

(35) 新しい原位置計測法とその岩盤物性の評価

日本国土開発株式会社 菊地 慎二

セラタジオメカニクス社 世良田章正

1. はじめに

原位置における岩盤計測の重要性から種々の測定システムが開発され実施されている。その中の孔内載荷試験はボーリング孔を利用して行うため、簡便に計測できるという利点をもっている。今後なお一層の改良、開発を必要とすることはいうまでもないが、岩盤調査では重要な位置を占めていくものと考えられる。

米国のセラタジオメカニクス社（SGI社）で新しく開発された孔内載荷試験装置は、載荷方式の違う2つのプローブから構成されている。一つは、ウレタン製のチューブにより孔内の壁面全体を加压する方式（S-100）であり、加压能力（max 700 kgf/cm²）が大きいこと、加压による変位を45°毎に測定できることが大きな特徴となっており、岩盤を孔内から破壊することにより岩盤の地圧応力を計測することが可能である。

もう一つのプローブ（P-100）は、プローブの側面に小径の円形ピストンを8本内蔵しており、これらのピストンを孔壁に貫入させるといふ新しい方式をとっている。

前者については他の報告に譲ることとし、本文では後者の載荷方式およびその適用例について説明する。

2. 載荷試験装置の概要と特徴

新しい孔内載荷試験装置 P-100は、径9.9mm、長さ1.2mの円柱体のプローブ、ピストンの載荷圧と貫入長を自動記録する記録装置（DDR-100）およびバッテリー、油圧ポンプならびにこれらを介する電気ケーブルと油圧ホースから構成されている。（図-1）

プローブに内蔵されている8本のピストンは、直径1.9mm、ストローク38mm（有効長30mm）で、90°間隔で4方向に2本ずつ、軸方向には約5cm（2inch）間隔に対称となるように配置されており（写真-1）、単一の油圧系統によって同時に加压され孔壁に貫入する。このときの貫入長は、各ピストンに内蔵している差動トランスにより感知される。油圧ポンプの加压能力は700 kgf/cm²であり、載荷圧力とそとのときの8本のピストンの貫入長は、最小時間間隔10秒でDDR-100にデジタルで記録される。8本のピストンは特殊な硬質合金で作られ、ピストンの貫入面の形状と大きさを種々交換できるよう設計されている。

P-100の特徴は、①より大きな加压能力があり、さらにピストン貫入面積を変えることにより硬岩をぜい性破壊

させるまで圧力を大きくすることが可能であること、②ピストンが4方向に配置され個々の貫入長を記録することができるため、岩盤の異方性を把握することが可能であること、③大量に得られるデータを現場に持ち込んだコンピュータによりその場で即時に図化処理できること、④測定間隔を密にしていくことにより、地層の構成、弱層の位置、層厚などを適確にとらえ、ボーリングコアの得られない位置の物性の把握ができることなどである。

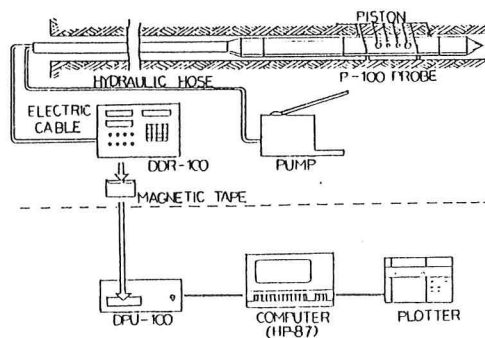


図-1 P-100システム概念図

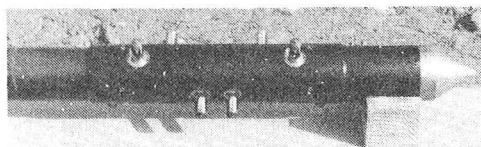


写真-1 P-100プローブ

3. 室内試験

一軸圧縮強度とP-100による計測値との相関を得る
 目的で、P-100と同様な室内試験装置を作成し、各種
 の岩石サンプルを用いて載荷試験（パンチテスト）を行っ
 た。図-2に試験装置の概要を示す。

