

ベローズコンボリューションの弾性非軸対称解析

1986年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1986年 6月

ペローズコンボリユーションの

弾性非軸対称解析

月森和之*，岩田耕司*，今津 彰*

要 旨

FBR大型炉のコスト低減方策のひとつとして、主冷却系配管に配管用ペローズ継手を適用することが考えられている。現在、FBR配管用ペローズ継手の成立性の検討が事業団を中心として進められているが、その一環として大洗工学センターでも昭和60年度より大型試験装置を用いたペローズの疲労・クリープ疲労試験、および内圧座屈試験を開始した。

本解析はこれらの試験の予備解析のひとつであり、ペローズ試験体の弾性範囲での非軸対称変形（曲げ、せん断及びねじり）挙動を把握することを目的としている。

本文中に解析によって得られた各種応力の分布及びばね定数の詳細を記しているが、更に解析結果を用いて米国の伸縮管継手に関する規格（EJMA st.**）による解を評価し、引張り及び曲げ負荷における子午線方向曲げ応力は解析解に良く一致するが、その他の応力は10%以上の差異があることを示した。

ここで得られた解析結果は、ペローズ試験で参照される他、簡易評価式の評価、策定の資となる。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

** Standard of Expansion Joint Manufacturers Association, Inc. の略

JUNE, 1986

Non-axisymmetric Elastic Analysis of Bellows Convolutions

Kazuyuki Tsukimori* ,
Koji Iwata* ,
Akira Imazu*

Abstract

There is an idea of the application of piping expansion joints to main piping systems of Large-scale FBRS as one of the cost reduction measures. The fatigue and creep fatigue tests and the pressure instability tests of bellows with use of the large test rigs started in 1985 FY at O-arai engineering center, as a part of the FBR piping expansion joints feasibility study that is going under PNC.

This analysis is one of the pre-analyses of the tests, and the purpose is to analyze the non-axisymmetric behaviours (bending, shearing and torsion) of bellows test specimens in the elastic region.

The contents includes the detailed stress distributions and spring rates. In addition, the simplified estimation by the Standard of Expansion Joint Manufacturers Association Inc. (EJMA), is compared with these results. It is found that concerning meridional bending stresses in tension and bending loading both results are coincident, but concerning other kinds of stresses the EJMA results are different from those by FEM more than 10%.

The obtained results are to be referred to the bellows tests and to be contributed to the establishment and the evaluation of simplified methods.

* Structural Engineering Section, Ōarai Engineering Center, PNC.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析概要	2
3. 解析モデル	4
4. 材料定数	11
5. 負荷条件および境界条件	12
6. 解析結果	17
7. EJMAスタンダードによる評価との比較	70
8. 結 言	73
9. 謝 辞	74
参 考 文 献	75
APPENDIX A. 要素分割, 要素特性に関する予備検討	76
APPENDIX B. 軸対称シェルと3次元曲面シェルの比較	85
APPENDIX C. EJMAスタンダードによる各値の算出	94

List of tables

Table 2.1	Definition of case No 解析ケースの一覧
Table 3.1	Dimensions of Bellows ベローズの寸法
Table 5.1	Loading Conditions 負荷条件
Table 5.2	Boundary conditions of 1 convolution model 1山モデルの境界条件
Table 5.3	Boundary conditions of 7(14) convolutions model 7(14)山モデルの境界条件
Table 5.4	Boundary conditions of 3 dimensional model 3次元モデルの境界条件
Table 6.1	Stresses : 1 convolution model, t=2mm (ModelA-1) 評価点の応力 : 1山モデル板厚 t = 2 mm (モデルA - 1)
Table 6.1(a)	Stresses : 1 convolution model, t=2mm (ModelA-1) 評価点の応力 : 1山モデル板厚 t = 2 mm (モデルA - 1)
Table 6.2	Stresses : 1 convolution model, t=3mm (ModelB-1) 評価点の応力 : 1山モデル板厚 t = 3 mm (モデルB - 1)
Table 6.2(a)	Stresses : 1 convolution model, t=3mm (ModelB-1) 評価点の応力 : 1山モデル板厚 t = 3 mm (モデルB - 1)
Table 6.3	Stresses : 7 convolutions model, t=2mm (ModelA-2) 評価点の応力 : 7山モデル板厚 t = 2 mm (モデルA - 2)
Table 6.3(a)	Stresses : 7 convolutions model, t=2mm (ModelA-2) 評価点の応力 : 7山モデル板厚 t = 2 mm (モデルA - 2)
Table 6.4	Stresses : 14 convolutions model, t=3mm (ModelB-2) 評価点の応力 : 14山モデル板厚 t = 3 mm (モデルB - 2)
Table 6.4(a)	Stresses : 14 convolutions model, t=3mm (ModelB-2) 評価点の応力 : 14山モデル板厚 t = 3 mm (モデルB - 2)
Table 6.5	Loads vs Displacements relations 荷重, 変位関係
Table 7.1	Valuation of Difference between present Analysis and EJMA st. 本解析とEJMA st.による評価の比較

Table A. 1 Differences among 3 models for bending (1 convolution, $t=2\text{mm}$) case A-1
曲げに対する各モデルの比較 (1山モデル板厚 $t = 2\text{mm}$) モデルA - 1

Table A. 2 Differences among 3 models for Shearing (1 convolution, $t=2\text{mm}$) case A-1
せん断に対する各モデルの比較 (1山モデル板厚 $t = 2\text{mm}$) モデルA - 2

Table B. 1 Stresses at the valuation points
評価点の応力

List of figures

- Figure 3.1 Shape of bellows
ベローズの形状
- Figure 3.2 1 convolution : numbering of elements (Model A-1, B-1) 56 elements
1山モデル要素番号図 (モデルA-1, B-1) 56要素
- Figure 3.3 1 convolution : numbering of elements, 100 elements
1山モデル要素番号図 100要素
- Figure 3.4 7 convolutions : finite element model (Model A-2)
7山モデル有限要素モデル (モデルA-2)
- Figure 3.5 14 convolutions : finite element model (Model B-2)
14山モデル有限要素モデル (モデルB-2)
- Figure 3.6 $\frac{1}{2}$ convolution : numbering of elements (Model A-3)
 $\frac{1}{2}$ 山モデル要素番号図 (モデルA-3)
- Figure 3.7 $\frac{1}{2}$ convolution : finite element model (Model A-4)
3 dimensional shell, 180° Model
 $\frac{1}{2}$ 山モデル有限要素モデル (モデルA-4)
3次元曲面シェル 180°モデル
- Figure 3.8 $\frac{1}{2}$ convolution : finite element model (Model A-4)
3 dimensional shell, 180° Model
 $\frac{1}{2}$ 山モデル有限要素モデル (モデルA-4)
3次元曲面シェル 180°モデル
- Figure 5.1 Non-axisymmetric modes
非軸対称の各モード
- Figure 5.2 Boundary conditions
境界条件
- Figure 5.3 Co-ordinates of 3 dimensional model
3次元モデル座標系
- Figure 6.1 Valuation points
評価点の位置
- Figure 6.2 Stress distribution (Tension, Model A-1, inner surface)
応力分布 (引張り モデルA-1 内面)
- Figure 6.3 Stress distribution (Tension, Model A-1, outer surface)
応力分布 (引張り モデルA-1 外面)
- Figure 6.4 Stress distribution (Bending, Model A-1, inner surface)
応力分布 (曲げ モデルA-1 内面)

- Figure 6.4(a) Stress distribution (Bending, Model A-1, inner surface)
 応力分布 (曲げ モデル A - 1 内面)
- Figure 6.5 Stress distribution (Bending, Model A-1, outer surface)
 応力分布 (曲げ モデル A - 1 外面)
- Figure 6.5(a) Stress distribution (Bending, Model A-1, outer surface)
 応力分布 (曲げ モデル A - 1 外面)
- Figure 6.6 Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model A-1 inner surface)
 応力分布 (せん断 (両端回転拘束) モデル A - 1 内面)
- Figure 6.6(a) Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model A-1 inner surface)
 応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転拘束) モデル A - 1 内面)
- Figure 6.7 Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model A-1 outer surface)
 応力分布 (せん断 (両端回転拘束) モデル A - 1 外面)
- Figure 6.7(a) Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model A-1 outer surface)
 応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転拘束) モデル A - 1 外面)
- Figure 6.8 Stress distribution (Shearing (rotation free), Model A-1 inner surface)
 応力分布 (せん断 (両端回転自由) モデル A - 1 内面)
- Figure 6.8(a) Stress distribution (Shearing (rotation free), Model A-1 inner surface)
 応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転自由) モデル A - 1 内面)
- Figure 6.9 Stress distribution (Shearing (rotation free), Model A-1 outer surface)
 応力分布 (せん断 (両端回転自由) モデル A - 1 外面)
- Figure 6.9(a) Stress distribution (Shearing (rotation free), Model A-1 outer surface)
 応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転自由) モデル A - 1 外面)
- Figure 6.10 Stress distribution (Torsion, Model A-1 inner surface)
 応力分布 (ねじり モデル A - 1 内面)
- Figure 6.11 Stress distribution (Torsion, Model A-1 outer surface)
 応力分布 (ねじり モデル A - 1 外面)
- Figure 6.12 Deformed shape (Tension, Model A-1)
 変形図 (引張り モデル A - 1)
- Figure 6.13 Deformed shape (Bending, Model A-1)
 変形図 (曲げ モデル A - 1)
- Figure 6.14 Deformed shape (Shearing (rotation constrain), Model A-1)
 変形図 (せん断 (両端回転拘束) モデル A - 1)

- Figure 6.15 Deformed shape (Shearing (rotation free), Model A-1)
変形図 (せん断 (両端回転自由) モデル A - 1)
- Figure 6.16 Deformed shape (Torsion, Model A-1)
変形図 (ねじり モデル A - 1)
- Figure 6.17 Stress distribution (Tension, (Model B-1), inner surface)
応力分布 (引張り モデル B - 1 内面)
- Figure 6.18 Stress distribution (Tension, (Model B-1), outer surface)
応力分布 (引張り モデル B - 1 外面)
- Figure 6.19 Stress distribution (Bending (Model B-1), inner surface)
応力分布 (曲げ モデル B - 1 内面)
- Figure 6.19(a) Stress distribution (Bending (Model B-1), inner surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (曲げ モデル B - 1 内面)
- Figure 6.20 Stress distribution (Bending (Model B-1), outer surface)
応力分布 (曲げ モデル B - 1 外面)
- Figure 6.20(a) Stress distribution (Bending (Model B-1), outer surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (曲げ モデル B - 1 外面)
- Figure 6.21 Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model B-1, inner surface)
応力分布 (せん断 (両端回転拘束) モデル B - 1 内面)
- Figure 6.21(a) Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model B-1, inner surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転拘束) モデル B - 1 内面)
- Figure 6.22 Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model B-1, outer surface)
応力分布 (せん断 (両端回転拘束) モデル B - 1 外面)
- Figure 6.22(a) Stress distribution (Shearing (rotation constrain), Model B-1, outer surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転拘束) モデル B - 1 外面)
- Figure 6.23 Stress distribution (Shearing (rotation free), Model B-1, inner surface)
応力分布 (せん断 (両端回転自由) モデル B - 1 内面)
- Figure 6.23(a) Stress distribution (Shearing (rotation free), Model B-1, inner surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転自由) モデル)
- Figure 6.24 Stress distribution (Shearing (rotation free), Model B-1, outer surface)
応力分布 (せん断 (両端回転自由) モデル B - 1 外面)
- Figure 6.24(a) Stress distribution (Shearing (rotation free), Model B-1, outer surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 (両端回転自由) モデル B - 1 外面)

- Figure 6.25 Stress distribution (Torsion, Model B-1 inner surface)
応力分布 (ねじり モデル B - 1 内面)
- Figure 6.26 Stress distribution (Torsion, Model B-1 outer surface)
応力分布 (ねじり モデル B - 1 外面)
- Figure 6.27 Deformed shape (Tension Model B-1)
変形図 (引張り モデル B - 1)
- Figure 6.28 Deformed shape (Bending, Model B-1)
変形図 (曲げ モデル B - 1)
- Figure 6.29 Deformed shape (Shearing (rotation constrain), Model B-1)
変形図 (せん断 (両端回転拘束) モデル B - 1)
- Figure 6.30 Deformed shape (Shearing (rotation free), Model B-1)
変形図 (せん断 (両端回転自由) モデル B - 1)
- Figure 6.31 Deformed shape (Torsion, Model B-1)
変形図 (ねじり モデル B - 1)
- Figure 6.32 Stress distribution (Bending, Model A-2, inner surface)
応力分布 (曲げ モデル A - 2 内面)
- Figure 6.32(a) Stress distribution (Bending, Model A-2, inner surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (曲げ モデル A - 2 内面)
- Figure 6.33 Stress distribution (Bending, Model A-2, outer surface)
応力分布 (曲げ モデル A - 2 外面)
- Figure 6.33(a) Stress distribution (Bending, Model A-2, outer surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (曲げ モデル A - 2 外面)
- Figure 6.34 Stress distribution (Shearing, Model A-2, inner surface)
応力分布 (せん断 モデル A - 2 内面)
- Figure 6.34(a) Stress distribution (Shearing, Model A-2, inner surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 モデル A - 2 内面)
- Figure 6.35 Stress distribution (Shearing, Model A-2, outer surface)
応力分布 (せん断 モデル A - 2 外面)
- Figure 6.35(a) Stress distribution (Shearing, Model A-2, outer surface)
応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 モデル A - 2 外面)
- Figure 6.36 Deformed shape (Bending, Model A-2)
変形図 (曲げ モデル A - 2)
- Figure 6.37 Deformed shape (Shearing, Model A-2)
変形図 (せん断 モデル A - 2)
- Figure 6.38 Stress distribution (Shearing, Model B-2, inner surface)
応力分布 (せん断 モデル B - 2 内面)

- Figure 6.38(a) Stress distribution (Shearing, Model B-2, inner surface)
 応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 モデルB-2 内面)
- Figure 6.39 Stress distribution (Shearing, Model B-2, outer surface)
 応力分布 (せん断 モデルB-2 外面)
- Figure 6.39(a) Stress distribution (Shearing, Model B-2, outer surface)
 応力分布 ($\tau_{\psi\theta}$) (せん断 モデルB-2 外面)
- Figure 6.40 Deformed shape (Shearing, Model B-2)
 変形図 (せん断 モデルB-2)
- Figure A.1 Stress distribution (Bending, inner surface)
 応力分布 (曲げ 内面 56分割)
- Figure A.2 Stress distribution (Bending, outer surface)
 応力分布 (曲げ 外面 56分割)
- Figure A.3 Stress distribution (Bending, inner surface)
 応力分布 (曲げ 内面 100分割)
- Figure A.4 Stress distribution (Bending, outer surface)
 応力分布 (曲げ 外面 100分割)
- Figure A.5 Stress distribution (Bending, inner surface, compatible element)
 応力分布 (曲げ 内面 適合要素)
- Figure A.6 Stress distribution (Bending, outer surface, compatible element)
 応力分布 (曲げ 外面 適合要素)
- Figure A.7 Stress distribution (Shearing, inner surface)
 応力分布 (せん断 内面 56分割)
- Figure A.8 Stress distribution (Shearing, outer surface)
 応力分布 (せん断 外面 56分割)
- Figure A.9 Stress distribution (Shearing, inner surface)
 応力分布 (せん断 内面 100分割)
- Figure A.10 Stress distribution (Shearing, outer surface)
 応力分布 (せん断 外面 100分割)
- Figure A.11 Stress distribution (Shearing, inner surface, compatible element)
 応力分布 (せん断 内面 適合要素)
- Figure A.12 Stress distribution (Shearing, outer surface, compatible element)
 応力分布 (せん断 外面 適合要素)
- Figure B.1 Valuation points ($\frac{1}{2}$ convolution model)
 評価点の位置 ($\frac{1}{2}$ 山モデル)
- Figure B.2 Stress distribution (Bending, inner surface, Axisymmetric shell)
 応力分布 (曲げ 内面 軸対称シェル)

- Figure B.3 Stress distribution (Bending, outer surface, Axisymmetric shell)
応力分析 (曲げ 外面 軸対称シェル)
- Figure B.4 Stress distribution (Bending, inner surface, 3-dimensional shell)
 $\frac{1}{2}$ pitch, $t=2\text{mm}$
応力分布 (内面) ($\frac{1}{2}$ 山 曲げ 板厚 $t = 2\text{mm}$ 3次元モデル)
- Figure B.5 Stress distribution (Bending, outer surface, 3-dimensional shell)
 $\frac{1}{2}$ pitch, $t=2\text{mm}$
応力分布 (外面) ($\frac{1}{2}$ 山 曲げ 板厚 $t = 2\text{mm}$ 3次元モデル)
- Figure B.6 Deformed shape (Bending, case A-3)
変形図 (曲げ モデル A - 3)
- Figure B.7 Deformed shape (Bending, case A-4)
変形図 (曲げ モデル A - 4)
- Figure B.8 Deformed shape (Bending, case A-4)
変形図 (曲げ モデル A - 4)
- Figure B.9 Deformed shape (Bending, case A-4)
変形図 (曲げ モデル A - 4)

1. 緒 言

FBR大型炉のコスト低減方策のひとつとして、主冷却系配管に配管用ベローズ継手を適用することが考えられている。現在、FBR配管用ベローズ継手の成立性の検討が、事業団を中心として進められているが、その一環として、大洗工学センターでも、昭和60年度より大型試験装置を用いたベローズの疲労、クリープ疲労試験及び内圧座屈試験を開始した。

本解析は、これらの試験の予備解析のひとつとして位置付けられ、ベローズ試験体の弾性範囲での各種非軸対称変形挙動の把握を目的とする。

対象とするベローズは、軸対称形状であるが、引張・圧縮よりもむしろ曲げなど非軸対称変位の吸収に使用されることが多い。非軸対称変位に対するひずみ等の諸特性の評価は、扱いの簡単さから、1山相当の軸方向変位に換算する簡易手法がよく用いられる。しかしながら、このような手法の妥当性を確認することは必要であり、ここでは、EJMAスタンダードの評価式との比較を含めた評価を行う。

解析対象としては、室温の基本挙動試験の参照データを提供することを考え、試運転用ベローズ（42B，肉厚3mm，14山）と試験ベローズ（42B，肉厚2mm，7山）を取り上げた。

解析は、軸対称シェル要素を用い、荷重あるいは変位をフーリエ級数展開することにより、非軸対称解析に適用する手法をとっている。

2. 解析概要

ペローズコンポリューションの基本的な非軸対称挙動についての解析を行なう。

解析モデルは、軸対称シェル要素による1山モデル、7山、14山の全体モデルとする。また、 $\frac{1}{2}$ 山モデルを軸対称シェル要素、3次元曲面シェル要素によりモデル化し、結果の比較を行なう。負荷条件は、引張り、曲げ、せん断およびねじりであり、強制変位により負荷する。

なお、予備検討として、要素分割、境界条件および要素特性について、軸対称シェル要素1山モデルの曲げ、せん断により検討する。また、軸対称シェル要素と3次元シェル要素との比較を $\frac{1}{2}$ 山モデルの曲げにより行なっており、これらの詳細はAppendix A 及び B に記述されている。

解析ケースの一覧をTable 2.1 に示す。

使用コードは高速炉非弾性構造解析システム FINAS V8.0 および、非線形構造解析汎用プログラム MARC K.1 である。軸対称シェル要素による解析は FINAS で、3次元曲面シェル要素による解析は MARC で行なう。

Table 2.1 Definition of case No

Model	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	B - 1	B - 2
No. of Conv.	1	7	$\frac{1}{2}$		1	14
Thickness (mm)	2				3	
Element	Asymmetric shell			Three dimensional shell	Asymmetric shell	
Tension	A 1 A				B 1 A	
Bending	A 1 B	A 2 B	A 3 B	A 4 B	B 1 B	
Shearing	A 1 S	A 2 S			B 1 S	B 2 S
Torsion	A 1 T				B 1 T	

3. 解析モデル

ベローズの形状および寸法をTable 3.1, Figure 3.1に示す。

ベローズを軸対称シェル要素および、3次元曲面シェル要素によりモデル化する。また各モデルにおける要素数をTable 3.1に示す。また各モデルの有限要素モデル図をFigure 3.2～Figure 3.19に示す。

要素数については、1山あたり56要素の場合と100要素の場合の結果を比較し、解析結果にほとんど差がないことより1山あたり56要素とする。これについては、APPENDIX. Aに示す。

・使用要素

2 節点円錐台シェル調和荷重要素 NCONC 2 (FINAS)

3 節点三角形曲面シェル要素 ELEMENT 8 (MARC)

Table 3.1 Dimensions of Bellows

Model	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	B - 1	B - 2
Diameter (D)	42 ^B (1100mm)					
Convolution defith (H)	60mm					
Bellows pitch (q)	50mm					
Thickness (t)	2 mm				3 mm	
Number of Convolutions(N)	1	7	½		1	14
Element Type	Asymmetric shell			Three dimensional shell	Asymmetric shell	
Number of elements	56	402	28	432	56	794

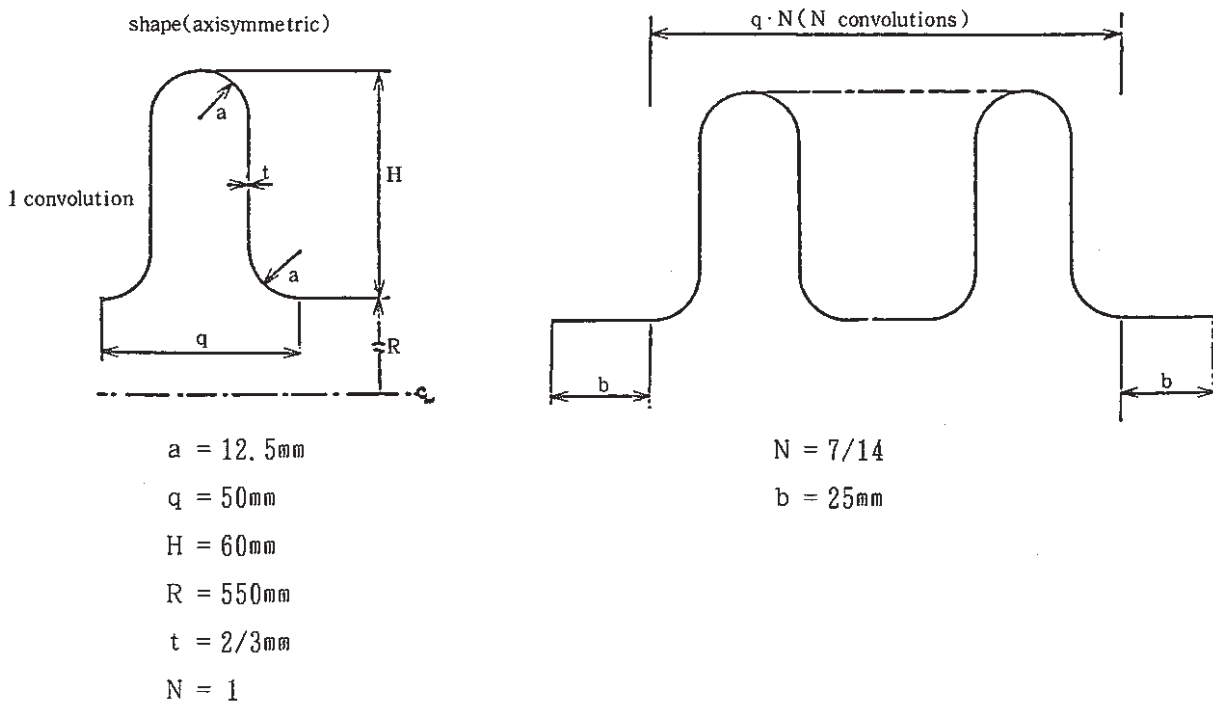
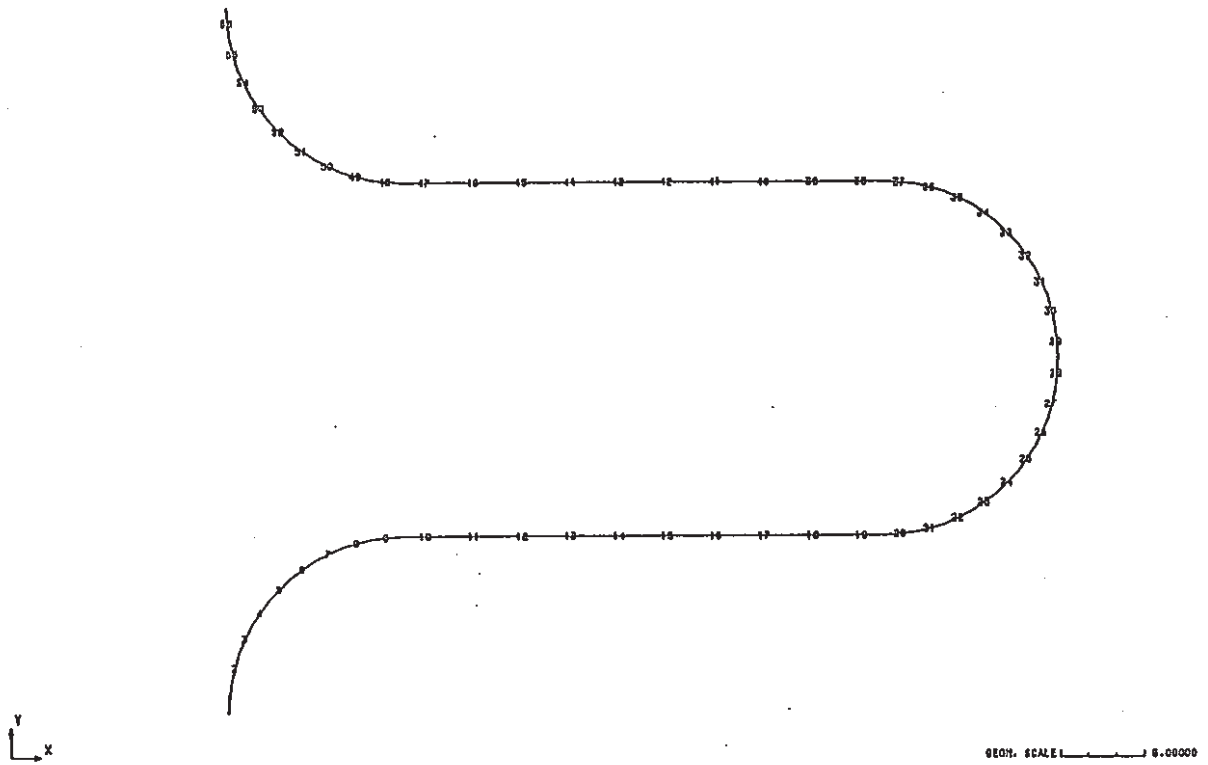


Figure 3.1 Shape of bellows

FINAS

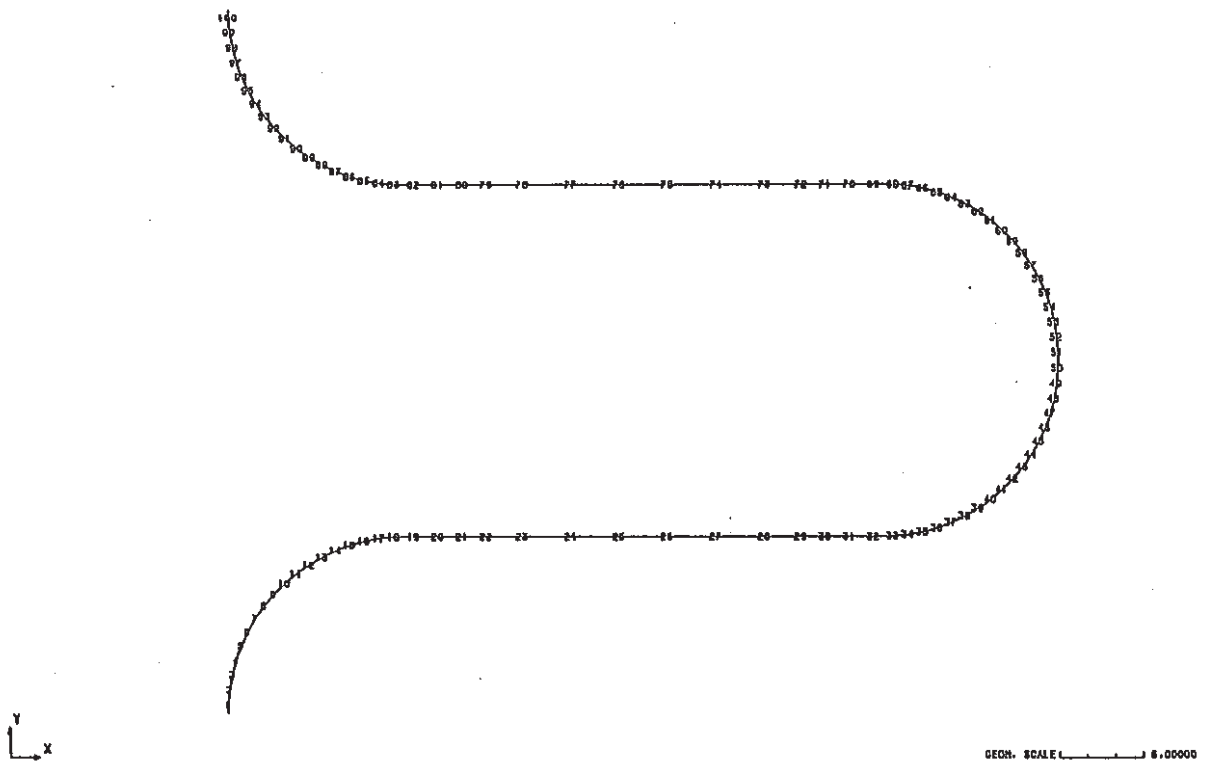


BELLOWS MODEL A-1 (1-PITCH T=2 MM)

Figure 3.2 1 convolution : numbering of elements

(Model A-1, B-1) 56 elements

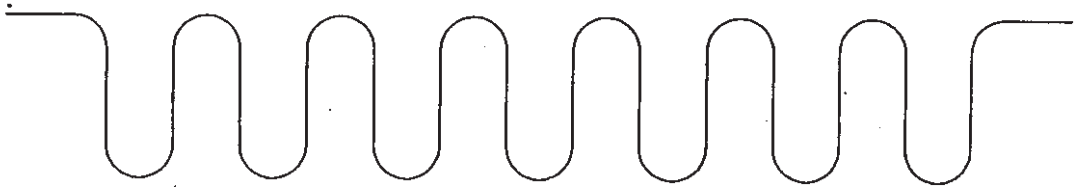
FINAS



BELLOWS MODEL A-1 (1-PITCH T=2 MM) 100 ELEM

Figure 3.3 1 convolution : numbering of elements

100 elements



BELLOWS MODEL (7-PITCH 1-2) 56*7 ELEM

GEOM. SCALE 40.0000

Figure 3.4 7 convolutions : finite element model (Model A-2)



BELLOWS MODEL (14-PITCH 1-3) 56*14 ELEM

GEOM. SCALE 60.0000

Figure 3.5 14 convolutions : finite element model (Model B-2)

FINAS

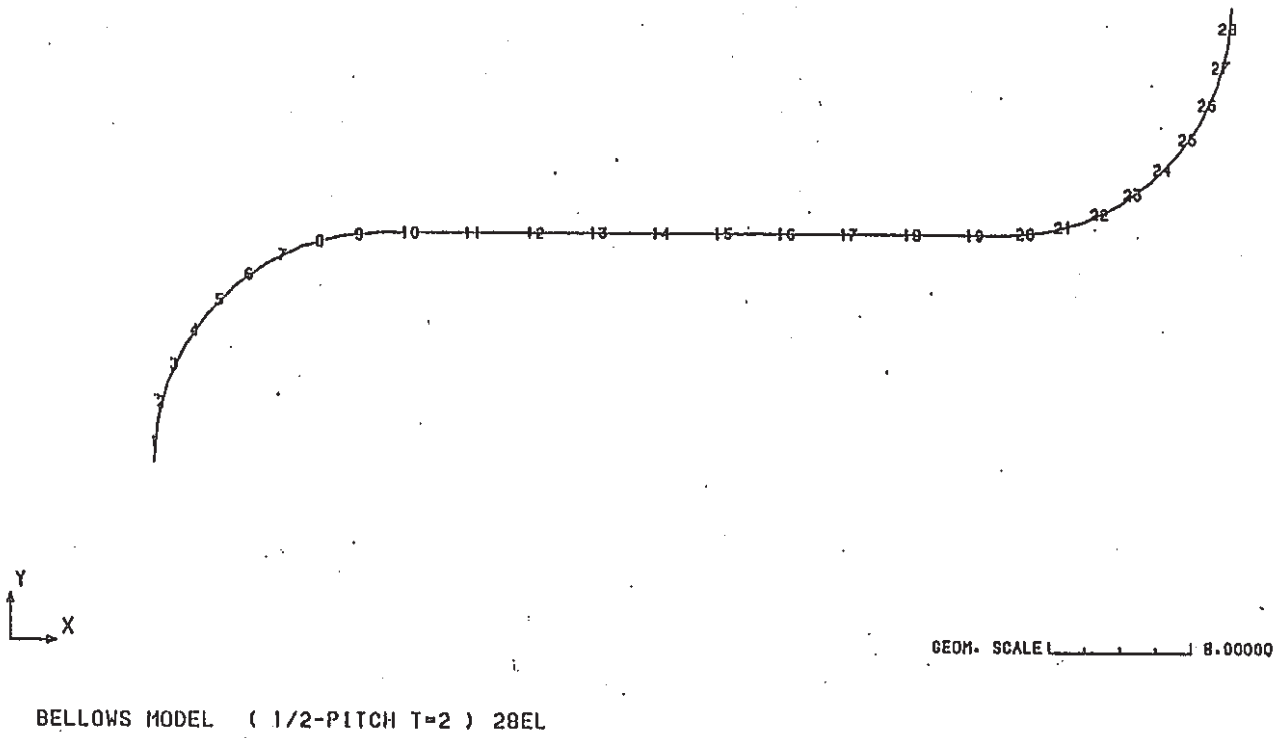
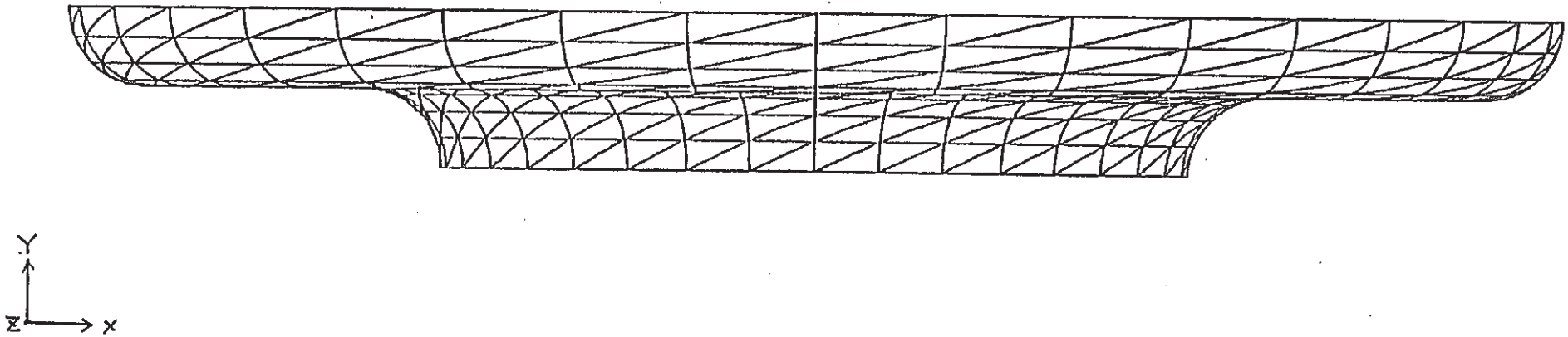
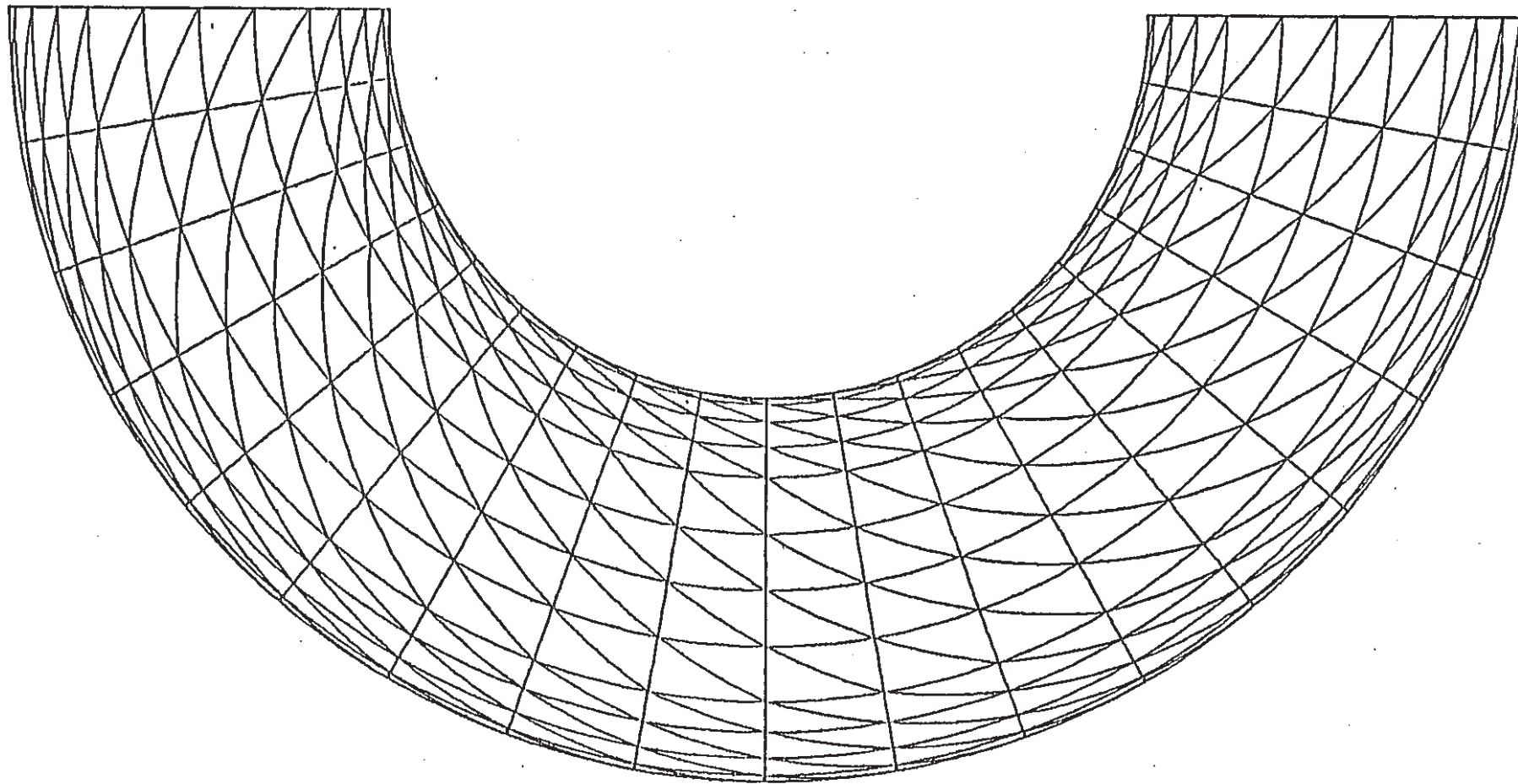


Figure 3.6 1/2 Convolution : numbering of elements (Model A-3)

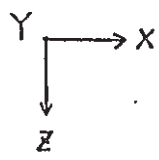


BELLOWS MODEL (1/2 PITCH)

Figure 3.7 1/2 convolution : finite element model (Model A-4)
3 dimensional shell, 180° Model



--10--



BELLOWS MODEL (1/2 PITCH)

Figure 3.8 1/2 convolution : finite element model (Model A-4)
3 dimensional shell, 180° Model

4. 材料定数

ペローズの構造材料は SUS316 であり，室温20℃の値を用いる。

縦弾性係数 $E = 1.98 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.266$

横弾性係数 $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 7.82 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$

5. 負荷条件および境界条件

引張り，曲げ，せん断およびねじりについて，強制変位により負荷する。負荷条件について Table 5.1 に示す。

非軸対称シェルを用いた非軸対称荷重解析においては，変位および荷重は，調和関数項により表わされる。

$$\begin{pmatrix} u_R \\ u_Z \\ u_\theta \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{n=0}^m u_{R,n}^s \cos n\theta + \sum_{n=0}^m u_{R,n}^a \sin n\theta \\ \sum_{n=0}^m u_{Z,n}^s \cos n\theta + \sum_{n=0}^m u_{Z,n}^a \sin n\theta \\ \sum_{n=0}^m u_{\theta,n}^s \sin n\theta + \sum_{n=0}^m u_{\theta,n}^a \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m \beta_n^s \cos n\theta + \sum_{n=0}^m \beta_n^a \sin n\theta \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

対称モード
SYN

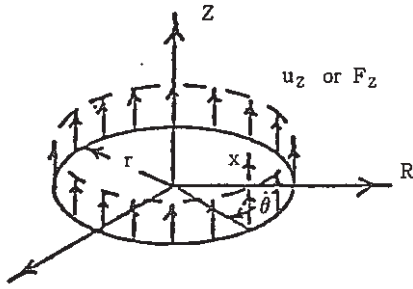
反対称モード
ANTI

引張り，曲げ，せん断およびねじりのモードは，Figure 5.1 のように表わされる。また，各ケースの境界条件を Table 4.2，Table 5.3，Figure 5.2 に示す。

