

(昭和 60 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

構造用鋼管 T 継手部の残留応力

正員 松岡 一 祥* 直井 保*

Residual Stresses in Welded Tubular T-joints

by Kazuyoshi Matsuoka, *Member* Tamotsu Naoi

Summary

Many off-shore structures of fixed or mobile platforms, are mainly composed of tubes of various diameters. The structures have many tubular joints called nodes, where two tubes or more connected together with welding in the same space. Due to the weld, there are residual stresses in tubular joints. It is said that the residual stresses have bad effects on static and fatigue strength of the joints. However, few investigations have been carried out for the problem of residual stresses in welded tubular joints. So, it has been almost impossible to take residual stresses into consideration when designing the joints.

This paper deals with the residual stresses in welded tubular T-joint, that is the most simple and popular type of the tubular joints. Experimental and analytical results are shown. Residual stresses of two specimens are measured. One specimen has 700 mm diameter chord and 400 mm diameter brace, another has 700 mm diameter chord and 300 mm diameter brace. FEM with shell elements is used for the full model analysis. Then, plane strain elements are used to perform the analysis of weld toes. Both experimental and analytical results are thoroughly agreed for the most part.

1 はじめに

固定式あるいは可動式の海洋構造物には、種々の寸法の鋼管を組み合わせで建造されるものが多い。これらの構造物には、溶接により 2 本以上の鋼管が結合された鋼管継手があり、それらは形状により T, y, K, TK などの記号が与えられている。鋼管継手は、鋼管部材に加わる荷重を、軸力、剪断力、モーメントとして伝達する部分であり、力が集中的に加わる。また、すみ肉溶接部の形状による応力集中も生じる。このように、鋼管継手は、構造強度に関して最も過酷な部分である。さらに、継手部に存在する溶接残留応力は、崩壊強度を低下させるのみならず、疲労き裂の発生、伝播にも影響を与えるといわれている^{1),2)}。しかし、鋼管継手の残留応力に関する報告は皆無に近い、そのため、鋼管継手の設計にあたって、残留応力を考慮した検討はほとんど行われていないのが現状である。

本論文は、溶接製鋼管継手の中で最も単純かつ一般的な T 継手の溶接残留応力を実験的および解析的に取扱う。まず、全体的な残留応力の分布形状を示した後、疲労き裂の発生に最も大きな影響を与えると思われる止端部の溶接線垂直方向の残留応力の集中現象を取扱う。全

体的な残留応力の分布形状および溶接変形の解析には要素による有限要素法を用いた。この手法では肉盛形状の複雑な溶接部近傍の残留応力を正確に求めることは困難である。そこで、溶接部近傍の残留応力解析には平面歪要素による解析を用いて精密化を図った。

2 残留応力の測定

2.1 供試体

Fig. 1 に示される T 継手供試体を用いた。管材は枝管 (brace) に STK 41, 主管 (chord) に STPY 41 を用いた。枝管の STK 41 は電気抵抗溶接管であり、製造過程でコイル状態から多数のロールを通り曲げ加工され、また溶接したままで使用されるため、製造時に生じる残留応力は無視できない。一方、主管の STPY 41 は U. O. E. 法による配管用アーク溶接管であり、最後に拡管機によりおし拡げて、真円、真直にするため、シーム部に軸方向残留応力が若干残るものの、全体としては製造時に生じる残留応力はあまり問題とならない。Fig. 1 に示される $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ の溶接 4 回をもって 1 周の溶接としたため、溶接の終端および始端となる 0° および 90° の位置では肉盛形状に若干の乱れが生じた。この供試体を No. 1 とする。さらに、著者らが以前残留応力測定を行った分岐管³⁾についても解析結果との比較を行うものと

* 運輸省船舶技術研究所船体構造部

Table 1 Dimensions and material properties.

		Dimensions (mm)		Strength (kg/mm ²)		Elongation (%)
		Radius	Thickness	σ_y	σ_u	
No. 1	Chord	351.7	8.0	38.6	52.0	32
	Brace	199.8	6.4	34.5	45.8	29
No. 2	Chord	351.0	9.2	35.4	47.8	30
	Brace	150.5	6.7	27.9	42.2	28

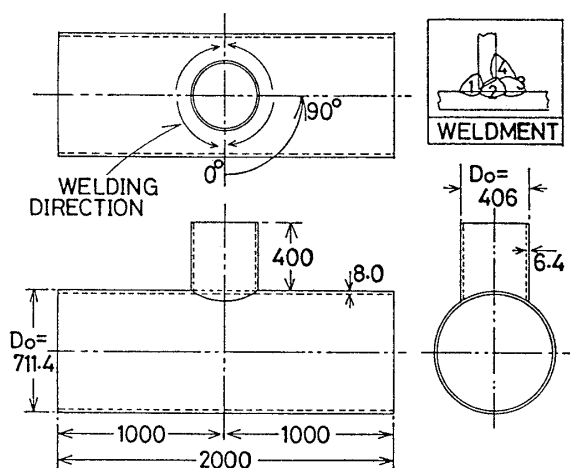


Fig. 1 Test specimen of No. 1 (unit: mm).

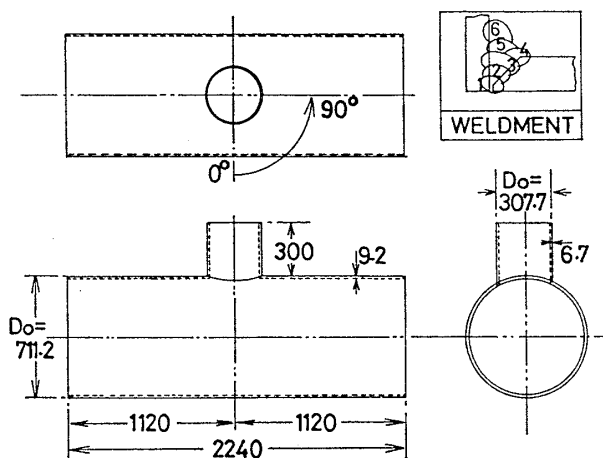


Fig. 2 Test specimen of No. 2 (unit: mm).

