

基于预应力锚索-格构梁协同作用的陡倾层状边坡支护优化研究

林 雄

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]陡倾层状边坡是水利水电工程中存在的较为普遍但较难处理的一类边坡。本论文以某 XX 水库枢纽工程建设为契机, 围绕库区左岸陡倾层状边坡稳定性的研究展开, 对预应力锚索—格构梁联合支护体系协同工作原理做了系统的研究。在理论计算以及数值仿真以及工程实例的基础上, 探索出预应力锚索与格构梁间的力传递规律及对边坡应力场的影响作用。结合陡倾层状边坡的地基结构特点和变形破坏机理, 进行锚索参数选择、格构梁结构设计及联合支护布置方式优化, 实现经济性与安全性并重的目标。研究表明: 预应力锚索和格构梁共同作用能有效地控制边坡的位移和改善其应力状态, 格构梁的约束作用使得锚索的锚固力更加均匀传到边坡上表面, 增强了整个边坡的稳定程度; 经过优化锚索间距由原先的 4.0m 变成了现在的 3.5m, 锚固段也由原来的 8.0m 变成了现在的 9.0m, 格构梁截面尺寸由原来的 300mm*400mm 变成了现在的 350mm*450mm, 安全系数由原来的 1.18 上升到了现在的 1.35, 满足了设计规范的要求。

[关键词] 预应力锚索; 陡倾层状边坡; 支护优化; 数值模拟

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19409

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Optimization of Support for Steep Layered Slopes Based on the Synergistic Effect of Prestressed Anchor Cables and Lattice Beams

LIN Xiong

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

Abstract: Steep layered slopes are a common but difficult type of slope in water conservancy and hydropower engineering. This paper takes the construction of a XX reservoir hub project as an opportunity to conduct research on the stability of steep layered slopes on the left bank of the reservoir area, and systematically studies the collaborative working principle of the prestressed anchor cable lattice beam joint support system. Based on theoretical calculations, numerical simulations, and engineering examples, explore the force transmission law between prestressed anchor cables and lattice beams, and their impact on the stress field of slopes. Based on the characteristics of the foundation structure and deformation failure mechanism of steep layered slopes, the selection of anchor parameters, design of lattice beam structure, and optimization of joint support layout are carried out to achieve the goal of balancing economy and safety. Research has shown that the combined action of prestressed anchor cables and lattice beams can effectively control the displacement of slopes and improve their stress state. The constraint effect of lattice beams makes the anchoring force of the anchor cables more evenly transmitted to the upper surface of the slope, enhancing the stability of the entire slope; After optimization, the spacing between anchor cables has been changed from 4.0m to 3.5m, the anchorage section has also been changed from 8.0m to 9.0m, the cross-sectional size of the lattice beam has been changed from 300mm * 400mm to 350mm * 450mm, and the safety factor has been increased from 1.18 to 1.35, meeting the requirements of the design specifications.

Keywords: prestressed anchor cable; steeply inclined layered slope; support optimization; numerical simulation

引言

我国内地西南地质环境十分复杂, 斜坡状坚硬岩边坡遍布于众多的水工建筑之中, 该类边坡稳定性的研究一直以来都是水利水电工程界的研究重点。某 XX 水库大坝枢纽位于广西壮族自治区来宾市武宣县境内, 坝型为沥青混凝土心墙堆石坝, 最高坝顶高程 66m, 总库容 1089.7 万 m³, 是一座主要用来解决城区居民生活饮用水需求及农田灌溉等多种综合利用为主的小(一)型水利工程。由于该水库左岸存在着大面积的斜坡状坚硬岩质边坡, 其岩石走向几乎呈直立状态, 即岩层走向接近 90°, 岩体中含有大量裂隙结构面、节理等, 因此该边坡的稳定性较差, 给

