

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第6報 キーみぞを有する軸

伊 藤 實

Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts

No. 6, Shafts with End Milled Keyseat

Minoru ITÔ

In order to clarify the effects of notches on yielding, strain figures developed in notched shafts are observed in details during the plastic stage of elastic-plastic torsion. The test pieces used are made of 0.48% C carbon steel shafts having an end milled keyseat. The torsional moment-deflection curves are obtained throughout the elastic-plastic stage of torsion and the values of torsional moment are obtained for each notch. Constraint factors for each notch are given and the influence of the shape of notch on factors is investigated. Comparison is made with the theoretical results obtained previously in the case of yield condition of constant maximum shearing stress.

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)・長方形円周みぞ⁽⁶⁾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なった。

本研究では、軸方向に有限長さを有する End Milled Keyseat (Profiled 型) を持つ軟鋼中実丸軸の弾塑性振り実験を行なった。ここでは、キーみぞの長さ l 、およびキーみぞ底の隅の曲率半径 r を異にする 9 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・振れ角線図を求め、とくに、キーみぞの長さ $l = 6, 24$ mm のキー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キーみぞ、および近傍の軸内に生ずる塑性域の発達と振りモーメント・振れ角との関係を明らかにした。またキー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^(7,8)と比較検討し、キーみぞの形状の変化によって塑性域の発達に及ぼす塑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⁽⁹⁾、J.L.M.カチャノフ⁽¹⁰⁾によりひずみ模様による類似の研究が示されているが、キー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キーみぞを有する軸のキーみぞ、および軸内に発達する塑性域の詳細な観測を行なった。

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 分保持後空冷, 700°C 60 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。

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 Kgf/mm ² | 横弾性係数 G Kgf/mm ² | 降伏点 σ_s Kgf/mm ² | 引張強さ σ_b Kgf/mm ² | 伸び φ % | 絞り ψ % |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|----------------|
| 2.17×10^4 | 8.38×10^3 | 38.0 | 61.5 | 27.8 | 51.5 |

本実験ではキーみぞの幅(b)、深さ(t)を一定とし、キーみぞの長さ(l)、みぞ底の隅の曲率半径(r)を異にする 9

種類のキームぞを持つ丸軸を用い、各試験片のキームぞは慎重に仕上げ、みぞ底隅の曲率は投影機を使用して検査し良好なものを使用した。図1に切欠き試験片の形状を示す。

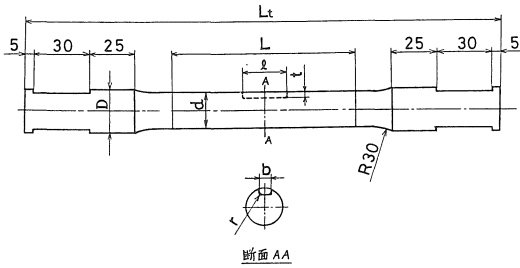


図1 キームぞを有する試験片の形状

ここに、各部の称呼寸法は

$$d = \phi 20.00 \text{ mm}, \quad D = \phi 24.00 \text{ mm}$$

$$b = 6.00 \text{ mm}, \quad t = 3.50 \text{ mm}$$

$$l = 6.00, 12.00, 24.00, 48.00, 72.00 \text{ mm}$$

$$r = 0.16, 0.25, 0.75, 1.50, 3.00 \text{ mm}$$

であり、標点間距離 $L = 100.00 \text{ mm}$ 、試験片の

$L_t = 260 \pm 0.5 \text{ mm}$ である。

2.2 実験方法

実験には、容量 $50 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ の振り重錘式振り試験機を用い、捩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配慮した。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捩れ角を測定した。降伏域がある程度広がると、試験片内に局部的なひず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、捩れ角の測定をし、さらに荷重を増すようにした。負荷終了はひ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ひずみ模様を検出した⁽¹¹⁾。また一部の試験片は軸表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

