

组合支挡及分台支挡方案在挖方高边坡中的应用

陈贵生¹, 余再西^{2*}

1. 昆明恒基建设工程施工图审查中心, 云南 昆明 650000

2. 云南建安昆宁工程设计咨询有限公司, 云南 昆明 650000

摘要 : 边坡工程因地质条件的时空变异性强、诱发因素多、不确定性强, 导致其破坏模式复杂多变、治理难度大、事故多发, 是工程建设安全管控的重点和难点, 高大边坡更是如此。单一的支持形式难以应对各种可能出现的不利因素而导致坡体变形或垮塌, 多种治理措施或支护方式联合使用成为边坡支护工程的常态。本文基于某实际工程案例, 探讨了组合支挡结构和分台支挡方案在挖方高边坡工程中的应用情况, 提出了组合支挡及分台支挡方案设计思路及其重点、难点和关键点, 以供类似项目参考借鉴。

关键词 : 挖方高边坡; 组合支挡; 分台支挡; 稳定性分析; 工程应用

Application of Combined Support and Split-Platform Support Design in Excavated High Slopes

Chen Guisheng¹, Yu Zaixi^{2*}

1. Kunming Hengji Construction Engineering Construction Drawing Review Center, Kunming, Yunnan 650000

2. Yunnan Jianan Kunming Engineering Design & Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Slope engineering is characterized by strong temporal and spatial variability of geological conditions, multiple inducing factors, and high uncertainty, which leads to complex and variable failure modes, difficult governance, and frequent accidents, making it a key and difficult point in the safety management of engineering construction. High and steep slopes are even more so. A single support form cannot effectively deal with various possible unfavorable factors that may cause slope deformation or collapse, and the combination of multiple governance measures or support methods has become the norm in slope support engineering. Based on a real engineering case, this paper discusses the application of composite retaining structures and tiered retaining schemes in cut high slope engineering, proposes the design ideas, key points, difficulties, and key points of composite retaining and tiered retaining schemes, and provides reference and learning for similar projects.

Keywords : excavated high slopes; combined support; split-platform support; stability analysis; engineering applications

一、研究背景

边坡工程因地质条件的时空变异性强、诱发因素多、不确定性强, 导致其破坏模式复杂多变、治理难度大、事故多发, 是工程建设安全管控的重点和难点, 高大边坡更是如此。单一的支持形式难以应对各种可能出现的不利因素而导致坡体变形或垮塌, 多种治理措施或支护方式联合使用成为边坡支护工程的常态。挖方高边坡的工程项目, 尤其是山区公路、铁路和水利工程等场景, 因其具有地形陡峭、地质条件复杂、边坡高度较高的特点, 一直是岩土工程领域的研究热点和技术难点^[1,2]。随着我国基础设施建设的不断推进, 许多项目的选址逐渐延伸到地质条件复杂的山区和丘陵地区, 挖方高边坡的支护设计与施工面临着越来越高的挑战。挖方高边坡支挡设计不仅关系到施工安全, 更直接影响工程的长期稳定性, 因此有必要探讨其支挡结构的合理设计及技

术支持。

边坡工程因地质条件的时空变异性强, 挖方高边坡通常存在软硬不均的地质条件, 如软土层、风化层或岩石夹层等, 坡体在开挖过程中容易产生滑动和变形, 大大增加了支挡结构设计的复杂性^[3,4]。高边坡的高度及坡度较大, 单一支持形式往往难以满足其支挡要求, 实际工程中通常使用组合支挡结构来达到治理目的。地下水的影响也是挖方高边坡支挡中的重要难点, 地下水渗流作用不仅影响边坡稳定性, 还可能对岩土体和支挡结构产生削弱作用。综上所述: 挖方高边坡的支挡施工难度较大, 受地形、气候及施工空间限制, 施工技术和管理要求高。因此支挡结构的合理布置及边坡变形和稳定性控制是设计的核心目标之一。本文基于某实际工程案例, 探讨了组合支挡结构和分台支挡方案在挖方高边坡工程中的应用情况, 提出了组合支挡及分台支挡方案设计思路及其重点、难点和关键点, 以供类似项目参考借鉴。

