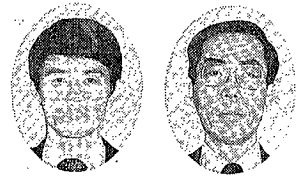


地震荷重を受ける脚支持大型反応器の 三次元構造解析

3-D Structural Analysis of Large Vertical Vessel with Leg Subjected to Earthquake Loading



(化)技術部 設計第3課 明
宮田 忠
Tadaaki Miyata
(化)製品開発課 正
榎本 正
Tadashi Enomoto

Recently the technique of applying Finite Element Method to predict structural behavior has become widespread. Therefore, by using this method and hardware systems, i. e. Engineering Work Station, we can obtain more realistic result.

This paper describes our stress analysis example that is 3-D structural model under earthquake load. A unique approach in this analysis is to model a 1/2-symmetrical portion of the structure.

More over, we showed the two other cases of analysis. One is a vessel with lug for support, the other is a model of 1/4-symmetrical portion of cylinder with inner jacket wall. And we examined the influence on local stress that occurred by the difference of these cases.

These results shows that our modeling presents a safe design.

まえがき

近年、応力解析を要求される業務が増えており、当社でも効率よく作業ができるようにEWS (Engineering Work Station) を使用しそれに対応している。

EWSの特長はいまさら説明するまでもないが、手近かなところに置いて、難しい手続きなしでいつでもすぐ利用することができる点にあると思われる。

このように、EWSを使って有限要素法による解析(以下FEM解析という)を容易にできる環境ができあがると、必要のないものまでFEM解析をしてしまうこともあるし、また、要求されることもある。しかし、解析業務の推進および応力解析技術の浸透のためにはそれも必要と思われ、積極的に取り組んでいるのが現状である。

本稿では、種々の解析事例の中から、特に三次元モデルを用いたものを選定し、その概要を紹介する。

1. 耐震設計該当機器の解析事例紹介

当社で取り扱っている反応器の中には「高圧ガス取締法の特定設備検査規則」²⁾に定める耐震設計の対象となる機器がある。通常、通商産業省告示515号に定める「高圧ガス設備等耐震設計基準」³⁾による強度計算を行い、耐震強度を確認する。しかし、その反応器が、「特定設備検査規則」に該当する特殊な設計による特定設備である場合、前述の強度計算に加えてFEM解析により細部にわたる検討を行う場合もある。ここでは、脚支持構造物のFEM解析による耐震設計事例を示し、さらに少し別角度からみた追加解析もあわせて紹介する。

1.1 解析モデル

当社で取り扱っている内部ジャケット付反応器⁴⁾の概略図を第1図に示す。解析計算上複雑な構造は次に述べるようなモデル化をすることにより、計算の効率化を計っている。すなわち、反応器部は胴板および上下鏡板で構成されるものとし、内部ジャケット構造はモデルから除外した。また、構造物の対称性から全体のモデルは1/2モデルとした。さらに、反応器の上部に設置されるリフラックスコンデンサの重量は、上鏡に相当重量として考慮することとし、モ

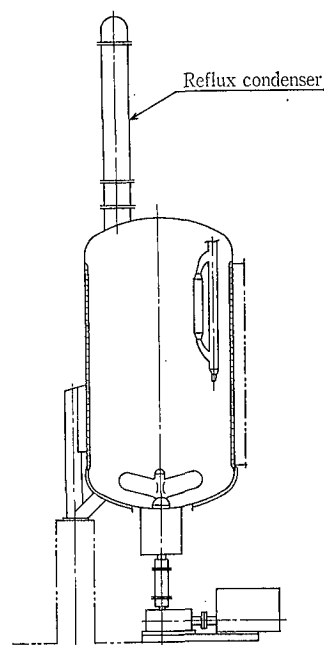
デルから除外した。

FEM解析のモデル図(要素図)を第2図に示す。このモデルでは脚と下部鏡板との間のサポートラグは省略している。応力を評価する部位は要素数の関係から一つの脚取付部分に絞り、計算精度を上げるためその部位の要素のメッシュサイズは小さくしている。解析に用いたプログラム名、要素タイプなどは次に示すとおりである。

