

---

UOE 鋼管降伏応力の推定

Estimation of Yield Strength of UOE Pipe

高田 庸(Isao Takada) 杉江 英司(Eiji Sugie) 蓮野 貞夫(Sadao Hasuno)

---

要旨：

UOE 鋼管の降伏応力を推定するために、くり返しひずみの際の応力-ひずみ曲線を調べた。素材の応力-ひずみ曲線と予ひずみ後のそれぞれ  $\sigma = C_0 \epsilon^{n_0}$  と  $\sigma = C' \epsilon^{n'}$  で近似すると、 $C'/C_0$  と  $n'/n_0$  は予ひずみ  $\lambda_P$  と  $C'/C_0 = -3.57\lambda_P + 0.991$  および  $n'/n_0 = -6.93\lambda_P + 1.00$  の関係がある。一方、圧縮-引張-圧縮のくり返し変形において、2 回目のひずみ( $\lambda_2$ )が 1 回目と 3 回目のひずみ( $\lambda_1, \lambda_3$ )より小さいならば、3 回目の変形における応力は 1 回目の応力-ひずみ曲線上の  $\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2$  における応力に等しい。また、3 回目の変形の際のバウシinger 効果に寄与するのは事前の予ひずみのみである。これらの結果に基づいて UOE 鋼管の降伏応力を推定する方法を提案した。素材の  $n_0$  と  $C_0$ 、4%ひずみ時の応力と引張強さ、または下降伏応力と降伏伸びのいずれか 1 組がわかれば、UOE 鋼管の降伏応力を  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$  の精度で予測することができる。

---

Synopsis：

For the purpose of estimating the yield strength of UOE pipe, stress-strain curves accompanying cyclic straining were investigated. When the stress-strain curves of original plates and those after prestraining were given by  $\sigma = C_0 \epsilon^{n_0}$  and  $\sigma = C' \epsilon^{n'}$ , respectively,  $C'/C_0$  and  $n'/n_0$  were associated with prestrain  $\lambda_P$ ;  $C'/C_0 = -3.57\lambda_P + 0.991$  and  $n'/n_0 = -6.93\lambda_P + 1.00$ . During cyclic loading in compression-tension-compression, if the 2nd strain ( $\lambda_2$ ) is smaller than each of the 1st ( $\lambda_1$ ) and 3rd strain ( $\lambda_3$ ), the stress in 3rd loading is equal to that in 1st loading at  $\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2$ . The Bauschinger effect in 3rd loading is affected solely by the strain immediately preceding. Based on the results, a method to calculate the yield strength of UOE pipe was proposed. If either  $n_0$  and  $C_0$ , the stress at 4% strain and tensile strength, or lower yield strength and yield elongation is given, the yield strength of UOE pipe can be predicted in accuracy of  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ .

(c)JFE Steel Corporation, 2003

# UOE鋼管降伏応力の推定

## Estimation of Yield Strength of UOE Pipe

高 田 庸\*

Isao Takada

杉 江 英 司\*

Eiji Sugie

蓮 野 貞 夫\*

Sadao Hasuno

### Synopsis:

For the purpose of estimating the yield strength of UOE pipe, stress-strain curves accompanying cyclic straining were investigated. When the stress-strain curves of original plates and those after prestraining were given by  $\sigma = C_0 \varepsilon^{n_0}$  and  $\sigma = C' \varepsilon^{n'}$ , respectively,  $C'/C_0$  and  $n'/n_0$  were associated with prestrain  $\lambda_p$ ;  $C'/C_0 = -3.57\lambda_p + 0.991$  and  $n'/n_0 = -6.93\lambda_p + 1.00$ .

During cyclic loading in compression-tension-compression, if the 2nd strain ( $\lambda_2$ ) is smaller than each of the 1st ( $\lambda_1$ ) and 3rd strain ( $\lambda_3$ ), the stress in 3rd loading is equal to that in 1st loading at  $\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2$ . The Bauschinger effect in 3rd loading is affected solely by the strain immediately preceding. Based on the results, a method to calculate the yield strength of UOE pipe was proposed.

If either  $n_0$  and  $C_0$ , the stress at 4% strain and tensile strength, or lower yield strength and yield elongation is given, the yield strength of UOE pipe can be predicted in accuracy of  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ .

## 1. 緒 言

鋼管用鋼板の品質設計のためには、鋼管の機械的性質と素材の材料特性との関係を明らかにする必要がある。今までにも鋼管成形時のバウシinger効果と加工硬化を考慮して、鋼管の降伏応力を素材の引張特性から推定することが試みられ<sup>1-3)</sup>、両者の関係もある程度明らかにされている。

しかし、これらはすべて素材の通常の引張特性値のほかに、バウシinger効果係数を求めることが不可欠になっており、実際に多くの鋼種の品質設計に当たってはかなりの時間と労力が要求される。

そこで、今回逆方向予ひずみによる応力-ひずみ曲線の変化を多くの鋼種について調査し、素材の単純引張における特性値から鋼管の降伏応力を推定する方法を検討した。

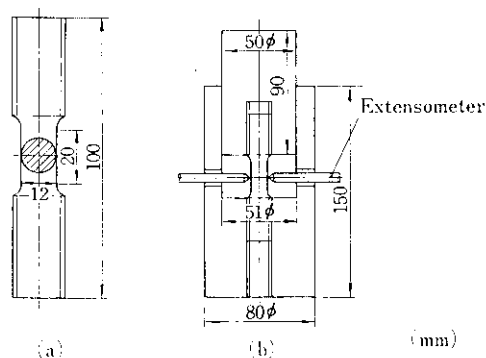
\* 技術研究所鋼材研究室主任研究員

## 2. 方向の異なる予ひずみによる応力-ひずみ曲線の変化

### 2-1 試験材と試験方法

供試材として21鋼種の圧延のままの厚板を用いた。これらの化学組成を **Table 1** に、引張特性を **Table 2** に示す。これらの供試材は API 5 LX X42, X52, X60およびX70相当で、成分系も普通の中炭素鋼, Nb鋼, Nb-V 鋼, Nb-V-Ni 鋼, Nb-Mo鋼およびNb-V-Mo鋼の多岐にわたっている。

これらの素材から **Fig. 1** (a) に示す棒状試験片を切り出し、圧縮の際の座屈を防止するため、**Fig. 1** (b) に示す治具を50 t 万能試験機に取付け、圧縮加工後引張試験を行った。この際、直径変化から軸方向のひずみを計算し、真応力-慣用ひず



**Fig. 1** Dimensions of specimen (a) and compression test fixture (b)

み曲線を求めた。

### 2-2 試験結果

圧縮予ひずみ後の引張における応力-ひずみ曲線の代表例を素材の応力-ひずみ曲線とともに

**Table 1** Chemical compositions of original plates

| Original plate | Grade | Chemical compositions (%) |      |      |       |       |       |       |       |      |
|----------------|-------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                |       | C                         | Si   | Mn   | P     | S     | Nb    | V     | Mo    | Ni   |
| P 1            | X42   | 0.17                      | 0.03 | 1.08 | 0.014 | 0.013 | —     | —     | —     | —    |
| P 2            | X52   | 0.15                      | 0.24 | 1.26 | 0.019 | 0.011 | 0.016 | —     | —     | —    |
| P 3            | X52   | 0.15                      | 0.24 | 1.44 | 0.019 | 0.010 | 0.028 | —     | —     | —    |
| P 4            | X52   | 0.14                      | 0.24 | 1.28 | 0.023 | 0.008 | 0.016 | —     | —     | —    |
| P 5            | X52   | 0.14                      | 0.24 | 1.28 | 0.023 | 0.008 | 0.016 | —     | —     | —    |
| P 6            | X52   | 0.14                      | 0.28 | 1.34 | 0.020 | 0.008 | 0.016 | —     | —     | —    |
| P 7            | X52   | 0.15                      | 0.24 | 1.26 | 0.019 | 0.011 | 0.016 | —     | —     | —    |
| P 8            | X60   | 0.13                      | 0.24 | 1.35 | 0.016 | 0.008 | 0.028 | 0.017 | —     | —    |
| P 9            | X60   | 0.13                      | 0.24 | 1.35 | 0.016 | 0.008 | 0.037 | 0.032 | —     | —    |
| P10            | X60   | 0.12                      | 0.26 | 1.35 | 0.019 | 0.006 | 0.028 | 0.020 | —     | —    |
| P11            | X60   | 0.12                      | 0.24 | 1.40 | 0.012 | 0.004 | 0.037 | 0.020 | —     | —    |
| P12            | X60   | 0.13                      | 0.24 | 1.35 | 0.014 | 0.005 | 0.035 | 0.017 | —     | —    |
| P13            | X60   | 0.08                      | 0.22 | 1.63 | 0.013 | 0.005 | 0.035 | 0.034 | —     | —    |
| P14            | X60   | 0.08                      | 0.28 | 1.53 | 0.015 | 0.005 | 0.031 | 0.031 | —     | —    |
| P15            | X60   | 0.08                      | 0.25 | 1.41 | 0.009 | 0.005 | 0.039 | —     | 0.230 | —    |
| P16            | X70   | 0.10                      | 0.27 | 1.52 | 0.010 | 0.004 | 0.043 | 0.036 | —     | —    |
| P17            | X70   | 0.11                      | 0.27 | 1.35 | 0.007 | 0.003 | 0.036 | 0.033 | —     | —    |
| P18            | X70   | 0.11                      | 0.21 | 1.40 | 0.006 | 0.004 | 0.036 | 0.043 | —     | 0.34 |
| P19            | X70   | 0.06                      | 0.21 | 1.69 | 0.007 | 0.003 | 0.040 | 0.030 | —     | —    |
| P20            | X70   | 0.08                      | 0.26 | 1.40 | 0.007 | 0.004 | 0.036 | 0.033 | 0.210 | —    |
| P21            | X70   | 0.06                      | 0.21 | 1.71 | 0.006 | 0.003 | 0.043 | —     | 0.234 | —    |

