

# 孔内載荷試験による応力～変位曲線の降伏点位置に関する考察 ——割れ目のない様な軟岩の場合——

武内俊昭・大橋武一郎

## A CONSIDERATION TO THE POSITION OF YIELD POINT IN THE STRESS-DEFORMATION CURVE OBTAINED FROM BOREHOLE LOAD TEST

Toshiaki TAKEUCHI and Takeichiro OHHASHI

### Abstract

Generally speaking, the stress-deformation curve obtained from borehole load test forms a straight line until certain stress level and it thereafter changes to non-linear configuration as the stress increases. It is often difficult to clearly determine the yield point due to gradual change from the linear to non-linear configuration. This paper is to present a method to determine the yield point, making use of the configuration of stress-deformation curve subsequent to the yield point.

Assuming an elasto-plastic model that behaves on Mohr-Coulomb's criterion for uniform crackless rock mass, Takeuchi, Suzuki and Kunimatsu (1981) proposed that displacement of borehole wall after the yield point  $U_{Ro}$  may be expressed by Equation (1) and yield stress  $Py'$  by Equation (2) based on equations presented by Esashi, Yoshida and Ikemi (1972).

From Equations (1) and (2) it is known that displacement in borehole wall  $U_{Ro}$  corresponding to stress  $P$  is determined by yield stress  $Py'$  when  $Po$ ,  $Ro$ ,  $E$  and  $\nu$  are given to Equation (3). Therefore, draw a series of curves having yield stress  $Py'$  as parameter according to Equation (3) and select one of the curves coincides with actual stress-deformation curve. By doing so yield stress can be determined. In fact, when the concept is applied to crackless uniform rock mass, slight varying yield stress  $Py'$  produce comparatively distinctive difference in the curve configuration. Therefore, either one of the curves containing the  $Py'$  as parameter can be easily made agreeable to the measured stress-deformation curve.

More than two points should be determined at different depths in the layer seems to have same shear strength, i. e. cohesion  $C$  and angle of friction  $\phi$ .

In other words,  $C$  and  $\phi$  can be obtained from Equation (7) with gradient  $a$  and intercept  $b$  of the straight line expressing the relation between yield stress and depth. But depending on the cases, variation of gradient  $a$  can significantly affect the value of  $\phi$ . For this reason yield stress at each measuring point should be determined accurately.

The yield stress can be thus determined rather easily with use of curve configuration after the yield point. For the end it is desirable to continue recording stress-deformation curve longer as possible even after yield point.

### 1 まえがき

一般の岩石、岩盤の変形試験において、ある応力まで

の間はその応力～変位曲線が直線を示しているが、ある応力レベルに達すると、応力を増すに従って変位の増加する割合が大きくなり、曲線は非線型となる。この直線

部分から非線型部分への移行点を一般に降伏点と定義している。しかしながら、実際に観測される応力～変位曲線においては、この移行が漸移的であるため、その降伏点を明確に決めることが困難な場合が多い。この降伏点を求める方法としては、実測曲線から直接に目視判定したり、応力と変位速度の関係から、変位速度が変化する点を求めて決定する方法が用いられている。本報告では、応力～変位曲線の非線型部分を用い、降伏点を正確に求める方法について述べる。

## 2 孔内载荷試験における応力～変位曲線について

一般に、比較的軟らかい割れ目のない様な岩盤について、孔内载荷試験で得られる応力～変位曲線の形状は、図-1に示すようなものである。この図において、 $P_0$  点は、孔内载荷試験装置のソンドのゴムチューブの一部が孔壁に接し始めた点である。この点から孔壁に接する部分がしだいに多くなり、 $P_1$  点では、完全に孔壁に密着していると考えられる。この点からさらに応力を加えていくと、 $P_2$  点までは、応力と変位の関係が直線を示す。 $P_2$  点をすぎると変位の割合が大きくなり、徐々に勾配がゆるやかになっていく。このような曲線においては、 $P_1 \sim P_2$  間の直線部分を孔壁岩盤の弾性挙動を示す部分と考え、この勾配から変形係数を求めている。

