

岩盤データベースを用いた NATM の事前設計のための物性値

PROPERTIES FOR INITIAL DESIGN OF TUNNELS BY NATM USING ROCK MASS DATA-BASE SYSTEM

瀬崎満弘*・Ömer AYDAN**・市川康明***・川本眺万****

By Mitsuhiro SEZAKI, Ömer AYDAN, Yasuaki ICHIKAWA and Toshikazu KAWAMOTO

The authors have developed a data-base system for the physical and mechanical properties of rock and rock mass especially for the initial design of tunnels by NATM. The features of this data-base system are described and the capabilities of the system have been demonstrated. By processing the all data of the system, it has been found out that the physical and mechanical properties of intact rock and rock mass can be predicted in terms of longitudinal elastic wave velocity (V_p). On the basis of this finding empirical relations are suggested for the estimation of the properties of rock mass by using the in-situ and field wave velocities and the properties of intact rock. Finally, a new proposal is made for the evaluation of properties of rock mass grade of the rock mass classification of Japan Roadway Association (JRA) in relation to the suggested formulas and wave velocities.

Keywords: rock properties, NATM, data-base system, longitudinal wave velocity

1. はじめに

今日の急速なコンピューターテクノロジーの発達に伴って、データベースを構築するための技術が著しい進展をみせ、大容量のハードディスクの低価格化と相まって、大型計算機によらなくてもかなりの規模のデータベースシステムの開発がパーソナルコンピューターを利用することによって可能となった。こうした観点から、NATMに関するデータベースが関係する研究機関や企業体で検討されるようになってきている^{1),2)}。

近年、山岳トンネルの掘削工法の主流となった NATM は、地山のもつ耐力を積極的に利用しようとする原理に基づくもので、掘削後できる限り速やかに、効果的な支保を施工することが要求される。この NATM の導入によって、トンネルの調査・設計・施工が、計測管理や地山解析といった合理的なシステムとして運用可能となった。

現在、川本らを中心とした委員会で、「NATM の設計・施工におけるエキスパートシステムの開発」の研究が進められている³⁾。このエキスパートシステムの開発は、トンネルの事前設計を主体としたシステムの構築を目指しており、標準支保パターンの決定、安定計算および有限要素法による解析が稼働中である。本研究はこのエキスパートシステムを支援するための岩盤に関するデータベースを開発することを目的とする。さらに、このデータベースを利用して NATM の事前設計のための岩盤物性値を、岩盤分類との関係を含めて検討するものである。

2. トンネルの岩盤分類

一般に、NATM は、事前調査のデータをもとに事前設計を行い、施工中の観察・計測に基づいて設計を修正していく方法をとる。この事前に行われる地質調査では、岩盤内の応力や岩盤の工学的特性を定量的に求めることは技術的、経済的な制限から困難である。そのため、NATM の設計・施工では、岩盤分類とその分類等級に応じて作成した、標準支保パターンから支保を決定する方法が取られることが多い。

岩盤構造物の設計、施工においては種々の岩盤分類法が提案されており、使用の対象により、またそれを使用

* 正会員 工修 宮崎大学助手 工学部土木工学科
(〒889-21 宮崎市学園木花台西1-1)

** 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部地盤工学教室
(〒464-01 名古屋市中種区不老町)

*** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部地盤工学教室
(同上)

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学教室
(同上)

する時期によって、分類因子の選び方は多岐にわたっている⁴⁾。

トンネルに対する岩盤分類は、使用する時期によって2種類に分けられる。1つは、事前設計および積算のために用いられるものであり、他方は、施工中の実際の切羽の評価のために用いられる。前者は工事発注のための分類であり、わが国の主なものに道路公団⁵⁾、JR⁶⁾、農水省⁷⁾の諸分類がある。事前調査の結果から得られる岩種、地山の縦弾性波速度、ボーリングコアの状態などが主な分類因子となっている。後者は、ヨーロッパ系に属する岩盤分類であり、施工中でなければ実際分類因子が得られないが、近年ではRSR法⁸⁾、RMR法⁹⁾、Qシステム¹⁰⁾の手法のように、各分類因子の評点から総合点を求め、その総合点を何段階かに分類し、NATMの支保の設計に適用する岩盤分類が提案されている。わが国では、清水らのフェジー理論を用いた分類法¹¹⁾、岩田らの2軸岩盤分類法¹²⁾、数量化理論を使った樗木らの岩盤分類法¹³⁾が提案されている。主な分類因子としては、岩盤の強度（地質状況）に加えて、切羽の観察から得られる節理面あるいは不連続面の状況、湧水の状況などが挙げられる。

3. 岩盤データベース

(1) データベースの内容

岩盤データベースの項目の一覧を表-1に示す。合計22の項目がある。主にトンネルとダム基礎の地質調査を対象にしたデータベースである。トンネルの1断面で採取されたコアの室内岩石試験より得られる物性に対し

