

土または岩石における超音波伝播速度とその力学特性

八 木 則 男・石 井 義 明

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN ULTRASONIC VELOCITIES IN SOILS OR ROCKS AND THEIR MECHANICAL PROPERTIES

By *Norio YAGI* and *Yosbiharu ISHII*

Synopsis

This is a report on the followings: (1) the comparison of the dynamic elastic constants of soils and rocks determined by ultrasonic methode with static one, (2) the investigation of the possibility of estimating the compressive strength from the dynamic shear modulus, (3) the influence of pore fluids on ultrasonic velocities in soils.

From the measurements of ultrasonic velocities in soils and rocks, and the uniaxial compression tests, the following results are obtained. (1) In relatively isotropic materials such as soils and mortars, the dynamic shear modulus G_d increases with the compressive Strength q_u and q_u/G_d increases with q_u (Fig. 4 and Fig. 5). (2) The longitudinal wave velocity V_l in soils is influenced by pore fluids and the present of air in pore causes the decrease in V_l (Fig. 9). (3) The dynamic Young's modulus E_d increases with the increase of the static one E_s (Fig. 10) and it seems that the relationship between E_d and E_d/E_s is approximately represented by hyperbola (Fig. 11 and Fig.12).

1. ま え が き

最近、地盤内を通過する弾性波の伝播速度から地盤の強さの判定や地質構造の調査などが広く行なわれるようになった。また弾性波伝播速度から地盤の動的な弾性諸常数が決定できるが、それらの値は、地盤を構成している土などが完全な弾性体でないために、静的な値とはかなり異なっている。しかし、動的な手法によって判定された地盤の強弱は静的な手法によって判定された強弱とは傾向は一致するであろうから、弾性波速度から静的な地盤の強度や弾性常数を推定できる可能性がある。

土や岩石はその構成が複雑であるため、弾性波伝播速度の値を支配する要素は多い。例えば、土の場合、土粒子骨格の強さや間げきの流体の性質（水、空気）や有効応力などの影響を受けるであろう。また縦波や横波かによってもその要素によって受ける影響の度合が異なるであろう。

従来より、岩石に対しては現場や室内においての測定例^{1,2,3)}は多く、またそれらについての理論⁴⁾についても発表されている。これらの測定例によると動弾性係数は静弾性係数に比べ大きい。また高压下にあったては間げきが液体で飽和されると動的な値は増加させるのに、静的な値は減少している。一方、低压下では間げきの液体による飽和は時には動的、静的の両値を低下させる。以上のような結果が得られている。

そこで本文では主に土中を通過する超音波伝播速度が土粒子骨格の強さや間げきの流体にどのように影響

されるかを室内実験で調べた結果および超音波伝播速度による土の強度や静的弾性係数の推定の可能性について検討した結果とその考察を報告する。

2. 実験装置

2-1 実験装置

超音波伝播速度の測定には前の報告⁵⁾で述べたものと同じで、縦波の振動子として 50 kc/sec, 横波の振動子として 25 kc/sec のものを用いた。また土の等方圧力による圧密を行なうため、高圧三軸試験機および圧縮試験には 1 軸圧縮試験機を用いた。岩石およびモルタルの圧縮試験は 30 ton の載荷能力を有した試験機を用いた。

2-2 試料

i) 粘性土

実験の対象とした粘性土は室内で人工的に等方圧力で圧密した試料（飽和土）とそれを空気中で乾燥させた試料（不飽和土）で両者とも同じ種類の粘土を用いた。それを A-Sample と呼ぶ。また別に突き固めた試料についても実験を行なった。この粘土を B-Sample と呼ぶ。A, B 両 Sample の物性は Table 1 に、粒度分布曲線は Fig. 1 に示されている。

Table 1 Physical properties for clays.

	A-Sample	B-Sample
Specific gravity	2.61	2.69
Liquid limit	64.5%	43.3%
Plastic limit	28.2%	21.3%

