I-56　HT-80鋼構造部材の圧縮-ねじり挙動について

大阪大学　正員　小松定夫
熊本大学　正員　○崎元達郎

1)まえがき；先に、著者らは、機械加工によるHT-80鋼管が、圧縮とねじりの組み合せ荷重を受ける場合について、実験を行ない、von Misesの降伏条件が、比較的良く合うことと、塑性ひずみが、降伏曲線に直交する方向に増大すること等を確めた。[1)] 今回は、溶接集成した正方形箱型断面について、同様の実験を行ない特に、溶接残留応力のねじり挙動に及ぼす影響について考察した。

2)供試体；材質は、NANKO-HT-80（C=0.12%，C_{eq}=0.51%）であり、図-1に寸法形状の概略を示す。供試体の断面諸元を表-1に、母材の材料試験結果を表-2に示す。四隅の溶接は、図-1(b)に示すように行ない（24V.,155A.）、溶接による残留応力を、機械的切断法により、コンタクトゲージで測定した。圧縮残留応力は、最大で$0.25\sigma_y$，平均$0.17\sigma_y$であった。測定値の分布形を、図-2に示している。

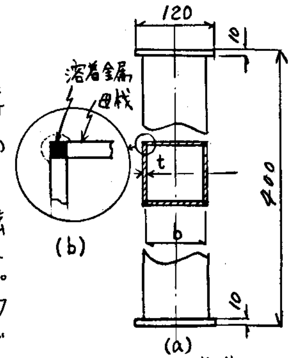

図-1 供試体

3)実験；載荷装置、測定方法については、当日、スライドにて説明する。5体の供試体について、表-3に示す載荷経路について行なった。実験結果の一部を図-4,5,6に示す。図中、$\sigma,\tau,\varepsilon,\gamma$はすべて断面について平均した応力とひずみである。図-5のθはねじり率、図-6のG_{ef}は、$T-\theta$曲線の勾配として求めた有効せん断係数とも言うべき係数である。

表-1 供試体断面諸元

供試体＼諸元	巾 b(mm)	厚さ t(mm)	断面積 A(cm²)	$2F_t$ (cm³)
HB-1	66.32	3.58	9.50	31.49
HB-2	66.10	3.50	9.27	30.64
HB-3	66.15	3.55	9.40	31.09
HB-4	66.24	3.56	9.40	31.19
HB-5	66.21	3.59	9.13	31.45

4)解析；文献2)の手法にならって、塑性増分理論とvon Misesの降伏条件を仮定して解析する。薄肉部材として取り扱えるとし、断面を一周するせん断流が存在すると考える。まず、残留応力分布を、図-3のように仮定すると、$\left(P/A+\sigma_{rc}\right)^2+3\left(\frac{T}{2b^2t}\right)^2\geq\sigma_y^2$の時、各辺の中央部に巾Cの降伏域を生じる。

$$C=b-\sqrt{\frac{(b-a)(4bt\sigma_1-P)}{2(\sigma_{rc}+\sigma_{rt})t}}\qquad ここに\quad \sigma_1=\sqrt{\sigma_y^2-3\tau^2}$$

表-2 材料試験結果

降伏応力 σ_y	引張強さ σ_B	降伏ひずみ ε_y	ひずみ硬化開始ひずみ	伸び	ヤング係数 E	せん断弾性係数 G
7980 (kg/cm²)	8492 (kg/cm²)	4040 (×10⁻⁶)	17,200 (×10⁻⁶)	19.8 (%)	2.03 (×10⁶ kg/cm²)	0.78 (×10⁶ kg/cm²)

又、平均ひずみ$\bar{\varepsilon}$は、$\bar{\varepsilon}=\frac{1}{E}\left\{\sqrt{\sigma_y^2-3\tau^2}-\sigma_r(c/2)\right\}$と表わせる。一方、塑性域の応力-ひずみ関係は、

$$\frac{d\gamma-d\tau/G}{d\varepsilon-d\sigma/E}=\frac{3\tau}{\sigma_1}$$

で与えられる。$d\varepsilon(x)=d\bar{\varepsilon}$として、

$$\frac{d\gamma}{d\bar{\varepsilon}}=\frac{1}{G}\frac{d\tau}{d\bar{\varepsilon}}+\frac{3\tau}{\sigma_1}-\frac{1}{E}\frac{3\tau}{\sigma_1}\frac{d\sigma}{d\bar{\varepsilon}}$$