3次元曲面シェルにおいては，Figure 5.3 に示す座標系によりつぎの座標成分，自由度をもち，境界条件は Table 5.4 で与えられる。

- ・座標成分 $\theta_1, \theta_2, X, \partial X / \partial \theta_1, \partial X / \partial \theta_2,$
 $Y, \partial Y / \partial \theta_1, \partial Y / \partial \theta_2,$
 $Z, \partial Z / \partial \theta_1, \partial Z / \partial \theta_2;$
- ・自由度 $U, \partial U / \partial \theta_1, \partial U / \partial \theta_2,$
 $V, \partial V / \partial \theta_1, \partial V / \partial \theta_2,$
 $W, \partial W / \partial \theta_1, \partial W / \partial \theta_2,$

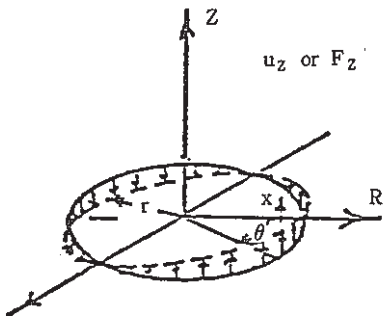
(1) Tension



symmetric, 0st mode

$$u_z = u_z^s$$

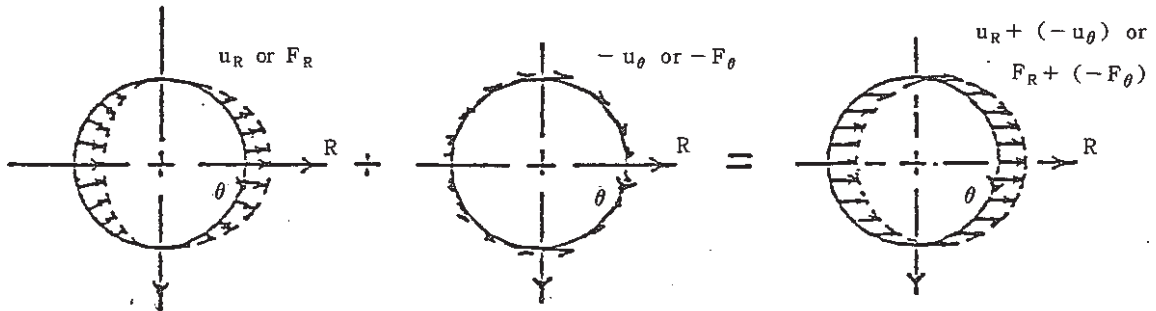
(2) Bending



symmetric, 1st mode

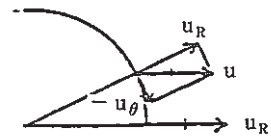
$$u_z = u_z^s \cos \theta$$

(3) Shearing

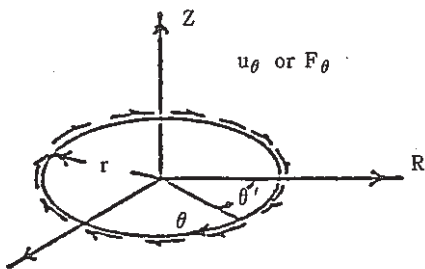


symmetric, 1st mode

$$u = u_R^s \cos \theta + (-u_\theta^s) \sin \theta$$



(4) Torsion



anti-symmetric, 0st mode

$$u_\theta = u_\theta^a$$

Figure 5.1 asymmetric modes

Table 5.1 Loading Conditions

	A - 1 1 Conv.	A - 2 7 Conv.	B - 1 1 Conv.	B - 2 14 Conv.	A - 3, A - 4 ½ Conv.
Tension	1 mm		1 mm		
Bending	1 °	7 °	1 °		0.5 °
Shearing	1 mm	7 mm	1 mm	14mm	
Torsion	1 °		1 °		

Table 5.2 Boundary conditions of 1 convolution model

	A				B			
	u_R	u_z	u_θ	β	u_R	u_z	u_θ	β
Tension		Given		Fix		Fix		Fix
Bending		Given		Given		Fix		Fix
Shearing	Given	Fix	Given	Fix	Fix	Fix	Fix	Fix
Torsion			Given				Fix	

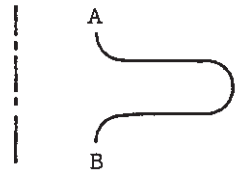
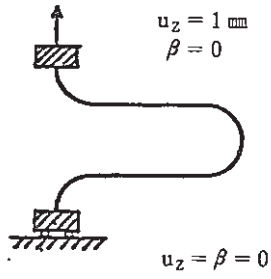


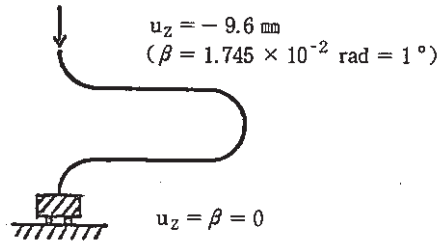
Table 5.3 Boundary conditions of 7(14) convolutions model

	A				B			
	u_R	u_z	u_θ	β	u_R	u_z	u_θ	β
Tension								
Bending		Given		Given	Fix	Fix	Fix	Fix
Shearing	Given	Fix	Given	Fix	Fix	Fix	Fix	Fix
Torsion								

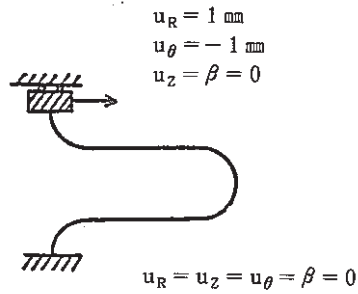
(1) Tension



(2) Bending



(3) Shearing



(4) Torsion

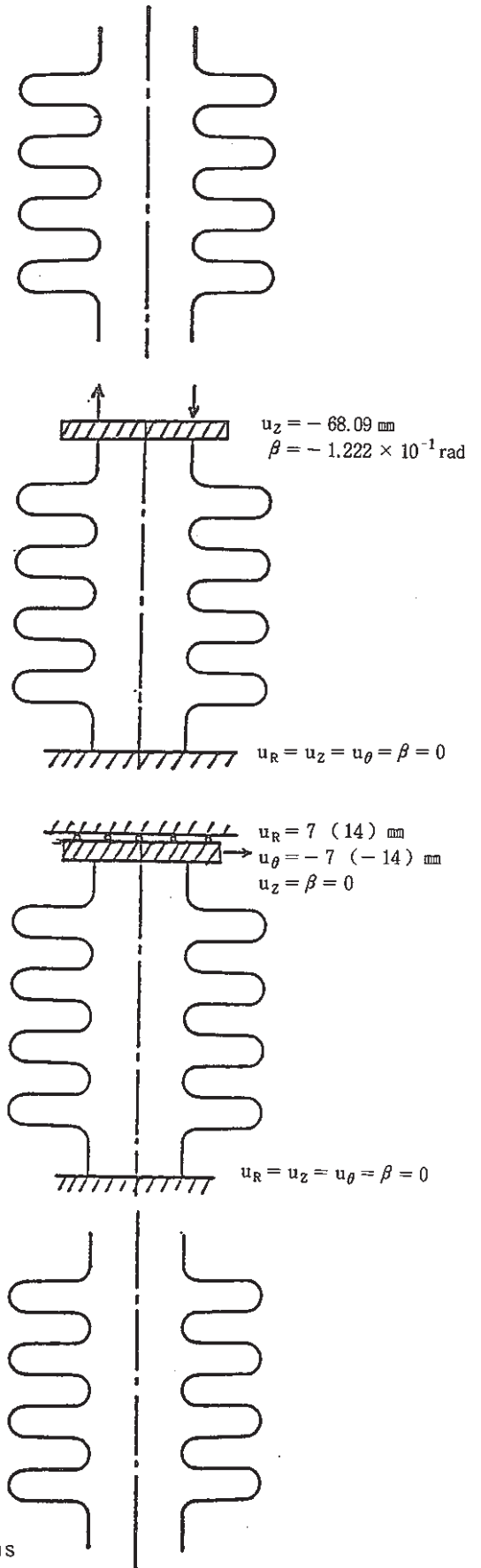
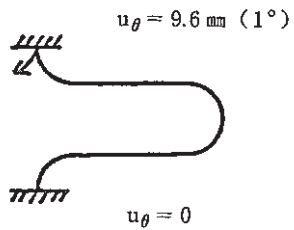


Figure 5.2 Boundary Conditions

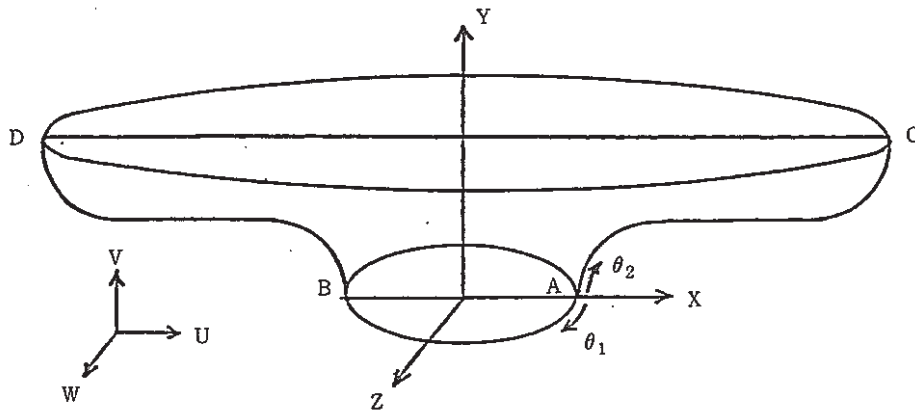


Figure 5.3 Co-ordinates of 3 dimensional model

Table 5.4 Boundary Conditions of 3 dimensional model

	U	$\partial U / \partial \theta_1$	$\partial U / \partial \theta_2$	V	$\partial V / \partial \theta_1$	$\partial V / \partial \theta_2$	W	$\partial W / \partial \theta_1$	$\partial W / \partial \theta_2$
$\theta_1 = 0$	A	Fix	Fix	Fix	Fix		Fix		Fix
$\theta_1 = \pi$	B	Fix	Fix	Fix	Fix		Fix		Fix
$\theta_1 = 0$	C	Fix	② (Given)	① Given	③ Fix (Given=0)		Fix		Fix
$\theta_1 = \pi$	D	Fix	② (Given)	① Given	③ Fix (Given=0)		Fix		Fix
	\widehat{AB}		Fix	Fix	Fix				Fix
	\widehat{CD}		② (Given)	① Given	③ (Given)				Fix
$\theta_1 = 0$	\widehat{AC}	Fix			Fix		Fix		Fix
$\theta_1 = \pi$	\widehat{BD}	Fix			Fix		Fix		Fix

① $V = R_0 \beta \cos \theta$

$R_0 = 610$

② $\partial U / \partial \theta_2 = -\beta$

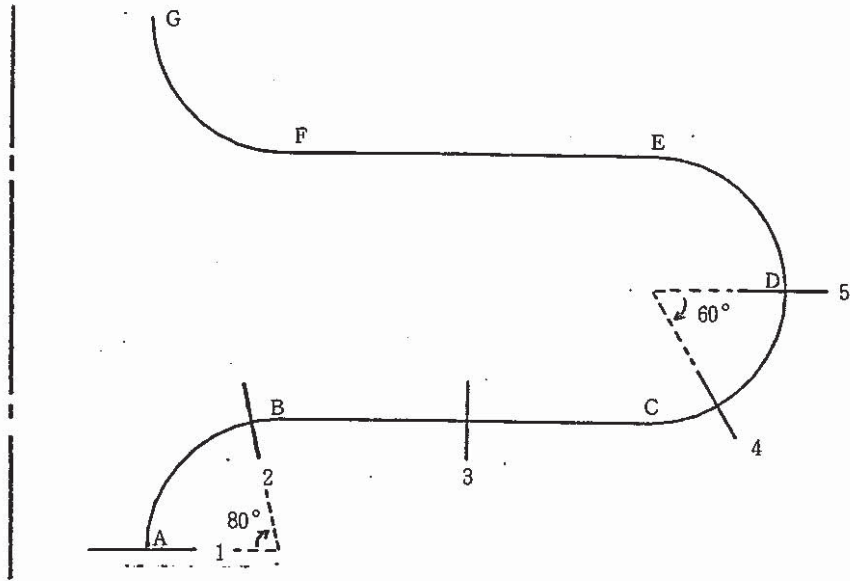
$\beta = -0.5^\circ = -8.727 \times 10^{-2} \text{ rad}$

③ $\partial V / \partial \theta_1 = -\beta \sin \theta$

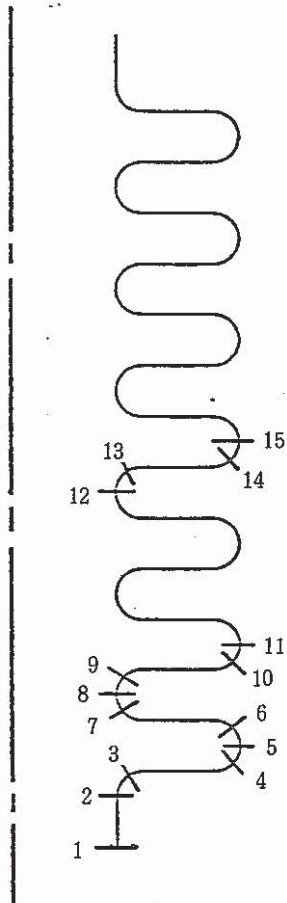
6. 解析結果

1山モデル（モデルA-1, B-1）, 7山モデル（モデルA-2）および14山モデル（モデルB-2）の結果を以下に示す。なお, 要素分割, 要素特性に関する予備検討の結果については APPENDIX. A に, 非軸対称シェル要素と3次元曲面シェル要素との比較については, APPENDIX. B に示す。

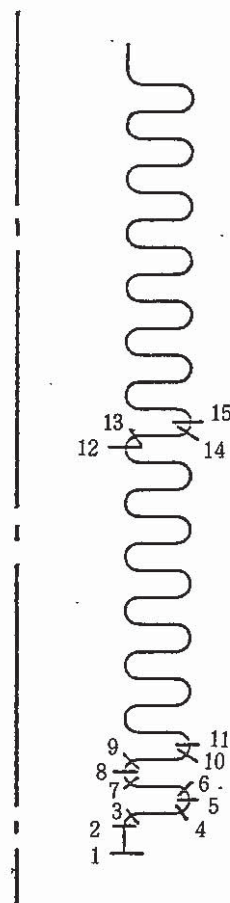
Figure 6.1 に示す評価点の内・外面の応力および膜応力, 曲げ応力を Table 6.1 ~ Table 6.4 に, 各負荷条件に対する荷重 - 変位関係を Table 6.5 に示す。また, モデルA-1 における応力分布図を Figure 6.2 ~ Figure 6.11 に, 変形図を Figure 6.12 ~ Figure 6.16 に, モデルB-1 における応力分布図を Figure 6.17 ~ Figure 6.26 に, 変形図を Figure 6.27 ~ Figure 6.31 に, モデルB-1 における応力分布図を Figure 6.32 ~ Figure 6.35 に, 変形図を Figure 6.36 ~ Figure 6.37 に, モデルB-2 における応力分布図を Figure 6.38 ~ Figure 6.39 に, 変形図を Figure 6.40 に示す。



Model A-1, B-1



Model A-2



Model B-2

Figure 6.1 Valuation points

Table 6.1 Stresses~1 convolution model, t=2mm (Model A-1)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface		outer surface		membrane		bending	
		σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}
Tension	1	-10.75	-1.34	11.01	4.45	0.13	1.55	-10.88	-2.89
	2	-7.34	-2.21	7.42	2.26	0.04	0.02	-7.38	-2.23
	3	0.23	-0.36	-0.18	0.29	0.03	-0.04	0.20	-0.33
	4	8.54	1.68	-8.44	-2.48	0.05	-0.40	8.49	2.08
	5	10.40	1.39	-10.17	-4.09	0.12	-1.35	10.28	2.74
Bending	1	111.4	13.96	-113.9	-45.97	-1.25	-16.00	112.7	29.96
	2	76.64	22.84	-77.84	-23.75	-0.60	-0.45	77.24	23.29
	3	0.23	4.20	-0.74	-3.71	-0.25	0.24	0.49	3.95
	4	-84.14	-16.68	82.70	24.16	-0.72	3.74	-83.42	-20.42
	5	-102.9	-13.72	100.5	40.38	-1.24	13.33	-101.7	-27.05
Shearing (rotation constrain)	1	-72.40	-19.28	67.38	17.90	-2.51	-0.69	-69.89	-18.59
	2	67.27	13.38	-75.83	-26.05	-4.37	-6.33	71.64	19.71
	3	16.57	-2.63	-23.14	-17.26	-2.84	-9.86	19.41	7.23
	4	-34.25	-18.53	30.87	-3.93	-1.69	-11.23	-32.56	-7.30
	5	-0.48	-0.13	0.26	-0.12	-0.11	-0.12	-0.37	0.00
Shearing (rotation free)	1	-1.21	-0.60	-3.17	-0.88	-2.19	-0.74	0.98	0.14
	2	80.83	7.29	-86.74	-37.96	-2.96	-15.33	83.79	22.62
	3	31.18	-7.71	-34.88	-29.60	-1.85	-18.66	33.03	10.95
	4	-20.20	-22.02	17.79	-15.73	-1.21	-18.87	-19.00	-3.15
	5	-0.33	-0.10	0.17	-0.28	-0.08	-0.19	-0.25	0.09

Table 6.1(a) Stresses~1 convolution model, t=2mm (Model A-1)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface	outer surface	membrane	bending
		$\tau_{\phi \theta}$	$\tau_{\phi \theta}$	$\tau_{\phi \theta}$	$\tau_{\phi \theta}$
Torsion	1	586.6	590.9	588.8	-2.2
	2	568.0	569.1	568.5	-0.5
	3	527.8	527.8	527.8	0.0
	4	488.9	490.3	489.6	-0.7
	5	477.3	480.4	478.8	-1.5
Bending	1	-0.02	0.01	-0.00	-0.02
	2	-2.53	1.97	-0.28	-2.25
	3	-3.28	2.77	-0.25	-3.03
	4	-1.76	1.33	-0.21	-1.55
	5	-0.01	0.01	-0.00	-0.01
Shearing (rotation constrain)	1	-48.88	-49.07	-48.97	0.09
	2	-47.84	-46.82	-47.33	-0.51
	3	-46.04	-42.78	-44.41	-1.63
	4	-42.63	-40.31	-41.47	-1.16
	5	-41.52	-39.96	-40.74	-0.78
Shearing (rotation free)	1	-44.28	-46.60	-45.44	1.16
	2	-44.37	-43.86	-44.12	-0.25
	3	-43.42	-40.01	-41.71	-1.71
	4	-40.95	-37.67	-39.31	-1.64
	5	-40.08	-37.35	-38.72	-1.36

Table 6.2 Stresses~1 convolution model, t=3mm (Model B-1)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface		outer surface		membrane		bending	
		σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}
Tension	1	-16.27	-2.81	16.82	5.99	0.28	1.59	-16.54	-4.40
	2	-10.83	-3.29	10.99	3.33	0.08	0.02	-10.91	-3.31
	3	0.33	-0.54	-0.28	0.43	0.03	-0.05	0.31	-0.48
	4	12.75	2.70	-12.53	-3.49	0.11	-0.39	12.64	3.09
	5	15.87	2.82	-15.33	-5.48	0.27	-1.33	15.60	4.15
Bending	1	168.5	29.17	-174.1	-61.96	-2.81	-16.39	171.3	45.56
	2	113.4	34.15	-115.0	-34.88	-0.79	-0.36	114.2	34.51
	3	0.42	6.28	-0.93	-5.51	-0.25	0.38	0.67	5.90
	4	-125.3	-26.59	123.1	34.15	-1.12	3.78	-124.2	-30.37
	5	-157.0	-27.88	151.5	54.18	-2.72	13.15	-154.3	-41.03
Shearing (rotation constrain)	1	-37.15	-9.91	31.97	8.48	-2.59	-0.71	39.74	-9.19
	2	54.59	11.79	-63.26	-21.08	-4.33	-4.65	58.92	16.44
	3	19.69	-0.42	-25.04	-16.33	-2.67	-8.38	22.36	7.96
	4	-16.46	-12.75	13.57	-8.16	-1.45	-10.46	-15.01	-2.29
	5	-0.27	-0.02	0.10	-0.21	-0.09	-0.12	-0.18	0.09
Shearing (rotation free)	1	-1.62	-0.59	-3.19	-0.85	-2.40	-0.72	0.79	0.13
	2	65.82	9.99	-72.65	-27.83	-3.42	-8.92	69.24	18.91
	3	30.89	-1.73	-34.80	-23.36	-1.96	-12.55	32.85	10.82
	4	-6.51	-13.44	4.52	-14.70	-1.00	-14.07	-5.51	0.63
	5	-0.15	0.02	0.05	-0.31	-0.05	-0.14	-0.10	0.16

Table 6.2(a) Stresses~1 convolution model, t=3mm (Model B-1)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface	outer surface	membrane	bending
		$\tau_{\psi \theta}$	$\tau_{\psi \theta}$	$\tau_{\psi \theta}$	$\tau_{\psi \theta}$
Torsion	1	585.6	592.0	588.8	-3.2
	2	567.8	569.3	568.5	-0.7
	3	527.8	527.8	527.8	0.0
	4	488.5	490.6	489.6	-1.1
	5	476.5	481.2	478.8	-2.3
Bending	1	-0.06	-0.01	-0.03	-0.03
	2	-3.67	3.09	-0.29	-3.38
	3	-4.74	4.26	-0.26	-4.48
	4	-2.54	2.11	-0.22	-2.32
	5	-0.04	-0.00	-0.02	-0.02
Shearing (rotation constrain)	1	-51.07	-51.36	-51.21	0.14
	2	-50.04	-48.87	-49.46	-0.58
	3	-47.92	-44.75	-46.34	-1.58
	4	-44.64	-41.76	-43.20	-1.44
	5	-43.62	-41.24	-42.34	-1.28
Shearing (rotation free)	1	-48.72	-50.38	-49.55	0.83
	2	-48.32	-47.58	-47.95	-0.37
	3	-46.74	-43.49	-45.11	-1.63
	4	-43.97	-40.40	-42.19	-1.78
	5	-43.10	-39.87	-41.48	-1.62

Table 6.3 Stresses~7 convolutions model, t=2mm (Model A-2)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface		outer surface		membrane		bending	
		σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ
Bending	1	-42.87	-11.41	39.94	10.62	-1.46	-0.39	44.33	-11.02
	2	60.53	11.44	-63.46	-21.60	-1.46	-5.08	61.99	16.52
	3	84.41	28.23	-88.34	-20.22	-1.96	4.00	86.37	24.23
	4	-87.69	-8.39	85.51	35.18	-1.09	13.39	-86.60	-21.78
	5	-101.6	-8.14	99.10	45.32	-1.26	18.59	-100.3	-26.73
	6	-87.89	-14.01	85.85	29.39	-1.02	7.69	-86.87	-21.70
	7	88.53	24.95	-89.81	-27.77	-0.64	-1.41	89.17	26.36
	8	114.8	14.49	-117.4	-47.27	-1.27	-16.39	116.1	30.88
	9	85.37	23.24	-86.50	-27.57	-0.57	-2.17	85.94	25.41
	10	-85.98	-17.34	84.18	24.70	-0.90	3.68	-85.08	-21.02
	11	-104.0	-14.31	101.5	40.31	-1.26	13.00	-102.7	-27.31
	12	113.4	14.22	-116.0	-46.81	-1.28	-16.30	114.7	30.52
	13	85.37	23.58	-86.58	-27.28	-0.61	-1.85	85.98	25.43
	14	-86.50	-17.16	84.69	25.16	-0.91	4.00	-85.59	-21.16
	15	-104.9	-13.98	102.4	41.16	-1.26	13.59	-103.6	-27.57
Shearing	1	-39.65	-10.55	36.69	9.75	-1.48	-0.40	-38.17	-10.15
	2	50.56	7.72	-53.17	-19.91	-1.30	-6.10	51.86	13.82
	3	72.52	21.32	-75.93	-20.16	-1.71	0.58	74.23	20.74
	4	-68.22	-8.80	66.37	24.54	-0.93	7.87	-67.29	-16.67
	5	-77.51	-5.31	75.58	35.40	-0.96	15.05	-76.55	-20.36
	6	-66.13	-6.94	64.71	26.18	-0.71	9.62	-65.42	-16.56
	7	57.13	20.31	-58.09	-14.31	-0.48	3.00	57.61	17.31
	8	73.28	9.29	-74.87	-30.07	-0.79	-10.39	74.07	19.68
	9	54.13	10.73	-54.69	-20.87	-0.28	-5.07	54.41	15.80
	10	-43.46	-12.37	42.46	8.23	-0.50	-2.07	-42.96	-10.30
	11	-52.91	-7.22	51.63	20.52	-0.64	6.65	-52.27	-13.87
	12	14.30	1.74	-14.62	-5.91	-0.16	-2.09	14.46	3.83
	13	10.69	-0.94	-10.71	-6.73	-0.01	-3.84	10.70	2.90
	14	-0.06	-3.49	-0.05	-4.10	-0.05	-3.80	-0.01	0.31
	15	-0.01	-0.01	0.01	-0.07	-0.00	-0.04	-0.01	0.03

Table 6.3(a) Stresses~7 convolutions model, t=2mm (Model A-2)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface	outer surface	membrane	bending
		$\tau_{\psi \theta}$	$\tau_{\psi \theta}$	$\tau_{\psi \theta}$	$\tau_{\psi \theta}$
Bending	1	-1.29	-1.32	-1.30	0.01
	2	-1.75	-1.17	-1.46	-0.29
	3	-2.85	-0.07	-1.46	-1.39
	4	-1.63	0.80	-0.42	-1.21
	5	0.26	-0.34	-0.04	0.3
	6	1.79	-1.36	0.21	1.58
	7	2.52	-1.80	0.36	2.16
	8	0.08	0.07	0.08	0.00
	9	-2.30	1.87	-2.15	-0.15
	10	-1.73	1.37	-0.18	-1.55
	11	0.01	0.05	0.03	-0.02
	12	0.01	0.05	0.03	-0.02
	13	-2.35	1.84	-0.25	-2.10
	14	-1.74	1.36	-0.19	-1.55
	15	0.02	0.04	0.03	-0.01
Shearing	1	-5.07	-5.11	-5.09	0.02
	2	-5.43	-5.09	-5.26	-0.17
	3	-6.35	-4.14	-5.24	-1.11
	4	-5.19	-2.82	-4.00	-1.19
	5	-3.67	-3.65	-3.66	-0.01
	6	-2.53	-4.24	-3.48	0.95
	7	-2.00	-5.25	-3.62	1.62
	8	-3.61	-4.10	-3.85	0.24
	9	-5.07	-2.90	-3.98	-1.09
	10	-4.79	-2.63	-3.71	-1.08
	11	-3.88	-3.28	-3.58	-0.30
	12	-3.67	-4.12	-3.90	0.23
	13	-3.91	-3.84	-3.87	-0.04
	14	-3.91	-3.32	-3.61	-0.30
	15	-3.86	-3.30	-3.58	-0.28

Table 6.4 Stresses~14 convolutions model, t=3mm (Model B-2)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface		outer surface		membrane		bending	
		σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ
Shearing	1	-23.54	-6.27	20.40	5.42	-1.57	-0.42	-21.97	-5.85
	2	41.80	10.43	-44.73	-12.66	-1.46	-1.12	43.26	11.55
	3	54.48	19.82	-58.10	-12.04	-1.81	3.89	56.29	15.93
	4	-58.73	-6.51	56.69	22.40	-1.02	7.94	-57.71	-14.45
	5	-67.48	-7.05	65.08	28.24	-1.20	10.60	-66.28	-17.65
	6	-56.36	-7.64	54.73	20.17	-0.82	6.27	-55.54	-13.91
	7	51.49	17.71	-52.32	-13.50	-0.42	2.10	51.91	15.61
	8	69.12	12.62	-71.31	-24.69	-1.09	-6.04	70.21	18.66
	9	51.34	12.87	-52.02	-17.24	-0.34	-2.19	51.68	15.06
	10	-44.30	-10.90	43.07	10.27	-0.61	-0.31	-43.69	-10.59
	11	-56.76	-10.29	54.77	19.33	-1.00	4.52	-55.76	-14.81
	12	0.00	-0.02	-0.01	-0.00	-0.00	-0.01	0.00	-0.01
	13	1.04	-1.07	-1.03	-1.38	0.00	-1.23	1.04	0.16
	14	5.23	-0.08	-5.10	-3.01	0.06	-1.55	5.17	1.47
	15	5.20	0.93	-5.02	-1.83	0.09	-0.45	5.11	1.38

Table 6.4(a) Stresses~14 convolutions model, t=3mm (Model B-2)

(unit : kg/mm²)

Loading Conditions	Point	inner surface	outer surface	membrane	bending
		$\tau_{\phi \theta}$	$\tau_{\phi \theta}$	$\tau_{\phi \theta}$	$\tau_{\phi \theta}$
Shearing	1	-3.52	-3.55	-3.54	0.02
	2	-3.93	-3.27	-3.60	-0.33
	3	-4.58	-2.46	-3.52	-1.06
	4	-3.29	-1.57	-2.43	-0.86
	5	-2.02	-2.32	-2.17	0.15
	6	-1.07	-3.02	-2.04	0.97
	7	-0.62	-3.56	-2.09	1.47
	8	-2.02	-2.42	-2.22	0.20
	9	-3.36	-1.22	-2.29	-1.07
	10	-3.06	-1.07	-2.07	-0.99
	11	-2.15	-1.80	-1.98	-0.17
	12	-2.16	-2.39	-2.27	0.11
	13	-2.13	-2.33	-2.23	0.10
	14	-2.10	-1.92	-2.01	-0.09
	15	-2.16	-1.83	-1.99	-0.17

荷 重

① 引張り

$$\begin{aligned}
 F &= \int_0^{2\pi} (\text{単位長さあたりの荷重}) \times (\text{微小長さ}) \\
 &= \int_0^{2\pi} (F_z / R \cdot 1\text{rad}) \times (R d\theta) \\
 &= 2\pi F_z
 \end{aligned}$$

② 曲 げ

$$\begin{aligned}
 M &= \int_0^{2\pi} (\text{単位長さあたりの荷重}) \times (\text{腕の長さ}) \times (\text{微小長さ}) \\
 &= \int_0^{2\pi} (F_z \cos\theta / R \cdot 1\text{rad}) \times (R \cos\theta) \times (R d\theta) \\
 &= \pi R F_z
 \end{aligned}$$

③ せん断

$$\begin{aligned}
 F &= \int_0^{2\pi} (\text{単位長さあたりの荷重}) \times (\text{方向余弦}) \times (\text{微小長さ}) \\
 &= \int_0^{2\pi} \{ (F_R \cos\theta / R \cdot 1\text{rad}) \times (\cos\theta) + (F_\theta \sin\theta / R \cdot 1\text{rad}) \times (\sin\theta) \} \times (R d\theta) \\
 &= \pi F_R - \pi F_\theta
 \end{aligned}$$

④ ねじり

$$\begin{aligned}
 M &= \int_0^{2\pi} (\text{単位長さあたりの荷重}) \times (\text{腕の長さ}) \times (\text{微小長さ}) \\
 &= \int_0^{2\pi} (-F_\theta / R \cdot 1\text{rad}) \times (R) \times (R d\theta) \\
 &= -2\pi R F_\theta
 \end{aligned}$$

Table 6.5 Loads vs Displacements relations

Model	Loading Conditions	Load	Displacement	Spring rate
A - 1 { 1 conv. Model t = 2 mm }	Tension	855.8kg	1 mm	855.8kg/mm
	Bending	2.399×10^6 kg·mm	1.7453×10^{-2} rad	1.375×10^8 kg·mm/rad
	Shearing (rot. constrain)	1.515×10^5 kg	1 mm	1.515×10^5 kg/mm
	Shearing (rot. free)	1.453×10^5 kg	1 mm	1.453×10^5 kg
	Torsion	2.239×10^9 kg·mm	1.7453×10^{-2} rad	1.283×10^{11} kg·mm/rad
A - 2 { 7 conv. Model t = 2 mm }	Bending	2.766×10^6 kg·mm	1.2217×10^{-1} rad	2.264×10^7 kg·mm/rad
	Shearing	1.362×10^4 kg	7 mm	1.946×10^3 kg/mm
B - 1 { 1 conv. Model t = 3 mm }	Tension	2840.6kg	1 mm	2840.6kg/mm
	Bending	7.928×10^6 kg·mm	1.7453×10^{-2} rad	4.542×10^8 kg·mm/rad
	Shearing (rot. constrain)	2.387×10^5 kg	1 mm	2.387×10^5 kg/mm
	Shearing (rot. free)	2.358×10^5 kg	1 mm	2.358×10^5 kg/mm
B - 2 { 14 conv. Model t = 3 mm }	Shearing	1.166×10^4 kg	14mm	8.329×10^2 kg/mm

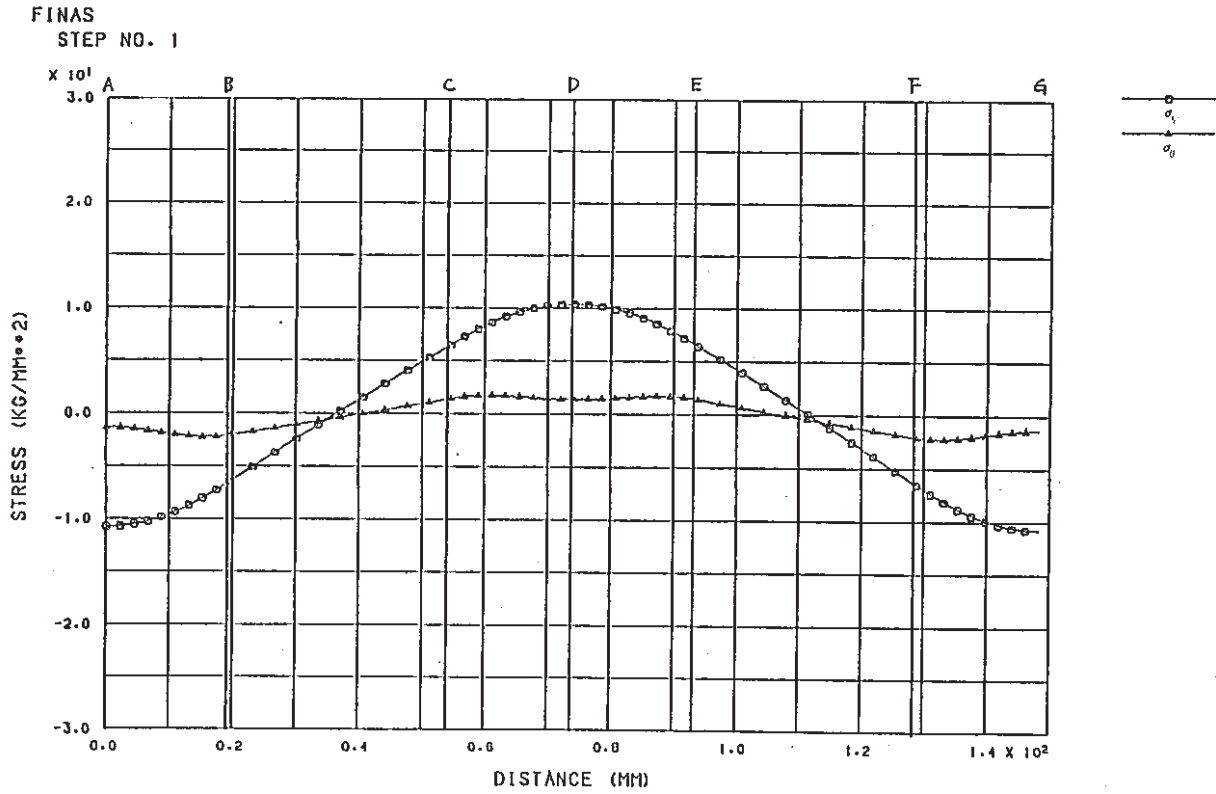


Figure 6.2 Stress distribution (Tension, model A-1, inner surface)
1-pitch, t=2,56el

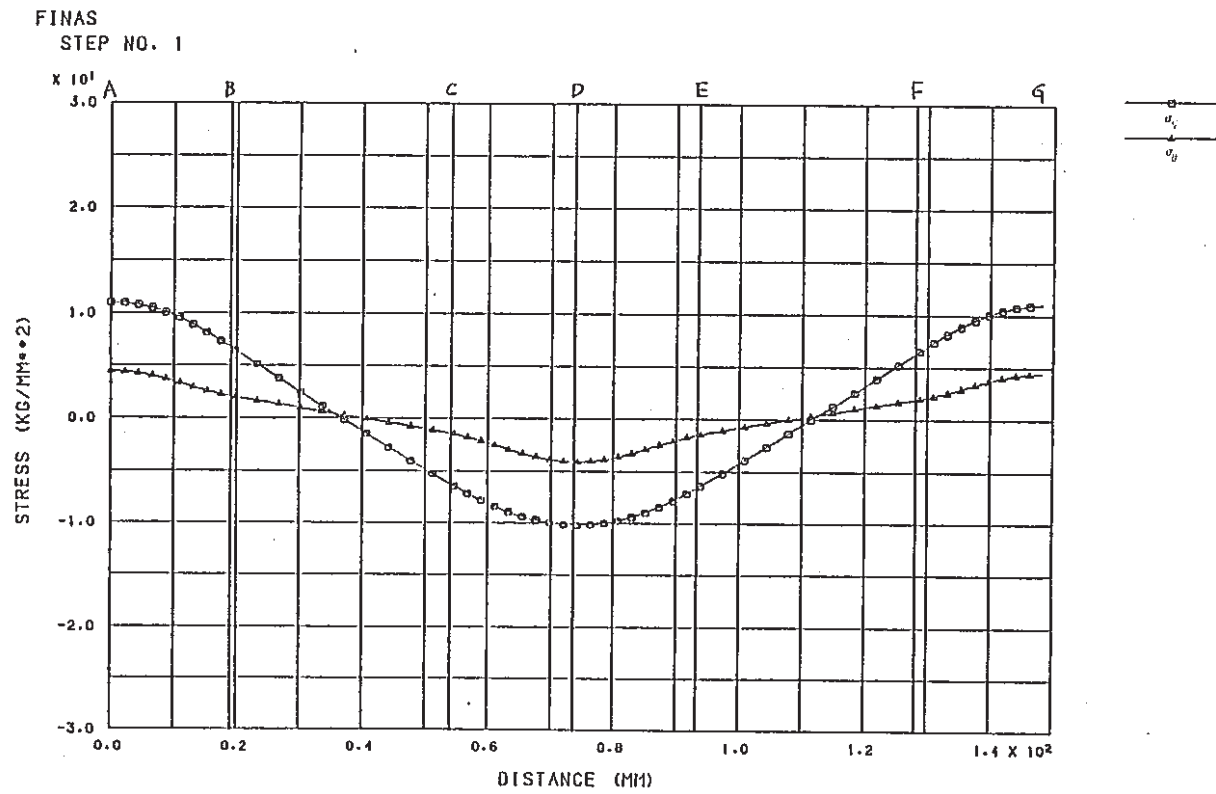


Figure 6.3 Stress distribution (Tension, model A-1, outer surface)
1-pitch, t=2,56el

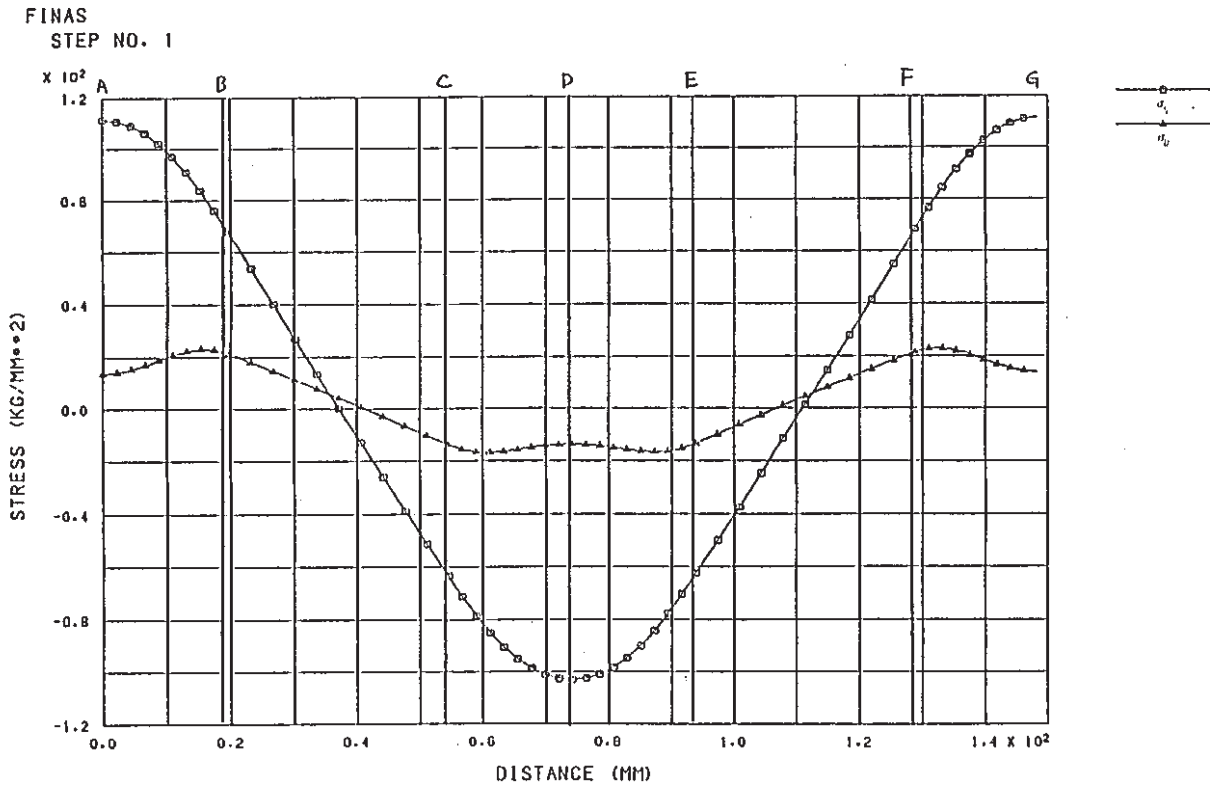


Figure 6.4 Stress distribution (Bending, model A-1, inner surface)
1-pitch, t=2,56e1

