

原位置摩擦試験による 地盤の強度・変形定数の推定と実務への適用

徐 光黎¹・前田 良刀²・落合 英俊³・安福 規之⁴・坂手 道明⁵

¹正会員 工博 九州共立大学助手 工学部 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

²正会員 工博 九州共立大学教授 工学部 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

³正会員 工博 九州大学教授 工学部 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁴正会員 工博 九州大学助教授 工学部 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁵正会員 工修 広島工業大学 (〒731-5143 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

ボーリング孔を縦方向に利用して、原位置での摩擦強度を推定する試験装置である SBIFT (Self Boring In-situ Friction Test) を開発してきた。この SBIFT では、杭などの軸方向摩擦力、せん断地盤反力係数及び変形係数などを推定することを主眼としている。本文では、SBIFT 装置の概要を示し、試験から得られたデータの地盤力学的な特徴を理論的に検討した。また、室内での大型三軸土槽を利用して、力学特性の明確な砂地盤を用いた条件下で SBIFT 装置による室内摩擦試験を行い、得られたデータを模型杭載荷試験結果と比較した。さらに、これまでに得られた原位置での SBIFT データと三軸圧縮試験などの試験結果を比較し、本試験法の実務への適用性について検討した。

Key Words: *Self Boring In-situ Friction Test (SBIFT), shear strength, coefficient of subgrade shear reaction, deformation moduli, in situ horizontal stress*

1. はじめに

地盤工学において地盤の強度・変形定数をいかに評価し、実務へ適用するかは最も重要な課題である。地盤定数を求める方法として、現在いくつかの室内要素試験及び原位置試験がある。

代表的な室内力学試験として直接せん断型の一面せん断試験、間接せん断型の一軸・三軸圧縮試験などの試験がある。室内試験は排水条件、ひずみ条件、拘束応力条件などの制御が可能で、高い試験精度と再現性が確保できるものである¹⁾。しかし、室内要素試験の結果を直接実務に反映できない場合も多い。杭の周面摩擦力などを代表とする構造物基礎の地盤の強度・変形定数の決定はいわゆる境界値問題である。地盤と構造物の接触面における応力、ひずみ、排水などの境界条件により発現される地盤定数が変化するからである。

一方、原位置試験には標準貫入試験、コーン貫入試験、ベーンせん断試験、孔内水平載荷試験などの試験がある¹⁾。原位置試験は、原位置での地盤の力学特性を直接測定できる利点があるが、土要素の応力、ひずみ、間隙水圧などが一様でなく、その試験により地盤のどの特性が求められるか、力学的な条件がはっきりしないケースもある^{2)~5)}。特に、現在実務に多用されている標準貫入試験の N 値を用いた種々の地盤定数推定は多くの構造物の載荷試験から逆算された経験値としての性格をもつが、この N 値をもとに地盤力学的挙動を詳細

に評価するには限界がある⁶⁾。

以上のように、室内試験及び原位置試験にもそれぞれ得失があり、その結果を実務に適用するには多くの技術的課題があるといえる。

ところで、最近の阪神淡路大震災などの経験から基礎の挙動を大変形領域まで合理的に評価し、しかも経済的な構造物を建設する重要性が認識されてきている。このため、地盤の支持力や変形問題などを精度良く推定し、実務へ適用することが重要である。

このような背景を踏まえて著者らはボーリング孔を縦方向に利用して、原位置での摩擦強度を直接推定する試験装置である SBIFT (Self Boring In-situ Friction Test) を開発してきた^{7)~11)}。ここでは、既往の原位置試験の欠点をできる限り減少することを試みた。応力解放問題を解決するために、セルフボーリング型ビットを用いて削孔することを工夫した。また、排水条件を知るために、間隙水圧計も測定管測定管に付けてある。この SBIFT は、杭などの軸方向摩擦力を測定するのが第一の目的であるが、装置表面粗度を変化させれば地盤の強度定数の評価も可能であり、さらに試験法の特徴から地盤の変形係数も求めることができると考えられる。

本文では、SBIFT 装置の概要を示し、この試験法から得られるデータの力学的特徴とそのメカニズムを検討する。そして、大型三軸土槽を用いた室内実験により、これらを検証し、さらにこれまでに原位置で得られたいくつかの SBIFT 測定データと実杭の支持力実験及び不攪乱

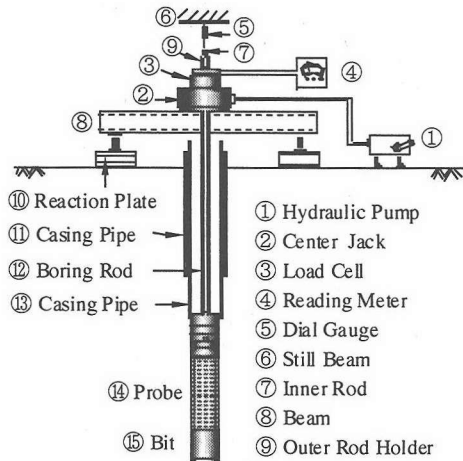


Fig.1 SBIFT device

試料を用いた三軸圧縮試験での強度特性などを比較し、本試験の意義と実務への適用性について検討する。

2. SBIFT 試験装置の概要 (7-11)

Fig.1 は SBIFT 装置概要図である。この装置は a) 自己掘進システム、b) 測定管システム、c) 荷重加圧システム及び d) 計測システムから成り立っている。

試験地盤の乱れの影響を小さくするために、セルフボーリング方式で測定管を挿入する。さらに、地盤に応じて適切なビット、シューを選択する。ボーリング径は試験位置直前の深さまで、径 116mm で掘削したのち、試験区間ではセルフボーリング方式(径 100mm)に切替える。

Fig.2 に測定管の概要図を示す。測定管は多孔円筒、ゴムスリーブ及び荷重表面板から成り立っている。その最小径は 99mm である。測定管は地上から注入された高水圧によりゴムスリーブが膨張し、その垂直応力を地盤に伝える。また、先端にせん断型ロードセル、間隙水圧計も取り付けられている。

なお、実際の基礎躯体の表面の粗滑の程度は使用材料や施工方法により異なるため^{12)~14)}、この SBIFT では地盤との接触面の粗度が変化できるように工夫している。現在までに、タイプ I とタイプ II 種類の測定管表面形状で検討してきた (Fig.3)。タイプ I は表面がスムーズな形状で鋼管杭のような境界条件に対応する。タイプ II は十分な凹凸を設けてある。この場合得られる強度は地盤のせん断強度に近くなると考えられる。なお、本文で検討する原位置測定データは、タイプ II の表面形状で測定されている。

