

(18) 不連続面の剛性を考慮したポアホールジャッキ試験結果の評価

京都大学工学部 正 員 谷本親伯
京都大学工学部 正 員 島昭治郎
京都大学大学院 学生員 ○西尾 朗

1. はじめに

岩盤の変形特性を調べる原位置試験の一つに、経済的で簡便なポアホールジャッキ試験がある。これは、剛性載荷板を介してボーリング孔壁の一部に、ある方向に加圧する等変位方式の試験法で、載荷方向に方向性があるため不連続性岩盤の異方性を評価でき、また、ポアホールテレビ観測と組み合わせることで、不連続面の分布状況や方位（走向傾斜）等の詳細な情報を試験結果の解析に反映させることができる。しかし従来の解析手法では地盤を連続な弾性体と仮定しているため、き裂や節理等の不連続面を含む岩盤に適用する場合には、試験結果に及ぼす不連続面の影響の評価が十分ではなかった。本論文では、このような観点から、不連続面の力学挙動を垂直剛性 k_n とせん断剛性 k_s を用いて表現し、岩盤の変形特性を定量的に評価することを目的とする。また、不連続面を含む模型地盤を対象とした室内実験、および、ジョイント要素を用いた有限要素解析を通じて、試験結果に及ぼす不連続面の影響を検討した上で、原位置試験から剛性を推定し、岩盤の変形特性を評価する方法を提案するものである。

2. 不連続面の剛性を考慮した解析手法

岩盤の変形特性は、岩石実質部と不連続面の性状に支配される。そこで、図-1のような規則的、かつ、平行に発達した不連続面をもつ岩盤において、東から北へ反時計回りに θ 傾いた方向の一軸応力状態における巨視的な変形係数 $D(\theta)$ を、岩石実質部の変形係数と不連続面の剛性、間隔、方位の関数として次のように求めた。

$$D(\theta) = \left[\frac{1}{E} + \sum_{i=1}^N \frac{A_i^{(j)}}{h_i} \left\{ \frac{1}{k_{si}} (A_i^{(1)} + A_i^{(2)}) + \frac{1}{k_{ni}} A_i^{(3)} \right\} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$A_i^{(j)} = (a_{ji}^{(1)} \cos \theta + a_{ji}^{(2)} \sin \theta)^2 \quad (j=1,2,3) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_{jk}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \beta_i & -\sin \alpha_i \cos \beta_i & -\sin \beta_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ \cos \alpha_i \sin \beta_i & \sin \alpha_i \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

E : 岩石実質部の変形係数 (kN/m^2)

N : 卓越した方向性を呈する節理群の数

i : 節理群の群番号 h_i : 節理群 i の平均的な間隔 (m)

k_{ni}, k_{si} : 節理群 i の垂直剛性, せん断剛性 (kN/m^3)

α_i, β_i : 節理群 i の走向 $N \alpha_i E$, 傾斜 $\beta_i S E$

また、図中の鉛直方向に削孔されたボーリング孔を利用してポアホールジャッキ試験を行う場合、 θ 方向に載荷して得られる変形係数 $D_j(\theta)$ は、岩盤を構成する岩石と不連続面の両者の変形量を反映したもので、(1) 式の $D(\theta)$ に相当すると考えられる。そこで、 $D_j(\theta)$ が $D(\theta)$ に比例すると仮定する。

$$D_j(\theta) = K \cdot D(\theta) \quad (K: \text{比例定数}) \quad (4)$$

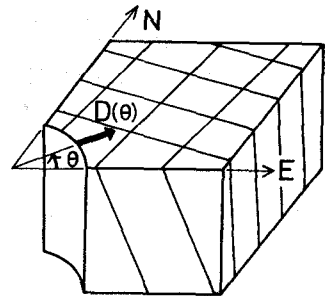


図-1 不連続性岩盤モデル

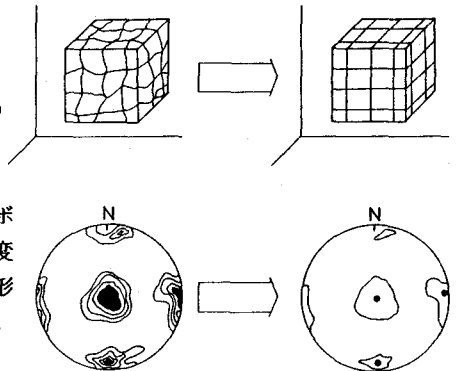


図-2 ステレオ投影法を利用した単純モデル化

(4) 式において、载荷区間を評価単位として、岩盤の変形係数 $D_j(\theta)$ 、不連続面の間隔と方位（ボアホールテレビ等による）、岩石の変形係数（一軸圧縮試験による）を決定すれば、不連続面の剛性を未知数とする方程式が得られる。²⁾ さらに、载荷方向 θ を未知数の数だけ変化させ、(4) 式を連立させることによって剛性 k_n 、 k_s が求まる。