Table 2 Tensile properties of original plates

| Original plate | Grade | Thickness (mm) | Tensile properties                   |                                      |                |                                       |                                     |       |                |       |                             |
|----------------|-------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------|----------------|-------|-----------------------------|
|                |       |                | $\sigma_{0.5}$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{LYS}$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | $\lambda_{VE}$ | $\sigma_{0.04}$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{TS}$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | YR    | Elongation (%) | $n_0$ | $C_0$ (kg/mm <sup>2</sup> ) |
| P 1            | X42   | 20.0           | 27.3                                 | 26.9                                 | 0.016          | 36.8                                  | 44.0                                | 0.611 | 32             | 0.308 | 99.8                        |
| P 2            | X52   | 20.3           | 43.2                                 | 41.9                                 | 0.020          | 51.0                                  | 58.1                                | 0.721 | 46             | 0.241 | 111.1                       |
| P 3            | X52   | 20.3           | 47.3                                 | 46.3                                 | 0.025          | 52.1                                  | 60.1                                | 0.770 | 45             | 0.214 | 104.2                       |
| P 4            | X52   | 13.0           | 41.5                                 | 41.2                                 | 0.020          | 48.8                                  | 53.3                                | 0.773 | 39             | 0.208 | 97.7                        |
| P 5            | X52   | 15.7           | 45.0                                 | 43.1                                 | 0.022          | 51.0                                  | 56.2                                | 0.767 | 41             | 0.216 | 102.6                       |
| P 6            | X52   | 19.3           | 40.1                                 | 40.9                                 | 0.015          | 48.5                                  | 55.5                                | 0.737 | 42             | 0.216 | 97.6                        |
| P 7            | X52   | 20.3           | 44.0                                 | 41.0                                 | 0.021          | 47.5                                  | 56.8                                | 0.722 | 40             | 0.265 | 106.0                       |
| P 8            | X60   | 20.3           | 44.7                                 | 43.6                                 | 0.025          | 50.5                                  | 58.7                                | 0.743 | 42             | 0.248 | 112.9                       |
| P 9            | X60   | 20.3           | 46.7                                 | 45.3                                 | 0.020          | 52.7                                  | 60.2                                | 0.752 | 45             | 0.223 | 108.4                       |
| P10            | X60   | 9.5            | 46.8                                 | 46.3                                 | 0.026          | 52.4                                  | 57.4                                | 0.807 | 39             | 0.188 | 95.5                        |
| P11            | X60   | 14.3           | 54.0                                 | 51.8                                 | 0.033          | 55.8                                  | 59.2                                | 0.875 | 37             | 0.171 | 97.1                        |
| P12            | X60   | 20.3           | 47.5                                 | 46.2                                 | 0.022          | 51.0                                  | 59.8                                | 0.773 | 39             | 0.228 | 104.0                       |
| P13            | X60   | 20.3           | 47.0                                 | 44.9                                 | 0.023          | 54.0                                  | 56.4                                | 0.796 | 39             | 0.208 | 95.2                        |
| P14            | X60   | 9.5            | 49.2                                 | 48.1                                 | 0.030          | 52.0                                  | 58.4                                | 0.824 | 38             | 0.186 | 95.7                        |
| P15            | X60   | 14.3           | 52.4                                 | 52.4                                 | 0.000          | 61.0                                  | 62.8                                | 0.834 | 36             | 0.134 | 94.2                        |
| P16            | X70   | 25.0           | 47.4                                 | 45.8                                 | 0.022          | 51.7                                  | 57.9                                | 0.791 | 51             | 0.197 | 98.1                        |
| P17            | X70   | 25.0           | 46.5                                 | 44.5                                 | 0.030          | 49.2                                  | 56.6                                | 0.786 | 45             | 0.215 | 99.9                        |
| P18            | X70   | 20.3           | 52.0                                 | 51.0                                 | 0.020          | 57.8                                  | 63.2                                | 0.807 | 48             | 0.182 | 104.1                       |
| P19            | X70   | 18.3           | 56.2                                 | 53.6                                 | 0.036          | 56.5                                  | 58.4                                | 0.918 | 43             | 0.130 | 86.1                        |
| P20            | X70   | 20.3           | 47.0                                 | 47.0                                 | 0.000          | 60.5                                  | 65.8                                | 0.714 | 45             | 0.189 | 113.1                       |
| P21            | X70   | 18.3           | 49.2                                 | 49.0                                 | 0.000          | 60.7                                  | 64.0                                | 0.766 | 41             | 0.147 | 99.8                        |

 $\sigma_{0.5}$ : Stress at 0.5% total strain $\sigma_{0.04}$ : Stress at 4% plastic strain $n_0$ : Work hardening exponent $\sigma_{LYS}$ : Lower yield strength $\sigma_{TS}$ : Tensile strength $C_0$ : Stress at true strain of 1 $\lambda_{YE}$ : Yield elongationYR: Yield ratio ( $\sigma_{LYS}/\sigma_{TS}$ )

Fig. 2 (a), (b), (c)に示す。すべての材料に圧縮予ひずみによる降伏応力の低下すなわちバウシinger効果が認められる。またフェライト-ベイナイト組織を示すMo含有のP21には降伏伸びが存在しない。ここで、素材の応力-ひずみ曲線を $\sigma = C_0 \varepsilon^{n_0}$ 、圧縮予ひずみ後のそれを $\sigma = C' \varepsilon^{n'}$ で近似すると、Fig. 3に示すように予ひずみ後の $C'$ と素材の $C_0$ との比 $C'/C_0$ は、予ひずみ $\lambda_p$ の増加とともに直線的に減少し、その関係は

$$C'/C_0 = -3.57\lambda_p + 0.991 \quad \text{..... (1)}$$

であらわされる。また Fig. 4 のように、予ひずみ後の $n'$ と素材の $n_0$ との比 $n'/n_0$ は $C'/C_0$ と

$$n'/n_0 = 1.94C'/C_0 - 0.923$$

の関係にあり、 $n'/n_0$ と予ひずみ $\lambda_p$ との関係は次式であらわされる。

$$n'/n_0 = -6.93\lambda_p + 1.00 \quad \text{..... (2)}$$

Fig. 3 および Fig. 4 の値は、C, Mn, Nb, V および Mo 含有量や圧延条件の異なった多くの鋼種の結果であり、この関係は鋼種によらず成立すると考えてよい。これらの関係式を用いれば、鋼種と圧延条件にかかわらず、素材の応力-ひずみ曲線から逆方向予ひずみ後の応力-ひずみ曲線を求めることができる。

