

文章编号: 1005-9865(2000)03-0015-05

# 具有裂纹损伤桩腿的海洋石油平台有限元分析\*

秦太验<sup>1</sup>, 柳春图<sup>2</sup>, 段梦兰<sup>3</sup>, 阚常珍<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 工程基础科学部, 北京 100083; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;  
3. 中国船级社海工部, 北京 100006)

**摘 要:** 采用有限元分析方法和断裂力学方法, 将含裂纹构件的裂纹段以线弹簧处理, 建立了带有裂纹损伤桩腿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了强度计算, 并与有限元细化网格计算结果和实验结果进行比较, 最后将等效单元计算程序接入大型有限元程序 Super SAP, 对受损后的平台整体结构进行了应力计算和强度分析。

**关键词:** 海洋平台; 桩腿; 有限元; 裂纹

中图分类号: O 241, TE951 文献标识码: A

## Finite element analysis of cracked members of ocean platform structures

QIN Tai-yan<sup>1</sup>, LIU Chun-tu<sup>2</sup>, DUAN Meng-lan<sup>3</sup>, KAN Chang-zhen<sup>2</sup>

(1. Dept. of Basic Engineering Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. Dept. of Ocean Engineering, China Classification Society, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The finite element stiffness matrix of the equivalent beam or pipe of the cracked leg of the platform is derived using the finite element method. The stresses and displacements of some damaged components are calculated, and the numerical solutions are in good agreement with those obtained by the fine mesh finite element method of the Super SAP procedure. Finally, by using the Super SAP combined with the procedure of the proposed equivalent element method, the stresses of some platform structures are calculated and analyzed.

**Key words:** ocean platform; leg of platform; finite element; crack

海洋石油平台桩腿是重要的支撑构件, 在平台的安装及服役期间, 难免受到海浪或船舶的冲击和其它非正常载荷作用而产生损伤, 如出现表面裂纹等。这些损伤将使桩腿的承载能力下降, 从而带来整个平台承载能力及剩余寿命的降低。目前, 海洋石油平台结构分析仍使用传统的有限元分析方法, 由于没有考虑杆件的损伤, 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, 海洋石油平台上的杆件, 特别是桩腿受损后的有限元分析技术受到了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。理论分析研究工作做的较多的有 Taby 等人<sup>[2]</sup>、Ellinas<sup>[3]</sup>及 Ueda 等人<sup>[4]</sup>。有限元方法大多是利用板和壳单元对受损杆进行

\* 收稿日期: 1999-04-15

作者简介: 秦太验(1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构力学研究

有限元分析, 其计算精度取决于网格的细化程度。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, 本文针对裂纹损伤, 提出了受损构件等效梁单元和等效管单元有限元分析方法, 建立其等效单元刚度矩阵, 并将其接入大型有限元计算程序, 如 Super Sap 等, 然后对受损后的海洋平台整体结构进行计算和分析。

### 1 受损构件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>[5]</sup>。考虑一含裂纹圆管或矩形截面梁构件, 假定裂纹面与构件垂直, 建立如图 1 所示局部坐标系。为建立其等效梁或管单元, 将损伤构件沿裂纹面两侧处分割为两个无损梁或管单元和一个无长度裂纹单元(简称损伤单元), 其中的裂纹单元称为线弹簧, 两个无损梁或管单元由线弹簧相连。对三个子单元分别建立单元刚度矩阵, 然后采用静凝聚法可求得受损构件的等效单元刚度矩阵。无损单元的单元刚度矩阵可按常规梁或管单元计算, 限于篇幅这里不再具体给出<sup>[6]</sup>, 下面给出损伤单元(即线弹簧)单刚的计算方法。