表-1 データベースの項目

| 項目分類 | 番号 | 内容 |
|------|----|-----------------------------|
| 一般項目 | 1 | 工事名 |
| | 2 | 都道府県名 |
| 地質条件 | 3 | 地質時代 |
| | 4 | 地層名 |
| | 5 | 岩石名 |
| 設計条件 | 6 | 地山分類の方法 |
| | 7 | 岩種 |
| | 8 | 地山等級 |
| 岩石物性 | 9 | 縦弾性波速度, km/s |
| | 10 | 横弾性波速度, km/s |
| | 11 | 密度, t/m ³ |
| | 12 | 一軸圧縮強度, kgf/cm ² |
| | 13 | 静的弾性係数, kgf/cm ² |
| | 14 | 静的ポアソン比 |
| | 15 | 内部摩擦角, ° |
| | 16 | 粘着力, kgf/cm ² |
| 岩盤物性 | 17 | 縦弾性波速度, km/s |
| | 18 | 横弾性波速度, km/s |
| | 19 | N値 |
| | 20 | RQD値 |
| その他 | 21 | 参考文献 |
| | 22 | 発刊年月 |

ては岩石物性とし、原位置での試験から得られる物性に対しては岩盤物性と分類した。またその断面での設計条件が既知の場合、地山分類の方法（道路公団、JR、電研分類など）、岩種（道路公団ではa, b, c, d1, d2, e, 国鉄ではA, B, C, E, F, G）、地山等級を入力するものである。

データベースを構成する基礎データの収集の方法を示すと、①施工会社の担当者にアンケートに答えてもらう形で収集したデータ、②既往文献に発表された岩石試験結果、主なものは文献に示した^{14),15)}、③主に道路と鉄道トンネルに関する工事報告書に記載されている地質調査結果、の3通りで、データ数としては約2500である。

(2) データベースシステムの概要

このシステムは、簡易リレーショナル・データベース言語“日本語dBASEⅢ”で作成した。システム構成を図-1に示す。

メインプログラムは、データの入力、追加、更新、削除を行う。入力したデータの検索を行う条件検索プログラムは、論理和、論理積による検索ができ、数値データと文字データの複合検索も可能である。検索してきた結果は、ディスプレイまたはプリンターに出力される。置き換えプログラムは、コードで入力されたデータをそれに対応する日本語に置き換えるものである。このシステムでは、入力、検索時の日本語入力の手間を省くため、入力データが固定している項目に対しては、コードで入力し、印刷あるいは検索時出力の際はそれに対応する日本語で出力するものである。並び替えプログラムは、特定の項目のデータを昇順に並び替えるもので、数値データと文字データに対して行える。印刷プログラムは、データベースのプリンターへの出力を制御するもので、決められたフォーマットで出力する方法と、データベースの中の必要な項目だけを、希望する順序で出力する方法が選択できる。

今まで述べたプログラムは、dBASEⅢで機能するものであるが、二次元相関図と頻度分布図を描くプログラムをN88-BASICで作成した。dBASEⅢの必要な項目

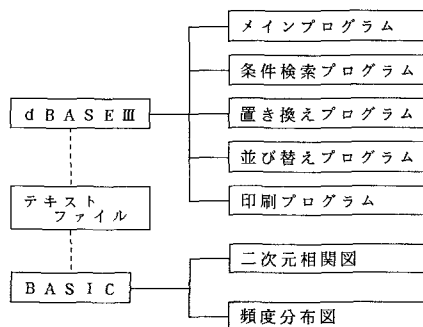


図-1 システムの構成

のデータをアスキーコードでテキストファイルに書き込み、これを N 88-BASIC で読んで図形を描くもので、条件検索プログラムと同様に、条件に合致したデータだけを選べる。

4. データベースを用いた岩盤物性

(1) 岩石物性

岩石または岩盤の物理的性質や力学的性質を間接的に知るために、弾性波速度を用いる方法は、一般に広く利用されており、これまでに弾性波速度とこれらの物理定数および力学定数との相関関係が検討されてきている^{16),17)}。

岩盤データベースの岩石物性について検討する場合でも、弾性波速度と他の物性との関係を考えてみることにする。図-2 に、横軸に岩石の弾性波速度、縦軸にそれぞれ密度、一軸圧縮強度、静的弾性係数および静的ポアソン比をとり、これら 4 つの物性値と弾性波速度の相関関係を示す。以下、煩雑さを避けるため、静的弾性係数は弾性係数と、静的ポアソン比はポアソン比と書くことにする。岩石の種類は、全データを対象にしたものと、堆積岩、深成岩、火山岩から代表的なものとして、砂岩、花崗岩、安山岩の 3 つを選んだ。図中の実線は、最小 2 乗法による近似を示すもので、密度、一軸圧縮強度および弾性係数は指数関数で、ポアソン比は一次式で近似してある。また、表-2 に、得られた近似式と相関係数を示してある。ここで、弾性係数については、データベースに収容されているデータの試験方法が一定でなく、値には接線弾性係数、割線弾性係数または他の方法による弾性係数が混在しているため、ここでは一括して岩石の弾性係数として取り扱う。

等方弾性体の理論によれば、半無限弾性体を伝わる縦弾性波速度 (V_p) と、他の物性値間には次式の関係があることが知られている。

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots(1)$$

$$E = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 V_p は縦弾性波速度、 E は動的弾性係数、 ρ は

密度、 ν は動的ポアソン比である。

まず、弾性波速度と密度の関係について考察する。図から明らかのように、全体的には密度は速度の増加とともに増大する傾向にある。特に、堆積岩である砂岩はこの傾向が著しく、速度と密度の相関係数は高い。安山岩も砂岩と同様な傾向を示すが、速度が高く、密度が大きい方へデータが集中してくる。この砂岩と安山岩の挙動は、速度が岩石の固結度とよい相関性をもつことを示している。一方、深成岩である花崗岩は速度の増大にもかかわらず、密度は 2.6 付近に集中しており、他の岩石と異なった特徴を示す。花崗岩については後で考察する。

