

孔内載荷試験の測定深度における拘束圧の検討

武内俊昭・大橋武一郎

A CONSIDERATION OF CONFINING PRESSURE AT THE MEASURING POINT OF THE BOREHOLE LOAD TEST

Toshiaki TAKEUCHI and Takeichiro OHHASHI

Abstract

Assuming an elast-plastic model that behaves on Mohr-Coulomb's criterion, Takeuchi et al. proposed that the displacement of borehole wall after the yield point, U_{Ro} , and yield stress, P_y' , may be expressed by Equation (1) and they also proposed the method to determine the shear strength C and ϕ of uniform and crackless rock mass such as soft rocks from the results of borehole load tests. This method is based on the fact that the yield stress which is determined from the stress-deformation curve obtained from borehole load test is a function of the confining pressure in-situ.

In this paper, the authors examined the methods of defining the confining pressure and studied the influence of the error, which is caused in an estimation of confining pressure, on the evaluation of C and ϕ of the rock mass.

The stress value at the point, $P_{o'}$, at which the stress-deformation curve obtained from borehole load test begins to a straight line as shown in Fig. 1, are compared with the values of overburden pressure which is calculated by use of characteristic values of the rock mass, i. e. weight per unit volume, Poisson's ratio and depth. Fig. 2 shows the relationship between the stress at $P_{o'}$ and depth Z for three boreholes at the topographical features as shown in Fig. 3. It is clear from Fig. 2 that the stress at $P_{o'}$ is close to the calculated horizontal stress. Although in the case of the borehole, A-2, the horizontal stress is calculated by F. E. M. because of the topographical condition, the stress at $P_{o'}$ is also close to the calculated value.

It becomes clear that a stress at the point, $P_{o'}$, is a horizontal geostress at the measuring point in a soft rock ground as the case in a clay ground.

Then, the evaluated values of C and ϕ are compared between the two cases; the one case is that a confining pressure is calculated, and the other case is that a confining pressure is defined as a stress at the point, $P_{o'}$, on a stress-deformation curve. There are not significant difference in both cases.

From the facts described above, there is no difficulty in practical use of calculated value as confining pressure for most cases.

It may, however, exist the exceptional cases that the stress at $P_{o'}$ is different considerably from the calculated horizontal stress. An example of this case can be seen in Fig. 2 (c); the plotted points around a depth of 200 m deviate considerably from the line which shows the calculated horizontal geostress. The stress-deformation curves obtained from the borehole load test for the measuring point mentioned above are compared with calculated curves for two cases are shown in Fig. 8. In the case that confining pressure is defined as a stress at $P_{o'}$, it can be found that the calculated curve coincides the measured curve as shown in Fig. 8(a). On the other hand, in the case that the confining pressure is defined as a calculated horizontal stress, it is

impossible to find the calculated curve which coincides the measured curve as shown in Fig. 8 (b), and also the yield stress Py' , C and ϕ can not be estimated correctly.

As a result of above fact, the authors proposed that in principle the confining pressure is to be defined from the stress-deformation curve of borehole load test, and the borehole load test is to be carried out carefully to obtain a stress-deformation curve on which the point Po' is clearly defined.

1. まえがき

いわゆる軟岩などのような均質で割れ目のない岩盤について、弾塑性モデルを適用し、孔内載荷試験によって得られる応力～変位曲線を用いて、原位置岩盤の C , ϕ を求める方法が武内らによって提案されている(武内・鈴木・国松; 1981, 武内・大橋; 1982)。この方法は、孔内載荷試験による応力～変位曲線上の降伏点応力が、その測定深度における拘束圧によって影響を受けて変化することを基本としている。しかしながら、測定深度における地盤の拘束圧が、土被り圧に相当するという考え方はあるものの、十分な検討がなされているとはいえない。

そこで、この報文においては、孔内載荷試験によって得られる応力～変位曲線上に現れる変曲点における応力と、その試験の測定深度の土被り圧との関係を調べ、拘束圧をどのように定めるのが妥当であるかについて検討した。そして、この方法の実際の岩盤への適用例を通して、拘束圧の評価の相異が原位置岩盤の C , ϕ の評価に与える影響の程度について考察した。

2. 応力～変位曲線上の変曲点 Po' について

孔内載荷試験の応力と変位の関係および降伏点応力 Py' と C , ϕ の関係については、武内・大橋 (1982) によれば、つぎの式によって表される。

$$URo = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \{2(1 - \nu) Po - Py'\} \cdot Ro \cdot e^{\frac{P - Py'}{Py' - Po}} \quad (1)$$

$$Py' = C \cos \phi + (1 + \sin \phi) \cdot Po$$

ここに、 URo : 降伏後の孔壁の変位

E : 地盤の弾性係数

ν : 地盤のポアソン比

Ro : ボーリング孔の半径

Po : 拘束圧

Py' : 降伏点応力

P : 孔壁に加える応力

C : 地盤の粘着力

ϕ : 地盤の内部摩擦角

応力～変位曲線の降伏点応力 Py' を用いて、(1)式によって岩盤の C , ϕ を求める場合、拘束圧 Po が直接関与しており、 C , ϕ の値に影響を及ぼすことが推察される。

