

セラミック製品の機械的特性改善研究

竹内 繁樹 深澤 正芳 山本 紀一

Improvement in Mechanical Property of Ceramic Products
by

Shigeki TAKEUCHI, Masayoshi FUKAZAWA and Kiichi YAMAMOTO

陶管を解析対象として、有限要素法による数値シミュレーションを行い、軽量化を形状面から検討した。陶管の外圧強さを損なうことなく軽量化できる形状を検討するため、現状の陶管形状についてJ I S R 1201に基づく外圧試験の数値モデルを作成し、その応力分布を詳細に調べた。その結果、差し口、受け口などの端部に大きな引張応力、胴部では、管内側の頂部・底部及び管外側の頂部から両側に90°の位置に比較的大きな引張応力が発生することがわかった。そこで、この応力集中を緩和し管重量を減少させる形状を検討するため、現行形状から管の端部の曲率半径を大きくしたり、管胴部の応力値の高い部分の厚さを増し、逆に応力値の低い部分を薄くするような形状変更について、5モデル作成し、J I S試験の数値シミュレーションによりその効果を調べた。その結果、応力集中の緩和を確認し、約4kg管重量を減少させることが可能な形状を提案した。

1. まえがき

陶管、タイル、煉瓦、瓦などの陶磁器建材は、長い歴史と経験を経るなかで機能性と施工性を追及して現在の形状に至った。しかし、最近では、コスト要因や他素材製品との競合から、さらなる軽量化や高強度化が求められている。

そこで、製品が受ける荷重環境を想定して、製品に発生する応力について解析を行い、その形状の改善を図る必要がある。例えば、陶管は既に外圧強さを充分有しているが、輸送コスト等の要因から管体の軽量化が望まれている。外圧強さを損なうことなく軽量化できる形状を検討するため、有限要素法による詳細な応力解析を行った。

2. 有限要素法

有限要素法 (Finite Element Method) は、構造物全体を三角柱や直方体などの簡単な形状の要素で分割する。各要素の荷重-変位の特性は、簡単な近似式で表わすことができる。この各要素についての荷重-変位の連立方程式から、構造物全体の連立方程式を作成し、荷重により構造物に発生する応力やひずみを工学的近似解として求める。^{1)~3)} 本研究の数値解析では、有限要素法プログラムとして、米国S. R. A. C製COSMOS/M

Ver. 1.70(32000節点仕様)を使用した。

3. 数値解析

3.1 陶管形状の数値モデル化

陶管形状の計測は、呼び径250mm、有効長1000mmのJ I S規格製品4種類から、差し口部分及び受け口部分を切断加工して、その断面形状を1mm方眼紙に写し取りを行った。厚さについては、現実の製品では、J I S規格の範囲内で、各製品にばらつきがあるため、直管部分の厚さは一定の26mmとした。これは、主に受け口及び差し口形状の違いによる応力分布の差に着目して解析を行うためである。この形状を座標値として、有限要素法プログラムに入力し、モデルを作成した。

また、素地の弾性率及び曲げ強度は、管の胴部から切り出した試料について3点曲げ試験法により測定した。

4)~6)

表1 採集試料の物性値

試料名	弾性率(GPa)	曲げ強度(MPa)
A	3.9	2.8
B	3.4	2.6
C	3.7	2.8
D	4.3	3.0

表1に示すとおり、弾性率は34~43GPaの範囲になることから、試料A~Dの数値モデルの弾性率は40GPa、材料密度は2.22g/cm³で統一した。また、ポアソン比は0.16¹⁾を使用した。

3.2 JIS試験のシミュレーション

陶管のJIS R 1201の外圧試験の概要を図1に示す。JIS試験での上下治具による荷重条件及び拘束条件を検討するため、圧力測定フィルムによる受圧面の寸法測定を行った。これは、荷重を印加する上側治具及び製品を支持する下側治具と製品の上に厚いフェルトをはさんで試験するため、実際に製品に荷重が伝わる受圧面の寸法を決定する必要があったためである。