岩盤に存在する不連続面は、通常、卓越した方向をもつ節理群を形成していることが多く、このような岩盤に(1) 式を適用するためには、ステレオ投影法を利用した統計的解釈による単純モデル化が便利である。(図-2)

図-3 は、モデル化された層状の不連続性岩盤に(1) 式を適用して、各方向の変形係数 $D(\theta)$ と不連続面の剛性との関係を示したものである。同図より、走向方向の変形係数 $D(90^\circ)$ は不連続面の影響を受けないことがわかる。

3. 不連続面を含む模型地盤を用いた室内実験

(a) 模型地盤および実験結果

不連続面の性状と変形係数の相関性を調べるために、図-4 に示す模型地盤を作成し、ボアホールジャッキ試験を行った。模型地盤には石コウを用い、配合は、石コウ：水=3:2 とした。この材料の変形定数は、一軸圧縮試験より、 $E=52700 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ 、 $\nu=0.20$ である。供試体 No.1 は連続体モデル、No.2~No.5 は、き裂頻度： $n(1/\text{m})=7.5, 15, 25, 35$ の不連続体モデルである。ここに、 n は水平面内に存在するき裂の長さの総和を、対象とする面積で除した値を採用した。なお、模型地盤の周囲に挿入されたフラットジャッキにより、任意の拘束圧の载荷が可能である。载荷パターンは、拘束圧を $10 \sim 40 (\times 10^2 \text{ kN/m}^2)$ の4段階に変化させ、各拘束圧に対して最高圧力を $10 \sim 40 (\times 10^2 \text{ kN/m}^2)$ の4段階に分割した繰返し载荷とした。また、模型地盤に存在するき裂の方向性を考慮して、図-5 のように载荷方向を変化させている。変形係数 D_j は、試験より得られた荷重(P)-変位(u) 曲線の包絡線の直線部分の勾配から Goodman 式³⁾ より算出し、さらに有効载荷率で補正した値とした。モデル No.2 の载荷方向 θ と D_j との関係を図-6 に示す。 θ による D_j の変動は、き裂を含むモデルの異方性に起因すると考えられる。また、拘束圧の増大に伴い D_j の変動が減少し、等方性に近い挙動を示す。

(b) 変形係数に及ぼすき裂頻度の影響

図-7 は、不連続体モデルの各载荷方向の D_j の平均値 $\bar{D}_j$ と連続体モデルの平均値 $\bar{D}_{j0}$ の比 $\bar{D}_j / \bar{D}_{j0}$ と、き裂頻度 n との関係を示している。不連続体モデルの変形係数がき裂頻度の影響を大きく受けていることが認められる。また、拘束圧が低い程、 n の値の増加に伴う変形係数の低下が著しいが、これは

