



## 邻近船闸基坑开挖安全影响因素\*

罗鹏飞, 刘晓平, 曹周红, 苏天宇, 张宇

(长沙理工大学, 湖南长沙 410076)

**摘要:** 邻近船闸基坑开挖工程会对已建船闸的安全运行带来一定影响, 为了解该影响, 保证邻近已建船闸的安全和正常运营, 结合非线性有限元仿真分析方法, 采用理想弹塑性本构模型和  $D-P$  屈服准则建立邻近船闸基坑放坡开挖平面二维有限元模型, 分析基坑距船闸的距离、基坑的坡度等因素对邻近已建船闸的影响, 提出了邻近船闸基坑开挖安全间距及基坑坡度的建议值。

**关键词:** 邻近船闸; 放坡开挖; 非线性有限元; 安全间距

中图分类号: U 641.5; TU 471.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0113-05

### Influential factors on safe excavation of foundation pit near lock

LUO Peng-fei, LIU Xiao-ping, CAO Zhou-hong, SU Tian-yu, ZHANG Yu

(Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** The excavation engineering in the vicinity of the existing building lock has a certain effect on the safe operation of it. In order to understand the influence of slope excavation in the foundation pit near the lock and ensure the safety and normal operation of it, we establish a 2D finite element model of the slope excavation in the foundation pit near the lock combining with nonlinear finite element simulation analysis method, ideal elastic-plastic constitutive model and  $D-P$  yield criterion. Base on the analysis of the influential factors including the distance between foundation pit and the lock, and slope of the pit, we present the proposed value of the safe distance and excavation slope of the foundation pit near the lock.

**Keywords:** near a lock; slope excavation; nonlinear finite element; safe spacing

随着我国腹地经济和沿江产业的迅速发展, 内河航运货运量呈持续快速增长态势, 年通过能力已趋于饱和。为改善航电枢纽船闸通航能力, 对原有低等级航道进行优化升级的需求日益迫切, 这促使大量的船闸枢纽扩建。改扩建工程与新建项目有所不同, 改扩建项目在开工建设时, 不仅需要考虑到项目本身的特点与条件, 更要考虑到项目在建设时对周边环境所带来的不利影响。在新建船闸施工时, 可能引起已建船闸闸首的侧移, 导致闸门无法紧密的闭合及闸室墙不稳定等问题出现。

目前已有不少学者对邻近船闸基坑开挖进行研究<sup>[1-2]</sup>, 如潘宣何等<sup>[3]</sup>对采用排桩支护结构下基坑开挖过程对邻近船闸的影响进行了研究, 得到了闸室墙后土压力、闸室墙地基反力和位移的变化规律; 李帆等<sup>[4]</sup>对不同有限土体宽度情况下排桩支护结构的土压力变化规律进行了研究。

本文拟结合某实际船闸工程, 运用有限元方法进行数值仿真模拟, 考虑不同基坑间距  $L$  及基坑坡度  $m$  等因素对已建船闸的影响, 这对合理安全选择新建船闸的位置及基坑的设计施工都具有一定的指导意义。

收稿日期: 2015-11-02

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309037)

作者简介: 罗鹏飞(1990—), 男, 硕士研究生, 从事港口、航道及近海工程方面的研究。

### 1 模型建立

#### 1.1 计算理论

1) D-P 屈服准则方程。

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[ \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{M} \mathbf{S} \right]^{\frac{1}{2}} = \sigma_y \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{6C\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (4)$$

式中： $\mathbf{S}$  为偏应力； $\sigma_m$  为平均应力； $\varphi$  为内摩擦角； $C$  为粘聚力。

2) 接触方程<sup>[5]</sup>。

$$\begin{cases} \Delta u_n = u_n^1 - u_n^2 + \Delta u_n^0 \\ \Delta d u_n = d u_n^1 - d u_n^2 \\ \Delta d u_a = d u_a^1 - d u_a^2 \end{cases} \quad (5)$$

① 接触条件。

作用力与反作用力原理

$$\begin{cases} \sigma_n^1 = -\sigma_n^2 = \sigma_n \\ \sigma_a^1 = -\sigma_a^2 = \sigma_a \end{cases} \quad (6)$$