また、大矢 (1979) は、粘性土地盤における孔内載荷試験の応力～変位曲線において、曲線が直線関係になり始める点の応力を求め、ハイドロフラクチャー法あるいはトータルプレッシャー法などによって測定した地盤の水平応力の値と比較して、それらが類似していることを示し、上記の直線関係になり始める点の応力を、その測定箇所の地盤の水平応力とみなすことができると述べている。この報告は、粘性土地盤に限られているが、軟岩地盤において実施した孔内載荷試験による応力～変位曲線上にも、図-1に示すように、粘性土地盤の場合と同

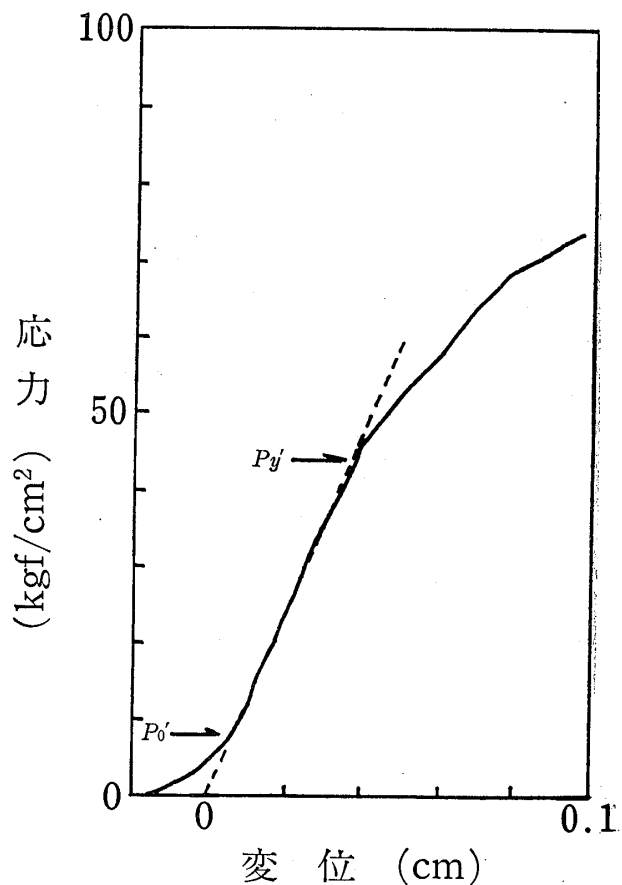


図-1 応力～変位曲線にみられる点 Po'

Fig. 1 Example of a point, Po' , on a stress-deformation curve

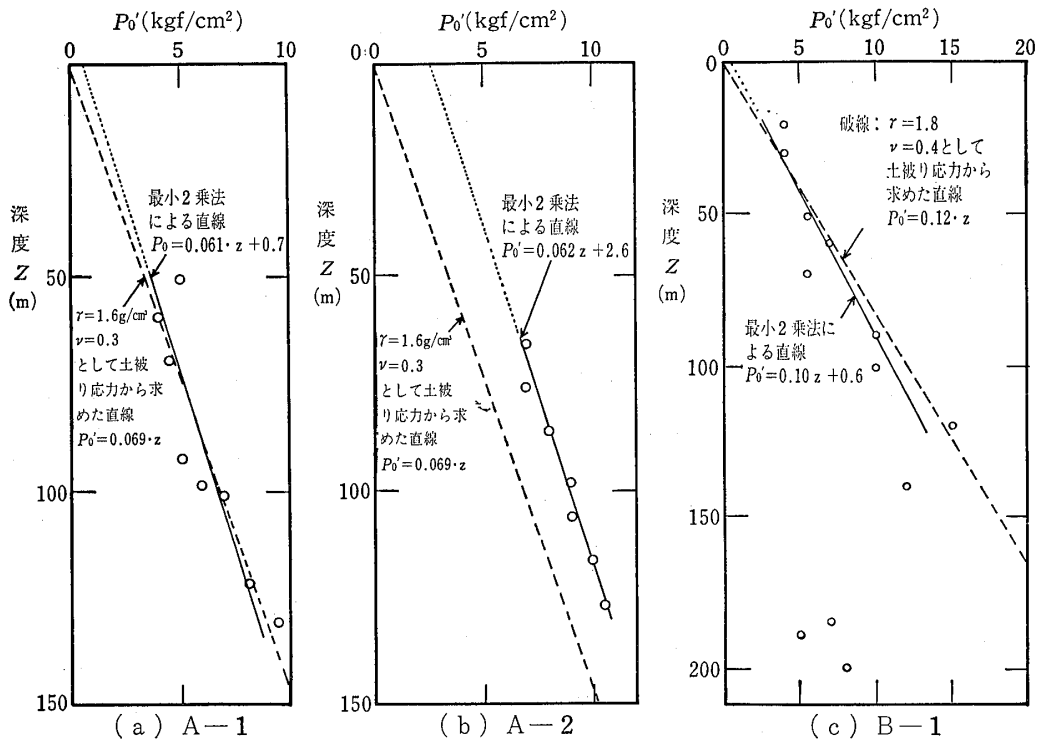


図-2 応力～変位曲線上の点 Po' の応力と深度との関係
 Fig. 2 Relationship between the stress at the point, Po' , and depth

