

東海大学工学部 森田定市 宇都一馬・冬木衛

1. まえがき 従来、くい打ち時や地震時などの問題を対象とした研究において、土の中に発生する応力の測定は、小型土圧計などを埋め込んで行っている。しかし、このような動的な現象の測定では、ピックアップ自身の影響、すなわち、土とピックアップとのインピーダンスのマッチングがとれていないために、必ずしも正確な値を得ていないように思われる。これはピックアップ面での応力の反射があり、その影響をうけるためである。すでに報告したように<sup>(1)</sup>、シンクロスコープを用いることにより、打撃応力を非常に正確に測定することができ、あわせて、スチールのように材質が均一で、弾性限界内でヤング率がリニアなロッドにおいては、一次元波動方程式による解が測定値とよく一致することを見付けた。

今回、このようなロッドを一種のピックアップとして土の中へ打ち込み、土との接触面で生じる応力の反射と透過の量を測定し、土の動的な挙動を推定しようと試みた。すなわち、材質の物理定数のわかっているもの運動から、土のような塑性体の破壊の問題を推定しようというものである。波動理論によれば、ロッド先端での応力の反射の割合(%)を知れば、土との接触面に生じる圧力、透過するエネルギー、接触面の変位などの時間的な変化を推定しうることになる。

初歩的な段階として、CBR用モールドに砂を突き固め、これにスチール製のロッドを打ち込んで検討した。以下、この方法による測定結果、問題点、その他応用面について述べる。

2. 実験方法 図-1にブロックダイアグラムを示す。実験装置、ロッド、ハンマーなどは参考文献<sup>(1)</sup>で用いたものと同じものをを使用した。ロッドには中央に半導体ひずみゲージ(抵抗値2kΩ, ゲージ率176, ゲージ長2mm)を2枚貼り、直列につないでいる。試料は最終含水比18%, 比重2.62, 均等係数2.31の山砂で、JISA 12111による55回突き固めたもの(以下CBR55と略す)と10回突き固めたもの(同CBR10)の二種類を使用した。比較のため自由端とみ仿しうると考えられるゴム板(厚さ3cm)も使用した。

ハンマーは解析を簡単にするため、ロッドと同じ断面積とし、落下高さは $h=100\text{cm}$ と一定にした。1つのモールドにつき、4~5回の打撃にとどめ、サイドのフリクションの影響が少ないようにした。チェックのため高速カメラ(HIMAC 16HM)を使用した。

3. 測定の方法 波動理論によれば、弾性体ヤング率 $E$ 、単位体積重量 $\gamma$ 、伝播速度 $C$ 内の伝播する弾性波の応力 $\sigma$ と、その応力の生じている部分の変位速度 $v$ とはつぎの関係がある。<sup>(2)</sup>

$$\sigma = \frac{\gamma C}{2} v = \sqrt{\frac{E \gamma}{2}} v \quad (1)$$

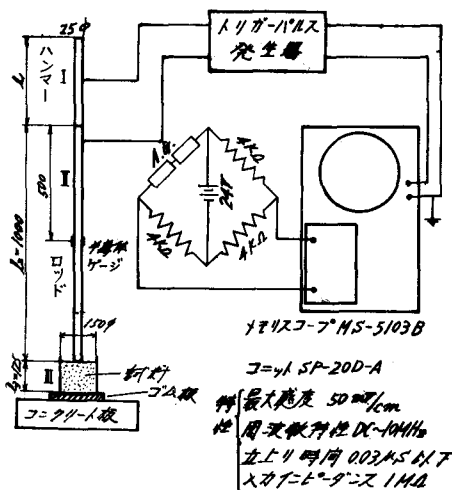


図-1 ブロックダイアグラム

このときエネルギーは、その部分(ΔL)の歪エネルギー  $-\frac{A\Delta\sigma}{2E}(\Delta^2)$  と分子のモフ運動エネルギー  $-\frac{A\sigma\Delta L}{2\rho}(\Delta^2)$  に二分されて存在する。弾性波が不連続面に達し長とき、応力の一部は反射し、一部は透過する。図-2において、ⅠからⅢ(弾性体へ)に入る場合、その割合は次式で与えられる。(詳細は文献(3))

$$\alpha = \frac{A_2\sqrt{E_2}\rho_2 + A_3\sqrt{E_3}\rho_3}{A_2\sqrt{E_2}\rho_2 + A_3\sqrt{E_3}\rho_3} = \frac{r-1}{r+1} \text{ (反射係数)}, \quad \beta = \frac{2A_2\sqrt{E_2}\rho_2}{A_2\sqrt{E_2}\rho_2 + A_3\sqrt{E_3}\rho_3} = \frac{2r}{r+1} \text{ (透過係数)} \quad (2)$$

