

· 港口 ·



# 基于ANSYS的某墩式码头升级改造 安全性评估方法研究

韩 阳, 张宝华

(交通运输部天津水运工程科学研究所 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 结合某实际工程, 采用ANSYS建立两种有限元模型对码头进行安全性计算。结果表明, 计算基床应力时应在沉箱与抛石基床间设置接触单元使计算结果更安全可靠, 同时结合规范对码头抗滑稳定性、抗倾稳定性进行计算分析, 采用ANSYS对码头进行安全性评估计算过程简便、计算结果准确。

**关键词:** ANSYS; 码头结构; 接触单元; 基床应力; 安全性评估

中国分类号: U 656.1<sup>+</sup>11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0035-005

## Safety assessment method of pier wharf's upgrading and reform based on ANSYS

HAN Yang, ZHANG Bao-hua

(Key Laboratory of Harbor Marine Structure Safety, Ministry of Transport,

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** Safety assessment is carried out for the wharf by establishing two finite element models by ANSYS. The result shows that contact element shall be set between the caisson and rubble-mound foundation when calculating the rubble-mound foundation's stress to guarantee a safer and more reliable result. The sliding stability and resistance to pour stability of wharf are also calculated and analyzed. It is shown that the calculation for wharf's safety assessment using ANSYS is simple in calculation and the calculated results is reliable.

**Key words:** ANSYS; wharf structure; contact element; rubble-mound foundation stress; safety assessment

随着国家经济的发展, 为了适应市场需求和船舶大型化趋势, 对已建码头升级改造是提高码头靠泊能力和吞吐能力的常见方法。在升级改造前应依据相关规范对码头进行检测与安全性评估。在安全性评估中, 利用有限元软件计算码头安全性与规范计算方法相比, 计算过程简便、计算结果精确。有限元软件ANSYS是融结构、流体、电磁场、热场分析于一体的大型通用有限元软件<sup>[1]</sup>, 在水运工程已得到广泛应用<sup>[2]</sup>。本文结合工程实例, 建立有接触和无接触ANSYS模型对某墩式码头进行安全性评估计算, 对比这两种模型计算结果, 有接触模型的结果更符合实际工程。

### 1 工程实例

某码头由9组重力墩和8跨钢桥组成, 全长412.3 m, 东侧可停靠15万t油轮1艘, 西侧可停靠8万t油轮1艘。1<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup>墩为首尾系缆墩(各墩结构形式一样), 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup>, 8<sup>#</sup>墩为横墩(各墩结构形式一样), 4<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>墩为靠船墩(各墩结构形式一样), 5<sup>#</sup>墩为装油平台。码头墩为圆筒沉箱重力墩, 码头墩处于薄土层, 基床处于风化程度较小的风化岩。沉箱直径9 m, 高19.7 m, 沉箱底为八角形, 底宽12.5 m。沉箱顶上为3层方块, 顶部方块为空心, 其余为实心方块。靠船墩墩顶高程10.0 m, 墩顶平面15万t侧为25 m × 12 m, 8万t侧为12 m × 12 m,

收稿日期: 2012-11-16

作者简介: 韩阳(1986—), 男, 硕士, 主要从事水工结构检测、诊断与加固技术研究。

其间由钢筋混凝土梁连接，连接部分宽7.6 m。  
15万t泊位侧设有3个C2000鼓型护舷。码头平面布置见图1，沉箱结构件见图2，靠船墩平面见图3，断面见图4。

