

具有失真性变形与凹坑耦合 损伤的海洋平台桩腿有限元分析

秦太验¹, 柳春图², 阚常珍²

(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)

摘要: 采用有限元分析方法, 建立了有失真性变形与凹坑耦合损伤桩腿的等效梁和管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, 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大型有限元程序 Super SAP, 然后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; 损伤有限元

中图分类号: O 241; TE951

文献标识码: A

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, 难免受到冲击和其它非正常载荷作用而产生损伤, 如出现表面凹性、变形等, 而且凹坑与变形损伤往往不是单独发生的, 而是相互耦合的。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, 由于没有考虑杆件的损伤, 特别是桩腿受损的影响, 故不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^[1]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。理论分析方面研究工作做的较多的有 Taby 等人^[2]、Ellinas^[3]以及 Ueda 等人^[4]。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^[5]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, 所以与在海洋工程上的实际应用之间, 仍有很大的距离。为使计算更加方便和趋于工程实用, 本文针对失真性永久变形与凹坑耦合损伤, 提出了受损桩腿等效梁单元和等效管单元有限元分析方法, 建立损伤构件的等效梁和等效管单元刚度矩阵, 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0.1时,则支撑构件应按薄壁管单元处理^[6]。考虑一带有失真性永久变形与凹坑耦合的损伤圆管或梁构件,凹坑位于损伤部位的中部,令杆件的损伤变形发生在局部系 xy 平面内,建立如图1(a)所示局部直角坐标系。为建立其等效梁或管单元,将其分割为五个子单元,其中间三个子单元为损伤区域,对五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。对于两端的梁或管子单元,可按正常的空间梁或管单元计算,这里不再具体给出。由于圆管单元刚度矩阵的计算与梁单元的类似,故这里统一给出等效梁和管单元刚度矩阵的计算方法。

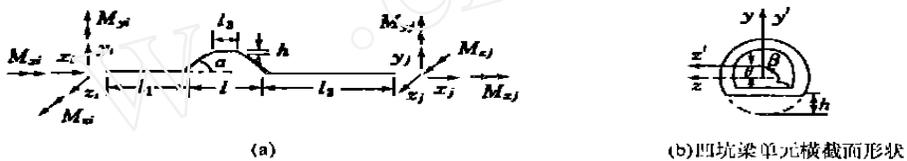


图1 具有永久变形与凹坑耦合损伤构件

2.1 损伤梁单元的单元刚度矩阵的计算

为简化分析,将受损构件的损伤部位简化为一凹坑损伤单元和两个斜直梁单元,凹坑损伤子单元的横截面形状如图1(b)所示,其中 y 轴和 z 轴为其形心主惯性轴。首先计算凹坑单元的单元刚度矩阵,此时,在其局部坐标系 xyz 内,其单元刚度矩阵的计算与正常空间梁相同。将左节点记为1,右节点记为2,并记坐标系 xyz 下的单元节点位移向量为 $\{U\} = \{u_1, v_1, w_1, \theta_1, \theta_1, \theta_1, u_2, v_2, w_2, \theta_2, \theta_2, \theta_2\}^T$,对应的节点载荷向量为 $\{F\} = \{X_1, Y_1, Z_1, M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}, X_2, Y_2, Z_2, M_{x_2}, M_{y_2}, M_{z_2}\}^T$,则损伤单元在坐标系 xyz 下的单元刚度方程为

$$\{F\} = [K]\{U\} \tag{1}$$

式中单元刚度矩阵 $[K]$ 为

$$[K] = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -eH_1 & -H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & eH_1 \\ 0 & H_{z2} & 0 & 0 & 0 & H_{z3} & 0 & -H_{z2} & 0 & 0 & 0 & H_{z3} \\ 0 & 0 & H_{y2} & 0 & -H_{y3} & 0 & 0 & 0 & -H_{y2} & 0 & -H_{y3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -H_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -H_{y3} & 0 & H_{y4} & 0 & 0 & 0 & H_{y3} & 0 & H_{y5} & 0 \\ -eH_1 & H_{z3} & 0 & 0 & 0 & H_{z4} - e^2H_1 & eH_1 & -H_{z3} & 0 & 0 & 0 & H_{z5} + e^2H_1 \\ -H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & eH_1 & H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -eH_1 \\ 0 & -H_{z2} & 0 & 0 & 0 & -H_{z3} & 0 & H_{z2} & 0 & 0 & 0 & -H_{z3} \\ 0 & 0 & -H_{y2} & 0 & H_{y3} & 0 & 0 & 0 & H_{y2} & 0 & H_{y3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -H_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -H_{y3} & 0 & H_{y5} & 0 & 0 & 0 & H_{y3} & 0 & H_{y4} & 0 \\ eH_1 & H_{z3} & 0 & 0 & 0 & H_{z5} + e^2H_1 & -eH_1 & -H_{z3} & 0 & 0 & 0 & -H_{z4} - e^2H_1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中,刚度系数计算如下

