

岩土工程基坑边坡失稳加固技术的探讨

文 / 李继仓 江苏省水文地质工程地质勘察院有限公司

摘要：基坑开挖是岩土工程建设的重要环节，而边坡失稳则是其面临的主要风险之一。本文在分析地质条件、水文环境、施工操作、人为管理等影响基坑边坡稳定性关键因素的基础上，重点探讨了抗滑桩支护、防渗膜隔水、排水降压、土钉墙加固、预应力锚索等一系列针对性的失稳加固技术路线及其应用策略。研究表明，工程实践中需综合考虑场地实际情况，动态优化设计方案，合理选择成熟可靠的加固措施，并严格把控施工质量，以期最大限度地规避边坡失稳风险，确保岩土工程安全、高效、经济的实施。

关键词：岩土工程；基坑边坡；失稳风险；加固技术；动态设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.022

引言

随着城市建设的不断推进，地下空间开发利用日益频繁，深基坑工程不断涌现。作为岩土工程施工的关键环节，基坑开挖的安全与质量直接关系到建筑物的整体性能。然而，边坡失稳问题却始终威胁着基坑施工的顺利进行。诸多因素如复杂多变的地质条件、不利的水文环境、不当的施工操作以及缺乏科学管理等，都可能诱发边坡坍塌等事故，给工程带来巨大的经济损失和安全隐患。因此，探索行之有效的基坑边坡失稳加固技术，对确保岩土工程建设的安全、高效、经济具有重要意义。

一、岩土工程基坑边坡稳定性影响因素

（一）地质条件与岩土特性

基坑边坡的稳定性首先取决于场地的地质条件。地层岩性、地质构造、土体类型等因素决定了边坡的天然强度和变形特性。例如，存在软弱下卧层（如淤泥、泥炭）或不良地质体（如膨胀土、湿陷性黄土）时，上覆土体极易沿软弱面发生滑移。而砂砾石层、基岩风化层等地层的组合特点与空间分布形式，也直接影响土体的渗透性、压缩性及抗剪强度。土体物理力学性质参数如黏聚力 c 值（常见粉土 20~40kPa，粘土 40~90kPa）和内摩擦角 ϕ 值（常见粉土 20° ~ 30° ，粘土 5° ~ 25° ）的大小，更是评判边坡稳定状态的直接指标。因此，工程前期必须开展详尽的工程地质勘察，获取准确的地层分布信息与土体抗剪强度设计参数，识别边坡的薄弱环节，为合理制定边坡开挖、支护方案提供可靠的地质依据^[1]。

（二）水文环境与气候影响

地下水文环境是影响基坑边坡稳定性的另一重要因素。一方面，高地下水位（尤其是承压水）会削弱土体的有效应力，降低土体抗剪强度。另一方面，地下水渗流会对土体产生动水压力，降低边坡的抗滑稳定性。若基坑水位骤降，土体中的渗透力方向将发生改变，可能引发快速砂土流失等边坡失稳问题。暴雨、融雪等气候

因素若导致地下水位异常升高，饱和土层的抗剪强度将急剧降低，极易诱发浅层滑坡。此外，降雨还会引起地表径流，对坡面产生冲刷，加剧土体风化，进一步降低边坡的整体稳定性。因此，必须全面掌握场地的水文地质条件，了解当地的降雨特征，评估其对边坡稳定性的影响，并在施工组织设计中制定相应的降排水措施与应急预案。

（三）施工操作与工艺偏差

基坑开挖施工过程中的操作行为与工艺控制水平直接关系到边坡的受力状态与稳定性。例如，开挖顺序不当，超挖欠挖，或开挖分段长度过大、时间间隔过长，都可能导致应力的急剧释放或累积变形，诱发局部土体失稳。大型机械设备的碾压荷载及其振动扰动也可能破坏土体结构，削弱边坡强度。若现场堆载超出设计限值，则坡顶附加应力会显著改变边坡的受力平衡。再如，支护桩施工滞后、混凝土浇筑振捣不到位等，都将降低支挡结构的变形控制能力。坡面防护的缺失，致使土体长期暴露，也会加剧风化与湿陷^[2]。因此，应严格按照专项施工方案进行作业，做好施工工艺交底，加强现场监督管理，严控各工序偏差，确保边坡受力状态始终处于动态平衡之中。

（四）人为管理与设计缺陷

人为因素是诱发基坑边坡失稳的主因之一。设计阶段，工程地质资料不全面、稳定性分析不到位、设计参数选取不合理等，都可能导致施工图的缺陷或漏洞。例如，边坡坡率过陡、放坡高度过大，或支护结构刚度不足、嵌固深度偏小等，便为边坡失稳埋下隐患。施工阶段，现场管理粗放、安全意识淡薄、责任心不强等，则可能造成工序脱节、技术措施不落实、质量行为失控等问题，如盲目赶工期、监测走过场、支护施工马虎等。若管理人员专业能力不足，缺乏应急处置经验，更易酿成严重事故。工程后期，若缺少必要的检测维护，致使排水设

