

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第8報 Sled Runner Keyseat を有する軸（その2）

伊 藤 實

Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts

No. 8, Shafts with Sled Runner Keyseat (Part 2)

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 0.48% C carbon steel shafts having a Sled Runner keyseat ; keyseat fillet, with keyseat end away from shoulder fillet ; and with n Sled Runner keyseats. 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⁾・End Milled Keyseat⁽⁷⁾・Sled Runner Keyseat⁽⁸⁾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、文献(8)と軸径Dを異にし、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振り実験を行った。ここでは、軸径Dおよびキームぞの幅b、深さt、およびキームぞ底の隅の曲率半径rを一定とし、キームぞの長さ ℓ 、キームぞの条数nおよび段付軸間距離 L_r をそれぞれ

$0.00\text{mm} \leq \ell \leq 70.00\text{mm}$, $1 \leq n \leq 6$, $L_r = 80.00\text{mm}$ の範囲で変えて15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、とくに、キームぞの長さ $\ell = 12\text{mm}$ のキームぞ試験片に

対しては、塑性振りの各段階において丸軸のキームぞ、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・捩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^(9,10)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⁽¹¹⁾, JI. M. カチャノフ⁽¹²⁾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℃・120分保持後空冷、700℃・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。

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)および軸径(D)を一定とし、キームぞの長さ(ℓ)、キームぞの条数(n)および段付軸間距離(L_r)を異

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 MP _a (kgf/mm ²)	横弾性係数 G MP _a (kgf/mm ²)	降伏点 σ_s MP _a (kgf/mm ²)	引張強さ σ_B MP _a (kgf/mm ²)	伸び δ %	絞り φ %
2.06×10^5 (2.10×10^4)	7.95×10^4 (8.11×10^3)	374 (38.2)	623 (63.6)	28.8	53.7

