

洪家渡 2 号塌滑体加固抗滑桩及锚固洞有限元内力分析

李同春¹ , 张 丹¹ , 周桂云¹ , 乐成军²

(1. 河海大学水利水电工程学院 , 江苏 南京 210098 ; 2. 成都勘测设计研究院 , 四川 成都 610072)

摘要 : 工程中常用的抗滑桩和锚固洞的内力计算方法多为地基系数法 , 该法只能将抗滑桩和锚固洞分开考虑 , 对于抗滑桩和锚固洞的联合结构 , 该法不能反映它们的相互作用和联合受力状况 . 为了正确反映锚固洞桩的受力状态 , 提出一种滑坡体加固构件有限元内力分析方法 , 并应用于洪家渡 2 号塌滑体加固构件——抗滑桩及锚固洞的有限元内力分析 , 从而为加固构件的配筋设计提供了可靠依据 .

关键词 : 洪家渡 ; 边坡 ; 加固 ; 抗滑桩 ; 锚固洞 ; 有限元分析

中图分类号 : TV223.2+2 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2004)02-0168-04

洪家渡水电站是乌江梯级中惟一具有多年调节性能的“龙头”水库 , 电站正常蓄水位 1 140 m , 总库容 49.47 亿 m³ , 调节库容 33.61 亿 m³ . 电站装机容量 540 MW , 保证出力 171.5 MW . 电站枢纽由高 179.5 m 的面板堆石坝、洞式溢洪道、泄洪洞、引水系统和地面厂房等建筑物组成 .

2 号塌滑体分布于坝址下游右岸 , 体积约 60 万 m³ , 物质成分为碎石、块石、粘土混杂 . 2 号塌滑体位于泄洪消能防冲区内 , 冲坑将塌滑体下部切脚 , 并且施工期和运行期在其上都布置有公路 . 2 号塌滑体失稳将直接影响洪家渡水电站的正常运行 . 分析表明 2 号塌滑体的安全系数达不到规定要求 , 需对其进行加固处理^① . 国家电力公司贵阳勘测设计研究院针对 2 号塌滑体具体情况 , 提出了抗滑桩、锚固洞桩、挡墙及预应力锚索的综合加固方案 : 锚固洞长 30 m , 深入滑面以下一定距离 , 与锚固洞相连的 5 根抗滑桩尺寸为 3 m × 5 m , 最大深度 30 m , 嵌入基岩 1/3 桩长 , 另外 3 根独立的抗滑桩尺寸为 3 m × 4 m , 下部的重力式挡墙高 14 m , 挡墙上每米设 2 根 1 200 kN 级的预应力锚索 . 挡墙、抗滑桩和锚固洞的具体布置如图 1、图 2 所示 .

工程中常用的抗滑桩和锚固洞的内力计算方法多为地基系数法^[1,2] . 该法只能将抗滑桩和锚固洞分开考虑 , 对于抗滑桩和锚固洞的联合结构 , 该法不能反映它们的相互作用和联合受力状况 . 为此 , 本文提出了一种根据常规有限元计算结果求解这种复杂受力结构的内力分析方法 , 并将其应用于洪家渡 2 号塌滑体加固构件的内力分析 .

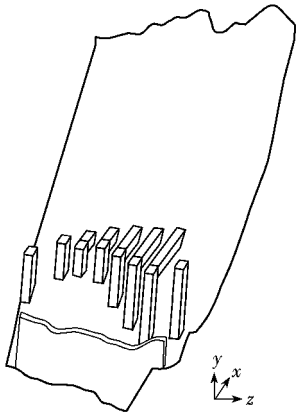


图 1 洪家渡 2 号塌滑体加固结构
Fig.1 Reinforcement structure of Hongjiadu No.2 landslide body

1 有限元内力分析原理

1.1 求解给定截面内力的有限元法

对一给定结构体系 , 施加相应的约束边界条件后的有限元方程为

$$K\delta = F \tag{1}$$

式中 : K ——结构刚度矩阵 ; δ ——未知节点位移向量 ; F ——荷载列阵 .

