

MSP0014-R00

2022 年 4 月 27 日

エムエス配管解析技術

水 野

直交型モデルによる T 字配管の内圧負荷解析の結果

(解析 No. TEE01P500F1NA)

1. まえがき

本資料は、20BSch40 SUS304 の T 字配管に対する内圧負荷解析の結果をまとめたものである。

2. 解析モデル

本解析では、ティーズのクロッチ部曲げ半径 R_c を仮想に 0mm とした所謂「直交型」モデルを用いる。クロッチ部形状が実際とは異なるが、ティーズの基本的な構造応答特性を把握するためには寧ろ都合がよい。また低グレードの低压配管では、この「直交型」ティーズ継手が、直管を加工し交叉溶接するだけで簡単に製作できることから実際にもよく用いられている実態があり、本解析はその参考となり得る。

図 1 には、解析に使用した T 字配管の解析モデルの全体概要を示す。

図 2 には、ティーズ部の「直交型」モデルのメッシュ分割(NTS)の詳細を示す。

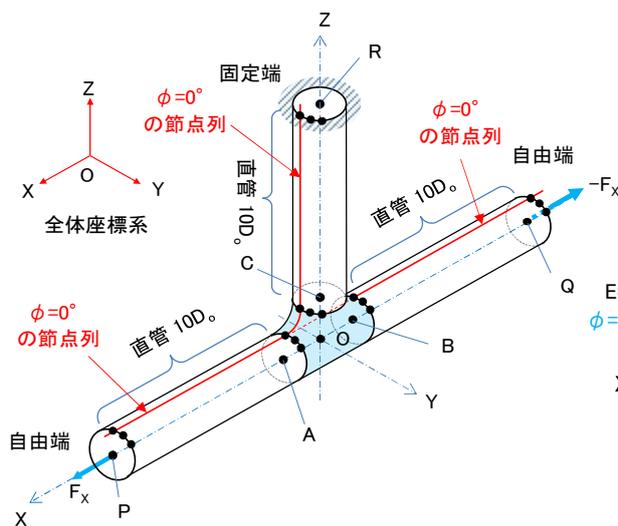


図1 T字配管の3次元シェル解析モデル
(内圧負荷解析)

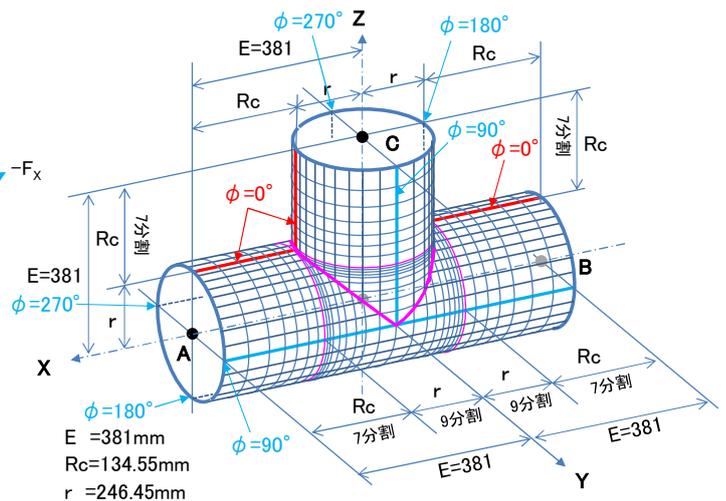


図2 ティーズ部の直交型分割モデル (JIS)

表 1 に T 字配管の主な寸法・仕様を示す。

接続配管は、主管・枝管ともに 20BSch40 ($t=15.1\text{mm}$) SUS304 配管とした。またティーズは SUS304 材の同径型で、肉厚は Sch40 とした。その他、ティーズの E 寸法(注記 1)や R_c 寸法は JIS に従った。

尚、解析モデルでは、配管・ティーズとも外形寸法には公称値を用いた。特に肉厚に就いては、直管は概ね均一で公称肉厚に近く、肉厚公差も $\pm 10\%$ で問題はない。しかしティーズは、相当に厚肉で公称値の 2~3 倍はざらで、且つ偏肉も大きい。解析では直管・ティーズともに均一且つ公称肉厚に等しい $t=15.1\text{mm}$ と仮定した。

(注記 1) JIS では、「中心から端面までの距離」が主管側で C、枝管側で M と規定されている。同径ティーズでは $C=M$ であるが、大口径の一部で $M < C$ の場合がある。ここでは $M < C$ の場合も含め、「E 寸法」を $E=C$ として定義してモデル化する。

解析コードは SAPIV とし、使用要素は 3 次元四辺形板シェル要素(type6)とした。

要素分割は、図 3 に示すように管周方向は 10° 刻みの 36 等分割とした。

尚、 $\phi=0^\circ$ の位置は図 1、図 2 に赤線で示す通りである。この直交型モデルの場合は、図 2 に示したようにティ

ーズと直管は同じ周方向要素分割となるため、 $\phi=0^\circ$ や $\phi=5^\circ$ のように ϕ の特定値で「節点列」や「要素列」を唯一的に示すことができる。以降、特定の「節点列」や「要素列」を示す場合は角度 ϕ を用いるので、記憶しておいて頂きたい。

直管長さは $10D_o$ (D_o : 外径) 程度とし、配管端部での荷重負荷や端部拘束の影響がティーズ部にできるだけ及ばないようにした。直管の軸方向分割は不等分割で、最大長さは $1D_o$ とし、ティーズとの接続部近傍では、円周方向の分割長さやティーズ側の要素長さを考慮して、それらと概ね同等になるようにした。

総節点数は 3977, 総要素数は 3924 である。

尚、相貫線部には「直角三角形」要素があるが、これは斜辺の midpoint に節点を設けた四辺形要素である。

解析温度は 20°C 常温とし、 20°C の SUS304 材料データを用いた。

内圧解析では枝管端部 R 点を固定とした。R 点に対する詳しい境界条件は表 3 に示す通りである。また主管の両端の P 点, Q 点はフリーとし、内圧による等価軸力 $\pm F_x$ (総荷重) を負荷した。詳細は次節 3 「荷重条件」を参照願いたい。

SUS304 の 20°C の材料定数は以下とした。

- (1) 縦弾性係数: $E=19,900\text{kg}/\text{mm}^2$
- (2) ポアソン比: $\nu=0.30$

シェル解析に必要なとなる材料定数はこれらの値から計算した。

表1 T字配管の寸法仕様(JISベース)

項目	記号	単位	主管	枝管	
直管仕様	呼び径	—	20B	20B	
	肉厚	—	Sch40	Sch40	
	材質	—	SUS304	SUS304	
	外径	D_o	mm	508.0	508.0
	内径	$D_i=D_o-2t$	mm	477.8	477.8
	肉厚	t	mm	15.1	15.1
	管平均外径	$D_m=D_o-t$	mm	492.9	492.9
	管平均半径	$r=D_m/2$	mm	246.45	246.45
	直管長さ(約 $10D_o$)	L	mm	5182	5182
	P点X座標, R点Z座標	—	mm	5563	5563
ティーズ仕様	呼び名称	—	20B × Sch40T		
	呼び径	—	20B	20B	
	肉厚	—	Sch40	Sch40	
	材質	—	SUS304	SUS304	
	外径	D_o	mm	508.0	508.0
	内径	$D_i=D_o-2t$	mm	477.8	477.8
	肉厚	t	mm	15.1	15.1
	管平均外径	$D_m=D_o-t$	mm	492.9	492.9
	管平均半径	$r=D_m/2$	mm	246.45	246.45
	ティーズ E寸法	E	mm	381.00	
クロッチ部曲げ半径	$R_c=E-r$	mm	134.55		

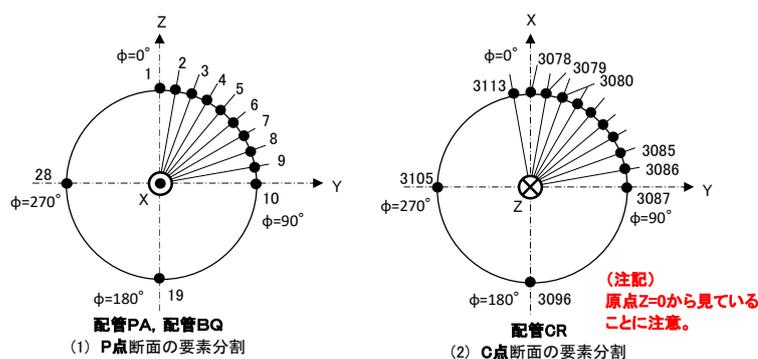


図3 配管断面の要素分割

3. 荷重条件

内圧としてモデル全体に $P=500\text{kg}/\text{cm}^2$ を負荷した(注記 2)。

これに対応し、主管両端の P 点、Q 点には等価軸力 $\pm F_x$ を負荷した。即ち、P 点、Q 点のそれぞれの 36 節点には表 2 に示す $\pm F_{xi}=\pm 26367.43\text{kg}$ を入力した。

尚、等価軸力 F_x の設定に関しては、添付資料 A を参照のこと。

表2 内圧に対する等価軸力 F_x の計算

項目	記号	単位	数値	
管外径	D_o	mm	508.0	
管内径	D_i	mm	477.8	
管肉厚	t	mm	15.10	
平均半径	r_m	mm	246.45	
周方向の分割数	N	個	36	
分割角度	θ	度	10.0	
		rad	0.174533	
内圧力	P	kg/cm^2	500	
受圧面積	三角形面積	S_i	mm^2	5273.49
	総面積	S	mm^2	189845.53
等価軸力	総荷重	$F_x=SP$	kg	949227.66
解析入力値	節点荷重	$F_{xi}=F_x/N$	kg	26367.43

(注記 2) 圧力の入力値 $P=500\text{kg}/\text{cm}^2$ に特別な意味はない。

4. 境界条件

固定とした枝管端部 R 点の境界条件は表 3 の通りとした。

R 点上の 36 節点に就いて Z 方向の並進変位は全て固定とした。X、Y 方向は、内圧による管の均一膨脹変位を拘束しないように、座標軸に沿う節点だけ、その軸直方向を固定とした。回転変位 X、Y、Z は全点でフリーとした。回転変位は全点固定としても大差はないことを別途の解析で確認している。

尚、端部 R 点上の節点番号は 3906~3941 の 36 節点である。これに対して節点 3942~3977 の 36 節点は、「直角三角形」要素の斜辺上の中点として後で追加したため、表 3 には出てこない。FEM 解析としては、このように並び順の飛んだ節点は剛性マトリックスのバンド幅を大きくし、解析時間がかかるので好ましくはないが、今回はそのままとした。

表3 固定端R点の境界条件 (TEE01P500F1NA)

角度 ϕ	枝管	並進変位			回転変位		
	R点 節点番号	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	3906	0	1	1	0	0	0
10° ~80°	3907~3914	0	0	1	0	0	0
90°	3915	1	0	1	0	0	0
100° ~170°	3916~3923	0	0	1	0	0	0
180°	3924	0	1	1	0	0	0
190° ~260°	3925~3932	0	0	1	0	0	0
270°	3933	1	0	1	0	0	0
280° ~350°	3934~3941	0	0	1	0	0	0

(注記) 節点 3942~3977 までの 36 節点は、「直角三角形」要素の斜辺の中点の節点である。

5. 解析結果

5.1 概要

内圧による変形や応力に関し説明するが、その前に、以下にいくつかの補足事項を示す。

- (1) 構造や負荷から変位や応力に対して対称性(或いは反对称性)が存在する部分に関しては、対称性を数値的に確認している。従って、いちいち断ってはいないが、代表部を取り出して説明するので了解願いたい。
- (2) 図 4 は、説明に於いて特に重要となるティーズの交叉部側面「L 点」とクロッチ部「S 点」を図示したものである。併せて、その他の各点や各断面の位置を示した。特に A, B, C 断面はティーズの端部で重要である。また D, E, F 断面は、 $X=\pm 246.45\text{mm}$, $Z=+246.45\text{mm}$ に位置し、この「直交型」モデルでは「クロッチ部 S 点」に当たる。しかし実構造とは対応していないので、注意願いたい。
- (3) 説明では、例えば、「A 点に於ける管断面」を「点 A 断面」とか「A 点断面」とか、或いは単に「A 断面」とかと略称したりする。また、応力は要素積分点での値であるが(等高線図 図 8 は除く。), これも「A 断面に隣接する何々側の要素列の応力」と言うべきところを単に「A 断面の応力」と略称したりする。この場合、「A 断面に隣接する要素列」は通常両側に存在するが、どちらの側の要素列を用いているかは、図には書いてあるが、いちいち断ってはいない。これらの点も承知置き願いたい。
- (4) 角度 ϕ で示す「節点列」の変位と同様に、応力を角度 ϕ で示すこともある。例えば、 $\phi=0^\circ$ に関わる「要素列」は $\phi=5^\circ$ と 355° の 2 列 存在する。本来ならこれらの 2 列の内挿値をとって $\phi=0^\circ$ の応力とすべきであるが、処理が面倒であることと、大差がないことから、代表してどちらか一方の値を用いている。これもいちいち断ってはいない。無論、 $\phi=5^\circ$ や 355° で応力を示すこともできるが、説明の焦点やイメージがぼける恐れがあるため、 $\phi=5^\circ$ とか 355° とかの半端な角度は敢えて使わないようにしているので了解願いたい。

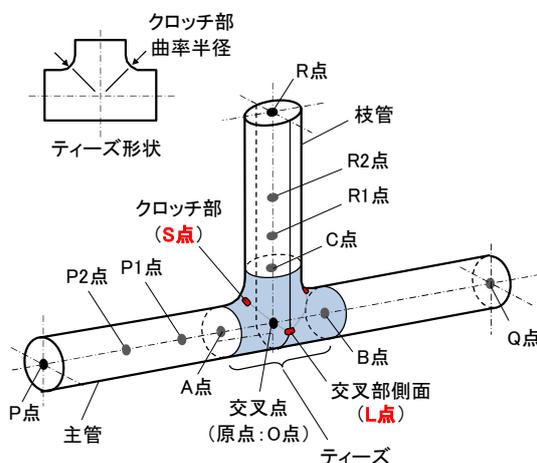
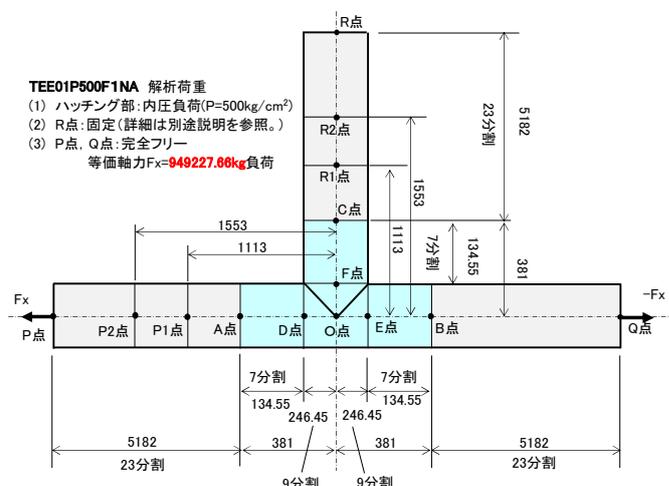


図4(1) ティーズ部の構造



(注記) この図はノットスケール(NTS)であるので、注意。

図4(2) T字配管の解析モデル(直交型モデル)

- (5) 図 4(3)は、実際のティーズ部のメッシュ分割図(プロッター出力)である。図 2 に示したものと同一であるが、縮尺図である。

以下、変形と応力に関して解析結果の詳細を説明する。

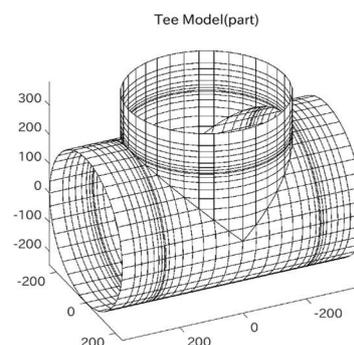


図 4(3) ティーズ部のメッシュ分割図

5.2 変形

以下、変形に関して説明する。

5.2.1 各部の断面変形

ティーズの交叉部側面は、主管側と枝管側の側面が同一平面上で交わり比較的に平坦な構造となっている。このため内圧に対して弱く、半径方向に大きく膨らむ。その反動でクロッチ部は半径方向に凹んで潰れる。この結果、ティーズ断面は大きく扁平化し、扁平化の影響は接続配管にも及ぶ。またクロッチ部が凹むことによって、主管は、中立となる枝管側に引き寄せられ、主管の両端点 P, Q は上方向(+Z 方向)に大きく変位し、原点 O を中心として主管の管軸は「V」字に折れ曲がる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

図 5(1)~(9)は各断面の断面変形(半径方向変位)を示したものである。

変形は見やすくするため拡大しているが、各断面の拡大率が異なるので、変位の大きさを直接比較することはできない。あくまでも変形の様子を見るものと考えて頂きたい。また断面の「平均変位」(36 節点の X,Y,Z 方向の各平均値)は除去されているので、注意願いたい。例えば、主管管端の P 断面の Z 方向の「平均変位」は約 36mm で、扁平化変位と比べても格段に大きい。尚、断面変形の程度は、 $\phi=0^\circ$ 、 90° 、 180° 、 270° など要所の変位量(半径方向が正)を図中に朱記したので、参照願いたい。

(1) 交叉部側面の変形と扁平化

図 5(1)~(9)に就いて特徴点を説明する。

まず図 5(5)の原点 O 断面では、圧力によって交叉部側面 L 点が半径方向(Y 方向)に+13.1mm と大きく膨らむ。最大値は L 点の少し上の Z=84.29mm の位置で+14.91mm である(後述の図 6(3)を参照)。

L 点近傍を中心にティーズ全体の側面が大きく膨らみ扁平化するが、その程度は、図 5 の(3), (4), (6), (7)に示す A, D 断面, F, C 断面で見たい。膨らみは、図 5(4)の D 断面では+8.00mm, 図 5(3)の A 断面では+5.74mm となっており、原点より離れるに従って次第に減少する。更に、図 5 の(3), (2), (1)と順に見ると、この扁平化は直管部にも波及し、後述の 5.2.3 項で詳しく説明するが、X=3500mm ぐらいまで継続することが分かる。最後は、管端に近づいて消滅し、内圧による半径方向の「均一膨脹変位」(約+0.86mm)に落ち着く。

尚、原点 O 断面や D 断面, A 断面(X=381mm)の扁平化の長軸は Y 方向であるが、P1 断面(X=1113mm)では Z 方向に変わる。扁平化の長軸が Y から Z に変わる転換点は、これも後述の 5.2.2 項で詳しく説明するが、P1 断面の少し手前の X=900mm 前後である。

以上に述べた主管での断面変形は、対称構造となる OQ 配管部では全く同じであり、また、ほぼ同じ構造条件にある枝管側の図 5 の(7), (8), (9)に於いても、変位が 20%ほど大き目にはなるが概ね同じである。

(2) クロッチ部の断面変形

次にクロッチ部の変形に関して検討する。

図 5(4)の D 断面の $\phi=0^\circ$ はクロッチ部 S 点に当たり、3.09mm の凹みとなる。これに対し、反対側の $\phi=180^\circ$ は 5.02mm と大きい。相対的に S 点側が潰れにくいのが、これは、接続されている枝管壁が補強リブの役目を果たして主管壁が凹む(曲率半径が大きくなる)のを抑え、扁平化に抵抗するためである。

一方、枝管側の図 5(6)の F 断面の $\phi=0^\circ$ も S 点であるが、こちらの凹みは 3.61mm(X 方向)で、D 断面の凹みよりも 20%程度大きい。こちらは主管壁が抵抗する訳であるが、凹みが 20%大きいと言うことは、主管の抵抗が相

対的に小さいことを意味する。主管は、管軸が「V」字に折れ曲がって枝管側に近寄って来るため、その分抵抗が小さくなるものと判断される。

管断面の扁平化の程度(「扁平率」に相当)を、長軸と短軸の変位(絶対値)の総計として比較すると、D断面は $3.09+5.02+8.00 \times 2=24.11\text{mm}$ に対しF断面は $3.61 \times 2+9.72 \times 2=26.66\text{mm}$ となり、F断面の方が10%程度大きい。このことは、図5(3)のA断面と図5(7)のC断面とを比較しても言える。原因は、枝管の場合、 $\phi=90^\circ$ 軸に対して対称変形となり、2箇所のカロッチ部変形の影響が重畳するためと考えられる。

