

海洋平台碰撞和损伤分析的进展

陈铁云 朱正宏

上海交通大学船舶及海洋工程系（邮政编码200030）

摘要 本文详细综述了平台结构的碰撞和损伤分析。十几年来，在这一领域内提出了许多有用的概念和切实可行的分析方法。文中介绍了分析碰撞和损伤的各种方法，并介绍和比较了钢质平台的能量吸收模型。

关键词 海洋平台；碰撞；损伤

1 引言

近年来，在海洋工程中钢质管状平台得到了广泛的使用。它们在复杂恶劣的环境中工作。除去正常的工作载荷和环境载荷之外，由于意外的事故，如船与平台的碰撞、下落重物等的碰撞时有发生^[1-3]。因此，如何正确地估算此类结构由于碰撞所造成的后果，便成了海洋工程中的重要研究课题。过去15年里，关于这一领域召开了许多次学术会议，发表了大量论文。世界上许多研究中心和学院已经完成或正在进行这方面的许多研究计划。

为了预报由冲击载荷造成的损坏，新的设计思想认为，结构的承载能力是由其能量吸收能力，而不是由极限载荷所决定。因此，碰撞作用可以看作是输入能量，然后分析结构对此能量的吸收能力，把碰撞的动力学问题转化为准静态问题。这就是所谓的碰撞的静强度问题。

在所研究的问题中，意外事故及其它载荷造成的损伤及损伤结构的残余强度，对于海洋平台结构的设计及使用有着重要的意义。因为对它们的了解有助于确定平台结构抗碰撞能力以及确定平台在使用期间是否有必要进行维修（根据安全性和经济性的要求综合评定）。

本文将详细地对这一领域内的一些最新研究状况作一介绍。

2 碰撞力学

考虑图1所示的供给船与半潜式浮动平台间发生的碰撞。假设碰撞时间远小于平台结构的运动周期^[4]，碰撞后船与平台一起运动。下面列出本节所要用到的符号： m_1 为

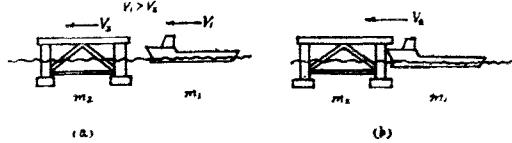


图1 供给船与半潜式平台的碰撞

碰撞船的质量，包括由水动力学效应带来的附加质量（即 $m_1 = m_{船} + k m_{船}$ ，其中侧向碰撞时 $k = 0.4$ ，船首或船尾撞向平台时 $k = 0.1$ ^[5]）； m_2 为半潜式平台质量，包括附加质量； V_1 为

碰撞前船的瞬间速度； V_1 为碰撞前平台的瞬间速度； V_c 为碰撞后船与平台的共同速度； E_s 为船吸收的能量； E_p 为平台吸收的能量。船与平台碰撞的数学模型以下面两个定律为基础：①动量守恒定律；②能量守恒定律。根据动量守恒定律可得

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = (m_1 + m_2) V_c \quad (1)$$

由此可以求出碰撞后的共同速度为

$$V_c = (m_1 V_1 + m_2 V_2) / (m_1 + m_2) \quad (2)$$

碰撞前的动能在一定程度上被船与平台的塑性变形所吸收，所以能量守恒可以表示为

$$\frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) V_c^2 + E_s + E_p \quad (3)$$

