

文章编号: 1001 - 4500 (2001) 03 - 005 - 07

带有损伤构件的海上采油平台的重分析方法

刘玉标, 申仲翰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 采用非线性有限单元法, 将各种管单元局部损伤进行有限元网格细分, 通过刚度矩阵的静力凝聚方法, 将损伤单元统一为等效的非线性梁单元, 然后再与整体平台结合进行重分析, 获得损伤后平台的极限强度。本方法对局部损伤的形式不附加任何限制, 并可方便地求解整体结构的后屈曲破坏结果; 准确地反映了损伤所引起的弯曲与轴向耦合刚度的变化。

关键词: 等效刚度; 局部损伤; 极限刚度

中图分类号: 0342

文献标识码: A

1 引言

随着海洋石油事业的发展, 海洋采油平台的数量日益增多, 特别是深水导管架的应用, 其受力状态更为复杂。这些平台结构虽然都经过严格的设计计算, 以保证其在使用寿命期内有足够的强度, 但其在安装施工和使用期间, 往往因受到冲撞和非正常荷载而产生弹塑性弯曲和凹陷等损伤, 以及海水在管壁上产生的腐蚀损伤。这些形式的损伤都将引起杆件承载能力的降低, 使结构局部构件的能力和状态产生明显的改变, 其整体承载能力和使用寿命也将降低。这样, 初期的计算将不再反映损伤后结构的安全情况, 因此需要对有构件损伤的结构的安全性重新评估, 才能作出是否应该立即修复、更换损伤构件, 或在一定的限制条件下继续使用的正确决定。由于海上设施修理费用昂贵, 正确的决策在经济上的影响是很显著的, 因此对海洋平台损伤构件的研究不仅有关人身财产安全, 也具有经济价值的。

国内外对于损伤构件的研究从 20 世纪 70 年代末开始, 已进行的研究工作主要在单根损伤构件特性研究和平台极限强度两个方面, 其中对于单根损伤圆管杆件受力情况分析的研究较多, 且对于损伤区的理想化模型比较统一; 对整根杆件的研究方法有多种, 其结果相互可比, 并进行大量的单杆特性实验研究, 验证了方法的正确性。

平台构件的损伤主要由于生产活动中意外事件(船只靠泊碰撞, 重物坠落碰撞)和环境腐蚀引起的, 损伤主要包括以下几种形式: (1) 构件出现永久性的总体弯曲; (2) 构件表面因碰撞而形成的凹陷; (3) 构件表面大面积均匀腐蚀和局部腐蚀; (4) 上述情况的组合。当构件受到损伤后, 损伤部位的应力将高于完好状态, 并提前达到安全临界值, 整根构件的轴压稳定性下降, 轴压和弯曲刚度也低于完好杆件, 并影响到外力的整个平台构件系统中的传递与分配关系, 因此研究受损伤单根杆件特性是问题的关键。

损伤杆件的研究主要有以下几种方法: (1) 实验的方法; (2) 有限单元法; (3) 简化模型的理论分析方法。实验方法主要是用实验来对杆件进行研究, 包括对各种参数的研究, 参数主要有 D/t , D_d/D , Z_0/L , L_d/L 及损伤坑的形状, 其中对杆件承载能力有较大影响的参数为 D/t , D_d/D , Z_0/L , 并且实验测得了大量的数据, 为理论提供了依据; 有限单元法主要利用板元和壳元对损伤杆件进行极限承载力分析, 其计算结果是比较精确的; 对简化模型的理论分析方法许多人都作过研究, 一种是 C. S. Smith 的 M - P - σ 方法(1990), 另一种是 D. M. R. richards 和 A. Andronicou 的应力缩减法, 通过实验数据找出应力缩减系数 K_s 的经验公式, 然后把损伤段当作完好杆处理, 还有一种模型采用 V 字形损伤,

收稿日期: 2001 - 03 - 15

作者简介: 刘玉标 (1961 -), 男, 副研究员。

对损伤面进行弹塑性研究，这些方法主要对 (1) (2) 两种损伤形式的承载力计算，并考虑残余应力的影响及复杂载荷的作用，计算结果和实验结果基本吻合。单根损伤杆件的研究作了很多工作，但重要的还是研究其损伤杆件对整体结构的影响。

