

3. 岩盤分類と標準設計法の実際

3.1 トンネル工事における岩盤分類と標準設計法の位置づけ

3.1.1 事前調査の重要性

山岳トンネルにおける地質調査は、事前段階から施工段階さらには維持管理段階に至るまで、一貫して実施されるべきものである。これは、トンネルが地中深くに建設される線状構造物であるため、その区間全長に渡って十分な事前情報を得ることが必ずしもできないからである。

しかしながら、事前調査によって地山評価を的確に行えるか否かは、トンネル工事の成否を左右するといっても過言でない。そのため、トンネルの事前調査では、施工時に大きな手戻りがないよう、地山の工学的な性状をマクロに把握した上で、施工上問題となる地質・環境条件を確実に抽出することに主眼を置いて行う必要がある。

地山の工学的な性状をマクロに把握できる指標として、我国では、一般に地山弾性波速度と地山強度比が用いられている。事前調査ではこの指標に基づいて地山分類が行われることになるが、その結果を鵜呑みにすることなく、他の調査手段による情報も加味して総合的に評価を行うことが重要である。

3.1.2 地山分類・標準設計法の意義と限界

トンネルでは、従来から地山分類と岩盤分類という用語を厳密に区分することなく、慣例的に「地山分類」という用語を用いている。そのため本章では、従来の表記に従って「地山分類」を用いることにする。

トンネルの事前調査では地山の状態を詳細に把握することができない場合が多く、解析的手法を用いた設計を行うことは一般に困難である。そのため、トンネルの設計は、地山弾性波速度や地山強度比といった比較的単純な指標を用いて岩質毎に地山の状態を大まかに分類（地山分類）し、その分類に対応させて予め用意されている標準設計（標準支保パターン等）を適用して設計を行う、いわゆる「標準設計法」によることが一般的である。このように、地山分類はトンネルの設計に直接結びついており、設計において極めて重要な位置を占めるものである。

しかし、前述のように事前調査の精度にはおのずと限界がある。特に地山弾性波速度や地山強度比には、それぞれの予測値に一定の誤差が生じ得ること、さらには地質構造等の地質工学的な解釈によって異なるものとなる可能性もあることなどについて、十分に認識する必要がある。

また、地山分類基準、標準支保パターンそのものについても、以下のような課題が内在していることについて、十分に認識する必要がある。

(1) 分析のもととなる施工実績データの量と質の問題

- ・「量」について：様々な地山条件を網羅したものではないこと、母集団に偏りがある可能性があること。
- ・「質」について：合理的なデータのみが蓄積されているとは限らないこと、地山状態・支保剛性・施工法が相互に影響し合うために実際を正しく捉えることが難しいこと。

(2) 分析手法の問題

- ・統計分析によることから論理構成がブラックボックスになる可能性があること。

地山分類に基づく標準設計法を適用するにあたっては、これらの意義と限界について認識し、他の類似条件における施工実績も加味して設計を行う必要がある。また、施工段階においては、現場の状況に応じてより適切な修正設計を行うことが必要である。

3.1.3 設計手法の種類と標準設計法の位置づけ

一般にトンネルの設計法には、以下の3つの方法がある。

- ①類似設計法
- ②標準設計法
- ③解析手法

これらのうち標準設計法は、内空断面が標準化されている鉄道トンネルや道路トンネルにおいて主に作成されており、表-3.1.3.1に示すように、一般的な地山条件と設計条件の場合における設計の中心的役割を担っている。ただし、表に示すように、著しい塑性化や流動化が問題となるような地山の場合や、著しい破碎帯、偏圧地形、多量・高圧湧水、特殊な断面形状・寸法、地表面沈下の制限、等の特殊な条件が介在する場合は、標準設計をそのまま適用することはできず、他の手法と併用または標準設計によらず他の手法を適用する必要がある。

表 3.1.3.1 各設計法の位置付け

地山の状態	設計条件	
	一般的な設計条件	特殊な設計条件※2
一般的な地山	標準設計法の適用	類似設計法の適用 解析手法の適用
特殊な地山※1	標準設計法の適用 (他の手法も併用)	

※1 特殊な地山：塑性化する地山、流動化する地山

※2 特殊な設計条件：①破碎帯、②偏圧地形、③多量・高圧湧水、
④特殊な断面形状・寸法、⑤地表面沈下の制限、等

3.1.4 標準設計法の現状

前述のように、標準設計法が確立されている分野・機関は、主に道路（国土交通省、道路）、鉄道（鉄道建設公団、鉄道）等であり、それぞれ地山分類基準、標準設計法が公表されている。これらの標準設計の範囲は、掘削工法、支保設計（標準支保パターン）、覆工設計、路盤設計の多岐に及んでいる。これらについては3.2～3.4に述べられる。

なおここでは、標準設計に基づく事前設計の精度を把握するための参考として、NATMが導入されて間もない1980年代に国鉄において行われた実績分析結果の例を2つ紹介する^{1)、2)}。

図-3.1.4.1¹⁾は、事前調査において得られた地上弾性波速度から設定された地山等級と、施工中に得られた坑内弾性波速度から設定された地山等級との関係を整理したものである。坑内弾性波速度による等級を正解とし、隣接する等級も許容すれば、事前段階の地山分類の的中率は比較的高いことが分かる。