把式(2)代入式(3)，可得塑性变形的表达式

$$E_s + E_p = (1/2) m_1 V_1^2 (1 - V_2/V_1)^2 / (1 + m_1/m_2) \quad (4)$$

上式是在假设忽略波浪及系泊系统引起的外力作用时导出的。可以看出，只有船与平台的对顶碰撞才会产生最大的塑性变形能吸收，并且这一能量或许会超过船的动能。

由于缺乏关于船体塑性变形的可靠资料，通常忽略船的塑性变形能 E_s ，同时考虑到平台的质量一般都远大于供给船的质量，因此，平台结构的保守设计准则是

$$E_p = (1/2) m_1 V_1^2 (1 - V_2/V_1)^2 \quad (5)$$

对于固定式平台， $V_2 = 0$ ，

$$E_p = (1/2) m_1 V_1^2 \quad (6)$$

3 受横向载荷作用的圆管壁的局部变形

平台结构的塑性变形能吸收具有三种形式：①圆管壁的局部变形；②圆管的弯曲变形；③圆管局部变形和弯曲变形的联合。

要了解平台对碰撞的响应，首先必须研究圆管在横向载荷作用下局部变形的特征。局部变形的形状和程度取决于碰撞性质。在给定船质量和速度情况下，一个对顶碰撞比侧向碰撞的集中力要大得多。由于碰撞问题的复杂性，不可能用一简单的解析模型来估算受碰撞圆管的局部变形，即估算碰撞力 P 与局部变形 δ 之间的关系，从而求得吸收能量 E 与变形 δ 之间的关系。目前在这方面有圆环模型和凹陷模型两种不同的模型。圆环模型假设环处于两块刚性平板中间受压时，环上出现四个塑性铰，然后按机动法求得 $P-\delta$ 关系^[6-9]

$$P = 8 M_0 / \{D[1 - (\delta/D)^2]^{1/2}\} (\delta/D \leq 1/\sqrt{2}) \quad (7)$$

其中 $M_0 = (1/4)\sigma_y t^2$ ， σ_y 为材料屈服应力， t 为圆管壁厚度， D 为圆管直径。

如考虑应变硬化效应^[8]，则

$$P = \frac{8 M_0}{D[1 - (\delta/D)^2]^{1/2}} \left[1 + \frac{E_p}{3\sigma_y \alpha} \sin^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) \right] \quad (8)$$

图 2 给出 $P-\delta$ 曲线。在实际应用时，往往把整个凹陷区总长 L 分为好几段^[10]如图 3 所示，每段长为 L/n ，其对应的凹陷值 δ_i 。分段计算吸收的能量，然后相加，得到整个凹陷区所吸收的能量。于是式(7)相应地改为

$$P_i = 8 M_0 / \{D[1 - (\delta_i/D)^2]^{1/2}\} \quad (9)$$

其能量为

$$E = \sum_{i=1}^n 8 M_0 \frac{L}{n} \sin^{-1} \left(\frac{\delta_i}{D} \right) \quad (10)$$

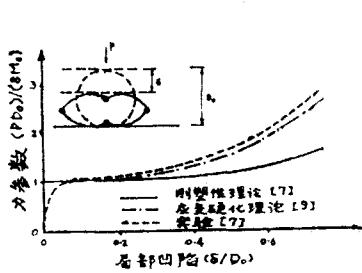


图 2 圆环的 P - δ 关系

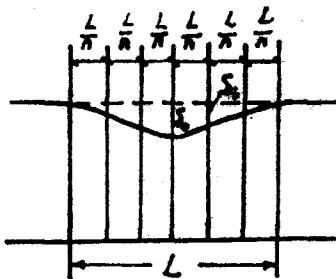


图 3 应用圆环模型的图示

考虑应变硬化效应,

$$E = \sum_{i=1}^n 8 M_0 \frac{L}{n} \sin^{-1} \left(\frac{\delta_i}{D} \right) \left[1 + \frac{E_p}{6\sigma_y a} \right] \quad (11)$$

然而在一般情况下, 圆管在受横向载荷作用时, 其局部凹陷深度是随长度连续变化的。因此, 提出用凹陷模型来分析 E - δ 关系。^[11—14] 在实验的基础上提出了半解析公式。如图 4 所示, 据实验观察, 简支的圆管在受侧向集中力作用时^[11], 其凹陷深度 δ 沿长度的变化可以用下列经验公式描述:

$$\delta = \delta_0 e^{-bx/D} \quad (12)$$

其中 x 是离载荷作用点的距离, δ_0 是最大凹陷值, b 是径厚比 D/t 的函数。 D/t 愈大, b 就愈小。 $D/t \approx 30$ 时, $b = 1.3$ 。