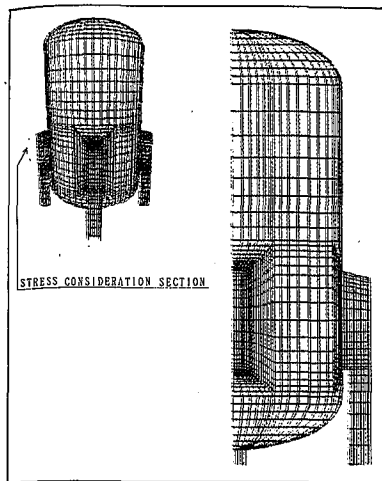
- ・プログラム名 : ANSYS
- ・要素タイプ : 4節点3次元四辺形シェル要素
- ・要素数 : 3074
- ・節点数 : 3194

計算実行に際して、次の仮定をおいた。

- (1) 内容物の重量は反応器の胴板および鏡板の比重を修正することにより考慮する。
- (2) 地震係数は0.39とし、水平方向加速度として0.39Gを用いる。



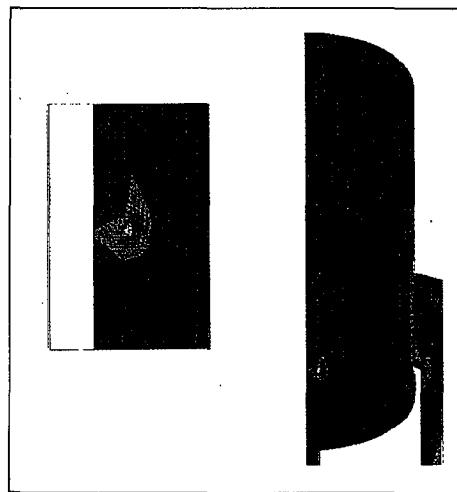
第1図
内部ジャケット付反応器
Fig. 1
Reactor with inner jacket



```

ANSYS 4.4
DEC 25 1990
17:49:20
POST1 ELEMENTS
TYPE NUM
YU #1
ZU #1
*DIST=9800
*YF =1393
*ZF =3012
UUP #2
CONE=30
CENTROID HIDDEN
POST1 ELEMENTS
TYPE NUM
WIND=2
XU #1
DIST=4981
*YF =-300
*ZF =3000
UUP #2
FACE HIDDEN
  
```

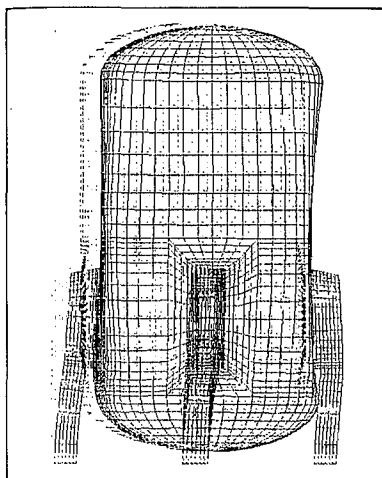
第2図 解析モデル形状(要素図)
Fig. 2 Finite element model of a 3-D structure



```

ANSYS 4.4
DEC 25 1990
18:01:35
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SY (AUG)
TOP
DMX #0.037318
SMX #10.529
WIND=2
XU #1
*DIST=5000
*YF =-288
*ZF =1000
*ZF =3000
UUP #2
FACE HIDDEN
0.037318
1.203
2.308
3.535
4.7
5.866
7.032
8.197
9.353
10.529
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SY (AUG)
TOP
DMX #2.728
SMX #10.529
WIND=2
XU #1
*DIST=9800
*YF =250
*ZF =580
UUP #2
FACE HIDDEN
  
