

# 正規圧密粘性土地盤に対するセルフボーリング プレッシャーメータ試験結果の解釈

秦樹一郎<sup>1</sup>・深川良一<sup>2</sup>・室達朗<sup>3</sup>・田中洋行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関西支社 (〒550 大阪市西区阿波座1-11-14)

<sup>2</sup>正会員 工博 立命館大学教授 理工学部建設環境学系土木工学科 (〒525-77 滋賀県草津市野路東1-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

<sup>4</sup>正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 土質部地盤調査研究室 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

等圧分布載荷型のプレッシャーメータ試験にはプレボーリング法とセルフボーリング法の2種類がある。セルフボーリング法は地盤の攪乱や応力解放を最小限に抑えることのできる有効な原位置試験の1つである。このセルフボーリング法とプレボーリング法について比較検討し、さらに他の種々の原位置試験および室内土質試験結果との比較を行い、正規圧密粘性土地盤におけるセルフボーリングプレッシャーメータ試験結果の評価について検討している。

**Key Words :** clay, Self-Boring Pressuremeter, coefficient of earth pressure at rest, shear modulus, strain-level dependency

## 1. はじめに

プレッシャーメータは日本では1960年代から普及し始めた。当初は地盤の水平方向の剛性を求める試験法として位置づけられていたが、近年、地盤解析に必要な定数の精度の向上が望まれる中で、地盤の強度( $c_u$ ,  $\phi$ )や静止土圧係数 $K_0$ 値などを推定するために用いられるようになってきた<sup>1,2</sup>。しかしながら、通常に使用されているプレボーリングプレッシャーメータ(PBP)は孔壁面の乱れや応力解放などが結果へ影響を与える可能性が強いため、室内土質試験に比較して試験精度に疑問を持たれていた。この問題を解決するために1970年代から孔壁面の乱れ・応力解放の影響を最小限にするセルフボーリングプレッシャーメータ(SBP)の開発が進められ<sup>3,4</sup>、結果の解釈が検討されてきた。

ところで、現在、プレッシャーメータ試験に関する国際的な研究の流れには二つある。一つはイギリスを中心としたもので、プレッシャーメータ試験が地盤特性を判定するためのより厳密な原位置試験機として位置づける。したがって試験機の測定精度を出来るだけ上げようとしている。SBPはその代表的な試験法である。他方は、フランスを中心としたもので、プレッシャーメータ試験はどちらかといえば標準貫入試験のようなインデックス

試験として位置づけられ、したがって土質定数を厳密に求めると言うよりは、実際の設計体系の中で有用なパラメータを与える試験法であるとされる。PBPはこの潮流の代表的な試験法である。この二つの潮流の間では70年代頃より継続的に議論が成されてきているが、未だに結論が出ているとは言い難い。イギリス派からすれば、PBPから得られた結果は攪乱や応力解放の影響が大きすぎるため、繰返し載荷過程から得られる変形係数を除けばほとんど評価は不可能であるということになる。フランス派からすれば、SBPの精度を追求するあまり細部に拘りすぎる結果になり、かえって現象が見えにくくなっているということになる。本論文における著者らの立場はこの二大潮流の中間に位置するものである。即ち、主としてSBPの有利性を確認しつつも、PBPから得られた情報にも力学的な情報としての価値を認めようとしている。基本的に両者は相補うべき試験法であると考ええる。

本報告では、SBPから得られる土質パラメータの内特に静止土圧係数 $K_0$ 値とせん断変形係数 $G$ について考察を加えた。その結果、適切な張力補正や間隙水圧補正を行うことにより合理的な試験結果を得ることが可能であることを明らかにした。また、特に「歪みレベル」に基づいて整理し、これまで異なる変形特性を与えると考え

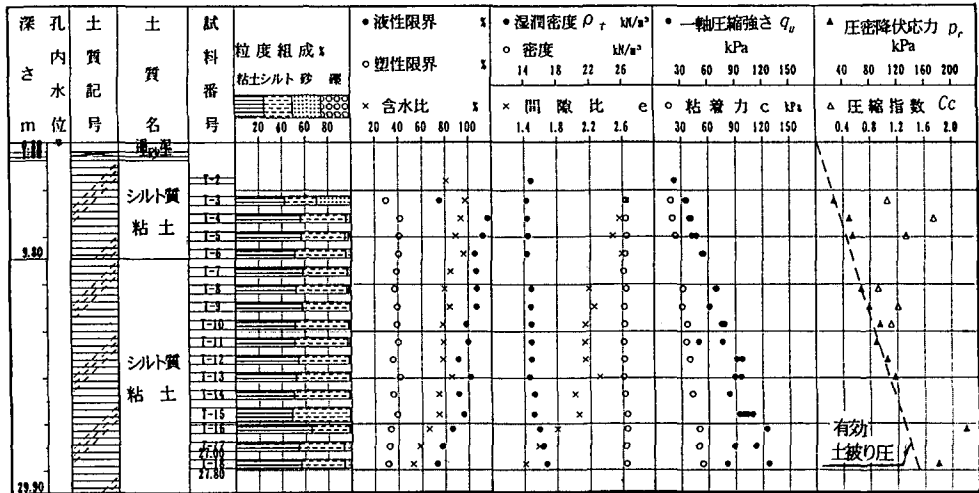


図-1 試験フィールドの土性値

表-1 使用したSBPの仕様

名称	測定管			加圧方法	最大加圧力
	直径 (mm)	全長 (mm)	構造		
MARKⅧd	83	624	1室型	ガス圧	4MPa

表-2 試験深度と試験種類

試験名	試験深度 (GL-m)	試験種類
T1	11.5	A
T2	13.0	A
T3	16.0	B
T4	17.5	C
T5	20.5	A
T6	22.0	A
T7	23.5	B
T8	25.0	B
T9	26.5	A
T10	28.0	C

られてきたSBPとPBPの結果を統一的に説明できることを明らかにしている。なお、本論文で示しているGは基本的に弾性論に基づいて決定されているが、これが純粋に地盤の弾性的挙動を示しているかどうかは定かでない。以下、せん断変形係数と呼ぶことにする。

表-3 SBPの試験方法

試験種類	載荷速度 (kPa/min)	計器設置後 放置時間(h)	掘削孔径 φ(mm)
A	20	0.5	83
B	20	16.0	83
C	20	0.5	87

