

## 山地用貫入試験器の開発(IV) : 応力波形の解析による土の機械インピーダンスの測定

梅田, 修史

吉田, 瑞樹

末, 勝海

<https://doi.org/10.15017/10807>

---

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 54, pp.85-103, 1984-03-26. 九州大学農学部附属演習林  
バージョン :  
権利関係 :

# 山地用貫入試験機の開発 (IV)

応力波形の解析による土の機械インピーダンスの測定

梅田 修史・吉田 瑞樹・末 勝海

Development of Penetration Test Apparatus for Mountain Slope (IV)

A Measurement of Mechanical Impedance of Soil by Analyzing Stress Waves

Shuji UMEDA, Mizuki YOSHIDA and Katsumi SUE

## 要 旨

従来の山地用貫入試験機によって得られる地盤の情報は、 $n$  値のみであった。これに対し、本論文では、ロッド内を伝ばする縦波を観測し、ロッドと土との境界面での反射係数  $\alpha$  を求め、ある場所の任意の深さの土の機械インピーダンス  $Z_m = \rho \cdot c$  を精度よく測定する方法を検討した。

土の機械インピーダンスを精度よく測定するためには、できるだけ土の  $Z_m$  に近い材質のロッドおよびハンマーを用いる必要がある。このため、鉄（従来の貫入試験機で用いられているロッドおよびハンマーの材料、 $\rho \cdot c = 4.02 \times 10^7$  N·s/m）、アルミニウム合金（5052、 $\rho \cdot c = 1.37 \times 10^7$  N·s/m）、マグネシウム合金（AZ 31、 $\rho \cdot c = 9.03 \times 10^6$  N·s/m）、アクリル樹脂（PMMA、 $\rho \cdot c = 1.93 \times 10^6$  N·s/m）の4種類のロッドおよびハンマーを用いて実験的に検討した。

この結果、鉄の機械インピーダンスは、土の  $Z_m = \rho \cdot c$  よりも2桁大きく、また、アクリル樹脂は、内部損失が大きいため、土の  $Z_m$  を精度よく求めることが不可能と判明した。したがって、土の  $Z_m$  よりも1桁大きな  $Z_m$  もつマグネシウム合金（AZ 31）が内部損失も小さく、土の  $Z_m$  を精度よく求めるには、アルミニウム合金（5052）よりも有利であると判断した。

マグネシウム合金ロッドおよびハンマーを用いることにより、土の  $Z_m = \rho \cdot c$  を精度よく測定できることを示し、山地の不攪乱土の物理量  $\rho \cdot c$  の測定が可能となった。

## 目 次

- |                                  |                       |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1. 緒 論                           | ドおよびハンマーの材質の選定        |
| 2. 機械インピーダンスと反射係数                | 3. 3 実験方法             |
| 2. 1 弾性体の機械インピーダンス               | 4. 実験結果および考察          |
| 2. 2 不連続面での機械インピーダンスの差による縦波の反射   | 4. 1 ゴム板を用いた場合        |
| 3. 実 験                           | 4. 2 ゴム板の機械インピーダンスの誤差 |
| 3. 1 反射係数 $\alpha$ を応力波形から求める方法  | 4. 3 締固めマサ土を用いた場合     |
| 3. 2 土の反射係数 $\alpha$ を測定するためのロッド | 5. 結 論                |
|                                  | 文 献                   |

## 1. 結 論

山地斜面の土層構造を探查するため、小型軽量の貫入試験機を開発した（梅田・吉田・末，1983）。この試験機は、従来の貫入試験機（大久保・上坂，1971・沖村・田中，1980）のように、 $n$  値（貫入ロッドを一定深さ貫入するのに要するハンマーの打撃回数）のみを求めるのではなく、ハンマーの打撃により生じたロッド内を伝ばする応力波の時間と振幅に関する特性を応力波形を解析することにより求め、土の力学的な性質を把握しようとするものである。

応力波形から求まる土の力学的な情報としては、主に次の2つがある。

- 1) ハンマーとロッドとの衝突によって生じた応力波（入射波）はロッド下端（ロッドと土との不連続面）において、反射波と透過波とに分れる。応力波測定装置で得られる記録波形での入射波および反射波は、図式解法（FISCHER, 1959, 1960・松本・三室・松森・中原，1963）により理論的に説明され、応力に関する反射係数  $\alpha$  は、入射波の振幅に対する反射波の振幅の比で与えられる。一方、 $\alpha$  は、ロッドおよび土の機械インピーダンス（機械インピーダンスの詳細は、2. で述べる）から理論的に求められる定数である。従って、ロッドの機械インピーダンスは、その材料によって決まる定数であるから、記録波形から  $\alpha$  を算出することによって、土の機械インピーダンスが求められる。
- 2) ハンマーとロッドとが衝突した瞬間を  $t=0$  とすると、 $t=2\cdot l/c$  ( $l$ : ロッドの長さ、 $c$ : 縦波の速さ) 後には、ロッドとハンマーとは離れる。その後、ロッドとハンマーとは2回目の衝突をする。 $t=2\cdot l/c$  後から2回目の衝突の瞬間までの時間間隔を、 $\Delta t_1$  とすると、 $\Delta t_1$  は、ロッドの貫入量によって変化する。従って、記録波形から求められる1回目と2回目、2回目と3回目の衝突（締固め土の実験では、3回目までの衝突が確認されている）のそれぞれの時間間隔とロッドの貫入量との関係を理論的に解析することにより、ロッドの貫入に対する土の抵抗力（この抵抗力は、一般には、排除抵抗、ロッドの周面摩擦抵抗、粘着抵抗などから成る）を求めることができる。

本報告は、記録波形より算出される反射係数  $\alpha$  から、被貫入材料の機械インピーダンスを求める方法について検討したものである。不連続面（機械インピーダンスの異なる物体の接触面）での弾性波の反射、透過、また、弾性体の機械インピーダンス等は、既に理論的に確立されている。本論文では、貫入試験の場合について、弾性体の機械インピーダンス、および不連続面での反射係数と機械インピーダンスとの関係について2. で述べる。また、貫入試験機を現地で使用する場合、1地点1深さの土の情報、ハンマーの1打撃のみで得られる。すなわち、厳密には、くり返しの試験は不可能である。従って、1打撃毎の反射係数  $\alpha$  の誤差を明確にする必要がある。このため、機械インピーダンスが既知のゴム板と4種類（鉄、アルミニウム合金、マグネシウム合金、アクリル樹脂）のロッドおよびハンマーとを用いて、各ロッドで求められるゴム板の機械インピーダンスの誤差について検討した。更に、被貫入材料に締固めマサ土を用いて、各ロッドで求められる土の機械インピーダンスを求め検討した。

## 2. 機械インピーダンスと反射係数

本章の内容は、既に解明され確立されている問題である。ここでは、（有山，1975・

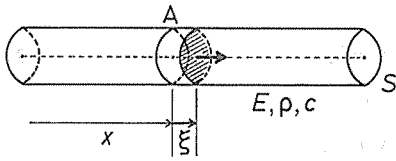


図-1 弾性体内を伝ばする縦波

FRANK, S. C. J. 1968) を参考にした。

2.1. 弾性体の機械インピーダンス

図-1 のような、ヤング率  $E$ 、断面積  $S$ 、密度  $\rho$ 、の弾性丸棒を縦波が速さ  $c$  で左から右へ進む場合、任意の断面  $A$  で棒を左右に分けると、 $A$  断面の左側の部分は右側の部分に