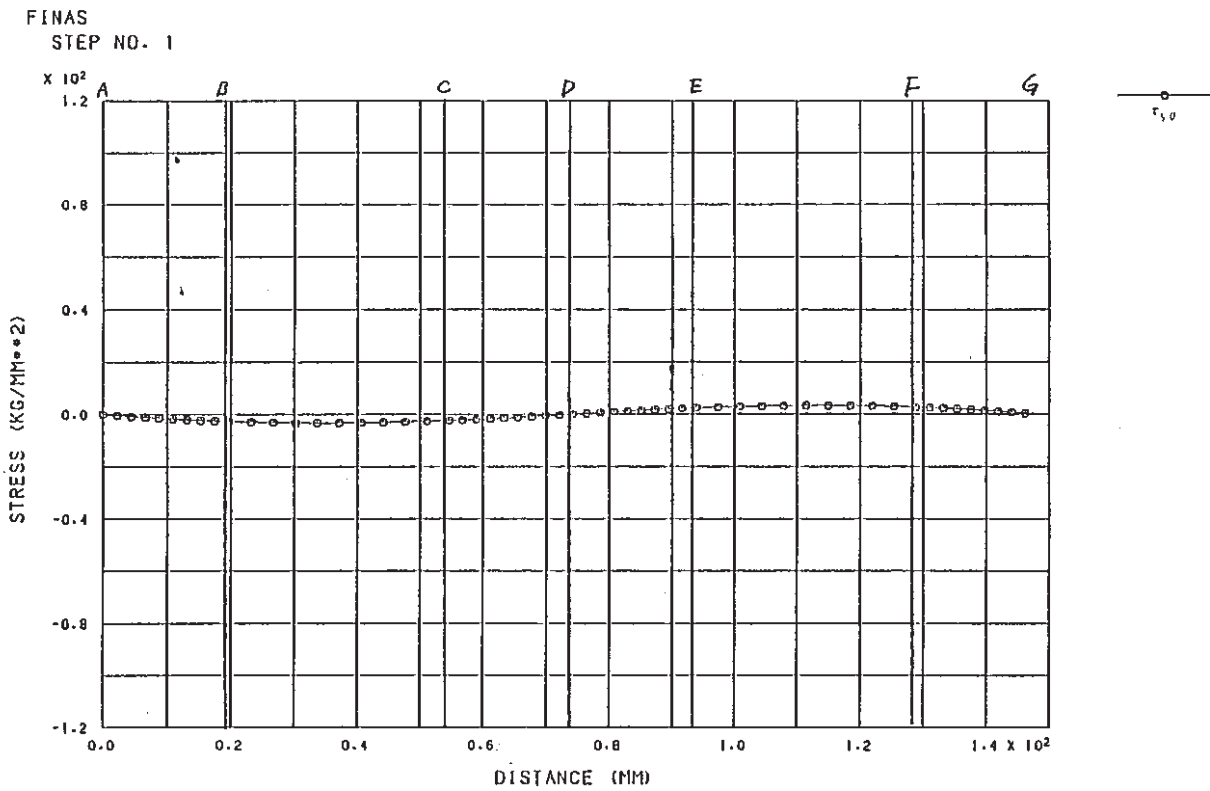


Figure 6.4(a) Stress distribution (Bending, model A-1, inner surface)
1-pitch, t=2,56e1

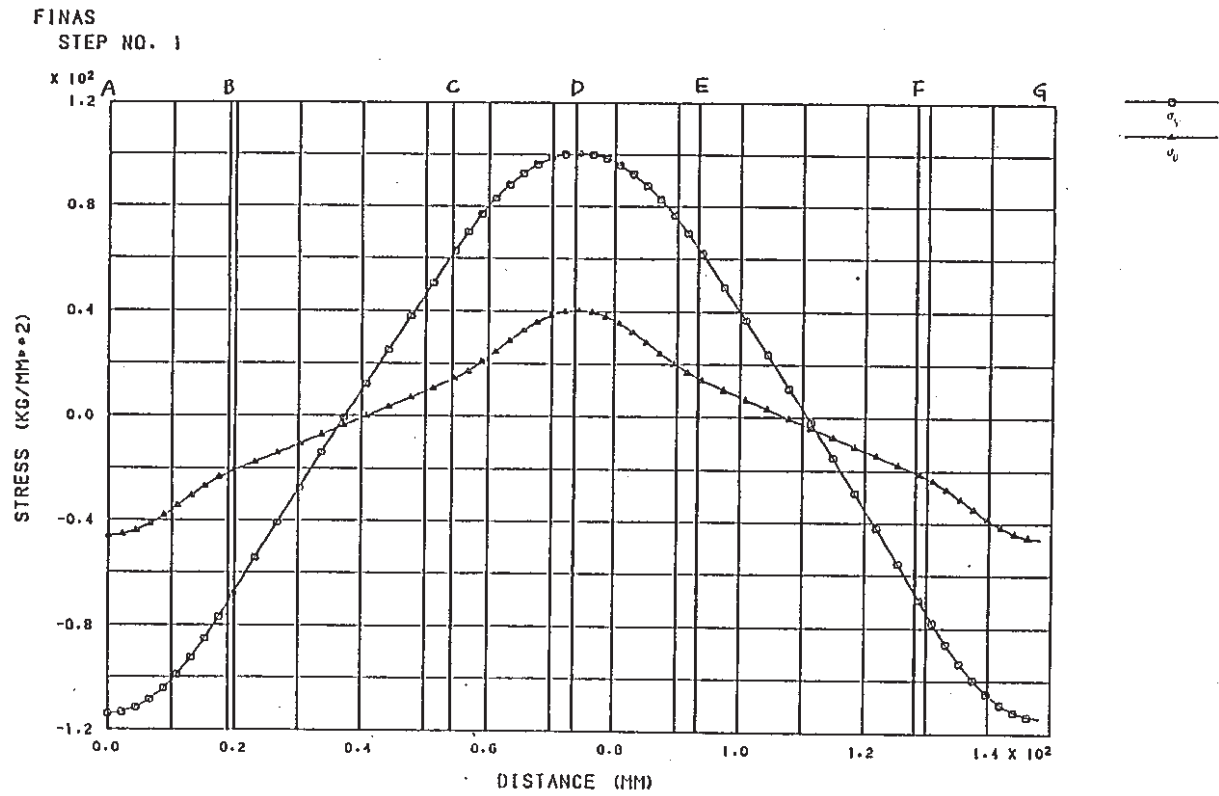


Figure 6.5 Stress distribution (Bending, model A-1, outer surface)
1-pitch, t=2, 56el

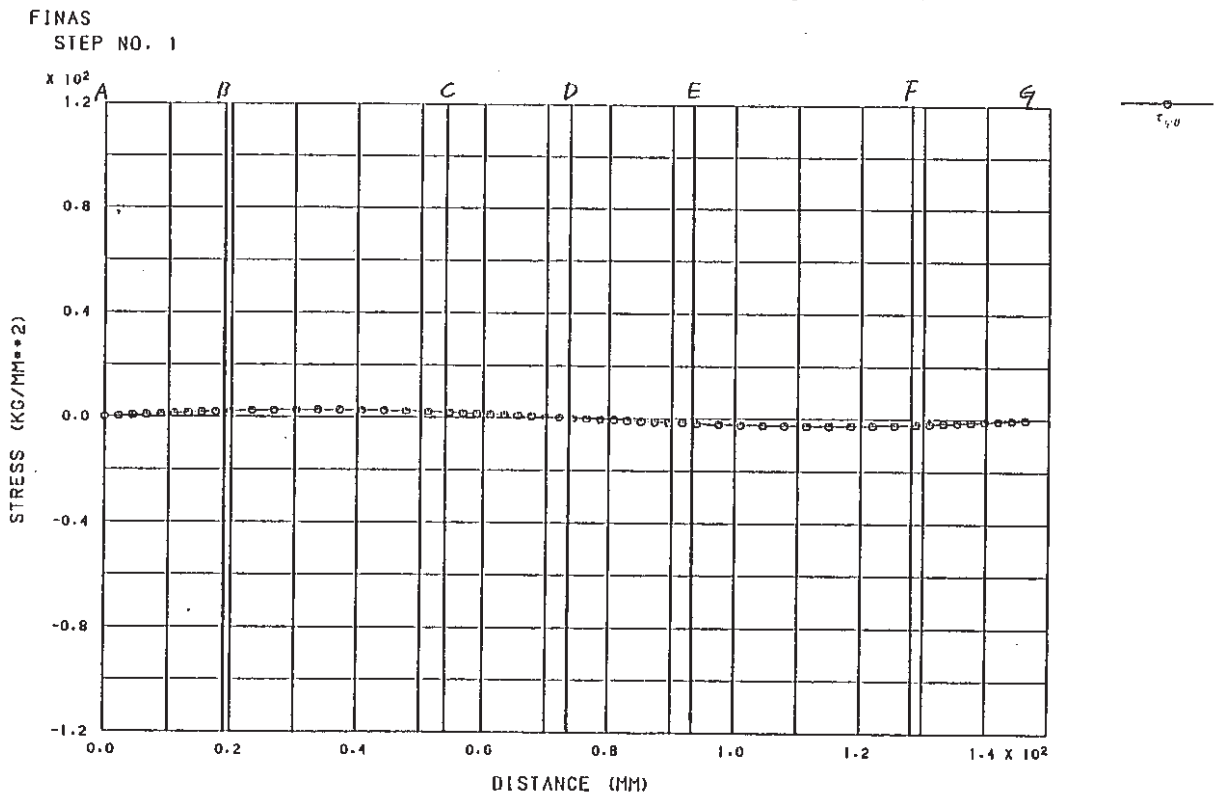


Figure 6.5 (a) Stress distribution (Bending, model A-1, outer surface)
1-pitch, t=2, 56el

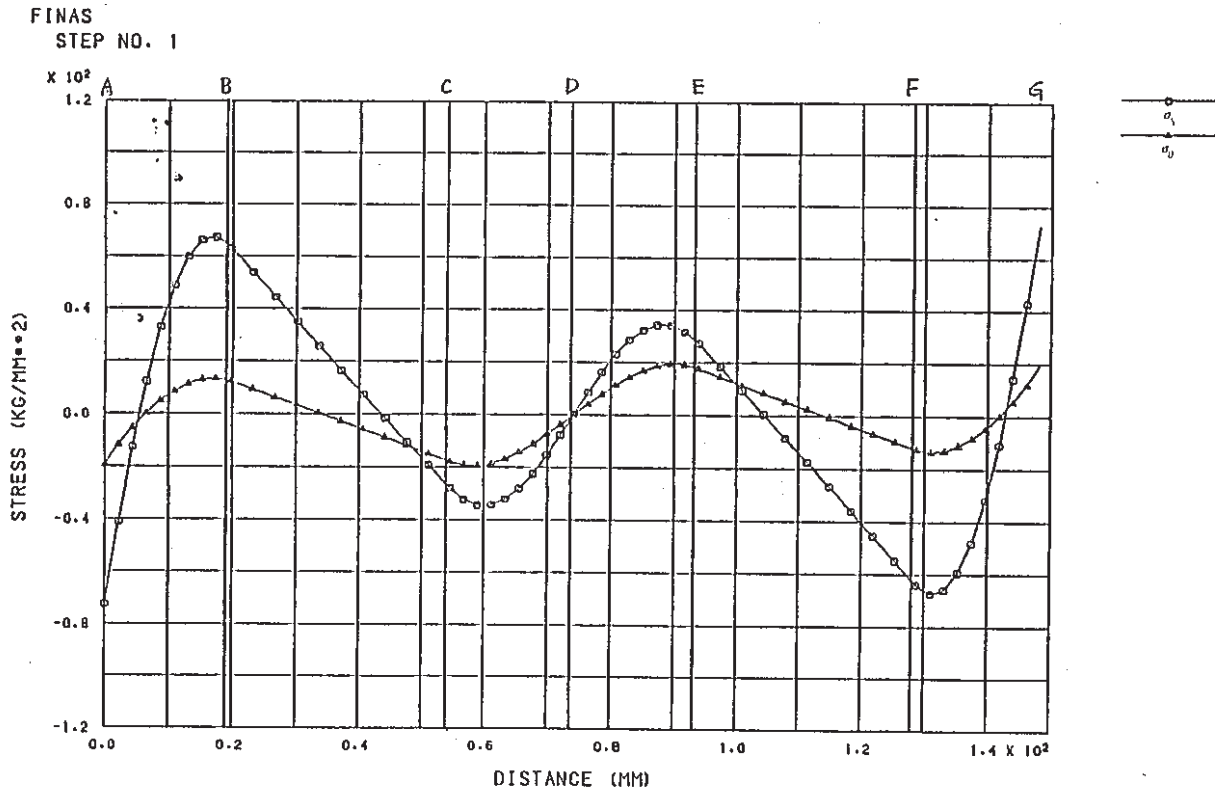


Figure 6.6 Stress distribution

(Shearing (rotation constrain), model A-1, inner surface)

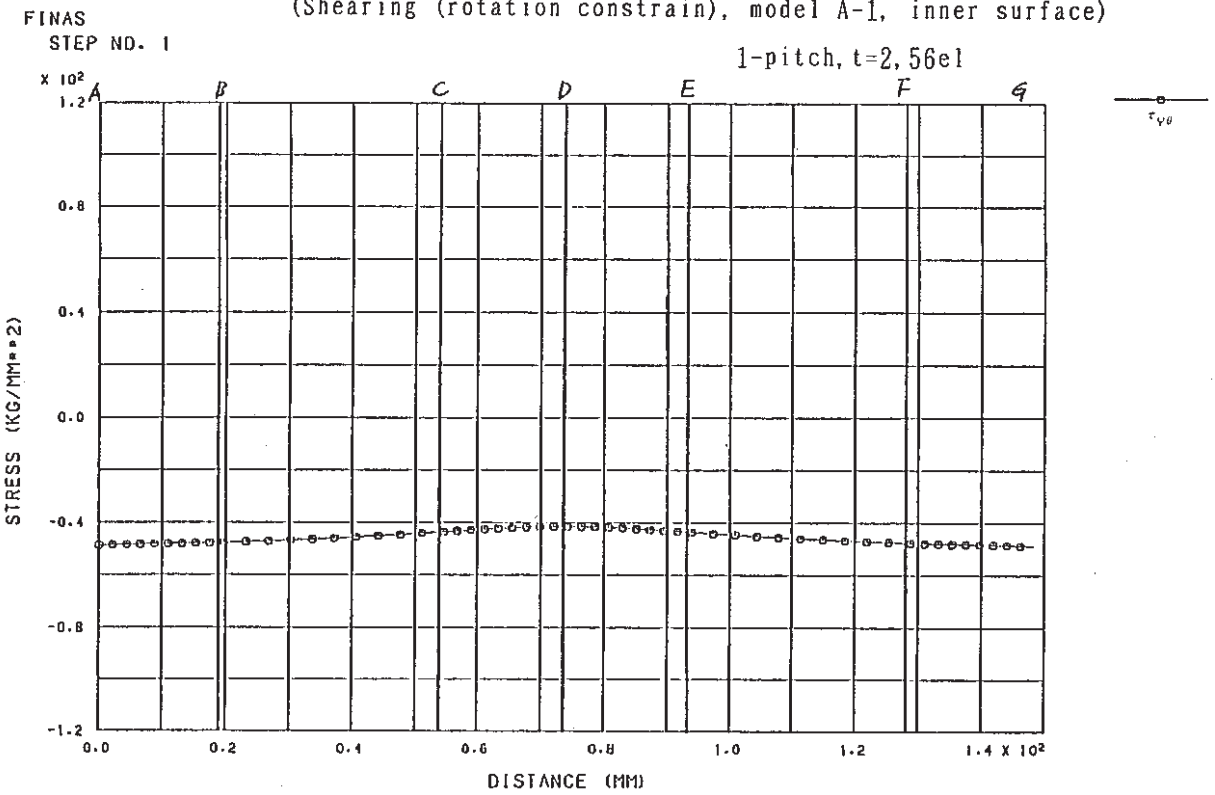


Figure 6.6 (a) Stress distribution

(Shearing (rotation constrain), model A-1, inner surface)

1-pitch, t=2,56el

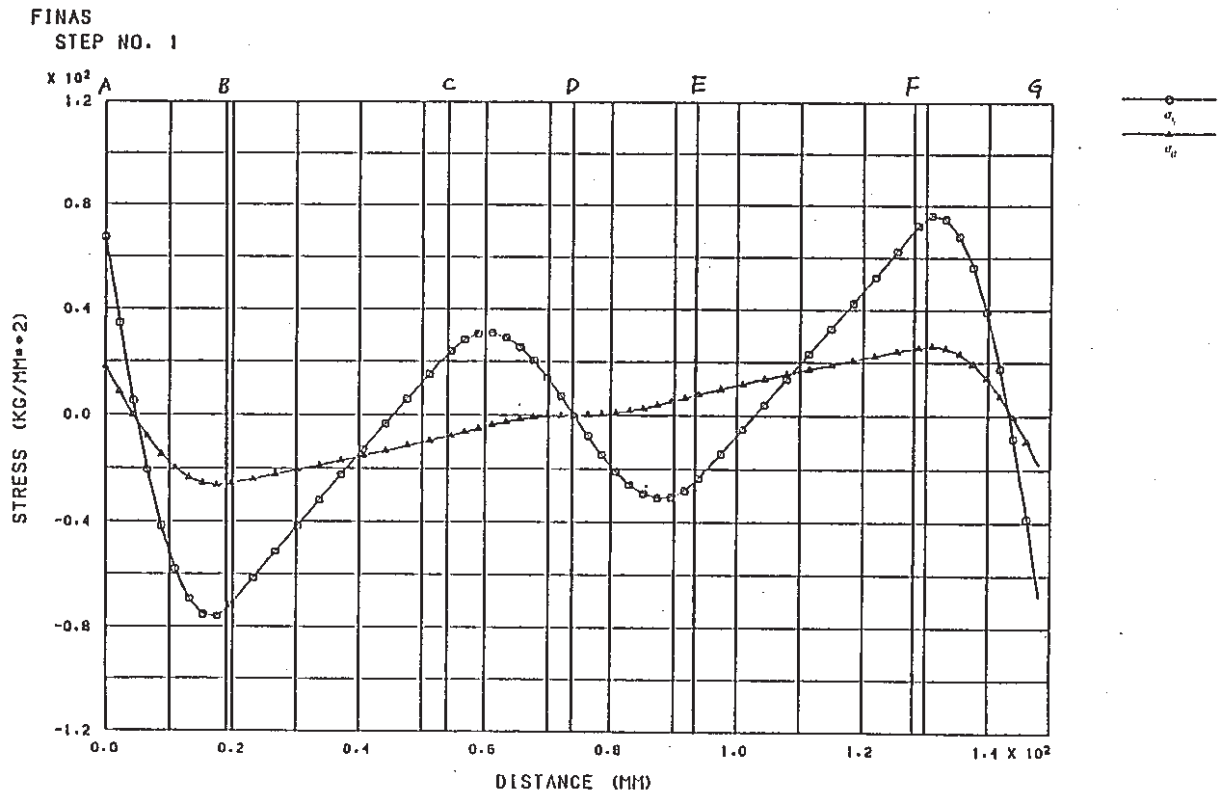


Figure 6.7 Stress distribution

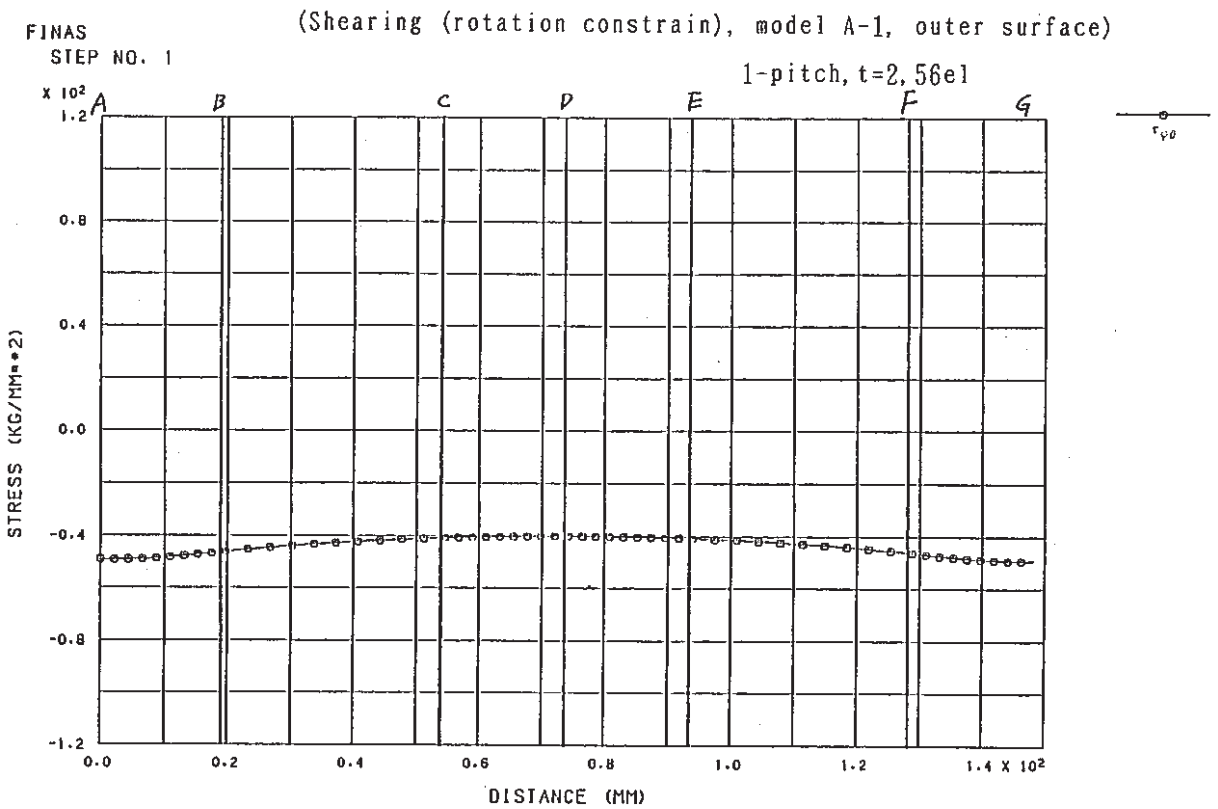


Figure 6.7(a) Stress distribution

(Shearing (rotation constrain), model A-1, outer surface)

1-pitch, t=2,56el

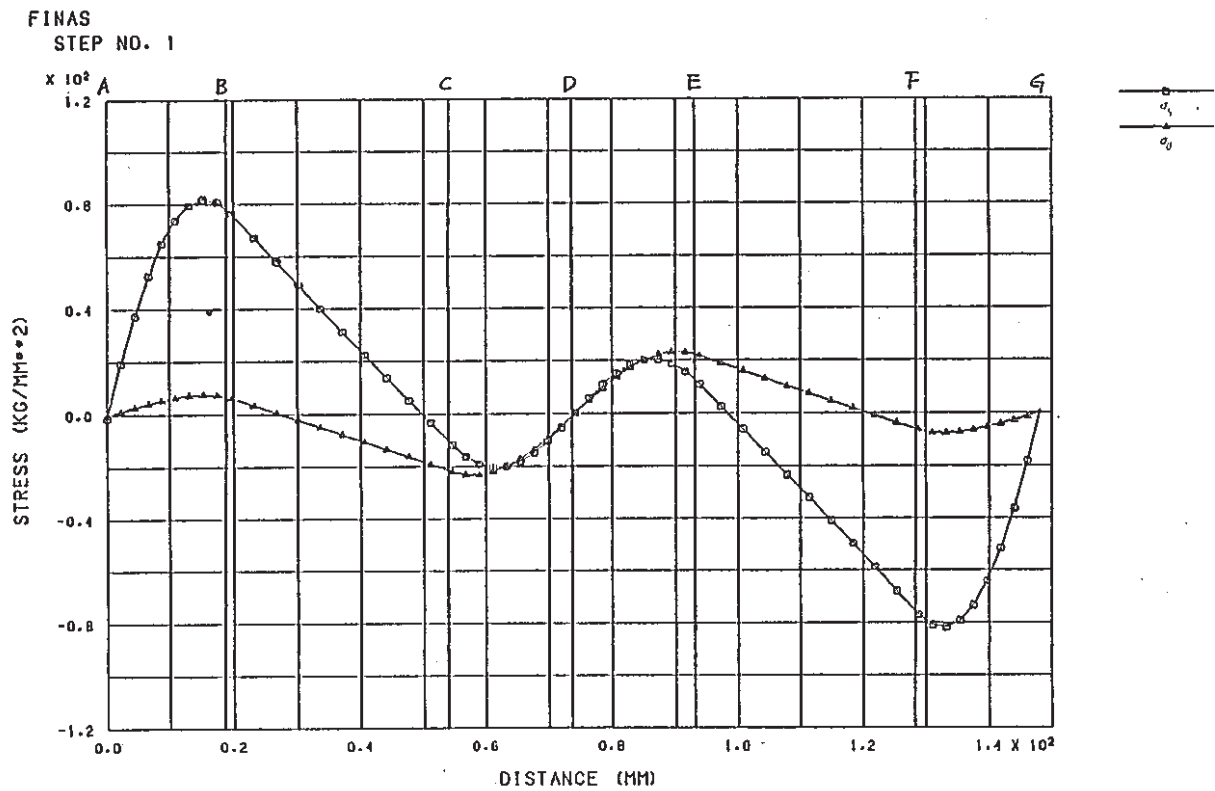


Figure 6.8 Stress distribution
(Shearing (rotation free), model A-1, inner surface)

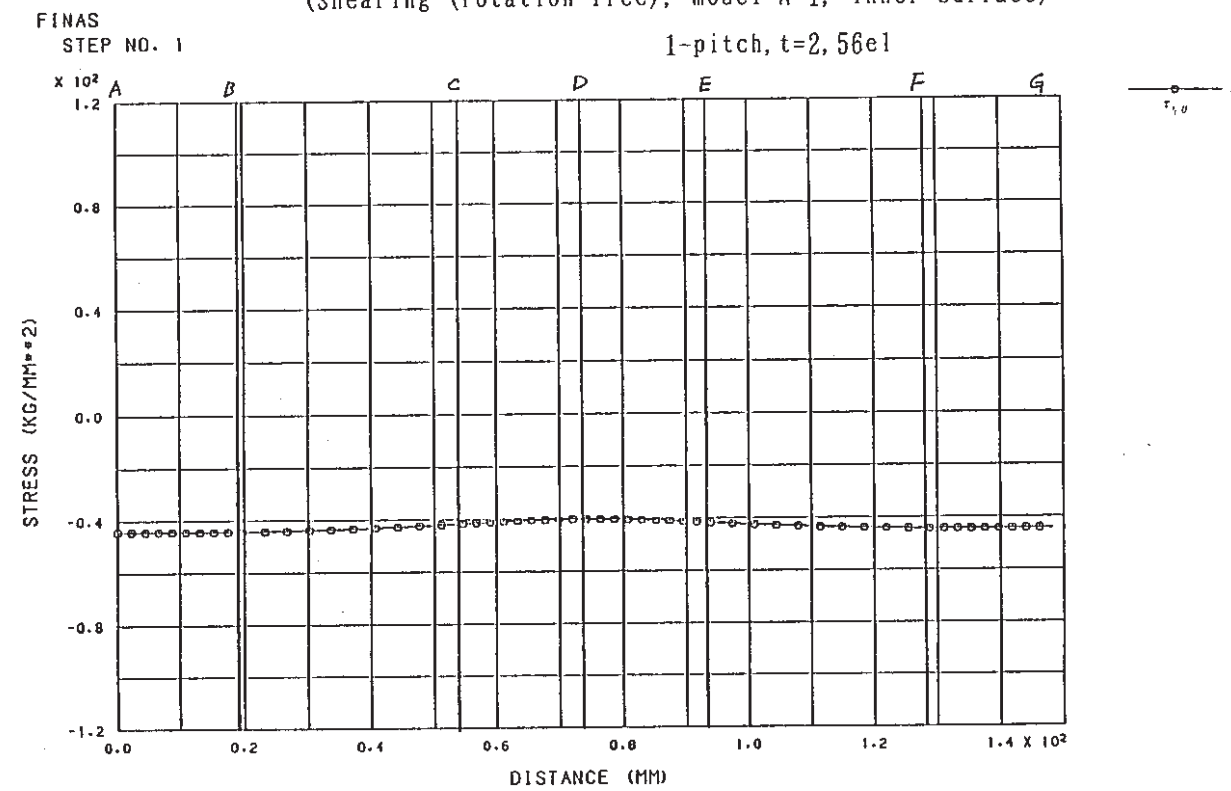
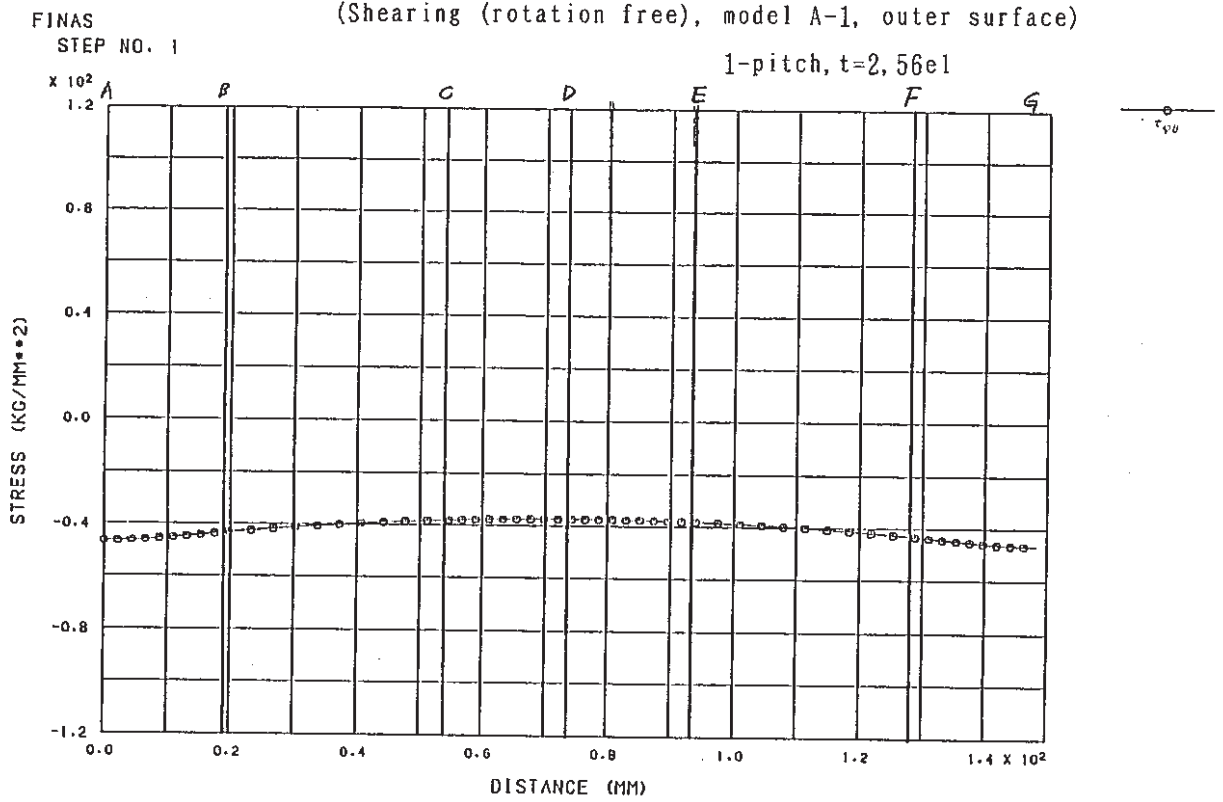
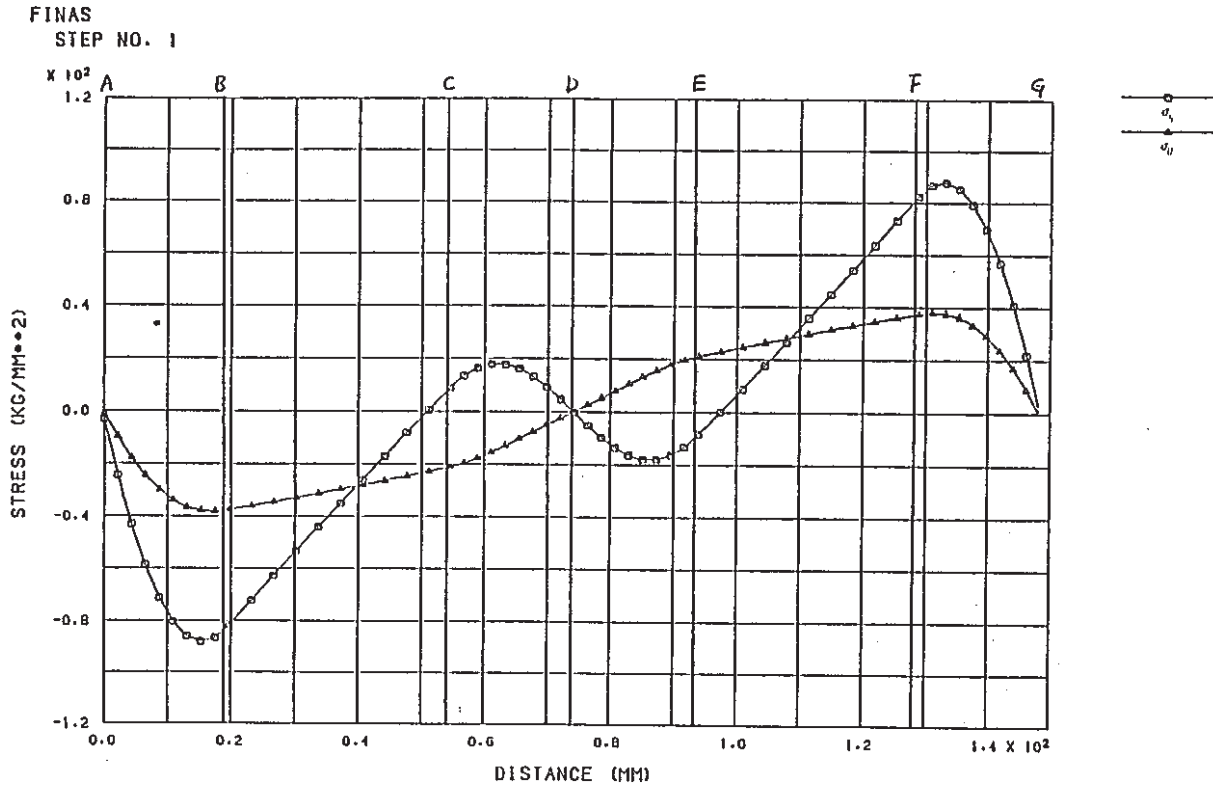


Figure 6.8 (a) Stress distribution
(Shearing (rotation free), model A-1, inner surface)
1-pitch, t=2, 56el



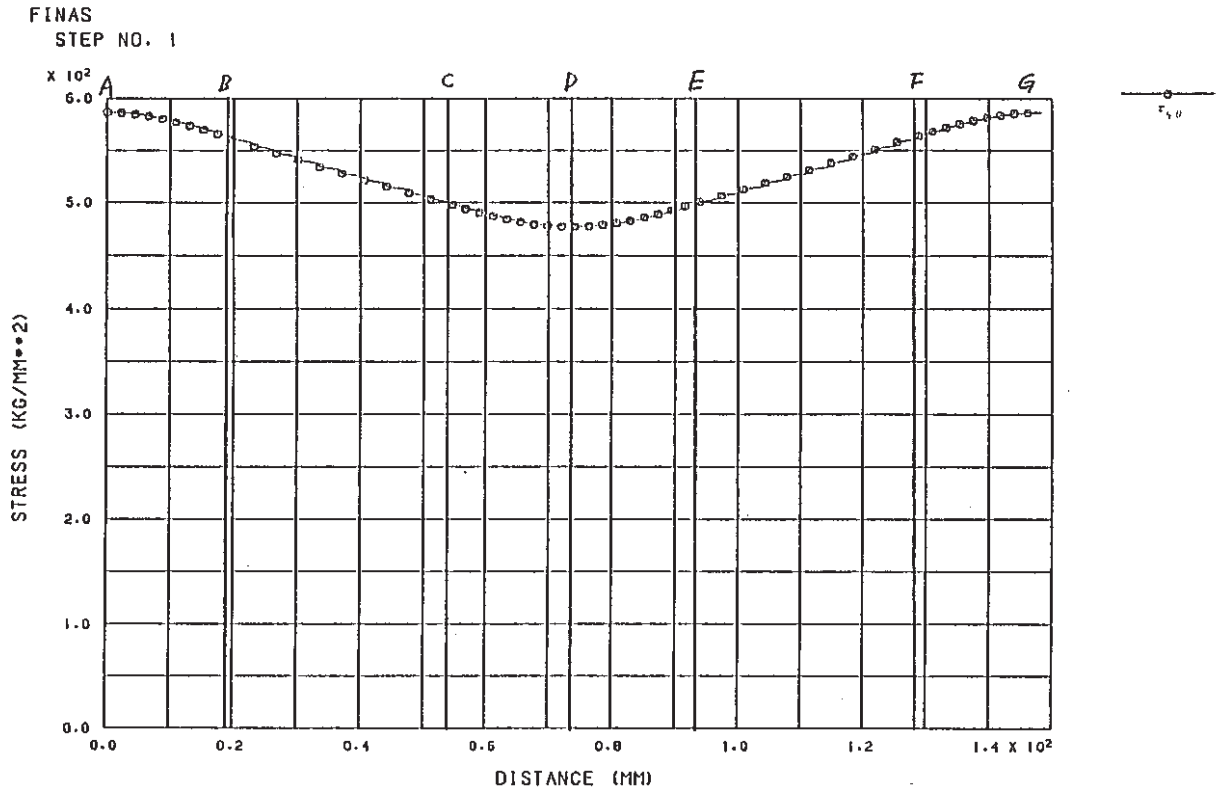


Figure 6.10 Stress distribution (Torsion, model A-1, inner surface)
1-pitch, t=2,56el

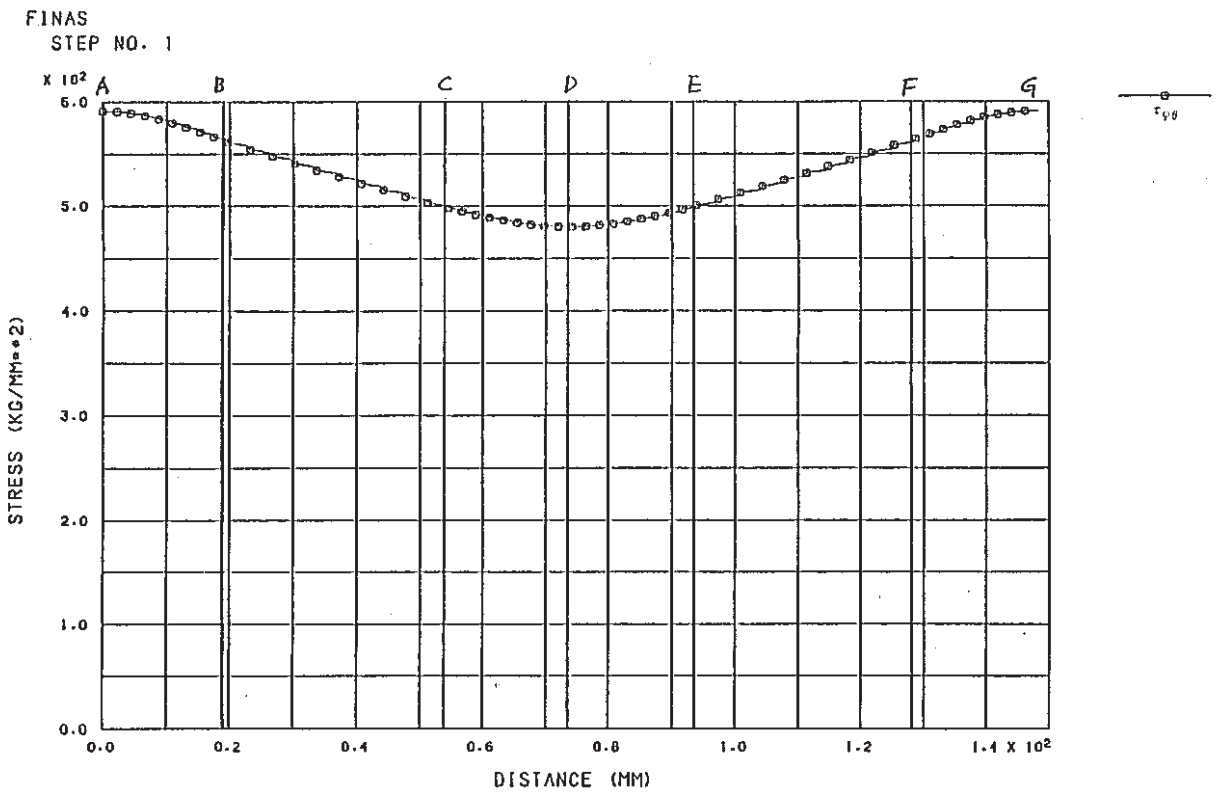


Figure 6.11 Stress distribution (Torsion, model A-1, outer surface)
1-pitch, t=2,56el

