

7. 地盤調査法・原位置試験

た な か ひろ ゆき
田 中 洋 行

運輸省港湾技術研究所

1. はじめに

地盤調査は文字どおり地盤の状態を把握するための調査で、地盤工学において最も基本的なものである。地盤調査には、調査目的や対象とする地盤の種類によって、原位置試験を含めて多くの調査方法がある。しかし、誌面も限られており、また筆者もすべての地盤調査をカバーするほどの知識を有してはいない。したがって、ここで述べる内容は、主として沖積（Holocene）層の軟弱な地盤を対象とし、また調査目的も基礎の沈下・安定を検討するもの（圧密、せん断強さ、変形係数）に限定する。

2. 地域性

インターネットに代表されるように通信手段の発達によって、以前にも増して地球規模の情報交換が活発になっている。地盤工学の分野でも同様に、調査や施工で得られた情報の有効活用が図られている。しかし、ここで注意しなくてはならないことに、地盤の地域性がある。この地域性には、Hanzawa（半沢）¹⁾が述べているように、堆積環境によって地盤の特性が変わることと、地盤調査者の技術力が地域によって変わることである。

2.1 技術力の地域性

地盤調査、特に調査の基本となるボーリングとサンプリングは、我が国でも3Kの代表とされているように、ほかの国においても決して高学歴者の職業ではない。したがって、医療の検査技師などの高度に訓練された技術者とは違い、後で述べるようにサンプリングの品質もボーリングの従事者によって大きく異なる。地盤工学の分野でも試験方法が比較的統一されていると思われる土粒子の密度（ ρ_s ）においても、図-1に示すように、現地および日本の土質コンサルタントが行った結果は大きく異なる。

2.2 土質特性の地域性

室内試験を含めた地盤調査の従事者の技術力以上に、地盤の特性が地域によって異なる。この小特集号の企画がよい例であるが、地盤工学が学問として確立されたのは、たかだか50年前である。そして、地盤工学の確立に多大な貢献をしたのが、北欧や北米の諸国であり、これらの地域で得られた経験を基に地盤工学が発達したといっても過言ではない。地盤の工学的性質を塑性指数（ I_p ）などのアッターベルグ限界値と結びつけようとする試みが数多くなされており、その多くは上記の地域で

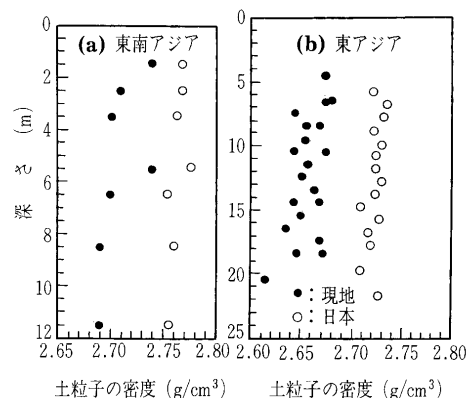


図-1 土粒子の密度の測定例

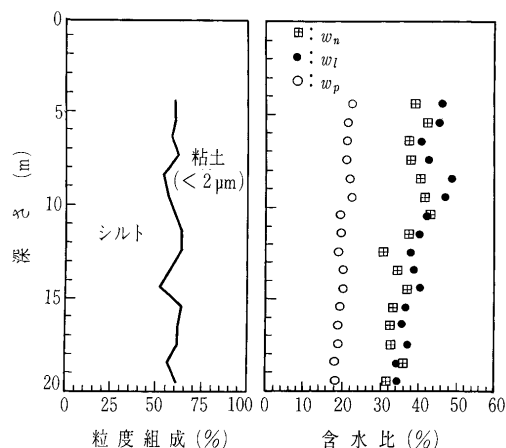
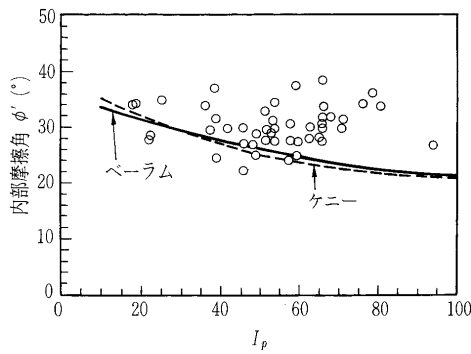
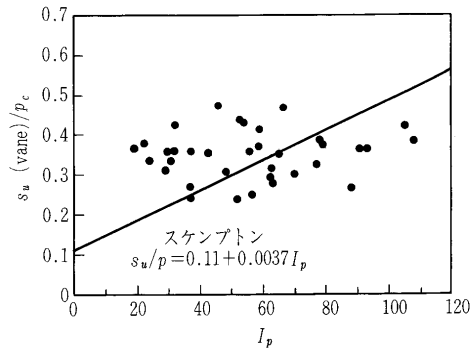
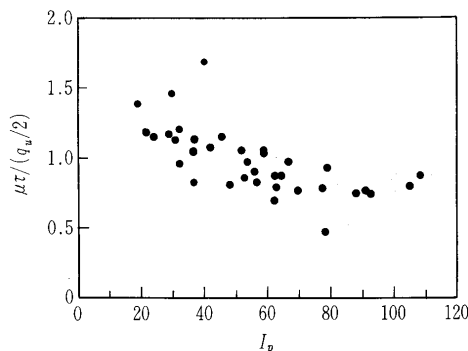


