

箔ゲージによる衝撃時の塑性曲げひずみの測定

田 中 豊・山 崎 和 義*

(受理 昭和52年5月31日)

THE USE OF FOIL GAGES TO MEASURE PLASTIC BENDING STRAIN UNDER IMPACT LOADING

Yutaka TANAKA and Kazuyoshi YAMASAKI

In this paper, experimental investigation is carried out on the measurement of large bending strain of the material under impact bending using the short foil gage. The residual strain of cantilever subjected to impact load at its free end was measured with foil gage bonded on the compression surface. This value was compared with the value that had been calculated from the Bernoulli-Euler's assumption using the curvature measured from residual deformation of that beam. These experiments were performed on the four cases combined two kinds of gage and two kinds of bond.

It was then found that 7×10^{-2} strain can be measured by using polyimide gage bonded with epoxy resin bond.

1. ま え が き

横衝撃をうけるはりの塑性域における過渡的応答については、従来から多くの実験的研究が行われてきたが、これらの実験的研究には、高速度カメラまたはフラッシュライトを用いて、衝撃期間中におけるはりのたわみ形を求めるものと、ひずみ計を用いてはり表面の曲げひずみの time history を求めるものがある。これらのうち前者のはりの塑性変形波の伝ばについて調査するのに適しているが、衝撃荷重の波形や、はりに生ずる応力（またはひずみ）を問題とする場合には、後者の実験によらなければならない。しかし、この種の実験を行うにあたっては、まず使用するひずみゲージによる塑性ひずみの測定可能限界を明らかにしておくことが必要である。一般に衝撃ひずみの測定には短いパルス幅の波形をも検出するために短いゲージを使用するのが普通であるが、短いゲージは大ひずみ測定、特に圧縮ひずみの測定には不利であるとされているので、衝撃時における材料の大きな圧縮ひずみを測定する場合、ひずみの測定可能限界とその測定誤差の問題は重要である。この短いゲージによる圧縮大ひずみの測定については、すでに河島ら¹⁾の実験的研究がある。

この研究は、長さ 1 mm の箔ゲージ（バークライト・ゲージ）を接着したアルミ丸棒に鋼製衝撃棒で縦衝撃を加え、生じた圧縮ひずみの残留値について、箔ゲージによる測定値とコンパレータによるひずみの実験値とを比較したもので、その結論によると少なくとも 5×10^{-2} 程度のひずみまでは測定可能であるとしている。

一方はりの衝撃曲げの実験においては、衝撃による曲げひずみが増大するにつれてはり表面に接着されたゲージははく離し易く、特にはりの引張側においてその傾向が著しいので衝撃時における大きな曲げひずみを測定するためにははりの圧縮側に貼付されたゲージのみによる一ゲージ法で測定しなければならない。短いゲージで、大きな圧縮ひずみを測定する点では河島らの場合と同じであるが、衝撃曲げのようにゲージがはく離し易く、かつ、わん曲した面に沿って圧縮ひずみを受ける場合にも、縦衝撃時と同じ測定限界が得られるかどうかについては、なお検討の必要があると思われる。

本報告は、はりの高速度横衝撃の実験において、材料が塑性変形をする場合に、長さ 1 mm の箔ゲージによって、どの程度の大きさの曲げひずみまで測定可能であるかについて調査したものである。

* 三井石炭鉱業株式会社

2. 実験方法

本実験では一端を固定した軟鋼製の試料はりの自由端に、圧縮空気源により発射された鋼製衝撃棒を衝突させた後その最終変形について、はりの圧縮側表面の一点に貼付された箔ゲージから求められたひずみ値を、同一点で実測されたはりの曲率から計算された表面ひずみとを比較して、測定限界を調査する方法をとった。

2.1 試料と衝撃棒

試験はりは、10 mm 角、長さ約 1 m の市販の軟鋼製角棒で、約 680°C で焼鈍してある。また、衝撃棒は直径 27.1 mm の S 45 C 材の丸棒で長さ 250 mm、100 mm、50 mm の 3 種類を用意し、衝撃速度に応じて使用した。

