

(討-9) 熱間振り試験による変形抵抗の測定

富士製鉄, 中央研究所

○矢吹 豊・神尾 弘

Determination of Flow-Stress by Hot-Torsion Testing.

Yutaka YABUKI and Hiromu KAMIO.

1. 緒 言

熱間振り試験は他の試験法にくらべて高温, 高歪速度の試験が容易である上, 非常に大きな変形を加えることができ, また変形抵抗と同時に変形能も知ることができるなどの多くの長所があるために, かなり古くから高温での材料の加工性の測定に用いられている. しかし一方中実試験片では断面内で歪, 歪速度が一樣でないため結果の解析が面倒になつたり, また変形様式が特殊であるために生ずる欠点などがある. これらの欠点の一部は中空試験片の使用などによりさげられるが, それに伴つて別の問題も生じ, 長所の一部が失なわれる.

中実試験片の振り試験にはこのような欠点はあるが鋼種による相対的な加工性の比較とか, 最適加工温度の決定などの目的には十分であり, 実際にもそのような使い方をされることが多い. そのため試験結果を, たとえば応力-歪曲線のような普遍的な形で出していることは少ない.

ここでは以上の点に着目し, 問題を変形抵抗のみに限定し, 中実試験片による鋼の熱間振り試験結果の解析方法に検討を加え適当な仮定の下に降伏応力(変形抵抗)-歪曲線を求める実用的な計算式をみちびくとともに, 数種の鋼について実験を行ない, 他の試験法による結果との比較を試みた.

2. 理論的考察

振りトルクから剪断降伏応力を求めるには薄肉円筒の試験片を用いるか<sup>1)</sup>, わずかに径の異なる中実試験片での差をとればよいが<sup>2)</sup>, 前者では試験の複雑化, 最大歪量の低下など, 後者では誤差の増大などの欠点がある. 中実試験片では断面内で歪分布が変化する点面倒であるが, 冷間のように剪断降伏応力 $\tau$ が歪速度に無関係のときには, 振り試験結果から応力-歪曲線を求める方法はすでにとかれていて, NADAI<sup>3)</sup>が詳しくのべている.

熱間では $\tau$ は歪速度に依存するためこの方法は使えないが, この場合にも FIELDら<sup>2)</sup>はいろいろの仮定をして Al 合金についてといているが, かなり複雑な方法であり, また鋼の場合にはこの仮定は妥当でない.

鋼の熱間の変形抵抗は歪速度の $m$ 乗( $m$ は定数)に比例することは経験的によく知られている. そこでこの仮定をとり, NADAIの方法に準じてとくと, 比較的簡単な

式が得られる. いま, 記号をつぎのようにとる.

$T$ : 振りトルク,  $\theta, \dot{\theta}$ : 試料単位長さの振り角および角速度,  $a$ : 試料半径,  $r$ : 試料の任意の半径,  $\gamma, \dot{\gamma}$ :  $r$ の位置の剪断歪および歪速度,  $\gamma_a, \dot{\gamma}_a$ : 試料表面での剪断歪および歪速,  $\tau_a$ : 度試料表面の剪断降伏応力

このようにとるとつぎの関係が成り立つ

$$\gamma = r\theta, \gamma_a = a\theta, \dot{\gamma} = r\dot{\theta}, \dot{\gamma}_a = a\dot{\theta} \dots \dots \dots (1)$$

トルクはつぎの式で表わされる.

$$T = 2\pi \int_0^a \tau \cdot r^2 dr \dots \dots \dots (2)$$

仮定により,  $\tau = f(\gamma, \dot{\gamma}) = \dot{\gamma}^m f(\gamma)$  とすると(2)式は

$$T = 2\pi \dot{\theta}^m \int_0^a f(\gamma) \gamma^{2+m} d\gamma \dots \dots \dots (3)$$

$$\therefore T \cdot \theta^{3+m} = 2\pi \dot{\theta}^m \int_0^a f(\gamma) \gamma^{2+m} d\gamma \dots \dots \dots (4)$$

この式の右辺は $\gamma_a$ の関数であるから $\theta$ の関数である. そこでこの式を $\theta$ で微分し, 整理すると

$$\tau_a = \dot{\gamma}_a^m \cdot f(\gamma_a) = - \frac{1}{2\pi a^3} \left\{ \frac{dT}{d\theta} \cdot \theta + (3+m)T \right\} \dots \dots \dots (5)$$

これが求める式である. 冷間では歪速度に無関係であるから $m=0$ となり, NADAIの式になる. また熱間でも完全剛塑性体と考えれば $dT/d\theta=0$ となり, ROSSARD<sup>4)</sup>らが求めた式となる.

