

# 深基坑桩锚支护结构数值 设计方法研究

匡 德

(新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**【摘要】** 基坑支护关系到水闸工程的安全性。为确保水闸工程的稳定性,需要充分重视深基坑在内的所有设计环节。本文以克孜加尔水闸工程为例,对桩锚支护结构设计方法进行讨论,并对结构设计效果进行数值模拟分析。结果表明:连续介质拉格朗日分析本构模型、支护结构数值计算模型能够比较准确地计算出支护结构的应力分布、横向位移、纵向位移等。

**【关键词】** 水利工程;水闸工程;基坑作业;桩锚支护;支护结构

中图分类号: TV223

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)04-0040-05

## Research on numerical design method of deep foundation pile anchor supporting structure

KUANG De

(Xinjiang Irtysh River Basin Development Engineering Construction Administration, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** Foundation pit supporting is related to the safety of sluice project. All design links including deep foundation pits should be emphasized fully in order to ensure the stability of sluice project. In the paper, Kezi Jia'er Sluice Project is adopted as an example for discussing design methods of pile anchor supporting structures. Numerical simulation analysis is carried out on the effect of structure design. Results show that stress distribution, horizontal displacement, vertical displacement, etc. of the supporting structure can be calculated more accurately by the continuous medium Lagrange analysis constitutive model and supporting structure numerical calculation model.

**Keywords:** water conservancy project; sluice project; foundation pit operation; pile anchor supporting; supporting structure

水闸工程设计中对基坑深度有着不同要求,若基坑开挖深度较大,需要处理的渗漏、支护问题也越复杂<sup>[1]</sup>。基坑支护不仅关系到水闸工程作业的便利性,而且对工程质量以及施工安全都十分关键<sup>[2]</sup>。现有的基坑支护型式包括桩锚支护结构、悬臂支护结构、逆作法支护等,其中桩锚支护结构具有施工便捷、设备简单、应用范围较广、环境污染较小的特点,在水闸工程

基坑工程实践中较为常用<sup>[3]</sup>。然而,为了更加有效地应对水闸工程基坑条件,避免结构性滑移,需要对桩锚支护结构设计进行深入分析。本文将对该类支护型式的结构设计进行分析和模拟,希望对提升桩锚支护结构受力性能有积极作用。

### 1 工程简介

本文以克孜加尔水闸工程为例,该工程基本结构

为潜孔平板型,共设计 8 个单孔,各单孔长度为 14.2m,总体宽度为 133.5m。为达到“蓄水、景观与通航一体”的目标,该水闸工程将与桥梁工程统筹实施。为确保工程基础预应力承受性能,拟将基坑设计成堤防结构的一部分。依据规划,该基坑支护左岸、右岸开挖深度分别在 8.6 ~ 10.3m、8.7 ~ 10.4m 之间,廊道深度设计在 6.6 ~ 11.3m 之间。根据地质勘测结果,场地为两河流交汇处,土层主要是中粗砂、残积土、风化混合岩以及人工填土。地层材料详细情况如表 1 所列。

表 1 基坑部位地质参数统计

岩土类型	密度/ (kN/m <sup>-3</sup> )	垂直渗透系数/ (cm/s <sup>-1</sup> )	挡土墙基 底摩擦系数
人工填土	18.7	5.64 × 10 <sup>-3</sup>	0.26
中粗砂	19.5	9.42 × 10 <sup>-3</sup>	0.41
淤泥质土	16.6	1.06 × 10 <sup>-6</sup>	—
风化混合岩	20.1	4.35 × 10 <sup>-5</sup>	0.36
残积土	19.5	4.05 × 10 <sup>-6</sup>	0.36

## 2 桩锚支护结构设计

理论上,关于桩锚支护结构设计的方法较多,包括极限平衡法、连续梁法、有限元法、弹性地基梁法、弹性支撑法等。结合本文工程特点,将重点介绍并采用极限平衡法与弹性地基梁法<sup>[4]</sup>。

### 2.1 极限静力平衡法

该类结构设计方法在单锚式结构上有着较好的适用性。在挡土结构嵌入土层深度有限时,需要借助结构后侧土壤摩擦与重力的作用,从而确保支梁结构处于平衡状态。在该结构中,存在被动土压力  $E_p$ 、主动土压力  $E_a$  以及锚杆支撑力  $T$  这三个主要参数,三者满足如下关系式:

$$T + E_p = E_a \quad (1)$$

依据力矩平衡,有

$$E_a H_a = E_p H_p \quad (2)$$

式中  $H_a$ ——被动土压力  $E_p$  与锚杆支撑之间的垂直距离,m;

