

复杂地形地质条件下高边坡分层分段开挖顺序优化与时空效应分析

胡天雷

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]针对西部大型水电站工程复杂的地形地质条件下的高边坡开挖问题,对分层分段开挖的力学机制和时空效应形成机理进行了系统的分析。通过建立不同的开挖顺序数值分析方案,得到边坡应力重分布特征及变形时空演化规律。在此基础上又研究了分层开挖高度、分段开挖长度、开挖时序组合对边坡稳定性的影响机理。研究结果表明,边坡向临空侧最大位移具有明显的非线性变形响应特征,非线性变形曲线上存在一个重要的特征点以及由该点可以界定出的两个明显不同的变形阶段。根据以上分析,提出最优开挖顺序下的稳定性控制措施,可以给类似工程提供借鉴。

[关键词]高边坡; 分层分段开挖; 顺序优化; 时空效应

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19879

中图分类号: TV1

文献标识码: A

Optimization of Excavation Sequence and Spatiotemporal Effects of Layered and Segmented Excavation of High Slopes under Complex Terrain and Geological Conditions

HU Tianlei

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: A systematic analysis was conducted on the mechanical mechanism and spatiotemporal effect formation mechanism of layered and segmented excavation for high slope excavation under complex terrain and geological conditions in large-scale hydropower projects in western China. By establishing numerical analysis schemes for different excavation sequences, the stress redistribution characteristics and deformation spatiotemporal evolution laws of the slope are obtained. On this basis, the influence mechanism of layered excavation height, segmented excavation length, and excavation timing combination on slope stability was also studied. The research results indicate that the maximum displacement of the slope towards the free side has obvious nonlinear deformation response characteristics. There is an important characteristic point on the nonlinear deformation curve and two distinct deformation stages can be defined from this point. Based on the above analysis, stability control measures under the optimal excavation sequence are proposed, which can provide reference for similar projects.

Keywords: high slope; layered and segmented excavation; sequential optimization; spatiotemporal effect

引言

西部某大型水电站位于高山峡谷地带,工程中高边坡开挖较多。复杂的地形地质条件使边坡在开挖过程中受到很大的空间效应和时间效应的影响,合理的开挖顺序是保证边坡稳定控制的重要因素。目前国内外学者对于边坡开挖稳定性做了大量的研究,但是对于分层分段开挖顺序的系统优化研究还比较缺乏。岩土体开挖时边坡变形存在明显的时空相关性,合理的边坡开挖步序、空间尺度的选择可以充分发挥边坡开挖的三维变形效应以及边坡岩体强度逐渐衰减的时间效应。因此,对高边坡分层分段开挖顺序进行优化以及时空效应的分析具有重大的科研和工程应用价值。

1 工程地质条件与高边坡开挖特征分析

西部某大型水电站坝址区地形陡峭、河谷深切,岸坡坡度大多在 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$,局部陡崖段坡度大于 70° 。地层岩性主要是花岗岩、片麻岩,局部有软弱夹层和蚀变带。区域地质构造复杂,断层、节理裂隙发育,优势结构面组合关系对边坡稳定性起控制作用。水文地质情况比较复杂,地下水位埋深时高时低,降雨入渗比较普遍。高边坡开挖的特点是开挖规模大,最大开挖坡高大于 200m; 开挖面形态复杂,有多个马道、多个平台; 卸荷松弛效应明显,开挖后应力重新分布剧烈; 变形有明显的时空差异,不同部位的变形响应不一样。放坡开挖时,边坡的侧壁形式可以根据具体情况选择单一坡形、折线坡形、台阶坡形三种

形式,对于开挖深度大的边坡,在不同岩土层的分界处或者一定深度处应设置一级或多级过渡平台。

2 高边坡分层分段开挖理论基础

2.1 分层分段开挖力学机制

高边坡开挖本质上就是岩土体应力场的动态调整过程。开挖卸荷使原有的平衡状态被破坏,坡体应力重新分配。卸荷带内应力水平下降,卸荷带外深部岩体的应力集中程度变大。当各个层的开挖间隔时间较短时,边坡土体位移和最大剪切应变较大,不利于边坡稳定;而当各个层的土体开挖时间间隔合理,上层土体在下层土体开挖之前已经完成了应力重分布时,边坡土体位移和最大剪切应变小,有利于边坡稳定。分层开挖的关键是控制每次开挖释放的能量大小,分段开挖的关键是利用三维应力拱效应来限制卸荷范围。采用分层分段的方式可以保证边坡在开挖过程中有足够的自稳能力。

