

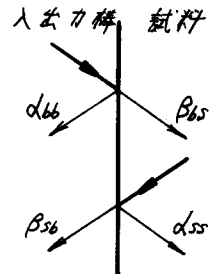
東海大学工学部 正員 中野一男

東海大学工学部 正員 冬木 衛

東海大学工学部 正員 近藤 博

1. まえがき 材料の高速変形下における挙動を明らかにするには、そのひずみ速度-応力の関係を知らなければならない。このような関係を求めるために、筆者らは、従来金属材料や高分子材料の高速圧縮試験に用いられているホプキンソン棒法を本試験に適用し、動的応力-ひずみ関係を求め報告してきた。今回の報告は、実験データの解析に普通用いられている平均値法を適用する場合、試験のインピーダンスに直した入出力棒を想定する目的で、材料および入出力棒に発生する階段状の弾性波を、解析的に取り扱いやすい階段関数に近似し、動的応力-ひずみ関係を求め、弾性係数 E の比較検討を行ない、試験棒材の選定と、求めた材料の弾性係数 E の補正法について述べる。

2. 階段関数表示 ホプキンソン棒法における入出力棒および材料に生ずる応力は、反射係数 d_{bb} (以下 d)と入射応力 O_i を用いると、図-2より明らかなように、次のようなステップ状の関数で表される。



$$1 + d_{bb} = \beta_{bs}$$

$$1 + d_{ss} = \beta_{sb}$$

$$d_{bb} + d_{ss} = 0$$

図-1. 反射透過係数関係

1). 入力棒に生ずる応力は境界面からの反射応力を O_r とすると

$$(O_i + O_r)_U = \{1 - (-d)^{2n+1}\} O_i \quad (O_i + O_r)_L = \{1 - (-d)^{2n-1}\} O_i \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 U , L はステップ関数の上側, 下側を、 n は材料内の弾性波の往復回数。

2). 出力棒に生ずる応力を O_t とすると、1)と同様に

$$(O_t)_U = \{1 - (-d)^{2n+2}\} O_i \quad (O_t)_L = \{1 - (-d)^{2n}\} O_i \quad \text{----- (2)}$$

3). 試料に生ずる応力を O_s とすると、1), 2)と同様に

$$(O_s)_U = \{1 - (-d)^{N+1}\} O_i \quad (O_s)_L = \{1 - (-d)^N\} O_i \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 N は試料内の弾性波の往復回数($N = 2n$)。

以上のような、ステップ関数では、解析的な取り扱いが困難である。そこで、実時間に変換するたつに、 $\tau = \frac{Gt}{2E_s}$, $N = \frac{Gt}{2L_s}$ を用いて、ステップ関数の上下応力の各項をとの相乗平均値ととり、応力を近似的な連続関数で表すと次のような階段関数で表すことができる。

1'). 入力棒に生ずる応力 $O_i + O_r$ は

$$O_i + O_r = \left[1 - \exp\left(-2 \cdot \frac{1+d}{1-d} \cdot \frac{G_s}{L_s} t\right)\right] O_i \quad \text{----- (1')}$$

2'). 出力棒に生ずる応力 O_t は

$$O_t = \left[1 - \exp\left\{-2 \left(\frac{1+d}{1-d}\right) \left(\frac{G_s}{L_s} t + 1\right)\right\}\right] O_i \quad \text{----- (2')}$$

3'). 試料に生ずる応力 O_s は

$$O_s = \left[1 - \exp\left\{-2 \left(\frac{1+d}{1-d}\right) \left(\frac{G_s}{L_s} t + \frac{1}{2}\right)\right\}\right] O_i \quad \text{----- (3')}$$

式(1'), (2'), (3')を用いて計算された値が、図-2の中で実験で示されている。これらの値は、直上り積分を用いてステップ関数の相乗平均値とかなり良く一致を示す。

よって、材料のひずみ速度は、式(1'), (2')から次のようになる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho C L_s} (O_i - O_r - O_t) = \frac{g O_i}{\rho C L_s} \left[1 + \exp\left(-2 \cdot \frac{1+d}{1-d}\right)\right] \cdot \exp\left(-2 \cdot \frac{1+d}{1-d} \cdot \frac{G_s}{L_s} t\right) \quad \text{----- (4)}$$

また、ひずみは次のようになる。

$$\epsilon = \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \frac{O_i}{2 E_s} \left\{1 + \exp\left(-2 \cdot \frac{1+d}{1-d}\right)\right\} \left[1 - \exp\left(-2 \cdot \frac{1+d}{1-d} \cdot \frac{G_s}{L_s} t\right)\right] \quad \text{----- (5)}$$

3. 試料の弾性係数 E の決定 ホプキンソン棒法によって求めた材料の弾性係数を E' とすると、真の弾

係数 E_s は、式(1'), (5) から次のようになる。

$$E_s = \frac{[1 + \exp(-2 \frac{1+\alpha}{1-\alpha} (\frac{C_s}{E_s} t + \frac{1}{2}))] \cdot [1 - \exp(-2 \frac{1+\alpha}{1-\alpha} (\frac{C_s}{E_s} t + \frac{1}{2}))]}{2 [1 - \exp(-2 \frac{1+\alpha}{1-\alpha} (\frac{C_s}{E_s} t + \frac{1}{2}))]} E_s' \quad (6)$$