様な変曲点 Po' が観測される。

図-2は、いろいろな深度において実施した孔内载荷試験の応力～変位曲線上の変曲点の応力 Po' と深度 Z の関係を示したものである。地点Aの地盤は、比較的軟質な新第三紀の凝灰角礫岩（単位体積重量：1.6g/cm³）であり、地点Bの地盤は、同様に軟質な新第三紀の砂岩（単位体積重量：1.8g/cm³）である。両地点ともに、割れ目はきわめて少なく、大局的には均質とみなすことができる地盤である。

まず、地点Aについてみると、深度に対する Po' の値は直線的関係で示すことができる。そこで、最小二乗法を用いて回帰直線を求めると、A-1孔では

$$Po' = 0.061z + 0.7 \quad (2)$$

となる。(2)式における切片の値0.7は、検定の結果、値0に対して有意でない ($\alpha = 0.05$) ので、回帰直線は原点を通るものと考えてよいことになる。すなわち、

$$Po' = 0.068z \quad (3)$$

と表すことができる (図-2(a))。

一方、A-2孔の回帰直線を求めると、

$$Po' = 0.062z + 2.6 \quad (4)$$

となる。(4)式の切片の値2.6は、値0に対して有意であり、深度0mにおいて、 Po' の値が2.6kgf/cm²であることを示している (図-2(b))。

地点Aの凝灰角礫岩の供試体について測定された単位体積重量1.6g/cm³ およびポアソン比0.3を用いて、土被りによる垂直荷重 σ_V から水平応力 σ_H を計算し、 σ_H の値と深度 Z との関係とを求めると、

$$\sigma_H = 0.069z \quad (5)$$

であり、(5)式で示される直線を図-2(a)および(b)に破線で示す。(3)式の回帰係数0.068は(5)式の係数0.069に対して有意でない。したがって、孔内载荷試験の応力～変位曲線上に現れる変曲点の応力 Po' は、土被りによる水平応力 σ_H を示すものと考えられる。また、(4)式の回帰係数0.062も0.069に対して有意でない。このことは、図-2(b)において、(4)式の直線と(5)式の直線が平行していることを意味している。そして、2.6kgf/cm² 隔たっている。この隔りについては、ボーリング孔、A-1孔とA-2孔付近の地形の相異によるものと考えられ