```

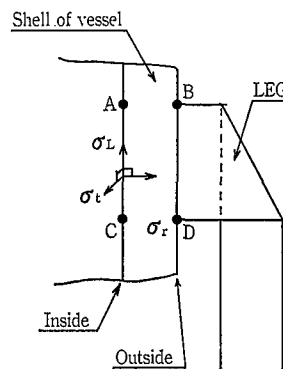
第4図 応力強さコンタ図
Fig. 4 Contours of stress intensity



```

ANSYS 4.4
DEC 25 1990
18:15:09
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=1
DMX #2.728
DSCA=177.918
YU #1
DIST=4953
*YF =1383
*ZF =3012
UUP #2
  
```

第3図 変形図
Fig. 3 Drawing of deformation



第5図 応力検討位置
Fig. 5 Location of stress evaluation

1.2 解析結果

地震荷重の水平方向作用時の反応器全体の变形図を第3図に示す。ここで、变形前の形状は緑色で、变形後の形状は赤色で示した。また、第4図はこの時に胴板に発生する応力を応力強さコンタ図で表した一例である。この図は本体胴板の外表面の応力強さを示しており、脚取付部にごく一部、応力値の高い部位が見受けられる。図中左にその拡大図を示した。

つぎに脚の取付部について、第5図に示す位置(A~D)における応力の検討を行った。この検討に際し、本章で求めた地震荷重による応力に加え、本体内部の設計圧力による応力も別途解析を行って考慮した。その結果、地震荷重による応力を第1表に、圧力荷重による応力を第2表に示した。

ここで、

- σ_r : 半径方向応力
- σ_t : 周方向応力
- σ_L : 長手方向応力
- τ_{tL} : せん断応力

第1, 2表の値を重ね合わせて、各部の主応力、応力強さを求め、第3表に示した。算出式は次のとおりである。

$$S_1 = \sigma_r$$

$$S_2 = \frac{1}{2}(\sigma_L + \sigma_t) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_L - \sigma_t)^2 + 4\tau_{tL}^2}$$

$$S_3 = \frac{1}{2}(\sigma_L + \sigma_t) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_L - \sigma_t)^2 + 4\tau_{tL}^2}$$

$$SI = \text{MAX}(|S_1 - S_2|, |S_2 - S_3|, |S_3 - S_1|)$$

以上のように求めた応力強さの許容限界は、JIS B 8250 圧力容器の構造(特定規格)によると、「一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さに対する許容値は

第1表 応力成分値(地震荷重)
Table 1 Component of stress under load of earthquake kg/mm²

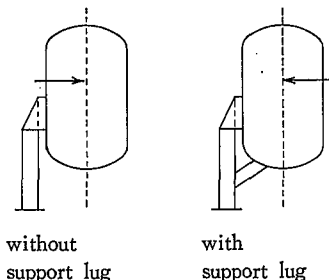
Location	σ_r	σ_t	σ_L	τ_{tL}
A	0.00	1.97	2.08	0.44
B	0.00	-2.60	-2.25	-0.48
C	0.00	-7.46	-7.89	0.49
D	0.00	9.91	9.36	-0.85

第2表 応力成分値(圧力荷重)
Table 2 Component of stress under load of pressure kg/mm²

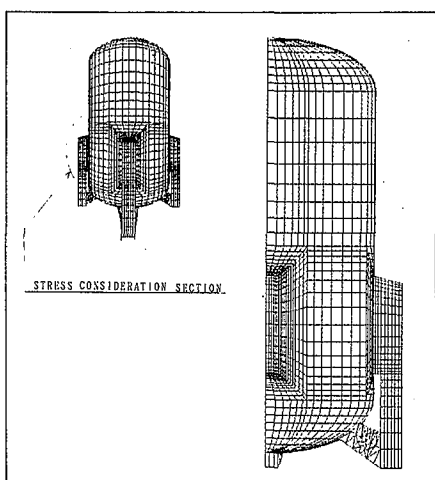
Location	σ_r	σ_t	σ_L	τ_{tL}
A	-0.14	8.03	4.61	-0.51
B	0.00	7.98	4.52	1.06
C	-0.14	13.78	10.20	-0.25
D	0.00	1.14	-2.27	0.19

