

(115) 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

京都大学工学部	正会員	谷本 親伯
京都大学工学部	正会員	○ 岸田 潔
京都大学大学院	学生員	梅澤 孝行
関西電力株式会社	正会員	吉津 洋一

Mechanical Behaviours of Jointed Rock Masses in Load~Displacement Curve Obtained through the Borehole Jacking

Chikaosa TANIMOTO,	Kyoto University
Kiyoshi KISHIDA,	Kyoto University
Takayuki UMEZAWA,	Kyoto University
Yoichi YOSHIZU,	Kansai Electric Power Co.

Abstract

The deformability of jointed rock masses has been determined through the plate bearing, flat jack or borehole loading test in general, and the modulus of deformation, which is obtained from the entire gradient of a load~displacement curve, has been employed as an index parameter of rock mass apart from the Young's modulus of intact rock. It is widely known that the deformation of rock mass is strongly affected by joint behaviour when the strength of intact rock is comparatively high. Also, in many cases a certain amount of nonrecoverable (inelastic) deformation is recognized as the hysteresis in the load~displacement curve. Based on the results of borehole jacking and borehole scanner system, the authors have considered the inelastic deformation of jointed rock masses with a concept of modulus of permanent deformation suggested by Goodman(1980).

1. はじめに

トンネルや地下発電所・ダム基礎といった岩盤を対象とする構造物を設計・施工する際、原位置岩盤の力学的特性を調べるため、平板載荷試験・原位置せん断試験・孔内載荷試験等が実施され、得られた結果から力学定数を算定し、設計の指標としている。これらの試験は、大規模で費用がかかると言った問題点を含むが、概ね原位置岩盤の力学・変形特性を把握するうえでは非常に有効なものであると考えられる。しかし、実際に行われている原位置試験の結果解釈が本当に原位置岩盤の変形特性の把握になっているのか疑わしい点があると考えられる。例えば、孔内載荷試験を行う場合、載荷地点の地質状態の把握が十分なされないまま試験を実施し、試験結果の解釈を行う際に載荷地点の詳細な地質やき裂状態を考慮しないまま行っているのが現状である。したがって、得られた結果は一つの指標にすぎず、なぜそのような変形が起こるのかと言うことに関して、岩盤の不連続性に関する条件と組み合わせた考察はほとんどなされていない。不連続面が変形におよぼす影響は非常に大きいものであり、不連続面の状態や幾何学的配置などを十分に把握せず原位置岩盤の変形を議論し、変形に関する力学定数を算定するのは不十分である。

そこで筆者らは、き裂の多く存在する地質に設けられたボーリング孔において1地点で2方向に対しジャッキ形式の等変位方式 (Goodman Jack または KKT) 孔内載荷試験を実施した。それに先立ち、ボアホールスキャナシステムにより孔壁観察を行い、地質及び不連続面の状態の把握を行った。孔壁観察の結果から載荷地点を決定すると共に、載荷試験から得られた荷重～変位曲線について不連続面の状況を考慮にいたした考察を行い、不連続性岩盤の変形特性についての検討を行った。

2. 孔壁観察

孔内载荷試験の実施に先立ち、ボアホールスキャナによる孔壁観察を行った。その結果、試験を実施したボーリング孔は、岩種が花崗班岩で、き裂頻度は5.9本/mといったデータが得られた。ボアホールスキャナのビデオ画像から载荷地点を決定し、後に载荷されたき裂の走行・傾斜・開口幅の状態や周辺のき裂頻度などを詳細な解析により求めた。载荷地点の画像からき裂をトレースしたものを図-1に示す。

3. 孔内载荷試験

孔内载荷試験では、ジャッキ形式の等変位方式を使用した。その理由は、载荷方向に方向性を持たせ、き裂のある地点で载荷を行い、き裂の方向性と载荷の方向性から岩盤の変形を論じるためである。ボーリング孔径は $\phi 66\text{mm}$ で、载荷パターンは繰返し段階载荷である。図-1に示した地点の荷重～変位曲線を図-2に示す。(a),(b)と(c),(d)は、それぞれ同一载荷地点で载荷方向が異なる。特に、(c),(d)は载荷地点のき裂の開口幅が大きいので、変形量に大きな違いが見られる。

