

# 具有凹坑损伤的海洋平台桩腿有限元分析

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE NOTCHED LEGS OF OCEAN PLATFORM STRUCTURES

柳春图<sup>1</sup> 秦太验<sup>2</sup> 徐永君<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 海洋工程部, 北京 100080) (2. 中国农业大学 工程基础科学部, 北京 100083)

LIU Chuntu<sup>1</sup> QIN Taiyan<sup>2</sup> XU Yongjun<sup>1</sup>

(1. Department of Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

(2. College of Engineering Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**摘要** 采用有限元分析方法, 将具有凹坑损伤的构件分割为三个子单元, 分别对各子单元建立单元刚度矩阵, 然后使用静凝聚法建立受损构件的等效梁和管单元的单元刚度矩阵的计算方法。为检验方法的正确性, 使用该方法对几种损伤构件进行强度计算, 并与有限元细化网格计算结果和试验结果进行比较, 结果表明, 三种结果符合很好。最后, 将等效单元计算程序接入 Super SAP 程序, 对受损后的平台整体结构进行应力计算和强度分析。

**关键词** 海洋平台 桩腿 有限元 凹坑损伤

**中图分类号** TE951 TB115

**Abstract** Using the finite element method, the notched member of the platform is divided into three sub-elements, and the element stiffness matrix of the every sub-element is derived. Then, the calculation method of the equivalent element stiffness matrix is obtained by the static condensation method, and the equivalent element for the damaged member is established. The stresses and displacements of some components with notch damages are calculated, and the numerical solutions agree with those obtained by the experiments and the fine mesh finite element method of the Super SAP procedure. Finally, using the Super SAP procedure combined with the procedure of the present equivalent element method, the stresses of a platform structure are calculated and analyzed.

**Key word** Ocean platform; Leg of platform; Finite element; Notch damage

Correspondent: LIU Chuntu, Fax: +86-10-62561284

Manuscript received 19990716, in revised form 19990827.

## 1 引言

海洋石油平台的桩腿是重要的支撑构件, 在平台安装及服役期间, 难免受到冲击和其他非正常载荷作用而产生损伤, 如出现表面凹坑等, 这些损伤将使桩腿的承载能力下降, 进而带来整个平台承载能力及使用寿命的降低。目前, 海洋石油平台结构分析仍使用以往的有限元方法, 由于没有考虑构件的损伤特别是桩腿受损的影响, 故不再能反映结构的真实受力情况。因此, 迫切需要发展受损后海洋平台结构的有限元分析技术。这一技术的发展及应用, 将为海洋平台结构的分析与评估, 提供更为精确和符合实际的分析手段, 将为海洋平台结构的维修间隔、构件更换周期、结构承载潜力的挖掘, 提供科学合理的决策依据, 从而大大提高海洋平台的综合经济效益。

近些年来, 海洋石油平台上的构件特别是桩腿受损

后的有限元分析技术受到海洋工程界的高度重视。Smith 等人<sup>[1]</sup> 在实验方面做了不少研究工作, 同时在有限元计算方面也进行了一些研究工作。理论分析方面研究做的较多的有 Taby 等人<sup>[2]</sup>。有限元方法大多是利用板和壳单元对受损杆进行有限元分析, 其计算精度取决于网格的细化程度。Gu 等人<sup>[3]</sup> 针对带有非直线凹陷损伤构件, 进行弹塑性强度分析, 并采用多次迭代法将受损构件作为等效梁强度拼装到整体平台结构中。

综合国内外的情况, 尽管在受损构件有限元分析方面已做了一些工作, 但大都是使用现有的有限元计算程序进行计算和分析, 由于其操作比较繁琐, 而且很难真正将受损构件与平台整体结构结合, 所以在海洋工程上的实际应用仍有很大的距离。为使计算更加方便和趋于工程实用, 本文针对凹坑损伤提出受损桩腿等效梁和管单元有限元分析方法, 建立损伤构件的等效梁和管单元刚度矩阵, 并将其接入 Super SAP 程序,

19990716 收到初稿, 19990827 收到修改稿。

柳春图, 男, 1935 年 2 月生, 江苏省南通市人, 汉族。中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师。主要研究方向为广义变形原理、板壳理论、夹层结构、断裂力学、疲劳等, 在国内外刊物上发表学术论文 100 余篇, 夹层结构的研究成果及专著《夹层板壳的弯曲、振动和稳定性》获全国科学大会重大成果奖, 含裂纹板壳的断裂分析成果获中国科学院科技进步二等奖, 海底管道研究成果获国家经委三等奖, 海洋平台监测研究成果获国家科技进步三等奖。现任国际断裂理事, 远东—大洋洲断裂组织常务理事, 中国科学院海洋工程研究中心副主任, 北京力学学会理事长等。