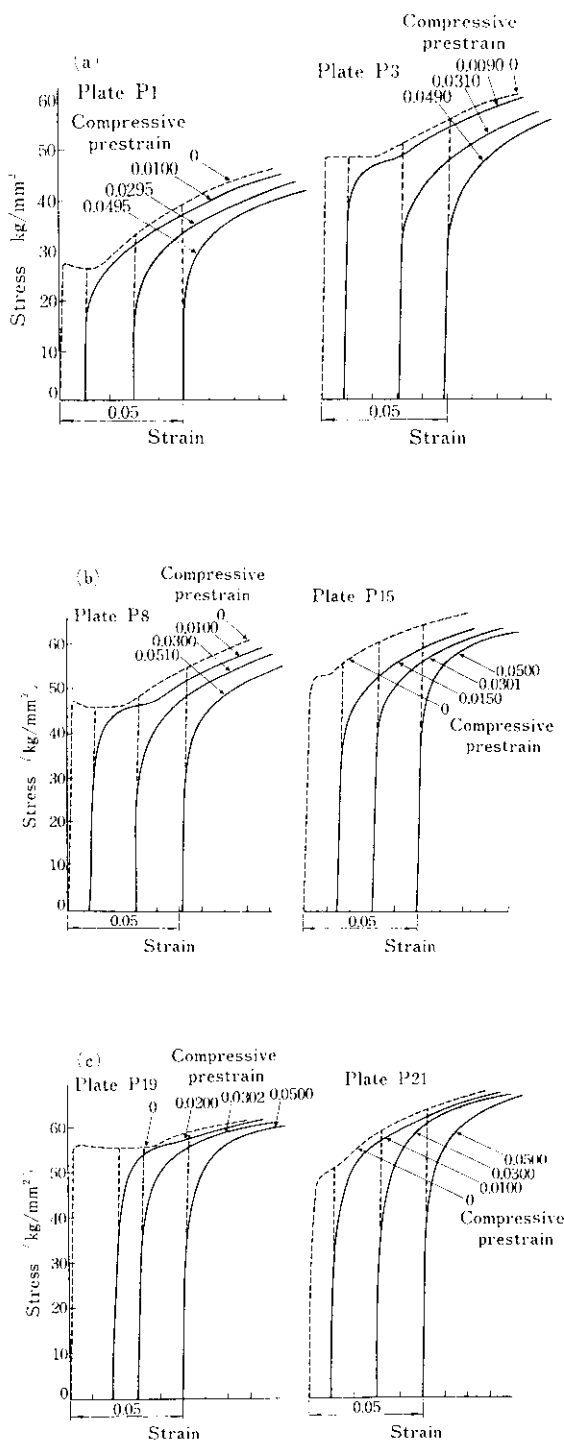


Fig. 2 Tensile stress-strain curves after pre-straining in compression

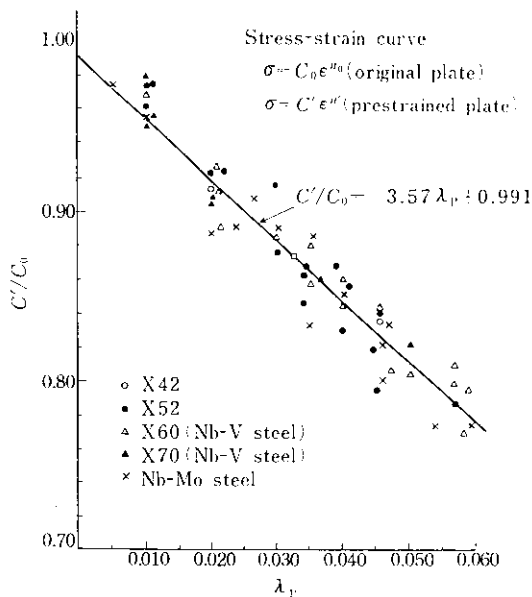


Fig. 3 Relation between compressive prestrain  $\lambda_P$  and  $C'/C_0$

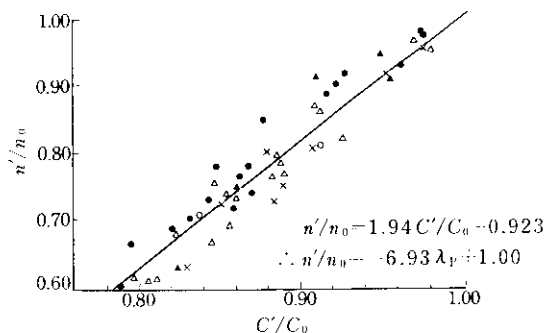


Fig. 4 Relation between  $C'/C_0$  and  $n'/n_0$

### 3. UOE 鋼管の降伏応力の推定

#### 3.1 鋼管の加工履歴

以上の結果より、1回の圧縮予ひずみ後の引張応力-ひずみ曲線は、素材の応力-ひずみ曲線がわかれば決めることができる。しかし、現実のUOE工程では、素材から鋼管、さらに平板化試片による引張試験にいたるまでに、円周方向位置によって大きさの異なる数回の圧縮加工と引張加工がくり返される。

たとえばUプレス時のナックル部に相当する溶

接線から135°と180°位置の内外表面はUプレスの際に大きな曲げひずみを受けるが、Oプレス時にはOプレスの型にそった曲げひずみ、すなわち、 $t/D$  ( $t$ : 板厚,  $D$ : 鋼管の外径) まで曲げもどされる。Uプレス時には曲げひずみを受けないこれ以外の部分も、Oプレス時には腰折のため位置によって異なったひずみを受ける<sup>4)</sup>。すなわち、Oプレスの際、腰折が生じない部分(溶接線から30°位置など)は $t/D$ の曲げひずみを受けるだけであるが、腰折部は最初大きな曲げひずみを受け、その後 $t/D$ のひずみまで曲げもどされる。このような腰折部の位置およびその曲げひずみは予測困難であるので、ここではUプレスの型、 $t/D$ および拡管率からひずみ履歴を比較的正確に知ることのできる溶接線から180°, 135°および30°位置について、降伏応力の測定や推定を行った。

### 3.1.1 鋼管内表面の加工履歴

いま、鋼管の平板化後の引張試験までの各工程において、材料はすべて平面ひずみ状態で変形され、曲げ加工においては均等曲げ変形を起こし、中立軸は板厚中心からはずれない、と仮定する。この仮定のもとでは、曲げ加工時における鋼管内外表面のひずみの絶対値は等しいので、Uプレス時の180°位置における内外表面の曲げひずみの絶対値を $\lambda_{U1}$ 、135°位置のそれを $\lambda_{U2}$ 、鋼管の板厚 $t$ と外径 $D$ の比 $t/D$ を $\lambda_{OB}$ 、Oプレス時の円周方向の圧縮率を $-\lambda_{OS}$ 、円周方向の拡管率を $\lambda_E$ 、そして平板加工時の曲げひずみの絶対値を $\lambda_F$  ( $\lambda_F = t/D = \lambda_{OB}$ ) とすれば、平板加工後の180°, 135°

および30°位置のひずみ履歴はTable 3およびFig. 5 のようになる。

Table 3 および Fig. 5 が示すように、30°位置の内表面はUプレス時に変形を受けず、Oプレス(OB)と圧縮時(OS)に $-(\lambda_{OB} + \lambda_{OS})$ のひずみを受けたあと、拡管(E)、平板化(F)および引張試験と連続して引張ひずみを受けるので、1回の圧縮後の引張と同じであり、(1)式と(2)式の間を直接適用することができる。

135°位置と180°位置の内表面では、30°位置とは異なり、Oプレス、拡管の両引張ひずみの間

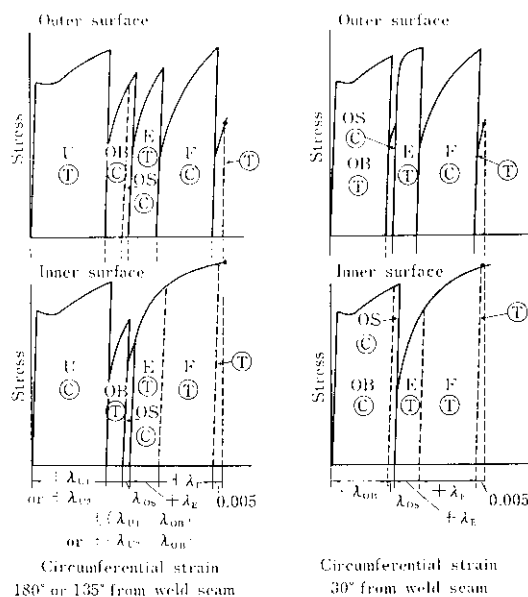


Fig. 5 Schematic stress-strain curves in UOE pipe forming

Table 3 Circumferential strain history in outer and inner surfaces of UOE pipe

| Location from weld seam | Strain          |                 |                                  |                                  |                 |                 |               |               |               |               |
|-------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                         | U               |                 | OB                               |                                  | OS              |                 | E             |               | F             |               |
|                         | Outer surface   | Inner surface   | Outer surface                    | Inner surface                    | Outer surface   | Inner surface   | Outer surface | Inner surface | Outer surface | Inner surface |
| 30°                     | —               | —               | $+\lambda_{OB}$                  | $-\lambda_{OB}$                  | $-\lambda_{OS}$ | $-\lambda_{OS}$ | $+\lambda_E$  | $+\lambda_E$  | $-\lambda_F$  | $+\lambda_F$  |
| 135°                    | $+\lambda_{U2}$ | $-\lambda_{U2}$ | $-(\lambda_{U2} - \lambda_{OB})$ | $+(\lambda_{U2} - \lambda_{OB})$ | $-\lambda_{OS}$ | $-\lambda_{OS}$ | $+\lambda_E$  | $+\lambda_E$  | $-\lambda_F$  | $+\lambda_F$  |
| 180°                    | $+\lambda_{U1}$ | $-\lambda_{U1}$ | $-(\lambda_{U1} - \lambda_{OB})$ | $+(\lambda_{U1} - \lambda_{OB})$ | $-\lambda_{OS}$ | $-\lambda_{OS}$ | $+\lambda_E$  | $+\lambda_E$  | $-\lambda_F$  | $+\lambda_F$  |

U : U-ing    OB : Bending in O-ing process    OS : Shrinking in O-ing process    E : Expansion  
F : Flattening

に比較的小さい  $-\lambda_{0S}$  の圧縮ひずみがあたえられるので、上述の  $30^\circ$  位置のように簡単に処理することができない。そこで、最終の応力-ひずみ曲線におよぼす中間微小逆ひずみの影響についての検討を行った。

このような引張-圧縮-引張または圧縮-引張-圧縮の際、前報<sup>5)</sup>で述べたように、材料の flow stress  $\sigma_F$  は、荷重方向に無関係な応力  $\sigma_d$  と、バウシinger 効果に寄与する応力、すなわちパイルアップした転位のバックストレスによる応力  $\sigma_b$  とに分けられ、つづいて逆方向ひずみを与えた際、そのひずみが小さい範囲では  $\sigma_d$  は変化せず  $\sigma_b$  のみが変わると考えられる。最初の引張または圧縮の際の flow stress を  $\sigma_{F1}$ 、2回目および3回目の圧縮または引張におけるそれらを  $\sigma_{F2}$  および  $\sigma_{F3}$  とし (Fig. 6 参照)、それらに対応する荷重方向に無関係な応力成分とバウシinger 効果に寄与する成分をそれぞれ  $\sigma_{d1}$ 、 $\sigma_{d2}$ 、 $\sigma_{d3}$  および  $\sigma_{b1}$ 、 $\sigma_{b2}$ 、 $\sigma_{b3}$  とすれば、

$$\sigma_{F1} = \sigma_{d1} + \sigma_{b1}$$

$$\sigma_{F2} = \sigma_{d2} + \sigma_{b2}$$

$$\sigma_{F3} = \sigma_{d3} + \sigma_{b3}$$

となり、2回目と3回目のひずみが小さいときは

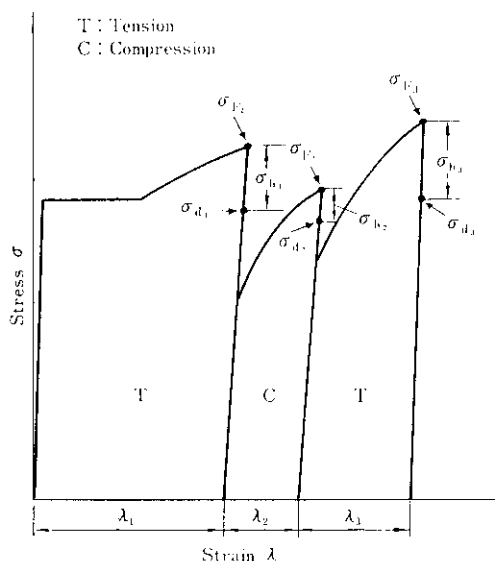


Fig. 6 Schematic stress-strain curves in cyclic straining

$$\sigma_{d1} = \sigma_{d2} = \sigma_{d3}$$

である。

$\sigma_b$  はパイルアップした転位のバックストレスによる応力であるから、2回目のひずみによって  $\sigma_b$  のみが変わるということは、換言すれば2回目のひずみはパイルアップした転位を最初と逆方向に移動させて、そのバックストレスを変化させるだけであるということができる。3回目のひずみは、2回目のひずみによって逆方向に移動した転位を再び最初と同じ方向にパイルアップさせる。