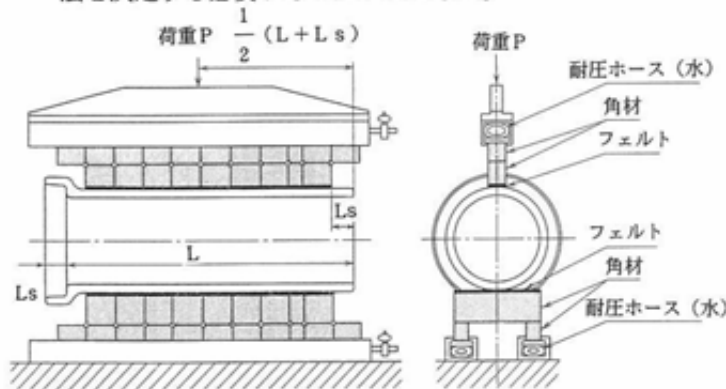


図1 JIS外圧試験概要図

荷重条件は、JISに定められた規格値32kN/mが作用する状態を想定して、各節点ごとの荷重を算出した。また、拘束条件は、下側治具により支持される部分の変位を0とした。

数値モデルは、陶管の形状、荷重条件及び拘束条件の対称性を考慮して、図2に示すように半分の形状を有限要素分割した。このため、半分にしても解析の整合性が保たれるように拘束条件を追加した。ここで、形状の半分についてだけ解析を行うのは、計算に要するメモリ、時間を節約するためである。

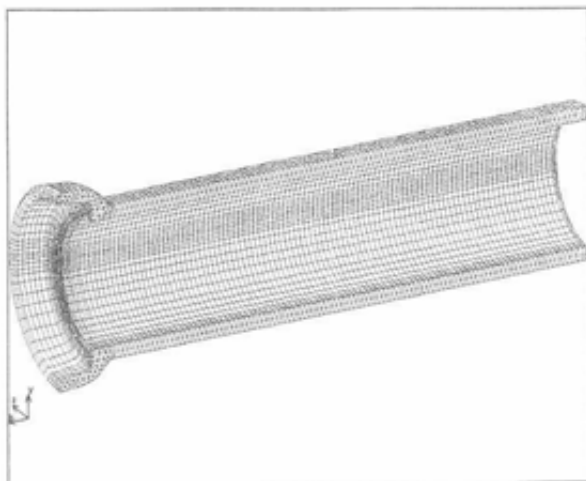


図2 有限要素分割例

4. 解析結果及び考察

4.1 有限要素モデルの精度

有限要素モデルによる解析の精度について調べた。有限要素法による数値解析では、要素分割を細かくするほど解析の精度が向上する。しかし、要素分割を細かくすれば演算に要するメモリが増加する。したがって、有限要素法では、要求する精度との兼ねあいで分割の細かさを決定する。²⁾

本研究では、この評価のため呼び径250mm、有効長1000mm、厚さ28mm、重量約56kgの実際の製品で外圧試験を実施し、図3に示すA、B2箇所の変位量を実測した。

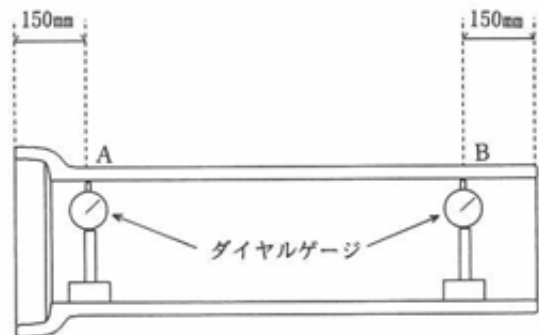
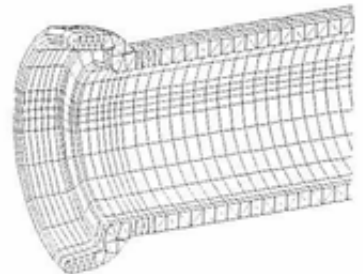


図3 JIS外圧試験変位測定箇所

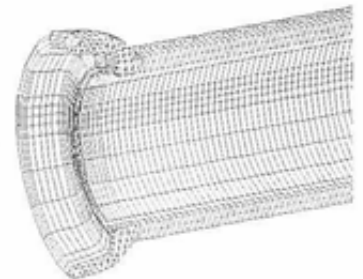
粗分割モデル

胴部の平均要素サイズ20mm
2380節点
2304要素



細分割モデル

胴部の平均要素サイズ10mm
6494節点
8302要素



微細分割モデル

周方向の細分割化
(胴部の平均要素サイズは10mm)
14134節点
18072要素

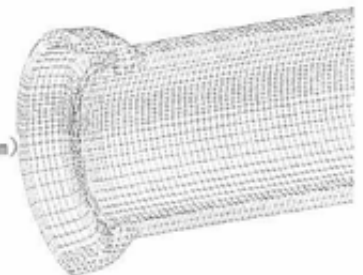


図4 数値解析精度の評価に用いたモデル

この実測値と解析結果の比較を行うことにより、数値解析の精度を調べた。有限要素モデルは、この陶管の形状を図4に示すように分割の細かさを変えた3モデルとした。実測値と解析結果の比較を表2に示す。粗い分割か

