



# 基于D-P准则的闸首底板 非线性有限元分析与比较

华 华

(江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏南京 210005)

**摘要:** 底板是闸首结构受力最复杂的部位, 属于典型的空间受力结构, 目前船闸规范中仍将弹性基础梁法作为闸首底板内力计算的主要方法, 该方法系平面计算理论, 且采用弹性模型代替弹塑性模型, 存在优化的可能。结合土基上某船闸工程实例, 利用有限元软件ANSYS, 通过D-P屈服准则进行三维非线性有限元分析, 研究弹塑性模型下闸首底板的内力与变化规律, 并与弹性基础梁法、三维有限元弹性法进行分析比较, 提出了各种方法的适用条件, 以供类似工程借鉴参考。

**关键词:** 闸首; 有限元; 非线性; 弹塑性; D-P准则; ANSYS; 弯矩

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0147-05

## Nonlinear finite element analysis and comparison for lock head floor of shiplock based on Drucker-Prager criterion

HUA Hua

(Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210005, China)

**Abstract:** The floor, which belongs to the typical space force structure, is the most complex part of the lock head. At present, the elasticity beam method is still the main method in the code for the internal force calculation of the lock head floor. Being the plane calculation theory, this method replaces the elastoplastic with elastic, so it can be optimized. According to the shiplock project in the soil base, using the finite element software ANSYS, nonlinear finite element analysis of three dimensional based on Drucker-Prager criterion, we analyze the lock head floor of shiplock based on the elastoplastic model, compare it with the elasticity beam and elasticity finite element method, and analyze the applicable conditions of various methods, to provide reference for similar shiplocks' engineering.

**Key words:** lock head; finite element; nonlinear; elastoplastic; D-P criterion; ANSYS; moment

船闸是用以克服集中水头差的通航建筑物<sup>[1]</sup>, 闸首是船闸水工建筑物的核心, 土基上的闸首大多采用整体性较好的坞式结构, 其底板是受力最复杂的部位。

传统计算方法常将闸首底板视为基础梁来计算内力。最早由捷克工程师文克勒在1867年提出文克勒模型假定, 之后众多学者在其假定基础上进行了相关研究。典型的代表是前苏联学者普罗

克托尔、热莫奇金、戈尔布洛夫等提出的以弹性理论为依据来计算基础梁, 即将地基简化为半无限弹性体<sup>[2]</sup>。国内也有不少学者对弹性基础梁做了相关研究, 如有限深弹性层上基础梁<sup>[3]</sup>、黏弹性基础梁<sup>[4]</sup>等。

目前船闸规范<sup>[5]</sup>仍将弹性基础梁法作为闸首底板内力计算的主要方法, 该方法有两点优化的可能: 其一是由于闸首自身形状与受力的不规

收稿日期: 2013-04-16

作者简介: 华华(1983—), 男, 工程师, 主要从事港口航道工程设计及咨询工作。

则，底板属于空间受力结构，规范的方法是将空间问题简化为平面问题进行分析；其二是土基属于弹塑性体，而规范中仅将土基简化为弹性体考虑。本文将结合工程实例，分析研究上述两点。

### 1 D-P屈服准则

土体属于弹塑性材料，弹塑性材料的一个显著特点是应力超过屈服点后，应力应变关系成非线性<sup>[6]</sup>。在土力学中，常用的屈服准则有Mohr-Coulomb (M-C) 准则，然而M-C屈服面在主应力空间为一不规则六棱锥面， $\pi$ 平面内为一不等角六边形，角点处的外法线方向存在不惟一性，给数值计算带来困难<sup>[7]</sup>。

Drucker-Prager (D-P) 屈服准则在 $\pi$ 平面上为圆形，在主应力空间的屈服面为光滑圆锥(图1)，采用内切圆D-P屈服准则能够得到良好的计算结果，计算效率高且易于收敛<sup>[8]</sup>。

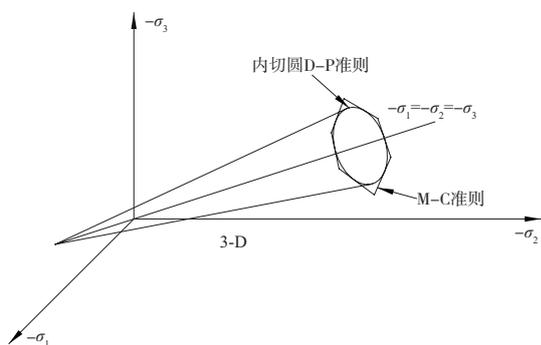


图1 D-P与M-C准则在主应力空间的表示

D-P屈服准则的表达式为<sup>[9]</sup>:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3)$$