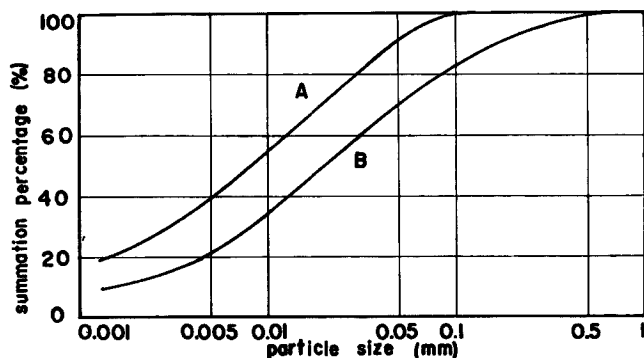


Fig. 1 Particle size distribution curves

また、A-Sample についての含水比と先行圧密荷重、圧縮強度の関係は Fig. 2 に示してある。Fig. 2 によるとこれらの関係は含水比と先行圧密荷重、圧縮強度の対数との間に直線関係で示されるが、以前の結果⁵⁾では含水比が低くなると直線からはずれていた。

ii) モルタル

岩石は均質な試料を得ることが非常に困難であるので、比較的強度の大きな材料としてモルタルを用いた。モルタルの強度を変化させるために、セメントと砂の混合比を変えた。セメントと砂の混合比は 1:0.5~1:4 の範囲である。

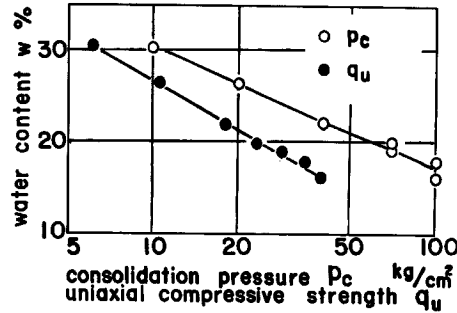


Fig. 2 Relationship between water content and consolidation pressure or uniaxial compressive strength for A-Sample

iii) 岩 石

岩石としては明瞭な薄い層構造を有した粘板岩と比較的大きな層を有した玄武岩を用いた。

2-3 実験方法

等方圧密した粘土の試料を三軸容器より取り出して直径 3.6 cm, 高さ 8.0 cm の円柱形に成形して超音波伝播速度の測定および圧縮試験を行ない, また突き固めた試料は B-Sample を標準の突き固め試験器によりそのモールド内で 2 層に分けて各々 40 回づつランマーで突き固めたものである。この試料を圧密試料と同じ寸法の供試体に成形し, 同様な試験を行なった。ただ, 強度が低く, 超音波の減衰が著しくて測定が困難なときには, 供試体の寸法を短くした。モルタルや岩石に対しても同様の試験を行なったが, モルタルの供試体寸法は直径 3.6 cm, 高さ 8.0 cm で, 岩石の供試体は直径 5.0 cm, 高さ 10.0 cm の円柱形である。モルタル, 岩石に対する圧縮試験の際には, 両端の摩擦が変形や強度に及ぼす影響を減少させるため, 両端面にグリースをぬった。圧縮試験はすべてひずみに対し 1%/min, モルタルおよび岩石に対しては 0.2%/min である。

3. 実験結果および考察

材料を弾性体と仮定すると弾性波の伝播速度から次式によって弾性諸常数が計算できる。

$$V_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに V_l および V_s は縦波および横波の伝播速度である。また ρ は材料の密度であり, λ, μ は Lamé の常数である。この λ, μ を用いれば, 動的なヤング係数 E_a , ポアソン比 μ_a , 体積弾性係数 K_a , せん断弾性係数 G_a が次式によって計算できる。

$$E_a = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\mu_a = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$K_a = \lambda + \frac{\mu}{3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$G_a = \mu = \frac{E_a}{2(1 + \mu_a)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって, 本研究においても, 超音波伝播速度からの動弾性諸常数はこれらの式を用いて計算した。

3-1 超音波伝播速度と土の乾燥密度との関係

土の強度や弾性係数は静的な場合はその乾燥密度の大きさによって左右される。そこで静的な力学特性を支配する乾燥密度によって超音波の縦波速度 V_l および横波速度 V_s がどのように変化するかを調べたのが

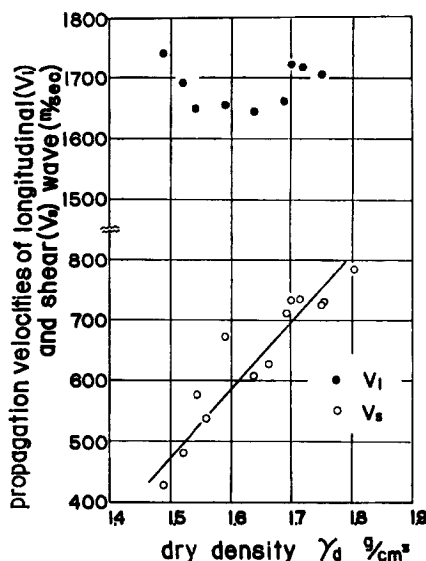


Fig. 3 Relationship between dry density and velocity of longitudinal or shear wave