## 2. 試験フィールドの概要

SBPによる試験は、神奈川県内の約30mの層厚で沖積粘性土が分布する地盤を対象として実施した。この試験フィールドではこれまでに種々の室内土質試験や原位置試験が行われている。室内土質試験は物理試験として、粒度試験、含水比試験、土粒子の密度試験、土の湿潤密度試験、液性・塑性限界試験などが行われ、力学試験として一軸圧縮試験や三軸圧縮試験(UU, CK<sub>0</sub>U)、標準圧密試験などが行われている。原位置試験としてはPBP、コーン貫入試験、ダイラトメータ試験、そして弾性波探査試験などが行われている。これらの試験結果から粘性土層はほぼ正規圧密状態であることなどが判明している。図-1に室内土質試験から求められた試験フィールドの土性図を示す。この図の圧密降伏応力 p<sub>c</sub> がほぼ有効土被り圧に近似していることから、沖積粘性土は正規圧密状態であることが伺える。なお、土性図に示した粘着力 c は三軸圧縮試験 (CK<sub>0</sub>U) から求められている。

## 3. 試験装置と試験方法

### (1) 試験装置

試験に用いたSBPは図-2に示したCAMBRIDGE INSITU MARKⅧ self-boring pressuremeterである。主な仕様を表-1に示す。このSBPの原型はWrothとHughesによりCambridge大学で開発された。このSBPの利点は、ガス圧による等分布載荷型の加圧方式を用いていること、間隙水圧計が測定部分(プローブ)の中心にあることである。前者の利点は通常良く用いられる水圧による加圧方式に比べて急速な加圧・減圧

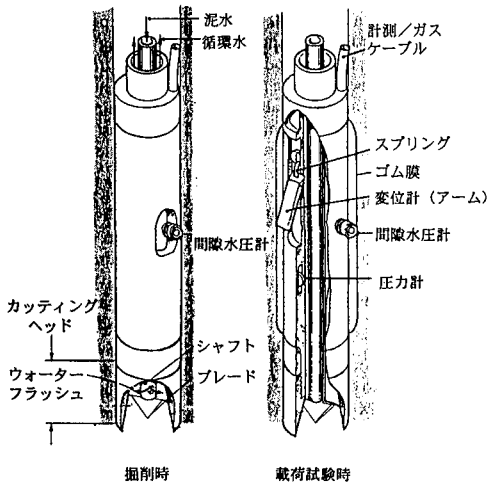


図-2 SBPの構造<sup>6)</sup>

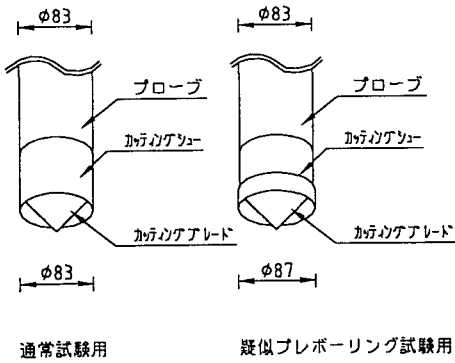


図-3 カuttingヘッドの構造

の操作が可能であり、繰り返し載荷時に便利であること、および気体の粘性抵抗が液体に比べて極めて小さいことにより、変形開始時の微小な挙動が捉え易く、静止土圧 $p_0$ を推定し易いことである。また、後者の利点は、間隙水圧計が測定部分(プローブ)の中央にあることにより、装置挿入時から試験終了時まで、孔壁面の間隙水圧の挙動を捉えることができ、特に変形開始時の間隙水圧から孔壁近傍地盤の有効応力が算出できるところにある。

## (2) 試験種類と試験方法

試験フィールドで行われた既往の原位置試験や図-1に示した室内土質試験の結果と比較するために、表-2に示した試験深度で合計10回のSBP試験を実施した。ところで、粘性土に対するプレッシャーメータ試験では、従来、プレボーリングによる孔壁の応力解放の試験結果への影響や、セルフボーリング時に発生する孔壁面の過剰間隙水圧への対処法などが必ずしも明確にされていなかった。そこで、これらの二点について検討するために、

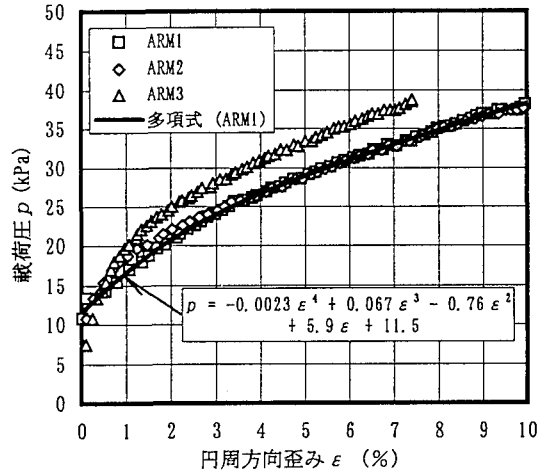


図-4 それぞれのアームに対するプローブの張力検定

表-2, 3に示したA~Cの三種類の試験を行った。試験はA試験を基本とし、載荷試験実施前に長時間放置することによる過剰間隙水圧の消散を目的としたB試験、カuttingヘッドを測定管の外径より大きくすることによる孔壁の応力解放を目的としたC試験からなる。なお、C試験に用いたカuttingヘッドは図-3に示したように、半径方向に2mm(5%)ほどシューの半径を大きくして、孔壁面の応力解放を許すような構造になっている。

SBPの試験方法は装置の特徴を生かしてPBPで行われている従来の断続応力制御法(応力制御+2分間応力保持)ではなく、応力増分を常に一定とする連続応力制御法で行った。載荷速度は非排水条件を維持するために20kPa/minとした。

## (3) プローブの張力検定

プローブの張力検定は、SBPの初期の応答を調べる場合に特に重要である。使用したSBPには、孔内水平方向の異方性を確認するため、プローブ内に円周方向へ120deg毎の等間隔で変位計が3ヶ所に設置されている。変位計はアームと呼ばれ、アーム1~アーム3でそれぞれに対する膨張曲線が得られた(図-2, 図-4参照)。通常、プローブ内のメンブレン(内ゴム)が若干の不均質性を示すために、それぞれの膨張曲線はお互い異なるものになることが多い。図-4でわかるように、膨張曲線は非線形であり、特に載荷初期に非線形性が強い。この膨張曲線の近似は膨張曲線が良好な線形性を示す場合は直線近似で行われることがあるが、今回の検討では微小な歪みレベルの地盤の変形特性を精度良く調べるために、高次関数の非線形近似式を採用した。各アームに対応する三つの近似式を式(1)~(3)に示す。この近似式では概ね $10^{-3}$ までの歪みレベルでプローブの膨張曲線を補正することが可能である。