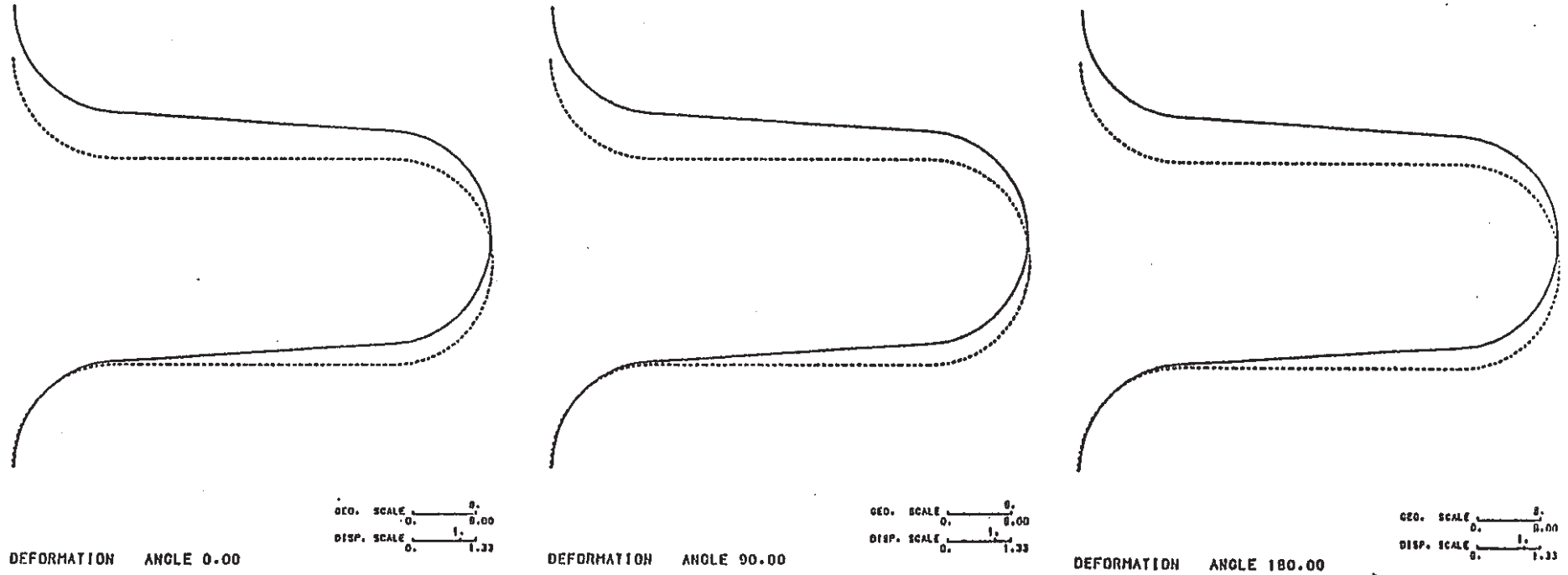


Figure 6.12 Deformed Shape (Tension, Model A-1)

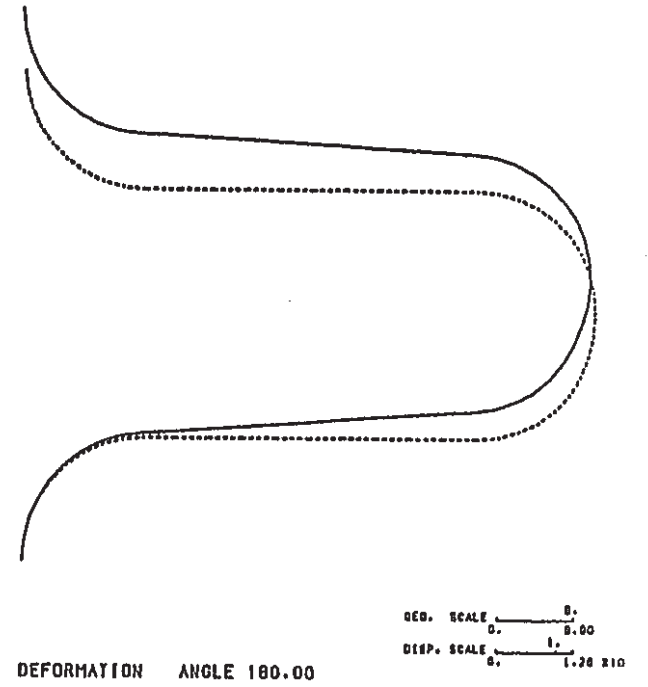
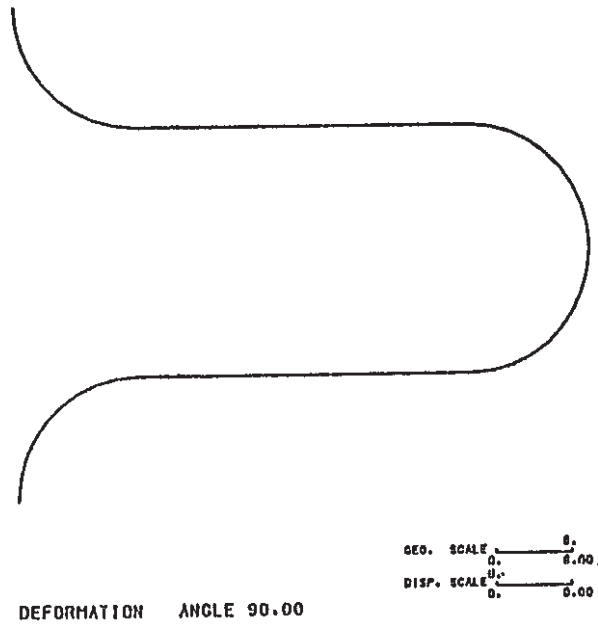
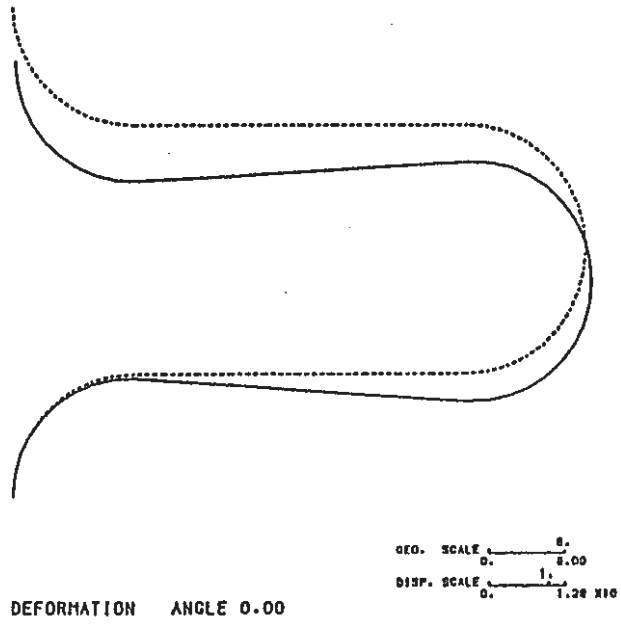


Figure 6.13 Deformed Shape (Bending, Model A-1)

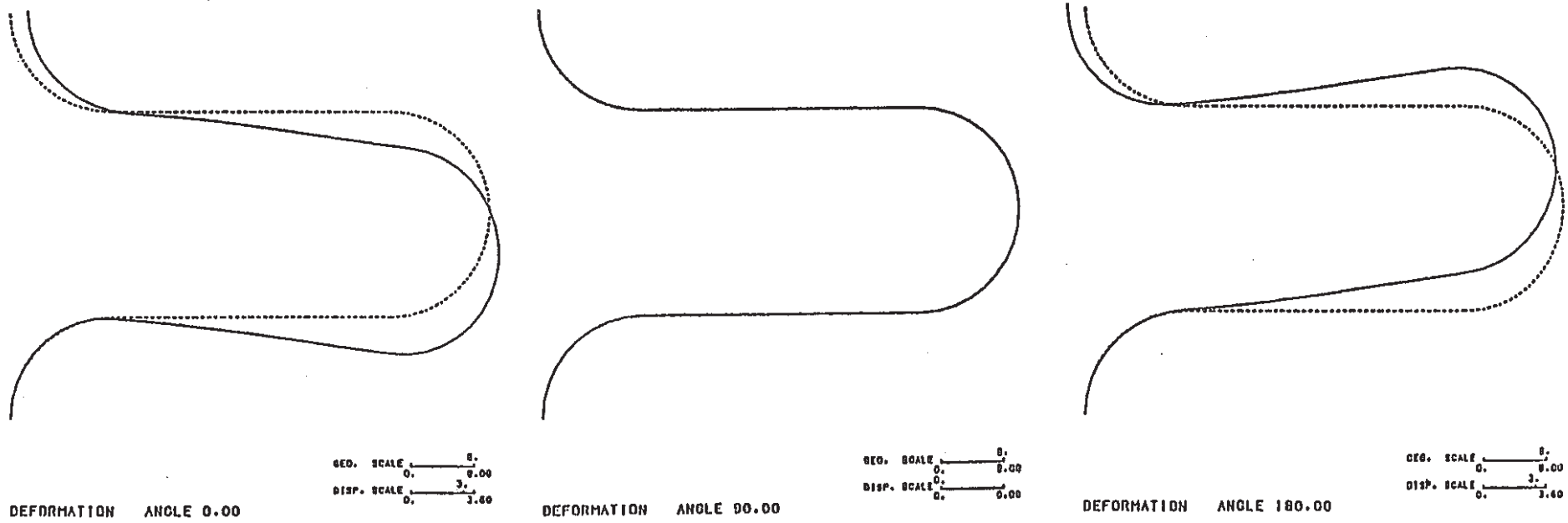


Figure 6.14 Deformed Shape (Shearing (rotation constrain), Model A-1)

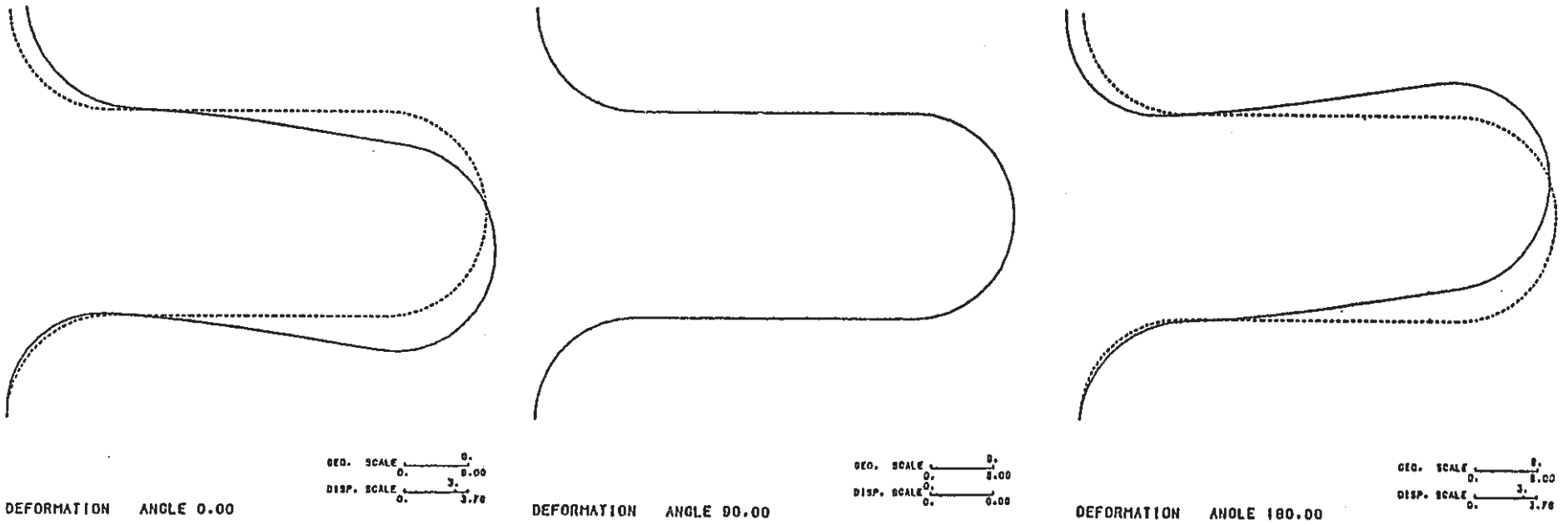


Figure 6.15 Deformed Shape (Shearing (rotation free), Model A-1)

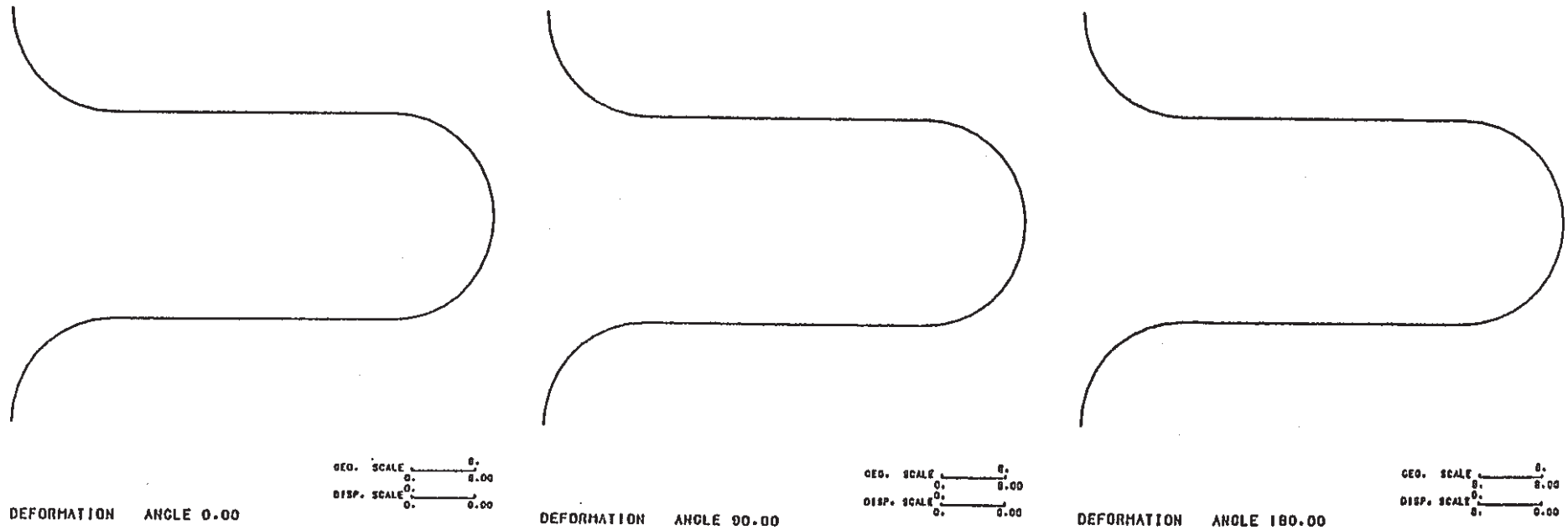
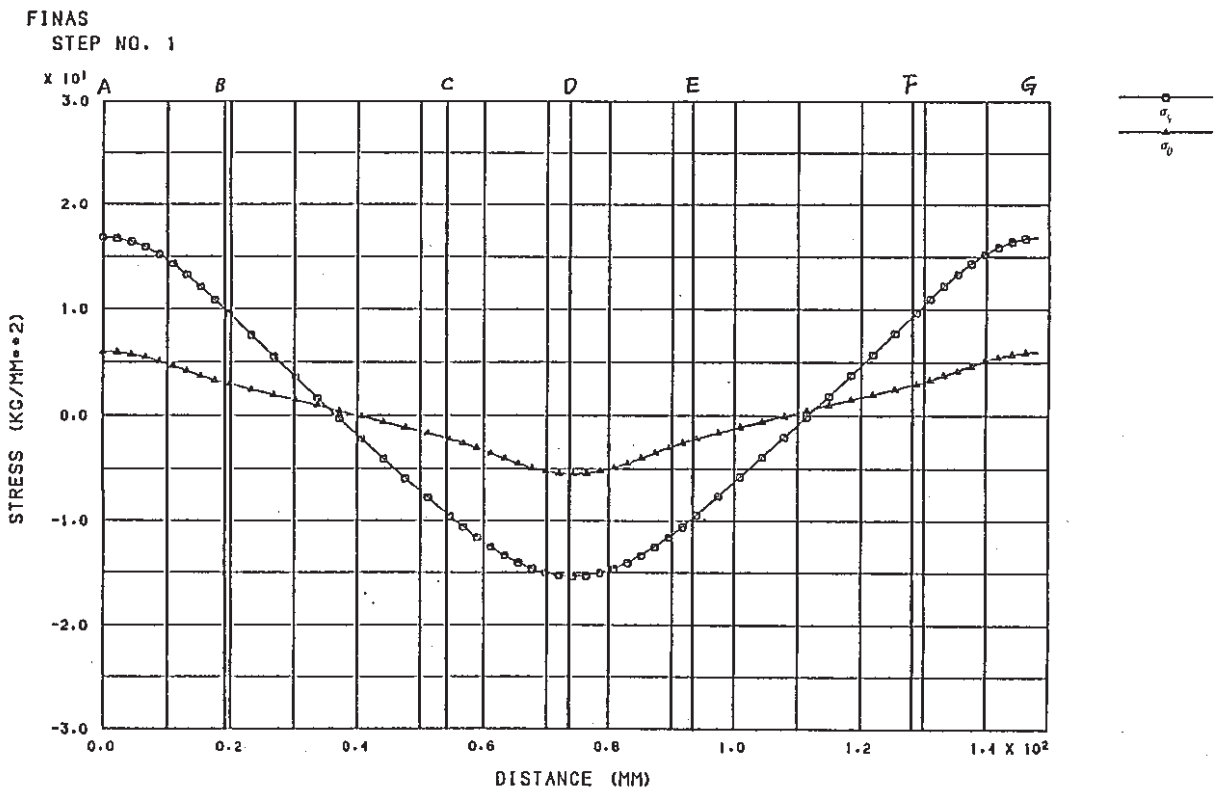
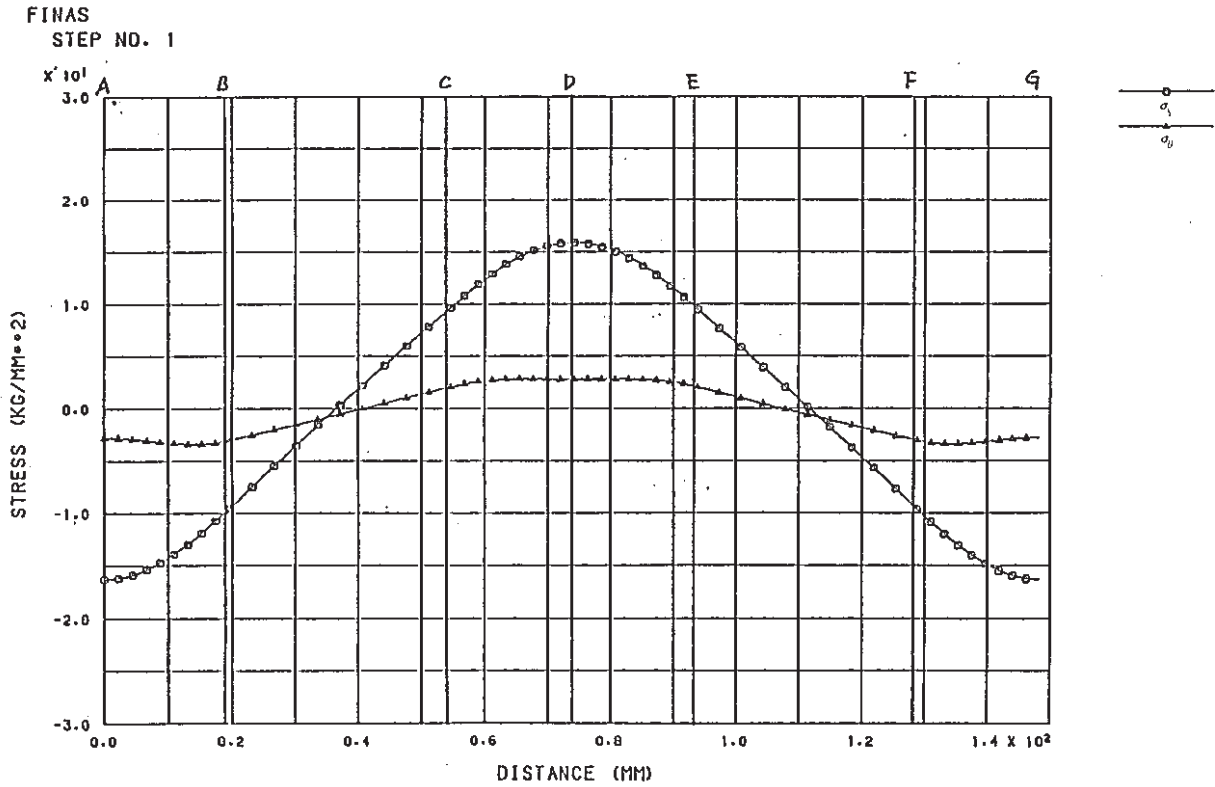
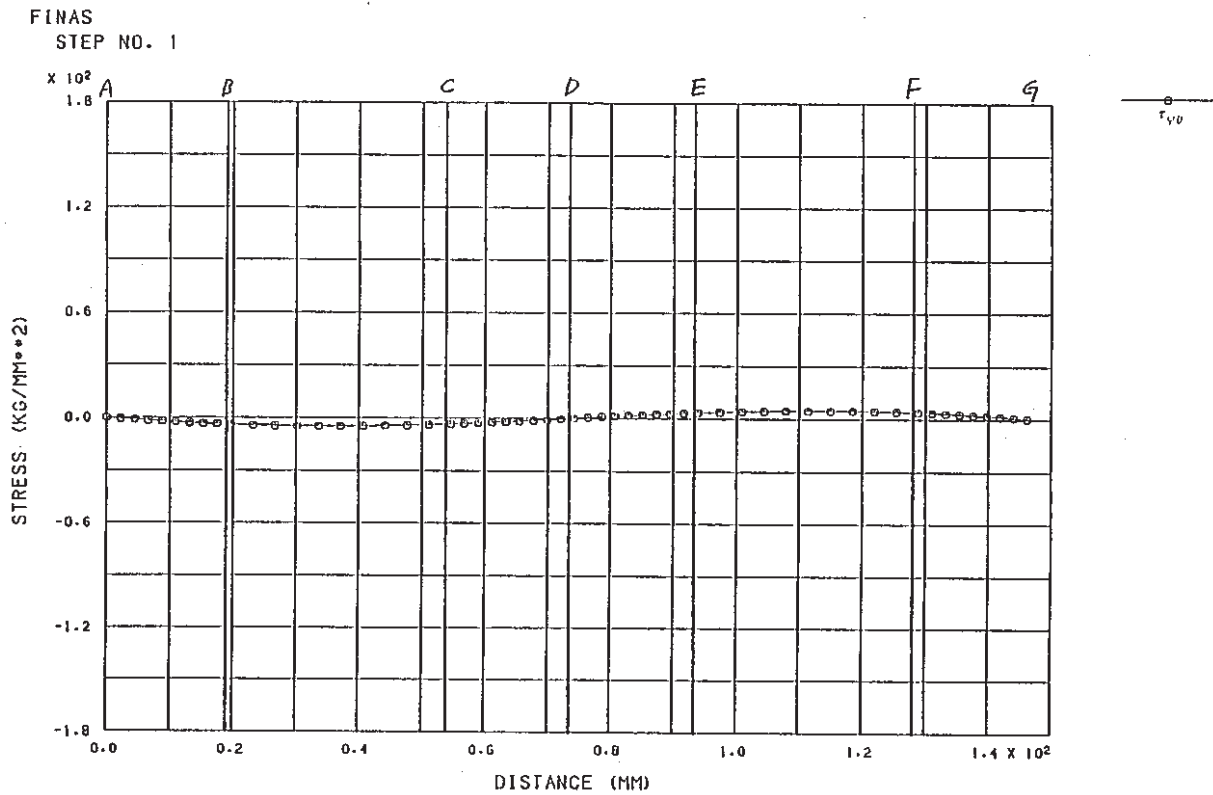
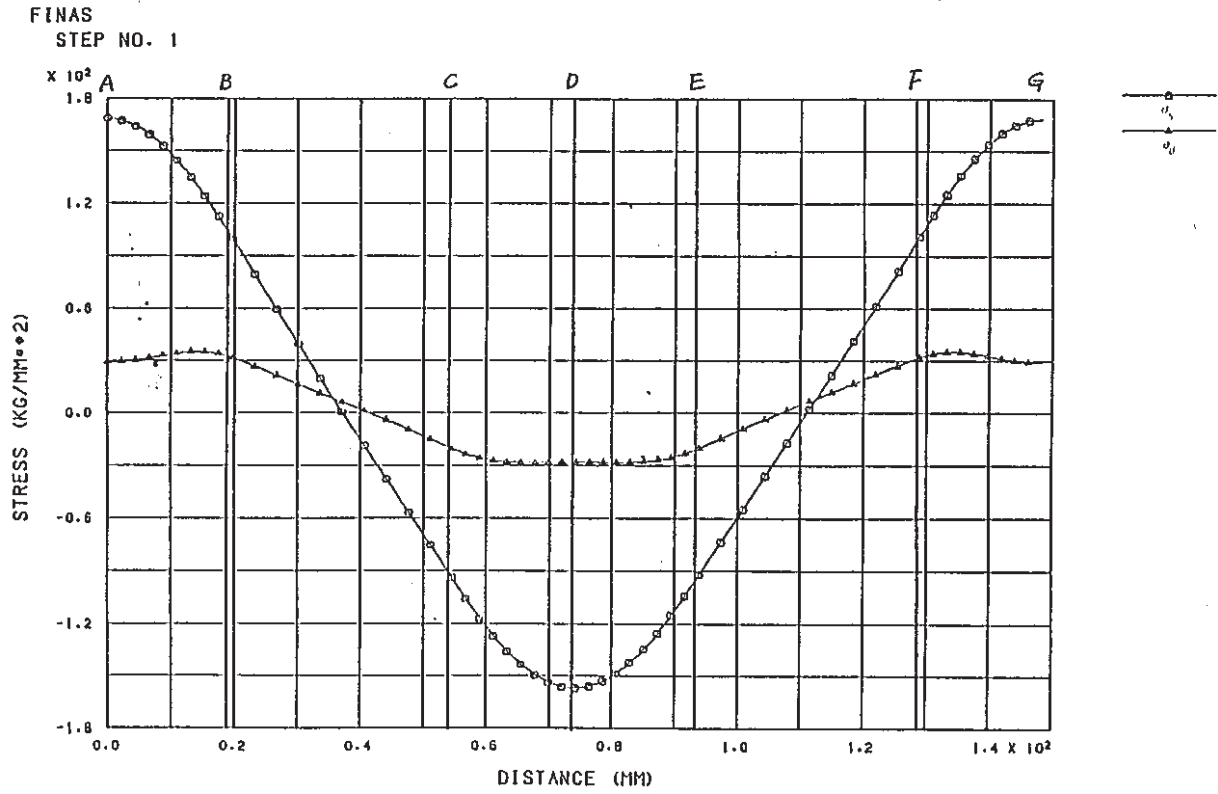
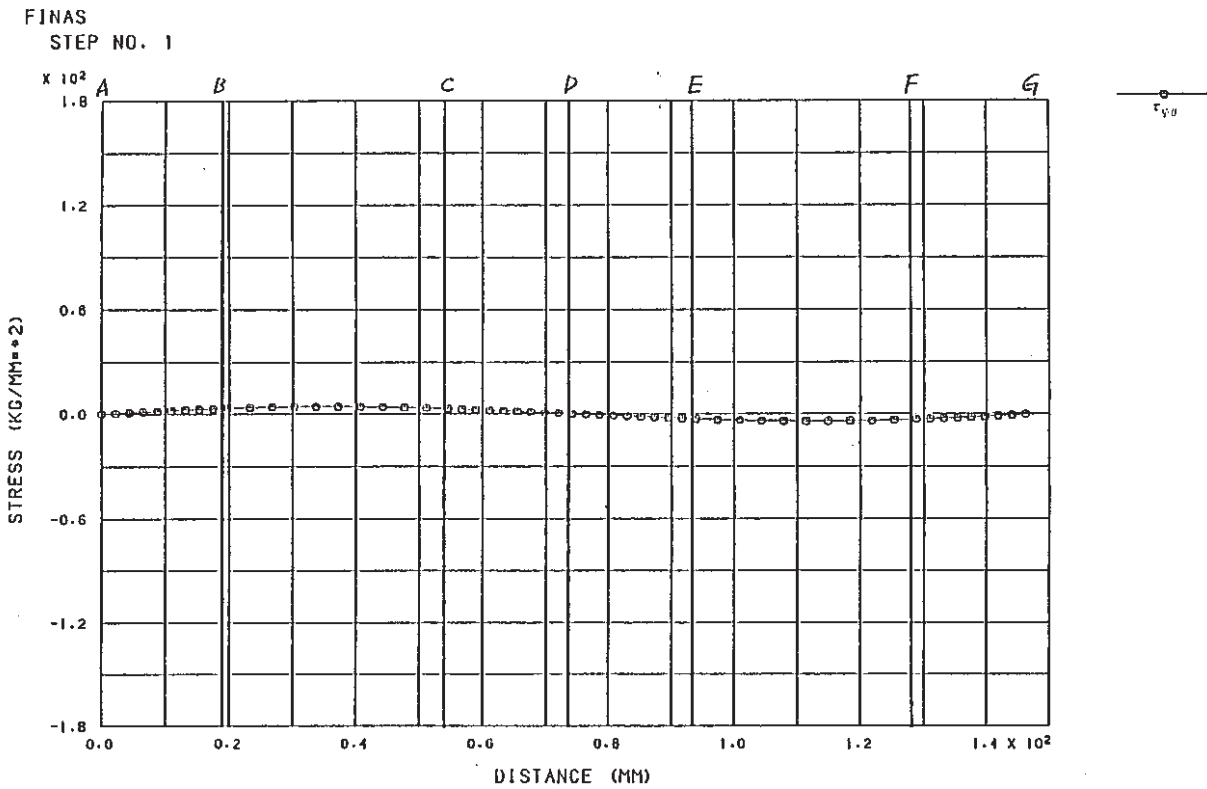
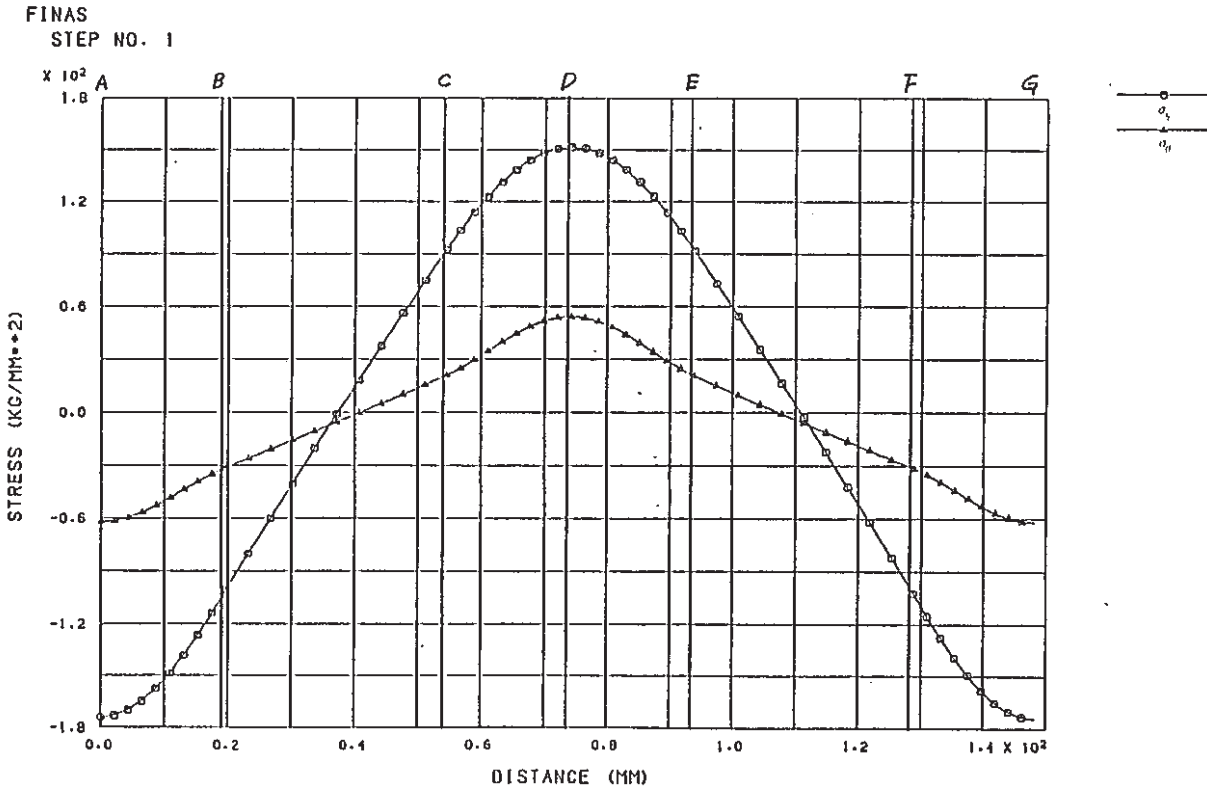
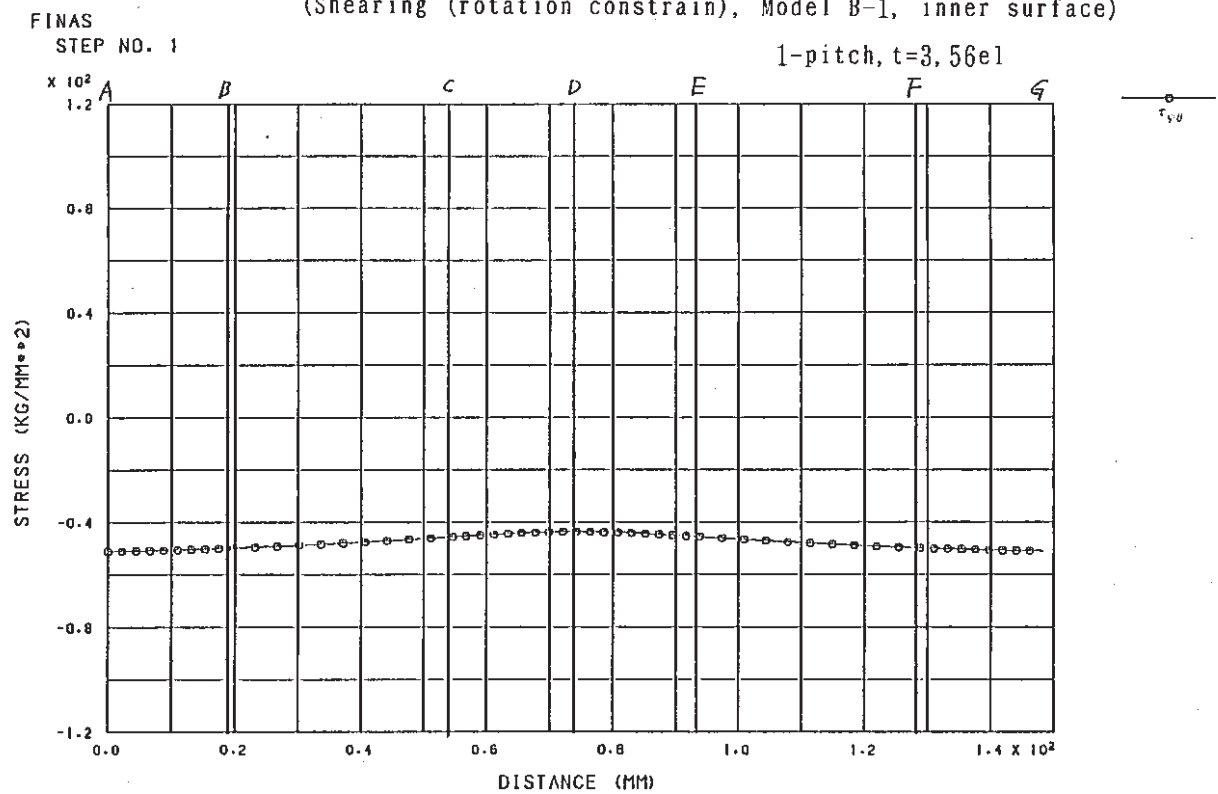
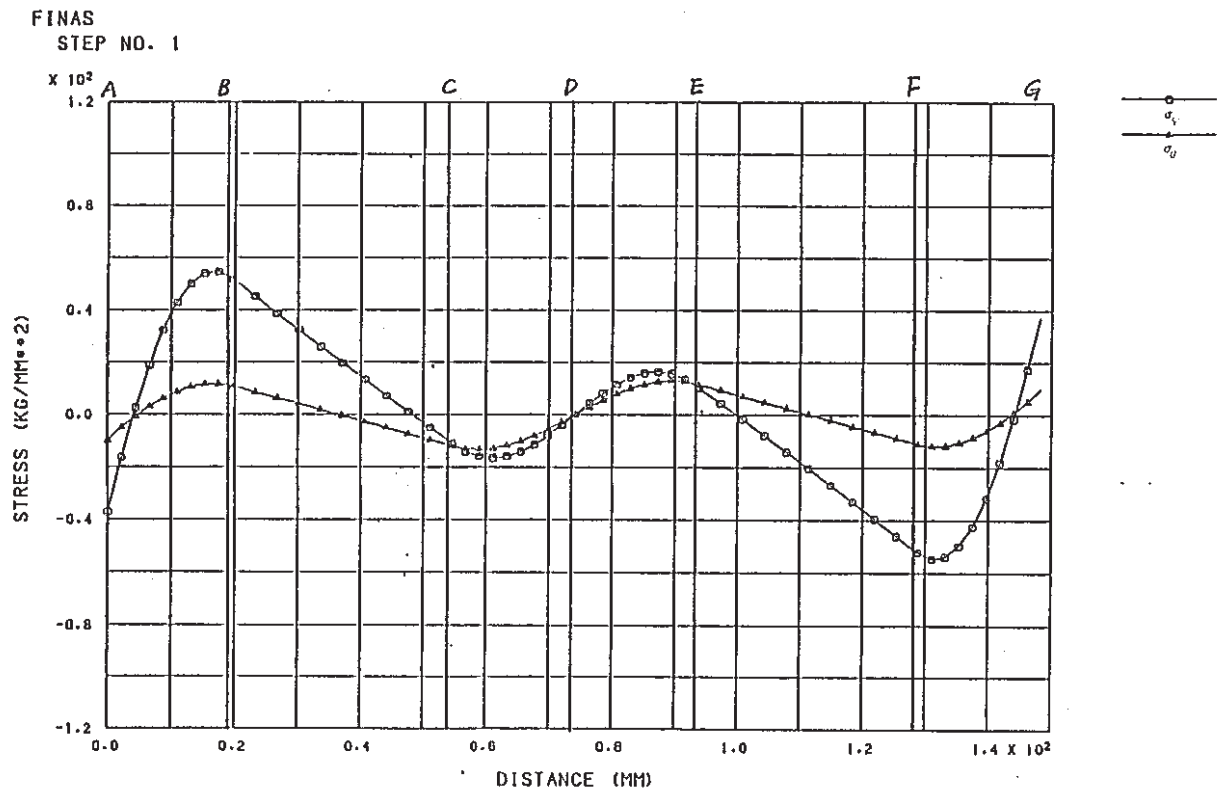


Figure 6.16 Deformed Shape (Torsion, Model A-1)