表2 数値解析の精度 (mm)

分割	図3	
	A点での変位	B点での変位
実測値	0.128	0.159
粗分割	0.105	0.138
相対誤差	18.0%	13.2%
細分割	0.107	0.141
相対誤差	16.4%	11.3%
微細分割	0.116	0.151
相対誤差	9.4%	5.0%

$$\text{相対誤差} = (\text{実測値} - \text{解析値}) / \text{実測値} \times 100(\%)$$

ら細かい分割になるに従い、相対誤差は減少する。微細分割モデルでは、10%以内の精度で実測値と一致していることから、本研究では、すべての解析を微細分割モデルと同様の分割により行った。

4.2 応力解析

収集した4種類の陶管の数値モデルについて、応力解析を行った。その結果の一例を図5a), b), c)に示す。この図は、陶管の周方向に作用する応力成分の分布図であり、受け口及び差し口などの端部では、管内側の頂部及び底部に大きな引張応力が作用している。胴部では、管内側の頂部及び底部に大きな引張応力が、また、管外側では頂部から両側に90°の位置に比較的大きな引張応力が発生している。

応力解析からは、周方向だけでなく、管の厚さ方向や管の軸方向の応力成分も得られているが、これらの応力成分は最大でも周方向応力の最大値の約65%以内である。また、実際のJIS試験において試験体が、管頂部、底部及び管頂部から両側に90°の位置で、管の軸方向に進展するき裂により破壊することから、応力解析は周方向応力に着目して行うこととした。

図6a), b)は、A~Dの数値モデルの管内側の頂部及び底部の周方向応力の分布を管の軸方向に沿って示したものである。ここでは、それぞれ差し口、受け口及び管の胴部に大きな引張応力が作用していることがわかる。その値がA~Dのモデルの間では、最大でも約6%異なるだけで、大きな差は認められない。このことから、1

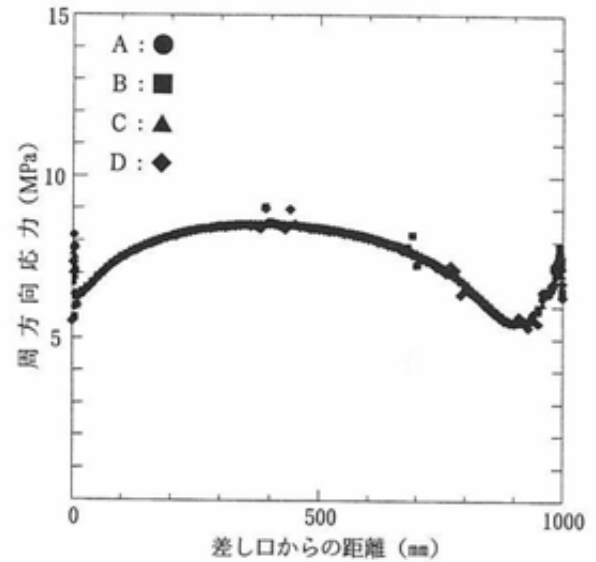


図6 a) 管軸に沿った周方向応力の分布 (管頂部内側)

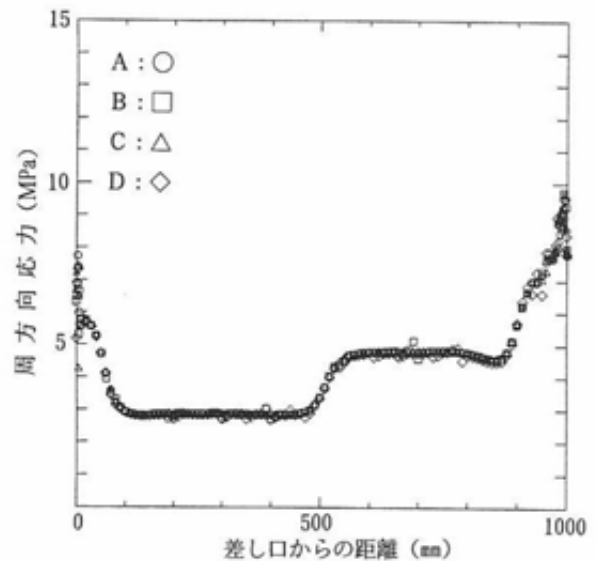


図6 b) 管軸に沿った周方向応力の分布 (管底部内側)