図-3.1.4.2²⁾は、NATMにより施工された鉄道トンネルの施工事例からピックアップされた20例について、地山状態の評価の想定と実績との差異を示したものである。地山は硬岩（火成岩・変成岩、古生代および中生代の堆積岩）、軟岩Ⅰ（新生代の堆積岩で内空変位量の小さなもの）、軟岩Ⅱ（新生代の堆積岩で内空変位量の大きなもの）、土砂に4区分されている。なお、この算出を行うに当たっては、質的変量である地山等級を数値とみなしている。

各種の地山における実績をみると、

- ① 土砂、軟岩Ⅰは、事前想定と実績の差異が小さい傾向にある。
- ② 軟岩Ⅱは、差異が大きく、事前に対して増の変更がなされる傾向にある。
- ③ 硬岩では変更幅が大きい、トンネル全長に対する変更幅の平均は増減が相殺されて0に近いという結果が半数以上の例で見られる。

この理由は、以下によるものと考えられる。

- ① 土砂、軟岩Ⅰの場合：一般に土被りが小さく、地質横造が単純なため、調査、評価が容易であること
- ② 軟岩Ⅱの場合：内空変位や土圧が増大する原因の一つである膨潤性粘土鉱物の作用が力学現象に及ぼす影響（膨潤に伴う地山強度の低下と堆積膨張）を定量的に解明できていないこと、すなわち、事前評価が十分にできないことに起因しているものと考えられる。
- ③ 硬岩の場合：調査の中心になっている弾性波探査の解折の限界に起因するものと考えられる。また、特に大きな差異のある事例は、特異な地山条件、等級評価上の問題に起因するものである。

参考文献

- 1) 吉川恵也、朝倉俊弘：NATMのための設計パターン化の研究、鉄道技術研究報告、No.1235、1983。
- 2) 吉川恵也、朝倉俊弘、木谷日出男、小野田滋：トンネルの事前設計と実績の対比、鉄道技術研究所速報、No.A-84-51、1984。

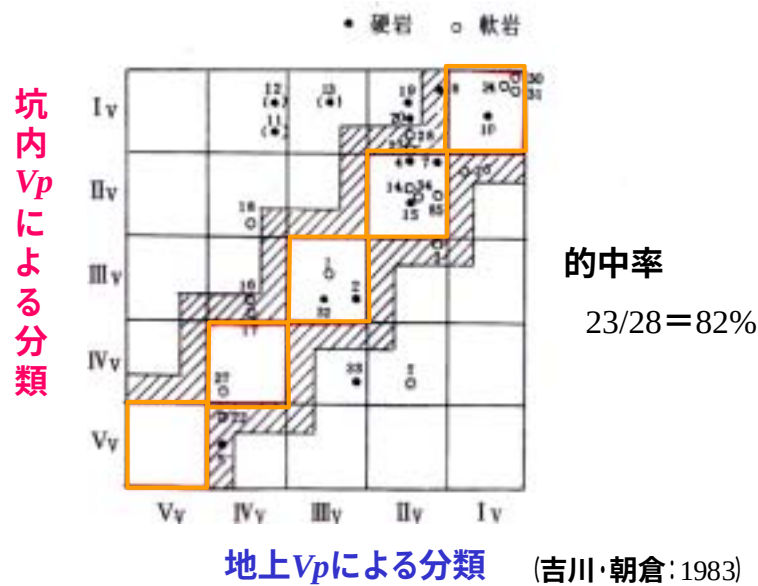


図-3.1.4.1 事前弾性波速度による地山等級と施工時坑内弾性波速度による地山等級の関係¹⁾
(NATM 導入初期における鉄道トンネルの例)

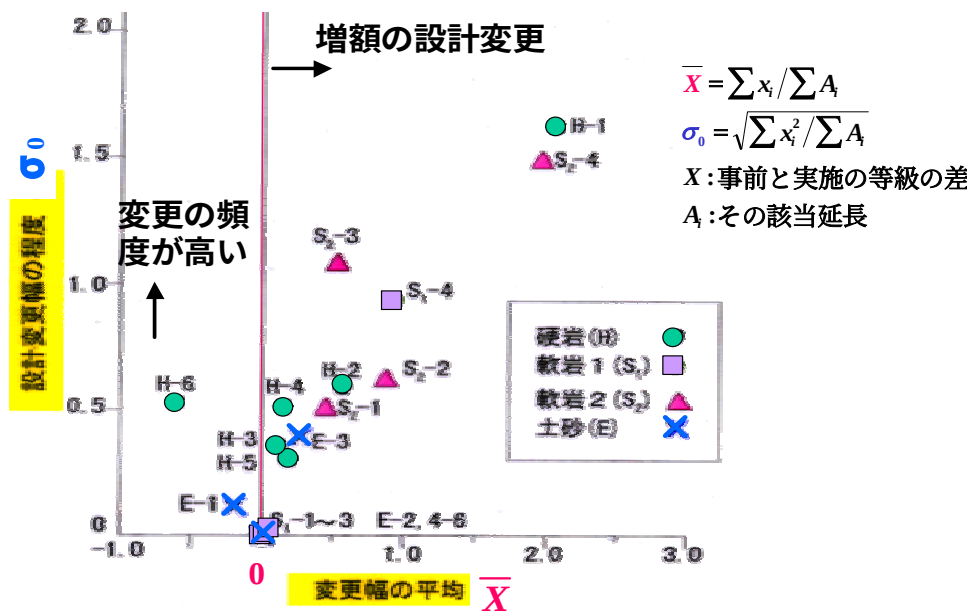


図-3.1.4.2 施工実績から得られた設計変更の程度に関する地山条件別の分布²⁾
(NATM 導入初期における鉄道トンネルの例)

