

素材の Flow Stress から UOE 鋼管の機械的性質を推定する方法

Estimation of Mechanical Properties of UOE Pipe from Flow Stress in Tensile Testing of Original Plate

高田 庸(Isao Takada) 山口 繁之(Shigeyuki Yamaguchi) 上田 正雄(Masao Ueda)

要旨：

素材の引張試験における flow stress から UOE 鋼管の機械的性質を推定する方法を検討した。UOE 鋼管の降伏応力, 降伏比および成形によるシャルピー破損面遷移温度の変化量 ($\nabla vTrs$) は素材の 4% 引張ひずみに対する応力 $\sigma_4(plate)$ から求める。一方, $\sigma_4(plate)$ は次式により表されていいる。 $\sigma_4(plate) = \{58.6C + 11.7(Si + Mn + Cr) + 6.76(Cu + Ni) + 29.7Mo + 90.1V + 18.0Nb^{**1/2}\} - 0.0586T - 0.243t + 70.1(kg/mm^{**2})$ C, Si……: 化学組成(wt%) T: 圧延仕上温度(°C) t: 板厚(mm) したがって素材の製造条件からも UOE 鋼管の引張特性と $\nabla vTrs$ を予測することができる。

Synopsis :

Method was studied to estimate the mechanical properties of UOE pipe from the flow stress of original plate under tensile testing. The tensile properties of UOE pipe and the change in Charpy fracture appearance transition temperature ($\nabla vTrs$) due to pipe forming are correlated with the stress at 4% tensile strain of the plate $\sigma_4(plate)$. The stress $\sigma_4(plate)$ is represented by the following equation: $\sigma_4(plate) = \{58.6C\% + 11.7(Si\% + Mn\% + Cr\%) + 6.76(Cu\% + Ni\%) + 29.7Mo\% + 90.1V\% + 18.0Nb^{**1/2}\% \} - 0.0586T - 0.243t + 70.1(kg/mm^{**2})$ T: Finishing temperature(°C), t: Thickness(mm) Consequently, the tensile properties of UOE pipe and the change of $\nabla vTrs$ can be estimated from $\sigma_4(plate)$ or chemical composition and the manufacturing process.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

素材の Flow Stress から UOE 鋼管の 機械的性質を推定する方法

Estimation of Mechanical Properties of UOE Pipe from
Flow Stress in Tensile Testing of Original Plate

高 田 庸*
Isao Takada

山 口 繁 之**
Shigeyuki Yamaguchi

上 田 正 雄***
Masao Ueda

Synopsis:

Method was studied to estimate the mechanical properties of UOE pipe from the flow stress of original plate under tensile testing. The tensile properties of UOE pipe and the change in Charpy fracture appearance transition temperature ($vTrs$) due to pipe forming are correlated with the stress at 4% tensile strain of the plate $\sigma_{4 (plate)}$. The stress $\sigma_{4 (plate)}$ is represented by the following equation:

$$\sigma_{4 (plate)} = \left\{ 58.6 C \% + 11.7 (Si \% + Mn \% + Cr \%) + 6.76 (Cu \% + Ni \%) + 29.7 Mo \% + 90.1 V \% + 18.0 Nb^{1/2} \% \right\} - 0.0586T - 0.243t + 70.1 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

T : Finishing temperature ($^{\circ}C$), t : Thickness (mm)

Consequently, the tensile properties of UOE pipe and the change of $vTrs$ can be estimated from $\sigma_{4 (plate)}$ or chemical composition and the manufacturing process.

