

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第10報 Keyseatを有する軸 (その2)

Plastic Torsion Test with Mild Steel Shafts

No. 10 Shafts with Keyseat (Part-2)

伊 藤 實
Minoru ITO†

Abstract 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 0.36% C carbon steel shafts having a keyseat taken in a broad sense. 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. 結 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⁾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、軸方向に無限長さを有するKeyseatを持つ軟鋼中実丸軸の弾塑性ねじり実験を行った。ここでは、前報⁽¹⁰⁾につづいて、軸径D、およびキー

みぞの隅の曲率半径rを一定にし、キーみぞの幅bを縮小又は拡張させた2種類、および深さtを異にする計6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振りモーメントT-ねじり角θ線図を求めた。塑性ねじりの各段階において丸軸のキーみぞを含む最小横断面の軸内に生ずる塑性域の発達と振りモーメント・ねじり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T₀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^(8, 9)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⁾, J. M. KATAMOHU⁽¹¹⁾により、ひずみ模様による類似の研究が示されているが、キーみぞを対称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丸軸のキーみぞ、および軸内に発達する塑性域の詳細な観測を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片

素材としては S35C 引抜鋼材を熱処理 (880°C・135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	Cu	Ni	Cr	Fe
0.36	0.23	0.64	0.014	0.032	0.19	0.06	0.12	残余

表 2 機械的性質

縦弾性係数 E GPa	横弾性係数 G GPa	降伏点 σ_s MPa	引張強さ σ_b MPa	伸び ϕ %	絞り ψ %
208	80.9	396	594	34.4	65.0

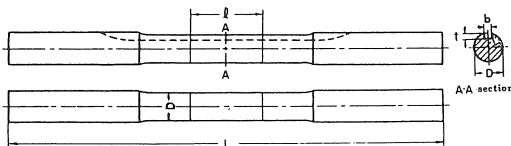


図 1 試験片の形状

本実験ではキーみぞ試験片の軸径 (D), みぞ底の隅の曲率半径 (r) を一定とし, 幅 (b), 深さ (t), を異にする 6 種類のキーみぞを持つ丸軸を用い, 各試験片のキーみぞは慎重に仕上げ, 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 に切欠試験片の形状を示す。

ここに, 各部の称呼寸法は

$$\begin{aligned} D &= 20.00 \text{ mm}, r = 0.00 \text{ mm} \\ b &= 1.00, \{ 3.00, 5.00, 7.00 \}^{(1)(2)} \infty \text{ mm} \\ t &= 2.00, 4.00, 6.00 \text{ mm} \end{aligned}$$

であり, 標点間距離 $l = 50.00 \text{ mm}$, 試験片の長さ $L = 300 \pm 1 \text{ mm}$ 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ご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。(2)

3. 実験結果および考察

キーみぞの形状を異にする 6 種類の試験片のキーみぞの幅 b の各値について, みぞの深さ t をパラメータにとり, 実験結果を示せば図 2, 3 のような振りモーメント (T)-振れ角 (θ) 図となる。図 4 に平滑試験片の T- θ 図を示した。さらに, 図 5~7 に試験片のキーみぞを含む最小横断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 4 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), すなわち, 溝底の隅で図 8 の m 点である。図 2 において ①は応力の集中点 m より発達する塑性域の初期の状態を表す, この段階における塑性変形は図示の如く微小である。

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に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 図は急に曲がり, 溝底に生じた塑性域は幅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塑性域が発生し輪郭線に垂直に発達する②。さらに T が増加し塑性域が発達するにつれて, T- θ 図は急激な曲がりを示し, 隣接する部分にりりが盛んに起こり, 塑性域はくさび状となりその幅及び数を増して内部に向かって進展する③。T- θ 図はわずかな傾きを持つが, ほとんど水平に近くなる。④に達すると溝底および外周はほとんど完全に塑性域となり, その応力値は降伏応力 σ_s に等しくなる。やがてこれらの降伏完了部より硬化する領域が発達し, 他方内部における降伏領域は中心に向かって延び, T- θ 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(1)(2)を囲むわずかな弾性域を残すのみとなり, また輪郭線表面及びその近傍はひずみ硬化を起こした領域となるものと考えられる⑤。なお試験片表面には円周域に線状の塑性域が現れていることが観察された。図 9 には各試験片の最終段階の荷重を除去した後 (12.5deg/50mm :