3.2 鉄道トンネルにおける地山分類と標準設計法の現状

3.2.1 標準設計法適用にあたっての基本的な考え方

(1) トンネルの設計手法

NATMはラブセビッツ等が開発したトンネル工法で、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工を適宜組合せて、トンネル内空を早期に覆って地山に反力を与えたり、地山が本来有する支持能力を有効に活用する工法である。また、保守管理面からも、覆工と地山の密着による安定性や寒冷地における防水工、断熱工等のし易さなどから、在来工法（矢板工法）に変わって鉄道トンネルの標準工法となっている。NATMによる鉄道トンネルの設計は、計画段階の事前設計（当初設計）と施工段階の実施設計の2段階にわたって行なわれる。

このように2段階にわたって設計が行なわれる要因として、トンネルは地中深くに設けられ、線状の長大な構造物であることから、工事着手前に地山の性状や施工時の地山の挙動を的確に把握し難いことに起因している。そのため、施工時に切羽の観察や各種の計測を行なって、事前設計が現状に適合するかどうかを判断し、不適合の場合は、設計変更して、実施設計を行なうことになる。

しかしながら、事前設計と実施設計とが、大幅な差異が生じると、工期や工事費の大幅な変更を余儀なくされることから、可能な限りの確かな事前設計を行うことが必要となる。的確な事前設計を行うためには、地山の実態をできるだけ、詳細かつ精度高く把握する必要がある。計画トンネル付近に対して、地表踏査、ボーリング、各種物理探査、資料試験、原位置試験等を組合わせ実施し、それらの成果をもとに総合的な地質図を作成して、的確な地山評価が必要となる。

トンネルの設計手法として、経験的な設計法と解析的な設計法に大別される。しかし、解析的な設計法の場合、解析に用いる数値、地山のモデル化、地下水の影響等により、計算値と実測値に差ができることが多く、適用が有効である範囲をみきわめて採用することが必要である。一方、経験的な設計法として、新幹線断面等についてトンネルを設計する場合には、類似の施工例や数多くの施工実績をもとに、技術的な判断を加えて、通常遭遇するような地山条件に対して、地山の状態を等級評価し、その地山等級に該当する標準支保パターンを選定する設計法が活用されている。

しかし、この方法にも適用しにくい条件があり、特殊断面、土被りが著しく小さい場合、偏圧地形、膨張性地山、流動性地山などでの設計においては、類似条件の事例を参考に、解析的な検討も合わせて行なうことにより、総合的な技術的判断を加えた設計を行わざるを得ない。

また、施工段階における実施設計は、切羽の地質と地山の挙動の観察、既施工区間の計測結果をもとに行なう。この場合、観察を主体とした切羽の地山評価を適切に行なうため、施工段階の地山分類基準を作成し、これにより事前設計での支保パターンの妥当性の評価を行なう。また、周辺地山の安定性、覆工コンクリートおよびインバートコンクリートの打設時期などを技術的に判断し、適宜、掘削工法の変更をも考慮した設計を行なうこととなる。

(2) 地山分類と標準設計パターン

標準設計パターンを用いる設計において、地山分類は欠くことのできないものである。標準設計パターンは主として事前設計において活用されるものであるが、施工の難易、すなわち地山の自立性に関連する掘削工法（断面分割、ベンチ長等）や支保方式、土圧特性に関連する支保工の設計（配置、種別、組合せ等）を考慮して何種類かの標準を定めている。

標準設計パターンは、地山等級と対応してはじめて活用できるので、境界条件を定量的に示せないものに対しては、パターン化から割愛されている。標準パターンや支保規模等と組合せられている地山分類は、次のようなものでなければならない。

- ①客観的、かつ定量的な評価ができ、その評価の指標が目的と関連する因子であること
- ②評価対象とする区間全長にわたって指標値が得られること
- ③通常、実施できる調査法、試験法から指標値が得られること

しかし、実際のトンネルの地質状態は千差万別で、ある区間には適用できても、他では適切でない場合もあり、適用の目的や段階によって適合しない場合もあるなど、すべてを満足する指標を得ることは難しい。そのため、指標は複数併用することで、地山種別や用途によって、使い分けられるように指標を用意し、地山等級区分のみを共通にしておくほうが良い

と考え、分類基準の作成にあたっては、適用範囲を限定しても、複数の指標を適用する考え方で作成されている。

(3) 地山の工学的区分

地山は、岩盤と岩盤にまだならない固結しない地盤や、岩石が風化や破碎作用を受けて固結度を失った地盤、いわゆる土砂からなっている。そして、岩盤にも初生的あるいは二次的に形成された分離面、節理、片理、シーム、断層面等が存在し、均質、一体として考えられない場合が一般的である。また、地山の強さ、安定性は、岩石や土の性状、分離面の状態、地山中の地下水等に支配される。