キームぞの形状を異にする9種類の試験片をキームぞの長さ l およびキームぞ底隅の曲率半径 r をパラメータ

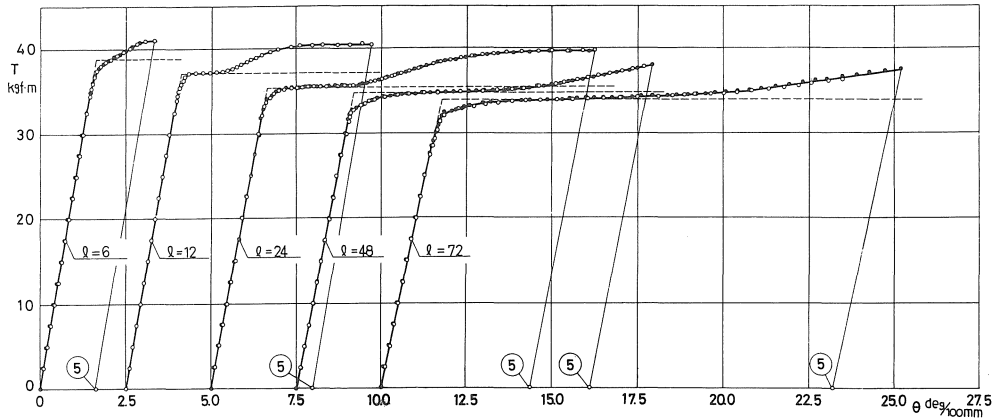


図2 T-θ 図 ($r = 0.16 \text{ mm}$)

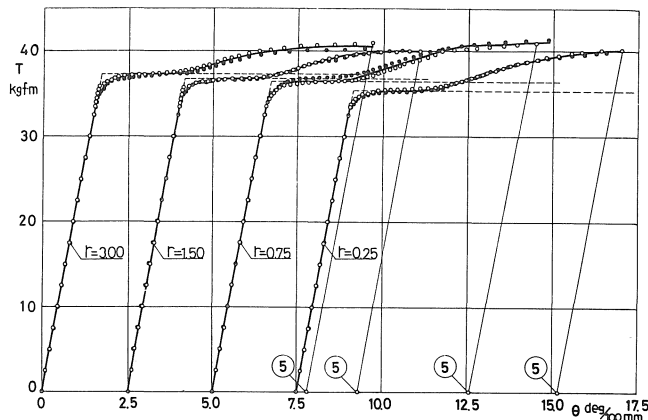


図3 T-θ 図 ($l = 24.00 \text{ mm}$)

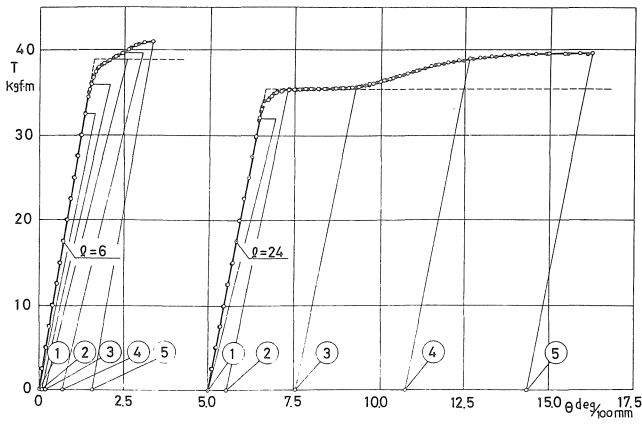


図4 T-θ 図 (r=0.16mm)