4. 剛性一軸圧縮試験

孔内载荷試験から力学定数を算出するために必要なポアソン比を

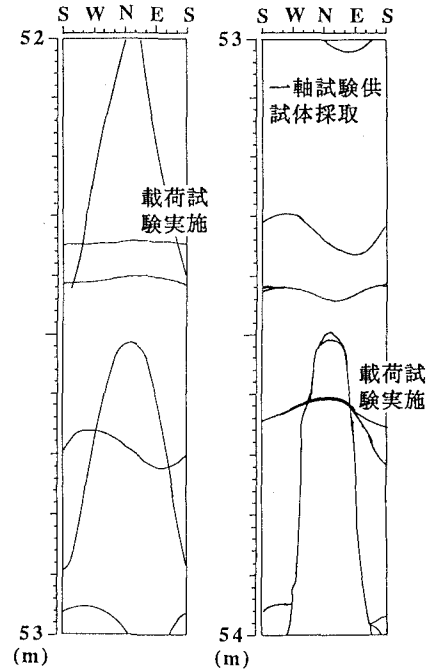
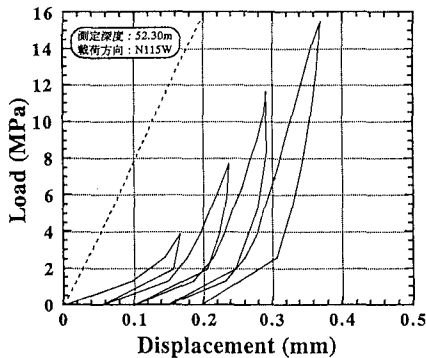
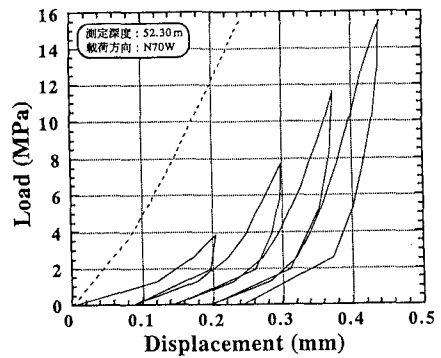


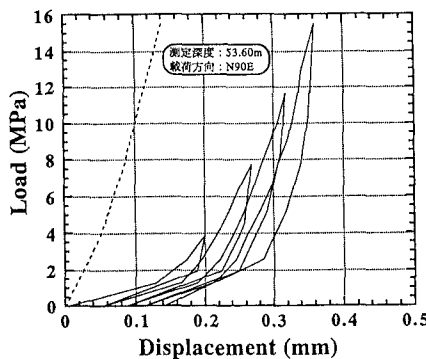
図-1 孔壁展開図
(き裂のみトレース)



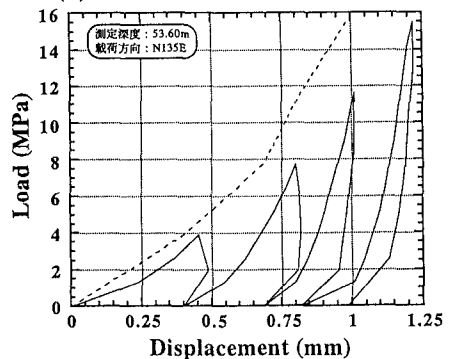
(a)測定深度52.30m 载荷方向N115W



(b)測定深度52.30m 载荷方向N70W



(c)測定深度53.60m 载荷方向N90W



(d)測定深度53.60m 载荷方向N135W

図-2 荷重～変位曲線

得るために、ボーリングコアからき裂のない供試体を作成し、1/100mmの精度で端面整形を行った後、剛性一軸圧縮試験を行った。試験の目的は、ポアソン比・一軸圧縮強度・弾性係数などの力学定数を求めることと、岩石実質部分の変形挙動を調べることである。応力～軸ひずみ関係はほとんど線形で、繰返し段階荷荷を行った場合ヒステリシスループが見られた。図-1に示す地点から得られた供試体を繰返し荷荷した剛性一軸圧縮試験結果（応力～軸ひずみ関係）を図-3に示す。

5. 考察

孔内荷荷試験で得られた荷重～変位関係から一般に、変形係数(D)や弾性係数(E)が求められる。原位置荷荷試験では従来より、変形係数は荷重～変位曲線の包絡線より算出し、弾性係数は最大荷重に近い荷重レベルで得られた直線部分の接線勾配として算出されている。この方法で今回の実験結果から算出した定数を表-1に示す。ただし、弾性係数は、荷荷時の接線勾配である。このようにして求められた弾性係数は多くの場合、岩石実質部分のそれとは一致せず、今回の実験においても一軸試験の結果と大きな違いが見られた。また、変形係数に関しては、その決定法にあいまいさがあり、どのような物理的変形を示しているのか不明確である。

