

振動三軸試験による土のポアソン比の測定

今井常雄・横田耕一郎・今野政志

Poisson's Ratio of Soils Measured by Cyclic Triaxial Test

Tsuneo IMAI
Koichiro YOKOTA
Masashi KONNO

Abstract

Poisson's ratio may be defined as the ratio of fractional transverse strain to fractional longitudinal strain. The authors performed cyclic triaxial test using a cyclic triaxial test apparatus. The axial and radial strain measurements made at that time were used to test methods of determining Poisson's ratio.

In general, measurement of axial strain is extremely easy, however, determination of radial strain has problems. In the study reported herein, radial strain in which the cyclic triaxial test apparatus was equipped could be calculated by measurement of volume changes in soil. These measurements were repeatedly carried out. The standard method of determining volume changes was performed; changes in the level of water situated inside the triaxial cell were measured. This was accomplished by a "gap sensor", which is a non-contact strain gauge that measures the changing distance between a fixed pickup and a given object. In this case, the object was the stainless steel base of a float riding on the water inside the cell. Changes in the level of the float were directly registered by the sensor.

If the components of the measuring apparatus and the dimensions of the specimen are given, Poisson's ratio is obtained only as a function of axial strain and changes in water level. If correct calibration of the detection range of the sensor, output characteristics and frequency characteristics are achieved, the amount of rise and fall of the float should give reliable value for water level changes. In practice, however, there is a problem in which the changes in the water and the rise and fall of the float do not agree.

To deal with this problem, a dummy specimen was used, and actual load tests were carried out. The relation between subsurface changes in overall capacity and output voltage was determined. This information was expressed as a calibration curve. By using this curve and the output voltage of the sensor to find the amount of change in overall capacity, and subtracting the capacity change due to gap input and output, the volume change of the specimen may be found.

This curve was used to test 4 different kinds of materials. The tests showed that Poisson's ratio varies according to the material being tested, its degree of saturation, level of shear strain, stress ratio, confining pressure, etc.. Another interesting result of these tests was that saturated, normally consolidated clays under an undrained condition have Poisson's ratio of about 0.5. Also, Poisson's ratio of medium density ($D_r=50\%$) sand under a saturated and drained condition is about from 0.15 to 0.25, much smaller than the customarily given value of 0.3.

1 まえがき

よく知られているように、一般に物質のある方向に法線応力が作用するとき、その方向に伸び（縮み）ひずみ ϵ を生じると同時に、それに垂直なすべての方向に縮み（伸び）の第二のひずみ ϵ' を生じる。実験によれば、等方体にあつては、弾性限界内でこの両者の比は物質による定数となる。これをポアソン比 (Poisson's Ratio) と云う。

$$\text{ポアソン比} \quad \nu = \frac{\epsilon'}{\epsilon} \quad (1)$$

さて、このような定義で示されるポアソン比は、弾性体力学の重要な定数の一つで、応力伝播、変形を取り扱う際に不可欠なものであり、一般に 0~0.5 の値をとる。土質力学の分野においても、地盤内の応力分布やひずみ分布を求める際、必要欠くべからざる値であり、土構造物や基礎の変形の検討や、設計に際して、その基礎データとしてポアソン比の役割はきわめて大きい。

さて、このようにポアソン比は、土質力学的取り扱いにおける土の基本的物性値の重要な一つであるにもかかわらず、これまで、十分な実験や研究がなされてきたとは云い難い。このことは、ポアソン比の測定が土のような物質に対して、なかなか困難であることを示している。

一方、地震工学からの要請もあいまって、近年、土の動力学 (Soil Dynamics) が急激な進展をみせ、その一つの重要な柱として、土の動的変形特性の解明に関する多くの実験的研究が進められている。その結果、土の剛性率、減衰定数、あるいはこれらのひずみ依存性については、多くのことが明らかとなってきた。しかし、この動力学の面においても、ポアソン比については、ほとんど研究は進んでいない。

筆者等は、土の力学像の形成とその理解に際して、もっとも基礎をなす重要な性質の一つとしてポアソン比を考え、研究を進めてきた。10数年前に開発し、以来測定を積み重ねてきた PS 検層もその研究の一つである。後述のように P 波速度と S 波速度の比から弾性論的に導くポアソン比の測定例を多くの現場、多くの土について蓄積してきたのである。また、一方、室内での力学試験においても、供試体のひずみ測定からポアソン比を求める試み、あるいは、体積変動の計測から導く方法も実験してきた。

本報告は、動力学の分野で良く用いられる振動三軸試験時の、供試体の体積変動を高精度で計測し、動的加振時の時々刻々のポアソン比の実態とその変動を測定する試みと、その成果についてまとめたものである。⁽¹⁾

2 測定方法

まず、これまでに行なわれてきたポアソン比測定方法の代表的なものを以下に示す。

1) 地盤あるいは供試体の P 波速度 V_P および S 波速度 V_S 、すなわち、弾性波速度を知ることにより、波動論から(2)式でポアソン比を求める。

$$\nu = \frac{(V_P/V_S)^2 - 2}{2\{(V_P/V_S)^2 - 1\}} \quad (2)$$

この方法は近年非常な発展をみた PS 検層法、あるいは岩石試料の超音波速度測定等によりこれまでも相当のデータの蓄積がなされている。

2) 円筒状に成形した土の供試体について一軸圧縮試験を行ない、その時の供試体の縦ひずみと横ひずみを測定し、(1)式の定義に基づいてポアソン比を求める。

この方法を用いる場合、縦ひずみはダイヤルゲージあるいは変位計により、縦方向の変位を測定することにより容易に求められるが、横ひずみの計測はなかなか難しい。円周方向にひずみゲージを張り付けたり、ダイヤルゲージを直接側面に接触させて、多方向より横方向の変位を測定するような方法がとられている。

3) 円筒状に成形した土の供試体について三軸試験を行ない、縦方向変位 Δa 、体積変化 ΔV を測定することにより(3)式を用いてポアソン比を求める。

$$\nu = \frac{1 - \Delta V/V}{2 \cdot \Delta a/a} \quad (3)$$

V : 初期体積

a : 初期供試体高さ

この方法でポアソン比を求める場合にも、縦ひずみ（あるいは縦方向変位）を求めることは容易であるが、体積変化を求めることは一般的には難しい。飽和試料の排水試験を行なう場合には、ビューレットにより供試体の体積変化を直接求めることができるが、他の試験条件に対しては別途体積変化測定装置を考案する必要がある。