一にとり、実験結果を示せば図2~4のような振りモーメント(T)-捩れ角(θ)図となる。図5に平滑試験片のT-θ図を示した。さらに、図6~8に試験片のキズ模様

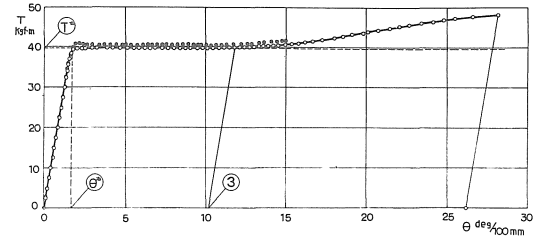


図5 平滑試験片のT-θ 図

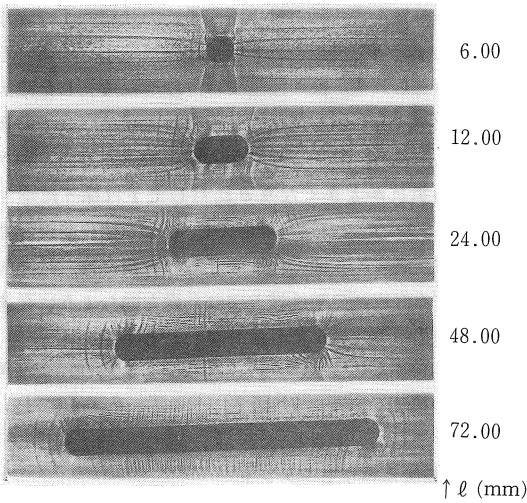
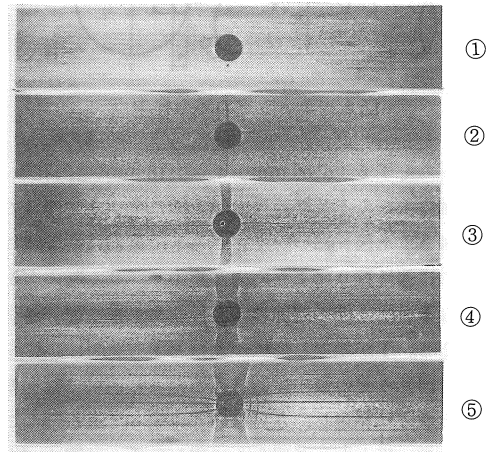


図6 ひずみ模様 r=0.16 mm



ℓ=24.00 mm : r=0.16mm

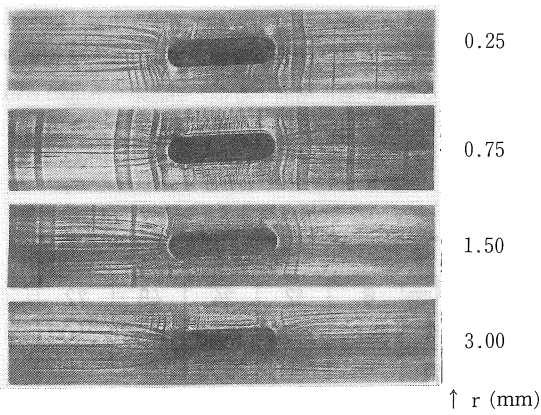


図7 ひずみ模様 ℓ=24.00 mm



ℓ=24.00 mm : r=0.16 mm

図8 ひずみ模様

を含む軸表面の塑性域の発達模様を示した。なお、 $T-\theta$ 図中の番号はひずみ模様（写真）中の番号に対応するが、いずれも負荷終了後エッチングして求めたものである。又図5の中の③は平滑試験片の近似的な降伏点振りモーメントを示す近傍の横断面のひずみ模様を求めた位置であるが詳細は文献⁽¹²⁾、図2"にゆずる。

3.1 $T-\theta$ 図と塑性域の発達

キームゾを有する試験片では、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箇所⁽¹³⁾すなわち図9である。