② 应力及法向非嵌入条件。

脱开状态：

$$\sigma_n = 0, \sigma_a = 0, \Delta u_n \geq 0 \quad (7)$$

黏着和滑动状态：

$$\sigma_n \geq 0, \Delta u_n = 0 \quad (8)$$

③ 库仑摩擦定律。

黏着状态：

$$\sigma_a \leq \mu\sigma_n, \Delta d u_a = 0 \quad (9)$$

滑动状态：

$$\sigma_a = \mu\sigma_n, \Delta d u_a \geq 0 \quad (10)$$

式中：变量前面加 d 表示增量；变量前面加  $\Delta$  表示可能接触点位移相对值； $u$  表示位移； $\sigma$  表示应力；上标 1、2 表示接触体  $\Omega^1$  和  $\Omega^2$ ；下标  $n$ 、 $a$  分别表示变量法向和切向方向，其中  $\Delta u_n^0$  表示可能接触面之间的法向初始间隙。

#### 1.2 计算模型

某枢纽船闸等级 III 级，为单线单级船闸，闸

首采用整体坞式结构，宽 46 m、高 18.9 m，底板厚 4.5 m。闸首周围地基及土体大致为中风化泥岩和黏土，其物理力学指标见表 1。船闸闸首计算简图见图 1，土体范围大致为 3 倍闸首宽度， $L$  为开挖距离， $H$  为基坑深度， $m$  为基坑坡比。计算模型为平面二维模型，模型单元选用平面 4 节点单元，有限元模型网格见图 2。

表 1 材料物理力学参数

土层	弹性模量 $E/\text{MPa}$	密度/ $(\text{t}/\text{m}^3)$	泊松比 $\mu$	剪胀角/ $(^\circ)$	粘聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦 角/ $(^\circ)$
混凝土	$2.2 \times 10^4$	2.50	0.167			
黏土层	46	1.85	0.320	0	150	15
中风化层	$2 \times 10^2$	2.00	0.350			

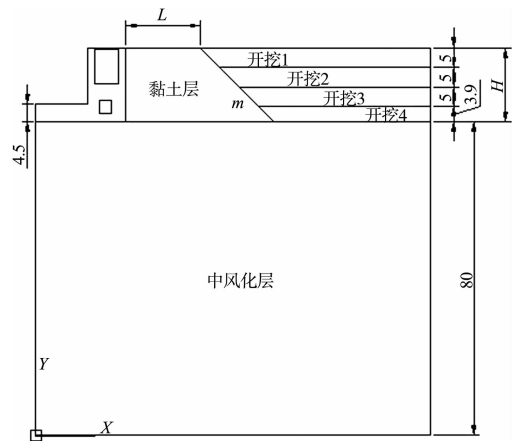


图 1 船闸闸首计算简图 (单位: m)

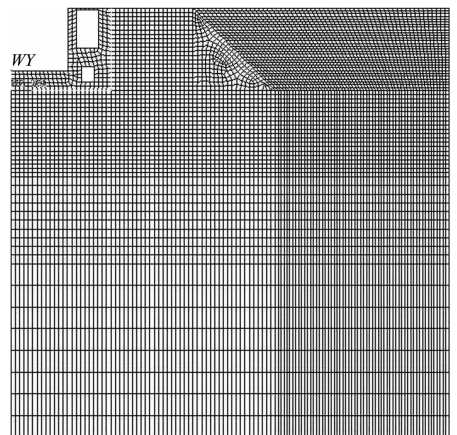


图 2 有限元模型网格

### 1.3 安全的判别标准

#### 1.3.1 边坡稳定性判别

有限元方法分析边坡稳定性的的一个关键问题

是如何根据有限元计算结果来判别边坡是否达到极限平衡状态。目前边坡的失稳判据<sup>[6-8]</sup>主要有3类: 1) 以有限元迭代计算不收敛为判据; 2) 以边坡特征部位(如坡顶、坡脚或坡体位移最大处)位移发生突变或变形趋势为判据; 3) 以剪切塑性应变从坡脚贯通到坡顶为判据。

### 1.3.2 船闸闸门运行的位移控制

根据经验, 设计中船闸闸首单边允许的最大水平位移值是以船闸人字闸门安全运行作为控制条件, 即认为闸首顶部水平位移大于3 mm时, 船闸人字闸门可能会发生漏水或者不能正常启闭的现象, 从而影响船闸的正常运行。

