

東海大学工学部 正会員 宇都一馬 正会員 冬木 衛
正会員 ○近藤 博 大学院生 松村 廣

1. まえがき 筆者らは、土の動的性質を知るために従来から金属材料や高分子材料の高速圧縮試験に多く用いられているホプキンソン棒法を土試料に適用することを試み、試作したホプキンソン棒法タイプの三軸圧縮試験装置ならびにセン断試験装置とこれら試験装置の測定原理、測定値の解析法および試験結果について、すでにその概要を報告した¹⁾。ホプキンソン棒法を土の試料に適用する場合、土固有の強度や変形定数が金属材料のそれに比べて極めて小さいので、入出力棒に鋼を用いると、土とのインピーダンスが大きく異なるために、土試料に生ずる応力測定に当って大きな誤差が生じ(ヒズミ測定は精度がよいが)入出力棒には利用し難い。そこで、筆者らは、これらの難点を解決するために、打撃棒および入出力棒に土とのインピーダンス比の適当なナイロン棒を使用して来たが、さらに、三軸圧縮試験を行なうに当って、このナイロンの入出力棒に初期圧縮応力や側圧をかけたことによつて、入出力棒に生ずる弾性波圧縮応力は、①初期圧縮応力の増大にもなつて小さい値になる。②側圧の増大にもなつて大きい値になる。③またこれらの条件が変わっても伝ば速度は変わらないなどの興味ある観測結果を得た。

そこで、今回は、ホプキンソン棒法タイプの三軸圧縮試験を行なう場合に、まづ初期圧縮応力を受けた入出力棒を打撃棒で打撃したときに生じる弾性波応力について理論的ならびに実験的に検討した結果について報告する。

2. 初期圧縮応力(σ_0)を受けた状態の棒を打撃した場合の弾性波応力(σ)の理論的取り扱い

図-1(a)に示すように、衝突直前に速度 V をもつ打撃棒によって、初期圧縮応力(σ_0)を受けた状態の入出力棒を打撃した場合、打撃棒と入出力棒のもつ衝突直前のエネルギー U_1 は、単位体積重量、縦弾性係数、断面積および長さをそれぞれ γ, γ_1 ; E_1, E_2 ; A_1, A_2 ; l_1, l_2 とすれば、打撃棒の運動エネルギーと入力棒のヒズミエネルギーからなるので、 $U_1 = \frac{1}{2} A_1 l_1 \frac{\gamma_1}{g} V^2 + \frac{1}{2} A_2 l_2 \frac{\sigma_0^2}{E_2}$ (1) で表わされる。

また衝突後の打撃棒と入力棒の弾性波応力とその伝ば速度をそれぞれ σ_1, σ_2 ; C_1, C_2 で表わし、図-1(b)に示すように衝突後も時間の領域 $C_1 t$, $C_2 t$ の変位速度を重心に対してそれぞれ U_1 , U_2 とする。これら領域のエネルギー U_2 は、ヒズミエネルギーと運動エネルギーの両者からなるので、つぎのように表わされる。

$$U_2 = \frac{1}{2} A_1 C_1 t \frac{\gamma_1}{g} (V - U_1)^2 + \frac{1}{2} A_1 C_1 t \frac{\sigma_1^2}{E_1} + \frac{1}{2} A_2 C_2 t \frac{\gamma_2}{g} U_2^2 + \frac{1}{2} A_2 C_2 t \frac{(\sigma_0 + \sigma_2)^2}{E_2} \quad (2)$$

弾性波応力の伝ばしない領域のエネルギー U_3 は打撃棒のまだ落下している部分の運動エネルギーと入力棒のまだ弾性波が到達していない部分の σ_0 によるヒズミエネルギーが存在するので、つぎのように表わされる。

$$U_3 = \frac{1}{2} A_1 (l_1 - C_1 t) \frac{\gamma_1}{g} V^2 + \frac{1}{2} A_2 (l_2 - C_2 t) \frac{\sigma_0^2}{E_2} \quad (3)$$