図-2 ドラメンの土質柱状図

得られたデータを基にしている。しかし、注意しなくてはならない事項に、これらの地域は氷河時代に巨大な氷河に覆われたことがあり、その後堆積した沖積粘性土はその影響を大きく受けていることである。これを良く表している例として Drammen（ドラメン）の土質柱状図を図-2に示す。粘土分（粒径が2 μm 以下）が40%もあるのに I_p が15から20程度と、我が国では信じられないほど低塑性である。これは、ロックフラワー（Rock Flour）と呼ばれる氷河が滑り落ちるときに岩を削ってきた、粒径は細かいが粘土鉱物を含まない土粒子を多く含んでいるためである。

I_p と地盤の定数に関連づけている有名な図に、内部摩擦角（ ϕ ）と強度増加率 c/p がある。図-3に我が国の海成粘性土で得られた I_p と ϕ の関係を示すが、我が国の場合には ϕ は I_p に対して一定であり、Bjerrum²⁾（ベラム）や Kenney³⁾（ケニー）の提案式のように I_p の増加によって ϕ は減少していない。また、 c/p に対しては Skempton（スケンプトン）の有名な $c/p = 0.11 + 0.0037I_p$ の式がある。我が国の粘性土に対して、ベーン試験から得られた c/p の関係を図-4に示す（ただし、 p は圧密試験から求められた圧密降伏応力）。図から c/p と I_p との間には何の関係も認められない。

後で述べるように、我が国は粘性土のせん断強さを一軸圧縮試験だけで決める数少ない国である。しかし、多くの国ではベーンせん断（VS）試験が用いられることが多い。VS試験から得られた強度を地盤の安定解析に

図—3 ϕ と I_p との関係図—4 ベーン試験から求められた c/p と I_p との関係

図—5 一軸圧縮強度と Bjerrum の補正係数で補正されたベーン強度の比較

用いる場合には、Bjerrum⁴⁾が提案した補正係数 (μ) で補正することが多い。この μ の提案の背景となった考え方に、①せん断強さの異方性と②速度効果、がある。これらの要素を I_p と関連づけたのが μ である。

我が国の海成粘土で行われた μ で補正されたベーン強さ ($\mu\tau$) と一軸圧縮試験から求められたせん断強さ ($q_u/2$) の比較を図—5 に示す。 I_p が40以下の場合には ($\mu\tau$) の方が大きい、これは我が国の場合には I_p が小さいと土は砂分を多く含むため中間土の性質が強くなり、一軸圧縮試験では強度を過小評価する傾向にあるためと思われる。一方、 I_p が40以上になると、 $q_u/2$ が ($\mu\tau$) よりかなり大きくなる。すなわち、Bjerrum の提案が正しいとすると、 $q_u/2$ は地盤の強度を過大評価していることになり、この値を用いて設計した施設は破壊していることになる。しかし、我が国では港湾の分野を含めて破壊事例は少なく、また $q_u/2$ を使った設計法を見直そうとする動きもない。むしろ、Bjerrum の補正

