

共同规范双壳油船货舱区结构有限元分析

张 波

(广船国际技术中心)

摘 要: 本文是就共同规范对有限元建模及分析的介绍。

关键词: 共同规范 双壳油船 有限元 建模 CSR

1 背景 (Common Structure Rule 生效)

2003年以来, 为了全面地对国际海事组织 (IMO) 现行公约的船舶安全性进行评估, 由巴哈马、希腊政府、国际船级社协会 (IACS) 发起, 在2002年的IMO外交大会上, 提出目标型标准的概念, 并在IMO的78、79、80次海安会上连续进行了讨论与补充, 要求IACS的规范向着更高的技术标准变化, 并且不断对国际海上安全公约 (SOLAS) 做出补充条款和修正案, 吸收IACS所制定的强制性标准, 使其成为公约中强制性文件。

与此同时, 为了满足海事界与船东的要求, 避免IACS成员之间在结构标准方面的不良竞争而导致建造中出现低标准船舶, IACS综合了其所有成员的经验与研究成果, 由LR、ABS、DNV三家船级社制定油船 (双壳) 共同规范, 由BV、RINA、GL、RS等船级社制定散货船共同规范, 并在国际海事、航运、造船各界广泛征求意见, 现已自2006年4月1日起生效。其中船体结构的有限元计算被规范吸纳, 成为强制要求的部分。

2 结合39 000 DWT成品油船研发项目对CSR有限元分析的介绍

2.1 船体结构强度的有限元计算在规范中是强制性规定

计算范围包括两部分:

1) 货舱区分析, 校核纵向构件、主要支撑构件和横舱壁的强度。

2) 细网格分析, 校核局部结构应力水

平。(规范中另有详细的要求, 本文不作论述)。

2.2 要求进行有限元的范围

2.2.1 为了做有限元强度校核, 规范规定了中部货舱区, 其范围如图1所示。

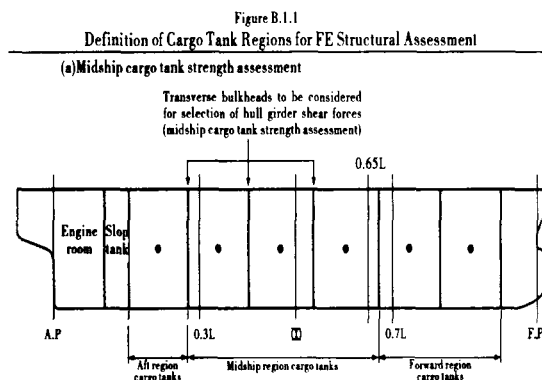


图1 货舱区定义

2.2.2 有限元模型的最小纵向范围应覆盖中部货舱区三个液货舱长度, 其范围应能充分表示中部区域内的结构。39 000 DWT (以下简称本船) 所作有限元模型的范围如图2所示 (其中包括了中部区域的三个货舱):

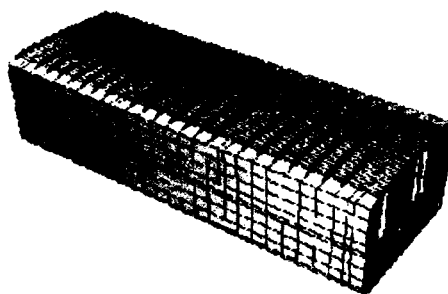


图2 货舱区三舱段有限元模型

2.3 有限元的类型

结构计算应基于三维线性有限元计算, 类型如表1。

2.4 板厚理论

2.4.1 液货舱有限元模型中构件厚度都应减去0.5倍腐蚀余量。如本船的船底板, 模型中的厚度是总厚度, 在进行有限元分析的时候扣除了外板腐蚀余量的一半 (如图3所示)。