対して力  $T$  をおよぼす。左から右へ進む縦波の変位を  $\xi$  とすると

$$\xi = f(t - x/c), \tag{2.1}$$

となり、力  $T$  は、

$$T = S \cdot E \cdot (\partial \xi / \partial x), \tag{2.2}$$

となる。

力  $T$  が  $A$  面の左から右に力をおよぼすとき、弾性体は、変位速度  $(\partial \xi / \partial t)$  に比例した逆向きの力で運動に抵抗する。この時の比例定数  $Z_m$  を機械インピーダンスとよぶ。従って、

$$T = -Z_m \cdot (\partial \xi / \partial t), \tag{2.3}$$

となる。(2.3) 式より  $Z_m$  は、

$$Z_m = -T / (\partial \xi / \partial t), \tag{2.4}$$

となる。(2.1) 式より  $(\partial \xi / \partial x)$ ,  $(\partial \xi / \partial t)$  を求め、(2.2) (2.4) 式へ代入して  $Z_m$  を求めると、

$$Z_m = S \cdot \sqrt{E \cdot \rho}, \tag{2.5}$$

となる。また、 $c = \sqrt{E/\rho}$  より (2.5) 式は、

$$Z_m = S \cdot \sqrt{E \cdot \rho} = S \cdot \rho \cdot c, \tag{2.6}$$

となる。

従って、弾性体の機械インピーダンス  $Z_m$  は、断面積  $S=1$  とすると、弾性体固有の定数となる。

2.2. 不連続面での機械インピーダンスの差による縦波の反射

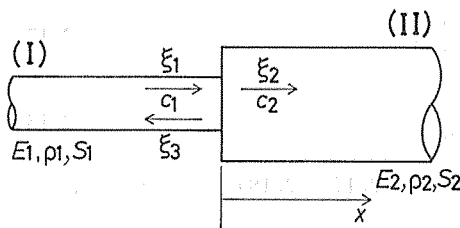


図-2 不連続面における縦波の反射と透過

図-2 に示すように、弾性丸棒 (I) の一端に、棒 (I) と物性定数の異なる弾性棒 (II) が接している場合について考える。棒 (I) の左端から伝ばする縦波の変位を  $\xi_1$ 、棒 (I) (II) の接触面 (不連続面) での反射波の変位を  $\xi_3$ 、棒 (II) への透過波の変位を  $\xi_2$  とする。

$\xi_1, \xi_2, \xi_3$  は、それぞれ次式のように表わ

される。

$$\xi_1(x, t) = f_1(t - x/c_1), \quad (2.7)$$

$$\xi_2(x, t) = g(t - x/c_2), \quad (2.8)$$

$$\xi_3(x, t) = f_2(t + x/c_1). \quad (2.9)$$

棒 (I), (II) の機械インピーダンス, ヤング率, 密度, 断面積, 縦波の速さをそれぞれ,  $Z_1, Z_2, E_1, E_2, \rho_1, \rho_2, S_1, S_2, c_1, c_2$  とする。また, 棒 (I), (II) の接触面を  $x=0$  とし, 棒 (I) は  $x=-\infty$  から  $x=0$  に, 棒 (II) は  $x=0$  から  $x=\infty$  にのびる半無限長の棒とする。

$x=0$  において, 変位速度および圧縮力が等しいという境界条件が成立しなければならないから, 境界条件は

$$\left(\frac{\partial \xi_1}{\partial t}\right)_{x=0} + \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial t}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial t}\right)_{x=0}, \quad (2.10)$$

$$S_1 \cdot E_1 \cdot \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial x}\right)_{x=0} + S_1 \cdot E_1 \cdot \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x}\right)_{x=0} = S_2 \cdot E_2 \cdot \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial x}\right)_{x=0}, \quad (2.11)$$

となる。(2.7) (2.8) (2.9) 式より, (2.10) 式は,

$$f_1' \cdot c_1 + f_2' \cdot c_1 = g' \cdot c_2, \quad (2.12)$$

となり, 同様に (2.11) 式は,

$$S_1 \cdot E_1 \cdot (f_1' - f_2') = S_2 \cdot E_2 \cdot g', \quad (2.13)$$

となる。(2.12) (2.13) 式の両辺を積分する。 $f_1 \equiv 0$  のとき,  $f_2, g$  も 0 であるから積分定数を 0 とすると, (2.12) 式は,

$$f_1 \cdot c_1 + f_2 \cdot c_1 = g \cdot c_2, \quad (2.14)$$

となり, (2.13) 式は,

$$S_1 \cdot E_1 \cdot (f_1 - f_2) = S_2 \cdot E_2 \cdot g, \quad (2.15)$$

となる。

ところで, 反射係数  $\alpha'$ , および透過係数  $\beta'$  は次式で与えられる。

$$\alpha' = f_2/f_1, \quad \beta' = g/f_1. \quad (2.16)$$

(2.14) (2.15) 式より  $\alpha', \beta'$  を求めると,

$$\alpha' = \frac{S_1 \cdot E_1 \cdot c_2 - S_2 \cdot E_2 \cdot c_1}{S_1 \cdot E_1 \cdot c_2 + S_2 \cdot E_2 \cdot c_1}, \quad (2.17)$$

$$\beta' = \frac{2 \cdot S_1 \cdot E_1 \cdot c_1}{S_2 \cdot E_2 \cdot c_1 + S_1 \cdot E_1 \cdot c_2}, \quad (2.18)$$

となる。ここで,  $c_1 = \sqrt{E_1/\rho_1}$ ,  $c_2 = \sqrt{E_2/\rho_2}$  より, (2.17) (2.18) 式はそれぞれ,

$$\alpha' = \frac{S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 - S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2}{S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 + S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2}, \quad (2.19)$$

$$\beta' = \frac{2S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1}{S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 + S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2} \cdot \frac{c_1}{c_2}, \quad (2.20)$$

となる。この  $\alpha'$ ,  $\beta'$  は、変位に関する反射係数、透過係数とよばれる。  $Z_1 = S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1$ ,  $Z_2 = S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2$  であるから、(2.19) 式は、

$$\alpha' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.21)$$

となる。

縦波に関する物理量には、変位  $\xi(x, t)$  だけでなく、変位速度  $\partial \xi(x, t) / \partial t$ , および力  $S \cdot E \cdot \partial \xi(x, t) / \partial x$  がある。(2.7) (2.9) (2.19) 式より、

$$\xi_3(0, t) = \alpha' \cdot \xi_1(0, t), \quad (2.22)$$

$$\partial \xi_3(0, t) / \partial t = \alpha' \cdot \partial \xi_1(0, t) / \partial t, \quad (2.23)$$

$$\partial \xi_3(0, t) / \partial x = -\alpha' \cdot \partial \xi_1(0, t) / \partial x, \quad (2.24)$$

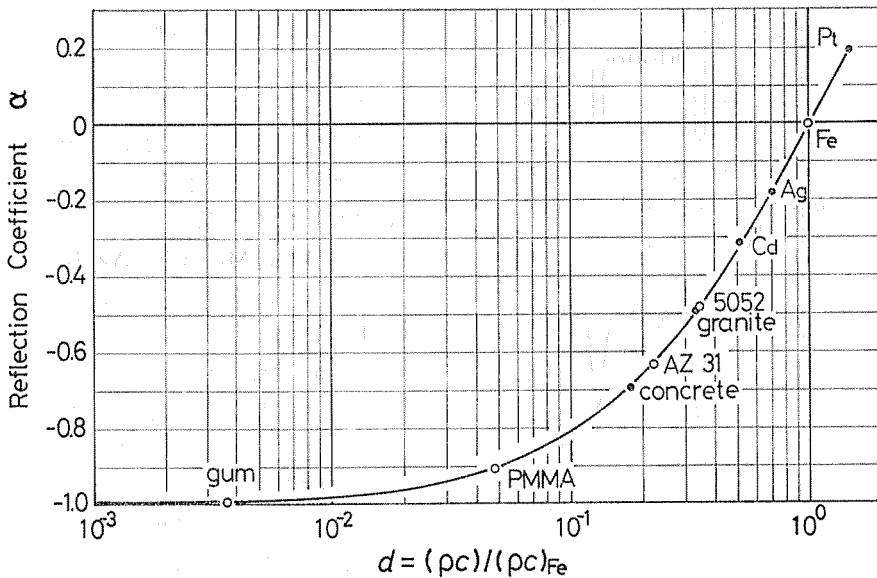
となる。

(2.22) (2.23) 式より、変位および変位速度に関する反射係数  $\alpha'$  は、(2.19) 式で表わされる。しかし、(2.24) 式より、応力に関する反射係数は、変位および変位速度に関する反射係数と大きさは等しいが、逆符号の反射係数を有する。従って、(2.19) (2.21) 式より、

$$\alpha = -\frac{S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 - S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2}{S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 + S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2} = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.25)$$

