

4. 地山分類とトンネル標準設計法の課題と展望

4.1 はじめに

これまでに述べたように、わが国には、複数の岩盤分類に関する評価手法が存在する。特に、トンネルに限定しても、調査、設計、支保構造選択、挙動評価の一連の作業について鉄道、道路系などの各組織が独自の方法論を展開している。各組織の発展の経緯が異なることにより、合理的にトンネルを建設するという同一の目的を達するために複数の異なる手法が存在する。その一方で、規準の国内での統一化、あるいは国際的な ISO 化の動きが活発化しており、手法そのものの合理化にあわせてそれらの統一化を論じる必要性が高くなっている。

本章では、トンネルの地山分類を主眼においてこれらの課題について議論し、今後の展望を探ることとする。

4.2 地山分類とトンネル標準設計法の課題

4.2.1 地山分類の現状と国際化の動向

トンネルにおける調査、設計、施工、計測管理の流れにおいて、建設の対象領域である地山、またそれを構成する岩盤を評価する必要がある。本章では議論を明確にするために、調査の対象領域が比較的狭く、直接的な調査方法（目視観察を必要とするもの）によってその特性を把握するような場合に「岩盤分類」の用語を当てはめる。この場合、対象領域の大きさ、広さは数 10cm から数 m のオーダーであり、具体的にはボーリングのデータ、あるいは切羽観察結果からそれぞれの岩種ごとにその特性を記述する作業がこれに当たる。一方、対象領域が岩盤分類によるものよりも相対的に広範囲で、調査方法は弾性波探査などを援用した間接的な方法が主である場合、その行為により岩盤を評価する場合「地山分類」を行うという表現をとることとする。地山分類により対象領域内の場所ごとに例えば弾性波速度を求めた場合、速度分布は地質構造との相関で総合的に分析、評価されることとなる。この場合、ある地山領域（数 m から数 10m のオーダーを想定）の速度値からその概略的な特性を評価して支保設計の指標とするが、この場合、一定の速度値を有する部分領域が必ずしも同一の岩盤である保証はない。また、その領域の定義は地質図の作成過程とも密接に絡んでおり、その作成精度に依存するものである。いずれにしても、トンネル建設において行われる作業の中で岩盤分類と地山分類は明らかに異なる作業であり、その

作業から得られる情報が関与する領域の広さや精度も異なるものであることをまず認識する必要がある。

さて、図 4.2.1.1 により再度、岩盤分類と地山分類の定義を確認する。建設以前に行う地表踏査、ボーリングなどから得られた地質縦断面図が描かれる。また、この段階で対象地山に対する弾性波探査が行われその速度分布図が得られる。前述したように、これらの情報からトンネルの建設予定ラインに沿ってどのような特性の地山が展開しているかの概略的予測が可能となる。ボーリングによって得られる岩盤の情報は正確であるが、その場所が限定されているため、その直接的な岩盤評価結果を広域に外挿するには地質技術者個人の解釈能力と経験に大きく依存する。トンネル建設が進むと、切羽において直接に岩盤を評価し分類することが可能となる。直接観察、あるいはボーリングによって新たに得られる貴重な地質情報であるが、これは設計前に得られた概略的な地山分類情報を局部的に更新するものとなる。予備的な情報から決定された支保設計の詳細は必要であれば、このような新規情報によって変更することも行われる。また、設計変更の大きな理由として、選択した支保構造仕様適用後の変形挙動が予想と異なるケースが起こることが挙げられる。地山分類結果、また詳細な岩盤分類結果から類推した変形挙動が予想より大きい、あるいは小さいことが明確に判明した場合にはその事実によって支保構造の設計変更が行われる。この作業は「地山、あるいは岩盤と支保構造により形成された複合構造体」の概略的な変形特性を評価することに等しい。

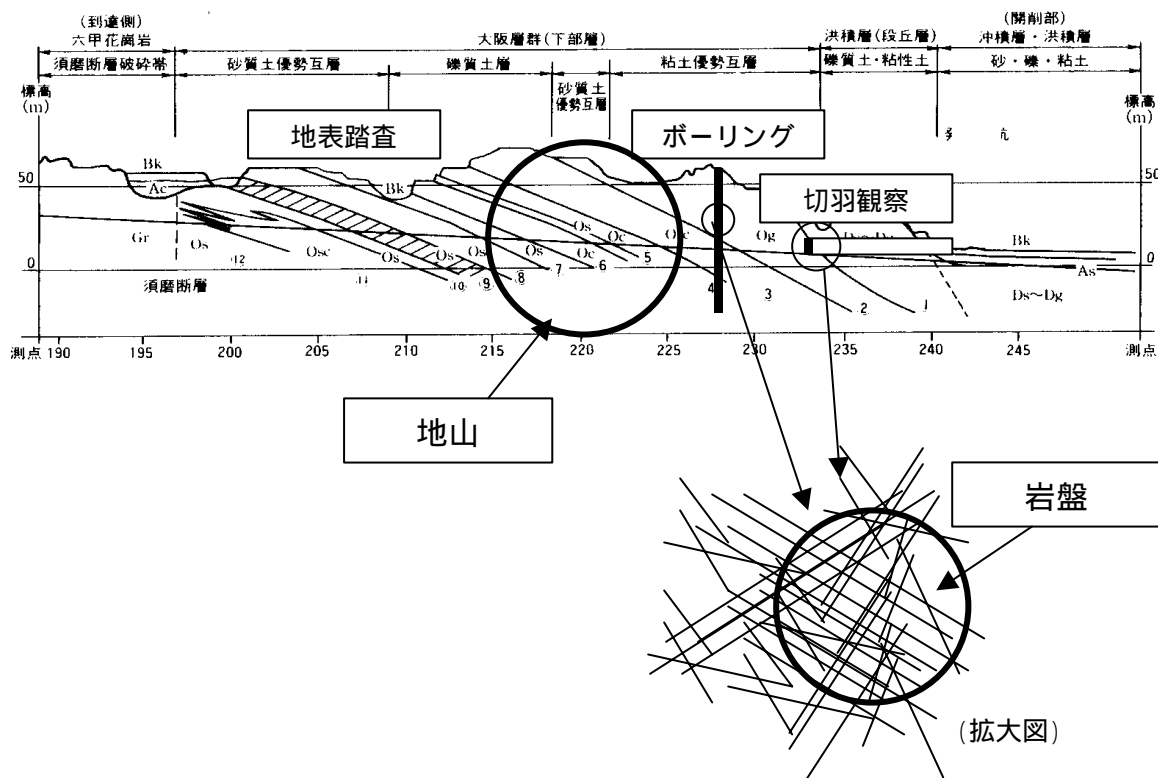


図 4.2.1.1 岩盤分類と地山分類の領域対比

さて、我が国には複数の岩盤分類手法が存在する。それらは構造物ごとに必要とされる情報の整理方法、結果の表示方法などが異なるため歴史的にそれぞれ別の経緯で発展してきた数手法が現在も存続していることによる。さて、トンネルに関しては主に鉄道系と道路系の手法があり、両者の方法は細部における差異はあるものの、概略的な手法はほぼ同一である。昨今の規準の統一化、国際化を勘案し、国内の岩盤分類手法の統一化、またその国際統一案（いまだ存在しないが）との整合性を議論する上でまず整理しておく事項について述べる。

現在までのところ、ISO 14689 Geotechnical engineering – Identification and description of rock については、基本的な分類の要素（割れ目の数え方、風化のあらわし方、など）についての審議が終わっており、岩盤の強度、亀裂、風化の状態、など基本事項の表記の方法について国際統一案の原案はほぼ完了している。この基本的な記述方法に基づき、次段階の統一案として岩盤分類の ISO 化が進められる予定である。これは、ここまで述べている内容のうち、局所的な岩盤分類のレベルに相当するものである。これに相当する方法としては RMR、Q 値など既に国際的にひろく用いられている手法も存在するが、新しい ISO の岩盤分類案がどのような形式になるかはいまだ把握できる状況ではない。しかしながら、日本においても ISO における岩盤分類の原案作成過程に積極的に関与するため、地盤工学会に「岩盤の工学的分類方法」として取りまとめられている¹⁾。

原則的には、岩盤分類とは、岩石・岩盤を工学的な統一基準で分類するものであり、地山を分類するものではない。従って、岩盤分類の ISO 化は、当面、局所的に岩盤を分類するときの作業に影響を及ぼすものであるということになる。この部分の ISO 化が現実のものとなったとき、鉄道系、道路系のそれぞれにおいて部分的に同一の作業をおこなう部分が出てくることになる。また、トンネル工事における ISO の取り扱いについては岩石、岩盤の分類だけでなく、換気、建設機械、環境管理など非常に多くの項目が関係してくることが予想されるがそれらについては本章では触れない。

また、全体の流れの中で岩盤関係の ISO に関連する可能性のある部分以外については、弾性波速度帯の定義や、地山の分類方法、岩種グループの定義、支保構造のパターンなどについて独自の метод論が展開する現在の状況が存続することになる。これらの全てを統一することがはたして賢明かどうかは、委員会の内部でもさまざまな意見があり、様々な視点からの広範囲の議論が必要である。

本章では、まず現在行っている作業のそれぞれの段階における不確実性、誤差などについて改めて考察し、統一化以前に我々が再認識しなければならない多くの問題点について考える。また、仮に鉄道系、道路系の作業の流れを統一化とした場合、どのような問題点をクリアしてゆく必要があるかについて整理することを試みる。