した (Fig. 2 参照)。これを No. 2 とする。No. 2 供試体は、主管壁を枝管が入るように切り取って接合する分岐管であり、枝管は切断後、溶接前に焼鈍されている。

供試体に用いた鋼管の寸法、材料強度を Table 1 に、溶接入熱量を Table 2 に示した。Fig. 1, 2 に示されている溶接積層手順図で、横におかれているのが主管壁であり、上から接合されているのが枝管壁である。枝管壁の左側が枝管の内側である。

2.2 測定方法

残留応力の測定方法には、切り出し法を用いた。No. 1

Table 2 Heat input (kJ/cm).

	Pass					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
No. 1	14.3	9.3	19.3	11.9	—	—
No. 2	32.1	15.6	16.7	12.3	16.1	12.5

供試体では、Fig. 1 中に 0°~90° で示される角度の、0°, 30°, 60°, 90° の測定線上で、止端から 30, 60, 90, 180 mm の位置に測定線方向 (溶接線に垂直) およびその直角方向に歪ゲージを貼付した。止端部には、30°, 60° の測定線を中心として応力集中ゲージを貼付した。

No. 2 供試体では、Fig. 2 中に 0°~90° で示される角度の 0°, 45°, 90° の測定線上での計測を行った。外側には、溶接肉盛中央、中央から 60, 120 mm の位置を中心、溶接線方向および溶接線垂直方向にゲージを貼付した。内側には、肉盛中央を除いて外側と対応する位置にゲージを貼付し、肉盛中央に対応する主管と枝管とのコーナー部には、溶接線方向 1 方向ゲージを貼付した。No. 2 供試体では、止端部における応力集中は測定していない³⁾。

歪ゲージ貼付、初期値計測の後、ドリル、バンドソーなどの機械的手段により小片に分割し、解放歪から残留応力を求めた。Fig. 3 に最終的な分割状況を示す。

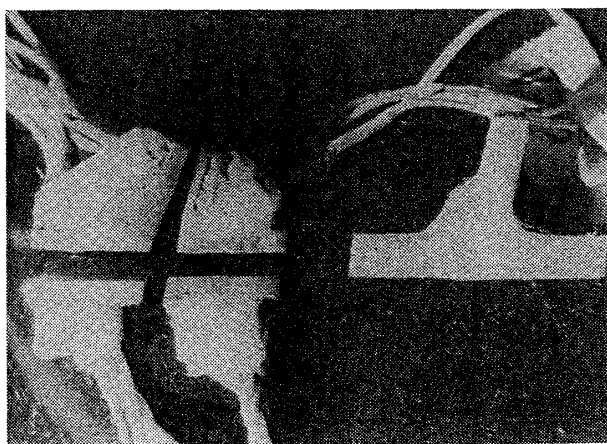


Fig. 3 Final divisions.

3 残留応力の簡易計算

文献 4) の方法により全体構造について残留応力および溶接変形の解析を行った後、その変形を用いて止端部の残留応力集中を計算するものとした。

3.1 全体構造解析

残留応力 σ^{ij} を溶接変形に対応する応力 σ^{*ij} と仮定された応力 σ_I^{ij} (ここでは固有応力と呼ぶ) の和とする。すなわち溶接変形を u_i 、構成テンソルを D^{ijkl} とすると、

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i|j} + u_{j|i}) \quad (1)$$

$$\sigma^{*ij} = D^{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

$$\sigma^{ij} = \sigma^{*ij} + \sigma_I^{ij} \quad (3)$$

である。ここに、 $|_j, |_i$ は共変微分記号である。

残留応力の釣合条件および外力が加わっていない条件を (3) 式を用いて表わすと、(4)、(5) 式となる。

$$\sigma^{ij}|_j = \sigma^{*ij}|_j + \sigma_I^{ij}|_j = 0 \quad (4)$$

$$\sigma^{ij}n_j = \sigma^{*ij}n_j + \sigma_I^{ij}n_j = 0 \quad (5)$$

ここに n_j は境界での外向き法線ベクトルである。(4) 式は物体内部での釣合条件、(5) 式は境界条件である。(1)~(5) 式により、 $\sigma_I^{ij}|_j$ を体積力とし、 $-\sigma_I^{ij}n_j$ を外力として加えて構造解析を行うと、溶接変形 u_i が求まり、(1)(2) 式により σ^{*ij} が算出され、さらに、(3) 式により残留応力が求められることがわかる。

固有応力の溶接線に垂直な断面での分布は、鋼管の円周溶接⁵⁾などの場合を参考にして、Fig. 4 のように定めた。Fig. 4 は、No. 1 供試体を想定している。図中、横におかれているのが主管壁であり、上から接合されているのが枝管壁である。左側は枝管の内側であり、この部分の固有応力は、1パス目の入熱量 Q_1 により算定されている。主管壁の固有応力は、この1パス目の溶接による部分と3パス目の入熱 Q_3 とによる。一方、枝管については、4パス目の入熱量 Q_4 により固有応力が算定される。図中に示された長さ a_1, a_3, a_4 により固有応力の溶接線方向成分の分布幅が定められている。すなわち、 $2\sigma_y$ (σ_y : 降伏応力) の固有応力が分布する範囲および $0 \sim 2\sigma_y$ と固有応力が線型に変化する範囲が与えられる。ここでは固有応力の剪断成分は小さいとして無視した。また、溶接線に垂直な成分も無視した。その理由は、枝管の端部が拘束されていないため、枝管の溶接線垂直方向成分は溶接部の収縮となって応力を生じさせないこと、さらに、主管については、曲面構造であるため面内拘束が小さいことおよびその肉厚が小さいため溶接線垂直方向成分による面外曲げ変形が小さいことによる。