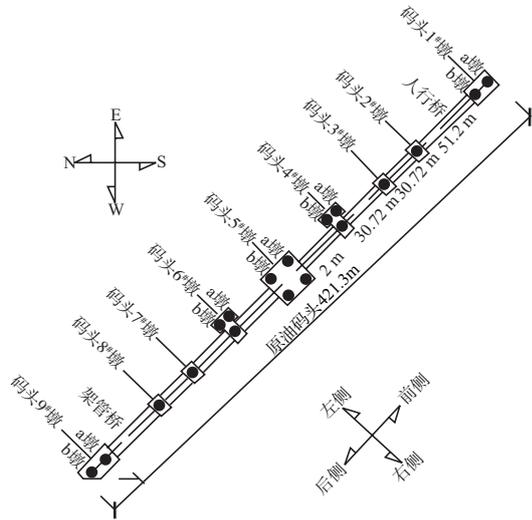


图1 码头平面布置

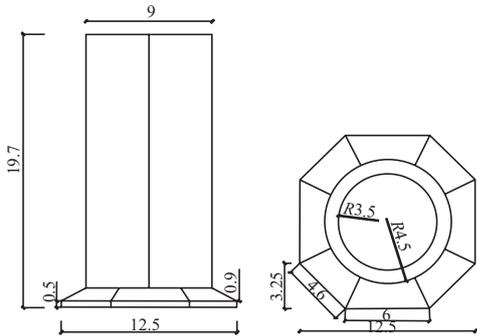


图2 沉箱结构

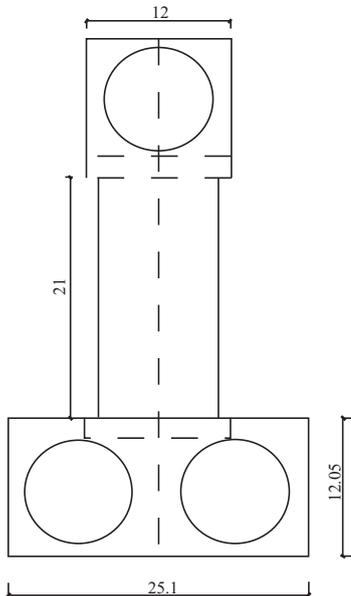
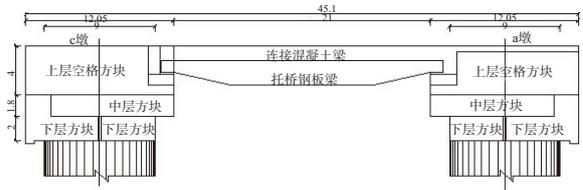
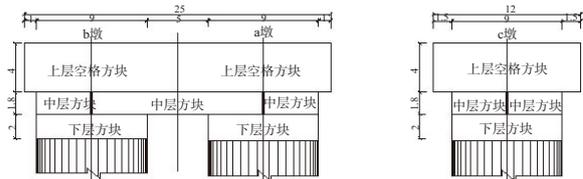


图3 靠船墩平面布置



a) 正立面 (前侧和后侧)



b) a墩和b墩侧面 (左侧和右侧) c) c墩侧面 (左侧和右侧)

图4 靠船墩断面

### 2 计算荷载

该码头由10万t升级到15万t，依据《港口码头结构安全性检测与评估指南》<sup>[3]</sup>以及JTJ 302—2006《港口水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[4]</sup>，结合当前码头检测评估工作的实际情况，根据JTS 167-2—2009《重力式码头设计施工规范》<sup>[5]</sup>中对墩式码头的计算要求，本次计算选择靠船墩进行抗滑稳定性、抗倾稳定性和基床应力进行计算。

#### 2.1 波浪力标准值<sup>[6]</sup>

对于 $D/L \leq 0.2$ 或 $b/L \leq 0.2$ 的小尺度桩柱，当 $H/d \leq 0.2$ 和 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 和 $d/L \geq 0.35$ 时，作用于水底面以上高度 $Z$ 处柱体全断面上与波向平行的正向力由速度分力和惯性力组成，可按下列公式计算：

$$P_D = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D D u |u| \quad (1)$$

$$P_I = \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\text{ch}(2\pi z/L)}{\text{sh}(2\pi d/L)} \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\text{ch}(2\pi z/L)}{\text{sh}(2\pi d/L)} \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

式中： $P_D$ 为波浪力的速度分力 (kN/m)； $P_I$ 为波浪力的惯性分力 (kN/m)； $a, b$ 为矩形柱体段面垂直和平行于波向的宽度 (m)； $D$ 为柱体的直径 (m)，当为矩形断面时， $D$ 改为 $b$  (m)； $A$ 为柱体的断面面积 ( $\text{m}^2$ )； $C_D$ 为速度力系数，对圆形

