

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第4報 縦方向にV形みぞを有する軸

機械工学科 伊藤 實, 古市 祐嗣

Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts No.4, Shafts with Longitudinal V-Notched

by Minoru ITŌ and Yuuji FURUICHI

和文概要 開き角を異にする6種類のV形みぞを持つ軟鋼軸の弾塑性振り実験を行い、振りモーメント・捩れ角線図を求め、軸に垂直な横断面のひずみ模様を検出することによって、弾性域内に発生・成長する塑性域の模様を示した。実在の軸材についての近似的な降伏点振りモーメントを求め、開き角 α の変化によって塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束の割合を示す、拘束係数を求めた。

1. 緒 言

降伏点荷重を求める問題は、材料の塑性変形機構の解明ならびに塑性設計に関する基礎的資料を得るための重要な課題である。したがって、降伏振りを受ける切欠き部材の降伏点荷重を求める問題は^(1,2)、基礎的な問題として実用上重要な研究課題である。特に実在の材料の特質を考慮に入れる場合には、実験的手段によらねばならない。さきに、円形・正方形及び長方形⁽³⁾の断面形状を有し、断面積を同一とする軟鋼軸、およびU形円周みぞ^(4,5)を有する軟鋼軸の塑性振り実験を取扱い、塑性域の発達と振りモーメントとの関係を詳細に観察して、塑性変形機構を明らかにすると共に、降伏点振りモーメントの測定を行った。

本研究では、縦方向にV形みぞを有する軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行なった。ここでは、開き角を異にする6種類の切欠き形状を選び、弾塑性振りの各段階に於ける振りモーメント・捩れ角線図を求め、開き角 90° のVみぞ試験片に対しては、塑性振りの各段階において丸軸の横断面内に生ずる塑性域の発達と振りモーメント・捩れ角との関係を明らかにした。またVみぞの形状の相違が塑性域の発達に及ぼす影響を及ぼすかを示した。さらに近似的な降伏点振りモーメントを測定し、とくに平滑試験片の場合には完全塑性材料として計算された理論値^(6,7)と比較検討し、Vみぞの形状の変化によって塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束の割合を示す拘束係数を求めた。

従来の研究としてはA. NADAI,⁽⁸⁾ J. M. カチャノフ⁽⁹⁾によりひずみ模様による類似の研究が示されているが、V形みぞを対象とした研究は見あたらないようである。本実験では本邦にて製造・市販されている実在の材料を使用してV形みぞを有する丸軸の軸に垂直な横断面に発達する塑性域の詳細な観測をなした。

2. 実験方法

2.1 試験片 素材としてはS45C引抜鋼材を熱処理(860°C 120分保持後油冷, 700°C 120分保持後空冷)したものをを用いた。この材料の化学的成分および機械的性質を表1, 2に示す。本実験では軸方向に開き角を異にする6種類のVみぞを持つ丸軸を用い、各試験片のVみぞは研磨をほどこし、Vみぞの角度とみぞ底の曲率は投影器を使用して検査し良好なものを使用した。図1に試験片の形状を示す。又、各部の称呼寸法は、図1に示す。 ℓ は標点間距離を、Lは全長で $270\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ である。

表1 化学成分(%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.48	0.29	0.78	0.020	0.021	残余

表2 機械的性質

縦弾性係数 E kg/mm ²	横弾性係数 G kg/mm ²	降伏点 σ kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	伸び ϕ ϕ %	絞り ψ %
2.12×10^4	8.43×10^3	45.7	66.2	27	63

