

岩盤不連続面剛性の評価と原位置岩盤の変形特性

ESTIMATION OF JOINT STIFFNESS AND DEFORMABILITY PROPERTY OF JOINTED ROCK MASS

谷本親伯¹⁾・岸田 潔²⁾

Chikaosa TANIMOTO & Kiyoshi KISHIDA

Abstract

When we estimate the mechanical properties of jointed rock masses, it is very important to grasp joint stiffness. In this paper, we have carried out the borehole loading test after surveying the borehole wall by using Borehole Scanner System, then we have suggested how to estimate joint stiffness in consideration of both the joints distribution and the loading mechanism on the Goodman jack type's loading tester. From the load ~ displacement curves obtained through the borehole jacking tests, we have calculated joint stiffness $K(\omega)$ which presents the stiffness in the loading direction against the nearest joint from the loading point. As confirmed the validity how to estimate joint stiffness $K(\omega)$, we have carried out the loading test in constant loading angles against joint in the laboratory. And, we have found the good correlation between joint stiffness $K(\omega)$ in the field measurements and that in the laboratory.

1. はじめに

不連続性岩盤の力学特性を論じる場合、岩盤不連続面の分布特性および力学特性を把握することが重要となる。不連続性岩盤の変形解析等を行う場合、大きく分けて、解析対象領域を不連続体として扱う場合と、不連続面の物性（力学特性）を含めて等価な力学定数で置き換えて、連続体解析を行う場合の2通りがある。不連続体解析の一つとして個別剛体要素法を用いて解析を行う場合、不連続面の分布特性や不連続面の物性の評価が必要となり、これら二つの要因が解析結果を大きく左右する。実際に、これらの要因が十分に検討されて適用されるのであれば、不連続体解析は不連続性岩盤の解析として非常に有効なものであると考える。

しかし、実際に岩盤不連続面の物性、特に不連続面剛性をどのように決定するのか、あるいは実際の実験データで決定されている例は非常に稀である。本研究では、不連続性岩盤において等変位式孔内載荷試験を実施し、その結果と載荷地点の不連続面情報を基に岩盤不連続面の剛性の算定方法の提案を行う。また、孔内載荷試験の載荷機構を考慮にいたした室内試験を行い、不連続面剛性の算定方法の妥当性を検証する。

2. 孔内載荷試験

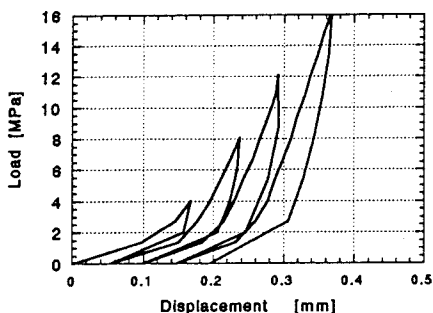
孔内載荷試験には、原位置岩盤の変形特性を載荷方向の違いにより考察するため、等変位式の硬岩用Goodman Jack

Model-52101（SINCO製）を用いて試験を行った。この試験機は、載荷部はステンレス製であるため剛性が高く、丈夫で破損するおそれがない。さらに、載荷能力が非常に高く、最大載荷荷重は70MPaで、軟弱地盤から硬岩まで広範囲に適用できる。載荷は、ポンプにより油圧を与えることで行われ、載荷圧力は手元の圧力計に表示される。載荷板の変位は、ジャッキの両端に内蔵されている2つのLVDT（差動トランス）により手元の変位計に直接表示される。孔内載荷試験の載荷パターンは、荷重レベル毎に各力学定数を算出するため、最大荷重まで3～5の荷重レベルに分け、各荷重レベルに対して載荷および除荷を繰返し最大荷重ないしは降伏点や破壊点に達するまで荷重レベルを増加させていく段階載荷法により行った。

