

复杂地质条件下基坑支护与土方回填协同施工技术

张 强

中国电子系统工程第四建设有限公司 河北 石家庄 050000

【摘 要】：复杂地质条件下，软弱土层、地下水及不均匀地层使基坑开挖变形控制更加困难，支护施工同土方回填衔接不当还会引起结构受力突变和局部沉降。针对支护参数适配不足、施工时序脱节、回填荷载控制不稳等问题，建立地质分区控制、分层开挖支护、分段回填压实及监测反馈联动技术体系，依据位移和沉降信息动态调整施工参数。工程应用表明，协同施工能够稳定基坑受力状态，控制侧向位移及回填沉降，提高复杂地质条件下施工质量和工序衔接效率。

【关键词】：复杂地质；基坑支护；土方回填；协同施工；变形控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.081

引言

深基坑施工进入软弱夹层、地下水丰富及地层变化频繁区域后，开挖卸荷、支护受力和回填加载之间形成连续的力学传递过程，任何环节控制失衡都可能放大基坑侧移、地表沉降及回填变形。传统分工序组织方式容易割裂支护体系受力变化和土方施工时序，尤其在分层开挖、支撑转换、肥槽回填等关键阶段，施工参数需要根据现场地质和监测信息及时修正。由此，应将地质分区、支护控制、土方组织、回填压实和监测反馈纳入统一技术链条，形成各工序相互匹配的协同施工方案。

1 复杂地质条件下基坑协同施工的技术控制基础

1.1 复杂地层工程特性及基坑稳定控制要求

复杂地层通常具有土层空间分布不均、软硬界面突变、局部承载能力差异明显及地下水渗流条件复杂等特征，基坑开挖后原有土体应力平衡被打破，坑壁易出现差异变形、局部隆起或深层水平位移。施工控制需结合勘察成果划分地质控制区段，根据土体黏聚力、内摩擦角、渗透系数及地下水位确定支护刚度、嵌固深度和降排水参数，同时把支护变形、周边沉降及坑底隆起纳入动态监测指标，使支护设计参数能够适应地层条件的空间变化。

1.2 开挖卸荷条件下支护结构受力变化规律

土方逐层开挖使坑内竖向荷载持续卸除，坑内外土压力差随开挖深度增加而重新分配，支护桩弯矩、支撑轴力及墙体水平位移也呈阶段性变化。开挖面接近软弱夹层或地下水富集区时，局部土压力重分布速度加快，支护结构容易产生受力集中^[1]。施工中应依据分层厚度和开挖深度控制卸荷速率，使土方开挖、支撑安装及预应力施加保持时序匹配，并利用测斜、轴力及沉降监测数据识别受力转折点，及时修正开挖步距和支撑控制参数，避免变形持续累积。

1.3 回填加载过程中的基坑变形传递特征

土方回填使基坑由开挖卸荷阶段转入逐层加载阶段，新增填土自重及压实作用会改变支护结构两侧土压力关系，并沿填土层、支护构件和邻近土体形成连续的荷载传递路径。回填速

度过快、分层厚度偏大或压实能量分布不均，容易产生局部附加侧压力和差异沉降，支护结构尚未完成受力转换时影响更为明显。回填施工应根据支撑拆换节点确定分区、分层加载顺序，控制填筑厚度、压实程度和加载速率，并将沉降量、水平位移及支护轴力变化作为调整后续回填参数的依据。

2 基坑支护及土方回填施工的关键制约环节

2.1 地层差异造成支护参数适配精度不足

复杂地质区域土层厚度、强度指标及渗透性能常呈明显空间差异，单纯依据勘察点参数进行统一支护设计，容易造成局部支护刚度与实际侧压力不匹配。软弱夹层附近可能出现水平位移集中，软硬土交界位置则容易形成弯矩突变，地下水位变化还会进一步改变有效土压力。若支护桩径、桩间距、嵌固深度及支撑刚度缺乏分区配置，施工阶段的实际受力状态便可能偏离设计假定，导致局部安全储备不足，同时增加后续开挖和回填过程中的变形控制难度。

2.2 开挖支护工序衔接不当引发变形累积

开挖深度增加后，土体卸荷与支护体系形成有效约束之间存在明显的时间关联，若开挖层厚过大、作业面推进过快或支撑安装滞后，坑壁土体会经历较长时间的无约束变形。局部位移一旦超过弹性恢复范围，即使后续支撑完成安装，也难以完全消除已经形成的侧移和沉降^[2]。多作业面交叉施工还可能造成开挖标高、支撑节点和机械作业顺序脱节，使变形由单一区域逐步向邻近区段传递，形成连续累积效应，进而增加支护构件内力波动及周边地层扰动程度。