No. 2 供試体については、Fig. 4 の主管と枝管の接合部から左側の主管壁がないものとした。主管壁については4パス目の入熱 Q_4 が、枝管壁については6パス目の

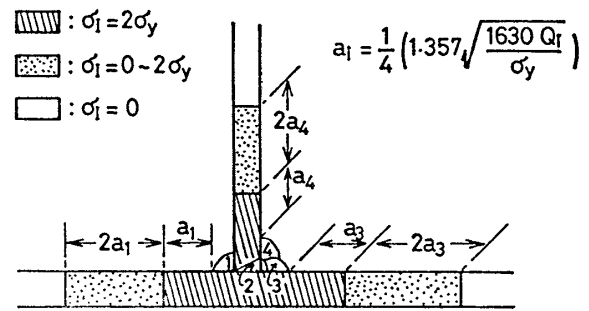


Fig. 4 Inherent stress distribution.

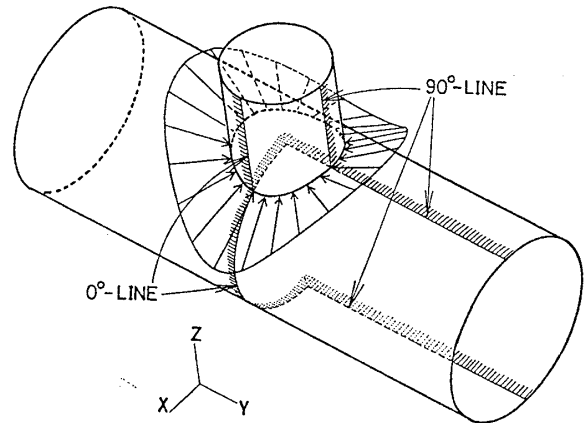


Fig. 5 Full model analysis.

入熱 Q_6 が固有応力の分布幅を支配するとした (Fig. 2 参照)。

溶接ビードの断面図心をむすぶ曲線 $r(s)$ を考える。この曲線は、鋼管T継手の場合主管と枝管との交差部であり、円形を少し変形させた形状である (Fig. 1, 2 および Fig. 5 参照)。パラメータ s をこの曲線の弧長とする。ここでは、固有応力の溶接線方向成分のみ考慮しているが、その大きさを σ_I とすると体積力ベクトル F_I は、固有応力を共変微分することにより (6) 式となる⁴⁾。

$$F_I = (d^2r(s)/ds^2)\sigma_I \quad (6)$$

d^2r/ds^2 は、溶接ビードの描く曲線の曲率円の中心に向かう絶対値が曲率に等しいベクトルである。Fig. 5 にこの体積力の加わる様子を示した。(5) 式に現われている外力は、溶接ビードが閉じたループを描くため生じない。

解析法は、殻要素による弾性有限要素法を用いた。対称条件より、Fig. 5 に示される 1/4 モデルとした。(6) 式の体積力を断面積分した後、ビードに沿ってシンプソン積分し、等価節点力とした。有限要素法による解は、溶接変形および (2) 式の応力 σ^{*ij} を与える。残留応力は、この σ^{*ij} と固有応力との和である。いま、固有応力は溶接線方向成分のみ考慮しているため、残留応力の溶接線方向成分には固有応力を加える必要がある。この場合、残留応力の溶接線方向成分についてはその上限

を降伏応力とした。切り捨てた応力は不釣合力となる。釣合条件を満足するためには固有応力の分布領域を拡げるなどの手段があるが、ここでは不釣合力をそのまま残した。

3.2 止端部の残留応力集中の解析

鋼管T継手止端部の応力解析については、疲労き裂発生寿命予測の観点から、吉田ら⁹⁾により精密に取扱われている。これによると、止端部およびその近傍の歪分布は、殻としての歪に、平面歪場的な余盛による歪が重ね合わされた状態となっており、溶接線垂直方向成分に、止端部の応力および歪の集中が見られる。一方、ここで用いる解析手法では、残留応力は溶接変形に対応する応力と固有応力の和であるが、固有応力の溶接線方向成分のみ考慮しているため、応力集中の生じる溶接線垂直方向成分については、溶接変形に対応する応力がそのまま残留応力となる。そこで、No.1 供試体の溶接線に垂直な断面について、前節の方法で求めた変形を用い、平面歪要素による弾性有限要素法により、残留応力の溶接線方向成分の応力集中を解析した。

Fig. 6 は、No.1 供試体の測定線 30° の断面について平面歪要素による解析を行った領域を示したものである。点線は対応する殻要素の中立面を示している。○印の7 節点で殻要素による解析結果から節点変位を入力した。図には、この断面での座標 (単位 mm)、および4 つの止端部を示す記号 (TOE 1~4) を併記した。余盛の形状は、断面マクロ写真を拡大して決定した。

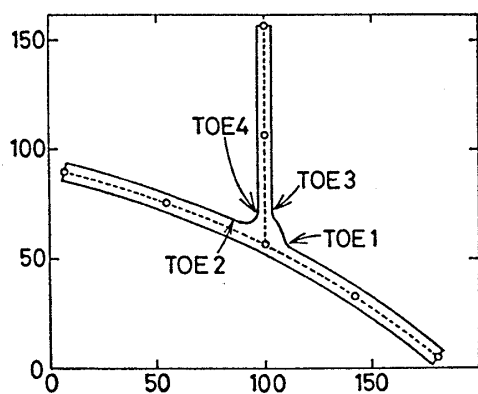


Fig. 6 Analytical model of weld toe.

