

東海大学工学部 正員 森田定中  
 正員 宇都一馬  
 正員 冬木 衡  
 正員 近藤 博

1. まえがき くい打ち・標準貫入試験など地盤への動的貫入の問題とあつた場合、このような目的にあつたひずみレベル、応力レベルの上の動的特性と正確に知る必要がある。筆者らは、従来金属材料・高分子材料の高速圧縮試験の有効な手段として多く使用されているホプキンソン棒法と土に適用すべく一連の実験も行なつてきた。この方法によつてかなり正確に応力-ひずみ曲線と決定しうることもみた。<sup>1,2)</sup> 動的セン断強度についてはShimming<sup>3)</sup>が動的高速試験を行なつた報告がなされている。<sup>3)</sup> 筆者らは、土の動的セン断時の応力-ひずみ曲線を決定すべく、ホプキンソン棒法タイプの土の動的セン断試験装置と考案し、初歩的な実験とすでに報告した。<sup>4)</sup> 今回、実験装置を改良し人工の土について実験を行ない、かなり正確に応力-ひずみ曲線を決定することができたので報告する。

2. 実験装置および試料 図-1に実験装置の概要を示す。入出力プレートにはアクリル板(表-1参照)を用い、試料との接触面は60番金剛砂と瞬間接着剤で接着し、試料との緊密をはかった。入出力プレートの中央からそれぞれ25mmの位置に半導体ストレインゲージ(抵抗1K $\Omega$ 、ゲージ率173 $\pm$ 3%、ゲージ長2mm)を両面に貼り、直列に継ぎ曲げの成分と打ち消した。出力プレートのA<sub>3</sub>、A<sub>4</sub>ゲージは一つのブリッジに組み込み、(O<sub>3</sub>+O<sub>4</sub>)の値として測定し解断の瞬間をはぶいた。打撃棒はステンレス棒を細いひもでつり下げ、5~20cmの高さから自由落下させ、入出力プレートに打撃を与えた。二枚の入出力プレートも平行に保つたために塩化ビニールのパイプ(外径25mm、厚さ3mm)を試料と同じ長さとして使用した。垂直荷重は一軸圧縮試験機を改良して載荷し、ブルーピングリング<sup>5)</sup>を測定し、0.5、1.0、1.5、2.0 kg/cm<sup>2</sup>の4段階とした。試料は標準砂、カオリンクレイ、石膏、水と重量比7:4:2:4の割合で混合し型枠に入れて、2日間湿潤養生し、型枠から押し出した人工の土を成型して使用した。試料の直径は35mm、長さには5、10、20、40mmの4段階とした。試料の性質は表-2に示した。

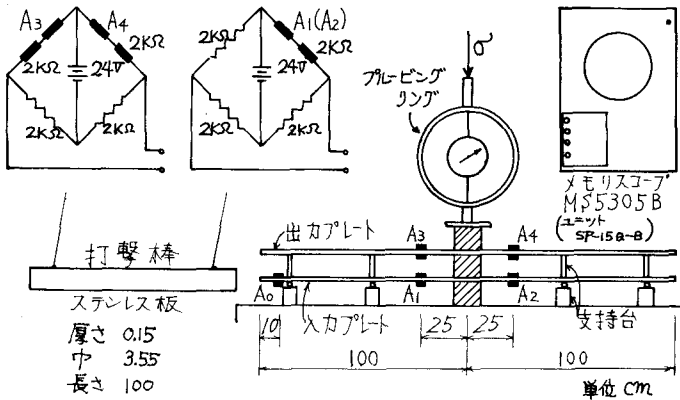


図-1 実験装置の概要

| 表-1                           | 表-2                                         |
|-------------------------------|---------------------------------------------|
| 入出力プレート<br>(アクリル)             | 試料の性質<br>(人工の土)                             |
| 板厚: 2 mm                      | Gs: 2.72                                    |
| 幅: 35 mm                      | $\gamma_c: 1.87 \text{ g/cm}^3$             |
| 長さ: 2 m                       | w: 30.97 %                                  |
| $\gamma: 1.18 \text{ g/cm}^3$ | $\rho_u: 2.27 \text{ kg/cm}^2$              |
| C: 2183 m/sec                 | Cs: 500 m/sec*                              |
| E: 57400 kg/cm <sup>2</sup>   | * 上下プレートの3段形の<br>立ち上がり部分のいずれか<br>計算したものである。 |