トンネルの分野では、明確な地山区分ではないが、硬岩地山、中硬岩地山、軟岩地山、土砂地山に大別され、力学的な特性として次のように説明がされている。

硬岩地山は、

①岩石がかなりの硬さを持っていて、不連続面は存在するが著しくなく、緩みがほとんどないため岩石とほとんど大差のない力学的特性を示す地山

②岩石がかなりの硬さを有し、不連続面が存在し、緩みがあるために、岩石の力学的性質とかなり異なった力学的特性を示す地山

また、軟岩地山は、

③岩石の固結度はかなり低く、不連続面はほとんど存在しないか、存在しても緩みも少なく岩石とほとんど大差ない力学的特性を示す地山

④岩石の固結度はかなり低く、不連続面が存在し、緩みも存在するために不連続面の影響もかなり強く現れている地山

中硬岩地山は、両者の中間的なものと考えられている。なお、土砂地山は、未固結あるいは固結度が非常に悪い堆積物の地山で、現地風化生成物である土砂、崖錐堆積物なども範疇に入る。

このような力学的特性を数値指標で工学的区分する方法として、測線に沿って連続的に求

められる弾性波速度を用いた池田和彦氏の地山分類をもとに、健全な岩盤に対する速度の低下の度合いから、分離面の発達度合いや風化、変質の程度を推定して岩種分類と対応させている。

しかし、弾性波速度と強度は高い相関があるものの強度そのものを示すものではないので、トンネル掘削後の二次応力状態での地山の破壊条件を示す指標とはならない。そこで、仲野良紀氏は二次応力状態で破壊し、塑性土圧が発生する軟岩地山の評価を行なうために、地山強度比という地山の一軸圧縮強度と初期応力の比を指標とすることを提案し、軟岩トンネルでは理論値とかなり良い対応を示す結果が得られたとのことから、地山強度比を地質の変化が少なく分離面の発達していない地質に対してのみ指標として岩種分類と対応させている。

また、地山の土圧特性、地山の挙動の特徴として、硬岩や中硬岩地山では、トンネル周辺地山は破壊にいたらず、したがって、変位はわずかな弾性変形を生ずるだけで、落ち着く。内空変位は、天端の変位が若干生じるだけで、土圧も小さくアーチ部の緩みに起因する緩み荷重によるもので、その程度は分離面の発達度合いに関連する。したがって、内空への変位や緩みを早期に拘束してしまえば、ほとんど健全岩盤と同様な挙動を示す。

一方、軟岩の場合は強度が小さいために、やや土被りが大きくなると二次応力状態で空洞周辺に破壊を生じ、塑性化した地山が内空に押出し、支保工で拘束すると土圧が作用する。さらに分離面が発達している場合は、緩みによる緩み荷重も加わってくる。特に土被りが増加して破壊限界を超えると、変位、土圧は急激に増大する。

また、軟岩地山の範疇に入るが、膨張性地山では、全周からの著しい地山の押出しがあり、盤ぶくれがはなはだしい。この現象は、岩石中に多量に含まれる粘土鉱物が浸水すると強度が急激に低下し、特にスメクタイトの場合は、膨潤性が著しく結晶層間に水を取り込むことによる体積の増加も加わり、岩石の強度低下、破壊領域の拡大を促進するものと考えられている。

土砂地山は、粘性土地盤では、軟岩と類似の挙動を示すが、砂質土地盤では粘着力が小さいので掘削後ただちに山留めをしないと緩みを生じ、粒子間の摩擦力も低下し崩壊に至る。地下水の湧出を伴う場合は、特にこの現象が促進され、粘土分をほとんど含まない均等粒径の砂層ではわずかな水によっても流動化する。

このような地山の特性から、設計のパターン化が有効にできるのは、硬岩地山、中硬岩地山、軟岩地山のうち著しい塑性土圧の発現がない地山、地下水の影響を受けない土砂地山に対応した限定的なものとなっている。

3.2.2 岩盤分類と標準設計の実際

(1) 地山分類基準

鉄道トンネルの基準として、NATM設計施工指針（平成8年2月（1996.2）日本鉄道建設公団）においては、岩種分類を表-3.3.2.1に示すように、A～Gの7区分とし、各々、地層名、岩石名をもとに区分するものとしている。

表-3.2.2.1 岩種分類表

岩 種	地 層 名 ・ 岩 石 名
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（ひん岩、花崗はん岩、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（片岩類、片麻岩）、②剥離性の著しいまたは細層理の古生層、中生層（千枚岩、粘板岩、頁岩等）
C	①中生層（頁岩）、②火山岩（流紋岩、石英粗面岩、安山岩等）、 ③古第三紀層の一部（珪質頁岩、珪質砂岩等）
D	古第三紀層～新第三紀層（頁岩、砂岩、礫岩、凝灰岩、凝灰角礫岩等）
E	新第三紀層（泥岩、シルト岩、砂岩、凝灰岩等）
F	洪積層、新第三紀層の一部（低固結層、未固結層、土丹、砂等）
G	表土、崩積土等

