



基于 Geo-slope 软件的码头陆域顺层岩质高边坡分级加固计算

邓方明¹, 虞 霈², 李 维³

(1. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 针对山区河流码头陆域开挖形成高 30~50 m 顺层岩质边坡的加固处理问题, 根据加固设计方案中格构锚索和抗滑桩的排间距, 采用 Geo-slope 软件, 在摩根斯坦-普拉斯法的基础上, 建立顺层岩质高边坡加固计算模型, 计算多组不同排间距不同工况下的边坡稳定安全系数, 从而选定经济安全的边坡加固组合方案。结果表明, 格构锚索与抗滑桩加固对边坡整体安全系数的影响大小取决于支护结构在整个滑面上产生抗力的大小。

关键词: 码头陆域; 顺层岩质边坡; Geo-slope 软件; 抗滑桩; 格构锚索; 分级加固

中图分类号: U 653.5; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0066-05

Gradual reinforcement calculation of bedded rock high slope in wharf land area based on Geo-slope software

DENG Fang-ming¹, YU Fei², LI Wei³

(1.Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China;

2.CCCC Water Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100007, China;

3.Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Aiming at the problem that the mountainous rivers terminal land excavation forms 30 m to 50 m high bedded rock slope reinforcement, according to the lattice anchor and anti-slide pile in the reinforcement design of row spacing, we use the Geo-slope software, establish the high bedded rock slope reinforcement calculation model based on the Morgan Stanley-Plath method, calculate the multiple sets of different row spacing of slope stability safety coefficient under the different working conditions, and select slope reinforcement combination of economic security. The results show that lattice anchor cable anchor and anti-slide pile reinforcement effect on the overall safety factor of slope depends on the size of the supporting structure in the whole slip surface resistance.

Keywords: wharf land area; bedded rock slope; Geo-slope software; anti-slide pile; lattice anchor cable; gradual reinforcement

三峡大坝建成蓄水后, 长江上游段航道通航条件得到极大改善, 航运日益繁忙, 并随着川渝共建长江上游航运中心的快速发展, 长江上游大

型专业化港口码头建设工程逐渐增多。山区河流地形地貌变化大、地质复杂、河岸高差大, 严重限制大型码头陆域纵深尺度, 极大影响港口码头

整体功能设计。为了解决此类问题, 在码头建设中通常采用开挖后方陡峭岸坡形成码头陆域, 以满足平面布置要求, 这就造成陆域后方形成 30~50 m 的高边坡需要加固处理, 以岩质边坡最为常见, 其中顺层滑动的岩质高边坡加固难度最大。因此, 研究码头陆域后方顺层滑动岩质高边坡加固处理已成为长江上游山区河流码头建设中不可忽视的问题。

边坡加固处理主要有削坡减载、抗滑挡土墙、抗滑桩、锚杆与锚索、格构加固等方法, 本文根据宜宾某码头陆域顺层岩质高边坡工程为计算分析实例, 通过削坡减载、格构锚索、抗滑桩等方法联合加固出现局部滑塌的顺层岩质高边坡, 采用 Geo-slope 软件计算分析其稳定安全系数, 分析不同加固结构对安全系数的影响, 选取经济合理的边坡加固方案。

1 计算方法

目前, 边坡稳定计算定量分析方法主要有极限平衡法和数值分析方法。极限平衡法有瑞典条分法、简化毕肖普法、摩根斯坦-普拉斯法等。瑞典条分法、毕肖普法都假定滑动面为圆弧, 摩根斯坦-普拉斯法可用于任意形状的滑动面, 本文工程实例边坡滑动面为平面, 故采用摩根斯坦-普拉斯法计算较合理。摩根斯坦-普拉斯法首先对任意曲线形状的滑裂面进行分析, 导出满足力的平衡即力矩平衡的微分方程式, 然后假定条间力的倾角 β_i 的正切值为某一函数分布, 即式(1), 根据整个滑动土体的边界条件求出问题的解^[1]。此法满足各土条力的主向量为零和主矩为零的静力平衡条件。

