

# 团 体 标 准

T/CCIASD XXXXX—XXXX

## 罐式集装箱有限元分析指南

Guidance for finite element analysis of tank containers

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国集装箱行业协会 发布



# 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 一般说明 .....	3
5 建立有限元模型 .....	3
6 工况加载 .....	7
7 分析报告文件 .....	14
8 附录 A（资料性） 有限元模型边界条件施加图示 .....	错误！未定义书签。7
参考文献 .....	155

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国集装箱行业协会提出并归口。

本文件起草单位：中集安瑞环科技股份有限公司、中国船级社、友诺罐箱租赁（上海）有限公司、大连九鼎国际物流有限公司。

本文件主要起草人：

# 罐式集装箱有限元分析指南

## 1 范围

本文件提供了液体（注1-1）货物罐式集装箱（以下简称液体罐箱）的结构静强度有限元计算处理过程，包含建立有限元模型的方法、工况加载、分析报告文件等内容。

本文件适用于罐式集装箱研制过程中GB/T 16563规定的静强度有限元分析。

注1-1：液体，是指在50°C时蒸气压力小于或者等于0.3Mpa（绝压），在20°C和0.1013Mpa（绝压）压力下不完全是气态，在0.1013Mpa（绝压）标准压力下熔点或者起始熔点等于或者低于20°C的物质。

[来源：TSG R0005—2011，移动式压力容器安全技术监察规程]

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1992 集装箱术语

GB/T 16563 系列1集装箱 技术要求和试验方法 液体、气体及加压干散货罐式集装箱

GB/T 33582 机械产品结构有限元力学分析通用规则

ISO 1496-1 Series 1 freight containers—Specification and testing, Part 1: General cargo containers for general purposes

## 3 术语和定义

GB/T 1992界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 罐式集装箱 tank container

由一个或多个罐体和框架两个基本部分构成，并符合GB/T 16563要求的集装箱。

[来源：GB/T 16563, 3.1]

### 3.2 有限元建模 finite element modeling

构建有限元模型的过程，包括几何模型构建和（或）处理、材料属性定义、网格划分、边界条件施加等步骤。

[来源：GB/T 33582, 3.1]

### 3.3 单元 element

具有几何、物理属性的最小求解域。

[来源：GB/T 33582, 3.6]

### 3.4 质量单元 mass element

表征只具备质量属性的单元。

[来源：GB/T 33582，3.11]

### 3.5 板/壳 plane/shell

一类厚度方向尺寸远小于长度和宽度方向尺寸的结构。

[来源：GB/T 33582，3.15]

### 3.6 实体 solid body

由面或棱边构成封闭体积的三维几何体。

[来源：GB/T 33582，3.16]

### 3.7 线性分析

在分析过程中，外载荷与模型的响应之间为线性关系，去掉载荷后，模型能够恢复至初始状态，其特点是：

- a) 几何方程的应变  $\epsilon$  和位移  $U$  的关系是线性的；
- b) 物理方程的应力  $\sigma$  和应变  $\epsilon$  的关系是线性的；
- c) 根据变形前的状态建立的平衡方程是线性的；
- d) 可以满足叠加原理。

### 3.8 非线性分析

外载荷与模型的响应之间具有非线性的关系，就属于非线性问题。它可以分为三类：几何非线性、边界条件非线性和材料非线性。

### 3.9 几何非线性

模型在分析过程中出现大的位移或转动、突然翻转、初始应力或载荷硬化，位移的大小会影响模型的响应，就是几何非线性问题。

### 3.10 边界条件非线性

在分析过程中边界条件发生变化。接触问题是最常见的边界条件非线性问题。

### 3.11 材料非线性

材料的应力-应变关系曲线是非线性的，就属于材料非线性。常见的非线性材料包括超过屈服点的金属材料、超弹性材料（例如橡胶）等。

### 3.12 泊松比

泊松比是指材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变的比值。

### 3.13 屈服强度

屈服强度是金属材料发生屈服现象时的屈服极限，也就是抵抗微量塑性变形的应力。对于无明显屈服现象出现的金属材料，规定以产生0.2%残余变形的应力值作为其屈服极限，称为条件屈服极限或屈服强度。

## 4 一般说明

### 4.1 基础说明

4.1.1 本文件提供了液体罐箱罐体、框架及其连接构件的有限元计算处理过程和结果评估指南。

4.1.2 液体罐箱有限元计算评估资料包括：

- a) 罐式集装箱总装图；
- b) 罐体图；
- c) 框架图；
- d) 罐体和框架之间的连接件图（适用时）；
- e) 其他认为必需的文件资料。

### 4.2 模型划分原则

4.2.1 液体罐箱的框架结构宜使用板壳单元（shell element）进行划分，以保证框架与罐体的单元连接方式的合理性以及连接位置应力的准确性。

4.2.2 液体罐箱的罐体部分以及罐体与框架的连接部分（如连接板、底部鞍座等）宜使用板壳单元（Shell element）来划分，在结构曲率比较大的区域，单元宜划分较细。

4.2.3 液体罐箱的其他结构零件宜使用适用的、合理的单元类型进行划分。

4.2.4 在有限元分析时，宜考虑板材的有效厚度（扣除加工减薄量、腐蚀裕量、板厚负偏差等）和框架不同的截面尺寸。

### 4.3 有限元分析规划

有限元分析规划宜包括以下内容。

- a) 确定有限元分析类型，宜包括：
  - 判断测试大纲中的工况需要采用静力线性还是非线性分析；
  - 大平板受面压，其法向刚度随变形加大而增加，宜打开几何非线性开关；
  - 梁在轴心受压，弯曲变形较大时要考虑失稳，宜打开几何非线性开关；
  - 考察零部件塑性变形时，宜采用非线性材料结构；
  - 零部件之间变形后互相接触和分离，宜采用状态非线性分析。
- b) 确定计算规模和模型精度，根据任务目标规定的时间要求和可用的人力、硬件算力评估有限元模型允许的计算规模和模型精度。
- c) 定义有限元模型，宜包括：
  - 确定纳入有限元模型的零部件范围，对整体结构强度、刚度没有贡献的零件无需纳入有限元模型，如爬梯、步道、外包、保温等附属件；
  - 若产品设计标准已明确对有限元模型的零部件范围进行了定义，则遵循设计标准进行有限元模型的建立，如ISO 10855-1中对近海集装箱需要参与结构计算的零部件进行了明确定义。
- d) 定义有限元分析判定准则，根据产品结构设计标准以及非标工况的结构力学性能要求进行制定。

## 5 建立有限元模型

### 5.1 单位制

有限元模型单位制宜统一且简洁，可采用国际单位制（SI）（见表1）。但对液体罐箱的结构有限元分析推荐采用常用单位制（见表2），因其变形、应力等单位与行业常用单位保持了一致。

表1 SI国际单位制（米制）

物理量名称	基础单位	
	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
温度	开（尔文）	K
导出单位		
力	牛顿	N
应力	帕	Pa
力矩	牛顿·米	N·m
位移	米	m
速度	米每秒	m/s
密度	千克每立方米	kg/m <sup>3</sup>
加速度	米每二次方秒	m/s <sup>2</sup>
频率	赫兹	Hz

表2 常用单位制（毫米制）

物理量名称	基础单位	
	单位名称	单位符号
长度	毫米	mm
质量	吨	t
时间	秒	s
温度	开（尔文）、摄氏度	K℃
导出单位		
力	牛顿	N
应力	兆帕	Mpa (N/mm <sup>2</sup> )
力矩	牛顿·毫米	N·mm
位移	毫米	mm
速度	毫米每秒	mm/s
密度	吨每立方毫米	t/mm <sup>3</sup>
加速度	毫米每二次方秒	mm/s <sup>2</sup>
频率	赫兹	Hz

## 5.2 坐标系

### 5.2.1 全局坐标系

#### 5.2.1.1 坐标轴定义

全局坐标系一般选择右手笛卡尔直角坐标系。

推荐将直角坐标系的X轴对应箱体纵向，Y轴对应箱体垂向，Z轴对应箱体横向。箱体纵向与罐体长度方向一致，箱体垂向与箱体高度方向一致。

### 5.2.1.2 坐标轴正方向定义

集装箱行业对箱体有前、后、左、右的定义。以20英尺液体罐箱为例，沿箱体纵向有底出料阀的一端为后端，与之相对的一端为前端；站在后端面朝前端，左手一侧为箱体左侧，右手一侧为箱体右侧。