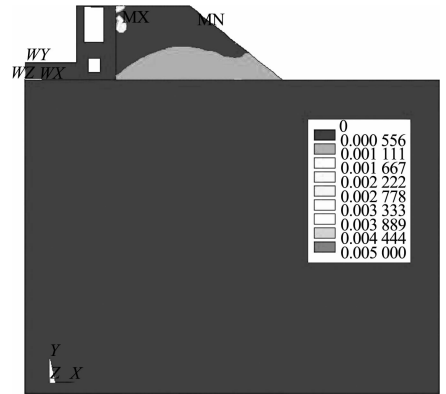
## 2 各因素对安全的影响分析

### 2.1 基坑坡度对安全的影响

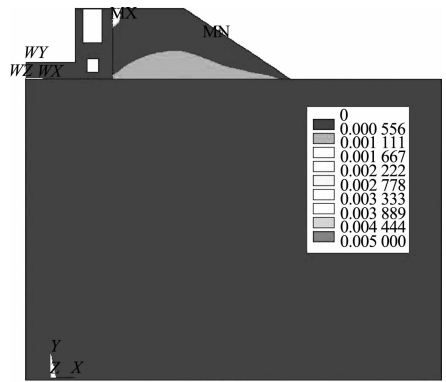
#### 2.1.1 基坑边坡稳定性分析

为分析基坑坡度对边坡安全的影响, 选取放坡比例  $m$  分别为 1:0.75、1:1、1:1.25、1:1.5, 开挖间距  $L$  均为  $H$  进行计算分析。

当基坑边坡坡比为 1:0.75 时, 有限元迭代计算不收敛, 根据边坡稳定性判别标准可知边坡已经失稳。如图 3 所示, 当边坡坡度减小为 1:1 时, 在坡顶和坡脚均出现塑性应变分布区, 但边坡内两塑性应变区尚未贯通, 且边坡内没有位移突变区, 边坡基本处于稳定的临界状态。随着基坑边坡坡度的减小, 边坡的塑性应变相应减小, 基坑边坡的稳定性提高。



b) 坡比1:1.25



c) 坡比1:1.5

图3 不同坡比边坡塑性应变

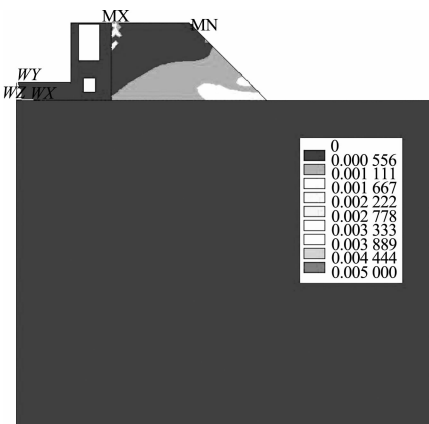
#### 2.1.2 坡度变化对邻近船闸影响

为分析不同放坡坡比基坑开挖对邻近船闸位移的影响, 在保证边坡稳定情况下, 选取放坡坡比  $m$  为 1:1、1:1.5、1:2, 开挖间距均为  $H$  作为计算情况。

图 4 分别是不同开挖坡比时闸首边墩墙水平位移、闸首边墩墙后土压力、船闸底板地基反力的计算结果比较, 由图 4 可知, 开挖坡比的变化除对边墩墙上部的土压力有一点影响外, 对其它参数(特别是闸墙水平位移控制参数)的影响很小。由此可知, 在邻近船闸基坑开挖边坡参数  $m$  的选取时, 可在保证边坡自身的稳定性的前提下, 尽可能采用较陡的开挖边坡, 使所占的开挖距离和开挖量相对较小。

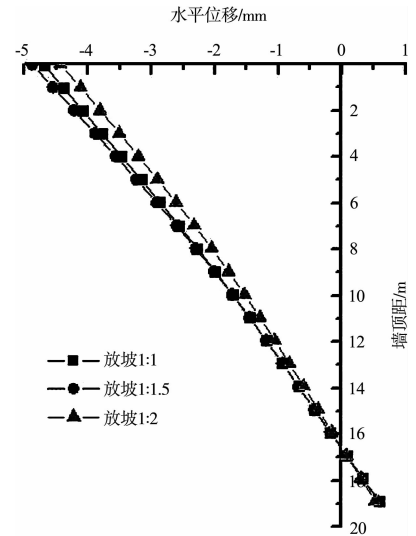
### 2.2 基坑开挖距离对安全的影响

由于基坑开挖距船闸距离  $L$  与基坑的开挖深度  $H$  是相互关联的参数, 为方便分析其变化对邻近船闸的影响, 取开挖深度  $H$  为定值, 选取间距