1回目のひずみ  $\lambda_1$  における flow stress  $\sigma_{F1}$  と3回目のひずみ  $\lambda_3$  における flow stress  $\sigma_{F3}$  が等しければ、2回目のひずみ  $\lambda_2$  によって逆方向に移動したパイルアップ転位が、3回目のひずみ  $\lambda_3$  によって最初のひずみ  $\lambda_1$  における状態にもどったことになるので、 $\lambda_3$  は  $|\lambda_2|$  に等しいと考えられる。

この考えを確認するために、Table 1 に示す鋼種 P7, P12, P13, P17 および P20 を用い、Fig. 7 に示すように圧縮 (ひずみ  $\lambda_1$ ) - 引張 (ひずみ  $\lambda_2$ ) - 圧縮 (ひずみ  $\lambda_3$ ) の変形を連続して与えた。最初の圧縮ひずみ  $|\lambda_1|$  に比べて、つぎの引張ひずみ  $\lambda_2$  が比較的小さく ( $\lambda_2 \leq \frac{1}{3} |\lambda_1|$ )、その後の圧縮ひずみ  $|\lambda_3|$  が  $\lambda_2$  より大きい範囲では、最後の圧縮ひずみ  $\lambda_3$  における応力は、最初の応力-ひずみ曲線における  $-(|\lambda_1| + |\lambda_3| - \lambda_2)$  に等しいひずみでの応力とほぼ一致する。この事実は先に述べた中間微小ひずみに対する考えを裏づけている。この結果は引張 (ひずみ  $\lambda_1$ ) - 圧縮 (ひずみ  $\lambda_2$ ) - 引張 (ひずみ  $\lambda_3$ ) における  $|\lambda_2| \leq \frac{1}{3} \lambda_1$  の場合にも適用できるであろう。したがって、実際の UOE 工程において途中で方向の異なる小さい変形 (OS 工程) を受けた場合、そのひずみ履歴は前後のひずみの和から微小ひずみを差し引いた同一方向の変形であると考えて処理すればよい。

この考えにしたがえば、 $135^\circ$ 位置と  $180^\circ$ 位置の内表面では、平板化試片の引張ひずみ 0.5% までに  $\lambda_U$  の圧縮後  $\lambda_{T2} = (\lambda_U - \lambda_{0B}) - \lambda_{0S} + \lambda_E + \lambda_F + 0.005 = \lambda_U - \lambda_{0S} + \lambda_E + 0.005$  ( $\because \lambda_{0B} = \lambda_F$ ) の引張ひずみを受けたことになり、 $30^\circ$ 位置の場合と同

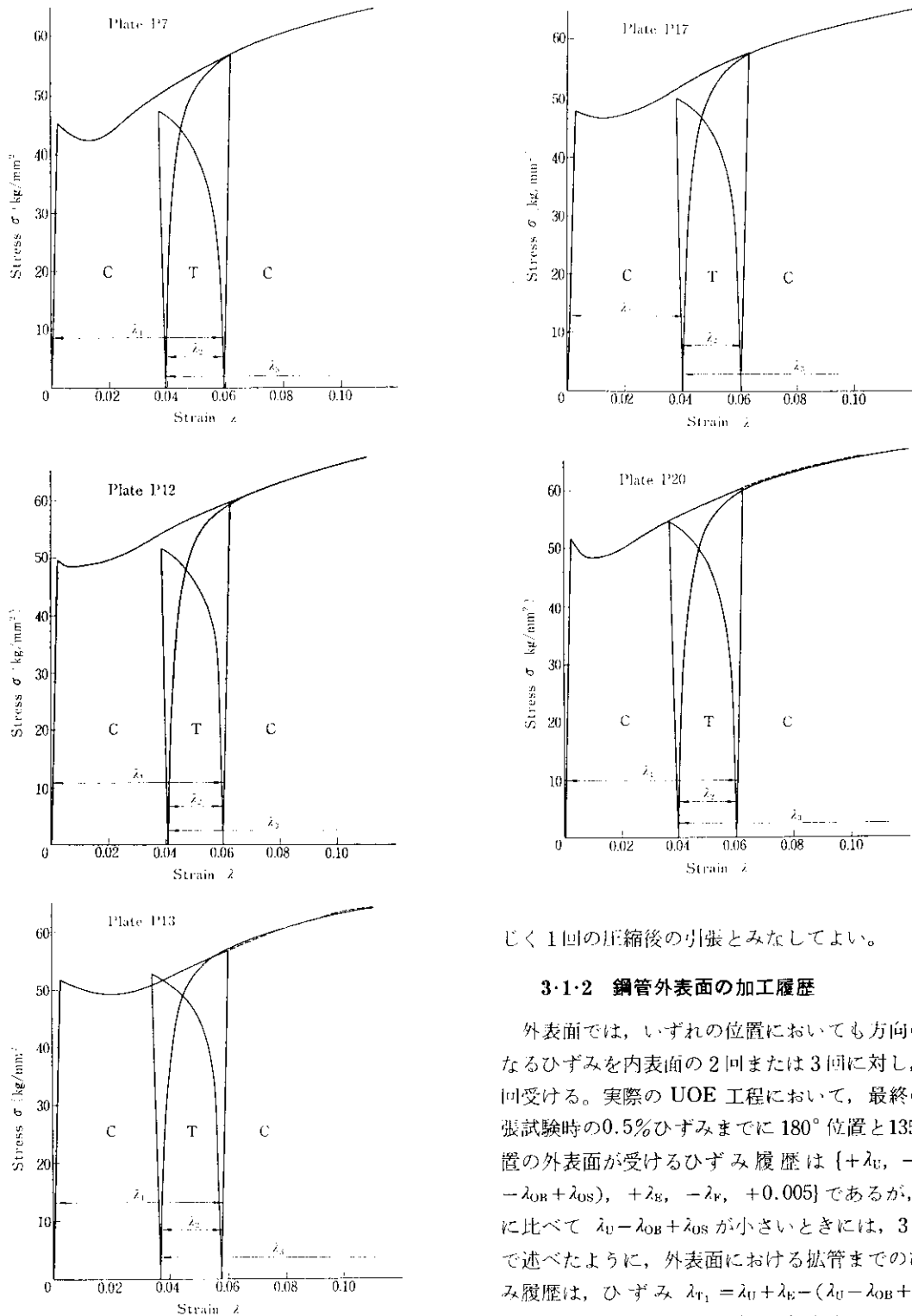


Fig. 7 Stress-strain curves of specimens strained in compression-tension-compression

じく 1 回の圧縮後の引張とみなしてよい。

### 3.1.2 鋼管外表面の加工履歴

外表面では、いずれの位置においても方向の異なるひずみを内表面の 2 回または 3 回に対し、5 回受ける。実際の UOE 工程において、最終の引張試験時の 0.5% ひずみまでに  $180^\circ$  位置と  $135^\circ$  位置の外表面が受けるひずみ履歴は  $\{+\lambda_U, -(\lambda_U - \lambda_{OB} + \lambda_{OS}), +\lambda_E, -\lambda_E, +0.005\}$  であるが、 $\lambda_U$  に比べて  $\lambda_U - \lambda_{OB} + \lambda_{OS}$  が小さいときには、3.1.1 で述べたように、外表面における拡張までのひずみ履歴は、ひずみ  $\lambda_{T1} = \lambda_U + \lambda_E - (\lambda_U - \lambda_{OB} + \lambda_{OS}) = \lambda_{OB} + \lambda_E - \lambda_{OS}$  の 1 回の引張に相当する。

したがって、 $180^\circ$  位置または  $135^\circ$  位置の外表面



は、鋼管の引張試験における0.5%ひずみまでに、まず引張ひずみ $+(\lambda_{0B}+\lambda_E-\lambda_{0S})$ を受け、引続いて圧縮ひずみ $-\lambda_F$ 、引張ひずみ $+0.005$ を受けるとみなすことができる。30°位置の外表面も3・1・1にしたがって $\{+(\lambda_{0B}+\lambda_E-\lambda_{0S}), -\lambda_F, +0.005\}$ の引張-圧縮-引張に相当するので、外表面のひずみ履歴は、円周方向位置によらず一定であると考えられる。しかし、これらの引張-圧縮-引張では、最後の引張におけるひずみが小さい。このような場合には、Fig. 7に示すように3回目の引張ひずみが0.5%のときの応力は、バウシinger効果のために最初の応力-ひずみ曲線の延長よりかなり低下するので、ひずみ履歴は1回の引張に相当せず、引張-圧縮-引張と考えねばならない。したがって、外表面の降伏応力を計算するには別の面からの検討が必要である。