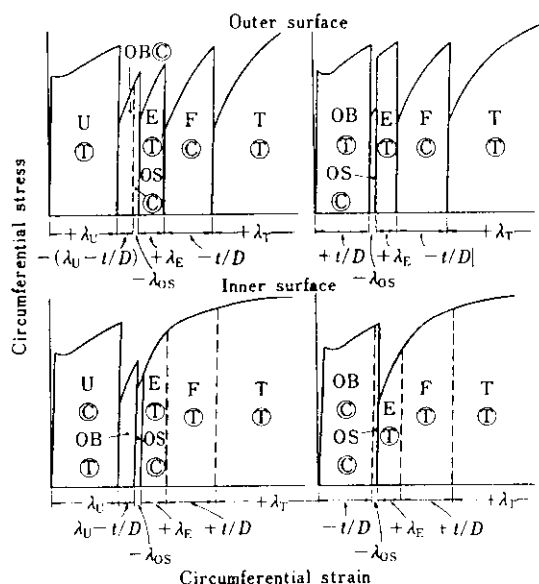
1. 緒 言

UOE 鋼管の成形工程において、材料は Fig. 1 に示される曲げ、曲げもどし、圧縮および拡張などのバウシinger効果と加工硬化が繰返される冷間加工を受けるので、その機械的性質は複雑に変化する。例えば Fig. 2 に示すように鋼管の降伏応力は素材のそれらと単純には対応しないので、素材の降伏応力から鋼管のそれらを推定する場合には大きな誤差が生じるおそれがある。そこで、鋼管用素材の品質設計のためには、成形による材質変化を定量的に把握し、鋼管の機械的性質を精度よく推定し得る素材の特性値を見出す必要がある。

今までも鋼管成形時のバウシinger効果と加工硬化を考慮して、鋼管の降伏応力を推定することが試みられ¹⁻³⁾、筆者らは素材の応力-ひずみ曲線を $\sigma = c_0 \epsilon^{n_0}$ で近似し、この係数 n_0 と c_0 を用いて UOE 鋼管の降伏応力および引張強さを計算する方式を提案してきた^{4,5)}。しかし、実際の工程試験において、すべての試片の応力-ひずみ曲線を求めるには大きな労力を必要とする。加えて現在までのところ n_0 および c_0 と化学組成および圧延条件などの製造方法との関係は明らかにされておらず、とくに c_0 は真ひずみ 1 または慣用ひずみ 1.7 という実用鋼板の伸びの 4 ~ 5 倍にあたる高ひずみに対する応力であり、 c_0 と製造方法との関連を見出すのは今後とも困難であると推察される。

* 技術研究所鋼材研究室主任研究員
*** 技術研究所鋼材研究室室長
〔昭和54年12月21日原稿受付〕

** 技術研究所鋼材研究室



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

U: U-bending, 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

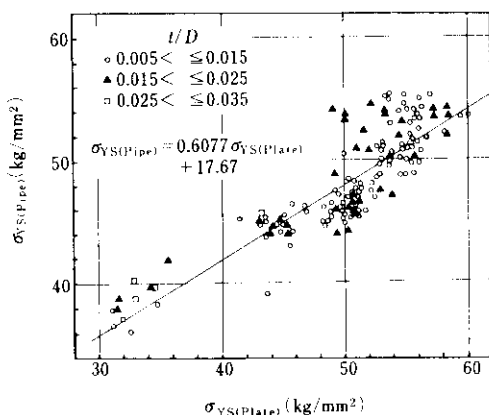


Fig. 2 Relation between yield strength $\sigma_{YS(Plate)}$ of original plate and that $\sigma_{YS(Pipe)}$ of UOE pipe

将来広範囲の素材を対象とし、その製造方法から直接鋼管の機械的性質を予測することを目指す場合、 n_0 と c_0 から推定する方式は最適ではない。

そこで、今回素材の工程試験で比較的容易に得

られ、かつ、その製造方法から予測し得る材質特性値から鋼管の機械的性質を推定する方法を検討した。

2. 鋼管素材の応力-ひずみ曲線

厚板ミルで製造された鋼管素材（板厚9～25.4 mm）の真応力-真ひずみ関係の例を Fig. 3 に示す。引張ひずみが3%以上のときに、真ひずみと真応力は直線関係になり、強度水準が高くなるほどその直線の勾配が小さくなる傾向を示す。このことは鋼管素材の応力-ひずみ曲線がいわゆる n 乗硬化式 $\sigma = c_0 \epsilon^{n_0}$ で近似され、かつその flow stress σ_F が高くなるほど n_0 が小さくなることを示している。さらに数多くの鋼管素材を対象として、引張ひずみ4%に対する応力 $\sigma_{4(Plate)}$ で σ_F を代表させ、 $\sigma_{4(Plate)}$ と n_0 との関係を調べた。その結