断面取1.2, 对方形或 $a/b \leq 1.5$ 的矩形断面取2.0;  $C_M$ 为惯性力系数, 对圆形断面取2.0, 对方形或 $a/b \leq 1.5$ 的矩形断面取2.2;  $\mu$ 和 $\frac{\partial u}{\partial t}$ 分别为水质点轨道运动的水平速度(m/s)和水平加速度(m/s<sup>2</sup>),  $\omega$ 为圆频率(s<sup>-1</sup>);  $t$ 为时间(s), 当波峰通过柱体中心线时 $t=0$ 。作用于整个柱体高度上的最大速度分力 $P_{D_{\max}}$ 和最大惯性分力 $P_{I_{\max}}$ 可按下列规定确定。

1) 沿柱体高度选取不同 $z$ 值, 按式(1)和(2)分别计算 $\omega t=0^\circ$ 和 $\omega t=270^\circ$ 时的 $P_{D_{\max}}$ 和 $P_{I_{\max}}$ , 计算点不宜少于5个点, 其中包括 $z=0$ ,  $d$ 和 $d+\eta$ 这三点,  $\eta$ 为任意相位时的波面在静水面以上的高度。当 $\omega t=0^\circ$ 时,  $\eta=\eta_{\max}$ ,  $\eta_{\max}$ 为波峰在静水面以上的高度; 当 $\omega t=270^\circ$ 时,  $\eta=\eta_{\max}-H/2$ 。若沿柱体高度断面有变化时, 则在交接面上下应分别进行计算。由 $P_{D_{\max}}$ 和 $P_{I_{\max}}$ 分布图形即可算出 $P_{D_{\max}}$ 和 $P_{I_{\max}}$ 。

2) 当 $z_1$ 和 $z_2$ 间柱体断面相同时, 作用于该段上的 $P_{D_{\max}}$ 和 $P_{I_{\max}}$ 分别按下式计算:

$$P_{D_{\max}} = C_D \frac{\gamma D H^2}{2} K_1 \quad (6)$$

$$P_{I_{\max}} = C_M \frac{\gamma A H}{2} K_2 \quad (7)$$

3)  $P_{D_{\max}}$ 和 $P_{I_{\max}}$ 对 $z_1$ 断面的力矩:

$$M_{D_{\max}} = C_D \frac{\gamma D H^2 L}{2\pi} K_3 \quad (8)$$

$$M_{I_{\max}} = C_M \frac{\gamma A H L}{4\pi} K_4 \quad (9)$$

4) 若沿整个柱体高度断面相同, 则在计算整个柱体上的 $P_{D_{\max}}$ 及其对水底面的力矩 $M_{D_{\max}}$ 应取 $z_1=0$ 和 $z_1=d+\eta_{\max}$ ; 而在计算整个柱体上的 $P_{I_{\max}}$ 及其对水底面的力矩 $M_{I_{\max}}$ 时应取 $z_1=0$ 和 $z_2=d+\eta_{\max}-H/2$ 。经计算, 极端高水位时的波浪力合力为6 860 kN, 合力矩为72 540 kN·m。

## 2.2 船舶撞击力

JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》中规定船舶靠岸时的撞击力标准值应根据船舶有效撞击能量和橡胶护舷性能曲线及靠船结构的刚度确定。而系泊船舶在横浪作用下对靠船结构产生的撞击力标准值, 对结构安全等级为1级的海港码

头, 应通过数学模型计算或物理模型试验确定; 对结构安全等级为2级且停靠船舶为10万吨级及其以上的码头, 宜通过数学模型计算确定; 对岸壁码头或横浪周期不大于6 s的墩式码头, 当无试验资料时可按JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》附录J确定, 本文根据对比靠岸时的撞击力、系泊船舶在横浪作用下对靠船结构产生的撞击力及物理模型试验结果, 最终船舶撞击力取物理模型试验结果9 000 kN。

