

土中を伝播する横波速度の異方向性

石 黒 良 夫

EFFECT OF THE STRESS-ANISOTROPY ON THE SHEAR WAVE VELOCITY IN SOILS

By *Yoshio ISHIGURO*

Synopsis

The shear wave velocities v_i in soils (dry sand and consolidated clays) were measured by the ultra-sonic pulse method in the triaxial compression and extension cells. The ratio of axial and lateral stresses σ_a/σ_r in the cells was varied from 0.2 to 4.0 for sand. Main results obtained here are as follows: 1) v_i in dry sand depends on the stress component parallel to the direction of wave propagation. 2) v_i in the consolidated clay is influenced by the particle orientations.

1. ま え が き

地盤の震動特性は地盤中における波動の伝播速度と密接な関係にあることが知られており、地盤の震動特性を取扱う場合には波動の伝播速度と地盤の力学的特性を把握しなければならない。砂が等方圧を受けたときに、そのせん断弾性係数と間げき比、有効応力との関係については B. O. Hardin と F. R. Richart¹⁾ が詳細な実験を行ない、それに基づく実験式を提案している。柴田ら²⁾ はせん断弾性係数に及ぼす間げき比と有効応力との関係をそれぞれ独立に調べた。間げき比については実質部分と間げきとから構成されるような媒質の力学モデルを提示してその妥当性を実験的に検証し、有効応力のせん断弾性係数に及ぼす影響については実験的に検討した。これらによると、せん断弾性係数は間げきの増加とともに減少し、有効応力のべき乗に比例し互いに独立である。以上の研究は有効応力についてはすべて等方圧を作用させているが、実際の地盤内では異方向応力状態であることを考慮すると、異方向応力を作用させたときの応力と弾性波速度との関係についても明らかにする必要がある。これについては B. O. Hardin と W. L. Black³⁾ が共振法を用いて実験を行っており、異方向応力状態における横波速度は平均主応力 σ_m によって規定されると報告している。

粘性土については、上に述べた異方向応力の影響に加えて異方向応力を除荷しても粘性土中に異方同性が存在する⁴⁾。本論文ではこれを便宜上、構造異方性と呼ぶが、この横波速度に及ぼす影響について調べた研究は見当たらないようである。片石のようにその構造が方向性をもつ岩石については有岡⁵⁾ が縦波速度について調べており方向によってかなりの差が認められる。

実際の地盤内では土質の分布は複雑であり土粒子をとりまく間げき水、吸着水の影響をも考慮せねばならないが、本論文では特に異方向応力および構造異方性の2点に絞りそれらの横波速度に及ぼす影響についてそれぞれ独立に実験的に検討した。

2. 実 験 概 要

岩石や土のような試料について波動伝播速度を求める方法には、試料を共振させその共振振動数より求める共振法もあるが、本実験では超音波パルス法を用いた。砂については、三軸セル中に超音波発振、および

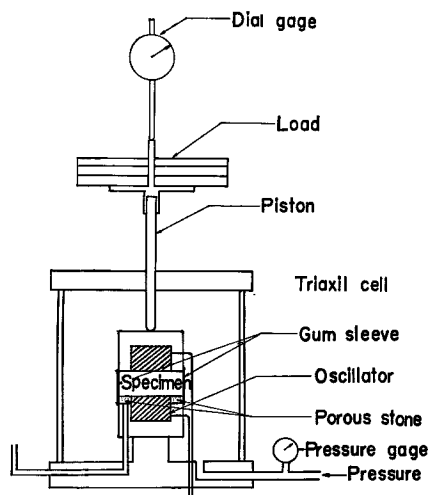


Fig. 1 Experimental device.

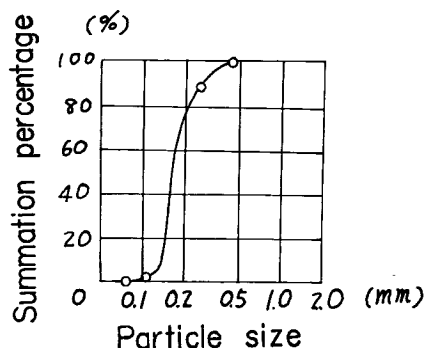


Fig. 2 Particle size distribution curve.

受振装置を組みこみ、任意の荷重段階において直径5 cm、高さ2 cmの供試体中を透過するに要する時間を、発振周波数と掃引周波数を同期させることにより電磁オシロから読取り横波速度を測定した。発振周波数は75kcである。圧縮試験時の三軸セル部分の概略をFig. 1に示す。試料は豊浦の標準砂を乾燥状態で用いた。比重は2,640、均等係数は1.28である。この粒径加積曲線をFig. 2に示す。

試験方法は空気圧による側圧をかけて一定とし、軸圧を重錘によって増加あるいは減少させて圧縮および伸張試験を行なった。圧縮試験では軸圧 σ_a と側圧 σ_r の比 σ_a/σ_r を1~3ないし4まで変化させ、伸張試験では軸圧を0.1 kg/cm²ずつ減少させ、破壊に近い状態まで連続して行なった。側圧は、圧縮試験では0.5 kg/cm²から0.5 kg/cm²ききみで2 kg/cm²まで計4通り、伸張試験では0.5 kg/cm²から同じく0.5 kg/cm²ききみで3 kg/cm²まで計6通りについて実験を行なった。円柱供試体の側面はゴムスリーブでおおわれており、供試体は底板を介して大気と通じているので過剰間げき圧はゼロである。

