

孔内載荷試験法による岩盤の二、三の変形特性について

株式会社応用地質調査事務所

武内俊昭

1. まえがき

ボーリング孔を用いる孔内載荷試験法によつて、岩盤の変形特性を求めることは、平板載荷試験等にくらべて経済的であり、また、地中深部の情報を比較的容易に把握できる利点をもっている。更にまた、この方法は明らかに平板載荷試験法とは異なる載荷機構、すなわち円孔を押し広げるため円周方向の応力 σ_θ は引張りとなる特徴的な機構をもっており、土木の設計等において、この様な岩盤の挙動を対象とする場合には、より適合した試験法となりうると思われる。このため、従来、孔内載荷試験法による岩盤の測定データについて種々検討を加え、載荷機構と岩盤の特性との関連を考察してきたが、岩盤の引張り抵抗を考慮に入れて、載荷による変形を考え、関連する種々の実測結果、特に、平板載荷試験結果との対比をおこなつて、測定方法による違いが、どの様な岩盤変形の現象によつているのかについて考察した。以下その結果について報告する。

2. 平板載荷試験結果との対比

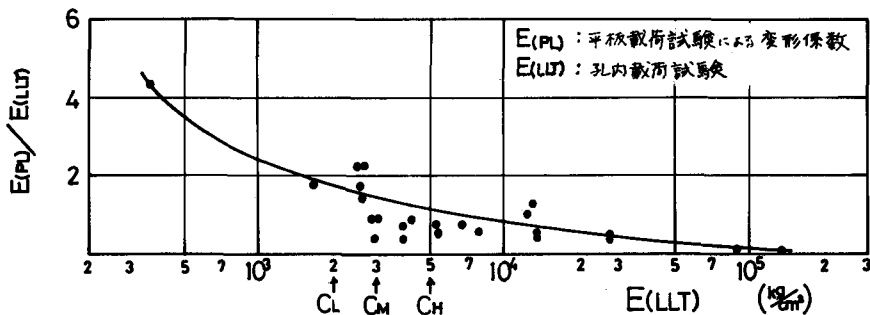
図一は、大部分が花崗岩地域で得られた、平板載荷試験結果と孔内載荷試験結果の対比図で、プロットされている点は、両者が1 m以内の距離で互いに測定されたものである。また、載荷の方向も、同一方向を有する面内にある。点数も多くはなく、比較的バラツキているとも云えるが、図に実線で示した関係におよそあると見ることができる。すなわち、同一岩盤における平板載荷試験と孔内載荷試験による変形係数は 5000 kg/cm^2 付近で両者が等しく、これより変形係数の小さな範囲では、平板載荷試験による結果が大きく、反対に、変形係数の大きな範囲では孔内載荷試験による値が大きく測定されている。この様な両者の結果の違いは、両試験法の載荷機構によるものと考えられる。以下この点について考察する。

半径 a なる円孔の内面に圧力 P が作用した場合、円孔の中心から r の距離における部分の応力は、半径方向を σ_r 、円周方向を σ_θ とするとよく知られるように弾性体においては、平面歪問題として扱つて、

$$\sigma_r = P \frac{a^2}{r^2} \quad (\text{compression}) \quad \sigma_\theta = -P \frac{a^2}{r^2} \quad (\text{tension})$$

で表され、円周方向には引張り力が働く。また、この場合、円孔内面の変位 u は次式で表される。

$$u = \frac{1+\nu}{E} a P \quad (1)$$



図一 平板載荷試験と孔内載荷試験結果の対比

ただし、 E 、ヤング率 ν 、ポアソン比

この様に孔内載荷試験によつて、岩盤内の円周方向に引張り力が働くとそれが岩盤の持つ引張り強度以上になると岩盤には、ボーリング孔に対して放射状の割れ目が発生することが考えられる。したがつて、この様な場合には、割れ目で囲まれたクサビ状の部分の変形が測定されることになる。軟岩など割れ目のもともと少ない軟質な岩盤では新たに割れ目が図-2の如く発生するが、割れ目のもともと多い岩盤などでは、放射状に沿つたもともと割れ目が分離すると考える。