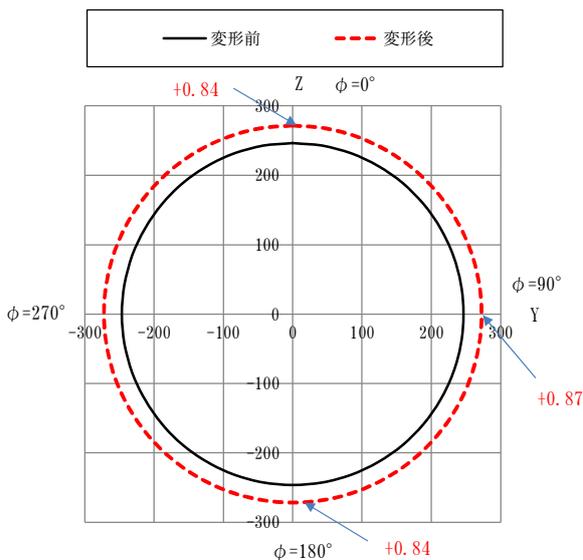


図5(1) P断面 (X=5563) 断面変形
(注) 朱記は扁平化変位(mm)を示す。

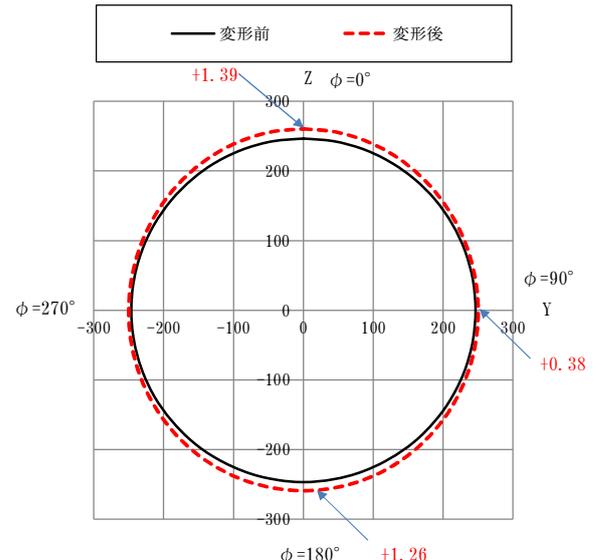


図5(2) P1断面 (X=1113) 断面変形
(注) 朱記は扁平化変位(mm)を示す。

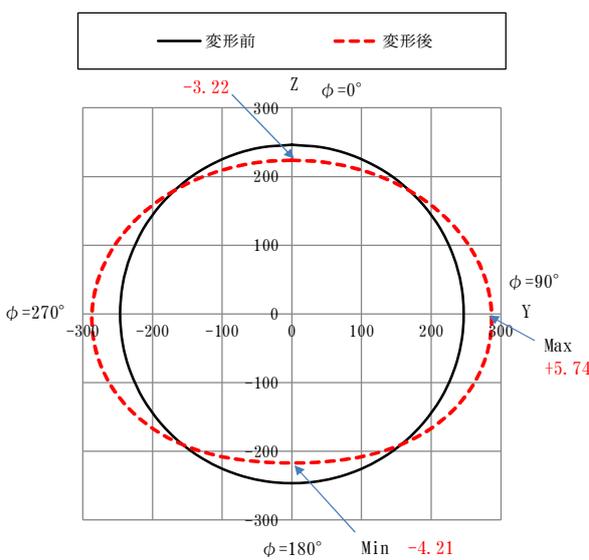


図5(3) A断面 (X=381) 断面変形
(注) 朱記は扁平化変位(mm)を示す。

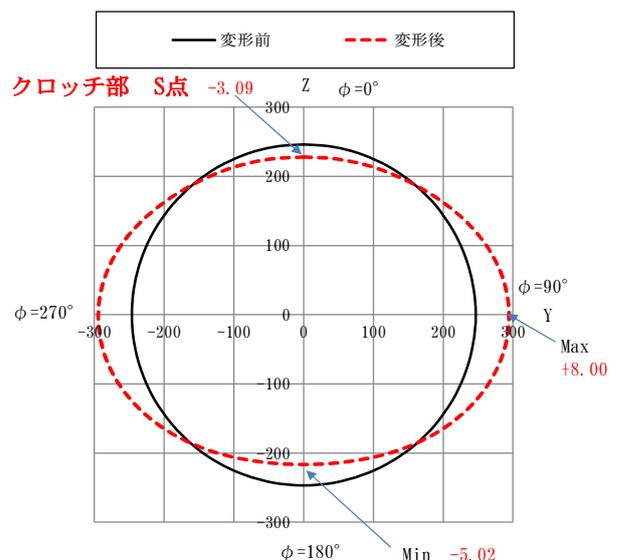


図5(4) D断面 (X=246.45) 断面変形
(注) 朱記は扁平化変位(mm)を示す。

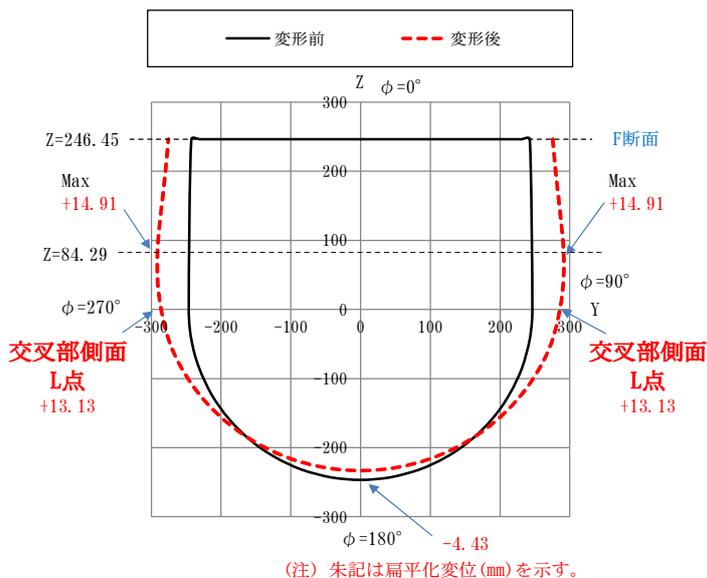


図5(5) 原点0断面 (X=0) 断面変形

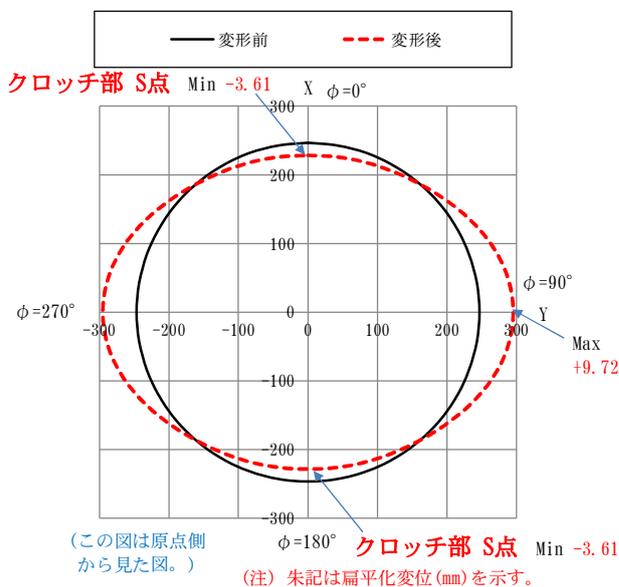


図5(6) F断面 (Z=246.45) 断面変形

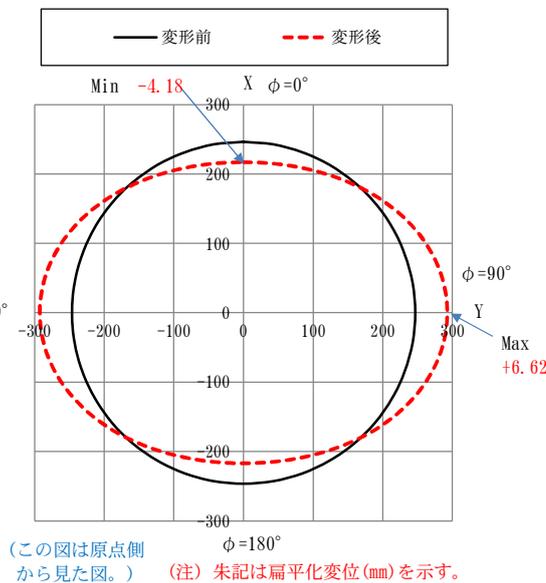


図5(7) C断面 (Z=381) 断面変形

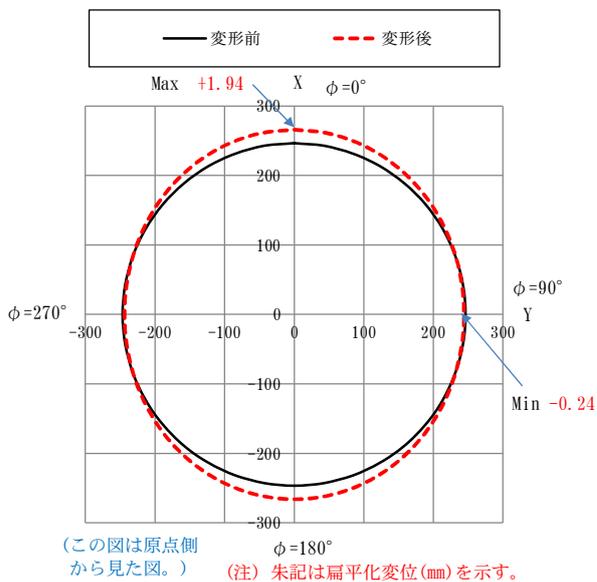


図5(8) R1断面 (Z=1113) 断面変形

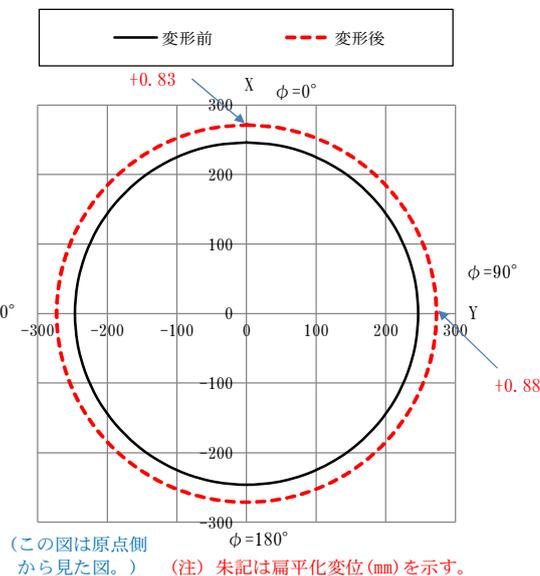


図5(9) R断面 (Z=5563) 断面変形

(3) 相貫線断面の断面変形

参考として相貫線断面(45° 傾斜断面)の変形を図 5(10)に示す。

これも、上記の図 5(1)~(9)と同様、全節点の平均変位を除去している。但し、円形断面ではないため、近似的な計算処理である。

尚、相貫線断面はA点側とB点側の2断面あるが、面対称であるので、代表としてA点側の「断面A」を示した。

変形前の断面は長径:短径比が $\sqrt{2}:1$ の楕円である。変形の図示手順は以下である。

まず、楕円上の節点に関して断面内の変位ベクトル(DY, DZ')を考える。次に楕円断面上に於いて、楕円に対する接線方向 t とその法線方向 n とで決まる局所座標系(n, t)を定める。最後に断面内変位ベクトル(DY, DZ')を(n, t)座標系に座標変換することで法線方向成分 D_nを計算し、それを図示する。変形は見やすくするため拡大する。

$\phi=0^\circ$ はクロッチ部の S 点で、変位は**-3.36mm**である。これは、図 5(4)の D 断面、図 5 (6)の F 断面の S 点の変位**-3.09mm, -3.61mm**に対応する。これらを 45° 傾いた断面変位に変換すれば大略一致する。

また $\phi=90^\circ, 270^\circ$ の変位は**+13.11mm**で、図 5(5)の原点 O 断面に示した交叉部側面の L 点変位と、楕円の法線方向 n が僅かに傾くため完全な一致は見えないが、ほぼ一致する。更に、 $\phi=180^\circ$ の変位は**-4.77mm**である。この点は E 断面の $\phi=180^\circ$ の点で、対称となる点は図 5(4)の D 断面の $\phi=180^\circ$ の点で**-5.02mm**となる。これも 45° 傾いた断面に変換すれば大略一致する。

最大変位点は $Z'=60.52\text{mm}$ の位置で**+14.44mm**となる。これは、図 5(5)の原点 O 断面に示した $Z=84.29\text{mm}$ の最大値**+14.91mm** とほぼ対応している。図 5(5)の最大点とは、少しずれた点であるため数値的に一致はしないが、ほぼ同じレベルの変位であることが分かる。

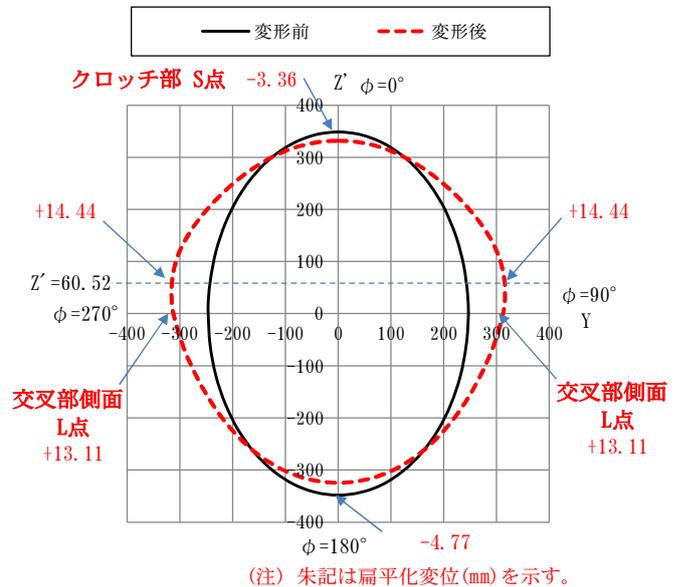


図5(10) 相貫線断面Aの変形

5.2.2 T字配管の全体変形

図 6(1)~(3)は、主管、枝管の全体的な変形を示したものである。

図 6(1)は、交叉部側面の L 点を通る主管断面上の $\phi=90^\circ$ の節点列の Y 方向変位を、また図 6(2)は、主管管軸の Z 方向変位(管断面平均変位)をいずれも管軸に沿って示したものである。図 6(3)は、交叉部側面の L 点を通る枝管断面上の $\phi=90^\circ$ の節点列の Y 方向変位を示したものである。

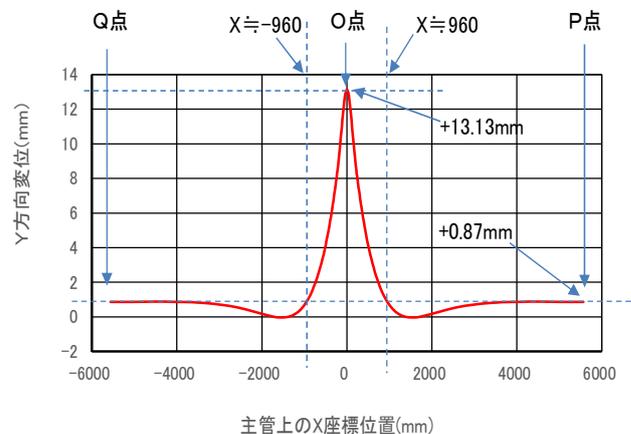


図6(1) 主管(POQ配管)のY方向変位($\phi=90^\circ$)

圧力を受けると、ティーズの交叉部側面 L 点が **+13.13mm** と大きく膨らむことは図 5(5)で説明したが、それは図 6(1)からもよく分かる。またこの反動で、図 6(2)に示すように、主管両端の P 点、Q 点は上方方向(+Z 方向)に約 **36mm** 変位し、主管の管軸は原点 O を中心に「V」字に大きく折れ曲がるのが分かる(注記 3)。

図 6(3)には、枝管の $\phi=90^\circ$ 節点列の Y 方向変位を示すが、 $Z=0\text{mm}$ での変位は、図 6(1)に示した $X=0\text{mm}$ での変位 **+13.13mm** と一致する。また最大値は $Z=84.29\text{mm}$ の位置で発生し **+14.91mm** である。この辺りの変形は図 5(5)で示したものと同一である。また図 6(1)では、前項 5.2.1(1)で言及した扁平化の長軸の方向変化を見ることができる。 $X=0\text{mm}$ の原点では、Y 軸方向が長軸で、膨らみは **+13.13mm** と非常に大きい。が、 $X=960\text{mm}$ 辺りで管の均一膨脹変位 **+0.87mm** を下回り、それ以降では、長軸が Z 方向に転換する。管断面の扁平化は正確な楕円ではないので、転換点の位置は多少ばらつく。例えば図 6(3)の枝管の転換点は、 $Z=840\text{mm}$ であるのに対し、次項 5.2.3 に示す図 7(1)では $X=910\text{mm}$ であり、また図 7(2)では $Z=850\text{mm}$ となる。

従って、原点から約 **900mm** で扁平化の長軸が転換するというのが大略の結論である。

尚、長軸方向が転換した後も、更に $X=3500\text{mm}$ 程度(A 断面より約 $6D_0$ の位置)まで扁平化の影響が及ぶことが分かる。

(注記 3) 内圧によって直管は軸方向に伸びるが、その量は $1,000\text{mm}$ 当たり 0.82mm である。OR 間の距離は $5,563\text{mm}$ であるので、管の軸方向伸びは $5,563 \times 0.82 / 1,000 = 4.6\text{mm}$ となる。従って R 点固定のため、原点 O の変位は $Z=-4.6\text{mm}$ となる筈であるが、実際は、図 6(2)に於いては -3.59mm となっている。これは、ティーズ部が扁平化して軸方向に若干縮んだためである。

5.2.3 クロッチ部変形の主管側と枝管側での比較

最後にクロッチ部の変形を見るため、主管の $\phi=0^\circ$ 節点列の Z 方向変位と、枝管の $\phi=0^\circ$ 節点列の X 方向変位とを図示して比較する。

尚、主管の Z 方向変位に就いては、主管管軸が「V」字に大きく折れ曲がるので、管軸の Z 方向変位(断面の Z 方向平均変位)を除去している。これは、前項 5.2.1(1)で説明した断面変形図 図 5(1)~(4)などと同じ取り扱いであるが、ここでは、他の変位との混同を避けるため、平均変位を差し引いた変位として「Z 方向変位(偏差)」と特別に「(偏差)」を付けて示すが、図 5(1)~(4)での $\phi=0^\circ$ に於ける変位と全く同じものである。

図 7(1)に主管の $\phi=0^\circ$ 節点列の Z 方向変位(偏差)を、また図 7(2)に枝管の $\phi=0^\circ$ 節点列の X 方向変位をそれぞれ示す。

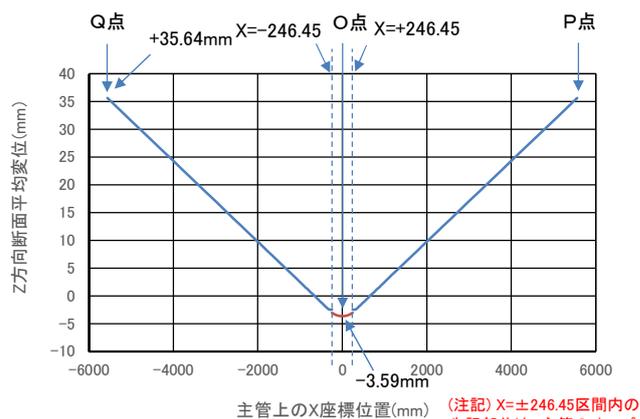


図6(2) 主管(POQ配管)のZ方向断面平均変位

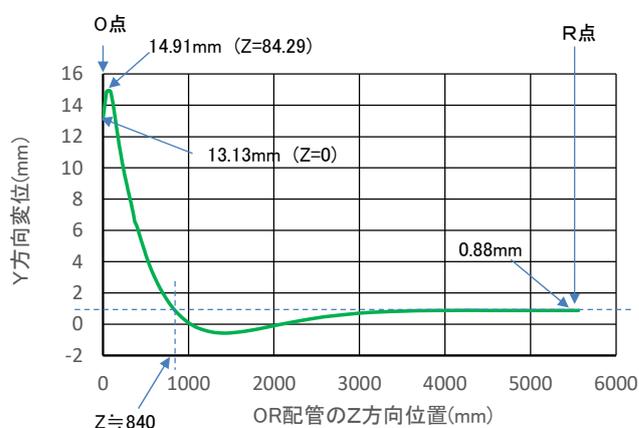


図6(3) 枝管(OR)のY方向変位($\phi=90^\circ$)

いずれも管端の P 点, R 点から X, Z=3500mm 辺りまでは内圧による均一膨脹変位+0.84, +0.83mm に等しい。X, Z=3500mm 辺りから「正」の変位増加が見られるが、これは断面の「扁平化」(但し反転したもの)によるため、X, Z=1500mm 辺りで「正」の最大変位(+1.72mm, +2.26mm)を示す。その後、X, Z=900mm 前後で本来の扁平化に変わり、「負」の変位、凹みとなる。クロッチ部 S 点に近づくと凹みは急激に増大し、X, Z=320mm に於いて最大の凹みとなり、それぞれ-3.71mm, -4.69mm の変位となる。S 点に於いては、相手側の管壁による抵抗や拘束があるため、凹みは寧ろ減少し-3.09mm, -3.61mm となる。

尚、構造寸法や負荷荷重が同じであるため、主管側と枝管側とでは、配管に沿ってほぼ同じ扁平化を示す筈であるが、上述のように図 7(1), (2)の最大値, 最小値, 極値などは、枝管側が全般的に 20~30%大きいことが認められる。これは、前項 5.2.1(2)に於いて、図 5(4)や図 5(6)によってクロッチ部の断面変形を比較した場合の結果と同じで、また原因も 5.2.1(2)項の最後に述べた通りである。

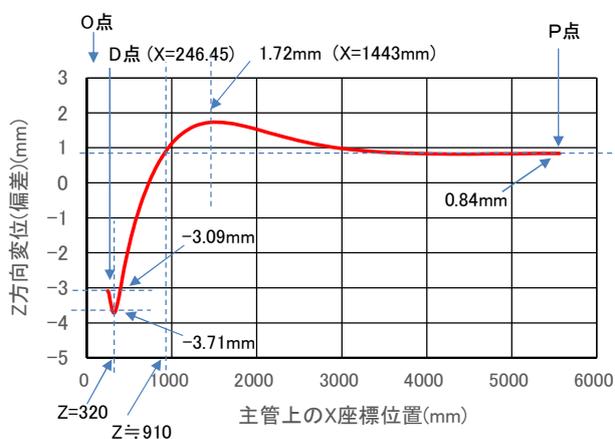


図7(1) 主管(PO) $\phi=0^\circ$ のZ方向変位(偏差)