推荐坐标轴正方向为：X轴正方向由箱体前端指向后端，Y轴正方向由箱底指向箱顶，Z轴正方向由箱体右侧指向左侧。

### 5.2.1.3 坐标系原点位置

推荐将全局坐标系原点放置在箱体八个角件包络空间的中心，便于利用液体罐箱结构对称性进行有限元模型前处理和计算。

## 5.2.2 局部坐标系

局部坐标系用于处理局部有限元分析模型的建立和结果的显示。例如，当载荷的方向与全局坐标系的坐标轴方向不一致时，可以建立局部坐标系，使局部坐标系的坐标轴方向和要施加的载荷方向保持一致，便于加载。

## 5.3 网格划分

### 5.3.1 网格尺寸

#### 5.3.1.1 全局网格尺寸

有限元模型网格划分的尺寸也即单元的尺寸，全局网格尺寸的选择宜根据有限元分析类型、有限元模型允许的计算规模及模型精度综合确定全局单元长度。推荐采用均匀的单元长度来进行集装箱结构有限元分析，全局单元长度一般为20mm~40mm。如果硬件算力足够，单元长度也可小于20mm，以得到更为精细的计算结果。

不推荐采用过小的单元长度，容易引起几何不连续区域的应力噪点，干扰有限元分析的结果判读。采用合适的单元长度，能平衡计算精度与求解效率，也能过滤有限元法分析结果中的部分数值噪点。

#### 5.3.1.2 特殊区域网格尺寸

液体罐箱中存在一些特殊区域，如果这些区域的网格尺寸也采用全局尺寸，则很难在这些区域得到准确的力学响应，宜在下列区域进行网格细化：

- a) 零件尺寸变化剧烈的区域；
- b) 零件曲率变化剧烈的区域；
- c) 零件载荷变化剧烈的区域；
- d) 集中载荷附近区域；
- e) 弹性模量差异较大的材料连接的区域。

#### 5.3.1.3 网格划分要点

网格的划分宜注意以下要点：

- a) 网格与几何轮廓严格贴合；
- b) 实体单元网格，在厚度方向上，体网格不少于三层；
- c) 梁类零件的壳单元网格，在横截面的任何一条边线上网格不少于三层；
- d) 面网格尽量以四边形为主，三角形面网格不超过有限元模型面网格总量的1%；

- e) 对于关注零件的体网格，尽量划分为六面体；其他零件体网格，划分为四面体即可；
- f) 粗细网格之间有足够数量的单元进行过渡，避免相邻单元间存在过大的质量差和刚度差；
- g) 对于壳体上直径较小的孔，沿着孔径向划分至少1层呈环形的全四边形网格；
- h) 保持网格的总体走向与载荷方向一致或正交。

### 5.3.2 网格质量

网格划分时，要控制网格质量参数在合理范围内，避免产生畸变网格。网格检查的主要参数包括：长宽比、翘曲度、偏斜度、内角等；在结构重点关注区域的网格宜维持较高质量，非关注区域的网格质量要求可适当放宽。网格质量控制指标见表3。

表3 网格质量控制指标

类别	四边形单元	三角形单元	六面体单元	楔形单元	四面体单元
长宽比	$\leq 5.0$				
翘曲度	$\leq 16^\circ$	-	$\leq 18^\circ$	$\leq 18^\circ$	-
偏斜度	$\leq 60^\circ$				
内角	$40^\circ \sim 135^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$	$40^\circ \sim 135^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$

### 5.4 单元类型选择

液体罐箱主要的几类零件，单元类型选择如下：

- a) 薄壁型零件，如罐体、管材、钣金件等，宜采用一阶薄壳单元模拟；
- b) 块体型零件，如角件、阀件、铰链等，宜采用一阶实体单元模拟；
- c) 翼缘厚度不均匀的型钢，如槽钢、工字钢等，采用一阶实体单元、一阶薄壳单元模拟均可；如采用壳单元模拟，注意在有限元模型中将型钢厚度处理为等厚，其厚度为对应型钢参数表中的“平均腿厚”；
- d) 细条型零件，如吊索等，只承受拉力宜采用一阶吊索单元模拟。

### 5.5 模型简化处理原则

对有限元模型中的几何进行必要的简化处理可减少一定的计算量，几何简化有下列注意点：

- a) 几何简化不宜对有限元分析精度产生明显影响；
- b) 对应力集中区域或者应力梯度变化剧烈区域，宜忠于原模型，不宜进行几何简化；
- c) 可简化对分析精度影响很小的几何特征，如零件上的小圆角、小倒角、小孔、小凸台、小压筋等特征；
- d) 可采用有限元前处理工具自带的各类特征简化工具，批量自动去除小特征，尽量避免手动操作；
- e) 几何简化后，质心坐标及质量与原三维数模相比，误差宜在合理范围内。

### 5.6 有限元模型检查方法

#### 5.6.1 检查有限元模型自重

有限元模型自重检查能帮助发现一些零件配置的错误，可采用如下方法：

- a) 通过前处理工具，测量有限元模型自重，与理论自重相比误差不超过5%；
- b) 如果有限元模型自重与理论自重出现较大误差，则检查壳单元厚度是否正确、实体单元是否正常生成、材料属性是否配置正确；
- c) 如果零件及材料相关属性配置均正确，是因结构简化等原因引起了有限元模型与理论质量有较大误差，推荐采用附加质量单元在结构简化区域进行配重；

d) 模态分析等计算对模型质量及分布准确性要求很高，需特别注意模型自重校核。

### 5.6.2 检查零部件焊接

检查每一道焊缝是否都按实际工艺要求进行了准确焊接，确认是否有漏焊、多焊等情况，可采用如下方法：

- a) 主流的有限元前处理器均有几何边线上色检查的功能，将自由边、两个面几何共享边、三个面几何共享边等边线，用不同颜色表示；
- b) 检查漏焊时重点查看自由边，零件焊边线上不出现自由边；
- c) 检查多焊时重点关注对称剖面线区域及面面交叠区域，零部件上不出现多余的两面或三面几何共享边。

### 5.6.3 检查零部件活动连接

检查活动连接是否准确反映了实际连接情况，可采用如下方法：

- a) 对于螺栓、铰接等转动副类的连接注意约束是否合理，约束不足会引起刚体位移导致后续静力计算无法进行，过约束会引起旋转自由度丢失变成刚性连接；
- b) 对于采用接触技术的连接，确认是否已经正确生成了接触单元，如果接触缺失，零件之间在加载后穿透，也会引起自由度过大导致静力计算无法进行。

### 5.6.4 检查网格质量

对全局网格质量进行检查，网格质量准则参考5.3。

主流有限元前处理器均能在用户设定网格质量准则后，自动将不符合准则要求的网格用不同颜色分类标记，可对这些不符合质量要求的网格进行优化。可通过有限元前处理器提供的网格质量改善工具，进行局部网格质量自动调整；当通过调参方式无法再改善网格质量时，可采用微调局部几何的方法。

### 5.6.5 有限元模型试算

有限元模型试算能检验有限元模型的完备性，可参考下面的方法：

- a) 液体罐箱静置于地面、纯自重工况下分析，测试求解能否正常完成，对求解器的求解日志进行检查，查看警告和错误信息，定位有限元模型存在的问题并进行模型修正；
- b) 液体罐箱的模态分析，在底角件固定、纯自重工况下计算前六阶模态，检查各阶模态下的结构应力和变形是否连续，可将结构变形放大以便于再次校验零件连接完备性。