この式を使うためにはまず $m$ を知らねばならないが, これは振り速度を変えたときのトルクから, 次式によりあるいは図から簡単に求めることができる.

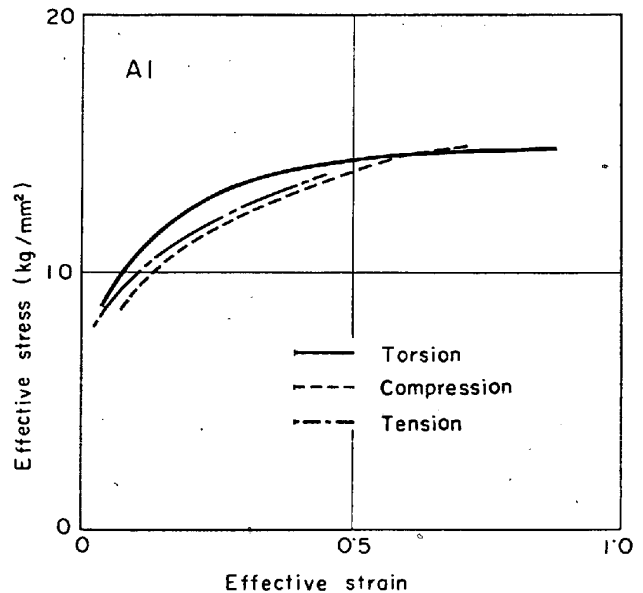


Fig. 1. Comparative tests on Al.

Table 1. Chemical composition of specimens. (%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
Mild steel	0.15	0.27	0.48	0.014	0.030	0.28					
FTW 60	0.16	0.26	1.22	0.010	0.005					0.064	
HI-Z	0.12	0.26	0.78	0.015	0.009	0.34	0.87	0.51	0.44	0.062	0.003
COR-TEN	0.10	0.42	0.42	0.080	0.009	0.30	0.37	0.74			

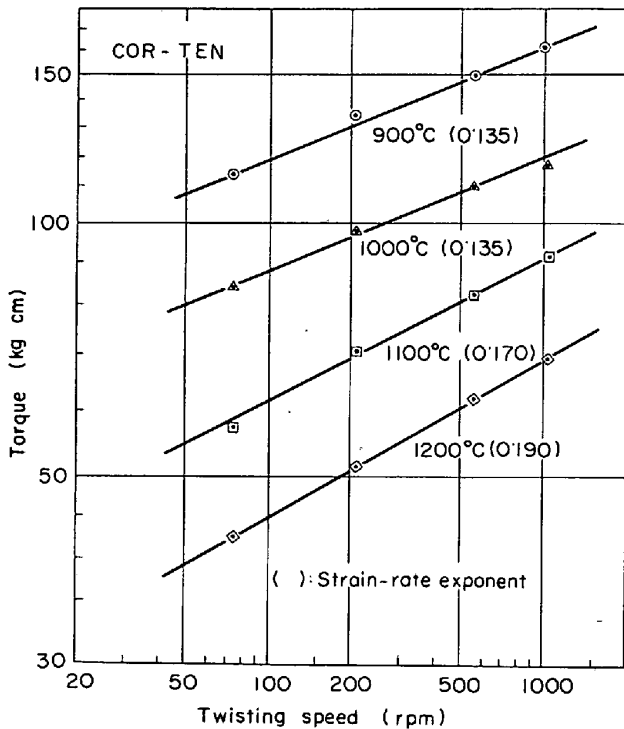


Fig. 2. Relation between twisting speed and torque of COR-TEN.