然后对损伤后的海洋平台整体结构进行计算和分析。

## 2 等效单元刚度矩阵的计算

海洋平台的支撑构件大都由薄壁管构成,当壁厚与管外径比小于十分之一时,则支撑构件按管单元处理<sup>[4]</sup>;对于壁厚与外径比不小于十分之一的圆管及其他横截面形状的构件均按梁单元处理。考虑一带有凹坑损伤圆管或梁构件,建立其局部坐标系  $xyz$ ,如图 1a,其中  $x$  轴与构件无损伤时的中性轴重合, $y$  轴和  $z$  轴为构件无损伤时的形心主惯性轴。为建立其等效单元,将其分割为三个子单元,其中间部分为损伤区域(称为损伤单元),对三个子单元分别建立单元刚度矩阵,然后采用静凝聚法消除内部自由度,由此便可获得受损构件的等效梁或管单元刚度矩阵。对于无损伤单元,其单元刚度矩阵可按正常的梁或管单元进行计算,这里不再具体给出。

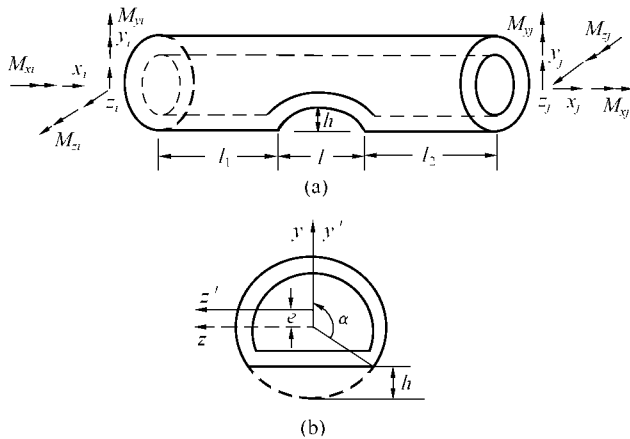


图1 带有凹坑损伤构件

Fig.1 A component with a notch damage

### 2.1 损伤梁单元的单元刚度矩阵的计算

将损伤部分用一短梁来代替,其横截面形状如图 1b 所示(以圆管为例),其中  $y$  轴和  $z$  轴为其形心主惯性轴。将其左节点记为 1,右节点记为 2,并记  $xyz$  系下的单元节点位移向量为  $\{U\} = \{u_1, v_1, w_1, x_1, y_1, z_1, u_2, v_2, w_2, x_2, y_2, z_2\}^T$ ,对应的节点载荷向量为  $\{F\} = \{X_1, Y_1, Z_1, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}, X_2, Y_2, Z_2, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}\}^T$ ;  $xyz$  系下的单元节点位移向量为  $\{\bar{U}\} = \{\bar{u}_1, \bar{v}_1, \bar{w}_1, \bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1, \bar{u}_2, \bar{v}_2, \bar{w}_2, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_2\}^T$ ,对应的节点载荷向量为  $\{\bar{F}\} = \{\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1, \bar{M}_{x1}, \bar{M}_{y1}, \bar{M}_{z1}, \bar{X}_2, \bar{Y}_2, \bar{Z}_2, \bar{M}_{x2}, \bar{M}_{y2}, \bar{M}_{z2}\}^T$ ,则  $xyz$  系下的单元刚度方程为<sup>[5]</sup>

$$\{\bar{F}\} = [\bar{K}]\{\bar{U}\} \quad (1)$$

式中  $[\bar{K}]$  为  $xyz$  系下的单元刚度矩阵。

为了与两端的无损伤单元组集成损伤构件的刚度矩阵,需将局部坐标系  $xyz$  下的单元刚度矩阵转换为坐标系  $xyz$  下的单元刚度矩阵,利用节点位移和节点

载荷的坐标转换关系,可得损伤单元在坐标系  $xyz$  下的单元刚度方程为

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (2)$$

限于篇幅,这里不再给出单刚  $[K]$  的具体表达式。

### 2.2 损伤管单元的单元刚度矩阵的计算

将受损构件的损伤区域简化为一细管,由于损伤对壁厚几乎没有影响,设构件受损后壁厚不变,假设损伤区域外径变为  $D_0 = D - h$ ,其中  $D$  为原管的外径, $h$  为凹坑深度。该单元的刚度矩阵计算与正常圆管单元相同。为了单元的组集,将形心主轴坐标系下的单元刚度矩阵转换为坐标系  $xyz$  下的单元刚度矩阵,方法与梁单元相同。