## 6 工况加载

### 6.1 堆码试验

#### 6.1.1 总则

本试验是验证满载液体罐箱在海洋船舶运输条件下，在箱垛中出现偏码时的承载能力。

表4提供了施加于每对角件上的力值和以试验力表示堆码质量。

表 4 堆码试验力值

集装箱型号	每个集装箱试验力 (四个角同时受力)		每对端部角 件的试验力		以试验力表 示堆码质量	
	kN (千牛顿)	lbf(磅力)	kN (千牛顿)	lbf(磅力)	kg (公斤)	lb (磅)
1EEE 1EE	3 767	846 854	1 883	423 317	213 360	470 380
1AAA, 1AA, 1A 和 1AX	3 767	846 854	1 883	423 317	213 360	470 380
1BBB, 1BB, 1B 和 1BX	3 767	846 854	1 883	423 317	213 360	470 380
1CC, 1C 和 1CX	3 767	846 854	1 883	423 317	213 360	470 380
1D 和 1D	896	201 600	448	100 800	50 800	112 200

注：不同模式下 1EEE/1EE 集装箱的堆码载荷规范见 ISO 1496-1。

6.1.2 加载方式

堆码试验宜采用如下加载方式：

- a) 罐内载荷为满载水的重力载荷，按压力梯度方式加载（见附录A.1）。施加向下1g载荷，货物重力等效为罐体上的梯度压力，载荷按公式（1）计算：

$$P = \rho * g * h \dots \dots \dots (1)$$

式中：

- P——载荷，单位为千牛顿 kN；
- ρ——水密度 1000kg/m<sup>3</sup>；
- g——重力加速度 9.81m/s<sup>2</sup>；
- h——距液面高度，液面处 h=0。

- b) 以节点力形式对端部顶角件上表面承压区域加载，每个端部顶角件沿相同方向进行加载区域的偏置，沿横向偏置 25.4mm、沿纵向偏置 38mm（见附录A.2），每个端部顶角件承压 96012Kg(942kN)，实际技术要求中对堆码载荷另有规定的，按技术要求执行；
- c) 全局施加重力加速度9.81m/s<sup>2</sup>。

6.1.3 约束方式

堆码试验宜采用如下约束方式：

- a) 对四个底角件底面约束垂向位移自由度；
- b) 对前端底角件底面约束纵向位移自由度；
- c) 对右侧底角件底面约束横向位移自由度。

6.1.4 求解结果提取及判读

6.1.4.1 对板壳单元，通常以四边形单元或三角形单元应力中心点表面的最大合成应力值（中面膜应力和局部弯曲应力的叠加后计算）作为判断对象；对梁单元，则以梁单元剖面上最大合成应力值作为判断对象。合成应力值为按公式（2）计算所得的合成应力（Von Mises合成应力）：

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \dots \dots \dots (2)$$

式中：

- σ<sub>0</sub>——合成应力，单位为千牛顿kN；
- σ<sub>x</sub>——单元平面沿x方向的合成正应力，单位为千牛顿kN；

$\sigma_y$ ——单元平面沿y方向的合成正应力，单位为千牛顿kN；

$\tau_{xy}$ ——单元平面x、y方向的合成剪应力，单位为千牛顿kN。

各工况的计算结果，宜关注整体框架结构，各处的最大合成应力值宜满足公式（3）（堆码试验工况，宜关注角柱的最大合成应力值）：

$$\frac{R_e}{\sigma_0} \geq 1.0 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$R_e$ ——罐式集装箱材料屈服极限；对于屈服点不明确的金属，按0.2%规定非比例伸长（对奥氏体钢为1.0%）的屈服应力。当采用奥氏体钢时，屈服极限值可根据材料标准提高15%，但这些较大值需在材质证书中列明；

$\sigma_0$ ——计算所得的最大合成应力。

6.1.4.2 如果不满足6.1.4.1要求，则增加进行非线性弹塑性分析，取罐箱结构在此载荷下的残余变形进行判断（如有严重的局部变形，需要增加失稳分析）。不影响栓固使用，即为满足要求。

## 6.2 由四个顶角件起吊试验

### 6.2.1 总则

除1D和1DX型以外本试验是验证的各型集装箱经受由四个顶角件竖向起吊的能力。1D和1DX型集装箱的起吊力是竖直方向至于水平面呈60°之间的任何角度。这是通过四个顶角件起吊该类集装箱的唯一方法。

本试验还宜作为验证罐式集装箱在起吊作业时，承受罐内载荷在加速作用下所产生的各种力的试验。

### 6.2.2 加载方式

由四个顶角件起吊试验宜采用如下加载方式：

a) 2R-T，按压力梯度方式加载，具体如下（见附录A.1）：

载荷分布于整个罐体壁面，自上而下成液体静压力分布，顶端压力为0，底端压力最大，合力为载重。载荷按公式（4）计算；载荷按  $\rho_1 * g * h$  计算；

$$P = \rho_1 * g * h \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\rho_1$ ：罐内介质当量密度kg/m<sup>3</sup> = (2R-T) / V；

b) 施加重力加速度9.81m/s<sup>2</sup>。

### 6.2.3 约束方式

对1D和1DX型箱，起吊线与水平面夹角为60°，通过计算得到起吊点高度后，创建一个起吊点位置的节点，连接此节点和四个顶角件上表面中节点，创建四个吊索单元模拟起吊线作用，并在刚刚创建的节点全约束，即  $UX=UY=UZ=0$ ， $ROTX=ROTY=ROTZ=0$ （见附录A.3）。

对其他箱型，约束为（见附录A.4）：

a) 四个顶角件上平面约束垂向位移自由度；

b) 一端顶角件上平面约束纵向位移自由度；

c) 一侧顶角件上平面约束横向位移自由度。

### 6.2.4 求解结果提取及判读

由四个顶角件起吊试验求解结果提取及判读同6.1.4。

### 6.3 由四个底角件起吊试验

#### 6.3.1 总则

由四个底角件起吊试验验证罐式集装箱由四个底角件起吊的能力，吊具与底角件承接，并于箱顶上方居中一根横梁连接。

#### 6.3.2 加载方式

由四个底角件起吊试验宜采用如下加载方式：

- a) 载荷2R-T，按压力梯度方式加载，具体同6.2；
- b) 施加重力加速度 $9.81\text{m/s}^2$ 。

#### 6.3.3 约束方式

起吊线与水平面夹角为 $\theta$ ，随箱型角度大小发生变化，计算得到起吊点至底角件下平面高度 $=L/2*\tan\theta$ ，创建左右侧两个起吊点位置的节点，分别连接两节点和同侧两个底角件侧面中节点一共创建四个吊索单元模拟起吊线作用，并在两个建立的节点全约束，即 $UX=UY=UZ=0$ ， $ROTX=ROTY=ROTZ=0$ （见附录A.5）。

#### 6.3.4 求解结果提取及判读

由四个底角件起吊试验求解结果提取及判读同6.1.4。

### 6.4 外部纵向栓固试验

#### 6.4.1 总则

外部纵向栓固试验验证罐式集装箱在动载情况外部纵向制动或在铁路行车操控时的动载情况下，即在相当于 $2g$ 加速作用时的承受能力。

#### 6.4.2 加载方式

外部纵向栓固试验宜采用如下加载方式：

- a) 载荷R-T，按压力梯度方式加载，具体同6.2；
- b) 施加重力加速度 $9.81\text{m/s}^2$ ；
- c) 对端部两个底角件纵向外端面，分别施加载荷R（见附录A.6），节点力施加两次，先压后拉。

#### 6.4.3 约束方式

外部纵向栓固试验宜采用如下约束方式：

- a) 对四个底角件底面约束垂向位移自由度；
- b) 对前端底角件底面约束纵向位移自由度；
- c) 对右侧底角件底面约束横向位移自由度。

#### 6.4.4 求解结果提取及判读

外部纵向栓固试验求解结果提取及判读同6.1.4。

### 6.5 内部横向栓固试验

#### 6.5.1 总则

内部横向栓固试验验证罐式集装箱的罐体本身和罐到框架连接所产生的横向加速度力的承受能力。

### 6.5.2 加载方式

内部横向栓固试验宜采用如下加载方式（见附录A.7）：

a) 载荷R-T，按压力梯度方式加载，具体如下：

载荷分布于整个罐体壁面，自左而右成液体静压力分布，罐体最左侧压力为0，罐体最右侧压力最大，合力为载重。载荷按公式（5）计算：

$$P = \rho_2 * g * h \dots \dots \dots (5)$$

其中，

$\rho_2$ ：罐内介质当量密度 $\text{kg/m}^3 = (R-T) / V$ 。

b) 全局施加重力加速度 $9.81 \text{ m/s}^2$ ，注意重力方向为横向。

### 6.5.3 边界条件

6.5.3.1 内部横向栓固试验宜采用如下约束方式（见A.8.1）：

- a) 对四个右侧顶、底角件外侧面施加横向位移自由度约束；
- b) 对两个后端右侧顶、底角件外侧面施加纵向位移自由度约束；
- c) 对两个右侧底角件底面外侧面施加垂向位移自由度约束。