2.2 开挖时空效应形成机理

开挖时空效应分为时间效应和空间效应两个方面。时间效应指的是岩体力学参数随着时间的推移而逐渐衰减的流变性质,软弱夹层以及节理密集带在卸荷之后就会表现出蠕变现象。时间效应的强弱同岩体结构面发育程度有关,结构面越发育,蠕变速率就越快。根据斜坡变形破坏的时间演化规律来判断,当边坡变形量逐渐趋于稳定增长的时候,没有出现加速变形的迹象,说明边坡处于基本稳定状态。空间效应是开挖临空面形成之后应力重新分布的三维现象^[1]。边坡端部约束作用产生应力集中区,中部卸荷最充分。不同的开挖长度下边坡向临空侧最大位移有明显的非线性变形响应特征。空间效应的充分利用要靠控制分段长度,使端部约束的作用得到充分发挥。合理利用空间效应,在保证整体稳定的基础上可以提高开挖效率。

3 开挖顺序优化模型构建与分析

3.1 不同开挖顺序方案设计

根据西部某大型水电站工程地质条件建立三维数值分析模型。模型尺寸为坡高方向取实际开挖高度,纵向深度取2倍坡高,横向宽度取3倍坡高。边界条件设为底部固定约束、四周法向约束。岩体本构模型采用摩尔-库仑准则,物理力学参数由室内试验和现场测试综合确定。网格划分使用六面体单元,重点部位局部加密,单元总数约15万个。设计四种典型的开挖顺序方案,分别是传统的自上而下的顺序开挖方案、跳级开挖方案(先开挖奇数级,后开挖偶数级)、分区跳挖方案(横向分区交错开挖)和预留核心土法方案(先开挖周边,后开挖中部)。各个方案都按照10级开挖步序进行模拟,每级开挖高度为8~

10m,分段长度为40m,保证对比基准的一致性。用FLAC D对边坡工程在分步开挖过程中表现出的三维变形效应进行研究,比较分析各种方案的应力场、位移场响应特征。

3.2 边坡应力重分布特征分析

计算结果说明不同的开挖顺序对边坡应力重分布的影响很大。方案A应力调整最均匀,但是局部应力集中程度高;方案B、方案C可以有效降低应力集中峰值,但是应力路径更复杂;方案D在预留核心土阶段边坡稳定性最好,但是核心土清除时应力释放较快。从应力分布形态上来说,方案A的拉应力区主要分布在坡脚处,方案B、方案C把拉应力区分散到多个台阶边缘上,较好地减小了单一部位的应力集中。

表1 为不同开挖顺序方案下边坡关键部位应力特征对比

方案编号	开挖顺序	最大主应力峰值/MPa	最小主应力峰值/MPa	剪应力集中区范围/m
方案A	自上而下顺序开挖	8.6	-2.3	12.5
方案B	跳级开挖	7.8	-1.9	10.2
方案C	分区跳挖	7.2	-1.8	8.6
方案D	预留核心土法	8.1	-2.1	11.3

由表1可知,方案C在控制应力峰值、减小剪应力集中区的范围上比其他方案好,是由于分区跳挖使卸荷能量空间分散所致。方案C的最大主应力峰值比方案A低约16%,剪应力集中区的范围也比方案A小了约31%,说明横向分区交错开挖可以有效地使卸荷能量在空间上得到分散,从而防止应力在局部区域过于集中。

3.3 边坡变形时空演化规律分析

变形监测点设在各级马道、坡面上重要的部位。计算结果表明边坡最大水平位移在坡腰处而不是坡顶处,呈“中部鼓出”变形模式。这说明边坡在自重和侧向卸荷的共同作用下存在特定的变形机理^[2]。从位移等值线分布来看(图1),方案A位移集中区在坡面中部,方案C位移分布比较均匀,没有明显的带状集中现象。采用大型通用有限元分析软件对边坡地形、地质条件和开挖过程进行模拟,建立边坡开挖有限元计算分析模型,分析不同开挖时序下边坡变形响应。方案C的坡面最大位移比方案A小约25%,且位移沿坡高分布更均匀。方案B、方案D位移控制效果处于方案A、方案C之间,方案D在核心土清除阶段有位移突增的现象。时间效应分析可知,每级开挖之后要留出3~5天时间来完成应力调整和变形收敛工作,过早进行下级开挖会造成变形叠加。监测数据显示开挖间隔时间越合理,累计位移就越小。