### 2.3 损伤构件的等效单元刚度矩阵的计算

将受损构件的各个子单元的单元刚度矩阵在局部坐标系  $xyz$  下进行组集,可得到受损构件的单元刚度矩阵,其中包含有非边节点项。为求得损伤构件的等效单元刚度矩阵,以便组集到平台整体结构中,必须将内部自由度从损伤构件的单刚中凝聚掉。若用  $\{U_a\}$  表示损伤构件的边节点位移向量,  $\{F_a\}$  表示对应的边节点载荷向量,  $\{U_b\}$  表示损伤构件的内部节点位移向量(即损伤单元的节点位移向量),则损伤构件的单元刚度方程可简单地表示如下

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

由上式消去内部节点自由度  $\{U_b\}$ ,即得损伤构件的等效单元刚度矩阵为

$$[\tilde{K}] = [K_{aa}] - [K_{ab}][K_{bb}]^{-1}[K_{ba}] \quad (4)$$

## 3 数值结果

为了检验上述受损构件的等效梁和管单元(简称等效单元)的正确性及说明其应用,这里进行了具有凹坑损伤圆管的三点弯曲试验,并对若干算例作了计算。

### 3.1 具有凹坑损伤悬臂梁

带有凹坑损伤的圆管如图 2 所示,圆管直径  $D = 600$  mm,厚度  $t = 10$  mm,在圆管中部有一长度为 2.4 m 的凹坑,其深度  $h = 120$  mm。有限元细化网格如图 3 所示( $xy$  平面图),其中网格单元为四边形和三角形单元,并在损伤区域网格加密一倍,节点数为 2 080,单元数为 2 112。对于无损伤管,有限元网格单元为四边形,节点数为 1 136,单元数为 1 120。表 1 给出不同载荷下管自由端挠度,并与受损前进行比较。由表可见,等效单元程序与细化网格计算结果基本符合。

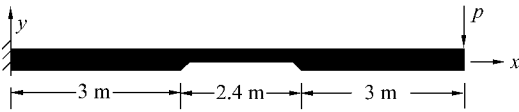


图 2 带有凹坑损伤圆管

Fig.2 A pipe with a notch

表 1 不同载荷下管自由端挠度

Tab.1 The deflection at the end of the pipe under different loads mm

载荷 P/kN	1	2	3	4	5	
等效单元	受损前	- 1.224	- 2.449	- 3.673	- 4.898	- 6.122
	受损后	- 1.463	- 2.926	- 4.389	- 5.852	- 7.315
细化网格	受损前	- 1.205	- 2.409	- 3.614	- 4.818	- 6.023
	受损后	- 1.442	- 2.884	- 4.326	- 5.768	- 7.211

### 3.2 具有凹坑损伤圆管三点弯曲试验

试样材料为普通低碳钢钢管,其直径  $D = 41$  mm,厚度为  $t = 3$  mm,加载方式为三点弯曲,如图 4 所示,千分表置于试验机底座上进行位移测量,梁的跨度  $L = 300$  mm,集中力载荷  $P$  作用于管的中部。使用等效单元计算程序对该受损钢管进行计算,表 2 给出凹坑深  $h = 7.7$  mm、长  $l = 60$  mm 的管的中点挠度的计算结果和试验结果,并与受损前进行比较。表 3 给出凹坑深  $h = 9.8$  mm、长  $l = 95$  mm 在不同位置时钢管的中点挠度的计算结果和试验结果,并与受损前进行比较。由表可见计算结果和试验结果基本符合。

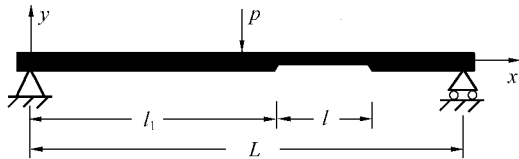


图 4 带凹坑损伤管

Fig.4 A pipe with a notch

表 2 管中心挠度 ( $l_1 = 190$  mm,  $h = 7.7$  mm,  $l = 60$  mm)

Tab.2 The deflection at the centre of the pipe ( $l_1 = 190$  mm,  $h = 7.7$  mm,  $l = 60$  mm) mm

载荷 P/kN	1.96	3.92	5.88	7.84	9.8	
等效单元	无损伤	- 0.081 5	- 0.162 9	- 0.244 4	- 0.325 9	- 0.407 3
	有凹坑	- 0.091 8	- 0.183 6	- 0.275 4	- 0.367 2	- 0.459 0
试验结果	无损伤	- 0.081	- 0.161	- 0.242	- 0.323	- 0.404
	有凹坑	- 0.086	- 0.172	- 0.259	- 0.345	- 0.431

