

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第7報 Sled Runner Keyseat を有する軸

伊 藤 實

Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts

No.7, Shafts with Sled Runner Keyseat

Minoru ITŌ

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 0.48% C carbon steel shafts having a Sled Runner 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 the 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、降伏ねじ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⁾・End Milled Keyseat⁽⁷⁾を有する軟鋼軸の塑性ねじり実験を取扱い、塑性域の発達とねじ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、降伏点ねじ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 Sled Runner Keyseat を持つ軟鋼中実丸軸の弾塑性ねじり実験を行なった。ここでは、軸径 D およびキームぞの長さ l 、およびキームぞ底の隅の曲率半径 r を一定にする8種類の切欠き形状を選び、弾塑性ねじりの各段階に於けるねじりモーメント・ねじれ角線図を求め、とくに、キームぞの長さ $l=12\text{mm}$ のキームぞ試験片に対しては、塑性ねじりの各段階において丸軸のキームぞ、および近傍の軸内に生ずる塑性域の発達とねじりモーメント・ねじれ角との関係を明らかにした。またキーム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

点ねじりモーメントを測定し、とくに平滑試験片の増合には完全塑性材料として計算された理論値^(8,9)と比較検討し、キーム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⁽¹⁰⁾、Jl. M. カチャノフ⁽¹¹⁾によりひずみが模様による類似の研究が示されているが、キーム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ムぞを有する丸軸のキームぞ、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。

本実験ではキームぞの幅(b)、深さ(t)、みぞ底の隅の曲率半径(r)を一定とし、キームぞの長さ(l)、軸径(D)を異にする8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。

ここに、各部の称呼寸法は

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 MPa (kgf/mm ²)	横弾性係数 G MPa (kgf/mm ²)	降伏点 σ_s MPa (kgf/mm ²)	引張強さ σ_B MPa (kgf/mm ²)	伸び ϕ %	絞り ψ %
2.08×10 ⁵ (2.12×10 ⁴)	7.95×10 ⁴ (8.11×10 ³)	374 (38.2)	623 (63.6)	28.8	53.7

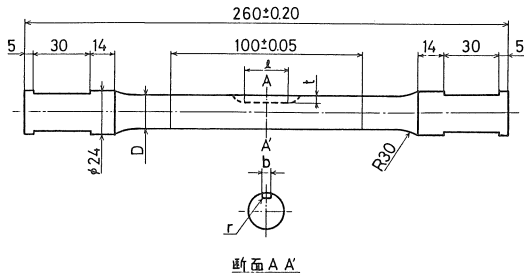


図1 キーみぞを有する試験片の形状

$D = \phi 16.00, \phi 18.00, \phi 20.00$ mm
 $b = 6.00$ mm, $t = 3.50$ mm
 $l = 0.00, 6.00, 12.00, 25.00, 50.00, 70.00$ mm
 $r = 0.16$ mm

であり、標点間距離 $L = 100.00$ mm、試験片の長さ $Lt = 260$ mm である。

2.2 実験方法

実験には、容量50kgf・mの振り重錘式振り試験機を用い、振れ角は光挺子によった。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と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、試験片内に局部的なひずみ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¹²⁾。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

キーみぞの形状および軸径を異にする8種類の試験片をキーみぞの長さ l および軸径 D をパラメーターにとり、実験結果を示せば図2～4のような振りモーメント (T)-振れ角 (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、7に試験片のキーみぞを含む軸表面の塑性域の発達模様を示した。なお、 T - θ 図中の番号はひずみ模様 (写真) 横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④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¹³⁾、図2"にゆずる。

3.1 T - θ 図と塑性域の発達

キーみぞ (Sled Runner Keyseat) 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¹⁴⁾、図8の σ_{k-max} に起因する箇所である。

