

(35) 孔内載荷試験とTV画像処理による不連続面性状の決定

京都大学工学部

○(正) 谷本 親伯

(正) 畠 昭治郎

日本道路公団徳島工事事務所

(正) 松田 均

序 論

不連続面を含んだ岩盤を対象とする多くの室内試験結果では、応力-変位関係の非線形性が認められているが、不連続面相互の状態が試料採取時の応力開放により変化し、原位置地盤の力学的挙動を正確に把握することは難しい。また、実際の岩盤構造物の設計においては、むしろ不連続面の存在による微視的な変形特性より岩盤全体としてみた全体的な変形特性が重要である。原位置試験は、その準備や実施上の時間・労力・操作性の面で問題も多く、さらに高価であり経済性の面で多数の地点で試験を実施できない。また、得られた結果の設計への適用についても難しかったが、Goodman の考案した孔内載荷試験の一種であるボアホールジャッキ試験は経済的にも操作性についても安価なボーリング孔さえ準備すれば簡便に実施でき、有用な試験と考えられる。本研究では、このボアホールジャッキ試験とその試験地点位置の不連続面の分布状況を知ることのできるボアホールTVカメラによる観察ならびにモデル岩盤による数値解析から不連続面の性状が岩盤の変形特性に及ぼす影響について考察した。

ボアホールジャッキによる室内試験結果と解析

原位置で岩盤調査用に削孔されたボーリング孔を利用するボアホールジャッキ試験は、岩盤内に存在する不連続面が変形挙動に及ぼす影響を岩盤実質部分(岩石)の変形と区別して考察するうえで非常に有効である。この試験理論解は、Goodmanにより次式で与えられる。[1]

$$D = \frac{d}{2} \Psi(\nu, \beta) \cdot \frac{\Delta P}{\Delta u} \quad (1)$$

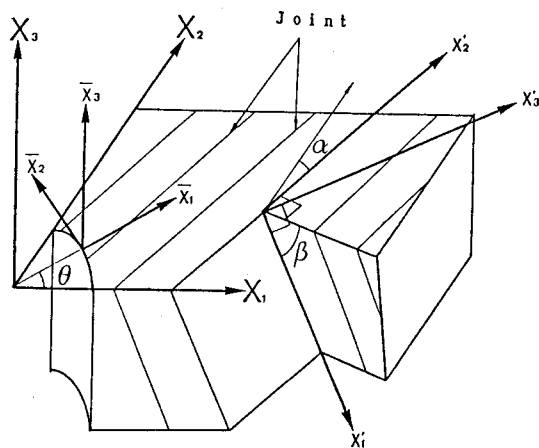


図-1 3次元不連続岩盤モデル

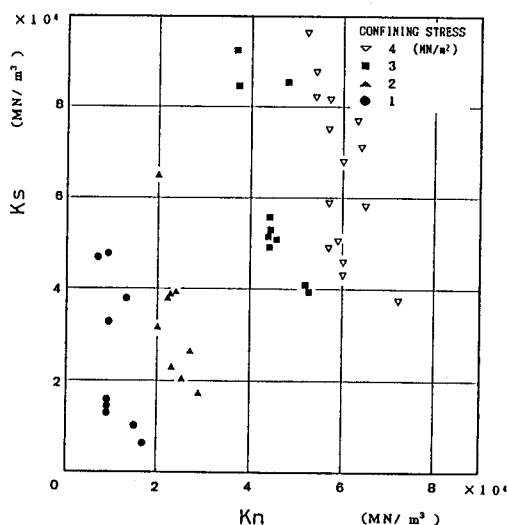


図-2 石コウブロックモデル試験結果より算定される垂直剛性とせん断剛性の関係

ここに D : Goodmanの式による変形係数
 d : ボーリング孔の直径
 $\Psi(\nu, \beta)$: ポアソン比 ν と載荷曲率 β
 によって決まる定数

ΔP : 荷重増分

Δu : ある荷重増分による半径方向の変形量

谷本らは、不連続面による変形挙動のちがいをみるため、石コウを用いた室内モデル岩盤に対しポアホールジャッキ試験を実施し、式(1)を用いて変形係数 D を算定した。[2]

