

深基坑支护结构施工过程变形控制措施研究

余孝卫

浙江交工集团股份有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】深基坑工程在城市建设中大量应用，支护结构在施工阶段极易受到地下水位、土体扰动及施工工序变化等因素影响而产生变形。本研究围绕施工过程中的关键控制点，分析深基坑支护结构变形的主要诱因，构建以监测反馈为核心的控制体系。通过优化支护形式、调整施工顺序、强化信息化管理等措施，使变形得到及时预判与动态修正，从而确保结构稳定与周边环境安全。研究内容结合工程实例，总结具有可操作性的施工控制策略，为同类型工程的变形控制提供参考。

【关键词】深基坑；支护结构；施工控制；变形监测；风险预警

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.016

引言

深基坑施工不断深入地下空间，工程活动与周边环境之间的相互影响愈发显著。支护结构在开挖、降水与混合工序反复叠加下，其变形变化具有突发性与阶段性特点。若处置不当，易诱发坍塌、管线损坏及周边建筑沉降等问题，因此施工过程中的变形控制成为整个工程的核心环节。为应对地下条件复杂、荷载转化迅速等挑战，有必要在施工过程中建立更精细的管控体系，通过监测数据及时识别异常，并依托合理的支护技术手段进行调整。基于此，本文围绕施工阶段的关键因素展开探讨，形成一套围绕深基坑支护结构变形控制的实践思路，为工程质量与安全提供更具针对性的支撑。

1 深基坑支护施工中的变形风险特征

深基坑支护结构在施工过程中处于动态受力状态，开挖深度逐步增加，使原有土体应力场被打破，支护体系在短时间内承受显著变化的侧向土压力与附加荷载。施工机械振动、地下水位波动以及支护构件刚度差异都会引起变形模式发生转变，使结构产生水平位移、竖向沉降或弹塑性屈服等复杂响应。围护桩、地下连续墙及内支撑作为主要受力构件，其变形往往具有相互影响的特征，任何环节控制不足都可能导致结构整体刚度下降，从而使局部变形发展为面状变形。

在开挖阶段，土体卸载效应显著增强，坑底隆起、支护墙体向内侧倾斜等现象逐渐显现，尤其在软土地区，超孔隙水压力消散缓慢，使变形呈持续增长趋势。若基坑周边存在既有建筑、密集管线或地铁隧道，基坑开挖引起的附加位移对周边环境的敏感性更为突出，任何轻微的支护响应变化都可能放大为区域性沉降。深基坑常伴随降水作业，地下水位降低导致土体有效应力增大，使支护墙后土体的侧向抗力发生变化，从而对变形控制提出更高要求。

施工过程中的工序转换也会使风险特征呈阶段化分布。支撑体系未成环前，墙体处于薄弱状态，极易出现瞬变性位移；成环后虽然整体稳定性有所提高，但由于内支撑轴力释放不均，结构仍可能产生二次变形。不同支护体系的抗变形能力差

异明显，如桩锚支护在锚索张拉阶段可能出现荷载传递滞后，而地下连续墙体系易受槽段接缝位置影响而形成弱点区，使其在开挖过程中表现出特定的变形模式。基坑施工的实时监测反馈表明，变形具有累积性、突变性及不可逆性等特征，多种作用叠加使风险具有复杂耦合属性。

2 基坑变形影响因素的系统解析

基坑变形的产生往往源于多重因素的叠加作用，其影响机制具有明显的空间差异性与时间相关性。土体性质是决定变形规模与模式的重要基础，不同类型土层在侧向变形与竖向响应上呈现显著差异。软黏土因固结度低、剪切强度弱，在开挖卸载后容易产生大的横向位移与坑底隆起；砂土在降水后会因有效应力改变而出现压缩变形；粉土层结构性较弱，在扰动下易产生剪切带，使支护结构局部区域发生不均匀变形。土层中存在的夹层、透水层或弱层结构还会造成侧压传递路径的变化，使实际变形与理论预测之间出现偏差。

地下水环境对基坑变形具有显著影响。降水导致水位下降，引起土体有效应力重新分布，使围护墙后侧土体抗力下降，从而增加支护体系的位移风险。若基坑处于承压含水层，水压变化可能形成向上渗流条件，引发坑底隆起或管涌潜势。降水引起地表沉降，同样可能通过附加荷载的方式反向影响基坑变形，使支护结构承受更复杂的应力条件。施工工序的调整和进度安排也是影响变形的重要因素。在分层开挖过程中，各层土体卸载差异造成不同阶段的侧向位移曲线出现明显变化。支撑体系未成环前，围护墙体缺乏足够的约束力，其变形速度加快；支撑成环后不同部位轴力传递不均，会导致墙体发生二次位移。若开挖速度过快，支护结构来不及形成有效受力体系，容易产生超限变形。支撑安装偏位、张拉力不足或超张拉也会改变结构刚度，使变形趋于复杂化。

