平板試料の二軸引張試験機*

坂 口 一 彦** 川 端 季 雄***

河 合 弘 迪*** 裕 伸 夫****

Biaxial Tensile Tester for Flat Plates

by

Kazuhiko SAKAGUCHI,

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Sueo KAWABATA, Hiromichi KAWAI,

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

and Nobuo HAZAMA

(Toyota Automotive Industry Co., Ltd., Toyota)

A new type of biaxial tensile tester for flat plates has been produced, which can make uniform extension of a square plate in biaxial directions. The tensile mechanism of this tester consists of two servomechanism for the control of the position of the two travelling beams on which cramp chucks are mounted. These chucks are capable of easy travelling on the beam surface by means of ball bearings. By the use of this tester it is made possible to perform such testing as tensile testing, stress relaxation measurement, creep testing and fracture strength testing, under homogeneous biaxial stress states.

In this paper the mechanism of this tester is described, and the results of elastic property measurements of BR, SBR, and IR rubber sheets using this tester are reported. The load-elongation diagrams are obtained by this tester and energy function are calculated from it as a function of invariants I_1 , I_2 of deformation tensor.

(Received Dec. 11, 1967)

1 緒 言

エラストマーのような大変形可能な高分子物質の力学的特性の試験は、普通は一軸引張試験によって行なわれているが、理論的には二軸および三軸の応力下での力学的特性を求めないかぎり完全な力学的定数を得ることはできない。また実際のこうした材料の使用状況をみてもむしろ二軸応力、すなわち平面応力状態が普通である。したがって、二軸応力下における材料の力学特性や強度特性を得ることが重要になるが、従来から試験はほとんど一軸引張りによって行なわれている状態で、この試験結果から大変形下すなわち非線型の二軸応力下で力学挙動を推定することは不可能であり、まして二軸応力下での強度はなおさらである。

二軸応力状態をつくる試験は従来からいろいろの方法が報告されている¹⁾²⁾。また平板状の試料に対する二軸

引張試験についても二、三報告されているが、大変形可能な物質に均等ひずみを加えて、その力学的性質を測定したり、強度特性を得るには不充分であると考えられる。そこで著者らは、このような物質の平板試料を用いて材料の力学的性質を正しく評価するために、試料に直角二方向から均等ひずみを加える二軸引張試験機を試作した。本試験機は二軸方向の定速引張り、応力緩和およびクリープ測定などが可能である。本報においては試験機の概要と二、三の測定例について記述する。

2 試験機の原理および概要

2・1 原理および機構

試験機は試料に引張変形を加える引張機構と、直角二軸方向のそれぞれの荷重検出機構、および引張りの制御部、荷重から電圧への変換装置および記録装置から構成されている。

Fig. 1 に本試験機の主要部の機構、Fig. 2 に主要部の外観を示す。試料は4個の荷重受バーで保持され、

* 原稿受理 昭和42年12月11日

** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区今出川通烏丸東

*** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

**** 正 会 員 トヨタ自動車工業(株) 豊田市トヨタ町

Fig. 1. Mechanism of the biaxial tensile tester.

Fig. 2. Appearance of the biaxial tensile tester.

うち2個のバーは荷重検出のため固定され、他の2個は試料に変形を与えるため移動できる移動用バーである。移動用バーはそれぞれのサーボモータにより駆動され、 x_1 , x_2 軸方向にそれぞれの指令電圧に従って移動する。正方形の平板試料は一辺7個ずつ、全周に28個のチャックでクランプされ、試料取付操作は容易にできるようにチャックの構造を設計した。また、チャックの試料把持部は、試料が伸張変形を受けるにつれて生ずる引張力により把持力を高める、いわゆるセルフタイト方式をとった。チャックアームの他端はボールベアリングが取り付けられ、荷重受バー上をなめらかに移動するようにした。サーボモータによって移動用バーが移動すると、試料の伸張につれて移動用バー上をボールベアリングの回転でチャックアームが移動して、試料に直角二方向から均等ひずみを与えるようにした。本試験機は試料にこのような均等ひずみを加える方式を採用しているため、後述する理由により、各辺の両端部のチャックは荷重検出バーから分離し、5個のチャックから荷重を検出している。また、Fig. 1に示すA, B, CおよびDのチャックからも荷重を検出することができる。

試料の伸張につれてチャックの位置が移動するため、試料の一辺にかかる荷重は、各軸方向についてそれぞれの荷重検出バーの両端に設けた2個の荷重検出器からの和の信号として次に述べるように検出し、記録す

るようになっている。

2.2 荷重検出原理

荷重検出器は力を差動変圧器によって検出する環状力計を用いた。これは荷重範囲の変更による力計の交換をなるべくなくするため、同じ力計でフルスケール2 kg から 200 kg までを選択できるようにしたが、これはリング式と差動変圧器の組合せで可能になる。特に、差動変圧器の材質については周囲の熱的環境条件による変動をできるだけ小さくするように考慮した。前述のように、試料の伸張につれてチャックが移動し加重点が移動するため、2個の荷重検出器を荷重検出バーの両端に設置した。Fig. 3に示すようにA点(移動点)

Fig. 3. Detection method of travelling load.