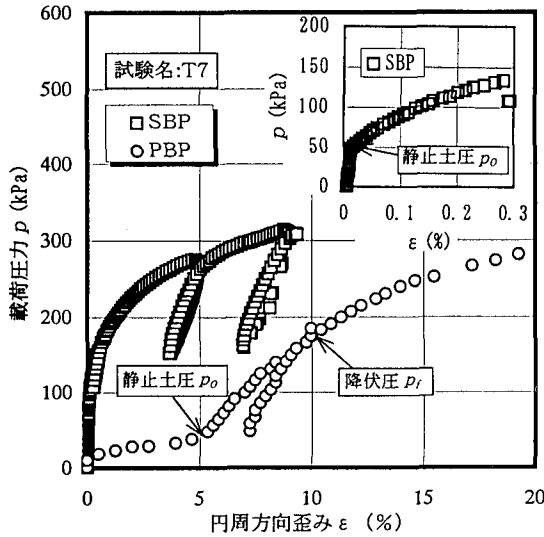


図5 SBPとPBPの載荷曲線の比較

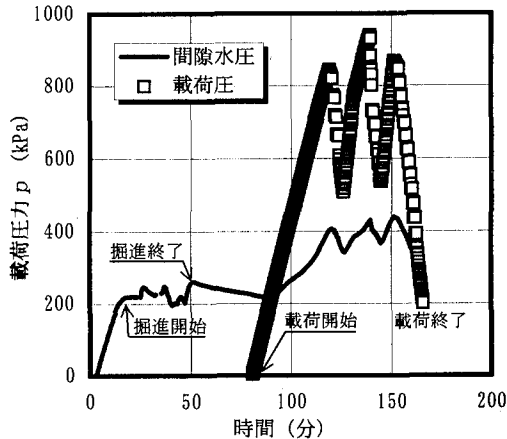


図6 間隙水圧と載荷圧の挙動

$$\text{アーム1: } p = -2.3 \cdot 10^{-3} \varepsilon^4 + 6.7 \cdot 10^{-2} \varepsilon^3 - 7.6 \cdot 10^{-1} \varepsilon^2 + 5.9 \varepsilon + 11.5 \quad (1)$$

$$\text{アーム2: } p = -7.5 \cdot 10^{-3} \varepsilon^4 + 1.8 \cdot 10^{-1} \varepsilon^3 - 1.6 \varepsilon^2 + 7.7 \varepsilon + 11.6 \quad (2)$$

$$\text{アーム3: } p = -4.0 \cdot 10^{-3} \varepsilon^4 + 7.2 \cdot 10^{-1} \varepsilon^3 - 4.7 \varepsilon^2 + 15.6 \varepsilon + 15.9 \quad (3)$$

ここに、 $p$ : 載荷圧(kPa),  $\varepsilon$ : 円周方向歪み(%)である。なお、円周方向歪み $\varepsilon$ は自然ひずみであり、測定管の初期半径 $d_0$ と各アームで計測されるプローブの変位 $\Delta d$ との関係から次式に基づき求めた。

$$\varepsilon = \ln \frac{d_0 + \Delta d}{d_0} \quad (4)$$

本論文におけるデータ整理は、まず膨張曲線に対する張力補正がそれぞれのアームに対して行われ、次に補正膨張曲線から得られた $G$ 、 $K_0$ などのパラメータを平均し

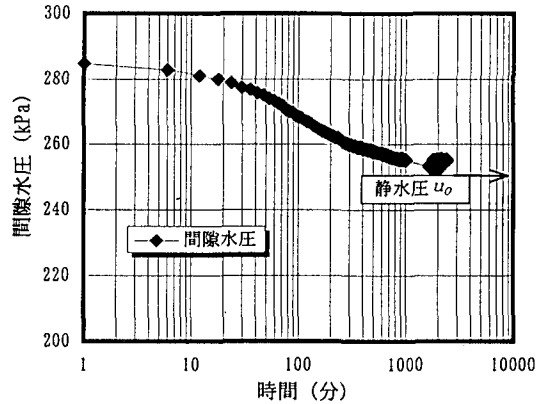


図7 SBPによる過剰間隙水圧の消散

て最終的なパラメータを決定するという手順で行われた。補正された膨張曲線が他の2つのアームに対する結果に対比してかなり異なる場合はそれを除外して平均値を計算した。こうした手順がほぼ妥当な土質パラメータを与えることは、Benoit(1995)<sup>7)</sup>、Allan(1995)<sup>8)</sup>、Hamouche, Roy & Leroueil(1995)<sup>9)</sup>らが指摘する通りである。

#### 4. SBPとPBPの試験結果の特徴

森ら(1981)<sup>10)</sup>は、PBPとSBPでは両者の載荷曲線に大きな違いがあり、特に降伏圧力 $p_f$ 以内の圧力に対する曲線には明確な差があると報告している。(ここで、PBPにおける降伏圧力 $p_f$ とは、クリープ量が一定値から増加し始めた圧力を指す<sup>11)</sup>。PBPは圧力を段階載荷しており、各荷重段階では2分間の圧力保持時間がある。クリープ量は2分間の圧力保持時間の内、0~90秒間に発生する変位量である)。同一深度で行われたSBPとPBPの試験結果の一例を載荷圧 $p$ と円周方向歪み $\varepsilon$ の関係として図-5に示した。この結果からPBPは静止土圧 $p_0$ から降伏圧力 $p_f$ までの擬似弾性領域で線形性の良い載荷曲線を描くのに対して、SBPでは載荷曲線全体で線形性に乏しいという特徴が見られる。また、SBPではPBPとの特徴の違いとして孔壁面の間隙水圧の挙動を測定できることが挙げられる。このことは粘性土の場合、これまでボーリング時に発生する孔壁面の過剰間隙水圧への対処法が明確にされていなかったという問題点を知る上で大きな機能である。図-6にセルフボーリングから得られたSBP周りの孔壁の間隙水圧・載荷圧時刻暦図を示す。この図からわかることはセルフボーリング機能を有しているものの、SBPにおいても若干の過剰間隙水圧が発生するという点である。この原因は装置挿入時の圧密変形と先端ビットの回転によるせん断

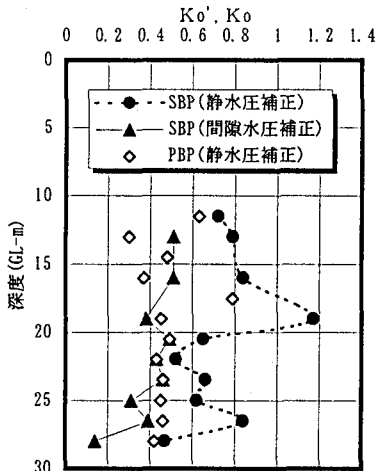


図-8 SBPとPBPの $K_0$ 値、 $K_0$ 値深度分布

変形によると考えられている。SBPによる载荷試験は過剰間隙水圧が消散してから行うのが望ましいが、図-7に示した間隙水圧の消散時刻暦図から、過剰間隙水圧が完全に消散して、静水圧 $u_0$ になるまでに長時間放置しなければならないことがわかっていて、この点については表-3の試験種類A、Bの結果の差について、次節以後に検討する。

