

東海大学工学部

正員 森田定市

正員 宇都一馬

学生員 赤石勝

正員 冬木樹

1 まえがき 地震時の構造物の動的解析、くい打ちや動的サウンディングなど動的負入、車両荷重の地盤への影響、施工時における土工機械の損傷など土に関する動的な問題を解析する場合、土の動的性質を明確にすることが、特に必要とされている。近年電子計算機の大規模化に伴い、このような複雑な問題を有限要素法によって解析する方法が急速に進歩してきたが、その精度は土の動的物理常数をいかにとるかにによって、大きく左右されているのが現状である。

土の動的性質について、従来の研究は、各研究者毎に実験条件の単純化、測定方法が異なり、いまだ実験方法が確立されていない。実験的に求める場合、つぎのような問題点を考慮する必要がある。

(1) 高速度の現象をとらえ得る特性をもった測定器系を用いること。(2) ピックアップの応答特性およびピックアップと土のインピーダンスのマッチングがとれていないための問題。(3) 実験装置については載荷方法その他、波の反射、透過による影響を考慮すること。

このような見地から、本研究は泥岩と粘土に直接弾性波を加えた場合の土の動的挙動を実験的に調べたものである。実験には、高速現象を忠実に測定する Hopkinson splitbar technique (以下ホプキンソン棒法と呼ぶ<sup>(1)</sup>) を用いた。高速現象の応答特性が良好なこの手法は、元来金属材料や高分子材料の高速圧縮試験に多く使用されている。また土の試験には、H.B. Porrooshab などによる、飽和粘土の応答特性の研究がある<sup>(2)</sup>。ホプキンソン棒法の概要、土のようにやわらかい材料を試験する場合に生じる問題点について考察した。

2. 平均値法 ホプキンソン棒法によって、試料の応力-ひずみ線図を求めるには、平均値法による。図-1で、試料は入力棒と出力棒の間にサンドイッチされており、入力棒に打撃棒で衝撃を与え、打撃速度に比例した大きさの圧縮波を、発生させる。入力棒内の圧縮波が、試料との接触面に到達すると、一部は反射し、一部は試料内を通り出力棒に伝わる。反射波、透過波の大きさは、試料と入出力棒の物理的性質による。

入力棒および出力棒にほられた2組のひずみゲージで、試料と入出力棒との入射、反射による応力の変化を継続的に記録する。これより試料の境界面における応力と変位の時間的変化が求まり、図解的に応力-ひずみ線図を求めることができる。

打撃棒を速度  $v$  で入力棒に衝突させると、入力棒に生じる打撃応力は次式で示される。

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (E \rho / g)^{1/2} v$$

(1)

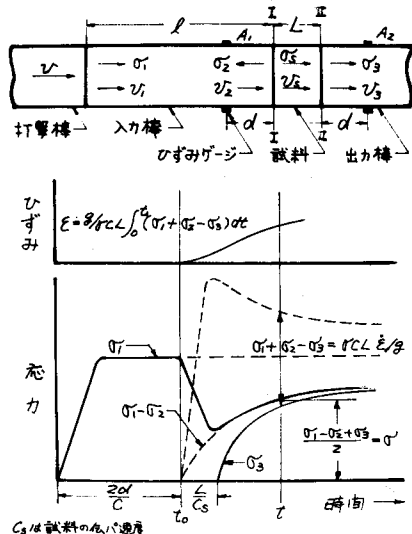


図-1 ホプキンソン棒と観測波形

$E$ は棒の弾性係数,  $\rho$ は単位体積重量,  $g$ は重力加速度である。

$\sigma_1$ は, 入力棒内を,  $C = (Eg/\rho)^{1/2}$ なる速度で伝わり, 試料との境界面Iで一部反射される。棒・試料のインピーダンスをそれぞれ $Z_1$ ,  $Z_s$ とすれば,  $\sigma_2$ は次式のようになる。

$$\sigma_2 = (\rho C/g)^{1/2} \quad (2) \quad \sigma_2 = \sigma_1 [(Z_s - Z_1)/(Z_s + Z_1)] \quad (3)$$

