線基準方式では 歯面上の現在測定位置を正確に示すような装置が絶対必要である。

直線基準方式と円弧基準方式とでは この他種々の点で本質的な相違、長短があるので、ここにその主なるものを列挙してみよう。

a) 実際測定可能な最小歯数は 円弧基準方式の方が小さい。

b) 円弧基準方式の方が構造が遙かに簡単となる。

c) 直線基準方式では歯筋上の任意の位置に対して歯形測定を行いうるが、円弧基準方式では端面近い部分しか測定できない。もつともパンタグラフ機構等を取り入れれば円弧式でも歯筋上の任意位置に対して測定できるが、このような場合には装置が複雑となり、直線基準方式に近い構造となる。

d) 直線基準方式は通常歯直角断面における歯形を測定し、必要に応じ軸直角断面における歯形も測定できるが、円弧基準方式では軸直角断面歯形の測定を行う。歯直角断面の歯形をも測定しうするためには直線基準方式と同程度の複雑な構造のものとなり、円弧基準方式の特徴が薄れる。

結局歯形の測定を歯車の端面に近い軸直角断面において行うことで充分とする場合には筆者らの考案した円弧基準式簡易歯形検査機がそのすぐれた特性を発揮し、一般歯車工場で充分利用価値のあるものであるのに対し、ネジレ角の大きいハスバ歯車の場合や、歯筋上の各位置において歯形を測定する必要がある場合には直線基準方

式、円弧基準方式いずれによるも相当大掛りな検査機となり、船用減速歯車工場のような特殊の大歯車工場以外では使用は困難であると考えられる。

8. 結 言

筆者らの考案製作した歯形検査機はその構造が極めて簡単なものであり、一般機械工場で容易に製作しうる程度のものであるにもかかわらず、検査機の中心位置の決定さえ注意すれば相当の高精度で大型歯車の軸直角断面歯形の誤差が測定でき、充分実用性のあるものであることが明かになった。一般機械に使用される大型歯車の歯形精度は特殊の場合を除き、予想外に悪いものでありその精度向上は焦眉の急を要するものであるが、それがためには広く一般の大型歯車製作、使用工場で本機の如き簡易歯形検査機の利用が望まれる次第である。

なお本機の円弧中心を空間上の所定の位置に正確に位置せしめるような可動支持台に取付けるようにすれば大型かさ歯車等の歯形の測定も可能であり、またハスバ歯車の歯直角断面における歯形の測定も可能となり、その他色々本機の原理を発展させた歯形検査機も考えられる。また自記装置等を採用すればさらに便利にならう。これらの点については今後さらに研究を進める所存である。

(1954, 5月13日受付)

参 考 文 献

- 1) D. W. Dudley: Involute checking machine for large helical gears. Mach. (A) 54(1946) Oct. p. 142/145.

薄板の剪断試験*

正会員 斎 藤 博**

Shearing Test of Mild Steel Sheet

Hiroshi SAITO

In the study of this shearing test, Amsler testing machine, three kinds of round shearing tools of 10mm, 25mm and 50mm in diameter respectively and autographic recorder are employed. The autographic recording system consists of dial gauge with thin disc having fifty slits, photocell, photo-electric-current amplifier with relay, electromagnet with ratchet attached to Amsler recording drum. By these apparatus, approximate shearing curves of round blank are recorded on the drum. The test pieces are of mild steel sheet of 0.96mm in thickness.

The results are as follows.

- 1) Nominal shearing stress decreases gradually in proportion to the increase of the tool clearance.

- 2) Nominal shearing stress is 75~80% of ultimate tensile strength.
- 3) The Minimum values of the specific work required in each tool being about 12kg·mm/mm², appear between 8 and 16% tool clearance,
- 4) And others.