モデルを選定し、形状の変更とその評価について行うこととした。

4.3 形状変更とその効果

形状変更は、4モデルの中から、周方向応力のばらつきが少ないCモデルを選定し、以下の要点に従い、形状を変更した5モデルについて、JIS試験のシミュレーションを行った。

- (1) 管端部の曲率半径を大きくする。
- (2) 管の胴部で応力値が高い部分の厚さを増す。
- (3) 管の胴部で応力値が低い部分を薄くする。

図7a), b)に示すように、(1)は応力集中が起こりやすい角を丸めることにより、その緩和を目的としている。(2), (3)は応力分布の高低から、管の形状を合理化し、全体として軽量化を図ることを目的としている。

形状変更モデルとその効果について、表3に示す。形状変更の効果については、最大応力値が発生する管内側の受け口部の応力値に着目して行った。角丸めによる効

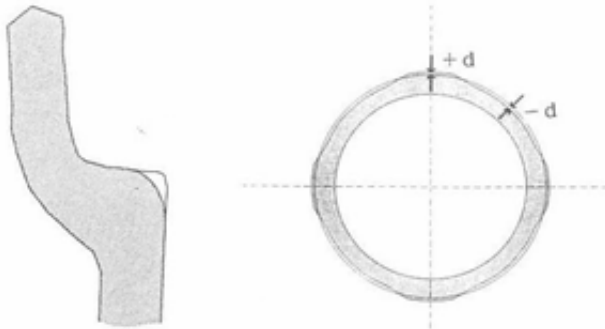


図7 a) 端部の角丸め b) 管胴部の厚さ変更

果は、丸めた部分では、応力低下が見られるが、その近傍に変更前の最大応力値にほぼ等しい応力値が発生していることから、応力集中を緩和できていないことがわかった。この原因は、受け口部分が局部的に肉厚になっているために、管の胴部に比べ剛性が大きくなり、外部荷重により応力集中が起きやすいと考えられる。

表3 形状変更とその効果

形状変更	ソケット端部の 応力値 (MPa)	管重量 (kg)
元の形状	9.69	56.0
角丸め	7.41 9.19*	55.8
+1/-1 mm	9.53	55.4
+2/-2 mm	9.43	54.9
+4/-4 mm	9.43	53.9
+1/-4 mm 角丸め	7.85 9.68*	51.9

* ソケット端部近傍の最大応力値
管重量の計算には、材料密度として2.22g/cm³を使用した。

また、管の胴部の形状を変更しても、受け口部の応力低下はわずかであり外圧強さは損なわれないことを示している。一方、管の重量について見ると、+1/-4mmの厚さ変更及び角丸めをしたモデルでは、約4kgの軽量化ができることが示されている。

+1/-4mmの厚さ変更及び角丸めをしたモデルの応力分布図を図8 a), b), c)に示す。もとの形状の応力分布(図5 a), b), c)と比較すると、大きな引張応力が発生する部位は元の形状と同様であるが、例えば、管底部について見ると6~8MPaの応力が発生していた部分が、4~6MPaのレベルに応力が低下していること、4~6MPaの応力が作用する部分の面積が管底部から上方へ向かって増えている。したがって、管の胴部については、厚さを増した管底部付近の応力集中が緩和されて、低い応力レベ

ルの面積が増していることから、管の形状の合理化が図られたと考えられる。

5. むすび

陶管の軽量化を、その形状を応力解析により評価しながら検討した。有限要素法を用いる利点は、実際に製品を試作するよりも、短時間で種々の形状について評価を繰り返し比較・検討できることである。また、試作品の外圧試験では得られない詳細な応力分布がわかることから、形状変更の効果が把握しやすいことも挙げられる。

本研究では、現行の製造ラインの変更が少なくすむような形状変更を検討したが、形状変更の自由度を増せば、さらなる軽量化は可能であろう。そして、その検討では有限要素法を利用する利点がさらに強調されることとなる。