2.5 对软件的要求

2.5.1 任何能反映船体结构所受到有效的合成弯矩、剪力、轴向力和扭转变形的软件, 经船级社同意都可用来进行有限元分析。

2.5.2 能提供令船级社满意的可靠计算结果的计算机程序被视为已获认可的程序。如所使用的计算机程序不是由船级社提供或未经认可的, 则应提交批准关于计算机程序的完整详细说明, 包括计算结果。建议程序设计人员在开始任何计算工作前, 向船级社咨询有关所使用计算机程序的适用性情况。

2.5.3 DNV、LR和ABS都分别有自己的有限元计算软件。

2.6 结构建模

2.6.1 建模中应注意的事项:

①模型端部: 端部的横舱壁应得到表示。如安装有槽型横舱壁, 模型端部的液舱前后壁墩结构也应包括在模型内。

②伸出端部横舱壁的模型长度, 应尽可能保持两端相等。

③模型端部的强肋骨应制作在模型中。

④模型制作应包括两舷, 高度应达到型深, 包括甲板外翻的结构。

⑤所有主要的纵向和横向构件, 都应

表1 有限元类型

| | |
|--------------|--------------------------------------|
| 杆 (或构架) 单元 | 只有轴向刚度线单元, 沿单元长度方向有恒定的横剖面面积 |
| 梁单元 | 有轴向的、扭转的以及双向的剪切和弯曲刚度的线单元, 沿单元长度有恒定特性 |
| 膜 (或面应力) 板单元 | 有双轴向和内平面板单元刚度的板单元, 有恒定厚度 |
| 壳 (或弯曲板) 单元 | 有内平面刚度和外平面弯曲刚度的板单元, 有恒定厚度 |

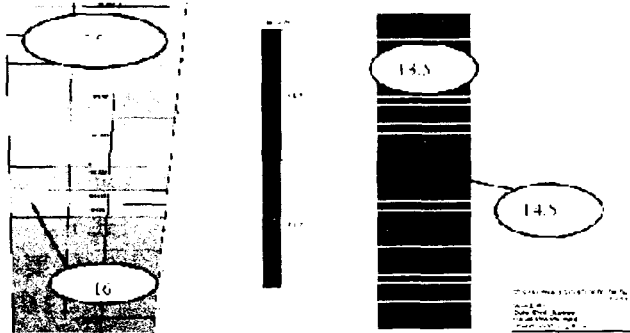


图3 腐蚀余量的扣除

制作模型。这包括内壳和外壳、双层底肋板、桁材系统、横向和垂向强肋骨、纵桁、横舱壁和纵舱壁结构。结构上的所有板材和扶强材, 包括梁腹加强板, 都应制作模型。

⑥所有主要构件的面板和肘板都应制作模型。

⑦所有局部的扶强材都应制作模型。对于不连续的扶强材的有效剖面积按表2计算。

表2 扶强材线单元的有效横剖面面积

| 线单元代表的结构 | 有效面积 A_e | |
|-------------------|------------|----------------|
| 距端部距离 $2dw$ 内的扶强材 | 所有剖面 | $A_e=25\%A_n$ |
| 距端部距离 $2dw$ 外的扶强材 | 所有剖面 | $A_e=100\%A_n$ |