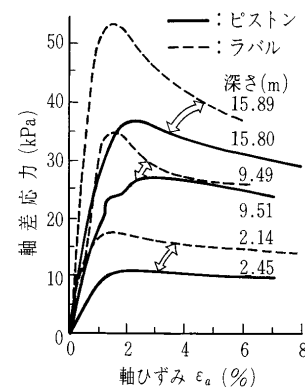
係数の考え方は、我が国の粘性土に適用できないと考えた方が自然である。

これと同様な考え方に、Young aged 粘土の設計の強度増加率 c/p がある。Mesri (メスリ)⁵⁾は Bjerrum の μ の根拠となったデータから Young aged 粘土の c/p は I_p によらず0.22であると提案をしている。しかし、我が国でプレローディングや段階載荷を行う場合の c/p は、0.3や1/3が一般に用いられている。これからも、ある地域で得られた経験則を無批判に使うことは厳に慎むべきであることがわかる。

3. サンプリング

3.1 我が国のサンプラー技術の地位

サンプリングに関する研究は、サンプリングが難しいとされている砂質土に対して積極的に行われ、粘性土については、もう研究がしつくされたと考えられていた。しかし、イギリスの地盤工学会が軟弱粘性土の研究フィールドとして購入した Bothkennar (ボスケナー) でのサンプリングの結果が、大きな議論を巻き起こした。これを図—6 に示す⁶⁾。大口径のラバル (Laval) サンプラー (後で述べる) と通常用いられるピストンサンプラー (我が国のサンプラーも含む) で得られた試料の品質は、図に示すように、著しく異なることを Hight (ハイト) ら⁶⁾が発表した。この試験結果は、二つの大きな意味をもつ。一つは、 $q_u/2$ を地盤の強度 (設計強度) として良いとの理論的な背景には、図—7 に示すように、サンプリングの乱れによる強度を過小評価する要素と、異方性 (一軸試験は圧縮強度) と速度効果 (一軸試験は1%/min でせん断) による過大評価する要素とがバランスしているとの、ラッキーハーモニー論がある。ここで、もし彼らのデータが本当となると、思っていたより乱れの要素が大きくなり、図—7 に示したバランスを維持するためには新たに過大評価する要素を見つける必要がある。もちろん、これはあくまでも $q_u/2$ は絶対であ

図—6 Bothkennar で行われたサンプリングによる強度の違い⁶⁾

図—7 一軸圧縮試験における強度のバランス

地盤工学50年の歩みと展望

ると考えた場合である。

もう一つの重要な問題は、地盤調査の契約である。外国、あるいは国内の業者が、日本のピストンサンプラーの代わりに、ラバルサンプラーで試料を採取しようとすると、「貴社のサンプリングはあまりにも良い品質が得られるので、使うことは許されません。」と言わなくてはならなくなる。普通の契約では、品質が悪いことを理由に使用を拒否することは多々あるが、「良すぎるから」との理由で断ることが、特に外国業者にできるであろうか？

3.2 種々のサンプラーを用いた比較実験

九州の有明で行った種々のサンプラーによる品質結果を以下に述べる。サンプリングに関する世界的な基準はなく、またボーリングに従事している技術者の技術力は地域によってかなり異なる。今回の比較試験では世界で用いられている著名、あるいは多く使われているサンプラーを用いた。サンプラーの諸元を表—1に示す。専門家の間で品質のよいサンプラーが採取できるとの名声を博しているのが、先ほど述べたラバル⁷⁾とシャルブルック (Sherbrooke) サンプラー⁸⁾である。これらのサンプラーはどちらも東カナダのケベック州の大学で開発されたものである。

有明の調査結果を表—2に示す。室内での再構成試料と違って、自然地盤では深さ方向に強度が変わるので、表に示す値は電気式静的コーン貫入試験から得られた強度で正規化している。表から、日本のピストンサンプラー、ラバルおよびシャルブルックサンプラーで採取した試料の品質はほぼ同じであり、イギリスの ELE100 およびシェルビーチューブの品質が悪いことがわかる。NGI の 54 mm のサンプラーはその中間に位置している。

表—1 有明の比較実験で用いたサンプラーの諸元

サンプラー	内径 (mm)	サンプラー の長さ (mm)	肉厚 (mm)	肉厚比 (%)	ピストン の有無
日本	75	1 000	1.5	7.5	yes
LAVAL	208	660	4.0	7.3	no
Shelby	72	610	1.65	8.6	no
NGI54	54	768	13.0	54.4	yes
ELE100	101	500	1.7	6.4	yes
Sherbrooke	350*	250*	—	—	no