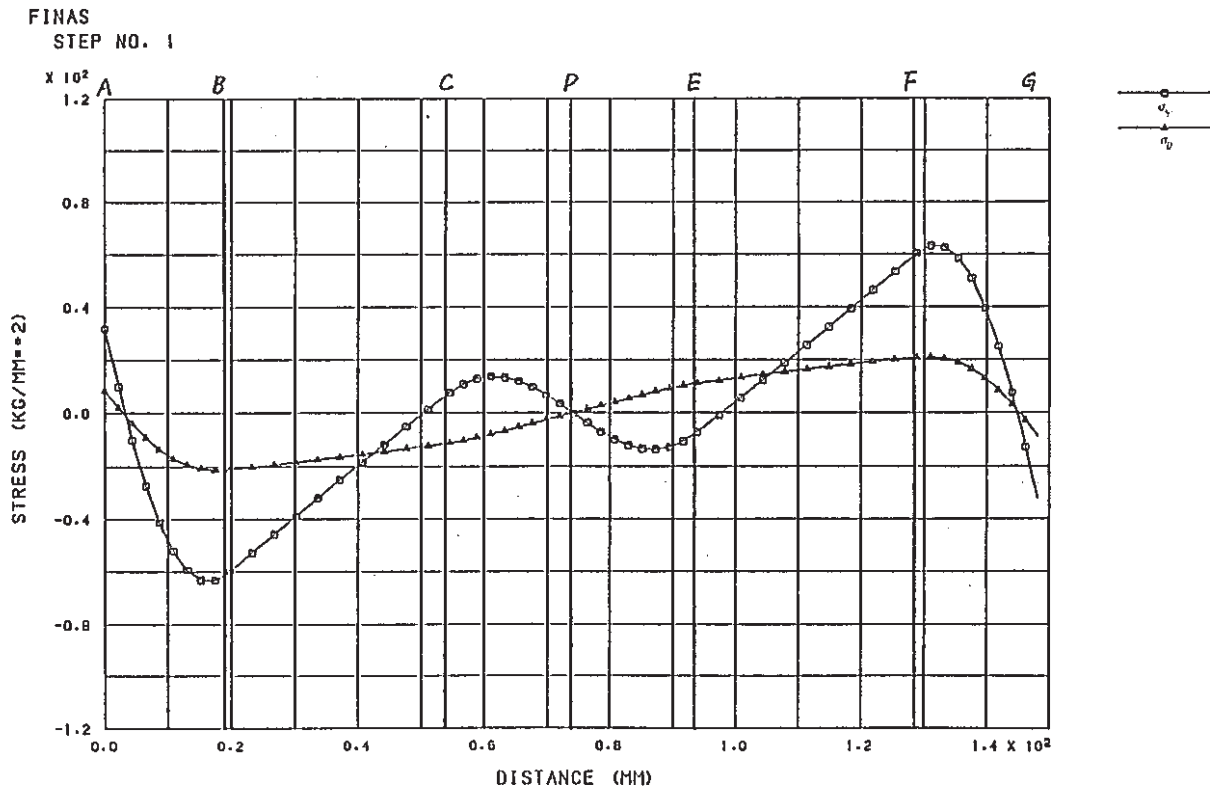


Figure 6.22 Stress distribution
(Shearing (rotation constrain), Model B-1, outer surface)

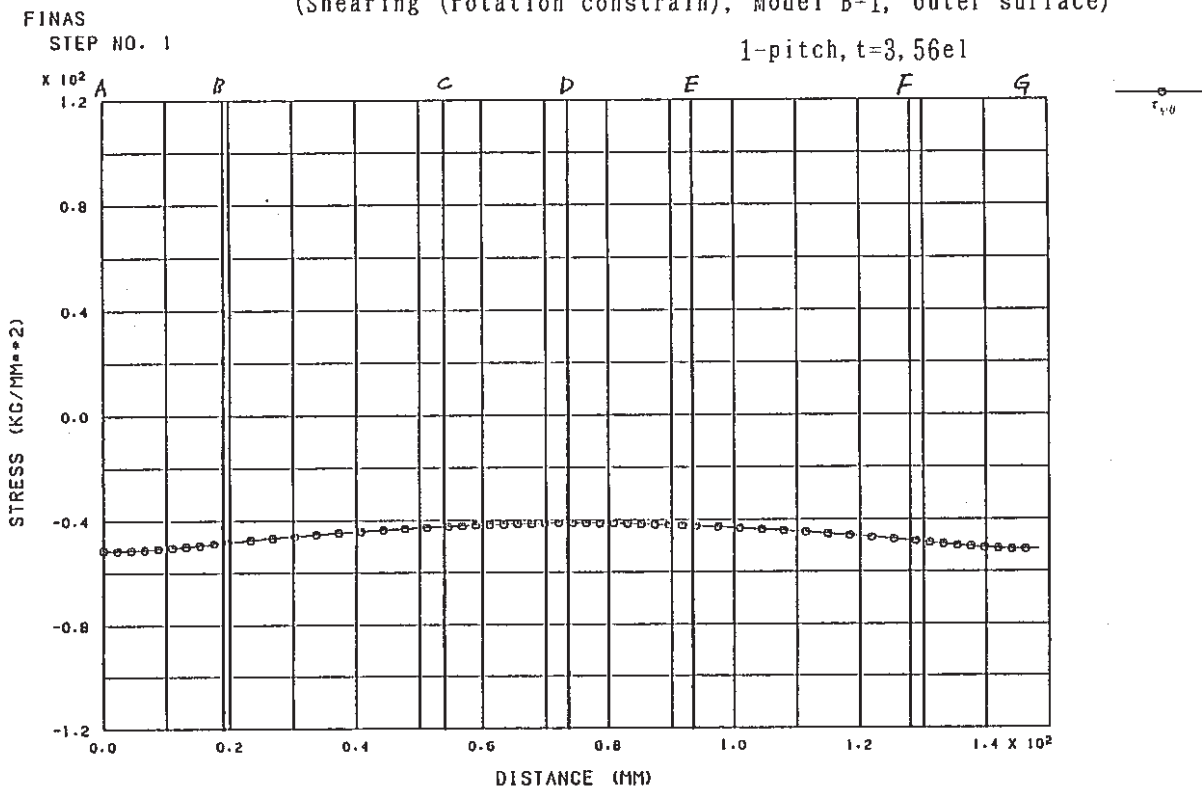
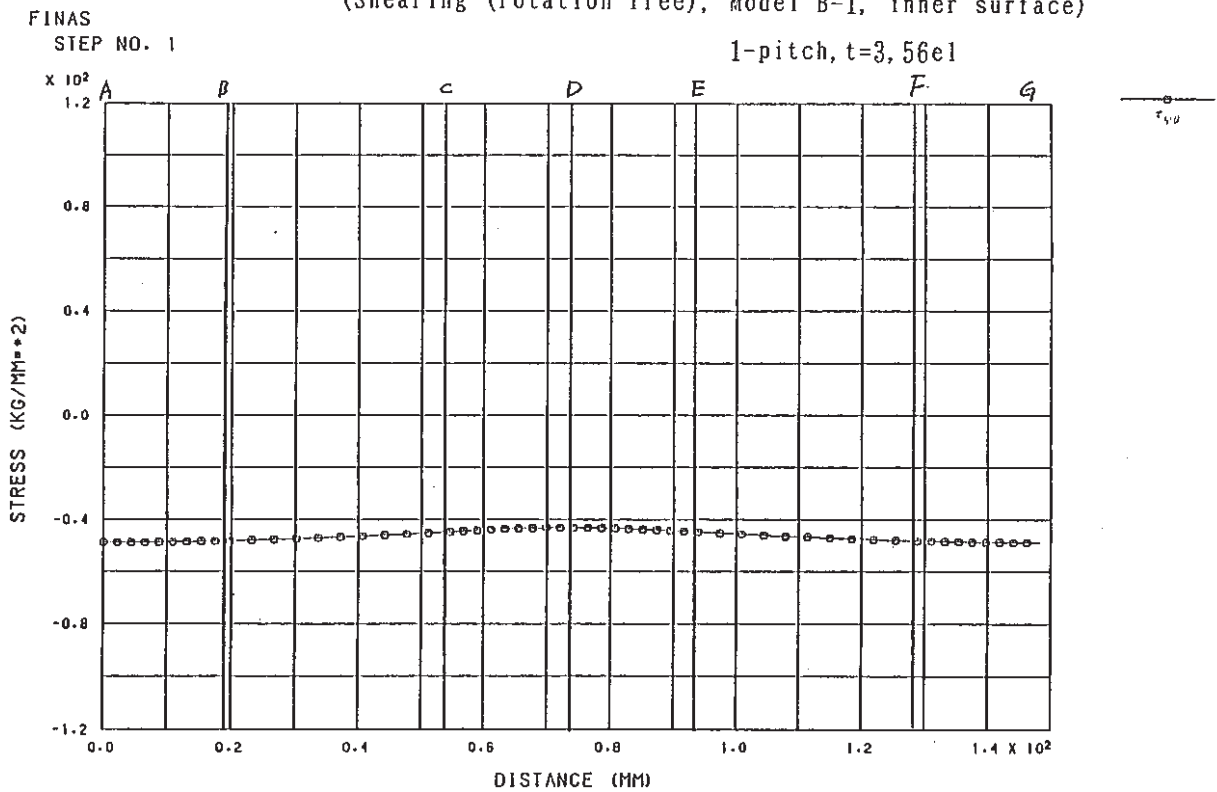
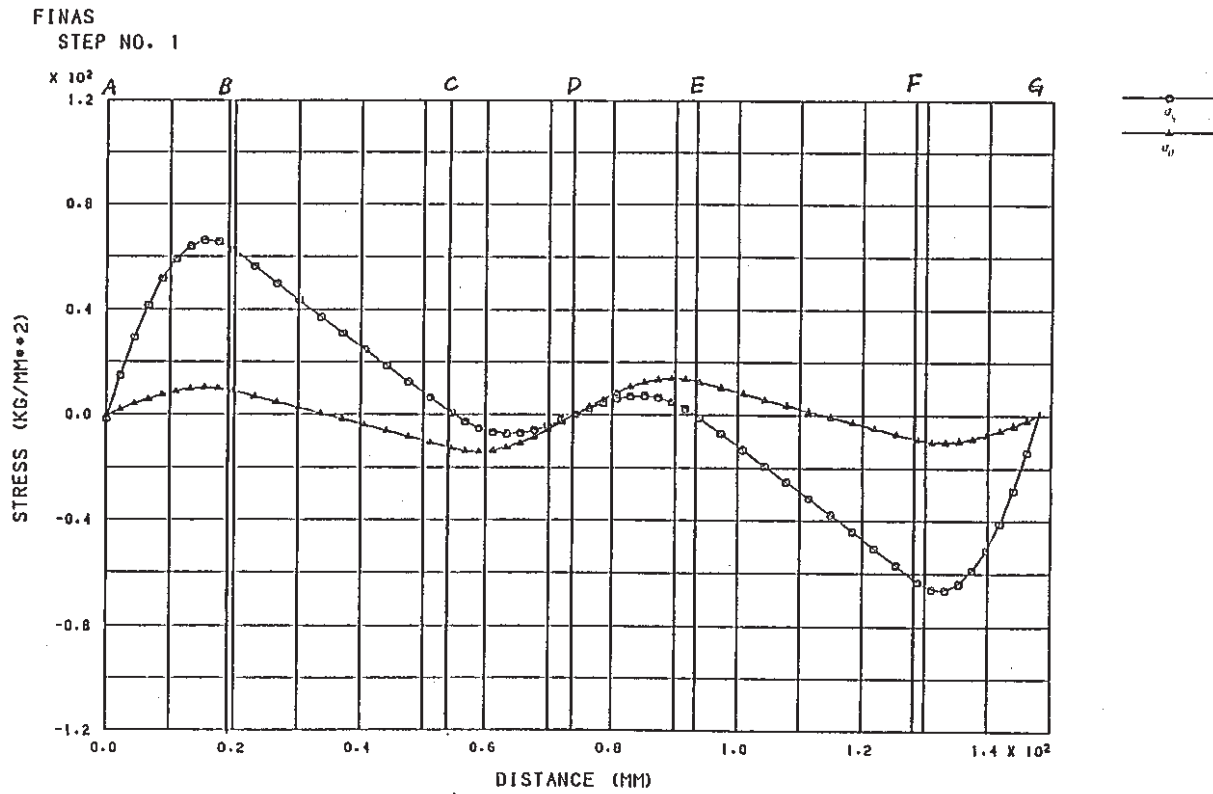


Figure 6.22(a) Stress distribution
(Shearing (rotation constrain), Model B-1, outer surface)
1-pitch, t=3,56el



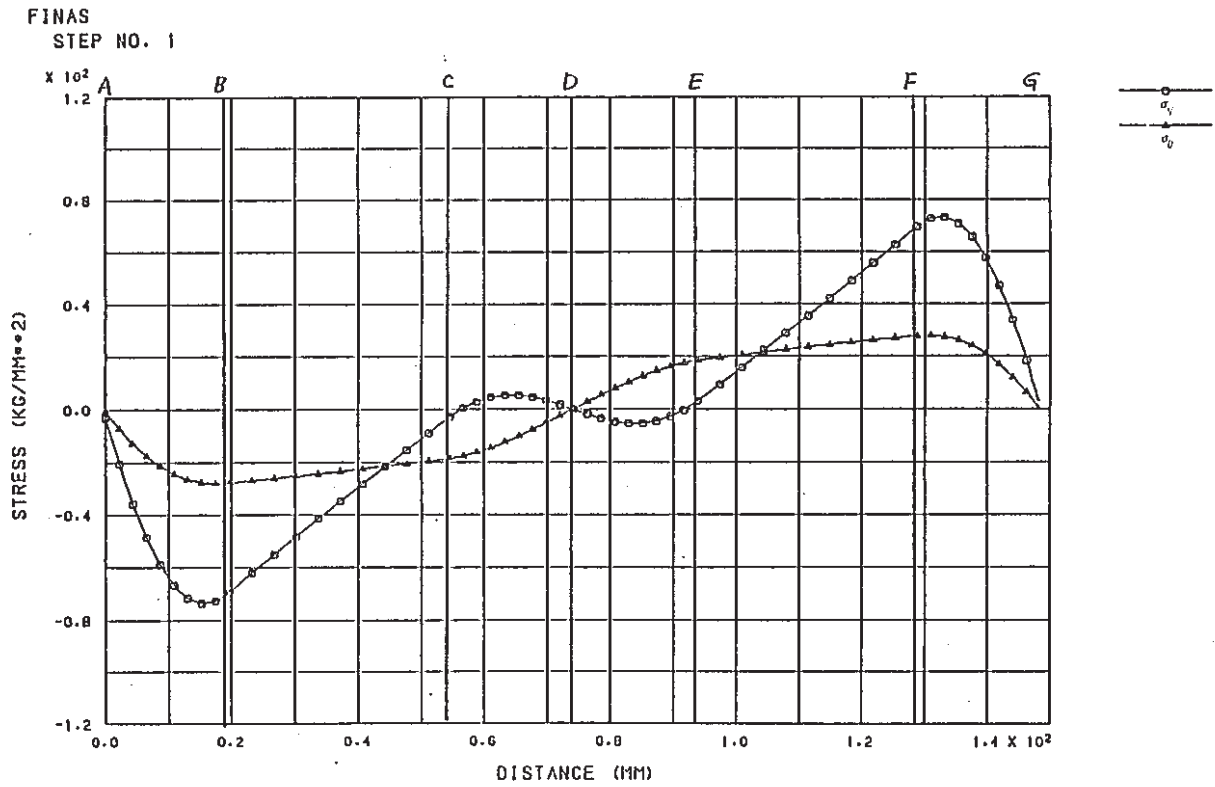


Figure 6.24 Stress distribution
(Shearing (rotation free), Model B-1, outer surface)

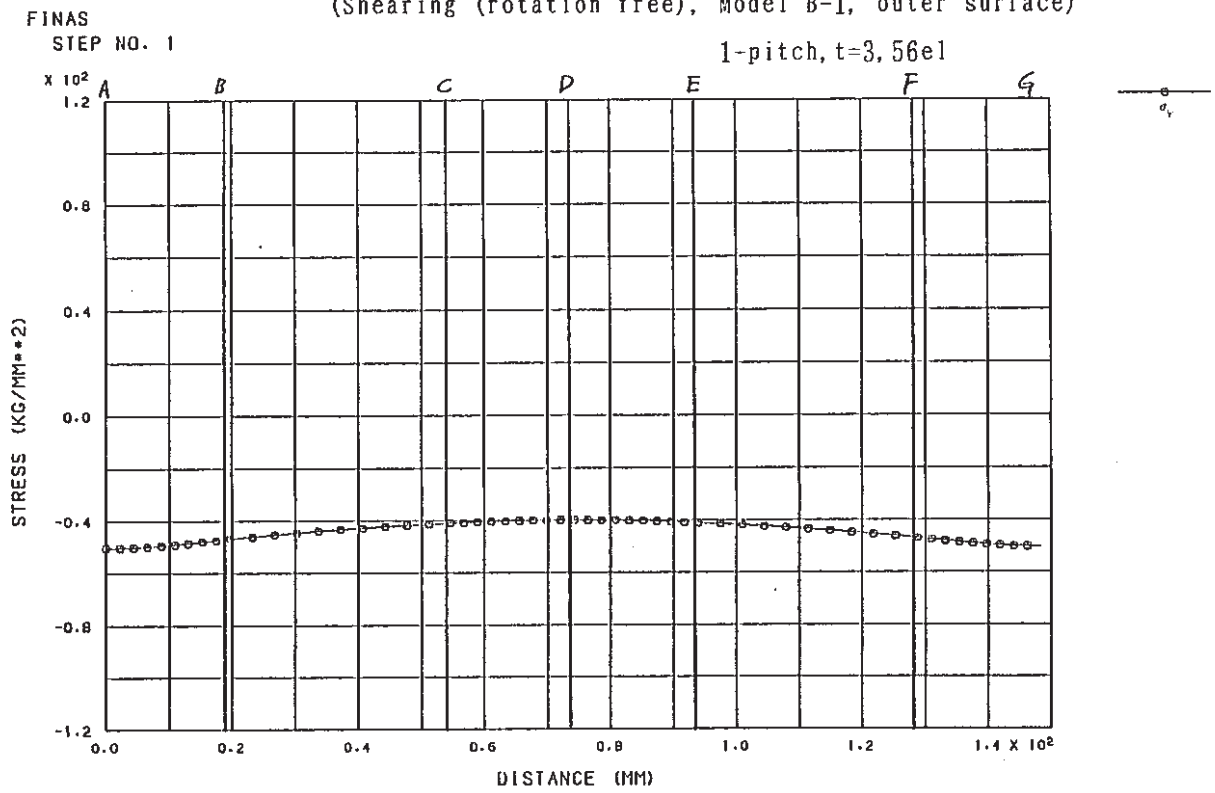


Figure 6.24(a) Stress distribution
(Shearing (rotation free), Model B-1, outer surface)
1-pitch, t=3,56el

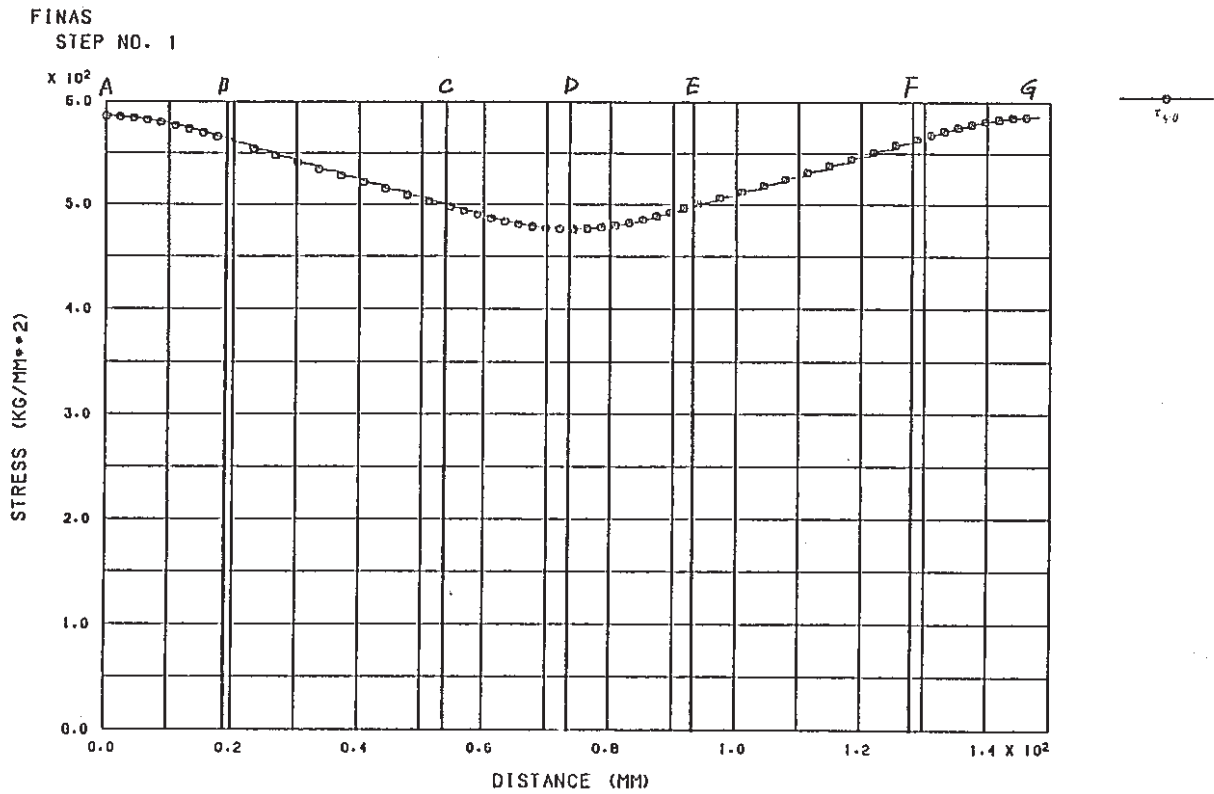


Figure 6.25 Stress distribution (Torsion, Model B-1, inner surface)

1-pitch, t=3, 56el

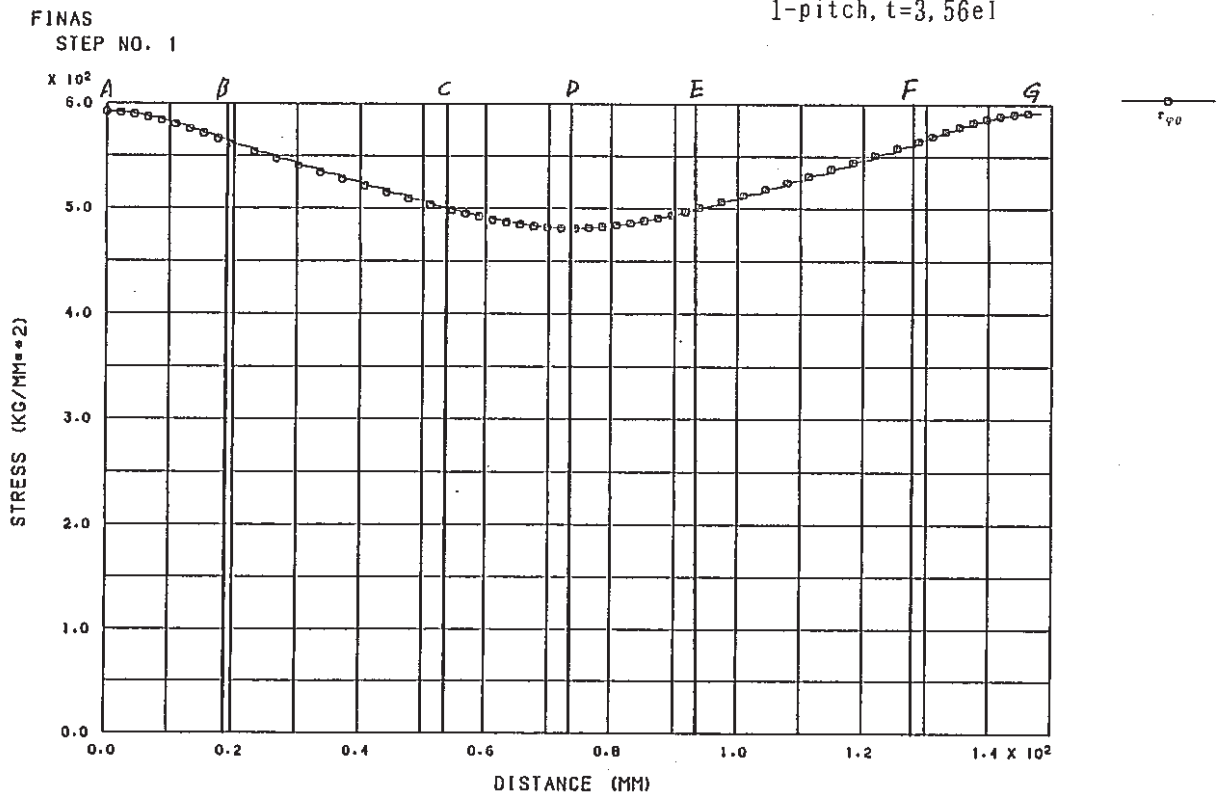


Figure 6.26 Stress distribution (Torsion, Model B-1, outer surface)

1-pitch, t=3, 56el

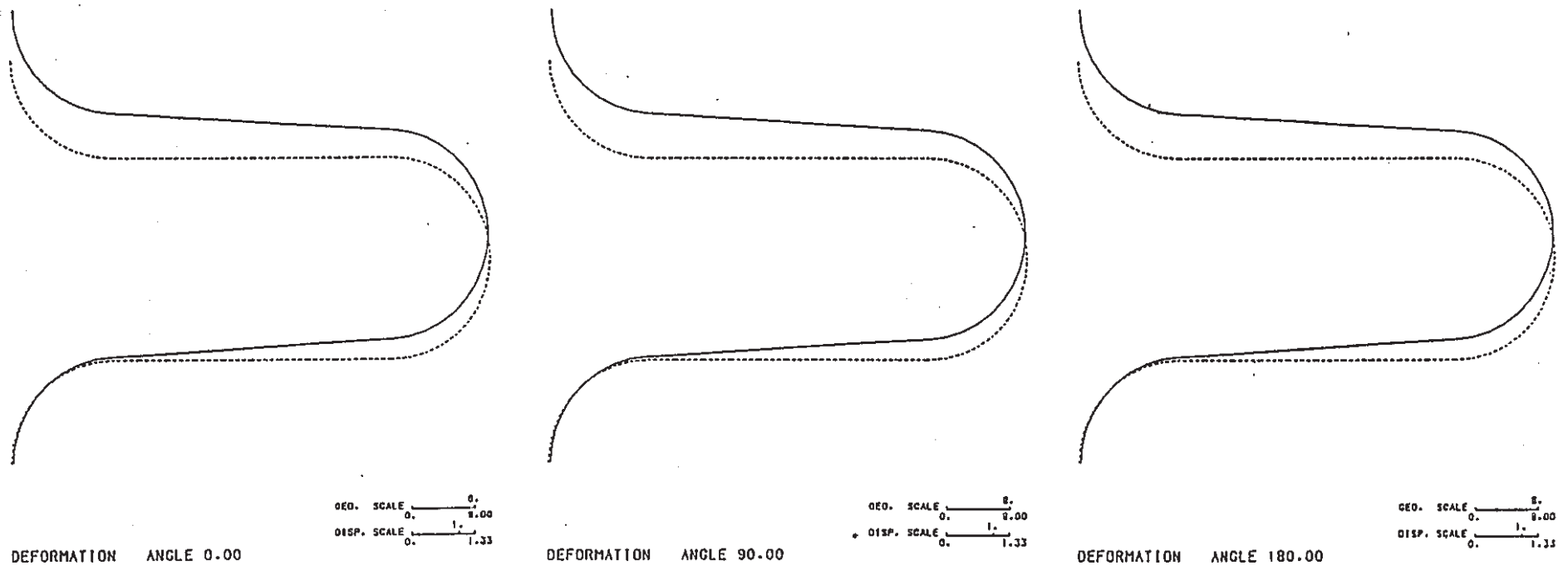


Figure 6.27 Deformed Shape (Tension, Model B-1)

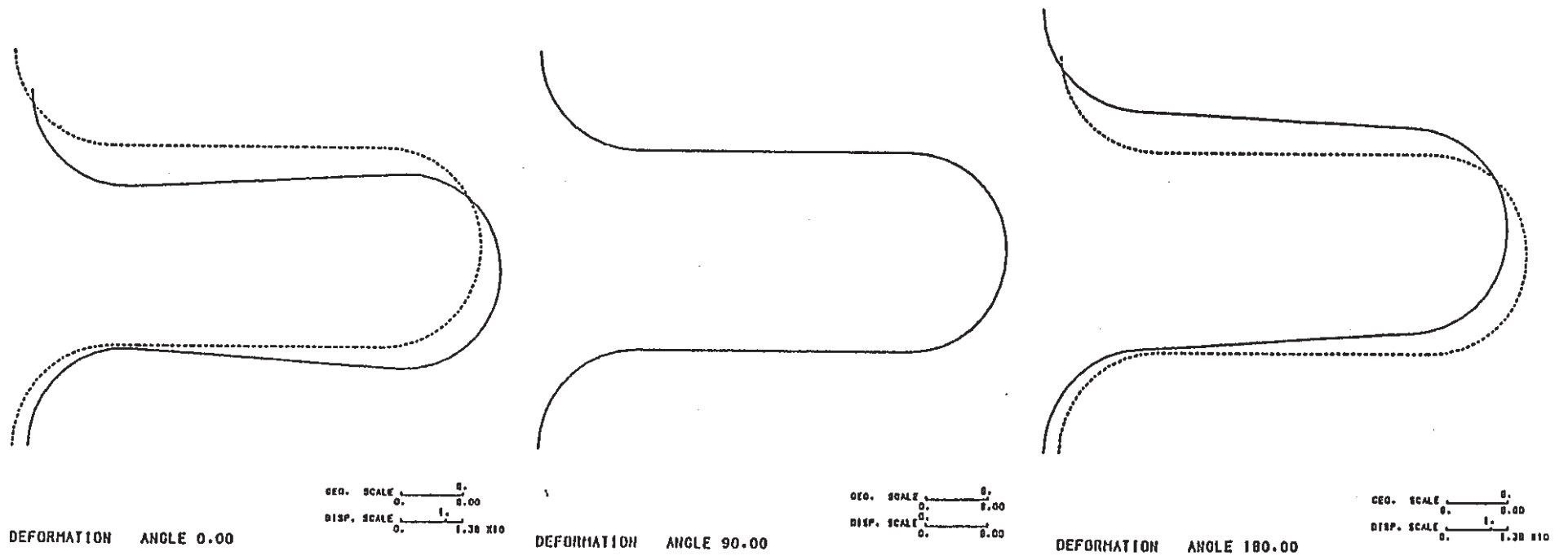


Figure 6.28 Deformed Shape (Bending, Model B-1)

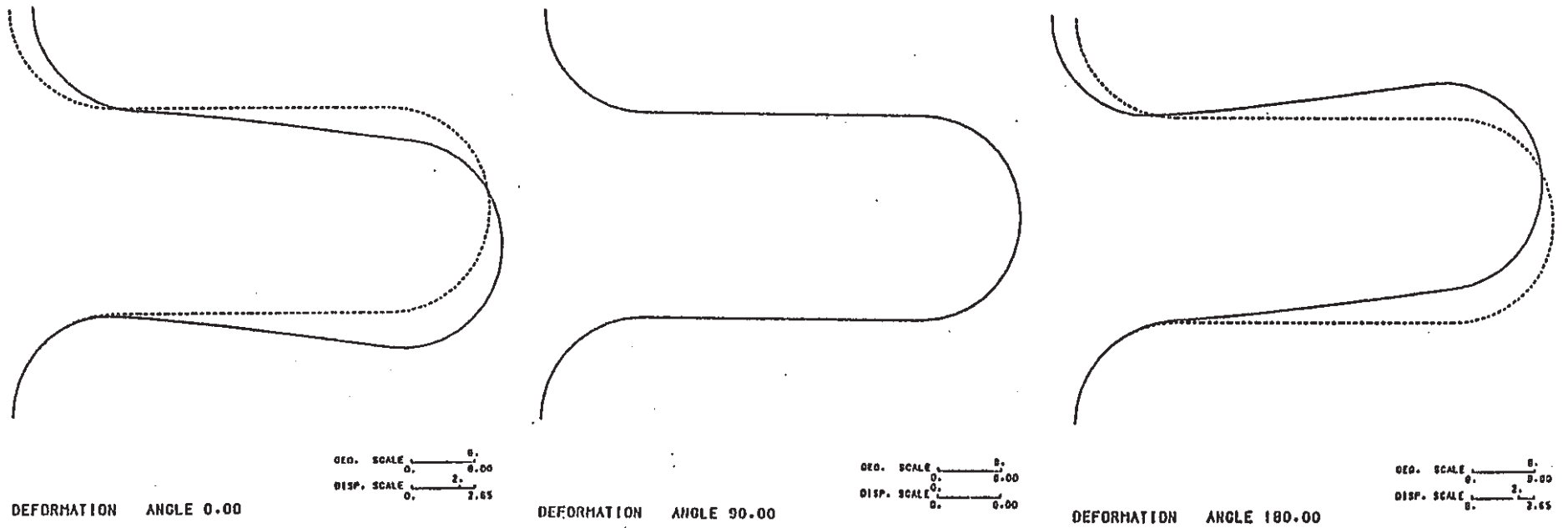


Figure 6.29 Deformed Shape (Shearing (rotation constrain), Model B-1)

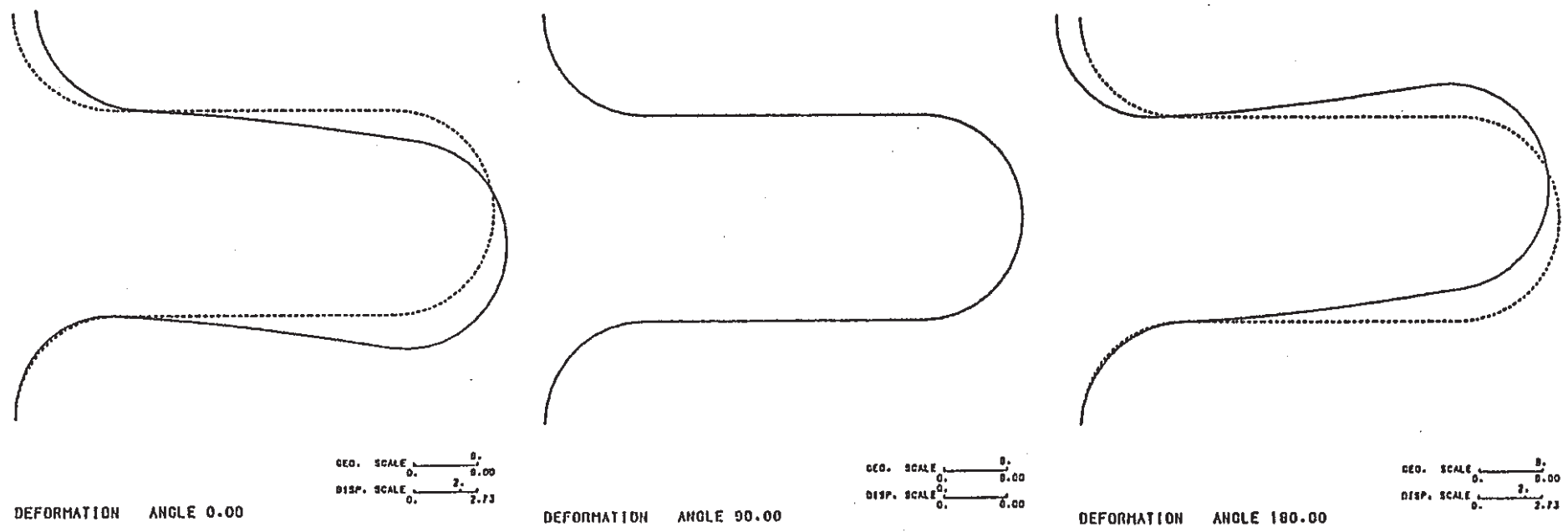


Figure 6.30 Deformed Shape (Shearing (rotation free), Model B-1)

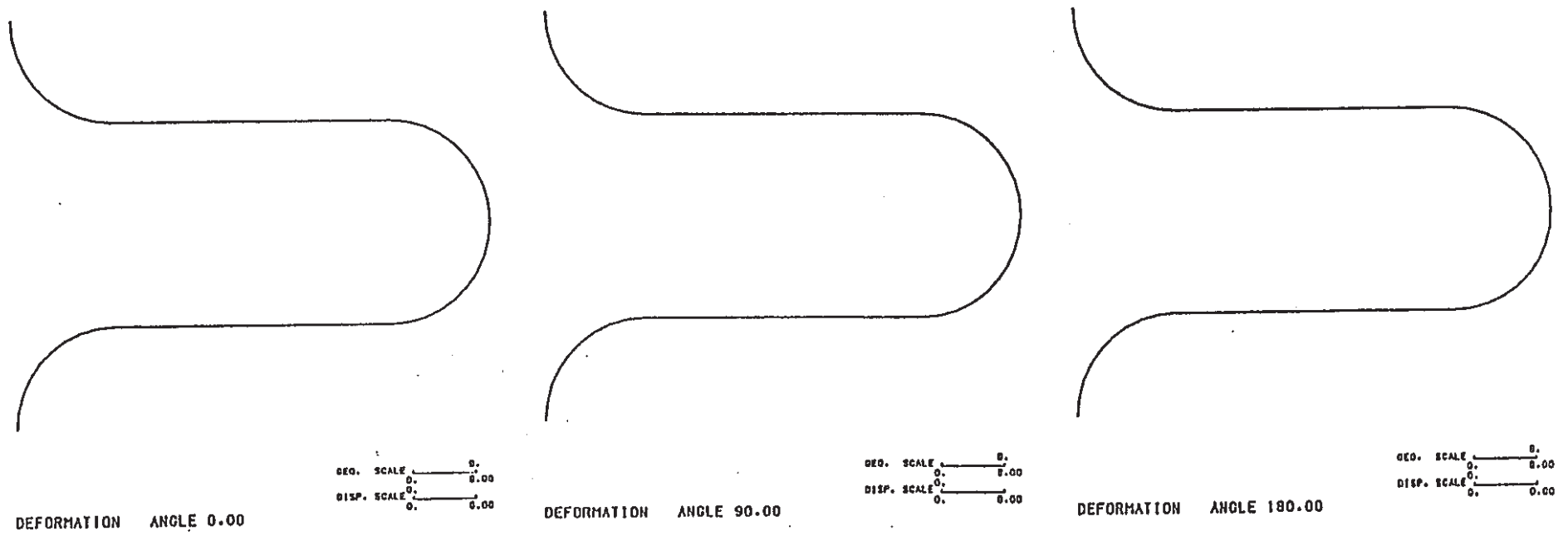


Figure 6.31 Deformed Shape (Torsion, Model B-1)

FINAS
STEP NO. 1

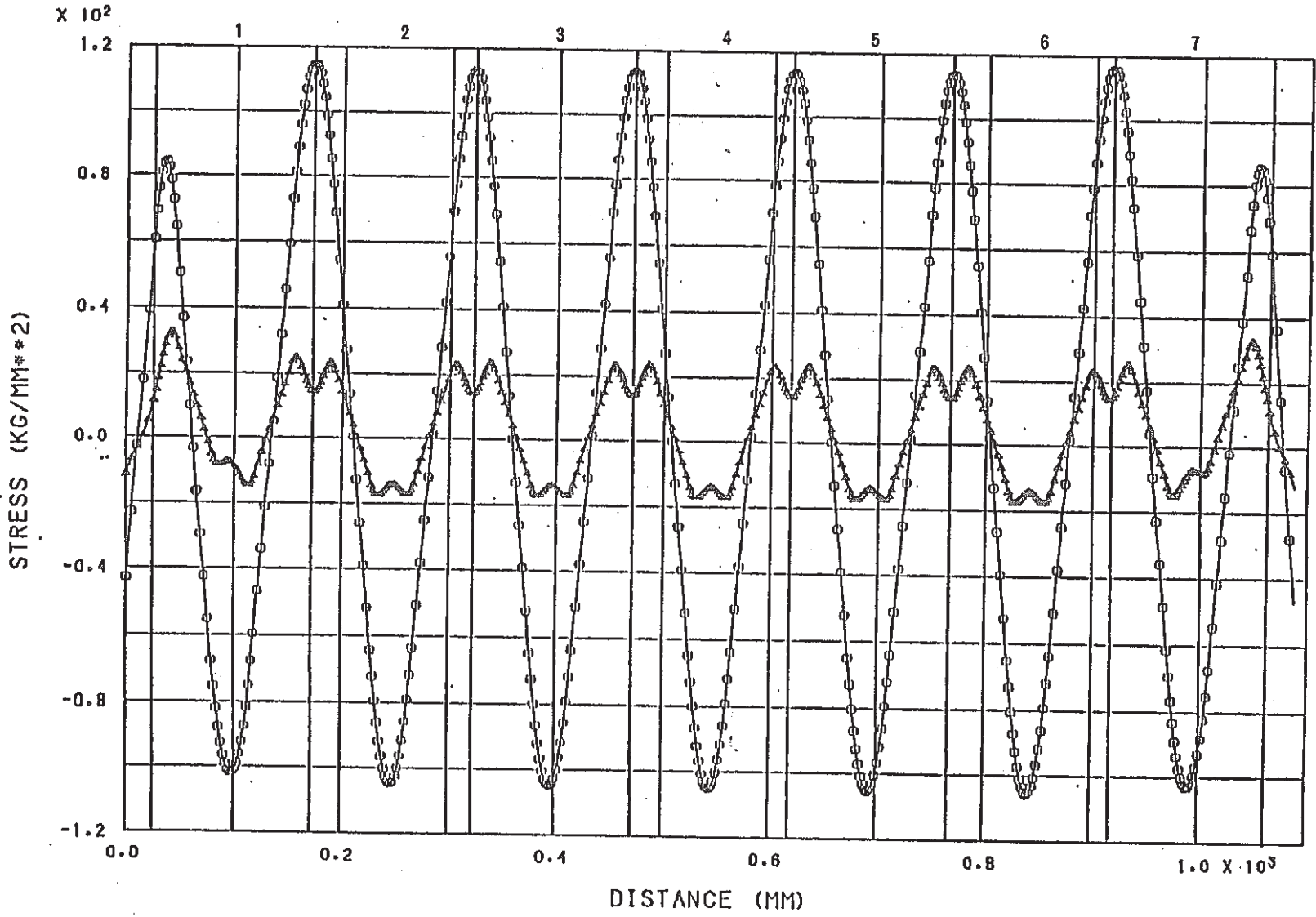


Figure 6.32 Stress Distribution (Bending, Model A-2, inner surface)
7-pitch, t=2

FINAS
STEP NO. 1

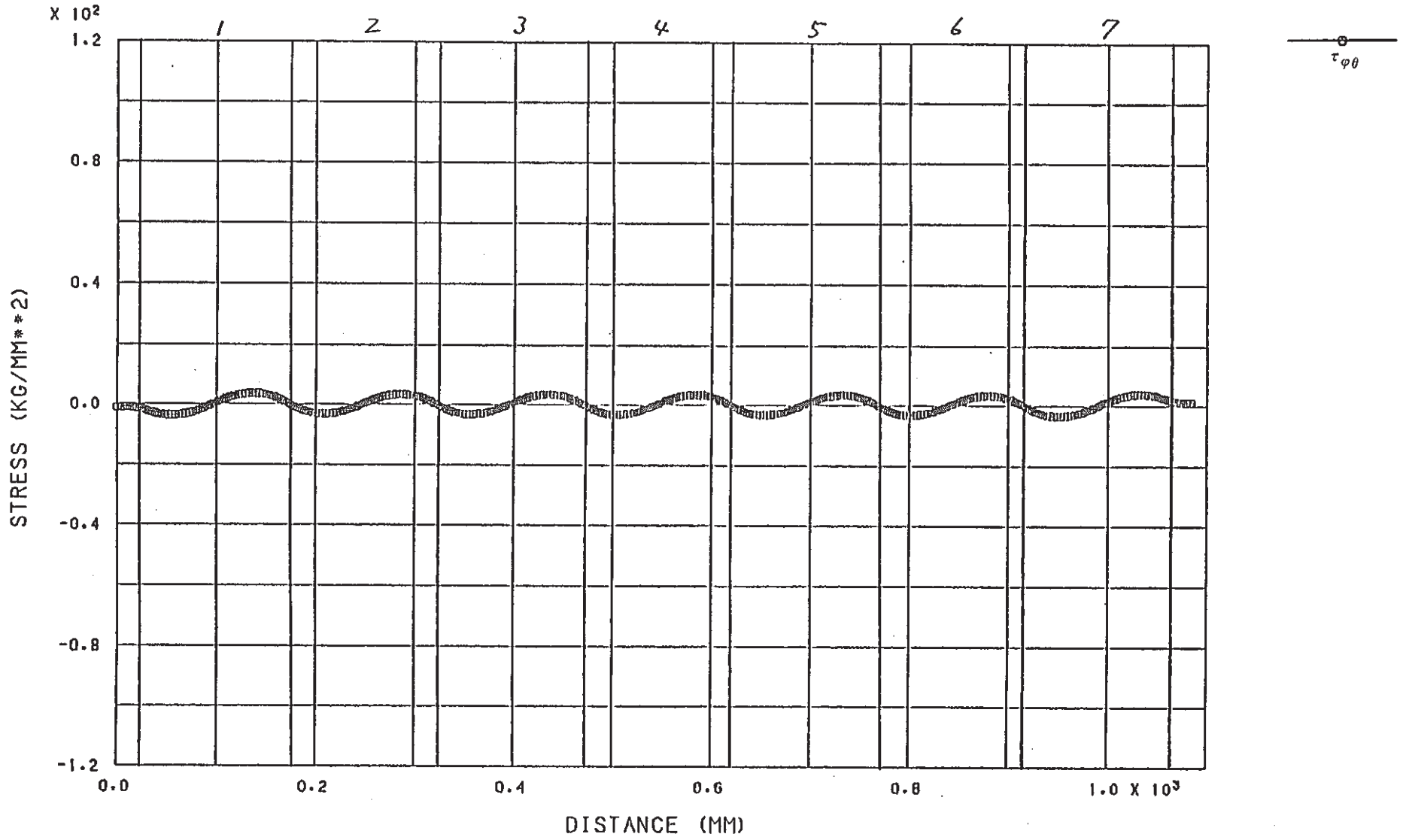


Figure 6.32(a) Stress Distribution (Bending, Model A-2, inner surface)
7-pitch, t=2