外部载荷的变化同样值得关注。基坑周边建筑物基础、地下管线及交通荷载在开挖过程中对支护体系的侧压作用不断变化，周边地表施工活动的振动亦能促使土体结构重新排列，引发附加变形。若周边存在高层建筑，其附加压力会使侧向位移曲线出现偏向性，使围护结构在局部区域表现出集中性变

形。支护结构自身的刚度匹配度也是影响变形的重要来源。围护桩间的接缝处理、地下连续墙槽段间的搭接质量、内支撑体系的截面与布置方式都会影响整体抗变形能力。如果构件刚度不连续或存在弱点区，应力传递将出现不均衡，使结构在开挖过程中的变形呈现非对称性与阶段性跳变。这些因素交互作用，构成基坑变形形成的系统性特征。

3 施工阶段的监测体系与数据反馈机制

施工阶段的监测体系以实时掌握支护结构与周边环境的变形状态为核心，通过多类型监测手段的协同布设构成完整的观测网络。围护墙体水平位移监测通常依托测斜管、固定测点及光学测量技术获取连续变形曲线，用于反映侧向土压力变化引起的结构响应；地表沉降监测通过分布密集的监测点记录土体沉降形态，可用于判别变形是否呈现扩散趋势；支撑轴力监测通过传感器布置在关键支撑节点，使结构在受力变化阶段能够及时发现应力集中与应力释放的异常；坑底隆起监测以水准仪或沉降板为工具，用来识别深层土体卸载引发的上隆行为；地下水位监测则用于判断降水或回灌对土体应力场的影响。各监测项目之间形成数据联动，有助于建立基坑整体变形的空间与时间演化模型。

监测体系的布置应与施工进度、支护结构布置及地质条件相匹配。监测点在空间上应覆盖围护墙内外、支撑节点、基坑周边敏感构筑物、地下管线等重点区域，使各类变形指标的变化能够形成闭合信息链。监测频次在工序转换时保持较高水平，以捕捉变形的突变节点；在结构稳定阶段保持适度观测，以掌握变形缓慢积累的趋势。监测数据通过信息化系统汇总至施工现场、监理及设计单位，实现不同参与方之间的共享，使任何异常信号都能在短时间内得到响应。

数据反馈机制以动态分析为基础，通过对监测曲线的斜率、曲率变化进行识别，判断结构与土体状态是否处于危险区间。墙体水平位移的加速度变化常作为预警的重要参考，若位移速率突然增大，说明侧压发生变化或支撑失效风险提升；支撑轴力若出现偏离设计范围的突跳，可能意味着受力路径改变或构件刚度不足；地表沉降曲面若呈不均衡发展，则意味着土体结构可能出现剪切弱化。监测数据需与计算分析模型进行校核，通过有限元校正或修正参数的方式提高判断准确性，使反馈结果具有工程可实施性。反馈机制不仅停留在数据判断层面，还应转化为施工调整措施的触发条件。数据一旦进入预警区间，施工方需及时减缓开挖速度、增设临时支撑、调整降水方式或进行加固处理，以抑制变形继续增长。监测—反馈—调整构成闭环，使深基坑施工过程具备可预测性与可控制性，为支护结构的变形调控提供稳定的信息支撑。

4 支护结构的施工调控措施与技术优化

支护结构在施工过程中的调控依赖对受力体系、土体环境

与施工节奏的综合掌握，通过结构刚度控制、受力路径优化与施工工法改进，使变形在可控范围内发展。围护结构的刚度提升常依靠加密围护桩间距、增加地下连续墙厚度、提高钢筋配筋率或改善混凝土强度等级等方式，使结构在侧向土压力变化时保持稳定的抗弯与抗剪能力。为弱化不同构件之间的刚度差异，墙体接缝区、桩间连接部位可采用止水钢板、锁扣结构或加强筋进行连续性处理，使受力传递更加均匀，减少局部变形集中。围护结构外侧进行土体加固也是常用措施，通过深层搅拌桩、旋喷桩或高压注浆的方式提升土体强度与变形模量，使结构后侧形成具有足够抗力的承载区，抑制墙体的侧移趋势。

支撑体系的布置与施工调控对基坑变形具有决定性影响。内支撑体系在设计中需合理匹配水平支撑跨度与立柱刚度，减小因受力不均造成的二次位移。钢支撑安装时通过严格控制轴线偏差与节点焊接质量，使结构形成完整的受力体系；在张拉阶段通过分级加载方式施加设计轴力，使支撑受力逐渐稳定，不致因瞬时荷载变化引起墙体位移突变。若采用锚索体系，需确保注浆体长度与锚固段位置满足稳定性要求，同时在张拉过程中控制张力偏差，使各锚索形成统一的受力状态。支撑体系的调整措施包括增设临时支撑、强化支撑节点、增加支撑层数或更换截面形式等方式，以应对施工期间监测数据出现的异常变化。