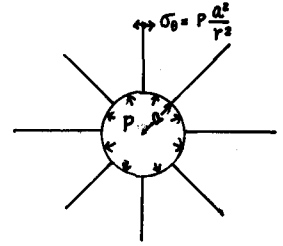


図-2 割れ目のモデル形状

図-3に示すクサビについて、ROCHA等(1967)は、その変形を次の式で表わしている。

$$u' = \frac{aP}{E} (\log \sqrt{\frac{P}{\sigma}} + 1 + \nu) \quad (2)$$

ここに、 σ 、岩盤の引張り強度。ROCHA等はクサビの先端部の角度 α を考慮に入れない、簡単な考え方を採用しており α による影響は少ないとしているが、実際、筆者の試算でも α の影響は少ない。ところで、図-1に示した孔内載荷試験の結果は、実測されている変位 u を(1)式を用いて E を算出するのに用いている。しかし実際に若し、(2)式に沿つた変形が生じているとすると、我々が実測するのは u' である。すなわち、 u' を測定して(1)式で E を求める次の操作を行なつてことになる。

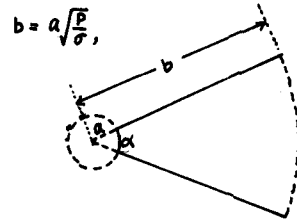


図-3 クサビモデルの変形

$$E' = \frac{(1+\nu) E}{\log \sqrt{\frac{P}{\sigma}} + 1 + \nu}$$

一方、平板載荷試験では、以上にくらべて、弾性論から導かれた式に沿つて変形が生じ、 E が測定されていると仮定すると、平板載荷試験による E と孔内載荷試験による E' との比は次のように書ける。

$$\frac{E}{E'} = \frac{\log \sqrt{\frac{P}{\sigma}} + 1 + \nu}{1 + \nu} \quad (3)$$

(3)式は、図-1の関係を、岩盤の変形モデルを仮定して式で表現したものといふことができる。

いま、(3)式において、圧力 P を通常多く用いられる 50 kg/cm^2 とし、ポアソン比 ν を0.3と仮定して、引張り強度 σ と E/E' の関係をグラフに表わすと図-4のような関係になる。これを図-1と比べてみると、横軸に、孔内載荷試験による変形係数と岩盤の引張り強度の違いがあるが、類似の傾向を示している。

3. 岩盤の引張り強度の推定及び変形係数

図-1及び図-4の対比を更に実測値をもとにつけるため、岩盤の引張り強度について検討する。岩盤の引張り強度は実測例がないため他のデータからの推定を行なつてみると、図-5に示す通りである。図-5は、図-1と同様な花崗岩における測定データで図中の点は、 $60 \times 60 \text{ cm}$ のコンクリートブロックによる直接セン断試験の結果である。また、同様に図中のモール応力図は、同じ花崗岩の岩石供試体の一軸圧縮強度で、図-6に示すように、それらの結果から最も小さい限界の値を採用したものである。この意味は、岩石供試体であつても、最も弱いものは、潜在クラックやヘアークラ

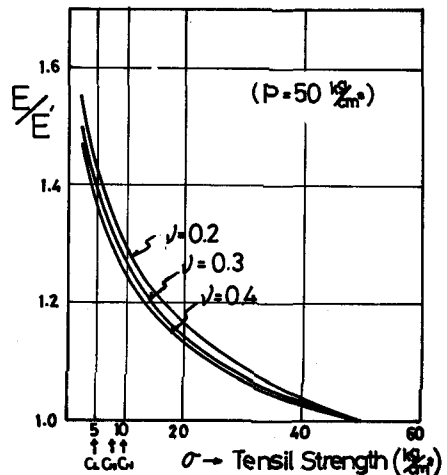


図-4 引張り強度による変形係数の変化

ツクが存在して、岩盤のそれと近い性質を示すものと考え岩盤のせん断試験結果と併せて考えることができると思うところにある。0、 ϕ の線を引くに当たっては、直接せん断試験の結果の最小限界と岩石試験のモール応力円をつなぐ様にした。これらの検討を行なつて図中には、D、OL、CM、CHの各岩盤についてそれぞれ0、 ϕ の線を引いた。そして、これらの線の延長から、それぞれ該当する岩盤の一軸引張り強度を推定した。これによると各岩盤ではそれぞれ次の通りである。

D : 0.8 (kg/cm²) OL : 5.2 (kg/cm²)

CM : 8 (kg/cm²) CH : 10.7 (kg/cm²)