第3表 重ね合わせ応力
Table 3 Added stress kg/mm²

Location	S_1	S_2	S_3	SI
A	-0.14	10.01	6.69	10.15
B	0.00	5.49	2.17	5.49
C	-0.14	6.34	2.29	6.48
D	0.00	11.16	6.98	11.16



第6図 モデル形状の比較
Fig. 6 Comparison of two models



第7図 解析モデル形状(要素図)
サポートラグ付
Fig. 7 Finite element model of a 3-D structure
with support lug

```
ANSYS 4.4
DEC 25 1990
19:24:20
POST1 ELEMENTS
TYPE NUM
XU =1
*DIST=7000
*VF =1300
*ZF =2000
UUP =Z
CONE=40
CENTROID HIDDEN
POST1 ELEMENTS
TYPE NUM
WIND=2
XU =1
DYST=0081
*VF =-300
*ZF =3000
UUP =Z
FACE HIDDEN
```

1.5×k×Sm とする。』とある。ここで、Sm は設計応力強さであり、k は同規格、表4.2.2 に示される割増係数である。本解析で用いた材料に対しては次のとおりである。

$$1.5 \times k \times S_m = 30.8 \text{ kg/mm}^2$$

したがって、解析結果は許容限界を超えないことが確認された。

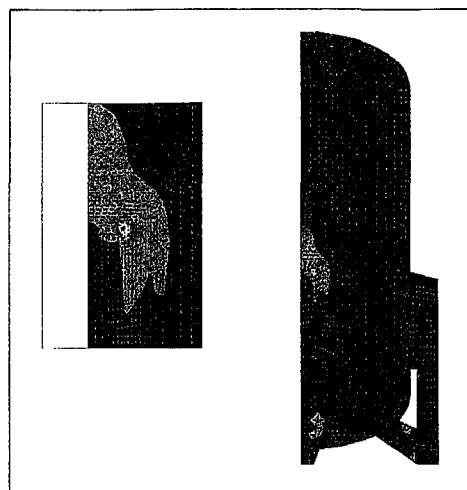
2. サポートラグを考慮した解析

前章で行った解析は、計算機の能力、解析時間などの理由からサポートラグを取り除くというモデル化を行ったものである。当然、このモデル化を行うに当たっては本来の構造のものと比べて安全設計となることが前提である。定性的にはこの考えが正しいことは理解できるが、定量的な裏付けの必要もあって、ここでは第6、7図に示すモデルを用いて比較検討を行った。

2.1 解析モデル

第1章で解析を行ったモデルにサポートラグを追加し、同一条件で解析を実施した。ただし、圧力荷重は考慮しない条件での比較検討とした。また、本サポートラグ付の解析では、メッシュサイズを小さくした評価部位が最大応力の発生する位置となるように、前章解析に対して荷重の向きは反対向きとした(第6図参照)。解析モデル図(要素図)を第7図に示した。要素数、節点数は次のとおりである。

- ・要素数：3270
- ・節点数：3304



第8図 応力強さコンタ図
サポートラグ付
Fig. 8 Contours of stress intensity

```
ANSYS 4.4
DEC 25 1990
18:24:52
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SI (AVG)
TOP
DMX =1.698
SMN =0.003844
SMX =8.497
XU =1
*DIST=5000
*KF =-286
*VF =-1000
*ZF =3000
UUP =Z
FACE HIDDEN
FACE HIDDEN
0.003844
0.947524
1.891
2.835
3.779
4.722
5.666
6.61
7.553
8.497
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SI (AVG)
TOP
DMX =1.698
SMN =0.003844
SMX =8.497
WIND=2
XU =1
*DIST=890
*VF =250
*ZF =2550
UUP =Z
FACE HIDDEN
```

第4表 応力強さの比較(地震荷重のみ)