只有完全由集装箱底结构来支承罐体或是有主管部门认为通过6.4和6.7对罐体与框架之间的连接已能充分证明其可靠性时，才可采用此约束方式。否则，采用6.5.3.2的约束方式。

6.5.3.2 内部横向栓固试验宜采用如下约束方式（见A.8.2）：

- a) 对两个右侧底角侧面施加横向位移自由度约束；
- b) 对一个右侧底角件外侧面施加纵向位移自由度约束；
- c) 对两个左侧底角件底面，及两个右侧底角件外侧面施加垂向位移自由度约束。

### 6.5.4 求解设置、求解结果提取及判读

内部横向栓固试验求解结果提取及判读同6.1.4。

## 6.6 横向刚性试验

### 6.6.1 总则

横向刚性试验验证除1D和1DX型以外的各型罐式集装箱承受船舶在航行中所产生的横向挤压力的能力。

### 6.6.2 加载方式

横向刚性试验宜采用如下加载方式：

- a) 在箱体的左侧，对前端和后端顶角件侧面各施加150KN的横向力，力的方向指向箱体内部（见附录A.9.1）；
- b) 在箱体的左侧，对前端和后端顶角件侧面各施加150KN的横向力，力的方向指向箱体外部（见附录A.9.2）；
- c) 全局施加重力加速度 $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

注：a) 加载方式计算完成后，再进行b) 加载方式的计算。

### 6.6.3 边界条件

横向刚性试验宜采用如下约束方式：

## T/CCIASD XXXXX-XXXX

- a) 对四个底角件底面约束垂向位移自由度;
- b) 对前端底角件底面约束纵向位移自由度;
- c) 对右侧底角件底面约束横向位移自由度。

### 6.6.4 求解设置、求解结果提取及判读

横向刚性试验求解后宜采用如下方法提取求解结果并进行判读:

- a) 求解结果提取及判读同6.1.4;
- b) 计算端部两条对角线的长度, 这两条对角线长度与原始对角线长度差值之和不超过60mm。

## 6.7 纵向刚性试验

### 6.7.1 总则

纵向刚性试验验证除1D和1DX型以外的各型罐式集装箱承受船舶在航行中所产生的纵向挤压力的能力。

### 6.7.2 加载方式

纵向刚性试验宜采用如下加载方式:

- a) 后端的顶角件端面各施加75KN的纵向力, 力的方向指向箱体内部(见A.10.1);
- b) 后端的顶角件端面各施加75KN的纵向力, 力的方向指向箱体外部(见A.10.2);
- c) 全局施加重力加速度 $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

注: a) 加载方式计算完成后, 再进行b) 加载方式的计算。

### 6.7.3 边界条件

纵向刚性试验宜采用如下约束方式:

- a) 对四个底角件底面约束垂向位移自由度;
- b) 对前端底角件底面约束纵向位移自由度;
- c) 对右侧底角件底面约束横向位移自由度。

### 6.7.4 求解设置、求解结果提取及判读

纵向刚性试验求解后宜采用如下方法提取求解结果并进行判读:

- a) 求解结果提取及判读同6.1.4;
- b) 提取加载一端顶角件的最大纵向位移, 其值不宜超过25mm。

## 6.8 载荷传递区试验

### 6.8.1 总则

载荷传递区试验在静态状况下, 模拟已知载荷传递区, 在动态作业时仅部分载荷区与运输车辆接触, 即底角件与旋锁间的空隙部分不传递载荷时的状况。

### 6.8.2 加载方式

载荷传递区试验宜采用如下加载方式:

- a) 载荷2R-T, 按压力梯度方式加载, 具体同6.2;
- b) 施加重力加速度 $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

### 6.8.3 边界条件

载荷传递区试验宜采用如下约束方式（见附录A.11）：

- a) 在鞍座底面载荷传递区位置，建立横向150mm×纵向350mm平板（确保大于鞍座纵向宽度），每个平板位于横向支撑区域的内端（内端距中轴线350mm），对平板施加全坐标系约束；
- b) 在鞍座底面载荷传递区位置，建立横向150mm×纵向350mm平板（确保大于鞍座纵向宽度），每个平板位于横向支撑区域的外端（外端距中轴线600mm），对平板施加全坐标系约束；
- c) 定义鞍座下端面与平板摩擦接触。

注：a) 加载方式计算完成后，再进行b) 加载方式的计算。

#### 6.8.4 求解设置、求解结果提取及判读

载荷传递区试验求解结果提取及判读同6.1.4。

### 6.9 步道试验

#### 6.9.1 总则

步道试验验证由工作人员在步道上作业，所产生载荷的承受能力。

#### 6.9.2 加载方式

步道试验宜采用如下加载方式（见附录A.12）：

- a) 步道最薄弱位置，并在此位置划分出600mm×300mm单元区域，在此区域内按节点力方式施加300公斤力载荷；
- b) 全局施加重力加速度9.81 m/s<sup>2</sup>。

#### 6.9.3 边界条件

步道试验宜在步道周边所有和箱体连接处全约束，即  $U_x=U_y=U_z=0$   $ROT_x=ROT_y=ROT_z=0$ （见附录A.13）：

#### 6.9.4 求解设置、求解结果提取及判读

步道试验求解结果提取及判读同6.1.4。

### 6.10 爬梯试验

#### 6.10.1 总则

爬梯试验验证扶梯对工作人员在其上作业时，所产生载荷的承受能力。凡设有扶梯的罐式集装箱均宜进行本项试验。

#### 6.10.2 加载方式

爬梯试验宜在最宽梯面的中央按节点力方式施加200公斤力载荷（见附录A.14）。

#### 6.10.3 边界条件

爬梯试验宜在扶梯周边所有和箱体连接处全约束，即  $U_x=U_y=U_z=0$   $ROT_x=ROT_y=ROT_z=0$ （见附录A.15）。

#### 6.10.4 求解设置、求解结果提取及判读

爬梯试验求解结果提取及判读同6.1.4。

## 7 分析报告文件

确认分析结果无异常，则可编制分析报告，分析报告宜包含如下内容：

- a) 分析对象，列出产品二维图纸或三维模型的图号及版本号，如果是面向设计变更的有限元分析，要列出设计变更的内容；
- b) 分析目的，陈述本次分析是为了评估什么问题；
- c) 参考标准，列出分析参考的产品结构设计标准；
- d) 分析工具，列出有限元分析采用的软件和版本号；
- e) 假设及简化，列出关键的理论假设以及几何简化；
- f) 分析方法，通常为线弹性静力分析，如果涉及非线性等特殊分析，要陈述采用的算法模型；
- g) 工况、载荷及约束；
- h) 材料清单，列出有限元模型中采用的所有材料及其力学性能参数、密度等信息；
- i) 结构在各种工况下的变形、应力等力学响应数据及云图，或力学响应随时间变化的视频；
- j) 结论及优化建议。

## 附录 A

(资料性)