### 3. 解析法と問題点

#### 3.1 測定原理 図-2(a)に示

したように、試料を出入カプレート  
の間にサンドウィッチし、さらに  
その上下に波の反射の影響を受け  
ない十分な長さの同一試料をセット  
する。入力プレート的一端を打撃  
し、圧縮矩形波  $\sigma_1$  を発生させる。  
発生した弾性波はプレート内を伝  
わり、試料の位置に達するとセン  
断波として試料に入射し、試料内  
を出力プレートに向って伝わる。  
境界面Iで  $\sigma_1$  の一部  $\sigma_R$  は反射され、  
一部  $\sigma_2$  は透過する。試料内を伝  
わったセン断波は出力プレートに達し、  
出力プレートには、絶対値  
の等しい異符号の波  $\sigma_3$ ,  $\sigma_4$  が境界面II  
からそれぞれ反対方向に伝わる。  
これらの応力の時間的変化は、試料の  
中心から出入カプレートにそれぞれ  
 $d$  の位置に合ったストレインゲージ  
 $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  によ  
って観察される。

いま、① 出入カプレートは粘性を無視しうるもので、これを伝  
うる波が一次元の波動方程式にしたがう。② 試料と出入カプレート  
は完全に一体となり、運動する。③ 試料の横断面内でのセン断応力  
の分布は一定である、と仮定する。試料の断面積を  $A_s$ 、出入カプレ  
ートの断面積を  $A_p$ 、弾性係数を  $E$ 、単位体積重量を  $\gamma$ 、弾性波の伝  
播速度を  $C$  とすると、入力プレートと試料との境界面Iでの力の釣  
合より、 $2A_s T_I = A_p(\sigma_1 + \sigma_R - \sigma_2) \dots (1)$ 、同じように出力プレートと試  
料との境界面IIでは、 $2A_s T_{II} = A_p(-\sigma_3 + \sigma_4) \dots (2)$ 、がえられる。試  
料両端の応力の平均に近似的に試料のセン断応力と考えると、

$$T = (T_I + T_{II})/2 = (\sigma_1 + \sigma_R - \sigma_2 - \sigma_3 + \sigma_4) A_p / 4 A_s \dots (1)$$

また、出入カプレートと試料との接触面の変位速度をそれぞれ、  
 $v_I$ ,  $v_{II}$  とすると、 $v_I = \sigma_2 g / \gamma C \dots (4)$ ,  $v_{II} = \sigma_4 g / \gamma C \dots (5)$  とする。こ  
こに  $g$  は重力加速度である。試料の長さ  $l$ 、試料両端の変位速度  
の差をとると、ヒズミ速度  $\dot{\epsilon}$  とヒズミ  $\epsilon$  はそれぞれ次式になる。

$$\dot{\epsilon} = (\sigma_2 - \sigma_4) g / \gamma C l \dots (2)$$

$$\epsilon = \int_0^t (\sigma_2 - \sigma_4) dt \cdot g / \gamma C l \dots (3)$$

以上の関係式(1),(2),(3)と出力波形の模式図、図-2(b)に適用す  
れば、 $T$ ,  $\dot{\epsilon}$ ,  $\epsilon$  は図解によって容易に求められることがわかる。

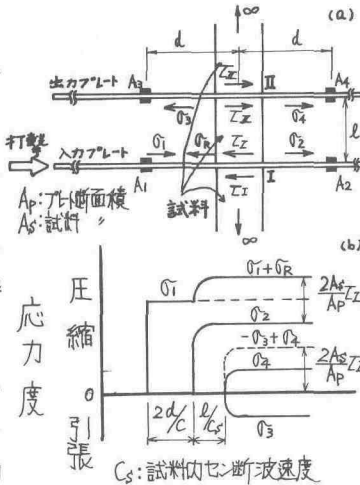


図-2 測定原理の説明図

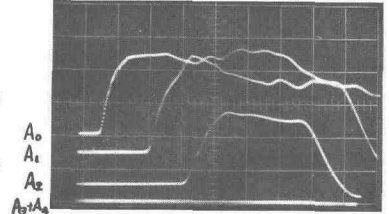


写真-1. 試料がない場合(解析の基準値)