粘性土に関しては、まず高さ17 cm、内径25 cmの大型圧密リングを用いて0.5 kg/cm²で圧密したのち切出して、高さ12 cm、内径5 cmあるいは6 cmの円筒容器を用いて所定の圧密圧力(0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0 kg/cm²)で圧密したのち、Fig. 3に示すように圧密方向に平行ならびに直角方向に試料を切出し高さ2 cm、直径5~4.5 cmに成型した。便宜上前者をV試料、後者をH試料と呼び、Fig. 3の点線で示した矢印方向に横波を透過させたときの速度をそれぞれ $V_{t,v}$, $V_{t,h}$ とする。同図において K_0 は静止土

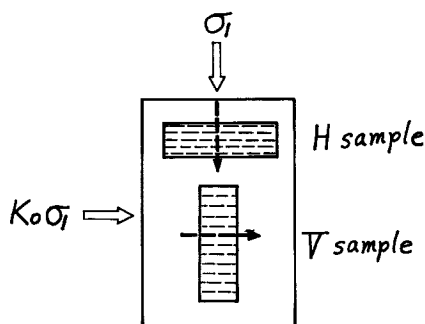


Fig. 3 Test pieces.

Table 1 Geophysical properties of the undisturbed clays.

	Depth	LL %	PL %
Tokyo clay 1	20m	64.2	33.5
"	25	37.7	22.9
"	30	38.6	20.9
"	35	34.6	20.6
"	40	—	—
Tokyo clay 2	76	—	—
"	140	—	—
Osaka clay 1	13	62.0	26.0
Osaka clay 2	46	—	—
"	54	—	—

圧係数を表わす。発振周波数は 25kc である。これに用いた試料の物性は、PL 24%, LL 40%, 比重 2.682 である。また比較のために用いた乱さない試料の物性を Table 1 に示す。

3. 砂の横波速度と異方向応力との関係

砂質地盤内の土の要素が等方圧を受けている場合は少なく、一般には異方向応力を受けている。例えば、自然堆積地盤内では主応力比 σ_1/σ_3 がほぼ 2 であるような応力を受けているといわれる。このような異方向応力が作用したとき砂中を伝播する横波速度は、等方圧作用時とはまた異なった値を示すものと考えられる。すなわち、土の要素に作用する応力を Fig. 4 のように等方的圧縮応力 (1) と偏差応力 (2) とに分けて考えると、異方向応力が作用した場合には、等方圧だけが作用した場合に比べて偏差応力によるせん断が発生し、これの横波速度に及ぼす影響がプラスされると考えられるからである。

ここでは砂質地盤内の要素が異方向応力を受けている状態を模擬した三軸圧縮および伸張試験を行なった。まず圧縮試験において σ_a/σ_r を 1~3 ないし 4 まで変化させたときの横波速度 (図では V_t と表示) と σ_a との関係、 σ_r をパラメーターとして示した結果が Fig. 5 である。砂中を伝播する弾性波速度は、砂の物性による相違を除けば有効応力と間げきの大小が支配的である。ここでは同じ種類の砂を用いかつ初期間げき比 e_0 がほぼ同じ ($e_0=0.633\sim0.651$) であるので、作用応力の相違によるせん断中の間げき比の変化の差が