## 3 有限元计算及分析

### 3.1 有限元模型的建立

建立靠船墩有限元模型, 有限元模型采用solid 187单元, 该单元为四面体实体单元, 能更好地适应本文模型的网格划分。为更好地模拟地基无限大的空间, 减小地基边界对计算结果的影响, 建立的天然地基边界长、宽各为抛石基床长、宽的3倍。地基四周及底部采用固定约束。天然地基厚约2 m, 下面为岩石层。分别建立沉箱与抛石基床有接触和无接触有限元模型, 本文选用无厚度的面-面接触单元对沉箱和抛石基床的接触面进行模拟, 采用KEYOPT(2)命令选择罚函数+拉格朗日的接触算法, 并利用KEYOPT(12)命令选择不分离但是可以滑动的接触方式。计算中沉箱和抛石基床的摩擦系数取0.6, 建立好的有限元模型见图1。材料参数见表1。

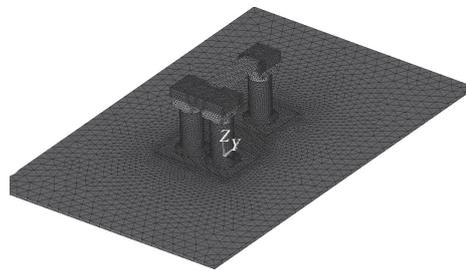


图1 有限元模型

表1 材料参数

材料(构件)	密度/(t·m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
水上混凝土	2.40	30	0.2
水下混凝土	1.40	30	0.2
空心块体混凝土	1.25	30	0.2
抛石基床	1.80	20	0.3
地基	1.80	2	0.3

### 3.2 有限元计算结果

根据JTS 167-2—2009《重力式码头设计施工规范》中对墩式码头的计算要求，计算工况为：  
 ①波浪力+竖向力；②15万t墩侧撞冲击力+竖向力。  
 工况①计算水位为极端高水位，工况②计算水位为设计低水位。图3~7为基床应力有接触和无接触模型计算结果。

根据计算结果可知：有接触模型基床应力大于无接触模型基床应力，有接触模型计算结果更安全可靠也符合实际工程，故在计算抗倾、抗

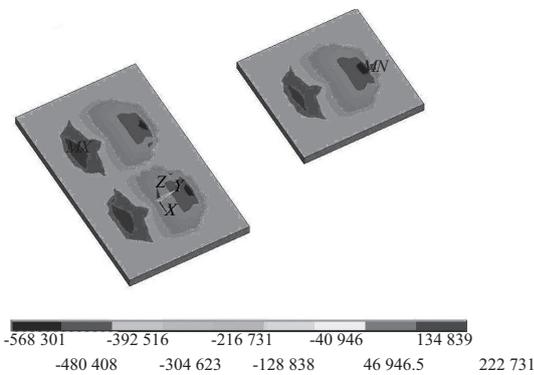


图2 工况①有接触基床应力 (单位:Pa)

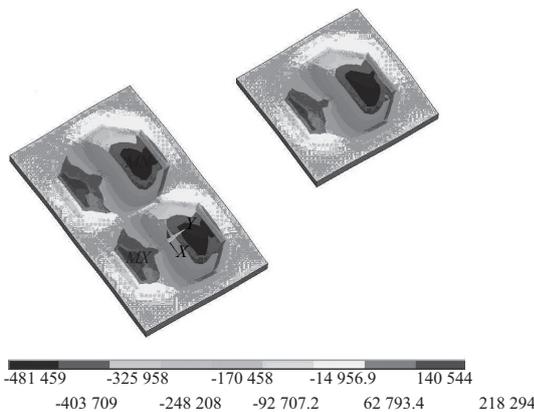


图3 工况①无接触基床应力 (单位:Pa)

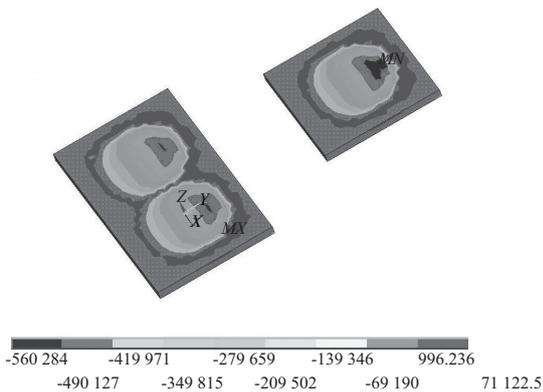


图4 工况②有接触基床应力 (单位:Pa)