4.2.2 トンネル岩盤分類の問題点

トンネルは地下深部の線状構造物であるため、事前調査に関して従来から次のような問題点が指摘されている²⁾。

地上の条件やトンネルが地下深部に位置する等の制約により直接的な地質情報が得にくい。

線状構造物であるため掘削対象区間を含む広範囲な地域を調査対象とする必要がある。

わが国の特性として地質構造が複雑で構成岩石も変化に富む。

土地利用等の社会環境上の問題が複雑である。

これらの問題は山岳トンネルの事前調査の困難さを示すとともに、その精度の低さをどこまで設計・施工において許容するか、という問題を含んでいる。ここではこのような山岳トンネルの現実的な問題点を踏まえ、トンネルの岩盤分類に関わるいくつかの基本的な問題点を整理する。

(1) 地質調査の精度に関する問題点

主にトンネル工事で計画段階に実施される調査のうち、地山分類に直接関係する調査を前提に問題点を整理する。

a) 地質図の作成に関する問題^{3), 4)}

計画段階で実施される地質踏査や調査ボーリング等の地質調査の成果は最終的には地質縦断図の様式に取りまとめるが、一方でその地質予測や評価が施工実績と大きく異なる場合も少なくない。このような事前調査に関して、地質調査技術の限界、不十分な地質調査、事実と解釈の区分、地質解釈が人によって異なること、残された問題点の成果物への明記、等が問題点として整理されている⁵⁾。以下に、この地質縦断図の作成段階での問題をあげる。

【自然要因】

地質踏査は要求される目的や精度により調査密度や内容が大きく異なり、特に複雑あるいは特殊な地質帯では高いレベルの専門技術者でも長期間の調査を必要とする。また、地質図は限定された点的な地表データとボーリングデータ等による推定で描かれる立体図であり、地表に露頭（基盤岩等の地表露出部）が少なければ精度は当然低下し、ボーリングが少なければ深部の構造は推定で書かざるを得ない。さらに、地表近くの状況が地下深部まで変化しないという保証はない。つまり、トンネルの深度での地質を示す縦断、横断図は深度を増すごとに精度が低くなる。

【技術および人的要因】

踏査の精度は上述のほか、技術者の地質学的知識（地質学の専門分野の違い等）や調査日数によるところが大きい。このうち、地質現象の見間違いや見落としの例に、岩石名の間違いによる地質図上の解釈間違いや岩盤クリーブによる構造解釈の間違いがある。また、調査期間が比較的短く、その範囲も狭い場合、実際には既存の地質図とボーリング結果を中心とした地質図を用いている場合が多い。

このように作成された地質図の精度は、一般には2万5千分の1から1万分の1の地形図上に図化できる程度の精度と考える必要がある。ところが、これに基づくトンネル縦断図は調査精度ではなく設計資料等としての必要性から縮尺が決められ、結果的に地質図を大縮尺に拡大したただけのものとなっている場合もある。

(2) 探査法、試験法の問題

トンネルは前述の地下構造物としての特徴から、その地山の直接的な状態を事前に、しかも連続的に知ることは特殊な場合を除いて困難である。このため、トンネルの事前調査は地質資料調査や地質踏査により地山全体を把握した後、ボーリング調査を中心に深度方向の精度を高め（主に概査段階の調査）、そのうえで地下の状態を間接的ながら連続性を持った状態変化として弾性波探査等で二次元ないし三次元的に推定している。さらに、これらの調査から得た成果に基づいて問題点を絞り、ボーリングや様々な試験を追加実施することにより全体を把握しているのが現状である（主に精査段階の調査）。

この概査から精査におよぶ一連の調査を通じて最も重要な調査は、現状ではボーリング調査である。これは点の情報ではあるが、そのボーリングの削孔技術の発達とともに、そのボーリング孔を利用した検層技術の発達もあり、掘削深度毎の地山情報を様々な手法で把握できるという利点によるためと理解される。これに対し、弾性波探査等のいわゆる物理探査手法は限られた地表の情報と上記のボーリング情報をつなぎ、地下深部の状態を三次元的に、より精度良く推定するための調査であり、その実施段階も概査と精査の境界領域的な位置にあると考えられる。

以下にこれら一連の事前調査のうち、トンネルの岩盤分類に密接に関わる問題について検討を加える。

a) 物理探査の精度

昭和30年代後半からトンネルの地質調査の主要な手段として弾性波探査屈折法が用いられるようになり、多くの岩種に適用可能な物理量であることから各機関で広く地山分類に用いられることとなり、現在に至っている。一方、その問題点は解析不能な地質構造や原理上の欠陥が指摘され、これに対処するためには踏査等の地質構造の解明や他の調査法と併用する必要があることが繰り返し述べられている^{6),7)}ほか。

一方、この手法の利点は、前述のように間接的ながら地下深部の状態を連続的に推定、把握できることにある。このため、ボーリングや孔内検層等に代表される調査技術が現在

に比べ未成熟であった時代においては、特に重要な手法として用いられた。この点では、現在でも地質調査の目的と適用性の関係から、例えば急峻な山岳地帯ではボーリングの施工位置、数量ともに制約があるため、弾性波探査の重要度が高くなる。これに対し、都市近郊では技術的、あるいは周辺環境上の制約によりほとんど弾性波探査は用いられず、代わって間隔を密にボーリング調査が行われている。これは対象とする地質の相違により弾性波探査の対象とし得ない適用性の問題とともに、地山調査に要求される精度が異なることによる。現実の問題として都市部では数 10m 間隔で直接情報が要求されるのに対し、山岳部では場合によるが一般には 1～数 km に 1 本のボーリングと弾性波探査による速度分布で補完しているということになる。このように考えると、弾性波探査はトンネル地質調査の主な手法として見る限り、ボーリング調査の補完をするための方法という位置付けで考えることが妥当であろう。

弾性波探査に求められる情報のうち、最も期待されるのは弾性波速度の不連続性、つまり低速度帯の分布に関するものである。この情報はあくまで点の情報に過ぎないボーリングのみではすべて把握することは困難であり、必然的に弾性波探査等への期待が高くなる。しかしながら、これは、前述のように様々な地質条件で在るものが見えなかったり、無いものが見えたりする場合がある。この問題については、弾性波探査の解析技術をはじめとする手法の改善や電気探査、磁気探査等の適用による技術的な精度向上に向けての努力が進められているが、現状ではさらに抽出、推定箇所での追加ボーリング調査等で確認することが最も望ましい評価と考える。

b) 岩石試料試験の代表性

ここでは、詳細な試験法に関する問題には言及せず、トンネル調査という観点からの試料試験の問題点を述べる。

地下深部の岩石試料の物性値を正しく把握することに関する問題は、従来から様々な観点で議論されている。これを整理すれば次のような点に集約される。

採取された試料サンプルの代表性の吟味が困難なこと

岩石と岩盤の評価が必ずしも一致するものでないこと

このうち、については通常行われているボーリングコアを用いた試料試験のばらつきの問題である。このばらつきには、1本のボーリング中での試験供試体の問題と、同一と見なされる複数のボーリングによる岩石物性の問題がある。これらの各試料の物性には一般に幅があるが、その幅が大きいほどその岩石の代表値をどう取るかに判断を伴う。さらに、1本のボーリングコアのうち、供試体とし得るのは棒状コアとしてある程度の長さを有する部分であり、密な割れ目や脆弱部を伴う場合には試験が困難となる。

このような問題は各現場レベルで検討されたうえで評価に用いられているが、必ずしも明確なルールが提示されていない。例えば、数値解析に用いる強度定数等はこれらの成果に基づき類似設計例等を引用して入力物性値を決めている事例も少なくない。一方、地山分

類の重要な指標とされる地山強度比ではそれぞれの深度での試料の一軸圧縮強度がそのような吟味もせず採用されている場合がある。さらに、地質条件によってはボーリング掘削工法や採取後の保存状態の影響まで含め検討する必要がある等、調査段階でのボーリング試料は事前段階で唯一の直接的な地下深部の地質情報であるにもかかわらず、その利用に当っては様々なばらつきの要因を含んでいる

次に についても上記と共通する点が多いが、特にトンネル掘削時に本質的な問題となる岩盤としての特徴を評価することの困難性をその最大の問題とする。岩盤は、上記の岩石の様々な組合せからなり、様々なサイズの割れ目を伴うことで特徴づけられる。つまり、岩盤とは「岩石と割れ目からなる複合材料」であり、さらに地下水が岩石中の間隙や割れ目に沿った空隙に存在する固相、気相および液相からなる複雑な系で構成されている。

トンネル工事に必要なのはこれらの組合せによる岩盤としての健全度の評価と言える。ただし、トンネルの地山評価は概して言えば、硬岩や中硬岩と呼ばれる地質では割れ目の状態、軟岩では岩石強度、さらに土砂地山では地下水の存在形態がそれぞれ主な評価項目となり、これらはトンネルの掘削時の問題となる挙動に応じた設計のための重大検討事項と位置付けられると理解される。

以上のように、 と は相互に関連している問題であるが、両者にはスケール上の違いとともにその評価の目的として要求される事象にも違いがある。これらの評価にはこの相違点を理解したうえで、まず試料試験の精度を十分考慮することで の問題を検討し、これに基づき岩盤としての問題 を評価する必要がある。

