

III-263 載荷試験における不連続岩盤の永久変形係数

京都大学工学部 正会員 ○ 谷本 親伯
 京都大学大学院 学生員 岸田 潔
 (株) 奥村組 正会員 岡村 正典

1. 序

不連続性に大きく影響される原位置岩盤の変形性を把握するために、平板載荷試験や孔内載荷試験が実施される。このような試験において繰り返し載荷を行い、徐々に載荷レベルを上げてゆくと、ヒステリシスループを描くことはよく知られる所である。荷重レベルの増加に比べ、比較的変形係数が一定している部分から実用的な変形係数を決定しているが、過去の多くのデータを再考してみると、試験地点毎のインデックスにとどまり、各地点で試験を実施しない限り同種の岩盤の変形係数を決定することは困難である。日本で対象とする多くの岩盤の力学的挙動は、ほとんど不連続面の性質に左右されるといっても過言ではない。本研究では、等変位型孔内載荷装置による試験結果を元に、不連続面での挙動をき裂の頻度と永久変形係数の変化から評価してみた。

2. 試験状況および結果

花崗岩質のトンネル切羽面より水平に20m削孔を行い、口径が約80mmの孔内にてボアホールスキャナーによる孔壁観察を行い、き裂状況を既知として、4ヶ所にて孔内載荷試験を行った。き裂頻度は0.9~1.5本/mで、個々のき裂は新鮮で風化は認められなかった。載荷は0~150kgf/cm²の範囲で、4段階に分け繰り返し載荷を行った。

図-1は、荷重(p)と載荷板の変位(u)との関係を示す。ただし、荷重はlogスケールである。荷重が増加し、あるレベル以上になると、線形関係を示す傾向が認められる。すなわち、

$$u = A + B \cdot \ln p \quad (\text{ただし、} A, B : \text{定数}) \quad (1)$$

なる関係で、ジョイントの垂直剛性がほぼ一定値をとる状態である。従来、変形係数を決定してきた荷重レベルはこれと対応している。一方、多くの試験で認められる繰り返し載荷時の荷重~変位曲線は、図-2に示すようにヒステリシスループが少しづつ移動し、ある荷重レベル以上では、処女載荷曲線の包絡線がほぼ直線となる。除荷を行うと、常に永久変形量が認められ、200kgf/cm²といった載荷試験ではかなり高いレベルから除荷しても元の変位に戻らない。もし、岩盤が完全弾性体であれば永久変形は認められないはずである。過去、繰り返し載荷時の永久変形量についてはそれ程着目されていなかったが、Goodman[1]は永久変形係数を次のように定義している。永久変形係数とは、岩盤の非弾性的な挙動を評価するもので、荷重をゼロに戻した状態で測定される永久塑性変形量に対する応力比で表される。すなわち、図-2に示すように、繰り返し載荷時の各サイクルでの最大荷重と除荷時の残留変形量の関係を示す係数で、載荷レベルによって変化するが、あるレベル以上では、ほぼ一定値を示す。このレベルは、(1)式の関係が成立するレベルと対応していて、硬岩ではほぼ30~40kgf/cm²以上と考えられる。

一方、岩盤中に不連続面が存在しないならば、変形係数Dと岩実質部分の弾性係数E.は一致するが、き裂が1~2本/mといったかなり小さい場合であっても、原位置試験でのDとE.はかなり異なった値を示す。ここで、変形係数D、

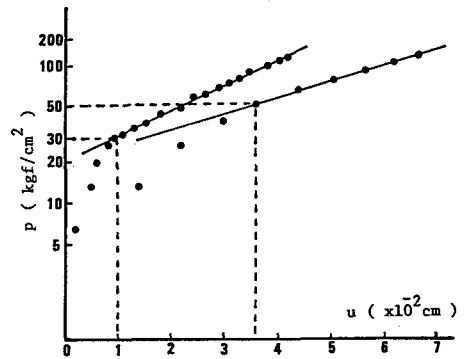


図-1 log p ~ u 関係

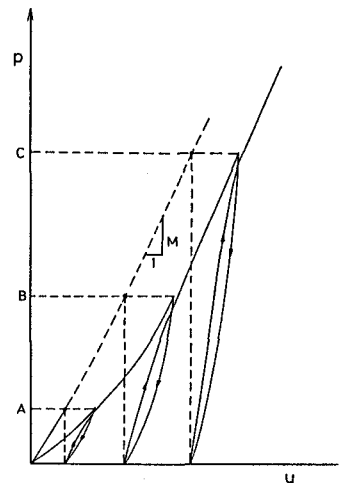


図-2 永久変形係数 M

永久変形係数M、岩実質部分の弾性係数E₀、き裂頻度nおよび各不連続面の剛性k(平均的にすべて同一とみなす)の関係を示せば、次式のようなものである。

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{M} + \frac{1}{E_0} + \frac{n}{k} \quad (2)$$