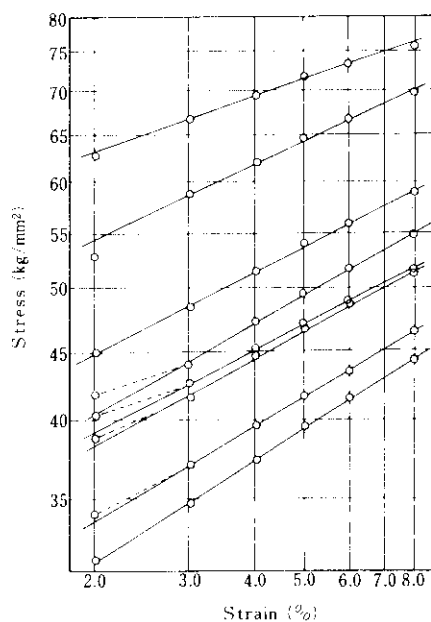


Fig. 3 Tensile stress strain relations of original plates for pipes

果を Fig. 4 に示す。ここで、 $\sigma_{4(Plate)}$ を用いたのは、まず通常のUOE成形における加工量はそれほど大きくなく、成形による材質変化を検討するには低ひずみ域（その加工量からみて8%以下）における応力-ひずみ関係がわかればよいことと、

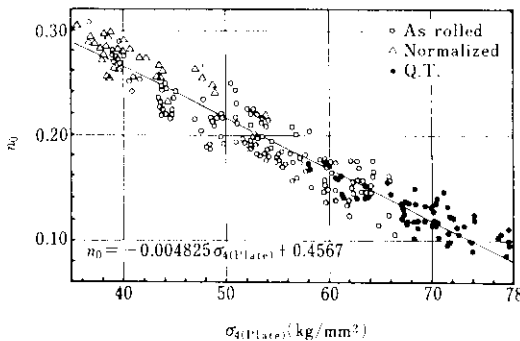


Fig. 4 Relation between stress $\sigma_4(\text{Plate})$ at 4% tensile strain and work hardening exponent n_0 of original plate

降伏伸びより小さい領域における応力とひずみの関係は Fig. 3 に点線で示すように n 乗硬化式からはずれるので、少なくとも鋼管素材の降伏伸びの最大値(約 3.5%)以上のひずみ域での flow stress を用いる必要があるためである。

Fig. 4 によると n_0 は $\sigma_4(\text{Plate})$ の増加とともに次式の関係にしたがってほぼ直線的に減少する。

$$n_0 = -0.004825 \sigma_4(\text{Plate}) + 0.4567 \quad (1)$$

ここで $\sigma_4(\text{Plate})$ は 4% 引張ひずみに対する応力であるから、(1) 式の関係性を n 乗硬化式に適用すると

$$\sigma_4(\text{Plate}) = c_0 (\ln 1.04)^{n_0} \quad (2)$$

となり、 $\sigma_4(\text{Plate})$ から (1) と (2) 式により n_0 と c_0 が求まる。(1) 式により求められた n_0 に対して、実測の n_0 は約 ± 0.02 のばらつきを有している。しかし、 $\sigma_4(\text{Plate})$ から得られる応力-ひずみ曲線は慣用ひずみ-真応力座標上の (0.04, $\sigma_4(\text{Plate})$) を必ず通り、かつ 4% 引張ひずみの近傍における n_0 の相異なる誤差は (2) 式で求まる c_0 により補正される。したがって、 $\sigma_4(\text{Plate})$ から求められた応力-ひずみ曲線はすべて低ひずみ域において実測曲線とはほぼ一致する。

(1) 式は種々の化学組成 (Si-Mn 鋼, Si-Mn-Ni 鋼, Nb 鋼, Nb-V 鋼, Nb-Mo 鋼, Nb-Cr 鋼など) を有する 9~27mm の As-rolled 材, 焼準材および焼入れ, 焼もどし材についての関係式であり、ほぼすべての鋼管素材に (1) 式の適用が可能であると考えられる。