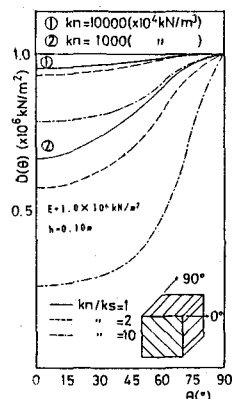


図-3 不連続性岩盤モデルの変形特性

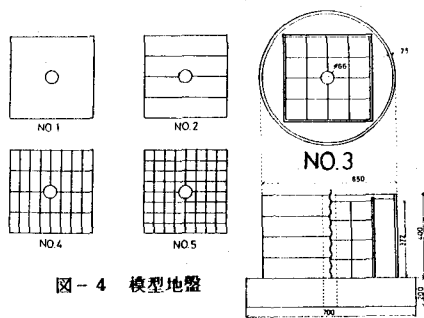


図-4 模型地盤

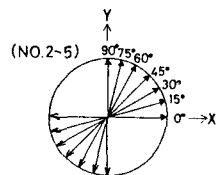


図-5 载荷方向

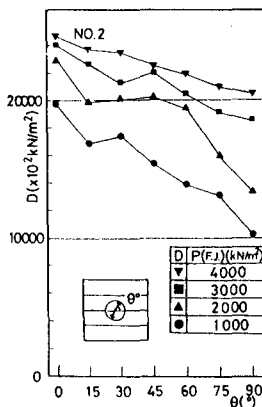


図-6 変形係数と载荷方向の関係

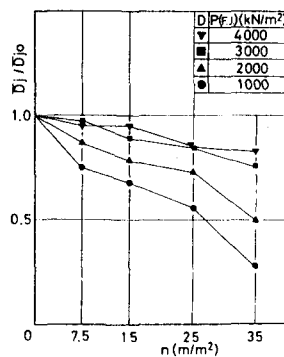


図-7 変形係数に及ぼすき裂頻度の影響

き裂によって分離された個々の岩片（石コウブロック）のかみ合わせが拘束圧に大きく依存していることを示唆するものである。4)

4. ジョイント要素を用いた有限要素解析

(a) 孔壁にき裂が存在する岩盤モデル
 解析モデルは、外径60cm、内径6cmの平面ひずみ状態にある厚肉円筒であり、X軸上にジョイント要素を組み込んでいる。このモデルに任意の拘束圧 P_0 を与え、さらに載荷板の幅 ($B=3\text{cm}$) として孔壁内の載荷板の範囲にある節点に任意の変位 u を与え、それによって生ずる反力の総和を載荷板の面積で除した値を載荷圧力 P_i とした。表-1にモデルの物性値を示す。また、載荷方向は図-5に示した7方向載荷とした。図-8は、X軸上に初めからき裂が存在している時の荷重-変位曲線で、(a)図は $\theta = 90^\circ$ で拘束圧を変化させた場合、(b)図は拘束圧 $P_0 = 5 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ で θ を変化させた場合を示している。(a) 図では拘束圧が低い程、わずかな P_i でき裂が孔壁から開口し変形係数が低下している。(b) 図では、載荷方向が $\theta = 0^\circ$ の時には、ほとんど弾性的な挙動を示しているのに対し、 $\theta = 45^\circ$ 90° の場合には、変形係数の低下が認められる。この曲線の接線から Goodman式により算出される変形係数を $D_j(\theta)$ として、連続体モデルの D_{j0} との比 $D_j(\theta) / D_{j0}$ と載荷方向との関係を図-9に示す。図中、黒印は載荷板と孔壁に存在するき裂が接触している場合、白印は接触していない場合を示す。同図より、 θ の増加に伴い、変形係数が減少していることがわかる。また、載荷板とき裂が接触していない場合には、載荷圧と拘束圧との比 P_i/P_0 によるパラッキ (P_i/P_0 が大きい程、 $D_j(\theta)/D_{j0}$ は小さい) が顕著であるのに対し、接触している場合には、ほぼ一定値をとる。

(b) 規則的な不連続面をもつ岩盤モデル
 解析は、ジョイント要素を用いて表現された不連続体モデルとそれに等価な直交異方弾性体モデル（主弾性係数比 $D_1/D_2=2.0$ ）について行った。図-10に解析モデルと解析結果

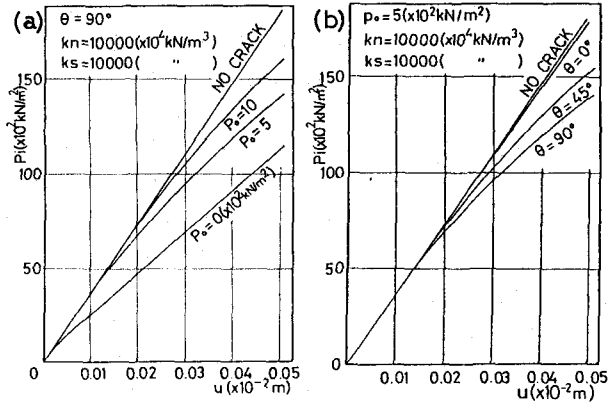


図-8 荷重-変位曲線

表-1 解析モデルの物性値

$E = 1.0 \times 10^6 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
$\nu = 0.2$
$kn = 1.0 \times 10^7, 1.0 \times 10^8 \text{ (kN/m}^3\text{)}$
$ks = 1.0 \times 10^7, 1.0 \times 10^8 \text{ (kN/m}^3\text{)}$
ジョイント要素の降伏応力
$\tau_y = 0.8 \sigma_n + 5.0 \text{ } 10^2 \text{ (kN/m}^2\text{)} (\sigma_n \geq 0)$
$\tau_y = 0.0 \text{ } (\sigma_n < 0)$