Fig.4 は荷重システムの概念図である。SBIFT 試験の荷重荷重は、垂直応力 q_{vi} を多段階で荷重し、その値を保持したまま壁面平行応力 q_{Hi} を変位制御方式で荷重し、各 q_{vi} に対する q_{Hi} のピーク値が確認された後、新た

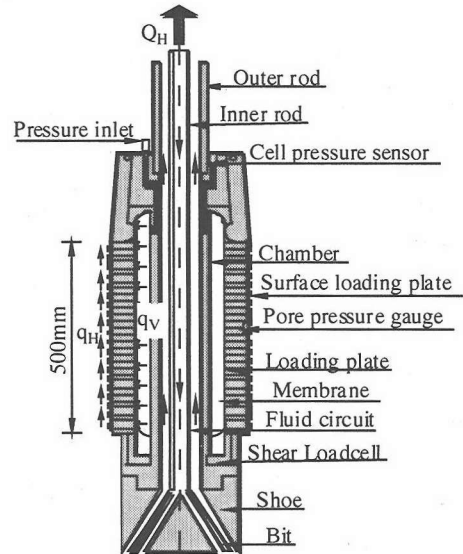


Fig.2 Probe of SBIFT

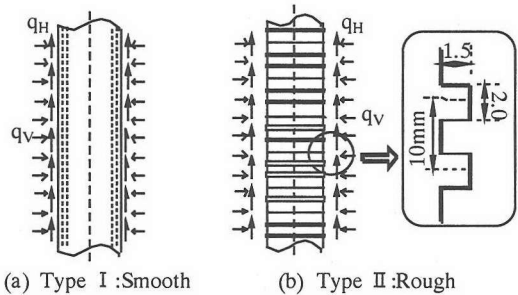


Fig.3 Shapes of surface loading plate

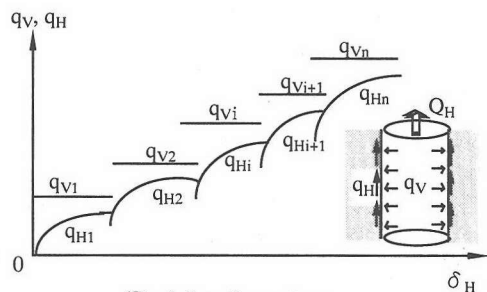


Fig.4 Loading pattern

な q_{vi+1} と q_{Hi+1} に移行する方法である。これにより垂直応力 q_{vi} と平行応力 q_{Hi} の関係が得られることになる。

Table 1 に本文で検討した SBIFT 装置の仕様を示す。

3. SBIFT データの地盤力学的な特徴検討

前述したように、原位置試験での地盤と試験装置との境界条件は複雑であり、地盤内の応力やひずみは一樣

Table 1 Specifications of SBIFT

寸法	荷重能力
測定管長さ $L=500\text{mm}$	最大垂直応力 $q_{v\text{max}}=1.5\text{MPa}$
測定管直径 $D=100\text{mm}$	最大せん断応力 $q_{H\text{max}}=0.65\text{MPa}$
測定管面積 $A=1570.8\text{cm}^2$	各段階の最大せん断変位
プレボ-リング径 $\phi=116\text{mm}$	$\delta_{Hi\text{max}}=20\text{mm}$
セルフボ-リング径 $\phi=100\text{mm}$	最大測定深さ $Z_{\text{max}}=50\text{m}$

でない。このため、SBIFT から得られるデータが地盤力学の面で何を測定しているのか、また、どのような特徴があるのかを検討しておくことは非常に重要である。SBIFT で生じる破壊メカニズムは、孔壁面に与える垂直荷重の大きさとせん断力の組合せに大きく依存すると考えられる。

(1) 摩擦強度定数 c, δ の評価

荷重システム上、SBIFT は孔内で応力を載荷するため、力学的に軸対称円筒モデルと見とすることができる^{7), 15), 16)}。Fig.5 は軸対称円筒モデルの力学状態を示したものである。応力の平衡式は次式で示される。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\alpha}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} = \gamma$$

ここで、主応力 σ_1, σ_3 が r, z 面内にあるとすると σ_r は中間主応力である。この応力平衡式は破壊条件式を用いて、塑性状態での拡張された軸対称下での Kötter 方程式として、差分的にすべり線の形状と塑性応力を求めることができる¹⁵⁾。

なお、Fig.5 で z 方向の物体力 ($\gamma = 0$) が無視出来る場合に、 $\theta = 0, \beta = 0$ とすると、Fig.6 に示す二次元問題となる。このとき、法線方向応力 σ_r は最大主応力 σ_1 となり、接線方向応力 σ_α は最小主応力 σ_3 となり、次式が成立する^{2), 8), 15)}。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\alpha}{r} = 0 \quad (2)$$

式(2)により、孔内水平載荷試験を利用して孔壁面での限界支持力を求める方法を太田ら²⁾が提案している。

一方、Fig.5 において、 $\alpha = 0$ として、 z, r 軸上の平面応力状態のみを考えると、Fig.7 の破壊メカニズムが考えられ、一般の傾斜荷重下の支持力問題となる。この時 z 方向への物体力を無視すると ($\gamma = 0$)、二次元状態を前提に一般の傾斜荷重下の支持力問題が Kötter 式で解析できる。これは式(1)で、 $r \rightarrow \infty$ の時に相当する^{8), 15), 16)}。この仮定は二次元問題となるため、三次元の軸対称の問