4 結果の比較検討

4.1 鋼管製造時の残留応力の影響

枝管の焼鈍を行わなかった No.1 供試体では、製造時に生じる残留応力が無視できない。No.1 供試体の枝管に使用したと同ロットの鋼管(長さ 500mm)の中央断面の4 点で残留応力を測定したところ、外側表面で、円周方向に 10.41~17.14 kg/mm² (平均 12.40 kg/mm²)、軸方向に 19.29~27.35 kg/mm² (平均 21.89 kg/mm²)、

また、内側表面で、円周方向に -7.14~-13.98 kg/mm² (平均 -9.74 kg/mm²)、軸方向に -20.71~-23.88 kg/mm² (平均 -22.87 kg/mm²) の残留応力が存在した。枝管は溶接加工前に切断される。切断面を平面として取扱うと、切断により、断面では軸方向残留応力が解放される。いま、軸方向残留応力が外側表面で 22.43 kg/mm²、内側表面で -22.43 kg/mm² の矢羽形分布をしているものと仮定する。すると、(5) 式などにより、切断面でのこの応力を打ち消す外力 (すなわち曲げ) を加えた場合の応力と、製造時に生じた残留応力を重ね合わせたもので、溶接前の枝管の残留応力を推定できる。これは、端面では直応力が 0 であることを示している。この軸方向応力による曲げを端面に加える問題の解はよく知られており⁷⁾ 簡単に計算できる。

長さ 400mm の鋼管を切り出した場合の残留応力を上記の方法で求めて Fig. 7 に示した。図中の応力 σ_{ao} , σ_{oi} , σ_{ho} , σ_{hi} のサフィックス a, h, o, i はそれぞれ、軸方向、円周方向、外側表面、内側表面を示している。溶接前に枝管には、Fig. 7 のような残留応力が存在していたと考えられる。

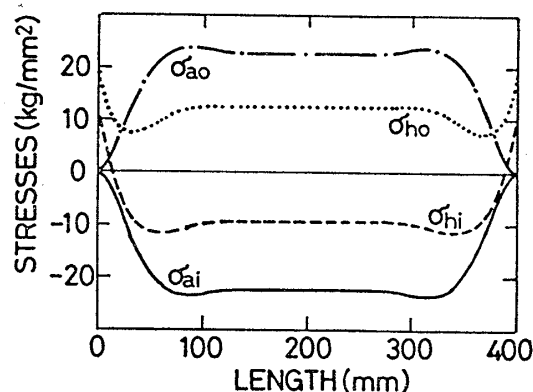


Fig. 7 Residual stresses in STK 41 tube.

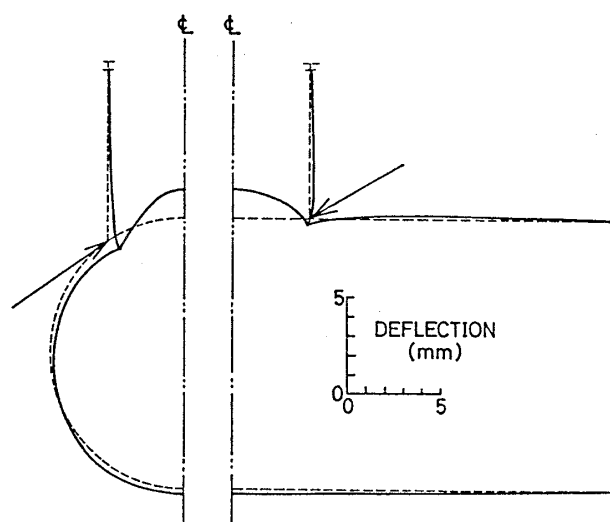


Fig. 8 Weld deflection of No.1 specimen (calculated value).

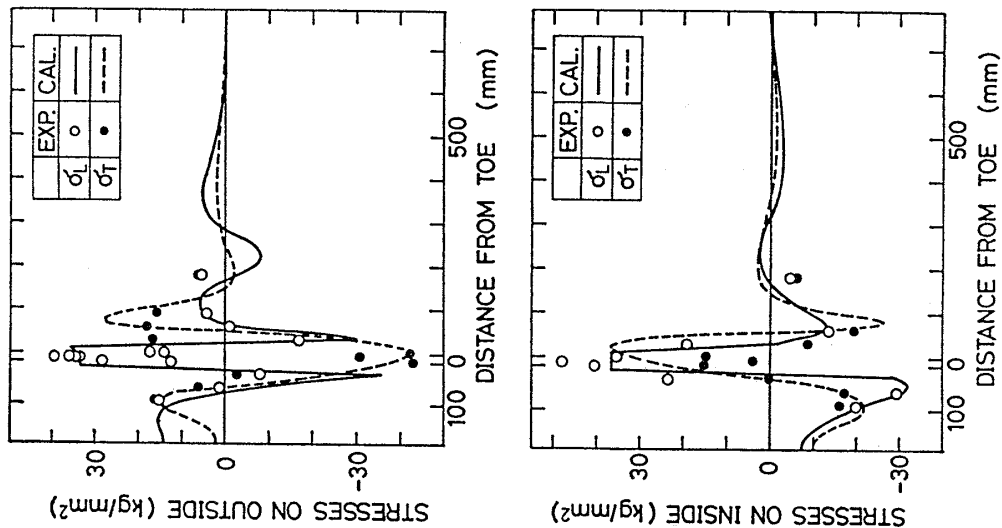


Fig. 11 Residual stresses in the chord of No. 1 specimen (60°-line).