にする15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1~3に切欠き試験片の形状を示す。

ここに、各部の称呼寸法は

$D = \phi 20.00\text{mm}$

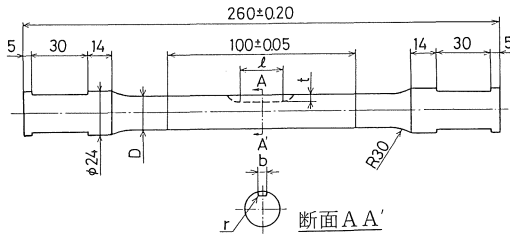


図1 キームぞを有する丸軸試験片の形状

$b = 6.00\text{mm}, t = 3.50\text{mm}, r = 0.16\text{mm}$

$l = 0.00, 6.00, 12.00, 25.00, 50.00, 70.00\text{mm}$

$L_r = 80.00\text{mm}$

であり、標点間距離 $L = 100.00\text{mm}$ 試験片の長さ $L_t = 260\text{mm}$ である。

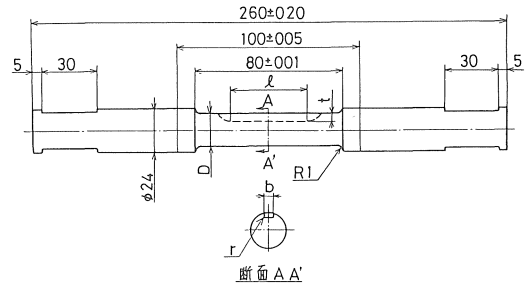


図2 キームぞを有する段付丸軸試験片の形状

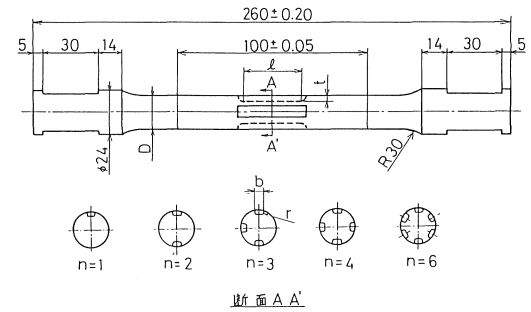


図3 多条キームぞを有する丸軸試験片の形状

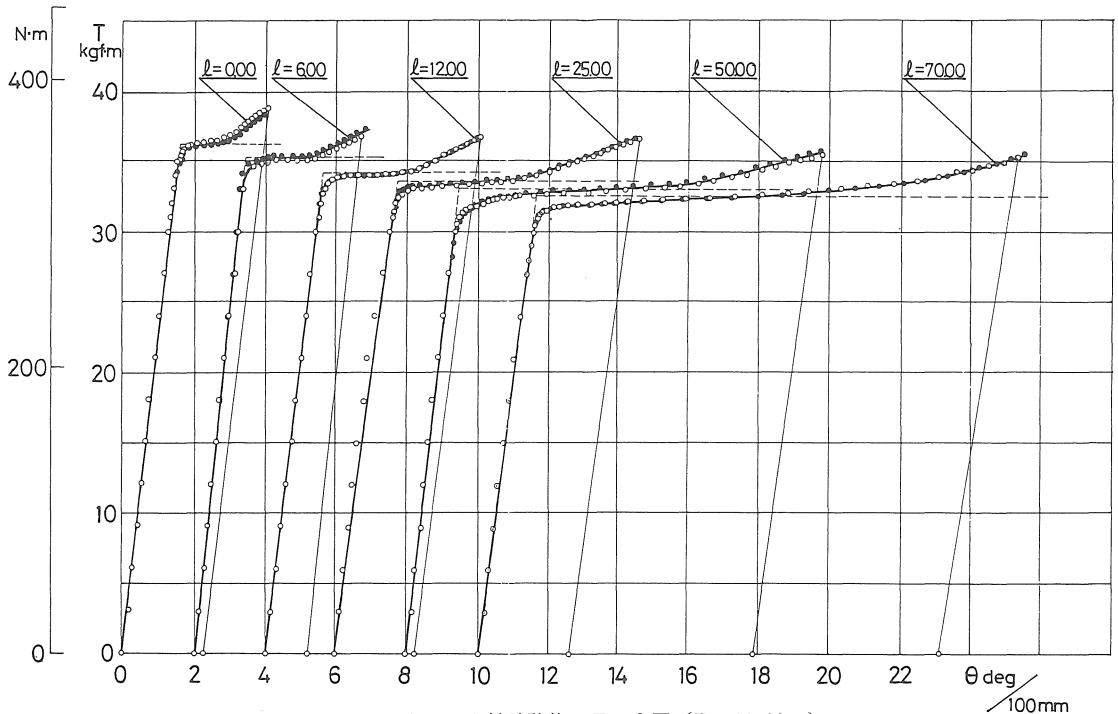


図4 キームぞを有する丸軸試験片のT-θ図 (D=20.00mm)

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、捩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

加するご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ねじ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