ここに、 $r = \frac{A_2E_2\rho_2}{A_3E_3\rho_3}$  であり、ダイナミック・スタiffnessの比である。ロッド先端の条件によ、 $\alpha$ の値はつぎのように変化する。固定端( $r=\infty$ )のとき $\alpha=1$ 、自由端( $r=0$ )のとき $\alpha=-1$ 、ロッドの材質より硬い( $r>1$ )とき  $0<\alpha<1$ 、柔い( $r<1$ )とき  $-1<\alpha<0$ 、同じ( $r=1$ )とき $\alpha=0$ 。今回の実験のように、Ⅱが土のような塑性体である場合  $-1<\alpha<0$  であり、近似的に土はロッドの断面積と同じ面積で破壊されると考えてよいから、(2)式において  $A_2=A_3$  とおけば、

$$\beta = \frac{2r}{1+r} = 1 + \alpha \quad (3)$$

となる。また、このとき、

$$E_3 = \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right)^2 \frac{E_2}{\beta} \quad (4)$$

なる関係より、 $\alpha$ ,  $E_2$  が既知なら、 $\alpha$  を測定すれば  $E_3$  を知るこができる。

図-2に反射係数 $\alpha=-0.9$ とした場合の理論変位図と、a, b, c断面における応力および速度の時間的変化を示した。変位速度は下向きを正としてある。特性線で囲まれた各領域の応力および変位速度は( )で示してある。

この図から明らかであるように、 $\alpha$ の値を知れば土との接触面に生じる応力、接触面の変位、エネルギーの分布などの時間的変化を知ることが出来る。この $\alpha$ の測定は、反射した応力が空なり合うことのない中央の位置で行う必要がある。また、ロッド端部の変位速度を知るこにより、 $\alpha$ が得られることがわかる。いずれか一方をチェックに使うとよい。

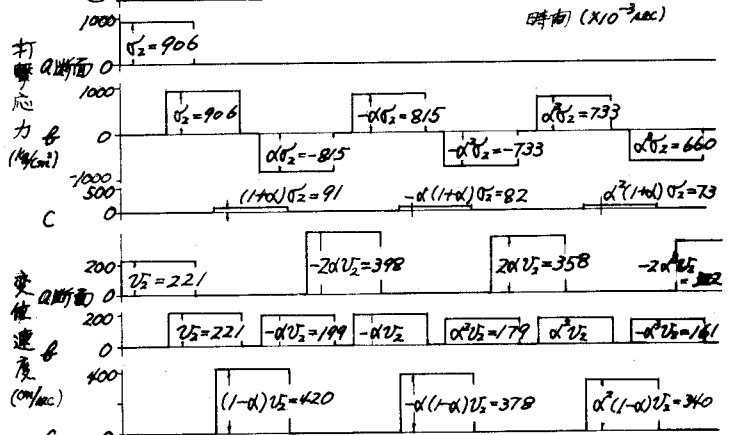
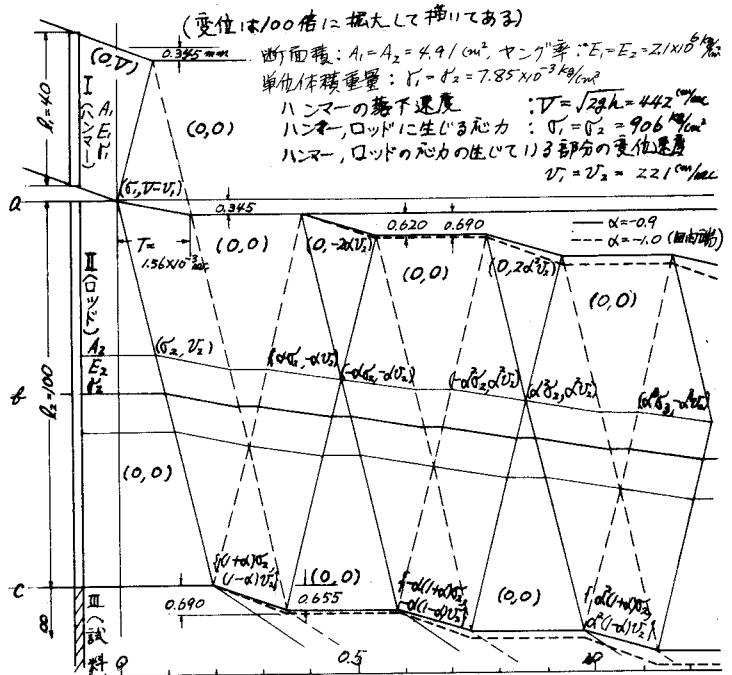