4) 原地盤で載荷試験を行なった時の、沈下量、ポアソン比、縦弾性係数、載荷板半径、荷重強度に関する理論解より、(4)式に基づいてポアソン比を計算する。⁽²⁾

$$\nu = \sqrt{1 - \frac{2\omega E}{\pi\sigma_0 P_0}} \quad (4)$$

ω : 沈下量

E : 縦弾性係数

σ_0 : 載荷板の半径

P_0 : 荷重強度

この方法は、弾性論による理論変形に適合する条件下にある地盤の場合のみ有用である。

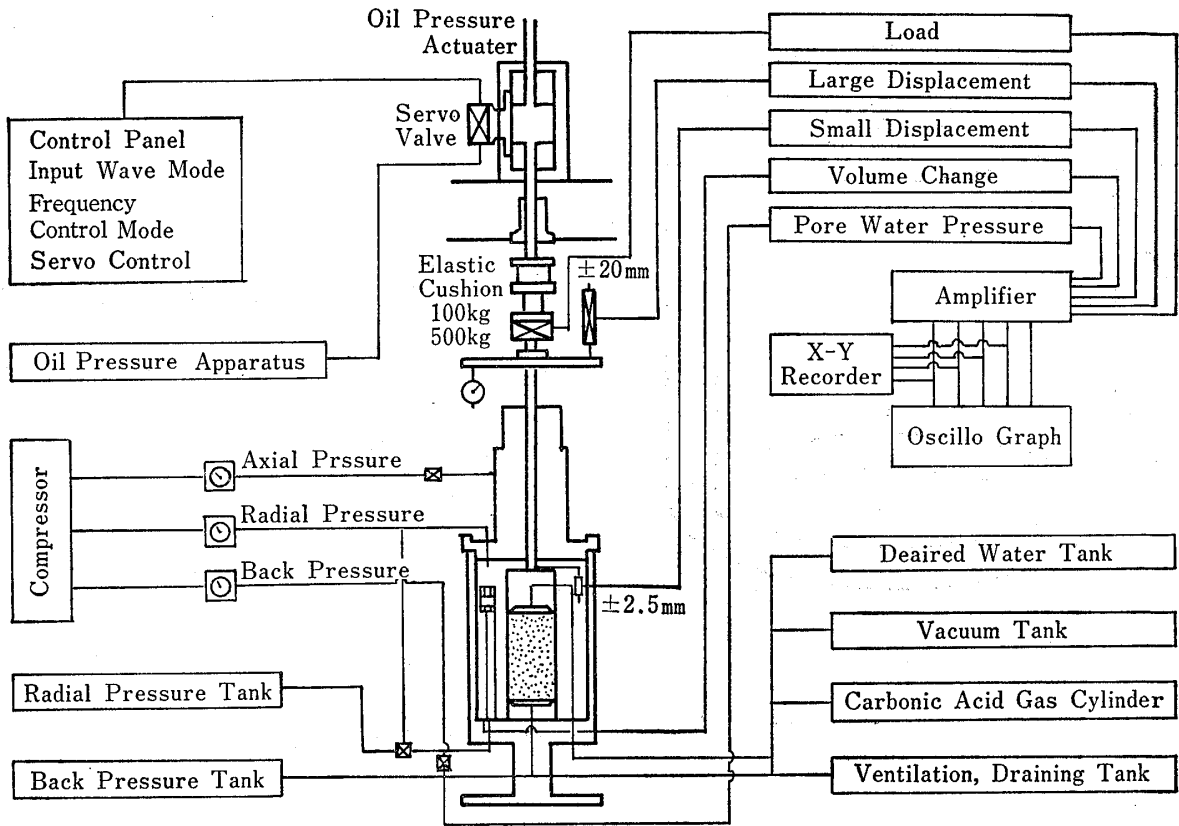


Fig. 1 Dynamic triaxial test apparatus

5) 土の供試体の圧縮試験あるいはせん断試験より試料の縦弾性係数 E , 横弾性係数 G を求め, (5)式によりポアソン比を求める。

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (5)$$

E および G を求める方法は種々あるが, E は三軸圧縮試験, G はねじりせん断試験より求めることが多い。

以上, 代表的なポアソン比の測定方法の特徴を述べた。今回報告する測定方法は基本的にはこのうちの 3) に属するものであり, 供試体の体積変化測定装置にその特徴をもつものである。以下, その装置, 原理, 各種キャリブレーション, 試験結果等について詳述する。

3 測定装置及び原理

試験機は, 通常の軸加振型の振動三軸試験機であり, その詳細は図-1 に示したとおりである。さらに図-1 のセルの部分および体積変化測定装置の詳細を図-2 に示す。図-2 よりわかるように, セルは2重セル方式となっており, 通常の三軸セルの内側にもうひとつのセルをもっている。内側セルはさらに供試体収納室とフロート, センサー収納室にわかれているが, この両者は孔隙