在此基础上, [12] 给出了载荷与凹陷的 P - δ 关系

$$P = 150 M_0 (\delta/D)^{1/2} \quad (13)$$

相应吸收的能量为

$$E = 100 M_0 (\delta^3/D)^{1/2} \quad (14)$$

图 5 表明, 式 (13), (14) 与实验结果符合得较好。

[13] 进一步考虑了由于轴向固定而产生的

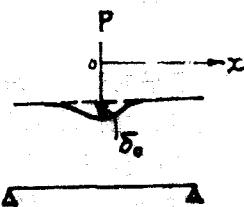


图 4 凹陷示意

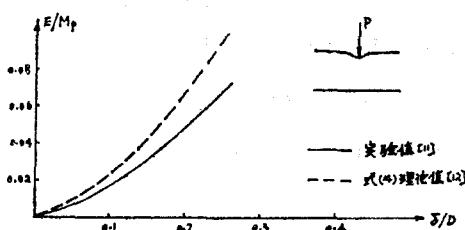


图 5 局部变形的能量吸收与凹陷 δ 的关系曲线

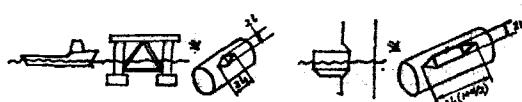


图 6 碰撞的塑性机构模型

影响。此外, [10] 用图 6 所示的塑性机构模拟侧向载荷作用下的局部变形。仅考虑各表面绕屈服线旋转, 可得到简单的关系式。对于图 6 所示的对顶碰撞

$$E = 4 M_0 \delta \left(\frac{2l}{L} + \frac{L}{l} \right) \quad (15)$$

对于图 6 所示的侧向碰撞

$$E = 2M_0\delta \left(\frac{4l}{L} + \frac{2L}{l} + \alpha L \right) \quad (16)$$

式(15), (16)适用于小的或中等程度的局部凹陷情况。对于工程应用而言, 它们已足够精确了。如果要更精确地描述结构变形, 则需要利用大量壳体理论知识。^[16, 17]进一步考虑了屈服线间表面的平坦化过程及母线伸长所带来的影响。^[18]

研究结果表明^[19], 局部凹陷所吸收的能量通常占整个碰撞能量的10—15%。

除此之外, 还有用非线性有限元程序如IMPACT^[17], TUBBUC^[18]计算的。

4 圆管构件的横向弯曲变形

圆管构件横向弯曲变形严格地讲必须用壳体理论来分析^[18]。然而这种分析既费时又不经济, 因此不适用于由大量圆管构成的海洋平台的整体分析。一般地, 海洋平台上所用的圆管(主要是支管), 其径厚比 $D/t < 50$ 。根据[19], 对于 $D/t < 60$ 的圆管, 其局部屈曲强度大于圆管柱的屈曲强度。因此, 在对圆管的横向弯曲变形进行分析时, 可以忽略局部屈曲的影响, 用梁的模型来模拟圆管的弯曲变形。

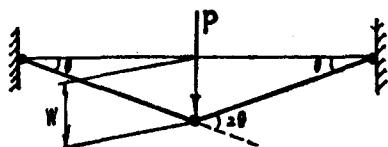


图7 三塑性铰梁的模型

首先假设材料为理想塑性, 利用[20]的方法可建立圆管的弯矩 M -轴力 N 的相关关系

$$\frac{M}{M_p} = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{N_p}\right) \quad (17)$$

其中 $M_p = \sigma_y D^2 t$, $N_p = \sigma_y \pi D t$ 。于是, 一根两端固定、中间受集中力作用、截面没有变形的圆管梁(图7)具有三个塑性铰时, 其简单梁理论的载荷-变形关系式为^[21-24]

$$\begin{cases} \frac{P}{P_0} = \left[1 - \left(\frac{W}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{W}{D} \right) \sin^{-1} \left(\frac{W}{D} \right), & \frac{W}{D} \leq 1 \\ \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{W}{\pi D}, & \frac{W}{D} > 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中 W 是梁的横向挠度, P_0 是塑性屈服载荷。

在实际平台结构中, 管子是相互连接的, 管接头具有一定的弹性。另外, 碰撞也不一定发生在管中央。于是, [10, 13]把式(18)扩展到包括弹性支撑、载荷不对称、管的弹性伸长效应的梁模型, 见图8。图中系数 K_1 , K_2 可通过实验加以确定^[25]。

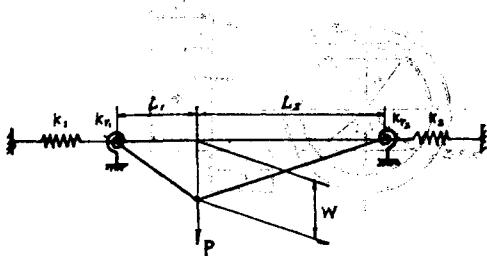


图8 梁模型的变形模式

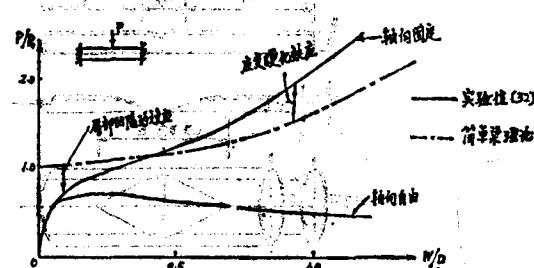


图9 载荷-挠度曲线特征

然而, 当圆管受一集中横向载荷作用时, 管截面会发生局部凹陷变形^[11]。这一变形对圆管的承载能力有很大影响, 如图9所示。因此, 有必要对简单的梁理论进行修正。