図-2に示すように、繰返し荷荷を行うと荷重をゼロに戻した状態で測定される永久変形量が見られる。Goodman[1]は、このような永久変形量に対する応力比（図-2の波線の勾配および図-4）として永久変形係数（M：modulus of permanent deformation）を定義している。すなわち、繰返し荷荷時の各サイクル毎で、最大荷重と除荷時の残留変形量の関係を示す係数である。孔内荷荷試験でこの永久変形係数を求めるために、谷本らはGoodmanの弾性解[2]をもとに次式のように定義している。[3]

$$M = \frac{d}{2} \cdot \varphi(\beta, \nu) \cdot \frac{P}{u - u_p} \quad (1)$$

d : ボーリング孔直径
 P : 増分荷重
 u : 荷重増分Pに対する変位量
 u_p : 荷重増分Pに対する残留変位量
 $\varphi(\beta, \nu)$: ポアソン比と荷重曲率による定数

この定義に従い、図-2に示した結果と一軸圧縮試験結果の永久変形係数を表-2に示す。各々の試験での永久変形係数を比較すると一軸圧縮試験の方がかなり大きい値を示している。不連続面の存在しない供試体での一軸圧縮試験において、ヒステリシスループが見られるのは、荷荷・除荷の繰返しにより岩の内部に発生したクラックやその

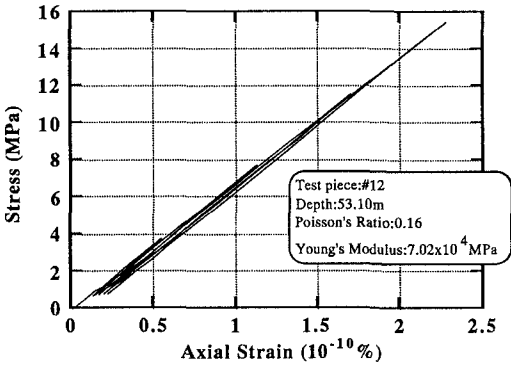


図-3 剛性一軸圧縮試験による応力～軸ひずみ関係

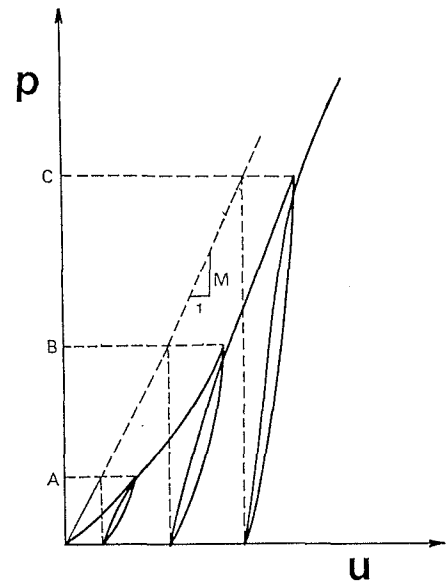


図-4 永久変形係数の概念[1]

表-1 従来の方法による弾性係数・変形係数

測定深度(m)	荷荷方向	変形係数(MPa)	弾性係数(MPa)
52.30	N115W	2.13×10^3	4.69×10^3
52.30	N70W	2.04×10^3	4.86×10^3
53.60	N90E	3.10×10^3	7.38×10^3
53.60	N135E	6.89×10^2	3.23×10^3

部分で起こるすべりによるエネルギーが消耗されるため[1]である。しかし、孔内载荷試験の場合、一軸圧縮試験より永久変形量が大きく、それが起こる原因が必ずしも同じであるとは言えない。谷本らは、石膏やセメントを用いた人造岩盤にて、不連続面の存在しない状態から種々の頻度で不連続面が存在する状態まで変化させ、同時にフラットジャッキで拘束し、その拘束圧を変化させて、4種類のことなる载荷試験を行っている。([4],[5]) この試験結果によれば、不連続面の頻度が大きい程ヒステリシスの広がりが大きく、拘束圧が大きい程広がり狭くなると言った結果を示している。この知見から考察すると、孔内载荷試験での永久変形量は、不連続面に支配されるものであると考えられ、一軸圧縮試験で見られた永久変形は無視できるものとする。実際に、同じ载荷地点でも载荷方向が異なると永久変形量は異なっている。特に、図-2の(c),(d)の場合、き裂の開口幅が大きいいためその傾向が顕著に示されている。このことは、载荷方向と不連続面の相対的位置関係で永久変形量が異なることに付き、すなわち、孔内载荷試験での変形は、不連続面に支配される永久変形量と弾性的変形量で考えられる。