また、図-6に、岩石試験による一軸圧縮強度の値を各岩盤等級とそれぞれが示す数値の頻度を示す。頻度が最も大きな、ピークを示す点、すなわち各等級の代表値と見做せる値は、最低値の1オーダー大きい値を示している。前述のように図-5においてはこの最低値を用いてモール応力円を描いた。以上のように、岩盤及び岩石試験の結果を併せて考察し、岩盤の引張強度を肉眼による岩盤等級に関連づけて示したが、この岩盤等級については直接、孔内載荷試験が実施されており、その結果をまとめて示すと図-7のようになる。このデータについてはすでに前回のシンポジウムで発表したところであるが今回の検討については、各岩盤等級に相当する最小値をとつて考える。それは、岩盤の引張り挙動を考慮に入れた場合、その変形は、最も弱い割れ目及びその方向に大きく支配されると考え、更に、せん断試験で採用した結果も最小値であるため、その関連を含めたためである。その結果、各岩盤等級に相当する、下限値としての孔内載荷試験変形係数はそれぞれ次に示す値となる。

D : 1200 (kg/cm²) OL : 2000 (kg/cm²) CM : 3000 (kg/cm²) CH : 5000 (kg/cm²)

以上検討した引張強度及び変形係数をそれぞれ図-4、図-1の横軸に該当する岩盤等級として示した。

4. 考 察

2. のべたような、クサビ状の岩盤の変形を仮定し、平板載荷試験と孔内載荷試験の結果の違いについて実測結果と仮定にもとづく計算結果として図-1及び図-4にそれぞれ示したが、仮定がどの程度現実の結果を説明し得るのかについて次に考察を加える。

図-1及び図-4は縦軸に2つの試験結果による変形係数の比 E/E' をとっており、それぞれ E/E' ～変形係数、 E/E' ～引張り強度の関係として示してある。この両者の関係から E/E' を消去して変形係数～引張り強度の関係として表わすと図-8の実線の様な関係が得られる。また、この図に重ねて、3. で検討した岩盤等級の各値をもとに変形係数と引張り強度の関係をプロットした。図からわかる様にD～CM岩盤程度までは実線にほぼ近接した結果となつてゐるが、岩盤がいわゆる、良好になるに従つて次第に外れる傾向

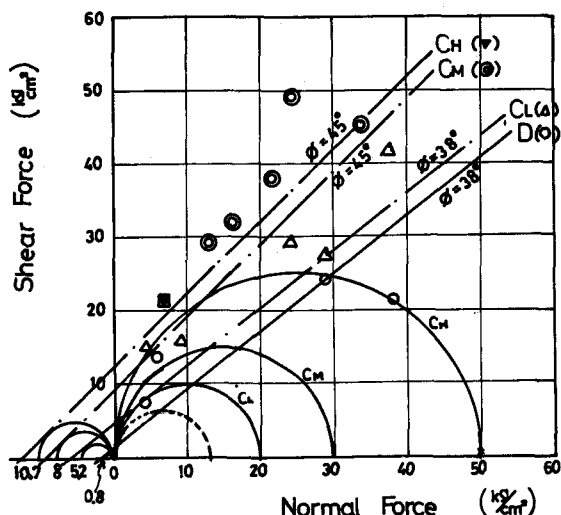


図-5 岩盤引張り強度の推定

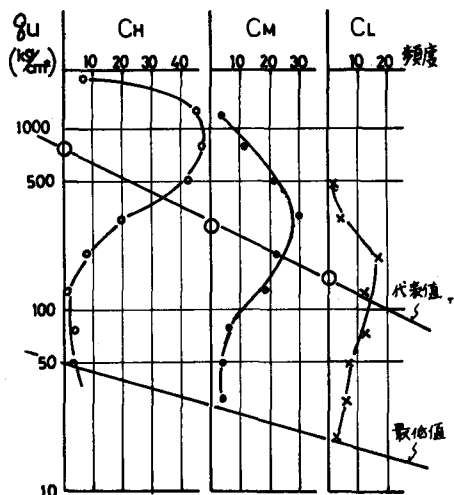
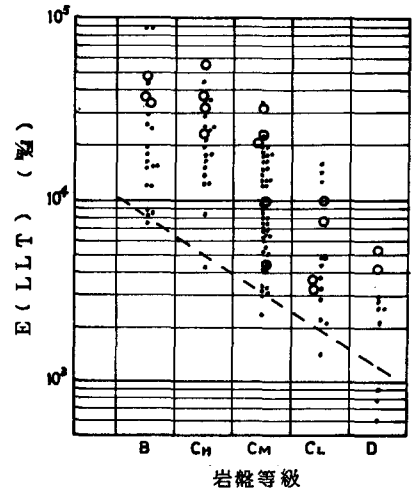