上式是1952年由Drucker-Prager提出的,式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力,  $I_1$ 为应力偏张量第一不变数;  $J_2$ 为应力偏张量第二不变数。

$\alpha$ 与 $k$ 为岩土体材料粘聚力 $c$ 与内摩擦角 $\varphi$ 的相关函数,当采用内切圆D-P屈服准则时,其表达式如下:

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \quad (4)$$

$$k = \frac{\sqrt{3} c \cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \quad (5)$$

## 2 工程概况

以江苏省里下河地区土基上某船闸上闸首作为工程实例,闸首为C25钢筋混凝土坞式结构,闸门为人字门,闸首纵向长23 m,横向宽40.6 m,边墩顶高程为10.83 m,门槛顶高程为1.83 m,底板底高程为-5.17 m,底板内设空箱,闸首底板坐落在粉质黏土层上。工程材料物理力学指标见表1。

表1 工程材料物理力学指标

| 材料       | 密度/<br>(t·m <sup>-3</sup> ) | 弹性<br>模量/MPa | 泊松比   | 粘聚力/<br>kPa | 内摩<br>擦角/(°) |
|----------|-----------------------------|--------------|-------|-------------|--------------|
| C25钢筋混凝土 | 2.50                        | 28 000       | 0.167 |             |              |
| 地基土      | 1.92                        | 20           | 0.300 | 30          | 20           |
| 回填土      | 1.85                        |              |       | 10          | 18           |

## 3 有限元模型与非线性计算

### 3.1 有限元模型

本次分析采用大型通用有限元软件ANSYS13.0,建立三维有限元模型,三维网格采用六面体单元。 $X$ 向为垂直水流方向, $Y$ 向为平行水流方向, $Z$ 向为竖直方向。闸首混凝土结构采用弹性模型,共28 906个单元;地基土体采用非线性弹塑性模型,符合D-P屈服准则,共19 448个单元,ANSYS中设定D-P模型需要输入3个参数,即粘聚力、内摩擦角、膨胀角,其表达式见式(1)~(5)。其中粘聚力与内摩擦角可以通过工程地质资料得到;膨胀角是用来控制体积膨胀大小的,一般密实的砂土和超强固结土在发生剪切的时候因为颗粒重新排列会出现体积膨胀,对于本工程不考虑上述情况,取膨胀角为0°。

约束情况如下:基础底面为3向约束,4个侧向为法向单向约束;闸首底板和地基土体之间设置接触单元。

有限元网格模型见图2,3。

### 3.2 非线性有限元计算结果

在有限元模型上施加水压力、回填土荷载、自重荷载、边荷载、门机荷载等,分别求解检修期、完建期、运用期3个工况,后处理主要是针对闸首底板 $X$ 向(横向)。根据其结果,不同工况闸

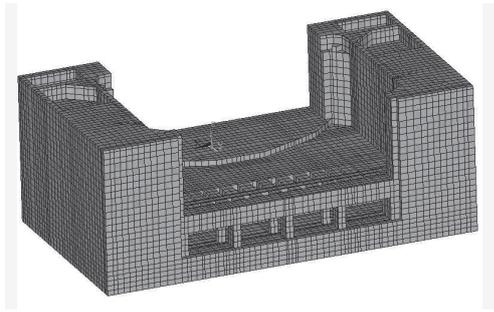


图2 闸首有限元网格模型

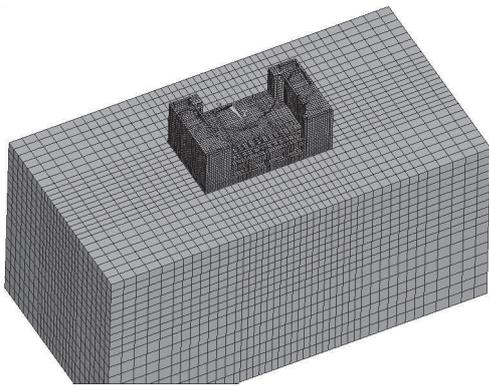


图3 闸首与地基有限元网格模型

首底板X向应力与弯矩仅数值大小有所区别，其变化规律基本相同，均为：底板跨中为负弯矩，底板边墩处为正弯矩，这一趋势也符合了相关文献的研究<sup>[10]</sup>。这里仅列出代表工况运用期X向的应力云图（图4），各工况底板应力与弯矩见表2。