第一作者简介: 陈贵生 (1965-), 男, 汉族, 云南曲靖人, 工程地质学士, 高级工程师, 国家注册土木工程师 (岩土), 主要从事岩土工程勘察、设计、检测、咨询和施工图审查工作, Email: chs97412@163.com。

通讯作者简介: 余再西 (1988-), 男, 汉族, 云南大理人, 岩土工程硕士, 高级工程师, 国家注册土木工程师 (岩土)、一级建造师, 主要从事岩土工程勘察、设计、审查、咨询和研究工作, Email: 764388172@qq.com。

二、工程概况

(一) 基本概况

此边坡项目位于山体半坡，地貌类型为构造低、中山缓斜坡地貌，场地为一单斜坡，场地平整工作完成后将在场地外形成了多处边坡，其中3#边坡为位于建筑区上坡向，为挖方斜坡，边坡长约168.3m，坡度为36~46°，挖方后支挡高度为5.58m~27.56m，如图1所示。结合场地规划以及合理治理理念，决定对3#边坡进行分段分方案治理，其中边坡3#A支挡高度26.80m~27.56m、边坡3#B支挡高度27.56m~26.30m，坡顶电塔须保护。本文主要对挖方高边坡段—3#A、3#B的支挡结构及设计展开讨论。



> 图1 治理前边坡实景图

> Fig. 1 Realistic view of the slope before treatment

(二) 工程地质条件

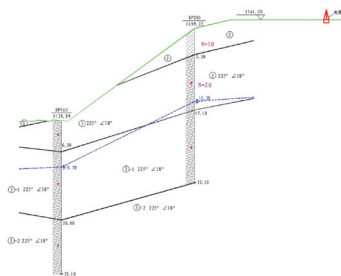
项目区域地基土(岩)层包括第四系填土层(Q^{ml})和第四系坡残积(Q^{el})黏性土层，白垩系下统普曼岗组(K_{1m})泥岩，局部夹薄层粉砂质泥岩。场地下伏基岩岩层倾向约在220~230°之间，倾角约在∠15~21°之间。具体各地层情况如下：①素填土：褐红色，松散，湿，成份以粉质黏土为主，局部为粉土夹层，含少量角砾、碎石，未经碾压，土质不均匀，未完成自重固结。②粉质黏土：褐红色，稍湿，可塑~硬塑状，中等压缩性。含少量未风化完全岩石碎块，稍有光泽，韧性中等，局部夹粉土层。③全风化泥岩：褐红色，稍湿，已风化为土状，切面稍粗，韧性中等，可~硬塑，中等压缩性，不均匀含5%~30%左右的粒径多为2~5cm、部分5~20cm的风化泥岩碎块。④-1强风化泥岩：褐红色，泥质结构，碎块状构造，差异风化强烈，节理、裂隙极发育，黏性土充填，岩体基本质量等级为V级。⑤-2中风化泥岩：褐红色，泥质结构为主，部分粉粒结构，中厚层状构造，岩石强度差异较大，岩体较破碎~较完整，节理、裂隙较发育，泥质充填，差异风化明显。岩石饱和单轴抗压强度为1.74~17.2Mpa，平均值为7.61Mpa，标准值为3.6Mpa，岩体强度差异大，以软岩为主，部分为极软岩，软化系数为0.626，为软化岩石，岩石基本质量等级为V级。

各土(岩)层物理力学指标取值见表1，削坡前地层结构分别见图2、图3。

表1 各岩土层物理力学指标(注：*表示为经验值)

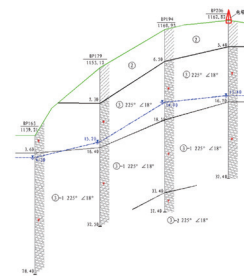
Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock and soil layer

土层及代号	土的重度 γ (kN/m ³)	地基承载力特征值 F_{sk} (kPa)	天然状态		浸水状态		锚固体与岩土层粘结强度标准值 f_{trbk} (kPa)
			粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)	
①素填土	18.8	90	20.0	8.0	16.0	7.0	18
②粉质黏土	20.0	170	43.0	14.0	35.0	9.0	55
③全风化泥岩	20.7	180	44.0	15.0	33.0	10.0	60
③-1强风化泥岩	22.5	260	45.0	23.0	36	18	120
③-2中风化泥岩	25.7	-	70.0*	35.0*	-	-	270