となる。(2.25) 式を  $Z_2 = S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2$  について解くと、

$$S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 = S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}, \quad (2.26)$$



図一3 鉄を基準にしたときの種々の材料の機械インピーダンスと反射係数  $\alpha$  との関係

となる。

$S_1=S_2$  として棒 (I) を貫入ロッド (機械インピーダンスを  $\rho_r \cdot c_r$ )、棒 (II) を被貫入材料 (機械インピーダンスを  $\rho \cdot c$ ) とすると、(2.26) 式は、

$$\rho \cdot c = \rho_r \cdot c_r \frac{1+\alpha}{1-\alpha}, \quad (2.27)$$

となる。 $\rho_r \cdot c_r$  はロッドの機械インピーダンスで一定となり、記録波形から  $\alpha$  を算出することにより、地盤の機械インピーダンス  $\rho \cdot c$  が求められる。

図-3は、鉄を基準にした時の種々の材料の機械インピーダンスの比と(2.25)式から求められる反射係数  $\alpha$  との関係を示す。白ぬき丸は、今回の実験で使用した材料である。土の機械インピーダンスのオーダーは、ゴムのそれと同じである。従って、鉄製ロッドを用いて土の反射係数  $\alpha$  を求めると、 $\alpha \approx -1$  となる。一方、花崗岩では、 $\alpha \approx -0.5$  であり、

岩から土までの  $\alpha$  の変化は、風化による岩の物性の変化を意味する。また、鉄製ロッドの下端に同じ鉄製の材料がある場合、 $\alpha=0$  である。従って、不連続面では、理論的に反射波は生じず、入射波と同じ透過波が鉄製材料内を伝ばする。

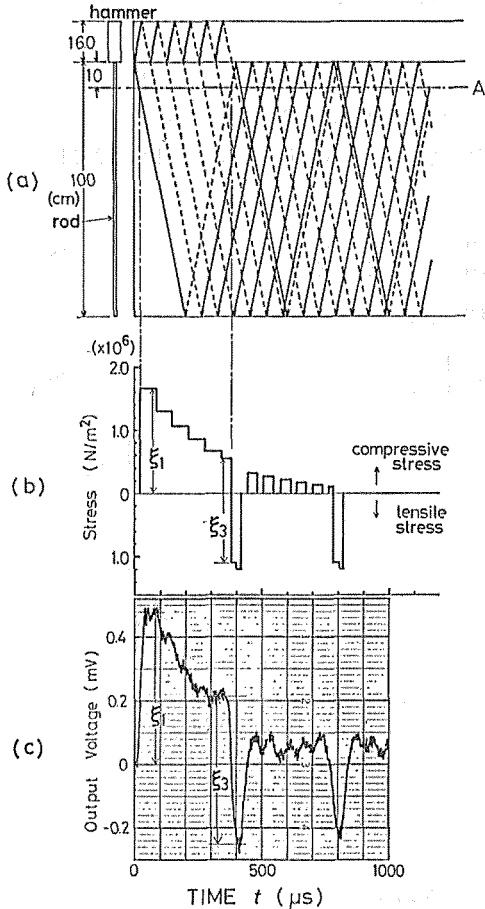


図-4 応力波形から反射係数  $\alpha$  の算出

- (a) ロッドおよびハンマーを伝ばする応力波
- (b) 理論波形
- (c) 記録波形

### 3. 実験

#### 3.1. 反射係数 $\alpha$ を応力波形から求める方法

前章で、不連続面 (機械インピーダンスの異なる材料の接触面) における反射係数  $\alpha$  は、ロッドと被貫入材料の機械インピーダンスで求められる定数であることを示した。ここでは、応力波形 (記録波形) から反射係数  $\alpha$  を算出する方法について述べる。

図-4に、Mg合金 (AZ31) の場合を例として、図式解法による理論波形 (b) と実験による記録波形 (c) を示す。(a)は、ロッドおよびハンマーを伝ばする応力波である。ロッドとハンマーとの衝突により、ロッドに生じた応力は、圧縮応力 (入射波) としてロッド下端へ向って  $c=4994 \text{ m/s}$  の速さで伝ばする。ロッド下端に、ロッドの機械インピーダンスよりも小さな  $\rho \cdot c$  をもつ材

料（例えばゴム板，土）が接している場合，ロッド下端は自由端に近くなり，圧縮応力は引張り応力（反射波）として反射する．（b）の理論波形は，打撃面下 10 cm の A 断面を伝ばする応力の時間的変化である．圧縮を正（（a）では実線で示す）とすると引張りは負（点線で示す）となり，（b）では，圧縮応力（入射波）が  $\xi_1$  となり，引張り応力（反射波）が  $\xi_3$  となる．反射係数  $\alpha$  は，入射波の最大振幅（ $\xi_1$ ）に対する反射波の最大振幅（ $\xi_3$ ）の比で与えられるから，

$$\alpha = \frac{\xi_3}{\xi_1}, \tag{3.1}$$

となる．前述のように， $\xi_1 > 0, \xi_3 < 0$  であるから  $\alpha < 0$  となる．また，ロッド下端が完全自由端であれば  $\xi_3 = -\xi_1$ ，完全固定端であれば  $\xi_3 = \xi_1$  となり， $\alpha$  は，それぞれ  $-1, 1$  となる．従って， $\alpha$  は， $|\alpha| \leq 1$  の値をとる．（c）の記録波形から  $\alpha$  の算出には， $\xi_1, \xi_3$  をノギスで測定し，（3.1）式を適用した．

### 3.2. 土の反射係数 $\alpha$ を測定するためのロッドおよびハンマーの材質の選定

前章の議論で明らかのように，土の機械インピーダンス  $Z_m = \rho \cdot c$  を精度良く測定するには，できるだけ土の  $Z_m$  に近い材質のロッドおよびハンマーを選定する必要がある．金属材料（表一では，Fe, 5052, AZ31）の場合，縦波の速さ  $c$  はほとんど変わらないので，できるだけ密度  $\rho$  の小さい材料を選ぶ必要がある．また，ロッドおよびハンマー中を縦波が伝ばし，境界面（ロッド下端）での  $\alpha$  を検出するため，材質内で  $Z_m$  が不均質であってはならない．更に，これらの材料は，屋外で使用するため，耐食性の良好なものが必要である．以上の条件を満足するものとしては，金属材料としては，アルミニウム合金（ $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ ），およびマグネシウム合金（ $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ ）しかなく，高分子材料としては，強靱性，剛性，入手の難易などを考慮するとアクリル樹脂しかない．

従って，本研究では，以上の3種類の材料からなるロッドおよびハンマーを用いて実験を行った（ゴム板を用いた実験のみ鉄製ロッド，ハンマーを加えた）．5052 は Al 合金の一種であり，その化学成分は Mg: 2.5%，Cr: 0.25%，Al: 残部（軽金属協会，1963）である．入手は容易で，各種の直径の丸棒が市販されている．AZ31 は Mg 合金の一種である．その化学成分は Al: 8.7%，Zm: 0.7%，Mg: 残部（機械設計便覧編集委員会，1977）である．この合金の入手は困難で，著者らが使用したものは，古河マグネシウ

表一 実験に用いた材料（ロッド，ハンマー）の物理定数

	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{N/m}^2)$	$c(\text{m/s})$	$\rho \cdot c(\text{Ns/m})$
Fe	7860	$2.10 \times 10^{11}$	5120	$4.02 \times 10^7$
5052	2680	$6.96 \times 10^{10}$	5095	$1.37 \times 10^7$
AZ31	1807	$4.51 \times 10^{10}$	4994	$9.03 \times 10^6$
PMMA	1185	$3.20 \times 10^9$	1627	$1.93 \times 10^6$

- $\rho$  : Density
- $E$  : Young's modulus
- $c$  : Speed of wave propagation
- $\rho c$  : Mechanical impedance



ム株式会社より譲与されたものである。PMMA (Polymethylmethacrylate の略) は、高分子材料の一種で、一般にアクリル樹脂とよばれる。PMMA は、Al 合金と同様、その入手は比較的容易である。