3. 素材の $\sigma_4(\text{Plate})$ と UOE 鋼管の降伏力との関係

UOE 鋼管の降伏応力 $\sigma_{YS}(\text{Pipe})$ は n_0 と c_0 を用いて以下のように計算される⁴⁾。

今、UOE 鋼管の肉厚を t 、外径を D 、U プレス時の溶接線から 180° の位置 (この位置から引張試験片を採取することが API で規定されている) における表面の曲げひずみを λ_U (ただし、 $\lambda_U = 1.56t/D^{4/3}$)、O プレス時の圧縮率を λ_{OS} 、拡張率を λ_E とすると $\sigma_{YS}(\text{Pipe})$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_{YS}(\text{Pipe}) = & \frac{1}{2} \left\{ \frac{c' (\ln 1.005)^{n'} \cdot \{1 - n' c' (\ln 1.005)^{n'} / 0.005 E\}}{c_0 \left\{ -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(1 - \frac{t}{D} \right) \right\}^{n_0}} \right. \\ & \times c_0 \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + \frac{t}{D} + \lambda_E - \lambda_{OS} \right) \right\}^{n_0} \\ & \left. + c'' \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + 1.56 \frac{t}{D} + \lambda_E - \lambda_{OS} + 0.005 \right) \right\}^{n''} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 E : ヤング率

$$n' = n_0 \left[6.93 \left\{ \left(1 - \frac{t}{D} \right)^{2/\sqrt{3}} - 1 \right\} + 1.00 \right]$$

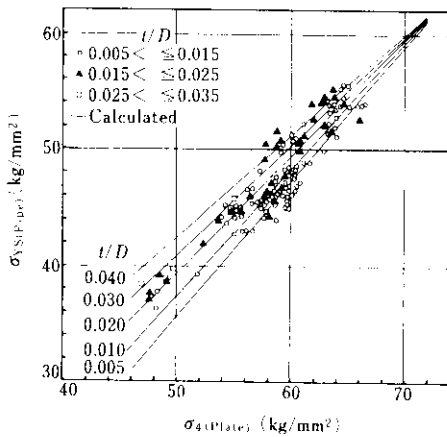
$$c' = c_0 \left[3.57 \left\{ \left(1 - \frac{t}{D} \right)^{2/\sqrt{3}} - 1 \right\} + 0.991 \right]$$

$$n'' = n_0 \left[6.93 \left\{ \left(1 - \frac{1.56t}{D} \right)^{2/\sqrt{3}} - 1 \right\} + 1.00 \right]$$

$$c'' = c_0 \left[3.57 \left\{ \left(1 - \frac{1.56t}{D} \right)^{2/\sqrt{3}} - 1 \right\} + 0.991 \right]$$

$$\lambda_E - \lambda_{OS} = 0.01 \text{ (通常 1 程における値)}$$

この実測の n_0 と c_0 の代わりに (1) 式と (2) 式より求められる n_0 と c_0 を用いることにより $\sigma_{YS}(\text{Pipe})$ は $\sigma_4(\text{Plate})$ から計算される。この $\sigma_{YS}(\text{Pipe})$ の計算値と $\sigma_4(\text{Plate})$ との関係を t/D をパラメータとして Fig. 5 に示す。 $\sigma_4(\text{Plate})$ の増加とともに $\sigma_{YS}(\text{Pipe})$ は上昇し、 $\sigma_{YS}(\text{Pipe})$ に対する t/D の影響は $\sigma_4(\text{Plate})$ の小さい領域で大きく現われている。また、Fig. 5 には API 5LX X42~X70 の外径 614~1442mm 鋼管における実測値も併せて示す。実測値は推定曲線に対して約 $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ の範囲におさまっている。

Fig. 5 Relation between $\sigma_{4(Plate)}$ and $\sigma_{YS(Pipe)}$

4. 素材の $\sigma_{4(Plate)}$ と UOE 鋼管の降伏比との関係

パイプライン用鋼管の場合、各需要家は $\sigma_{YS(Pipe)}$ の下限とともに降伏比 $YR(Pipe)$ の上限を規定してくるのが普通である。上記のように $\sigma_{4(Plate)}$ から $\sigma_{YS(Pipe)}$ が推定されるので、 $YR(Pipe)$ も同じように推定できれば、素材の品質設計は非常に容易になる。