整个工程的安全带来了隐患。

预应力锚索-格构梁组合结构是近些年用于边坡加固工程中采用的新式抗滑支挡结构, 在边坡加固工程中采用的一种抗滑支挡结构就是格构锚固结构, 在这个格构锚固结构中结合了格构梁护坡及锚固工程两种形式而构成的一种新的抗滑支挡结构既可以对深层进行加固也可以对浅层进行处理, 非常适合土质边坡、松散堆积体滑坡的治理, 这是一种常用的应用广泛的抗滑支挡结构。预应力锚索-格构梁组合结构是近几年来用于防止滑坡、边坡加固的一种新型结构措施, 但是关于陡倾层状边坡中锚索与格构梁相互协作的工作原理系统的研究还比较少, 尤其是关

于锚固参数的选择以及格构梁结构的选择方面没有具体的量化数据。大型高边坡锚固模型的研究结果显示,根据锚索实际布置情况在模型中采用缆索单元来模拟锚索群、根据实际情况以梁单元模拟格构梁的方式,为协同作用的数值分析提供了解决思路^[1]。

1 理论基础

预应力锚索-格构梁复合支护结构涉及岩土力学、结构力学、弹性力学等多个领域相关的知识。Winkler 弹性地基梁理论作为对格构梁受力分析的重要理论基础,在此理论中格构梁被看作是在其上放置了弹性地基的梁,其地基反力与梁挠度之间呈线性关系;其认为当格构梁由于锚索预应力的作用而发生弯曲时,坡面岩土体会产生相应的弹性抵抗力,锚索锚固力是通过梁身以剪力及弯矩的形式传至地基之上,而关于格构梁的节点部位,则可以将其近似为受集中力的作用下的弹性地基梁,采用无限长梁或者有限长梁来对其进行力学分析。

有限元数值仿真手段是进行复杂构件内力计算的有效办法。目前应用较多的计算模型有:用索元描述预应力锚索束;梁单元代表格构梁;实体单元表示岩土介质以及用接触单元来表示结构与岩土之间的相互作用等。三维非线性有限元分析方法可以有效地反映岩土材料的非线性特征以及结构的空问受力情况。

2 预应力锚索-格构梁协同作用机理

2.1 锚索与格构梁的荷载传递机制

预应力锚索-格构梁复合体系依靠锚索、格构梁共同协作来达到对边坡的加固的目的。其中锚索锚固部分埋设在稳定的地层中,提供深部锚固力;自由段传输预应力传给坡面;受拉端锚具把荷载集中在格构梁节点上^[2]。格构梁起到了荷载传递及扩散的作用,把节点上的集中力转化为边坡大区域内的剪力、弯矩等。

基于 Winkler 弹性地基梁模型,格构梁锚索预应力作用下的挠曲变形可以用微分方程表达式表示出来:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kbw(x) = q(x)$$

其中, EI 为格构梁抗弯刚度, w(x) 为挠度函数, k 为地基反力系数, b 为梁宽, q(x) 为分布荷载。锚索预应力在节点上产生集中力,在梁身上传递成为坡上分散力,大大扩展了加固空间。

2.2 协同作用对边坡应力分布的影响

锚索和格构梁的作用机理主要有三个方面,一是锚索产生深部锚固力,把滑体和稳定岩基连接在一起;二是格构梁将锚索局部受力转变为坡面分布力从而减轻了局部应力集中的程度;三是格构梁对坡面的限制作用,防止表层滑动。

由图 1 可知,是否有格构梁对边坡应力的影响差异表现为:只设置单根锚索的状态下在锚固点附近产生较大的

应力密集区,在增加了格构梁之后,应力分布更加稳定均衡,在格构梁节点位置应力最高值下降了大约 25%~30%,坡面的最大位移量也减小了约 40%。格构梁的限制作用让锚杆预应力可以更好地传达到被加固的整体范围内,大幅度提高了支护效果的整体强度。