となる。ここで、$E=2(1+\nu)G$, $d\sigma=-\frac{3\tau}{\sigma_1}d\tau$, $\sigma_y=\sqrt{3}k$とすると次式を得る。

$$\frac{d\gamma}{d\bar{\varepsilon}}=\left\{1+\frac{1}{2(1+\nu)}\frac{3\tau^2}{k^2-\tau^2}\right\}\frac{1}{G}\frac{d\tau}{d\bar{\varepsilon}}+\frac{3}{2(1+\nu)G}\frac{\tau}{\sqrt{3(k^2-\tau^2)}}$$

一方、薄肉理論より、そりω，扇形面積F_s，断面一周座標sとして、

$$\gamma=\frac{\partial w}{\partial s}+2\frac{\partial(\theta F_s)}{\partial s}$$

表-3 載荷径路

HB-1	$\sigma=0.83\sigma_y$なる一定圧縮における漸増ねじり
HB-2	$\tau=0.26\sigma$なる比例負荷
HB-3	$\sigma=0.69\sigma_y$なる一定圧縮における漸増ねじり
HB-4	$\tau=0.46\sigma$なる比例負荷
HB-5	単純ねじり

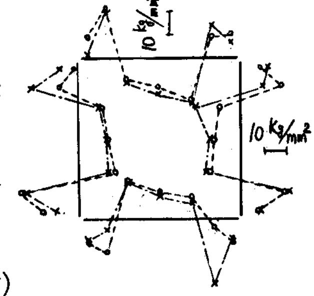

図-2 残留応力分布

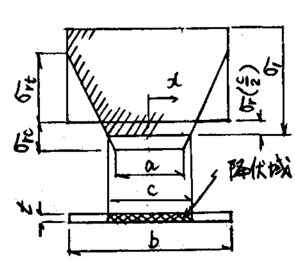

図-3 解析上のモデル化

上記の二式より、降伏域 $|x|\le c/2$ で次式が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right)+2\frac{dF_s}{ds}\frac{d\vartheta}{d\varepsilon}=\left\{1+\frac{1}{2(1+\nu)}\frac{3\tau^2}{k^2-3\tau^2}\right\}\frac{1}{G}\frac{d\tau}{d\varepsilon}+\frac{1}{2(1+\nu)}\frac{3\tau}{G\sqrt{3(k^2-\tau^2)}}$$

一方，弾性域 $c/2\le|x|\le b/2$ では，$d\tau=G\cdot d\gamma$ が成りたつから

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right)+2\frac{dF_s}{ds}\frac{d\vartheta}{d\varepsilon}=\frac{1}{G}\frac{d\tau}{d\varepsilon}$$

となる。

上の二式を全周にわたって積分し、そりの連続条件として $\oint\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right)ds=0$ を考慮して整理すると 次式を得る。

$$\frac{d\vartheta}{d\varepsilon}=\frac{\varphi}{2FG}\frac{d\tau}{d\varepsilon}+\frac{\varphi}{2F}\left[\frac{3\tau^2}{2(1+\nu)(k^2-\tau^2)}\frac{1}{G}\frac{d\tau}{d\varepsilon}+\frac{3\tau}{2(1+\nu)G\,3(k^2-\tau^2)}\right]\cdot\int_p ds$$

ここに，φは全周長，$\int_p ds$ は，降伏域における積分である。上式を，与えられた載荷径路について積分すれば変形が求まる。本実験の場合について行なった数値計算結果を，図-4, 5, 6に破線で示し，実験値と比較している。