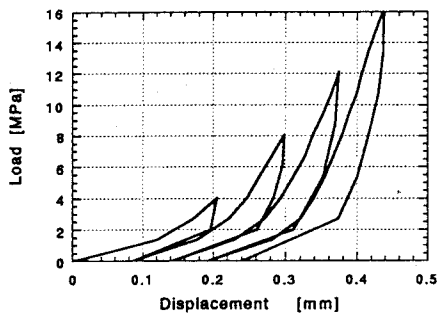
本研究では、孔内載荷試験の実施に先立ち、ボーリング孔壁の観察を行い、不連続面の分布状況の把握を行った。観察には、ボアホールスキャナシステム(BSS)（コア社製）を用い、不連続面の位置、走向・傾斜等の3次元的な配置状況およびそれぞれの不連続面の開口幅、充填物の有無といった性状の把握を行った^{1),2)}。孔壁観察の結果、流紋岩質凝灰岩、花崗岩、花崗斑岩では、不連続面は2～3の明瞭な卓越方向をもって存在し、卓越方向に沿った不連続面は連続性を持って生成されている³⁾。また、断層・破碎帯周辺では、その方向に沿って不連続面が連続性を持って生成されているのが確認されている³⁾。これに対し、粘板岩では、火山活動後に熱水変成を受けた影響で不規則に不連

¹⁾ 正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻

²⁾ 正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻



(a) Borehole : A, Location : 52.30m,
Loading Direction : N115W



(b) Borehole : A, Location : 52.30m,
Loading Direction : N70W

Fig.1 Example of Load ~ Displacement Curve through the borehole jacking

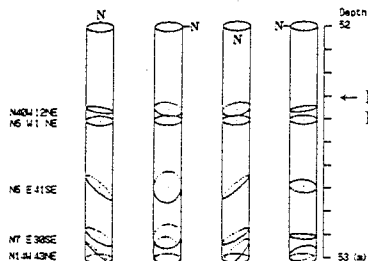


Fig.2 Three dimensional continuous image of joints

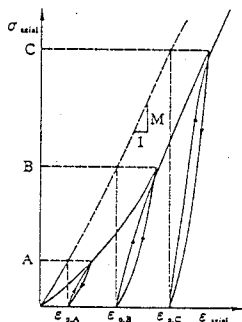


Fig.3 Determination of the modulus of permanent deformation M^p

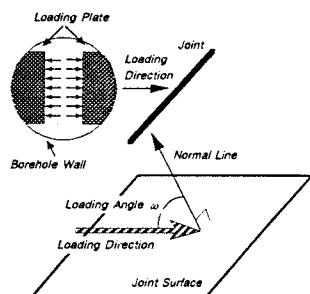


Fig.4 The concept of loading angle in the borehole jacking

継面が生成されており、不連続面に粘土充填物が多く確認されている³⁾。

試験地点は、4つのボーリング孔を通じて63地点で行った。また、岩盤の変形特性が載荷方向によりどのように変化するかを、不連続面の方向性と載荷方向の関係が変形に影響をおよぼすのかを検討するため、同一地点で載荷方向を変えて試験を行った。したがって、合計で126方向で試験を実施した。

孔内載荷試験の結果の一例をFig.1に示す。Goodman Jack型孔内載荷試験機では、先にも述べたが載荷に方向性があるため、き裂の方向性と載荷の方向から岩盤の変形を論じることが出来るものと考えられる。実際に、Fig.1には同一地点で載荷方向を変えた場合の結果を示しており、載荷方向が異なれば、得られる荷重～変位曲線が異なり、繰返し載荷に伴う塑性変形量（永久変形量）も異なっていることが確認できる。Fig.2は、Fig.1に示す孔内載荷試験を実施した地点の不連続面の分布状況を示したものである。これは、BSSにより孔壁観察を行い、不連続面の位置および走向・傾斜を求め、展開図に示したものである。孔内載荷地点は、局所的な載荷であり、載荷地点周辺のき裂が変形に寄与し、変形量や永久変形量が異なる原因になっているものと考えられる。

一般に、得られた荷重～変位関係より、Goodmanの弾性解⁷⁾を用いることで、ボーリング孔周辺の応力状態を考慮して変形係数や弾性係数を求めることができる。また、繰