$H_p$ ——主动土压力  $E_p$  与锚杆支撑之间的垂直距离,m。

若记入土深度值为  $t$ ,则该值与锚杆支撑深度值之间呈负相关关系。为将支护桩直径控制到最小,需要精确计算其与锚杆支撑深度之间的关系。通常而言,随着杆支撑深度逐渐增加,弯矩会首先降低,其后弯矩值会呈现向上“U”形变化特征,而其最小值处即为桩径设计、开挖深度设计最佳情形。此时,按下式计算锚杆支撑力  $T_k$ :

$$T_k = E_{ak} - E_{pk} - \sum T_A \quad (3)$$

式中  $T_A$ ——不同开挖土层处的锚杆支撑力。

由力矩平衡原理进一步可得:

$$E_{pk} b_k - E_{ak} a_k - \sum T_A a_{T_A} = 0 \quad (4)$$

式中  $a_k$ —— $k$  层锚杆支撑与被动土压力之间的力臂, N · m;

$b_k$ —— $k$  层锚杆支撑与主动土压力之间的力臂, N · m;

$a_{T_A}$ —— $k$  层锚杆支撑与开挖处锚杆支撑力之间的力臂, N · m。

如图 1 所示,为极限静力平衡法下的该工程结构图。

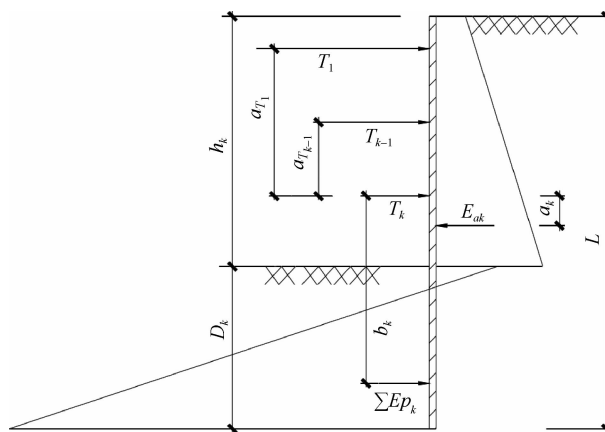


图 1 静力平衡法计算结构

### 2.2 弹性地基梁支点法

在该方法下,需要将地基梁视为包含多个边界的分段工程集合体,其计算结构如图 2 所示。

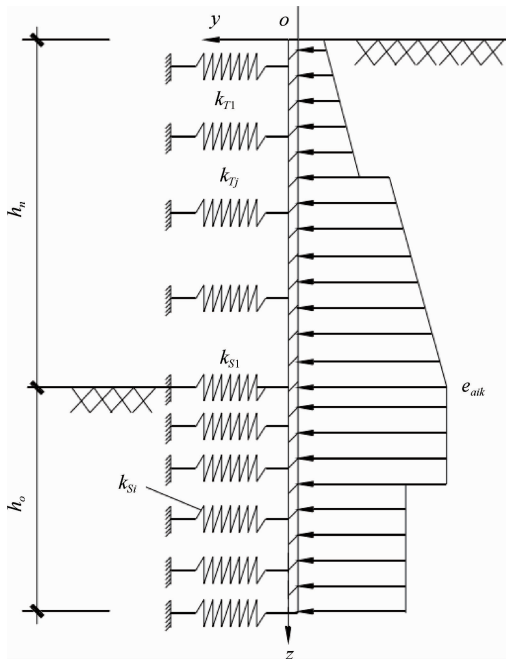


图2 弹性支点法计算结构

在对基坑支护结构进行计算时,首先须按式(5)计算其开挖面上部受力结构:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} - e_{aik} b_s = 0 \quad 0 \leq z \leq h_n \quad (5)$$

接着,按式(6)计算其开挖面下部受力结构:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + m b_0 (z - h_n) y - e_{aik} b_s = 0 \quad z > h_n \quad (6)$$

式中  $z$ ——计算点与支护结构最上端之间的垂直距离, m;

$h_n$ ——开挖深度(第  $n$  类工况), m;

$m$ ——土体水平抗力系数;