2 有限元方法

海上导管架平台通常是管形截面的梁单元，其损伤方式一般可分为三种：(1) 局部凹陷；(2) 整体失直；(3) 局部区域腐蚀。如果采用解析方法分析损伤构件的承载力，必须对损伤的形状及受力状态作出某些严格的假定，且一种方法通常只适用于某一种特殊情况，使得它在实际工程应用上受到极大的限制。采用有限元方法分析损伤构件的承载力则可在处理上述三种损伤形式时方法完全统一，而且对局部凹陷的形状无须附加任何限制，特别使在求解损伤构件的后屈曲响应变得较为方便。

3 有限元模型

本文采用三角形板单元将局部损伤的管单元进行细分，为了更好地模拟损伤区域，其网格比两端密 4 倍 (见图 2)。材料非线性可假定为等向硬化或理想塑性。几何非线性假定为小应变大变形并忽略损伤残余应力的影响。为了将损伤单元等效为非线性梁单元以便和整体平台结构进行承载力计算，管单元两端采用平面假定，一端固定，另一端只有平移和转动两个独立自由度。端部单元的其它自由度采用约束方程表示，为了使结果和以前的研究比较，损伤假定为 V 形的凹陷，初始的失直假定为 $Z = Z_0 \sin(x/L)$ ， Z_0 为中点挠度， L 为单元长度，两端受弯矩 M 和轴向压力 P 。

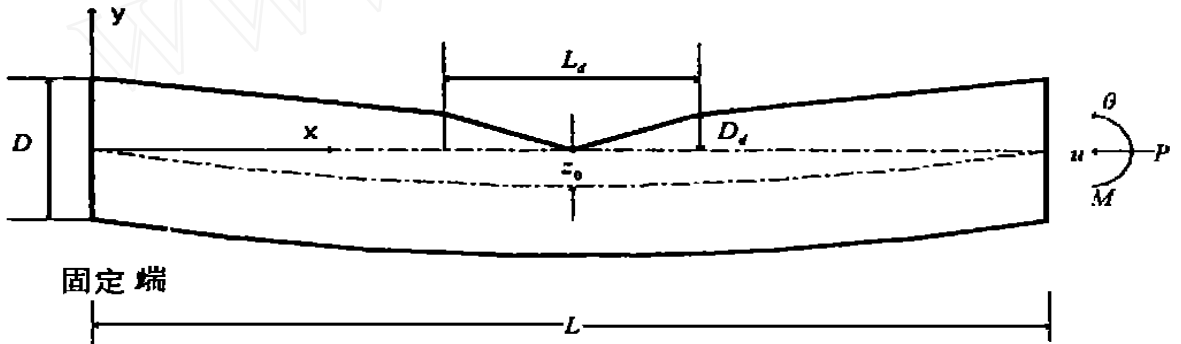


图 1 损伤杆件凹陷与失直模型

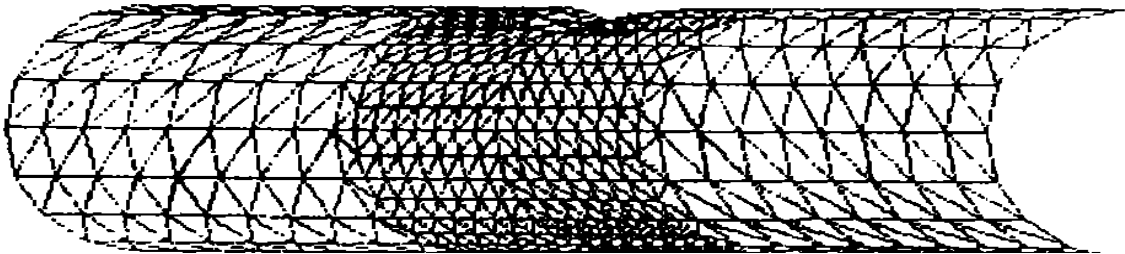


图 2 损伤杆件的有限元网络模型

4 静力平衡方程

有限元表示的静力平衡方程可写为：

$$K u + R - F = 0 \tag{1}$$

K 表示外加荷载节点之间向量； F 表示等效单元节点力向量； u 表示前一荷载步对应的平衡位置； $u + \Delta u$ 表示当前平衡位置。由于 F 中存在材料和几何非线性，所以方程 (1) 不能直接求解。根据牛顿迭代法将方程 (1) 写成增量形式：