$\sigma_{4(Plate)}$ から $YR(Pipe)$ を推定するには、 $\sigma_{YS(Pipe)}$ と引張強さ $\sigma_{TS(Pipe)}$ の両者を求めなければならない。 $\sigma_{TS(Pipe)}$ は次式において λ_T を変化させたときの見かけの応力 σ_T の最大値として求められる⁵⁾。

$$\sigma_T = \frac{1}{1 + \lambda_T} \left[\frac{1}{2} c_0 \{ \ln(1 + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T) \}^{n_0} + \int_0^{t/2} c' \left\{ \ln \left(1 + \frac{2x}{t} \cdot \frac{1.56t}{D} + \lambda_E - \lambda_{OS} + \lambda_T \right) \right\}^{n'} dx \right] \quad (4)$$

(4) 式に (1) 式と (2) 式より得られる n_0 と c_0 を代入することにより $\sigma_{TS(Pipe)}$ は $\sigma_{4(Plate)}$ から求められる。

ここで、 λ_T : 鋼管の平板化試片による引張試験時のひずみ

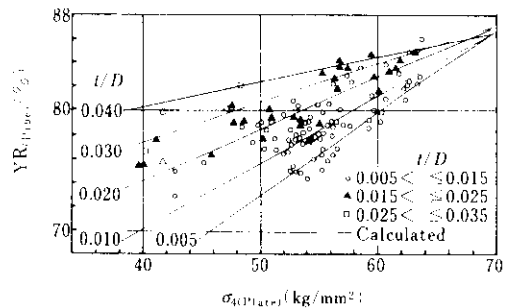
t : 鋼管の肉厚

x : 鋼管の肉厚中心層から厚さ方向への距離

$$n' = n_0 \left(-6.93 \cdot \frac{2x}{t} \cdot \frac{1.56t}{D} + 1.00 \right)$$

$$c' = c_0 \left(-3.57 \cdot \frac{2x}{t} \cdot \frac{1.56t}{D} + 0.991 \right)$$

したがって、 $YR(Pipe) = \sigma_{YS(Pipe)} / \sigma_{TS(Pipe)}$ もまた $\sigma_{4(Plate)}$ から推定される。 $YR(Pipe)$ の計算値と $\sigma_{4(Plate)}$ との関係を実測値のプロットと併せて Fig. 6 に示す。実測の $YR(Pipe)$ は推定曲線に対して絶対値で約 $\pm 3\%$ のばらつきを有している。 $\sigma_{YS(Pipe)}$ の推定値に対する実測値のばらつきが $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ 、さらに $\sigma_{TS(Pipe)}$ における実測値と推定値の誤差をも考慮すると、この程度のばらつきが生じるのはやむを得ないであろう。

Fig. 6 Relation between $\sigma_{4(Plate)}$ and yield ratio $YR(Pipe)$ of UOE pipe

5. UOE 成形による σ_4 の変化量とシャルピー破面遷移温度の変化量との関係

寒冷地ラインパイプ用鋼管の衝撃特性に対する需要家の要求は非常に厳しい。この要求に応じるためには、衝撃特性にすぐれた素材の製造法を確立させると同時に鋼管成形による衝撃特性の変化を定量的に把握しておく必要がある。筆者らは先に鋼管素材の衝撃特性におよぼす冷間加工の影響に関する調査、検討を行い、シャルピー吸収エネルギーの冷間加工による変化量はばらつきが大きく予測し難いが、破面遷移温度 ($vTrs$) の変化量 ($\Delta vTrs$) は、flow stress の変化量と直線関係にあり、素材の応力 ひずみ曲線から推定し得ることを示した⁶⁾。

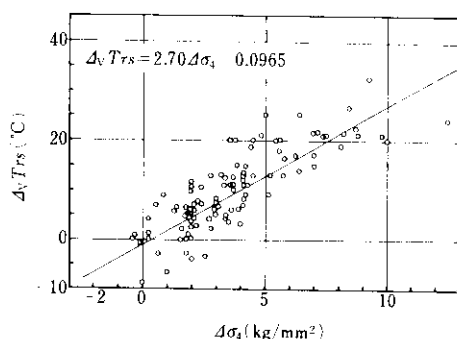
そこで、ここでは $\sigma_{YS(Pipe)}$ および $YR(Pipe)$ を推