$EI$ ——特定宽度下的结构抗弯刚度值, N/mm<sup>2</sup>;

$y$ ——支护结构水平变形系数;

$b_s$ ——特定荷载水平下的计算宽度值, m;

$b_0$ ——支护结构抗力计算宽度, m;

$e_{aik}$ ——结构荷载水平值(外部), N。

本文深基坑桩结构为圆形排式,可按式(7)求取其结构抗力计算宽度:

$$b_0 = 0.9 \times (1.5d + 0.5) \quad (7)$$

在计算不同土层的支点边界条件  $T_j$  时,可按式(8)进行:

$$T_j = k_{Tj} (y_j - y_{oj}) + T_{oj} \quad (8)$$

式中  $k_{Tj}$ ——计算土层的刚度系数;

$y_j$ ——计算土层的水平支点位移, m;

$y_{oj}$ ——结构进行支点设置前的水平位移值, m;

$T_{oj}$ ——计算土层的支点预应力, N。

### 3 数值模拟

关于深基坑桩锚支护模拟,工程实践中常用的方法包括有限差分法(FDM)、边界元法、有限元法等。其中,应用最成熟的有限差分法(FDM),其具有较为理想的弹塑性应对能力,从而可以较好地计算支护结构稳定性。本文将运用该方法中的快速连续介质拉格朗日分析法(FLAC)进行深基坑桩锚支护结构模拟。

#### 3.1 连续介质拉格朗日分析结构模型

由于水闸工程土体结构较为复杂,因而需要对其塑性变形特征进行合理模拟。对此,土体结构应该遵循 Mohr-Coulomb 屈服规则:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (9)$$

式中  $f_s$ ——屈服函数;

$\phi$ ——土体与支护结构的夹角, (°);

$N_\phi$ ——二者间的摩擦力, N;

$c$ ——土体凝聚力, N;

$\sigma_1, \sigma_3$ ——抗压强度以及抗剪强度, MPa。

如图3所示,为 Mohr-Coulomb 屈服准则下的计算结构示意图。

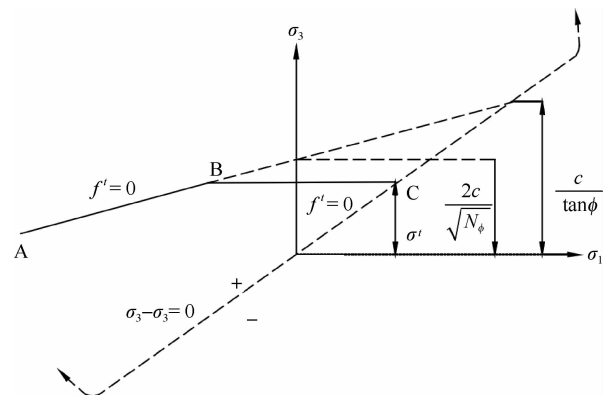


图3 Mohr-Coulomb 破坏准则示意图

计算拉应力屈服时,按式(10)进行:

$$f_t = \sigma_t - \sigma_3 \quad (10)$$

式中  $\sigma_t$ ——抗拉强度值, MPa。

### 3.2 数值模型

本工程数值计算模型以及支护结构模型如图4所示。在该模型中,相关参数值如表2所列。

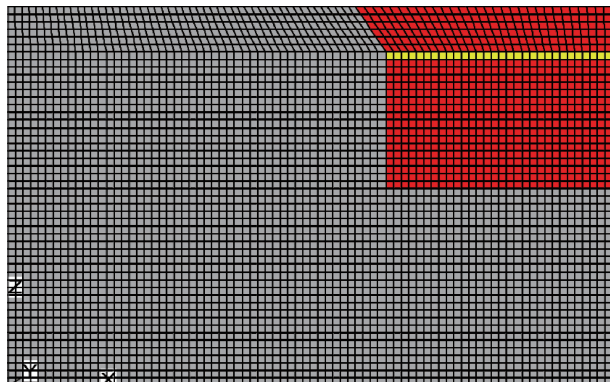


图4 支护结构数值计算模型

表2 桩锚支护结构参数统计

参数	取值	参数	取值
基坑总深度	12m	顶部放坡	3.0m
坡度比	1:1.1	灌注桩总长度	13.0m
灌注桩直径	0.79m	灌注桩间距	1.18m
桩顶标高	-3.1m	冠梁尺寸	高600m 宽800m
锚杆长度	18.0m	锚杆直径	18cm
锚杆固定段	9.0m	锚杆自由段	9.0m
锚杆上部预应力	138kN	锚杆下部预应力	211kN