#### 1.1 损伤单元的单元刚度矩阵的计算

考虑一无长度裂纹梁或管, 记其两端的节点编号分别为 1 和 2, 如图 2 所示。

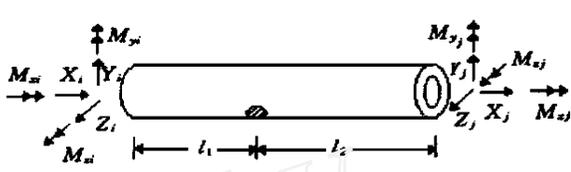


图 1 具有裂纹损伤构件

Fig 1 The cracked component

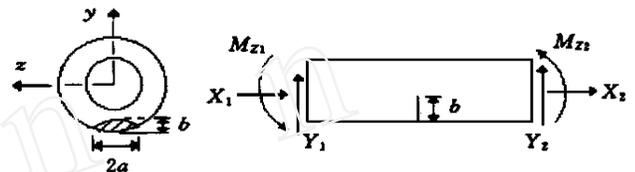


图 2 裂纹单元

Fig 2 The cracked element

由于不考虑单元的长度, 由静力平衡条件可知, 两端的节点力满足关系

$$X_1 = -X_2 \quad Y_1 = -Y_2 \quad M_{z1} = -M_{z2} \tag{1}$$

记节点位移差为:  $u = u_2 - u_1, \quad v = v_2 - v_1, \quad \theta = \theta_2 - \theta_1$  (2)

则节点位移与节点力之间有如下关系<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} u = \lambda_{uu} X_2 + \lambda_{u\theta} M_{z2} \\ \theta = \lambda_{\theta X} X_2 + \lambda_{\theta\theta} M_{z2} \\ v = \lambda_{vv} Y_2 \end{cases} \tag{3}$$

式中

$$\begin{aligned} \lambda_{uu} &= \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \left(\frac{K_{IX}}{X_2}\right)^2 dS & \lambda_{u\theta} &= \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \frac{K_{IX}}{X_2} \cdot \frac{K_{IV}}{M_{z2}} dS \\ \lambda_{\theta\theta} &= \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \left(\frac{K_{IV}}{M_{z2}}\right)^2 dS & \lambda_{vv} &= \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \left(\frac{K_{IIV}}{Y_2}\right)^2 dS \end{aligned}$$

其中  $E$  为材料的弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $S$  为裂纹面面积,  $K_{IX}, K_{IIV}, K_{IV}$  分别为  $X_2, Y_2, M_{z2}$  引起的各型应力强度因子。应力强度因子可由下式计算<sup>[8]</sup>

$$K_{I} = \frac{M_N \alpha + M_B \beta}{E(k)} \sqrt{\pi b} \quad K_{II} = \frac{M_Q \tau}{E(k)} \sqrt{\pi b} \tag{4}$$

式中,  $b$  为裂纹深度,  $M_N, M_B, M_Q$  分别为与裂纹和横截面尺寸有关的拉伸、弯曲、剪切应力修正系数,  $\alpha, \beta, \tau$  分别为无裂纹时轴向力  $X_2$ 、弯矩  $M_{z2}$ 、剪力  $Y_2$  引起的热点应力,  $E(k)$  为全椭圆积分。若梁横截面为矩形截面, 则应力强度因子有简单的显式表达式<sup>[8]</sup>, 即

$$\begin{aligned} K_{IX} &= \frac{X_2}{boh} \sqrt{\pi b} (1.12 - 0.23\xi + 10.6\xi^2 - 21.7\xi^3 + 30.4\xi^4) \\ K_{IV} &= \frac{6M_{z2}}{boh^2} \sqrt{\pi b} \sqrt{\frac{2}{\pi\xi} \tan \frac{\pi\xi}{2} \cdot \frac{0.923 + 0.199[1 - \sin(\pi\xi/2)]^4}{\cos(\pi\xi/2)}} \end{aligned} \tag{5}$$

$$K_{IIY} = \frac{Y_2}{b_0 h} \sqrt{\pi b} \frac{(3\xi - 2\xi^2)}{\sqrt{1 - \xi}} (1.122 - 0.561\xi + 0.085\xi^2 + 0.8\xi^3)$$