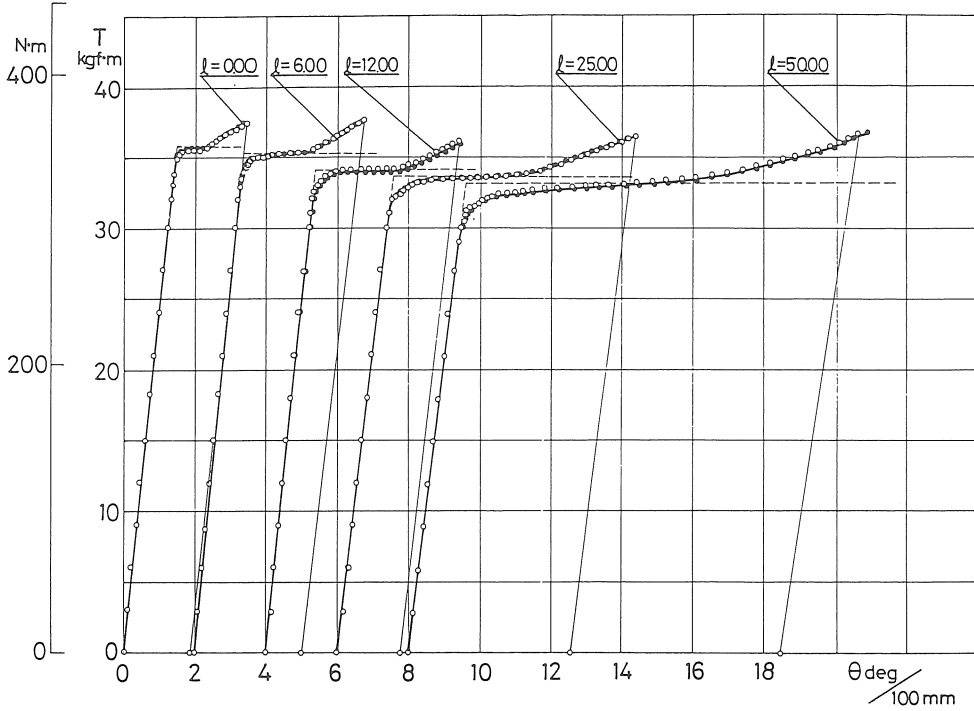


図5 キーみぞを有する段付丸軸試験片の T-θ 図 ($D: 20.00\text{mm}$
 $L_f: 80.00\text{mm}$)

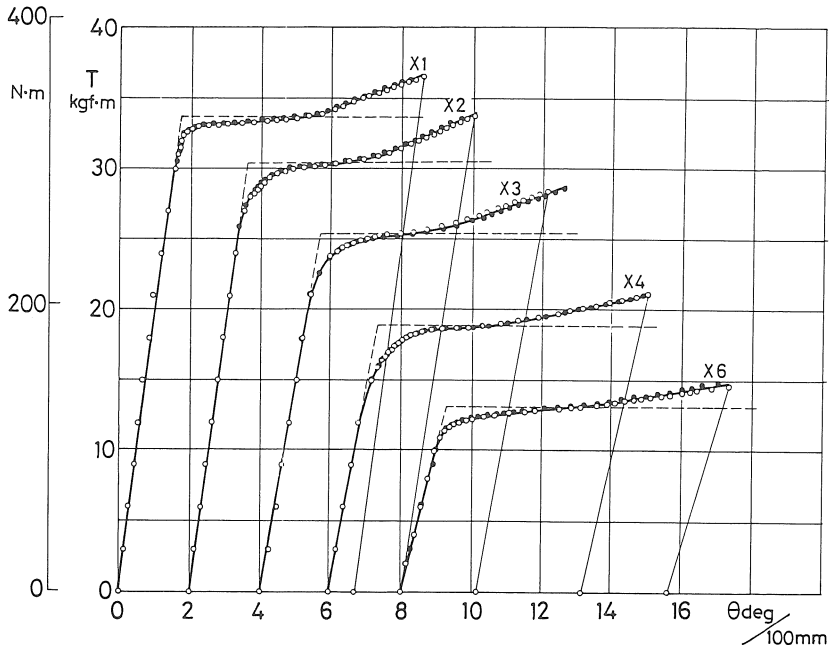


図6 多条キーみぞを有する丸軸試験片の T-θ 図 ($D=20.00\text{mm}$
 $l=25.00\text{mm}$)

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⁽¹³⁾。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

Sled Runner Keyseat を有し、同一軸径 D を持つ丸軸試験片、段付丸軸試験片および多条丸軸試験片のキームぞの長さ l および条数 n をパラメータにとり、15種類の試験片の実験結果を示せば図4～7のような振りモーメント (T)—振り角 (θ) 図となる。図8に平滑試験片の T - θ 図を示した。さらに、図9～12に試験片のキーム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) 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8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⁽¹⁴⁾、図2'にゆずる。

3.1 T - θ 図と塑性域の発達

文献(8)と軸径 D を異にし、軸方向に有限長さのキームぞ (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⁽¹⁵⁾、図13の σ_{k-max} に起因する箇所である。

キームぞ: $l = 12.00\text{mm}$ ($D = \phi 20.00\text{mm}$) 試験片の

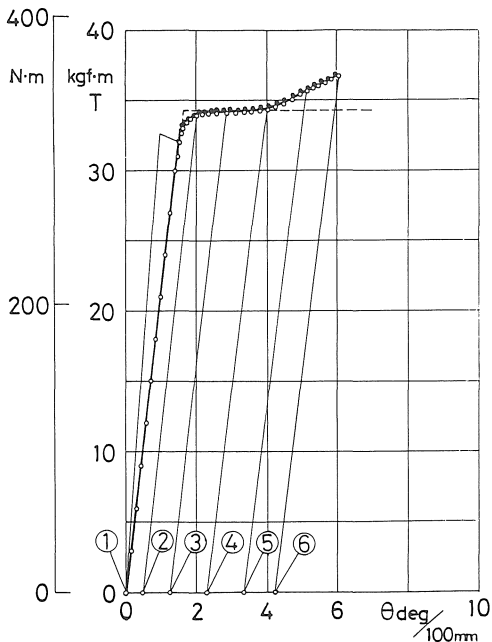


図7 キームぞを有する丸軸の T - θ 図 (ひずみ模様と対比: $l = 12.00\text{mm}$)