$$K^{(i-1)} \Delta u^{(i)} = -R - F^{(i-1)} \tag{2}$$

$$u^{(i)} = u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)}$$

其中 K 为切线刚度矩阵; u 为当前载荷增量步的位移增量, u 为总体位移向量。为了便于方程 (2) 的求解, 引入载荷乘子 λ , 假定外加载荷向量可表示为:

$$\lambda R = R \tag{3}$$

R 为某一固定载荷向量, 通过对 R 的调整可适应各种加载模式, 最后增量平衡方程变为:

$$K^{(i-1)} u^{(i)} = \lambda R + F^{(i-1)} \tag{4}$$

$$u^{(i)} = u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)}$$

5 增量平衡方程的求解

5.1 载荷增量法

对方程 (3), 如果每次给定载荷增量 $\Delta \lambda$, 并且有 $\lambda^0 = 0$, 通过逐步增量迭代可获得各载荷乘子 λ 所对应的位移 u 。

5.2 位移增量法

上述迭代过程在给定载荷乘子 λ 方程有解时有效, 对于结构的后屈曲响应, 给定的载荷乘子 λ , 方程可能没有解, 这时必须将 u_k 作为变数, 通过迭代求解, 为此引入载荷增量 $\Delta \lambda$, 方程 (4) 变为:

$$K^{(i-1)} u^{(i)} = (\lambda^{(i-1)} + \Delta \lambda^{(i)}) R + F^{(i-1)} \tag{5}$$

并附加一方程 $u_k = u_k + \Delta u_k$ (6)

k 表示结构中的某一自由度, 通常假定这一自由度在屈曲过程中的变形方向; u_k 为假定的位移增量, 其迭代过程如下:

在 $i = 1$ 时, 先解方程

$$K u^{(1)} = R \tag{7}$$

为了使 k 自由度上的位移增量等于 u_k , 应取

$$\Delta \lambda^{(1)} = u_k / u_k^{(1)} \tag{8}$$

$$u^{(1)} = u + \Delta \lambda^{(1)} u^{(1)} \tag{9}$$

对 $i = 2, 3, \dots$, 则通过下面的方程进行平衡迭代

$$K^{(i-1)} \bar{u}^{(i)} = (\lambda^{(i-1)} + \Delta \lambda^{(i)}) R + F^{(i-1)} \tag{10}$$

$$K^{(i-1)} \bar{u}^{(i)} = \lambda^{(i)} R \tag{11}$$

其中方程 (11) 的解为

$$\bar{u}^{(i)} = \lambda^{(i)} u^{(1)} \tag{12}$$

由于 k 自由度上位移被固定, 即 $u_k^{(i)} = 0$, 所以有

$$\Delta \lambda^{(i)} = - \bar{u}_k^{(i)} / u_k^{(1)} \tag{13}$$

$$u^{(i)} = u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)} \tag{14}$$

$$u^{(i)} = \bar{u}^{(i)} + \lambda^{(i)} u^{(1)} \tag{15}$$

$$\Delta \lambda^{(i)} = \lambda^{(i-1)} + \Delta \lambda^{(i)} \tag{16}$$

上述迭代过程直至满足如下的收敛条件

$$\frac{u^{(i)T} (\lambda^{(i-1)} R + F^{(i-1)})}{u^{(i)T} \lambda^{(i)} R} \tag{17}$$

表示收敛误差。

5.3 自动步长增量法

当载荷增量法或位移增量法方程都可能出现收敛困难, 这时引入一附加约束方程

$$f(\lambda^{(i)}, u^{(i)}) = 0 \tag{18}$$

约束方程可取各种不同形式。本文采用弧长增量或外部功能增量。

弧长增量约束方程取为

$$\{ \sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)} + l^2} + u^{(i)T} u^{(i)} = l^2 \tag{19}$$

$$u^{(i)} = u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)} \tag{20}$$

l 为给定的弧长增量。

外部功增量约束方程取为

$$\text{当 } i=1 \text{ 时 } \{ \sqrt{u^{(1)T} u^{(1)}} + R^T u^{(1)} = w \tag{21}$$

$$\text{当 } i=2, 3, \dots \text{ 时 } \{ \sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)}} + \frac{1}{2} u^{(1)T} u^{(1)} + R^T u^{(i)} = 0 \tag{22}$$