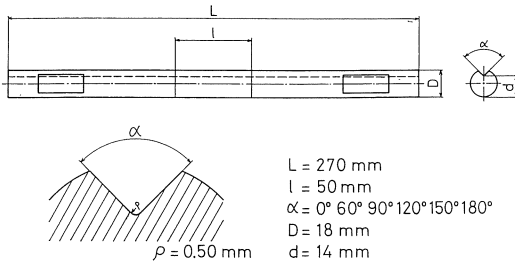


図 1 試験片の形状および称呼寸法

2.2 実験方法 実験には、容量 50Kg_mの振り重錘式振り試験機を用い、振れ角は光挺子による。荷重は手動によって静かに加え、各荷重段階における荷重速度は常に一定になるように注意した。降伏域に達するまでは荷重が一定量増加することに荷重設定を行いそのつど振れ角を測定した。降伏域がある程度広がると、試験片内に局部的にりりが著しくなるため荷重が不安定になる。この場合には荷重が安定してから、振れ角の測定をし、さらに加重を増すようにした。負荷終了は必ずみ硬化が明らかに認められる時とした。次に試験片の一部を切り取り、エッチングを施して必ずみ模様を検出した。また一部の試験片は横断面の降伏域の発達状態を観察するため適当な荷重で除荷し同様の処置を施した。