不連続面の影響がなくなれば、すなわちnがゼロになれば永久変形係数Mは無限度であり、変形係数DはE₀と一致するはずである。

一辺40cmの立方体ブロックを二軸セルの中に入れて行った模擬岩盤試験の結果[2]では、n=20本/mなるき裂頻度の高い条件下でも、拘束圧を5kgf/cm²から30kgf/cm²まで増加させると、繰り返し载荷によるヒステリシスループはほぼ一つの線に収束し、さらに変形係数は供試体の弾性係数に近くなることが実験的に確認されている。(図-3(a)(b))小さなブロックを集積した場合の不連続面と実験の岩盤の不連続面の相違は当然存在するが、载荷領域が限定されていれば、载荷レベルの増加あるいはき裂頻度の減少とともに岩盤の挙動は岩実質部分の挙動に接近することは明瞭である。

次に、繰り返し载荷時の载荷曲線の接線勾配から得られる変形係数E_t(一般の载荷試験では、弾性係数と称している。)に対するDに着目すると、今回の孔内载荷試験結果では、ほとんど0.6以上の値を示し、ポアホールスキャナーによる観察もあわせて、比較的き裂が少なくよく締まった状態とみなせるが、D/E₀は図-4に示すように、4例中3例が、载荷圧が100kgf/cm²以上になっても、いずれも0.2以下の値にとどまり、依然として不連続面が岩盤の変形挙動を支配している。

3. 载荷試験における载荷領域

き裂頻度も小さく、不連続面に作用する垂直応力も100kgf/cm²以上の高レベルであっても、DとE₀の値に大きな隔たりがあるのは何故であろうか。もう一度、永久変形係数Mに着目し、载荷レベルと変形係数Dとの対応を考えてみる。図-4は、D/E₀とM/E₀とを比較したものであるが、両者はほぼ一致している。さらに、(1)式で示した垂直ジョイント剛性の傾向もあわせて考察してみよう。すなわち、剛性がほぼ一定となる点である。

従来の载荷試験では、载荷の影響範囲をある一定の領域とみなし、载荷重を増加させれば载荷圧も同様に増加しているものと考えていたが、実際の不連続面を含む岩盤内の試験では、荷重を増加しても、不連続面の閉合される領域が広がるだけで、载荷板付近の不連続面は、一定の閉合量にとどまり、不連続面に作用する拘束圧は増大していないものと考えられる。すなわち、荷重は増大しても、範囲が拡大するだけで、载荷点近傍の载荷圧はあるレベル以上には増加しない。

したがって、载荷試験における変形係数の評価は、永久変形係数、き裂頻度、ジョイント剛性の変化などを考察した上でなされることが望ましい。

<参考文献> [1]Goodman, R.E. (1980): Introduction to Rock Mechanics, pp.170-189, John Wiley & Sons.

[2]谷本親伯 他(1982): 孔内载荷試験結果の評価に関する考察, 第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.6-10, 土木学会岩盤力学委員会

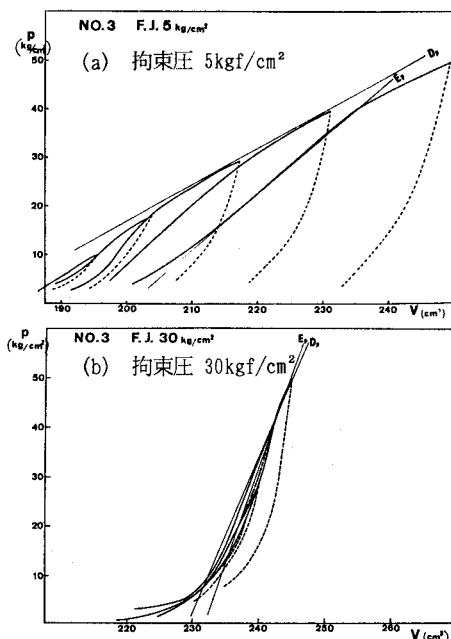


図-3 ヒステリシスの応力依存性

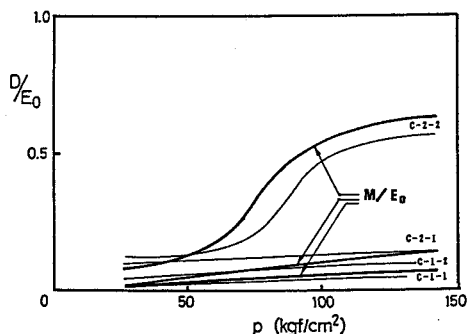


図-4 D/E₀およびM/E₀