$$\tan\beta_i = \lambda f(x_i) \quad (1)$$

式中: $f(x_i)$ 为条间力函数; λ 为比例系数, 在计算过程中确定。

2 工程概况

2.1 基本情况

该码头位于长江上游左岸宜宾市境内, 建设 3 个 1 000 吨级散货泊位, 设计年吞吐量 550 万 t, 陆域纵深约 450 m。码头陆域通过开挖山体形成, 顺水流方向 K0+100~K0+956 段边坡开挖长度约 856 m, 其中 K0+246~K0+466 段长 220 m 范围内边坡最大开挖高度达 45 m, 根据地质勘探报告, 陆域后缘边坡为顺层岩质高边坡, 主要由砂岩和粉砂质泥岩组成, 其中泥岩内部、砂岩与粉砂质泥岩交界处存在连通的顺层向破碎带及泥化软弱夹层等软弱层面, 主要存在 3 条潜在滑动带, 如图 1 所示。

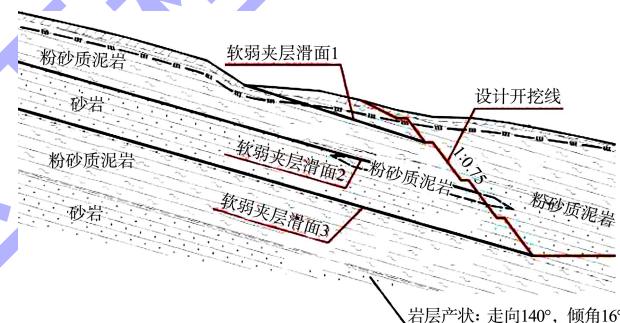


图 1 地质断面

2.2 原边坡支护设计方案

原设计方案根据边坡稳定计算及剩余下滑力计算结果, 对存在软弱夹层段的岩质高边坡采用预应力格构锚索分 4 级支护, 其余高 20 m 以下岩质边坡采用格构锚杆支护、土质边坡采用格构三维网支护。根据剩余下滑力不同, 预应力锚索分别有 10 束钢绞线、锚索间距 3.0 m×3.0 m(横间距×纵间距)以及 9 束钢绞线、锚索间距 4.0 m×4.5 m 两种, 格构锚杆长 3 m、间距 3.0 m×3.7 m, 格构植草护坡为边长 1.5 m 的菱形方格, 支护设计断面见图 2。

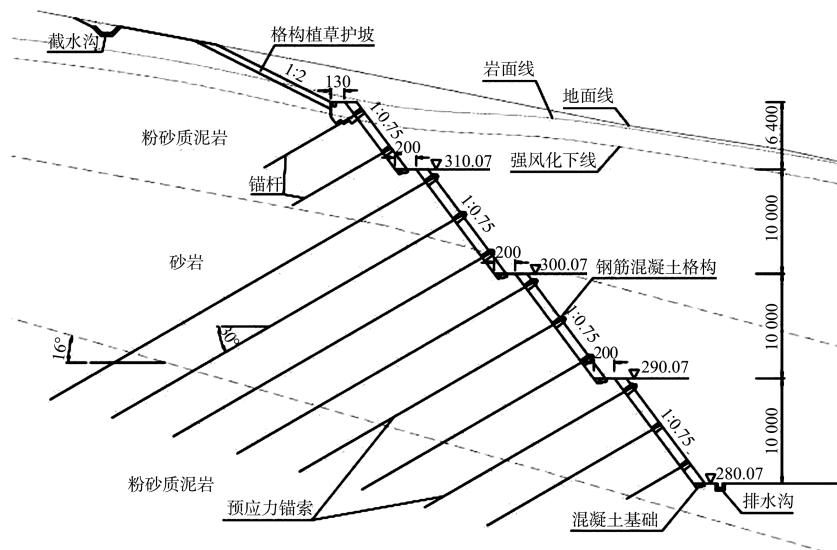
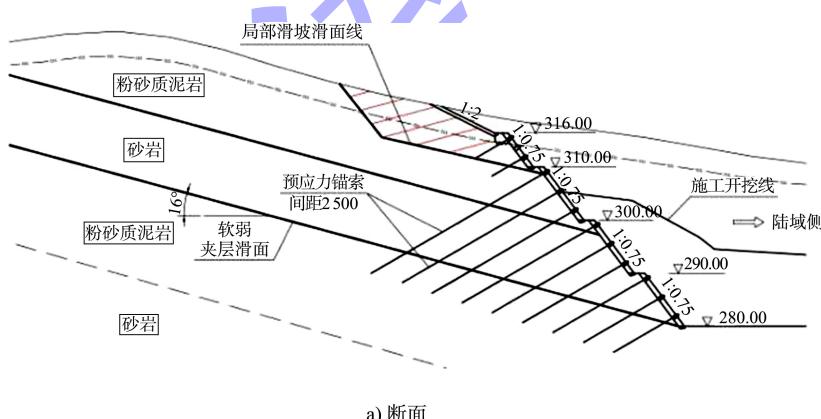


