

深基坑支护结构施工力学特性探析

蔡 娥

四川建筑职业技术大学 四川 德阳 618000

摘 要：深基坑支护结构的施工力学特性，取决于挡土挡水功能划分、支撑拉结传力路径和止水体系协同工作机理这几个方面的共同作用。主要荷载有随墙体位移转化的围岩侧压力、渗透压力、地面与施工荷载，还有坑底卸荷回弹压力。地质条件、开挖深度、施工工艺和结构刚度是影响受力状态的主要因素。施工过程中要通过分级施加预应力、匹配刚度、连续管控止水、优化工序时序等手段，对变形、稳定性和渗流做综合力学控制。

关键词：深基坑；支护结构；力学特性；挡土挡水结构

引 言：深基坑支护结构在施工过程中要承受土体侧压力、渗透压力、地面荷载和坑底卸荷等多重荷载的复合作用，力学特性直接关系到基坑安全和周边环境的稳定性。挡土挡水结构的功能划分、支撑拉结的传力路径、止水体系的协同机理，这三者共同搭起支护受力体系的基本框架。地质条件、开挖深度、施工工艺和结构刚度是影响受力状态的关键因素。施工中要从变形、稳定性、渗流三个维度入手，系统做好分级预应力施加、刚度匹配、止水管控和工序优化等力学控制工作。

1 深基坑支护结构受力体系的基本构成

1.1 挡土挡水结构的受力功能划分

透水挡土结构允许地下水在可控条件下经由主体受力构件渗过，其侧壁稳定性主要依靠土体自身强度与构件的遮挡作用共同维持。这类结构多见于地下水位较低或降水措施较为完备的场地，受力上以承担土体侧向压力为主，水压力则通过预设的排水路径加以消解。止水挡土结构则不同，它既要承受土水合算的侧压力，又需隔绝外部水体渗入，连续封闭的墙体能够有效阻断基坑内外的水力联系。两类结构因受力机理的差异，各自适用的水文地质条件和开挖深度范围也有所不同。设计时，可依据地下水位动态变化规律及土体渗透性能来合理选定结构类型，并明确总侧压力分配中的主导荷载项。

1.2 支撑拉结结构的传力路径

土层锚杆靠锚固段与稳定地层的握裹作用，把支护结构承受的侧向荷载传到深层土体里去。传力效果怎么样，主要看锚固段长度、注浆质量和地层抗剪强度参数。钢管和型钢水平支撑搭成闭合或对顶的刚性框架，把桩墙顶部的水平推力转成支撑构件内部的轴向压力或拉力，再通过支座节点传到对侧支护体上。斜撑体系靠倾斜构件和桩墙根部或基底之间的三角支撑关系，利用斜向力的分解来约束水平位移。自立式桩墙则完全靠桩

身嵌固深度范围内的被动土压力维持自身稳定。各条传力路径在空间布置上要相互协调，不能因为传力不连续或路径太长，导致过大变形或局部屈曲。

1.3 支护结构与止水体系的协同工作机理

支护结构在承受土体侧向压力之际，水压力的作用方式也不容忽视。水压力与土压力究竟是合算还是分算，在很大程度上取决于止水模式的实际隔水成效。要是止水帷幕能够阻断基坑外侧地下水向坑内的渗流，那么支护结构主要承受的就是主动土压力与静水压力，其中静水压力会依据静水压强规律作用于墙体迎土面。止水帷幕的设置使得墙后的渗透坡降降低，与之相应，渗流导致的动水压力与渗透力减小，支护结构在坑底附近的附加弯矩和剪力也得以有效控制^[1]。止水模式的完整性对支护结构周边土体的有效应力状态有着直接影响。一旦止水失效，渗透压力会快速升高，主动土压力增加，被动区土体强度下降，原本的协同受力平衡也就难以维系了。

2 深基坑支护结构的主要荷载类型及特征

2.1 围岩侧压力

围岩侧压力随墙体位移方向及位移量的变化，可在静止、主动与被动三种状态之间转换。墙体无明显位移时，侧压力保持为静止值；当墙体背离土体方向移动，位移量达到主动极限条件时，侧压力便降至主动值；反之，若墙体压向土体并挤压至被动极限，侧压力则升至被动值。这一转化过程受到开挖深度增加所引起的应力释放、各土层力学参数差异以及墙体施工扰动等因素的叠加影响，不同深度处的侧压力未必处于同一状态区间。位移速率与累计位移量共同决定着土压力状态转化的完成程度。墙土接触面的摩擦特性会改变剪应力传递方式，使得侧压力沿墙高的分布偏离经典线性规律，在粗粒土层中这种偏离尤为突出。