試験サンプルは、花崗岩、玄武岩、緑泥片岩、石灰岩、泥岩および2種のモルタルで10cmの立方体である。このときのピストン先端部（パンチ）は円形平底のタイプで直径5、10、14、19mmの計4タイプを用いた。均一な圧力を加えるために、試験結果のうち硬岩の圧力-変位曲線を図-3に示す。変位が突然大きくなっている曲線は脆性破壊を生じたことを表わしている。軟岩に対しては軟岩の程度に合わせてパンチ径を変え、載荷面積を調整し、最適な状態で圧力-変位曲線を求めている。上記試験結果のうち硬岩の試験結果と一軸圧縮試験結果との関係求めたものを図-4、5に示す。図-4はパンチ径10mmのときの硬岩の破壊強度と一軸圧縮強度の関係求めたものでありその比がほぼ1:1となっていることがわかる。また図-5はパンチ径5mmのときの弾性係数(Ep)と一軸圧縮試験から求められる弾性係数(Eu)の関係を示したものである。Epは次にあげる弾性で半無限の平面に対して円形載荷試験を行うときの理論式から求めている。

$$E_p = (1 - v^2) \cdot \frac{\pi a}{2} \cdot \frac{p}{\delta} \dots\dots (1)$$

ここで a : パンチ半径、 ν : ポアソン比、 p : 載荷圧、 δ : パンチ変位である。試験数が少ないが、 E_p と E_u の間にはほぼ直線的な関係があることが推定される。なお図の四角で囲んだ部分は、計測値の範囲を示す。以上の室内試験では、拘束圧は全て一定としているが、Tsaiらの実験①では、 E_p は拘束圧の変化に対し殆ど影響を受けないとしている。また室内試験においては、パンチとサンプルの接触面は平面であるのに対し、 $P-100$ を用いた原位試験では孔壁面は円筒状、 $P-100$ のパンチは球面状と異なっている。そこで接触状態の相違による圧力-変位関係について二次元のFEM解析を行い検討した。その結果、これらの接触状態の差は1%以下であることが判明した。②

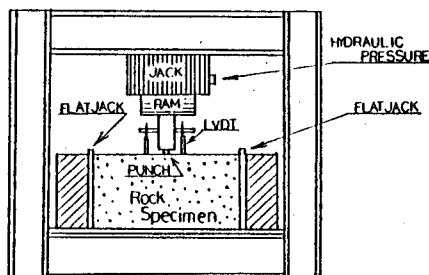


圖-2 室內試驗裝置

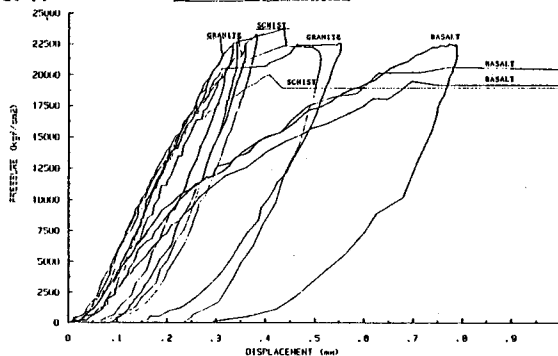


図-3 硬岩の圧力-変位曲線

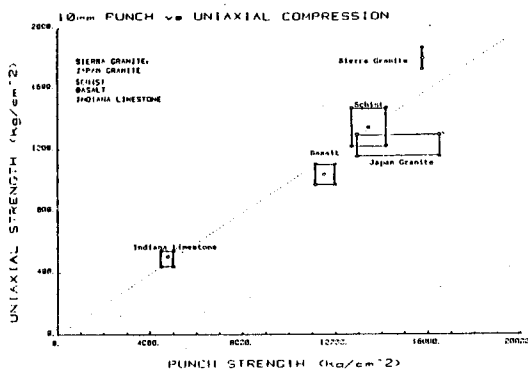


図-4 一軸圧縮強度と破壊強度

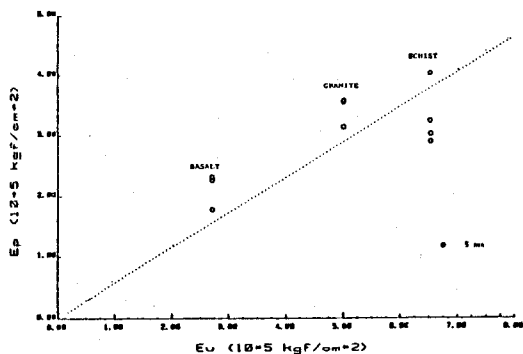


図-5 弾性係数の相関関係

これらの結果を総合すると、P-100は硬岩に対し室内の圧縮試験と同様な試験装置として原位置で簡便に使用できることが期待されるが、今後さらに各種の岩石サンプルを用いてこれらの相関を確立していくことが必要である。

4. 原位置試験

ここでは原位置での計測例として軟岩を対象にした結果について報告する。計測地は横浜市金沢区の小丘陵の中腹点で、ボーリングは室内試験に用いるコアサンプルを得るためオールコアボーリングとし、径106mm深度20mまで掘削した。ボーリング結果によると、地質は、ほぼ均質な第三紀泥岩層であるが、所々に10～25cm程度の砂層が挟んでいる。孔内の水位は、-6.0mであった。図-7にボーリングコアによる