返し載荷に伴う非弾性変形量（永久変形量）に対して永久変形係数 M の概念⁵⁾を適用し（Fig.3）、筆者らは次式のよう

$$M = \frac{d}{2} \cdot \psi(\beta, \nu) \cdot \frac{p}{u - u_e} \quad (1)$$

ここで、
 d : 孔径 (mm)
 u : 載荷圧増分に対する平均変位
 u_e : 再載荷圧増分に対する平均変位
 p : 増分載荷圧

$\psi(\beta, \nu)$: 載荷板角とポアソン比に決まる関数

不連続性岩盤における永久変形量は、岩石実質部分の塑性変形ではなく不連続面の変形、特に不連続面のせん断変形に起因するものであることを筆者らは室内実験を通じて確認している⁷⁾。

孔内載荷試験の結果より、不連続性岩盤の変形は、弾性変形と非弾性変形から構成されている。

$$u_{total} = u_e + u_p \quad (2)$$

そこで、変形係数 D 、弾性係数 E と載荷重 P を用いると、

$$\frac{P}{D} = \frac{P}{E} + \frac{P}{M} \quad (3)$$

となり、

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{E} + \frac{1}{M} \quad (4)$$

という関係が得られる。先にも述べたが、不連続性岩盤の非弾性的変形は不連続面に起因するものである。残りの岩

盤の弾性変形は、岩石実質部分と不連続面の弾性変形の和であると考え、そこで、

$$\frac{1}{E_{mass}} = \frac{1}{E_{intact}} + \frac{1}{E_{joint}} \quad (5)$$

という関係を得ることが出来る。 E_{mass} は、孔内載荷試験の結果や式(4)から求めることが可能である。本研究で行った孔内載荷試験は、載荷の方向性があり1点で2方向試験をしており、同一地点で E_{mass} を2種類求めることが出来る。また、 E_{intact} は岩実質部分のサンプルにより室内試験から求められるものである。これらより、式(5)を用いて岩盤不連続面の剛性を決定することが可能であると考え、

3. 不連続面剛性

ここでは、孔内載荷試験実施地点において不連続面にどのような載荷圧が作用しているか試験機の載荷機構を含めて考察を行い、不連続面の剛性の算定を行う。

本研究では、Fig.4に示すように不連続面の法線方向と載荷軸方向とのなす角を ω と定義し、その方向に計測した変位と載荷重を求め、これらにより載荷角方向の不連続面剛性 $K(\omega)$ により不連続面の变形が表される、というモデルを提案する。これにより、原位置試験において任意の方向に対して試験を実施した場合、孔壁観察より抽出した変形に影響をおよぼす不連続面と載荷軸方向との角度(載荷角 ω)に応じた不連続面剛性 $K(\omega)$ が次式のより求められることになる。

$$E_{mass} = \left[\frac{1}{E_{intact}} + \frac{d \cos^2 \omega}{2h^2 K(\omega)} \right]^{-1} \quad (6)$$

この式は、載荷試験に影響のある不連続面を孔壁観察から決定し、載荷板とその不連続面の最少距離 h を用いて表したものである。したがって、距離による荷重の現象を考慮していることになる。

このような手法を用い孔内載荷試験結果から求めた不連続面剛性 $K(\omega)$ と載荷角 ω をFig.5に示す。以上のような手法で、孔内載荷試験の結果から不連続面の剛性を求めることが可能となったが、載荷角 ω と不連続面剛性 $K(\omega)$ を用いて不連続面の力学特性を評価するには、これらの関係を明確にする必要がある。次章では、不連続面の变形特性を明らかにする室内試験を実施し、載荷角と載荷角方向の不連続面剛性の関係について検討を行う。

4. 載荷角一定載荷試験

不連続面の变形挙動を把握するため、室内試験を行い、載荷角と載荷角方向の不連続面剛性に関する検討を行う。

まず、供試体の作成を行う。供試体は、ボーリングコアより5種類の自然の不連続面を抽出し、シリコンゴム(TSE350, 東芝シリコン製)により不連続面の型取りを行う。このゴム型を用い、モールドにゴム型を設置し、モルタルを流し込み、自然状態と同一形状の不連続面を有するモルタル供試体を作成した。用いたセメントは、超早強セメント(ジェットセメント)で、配合比をセメント:砂:水=1:1:0.375とした。材令が14日以上であれば、