$$H_1 = \frac{EA}{l}, \quad H_6 = \frac{GJ}{l}, \quad H_{y2} = \frac{12EI_y}{l^3(1+\Phi)}, \quad H_{y3} = \frac{6EI_y}{l^2(1+\Phi)}$$

$$\begin{aligned}
 H_{y4} &= \frac{4EI_y(1+0.25\phi)}{l(1+\phi)}, & H_{y5} &= \frac{2EI_y(1-0.5\phi)}{l(1+\phi)}, & H_{z2} &= \frac{12EI_z}{l^3(1+\phi)} \\
 H_{z3} &= \frac{6EI_z}{l^2(1+\phi)}, & H_{z4} &= \frac{4EI_z(1+0.25\phi)}{l(1+\phi)}, & H_{z5} &= \frac{2EI_z(1-0.5\phi)}{l(1+\phi)}
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 A 为横截面面积, I_y 和 I_z 分别为 y 轴和 z 轴惯性矩, ϕ 和 ϕ' 分别为剪切修正系数。

其次, 两个斜直梁单元的单元刚度矩阵可由无损伤梁单元刚度矩阵经坐标变换而得, 若设 $[K]$ 为无损伤梁单元刚度矩阵, 则坐标变换公式为

$$[K] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}^T [K] \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中坐标变换矩阵 $[\lambda]$ 为

$$\text{对于左单元} [\lambda] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \text{对于右单元} [\lambda] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 损伤管单元的单元刚度矩阵的计算

为简化分析, 将受损构件的损伤部位简化为一凹坑损伤单元和两个斜直管单元, 凹坑损伤子单元简化为一细管单元, 其壁厚与原管相同, 外径 $D_0 = D - h$, 其中 D 为原管的外径。三个子单元的刚度矩阵计算均与正常圆管单元相同。为了单元的组集, 须将其形心主惯性轴坐标系下的单元刚度矩阵经坐标变换转换为坐标系 xyz 下的单元刚度矩阵, 方法与梁单元相同, 这里不再具体给出。

2.3 损伤杆件的等效单元刚度矩阵的计算

将损伤杆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, 就可得到损伤杆件的单元刚度矩阵, 其中包含有非边节点项(即内部自由度项)。为求得损伤杆件的等效单元刚度矩阵, 以便组集到石油平台整体结构中, 必须将内部自由度采用静凝聚法从损伤杆件的单元刚度矩阵中消除掉。若用 i 表示损伤杆件的左端节点(即左边节点), 用 j 表示损伤杆件的右端节点(即右边节点), $\{U_a\} = \{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}\}^T$ 表示损伤杆件的边节点位移向量, $\{F_a\} = \{X_i, Y_i, Z_i, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}, X_j, Y_j, Z_j, M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}\}^T$ 表示对应的边节点载荷向量, $\{U_b\}$ 表示损伤杆件的内部节点位移向量(即损伤单元的节点位移向量), 则损伤杆件的单元刚度方程可简单地表示如下

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

由上式消去内部节点自由度 $\{U_b\}$, 即得

$$[\bar{K}]\{U_a\} = \{F_a\} \quad (6)$$

其中 $[\bar{K}]$ 即为损伤杆件的等效单元刚度矩阵, 具体表达为

$$[\bar{K}] = [K_{aa}] - [K_{ab}][K_{bb}]^{-1}[K_{ba}] \quad (7)$$

3 与有限元细化网格计算结果的比较

为了检验上述受损构件的等效梁和管单元的正确性,这里使用 Super S A P 程序对带有永久变形与凹坑耦合损伤的圆管进行了有限元细化网格计算,并与等效单元程序计算结果进行比较,以此来考核前面所建立的理论的正确性。