不連続面の微視的な形状による応力-変位関係の非線形性が認められているが、設計などの実的な応力レベルでは、応力-変位関係は、線形性を有していることが知られている。今、Goodmanが提案しているように不連続面での垂直方向、せん断方向の応力-変位関係が弾性的な挙動を示すとし、この応力-変位関係の勾配を、垂直剛性、せん断剛性(以後、 K_n 、 K_s とする)と定義する。また、岩石自身が弾性体であると仮定すれば、図-1のような3次元の不連続岩盤モデルを考えることにより、変形係数 D は、次式で表わされる。[3]

$$D(\theta) = \left[\frac{1}{E} + \frac{\Lambda_3}{h} \left\{ \frac{1}{K_s} (\Lambda_1 + \Lambda_2) + \frac{1}{K_n} \Lambda_3 \right\} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$A_i = (S_{i1} \cdot \cos \theta + S_{i2} \cdot \sin \theta)^2$$

($i=1, 2, 3$)

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta & -\sin \alpha \cdot \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \cdot \sin \beta & -\sin \alpha \cdot \sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix}$$

ここに E : 岩石実質部の弾性係数
 h : 不連続面の平均距離
 K_n : 不連続面の垂直剛性
 K_s : 不連続面のせん断剛性
 α : 不連続面の走向
 β : 不連続面の傾斜

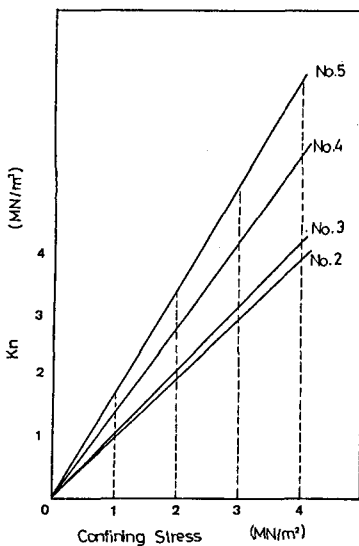


図-3 線形回帰された垂直剛性と垂直応力の関係

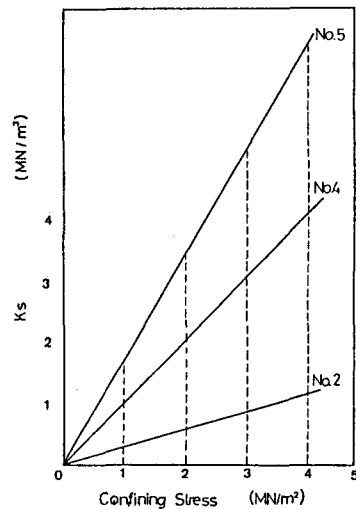


図-4 線形回帰されたせん断剛性と垂直応力の関係

これより、不連続面の分布状況（走行、傾斜、平均間隔）と、ボアホールジャッキ試験から求めた変形係数が2つ以上あれば、 K_n 、 K_s を決定できる。図-2は、室内試験結果をもとに算出した K_n 、 K_s を表わした例である。このようにして表わされた K_n 、 K_s はともに垂直応力に依存していることがわかる（図-3、4）また、 K_n と K_s に関して線形回帰すると、次の関係が導かれる。

$$K_s = 1.36 K_n \quad (r = 0.65) \quad (3)$$

上式の係数は、岩盤内の不連続面の垂直方向と、せん断方向のそれぞれの変形特性の相対的な関係を示す定数とみなすことができる。

原位置試験結果と解析

上記のボアホールジャッキ試験から K_n 、 K_s を算定するには、節理系の走行、傾斜、平均の間隔が必要である。このため、ボアホールカメラ（極細のTVカメラ）による孔壁の観測により、これらのパラメータを決定した。写真-1は、ボアホールカメラによるTV画面上の実像に、検出した節理群を重ね合わせたものである。発表のため、TV画面を写真撮影したため、かなり不鮮明であるが、ビデオテープから逐次画面を追跡していくと、節理群を明瞭に観察できる。この実画像上に、パソコン操作により、マウスを使用して検出した節理を重ねたものである。この情報をパソコンに自動的に入力され、コンターダイアグラムを作成した後、代表的な節理系の走向、傾斜を算出させることができる。図-5は、ステレオ投影法を用いて作成したコンターダイアグラムの一例である。

