

川崎地質(株) ○ 三木 幸 蔵  
 // 宮 川 純 一

1. はじめに

近年、岩盤試験には、非常に多くの種類があり、現在も様々な創意工夫をこらした試験機が開発されている。その中で、原位置において、直接岩盤の変形特性を調べる試験として最も一般的なジャッキ試験(平板載荷試験)は、数多くの地点で実施され、それより得られる物性値も設計段階で評価されてきた。しかし、この試験は、手間と費用を要するという欠点があった。一方で、岩盤に含まれる地質要素の複雑さを考え載荷寸法の大型化が要求されるが、他方、より手軽で、経済的な試験機の開発が望まれてきた。後者を満たすものとして、ボーリング孔を利用した孔内載荷試験が開発され、すでに実用に供している。実際には、ジャッキ試験と孔内載荷試験を併用することによって、各々の特長を生かした岩盤の変形特性調査が重要となる。

ところで、孔内載荷試験機は、主として、その載荷方式の違いにより、2つに大別できる。1つは、ポアホールダイラトメータ(孔内膨張計)と呼ばれるもので、これはゴムチューブ等を介して、孔壁全周にわたって放射状等分布荷重を与える装置である。もう1つの孔内載荷試験機として、ポアホールジャッキがある。これは、ボーリング孔の円周の一定部分に、一定方向の圧力を剛性載荷板を介して与える装置であり、前者が等分布荷重形式であるのに対して、これは等変位形式となっている。(図-2、3参照) 両装置には、それぞれ特長があるが、ポアホールジャッキの特長として、1) 載荷圧力が大きいため、軟岩から硬岩に至るまで適用でき、さらに、軟岩では、弾性領域を超えた試験が可能のため、その強度値も算定できる。2) 載荷方向が一定なため、あらかじめポアホールカメラ等で孔内の様子を調べておけば、試験目的に合う岩盤に集中して試験が行える、等があげられる。本文では、ポアホールジャッキの1種である高圧型KKTについて、装置の概要、試験結果の整理方法、問題点について若干の考察を行ったので、報告する。

2. ポアホールジャッキ(高圧型KKT)の概要

高圧型KKTの概略図を、図-1に示す。圧力は、地上の油圧ポンプにより高圧ホースを通じてジャッキに与えられる。与えた圧力およびそれによって生じた変位量は、ジャッキ本体に組み込まれた圧力計および載荷板に直結された変位計(ポテンシオメータ)によって測定される。さらに、圧力は、地上のポンプに取り付けられた圧力計、変位量は、ジャッキからの逆流オイル量をピュレットに導いて、それぞれ測定できるため、共にダブルチェックされ、正確な測定値が得られるようになっている。なお、変位量の測定精度は、 $2/1000$ mmである。

3. 試験結果の整理方法

KKT試験結果は、荷重P~変位量r図として得られる。この図より、I次、II次弾性係数およびI次、II次変形係数(用語の説明は、文献1)参照)を求める算定式について、以下説明していく。