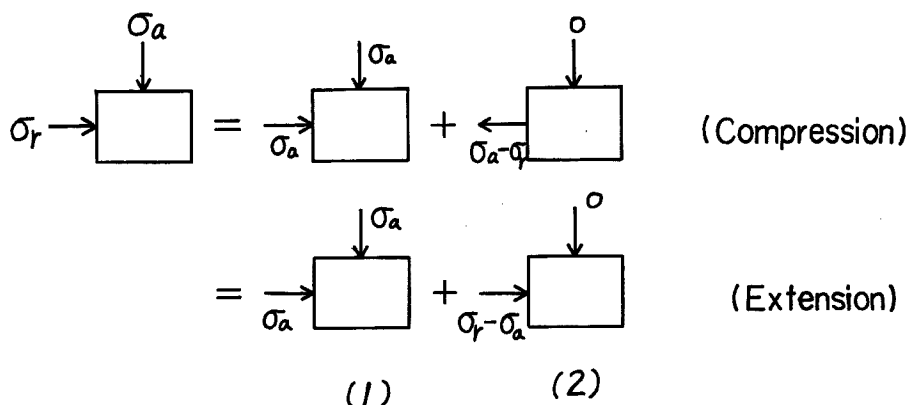
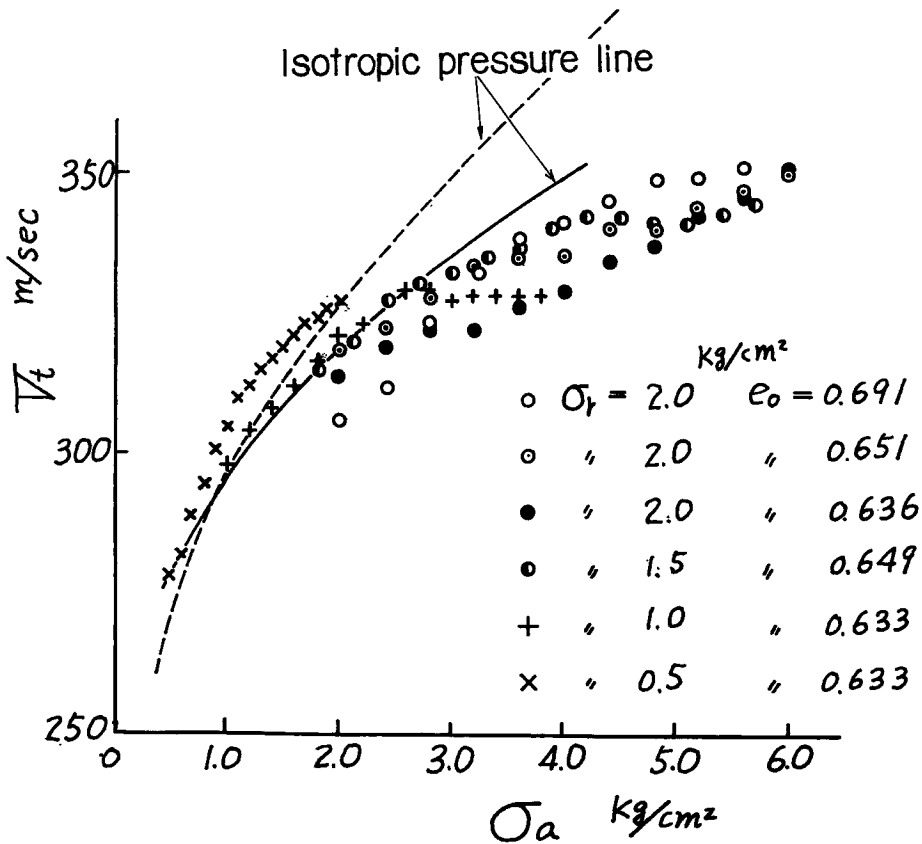


Fig. 4 Stress condition applied to a soil element.

Fig. 5 $V_t \sim \sigma_a$ curves in compression tests.

無視できれば、横波速度の変化は異方向応力に帰せられる。Fig. 5 において実線で示した $V_t \sim \sigma_a$ 関係は等方圧縮状態で 0.5 kg/cm^2 ずつ増加させていったときのものであり、初期間げき比が 0.620 から 0.727 の範囲内にある 4 回の実験結果を平均したものである。また点線は同じく等方圧縮状態で 0.2 kg/cm^2 ずつ増加させていったときのデータであり、初期間げき比が 0.674 と 0.727 の 2 回について平均したものである。この両者の差については不明であるが、ここでは側圧一定としたときの一連の実験結果のうち最初の等方圧のプロットに近い実線の方と対比してみた。するとせん断があまり進んでいない場合には、実線で示す等方圧作用時における $V_t \sim \sigma_a$ 関係（以後等方圧線と呼ぶ）にほぼ一致し、さらにせん断が進行すると等方圧線より下側に出る。

ところで、弾性論によれば実質を伝わる横波速度 v_t は次式で表わされる。

$$v_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで μ はせん断弾性係数であり、 ρ は密度である。(1) 式は均質な物体を対象としているが、砂のような粒状体についても柴田、土岐ら⁶⁾は理論的に次式を導いている。

$$v_t^2 = \frac{(1-n)\mu}{\rho} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで n は間げき率を表わす。(2) 式によればせん断中に密度があまり変化しないと考えると、横波速度の 2 乗は微小な繰返しひずみを与えたときの応力-ひずみ関係の勾配に比例的である。したがって、せん断