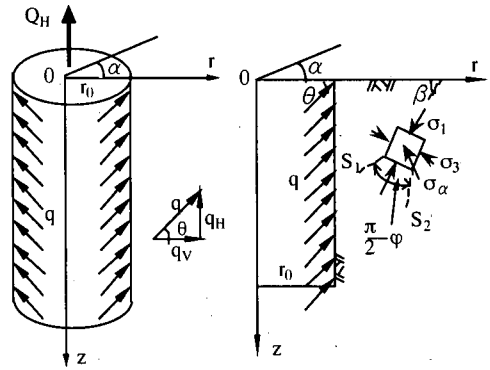


Fig.5 Stress state of axial symmetry cylinder model

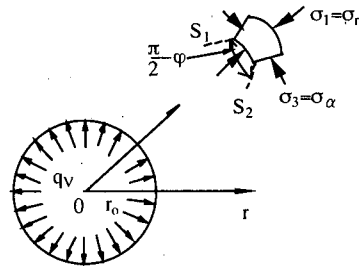


Fig.6 Stress state in 2-dimension

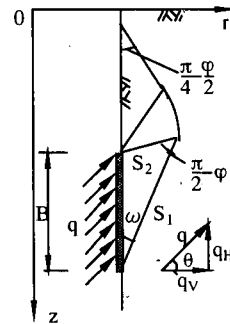


Fig.7 Bearing capacity problem in r-z plane

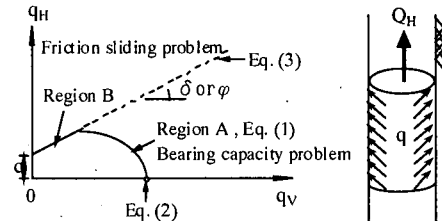


Fig.8 Bearing capacity problems under combined loads

題と異なるが、二次元下の一般の傾斜荷重下の支持力問題を検討し、垂直応力 q_v と平行応力 q_H の関係からすべり形状を検討し、SBIFT から得られるデータの地盤力学的に考察する意義がある。

Fig.8 は傾斜荷重下支持力理論から得られる支持力

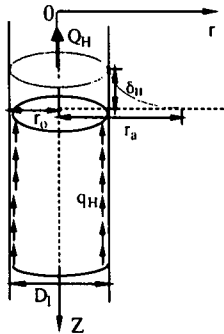


Fig.9 Displacement due to stress q_H

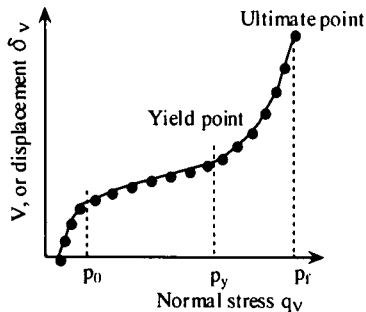


Fig.10 Inleted water volume V and normal stress q_v

の特性の概念を示したものである。A 区間では式(1)の数値解として、その支持力が得られる。ただし、 $\theta = 0$ のときは、式(2)となり孔内水平載荷試験と同じ力学モデルが成立する。また、B 区間では境界面での摩擦角(φ / δ)が得られる。このとき、作用している垂直応力 q_v (一般には水平土圧)が分かれば摩擦抵抗が推定できる。この時、式(3)が成立し、境界面での摩擦強度定数 c, δ あるいは地盤の強度 c, φ が求められる⁹⁾。

$$\tan \varphi (or \delta) = \frac{q_H}{c \cot \varphi (or, \delta) + q_v} = \text{const.} \quad (3)$$

(2) せん断地盤反力係数 C_s の評価

杭基礎や地中連続壁基礎などの深い基礎で周面摩擦力の発現過程を検討する場合、基礎体と地盤の間のせん断地盤反力 C_s を設定する必要がある¹⁷⁾。

ここでは、SBIFT を利用したせん断地盤反力係数の推定法を検討する。

SBIFT 装置境界でのせん断応力 q_H と変位 δ_H との模式的関係を Fig.9 に示す。地盤が弾性体で、その物体力が無視できる ($\gamma = 0$) とすると、変位と応力の平衡方程式は、次式で示される。

$$\frac{\partial^2 \delta_H}{\partial r^2} + \frac{\partial \delta_H}{r \partial r} = 0 \quad (4)$$

せん断地盤反力係数 C_s は次式で求まる^{9), 18)}。

$$C_s = \frac{q_H}{\delta_H (r=r_0)} = \frac{G}{r_0} \frac{1}{\ln \frac{r_a}{r_0}} = \frac{1}{r_0} \alpha G \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\ln \lambda}, \lambda = \frac{r_a}{r_0} \quad (6)$$

ここで、 G は地盤のせん断弾性係数であり、 r_0 は変位が無視できる半径、 r_0 は孔内の半径である。

式(5)によれば、せん断地盤反力係数 C_s が地盤のせん断弾性係数 G 及びボーリングの半径 r_0 と変位が無視できる半径 r_a の比 λ に関係することがわかる。地盤体を弾性体と仮定すると、 λ が 15 以降になると、係数 α はあまり変わらない結果が得られている^{9), 18)}。

以上から C_s は地盤が弾性体の場合、孔内半径に反比例して小さくなる、いわゆる寸法効果が存在することになる。応力、ひずみ関係に非線形性を生じる一般の地盤においては、このような特性を厳密には適用できないが、データの集積によって実用的な寸法効果を弾性論を基本として評価できる可能性がある。ここでは、SBIFT によるせん断地盤反力係数を実荷試験の結果と比較するため、道路橋基礎の地盤反力係数の寸法効果の評価法を準用して、実用的な見地から次式を定義する²¹⁾。

$$C_{SP} = \eta C_{SI} \left(\frac{D_p}{D_i} \right)^{-n} \quad (7)$$

ここで、 C_{SP} : 対象とする杭のせん断地盤反力係数、 C_{SI} : SBIFT で得られるせん断地盤反力係数、 η : 地盤や基礎の施工法の違いに起因する補正係数、 D_p : 対象とする杭の孔径、 D_i : SBIFT 孔径、 n : 寸法効果の係数である。

(3) 変形係数 E の評価

地盤の変形係数 (E) は、地盤・構造物の変形・安定性の解析に必要となる。変形係数 (E) を求める代表的な方法として、以下の4つの方法がある²²⁾: a) 直径 30cm の剛体円板による平板載荷試験; b) 孔内水平載荷試験; c) 供試体の一軸または三軸圧縮試験; 及び d) 標準貫入試験。道路橋示方書では変形係数を換算係数で補正しているのが現状である。