4.2.3 地山分類に関する問題点

(1) 地山分類の目的と定義

地山分類の検討を進める重要な前提条件として、そもそも地山分類の目的とは何かという点を整理する必要がある。様々な土木工事では従来から計画に際して地質調査を中心とする事前調査を実施し、設計・施工計画の後に施工に着手する手順が一般的である。ここで、地質調査を担当する技術者と設計以降を担当する技術者が一致することは稀であり、さらに言えば地質学と土木工学の混在する領域の問題でもある。このような観点から見た時、地山評価とは「地質学的な地山の初期状態把握結果（地質解釈）の土木工学的な問題解決のための経験工学的な解釈」というようなものに過ぎない。例えば、「断層や褶曲構造を一部に伴い、地質構造的には複雑であるが、構成岩種は硬質な古生層の砂岩である」という地質学的な記載に対し、土木工学的には同じ地山の状態を「一部に断層や褶曲軸部を伴うため割れ目が発達する地山で、岩は硬質砂岩であるが特に断層部や褶曲軸部では突発湧水や大きな変形の発生が懸念される」というように、その主たる記述内容が変化する。もちろん、後者がいわゆる地山評価に求められる要件となるが、その主な相違点は地質学的な現象記載と、これに基づく工学的な解釈を必要とする点にあるといえる。それぞれの

役割は、図 4.2.3.1 に示す「自然条件の下に工事を行う結果としての地山の挙動」という単純な関係で理解することができる。

ここに、図中の (A) に示す物性条件とは、自然状態ないし、ある種のバランス関係にある「掘削以前の地山状態」である。トンネル工事の場合、この条件に (B) 環境条件としてトンネル施工位置における土被りや、地下水状況あるいは、トンネル掘削方向などの環境条件が加わることによって、結果として、トンネル掘削による応力変化とその結果である (C) 岩盤挙動が発生する。それに対して、掘削工法や適切に支保を施すことによる地山補強により (E) 地山挙動をコントロールする。

トンネル工事はその黎明期から様々な地山条件の下でこの単純なプロセスを繰り返し、その蓄積からいくつかの経験則を見出すことにより今日の経験工学的な体系を築いてきたと言える。これらの関係を見る時、「地山評価」とは (A) を十分吟味したうえで、これに基づき (C) の状態を工学的に予測することであり、「地山分類」とはその予測に基づいて適切な (D) 施工法設計や (B) 環境条件を立案することを目的とする作業である。

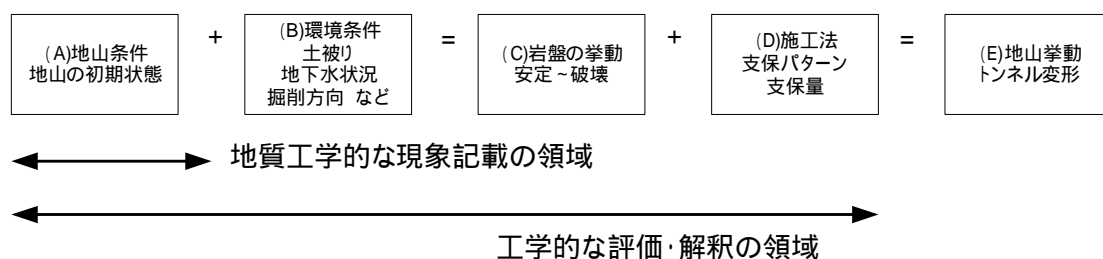


図 4.2.3.1 地山評価のプロセス

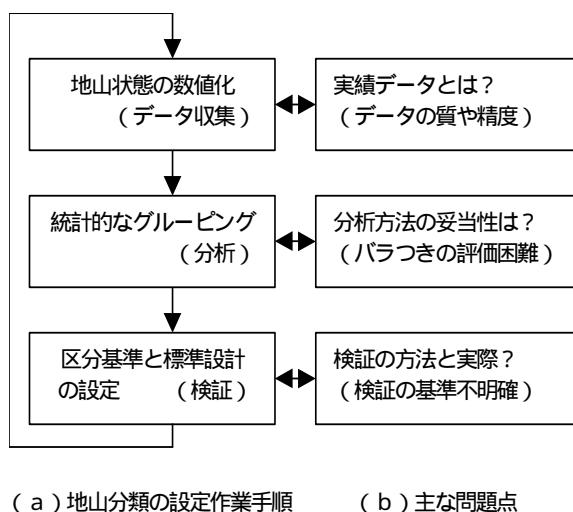


図-4.2.3.2 地山分類基準設定のための基本作業手順

(2)地山分類の基準設定に関わる問題

上記のような地山評価やこれに基づく地山分類に関する基本的な意味付けを前提とすれば、その設定は図 4.2.3.2 に示す手順 (a) で進められることとなる。ここに、地山状態とは標準設計を導くための施工実績データであり、主に地山の物性値、支保工の組合せ、さらにはその計測結果である。また、統計的なグルーピングとは、これらの施工実績の分析作業（現行では主に統計分析的な手法？）を意味し、当然であるが解析データとなる母集団の量や質の違いで結果は異なることとなる。さらに、区分基準とは地山等級というグループ分けのための地山分類指標による境界値であり、これに対する標準設計は施工実績から得られた平均的な支保の組合せとなり、これらの一連の作業を繰り返すことでその検証を行うこととなる。また、同図 4.2.3.2 には各作業の主な問題点 (b) を併記した。以下に、手順に沿って問題点を整理する。

【地山状態の数値化（データ収集）】

ここで問題となるのは、トンネルにおける地山分類が事前段階での評価結果の経験的なグループ化を主とし、一方、地山状態に関する設計的な情報は支保工の組合せやその結果である計測結果等の実績データとして別に検討されていることにある。つまり、標準設計の設定に直接つながる地山情報として現行事前段階の分類結果は必ずしも直接的なデータとして活用し得るデータの質や量を備えていないのではないかという疑問が残る。

また、これまでに蓄積された NATM の施工実績データは各機関ごとに様々な形態で整理されているが、個別のデータの質や精度の吟味、検証についても、以降の分析や分類の設定の最も重要な基礎データであるという観点からの見直しが必要と考える。例えば、図 4.2.3.3 に例示するような通常行われる修正設計の適用を考えた場合、支保の剛性と変形量には必ずしも明瞭な相関関係とならない。

【統計的なグルーピング（統計分析）】

国内外を問わず、トンネルの設計に直結する岩盤分類法の根拠とするのはこの段階での実績データのグループ化ということになる。前述のように地下深部の地山情報の把握が困難なことから、トンネルでは実際に掘ってみて考える式の経験則が先にあり、これを整理した結果として地山分類という体系化が進められてきたように思われる。その是非はともかく、その体系化の分析手法により、点数化（重回帰分析的な手法）やグループ化（判別分析的な手法）が行われた結果が様々な形態をとる岩盤分類法として提案されたものである。この場合の問題は何を目的変数とし、何をその説明変数とするかという問題であり、一般的に言えばその精度は目的変数の妥当性と説明変数の質や量の問題に帰着する。

このように考えれば、現行の岩盤分類設定時の手法を検証し、さらに先に述べた基本デ

前提：基本P-nによる施工

(計測データのフィードバックによる修正設計)

結果：

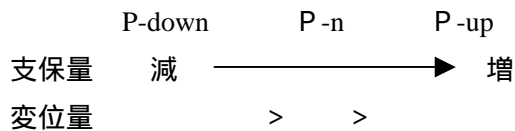
CASE-1 (許容変形量に対し変形大の場合)

(支保増強 P-up) 変形抑制

CASE-2 (許容変形量に対し変形小の場合)

(支保軽減 P-down) 変形許容

結果の図化 (上記の CASE による前後施工区間)



(支保の修正設計のルールにより実績データ
としての取り扱いに混乱?)



施工実績として支保量 (パターン) を, 変形量
や土被り, その他の地山条件との関係で整理し
た時, 実施されたパターンは必ずしもきれいな
関係にはならない!!

図 4.2.3.3 変形量で支保構成, 量を評価する
場合に想定される問題となる事例

一タの問題と合わせて検討する必要があると考えられる。ただし、この際に重要なことは事前段階でどこまでのデータや分析結果のあいまいさをトンネル工事の特徴から許容するかという点ではないかと考える。

【区分基準と標準設計の設定 (検証)】

上記のような作業および検討結果として設定された区分基準や標準設計の問題は、当る、当たらないという妥当性で議論されるが、結局のところある期間を経て必要に応じた修整を加えることで現在に至っている。現状の地山分類を理解するためにはこの現実的な対応上の問題を明らかにし、今後の動向を現段階で検討しておくことが重要である。さらに言え

ば、各機関ごとにその検討段階で積み残した問題を解決するにあたり、現行の地山分類の手法的な枠組みの中での修整でより精度の高い地山分類の構築が可能かどうか、あるいは標準設計法の採用の是非を含めた大きな考え方の変更の可能性はないのか、という点からの議論が必要である。

4.2.4 弾性波速度に基づく地山評価に関する問題点

前節でも述べたように、弾性波探査は、ボーリング調査を補完し、地山全体の地山性状を簡便に評価する指標として重要視されてきている。ただ、弾性波探査により得られる弾性波速度分布図の評価においては岩石・岩盤の不連続面の状態、含水比、一軸圧縮強度、拘束圧などが正しく評価されない限り岩盤の力学的特性を評価する際に誤差が生じてくる。ここでは、それらの複数のファクターがどのように岩盤の弾性波速度に影響を及ぼすかについて整理し、弾性波速度分布図の利用に関する問題点を整理する。

(1) 弾性波速度の一般論

トンネルおよびダム等の岩盤分類の主要なパラメータとなる弾性波速度は、以下に述べるような性質を有しているため、岩盤評価における精度の向上を論ずる場合は、弾性波速度を正しく理解する必要がある。

地表または、地中の一点で発破などによって衝撃を与えると、岩盤は振動し、発生した弾性波は周囲に広がっていくが、この波動には実体波として縦波（P波）と横波（S波）が有り、それぞれの伝播速度 V_p 、 V_s は次式によって表される。

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot g \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E \cdot g}{\rho \cdot 2(1 + \nu)}} \quad (4.2.4.1)$$