## 有限元模型边界条件施加图示

A.1 堆码试验、由四个顶角件起吊试验、由四个底角件起吊试验、外部纵向栓固试验、载荷传递区试验，罐内加载方式

罐体内顶部压力为 0，底部压力最大，图 A.1 中从蓝色到红色箭头显示从 0 到最大的压力值。

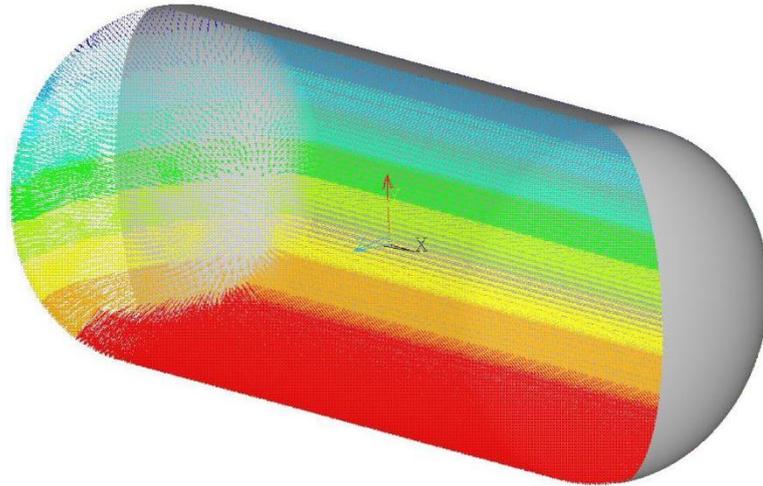


图 A.1 罐内垂直方向梯度加载

A.2 堆码试验顶角件偏置加载方式

顶角件偏置后的加载区域见图 A.2 中灰色面域。

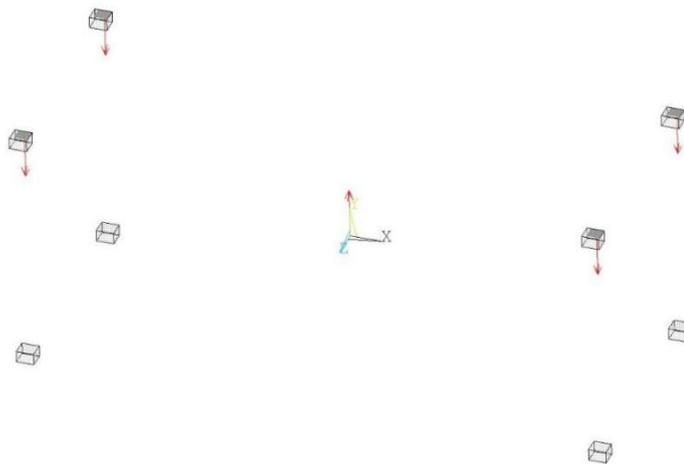


图 A.2 顶角件偏置加载

A.3 1D 和 1DX 型箱顶部起吊试验约束方式

1D和1DX型箱顶部起吊试验约束方式见图A.3。

U  
ROT

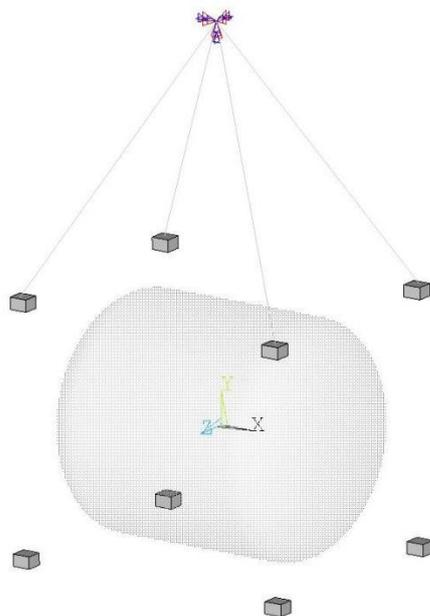


图 A.3 1D 和 1DX 型箱，吊点位置节点全约束

#### A.4 由四个顶角件起吊试验约束方式

由四个顶角件起吊试验约束方式见图A.4。

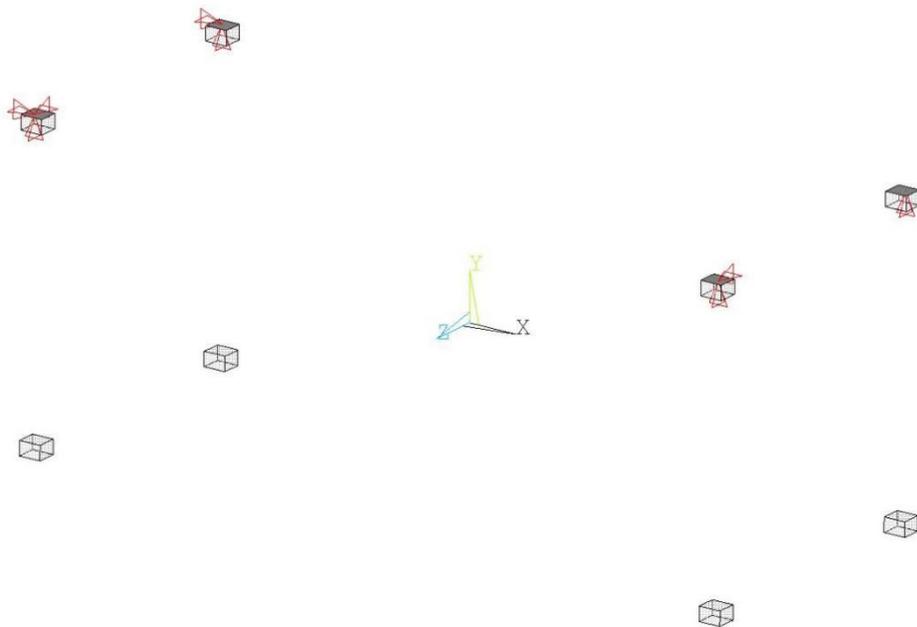


图 A.4 由四个顶角件起吊试验，顶角件灰色区域约束

#### A.5 由四个底角件起吊试验，约束方式

两侧起吊点，见图 A.5 中红、蓝色约束位置。