本文では、SBIFT 試験から変形係数 (E) を推定する可能性を示す。

孔壁に垂直応力のみを載荷する場合に、変形係数は Fig.10 に示す垂直応力 q_v ~ 垂直変位 δ_v 曲線の勾配から求めることができる。即ち、弾性論から孔内における圧力 q_v と孔半径 r_0 の変化との間に次式の関係が成立する^{11), 17), 23)}。

$$E = 2(1+\nu)(\nu_0 + \nu_m) \frac{dq_v}{d\nu} \quad (8)$$

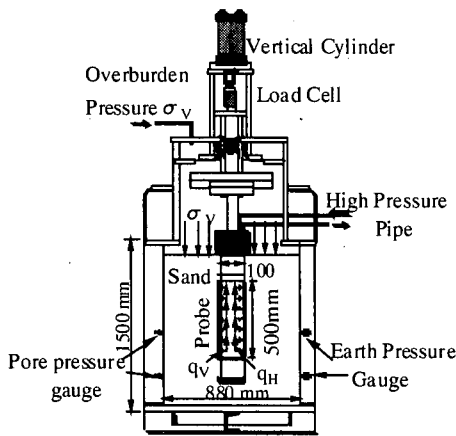


Fig.11 Sketch of triaxial chamber with SBIFT

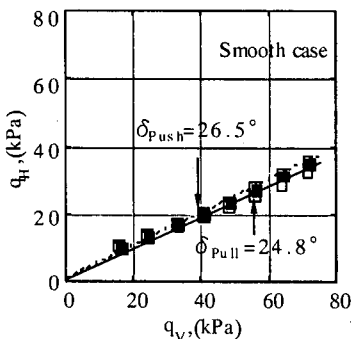


Fig.12 Friction resistance measured in SBIFT

ここで、 ν :ポアソン比; dq_v :圧力～変位量曲線の直線部分における圧力増分(kPa); $\frac{dq_v}{dv}$:圧力～体積変化量曲線の直線区間の勾配 (kPa/cm³)である; v_0 :SBIFT測定管セルの初期体積あるいは無加圧時の体積(cm³); v_m : $\frac{dq_v}{dv}$ 算定区間の中間に対応する注水量 (cm³).

上記の式(8)から地盤の変形係数(弾性係数)を求めることができる。SBIFT試験から変形係数 E を推定する手法は孔内水平載荷試験方法(地盤工学会基準 JGS1421-1995)と同一である。

変形係数 E の算定に際してはポアソン比 ν を仮定する必要がある。非排水条件下のせん断である場合、通常の粘性土では $\nu = 0.5$ と仮定できる。それ以外の土では、厳密に決定することは困難であるから、通常 $\nu = 0.3$ 程度と仮定して変形係数の算定が行われる²³⁾。

(4) 静止土圧 p_0 の評価

杭などの周面摩擦力を推定する際には、静止土圧 p_0 を求める必要があるが、その決定は地盤工学において最も困難な課題の1つである²³⁾。

SBIFT試験装置では、前述のように孔壁を乱さないようにセルフボーリング方式で削孔することとしているから、原位置応力の解放が少ないことが特徴である。静止土圧 p_0 を推定する時、SBIFT試験の第一段階垂直応力 q_v の載荷における応力～変形に着目すればよい。推定手法は現行の孔内水平載荷試験と同様である。

4. SBIFTの室内検証実験結果

SBIFTの原位置試験法としての実務への適用性については、地盤の力学性状を明確にした条件下で確認しておく必要がある。このため、大型三軸土槽を製作し、これを利用して、SBIFT装置による室内摩擦力試験を行なった。また、杭の支持力試験と比較するために、別に実施された室内モデル杭の支持力試験も行った。

(1) 試験概要

地盤材料として福岡県岡垣町産の岡垣砂を使用した。岡垣砂の物理的及び力学的性質は豊浦砂とよく一致している。気乾状態の岡垣砂を用い、専用の砂撒き装置により空中落下方式で乾燥密度 $\rho_d = 1.46(\text{g/cm}^3)$ 程度の均一な地盤が作製できた。一方、三軸圧縮試験から内部摩擦角 $\phi = 38^\circ$ が得られた¹⁰⁾。

製作した大型三軸土槽の概要を Fig.11 に示す^{10), 24)}。大型三軸土槽は、円柱土槽であり土槽内の壁面に作用する静止土圧、間隙圧が測定できるとともに、土被り圧に相当する上載空気圧 σ_v を種々載荷できる構造となっている。空気室の境界面に変形随従できるゴムメンブレンが設置しており、空気圧 σ_v を土槽の地盤に伝える。それを利用し上載圧を加えると、地盤の深さ及び応力履歴に及ぼす影響を調べることができる。

原位置での SBIFT 装置をそのまま大型三軸土槽に設置して、室内摩擦試験を行った。しかし、測定管を事前に設定し、地盤を空中落下方式で作製するため、セルフボーリング方式とはなっていない。

また、杭の支持力試験と比較するために、同じ地盤で別に実施された室内モデル杭の支持力試験も行った。モデル杭は、アルミ製で、径 $\phi = 100\text{mm}$ 、根入れ長さ $L = 600\text{mm}$ で比較的大型である。モデル杭の設置方法は SBIFT 測定管の設置方法と同じである。なお、杭の支持力試験は上載圧 $\sigma_v = 49\text{kPa}$ で一定とした²⁴⁾。

(2) 実験結果とその考察

Fig.12 は上方引き抜き後、下方押し込んだ載荷試験の結果の例である。両方とも発揮された抵抗力はほぼ同じとなる。前述したように、地盤自重が無視できる場合、上方へ引き上げる方式と下方へ押し下げる方式ではその支持力に差を生じない¹⁰⁾。

Fig.13 は、Fig.3 に示した表面形状の違いが q_{vi} と q_{Hi} の関係に及ぼす影響を示したものである。得られた

Table 2 A list of SBIFT tests

場所	対象地盤	試験の種類			
		SBIFT	杭の載荷試験	室内三軸試験	他の試験
鹿児島国分市	二次堆積 しらす	4.5m, 9.5m, 18.5m, 26.5m, 33.7m, 37.4m, 44.5m	場所打杭 $D_p=1.2m, L=41.0m$	CD, CU	SPT, 孔内載荷試験, CPT
愛知第二東海大府	河成, 湖成堆積 シルト, 砂質土	2.5m, 6.5m, 10.5m, 13.5m, 16.5m, 21.5m, 25.5m	場所打杭 $A_p=1.2 \times 2.4m, L=26.7m$	CD, UU	SPT
愛知第二名神飛島	海成, 沖積 砂質土, 粘土	6.5m, 20.0m	鋼管ソイルセメント杭 $D_p=1.2m, L=41.0m$	UU	SPT, 一軸試験
佐賀鳥栖 JCT	沖積砂質土	6.5m, 8.5m, 13.5m, 14.5m, 26.5m, 28.5m, 33.5m	場所打杭 $D_p=0.8m, L=24.5m$	CD	SPT
南京都京滋バイパス	沖積, 洪積 シルト, 砂礫	5.5m, 7.5m	場所打杭 $D_p=1.2m, L=13.4m$	UU	SPT