施老化堵塞、锚索张拉应力损失、喷混凝土面层开裂剥落等，也会诱发边坡失稳。因此，切实加强全过程精细化管理，提升人员综合素质，健全隐患排查治理机制，是确保基坑边坡安全的根本保障。

二、岩土工程基坑边坡失稳加固技术应用策略

(一) 抗滑桩支护体系构建

抗滑桩通过桩-土相互作用，利用桩体抵抗滑动土体的水平位移，是边坡存在明显滑动趋势时的有效治理途径。其加固原理在于桩体剪切阻力和桩侧摩阻力的共同作用：桩体剪切阻力提高了滑体抗剪能力，而

桩侧摩阻力则消耗了部分滑动推力。抗滑桩多采用钻孔灌注施工工艺，桩径通常为1-2m，桩长则须穿透滑动面并深入稳定层3-5m。桩间距一般为3-5倍桩径，具体布置方案须通过严格计算确定(见表2-1)。施工时，机械钻孔或人工挖孔成桩后应及时清渣并采取护壁措施，然后尽快浇注桩身混凝土，28天无侧限抗压强度宜达20MPa以上。同时，桩顶设置连系梁可进一步提高整体刚度，构成完整的抗滑支挡体系。工程实践表明，抗滑桩适用于各类土质边坡，尤其对深层滑坡和泥石流治理效果显著。

表 2-1 不同地质条件下抗滑桩技术参数推荐值

土质类型	桩径 (m)	桩间距 (m)	嵌入稳定层深度 (m)	桩身混凝土强度等级
粘性土	1.0-1.2	3.0-4.0	3.0-4.0	C25-C30
砂性土	1.2-1.5	4.0-5.0	4.0-5.0	C30-C35
碎石土	1.5-2.0	5.0-6.0	5.0-6.0	C35-C40

(二) 防渗膜隔水防护措施

铺设防渗膜是控制边坡地下水入渗、维护其稳定的有效手段。常用的高密度聚乙烯 (HDPE) 膜，厚度一般为1-2mm，渗透系数可低至 $1.0 \times 10^{-13} \text{cm/s}$ ，对降雨和地表水的阻隔效果良好(见表2-2)。铺设时应保证膜面平整，搭接缝宽度不小于100mm，热熔粘结严密，膜体伸缩系数宜与土体变形协调一致^[3]。坡脚处可利用土工格栅进行固定，锚固长度不宜小于1m。为便于渗流水

排出，可在防渗膜下铺设透水性良好的排水盲沟，管径100-200mm，坡度3%-5%。对孔隙发育的岩质边坡，喷涂聚脲等反应型高分子材料形成柔性防水层，厚度2-4mm，粘结强度可达2MPa以上，渗透系数可低至 $1.0 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ ，可进一步提升防渗性能。工程实践表明，采取综合防渗措施后，边坡土体含水量可降低5%-10%，稳定性系数可提高0.1-0.2。

表 2-2 常用防渗材料性能对比参数

防渗材料类型	厚度 (mm)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (倍)	使用寿命 (年)
HDPE 防渗膜	1.0-2.0	22-27	6-8	50-100
EVA 防渗膜	1.2-2.5	12-18	4-6	30-50
聚脲涂层	2.0-4.0	18-25	3-5	20-30

(三) 排水降压系统设置

系统的排水措施能有效降低边坡土体含水量，维持地下水位稳定，是保证边坡稳定的重要手段。其中，坡顶截水沟可有效拦截地表径流，避免其冲刷坡面，沟深0.3-0.5m，底宽0.4-0.6m，边坡1:1-1:1.5，现浇砼厚度不小于0.1m。坡面泄水孔则用于疏导土体内部渗流水，孔径50-100mm，长3-8m，倾角 $5^\circ - 15^\circ$ ，间距2-4m，孔口连接PVC管引至坡脚排水沟。坡脚反滤层铺设砂砾

石等透水材料，厚度0.2-0.5m，可有效疏通坡体出水，防止细颗粒流失引发管涌。对于地下水位较高的场地，可在基坑内布设管井降水，井管直径400-600mm，管壁采用桥式滤水管，开孔率20%-30%，井点间距15-30m，深度应达到目标水位以下2-3m，连续运行7-15天可将水位降至基底以下0.5-1m。工程实践表明，科学设置排水系统可使土体含水量降低10%-20%，显著改善边坡稳定状况，见图2-1。