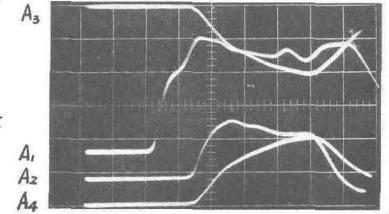


写真-2.  $A_3$ ,  $A_4$  と別々にとった場合(基準値より下の引張応力)

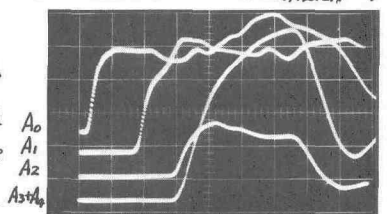


写真-3.  $A_3$  と  $A_4$  とで測定 (一般的な測定波形)

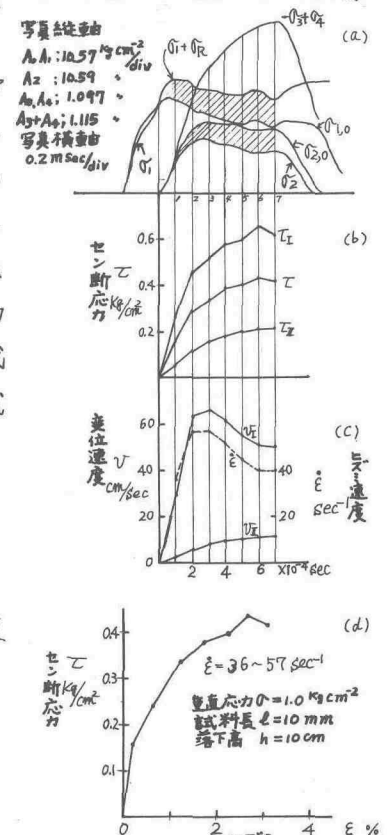


図-3 測定波形解析の一例

### 3.2 測定波形の解析法

測定波形の解析の一例を図-3に示す。写真-1は、試料をサンドウイッチしない場合の波形で、当然ながら出力プレートには応力は生じない。3.1で述べた解析法は矩形波が発生するとのみ適用できるもので、この写真でわかるように、この条件は満たれていない。したがってこの波形も基準値として解析を進めるわけである。写真-2は $A_3, A_4$ と別々にとったもので、出力プレートには絶対値の等しい異符号の応力が発生していることがわかる。 $(A_3, A_4$ の感度は $A_1, A_2$ の10倍してある) 写真-3は $-A_3 + A_4$ として測定し、一般的測定波形である。図-3に写真-3の波形を例に解析方法を示した。以下写真-1の試料のない場合のデータに添字0をつけて表わす。写真-3に写真-1の基準値と重ねてトレースしたものが図-3(a)である。(このとき基準線は一致せず) 基準値をもとに(1)式と書き直すと、 $2A_5 \tau_L = A_p \{ (\sigma_t + \sigma_R - \sigma_{t,0}) + (\sigma_{2,0} - \sigma_2) \} \dots (1)'$ となる。すなわち、図-3(a)でハッキリした部分の和で与えられる。したがって(1)式はつぎのようになる。

$$\tau_L = \{ (\sigma_t + \sigma_R - \sigma_{t,0}) + (\sigma_{2,0} - \sigma_2) - \sigma_3 + \sigma_4 \} A_p / 4 A_5 \dots (1)'$$

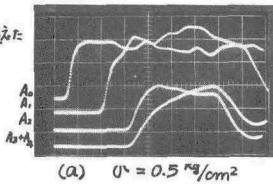
時間間隔 $\Delta t = 0.1 \text{ msec}$ で解析した結果を図-3(b)に $\tau_L, \tau_R, \tau$ 、図-3(c)に $v_L, v_R$ 、および $\dot{\epsilon}$ の時間変化を示した。図-3(d)に $\tau - \dot{\epsilon}$ 曲線を示した。このときヒズミ速度は $36 \sim 57 \text{ Sec}^{-1}$ であった。