表2 各工况底板应力与弯矩

| 工况  | 最大拉应力/MPa | 最大压应力/MPa | 弯矩/(kN·m·m <sup>-1</sup> ) |         |
|-----|-----------|-----------|----------------------------|---------|
|     |           |           | 跨中处                        | 边墩处     |
| 检修期 | 3.61      | 5.38      | -7 351.1                   | 2 179.8 |
| 完建期 | 4.46      | 5.93      | -7 912.4                   | 3 125.3 |
| 运用期 | 3.47      | 4.02      | -7 279.0                   | 3 143.5 |

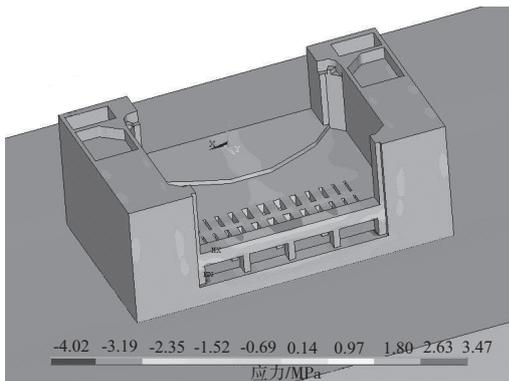


图4 运用期底板X向应力云图

#### 4 分析与比较

##### 4.1 按弹性地基梁法计算

为分析比较闸首底板受力与变化规律，首先按照船闸规范中的弹性地基梁法计算底板弯矩，计算采用船闸CAD程序<sup>[11]</sup>，计算公式选用平面半无限大弹性地基沉降公式，计算结果见表3。

表3 弹性地基梁法各工况底板弯矩

| 工况  | 弯矩/(kN·m·m <sup>-1</sup> ) |         |
|-----|----------------------------|---------|
|     | 跨中处                        | 边墩处     |
| 检修期 | -7 454.5                   | 825.1   |
| 完建期 | -5 048.1                   | 3 222.1 |
| 运用期 | -6 009.9                   | 2 518.0 |

对比表2,3可知，底板最大正负弯矩出现位置一致，但各工况弯矩值不尽相同，考虑到弹性地基梁法系平面理论计算方法，且涉及到许多假设条件，必然会对计算结果产生一定的影响，故笔者认为采用三维有限元法计算结果更为符合实际。

##### 4.2 弹性模型三维有限元法计算

假定土基为弹性模型，其余条件不变，弹性模量和泊松比取与弹塑性模型一致。计算结果见表4。这里也仅列出代表工况运用期X向的应力云图（图5）。

表4 弹性模型下底板应力与弯矩

| 工况  | 最大拉应力/MPa | 最大压应力/MPa | 弯矩/(kN·m·m <sup>-1</sup> ) |         |
|-----|-----------|-----------|----------------------------|---------|
|     |           |           | 跨中处                        | 边墩处     |
| 检修期 | 3.61      | 5.39      | -7 198.8                   | 2 002.4 |
| 完建期 | 4.43      | 5.96      | -7 510.9                   | 2 751.9 |
| 运用期 | 3.46      | 3.99      | -7 161.6                   | 2 970.1 |