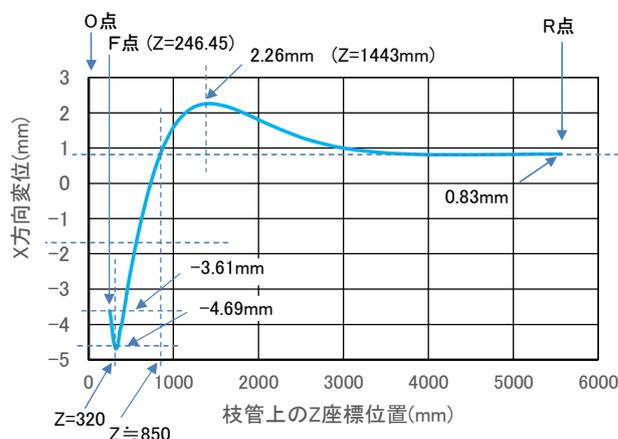


図7(2) 枝管(OR) $\phi=0^\circ$ のX方向変位

以上が変形に就いての結果である。

5.3 応力

続いて応力に関する解析結果を述べる。

その前に、応力分布図の見方や注意事項に就いて説明しておく。

5.3.1 応力分布図の見方と注意事項

応力分布図としては、図 8 の「3次元 等高線図」(ティーズ部のみ)と、図 9 の「展開 等高線図」、図 10 の「断面 応力分布図」の 3 種類がある(注記 4)。これらに関して見方や注意事項を以下に示す。

(1) 「3次元 等高線図」(注記 5)

図 8 の「3次元 等高線図」は、スケール図のためティーズ部のみを示している。

応力としては、①周・軸方向膜応力 $\sigma_{m\phi}$, σ_{mL} , ②周・軸方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$, σ_{bL} , ③相当応力 σ_{eq} (外表面、板厚中央面、内表面)の 3 種類を、節点応力として、下記の「基準応力」で規格化した応力指数 SI(Stress Index)で表示している。尚、配管設計で使用される応力指数 B_1 , C_1 , K_1 と関連付け、応力成分 $\sigma_{m\phi}$, σ_{mL} , $\sigma_{b\phi}$, σ_{bL} に就いては所謂「周方向基準応力」 S_ϕ を「基準応力」として規格化している。

① 応力成分に対する基準応力 : $S_\phi = PD_m/2t = 81.61 \text{ kg/mm}^2$

② 相当応力に対する基準応力 : $S_{EQ} = 70.67 \text{ kg/mm}^2$ (注記 6)

因みに、両端を閉じた均一円管に内圧が作用する場合は、周方向膜応力 $\sigma_{m\phi}$ が卓越し、内圧 $P = 500 \text{ kg/cm}^2$ では $\sigma_{m\phi} = PD_m/2t = 81.61 \text{ kg/mm}^2$ となる。これが上記「周方向基準応力」 S_ϕ である。これに対し、軸方向膜応力 σ_{mL} は $\sigma_{mL} = PD_m/4t$ と、 $\sigma_{m\phi}$ の 1/2 で $\sigma_{mL} = 40.80 \text{ kg/mm}^2$ となる。これを「軸方向基準応力」 S_L とも言うが、以下の説明に於いて時々用いることがあるので、覚えて置いて頂きたい。

尚、この「3次元 等高線図」に於ける「等高線」は、図中に示された応力指数目盛の 1/7 相当の数値幅を持っており、幅ゼロの所謂「線」ではない。この点、通常の等高線図とは異なる。このため応力が なたらかに変化する箇所では黒線幅が大きくなったり、場合によっては広範囲の黒塗りとなったりするので留意願いたい。

また相貫線上の節点では、主管側と枝管側の要素が空間的に折れ曲がって繋がり、且つ関連する要素の局部座標系が変化するが、それらを無視してその他の節点と同様の計算処理をしているため、応力が不正確になっている。これを考慮し、相貫線上とその近傍の節点応力は参考扱いとする。

(注記 4) 3 種類の他に図 11 の「等価線形化曲げ応力」や「等価線形化曲げ変位」の図があるが、特殊な説明図である。

(注記 5) 「3次元 等高線図」は、SAPIVの要素応力(積分点)から節点応力を計算し直して描いたものである。そのため、次項以降に示す、要素応力から求めた図 9 の「展開 等高線図」や図 10 の「断面 応力分布図」とは、特に構造不連続部の応力集中部では、応力の算出位置の違いによって大きな差が出るので、注意願いたい。それ以外の一般部では、内外挿補完による差はあるが、概ね一致することを確認している。但し、相貫線部や三角形要素が絡む部位では、取り扱いの違いがあり、応力値に差が出ることを承知置き願いたい。

(注記 6) 内圧による主応力を $\sigma_1 = \sigma_\phi = 81.61 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_2 = \sigma_L = 1/2 \sigma_\phi = 40.80 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_3 = \sigma_R = 0 \text{ kg/mm}^2$ として相当応力に対する基準応力 $S_{EQ} = 70.67 \text{ kg/mm}^2$ を求めた。尚、薄肉シェル解析では $\sigma_3 = \sigma_R = 0 \text{ kg/mm}^2$ としているが、ソリッド要素などで解析する場合は、板厚中央面位置では $\sigma_3 = \sigma_R = -P/2 = -2.5 \text{ kg/mm}^2$ とする点が異なる。

(2) 「展開 等高線図」

図 9 の「展開 等高線図」は、特に直管部の応力分布を見るため、 $\phi = 0 \sim 180^\circ$ の範囲の円筒面を平面に展開したものである。作図の都合上 主管側と枝管側とは分離し、横軸は、管軸に沿った要素積分点の座標値で示している。但し、座標値 表示とはなっているが、要素数単位で刻んでいるため線形比例ではない。従って応力分

布は軸方向に伸縮されていることに注意願いたい。

表示応力は要素積分点での応力で、成分は図 8 に合わせて $\sigma_{m\phi}$ 、 σ_{mL} 、 $\sigma_{b\phi}$ 、 σ_{bL} 、 σ_{EQ} とし、図 8 と同じ規格化を行い、対比できるようにした。

本図は直管部の応力を見るのが主目的ではあるが、実際にはティーズ部も含んでいる(注記 7)。応力値そのものは正しいが、特に、ティーズ部の正確な分布形状を見たい場合は図 8 を参照願いたい。また描画上、等高線間隔などの設定によっては見た目が大きく違うので、図 8 とはできる限り見た目が一致するように調整した。更に、各図ごとには主管側と枝管側とで等高線間隔や応力階級、線色などを一致させ、相互に突き合わせができるようにした(注記 8)。

尚、取り扱いが難しいため、相貫線部の「直角三角形」要素は除外した。従って図 9 には相貫線部は含まれてはいない。また、前項(1)の注記にも記したように図 8 と図 9 とでは、応力値は基本的に一致するので、応力値を参照する場合は、ティーズ部も含めて図 9 を用いるものとした。

(注記 7) 図 9 に於いて黄色で塗り潰した三角形領域は作図の都合上のもので、要素は存在しない領域である。

(注記 8) 図 9 の場合、主管側と枝管側とで図の突き合わせができるように、等高線間隔や応力階級、線色などの凡例を一致させた。このため、最大値、最小値を含む端に近い応力階級の一部の凡例に、実在しない応力値に対する応力階級が存在するので、注意願いたい。

(3) 「断面応力分布図」

等高線図 図 8、図 9 は、全体的な応力分布を見るのには都合がいいが、断面上での詳細な応力分布や応力値そのものを見るのは難しい。そこで補足として図 10 の「断面応力分布図」を作成した。

「断面応力分布図」には、以下の 3 種類がある。

- ① A 断面とか D 断面とかの管断面の周方向の断面応力分布図
- ② 代表的角度 ϕ の「要素列」での管軸方向の断面応力分布図
- ③ 原点 O 断面とか、或いは相貫線に沿った 45° 断面とかの特殊な断面応力分布図

いずれも要素積分点での応力である。

また A 断面とか D 断面とかは、本来 節点で決まる断面であるが、応力の位置表示にも使用する。この場合、節点で決まる断面の両側の要素応力から内挿補完して示せば良いが、計算が面倒なこと、大差がないことから、実際はどちらかの要素応力をそのまま示している。図には書いてあるが、どちらの応力を用いたかはいちいち断ってはいない。

同様に、例えば $\phi=0^\circ$ の応力分布に関しても、当該位置の両側の要素応力から内挿補完して求めるべきであるが、実際はどちらかの応力をそのまま用いている。そういった意味では、例えば $\phi=5^\circ$ とか $\phi=355^\circ$ とかの要素列の応力と言う方が正しいが、そうした個別角度を用いると説明全体のイメージや焦点がぼけるので、ここでは敢えて $\phi=0^\circ$ と言っている。いずれも大略の説明であることが前提であるので、了解願いたい。

尚、上記②の管軸方向の「断面応力分布図」は、横軸が要素番号で示されており、実位置ではない。実際の軸方向の座標値を所々に追記したが、正確さには少々欠けるので、ほんの参考である。無論、いずれも線形比例ではないので、呉々も注意願いたい(注記 9)。

また「断面応力分布図」は、応力値を直接 把握できるように応力値をそのまま表示した。応力指数 SI とする場合は基準応力で換算頂きたい。本文中で引用する場合は一応 SI 値を併記した。

(注記 9) 例えば図 10(7)-1 の $\sigma_{m\phi}$ は、 $X=246\text{mm}$ のクロッチ部 S 点では、構造不連続部で無限大に発散する傾向にあるが、図を見る限りピークアウトする傾向を示す。これは、本来、S 点に近づくに従って表示間隔を小さくすべきであるが、均等間隔で表示されて

いるためである。これは横軸 X が線形比例でないことの弊害の一例である。図 9, 図 10 を見る場合には呉々も注意願いたい。

以上が, 応力分布図の見方や注意事項に就いての説明である。

5.3.2 応力の詳細説明

図 8, 図 9, 図 10 の 3 種類の応力分布図を見ながら, 以下, 応力に就いて詳細を説明する。

5.2 節の「変形」でも述べたように, 交叉部側面 L 点近傍は圧力によって膨らみ, クロッチ部 S 点近傍が凹んでティーズ断面が大きく扁平化したが, これに対応して応力はどうなるかが焦点である。

まず等高線図 図 8, 図 9 を全体的に眺めると, ティーズ部の扁平化に対応し, クロッチ部 S 点近傍や交叉部側面 L 点近傍に高応力が発生することが認められる。相当応力で見ると一層よく分かる。

またクロッチ部 S 点に於いては周方向膜引張り応力の極めて高い応力集中が発生することが注目される。ただ, この高応力はティーズ部に限定され, 接続配管には殆ど伝播しないことが分かる。これに対し, それ以外の応力成分は, いずれもティーズ部で高応力を発生し, 且つその影響が接続配管にも伝播する。

以下, ティーズ部と直管部に分け, 特徴的な点を拾いながら応力成分ごとに詳細を説明する。最後に相当応力に就いて補足する。

5.3.2.1 ティーズ部の応力

まずは, ティーズ部の応力に関し, クロッチ部 S 点近傍と交叉部側面 L 点近傍の高応力を中心に説明を加える。

表 4 にティーズ部の高応力指数値を図 9 に基づいてまとめたので, これを参照しながら以下説明する。

応力成分		ティーズ部位	高応力指数SI	
			S点・近傍	L点・近傍
膜応力	$\sigma_{m\phi}$	主管側	Max 4.221	1.283
		枝管側	Max 4.220	0.835
	σ_{mL}	主管側	0.769	0.857
		枝管側	0.757	Max 1.323
板曲げ応力	$\sigma_{b\phi}$	主管側	0.375	Max 1.691
		枝管側	0.364	Max 1.593
	σ_{bL}	主管側	Max 2.113	1.091
		枝管側	2.104	Max 2.145

(注) 応力指数SI値は 図9「展開 等高線図」から求めたものである。

5.3.2.1.a クロッチ部 S 点近傍の応力

まずクロッチ部の高応力を取り上げる。表 4 を参照。

(1) クロッチ部 S 点での周方向膜応力 $\sigma_{m\phi}$ の応力集中^(注記 10)

等高線図 図 8, 図 9 からクロッチ部 S 点の周方向膜引張り応力 $\sigma_{m\phi}$ の応力集中が非常に大きいことが認められ, 図 9(1)では最大値 $SI=4.221$ (主管側), $SI=4.220$ (枝管側)を示す。

周方向膜引張り応力 $\sigma_{m\phi}$ に対する応力集中であることから, これは明らかに, 主管に於いて枝管が開口することによる所謂「開口欠損」による応力集中であることが分かる^(注記 11)。

またこれは, 断面応力分布図 図 10(5)-1(D 断面)や図 10(14)-1(F 断面), 図 10(7)-1(主管 $\phi=0^\circ$), 図 10(15)-1(枝管 $\phi=0^\circ$)からも明らかで, いずれも $\sigma_{m\phi}$ の最大値は $345\text{kg}/\text{mm}^2$ ($SI=4.227$)と極めて大きい。

この高応力は, 構造不連続による応力集中の特徴として周辺に行くに連れて急速に減衰し, 局所に限られることが分かる。従って概ねティーズ内で終息する。

(注記 10) シェル解析は、所謂「構造不連続部」の応力集中の解析には元々向いていないし、また今回のメッシュ分割もこの応力集中に対して必ずしも適切とは言いがたい。従って、応力集中応力に対する解析精度は余り期待できないと考えて頂きたい。尚、弾性解析では、メッシュを細かくすればするほど、「構造不連続部」の応力集中応力は大きくなり、やがては発散するので、値そのものを細かく求めることに余り意味はないことに留意願いたい。

(注記 11) 圧力容器や圧力配管の設計に於いては、容器胴や配管に穴を開ける場合は穴の補強を行う。所謂「穴の補強計算」として規格で定められており、補強材を穴縁に取り付け、内圧による周・軸方向の応力増大や応力集中に対抗させる。但し、この「穴の補強計算」は部材の欠損断面積に対して単に面積補償するだけの圧力に対する補強である。管の曲げモーメント荷重に対する曲げ剛性補強にはなっていない可能性もあるので(基準が保証している訳ではないので)、注意する必要がある。

(2) クロッチ部 S 点近傍の軸方向膜応力 σ_{mL} の増大

5.2 節「変形」の 5.2.3 項では、クロッチ部 S 点の凹みを抑制するように相手側の管壁が抵抗することを図 7(1)、(2)によって説明した。即ち、主管側 D 断面上での S 点の凹みに対しては枝管壁が抵抗し、そのため S 点の枝管側の管壁には大きな軸方向膜引張り応力 σ_{mL} が発生する。逆に枝管側 F 断面上の S 点に対しては主管壁が抵抗し、主管側の管壁に大きな軸方向膜引張り応力 σ_{mL} が発生する。

図 9(2)を見ると一目瞭然であるが、S 点近傍で σ_{mL} が大きな値を示し、S 点では $SI=0.769$ (主管側)、 $SI=0.757$ (枝管側)となる。

これは、断面応力分布図 図 10(5)-1(D 断面)、図 10(14)-1(F 断面)で見ても、S 点で σ_{mL} が大略 $60\text{kg}/\text{mm}^2$ ($SI=0.735$)となることから確認できる。

この軸方向膜引張りの高応力は、図 9(2)を見ると、ティーズ端部(A, C 断面)を超えて直管部にまで伝播するが、この高応力が、主管の管軸を「V」字に曲げる「管曲げ応力」となるのである。「管曲げ応力」に就いては、後述の 5.3.2.2 (1)項で「直管部の応力分布の特徴」と併せて詳しく説明する。

(3) クロッチ部 S 点近傍の周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ の分布

以上はクロッチ部 S 点近傍の膜応力の話であったが、次に、周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ に就いて説明する。

等高線図 図 8(3)、図 9(3)では、S 点近傍にも周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ の若干の応力集中が見られ、図 9(3)からは $SI=0.375$ (主管側)、 0.364 (枝管側)と得られる。

これを断面応力分布図 図 10(7)-2(主管 $\phi=0^\circ$) や図 10(15)-2(枝管 $\phi=0^\circ$) で確認すると、S 点での周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ はいずれも $30\text{kg}/\text{mm}^2$ ($SI=0.368$)と小さいことが分かる。

板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ の応力集中が小さい原因は、相手側管壁が補強リブの役目を果たし、管壁が円周方向に曲げられるのを抑制するためである。このように相手側管壁が曲率変化を拘束するため、板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ が抑えられる訳であるが、実際、S 点から概ね $1.5\sqrt{RT}=90\text{mm}$ 程度(注記 12) 離れると応力は負値となり、この拘束の影響がほぼなくなるのが図 9(3)から分かる。

(注記 12) ASME や告示 501 号の穴の補強計算⁽⁴⁾では影響がなくなる距離として $2.25\sqrt{RT}$ が用いられているが、これは円周上に一樣に荷重を受ける場合の Timoshenko 解析結果⁽⁵⁾を参照して決めたものである。しかし小さい一点荷重、或いはそれに近い場合は、影響の及ぶ範囲が狭くなるので、 $1.5\sqrt{RT}$ でも妥当である。

(4) クロッチ部 S 点近傍の軸方向板曲げ応力 σ_{bL} の分布

最後に、軸方向板曲げ応力 σ_{bL} に就いて説明する。

等高線図 図 8(4)、図 9(4)を見ると、クロッチ部 S 点には軸方向板曲げ応力 σ_{bL} の強い応力集中があり、図 9(4)からは $SI=2.113$ (主管側)、 2.104 (枝管側)と非常に大きな値が得られる。

これを断面応力分布図で確認すると、主管は図 10(5)-2(D 断面), 図 10(7)-2(主管 $\phi=0^\circ$), 枝管は図 10(14)-2(F 断面), 図 10(15)-2(枝管 $\phi=0^\circ$) の S 点に於いて、いずれも $170\text{kg}/\text{mm}^2$ (SI=2.083) の高値を示す。

この高応力の発生原因は、前述の(2)項で述べたところと同じで、クロッチ部の S 点での凹みに対し、それを抑制するように相手側管壁が抵抗するため、相対的に S 点の管壁が持ち上げられて「上に凸」となり、大きな板曲げ応力(正值)が発生するのである。

尚、この場合の変形に就いては、5.2.節「変形」の 5.2.3 項の図 7(1), (2)に対する説明を参照願いたい。

5.3.2.1.b 交叉部側面 L 点近傍の応力

以上は、クロッチ部 S 点近傍の高応力に就いての説明である。

次に交叉部側面 L 点近傍の応力に就いて説明する。これらに就いても表 4 を参照願いたい。

(1) 交叉部側面 L 点近傍での膜応力 $\sigma_{m\phi}$, σ_{mL} の増大

等高線図 図 8, 図 9 では、交叉部側面 L 点近傍で膜応力 $\sigma_{m\phi}$, σ_{mL} が増大することが分かる。

図 9(1), (2)で数値的に確認すると、評価位置により微妙に値が異なるが、 $\sigma_{m\phi}$ に就いては、主管側で SI=1.283 と大きな値となり、また σ_{mL} に就いては、枝管側で SI=1.323 と最大値を示す。

これは断面応力分布図でも確認することができる。主管側は図 10(6)-1(原点 O 断面), 枝管側は図 10(16)-1(枝管側 $\phi=90^\circ$) からそれぞれ応力を求めると、いずれも $110\text{kg}/\text{mm}^2$ (SI=1.348)となり、上記と一致する。

結論的には、交叉部側面 L 点近傍は内圧によって膨れ、膜応力の局所高応力が発生することが分かった。

(2) 交叉部側面 L 点近傍での板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$, σ_{bL} の増大

以上は膜応力成分の話であったが、等高線図 図 8, 図 9 の(3), (4)の板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$, σ_{bL} を見ると、これらも L 点近傍で高応力となることが分かる。

まず周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ は、例えば、等高線図 図 8(3)を見ると、L 点近傍で最大となり、ティーズ端に向かって高応力の峰が帯状に縦横に延びることが分かる。峰の頂点では、管壁は外側に凸に膨らむので、これはティーズの扁平化と対応していることは明らかである。また等高線図 図 9(3)を見ると、この高応力の峰は直管部にも伝播し、直管の扁平化を惹き起こしていることも確認できる。

図 9(3)からは、交叉部側面 L 点近傍で $\sigma_{b\phi}$ は最大値を示し、SI=1.691(主管側), SI=1.593(枝管側)となる。

これを、断面応力分布図 図 10(8)-2(主管 $\phi=90^\circ$)や図 10(16)-2(枝管 $\phi=90^\circ$)で確認すると、最大値は、主管側では $140\text{kg}/\text{mm}^2$ (SI=1.715), 枝管側では $130\text{kg}/\text{mm}^2$ (SI=1.593)と得られ、いずれも上記と一致する。

次に軸方向板曲げ応力 σ_{bL} の等高線図 図 8(4)を見ると、周方向の $\sigma_{b\phi}$ とは様子が異なり、高応力の範囲が枝管側の L 点近傍に限られることが分かる。このことは図 9(4)からも確認でき、図 9(4)から σ_{bL} を求めると、L 点近傍では、主管側で SI=1.091 と大きな値となり、枝管側では SI=2.145 と最大値を示す。

これらを断面応力分布図 図 10(8)-2(主管 $\phi=90^\circ$)や 図 10(16)-2(枝管 $\phi=90^\circ$)で確認すると、最大値は、主管側では $90\text{kg}/\text{mm}^2$ (SI=1.103), 枝管側では $170\text{kg}/\text{mm}^2$ (SI=2.083)と得られ、いずれも上記と一致する。

軸方向板曲げ応力 σ_{bL} の高応力が L 点近傍に限定される原因は、円筒面での板曲げ剛性の違いにある。円筒面の軸方向は、^{たとえ}仮令微小幅の断面要素を考えたとしても断面は常に所謂「八つ橋」状になるため、単なる「矩形断面」となる周方向よりも板曲げ剛性が高く、曲がりにくい。従って軸方向板曲げ応力 σ_{bL} は相対的には発生しにくく、またそのため局所に限られる。