2.3 回填荷载控制失衡加剧局部沉降变形

回填阶段的主要制约来自填筑荷载增长速度、压实能量及支护体系转换状态之间缺少协调。填土分层过厚会降低深部压实均匀性，局部机械反复碾压又可能产生较大的瞬时附加荷载，使支护结构承受非均匀侧压力。支撑拆除与回填高度控制不同步时，原有受力路径提前改变，新增土压力难以及时获得稳定约束；不同区域填料含水率、压实度存在偏差，还会造成后期固结量不一致。多种因素叠加后，局部沉降容易向结构接

触部位集中,并伴随地表高差和回填体不均匀变形。

3 复杂地质条件下基坑支护施工控制技术

3.1 依据地质分区实施支护参数动态配置

地质分区应落实到具体支护单元,将勘察揭示的土层厚度、黏聚力、内摩擦角、压缩模量、渗透系数及地下水埋深进行空间对应,识别软弱夹层、土岩交界、富水层和地层突变位置,据此划定不同等级的支护控制区。软弱及富水区段适当提高支护体系整体刚度,结合侧压力变化调整桩径、桩间距、嵌固深度及支撑间距;较稳定区段则依据实际受力合理配置参数,减少刚度过剩造成的材料投入。施工揭露地层与勘察资料存在偏差时,不宜继续沿用原定参数,可将现场地质编录、成孔记录、地下水变化和支护结构响应纳入数字化台账,形成地质信息与施工参数对应关系。参数调整同步校核支护构件承载力、整体稳定性、抗隆起及抗渗流稳定条件,使支护配置由统一设定转向分区控制和动态修正。

3.2 采用分层开挖支护控制基坑变形发展

分层开挖需把单层开挖厚度、作业面长度、支撑形成时间和土体暴露时间作为联动参数控制,避免连续超挖造成坑内外土压力差短时间扩大^[3]。土方施工按照设计标高分级推进,每完成一个开挖层级即核验坑壁位移、坑底状态及支护节点,达到支撑安装条件后及时完成支撑架设、节点连接和预应力施加,再转入下一层作业。地层软弱或地下水敏感区可缩短开挖步距,限制临空面长度,并采用分块、对称、均衡的土方组织方式,降低空间卸荷差异。机械开挖接近支护桩、支撑立柱和坑底控制标高时应保留保护层,减少机械扰动和超挖回填。开挖过程中还需协调降水速率,防止坑外水位骤降引起附加沉降,使“开挖一层、约束一层、监测一层”的施工节奏与支护体系受力形成过程保持一致。

3.3 结合监测反馈调整支撑体系施工参数

监测反馈不能停留于位移是否超过报警值的被动判断,应将支护桩水平位移、支撑轴力、立柱沉降、坑外地表沉降、地下水位及周边构筑物变形进行关联分析,重点识别变化速率和不同指标之间的同步关系。施工阶段按照开挖深度建立监测基准曲线,对连续增长、局部突变及轴力异常集中的区段提高监测频率,并与当前开挖位置、支撑安装时间和降水工况进行对应。位移增长速度明显加快时,可缩小后续开挖步距、提前形成支撑约束;支撑轴力接近控制范围时,则复核节点连接、预加轴力和构件稳定状态,必要时调整预应力水平或增加局部约束。监测数据统一接入数字化管理平台,设置分级预警阈值和参数调整触发条件,使现场数据能够直接反馈至施工组织及支撑控制环节,形成可追踪的动态闭环。

4 土方回填协同施工及工序衔接技术

4.1 匹配支护受力状态确定分段回填时序

回填时序应服从支护体系受力转换过程,根据地下结构施工进度、支撑拆换条件、支护桩侧向位移及支撑轴力确定填筑起始位置和分段界面。基坑平面可按照结构分区、支护刚度差异和施工通道划分回填单元,避免大面积单向连续填筑造成两侧土压力增长失衡。支撑拆除前应核验地下结构强度、换撑构件工作状态及相邻区段变形数据,具备荷载转换条件后再实施对应高度回填,使新增土压力逐步传递至已形成承载能力的地下结构。不同区段存在明显高差时,采用阶梯式推进控制回填面落差,减少局部侧向荷载集中。狭窄肥槽、转角及支护刚度变化位置应缩短施工段长度,回填高度与支撑拆除层级保持对应,避免先拆后填形成约束空档。施工计划同步纳入结构施工、材料运输、机械作业及监测时间窗口,实现支护受力转换和回填加载节奏的连续衔接。