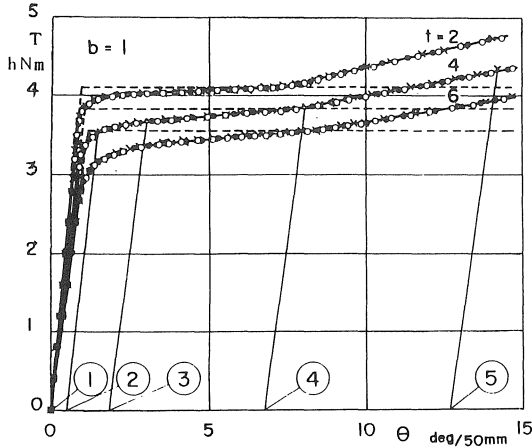


図2 T-θ 図

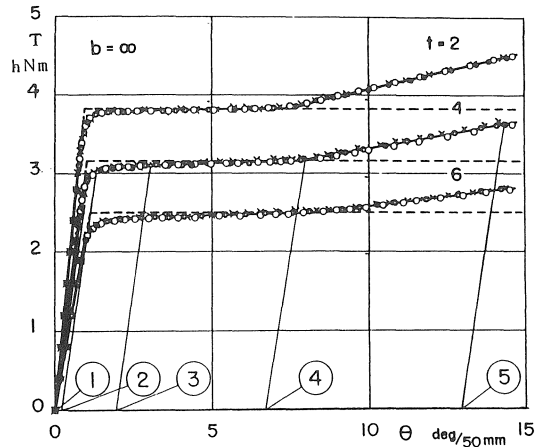


図3 T-θ 図

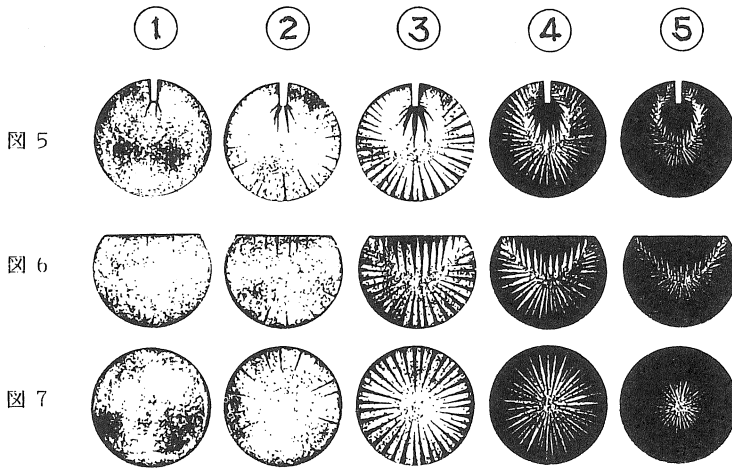


図8
応力集中点

図5～7 ひずみ模様

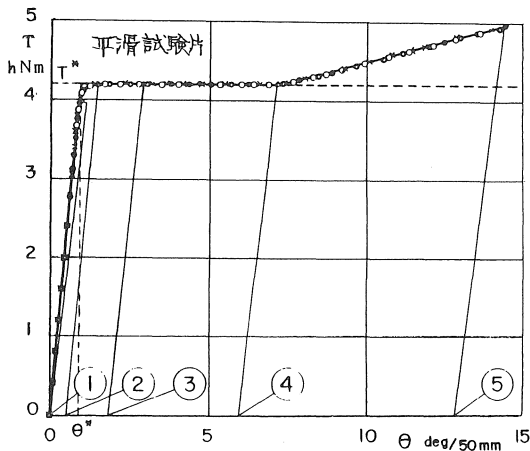


図4 平滑試験片の T-θ 図

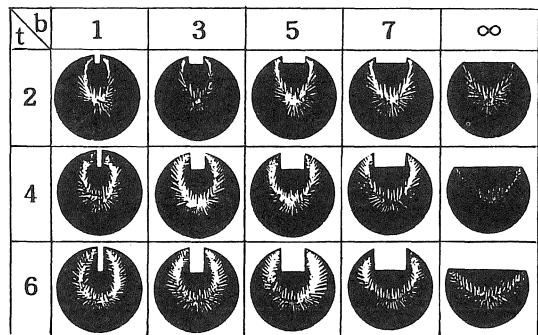


図9 ひずみ模様 (12.5deg/50mm : 近傍)

近傍, 前報⁽¹⁶⁾分も含む)の塑性域の発達の模様を示したもので, 振りの中心は横断面の溝底と輪郭線のほぼ中央に有ることがわかる。

3.2 降伏点振りモーメント

図5~7に示す塑性域の発達の状態より, ④においてはキームぞの最小断面(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こす直前, 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 図を用いてキーム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。

表3 降伏点振りモーメント

		T ₀ Nm	
t	b	1	∞
2		410.2	381.3
4		382.9	315.7
6		355.1	250.5

表4 平滑試験片の降伏点振りモーメント; T*, θ*

D mm	T* Nm	T _{1h} Nm	T _{1h} / T*	θ* deg/50mm	θ _{1h} deg/50mm
20.00	420.0	414.7	0.987	0.925	0.936

平滑試験片の降伏点振りモーメントT*およびT_{1h}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4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

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

りモーメントT_{1h}*およびT_{1h}*によって弾性的に振られると仮定した振れ角θ_{1h}*は, 夫々(1)式で与えられる。

(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ずく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ム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。キーム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, キームぞの幅bと軸径Dとの比b/Dとの関係を図10に示す。(前報⁽¹⁶⁾分も含む), 表3・図10よりキームぞの幅bが大きくなるにしたがい, 又溝の深さtが深くなるに伴い降伏点振りモーメントT₀が減少すること, すなわち, 振りに対する抵抗が次第に減少し, 逆にtが減少すればT₀は次第にT*になることがわかる。

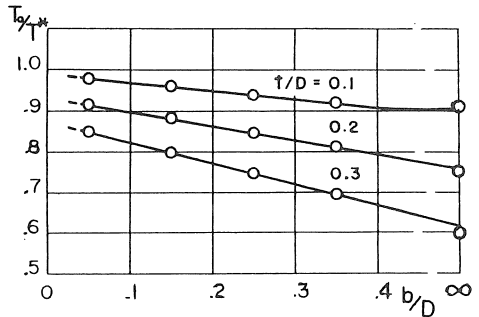


図10 拘束係数

4. 結 言

キームぞを有する6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最小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) 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) Л. М. カチャノフ: 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
- 16) 伊藤: 愛知工業大学研究報告 Vol.28-B, Mar. 1993.