### 4. 解析結果

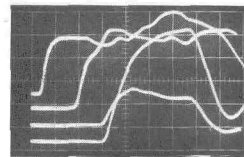
(写真-4, 5, 6の縦軸、横軸は写真-3と同じ、 $A_1, A_2$ は $0.2 \text{ V/div}$ 、 $A_3, A_4, A_3 + A_4$ は $0.02 \text{ V/div}$ )

写真-4. 垂直荷重の増えた場合

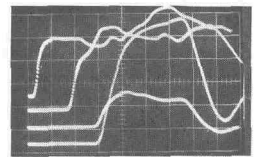
試料長  $l = 10 \text{ mm}$   
落下高  $h = 10 \text{ cm}$   
1回目の落下のデータ



(a)  $\sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



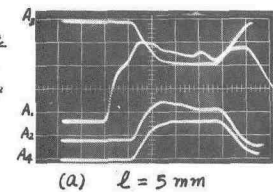
(b)  $\sigma = 1.0 \text{ kg/cm}^2$



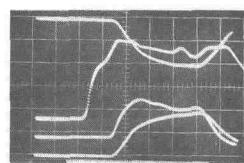
(c)  $\sigma = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

写真-5. 試料長 $l$ を変えた場合

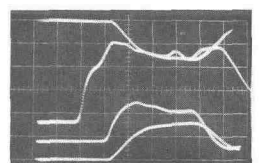
垂直応力  $\sigma = 1.0 \text{ kg/cm}^2$   
落下高  $h = 10 \text{ cm}$



(a)  $l = 5 \text{ mm}$



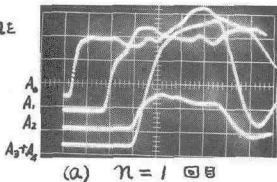
(b)  $l = 10 \text{ mm}$



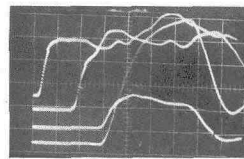
(c)  $l = 20 \text{ mm}$

写真-6. 打撃回数 $n$ を増えた場合

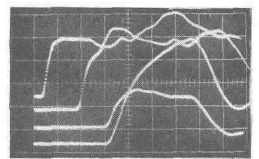
試料長  $l = 10 \text{ mm}$   
垂直応力  $\sigma = 1.0 \text{ kg/cm}^2$   
落下高  $h = 10 \text{ cm}$



