

UOE 鋼管の引張強さの推定

Estimation of Tensile Strength of UOE Pipe

高 田 庸*

Isao Takada

杉 江 英 司*

Eiji Sugie

蓮 野 貞 夫**

Sadao Hasuno

Synopsis:

Based on some experimental results of cyclic straining, a new method has been introduced to estimate the tensile properties of a flattened specimen of UOE pipe. At any position of the "outer wall", namely, a part of a flattened specimen which was the outer half of UOE pipe wall before flattening, the tensile stress-strain curve can be approximated to the curve under plain tension of the original plate specimen. Such is also the case with the "inner wall" except that post pre-compression tension applies instead of plain tension. The above stress-strain curve under post pre-compression tension can again be approximated to the curve under plain tension. Assuming the stress given to the entire pipe wall to be equal to the through thickness average stress, the tensile stress-strain curves and the tensile strengths for flattened specimens of UOE pipes in various dimensions can be calculated from the plain tensile stress-strain curve for the original plate.

1. 緒 言

UOE 成形に伴うくり返しひずみにより、UOE 鋼管の降伏応力と引張強さは素材のそれらと異なる。平板化試験片による鋼管の降伏応力を推定する試みはすでに各方面で行われており¹⁻⁴⁾、筆者らも、素材の応力-ひずみ曲線から UOE 鋼管の円周方向平板化試験片の降伏応力を推定する方法を見出し、その推定値は実測値とよく一致することを確認している⁵⁾。しかし、鋼管の平板化後の引張試験にお

ける高ひずみ域での応力とひずみの関係および引張強さを推定する方法に関する研究はほとんど行われていない。

そこで、今回 UOE 鋼管の円周方向平板化試験片による引張応力-ひずみ曲線と引張強さを、素材の応力-ひずみ曲線から推定する方法を検討した。

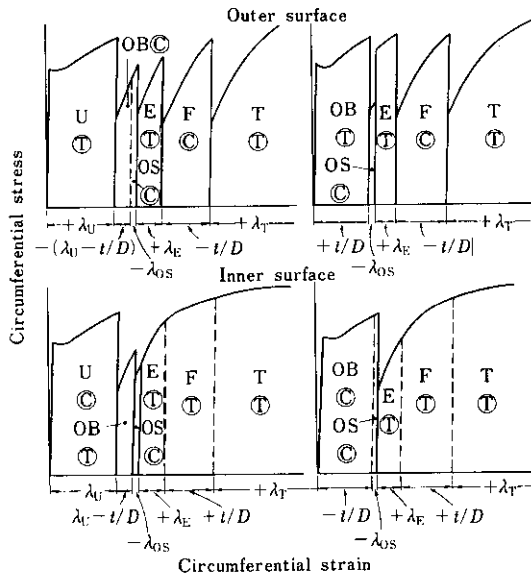
2. UOE 鋼管の成形、平板化および引張試験によるくり返し変形

UOE 鋼管の成形、平板化および引張試験の際の

* 技術研究所鋼材研究室主任研究員
〔昭和51年10月22日原稿受付〕

** 技術研究所鋼材研究室

管肉厚の外表面と内表面における円周方向の応力-ひずみ挙動を模式的に Fig. 1 に示す。U ボンチのナックル部に相当する、溶接線から円周方向に 180° または 135° はなれた位置(以後 180/135 位置と略称する)で、外表面は圧縮ひずみと引張ひずみを交互に 5 度受ける。このように方向の異なるくり返し変形を受ける特殊な状況下の応力-ひずみ曲線の変化はすでに明らかにされている⁵⁾。すなわち、圧縮(ひずみ: $-\lambda_1$)-引張(ひずみ: $+\lambda_2$)-圧縮(ひずみ: $-\lambda_3$)と方向の異なる変形を 3 回くり返して与えた場合、 λ_1 に比べて λ_2 が比較的小さいならば、第 3 の変形においてその絶対値が λ_2 より大きい圧縮ひずみ $-\lambda_3$ に対する応力は、Fig. 2 に例示するように最初の圧縮変形時の応力-ひずみ曲線におけるひずみ $-(\lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3)$ に対する応力とほぼ一致する(前報⁵⁾ も参照)。同様の関係が引張-圧縮-引張の場合にも成立すると考えられるので、これを実際の Fig. 1 に示す UOE 鋼管のひずみ履歴に適用すると、それらはつぎのように簡易化される。