に作用する一つの力を F 、バーの全長を l 、A点から両端までの距離を l_1 , l_2 とし、両端部すなわち検出器に作用する力を f_1 , f_2 とすると

$$f_1 = \frac{Fl_2}{l}, \quad f_2 = \frac{Fl_1}{l}$$

$$\therefore f_1 + f_2 = F$$

となる。A点に作用する力が検出バー上のどの位置に移動しても荷重検出器に作用する力の和 ($f_1 + f_2$) は一定 F を示す。

2.3 測定機能

Fig. 4は全体のブロックダイアグラムを示す。試料

Fig. 4. Block diagram of the biaxial tensile tester.

に変形を与える引張機構は x_1 , x_2 軸ともに電圧を入力とし、移動用バーの位置を出力とするサーボ機構になっており、このため外部からの命令信号に従って試料に引張変形をその命令どおりに与えることが可能で

ある。したがって、たとえば二軸方向への異なった比率での定速引張試験、また二軸方向の各荷重を一定に保つように試料に変形を与える(クリープ試験)ことも可能で、また試料の体積一定を仮定して荷重を真応力に変換したクリープ試験もできるようにした。そのほかに応力緩和測定、二軸破壊強度も容易に測定が可能である。

3 試験機の特長および性能

Fig. 5 にサーボ機構の周波数応答特性を示すボード線図を示す。 x_1, x_2 軸とも同じ状態である。

Fig. 6 は荷重検出バーに静荷重を加え、荷重検出器の校正曲線を示す。荷重検出バーは 200 kg までの荷重の検出ができるよう設計している。変換器の感度は 5 段切換えとし、2, 6, 20, 60 および 200 kg フルスケールとしている。

試料形状はモールド可能な材料に対しては、Fig. 7 に示すように、周辺部を補強したものを用いた。また、

Fig. 5. Frequency response of the servomechanism.

Fig. 6. Calibration curve of load detector.

Fig. 7. Shape of specimen.

周辺部を補強しない試料、すなわち、平板より切り取った試料に対しては四隅のチャック間の距離を内部チャック間の距離より大きく取り、試料有効長さを小さくする。試料形状に関する問題は試験中の試料の変形状態を検討することによって明確となる。

本試験機は均等ひずみを与える方式をとっているため、その均等性についての検討を必要とする。Fig. 8

Fig. 8. (a) Undeformed state of specimen.

Fig. 8. (b) Deformed state of specimen stretch ratio $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$.

に示すように試料に格子を描き、伸張時の変形状態を写真撮影した。(a)は変形前、(b)は変形後の状態($\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$)を示す。図から明らかなように、試料の周辺部において変形状態はやや乱れている。したがって、荷重の検出はこの周辺部の乱れを避けるため、前述のように荷重検出バー側の両端チャックを荷重検出バーから分離し、5個のチャックの力を検出する。それぞれのチャックにかかる力を検討した結果、ほとんど均一であることが確認された。したがって、Fig. 7に示すように試料有効長さをとることとする。

X_1, X_2 軸から検出される荷重を記録するために、マルチバイブレータとリレーを組み合わせで自動(手動も可)切換装置を試作した。単チャンネルレコーダにより容易に X_1, X_2 軸の荷重を同時記録することが可能である。その上切換時間を適当に選ぶことができる。

4 測定結果および考察

応用測定例として、BR(ブタジエンゴム)、SBR(スチレンブタジエンゴム)および IR(イソプレンゴム)をプレスで圧縮加硫成形した試料を用いた二軸定速引張

Fig. 9. Some different types of tensile testing.

試験による結果について記述する。 X_1, X_2 軸の伸張比をそれぞれ異にした場合の荷重-伸び線図を求め、材料の力学定数を決定する。 Fig. 9 は X_1, X_2 軸方向の伸張比を異にした場合の荷重と伸張比の関係を示す。斜線の部分は変形前の形状を示し、変形後の状態を鎖線で示す。添字 1, 2 はそれぞれ X_1, X_2 軸方向を示し、 λ_1, λ_2 をそれぞれの伸張比とし、 F_1, F_2 をそれぞれの

荷重とする。一般に X_1, X_2 軸方向の伸張比を等しくした場合を均等二軸引張り (Uniform biaxial tensile), X_1 軸方向に伸張し、 X_2 軸方向の伸張は零、すなわち、常に変形前の長さを保つ場合をストリップ二軸引張り (Strip biaxial tensile), X_1 軸方向に伸張し、 X_2 軸方向の力を零にした場合を一軸引張り (Uni-axial tensile) と呼び、これらの伸張比のほかにも異なる伸張比