FINAS
STEP NO. 1

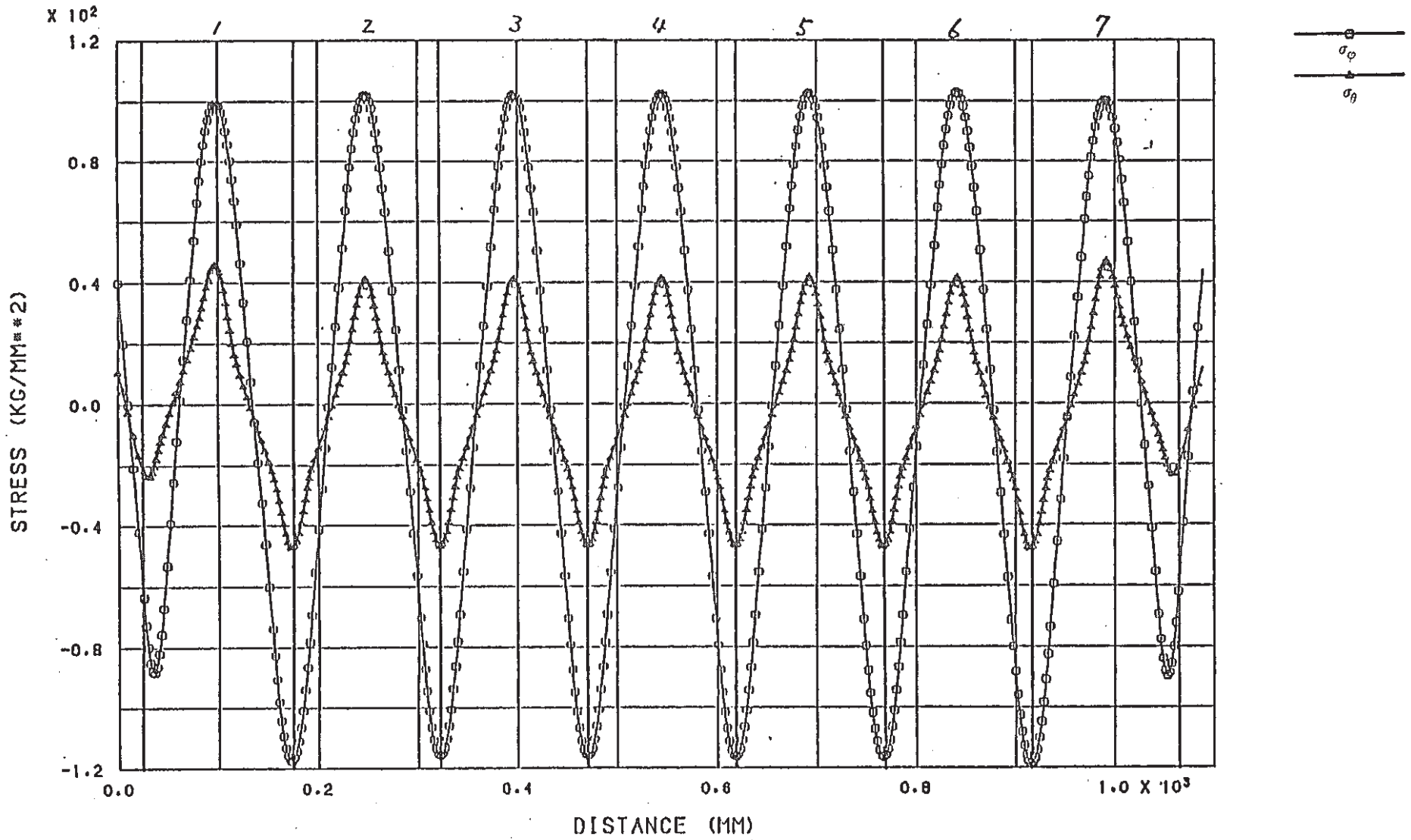


Figure 6.33 Stress Distribution (Bending, Model A-2, outer surface)
7-pitch, t=2

FINAS
STEP NO. 1

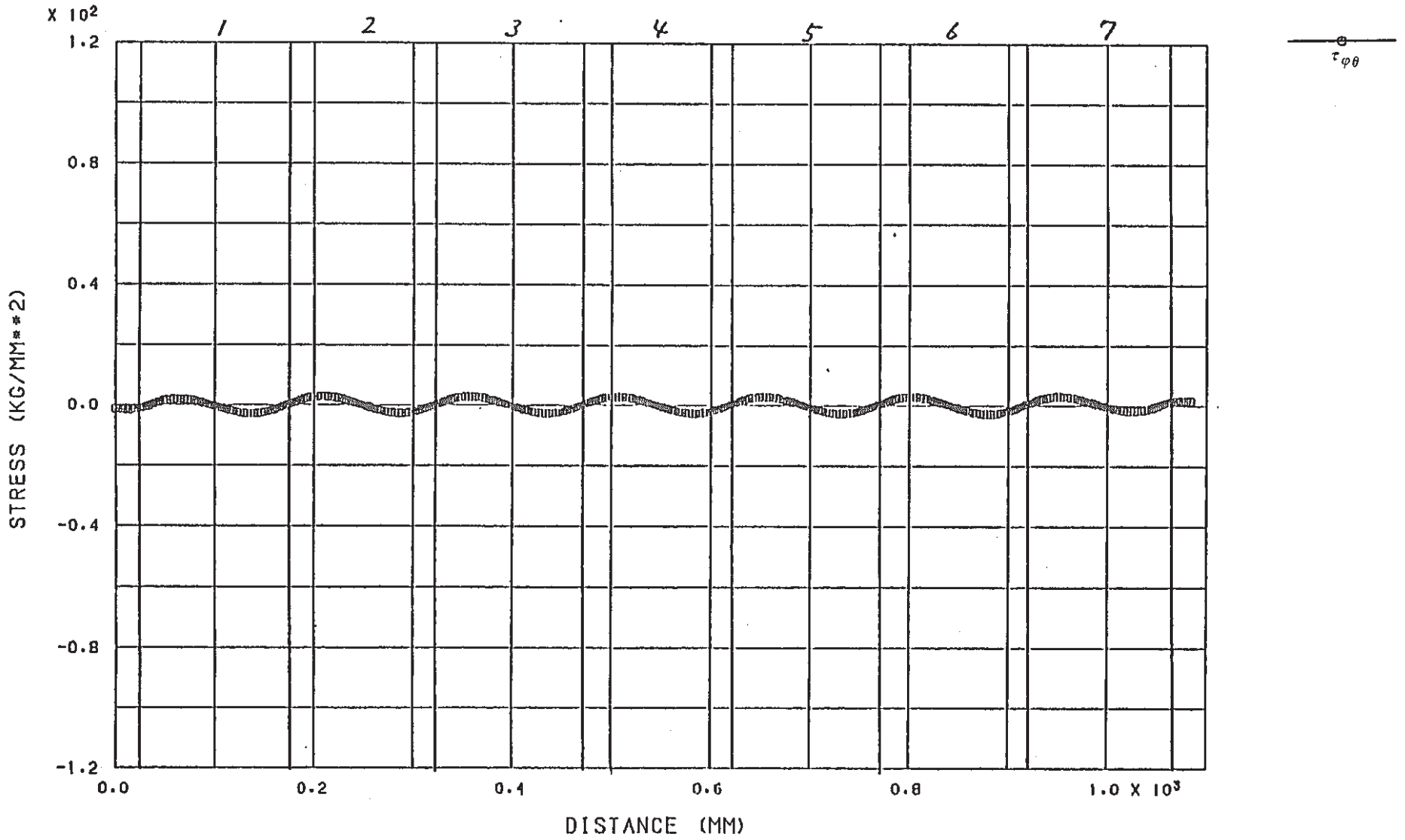


Figure 6.33(a) Stress Distribution (Bending, Model A-2, outer surface)
7-pitch, t=2

FINAS
STEP NO. 1

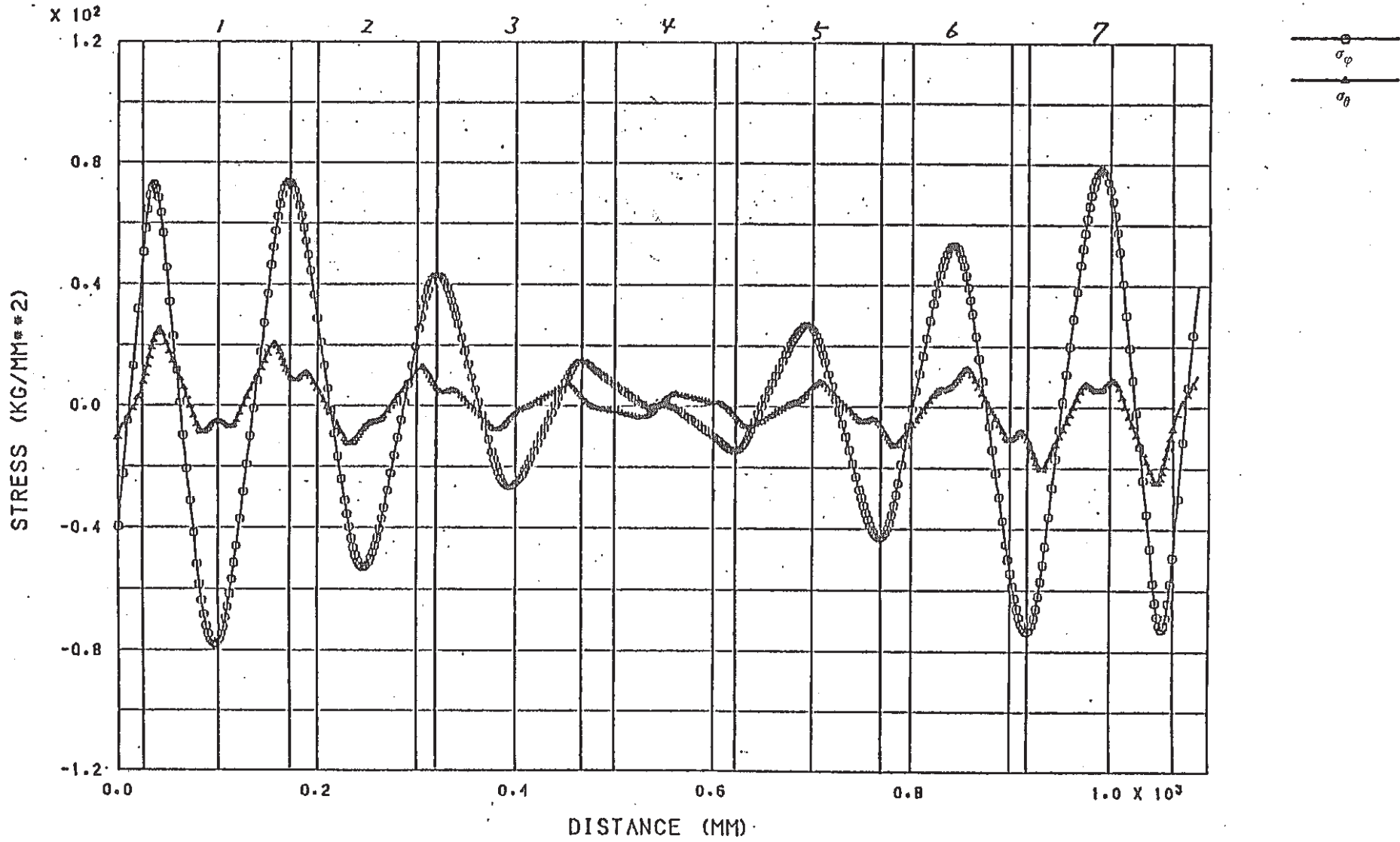


Figure 6.34 Stress Distribution (Shearing, Model A-2, inner surface)
7-pitch, t=2

FINAS
STEP NO. 1

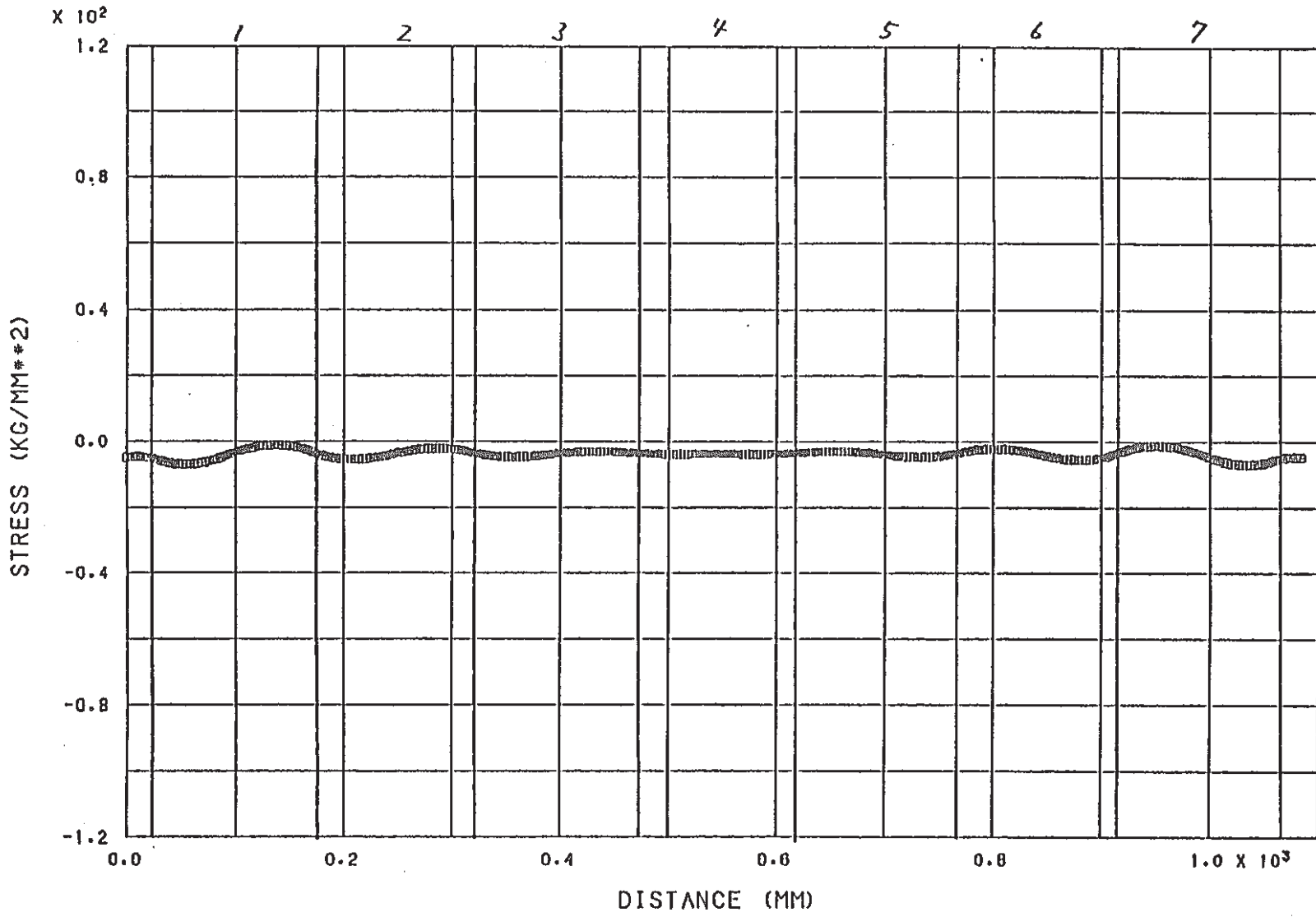
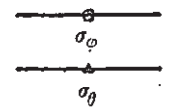


Figure 6.34(a) Stress Distribution (Shearing, Model A-2, inner surface)
7-pitch, t=2



FINAS
STEP NO. 1

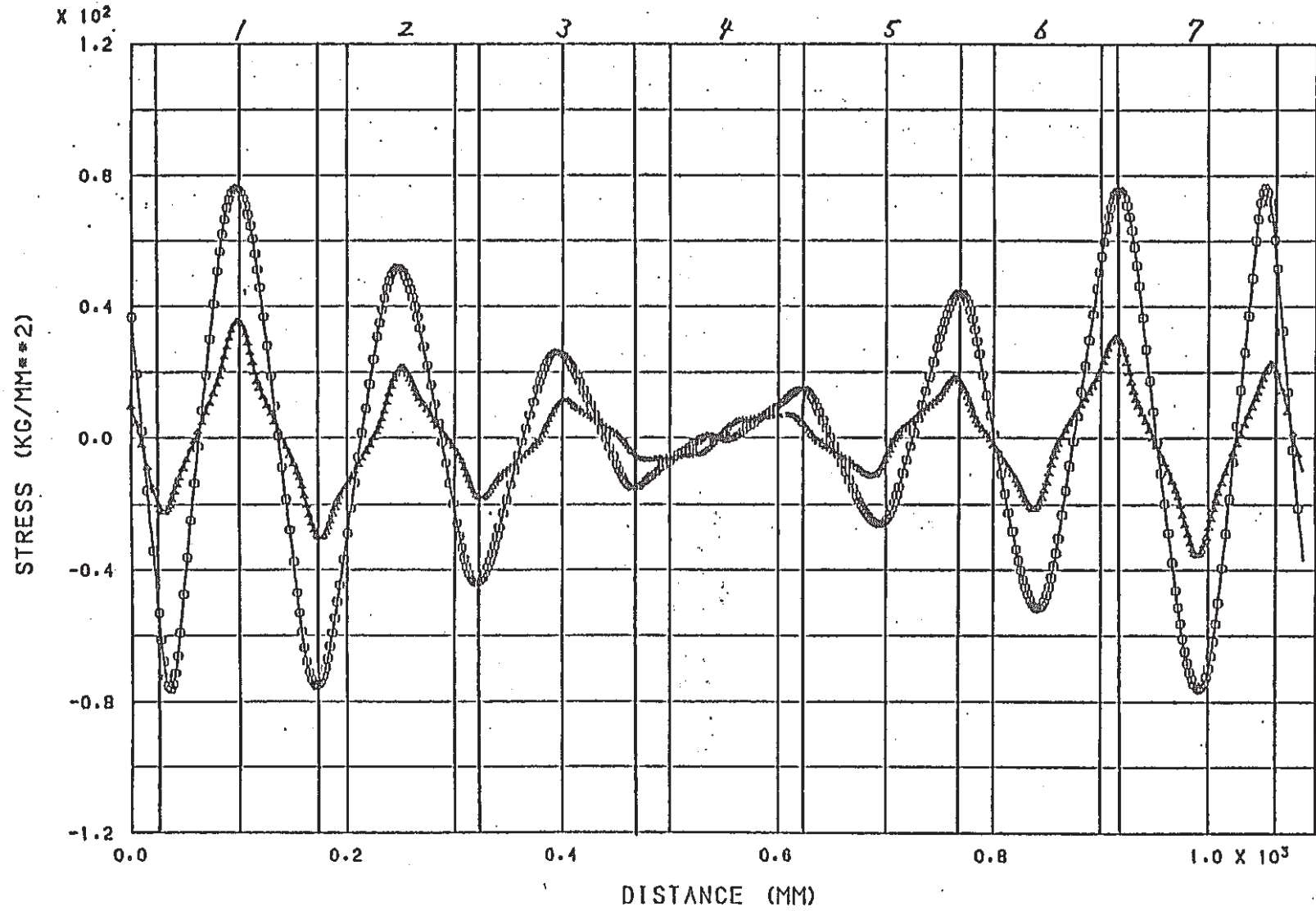


Figure 6.35 Stress Distribution (Shearing, Model A-2, outer surface)
7-pitch, t=2

FINAS
STEP NO. 1

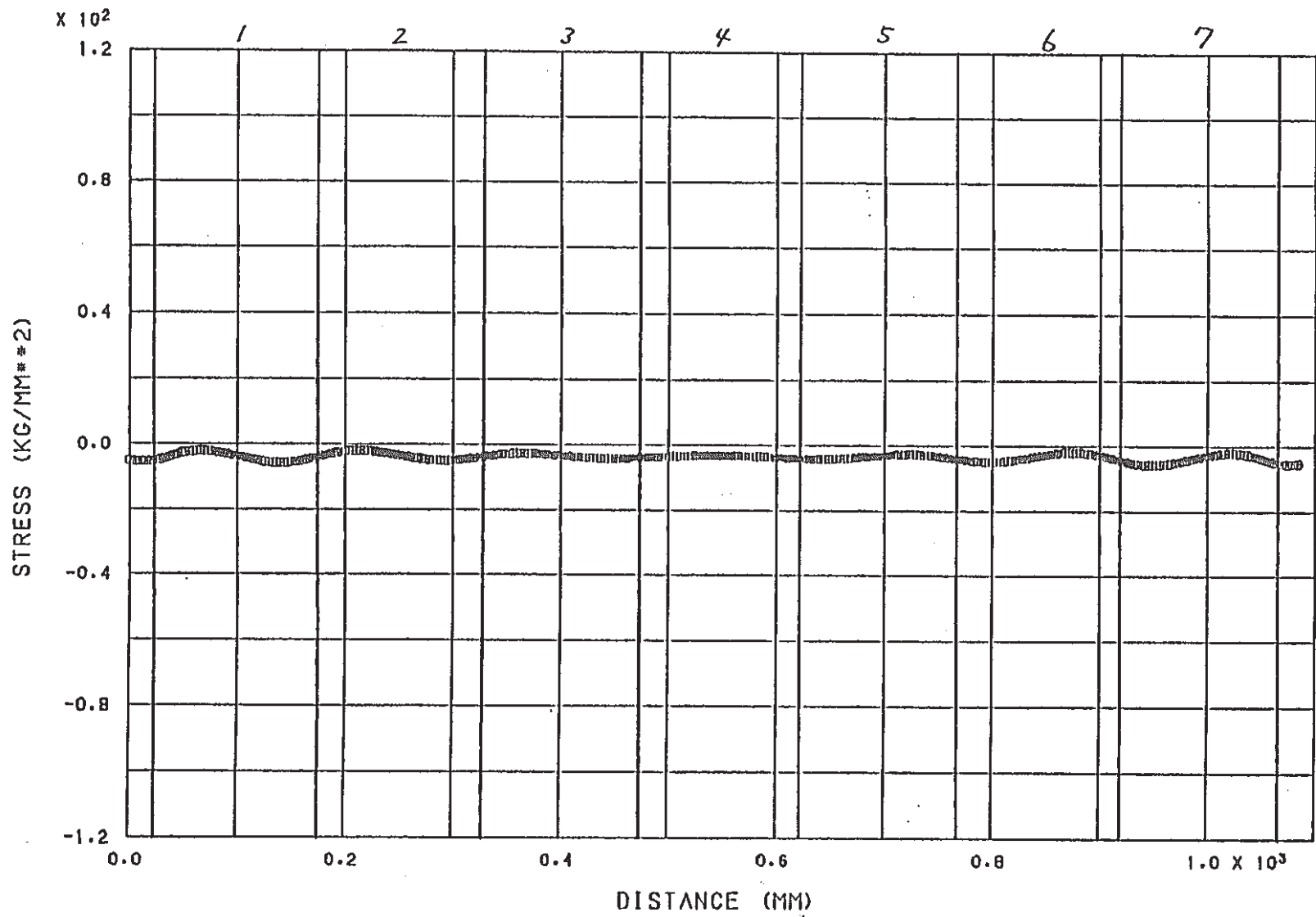
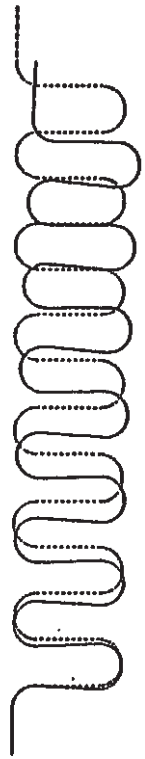


Figure 6.35(a) Stress Distribution (Shearing, Model A-2, outer surface)
7-pitch, t=2



DEFORMATION ANGLE 0.00

GEOM. SCALE 0. — 4.26 110
DISP. SCALE 0. — 9.66 110



DEFORMATION ANGLE 90.00

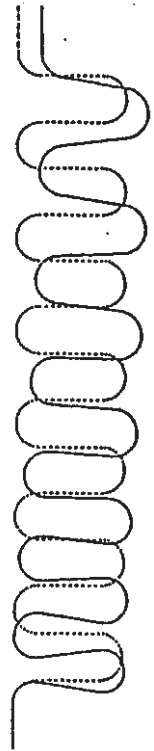
GEOM. SCALE 0. — 4.26 110
DISP. SCALE 0. — 9.66 110



DEFORMATION ANGLE 180.00

GEOM. SCALE 0. — 4.26 110
DISP. SCALE 0. — 9.66 110

Figure 6.36 Deformed Shape (Bending, Model A-2)



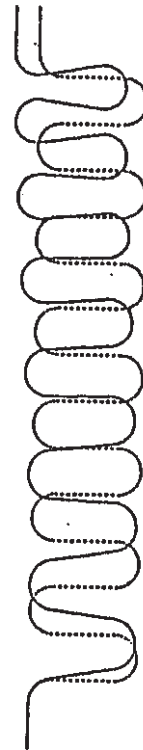
DEFORMATION ANGLE 0.00

DEO. SCALE $\frac{4.21 \times 10^3}{0}$
DISP. SCALE $\frac{2.29 \times 10^3}{0}$



DEFORMATION ANGLE 90.00

DEO. SCALE $\frac{4.21 \times 10^3}{0}$
DISP. SCALE $\frac{0.00}{0}$



DEFORMATION ANGLE 180.00

DEO. SCALE $\frac{4.21 \times 10^3}{0}$
DISP. SCALE $\frac{2.29 \times 10^3}{0}$

Figure 6.37 Deformed Shape (Shearing, Model A-2)

FINAS
STEP NO. 1

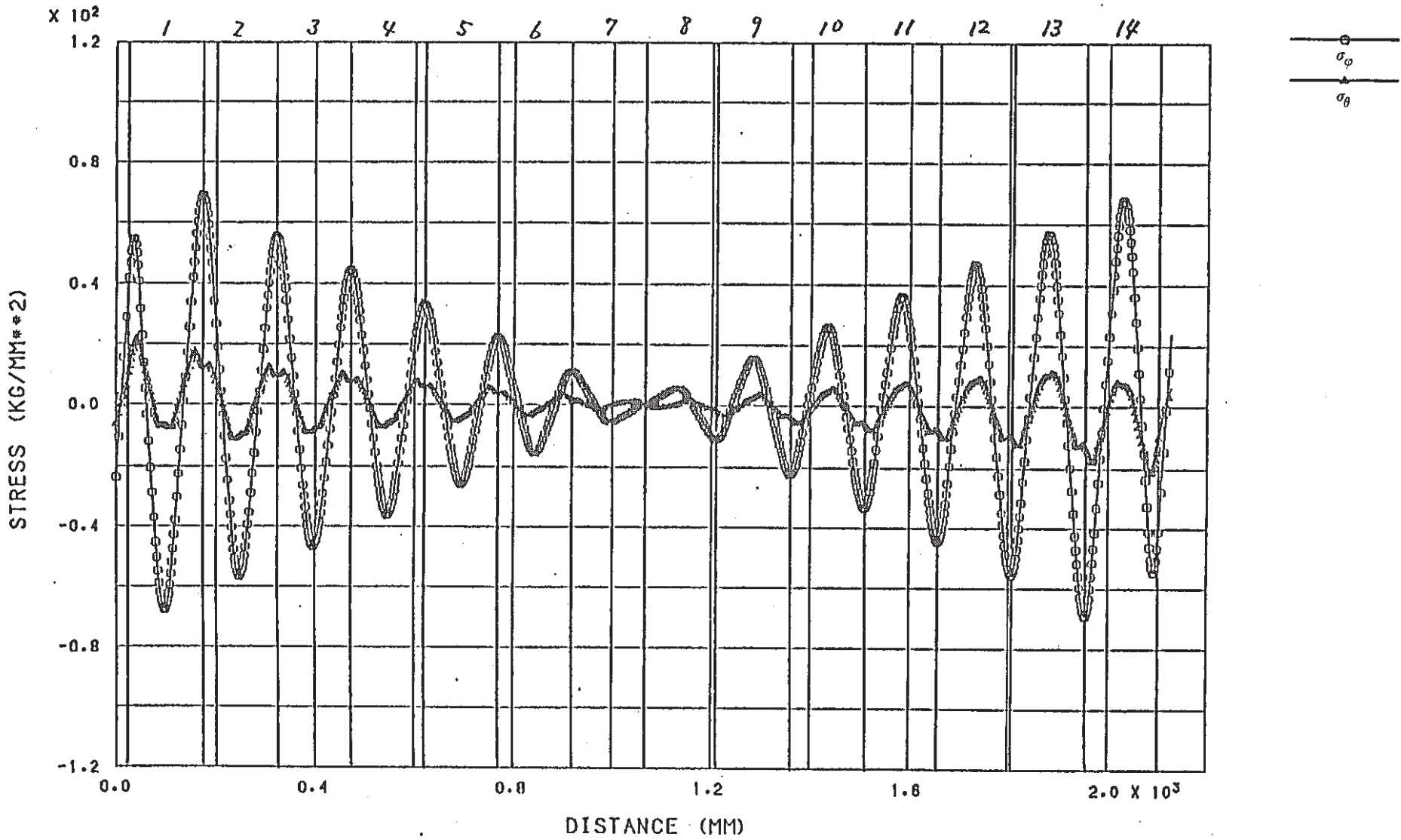


Figure 6.38 Stress Distribution (Shearing, Model B-2, inner surface)
14-pitch, t=3

FINAS
STEP NO. 1

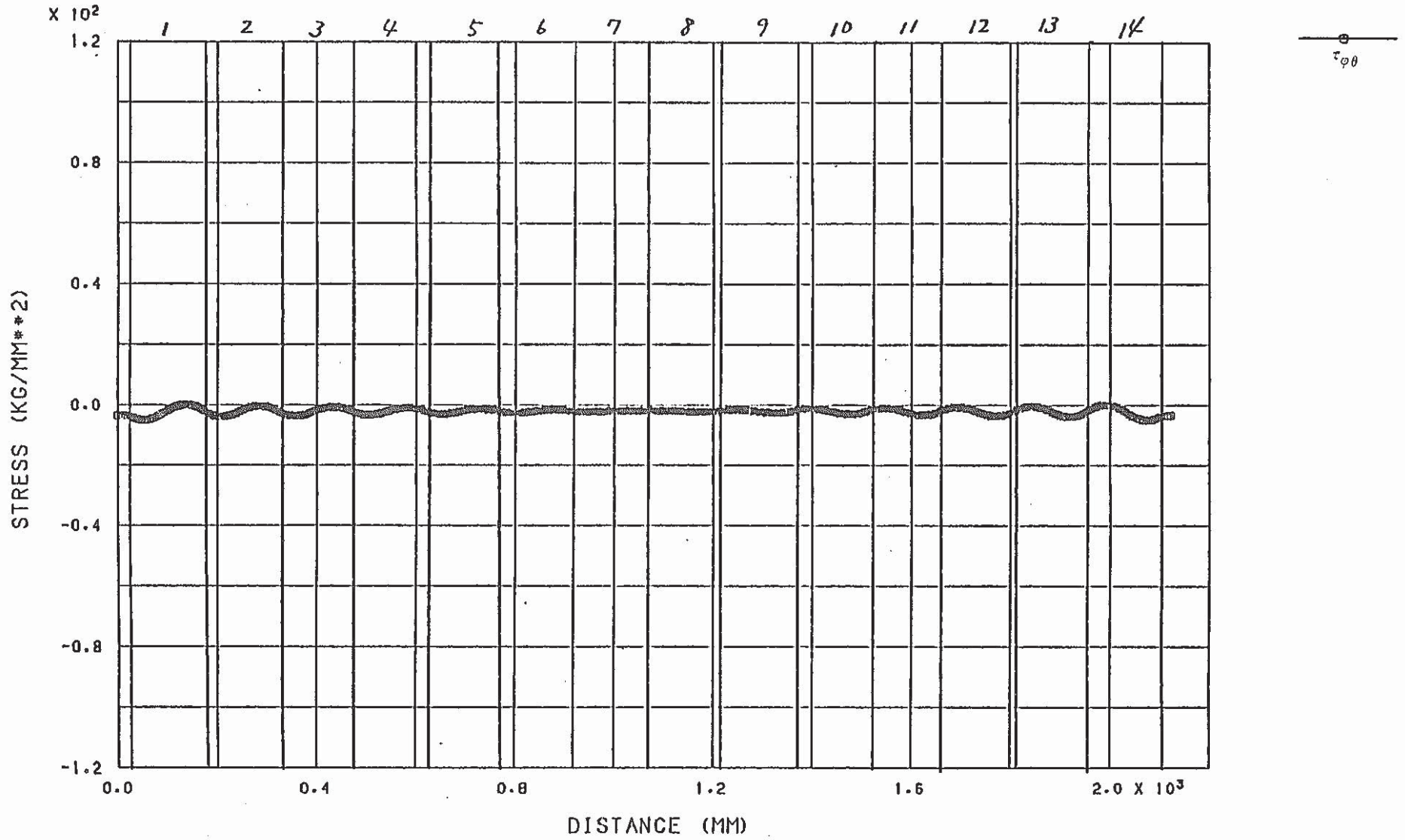


Figure 6.38(a) Stress Distribution (Shearing, Model B-2, inner surface)
14-pitch, t=3

FINAS
STEP NO. 1

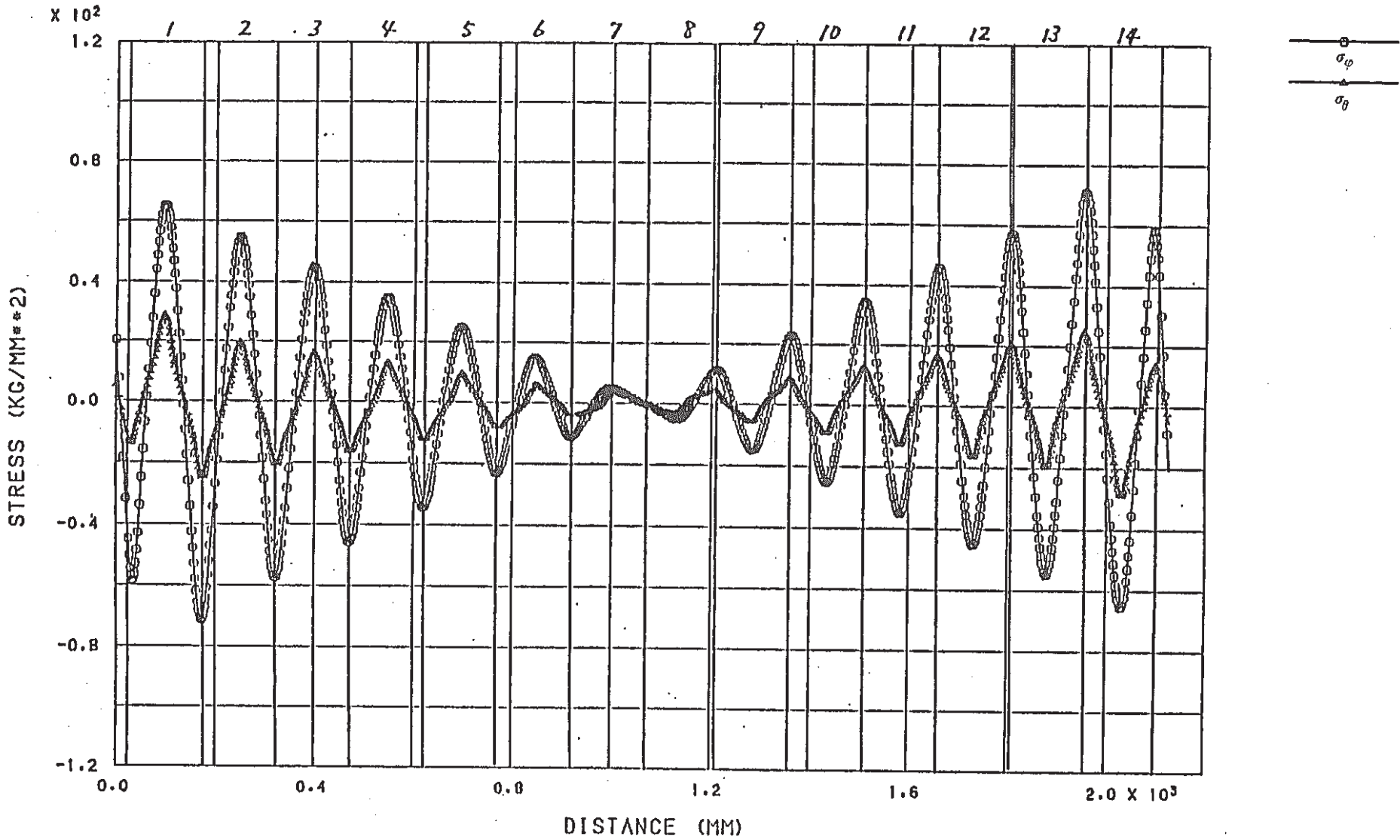


Figure 6.39 Stress Distribution (Shearing, Model B-2, outer surface)
14-pitch, t=3