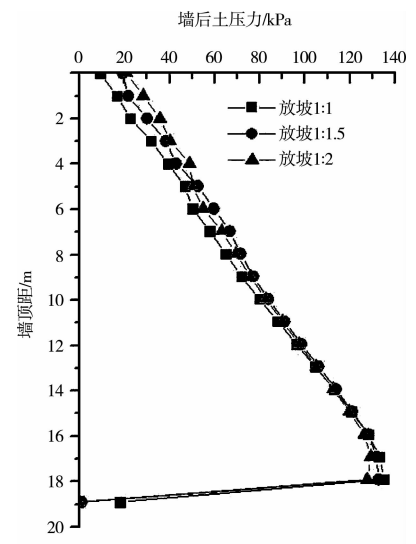


a) 坡比1:1

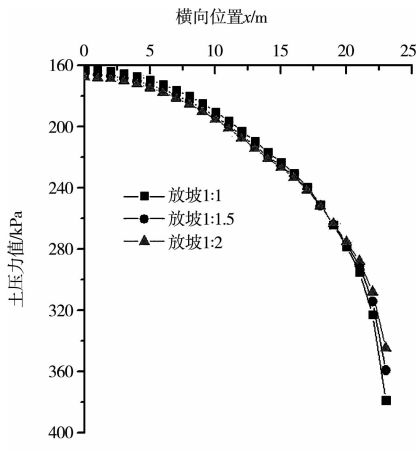
$L$  为  $H$ 、 $2H$ 、 $3H$ 、 $4H$ ，开挖放坡坡比均为  $1:1$  作为计算情况，计算结果见图 5。