一个简单的方法就是分别考虑局部与整体变形。即假设由于碰撞所带来的能量分别由两种变形方式吸收，且当一种变形方式在吸收能量时，另一方式保持稳定不变^[12]。这一假设由[11]的实验结果所验证。另一方法是考虑局部凹陷和整体弯曲变形的联合作用。目前有三种简单的理论方法来估算由凹陷引起的承载能力的损失。

第一种方法^[26,27]假设在凹陷区域的纤维模量由于凹陷而下降。于是选用一系数 K_y ，令凹陷区域的屈服应力 $\sigma_{y,d} = K_y \sigma_y$ （图10）。系数 K_y 由实验确定^[27]：

$$K_y = 0.59 - 0.0096(D/t) + 0.0003(E/\sigma_y) - 0.57(\delta/D) \quad (19)$$

于是式(17)的M-N相关关系修正为^[28]

$$\frac{M}{M_s} = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{N}{N_p}\right) \cos\left[(1 - K_y)\left(\frac{\theta_s}{2}\right)\right] - \sin\left[(1 - K_y)\left(\frac{\theta_s}{2}\right)\right] \\ - (1 - K_y) \sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \quad (20)$$

其中 $\theta_s/2 = \sin^{-1}(\delta/D)^{1/2}$

相应地，用与[21—24]相同的方法，可以导出式(18)的修正式

$$\frac{P}{P_0} = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{W}{D}\right)^2} \cos\left[(1 - K_y)\left(\frac{\theta_s}{2}\right)\right] - \frac{W}{D} \sin\left[(1 - K_y)\left(\frac{\theta_s}{2}\right)\right] \\ - (1 - K_y) \sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right), & \frac{W}{D} \leq 1 \\ \frac{W}{D} \cos^{-1}\left[(1 - K_y) \sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right)\right] - (1 - K_y)\left(\frac{\theta_s}{2}\right), & \frac{W}{D} > 1 \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可见 K_y 使 P 降低了。如取 $K_y = 0$, $\theta_s = 0$, 则式(21)化为式(18)。

第二种方法^[29,30]建立在凹陷中心截面有一个假定的应力分布的基础上。图11反映了凹陷区域塑性力学的解析模型及截面应力分布。

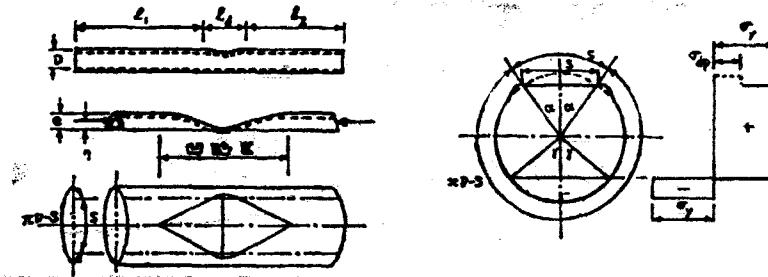


图 11 凹陷的圆管及其截面的应力分布示意图

假设轴力在截面上均匀分布。由于凹陷而有一偏心，在凹陷区形成一局部弯矩。此弯矩使凹陷部分绕凹陷的中心线旋转。当中心线发生屈服形成塑性屈服线时，令此时截面上的均

匀应力为

$$\sigma_{d,p} = \sigma_y [\sqrt{4(\eta/t)^2 + 1} - 2(\eta/t)] \quad (22)$$

其中偏心距离 η 如图11中所示。

当载荷继续增加时，只有剩余截面 $(\pi D - s)$ 能承受应力的增加，直到形成塑性铰。此时 $M-N$ 相关关系为

$$\frac{M}{M_p} = \cos \left[\frac{\pi}{2} - \frac{N}{N_p} + \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\sigma_{d,p}}{\sigma_y} \right) \right] - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sigma_{d,p}}{\sigma_y} \right) \sin \alpha \quad (23)$$

可以看到式(23)与式(20)极为相似。只要把式(23)中的 $\sigma_{d,p}/\sigma_y$ 改为 K_y ， α 改为 θ_s ，则式(23)就成了式(20)。因此，用类似的方法可以建立起 $P-W$ 的关系式。