5.3.2.2 直管部の応力

以上はティーズ部の応力であったが、以下では直管部の応力に就いて特徴点を拾いながら説明する。

(1) 直管部の応力分布の特徴と「管曲げ応力」

直管部の応力分布の特徴は等高線図 図 9(1)~(4)を見ると分かりやすい。

まず着目すべき点は図 9(1) の周方向膜応力 $\sigma_{m\phi}$ である。ティーズとの境界の A 断面, C 断面を超えると、周方向膜応力 $\sigma_{m\phi}$ は殆ど 1.0 となっており、目立った応力の変動はないことが分かる。

これに対して図 9(2), (3), (4)に示す応力 σ_{mL} , $\sigma_{b\phi}$, σ_{bL} は、ティーズ部の高応力の影響が直管部にも伝播し、応力が大きく変動することが分かる。このうち、まず軸方向膜応力 σ_{mL} に就いては、**次項(2)**で詳述するが、主管の管軸を「V」字に折り曲げる「管曲げ応力」を発生することが特徴的である。また周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ は、元々ティーズの扁平化に伴って発生する応力で、それが伝播し、直管部では、単純な扁平化現象として周方向にきれいな cosine カーブとなって分布するのが特徴の 2 次応力である。更に軸方向板曲げ応力 σ_{bL} は、これもティーズの扁平化で発生するが、元々局所性が強く、伝播はしにくい。直管部では、周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ に従属して発生し、 $\sigma_{b\phi}$ と極めて似た分布となるのが特徴の 2 次応力である。これらに関しては**次々項の(3)項, (4)項**で詳しく説明する。

(2) 軸方向膜応力 σ_{mL} による「管曲げ応力」の発生

まず主管に関して等高線図 図 9(2)を見ると、軸方向膜応力 σ_{mL} は、 $\phi=0^\circ$ 側に大きく片寄って分布することが分かる。偏った分布であることから、Y 軸周りの「管曲げ応力」の重畳が予想される。

確認のため、代表的な断面に就いて Y 軸回りの「等価線形化曲げ応力 σ_B 」を計算すると、**図 11(1), (2), (3)**に示す結果となった^(注記 13)。これらから各断面には、有意な「等価線形化曲げ応力 σ_B 」が存在し、Y 軸回りに主管が曲げられることが分かる。その他の断面に就いても σ_B を計算して、X に対して σ_B を図示すると、**図 11(4)**に示すようになった。 σ_B は負値を示すが、X とともに絶対値が急減して **$X \cong 800\text{mm}$** でゼロとなり、その後、少しオーバーシュートして最終的にはゼロに収束することが分かる。

尚、**図 11(1), (2), (3), (4)**には、「等価線形化曲げ変位 dX_B 」も併せて示したが、 dX_B は累積値となるため、 $\sigma_B=0$ の場合は dX_B の増減変化がゼロとなることに注意して見て頂きたい。

この軸方向膜応力による「管曲げ応力」の発生原因は明らかである。即ち、ティーズ断面が圧力により扁平化し、S 点が凹む場合、中立となる枝管が主管を相対的に引き寄せるため「管曲げ応力」が発生するのである。またこれによって主管 管軸は「V」字に折れ曲がるのである。

これに対して枝管は、元々 応力も変位も全て $\phi=90^\circ$ 軸に関して対称のため、常に $\sigma_B=0$ であり、当然に管軸の曲がりも発生しない。

尚、主管に関して「管曲げ応力」 σ_B がゼロとなる位置は**図 11(4)**より **$X \cong 800\text{mm}$** であるが、これを**図 9(2)-1**で確認すると、 **$X \cong 800\text{mm}$** は、 $\phi=90^\circ$ 軸に対して σ_{mL} が「対称分布」となる開始点であることが分かる。

以上より、「管曲げ応力」がゼロとなる位置は、ティーズ端より大概略 $800-381=419\text{mm}=1D_0$ の距離と分かる。因みに、主管の D, A, P1 断面等に於いて軸方向膜応力 σ_{mL} の断面平均値は「軸方向基準応力」 S_L に一致し、且つ、重畳する変動成分の総和はゼロとなるので、重畳する変動成分は 2 次応力であることが確認できる(注記 14)。また枝管の F, C, R1 断面等に於いても全く同じで、重畳する変動成分は 2 次応力であることが分かる。

(注記 13) 図 11(1), (2), (3)に記載した平均応力 σ_m は、「等価線形化曲げ応力 σ_b 」を求めるために計算した特殊な平均値(Z 軸に射影した要素幅と単位長さとの積を考慮した平均値)であり、管断面の円周上の所謂「断面平均値」ではない。誤解のないようにして頂きたい。平均変位 dX_m に就いても同じである。

(注記 14) 今更説明するまでもないが、「2 次応力」と言うのは「変位」や「歪み」が拘束されて発生する応力で、外部から負荷された荷重に平衡する応力ではない。従って、適切な閉曲面に就いて面積を掛けて総和をとるとゼロとなるのである。

(3) 直管部に於ける周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ の分布の特徴

周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ は、管断面の扁平化と絡んで発生することが多いので、5.2 節で説明した図 5 の断面変形図と併せて考えると割合に理解しやすい。

そもそも直管部には、肉厚の不均一、穴、構造物の取り付けもなく、また円周方向に外力荷重が加わってもないので、直管部の板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ は全て 2 次応力とすることができる。また概ね周方向に 180° 周期の cosine カーブとなって分布していることから、これは明らかに管の扁平化に伴って発生していることが分かる。

断面応力分布図 図 10(4)-2(A 断面)や図 10(13)-2(C 断面)を見ると、大体 180° 周期の cosine カーブ($\phi=0^\circ$ で負値)になっている。また X, Z=1048mm の図 10(3)-2(P1 断面)や図 10(12)-2 (R1 断面)では、応力値が反転した 180° 周期のほぼ cosine カーブとなることが分かる。また更に X, Z=1553mm の図 10(2)-2(P2 断面)や図 10(11)-2(R2 断面)では、きちんとした cosine カーブとなっていることが確認できる。

扁平化の伝播状況に就いては 5.2 節で詳しく述べたので、図 6 や図 7 を参照願いたい。まず X, Z=900mm で扁平化の主軸方向が変化した。これに対応して周方向板曲げ応力 $\sigma_{b\phi}$ の大小関係も上述の通り X, Z=1048mm の P1 断面や R1 断面では入れ替わった。また等高線図 図 9(3)でもほぼ同じ位置の X, Z=1000mm 前後に於いて入れ替わることが確認できる。更に X, Z=3500mm 辺りでも扁平化変位が僅かに変化した。これもほぼ同様に、図 9(3)の X, Z=3500mm 辺りで応力の大小関係が再度入れ替わることが確認できる。

尚、ティーズ部で発生した扁平化が伝播し、扁平化の主軸が最初に転換するまでの距離を「扁平化の伝播距離」とすれば、「扁平化の伝播距離」は X, Z=900mm となり、ティーズ端より $900-381=519\text{mm}$ で概ね $1D_0$ となった。

(4) 直管部に於ける軸方向板曲げ応力 σ_{bL} の分布

説明するまでもないが、直管部の軸方向板曲げ応力 σ_{bL} も全て 2 次応力である。

基本的には $\sigma_{b\phi}$ と同様に管壁の変形となって現れるが、現実的には局所的な凹凸になる以外、この応力による変形が大きく且つ広範囲に単独で生じることはない。これは、 $\sigma_{b\phi}$ が円筒管断面の扁平化と相俟って出現することとは大きな違いである。その理由は、5.3.2.1.b (2) 項の最後でも説明した通り、円筒壁面では、軸方向は円周方向に比べて面の板曲げ剛性が大きく変形しにくいからである。

尚、等高線図 図 9(3)と図 9 (4)の直管部を見比べると、主管、枝管ともに大略 X, Z=900~5308mm の広範囲に亘って $\sigma_{b\phi}$ と σ_{bL} とが似た分布となっている。その原因は、まず直管部の扁平化によって $\sigma_{b\phi}$ が発生するが、従属的にポアソン比分の σ_{bL} が大略 $\sigma_{bL} \doteq \nu \sigma_{b\phi}$ の関係で併発するためである。

5.3.2.3 相当応力の分布

最後に、相当応力の分布に就いて一言 補足して置く。

(Mises の)相当応力は 3 つの主応力を用いて次式によって計算する。

$$\sigma_{EQ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

説明するまでもないが、相当応力はスカラー量^(注記 15)であり、応力(テンソル)とは性質が全く違う。基本的には、単軸の引張り応力に一致するようにその係数が定められており、構造物の「応力の大きさ」をスカラー量で定量的に表示するものである。従って、異なる応力状態の「応力の大きさ」を相互に比較できる。

こう考えて、相当応力の等高線図 図 8, 図 9 の(5)~(7)図を見ると、クロッチ部が圧倒的に厳しい応力集中に晒されることがはっきりと分かり、また図 9(5)からは、交叉部側面 L 点近傍の応力が比較的に大きいことも分かる。

参考に相当応力の応力指数 SI 値を求めると、表 5 のようにまとまる。

膜応力に対応した板厚中央面では、S 点で最大値 **SI=4.591**、L 点で **SI=1.358** と得られる。また膜応力+板曲げ応力に対応した内・外表面では、S 点で最大値 **SI=5.457**(内表面)、L 点で **SI=3.589**(外表面)と得られる。これらはいずれも今まで説明してきた応力分布と符合していることは明らかである。

(注記 15) Mises の相当応力は、係数は異なるが、基本的には応力テンソルの第 2 不変量と同一である。

表5 ティーズ部の相当応力のまとめ 応力指数SI(無単位)

応力成分		ティーズ部位	高相当応力指数SI	
			S点・近傍	L点・近傍
相当応力	外表面	主管側	Max 4.646	2.957
		枝管側	Max 4.632	3.589
	中央面	主管側	Max 4.591	1.310
		枝管側	Max 4.521	1.358
	内表面	主管側	Max 5.450	0.726
		枝管側	Max 5.457	0.914

(注) 応力指数SI値は 図9「展開 等高線図」から求めたものである。

5.3.3 応力分布のまとめ

応力に関しては以下の結果が得られた。

- (1) 交叉部側面 L 点近傍は、圧力によって半径方向に大きく膨らみ、周・軸方向の膜応力、板曲げ応力の高応力が発生する。L 点近傍の膜応力は最大 $SI=1.323$ 、板曲げ応力は最大 $SI=2.145$ となった。
- (2) クロッチ部 S 点近傍には、主管の開口欠損による応力集中が発生し、周方向膜引張り応力に対して極めて高い応力集中応力となり、最大応力は $SI=4.221$ となった。また、S 点近傍の変位拘束による軸方向板曲げの局所高応力が発生し、 $SI=2.113$ となった。これらの高応力は、いずれも概ねティーズ内で終息した。
- (3) クロッチ部 S 点の凹みに抵抗し、相手側管壁には軸方向膜応力の局所高応力が発生した。主管では、それが「管曲げ応力」となって 管軸を「V」字に大きく折り曲げた。この「管曲げ応力」は、主管断面に於いて Y 軸周りの「等価線形化曲げ応力」を計算することによって明らかにした。

尚、この「管曲げ応力」がゼロとなる位置は、ティーズ端より大略 $1D_0$ の距離となった。

- (4) L 点や S 点近傍で発生した局所応力集中による高応力はすぐに減衰したが、ティーズ断面の扁平化に起因する周方向板曲げ応力や軸方向板曲げ応力は比較的遠くにまで及んだ。

ティーズ部で発生した扁平化が伝播し、扁平化の主軸が最初に転換するまでの距離、即ち「扁平化の伝播距離」は、ティーズ端より概ね $1D_0$ となった。

- (5) 相当応力の等高線図によると、クロッチ部が圧倒的に厳しい応力集中に晒され、また交叉部側面 L 点近傍が比較的大きな応力となることが明らかとなった。

参考に相当応力による応力指数を求めた結果、最大値は、膜応力に対応した板厚中央面の相当応力は、S 点で $SI=4.591$ 、L 点で $SI=1.358$ と得られ、また膜応力+板曲げ応力に対応した内・外表面の相当応力は、S 点で $SI=5.457$ 、L 点で $SI=3.589$ となった。

6. 結論

T字配管に就いて直交型モデルでの内圧解析を実施した結果、以下のことが判明した。

尚、ここで示す結果は所謂「外径肉厚比 D_o/t 」に依存するため、本解析に用いた配管仕様条件($D_o/t=34$)に対する結果であることに留意願いたい⁽²⁾。

(1) 内圧によりティーズの交叉部側面が膨らみ、その反動としてクロッチ部が半径方向に凹んで、ティーズ全体が大きく扁平化し、且つ、主管の管軸が「V」字に大きく折れ曲がることが判明した。

(2) 内圧による局所高応力が発生した。特に、交叉部側面では周・軸方向の膜応力・板曲げ応力の増大を見た。周・軸方向膜応力は基準応力の最大 **1.323** 倍、また板曲げ応力は基準応力の最大 **2.145** 倍の高応力となった。

(3) クロッチ部には、主管と枝管の所謂「開口欠損」による極めて高い応力集中が発生し、周方向膜引張り応力に対して基準応力の最大 **4.221** 倍の高応力となった。また変形の拘束による軸方向板曲げ応力の応力集中が発生し、基準応力の最大 **2.113** 倍の高応力となった。

(4) 相当応力によると、クロッチ部が圧倒的に厳しい応力集中に晒され、また交叉部側面 L 点近傍が比較的に大きな応力となることが明らかとなった。

相当応力の最大値は、膜応力に対応した板厚中央面の相当応力は、S 点近傍で **SI=4.591**、L 点で **SI=1.358**、また膜応力+板曲げ応力に対応した内・外表面の相当応力は、S 点で **SI=5.457**、L 点で **SI=3.589** となった。

(5) 主管部と枝管部とを比較した場合、変位や応力に関して枝管部の方が 20%程度大きくなった。原因は、枝管側は、クロッチ部 S 点が 2 箇所あり、その影響が重畳するためと考えられた。

(6) ティーズ部で発生した扁平化が伝播し、扁平化の主軸が最初に転換するまでの距離、即ち「扁平化の伝播距離」は、ティーズ端より概ね **1D_o**となった。

(7) ティーズ部の扁平化によって主管 管軸は「V」字に大きく折れ曲がるが、この原因は、主管断面内に発生する「管曲げ応力」であることを明らかにした。この「管曲げ応力」がゼロとなる位置は、ティーズ端より大略 **1D_o**の距離であることが判明した。

7. 検討

本解析の結果から、ASME で決められている内圧に対するティーズの応力指数をチェックすると、以下のことが言える。無論、ASME の応力指数は、「直交型」ではなく、クロッチ部曲げ半径 $R_c=381\text{mm}$ の規格品ティーズに対するものであることに留意する。

(1) 内圧に対する応力指数 $B_1=0.5$ と設定しており、これは軸方向の 1 次一般膜応力の増加はないと判断しているが、実際 図 9(2)、図 10(5)-1、図 10(14)-1 などの正規の直管断面を見ると、2 次応力の重畳は見られるが、特に広範囲に亘って管断面の軸方向膜応力(管断面平均値)が「軸方向基準応力」 S_L を超えることはないので、この判断は妥当と考えられる。

(2) 1 次+2 次応力係数 $C_1=1.5$ と設定しており、内圧による交叉部側面 L 点近傍に於ける局所膜応力の増加、最大 $SI=1.323$ を考慮し、これを 2 次応力と考え、 $C_1=1.5$ を設定しているものと判断される。

尚、交叉部側面 L 点局所の板曲げ応力は、縦・横に且つ広範囲に高応力の峰が続き、最大値は $SI=2.145$ を示したが、いずれも円周方向の狭い範囲に分布する板曲げ応力であることを考慮し、ピーク応力に分類したものと考えられる。

(3) ピーク応力係数 $K_1=4.0$ と設定しており、これは、クロッチ部の応力集中、最大 $SI=4.221$ や $SI=2.113$ などに対応したものと考えられる。上述の交叉部側面 L 点近傍の板曲げ応力の最大 $SI=2.145$ も併せてカバーしているものと考えられる。

尚、ピーク応力係数 K_1 は C_1 係数に掛けてピーク応力 F を算定するもので、ピーク応力は $F=K_1C_1=6.0$ となる。これは、応力成分では判断しづらいが、相当応力で見ると、内・外表面の最大値は $SI=5.457$ であり、これに対しても十分に保守的であると判断される。

以上であるが、今回は直交型のため、特に開口欠損による応力集中が大きく、相当応力による最大応力指数が $SI=5.457$ とぎりぎりとなったが、実際の規格品ティーズは、クロッチ部が曲率半径 $R_c=381\text{mm}$ で滑らかな構造になっており、応力集中も小さくなるので、ASME の内圧応力指数は十分な保守性を持つものと判断される。

クロッチ部の $R_c=381\text{mm}$ を考慮した R_c 型モデルの解析⁽⁶⁾を別途実施しているので、詳しくはそちらを参照願いたい。

8. 関連資料

- (1) 水野, 「配管の設計解析法 (改訂 第一版)」第 4.1.8 項, p.118~p.122, (2018 年 5 月)
- (2) 岩崎, 清水, 「直角分岐管の応力解析」, 日立評論(1972 年 12 月号), Vol.54, No.12, p.1053~1058
- (3) Z.F.Sang, et al. "Limit burst pressures for a cylindrical shell intersection with intermediate diameter ratio", International Journal of Pressure Vessels and Piping 79 (2002) p.341-349
(注記) これは, 小口径セットオンノズルの破裂試験と解析の結果であるが, 弾性解析部分の変形や応力分布が参考になる。
- (4) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編「最新版 解説 原子力設備の技術基準」改訂版, 昭和 58 年 7 月, 電力新報社, 第 17 条(穴と補強) 第 3 項 第 2 号 解説, p.192-193
- (5) S.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger, "Theory of Plates and Shells", Second Edition, International Student Edition, McGraw-Hill, Chap.15, § 115, p.471-474 (特に Table 84, Fig.239 を参照。)
- (6) MSP0015-R00 「Rc 型モデルによる T 字配管の内圧負荷解析の結果」