式中: A_n 线单元长度的平均横剖面面积; Dw 强结构腹板高

⑧所有主要构件上的扶强材都应制作模型。如这些扶强材与主要有限元网格不一致, 则沿着邻近的节点设置线单元, 但调整的距离不能超过0.2倍的纵骨间距。

典型的模型结构如图4、5、6所示。

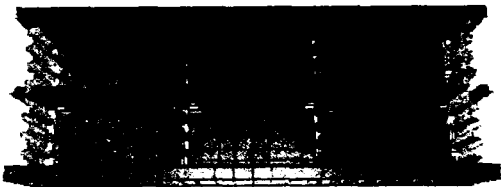


图4 纵横舱壁

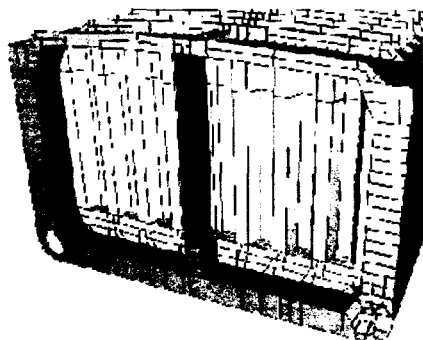


图5 模型端部的横舱壁和强肋骨



图6 双层底内的主要构件

2.6.2 板单元的网格应尽可能符合骨架系统，从而保证扶强材之间的实际板格。总体上，板单元要满足以下要求：

- ①每两个纵向扶强材之间有一个单元，纵向长度一般不超过两个肋距。
- ②横舱壁每个扶强材之间有一个单元。

③在每个强肋骨、横撑和纵桁的两个扶强材之间有一个单元格。

④在双层底内的纵桁和实肋板、横向和垂向的强肋骨、横舱壁的水平桁材高度内至少要有三个单元。

⑤对于撑杆和具有较小腹板的制荡横舱壁和纵舱壁上的甲板强横梁和水平桁材，在其腹板高度上可使用两个单元来表示。

⑥底边舱腹板上的网格应精细到足以表示腹板开口的形状。

⑦主要构件大肘板的自由边的形状尽可能与实际一样，以避免由于形状引起的应力集中。

典型的网格如图7、8、9、10所示。



图7 双层底内的有限元网格

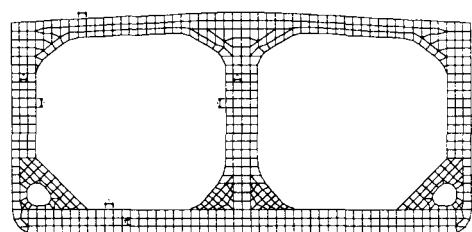


图8 强肋骨典型有限元网格 (s =纵骨间距)

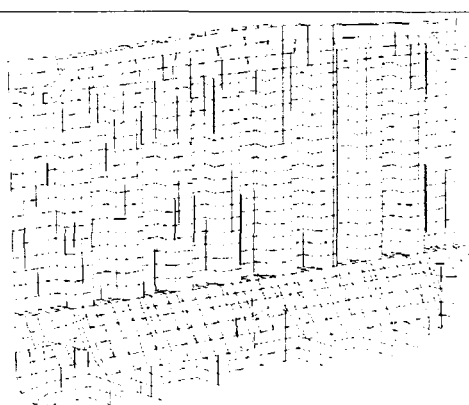


图9 槽型横舱壁的典型有限元网格

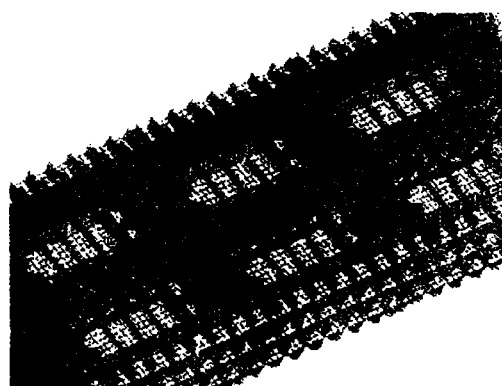


图10 货舱段内部结构有限元网格

2.6.3 单元的长宽比系数通常不超过3，尽量不使用三角形。在高应力区域单元的长宽比值应尽量接近1（如可能），且避免使用三角形。

2.6.4 主要支承构件腹板的开口如表3和图11、12所示。模型制作中如未考虑较小开口，有限元计算得到的应力，应根据规范另行修正。

表3 梁腹开口的表示

| | |
|--|---|
| $h_o/h < 0.35$ 和 $r_o < 1.2$ | 开口无需制作模型 |
| $0.5 > h_o/h \geq 0.35$ 和 $r_o < 1.2$ | 板材可用平均厚度 $t_{1-net50}$ 制作模型 |
| $0.5 > h_o/h \geq 0.35$ 和 $2 > r_o \geq 1.2$ | 板材可用平均厚度 $t_{2-net50}$ 制作模型 |
| $0.5 > h_o/h \geq 0.35$ 和 $2 > r_o \geq 1.2$ | 板材可用平均厚度 $t_{1-net50}$ 和 $t_{2-net50}$ 的最小值制作模型 |
| $h_o/h \geq 0.5$ 或 $r_o \geq 2.0$ | 开口的几何图形应制作模型 |