第三种方法^[17,31,32]认为由于凹陷引起截面惯量改变及中性轴移动造成了强度损失。如图12所示凹陷区是平的，而截面剩余部分为一段定常半径的圆弧。同时，在变形过程中，截面面积保持不变。这一过程计算量较多，一般用计算机完成，这里无法列出简洁的公式。

这样，对于图13的二端轴向自由，转角固定的有凹陷的圆管梁，其极限载荷为 $P_{d,p}$ ：

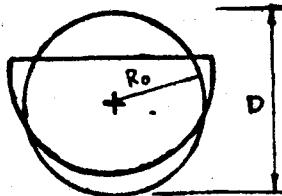


图 12 碰撞点截面变形模型

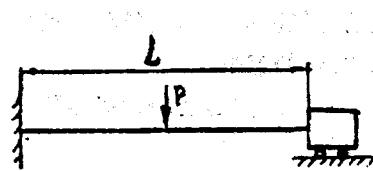


图 13 梁的示意图

$$P_{d,p} = (4M_0/L)(1 + M_{p,d}/M_p) \quad (24)$$

式中 $M_{p,d}$ 是有凹损圆管的塑性弯矩：

$$M_{p,d} = K M_p \quad (25)$$

图14给出由上述三种方法得出的 K 值与实验值^[11]的比较，可以看出前两种方法给出与实验值较为接近的上、下限，而第三种方法的结果与实验值相差较大，其原因是假设了整个截面的屈服应力均匀地等于材料的塑性屈服应力。

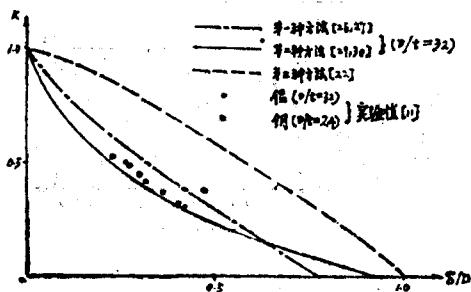


图 14 局部凹陷管的塑性弯矩降低的理论值与实验值的比较

将降低其承载能力。因此，受损圆管在轴向压力及弯曲力矩的作用下其残余强度的估算就显得很重要了。同时，它也是估算平台构件残余强度的基础。一般地，圆管损伤有下列几种形式^[10,12,14,26,28~30,33~37]：①局部凹损；②整体弯曲变形；③上述二种损伤形式的联合。

局部凹损对于承载能力的影响主要都在上节中讨论了。从式(19)可以看到，圆管的径厚比 D/t 越大，其残余强度就愈小；材料的 σ_y 越大，圆管受损后的强度也越小。由此可见，高强度材料并不适用于平台结构。另外，上节中考虑局部凹损的三种方法都忽略了初始曲率对残余强度的影响。^[36]在^[29,30]的基础上，考虑了初始曲率的影响。在考虑了局部凹陷

及初始曲率的作用之后，用梁模型对受损圆管进行分析，就可以估算在局部凹陷及初始曲率联合作用下的残余强度。图 15(a)给出局部凹陷对残余强度影响的理论值与实验值的比较。图 15(b)给出初始挠度对残余强度影响的理论值与实验值的比较，理论与实验比较吻合。