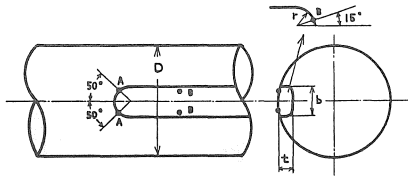


図9 キームゾの応力集中点

キームゾ： $l=6.00\text{ mm}$ ， $r=0.16\text{ mm}$ (=円孔みぞ)の丸軸のキームゾ及び近傍の軸表面に生ずる塑性域の発達(図8：上図)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箇所、即ち円孔の中心軸を含む横断面(最小)上にある。 T が増加し降伏が進むと $T-\theta$ 図は直線はずれ、円孔みぞの最小断面付近のたった領域は幅を増しながら周辺に発達し、さらに内部に向かって進む⁽¹⁴⁾、このとき、細い線となって明らかに現われる。[(図4・左②、図8・上の②)=②として表現]このことは、塑性域の発達の初期の状態を表わす。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 が増加し塑性域が発達するにつれて $T-\theta$ 図は急な曲がりを示し、隣接する部分に迂りが盛んに起り、塑性域は幅を増す。したがって、 θ の増加が著しくなり $T-\theta$ 図の曲りがゆるやかになり③に到ると、最小断面の応力状態は一定な降伏応力 σ_s に等しくなり、この時、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、楔形に成長した降伏領域が次第にその幅を増すと同時に、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 T は徐々に増加する。なお、試験片表面の円孔みぞの孔縁近傍には、軸方向に発達する直線状の塑性域および孔縁を囲むように発達する曲線状の塑性域が現われることが観察された④⑤。円孔みぞより離れたところでは、平滑試験片の軸表面のひずみ模様を示している⁽¹⁴⁾。

キームゾ： $l=24\text{ mm}$ ， $r=0.16\text{ mm}$ 試験片の塑性域の発達について述べれば、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箇所、即ちキームゾの直線縁と円弧縁との接するキームゾの縁である〔(図4・右①、図8・下の①)=①として表現〕。つぎに、 T が増加して降伏が進むと $T-\theta$ 図は弾性変形をなす直線部分からはずれる。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 を加えてゆくと $T-\theta$ 図は急に曲り、キームゾ部分の直線縁と曲線縁の接点の4ヶ所から円弧縁に沿って数を増して塑性域が発達する②。この時、 θ の増加が著しくなり曲線がゆるやかになって、水平部分に移行するようになる。さらに、 T を加えると、キームゾの最小断面の表面の輪郭線より軸中心に向っての全域にわたって、さかんに迂りが起り、従って θ の増加が著しくなり水平部分を生ずる⁽¹⁴⁾③。このとき、キームゾの直線縁を含む軸の最小断面の応力状態は、一定な降伏応力 σ_s に等しくなり、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、楔形に成長した降伏領域が次第にその幅を増すと同時に、内部に向かって楔形に進展し、他方、表面より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 T は徐々に増加し、やがて $T-\theta$ 図の傾きは増大し、ひずみ硬化曲線を描く。なお、試験片表面のキームゾ縁の近傍には、軸方向に発達する直線状の塑性域および孔縁を囲むように発達する曲線状の塑性域がそれぞれ現われる④⑤。

最終加荷重⑤除去後のキームゾを含む軸表面の塑性域の発達の模様を図6、7(図2、3の $T-\theta$ 図⑤に対応)に示す。

3.2 降伏点振りモーメント

図8に示す塑性域の発達の状態より、③においてはキームゾの最小断面(輪郭線表面も含み)はほぼ全域が塑性域に達したこと⁽¹²⁾が、ひずみ模様よりわかる。一方図2~4の実験結果から③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、③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③の点の位置は容易に求まる。かくしてひずみ硬化を起す直前、

表3 キームゾを有する試験片の降伏点振りモーメント

| | | T_0 kgf·m | | | | |
|--------|--------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| r mm | l mm | 6 | 12 | 24 | 48 | 72 |
| 0.16 | | 38.84 | 37.20 | 35.65 | 34.84 | 34.00 |
| 0.25 | | — | — | 35.70 | — | — |
| 0.75 | | — | — | 36.42 | — | — |
| 1.50 | | — | — | 36.80 | — | — |
| 3.00 | | — | — | 37.47 | — | — |

表4 平滑試験片の降伏点振りモーメント, 振れ角

| T* | T _{th} * | T _{th} */T* | θ* | θ _{th} * | θ _{th} */θ* |
|-------|-------------------|----------------------|-----------|-------------------|----------------------|
| kgf·m | kgf·m | | deg/100mm | deg/100mm | |
| 39.74 | 39.82 | 1.002 | 1.69 | 1.73 | 1.024 |

すなわち, ③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 T₀を与えるものである。すなわち図2~4に破線で示したごとく③の点を通る水平線と弾性部分の延長とを結ぶT-θ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-θ図を用いて, キーみぞを有する試験片の降伏点振りモーメント T₀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5から求めれば表4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。