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 不平衡力模拟结果

为对基坑土层塑性流动性能进行很好的模拟,可以借助不平衡力参数。图5所示为不平衡力演化曲线图。由图5可知,随着计算步数的增加,不平衡力呈显著波动状态,且最大值以及最大波动特征出现在工况开挖结束阶段;就各个开挖阶段而言,不平衡力在初始作业时陡然上升,随后会逐渐降低至0。可见,对深基坑作业而言,应该从第二层锚杆处开始便十分重视不平衡力的测量与控制,尽量降低开挖作业对基坑稳定性造成破坏。

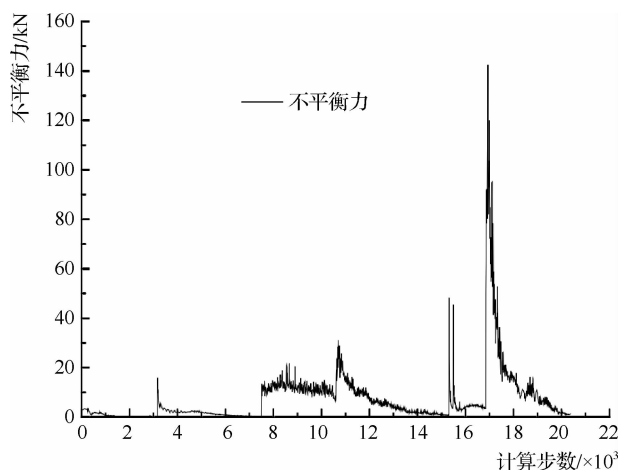


图5 不平衡力模拟结果曲线

#### 3.3.2 土体应力模拟结果

##### 3.3.2.1 土体初始应力分析

在对深基坑进行土体开挖作业之前,土体由于自重作用而具备一定初始应力。如图6所示,为水闸工程的初始应力模拟结果。由图6可以看出,随着土层深度增加,深基坑土体自身所具备的初始应力呈显著相应增加的特征。

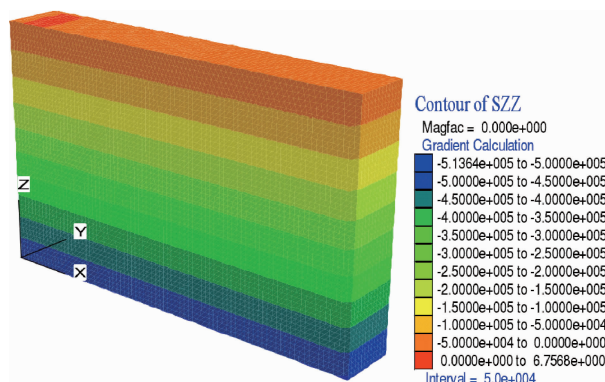


图6 水闸工程深基坑土体初始应力场云图(单位:Pa)

##### 3.3.2.2 SXX 应力分析

当深基坑土体开挖值区间在[8.8, 12.0]m时, SXX 应力随着工程自身重力降低而可能出现相应减小。如图7、图8所示,为 SXX 应力分布图(水平应力)。

由图7、图8可知,随着开挖深度增加,土体应力呈现显著降低特征;就不同土体部位而言,相对于开挖面下部,开挖面上部土体应力变化显著。



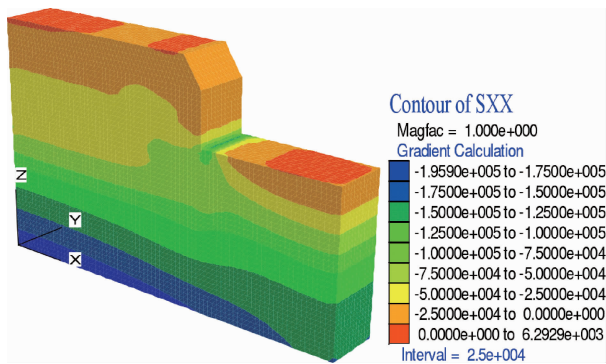


图7 土体水平应力(单位:Pa) (8.8m)