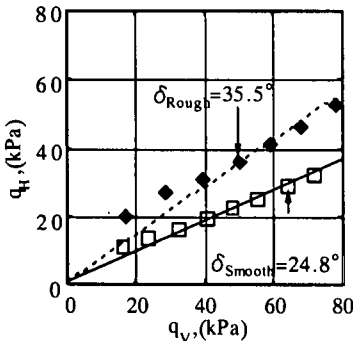


Fig.13 Friction strength due to superficial shapes

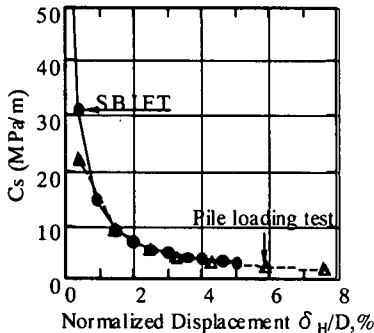


Fig.14 C_s in SBIFT and pile loading test

摩擦強度は測定管表面形状の粗滑によって違うものの、いずれにおいても、垂直応力 q_v と平行応力 q_{hi} の関係が一定である。今回、用いた滑、粗表面形状における摩擦角度 δ を原点から評価するとそれぞれ約 25° と 36° であった。この地盤の内部摩擦角は最大で $\varphi_{max}=38^\circ$ 、限界状態に対応する $\varphi_{cv}=36^\circ$ が得られているが¹⁰⁾、このことは本試験のような多段階方式の摩擦試験では、試験の後半部では限界状態に対応する摩擦角に近くなることがわかる。また、滑な表面形状の場合の

境界面摩擦強度と地盤の強度の関係は一般に示されている $\delta \approx (2/3)\varphi$ の関係²²⁾を有することがわかった。したがって、表面の粗滑の程度を種々の杭材に一致させれば、杭の周面摩擦強度が測定でき、十分に粗とすれば地盤の内部摩擦強度に近づくと、摩擦角は多段階の影響により、 φ_{max} と φ_{cv} の間の値となるものと考えられる。

SBIFT とモデル杭の試験結果から求めたせん断地盤反力係数と杭径で正規化した変位との関係の例を Fig.14 に示す。この図より、SBIFT から得られたデータはモデル杭の結果とよく一致しており、SBIFT で得られるせん断地盤反力係数は杭の周面摩擦力度の発現過程を説明できることがわかる¹⁰⁾。

5. 原位置での測定例とその考察

SBIFT の実務への適用性を検討するため、いくつかの原位置試験を行なった。これまでに実施した試験の一覧を Table 2 に示す。SBIFT の他に、杭載荷試験や不攪乱試験料を用いた室内試験も併せて行っている。以下では、それらの中から代表的な事項について述べる。

(1) 摩擦強度定数 c 、 δ の測定例

Fig.15 は九州自動車道・鳥栖 JCT ランプ橋の沖積砂質土盤において測定した例である。当地盤では、試験時に間隙水圧がほとんど発生しなかった。すなわち、試験は排水状態で行われたと考えられ、全応力は有効応力と等しい。整理された結果を Fig.16 に示す。垂直応力 q_v とせん断応力 q_H の関係が一次比例の関係であり、SBIFT 装置と地盤の接触面ですべりが生じているものといえる。このような摩擦強度特性としては鹿児島県国分市内の二次堆積しらす地盤⁹⁾及び室内摩擦試験¹⁰⁾においても同様な結果が得られている。

第二名神高速道路飛鳥西ランプ橋基礎の飽和粘性土土盤 (GL-20.0m) においては SBIFT 測定したデータで

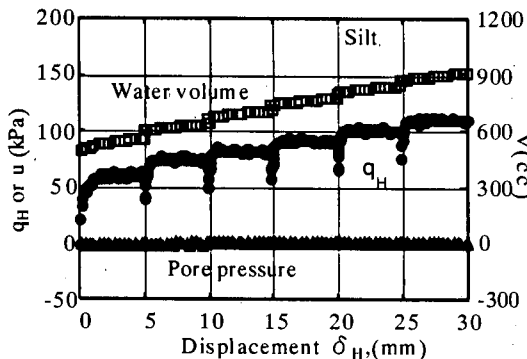


Fig.15 An example data measured by SBIFT at Tosu JCT site(GL-8.5m)

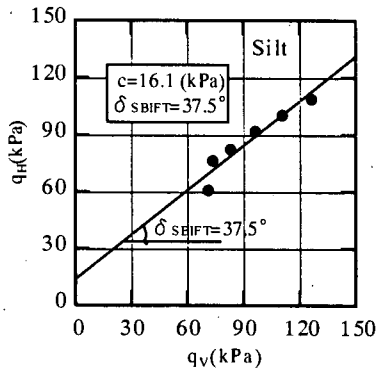


Fig.16 An example of Shear strength at Tosu JCT site(GL-8.5m)

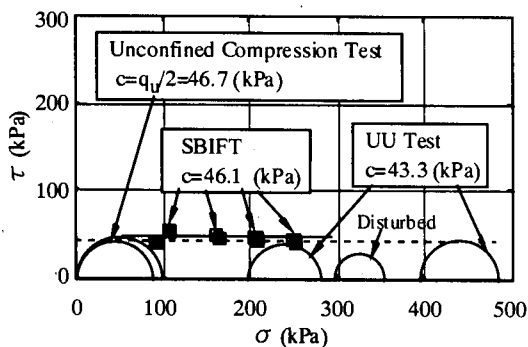


Fig.17 An example of strength of clay at Tobishimanishi Lamp site (GL-20.0m)

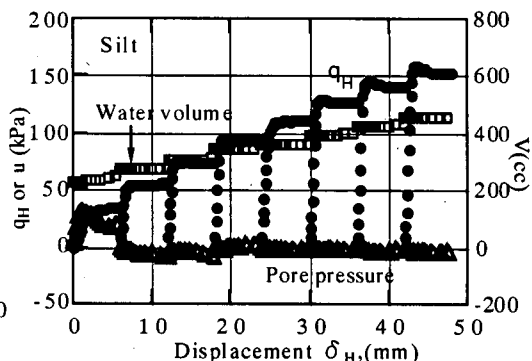


Fig.18 An example data measured in SBIFT at Tokaidaiifu viaduct site(GL-13.5m)

