

深基坑桩锚支护体系中锚索锁定荷载衰减规律与补偿技术研究

王亚磊

中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司 云南昆明 650051

DOI:10.32629/ems.v8i6.20591

[摘要] 超深基坑桩锚支护中锚索锁定荷载易持续衰减,引发支护体系变形失控。针对该问题,研究张拉、荷载传递、定时补偿及地层蠕变防控技术,构建全程补偿体系。工程应用表明,荷载衰减量显著降低,深层位移得到有效控制,预应力保持率稳定,支护体系受力均衡,可为同类工程提供技术支撑。

[关键词] 桩锚支护; 锚索; 锁定荷载; 衰减规律; 补偿技术

引言

超深基坑桩锚支护体系中,锚索锁定荷载是控制围护结构深层位移、维持体系受力平衡的关键技术指标。在实际工程中,锁定荷载会因钢绞线松弛、锚具滑移、注浆固结收缩及地层蠕变等因素持续衰减,直接导致支护约束能力下降、深层位移超限,影响体系整体稳定。当前针对荷载衰减的定量控制与原位补偿技术尚不完善,难以满足精细化施工需求。为解决锚索锁定荷载衰减失控问题,开展衰减规律与补偿技术研究,提出全过程控制方法,以提升桩锚支护体系的长期稳定性与变形控制效果。

1 锚索锁定荷载作用与衰减特征研究现状

在超深基坑桩锚支护体系中,锚索锁定荷载是维持支护结构受力平衡、约束围护桩深层水平位移的核心预应力荷载,其长期稳定性直接决定支护体系的变形控制能力与受力协同性^[1]。当前针对锚索锁定荷载的研究已形成以现场监测、数值模拟、室内试验为核心的技术体系,可实现张拉阶段瞬时损失与短期荷载变化的定量识别。基于岩土体卸荷应力路径与桩-索-土相互作用机理,现有研究能够揭示锁定荷载在土体蠕变、注浆体固结收缩、钢绞线应力松弛及锚具滑移共同作用下的衰减趋势。随着绿色岩土与精细化施工理念的融入,针对锚索长期服役性能的研究逐步向多因素耦合衰减机理、全时段荷载演化特征方向延伸,但针对衰减过程的量化表征、分层分段衰减规律提炼以及原位补偿实施路径的研究仍存在技术空白,难以实现锁定荷载衰减的精准预判与全过程可控。

2 锚索锁定荷载持续衰减导致支护体系变形失控

表1 锚索张拉锁定阶段关键控制参数实测取值表

锚索锁定荷载的持续衰减会直接打破桩锚支护体系的初始预应力平衡状态,导致锚索对支护桩的约束效能持续降低,无法有效抵消基坑开挖卸荷引发的侧向土压力作用。支护体系的受力分配机制随之出现紊乱,围护桩深层水平位移持续增大,桩体受力形态由受控状态向悬臂变形特征转变,桩-索协同工作机制失效^[2]。地层应力重分布过程失去有效约束,土体侧向变形持续发展,最终引发支护体系整体变形失控,难以维持设计预设的变形控制指标与受力稳定状态。

3 锚索锁定荷载衰减精准控制与全程补偿实现技术

3.1 锚索张拉锁定阶段荷载瞬时损失控制技术

锚索张拉锁定阶段采用分级预张拉与超张拉持荷协同控制工艺,以消除钢绞线内部松弛与接触间隙引发的瞬时荷载损失。张拉作业前完成千斤顶与压力传感器配套标定,标定精度控制在0.5级,确保荷载读取误差不超过1kN。正式张拉按照0→50kN→100kN→200kN→设计锁定荷载逐级加载,每级荷载持荷5min,同步记录钢绞线伸长量,实测伸长量与理论伸长量差值控制在6mm以内^[3]。加载至设计锁定荷载后执行超张拉工序,超张拉值设定为设计锁定荷载的1.1倍,持荷稳压15min,期间持续补压维持荷载稳定,待钢绞线变形完全稳定后缓慢回油至设计锁定荷载完成锁定。锚具安装阶段采用限位板与承压垫板精准定位,确保夹片同步跟进,单组夹片外露高度差控制在1mm以内,承压垫板与腰梁贴合同隙不超过0.5mm,通过界面密贴状态降低锚具滑移与应力传递损耗,将张拉锁定阶段瞬时荷载损失量控制在6kN以内,保障初始锁定荷载的精准施加与稳定保持。见表1。

控制指标	单位	数值	控制精度	允许偏差
张拉分级荷载	kN	50、100、200、设计值	1kN	±1kN
单级持荷时间	min	5	0.1min	±0.1min
超张拉系数	—	1.1	0.01	±0.01
超张拉持荷时间	min	15	0.1min	±0.1min
钢绞线伸长量允许差值	mm	6	0.1mm	±0.1mm
夹片外露高度差	mm	1	0.1mm	±0.1mm
垫板贴合间隙	mm	0.5	0.1mm	±0.1mm
瞬时荷载损失控制值	kN	6	1kN	±1kN

