

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第5報 長方形円周みぞを有する軸

機械工学科 伊藤 實

Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts

No.5, Shafts with Rectangular-Nothed Circumferential Groove

by Minoru ITŌ

円周方向に長方形みぞを有する試験片の幅 λ 、最小径 d 、みぞ底隅の曲率半径 ρ を異にする13種類の丸軸の弾塑性ねじり実験を行い、ねじりモーメント・捩れ角線図を求め、軸に平行な縦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ねじりモーメントを求め、みぞの幅 λ およびみぞ底隅の曲率半径 ρ 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)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、円周方向に長方形みぞを有する軟鋼丸軸の弾塑性ねじり実験を行なった。ここでは、長方形円周みぞの幅、最小径およびみぞ底隅の曲率半径を異にする13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・捩れ角線図を求め、特に幅 $\lambda = 8$ mmの長方形円周み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縦断面内に生ずる塑性域の発達とねじりモーメント・捩れ角との関係を明らかにした。また長方形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ねじ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、長方形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、長方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長方形みぞを有する丸軸の軸に平行な縦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°C120分保持後油冷, 700°C120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。本実験では円周方向にみぞの幅

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_s kg/mm ²	引張強さ σ_b kg/mm ²	伸び δ %	絞り ψ %
2.13×10^4	8.46×10^3	45.3	65.3	21	63

(λ)、最小径(d)およびみぞ底隅の曲率半径(ρ)を異にする13種類の長方形円周みぞを持つ丸軸を用い、各試験片の長方形みぞは研磨をほどこし、みぞ底隅の曲率は投影器を使用して検査して良好なものを使用した。図1に切欠き試験片の形状および称呼寸法を示す。 l は標点間距離を、 L は全長で270mm \pm 0.5mmである。

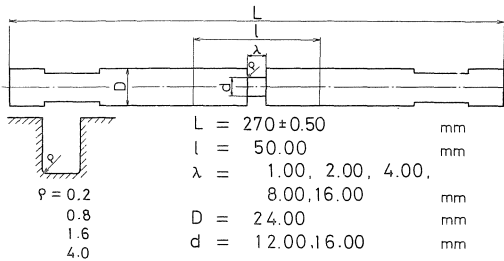


図1 長方形円周みぞを有する試験片の形状および称呼寸法

2・2 実験方法 実験には、容量50kgf・mの振子垂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⁽¹⁰⁾ また一部の試験片は縦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

長方形円周みぞの形状を異にする13種類の試験片を幅λおよび曲率半径ρをパラメータにとり、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6～8に試験片の縦断面の塑性域の発達模様を示した。T－θ図中の実験点は試験片3本以上の平均値として求めたものである。なお、T－θ図中の番号はひずみ模様中の番号に対応するが何れも、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⁽¹¹⁾図2"にゆずる。

3・1 T－θ図と塑性域の発達 長方形円周みぞ： $\lambda = 8.00 \text{ mm}$ 、 $\rho = 0.20 \text{ mm}$ および $d = 12.00 \text{ mm}$ の丸軸の縦断面に生ずる塑性域の発達(図6)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、すなわち図9に示すようなみぞ底の隅の円弧部とみぞ底の直線部と接する点m、m'の近傍である図6①。せん断応力が降伏応力に達するまでは試験片全体は純弾性的に変形するが、振りモーメントTが増加して降伏域が発達するにつれて、T－θ図は弾性状態である直線部分から外れ①、点m、