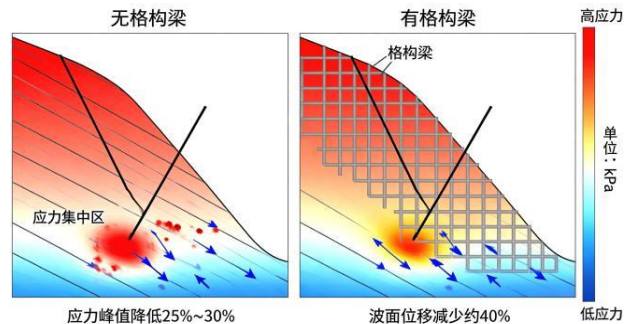


图 1 有无格构梁条件下边坡应力分布对比

3 陡倾层状边坡变形与稳定性特征

3.1 地质结构与边坡破坏模式

某一 XX 水库坝址处在黔江支流东河水系之上,坝址两岸地势不对称,左岸 244.0m 高程以下地形较为陡峭,自然坡度约为 75°,从 244.0m 高程直至坡顶自然坡度约为 26°,是典型的侵蚀型山地山谷地形。坝区出露岩层主要为泥盆系下统之莲花山组、那高岭组以及泥盆系中统之郁江组和第四系;左岸岸坡地形相对平缓,有冲洪积及残坡积覆盖层。

水库左岸分布陡倾层状边坡的地层岩性主要是粉砂质砂质泥岩以及泥质粉砂岩等碎屑岩,属软岩—较软岩。岩层产状为倾向 320°、倾角 65°~78°,裂隙十分发育,把岩体分割成块状结构。表 1 给出了这个边坡的相关物探力学指标。

表 1 边坡岩土体主要物理力学参数

岩性	重度 γ (kN/m ³)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	弹性模量 E (MPa)	泊松比 μ
泥质粉砂岩	24.5	180	32	1.2×10 ³	0.28
砂质泥岩	23.8	150	28	0.9×10 ³	0.30
残坡积土层	19.5	25	18	30	0.35
结构面(层面)	-	50	22	-	-

根据地质情况判断,此边坡潜在破坏类型主要是沿节理面的顺层滑动破坏,在局部有可能发生弯曲倾倒破坏,复杂层状高边坡变形研究中,顺层滑动及倾倒变形是陡倾层状边坡的代表性破坏方式,坡体软弱层面及节理和后缘陡倾卸荷张裂隙对边坡稳定起着控制作用。

3.2 层状结构面控制作用分析

层面构造是造成该区边坡稳定问题的主要原因,层面倾角大,切割性好,形成潜在的滑动面,在现场勘查中,可见坡面上发育有两组主要的节理, J1 组走向大致平行坡向,倾角约为 70°,属于层面结构面; J2 组走向近直

交 J1, 倾角约为 55°。这两组结构面组合将岩体切成楔形的块体, 削弱了边坡的整体稳定性。

结构面强度明显小于完整的岩石体, 是边坡变形的薄弱部位^[3]。层面黏聚力仅为原岩体的 1/3 左右, 内摩擦角为原岩体约 70% 左右, 在水库蓄水前结构面强度已经很低的状态下, 随着库水位的变化产生的孔隙水压力的变化使得结构面强度进一步下降, 导致边坡变形严重。

3.3 边坡稳定性影响因素

急倾斜层状岩质边坡的稳定性是由多种因素共同决定的, 主要的影响因素有以下几点: ①岩层产状及坡向的关系: 岩层走向与边坡走向之间的夹角小于 30° 时, 则是顺向坡, 对边坡很不利; ②结构面的发育情况: 层面整体连续性较好, 节理发育较为密集约在每米 2~3 条之间, 岩体的完整程度较低只有 0.45~0.55; ③风化的作用: 强风化层厚度介于 5~12m 之间, 风化圈宽度达到 15~20m 左右, 使岩体内质量下降很多; ④水流的作用: 库水位波动造成动水压力、浮托力的变化, 使得结构面软化^[4]。钻孔注水试验表明, 洪积层漂石、卵石注水段渗透系数均值是 4.89E-02cm/s 属强透水岩土层, 地下水对边坡稳定不利因素不能不考虑。⑤地震作用: 工程区地震基本烈度为 VII 度, 地震动峰值加速度为 0.10g。

3.4 数值模拟方法选取与建模

利用 FLAC 3D 有限元软件建立起一个三维数值模型。建模尺寸为: 沿山坡走向 (X 轴方向) 150m; 垂直于坡向 (Y 轴方向) 80m; 竖直方向 (Z 轴方向) 100m; 共划分为单元 85000 多个等。岩块使用 Mohr-Coulomb 弹塑性材料模型, 结构面用 Interface 单元进行模拟。锚索用 Cable 单元进行模拟, 格构梁用 Beam 单元进行模拟。