对某一结构系统 , 若用给定的截面 π 将结构分为 I , II 两子结构 , 并对这两子结构在该指定截面上施加

收稿日期 : 2003-07-16
作者简介 : 李同春 (1963—) , 男 , 江苏姜堰人 , 教授 , 博士 . 主要从事水工结构工程、防灾减灾及防护工程研究 .
① 河海大学 , 国家电力公司贵阳勘测设计研究院 . 乌江洪家渡水电站 2 号塌滑体加固设计与稳定分析报告 2000 .

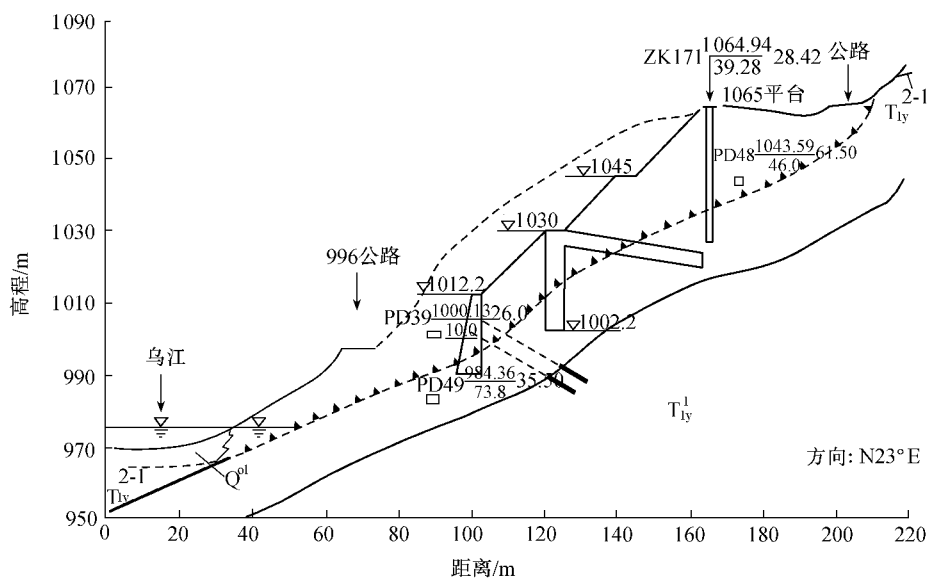


图 2 洪家渡 2 号塌滑体加固结构典型剖面

Fig.2 Typical profile of reinforcement structure of Hongjiadu No.2 landslide body

一组大小相等、方向相反的约束内力,则可建立与方程(1)完全等价的另一组方程

$$\begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ic} \\ k_{ci} & k_{cc} \end{bmatrix}_{I,II} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_c \end{Bmatrix}_{I,II} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_c + f_c \end{Bmatrix}_{I,II} \tag{2}$$

式中:下标 c ——截面 π 上的节点;下标 i ——非 π 截面上的节点; F_i ——非 π 面上节点荷载向量; F_c —— π 面上节点荷载向量; f_{cI} 、 f_{cII} —— π 面上 I、II 两子结构间的约束内力,并且

$$f_{cI} + f_{cII} = 0 \tag{3}$$

由于方程(1)和(2)完全等价,则由方程(1)解出节点位移并将其代入式(2)就可直接求解出给定截面 π 上的约束内力,其表达式为

$$f_{cI} = -f_{cII} = k_{ciI} \delta_{iI} + k_{ccI} \delta_{cI} - F_{cI} = F_{cII} - k_{ciII} \delta_{iII} - k_{ccII} \delta_{cII} \tag{4}$$

式(4)中的右端项可按 I 或 II 中的所有单元循环求解,然后按自由度进行叠加.由于有限元中位移采用的是分片插值函数,因此 π 面上的约束内力只与 I 或 II 子结构中所有包含 π 面上的节点单元有关.故在实际求解时只需对 I 或 II 子结构中所有包含 π 面上的节点的单元进行循环即可.