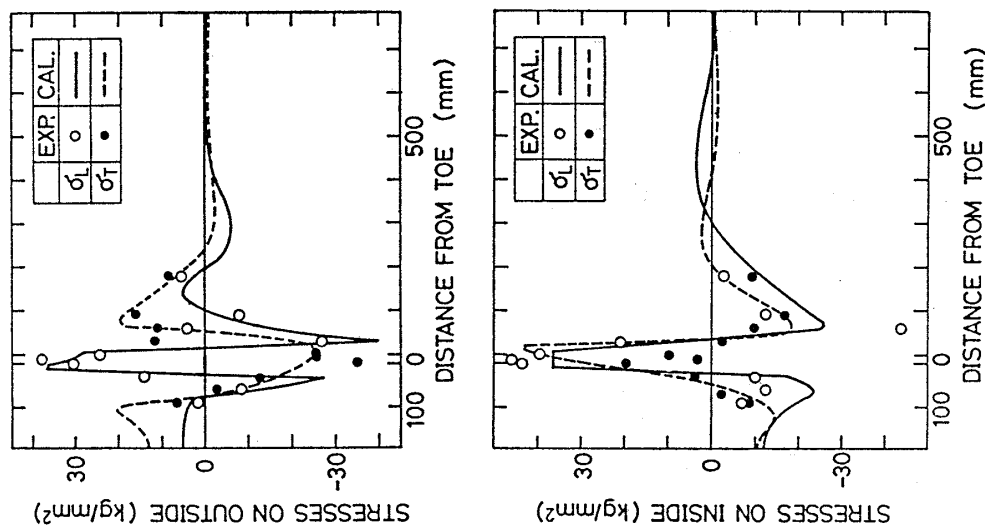


Fig. 10 Residual stresses in the chord of No. 1 specimen (30°-line).

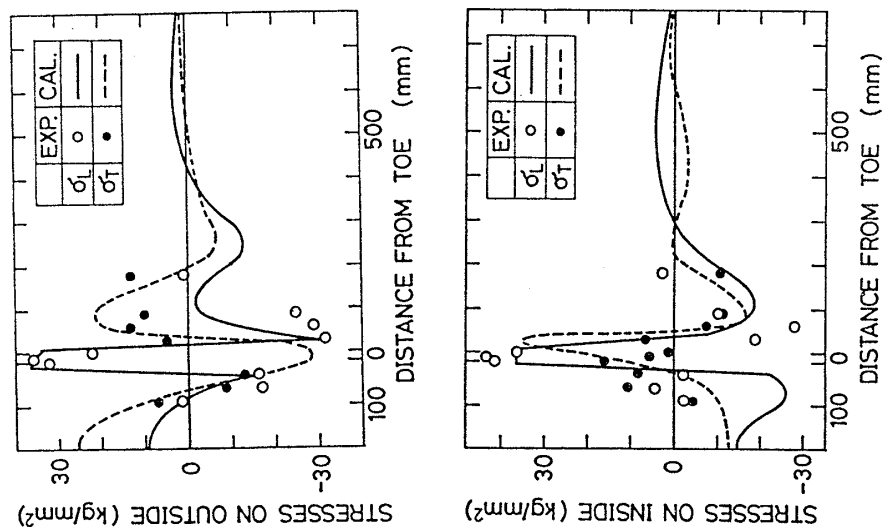


Fig. 9 Residual stresses in the chord of No. 1 specimen (0°-line).

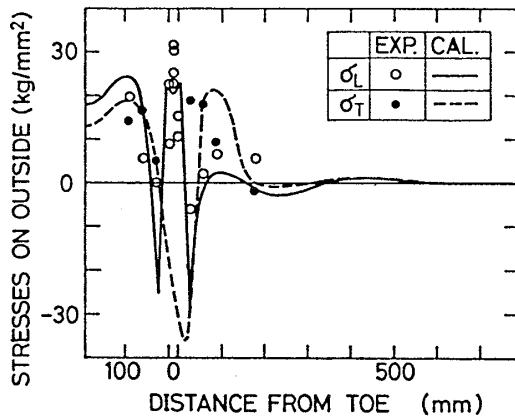


Fig. 12 Residual stresses in the chord of No. 1 specimen (90°-line).

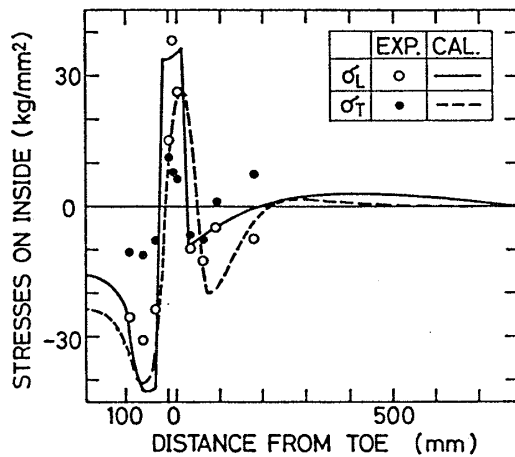


Fig. 13 Residual stresses in the brace of No. 1 specimen (0°-line).

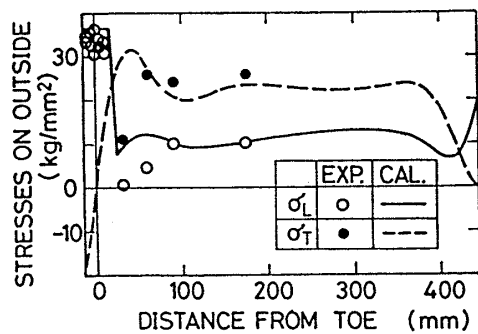


Fig. 14 Residual stresses in the brace of No. 1 specimen (30°-line).