そして、トンネル工事の当初計画段階における地山分類基準は、岩種分類に応じ、表-3.3.2.2に示すように地山の弾性波速度(V_p)、もしくは地山の弾性波速度と地山強度比(G_n)、土砂地山の砂質土が主体の場合は相対密度(D_r)と細粒分含有率(F_c)によって、トンネル掘削対象地山を一般地山として $I_N \sim V_N$ の5等級に、特殊地山として $I_L \sim I_S$ の4等級に区分している。

なお、表-3.2.2.2に示す地山分類基準は、主に本来連続的な物理量である弾性波速度および地山強度比の大きさを標準支保パターンの等級と対応させて区分している。

また、これらの地山等級のうち、一般地山の5等級と特殊地山の I_S および I_L については標準支保パターンが適用できるものとしている。

適用にあたっての留意点として、地質調査の成果である弾性波速度あるいは地山強度比の数値を単に機械的にあてはめるのではなく、湧水状況、岩盤の物理的特性および支保の施工性なども考慮する必要がある。また、地質調査の精度から考えて、5～10m幅程度以下の断層破碎帯あるいは良い地山と悪い地山が小刻みに繰り返すことが判っている場合には、そのことを明記したうえで、ある延長について平均的な地山を想定して地山区分を行い、施工時の観察や計測による設計変更で対処した方がよいとしている。

表-3.2.2.2 当初設計段階における地山分類基準

地山種類 *地山等級	硬 岩			中 硬 岩	軟 岩**	土 砂	
	A 岩 種	B 岩 種	C 岩 種	D 岩 種	E 岩 種	F・G岩種	
						粘性土	砂質土
V _N	$V_p \geq 5.2$		$V_p \geq 5.0$	$V_p \geq 4.2$			
IV _N	$5.2 > V_p \geq 4.6$		$5.0 > V_p \geq 4.4$	$4.2 > V_p \geq 3.4$			
III _N	$4.6 > V_p \geq 3.8$	$V_p \geq 4.4$	$4.4 > V_p \geq 3.6$	$3.4 > V_p \geq 2.6$ かつ $G_n \geq 5$	$2.6 > V_p \geq 1.5$ かつ $G_n \geq 6$		
II _N	$3.8 > V_p \geq 3.2$	$4.4 > V_p \geq 3.8$	$3.6 > V_p \geq 3.0$	$2.6 > V_p \geq 2.0$ かつ $5 > G_n \geq 4$	$2.6 > V_p \geq 1.5$ かつ $6 > G_n \geq 4$		
I _N	$3.2 > V_p \geq 2.5$	$3.8 > V_p \geq 2.9$	$3.0 > V_p \geq 2.5$	$2.6 > V_p \geq 2.0$ かつ $4 > G_n \geq 2$ あるいは $2.0 > V_p \geq 1.5$ かつ $G_n \geq 2$	$2.6 > V_p \geq 1.5$ かつ $4 > G_n \geq 2$	$G_n \geq 2$	$80 \leq D_r$ かつ $10 \leq F_c$
I _S	$2.5 > V_p$	$2.9 > V_p$	$2.5 > V_p$	$1.5 > V_p$ あるいは $2 > G_n \geq 1.5$	$1.5 > V_p$ あるいは $2 > G_n \geq 1.5$	$2 > G_n \geq 1.5$	---
I _L						---	$80 \leq D_r$ かつ $10 > F_c$
特S				$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	---
特L						---	$80 > D_r$

注) V_p ：弾性波速度(km/sec)、 G_n ：地山強度比、 D_r ：相対密度(%)

F_c ：細粒分含有率(%)

＊ 一般的な地山の等級 I ～ V については、N のサフィックスをつける。

特殊な地山のうち標準支保パターンが示されているものは等級の後に塑性化地山については $_S$ 、未固結地山については $_L$ のサフィックスをつける。これらの標準支保パターンでは、不十分と考えられる地山に対する等級は特 S、特 L とする。

＊ E 岩種で $V_P \geq 2.6$ の場合は D 岩種に準じて評価する。

(注1) この表は土被り $500\text{m} > H > 2D$ (D :トンネル幅)程度のトンネルの計画に用いるものとする。ただし I_L については $0.5D$ 以上のものに適用できるものとするが、適用にあたっては十分検討のうえ計画するものとする。

(注2) 幅の広い断層破碎帯、偏圧地形や偏圧を及ぼす地質の地山、また、トンネル断面が著しく小さいか大きい場合、作業に支障する湧水があると考えられる場合、あるいは水圧を設計に考慮しなければならない場合、および市街地、重要構造物下、近接、併設トンネルなどについては、十分検討のうえ適用するものとする。

(注3) V_P : 地山の弾性波速度 (P波: km/sec)

G_n : 地山強度比 ($\sigma_C / \gamma H$)

D_r : 相対密度 (%)

F_c : 細粒分含有率 (%)

$\left[\begin{array}{l} \sigma_C : \text{地山の一軸圧縮強度 (KN/m}^2\text{)} \\ \gamma : \text{地山の単位体積重量 (KN/m}^3\text{)} \\ H : \text{土被り高さ (m)} \end{array} \right]$

なお、地山の一軸圧縮強度は亀裂等の存在が無視できる地山においては、試料の一軸圧縮強度を適用できるが、準岩盤強度 σ_C' (kN/m²) を用いてもよい。

$$\sigma_C' = (V_P / v_P)^2 \cdot q_u$$

v_P : 試料の超音波 (弾性波) 速度 (km/s)

q_u : 試料の一軸圧縮強度 (kN/m²)