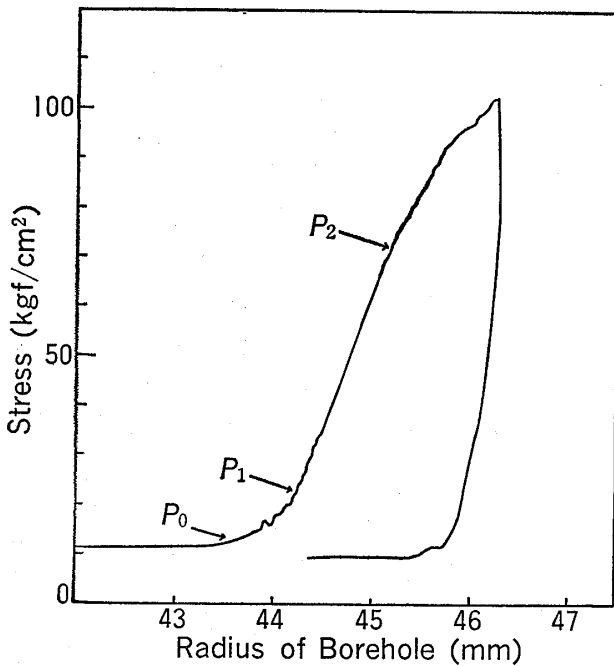


図-1 孔内载荷試験による応力～変位曲線の例  
Example of stress-deformation curve measured by borehole load test

## 3 応力～変位曲線の形状および降伏点

### 3-1 非線型部分の曲線形状に関する理論的考察

武内、鈴木、国松(1981)は、割れ目のない様な岩盤について、モールクーロンの破壊規準によって挙動する弾塑性モデルを考え、塑性領域内の応力分布については、江刺、吉田、池見(1972)が示した式を用い、一方、弾性領域内については、厚肉円筒理論による式を用いて、拘束圧  $P_0$  における降伏後の孔壁の変位  $U_{R0}$  が次式で表されることを示した。すなわち、

$$U_{R0} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \left\{ (1-2\nu) \cdot P_0 - Y \right\} \cdot R_0 \cdot e^{\frac{P-Y-P_0}{Y}} \quad (1)$$

ここに、 $U_{R0}$ : 孔壁の変位

$P$ : 孔壁に加える応力

$E$ : 地盤の弾性係数

$\nu$ : 地盤のポアソン比

$P_0$ : 拘束圧

$R_0$ : 孔の半径

$Y = (C \cdot \cot\phi + P_0) \cdot \sin\phi$

ただし、 $C$ : 地盤の粘着力

$\phi$ : 地盤の内部摩擦角

また、降伏点応力  $P_y'$  は、

$$P_y' = C \cdot \cos\phi + (1 + \sin\phi) P_0 = Y + P_0 \quad (2)$$

で表されることを示している。

そこで、(2)式を用いて(1)式を書き直すと、次式が得られる。

$$U_{R0} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \left\{ 2(1-\nu) P_0 - P_y' \right\} \cdot R_0 \cdot e^{\frac{P-P_y'}{(P_y'-P_0)}} \quad (3)$$

したがって、(3)式において、 $P_0$ 、 $R_0$ 、 $E$ および $\nu$ が既知とすれば、降伏点応力  $P_y'$  の種々の値に関して、応力  $P$  に対する孔壁の変位  $U_{R0}$  の値を計算することができ、降伏後の応力～変位曲線を描くことができる。このようにして得られた曲線と、孔内载荷試験によって得られた曲線とを比較し、良く対応する曲線を選び出すことによって、降伏点応力  $P_y'$  を決定することができる。ここに  $E$  については、孔内载荷試験で得られた応力～変位曲線の直線部分の勾配から計算によって求めた値\*を用いる。

\* 孔内载荷試験による曲線の直線部分の勾配から弾性係数  $E$  を計算するにあたっては、ポアソン比  $\nu$  の値が必要であり、一般には岩石試験による値などを用いるが、軟岩では0.3～0.4程度の値が用いられている。