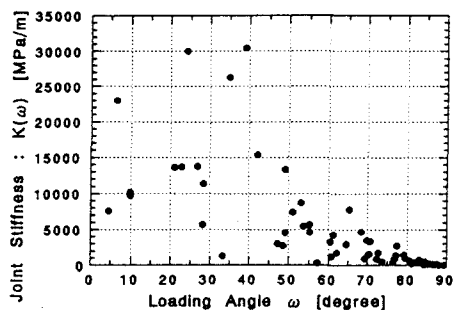


Fig.5 Relationship between joint stiffness $K(\omega)$ and loading angle ω through the borehole jacking

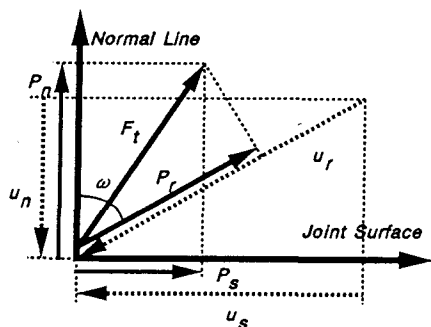


Fig.6 The concept of joint stiffness $K(\omega)$

強度増加が認められずほぼ一定となり、平均52.0MPaである。配合時には、高性能減水材(9HS)と凝固遅延材(ジャットセッター)を使用した。

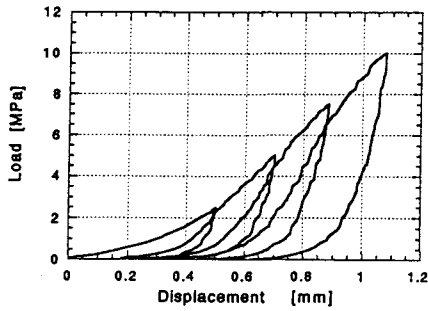
試験には岩石一面せん断試験装置(誠研舎製)を用い、パソコンを用いたインテリジェント式デジタル制御装置の開発を行うことにより、等変位式孔内載荷試験の載荷機構の特徴である不連続面に作用している応力の方向と変位の方向に着目した制御にて試験を行う。

まず、孔内載荷試験機の構造に着目し、不連続面の挙動と計測されるデータについて検討を行う。

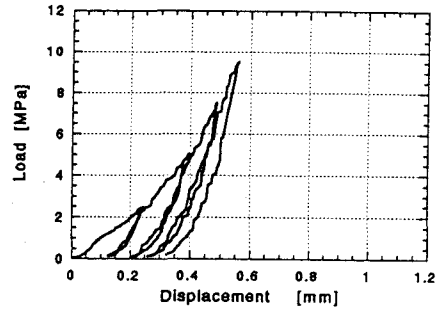
原位置においてFig.4のように、ある不連続面に対し載荷角 ω の方向で孔内載荷試験が行われた状況を考える。等変位式孔内載荷試験では、載荷軸方向に載荷を行い、すなわち、載荷板を強制的に変位させ、載荷力がある荷重レベルに達したとき、その方向の載荷板の変位を計測している。その時、不連続面上では載荷角の方向に強制的に変位が与えられ、その方向の荷重により制御が行われていると考える。このような不連続面上の作用する力の状態を室内試験により再現するため、以下のような制御を行う。

- ある載荷角 ω を設定し、不連続面に対しその方向の強制的な変位 u_n を与える。
- その際、垂直・せん断の各反力 P_n 、 P_s を計測し、合力 P を求める。
- その合力の載荷角方向の成分 P_ω が、設定した荷重レベルに達するまで不連続面を変位させる。