### 3.2 素材の $n_0$ と $C_0$ からの鋼管の降伏応力の推定

3.1で示したように、鋼管の引張試験までのひずみ履歴は、内表面では1回の圧縮後の引張に簡単化できるので、最初の圧縮ひずみとその後の引張ひずみがわかれば(1)式と(2)式を用いて鋼管の降伏応力が計算できる。しかし、外表面の履歴は引張-圧縮-引張に相当し、最後の引張までに2回の予ひずみを受けるので、その降伏応力は(1)式と(2)式のみからでは求まらない。しかし、外表面においても、最初の引張の最大ひずみにおける応力、すなわち拡張時の最大応力は、素材の応力-ひずみ曲線から直ちに計算できるので、最終の引張試験における降伏応力とこの最大応力および中間の圧縮ひずみ $-\lambda_F$ との関係がわかれば、その降伏応力を求めることができるであろう。

そこで、鋼種P13、P20およびP17を用いて、圧縮-引張-圧縮変形における最後の圧縮時の降伏応力と、最初の引張の際の最大応力および中間の引張ひずみとの関係を調べた。Fig. 8に示すように圧縮-引張-圧縮における最初の引張時の最大応力を $\sigma_{F1}$ とし、3回目の圧縮時の降伏応力を $\sigma_{C0.5}$ 、また1回の圧縮-引張における圧縮ひずみ $\lambda_F$ における応力を $\sigma_P$ 、引張時の降伏応力を $\sigma_{T0.5}$ として、 $\sigma_{C0.5}/\sigma_{F1}$ と中間の引張ひずみ $\lambda_2$ の

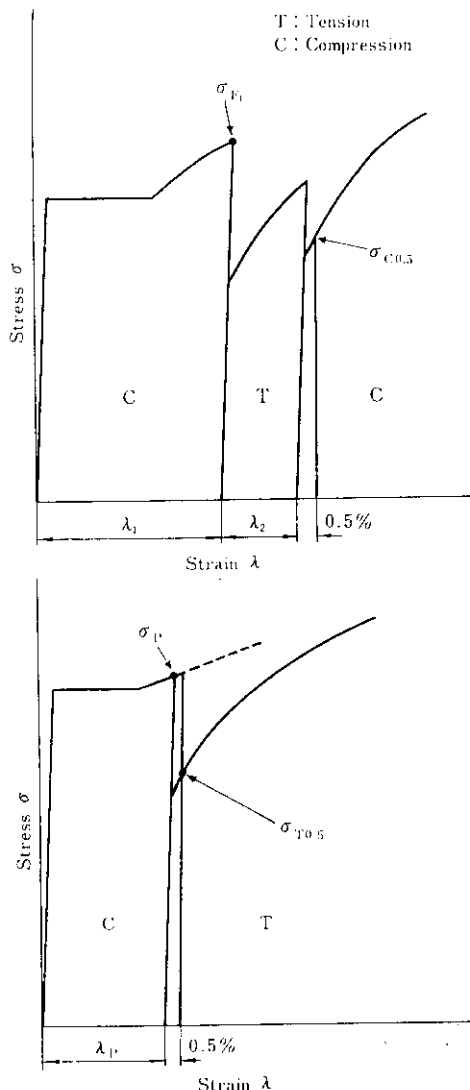


Fig. 8 Schematic stress-strain curves of specimens strained in compression-tension-compression and compression-tension

関係および $\lambda_F$ と $\sigma_{T0.5}/\sigma_P$ との関係をFig. 9に示す。くり返しの回数によらず $\lambda_2=\lambda_F$ のときには

$$\sigma_{C0.5}/\sigma_{F1} = \sigma_{T0.5}/\sigma_P \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。

いま、素材の応力-ひずみ曲線を $\sigma = C_0 \epsilon^{n_0}$ 、外表面の引張試験における降伏応力を $\sigma_{ou}$ とする。 $\lambda_{T1}$ 、 $-\lambda_F$ はいずれも平面ひずみ状態での変形

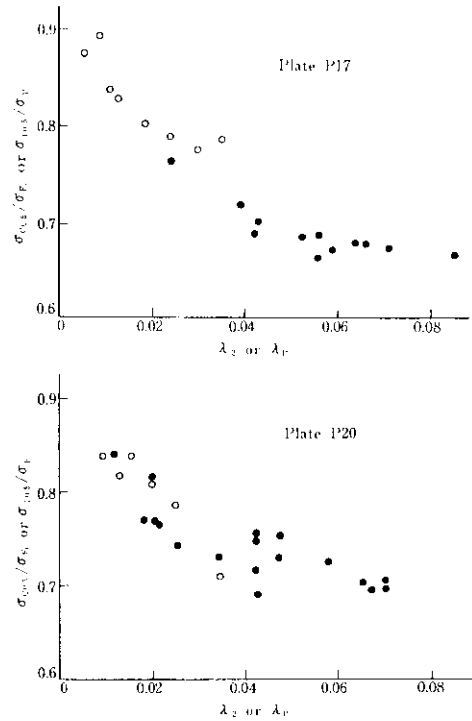
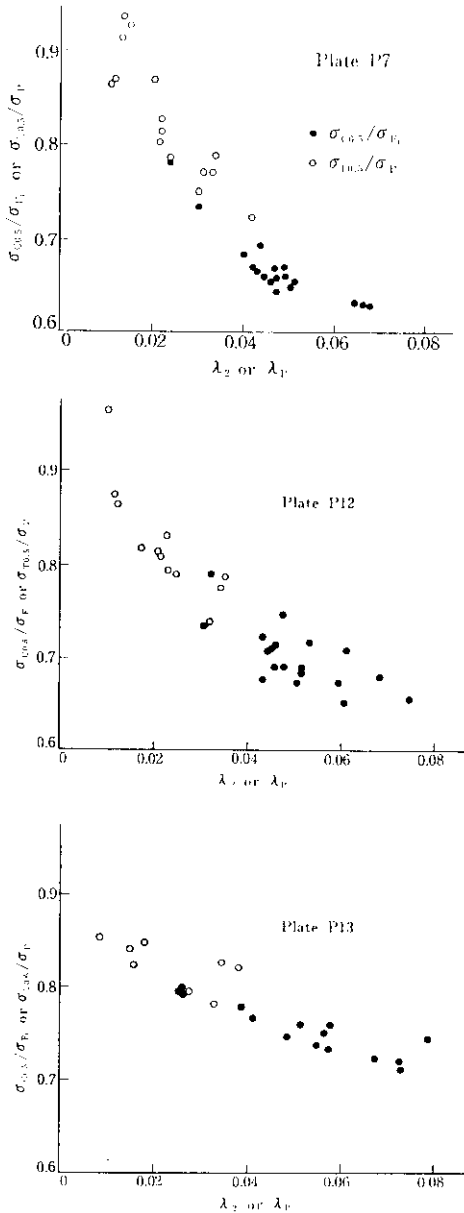


Fig. 9 Relation between previous strain and Baushinger effect factor of specimen strained in compression-tension-compression and compression-tension ( $\sigma_{0.5}$ ,  $\sigma_{T0.5}$ ,  $\sigma_F$ ,  $\sigma_P$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_P$ : see Fig. 8)

み曲線を  $\sigma = C'\epsilon^{n'}$  とし、このときの降伏応力を  $\sigma_{(-\lambda'_F)0.5}$  とすると、 $\sigma_{(-\lambda'_F)0.5}$  と素材の応力-ひずみ曲線における圧縮ひずみ  $-\lambda'_F = (1 - \lambda_F)e^{2/\sqrt{3}} - 1$  の応力との比  $B_{(-\lambda'_F)0.5}$  は

$$B_{(-\lambda'_F)0.5} = \sigma_{(-\lambda'_F)0.5} / C_0 \cdot \left\{ -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1 - \lambda_F) \right\}^{n_0}$$

であらわされる。ここで(1)式と(2)式の  $\lambda_F$  に  $\lambda'_F$  を代入すると

$$\begin{aligned} C' &= C_0 [-3.57 \{(1 - \lambda_F)e^{2/\sqrt{3}} - 1\} + 0.991] \\ n' &= n_0 [-6.93 \{(1 - \lambda_F)e^{2/\sqrt{3}} - 1\} + 1.00] \end{aligned}$$

となり、これらの  $C'$  と  $n'$  から  $\sigma_{(-\lambda'_F)0.5}$  はつぎのように近似される。

$$\sigma_{(-\lambda'_F)0.5} = C' [\ln(1.005)]^n \cdot [1 - n'C' \cdot \{\ln(1.005)\}^{n'} / E \cdot 0.005]$$

における円周方向ひずみであり、その方向はひずみの主軸と一致しているので、これらの塑性相当ひずみはそれぞれ  $\epsilon'_{T1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1 + \lambda_{T1})$ ,  $\epsilon'_F = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln(1 - \lambda_F)$  であらわされ、これらに対応する慣用ひずみは  $\lambda'_{T1} = (1 + \lambda_{T1})e^{2/\sqrt{3}} - 1$ ,  $-\lambda'_F = (1 - \lambda_F) \cdot e^{2/\sqrt{3}} - 1$  となる。1軸の圧縮-引張の結果である(1)式と(2)式に、この塑性相当ひずみを適用して以後の計算を行った。