$\nu$  は  $E$  を求める際に用いた値を採用する。また、 $R_0$  は、厳密には降伏点に対応する孔半径であるが、応力～変位曲線の直線部分の中間半径を用いて近似すれば、十分である。拘束圧  $P_0$  については、測定深度の土被りに対する水平方向の応力として、次式により求める。

$$P_0 = \gamma \cdot Z \cdot \frac{\nu}{1-\nu} \quad (4)$$

ここに、 $\gamma$  : 地盤の単位体積重量  
 $Z$  : 測定深度

### 3-2 ひずみレベルからみた降伏点近傍の挙動

一般に、変形試験においては、降伏点近傍のひずみ量は、弾性係数が大きいほど小さい値を示す。そこで、新第三紀の砂質泥岩に関して、孔内載荷試験における降伏点近傍のひずみ、および測定箇所付近から採取した供試体の三軸圧縮試験によるひずみについて、横軸に弾性係数、縦軸にひずみを取り、それぞれの結果をプロットすると、図-2のようになる。この図によれば、三軸圧縮試験のひずみは、孔内載荷試験のひずみにくらべてやや

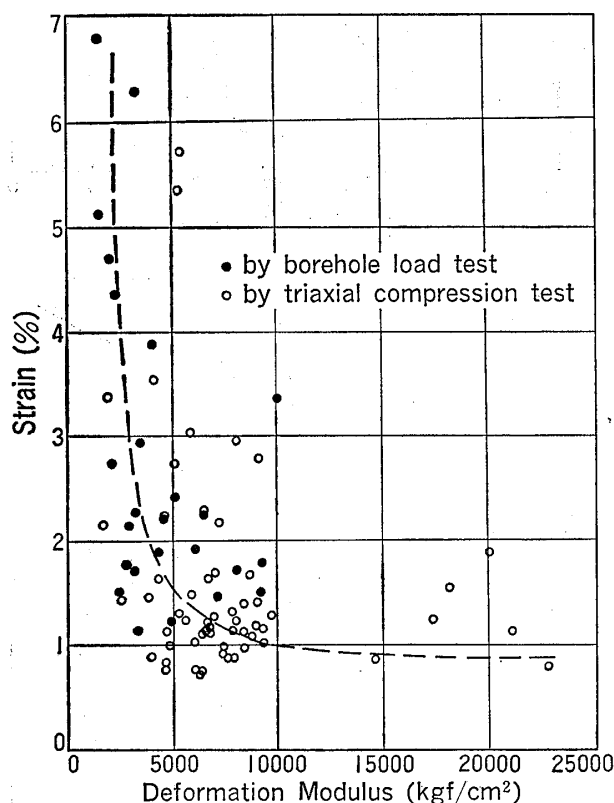


図-2 変形係数と降伏点近傍のひずみの関係(新第三紀砂質泥岩)

Fig. 2 Relationship between deformation modulus and strain near the yielding point(Tertiary, Sandy mudstone)

小さい値を示すようにも見えるが、大局的にみると、図中の波線で示した曲線の近傍に分布している。このことは、両者ともほぼ同じような関係にあり、両者の降伏点近傍の変形挙動に大差がないことを示すものと考えられる。一方、三軸圧縮試験に用いた岩石供試体は、肉眼観察により、一様で割れ目がないことが確認されている。したがって、図-2に示した孔内載荷試験を実施した箇所の岩盤は、一様で割れ目がないものと考えて、差し支えないであろう。

### 3-3 三軸圧縮試験の $C$ , $\phi$ による孔内載荷試験の変形挙動の検討

3-2節に述べた新第三紀の砂質泥岩において、孔内載荷試験を実施した各深度から採取した岩石の三軸圧縮試験の  $C$ ,  $\phi$  の値を用いて、(1)式によって応力～変位曲線を求め、これと孔内載荷試験によって得られた曲線とを比較して図-3に示す。図-3によれば、両者は良く一致している。このことは、孔内載荷試験を行った箇所の岩盤の  $C$ ,  $\phi$  は三軸圧縮試験によって得られた  $C$ ,  $\phi$  と同じ値をもつことを示しており、さらには、3-2節で述べたように岩盤が一様で割れ目がないということの意味していることになる。