其中  $b_0, h$  分别为矩形截面的宽和高,  $\xi = b/h_0$

由式(1~ 3), 可得裂纹梁(或管)单元的单元刚度方程为

$$\begin{bmatrix} \lambda_{\theta\theta}/\Delta & 0 & -\lambda_{v\theta}/\Delta & -\lambda_{\theta\theta}/\Delta & 0 & \lambda_{v\theta}/\Delta \\ & 1/\lambda_{vv} & 0 & 0 & -1/\lambda_{vv} & 0 \\ \text{对} & & \lambda_{uu}/\Delta & \lambda_{v\theta}/\Delta & 0 & -\lambda_{uu}/\Delta \\ & & & \lambda_{\theta\theta}/\Delta & 0 & -\lambda_{v\theta}/\Delta \\ & & & & 1/\lambda_{vv}/\Delta & 0 \\ \text{称} & & & & & \lambda_{uu}/\Delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ M_{z1} \\ X_2 \\ Y_2 \\ M_{z2} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中  $\Delta = \lambda_{uu}\lambda_{\theta\theta} - \lambda_{v\theta}^2$ 。由于裂纹对扭转及  $xz$  平面内弯曲影响比较小, 故设  $\theta_1 = \theta_2, w_1 = w_2, \theta_1 = \theta_2$ 。

### 1.2 受损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单元局部坐标系  $xyz$  下进行组集, 就可得到受损构件的单元刚度矩阵, 其中包含有非边节点项。为求得受损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受损构件的单刚中凝聚掉。若用  $\{U_a\}$  表示受损构件的边节点位移向量,  $\{F_a\}$  表示对应的边节点载荷向量,  $\{U_b\}$  表示损伤单元(即线弹簧)的节点位移向量, 则受损构件的单元刚度方程可表示为

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

如果受损构件还受单元荷载作用, 则将其转化为等效节点载荷作用于边节点上<sup>[6]</sup>。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

$$[\bar{K}] = [K_{aa}] - [K_{ab}][K_{bb}]^{-1}[K_{ba}] \quad (8)$$

## 2 数值结果

为了验证上述损伤构件等效梁和管单元有限元方法的正确性及说明其应用, 进行了带有表面裂纹梁的三点弯曲实验, 并对若干算例作了计算。

### 例 1 带有穿透裂纹圆管

损伤构件模型及 Super S A P 有限元细化网格如图 3、图 4 所示, 管的外径为 1m, 壁厚为 0.025m, 跨度为 10m, 管中部有一穿透裂纹, 裂纹长度为 0.195m, 集中力载荷  $P$  作用于管的中部, 其中网格单元为四边形和三角形板单元, 损伤附近区域网格加密一倍, 节点总数为 937, 单元总数为 945。表 1 给出了管的中点挠度等效单元程序及有限元细化网格的计算结果, 并与无裂纹时进行比较。由表可见, 两种计算结果符合很好。

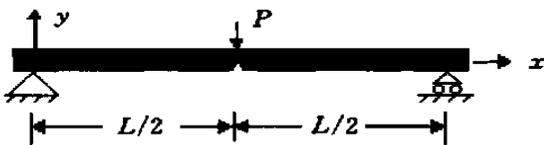


图 3 带穿透裂纹圆管  
Fig 3 A pipe with a pierced crack



图 4 带裂纹圆管有限元细化网格图  
Fig 4 The fine mesh of the cracked pipe

表 1 管中心挠度(单位:m)

Tab 1 The deflection at the centre of the pipe (in it m)

P (kN)		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
等效单元	无裂纹	- 0.1090E- 4	- 0.2179E- 4	- 0.3269E- 4	- 0.4358E- 4	- 0.5448E- 4
	有裂纹	- 0.1094E- 4	- 0.2188E- 4	- 0.3281E- 4	- 0.4375E- 4	- 0.5469E- 4
细化网格	无裂纹	- 0.1091E- 4	- 0.2182E- 4	- 0.3273E- 4	- 0.4364E- 4	- 0.5455E- 4
	有裂纹	- 0.1098E- 4	- 0.2196E- 4	- 0.3294E- 4	- 0.4392E- 4	- 0.5490E- 4

例 2 带有表面裂纹梁三点弯曲实验

试样材料为普通低碳钢,其尺寸为  $0.22\text{m} \times 0.02\text{m} \times 0.025\text{m}$ ,加载方式为三点弯曲,如图 5 所示,千分表置于试验机底座上进行位移测量,梁的跨度  $L = 0.22\text{m}$ ,集中力载荷  $P$  作用于梁的中部,裂纹深度为  $0.012\text{m}$ 。分别使用损伤构件等效单元计算程序和 Super SAp 有限元细化网格进行计算,其中网格单元为四边形和三角形平面元,损伤附近区域网格加密,图 6 给出了 Super SAp 细化网格图。表 2 和表 3 分别给出了裂纹处位置不同时梁的中点挠度,并与无裂纹时进行比较。由表可见,两种计算结果与实验基本符合,有限元细化网格结果与实验偏差较大。