弾性波速度と一軸圧縮強度の関係については、全データの図からわかるように相当にばらついたものになっている。特に、速度の高いところでこの傾向が著しい。しかし、各岩石ごとにみれば、砂岩と花崗岩は比較的よい相関を示す。しかし、安山岩は速度の高いところでの強度のばらつきが大きく相関係数は低い。大久保、寺崎¹⁶⁾ は、両者の関係を次の実験式で近似している。

$$q_u = 10 V_p^3 \dots\dots\dots(3)$$

表-2 からわかるように、全データに対しては非常に似た結果を得たが、花崗岩については、強度は速度の約 2 乗に比例するという他の岩石と異なった結果を得た。

弾性波速度と弾性係数の関係は、一軸圧縮強度と同様に相当ばらついたものとなっているが、相関係数は弾性係数の方が比較的高い。全データ、砂岩それに安山岩に対して、弾性係数は速度の約 3 乗に比例する結果を得た。前出の大久保、寺崎も全く同様の結論を得ている。ここでも花崗岩は異なった挙動を示し、一軸強度とほぼ同じ、約 2 乗に比例する結果を得た。理論的には式(2)に示すように、弾性係数は速度の約 2 乗に比例することになる。ただしこの弾性係数は、動的弾性係数を表すものである。この理論と実験結果との違いは、動的弾性係数と静的弾性係数との関係が非線形であるためと考えられる。つまり、動的弾性係数と静的弾性係数との関係については、砂岩と安山岩は非線形性が大きく、花崗岩はほぼ線形に近いことがいえる。ここでは他の岩石の結果を示していないが、堆積岩、火山岩、深成岩の全体について同様のことがいえる。

表-2 弾性波速度と各物性値間の近似式と相関係数

| | 全データ | 砂岩 | 花崗岩 | 安山岩 |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 密度 (g/cm^3) | $\rho = 1.8V_p^{0.22}$ $r = 0.76$ | $\rho = 1.8V_p^{0.23}$ $r = 0.85$ | $\rho = 2.4V_p^{0.04}$ $r = 0.63$ | $\rho = 1.7V_p^{0.26}$ $r = 0.77$ |
| 一軸圧縮強度 (kgf/cm^2) | $q_u = 9.8V_p^{2.7}$ $r = 0.61$ | $q_u = 14.0V_p^{2.6}$ $r = 0.67$ | $q_u = 41.0V_p^{2.1}$ $r = 0.81$ | $q_u = 8.5V_p^{2.9}$ $r = 0.29$ |
| 弾性係数 (kgf/cm^2) | $E = 2048V_p^{3.0}$ $r = 0.77$ | $E = 2368V_p^{2.9}$ $r = 0.74$ | $E = 10000V_p^{2.1}$ $r = 0.63$ | $E = 2288V_p^{2.9}$ $r = 0.64$ |
| ポアソン比 | $\nu = 0.36 - 0.02V_p$ $r = 0.55$ | $\nu = 0.37 - 0.03V_p$ $r = 0.60$ | $\nu = 0.32 - 0.01V_p$ $r = 0.34$ | $\nu = 0.39 - 0.03V_p$ $r = 0.52$ |