## 4 降伏点応力および $C$ , $\phi$ の評価

### 4-1 実測された曲線における降伏点応力の決定

図-4は、3-1節で述べた方法によって、降伏点応力  $P_y'$  をパラメーターとして応力～変位曲線を描き、実測した結果と比較したものである。(a)～(e)の各深度における曲線群とも、 $P_y'$  の値をわずかに変化させることにより、比較的明瞭に曲線形状に差異が生ずることがわかる。したがって、実測された応力～変位曲線は、これらの  $P_y'$  をパラメーターとする曲線群のいずれかに、比較的容易に一致させることができる。(a)～(e)のすべてのケースについて、 $P_y'$  は  $\pm 1 \text{ kg f/cm}^2$  の範囲で定めることができる。ちなみに、同じデータについて実測曲線から目視によって定めようとする、 $\pm 2 \text{ kg f/cm}^2$  程度の任意性があると考えられる。そこで、曲線形状から求めた  $P_y'$  と目視によって定めた  $P_y'$  を比較すると図-5のようになる。この結果では曲線形状より求めた  $P_y'$  は、目視による  $P_y'$  よりも全体に小さい値となっている。このことは、曲線形状より求めた降伏点応力は、孔壁がごくわずかも塑性化を始めたところを示し、一方、目視による降伏点応力は、塑性域がある程度広がった段階で、初めて曲線上にその徴候が確認できることを示して

いることになる。

以上のように、降伏点をより正確に定めるために、降伏後の応力～変位曲線の形状を利用することが有効であり、この降伏後の区間が長い程、曲線を合わせやすい。したがって、実際の測定に当たっては、降伏後の測定区間をできるだけ長くすることが望ましい。

#### 4-2 降伏点応力の深度分布と $C$ , $\phi$ の評価

降伏点応力  $P_y'$  が求められたとしても、(2)式からわかるように、 $C$ ,  $\phi$  を算出することはできない。 $C$ ,  $\phi$  を

求めるには、武内ら(1981)が示したように、同じ  $C$ ,  $\phi$  をもつと考えられる地層内で、少なくとも深度(拘束圧  $P_0$ ) の異なる2点での測定が必要である。いま、降伏点応力  $P_y'$  と深度  $Z$  との関係が、次のような直線の式で表されるものとする。