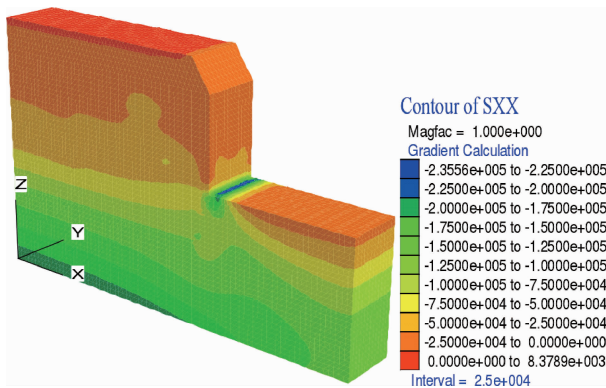


图8 土体水平应力(单位:Pa) (12m)

### 3.3.3 土体位移模拟结果

#### 3.3.3.1 水平位移分析

如图9所示,为本文水闸工程深基坑土体水平位移模拟结果。由图9可知,水平位移最大值出现在深基坑中部,达8.1m;随着测量距离逐渐远离基坑,水平位移量越来越小;桩基处,水平位移图出现凹槽,表明支护结构与土体间存在显著相互作用。

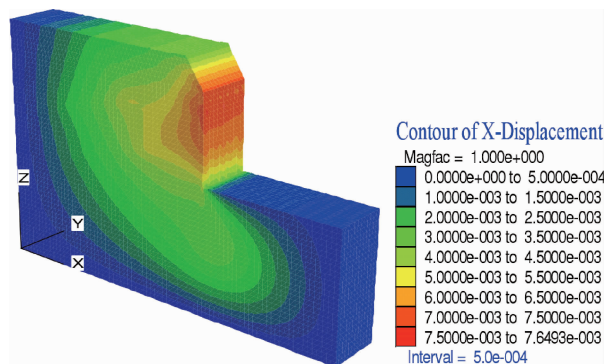


图9 土体水平位移模拟分析

#### 3.3.3.2 纵向位移分析

如图10所示,为水闸工程深基坑底部位移分布情况。由图10可知,以基坑底部开挖处为核心,土体位移量逐渐向下部、侧部降低;基坑底部隆起现象显著,最大位移量达17.9m。

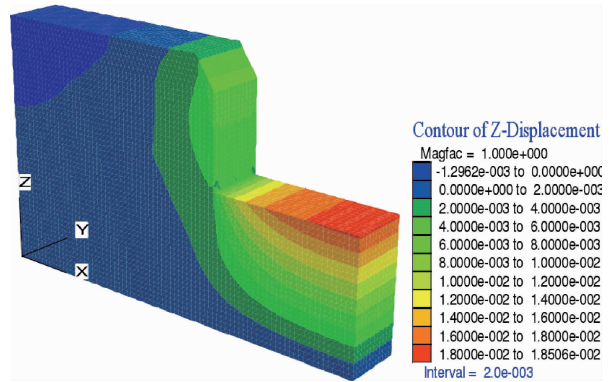


图10 深基坑土体竖向位移模拟分析

## 4 结论

本文对深基坑桩锚支护结构的设计方法以及受力特征进行了模拟。主要得出如下几点结论:

- a. 随着计算步数的增加,不平衡力呈显著波动状态,且最大值以及最大波动特征出现在工况开挖结束阶段。因此,应该从第二层锚杆处开始重视不平衡力的监测及控制。
- b. 随着土层深度增加,深基坑土体自身所具备的初始应力呈显著增加。就不同土体部位而言,开挖面上部土体应力变化相对于下部更加显著。
- c. 随着测量距离逐渐远离基坑,土体水平位移量越来越小;纵向分析结果表明,基坑底部隆起现象显著,最大位移量达17.9m。◆

### 参考文献

- [1] 夏国春,程永华,张宏. 船坞工程坞口段深基坑支护施工技术[J]. 水利建设与管理,2012(6):16-19,9.
- [2] 王婉芬. 地下连续墙深基坑结构工程施工[J]. 水利建设与管理,2013(5):28-32.
- [3] 张太利. 非均匀受力圆形深基坑地下连续墙支护结构应用[J]. 中国水能及电气化,2016(1):54-59.
- [4] 季晨,郭桂祥,杨勇. 小口径镀锌钢管井点降水技术在泵站工程深基坑开挖中的应用[J]. 中国水能及电气化,2015(4):1-4.