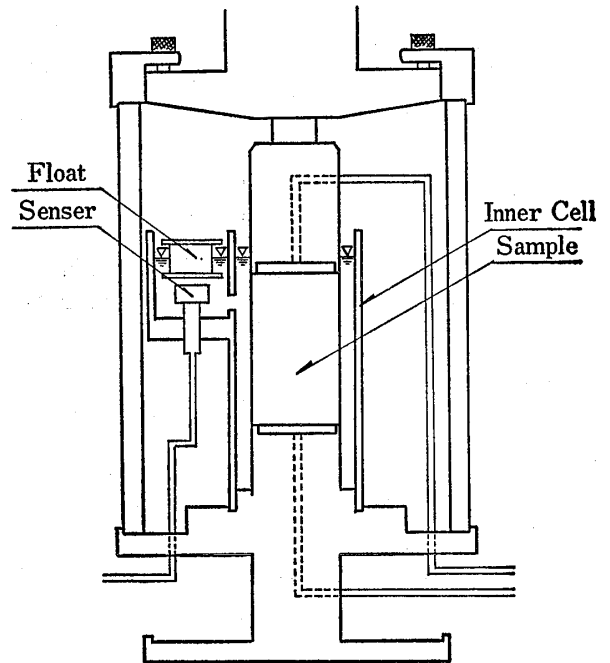


Fig. 2 Schematic view of the cell for Poisson's ratio measurement

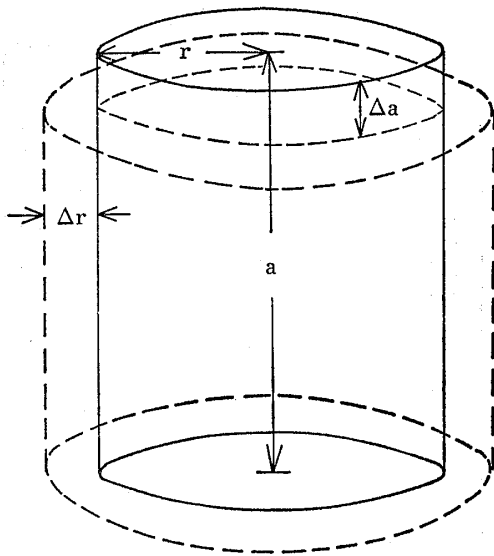


Fig. 3 Definition of Poisson's ratio

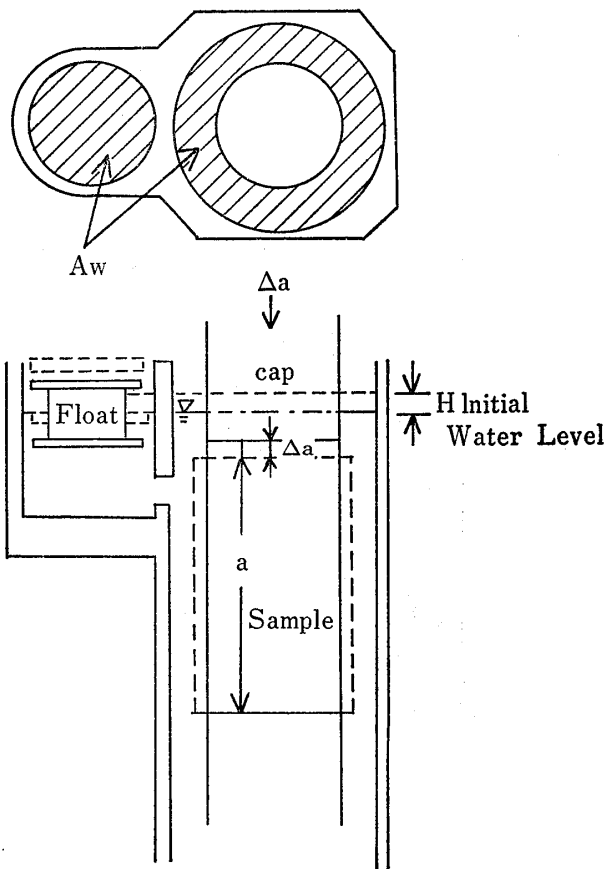


Fig. 4 Schematic view of test device

で連続している。図中のセンサーはギャップセンサーと呼ばれる非接触型変位計であり、フロート下部に貼られた金属板との距離を電氣的に検出する。内側セルは実験時には水が満たされており、その水面は上部キャップ部分にある。実験時には供試体の体積変化およびキャップ部の上下動により水面の位置が変わり、その変化に伴ってフロートの位置も変わる。この変化はただちにギャップセンサーにより検出される。この測定の実理はこのようにして検出された記録より、供試体の体積変化 ΔV を算出して(3)式によりポアソン比を計算するものである。

以下にその具体的な手法を説明する。

縦ひずみ、横ひずみをそれぞれ ϵ_a , ϵ_r と書けば、体積ひずみは、(6)式のようなになる。ただし、体積増加の場合を正とする。(図-3 参照)

$$\epsilon_a = -\frac{\Delta a}{a}, \quad \epsilon_r = \frac{\Delta r}{r}, \quad \epsilon_V = -\frac{\Delta V}{V}$$

$$V = 2\pi r^2 a, \quad \Delta V = 2\pi(r + \Delta r)^2(a + \Delta a) - V$$

$$\epsilon_V = (1 + \epsilon_a)(1 + \epsilon_r)^2 - 1 \tag{6}$$

(6)式を変形して

$$(1 + \epsilon_r)^2 = \frac{1 + \epsilon_V}{1 + \epsilon_a}$$

であることより

$$\epsilon_r = \sqrt{\frac{1 + \epsilon_V}{1 + \epsilon_a}} - 1 \tag{7}$$

したがってポアソン比 $-\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a}$ は(8)式のようなになる。

$$\nu = \frac{1 - \sqrt{\frac{1 + \epsilon_V}{1 + \epsilon_a}}}{\epsilon_a} \tag{8}$$

なお、(6)式において ϵ_a , ϵ_r の2次の項を省略した場合の近似式は(9)式の通りである。

$$\begin{aligned} \epsilon_V &= (1 + \epsilon_a)(1 + \epsilon_r)^2 - 1 \\ &\approx (1 + \epsilon_a)(1 + 2\epsilon_r) - 1 \\ &\approx \epsilon_a + 2\epsilon_r \end{aligned} \tag{9}$$

この場合のポアソン比は(10)式のようなになる。

$$\begin{aligned} \nu &= -\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a} \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_V}{\epsilon_a} \right) \end{aligned} \tag{10}$$

(10)式は(3)式と全く同様の意味を持っている。

以上の計算よりポアソン比は(8)式または(10)式より ϵ_a と ϵ_V を用いて求められる。 ϵ_a は試験時の軸変位を測定することにより容易に求められるので、結局 ϵ_V の値をどう求めるかが決めればよい。そこで次に ϵ_V の求め方の詳細を示す。

図-4 に示した、模式的試験装置において、諸元を次

のように定める。

- a : 供試体の初期高さ
- V : 供試体の初期体積
- Δa : 供試体の縦変位 (圧縮時に負とする)
- ΔV : Δa 変位時の供試体の体積変化
- ϵ_V : $\Delta V/V$
- ϵ_a : $\Delta a/a$
- ΔH : Δa 変位のときの水位上昇量
- A_s : 供試体の初期断面積
- A_c : キャップの断面積
- A_w : 変動水位に関する全面積 (図-4の斜線部)

今、静止のある状態から出発して、キャップが Δa cm 変位 (この場合圧縮) したとき、フロート水位が ΔH cm 上昇したとする。このとき体積ひずみは、

$$\Delta H \times A_w = -\Delta a \cdot A_c + \Delta V$$

$$\Delta V = \Delta H \times A_w + \Delta a \cdot A_c$$

より

$$\epsilon_V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H \times A_w}{V} + \frac{A_c}{A_s} \cdot \frac{\Delta a}{a}$$

$$= \frac{A_c}{A_s} \times \epsilon_a + \frac{A_w}{V} \times \Delta H \quad (11)$$

と表わされ、 ϵ_V は(11)式により求めることができる。さらに ϵ_V を(8)式および(10)式に代入することによりポアソン比は、(12)式、(13)式のようになる。

$$\nu = \frac{1}{\epsilon_a} \left(1 - \sqrt{\frac{1 + \frac{A_c}{A_s} \cdot \epsilon_a + \frac{A_w}{V} \cdot \Delta H}{1 + \epsilon_a}} \right) \quad (12)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A_c}{A_s} - \frac{A_w}{V \cdot \epsilon_a} \cdot \Delta H \right) \quad (13)$$

次に(12)式、(13)式に A_c/A_s 、 A_w/V 等の値を設定して $\nu \sim \epsilon_a \sim \Delta H$ の関係を調べてみる。用いた試験装置の寸法および標準の供試体寸法から、

$$\begin{cases} A_w = 22.79 \text{ cm}^2 \\ A_c = 19.57 \text{ cm}^2 \\ \phi = 5 \text{ cm} \\ a = 10 \text{ cm} \\ A_s = 19.63 \text{ cm}^2 \\ V = 196.3 \text{ cm}^3 \end{cases}$$

である。したがって A_c/A_s 、 A_w/V は次のようになる。

$$\begin{cases} A_c/A_s = 1 \\ A_w/V = 0.1161 \text{ cm}^{-1} \end{cases}$$

この値を(12)式および(13)式に代入すると、(12)式、(13)式のポアソン比はそれぞれ次のように示すことができる。

$$\nu = \frac{1}{\epsilon_a} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{0.11608 \cdot \Delta H}{1 + \epsilon_a}} \right) \quad (14)$$