Fig. 3 である。Fig. 3 より明かなように V_l の値は中間の乾燥密度で最も小さくなり、それより乾燥密度が大きく、すなわち含水比小さくなくても、また γ_d が小さく、すなわち含水比が大きくなっても、 V_l の値は大きくなっている。しかし土粒子骨格の圧縮性は含水比の減少とともに小さくなる。したがって、水の圧縮性と土粒子骨格の圧縮性の両方の影響を受けて、ある特定の含水比で V_l が最小になるとと思われる。これらについては後に詳しく説明する。

一方 V_s は γ_d の増加とともに直線的に増加している。 V_l のように間げきの水の量には影響されず、土粒子骨格の強さを反映していると考えてもよいようである。

3-2 超音波伝播速度による強度の推定

3-1 で述べたように横波速度 V_s は乾燥密度と直線関係をもっているので、 V_s は土粒子骨格の強さ、すなわち土の強度を反映しているように思われる。そこで単位体積重量 ρ の影響をなくするために、縦波速度 V_l とは無関係に (5) 式より求まる 動的せん断弾性係数 G_d と 1 軸圧縮強度 q_u の関係を求めたのが Fig. 4 である。

Fig. 4 は圧密された飽和粘土と突き固めた不飽和粘土の q_u と G_d の関係を示したものである。この図によると、プロットにはバラツキはあるが、 q_u が小さいほど G_d が大きな割には q_u 小さくなっている。そして G_d が $1.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ をやや越えたところで q_u が増加するのに G_d はあまり変化しないようである。これらの現象をもっと強度の大きな材料に対して調べるために、岩石の代りに均質な供試体が得られるモルタルに対して実験を行なった。その結果が Fig. 5 に示されている。Fig. 5 も Fig. 4 と同様な結果を示しており、 G_d が $15 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 付近で q_u の増加に対して G_d の増加がみられない。このような現象の原因については現在のところ不明である。ただ考えられることは、1つは測定誤差であり、他の1つは q_u が G_d の高いべき数の関数であって G_d の増加とともに q_u が急激に増加して、その測定誤差の範囲内に入ったということである。いずれにしても、著者の1人が以前に報告³⁾ したように両者の間には直線関係が得られず、さらに q_u の範囲 (以前の報告では q_u は $3 \sim 22 \text{ kg/cm}^2$ の範囲) を広げると q_u が小さくなるほど q_u/G_d の値は小さくなるようである。

岩石は一般に岩層を有しているので、異方向性である。したがって、圧縮試験および超音波伝播速度の測

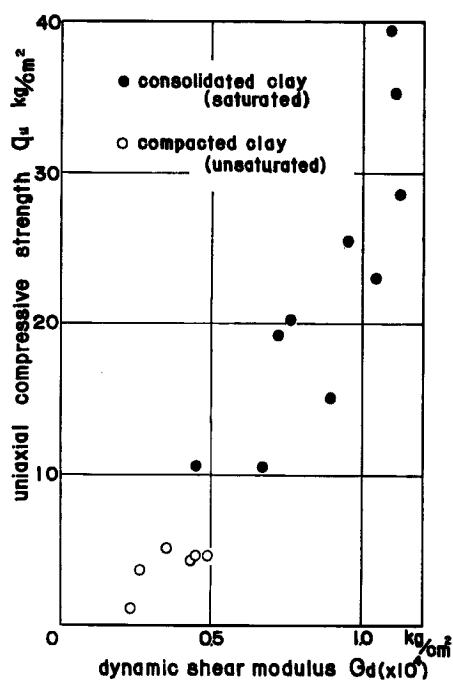


Fig. 4 Relationship between dynamic shear modulus and uniaxial compressive strength for clay

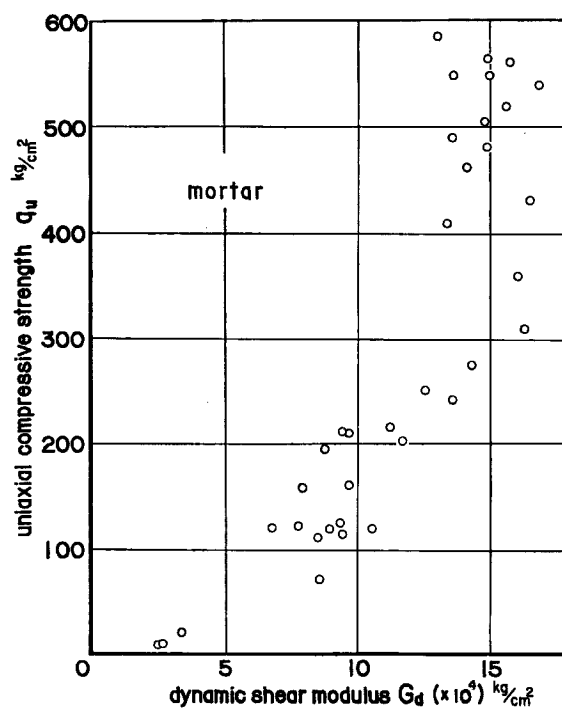


Fig. 5 Relationship between dynamic shear modulus and uniaxial compressive strength for mortar