1.2 内埋式构件截面内力计算

抗滑桩和锚固洞桩结构属内埋式构件,当岩体与抗滑桩或锚固洞之间设置厚度较薄的接触面单元时,其内力可非常方便地解出.

本文以图 3 所示平面问题的抗滑桩内力计算说明内埋式构件内力计算方法.设该抗滑桩及与滑坡体(或基岩)的接触面由截面 π — π 分为 I 和 II 两区(图 4),节点 i,j,k 的约束内力可直接由式(4)解出.应注意的是,此时用式(4)计算时需考虑第 II 区中与节点 i,j,k 相连的接触单元的贡献.严格来讲,由此计算得到的 π — π 截面的约束内力包含了该截面上 I、II 区与 i,j,k 有关的接触面单元的约束内力,但由于计算时接触面单元厚度取得非常小,所以可以忽略接触面单元间的约束内力,近似地认为桩体单元之间的约束内力就是抗滑桩 II 区对 I 区的约束内力.

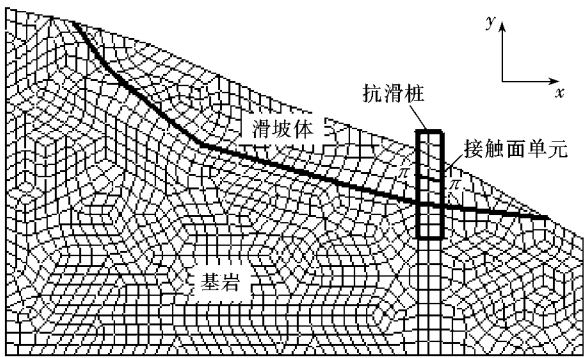


图 3 计算简图

Fig.3 Calculation scheme

1.3 正截面内力与斜截面内力之间的转换关系

上述求解内力的截面取决于有限元网格.由于有限元网格必须适应整体结构的形状,因此不能保证与网

格相对应的截面是正截面.如锚固洞桩与坡面相交处就可能是斜截面,而构件正截面设计的依据是正截面的内力.为此,计算时将斜截面上的内力按下式转换后变成正截面上的内力,即

$$f_{cZ} = \frac{A_Z}{A_X} f_{cX}$$

(5)

式中: A_X ——斜截面面积; A_Z ——与截面中心位置相对应的正截面积.

1.4 由截面约束内力求解结构内力

用上述方法求解的截面约束内力是在 π 面上与坐标系相对应的每个节点的约束内力值,而结构内力是用与节点无关的弯矩、轴力、剪力等表示的,因此需进一步合成截面约束内力.这里以矩形截面为例说明合成方法.

设矩形截面 π 上的有限元节点为 $1 \sim n$,截面形心点为 A ,截面内的局部坐标为 $x'Oy'$,垂直于该截面的坐标轴为 z' 轴,截面在 y' 方向和 x' 方向的中性轴分别为 $x'-x'$ 和 $y'-y'$,将已解出的每个节点的约束内力转换到局部坐标下,即 $f^i_c=[f^i_{x'} \quad f^i_{y'} \quad f^i_{z'}]$,则该截面上相对于 A 点的结构内力为

$$F = [N \quad Q_{x'} \quad Q_{y'} \quad M_{x'} \quad M_{y'} \quad M_{z'}]^T$$

(6)

其中: $N = \sum_{i=1}^n f^i_{z'}$; $Q_{x'} = \sum_{i=1}^n f^i_{x'}$; $Q_{y'} = \sum_{i=1}^n f^i_{y'}$; $M_{x'} = \sum_{i=1}^n f^i_{z'}(y'_i - y'_A)$; $M_{y'} = \sum_{i=1}^n f^i_{z'}(x'_i - x'_A)$; $M_{z'} = \sum_{i=1}^n [f^i_{x'}(y'_A - y'_i) + f^i_{y'}(x'_i - x'_A)]$.