の組合せで実験を行なったが、得られた荷重-伸び線図の一例を Fig. 10 (a), (b) に示す。 X_1, X_2 軸の荷重は一定時間ごとに自動切り換えされ記録されている。伸張比は X_1 軸の値のみが現われているが、 X_2 軸の伸張比は両軸の伸張の割合をあらかじめ設定しているために容易に算出できる。

力学定数を二軸試験によって得られた荷重-伸び線

 (a) F_1 and F_2 are recorded on same chart by electronic switching where the upper rim of the band is F_1 and the lower is F_2 .

 (b) F_1 and F_2 are on a same line because the material is homogeneous and isotropic.

Fig. 10. Load-stretch ratio diagram.

 Fig. 11. (a) Measured $\partial W/\partial I_1$ (I_1, I_2) for the BR test specimen.

 Fig. 11. (b) Measured $\partial W/\partial I_2$ (I_1, I_2) for the BR test specimen.

図より算出するが、ここで材料を完全弾性体、均一系、等方性および非圧縮性と仮定して、線図より得られた荷重と伸張比との関係より、次式が成立する。⁴⁾⁵⁾

$$F_1 = 2 \frac{H}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \times \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

$$F_2 = 2 \frac{H}{\lambda_2} \left(\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \times \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

ただし、

$\lambda_1 \lambda_2$: 伸張比 ($=1+\epsilon$, ϵ : ひずみ)

F_1, F_2 : 変形前の有効長さあたりの荷重

H : 変形前の試料の厚み

I_1, I_2 : 変形テンソルの不変量

(非圧縮性物質では

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2},$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \lambda_1^2 \lambda_2^2)$$

W : 変形によって生ずるひずみエネルギー

$\partial W/\partial I_1, \partial W/\partial I_2$ は材料の力学定数を示し, 上式に測定した力成分 F_1, F_2 を代入して容易に算出できる。

BR, SBR および IR について I_1, I_2 と $\partial W/\partial I_1, \partial W/\partial I_2$ の関係を図示すると Fig. 11 (a), (b), Fig. 12 (a), (b) および Fig. 13 (a), (b) が得られる。この曲面から材料のそれぞれの伸張時の定数が明確になる。 $\partial W/\partial I_1, \partial W/\partial I_2$

Fig. 12. (a) Measured $\partial W/\partial I_1$ (I_1, I_2) for the SBR test specimen.

Fig. 12. (b) Measured $\partial W/\partial I_2$ (I_1, I_2) for the SBR test specimen.

Fig. 13. (a) Measured $\partial W/\partial I_1$ (I_1, I_2) for the IR test specimen.

Fig. 13. (b) Measured $\partial W/\partial I_2$ (I_1, I_2) for the IR test specimen.

はともに I_1, I_2 が大になるに従って減少し, 減少率は $\partial W/\partial I_1$ より $\partial W/\partial I_2$ が大である。

5 結 言

以上試作した平板用の二軸引張試験機の構造および性能について記述した。特に, 試料に均等ひずみを与える方式を採用しているため, その均等性については試験中における変形状態を記録撮影することによって満足できる均等性が得られていることを確認できた。本試験によって, (a)二軸定速引張試験, (b)二軸応力緩和試験, (c)二軸クリープ試験および, (d)二軸破壊強度試験など各種試験が可能である。

BR, SBR および IR を用いて力学定数を決定するため材料を完全弾性体, 均一系, 等方性および非圧縮性と仮定し, 荷重-伸び線図より得られた荷重および伸張比より算出したエネルギー関数を, 変形テンソルの不変量 I_1, I_2 の関数として図示し, $\partial W/\partial I_1, \partial W/\partial I_2$

の曲面を得た。この曲面より任意の伸張時の $\partial W/\partial I_1, \partial W/\partial I_2$ が明らかとなった。これらの定数は一軸引張試験によって求まらないものである。

最後に本試験機の製作に対してご協力いただいた岩本製作所に対して感謝する。

(昭和42年8月30日 第16回レオロジー討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Naghdi, P.M., and J.C. Rowly, J. Mech. Phys. Solid, 3 (1954).
- 2) Sharma, M.G., SPE Trans., 6, No. 1, (1966).
- 3) 白鳥英亮, 池上皓三, 材料, 16, 165 (1967).
- 4) Rivlin, R.S., and D.W., Saunders, Philos. Trans. Roy. Soc. London, A 243 (1951).
- 5) Eringen, A.C., Nonlinear Theory of Continuous Media, Chap. 6 (1962) McGraw-Hill Co., New York.