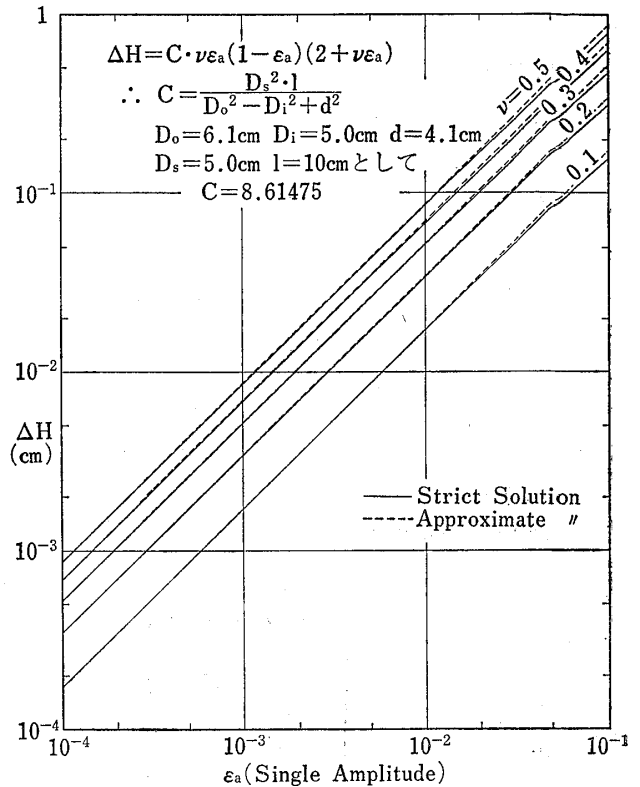


Fig. 5 Relation between ΔH and ϵ_a

$$\nu = -0.05804 \cdot \frac{\Delta H}{\epsilon_a} \quad (15)$$

(14)式、(15)式よりを逆算すると

$$\Delta H = -8.61475 \cdot \nu \epsilon_a (1 + \epsilon_a) (2 - \nu \epsilon_a) \quad (16)$$

$$\Delta H = -17.229 \cdot \epsilon_a \cdot \nu \quad (17)$$

となる。(16)式を用いて適当な ϵ_a 、 ν に対する ΔH を計算した結果を ν をパラメータとして、 $\epsilon_a \sim \Delta H$ の関係にまとめて図-5に示す。なお、図-5には(17)式の近似解での関係も併記した。図-5をみると、 $\epsilon_a < 10^{-2}$ の範囲では、(16)式で求めたポアソン比と(17)式で求めたポアソン比はほとんど差がみられないことがわかる。したがって、 $\epsilon_a < 10^{-2}$ の範囲では ϵ_a 、 ϵ_V の2次の項を省略して導いた(17)式の関係を用いてポアソン比を概算することができる。

4 測定装置のキャリブレーション

(1) センサーの特性

試験に用いたセンサーはギャップセンサーと呼ばれているものであり、センサーと、あらかじめ用意された導体または磁性体との間隔を、ピックアップコイルのインダクタンス変化を利用することにより測定しようとする非接触型の変位計の一種である。今回の試験では前述の

ようにセンサーとフロート底部に貼ったステンレス板との間隔を求めることをそのおもな目的としている。

センサーの分解能は公称 3×10^{-4} mm, 測定範囲(直線部分)は公称最大 ± 4 mm でこの時の出力は ± 4 Volt である。分解能および測定範囲を図-5 と見比べてみると測定可能な軸ひずみ範囲はおよそ $10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$ 程度であることがわかるが、これは振動三軸試験機を用いて行なう変形特性試験のひずみ領域とも合致しており、充分目的に適うものであると云えよう。また、図-6 はセンサーとステンレス板間の距離と、出力電圧の検定結果である。図よりセンサーとステンレス板間の初期間隔を 4.4mm にセットすることが望ましいと云える。

図-7 はセンサーの周波数特性を示したものである。AC 電源では 9 Hz 以下ではフラットな特性を持ってお

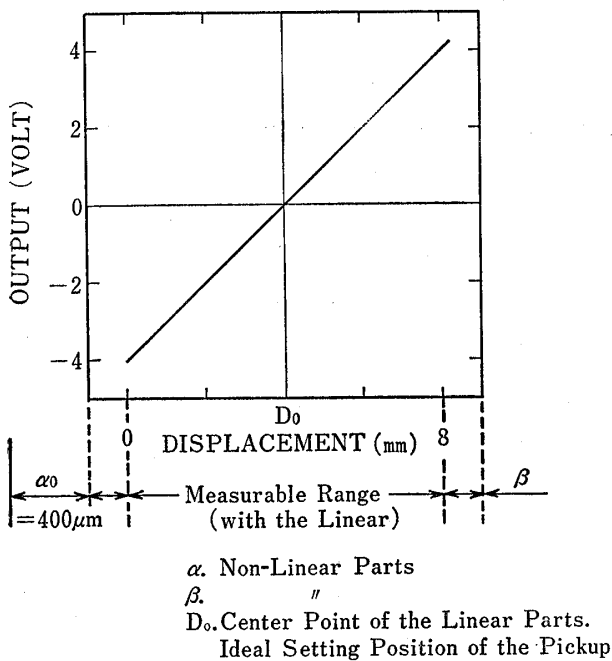


Fig. 6 Output characteristics

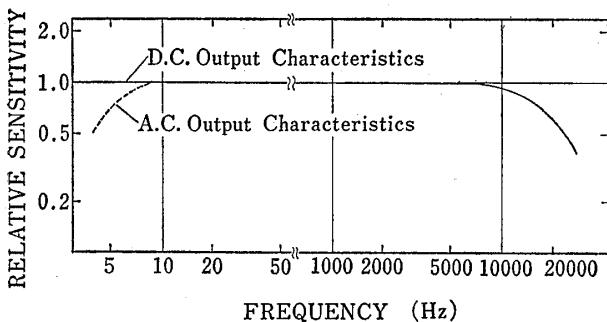


Fig. 7 Frequency Characteristics

らず、振動三軸試験のような低周波領域での試験はできない。今回は勿論 DC 電源にて測定を行なった。

(2) 体積変化のキャリブレーション

前章で説明したように、ポアソン比は(12式または(13式)により求めることができるが、今回の研究で対象としているひずみは $10^{-4} \leq \epsilon_a \leq 10^{-2}$ 程度なので、以後の議論は(13式)に基づいて説明する。これまでの議論で、ポアソン比を求めるには、(13式)の ϵ_a と ΔH を実測すればよいことがわかった。 ϵ_a を求めることは振動三軸試験の場合ダイヤルゲージによっても、また、変位計によってもきわめて容易である。一方、 ΔH を直接測定することは厳密には難しい。それ故、先に述べた 2 重セル構造の三軸圧縮セルを用い定圧下の水を媒体としてフロートの動きをギャップセンサーにより測定することを試みた。この測定において、最も大切なことは、ギャップセンサーの計測値を真の ΔH としてよいかどうかの問題で、これにはいくつかの基本的誤差要因が考えられる。

- 供試体体積の変動に対して、セル内の水位変動がスムーズに追随するか。
- セル内の水位変動にフロート室の水位変動が追随するか。
- フロート室の水位変動にフロート自身が追随するか。
- フロートの変動を測定するギャップセンサーの応答がよいかどうか。