Table 4 Stress intensity under load of earthquake kg

Location	without support lug	with support l
A	2.47	6.16
B	2.93	8.50
C	8.21	1.16
D	10.53	1.92

2.2 解析結果

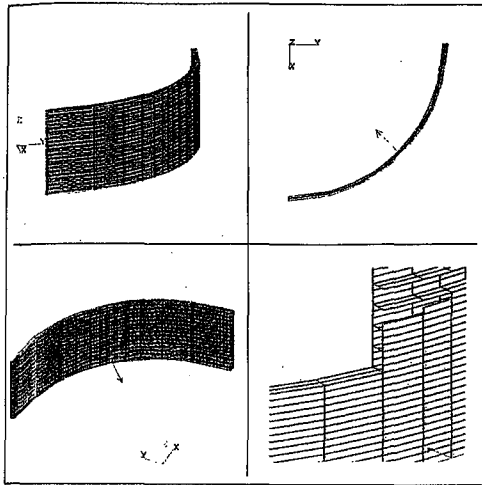
本体胴板に発生する応力を前章と同様に応力強さコンタ図として第8図に示す。また、脚取付部の各位置(参照)における応力強さを第4表にまとめて示す。結果、サポートラグを考慮した場合、応力強さの最大値サポートラグを考慮しない場合と比較して約20%減っていることがわかった。すなわち、第1章の解析は安全側の検討を行っていたことになる。

3. 内部ジャケット部材に及ぼす影響

今まで紹介してきた解析は前述したごとく、内部ジャケット構造は考慮されていない。そこで、より厳密な解析を行うためには既存のモデルに内部ジャケットを追加することであるが、現実的にはこれ以上要素数を増やすことは解析時間などの理由から不可能であり、別途それを検討するモデルを考えた。

3.1 解析モデル

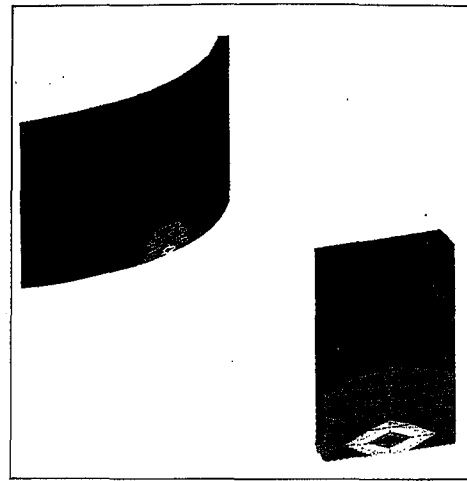
内部ジャケットに及ぼす影響を検討するためのモデルとして、二重円筒の間を仕切板でつないだ1/4円周モデルを考え、これを第9図に示した。本モデルは図中右下の図に示したように当社の内部ジャケット構造をうまくしている。境界条件としては各終端部に対称境界条件を与えている。ただし、上端は連続の条件を与えた。作用の荷重として図中矢印で示した集中荷重を与えた。その大きさは前章の解析で得られた(脚取付部の)最大値5000kgを与えた。



第9図 解析モデル形状(要素図)
Fig. 9 1/4-symmetrical finite element model of a 3-D cylindrical structure

```

ANSYS 4.4
DEC 25 1990
11:45:12
PREP7 ELEMENTS
TYPE NUM
XU =1
YU =-0.2
ZU =0.3
*DIST=1420
XF =1097
YF =1097
ZF =547.5
UUP =Z
FACE HIDDEN
PREP7 NODES
XU =1
YU =-0.2
ZU =0.3
*DIST=1420
XF =1097
YF =1097
ZF =547.5
UUP =Z
FACE HIDDEN
PREP7 ELEMENTS
TYPE NUM
BC SYMBOLS
UIND=2
ZU =1
*DIST=1700
XF =1097
YF =1097
ZF =547.5
UUP =Z
FACE HIDDEN
PREP7 NODES
BC SYMBOLS
UIND=2
ZU =1
*DIST=1700
  