在估计平台结构的残余强度时，这些方法都是很有效的。

受轴向压力作用的梁柱，[29]的实验表明（图16），由于局部凹陷，圆管的屈曲强度下

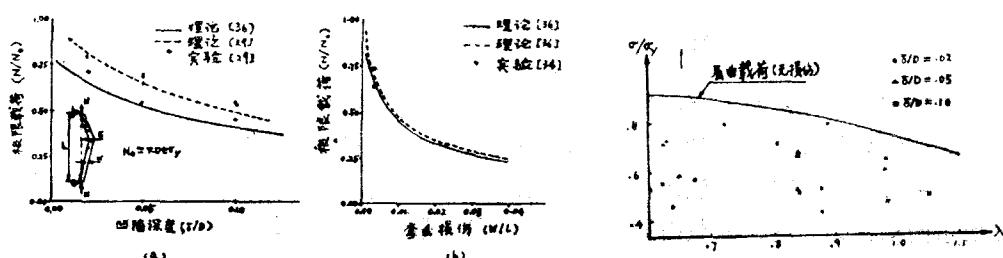


图 15 受损圆管的轴向承载能力
(a) 只有局部凹陷 (b) 只有初始弯曲

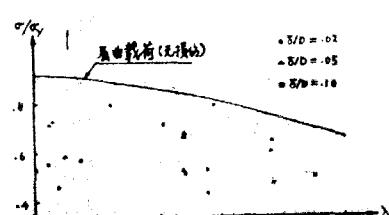


图 16 理论与实验载荷比较

降。目前还缺乏足够的实验资料和理论资料，尤其是凹陷与初始挠度同时存在的情况。

6 动力效应的影响

以上所有的论述都是在静力或准静力条件下进行的，实验表明，应变率对材料的应力有很大的影响（图 17）^[49]。

[32]的静、动力实验表明（图18），动载荷主要影响碰撞点的局部变形，并且在动态碰

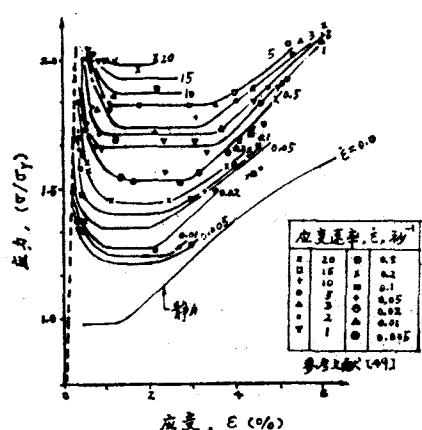


图 17 中碳钢在不同应变率下的应力-应变曲线

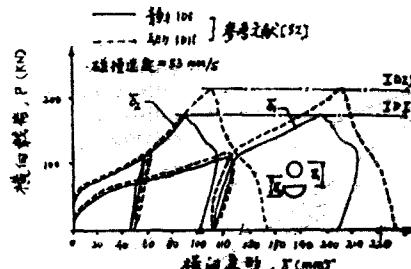


图 18 横向载荷作用下的圆管的静、动态载荷-变形响应的实验比较

撞条件下，结构的承载能力比静态时高10%左右。

7 平台结构的碰撞和损伤响应的数值方法

目前用来估算平台碰撞和损伤的主要数值方法为有限元法和有限差分法。

尽管非线性计算机程序在大挠度、大应变、弹塑性方面取得了很大进展，但是到目前为止，这些程序在具体使用时仍然不方便，既费时又不经济，并且是否能把所有对于碰撞及损伤有重要影响的作用都反映出来还值得怀疑。现在尚未见到整体结构的载荷-变形响应的切实可行的纯数值方法。

一个可行的方案就是在一些简化的条件下，建立非线性的计算模型，这些模型能够尽可

能地包括所有重要的失效模式。它们是一种混合模型。有时用上述理论模型来考虑局部变形。[14,37—42]给出了一些用简单数值方法来估算平台结构的载荷-变形响应的例子。

在大多数上述数值方法中，每个单元内的几何和物质的非线性性质用一组非线性的力-变形曲线描述，这些曲线或由实验确定，或由精确的数值计算给出。这样就可以把那些局部损伤效应（例如屈曲、塑性化及断裂等）简单地归入结构响应的整体分析之中。以此为基础的计算，提供了分析碰撞和损伤作用的有力且有相当精度的工具。整体分析的精度将完全取决于单元对碰撞及损伤响应的精度。有必要花更多的力量去提高单元对局部变形响应的精度。

8 钢质管状平台结构在碰撞载荷作用下的主要失效模式

由钢质管构成的海洋平台结构具有很好的能量吸收特性。计算和经验表明，在大多数中等程度的意外碰撞事故中，平台吸收了全部的碰撞能量，而撞击船则在撞击了支管以后就停止不动了。因此，通常对于平台的损伤就局限于单根支管，而整个平台仍具有足够的强度承受正常的工作及环境载荷。

然而在某些情况下，支管在其早期变形阶段就失效了，撞击将导致其余的一些支管也跟着损坏。显然这种情况是危险的，必须避免。因此，人们花了很大精力去研究平台的强度问题。目前对于平台的碰撞响应已有较多了解。它的失效模式归纳起来主要有三种：①受压部位的屈曲。主要发生在具有大径厚比 D/t 和弱轴向约束的管中。②受拉部位的断裂。主要发生在具有小径厚比 D/t 和强轴向约束的管中。③管接头失效。支管从弦管壁上断开。