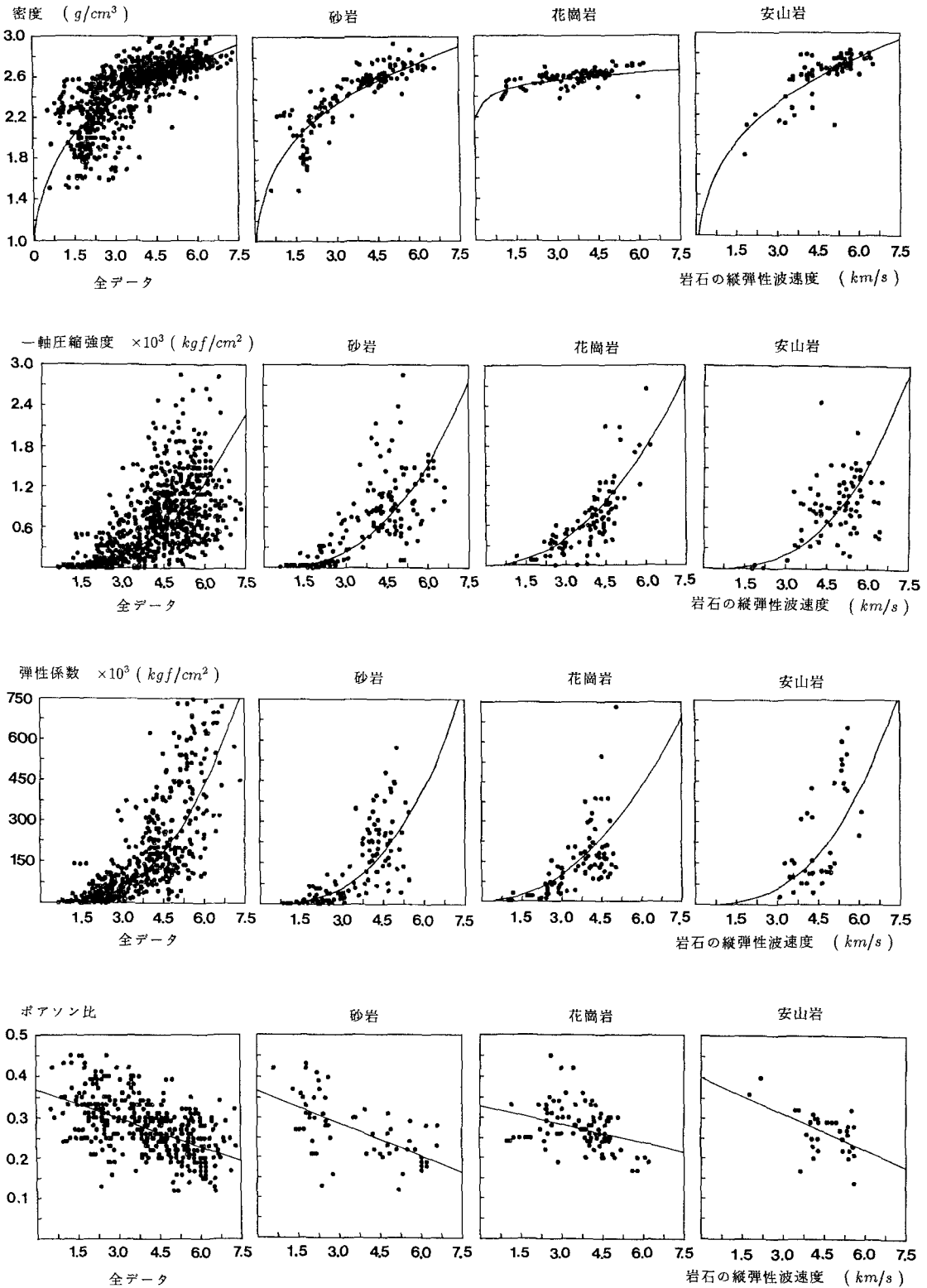


図-2 岩石の縦弾性波速度と各物性値間の関係

弾性波速度とポアソン比との関係については、図からわかるように、相当ばらついたものになっている。最小 2 乗法の近似では、右下がりの負の関係を得ることができるが、相関係数はあまり高くない。

ここで、花崗岩について考えてみる。花崗岩は弾性波速度自体があまり大きくならず、さらに、他の岩石と比べて、同じ弾性波速度では、一軸圧縮強度と弾性係数の値は小さい。このことは、造岩鉱物が複雑なうえに、結晶構造が発達しているために、結晶間に微細なクラックが存在することが原因と思われる。

5. 岩盤物性値と岩石物性値について

(1) 岩盤と岩石の弾性波速度

トンネルなど地盤を数学的に解析しようとするとき、当然必要となってくる物性値は、岩盤についてのものである。岩盤の強度および弾性係数は、節理、亀裂、破砕帯等の弱面の存在と、空隙の存在、吸水状態それに風化の影響を強く受けることはよく知られている。一方、弾性波速度は式(1)に示されるように、弾性係数、ポアソン比それに密度の関数であるが、これらの物性は前述の影響のほかには外的条件としての温度、圧力の影響を受ける。

岩石試験から得られる物性値から、岩盤の物性値を推定しようとするときに広く利用されるパラメーターに、割れ目指数と岩目係数がある。割れ目指数を式(4)に示すが、岩盤内の弾性波速度とその岩盤から採取した亀裂を含まない岩石試料の弾性波速度の比を取ったものである。この割れ目指数が、岩盤中に存在する弱面による弾性波速度の低下率を示すといわれ、この値が小さければ小さいほど岩盤中にクラック等の弱面が多く存在することになる。岩目係数を式(5)に示すが、割れ目指数を 2 乗したものである。岩盤の弾性係数はこの岩目係数を、供試体の試験から得られる弾性係数に掛けることで推定できる。この 2 乗は式(2)の弾性係数が弾性波速度の 2 乗に比例することによるものである。しかしながら、4. で述べたように、花崗岩などの深成岩を除いてはこのような関係にはならない。

$$K = \frac{V_{pm}}{V_{pr}} \dots\dots\dots (4)$$

$$f = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}}\right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 K は割れ目指数、 f は岩目係数、 V_{pm} は岩盤の縦弾性波速度、 V_{pr} は岩石の縦弾性波速度である

このデータベースシステムに収められている全岩石について、岩石と岩盤の弾性波速度の関係をとったものを、図-3 に示す。図からわかるように、両者は比較的に相関係数が高く、一次式で近似すると 0.86 の傾きを得た。

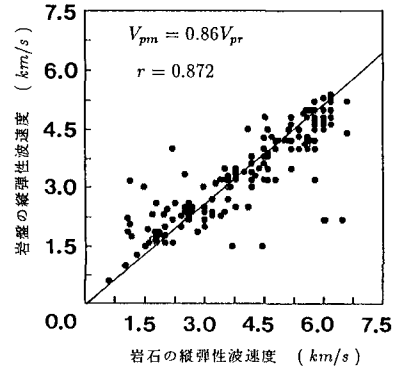


図-3 岩石と岩盤の縦弾性波速度の関係

この値が式(4)に示す割れ目係数の平均的な値となる。岩石の弾性波速度の値が低いところでは、割れ目係数 K が 1 より大きくなるものがある。つまり、岩盤の弾性波速度が岩石のより大きくなることで、このことは、弾性波速度の低いところでは岩盤に弱面が存在するにしてもほとんど影響せず、むしろ土被りによる拘束圧や水による影響が大きいのと思われる。弾性波速度の高いところでは割れ目係数が 1 より小さくなり、岩盤中に存在する弱面によって岩盤の弾性波速度が低下したことを示している。