圧縮ひずみ  $-\lambda'_F$  後の引張における応力-ひず

Table 4 Calculated and observed yield strengths of UOE pipe

|     | Location<br>from weld<br>seam | I                                                   |                                    |                                         | II                                                           |                                    |                                         | III                                                           |                                    |                                         | Observ-<br>ed<br>yield<br>strength<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|     |                               | Calculated values using<br>$n_0$ and $C_0$ observed |                                    |                                         | Calculated values using<br>$\sigma_{0.04}$ and $\sigma_{TS}$ |                                    |                                         | Calculated values using<br>$\sigma_{0.05}$ and $\lambda_{VF}$ |                                    |                                         |                                                                 |
|     |                               | $n_0$                                               | $C_0$<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_M$<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) | $n_0$                                                        | $C_0$<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_M$<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) | $n_0$                                                         | $C_0$<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_M$<br>(kg/<br>mm <sup>2</sup> ) |                                                                 |
| P 1 | 180°                          | 0.308                                               | 99.8                               | 38.0                                    | 0.265                                                        | 86.8                               | 36.9                                    | 0.326                                                         | 105.5                              | 40.3                                    | 39.3                                                            |
| P 4 | 180°                          | 0.208                                               | 97.7                               | 44.2                                    | 0.189                                                        | 90.0                               | 43.8                                    | 0.232                                                         | 104.4                              | 43.0                                    | 45.2                                                            |
| P 5 | 180°                          | 0.216                                               | 102.6                              | 46.8                                    | 0.197                                                        | 96.5                               | 46.2                                    | 0.220                                                         | 102.2                              | 44.9                                    | 44.4                                                            |
| P 6 | 180°                          | 0.216                                               | 97.6                               | 43.8                                    | 0.229                                                        | 101.8                              | 43.5                                    | 0.234                                                         | 111.1                              | 46.7                                    | 44.0                                                            |
| P10 | 180°                          | 0.188                                               | 95.5                               | 44.3                                    | 0.191                                                        | 97.3                               | 44.5                                    | 0.199                                                         | 98.5                               | 43.5                                    | 46.2                                                            |
| P11 | 30°                           | 0.171                                               | 97.1                               | 49.4                                    | 0.162                                                        | 94.3                               | 48.5                                    | 0.163                                                         | 93.6                               | 48.1                                    | 46.0                                                            |
|     | 135°                          | 0.171                                               | 97.1                               | 50.8                                    | 0.162                                                        | 94.3                               | 51.1                                    | 0.163                                                         | 93.6                               | 49.7                                    | 48.0                                                            |
|     | 180°                          | 0.171                                               | 97.1                               | 49.6                                    | 0.162                                                        | 94.3                               | 49.0                                    | 0.163                                                         | 93.6                               | 48.3                                    | 47.2                                                            |
| P14 | 135°                          | 0.186                                               | 95.7                               | 45.5                                    | 0.213                                                        | 103.7                              | 46.4                                    | 0.187                                                         | 95.7                               | 46.0                                    | 47.6                                                            |
| P15 | 30°                           | 0.134                                               | 94.2                               | 54.2                                    | 0.134                                                        | 94.1                               | 53.0                                    | —                                                             | —                                  | —                                       | 53.8                                                            |
|     | 135°                          | 0.134                                               | 94.2                               | 54.8                                    | 0.134                                                        | 94.1                               | 55.1                                    | —                                                             | —                                  | —                                       | 54.6                                                            |
|     | 180°                          | 0.134                                               | 94.2                               | 54.3                                    | 0.134                                                        | 94.1                               | 53.5                                    | —                                                             | —                                  | —                                       | 54.6                                                            |
| P19 | 30°                           | 0.130                                               | 86.1                               | 50.6                                    | 0.139                                                        | 88.6                               | 49.6                                    | 0.152                                                         | 92.3                               | 49.4                                    | 50.5                                                            |
|     | 135°                          | 0.130                                               | 86.1                               | 51.0                                    | 0.139                                                        | 88.6                               | 51.6                                    | 0.152                                                         | 92.3                               | 50.9                                    | 49.2                                                            |
|     | 180°                          | 0.130                                               | 86.1                               | 50.9                                    | 0.139                                                        | 88.6                               | 50.5                                    | 0.152                                                         | 92.3                               | 49.9                                    | 49.8                                                            |
| P21 | 30°                           | 0.147                                               | 99.8                               | 55.0                                    | 0.156                                                        | 100.6                              | 52.6                                    | —                                                             | —                                  | —                                       | 52.2                                                            |
|     | 135°                          | 0.147                                               | 99.8                               | 56.0                                    | 0.156                                                        | 100.6                              | 55.5                                    | —                                                             | —                                  | —                                       | 53.0                                                            |
|     | 180°                          | 0.147                                               | 99.8                               | 55.5                                    | 0.156                                                        | 100.6                              | 53.9                                    | —                                                             | —                                  | —                                       | 54.1                                                            |

 $\sigma_M$ : Calculated yield strength of UOE pipe

(〔 〕)の項は弾性ひずみの補正項である。 $E$ :弾性率)

最終の引張試験における降伏応力すなわち鋼管外表面の降伏応力  $\sigma_{ou}$  と、拡管時の最大応力すなわち  $\sigma = C_0 \varepsilon^{n_0}$  の  $\lambda'_{T1}$  における応力  $\sigma_{T1}$  との比は、(3)式より  $B(-\lambda'_F)^{0.5}$  に等しいから、次式

$$\begin{aligned} \sigma_{ou}/\sigma_{T1} &= C' \{ \ln(1.005) \}^{n'} [1 - n' C' \\ &\quad \cdot \{ \ln(1.005) \}^{n'}/E \cdot 0.005] / \\ &\quad C_0 \{ -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1-\lambda'_F) \}^{n_0} \\ \sigma_{ou} &= C' \{ \ln(1.005) \}^{n'} [1 - n' C' \\ &\quad \cdot \{ \ln(1.005) \}^{n'}/E \cdot 0.005] / \\ &\quad C_0 \{ -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1-\lambda'_F) \}^{n_0} \end{aligned}$$

$$\cdot C_0 \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \{ \ln(1+\lambda_{0B}+\lambda_E - \lambda_{0S}) \}^{n_0} \right] \quad (4)$$

によって外表面の降伏応力を計算することができる。

つぎに、内表面については3・1・1で述べたように、180°位置と135°位置では、平面ひずみ状態における圧縮ひずみ  $-\lambda_U$  後の引張-応力ひずみ曲線のひずみ  $\lambda_{T2} = \lambda_U - \lambda_{0S} + \lambda_E + 0.005$  における応力であるから、(1)式と(2)式の  $\lambda_F$  に相当ひずみ  $-\lambda'_U = -\{(1-\lambda_U)e^{2/\sqrt{3}} - 1\}$  を代入すると

$$C' = C_0 [3.57 \{ (1-\lambda_U)e^{2/\sqrt{3}} - 1 \} + 0.991]$$

$$n' = n_0 [6.93 \{ (1-\lambda_U)e^{2/\sqrt{3}} - 1 \} + 1.00]$$

となり、これらの  $C'$  と  $n'$  を用いて降伏応力  $\sigma_{1n}$  はつぎのようにあらわされる。

$$\sigma_{1n} = C' (\ln \varepsilon'_{T_2})^{n'} = C' \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln(1 + \lambda_{T_2}) \right\}^{n'} \quad (5)$$

ここで  $\varepsilon'_{T_2}$  は塑性相当ひずみ  $\frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1 + \lambda_{T_2})$  である。

30° 位置の降伏応力は、平面ひずみ状態における圧縮ひずみ  $-(\lambda_{OB} + \lambda_{OS})$  後の引張応力-ひずみ曲線におけるひずみ  $\lambda_E + \lambda_F + 0.005$  における応力であるから、次式

$$C' = [3.57 \{ (1 - \lambda_{OB} - \lambda_{OS}) e^{2/\sqrt{3}} - 1 \} + 0.991]$$

$$n' = [6.93 \{ (1 - \lambda_{OB} - \lambda_{OS}) e^{2/\sqrt{3}} - 1 \} + 1.00]$$

で計算される  $C'$  と  $n'$  を用いた次式

$$\sigma_{1n} = C' \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1.005 + \lambda_E + \lambda_F) \right\}^{n'} \quad (6)$$

から求められる。ここで鋼管全厚の降伏応力  $\sigma_M$  は、外表面と内表面の算術平均にほぼ等しいとす

れば、180°位置と135°位置では(4)式と(6)式を、30°位置では(5)式と(6)式を平均した

$$\sigma_M = \frac{1}{2} (\sigma_{0u} + \sigma_{1n}) \quad (7)$$

で求められる。

Table 1 に示した P 1, P 4, P 5, P 6, P 10, P 11, P 14, P 15, P 19 および P 21 について、素材の  $n_0$ ,  $C_0$  を使って計算した鋼管の降伏応力を Table 4 I 欄に示す。また計算値と実測値の対応を Fig. 10 に示す。実測値と計算値はほぼ  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$  以内で対応しており、本方法で鋼管の降伏応力を予測できる。

### 3.3 素材の 4% ひずみ時の応力と引張強さからの鋼管の降伏応力の推定

3.2 で示したように、素材の応力-ひずみ曲線の  $n_0$  と  $C_0$  がわかれば、鋼管の降伏応力を比較的精度よく推定することができるが、工程試験でパイプ素材すべての  $n_0$  と  $C_0$  を求めるのは、時間、人員の面から困難である。そこでここではよ