定においては、圧縮の方向および超音波の伝播方向が岩層に対して垂直、平行、45度の角度をなした場合について実験を行なった。その結果、 q_u と G_d の関係は Fig. 6 に示すようである。岩層に対して垂直、平行、45度の傾斜させて測定したのは粘板岩であり、 G_d の大きさに対する q_u/G_d の大きさの順序は岩層に平行のもの、垂直のもの、45度傾斜したものである。岩石は非均質であるので、測定結果にもバラツキは多いが、岩層のための強度の低下を超音波伝播速度は十分反映していない。すなわち、層と45度傾斜した場合は当然圧縮強度は低下するがそれに応じた伝播速度の低下は起らない。さらに層の数は少ないが、大きい巾の層を有した玄武岩（層の方面は圧縮または伝播方向と20~50度の角度をなしている）に対して行なった試験では q_u と G_d の関係にはバラツキが多く、それらの間には関係を見い出すのは困難である。

したがって、層を有した岩石のような異方向性材料では超音波伝播速度から圧縮強度を推定することは困難である。結局、超音波伝播速度から強度が推定できるのは等方材料に対してであり、等方材料においても土のような土粒子、水、空気の混合体ではそれらの影響についても十分に研究されなければならない。

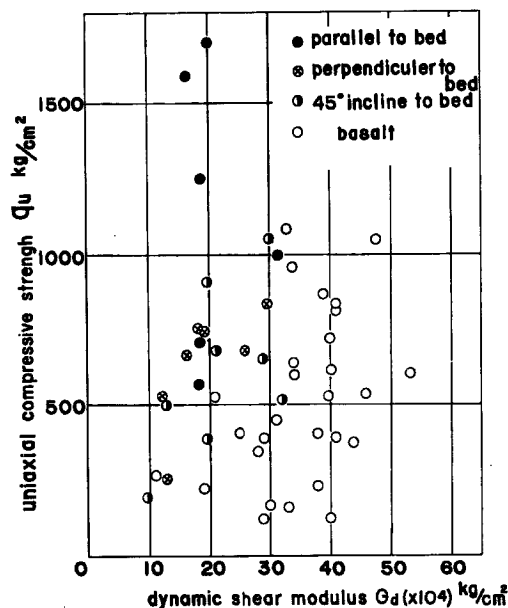


Fig. 6 Relationship between dynamic shear modulus and uniaxial compressive strength for rocks

3-3 土中の間げき流体が超音波伝播速度に及ぼす影響

弾性波伝播速度は土中の間げきに存在する水と空気の割合に影響される。そこで土中の間げきの流体が超音波伝播速度に及ぼす影響を調べるため、A-Sample を種々の圧密圧力 $p_0 = 0.5, 10, 20, 40, 70, 100 \text{ kg/cm}^2$ で圧密した試料の空気中における乾燥過程において縦波伝播速度 V_i および横波伝播速度 V_s の測定を行なった。圧密圧力を変えたのは同じ含水比で飽和度の異った試料を得るためである。

測定結果は Fig. 7 に含水比 w と V_i, V_s の関係で示されている。この結果によると、すべての圧密圧力の試料に対して V_i は Fig. 3 の飽和粘土の場合と同様にある中間の含水比においてその最小値を示している。この理由としてつぎのことが考えられる。縦波の速度は材料の圧縮性によって変化する。土の場合は土粒子、間げきの流体、土粒子骨格の圧縮性が関係するであろう。乾燥過程における不飽和土では、土粒子の圧縮性は不変であるが、含水比が低く、すなわち飽和度が小さくなると土粒子骨格の圧縮性は小さくなるが、間げきの流体の圧縮性は大きくなる。したがって、土粒子骨格の圧縮性と間げきの流体の圧縮性を合成した圧縮性が V_i に対して最大となったところで V_i は最小となる。

