



# 基于有限元计算的 码头凹凸缝结构配筋和防护设计

陈亮<sup>1</sup>, 张俊<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 泰州市港口管理局, 江苏泰州 225300)

**摘要:** 由于凹凸缝为非杆件结构, 不能直接依据JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》计算结构内力, 而基于连续介质力学的有限元方法则可以很好地分析钢筋混凝土结构的内部应力。运用Robot有限元软件构建模型, 将整个码头简化为弹性支撑的连续梁, 通过计算连续梁内力得到凹凸缝结构所受外力, 进而计算凹凸缝结构内部应力分布, 最后依据计算结果和相关规范对凹凸缝结构进行配筋和防护设计。该方法自2008年工程实际应用至今, 效果良好。

**关键词:** 有限元; 码头; 凹凸缝; 配筋; 防护设计

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0073-05

## Reinforcement and protection design for structural joints of wharves based on finite element method

CHEN Liang<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>

(1. Third Harbor Consultants Co. of China Communications Construction Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Bureau of Port Management, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** As a kind of non-pole structure, internal force of structural joints of wharves can not be calculated according to Design Code for Concrete Structures of Port and Waterway Engineering (JTS 151—2011) directly. Based on the continuous mechanism theory, the finite element method is good at analyzing the stress of reinforced concrete structure. By modeling in ROBOT, the whole wharf is simplified as a continuous beam with elastic support. Furthermore, the external force applied to structural joints and stress distribution inside the structure are calculated. The reinforcement and protection design according to results obtained and related codes are also presented. Since 2008, this design method has been applied to practical engineering with good effects.

**Key words:** finite element; wharf; structural joint; reinforcement; protection design

港口工程中, 码头结构在横向上主要受到船舶系缆力、船舶撞击力、船舶横摇撞击力、门机水平力、波浪力、水流力等荷载<sup>[1]</sup>, 为加强相邻分段的整体受力, JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》要求在分段衔接处设置凹凸缝<sup>[2]</sup>。相邻分段在凹凸缝位置存在较大水平接触力, 容易导致凹凸缝发生不同程度的损坏, 见图1和2。

由于凹凸缝为非杆件结构, 不能直接依据

JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》进行配筋<sup>[3]</sup>, 而基于连续介质力学的有限元方法则可以很好地分析钢筋混凝土结构的内部应力<sup>[4]</sup>。本文基于Robot有限元软件和相关规范, 提出了一种外荷载作用下凹凸缝结构配筋和防护设计的方法。

### 1 设计思路

1) 依据码头分段间的受力特点建立整体分

收稿日期: 2012-07-06

作者简介: 陈亮(1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、航道及近海工程设计工作。

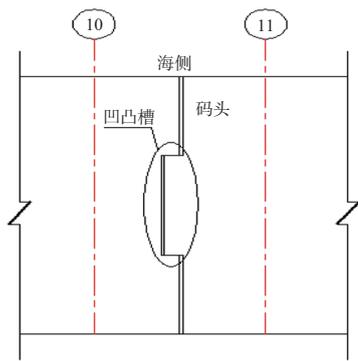


图1 分段衔接处设置凹凸缝



图2 发生损坏的凹凸缝

析模型；2) 取一榀横梁为研究对象，得到整体模型所需要的刚度系数；3) 施加外部荷载，计算承载能力极限状态下分段间的最大接触力；4) 基于Robot有限元软件，建立凹凸缝结构模型；5) 计算最大接触力作用下，凹凸缝结构的应力分布并进行配筋和防护设计。

### 1.1 建立整体分析模型

本文所分析的码头由4个分段组成，29跨，33榀横梁，从左至右为第1至第4分段，各分段长度分别为69.49，110.96，69.48和79.98 m，总长度为329.91 m，现浇悬臂板厚度为0.56 m。

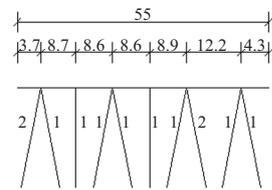
分段间受纵向与横向力，分段间允许有相对转动发生。依据分段间的受力特点，为使分段间受力分析简明清晰，将码头各分段的连接假设为铰接，每一榀横梁的桩基简化为一个弹性支座，则整个码头简化为弹性支撑的连续梁。