边界条件设定: 模型底部进行固支, 边界周围进行法向支承。计算工况有: 天然状态、蓄水状态及地震工况三种情况, 在天然工况下初始应力场取自重力场。从图 2 可以看出是三维数值模型图。

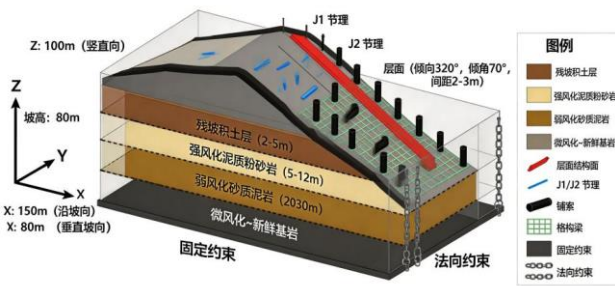


图 2 某 XX 水库左岸边坡三维数值模型

4 支护结构优化设计与分析

4.1 锚索参数优化

使用正交试验法对锚索长度、锚固段长度、锚索间距及预应力大小等 4 个参数进行了优化, 建立 4 因素 3 水平正交表 L₉ (3⁴)。共 9 组试验。在各方案条件下用数值模

拟求出边坡的安全系数和坡面位移, 在此过程中把安全系数最大化作为选择最优组合的目标。

改进的结果是: 锚索间距对支护的效果起到最大作用的因素, 约占到 38%; 锚固段长度其次为 27%; 预加力大小与锚索全长的影响不大。综合考虑经济技术方面, 确定最佳锚索参数如下表 2。

表 2 锚索参数优化前后对比

参数	优化前	优化后	变化幅度
锚索长度 (m)	24.0	26.0	+8.3%
锚固段长度 (m)	8.0	9.0	+12.5%
锚索间距 (m)	4.0	3.5	-12.5%
预应力设计值 (kN)	800	900	+12.5%

预应力锚索与混凝土框格梁相结合加固处理的方法在斧子口水电站等项目中已经实现了应用, 证明改进后的锚索参数具有技术和可行性。

4.2 格构梁结构形式优化

格构梁的结构类型对承载能力的影响及所用钢筋量有着至关重要的影响。比较了矩形、T 形、工字形等几种截面格构梁, 并探讨不同配筋率与不同的混凝土强度等级相结合的方案。

数值分析的结果见下表 3。优化分析得出结论: 格构梁的位置设置对边坡稳定性有很大的作用, 适当增大格构梁截面刚度能提高荷载分散效果, 但是过分增大截面会造成浪费以及施工难度加大等问题出现。

表 3 格构梁结构形式优化方案对比

方案	截面形式	截面尺寸 (mm)	配筋率 (%)	混凝土等级	最大挠度 (mm)	用钢量 (kg/m)
方案 1	矩形	300×400	0.8	C30	12.6	45.2
方案 2	矩形	350×450	0.8	C30	8.3	57.8
方案 3	T 形	350×450	0.8	C30	9.1	53.4
方案 4	矩形	350×450	1.0	C35	7.2	68.5

综上所述比较, 方案二 (矩形截面 350mm×450mm、配筋率 0.8%、C30 混凝土), 是最合理的结构形式, 在保证沉降量的要求下较经济。

4.3 协同布置模式优化

锚索与格构梁相辅相成布局包含锚索节点位置、格构梁网格大小以及梁—岩面联接形式等相关因素, 在改进研究的时候包含了如下几个方案: 方案 A: 锚索节点处在格构梁节点上, 格构梁网空间距为 3.5m×3.5m; 方案 B: 锚索节点处在格构梁节点上, 格构梁网空间距为 4.0m×4.0m; 方案 C: 锚索节点处在格构梁跨间中, 格构梁网空间距为 3.5m×3.5m。

仿真结果显示: 方案 A 的安全系数最大 (1.35)、方案 B 其次 (1.26)、方案 C 最小 (1.22)。锚索节点处在格构梁相交处的时候, 加载传力链条最短, 受力最均匀; 格构梁网孔大小设置在 3.5m 错 3.5m 的情况下, 既可以满足