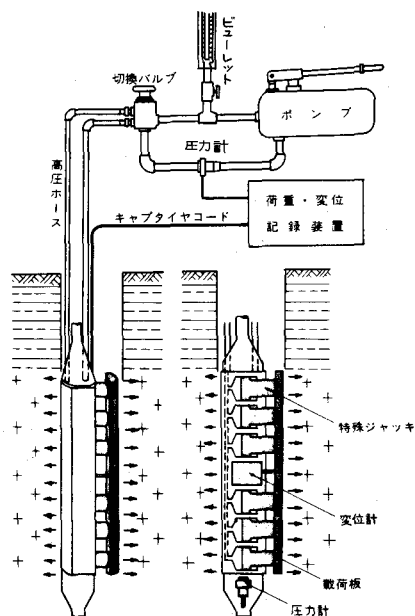


図-1 高圧型K.K.T

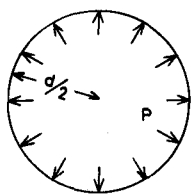


図-2. ボアホールダイラトメータ

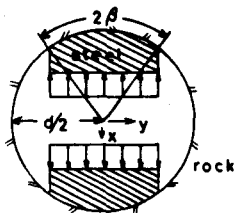


図-3. ボアホールジャッキ

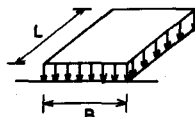


図-4. ブーゼンスク

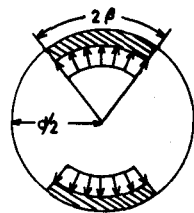


図-5. ジェーガー

図-2に示す等分布荷重形式の孔内載荷試験機に較べて、KKTのようなボアホールジャッキでは、図-3に示すように荷重が、孔壁の円周に連続的に載荷されないので、この厳密解を得ることは、容易な問題でなかった。そのため、従来は図-4に示す半無限弾性体の表面に部分分布荷重が載った場合の、いわゆるブーゼンスクの式を用いてE値やD値(弾性係数、変形係数の定義は、文献2)に準ずる。)を算定してきた。しかし、ブーゼンスクの式を図-3のケースに問題なく適用できるのは、載荷幅とボーリング孔直径の比が0.1以下の場合に限られるという報告がある。3) 高圧型KKTについて、載荷幅/孔直径を調べると、 $30\text{mm}/66\text{mm} = 0.45$ となり、0.1に較べてかなり大きく、よって、E値、D値の算定式として、ブーゼンスクの式は、完全な式とは言いがたい。

ジェーガーは、よりKKTの載荷形態に近い図-5の場合について、E値、D値の算定式を求めており、<sup>4)</sup>このジェーガーの式を用いて、ボアホールジャッキ試験結果を整理した報告<sup>5)</sup>もみられるが、図-3、5を比較すればわかるように、載荷方向が両者で異なっているため、この式もまた、十分な算定式とは言いがたい。

つきに、グッドマンは、ジェーガーの解をもとに、図-3に示す載荷条件を満足する解を得た。詳細な解析過程は、文献6)にゆずるとして、ここではその結果だけを示すことにする。すなわち、

$$E_G = d/2 \cdot \psi(\nu, \beta) \cdot \Delta P / \Delta r \quad \text{————— (1)}$$

ここに、 $E_G$ : グッドマンの式による弾性係数 ( $\text{Kg/cm}^2$ )。なお、変形係数についても同様。d: ボーリング孔直径 (cm)、 $\psi(\nu, \beta)$ : ポアソン比 $\nu$ と載荷曲率 $\beta$ (図-3)によって決まる定数。文献6)に表として与えられている。 $\Delta P$ : 荷重増分 ( $\text{Kg/cm}^2$ )、 $\Delta r$ : ある荷重増分 $\Delta P$ による半径方向変位量 (cm)

以上より、高圧型KKT試験結果からE値およびD値を算定する式として、式(1)に示すグッドマンの式が、最も適していることがわかる。この式を用いて、E値 $\sim \Delta P / \Delta r$ 関係を求めると、

$$\begin{aligned} \text{〈高圧型KKT〉 } E_k(P) &= d/2 \cdot \psi(\nu, \beta) \cdot \Delta P / \Delta r = 6.6/2 \times 1.115 \times \Delta P / \Delta r \\ &= 3.68 \Delta P / \Delta r \quad \text{————— (2)} \end{aligned}$$

ここに、 $E_k(P)$ : KKT試験より得られる任意の荷重 $P \text{ Kg/cm}^2$ 時の弾性係数 ( $\text{Kg/cm}^2$ )。なお、変形係数についても、同様の算定式とする。たゞし、ボーリング孔直径 $d = 66\text{mm}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、載荷曲率 $\beta = 27.5^\circ$ より、 $\psi(\nu, \beta) = 1.115$ とした。

#### 4. 試験結果の整理に伴う問題点

##### 4-1 ポアソン比

グッドマンの解析解をもとに、<sup>6)</sup> $\psi(\nu, \beta)$ とポアソン比 $\nu$ の関係を示すと、図-6となる。これより、E値やD値は、ポアソン比が高い場合を除いて、 $\nu$ にそれほど影響されないことがわかる。したがって、ポアソン比については、適切な試験を行ってその値を得るにこしたことはないが、妥当な仮定値を用いてE値

D値を求めても、その誤差は、無視しうるほど、小さいことがわかる。

#### 4-2 高圧ホースによる圧力損失の影響

前述したが、KKT試験において、圧力は、ジャッキ本体および地上の油圧ポンプの両方に取り付けられた圧力計により測定される。測定深度30m、ポンプ圧450kg/cm<sup>2</sup>で、両圧力計により得られた値の差異は、2~3%内と無視しうる程度であることが判明している。