2.2 ひずみゲージおよび接着剤

実験における曲げひずみの測定点ははりの衝撃端から 20 mm、50 mm、100 mm の 3 点で、これら測定点におけるはりの下面（圧縮側）を #100 のエメリー紙で研磨した後ゲージを接着した。使用した箔ゲージはベークライト・ゲージ (G. F. = 2.09) とポリミクロン・ゲージ (ポリイミド・ベースのもの、G. F. = 2.19, および 2.00) でゲージ長はいずれも 1 mm のものである。これらのゲージの接着にはシアノアクリレート系接着剤 (アロン・アルファ) ならびにエポキシ系接着剤 (アラルダイト) を用い、先の 2 種類のゲージとこの 2 種類の接着剤とを組合せて、計 4 種類のゲージ・接着剤の組合せを作り、各々の場合について、曲げひずみの測定を行った。

2.3 実験方法

実験に使用した衝撃曲げ試験装置を図 1 に示す。ボンベ①内の高圧空気は減圧弁をへて一旦蓄気室②に導かれ、同室にとりつけられている排気弁により所要の圧力に調節される。電磁弁③を開くと空気は装てん室④に流れこみ、同室内にあらかじめ装てんしてあった衝撃棒が高圧空気によって発射され、固定台⑤において一端を固定されたはりの自由端に衝撃を加え、はりには衝撃曲げひずみを生じついに最終変形に至る。なお過渡的なひずみ波形をシンクロスコープで観測する場合、この曲げひずみによるゲージの抵抗変化は図 2 の観測装置図に示すように直流電源 6 ボルトを有するブリッジ回路から直流増幅器 (周波数特性 DC~200

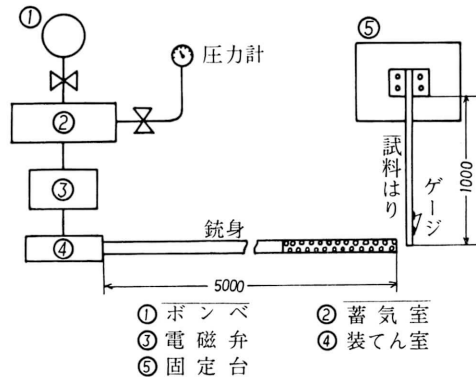


図1 衝撃曲げ試験装置図

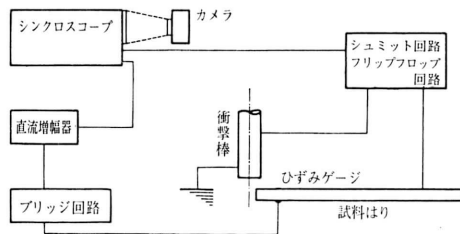


図2 観測装置図

KHz) をへて電圧変化の形で二現象用シンクロスコープの入力端子に加えられる。一方衝撃棒がはりに接触すると、トリガー回路が作動してシンクロスコープの単掃引が開始され、曲げひずみ波形がブラウン管面上に画かれる。

なお、本実験で実施した衝撃棒の速度は約 30 m/sec から 160 m/sec であったが、衝撃速度 70 m/sec 以上の大ひずみ測定には直流増幅器を用いることなく、ブリッジからの出力を直接シンクロスコープに導いた。我々の場合、ゲージのはく離、断線したものまたはその残留値が正常であってもその過程で不確かな挙動を示したものは実験データから除外したが、シンクロスコープはその監視用として使用した。

2.4 残留ひずみの測定

実験においてはまず横衝撃荷重をうけたはりの測定点における曲げひずみの残留値を、はりに接着された箔ゲージから求めなければならない。これにはシンクロスコープで観測した値に較正を施して求める方法もあるが、この研究では箔ゲージの大ひずみへの追従性を正確に測定することを主眼にしているため、シンクロスコープを用いることによる諸誤差の混入をさける

ため、直接ゲージの抵抗変化を測定してゲージによるひずみ値を定めた。すなわち衝撃前と衝撃終了後におけるゲージの抵抗値をそれぞれ R_a , R_s とすると残留曲げひずみ ε_g は次式のようになる。

$$\varepsilon_g = \frac{1}{G \cdot F} \left(R_a - \frac{R_a \cdot R_s}{R_a + R_s} \right) / R_a \quad (1)$$

ただし $G \cdot F$ は使用ゲージの静的 gage factor である。

抵抗 R_a , R_s の測定にはデジタル電圧計（最高表示：19999，精度： $\pm 0.04\%$ of rdg ± 2 digit）を使用した。我々の場合、十分精度は確保し得たと考えている。