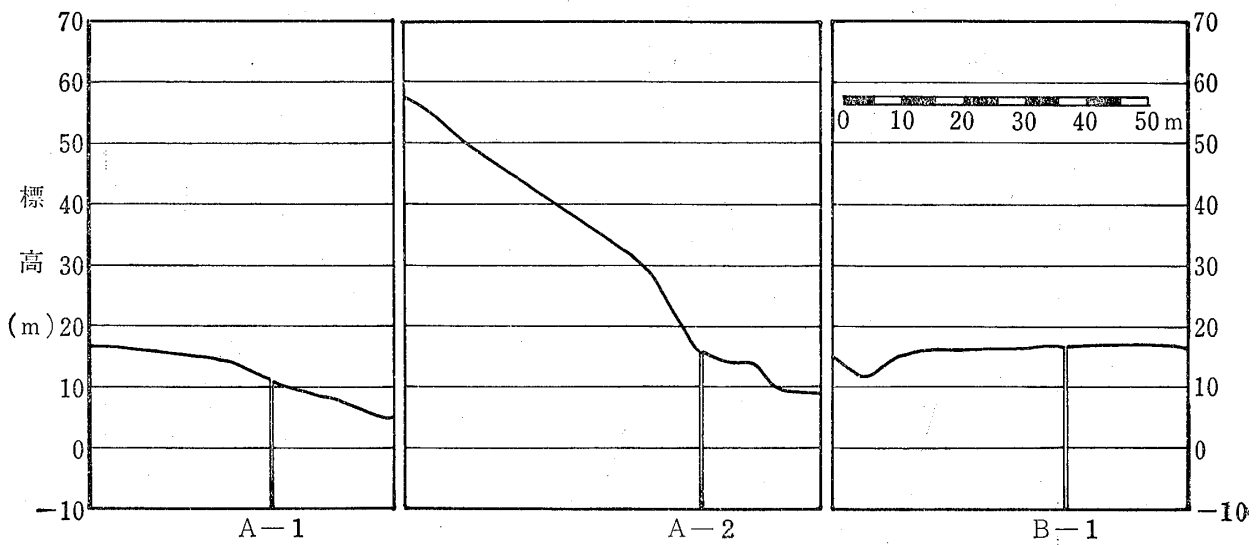


図-3 測定孔付近の地形断面図
Fig. 3 Topographical features near the site of borehole

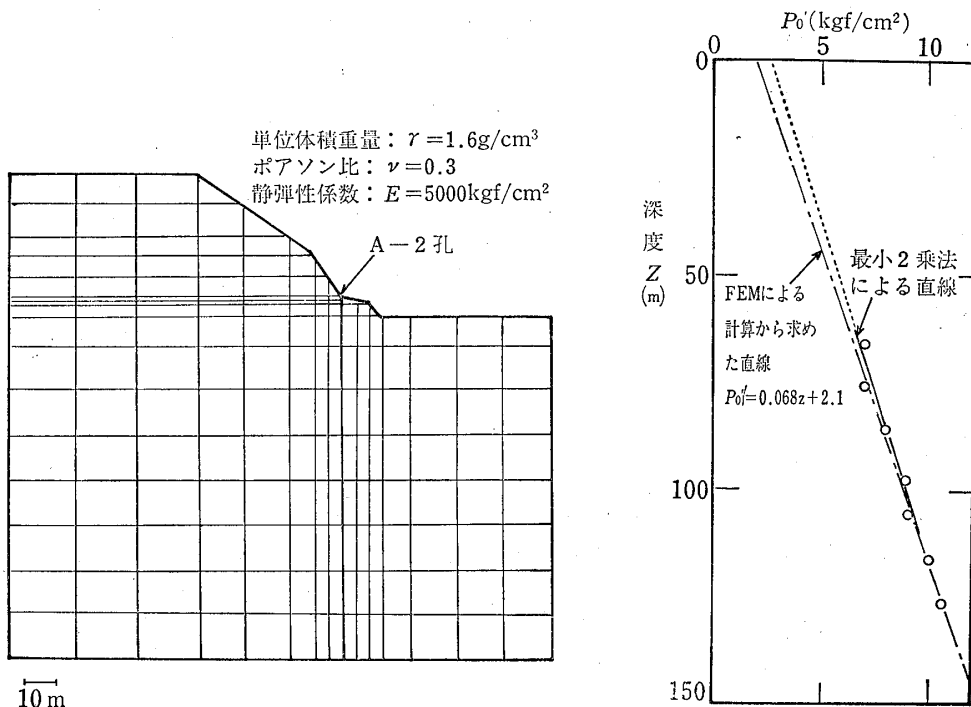


図-4 Po' の応力と有限要素法による計算結果との比較
Fig. 4 Comparison between the stress at the point, Po' , and calculated value by F. E. M.

る。すなわち、図-3に示すように、A-1孔では、その近傍がほぼ平坦な地形を示しているのに対して、A-2孔では、その一方が約40mの高さの斜面となっており、この斜面部の物質による応力が、A-2孔の測定箇所地盤に作用しているものと考えられる。図-3(b)に示すこの地形条件を用い、2次元有限要素法によって、

A-2孔に作用する地盤の水平応力を計算すると、図-4に示すようになる。計算で得られた応力の深度に対する回帰直線は、

$$Po' = 0.068z + 2.1 \quad (6)$$

となる。(6)式に示す回帰係数および切片の値を、 Po' の

実測値から求めた(4)式に示す回帰係数および切片の値とそれぞれ比較すると、有意性は認められない。

このことは、図-3(b)に示すように、ボーリング孔周辺の地形が平坦でない場合には、実測による応力～変位曲線上の Po' の値は、ボーリング孔近傍の地形を考慮して得られるその深度の水平応力を表しており、(4)式の 2.6kgf/cm^2 のような切片の値は、孔口より上部の地形によってきまるものといえることができる。

以上のことから、降伏点応力 Py' に影響を与える拘束圧は、その測定点における地盤の水平応力として、応力～変位曲線上の点 Po' と考えることができる。しかし、実際の応力～変位曲線において、 Po' が見られない場合があり、また、変曲点が明瞭でないために、 Po' の決定に大きな誤差を生ずる場合も多くみられる。このような場合、上述のことから、地盤のポアソン比と単位体積重量がわかれば、つぎに示す地点BのB-1孔のような場合を除いて、計算によって水平応力を求め、それを用いることができる。

つぎに、図-2(c)に示す地点BのB-1孔の場合には、深度140m以深における Po' の値が、急激に小さな値を示している。この原因は今のところ明確ではないが、このような部分では、地盤の水平応力を上述の計算方法を用いて推定することは適切でない。

以上のように、測定点における水平応力を求めるに当たって、地盤のポアソン比や単位体積重量の値から計算に

よって推定することが不適切な場合があり、また、計算によって推定しても良い場合でも、地盤のポアソン比と単位体積重量の値を決める必要があり、これらの値の評価いかんによって拘束圧が異なることになる。したがって、拘束圧は、実際の応力～変位曲線上から求めることを原則とすべきであろう。

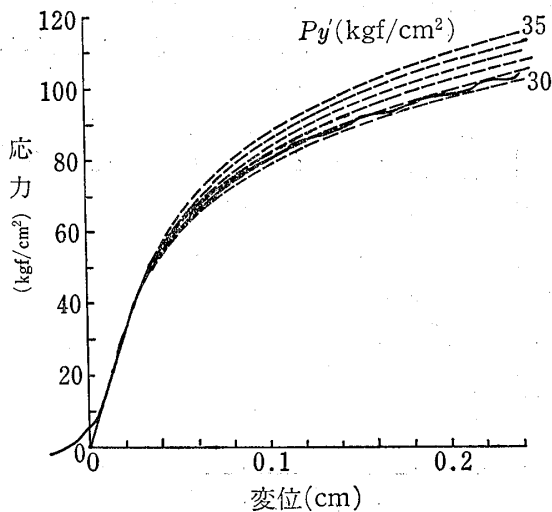
3. 実際例からみた拘束圧 Po の考察

3-1 降伏点応力 Py' の決定における拘束圧 Po の影響

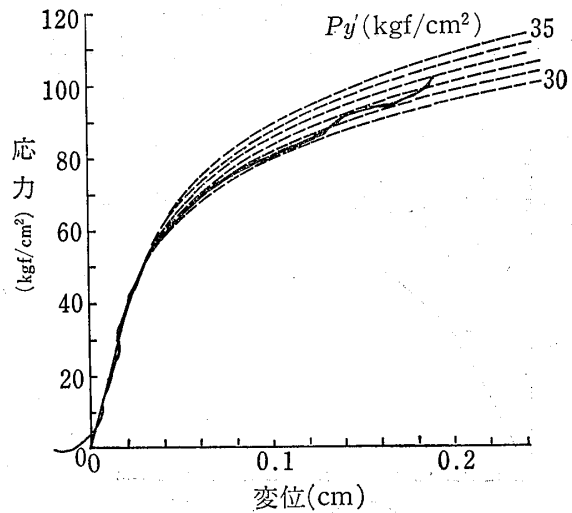
前章に示した(1)式から明らかなように、拘束圧 Po は応力～変位曲線の形状に影響を与える。すなわち、このことは、降伏点 Py' を決定する上で拘束圧 Po が関係していることを示していることになる。