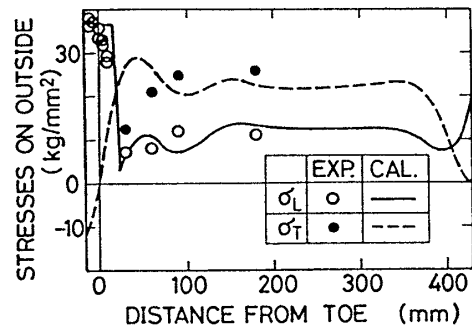
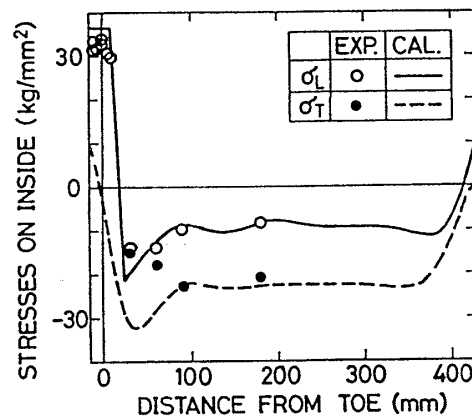


Fig. 15 Residual stresses in the brace of No. 1 specimen (60°-line).



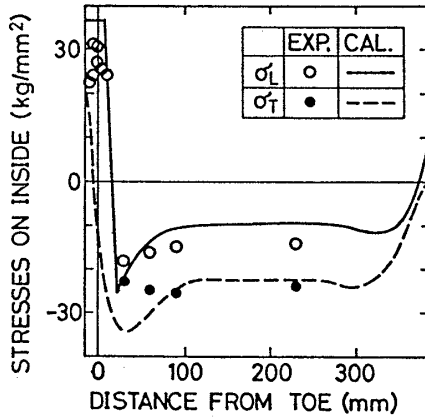
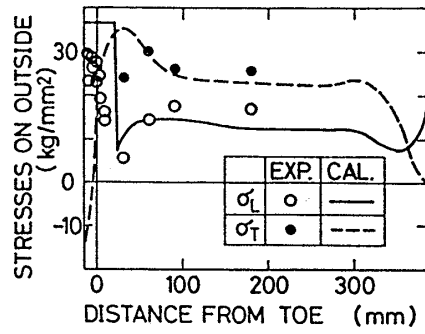


Fig. 16 Residual stresses in the brace of No.1 specimen (90°-line).

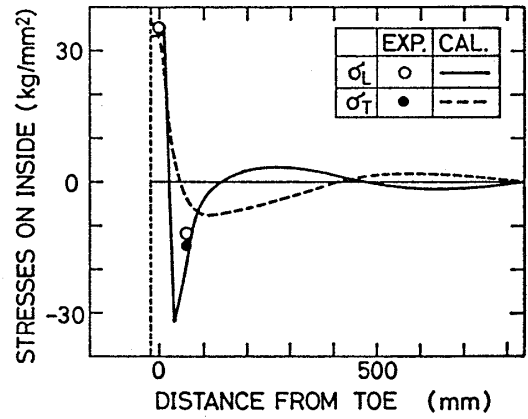
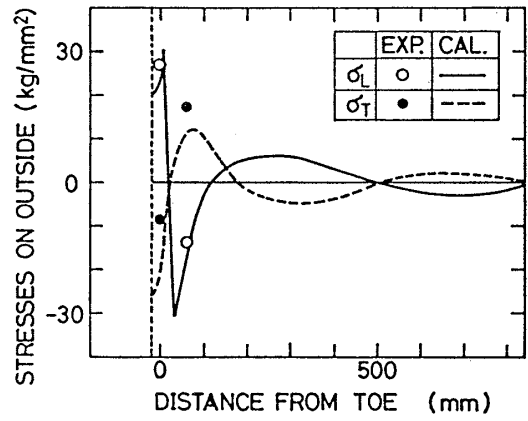


Fig. 18 Residual stresses in the chord of No.2 specimen (45°-line).

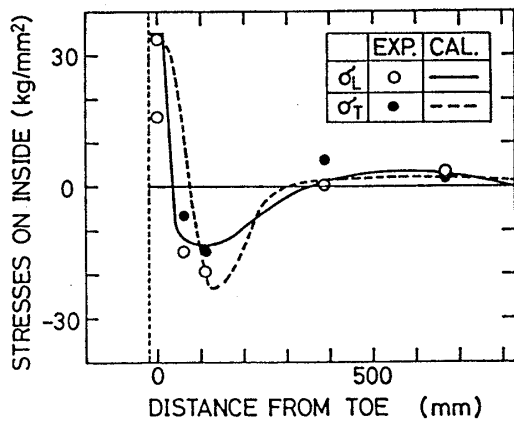
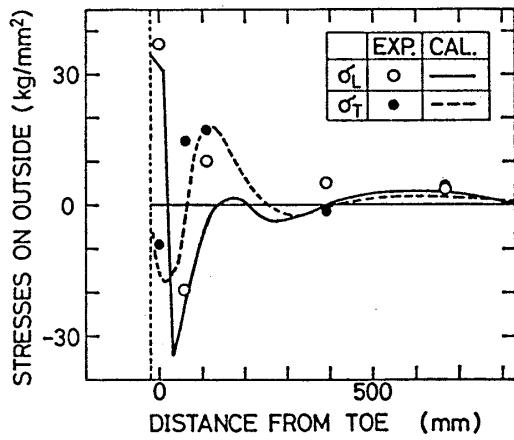


Fig. 17 Residual stresses in the chord of No.2 specimen (0°-line).

