

# ボーリング孔内載荷試験による山岳トンネル周辺岩盤の変形係数測定例

## THE MEASUREMENT RESULTS OF ROCK MASS DEFORMABILITY AROUND THE MOUNTAIN TUNNEL BY BOREHOLE JACK TEST

蛭子 清二\*・浅野 剛\*・竹本 光慶\*\*・斎藤 敏明\*\*\*

Seiji EBISU, Takeshi ASANO, Mitsuyoshi TAKEMOTO and Toshiaki SAITO

In this report, the following in-situ and laboratory test results carried out in multiple mountain tunnel fields are presented, such as the results of borehole jack test, seismic logging within a borehole and laboratory core tests. Dispersion of test results and relevance among each test results are analyzed. The value of the rock mass deformation modulus measured from borehole jack tests is compared with the design value. The characteristics of rock mass deformability measured from borehole jack tests and the applicability of these data to the rock mass evaluation are discussed.

*Key Words* : borehole jack test, rock mass deformability, mountain tunnel

### 1. まえがき

岩盤の変形特性を評価するための原位置試験法の一つに、ボーリング孔内載荷試験がある。この方法は、ボーリング孔があれば任意の位置と方向に載荷試験が可能であり、平板載荷試験と比較して簡便、短時間に測定できる点の特徴である<sup>1)</sup>。岩盤基礎などでは平板載荷試験を補助する試験法として、あるいは、岩盤分類を行なう際の判断材料として試験結果が利用されることが多い。しかし、山岳トンネル分野での利用は比較的少ないようである。ここでは、複数の山岳トンネルで行なったボーリング孔内載荷試験結果と、同じ位置のボーリングコアを用いた室内試験結果、さらに、ボーリング孔壁弾性波速度測定結果などを具体的に示す。それぞれの試験結果のバラツキや関連性、設計に用いられた変形係数との関連性などを分析し、山岳トンネル周辺岩盤でボーリング孔内載荷試験から測定した変形係数の特徴と岩盤評価への適用性を考察する。

### 2. 試験の概要

#### 2-1 ボーリング孔内載荷試験

試験の概要は、表-1に示すようであり、条件の異なる5箇所のトンネルで等変位型のボーリング孔内載荷試験を行なった。表中の岩級区分は電中研式<sup>2)</sup>である。また、5箇所のトンネルを記号A、B、C、D、Eで区別する。切羽の後方位置でトンネル掘削の影響が収束したと見なせる時期に、側壁から直径66mmのコアボーリングを行なった。それぞれのボーリング孔の配置と方向を一つの断面に併記して、図-1の模式図に示す。ボーリング孔壁への載荷方向を同図に両矢印で示した。ボーリング孔がトンネルの横断方向にあるA、B、Eではトンネル周方向への載荷、C、Dではボーリング孔に対して水平方向への載荷を行なった。

載荷板の大きさは幅3cm、長さ25cmである。載荷パターンは、最初の30秒間に所定の載荷板圧力増分を加え、以後の30秒間はこれを保持する階段状の単調載荷とした。基礎など、岩盤上に作用する荷重が明白な構造物の場合には、設計荷重を目安にして最大載荷板圧力を設定できる。しかし、トンネルの場合、掘削に伴う周囲

\* 正会員 工博 (株)奥村組技術研究所 地盤研究室

\*\* 正会員 (株)奥村組技術研究所 土木研究室

\*\*\* 正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 資源工学専攻

表-1 試験の概要

トンネル名	A	B	C	D	E
岩種	六甲花崗岩	雲原花崗岩	泥岩基質 混在岩	凝灰岩 玄武岩	砂岩
岩級	C <sub>L</sub> , C <sub>M</sub>	D	D, C <sub>M</sub> , C <sub>H</sub>	C <sub>H</sub>	D
土被り (m)	46~67	6	400	140	15
掘削幅 (m)	11.8	11.0	4.0	17.0	3.3
ボーリングの諸元 長さ (m)×本数 トンネル軸となす角度 傾斜角	6.5 (m)×3 本 90° 5°	6.5 (m)×1 本 90° 45°	10.0 (m)×1 本 30° 5°	10.0 (m)×1 本 45° 5°	3.5 (m)×6 本 90° 30°
ボーリング孔壁 弾性波伝播速度測定			○	○	○
岩石コア試験	○		○	○	