(2) 岩盤の弾性係数と一軸圧縮強度

表-2 に示したように、全データに対して、岩石の弾性係数は岩石の弾性波速度の 3.0 乗に比例し、同じく岩石の一軸圧縮強度は岩石の弾性波速度の 2.7 乗に比例する。岩盤においても同様の関係が成り立つものと仮定する。つまり、岩盤の弾性係数は岩盤の弾性波速度の 3.0 乗に比例し、岩盤の一軸圧縮強度は岩盤の弾性波速度の 2.7 乗に比例するものとする。この考え方に基くと、岩盤の弾性係数と一軸圧縮強度は割れ目係数 K を用い、次式で求めることができる。

$$E_m = K^{3.0} E_r \dots\dots\dots (6)$$

$$q_{um} = K^{2.7} q_{ur} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 E_m は岩盤の弾性係数、 E_r は岩石の弾性係数、 q_{um} は岩盤の一軸圧縮強度、 q_{ur} は岩石の一軸圧縮強度である。

表-3 道路公団の岩盤分類の岩種

| | | |
|---|--------------|---|
| a | 変成岩 | 千枚岩, 石墨片岩, 珪質石墨片岩, 石英片岩, 緑色片岩, 片麻岩, 蛇紋岩, ホルンフェルス等 |
| | 深成岩 | 斑れい岩, かんらん岩等 |
| b | 古生層および中生層 | 粘板岩, 砂岩および礫岩, 硬砂岩, 石灰岩, 珪岩, 輝緑凝灰岩等 |
| | 火山岩 | 石英粗面岩, 安山岩, 玄武岩等 |
| c | 脈岩 | 花崗斑岩, 石英斑岩, ひん岩, 輝緑岩等 |
| | 深成岩 | 花崗岩, 閃緑岩等 |
| d | 第三紀層および下部洪積層 | 泥岩, 頁岩, 珪質頁岩, 砂岩および礫岩, 凝灰岩, 凝灰角礫岩, 集塊岩等 |
| | e | 上部洪積層 |
| | 沖積層 | 崖錐, 表土等 |

表—4 道路公団岩種と各物性値間の近似式と相関係数

| | 岩種 a | 岩種 b | 岩種 c | 岩種 d |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 密度 (g/cm^3) | $\rho = 2.2V_p^{0.12}$ $r = 0.79$ | $\rho = 2.4V_p^{0.07}$ $r = 0.43$ | $\rho = 2.3V_p^{0.09}$ $r = 0.52$ | $\rho = 1.8V_p^{0.17}$ $r = 0.51$ |
| 一軸圧縮強度 (kgf/cm^2) | $q_u = 4.5V_p^{3.0}$ $r = 0.40$ | $q_u = 15.0V_p^{2.7}$ $r = 0.20$ | $q_u = 40.0V_p^{2.1}$ $r = 0.54$ | $q_u = 7.8V_p^{3.1}$ $r = 0.79$ |
| 弾性係数 (kgf/cm^2) | $E = 570V_p^{3.7}$ $r = 0.77$ | $E = 10000V_p^{2.3}$ $r = 0.60$ | $E = 9000V_p^{2.2}$ $r = 0.64$ | $E = 2448V_p^{2.6}$ $r = 0.72$ |
| ポアソン比 | $\nu = 0.36 - 0.02V_p$ $r = 0.56$ | $\nu = 0.28 - 0.01V_p$ $r = 0.21$ | $\nu = 0.30 - 0.01V_p$ $r = 0.22$ | $\nu = 0.33 - 0.02V_p$ $r = 0.27$ |

ポアソン比と密度に関しては、岩盤中でも岩石と変わらないと考え、同じ値を用いることとする。

6. 道路公団の岩盤分類と物性値

トンネルの設計に必要なとされる物性値が、岩盤分類と関連づけられていれば、岩盤分類の客観性あるいは岩盤の評価において非常に有意義であろう。菊地ら¹⁸⁾は田中による方法（電研分類）を進展させた新しい岩盤分類方法を提案し、その分類と弾性係数、粘着力、内部摩擦角等の物理定数を関連づけ、その相関性を考察している。著者らは道路公団の岩盤分類について同様のことを試みた。

道路公団の岩盤分類の岩種を表—3に示す。この岩種ごとに、4.で求めたものと同様の相関図を作成した。その結果を図—4に示す。図中の実線は最小二乗法で求めた近似曲線を表わしており、その近似式と相関係数を表—4に示してある。ここで、岩種dについては一軸圧縮強度による細分割は行っておらず、岩種eについてはデータの数が少ないため、示すことができなかった。