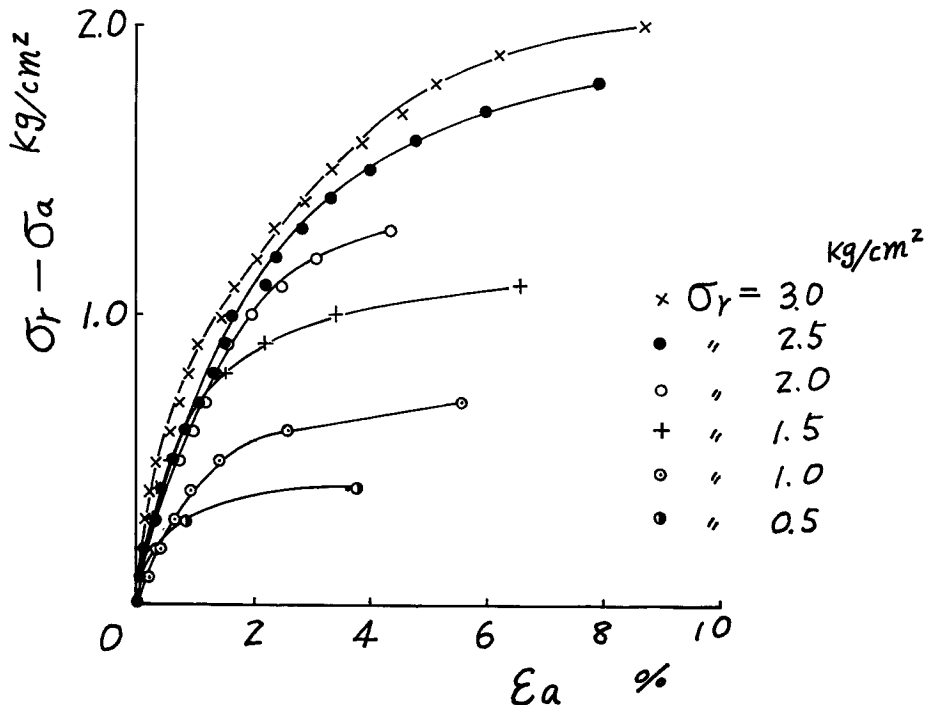
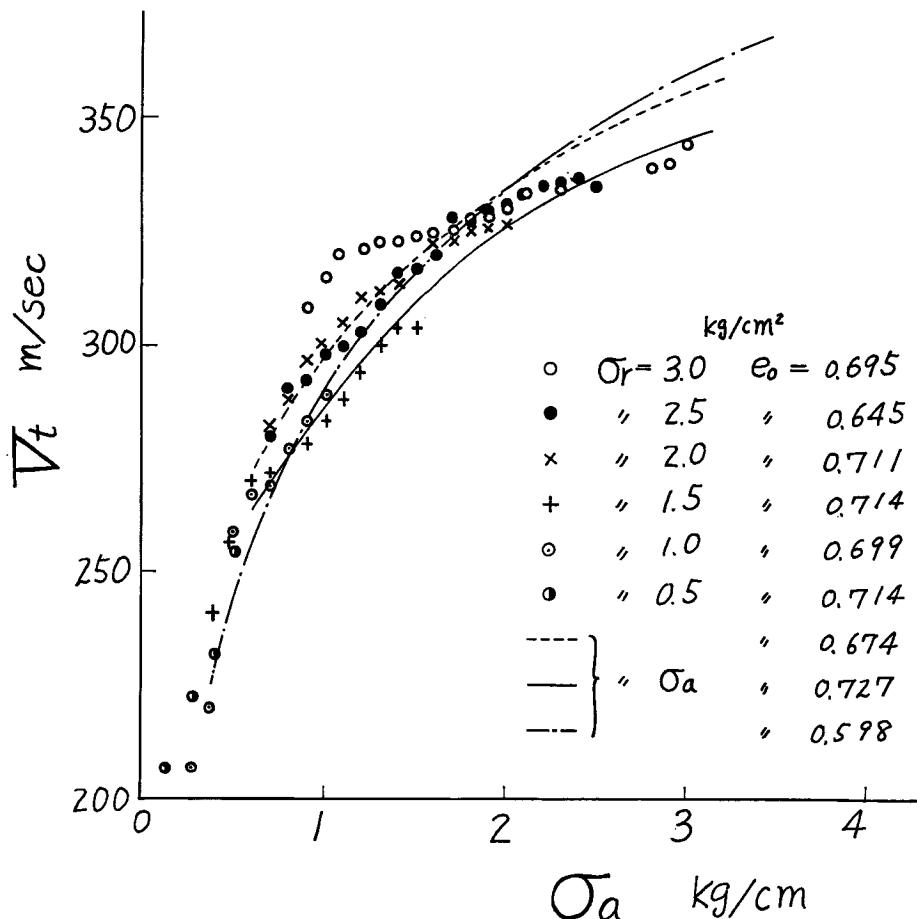


Fig. 6 Stress~strain curves in extension tests.

が進行すると等方圧の場合に比して同じ σ_a に対する横波速度が小さいということは、微小な繰返しひずみを与えたときの応力—ひずみ関係の勾配が、せん断が進行するに従って減少することを意味している。

ここで行った圧縮試験における応力—ひずみ関係をみると *hard-spring* 型を呈している (図は省略)。これは、軸圧を増加させてせん断を進行させるとともに軸圧に比例的な供試体端面と振動子間の摩擦が増大し、供試体が側方に拡がるのを妨げる、いわゆる側方拘束状態に近くなり、側圧にこの摩擦力が加わって結果的に過大な側圧が作用していることに起因するものと思われる。この供試体端面と振動子間の摩擦の影響を小さくするため伸張試験を行なった。その応力—ひずみ関係を Fig. 6 に示す。ひずみとしては軸ひずみ ϵ_a をとった。これより求める内部摩擦角 ϕ を検討すると摩擦の影響はあまりないことが判る。これは伸張試験では圧縮試験の場合とは逆に軸圧を漸次減少させていくことに因るものと思われる。