2.5 曲率の測定と表面ひずみの決定

箔ゲージによる曲げひずみの測定が可能であるかどうかを検討するに当たって、前項2.4の方法によりゲージから測定されたひずみ値と同じ測定点におけるひずみの実測値とを比較しなければならない。しかし、曲げひずみの実測は、縦ひずみの場合と異なり、ひずみ面がわん曲しているために極めて困難である。そこで、本実験においては、まず測定点のはり下面（圧縮側）における曲率を実測し、この実測値よりはりの中立軸の曲率を求め、これに Bernoulli-Euler の仮定を用いて表面ひずみを計算し、この値とゲージからの測定値とを比較した。以下に曲率測定の概要について述べる。

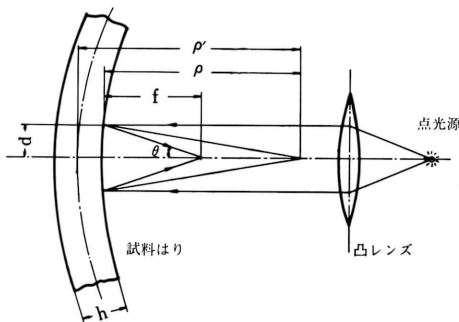


図3 曲率の測定

幾何光学の法則によると、図3のように平行光束が凹円筒面の光軸に沿って入射すると、反射光は円筒軸に平行な一直線（焦線）上に集まる。このとき円筒面の曲率半径 ρ と焦点距離 f の間に $\rho = 2f$ なる関係がある。この法則は入射光、反射光ともに近軸光線である場合、すなわち、反射光線と光軸とのなす角 θ が $\theta \div \tan \theta$ とみなされる範囲内でのみ成立する。本実験では上記の法則に基づき、衝撃後のはりのわん曲面上

の測定点を中心にして $\pm 2\text{mm}$ の部分をエメリー紙で研磨した後、点光源（ジルコン・ランプ）と凸レンズを図3のように配置して平行光を作りこれを研磨面の光軸に沿って入射せしめ、求められた焦点距離を2倍することにより、この部分の平均曲率半径を求めた。本実験において求められた焦点距離の最小値は約50 mmであったが、このとき最も周縁の光線でも $\tan \theta = 0.04$, $\theta = 0.0402$ となり $\theta \div \tan \theta$ が成り立つので上記の法則は近似的に成り立つものと考えてよい。このようにして測定された曲率半径の精度を調べるために既知の半径を有する円筒面について同様の方法で測定した結果を図4に示す。測定結果と円筒の半径とはほ

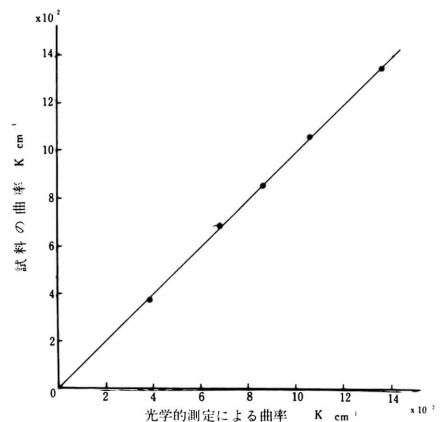


図4 光学的方法の検定曲線

んど一致しており、この計測法の正しいことが認められた。この方法によりはりの測定点における曲率が求められると、この点の表面ひずみは“はり断面は曲げ変形後も中立軸に直角であり、かつ平面を保つ”とする Bernoulli-Euler の仮定を用い

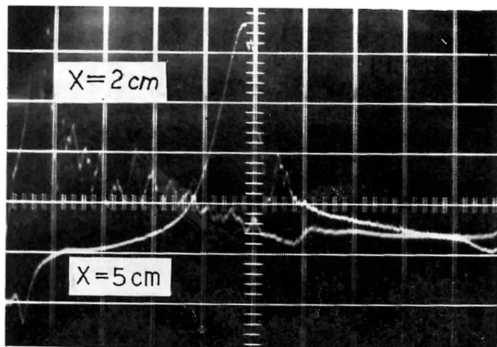
$$\varepsilon_a = \frac{h}{2} / \left(\rho + \frac{h}{2} \right) \quad h; \text{ はりの高さ}, \rho; \text{ 曲率半径} \quad (2)$$