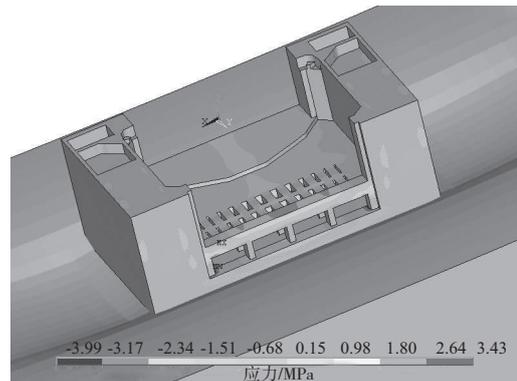


图5 弹性模型下运用期底板X向应力云图

对比表2,4可知, 底板应力变化规律基本一致, 最大正负弯矩值在弹塑性模型下的计算结果略大于弹性模型。

### 4.3 弹塑性变化规律及影响分析

结合类似工程地质报告, 将土体物理力学指标与地基承载力进行折减(表5), 闸首混凝土指标与加载不变, 为方便比较, 土体的弹性模量和泊松比保持不变。

表5 不同土基物理力学指标

| 材料       | 弹性模量/<br>MPa | 泊松比 | 粘聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>(°) | 承载力/<br>kPa |
|----------|--------------|-----|-------------|--------------|-------------|
| 土基A(未折减) | 20           | 0.3 | 30          | 20           | 250         |
| 土基B(折减)  | 20           | 0.3 | 24          | 16           | 200         |
| 土基C(折减)  | 20           | 0.3 | 18          | 12           | 150         |
| 土基D(折减)  | 20           | 0.3 | 13          | 8            | 100         |
| 土基E(折减)  | 20           | 0.3 | 12          | 7            | 90          |

取代表工况运用期分别对指标折减后的模型进行计算, 也仅列出数值最大的土基D模型下X向应力云图(图6)。各土基模型下底板应力与弯矩见表6, 弯矩与地基承载力关系见图7。

表6 运用期各土基模型下底板应力与弯矩

| 工况   | 最大拉应力/ 最大压应力/ |      | 弯矩(kN·m·m <sup>-1</sup> ) |         |
|------|---------------|------|---------------------------|---------|
|      | MPa           | MPa  | 跨中处                       | 边墩处     |
| 弹性土基 | 3.46          | 3.99 | -7 161.6                  | 2 970.1 |
| 土基A  | 3.47          | 4.02 | -7 279.0                  | 3 143.5 |
| 土基B  | 3.50          | 4.03 | -7 366.7                  | 3 170.5 |
| 土基C  | 3.68          | 4.05 | -8 036.6                  | 3 552.4 |
| 土基D  | 3.94          | 4.16 | -9 173.9                  | 4 324.3 |
| 土基E  | 不收敛           | 不收敛  | 不收敛                       | 不收敛     |

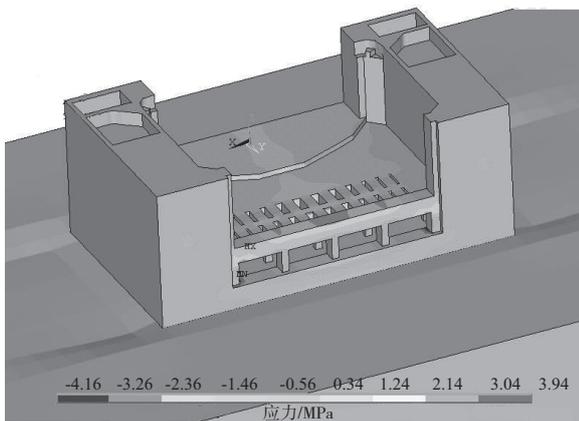


图6 土基D模型底板X向应力云图

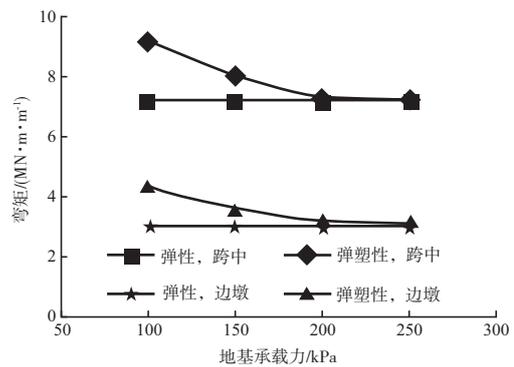


图7 弯矩与地基承载力关系

地基承载力可以综合反映土基土质状况, 为比较不同土质下底板弯矩变化规律, 按直线反力法求出闸首结构运用期平均地基应力为105 kPa, 用以对比地基承载力。

这里列出土基A-D对应的塑性应变云图(图8), 土基E模型计算不收敛无法列出。可以看出, 随着土体承载力的降低, 塑性区从无逐渐发展, 并形成贯通发散状, 底板弯矩也随之增加, 且变化趋势逐渐增大。