2.2 水流渗透压力

地下水位变化会直接改变支护结构两侧的水头差,由此产生附加渗透压力,作用在墙体和坑底区域。地下水位上升或基坑内外水头差增大,渗透力方向指向基坑内部,墙后主动侧的水压力分量增加,被动区土体的有效应力随之降低。渗透压力一旦超过土体抗渗临界梯度,坑底或墙后土体就会发生渗透破坏,管涌或流土就出来了,这时候支护结构承受的荷载条件会急剧恶化。渗透压力持续作用在支护结构上,还会加速墙体接缝或止水薄弱部位的渗漏发展。渗漏通道一旦形成,局部水压力分布形态就变了,墙体的弯矩和剪力分布会偏离原有设计模式,严重的情况下可能引发支护体系整体失稳。

2.3 地面荷载与施工荷载

周边既有建筑基础、地下管线、大型施工机械等竖向荷载,会通过地基土体向围护墙后区域传递附加水平侧压力。其传递方式取决于荷载作用位置、分布宽度和地基土层的应力扩散能力。邻近地面的集中荷载经土体剪切传递后,在墙后形成局部附加应力区,该深度范围内的主动土压力将明显增大。施工期间,堆载材料的自重与运输车辆行驶产生的动载,无论瞬时还是持续,均叠加于原有土压力场上^[2]。动载频率高、作用时间短,会引发墙后土体瞬时压缩与弹性恢复,侧压力随之出现脉动性增加。静载则持续抬高土体水平应力,长期作用下还会诱发墙后土体蠕变变形,围护墙的侧向位移趋势亦随之加剧。

2.4 坑底土压力与卸荷回弹

基坑开挖卸掉坑底以上土体自重后,支护结构两侧压力差就出来了。被动区侧压力不够的时候,坑底土体会往基坑内部发生塑性流动,被动区抗力被削弱,墙体下部往坑内的位移也跟着加大。塑性流动的范围和深度,要看土体抗剪强度、坑底宽度和开挖深度的比值。坑底土体上覆压力没了,会产生卸荷回弹,竖向变形从坑底往上逐渐变大。回弹量多大,跟开挖深度、土层压缩性和基坑几何尺寸直接相关。回弹变形不光抬高坑底标高,还会通过桩墙侧摩阻力或基底约束条件,影响支护结构下部的内力分布。严重的时候坑底隆起,墙脚跟着转动,整个受力平衡状态就被打破了。

3 支护结构受力的关键影响因素

3.1 地质条件的影响

不同土层给的强度参数、压缩性指标和渗透特性差别很大,土压力计算用的内摩擦角、黏聚力和侧压力系数等核心参数也跟着变。黏性土黏聚力高,但排水条件不好,土压力怎么发展要看施工速率和排水路径。砂

性土渗透性强,黏聚力几乎为零,侧压力随深度增加更接近线性,对振动也比较敏感。软土灵敏度高、压缩性大,土压力会随时间持续增长,还容易产生滞后效应。风化岩不均匀,局部节理或破碎带会让侧压力分布突然变化。土体蠕变会使支护结构在恒定荷载作用下产生随时间增长的侧向位移。软土和高塑性黏土里这种时空效应尤其明显,后期主动土压力会向静止土压力方向恢复,支撑轴力的长期负担也跟着增加。

3.2 开挖深度与基坑几何形状

开挖深度决定了土压力总量和支撑布设数量。深度增加,墙后主动土压力和水压力的合力作用点下移,墙体底部弯矩增大得很快,得靠增加支撑道数来控制墙体位移和内力峰值。一般8m以内的基坑,单道支撑就能满足受力平衡;8-12m需要两道支撑,把上部和中间的水平推力分开承担;超过12m就得三道或更多支撑,才能限制墙体多段挠曲变形。基坑平面宽度和形状规不规则,直接决定支撑体系怎么布置^[3]。宽大的基坑没法用对顶支撑,得考虑角撑或环撑;轮廓不规则的基坑,土压力沿墙体长度方向分布不均匀,支撑节点会承受附加扭矩或偏心力,对支撑构造细节的要求就更高了。

3.3 施工工艺对受力的影响

间隔成桩工艺中当间距超过四倍桩径或相邻桩施工间隔超过36小时,先行桩周边土体因钻孔扰动产生应力重分布,后行桩施工又再次扰动已部分恢复的应力场,导致桩间土体出现反复卸载与加载过程,使土体结构损伤累积且侧向应力释放不充分。施工顺序若未遵循对称、分层、限时开挖原则,支护结构各段受力速率差异显著,先开挖段提前承受较大荷载而后开挖段尚未形成有效支撑,造成墙体产生不均匀侧移甚至局部弯折。降水措施在降低地下水位的同时增大土体有效应力,使土体抗剪强度提升,但若降水速率过快则产生较大渗流,引起墙后土体固结沉降与水平附加应力增加,反而加重支护结构负担。