4.2 控制填料质量及分层厚度提高压实水平

填料进入作业面前应根据设计压实标准检查颗粒组成、最大粒径、含水状态及杂质含量,严禁将淤泥、冻土、有机质含量偏高或粒径明显超限的材料直接用于回填。含水率偏离适宜压实区间时,应采取翻松晾晒或均匀补水处理,防止材料过湿形成弹簧土、过干导致颗粒间难以有效咬合。分层厚度需结合填料性质、压实设备有效作用深度和作业空间确定,铺填后控制表面平整度,避免局部虚铺厚度突增^[4]。靠近地下结构外墙、支护构件及管线密集区域,应采用小型压实设备分层处理,控制机械冲击对结构和防水层产生的不利影响。每层完成后按照规定布置检测点,对压实系数、含水率及层厚进行核验,不合格区域重新处理后方可覆盖。数字化记录填料来源、铺筑层次、检测位置和压实结果,可形成可追溯的回填质量档案。

4.3 联动沉降监测修正回填加载施工参数

沉降监测应贯穿填筑、压实、支撑转换及阶段性停工全过程,根据基坑深度、回填分区和邻近结构敏感程度设置监测断面,将回填体表面沉降、地下结构沉降、支护顶部位移及周边地表高程变化纳入同一数据链。每完成一定回填高度后读取监测数据,并与前一填筑阶段进行增量比较,不仅判断累计沉降值,还需分析单位时间沉降速率及相邻测点差异。局部沉降增长明显时,应暂缓对应区域继续加载,复核填料含水率、分层厚度、压实遍数和下卧层状态;沉降速率保持较高水平时,可降低单次填筑高度、延长相邻层施工间隔,减少短时间集中加载。监测平台可按照施工阶段设置分级阈值,将异常数据自动关联至具体回填区段和施工记录,使铺填厚度、机械压实参数、施工间隔及加载顺序能够依据现场变形响应及时修正,避免沉降异常被后续填层覆盖。

5 协同施工技术应用后的工程控制成效

5.1 基坑侧向位移及周边沉降得到有效控制

地质分区支护、分层开挖和动态监测形成连续控制链后,开挖卸荷引起的土压力重分布能够获得及时约束,支护桩水平位移的发展速率明显趋缓,深层土体变形不易向坑外持续扩展。开挖层厚、支撑形成时间及降水强度按照监测响应动态调整,使局部软弱区产生的变形能够被限制于较小范围。周边地表沉降曲线由明显波动逐渐转为平缓,差异沉降受到抑制,支护结构受力突变和坑外土体附加变形同步减少,基坑开挖阶段的空间稳定状态得到持续保持。

5.2 回填压实质量及结构受力稳定程度提高

分区回填、分层压实和加载节奏控制改善了回填体内部密实状态,填料含水率、铺筑厚度及压实程度保持较好的层间一致性,局部松散、虚填和压实不足造成的后期沉降得到削弱。回填高度同支撑拆换节点合理匹配后,新增侧向土压力能够逐级传递,地下结构、支护构件及回填土之间的受力转换更加平稳,避免集中填筑造成局部荷载骤增^[5]。压实检测结果与沉降监测信息同步进入质量控制链,可及时锁定异常区段并实施针对性处理,使隐蔽回填质量由完工抽检转向施工过程连续控

制。

5.3 工序转换效率及全过程施工稳定性增强

支护、开挖、结构施工、支撑拆换和土方回填按照统一节点组织后,各专业工序之间的等待时间得到压缩,作业面交接由经验协调转为条件触发,减少支撑未形成便继续开挖、结构强度不足提前拆撑等工序冲突。数字化监测信息及时反馈至施工计划,可依据变形速率、支撑轴力和沉降变化调整后续作业节奏,使异常处置前移至参数偏离阶段。机械设备、运输通道及回填作业面能够根据施工节点统筹配置,降低交叉施工干扰,同时保持开挖卸荷、支护约束和回填加载之间的连续平衡,提高复杂地质基坑全过程施工的可控程度。

6 结语

复杂地质条件使基坑开挖、支护受力及回填加载形成紧密关联的施工链条。采用地质分区配置、分层开挖支护、分段回填压实及监测反馈修正,可减少局部变形累积和荷载突变,提高支护结构稳定性及回填密实度。施工阶段还需强化工序节点衔接和动态参数控制,使基坑侧移、周边沉降及结构受力保持可控,提升复杂基坑工程全过程施工质量。

参考文献:

- [1] 彭聪颖.复杂地质条件下市政高架桥深基坑支护与桩基协同施工关键技术[J].工程设计与施工,2025,7(5):105-107.
- [2] 李秀荣.复杂地质建筑深基坑土钉墙支护施工技术研究[J].四川建材,2025,51(3):187-189.
- [3] 叶涛.湖畔首府基坑支护与土方开挖的协同施工管理研究[J].居业,2025,(7):217-219.
- [4] 蒋代均.复杂地质条件下深基坑支护结构施工风险评估与预警系统研究[J].建筑与装饰,2025,(20):49-51.
- [5] 刘坤.建筑施工土方回填材料选择与质量控制[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题(第三册).2025:98-102.