足够的加固强度，同时也不会出现过多的材料损耗。所以选择方案 A 作为最佳配合方案。图 3 是优化后支撑框架布置方案图。

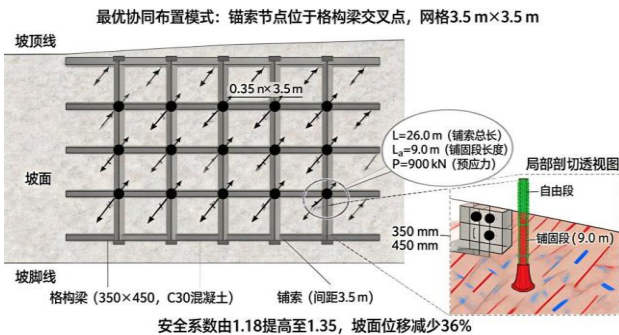


图 3 预应力锚索-格构梁协同支护结构布置

4.4 经济性与安全性综合评价

根据以上优化结果对优化前后支护方案进行了综合比较分析，优化方案的安全性及经济性较之前有较大提高，其比较如表格所示。

表 4 支护方案优化前后综合对比

对比项目	优化前方案	优化后方案	变化
安全系数（天然工况）	1.18	1.35	+14.4%
安全系数（蓄水工况）	1.06	1.22	+15.1%
安全系数（地震工况）	0.98	1.14	+16.3%
坡面最大位移（mm）	28.6	18.3	-36.0%
锚索用量（m）	100%	108%	+8%
混凝土用量（m ³ ）	100%	112%	+12%
综合造价	100%	108%	+8%

改进后的方案的安全系数都符合规定标准（各工况安全系数≥1.20），坡面位移得到很好抑制，总体造价只提高了大约 8%，格构锚固结构既能做到深层加固又能兼顾浅层滑坡的优点被优化方案很好地体现出来了，在安全性和经济性上都做到了很好协调。

5 结束语

本文基于某 XX 水库左岸陡倾层状边坡工程实例，在此基础上对预应力锚索—格构梁组合支护结构耦合作用及其支护效果进行了系统的探讨。得出如下结论：①锚索、格构梁之间形成共同作用体，通过传递力并分散应力达到协调配合的效果；格构梁采用 Winkler 弹性地基梁理论对荷载进行计算分析，可以使得锚索集中荷载变成均匀分布荷载，应力集中程度下降 25%~30%，位移下降约为 40% 左右；②陡倾层状边坡的稳定性一方面取决于岩层产状、结构面发育情况、风化卸荷以及水的影响，另一方面是由于顺层滑动导致的整体失稳，而且蓄水之后孔隙水压的变化又会加大边坡变形的风险。③运用正交试验以及数值模拟法得出了最合理的锚杆参数以及格构体系结构形式，在其上采用联合布置方案即锚杆结点处在格构梁交汇处且格构梁间距为 3.5m×3.5m 时较为适宜。④经过优化边坡的安全系数由原有的 1.18 提升至 1.35，而坡顶水平位移也下降了 36%，工程总造价只上升了 8% 左右，达到了较好的安全性和经济性之间的协调。后期可以进行一些长期观测数据的反馈来观察它的支护作用是否能长期维持以及借助智能化监测设备构建边坡的安全警告系统等。

【参考文献】

- [1]虞晴川.用于水利工程边坡支护的聚丙烯纤维改性喷射砂浆抗压强度研究[J].江西水利科技,2026,52(1):8-12.
- [2]何琳琳.边坡支护技术在土木工程施工中的运用分析[J].散装水泥,2026(2):106-108.
- [3]宋有东.水库溢洪道边坡锚固支护施工技术研究[J].水上安全,2026(1):172-174.
- [4]符先明,易帆,洪佳民.加筋土在高陡边坡工业建筑上的应用[J].科技与创新,2026(2):11-15.

作者简介：林雄（1991.2—），男，毕业院校：成都大学，所学专业：材料成型及控制工程，当前就职单位：中国水利水电第十二工程局有限公司，职务：项目副经理，职称级别：高级工程师。