なお、軟岩で $V_P > v_P$ となることがあるが、その場合には $(V_P / v_P) = 1$ とする。

(注4) 岩種の区分は、表-3.2.2.1の岩種分類による。なお、E岩種は新鮮岩の一軸圧縮強度が概ね20MN/m²以下のものとする。

(注5) F・G岩種の砂質土と粘性土の土質区分は、以下を目安とする。

砂質土: 細粒分 (粒径75 μm 以下の土粒子) 含有率が30%程度未満の土

粘性土: 細粒分含有率が30%程度以上の土

(補足説明)

① A岩種とB岩種の分類

B岩種は、トンネル掘削を難航させる地質条件の一つである剥離性の著しい変成岩や古生層、中生層などで代表される。これらの岩種のうち古生層、中生層の粘板岩や千枚岩、頁岩等は単独で広く分布する場合もあるが、多くは砂岩やチャート、凝灰岩等と互層することが多い。そして互層の多くの場合、粘板岩等が剥離性を有し、切羽の自立性を妨げている。また、これらの岩種は、ボーリング調査で顕著な特徴を表し、ボーリング掘削の際コア詰まりが頻繁に生じ、掘進速度も著しく低下するなど掘進状況が悪くなるなどのほか、採取したコアは細かい岩片状を呈するか、あるいは板状を呈するなどし、RQDが極めて低下することが多いことなどである。

したがって、B岩種の分類は、単に地表地質踏査による観察で命名された岩石名だけから区分するのではなく、前述のような特徴を参考に総合的に勘案して区分することが肝要である。

② 特殊地山の分類

I_S 、 I_L および特S、特Lの特殊地山については鉄道総研の研究¹⁾²⁾³⁾があり、これを取り入れることとした。その研究から、粘土質の粒子からなる地山(c地山)では、 I_N と I_S および I_S と特Sを区分する指標として地山強度比を適用できる。境界値についてのバラツキは見られるもののそれぞれ2.0、1.5を事前検討段階の大雑把な目安として考える。

E岩種の泥質岩(泥岩、シルト岩、凝灰岩等)で $2 > G_n$ の場合は、ボーリング施工時の状況やコア状況および自然含水比 W_n 、スメクタイト(モンモリロナイト等)含有量 C_m 、浸水崩壊度等の室内試験結果により、吸水等による地山の強度低下に関する評価を行い、表-3.2.2.2に示す地山等級区分(I_S 、特S)を補正する必要がある。その評価に当たっては、表-3.2.2.3に示す判定の目安を参考にして、総合的に行う。ただし、 $0.5 > G_n$ の場合は特Sに区分するものとする。

なお、一軸圧縮強度、自然含水比、スメクタイト含有量、浸水崩壊度は、サンプリング、試験方法について十分な配慮が必要である。特に、一軸圧縮強度を試験結果のみから決める

ことは、必ずしも地山全体の強度を表すとは限らないので注意が必要である。

D岩種の泥質岩またはF・G岩種の粘性土においても、 $2 > G_n$ の場合には、上記に準じて評価して良い。

また、砂質土からなる地山（ ϕ 地山）では、切羽崩壊と各種物性値の関係について分析した結果、砂質土の物性値として砂の締まり程度を示す指標である相対密度（ D_r ）と、細粒分含有率（ F_c ）により、表-3.2.2.4のように暫定案が示され、これを取り入れることとした。

表-3.2.2.3 泥質岩の地山区分の目安

指 標 お よ び 指 標 値		地 山 分 類		
		～ I _N	I _S	特 S
地質的条件	グリーンタ地域の破砕質の泥質岩または凝灰岩			○
ボーリングの施工条件	無水掘りをせざるを得ない			◎
ボーリングコアの状況	応力解放により目視で体積増加が認められる			◎
	コア採取率が極めて悪い			△
	ディスクキング現象を生ずる			△
地山強度比	$G_n < 0.5$			◎
	$0.5 \leq G_n < 1.5$			○
	$1.5 \leq G_n < 2.0$		○	
	$2.0 \leq G_n$	○		
スラット含有量 C _m	C _m ≥ 20%, w _n ≥ 20%			○
地山自然含水比 w _n	C _m < 20%, w _n < 20%	○		
浸水崩壊度 D				○
その他	2 × 10 ⁻⁶ m 以下含有率 ρ _Z ≥ 30%			△
	液性限界 w _L ≥ 100 %			△
	地山弾性波速度 V _p < 1.5			△

注) ◎：確実に区分可能

○：区分可能（他の指標との組み合わせによる総合評価が必要）

△：目安となる

表-3.2.2.4 切羽安定性評価に着目した砂質地山の地山分類基準（暫定案）

地山等級	地 山 の 状 態	分類指標	
		相対密度	細粒分含有率
I _N	切羽がほぼ安定した状	$D_r \geq 80\%$	$F_c \geq 10\%$
I _L	わずかな変化で流出する		$F_c < 10\%$
特L	切羽自立性が著しく低い	$D_r < 80\%$	

相対密度（ D_r ）は、地盤工学会基準（J G S T161-1990）「砂の最大密度・最小密度試験方法」および同基準（J G S T191-1990）「土の湿潤密度試験方法」により求める。

