

预应力锚杆支护体系在深基坑中的失效模式与防控研究

王兵 张庆文 朱金林 张俊浩

江苏地质基桩工程有限公司，江苏镇江，212000；

摘要：本论文围绕预应力锚杆支护体系在深基坑工程中的应用，深入探讨其失效模式与防控措施。通过分析工程案例、开展理论研究和进行数值模拟，系统梳理了预应力锚杆支护体系常见的失效类型，包括锚杆杆体断裂、锚固体与土体间的界面破坏、张拉锁定失效等，针对不同失效模式从设计、施工、监测等多环节提出具体防控策略，旨在为深基坑工程中预应力锚杆支护体系的安全稳定提供理论依据与实践指导，降低工程风险，保障施工安全与周边环境稳定。

关键词：预应力锚杆支护体系；深基坑；失效模式；防控研究

DOI：10.69979/3029-2727.25.09.017

引言

城市化进程加速，城市建筑高层化、地下化发展使得深基坑工程越来越多。预应力锚杆支护体系因有支护效果好、经济效益高、对周边环境影响小等优点而在深基坑支护工程里被广泛应用。不过，由于深基坑工程地质条件复杂、施工环境多变且存在设计施工问题，预应力锚杆支护体系在实际应用时可能会失效，一旦失效就可能出现基坑坍塌、周边建筑物沉降开裂等严重后果，从而导致巨大经济损失和人员伤亡。深入研究深基坑里预应力锚杆支护体系的失效模式和防控措施有着重要的理论意义和工程应用价值。

1 预应力锚杆支护体系工作原理与组成

1.1 工作原理

预应力锚杆支护体系属于一种主动支护结构，其工

作原理是先给锚杆施加预应力，将锚杆锚固在稳定的土体或者岩体里，凭借锚杆和土体或者岩体间的摩阻力，把基坑侧壁土体的侧压力传递到深部稳定地层以限制基坑侧壁土体变形，确保基坑稳定，基坑开挖时土体卸载，锚杆拉力渐增，预应力能有效抑制土体变形，让基坑侧壁土体处于稳定应力状态。

1.2 组成部分

预应力锚杆支护体系主要由锚杆杆体、锚固体、锚具和张拉设备等构成，锚杆杆体一般选用高强度钢筋或者钢绞线，是承受拉力的关键构件，锚固体是锚杆杆体与土体或者岩体连接之处，靠灌注水泥浆或者水泥砂浆形成，借助与土体或岩体的摩阻力来传递拉力，锚杆杆体靠锚具固定，锚杆拉力经锚具传递到支护结构，张拉设备用来给锚杆施加预应力。

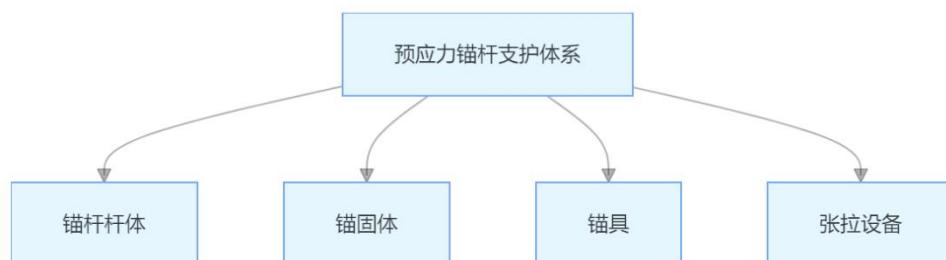


图 1 预应力锚杆支护体系组成示意图

2 预应力锚杆支护体系在深基坑中的失效模式分析

2.1 锚杆杆体断裂

预应力锚杆支护体系中，锚杆杆体断裂是常见且危害极大的失效模式且成因复杂多元。在材料质量方面，部分锚杆杆体生产时就有质量隐患，使用强度、韧性等关键性能指标不达标的材料制作杆体，当深基坑长期受

力环境复杂时杆体很容易断裂，研究显示，使用不合格材料的锚杆断裂概率比合格材料的高约30%，某深基坑工程，选用的锚杆杆体内部有夹渣、裂纹等缺陷，基坑开挖时杆体承受约80%设计拉力就从缺陷部位断裂，致使基坑局部变形太大。在应力集中方面，锚杆制作和安装的工艺缺陷和误差影响较大，锚杆杆体和锚具连接部位加工精度不够、连接面不平整、螺纹加工不规范等会使该部位应力分布不均，在实际工程中这种原因造成的应力集中能使局部应力值达到正常应力的2-3倍，当锚杆承受较大拉力时应力集中部位成为薄弱点很容易引发杆体断裂，有项目锚具和杆体连接工艺粗糙，张拉时杆体在连接部位突然断裂，周边土体明显位移。锚杆杆体受到的腐蚀威胁同样不小，锚杆长期处于地下潮湿环境，地层要是有硫酸盐、氯化物这类腐蚀性介质腐蚀速度就会大大加快尤其是在这样的地层中。相关数据表明，在强腐蚀性地层里，锚杆杆体每年的截面损失能达到1-2mm，由于腐蚀一直在持续，杆体有效受力截面不断变小，承载能力也渐渐降低，杆体腐蚀到一定程度，就算所受拉力没达到设计值，也有断裂的可能，就像沿海地区某个深基坑工程，地下水含盐量高，部分锚杆杆体用了1年之后，由于腐蚀截面被削弱，在正常使用状况下就断裂了，进而整个支护体系的稳定性受到了影响。