なお、外圧試験のシミュレーションにおいて、現行形状の応力解析及び形状変更の効果の評価を行ったが、施工された製品に作用する土圧等を荷重条件及び境界条件として与えれば、施工後のシミュレーションも可能である。本研究の結果は以下の通りである。

- (1) 陶管のJIS試験の数値シミュレーションにより、管の差し口、受け口などの端部に大きな引張応力、胴部では、管内側の頂部・底部及び管外側の頂部から両側に90°の位置に比較的大きな引張応力が発生することがわかった。
- (2) 陶管の外圧強さを損なうことなく軽量化できる形状を検討し、約4kgの軽量化が可能な形状を提案した。

文 献

- 1) 戸川隼人, 有限要素法へのガイド, サイエンス社(1979)pp. 1~17.
- 2) 三好俊郎, 白鳥正樹, 座古 勝, 坂田信二, 有限要素法構造要素の変形・破壊挙動, 実教出版(1976)pp. 12~29.
- 3) G. N. Smith, 瀬川富士訳, スミス有限要素法による応力解析入門, ブレイン図書出版(1974)pp. 148~196.
- 4) 下水道用厚陶管の道路下埋設に関する研究報告書, 愛知県陶管協同組合(1982)p. 8.
- 5) JIS K 7203
- 6) 西田俊彦, 安田榮一編著, セラミックスの機械的特性評価, 日刊工業新聞社(1986)pp. 5~9.
- 7) 下水道用厚陶管の道路下埋設に関する研究報告書, 愛知県陶管協同組合(1982)p. 57.
- 8) 戸川隼人, 有限要素法へのガイド, サイエンス社(1979)pp. 144~145.