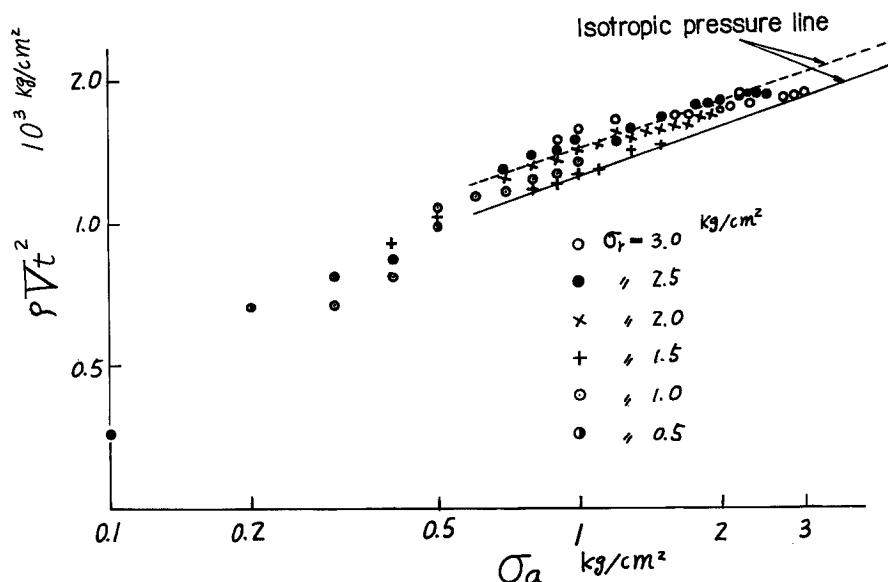
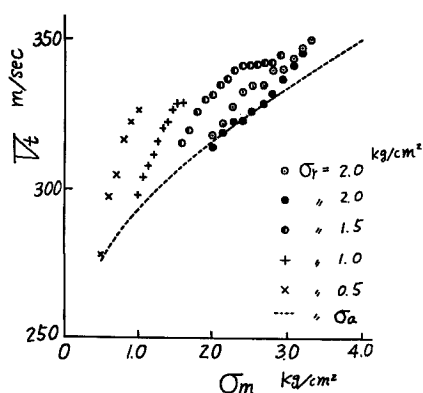
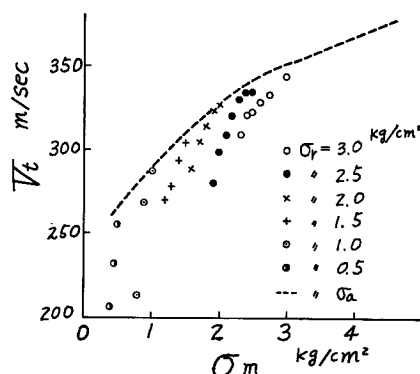
伸張試験における $V_t \sim \sigma_a$ 関係を Fig. 7 に示す。点線および実線はともに等方圧を 0.2 kg/cm^2 ずつ増加させていったときの $V_t \sim \sigma_a$ 関係を表わす。伸張試験では軸圧を漸次減少させるものであり等方圧線と比較する場合にはやはり等方圧も減少させて比較せねばならない。一点鎖線で示した曲線は 5 kg/cm^2 まで一度に等方圧を作用させ漸次等方圧を減少させたものであるが、あまり差はないようである。Fig. 7 をみると、せん断があまり進行していないときには圧縮試験結果と同じく横波速度は σ_a だけによって規定され、等方圧状態における $V_t \sim \sigma_a$ 関係とほぼ一致する。 σ_a が小さいところの $V_t \sim \sigma_a$ 関係をよくみるため、Fig. 7 に示した結果をそのまま両対数紙上にプロットし直したものが Fig. 8 である。同図においてはすべて Fig. 6 と同じ記号を用いている。縦軸はせん断弾性係数と等価な ρV_t^2 をとった。ただし ρ はせん断中も一定と仮定している。Fig. 8 より、せん断があまり進行していないときには異方向応力作用下でも $\log V_t \sim \log \sigma_a$ 関係は直線となり、その勾配は等方圧線とほぼ同じとみてよい。Fig. 8 に書き入れた等方圧線の勾配は 0.35 と 0.33 であり、柴田らの実験で得られた値⁷⁾ とはかなり異なっている。ただ本実験は空気圧を用いてお

Fig. 7 $V_t \sim \sigma_a$ curves in extension tests.

り、柴田らが行なったように水圧を用いた実験ではその勾配が 0.45 となり 0.5 にかなり近い値を示した。この差については振動子間の電氣的絶縁と関係がありそうだが、今のところその詳細および理由については不明である。圧縮試験で見られたと同じように伸張試験においても、せん断がかなり進行すると、横波速度は等方圧線より多少小さくなることが認められる。

今までは横波速度と σ_a について整理してきたが、さきに述べたように B. O. Hardin と W. L. Black⁹⁾ は横波速度は平均主応力 σ_m によって規定されるとしている。そこで Fig. 5, Fig. 7 の横軸の代りに σ_m で整理し直し、それぞれを Fig. 9, Fig. 10 とする。ともに Fig. 5, Fig. 7 と同じ記号を用いている。いずれの場合にも横波速度が σ_m で規定されないことを表わしている。この結果は B. O. Hardin らの実験結果とは異なるが、彼らの実験で用いられた共振法と、ここで用いた超音波パルス法を比較すると、応力レベル、周波数、変形量などにおいて相当違った状態にあると考えられる。これらの相違が、等方圧作用下ではほとんど差異は見られなかったが⁹⁾、異方向応力が作用した場合に差が生じるということが考えられる。

結局、圧縮、伸張試験とも定性的には横波速度は波の伝播方向に平行な応力が支配的であり、せん断がかなり進んで破壊に近くなってからせん断の影響が多少認められる程度である。実験の地盤内に通常作用している異方向応力程度では、波動伝播方向の応力成分によってほぼ規定されると考えてよいであろう。


 Fig. 8 $\log V_t \sim \log \sigma_a$ curves in extension tests.