孔内载荷試験で得られた応力～変位曲線の降伏点応力 Py' を決定するために、(1)式を用いて、 Py' をパラメータとして計算によって求めた曲線群と、これまでに扱ってきた比較的軟質で割れ目のない均質な岩盤における応力～変位曲線とを比較すると、おおむね、つぎの2つの型に分類することができる。

- I. 測定された応力～変位曲線が長い区間に亘って計算によって求められた曲線と良く一致するもの。
- II. 測定された応力～変位曲線がパラメータ Py' の値の異なるいくつかの曲線にまたがるもの。



(a) 応力～変位曲線が長い区間に亘って計算した曲線と良く一致する例(I)



(b) 応力～変位曲線がパラメータ Py' の異なるいくつかの曲線にまたがる例(II)

図-5 孔内载荷試験で得られた応力～変位曲線と Py' をパラメータとする計算曲線との比較

Fig. 5 Comparison between the measured stress-deformation curve and calculated curves with parameter, Py'

上記のⅠ型およびⅡ型の代表例をそれぞれ図一5(a)および(b)に示す。いずれも新第三紀の凝灰角礫岩の地点Aのものである。分類Ⅱの場合、曲線がまたがる P_y' の範囲は、図一5(b)に示すように、ほとんどのものが 2 kgf/cm^2 程度である。したがって、Ⅱ型の場合でも、降伏後の曲線形状を用いて P_y' を決定する上では差支えはない。しかし、ここで決定された P_y' は、使用した P_0 の値に対する結果であって、 P_0 に含まれる誤差によってもまた、 P_y' の値に誤差を含むことになる。

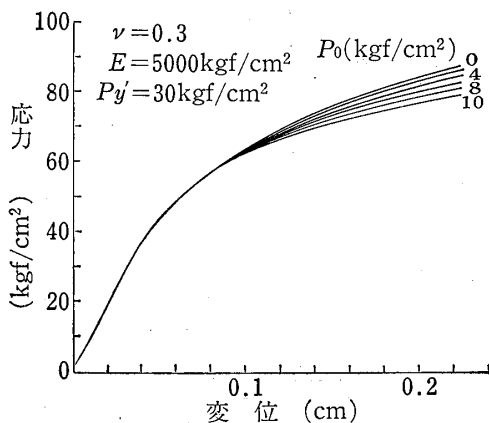
そこで、 P_0 の値の相異が P_y' の値に及ぼす影響の度を調べるに当たって、その1例として、前章で述べた地点Aの凝灰角礫岩について計測されたポアソン比 $\nu = 0.3$ 、弾性係数 $E = 5,000 \text{ kgf/cm}^2$ を用い、降伏点応力 P_y' としては 30 kgf/cm^2 の場合を想定し、拘束圧 P_0 を $0 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ に変化させた場合の応力～変位曲線を計算した。その結果は図一6に示す通りであり、あたかも P_y' をパラメーターとした応力～変位曲線の場合（図一5参照）と同様な曲線形状を示している。

図一6に示した地盤のポアソン比 $\nu = 0.3$ 、弾性係数 $E = 5,000 \text{ kgf/cm}^2$ は変化しないものとし、($P_0 = 4 \text{ kgf/cm}^2$, $P_y' = 30 \text{ kgf/cm}^2$) を基準として、($P_0 = 2 \text{ kgf/cm}^2$, $P_y' = 29 \text{ kgf/cm}^2$) および ($P_0 = 6 \text{ kgf/cm}^2$, $P_y' = 31 \text{ kgf/cm}^2$) の場合の応力～変位曲線を比較すると、図一7に示すようになる。この結果によれば、3つの曲線はよい一致を示しているとみることが出来る。そして、 P_0 の値が 2 kgf/cm^2 増減するとき、 P_y' の値は 1 kgf/cm^2 程度の変化を示すことがわかる。

前章に示した地点AのA-2孔においては、 P_0' の値が(4)式で与えられることを示し、(4)式中の定数項は、A

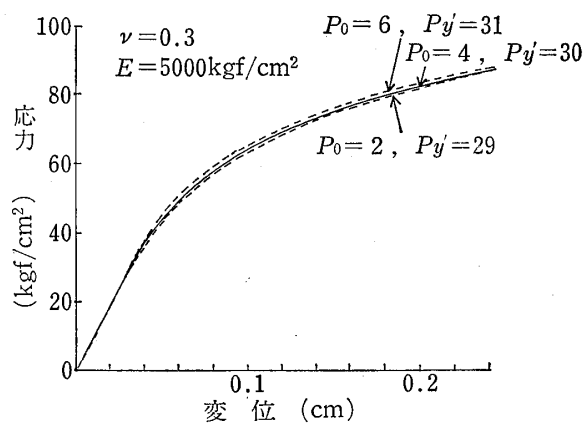
—2孔周辺の地形の影響によることを述べたが、このA-2孔の例において、拘束圧として、応力～変位曲線から P_0' を読み取り決定したものをを用いた場合と、周囲の地形を考慮しないで、ボーリング地点における直下の土被り相当の応力を用いた場合とを比較すると、得られる P_y' の値の差は 1 kgf/cm^2 程度であるということが出来る。