ここで、 ρ ：密度、 E ：弾性係数、 ν ：ポアソン比、 g ：重力加速度である。

式からわかる様に、岩盤の弾性波速度は、媒質の弾性係数、密度、そしてポアソン比の関数である。

一方、細長い棒の中を伝わる波を考えると、棒の側面方向への拡がり自由であるため、無限の大きさをもつ岩盤の中での体積変化の条件とは異なった状態の伝播となり、その場合の縦波（ V_p ）は次の式で与えられる。式からわかるように、体積変化のパラメータを表すポアソン比の影響がなくなる。

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot g}{\rho}} \quad (4.2.4.2)$$

まず，弾性波速度に対するポアソン比の影響を見るために，次式のようなポアソン比に関するパラメータを導入する．

$$C1 = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad , \quad C2 = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (4.2.4.3)$$

そうすると，伝播速度 V_p ， V_s は再度次式のように書ける．

$$V_p = C1 \sqrt{E \times \frac{g}{\rho}} \quad , \quad V_s = C2 \sqrt{E \times \frac{g}{\rho}} \quad (4.2.4.4)$$

図 4.2.4.1 に，ポアソン比に対する $C1$ と $C2$ の値を示すが， $C1$ はポアソン比の影響を大きく受けるが， $C2$ は殆ど変わらない，このことから， V_s はポアソン比の影響を受けにくいことが判る．

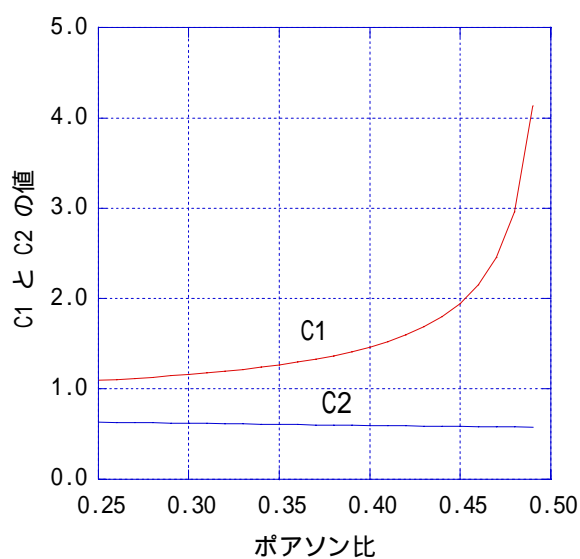


図 4.2.4.1 ポアソン比と $C1$ ， $C2$

実際に，弾性波速度 V_p ， V_s を測定する場合は，棒の一端に周期的に振動する超音波を与え，定常振動を起こし，これが他端に達する時間を測定して計算する．棒状になった一軸試験用の円柱供試体に，縦振動を与えるのは比較的容易であり， V_p は簡単に測定される．しかし，棒にねじり振動だけを発生させるのは比較的困難であるため， V_s が測定されるようになったのは比較的最近のことで，その測定には熟練を要し，またその値も不正確である．

実験的に、 V_p 、 V_s を求め、密度 ρ を測定すれば、弾性係数 E とポアソン比 ν が式-4.2.4.5のように計算できる。このように計算されたポアソン比と弾性係数は、動ポアソン比と動弾性係数と呼ばれ、動弾性係数は、一軸圧縮試験の応力とひずみの関係より求まる静弾性係数より大きくなる。

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2\{(V_p/V_s)^2 - 1\}} \quad , \quad E = \frac{V_s^2 \{3(V_p/V_s)^2 - 4\}}{\{(V_p/V_s)^2 - 1\}} \rho \quad (4.2.4.5)$$

種々の物質において、弾性波速度 V_p 、 V_s は固有な値をもつ。気体、液体および固体の代表的な物質における V_p 、 V_s は、理科年表（丸善）⁸⁾からのデータによれば、表 4.2.4.1 のようになる。なお、この表の動弾性係数は式(4.2.4.5)より計算した値である。

表 4.2.4.1 物質の音速度（主に理科年表・丸善出版）

物質	密度 ($10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	V_p ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_s ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	動ポアソン比	動弾性係数 (10^{11}dyne/cm^2)
空気(乾燥)	-	331	-	-	-
蒸留水(24)	1.00	1500			
水銀(24)	13.6	1450			
ゴム	0.97	1500	120		
鉛	11.34	1960	690	0.43	1.5
氷	0.917	3230	1600	0.34	0.6
金	19.32	3240	1220	0.42	8.2
スズ	7.3	3320	1670	0.33	5.4
銀	10.49	3650	1660	0.37	7.9
亜鉛	7.18	4210	2440	0.25	10.7
銅	8.96	5010	2270	0.37	12.7
マグネシウム	1.54	5770	3050	0.31	3.7
鉄	7.86	5950	3240	0.29	21.3
ニッケル	8.9	6040	3000	0.34	21.4
アルミニウム	2.69	6420	3040	0.36	6.7

(2) 造岩鉱物の弾性波速度

鉱物の集合体である岩石の弾性的性質を決定するもっとも重要な要素は、鉱物組成（水や空気を含めて）とそれらの弾性的性質であるとして、大草⁹⁾は岩石を構成する造岩鉱物について、鉱物が弾性的に等方とした場合に、二人のモデルから計算される理論的な弾性定数として紹介している。弾性係数とポアソン比について、二つのモデルの平均値を表 4.2.4.2 に示す。つまり、岩石がこれらの造岩鉱物だけから構成されているとした場合の、理想的な値（この値が最大値となる）を示すと考えてよい。

表 4.2.4.2 主要造岩鉱物の弾性波速度

造岩鉱物	密度 ($10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	V_p ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_s ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	ポアソン比	弾性係数 (10^{11}dyne/cm^2)
斜長石	2.605	6.06	3.35	0.28	7.49
正長石	2.58	5.90	3.07	0.25	6.36
石英	2.65	6.03	4.11	0.08	9.64
角閃石	3.17	7.21	3.99	0.28	12.88
透輝石	3.29	7.80	4.39	0.26	16.03
黒雲母	2.89	5.13	2.98	0.25	6.96
かんらん石	3.324	8.40	5.16	0.24	20.01

(3) 岩石の弾性波速度

前述したように、ある物質の弾性波速度は、媒質の弾性係数、密度、そしてポアソン比の関数となる。さらに正確に記すと、弾性波速度は図 4.2.4.1 に示すようにポアソン比の影響を受け、弾性係数 (E) の $1/2$ 乗に正比例、密度 (ρ) の $1/2$ 乗に逆比例する。しかし、実際には密度が大きくなると弾性係数は大きくなり、密度の増加割合に比べて、弾性係数の増加割合が大きいため、密度が大きくなると弾性波速度は大きくなる傾向を示すなど、これらの弾性定数は

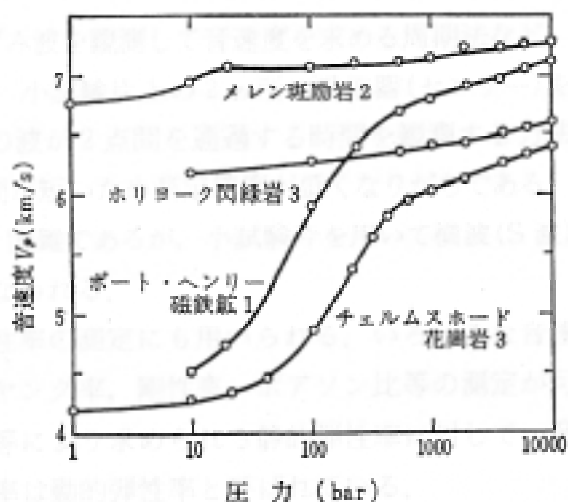


図 4.2.4.2 圧力増加による岩石中の音速度の変化 (F.Birch による)¹⁰⁾

相互に影響しあい単純ではない。

一方，岩石の弾性波速度は，岩石を構成する鉱物の種類，骨格構造，空隙を埋める流体の弾性的性質と岩石の拘束条件（外圧，間隙水による表面張力）に影響される．以降，拘束条件および含水条件が弾性波速度に与える影響と，岩石の弾性波速度と密度，一軸圧縮強度，弾性係数およびポアソン比との相関関係について述べる．

拘束条件による影響は岩石中の空隙の大きさ，量，形状およびその夾在物の弾性的性質によるが，拘束圧の影響は一般に図 4.2.4.2 および図 4.2.4.3 のようになる．弾性波速度 (V_p) は理論的には圧力には依存せず，岩石中に存在する空隙の影響だけを受けると考えて良い．弾性波速度は拘束圧の増大に従って増加するが，多くの場合，その増加のほとんどが，圧力の比較的低い部分で起こっている．この拘束圧の影響は，トンネル工事等において，不連続面が多く存在するような岩盤での切羽の安定に大きく影響するので，非常に重要となる．

拘束圧と同様に空隙中に含まれる水も，弾性波速度に影響を与える．図 4.2.4.4 は同一の岩石における含水状態の縦波 (V_p)，横波 (V_s) の変化を示している．表面張力による骨格拘束の影響はあるが，単純に言えば，空隙の岩石そのものに対する比率と，空隙の中を占める空気と水の比率によって，弾性波速度は変化するものと考えられる．含水比が小さいければ，岩石における空隙自体が占める体積が小さいことを意味し，縦波 (V_p) は，岩石を構成する鉱物の弾性波速度に大きく影響され