定する場合と同じく、 $\sigma_4(\text{Plate})$ を用いて $\Delta_v Trs$ を推定する方法を検討した。

工学的なデータから得られた $\Delta\sigma_4$ と $\Delta_v Trs$ (それぞれ鋼管と素材との差) との関係を図 7 に示す。多少のばらつきは認められるが、 $\Delta_v Trs$ は $\Delta\sigma_4$ の上昇とともに次式の関係にしたがってほぼ直線的に上昇する。

$$\Delta_v Trs = 2.70\Delta\sigma_4 - 0.0965 \quad \cdots \cdots (5)$$

鋼管の平板化された試片を用いた引張試験における $\sigma_4(\sigma_4(\text{Pipe}))$ は $\sigma_4(\text{Plate})$ から (1) と (2) 式により求めた n_0 と c_0 を用い、次式により計算される⁵⁾。したがって $\Delta_v Trs$ もまた $\sigma_4(\text{Plate})$ から推定することができる。



$\Delta\sigma_4$: Difference between $\sigma_4(\text{Plate})$ and $\sigma_4(\text{Pipe})$
 $\Delta_v Trs$: Difference between Charpy fracture appearance transition temperature $vTrs(\text{Plate})$ of original plate and that $vTrs(\text{Pipe})$ of UOE pipe

Fig. 7 Relation between $\Delta\sigma_4$ and $\Delta_v Trs$

$$\begin{aligned} \sigma_4(\text{Pipe}) = & \frac{1}{2} c_0 \{ \ln(1 + \lambda_E - \lambda_{OS} + 0.04) \}^{n_0} \\ & + \int_0^{t/2} c' \left\{ \ln \left(1 + \frac{2x}{t} \cdot \frac{1.56t}{D} + \lambda_E - \lambda_{OS} \right. \right. \\ & \left. \left. + 0.04 \right) \right\}^{n_1} dx \quad \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

6. 素材における $\sigma_{YS}(\text{Plate})$ または $\sigma_{TS}(\text{Plate})$ と $\sigma_4(\text{Plate})$ との関係

$\sigma_{YS}(\text{Pipe})$, $YR(\text{Pipe})$ および鋼管成形による $\Delta_v Trs$ はすべて $\sigma_4(\text{Plate})$ から推定されるが、この推定の妥当性を評価するには、今までに製造されたできるだけ多くの鋼管に本手法を適用して検討する必要がある。しかし、素材の引張試験において今ま

でに得られている $\sigma_4(\text{Plate})$ のデータ数は試験数にくらべ少ない。そこで、ここではすべての試材について求められている $\sigma_{YS}(\text{Plate})$ または $\sigma_{TS}(\text{Plate})$ と $\sigma_4(\text{Plate})$ との関係を調べた。

$\sigma_{YS}(\text{Plate})$ と $\sigma_4(\text{Plate})$ との関係を Fig. 8 に、 $\sigma_{TS}(\text{Plate})$ と $\sigma_4(\text{Plate})$ との関係を Fig. 9 にそれぞれ示す。 $\sigma_4(\text{Plate})$ と $\sigma_{YS}(\text{Plate})$ との間には (8) 式の、また $\sigma_{TS}(\text{Plate})$ との間には (9) 式の関係がある。