岩盤の応力状態の変化は複雑であり、掘削前の初期の圧縮応力状態から半径方向は除荷、周方向は載荷を受け、その程度はトンネル壁面からの距離に依存して低減する。このように、トンネルの場合には設計荷重を決めることが難しい。一方、孔内載荷試験の場合、載荷板付近の岩盤はボーリング孔の半径方向に圧縮、円周方向に引張りを受けて一軸圧縮の条件に近い状態となり、ボーリング孔が削孔される前の岩盤の応力状態は再現されない。そこで、試験結果から岩盤の弾性的応答を見逃さずに把握することに主眼を置き、試験機の性能である 28 MPa を最大載荷板圧力とした。ただし、D級の軟質な岩盤の場合には、載荷板がその最大ストロークである 10 mm にまで押出された時点で試験が終了となった。

載荷板圧力と変位の関係から、載荷ステップごとの勾配（圧力増分/変位増分）を用いて変形係数  $D_b$  を推定した。具体的には、載荷ステップごとに変形係数を算出し、載荷板圧力が変化しても変形係数が一定になるときの値を  $D_b$  とした。 $D_b$  の算出に際して岩盤のポアソン比  $\nu$  が必要であるが、 $\nu$  は同じ位置のボーリングコアの一軸圧縮試験から求めた値を用いた。ただし、ボーリングコアを回収できなかった B、E トンネルでは、トンネル内から採取した試験体の一軸圧縮試験結果を代用した。なお、E トンネルの試験では、載荷板圧力と変位の関係に直線部分が認められず、載荷の最初から非線形性が現れた。載荷板圧力の増大に伴い勾配も大きくなり、弾性領域の特定が難しかった。同トンネルでは、変位計測結果の分析から、初期応力が一軸状態に近かったと推定された。そこで、円形トンネルの理論解を利用し、載荷板圧力が土被り圧力の 3 倍に相当する 1.2 MPa のときの変形係数を  $D_b$  とした。

## 2-2 その他の試験

ボーリングコアを回収できた A、C、D トンネルで岩石コアの室内試験を行なった。試験体は可能な限り孔内載荷を行なった位置と一致するように選択した。測定項目は、密度 ( $\rho$ )、弾性波伝播速度 ( $v_p$ ,  $v_s$ )、静弾性係数 ( $E_s$ )、ポアソン比 ( $\nu$ )、一軸圧縮強度 ( $S_c$ ) である。

C、D、E トンネルでは、孔内載荷試験を行なう前に、ボーリング孔壁の弾性波伝播速度(孔壁  $V_p$ )を測定した。これは、孔壁軸方向 30 cm 間の平均的な  $V_p$  を測定するものである。測定方法などの特徴は文献 3) を参照されたい。

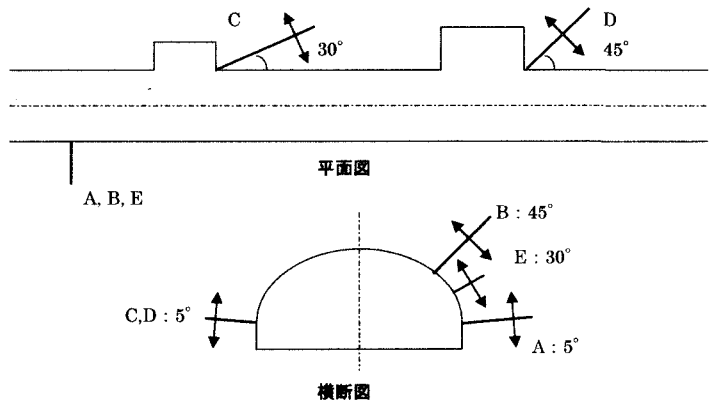


図-1 ボーリング孔の配置と方向

### 3. 試験結果と考察

#### 3-1 試験結果とバラツキ

ボーリング孔に沿った  $D_b$ 、孔壁  $V_p$  とコア試験結果の  $v_p$ 、 $E_s$ 、 $S_c$  の分布を図-2から図-6に示す。それぞれの図で、凡例内の記号は前からトンネル名/岩級/掘削工法の順である。図-2では  $D_b$  を対数で表示しており、そのバラツキが最大1オーダー程度であること、また、岩級が低位である場合にバラツキが小さいことが分かる。