8.1 局部屈曲 [43]中的一系列圆管弯曲试验表明，对于 $D/t < 35$ 的管件能形成完全的塑性铰，并能保持到充分大的大挠度。同时，当它的曲率到达屈服曲率 6 倍时，它的强度没有损失^[14,43]。API^[44]给出了一个较为保守的准则是（当 σ_y 的单位为 MPa 时）

$$D/t < 8962/\sigma_y \quad (26)$$

圆管能形成并保持管梁的全塑性弯矩，在大挠度情况下，考虑到在变形过程中圆截面的椭圆化等因素，[43]的实验结果指出一个更现实的限制是 $D/t < 20$ 。在这方面尚有更多的工作要做。

8.2 拉伸断裂失效 为了确定这一失效模式，有必要估算应变硬化材料的充分塑性化区域的最大局部应变。普通碳素钢的拉伸实验表明断裂发生在伸长为 30—40% 时。[4]提出最大名义应变是缺陷大小的函数。最大名义应变可大到 $\epsilon/\epsilon_y < 30$ 范围。通常在设计时取平均伸长的 10%。

8.3 管接头的失效 管接头的承载能力在很大程度上决定了支管所能吸收的碰撞能量的大小。在分析碰撞及损伤时，一般把管接头的极限能力化为支管端部的约束力和力矩。[45—47]给出一些有用的结果。但是关于面外弯矩及复合加载条件下管接头极限承载能力方面的资料目前尚不多见。

9 结论与展望

本文详细总结了钢质海洋平台管状结构的碰撞及损伤方面的工作进展。比较了各种理论方法与实验方法。

一般地，由于在碰撞时产生大变形，理想刚塑性理论是分析平台对碰撞载荷的响应及能量吸收的一个简单而有效的工具。在小损伤范围内，为了提高精度，有必要考虑弹性效应。

当圆管受到大的横向载荷作用时, [4, 48]的工作表明, 根据轴向约束情况, 轴向变形是能量吸收的主要形式, 并且出现拉伸失效形式。这时, 局部凹陷和弯曲变形通常对于圆管的总能量吸收能力只有极小的贡献。

目前在以下几个方面仍然需要有更多的理论和实验的资料来建立更切合实际的计算方法: ①管接头的极限承载能力; ②碰撞引起的平台构件的凹陷; ③损伤构件及结构的残余强度; ④动力效应; ⑤整体碰撞响应的切实可行的计算程序。

参 考 文 献

- 1 Veritec A S. Worldwide Offshore Accident Datebank (WOAD), Annual Statistical Report 83. Oslo, Norway (May 1984)
- 2 Veritec A S. Offshore Accident Review, Fagerjord O (Ed.), 2, 1 (May 1984)
- 3 Laheld P. Statistics on collision accidents involving offshore structures. Proc. IABSE Colloquium of Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Introductory Report, Copenhagen (1983) : 27—45
- 4 Pettersen E, Valsgard S. Collision resistance of marine structures. Structural Crashworthiness, Butterworths, London (1983) : 338—370
- 5 Det norske Veritas (DnV). Rules for Classification of Mobile Offshore Units (1981)
- 6 Reid S R. Laterally compressed metal tubes as impact energy absorbers. Structural Crashworthiness, Butterworths, London (1983) : 1—43
- 7 DeRantz J A, Hodge P C. Trans. ASME, J. of Applied Mechanics, 30 (1983) : 391—394
- 8 Reddy T Y, Reid S R. Int. J. Solid and Structures, 16 (1980) : 545
- 9 Reid S R, Reddy T Y. Int. J. Solid and Structures, 14 (1978) : 213
- 10 Oliveira J G de. Proceedings of the Thirteenth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Tex., Paper OTC 4136 (1981) : 187—198
- 11 Thomas S G, et al. Int. J. Mechanical Sciences, 18 (1976) : 325—333, 387—397, 501—509
- 12 Ellines C P, Walker A C. Proc. IABSE Colloquium of Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Preliminary Report, Copenhagen (1983) : 253—261
- 13 Oliveira J G, et al. Plastic behaviour of tubular members under lateral concentrated loading. Det norske Veritas. Progress Report No. 15 on Impact and Collision Offshore. Report NO. 82—0708 (1982)
- 14 Ellines C P, et al. Buckling of Offshore Structures, Granada, London (1984)
- 15 Furnes O, Amdahl J. Ship Collision with Offshore Platforms, Intermaritec, Hamburg (1980)
- 16 Oliveira J G, et al. Simple method of estimating the energy absorption capability of steel tubular members used in offshore structures. Division of Marine Structures, The University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Report SK/R50 (August 1979)
- 17 Søfreide T H. IMPACT—A Computer Program for Non-linear Geometric and Material Analysis of Beams and Columns, Division of Marine Structures, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway (1981)
- 18 Remseth S N, Holth K, Bergam P G, Holand I. Tube buckling analysis by the finite element method. Finite Elements in Nonlinear Mechanics, Tapir Publishing Company, Trondheim, Norway (1977)
- 19 Bouwkamp J G. OTC 2204 (1975) : 583—593
- 20 Hodge P G. Int. J. Mechanical Sciences, 16 (1974) : 385—388
- 21 Soates C G, Søfreide T H. Trans. ASME, J. Structural Engineering, 109, 2 (1983) : 451—467
- 22 Oliveira J G de. Proc. the 3th International Symposium on Offshore Engineering, Coppe, Rio de Janeiro, Brazil (1981) : 466—483
- 23 Søfreide T H. Ultimate Load Analysis of Marine Structures, Tapir Publishing Company, Trondheim, Norway (1981)
- 24 Jones N. Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, 84 (1976) : 115—145
- 25 Det norske Veritas (DnV). Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures, Appendix C Steel Structures (1977)
- 26 Smith C S. Buckling of Shell in Offshore Structures, Granada, London (1982) : 1—24