一軸圧縮強度の深度分布を示す。この図から8.3m付近に $q_u = 80 \text{ kgf/cm}^2$ 程度のやや硬い層がある他、全深度にわたりバラツキの少ない $q_u = 20 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ の様な泥岩層と考えられた。しかし部分的にコアの得られない場所があり、ボーリング掘削時の観察では硬い層と砂層の互層状であることが推定された。P-100の計測は、まず変形特性の深度方向の詳細な分布変化を把握する目的で、ボーリング孔内でプローブを0.5m毎に移動して行い、各深度毎に3回の繰

返し等速載荷(40～50 $\text{kgf/cm}^2/\text{min}$)を行った。この結果の圧力-変位曲線は大きく3種の基本的な曲線に分類することができ、その典型例を図-6に示す。タイプIは繰返し載荷による明確な残留変位量がなくほぼ直線的な挙動を示し、深度8.0m付近にだけ出現しているのが特徴であり、ボーリング孔付近のトンネルの壁面の観察により、砂岩であることが判明した。

タイプIIは最も多くみられるタイプで泥岩を表している。またタイプIIIは砂層であり、タイプI、IIに比べ変位量は非常に大きいので圧力-変位曲線から容易に判別することができた。これらの曲線の勾配の深度方向分布を図-8に示す。この図で、*は圧力レベル40～80 kgf/cm^2 、#、×は圧力レベル80～130 kgf/cm^2 のもので、それぞれ2種あるのは、N-S方向とE-W方向に区別しているためである。この図からN-S方向とE-W方向に有意の差がみられず、この泥岩層が異方性を示さない岩盤であることがわかる。次にボーリングから得られたコアサンプルのスケッチ図と、圧力-変位曲線の勾配から先にあげた(1)式を用いて求めた変形係数および一軸圧縮強度の深度分布の一例を図-9に示す。ボーリングコアの斜線部は、コアの得られていない部分である。この図のうち、変形係数が急に大きくなっている部分が砂岩であるが、特徴的なことは変形係数の変動の差が大きい位置では殆どコアが得られていないことである。この部分はボーリングの掘削状況や近接して施工されているトンネルの壁面の観察から、泥岩と砂層あるいは砂岩の薄層の互層

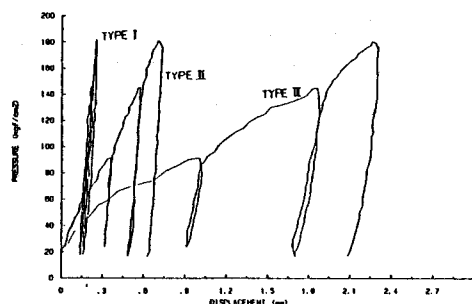


図-6 圧力-変位曲線例

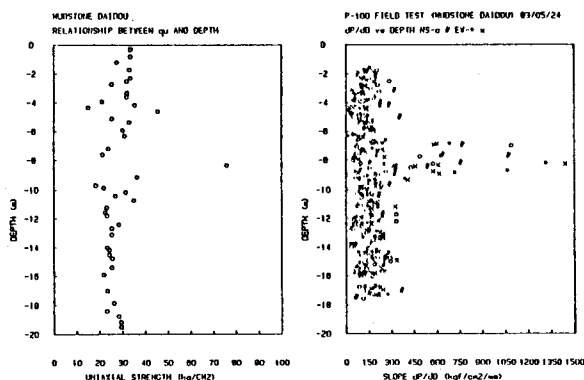


図-7 一軸圧縮強度深度分布

図-8 変形係数深度分布(1)

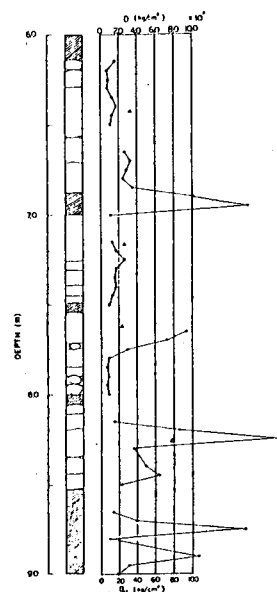


図-9 変形係数深度分布(2)

状態であり、ボーリング時に破壊されコアサンプルが得られないと判断された。

このようにマクロ的には一様と判断される岩盤でもミクロ的にみると、無視できない物性の変化がみられることがあり、とくに弱層の存在や上記のような互層状態となっている地層ではコアサンプルを得ることができないため、定量的な物性の評価ができないことが多い。さらにこのような層は設計上あるいは施工上問題となることが多く、これらに対する評価が重要な意味をもつことになる。