m'に生ずる塑性域は徐々に進展しながらみぞ底表面の円周方向より最小断面の図心に向かって進む⁽¹¹⁾同時に、点m、m'を通る輪郭線に垂直に塑性域が発生し発達する。さらに振りモーメントTを増加させると、塑性域は幅および数を増して発達発生し、T－θ図は弾塑性共存状態を示し、滑らかな曲線を描く②。また、みぞ底の直線部(輪郭線表面)の垂直方向〔輪郭線の法線方向および半径方向〕に新たな塑性域が発達し、軸心に向かった塑性域は“楔状”となってその幅および数をさらに増しながら進展する③。みぞ底の直線部(輪郭線表面)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 に等しくなり、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。したがって、点m、m'を通る輪郭線においてひずみ硬化する領域が発生発達し始める点の振りモーメントTは、近似的に降伏点振りモーメント(T_0)とおくことができる④。すなわち、その応力値は降伏応力(τ_s)ということができる。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図の傾きは増大し、ひずみ硬化曲線を描き、さらに荷重を増すと弾性域は塑性域の広まるなかでその領域を狭くし、その内で応力は急激に変化して、弾性域は線状化し放射状として残り⁽¹¹⁾⑤、振りモーメントTを加荷重し続ければ最後に応力の不連続線⁽¹²⁾となり軸上に線状化することが予想される。最終加荷重⑤除去後の縦断面の塑性域の発達の模様を図7、8に示す。

3・2 降伏点振りモーメント 図6に示す塑性域の発達の状態より、④においてはみぞ底の直線部(輪郭線表面)はほぼ全域が塑性域に達したこと⁽¹¹⁾が、ひずみ模様よりわかる。一方図2～5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2～5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、4はT－θ図を用いて、長方形円周みぞを有する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