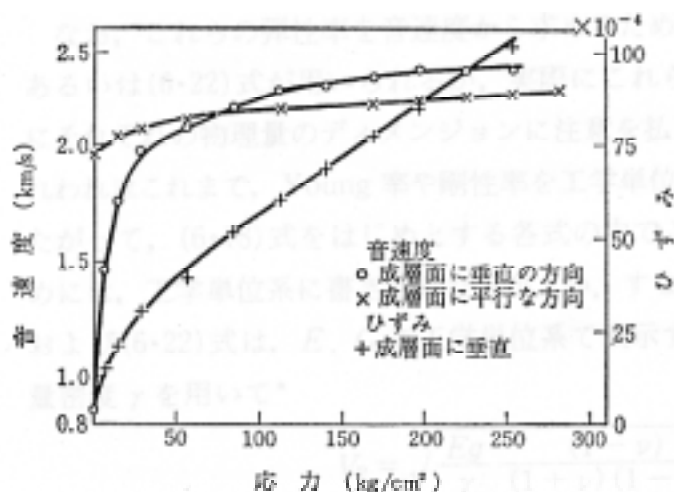


図4.2.4.3 圧力増加による石炭中の音速度の変化（成層面に対する方向性のちがいを示す）(N.B.Terry による)¹¹⁾

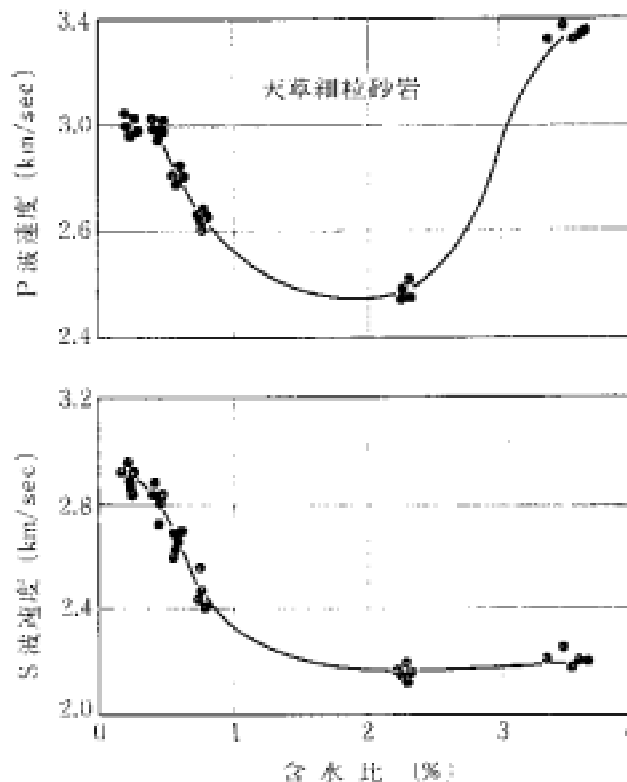


図 4.2.4.4 含水比の変化による P 波，S 波速度への影響(井上・大見)¹²⁾

る。また、含水比が大きくなると、岩石における間隙自体の体積も大きくなるが、間隙の飽和度が大きくなり、岩石の弾性波速度は、岩石を構成する鉱物と水の弾性波速度の影響を受けることになる。この中間の領域では、間隙中に水と空気が存在することになる。岩石によって形状は異なってくるだろうが、岩石の縦波 (V_p) は空気の影響を受け、含水比に対してU字型の形状をもって変化するものと考えられる。横波 (V_s) は理論的には気体および液体中は伝播しないため、含水比が大きくなれば V_s は小さくなり、ある値に収束するものと考えられる。

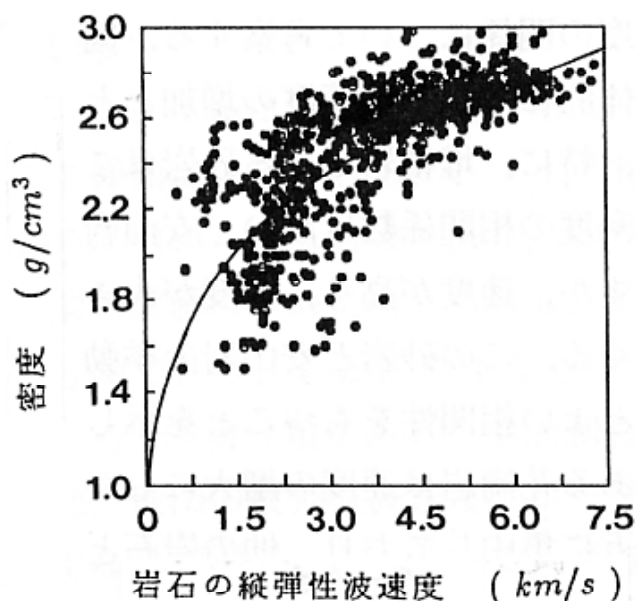


図 4.2.4.5 岩石の縦弾性波速度と密度との関係(瀬崎らによる)¹³⁾

弾性波速度と岩石の物理的性質および力学的性質との関係は、多くの研究者によって検討されており、以下代表的な例を紹介する。しかし、注意しなければならないのは、これらの試験に供される試験片は、ボーリングコア等から見たかぎり節理等がなく、ほとんど風化していない新鮮な部分から切り出されたものである。それでも潜在的な不連続面が存在するため、一軸圧縮試験から得られる強度や弾性係数は相当ばらつく。

瀬崎ら¹³⁾は、縦波 (V_p) と密度との相関を求めており、図 4.2.4.5 に示されるように、全体としては縦波 (V_p) が大きくなると、密度が高くなる傾向を示す。しかし、本来固結度が高い火成岩である花崗岩は、 V_p の変化に係わらず密度はほぼ一定となる。このような傾向は変成岩でも同様であり、片岩類は V_p の変化に対して、密度の値はバラつくが花崗岩とほぼ同様の傾向を示す。また、堆積岩では固結度が

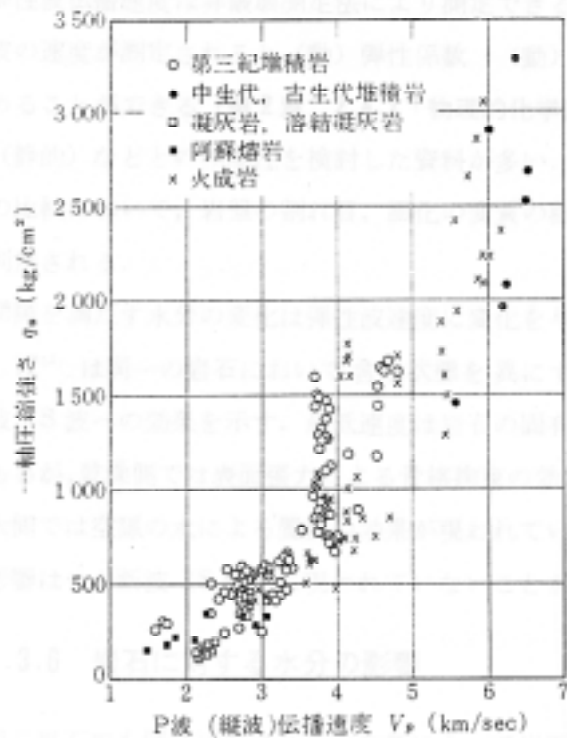


図 4.2.4.6 岩石の縦弾性波速度と一軸圧縮強度との関係(井上・大見による)¹⁴⁾

問題となるため、砂岩、泥岩あるいは凝灰岩においては、 V_p に対する密度の変化は大きくなる。

井上・大見⁷⁾は、図 4.2.4.6 に示すように、縦波 (V_p) と一軸圧縮強度との関係を求めている。これらの関係は、全体的には正の相関を有するが、岩石の種類ごとにある特性を示すことが知られている。この特性が鉄道系および道路系の岩盤分類の基礎をなすものであるが、実際には前述したように潜在性の不連続面が卓越する岩種では、弾性波速度の高い領域で一軸圧縮強度は相当ばらつく。

図 4.2.4.7 は、大久保・寺崎¹⁵⁾による縦波 (V_p) と静的弾性係数との関係を示す。縦波 (V_p) と一軸圧縮強度との関係の項でも述べたように、この関係でも岩石の種類ごとの特性が見られることがわかる。さらに、縦波 (V_p) と一軸圧縮強度との関係と同様に、弾性波速度

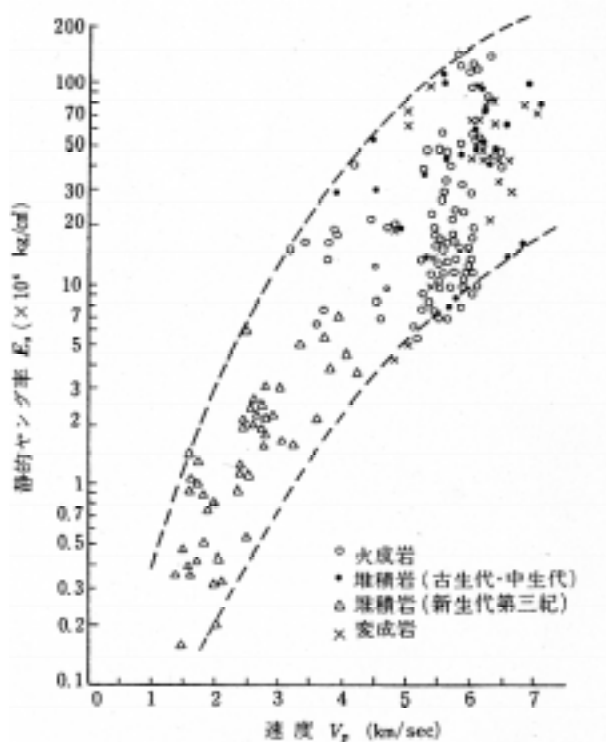


図 4.2.4.7 岩石の縦弾性波速度と静的ヤング率との関係 (大久保・寺崎による)¹⁵⁾

度の高い領域では弾性係数は相当ばらつく。

縦波 (V_p) とポアソン比との関係を求めたものはほとんどないが、瀬崎ら¹³⁾は図 4.2.4.8 の相関関係を示している。値は相当ばらつくが、ポアソン比は縦波 (V_p) が大きくなるに従って、全体的には右下がりの関係を示す。理論的には図 4.2.4.1 に示すように、縦波 (V_p) はポアソン比が大きくなるに従って急激に大きくなることになるが、実際には、縦波 (V_p) が大きくなると、密度、一軸圧縮強度および弾性係数も全て高くなるので、横方向にひずみにくくなるため、理論とは異なって低くなるものと考えられる。