キーみぞ: $l = 12.00$ mm ($D = \phi 18.00$ 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、即ちキーみぞの輪郭線と交はる (上縁の) 直線縁と Sled の (上縁の) 円弧縁との接するキーみぞの縁である。〔(図3の①, 図7の①)=①として表現〕、つぎに、 T が増加して降伏が進むと T - θ 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はほぼ同じ程度の大きさととどまるものと考えられる。さらに、 T を加えてゆくと T - θ 図は急に曲り、キーみぞ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③、さらに、 T を加えると、キーみぞ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、さかんにひずみが起り、従って θ の増加が著しくなり水平部分を生ずる¹⁵⁾④。このとき、キーみぞ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ともに、内部に向かって楔状に進展し、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 - θ 図の傾きは増大し、ひずみ硬化曲線を描く。なお、試験片表面のキーみぞ縁の近傍には、軸方向に発達する直線状の塑性域および直線縁より発達する曲線状の塑性域がそれぞれ現われる④、⑤。

最終加荷重⑥除去後のキーみぞ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 - θ 図⑥に対応) に示す。

3.2 降伏点振りモーメント

図7に示す塑性域の発達の状態より、④においてはキーみぞの最小断面 (輪郭線表面も含み) はほぼ全域が塑性域に達したこと¹³⁾が、ひずみ模様よりわかる。一方図