### 1.2 计算横梁的刚度系数

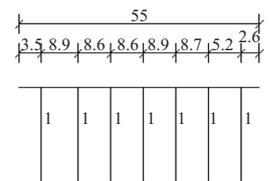
#### 1.2.1 横梁资料

横梁尺寸见图3。第1,3分段桩基采用 $\phi 1200$ 组合管桩，桩尖入土部分刚性系数756 MN/m；第2分段桩基采用 $\phi 2300$ 嵌岩桩，桩尖入土部分刚性系数1512 MN/m；第4分段采用 $\phi 1200$ 钢管桩，桩

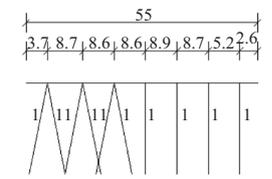
尖入土部分刚性系数1134 MN/m，桩单元模式皆采用上下固接。



a) 第1, 3分段横梁



b) 第2分段横梁



c) 第4分段横梁(右)

图3 横梁尺寸(单位:m)

#### 1.2.2 横梁刚度系数

将横梁简化为一个弹性支座，结构按照杆系有限元法进行分析，空间梁单元刚度矩阵如下：

$$\begin{bmatrix}
 \frac{EA}{L}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -\frac{EA}{L}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\
 0, & 12\frac{EI_z}{L^3}, & 0, & 0, & 0, & -6\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & -12\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & 6\frac{EI_z}{L^2} \\
 0, & 0, & 12\frac{EI_y}{L^3}, & 0, & -6\frac{EI_y}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & -12\frac{EI_y}{L^3}, & 0, & -6\frac{EI_y}{L^2}, & 0 \\
 0, & 0, & 0, & 0, & \frac{GI_x}{L}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -\frac{GI_x}{L}, & 0 \\
 0, & 0, & -6\frac{EI_y}{L^2}, & 0, & 4\frac{EI_y}{L}, & 0, & 0, & 0, & 6\frac{EI_y}{L^2}, & 0, & 2\frac{EI_y}{L}, & 0 \\
 0, & 6\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & 4\frac{EI_z}{L}, & 0, & -6\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & 2\frac{EI_z}{L} \\
 -\frac{EA}{L}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & \frac{EA}{L}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\
 0, & -12\frac{EI_z}{L^3}, & 0, & 0, & 0, & -6\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & 12\frac{EI_z}{L^3}, & 0, & 0, & 0, & -6\frac{EI_z}{L^2} \\
 0, & 0, & -12\frac{EI_y}{L^3}, & 0, & 6\frac{EI_y}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & 12\frac{EI_y}{L^3}, & 0, & 6\frac{EI_y}{L^2}, & 0 \\
 0, & 0, & 0, & 0, & -\frac{GI_x}{L}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & \frac{GI_x}{L}, & 0 \\
 0, & 0, & -6\frac{EI_y}{L^2}, & 0, & 2\frac{EI_y}{L}, & 0, & 0, & 0, & 6\frac{EI_y}{L^2}, & 0, & 4\frac{EI_y}{L}, & 0 \\
 0, & 6\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & 2\frac{EI_z}{L}, & 0, & -6\frac{EI_z}{L^2}, & 0, & 0, & 0, & 4\frac{EI_z}{L}
 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $I_x$ 为梁对X轴的惯性矩( $m^4$ );  $I_y$ 为梁对Y轴的惯性矩( $m^4$ );  $I_z$ 为梁对Z轴的惯性矩( $m^4$ );  $E$ 为拉伸弹性模量(GPa);  $G$ 为剪切弹性模量(GPa);  $A$ 为截