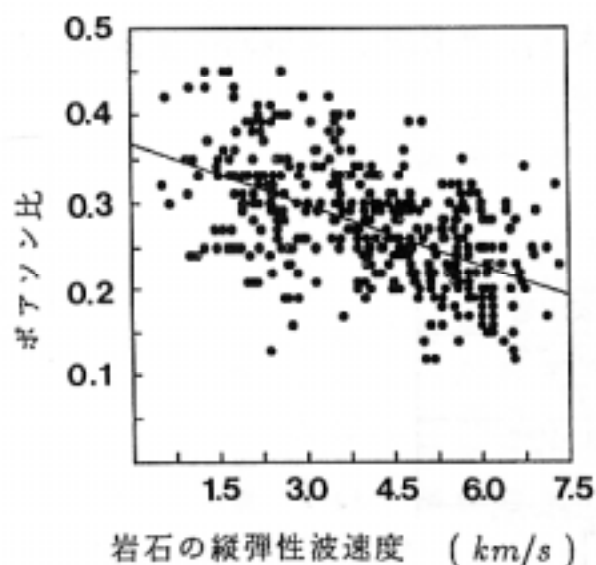


図 4.2.4.8 岩石の縦弾性波速度とポアソン比との関係 (瀬崎らによる)¹³⁾

(4) 岩盤の弾性波速度と屈折波法の問題点

岩盤の弾性波速度は、岩石の弾性波速度と

同等以上に、その地質構造、生成過程、岩盤を構成する岩石の種類、不連続面の頻度、間隙、夾雑物などの影響を受ける。さらに複雑となるのは、岩石の弾性波速度がほぼ正確な値であるのに較べて、岩盤の弾性波速度は弾性波探査によって求められたある速度層の値でしかないことにある。

物理探査法の中で最も汎用性のあり、通常のトンネル、ダム、地下空洞などのほとんどの岩盤調査に用いられる弾性波探査には、直接波法と屈折波法がある。岩盤中を伝播する波動は伝播速度の異なる媒質の境界面で反射屈折を起こすので、ある地点に到達する波には直接波、反射波、屈折波とがある。このうちどれを主に用いて探査を行うかによって、直接波法、反射波法、屈折波法とに分けられる。

直接波法は、地中における横坑やボーリング孔を利用して直接波によって速度を測定する方法である。屈折波法は、調査する区域に測線を設置し、測線上に配置した受信器で、測線上に発生した弾性波の直接波と屈折波の初動を捕らえ、その記録を走時曲線として表現し、これを解析して、地中の地層状態を弾性波速度の異なるいくつかの速度層に分けて地質断面図を作成する。しかし、屈折波法は下層が上層より低速度の場合、下層と表面とのなす角と弾性波の臨界角との和が 90° より大きい場合には、波動が地表には戻らないので測定は不可能となる。

(5) 岩石の弾性波速度と岩盤の弾性波速度の相関関係

池田¹⁷⁾は鉄道系の岩盤分類の基本となった論文の中で、岩石の弾性波速度と岩盤の弾性波速度のデータを示している。その関係を図にしたものが、図 4.2.4.9 である。ここで、岩石の弾性波速度は、ある速度層（岩盤の弾性波速度）から採取されたボーリングコアから切り出された岩石サンプル（一軸圧縮試験用供試体）により求められた弾性波速度である。岩盤の弾性波速度は、ある速度層を示す地層の平均的な弾性波速度を表しており、岩石の弾性波速度は、見た目層理等の不連続面がなく、風化のない堅固な部分から切り出されたコアの弾性波速度を表していると考えて良い。瀬崎ら¹³⁾も 1989 年より以前に NATM 工法で掘削されたトンネルについて、同様な関係を求めており、その結果を図 4.2.4.10 に示す。なお、池田のデータは全て鉄道トンネルであり、瀬崎のデータは道路トンネルと鉄道トンネルが混在している。

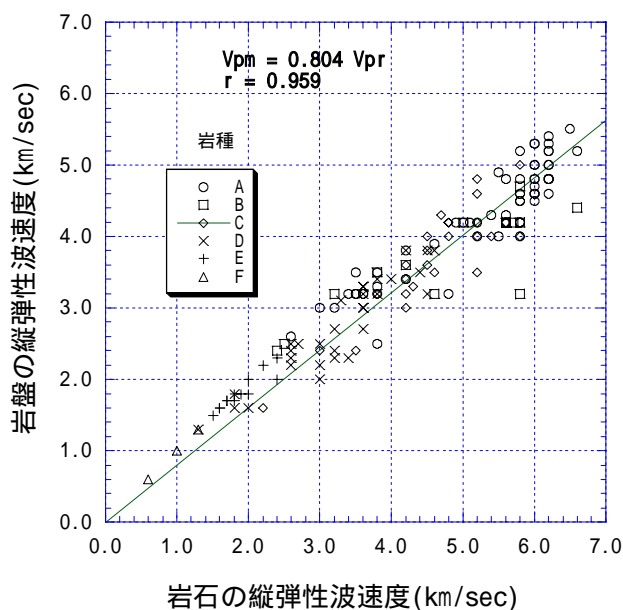


図 4.2.4.9 岩石の縦弾性波速度と岩盤の縦弾性波速度との関係（池田¹⁷⁾によるデータを瀬崎が図を作成）

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、割れ目係数と岩目係数がある。割れ目係数を式-4.2.4.6 に示すが、岩盤の弾性波速度とその岩盤から採取された岩石試料の弾性波速度の比を取ったものである。この割れ目係数が、岩盤内に存在する不連続面等の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不連続面等の弱面が存在することになる。岩目係数を式-4.2.4.7 に示すが、割れ目係数を2乗したものである。岩盤の強度はこの岩目係数を、供試体の試験（岩石の試験）から得られる強度に掛けることで計算される。これを「準岩盤強度」と呼んでいる。

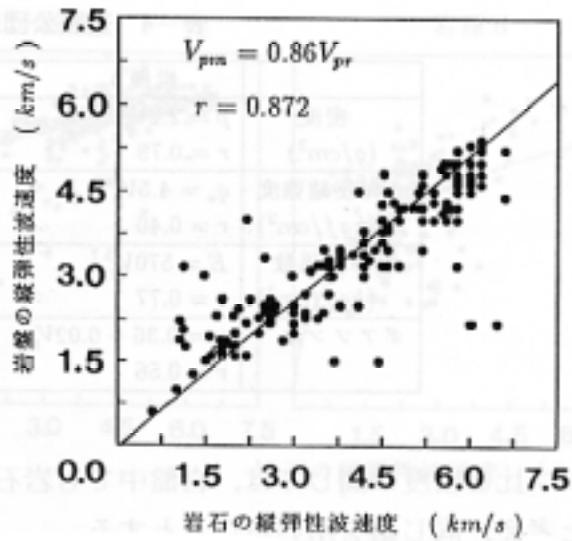


図 4.2.4.10 岩石の縦弾性波速度と岩盤の縦弾性波速度との関係（瀬崎らによる）¹³⁾

$$K = \frac{V_{pm}}{V_{pr}} \quad (4.2.4.6)$$

$$f = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \quad (4.2.4.7)$$

ここで、 K は割れ目係数、 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。

図 4.2.4.9 と図 4.2.4.10 からわかるように、両者は比較的に関係数が高い。両者とも一次式で近似しているので、この傾きが式-4.2.4.6 に示す割れ目係数の平均的な値となり、池田では 0.80、瀬崎では 0.86 の値となっている。岩石の弾性波速度の低いところでは、割れ目係数が 1 より大きくなることがある。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の影響が大きいと思われる。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。しかし、その低下率は約 2 割であり、感覚的に岩盤の弾性波速度は高く測定されるといわれ、これが拘束圧によるものと考えられている。そうすると、岩盤中に存在する不連続面等の弱面が、拘束圧のない切羽に現れた場合の岩

盤の評価法が問題となろう。

(6) 弾性波速度の地山分類への適用について

以上述べてきたように、弾性波速度は非常に多くの情報が複合的に評価されて決まる指標である。その評価においては、地層が切羽に現れた時の、地層全体としての切羽の安定性に関する不連続面、拘束圧、さらには水（地下水）等に関する情報などが正しく評価・数値化されればこれまで以上に有効な地山分類の為の武器となることが期待される。

4.2.5 現状での地山分類に基づく設計法の有する問題点

地山分類そのものが内包する問題をこれまで述べてきたが、最も重要な問題の一つは「地山分類＝標準支保パターン」という、トンネル設計法に地山分類が直結している点である。これは事前調査結果に基づく工事計画の段階で、各区間ごとに地山状況を地山全体に連続的に得られている弾性波速度値を基本にして想定し、それに応じた標準設計を適用する当初設計を決定し、これに基づき予算計画を行うというトンネル工事の有する特徴による。一方で、従来からトンネル工事は不良地質との遭遇等の理由により、計画予算や工事期間と実績の不一致が大きいことが指摘されることが多い工種であるという一面を持っている。これは、前述の地質調査の精度、数量の問題やこれに基づく地山評価、さらには施工中の岩盤分類そのものの問題点であると言える。