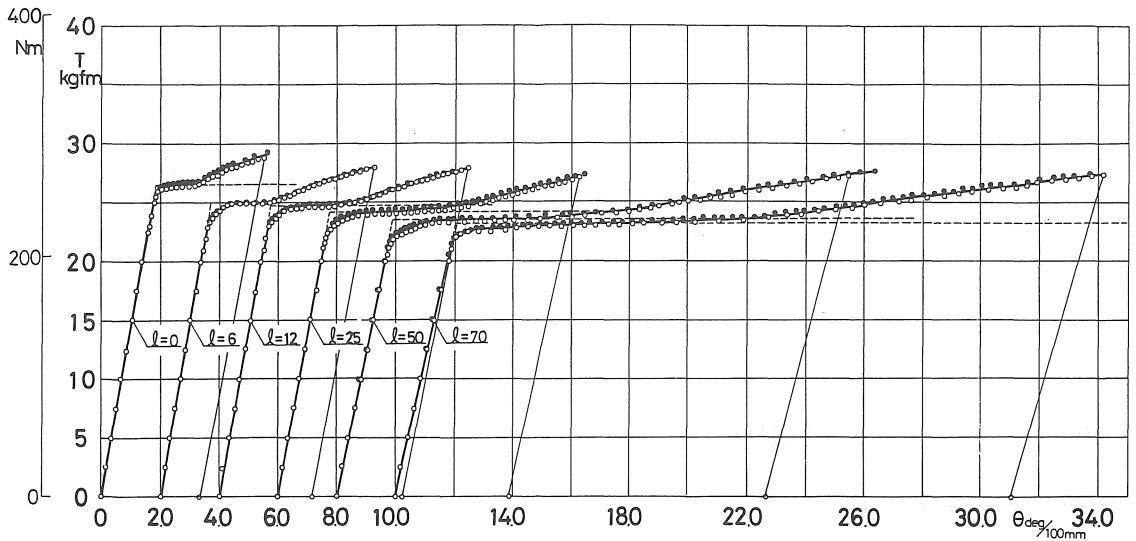


図2 T-θ図

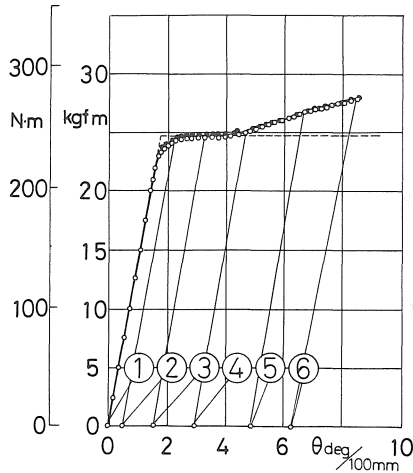


図3 T-θ図

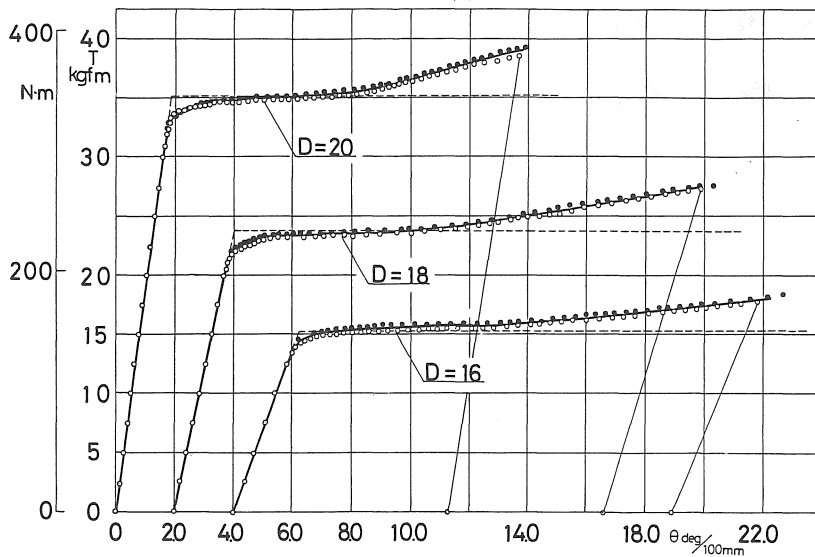


図4 T-θ図 (l=50.00mm)

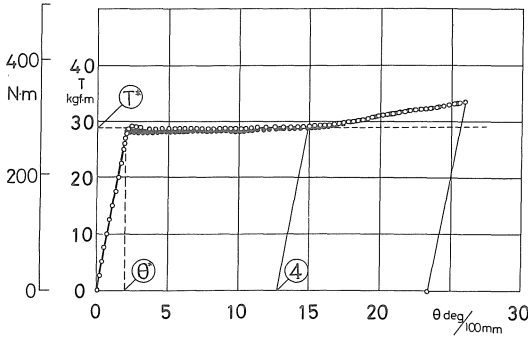


図5 平滑試験片の T-θ 図

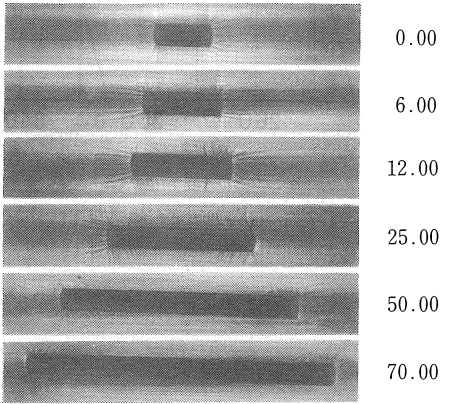


図6 ひずみ模様

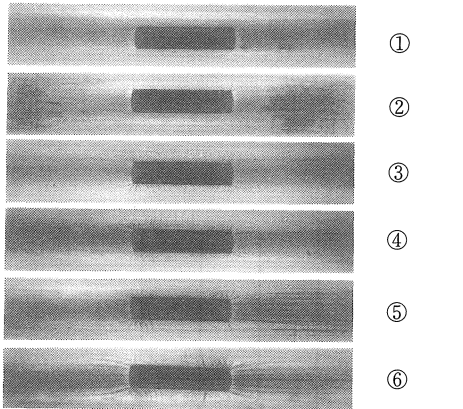


図7 ひずみ模様 ℓ=12.00mm

2～4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-θ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、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 を与えるものである。すなわち図2～4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-θ図は本実験

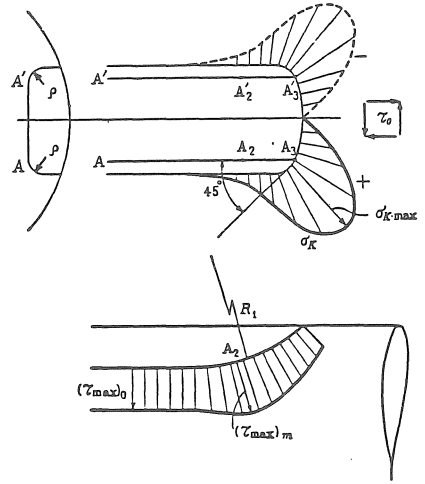


図8 キーみぞの応力分布状態

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、4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 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5から求めれば表5のようなになる。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。