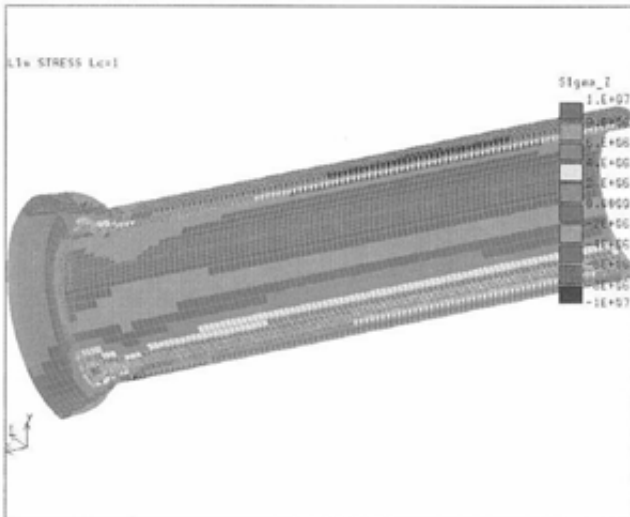


図 5 a) 現行形状での応力分布図

管内側の頂部及び底部に高い応力が発生しているのがわかる。上からの視点による。

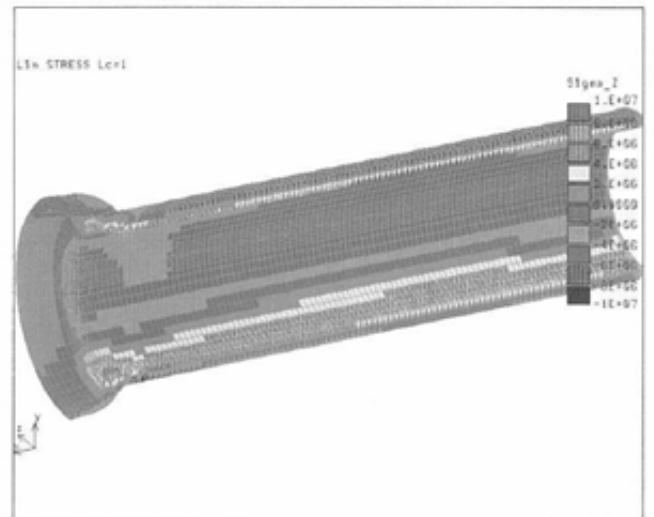
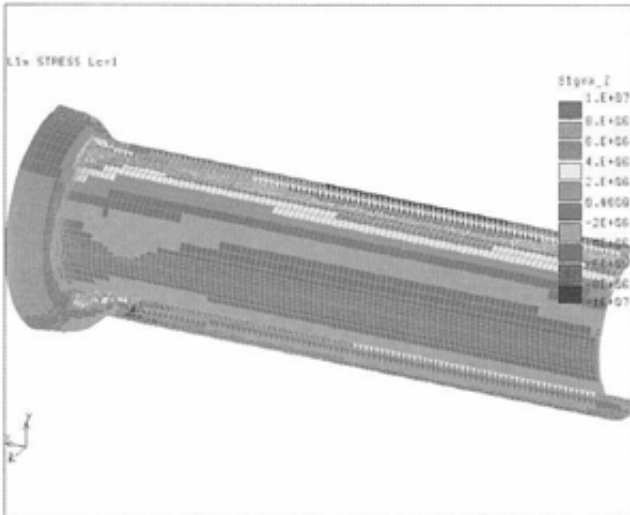
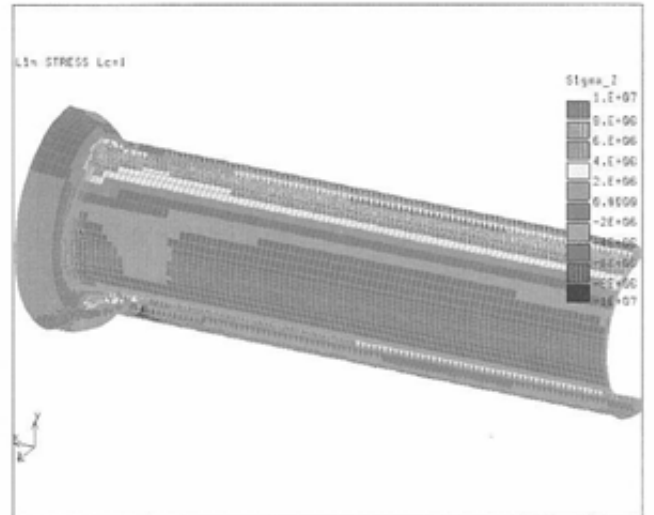


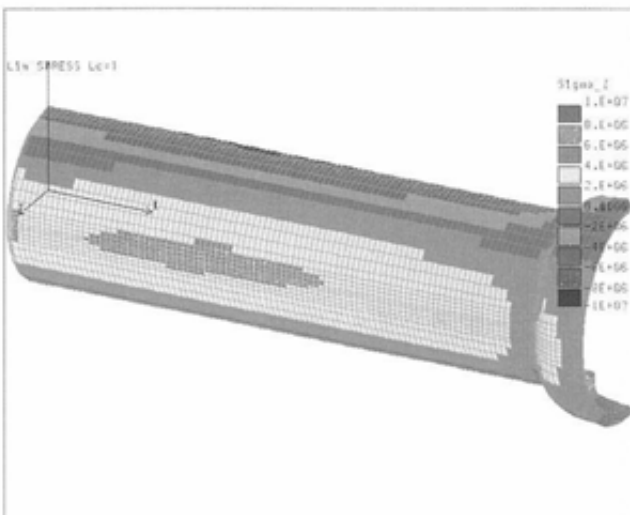
図 8 a) +1/-4 mm及び角丸めモデルでの応力分布図



b) 下からの視点による管内側の応力分布図

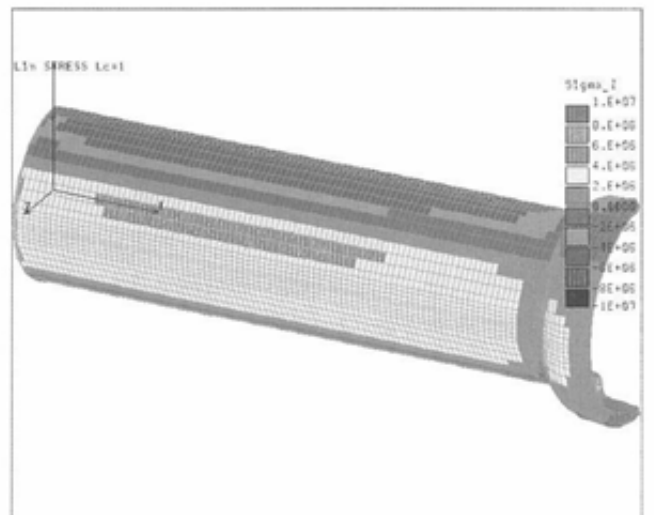


b) 下からの視点による管内側の応力分布図



c) 管外側の応力分布図

頂部から両側90°に高い応力が発生する。



c) 管外側の応力分布図