At 180° or 135° from weld seam At another location

U: U-ing, OB: O-bending, OS: O-shrinking
 E: Expanding, F: Flattening, T: Tension testing
 ⊕: Tensile strain, ⊖: Compressive strain
 Compressive stress-strain curves are reversed

Fig. 1 Schematic stress-strain curves during UOE pipe forming, flattening and tension testing

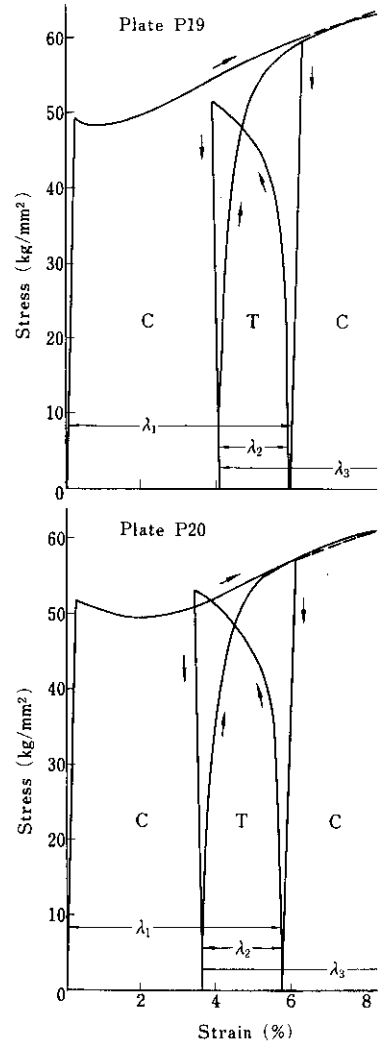


Fig. 2 Stress-strain curves for specimens strained under compression-tension-compression

2・1 管厚の外表面側におけるひずみ

2・1・1 特定の位置におけるひずみ

鋼管の 180/135 位置の外表面において、U 成形時の引張ひずみ λ_U は常に O 成形時の曲げもどしおよび圧縮による圧縮ひずみの絶対値 $\lambda_U - t/D + \lambda_{OS}$ (ここで、 t : 鋼管肉厚、 D : 外径) より大きく、つぎの拡管時の引張塑性ひずみ λ_E もまた通常 $\lambda_U - t/D + \lambda_{OS}$ より大きい。したがって、拡管後の塑性ひずみ λ_E に対する応力は、U 成形時のひずみ $\lambda_U - (\lambda_U - t/D + \lambda_{OS}) + \lambda_E = \lambda_E + t/D - \lambda_{OS}$ に

対する応力に等しくなる。ところがU成形時の応力-ひずみ挙動は原板のそれに等しいので、結局、拡管時のひずみ λ_E に対する 180/135 位置の外表面の応力は、原板の引張応力-ひずみ曲線におけるひずみ $\lambda_E + t/D - \lambda_{OS}$ に対する応力に等しい。

前報⁵⁾では降伏応力を問題にしたので、最終の引張試験におけるひずみとして 0.5% を採用したが、今回は高ひずみ域での応力-ひずみ挙動および引張強さを取り扱うので、より大きなひずみ λ_T ($\lambda_T \gg 0.5\%$)での応力を検討する必要がある。平板化後の引張試験におけるひずみ λ_T までの 180/135 位置の外表面のひずみ履歴は、そのおのおののひずみが $+(\lambda_E + t/D - \lambda_{OS})$, $-t/D$, $+\lambda_T$ である引張-圧縮-引張に相当する。ここで t/D は $\lambda_E + t/D - \lambda_{OS}$ および λ_T より小さいので、平板化後の 180/135 位置において、外表面の引張試験時のひずみ λ_T に対する応力は、原板の引張応力-ひずみ曲線におけるひずみ $\lambda_E + t/D - \lambda_{OS} - t/D + \lambda_T = \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T$ に対する応力に等しくなる。

2.1.2 その他の位置におけるひずみ

180/135 以外の位置の外表面はU成形時に変形を受けないので、ひずみ λ_E の拡管までにそれぞれ $+t/D$, $-\lambda_{OS}$, $+\lambda_E$ の引張-圧縮-引張ひずみを受ける。ここで、第2の変形時のひずみの絶対値 λ_{OS} は t/D および λ_E より小さいので、拡管時のひずみ λ_E に対する外表面の応力は、原板の引張応力-ひずみ曲線におけるひずみ $t/D - \lambda_{OS} + \lambda_E$ に対する応力に等しい。したがって、180/135 以外の位置において、平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する外表面の応力は 180/135 位置のそれらと同じく、原板の引張応力-ひずみ曲線におけるひずみ $\lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T$ に対する応力に等しくなる。