$$m = \log(T_1/T_2) / \log(v_1/v_2) \dots\dots\dots (6)$$

$T_1, T_2$  は振り速度  $v_1, v_2$  のときのトルクを表わす。

(5)式は微分項を含むので多少計算は面倒になる。しかし、一般には立上りのわずかな部分を除いては、この項の影響は小さいので、それほど計算は複雑にはならない。もちろん NADAI の図式解法を用いてもよい。

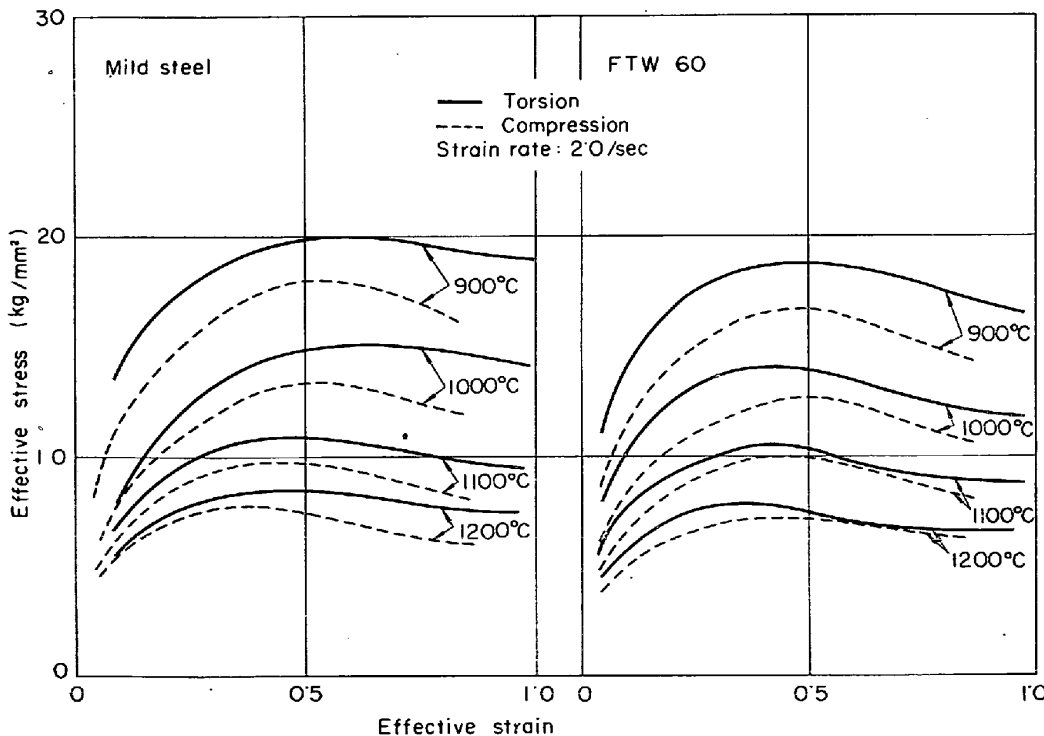


Fig. 3. Flow-curves of mild steel and FTW 60.

Table 2. Strain rate exponent, m.

Steel \ Temp. °C	900	1000	1100	1200
Mild steel	0.10	0.11	0.14	0.13
FTW 60	0.10	0.15	0.17	0.19
HI-Z	0.06	0.13	0.16	0.17
COR-TEN	0.14	0.14	0.17	0.19

このようにして歪速度  $\dot{\gamma}_a$  での応力-歪曲線が求まるので、それを目的とする歪速度の値に換算すればよい。

引張、圧縮などの他の試験法と比較するためにはさらに換算が必要である。材料を等方性と仮定すれば、その降伏条件からこれらの関係を求めることができる。いま材料の応力状態を考え、各試験での相当応力  $\bar{\sigma}$  と、相当歪  $\bar{\epsilon}$  をとると、引張と圧縮では  $\bar{\sigma} = \sigma_{max}$ ,  $\bar{\epsilon} = \epsilon_{max}$  であり、振りでは  $\bar{\sigma} = \sqrt{3} \tau_{max}$ ,  $\bar{\epsilon} = \gamma_{max} / \sqrt{3}$  となる。von Mises の降伏条件をとると、これらは等しくなるから

$$\bar{\sigma} = \sigma_{max} = \sqrt{3} \tau_{max}, \bar{\epsilon} = \epsilon_{max} = \gamma_{max} / \sqrt{3} \dots (7)$$