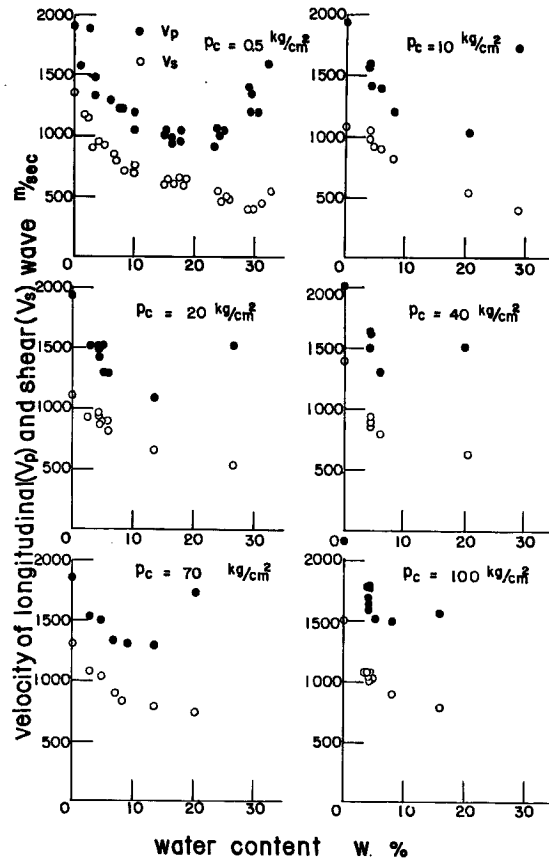


Fig. 7 Variation of velocity of longitudinal or shear wave versus water content for unsaturated clay

Whitman⁶⁾ は突き固め試料に対する V_L は含水比の増加とともに増加するという結果を得ているが、測定した試料の含水比が比較的高い範囲 ($w=15\sim35\%$) であるので、本実験の含水比が約15%以上の傾向と比較するとよく一致するようである。

一方、Fig. 7 によると横波速度 V_s は含水比 w の減少とともに増加している。間げきの流体はせん断抵抗力を持たないから、多分 V_s の値には無関係であろうと思われる。したがって含水比が低下するほど土粒子骨格は強くなるので V_s は含水比の減少とともに増加する。

Fig. 7 における各プロットにおいては含水比のほかには飽和度 S_r や乾燥密度 γ_d なども変化している。そこで S_r と V_L, V_s の関係を求めるためには上記の量が一定の状態で調べるのが望ましい。そこでまず含水比が一定の条件の下で S_r と V_L, V_s の関係を求めることにする。そのために含水比 w と飽和度 S_r の関係を示すと Fig. 8 のように、ほぼ原点を通る直線関係が得られる。そして含水比が20%および15%における V_L, V_s と S_r の関係を求めることにする。Fig. 8 より $w=20\%$ および15%に相当する S_r の値を各圧密圧力に対して内挿によって読みとり、その S_r の値と Fig. 7 より同様な方法で読みとった $w=20\%$ および15%に相当する V_L, V_s の値との関係をプロットすると Fig. 9 のようになる。これらのプロットは内挿により求めたものでその精度は充分とはいえないが、Fig. 9 が示すごとく、 V_L が飽和度によって受ける影響は大きく、間げきの流体の圧縮性の影響を反映している。