(a)  $n = 1 \text{ 回目}$



(b)  $n = 2 \text{ 回目}$



(c)  $n = 3 \text{ 回目}$

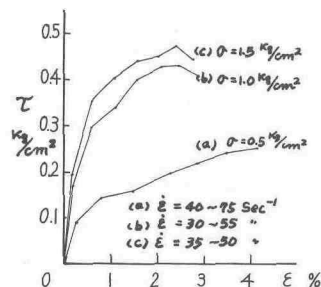


図-4. 写真-4の解析結果

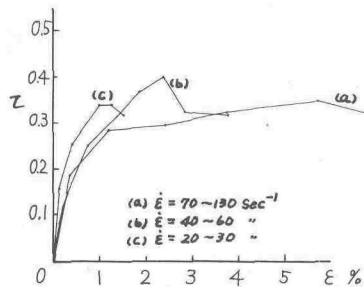


図-5. 写真-5の解析結果

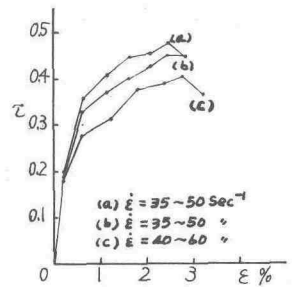


図-6. 写真-6の解析結果

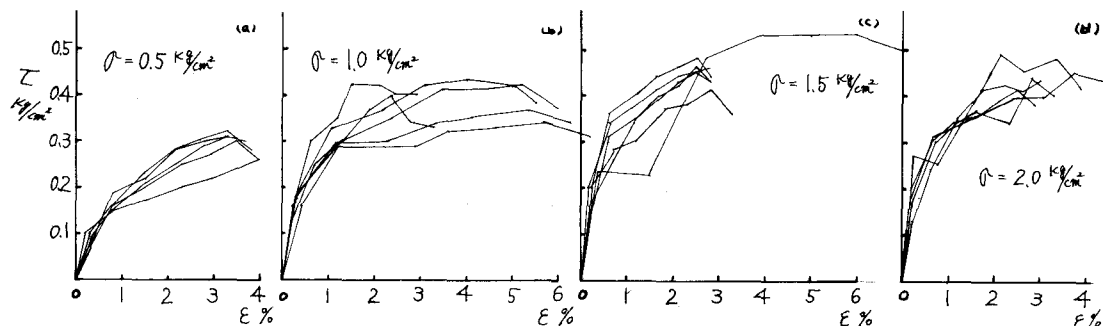


図-7 図-3と同一方法によって得られた応力(σ)-ヒズミ曲線

写真-4は、試料長 $l=10\text{mm}$ 、ハンマー落下高さ $h=10\text{cm}$ と一定にし、垂直応力の $\rho$ を変えたものである。このデータの応力(σ)-ヒズミ曲線を図-4に示す。垂直応力の増加にともなう試料の剛性が増えることがわかる。このσ-ε曲線のピークを破壊強度と判断したいが(これはプレートと先端からの除荷波が反射してくるので、最後の7点目のプロットの実がこの影響を受ける可能性があり、信頼性が低い)。これはプレートを長くすることによって解決できる。写真-5は $\rho=1.0\text{kg/cm}^2$ 、 $h=10\text{cm}$ と一定にして、試料長 $l$ を変化させたもので、このσ-ε曲線を図-5に示す。 $l$ の変化によって、ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}$ を変化させることができる。すなわち $h$ と $l$ の組合せによって、任意の $\dot{\epsilon}$ の実験を選択することができる。写真-6は、同一試料を、連続して2打撃したもので、3回目までの波形である。このσ-ε曲線も図-6に示す。この図から、1回目より2回目、3回目の打撃による順次試料の剛性が低下することがわかる。これは打撃による試料内部の乱れによるものと考えられる。図-7は、今回実験によって得られたσ-ε曲線の一部を別に表示したもので、 $\rho$ の増加によって、この場合も試料の剛性が増加することがみられる。

なお、この測定法によれば、かなり有意な波形が観測できるので、この測定方法は、土の動的応答特性や破壊機構を研究するための有効な手段になると思われる。

5. むすび ①今回の実験で、かなりの精度で<sup>動的</sup>セン断時の応力-ヒズミ曲線がみられた。さらに実験装置を改良することによって、弾性限度から破壊限度付近までの応力-ヒズミ特性を決定できる。
- ②試料長 $l$ 、ハンマーの落下高さ $h$ を適正に選ぶことによって、かなり広範囲の動的セン断試験が可能である。
- ③土の動的応答特性や土の破壊機構の問題を取りあつかうには、有意な測定法である。
- ④試料とプレートとの接触面、垂直応力の載荷方法、プレートの材料特性など問題点はあるが、さらに精度の向上は必要ない。発表時までにほころびはデータの収集を行なう予定である。

実験、解析にあり、大学院生佐藤正人君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 森田、宇都、冬木、赤石; 土の動的挙動に関する実験的研究, 第3回日本地震工学シンポジウム, (1970)。2) 森田、宇都、赤石; 低速度ポフキンソン棒法の問題点, 第26回年次学術講演会, 土木学会, (1971)。3) B.B. Shiming, H.T. Hoas and H.C. Saxe; Study of Dynamic and Static Failure Envelopes, Proc. of ASCE SM2, (1966)。または、土質力学 最上式雄編, 土の動的性質(市原)。

4) 森田、宇都、冬木、岡田; ポフキンソン棒法タイプの動的セン断試験, 第7回土質工学研究発表講演集, 土質工学会(1972)。