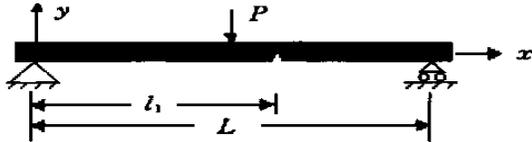


图 5 带裂纹矩形截面梁

Fig 5 A cracked rectangular beam



图 6 裂纹梁细化网格模型

Fig 6 The fine mesh of the cracked beam

表 2 梁中心挠度 ( $l_1 = L/2$ ) (单位: mm)

Tab. 2 The deflection at the centre of the beam ( $l_1 = L/2$ ) (un it: mm)

$P$ (kN)		0.392	0.784	1.176	1.568	1.960
等效单元	无裂纹	- 0.015 9	- 0.031 8	- 0.047 7	- 0.063 6	- 0.079 5
	有裂纹	- 0.023 5	- 0.047 0	- 0.070 5	- 0.094 0	- 0.117 5
细化网格	无裂纹	- 0.016 5	- 0.032 9	- 0.049 4	- 0.065 8	- 0.082 3
	有裂纹	- 0.028 3	- 0.056 6	- 0.084 9	- 0.102 2	- 0.127 4
实验结果	无裂纹	- 0.016	- 0.032	- 0.048	- 0.064	- 0.080
	有裂纹	- 0.025	- 0.051	- 0.076	- 0.102	- 0.127

表 3 梁中心挠度 ( $l_1 = 0.14\text{m}$ ) (单位: mm)

Tab. 3 The deflection at the centre of the beam ( $l_1 = 0.14\text{m}$ ) (un it: mm)

$P$ (kN)		0.392	0.784	1.176	1.568	1.960
等效单元	无裂纹	- 0.015 9	- 0.031 8	- 0.047 7	- 0.063 6	- 0.079 5
	有裂纹	- 0.021 4	- 0.042 9	- 0.064 3	- 0.085 7	- 0.107 2
细化网格	无裂纹	- 0.016 5	- 0.032 9	- 0.049 4	- 0.065 8	- 0.082 3
	有裂纹	- 0.024 9	- 0.049 7	- 0.074 6	- 0.099 4	- 0.124 3
实验结果	无裂纹	- 0.016	- 0.032	- 0.048	- 0.064	- 0.080
	有裂纹	- 0.021	- 0.041	- 0.062	- 0.082	- 0.103

例 3 固定式平台整体结构

如图 7 所示某一平台整体结构,总高度为  $80\text{m}$ ,每层高度均等。平台的桩腿外径为  $0.99\text{m}$ ,壁厚为  $0.025\text{m}$  的钢管,横梁和支杆的外径为  $0.529\text{m}$ ,壁厚为  $0.007\text{m}$ ,材料的弹性模量为  $200\text{GPa}$ ,泊松比为  $0.23$ 。设平台结构受自重和图示载荷作用,竖向总载荷为  $4\,905\text{kN}$ ,横向(沿  $y$  轴方向)总载荷为  $981\text{kN}$ 。假设平台的一桩腿中部有长为  $0.16\text{m}$  的表面裂纹(单元 19),经联合使用等效单元和 Sur Sap 程序进行有限元计算,结果表明各个单元均不同程度地受到损伤影响,整体结构产生应力重分布现象,受损结构最大轴向压应力产生于 20 号单元,最大轴向拉应力产生于 76 号单元,图 8 给出了受损结构沿横向载荷方向最大位移随裂纹深度变化曲线图,图 9 给出了受损结构最大轴向压应力随裂纹深度变化曲线图,图 10 给出了受损结构最大轴向拉应力随裂纹深度变化曲线图,由图可知,裂纹越大,对结构的影响也越大,裂纹的存在,使得平台桩腿结构的强度减弱。