V_s はその変化量は V_L ほどでないが、同様に飽和度の増加とともに増加している。しかし Fig. 9 にお

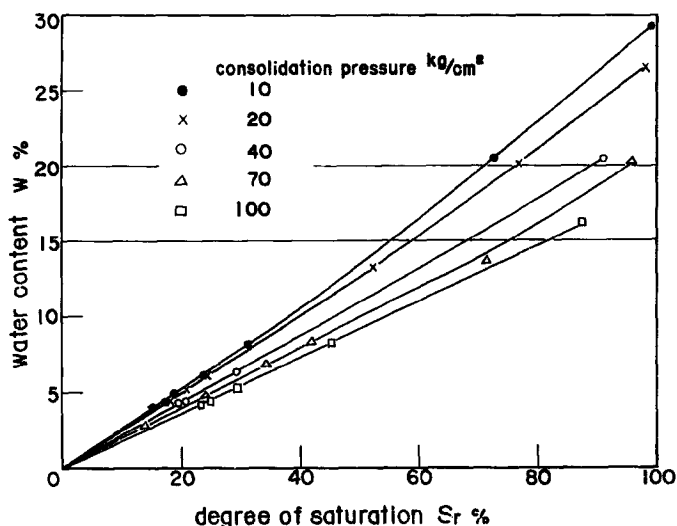


Fig. 8 Relationship between degree of Saturation and water content

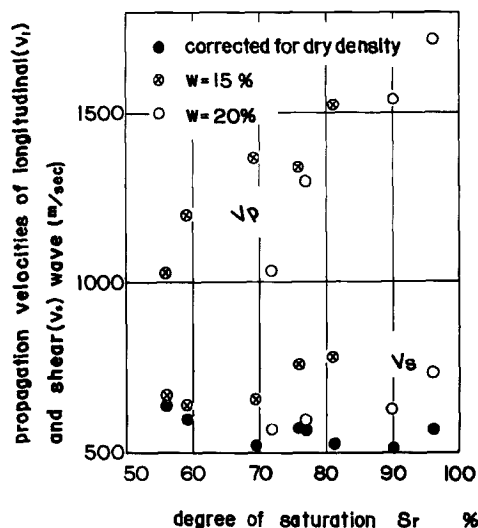


Fig. 9 Variation of velocity of longitudinal or shear wave versus degree of saturation

いて飽和度が大きくなれば、乾燥密度 γ_d も増加するので、当然 γ_d の影響を受けている。そこで γ_d の影響が不飽和土に対しても飽和土と同じであると仮定して、 γ_d に対する V_s の補正を行なう。すなわち、Fig. 3 において、 V_s と γ_d の関係が直線関係にあるとして、Fig. 9 における V_s の最小値である $w=20\%$ 、 $S_r=72\%$ の V_s を規準にして、他の点の γ_d の増加による V_s の増加量を Fig. 3 より求めて差引きプロットしたのが Fig. 9 の●印である。したがってこの関係は定量的なものではなく、相対的な比較のための定性的なものである。●印をみると、補正していないプロットとは逆にむしろ飽和度の減少とともに V_s の値はわずかではあるが増加の傾向にある。これは Table 2 に示すように Gregory¹⁾ が得た結果と一致しているようである。すなわち、間隙を空気で充した場合 V_s が最小値であるのに対し V_l は最大

Table 2 Influence of pore saturant on ultrasonic wave velocity (ft/sec) (by Gregory)

Pore Saturant	P-Wave velocity	S-Wave velocity
Air	8,500	6,690
Oil	10,930	5,810
CCl ₄	10,250	5,630

値であることである。また土の場合は飽和度によって有効応力が異なることが S_r の変化に対して V_s が変化する一因であるように思われる。

3-4 静的ヤング係数と動的ヤング係数の関係

一般に動的ヤング係数 E_d は静的ヤング係数 E_s より大きいといわれてきたが、ここでは静動両ヤング係数の間の関係を調べる。なお動的ヤング係数は(2)式から計算したものであり、静的ヤング係数は1軸圧縮の応力・ひずみ関係における初期の直線部分の勾配である。

圧密した飽和粘土と突き固めた不飽和粘土の静的ヤング係数 E_s と動的ヤング係数 E_d との関係を示したのが Fig. 10 である。両者の関係は一つの曲線で示されるが、 G_a と q_u の関係と同様に、 E_d が小さいほど E_d の大きさの割には E_s は小さい。これは衝撃のような荷重に対しては E_s が小さいほど材料の粘性的効果のしめる割合が大きいためであろう。もし材料が完全な弾性体であれば、超音波伝播速度のような動的な手法により求めたヤング係数と静的な手法によって求めたヤング係数とは一致するはずである。それで、 E_d の大きさに対して E_d と E_s の比がどのように変化するかを調べるために E_d と E_d/E_s の関係を示したのが Fig. 11 である。測定値にバラツキはあるが、 E_d と E_d/E_s の関係はほぼ双曲線によって表わされる。そして E_d が $2 \sim 3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度では E_d/E_s は約 20~30 であり、突き固め試料に対しては E_d が $1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度より以下であるので、 E_d/E_s は急激に増加して 40~80 にまでも達している。また