图 2 原边坡支护设计断面 (尺寸: mm; 高程: m。下同)

2.3 施工过程边坡局部滑塌

施工期恰逢持续强降雨，边坡顶部覆盖层及岩体软弱夹层内含水量迅速增加，导致岩体内部裂缝、泥化夹层、软弱结构面饱水至饱和，抗剪强度指标降低，K0+367~K0+496 段边坡支护由上

而下开挖至第 3 级格构锚索护坡中部时，边坡顶部出现数条 6~10 cm 宽裂缝，且锚杆格构顶部存在 8.5 cm 垂直位移导致部分三维网格构开裂，在第 3 级岩质边坡马道下方 3.5m 高度出现岩层外移的情况，并伴随出现局部滑塌，见图 3。



a) 断面



b) 现场

图 3 局部滑坡

2.4 边坡分级加固方案

针对施工过程中出现的边坡局部滑塌险情，

新的边坡加固方案采用坡顶以 1:3 坡度进行削坡减载，边坡中部采用 1:0.75 坡度的格构+预应力锚索分 3 级加固，最上 1 级布置 1 根锚索，其余每级布置 4 根锚索，锚索排间距 2.5 m；边坡底部采用预应力锚索+抗滑桩加固，抗滑桩截面尺寸 3.5 m×2.5 m(长×宽)，桩排间距 5 m，每根桩在桩顶以下 2 m 处设置 1 根预应力锚索，见图 4。施工方案采用分段分级开挖，每 10 m 分一级，马道宽度 2 m，自上而下开挖，每开挖一级施工完永久支护措施后方可进行下一级的开挖；每段开挖后采取永久支护措施后方可进行下一段的开挖。