面面积( $m^2$ );  $L$ 为单元长度(m)。

如果有弹性地基结构时, 可以附加弹性地基矩阵:

$$K_F = \begin{bmatrix} \frac{3}{35}Lk_j + \frac{2}{7}Lk_i & \frac{1}{60}L^2k_j + \frac{1}{28}L^2k_i & \frac{9}{140}Lk_j + \frac{9}{140}Lk_i & -\frac{1}{70}L^2k_j - \frac{1}{60}L^2k_i \\ \frac{1}{60}L^2k_j + \frac{1}{28}L^2k_i & \frac{1}{280}L^3k_j + \frac{1}{168}L^3k_i & \frac{1}{60}L^2k_j + \frac{1}{70}L^2k_i & -\frac{1}{280}L^3k_j - \frac{1}{280}L^3k_i \\ \frac{9}{140}Lk_j + \frac{9}{140}Lk_i & \frac{1}{60}L^2k_j + \frac{1}{70}L^2k_i & \frac{2}{7}Lk_j + \frac{3}{35}Lk_i & -\frac{1}{28}L^2k_j - \frac{1}{60}L^2k_i \\ -\frac{1}{70}L^2k_j - \frac{1}{60}L^2k_i & -\frac{1}{280}L^3k_j - \frac{1}{280}L^3k_i & -\frac{1}{28}L^2k_j - \frac{1}{60}L^2k_i & \frac{1}{168}L^3k_j + \frac{1}{280}L^3k_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $k_i, k_j$ 是*i*端和*j*端弹性系数(kPa)。

经计算得到: 分段1和分段3单榀横梁刚度系数为131.9 MN/m; 分段2单榀横梁刚度系数为154.9 MN/m; 分段4单榀横梁刚度系数为124.1 MN/m。

### 1.3 计算分段间最大水平接触力

#### 1.3.1 主要荷载

1) 装卸机械水平力。

考虑2座门机同时工作下的水平力作用, 不同工况下的水平力见表1。

工况	A腿	B腿
工况1(小车位于海侧端, 风向海侧吹)	120.9	122.2
工况2(小车位于岸侧端, 风向岸侧吹)	120.2	122.8
工况3(小车位于海侧端, 角度风)	106.4	136.5

门机位置见图4, 轮距1.5 m, 基距14.3 m。

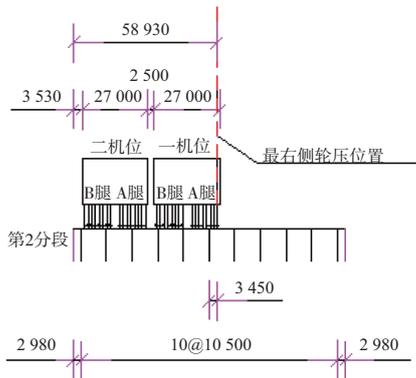


图4 门机位置(单位: mm)