## 5. 静止土圧係数 $K_0$ 値

### (1) SBPとPBPの比較

静止土圧係数 $K_0$ 値を求めるために必要な静止土圧 $p_0$ は、PBPとSBPで求め方が異なる。PBPによる静止土圧 $p_0$ の算出は通常、以下の方法による。PBPはプレボーリングであることから、最初の载荷段階では応力解放で緩められた孔壁を押し戻すことにより、クリープ量が大きい。その後に加圧力が増すごとにクリープ量は小さくなり、最もクリープ量が小さくなった時に孔壁が元の状態に戻されたものと考えられている<sup>11)</sup>。この時の全载荷圧力から静水圧 $u_0$ を差引いた圧力を擬似的な有効応力状態の静止土圧 $p_0'$ としている。以後、このような圧力補正を静水圧補正と呼ぶこととする。

次にSBPによる静止土圧 $p_0$ の算出法は以下の通りである。プローブを予定深度まで貫入した後、プローブにガス圧を徐々に加え、プローブが膨張を開始した圧力を静止土圧 $p_0$ としている。この方法は本報告で使用したSBPのように圧力媒体にガス圧が使用されているときに有効である。この方法により求められた全応力の静止土圧 $p_0$ から、同時に測定されている孔壁面の間隙水圧を差引いて有効応力に基づく静止土圧 $p_0'$ を求めている。以後、このような圧力補正を間隙水圧補正と呼ぶこととする。

以上のようにPBPとSBPの静止土圧 $p_0$ の求め方の差は、静止土圧を全応力から有効応力にするためにPBPでは静水圧補正を行なうのに対して、SBPでは測定されている間隙水圧を用いて補正を行なう点にある。このことから、粘性土の場合にPBPでは孔壁面の過剰間隙水圧の発生により、真の有効応力が求められていない可能性が高い。

有効応力に基づく静止土圧 $p_0'$ は測定深度での有効土被り圧 $\sigma_v'$ との比として次式のような静止土圧係数 $K_0'$ 値に変換される。

$$K_0' = \frac{p_0'}{\sigma_v'} \quad (5)$$

ここで、SBPや $K_0$ 圧密試験のように間隙水圧補正による有効応力で求められる場合の静止土圧係数を $K_0'$ 値とし、静水圧補正による有効応力で求められる場合の静止土圧係数を $K_0$ 値と区別して呼ぶものとする。PBPとSBPで求められた $K_0$ 、 $K_0'$ 値の深度分布図を図-7に示した。この図で着目されるのは、SBPの結果を用いてPBPのような静水圧補正を行なった $K_0$ 値は、孔壁面に過剰間隙水圧が多く発生している地点ほど大きな値を示すが、孔壁面の間隙水圧補正を行った結果では過剰間隙水圧の大きさに関わらずおよそ0.5付近に分布するという点である。また、図-7の深さ16、23.5、25mに対応するSBPの $K_0'$ 値は表-2におけるB試験であり、掘削後およそ16時間放置されたものであるが、間隙水圧補正を加えれば、これら以外の掘削後30分放置されたA試験との傾向の差は少ないと判断できる。結局、SBPでこれまで懸念されてきたセルフボーリング時の粘性土地盤内での過剰間隙水圧の発生は、過剰間隙水圧の補正を行うことにより、 $K_0'$ 値にはあまり影響を与えないと結論できそうである。逆に、PBPにおいては孔壁面の間隙水圧が測定されていないことから、孔壁面の仕上がりが具合によって孔壁の間隙水圧が異なり、 $K_0$ 値が大きくばらつくものと考えられた。しかし、本現場におけるPBPの $K_0$ 値はSBPの間隙水圧補正を行なった結果に近似している。以上の一致は、もちろん偶然の一致という可能性もあるが、後のせん断変形係数の節における両者の一致を合わせて考慮すれば、それよりもむしろ、次の事柄を意味しているものと考えられる。つまり、慎重に実施されたPBPであればSBPとほぼ同等の地盤に関する情報を与える、ということである。PBPの場合もSBPと同様にロータリーボーリング中には、孔壁面に過剰間隙水圧が発生すると思われる。しかし、ボーリング作業後から測定管を孔内に挿入するまでの若干の時間間隔があるため、孔壁面の近傍では過剰間隙水圧が消散すると考えられる。特に $K_0$ 値は孔壁近傍の間隙水圧により大きく影響を受けることから、孔壁面に過剰間隙水圧が残留していなければ、静水圧補正の $K_0$ 値がSBPの $K_0'$ 値に

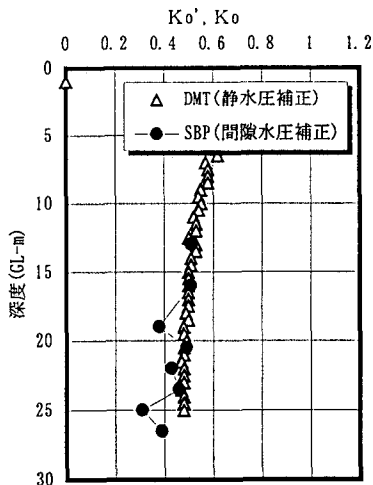


図-9 SBPとDMTの $K_o'$ 値、 $K_o$ 値の比較

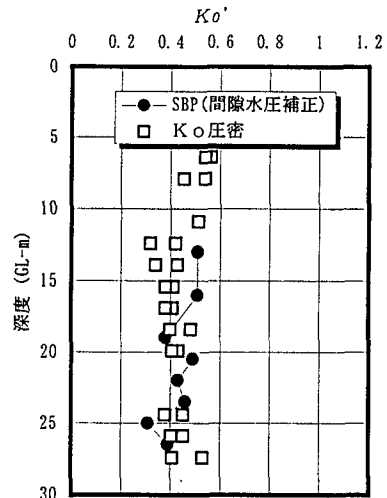


図-10 SBPと $K_o'$ 圧密の $K_o'$ 値の比較

似してくると考えられる。ただし、一般的には、PBPの方がプレボーリング時のロータリーボーリングによる攪乱や循環泥水の影響、および測定管装置（ポンデ）の押し込み時の孔壁への影響が大きいことから、鋭敏な粘性土などについては特に結果の解釈に注意する必要があるだろう。