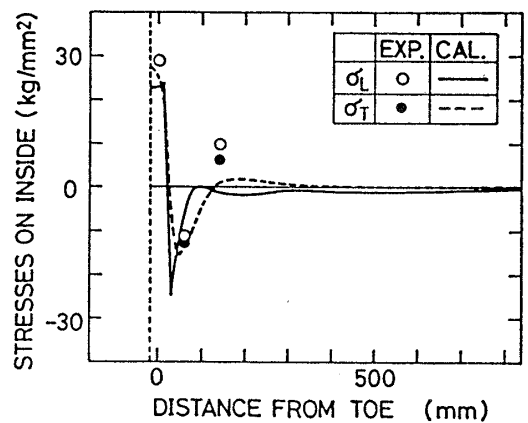
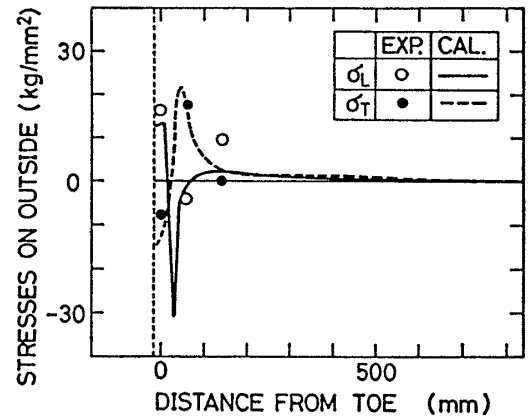


Fig. 19 Residual stresses in the chord of No.2 specimen (90°-line).

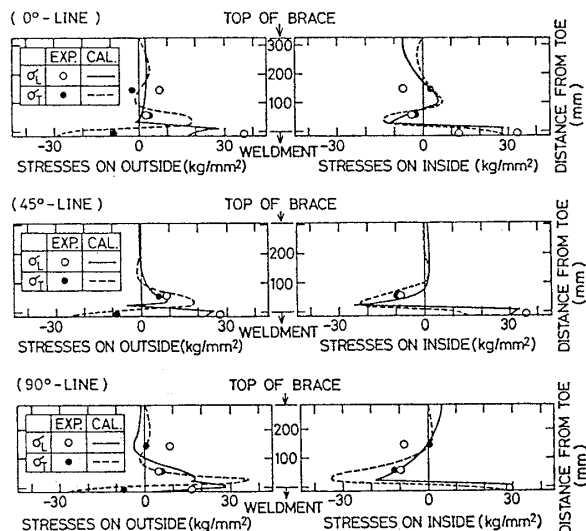


Fig. 20 Residual stresses in the brace of No. 2 specimen.

4.2 全般的な傾向

4.2.1 変形

溶接変形の計測は行わなかったが、殻要素による解析で得られた溶接変形の計算結果の例を Fig. 8 に示す。図は、No. 1 供試体の主管軸に垂直な断面（測定線 0°，Fig. 1, 2 および Fig. 5 参照）および主管軸方向断面（測定線 90°）での変形を示している。図中に矢印で体積力を加えた方向を示している。溶接部は、主管の内側に引き込まれ、さらに枝管が若干くびれるように変形している。主管の変形は複雑である。特に、溶接線で囲まれた円盤状の部分では、主管の円周方向と軸方向とで変形の性状が異なる。

4.2.2 残留応力

Fig. 9~16 に、No. 1 供試体の残留応力の測定結果と計算結果とを示した。Fig. 17~20 に、No. 2 供試体の結果を示した。No. 1 供試体の枝管 (Fig. 13~16) については計算結果に 4.1 節で示した溶接前の残留応力を加えている。図中 σ_L および σ_T はそれぞれ残留応力の溶接線方向および溶接線垂直方向成分である。溶接部の σ_T については次節に示すため除いているものもある。主管の残留応力 (No. 1 供試体 Fig. 9~12, No. 2 供試体 Fig. 13~15) では、図中左側が枝管の内側、右側が外である。溶接部およびそのごく近傍では σ_T の若干の差異は見られるものの、計算結果と測定結果とは比較的よく一致している。海洋構造物でよく問題の生じる主管外側表面では、溶接線方成分は溶接部で最大、溶接線垂直方向成分は溶接線から少し離れた位置で最大となる。主管の溶接部の残留応力の溶接線垂直方向成分は、内側が引張、外側が圧縮であり、4.2.1 節に示した変形と対応している。枝管の残留応力 (No. 1 供試体 Fig. 13~16, No. 2 供試体 Fig. 20) は、No. 1 供試体の場合、溶

接部の近傍を除けば製造時の残留応力 (4.1 節参照) が支配的である。溶接部およびその近傍では σ_T の計算値と測定値に若干の差異が見られる。

溶接部およびその近傍における残留応力の溶接線垂直方向成分が、計算値と測定値で異なる理由は、1 つに殻要素を用いた全体構造解析では、余盛形状などの影響を評価できないことがあげられる。さらに、No. 1 供試体の枝管では、溶接前の残留応力を溶接残留応力に加えているが、溶接によるそれ以前の応力の消滅および緩和を考慮していないことも理由としてあげられる。

4.3 止端部の残留応力集中

溶接部は融解するため、それ以前の応力はいったん消滅する。また、その近傍では熱による応力の緩和が生じる。そこで、止端部の解析では、4.1 節の溶接前の残留応力は無視した。Fig. 21, 22 に、No. 1 供試体の残留応力の溶接線垂直方向成分の測定値と計算値とを示した。Fig. 21 は測定線 30°，Fig. 22 は 60° である。止端半径は、測定線 30° で TOE 1~4 それぞれ 3.28mm, 6.21mm, 5.17mm, 6.21mm であった。測定線 60° では、7.23mm, 3.57mm, 4.25mm, 3.22mm であった。図を見ると、枝管内側の TOE 4 について、計測点が不足している。また、本解析手法は弾性計算であるため、大きな歪集中が生じる主管の止端部 (TOE 1, 2) の計算値は、計測値よりも絶対値が大きなものとなっている。これらの点を除けば、計算値と測定値はよく一致している。