* 採取された試料の寸法

表—2 有明の比較実験での結果

サンプラー	試験個数 (<i>n</i>)	平均値*	標準偏差*
日本	16	0.96	0.13
LAVAL	11	0.98	0.20
Shelby	12	0.65	0.11
NGI54	8	0.86	0.12
ELE100	15	0.61	0.14
Sherbrooke	9	1.03	0.10

* $(q_u/2)/s_{ur}$ s_{ur} : CPT で求められたせん断強さ

もちろん、表—2に示した結果がほかの地盤に適用できるかは、すでに述べたように地域性があるために、慎重に考える必要がある。

4. 原位置試験

4.1 標準貫入試験

我が国に限らず、原位置試験といえば文字どおり標準貫入試験 (SPT) が標準として多く使われている。SPT から得られる N 値は、過去に蓄積された豊富なデータによって地盤定数や杭などの支持力と結びつけられ、現在では N 値なしには構造物の設計ができないほどになっている。このように、 N 値が我が国の設計方法に果たした役割は多大であると思われる。しかし、 N 値による設計は、電卓を用いた計算程度であり、複雑な構成方程式に基づく設計に N 値を使うことに対して疑問を感じている。例えば悪いが、目盛りが 1 m で、かつ人によってその目盛りが異なる物差しを使って、ミクロの話をしているのと同様な感じがする。すなわち、地盤定数と計算手法との精度のバランスに気をつける必要があると思われる。

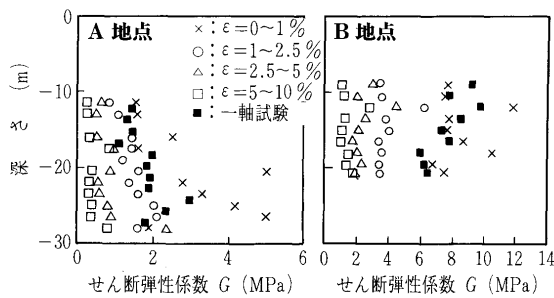
4.2 ベーンせん断試験

ベーンせん断 (VS) 試験は北欧を初め、多くの国々で軟弱粘性土の非排水せん断強さを求める代表的な試験である。しかし、我が国での実績はきわめて少なく、すでに述べたように一軸圧縮試験が主流となっている。VS 試験の最大の難点は、試験誤差の多くが強度を過大評価する方向にあることである。すなわち、ベーンロッドと地盤の摩擦、またベーンの回転時に生じる遊星運動によって、実際のベーン強度より大きめにトルクが測定される傾向にある。一方、一軸圧縮試験はサンプリングを含めて、試験を雑にすればするほど、強度を過小評価、逆の見方をすると安全側の強度を与える。

4.3 プレシオメーター試験

SPT を含めて、原位置試験から理論的に地盤定数を求めることは難しく、経験的に c や ϕ の定数と杭の支持力値などの設計値と結びつけられている。しかし、プレシオメーターは試験から理論的に地盤定数を求められる数少ない原位置試験である。

プレシオメーター試験は地盤に円筒状の風船を挿入させ、圧力と風船の変形の関係から地盤の変形係数や強度を求める試験である。風船の挿入方法は、あらかじめボーリング孔を用意するプレボーリングタイプと、風船自体がボーリングするセルフボーリングタイプの2種類がある。地盤の乱れの観点から、後者のセルフボーリング型が理想と言える。港湾技術研究所もこの試験機をイギリスから導入し、我が国の海成粘性土地盤に適応してみた。この試験機の名前はカムコメーター (camkometer) と呼ばれている。その名前の由来は、イギリスのケンブリッジ (Cambridge) 大学で開発され、かつ K_0 状態で試験を開始できる試験機という意味である。実際にこの試験機を使った感想は、この試験機の操作は複雑であり、一般の調査としての位置付けは難しいとの印象



図一8 自己ボーリング型プレシオメーターから得られた変形係数⁹⁾

を得た。また、図一8に示すように、得られた変形係数も一軸圧縮試験で得られた値とほぼ同程度である⁹⁾。もちろん、ひずみレベルの小さな時の変形係数も求めることはできるが、この場合にはゴムの風船の変形係数が問題となり、また変形を測定しているひずみゲージもいろいろと工夫する等の、職人芸が必要となる。