岩種aは、変成岩と塩基性深成岩である。変成岩としては、片麻岩、片岩類、蛇紋岩のデータが多く、深成岩としては斑れい岩のデータがわずかにあるだけである。データは、弾性波速度の値が低いところには比較的少なく、速度の値が3.0 km/s以上のところに多い。密度、弾性係数およびポアソン比の相関係数は高いが、一軸圧縮強度は低い。変成岩のなかには、ある方向への異方性が非常に強いものがあり、載荷方向によって値が相当にばらつくことが知られている。密度の相関がよく、一軸圧縮強度の相関がよくないのは、この理由によるものであろう。

岩種bは、古生層および中生層の堆積岩である。データとしては、粘板岩、硬砂岩、石灰岩が多い。密度が2.6 g/cm³付近に集中しており、固結度は高い。そのため、弾性波速度の値も高く、2.5 km/s以上に集中している。反面、速度に対する一軸圧縮強度、弾性係数、ポアソン比のばらつきが大きく、相関係数はすべての岩種の中で一番低い。古い堆積岩のため固結度が高いが、岩石のなかに存在する微細なクラックが影響してばらつき

が大きいと考えられる。

岩種cは、火山岩、脈岩および酸性深成岩である。火山岩では安山岩のデータが圧倒的に多く、石英粗面岩がわずかにある。脈岩のデータはほとんどない。深成岩では花崗岩のデータが相当数あり、閃緑岩はそれほど多くない。4.で述べた花崗岩と安山岩を足したような形となり、全体的には岩種aと似たような特徴をもつ。しかし、岩種aに比べて弾性波速度の値が低くなり、密度、弾性係数およびポアソン比ともばらつきが大きくなる。一軸圧縮強度および弾性係数とも、弾性波速度に対して余り大きくならず、どちらかといえば花崗岩に近い特徴をもつ。

岩種dは、第三紀層および下部洪積層の堆積岩である。データとしては、砂岩と泥岩が圧倒的に多く、それに凝灰岩が続く。特徴として、密度が他の岩種より大部小さくなり、弾性波速度の値が4.5 km/s以下に集中してくる。一軸圧縮強度と弾性係数の値が、同様に小さくなる。その分ばらつきが小さくなるため相関係数は高くなる。特に、一軸圧縮強度の相関係数が他の岩種と比べて最も高くなる。

表—5に、道路公団分類の岩種について、弾性波速度に対しての物性値を示した。この値は前述の各岩種ごとの近似式に弾性波速度を代入して求めたもので、その岩種での岩石の物性値の平均と考えてよい。AからD IIまでの記号は、道路公団の地山等級に相当するものであるが、この記号は岩石の弾性波速度で区分してある。道路公団の地山等級は、岩盤の弾性波速度で区分されるため、実際の地山等級とは異なる。さらに、実際には岩種、弾性波速度のほかには地山強度比、ボーリングコアの状態、地質状態などの判断材料が加わるため、このように簡単にはいかない。

トンネルの設計においては、岩盤分類を行うために通常、岩盤の弾性波速度の調査が必要となる。トンネルの数値解析を行うとすると、この岩盤の弾性波速度を用いて、岩盤の物性値を推定することができる。数値解析を行おうとする断面の数か所で、亀裂のない岩石の弾性波速度を測定する。この値を平均したものを、断面での岩石の弾性波速度とする。この岩石の弾性波速度と調査