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

(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 $\kappa = \tau_s = \sigma_s/2$ の値で計算した結果を表5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 T_0 、 T^* を求めこれを表3、4および表5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 T_0/T^* を求め、キーみぞの長さ ℓ および軸径 D ($\ell = 50\text{mm}$:一定)の関係を図9、10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 T_0 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9よりわかる。また、軸径 D が大きい程振りに対する抵抗は大きく、

表3 キーミゾを有する試験片の降伏点
振りモーメント (l : 変化)

		T_0 N·m (kgf·m)					
l mm D mm	0	6	12	25	50	70	
18.00	259.0 (26.43)	245.0 (25.00)	242.1 (24.70)	236.2 (24.10)	232.3 (23.70)	227.9 (23.26)	

表4 キーミゾを有する試験片の降伏点
振りモーメント (D: 変化)

		T_0 N·m (kgf·m)		
l mm D mm	16	18	20	
50.00	154.2 (15.73)	232.3 (23.70)	345.0 (35.20)	

表5 平滑試験片の降伏点振りモーメント,
捩れ角

T^* N·m (kgf·m)	T_{th}^* N·m (kgf·m)	T_{th}^*/T^*	θ^* deg/100mm	θ_{th}^* deg/100mm	θ_{th}^*/θ^*
284.2 (29.00)	285.7 (29.15)	1.005	1.97	2.00	1.015

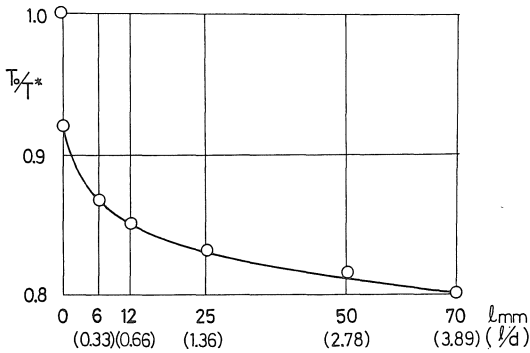


図9 拘束係数

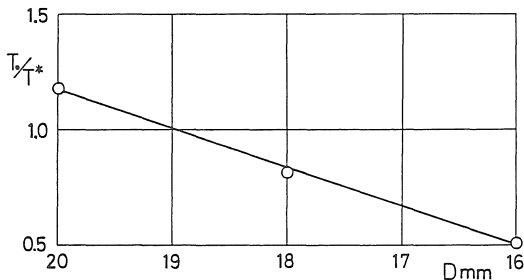


図10 拘束係数

その変化はほぼ直線的であることが表4および図10よりわかる。

4. 結 言

キーミゾを有する8種類の軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行い、 $T-\theta$ 図を求め、丸軸のキーミゾ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, 中原益次郎: 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) 伊藤: 愛知工業大学研究報告 No.16, 55, 1981.
- 8) 大久保 肇: 最新材料力学, 朝倉, 159, 1957.
- 9) W. Prager & P. G. Hodge, Jr: Theory of Perfectly Plastic Solid (Wiley, 1951), P. G. ホッジ 著, 塑性学, 丸善, 緒論および第1章, 1954.
- 10) A. Nadai: Plasticity, (McGraw-Hill), 156, 1931.
- 11) И. М. Качанов: 大橋訳, 塑性理論の基礎, 養賢堂, 111, 1971.
- 12) 清家, 伊藤: 機械学会論文集, 28-194, 1353, 1962.
- 13) 伊藤: 愛知工業大学研究報告 No.10, 89, 1975.
- 14) 西田正孝: 応力集中, 森北, 662, 1973.
- 15) 伊藤: 愛知工業大学研究報告 No. 8, 155, 1973.

(受理 昭和58年1月16日)