4.4 電気式静的コーン貫入試験

この試験機の最大の特徴は、①個人的誤差がほぼない、②深さ方向にほぼ連続した地盤方法が得られる、である。特に②の特徴は、地盤調査の現場に行くことが少ない設計者に対して、地盤の状態を詳細に伝えることができるので貴重である。しかし、この試験の大きな欠点は、①堅い地盤には貫入できない、②コーンのメーカーによって測定値が異なる、である。貫入装置の能力は年々大きくなっているが、それでも締まった砂や礫に当たると、コーンを貫入することができなくなり、別途ボーリングを行う必要が生じる。振動や水ジェットなどを併用して、小さな貫入装置でも貫入能力の増大することが望まれる。②については、地盤工学会で基準を設けているが、それでも測定値がメーカーによってかなり異なることが一斉試験の結果わかった¹⁰⁾。関係者の連絡を密にして、異なる原因の解明が望まれる。

4.5 ダイラトメーター

CPTの場合にはデータロガーと計算機が必要となる。これらの精密機器は屋内の実験室を前提としており、ほこりや雨・風にさらされる現場では、しばしばトラブルが生じる。ダイラトメーター (DMT) は、このような複雑な機器を必要としないタフな試験である。

DMTはイタリアのMarchetti (マルケッティ)¹¹⁾が開発し、ブレードに取り付けられたステンレス製の膜が0.1 mmと1.1 mm膨張するときの圧力を計測するものである。Marchettiによると、これらの値を使って、あらゆる地盤定数が導けると主張しているが、日本で行った研究によれば、場合によっては、誤差が大きいと報告されている^{12),13)}。SPTやCPTでも同じであるが、す

べての症状に効く薬がないように、一つの試験からすべての地盤定数を求めること自体不可能である。試験方法の特徴を理解して、地盤の状態や構造物の設計にとって何が重要かをよく考えて、どの試験を採用するかを決めるべきである。

5. おわりに

我が国の地盤調査の技術レベルは総じてかなり高い位置にある。長い不況を経て、ようやく最近になって日本経済の基盤が基本的な技術力にあるとの認識を深めている。地盤の設計も同様であり、その基本となるのは、地盤調査の結果であることに、再度認識していただきたい。

参考文献

- 1) Hanzawa, H.: A new approach to determine soil parameters free from regional variations in soil behavior and technical quality, 土質工学会論文報告集, Vol. 32, No. 1, pp. 71~84, 1992.
- 2) Bjerrum, L. and Simons, N. E.: Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays, Proc. of ASCE Research Conf. on Shear strength of cohesive soils, pp. 711~726, 1960.
- 3) Kenney, T. C.: Discussion, ASCE, Vol. 85, No. SM3, pp. 67~79, 1959.
- 4) Bjerrum, L.: Problems of soil mechanics in unstable soils, Proc. of 8th ICSMFE, Vol. 3, pp. 111~159, 1973.
- 5) Mesri, G.: New design procedure for stability calculation of embankments and foundations on soft clay, Discussion, ASCE, GT4, Vol. 101, pp. 409~412, 1975.
- 6) Hight, D. W., Boese, R., Butcher, A. P., Clayton, C. R. I. and Smith, P. R.: Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing, Geotechnique, Vol. 42, No. 2, pp. 199~217, 1992.
- 7) La Rochelle, P., Sarraillh, J., Tavenas, F., Roy, M. and Leroueil, S.: Cause of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, No. 1, pp. 52~66, 1981.
- 8) Lefebvre, G. and Poulin, C.: A new method of sampling in sensitive clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 226~233, 1979.
- 9) 重松尚久・深川良一・室 樹朗・秦樹一郎・田中洋行：SBPによる粘土地盤の変形・強度特性の評価、第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 431~432, 1996.
- 10) 電気式静的コーン貫入試験WG:電気式静的コーン貫入試験の基準案と一斉試験の結果、第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 289~292, 1993.
- 11) Marchetti, S.: In situ tests by flat dilatometer, ASCE, Vol. 106, No. GT3, pp. 299~321, 1980.
- 12) 岩崎公俊：フラット・ダイラトメーター試験を用いた実務設計用土質定数の評価に関する研究、信州大学学位請求論文, 1995.
- 13) 田中洋行・田中政典：電気式静的コーン貫入およびダイラトメーター試験を用いた地盤調査法、港研資料, No. 837, 1996.

(原稿受理 1999.7.5)