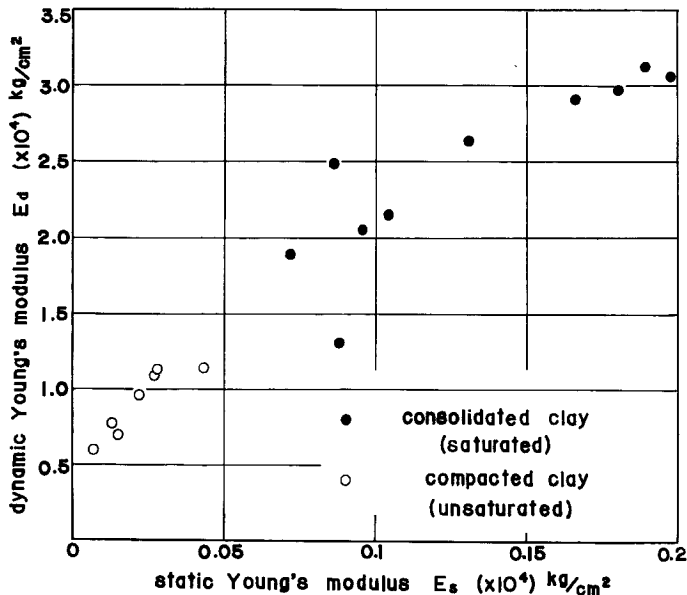


Fig. 10 Relationship between Static Young's modulus and dynamic one for clays

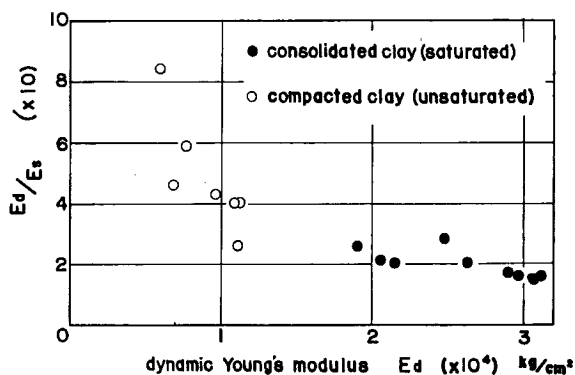


Fig. 11 Variation of Young's modulus ratio E_d/E_s versus dynamic Young's modulus for clays

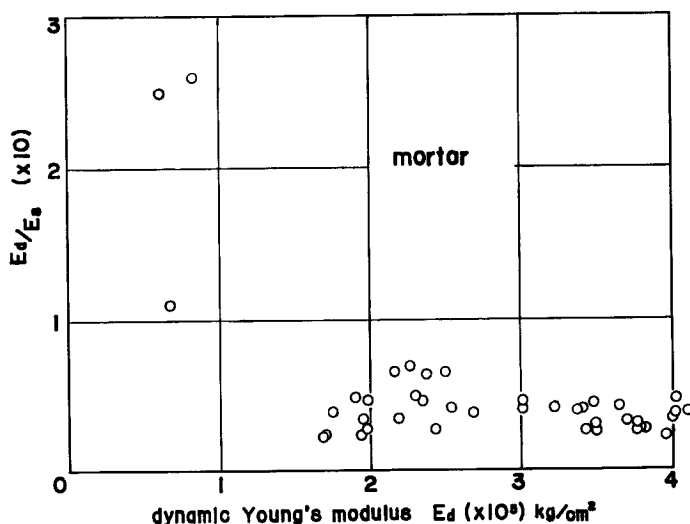


Fig. 12 Variation of Young's modulus ratio E_d/E_s versus dynamic Young's modulus for mortar

モルタルに対しても E_d と E_d/E_s の関係をプロットしてみると Fig. 12 のようになり、 E_d が $2 \sim 4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ のオーダーでは E_d/E_s は $2 \sim 6$ の範囲にあることを示している。また E_d が小さくなると土の場合と同様に E_d/E_s は急激に増大する。したがってモルタルに対しても E_d と E_d/E_s の関係は双曲線で表わされると推定できるが、中間点におけるデータの不足とバラツキのために確言はできない。

3-5 動的ポアソン比

(3) 式によって得られる動的ポアソン比について簡単に調べる。飽和粘土に対しては静的な圧縮試験によって得られるポアソン比は、試料内の水の出入りがないかぎり水および土粒子の圧縮性が土粒子骨格に比べ大きいために、0.5 に近い値を得るであろう。一方 (3) 式より計算される飽和土の動的ポアソン比 μ_d を試料の圧密圧力 p_c に対して示すと Fig. 13 のようになり、圧密圧力の増加とともに μ_d は小さくなっている。そして $p_c = 10 \text{ kg/cm}^2$ では μ_d は 0.5 に近い値である。これは圧密圧力が大きいと試料を三軸容器より取り出したときに空気を吸う量が多くなり飽和度を低下させたことも一因であろう。以前に著者の

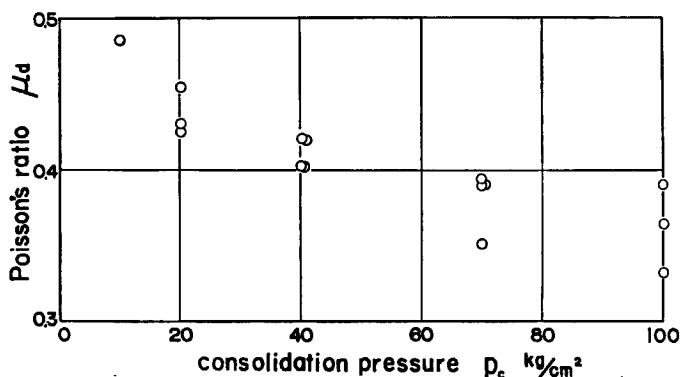


Fig. 13 Variation of dynamic Poisson's ratio versus consolidation pressure for saturated clay