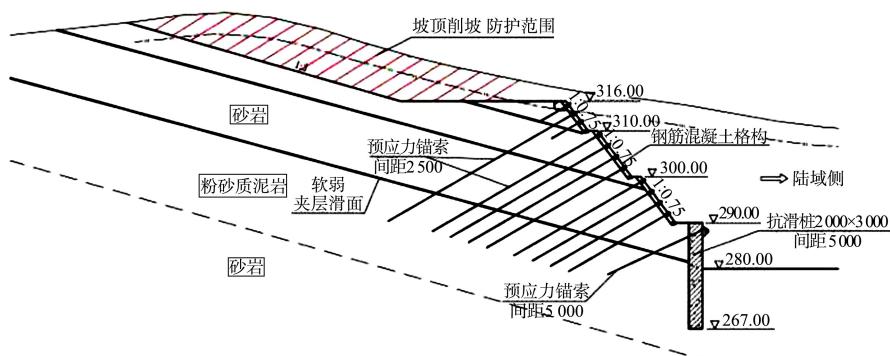


图4 边坡加固方案断面

3 计算参数及工况

3.1 计算模型

根据边坡加固方案典型设计断面, 利用 Geo-slope 软件建立分析模型, 其中结构单元主要采用桩和锚索模拟支护加固结构^[2]。模型中抗滑桩坡脚至坡顶垂直投影高度约 55 m, 边坡水平投影长度约 180 m, 计算模型见图 5。

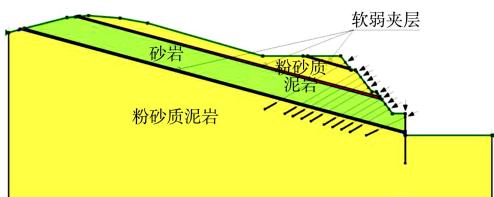


图5 Geo-slope 计算模型

3.2 岩土体和结构单元参数

3.2.1 岩土体参数

据地质勘察资料, 边坡上部滑体为粉砂质泥岩, 中部为砂岩, 潜在滑面为岩屑型软弱夹层, 滑床主要为粉砂质泥岩, 相关参数见表 1、2。

表1 软弱夹层潜在滑面抗剪参数

气候状态	软弱夹层	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
天然状态	1	16.0	10.0
	2	16.5	13.0
	3	16.5	13.0
暴雨状态	1	15.0	9.0
	2	15.5	9.5
	3	15.5	9.5

表2 岩土体计算参数指标

岩土体	天然密度/ $(t \cdot m^{-3})$	饱和密度/ $(t \cdot m^{-3})$
砂岩	2.50	2.55
粉砂质泥岩	2.55	2.60

3.2.2 结构单元参数

根据加固设计方案, 抗滑桩截面尺寸 $3\text{m} \times$

2m (长×宽), 桩长 23 m, 嵌固长度 11 m; 预应力锚索锚固体直径 0.3 m, 锚索进入潜在滑面以下 6 m。各结构单元计算参数: 抗滑桩的受剪承载力为 6.006 MN, 剪力安全系数为 1; 预应力锚索的黏结面强度为 380 kPa, 锚固长度为 6.0 m, 锚固体直径为 0.3 m。

3.3 计算工况

评价边坡的稳定性, 不仅要衡量采用的稳定计算方法和计算参数是否合理、设计采用的安全系数是否合适, 还要衡量采用的计算工况是否合理^[3]。根据本工程实际情况, 拟定 3 种计算工况: 计算工况 1 为天然(滑体自身重力+地下水); 计算工况 2 为暴雨(滑体自身重力+地下水+暴雨); 计算工况 3 为地震(滑体自身重力+地下水+地震)。

工程区域地震基本烈度Ⅶ度, 地质影响系数 K 取 0.026 2。

4 计算结果分析

边坡加固设计方案中, 分别拟定锚索 2 种排间距为 2.5 和 3.0 m; 分别拟定抗滑桩 2 种排间距为 5.0 和 6.0 m, 共形成 4 种组合方案, 见表 3。

表3 格构锚索和抗滑桩组合方案

组合方案	格构锚索排间距/m	抗滑桩排间距/m
1	2.5	5.0
2	2.5	6.0
3	3.0	5.0
4	3.0	6.0

根据以上拟定的工况和加固组合方案, 通过 Geo-slope 软件, 采用摩根斯坦-普拉斯法, 指定潜在 3 组软弱夹层为滑面, 计算得出边坡加固的稳定安全系数, 见表 4。

表 4 各工况下各组合方案边坡加固稳定安全系数

工况	稳定安全系数			
	组合方案 1	组合方案 2	组合方案 3	组合方案 4
1	1.698	1.615	1.545	1.468
2	1.572	1.518	1.429	1.377
3	1.492	1.444	1.342	1.300