### (2) SBPとダイラトメータの比較

ダイラトメータ (DMT) 試験では水平応力インデックス $K_o$ 値から $K_o'$ 値を推定する次式が提案されている<sup>12)</sup>。

$$K_o' = 0.29 K_o^{0.57} \quad (6)$$

この式(6)で求められた $K_o'$ 値と、SBPの間隙水圧補正による $K_o'$ 値の比較を図-9に示した。この図から両者は概ね良く整合しているが、DMTの場合もPBPと同様に載荷面の間隙水圧を直接的には測定できないことから、 $K_o$ 値を求めるにあたり、静水圧補正で有効応力を求めている。このようにして $K_o$ 値には押し込み時における載荷面での過剰間隙水圧の発生や乱れの影響が含まれているものの、 $K_o$ 圧密試験やSBPによる $K_o'$ 値との相関関係から式(6)を得ている。図-9から、式(6)が沖積粘性土について有効であることがわかる。ただし、DMTの押し込み時における載荷面付近の状態は、調査地の土性によっては複雑に変化すると予想されることから、式(6)による $K_o$ 値と $K_o$ 圧密試験やSBPによる $K_o'$ 値との直接的な比較ができない場合には、既存の類似した地盤でのDMTの結果を参照するなど、その結果の解釈には、十分な検討が必要である。

### (3) SBPと $K_o$ 圧密試験の比較

ここに取り上げた $K_o$ 圧密試験は、三軸試験状態で側方の変形が生じないように鉛直圧が原位置の有効土被り圧

に等しくなるまで徐々に上げて $K_o'$ 値を求める方法である。この方法で求められた $K_o'$ 値とSBPによる間隙水圧補正を施した $K_o'$ 値の比較を図-10に示した。この図では、 $K_o$ 圧密の結果がGL-15m付近で若干小さく現れているものの両者は概ね整合していることがわかる。このことから、孔壁面の間隙水圧の挙動を捉えることにより、SBPで $K_o$ 圧密試験とほぼ同様な $K_o'$ 値を求めることができることが明らかになった。

### (4) SBPによる $K_o'$ 値推定の際の留意事項

以上のように正規圧密粘性土地盤では、SBP試験を実施することによって、ほぼ妥当な $K_o'$ 値を推定できることが分かった。しかし、そのためには以下の条件が満足される必要がある。

- ・セルフボーリング時の孔壁の攪乱ができるだけ抑えられていること。
- ・適切な張力補正、間隙水圧補正がなされていること。
- ・データのサンプリング精度が高いこと。
- ・非排水条件を保つ載荷速度を設定すること。

プレッシャーメータによる静止土圧 $p_o$ の推定は、従来SBPによってさえ、かなり困難なことであるとされてきたが、機器やデータ計測方法の発達、また今回示した注意深いデータ処理によって今後、測定の成功例が増えるであろうと考えられる。特に、SBPが地盤の変形特性を知る目的だけでなく、精度の高い $K_o'$ 値の推定に用いられることにより、 $K_o'$ 値が過圧密比に伴い変化する過圧密粘性土地盤では、SBPによる精度の高い $K_o'$ 値の推定が地盤の変形解析にたいへん有効であると考えられ、その活躍が期待できる。

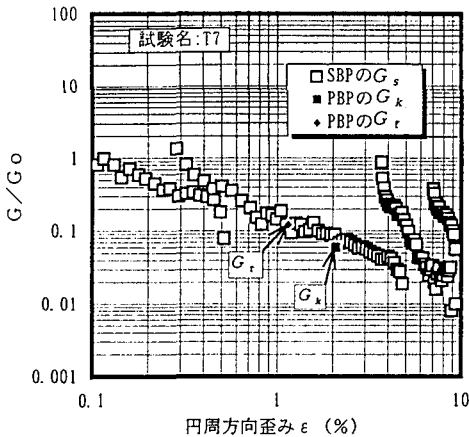


図-11 SBPの $G_s$ とPBPの $G_k$ および $G_r$ の比較

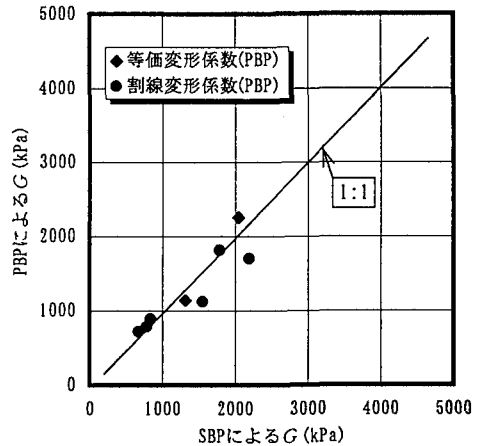


図-12 同一歪みレベルによるSBPとPBPのGの比較

## 6. せん断変形係数G

### (1) せん断変形係数の定義

せん断変形係数 $G$ は試験フィールドで行われた以下の原位置試験と室内土質試験により求められた。

#### a) プレッシャーマータ試験

プレッシャーマータで求められるせん断変形係数 $G$ には次の三種類がある。

割線変形係数 $G_k$ ：任意に指定した歪み区間の端点を結ぶ

載荷圧と歪みの勾配から求められる。

接線変形係数 $G_s$ ：微小な区間の端点を結んだ載荷圧と歪みの勾配から求められる。

等価変形係数 $G_r$ ：繰返し載荷時の載荷圧と歪みの勾配から求められる。

割線変形係数 $G_k$ はPBPで見られる擬似弾性領域の $G$ を求める時に使用される。接線変形係数 $G_s$ はSBPのように非線形性の強い載荷曲線で変形係数を求める時に使用される。

#### b) 弾性波探査

せん断変形係数 $G_0$ は弾性波探査で求められるせん断弾性波速度 $V_s$ から次式で求められる。

$$G_0 = \frac{\gamma_t V_s^2}{g} \quad (7)$$

ここに、 $\gamma_t$ ：土の単位体積重量、 $g$ ：重力加速度  
弾性波探査で求められた $G_0$ は微小歪みレベル( $\approx 10^{-6}$ )での変形係数であり、主に動的な変形問題で取り上げられてきたが、これまで静的な変形問題ではあまり取り上げられてこなかった。

#### c) 一軸圧縮試験

室内土質試験では一軸圧縮試験から求められる1/2強度変形係数 $G_{50}$ を採用した。しかし、一軸圧縮試験の場合、試料の応力解放を受けた状態の変形挙動であり、その影響が懸念される。