この点に関しては、地山分類を前提とする標準設計法に対し、類似設計法や数値解析法との関係からその適用条件やルールの見直しを含めた検討を行う必要がある。その場合に重要な前提条件として、前述の施工中の岩盤分類の位置付けとともに地山分類の精度の許容範囲に関する共通認識を確立することが重要であると考えられる。

4.3 岩盤分類に関する展望

これまで述べてきたように、トンネルの設計・施工のための岩盤分類は、鉄道、道路、電力、農業土木それぞれの事業主体によって異なるものを用いている。そこには、それぞれのトンネルの重要度や、トンネル掘削断面積の大きさ、形状の違い等によるさまざまな考え方の変遷がその基本にあり、これらをすべて無視して統一的な岩盤分類を考えることはほとんど不可能に近い。本節では、まずもしこれらの複数の岩盤分類手法を横並びにした場合にそれらの分類手法で使われる指標などがどのような相関になっているかを概観し、直接的な「ものさし」を作ることが用意でないことを確認する。その後、道路系、鉄道系の岩盤分類手法の融合を意識して、どこまでを統一化し、どの部分はそれぞれの裁量に任せるべきかについての議論を行うこととする。

4.3.1 「ものさし」を作ることの限界

報告書末に収められている資料（平成 14 年 1 月 10 日に地盤工学会岩盤分類基準化検討準備 WG にて用いられたもの；脇坂氏作成）からその一部を抜粋し、複数の岩盤分類手法を実際に統合する際に遭遇する困難の一部を指摘する。

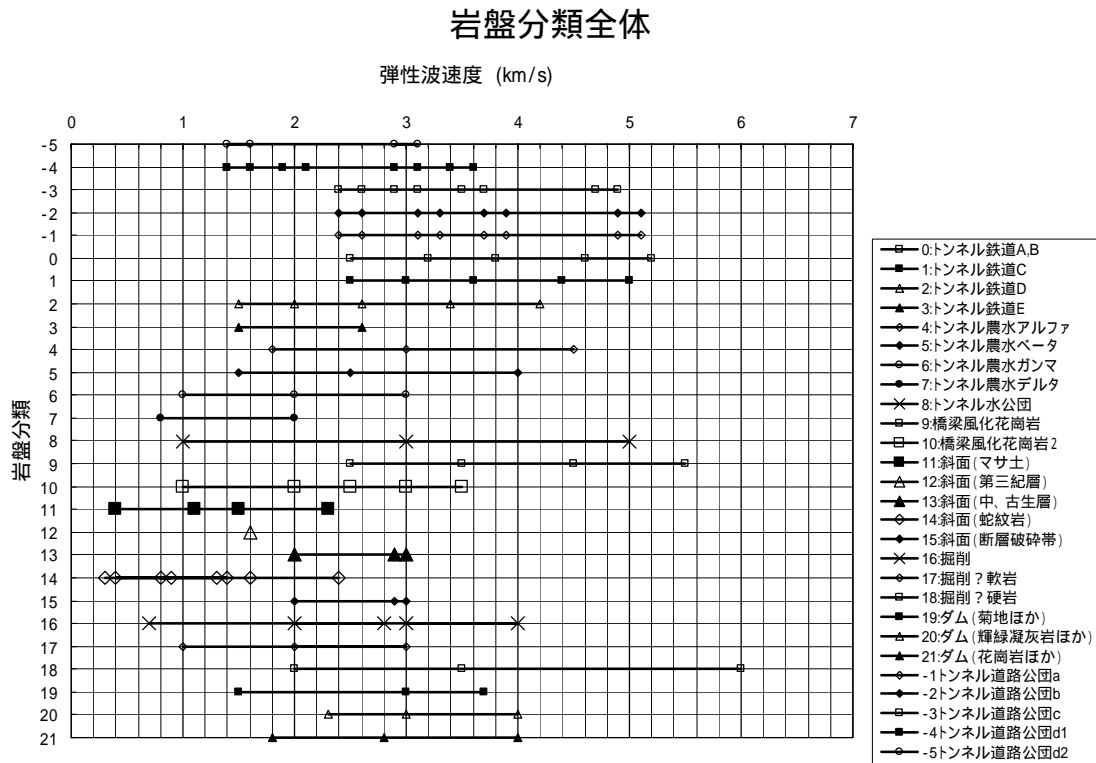


図 4.3.1.1 種々の岩盤分類における岩種グルーピングと弾性波速度の関係

図 4.3.1.1 は種々の岩盤分類における岩種グルーピングと弾性波速度の関係を示したものである。周知のように、主に鉄道系、道路系の岩盤分類手法では岩種のグルーピングを行った後、それぞれのグループに対して一定の弾性波速度帯を定義することで岩盤の分類を行うという基本原則を採用している。

鉄道	農水		道路公団		
A,B岩種	アルファ群	ベータ群	a岩種	b岩種	c岩種
A:1.古生層、中生層(粘板岩、砂岩、礫岩、チャート、輝緑凝灰岩、石灰岩等) 2.深成岩(花崗岩、閃緑岩等) 3.半深成岩(ヒン岩、花崗斑岩、輝緑岩等) 4.火山岩(粗粒玄武岩、玄武岩等) 5.変成岩(片岩類、片麻岩、千枚岩、ホルンフェルス等) B:1.剥離性の著しい変成岩 2.細層理の古生層、中生層	1.古生層、中生層(粘板岩、砂岩、礫岩、チャート、石灰岩、輝緑凝灰岩等) 2.深成岩(花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩、斑糲岩等) 3.半深成岩(石英斑岩、花崗斑岩、ヒン岩、輝緑岩、蛇紋岩等) 4.火山岩(玄武岩等) 5.変成岩(結晶片岩、千枚岩、片麻岩、ホルンフェルス等)	1.剥離性の著しい変成岩 2.細層理の発達した古生層、中生層(頁岩、砂岩、輝緑凝灰岩等) 3.火山岩(流紋岩、安山岩等) 4.古第三紀層の一部(火山岩質凝灰岩、珪化頁岩、砂岩、凝灰岩等)	変成岩(千枚岩、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(斑糲岩、橄欖岩等)	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) 脈岩(花崗斑岩、石英斑岩、輝緑岩等) 深成岩(花崗岩、閃緑岩等)

図 4.3.1.2 岩種グルーピングの一部

図 4.3.1.2 には岩種グルーピングの一部を示す。合理的設計を実現するという目的は同一であるにもかかわらず、発展の経緯などからグループの名前からそこに含む岩種リストまで異なったものになっている。

道路公団	鉄道	農水アルファ群	農水ベータ群
A	VN	A	A
B	IVN		
CI CII	IIIN	B	B
DI	IN	C	C
DII	IS,IL,特S,		
E	特L	D	D

図 4.3.1.3 仮の相関関係

図 4.3.1.3 にはこれらの差異を認識した上で「仮に」作成した異種岩盤分離間の相関を示す。ここに示している相関は岩種リストの違い，弾性波速度閾値の差異などを認識した上で，あえて示した相関である。したがって，一見，この表が異種岩盤分類間の「ものさし」のようにも見えるが，実際には安易にそのような取り扱いをすることはできない。また，現存する岩盤分類の諸手法を温存して，それらの中に「厳密に定義されたものさし」を作成することも非常に困難であり，あまり意味があるとは思われない。

これらの資料を考慮しても明らかのように，岩種区分，弾性波速度区分，カテゴリーの名称，注意書きなどのすべての項目において差異がある複数の岩盤分類手法間で「ものさし」，すなわち「A の手法でクラス n の岩盤は B の手法ではクラス m である」というような簡易な換算メカニズムを構築することは非常に困難であり，またそれを強引に作成したとしてもそれは使用しづいものとなろう。

4.3.2 統一化すべき範囲に関する意思統一

様々な問題点が存在するのは確かであるが，混在する数種類の岩盤分類，あるいは地山分類手法については，今後予想される国際標準化の流れなどを考慮すると，これらをできるだけ合理的に標準化することが賢明であろう。岩石の記述などに関する基礎の部分から国内外での標準化が既に進行している。ここで，トンネルに関する岩盤分類の標準化について最も重要な視点は，調査，分類，地山の等級化，支保パターン決定の流れの中で，どの段階までの作業・指針を標準化するか，ということである。

図 4.3.2.1 は，岩盤分類の手法における流れを，道路系（上），鉄道系（下），統一案（中）についてそれぞれ模式化したものである。岩種グルーピング，弾性波速度，地山強度比については，分類に不可欠な要素として考え，それらについての統一案を新規に作成することは不可能ではない。また，それ以外のパラメータについては，現在では道路系と鉄道系に僅かの差があるが，これらについては適切な検討を行うことにより，合理的な案を作成することは十分に可能である。考慮する項目の中で，クラス分けなどを行う際の閾値の設定についても標準化は実現性のあるものである。ここまで（左端から図中の Boundary 2 まで）を新しい標準化岩盤分類の範囲と位置付けることは一案であるが，本部会では更に一歩踏み込んで，岩盤，あるいは地山の等級を設定する部分まで（図中の Boundary 1）を標準化の範囲として捕らえることも可能であると考えられる。