つぎに、図一2(c)に示す地点BのB-1孔の深度がおおよそ 150 m 以深のところ、 P_0' が土被りから計算される相当応力に比べてきわめて小さい値を示す例について検討する。図一2(c)に示すように、深度 189 m のところの P_0' の値は 5 kgf/cm^2 であるので、 $P_0 = 5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、 $P_y' = 19.5 \text{ kgf/cm}^2$, 20.0 kgf/cm^2 , 20.5 kgf/cm^2 の場合の応力～変位曲線を計算すると、図一8(a)に示すようになる。ここに、 $E = 2,130 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.4$ として計算した。図中に示してある実測値が $P_y' = 20.0 \text{ kgf/cm}^2$ の曲線とよい一致を示していることがわかる。一方、地盤の単位体積重量 γ を 1.8 g/cm^3 、ポアソン比を 0.4 として、計算によって求めた土被り応力 (22.7 kgf/cm^2) を拘束圧として求めた応力～変位曲線は、図一8(b)に示すようになる。この場合も、図一8(a)の場合と同じく、 $E = 2,130 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.4$ として計算した。これらの計算曲線と実測値を比較するとき、 P_y' をどのように選んでも一致する曲線を見出すことができない。すなわち、応力～変位曲線から求められる変曲点 P_0' の値が、土被り応力を拘束圧 P_0 とした値にくらべて大きく異なる場合であっても、応力～変位曲線から読み取られる P_0' の値を用いる方が、その深度における降伏点応力 P_y' を適確に定めることができることを示して



図一6 拘束圧 P_0 をパラメーターとして計算により描いた応力～変位曲線

Fig. 6 The calculated stress-deformation curves with parameter of confining pressure, P_0



図一7 P_0 と P_y' の異なる組合せによる応力～変位曲線の比較

Fig. 7 Comparison between the stress-deformation curves of which P_0 and P_y' are different

いる。

以上に示したように、若干の例についてはあるが、降伏点応力 $P_{y'}$ の値を決定するに当っては、拘束圧 P_0 の値が微妙に影響することから、可能なかぎり応力～変位曲線上の $P_{o'}$ の値を用いることが望ましく、さらには、 $P_{o'}$ 点が明瞭に識別できるようなデーターをとることが必要となる。

3-2 C, ϕ を求める場合の拘束圧 P_0 について

(1)式によれば、2つ以上の異なる P_0 に対する $P_{y'}$ があれば、 C, ϕ を算出することができる。そこで実際には、同一層内の異なる深度で、孔内載荷試験を行うことによって、異なる P_0 に対する $P_{y'}$ を求めている。

応力～変位曲線から P_0 が明確に求められる場合には、同一層内の各測定点において、 P_0 と $P_{y'}$ が対応して決定され、(1)式によって C, ϕ を求めることになる。

一方、応力～変位曲線から $P_{o'}$ が求められない場合には、計算によって求めた土被り応力を P_0 値として用いるが、この場合には、 P_0 が深度に比例すると考え、降伏点応力 $P_{y'}$ の深度分布から C, ϕ を算出することになる。

図-3に示した3つのボーリング孔の孔内載荷試験の応力～変位曲線について、変曲点の応力 $P_{o'}$ を読み取

り、それに対応する降伏点応力 $P_{y'}$ を降伏後の曲線形状から求め、 $P_{y'}$ と $P_{o'}$ の関係を示すと、図-9のようになる。3つのボーリング孔について、地盤の C, ϕ の値はそれぞれ一定であるとすれば、 $P_{y'}$ が $P_{o'}$ の一次式で表されることは(1)式から明らかである。図中の実線は、 $P_{y'}$ と P_0 の関係を最小2乗法によって直線近似したものである。それぞれのボーリング孔における $P_{y'}$ と P_0 の関係は、つぎのように表される。

$$\left. \begin{aligned} A-1 \text{ 孔} &\cdots\cdots\cdots P_{y'} = 1.37P_0 + 23.8 \\ A-2 \text{ 孔} &\cdots\cdots\cdots P_{y'} = 1.59P_0 + 16.9 \\ B-1 \text{ 孔} &\cdots\cdots\cdots P_{y'} = 1.48P_0 + 6.9 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

そして、(1)式の関係を用いて、 C, ϕ を計算すると、

$$\left. \begin{aligned} A-1 \text{ 孔} &\cdots\cdots\cdots C = 26 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 22^\circ \\ A-2 \text{ 孔} &\cdots\cdots\cdots C = 21 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 36^\circ \\ B-1 \text{ 孔} &\cdots\cdots\cdots C = 8 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 29^\circ \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。