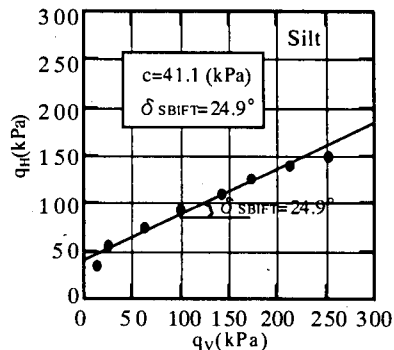


Fig.19 An example of Shear strength at Tokaidaiifu viaduct site(GL-13.5m)

は、間隙水圧の上昇がみられた。全応力で整理した摩擦強度を Fig.17 に示している。飽和粘性土地盤では、非排水状態で試験されることになるため、 $\varphi_u = 0$ となり、粘着力成分 c_u のみが測定されることがわかる。また、図中には不攪乱試料を用いた室内一軸圧縮試験及び三軸 UU 圧縮試験を行った結果も図に併せて示している。各試験から得られた強度はほぼ等しいことがわかる。

ところで、シルトなどの中間的な地盤では、透水性が砂質土と粘性土の間にあるため、摩擦強度に対して間隙水圧の評価が重要である。Fig.18 は第二東海自動車道・横浜東海線東海大府高架橋基礎の河成～湖成堆積シルト地盤の測定例である。SBIFT での間隙水圧は最初荷重段階のみ測定されたが、後続段階の荷重では間隙水圧を測定できなかった。このため、正確な間隙水圧の評価ができなかったことから Fig.19 に示す摩擦強度は全応力表示のみとしている。間隙水圧の問題は砂と粘土の中間的な地盤の摩擦強度の解釈に大きな意味を持つため、今後より正確な間隙水圧の測定方法を検討していくことが大切である。

第二東海自動車道・横浜東海線東海大府高架橋基礎の河成～湖成堆積において SBIFT 試験及び室内試験から推定した周面摩擦力と場所打杭載荷試験結果との比較を Fig.20 に示している。図より、SBIFT 試験により推定した摩擦強度は実物杭載荷試験結果⁹⁾とよく一致することがわかる。

(2) せん断地盤反力係数 C_s の測定例

Fig.21 は東海大府高架橋の基礎において場所打杭載荷試験と SBIFT のせん断地盤反力係数 C_s を正規化して比較した例である。SBIFT による C_s は杭の載荷試験結果及び既往の例⁹⁾と同様の傾向で、ひずみ及びボーリング孔径に依存する寸法効果が存在する。

ここで、式(7)を用い、ある地盤に対する SBIFT の結果から、実杭のせん断地盤反力係数 C_s を推定することを検討する。

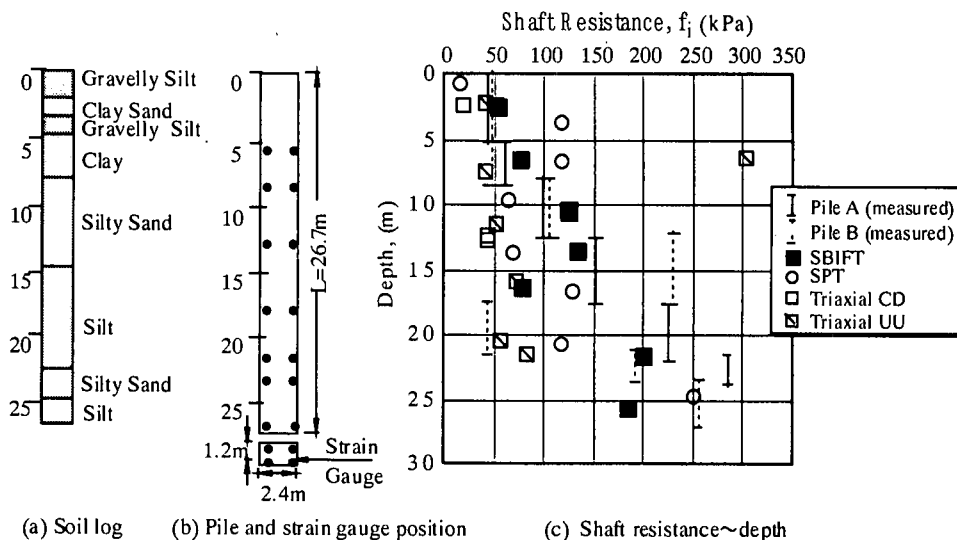


Fig.20 Comparison of shaft resistance estimated by different tests at Tokaidaiifu viaduct site

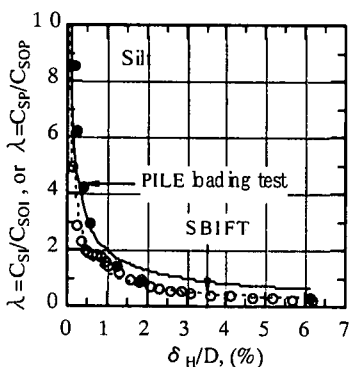


Fig.21 An example of C_s interpreted at Tokaidaiifu viaduct site (GL-16.5m)

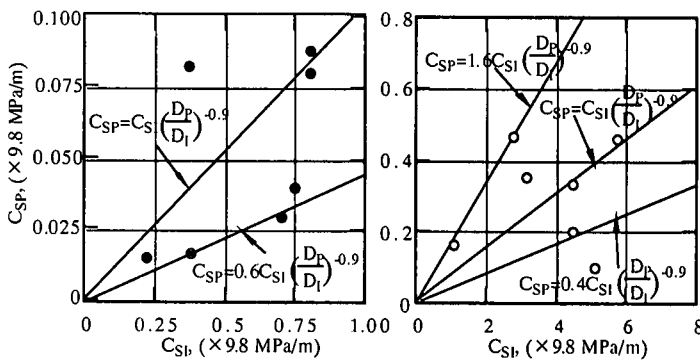


Fig.22 C_s interpreted in pile loading test and SBIFT

これまで得られた (C_{SP}/C_{SI}) と (D_P/D_I) の関係はひずみレベルにかかわらず寸法効果の係数 $n=-1.0\sim-0.50$ の領域にあり、平均値としてせん断地盤反力係数の寸法効果は $n=-0.9$ 程度である²¹⁾。