U  
ROT

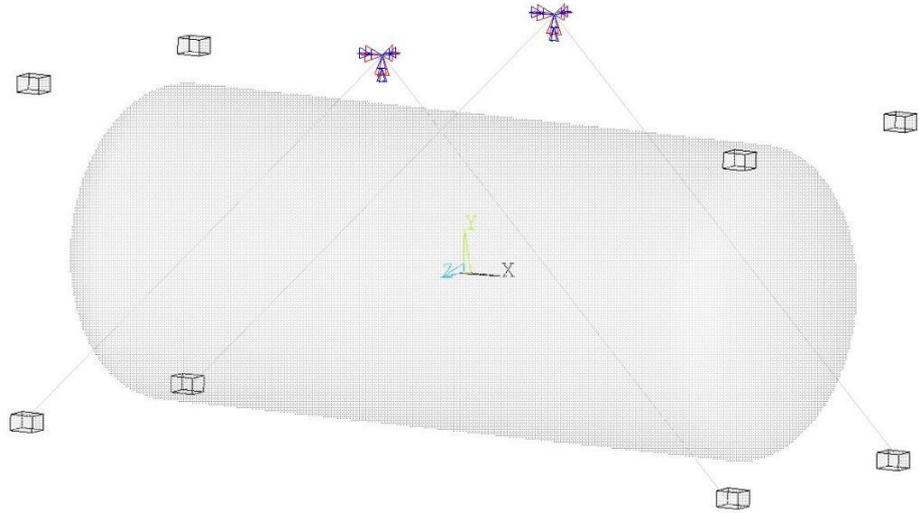


图 A.5 由四个底角件起吊试验，两侧起吊点全约束

#### A.6 外部纵向栓固试验，底角件加载

外部纵向栓固试验，底角件加载见图A.6



图 A.6 外部纵向栓固试验，一端底角件加载

#### A.7 内部横向栓固试验，罐内加载方式

罐体内一侧压力为0，另一侧压力最大，图 A.7 中从蓝色到红色箭头显示从0到最大的压力值。

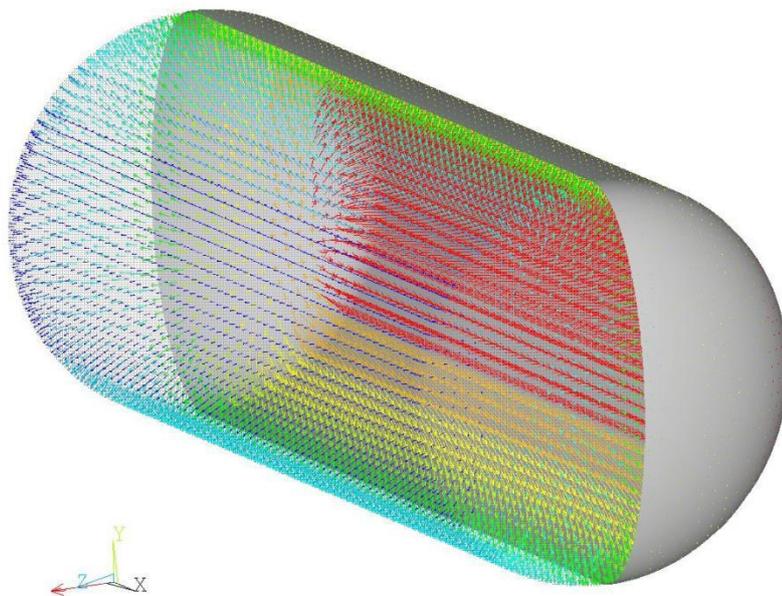


图 A.7 内部横向栓固试验，罐内横向梯度加载

A.8 内部横向栓固试验，约束方式

罐箱一侧顶、底角件的侧面约束，见 A.8.1 图中红色箭头。

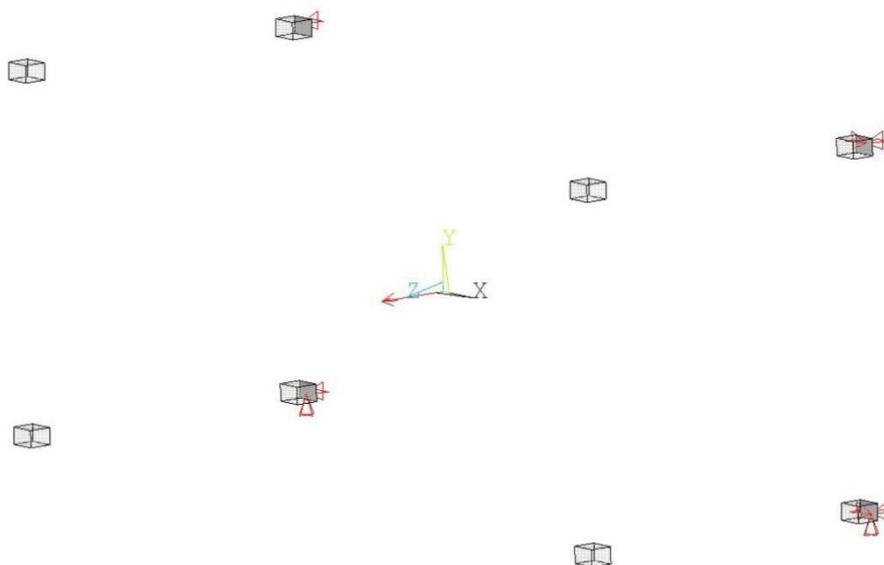


图 A.8.1 内部横向栓固试验，一侧顶、底角件约束

罐箱四个底角件约束，见 A.8.2 图中红色箭头。

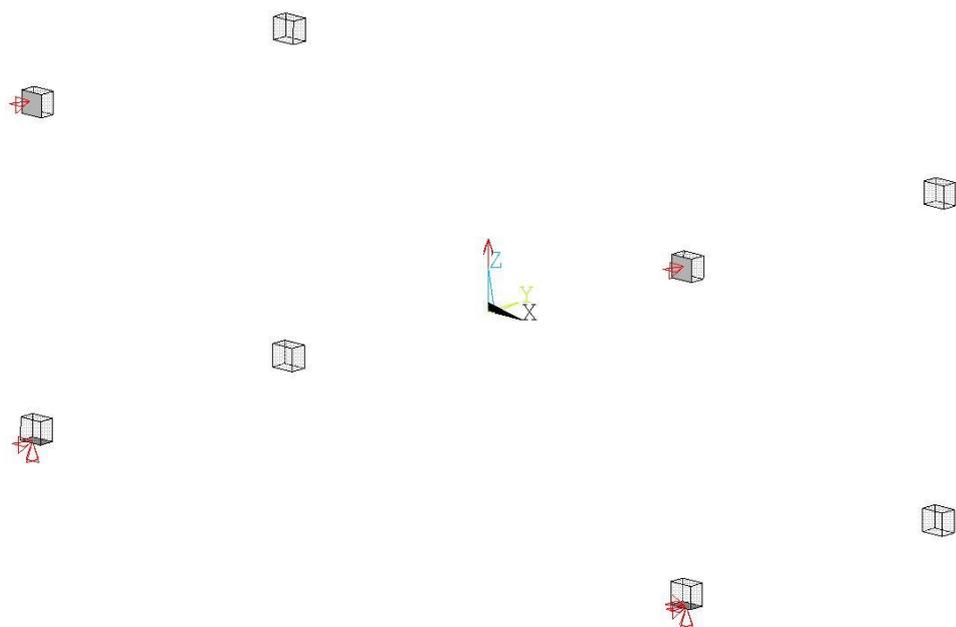


图 A.8.2 内部横向栓固试验，四个底角件约束

#### A.9 横向刚性试验，顶角件加载

横向刚性试验，一侧顶角件的侧面施加推力见图A.9.1。