- 27 Smith C S. Assessment of damage in offshore steel platforms. The International Conference to Celebrate the Centenary of the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow (Sept. 1983)
- 28 Richards D M, Andronicou A. *Trans. ASME, J. Energy Resources Technology*, 107 (1985) : 485—492
- 29 Taby J, et al. *Norwegian Maritime Research*, 2 (1981) : 26—33
- 30 Ueda Y, Rashed S M H. Proceedings of the 4th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Dallas, Tex. (Feb. 17—22, 1985)
- 31 Valsgard S, Foss G. *Buckling of Shell in Offshore Structures*, Granada, London (1982) : 491—548
- 32 Søfreide T H, Amdahl J. *Norwegian Maritime Research*, 2 (1982) : 3—12
- 33 Smith C S, et al. BOSS'79, Behaviour of Offshore Structures, Imperial College, London (1979) : 303—326
- 34 Smith C S, et al. Proceedings of the Thirteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 3981 (1981) : 273—282
- 35 Smith C S. Assessment of damage in offshore steel platforms. Proceedings of the International Conference on Marine Safety, University of Glasgow (Sept. 7—9, 1983)
- 36 Ellinas C P. *Trans ASME, J. Structural Engineering*, 110, 2 (1983) : 245—259
- 37 Søfreide T H, et al. Proceedings of the Thirteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 5302, Houston, Tex. (1981) : 95—102
- 38 Peterson J P, Pederson J J. Proceedings of the Thirteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 4134, Houston, Tex. (1981)
- 39 Pettersen E, Johnsen K R. Proceedings of the Thirteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 4135, Houston, Tex. (1981)
- 40 Zayas V A, et al. Proceedings of the Thirteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 3979, Houston, Tex. (1981)
- 41 Zayas V A, et al. BOSS'82, Behaviour of Offshore Structures, M. I. T. (1982) : 39—58
- 42 Ueda Y, et al. Proceedings of the 3th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, New Orleans, La. (1984) : 260—268
- 43 Sherman D R. *Proceedings of the ASCE, J. Structural Division*, 102, STII (1975)
- 44 American Petroleum Institute (API). Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP2A, Thirteenth Edition, Washington, D. C. (1982)
- 45 Gibstein M B. Det norske Veritas, Report NO. 73-86-C (1973)
- 46 Yura J A, et al. Proceedings of the Twelfth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 3690 (1980)
- 47 Marshall P W, Bea R G. BOSS'76, Behaviour of Offshore Structures, PART II (1976) : 579—635
- 48 Foss G, Edvarsen G. Proceedings of the Fourteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 4217, Houston, Tex. (1982) : 625—634
- 49 Marsh K J, Campbell J D. *Int. J. Mechanics and Physics of Solids*, 11 (1963) : 49

ADVANCES IN ANALYSIS OF COLLISION AND DAMAGE OF OFFSHORE PLATFORM

Chen Tie-yun Zhu Zhen-hong
Shanghai Jiao Tong University

Abstract This paper reviews the analysis of collision and damage of offshore platform in great details. A general description of the collision mechanisms is given and various methods available for analyzing the collision and damage problem are discussed. Models of energy absorption of steel platforms are identified and compared.

Keywords offshore platform; collision; damage