式中：

$$r_o = 1 + \frac{l_o^2}{2.6(h - h_o)^2}$$
$$t_{1-net50} = \frac{h - h_o}{h} t_{w-net50}$$
$$t_{2-net50} = \frac{h - h_o}{h r_o} t_{w-net50}$$

t_{w-net} 从总厚度中减去 $0.5 t_{corr}$ 得到的实际净腹板厚度
 l_o 平行于腹板水平方向的开口长度； h_o 平行于腹板垂直方向的开口高度。
 r_o 开口的半径； h 腹板高度。
注：如连续开口之间的距离 d_o 小于 $0.25h$ ，长度 l_o 取下所示的开口之间的长度值。

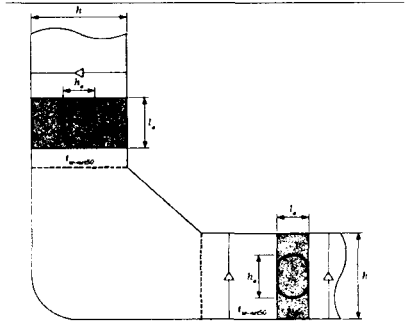


图11 腹板开口

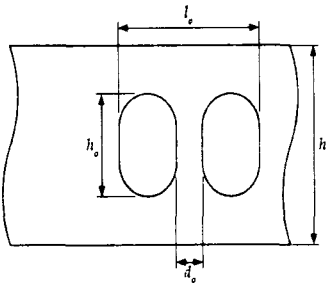


图12 $d_o < h/4$ 时连续开口的长度 l_o

2.7 载荷及装载工况

2.7.1 在结构分析中，应该检查在船所受的静载荷和动载荷作用下的弯矩、剪力。
2.7.2 规范中规定了有限元分析中应包含的装载工况（包括航行、港口及实验状态）。

2.7.3 如标准载荷实例中未涉及特定的装载工况，则应对这些附加的装载工况进行检查。
2.8 有限元分析的目的
有限元可验证，作用在静载荷和动载荷下，以下各项是否均在可接受的衡准之内。

2.8.1 被建成船体梁、主要支撑构件及其面板、横舱壁的板或杆元的应力水平。

以本船内底的局部为例，根据规范， $\lambda_y = \sigma_{vm} / \sigma_{yd} \leq 0.80$ ，得出 $\sigma_{vm} \leq 188.0 \text{ N/mm}^2$ ；有限元分析得出的单元中心所受的实际平均应力为 $\sigma_{vm} = 90.3821 \text{ N/mm}^2$ ，实际所受的平均应力小于理论值，所以这个单元是

满足要求的（如图13和表4）。

2.8.2 板和筋的屈曲能力

以本船的一个强框为例，根据规范第九章的表9.2.2，对于板的屈曲要求屈曲系数 $\eta \leq 1$ ，由有限元分析的结果来看，其中部分的板是不满足屈曲的要求（如图14、15和表5所示）。