> 图2 边坡3#A 削坡前地层结构图

> Fig. 2 Stratigraphic structure of slope 3#A before slope cutting



> 图3 边坡3#B 削坡前地层结构图

> Fig. 3 Stratigraphic structure of slope 3#B before slope cutting

全风化泥岩含水量较大时，物理力学指标降低明显，极易造成边坡失稳滑动。此外，根据评价分析^[6]，场地地下水对砼结构及钢筋砼结构中的钢筋具有微腐蚀性。

三、边坡治理

(一) 边坡稳定性分析

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)^[6]，确定边坡3#A、边坡3#B的安全等级确定为一级。一般工况情况下边坡稳定安全系数 F_{st} 不应小于1.35，校核工况(地震工况)边坡稳定安全系数 F_{st} 不应小于1.15，校核工况(浸水工况)边坡稳定安全系数 F_{st} 不应小于1.10。根据边坡的工程地质条件，结合表1各岩土层物理力学指标，采用理正边坡综合治理分析软件对削坡未支挡工况下边坡的稳定性和剩余下滑力进行分析计算，计算结果见表2。

(三) 水文地质条件

场地静止水位埋深约0.0~16.5m，水位随季度变化较大，变化幅度为1.5~2.0m。场地内地下水赋存于①人工填土、②粉质黏土和③系列泥岩中，为裂隙水和孔隙水组成的混合水，黏性土及

结果表明，在边坡削坡未支挡的一般工况下，边坡3#A、边坡3#B均不足1.35，为欠稳定和欠稳定状态。在浸水工况下，边坡稳定性大幅下降，表明坡体稳定性受地下水升降或降雨影响显著。此外，边坡3#B在各个工况下的稳定安全系数均不足1.0，表明其开挖风险大。因此，为保证场地永久性边坡稳定以及山顶电塔、坡下拟建建（构）筑物等的安全使用，需对边坡3#A、3#B进行支挡设计，且支挡结构在设计中需要有效考虑截排水系统，使其满足安全要求。

表2 削坡未支挡工况下的稳定性和剩余下滑力分析

Table 2 Stability and residual sliding force analysis for the unsupported condition of the cutting slope

边坡号	稳定安全系数			剩余下滑力 kN/m			
	一般工况	地震工况	浸水工况	圆弧法		折线法	
				一般工况	一般工况	地震工况	浸水工况
3#A	1.046	1.045	0.794	761.128	161.288	0	425.337
3#B	0.747	0.746	0.478	1429.152	1407.919	1095.845	1745.637

(二) 选型分析

挖方边坡可以选择的支护结构主要有重力式挡墙、锚杆（索）挡墙、抗滑桩等支挡措施；开挖卸荷堆载反压等减小应力应变提高稳定性的削坡方案；坡面截排水和坡体内截排水措施。挖方边坡有条件应以削坡方案为主，削坡方案满足稳定性要求的基础上再辅以截排水措施进行治理；若削坡方案不能满足变形和稳定性的要求，应采取抗滑桩、锚索和挡墙等支挡措施，这样才能做到经济合理。本项目综合考虑工程地质条件、地下水影响、边坡高度、可利用的放坡条件、边坡的保护对象等因素，先验算了纯削坡减载方案，论证发现边坡高度太高，放坡空间有限，采用纯削坡减载方案不能满足安全要求，故需要考虑使用多形式联合支挡结构，以满足其高边坡的稳定性要求。在组合支护结构中，常用的支挡部件包括挡土墙、抗滑桩、锚杆（索）和格构梁等。首先，抗滑桩嵌入深度较大，相较于挡土墙更能有效控制坡体的深层滑移，抗滑桩桩体刚度较大，提供良好的抗弯支撑，使整个支护体系更加稳固。其次，锚杆（索）适用于多种土体和岩体，特别适用于坡体浅层滑动控制，且锚杆（索）具有较好的灵活性，可以根据实际情况调整其布置方式。最后，基于坡体排水系统的布置、防止坡体表层土石剥落、增强坡面和坡体浅层的稳定性，可在组合支挡结构中加入格构梁。