なお、地山等級の目安として、塑性化地山については「内空変位が単線断面で15cm、複線・新幹線断面で30cm程度以下と想定される地山」をI_S、それ以上のいわゆる膨張性地山を特Sとし、また、未固結地山については、「流動化せず、切羽からの斜めボルト、フォアポーリング程度の山留め工で切羽が安定すると想定される地山」をI_Lとして、それ以外の流動性地山を特Lとしている。

(2) 標準支保パターンによる設計

標準支保パターンによる設計は、地山条件（地形、地質、土被り等）、断面積、断面形状、周辺への影響に対する制約等の条件が一般的である場合に適用する。しかし、一般に地山条件は複雑に変化するため、事前設計の段階で地山特性を正確に把握・評価し、地山の変化に適応した支保工を設計することは難しいのが現状である。

したがって、地山条件を適切な指標で区分した地山等級区分毎に、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工等の支保部材が適宜組み合わせられた標準支保パターンによる設計を当初設計の原則としている。

標準支保パターンによる当初設計の適用範囲は、表-3.2.2.5に示すとおり、一般的な設計条件で、かつ地山等級 $V_N \sim I_N$ の一般地山あるいは特殊地山のうち I_S 、 I_L に分類される地山である。

表-3.2.2.5 標準支保パターンの適用範囲

	一般地山 (V_N 、 IV_N 、 III_N 、 II_N 、 I_N)	特殊地山 I_S	特殊地山 I_L
適用範囲	トンネルの土被りが $2D \sim 500m$ (D は掘削幅) の範囲に適用する。 ただし、土被りが $500m$ を越える場合でも地山等級 $III_N \sim V_N$ については、山はね等の真の土圧現象が予想されない限り適用してよい。	著しい膨圧の発生がなく、内空変位が単線で概ね $15cm$、複線・新幹線で概ね $30cm$ 以下に収まる地山。	①新第三紀鮮新世後期、第四紀更新世の砂質土、風化残積土および軽石流堆積物で先受け工や簡単な水抜き工で切羽が安定する地山。 ②硬岩 (A、B、C 岩種)、中硬岩 (D 岩種)、軟岩 (E 岩種) 地山において、トンネルの土被りが $0.5D \sim 2D$ でも、補助工法で切羽の安定性が得られる場合。 ③硬岩、中硬岩、軟岩地山において、断層破碎帯など土砂化が進んだ場合でも、補助工法で切羽の安定性が得られる場合。

(3) 標準支保パターン

施工実績の分析に基づき作成した標準支保パターンを表-3.3.2.6に示す。一般的な設計条件においては、関連する掘削工法、インバート、二次覆工、その他の項目等を検討のうえ当初設計として適用することとしている。

表-3.2.2.6 標準支保パターン（新幹線複線トンネルの場合）

支保部材 標準支保 パターン	ロックボルト			吹付けコンクリート厚 (cm)		鋼製 支保工
	配置	長さ×本数 (m) (本)	縦断間隔 (m)	アーチ・側壁	インバート	種類
IV _{NP}	—	—	—	5(平均)	—	—
III _{NP}	アーチ	2×0～6	(随意)	10 (平均)	—	—
II _{NP}	アーチ	3×10	1.5	10 (平均)	—	—
I _{NP}	アーチ ・側壁	3×14	1.0	15 (最小)	—	125H ^{※※}
I _{SP}	アーチ ・側壁	3×8 4×12 [※]	1.0	15 (最小)	15 (最小)	150H
I _{LP}	アーチ ・側壁	3×12	1.0	20 (最小)	—	125H

※ 4mのロックボルトはS L（スプリングライン）付近に配置する。

※※ 鋼製支保工を用いる場合には、125Hとする。

参考文献

- 1) 小島芳之、朝倉俊弘、吉川恵也：N A T Mのための膨張性泥質岩の地山分類、鉄道総研報告 Vol.3 No.5, 1989.
- 2) 木谷日出男、大島洋志、榎本秀明：切羽安定性評価のための砂質地山の分類法、鉄道総研報告 Vol.5 No.6, 1991.

- 3) 木谷日出男、太田岳洋：トンネル切羽の安定性評価法の検討、鉄道総研報告 Vol.7, No.12, 1993.
- 4) 吉川恵也、朝倉俊弘：N A T Mのためのパターン化の研究、鉄道技術研究報告 No.1235, 1983.3
- 5) 日本鉄道建設公団：N A T M設計施工指針（平成8年2月）

3.3 道路トンネルにおける地山分類と標準設計手法の現状

3.3.1 標準設計法適用にあたっての基本的な考え方

(1) トンネルの設計手法

トンネルにおいては、橋などの構造物と違い、周辺の地山そのものが荷重として作用し、かつ構造物の一部としてトンネルを支える。また、作用する荷重の大きさに比べて、選定できる支保工の耐力は、実用上限られる場合が多い。

トンネルにおける本質的な地山の挙動の支配的要因は地山自体の特性によるものである。支保工の耐荷能力は土被り圧に比較すると非常に小さなものであり、支保工の量を増減させても、地山の本質的な挙動をコントロールすることはできない。