この簡易化過程を UOE 鋼管の肉厚の外側半分全域に適用すれば、平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する外表面の応力は、外表面と同じく原板の引張応力-ひずみ曲線におけるひずみ $\lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T$ に対する応力に等しくなる。

2.2 管厚の内面側におけるひずみ

2.2.1 特定の位置におけるひずみ

180/135 位置ではU成形時にひずみ $-\lambda_U$ の圧縮

を、O成形時に曲げもどしによるひずみ $\lambda_U - t/D$ の引張と圧縮工程におけるひずみ $-\lambda_{OS}$ の圧縮を受け、その後拡管、平板化および引張試験によって連続してひずみ $\lambda_E + t/D + \lambda_T$ の引張を受ける。O成形以後のくり返し変形、すなわち $+(\lambda_U - t/D)$, $-\lambda_{OS}$, $+(\lambda_E + t/D + \lambda_T)$ において λ_{OS} は $\lambda_U - t/D$ および $\lambda_E + t/D + \lambda_T$ より小さいので、このO成形以後のくり返しひずみはひずみ $(\lambda_U - t/D) - \lambda_{OS} + (\lambda_E + t/D + \lambda_T) = \lambda_U + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T$ の単純引張に相当する。したがって、180/135 位置の内表面における平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する応力は、原板の予ひずみ $-\lambda_U$ の圧縮後の引張におけるひずみ $\lambda_U + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T$ に対する応力に等しくなる。

いま、鋼管成形時の曲げ加工において、中立軸は管厚の中心に保持され、管厚各部の曲げひずみは管厚中心層からの距離に比例するととして、上記の簡易化過程を管厚の内面側半分全域に適用すれば、平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する管厚中心から内面側への距離が x の層（以後内側距離 x の層と略称する）の応力は、原板の圧縮予ひずみ $-2x\lambda_U/t$ 後の引張におけるひずみ $2x\lambda_U/t + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T$ に対する応力に等しくなる。

2.2.2 その他の位置におけるひずみ

180/135 以外の位置はU成形時に変形を受けないので、内側距離 x の層は、O成形時にはじめてひずみ $-(2x/D + \lambda_{OS})$ の圧縮を受け、その後拡管、平板化および引張試験において連続してひずみ $\lambda_E + 2x/D + \lambda_T$ の引張を受ける。したがって、この位置における平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する応力は、原板の圧縮予ひずみ $-(2x/D + \lambda_{OS})$ 後の引張ひずみ $\lambda_E + 2x/D + \lambda_T$ に対する応力に等しい。

3. 平板化後の引張試験における応力-ひずみ曲線および引張強さの推定

先に述べた簡易化されたひずみ履歴にもとづいて、UOE 鋼管の平板化後の引張応力とひずみの関係を以下に計算する。前報⁵⁾においては、鋼管成形時に工具の拘束のため材料は軸方向の変形がない平面ひずみ変形を受けるものとした。しかし、

実際の鋼管成形においては、工具の拘束は完全でなく、拡管時には軸方向の変形が認められる。とくに、試験片が採取される鋼管端部近傍では、UOEの全成形を通じて平面ひずみと平面応力の中間の変形を受ける。平面応力状態における鋼管の管軸、管厚および円周方向のひずみ相互の関係は、単軸の引張または圧縮のそれらに等しい。また、今回は平板化後の引張試験における高ひずみ域での応力を問題にしているので、鋼管成形時の変形状態の差異による影響は小さい。そこで、以下の計算において鋼管成形および平板化の際の応力とひずみの関係は、単軸の引張または圧縮におけるそれらの関係に等しいものとする。

3・1 管厚の外側面における応力とひずみの関係

原板の応力-ひずみ曲線が $\sigma = c_0 \epsilon^{n_0}$ で表されるとすれば、平板化後の引張試験におけるひずみ λ_T に対する外面側の応力 σ_{T0} は、管厚方向や円周方向の位置を問わずつぎのように表される。

$$\sigma_{T0} = c_0 \{\ln(1 + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T)\}^{n_0} \quad \cdots \cdots (1)$$