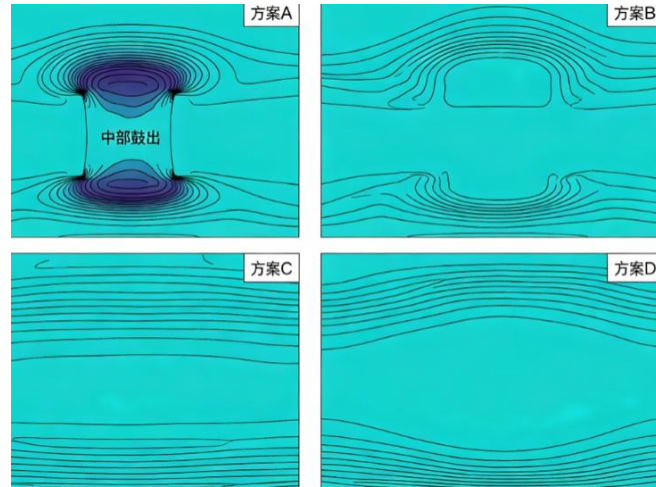


图 1 不同开挖方案下的边坡位移等值线分布图

3.4 开挖顺序优化评价与优选

根据应力控制效果、变形限制能力、施工可行性这三个方面的因素来建立开挖顺序优选的综合评价体系。评价指标有最大主应力峰值、最大位移量、塑性区体积比、施工工期、支护工程量等^[3]。各指标权重用层次分析法确定，应力控制效果、变形限制能力权重高，分别为 0.35、0.30，施工可行性、工期影响权重低。

表 2 为不同开挖顺序方案综合评价结果

评价指标	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
应力控制效果	一般	较好	好	一般
变形限制能力	一般	较好	好	较好
施工复杂度	低	中等	高	中等
工期影响	短	中等	较长	中等
综合推荐度	不推荐	可选用	优先选用	有条件选用

综合比较之后得出结论，采用缩短采煤长度、分段开挖、跟进回填、反压护坡的开采方式，不仅可以缩短边坡暴露时间，还可以充分发挥边坡开挖的三维变形效应。从综合评价结果可知，方案 A 施工简单、工期短，但是应力、变形控制效果不好，安全储备不够；方案 B、方案 D 在部分指标上较好，但各有所长；方案 C 综合得分最高，是安全性和施工可行性兼备的最优方案。方案 C（分区跳挖）控制应力、变形最好，可以作为西部某大型水电站高边坡开挖的推荐方案。

4 开挖时空效应响应及稳定性控制

4.1 分层开挖高度对边坡响应的影响

分层开挖高度属于决定边坡卸荷程度的关键参数。计算结果表明，当单级开挖高度小于 8m 时，坡脚应力集中程度低，边坡自稳性好；当开挖高度大于 12m 以后，坡脚剪应力急剧增大，塑性区贯通的风险增大。为了更清楚地反映分层高度的影响规律，设置 5m、8m、10m、12m、

15m 这五个工况进行对比计算。黏性土分段开挖长度取 10m~15m，分层开挖深度取 0.5m~1.0m，砂土、碎石类土分段开挖长度取 5m~10m，分层开挖深度取 0.3m~0.5m。岩质边坡单级开挖高度控制在 10m 以内。分层高度与位移的关系是非线性的，有临界高度。计算结果表明临界高度为 10m，当开挖高度小于该值时位移增长速率是 0.5~0.8mm/m，大于该值时位移增长速率突然增大到 2.0mm/m 以上。开挖高度小于临界值时位移增长缓慢，大于临界值后位移迅速增大。从塑性区分布可知，开挖高度大于 12m 以后，坡脚塑性区向上延伸与上部卸荷带相接，形成潜在滑动面。根据以上建议，西部某大型水电站高边坡单级开挖高度控制在 8~10m，软弱破碎带部位可降低到 6m。

4.2 分段开挖长度对边坡稳定性的影响

分段开挖长度决定三维应力拱效应发挥的程度。计算结果表明，分段长度增大时边坡端部约束减小，中部卸荷区范围变大。为了定量地揭示出这个规律，设定了 20m、30m、40m、50m、60m、80m 这六个分段长度的工况来进行对比分析。分段长度小于 30m 的时候，端部约束效应明显，中部最大位移只有连续开挖工况的 60%；分段长度大于 60m 以后，端部约束效应几乎消失。连续开挖工况（不分段）下，中部最大位移比分段长度 30m 工况大 67%。边坡向临空侧最大位移具有明显的非线性变形响应特点，非线性变形曲线上出现一个重要的特征点，并且可以根据这个特征点将变形分为两个不同的变形阶段^[4]。图 2 中该特征点对应的分段长度为 45m（图中红圈标记的点之前的位移变化比较缓慢，之后位移的变化比较快）。图 2 清楚地显示了非线性变化规律以及两个阶段的划分，因此建议分段开挖长度控制在 30~50m 之间，软