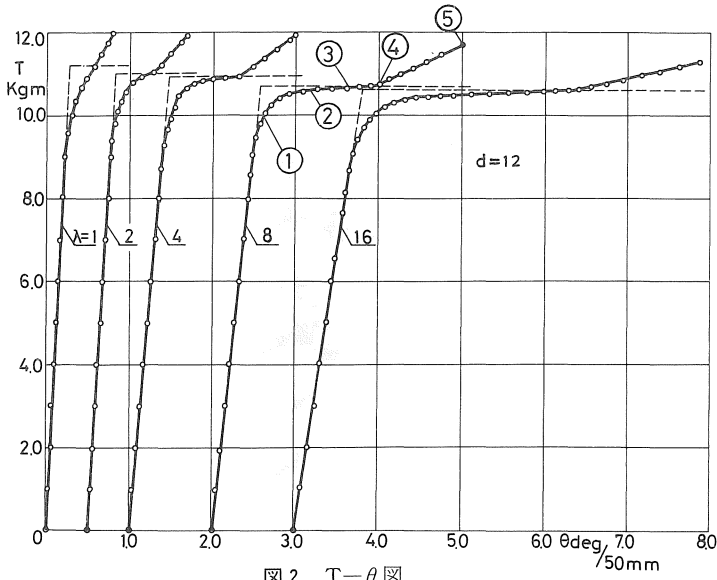


図2 T-θ図

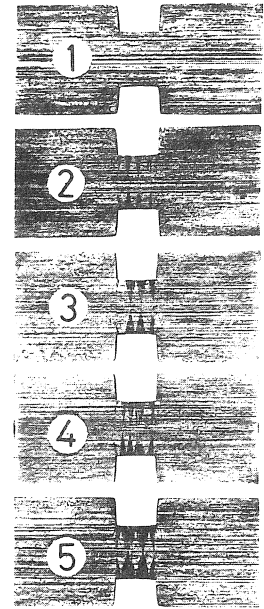


図6 ひずみ模様
 $d = 12.00$
 $\lambda = 8.00$
 $\rho = 0.20$

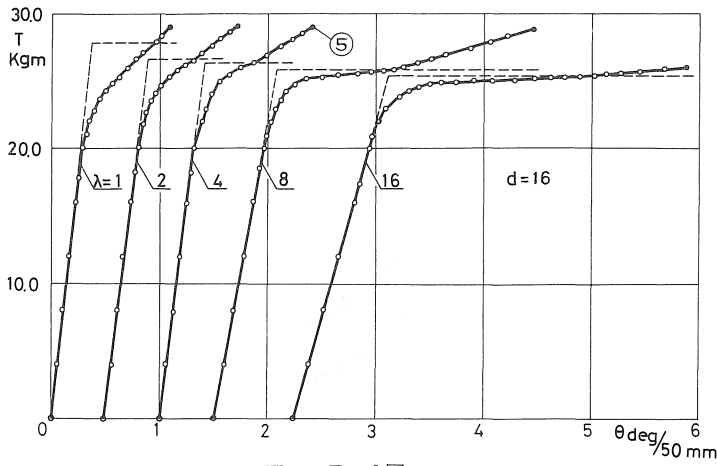


図3 T-θ図

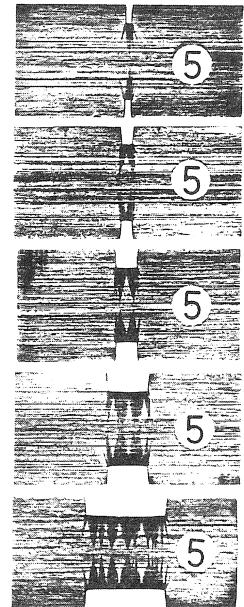


図7 ひずみ模様
 $d = 16.00$
 $\rho = 0.20$
 $\lambda = 1, 2, 4, 8, 16.00$

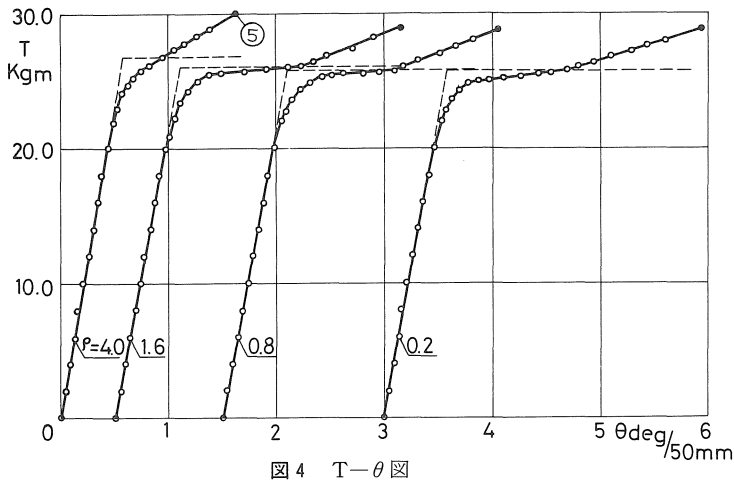


図4 T-θ図

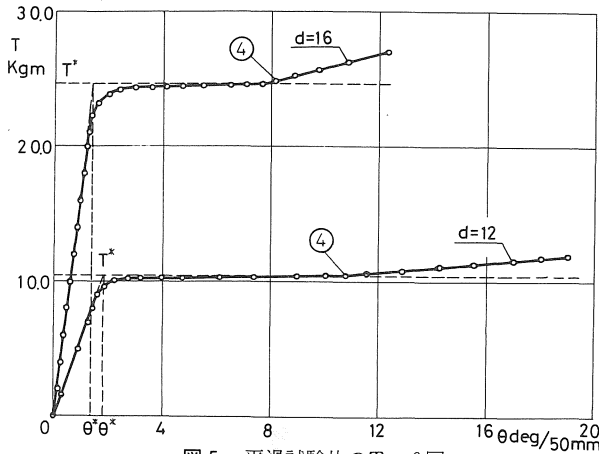


図5 平滑試験片のT-θ図

表3 長方形円周みぞを有する試験片の降伏点振りモーメント (ρ = 0.20 : 一定)

d/mm \ λ/mm	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00
12.00	11.20	11.05	10.93	10.73	10.64
16.00	27.80	26.60	26.30	25.80	25.40