 Fig. 9 $V_t \sim \sigma_m$ curves in compression tests.

 Fig. 10 $V_t \sim \sigma_m$ curves in extension tests.

4. 粘性土の横波速度と構造異方向性との関係

ある荷重段階で圧密終了後、Fig. 3 に示すように圧密方向に平行および直角方向に試料を切出し、Fig. 3 に点線で示す方向に横波を発振させて速度を測定した。そのときの横波速度と圧密圧力 p の関係を Fig. 11 に示す。これによると、 $V_{t,h} \sim p$ および $V_{t,v} \sim p$ 関係はともに両対数紙上で直線的に比例し、その関係を $V_t = ap^b$ (m/sec) (a, b はともに常数)

と表わしたときの b の値は、 $V_{t,h}$ のとき 0.38, $V_{t,v}$ のとき 0.44 であった。このように圧密圧力に対する方向の相違によって横波速度が異なる原因は、圧密によって土要素内に異方向性が生じていることが挙げられよう。

実際に圧密による異方向性が生じていることを確認するため、32kg/cm² 圧密終了のH試料とV試料をととも

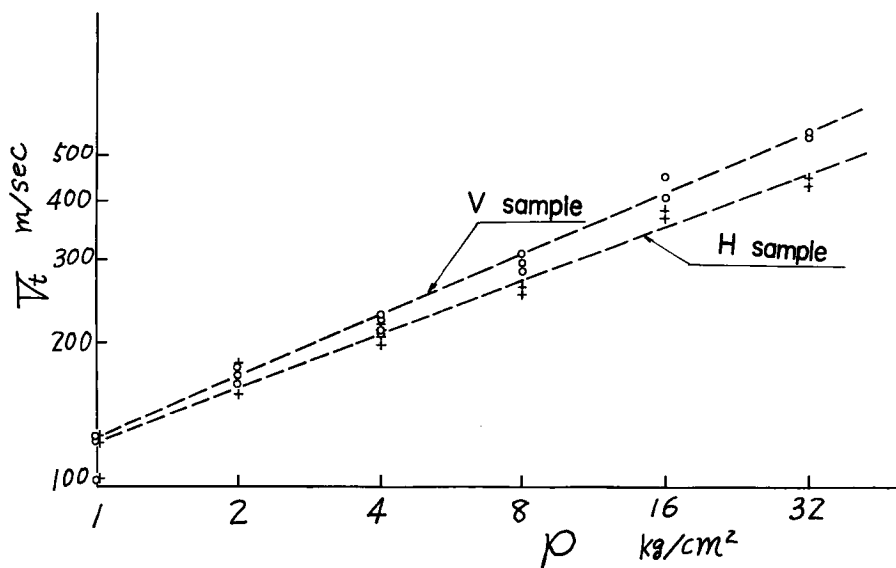


Fig. 11 $\log V_t \sim \log p$ curves for the remolded-reconsolidated clay.

に自然乾燥させたのち水浸させて膨潤させた。すると **Photo. 1** に示すように、分離面の生じる方向の相違が明瞭に見られた。この分離面の方向は粘土粒子配向方向と同じと考えられるが、これは方向により収縮、膨張の度合いが異なる、すなわちそれぞれの試料の異方性をマクロ的に反映するものと考えられる。ただし、 $V_{t,h}$ と $V_{t,v}$ では横波伝播状況が異なるため、それらの差が直ちに構造異方性を表わしているとはいえないが、とにかく自然堆積地盤を模擬した一次元圧密状態では、波動伝播方向により横波速度が変化することが確認されたといえよう。

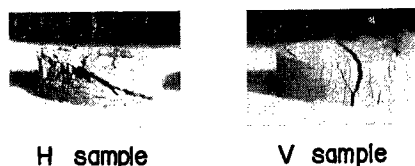


Photo. 1 Influence of particle orientation in swelling test.

以上の結果は、練返し再圧密試料を用いた実験データであるが、それと乱さない試料による場合とを比較したものが **Fig. 12** である。縦軸は $V_{t,h}$ と $V_{t,v}$ の差を $V_{t,h}$ で除して無次元化しており方向による横波速度差の程度を表わしている。横軸は圧密圧力を表わしており、乱さない試料についてはその有効土かぶり圧をとった。縦軸、横軸ともに対数目盛をとっている。これによると、練返した試料ではほぼ直線的に比例しており、乱さない試料でもほぼその直線の近くに分布しているとみなせる。乱さない試料によるデータの中には、練返した試料によるデータと比較して同じ圧密圧力に比べ方向による速度差がかなり大きいものもあるが、これはサンプリングした地盤が先行圧縮荷重を受けていたのではないかと考えられる。