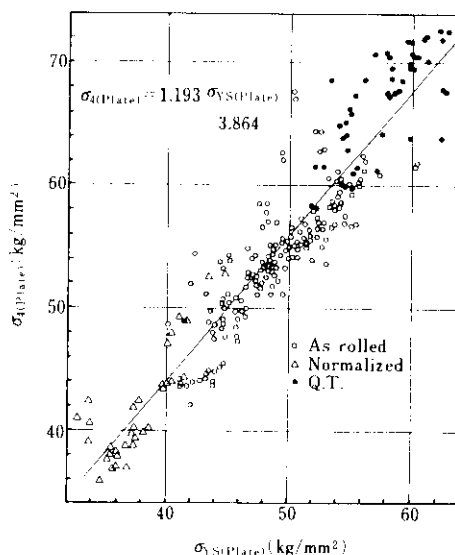


Fig. 8 Relation between $\sigma_{YS}(\text{Plate})$ and $\sigma_4(\text{Plate})$

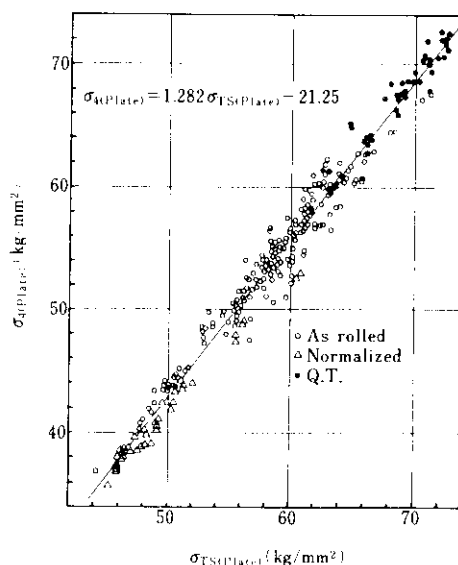


Fig. 9 Relation between tensile strength $\sigma_{YS}(\text{Plate})$ of original plate and $\sigma_4(\text{Plate})$

$$\sigma_{4(\text{Plate})} = 1.193 \sigma_{\text{YS}(\text{Plate})} - 3.864 \quad \cdots (8)$$

$$\sigma_{4(\text{Plate})} = 1.282 \sigma_{\text{TS}(\text{Plate})} - 21.25 \quad \cdots (9)$$

図より $\sigma_{\text{TS}(\text{Plate})}$ との関係のほうがはるかにばらつきが小さい。このことは σ_{YS} より σ_{TS} のほうが加工硬化域における応力-ひずみ曲線の形状と強く関係づけられることを示しており、過去すべての $\sigma_{\text{TS}(\text{Plate})}$ から (9) 式により $\sigma_{4(\text{Plate})}$ を求め、本手法により $\sigma_{\text{YS}(\text{Pipe})}$, $\text{YR}(\text{Pipe})$ および $\Delta_V T_{\text{rs}}$ を推定し、それらを実測値と対比させれば、本手法の妥当性がある程度確認されるであろう。

しかし、 $\sigma_{\text{TS}(\text{Plate})}$ から UOE 鋼管の機械的性質を精度よく推定することができるならば、工程試験の際に $\sigma_{4(\text{Plate})}$ を求める必要がなくなる。そこで $\sigma_{\text{TS}(\text{Plate})}$ から $\sigma_{\text{YS}(\text{Pipe})}$ を推定した場合の精度を以下に述べる。Fig. 5 の横軸に示す $\sigma_{4(\text{Plate})}$ を (9) 式により $\sigma_{\text{TS}(\text{Plate})}$ に変換した $\sigma_{\text{YS}(\text{Pipe})}$ の推定曲線を実測値とともに Fig. 10 に示す。推定曲

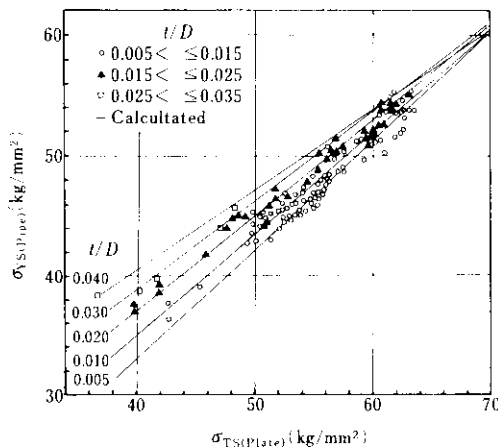


Fig. 10 Relation between $\sigma_{\text{TS}(\text{Plate})}$ and $\sigma_{\text{YS}(\text{Pipe})}$

線に対する実測値のばらつきは約 $\pm 3 \text{ kg/mm}^2$ で $\sigma_{4(\text{Plate})}$ から推定した場合の $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ より 50% 大きい。推定精度を考慮すると $\sigma_{4(\text{Plate})}$ を用いることが必要である。