Fig.22 は SBIFT の孔径及び実杭の杭径で正規化した変位量 $\delta/D=2.0\%$ に着目した SBIFT のせん断地盤反力係数 C_{SI} と杭載荷試験の C_{SP} の関係である。●は鹿児島県国分市の二次堆積しらす地盤のデータで、○は東海大府高架橋河成～湖成堆積シルト質粘土、シルト地盤のデータである。式(7)より、寸法効果の係数 $n=-0.9$ を用いて、二次堆積しらす地盤においては次の結果が得られる。

$$C_{SP} \cong (0.6 \sim 1.0) C_{SI} (D_P/D_I)^{-0.9} \quad (9-1)$$

また、河成～湖成堆積シルト質粘土、シルト地盤においては、次の結果となる²¹⁾。

$$C_{SP} \cong (0.4 \sim 1.6) C_{SI} (D_P/D_I)^{-0.9} \quad (9-2)$$

これから、地盤や基礎の施工法の違いによる補正係数はかなり広い領域にバラツクことがわかる。本文では、式(7)のような評価法を示しているが、余り精度の良いものとはなっておらず、今後、多くのデータを集積してより合理的な評価法を検討する必要がある。

(3) 変形係数 E の測定例

Fig.23 は第二名神高速道路飛島西ランプ橋基礎の沖積砂質土(GL-6.5m)において SBIFT から得られた応力と体積変化の関係である。算定した変形係数 E は各載荷段階に対して、4.3, 8.6, 11.6, 9.7 及び 10.3MPa であった。すなわち、初期載荷段階に対する E は 4.3MPa で、後続載荷段階に対する値はほぼ同じ、平均で 10.0MPa であった。両者の比は約 1:2 であった¹¹⁾。この関係は、他の試験結果による処女荷重に対して求めた値と繰返し曲線から求めた値の比 1:2 と同程度である²⁶⁾。

Table 3 は変形係数の試験法に対する比較例である。当工事現場の沖積粘性土層(GL-20.0m)において SBIFT

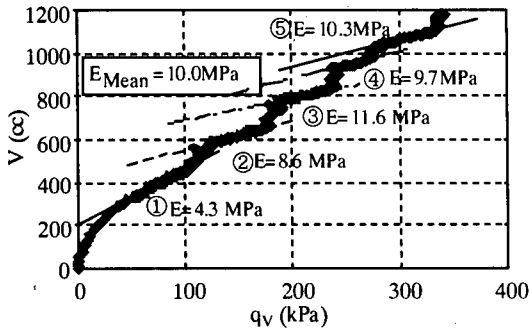


Fig.23 Curve of $V \sim q_v$ and deformation moduli, E at Tobishimanishi Lamp site (Sandy soil, GL=-6.5m)

Table 3 An example of E_0 estimated by different tests

試験法	換算係数 α	E_0 (MPa)
SBIFT	1	10.3
標準貫入試験	4 ($E = 7N$)	11.2
一軸圧縮試験	4	12.3
三軸圧縮試験	4	11.0

から算定した変形係数の平均値は 10.3MPa であった。また、一軸、三軸圧縮試験及び N 値から算出した変形係数はそれぞれ 3.1, 3.0 と 11.2MPa である。

一方、道路橋示方書の方法²³⁾により、設計変形係数 E_0 を求めた結果は Table 3 の通りとなる。

SBIFT 試験から推定した変形係数は他の方法から推定した結果と比べ大きな値となっていることがわかる。ただし、換算係数については、データを蓄積して、検討していく必要がある。以上から、SBIFT により変形係数を推定し実務へ適用可能性がある。

(4) 静止土圧 p_0 の測定例

Fig.24 は第二名神高速道路飛鳥西ランプ橋基礎の沖積砂質土 (GL=-6.5m) において推定した静止土圧 p_0 を示している。静止土圧係数 K_0 に換算すると、約 0.6 程度である。ただし、この静止土圧の決定方法には多くの課題がある。一般に明確な折れ点を特定できず、静止土圧を簡単に決定できない。このため原位置で正確に静止土圧を決定する方法はまだ確立していない。この問題の一解決法として、孔内応力と変位の関係を差分的に解き静止土圧を求めようとする森田²⁷⁾の提案があり、これにより合理的な結果が得られる可能性がある。

6. おわりに

本文では、著者らが開発した SBIFT (Self Boring In-situ Friction Test) の力学的な特性と実務への適用性について検討した。その結果をまとめると以下の通りである。

(1) SBIFT 試験では既存の原位置試験法の欠点をでき

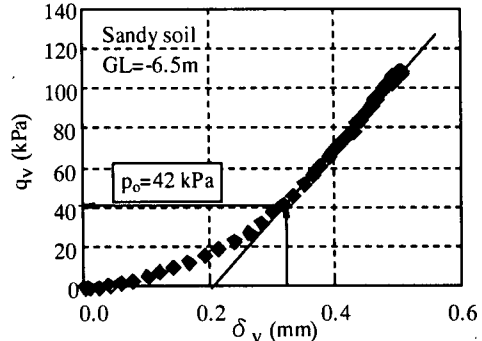


Fig.24 An example of earth pressure at rest at Tobishimanishi Lamp site

る限り解消する工夫をしている。応力解放問題を解決するために、セルフボリング型ビットを用い、排水条件を知るために間隙水圧計も設置している。ただし、間隙水圧の測定は地盤の力学特性の解釈上非常に重要であり、今後、間隙水圧計の設定場所や測定メカニズムを工夫していく必要がある。なお、多段階で載荷する本方法を採用することにより、一試験により測定される地盤のデータは多くなり、他の既存の試験方法に比べるとデータの信頼性が高いといえる。

- (2) 室内及び原位置で測定した結果では、垂直応力 q_v とせん断応力 q_H は一次比例の関係にあり、測定管と地盤の接触面での直接せん断強度を表わすものと考えてよい。ただし、接触面でのせん断強度は表面形状の粗滑によって変化し、装置の表面が十分な粗であれば得られるデータは地盤のせん断強度に近く、本試験のシステムピーク時と限界状態時の中間の値となるものとする。
- (3) SBIFT 装置境界でのせん断応力 q_H と変位 δ_H との関係からせん断地盤反力係数、 C_S を推定することが可能である。得られた結果は実杭での載荷試験と同様の地盤反力の発現特性があることが確認された。また、せん断地盤反力係数はボーリング孔径や杭径に依存する寸法効果が存在し、今回は地盤を弾性体と仮定した場合にほぼ一致した。
- (4) 地盤の変形係数 E は、垂直応力 q_v ~ 垂直変位 δ_v 曲線の勾配から求めることができる。推定した変形係数は他の試験法の値と良好な相関性がある。これから、SBIFT 試験による変形係数 E を推定し、実務に適用することが可能性がある。
- (5) SBIFT 試験の第一段階垂直応力 q_v ~ 変形 δ_v を着目して、既往の方法と同様に静止土圧 p_0 を推定することが可能である。