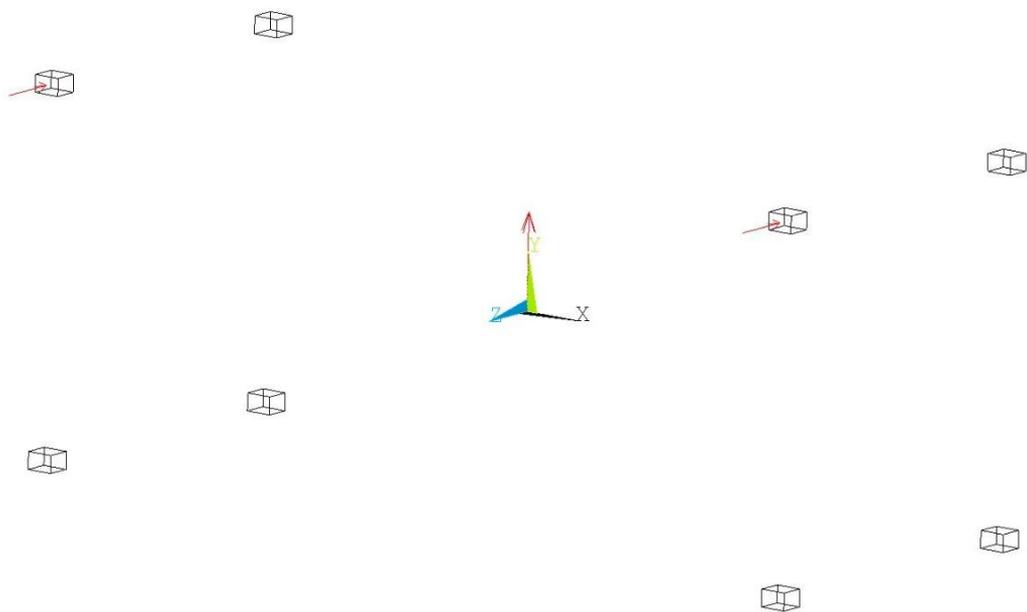


图 A.9.1 横向刚性试验，一侧顶角件的侧面施加推力  
横向刚性试验，一侧顶角件的侧面施加拉力 A.9.2。

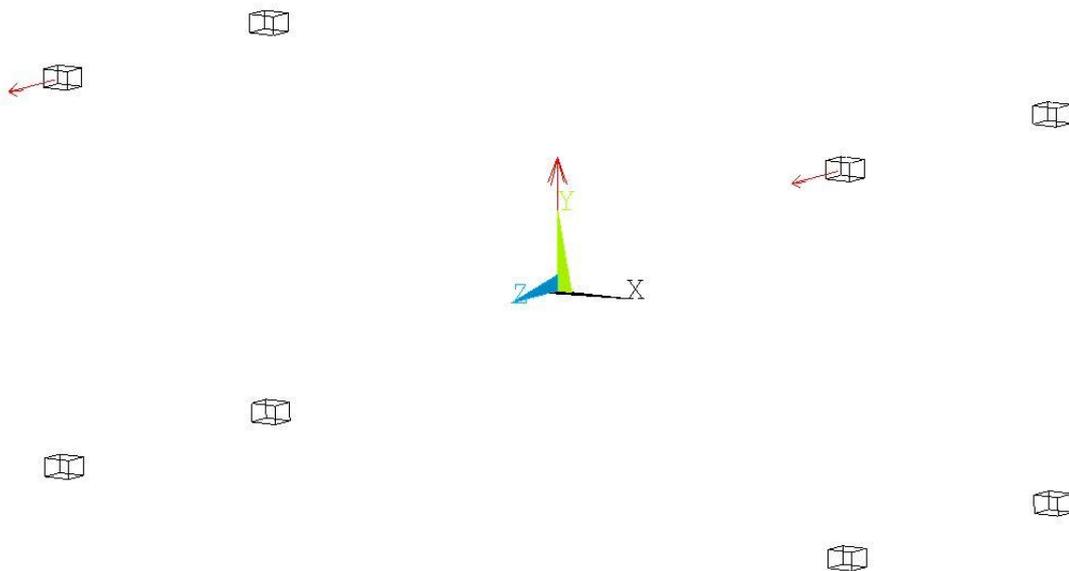


图 A.9.2 横向刚性试验，一侧顶角件的侧面施加拉力

#### A.10 纵向刚性试验，顶角件加载

纵向刚性试验，一端顶角件的侧面施加拉力见图 A.10.1。

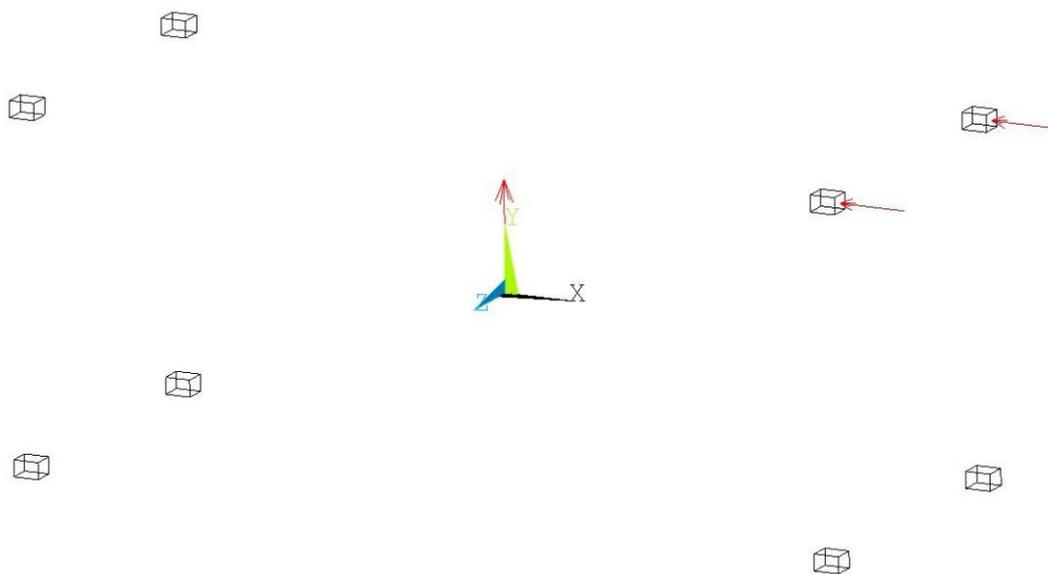


图 A.10.1 纵向刚性试验，一端顶角件施加推力

纵向刚性试验，一端顶角件施加拉力见图 A.10.2。

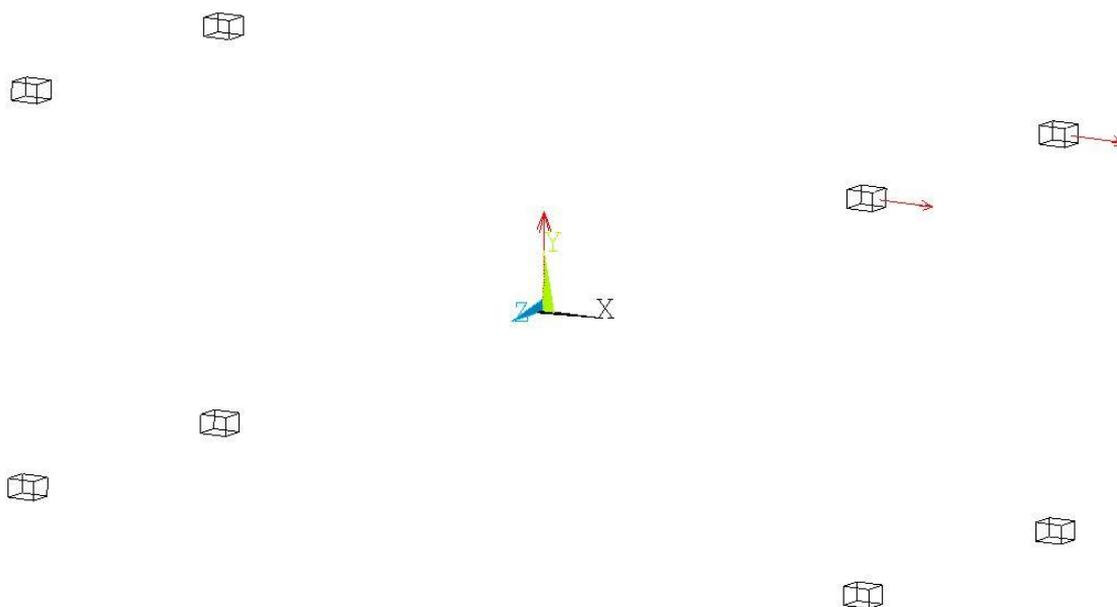


图 A.10.2 纵向刚性试验，一端顶角件施加拉力

#### A.11 载荷传递区试验，约束方式

载荷传递区试验，第一对和第三对载荷传递区承载，底部灰色支撑平板全约束见图A.11.1。

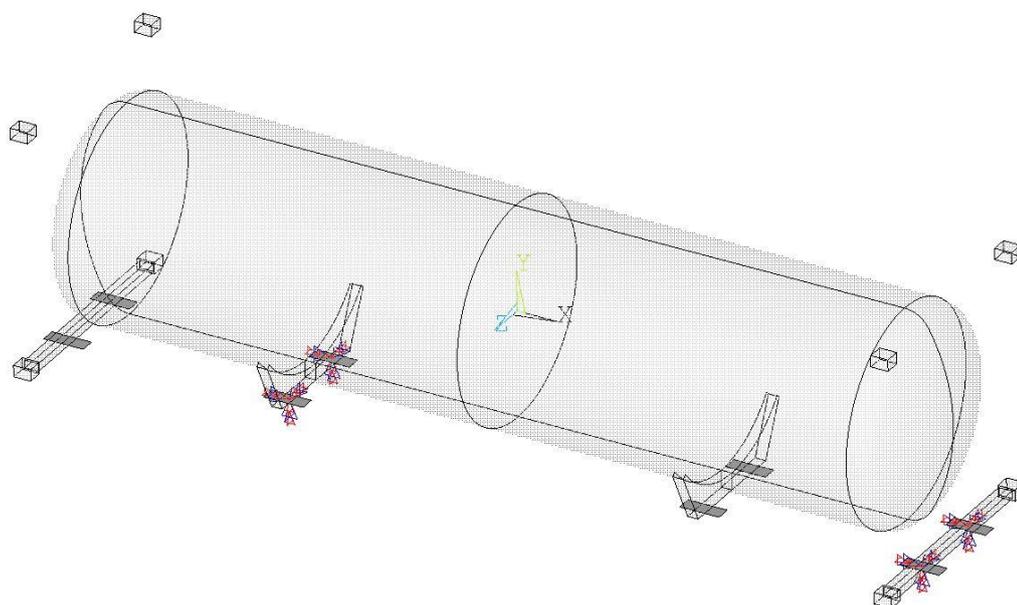


图 A.11.1 载荷传递区试验，第一对和第三对载荷传递区承载，底部灰色支撑平板全约束  
 载荷传递区试验，第二对和第四对载荷传递区承载，底部灰色支撑平板全约束见图 A.11.2。