Fig. 11 に示したデータは練返した粘土を用いたものであるが、練返しによる横波速度への影響を調べるため、さきに **Fig. 12** に用いた 2 種類の粘土にもう 1 種類の粘土を加えて計 3 種類の乱さない試料を用いて横波速度を測定した。さらに別の種類の乱さない試料を直径 5cm、高さ 2cm に成型して再圧密し、それぞれの圧密終了後圧密試験機よりはらずして圧密段階に対応する横波速度を測定した。これらのデータを示したものが **Fig. 13** である。横軸には乱さない試料の場合には有効土かぶり圧を、再圧密の場合には圧密圧力をとっており、両軸とも対数目盛である。これによると乱さない試料でも同図に点線で示した練返し試料の場合と同じく、ともに両対数紙上でほぼ直線的に比例しており、練返しによる横波速度への影響はあまりないと考えてよからう。

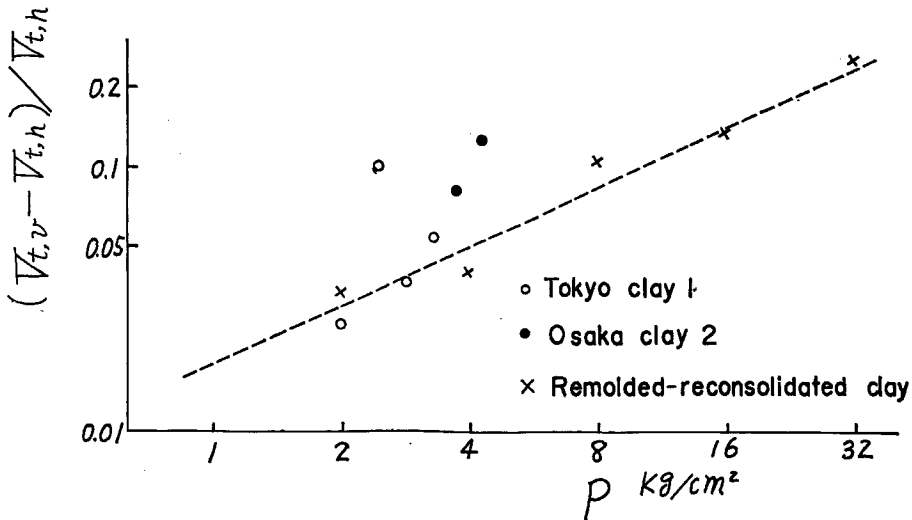
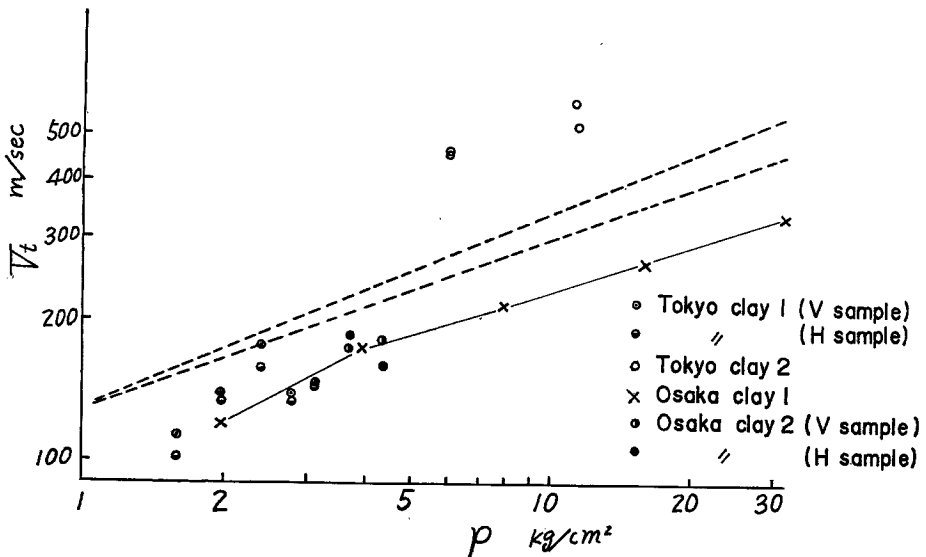
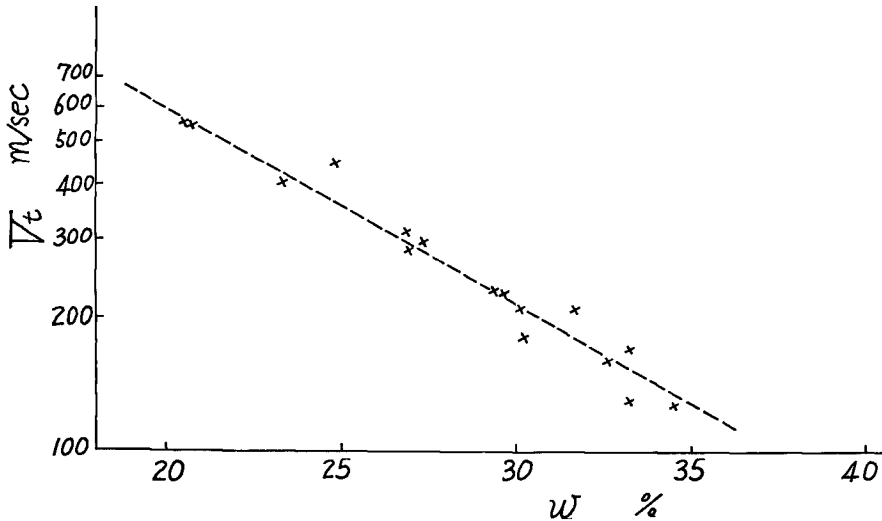