根据表 4 可以看出, 各工况下组合方案 4 的安全系数最小, 组合方案 1 的安全系数最大且最危险滑面为粉砂质泥岩与砂岩接触面(图 6), 其中工况 3 最危险, 是最不利工况。《建筑边坡工程技术规范》^[4]规定: 安全等级为一级的永久边坡工程一般工况稳定安全系数不小于 1.35, 地震工况安全系数不小于 1.15。考虑到本工程的重要性且已出现险情, 结合工程经验, 选定一般工况安全系数不小于 1.40, 地震工况安全系数不小于 1.20, 故组合 4 在工况 2 下不满足要求。

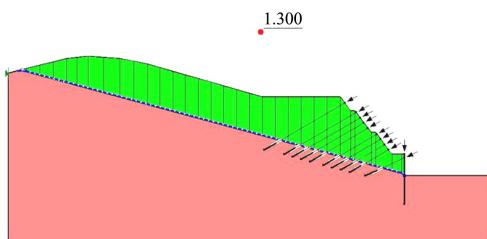


图 6 组合方案 4 工况 3 的计算结果

在组合方案 1~3 均满足安全稳定的要求下, 通过经济性比较, 组合方案 2 的造价最低。最终边坡加固优化方案^[5]选用锚索排间距 2.5 m、抗滑桩排间距 6.0 m。该工程 2019 年底完工至今, 未出现任何状况, 根据监测资料, 抗滑桩桩顶监测最大水平位移不超过 60 mm, 整个边坡加固效果显著, 见图 7。



图 7 边坡加固完工现场

在工况 3 下, 对比组合方案 1 和 2, 锚索排间距相同, 安全系数减小 0.048, 桩间距对安全系数的影响为 3.2%; 对比组合方案 1 和 3, 安全系数减小 0.15, 锚索排间距对安全系数的影响为 10.1%。通过计算, 该边坡断面的剩余下滑力

3.86 MN/m, 边坡中部格构锚索产生的抗滑力 2.70 MN/m, 剩余 1.16 MN/m 由抗滑桩承担, 格构锚索抗滑力权重较大, 因此锚索排间距对边坡整体加固稳定安全系数影响较大。

5 结语

1)对于码头陆域顺层岩质高边坡, 其稳定性较差, 表现为边坡中上部极易失稳破坏, 一旦失稳, 造成的后果是比较严重的, 应适当提高安全系数判断标准。在加固治理时, 上部应削坡减载放缓边坡, 中部可以采用预应力锚索逐级加固, 下部建议采用刚度较大的抗滑桩锁定坡脚, 确保一次根治, 不留后患。

2)预应力格构锚索和抗滑桩加固的排间距应经过多组不同排间距组合计算比较分析后合理确定, 力求以最经济的途径使边坡满足安全稳定的要求。

3)对于采用不同支护结构的分级加固边坡, 格构锚索与抗滑桩加固对边坡整体安全系数的影响大小取决于支护结构在整个滑面上产生抗力的大小。

4)对于存在顺层潜在滑面的岩质高边坡, 利用摩根斯坦-普拉斯法和 Geo-slope 软件, 通过指定滑面计算出的安全系数可以合理地评价加固边坡稳定性, 并应用于实际工程。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等.边坡与滑坡工程治理[M].北京: 人民交通出版社, 2007.
- [2] GEO-SLOPE International Ltd.边坡稳定性分析软件 SLOPE/W 用户指南[M].中仿科技公司, 译.北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [3] 赵明阶, 何光春, 王多垠.边坡工程处治技术[M].北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 重庆市设计院, 中国建筑技术集团有限公司.建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [5] 李建林, 胡兴娥, 熊俊华, 等.三峡地下电站进水口边坡稳定分析及加固优化[J].岩石力学与工程学报, 2001(5): 676-679.