### (2) SBPとPBPの比較

#### a) 歪みレベルに基づく評価

SBPによる変形係数は同じ深度で実施されたPBPの擬似弾性領域の変形係数と比べて大きな値を示すという一般の評価がある。ここで、PBPにおける擬似弾性領域とは、静土圧 $p_0$ と降伏圧力 $p_f$ の間を指し、この区間の圧力～歪み関係は図-4のように線形的であり弾性領域と考えられている。SBPの載荷曲線は前述したように非線形性が強く、PBPのような擬似弾性領域が明確ではない。このことからSBPではPBPのような割線変形係数を用いると、載荷曲線上の二点間を選ぶ場合に測定者の主観でばらつきが発生し、およそPBPの変形係数より大きく見積もられる。このようなことから、SBPの変形係数は接線変形係数 $G_s$ で求め、同一の歪みレベルでPBPの変形係数 $G_k$ と比較検討した。なお、PBPの $G_k$ に対応する歪みは擬似弾性領域の midpointでの歪みとした。また、この時の歪みの原点はSBPと同一条件にするために静止土圧 $p_0$ 時である。

SBPの $G_s$ とPBPの $G_k$ の比較を図-11に示した。なお、この図の縦軸はせん断弾性波速度 $V_s$ で求めた $G_0$ で無次元化している。この図の中で、SBPは接線勾配から $G_s$ を求めているので、歪みレベル毎に複数個の点が求められている。

$G_s/G_0$ ～円周方向歪み $\epsilon$ の関係は図-11からわかるように両対数グラフ上では直線性を示す傾向があり、 $10^{-3}$ の微小な歪みレベルまで連続して、せん断変形係数～歪み関係を求めることができた。従来のPBPの場合は擬似弾性領域に対する割線変形係数および繰返し載荷部に対する等価変形係数がそれぞれ1つずつ図-11には記載されている。PBPの $G_k$ と $V_s$ 速度から得られた $G_0$ は10倍程度の差があることが指摘されており、今調査の結果でも概ね10倍程度異なるようである。PBPの $G_k$ および $G_r$ は同一歪みレベルでのSBPの $G_s$ と比較すると、

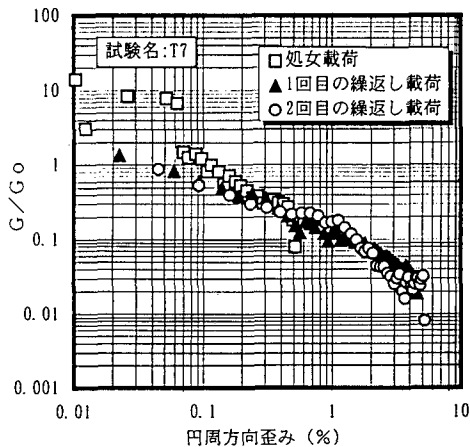


図-13 SBPにおける処女載荷と繰返し載荷の  $G$  の比較

図-12になる。この図によると、両者は概ね等しいことがわかる。

以上のことから、次の点が明らかになった。

- SBPとPBPの  $G$  は異なった値であると認識されてきたが、歪みレベルで検討すれば、両者は概ね整合する。
- PBPでは、微小歪みから大歪みまでの信頼される連続した応力～歪み関係が求められなかったが、SBPではそれが可能である。
- PBPの  $G_k$  は  $V_s$  による  $G_0$  に対して 10 分の 1 程度の値を示した。このことは歪みレベルの差であると指摘されてきたが、今回のSBPの結果からもそれが明らかになった。

#### b) プレッチャーメータ試験結果に影響を及ぼす諸因子

SBPとPBPから得られたせん断変形係数  $G$  を比較してきたが、これらの  $G$  に影響を及ぼす可能性のある因子としてはボーリング時の孔壁攪乱やPBPにおける応力解放以外に載荷速度、載荷方法やプローブサイズなどがあるだろう。以下にこれらの因子について簡単に考察した。

まず、載荷速度は、SBPについては応力増分を一定とする連続応力制御であり、20kPa/min である。したがって、例えば図-5 の場合、5%歪みに達するまでに13分程度を要することとなる。PBPについては、同様に応力制御ではあるが、段階載荷である。今回の実験では実験深度に応じて1荷重段階あたりの応力増分を微妙に変更しているが、1試験あたりの平均的な載荷速度は2.5-5.9kPa/min (これらの平均値は4.2kPa/min) であった。また1段階あたりの放置時間は2分間である。したがって、例えば図-5 の場合、円周方向歪みで5-10%の区間を単調載荷するのにほぼ1時間程度を要することとなる。結局、載荷時間の比はほぼ5倍である。この差の及ぼす

影響を評価するために、従来の研究を参照してみる。まず実験的研究を考える。例えば、Windle & Wroth(1977)<sup>13)</sup> はSBPにより再載荷過程での非排水変形係数を求めた。10%歪みに達する時間を6, 12, 24分の3種類変化させて試験を行ったが、結果的に載荷速度の影響はほとんど見られなかった。今井ら(1983)<sup>14)</sup> はPBPにより、1段階の載荷時間を1, 2, 5, 10分の4種類で試験を行ったが、載荷方法、載荷速度の影響はこの程度の範囲ではほとんど影響を及ぼさなかったと結論付けている。以上のような実験的研究の成果から判断すれば、載荷速度の影響は無視できるレベルであったと結論出来るだろう。ただし、有限要素法に基づく数値解析を試みた理論的研究<sup>15), 16)</sup> に依れば、いずれも上で述べた載荷速度の差は無視できぬ差をもたらす。一般に載荷速度の速い方がせん断弾性係数は大きく現れる傾向を示す。結局、図-11の結果から判断すれば、載荷速度の影響が現れているという可能性は否定できない。しかし、載荷速度は圧密項と粘性項に複雑な影響を与えるため、その影響の評価については今後慎重に検討する必要があるだろう。

載荷方法については応力制御と歪み制御、あるいは本研究でのSBPとPBPのように同じ応力制御でも連続載荷、段階(断続)載荷という分類もある。森、丹下(1983)<sup>17)</sup> はSBPを用いて段階載荷による応力制御法と連続載荷に歪み制御法で載荷試験を実施した。その結果、歪み制御法の方が若干大きな  $G$  を与えたが、それらの差は有意な差ではないと結論付けている。これらのことから判断して、載荷方法による差もさして影響を及ぼさなかったととりあえず判断できるだろうが、これらの影響の厳密な評価は今後の研究に待たねばならない。

プローブサイズはSBPで直径83mm、長さ624mm、PBPで直径80mm、長さ600mmである。直径はほぼ同等であり、また長さ/直径比はいずれにおいてもほぼ7.5であるから、これらプローブサイズの差に基づく結果の差というのはほとんどないと判断できる。