一方、降伏点応力 $P_{y'}$ と深度の関係を探ると、図-10に示すようになる。図中の実線は、 $P_{y'}$ と Z の関係を最小2乗法によって直線近似したものである。さきに述べたように、応力～変位曲線の変曲点 $P_{o'}$ の値は、一般的には、単位体積重量と深度から求められる土被り応力に

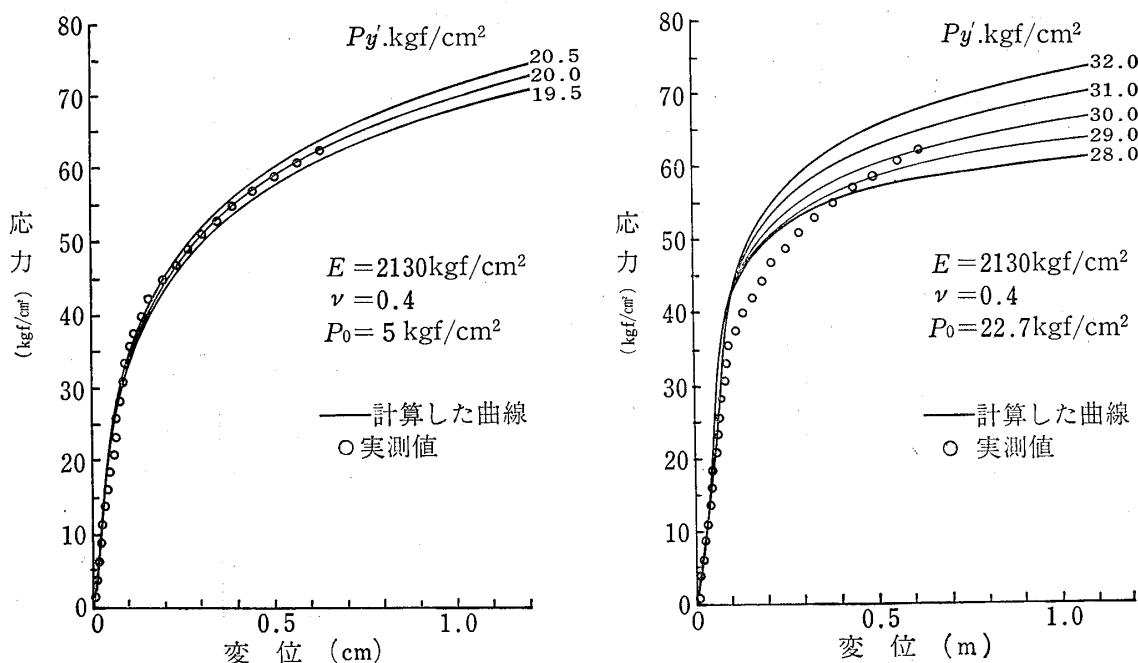


図-8 $P_{y'}$ をパラメーターとして計算した応力～変位曲線と実測値との比較
— P_0 が異なる2通りの場合について

Fig. 8 Comparison between measured values and calculated curves with parameter, $P_{y'}$; in two cases in which the value of P_0 are different