以上の追随性に関するいくつかの問題点はいずれも静的には問題とならないもので、おもに動的加振時特有の問題としてとらえられるものと云える。すなわち慣性力、水面、水中の自由振動との関係で決まる周波数特性や位相の遅れ等の問題である。したがって、厳密には、測定値そのものを ΔH とすることにはかなり無理があり充分な検定に基づく補正が必要となろう。今回は、既知の ΔH に対する出力電圧 E の関係を調べることにした。既知の ΔH を与える方法としては次のような方法が考えられる。

- 1) 注射器あるいはピペットで既知の水を加える。(または減じる)
- 2) 針金あるいは棒鋼のような、細い、直径のわかっている材料を水中に出し入れる。
- 3) 体積変化既知の試料を使い、実験時と同様の装置で測定する。

しかしながら今回のように微小ひずみ範囲について体積変化を検討する場合、図-5 にも示したように水面の移動量がきわめて小さいので、微量の水の動きが鋭敏に測定値に影響する。このことは動的載荷時にキャップに付着している水の量も無視し得ないことを意味してい

る。この点で 1), 2) は実際の試験条件と異なり正しい検定試験とはならないことが明白である。すなわち、今回の試験目的のためには、特に水面付近で実際の試験時と同様の条件が満たされていることが望ましく、この点より考えて、3) の方法を採用することが最善である。そこで図-8 に示すような鋼製バネのダミーサンプルを用いてこれを試料と同様に取り扱い動的加振をさせて既知の水位上昇 ΔH に対するギャップセンサーの出力電圧 E の関係を求めることにした。なお、以下は水位上昇 ΔH に代えて $\Delta Vw (= \Delta H \times Aw)$ すなわち総体積変動量を扱うことにする。

さて、 ΔVw には、考えられる体積変化としては次のようなものがある。

- ΔVw_1 : キャップの水中への出入
- ΔVw_2 : キャップ自身の体積変化
- ΔVw_3 : バネ自身の体積変化
- ΔVw_4 : ペDESTAL 自身の体積変化
- ΔVw_5 : バネのホルダー自身の体積変化
- ΔVw_6 : その他 (三軸室底板の部分等)

したがって、合計の ΔVw としては、次のようになる。

$$\Delta Vw = \sum_{i=1}^6 \Delta Vw_i \quad (18)$$

(18) 式のうち、 ΔVw_3 , ΔVw_6 については、通常の土質材料での振動三軸試験時は、無視し得ることが明白なので除外し他の体積変化量を具体的数値を入れて求めてみる。

○ ΔVw_1 の計算

ΔVw_1 はキャップの断面積 Ac , 軸ひずみ ϵ_a , 供試体高さ a より

$$\Delta Vw_1 = \epsilon_a \cdot a \cdot Ac \quad (19)$$

として容易に求められる。 $\epsilon_a = 10^{-4}$, $a = 10\text{cm}$, $Ac = 20\text{cm}^2$ と仮定して ΔVw_1 を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta Vw_1 &= 10^{-4} \times 10 \times 20 \\ &= 0.02\text{cm}^2 \end{aligned}$$

となる。

○ ΔVw_2 及び ΔVw_4 の計算

ΔVw_2 と ΔVw_4 とは同寸法であるとし、計算の条件を次のように仮定した。

- キャップの直径 ϕ : $\phi = 5\text{cm}$
- キャップの水中部分の厚さ T : $T = 3\text{cm}$
- キャップの縦弾性係数 E_c : $E_c = 4 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$
- キャップのポアソン比 ν_c : $\nu_c = 0.3$
- 供試体の縦弾性係数 E_s : $E_s = 5,000 \text{kg/cm}^2$

このように定めると、キャップに作用する軸応力は次

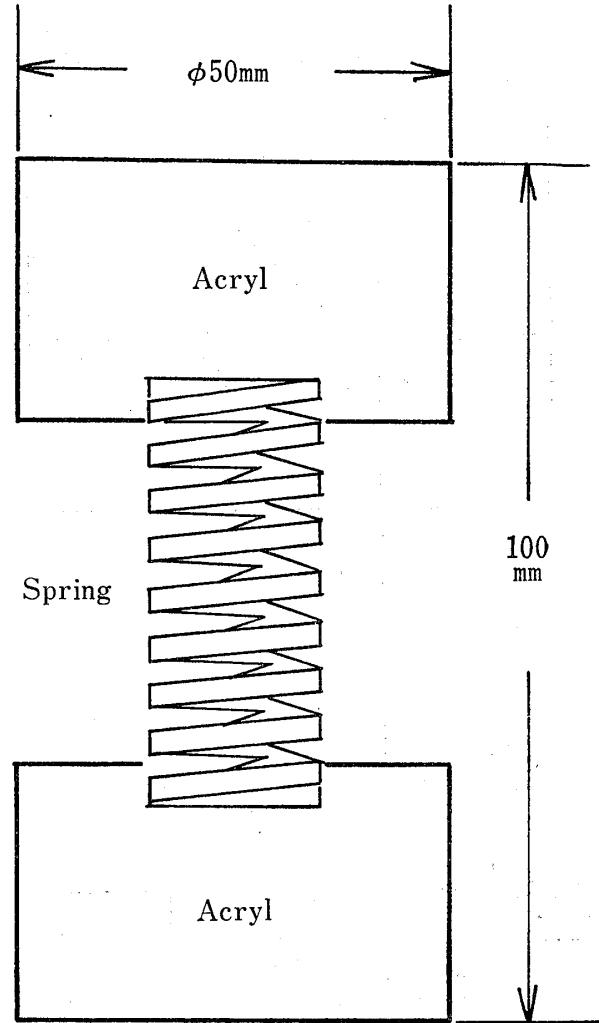


Fig. 8 Dummy sample

のようになる。(ただし、 σ は圧縮と考え、符号は負とする)

$$\begin{aligned} \sigma &= \epsilon_a \cdot E_s \\ &= -10^{-4} \times 5 \times 10^3 \\ &= -0.5\text{kg/cm}^2 \end{aligned}$$

したがってキャップの縦ひずみ ϵ_{ac} , 横ひずみ ϵ_{rc} は次のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ac} &= \frac{\sigma}{E_c} \\ &= \frac{-0.5}{4 \times 10^4} \\ &= -1.25 \times 10^{-5} \\ \epsilon_{rc} &= -\epsilon_{ac} \times \nu_c \\ &= 1.25 \times 10^{-5} \times 0.3 \\ &= 3.7 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