境界面Iにおける試料の粒子速度 $V_s = V_1 + V_2$ , 応力 $\sigma_s = \sigma_1 - \sigma_2$ である。試料内の応力, ひずみ分布を一様と考え, その平均値をとる。土の公称応力 $\sigma'$ , ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ , 公称ひずみ $\epsilon$ は, 次式で示される。 $L$ は試料の長さである

$$\sigma' = (\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_s)/2 \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = (\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_s)g/CL \quad (5)$$

$$\epsilon = g/CL \int_0^t (\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_s) dt \quad (6)$$

### 3. 図式解による考察 平均値法を完全弾

性体を試料とした場合について, 特性線を用いて図解的に考察する。(図-2)

試料と入力棒のインピーダンスの比を $d = Z_s/Z_1$ とすると, 反射係数 $\alpha$ は(3)式より

$$\alpha = \sigma_2/\sigma_1 = (Z_s - Z_1)/(Z_s + Z_1) = (d - 1)/(d + 1) \quad (7)$$

となる。ひずみゲージ $A_1$ ,  $A_2$ で得られる応力波形は, 境界面での反射, 透過を考えて, 次式のように簡単に表わされる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (1 + \alpha^{2n+1})\sigma_1 \quad (8)$$

$$\sigma_s = (1 - \alpha^{2n})\sigma_1 \quad (9)$$

試料内で $n$ 回の反射が生じたとき, 試料の応力とひずみ速度は, 次式で表わされる。

$$\sigma_s = \sigma_1 [1 - \alpha^{2n}(1 - \alpha)/2] \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon} = \alpha^{2n}(1 - \alpha)\sigma_1 g/CL \quad (11)$$

この式から, 平均値法で求める応力-ひずみ線は,  $n = 0 \sim \infty$ の範囲内である。 $\alpha$ と $\sigma_1$ の大きさによって, その範囲は大きく変化するので, 実験目的に応じて, 打撃速度, ホプキンソン棒の材質を選ぶ配慮が必要である。

参考のため図-2において試料がなく, 境界面Iが自由端とした場合の先端変位の時間的变化を図-3に示す。ピックアップにコンデンサータイプの微小変位計を用い, シンクロスコープで観測した。

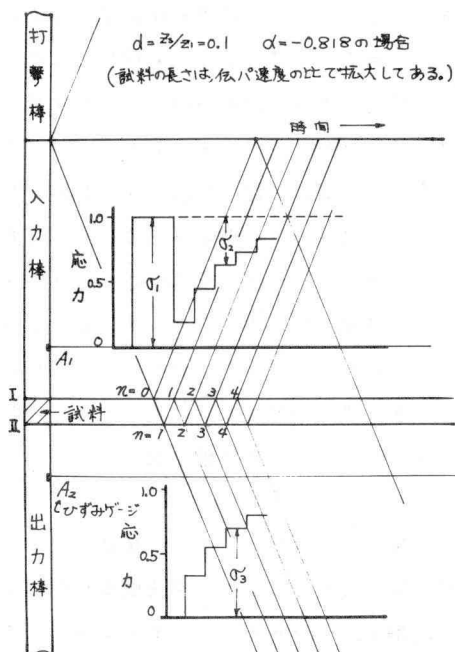


図-2 平均値法の図式解

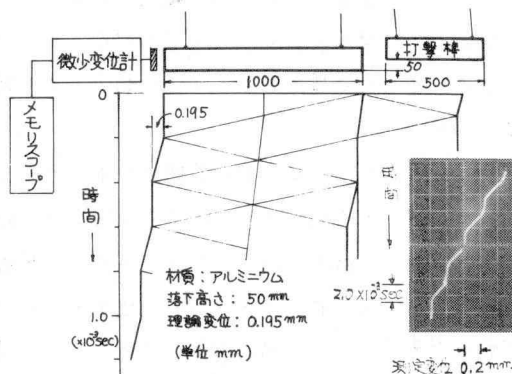


図-3 微小変位計による変位の測定例

4. 実験結果 試料に、泥岩(横浜市港南台地区で採取したもの4種類<sup>(3)</sup>)と粘土(茨城県那珂湊港で採取<sup>(4)</sup>)を用いて行なった実験結果の一部を示す。