3・2 管厚の内側面における応力とひずみの関係

原板の圧縮予ひずみ λ_P 後の引張における応力-ひずみ曲線が $\sigma = c' \epsilon^{n'}$ で表されるとすれば、 c' および n' は c_0 および n_0 と次式で関係づけられる⁵⁾。

$$c' = c_0 (-3.57\lambda_P + 0.991) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$n' = n_0 (-6.93\lambda_P + 1.00) \quad \cdots \cdots (3)$$

したがって、平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する内側距離 x の層の応力 σ_{T1} はつぎようになる。

180/135 位置において、

$$\sigma_{T1} = c' \left\{ \ln \left(1 + \frac{2x\lambda_U}{t} + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T \right) \right\}^{n'} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\lambda_P = \frac{2x\lambda_U}{t}$$

(λ_P については (2), (3) 式参照, 以後同様)

180/135 以外の位置において、

$$\sigma_{T1} = c' \left\{ \ln \left(1 + \lambda_E + \frac{2x}{D} + \lambda_T \right) \right\}^{n'} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\lambda_P = \frac{2x}{D} + \lambda_{OS}$$

3・3 全厚の応力とひずみの関係

いま、鋼管の全厚の応力が肉厚各層の応力の平均値であるとすれば、平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する全厚の応力 σ_T はつぎのように表される。

180/135 位置において、

$$\begin{aligned} \sigma_T = & \frac{1}{2} c_0 \{\ln(1 + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T)\}^{n_0} \\ & + \int_0^{1/2} \left[c' \left\{ \ln \left(1 + \frac{2x\lambda_U}{t} + \lambda_E - \lambda_{OS} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \lambda_T \right) \right\}^{n'} \right] dx \quad \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

$$\lambda_P = \frac{2x\lambda_U}{t}$$

180/135 以外の位置において、

$$\begin{aligned} \sigma_T = & \frac{1}{2} c_0 \{\ln(1 + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T)\}^{n_0} \\ & + \int_0^{1/2} \left[c' \left\{ \ln \left(1 + \lambda_E + \frac{2x}{D} + \lambda_T \right) \right\}^{n'} \right] dx \\ & \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

$$\lambda_P = \frac{2x}{D} + \lambda_{OS}$$

一方、引張強さは引張試験時の最大荷重を最初の断面積で割った値、すなわち見かけの応力の最大値で表される。平板化後の引張試験時のひずみ λ_T に対する見かけの応力 σ'_T は、真応力 σ_T と次式の関係がある。

$$\sigma'_T = \frac{\sigma_T}{(1 + \lambda_T)} \quad \cdots \cdots (8)$$

(6) 式と (7) 式によって種々の λ_T に対する σ_T を求め、これから (8) 式により計算される見かけの応力 σ'_T の最大値をもって UOE 鋼管の平板化試片の引張強さの推定値とすることができる。

4. 計算値と実測値の対比

Table 1 に化学成分を示す。P1 から P18 の 18 種類の厚板素材から造管した UOE 鋼管の平板化後の引張強さを上記の方法で計算して実測値と比較した。また P11 から P18 の 8 鋼種については同じく鋼管の平板化試片の計算による引張応力-ひずみ曲線と実測のそれらとの対比を行った。応力-ひずみ曲線の計算は、鋼管の外面側の成形、平板化および引張試験におけるくり返しひずみが上記のように単純引張ひずみに簡易化できる範囲、すなわち鋼管の t/D より大きい引張ひずみの領域でのみ行った。

