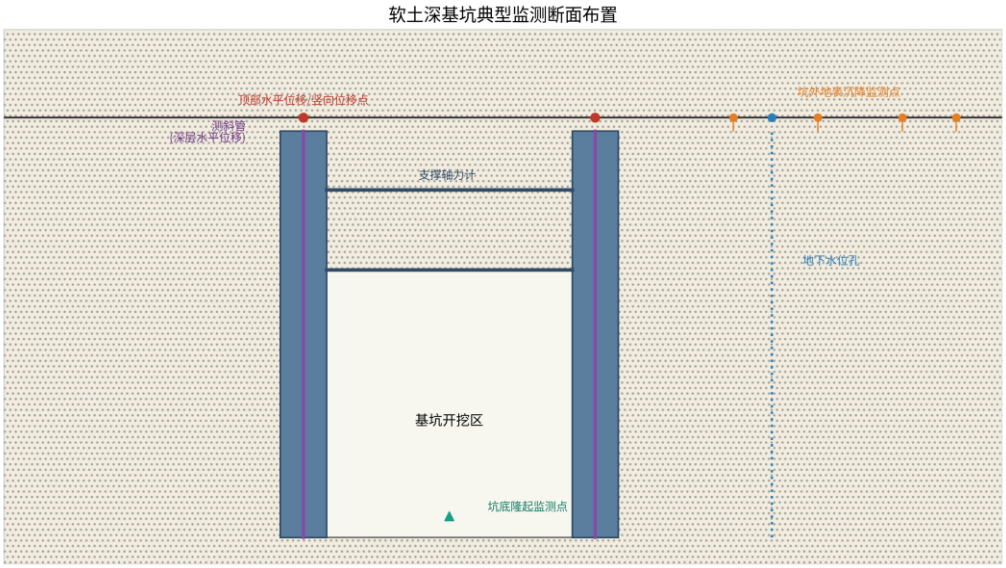


图 3 软土深基坑典型监测断面布置示意

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

4.3 监测预警与信息化施工

软土深基坑变形采用累计量、速率双控，分级预警。数据超标及时处置；遇围护、支撑、地面险情即刻报警并启动预案。表 3 为围护顶水平位移预警参考值。

表 3 围护结构（边坡）顶部水平位移监测预警值参考范围

支护形式	一级安全等级	二级安全等级	三级安全等级
灌注桩、地下连续墙、钢板桩、型钢水泥土墙	累计值 20～30mm，速率 2～3mm/d	累计值 30～40mm，速率 3～4mm/d	累计值 40～60mm，速率 4～5mm/d
土钉墙、复合土钉墙、锚喷支护、水泥土墙	累计值 30～40mm，速率 3～4mm/d	累计值 40～50mm，速率 4～5mm/d	累计值 50～60mm，速率 5～6mm/d

信息化施工是控制软土地区深基坑变形有效的方法，在基坑现场布置自动化监测仪器，持续采集桩体水平位移、土体深层位移、支撑轴力、地下水位等各项数据，并同步上传到项目管理平台，自动采集数据、自动报警提示异常、直观展示监测结果，不仅提高了监测频率，还能第一时间掌握基坑本体和周边环境的变形情况，为动态调整设计、指导现场施工提供可靠的数据依据。从基坑开挖到施工完成，监测数据的整理分析和信息反馈要全程跟进，结合现场施工工况预判后续变形发展，据此调整土方开挖和支护施工方案。

5 结语

山东滨海及冲积平原软土具有高含水率、高压缩性、低强度的特点，基坑变形时空效应显著，支护阶段土体水平位移占比高，变形管控应贯穿施工全过程。支护方案需结合开挖深度、水文地质与周边保护条件择优选用，优先采用排桩+内支撑、地下连续墙、型钢水泥土搅拌墙等高刚度止水支护体系，场地条件复杂可分区差异化支护。土方开挖严格执行“先撑后挖、分层分段、对称限时、快速封闭”，缩短土体无支撑暴露时间，及时架设并张拉支撑，地下水采取按需、最小化降水，必要时增设止水帷幕，严控承压水降压幅度。搭建涵盖围护位移、支撑轴力、坑底隆起、水位及周边构筑物的多指标监测体系，以累计变形和变形速率双重预警，配合自动化监测与信息化施工，能够有效控制基坑变形，保障施工安全并保护周边环境。

[参考文献]

[1]郑宏.软土地区深基坑支护与土方开挖施工技术研究[J].中国住宅设施,2026(8):203-205.

[2]潘建旭,张轶辰,徐靖文.深基坑开挖支护施工技术在深厚软土区高层建筑施工中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2026(24):184-186.

[3]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.

[4]刘鑫.软土地基上水闸基坑开挖的变形监测与支护结构优化施工技术[J].新发现,2025(22):61-63.

[5]周孙桐.软土地基深基坑支护及开挖施工技术分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(8):75-77.

[6]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.

作者简介：孙会朋（1990—），男，山东青岛人，本科学士，就职于山东省青岛市崂山区人民政府王哥庄街道办事处农业农村中心，工程师，从事建设工程管理方向的工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.