a) 闸首边墩墙水平位移

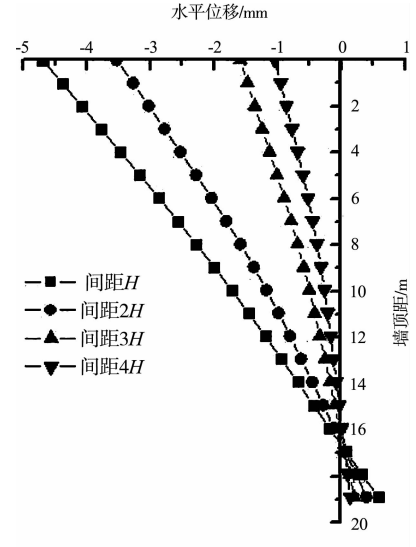


b) 闸首边墩墙后土压力

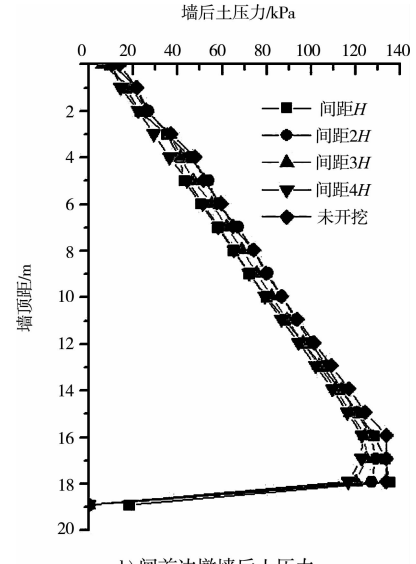


c) 闸首底板地基反力

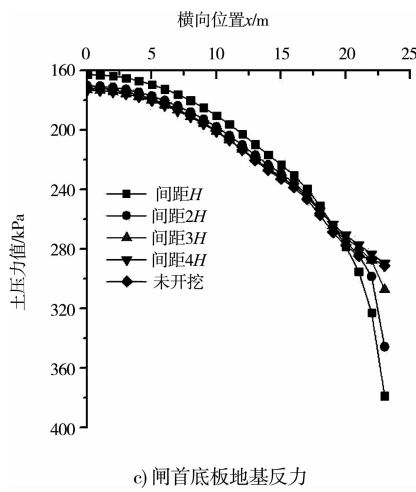
图 4 闸首位移及土压力



a) 闸首边墩墙水平位移



b) 闸首边墩墙后土压力



c) 闸首底板地基反力

图 5 闸首位移及土压力

从图 5a) 可知，基坑开挖后，闸首整体表现向墙前发生倾斜。基坑间距为  $H$  时，闸首最大水平

位移达到 4.70 mm, 超过最大水平位移允许值 1.70 mm; 当基坑间距增大到  $2H$  时, 最大水平位移为 3.53 mm, 超过最大水平位移允许值 0.53 mm; 随着基坑间距增大至  $3H$  时, 最大水平位移值减小到 1.59 mm; 基坑间距从  $3H$  增大到  $4H$  时, 闸首最大水平位移为 1.05 mm, 变化不大。

计算结果显示, 基坑距船闸距离越近, 闸首水平位移值越大, 对船闸的安全运行影响越明显。当基坑间距大于等于  $3H$  时, 船闸横向位移值在人字闸门安全运行的控制范围内。

### 2.3 已建船闸位移的综合分析

图 5b)、5c) 分别是不同开挖间距时闸首边墩墙后土压力、船闸底板地基反力的计算结果比较。

从图 5b) 可知, 基坑开挖后, 随着基坑间距变化, 墙后土压力变化较小。由图 5c) 可知, 闸首底板地基反力沿  $X$  轴逐渐增大。闸墙底板地基反力在闸墙的端部处随着基坑开挖间距增大地基反力逐渐减小, 在闸墙底板的前部随着间距增大地基反力逐渐增大。

图 6 为闸首结构及周围部分土体的变形, 结合上面的结果综合分析可知, 闸首结构在基坑开挖后出现向闸内的位移, 其原因主要是基坑开挖导致闸首墙的边荷载减小, 从而引起地基回弹, 结合端部的较大的地基反力最终使得闸首产生向闸内倾斜的位移。随着基坑开挖间距的增大, 闸墙底板两端的地基反力差值逐渐减小, 这减弱了闸首的旋转倾斜, 从而减小了闸首的水平位移。

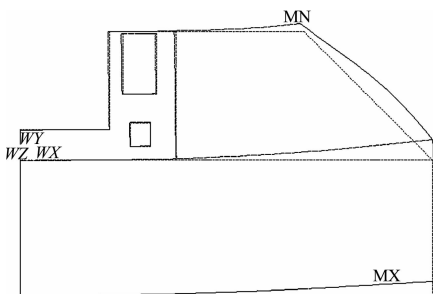


图 6 闸首结构及周围部分土体变形

### 3 结语

1) 邻近船闸基坑开挖时, 基坑距离已建船闸越近, 闸首端部的地基反力越大, 从而闸墙的水平位移越大; 基坑距离已建船闸较近时会影响到船闸的安全运行, 在邻近船闸新建时, 合理选择邻近船闸与已建船闸的距离至关重要, 当闸首周围地基及土体大致为中风化泥岩和黏土且邻近船闸基坑开挖坡比小于 1:1 时, 建议邻近船闸基坑距离已建船闸至少为 3 倍开挖深度。

2) 邻近船闸基坑开挖坡比的变化对邻近已建船闸的水平位移影响较小。

### 参考文献:

- [1] 郭力群, 程玉果, 陈亚军. 不同间距下相邻基坑相互影响数值分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2014, 35(1): 92-96.
- [2] 赵琦, 朱建明. 临近地下室外墙影响下的考虑土拱效应的挡土墙主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 723-728.
- [3] 潘宣何. 采用排桩支护结构的基坑开挖对邻近船闸的影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- [4] 李帆. 考虑有限土体影响的排桩支护结构土压力研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [5] 扈世龙, 刘晓平, 曹周红, 等. 复杂地基对坞式船闸结构的影响研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 124-130.
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座—II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.
- [7] 周正军, 陈建康, 吴震宇, 等. 边坡稳定数值计算中失稳判据和岩土强度屈服准则[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(4): 6-12.
- [8] 裴利剑, 屈本宁, 钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3337-3341.

(本文编辑 武亚庆)