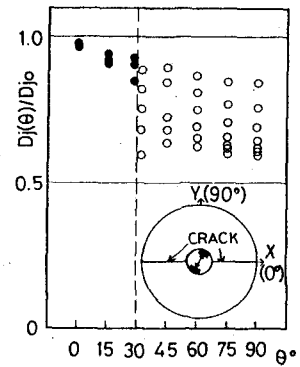


図-9 変形係数と載荷方向の関係

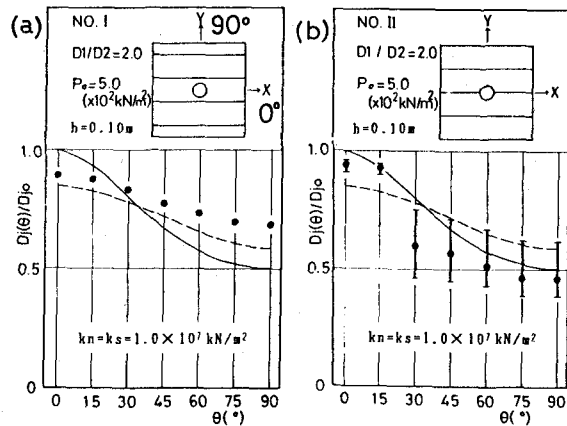


図-10 解析モデルと解析結果

を示す。モデルの物性値は表-1の通り。図中、実線は(1)式より得られる剛性を考慮した理論曲線、破線は直交異方弾性体モデル、プロットされた点是不連続体モデルの解析結果を表わす。同図より、解析結果と理論曲線が類似した傾向を示すものの、両者の間には相違が認められる。これは、主に、等変位载荷によって生ずる地盤内応力状態がかなり複雑であることに起因していると考えられる。また、孔壁にき裂が存在するモデルNo. IIでは、地盤に作用する引張応力のため、き裂が P_i/P_0 に依存して開口、進展し、変形係数の変動や分散が著しい。

5. 原位置試験結果の評価

調査の対象としたダムサイト基礎岩盤の地質は、主に、輝緑凝灰岩とチャートから構成されている。この岩盤に数本の鉛直ボーリング孔を削孔し、ボアホールジャッキ試験を行った。载荷試験は、不連続面の方向性を評価するために、採取されたコアの目視観察から孔壁に存在する不連続面がほぼ平行な一組の節理系列を成している区間を選定して、4方向に単調载荷で実施した。その結果の一例を図-11に示す。変形係数は荷重範囲30~50($\times 10^2 \text{ kN/m}^2$)の荷重-変位曲線の直線部分から算定した。同図より、载荷方向の違いによる D_j の変動が顕著に認められる。また、観察結果から载荷地点の孔壁はボーリングによる乱れも少なく、有効载荷率は载荷方向に関わらずほぼ一定とみなせる。よって、このような変形係数の変動は、主に、不連続面の性状や方向性に起因していると考えてよい。そこで、(1)式に基いて整理する。なお、この試験は最高圧力が約 $50 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の低応力レベルであり、不連続面の垂直およびせん断方向の荷重-変位関係が線形関係として近似でき、剛性 k_n 、 k_s が一定値をとるものとする。また、種々の不連続面を含む凝灰岩を対象とした実験から、初期せん断剛性と垂直剛性がほぼ等しいことが確認されており⁵⁾、ここでは、簡単のため、 $k_n = k_s$ と仮定した。図-3からも明らかに、変形係数は不連続面の走行方向で最大値、傾斜方向で最小値をとり、これらの変形係数の比は次式で与えられる。