この原位置でのボアホールジャッキ試験結果とボアホールカメラによる観測結果を用いて室内試験で求めたのと同様の方法により得られた K_n 、 K_s を示したのが図-6、7である。横軸の垂直応力は、ボアホールジャッキ試験を実施した深度と岩盤の単位体積重量より側圧係数を0.5として算出した。これらを、各々線形回帰して求めた結果が次式である。

$$K_n = 0.22 \sigma_n \quad (r = 0.67) \quad (4)$$

$$K_s = 0.60 \sigma_n \quad (r = 0.75) \quad (5)$$

これより、 K_n 、 K_s 間の関係は次のようになる。

$$K_s = 2.73 K_n \quad (6)$$

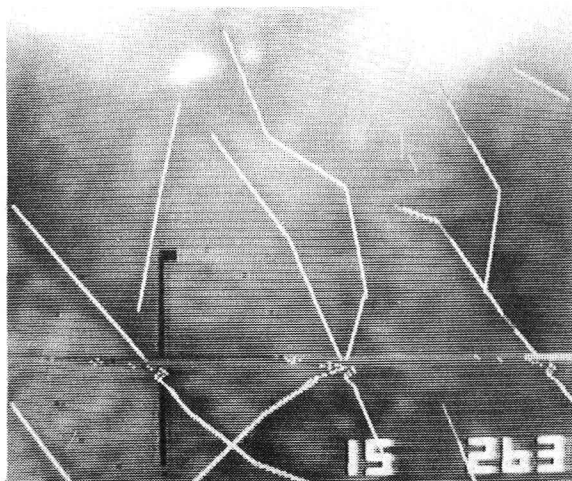


写真-1 TV画面上における実像と情報入力のため
検出した節理群（実像とモニター像との重ね合わせ）

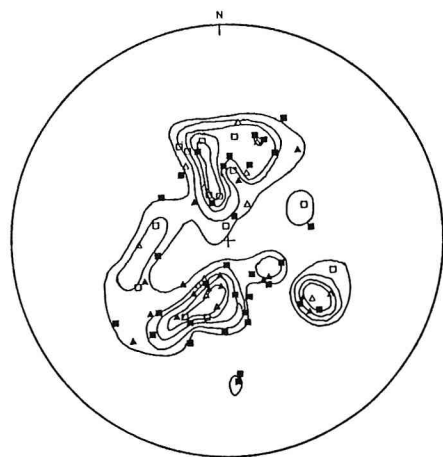


図-5 ステレオ投影法による
節理系コンターダイアグラム例

室内試験結果で求めた式(3)と式(6)の係数を比較すると、室内モデル試験と原位置試験での不連続面の粗度に対応していて、原位置岩盤では非常に荒く、そのため K_s が K_n に対し、高い値をとるものと考えられる。

結 論

現位置岩盤の力学的挙動を把握するため、種々の岩盤試験が実施されているが、いずれの結果においても岩盤中の不連続面の性状により大きな影響を受けている。従来の試験では、岩石実質部分と不連続面との挙動が一つとなったインデックス的な値しか得られず、地点が異なれば、新たな原位置試験を実施しなければならなかった。著者らの試みは、簡便に実施できるボアホールジャッキ試験に、ボアホール内の同一地点で試験機を回転させ、載荷方向を変化させることにより、方向性をもたせることのできる点、および、短時間に多数の地点を試験できる点に着目し、ボアホールの方向と不連続面の方向との相対的位置関係をボアホールTVを用いることによって検出し、節理群の走向、傾斜、節理間隔(場合によっては不連続面の開口幅)等に関する情報を得ることである。この結果は、すべてビデオテープに記録される。これをモニター画面上に再生し、パソコンと連動させ、実像から有意義な節理を抽出し、モニター画像を実像上に重ね合わせる。この操作から、自動的に節理情報が解析され、等間隔に広がる等価な節理(不連続岩盤)モデルにより原位置岩盤を表現し、岩石実質部分の変形性と不連続面の変形特性を区別して、岩盤構造物設計のための有用なパラメータを得る手法を確立することである。本研究において取扱った原位置岩盤は、流紋岩、シャルシュタイン、チャート、頁岩である。