#### 4-3 変位置測定に伴う誤差

圧力と同様、変位置も2つの測定方法により、ダブルチェックされることは、すでに述べたとおりである。図-7に、ビューレットおよびポテンシオメータによって、それぞれ得られた両測定結果の関係を示す。これより、両測定結果には、ほぼ1対1の関係が成立することがわかる。

#### 4-4 載荷板長さの影響

式(1)の誘導は、平面ひずみ条件で解かれているため、載荷板長さが無限長であると仮定している。ところが、実際のKKT載荷板は、有限長であるため、何らかの補正を必要とするが、高圧型KKTの場合、載荷長さ/載荷幅 = 300mm / 30mm = 10と、載荷幅に比べ、載荷長さが大きいので、有限長に関する補正を行っても、10%以内<sup>6)</sup>と思われる。よって、高圧型KKTについては、載荷板長さの影響は、特に考慮しないことにする。

#### 4-5 孔壁と載荷板の接触不良による影響

ボーリング孔を利用する孔内載荷試験の場合、試験結果に最も大きな影響をおよぼすのは、孔壁の仕上がり具合であることは、すでに知られている事実である。<sup>7)</sup>粘性土地盤では、KKT試験機の先端にトリーマ

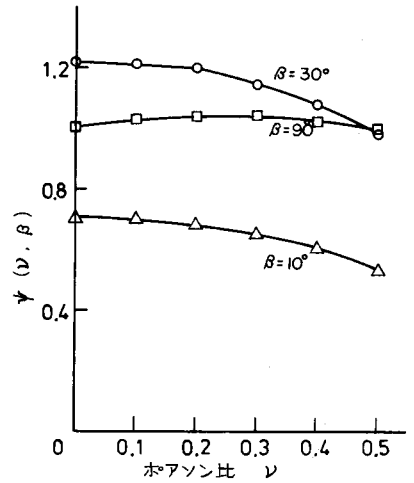


図-6  $\psi(\nu, \beta)$ と $\nu$ の関係

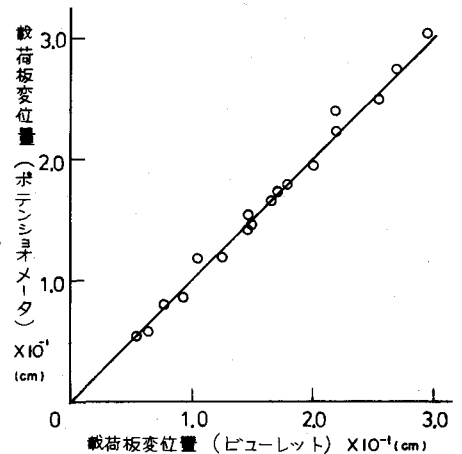


図-7 変位置測定結果の比較

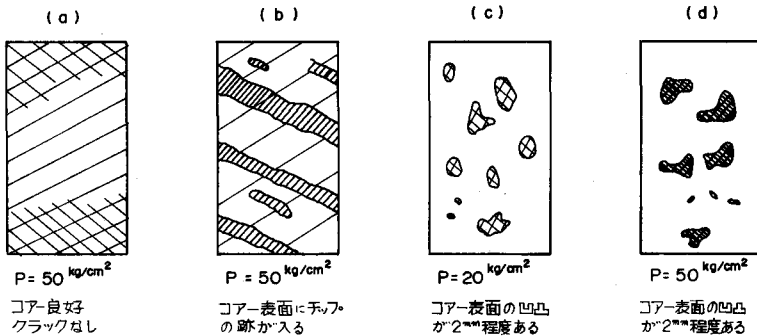


図-8 孔壁と載荷板の接触状況 (角礫凝灰岩)

一を取り付けることによって、孔壁を不攪乱に近い状態に仕上げる事が可能であるが、岩盤の場合、ボーリング掘削後、そのままの状態です試験を実施するため、孔壁の仕上がり具合が非常に重要となってくる。孔壁をきれいに仕上げるには、従来、良好なコアを採取することにのみ関心が払われてきたが、孔内載荷試験を行う場合には、コアよりもむしろ孔壁をいためないような配慮が大切となってくる。