弱部位取小值。分段开挖时端部岩墙起着部分卸荷的作用，中部坡面受到一定的约束，三维应力拱效应得到充

分发挥。分段间留设岩墙为临时支撑，待相邻区段支护完成后再清。

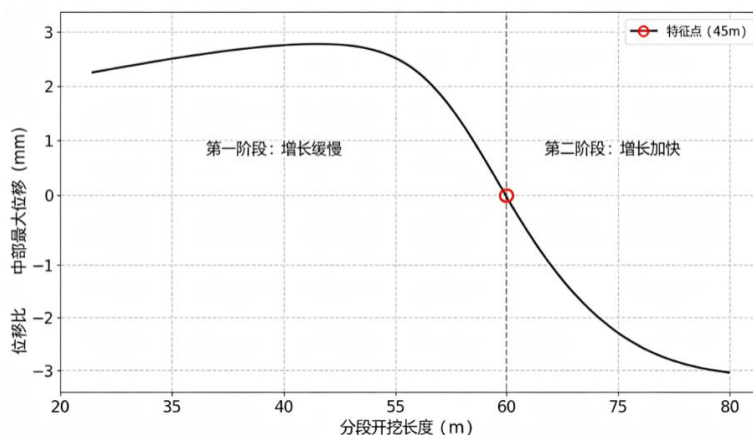


图2 分段开挖长度与中部最大位移关系曲线

4.3 开挖时序组合对边坡变形的影响

开挖时序组合由开挖顺序、间隔时间、相邻作业面高差控制三个部分组成。不同时间序列的边坡变形存在不一样的累积特性以及速率特性。为了评价各个因素影响的程度，设置了九个不同时序组合工况进行比较，研究间隔时间（1天、3天、5天）、高差控制（一级台阶、二级台阶、三级台阶）的组合效应。时空效应分析显示，使用分区跳挖加错时作业的时序组合可以很好地控制变形。相邻分区开挖时间间隔不得小于3天，保证先开挖区的应力重新分布基本完成。计算结果表明，间隔1天的变形累积量比间隔3天大35%，间隔5天与间隔3天相比改善不到5%，所以3天是经济合理的间隔周期。高差控制上相邻作业面高差不大于两级台阶高度，防止形成高陡临空面。高差大于两级台阶时，下部开挖面对上部坡脚的扰动明显增大，位移速度提高25%以上。通过监测数据可以得知合理的时序组合可以把累计位移降低30%~40%。另外先开挖软弱带后开挖硬岩区的时序安排，能防止应力调整时出现大的变形，进而提高边坡整体稳定性。

4.4 最优开挖顺序下稳定性控制措施

根据方案C（分区跳挖）的优化结果，给出如下稳定性控制措施，即开挖过程控制，严格按照分区、分层、分段、跳挖的原则进行，单区开挖长度不大于40m，单级高度不大于10m，相邻区段高差不大于15m。每级开挖完成后立即进行系统锚杆、喷混凝土支护，封闭暴露面。建立以地表位移监测、深部位移监测、锚杆应力监测、地下水监测为主要内容的综合监测系统。加强对水库蓄放水过程中地表裂缝巡视以及监测数据的分析，位移速率连续三日

大于2mm/d或者累计位移大于预警值时，立即停止施工并采取加固措施。动态优化设计就是根据现场监测数据的反馈来动态调节开挖参数以及支护时机。软弱带部位加密监测断面，必要时缩短分段长度或者增设临时支撑。

5 结语

高边坡分层分段开挖时，应力重分布、变形演化存在明显的时空联系特点，科学应用三维变形效应、时间效应可以较好地控制边坡卸荷变形。不同的开挖顺序对边坡应力场、位移场的影响很大，方案C（分区跳挖）在控制应力集中峰值、限制变形发展方面综合效果最好，可以作为西部某大型水电站高边坡开挖的推荐方案。分层开挖高度和分段开挖长度都有临界控制值，单级开挖高度控制在8~10m，分段开挖长度控制在30~50m，软弱部位取小值。最优开挖顺序下稳定性控制应该采用过程控制、监测预警、动态优化三者相结合的技术手段。

[参考文献]

- [1]唐小军,袁仕贵.开挖间隔时间对铁路高边坡稳定性影响[J].四川水泥,2022(5):208-209.
- [2]李忠,杨俊,曹永春.滑坡地带多级路堑边坡阶梯开挖三维数值模拟[J].甘肃科学学报,2014,26(6):116-120.
- [3]秦超.高陡边坡土石方开挖安全控制技术与支护方案研究[J].水利科技与经济,2026,32(3):136-139.
- [4]叶冰霜,陈正峰,符文熹.大型土岩边坡开挖稳定性研究[J].地质灾害与环境保护,2025,36(1):39-46.

作者简介：胡天雷（1989—），男，工程师，毕业于中国石油大学，现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，项目安全总监，从事大型水电站项目安全管理工作。