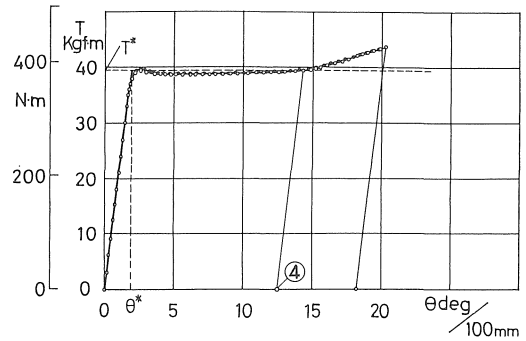


図8 平滑試験片の T - θ 図 ($D = 20.00\text{mm}$)

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ムぞの縁である〔図7の①、図12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 - θ 図は急に曲り、キーム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。このとき、文献(8)と軸径 D (増大) を異にした差異により、発生発達する塑性域が軸方向に傾いている。このことは軸径を異にする周辺の弾性域の増大に起因するものと思われる。また、 T の増加とともに、 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、キームぞの最小断面の表面の輪郭線より軸中心に向か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⁽¹⁶⁾④。このとき、キーム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 τ_0 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 (軸中心) 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、試験片表面のキームぞ縁の近傍には、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除去後のキームぞを含む軸表面の塑性域の発達の模様を図9～12(図4～7の T - θ 図⑥に対応) に示す。最終荷重除去後の Sled Runner Keyseat を含む最小断面の表面は塑性域中に硬化域が発達して T - θ 線

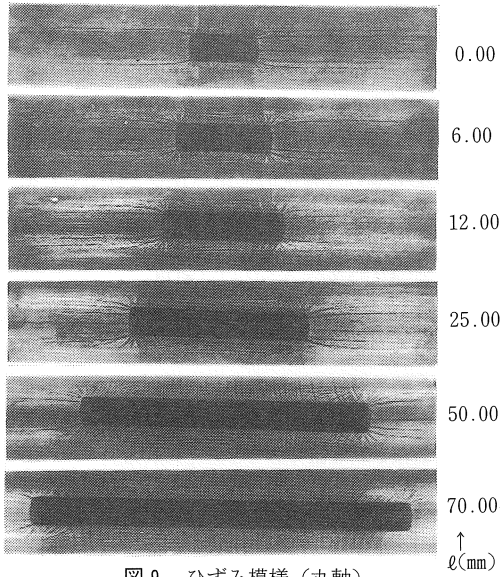


図9 ひずみ模様 (丸軸)

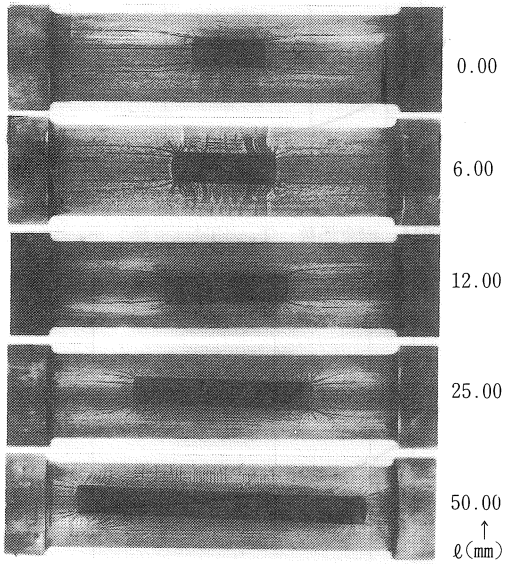


図10 ひずみ模様 (段付丸軸)