#### c) 繰返し載荷と歪みレベル

繰返し載荷から得られたせん断変形係数は等価変形係数  $G_e$  として処女載荷時とは異なったものと考えられてきた。PBPでは  $G_e$  が割線変形係数  $G_k$  より大きな値を示し、地盤内のサイクリックな載荷過程に用いる変形係数として扱われている。SBPでは圧力媒体に空気圧を用いていることから、繰返し載荷が容易で、試験では0.5, 5.0, 10.0%の歪み時に繰返し載荷を行った。図-13に処女載荷と繰返し載荷の変形係数の比較を示した。この図では繰返し載荷の歪みは再載荷時の開始時を原点(歪みゼロ)にして整理している。この図から0.1~1%レベルの歪みでは処女載荷と繰返し載荷時の変形係数がほぼ一致していることが分かる。このことから孔壁面の攪乱が相対的に少ないとSBPにおいては、処女載荷時の載荷曲



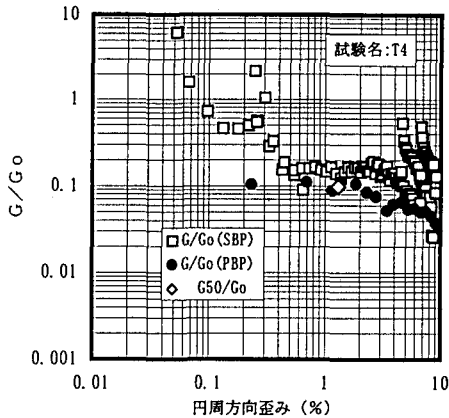


図-14 SBPによる擬似PBP試験とPBPの比較

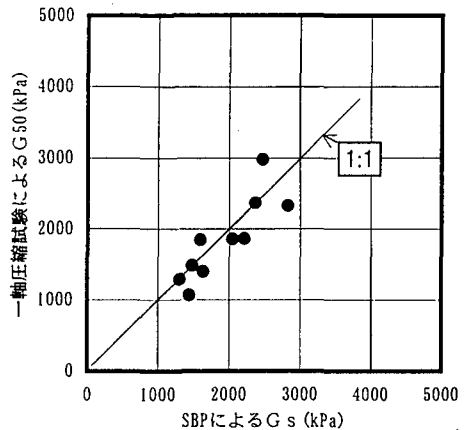


図-15 同一歪みレベルによるSBPと一軸圧縮試験のGの比較

線を求めてさえいれば、再載荷を行い等価変形係数  $G_e$  を求める必要は必ずしも無いことがわかる。

以上、今回のような正規圧密粘性土地盤では、繰返し載荷を開始する歪みの値の影響は少ないような結果であったが、孔壁攪乱などの影響を受けやすいような地盤ではこれらを慎重に考慮する必要がある。菅原ら<sup>19)</sup>は、広い歪み領域において合理的に変形特性を評価するためには、予め繰返し載荷を開始する歪みの値を計画的に設定し、さらにそれらの歪みに対応する除荷時の歪み振幅の値を設定しておくことが重要であると述べている。

#### d) SBPによる擬似PBP試験

表-2 に示したC試験は先端のカッティングシュアの径を測定管径より大きくし、孔壁の応力解放を許した擬似PBP試験である。この試験は、PBP試験と同条件になるように、掘削後に応力解放で緩んだ地盤に対して載荷し、その載荷特性を求めると行われた。結果の一例を図-14 に示した。この図-14 とA試験の図-11 を比較すると接線せん断変形係数  $G$  の分布に違いがあることがわかる。SBPの通常の試験であるA試験(図-11)は、 $G$  が歪みの増加とともに徐々に小さくなる特徴があるのに対して、C試験は歪み 0.4~4% 区間で  $G/G_0$  値がほぼ一定値を示している。このことは線形性が良いということの意味している。この特徴は図-14 でわかるようにPBPの載荷曲線の擬似弾性領域でも確認できることである。C試験は5%ほど大きな孔径でボーリングしているが、調査地の軟弱な粘性土では孔壁の応力緩和のために、測定管外壁まで孔壁が変位してくると想像できる。このことから、C試験のおよそ歪み5%までの孔壁の挙動は、応力解放を受けて緩められた状態を原地盤の状態に戻す過程を意味している。図-14 に示したおよそ歪み4%までの線形的な挙動が応力解放で緩められた地盤の挙動特性であるとすると、この現象とのアナロジーから、通常行われているPBP試験においても、緩みの影響を受けて

結果的に線形的な擬似弾性領域が現れているものと考えられる。この点については、室内土質試験における一軸圧縮試験と三軸圧縮試験(CU)での正規圧密領域の応力~歪み関係も同様な傾向にあると指摘できる。つまり、応力解放を受けた一軸圧縮試験は若干過圧密的にふるまうため初期に線形な応力~歪み関係を示すのに対し、拘束圧を受けている三軸圧縮試験では、正規圧密土の特性が強まり非線形な応力~歪み関係を示す傾向があることに対応している。このような点から比較しても、地盤内の実際の応力状態で応力解放や乱れの少ないSBP試験がPBP試験に比べて有効であることがわかる。

#### (3) SBPと1/2強度変形係数 $G_{50}$ の比較

図-15 に同一歪みレベルによるSBPと一軸圧縮試験の変形係数の比較を示した。この図でわかるように、 $G_{50}$  の場合もPBPの変形係数  $G_e$  と同様に、同一歪みレベル上でSBPの変形係数  $G_e$  と比較すれば、両者は良く一致している。ただし、こうした両者の整合性を力学的に説明するためには異方性や一軸圧縮試験における応力解放や攪乱の影響など、今後引き続き説明されていかなければならない課題が多い。Ohta et al(1989)<sup>19)</sup>は、粘性土の一軸圧縮強度の評価に際して、応力解放や攪乱の影響を関口、太田モデルに基づき定量的に表現した。その結果にさらに異方性や時間依存性を考慮することによって、他の試験法による結果との比較が可能となった。本論文のケースでもあるいはこうした理論的アプローチが現象の解釈に有効な示唆を与えるかもしれない。

## 7. 結論

これまでに变形特性の歪みレベル依存性について多くの研究がなされているが、その研究は室内土質試験にお

けるものが主体であった。これは原位置試験に精度の高い試験法が少なく、地盤内の応力状態などが不明瞭であることが原因であった。研究成果の要旨として室内土質試験で得られるような応力と歪みの関係をSBPにおいても精度良く求めることができること、さらに有効応力を求めることから、原位置試験の結果のばらつきを補正することができる結果を得た。

本報告ではこれまでに種々の土質調査が実施され、土性が比較的明瞭な正規圧密粘性土地盤の試験フィールドを用いてSBP試験を行い、以下の結果を得ることができた。

(1) 間隙水圧計を内蔵したSBPを用いることにより、掘進中から載荷試験中までの間隙水圧の挙動を捉えることができた。特にセルフポーリング時に発生する過剰間隙水圧を測定できることから、静止土圧係数 $K_0$ 値を過剰間隙水圧の消散を待つこと無く求めることができた。原位置試験の弱点であった、地盤内の有効応力状態の把握をSBPで行うことができた。