$$P_y' = a \cdot Z + b \quad (5)$$

一方、前述の(2)式に(4)式を代入すると次式になる。

$$P_y' = A \cdot (1 + \sin \phi) \cdot Z + C \cdot \cos \phi \quad (6)$$

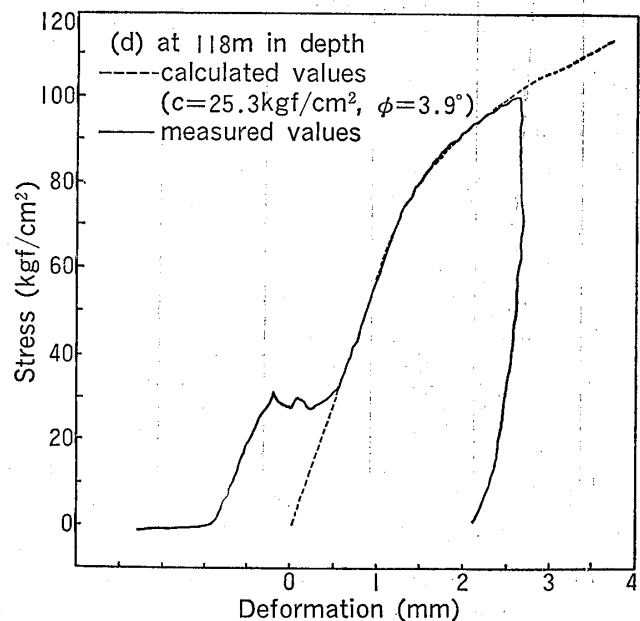
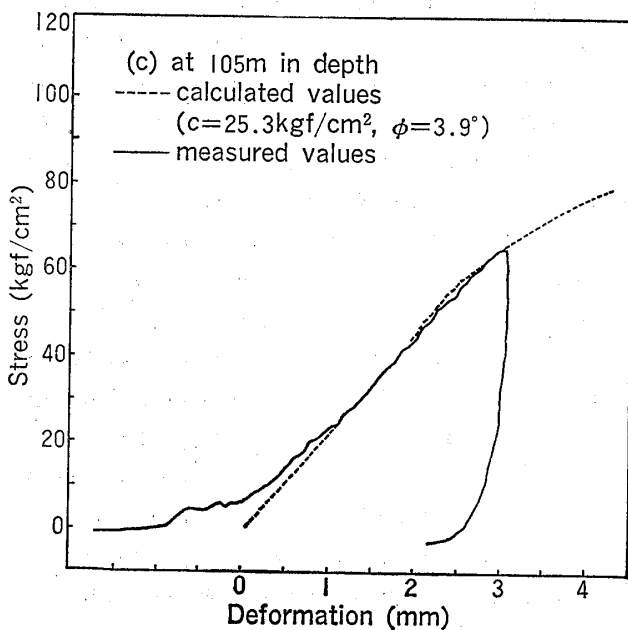
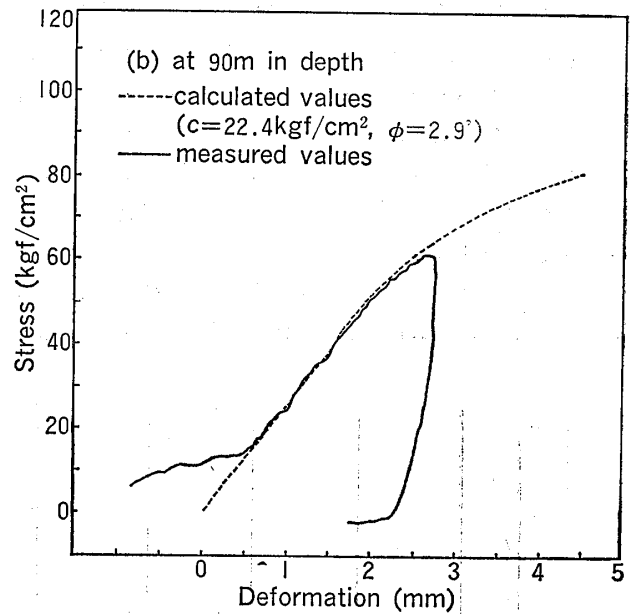
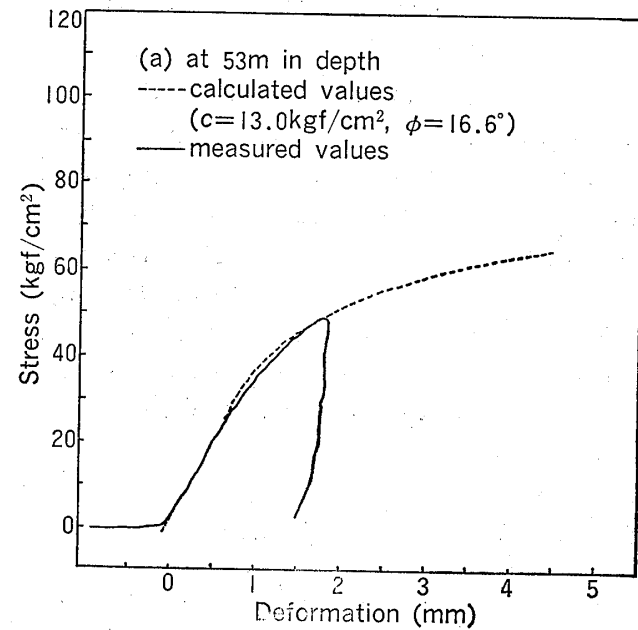


図-3(a)~(d) 実測曲線と三軸試験による  $C$ ,  $\phi$  から計算した曲線の比較

Fig. 3(a)~(d) Comparison calculated curve from  $c$ ,  $\phi$  obtained by triaxial test with the measured curve