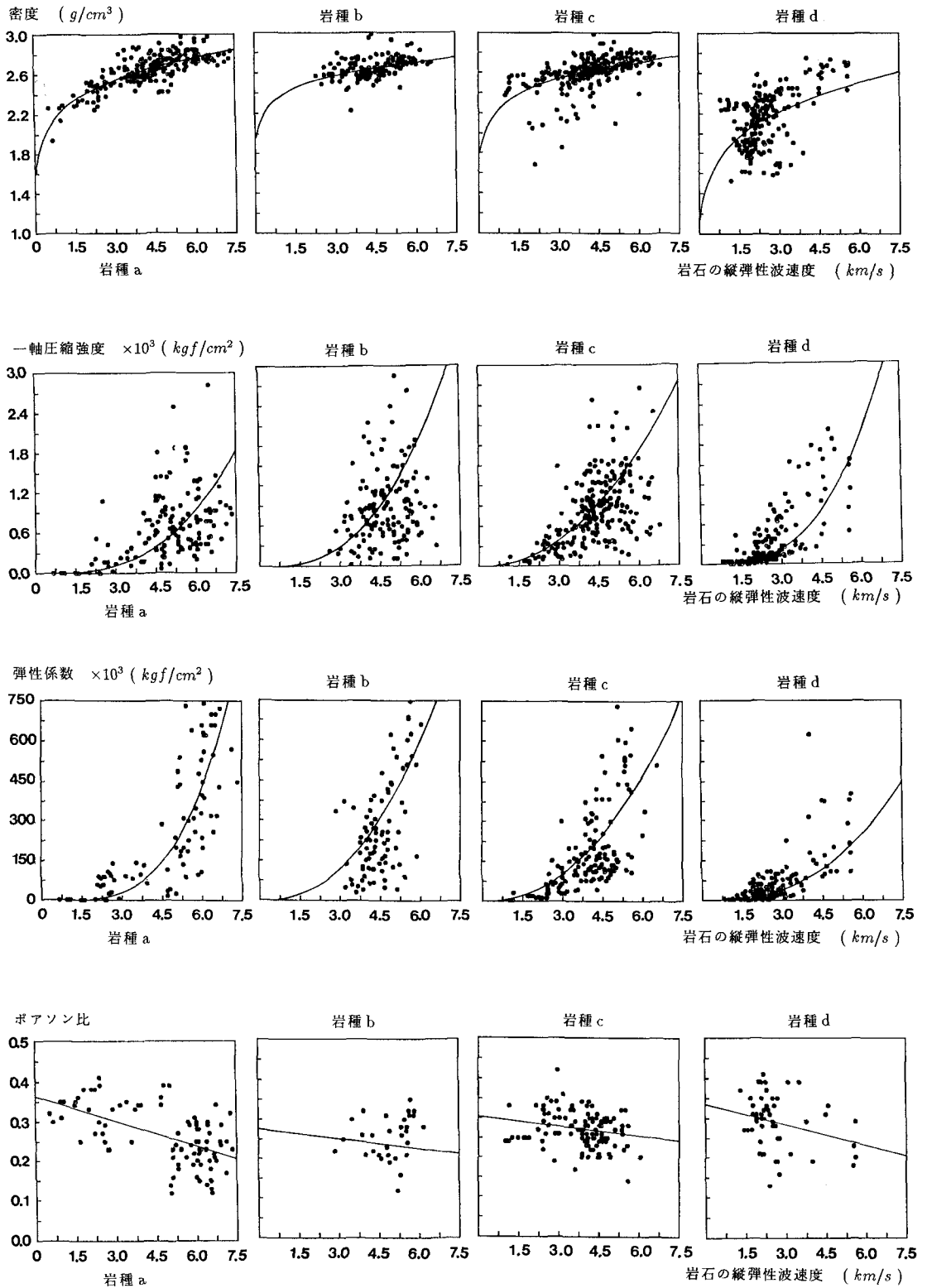


図-4 道路公団岩種の縦弾性波速度と各物性値間関係

表—5 道路公団岩盤分類についての物性値

| 地山等級 | | A | B | C | DI | DII |
|------|--------|------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| 岩種 a | Vp | $Vp > 5.0$ | $5.0 > Vp > 3.8$ | $3.8 > Vp > 3.2$ | $3.2 > Vp > 2.5$ | $2.5 > Vp$ |
| | 密度 | ~ 2.70 | 2.70 ~ 2.62 | 2.62 ~ 2.56 | 2.56 ~ 2.49 | 2.49 ~ |
| | 一軸圧縮強度 | ~ 540 | 540 ~ 239 | 239 ~ 144 | 144 ~ 69 | 69 ~ |
| | 弾性係数 | ~ 210 | 210 ~ 77 | 77 ~ 41 | 41 ~ 16 | 16 ~ |
| | ポアソン比 | ~ 0.26 | 0.26 ~ 0.28 | 0.28 ~ 0.30 | 0.30 ~ 0.31 | 0.31 ~ |
| 岩種 b | Vp | $Vp > 5.0$ | $5.0 > Vp > 3.8$ | $3.8 > Vp > 3.2$ | $3.2 > Vp > 2.5$ | $2.5 > Vp$ |
| | 密度 | ~ 2.67 | 2.67 ~ 2.62 | 2.62 ~ 2.59 | 2.59 ~ 2.54 | 2.54 ~ |
| | 一軸圧縮強度 | ~ 1157 | 1157 ~ 551 | 551 ~ 347 | 347 ~ 178 | 178 ~ |
| | 弾性係数 | ~ 389 | 389 ~ 208 | 208 ~ 141 | 141 ~ 80 | 80 ~ |
| | ポアソン比 | ~ 0.23 | 0.23 ~ 0.24 | 0.24 ~ 0.25 | 0.25 ~ 0.26 | 0.26 ~ |
| 岩種 c | Vp | $Vp > 4.8$ | $4.8 > Vp > 3.6$ | $3.6 > Vp > 3.0$ | $3.0 > Vp > 2.5$ | $2.5 > Vp$ |
| | 密度 | ~ 2.65 | 2.65 ~ 2.58 | 2.58 ~ 2.54 | 2.54 ~ 2.49 | 2.49 ~ |
| | 一軸圧縮強度 | ~ 1078 | 1078 ~ 589 | 589 ~ 401 | 401 ~ 273 | 273 ~ |
| | 弾性係数 | ~ 284 | 284 ~ 151 | 151 ~ 101 | 101 ~ 68 | 68 ~ |
| | ポアソン比 | ~ 0.263 | 0.263 ~ 0.273 | 0.273 ~ 0.278 | 0.278 ~ 0.282 | 0.282 ~ |
| 岩種 d | Vp | $Vp > 3.5$ | $3.5 > Vp > 3.0$ | $3.0 > Vp > 2.0$ | $2.0 > Vp > 1.5$ | $1.5 > Vp$ |
| | 密度 | ~ 2.26 | 2.26 ~ 2.20 | 2.20 ~ 2.05 | 2.05 ~ 1.95 | 1.95 ~ |
| | 一軸圧縮強度 | ~ 365 | 365 ~ 227 | 227 ~ 65 | 65 ~ 27 | 27 ~ |
| | 弾性係数 | ~ 62 | 62 ~ 42 | 42 ~ 15 | 15 ~ 7 | 7 ~ |
| | ポアソン比 | ~ 0.27 | 0.27 ~ 0.28 | 0.28 ~ 0.30 | 0.30 ~ 0.31 | 0.31 ~ |