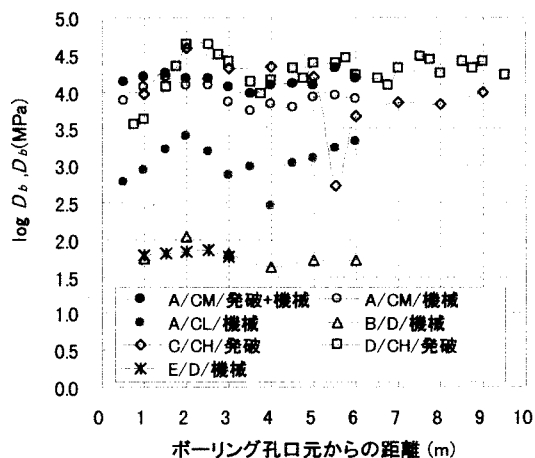


図-2  $\log D_b$  の分布

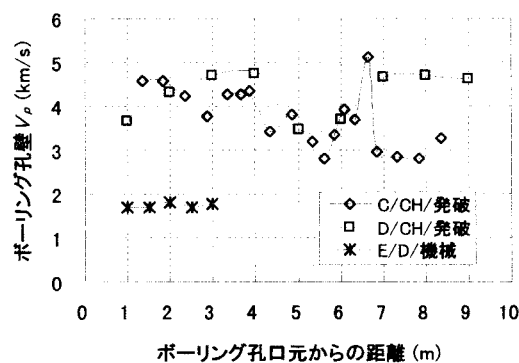


図-3 ボーリング孔壁  $V_p$  の分布

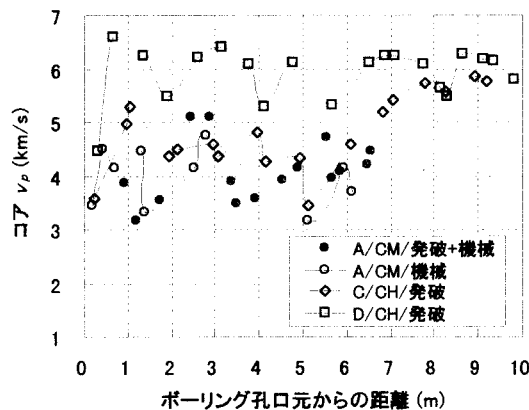


図-4 コア  $v_p$  の分布

なお、Cトンネル 5.5 m 位置の  $D_b$  の大きな低下は、断層の影響によるものである。同図に示した  $D_b$  の分布形を見ると、トンネルの壁面近くのプロットが全般に小さい傾向があるものの、深部の  $D_b$  が必ず壁面近くのそれらよりも大きいわけではない。同じ原位置測定である図-3の孔壁  $V_p$  の分布についても同様のことが言える。これらの結果は、 $D_b$  の分布からトンネル壁面近くのゆるみ領域を特定できるとした三木ら<sup>4)</sup>の測定例とは異なる。 $D_b$  よりも初期載荷段階に生じる載荷板変位の方がゆるみ現象との関連性が強いとした指摘もある<sup>5)</sup>。また、図-4から図-6に示したコア試験結果の分布形が、大雑把に見れば原位置試験結果の分布形に似ている点を指摘できる。同じボーリング孔同士で比較すれば、 $E_s$ 、 $S_c$  の分布形が  $D_b$  の分布形に似ており、 $v_p$  の分布形が孔壁  $V_p$  の

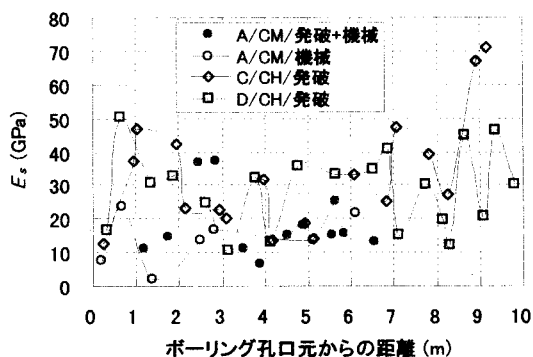


図-5  $E_s$  の分布

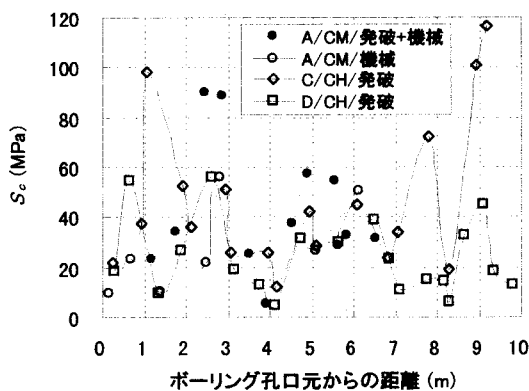


図-6  $S_c$  の分布

表-2 測定値の変動係数 (%)