鋼管の引張強さの計算値と実測値の対比を Fig. 3 および Table 2 に示す。計算値は実測値と

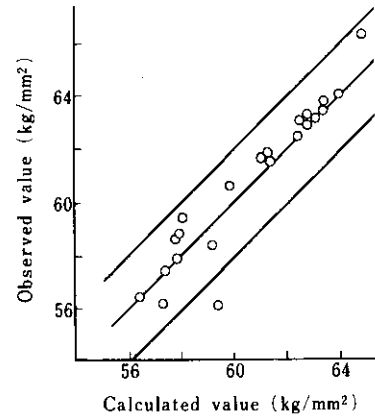


Fig. 3 Comparison between calculated and observed tensile strengths of UOE pipe

Table 1 Chemical compositions of original plates

	Grade	Chemical compositions (%)							
		C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Mo
P1	X52	0.14	0.24	1.28	0.023	0.008	0.016	—	—
P2	X52	0.14	0.24	1.28	0.023	0.008	0.016	—	—
P3	X52	0.14	0.28	1.34	0.020	0.008	0.016	—	—
P4	X60	0.12	0.26	1.35	0.019	0.006	0.028	0.020	—
P5	X60	0.12	0.24	1.40	0.012	0.004	0.037	0.020	—
P6	X60	0.08	0.28	1.53	0.015	0.005	0.031	0.031	—
P7	X60	0.08	0.25	1.41	0.009	0.005	0.039	—	0.230
P8	X70	0.06	0.21	1.69	0.007	0.003	0.040	0.030	—
P9	X70	0.06	0.21	1.71	0.006	0.003	0.043	—	0.234
P10	X70	0.10	0.24	1.50	0.015	0.006	0.038	0.026	0.132
P11	X70	0.10	0.28	1.59	0.013	0.006	0.049	0.029	0.133
P12	X70	0.08	0.24	1.48	0.014	0.006	0.040	0.024	0.144
P13	X70	0.08	0.24	1.48	0.014	0.006	0.040	0.024	0.144
P14	X70	0.08	0.24	1.51	0.014	0.006	0.040	0.022	0.127
P15	X70	0.09	0.26	1.52	0.015	0.007	0.042	0.023	0.131
P16	X70	0.08	0.26	1.53	0.014	0.006	0.040	0.024	0.121
P17	X70	0.09	0.27	1.53	0.015	0.006	0.040	0.025	0.129
P18	X70	0.08	0.26	1.52	0.015	0.006	0.042	0.024	0.133
P19	X60	0.13	0.24	1.35	0.014	0.005	0.035	0.017	—
P20	X60	0.08	0.22	1.63	0.013	0.005	0.035	0.034	—

Table 2 Tensile properties of original plates and calculated and observed tensile strengths of UOE pipe

	Grade	Thickness (mm)	Tensile properties of original plate				Tensile strength of UOE pipe		
			YS * (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	n_0	c_0 (kg/mm ²)	Location from weld	Calculated (kg/mm ²)	Observed (kg/mm ²)
P1	X52	13.0	41.5	53.3	0.208	97.7	180°	57.3	56.2
P2	X52	15.7	45.0	56.2	0.216	102.6	180°	59.4	56.2
P3	X52	19.3	40.1	55.5	0.216	97.6	180°	56.5	56.5
P4	X60	9.5	46.8	57.4	0.188	95.5	180°	57.8	58.6
P5	X60	14.3	54.0	59.2	0.163	93.6	180°	59.2	58.4
P6	X60	9.5	49.2	58.4	0.186	95.7	180°	58.1	59.5
P7	X60	14.3	52.4	62.8	0.134	94.2	90°	62.5	63.0
							135°	62.8	62.9
							180°	62.8	63.2
P8	X70	18.3	56.2	58.4	0.130	86.1	90°	57.4	57.4
							135°	57.9	57.9
							180°	57.9	58.8
P9	X70	18.3	49.2	64.0	0.147	99.8	180°	64.9	66.4
P10	X70	20.0	53.9	62.0	0.147	97.1	180°	63.2	62.7
P11	X70	20.0	53.1	62.7	0.154	99.5	180°	63.9	64.1
P12	X70	20.0	56.2	62.8	0.130	94.3	180°	63.5	63.3
P13	X70	20.0	56.1	61.9	0.130	92.9	180°	62.6	63.8
P14	X70	20.0	54.9	61.2	0.137	93.2	180°	61.9	62.1
P15	X70	20.0	55.1	61.1	0.150	96.1	180°	62.2	61.8
P16	X70	20.0	54.7	59.7	0.154	94.7	180°	60.9	60.7
P17	X70	20.0	56.0	63.0	0.126	93.7	180°	63.6	63.7
P18	X70	20.0	55.7	61.4	0.147	96.3	180°	62.7	61.9

* Stress at 0.5% total strain of original plate

よく一致している。また、Fig. 4 には P11～P18 の計算による引張応力-ひずみ曲線と実測のそれらをあわせて示すが、これらの鋼管の $t/D(1.4\%)$ より大きい 2% 以上のひずみ領域において両者はよく一致しており、鋼管の平板化試片による引張応力-ひずみ曲線および引張強さは、素材の引張応力-ひずみ曲線が与えられれば精度よく推定できることがわかる。