(2) 変形特性ではSBPによって、広い歪み領域における信頼性の高い孔壁面での応力 $p$ と円周方向歪み $\varepsilon$ の関係を求めることができた。最小な円周方向の歪みレベルとしては $10^{-3}$ 程度までのせん断変形係数 $G_s$ を求めることができた。

(3) SBP試験とPBP試験によるせん断変形係数 $G$ はこれまでの研究で載荷条件の違いから、両者で異なるものと考えられてきたが、同一な歪みレベルで両者の結果を比較すると、整合性が高いことが明らかになった。

(4) SBP試験では歪みレベルを同一にすれば処女載荷と繰返し載荷で求められるせん断変形係数 $G$ はおおよそ整合する。この結果から、SBP試験では孔壁の攪乱を最小限に押さえること(過剰間隙水圧が小)に注意すれば、繰返し載荷の必要性は必ずしも無いと思われる。

(5) これまで、PBP試験では線形性の良い擬似弾性領域を有するような載荷曲線が得られることが一般的であった。拡張型カッティングシュエーを有する擬似PBP試験とのアナロジーから、こうした擬似弾性領域は応力解放で緩んだ孔壁を再載荷する過程であると判断された。実際の乱さない状態での原地盤に対して水平方向載荷を実施すれば、SBP試験で得られたような非線形性の強い膨張曲線となるものと判断されることから、対応する歪みレベルを明記するような形で結果の整理が行われなければならない。

国内では未だSBPの使用例が少ない。本報告で示したようにSBPは初期の異方性を含めた地盤内の応力状態を知ることができ、連続的な応力～歪み関係を求めることができる有効な原位置試験であることから、今後さらに多くの研究と活用法の検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 太田秀樹, 深川良一, 西原 晃: 原位置試験による変形・強度定数の決定と設計への適用性, 土木学会論文集, 第346号/Ⅲ-1, pp. 77-86, 1984.
- 2) 日野直哉, 深川良一, 室達朗: プレッシャーメータから砂質地盤の $\phi$ を推定する新しい方法, 第28回土質工学会発表論文集, pp. 187-188, 1994.
- 3) Baguelin, F., Jezequel, J.F., LeMee, E. and Le Mehaut, A.: Expansion of cylindrical probes in cohesive soils, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., J. Soilmech. Found. Div., Vol.98(SN11), pp. 1129-1142, 1972.
- 4) Wroth, C.P. and Hughes, J.M.O.: An instrument of the in-situ measurement of the properties of soft clays, Proc. 8th Int. Conf. On Soil Mech. and Found. Eng., Vol.2, pp.487-494, 1973.
- 5) 田中洋行, 田中政典, 土田孝・水上純一: 久里浜試験フィールドの土質特性, 土と基礎, 42-8, pp. 11-16, 1994.
- 6) Mair, R.J. and Wood, D.M.: Pressuremeter testing, CIRIA Ground Engineering Report, Buttworhs, p.8, 1987.
- 7) Benoit, J.: Advances in pressuremeter technology with specific reference to clays, Proc. of ISPA, pp.125-139, 1995.
- 8) Allan, P.G.: Assessment of in situ horizontal stress and modulus of London Clay at a site in Kent using the self-boring pressuremeter, Proc. of ISPA, pp.141-146, 1995.
- 9) Hamouche, K.K., Roy, M. and Leroueil, S.: A pressuremeter study of Louisville sensitive clay, Proc. of ISPA, pp.161-168, 1995.
- 10) 森博, 室伏信明: セルフポーリングプレシオメーターによるちゅう積粘性土の性質の原位置測定, 第16回土質工学研究発表会, 昭和56年度発表講演集, pp. 109-112, 1981.
- 11) 地盤工学会: 地盤調査法, 孔内水平載荷試験, pp. 249-257, 1995.
- 12) 岩崎公俊: フラットダイラトメーター試験による静止土圧係数の評価, 第30回土質工学研究発表会, pp. 261-272, 1995.
- 13) Windle, L. and Wroth, C.P.: In situ measurement of the properties of stiff clays, Proc. of 9th ICSMFE, pp.346-352, 1977.
- 14) 今井常雄, 松原幹夫, 東沢敏, 和田晃, 島村義晴, 高上裕考: プレッシャーメータ試験でのポーリング 掘削法, 載荷方法などの影響, 第28回土質工学シンポジウム昭和58年度発表論文集, pp. 1-6, 1983.
- 15) Anderson, W.F. and Pyrah, I.C.: Undrained strength and deformation parameters from pressuremeter test results, Proc. of the 2nd Int. Symp. on the Pressuremeter and its Marine Applications, pp.324-338, 1986.
- 16) Ohta, H., Iizuka, A., Nishihara, A., Fukagawa, R. and Morita, Y.: Design strength derived from pressuremeter tests, Proc. of the 7th Int. Conf. on Computer Meth. and Adv. in Geomech., pp.273-278, 1991.
- 17) 森博, 丹下良樹: SBPプローブの長さが軟らかい粘性土の試験結果に与える影響, 第18回土質工学研究発表会, 昭和58年度発表講演集, pp. 107-110, 1983.

- 18) 菅原紀明, 米森博喜, 小池豊: プレッチャーメータによる過圧密地盤の変形係数の評価, 応用地質年報, No. 13, pp. 97-116, 1991.
- 19) Ohta,H.,Nishihara,A.,Iizuka,A.,Morita.M.,Fukagawa,F.andArai,K: Unconfined compression strength of soft aged clays, Proc. 12th Int.Conf. Soil Mech. & Foundation Engrg, Rio de Janeiro, Vol.1, 71-74, 1989.

(1997. 4. 21 受付)

## EVALUATION OF SBP TEST RESULTS IN NORMALLY-CONSOLIDATED CLAY GROUND

Kiichiro HATA, Ryoichi FUKAGAWA, Tatsuro MURO and Hiroyuki TANAKA

The pressuremeter is mainly classified into pre-boring type pressuremeter (PBP) and self-boring type pressuremeter (SBP) according to the boring methods. The SBP is one of the most reliable in-situ shear test method which can minimize the effect of bore hole wall disturbance and stress release. In this paper, some practical problems of SBP tests, such as the effect of excess pore water pressure generated at the boring process, were evaluated based on a series of SBP tests in a normally-consolidated clay ground, and the lateral earth pressure at rest and the shear moduli obtained from SBP were compared with those of some other in-situ and laboratory test methods including PBP, dilatometer, unconfined compression tests etc.