となる。この関係を用いて比較をすればよい。

なお、振りでは軸力が存在するが、その影響は非常に小さいので無視できる。

### 3. 試料および試験方法

試料は、冷間用として市販の Al の焼鈍材を熱間用としては Table 1 に示す組成の 4 鋼種を選んだ。

試験片の平行部は 8 mm  $\phi$   $\times$  16~30 mm $\frac{1}{2}$  で、すみ肉半径は 2 mm である。

試験機は 75~1000 rpm のもので、トルク、軸力、回転角を測定する。試験片の加熱は電気炉で行ない、温度は平行部中央に点溶接した熱電対で測定した。保持時間は 20 min である。炉中には 2 l/min の Ar を通した。

比較のために行なつた圧縮試験は、東大生研のカムプラストメータによつた。

### 4. 試験結果および考察

#### 4.1 冷間

冷間の Al では変形抵抗は歪速度の影響を受けず、加工硬化により単純に増大する。Fig. 1 は焼鈍材についての振り、圧縮および引張試験の比較結果で、かなりよい一致を示しているが、歪の小さい範囲で振りから求めた  $\bar{\sigma}$  が高めになり、文献に見られる程一致はしていない。加工材についての他の結果からみて、試料の異方性加工方法の差などがその原因と考えられる。

## 4.2 熱間

この場合にはまず  $\tau \propto \dot{\gamma}^m$  の仮定を確かめねばならない。そのためには(6)式の関係を見ればよいが、その例をFig. 2に示した。各点はよく直線にのついていて、この仮定が妥当なことがわかる。mは歪量により多少変わるがこの値は計算結果にはそれほど影響しないので、数点の平均をとれば十分である。このようにして求めたmをTable 2に示したが、全般に高温ほど大きくなり、歪速度の効果が増すことがわかる。

このmの値と、200rpmの試験値から求めた  $\bar{\sigma}-\epsilon$  曲線を、圧縮試験値とともにFig. 3

～4に示したが、両者は類似の曲線にはなるが一致しない。全般に振りが高い値になるが、高温ではかなり近づいている。差の原因としては、温度などの測定法にもとづく誤差と、変形様式の差にもとづく材質的なものがある。ここでは材料は等方性と仮定しているが、全変形過程を通じて等方性が保たれるとは考え難く、その状態が変形様式によつてかなり変わることは予想される。これが差の大きな原因と考えられる。

しかし大体の傾向は一定している上、とくに高温での試験の再現性がよいので、相対的な  $\bar{\sigma}$  の比較には十分である。この場合も軟鋼を基準にすると、振りも圧縮もほぼ同じ比率となり、これらの鋼の  $\bar{\sigma}$  が軟鋼と大差ないことがわかる。

## 5. 結 言

歪速度の影響の大きい鋼の熱間変形抵抗を、これが歪速度のm乗に比例すると仮定して、中実試験片による振り試験から求める方法をみちびき、これによつて冷間のAlと熱間の数鋼種について求めた変形抵抗を圧縮試験値と比較した。その結果、Alではかなりよい一致をみたが、熱間では応力-歪曲線の形は似ていても一致せず全体として振りから求めた値が高めであり、高温ほどその差は少なくなる。この原因は、温度などの測定上の誤差と、変形様式の差、すなわち変形過程を通じ材料の等方性は保たれるという仮定の誤りによると考えられる。しかし高温での試験の再現性もよく、他の試験にありがちなトラブルも少ないので、変形能測定の点もあわせ考え、熱間振り試験は熱間加工性の試験法としてすぐれたものといえよう。