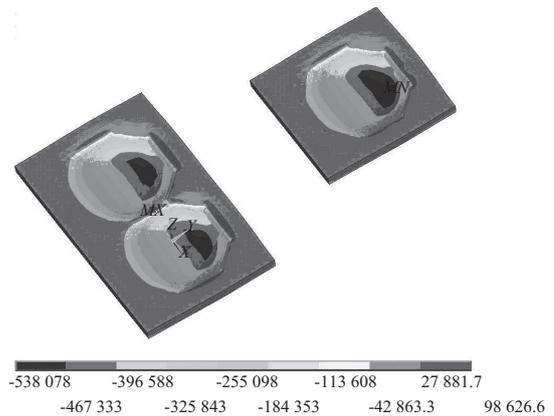


图5 工况②无接触基床应力 (单位:Pa)

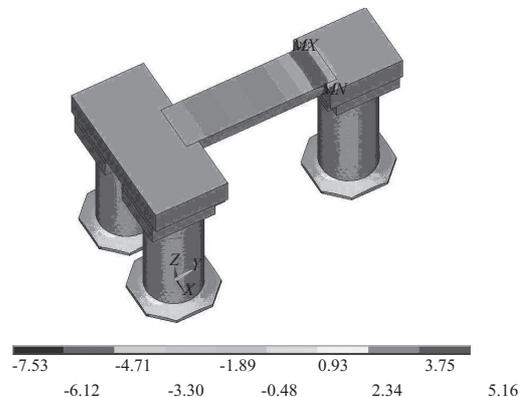


图6 工况①有接触垂直码头方向应力 (单位:MPa)

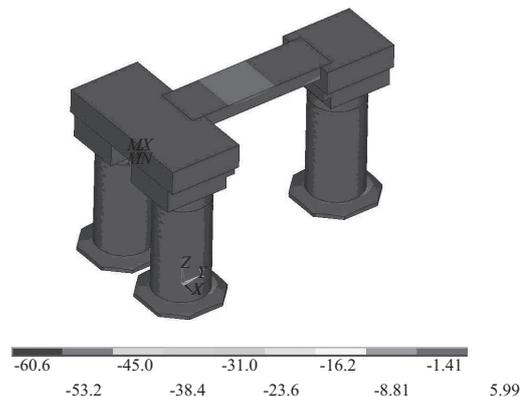


图7 工况②有接触垂直码头方向应力 (单位:MPa)

滑时也选用有接触模型。实体单元的内力提取采用ANSYS提供面操作功能项。面操作是通过定义一个面(surface)，将节点结果映射到该面并进行各种运算，以获得所需要的结果，可获得该面上的合力、平均应力和弯矩。该方法的精确度已经过实际工程验证<sup>[7-8]</sup>。

### 3.3 码头安全性评估

根据JTS 167-2—2009《重力式码头设计与施

工规范》, 沿圆筒墙底面抗滑稳定性计算公式为:

$$\gamma_0 \gamma_P P \leq (\gamma_G V_K + \gamma_U P_U) f \quad (10)$$

$$\gamma_0 \gamma_{PZ} P_Z \leq \gamma_G V_K f \quad (11)$$

式中:  $\gamma_0$ 为结构重要性系数,  $\gamma_0=1.0$ ;  $\gamma_G$ 为自重力的分项系数, 取 $\gamma_G=1.0$ ;  $f$ 为沉箱底面与抛石基床顶面的摩擦系数标准值, 取 $f=0.6$ ;  $\gamma_P$ 为波浪水平力分项系数,  $\gamma_P=1.2$ ;  $V_K$ 为作用在计算面上的结构自重力标准值(kN);  $\gamma_U$ 为波浪水平力分项系数,  $\gamma_U=1.2$ ;  $P_U$ 为波峰作用时作用在计算面上的波浪浮托力标准值(kN);  $\gamma_{PZ}$ 为船舶撞击力分项系数, 取 $\gamma_{PZ}=1.5$ ;  $P_Z$ 为船舶撞击力标准值(kN)。

