

孔内載荷試験による岩盤の変形及び破壊機構に関する考察

京都大学 工学部 正会員 富 昭治郎

正会員 谷 本親伯

学生会員 西 原 晃

1. まえがき

土木構造物の大型化に伴い岩盤の変形特性を正確に把握することは急務となり、いくつかの試験法が開発されてきているが、そのうちの1つに孔内載荷試験がある。孔内載荷試験は現場でボーリング孔を利用して行われるもので載荷方法はジャッキ形式とゴムチューブ形式の2つに大別される。ジャッキ形式のものは孔内において、2枚の加圧板をジャッキにより横方向に、それぞれ反対方向に加圧し、加えた圧力と加圧板の変位から岩盤の変形係数を算出しようとするもので、実用化されているものにGoodmann Jack method, KKT法などがある。この種の試験器は載荷装置の取扱いが簡便で測定精度も高いという反面、孔壁の仕切りが悪い場合、加圧板が孔壁に密着せず試験結果に大きな誤差を生ずるという問題を持っている¹⁾。ゴムチューブ形式のものは孔内に挿入したゴムチューブを水压によって加圧、膨張させ、加えた水压と孔壁の変位から変形係数を算出しようとするもので、わが国では建設省土木研究所型K値試験器、LST、プレシオメーターなどが利用されている²⁾。ゴムチューブ形式の試験は孔壁が少々荒れている場合でも使用できるという利便をもっているが、孔壁の変位を排水量から換算するため大きな変形係数を有する材料の測定には水の圧縮ほど精度は校正と必要とする。

これら孔内載荷試験は現場で簡単に実施することができ、また他の現場試験を行うことができないような地質的条件の悪い箇所においても実施できるという利便から、最近では多く用いられるようになってきており、従来から数多くの研究がなされてきている。土質岩盤においてはワイの横抵抗の設計に利用されるほどその方法がある程度確立したものになっているが、岩盤を対象とする場合にはいまだ解明されていない点はいくつか残されている。特にこれら孔内載荷試験は必ずしも地盤を弾性体と仮定して解析を行っている^{2), 3)}ので、ひびわれを数多く含む岩盤に適用する場合には測定結果に及ぼすひびわれの影響の評価が重要な問題となる。これらの点に関してはいくつか研究がなされているが、現在のところ十分に解明されているとは言いがたい^{2), 3)}。本実験はこのように観察に立ち、孔内載荷試験を岩盤に適用する際に岩盤内に存在するひびわれの影響を評価するための研究の一環として、まずひびわれの存在しない理想的な岩盤モデルを用いて載荷試験を行い、岩盤内のひずみを測定することにより岩盤の変形特性と孔内載荷試験の相関性を明らかにしようとしたものである。

2. 実験の概要

本実験で製作したモデル岩盤およびひずみ測定位置は図-1に示してある。モデル岩盤の材料としてはモルタルと石膏の2種類を用い、ドラム缶に打設することにより横方向の拘束圧を与えている。モデル岩盤の配合および室内実験から得られた諸数値は表-1に示す。モルタルと石膏のそれぞれに対してA, Bの2シリーズの実験があり、Aシリーズは主として径方向のひずみ分布を調べるために図-1, Aに示すように、岩盤と同配合の円柱状試体に半径方向、接線方向そして径方向のひずみゲージを貼付したものを岩盤内に埋設している。Bシリーズは孔内載荷時のひびわれの発生を測定する目的で、孔を中心として同心円上に8方向モールドゲージを配置している。

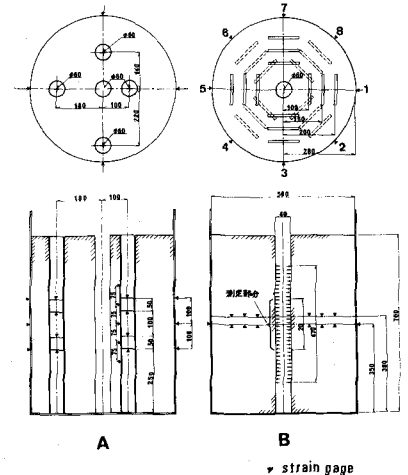
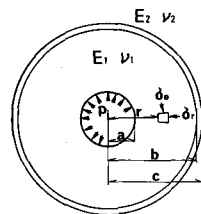


図-1 モデル岩盤 およびゲージ埋設位置

実験で用いた孔内載荷試験はゴムチューブ形式に属するメナールの4型プレシオメーターである。プレシオメーターの測定管は上中下3室の圧力セルからなり、上下のセルはガスによって加圧され、中央のメインセルの外側の応力分布を均等にする役目を果している。メインセルは水によって加圧され、送水量とその時の水压から変形係数が算出される。