トンネル名	岩級	掘削工法	$D_b$	孔壁 $V_p$	$E_s$	$S_c$	コア $v_p$
A	$C_M$	発破機械併用	20.84		53.98	60.79	14.03
	$C_M$	機械	33.60		53.84	64.65	13.79
	$C_L$	機械	50.72				
B	D	機械	38.16				
C	$D, C_M, C_H$	発破	81.90	18.25	51.75	65.10	14.82
D	$C_H$	発破	46.36	12.36	41.21	62.94	8.50
E	D	機械	28.49	9.09			

分布形に似ている。したがって、コア試験結果が岩石の変形特性、原位置試験結果が岩盤の変形特性を表しているとするれば、岩石の変形特性が岩盤のそれに現れたと言える。

ボーリング孔ごとに測定値の変動係数を算出して表-2に百分率で示す。室内試験結果である  $E_s$ 、 $S_c$  と原位置試験である  $D_b$  を比較する。前者の場合、ボーリング孔が変わっても変動係数がほぼ 50 % 程度に一定であるのに対し、後者の場合にはボーリング孔が変わると変動係数も 20~80 % に変化した。すなわち、岩石の力学特性のバラツキはサイトが変わってもほぼ一定であるが、岩盤の変形特性のバラツキはサイトごとに変化した。岩盤の特性は、岩石と内在する地質的不連続面から決まると考えられる。したがって、岩石の力学特性のバラツキが地質的不連続面の影響によって増長される場合と低減される場合の両方があり、それらの結果が岩盤の力学特性のバラツキとなって現れた可能性がある。ただし、これはボーリングコアを回収できた  $C_L$  級以上の岩盤の結果である。

### 3-2 $D_b$ と岩級区分の関係

$\log D_b$  と岩級区分の関係を図-7に示す。同図から、同一のボーリング孔で見ても、 $D_b$  が1オーダー程度の幅にある場合でも同じ工学的特性を有する岩盤として一つの岩級に区分されている様子が分かる。逆に、 $D_b$  を用いて岩級を区分する場合には、その対数をとって評価できると言える。CトンネルのD級、 $C_M$ 級のプロットが他のトンネル場合よりも大き目であり、特にD級のプロットは $C_L$ 級に区分されてもおかしくない値である。岩盤分類に際して、サイト内の相対的な特性変化も重視されている状況が窺われる。また、 $C_M$ 級と $C_H$ 級のプロットの $D_b$ に大きな違いが認められず、両クラスの区分が難しいことが分かる。

### 3-3 $D_b$ と孔壁 $V_p$ の関係

原位置試験同士の  $D_b$  と孔壁  $V_p$  の関係は、 $D_b$  を対数で表示すると図-8のようであり、試験データを全部合わせて見るとおおむね良好な相関関係が見出された。ただし、細かく見ると、Dトンネルの玄武岩やEトンネルの砂岩には、はっきりとした相関関係が認められない。また、 $\log D_b$  が大きくなると、孔壁  $V_p$  のバラツキが大きくなる傾向が見られる。岩石や岩盤の変形係数が最大3オーダー規模の範囲に分布するのに対して、弾性波の伝播速度は最大でも 6 km/s 程度以下の狭い範囲に分布し<sup>6),7)</sup>、変形係数が大きな場合の弾性波速度の変化が小さいのが一般的である。これを図-8に当てはめると、 $\log D_b$  が大きな位置で孔壁  $V_p$  が一定値に収束することになるが、測定値の傾向は異なった。岩種による影響や地質的不連続面の及ぼす複雑な影響が考えられる。

### 3-4 $D_b$ と設計変形係数の関係

$D_b$  と設計変形係数  $D$  の関係を図-9に示す。 $D_b$ 、 $D$  ともに対数で表示し、 $D_b$  はボーリング孔ごとの平均値をプロットで示し、その分布範囲をプロット位置の横線で示した。ここで、 $D$  に関しては、トンネル掘削時の壁面変位計測結果に整合する変形係数として定義し、次のようにして求めた。A、Bトンネルでは、静水圧的初期地圧を仮定した円形トンネル理論解を利用した逆解析を行なった。C、D、Eトンネルでは、有限要素法の順解析を試行錯誤的に繰返した。いずれの場合も、初期地圧解放率が 40 % のときに計測が開始されたとした。図-9から、Eトンネルを除き、 $D_b \geq D$  であり、それぞれのプロットの  $\log D$  に対する  $\log D_b$  の差は最大で1オーダー程度であ