根据JTS 167-2—2009《重力式码头设计与施工规范》, 沿圆筒墙底面前趾抗倾稳定性验算:

$$\gamma_0 (\gamma_P M_P + \gamma_U M_{PU}) \leq \frac{1}{\gamma_d} \gamma_G M_{VK} \quad (12)$$

$$\gamma_0 \gamma_{PZ} M_{PZ} \leq \frac{1}{\gamma_d} \gamma_G M_{VK} \quad (13)$$

式中:  $\gamma_d$ 为结构系数, 有波浪作用时,  $\gamma_d=1.35$ ;  $M_{VK}$ 为竖向合力标准值对方块(或沉箱)底面前趾的稳定力矩(kN·m);  $M_P$ 为波谷作用时水平波压力标准值对方块(或沉箱)底面前趾的倾覆矩(kN·m);  $M_{PU}$ 为波谷作用时作用在方块沉箱底面上的波浪浮托力标准值对方块沉箱底面前趾的稳定力矩(kN·m)。其它参数意义同抗滑稳定计算公式。 $M_{PZ}$ 为船舶撞击力标准值对方块沉箱底面前趾的倾覆力矩(kN·m)。

根据JTS 167-2—2009《重力式码头设计与施工规范》规定, 建筑物基地的最大应力应小于抛石基床的极限抗力限值, 即应满足承载力极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 \sigma_{\max} \leq \sigma_T \quad (14)$$

式中:  $\gamma_0$ 为结构重要性系数, 一般取1.0;  $\sigma_T$ 为抛石基床承载力设计值, 一般取600 kPa。对于非岩石地基, 为避免建筑物产生过大的不均匀沉降, 在基底面上合力的作用点距前趾的距离 $\xi$ 一般不小于基底宽度的1/4, 即 $\xi \geq 1/4$ 。对于岩石地基, 合力作用点的位置无须限制。

根据上述规范要求 and 有限元计算结果对该码头进行安全性评估。根据评估结果可知, 作用效应值均小于结构抗力值, 码头结构安全性满足规

范要求。评估结果见表2。

表2 评估结果

水位	类型	抗滑力/ kN	抗倾力矩/ (kN·m)	基床应力/ kPa
工况①极端高水位	作用效应	14 097	274 988	568
	结构抗力	34 510	322 100	600
工况②设计低水位	作用效应	13 500	283 500	560
	结构抗力	48 728	454 882	600

#### 4 结语

1) 某墩式码头的安全性评估实例表明: 基于ANSYS的码头升级改造安全性评估方法过程简便, 计算结果精确, 可以应用于实际工程。但在建模时应保证材料参数和边界条件的准确性以确保结果安全可靠。

2) 对比两种不同模型基床应力计算结果表明: 基于ANSYS计算墩式码头基床应力时, 应对沉箱与抛石基床间设置接触单元, 并按规范选取摩擦系数, 使计算结果更准确。

3) ANSYS的后处理中面处理方法提取结构内力方便准确。文中某墩式码头的安全性评估实例采用该方法提取结构内力并结合相关规范评估得到码头抗滑稳定性、抗倾稳定性及基床应力均满足规范要求。为该码头的升级改造提供了科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [2] 熊洪峰, 刘现鹏, 赵冲久. 基于外环境变化下高桩码头的水平承载力不足及补强研究[J]. 水运工程: 2011(4): 28-32.
- [3] 中交四航工程研究院有限公司. 港口码头结构安全性检测与评估指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [4] JTJ 302—2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S].
- [5] JTS 167-2—2009 重力式码头设计施工规范[S].
- [6] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [7] 蒋国栋, 于晓岩, 梁邦炎. 基于ANSYS二次开发求解实体单元内力在港口工程中的应用[J]. 水运工程, 2011(3): 81-85.
- [8] 肖仕宝, 吴遵奇. 基于ANSYS APDL沉箱内力参数化求解模型[J]. 水运工程, 2008(8): 10-13.

(本文编辑 武亚庆)