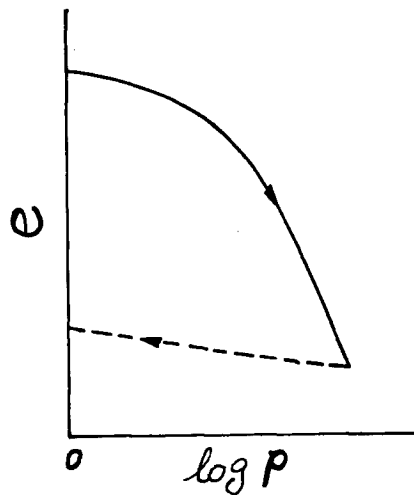
Fig. 12 Degree of velocity-anisotropy vs. consolidated pressure.


 Fig. 13 $\log V_t \sim \log p$ curves for the undisturbed clays.

つぎに、繰返し試料の $V_t \sim p$ 関係と含水比との対応を考える。圧密圧力を増加させるに従い、含水比は漸次減少しその関係は $w \sim \log p$ (w : 含水比) 曲線上でほぼ直線的に比例するので、 $\log V_t \sim w$ 関係をプロットするとそれは $\log V_t \sim \log p$ 関係の横軸 $\log p$ の代りに w を用いてその勾配が負になるような関係になる。実際にプロットしたものが Fig. 14 である。ここでは V 試料だけについて示した。土の種類が同じであれば $\log V_t \sim w$ 関係は Fig. 14 のように比例関係にあるが、例えば LL, PL が異なる試料が混っておればこれとは異なった整理の仕方が必要であろう。

Fig. 14 $\log V_t \sim w$ curves for the remolded clay.

以上、練返した試料と乱さない試料を用いて方向による速度差を問題としたが、これらはいずれも横波速度測定時にはほぼ拘束圧はゼロである。練返した試料の $e \sim \log p$ 曲線を模式的に Fig. 15 に示すが、圧密終了後拘束圧を除荷して Fig. 15 の点線で示した軌跡を通して膨張し、その状態における横波速度を測定したことになる。この膨張による横波速度への影響については、練返した試料および乱さない試料のそれぞれに存在するため 2 者を比較する場合にはあまり問題とはならないが、例えば Fig. 11 のような $V_t \sim p$ 関係が地盤内で土かぶり圧を受けた状態においても存在するかどうかについては推測の域を出ない。それを確認するためには、圧密終了後除荷しない状態で横波速度を測定せねばならないであろう。

Fig. 15 $e \sim \log p$ curve.

5. 結 び

地盤の震動特性に関与する要因は多種にわたり、かつ相互の関連も複雑であるが、その要因のうち特に異方向応力と構造異方向性について焦点をしぼり、それらの横波速度に及ぼす影響について実験的に検討を加え以下の結果を得た。

1) 砂に異方向応力が作用した場合、せん断がそれほど大きくないうちは、横波速度は伝播方向の応力成分に規定される。実地盤内では静止土圧係数が0.5前後であることを考慮すると、横波速度伝播方向によってかなりの速度差が生ずるものと考えられる。

2) 粘性土については圧密圧力と横波速度は両対数紙上で直線的に比例し、横波伝播方向が異なることによって明瞭な差がみられ、現場試料と良い一致を得た。ただ定量的には、 32kg/cm^2 の圧密圧力で $(V_{t,v}-V_{t,h})/V_{t,h}$ が0.2前後であり、かなりの深度を考慮せねばならない場合を除いて特に地盤内異方向性に留意することはない。

本研究では、パルス法を用いて横波速度を測定した。砂の場合についていえば、確かにパルス波の速度は応力、間げきなどの力学的条件に対応しているが、ミクロにみた場合、正確に何を反映しているのかよく判っていない。この問題については、発振波の応力レベル、周波数、変位量などの弾性波速度への依存存在とも関連させて今後明らかにされるべきであろう。

最後に、この研究を進めていくにあたり御指導を賜った京大防災研究所柴田徹教授、およびおもに実験に協力された京大工学部塩田憲作氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Hardin, B.O. and F.E. Richart: Elastic Wave Velocities in Granular Soils, Proc. ASCE, SM1, 1963, pp. 33-65.
- 2) 柴田 徹・土岐憲三・寺田邦雄：砂質土の弾性波速度に関する研究，京大防災研究所年報，第13号B，昭45，pp. 593-609.
- 3) Hardin, B. O. and W.L. Black: Sand Stiffness under Various Triaxial Stresses, Proc. ASCE, SM2, 1966, pp. 27-41.
- 4) Duncan, J. M. and H.B. Seed: Anisotropy and Stress Reorientation in Clay, Proc. ASCE, SM5, pp. 21-50.
- 5) 有岡正樹：異方性岩質材料の破壊と弾性挙動に関する実験的研究，京大修士論文，昭44，pp. 95-101.
- 6) 前出 2)
- 7) 前出 2)
- 8) 前出 3)
- 9) 前出 2)