施工工序的调控同样影响支护结构的变形模式。分层开挖深基坑时，通过合理设置开挖厚度，使支护结构在短时间内不承受过大的卸载梯度；开挖与支撑施工之间保持紧密衔接，使受力体系在最短时间内闭合。若地层属软弱土体，可采用跳槽开挖、分块开挖或反压回填等方法，使侧向压力释放速度得到控制。降水调控通过控制抽水速率、采用回灌井或止水帷幕，减少地下水位突然下降引发的土体体积变化，使基坑周边环境保持稳定的水力条件。

技术优化可借助施工信息化与预测模型实现动态调控。监测数据与数值模型实时比对，可用于评估支护体系的安全储备，通过反演分析校正土体参数，使结构受力评估更加接近现场实际。地基改良技术在关键位置进一步提升土体抗剪强度与变形模量，使支护结构在高应力区域保持足够稳定性。通过对支护体系构件、施工顺序、地层处理和水文控制的协同优化，使深基坑施工过程形成可调控、可验证、可响应的技术体系，为变形控制奠定工程条件。

5 深基坑变形控制策略的综合总结

深基坑变形控制策略的形成源于对支护结构受力状态、土体响应特征及施工节奏的整体把握，通过结构体系、施工工艺与监测反馈的协同作用构建稳定的控制框架。在变形产生的初期阶段，侧向位移、地表沉降与支撑轴力变化共同反映基坑受力体系的动态演化，因此控制策略需要围绕“减小侧压增量、提高结构刚度、稳定土体环境”展开。围护体系在设计与施工

过程中依靠结构连续性与整体刚度的提升，使侧向变形受到有效限制；支撑体系在不同施工阶段提供均衡的反力，使受力路径保持稳定；土体在受到卸载或水位波动影响时，通过适当的加固措施或水文调控保持必要的强度与抗变形能力。

在施工过程中，控制策略通过监测反馈不断调整，使风险处于受控状态。监测数据中位移速率的变化、轴力曲线的波动、地下水位的迁移趋势都是判断变形潜在发展方向的重要依据。位移增长速率的突变常提示侧压条件或结构状态发生转折，控制策略需及时启动应急调整措施，使支护体系重新获得稳定的受力平衡。通过对支撑轴力的实时调整、局部构件的加固、开挖节奏的放缓，能够在短时间内减弱变形累积效应，使整体风险得到抑制。土体沉降的分布若出现扩散趋势，通过地表与壁后加固构建新的抗力区域，使土体在卸载条件下保持一定的结构性，从而阻断进一步变形的发展路径。

在施工方法的组织与优化方面，控制策略强调工序衔接与结构成环时间的重要性。开挖厚度的合理分配、支撑安装的及

时推进、降水节奏的平稳控制共同影响支护结构的应力状态。开挖速度与支撑反力之间需要保持稳定匹配，使结构受力在可预测范围内变化，减少应力突跳导致的非线性位移。若遇复杂地层或软弱区域，通过局部加固、反压回填或调整开挖顺序，使卸载速率得到控制，减弱深层土体的变形反应。控制策略依托结构、土体与施工的综合调控，使基坑在不同阶段的变形均维持在可控区间。通过优化支护体系配置、强化施工管理、提升监测反馈能力，使基坑变形呈现平稳、可预测的变化规律，为深基坑施工在复杂环境下实现安全可控提供工程基础。

6 结语

深基坑施工中支护结构的变形控制依赖结构体系、土体条件与施工管理的协同调控，通过监测反馈、施工优化及技术强化形成动态可控的安全框架。对支护体系刚度、开挖节奏与水文环境的综合管理，使基坑在复杂受力条件下保持稳定变形模式，为城市地下工程建设提供可靠保障。

参考文献：

- [1] 王志强.深基坑支护结构受力变形规律研究[J].岩土工程技术,2022,54(3)112-118.
- [2] 刘海峰.基于监测反馈的深基坑施工变形控制方法探讨[J].地下空间与工程学报,2023,49(2)87-95.
- [3] 周建辉.复杂地质条件下深基坑支护体系优化设计研究[J].土木建筑工程信息技术,2022,14(4)56-62.
- [4] 陈立昊.城市深基坑施工阶段变形监测体系构建与应用[J].工程勘察,2023,51(1)73-80.
- [5] 赵明浩.深基坑围护结构变形影响因素及控制措施分析[J].建筑施工,2024,46(2)129-135.