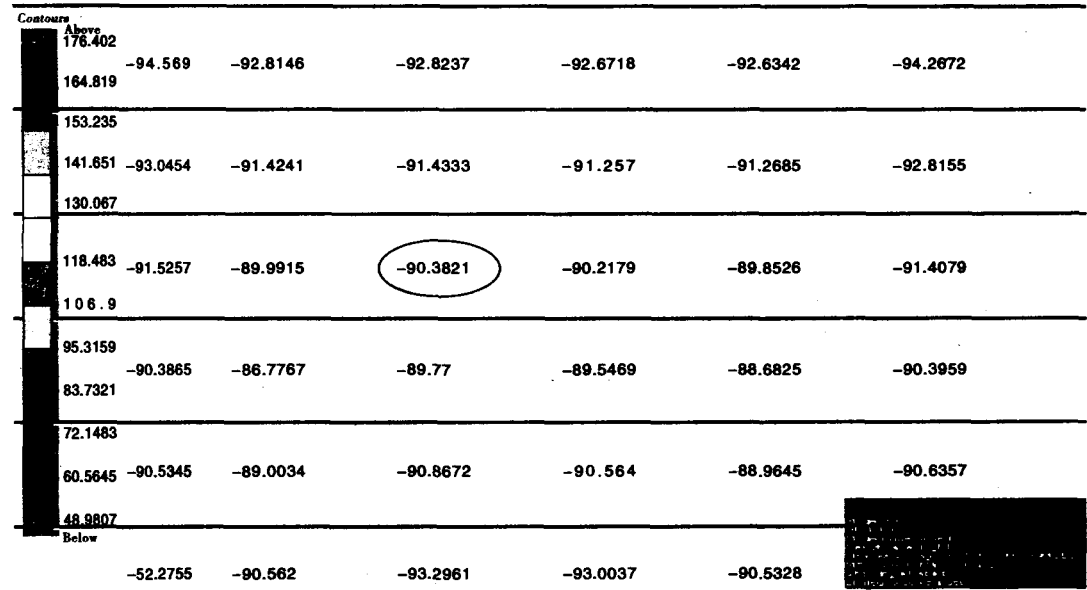


图13 内底板所受的应力

表4 最大许用隔板应力

| 结构部件 | 屈服应用因数 |
|---|---|
| 液舱内部结构 | |
| 如：横向强肋骨结构、内部腹板、水平纵桁、底板及桁材。 采用杆单元，制成模型的主要支撑构件面板 | $\lambda_y \leq 1.0$ （航行状态） $\lambda_y \leq 0.8$ （泊港状态） |
| 液舱限界上结构 | |
| 甲板、舷侧、内船体、边舱斜顶板、平面及槽形液货舱纵舱壁 | $\lambda_y \leq 0.9$ （航行状态） $\lambda_y \leq 0.72$ （泊港状态） |
| 内底、外底、平面横舱壁及槽形舱壁；密封底板、桁材及腹板 | $\lambda_y \leq 0.8$ （航行状态） $\lambda_y \leq 0.64$ （泊港状态） |

式中：

λ_y 屈服应用因数

，板构件

$$= \frac{\sigma_{vm}}{\sigma_{yd}}$$

，杆单元或横梁构件

σ_{vm} 根据单元形心上的隔板应力计算得出的von Mises应力， N/mm^2

σ_{yd} 杆单元上的应力， N/mm^2

σ_{yd} 材料的规定最小屈服应力， N/mm^2 ，对于应力集中区域，在航行状态下不能大于 315N/mm^2 。

注：

- 本表格中给出的结构项仅供指导之用。规范中规定的有限元模型所有部件应力都应对照许用应力衡准进行验证。
- 应力集中区域包括以下地方：开口的折角、折角连接处、主要支撑构件和骨材的趾端和趾跟。