よって ΔVw_2 と ΔVw_4 を合わせた体積変化は

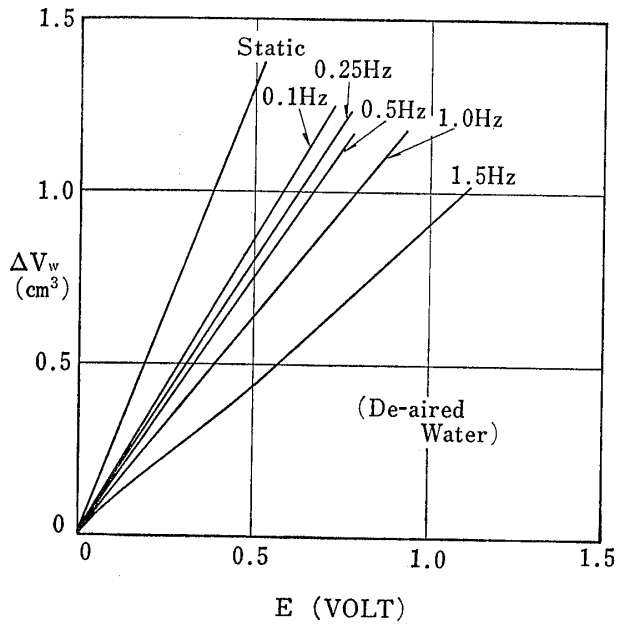


Fig. 9 Relation between ΔV_w and E

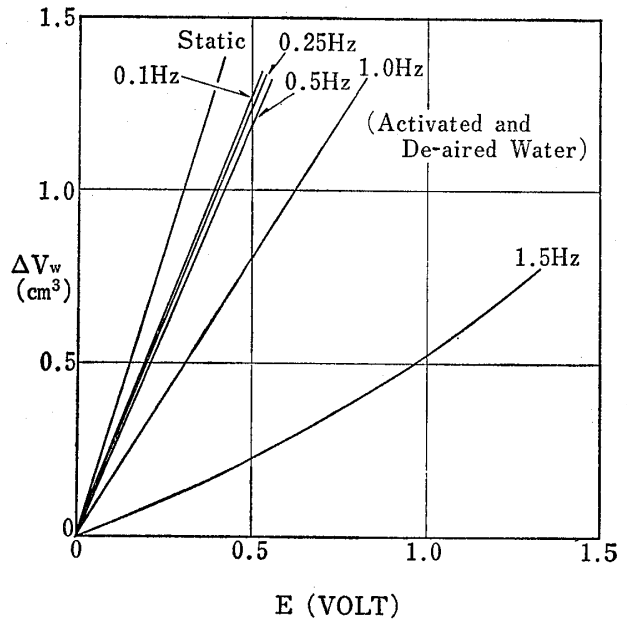


Fig. 10 Relation between ΔV_w and E

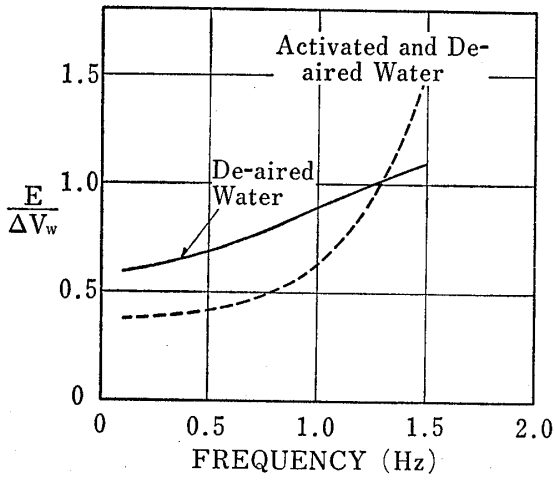


Fig. 11 Relation between $E/\Delta V_w$ and frequency

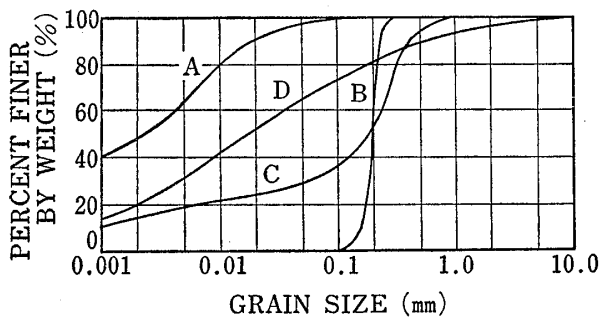


Fig. 13 Grain size distribution

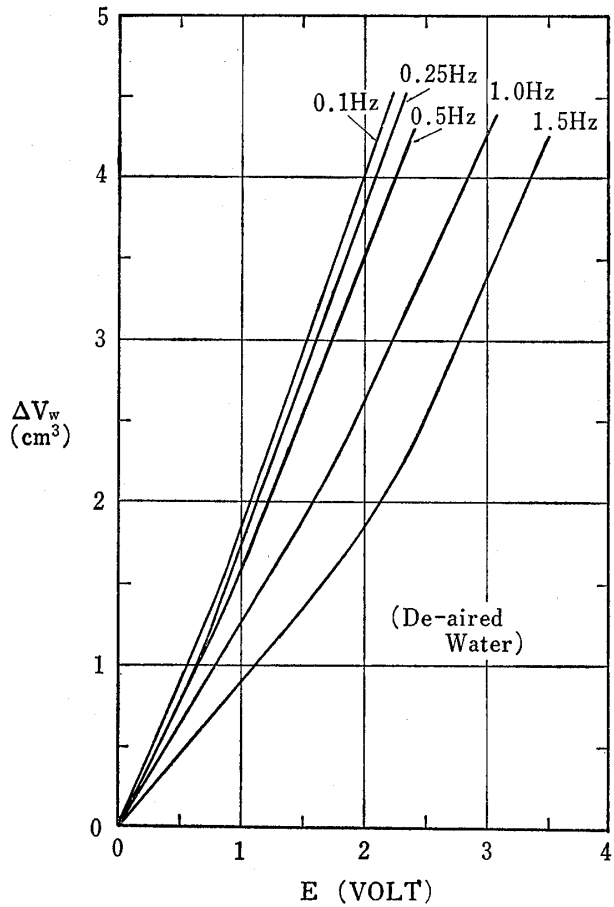


Fig. 12 Relation between ΔV_w and E

$$\begin{aligned}\Delta w_2 + \Delta V w_4 &= 2(\epsilon_{ao} + 2\epsilon_{rc}) \times \frac{\pi \phi^2}{4} \cdot T \\ &= 2(-1.25 \times 10^{-5} + 2 \times 3.7 \times 10^{-6}) \times \frac{\pi \times 5^2}{4} \times 3 \\ &\approx -6 \times 10^{-4} \text{cm}^3\end{aligned}$$

となる。

○ $\Delta V w_5$ の計算

$\Delta V w_5$ を求めるための計算条件は次の通りとする。

$$\begin{aligned}\phi &= 2 \text{ cm} \\ T &= 1.5 \text{ cm} \\ E_c &= 4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 \\ \nu_c &= 0.3 \\ E_s &= 5,000 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

$\Delta V w_2$ を求めた時と同様の計算を行ない

$$\Delta V w_2 \approx -3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$$

を得た。ただし、この値は上下2つのホルダーの合計である。

以上の検討より、ここで与えた数値に対しては、 $\Delta V w$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta V w &= \Delta w_1 + \Delta V w_2 + \Delta w_4 + \Delta V w_5 \\ &= 0.02 - 0.0006 - 0.0003 \\ &= 0.191 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