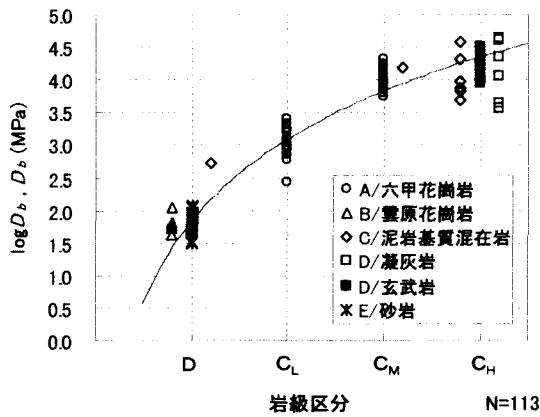


図-7  $\log D_b$  と岩級区分の関係

ることが分かる。Eトンネルでは、前記したように、 $D_b$ を推定したときの載荷板圧力が少し小さかった可能性がある。

図-9では、 $D_b$ と $D$ の間にある程度の対応関係が認められた。安全側に見て、

$$\log D = \log D_b - 1 \quad (1)$$

とすれば、孔内載荷試験結果からトンネル規模の岩盤変形係数を設計時の目安として推定できると考えられる。

#### 4. まとめ

複数の山岳トンネル現場でボーリング孔内載荷試験を行ない、同じ位置のボーリングコアの室内試験結果やボーリング孔壁の弾性波速度測定結果と対比して、孔内載荷試験結果から求めた変形係数の特性を分析した。その結果から、孔内載荷試験より求めた変形係数の常用対数を利用することが、岩盤の変形特性評価に際して有効であることを示した。具体的には、岩級区分を行なうときの定量的な判断指標としての利用や、岩盤の弾性波速度からその変形係数を推定するときの利用である。さらに、解析によってトンネルの変位計測結果が説明できるときの入力変形係数を設計変形係数と定義し、これが孔内載荷試験結果から求めた変形係数を用いて式(1)のように表されることを示した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：孔内載荷試験法の現状と課題，1988。
- 2) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門，山海堂，1966。
- 3) 篠原茂，寺田道直，浅野剛：土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，III-A354，pp.708-709，1999。
- 4) 三木幸蔵，宮川純一：第16回土質工学研究発表会，pp.1357-1360，1981。
- 5) 浅野剛，蛭子清二，岩本容昭，西村正夫，斎藤敏明：第10回岩の力学国内シンポジウム，pp.641-646，1998。
- 6) 三木幸蔵：岩盤力学入門，鹿島出版会，pp.193-197，1993。
- 7) 吉中龍之進，櫻井春輔，菊地宏吉：岩盤分類とその適用，土木工学社，pp.48-51，1989。

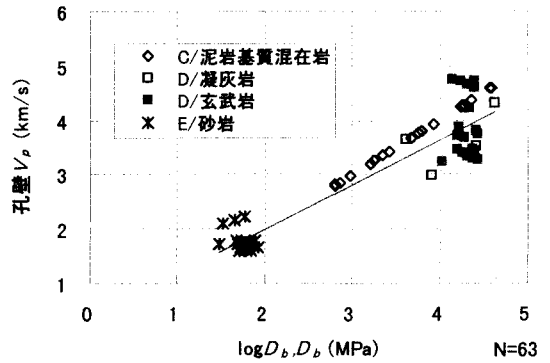


図-8 孔壁  $V_p$  と  $\log D_b$  の関係

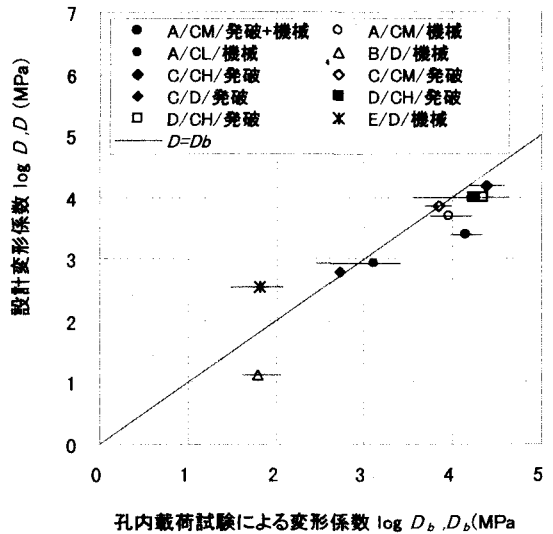


図-9 設計時の変形係数  $\log D$  と  $\log D_b$  の関係