次に弾性的変形について考えて見る。前述したように、最大荷重に近い荷重レベルで得られた直線部分の接線勾配による弾性係数と、一軸圧縮試験のそれとは大きく異なる。このことは、原位置岩盤での弾性変形は、岩石実質部分の弾性変形と不連続面の弾性変形により成り立っていることを示している。

以上のようなことから、孔内载荷試験による不連続性岩盤の変形は、不連続面の非弾性及び弾性変形と岩石実質部分の弾性変形との組み合わせ

表-2 永久変形係数

測定深度 (m)	载荷方向	永久変形係数(MPa)			
		M1	M2	M3	M4
52.30	N115W	2.91×10^3	3.21×10^3	3.21×10^3	3.08×10^3
52.30	N70W	1.77×10^3	2.65×10^3	2.96×10^3	3.20×10^3
53.10	一軸圧縮	6.27×10^3	1.13×10^4	1.29×10^4	1.55×10^4
53.60	N90W	3.02×10^3	4.31×10^3	5.81×10^3	5.39×10^3
53.60	N135W	3.78×10^3	5.30×10^3	1.11×10^4	9.21×10^3

M1: 荷重レベル 0～3.92 MPa M2: 荷重レベル 3.92～7.84MPa

M3: 荷重レベル 7.84～11.76MPa M4: 荷重レベル 11.76～15.68MPa

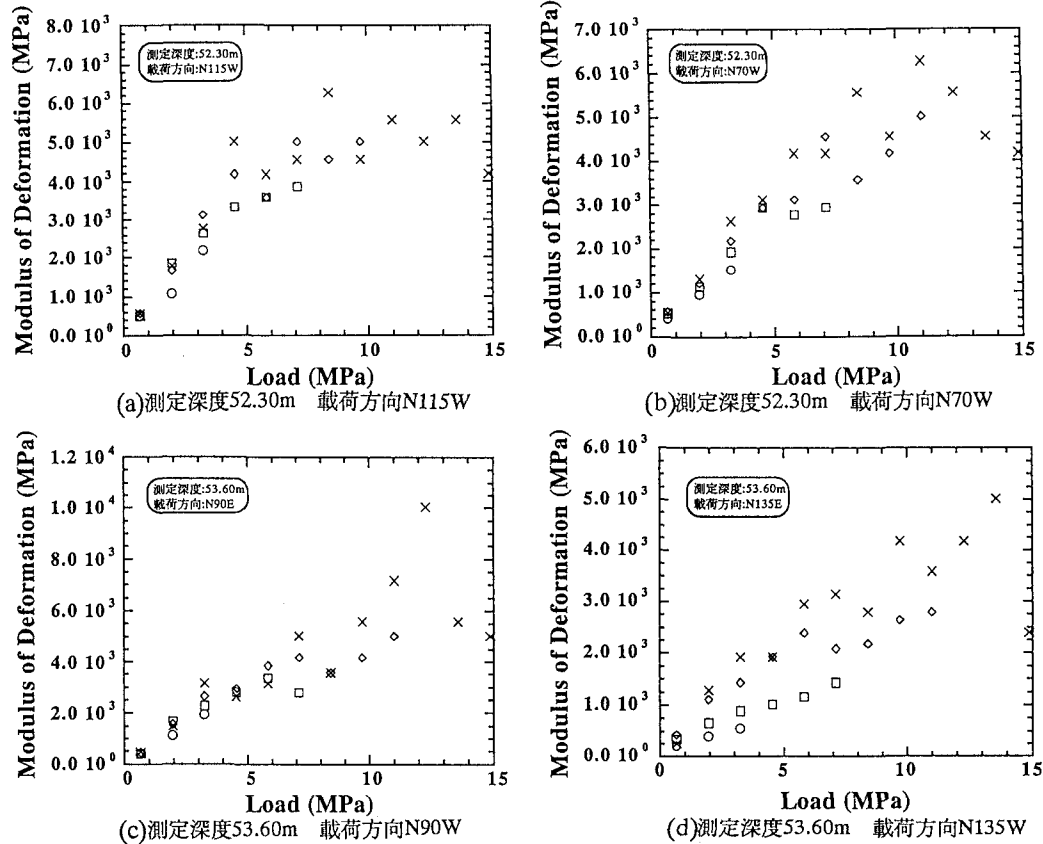


図-5 変形係数の荷重依存性

わせで成り立っている。すなわち、変形量 u は、

$$u = \frac{P}{D} + \frac{P}{E} + \frac{P}{M} \cdot F_1 + \frac{P}{K} \cdot F_2 \quad (2)$$

となり、力学定数の関係は、

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{E} + \frac{1}{M} \cdot F_1 + \frac{1}{K} \cdot F_2 \quad (3)$$

となる。ここで、 F_1 および F_2 は不連続面の走行・傾斜・頻度・開口幅に影響される関数であり、 K は不連続面の弾性変形を表す不連続面の剛性（せん断剛性・垂直剛性）である。谷本ら[3]は、弾性的挙動のみに着目しボアホールスキャナ情報により載荷地盤をモデル化し、載荷方向との関係からせん断剛性・垂直剛性を決定する方法も試みている。 M を考慮すれば、そこで用いた方法で M をせん断成分と垂直成分に分配することも考えられる。しかし岩盤不連続面の一面せん断試験でのせん断変形とダイレーションの変化[6]から、ダイレーションの増加にともないせん断剛性が減少することが示されている。したがって、永久変形は、不連続面のせん断方向の変形に支配される言い換えると不連続面のラフネスに影響されると考えられる。しかし、この点に関しては、今後せん断試験と併せて考察していくべきである。