図-2 反射係数 $\alpha=-0.9$ としたときの理論変位

4. 測定結果および考察

1). 先端の条件の違いによる波形の相違。(ハンマー長さ $l_1=40\text{cm}$ の場合, 掃引時間 $0.2\text{ms/div}$ )

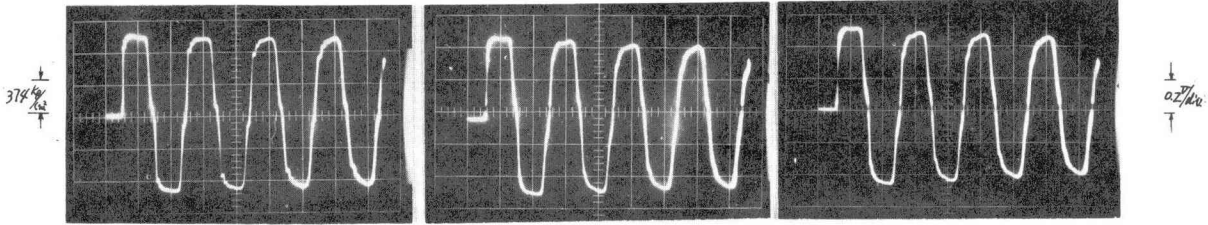


写真-1. ゴム板(厚さ $3\text{cm}$ )

写真-2. CBR<sub>10</sub> 沈下量 $=0.96\text{cm}$

写真-3. CBR<sub>55</sub> 沈下量 $=0.36\text{cm}$

CBR<sub>55</sub>とゴム板を比較すると波形のかけ具合に相違がでており、反射の回数が多いほど顕著になっている。(ゴム板も自由端とみなすことは出来ない。) 図-3に、3. で述べた方法により解析した代表的な例を示した。これからつぎのようになっている。①パルスの前部がかける。このことは、パルスの前部が土の破壊に対して主要な役割をはたしているものと思われる。②これは1回の貫入において一定の値ではなく、時間とともに変化し、③土との接触面に生ずる応力は図-3に示したような分布をし、最大 $100\text{kg/cm}^2$ 位である。最初 $0.01\text{ms}$ ほど応力の発生しない部分があり、表面のせわらかい粒子をおしつぶしている時間と思われる。つぎにピークが現われ、この時、土は破壊し、その後一定の応力を生じながら変位するものと思われる。④ロッド頭部および先端の変位は図-3に示したごとくで、つぎのパルスが到達するまで静止する。<sup>(応力はフリ)</sup>⑤エネルギーは波形を定数として求められる。

CBR<sub>55</sub> ハンマー長さ $l_1=40\text{cm}$ , 沈下量 $0.35\text{cm}$   
掃引時間 $0.1\text{ms/div}$

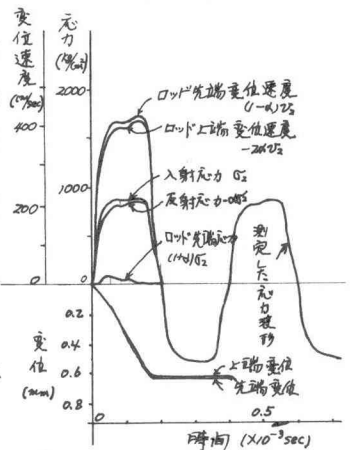


図-3 解析の一例

⑥ヤング率は時間とともに変化し、由式によつて逆算すると最大 $15\text{kg/cm}^2$ の値が観測され、他の方法(弾性波試験)によつて得られた値 $770\text{kg/cm}^2$ と大きく異なり、試験方法などをお検討する必要がある。

2) ハンマーの長さの影響。(CBR<sub>55</sub>モールドの場合, 掃引時間  $2\text{ms/div}$ )