表-1 に、鉄を加えた上述の 3 種類の材料の物理定数を示した。5052, AZ31 の  $\rho$  は、鉄の  $\rho$  のそれぞれ  $1/3$ ,  $1/4$  であり、PMMA の  $\rho$  は、鉄のその  $1/7$  である。従って、各材料の機械インピーダンス  $Z_m$  は、鉄の  $Z_m$  の  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/20$  となる。

これらの材料からなるロッドは、いずれも長さ 1.00 m、直径は鉄、5052, PMMA ロッドが 15 mm で、AZ31 は 17 mm である。また、ハンマーは、直径 50.0 mm、長さは、鉄製ハンマーが 148.8 mm で他は 160 mm である。

### 3.3. 実験方法

実験は、被貫入材料として、ゴム板と締固めマサ土を用いた場合とについて行った。

ゴム板は、厚さ 50 mm、直径 66 mm、の円柱状のものである。その圧縮弾性率  $E_c$  は、 $1.457 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> で、密度  $\rho_c$  は、 $1513$  kg/m<sup>3</sup> である。従って、(2.6) 式から、このゴムの機械インピーダンス  $Z_m^c$  を求めると、 $Z_m^c = 1.47 \times 10^5$  N·s/m となる。

一方、マサ土は、三郡山系若水林道付近から採取したものである。その比重は、2.60、砂分 77% の砂質土である。このマサ土を、自然含水比 12~16% に調整し、締固め回数  $K_c$  を、0, 5, 10, 15, 20, 25 の 6 種類 (Mg 合金の場合のみ  $K_c = 30$  までの 7 種類) で突固めた。なお、 $K_c = 0$  の場合は、ランマー (Rammer) を用いず、スパチラ (Spatula) を 10 回程度貫入させ締固めた。また、これらの 5 種類 (Mg 合金の場合は 6 種類) の締固めは、JIS A 1210 T の土の締固め試験に準拠して三層に分けて行った。使用したモールド (Mold) およびランマーは、締固め試験で用いる規格品であり、モールドの容積は、 $10^{-3}$  m<sup>3</sup>、ランマーの質量は、2.5 kg のものである。

これらの 2 種類の被貫入材料をロッド下端に設置し、貫入実験を行った。図-5 は、締固めマサ土を設置した場合の概略である。

ゴム板を用いた実験では、1 打撃毎にロッド内を伝ばする応力波を観測し、各ロッドで

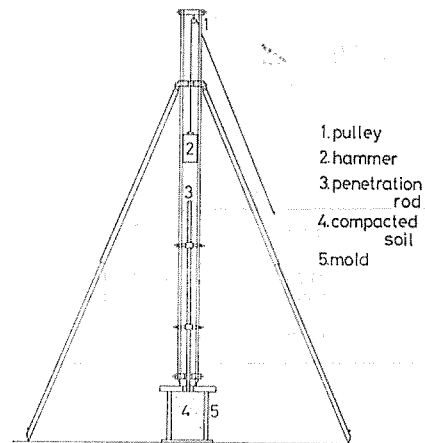


図-5 締固めマサ土を設置した場合の概略

それぞれ 20 の記録波形を得た。締固めマサ土を用いた場合は、1 打撃した後、記録波形を求めるとともに、貫入量を測定した。その後、試料を炉乾燥して土の乾燥密度  $\rho_d$  を求めた。両実験とも、ハンマーの落下高  $h$  は、0.20m であり、ひずみゲージは、各ロッドの上端 (打撃端) より 0.10 m 下に貼付している。また、使用した応力波測定装置および応力波の測定方法は、前報 (梅田・吉田・末, 1983) と同じである。両実験で用いたロッド下端は、いずれもその断面は平たんである。この理由は、ロッド下端を円錐形にすると、土の機械インピーダンスを求める際に応力波形の解析が複雑となるためである。

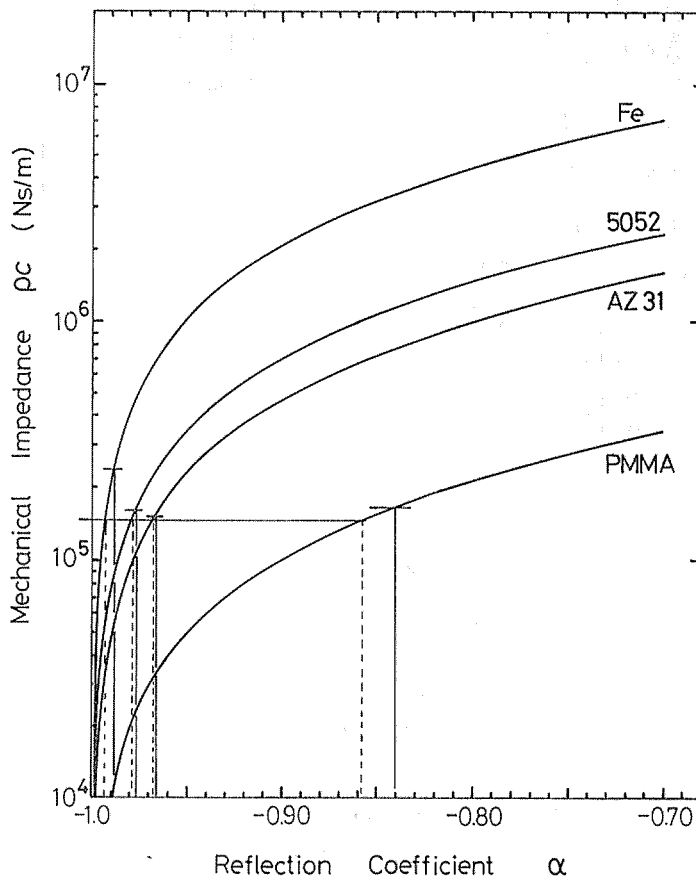
#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1. ゴム板を用いた場合

表一2に実験結果を示す。反射係数  $\bar{\alpha}$  は、20個の試料の平均値である。反射係数は、前述のごとく、記録波形から、応力波の立上りの最大振幅に対する立下りの最大振幅の比で求められる。各ロッドで求めた反射係数のばらつきの程度を示す変化係数  $C.V.$  ( $C.V. = s/\bar{\alpha}$ ,  $s$ : 標準偏差,  $\bar{\alpha}$ : 反射係数の平均値) には、ロッドの違いにより、オーダーが違う程の顕著な差は認められない。 $\rho \cdot c$  は、各ロッドで求めたゴム板の機械インピーダンスである。これらは、(2.27)式に各ロッドの機械インピーダンス  $\rho_r \cdot c_r$  と、記録波形より算出した反射係数  $\alpha$  とを代入して求めた(図一6)。ゴム板の機械インピーダンス  $Z_{in}^0$ ,  $1.47 \times 10^6 \text{Ns/m}$  である。この値を真値として、各ロッドで求めたゴム板の  $\rho \cdot c$  の誤差 ( $E_r$ ) は、鉄ロッドで51.0%と最も大きく、AZ31ロッドで3.4%と最も小さい。

##### 4.2. ゴム板の機械インピーダンスの誤差

反射係数  $\alpha$  の誤差  $\Delta\alpha/\alpha$  をパラメータにして、 $\alpha$  の変化に判う被貫入材料の機械イン