3. 実験結果および考察

Vみぞの開き角を異にする6種類の試験片を開き角 α をパラメータにとり、実験結果を示せば図2~7のような

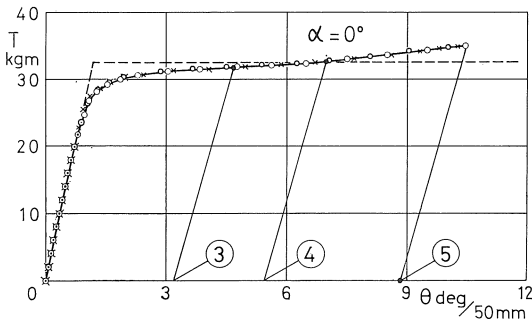


図 2 T - θ 図

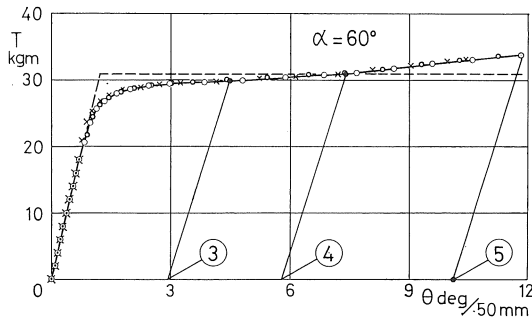


図 3 T - θ 図

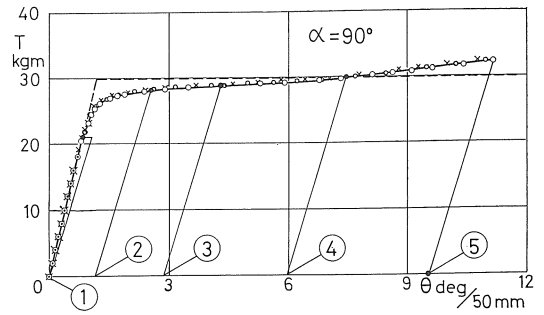


図 4 T - θ 図

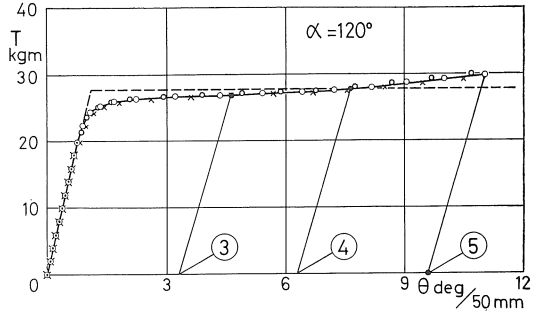


図 5 T - θ 図

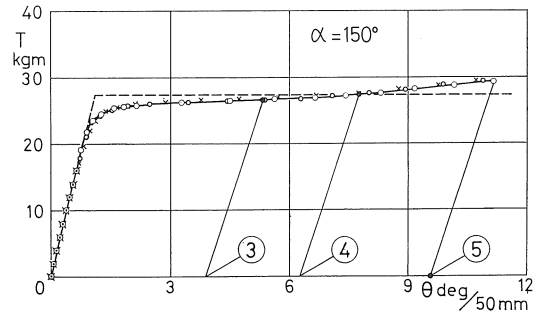


図 6 T - θ 図

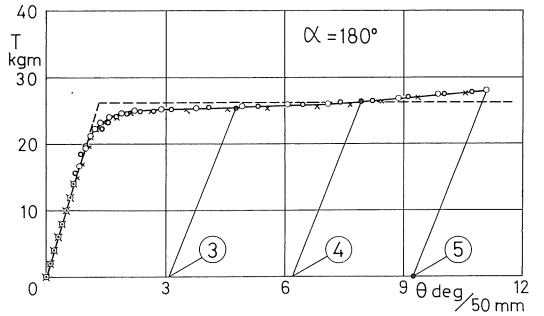


図 7 T - θ 図

振りモーメント (T) - 振れ角 (θ) 図となる。図8には平滑試験片のT- θ 図を示した。さらに、図4'に試験片の横断面の塑性域の発達模様を、図9には、Vみぞの開き角 $\alpha = 0^\circ \sim 180^\circ$ におけるT- θ 線図がわずかに傾き

を持つが、ほとんど水平に近くなった点③と降伏点荷重を示す近傍④及びひずみ硬化が明らかに認められた時点⑤の横断面のひずみ模様を示した、

3.1 T-θ 図と塑性域の発達 Vみぞの開き角 $\alpha=90^\circ$ の場合の丸軸の横断面に生ずる塑性域の発達(図4)について述べると、最初に塑性域に達するのは弾性振りにより応力が集中しせん断応力が最大となるVみぞの図心に近い点である①。振りモーメントTが増加して降伏が進むとT-θ図は直線はずれる。この段階における塑性変形は弾性変形とほぼ同じ程度の大きさとどまるものと考えられる。さらにTが増加するとみぞ底に生じ