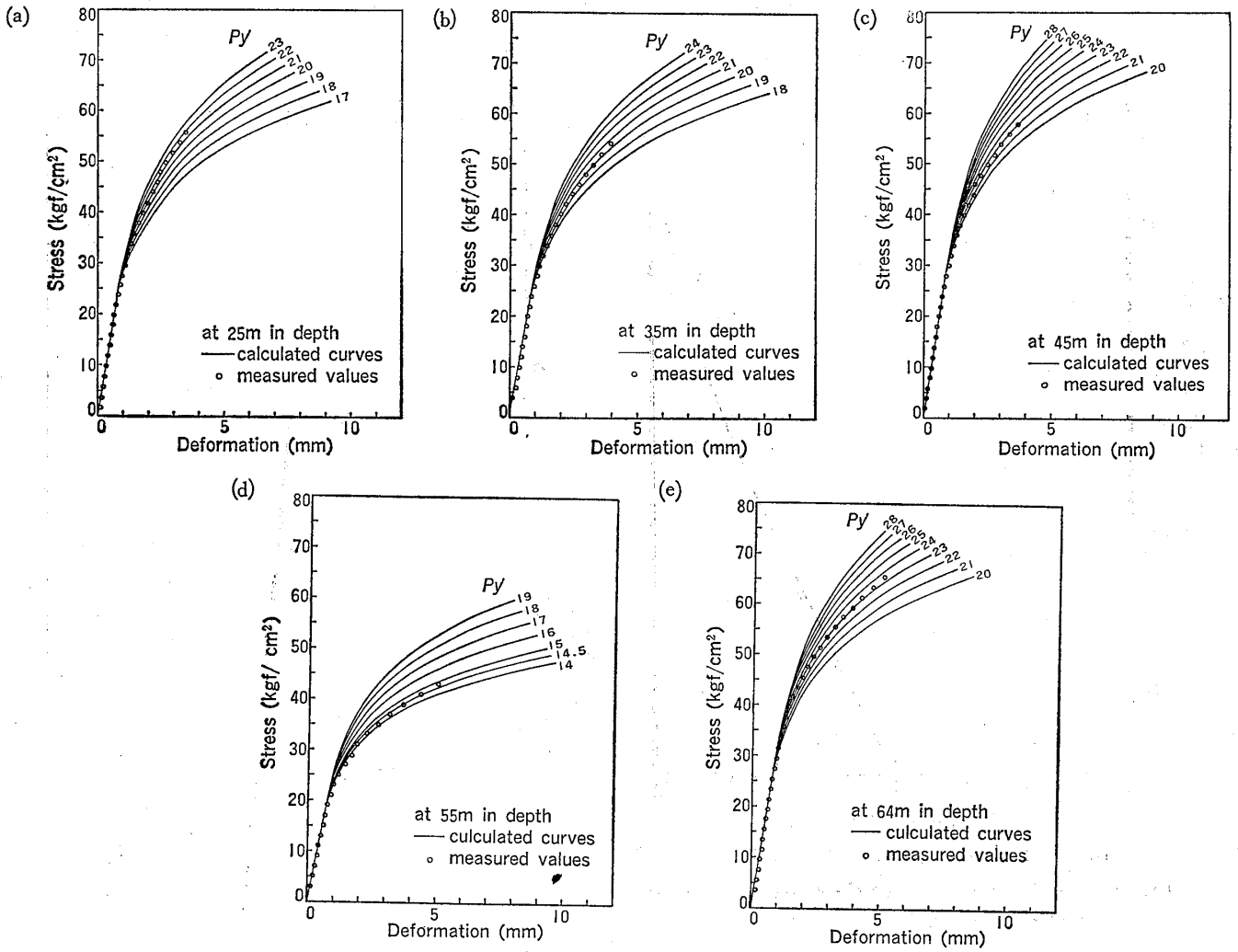


図-4(a)~(e)  $P_{y'}$  をパラメーターとした曲線と実測データの比較

Fig. 4(a)~(e) Comparison between measured values and the calculated curves with parameter,  $P_{y'}$

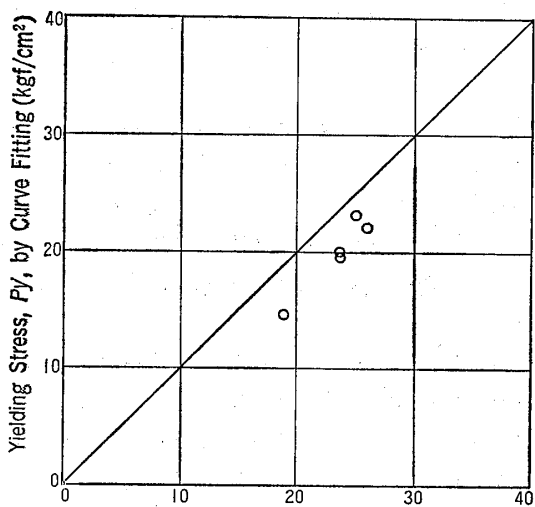


図-5 曲線形状比較による  $P_{y'}$  と目視による  $P_{y'}$  の比較

Fig. 5 Comparison  $P_{y'}$  by curve fitting with  $P_{y'}$  by visual.