この結果より、 $\Delta V w \approx \Delta w_1$ においても、その誤差は最大5%程度であることがわかる。今回の供試体の縦弾性係数は土質試験としては大き目の5,000kg/cm²を仮定しており、実際の誤差はこの値よりかなり小さいと考えてよい。以上の検討より既知の $\Delta V w$ としては、キャップ部分の水中への出入の量 $\Delta V w_1$ のみを用いることにして、 $\Delta V w \sim E$ の関係を調べた。

図-9、図-10にはこのようにして求めた $\Delta V w \sim E$ の関係を示す。この両図は $\Delta V w \leq 1.5 \text{ cm}^3$ での較正曲線を表わしている。図はいずれも周波数を変化させて、 $\Delta V w \sim E$ の関係をとったものであり、図-9は脱気水を用いたもの、図-10は脱気水に活性剤(ポリチオン2%)を混ぜたものを用いたものである。いずれの図も周波数が高くなるほど、同じ $\Delta V w$ に対する E の値が大きくなっている。すなわち、感度の増大している傾向が認められる。このことをわかり易く一覧で示したのが次の図-11である。図の縦軸は感度を示している。図では脱気水で行なった検定と、活性剤混入で行なった検定が、周波数1.3Hz付近で交差しており、これ以下は脱気水の方が感度がよく、これ以上では、活性剤混入の方が感度が高くなっている。これらの現象は次のような理由により起こる。すなわち、これらの曲線は基本的には水面の振動と動的載荷の共振曲線を意味しており、その共振振動数は脱気水のみの場合約2Hz、活性剤混入の場合約1.7Hz

であった。このことから、図はいずれも右上りになるし特に活性剤混入の場合には1.5Hz程度で急激な上昇をみるのである。周波数に対する感度は以上の特性を持っており、単純に考えるとこの曲線が上にくる程測定精度はあがることになる。しかし、実際には共振時に近い領域では、わずかの周波数の差も敏感に影響することが明らかであり、記録の再現性には大きな問題があると思われる。今回特に確かめてはいないが、脱気水の場合と、活性剤使用の場合の周波数1.3Hz以下の領域での感度の差についても同様の問題があり、一概にこの感度を測定値の精度と結び付けることはできない。図-12は $\Delta V w \leq 5 \text{ cm}^3$ の範囲で行なった較正曲線である。図-9、図-10と図-12のキャリブレーションは、バネ常数の異なったバネダミーサンプルを用いた。図-12の微小体積変化範囲($\Delta V w \leq 1.5 \text{ cm}^3$)は当然のことながら、図-9の結果とほぼ一致していることがわかる。

5 測定結果例

以上述べてきたキャリブレーション結果を用いて、土供試体でのポアソン比の実測が可能となった。その手順を以下にまとめて示す。

まず、算定式としては、(13)式

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Ac}{As} - \frac{Aw}{V \cdot \epsilon_a} \cdot \Delta H \right)$$

を使用する。手順は次のようになる。

- 1) キャップの直径をあらかじめ測定しておき、キャップ断面積 Ac を求めておく。
- 2) 供試体をセットし、試験直前の直径、高さを計測し、 As 、 V を算出しておく。
- 3) 動的加振を行ない、軸ひずみ ϵ_a 、出力電圧 E を計測する。
- 4) 試験時周波数に応じたキャリブレーション曲線を用いて、 E から $\Delta V w$ を求める。なお、 $\Delta V w = Aw \cdot \Delta H$ である。
- 5) Ac 、 As 、 V 、 ϵ_a 、 $\Delta V w = Aw \cdot \Delta H$ を(13)式に代入して ν を求める。

次に以上の手順を用いての実際の土での試験結果例について報告する。

試験に用いた試料および試験条件の一覧を表-1に示す。なお、載荷波形はすべて0.25Hzのsin波として脱気水を使用した。また、試験に用いた各試料の粒度分布を図-13に示した。

図-14から図-17に各試料毎の実験結果を、セン断ひずみ振幅 γ に対するポアソン比 ν として示した。図-14は正規圧密飽和冲積粘性土のポアソン比であり、0.5を

Table-1 Test condition

Sample	σ_3'	σ_1'/σ_3'	Void Ratio	Drain Condition	Remarks	
A	0.5	1.0	3.06	Undrained	Saturated	LL=130% PL=50%
	1.0		2.82			
	2.0		2.41			
B	1.0	1.0	0.79	"	Unsaturated	Sr=90%
	1.0		0.79	Drained	Saturated	
C	1.0	2.0	0.77	Undrained	Unsaturated	Sr=80%
D	1.0	1.0	1.10	"	"	Sr=90%

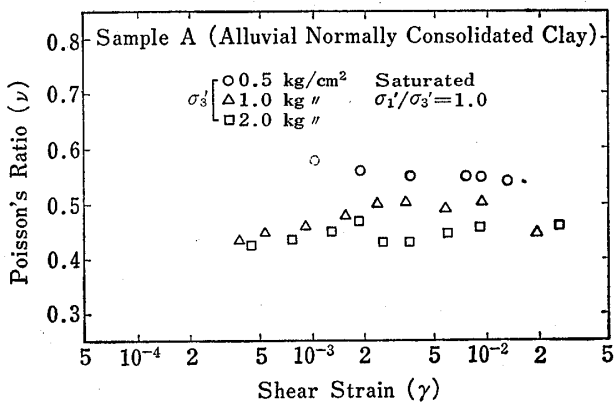


Fig. 14 Test results (1)

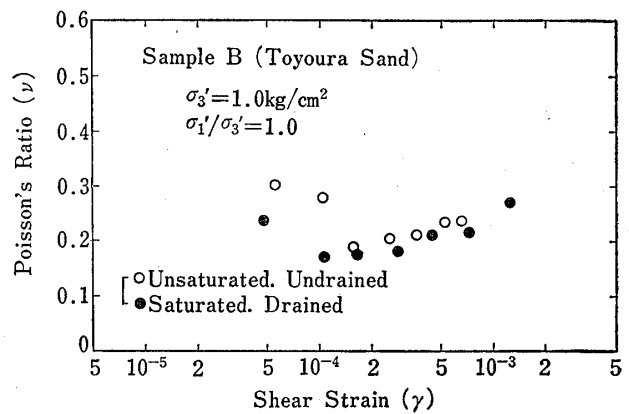


Fig. 15 Test results (2)

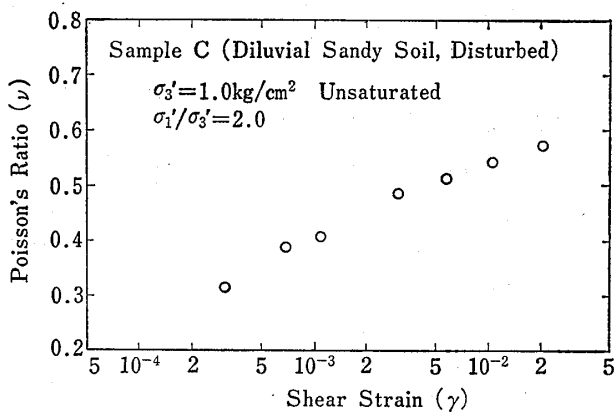


Fig. 16 Test results (3)