带有永久变形与凹坑耦合损伤的圆管如图 2 所示,单元直径为 $D = 60\text{cm}$,厚度为 $t = 2\text{cm}$,单元中部有一凹坑,其深度为 $h = 12\text{cm}$,长度为 $l = 1.5\text{m}$,凹坑两端为斜直管,其角度为 10° ;有限元细化网格如图 3 所示,其中网格单元为四边形和三角形板单元,并在损伤区域网格加密一倍,节点数为 1630,单元总数为 1664。表 1 和表 2 分别给出了不同载荷下管自由端中性轴挠度和转角,由表可见,二种计算结果符合较好,挠度计算结果偏差为 1.3%,转角偏差为 1%。

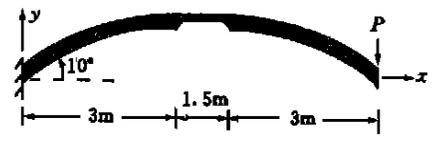


图 2 受损构件



图 3 受损构件细化网格模型

表 2 不同载荷下管自由端的挠度(单位:mm)

| P (kN) | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 等效单元 | - 0.5036 | - 1.0072 | - 1.5108 | - 2.0144 | - 2.5180 |
| 细化网格 | - 0.4971 | - 0.9941 | - 1.4412 | - 1.9884 | - 2.4853 |

表 3 不同载荷下管自由端的转角

| P (kN) | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 等效单元 | - 0.1042E- 3 | - 0.2084E- 3 | - 0.3126E- 3 | - 0.4168E- 3 | - 0.5210E- 3 |
| 细化网格 | - 0.1032E- 3 | - 0.2063E- 3 | - 0.3095E- 3 | - 0.4127E- 3 | - 0.5159E- 3 |

4 与实验结果的比较

为了进一步检验受损构件的等效单元的正确性,做了损伤圆管的三点弯曲实验,并与等效单元程序以及有限元细化网格计算结果进行比较。如图 4 所示一带有永久变形与凹坑耦合损伤三点弯曲钢管,钢管的跨度 $L = 300\text{mm}$,外径 $D = 41\text{mm}$,壁厚 $t = 3\text{mm}$,损伤深度 $h = 11.3\text{mm}$,凹坑深度 $h_1 = 5.6\text{mm}$,凹坑长度 $l_3 = 50\text{mm}$,集中力载荷 P 作用于钢管的中部。分别使用等效单元及有限元细化网格进行计算,并与实验结果进行比较,其中有限元细化网格单元为四边形和三角形板单元,如图 5 所示,节点数为 878,单元数为 918。图 6 给出了管的中点挠度的计算结果和实验结果,由图可见,两种计算结果均与实验结果符合,等效单元程序与实验结果相比误差 3.1%,细化网格计算结果误差约为 4%。