図が硬化曲線を描くが, Keyseat の sled の立上り端の輪郭線表面では弾性域が拡がり, わづかに軸方向に直線状の塑性域が生じている。弾塑性ねじりによる変形挙動はほとんど Keyseat の切欠きを含む軸内で行われていることが判る。さらに, 図5の $T-\theta$ 図は段付丸軸試験片 L_r ($= 80.00\text{mm}$) を一定とし, キーみぞの長さ l をパラメータにとってあらわしたもので図10はその場合の最終荷重除去後のひずみ模様を示し, 図6の $T-\theta$ 図はキーみぞの長さ l ($= 25.00\text{mm}$) を一定として, キーみぞの条数 n をパラメータにとってあらわした多条 (キーみぞを持つ) 丸軸試験片に対するもので図11はその場合の最終荷

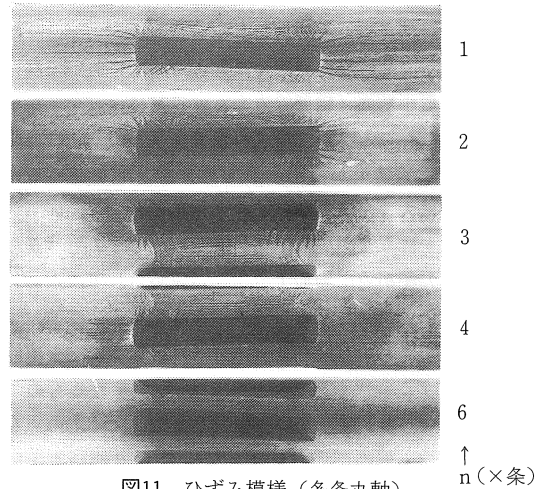


図11 ひずみ模様 (多条丸軸)

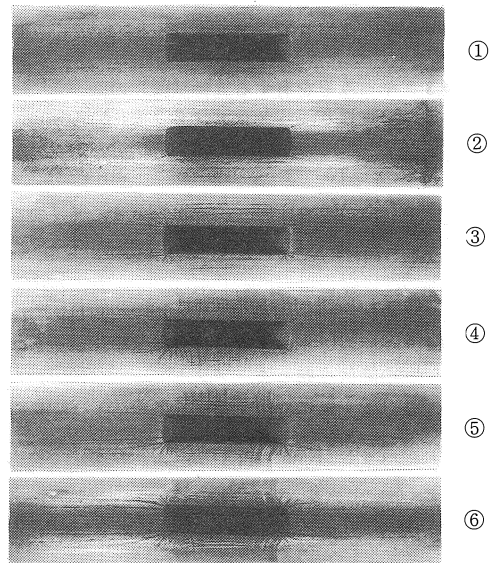


図12 ひずみ模様の発達 (丸軸) $l = 12.00\text{mm}$

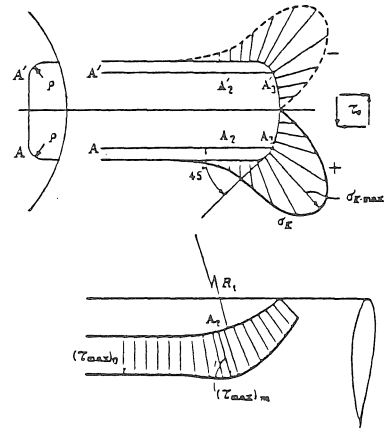


図13 Sled Runner Keyseatの応力分布状態

重除去後のひずみ模様を示したものである。

3.2 降伏点振りモーメント

図12に示す塑性域の発達の状態より、④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⁽¹⁴⁾が、ひずみ模様よりわかる。一方図4～7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-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T₀を与えるものである。すなわち図4～7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-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3～5はT-θ図を用いて、キームゾ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

表3 キームゾを有する丸軸試験片の降伏点振りモーメント (ℓ:変化)

ℓ/mm Dmm	T ₀ N・m (kgf・m)					
	0	6	12	25	50	70
20.00	356.5 (36.35)	342.7 (34.95)	336.1 (34.35)	326.1 (33.25)	321.2 (32.75)	317.7 (32.40)

表4 キームゾを有する段付丸軸試験片の降伏点振りモーメント (ℓ:変化, L_r:一定)

ℓ/mm Dmm	T ₀ N・m (kgf・m)				
	0	6	12	25	50
20.00	357.7 (36.50)	344.0 (35.10)	337.1 (34.40)	329.8 (33.65)	323.4 (33.00)

表5 多条キームゾを有する丸軸試験片の降伏点振りモーメント (n:変化, ℓ:一定)