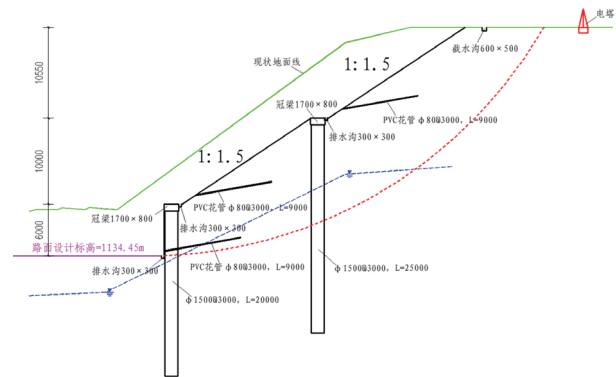
分台支挡是一种常用的高边坡支护方式，尤其适用于高度较高、地质条件复杂的边坡。分台支护通过将坡体分段、降低单层边坡的高度，可以有效提高了边坡的自稳能力。分台支挡也为组合支挡提供了便利的条件，不同土层和高度的支护需求各异，分台设计可以根据坡体土层的特点布置不同的支护结构，形成多层次、多类型的支挡形式，优化了整体设计。此外，在坡体较高的情况下，采用分台阶形式施工，可以有效降低每一台阶的施工难度。而抗滑桩、锚杆、格构梁等支挡部件各具优势，相互合理组合能够在复杂地质条件和多变工况下确保边坡的长期稳定性。

综上分析，组合支挡和分台支挡在边坡3#A、3#B的支挡设计中具有必要性、合理性和可行性。

(三) 具体方案设计

根据分析论证和计算后，本项目采用了在放坡的基础上采用抗滑桩、锚索和截排水等综合治理措施。边坡3#A、3#B分别采用如下治理措施：

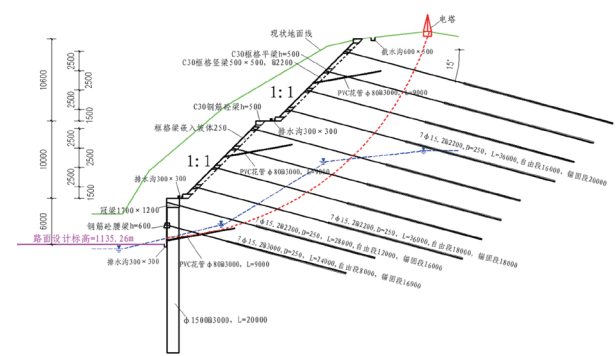
(1) 边坡3#A：如图4所示，采用组合支挡结构和分两台支挡措施。上台约1:1.5削坡，坡体高度约10.6m，坡面内植被种草，分级平台处设置 $\phi 1500@3000$ 的抗滑桩，桩长25m；下台约1:1.5削坡，坡体高度约10.0m，坡面内植被种草；坡脚处设置 $\phi 1500@3000$ 的抗滑桩，桩长20m，桩体高出设计标高6m。



> 图4 边坡3#A支挡设计

> Fig. 4 Slope 3#A support design

(2) 边坡3#B：如图5所示，采用组合支挡结构和分两台支挡措施。上台约1:1削坡，坡体高度约10.6m，采用框格梁预应力锚索进行支挡，框格梁方格坡面内植被种草，锚索为4排 $7\phi 15.2@2200$ 的无粘结钢绞线，锚固体直径250mm，锚索长36m，自由段16m，锚固段20m，入射角度15°。下台约1:1.5削坡，坡体高度约10.0m，采用框格梁预应力锚索进行支挡，框格梁方格坡面内植被种草，锚索为4排 $7\phi 15.2@2200$ 的无粘结钢绞线，锚固体直径250mm，锚索长36m，自由段18m，锚固段18m，入射角度15°。坡脚处采用抗滑桩和2排预应力锚索进行支挡，抗滑桩为 $\phi 1500@3000$ ，桩长20m，桩体高出设计标高6m；上排锚索为 $7\phi 15.2@2200$ 的无粘结钢绞线，锚固体直径250mm，锚索长28m，自由段12m，锚固段16m，入射角度15°；下排锚索为 $7\phi 15.2@3000$ 的无粘结钢绞线，锚固体直径250mm，锚索长24m，自由段8m，锚固段16m，入射角度15°。其中，锚索轴向拉力标准值为700kN，预应力张拉值为735kN，锁定值为600kN。