載荷方法は定荷重式のくり返し載荷を行っている。各圧力段階においては2分間一定圧を保ち、加圧後30秒後と2分後に送水量とひずみの測定を行った。

2 解析説明図

3. 実験結果および解析

(1) 横方向の拘束効果

ドラム缶による横方向の拘束効果も調べるために図-2に示すように、異なった弾性定数も有する材料からなる2重の円筒を考えれば、内側の円筒内の応力は厚肉円筒の理論より次式で表わされる。

$$\sigma_r = \left\{ T \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - 1 \right\} p_i, \quad \sigma_\theta = \left\{ T \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - 1 \right\} p_i \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{b^2 \left\{ (1-\nu_1)(b^2 - c^2)/E_1 - K_1 \right\}}{(b^2 - c^2)K_1 - (b^2 - a^2)K_2}$$

$$K_1 = \frac{1}{E_1} \left\{ a^2(1+\nu_1) + b^2(1-\nu_1) \right\} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{1}{E_2} \left\{ c^2(1+\nu_2) + b^2(1-\nu_2) \right\}$$

今、室内実験から得られた諸数値を式(2)に代入すれば、モルタル・石コウとも $T = 1.01$ を得る。したがって $T = 1$ とおくと式(1)より岩盤内の応力はひずみは、

$$\sigma_r = -\frac{a^2}{r^2} p_i, \quad \sigma_\theta = \frac{a^2}{r^2} p_i \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{1+\nu_1}{E_1} \frac{a^2}{r^2} p_i, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1+\nu_1}{E_1} \frac{a^2}{r^2} p_i \quad (4)$$

とほり半無限弾性岩盤を仮定した時の応力とひずみを与える式と全く同一の式となる。したがって本実験で得られた測定結果はモデルの寸法による影響は含まれない。

(2) プレシオメーター測定結果

図-3は石コウモデルのBシリーズにおけるプレシオメーター測定結果を示したもので、水压 P に対して送水量 V と加圧後2分経過時の送水量から30秒後の送水量と引いたフリーフロム量 ΔV をプロットしている。なお水压はガムの弾性による補正を行っている。プレシオ試験における $P-V$ 曲線と $P-\Delta V$ 曲線と模式的に表わすと図-4のようになり、同図において P_0 はゴムチューブが孔壁に接した点を示し、 P_f は降伏点と考えられている。岩盤の変形係数はこの $P-V$ 曲線を用いて弾性理論より次式で表わされる。

表-1 岩盤の性状

モデル	M	G
岩盤材料	モルタル	石コウ
配合比	砂:水 10:3:2	砂:水 3:2
軸圧縮強度 Q_u kg/cm^2	120	70
引張強度 σ_t kg/cm^2	8.4	13.4
弾性係数 E kg/cm^2	1.8×10^5	4×10^4
ポアソン比 ν	0.25	0.27
内摩擦角 Φ deg.	52	21
粘着力 c kg/cm^2	19	2.5

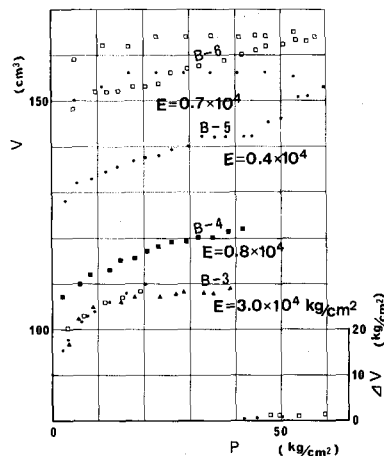


図-3 プレシオ測定結果

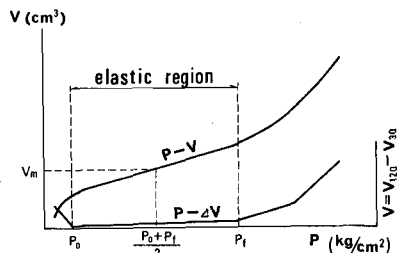


図-4 $P-V$ 曲線の模式図

$$E = 2(1+\nu)(V' + V_m) \frac{1}{\frac{dV}{dP} - \alpha} \quad (5)$$

ここに、 V' ：プレシオ測定管の初期体積（G型プレシオメーターでは $V' = 540 \text{ cm}^3$ ）、 V_m ： P_0 と P_f の中間点の圧力に対応する送水量、 dV/dP ：弾性領域におけるP-V曲線の勾配、 α ：水とゴムとの圧縮に対する補正係数である。