表 3 管中心挠度 ( $h_1 = 9.8$  mm,  $l = 95$  mm)

Tab.3 The deflection at the centre of the pipe ( $h = 9.8$  mm,  $l = 95$  mm) mm

载荷 P/kN	1.96	3.92	5.88	7.84	9.8	
等效单元	无损伤	- 0.081 5	- 0.162 9	- 0.244 4	- 0.325 9	- 0.407 3
	$l_1 = 103$ mm	- 0.119 9	- 0.239 8	- 0.359 8	- 0.479 7	- 0.599 6
	$l_1 = 178$ mm	- 0.101 4	- 0.202 7	- 0.304 1	- 0.405 4	- 0.506 8
试验结果	无损伤	- 0.081	- 0.161	- 0.242	- 0.323	- 0.404
	$l_1 = 103$ mm	- 0.106	- 0.213	- 0.319	- 0.425	- 0.532
	$l_1 = 178$ mm	- 0.105	- 0.210	- 0.316	- 0.421	- 0.526

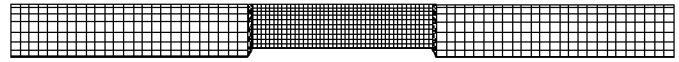


图 3 损伤构件有限元网格模型(前视图)

Fig.3 The mesh of the damaged pipe (front view)

### 3.3 移动式平台整体结构

某钻井平台由近似三角形的平台体和三根桩腿组成,桩腿结构由竖向齿条(钢管组合截面)、横向撑杆和斜撑组成,总高度为 86.44 m,共有 990 个梁单元,如图 5 所示。由于平台结构的支撑主体是桩腿,故这里只对平台的桩腿进行有限元计算和分析。为方便起见,将船体简化为六根刚性梁,将竖向齿条简化为圆钢管,其外径为 810.8 mm,壁厚为 48 mm,横向撑杆和斜撑的外径为 323.85 mm,壁厚为 22.22 mm,材料的弹性模量  $E = 210$  GPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。总体坐标系以平台首向为  $x$  轴,左舷方向为  $y$  轴,竖向向上为  $z$  轴,以平台尾部中部为  $xy$  平面原点,以水平面为  $xy$  平面。竖向总载荷为 75 922 kN,横向风总载荷(沿  $x$  轴方向)为 2 426 kN,波浪总载荷(沿  $x$  轴方向)为 5 671 kN。在桩腿无损伤的情况下,最大压应力发生在前桩腿的底部 737 号单元的底端部,其值为 - 375.8 MPa,最大拉应力发生在左舷桩腿的底部 724 号单元的底端部,其值为 173.9 MPa。

现设桩腿 737 号单元带有凹坑损伤,该单元长度  $L = 4.04$  m,凹坑位于该单元的中部,此时随着损伤程度的增加,桩腿结构出现较弱应力重分布现象,损伤对桩腿结构的底部影响相对较大。图 6 分别给出桩腿整体结构横向( $x$  轴方向)最大位移随凹坑深度和凹坑长

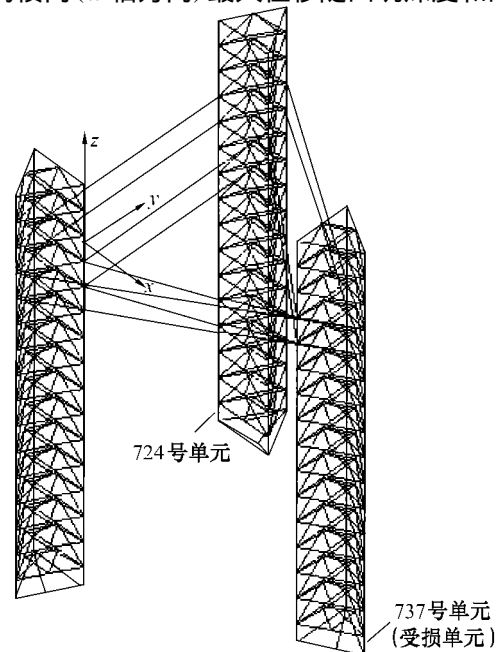
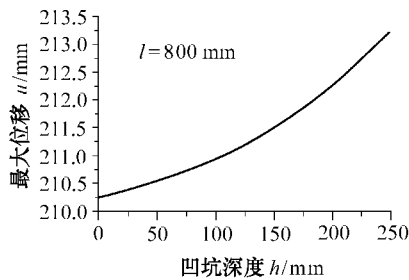