上式は、弾性波が試料内を幾回往復した後、すなわち、 $\frac{C_s}{E_s} t > \frac{1}{2}$ なる条件がありとせば次式のようになる。

$$E_s = \frac{1 + \exp(-2 \frac{1+\alpha}{1-\alpha})}{2} E_s' \quad (6')$$

式(6')において α を 1 に限りなく近づけると $E_s = E_s'$ となる。よって測定から得られる弾性係数 E_s は、試料と入出力棒の動的剛比 $R = \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$ が小さいほど精度がよいことが分る。

一般に、弾性係数の精度は 277 位であると言われているので、誤差 5% の精度を得るような試験条件は、式(6') から $R < 0.05$ となる。

一方、試料に生ずる応力の使用可能な精度(実験データの解析における)が満たされなければならない。そこで、つぎに試料に生じる有効な応力が得られる動的剛比 R を検討する。

式(1') から

$$\frac{\sigma_s(t)}{\sigma_i} = 1 - \exp[-2 \frac{1+\alpha}{1-\alpha} (\frac{C_s}{E_s} t + \frac{1}{2})] > R \quad (7)$$

と置く。その値として、弾性上 $\frac{1}{5}$ までとり、種々の試験条件を考慮すると、おおよそ $R > 0.01$ となり、動的剛比 R の範囲は、使用上つぎのようになる。

$$0.01 < R < 0.05 \quad (8)$$

図-3 には、式(1'), (5) を用いて計算した、 R の値が式(8) を満足する 0.021 と、範囲外の 0.15 のとき得たカーブの両方を描いてある。これより、平均値法で決定されるカーブの両方が、式(8) の範囲外で大きく変化するほか、定むべき速度の実験が不可能となる。

以上のような事を考慮して、入出力棒に鋼、アルミ、アクリルの三種を用いた場合、式(8) を満足する試料の弾性係数 E_s の範囲は、表-1 に示すように $4 \sim 25000 \text{ kg/cm}^2$ となり、三種の入出力棒を準備することにより、補正なしでかなり広範囲な弾性係数の試料の実験が実施することができた。

4. まとめ 土試料にオアキニソニ棒法を適用する場合は、試料のおおよその弾性係数 E_s を見きわめ、試験棒を選定する必要がある。その場合、静的試験結果を参考にして、入出力棒には、鋼、アルミ、アクリル材を適当に選

ぶとよい。また、動的剛比 R の値が大きいような場合には、図-2 に示すように、入力棒に発生する引張波による降込みから反射係数 α で決定し、式(6') により補正する必要がある。オアキニソニ棒法は動的応力-変形関係の決定に際しかなり有効な試験法である。最後に、整理・計算等に協力して下さった当時肥後松村大君に深く感謝します。参考文献 (1) 中野・冬木・近藤・松村; オアキニソニ棒法タイプ I の動的試験方法、土と岩、22-3

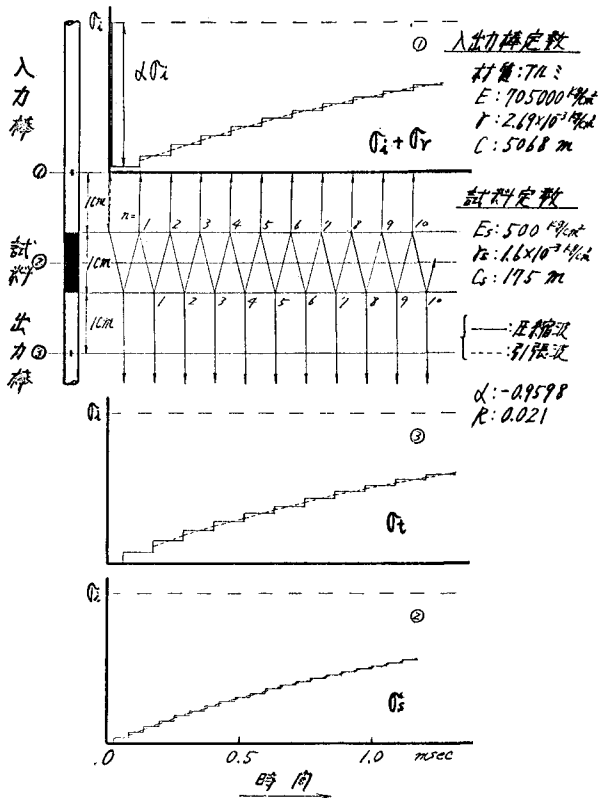


図-2 弾性波の伝播

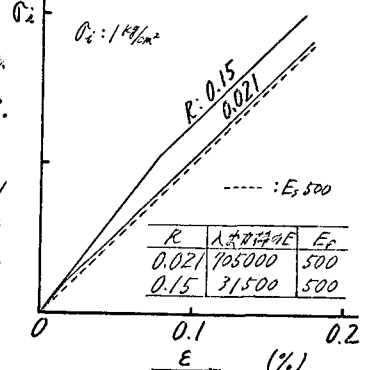


図-3 応力-変形関係

表-1 E_s の範囲

入出力棒	式(8)を満たす E_s
鋼	1000 ~ 25000 kg/cm^2
アルミ	100 ~ 3000
アクリル	4 ~ 100