对一般受弯构件而言,只需计算 N 、 $M_{x'}$ 和 $Q_{y'}$.

2 洪家渡2号塌滑体加固抗滑桩和锚固洞内力分析

锚固洞、抗滑桩的网格剖分情况及编号如图5所示,计算参数见表1.假定加固前边坡处于极限平衡状态,假设粘聚力 $c=0$ 情况下反演求得的滑面上的摩擦系数为0.573,计算时塌滑体在加固体系的施工过程中一直处于稳定状态,施工完成后由于外部环境的影响(如降雨、地震等)使得滑动面上的抗剪强度指标降低至要求值0.311,塌滑体自身不能维持稳定,其部分重量转由加固体承担.为此,计算分2步进行:首先计算塌滑体(无任何加固措施)滑动面上摩擦系数 $f=0.573$ 条件下的应力分布;然后考虑加固措施,将滑动面上的摩擦系数降低为0.311,用上述方法计算抗滑桩、锚固洞的内力.从计算结果来看,除了桩1的扭矩 M_z 较大外,其余轴力 N_z 、弯矩 M_x 和剪力 Q_y 均为内力的主要分量.相应的轴力、剪力和弯矩如图6~图9所示.

表1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

材 料	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 /MPa	泊松比	f	c /MPa
塌滑体	2100	2000	0.36	0.45	0.000
岩 体	2610	7000	0.32	0.45	0.000
混凝土与滑体				0.48	0.001
混凝土与岩体				0.55	0.300

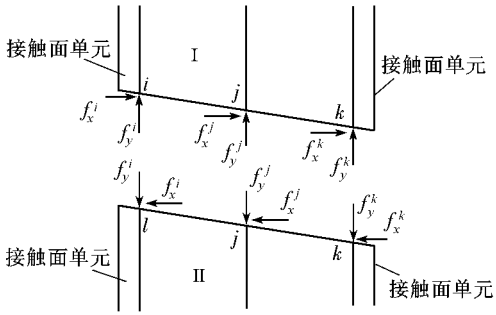


图4 $\pi-\pi$ 截面力的示意图

Fig.4 Forces on $\pi-\pi$ section

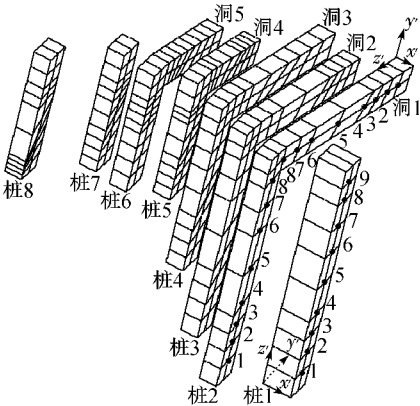


图5 抗滑桩及锚固洞有限元网格

Fig.5 Finite element grid of anti-slide piles and anchor caverns

从图中可以看出,除了抗滑桩8外,抗滑桩1~7和锚固洞1~5的轴向力 N_z 和剪力 Q_y 的最大值都出现在桩或洞与滑动面交界处.这与理论分析相符.

3 结 论

本文提出了用有限元法求解边坡加固构件抗滑桩和锚固洞内力的分析方法,并将其应用于洪家渡2号塌滑体加固构件的内力分析,为加固构件的配筋设计提供了依据.