で表わされる。以後、便宜上この方法を“光学的方法”と呼ぶことにする。

3. 実験結果と考察

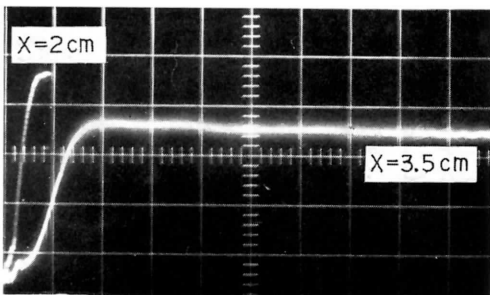
図5、図6、図7は今回の実験において観測された波形写真例である。図5はゲージがはく離した場合、図6はゲージ抵抗とゲージリード線の接続点で断線した場合、図7は正常な場合のものである。

本実験において見られたゲージのはく離は、ゲージ



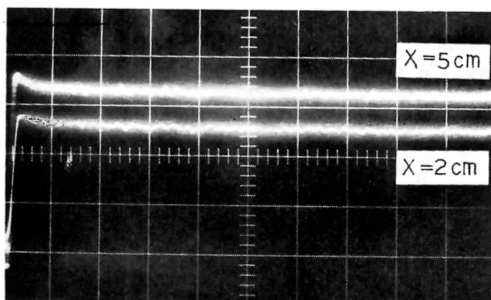
縦軸 500mV/div
時間軸 50 μ sec/div
(増幅器使用)

図5 ゲージのはく離の状態
($V=68.8\text{m/sec}$)



縦軸 50mV/div
時間軸 50 μ sec/div

図6 ゲージの断線の状態
($V=160.2\text{m/sec}$)



縦軸 50mV/div ($2.0 \times 10^{-2}/\text{div}$)
時間軸 1msec/div

図7 ひずみ波形 ($V=113.2\text{m/sec}$)

がはりの引張側に貼付されたものについては、シアノアクリレート系接着剤を用いた場合 2×10^{-2} 程度のひずみから、またエポキシ系接着剤を用いた場合 2.5×10^{-2} 程度のひずみから生ずるようであるが、はりの圧

縮側に貼付されたゲージではシアノアクリレート系接着剤では 2×10^{-2} のひずみではなく離した例もあるがほとんど 4.0×10^{-2} 程度のひずみから起るようである。図8において回帰直線より著しく離れて数点散在しているのは、このはく離を起したものである。しかし、エポキシ系接着剤を用いた場合ベークライトゲージでは 5×10^{-2} のひずみあたりからはく離を起すが、ポリミクロンゲージについては本実験の範囲内ではく離は起きなかった。ゲージの接着には多分に技術的巧拙があると思われるので一概に判断することは出来ないが、少なくとも我々の使用した範囲内では、衝撃塑性曲げに使用する接着剤にはエポキシ系接着剤の方がシアノアクリレート系接着剤よりも適しているように思われる。

また図5のはく離および図6の断線はゲージが急速な変形をうけつつある場合に起るのではなくうけた直後に起こしているのは興味深い現象である。

また図7からははりの 20 mm, 50 mm 点における塑性挙動がよくうかがわれる。すなわち、衝撃直後に一度だけ急激な大変形を行いその後弾性回復を行いつつ一定ひずみ状態で残留値へと移行していく。この挙動は弾完全塑性材のはりにおけるヒンジ理論の予測と一致している。

次に我々は箔ゲージによる大ひずみの測定限界を調査するために、縦軸にゲージによるひずみ値、横軸には光学的方法によるひずみ値をとって回帰図をかいたものが図8である。図中の○印はベークライト・ゲ