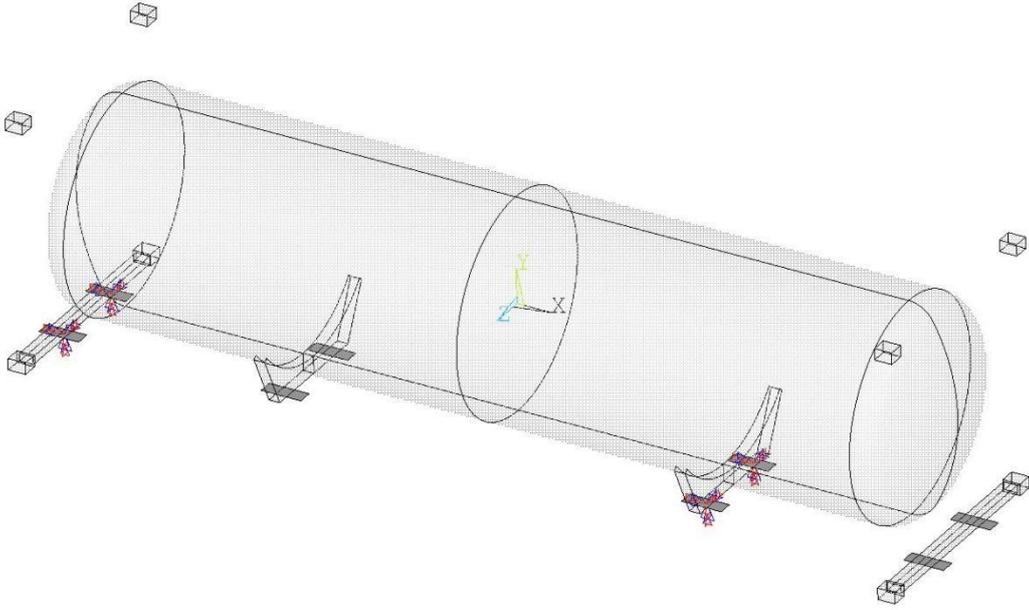


图 A.11.2 载荷传递区试验，第二对和第四对载荷传递区承载，底部灰色支撑平板全约束

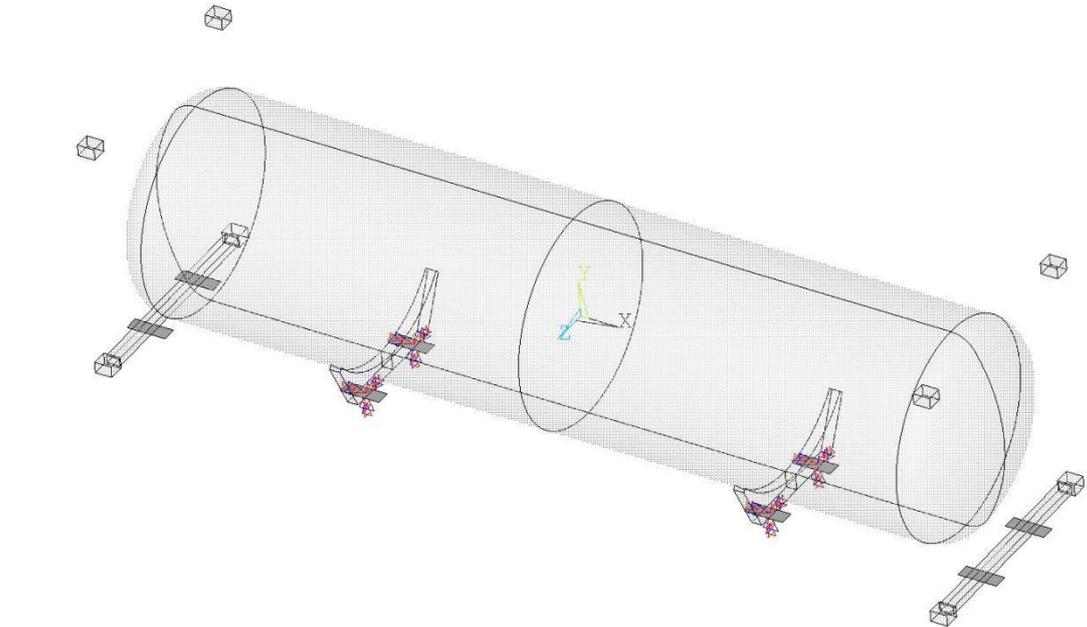


图 A.11.3 载荷传递区试验，第二对和第三对载荷传递区承载，底部灰色支撑平板全约束

### A.12 步道试验，加载方式

步道试验，加载方式见图A.12。

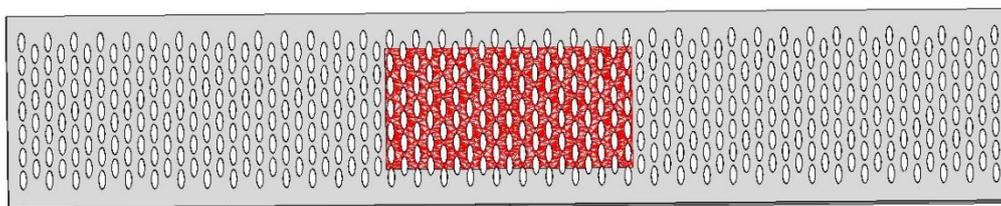


图 A.12 步道试验，加载方式

#### A.13 步道试验，约束方式

图 A.13 中，步道底部四角 30mmx30mm 的灰色区域全约束。

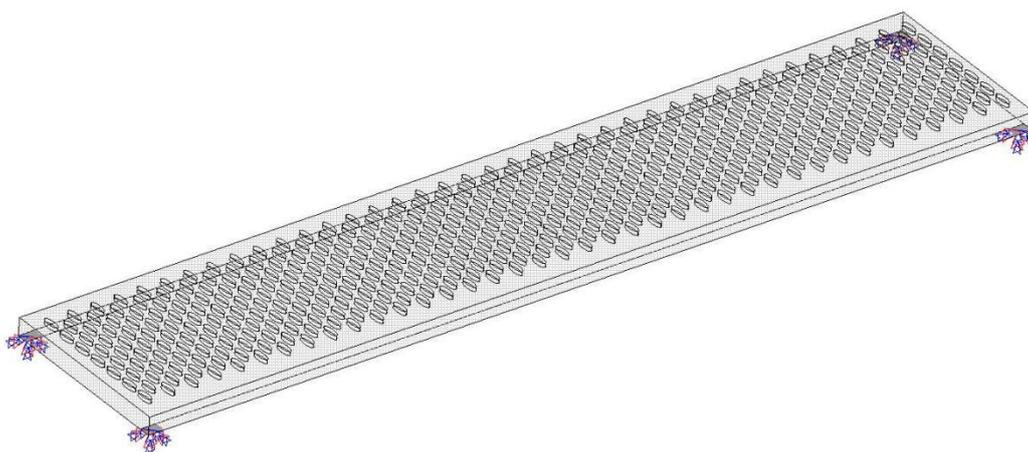


图 A.13 步道试验，约束方式

#### A.14 爬梯试验，加载方式

爬梯试验，加载方式见图A.14。

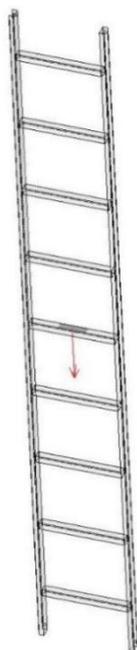


图 A.14 爬梯试验，加载方式

A.15 爬梯试验，约束方式

图 A.15 中，爬梯四角螺栓孔位置全约束。

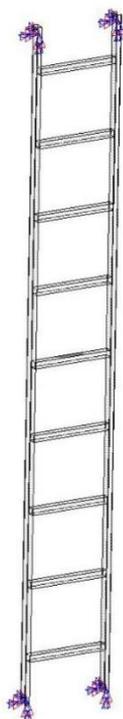


图 A.15 爬梯试验，约束方式

### 参考文献

- [1] GB/T 1413 系列1集装箱 分类、尺寸和额定质量
  - [2] T/CCIASD 10005—2023 集装箱结构有限元分析指南
  - [3] NB/T 47064 液体危险货物罐式集装箱
  - [4] 中国船级社集装箱检验规范
-