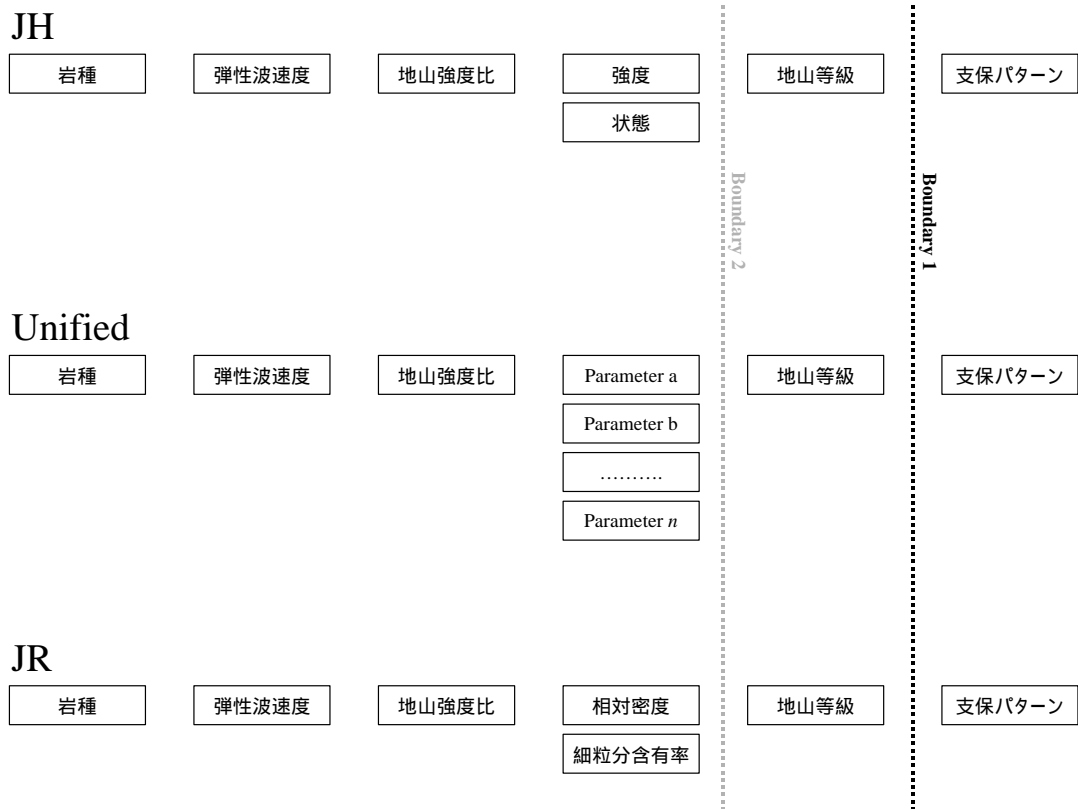


図 4.3.2.1 岩盤分類の統一における基本スタンス

即ち、新しい標準化岩盤分類を用いて地山に等級を与える段階までは共通化することにより、「どのような地山を対象としているのか」についての記述を標準化することを目標とすることとする。これは即ち、与えられた地山は同一でも、トンネルの断面形状、使用目的、施工方法などの差により具体的な設計はこれまでと同様に異なっても良い、という自由度を残す考え方を採用することを意味する。

ただし、「どのような地山か？」の判定の際に、一次支保構造など的人為的行為の結果が混在する場合（内空変位の値を Boundary 1 よりも左側のパラメータ認識に使用する場合などに相当する）があるが、これはある限度内は認めるものとして、標準化案について考察するのが賢明であると思われる。次節では、ほぼ掘削断面積が同様の新幹線複線断面の鉄道トンネル並びに 2 車線道路トンネルに焦点を絞って、統一的な考え方の適用の可能性について一例を挙げて考察してみる。

4.3.3 鉄道系と道路系の岩盤分類統一化に関する一考察

トンネルの地山状況の把握や、それに対応した支保選定を目的として、トンネル建設前に、種々の地質調査（地質踏査、弾性波探査、電気探査、地質調査ボーリング、ボーリング孔を用いた原位置試験、岩石試料試験など）が実施されてきた。池田は、昭和30年代後半からトンネル地質調査の主要な手段となった弾性波探査による弾性波速度に基づくトンネルの岩盤強度分類⁷⁾を主体とし、弾性波速度と地質調査並びに設計・施工との関連性について整理し、簡便な地山強度分類として整理した。図4.3.3.1に、池田が整理した弾性波速度と地質状態の関係について示す。図から明らかなように、弾性波速度は、地質の良否と関係がある。

弾性波速度を地山強度分類の基準の一つとして採用した理由は、トンネルは線状構造物であり、ボーリングは線あるいはトンネル施工位置から考えれば点情報でしかないこと、地質踏査は、地質の定性的な評価でしかないことなどがあり、トンネル縦断面としての定量的な情報を得るには弾性波速度がもっとも得やすいことが挙げられる。従って、鉄道トンネルにおいては、弾性波速度を基本とした岩盤分類が基礎となって現在の岩盤分類が策定されている。一方、道路トンネルでは、その基本的な考え方は、鉄道トンネルのそれと同様の岩盤分類を基本としているが、その後の発展の経緯により現在では、異なった岩盤分類となっている。これらの両者の違いは、事業主体のトンネル設計・施工に対する考え方を反映したものと思われる。

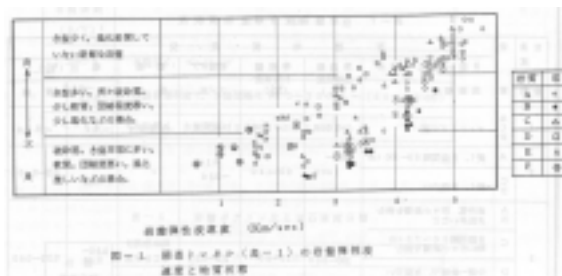


図 4.4.3.1 弾性波速度と地質状態（池田）

表 4.3.3.1 新幹線複線トンネルと2車線道路トンネルの対応表

新幹線複線トンネル	2車線道路トンネル
IV _{NP}	
III _{NP}	B
II _{NP}	C _I
I _{NP}	C _{II}
I _{SP}	D _I
I _{LP}	D _{II}

ら（建設作業環境，建設機械，など様々）がトンネルの設計全体に対してどのような影響を及ぼすかについてはこれからも注視することが必要である．

この見方をとれば，「国際化の時代であるから国内に様々な方法が統一されないまま存在するのは時代遅れであり，従って，トンネル岩盤分類の統一案を作成すべきである」との見解は，ISO化には左程影響されない可能性があることを意識した上で再度その意義を確認する必要があるということになる．これらの点を考慮して，今後，統一案の原案についての議論を進めていくことが必要である．

表 4.3.3.2 地山分類比較表

鉄道	道路	岩石分類 岩盤等級	硬岩			中硬岩	軟岩	土砂	
			A	B	C	D	E	粘性土	砂質土
	B	極めて良好	3.8～4.6 4.2～	4.4～	3.6～4.4 4.2～	3.4～2.6 -	4.2～		
	C _I	良好	3.2～3.8 3.3～4.6 3.9～4.6	3.8～4.4 3.9～ 4.4～	3.0～3.6 3.9～4.6 3.9～	2.0～2.6 3.6～	2.0～2.6 3.4～4.1 2.9～		
N	C _{II}	普通	2.5～3.2 3.3～3.7 3.2～4.1	2.9～3.8 3.3～4.2 3.5～4.5	2.5～3.0 2.9～3.8 3.3～4.2	2.0～2.6 1.5～2.0 2.8～3.4	2.0～2.6 2.6～3.4 1.4～3.1		
L	D _I	やや不良	～2.5 ～2.6 ～3.1	～2.9 ～4.1 ～3.6	～2.5 ～3.1 ～4.1	～1.5 ～3.1	～1.5 ～2.6 ～2.7		
S	D _{II}	不良	～2.5 - ～3.1	～2.9 ～4.1 -	～2.5 ～2.6 ～4.1	～1.5 ～2.7	～1.5 ～2.6 ～2.7		
		備考 道路系 地山 分類	H塊状 (花崗 岩) H塊状 (中古生 層砂岩)	M層状 (粘板 岩) L層状 (黒色, 緑色片 岩)	M塊状 (安山 岩) M層状 (中古生 頁岩)	M塊状 (第三紀 層砂岩)	L塊状 (凝灰 岩) L層状 (第三紀 層泥岩)		

参考文献

- 1) 地盤工学会：岩盤の工学的分類方法,2004.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説，1996.
- 3) 鈴木守・富田宏夫：トンネル地質調査の性格と問題点(1)，トンネルと地下，Vol.24,No.9,1993.
- 4) 鈴木守・富田宏夫：トンネル地質調査の性格と問題点(2)，トンネルと地下，Vol.24,No.10,1993.
- 5) 石崎昭義：山岳トンネルの事前調査(1),トンネルと地下，Vol.10,No.1,1979.
- 6) 高橋彦治：地質からみたトンネル工事のすべて，施工技術，Vol.10,No.1,1977.
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説，1977.
- 8) 国立天文台編：理科年表, 丸善, 2003.
- 9) 大草重康：土木地質学, 朝倉書店, 1972.
- 10) F.Birch : The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 1, J. of Geophys. Res, 65, 1960.
- 11) N.B.Terry : The dependence of the elastic behaviour of coal on the microcrack structure, Fuel, 38(2), 1959.
- 12) 井上・大見：堆積岩の弾性波伝搬速度・圧縮強さと含水比の関係, 日鉱誌, Vol. 88, 1009, 1972.
- 13) 瀬崎満弘・Omer AYDAN・市川康明・川本眺万：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, 土木学会論文集, 第 421 号/ -13, 1990.9.
- 14) 井上・大見：岩石供試体の縦波伝搬速度と一軸圧縮強度との関係, 応用地質, Vol. 12, No.3, 1971.
- 15) 大久保・寺崎：岩石の物理的性質と弾性波速度, 土質工学会誌, Vol.19, No. 7, 1971.
- 16) 池田和彦：トンネルの岩盤強度分類, 鉄道技術研究報告, NO.695 , 1969.