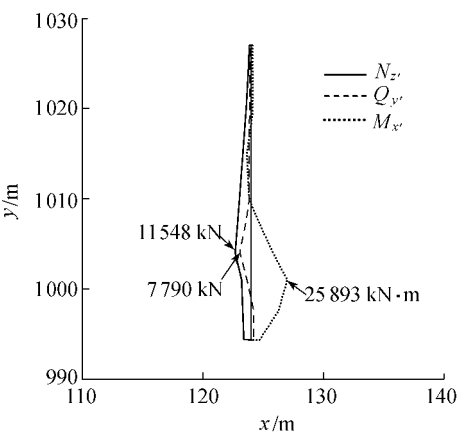


图 6 抗滑桩 1 内力
Fig.6 Internal force of anti-slide pile 1

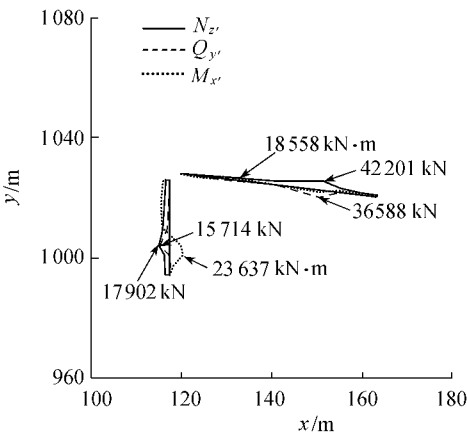


图 7 抗滑桩 2+ 锚固洞 1 内力
Fig.7 Internal force of anti-slide pile 2 and anchor cavern 1

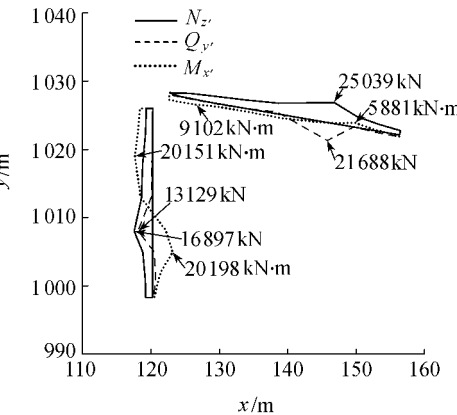


图 8 抗滑桩 3+ 锚固洞 2 内力
Fig.8 Internal force of anti-slide pile 3 and anchor cavern 2

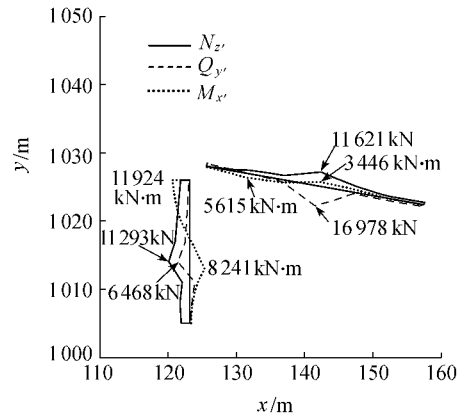


图 9 抗滑桩 4+ 锚固洞 3 内力
Fig.9 Internal force of anti-slide pile 4 and anchor cavern 3

参考文献：

[1] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算 [M]. 北京 :中国铁道出版社 ,1983.75—122.
[2] 戴自航 ,彭振斌. 地基系数法在岩体抗滑桩内力计算中的应用 [J]. 湖南大学学报(自然科学版) 2002 29(1) 98—104.

Finite element analysis of internal forces in anti-slide piles and anchor caverns for reinforcement of Hongjiadu No. 2 landslide body

LI Tong-chun¹ , ZHANG Dan¹ , ZHOU Gui-yun¹ , LE Cheng-jun²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC , Chengdu 610072 , China)

Abstract : The ground coefficient method is commonly used for internal force calculation for anti-slide piles and anchor caverns. Owing to its separate consideration of the internal forces of the two parts , the method cannot reflect the interaction between the anti-slide piles and anchor caverns and the combined stress state of the associated structure. For reasonable reflection of the stress state of the associated structure of anti-slide piles and the anchor caverns , a finite element internal force analysis method is proposed and applied to analysis of the internal forces of the reinforcing components of the Hongjiadu No.2 landslide body. The result provides a rational basis for reinforcement design of landslide reinforcing components.

Key words : Hongjiadu ; side slope ; reinforcement ; anti-slide pile ; anchor cavern ; finite element analysis