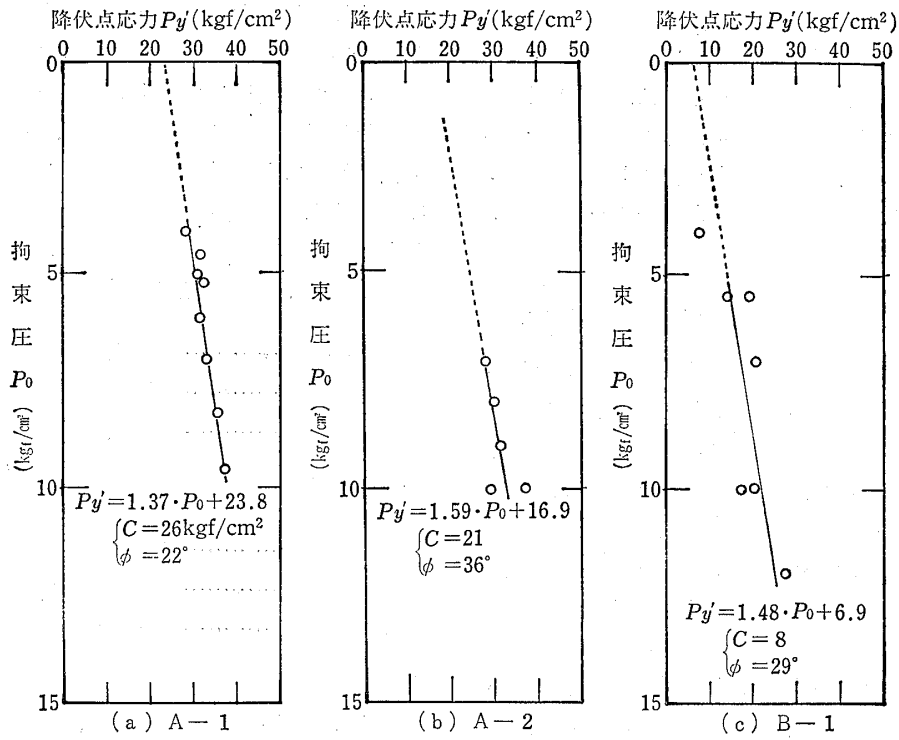


図-9 降伏点応力 P_y' と拘束圧 P_o の関係

Fig. 9 Relationship between the yield stress, P_y' , and confining pressure, P_o

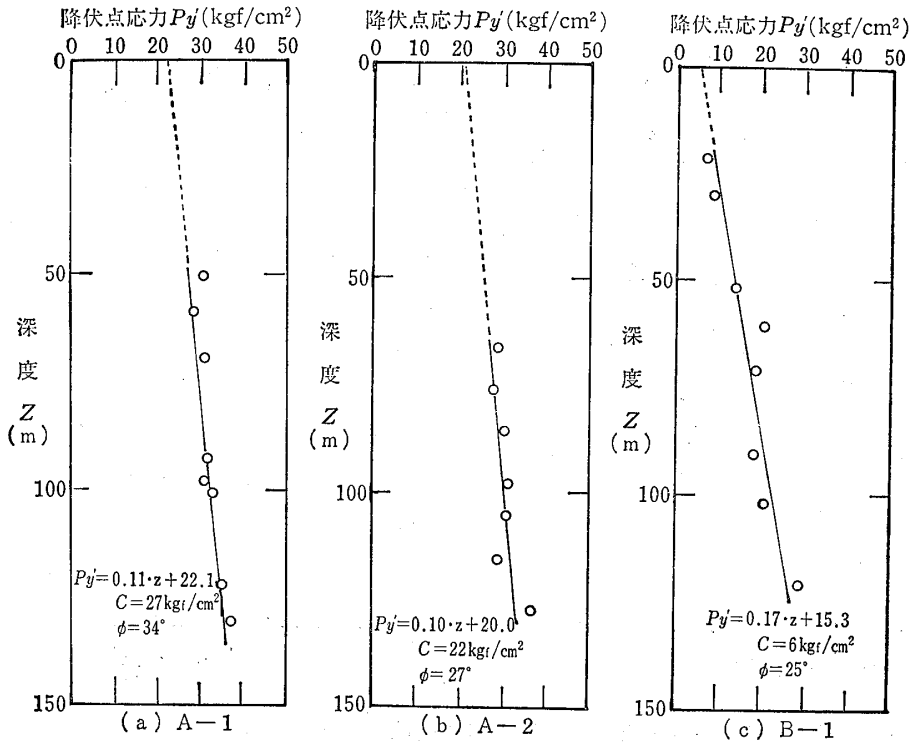


図-10 降伏点応力 P_y' と深度の関係

Fig. 10 Relationship between the yield stress, P_y' , and depth

相当することが実際の測定例からもわかっている。そこで、図-2に示されている土被り応力と深度の関係と、図-10の降伏点応力と深度との関係を用いて、 P_y' と P_o の関係を求めると、つぎのようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{A-1孔} \cdots \cdots \cdots P_y' = 1.55P_o + 22.1 \\ \text{A-2孔} \cdots \cdots \cdots P_y' = 1.45P_o + 20.0 \\ \text{B-1孔} \cdots \cdots \cdots P_y' = 1.43P_o + 5.3 \end{array} \right\} \quad (9)$$

そして、(1)式の関係を用いて、 C 、 ϕ を計算すると、

$$\left. \begin{array}{l} \text{A-1孔} \cdots \cdots \cdots C = 27 \text{kgf/cm}^2, \quad \phi = 34^\circ \\ \text{A-2孔} \cdots \cdots \cdots C = 22 \text{kgf/cm}^2, \quad \phi = 27^\circ \\ \text{B-1孔} \cdots \cdots \cdots C = 6 \text{kgf/cm}^2, \quad \phi = 25^\circ \end{array} \right\} \quad (10)$$

となる。

(7)式と(9)式をそれぞれのボーリング孔について比較すると、回帰係数、切片ともに若干の相異がみられる。しかしながら、これらの回帰係数および切片の値の差の有意性を検定した結果によれば、有意水準5%で差は認められなかった。したがって、(8)および(10)に示した C 、 ϕ の値の相異は、バラツキの範囲といえることができる。

以上のように、一般的には、実用上、計算による土被り応力を拘束圧 P_o として用い、降伏点応力～深度の関係から C 、 ϕ を求めても大きな誤差は生じないものと考えられる。しかしながら、図-2(b)あるいは(c)のような例もあるので、可能な限り、応力～変位曲線から P_o' を求めようとするべきである。

4. あとがき

孔内載荷試験の応力～変位曲線の降伏点応力 P_y' を利用して、地盤の C 、 ϕ を求めるに当たって、応力～変位曲線が直線関係を示す最初の点(変曲点)の応力 P_o' を拘束圧 P_o とすることが望ましいことを示した。しかし、変曲点応力 P_o' は、従来の測定結果をみると、すべての試験において明瞭に見出せるとは限らない。そこで、今後は変曲点近傍の応力レベルにおいても一層の注意を払って測定を行うとともに、変曲点の現れ方に影響を与えようと考えられるボーリング孔の掘削にも細心の注意を払い、孔壁の乱れを極力少なくすることや、乱れの少ないところを選ぶなどの点にも留意するようにしたい。

参 考 文 献

- 大矢暁(1979)：原位置における K_o 評価のための地中
応力測定 応用地質調査事務所年報 No.1 P.
85~103
- 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 、 ϕ についての考察 その2
応用地質調査事務所年報 No.3 P.139~149
- 武内俊昭, 大橋武一郎(1982)：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
目のない一様な軟岩の場合——応用地質調査事務
所年報 No.4 P.113~119