```



第10図 応力強さコンタ図(外面)
Fig. 10 Contours of stress intensity (Outside surface)

```

ANSYS 4.4
DEC 27 1990
10:40:45
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SI (AUG)
BOTTOM
SMN =0.024107
SMX =4.253
XU =1
YU =-0.2
ZU =0.3
*DIST=950
XF =1100
YF =1100
ZF =470
UUP =Z
FACE HIDDEN
0.024107
0.489944
0.903781
1.434
1.903
2.375
2.843
3.313
3.783
4.253
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SI (AUG)
BOTTOM
SMN =0.309024
SMX =4.253
UIND=2
XU =1
YU =0.5
ZU =0.500015
*DIST=250
XF =1350
YF =1350
  
```

第5表 円筒モデルによる比較(応力強さ)
Table 5 Comparison for cylindrical structure kg/mm²

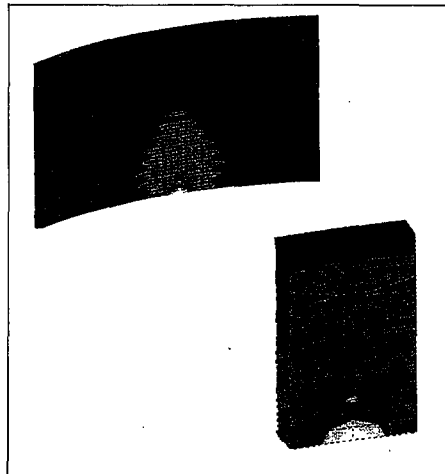
Single cylinder	Outside	17.33
Double cylinder	Outside of shell	4.25
	Inside of inner jacket	2.80

3.2 解析結果

集中荷重が作用したときの応力強さのコンタ図を第10, 11図に示す。第10図は円筒外部から見た外面(本体胴板に相当)の応力値で、第11図は円筒内部から見た内面(内部ジャケット板に相当)の応力値である。これに加え、一重円筒のモデルの解析も行い、その結果を一覧表にして第5表に示す。第1, 2章での条件が本章の解析条件と同一にならないため発生する応力値は異なるが、内部ジャケットを有する構造は前章で求めた応力を緩和する方向にあることがいえる。さらに本体胴板に比べ内部ジャケット板に生じる応力はさらに低いことが確認された。

むすび

今回、高圧ガス設備の耐震設計該当機器について行った解析を基にして、通常は理論だけ考えてあえて解析を行わないような内容についても、少し時間をさいて検証した結果を紹介してきた。今回の結果はたまたま予想したとおりのものであったが、なかには解析をして初めて分かったと



第11図 応力強さコンタ図(内面)
Fig. 11 Contours of stress intensity (Inside surface)

```

ANSYS 4.4
DEC 27 1990
10:58:08
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SI (AUG)
TOP
SMN =0.003837
SMX =3.572
XU =-1
YU =-0.3
ZU =0.3
*DIST=250
XF =1100
YF =1500
ZF =250
UUP =Z
FACE HIDDEN
0.003837
0.400333
0.788828
1.153
1.59
1.988
2.383
2.778
3.178
3.572
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=1
SI (AUG)
TOP
SMN =0.164247
SMX =3.572
UIND=2
XU =-1
YU =-0.5
ZU =0.5
*DIST=250
XF =1580
YF =1580
  
```

いうケースも少なくない。したがって、解析しようとしている問題の工学的な内容をしっかりつかみ、簡単な検証を試みながら問題を解決していくべきであろう。

【参考文献】

- 1) 神鋼ファウドラ-技報, Vol. 33, No. 2, (1989) p. 18
- 2) 監修: 通商産業省立地公書局保安課, 高圧ガス取締法令例規集, 新日本法規
- 3) 高圧ガス設備等耐震設計指針, 高圧ガス保安協会
- 4) 神鋼ファウドラ-技報, Vol. 32, No. 3, (1988) p. 23