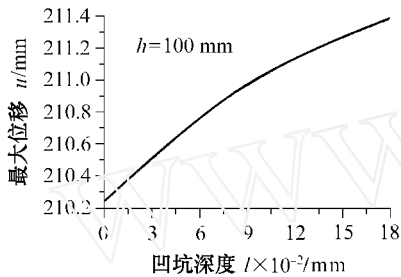
图 5 平台桩腿结构图

Fig.5 The leg of a platform



(a) 最大横向位移随凹坑深度的变化

(a) The maximal cross displacement varying with the depth of the notch



(b) 最大横向位移随凹坑长度的变化

(b) The maximal cross displacement varying with the length of the notch

图 6

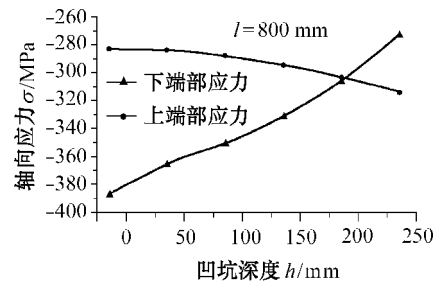
Fig. 6

度变化的系曲线,图 7 分别给出受损单元两端最大轴向应力随凹坑长度和凹坑深度变化的关系曲线。由图可知,随着损伤程度的增加,桩腿结构的最大横向位移增大,整体结构的强度也随之减弱。

#### 4 结论

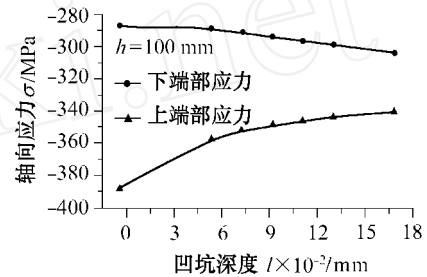
本文针对海洋平台结构中出现的凹坑损伤,使用有限单元法建立受损构件等效梁和管单元的有限元计算方法,并编制相应的计算程序,在此基础上,将其接入 Super SAP 程序,然后对损伤后的海洋平台整体结构进行计算和分析。

通过 Super SAP 有限元细化网格和试验的考核,以及对典型例子的计算和分析可见,本文所建立的有限元分析技术是实用的、可行的,操作简单,结果可靠,是一种比较理想的受损后海洋石油平台桩腿结构分析计算方法。



(a) 受损单元端部应力随凹坑深度的变化

(a) The stresses of the damaged element varying with the depth of the notch



(b) 受损单元端部应力随凹坑长度的变化

(b) The stresses of the damaged element varying with the length of the notch

图 7

Fig. 7

#### 致谢

本文研究得到中国船级社的资助,在此表示感谢。

#### References

- 1 Smith C S, Kirkwood W, Swan J W. Buckling strength and post-collapse behavior of tubular bracing members including damage effects. Proc. 2nd Inter. Conf. on Behavior of Offshore Structures, London, 1979.
- 2 Taby J, Mban T, Rashed S M H. Theoretical and experimental study of the behavior of damaged tubular members. Report SK/R52, Division of Marine Structures, Norwegian Institute of Technology, 1980.
- 3 Gu Y N, Li R P, Wang Z N. On the assessment of strength of platform with damaged members. Proc. 2nd Inter. Offshore and Polar Engineering Conf., San Francisco, USA, 1992. 14 ~ 19.
- 4 Bao S H, Zhou J. Mechanics of thin-walled structures. Beijing: China Architecture & Building Press, 1979 (In Chinese) (包世华,周坚.薄壁构件结构力学.北京:中国建筑工业出版社,1991).
- 5 Zhu B F. Finite element principle and its applications. Beijing: China Hydraulic and Electrical Press, 1979 (In Chinese) (朱伯芳.有限单元原理与应用.北京:水利电力出版社,1979).

·下期发表论文摘要预报·

### 混沌状态下非线性隔振装置的隔振性能评估

姜荣俊 朱石坚 翁雪涛

(海军工程大学 振动与噪声研究所,武汉 430033)

**摘要** 针对混沌状态下非线性隔振装置的特殊隔振性能,从非线性系统的隔振原理及混沌隔振原理出发,提出在激励频率为优势频率的简谐激励下,使隔振装置处于特定的混沌状态,通过振级落差公式评估隔振装置的整体隔振性能,通过优势频率处的能量衰减评估隔振装置对特定优势频率的局部隔离效果,从而对混沌状态下的非线性隔振装置的隔振性能进行综合评估。并通过实例对该方法进行了验证。

**关键词** 混沌 振动 性能 评估

**中图分类号** O322 O328