2.2 锚固体与土体间的界面破坏

预应力锚杆支护体系失效的一个重要因素是锚固体与土体间的界面破坏，当地层土体强度低、压缩性大时，软土地层，土体抗剪强度不够，锚杆拉力承受不住而受力容易塑性变形，会使锚固体与土体间的摩阻力下降从而发生界面破坏，并且施工环节的质量问题也不容小觑，水泥浆配合比不对、灌注压力不够或者灌注不饱满以及锚杆成孔时孔壁坍塌、缩径都会让界面粘结强度大大降低，如某个深基坑工程就因水泥浆灌注不饱满，施工完没多久锚固体和土体就脱离了，地下水的冲刷和浸泡会削弱界面粘结力且使土体软化，进一步加大界面破坏风险，研究显示，地下水丰富且流速快的区域，界面破坏概率比其他区域高大概40%。

2.3 张拉锁定失效

预应力锚杆支护体系难以达到预期支护效果的关键问题是张拉锁定失效，这一问题的成因包括锚具质量、

张拉工艺和土体特性等多方面，锚具质量跟锚杆预应力的锁定效果直接相关，若夹片硬度不够、锚板强度不达标，张拉时夹片咬不住锚杆杆体便很容易滑出，从而使预应力散失，某项目采购的锚具夹片硬度不达标，张拉到设计预应力80%的时候夹片突然松了，进而导致锚杆预应力无法锁定，张拉工艺不对也是常见原因，张拉速度太快会使锚杆杆体受力不均匀，内部应力瞬间增大，容易造成局部损伤，且张拉顺序不合理会使各锚杆受力差别很大，部分锚杆达不到设计预应力值，有个工程没按规范顺序张拉，好多锚杆实际预应力只有设计值的60%-70%，土体蠕变现象也不容忽视，特别是软土地层，土体在长期荷载下一直变形会慢慢消耗锚杆预应力，数据表明，软土地层里半年内锚杆预应力可能土体蠕变损失15%-20%，若损失超过一定数值，张拉锁定就会失效，深基坑支护体系的稳定性就会受到严重威胁。

2.4 其他失效模式

预应力锚杆支护体系除了上述主要失效模式外，还可能由于支护结构设计不合理、周边环境变化（像地面超载过大、相邻基坑施工影响等情况）而出现失效情况，支护结构刚度不足的话，在基坑侧壁土体压力下就会有过大变形，这会让锚杆受力不均匀，增加失效风险。

表1 预应力锚杆支护体系常见失效模式及原因分析

失效模式	主要原因
锚杆杆体断裂	材料质量问题、应力集中、腐蚀作用
锚固体与土体间的界面破坏	土体性质不良、施工质量问题、地下水影响
张拉锁定失效	锚具质量问题、张拉工艺不当、土体蠕变
其他失效模式	支护结构设计不合理、周边环境变化

3 预应力锚杆支护体系失效模式的防控措施

3.1 优化设计

合理选择锚杆参数：基坑工程的地质条件、开挖深度、周边环境等因素得考虑进去，从而合理确定锚杆长度、直径、间距、倾角等参数，设计时要充分考虑土体力学性能以确保锚杆能提供充足锚固力，像在软土地层中，可适当增加锚杆长度和直径来提高锚杆承载能力。

加强结构计算分析：运用先进的计算方法与软件详

细分析预应力锚杆支护体系的结构，计算时得考虑多种工况下锚杆的受力状况，基坑开挖时土体卸载、地下水变动、周边荷载作用等情况以保证支护体系在各种工况下稳定。

考虑耐久性设计：锚杆杆体容易被腐蚀，设计阶段得采取有效的防腐办法，说可以用防腐型的锚杆杆体，像环氧涂层钢筋、镀锌钢绞线之类的，在锚杆外边设个防腐套管，不让杆体跟腐蚀性介质接触，并且给锚固体做防腐处理，增强它的抗腐蚀能力。

3.2 严格施工管理

保证材料质量：锚杆杆体、锚具、水泥浆等材料的质量要严格把控，进场材料要有质量合格证明文件且按规定抽样检验必不可少，不合格的材料绝不能用于工程施工。

规范施工工艺：详细的锚杆施工工艺标准和操作规程得制定出来，这样施工过程才能规范有序，锚杆成孔时要严格控制成孔质量，保证孔壁垂直、孔径符合设计要求，水泥浆灌注时要控制好配合比、灌注压力和灌注量，确保锚固体饱满密实。