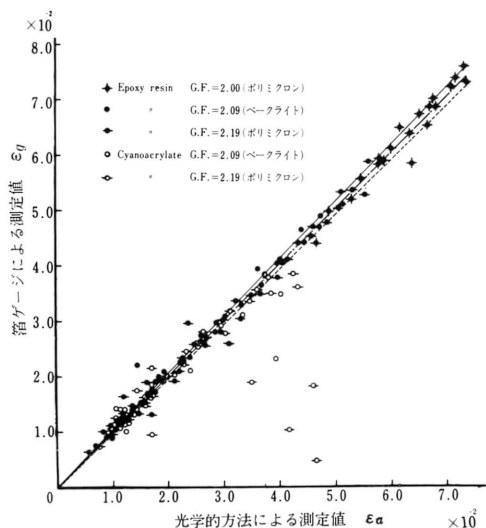


図8 量的追従性の回帰図

ジにシアノアクリレート系接着剤、-○-印はポリミクロン・ゲージにシアノアクリレート系接着剤、●印はベークライト・ゲージにエポキシ系接着剤、-●-印はポリミクロン・ゲージにエポキシ系接着剤をそれぞれ用いたものである。この4つの場合について最小自乗法によって求められた回帰直線の勾配はそれぞれ0.972, 0.976, 1.028, 1.027であった。図8にはこれらの回帰直線が示されている。図中、3本の直線のうち一点鎖線は勾配が1.0の直線で、実線はエポキシ系接着剤を使用したもの、また、破線はシアノアクリレート系接着剤を使用したものである。使用した箔ゲージによる回帰直線の勾配の差はほとんど認められない。この結果から判断すると箔ゲージによる曲げひずみの測定値の信頼度は極めて高いように見える。ただし、ゲージによる曲げひずみの測定値には、縦ひずみの場合と異なり接着層およびゲージベースの厚さにもとづく誤差が含まれている。すなわち、はり表面に貼付されたゲージははり表面から、(接着層の厚さ)+(ゲージベースの厚さ)= h' だけ浮いていることになるのではりの中立軸の曲率を K とすると、ゲージからの測定値とはり表面のひずみの間には

$$\{K(\frac{h}{2}+h')-K\frac{h}{2}\}/(K\frac{h}{2})=2h'/h \quad (3)$$

だけ誤差を生ずることになる²⁾。本実験においてもこの h' の値を工具顕微鏡を用いて測定したが明確な値を求めることは困難であった。しかし、 h' の値は大きめに見積っても 0.07 mm 以上ではないようである。従って我々の用いた高さ 10 mm のはりに対して上記の誤差はたかだか 1.4 % 程度である。しかし、この誤差を考慮に入れて上記の回帰図を検討してみても、ポリミクロン・ゲージにエポキシ系接着剤を使用した場合、少なくとも 7×10^{-2} 程度の曲げひずみの測定は可能であると思われる。なお、図8における回帰直線の勾配をみるとエポキシ系接着剤を使用した場合にはゲージによる測定値が実測値よりわずかであるがやや大きめに、またシアノアクリレート系接着剤を用いた場

合はやや小さめにあらわれているが、河島らの縦衝撃の実験¹⁾においても同様の傾向が見受けられる。

4. 結 論

我々は今回、片持りの高速横衝撃実験を行うに当り使用する箔ゲージによる曲げひずみの測定範囲を明らかにする必要にせまられてこの実験を行ったものであるが、以上の実験結果によると箔ゲージの大きな曲げひずみへの追従範囲は高速変形にもかかわらず予想外に大きく 1 mm の箔ゲージによるエポキシ系接着剤を用いてベークライト・ゲージを使用した場合、約 5×10^{-2} の大きさの曲げひずみまで、また、ポリミクロン・ゲージを使用した場合、少くとも約 7×10^{-2} 程度の大きさの曲げひずみまで追従可能であることが明らかになった。従ってシンクロスコープ等で動的曲げひずみを測定する場合十分正確な較正を行えば 7×10^{-2} 程度まではかなり精度の高い測定結果が期待できる。また、接着剤としてはシアノアクリレート系のものよりもエポキシ系のものが適しているようである。さらに図8に見られるごとく、箔ゲージによる測定値と実測された曲率から Bernoulli-Euler の仮定を用いて計算された表面ひずみとの間で極めて高い相関が見られることから、高さ 10 mm 程度のはりの塑性曲げにおいても Bernoulli-Euler の仮定が成立するものと考えてよいであろう。

最後にこの実験を行うに当り、衝撃装置を御貸与頂いた九州大学工学部航空工学科の河島佑男教授および関係者の方々に深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河島・河村：箔ゲージによる衝撃時の大ひずみ測定，九大工学集報，39巻4号，昭和42年。
- 2) G. F. Chalmers: Some Thought on the Making of Reliable Strain Gauge Measurement, J. Brit. Soc. Strain Measurement. 1967-4, Vol. 3, No. 2, p. 3-6.