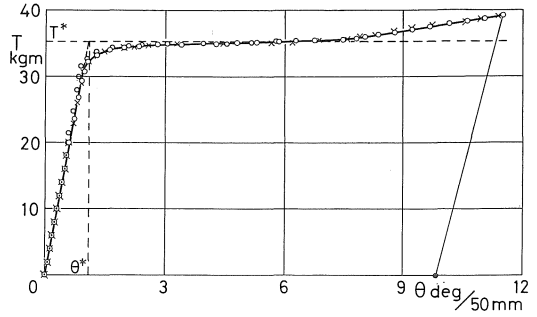


図8 平滑試験片のT-θ図

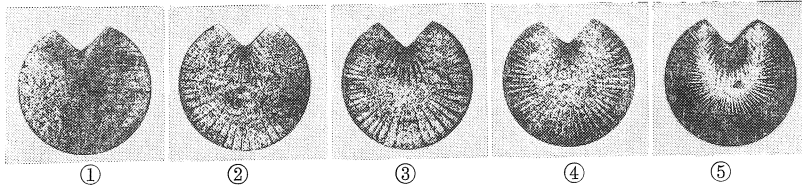


図4' $\alpha = 90^\circ$ の横断面ひずみ模様

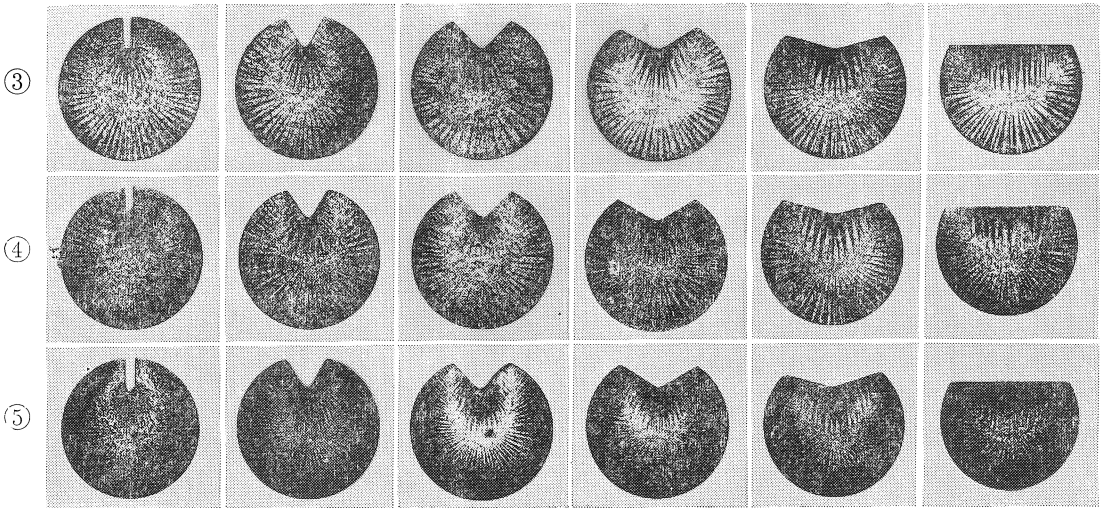


図9 試験片横断面のひずみ模様

た塑性域は巾及び数を増しながら、中心に向かって進み、他方今まで弾性状態にあった円周部分からも輪郭線に垂直に塑性域が発生し中心に向かって発達する。さらにTが増加し塑性域が発達成長するにつれて、T-θ線図は急激な曲りを示し隣接する部分に新たな二りが起こり、塑性域はくさび状となり内部に向かって進展する②。T-θ線図はわずかな傾きを持つが、ほとんど水平に近くなる③。④に達するとVみぞを持つ丸軸の表面すなわち輪郭線では応力状態は弾性変形をなす図心付近及び針状に伸びる弾性部分を除き一定降伏応力 τ_s に等しくなく、やがて表面では降伏完了点に達するものと考えられる。次の段階ではこれらの降伏完了部より硬化する

領域が発達するが、内部における降伏領域はなおも中心に向って成長し続ける。一方ひずみ硬化を伴うため、振りに対する抵抗が大きくなりθに対してはTは徐々に増加し、やがてT-θ線図の傾きは増大する。さらに荷重を増すと、くさび状に発達した塑性域は応力の不連続線を囲むわずかな弾性域を残すのみとなり、また輪郭線上及びその近傍はひずみ硬化を起した領域となるものと考えられる⑤。

3.2 降伏点振りモーメント 図4'及び図9に示す塑性域の発達の状態より④において塑性域はほぼ横断面の全域にわたって発達した状態にあることが解る。一

方図2~7の実験結果から④の点を越えて変形を進めるには、さらに大きな振りモーメントを必要とする。即ちひずみ硬化を伴うため、④の点を越えると、 $T-\theta$ 図の θ 軸に対する勾配が急に増加することが認められ④の位置は容易に求まる。かくしてひずみ硬化を起す直前、すなわち、④に対する振りモーメントは近似的に完全塑性材料に対する降伏点振りモーメント T_0 を与えるもの

表 3 降伏点振りモーメント

Dmm	T_0 kgm						
	α°	0	60	90	120	150	180
18.00		32.68	31.11	29.90	27.85	27.40	26.38

表 4 平滑試験片の降伏点振りモーメント、
振れ角、弾性的最大振れ角

D	T^*	T_{th}^*	T_{th}^* / T^*	θ^*	θ_{th}^*
mm	kgm	kgm		deg/50mm	deg/50mm
18.00	35.40	34.87	0.985	1.10	1.15