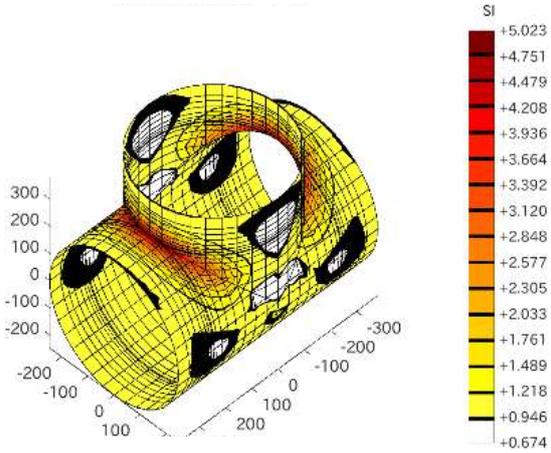


图 8(1)-1 周方向膜应力 $\sigma_{m\phi}$ 指数 SI

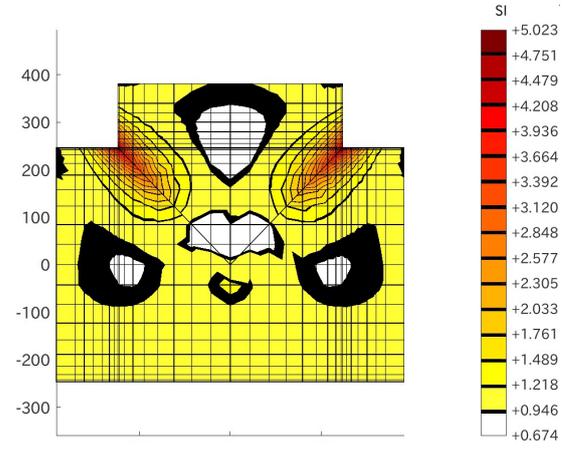


图 8(1)-2 周方向膜应力 $\sigma_{m\phi}$ 指数 SI

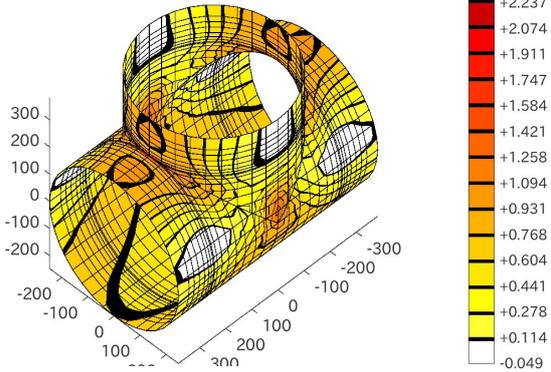


图 8(2)-1 轴方向膜应力 σ_{mL} 指数 SI

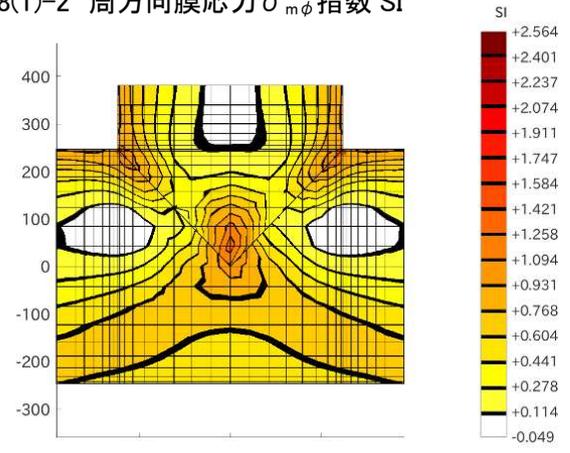


图 8(2)-2 轴方向膜应力 σ_{mL} 指数 SI

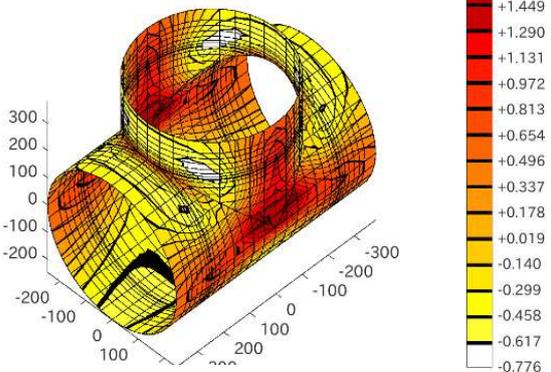


图 8(3)-1 周方向曲げ应力 $\sigma_{b\phi}$ 指数 SI

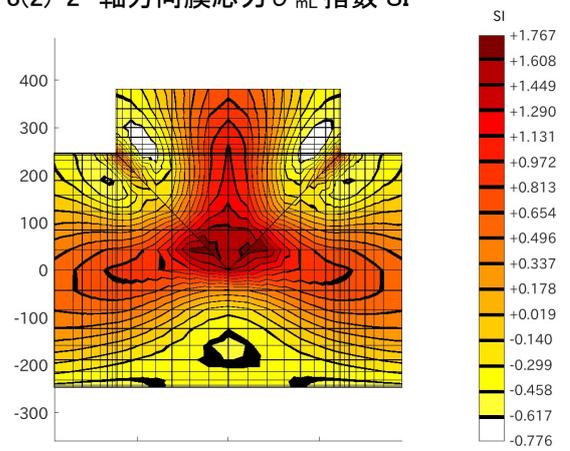


图 8(3)-2 周方向曲げ应力 $\sigma_{b\phi}$ 指数 SI

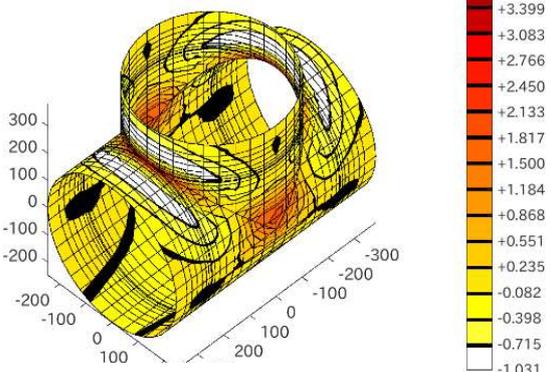


图 8(4)-1 轴方向曲げ应力 σ_{bL} 指数 SI

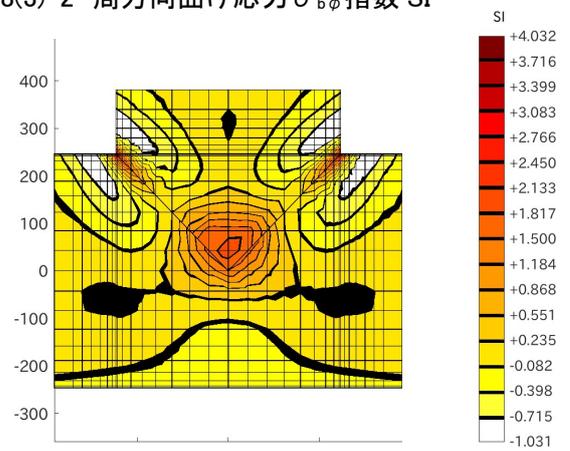


图 8(4)-2 轴方向曲げ应力 σ_{bL} 指数 SI

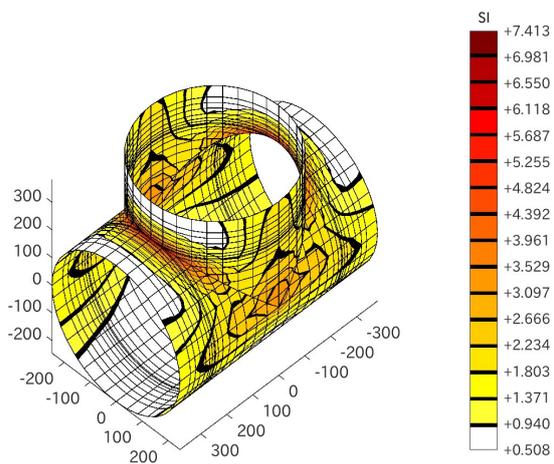


图 8(5)-1 相当应力 σ_{eq} 指数 SI(外表面)

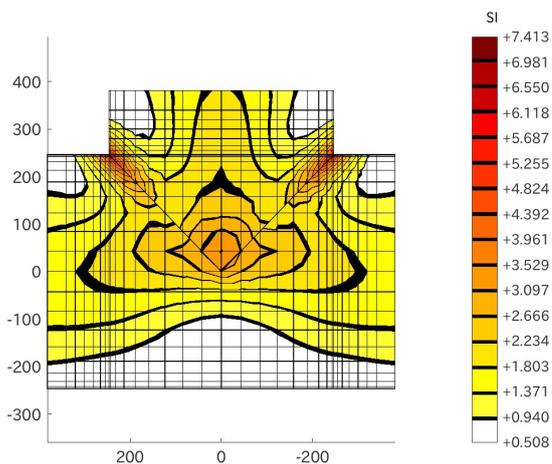


图 8(5)-2 相当应力 σ_{eq} 指数 SI(外表面)

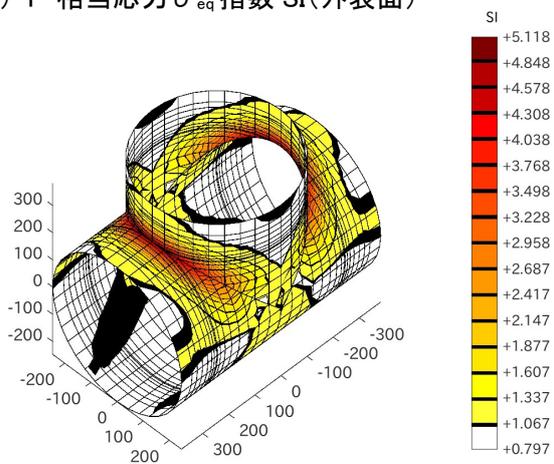


图 8(6)-1 相当应力 σ_{eq} 指数 SI(中央面)

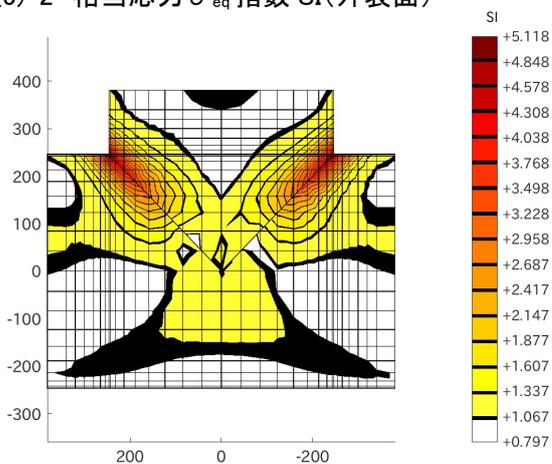


图 8(6)-2 相当应力 σ_{eq} 指数 SI(中央面)

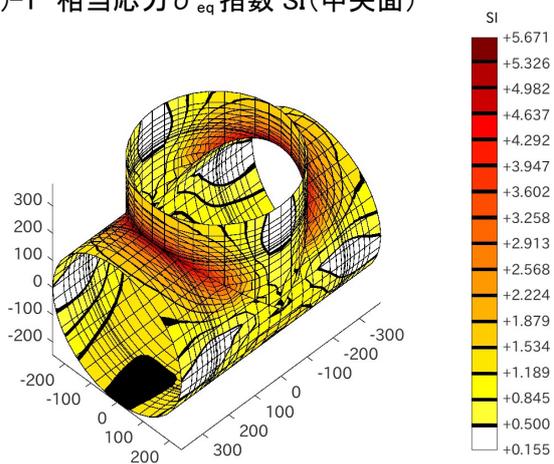


图 8(7)-1 相当应力 σ_{eq} 指数 SI(内表面)

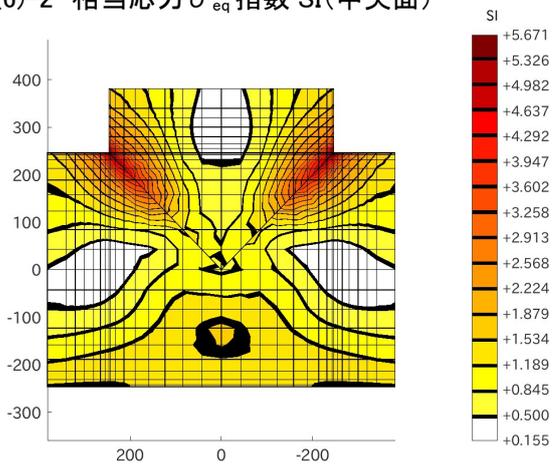
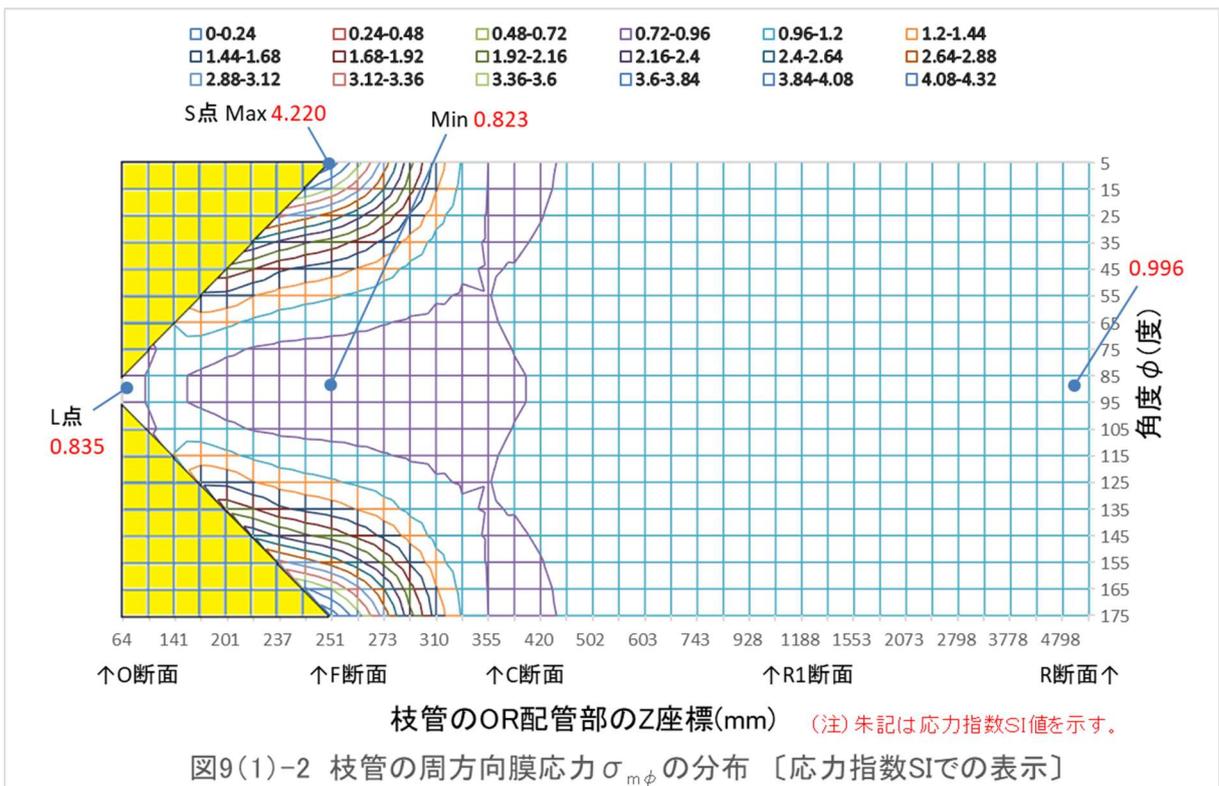
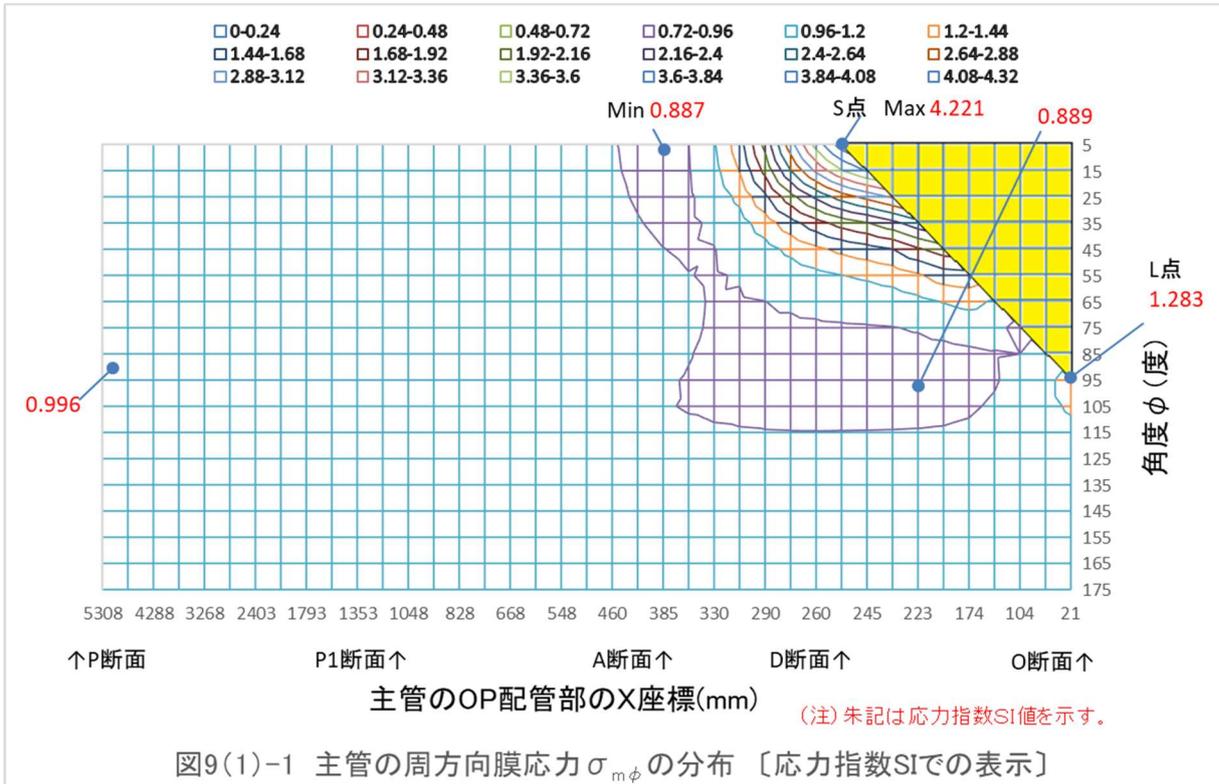
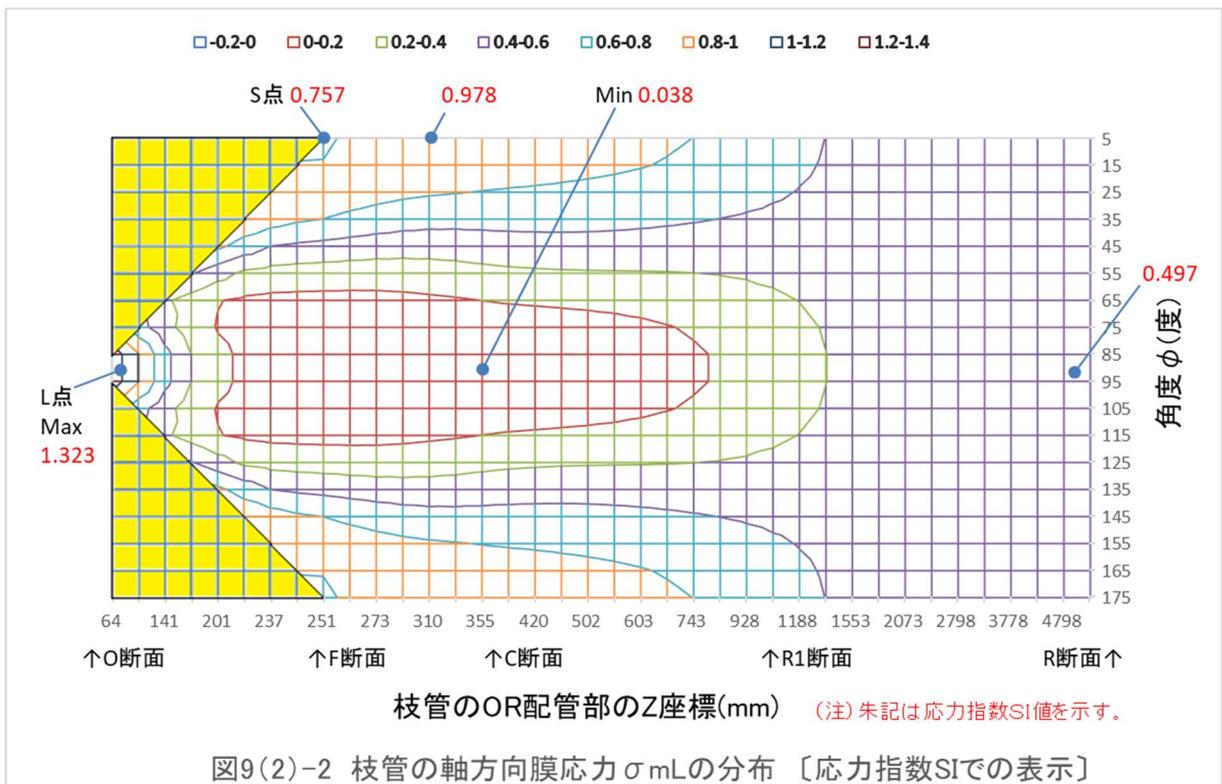
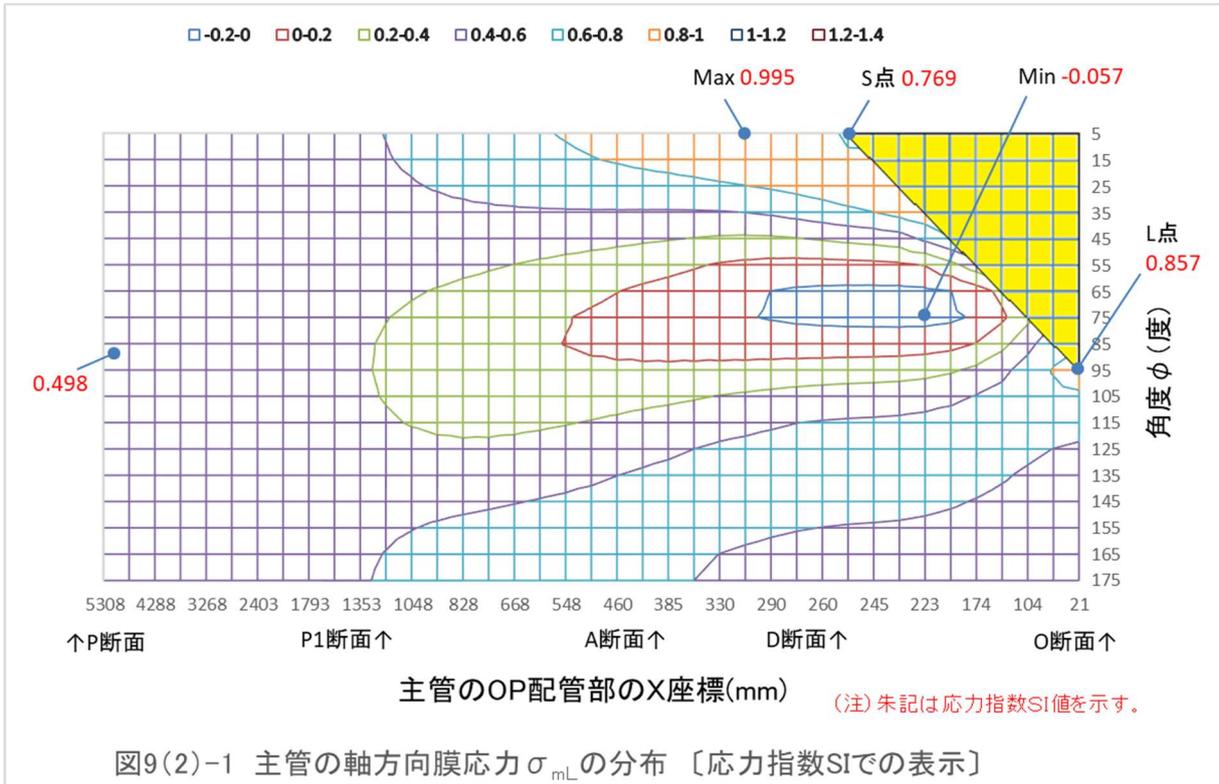
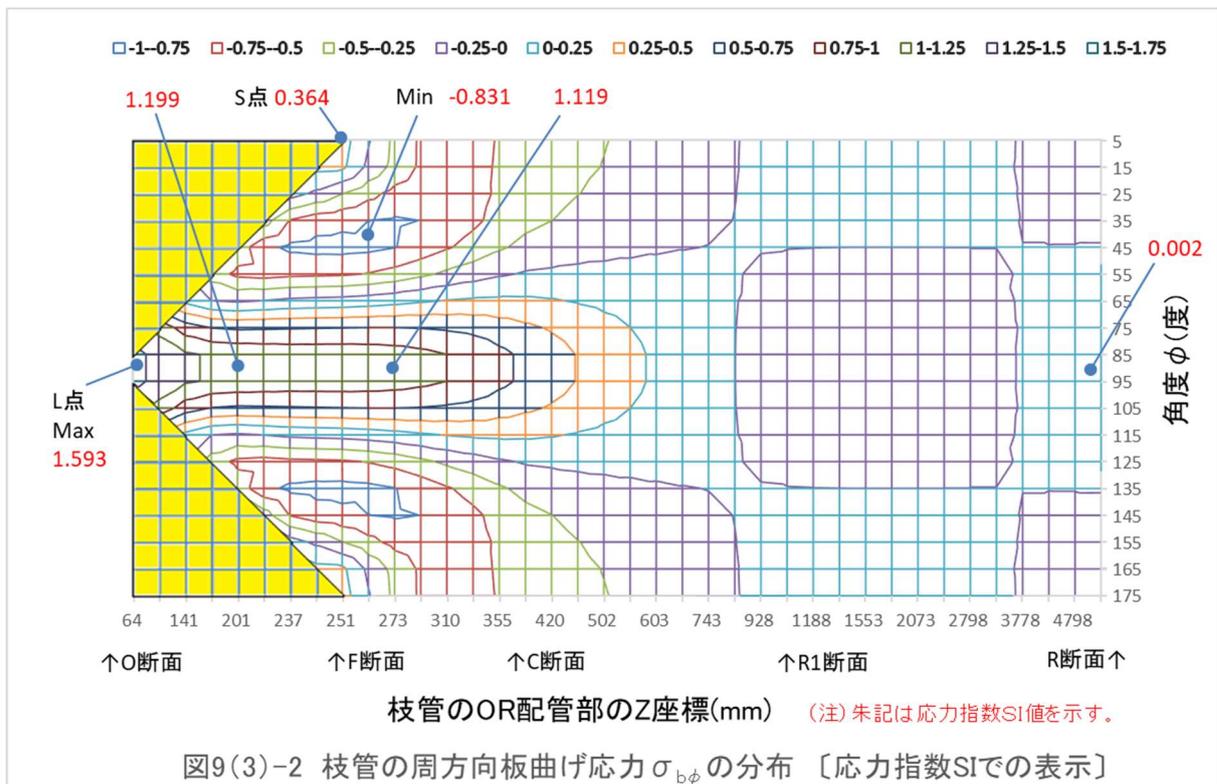
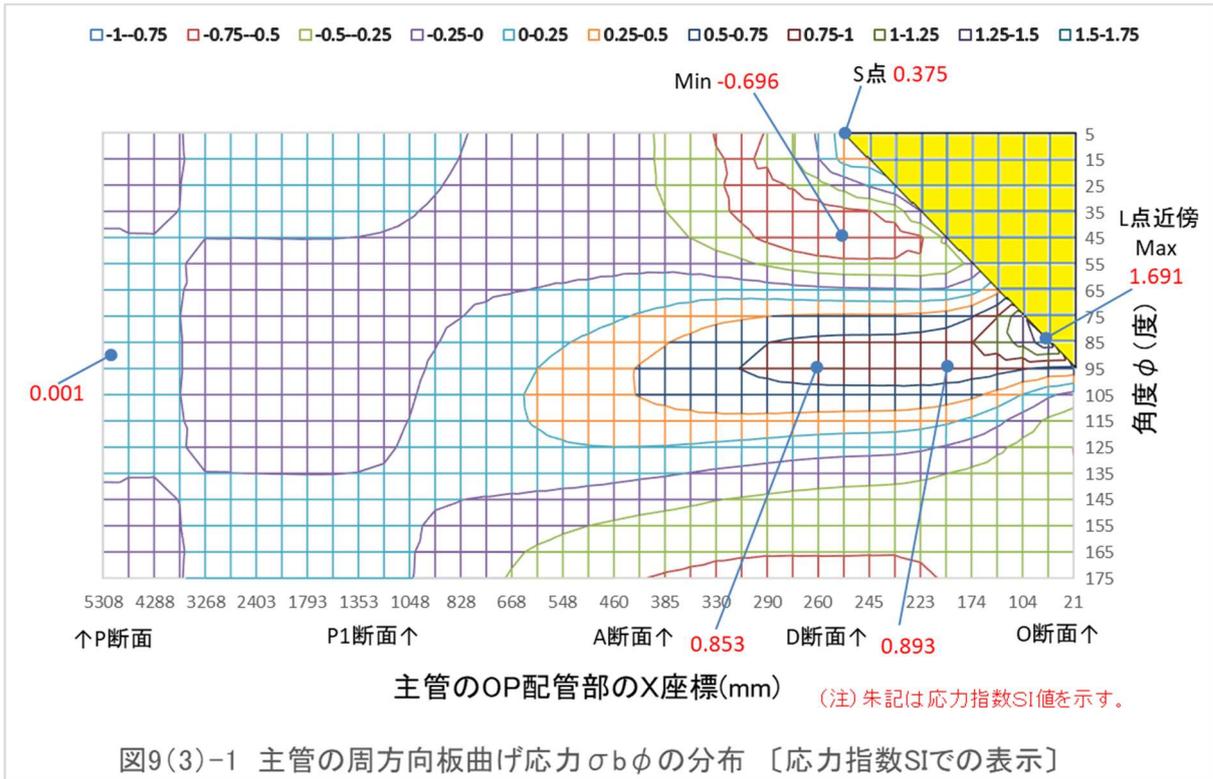
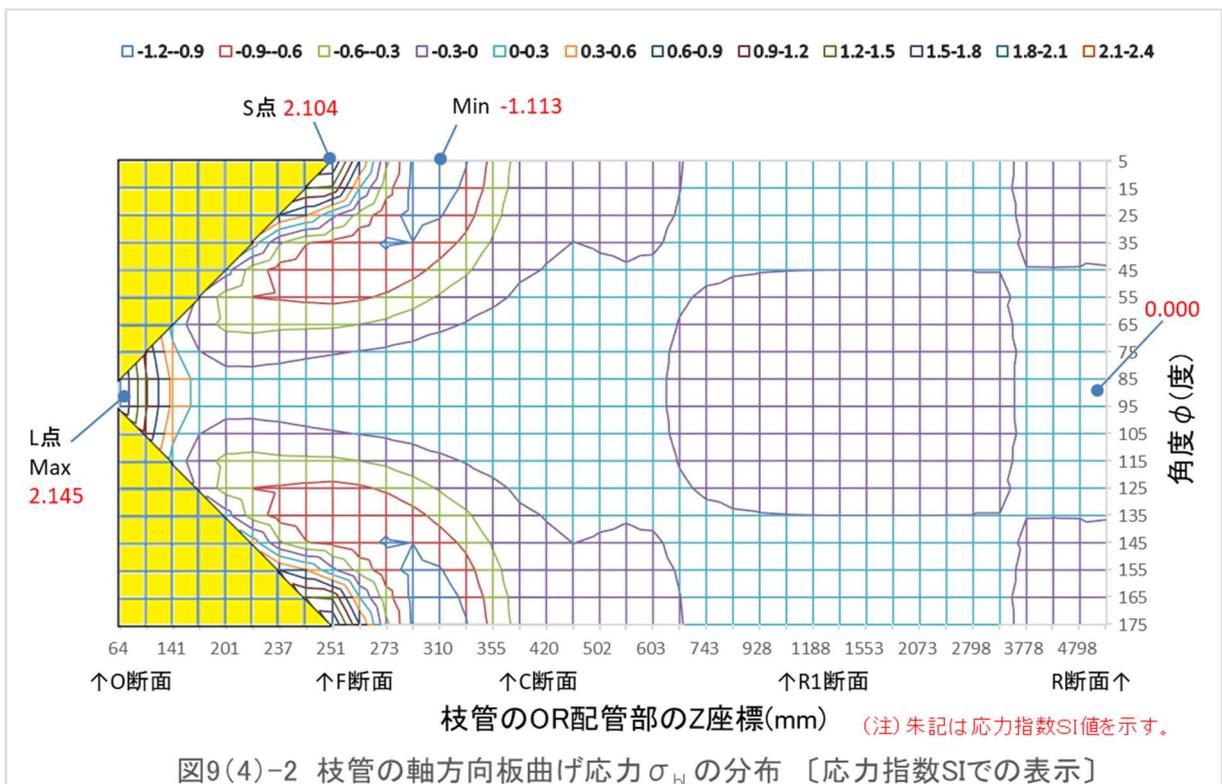
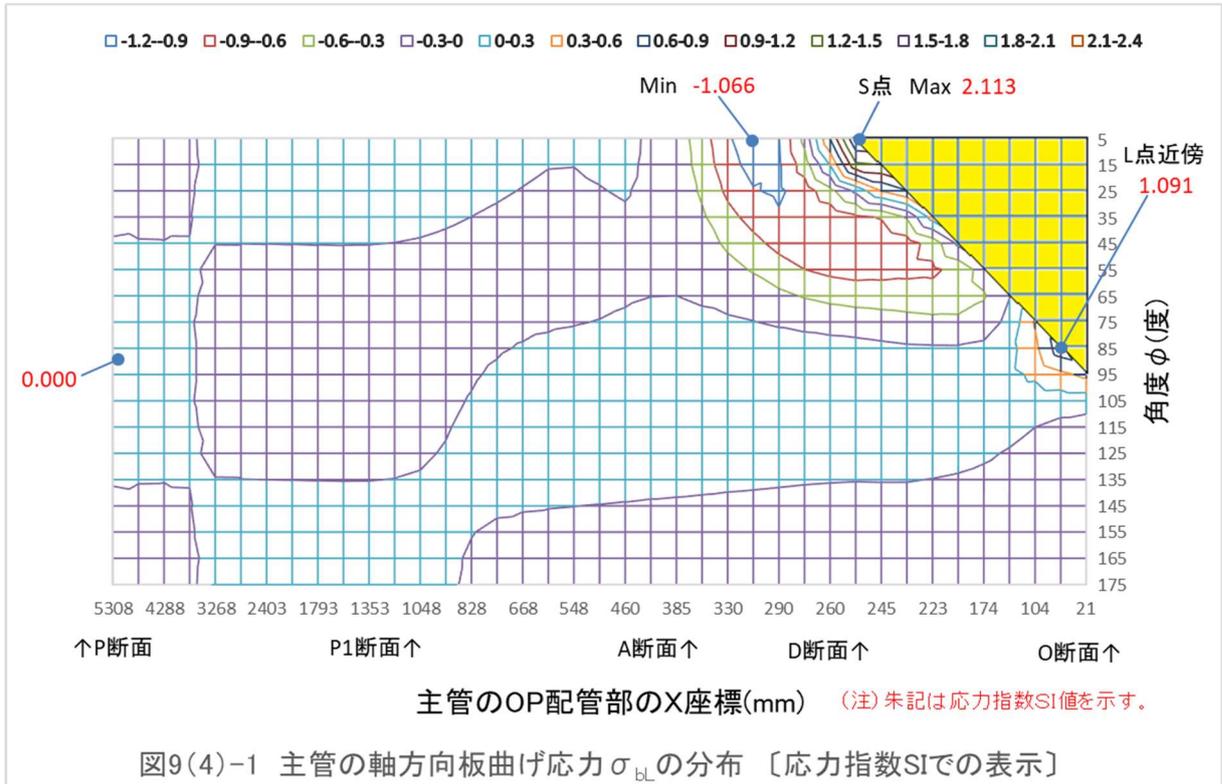