由于使用 Super Sap 三维块体单元对具有表面裂纹管进行有限元计算时,建模相对比较繁琐,这里没有进一步计算。

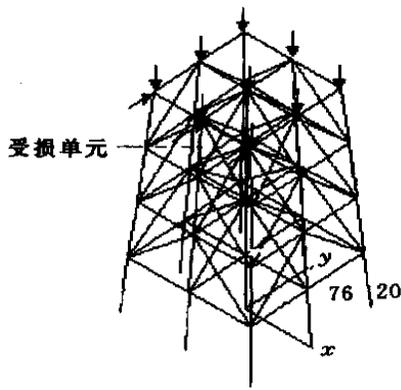


图 7 平台整体结构图

Fig 7 A platform structure

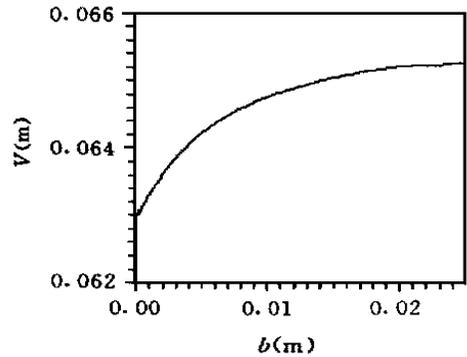


图 8 最大位移随裂纹深度变化曲线

Fig 8 The maximum displacements of the structure

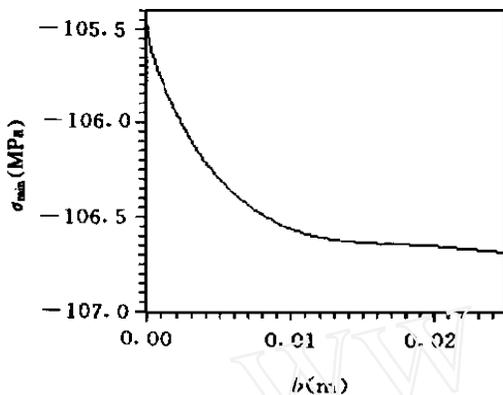


图 9 最大压应力随裂纹深度变化曲线

Fig 9 The maximum compressive stresses

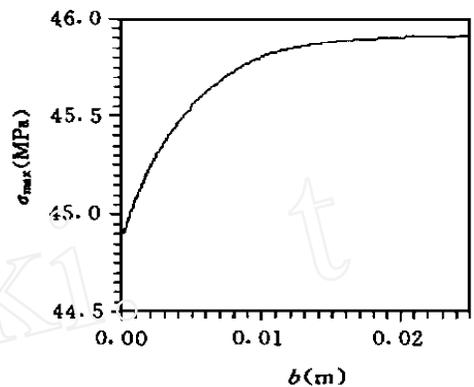


图 10 最大拉应力随裂纹深度变化曲线

Fig 10 The maximum tensile stresses

### 3 结 论

本文针对海洋平台结构中出现的裂纹损伤, 使用有限单元法, 并结合断裂力学方法, 建立了受损构件等效梁和等效管单元有限元分析方法, 并编制了相应的有限元计算程序, 在此基础上, 将其接入 Super Sap 有限元程序, 然后对受损后的海洋平台整体结构进行计算和分析。

通过 Super Sap 有限元细化网格和实验的考核, 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方法是可行的, 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结构分析计算方法。

致谢: 本文研究得到中国船级社的资助, 在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Smith C S, Kirkwood W, Swan J W. Buckling strength and post-collapse behavior of tubular bracing members including damage effects[A]. Proc 2nd Inter. Conf on Behavior of Offshore Structures[C]. London: 1979
- [2] Taby J, Moan T, Rashed SM H. Theoretical and experimental study of the behavior of damaged tubular members [R]. Report SK/R52, Divison of Marine Structures, Norwegian Institute of Technology, 1980
- [3] Ellinas C P. Ultimate strength of damaged tubular bracing members[C]. ASCE (Struct Div.) 1983
- [4] Ueda Y, Rashed SM H. Behavior of damaged tubular structural members[A]. 4th Intl symp. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) [C]. Dallas texas, Vol 1, 1985
- [5] 包世华, 周坚. 薄壁杆件结构力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [6] 朱伯芳. 有限单元原理与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979
- [7] Tharp T M. A finite element for edge-cracked beam columns [J]. Int J Numer Meth Engng, 1987, 24: 1941-1950
- [8] Murakami Y. Stress Intensity Factors Handbook [Z], Beijing Pergamon Press, World Publishing Corporation: Vol. 2, 1989.