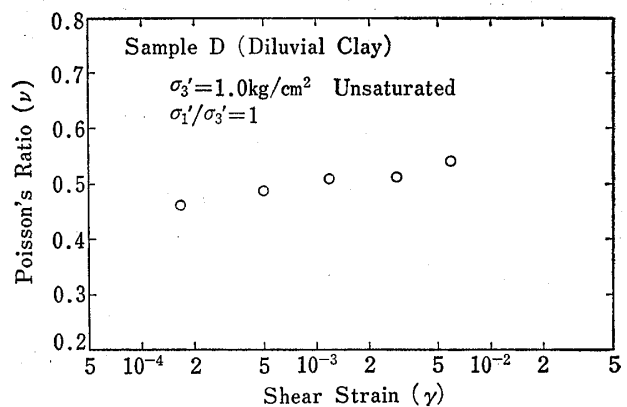


Fig. 17 Test results (4)

中心として ± 0.07 位の範囲に分散している。この試験は非排水状態で行なったものであり、ポアソン比は 0.5 前後になると予想された試料である。

図-15は豊浦標準砂での試験結果である。図の $\gamma=10^{-4}$ 付近の結果は測定精度自身充分であるとは思えないが、他のデータは比較的良好にまとまっており、いずれも γ の増加に対してポアソン比は 0.15 から 0.25 と増加してい

る。この値は通常用いられる 0.3 に比べるとかなり低い値である。

図-16は洪積砂質土に対するもので、攪乱砂を突き固めて作成したものである。 ν の値は γ の増加とともにかなり急激に増加しており、一部 0.5 以上になるものもみられる。図-14でもこのような傾向がみられたが、これは測定誤差的なもの、試料のダイランシー特性に基

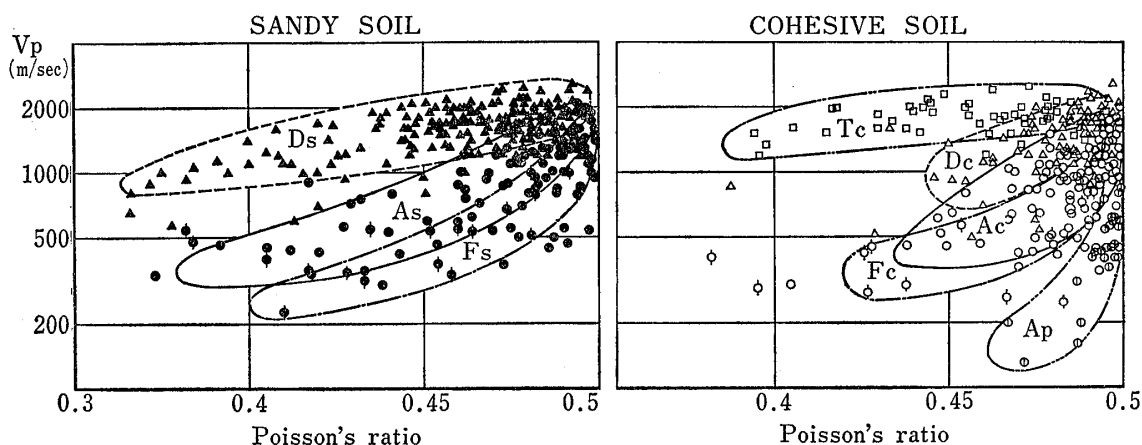


Fig. 18 Poisson's ratio by Ps-logging

づく体積膨張傾向, 双方の影響によるものと思われる。図—16のように γ に対して急激に増加する理由は, この場合の初期主応力比が $\sigma'_1/\sigma'_3=2$ であるためであり, $\sigma'_1/\sigma'_3=1$ の時に比べてそれだけ破壊領域に近いためと考えられる。

図—17は不飽和な洪積粘性土の例であり, ν は 0.46~0.52 と緩やかに γ の増大とともに増加している。飽和試料の場合にはこの傾きはさらに緩やかになり, ほぼ 0.5 前後の一定値を示すものと考えられる。

以上のように振動三軸試験機を利用して測定した動的ポアソン比は, 試験条件, 試料によって大きく異なる値を示しているが, 個々の試験結果は一応それぞれの試験条件に見合った値を示していると思われ, 妥当な結果であるといえよう。試験数が少なく不十分ではあるが, 以上の結果より明らかにされたことを以下にまとめた。

- 正規圧密飽和粘土 (試料A参照) の非排水試験では, $\nu=0.5$ となる。
- 中程度の密度 ($Dr=50\%$) のきれいな砂 (試料B参照) の飽和排水条件でのポアソン比は, 0.15~0.25 位であり, 通常いわれている 0.3 よりかなり小さい。また, ひずみに対する依存の傾向が明瞭にでており, γ が大きくなる程 ν は大きい。
- 上記試料 (試料B参照) で不飽和 ($Sr=90\%$) 非排水試験を行なった結果は, ほぼ飽和排水条件での試験結果と同じである。
- よく締った砂質土 ($Dr=100\%$) (試料C参照) の不飽和 ($Sr=80\%$) 非排水試験を行なった結果は $\nu=0.3\sim0.7$ 位となっており, その値は上述の 0.15~0.25 に比べてかなり大きい。しかし, 測定値の γ に対する傾向はほぼ同じであり右上りとなっている。
- 洪積粘性土の不飽和 ($Sr=90\%$) 非排水試験では

ポアソン比は 0.47~0.53 の範囲に分散しており, γ に対してわずかに右上りとなっている。

以上の結論は今後データの蓄積とともに変わり得るものであることはいうまでもない。

最後にこれまでに既に相当数のデータが蓄積されている, PS 検層により(2)式で求めたポアソン比を各種土質別にまとめたものを図—18に示す。⁽³⁾ これらのポアソン比は, $\gamma=10^{-6}$ 程度のひずみでのポアソン比を示していると考えられる。今回研究した試験結果に基づく値との対比が問題になると思われるが, 現状では土質試験からのデータは限られており,⁽⁴⁾⁽⁵⁾ その結び付きは今後の研究に待つ必要がある。ただし, 今回の研究をもとに考察するならば, このような速度から求めたポアソン比は, 土の力学特性の実際を, さらにスケルトン構造に伴う弾性と, 間隙を充填する水の体積弾性の二相力学系と考えると, 本来の定義とは一致せぬ見掛けのものとも考えられる。

参 考 文 献

- (1) 今井常雄, 横田耕一郎, 今野政志, 栗田好文(1979) : 振動三軸試験機を用いた動ポアソン比の測定について 第14回土質工学研究発表会講演集
- (2) 最上武雄編著(1969) : 土質力学 技報堂
- (3) T. Imai (1977) : P and S Wave Velocities of the Ground in Japan, Proc. of Xth ICSMF.
- (4) 渡辺啓行(1979) : 碎石の動的せん断変形係数 減衰定数ならびにポアソン比に関するパイリニアモデルによる考察 第14回土質工学研究発表会講演集
- (5) 原 昭夫, 丹羽正徳, 坂野 正(1974) : 粘性土の動力学的性質 鹿島技研年報 22号