2) 系缆力。

单个系船柱承受系缆力2 000 kN。

3) 船舶撞击力。

单个护舷(TD-A200H)的反力值为1 781 kN。

### 1.3.2 荷载组合

工况1: 门机水平力+系缆力。

工况2: 门机水平力+撞击力。

工况3: 门机水平力+系缆力组合。

### 1.3.3 计算结果

经计算, 工况2时, 第1分段与第2分段之间产生最大水平力, 大小为2 633.64 kN。

### 1.4 建立凹凸缝结构模型

#### 1.4.1 建立模型

所建计算模型长55 m, 最宽处为3.38 m, 高0.56 m, 一边为固接, 三边自由。

#### 1.4.2 增设护边钢板

为改善凹凸缝受拉区应力状态, 在凹凸缝边缘增设护边钢板, 见图5。护边钢板的长度及截面尺寸见图6。

### 1.5 计算应力分布与防护设计

假设接触力以线荷载形式均布于凹凸缝接触面, 合力大小为2 633.64 kN。护边钢板水平段长度为0.24 m, 码头分段间结构缝宽度为0.03 m,

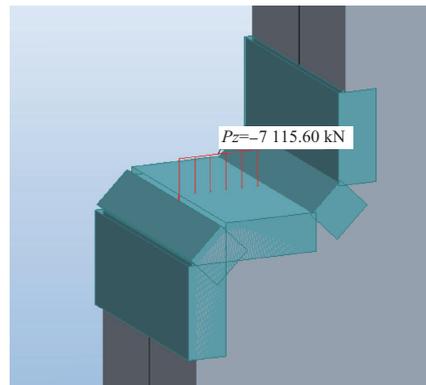


图5 护边钢板

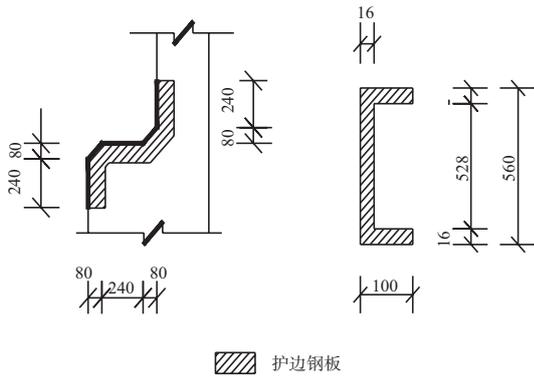
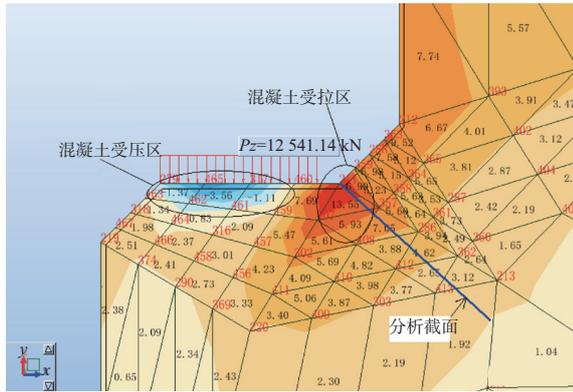


图6 护边钢板位置及截面尺寸(单位: mm)

因此分段间护边钢板接触水平长度为0.24 m—0.03 m=0.21 m。线荷载大小为2 633.64 kN/0.21 m=12 541.14 kN/m。

经计算,凹凸缝受力部位附近存在应力集中的混凝土受拉区和受压区,最大拉应力 $\sigma_t=13.55$  MPa,最大压应力 $\sigma_c=6.44$  MPa,见图7。



注: 正值为拉应力, 负值为压应力。

图7 荷载作用(单位: MPa)

### 2 配筋计算

根据SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》中有关“非杆件体系钢筋混凝土结构的配筋计算原则”进行计算<sup>[5]</sup>。

所分析的截面位置见图7, 对应的截面应力见图8, 截面的弹性总拉力

$$T=Ab \quad (3)$$

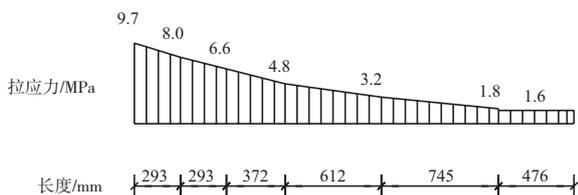


图8 截面应力

式中:  $A$ 为弹性应力图形中主拉应力图形总面积;  
 $b$ 为结构截面宽度, 0.56 m。

应力图形偏离线性分布较大时, 受拉钢筋截面面积 $A_s$ 应满足要求:

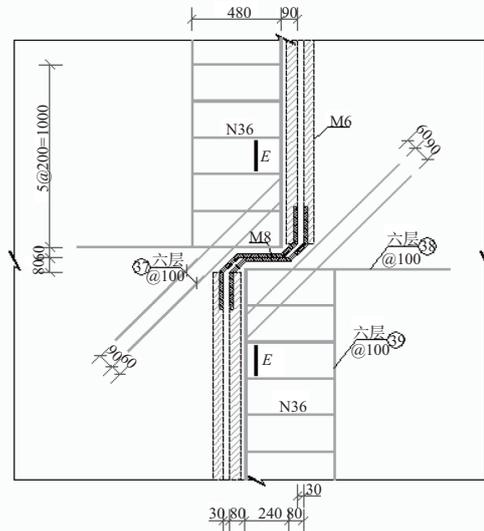
$$T \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.6T_c + f_y A_s) \quad (4)$$

式中:  $T_c$ 为混凝土承受压力,  $T_c=A_c b=46.95$  kN;  
 $A_c$ 为弹性应力图形中主拉应力值小于混凝土土轴心抗拉强度设计值 $f_t$ 的图形面积;  $f_y$ 为钢筋抗拉强度设计值, II级, 取310 MPa;  $\gamma_d$ 为钢筋混凝土结构的结构系数, 取1.20;  $A_s \geq 2\ 841$  mm<sup>2</sup>取6 $\phi$  25,  $A_s=2\ 945$  mm<sup>2</sup>。