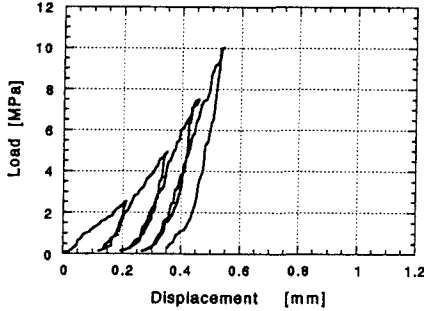
Fig.6に上述の制御の概念図を示す。このような制御を



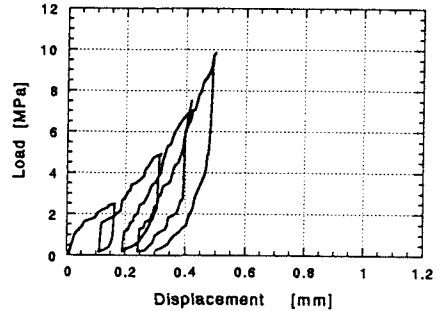
(a) Sample 1, Loading Angle = 75



(b) Sample 2, Loading Angle = 60



(c) Sample 3, Loading Angle = 45



(d) Sample 4, Loading Angle = 30

Fig.7 Example of Load ~ Displacement Curve through the loading test in constant loading angle

行えば、孔内載荷試験時の不連続面上の力の作用状況を再現できるものとする。また、この制御において、載荷角 $\omega=0$ とした場合、不連続面に対してせん断は起こらず、荷重制御の一軸圧縮試験と等しくなる。それ故、せん断試験という呼称は相応しないと考えられる。そこで、今回の制御で実施する試験は、載荷角一定載荷試験 (Loading Test in Constant Loading Angle) と名付けることにする。

実際の試験では、載荷角 $\omega=0, 15, 30, 45, 60, 75$ の6種類で、荷重レベルは2.5, 5.0, 7.5, 10.0 MPaの段階載荷、載荷速度は1.0 MPa/min.で実施した。

載荷軸方向の荷重～変位曲線の一例をFig.7に示す。この図から見られるように、孔内載荷試験の結果 (Fig.1) と類似した形になっている。これらの結果より、載荷角方向の不連続面の剛性 $K(\omega)$ を求めることが出来る。

5. 考察

原位置における孔内載荷試験の場合と同様、室内試験においても得られた荷重～変位曲線より不連続面の剛性を算出し、考察を行う。

原位置試験の場合は、岩盤中の不連続面と岩実質部分の変形を合わせたものを計測しているのに対し、室内試験では不連続面の変形のみを考えている。その上、せん断に与える面積が室内試験では非常に小さく、そのため寸法効果による影響が存在することが考えられる。したがって、得られた剛性の値自体を原位置試験の結果と比較することには問題があるが、その傾向を比較することは不連続面剛性算定法を検証するうえで必要であると考える。

載荷軸方向の荷重～変位曲線より求めた不連続面剛性

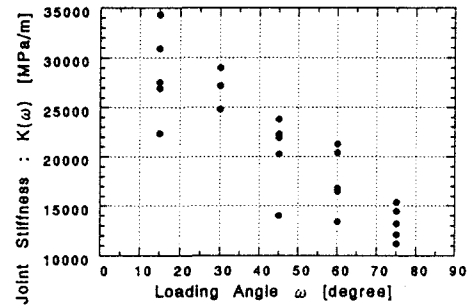


Fig.8 Relationship between joint stiffness $K(\omega)$ and loading angle ω through the loading test in constant loading angle

$K(\omega)$ と載荷角の関係をFig.8に示す。この図は、原位置での孔内載荷試験により得られた不連続面剛性 $K(\omega)$ (Fig.5)の傾向と概ね一致する。そこで、載荷角方向の不連続面剛性 $K(\omega)$ と垂直剛性 K_n およびせん断剛性 K_s との関係について考察を行う。

Fig.4において、載荷角 ω 、変位の大きさ u_r とすると、不連続面に与える変位 $\vec{u}_r$ は、せん断方向変位成分 u_s 、垂直方向成分 u_n に分解できる。

$$\vec{u}_r = u_r \begin{pmatrix} \sin(\omega) \\ \cos(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_s \\ u_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

それぞれの変位により、反力としてのせん断荷重 P_s 、垂

直荷重 P_n が計測されるが、それらの間には以下のような関係が成立する。

$$P_t = K_t \times u_t, \quad P_n = K_n \times u_n \quad (8)$$

したがって、実際に不連続面で作用している力 $\vec{P}_t$ は、次のように表すことが出来る。

$$\begin{aligned} \vec{P}_t &= \begin{pmatrix} P_t \\ P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_t \cdot u_t \\ K_n \cdot u_n \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} K_t \\ K_n \end{pmatrix} \cdot \vec{u}_t \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、計測している荷重 P_n は、不連続面上で作用している力 $\vec{P}_t$ の載荷角方向成分の大きさであるから、式(7)および(9)より以下のような関係が成立する。