Dmm	n	T ₀ N・m (kgf・m)				
		1	2	3	4	6
20.00		326.1 (33.25)	297.9 (30.40)	249.4 (25.45)	183.3 (18.70)	125.9 (12.85)

表6 平滑試験片の降伏点振りモーメント振れ角

T・N・m (kgf・m)	T _{th} ・N・m (kgf・m)	T _{th} */T*	θ* deg/100mm	θ _{th} * deg/100mm	θ _{th} */θ*
387.4 (39.50)	392.1 (39.98)	1.012	1.83	1.80	0.984

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6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。

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

(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6に示したが、実験値とよく一致する。したがって他のキームゾ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。

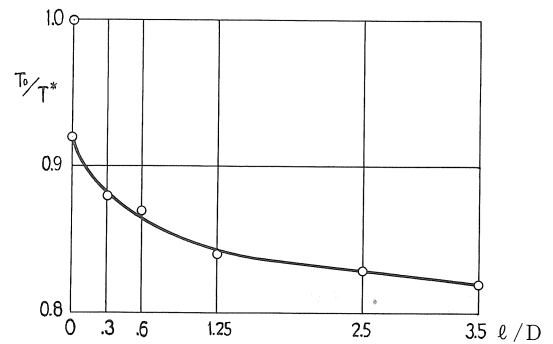


図14 拘束係数 T₀/T* (丸軸)

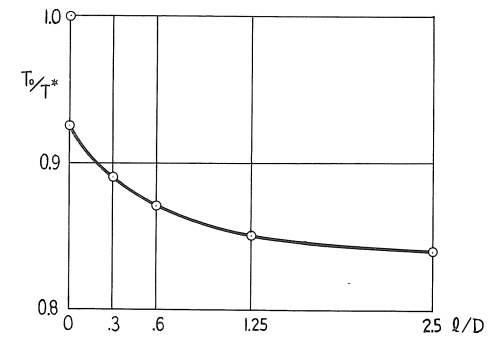


図15 拘束係数 T₀/T* (段付丸軸)

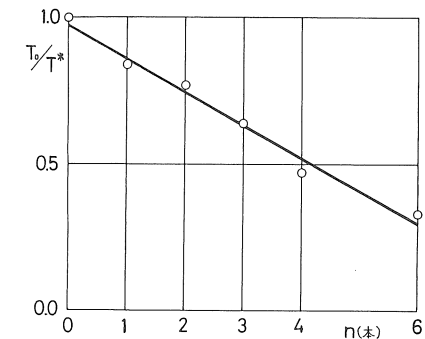


図16 拘束係数 T₀/T* (多条丸軸)

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 3～5 および表 6 に示した。キームぞを有する切欠試験片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、キームぞの長さ l と軸径 D との比 l/D およびキームぞの条数 n ($l = 25\text{mm}$:一定) の関係を図 14～16 に示す。 l/D が大きくなるにつれて、振りに対する抵抗が减小し、キーム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, 4 および図 14, 15 よりわかる。また、キームぞの条数 n が多い程振りに対する抵抗は小さく、その変化はほぼ直線的であることが表 5 および図 16 よりわかる。

4. 結 言

キームぞの幅 b , 深さ t , みぞ底の曲率半径 r , 軸径 D を一定とし、キームぞの長さ l , 段付軸間距離 L_r をそれぞれ $0.00\text{mm} \leq l \leq 70.00\text{mm}$, $L_r = 80.00\text{mm}$ および $1 \leq n \leq 6$ の範囲で変えた、キームぞを有する 15 種類の軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行い、T- θ 図を求め、丸軸のキーム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) 伊藤: 愛知工業大学研究報告No.18, 87, 1983.
- 9) 大久保 肇: 最新材料力学, 朝倉, 159, 1957.
- 10) 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.
- 11) A. Nadai: Plasticity, (McGraw-Hill), 156, 1931.
- 12) JI. M. カチャノフ: 大橋訳, 塑性理論の基礎, 養賢堂, 111, 1971.
- 13) 清家, 伊藤: 機械学会論文集, 28-194, 1353, 1962.
- 14) 伊藤: 愛知工業大学研究報告No.10, 89, 1975.
- 15) 西田正孝: 応力集中, 森北, 662, 1973.
- 16) 伊藤: 愛知工業大学研究報告No.8, 155, 1973.

(受理 昭和59年1月17日)