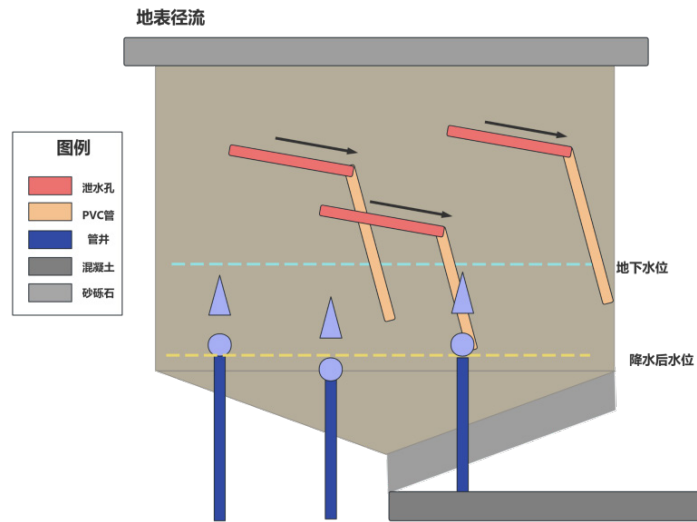


图 2-1 边坡排水降压系统设置技术图

(四) 土钉墙复合支护方案

土钉墙适用于加固浅层及中等深度的临时或永久性边坡。其做法是在土体中密集打入钢筋或型钢，并在坡面喷射混凝土，形成“土钉+喷混”的复合支护体系。土钉通过注浆与土体紧密粘结，可有效提高土体抗剪强度，钉体抗拔承载力可达 100-300kN。喷混面层与土钉协同作用，共同承担土压力，并起到削坡防护、防止土体风化松散的效果。土钉直径一般为 16-32mm，水泥基注浆体直径可达 100-150mm，长度 3-10m，水平间距 0.5-2m，垂直间距 1-3m，倾角 10° -20°（见表 2-3）。喷混面层厚度一般为 5-15cm，抗压强度应达 20-30MPa，粗糙面宜喷射素混凝土并布置钢丝网片，钢筋网片直径 4-6mm，间距 100-200mm。土钉墙造价低、工期短，每米墙身造价约 0.5-1.0 万元，10m 高边坡 7-15 天即可完成，但对高陡岩质边坡加固效果欠佳^[4]。

表 2-3 不同边坡高度土钉墙设计参数

边坡高度 (m)	土钉长度 (m)	水平间距 (m)	垂直间距 (m)	喷混面层厚度 (cm)
3-5	3-4	1.2-1.5	1.0-1.2	5-8
5-8	4-6	1.0-1.2	1.2-1.5	8-12
8-12	6-10	0.8-1.0	1.5-2.0	12-15

(五) 预应力锚索主动加固

预应力锚索通过主动张拉，在土体中形成压应力场，提高边坡抗滑能力，尤其适用于高陡岩质边坡及高边坡加固。锚索一般由 3-7 根高强度钢绞线组成，钢绞线直径 5-15mm，抗拉强度 1500-2000MPa。锚固段长度一般为锚索长度的 1/4-1/3，外包水泥基注浆体，直径不小于锚索直径的 3 倍，粘结强度可达 2-4MPa。张拉段采

用无粘结设计，如包裹塑料套管或涂刷脱模剂。施工时先用锚索钻机钻孔，然后安装锚索并分段注浆，注浆压力 0.5-2MPa，液固比 0.45-0.55，注浆密度 1.8-2.0g/cm³。注浆凝固 7-15 天后，采用千斤顶或油泵对锚索进行张拉，有效预应力 300-500kN，锁定应力不小于设计值的 75%。锚索体现了主动加固理念，加固效果显著，边坡整体稳定性系数可提高 0.2-0.3。但其造价相对较高，每米锚索的材料和施工费用在 0.5-1.0 万元，后期还需定期监测预应力损失情况，残余预应力不应低于设计值的 60%。

结语

综上所述，岩土工程基坑边坡失稳风险防控是一项复杂的系统工程，需要从设计到施工全过程动态管理，因地制宜地综合采取各类加固措施。工程实践中应立足场地实际情况，充分考虑各类影响边坡稳定性的不利因素，合理选择抗滑桩、防渗膜、排水降压、土钉墙、锚索等成熟可靠的加固技术，并做好优化组合，形成综合防护体系。同时还应建立完善的信息化监测网络，基于监测数据及时优化设计方案、指导施工决策，真正做到“动态设计、精细施工”。

参考文献

[1] 吉星刚, 朱弘扬. 岩土工程施工中基坑边坡失稳及加固处理方法 [J]. 江苏建材, 2025, (02): 101-102.
 [2] 王彦羽. 岩土工程施工中基坑边坡失稳及加固处理研究 [J]. 房地产世界, 2025, (04): 149-151.
 [3] 胡枫. 岩土工程施工中基坑边坡失稳及加固处理技术 [J]. 工程建设与设计, 2024, (19): 36-38.
 [4] 贺帅帅. 岩土工程基坑边坡失稳加固技术的探讨 [J]. 四川水泥, 2023, (10): 202-204.