打撃棒, 入力棒, 出力棒は直径3.5 cm, 長さ2 mのアルミ棒(またはナイロン棒, 長さ1 m)でできており, 弾性圧縮波の伝達を防げないように, ゴムバンドで水平に支持されている。打撃棒は細いひもで水平に吊り下げられる。応力測定には, 入力棒に, 半導体ひずみゲージ(抵抗値1 k $\Omega$ , ゲージ率約173, ゲージ長2 mm)2枚を対称な位置に直列に貼った。ブリッジに24ボルトの直流電圧をかけ, 前置増巾器を用いず直接シンクロスコープを作動させた。泥岩に対してはアルミニウム( $E = 1.38 \times 10^{11}$  dyn/cm<sup>2</sup>,  $C = 5000$  m sec<sup>-1</sup>), 粘土に対してはナイロン( $E = 0.202 \times 10^{11}$  dyn/cm<sup>2</sup>,  $C = 1800$ )を使用した。これによって打撃棒の落下高さ10~30 cmで泥岩について20~500 sec<sup>-1</sup>, 粘土について20~300 sec<sup>-1</sup>のひずみ速度の実験ができた。

図-4, 5に泥岩と粘土の公称応力-ひずみ線ならびに観測波形の一例を示す。図-6に粘土の圧縮強さと加圧時間の関係, 図-7に圧縮強さ増加率と飽和度の関係を示した。

データ数が少なく, 決定的なことはいえないが, およそつぎのことがいえる。

泥岩に対して (1) そのひずみ速度効果は小さい。(2) 動的弾性係数は静的弾性係数に等しい。

(3) 高速圧縮試験の場合の強度は約1.5倍に増加している。

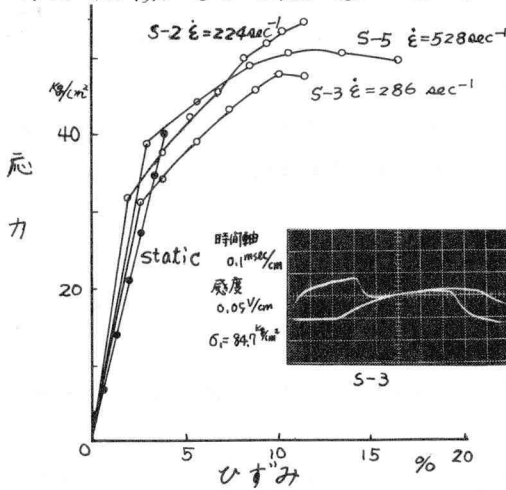


図-4 応力-ひずみ曲線(泥岩の場合)

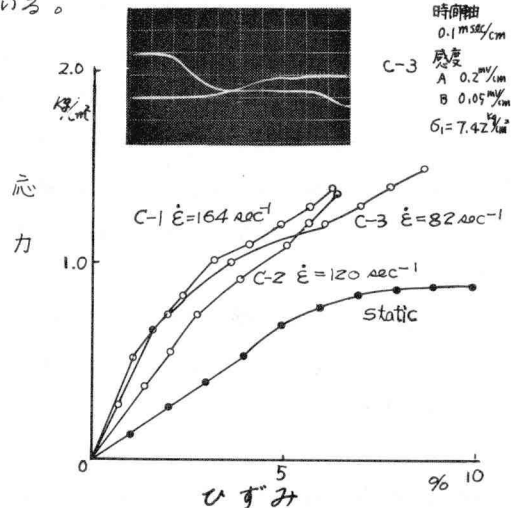


図-5 応力-ひずみ曲線(粘土の場合)