図-6 一軸圧縮強度と岩盤等級

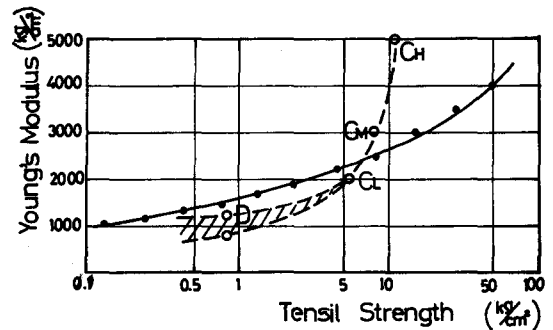
を示している。この図の結果から、D～OM岩盤の範囲においては、載荷機構の違いによる岩盤挙動の実態を、仮定した変形モデルで概略的に説明することができると思われる。一方、OM→CHにかけては、次第に外れる傾向を示すのは、岩盤が良好になるにしたがつて、仮定が合わないこと、すなわち図の傾向から考えて岩盤の引張り強度によると考えられる載荷時の割れ目（クサビ）の長さが仮定よりも小さいことを意味する。もつともOM岩盤付近は、 E/E' が1に近いところで、それより良好な岩盤の範囲では $E/E' < 1$ となる。この範囲の挙動については別途検討したいが少なくとも $E/E' < 1$ の範囲とは別な現象が生じていると云える。



5 あとがき

平板載荷試験による変形係数と孔内載荷試験による変形係数を比較し、前者が大きく測定される範囲について、両者の載荷機構からくる違いを考慮して考察を加えたが、検討すべき実測データが十分でなく、現状において、一つの考え方を傾向的にチェックしたものと見える。また、考え方としてすべて2次元的に取扱っているが、土被り厚を考慮した取扱ひも必要と思われる。データの増加とともに検討を加えていく予定である。

図一7 孔内載荷変形係数と岩盤等級



図一8 変形係数と引張り強度の関係

参考文献

- 1) 相良正次、高橋幸蔵、宮島圭司、武内俊昭、；高圧孔内載荷試験機の開発と岩盤えの利用結果、第8回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要（1973）
- 2) 山県守、武内俊昭、；花崗岩岩盤に関する2、3の変形特性について、第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要（1974）
- 3) 武内俊昭、鈴木権夫、田中荘一、；孔内載荷試験と岩盤の変形に関する特性の研究、土と基礎、vol 24 №12（1976）
- 4) M ROCHA、A SILVERA、N GROSSMANN、E OLIVEIRA、；Determination of the Deformability of Rock Masses along Boreholes Proceedings of the 1st Congress of the ISRM（1966）

On Some Characteristics of Deformation of Rocks used by Borehole Load Test.

Toshiaki Takeuchi

From the relationships between datum of the plate load test and borehole load test with rock deformation, the deformation coefficient of the weathered rocks measured by plate load test is larger than borehole load test. This phenomenon may be caused by difference of the loading mechanism with both load test. That is, with borehole load test, the stresses distribution in rocks expressed by polar coordinate is shown below.

$$\sigma_r = \frac{a^2 P}{r^2}, \quad \sigma_\theta = -\frac{a^2 P}{r^2}$$

where a is radius of borehole, r is radial distance, p is pressure.

As above mentioned the stress in rock in direction of perpendicular to radial direction is tension. From point aimed at above, the deformation of wedge enclosed by tensile joints is given by the expression

$$u' = \frac{aP}{E} \left(\log \sqrt{\frac{P}{\sigma}} + 1 + \nu \right)$$

where E is young's modulus, σ is tensile strength of rock

This equation was proposed by Rocha (1966).

According to this assumption, the difference of deformation at borehole and plate load test is shown by

$$\frac{E}{E'} = \frac{\log \sqrt{\frac{P}{\sigma}} + 1 + \nu}{1 + \nu}$$

And the tensile strength of rocks was assumed by the results of direct shear test in field and uniaxial compression strength of rock specimen.

As a result of assumption of tensile strength, this is to certify that the equation has may explained the datum of both load test.