5. 結 言

くり返しひずみ履歴に伴う応力-ひずみ挙動の変化にもとづいて、UOE 鋼管の平板化後の引張試験における応力-ひずみ曲線と引張強さの推定法について検討を行った。その結果両者とも素材の引張応力-ひずみ曲線から推定でき、その推定値は実測値とよく一致することが確認された。前回の降伏応力の推定法に関する結果⁵⁾とあわせると、素材

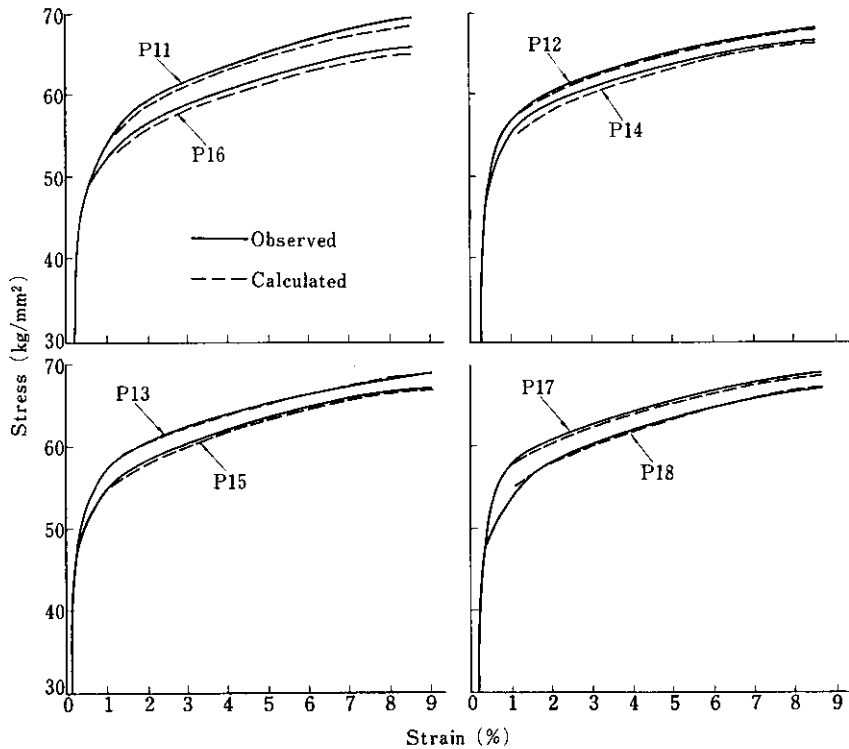


Fig. 4 Comparison between calculated and observed stress-strain curves in tension testing of UOE pipe

の引張応力-ひずみ曲線と鋼管のひずみ履歴がわかれば UOE 鋼管の引張特性をほとんどすべて精度よく予測できる。

記号説明

- λ_U : U プレスにおける鋼管内外表面の円周方向ひずみの絶対値
- λ_{OS} : O プレス時の円周方向圧縮ひずみの絶対値
- λ_E : 円周方向拉管ひずみ
- λ_T : 鋼管の平板化後の引張におけるひずみ
- t : 鋼管の肉厚
- D : 鋼管の外径
- x : 管厚中心層から内面側への距離
- n_0 : 素材の加工硬化指数

- c_0 : 素材の応力-ひずみ曲線上の真ひずみ 1 に対する応力
- n' : 圧縮予ひずみ後の引張における加工硬化指数
- c' : 圧縮予ひずみ後の引張における真ひずみ 1 に対する応力
- σ_{T0} : 鋼管の平板化後の引張における肉厚外面側の応力
- σ_{T1} : 鋼管の平板化後の引張における肉厚内面側の応力
- σ_T : 鋼管の平板化後の引張における全厚の応力
- σ'_T : 鋼管の平板化後の引張における全厚の見かけの応力

参考文献

- 1) 平：日本金属学会会報，14 (1975) 1, 41
- 2) 中島，菊間，水谷，松本：製鉄研究，(1973) 277, 91
- 3) 長谷部，京極，古賀，北川，岡沢：住友金属，23 (1971) 3, 18
- 4) 横山，大坪，山県，杉本：川崎製鉄技報，6 (1974) 4, 23
- 5) 高田，杉江，蓮野：川崎製鉄技報，7 (1975) 4, 1