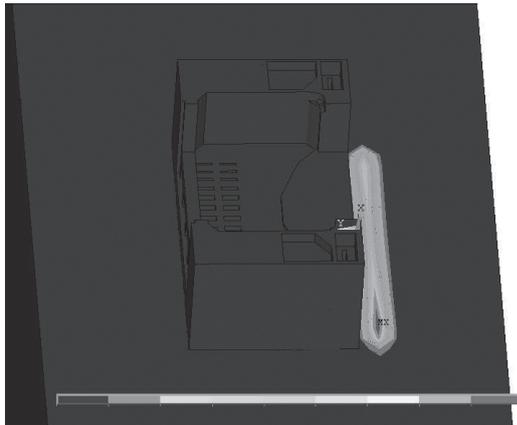
分析比较上述数据, 当地基承载力接近地基应力时(对应土基模型D), 弹性模型下闸首底板最大正负弯矩仅为弹塑性模型的78%和69%, 采用弹性法得出的数据明显失真; 当地基承载力为地基应力的2倍时(对应土基模型B)弹性模型下最大正负弯矩为弹塑性模型的98%和95%, 两者计算结果较为接近。

### 5 结语

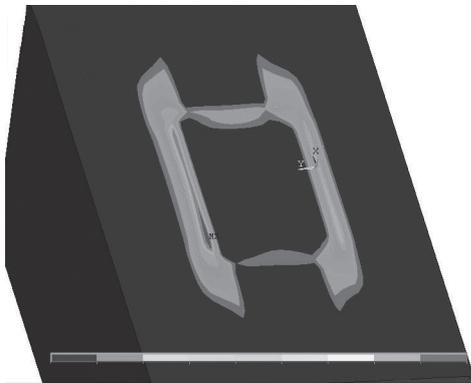
1) 船闸规范中采用的弹性地基梁法系平面计算方法, 涉及到许多假设条件, 一定程度上难以



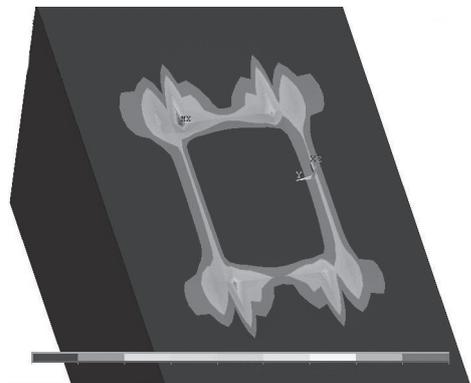
a) 土基A



b) 土基B



c) 土基C



d) 土基D

图8 土基塑性应变云图

反映闸首底板的真实受力状况, 笔者建议应尽量采用三维有限元法。

2) 土基属于弹塑性体, 对土基上的闸首结构进行三维非线性弹塑性有限元分析更符合实际情况。

3) 闸首底板弯矩在弹塑性模型下计算结果较弹性模型大, 工程中应尽量采用弹塑性模型计算, 特别对于地基承载力接近地基应力时, 否则计算结果会失真。

当地基承载力大于平均地基应力2倍时, 两者计算结果相差在5%之内, 对于初步估算可采用方便快捷的弹性模型。

#### 参考文献:

- [1] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992: 1.
- [2] 周氏, 章定国, 钮新强. 水工混凝土结构设计手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 957.
- [3] 赵光恒, 张子明. 有限深弹性层上基础梁的计算[J]. 华东水利学院学报, 1984, 12(2): 32-33.
- [4] 苏超, 姜弘道, 谭恩会. 黏弹性基础梁计算方法及其应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(5), 101-105.
- [5] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].
- [6] 杨斌, 朱旭. 船闸闸首非线性有限元计算分析[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 538.
- [7] 邓楚键, 何国杰, 郑颖人. 基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 735-739.
- [8] 陈星, 王乐华, 王瑞红. 三种大型软件在边坡开挖中的应用分析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 155-157.
- [9] 黄书珍, 胡仁喜, 康士廷. ANSYS12.0土木工程有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010, 71-72.
- [10] 于忠涛, 刘君. 土基上坞式闸首底板受力分析[J]. 水运工程, 2010(8): 101-105.
- [11] 苏超, 王仙美, 曹建中, 等. 船闸结构仿真计算方法研究[J]. 水运工程, 2010(9): 97-99.

(本文编辑 武亚庆)