である。すなわち 図2~7に破線で示したごとく④の点を通る水平線と弾性部分の延長とを結ぶ $T-\theta$ 図は本実験で用いた軸材を完全塑性材料と考えた場合を表わすとみなしてよい。表3は $T-\theta$ 図を用いて、 V みぞを有する試験片の降伏点振りモーメント T_0 を求めたものである。平滑試験片の降伏点振りモーメント T^* および T^* によって弾性的に振られると仮定した最大振れ角 θ^* を図8から求めれば表4のようになる。無限に大きな相対的振れ角に対して現われる純塑性応力状態を仮定して計算された理論値⁽²⁾によれば、降伏点振りモーメント T_{th}^* および T_{th}^* によって弾性的に振られると仮定した振れ角 θ_{th}^* は、夫々(1)式で与えられる。

$$T_{th}^* = \frac{2}{3} \pi \kappa \left(\frac{d}{2}\right)^3, \quad \theta_{th}^* = \frac{32 T_{th}^* \ell}{\pi d^4 G} \dots (1)$$

(1)式に於て κ は塑性条件によって定まる定数であり最大せん断応力一定の条件にもとづく $\kappa = \tau_s = \sigma_s/2$ の値で計算した結果を表4に示したが、実験値とよく一致する。したがって他の V みぞを有する試験片の場合も、いちおう信頼される値であると考えられる。

3.3 拘束係数 表3の T_0 および表4の T^* の値を用いて、切欠き形状の変化によって塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束の割合、すなわち拘束係数 T_0/T^* を求め、 V みぞの開き角 α との関係を示せば図10のようになる。表3, 図10より V みぞの開き角 α が小になるにつれ

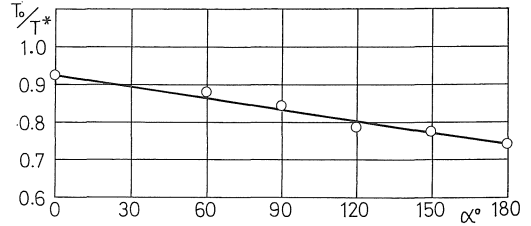


図 10 拘束係数

て、すなわち、切欠きが狭くなるに従って振りに対する抵抗が増大し T_0 は次第に T^* に接近することがわかる。

4. 結 言

V みぞを有する軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行い、 $T-\theta$ 線図を求め、丸軸の横断面のひずみ模様を検出することによって、塑性域の発達と振りモーメントとの関係を明らかにした。また、実在の軸材についての近似的な降伏点振りモーメントを求め、とくに平滑試験片の場合には、純塑性応力状態を仮定した理論との比較を行い、最大せん断応力が一定の塑性条件のもとに計算された理論値とよく合うことを明らかにした。また、塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束をあらわす拘束係数を求めた。

文 献

- 1) 山田嘉昭, 中原益次郎, 塑性学, 機械学会 (1960), P.207
- 2) B.B.ソコロフスキー, 大橋訳, 塑性学, 朝倉 (1959), P.93
- 3) 伊藤., 機械学会東海支部15期支部総会 学術講演会前刷, (昭和41—3) P.17
- 4) 伊藤., 機械学会・精機学会東海支部講演会前刷, (昭和41—10), P.1.
- 5) 伊藤., 愛知工業大学研究報告 No.7 (1972), P.175
- 6) 大久保肇, 最新材料力学, 朝倉 (1957), P.159
- 7) W. Prager & P. G. Hodge, Jr., Theory of Perfectly Plastic Solid, (Wiley, 1951) : P.G. ホッジ著, 塑性学, 丸善 (1954), 緒論及び第1章.
- 8) A. Nadai, Plasticity., (McGraw-Hill, 1931) P.156
- 9) J.I. M. カチャノフ., 大橋訳, 塑性理論の基礎, 養賢堂 (1971), P.111
- 10) 清家, 伊藤., 機械学会論文集, 28—194 (昭37—10), 1353