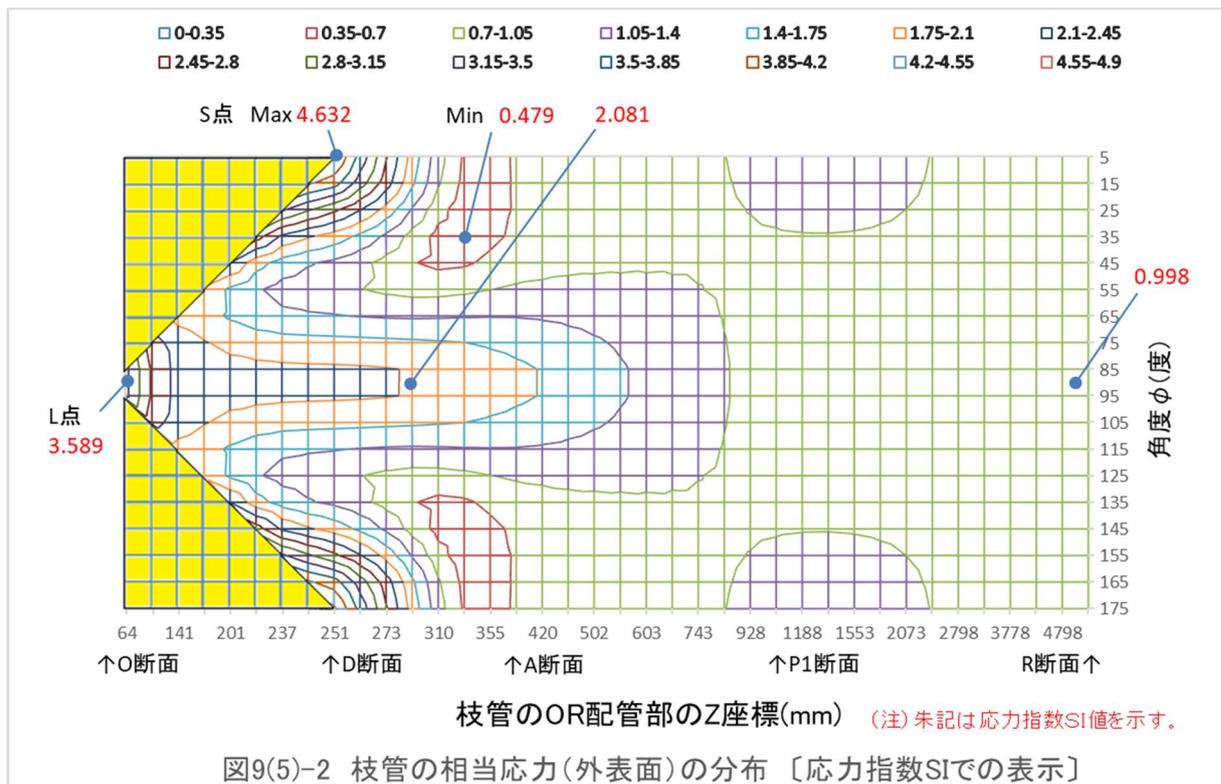
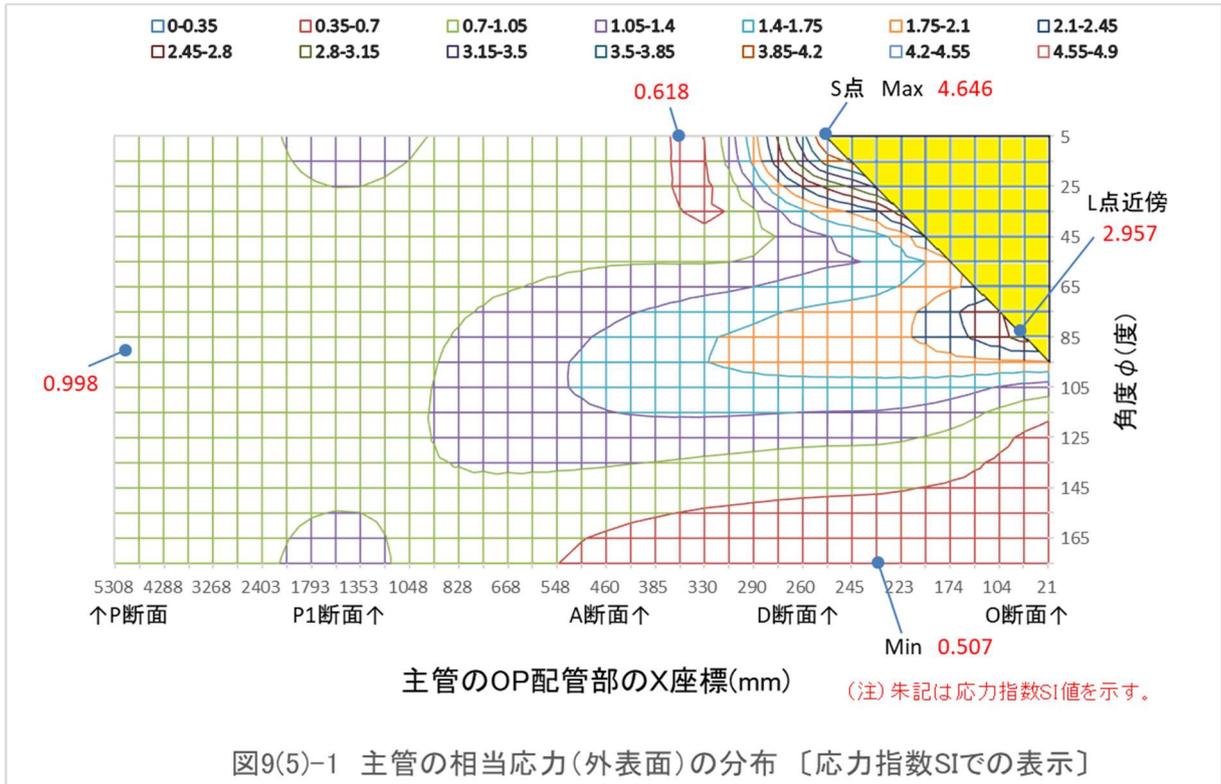
图 8(7)-2 相当应力 σ_{eq} 指数 SI(内表面)

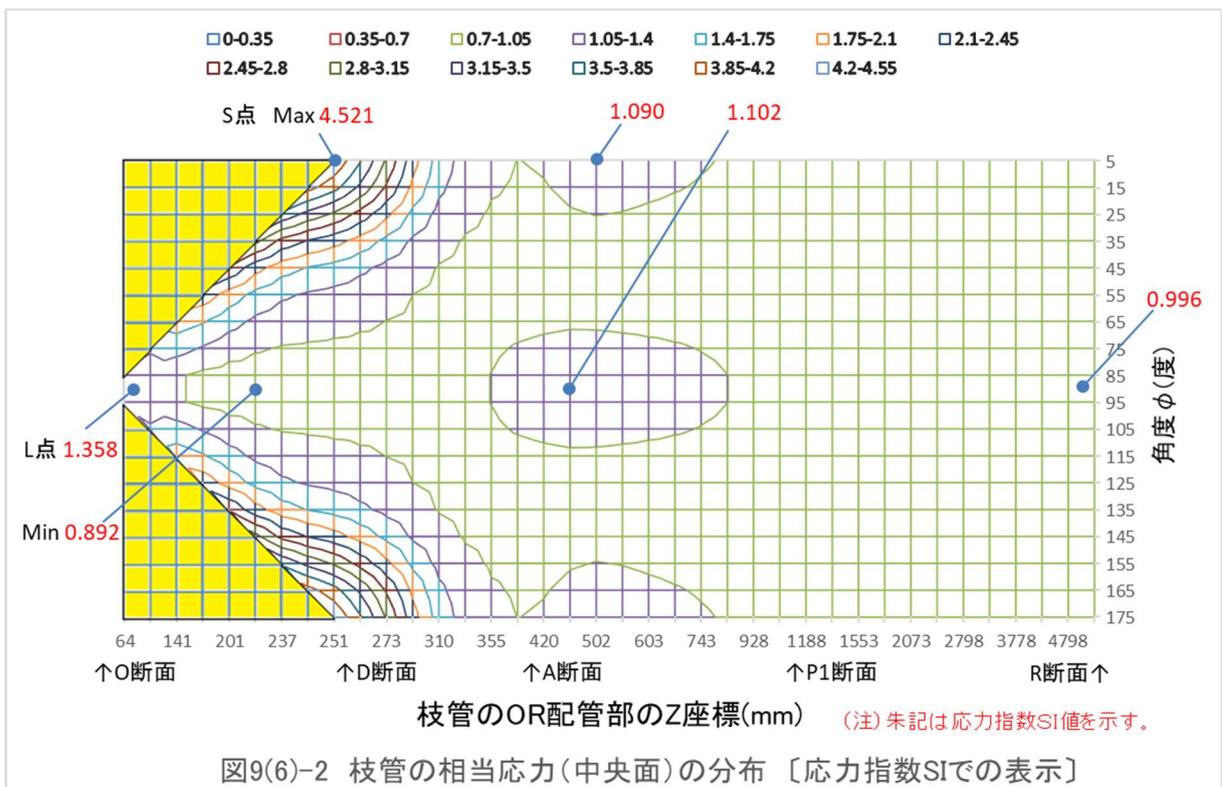
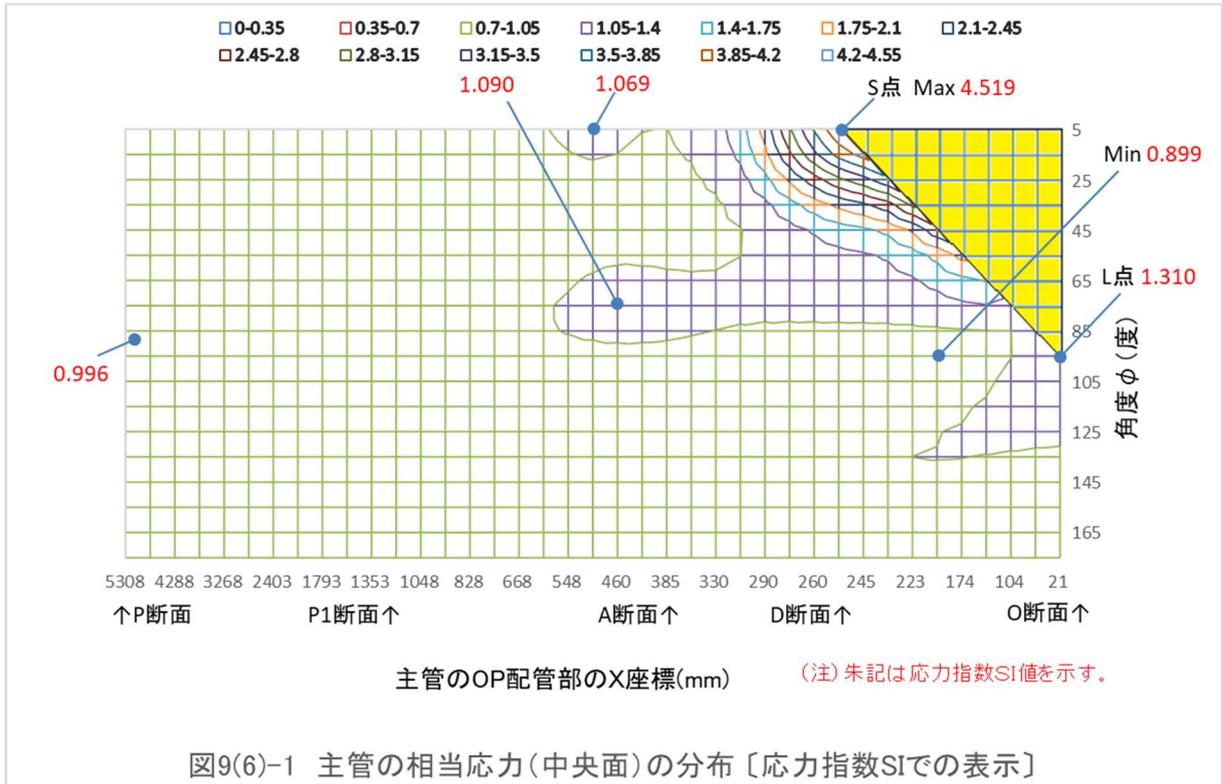