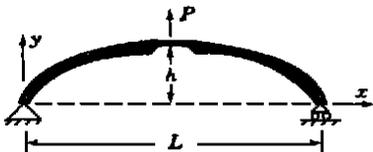


图 4 带永久变形与凹坑耦合损伤管

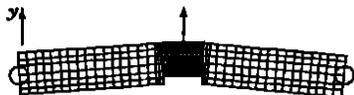


图 5 有限元细化网格模型

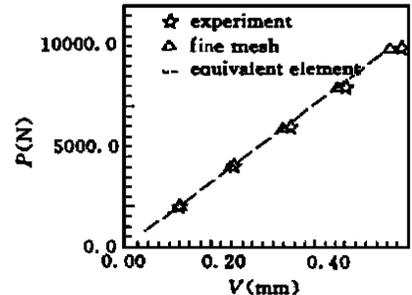


图 6 受损圆管位移-载荷曲线

5 数值算例

为说明上述受损伤构件的等效梁和管单元的应用, 这里使用本文的等效单元计算程序和 Super S A P 程序对两个受损后海洋平台桩腿结构进行了应力计算和分析。

5.1 算例 I

如图 7 所示某一平台整体结构, 结构总高度为 80m, 每层高度均等。平台的桩腿为外径 $D = 0.99\text{m}$, 壁厚 $t = 2.5\text{cm}$ 的钢管, 横梁和支杆的外径 $D = 0.529\text{m}$, 壁厚 $t = 0.007\text{m}$, 材料的弹性模量 $E = 200\text{GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.23$ 。设平台结构受自重和图示载荷作用, 竖向总载荷为 4905kN (500t), 横向(沿 y 轴方向) 总载荷为 981kN (100t)。假设平台的一桩腿带有永久变形和凹坑耦合损伤(单元 19), 永久变形凹陷深度为 $h = 50\text{cm}$, 凹坑位于损伤单元的中部, 其长度为 2m, 经联合使用等效单元和 Super S A P 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, 但对最大应力影响比较小, 最大轴向拉应力产生于 76 号单元, 受损结构最大轴向压应力产生于图示 20 号单元, 图 8 和图 9 分别给出了受损结构沿横向载荷方向损伤单元节点和最大位移随凹坑深度变化曲线图和损伤单元两端轴向压应力随凹坑深度变化曲线图, 并与无永久变形损伤时进行比较。由图可知, 永久变形损伤的影响相对比较大, 损伤构件变形越大, 对结构的影响也越大, 而且损伤的存在, 使得受损单元附近的桩腿中的压应力有向拉应力转化的趋势。

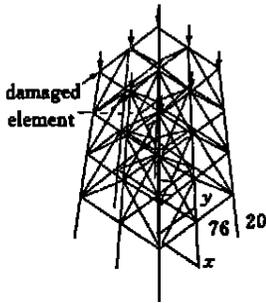


图 7 整体结构图

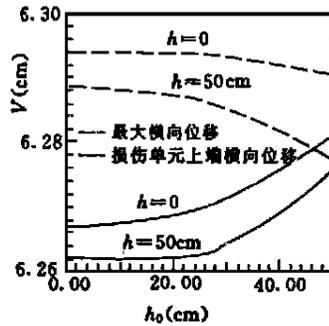


图 8 沿横向载荷方向损伤单元节点和最大位移随凹坑深度变化曲线

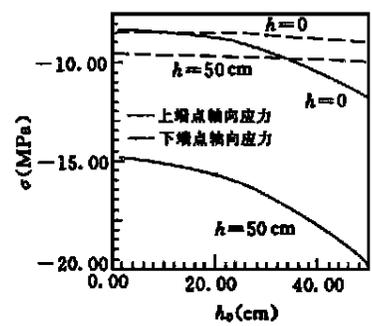


图 9 损伤单元两端轴向压应力随凹坑深度变化曲线

5.2 算例 II

南海一号石油钻井平台由近似三角形的平台体和三根桩腿组成, 其桩腿结构为三个结构相同的空间桁架式焊接结构, 由竖向齿条(钢管组合截面: 中间加弦板、两侧焊齿条)、横向撑杆和斜撑组成, 如图 10 所示, 桩腿总高度为 86.44m, 共有 990 个梁单元(包括底部的铰支单元)组成。由于平台结构的支撑主体部分是桩腿, 故这里只对平台的桩腿进行受损后的有限元计算和分析。为了方便起见, 将船体简化为六根刚性梁, 将竖向齿条简化为圆钢管, 圆管的外径 $D = 810.8\text{mm}$, 壁厚 $t = 48\text{mm}$, 横向撑杆和斜撑的外径 $D = 323.85\text{mm}$, 壁厚 $t = 22.22\text{mm}$, 材料的弹性模量 $E = 210\text{GPa}$, 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, 以平台尾部中点为 xy 平面原点, 以水平面为 z 轴原点。为简化计算, 将船体的

重量和总竖向载重及风载荷作为竖向均布载荷和横向均布载荷分别加到代替船体的刚性梁,将波浪载荷简化为分布横向载荷作用于桩腿水面附近的部分桩腿上。作用于船体上竖向总载荷为 75922kN (约 7739t), 横向风总载荷(沿 x 轴方向) 为 2426kN (约 247.3t), 作用于桩腿上的波浪总载荷(沿 x 轴方向) 为 5671kN (约 578t)。在桩腿整体结构没有损伤的情况下, 最大压应力发生在前桩腿的底部 737 号单元的底端部, 如图 10 所示, 其值为 -375.8MPa , 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 173.9MPa , 横向撑杆和斜撑上的最大拉应力发生在船体部位的斜撑上(650 号单元), 其值为 102.2MPa 。