I. 緒言

直線刃及び円形の剪断工具を使用して、薄板の剪断試験を行つた例は、従来もしばしば見受けられる¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。それらの剪断曲線を記録する場合に、多くは、顕微鏡又はダイヤルゲージ等を使用して工具のストロークを測定した様であるが、今回筆者は、光電管を応用した自記装置を考案してアムスラー試験機に取付け、軟鋼薄板の近似的な剪断曲線を記録させ、剪断抵抗、所要仕事量その他に就き検討した。

た。

(2) 実験装置全体の説明

図1は全体の概略を示すもので、パンチのストロークを0.01mm目盛のダイヤルゲージ1に伝え、ゲージ指針の代りに、全円周に等分に50個のスリットを切つた薄円板2を取附けた。これと近く対向して、同じスリットを刻んだ固定スリット3が光電管カバーの窓に取附けてある。光源から出た平行光線は、ダイヤルゲージに加工した窓から内部の空所を通過し、廻転及び固定スリットを

表1 試片材料

名称	性質	板厚 mm	抗張力 kg/mm ²	降伏点 kg/mm ²	伸率 %	V. H. N.	化学成分(分析値)%
高級仕上 鋼板第一種		0.96	35.8	26.4	39.9	99.3	C 0.087 Mn 0.33 Si 0.007 S 0.026 P 0.013 Cu 0.274

II. 実験に用いた材料

試片材料は、市販の高級仕上鋼板第一種の定尺物(6'×3')を入手の儘とし、不平滑、きず、曲り、板厚不同、ばり、硬度不同等に注意を払い、比較的均一な良質の部分のみを用いた。その性質は表1の如きものである。

又工具材料としては、特殊工具鋼第二種の材料を用いV. H. N. 800 程度に熱処理後、普通の研削仕上を施した。

III. 実験装置と方法

(1) 工具及びアムスラー試験機

剪断工具はダイの直径が10, 25.33mm及び50mmのガイド付きの円形工具を使用した。各工具はそれぞれパンチを交換して、クリアランス(片側)に2, 6, 9, 12及び20%の変化を与えた。試片材料はダイ上に自由に支持した状態で打抜いた。材料にも双先にも給油はしないこととした。

アムスラー試験機は、最大容量10tのもので、10φ工具には2tスケールを、25.33φ及び50φ工具には5tスケールを使用した。操作は充分静的に行い、試片の剪断が終つて(切断終了ではない)荷重が下る際には、徐々に荷重が戻る様に工夫して、曲線記録の正確を期し

経て、光電管4に達する。パンチの0.02mmのストロークに対して、光電流が一回流れることになる。発生した光電流は増幅継電装置5を経て、アムスラー機の記録ドラムに取附けた電磁石6を吸引し、ラチェット(歯数36)を駆動する。ラチェットの動作は一組の歯車を介して記録ドラム7を回転させる。

図1 装置の概要

- 1 = ダイヤルゲージ
- 2 = 廻転スリット板
- 3 = 固定スリット板
- 4 = 光電管
- 5 = 光電増幅器
- 6 = 電磁石
- 7 = 記録ドラム

これらに依りパンチのストロークが記録ドラム円周上で145.5倍に拡大記録される。即ちパンチの動き0.02mmが記録紙上で、2.91mmとなる。打抜荷重に相当する

*昭和28年10月24日精機学会講演会にて発表

**富士電機製造株式会社松本工場

ドラム軸方向の動きは、アムスラー機自体の鉛筆で行う。此の両者の動きで階段状の近似剪断曲線が記録される。

(3) 光電流増幅継電部分

図2は光電流増幅継電部分の結線を示すもので、装置は自製したものである。回路の説明は省略するが、電源の端子の接続方向には注意を要する。リレーは電話用のもので、直流4mA以上で確実に動作する。