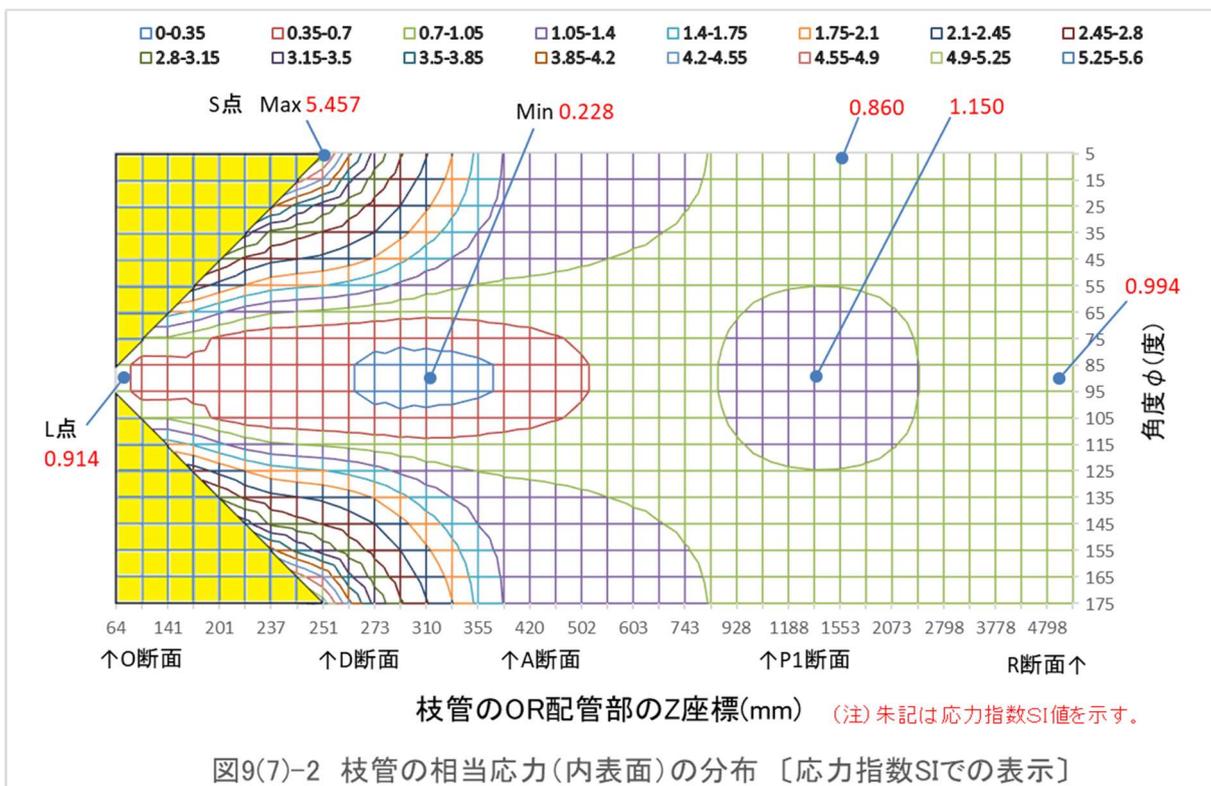
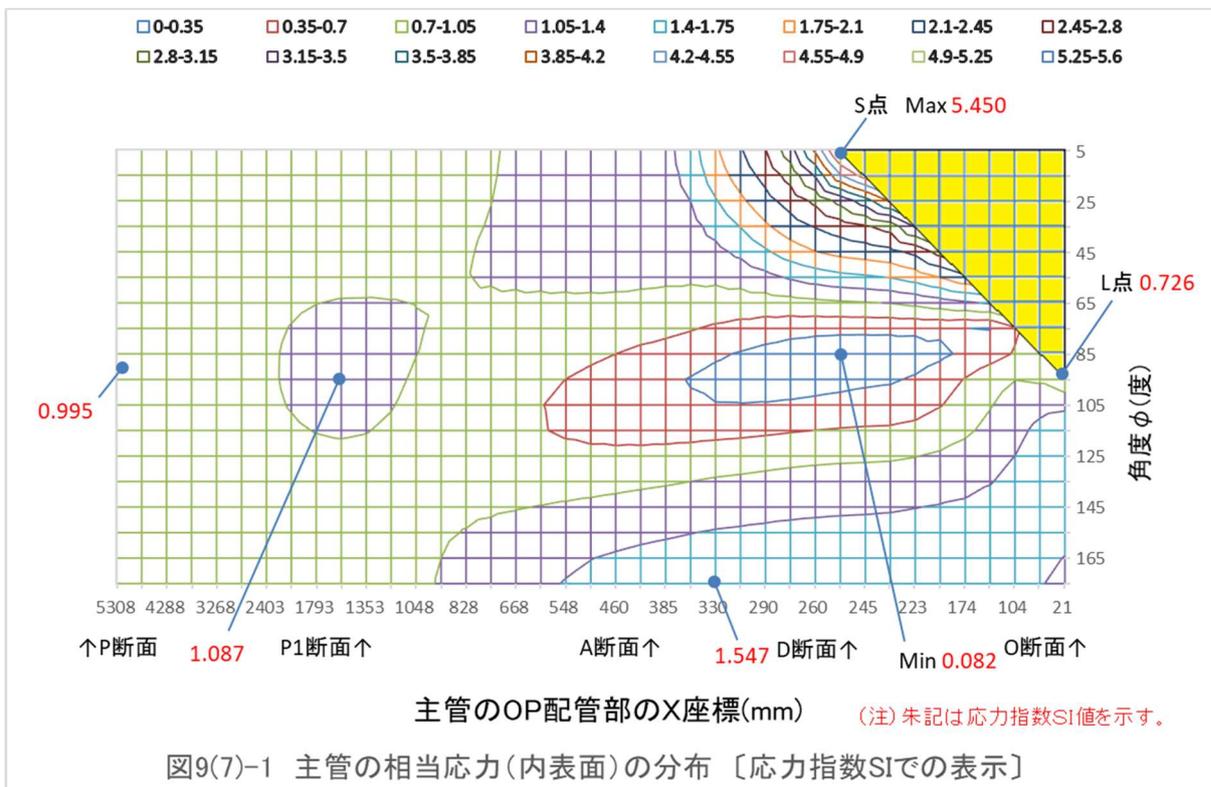


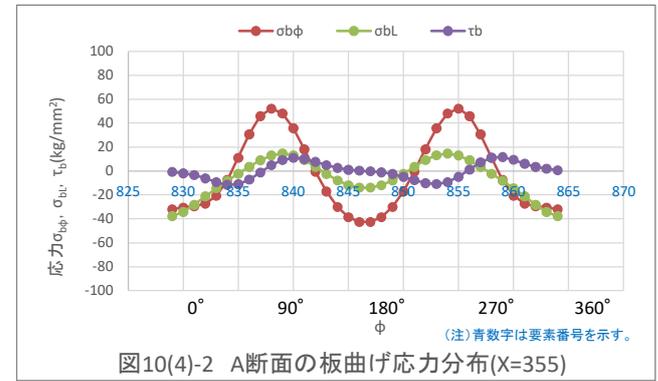
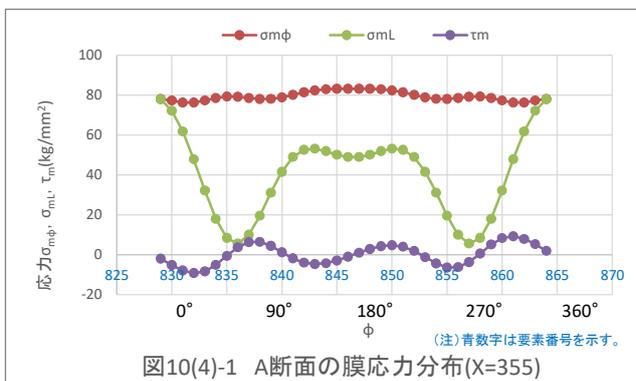
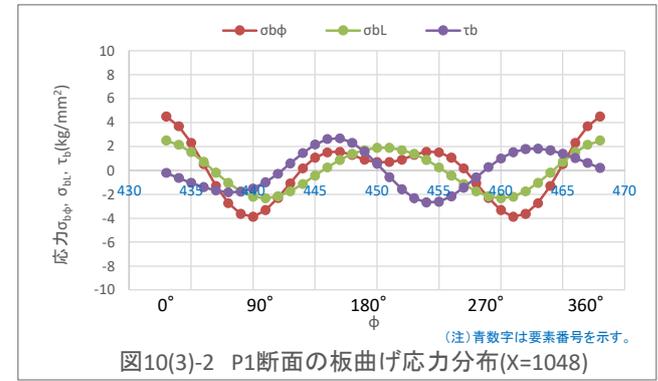
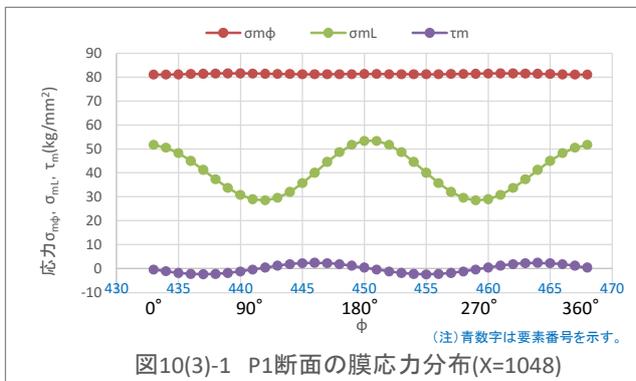
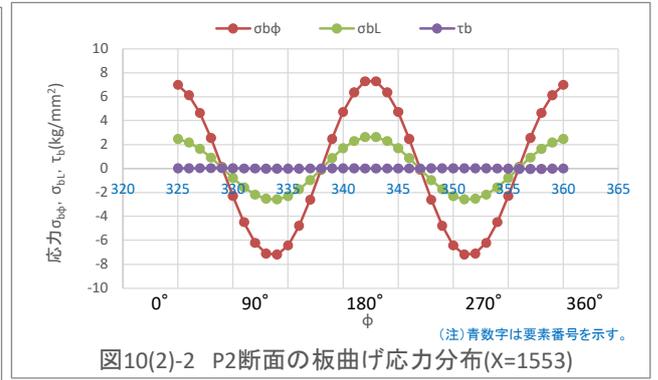
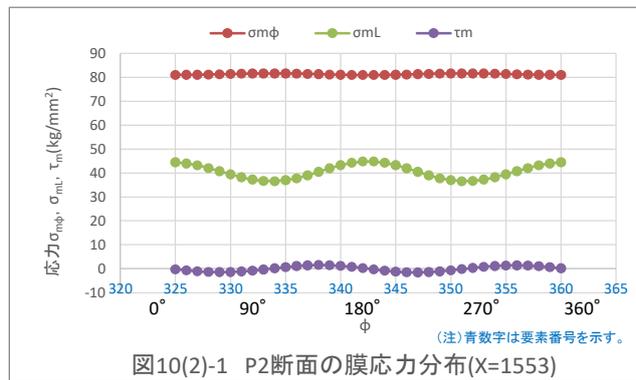
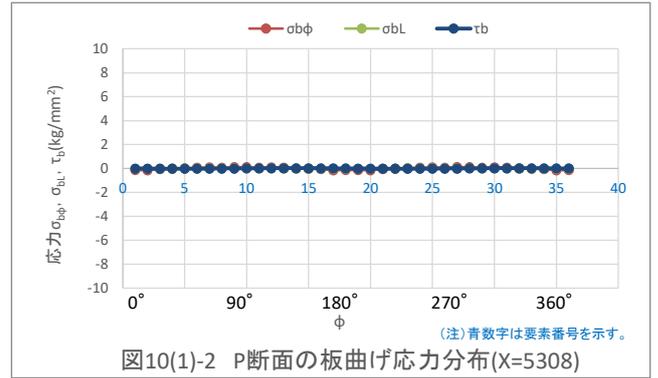
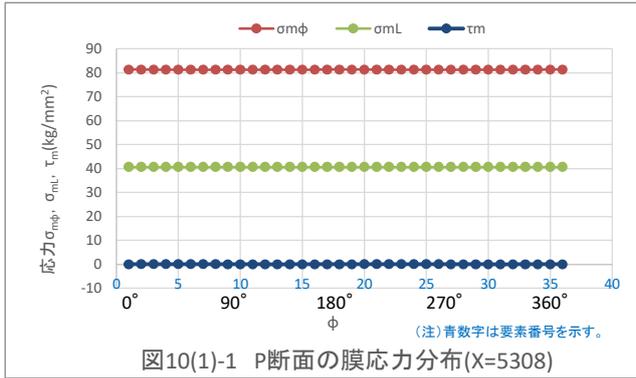


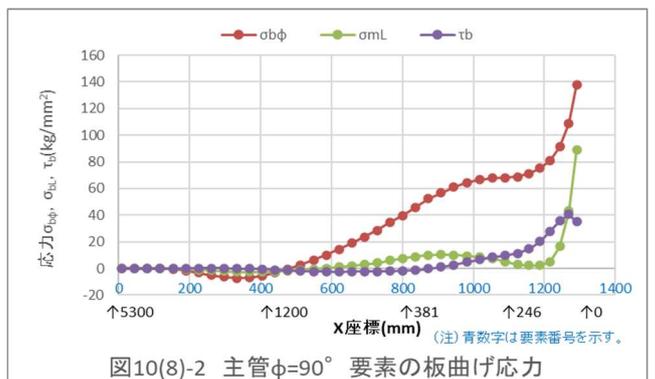
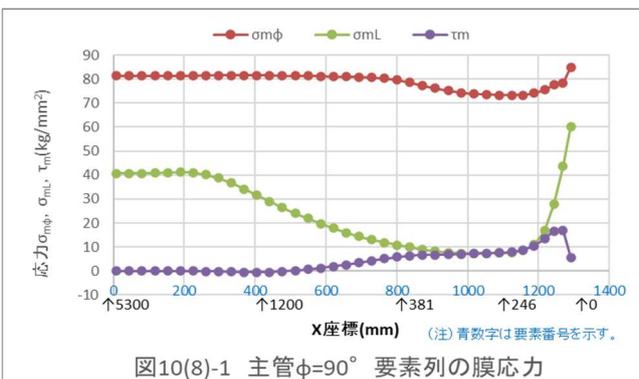
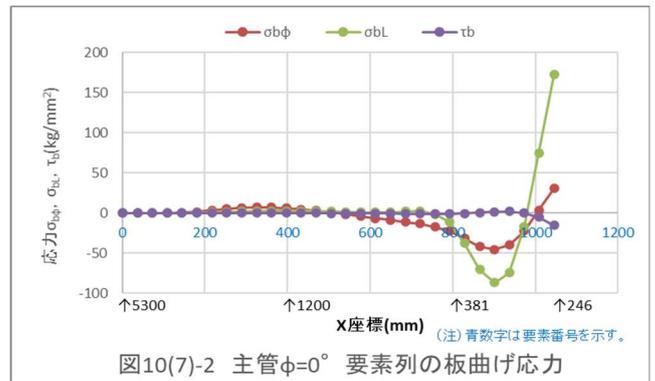
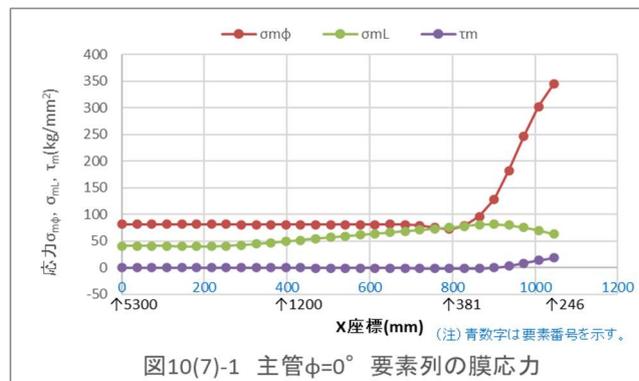
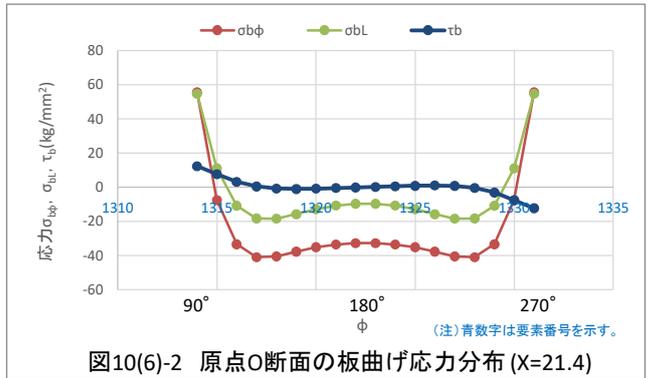
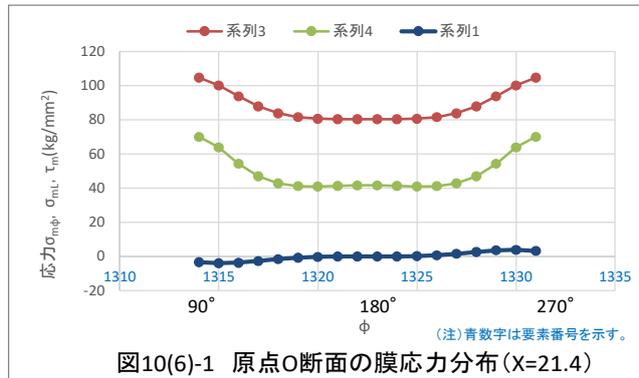
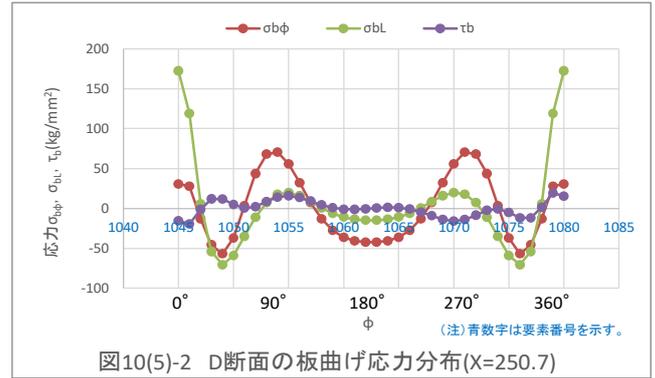
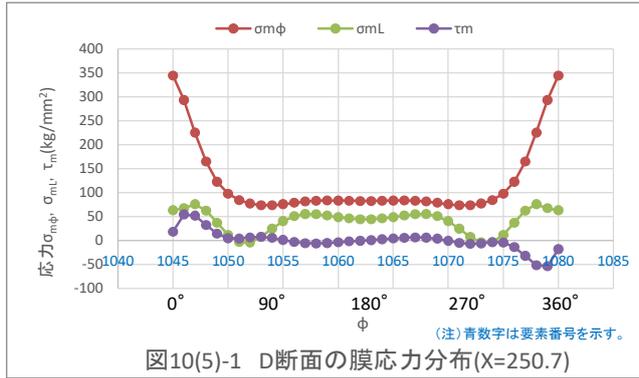