当采用自动增量法求解有限元方程时，第一步 = 首先采用位移增量法求出 u 与 $u^{(1)}$ ，根据下式计算每步的弧长增量。

$$l = \sqrt{u^{(1)T} u^{(1)} + l^2} \tag{23}$$

其中 $u = u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)}$ ； $u^{(i-1)}$ = $u^{(i-2)} + \Delta u^{(i-1)}$ ；需根据上步的收敛情况取值。

平衡迭代第一步 $i=1$

$$K \bar{u}^{(1)} = R - F \tag{24}$$

$$K \bar{u}^{(1)} = R \tag{25}$$

$$u^{(1)} = \bar{u}^{(1)} + u^{(1)} \tag{26}$$

$$u^{(1)T} u^{(1)} + (u^{(1)})^2 = l^2 \tag{27}$$

对于 $i=2, 3, \dots$ ，采用下面的方程

$$K^{(i-1)} \bar{u}^{(1)} = \sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)}} + R - F^{(i-1)} \tag{28}$$

$$+ u^{(i)} = \sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)}} + u^{(i)} \tag{29}$$

$$u^{(i)} = \bar{u}^{(i)} + u^{(i)} \tag{30}$$

如采用弧长增量， $u^{(i)}$ 由方程 (19) 解出；如采用外部功增量， $u^{(i)}$ 由方程 (21) 和 (22) 解出。 $\bar{u}^{(1)}$ 为方程 (25) 的解：

$$+ u^{(i)} = \sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)}} + u^{(i)} \tag{31}$$

上述迭代过程直至满足如下的收敛条件

$$\frac{u^{(i)T} (\sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)}} + R - F^{(i-1)})}{u^{(i)T} + u^{(1)T} R} \tag{32}$$

表示收敛误差。

注意， $u^{(i)}$ 是由一个二次方程 (19) 决定的，当二次方程没有实根时，采用外部功增量法；当有两个实根时，采用其中使 $u^{(i-1)T} u^{(i)}$ 取最大值的实根。

6 损伤杆件的等效刚度矩阵

假定 K 为某一载荷步下损伤杆件在细化网格下的切线刚度矩阵，将 K 表示为如下的形式

$$K = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \tag{33}$$

i 表示损伤杆件内部节点的自由度， b 表示边界节点的自由度。

增量平衡方程为

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^{(i)} \\ u_b^{(i)} \end{Bmatrix} = \sqrt{u^{(i-1)T} u^{(i-1)}} \begin{Bmatrix} R_i \\ R_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_i \\ F_b \end{Bmatrix} \tag{34}$$

通常损伤杆件内部节点不施加载荷

$$P = \frac{P}{yA_x}; \quad K_{uu} = \frac{K_{uu}}{EA/L}; \quad K_u = \frac{K_u}{12EI/L^2}; \quad K = \frac{K}{4EI/L}$$

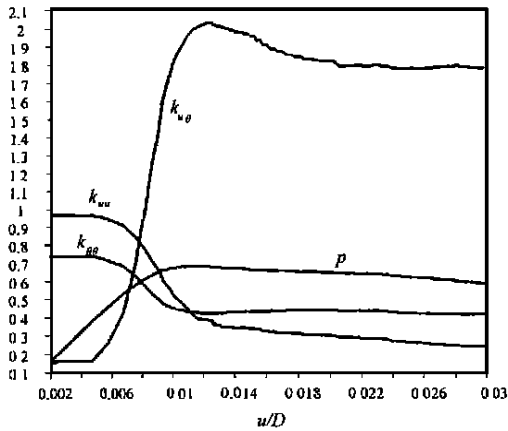


图3. 损伤杆件的等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系
 $D_d/D = 0.1, z_0/L = 0.0, t/D = 0.01, L_d/L = 0.1$