図-3からわかるように、弾性領域内はくり返し载荷によるP-V曲線はほとんど一致しており、くり返しによる

影響は見られず、降伏点を超えて载荷した場合にはその後のP-V曲線においてくり返しの影響が強く現れている。各くり返し段階において式(5)より変形係数を算出すると図中に示すようにくり返しによる変形係数は着しく低下している。

(3) 岩盤内のひずみ分布

図-5は石工ウのBシリーズにおけるひずみの測定結果の一例で、図-3のP-V曲線に対応するものである。同図からわかるようにP-E₀曲線はP-V曲線と全く同様傾向を示している。また図-5には加圧後2分経過時のひずみから30秒後のひずみと引いたクリープひずみ ΔE もプロットしてあるが、このクリープひずみは圧力が40 kg/cm²付近より増加の割合が大きくなっており、これは図-3におけるクリープ測定結果とよく対応している。よりのことからプレシオメーターの測定結果は岩盤内の変形特性をよくとらえているように思われる。

つぎに図-6は石工モデルのAシリーズにおけるひずみの測定結果を示したもので、圧力 $p = 50 \text{ kg/cm}^2$ のときの接線方向ひずみ E_θ と半径方向ひずみ E_r と深さに対してプロットしている。また同図には式(5)から求められるひずみ分布も示してある。孔壁の近傍ではひずみの分布にばらつきがみられるが、孔壁から離れるにしたがって、深さ方向にはほぼ一定のひずみ分布となりまた理論値とよく対応している。さらに、全体的に E_θ の方が E_r に比べて値が大きく、孔壁に近づくにつれてその傾向は強くなっている。このことから、孔壁から十分に離れた位置においては岩盤のひずみ分布はほぼ一様となり岩盤も弾性的な挙動を示しているが、孔壁の近傍では岩盤の変形は接線方向に引張りが主体となっていることがわかる。

Bシリーズの実験において8方向のひずみの平均値をとり両対数紙上に孔の中心からの距離に対してプロットすれば図-7のようになり、ひずみと距離は直線関係にあり、またその勾配はほとんど等しいことがわかる。図中には式(5)から求められるひずみと距離の関係と弾性係数のそれぞれの値に対して記入しているが、この図からわかるように実験された結果は弾性理論とよく対応している。また岩盤が理想的な弾性体であるならば、 E_θ/p と r の関係は p に関係なく一般的に定まるが、石工ウの場合圧力の影響を強く受け実際の岩盤材料における応力-ひずみ関係と類似する。これに対しモルタルの場合には圧力の影響はあまり見られず、また直線の勾配も理論結果とほとんど一致している。このことからモルタルが弾性体と同じ挙動を示していることがわかる。またプレシオメーター測定結果にお

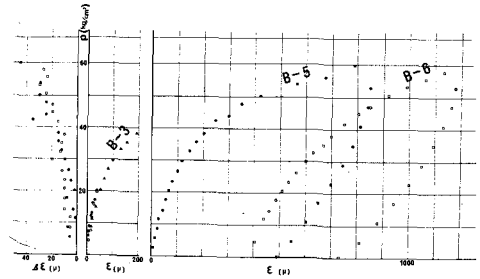


図-5 圧力-ひずみ曲線

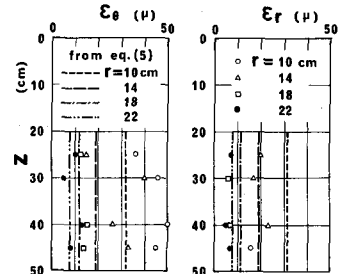


図-6 深さ方向のひずみ分布

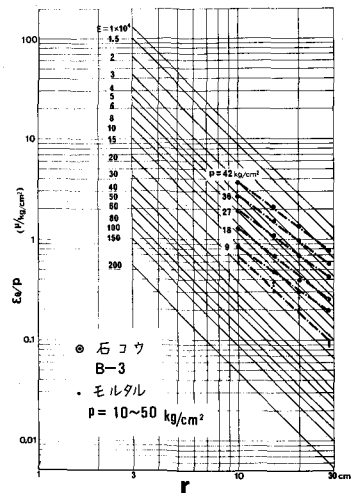


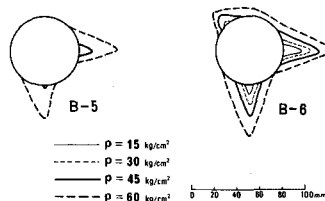
図-7 半径方向のひずみ分布

ける圧力 p_m に対応する弾性係数を図から求めるとそれをモルタルの場合 $E=17 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, 石工ウの場合 $E=4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ と一軸圧縮試験から求めた弾性係数とよく一致する。一方、同じ圧力 p_m に対してプレジオメータ試験から算出される弾性係数はそれぞれモルタルで $E=14 \times 10^4$, 石工ウで $E=3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ と25%程度小さく値を示している。しかしながら今回の実験のように変形係数が非常に大なる岩盤の場合には試験における測定精度から考えて比較的良好に対応していると考えよう。