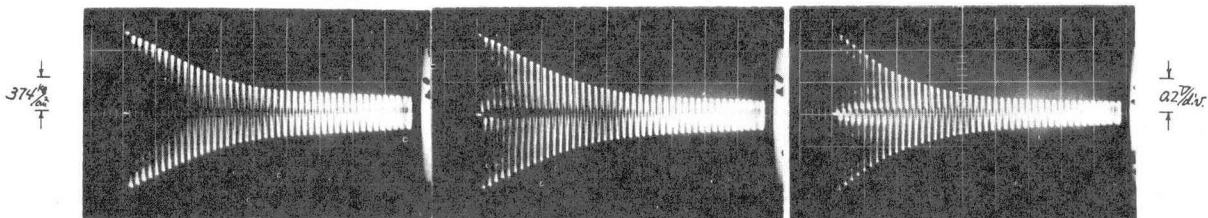


写真-4  $l_1=40\text{cm}$ , 沈下量 $=0.45\text{cm}$

写真-5  $l_1=30\text{cm}$ , 沈下量 $=0.33\text{cm}$

写真-6  $l_1=20\text{cm}$ , 沈下量 $=0.21\text{cm}$

ハンマーの長さの短いほど応力の減衰が早い。これは1)で述べたように、パルスの前部がかけることから、パルス長の短いもの(ハンマーの短いもの)ほど減衰が早いことになる。(写真-3と写真-7を比較)土の問題を解析するとき、このように全体の減衰から推定することも出来るが、この減衰の割合が必ずしも土の性質を表わしていない。

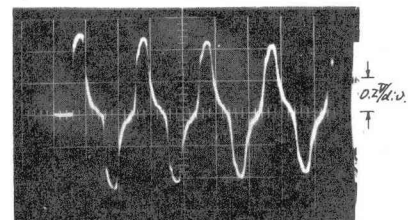


写真-7.  $l_1=20\text{cm}$ , 沈下量 $=0.14\text{cm}$   
(掃引時間 $0.2\text{ms/div}$ )

3) 高速度カメラによる観測.

2. で述べたように、ロッド頭部の変位を測定することによつて、次の値を知ることができる。  
 図-4は高速度カメラで撮ったロッド頭部の動きを示す。プロットした数値が小さいが使用したカメラの性能の限界である。

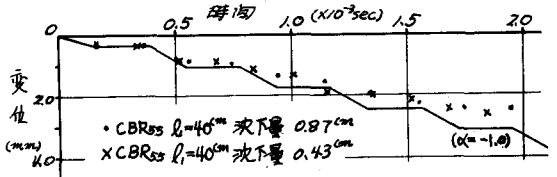


図-4 高速度カメラで補正したロッド頭部の動き

測定値はほぼ満足すべき結果をえている。なお、CBRのモールドの深さが有限であり、<sup>(ロッド内での)</sup>5回目の反射において、モールドの下面と反射が現われることがわかったので、それ以降については解析してはいない。

5. および 以上検討した結果からつぎのようなことがいえる。

- 1) ロッドの土への貫入は、断続的な変位によつて、土を破壊して作られたものである。
- 2) 一般的に土の打ち筋などで、くい体で測定した応力は先端での応力の反射が重なり、たものであり、土に発生する応力を知るには、この影響を差引く必要がある。
- 3) 波動理論により、ロッド先端での応力の反射の量を知れば、土との接触面に生じる応力、接触面の変位、エネルギーの分布などの時間的変化、あるいは土のヤング率の推定も可能になる。また、そのチェックはロッド上端の変位の時間変化を知ることによつてできる。このような考えで、予め標準貫入試験について行ったものを、参考文献(4)に述べてある。
- 4) 実験結果によると、土の影響はパルス前面が伸びてくることに現われる。このパルスの前部が土の破壊に対して、主要な役割を担っていると考えられる。
- 5) 土の性質を推定するのに2つの方法がある。一つは図-3に示したやり方で、1回の反射ごとに振幅を量り比べて比較するもので、他の一つは、波形の減衰の状況から推定する方法である。土の破壊の問題を取り扱う場合には前者の方法がよいと思われる。
- 6) 土のヤング率の逆算など、定量的な問題を取り扱うには、スチール製のロッドは最良のものといえず、今後ロッドの材質の選定が重要になる。その他、落下装置、土の試料の大きさ、などに検討の余地がある。ロッドの変位からのチェックは必ず必要で、高性能の高速度カメラ、微小変位計などの使用が望まれる。
- 7) 以上のような問題を検討し、改良すれば、この方法は衝撃荷重のほか、動的荷重(振動、地震、など)をうける材料などの挙動を調べる有効な手段になるであろうと思われる。

参考文献

- 1) 森田定市、宇都一馬、冬木衛：“シンク羅斯コープを用いた打撃応力の観測”  
 才23回 土木学会年次学術講演会概要 P.119 (1968)
- 2) E.A. Ripperger & H.N. Abramson, Proc. 3rd Midwestern Conf. on Solid. Mech. (1957) P.135
- 3) 宇都一馬：“くいの打ち筋(弾性波としての打撃応力について)” 橋梁と基礎 P.21 1-7(1967)
- 4) 森田定市、宇都一馬、前橋泰元、冬木衛：“N値の補正(主としてロッドの取入れの影響について)”  
 才4回 土木学会学術研究発表会概要 P.143 (1969)

この実験観測にあつては、学生森田新雄君の絶大な協力を得た。ここに謝意を表す。