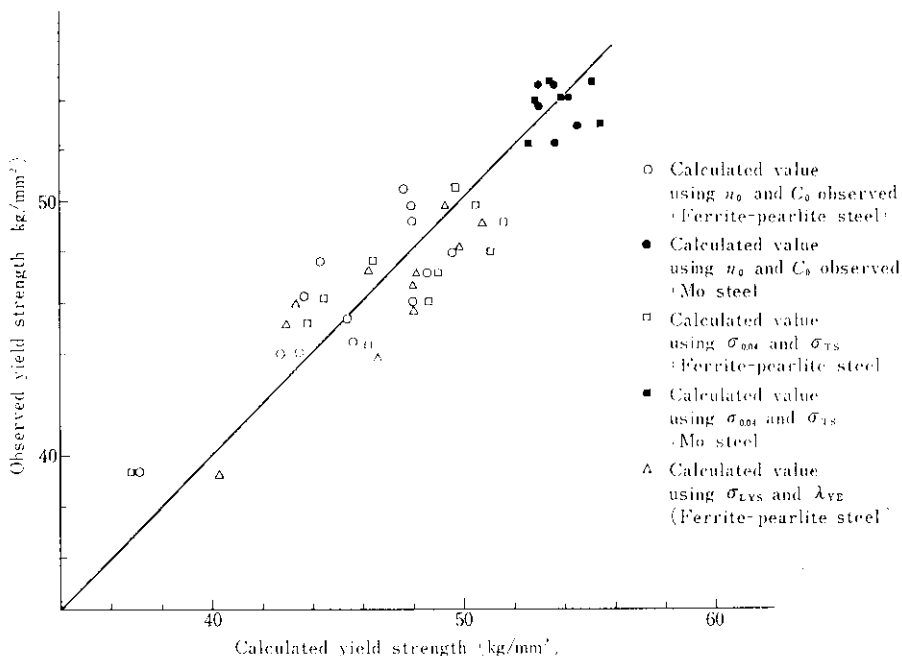


Fig. 10 Comparison of calculated and observed yield strengths of UOE pipe

り簡単に得られる引張特性値から鋼管の降伏応力を推定する方法を検討した。

Table 2 に示すように、降伏比 YR が大きい素材ほど  $n_0$  が小さくなる傾向がある。しかし、この YR は下降伏応力  $\sigma_{LYS}$  と引張強さ  $\sigma_{TS}$  の比であらわしたものであり、降伏伸びの存在しない Mo 含有鋼ではフェライト-パーライト鋼と同じようには取扱えない。そこで  $\sigma_{LYS}$  の代わりに、すべての鋼種の降伏伸びより大きく、かつそのなかでできるだけ小さいひずみである 4% ひずみ時の応力  $\sigma_{0.04}$  を用い、それと  $\sigma_{TS}$  との比  $\sigma_{0.04}/\sigma_{TS}$  と  $n_0$  の関係を示したのが Fig. 11 である。ややバラツキが認められるが、Mo 含有鋼を含むすべての鋼種についてはほぼ次式の直線関係がある。

$$n_0 = -1.007\sigma_{0.04}/\sigma_{TS} + 1.075 \quad \cdots \cdots (8)$$

(8) 式から求めた  $n_0$  と次式の関係

$$\sigma_{0.04} \times 1.04 = C_0 \{ \ln(1.04) \}^{n_0}$$

$$C_0 = \sigma_{0.04} \times 1.04 / \{ \ln(1.04) \}^{n_0}$$

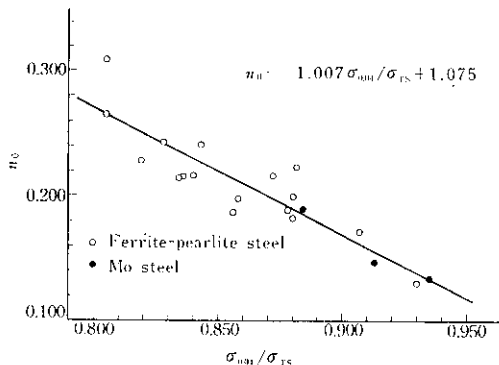


Fig. 11 Relation between  $\sigma_{0.04}/\sigma_{TS}$  and  $n_0$  ( $\sigma_{0.04}$ : Stress at 4% strain,  $\sigma_{TS}$ : Tensile strength)

で計算した  $C_0$  を用い、(4) 式、(5) 式および (7) 式、または (4) 式、(6) 式および (7) 式から求めた鋼管の降伏応力を Table 4 II 欄に示す。また実測値との対応を Fig. 10 に示す。素材の  $n_0$  と  $C_0$  から推定した場合とほとんど同じ精度で計算値と実測値は対応している。したがって、4% ひずみ時の応力  $\sigma_{0.04}$  と引張強さ  $\sigma_{TS}$  がわかれば、鋼管の降伏応力を推定することができる。

### 3.4 素材の下降伏応力と降伏伸びからの鋼管の降伏応力の推定

素材の 4% ひずみ時の応力  $\sigma_{0.04}$  を求めることは、 $n_0$  と  $C_0$  を求めることに比べればはるかに容易であるが、 $\sigma_{0.04}$  も通常の工程試験における引張特性値とはいい難い、そこでさらに普通の引張特性値から鋼管の降伏応力を推定する方法を検討した。

Table 2 より素材の下降伏応力  $\sigma_{LYS}$  が小さいほどその  $n_0$  が大きいことに注目して、 $n_0$  を  $\sigma_{LYS}$  に対してプロットしたのが Fig. 12 である (ただし Mo 含有鋼には  $\sigma_{LYS}$  が存在しないので、0.5% の応力に対してプロットした)。多少のバラツキは認められるが、 $n_0$  と  $\sigma_{LYS}$  の間には次式

$$n_0 = -0.00652\sigma_{LYS} + 0.501 \quad \cdots \cdots (9)$$

の関係があり、素材の  $\sigma_{LYS}$  から  $n_0$  が求められる。また  $\sigma_{LYS}$  は降伏伸びの終点  $\lambda_{YE}$  の応力をあらわしているので、 $\sigma_{LYS}$  と  $\lambda_{YE}$  には次式の関係がある。

$$\sigma_{LYS}(1 + \lambda_{YE}) = C_0 \{ \ln(1 + \lambda_{YE}) \}^{n_0}$$

$$C_0 = \sigma_{LYS}(1 + \lambda_{YE}) / \{ \ln(1 + \lambda_{YE}) \}^{n_0}$$

これに (9) 式で得られる  $n_0$  を用いると、 $C_0$  は

$$C_0 = \sigma_{LYS}(1 + \lambda_{YE}) / \{ \ln(1 + \lambda_{YE}) \}^{(-0.00652\sigma_{LYS} + 0.501)} \quad \cdots \cdots (10)$$