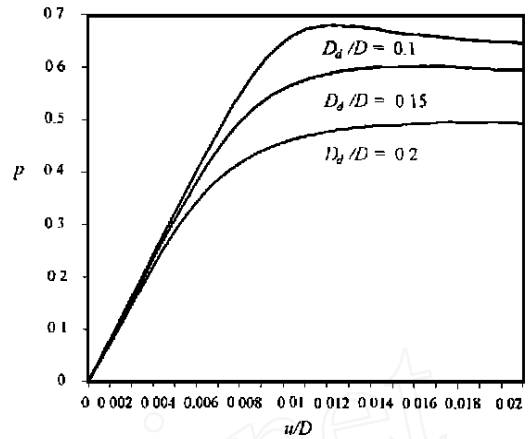


图4. 损伤杆件的轴力与轴向缩短的关系
 $z_0/L = 0.0, t/D = 0.01, L_d/L = 0.1$

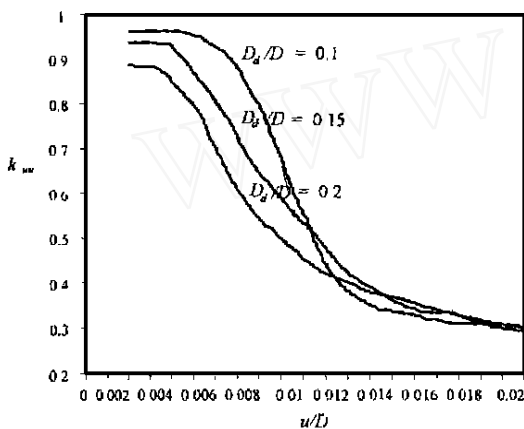


图5. 损伤杆件的等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系
 $z_0/L = 0.0, t/D = 0.01, L_d/L = 0.1$

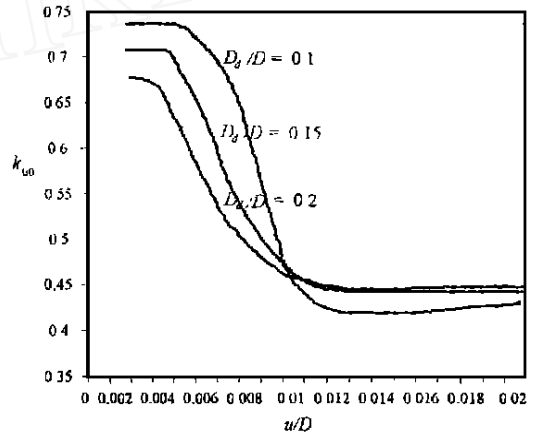


图6. 损伤杆件的等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系
 $z_0/L = 0.0, t/D = 0.01, L_d/L = 0.1$

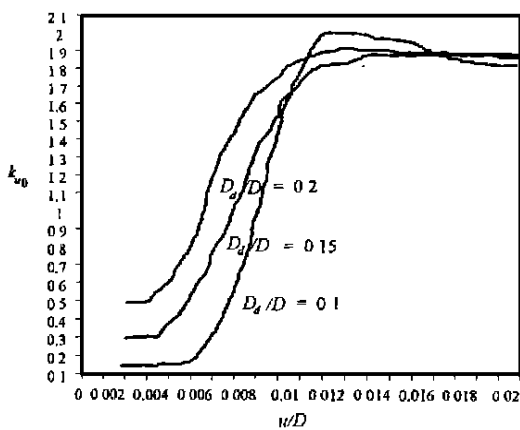


图7. 损伤杆件的等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系
 $z_0/L = 0.0, t/D = 0.01, L_d/L = 0.1$

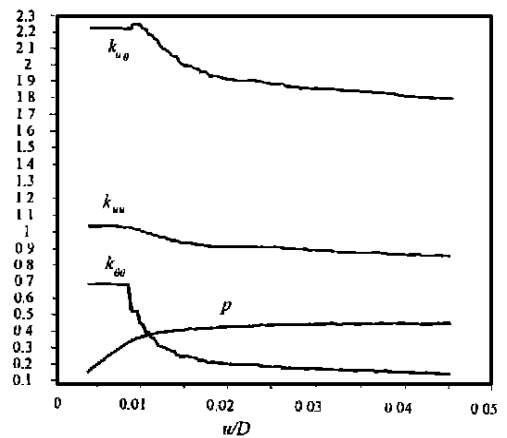


图8. 损伤杆件的等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系
 $D_d/D = 0.0, z_0/L = 0.05, t/D = 0.025, L_d/L = 0.1$