(4) 実験装置各部分の誤差の検討

これらの実験装置で、誤差の生じる個所を検討し、極力排除に努めた。その主なものは

図2 光電増巾器結線図

$V_1 = \text{PT 17 G}$	$V_2 = \text{UZ 6 C 6}$
$V_3 = \text{TY 66 G}$	$V_4 = \text{KX 80 HK}$
$R_1 = 1 \text{ M}\Omega$	$R_2 = 250 \text{ K}\Omega$
$R_3 = 500 \text{ K}\Omega$	$R_4 = 1.5 \text{ K}\Omega$
$R_5 = 20 \text{ K}\Omega$	$R_6 = 50 \text{ K}\Omega$
$R_7 = 10 \text{ K}\Omega$	$R_8 = 1 \text{ K}\Omega$
$C_1 = 4 \mu\text{F}$	$C_2 = 0.5 \mu\text{F}$

(i) ダイアルゲージ

市販品の精度の良いものを予め検定して、誤差 10μ 以内の範囲を使用した。又スリット板の精度も極力良くした。

(ii) 工具に関するもの

(a). ダイ、パンチ間の偏心、 0.01mm 以内とした。(b). パンチ双面の傾斜。(c). ガイドとダイ上面の直角度。(d). ガイドとパンチの嵌合。(e). 刃先の鋭利さ。これらはいずれも極力良好とした。(f). パンチ、ダイの打抜中の圧縮。これは計算に依れば、最高荷重の点で、 50ϕ のパンチで 0.013mm 、 $25.33\text{mm}\phi$ で 0.14mm 、 10ϕ で 0.019mm 圧縮されることとなるが、同時にダイも微量だけ変形する筈であるから、互に或程度補償され、パンチ圧縮の影響は無視出来ると考えられる。(g). 打抜中のパンチの曲り、傾き。図3・1これはの如き装置を使い、予め検定したダイアルゲージ2個を使用し、ゲージ間の距離を 180mm として測定した結果は、両ゲージ

の読みの真の差は、 $4 \sim 10\mu$ であつて、打抜中のパンチの曲りと傾きは無視し得る。

(iii) 装置の最高動作速度

光電管以降、記録ドラム迄の装置の動作可能な最高速度を、別の試験器を製作して測定した処、毎秒15回のインパルス電流まで確実に動作することを認めたから充分である。

図3 複刃の作用、工具の検査

IV. 実験の結果と考察

(3) 複刃の剪断現象⁵⁾⁶⁾

複刃による剪断の際の力の作用は、Krabbe⁷⁾が考えて居るが、図3・2の如く、工具が材料に喰込んだ状態で力の作用を考えると、打抜力 P が工具のクリアランスよりも大きい距離 l で作用して、これにより板材は曲げモーメント $P \cdot l$ を受け、曲げと傾きを受ける。円形剪断の場合には、モーメント $P \cdot l$ が環状に作用して、板材の傾きは或程度制限を受ける。又材料の傾きにより側圧力 P_w が生ずる。これらに摩擦が加わり $\mu'P$ 、 μP_w な

る力が生じる。打抜力として実際に測定されるのは $P + \mu P_w$ であるが、 μP_w は小さく無視し得るものとされて居る。 P が或る程度以上大きくなると材料内の双先部分から、クラックが入る。クラックが発生すると、応力集中効果により前より小さい力でクラックが成長し、打抜力の減少となつて現われる。このクラックが更に成長し、上下両方のクラックの会合が起つて剪断は終り切断する。剪断の際の双先附近の材料の変形は複雑で、材料は上下の双先により、材料の上下両面から切削と同様な作用を受けつゝ、同時に、残つた中間の材料は、刻々方向の変化する引張りと似た作用を受け乍ら変形して切断する。此の点に就き筆者は、クラック発生直後の試片を腐蝕して拡大写真をとり観察した。図3・3~6はこれの一部を示す。尚、剪断加工中に於ける応力・歪関係は、

図4 近似剪断曲線

現状では解析されて居ない。

(2) 近似剪断曲線

図4は、この実験装置を使用して、近似的な剪断曲線を記録したものである。装置の性質上から、完全な曲線ではなく階段状になる憾みはあるが、円滑な曲線と比較しての曲線下の面積の誤差は、計算の結果は10φ, 25.33φ及び50φの工具で、それぞれ±3%弱であると考えられる。