P-100は、8本のピストンが約5cm間隔に配置されており、ピストンの変位はそれぞれ独立して記録されるため、測定を密に行うことにより、計測が困難なこのようなシーム状の弱層や亀裂の検知に優れているといえる。

軟岩の場合、クリープ変形特性が顕著であることから圧力-変位曲線はその載荷速度により大きく左右される。

図-10は、載荷速度の違いによる降伏強度の変化をプロットしたものである。載荷速度の増加に伴い降伏強度が増加していることがわかる。このため、P-100を軟岩に適用しその物性を評価する場合、時間の要素を十分に考慮する必要がある。

なお、P-100による泥岩の降伏強度は、図-10に示されるとおり200~300kgf/cm²という結果を得るが、一方、一軸圧縮強度は図-7からわかるとおり、 $q_u = 20 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ であり、P-100による降伏強度は、 q_u のほぼ100倍程度となっている。

5. おわりに

岩盤は、岩石と不連続面の集合体であり、さらに本文でも紹介したようにマクロ的には一様な岩石とみなされる場合もミクロ的には不均質であることが多い。P-100は、載荷面の径が5mm~19mmと非常に小さいが、1回の計測で8点のデータを得ることができ、その測定間隔を密にし、ほぼ連続して載荷を行うことにより、不連続面も岩石部分と同様に等しく測定することになる。したがって測定値のバラツキがとりもなおさずその岩盤のもつ物性のバラツキということができ、これらを統計的に評価する方法も岩盤を評価する一手法といえよう。またP-100のマルチピストンローディング方式はとりわけ構造物の安定上重要な存在となる薄い弱層や破砕帯の位置の確認といったいわばサウンディングマシンの機能を果たすともいえる。

さらに図-11に示すようにP-100の圧力-変位曲線のFEMシミュレーションを行うことにより、設計に用いる定数を設定することもできる。とはいえ、P-100は開発されて間もない試験装置

であり、測定データ数も少なくかつその能力を未だ十分に活用しているとはいえない。今後多種の岩盤計測を行いデータの蓄積を図り、同時にそのデータを基礎に岩盤物性の評価手法の確立に努力する必要がある。

参考文献

- ① Cook, N.G.W., Hood, M., Tsai, F., "Observation of Crack Growth in Hard Rock Loaded by an Indenter," Int. J. of Rock Mech., in Press.
- ② Serata, S., McNamara, J.F., Tsai, F., "Field Experience with a Multiple-Piston Loading Borehole Probe," Proc. of 24th U.S. Symp. on Rock mech. June 1983.

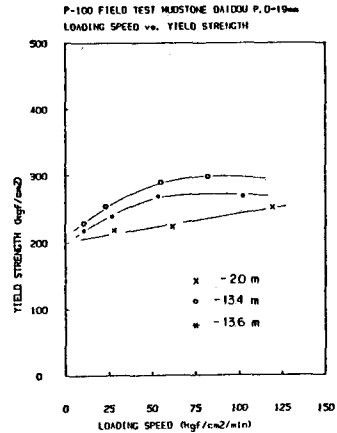


図-10 載荷速度特性

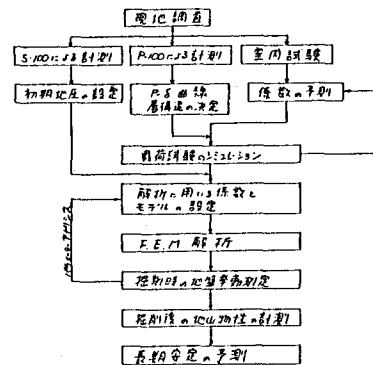


図-11 解析のフローチャート

(35) Determination of in situ properties and
 their distribution by using new property meter

By: Shinji Kikuchi

Shosei Serata

A Borehole propertymeter device (P-100) has been developed, as a computerized field instrument, calibrated through laboratory tests and applied to various field conditions. P-100 has a cylindrical form containing a set of 8 loading pistons which are readily applied to borehole walls simultaneously, to obtain relation of piston loading and its penetration for the individual pistons at the same time. Field application was made at the ground of soft sedimentary strata at Yokohama. Results of the laboratory calibration and field test are presented disclosing the following observations.

- (1) P-100 can be applied effectively in a wide range of earth materials from soft mudstone to hard granite.
- (2) For hard rocks certain consistent linear relations are found between Young's modulus determined from uniaxial testing of laboratory specimens and elastic piston penetration modulus of borehole. Another similar relationship is found between uniaxial failure strength of laboratory specimens and piston penetration failure strength.
- (3) Measurement in the field tests disclose not only material properties at the individual pistons but also their variation along the boreholes depicting the true nature of property distribution in situ.