7. 素材の化学組成および製造方法と $\sigma_{4(\text{Plate})}$ との関係

$\sigma_{4(\text{Plate})}$ から品質管理上必要な UOE 鋼管の材質諸特性を推定し得るが、鋼管材質に対する需要家

からの要求に応じて、適切な素材の品質設計を行うためには、最終的に素材の化学組成および製造方法と $\sigma_{4(\text{Plate})}$ との関係を明らかにする必要がある。

そこで、今までに入手し得た範囲のデータを用いて $\sigma_{4(\text{Plate})}$ と化学組成 (wt%), 圧延仕上げ温度 ($T^\circ\text{C}$) および板厚 ($t \text{ mm}$) との重相関関係を求めると、 $\sigma_{4(\text{Plate})}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_{4(\text{Plate})} = & |58.6\text{C} + 11.7(\text{Si} + \text{Mn} + \text{Cr}) + 6.76(\text{Cu} \\ & + \text{Ni}) + 29.7\text{Mo} + 90.1\text{V} + 18.0\text{Nb}|^{1/2} \\ & - 0.0586T - 0.243t + 70.1 \quad (\text{kg/mm}^2) \end{aligned} \quad \cdots (10)$$

(10) 式から計算された $\sigma_{4(\text{Plate})}$ と実測のそれらとの対比を Fig. 11 に示す。ここに用いた材料に限れば計算値は実測値によく合っている。しかし、(10) 式の関係はまだ確立されたものとは言えず、今後 $\sigma_{4(\text{Plate})}$ の測定値を増加させるとともに、広範囲の材料を対象として、加熱温度および低温域での圧下方法なども含めた素材の製造方法および化学組成と $\sigma_{4(\text{Plate})}$ との関係を明らかにしていく必要がある。

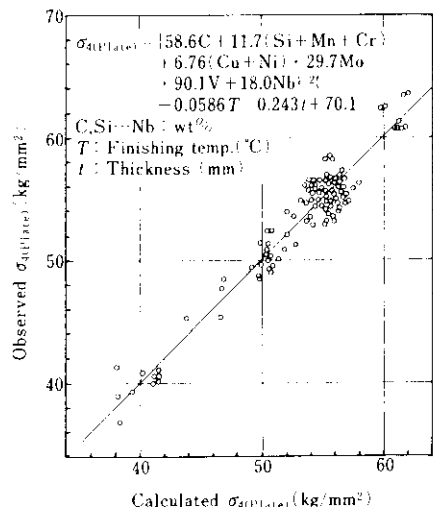


Fig. 11 Comparison between calculated $\sigma_{4(\text{Plate})}$ and observed one

8. 結 言

素材の工程試験で比較的容易に得られかつその

製造方法から予測し得る引張特性値から UOE 鋼管の機械的性質を推定する方法を検討し、つぎのことがわかった。

(1) 素材の引張試験における 4%ひずみ(このひずみは降伏伸びの最大値より大きい)に対する応力 $\sigma_{4(Plate)}$ から、鋼管の降伏応力、降伏比および成形によるシャルピー破壊遷移温度の変化量を t/D に応じて推定することができる。

(2) 本検討に用いた材料の範囲内で $\sigma_{4(Plate)}$ は化学組成 (wt%), 圧延仕上温度 ($T^{\circ}\text{C}$) および板厚 (t mm) から次式

$$\sigma_{4(Plate)} = 158.6C + 11.7(Si + Mn + Cr) + 6.76(Cu + Ni) + 29.7Mo + 90.1V + 18.0Nb^{1/2} \\ - 0.0586T - 0.243t + 70.1 \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad \dots\dots (10)$$

により予測される。

参 考 文 献

- 1) T. Taira, T. Otsuka and Y. Ishida: Mechanical Working and Steel Processing XI (Proceeding of 15th Mechanical Working and Processing Conference), (1973), 33
- 2) 中島, 菊間, 水谷, 松本: 製鉄研究, (1973) 277, 91
- 2) 長谷部, 京極, 古賀, 北川, 岡沢: 住友金属, 23 (1971) 3, 18
- 4) 高田, 杉江, 蓮野: 川崎製鉄技報, 7 (1975) 4, 1
- 5) 高田, 杉江, 蓮野: 川崎製鉄技報, 9 (1977) 1-2, 42
- 6) 高田, 片岡, 山口: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 3,