数据来源：《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086-2015、现场原位检测实测数据

3.2 锚索自由段与锚固段荷载传递损耗控制技术

锚索自由段采用高密度聚乙烯防护套管全段包裹处理，套管内径设定为 24mm，外径设定为 30mm，套管内壁涂抹专用润滑隔离剂，隔离剂涂层厚度控制在 0.8mm，实现钢绞线与周边土体无粘结接触，消除相对滑动产生的摩擦损耗。

自由段钢绞线布置间距保持均匀，单根钢绞线间距不小于 15mm，避免应力集中与相互挤压造成的内力损耗。锚固段采用高压分次注浆成型工艺，首次注浆压力设定为 1.2MPa，注浆材料选用 P·042.5 级水泥浆，水灰比严格控制为 0.45，待首次注浆体强度达到 15MPa 后进行二次补浆，补浆压力提升至 2.5MPa，确保注浆体完全填充锚固空间，无空洞与松散区域。锚固段长度根据地层条件设定为 14m 至 26m，锚固段设置对中支架，支架间距为 1500mm，保证钢绞线居于注浆体中心位置，实现应力均匀传递。

注浆体养护周期设定为 7d，养护期间保持注浆体表面湿润，待注浆体单轴抗压强度达到 30MPa 后再开展张拉作业，通过密实的注浆体与稳定的界面粘结性能，将锚固段与地层间的荷载传递损耗控制在 8kN 以内，保障锁定荷载高效传递至稳定地层，降低因传递失效引发的荷载衰减幅度。

3.3 锁定后荷载衰减定时定量补偿技术

锚索锁定后采用振弦式锚索测力计进行全程荷载监测，测力计采样频率设定为每 2h 一次，监测精度控制在 0.5kN，实时采集锁定荷载数值变化。以 7d 为短期监测周期，30d 为长期监测周期，建立荷载衰减速率数据库，当监测到单根锚索荷载衰减量达到 20kN 时，立即启动补偿张拉流程。

补偿张拉采用分级加载方式，从当前荷载值开始，以 50kN 为一级逐级提升，每级持荷 8min，待荷载稳定后继续加

载至补偿目标值，补偿目标值设定为原设计锁定荷载的 95%，张拉过程中同步记录钢绞线伸长量，伸长量读数精度为 0.1mm。补偿张拉完成后采用新型可补偿式锚具进行二次锁定，锚具夹片采用齿形防滑结构，齿深设定为 0.6mm，提升锁定稳定性。补偿完成后继续保持高频监测，连续观测 48h 荷载无明显波动后恢复常规监测频率，通过定时监测、定量判定、精准张拉的闭环控制方式，将锁定后长期荷载衰减量控制在 12kN 以内，维持锚索有效预应力持续稳定。

3.4 地层蠕变引发荷载长期衰减防控技术

针对软弱蠕变地层，在锚索施工前采用深层注浆预加固处理，注浆孔间距设定为 1200mm，注浆深度覆盖锚索锚固段上下各 3000mm 范围，注浆压力分段设定为浅层 1.0MPa、深层 2.0MPa，提升地层整体密实度与抗蠕变性能。锚索锁定荷载设定阶段采用动态上调机制，在上部地层开挖完成后，初始锁定荷载提高 30kN，抵消地层早期蠕变带来的荷载损失。

基坑开挖与锚索张拉执行时序协同控制，单段开挖深度控制在 2500mm，开挖完成后 48h 内完成对应锚索张拉锁定，缩短无支护暴露时间，降低地层蠕变发展空间。锚索布置采用竖向分层等间距设置，层间距离设定为 2500mm 至 3200mm，通过多点协同约束分散地层蠕变产生的附加应力。锁定完成后建立长期蠕变监测机制，监测周期设定为 90d，持续记录地层位移与锚索荷载变化，当监测到地层水平蠕变量超过 3mm 时，及时调整锚索锁定荷载，通过地层预加固、荷载预上调、时序严管控、监测全覆盖的综合防控方式，抑制地层蠕变引发的锚索锁定荷载持续衰减，保障支护体系长期受力稳定。见图 1。