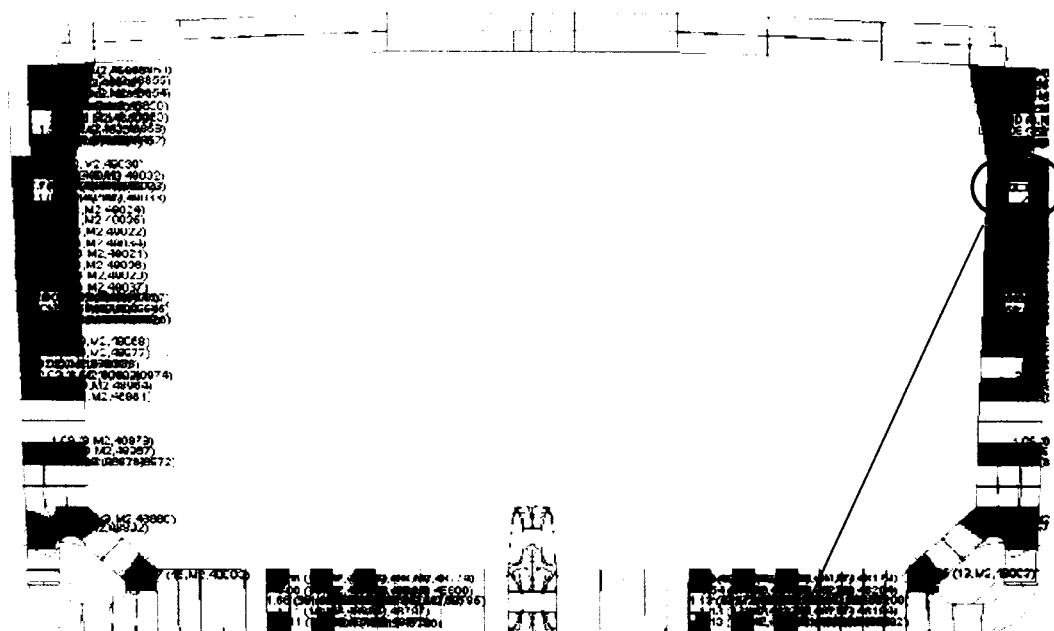


图14 横向构件的屈曲

表5 最大许用屈曲应用因数

| 结构部件 | 屈曲应用因数 |
|-----------|---------------------|
| 板和加筋板格 | $\eta < 1.0$ (航行状态) |
| | $\eta < 0.8$ (泊港状态) |
| 开口处腹板 | $\eta < 1.0$ (航行状态) |
| | $\eta < 0.8$ (泊港状态) |
| 撑杆结构的支柱屈曲 | $\eta < 0.5$ (航行状态) |
| | $\eta < 0.4$ (泊港状态) |

式中: η 屈曲应用因数

2.8.2 板和筋的屈曲能力。

以本船的一个强框为例, 根据规范第九章的表9.2.2, 对于板的屈曲要求屈曲系数 $\eta \leq 1$, 由有限元分析的结果来看, 其中部分的板是不满足屈曲的要求 (如图14、15和表5所示)。

3 结语

随着船舶行业对船舶的安全性要求越来越高和计算机技术的发展, 在新的共同规范中规定了强制性的有限元分析。

在有限元模型中, 所有的构件都被表

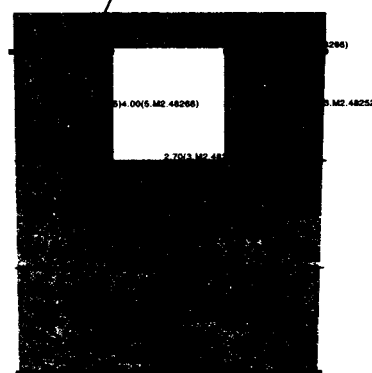


图15 局部放大

示出来, 基本能全面地表示了船舶结构, 再加上规范中给定的装载工况就能表示出船舶在航行或港口状态下所受的实际载荷, 较真实的反映了船舶的受力情况。所以通过有限元计算所得到的应力被认为是真实的、准确的。

参考文献

- 1 国际船级社协会 (IACS) 双壳油船公共规范 (Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers) IACS 2006.04
- 2 国际船级社协会 (IACS) 共同规范背景资料 IACS 2005.03
- 3 挪威船级社 DNV有限元培训资料 挪威船级社 2005.10

(收稿日期:2006-09-20)