> 图5 边坡3#B支挡设计

> Fig. 5 Slope 3#B support design

此外,边坡3#A、3#B坡顶设置截排水沟,尺寸为600mm×500mm,沟两侧应采取硬化封闭措施。坡脚设置场地内排水沟,尺寸300×300mm,并设置盖板。坡体设置 $\phi 80@3000$,长为9m的PVC花管作为泄水孔。边坡3#B框格梁马道底部设置排水沟,尺寸为300mm×300mm。

(四) 设计计算

根据各岩土层物理力学指标及上述边坡支挡措施,采用理正边坡综合治理分析软件进行分析验算,其结果见表3。

表3 边坡支挡后稳定性分析结果

Table 3 Stability analysis results after the slope support

边坡号	一般工况			校核工况稳定安全系数	
	稳定安全系数	桩身最大位移 (mm)		地震工况	浸水工况
		坡脚抗滑桩	分级平台处抗滑桩		
3#:5-5	1.401	3.24 (桩顶)	8.95 (桩顶)	1.399	1.145
3#:6-6	1.472	30.72 (桩顶)	-	1.471	1.160

结果可知,边坡3#A、边坡3#B在一般工况、地震工况和浸水工况下的稳定性均达到了规定标准,表明支护体安全性在放坡的基础上得到了大幅提升能满足要求。这也表明组合支挡结构、分台支挡方案在本项目是适用的,成功应对了挖方高边坡的复杂地质条件、地震荷载以及降雨浸水等不利因素。

(五) 方案注意事项及要点

(1) 在坡体开挖过程中应充分考虑时空效应的影响:遵循分区、分块、分层开挖的原则,减少边坡开挖期间无支护体系暴露时间、宽度和深度,将边坡开挖造成的周围设施的变形控制在允许的范围之内。

(2) 根据设计,边坡支挡结构施工时应分阶段进行施工,避免在同一时间段内进行大面积开挖或支护,以降低施工对岩土体

内应力应变的影响。

(3) 边坡开挖过程中,要严格做好降排水工程,边坡开挖至设计标高后应尽快进行基底检查、边坡封底。

(4) 后期场地使用期间应不定期检查,疏导边坡排水系统,清除沉积物和杂物,保证其排水畅通。

(5) 支挡结构施工后应在坡面及时进行植被种草等生态恢复措施,促进土壤稳定和环境可持续性。

(6) 做好施工监测和运营期的监测和维护工作,岩土工程偶然因素和突发事件比较多,发现异常情况应及时分析和处理,避免事态扩大。

四、结语

(1) 在挖方高边坡的支护设计中,单一支挡形式一般难以满足复杂地质条件下的支护要求,需要采用多种治理措施联合使用。本文通过具体工程案例分析了组合支挡结构和分台支挡设计的边坡治理的设计思路和设计过程,提出了此类支护结构设计重点和难点。

(2) 在组合和分级支挡结构中,工程地质条件的分析、设计条件的应用和各种支护措施的布置显得尤为重要。其中削坡减载、坡面防护和截排水措施是基础措施,各种支挡方案都是根据其结构特点和适用范围在这些基础方案上做加法,解决这些基础方案尚未解决的问题。

(3) 合理的截排水系统,包括坡顶截排水沟、坡脚和坡面排水沟,以及坡体泄水孔,有效控制了水流对边坡稳定性的影响,减少了潜在的渗水和土体失稳风险,不仅增强了边坡的抗滑能力,还保障了在极端工况下的安全性。

参考文献

- [1] 梁瑞,张永安,王三德,等. 东乡新区挖方高边坡渗水引发滑坡机理研究[J]. 四川建材, 2024, 50(09):81-83.
- [2] 秦良彬,李学伟. 典型山地城市建筑挖方高边坡支护应用研究[J]. 中国勘察设计, 2017, (09):105-107.
- [3] 周志武. 探讨公路软土地基高边坡防护处理研究[J]. 中国住宅设施, 2020, (05):103-104.
- [4] 杨健,李金锋,孙浪,等. 千枚岩风化层高边坡稳定性评价研究[J]. 工程与建设, 2023, 37(04):1222-1231.
- [5] GB 50021-2001(2009), 岩土工程勘察规范[S].
- [6] GB 50330-2013, 建筑边坡工程技术规范[S].