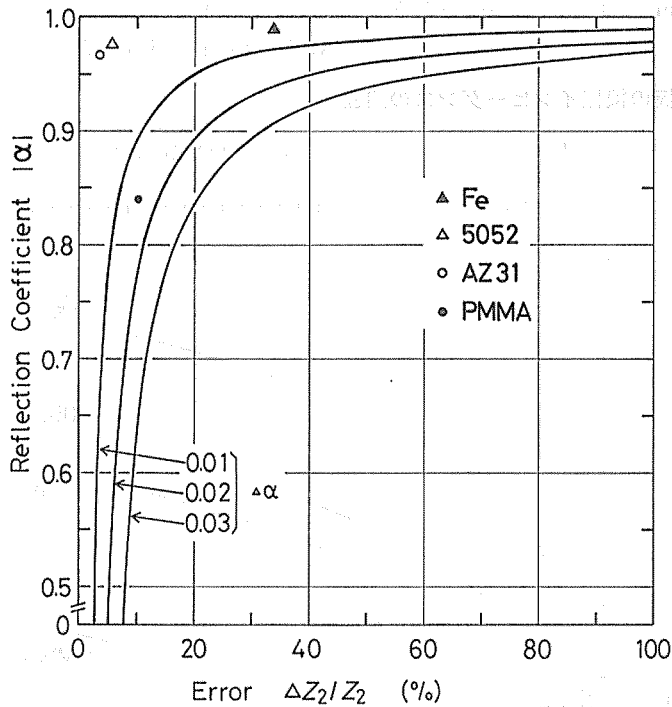


図一6 ゴム板を用いた実験結果

表—2 ゴム板を用いた実験結果

	$m$	$\bar{\alpha}$	C.V.	$\rho \cdot c$ (Ns/m)	$E_r$ (%)
Fe	20	-0.989	$-8.26 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^5$	51.0
5052	20	-0.978	$-4.75 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^5$	4.1
AZ31	20	-0.967	$-2.07 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^5$	3.4
PMMA	20	-0.841	$-7.69 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^5$	12.9

$m$  : Number of samples  
 $\bar{\alpha}$  : Mean reflection coefficient  
 C.V. : Coefficient of variation  
 $\rho c$  : Mechanical impedance  
 $E_r$  : Error



図—7 反射係数  $\alpha$  の誤差  $\Delta\alpha/\alpha$  を 1, 2, 3 % としたときの被貫入材料の機械インピーダンスの誤差 ( $\Delta Z_2/Z_2$ ) と反射係数との関係

鉄製ロッドで求まる  $\alpha$  の誤差  $\Delta\alpha/\alpha$  は 1% 以内であるが  $|\alpha|$  が 1 に近いため被貫入材料の  $\Delta Z_2/Z_2$  は 30% をこえている。

ピーダンスの誤差を求める。(2.25) 式より

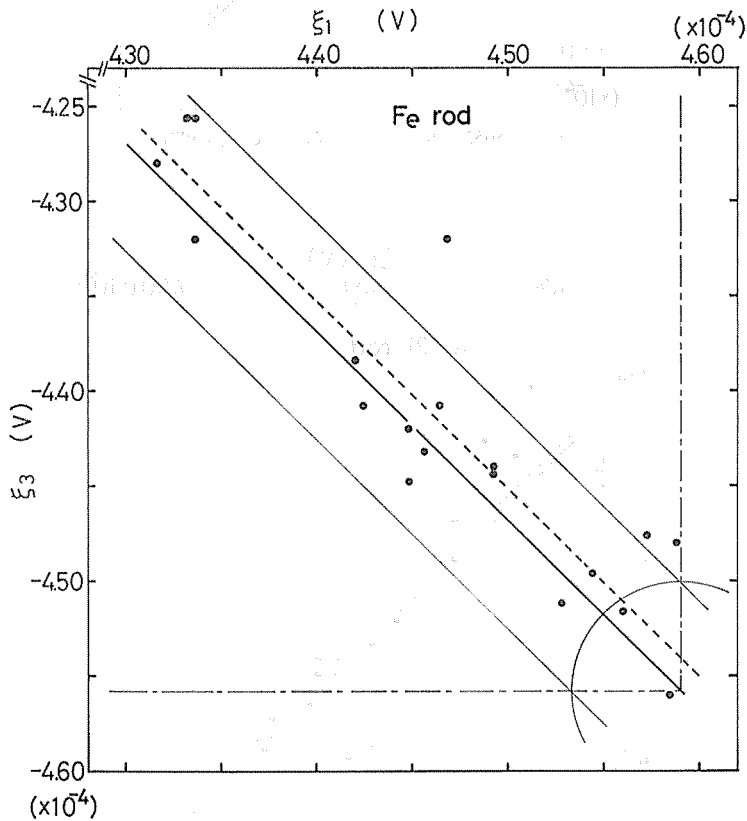
$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1+\alpha}{1-\alpha},$$

であるから、両辺の対数をとって微分すると、

$$\frac{\Delta Z_2}{Z_2} = \frac{2 \cdot \Delta\alpha}{1-\alpha^2}, \tag{4.1}$$

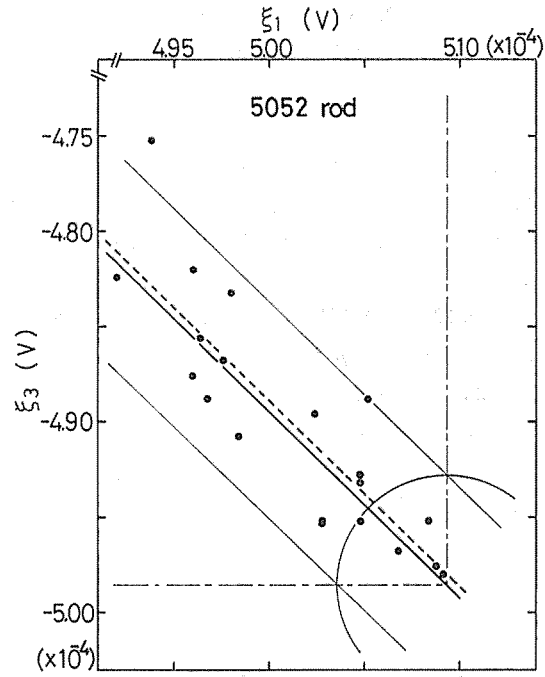
となる。図一7は、 $\Delta\alpha/\alpha$  を1, 2, 3%とし、(4.1)式で $\alpha$ を変化させたときの被貫入材料の機械インピーダンスの誤差( $\Delta Z_2/Z_2 \times 100$ )を示している。被貫入材料の $\rho \cdot c$ の誤差を小さくするには、 $\alpha$ の測定精度を高めるか、反射係数 $\alpha$ の絶対値を小さくする、すなわち、土の $\rho \cdot c$ に近い $\rho \cdot c$ を持つロッドを用いるかのいずれかしかない。ゴム板を用いた実験で得た $\alpha$ から、例えば、ゴム板の $\rho \cdot c$ を10%以内の誤差で得るためには、鉄ロッドでは、 $\alpha$ を0.11%以内の誤差で求める必要がある。同様に、5052ロッドでは、 $\alpha$ を0.22%以内、AZ31ロッドでは、 $\alpha$ を0.32%以内、PMMAロッドでは、1.46%以内となる。一方、(2.25)式で求まる $\alpha$ の理論値に対する実験値の誤差は、鉄ロッドで、0.37%、5052ロッドで、0.12%、AZ31ロッドで、0.12%、PMMAロッドで、1.98%であった。この結果、被貫入材料の $\rho \cdot c$ を最も精度良く求め得るのは、AZ31ロッドを用いた場合である(表一2, 図一6)。

ところで、反射係数 $\alpha$ のばらつきの原因には、大別して、増幅器、ひずみゲージの固有の雑音による振幅の誤差によるものと、貫入試験機の設置方法、また操作方法によるものがあると考えられる。後者の中には、ハンマーとガイドパイプとの摩擦により、ハン

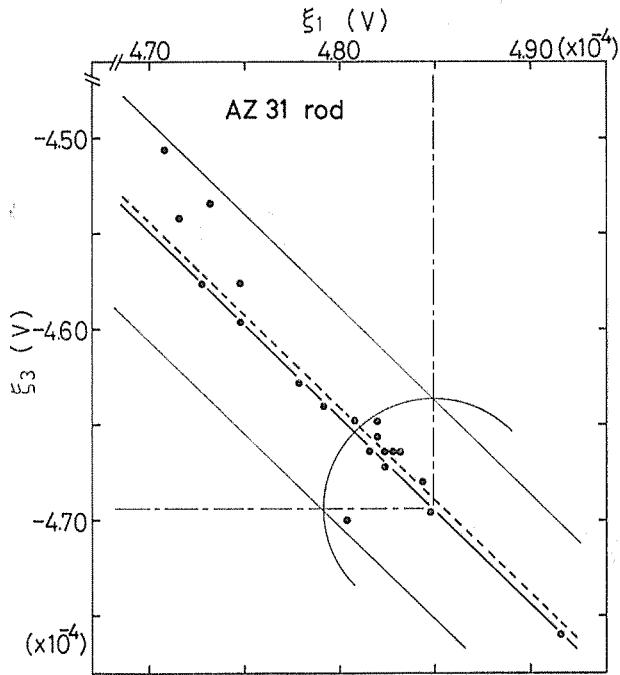


図一8 Feを用いた時の $\xi_1$ と $\xi_3$ との関係

黒丸は実験値、点線は実験値の $\alpha$ の平均値であり、一点鎖線は $\xi_1$ (立上りの最大振幅) $\xi_3$ (立下りの最大振幅)の理論値で、2本の細線に囲まれた部分は、雑音電圧の幅である。