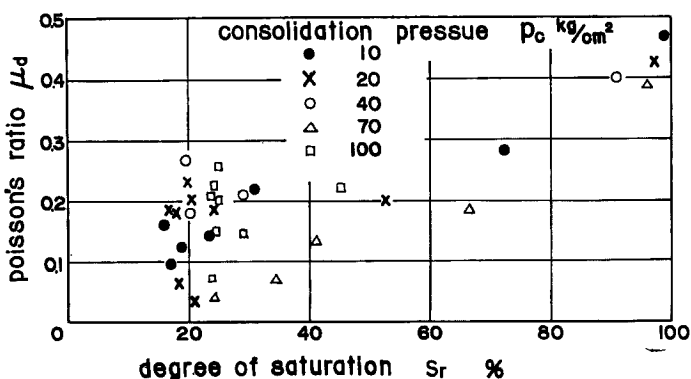


Fig. 14 Variation of dynamic Poisson's ratio versus degree of saturation

一人が飽和土に対して行なった測定結果⁵⁾によれば、 μ_d の大部分の値が0.45～0.5の範囲にあったので、 μ_d の値は飽和土に対してはあまり大きくは変化しないであろう。

一方、乾燥過程における不飽和土に対して、飽和度 S_r と μ_d の関係を示したのが Fig. 14 である。この図によると、 $S_r=100\%$ の近くでは μ_d は0.4～0.5の範囲にあり、 S_r の減少とともに μ_d は減少している。そして $S_r=20\%$ 付近では非常にバラツキが顕著であるが、平均すると0.2ぐらまで低下していて、間げきの流体の圧縮性の増加とともにポアソン比が減少していることを示している。

4. あとがき

以上の結果を要約するとつぎのようである。

(1) 土やモルタルのように比較的等方的な材料では1軸圧縮強度 q_u と動的せん断弾性係数 G_d の関係は互に単調増加であり、 G_d が小さいほど q_u/G_d も小さい。しかし岩石のような異方向性の大きな材料については q_u と G_d の関係は得られない。

(2) 超音波縦波速度 V_l は間げきの流体の影響を大きく受けるが、横波速度 V_s はその影響は少なく、飽和土に対してはその乾燥密度とはほぼ直線的な関係がある。

(3) 動的ヤング係数 E_d と静的ヤング係数 E_s との関係は互に単調増加で E_d が小さいほど E_d/E_s の値は大きく、 E_d と E_d/E_s の関係はほぼ双曲線で近似できる。

(4) 動的ポアソン比 μ_d は静的なポアソン比と同様に飽和度の減少とともに小さくなる。

以上のような結果であるが、今回行なった実験は供試体の周りからの圧力が作用していない状態で超音波の速度を測定した。しかし、実際地盤中の土は周囲から圧力を受けている。今後は三軸試験機を用いて周圧の作用下で超音波速度を測定し、土の有効応力や間げき水圧がそれらに及ぼす影響について調べたい。さらに土の強度常数である粘着力や内部摩擦角とも関連づけることを希望している。

終りにではあるが、この研究を進めるにあたり御指導を賜った村山朔郎博士に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) A. R. Gregory, "Shear Wave Velocity Measurements of Sedimentary Rock Sample under Compression" Rock Mech., Proc. of the Fifth Symp. on Rock Mech., 1963, pp. 439—467.
- 2) D. S. Huges and H. J. Jones "Elastic Wave Velocities in Sedimentary Rocks", Trans. Amer. Geophysical Union 32, 1951, pp. 173—178.
- 3) W. C. Schneider and C. J. Burtou, "Determination of the Elastic Constants of Solids by Ultrasonic Methods", J. Appl. phys. 20, 1949, pp. 48—58.
- 4) M. A. Biot, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low Frequency Range. II. High Frequency Range", J. Acoust. Soc. Amer. 28, 1956, pp. 168—191.
- 5) 村山朔郎, 八木則男 "泥岩の力学的特性", 京都大学防災研究所年報, 第9号, 昭41. 3, pp. 403—408.
- 6) R. V. Whitman, "discussion", Proc. of the Sixth Int. Conf. on S. M. F. E. Vol III, 1965, pp. 376—377.