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

(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 κ=τ_s=σ_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。したがって他のキー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

T-θ図により, 各試験片についての降伏点振りモーメント T₀, T*を求めこれを表3および表4に示した。キーみぞの形状の変化によって塑性域の発達におよぼす弾性域の拘束の割合, すなわち拘束係数 T₀/T*を求め, キーみぞの長さ l およびみぞ底隅の曲率半径 r の関係を図

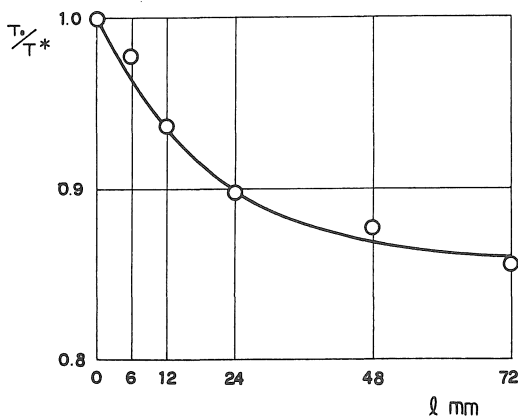


図10 拘束係数 (r=0.16mm)

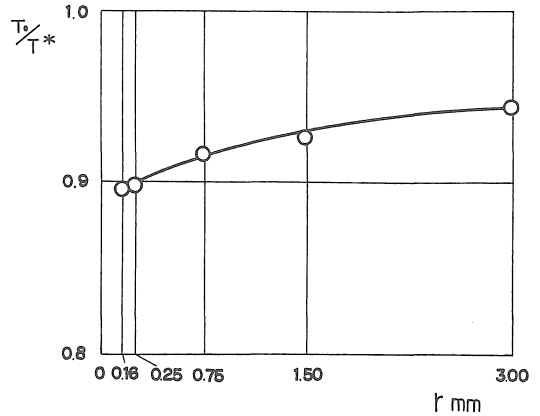


図11 拘束係数 (l=24.00mm)

10, 11 に示す。長さ l が大きくなるにつれて, 振りに対する抵抗が減少し, キーみぞを有する試験片の降伏点振りモーメント T₀は, 平滑試験片の降伏点振りモーメント T*よりはなれることが, 表3および図10よりわかる。また, 曲線半径 r が小さくなるにつれて T₀は, T*よりはなれることが表3および図11よりわかる。

4. 結 言

キーみぞを有する9種類の軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行い, T-θ図を求め, 丸軸のキーみぞを含む軸表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, 中利益次郎: 塑性学, 機械学会, 207, 1960.
- 2) B.B.ソコロフスキー: 大橋訳, 塑性学, 朝倉, 93, 1959.
- 3) 伊藤: 機械学会東海支部15期支部総会学術講演会前刷, 17, 1966.
- 4) 伊藤: 機械学会, 精機学会東海支部講演会前刷, 1, 1966.
- 5) 伊藤: 愛知工業大学研究報告 No.7, 175, 1972.
- 6) 伊藤: 愛知工業大学研究報告 No.14, 45, 1979.
- 7) 大久保 肇: 最新材料力学, 朝倉, 159, 1957.
- 8) W. Prager & P.G.Hodge, Jr: Theory of perfectly plastic solid (wiley, 1951), P.G. ホッジ著, 塑性学, 丸善, 緒論及び第1章, 1954.

- 9) A. Nadai : Plasticity, (Mcgraw Hill), 156, 1931。
- 10) JI. M. カチャノフ : 大橋訳, 塑性理論の基礎, 養賢堂, 111, 1971。
- 11) 清家, 伊藤 : 機械学会論文集, 28-194, 1353, 1962。
- 12) 伊藤 : 愛知工業大学研究報告 No.10, 89, 1975。
- 13) Peterson.R.E. : Stress Concentration Factors, 267, John Wily & Sons, New York, 1974。
- 14) 伊藤 : 愛知工業大学研究報告 No. 8, 155, 1973。

(受理 昭和56年1月16日)