ここに、 $A = \gamma \cdot \nu / (1 - \nu)$

(5)式と(6)式から次の関係が得られる。

$$a = A \cdot (1 + \sin \phi)$$

$$b = C \cdot \cos \phi$$

したがって、 $C$ 、 $\phi$ は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \sin^{-1} \left( \frac{a}{A} - 1 \right) \\ C &= \frac{b}{\cos \phi} = \frac{b \cdot A}{\sqrt{a(2A - a)}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(7)式によれば、降伏点応力の深度分布が既知であれば、その分布を表す直線の勾配  $a$  と深度ゼロでの切片  $b$  から、 $C$ 、 $\phi$ を求めることができる。

しかし、 $\phi$ は明らかに  $0 < \phi < 90^\circ$  であるから、(7)式から勾配  $a$  は次の条件を満たす範囲内に限定される。

$$A < a < 2A \quad (8)$$

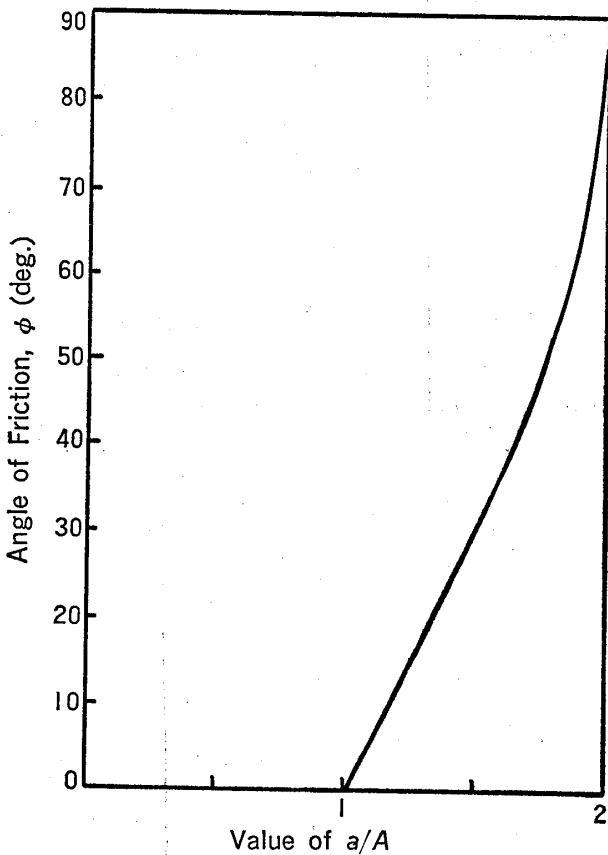


図-6 内部摩擦角φと比 a/A の関係

Fig. 6 Relationship between the angle of friction, and the ratio a/A.

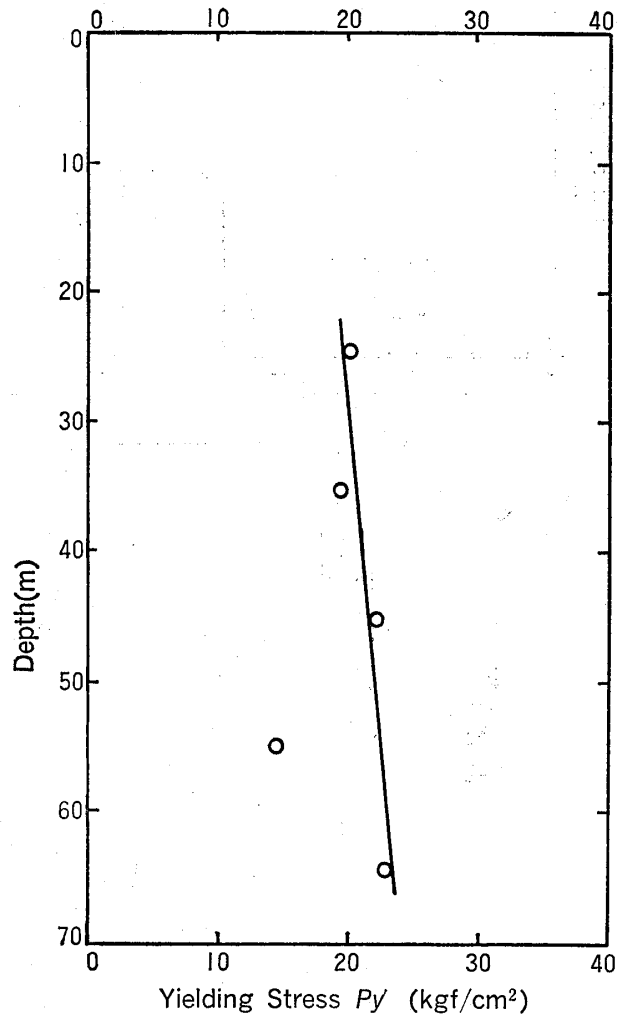


図-7 降伏点応力の深度分布

Fig. 7 Distribution of yielding stress in the direction of depth.