8 结论

图 3 表示当损伤深度 $D_d/D = 0.1$ 时损伤杆件等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系,可以看出轴向刚度系数 K_{uu} 与弯曲刚度系数 $K_{\omega\omega}$ 随轴力的增加迅速减小,而耦合刚度 $K_{u\omega}$ 却随轴力的增加迅速增加,这表明随载荷增加损伤杆件的轴向自由度与弯曲自由度会产生强烈的耦合现象,这时如仍采用线性梁刚度矩阵 ($K_{u\omega} = 0$) 会产生较大的误差。

图 4 表示不同的损伤深度与轴向承载力的关系,可以看出损伤深度对承载力的影响非常明显。

图 5 ~ 图 7 表示不同损伤深度 D_d/D 对损伤刚度系数 K_{uu} , $K_{\omega\omega}$, $K_{u\omega}$ 的影响,由图可知在较小轴向载荷情况, D_d/D 对损伤刚度系数的影响非常显著。随着轴向载荷的不断增加,损伤区域会变为塑性铰,这时刚度系数基本上和初始损伤无关。

图 8 表示杆件失直 $z_0/L = 0.05$ 时损伤杆件等效刚度系数及轴力与轴向缩短的关系,可以看出杆件失直对初始轴向刚度 K_{uu} 及轴向承载力影响显著,并且初始就会有较大的耦合刚度系数 $K_{u\omega}$ 。

本文所提出的方法对局部损伤的形式不附加任何限制,并可方便地求解整体结构的后屈曲破坏结果;准确地反映了损伤所引起的弯曲与轴向耦合刚度的变化。并开发了计算机软件,确定损伤构件的等效非线性梁刚度及计算整体海洋平台极限承载能力的功能。

参考文献

- [1] Bathe KJ. On the Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equations[J]. J. Computers & Structures, 1983, 17(5-6).
- [2] Taby J., Moan T. Collapse and Residual Strength of Damaged Tubular Members[A] Behaviour of Offshore Structures[C]. (1985).
- [3] Remseth S N, Holthe K, Bergan P G, Holand I. Tube Collapse Analysis Using Finite Elements[J]. J. Computers & Structures, 1978, 8:383 - 390.
- [4] Loh T.J. Ultimate Strength of Dented Tubular Steel Member[A] Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference Singapore[C], 1993.
- [5] Taby J., Moan T. Theoretical and experimental of the behaviour damaged tubular members in offshore structures[A]. Proceeding of Fifth International offshore mechanics and Arctic Engineering Symposium[C], Vol. III, ASME:301 - 308.
- [6] Duan L., Chen W F, Loh J. T. Behaviour and Strength of Damaged Tubular Members In Offshore Structures[A]. Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference[C], San Francisco, USA. 14 - 19 June, 1992.
- [7] Gu Yongning, Li Runpei, Wang Zhinnong. On The Assessment of Strength of Platform With Damaged members[A], Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference[C], San Francisco, USA. 14 - 19 June, 1992.
- [8] 许滨, 申仲翰, 吕聪明. 渤海八号导管架生产平台极限承载力分析[A]. 第七届全国海洋工程学术会议论文集[C], 1995, 276.

Re-analysis Method on Ultimate Strength of Offshore Platform with Damaged Tubular Members

LIU Yu - biao SHEN Zhong - han

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080, China)

Abstract: In this paper, nonlinear finite element method is used to simulate various local defects of tubular members as equivalent nonlinear beam elements. This procedure can be applied to any form of local damage deformation with no additional limitation. It is rather convenient to implement with nonlinear finite element program to yield post-collapse result of the whole structure. The equivalent beam model can reflect the nonlinear characteristics of compressing stiffness with change of loads acting on the damaged member. A computer program was developed to predict the load deflection behaviors, equivalent nonlinear beam stiffness for damaged tubular member and to calculate the ultimate load, post-collapse curve of the whole offshore platform.

Key words: equivalent stiffness, local damage, ultimate strength, tubular member offshore platform