4 支护结构施工过程中的力学控制措施

4.1 变形控制

内支撑预应力采取分级加载的方式。每加一级,先观察墙体位移和支撑轴力的变化,等变形稳定了再加载下一级。最终锁定值要兼顾墙体侧移控制和支撑受压屈曲的预防。锚索张拉的时机,得等锚固段注浆体达到设计强度以后。张拉完了封锚要快,锁得要牢靠,不能让锚索松掉,否则墙体受力状态的锁定效应就没了。监测数据要是显示局部区段墙体位移增速异常,或者超过了预警阈值,就往墙体背后或被动区土体注浆,提升土体强度和局部刚度,

改变墙体弯矩分布,减缓位移进一步发展^[4]。变形控制还得看开挖深度和支撑道数,不同情况预应力施加方案也不一样,各道支撑之间的受力要协调好。

4.2 稳定性控制

支撑体系各组成构件的刚度,需与墙体刚度及荷载条件相协调。若三者之间刚度差异过大,荷载将更多地向强构件一侧转移,而弱构件则可能趋于卸载,甚至出现过度的变形响应。立柱的设置应兼顾水平支撑在平面外的稳定问题,其间距与支撑跨度的确定,需满足侧向稳定性的基本要求;立柱基础宜避开坑底扰动区范围。坑底加固的目的在于通过提高被动区土体强度和压缩模量,从而抑制基坑隆起。加固深度和范围以覆盖最危险滑弧所经区段为宜,以确保被动土压力能够有效发挥。施工期间,应对基坑周边地面堆载、重型设备行走路线以及邻近施工活动加以限制,明确相应的荷载上限,并建立全天候监测制度。监测数据若显示荷载超限或支护结构位移响应加剧,应立即采取卸载或回填等应急措施

4.3 渗流控制

止水帷幕的施工连续性需全程管控,墙体搭接厚度与深度应满足隔水设计要求,任何搭接不良或冷缝均可能成为渗透压力集中突破的薄弱通道。帷幕有效隔断基坑内外水力联系后,坑内降水只需维持开挖面干燥即可,降水速率宜缓慢控制,以减小土体有效应力的突变。可通过设置回灌或调节降水井运行数量,抑制坑外地面沉降与坑底回弹的过度发展。基坑开挖或降水过程中若突发局部渗漏,须立即启动高压注浆应急处置。注浆材料与压力参数应依据渗漏位置的水头差及土体孔隙特征快速选定,注浆作业宜先在渗漏点周边形成封闭圈,再向中心逼近,待渗流完全停止并经压力测试验证后,方可继续后续开挖。

4.4 施工工序对受力的优化

土方分层开挖时,每层的厚度要依据支撑设计标高来决定。当开挖到该层支撑位置的下方后,要马上安装支撑并且施加预应力,这样能缩短没有支撑的暴露时

间,还可以限制墙体自由位移的累积。支撑安装和土方开挖在时间顺序上的配合,最好保证对称平衡,防止因为单侧超挖而致使支护结构承受非对称荷载。土钉墙作业要依照开挖后马上注浆、注浆后快速喷面封闭的限时施工原则来进行,各个工序的时间间隔不适合超过土体应力释放、含水量变化所允许的临界时长,避免开挖面暴露时间过长从而引发土体强度衰减或者局部坍塌^[5]。在咬合桩施工过程中,序桩得在相邻序桩混凝土初凝但是还没有终凝的时间范围内完成切割与浇筑,以此保证两桩之间形成完整连续的咬合面。

结束语:基坑支护结构在施工过程中的力学特性,会涉及到受力模式如何构成、荷载具有哪些特征、关键影响因素都有什么、控制措施包括哪些等多个方面。挡土功能与挡水功能的分工,还有支撑传力路径上的协同作用,这两者一起形成了结构的整体受力模式。主要的荷载来源有围岩侧压力、渗透压力、地面荷载、坑底卸荷,而地质条件、开挖深度、施工工艺、结构刚度,这些构成了影响受力状态的核心变量。在施工阶段进行力学控制时,要兼顾变形、稳定性和渗流这三个维度,借助分级施加预应力、刚度匹配、止水管控、工序优化等方法,达成系统性的协调。

参考文献

- [1]王德武.深基坑支护材料施工工法与界面力学性能研究[J].江西建材,2025(9):345-346,353.
- [2]吴兴.深基坑新型组合支护结构力学性能研究[J].新城建科技,2025,34(8):162-164.
- [3]王展翔.深基坑桩-撑-土组合支护结构力学特性及优化设计[J].河南建材,2026(1):100-103.
- [4]姚志雄,方佳斌,蔡亦来,等.滨海软土地层邻近高铁桥的深基坑支护结构力学性状及对环境的影响[J].城市轨道交通研究,2025,28(8):65-71.
- [5]王鹏悦.“桩墙合一”支护结构受力特性及影响因素分析[D].山东:山东建筑大学,2025.