謝辞 京都大学工学部稲田徹氏には、図面の作成にあたり、多大の協力を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] R.E.Goodman, T.K.Van & F.H.Heuse: The Mesurement of Rock Deformability in Bore Holes, Symp. on Rock Mechanics, (1968)
- [2] 谷本親伯, 畠昭治郎, 荻谷敬三: 孔内載荷試験結果の評価に関する研究, 第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (1982, 2), pp. 6-9
- [3] 谷本親伯, 畠昭治郎, 西尾朗: 不連続面の剛性を考慮したボアホールジャッキ試験結果の評価, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (1985, 2), pp81-85

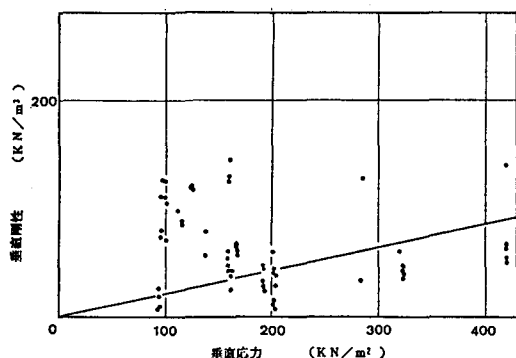


図-6 原位置試験に基づく垂直応力と垂直剛性の関係

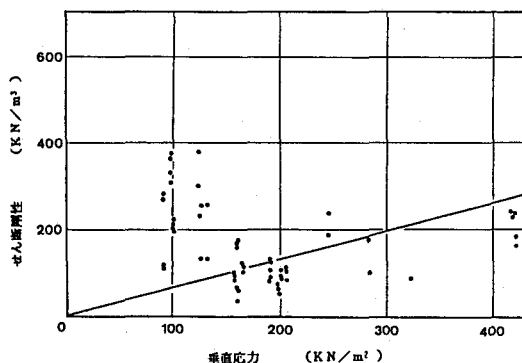


図-7 原位置試験に基づくせん断応力と垂直剛性の関係

(35) DETERMINATION OF JOINT STIFFNESS BY BOREHOLE JACK TEST
AND BOREHOLE TV WITH DATA PROCESSING ON MONITOR SCREEN

By Chikaosa TANIMOTO, Shojiro HATA;
Dept. of Civil Engg, Kyoto University, Kyoto,
and Hitoshi MATSUDA; Nihon-Dohro-Kohdan, Tokyo

A B S T R A C T

It is well known that the mechanical behaviour of fractured rock is strongly influenced by the state of joints. Joint orientation, contact pressure at joints and physical properties such as fracture frequency, aperture, roughness, alteration and moisture content are predominant parameters in the mechanical behaviour of rock mass. The authors have investigated the mechanical behaviour of jointed rocks through the plate bearing test, the rock shear test, and the borehole loading test in association with the laboratory test. However, it has been realized that joint behaviour is very hard to be analyzed in the laboratory test and the employment of limited number of specimens give rather unreliable solution apart from reality. It is concluded that the physical properties of joints must be determined in situ in undisturbed condition with a reasonable interpretation. Then authors have tried to solve it by introducing the concept of joint stiffness. The joint stiffnesses for normal and shear directions are considered as the overall indexes which cover roughness, alteration and aperture at joints at the same time. The authors's objective is to clarify the relationship between physical properties of joints and joint stiffnesses through the execution of the borehole jack loading test. The authors discussed in this paper on the determination of joint orientation and spacing in terms of observation by a borehole TV and then how to obtain representative stiffnesses of discontinuity. The new system in which data are processed automatically by a personal computer is described.