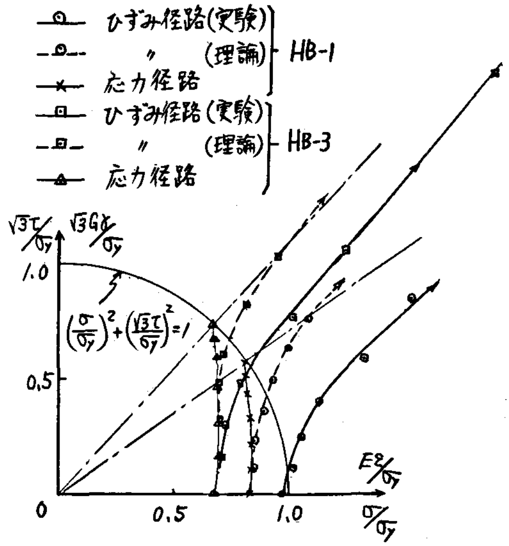

図-4 平均応力と平均ひずみの変化

5) 考察；図-4では，残留応力等の影響により，早くから塑性ひずみが生じるのが解るが，全断面が降伏に近づくと塑性ひずみ増分は，理論値で予測する降伏曲線に直交する（放射）方向に生じる。図5,6では，二種の載荷径路に対応して，ねじり剛度の変化に異った二つの傾向が現れることが解り，理論値は，これを比較的良く説明している。図-7の斜線部は，引張試験のバラツキによる降伏曲線の巾であり，実験結果は，von Misesの降伏条件によく合っている。HB-4は，最終状態でひずみの反転を確認しているので，座屈したものと考えられる。

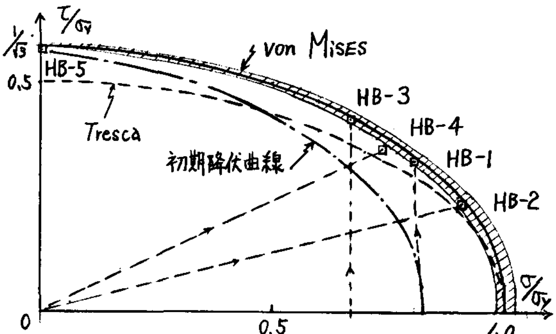

図-7 最終応力状態

供試体の製作にあたって，阪神高速道路公団とK.K.日立造船所の協力を得たことを記して謝意を表します。本研究の一部は，福岡一男君（京都市役所）が，大阪大学で行った卒業研究である。

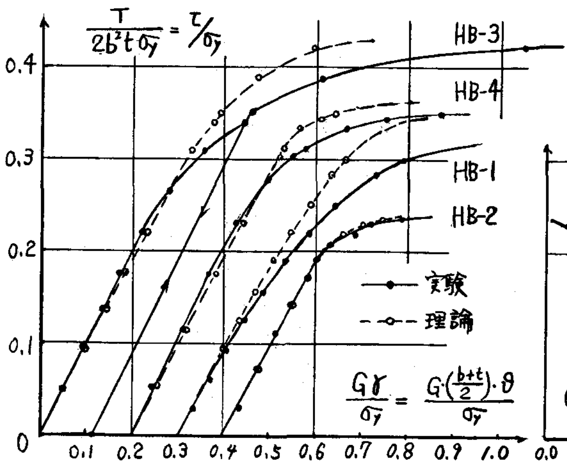

図-5 ねじり荷重－ねじり変形曲線

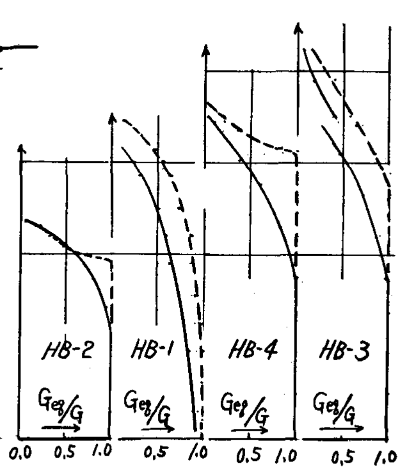

図-6 有効せん断係数

1) 小松・崎元；土木学会関西支部年次学術講演会概要 I-22 昭和48年6月

2) Hill & Siebel；「On Combined Bending and Twisting of Thin Tubes in the Plastic Range」 Phil. Mag. 42, 1951