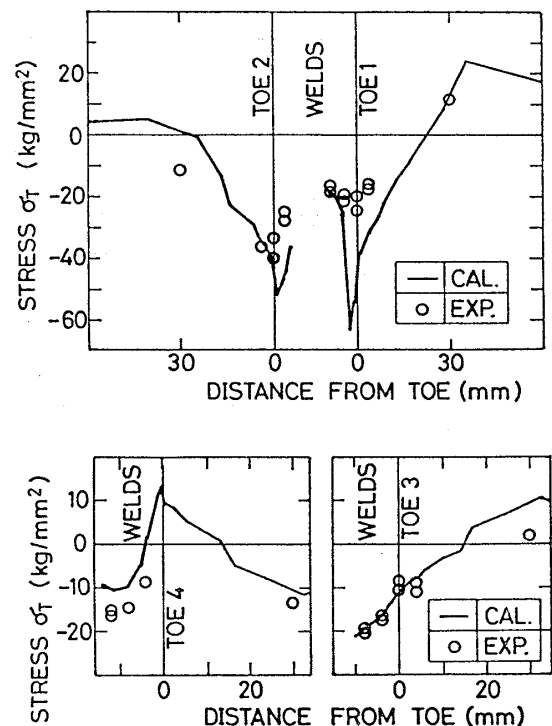


Fig. 21 Residual stress concentration (30°-line).

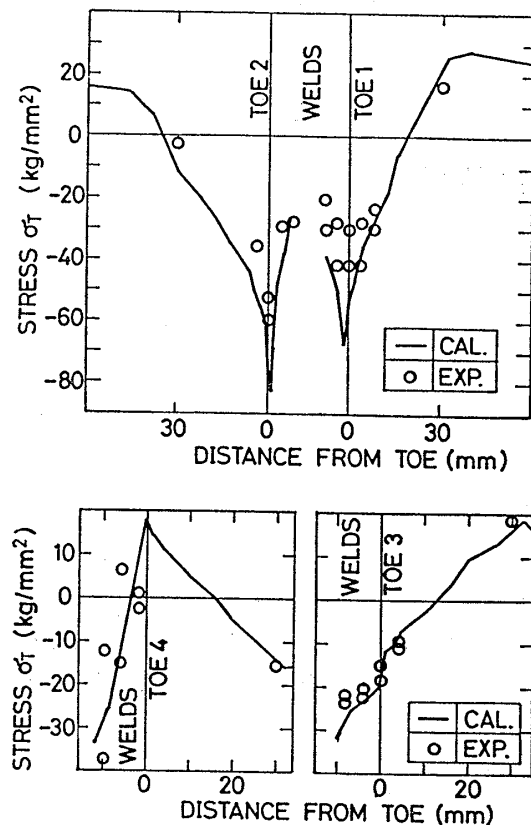


Fig. 22 Residual stress concentration (60-line).

残留応力の集中は、TOE 1, TOE 2, TOE 4に見られる。しかし、枝管内側の TOE 4 を除けば、止端部の応力は圧縮である。ここには示さなかったが、測定線 0° および 90° についても計算結果は同じ傾向であった。鋼管T継手部の疲労き裂は一般に溶接線に並行、主管外側の止端部に沿って発生する。この疲労亀裂に影響を与えるのは、応力の溶接線垂直方向成分である。図を見ると、主管外側の止端部 (TOE 1) では残留応力の溶接線垂直方向成分は、大きな負の値となる。負の残留応力は疲労強度を高めると考えられる。外力により、塑性降伏と除荷が繰り返され、残留応力が緩和されていったとしても、鋼管T継手部の残留応力は、疲労き裂の発生を促進はしないであろうと考えられる。

5 結 論

構造用鋼管T継手部の溶接残留応力の全体的な分布および止端部での応力集中現象について、実験的および解析的な検討を試み、以下の結論を得た。

- (1) 鋼管T継手では、溶接部は主管に引き込まれるように、また、枝管をくびれさせるように変形する。
- (2) (1) の変形により溶接部では主管の内側は引張、外側は圧縮の残留応力が溶接線垂直方向に生じる。
- (3) 主管外側の溶接線垂直方向の残留応力は、溶接部から少し離れた位置で最大となる。
- (4) 無焼鈍の電気抵抗溶接管を枝管とした場合、溶接部近傍を除いて、枝管では鋼管製造時の残留応力が支配的である。
- (5) 止端部での溶接線垂直方向残留応力の集中現象は、主管および枝管内側で生じ、枝管外側では生じない。
- (6) 主管止端部の溶接線垂直方向残留応力は圧縮であり、止端部に沿って生じる疲労亀裂の発生を促進するものではないと思われる。

本研究に対して、東京大学藤田譲教授 (当時)、野本敏治助教授はじめ塑性設計委員会の方々から多くの有益な御意見を賜った。ここに心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) R. Olivier and W. Ritter: Improvement of fatigue strength of welded joints by different treatment, Int. Conf. of Steel in Marine Structures (1981), Paper No.9.6.
- 2) J. Charleux: Metallurgical, Welding and in spection problems raised by the construction of steel off-shore platforms, Bulletin Technique de Bureau Veritas, Special English Issue (1976).
- 3) 直井, 松岡: パイプ溶接継手部の残留応力 (T 継手), 船舶技術研究所研究発表会講演集 (1981), No. 37.
- 4) 松岡: 溶接製殻構造物の残留応力に関する一解法, 日本造船学会論文集 (1983), No. 153.
- 5) 松岡, 直井: パイプ円周溶接により生ずる残留応力に関する一解法, 溶接学会誌 (1982), Vol. 51, No. 2.
- 6) 吉田 他: T型パイプ継手の歪詳細解析と疲労亀裂発生寿命予測, 日本造船学会論文集 (1978), No. 144.
- 7) S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger: Theory of plats and shells, 2nd Ed. (1959), McGraw-hill, Chapter 15.