(3) 剪断曲線

段階状な前記の近似剪断曲線を、円滑な曲線に修正したものを図5に示す。比較の便宜上から、縦軸には、見掛けの剪断応力 p kg/mm² をとり

$$p = P / \pi D t \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し P = 打抜力 kg D = ブランク直径 mm

t = 板厚 mm

これらの剪断曲線は、最大荷重（見掛けの最大剪断応力）及び剪断が終る迄のパンチのストロークは、工具のクリアランス及び直径により多少異なるが、いずれの場合もほぼ同様な経過をたどる。即ち、パンチが試片に接触し表面の微小な凹凸をならしながら材料に喰込む。この間は荷重の増加は少い。次に双先附近の材料に応力が集中しこの部分が塑性変形を起す。此の期間は荷重は急に増す。応力が或る限度を越えると、双先部分の材料が切断し始める。この期間には荷重の増加は少くなり次第に飽和した状態になる。次に材料の双先附近にクラックが発生して荷重は低下し、上下のクラックが会合すると剪断は終る。剪断終了と共に、普通は、荷重が急速に0に戻るが、工具のクリアランスが小さく、又直径も小さい場合には、一応の剪断が終つても、完全に切断するのが

図5 修正剪断曲線

遅れることがある。即ち10φ及び25.33φの工具で2%のクリアランスでは、剪断が終つても、尚、曲線が続き逐次降下する。これは工具の直径が比較的小さいと、材料の変形する自由さが少く⁸⁾、又、クリアランスが少いと二次剪断の影響と、材料と打抜品及びダイと打抜品の間の摩擦が現われる為と考えられる。

各工具共、クリアランスが増加するにつれて、見掛けの最高剪断応力の現われる迄のパンチの喰込みストロークが多くなる傾向が見られる⁹⁾。これは既述の複双の剪断で明らかな如く、工具の直径及び板厚が一定の場合、クリアランスが増加すると、板材に作用するモーメント

が増加する為に、板材の彎曲による変位が大きくなり、従つて材料にクラックの発生する時期が遅れる結果と考えられる。

(4) パンチ喰込量及び剪断抵抗

工具双先が板材の表面に接触してから剪断が終了する迄のパンチのストロークと材厚との比の % を喰込量と名付けて、これとクリヤランスとの関係を図6に示した。但し前述の通り、剪断が一応終つても、直ちに切断しない場合がある。その様な場合は一応剪断の終つた処迄のパンチのストロークをとることとする。各工具共、クリヤランスの増加に伴つて、パンチの喰込量は次第に増し

図6 剪断抵抗, パンチ喰込量

て居る。これは前記のクラックの発生が遅れることが主な原因と考えられる。無論、発生したクラックが成長して会合する遅速も影響することであろう。工具の直径がパンチ喰込量に及ぼす影響は判然とせず、今後の実験にまたねばならぬ。

見掛けの剪断応力の最大値を剪断抵抗 $f \text{ kg/mm}^2$ と名付け

$$f = p_{\max} = P_{\max} / \pi D t \dots\dots\dots (2)$$

但し $P_{\max}$ = 最大打抜力 kg $p_{\max}$ = 見掛けの剪断応力の最大値 π, D, t は前出。

f とクリヤランスとの関係を図6に示す。いずれの直径の工具の場合も、 f はクリヤランスの増加に伴い低下する傾向にある¹⁰⁾。此の理由は現在では充分に解明されて居ない。工具直径と f との関係も、一定の簡単な法則は不明と言う外はない。