加强施工质量检测：施工质量检测制度得建立健全起来以全过程检测锚杆施工质量，可用锚杆拉拔试验来检测锚杆锚固力是否符合设计要求，利用超声波检测等方法检测锚固体的完整度与密实性。

3.3 完善监测预警

建立监测体系：深基坑工程施工时得建立完善监测体系，实时监测基坑侧壁土体位移、锚杆拉力、周边建筑物沉降等且监测点要布置合理，这样才可以准确反映基坑变形情况。

及时分析处理数据：监测数据得及时分析处理，一旦发现监测数据超预警值就得马上采取相应措施处理，像锚杆拉力异常增大时要及时检查锚杆有无问题并采取补强、加固之类的措施。

加强信息化管理：信息化技术被利用起来使监测数据实时传输和共享得以实现，从而为工程管理人员提供了及时准确的决策依据。通过长期分析总结监测数据，预应力锚杆支护体系的设计和施工不断得到优化。

4 工程案例分析

4.1 案例概况

某城市有个商业综合体项目，其基坑开挖深度达15米且采用预应力锚杆支护体系，基坑周边环境复杂得很，东侧紧挨着已建高层住宅，西侧是城市主干道，并且这基坑的工程地质条件不咋好，粉质黏土和淤泥质土是主要地层且地下水水位还挺高。

4.2 失效情况分析

基坑开挖到10米深的时候监测数据表明，基坑东侧有部分锚杆拉力不正常地增大且这个区域的基坑侧壁土体位移也超出了预警值。现场检查发现部分锚杆杆体断裂且锚固体和土体之间有明显缝隙。进一步分析，此次失效主要有以下几个原因：

设计方面：基坑东侧紧挨着高层住宅，由于设计的时候没充分考虑这一特殊工况，锚杆设计参数不能很好满足该区域支护要求。

施工方面：锚杆施工的时候，由于水泥浆灌注质量没达标，使得锚固体和土体之间的粘结强度不够，并且有些锚杆杆体有质量毛病，受到较大拉力时就断裂了。

监测方面：监测点布置得不合理，无法及时准确反映锚杆受力变化情况，因而没能及时发现问题并采取有效措施。

4.3 防控措施及效果

针对上述失效问题，采取了以下防控措施：

设计优化：基坑东侧锚杆的设计参数得调整下，通过增加锚杆的长度和直径来提高其承载能力，并且该区域支护结构的整体计算分析得加强以确保支护体系稳定。

施工整改：断裂的锚杆要进行更换并重新施工，水泥浆灌注质量得严格控制以确保锚固体与土体间的粘结强度满足要求。

监测完善：加密监测点的布置并提高锚杆拉力与土体位移的监测频率，构建实时监测预警系统以便监测数据一有异常就及时发出预警信号。

采取上述防控措施后，有效控制了基坑变形，使锚杆拉力恢复正常，基坑工程顺利完成施工且没有对周边建筑物和城市主干道产生不良影响。

5 结论与展望

本论文研究预应力锚杆支护体系在深基坑中的失效模式与防控措施并得出主要结论：深基坑工程里预应

力锚杆支护体系常见失效模式有锚杆杆体断裂、锚固体与土体间界面破坏、张拉锁定失效等且各有特定成因，不同失效模式下需从设计、施工、监测等多环节采取防控措施，优化设计参数、严格施工管理、完善监测预警体系，从而降低失效风险，保障深基坑工程安全稳定，工程案例分析验证了防控措施有效性和可行性，为类似工程提供参考借鉴。虽然本文对预应力锚杆支护体系失效模式与防控措施研究较深入，但随着深基坑工程向更深、更大规模发展，复杂地质条件和周边环境带来挑战，预应力锚杆支护体系失效问题或许会更复杂多样，以后可在研究新型预应力锚杆材料和结构形式以提升锚杆承载能力和耐久性、强化预应力锚杆支护体系在复杂地质条件和极端工况下失效机理研究从而为工程设计和施工提供更准确理论依据、借助人工智能、大数据这类先进技术构建预应力锚杆支护体系的智能监测与预警系统以达成基坑工程的智能化管理等方面深入。

参考文献

- [1] 郑卫锋. 深基坑预应力锚杆柔性支护力学性能的研究[D]. 大连理工大学, 2007. DOI: 10.7666/d.y1227564.
- [2] 陈长流, 叶帅华, 朱彦鹏. 预应力锚杆与土钉联合支护体系在兰州深基坑工程中的应用与监测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(suppl): 484-489. DOI: CNKI:SUN:YTGC.0.2012-S1-096.
- [3] 徐松山. 预应力锚杆复合土钉支护稳定性分析及数值模拟方法研究[D]. 中南大学, 2013.
- [4] 尚新乐. 深基坑施工中预应力锚杆支护技术的实践研究[J]. 工程技术研究, 2019(1): 2. DOI: CNKI:SUN:YJCO.0.2019-01-022.
- [5] 范怀亮. 预应力锚杆与灌注桩支护体系在深基坑支护中的应用[J]. 2014.