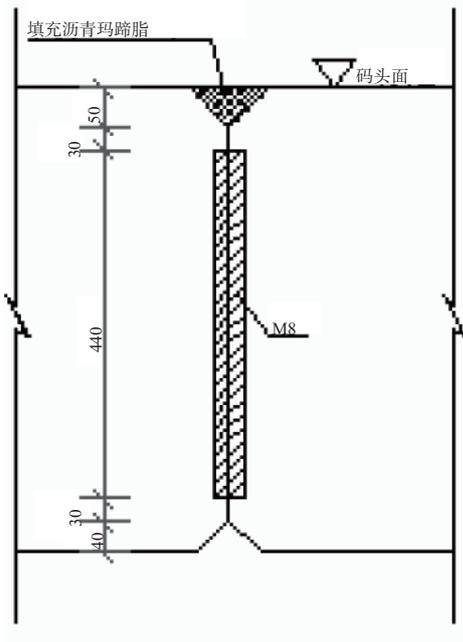
### 3 防护设计与实际应用效果

考虑到码头面车辆荷载较多, 而沥青玛蹄脂具有较高的抗车辙能力、温度稳定性, 以及优良的抗裂性。因此, 在分段间伸缩缝表层位置, 设置50 mm×50 mm倒角, 倒角形成的空隙内填充沥青玛蹄脂。码头凹凸缝见图9。为增强护边钢板与钢筋混凝土结构的连接, 护边钢板塞焊锚筋, 锚筋直径16 mm, 锚固长度不小于320 mm, 护边钢板结构见图10。

本工程于2008年建成并投入使用, 运营期间, 适用性良好, 结构安全稳定, 证明了凹凸缝结构防护设计合理可行, 现场实际应用效果见图11。



a) 平面



b) 剖面 (E-E)  
图9 凹凸缝



a)



b)

图11 现场实际应用效果

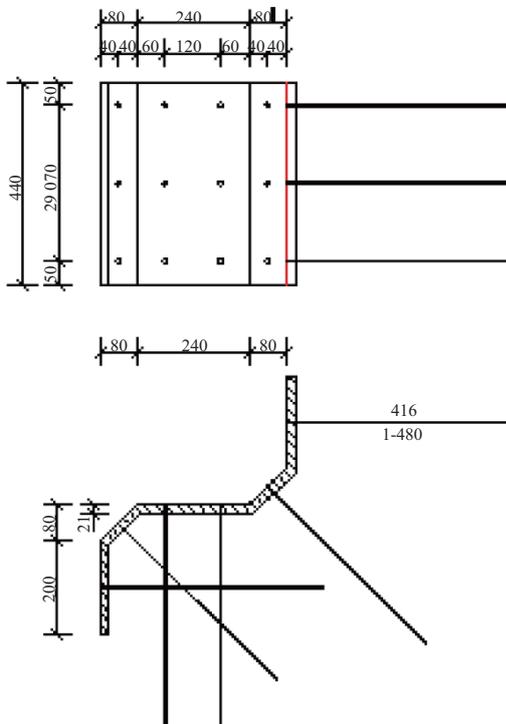


图10 护边钢板结构

#### 4 结语

港口工程中, 码头凹凸缝结构由于受到由船

舶系缆力、船舶撞击力、装卸机械荷载等作用引起的水平力<sup>[1]</sup>, 常常容易发生不同程度的损坏。

由于凹凸缝为不规则构件, 不能直接依据 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》进行配筋<sup>[3]</sup>, 而基于连续介质力学的有限元方法则可以很好地分析钢筋混凝土结构的内部应力<sup>[4]</sup>。本文基于 Robot 有限元软件, 对外荷载作用下的凹凸缝结构应力分布进行了计算, 并依据 SL191—2008《水工混凝土结构设计规范》中相关规定, 对凹凸缝结构进行了配筋和防护设计<sup>[5]</sup>。经工程实践验证, 该防护设计效果良好, 方法合理可行。

#### 参考文献:

- [1] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [2] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [3] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [4] Zienkiewicz O C.有限元方法固体力学和结构力学[M]. 6版. 北京: 世界图书出版公司, 2009.
- [5] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].

( 本文编辑 武亚庆 )