衝突による熱や音などによるエネルギー損失を無視すれば、 $U_1 = U_2 + U_3$ (4) となり、また衝突中の衝突面の変位速度が等しいと仮定すれば、 $V - U_1 = U_2$ (5) となる。さらにウゴニオの式²⁾によれば、変位速度 v と弾性波応力 σ の関係は $\sigma = \sqrt{\frac{\gamma E}{g}} v = \frac{\gamma C}{g} v = \frac{E}{C} v$ (6) で与えられるので、式(1)~(6)を両棒の変位速度 U_1, U_2 および弾性波応力 σ_1, σ_2 について解くと、それぞれ、つぎようになる。

$$U_1 = \frac{A_2 C_2 \gamma_2 V + A_2 g \sigma_0}{A_1 C_1 \gamma_1 + A_2 C_2 \gamma_2} \quad U_2 = \frac{A_1 C_1 \sigma V - A_2 g \sigma_0}{A_1 C_1 \gamma_1 + A_2 C_2 \gamma_2} \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \frac{A_2 C_2 \gamma_2 E_1 V + A_2 C_1 \gamma_1 \sigma_0}{A_1 C_1^2 \gamma_1 + A_2 C_1 C_2 \gamma_2} \quad \sigma_2 = \frac{A_1 C_1 \gamma_1 E_2 V - A_2 C_2 \gamma_2 \sigma_0}{A_1 C_1^2 \gamma_1 + A_2 C_1 C_2 \gamma_2} \quad (8)$$

(8)式と初期圧縮応力 σ_0 から打撃面において、 $A_1 \sigma_1 = A_2 (\sigma_0 + \sigma_2)$ となり静荷重をかけた場合と同じ釣合の条件を満足している。またホプキンソン棒法のように両棒の材質・断面積が等しい場合には、 $\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sqrt{\frac{E_1}{E_2}} V + \sigma_0)$ 、

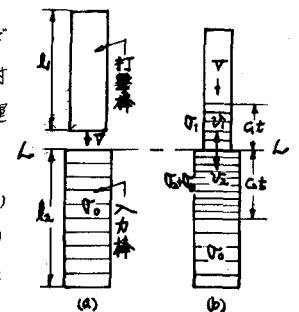


図-1 不連続面 l_1 を打撃した状態

$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sigma_0 \right) \quad (9)$ となる。更に、初期圧縮応力がない場合 ($\sigma_0 = 0$) には、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot V \quad (10)$ となり、入力棒に弾性波応力が発生し得ない限界速度 V_c 、限界落下高さ h_c は (9) 式において $\sigma_2 = 0$ とおけば、

$$V_c = \sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \sigma_0, \quad h_c = \frac{\sigma_0}{2 E \rho} \quad \text{となる。}$$