孔壁と載荷板の接触状況を実測した例は、きわめて少ないが、<sup>5)</sup>今回、圧力判別紙を用いて、調べてみたので、その結果を図-8に示す。図より、両者の接触は、必ずしも良好とは言えない。式(2)を用いて、E値、D値を算定するとき、載荷板全面が孔壁にあたっているという仮定に基づいているが、図-8に示すように、接触面積が小さいと、E値、D値が真の値より小さい値として得られることになる。よって、この接触不良による何らかの補正を必要とする。そこで、実際に載荷板が孔壁に接触している部分を有効載荷面積と名付け、この有効載荷面積と載荷板面積の比を、有効載荷率とした。すなわち、

$$\text{有効載荷率} = \frac{\text{有効載荷面積}}{\text{載荷板面積}} \quad (3)$$

図-8に示す4ケースについて、この有効載荷率を求めると、表-1となる。この有効載荷率は、ボーリング掘削技術の工夫により高められるものであるが、一方、岩種、岩盤状態(割れ目、キレット等)に依存し、さらに、荷重強度によって変化する性質のものである。現時点では、この有効載荷率に関するデータは少ないが、正確なE値やD値を求めるには、

表-1 有効載荷率

	図-8(a)	図-8(b)	図-8(c)	図-8(d)
有効載荷率	0.53	0.48	0.28	0.29

KK T試験を実施する地点の有効載荷率を求め、これによって、載荷板接触不良の補正を行っていく必要があると考えている。

### 5. 試験結果の検討

KK T試験より得られる荷重~変位図の見方、用語の説明については、文献1)に示したが、この試験機の特長の1つとして、前述したように、載荷方向が一定しているため、岩盤中に含まれる地質分離面に起因した異方性を判定することが可能であることがあげられる。

異方性の判定方法として、1)、同一ボーリング孔内で、載荷板の位置を変化させて試験する方法や、2)、同一地点で方向を変えた数本のボーリング孔を掘削し、それぞれの孔内で試験する方法、がある。このような試験を実施し、その結果を吟味すれば、その岩盤のもつ異方性の度合を判定する何らかの目安を得ることが期待される。現在のところ、異方性の顕著な岩盤では、それを最も強く反映する指標として、最大I次荷重  $P_{I \max}$ 、最大II次荷重  $P_{II \max}^1$  が有効であると考えている。すなわち、載荷方向によって、これらの諸数値は当然変化するものと考え、データの解析、考察を進めている。

参考文献：1) 光宗、佐藤、宮川：“横坑内ジャッキ試験とボアホールジャッキ試験の対比検討”第11回岩盤力学に関するシンポジウム 1978 2) 土木学会編、“土木技術者のための岩盤力学” 3) 松岡、能町：“無限体中の円孔に部分分布荷重が作用するときの3次元応力解析”土木学会論文報告集 第229号 1974 4) J.C. Jaeger,：“Fundamentals of Rock Mechanics (242P), Methuen (1968) 5) 猪熊明：“孔内載荷試験の岩盤への適用性”第32回土木学会年次学術講演会講演概要集 P534~P535 6) R.E. Goodman, T.K. van and E.H. Heuse,：“The Measurement of Rock Deformability in Bore Holes” Symp. on Rock Mechanics. 1968 7) 西垣、三木、森田：“ボーリング孔壁の乱れが孔内載荷試験におよぼす影響”第31回土木学会全国大会 P420

## ROCK DEFORMABILITY TEST BY BOREHOLE JACKS

Kozo MIKI\*

Junichi MIYAGAWA\*

For the purpose of loading test in the borehole to measure the deformability of rocks, two types of devices, the borehole jacks and the borehole dilatometers, have been developed mainly. These devices have different loading systems.

Advantages of the borehole jacks are follows.

- (1) As loading pressure is high, it can be used in soft or hard rocks. Especially in soft rocks, as it is possible to measure over yield stress, the value of strength can be obtained.
- (2) The loading being directional, the test can be oriented and focused on certain geologic targets.

Many equations are proposed to obtain the coefficient of deformability and the modulus of elasticity from the test result, load-displacement relations, by Boussinesq, Jaeger, and Goodman. But Goodman's equation was most reliable for interpretation of field data.

Most important problem to obtain good test results by means of borehole jacks is the state of the loading plate-rock contact face. But in even the best test case in this study, contact area was about 50 % of the total loading plate area. So any corrections about this problem is will be necessary.

---

\* KAWASAKI Geological Engineering Co., Ltd.  
Technical Research Institute