謝辞：SBIFT 試験機の開発から原位置試験の実施に至るまで全般にわたり、日本道路公団技術部構造技術課、同九州支社構造技術課、同名古屋建設局名古屋工務事務所及び基礎地盤コンサルタント(株)の多くの方々に多大なるご指導、ご協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 太田秀樹:土の強さと地盤の破壊入門,3.3.4 原位置試験の解釈,土質工学会, pp.253-261, 1987.
- 2) 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.
- 3) Wroth, C. P.: The interpretation of in situ soil tests, *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.449-489, 1984.
- 4) 谷和夫,杉田信隆,西尾伸也,田中達吉:講座地盤材料の小ひずみでの非線形特性と地盤変形問題への適用,4.原位置試験法, 土と基礎,Vol.45, No.6, pp.61-66, 1997.
- 5) 谷和夫,園田玉紀,菅原紀明,鍛冶義和:講座「地盤材料の小ひずみでの非線形特性と地盤変形問題への適用,4.原位置試験法(その2)」,土と基礎, Vol.45, No.7, pp.59-64,土と基礎, 1997.
- 6) 森田悠紀雄: Q&A コーナー「強度定数 N 値による評価について」, 土と基礎,Vol.45, No.10, pp. 35-37, 1997.
- 7) 前田良刀,落合英俊,安福規之,坂田隆博,森田靖章:SBIFT から得られたデータの支持力理論的考察,九州共立大学研究報告,第21号, pp.95-101, 1997.
- 8) 徐光黎,前田良刀,落合英俊,安福規之, 森田悠紀雄:ポリング孔内での原位置摩擦試験による強度定数とその特徴, 第41回地盤工学シンポジウム, pp.79-84, 1997.
- 9) Maeda, Y., Xu, G. L., Ochiai, H., Sakata, T. and Uno, K.: Pile and the results measured in SBIFT, *Int. Conf. on Foundation Failures*, Singapore, pp.317-326, 1997.
- 10) Maeda, Y., Xu, G. L., Sakata, T., Ochiai, H., Yasufuku, N. and Sakate, M.: Laboratory studies of the S.B.I.F.T. test in sand, *Bulletin of Kyushu Kyoritzu Uni.*, No. 22, 1998, pp. 85-94, 1998.
- 11) Maeda, Y., Xu, X. L., Ochiai, H., Sakate, M., Sakata, T., Ogata and Uno K.: A New Self Boring In-situ Friction Testing Technique, *1st Int. Conf on Site Characteristics*, Atlanta, USA, pp.831-836, 1998.
- 12) Yoshimi, Y. and Kishida, T.: A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces, *Geotechnical Testing J.*, No.4, pp.145-152, 1981.
- 13) Kishida, H. and Uesugi, M.: Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus, *Geotechnique*, Vol.37, No. 1, pp.45-52, 1987.
- 14) 落合英俊,安福規之, 大嶺聖,大野司郎,三倉義教:粘土-鋼材間の摩擦特性試験の過圧密粘土への適用,九州大学工学集報,Vol. 70, No. 2, pp. 159-166, 1997.
- 15) 山口柏樹:三次元支持力論の展望,土木学会論文集,第394号/Ⅲ-9, pp.1-10, 1988.
- 16) 駒田敬一:二次元傾斜荷重に対する地盤支持力の計算図表,土木研究所報告,第135号, 1969.
- 17) Yoshida, I. and Yoshinaka, R.: A method to estimate modulus of horizontal subgrade reaction for a pile, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.6, pp.1-17, 1972.
- 18) 松原勝:線状土中構造物に対する地盤バネ定数について,ハザマ研究年報, pp.1-6, 1994.
- 19) Terzaghi, K.: Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, *Geotechnique*, Vol.5, No.5, pp.297-326, 1955.
- 20) 今井常雄:地盤の横方向 K 値の研究(4),-LLT 測定結果によるクイの横方向挙動の計算法,土と基礎, Vol.18, No.1, pp.11-16, 1996.
- 21) 徐光黎,前田良刀,落合英俊,安福規之:S.B.I.F.T.による摩擦面のせん断地盤反力係数について,第32回地盤研究発表会講演集, pp. 211-212,1997.
- 22) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説,Ⅳ下部構造編, pp.200-203, 1995.
- 23) (社)地盤工学会:地盤調査法,孔内水平載荷試験,pp. 249-257,1995.
- 24) 坂田隆博,前田良刀, 徐光黎,落合英俊,安福規之:傾斜荷重を受ける杭の支持力特性に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集,Vol. 44A, pp.1667-1674, 1998.
- 25) Hughes, J. M. O., Wroth, C. P. and Windle, D.: Pressuremeter tests in sand, *Geotechnique*, Vol.27, No.4, pp.455-477, 1977
- 26) 木村嘉富: Q&A コーナー「平板載荷試験値に相当する地盤反力係数について」,土と基礎,Vol.45, No.9, pp.36-37,1997.
- 27) 森田悠紀雄:差分法による孔内載荷試験の極限荷重推定法,第24回土質工学研究発表会, pp. 231-234, 1989.

(1998.4.13 受付)

DEVELOPMENT AND INTERPRETATION OF THE SELF BORING IN SITU FRICTION TEST

Guang-Li XU, Yoshito MAEDA, Hidetoshi OCHIAI
Noriyuki YASUFUKU and Michiaki SAKATE

A newly developed Self Boring In situ Friction Test (SBIFT), is presented. As a multi-purpose technique, it is aimed to evaluate soil / soil-structure strength, coefficient of subgrade shear reaction, deformation moduli and earth pressure at rest. Firstly, the device is introduced. Then theoretical background for interpretations required is discussed. Examination tests in the laboratory with the probe of SBIFT were conducted to investigate the technique's reliability. And, in situ SBIFT in various soils were conducted and compared with other tests' results. The conclusions are that the friction strength, subgrade shear reaction coefficient and deformation modulus can be interpreted, and the earth pressure at rest be possibly interpreted by SBIFT.