## 文 献

- 1) F. A. HODIERNE: J. Inst. Metals, 9 (1962, 63), p. 267

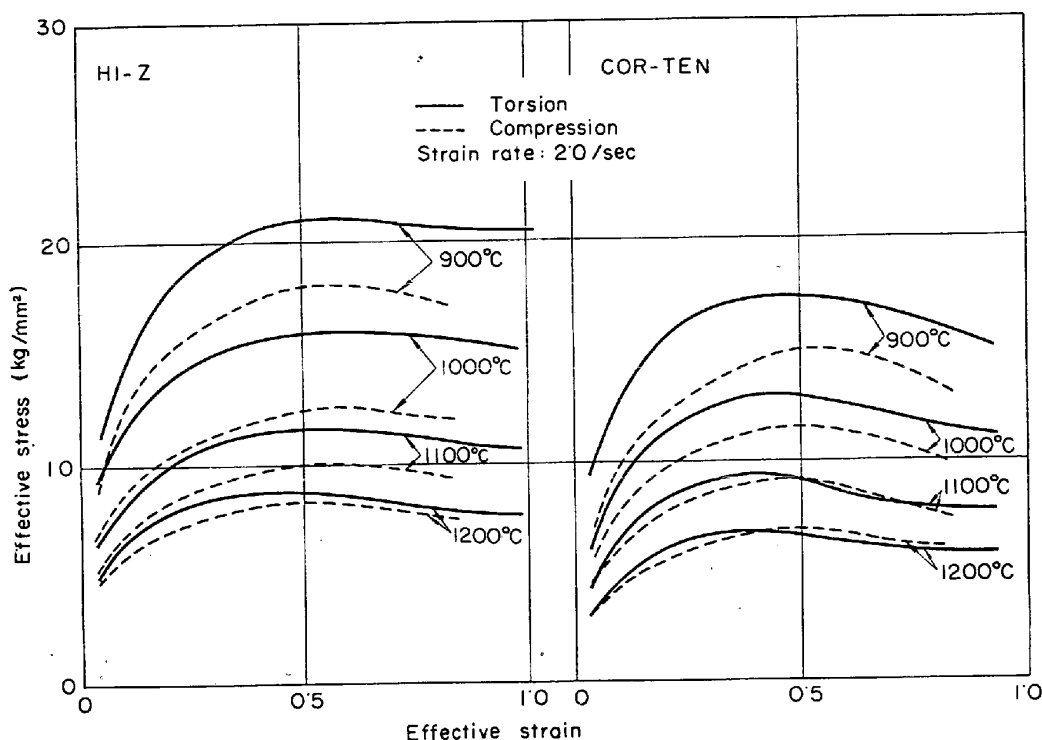


Fig. 4. Flow-curves of HI-Z and COR-TEN.

- 2) D. S. FIELDS and W. A. BACKOFEN: Proc. Amer. Soc. Test. Mat., 57 (1957), p. 1259
- 3) A. NADAI: Theory of Flow and Fracture of Solids, (1950), p. 349, [McGraw Hill]
- 4) C. ROSSARD and P. BLAIN: Publication IRSID Serie A-174, (1958)

## (討-10) 熱間振り変形様式の分類と2次応力の挙動について

日本鋼管、技術研究所○両角不二雄  
On the Classification in Hot Twist Deformation Pattern and Behaviour of Secondary Stress.

Fujio MOROZUMI.

## 1. 緒 言

熱間振り試験で得られる破断までの振り回数は、高温での加工性をよく示すといわれ、これを用いての実験が古くからなされている。しかし変形中亀裂が発生し、破断前すでに加工限度に達するものについては、この破断までの振り回数では亀裂の発生時期を知ることが困難なため加工性を十分評価することができない。振り加工限度は変形中の応力と歪みの関係によつて定まるので、振り過程で発生する軸方向の2次応力は重要な因子となることが予想される。従来、2次応力について検討した例はほとんどみられず、また文献もきわめて少ないので、筆者はこの挙動と振り変形様式について検討するとともに穿孔試験を行ない穿孔加工における2次応力の重要性について考察した。