3. 実験結果と理論値の比較

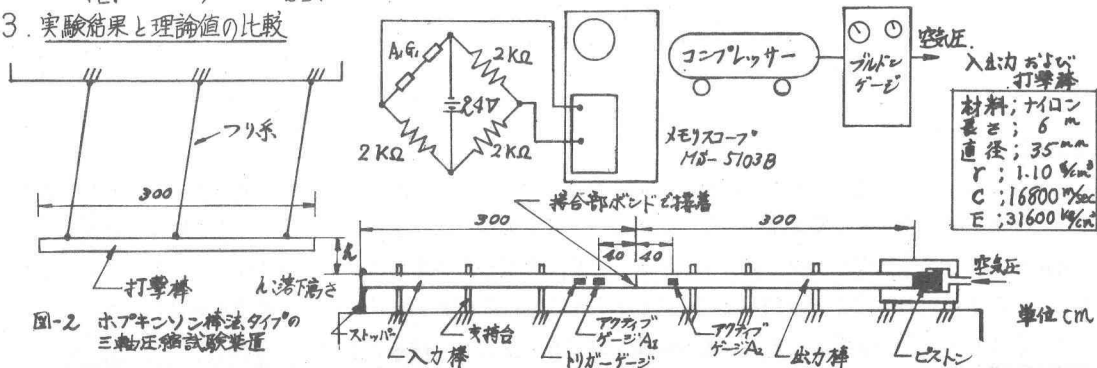


図-2 ホプキンソン棒法タイプの三軸圧縮試験装置

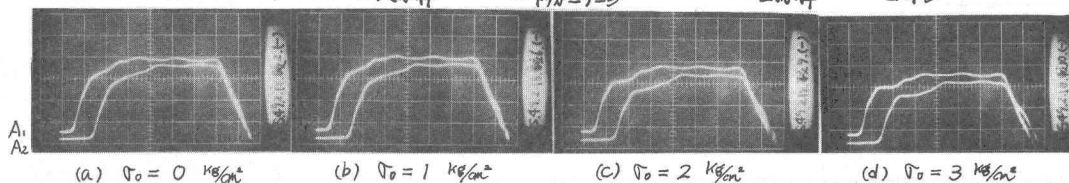


写真-1 縦軸: $20 \text{ mV/div.} = 0.767 \text{ kg/cm}^2$, 横軸: 0.05 msec/div. , 落下高さ: 2.5 cm

図-2 に示すホプキンソン棒法タイプの三軸圧縮試験装置の入出力棒をボンドで接着し、長さを6mの一体の棒にして、これに初期圧縮応力 σ_0 を棒の後部から加えて、打撃した場合の A_1, A_2 ゲージによって得られた観測波形の一例を写真-1 に示す。これらの写真から初期圧縮応力 σ_0 が大きくなると弾性波応力は減少することがわかる。これと同様の落下高さを変えた一連の観測波形の A_1 ゲージについて、応力値をほぼ一定になったとみなされる、立ち上がり約 $0.1, 0.2, 0.3 \text{ msec}$ の位置の3点で応力値を読み取り、これらの平均値を $\sigma_0 = 0$ のときの観測値と (9) 式の σ_2 による理論値 ($\sigma_0 = 0$ に相当する値) との比で補正した。この値を初期圧縮応力 σ_0 をパラメータにして、落下高さ h に対してプロットしたのが図-3 である。図-3 には (9) 式で得られた理論値を実線で示した。観測値は理論値とよい対応を示すことがわかる。とくに落下高さ h が小さい部分では初期圧縮応力 σ_0 の増大にともなって弾性波応力は急激に減少することがわかる。また初期圧縮応力 σ_0 をうけた入力棒には、弾性波応力 σ の発生し得ない限界落下速度 V_c ないし限界落下高さ h_c が存在することがわかる。

4. まとめ

① 初期圧縮応力 σ_0 をうけた棒を打撃したときの弾性波応力を求める理論式 (8) を示した。

② ホプキンソン棒法に用いる打撃棒と入出力棒の材質・断面積が同じ場合の打撃による弾性波応力は初期圧縮応力がないときの値から $\frac{\sigma_0}{2}$ を引いた値になる。

③ これらの理論的実験的事実は PC ぐいの打撃応力の問題や土被り圧をうけた地盤の波動の問題などへの応用が考えられる。

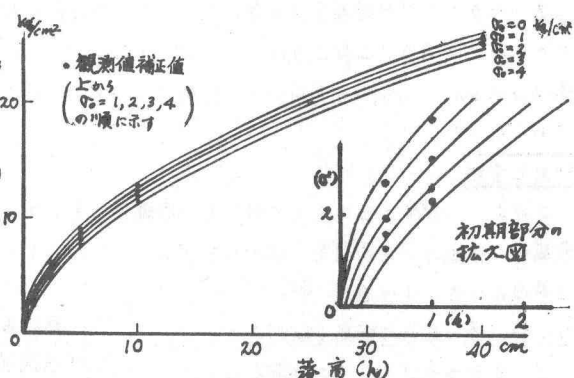


図-3 弾性波応力 (σ) と落下高さ (h) の関係

参考文献 1) 岸部・冬木・近藤・松村; ホプキンソン棒法タイプの動的試験方法, 土と基礎, No.193, 1974.3.

2) たとえば 山田嘉明; 塑性力学, 日刊工業新聞社, 1965.