(4) 孔周辺における降伏領域

岩盤の自重を考慮しない場合 ($\sigma_z = 0$), 軸対称平面ひずみ状態における降伏条件式はモール-クーロンの破壊条件から ε_θ と一軸圧縮強度 σ_u を用いて次のように表わされる⁵⁾

$$\frac{E}{1+\nu} \varepsilon_\theta \left(\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) - \sigma_u = 0 \quad (6)$$



ε_θ は図-7に示されるように両対数紙上で孔中心からの距離 r と直線関係にあるので、この直線を孔壁まで延長し、各圧力段階において

式(6)から求められる降伏ひずみ $\varepsilon_{\theta y}$ に対応する距離 r を読みとることにより降伏領域が決定できる。図-8は石工ウモデルのBシリーズのひずみ測定の結果からそれぞれ8方向に関して上記の方法により降伏している位置と読みとり孔周辺の降伏領域を推定したものである。降伏領域はくび状に発生し、明らかにひびわれの模様を示している。また降伏領域が最初に発生する時期はプレジオメータのP-V曲線から得られる降伏点の少し以前であり、このころからプレジオメータによって測定される降伏点は孔壁でのひびわれの発生を示すものと考えられる。さらに図-8からわかるように、除荷した場合にも残留降伏域が存在し、再度同レベルまで載荷すると降伏域が広がり、ひびわれが進展していることが認められる。これらのことからプレジオメータの測定結果におけるくり返しの影響は、くり返しによって進展するひびわれの影響が大きいと思われる。

4. あとがき

本実験の結果、ひびわれの存在しない理想的な岩盤は弾性体に近い挙動を示し、このような岩盤においては孔内載荷試験は岩盤の変形特性をよくとらえているように思われる。孔内載荷試験によって孔壁に生じたひびわれは圧力の増加とともに半径方向に進展し測定結果に重大な影響を及ぼし、このような状態のものを孔内載荷試験の結果には全く信頼性がないことが明らかになった。したがって今後孔内載荷試験と実際の岩盤に適用しその理論を確立させていくためには岩盤内に存在するひびわれに関する検討が重要な課題としよう。

本実験の実施にあたって御協力を賜った基礎地盤コンサルタント(株)の各位と本学4年生森谷敬三君に対して殊く謝意を表する。

参考文献

- 1) R. V. de la Cruz: Modified Borehole Jack Method for Elastic Property Determination in Rocks, Rock mechanics 10, pp 221-239 (1978)
- 2) 岡山・大沢・今井: 地盤の掘方向K値の研究, エと基礎 14-10, pp 31-38 (1966)
- 3) 本州四国連絡橋公団: 孔内載荷モデル実験報告書, (1977)
- 4) 武内・鈴木・田中: 孔内載荷試験と岩盤の変形に関する特性の研究, エと基礎 24-1, pp 35-41 (1976)
- 5) H. カスター: トンネルの力学 (金原 弘 訳), pp 37-64, 森北出版 (1974)

Deformation Behavior and Failure Mechanism of Rock
in Borehole Loading Test by Pressiometer

by Shojiro HATA, Chikaosa TANIMOTO and Akira NISHIHARA
Dept. of Civil Engineering, Kyoto University

It is needed to obtain the elastic properties of rock in-situ for more precise design of structures on rock mass. The borehole loading test, which was originally established in the field of soil mechanics, is one of the methods of determining the in-situ elastic properties of rock mass. In recent years this method has been widely used because of its simplicity, low cost and wide applicability, but it has not been fully established.

The analysis of the borehole loading test is based on the theory of elasticity. But in most cases the rock mass contains fractures which are expected to have large effect on the deformability. Therefore, it is important to clarify the applicability of the borehole loading test on rock mass with fractures. As a first step of the research project, the borehole loading tests were carried out on the rock model in the laboratory to clarify the applicability of the borehole loading test on the rock without fractures.

The model rock masses were made of mortar and gypsum, and it was encased in a drum to confine its lateral deformation. To obtain the deformation characteristic of the rock mass, stress gages were placed in tangential, radial and vertical directions in the mass. The cyclic loading tests using the pressiometer, which is one of the borehole loading test apparatus, were carried out, and strain was also measured to each pressure.

From the results of loading test, it is shown that the rock mass without fracture behaves as an elastic body and in such a case the borehole loading test has good agreement with the deformation of the rock mass. If the pressure is increased till the borehole wall are fractured, the results of the borehole loading test are affected with the fracture and the method now in use is not applicable.