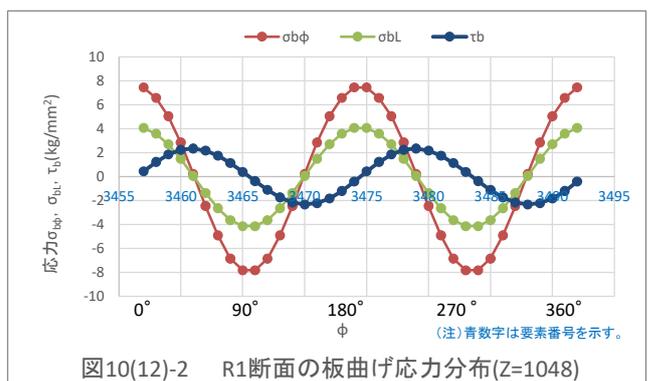
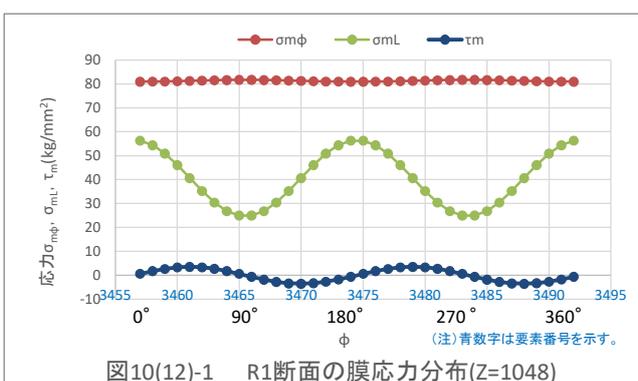
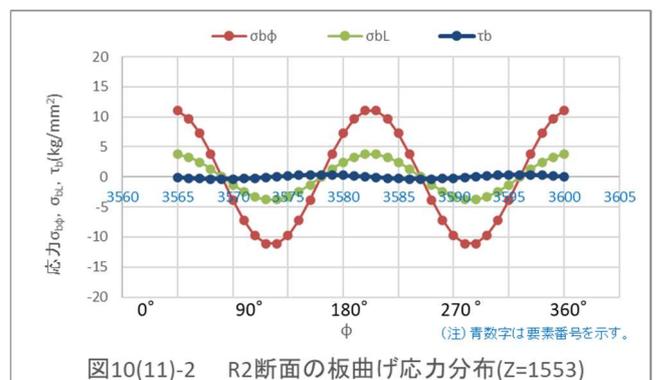
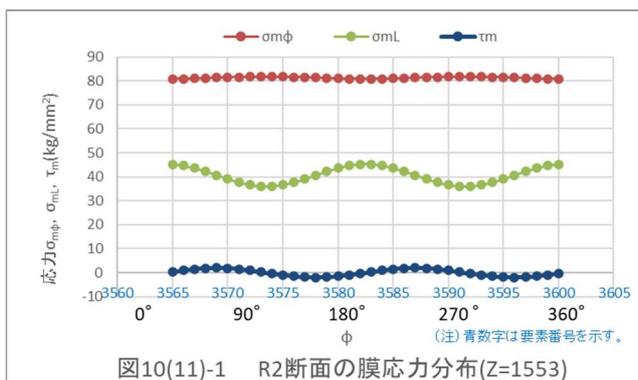
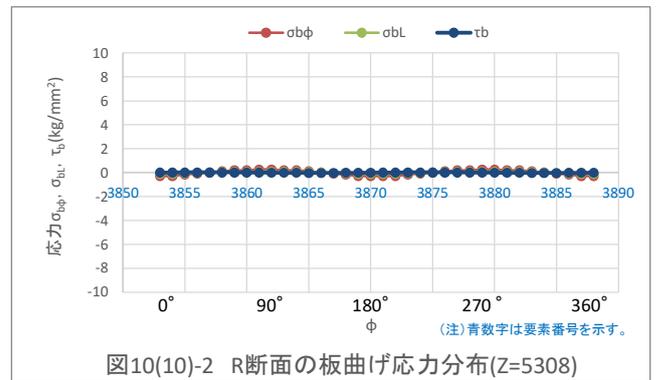
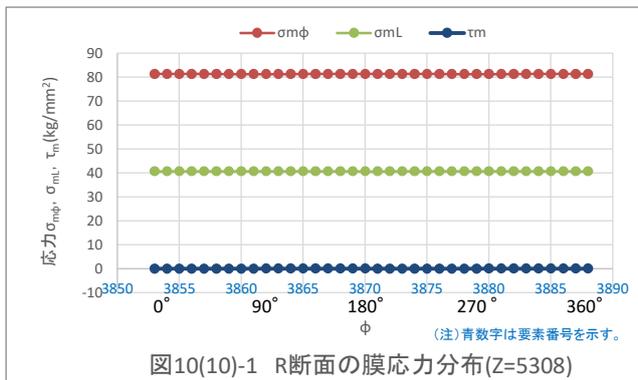
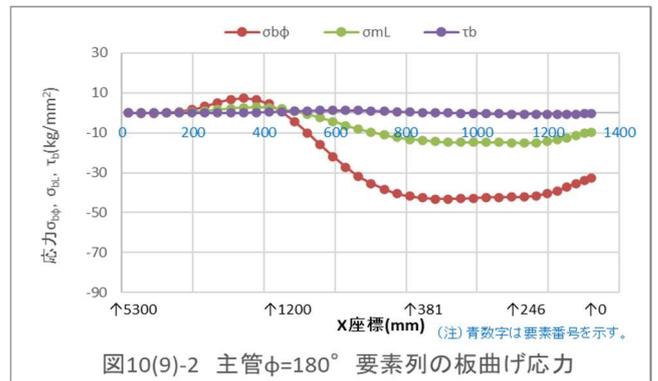
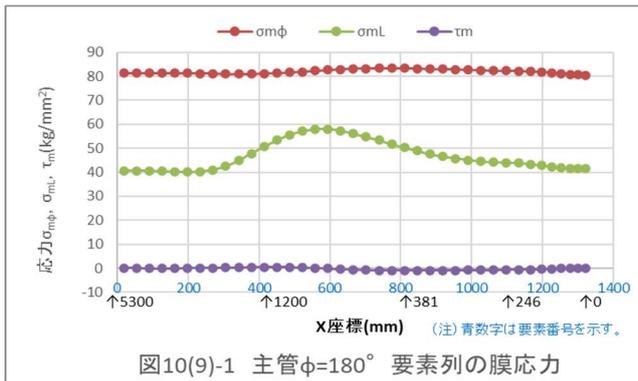


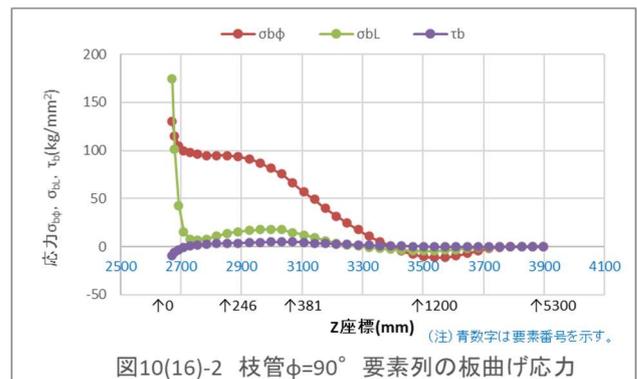
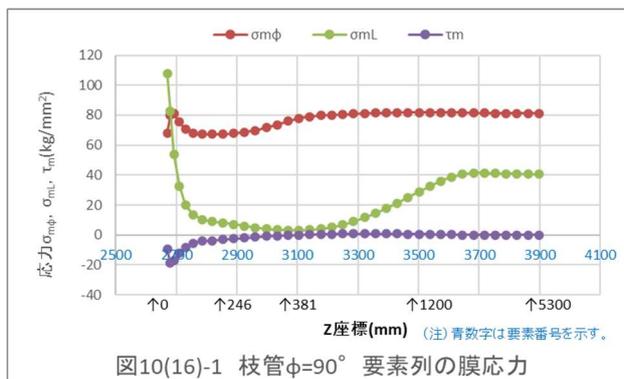
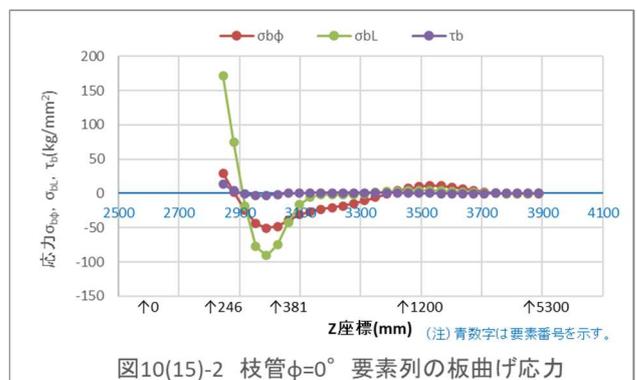
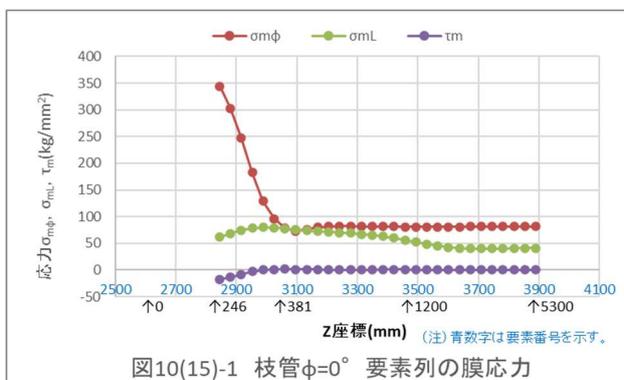
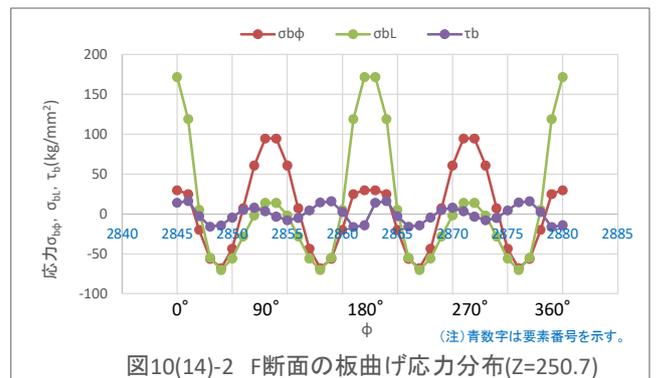
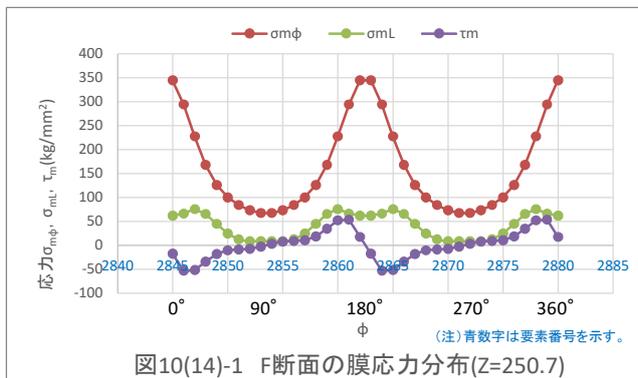
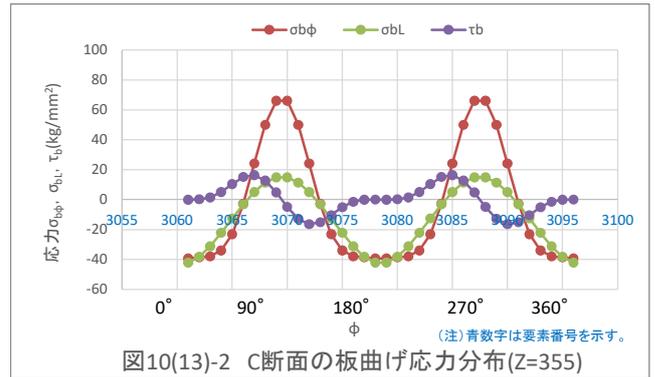
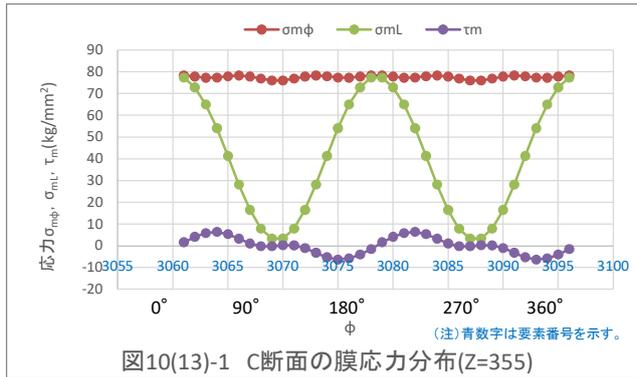


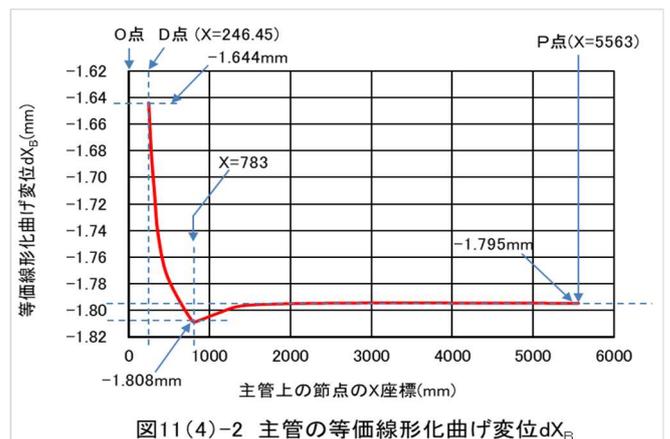
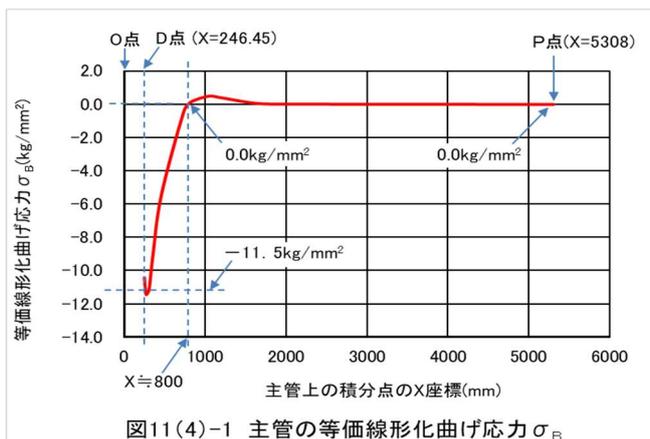
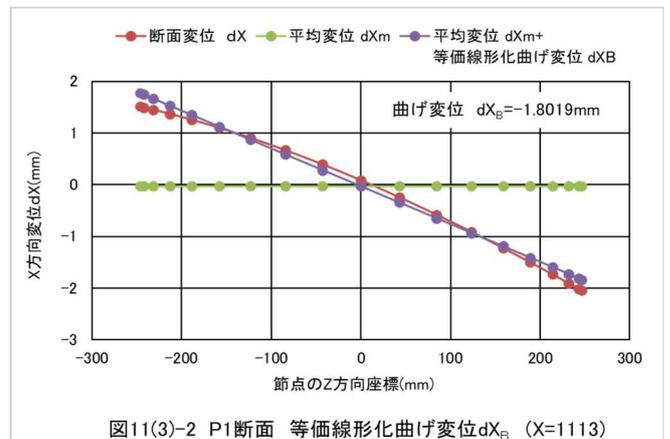
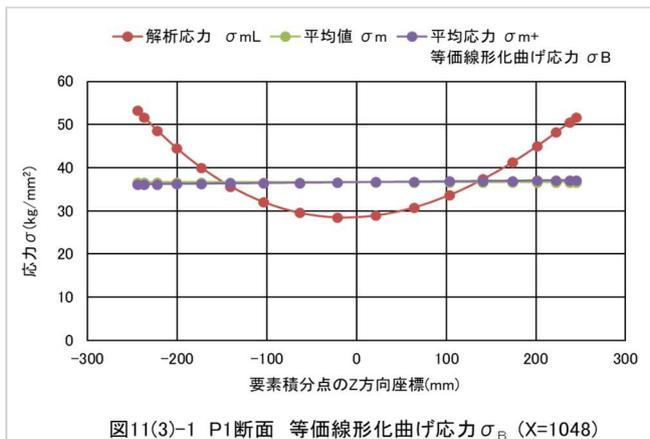
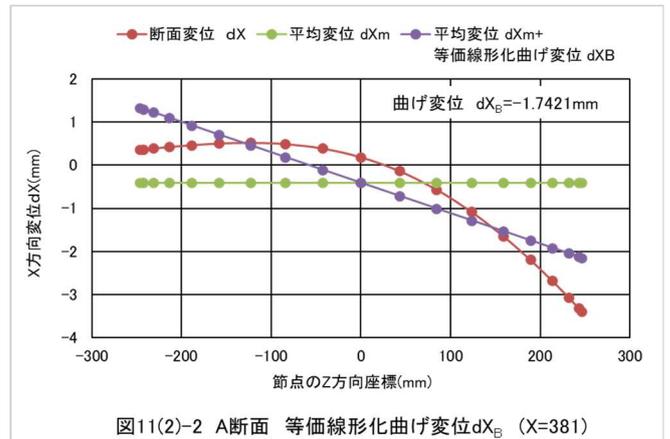
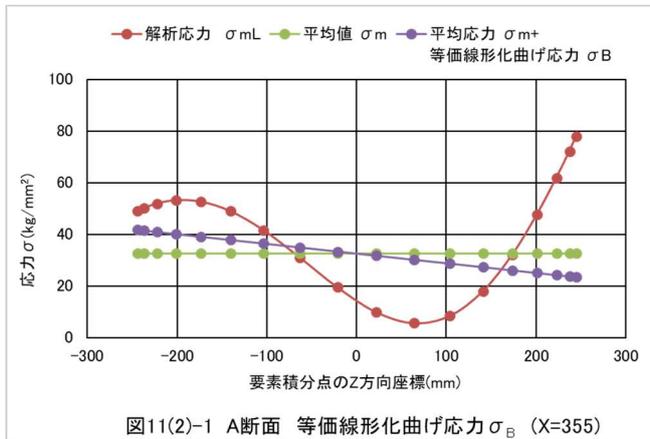
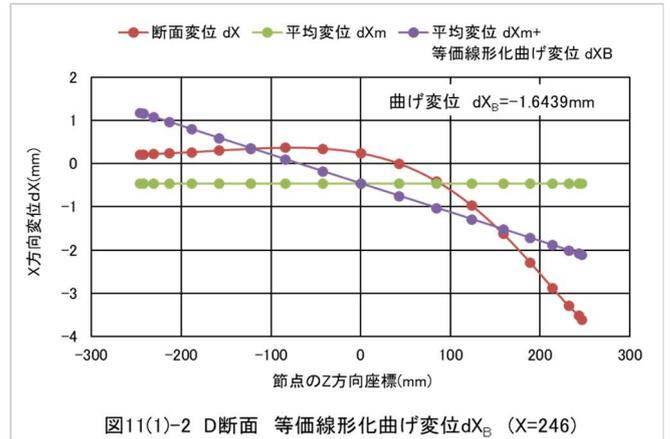
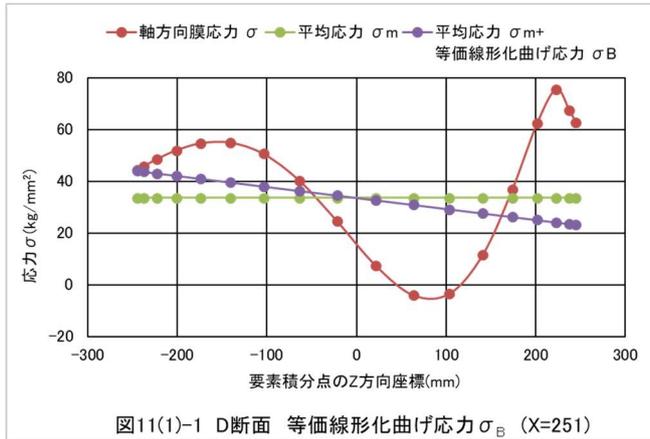












添付資料 A 「内圧に対する等価軸力の計算」

1. まえがき

両端が密封された直管に内圧が作用する場合、軸方向に内圧による軸張力(略して、軸力)が発生する。

この軸力の総和 F は、管の内法面積 S_o に圧力 P を掛けた値となる。

2. SAPIVでの等価軸力

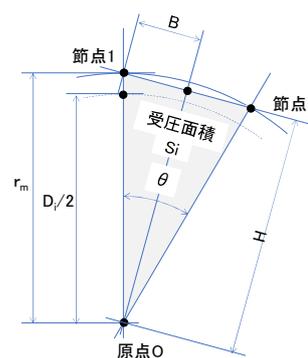
さて、こうした明白な定義の軸力ではあるが、解析モデル化に於いては細かいところで色々問題が出る。

今回の SAPIV シェル解析は、配管の平均半径 r_m を基準に、円周方向に $\theta = 10^\circ$ ごとに 36 分割し、管をモデル化している。即ち、図 A-1 に示すように、正 36 角形の筒が半径 r_m の円筒に内接している。この正 36 角形の筒の断面積 S は、図 A-1 に示した式で計算でき、この断面積 S を円筒の内法断面積 S_o と比較すると、表 A-1 に示す通り、 S_o に対して 1.06 倍となる。

等価な荷重とするには、例えば r_m や内圧荷重 P を割り引く必要がある。しかし、例えば、今回の T 字配管の枝管側を見ると、枝管の端点 R は固定端であるが、他端はティーズ部となっており、シェル要素で閉じられて内圧 P が直接負荷されている。このため、R 端部の反力荷重は、上記の断面積 S に対する荷重と同じ値となる。

表 A-1 等価軸力の計算結果

項目	記号	単位	数値	
管外径	D_o	mm	508.0	
管内径	D_i	mm	477.8	
管肉厚	t	mm	15.10	
管内法断面積	$S_o = \pi / 4 \cdot D_i^2$	mm ²	179300.8	
平均半径	r_m	mm	246.45	
周方向の分割数	N	個	36	
分割角度	θ	度	10.0	
		rad	0.174533	
内圧力	P	kg/cm ²	500	
受圧面積	三角形	S_i	mm ²	5273.49
	総面積	S	mm ²	189845.53
	面積比	S/S_o	—	1.0588
	等価半径	$r_{eq} = (S_o/\pi)^{0.5}$	mm	238.90
	半径比	r_{eq}/r_m	—	0.969
等価軸力	総荷重	$F_x = SP$	kg	949227.66
解析入力値	節点荷重	$F_{xi} = F_x/N$	kg	26367.43



$$S = N \cdot S_i = N \cdot r_m^2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

図 A-1 受圧面積の計算

従って、解析全体を考えると、モデル化の基準となる半径 r_m 、或いは、負荷内圧 P を割り引くと言うことはできないことが分かる。

断面積 S で決まる実際より 6% 大きい荷重を等価軸力として負荷せざるを得ないことになる。

この問題は、実はシェル解析の持つ根本的な矛盾である。内法断面積と解析モデルの違いは、板厚が有限であることによる矛盾である。シェル解析は、元々板厚が無視できる場合の近似であって、板厚が無視できない場合は必然的に乖離が生じるのである。

以上より、ここでは、表 A-1 に示した計算値の F_x を入力した。尚、節点に入力する荷重 F_i は F_x を $N=36$ で割ったものである。