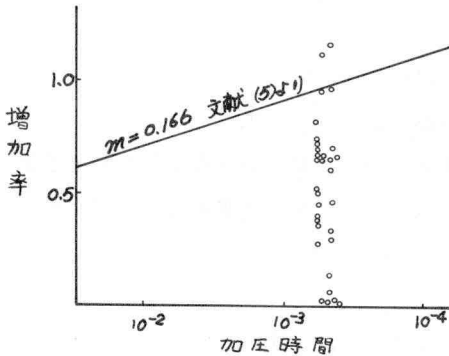


図-6 粘土の圧縮強さと加圧時間

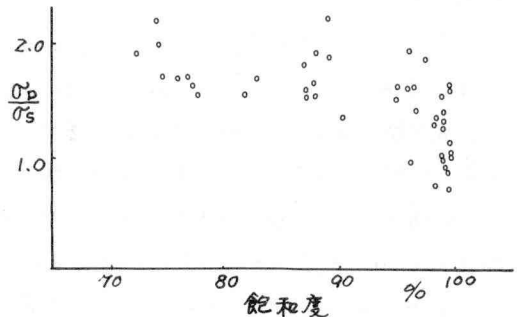


図-7 粘土の圧縮強さ増加率と飽和度

粘土に対して (1) 高速圧縮をうける粘土の増加は認められるが、従来発表されている程大きいものではなく、ひずみ速度  $20 \sim 300 \text{ sec}^{-1}$  で  $1.2 \sim 1.4$  倍程度である。(図-6) (2) 粘土の圧縮強さ増加率は、飽和度  $70 \sim 100\%$  の範囲内で、飽和度の増大とともに減少する傾向にある。(図-7)

5. 問題点 (6) ホプキンソン棒法については Kolsky<sup>(7)</sup> や Davies<sup>(8)</sup> によって詳しく論じられている。この方法を土のような低インピーダンスの試料に適用した場合に生ずる問題点について考える。

(1) インピーダンスの比  $d$  の値が小さい状態で実験を行なうと、入力棒で、弾性波がほとんど反射され、試料への入射応力がゼロに等しい。試料のインピーダンスに適した材質のホプキンソン棒を選ばなければならない。図-8 に  $\alpha$  と  $d$  の関係を示した。グラフ上にプロットした点は、アルミニウムに対する各材質のインピーダンスの比である。なお、 $\alpha$  の値は、標準貫入試験について実測した  $\alpha$  の値に対応するものである。

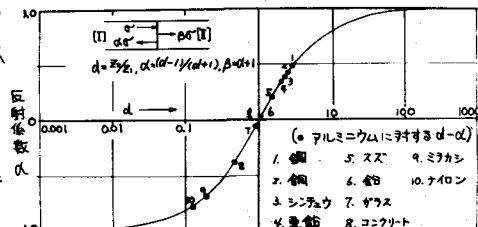


図-8  $d$  と  $\alpha$  の関係

(2) 弾性圧縮波を、鋼球で発生させる場合、複雑な応力波形、短い弾性圧縮波継続時間となり、解析が困難となる。同径、同材質の長い打撃棒を使用するのが望ましい。

(3) 打撃速度とホプキンソン棒の材質により、試料のひずみ速度が決定されるので、土の弾性限度付近の挙動を明らかにするため、低い打撃速度で実験する必要がある。

(4) 低い打撃速度で実験する場合、完全な形の打撃応力パルスを得るために、打撃棒と入力棒の衝突時の全断面同時接触が特に重要である。打撃面の小さな凹凸、不一致が観測波形の立ち上がり時間のにおくに大きく影響し、測定値の誤差の原因となる。

## 6. まとめ

(1) 上に述べたような問題点を考慮して実験を行なえば、土のような試料に対して、広い範囲のひずみ速度における動的実験装置として考えられる。

(2) 土にかぎらず、コンクリート、アスファルト、岩石、フション材などの動的試験方法として使用可能である。

(3) 現在、試料に側圧をかけられる、三軸タイプの実験を行なっている。またホプキンソン棒法と同様な考え方で、土の動的セン断試験装置の開発も可能と考えられる。

## 参考文献

- (1) B. Hopkinson: Phil. Trans. Roy. Soc. London 213 (1914) 437
- (2) H. B. Poorooshab: Proc. Symposium on Wave Propagation (1967)
- (3) 森田, 宇都, 冬木, 赤石: "ホプキンソン棒法による土の動的粘弾性係数" 第5回土質工学講演集
- (4) 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
- (5) 大崎順彦: "土の動的性質とその応用" 土質工学会 (1965) 49.
- (6) H. Kolsky: Proc. Phys. Soc. 1362 (1949)
- (7) E. D. H. Davies, S. C. Hunter; J. Mech. Phys. Solids II (1963) 155
- (8) 森田, 宇都, 冬木: "棒の地盤への動的貫入機構(標準貫入試験を対象にして)" (3) と同じ