FINAS
STEP NO. 1

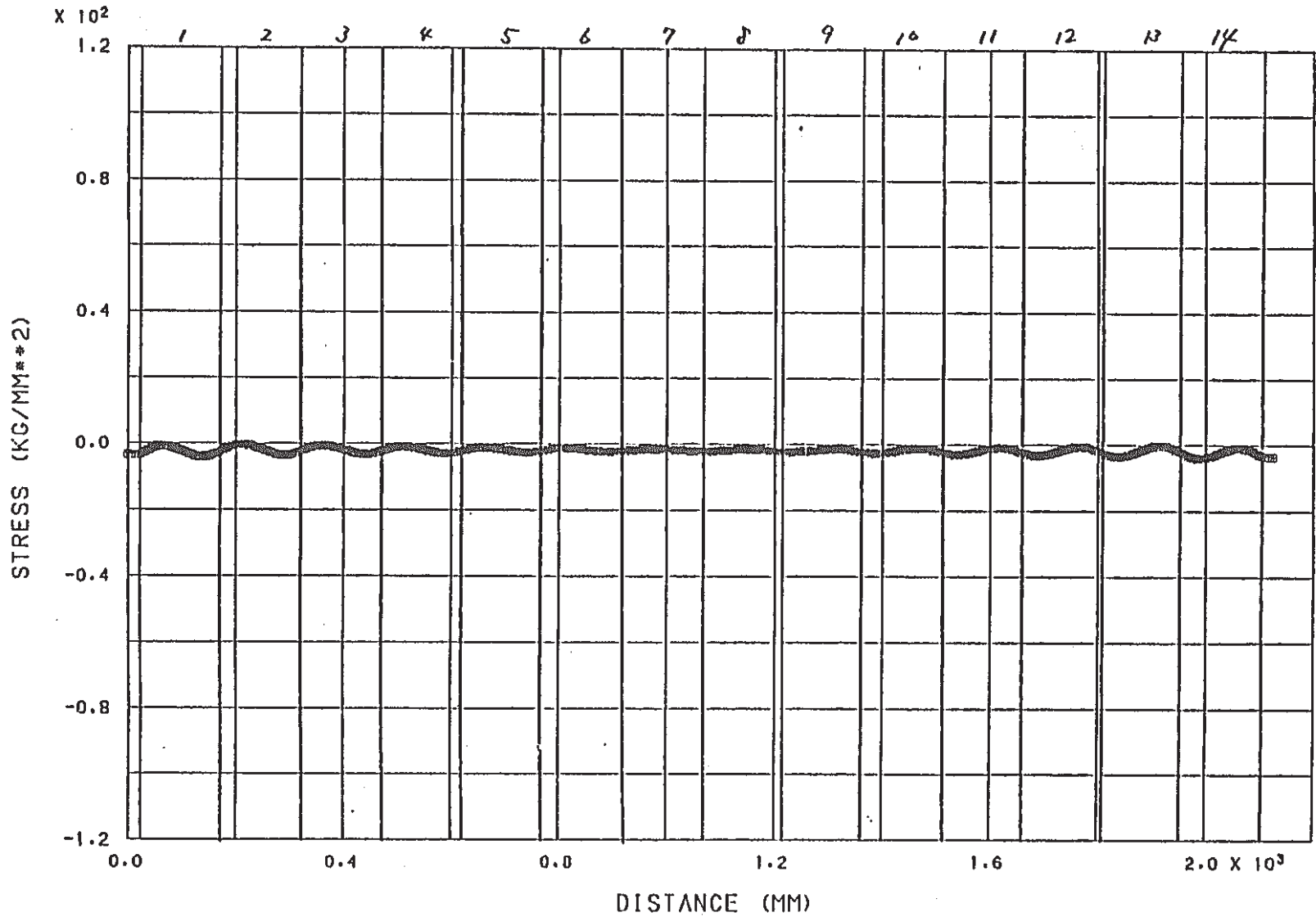


Figure 6.39(a) Stress Distribution (Shearing, Model B-2, outer surface)
14-pitch, t=3

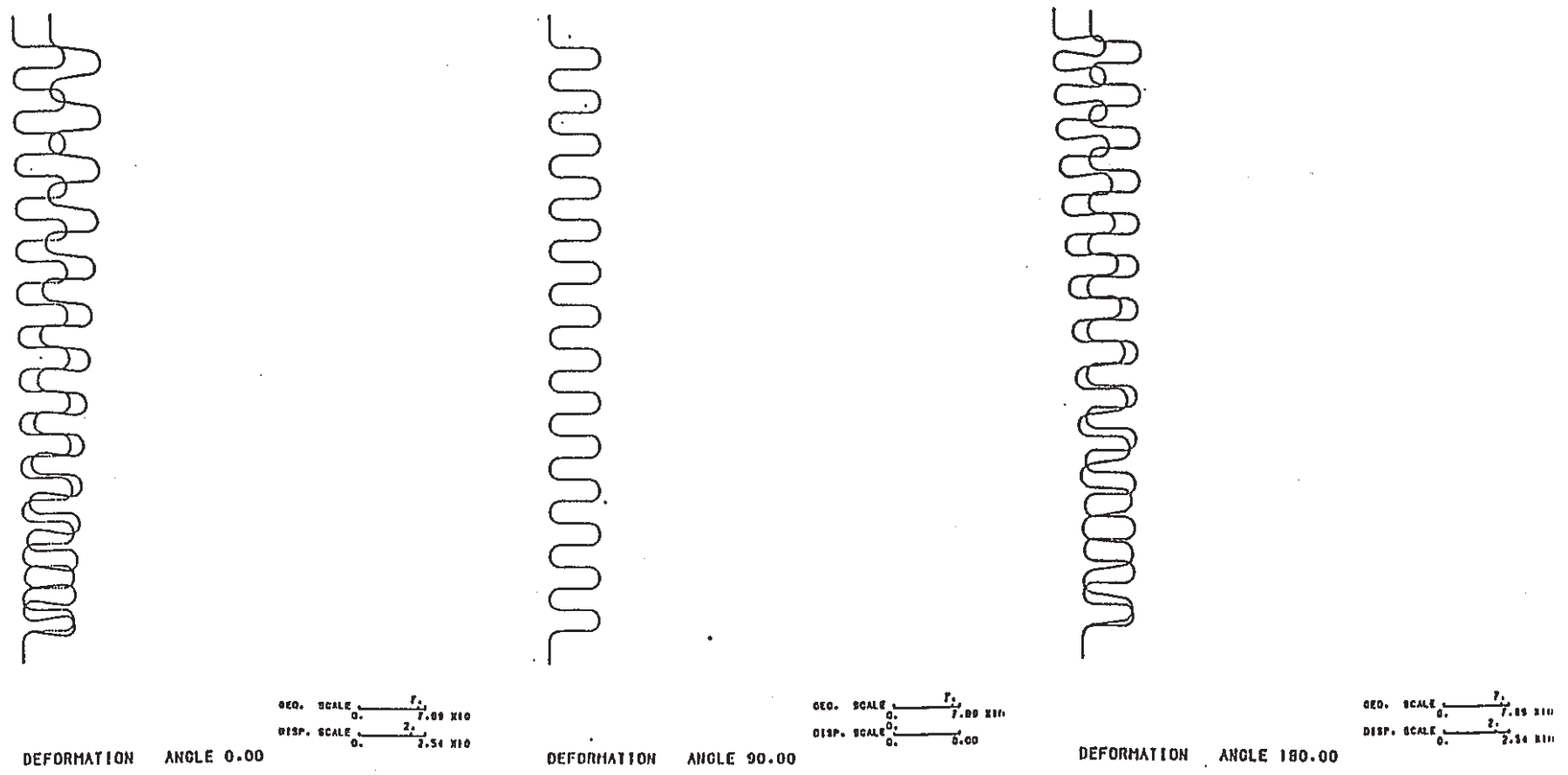


Figure 6.40 Deformed Shape (Shearing, Model B-2)

7. EJMAスタンダードによる評価との比較

ベローズの簡易応力評価式のひとつとしてEJMAスタンダード¹⁾の式があるが、ここでは、解析ケースA、BをEJMAスタンダードの式を用いて応力及びばね定数を評価し、数値解析結果と比較する。

Table 7.1にEJMAスタンダードの式による評価と本解析との比較を示す。

引張り負荷及び曲げ負荷について、EJMAスタンダードとFEMによる評価を比較すると曲げ応力はかなり良く一致するが膜応力はEJMAスタンダードの方は、10～15%の低目の値となる。

せん断負荷については、両者の間にかかなり大きな差異が見られ、EJMAスタンダードはFEMに比べて膜応力については低目、曲げ応力については高めの評価となる。EJMAスタンダードはせん断ひずみによる変形を考慮していないため、全体として剛性を高く評価することになる。従って、山数が多くなると両者の差異は小さくなると考えられる。

ねじり負荷については、FEM解に比べEJMAスタンダードの評価は15%程度低目となる。

Table 7.2にばね定数についての比較結果を示す。引張り及び曲げのばね定数については、かなりよく一致する。曲げのばね定数については、1山解析では、FEM解はEJMAスタンダードに比べてやや柔めの評価になるが、端部効果を含めた全山解析では、逆にやや硬めの評価となる。せん断ばね定数については、せん断変形が支配的な1山解析では、EJMAスタンダードがせん断変形を考慮していないために両者に大きな差異が認められるが、曲げ変形が支配的な7山、14山の解析では、両者はかなり良く位置する。ねじりばね定数は、EJMAスタンダードは、FEM解に対し、15%程度低目の評価となる。

Table 7.1 Evaluation of Stresses by Present FEM Analysis and the Standard of EJMA

Model	Loading Mode	Kind of Stresses	Stress Values (kg/mm ²)		EJMA st.
			EJMA st.	Present Analysis (FEM)	FEM
A	Tension (A1A)	Meridional membrane σ_{mm}	0.112	0.13	0.862
		Meridional bending σ_{mb}	11.17	10.88	1.03
	Bending (A1B)	Meridional membrane σ_{mm}	1.13	1.25	0.904
		Meridional bending σ_{mb}	113.05	112.7	1.003
	Shearing (A2S)	Meridional membrane σ_{mm}	1.114	1.71	0.651
		Meridional bending σ_{mb}	111.06	76.55	1.451
	Torsion	shear τ	505.36	590.9	0.855
B	Tension (B1A)	Meridional membrane σ_{mm}	0.247	0.28	0.8821
		Meridional bending σ_{mb}	16.94	16.54	1.024
	Bending (B1B)	Meridional membrane σ_{mm}	2.50	2.81	0.890
		Meridional bending σ_{mb}	171.43	171.3	1.001
	Shearing (B2S)	Meridional membrane σ_{mm}	1.228	1.81	0.678
		Meridional bending σ_{mb}	84.22	70.21	1.20
	Torsion	shear τ	505.36	592.0	0.854

※ Above stress values are generated by unit displacement loadings
(1 mm or 1 deg) per 1 convolution.

Table 7.2 Evaluation of Spring rates by Present FEM Analysis and the Standard of EJMA

Model	Loading Mode	Kind of Spring rates	No. of convolution	Spring rate Values		EJMA
				EJMA	Present Analysis (FEM)	FEM
A - 1	Tension	K_x (kg/mm)	1	864.8	855.8	1.011
	Bending	K_θ (kgmm/rad)		1.455×10^9	1.375×10^8	1.058
	Shearing (rot. constrain)	K_y (kg/mm)		6.98×10^5	1.515×10^5	4.607
	Shearing (rot. free)				1.453×10^5	(4.804)
	Torsion	K_ω (kgmm/rad)		1.101×10^{11}	1.283×10^{11}	0.858
A - 2	Bending	K_θ (kgmm/rad)	7	2.078×10^7	2.264×10^7	0.918
	Shearing	K_y (kg/mm)		2.035×10^3	1.946×10^3	1.046
B - 1	Tension	K_x (kg/mm)	1	2903.6	2840.6	1.022
	Bending	K_θ (kgmm/rad)		4.883×10^8	4.542×10^8	1.075
	Shearing (rot. constrain)	K_y (kg/mm)		2.344×10^6	2.387×10^5	9.820
	Shearing (rot. free)				2.358×10^5	(9.941)
	Torsion	K_ω (kgmm/rad)		1.652×10^{11}	1.924×10^{11}	0.859
B - 2	Shearing	K_y (kg/mm)	14	8.543×10^2	8.329×10^2	1.026

8. 結 言

FBR 配管用ペローズ継手のフィージビリティスタディの一環として、事業団大洗工学センターで実施されているペローズの疲労・クリープ疲労試験及び内圧座屈試験の予備解析のひとつとして、また、既存の簡易評価式の評価のために弾性非軸対称解析を実施した。

板厚 2 mm, 7 山と板厚 3 mm, 14 山の 2 つの仕様のペローズについて、引張り、曲げ、せん断及びねじりの 4 つの負荷モードで単位変位を負荷し、内外表面応力分布、膜・曲げ応力分布、及びばね定数の詳細解析データを得た。

また、解析結果から、ペローズの簡易評価式である EJMA スタンドガードの評価を行った。その結果、引張・曲げ負荷の子午線方向曲げ応力は良好な解を与えるが、膜応力は 10~15% 低目となること、せん断負荷の子午線方向曲げ応力はかなり高目、膜応力は逆に低目となること、及びねじり負荷のせん断応力は 15% 程度低目となることわかった。

ばね定数に関しては、引張り、曲げのばね定数については、EJMA スタンドガード、FEM 双方とも良く一致するが、せん断ばね定数については、せん断変形が無視できる範囲において EJMA スタンドガードは FEM 解と良い一致を示す。また、ねじりばね定数については、EJMA スタンドガードは FEM 解に対し、15% 程度低目の評価となることわかった。

引張り、曲げにおける子午線方向曲げ・膜応力については、曲げ応力が膜応力の百倍オーダーであることから、膜応力の FEM、簡易式間の絶対的な相違は、曲げ応力のそれ以下である。但し、相対的に板厚が厚くなり、曲げ応力に対し、膜応力の比率が大きくなった場合、FEM、簡易式間の差異は無視できなくなる可能性がある。

せん断負荷において、子午線方向曲げ応力が、簡易式の方が FEM よりもかなり高めになる点に関しては、FEM 解では最大あるいは最小となるべきペローズの起点、終点である両端部の応力が端部効果により緩和されていることが原因と考えられる。端部効果は引張り、曲げ負荷においても見られるが、ペローズ両端でピークが現われるせん断負荷においては、これが直接、簡易式との差異となる。応力分布図において、ピーク値を外挿して端部の値を推測すると、ほぼ簡易式に近い値となることわかる。

ねじりについては、応力、ばね定数ともに簡易式、FEM の差異が定量的に同じ傾向があるため、今後検討を要する。

9. 謝 辞

本解析を実施するに当っては、センチュリリサーチセンター株式会社構造技術部，川副博，吉田博治の両氏に大変お世話になったことを記すとともに，謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Standard of the Expansion Joint Manufacturers Association, Inc. Fifth Edition (1980).

APPENDIX. A

要素分割，要素特性に関する予備検討

板厚 2 mm の 1 山モデル（モデル A - 1）を用いて，曲げ，せん断における要素分割，要素特性の影響について検討する。

要素分割については，56分割，100分割の場合について比較する。

要素特性については，適合要素，非適合要素の場合について比較する。

各評価点の応力を Table A.1～A.2 に示す。また，応力分布図を Figure A.1～Figure A.12 に示す。これらより，要素分割については，ほとんど差がなく 56 分割で充分である。要素特性についても，ほとんど差がなく，本解析においては，非適合要素を用いる。

Table A.1 Differences among 3 models for bending (1 convolution, t=2mm) case A-1

(unit : kg/mm²)

Model	Point	inner surface		outer surface		membrane		bending	
		σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ
56 elements non-compatible elements	1	111.4	13.96	-113.9	-45.97	-1.25	-16.00	112.7	29.96
	2	76.64	22.84	-77.84	-23.75	-0.60	-0.45	77.24	23.29
	3	0.23	4.20	-0.74	-3.71	-0.25	0.24	0.49	3.95
	4	-84.14	-16.68	82.70	24.16	-0.72	3.74	-83.42	-20.42
	5	-102.9	-13.72	100.5	40.38	-1.24	13.33	-101.7	-27.05
100 elements non-compatible elements	1	111.2	13.96	-113.7	-45.87	-1.25	-15.96	112.45	29.92
	2	76.36	22.85	-77.44	-23.63	-0.54	-0.39	76.90	23.24
	3	0.23	4.19	-0.74	-3.71	-0.25	0.24	0.48	3.95
	4	-81.4	-16.77	79.86	22.44	-0.77	2.83	-80.63	-19.6
	5	-102.8	-13.72	100.3	40.30	-1.24	13.29	-101.56	-27.01
56 elements compatible elements	1	111.3	13.95	-113.9	-45.98	-1.30	-16.02	112.6	29.97
	2	76.85	22.89	-77.63	-23.69	-0.39	-0.40	77.24	23.29
	3	0.24	4.20	-0.74	-3.71	-0.25	0.24	0.49	3.96
	4	-83.9	-16.61	82.94	24.22	-0.48	3.81	-83.42	-20.42
	5	-102.9	-13.71	100.5	40.39	-1.21	13.34	-101.69	-27.05

Table A.2 Differences among 3 models for Shearing (1 convolution, t=2mm) case A-1

(unit : kg/mm²)

Model	Point	inner surface		outer surface		membrane		bending	
		σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ	σ_ψ	σ_θ
56 elements non-compatible elements	1	-72.40	-19.28	67.38	17.90	-2.51	-0.69	-69.89	-18.59
	2	67.27	13.38	-75.83	-26.05	-4.37	-6.33	71.64	19.71
	3	16.57	-2.63	-23.14	-17.26	-2.84	-9.86	19.41	7.23
	4	-34.25	-18.53	30.87	-3.93	-1.69	-11.23	-32.56	-7.30
	5	-0.48	-0.13	0.26	-0.12	-0.11	-0.12	-0.37	0.00
100 elements non-compatible elements	1	-72.12	-19.46	68.54	18.22	-2.29	-0.62	-70.83	-18.84
	2	67.24	13.37	-75.97	-26.06	-4.37	-6.34	71.61	19.71
	3	16.57	-2.64	-22.24	-17.11	-2.84	-9.87	19.41	7.23
	4	-34.46	-19.09	30.97	-4.44	-1.74	-11.76	-32.72	-7.33
	5	-0.24	-0.06	0.13	-0.06	-0.06	-0.06	-0.18	0.00
56 elements compatible elements	1	-72.21	-19.23	67.57	17.95	-2.32	-0.64	-69.89	-18.59
	2	67.17	13.35	-76.10	-26.06	-4.47	-6.35	71.64	19.7
	3	16.76	-2.58	-22.05	-17.04	-2.65	-9.81	19.41	7.23
	4	-34.17	-18.51	30.95	-3.91	-1.61	-11.21	-32.56	-7.30
	5	-0.27	-0.08	0.44	-0.07	0.07	-0.07	-0.36	-0.01

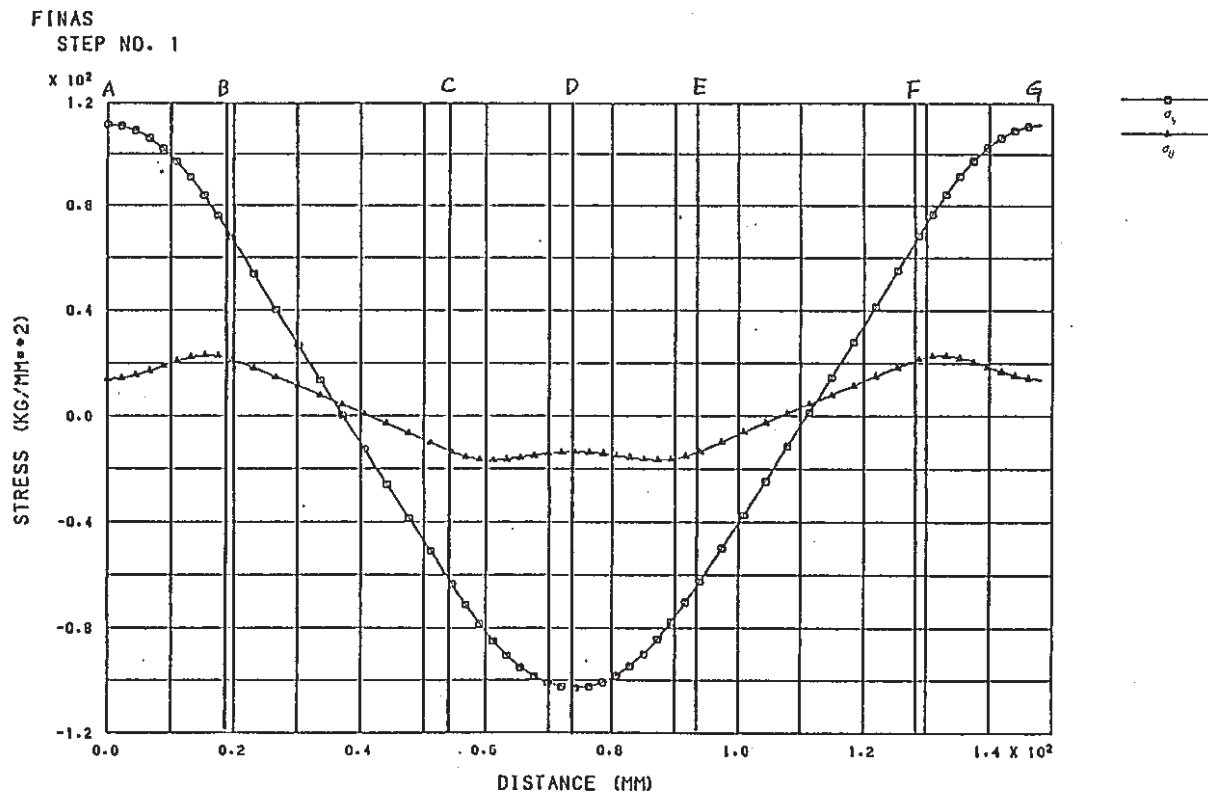


Figure A.1 Stress Distribution (Bending, inner surface)
1-pitch, t=2,56el

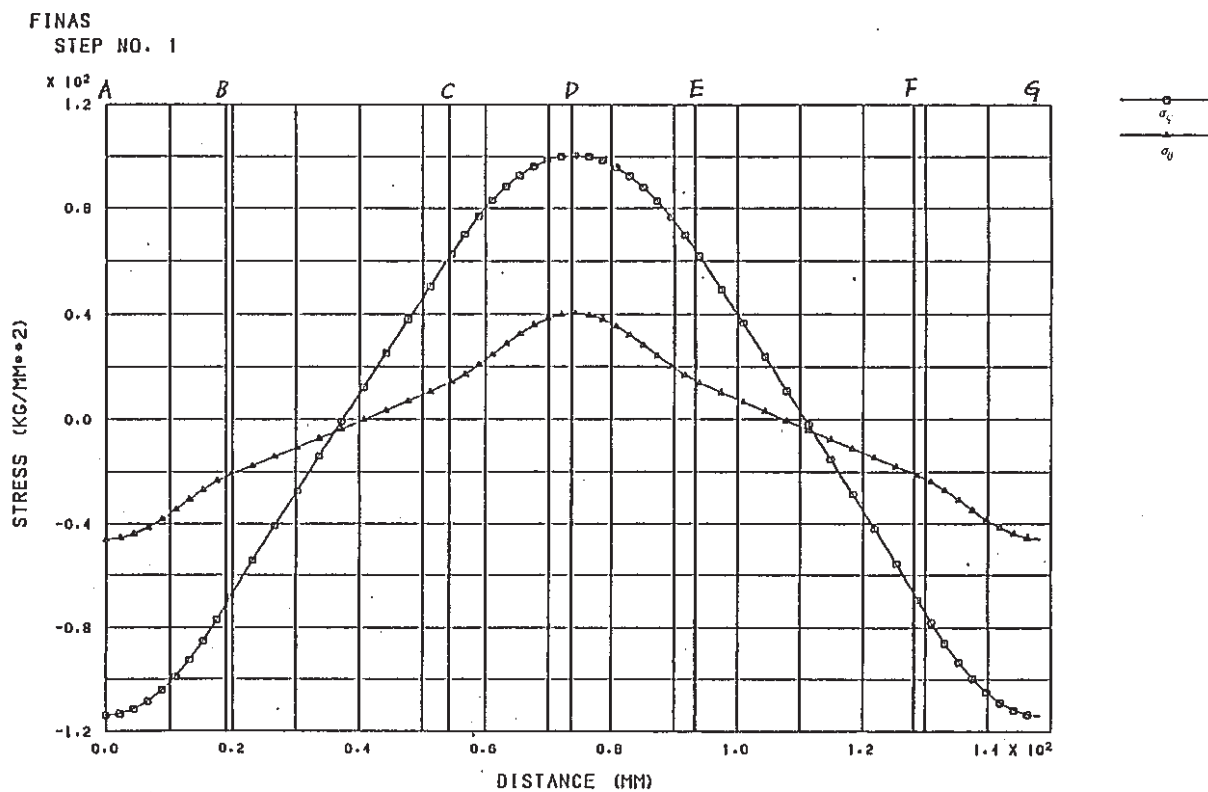


Figure A.2 Stress Distribution (Bending, outer surface)
1-pitch, t=2,56el

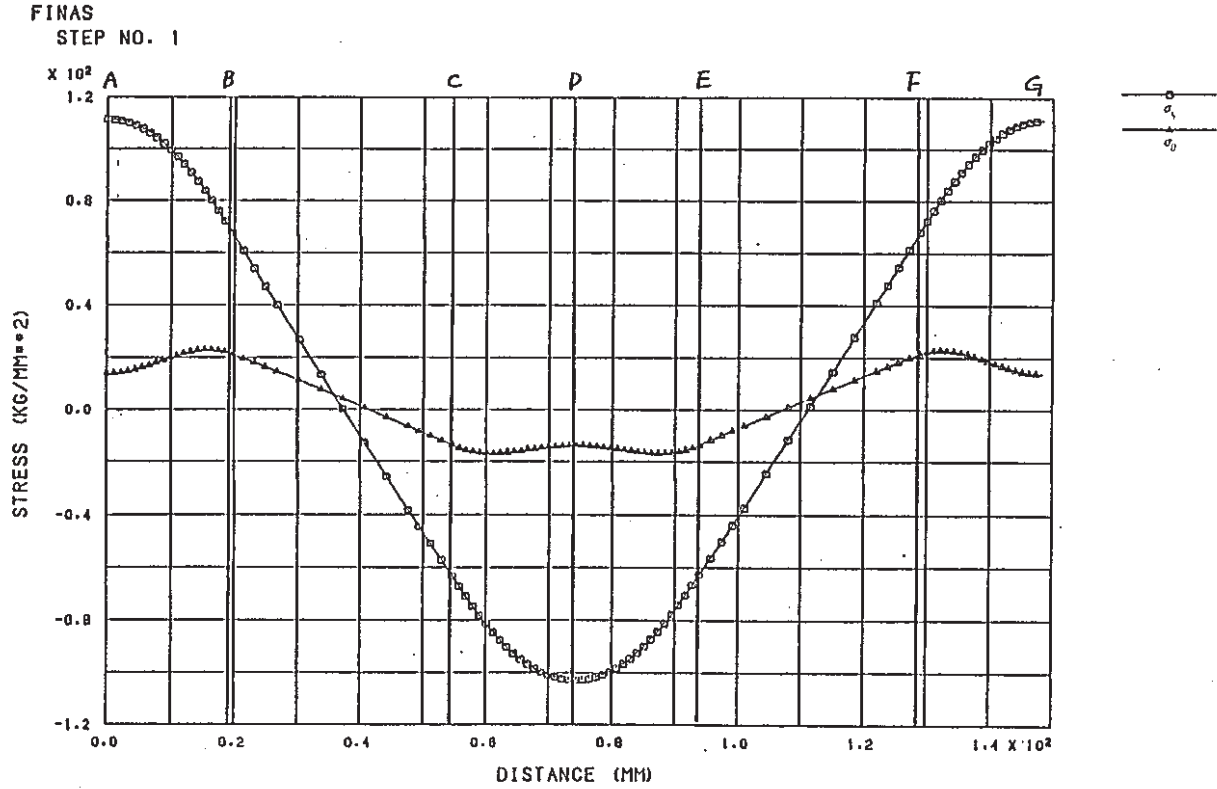


Figure A.3 Stress Distribution (Bending, inner surface)
1-pitch, t=2, 100e1

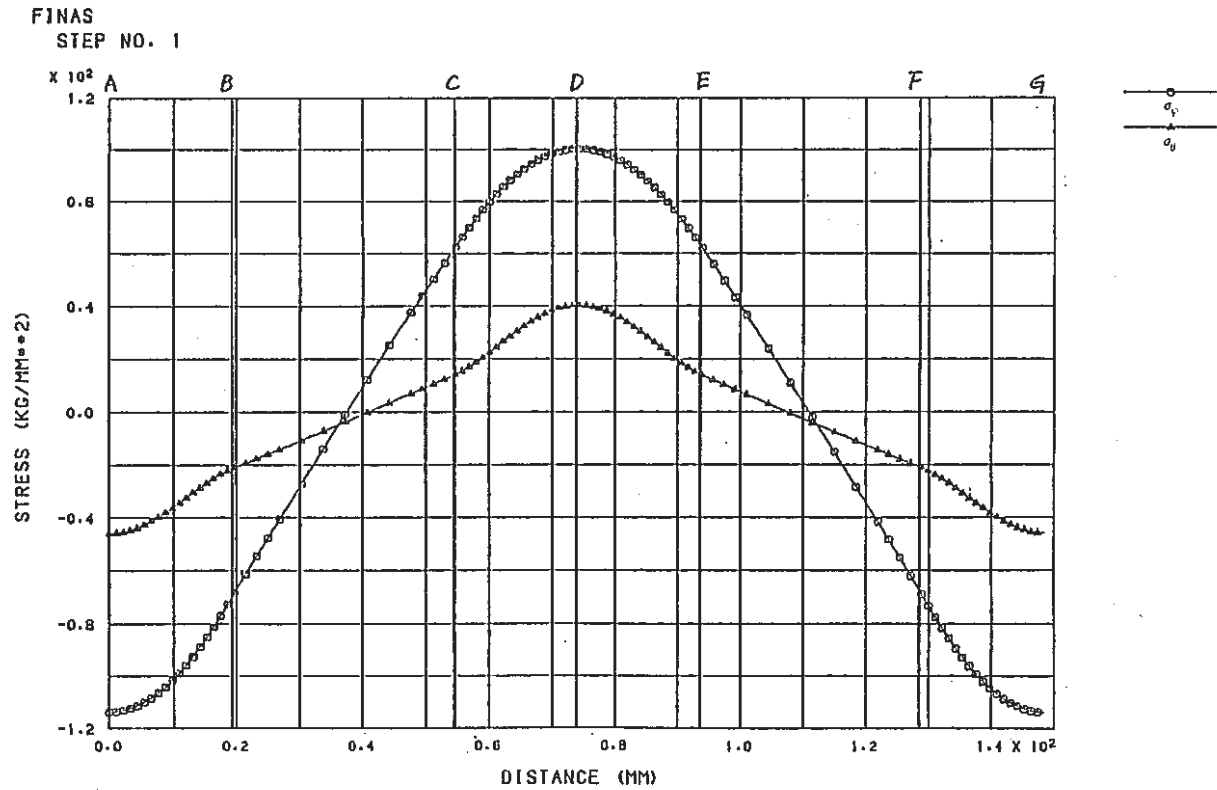
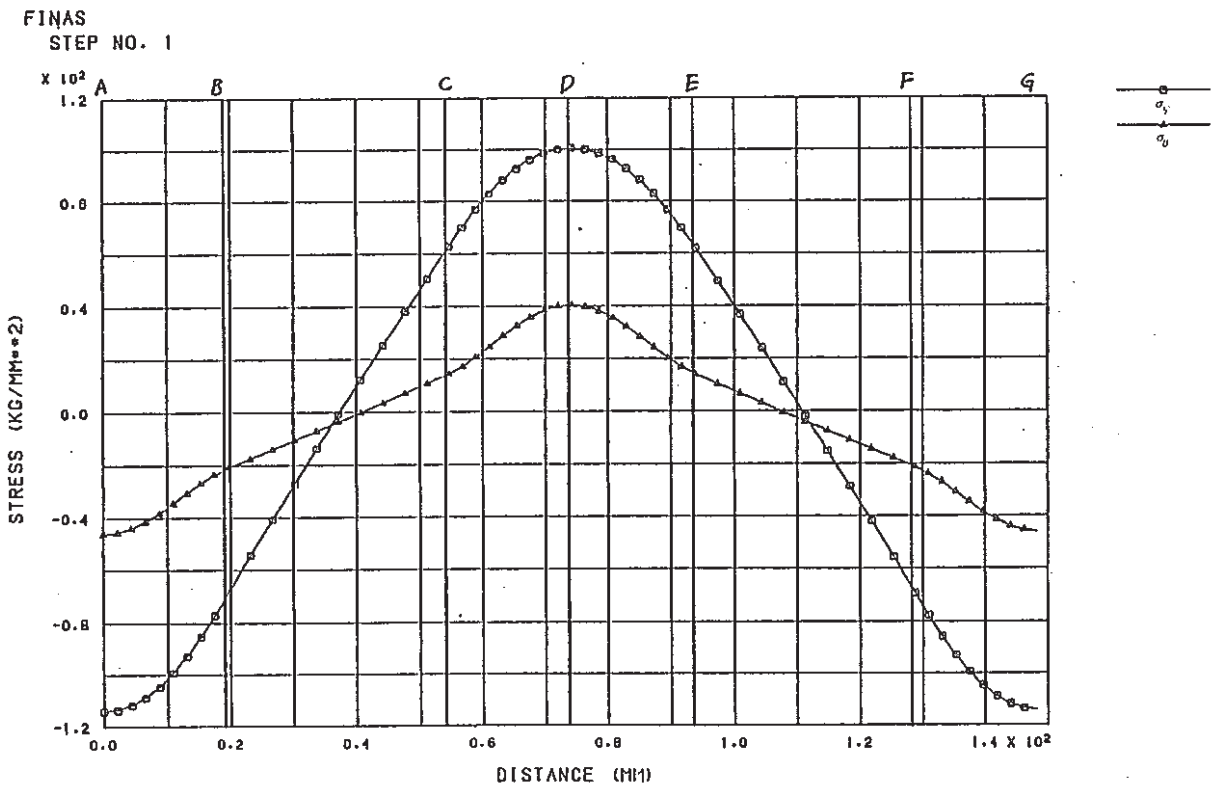
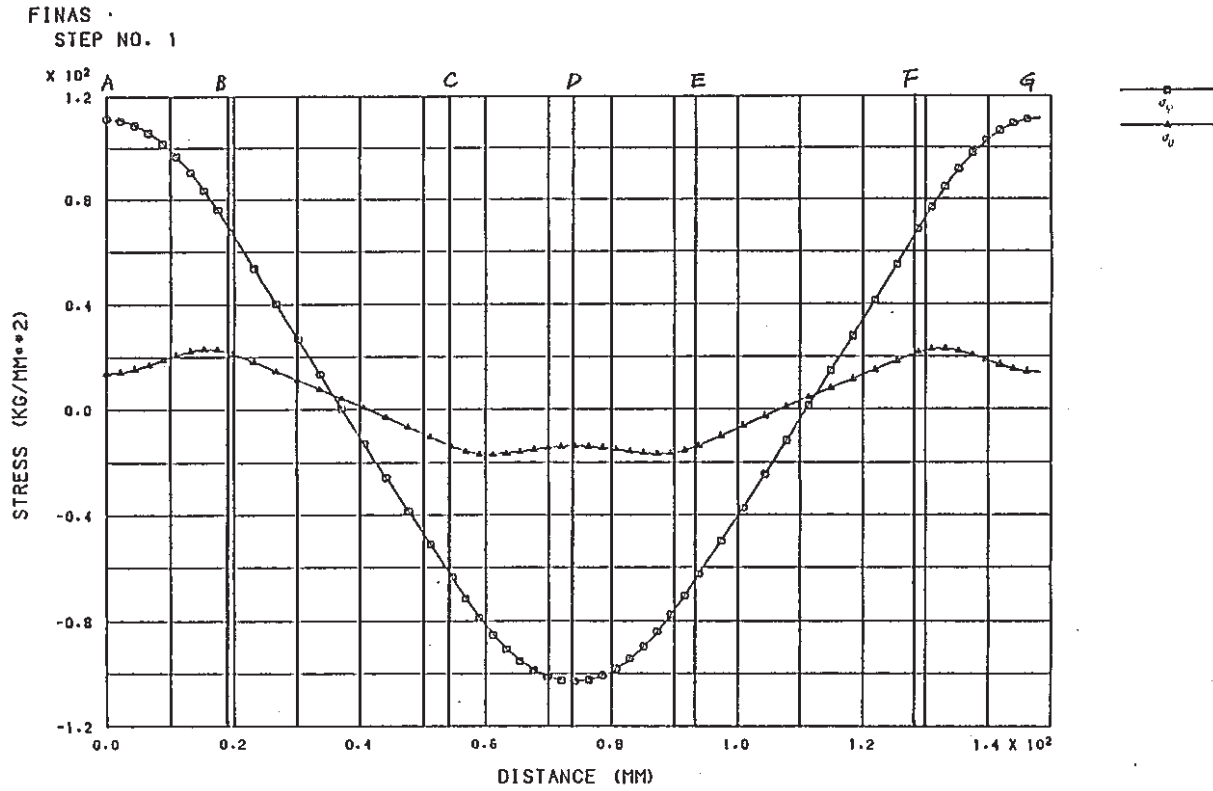
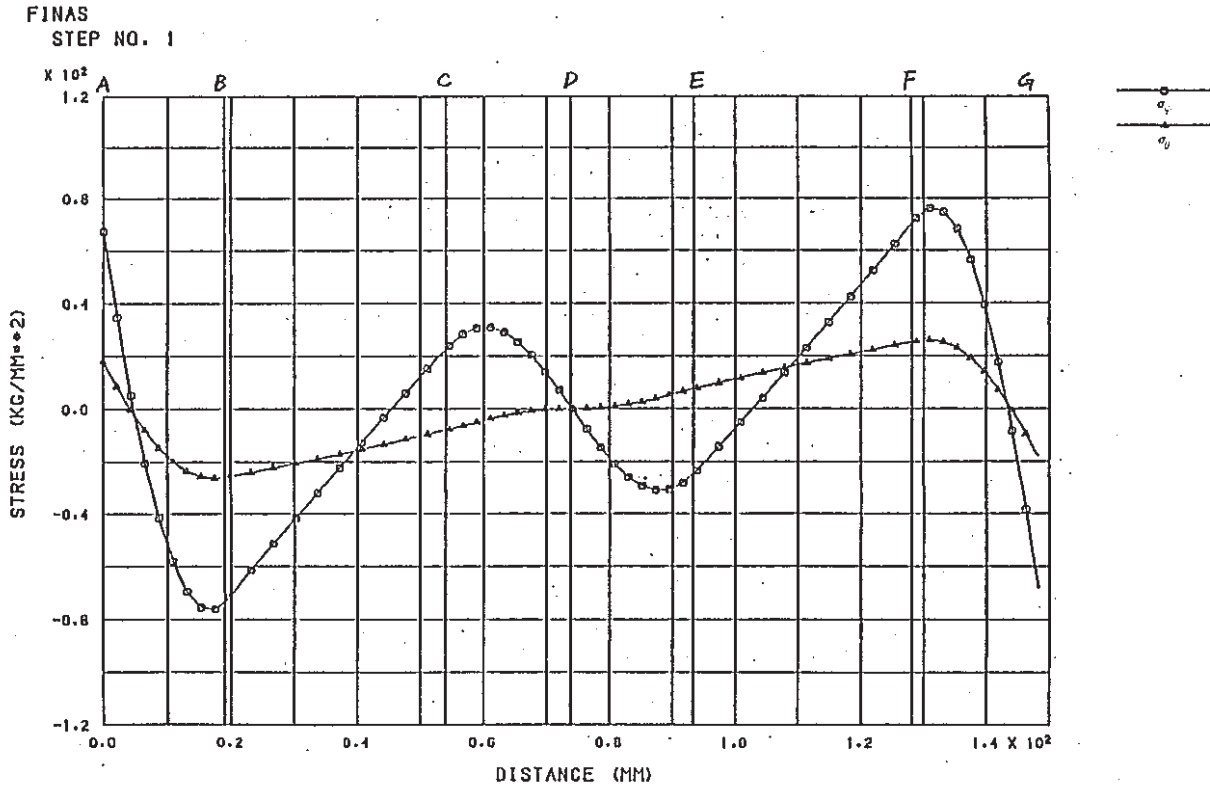
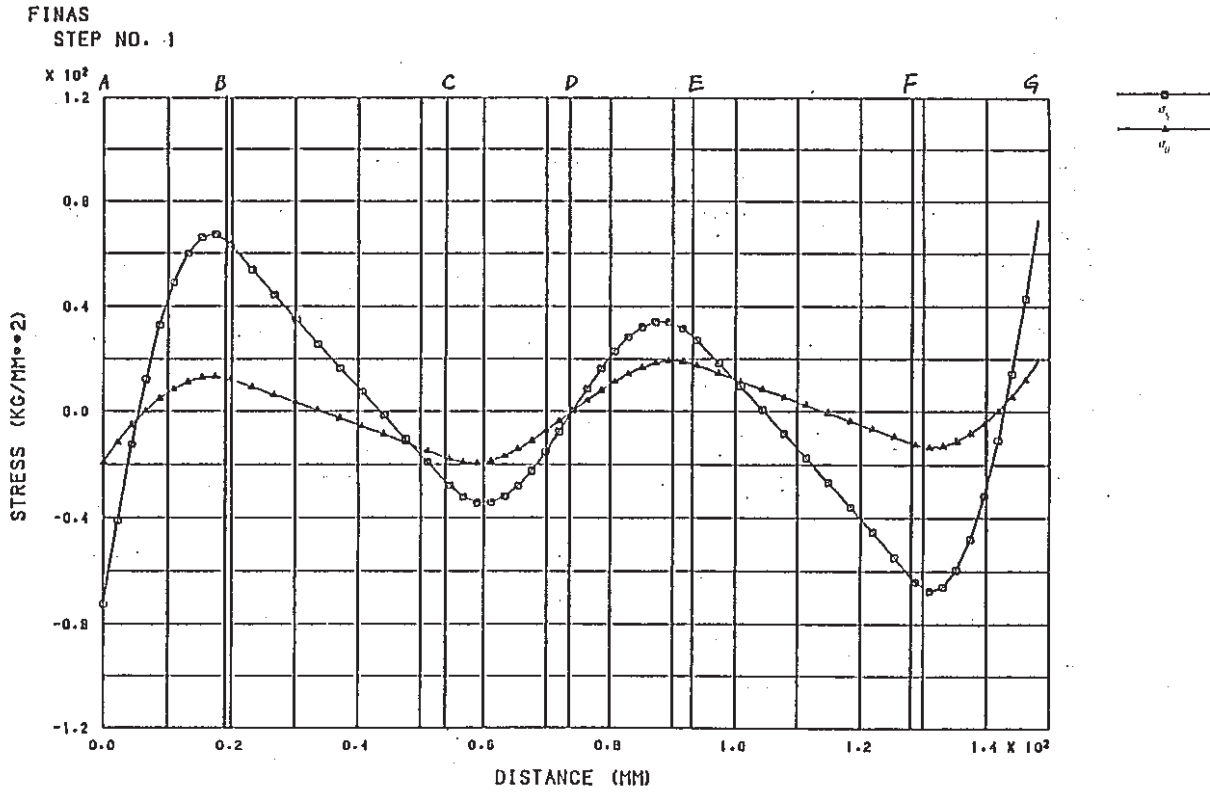
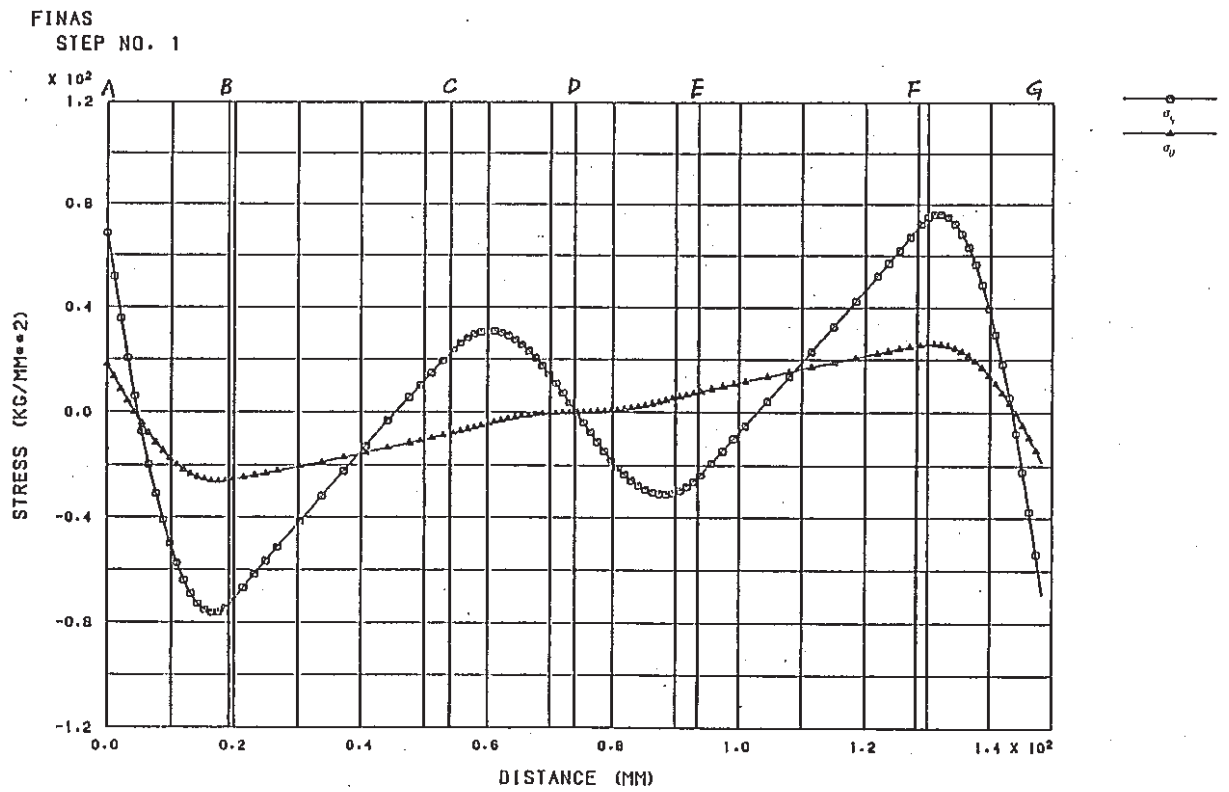
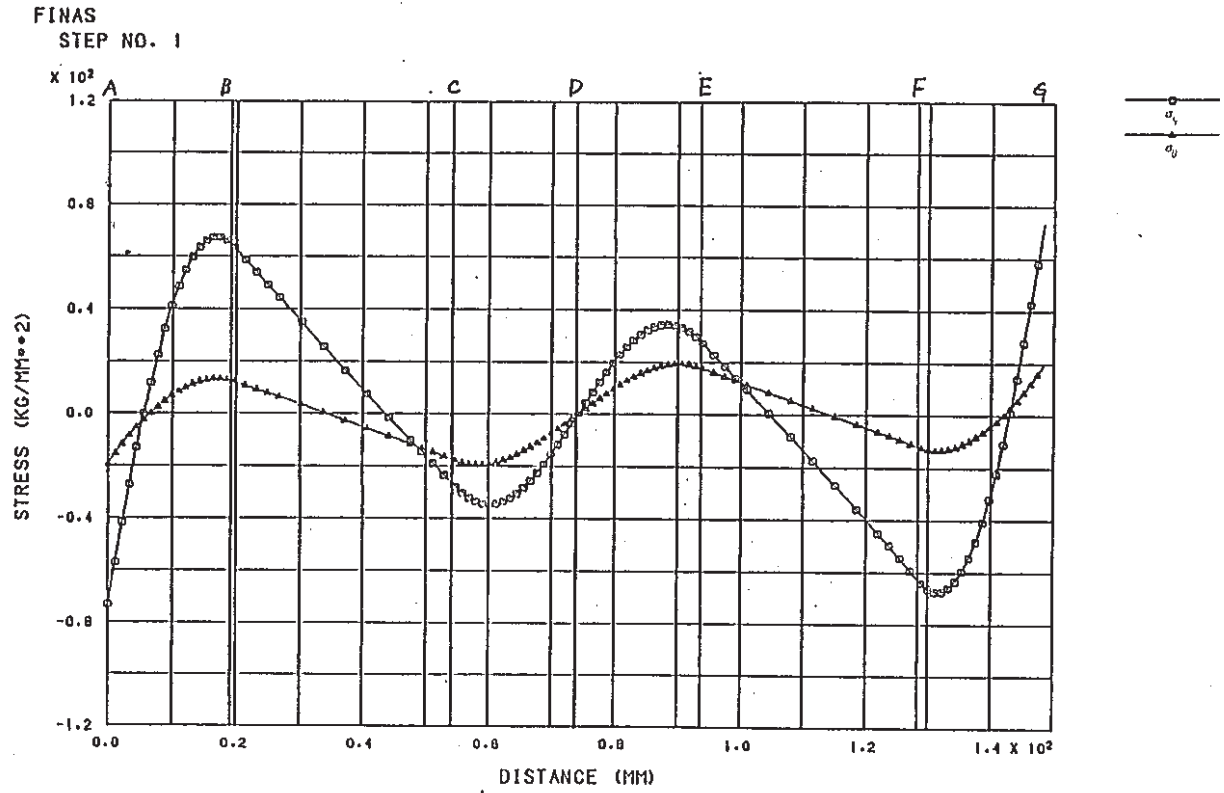
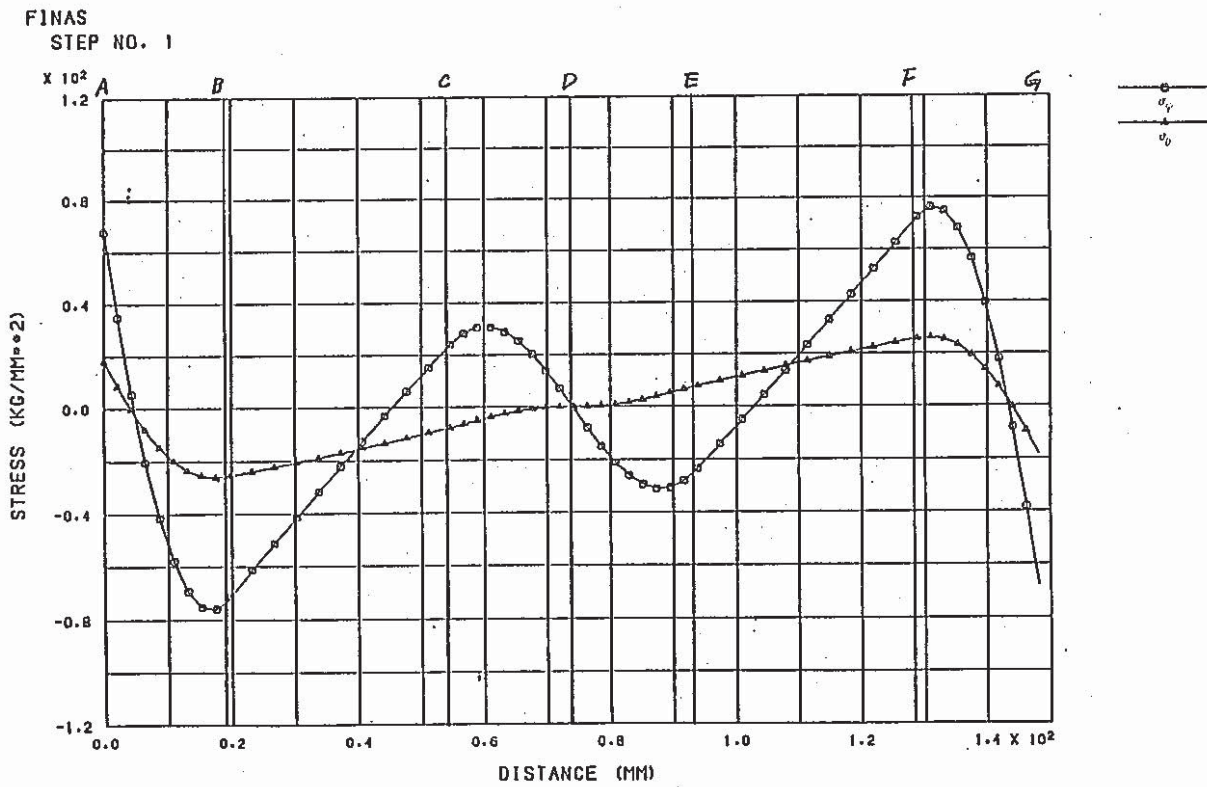
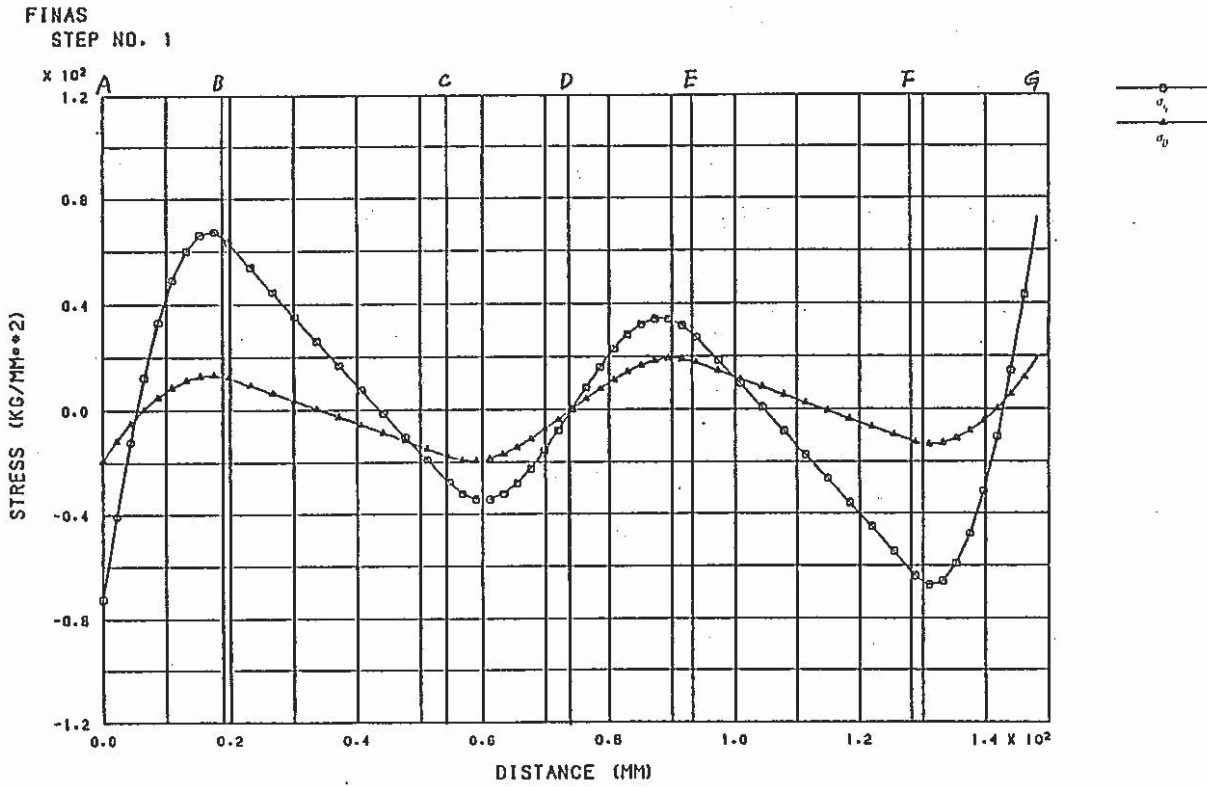