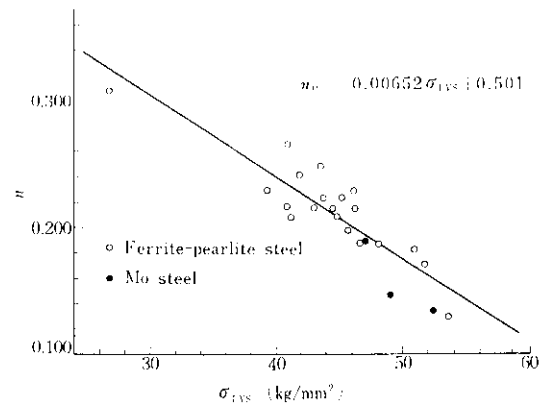


Fig. 12 Relation between lower yield strength  $\sigma_{LYS}$  and  $n_0$

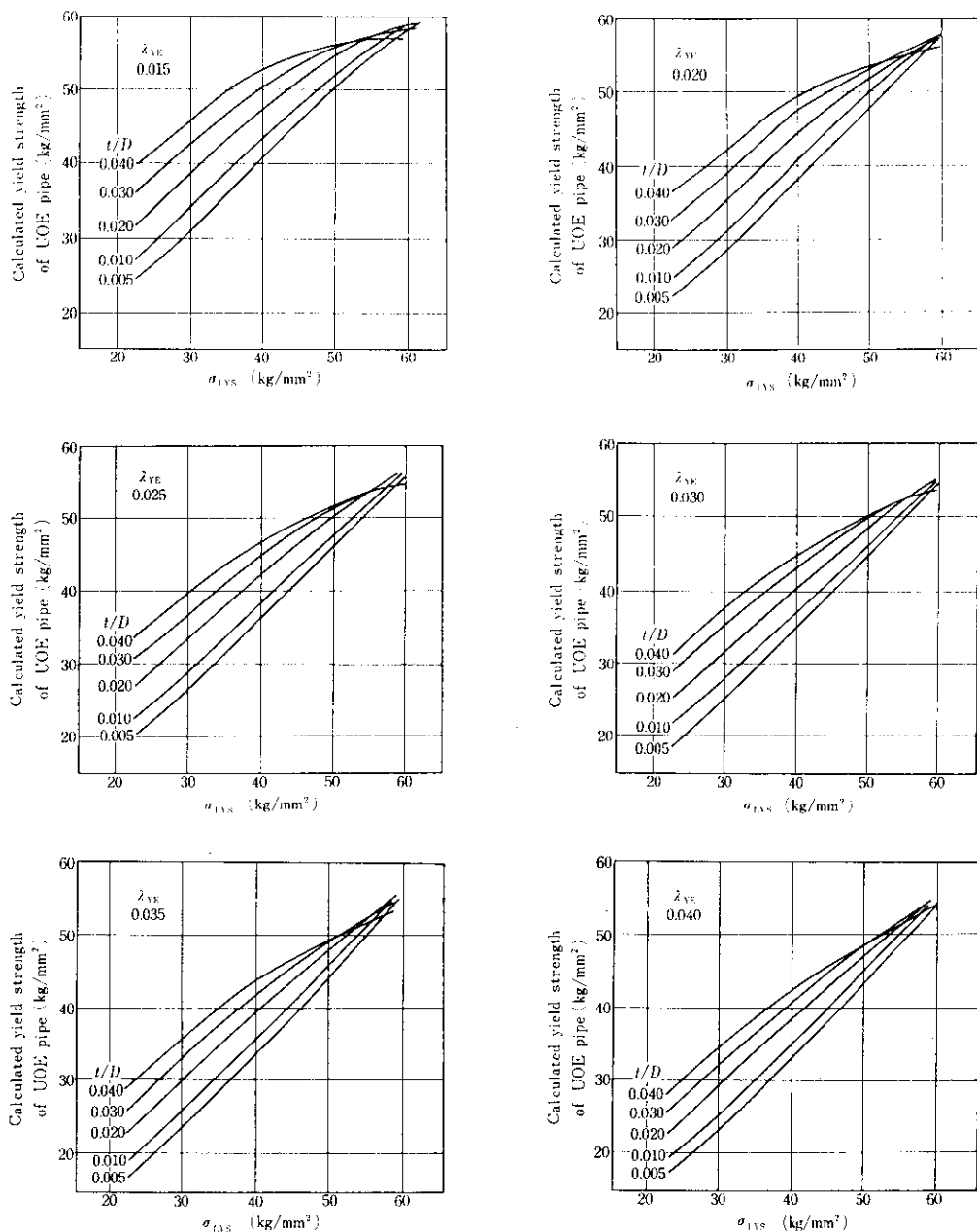


Fig. 13 Relation between  $\sigma_{LYS}$  and calculated yield strength of UOE pipe ( $\lambda_{VE}$ : Yield elongation,  $t$ : Wall thickness,  $D$ : Outer diam. of pipe)

となり、これらの  $n_0$  と  $C_0$  を (4) 式、(5) 式および (7) 式または (4) 式、(6) 式および (7) 式に代入して計算した鋼管の降伏応力を Table 4 Ⅲ欄に、実測値との対応を Fig. 10 に示す (ただし Mo 含有鋼は、0.5% 近傍において応力-ひずみ曲

線の近似式  $\sigma = C_0 \epsilon^{n_0}$  からのずれが大きいのので、計算から除外した)。フェライト-パーライト鋼に限れば、実測値と計算値はよく合っており、下降伏応力  $\sigma_{LYS}$  と降伏伸び  $\lambda_{VE}$  からでも鋼管の降伏応力を推定することができる。

現実の鋼管用鋼板の大部分をしめるフェライト-パーライト鋼では、素材の $\sigma_{LYS}$ と $\lambda_{YE}$ がわかればほとんどの UOE 鋼管の降伏応力が推定できる。この手法を用いて、素材の $\sigma_{LYS}$ と $\lambda_{YE}$ による鋼管の降伏応力 $\sigma_M$ の変化をつぎのように求めた。 $\lambda_U$ と $t/D$ には一定の関係があり、 $\lambda_{OS}$ と $\lambda_E$ は通常工程ではほぼ一定であるので、 $t/D$ がわかれば鋼管のひずみ履歴は決められる。いま、 $\lambda_{OS}$ および $\lambda_E$ として通常工程における値を用い、 $t/D = 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ に対して(9)式と(10)式から得られた $n_0$ と $C_0$ を用いて、(4)式、(5)式および(7)式から $180^\circ$ 位置の降伏応力を求め、それと $\sigma_{LYS}$ との関係を $t/D$ と $\lambda_{YE}$ をパラメータとして示したのが Fig. 13 である。 $\sigma_{LYS}$ が $50\text{kg/mm}^2$ より小さく $\sigma_{LYS}$ と $\lambda_{YE}$ が同じ材料では、 $t/D$ が大きくなるほど鋼管の降伏応力は増加するが、 $\sigma_{LYS}$ が $50\text{kg/mm}^2$ を超える材料では、 $t/D$ の増加に対して降伏応力が減少する場合が生じる。また $t/D$ が等しいときには、 $\lambda_{YE}$ が大きくなるほど同じ $\sigma_{LYS}$ に対する鋼管の降伏応力は減少する。

#### 4. 総 括

逆方向予ひずみによる応力-ひずみ曲線の変化を、X42からX70までの多数の鋼種について調べ、その結果から UOE 鋼管の降伏応力を推定する方法を検討し、つぎの結論を得た。

(1) 素材の応力-ひずみ曲線を $\sigma = C_0 \epsilon^{n_0}$ で、逆方向予ひずみ $\lambda_P$ 後のそれを $\sigma = C' \epsilon^{n'}$ で近似すると、 $C'$ および $n'$ は次式であらわされる。

$$C' = C_0 (-3.57\lambda_P + 0.991)$$

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

(2) くり返し変形過程で同一方向の変形( $\lambda_1, \lambda_3$ )の間に微小な逆方向ひずみ( $-\lambda_2$ )が与えられたとき、3回目の変形におけるひずみ $\lambda_3$ ( $\lambda_3 > \lambda_2$ )の応力は、最初の応力-ひずみ曲線のひずみ( $\lambda_1 + \lambda_3 - |\lambda_2|$ )に相当する応力に等しい。また、この際バウシinger効果に寄与するのは直前の逆方向予ひずみのみであると考えられる。

(3) 上式の関係および(2)の結果を用いて、素材

の $n_0$ と $C_0$ から計算した鋼管の降伏応力は、実測値とよく一致する。

(4) 素材の4%ひずみ時の応力 $\sigma_{0.04}$ と引張強さ $\sigma_{TS}$ との比 $\sigma_{0.04}/\sigma_{TS}$ から、 $n_0$ は次式

$$n_0 = -1.007 \times \sigma_{0.04}/\sigma_{TS} + 1.075$$

であらわされ、この $n_0$ と次式

$$\sigma_{0.04} \times 1.04 = C_0 \{ \ln(1.04) \}^{n_0}$$

で求められる $C_0$ を用いて計算した鋼管の降伏応力は実測値とよく合う。

(5) 素材の下降伏応力 $\sigma_{LYS}$ と $n_0$ の関係は次式で示される。

$$n_0 = -0.00652\sigma_{LYS} + 0.501$$

この $n_0$ と $\sigma_{LYS}$ および降伏伸び $\lambda_{YS}$ から次式

$$C_0 = \sigma_{LYS}(1 + \lambda_{YS}) / \{ \ln(1 + \lambda_{YS}) \}^{n_0}$$

で求めた $C_0$ を用いて計算した鋼管の降伏応力は、フェライト-パーライト鋼に限れば実測値とよく合う。

#### 本文に用いた記号

$\sigma_{C0.5}$ : 圧縮における0.5%ひずみ時の応力

$\sigma_{T0.5}$ : 引張における0.5%ひずみ時の応力

$\sigma_P$ : 圧縮-引張における prestress

$\lambda_{T1}$ : UOE 鋼管成形の外表面の拡管までの引張ひずみ

$\lambda_{T2}$ : UOE 鋼管成形時の内表面のUプレス後最終引張までの引張ひずみ

$\epsilon'$ : 平面ひずみ状態における塑性相当ひずみ $\frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon$

$\lambda'$ : 平面ひずみ状態における塑性相当ひずみに対応する慣用ひずみ [ $\epsilon' = \ln(1 + \lambda')$ ]

$\sigma(-\lambda'_F)_{0.5}$ : 圧縮予ひずみ $-\lambda'_F$ 後の0.5%引張ひずみ時の応力

$B(-\lambda'_F)_{0.5}$ : 圧縮予ひずみ $-\lambda'_F$ 後のバウシinger効果係数

$\sigma_{ou}$ : 鋼管外表面の降伏応力

$\sigma_{in}$ : 鋼管内表面の降伏応力

$\sigma_M$ : 鋼管全厚の降伏応力

$\sigma_{0.04}$ : 素材の4%ひずみ時の応力

|                                                 |                                                       |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $\sigma_{LYS}$ : 素材の下降伏応力                       | $\lambda_{OS}$ : Oプレス時の円周方向圧縮率の絶対値                    |
| $\sigma_{TS}$ : 素材の引張強さ                         | $\lambda_E$ : 円周方向拡管率                                 |
| $\lambda_{YE}$ : 素材の降伏伸び                        | $\lambda_F$ : 平板加工における内外表面の円周方向                       |
| $n_0$ : 加工硬化指数                                  | 曲げひずみの絶対値                                             |
| $C_0$ : 素材の応力-ひずみ曲線上の真ひずみ                       | $\lambda_{F1}, \lambda_{F2}, \dots$ : くり返し変形過程における各段階 |
| 1における応力                                         | の flow stress                                         |
| $n'$ : 圧縮予ひずみ後の加工硬化指数                           | $\sigma_{d1}, \sigma_{d2}, \dots$ : くり返し変形過程における各段階   |
| $C'$ : 圧縮予ひずみ後の真ひずみ 1 における                      | のひずみ方向に無関係な応力                                         |
| 応力                                              | $\sigma_{b1}, \sigma_{b2}, \dots$ : くり返し変形過程における各段階   |
| $\lambda_P$ : 圧縮予ひずみ                            | のバウシinger効果に寄与する応                                     |
| $\lambda_U$ : Uプレスにおける鋼管内外表面の円周                 | 力                                                     |
| 方向曲げひずみの絶対値                                     | $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ : くり返し変形過程における各段階       |
| $\lambda_{OB}$ : 鋼管の $t/D$ ( $t$ : 板厚 $D$ : 外径) | のひずみ                                                  |

### 参 考 文 献

- 1) T. Taira, T. Otsuka and Y. Ishida : Mechanical Working and Steel Processing XI (Proceeding of 15th Mechanical Working and Steel Processing Conference), (1973), 33
- 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) 阿部, 中川 : 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 1
- 5) 高田, 杉江 : 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 14