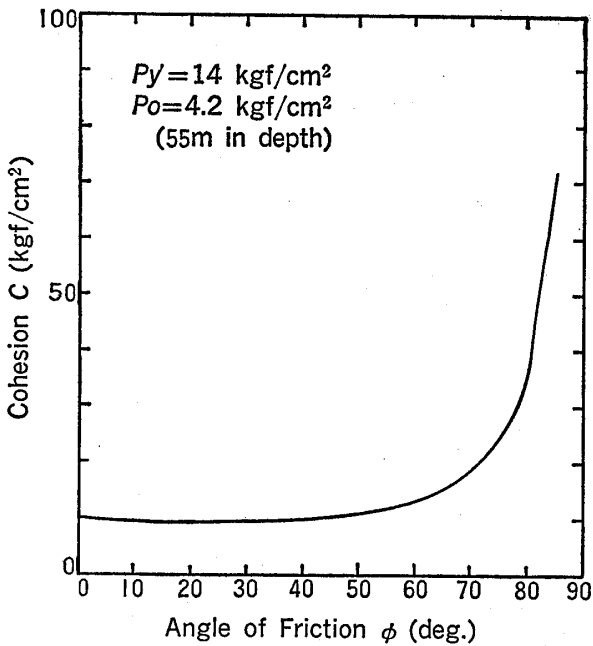


図-8  $P_y'$  を一定としたときの  $C$  と  $\phi$  の関係

Fig. 8 Relationship between  $c$  and  $\phi$  at the condition that yielding stress  $P_y'$  is constant.

図-6は、 $a/A$ と $\phi$ の関係を示したものであるが、 $a$ が $2A$ に近い値では、わずかな変化が $\phi$ の値に大きな影響を与えることがわかる。したがって、勾配 $a$ についてはできる限り正確に決定する事が重要である。この点からも、各測定点の降伏点応力をより正確に決定することが必要である。

図-7は、新第三紀の地層について、曲線形状から求めた降伏点応力の深度分布である。ちなみに、深度55mの点を除いて求めた直線の勾配と切片から $C$ 、 $\phi$ を求めると $C=17.8\text{kgf/cm}^2$ 、 $\phi=17.3^\circ$ となる。

さて、実際の地盤においては、同一の地層と考えられる区間においても、局所的に $C$ 、 $\phi$ が異なるため、その点の降伏点応力 $P_y'$ が直線から大きく外れることがある。例えば、図-7における深度55mの測定点は、他よ

り小さな  $P_y'$  となっている。このような測定点については、降伏点応力  $P_y'$  は決まっているが、一点だけでは  $C$ 、 $\phi$  を一意的に求められない。図—8は、図—7に示した深度55mの測点 ( $P_y' = 14 \text{ kg f/cm}^2$ ,  $P_0 = 4.2 \text{ kg f/cm}^2$ ) について、(2)式より  $C$ 、 $\phi$  の関係を示したものである。この図によって明らかなように、 $\phi$  の値が  $50^\circ$  以下の場合の  $C$  の値は、ほとんど変化せず、約  $10 \text{ kg f/cm}^2$  である。さきに述べたように、この点を除いた他の測定値から求めた  $\phi$  の値が  $17.3^\circ$  であることを考慮すると、この測点における  $\phi$  は不明であるとしても、 $C$  の値を約  $10 \text{ kg f/cm}^2$  と想定することは可能であろう。したがって、この点が直線から外れた位置にあるのは、主として  $C$  の違いによるものと考えられる。

## 5 あとがき

一様で割れ目のない岩盤において、孔内載荷試験から得られる応力～変位曲線上の降伏点を正確に決定するためには、降伏後の測定値が重要な役割を果している。したがって、測定に際しては降伏後の観測を十分に行うことが必要であり、また、このことを推奨する。

## 参 考 文 献

- 武内俊昭, 鈴木楯夫, 国松直 (1981) : 孔内載荷試験による原位置岩盤の  $C$ 、 $\phi$  についての考察 その2  
応用地質調査事務所年報 No.3 pp 139~147