(5) 所要仕事量

剪断に必要な仕事量を決定するのは、打抜力と切断が完了する迄の工具のストロークであつて、剪断曲線の下面積を精算すれば求められる。

$$W = \int_0^s P ds = \pi D t \int_0^s p ds \dots\dots\dots (3)$$

$$w = \int_0^s p ds \dots\dots\dots (4)$$

但し、 W = 剪断仕事量 $\text{kg}\cdot\text{mm}$

s = パンチのストローク

w = ブランク切口の単位面積当りの所要仕事量 $\text{kg}\cdot\text{mm/mm}^2$

D, P, p, t は前出の通り。

図7 所要仕事量

w とクリヤランスとの関係を図7に示す。或るクリヤランスの範囲で極小値を示して居る。これは図6の如く剪断荷重はクリヤランスの増加に伴い直線状に低下する傾向にあり、切断する迄のパンチのストロークは、それとは反対に増加する。従つて、両者の積に相当する所要仕事量は、或るクリヤランスの範囲で極小値を示すことになる。10φ 及び 25. 33φ の工具で、クリヤランスの少ない方で w が著しく大きくなるのは、切断完了迄のパンチのストロークが著しく長い為である。図7にてクリヤランス 8 ~ 16% の所に、各工具共、極小値がある。

(6) 打抜品の断面の形状¹¹⁾

以上の剪断試験で打抜いたブランクの切口の断面の形状を、光切断装置とツァイス製工具顕微鏡 (倍率 30) で測定した値を図8に示す。断面の形状を表わす為に、各部分に符号を付け、 c はだれ、 a は剪断面の幅、 α は破断面の板面に対する傾き角、 r は剪断面の傾き角とした。これらに就ては、今迄に筆者が、しばしば述べてあるので省略する。図8にて、クリヤランスが増すに従つ

て、 r が極めて僅かであるが増加する傾向にあること、 $a+c$ の値が大きくなることは、クリヤランスが大きい場合に、打抜中に板材の傾きと撓みが大きかったこととなり、前述のパンチの喰込量の増加と一致して居る。

図 8 打抜品の切口断面の形状

V. 結 言

以上を総括すると

- (1) クリヤランスの小さい程、最大打抜荷重は早期に現われる。
- (2) クリヤランスの増加に伴い、剪断抵抗は直線的に減少する。
- (3) 剪断抵抗の値は抗張力の 75~80%である。
- (4) 剪断完了迄のパンチのストロークは、クリヤランスの増加と共に大きくなる。

(5) 切口の単位面積当りの所要剪断仕事量は、クリヤランス 8~16% に於て極小値を示し、その値は 12 kg-mm/mm^2 前後である。

(6) 加工に適したクリヤランスの値は、加工目的により適当に選ぶべきで、打抜品の切口の断面の形状の良好なものを望む時は、板厚の 2~6% 位で、さうでない場合には、更に多く、15% 位を選ぶが良い。

終りに臨み、御懇切な指導を賜った東京大学教授・福井伸二博士、前田禎三助教授、並に、有益な助言を頂いた倉藤尚雄博士に深甚の謝意を表し、又、会社関係者の方々にも厚く御礼を申上げる次第である。

(1954, 5月13日受付)

参 考 文 献

- 1) T. M. Chang: Shearing of Metal blanks, J. Inst. Metals, 78 (1950—51), p. 393~414.
- 2) 福井伸二, 久能木真人: 科学研究所報告, 28 輯 3 号, 昭 27.5, p. 139~150.
- 3) 青木三策: 機械試験所報告, 3 巻 5 号, 昭 24.12, P. 6~10.
- 4) 福井伸二, 前田禎三: 精密機械, 16 巻 3 号, 昭 25.3, p. 6~13.
- 5) E. V. Crane: Plastic Working in Presses, 1948, p. 25~31.
- 6) 精機学会編: 精密工作便覧, 第 3 巻, 昭 28.6 p. 48~49.
- 7) E. Krabbe: Stanztechnik, 1936.
- 8) T. M. Chang: p. 403, 前出.
- 9) Chang and Swift: Shearing of Metal bars, J. Inst. Metals, Vol. 78, p. 132, 135.
- 10) T. M. Chang: p. 405, 前出
- 11) 斎藤博: 精密機械, 17 巻 11~12 号, p. 10~14.