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{\vec{P}_t \cdot \vec{u}_r}{|\vec{u}_r|} = \frac{d_r^2 \{ K_n \cos^2 \omega + K_t \sin^2 \omega \}}{d_r} \\ &= d_r \{ K_n \cos^2 \omega + K_t \sin^2 \omega \} \end{aligned} \quad (10)$$

したがって、載荷角方向の不連続面剛性は式(10)より以下のように表せられる。

$$K(\omega) = \frac{P_r}{d_r} = K_n \cos^2 \omega + K_t \sin^2 \omega \quad (11)$$

このとき、垂直剛性・せん断剛性共に一定であると仮定すると、載荷角一定載荷試験の結果は式(11)を用いて表すことが出来る (Fig.8)。また、式(11)を用いて実験結果を回帰することにより、平均の垂直剛性およびせん断剛性を推定することが可能となった。

今回の室内試験では、垂直剛性 $K_s = 4.1 \times 10^4 \text{ MPa/m}$ 、せん断剛性 $K_r = 4.5 \times 10^3 \text{ MPa/m}$ が得られた。

6. まとめ

式(11)の関係を原位置試験に適用し求めた不連続面剛性は、垂直剛性 $K_s = 1.7 \times 10^4 \text{ MPa/m}$ 、せん断剛性 $K_r = 3.0 \times 10^2 \text{ MPa/m}$ である。室内試験とは、材料強度、せん断面積の関係で異なる値となっている。

このように、不連続面に対する載荷角一定載荷試験を行った結果、載荷角方向の不連続面剛性は、垂直剛性およびせん断剛性と載荷角で表すことが可能となった。この関係は、原位置での孔内載荷試験の載荷機構を反映した室内試験の結果に基づくものである。したがって、この関係を原位置試験結果の解析に適用することで、孔内載荷試験を実施することにより不連続面の剛性を求めることが出来ることが確認できた。

しかし、一方で室内試験では供試体毎に不連続面剛性 $K(\omega)$ が異なることも確認している。ここでは述べなかったが、室内試験を行う前に不連続面の形状を計測し、ラフネスの評価を行っている。ラフネスや材料強度が、不連続面剛性にどのような影響を与えるのか、もう少し詳細に室内実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) Murai, S., Tanimoto, C., Matsumoto, Y. and Nagata, K. : Development of borehole scanner for underground geological survey, *Proc. of 16th Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.26, Part B7, Commission VII, pp. 391- 395, 1988.
- 2) Tanimoto, C., Murai, S., Matsumoto, Y., Kishida, K. and Ando, T. : Immediate image and its analysis of fractured jointed rock mass through the Borehole Scanner, *Fractured and Jointed Rock Masses*, L.R. Myer, N.G.W.Cook, R.E.Goodman, C.-F.Tsang (eds), Balkema, pp.219-227, 1995.
- 3) 谷本親伯, 岸田潔, 田畑浩宏司, 吉津洋一, 國井仁彦: 岩盤不連続面の取得・分析および不連続性岩盤のモデル化, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-36, pp.145-157, 1996.
- 4) Goodman, R.E., Van, T.K. & Heuze, F.E. : Measurement of Rock Deformability in Borehole, *Proc. of U.S. Symp. on Rock Mechanics*, pp. 525- 555, 1968.
- 5) Goodman, R.E. : Introduction to Rock Mechanics (Second Edition), *John Wiley & Sons*, pp.180-190, 1989.
- 6) 谷本親伯, 岸田潔, 岡村正典: 孔内載荷試験による岩盤不連続面剛性の決定, 第26回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1147-1150, 1991.
- 7) 谷本親伯, 岸田潔, 梅澤孝行, 吉津洋一: 孔内載荷試験による不連続性岩盤の荷重～変位曲線の解釈, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.556-560, 1993.