表4 長方形円周みぞを有する試験片の降伏点振りモーメント (λ = 8.00, d = 16.00 : 一定)

d/mm \ ρ/mm	0.20	0.80	1.60	4.00
16.00	25.80	25.85	26.05	26.83

表5 平滑試験片の降伏点振りモーメント, 振れ角

d/mm	T* kgm	T _{th} * kgm	T _{th} ² / T*	θ [*] deg/50mm	θ _{th} [*] deg/50mm
12.00	10.44	10.24	0.981	1.70	1.70
16.00	24.61	24.28	0.987	1.29	1.28

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。

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

(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。したがって他の長方形円周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。長方形円周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

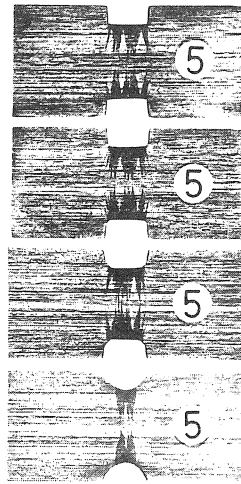


図8 ひずみ模様

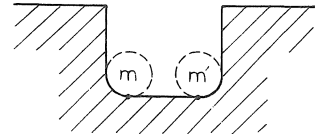


図9 みぞ底の応力集中点

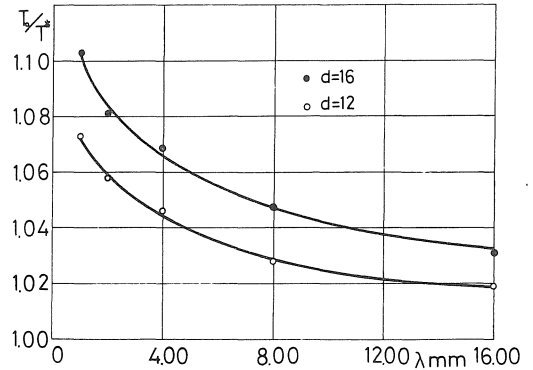


図10 拘束係数 (ρ = 0.20 : 一定)

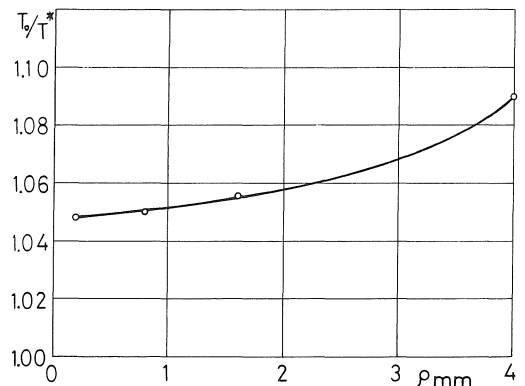


図11 拘束係数 (λ = 8.00, d = 16.00 : 一定)

なわち拘束係数 T_0/T^* を求め、幅 λ およびみぞ底隅の曲率半径 ρ の関係を図10, 11に示す。幅 λ が大きくなるにつれて、振りに対する抵抗が減少し、長方形円周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^* に近接することが、表3および図10よりわかる。また、曲率半径 ρ が小さくなるにつれて T_0 は、 T^* に近接することが、表4および図11よりわかる。

4. 結 言

長方形円周みぞを有する13種類の軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行い、 $T-\theta$ 線図を求め、丸軸の縦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, 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) 大久保肇: 最新材料力学, 朝倉, 159, 1957,
- 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, 緒論及び第1章, 1954,
- 8) A. Nadai: Plasticity, (McGraw-Hill), 156, 1931,
- 9) JI. M. カチャノフ: 大橋訳, 塑性理論の基礎, 養賢堂, 111, 1971,
- 10) 清家, 伊藤: 機械学会論文集, 28-194, 1353, 1962,
- 11) 伊藤: 愛知工業大学研究報告No. 10, 89, 1975,
- 12) 文献(2), 第4章,