図—9 5052を用いた時の  $\xi_1$  と  $\xi_3$  との関係



図—10 AZ 31を用いた時の  $\xi_1$  と  $\xi_3$  との関係

マーとロッドとの衝突時に、ハンマーが所定の速度に達していない。また、ロッドが正確に鉛直に設置されていないため、ロッドの打撃面に加わる衝撃力がこの面に均等に加わっていないためなどが含まれる。

反射係数  $\alpha$  は、理論的には (2.25) 式より、ロッドと被貫入材料の機械インピーダンスで求まる定数である。一方、 $\alpha$  は、前述のごとく、記録波形では次式で表わされる。

$$\alpha = \xi_3 / \xi_1, \tag{3.1}$$

ここに、 $\xi_1$ : 立上がりの最大振幅 (V)

$\xi_3$ : 立下がりの最大振幅 (V)

ハンマーの落下高を  $h$  とすると、 $\xi_1$  は  $\sqrt{h}$  に比例して大きくなる (梅田・吉田・末, 1983)。また、(3.1) 式より、 $\xi_3 = \alpha \cdot \xi_1$  となり、 $\xi_3$  は  $\xi_1$  に比例する。従って、記録波形から  $\alpha$  を求めるには、理論的には、 $h$  は一定でなくても良いことになる。(ただし、貫入量を求める場合には、 $h$  は一定でなければならない。)

図-8, 9, 10 は、ゴム板を用いた場合の実験結果である。 $\xi_1, \xi_3$  は、ブリッジ回路からの出力電圧 (入力換算値) で示している。図中の点線は、 $\alpha$  の平均値である。また、図式解法で  $h=0.20$  m とした場合、ロッドのひずみによって生じたブリッジ回路の出力電圧の理論値  $\xi_1^{\text{th}}$  を縦の一点鎖線で示している。(2.25) 式で求めた  $\alpha$  の理論値  $\alpha^{\text{th}}$  を (3.1) 式に代入し、 $\xi_3$  の理論値  $\xi_3^{\text{th}}$  を求め、 $\xi_1^{\text{th}}$  と  $\xi_3^{\text{th}}$  の交点と原点を結び直線 (実線で示す) の傾きが、 $\alpha^{\text{th}}$  である。ところで、ひずみゲージから差動増幅器までを含めた雑音電圧  $V_N$  は、 $1.140 \times 10^{-5}$  V であった。図中の円は、 $(\xi_1^{\text{th}}, \xi_3^{\text{th}})$  を中心に、半径  $V_N/2 = 5.7 \times 10^{-6}$  V の円である。また、直線  $\xi_3^{\text{th}} = \alpha^{\text{th}} \cdot \xi_1^{\text{th}}$  に平行な2直線は、各  $\xi_1$  点で、 $\xi_3^{\text{th}} \pm (V_N/2)$  を、各  $\xi_3$  点で、 $\xi_3^{\text{th}} (\pm V_N/2)$  を連ねた線である。各ロッドでの、 $(\xi_1, \xi_3)$  の値は、理論値よりも小さくなっているが、ほぼ、 $\xi_3^{\text{th}} = \alpha^{\text{th}} \cdot \xi_1^{\text{th}}$  に沿って雑音電圧の幅内に分布している。 $(\xi_1, \xi_3)$  が理論値よりも小さくなっている原因は、ハンマーがロッドに衝突する時の速度が所定の値に達していないためと考えられる。速度のばらつきは、落下高  $h$  のばらつき、またハンマーとガイドパイプとの摩擦によるものである。

記録波形からの  $\xi_1, \xi_3$  の測定には、ノギスを用いて 0.05 mm まで、また、雑音電圧  $V_N$  の中央値を常に読み取った。従って、 $V_N$  の中央値が常には真値でないとするれば、雑音電圧内に  $(\xi_1, \xi_3)$  がちらばる可能性はある。

PMMA ロッドを用いて求めた  $\alpha$  の誤差は、1.98 % で、 $\alpha$  の誤差としては、4種類のロッド中最も大きかった。理論的には、PMMA ロッドの  $\rho \cdot c$  は、4つのロッド中最も小さく、土の  $\rho \cdot c$  を求めるには、最も有利である。PMMA ロッドで、 $\alpha$  の誤差が大きくなった原因は、PMMA の内部損失が大きいためである。

ロッド内を伝ばする応力波の減衰率を求める実験方法を、図-11 に示す。この方法は、ロッドを綿糸 (#

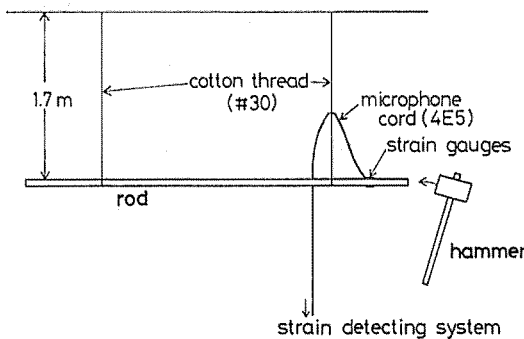


図-11 減衰波形を求める実験方法

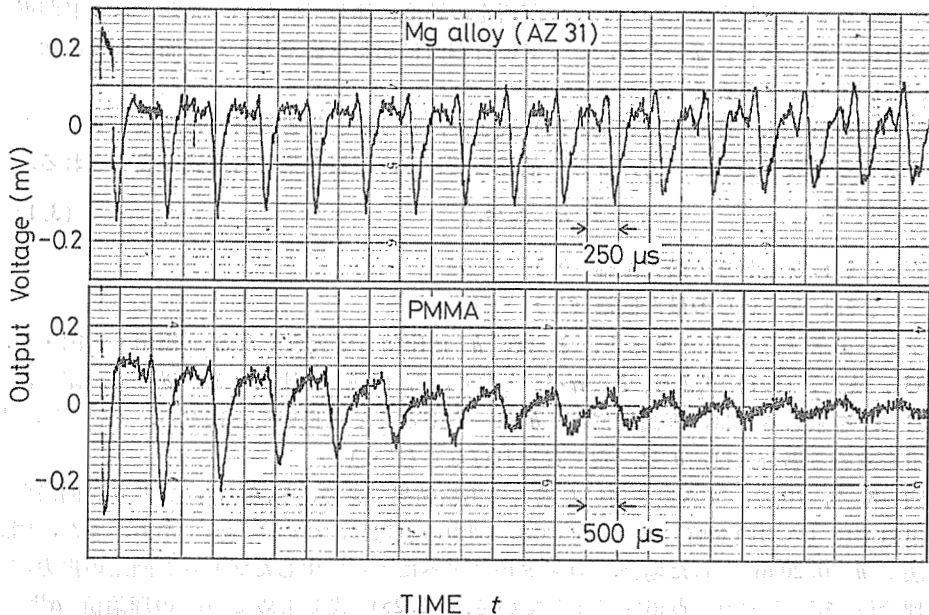


図-12 減衰波形の例

30) で水平に懸垂し、ロッド右端(打撃端)をハンマーで打撃するものである。ロッド内を伝ばする応力波の測定には、貫入試験で用いるひずみ測定装置がそのまま利用できる。このような方法で測定された応力波形の例として、Mg合金(AZ 31)とPMMAロッドの場合について、図-12に示す。両波形の振幅とも、プラスとマイナスが非対称となっているのは、ひずみゲージを打撃面から10 cm下の位置に貼付しているためである。4種類のロッドで、図-12のような減衰波形を求め、減衰率(水野・三木, 1971)を算出した。減衰率 $d_r$ は、次のように定義される。応力波形で、一定の時間間隔ごとに振幅をつぎつぎと連続して測った値を、 $x_1, x_2, \dots, x_n$ とする。 $n$ が偶数の場合は、 $n=2m$ とおき、1から $m$ までと $m+1$ から $2m$ までの2組に分け、 $x_{m+1}/x_1, x_{m+2}/x_2, \dots, x_{2m}/x_m$ を計算すると、これらはいずれも1回振動する間、または1間隔の間の減衰比の $m$ 乗に等しい。従って1回あたりの減衰率 $d_r$ は次式のようなになる。

$$d_r^m = \frac{x_{m+1}}{x_1} = \frac{x_{m+2}}{x_2} = \dots = \frac{x_{2m}}{x_m} = \frac{x_{m+1} + x_{m+2} + \dots + x_{2m}}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (4.2)$$