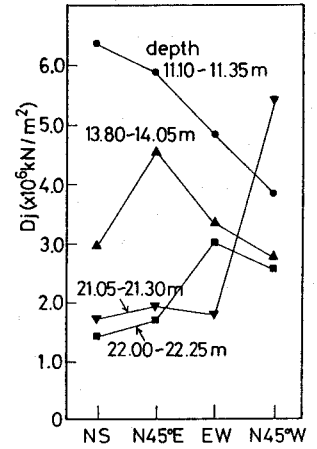


図-11 原位置試験結果

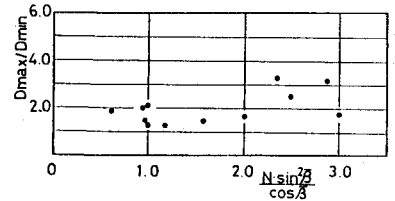


図-12 $D_{j\max}/D_{j\min}$ と $N \sin^2 \beta / \cos \beta$ の関係

$$\frac{D_{j\max}}{D_{j\min}} = 1 + \frac{E \sin^2 \bar{\beta}}{h k_n} = 1 + \frac{E}{0.25 k_n} \left(\frac{N \sin^2 \bar{\beta}}{\cos \bar{\beta}} \right) \quad (5)$$

$$h = \cos \bar{\beta} / n = 0.25 \cos \bar{\beta} / N$$

N : 载荷区間(0.25m)に存在する不連続面の数

n : 亀裂頻度(1/m)

$\bar{\beta}$: 不連続面の傾斜角 β の平均値

図-12は、 D_j の最大値と最小値の比 $D_{j\max}/D_{j\min}$ と、 $N \sin^2 \bar{\beta} / \cos \bar{\beta}$ の関係を示している。(5)式に対応した相関関係が得られるものの、バラツキが目立つ。これは、不連続面のラフネス、風化度や充填物等の複雑な性状に支配される剛性を考慮していないためと考えられる。したがって、このような重要な意味をもつ剛性 k_n 、 k_s を推定し、岩盤の変形特性を適確に評価するためには、不連続面の方位等の正確な情報の把握が必要である。今後は、実際への適用性を高めるために、ボアホールテレビ等による孔内観察結果を活用して実際に k_n 、 k_s を求め、より現実的な原位置試験結果の評価方法について検討する予定である。

参考文献

- 1) R.E. Goodman: Introduction to Rock MECHANICS pp.186 ~ 193, John Wiley & Sons
- 2) 川崎地質株式会社: ボアホールジャッキ法による岩盤調査, 研究紹介-土木学会岩盤力学委員会 第3分科会, 土木学会 (1983)
- 3) R.E. Goodman, T.K. Van, and F.E. Heuze: MEASUREMENT OF ROCK DEFORMABILITY IN BOREHOLES, Symposium on Rock Mechanics May 1968
- 4) 畠, 谷本, 菊谷, 西尾: 岩盤に対する等変位孔内载荷試験の適用, 昭和58年度土木学会関西支部年次学術講演概要, 土木学会 (1983)
- 5) 山辺, 石川, 星野: 不連続性岩盤の変形性評価に関する実験的研究, 第38会年次学術講演会講演概要集, 土木学会 (1983)

(18) INTERPRETATION OF BOREHOLE JACK TEST WITH JOINT STIFFNESS

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

SUMMARY

To speak of jointed rock, which we confront with widely through rock works in Japan, mechanical properties and behaviors of jointed rock are affected strongly by a state of joint or discontinuity. We can say that behavior of joint is extremely predominant over that of intact rock. However, there is very few analysis with consideration of joint behavior, and it has been widely developed to assume a certain uniform solid in which any joint concept is not considered by uniforming everything to one. So long as one takes this concept, any realistic rock behavior cannot be taken account into analysis.

Our approach is to clarify joint properties through the borehole jack test, which is much simpler and more economical than a conventional test such as plate loading and/or rock shear test, and to represent mechanical properties of joint (or discontinuity) both qualitatively and quantitatively with a concept of joint stiffness proposed by Goodman [1976] .

As the fundamental study, several simplified models are discussed with following parameters: joint spacing, orientations of discontinuities, normal joint stiffness and shear joint stiffness, and elastic properties of solid rock. Next, enlarging this concept, discontinuities posing in arbitrary three dimensional state are discussed through our numerical model. Experimental model produced by plaster blocks as well as numerical analysis were tested in the bi-axial loading vessel.

Based on the results obtained by the numerical and experimental studies, relationships between deformability of jointed rock, orientation of discontinuity, loading direction, and joint spacing are described in this paper. Also, we carried out several field measurements with a borehole jack and a borehole TV camera with 65mm dia. into the base rock consisting of chert and schalstein.

From the result mentioned above, we propose a useful method how to evaluate realistic joint stiffness and mechanical properties of jointed rock more quantitatively.