Figure A.4 Stress Distribution (Bending, outer surface)
1-pitch, t=2, 100e1









APPENDIX. B

軸対称シェルと3次元曲面シェルの比較

1/2山モデルの曲げについて、非軸対称解析用軸対称シェル要素を用いたモデルと3次元曲面シェル要素を用いたモデルについて比較する。

3次元モデルは、長手方向12分割、周方向18分割のモデル、長手方向8分割、周方向8分割のモデル、長手方向5分割、周方向8分割のモデルの結果を示す。

Figure B.1に示す評価点の応力をTable B.1に、応力分布図をFigure B.2～Figure B.5に、変形図をFigure B.6～Figure B.9に示す。

Figure B.4からわかるように、3次元曲面シェル要素の分割を細かくするに従い、軸対称シェル要素の解析結果に近づく。このことから、軸対称シェル要素を用いた本非軸対称解析が妥当であることが確認できる。

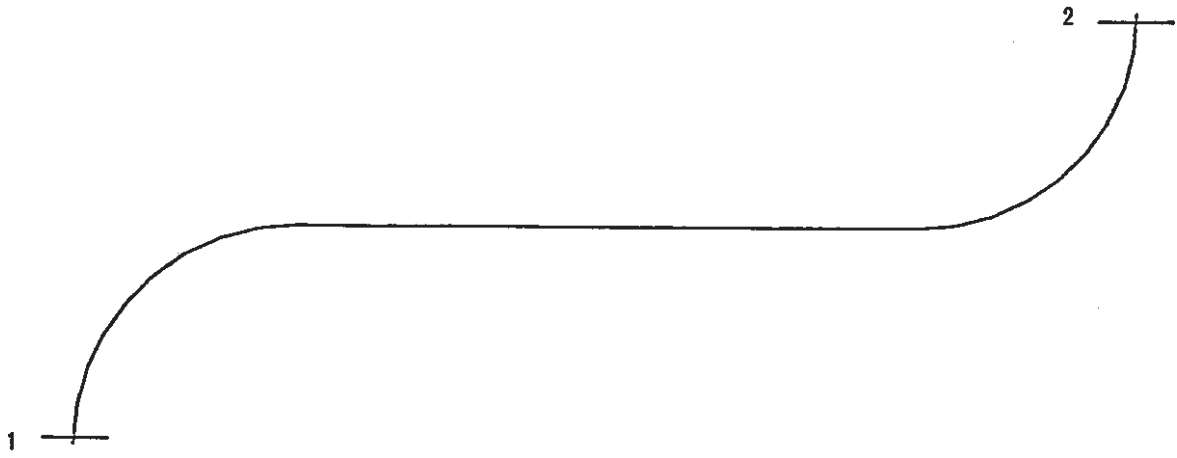


Figure B.1 Valuation points ($\frac{1}{2}$ convolution model)

Table B.1 Stresses at the valuation points

(unit : kg/mm²)

Model	Point 1				Point 2			
	inner surface		outer surface		inner surface		outer surface	
	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}
axisymmetric shell	111.4	13.96	-113.9	-45.96	-102.9	-13.71	100.4	40.38
3 dimensional shell (12×18 elements)	102.8	12.76	-95.12	-39.93	-105.9	-14.92	109.6	42.25
3 dimensional shell (8×8 elements)	99.86	11.96	-91.76	-39.20	-77.68	-9.86	89.55	34.25
3 dimensional shell (5×8 elements)	102.5	12.36	-83.81	-37.59	-67.95	-8.97	82.60	30.43

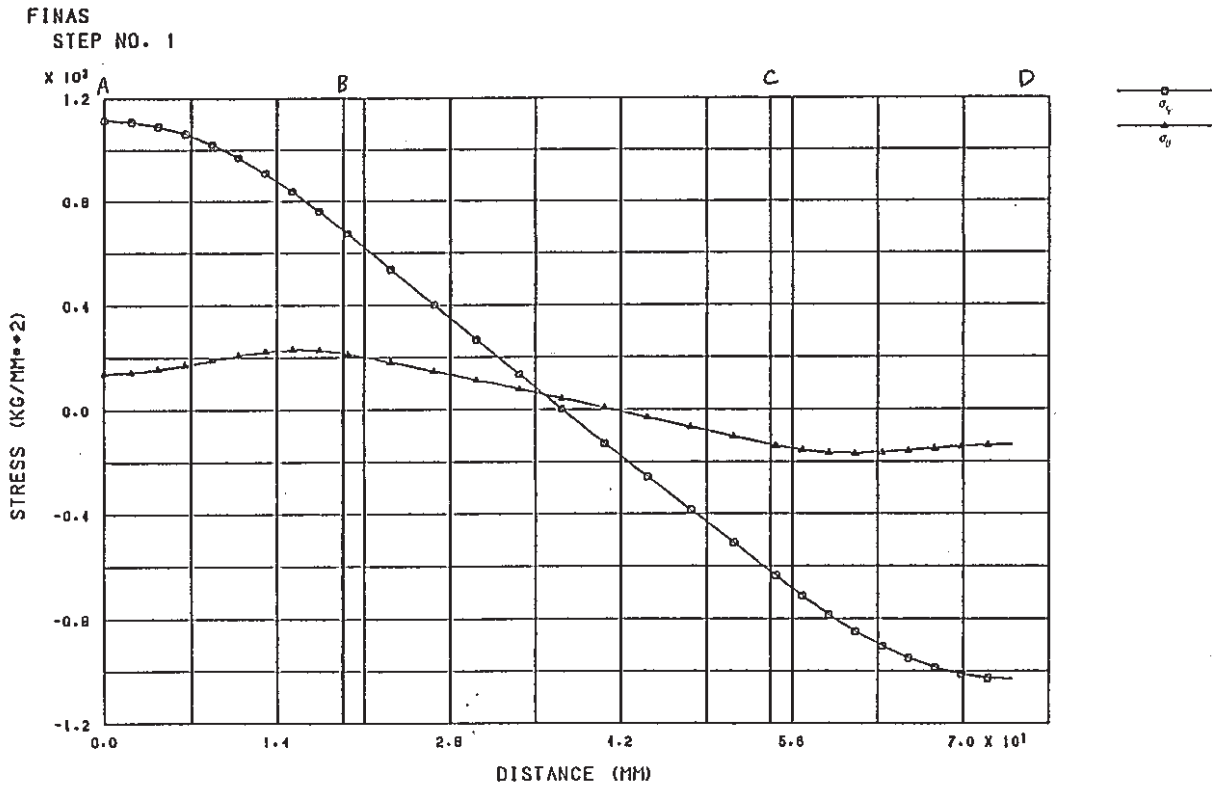


Figure B.2 Stress Distribution (Bending, inner surface, Axisymmetric shell)

$\frac{1}{2}$ -pitch, t=2, 28el

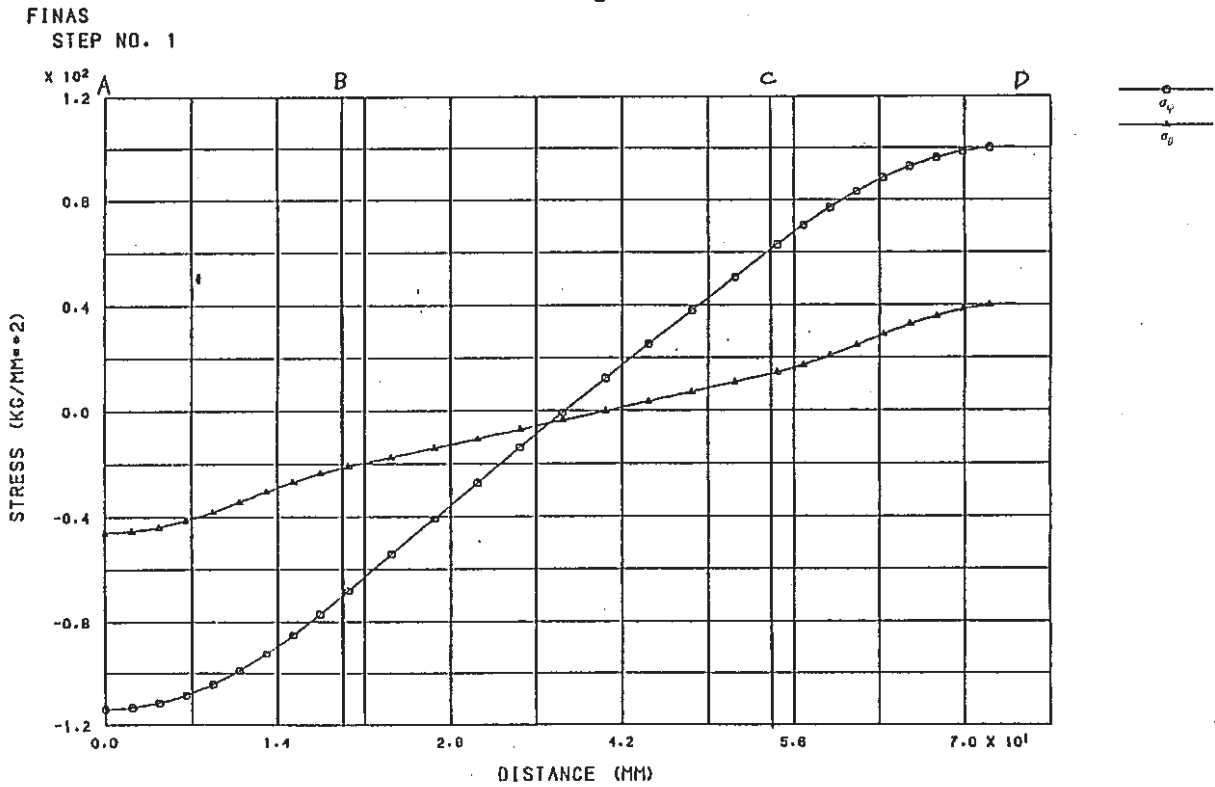


Figure B.3 Stress Distribution (Bending, outer surface, Axisymmetric shell)

$\frac{1}{2}$ -pitch, t=2, 28el

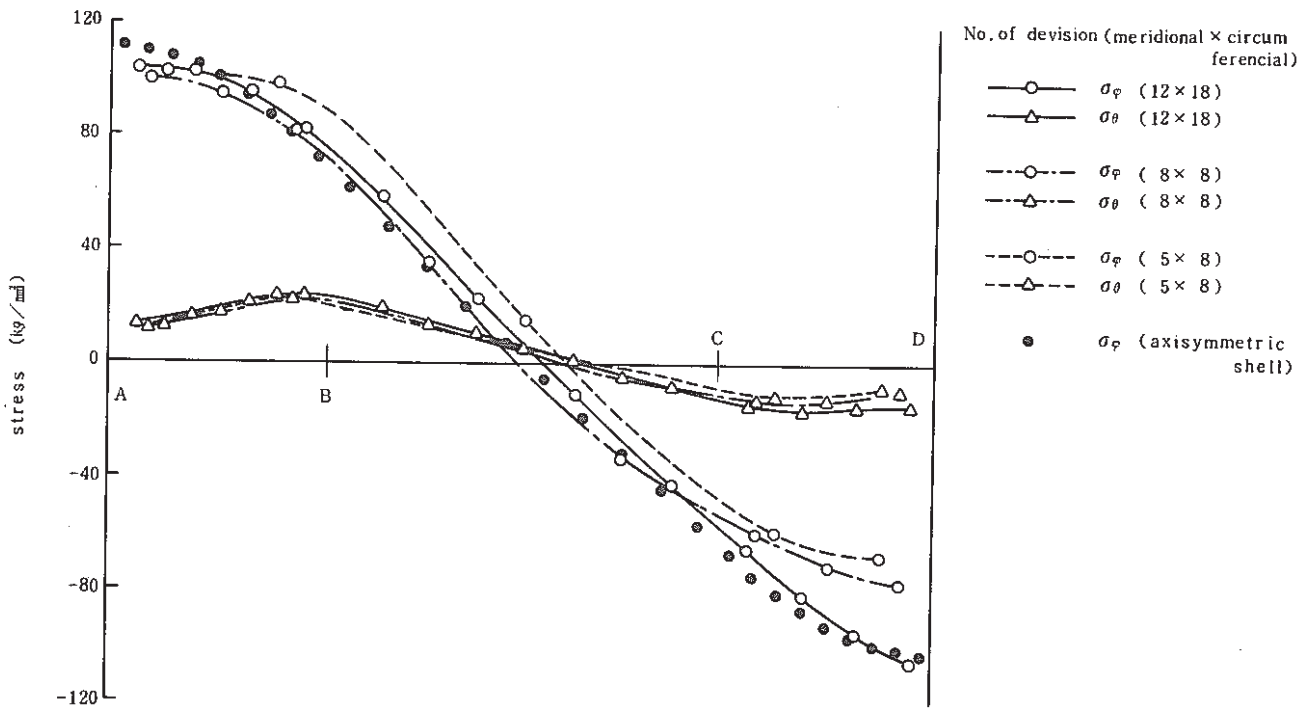


Figure B.4 Stress Distribution (Bending, inner surface, 3 dimensional shell)

$\frac{1}{2}$ -pitch, t=mm

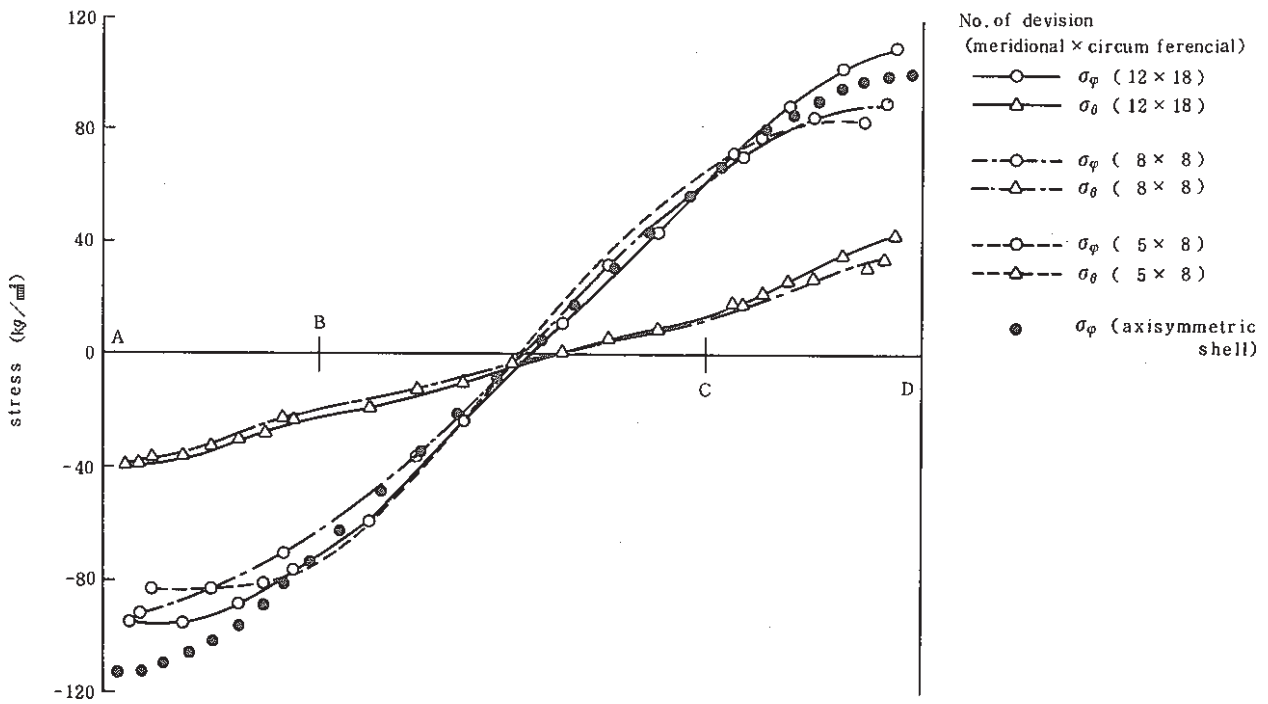


Figure B.5 Stress Distribution (Bending, outer surface, 3 dimensional shell)

$\frac{1}{2}$ -pitch, t=mm

— 90 —

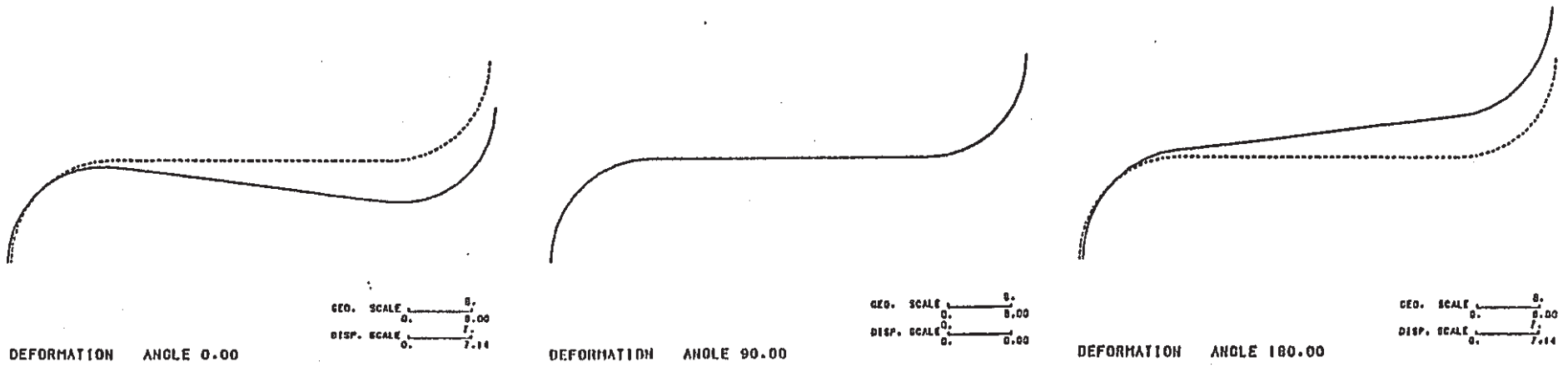
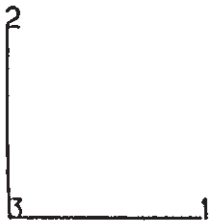


Figure B.6 Deformed Shape (Bending, case A-3)

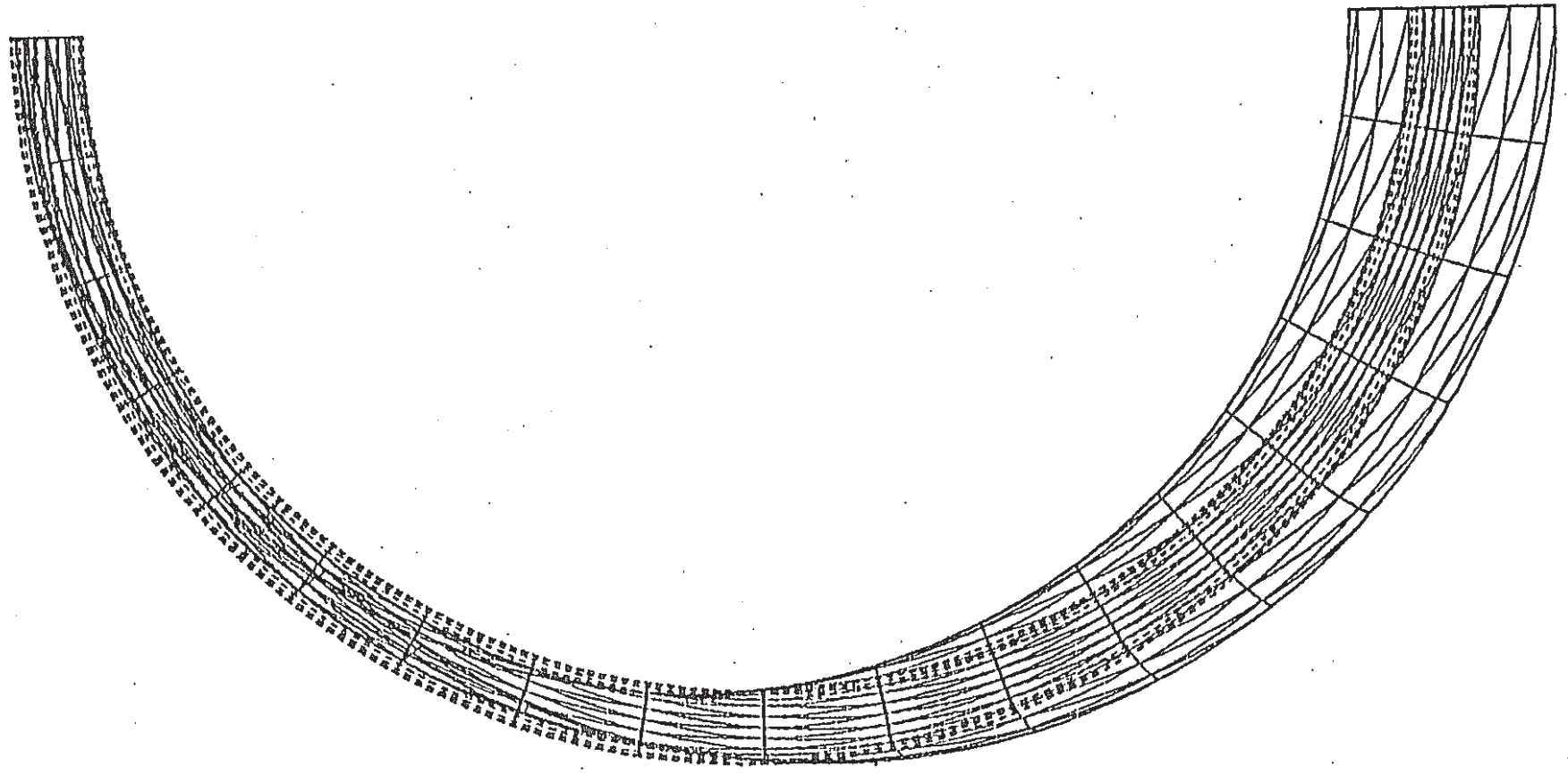


— 91 —



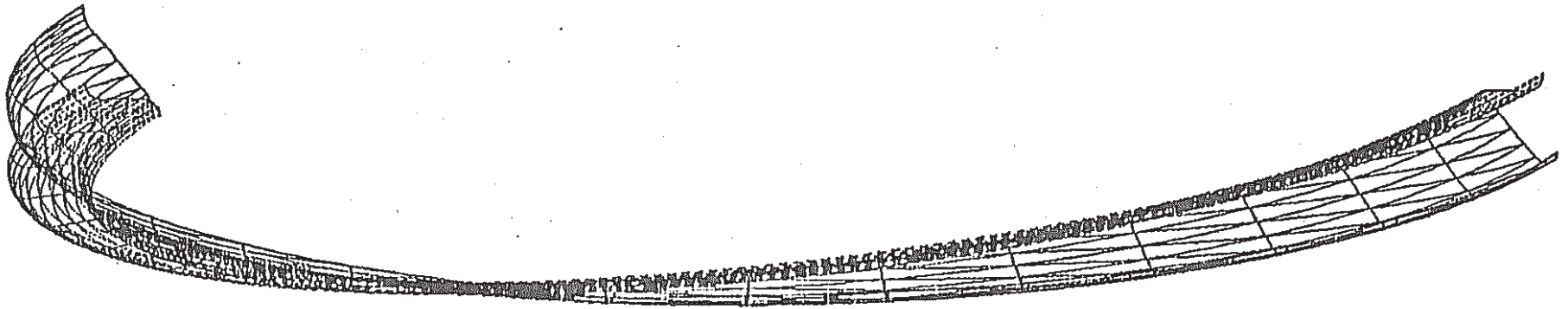
BELLOWS MODEL (1/2 PITCH)

Figure B.7 Deformed Shape (Bending, case A-4)

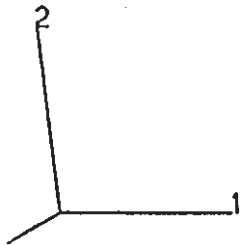


BELLOWS MODEL (1/2 PITCH)

Figure B.8 Deformed Shape (Bending, case A-4)



—93—



BELLOWS MODEL (1/2 PITCH)

Figure B.9 Deformed Shape (Bending, case A-4)

APPENDIX. C E J M A st. による各値の算出

名 称	記 号	計 算 式	単 位	値	備 考
谷 外 径	d		mm	1100	
山 高	H		mm	60	
ピ ッ チ	q		mm	50	
板 厚	t		mm	A2 / B3	
ピ ッ チ 径	d_p	$d + H$	mm	1160	
	t_p	$t \sqrt{\frac{d}{d_p}}$	mm	A 1.95 B 2.92	
1 山 展 開 長 さ	L_d	$2H + (\pi/2 - 1)q$	mm	148.5	
層 数	n			1	
山 数	N			A7 / B14	
		$\frac{q}{2H}$		0.417	C_p, C_f, C_d を求めたための パラメータ
		$\frac{q}{2.2 \sqrt{d_p t_p}}$		A 0.478 B 0.391	"
	C_p	図表から読み取る		0.7	
	C_f	"		1.55	
	C_d	"		1.6	
縦 弾 性 係 数	E		kg/mm ²	1.98×10^4	R. T., SUS316
横 弾 性 係 数	G	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	kg/mm ²	7.82×10^3	"
ポ ア ソ ン 比	ν			0.266	"
1 山 相 当 の ば ね 定 数	f_w	$1.7 \frac{d_p E t_p^3 n}{H^3 C_f}$	kg/mm	A 864.8 B 2903.6	
軸 方 向 ば ね 定 数	K_x	$\frac{f_w}{N}$	kg/mm	A 123.5 B 207.4	
軸 直 方 向 ば ね 定 数	K_y	$\frac{3 f_w d_p^2}{2 N^3 q^2}$	kg/mm	A 2.035×10^3 B 8.543×10^2	

名 称	記 号	計 算 式	単 位	値	備 考
曲げばね定数	K_{θ}	$\frac{f_w d_p^2}{8 N}$	kg・mm/rad	A 2.078×10^7 A 3.488×10^7	
ねじりばね定数	K_{ω}	$\frac{\pi G t d^3}{4 L_d N}$	kg・mm/rad	A 1.583×10^{10} A 1.180×10^{10}	
内圧による 周方向膜応力	S_2	$\frac{pd_p}{2nt_p} \left(\frac{1}{0.571+2H/q} \right)$	kg/mm ²		pは内圧 kg/mm ²
内圧による 子午線方向膜応力	S_3	$\frac{pH}{2nt_p}$	"		"
内圧による子午線 方向曲げ応力	S_4	$\frac{p}{2n} \left(\frac{H}{t_p} \right)^2 C_p$	"		"
変位による 子午線方向膜応力	S_5	$\frac{E t_p^2 e}{2 H^3 C_r}$	"		eは1山相 当変位 mm
変位による子午線 方向曲げ応力	S_6	$\frac{5 E t_p e}{3 H^2 C_d}$	"		"
内 圧	p		kg/mm ²		
1山相当の変位	e	$\frac{\delta_x}{N} + \frac{d_p \theta}{2N} + \frac{3d_p \delta_y}{N^2 q}$	mm/山		
内圧による子午線 方向外表面ひずみ	ϵ_p	$\frac{S_3 + S_4}{E}$	$\mu \epsilon$		
軸変位による子午線 方向外表面ひずみ	$\Delta \epsilon_{ax}$	$\frac{\Delta (S_5 + S_6)}{E}$	$\mu \epsilon$		
曲げ変位による子午 線方向外表面ひずみ	$\Delta \epsilon_{be}$	"	$\mu \epsilon$		
軸直変位による子午 線方向外表面ひずみ	$\Delta \epsilon_{La}$	"	$\mu \epsilon$		
応 力 範 囲	ΔS_t	$\Delta (S_5 + S_6)$	kg/mm ²		
疲 勞 寿 命	N_f	$\left[\frac{1.308 \times 10^3 T_f}{S_T - 38.0} \right]^{3.4}$			$T_f = 1$ (R.T.)
ひ ず み 範 囲 (弾性ベース)	$\Delta \epsilon_t$	$\frac{\Delta S_T}{E}$	$\mu \epsilon$		