(4.2)式から明らかなように、時間とともに振幅の減小がない場合、すなわち $x_1 = x_2 = \dots = x_n$ のとき、 $d_r = 1$ となりロッドの内部損失は0である。各ロッドで求めた減衰率 $d_r$ は、鉄ロッドで0.989、5052ロッドで0.987、AZ31ロッドで0.985、PMMAロッドで0.885であった。このように、PMMAロッドでは、金属材料に比べ内部損失が大きく、 $\alpha$ の誤差の原因となっている。

#### 4.3 締固めマサ土を用いた場合

表-3に実験結果を示す。締固め回数 $K_c=0$ の場合、各ロッドの $\rho_d$ にかなりの差が認められた。これは、スパチラの貫入による締固めのむらが原因と考えられる。また、

表-3 締固めマサ土を用いた実験結果

	$K_C$	$w$ (%)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$h_p$ (m)	$\alpha$
5052	0	16.22	1265	0.0213	-0.988
	5	15.26	1484	0.0067	-0.955
	10	12.39	1602	0.0037	-0.947
	15	14.99	1618	0.0037	-0.951
	20	14.72	1661	0.0029	-0.926
	25	13.76	1672	0.0027	-0.921
AZ31	0	14.99	1409	0.0082	-0.962
	5	15.27	1491	0.0042	-0.954
	10	15.69	1581	0.0030	-0.951
	15	14.44	1637	0.0024	-0.945
	20	14.85	1650	0.0021	-0.935
	25	14.92	1685	0.0018	-0.927
PMMA	0	15.56	1204	0.0239	-0.815
	5	13.61	1437	0.0040	-0.796
	10	13.74	1563	0.0021	-0.768
	15	13.81	1620	0.0016	-0.752
	20	16.17	1669	0.0014	-0.749
	25	15.15	1701	0.0012	-0.729

$K_C$  : Number of times in compaction       $w$  : Water content  
 $\rho_d$  : Dry density       $h_p$  : Penetration depth  
 $\alpha$  : Reflection coefficient

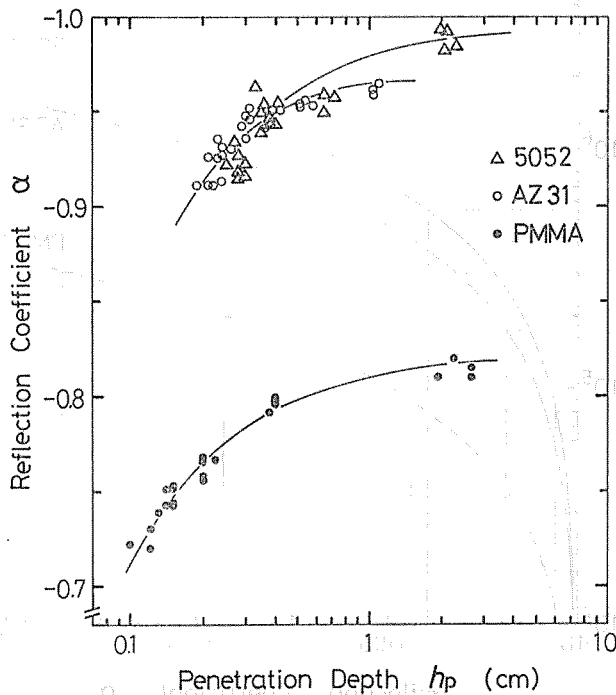


図-13 貫入量  $h_p$  と反射係数  $\alpha$  との関係



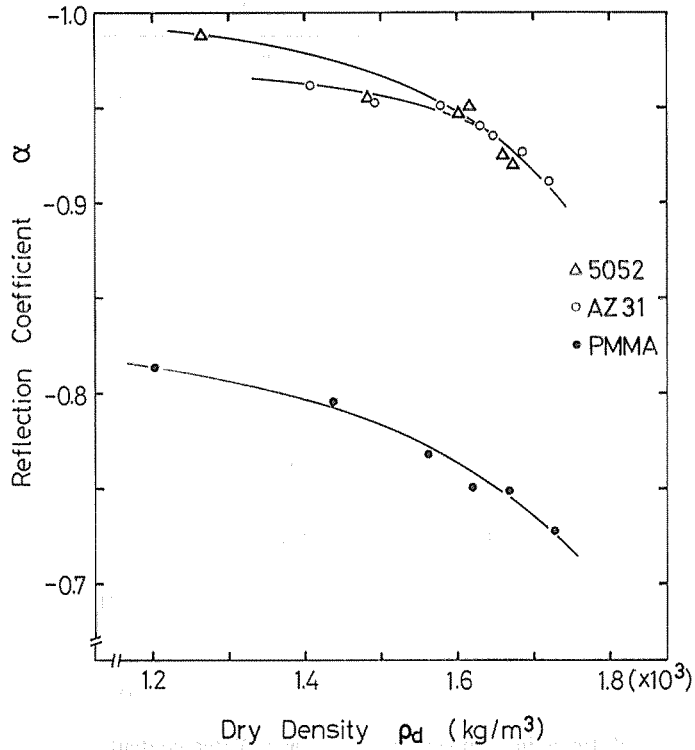


図-14 土の乾燥密度  $\rho_d$  と反射係数  $\alpha$  との関係

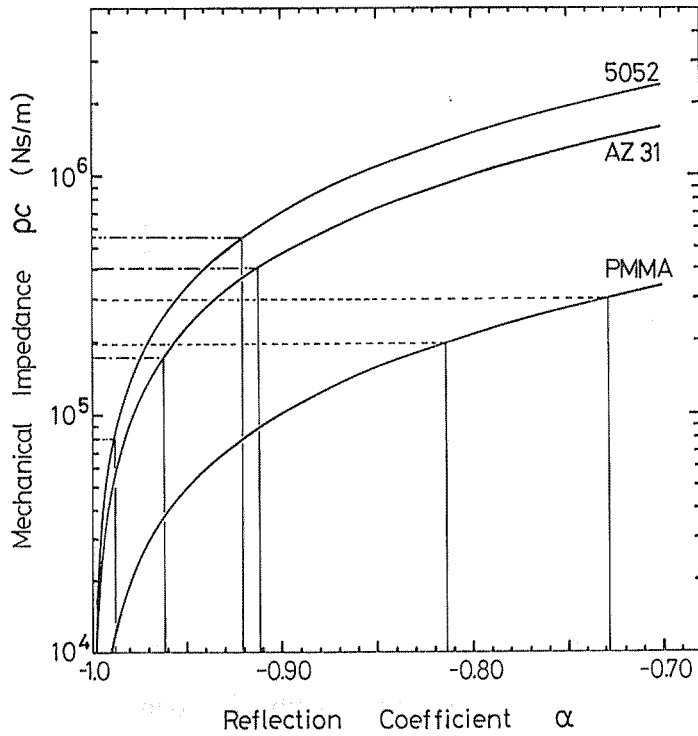
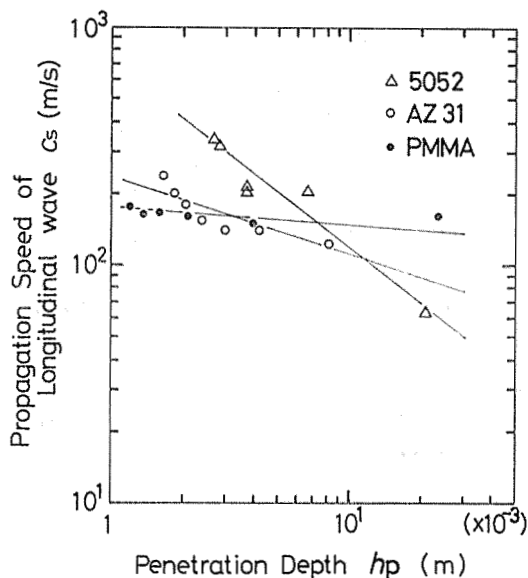