また、荷重増分毎に変形係数を求め、それに対応する荷重をプロットしたものが図-5である。これによると、変形係数はある荷重までは荷重に依存して増加し、その後ほぼ一定の値となる。一般にはこの一定になったときの変形係数を着目しているが、低荷重領域での変形係数にも注意を払う必要がある。掘削に伴うゆるみ域の発生は、周辺拘束圧の開放により起こる現象で、低荷重域での変形挙動を捉えることは、掘削に伴う変形挙動の把握につながるものと考えられる。また、図-5(c),(d)のように、載荷地点のき裂の性状が変形に特に支配的な状況では、変形係数が一定値を取るような荷重領域でもバラツキが見られる。このような場合、式(3)は、荷重に依存することになり、 E, K が荷重に依存しないことから M が変化するものと考えられる。実際に求めた M の値も、荷重レベルの増加にともない増加する傾向にあった。

6. まとめ

原位置不連続性岩盤の変形は、不連続面の方位・頻度・開口幅・状態などにより同じ岩種（同じ実質部分の弾性係数）を持つものでも異なり、その傾向を表す指標として永久変形係数 M を挙げた。これは、き裂の無い岩石供試体での一軸圧縮試験で見られるものとは異なり、原位置孔内載荷試験により不連続面に大きく支配されているものであることが確認された。また、不連続面の力学的特性は、従来の剛性に加えて永久変形係数も考慮に入れる必要があると考えられる。そのためには、載荷地点の不連続面の状態を十分に把握しておくことが非常に重要であると考えられる。また、従来変形係数だけで分類されていた岩盤が、不連続面の状態と永久変形係数により分類することで、より詳細な原位置岩盤の変形特性に関する分類ができるものと考えられる。

参考文献

- [1] Goodman, R. E. (1980): "Introduction to Rock Mechanics", pp.170-189, John Wiley & Sons.
- [2] Goodman, R. E. et. al. (1968): "Measurement of Rock Deformability in Borehole", Symp. on Rock Mech..
- [3] 谷本親伯他(1991): 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, 土質工学会.
- [4] 谷本親伯(1980): 孔内載荷試験, 地質と調査, 1980年第1号, pp.17-21, 土木春秋社.
- [5] 谷本親伯他(1982): 孔内載荷試験結果の評価に関する考察, 第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.6-10, 土木学会.
- [6] 谷本親伯他(1990): 岩盤不連続面の一面せん断特性とラフネスについて, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 103-108, 岩の力学連合会.