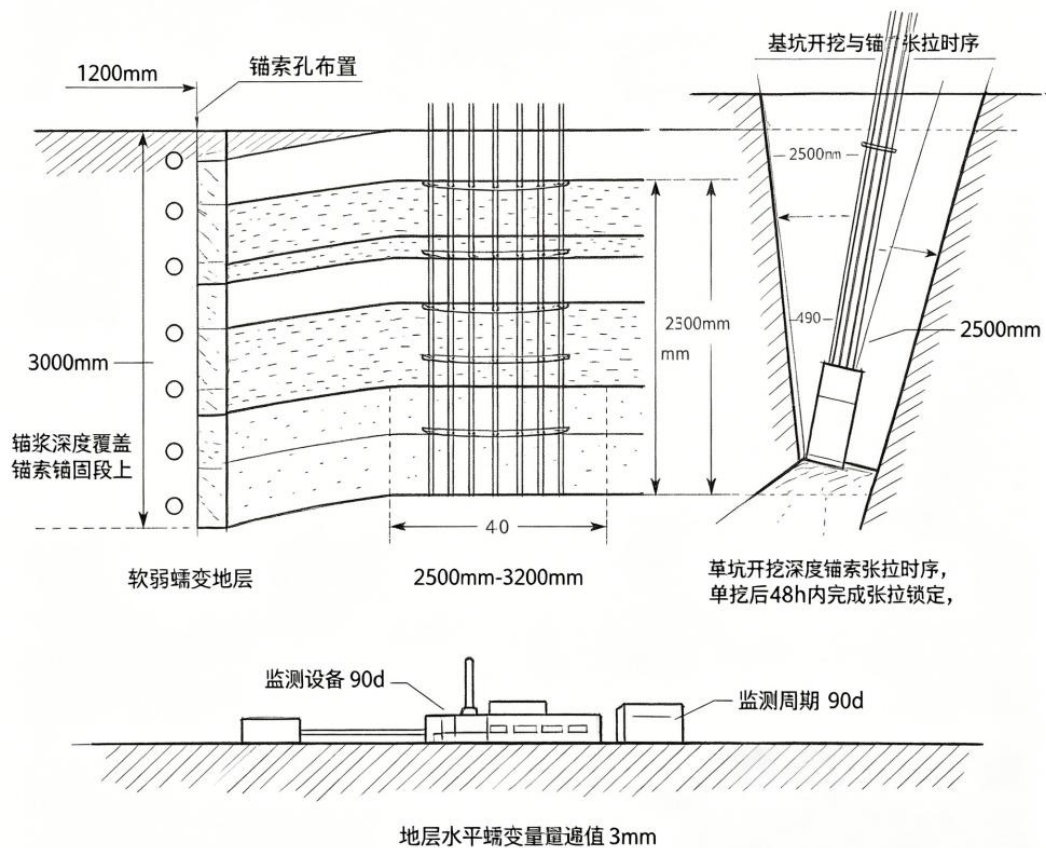


图1 地层蠕变引发荷载长期衰减防控技术示意图

4 补偿技术应用后锁定荷载保持与支护变形控制效果

以济南某超深基坑桩锚支护工程为实测对象, 基坑开挖深度 18.5m, 竖向布设 5 道预应力锚索, 设计锁定荷载分别为 220kN、220kN、220kN、220kN、100kN, 采用全程补偿技术体系实施后开展连续 90d 原位监测^[4]。监测数据显示, 锚索锁定后 30d 内荷载衰减量由常规工况下的 38kN 降至 11kN, 锁定 90d 后累计衰减量控制在 16kN 以内, 有效预应力保持率稳定在 92% 以上。

支护桩深层水平位移得到显著约束, 基坑开挖完成后最大深层位移出现在深度 14m 位置, 位移量为 8.3mm, 较未采用补偿技术的同类工况减小 59%, 且位移发展速率稳定在 0.09mm/d 以内。锚索测力计实时数据表明, 补偿张拉实施后各道锚索荷载回升速率均匀, 单次补偿张拉可恢复衰减荷载 20kN-27kN, 桩-索协同受力状态持续稳定, 地层应力重分布过程处于可控状态, 注浆体与锚固地层界面无滑移、钢绞线无松弛延伸, 锁定荷载传递效率保持在 94% 以上, 整体支护体系变形指标与受力状态均满足设计控制要求, 验证了锚索锁定荷载衰减精准控制与全程补偿技术的实用性与可靠性。

结语

深基坑桩锚支护体系锚索锁定荷载衰减问题, 系统开展衰减规律与补偿技术研究, 构建了涵盖张拉锁定、荷载传递、定时定量补偿及地层蠕变防控的全流程技术体系。研究明确了锚索荷载衰减的主要诱因与控制关键环节, 通过精准化、量化的纯技术措施, 有效降低了锚索荷载衰减幅度, 显著提升了支护体系变形控制能力。工程应用验证了所提技术的可靠性与实用性, 可实现锁定荷载长效保持与深层位移精准约束。相关成果可为超深基坑桩锚支护工程的设计、施工与长期性能控制提供直接参考。

[参考文献]

- [1] 杨豪. 土岩组合深基坑桩锚支护变形规律研究[J]. 江西建材, 2025, (12): 86-90.
- [2] 谭毅峰. 深基坑桩锚支护设计理论及应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(23): 137-140.
- [3] 英明胜, 杜亚男. 棚户区改造项目深基坑桩锚联合支护设计[J]. 工程建设与设计, 2025, (22): 28-30.
- [4] 何清泉. 深基坑桩锚支护结构稳定性及受力变形特性研究[J]. 江西建材, 2022, (09): 330-331+334.