図-15 反射係数  $\alpha$  から求めた締固めマサ土の機械インピーダンス  $\rho \cdot c$



図一16 貫入量  $h_p$  と土中を伝ばする縦波の速さ  $c_s$  との関係

$\rho_d$  の値に対して、貫入量  $h_p$  が全体として小さいのは、貫入ロッドの下端（土との接触部）が平たんな断面であるためと考えられる。

図一13は、貫入量  $h_p$  と反射係数  $\alpha$  との関係を示す。前述のごとく、 $h_p$  は、ハンマーの1打撃によるロッドの貫入量である。横軸を  $h_p$  で表わしたのは、標準貫入試験機で求める  $N$  値（重量 63.5 kg のハンマーを 75 cm 自由落下させ、標準貫入試験用サンプラーを 30 cm 打込むのに要する打撃回数）のように一定の貫入量に要する打撃回数の平均値で表現するよりも、直接土の力学的性質を表現できるからである。図一14は、土の乾燥密度  $\rho_d$  と反射係数  $\alpha$  との関係を示す。図一13, 14において、いずれのロッドを用いた場合も、 $h_p$  が小さくなる、すなわち、 $\rho_d$  が大きくなるのに従って、 $\alpha$  の差が大きくなる。換言すれば、 $\rho_d$  が大きな土では、 $\alpha$  に有意な差が出るが、 $\rho_d$  が小さくなると、記録波形から算出される  $\alpha$  に有意な差が認められなくなる。

図一15は、 $\alpha$  の最大値と最小値を示して、供試土の機械インピーダンスの範囲を求めたものである。3本の曲線は、(2.27) 式の理論曲線である。図中、縦の実線が実験によって得た反射係数  $\alpha$  である。PMMA で求められる供試土の機械インピーダンス  $\rho \cdot c$  の範囲は、点線で、AZ31 は一点鎖線で、また 5052 は二点鎖線で示している。この結果、各ロッドで求めた土の  $\rho \cdot c$  の範囲は、 $(\rho \cdot c)_{PMMA} < (\rho \cdot c)_{AZ31} < (\rho \cdot c)_{5052}$  となった。

土の機械インピーダンス  $\rho \cdot c$  は、今まであまり測定された例がなかった。そこで今回の実験で得た  $\rho \cdot c$  の妥当性について、供試土中を伝ばする縦波の速さ  $c_s$  を算出して検討した。図一16は、貫入量  $h_p$  と  $c_s$  との関係を示す。各ロッドでの値にはばらつきがあるが、 $h_p$  の増大にともなって  $c_s$  が小さくなる傾向は認められる。(金井, 1968) は、砂質土での  $N$  値と  $c_s$  との関係を求めている。これによれば、 $N$  値が、5~20 の範囲では、 $c_s$  は 40~200 m/s である。 $N$  値と  $h_p$  との関係は明確ではないが、今回求めた  $c_s$  の値は、土中を伝ばする縦波の速さのオーダーとしては妥当な値であると考えられる。

## 5. 結 論

今回の実験結果から次のことが明らかとなった。

- 1) 簡易貫入試験機Ⅱ号機および応力波測定装置を用いて得られる記録波形には、被貫入材料の物理的特性を示す有意な情報が含まれている。
- 2) 記録波形より算出される反射係数  $\alpha$  は、理論的に明確な意味を持ち、これを用いて、被貫入材料の機械インピーダンス  $\rho \cdot c$  が求められる。
- 3) 各ロッドで求めた  $\alpha$  から、被貫入材料（ゴム板）の機械インピーダンスの誤差を求めると、鉄ロッドでは、51.0%、5052 ロッドでは、4.1%、AZ31 ロッドでは、3.4%、PMMA ロッドでは、12.9%であった。鉄ロッドで求めたゴム板の  $\rho \cdot c$  の誤差の原因は、ゴム板の  $\rho \cdot c$  ( $1.47 \times 10^5$  N·s/m) に比べ鉄自体の  $\rho \cdot c$  ( $4.02 \times 10^7$  N·s/m) が大きいためであった。また、PMMA での  $\alpha$  の誤差の原因は、PMMA の内部損失が大きいためである。
- 4) 従って、土の機械インピーダンスを精度良く求めるには、Mg 合金 (AZ31) しかないと判断される。

## 文 献

- 有山正孝 (1975): 基礎物理学選書 8. 振動・波動. 裳華房, 東京, pp. 193~203
- FISCHER, H. C. (1959): On Longitudinal Impact I. Appl. Sci. Res. A-8: 105-138
- FISCHER, H. C. (1959): On Longitudinal Impact II. Appl. Sci. Res. A-8: 278-308
- FISCHER, H. C. (1960): On Longitudinal Impact III. Appl. Sci. Res. A-9: 9-42
- FISCHER, H. C. (1960): On Longitudinal Impact IV. Appl. Sci. Res. A-9: 93-138
- FRANK, S. C. J (1968) 高橋秀俊 監訳: パークレー物理学コース 3. 波動 (上). 丸善, 東京, pp. 253~285
- 金井 清 (1968): 地震工学. 彰国社, 東京, p. 39
- 軽金属協会 (1963): アルミハンドブック. 朝倉書店, 東京, p. 144
- 機械設計便覧編集委員会 (1977): 機械設計便覧. 丸善, 東京, p. 269
- 松本浩之・三室 弘・松森保雄・中原一郎 (1963): 縦衝撃を受けた丸棒に生じる応力およびその伝ば. 日本機械学会論文集 29: 49~59
- 水野善右衛門・三木久夫 (1971): 基礎物理学実験. 培風館, 東京, pp. 14~16
- 沖村 孝・田中 茂 (1980): 一試験地における風化花こう岩斜面の土層構造と崩壊深さに関する研究. 新砂防 33: 7~16
- 大久保駿・上坂利幸 (1971): 簡易貫入試験による地盤調査. 土木技術資料 13: 31~35
- 梅田修史・吉田瑞樹・末 勝海 (1983): 山地用貫入試験機の開発. 九大演報 53: 255~274

## Summary

In this report we developed the method for obtaining mechanical impedance of soil with high accuracy from the reflection coefficient  $\alpha$  at the boundary between the lower end of rod and soil under the test.

The results are summarized as follows:

- 1) Using the simplified penetrating apparatus and strain detecting sys-

tem, measurements were carried out on the stress waves propagating and reflecting along the rod.

2) The mechanical impedance of soil is obtained from the reflection coefficient  $\alpha$ .

3) For the purpose of selecting the best material for rod and hammer, measurements on mechanical impedance of Gum were carried out, which has a similar mechanical impedance with soil, with 4 kinds of rods; iron, aluminum alloy 5052, magnesium alloy AZ31, and PMMA (Plastics). With those material, the mechanical impedance of Gum is measured and the error was 51 % for iron rod, 12.9 % for PMMA rod and 0.12 % for magnesium and aluminum alloy rods respectively. In case of using iron and PMMA rod, it is impossible to measure the impedance of soil with high accuracy since the mechanical impedance of iron is so high compared with the soil impedance and for PMMA rod due to it too much internal loss.

4) An alloy of magnesium(AZ31) is the best material for rod and hammer of the simplified penetrating test apparatus, since its internal loss is small and its mechanical impedance was larger than that of soil by one order.