密度 (g/cm^3), 一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)
 弾性係数 $\times 10^3$ (kgf/cm^2)

の段階で求まる岩盤の弾性波速度より、断面における割れ目指数を、式(4)から求める。また、岩石の弾性波速度と岩種より、表—5から地山等級を決める。道路公団の岩盤分類においては、岩盤の一軸圧縮強度は式(6)から、つまり、断面の割れ目指数を2.7乗した値を、表—5の地山等級と岩種の一致した項の一軸圧縮強度の値に掛ければ推定できる。同様に、岩盤の弾性係数は、式(7)から推定できる。亀裂のない岩石の弾性波速度が測定できなければ、割れ目指数を仮定することで同様のことができる。この方法は、岩盤内に存在するクラック、節理、断層等の不確定要素をすべて、割れ目指数の指数乗の形に被いかぶせるため、さらに研究が必要であろう。

7. おわりに

NATMの設計のための物性値を岩盤データベースを用いて推定するために、岩石の弾性波速度についていろいろと考察した。その過程で以下の結果を得た。

(1) 一軸圧縮強度は、全データに対して弾性波速度の2.7乗に比例し、弾性係数は同様に弾性波速度の3.0乗に比例する。花崗岩については、この結果と異なった挙動を示した。弾性係数に対する相関係数は、各岩石とも比較的高くなったが、一軸圧縮強度に対しての相関係数は、各岩石によってばらついた。

(2) 密度に対しては、各岩石の成因による特徴を示したため、特に砂岩では相関係数が高くなった。

(3) ポアソン比については、弾性波速度に対して右下がりの関係を得たが、相関係数は高くない。

(4) 岩石の弾性波速度と岩盤の弾性波速度との関係については、良好な相関関係が得られ、岩石の弾性波速度から、岩盤の物性値を割れ目指数で推定できることを示した。このデータベースに収納されているデータの平均的な割れ目指数は0.86になった。

(5) 岩盤の弾性係数と一軸圧縮強度は、割れ目指数を用いて式(6)と(7)で推定できる。

(6) 道路公団の岩盤分類の岩種について、岩石の弾性波速度と各物性値間の相関を求めたところ、各岩石と同様な比較的良好な相関関係を得た。そこで各岩種ごとの弾性波速度に対する物性値を示した。岩種ごとの岩盤の弾性係数と一軸圧縮強度は、割れ目指数を用いて同様に式(6)と(7)から推定できる。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、「NATMの設計・施工におけるエキスパートシステムの開発」委員会の各委員に多大のご協力をいただいた。特に、(株)熊谷組、御手洗良夫氏、佐藤工業(株)篠川俊夫氏、清水建設(株)石塚与志雄氏、大成建設(株)大坂一氏、西松建設(株)北川隆氏の各位には貴重なデータを提供していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 河田博之・朝倉俊弘：データベースとエキスパートシステム、トンネルと地下、Vol.17, No.12, pp.27~34, 1986.
- 2) 今津雅紀：岩盤物性のデータバンク化とトンネルへの適用、土と基礎、Vol.35, No.3, pp.9~15, 1987.
- 3) Osaka, H., et al. : An expert system for tunnel design

- and tunnelling—TUX, IABSE Colloquium “Expert Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, October, 1989.
- 4) 日本応用地質学会編：岩盤分類，日本応用地質学会，1984.
 - 5) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，pp. 32～36，日本道路公団，1985.
 - 6) 日本国有鉄道：NATM 設計施工指針（案），1983.
 - 7) 農林省構造改善局：土地改良事業計画設計基準第三部設計，1975.
 - 8) Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. and Skinner, E. H. : Support determinations based on geological predictions, North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Chicago 1972, Proceedings, Vol. 1, pp. 43～64, 1972.
 - 9) Bieniawski, Z. H. : Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunnelling, Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics, Vol. 2, Part A, pp. 27～32, 1974.
 - 10) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. : Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 189～236, 1974.
 - 11) 清水則一・桜井春輔：ファジー理論を用いた岩盤分類の構成方法に関する研究，土木学会論文集，第370号/Ⅲ-5，pp. 225～232，1986.
 - 12) 岩田龍典・藤田修一・北條 明：トンネル掘削工事における岩盤分類法の一考察，電力土木，No. 217，1988.
 - 13) 樗木 武・平田登基男・西頭道彦・相川 明：NATM の数値解析のための地山分類と地山定数，土と基礎，Vol. 34, No. 2, 1986.
 - 14) 池田和彦：トンネル岩盤分類に関する一考察，鉄道技術研究報告，No. 695，pp. 1～31，1969.
 - 15) 日本鉱業会岩石試験データシート作成・利用研究委員会，岩石試験データシートの作成と利用の現況，日本鉱業会誌，Vol. 86, No. 8, pp. 507～552，1986.
 - 16) 大久保彪・寺崎 晃：岩石の物理的性質と弾性波速度，土と基礎，No. 631, July, 1971.
 - 17) 井上正康・大見美智人：岩石供試体の縦波伝播速度と一軸圧縮強度との関係，応用地質，Vol. 12, No. 3, 1971.
 - 18) Kikuchi, K., Saito, K. and Kusunoki, K. : Geotechnically Intergrated Evaluation on the Stability of Dam Foundation Rocks, Commission Internationale des Grands Barrages, Rio de Janeiro, 1982.

(1990. 2. 26・受付)