现设桩腿 737 号单元带有失真性永久变形与凹坑耦合损伤, 该单元长度 $l = 4.04\text{m}$, 损伤长度与单元长度相同, 即 $l = L$, 变形损伤凹陷深度 $h = 20\text{cm}$, 凹坑位于该单元的中部, 凹坑长度 $l_0 = 100\text{cm}$ 。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 11 给出了桩腿整体结构横向(x 轴方向) 最大位移随损伤凹陷深度变化的关系曲线, 表 3 给出了损伤深度对最大拉应力的影响, 图 12 给出了损伤单元两端应力随损伤深度变化的关系曲线。由图和表可知, 随着损伤程度的增加, 桩腿结构的最大横向位移及最大轴向应力都不同程度地增大, 整体结构的强度也随之减弱。

表 4 最大拉应力单元的两端应力随凹坑深度的变化 (单位: MPa)

| h_0 (cm) | 0 | 0.5 | 1 | 5 | 10 | 20 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 724 单元上端部 | 86.84 | 86.88 | 86.93 | 87.34 | 88.01 | 90.04 |
| 724 单元下端部 | 177.8 | 177.9 | 178.0 | 178.6 | 179.6 | 182.7 |



图 10 南海一号石油钻井平台桩腿结构图

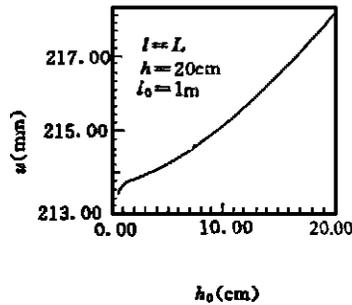


图 11 受损桩腿结构最大横向位移

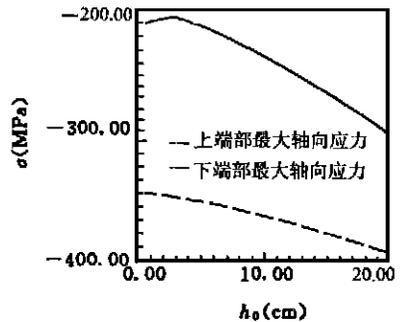


图 12 受损单元端部应力

6 结 论

本文针对海洋平台结构中出现的失真性永久变形与凹坑耦合损伤, 建立了受损构件等效梁单元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, 将其接入大型有限元计算程序 Super SA P 等, 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 SA P 有限元细化网格和实验的考核, 对实例的计算和分析可见, 本文所建立的有限元分析技术是实用、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: 本文得到中国船级社的资助, 在此深表感谢。

参考文献:

- [1] Smith C S, Kirkwood W and 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 and Rashed SM H. Theoretical and experimental study of the behavior of damaged tubular members [R]. Report SK/R52, Division of Marine Structures, Norwegian Institute of Technology, 1980.
- [3] Ellinas C P. Ultimate strength of damaged tubular bracing members *A SCE Struct. Div.*, 1983.
- [4] Ueda Y and Rashed SM H. Behavior of damaged tubular structural members [A]. *4th Intl. Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)* [C], Dallas Texas, 1985, 1.
- [5] Gu Y N, Li R P and Wang Z N. On the assessment of strength of platform with damaged members [A]. *Proc. 2nd Inter. Offshore and Polar Engineering Conf.* [C], San Francisco, USA, 1992. 14~19.
- [6] 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.
- [7] 朱伯芳. 有限单元原理与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- [8] S. 铁木辛柯, J. 盖尔. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

Finite element analysis of the deformed-sunken damaged members of ocean platform structures

Q N Tai-yan¹, L U Chun-tu², KAN Chang-zhen²

(1. Dept. of Basic Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The element stiffness matrix of the equivalent beam or pipe of the deformed-sunken damaged leg of the platform is derived through the finite element method. The stresses and displacements of some damaged components are calculated. The numerical solutions agree with those obtained by the fine mesh finite element method of the Super SAP procedure. Finally, using the Super SAP combined with the procedure of the present equivalent element method, the stresses of some platform structures are calculated and analyzed.

Key words: ocean platform; leg of platform; finite element; damage