地山の荷重は、地山の単位体積重量と土被りの積に比例して大きくなるから、土被りが 50 m 程度以上となると、その荷重は支保工耐力より大きくなる。また、通常、トンネル支保工を設置する前に、すでに掘削部分の荷重の約半分程度は地山に配分されていること、あるいは、地山の剛性が大きくなると変形が小さくなるので、支保工に作用する荷重は小さくなることに留意する必要がある。したがって、多くの場合、トンネルに作用する荷重の大部分は地山自身によって分担されなければならないことになる。

したがって、支保工の設計に際しては、あくまでトンネルは地山が主役であるということを念頭において地山を良く観察し、そこにある弱点を補強するために、支保工を補助的に使用するという観点に立たなければならない。

トンネルの設計は、①地山分類による標準支保パターンの適用、②解析的手法の適用、③類似条件のトンネル設計の適用に分類される。また施工時において、観察・計測結果をもとにトンネルの安定性と経済性が確保できるよう支保工の変更を行う必要がある。

トンネルの調査時点や設計時点の地質調査では、時間・費用面からの制約や地山の不均質などから得られる情報におのずと限りがあり、特にトンネルは線状構造物であるために、その傾向は強くなる。そのために施工中に得られる情報を活用して設計を適宜修正することは合理的な考えであると考ええる。

(2) 地山分類と標準支保パターン

トンネルの設計はそれぞれの地質に応じて設計することが望ましいが、一つのトンネルをとってみてもその地質は千差万別であり、これに適合する支保等の設計を一つ一つ対応させることは非常に困難でかつ複雑となる。

トンネル施工の安全性、迅速性、経済性および合理性を追求していくなかで、詳細な設計があまり意味がない場合も多くある。地山の評価は、個々のトンネルで評価・判断すべき点もあるが、岩石の違いによる挙動の特徴を定量的に理解しておくことは、設計時に地山の挙動をあらかじめ予測することや施工時において地山に適合する支保工を選定する際に必要になると

考える。

そこで、当初設計においては類似した地山を、トンネル施工時の挙動の特徴によって大まかに4つの岩石グループに区分し、さらに岩石グループそれぞれにおいて、トンネル施工時の挙動の程度に応じた地山等級に分類し、それと標準支保パターンとの対応をつけることにより当初設計の効率化や合理化を図ることとした。そしてトンネルの工事は観察・計測による修正が基本との認識に立って、施工段階の適切な地山評価と技術的判断に基づいて、対象とするトンネルの実態に即応した支保パターンに変えていくことを基本的な考え方とした。

従来から地山分類に関して、各研究機関において幾多の研究が行われており、それぞれ分類がなされているが、設計思想・契約方式の違いにより未だ統一された分類法は確立されていない。

(3) 地山の工学的区分

トンネルの適切な設計・施工計画を得るためには、地質調査等の成果を評価し、設計・施工との関連に対する的確な判定がなされなければならない。そのための指標は、通常実施し得る調査法や試験法から得られ、客観的かつ定量的な評価が可能なもので、評価対象とする全区間にわたって得られるものが望ましいと考える。よってこうした地山の工学的な諸性質を判定するための指標は、一般的に行われる地表地質踏査、弾性波探査、ボーリング調査等の地質調査成果から得るのが望ましい。

現段階における地山の分類においては、地山条件と密接な関係にあるトンネルの挙動に応じて次のように考えることとしている。

トンネル掘削により周辺地山の挙動には、岩石強度がトンネル掘削による荷重に比べて大きく、これらに無関係な節理等の力学的不連続面で支配される不連続体の挙動を示す場合と、岩石の強度がトンネル掘削による荷重に比べて比較的小さく、それらの大きさの比率がトンネルの変形量を支配する連続体の挙動を示す場合とがある。

前者の場合においては、地山の挙動は岩盤中の地質不連続面の方向、節理系の数、分布密度、連続性、充填物の状態などに関連するので、地表地質踏査、ボーリング調査によって岩盤の不連続面の調査を主体とし、これらを補完する目的で弾性波速度を利用して地山を評価し分類する。

後者は、新第三紀層や洪積層等の軟岩地山などのように、岩石のもつ強度が作用する応力に比べて同じ程度か小さくなる場合である。この場合、地山の強度と作用する応力の比である地山強度比によって、これが大きければ地山は弾性変形にとどまり、逆に小さければ塑性変形により地山に大きな変位が生じる。したがって、分類の主たる指標として、トンネルの挙動を定量的に表現できる地山強度比(地表地質踏査、ボーリング調査、弾性波速度調査から推定した地山の圧縮強度により算定する)を用いる。

トンネルの当初設計にあたっては、これらの地質調査などから得た地山の評価と過去の実例等とを照合し総合的な見地に立って、設計・施工と対応をつけた地山分類基準に基づいて地山の分類を行うが、トンネル掘削時の地山の挙動を十分に想定した地山分類を行う必要がある。

しかし、設計を確定し得る完璧な地質の調査手法が無く地山の評価が難しい状況を考えると、設計・施工計画立案時に行った地山の分類は、ある程度の幅を有していると判断する必要がある。工事着手した後、切羽等の観察や計測を主体とした調査結果に基づいて適切な地山評価を行い、地山の条件に最も適した支保パターンに変更することが必要である。

3.3.2 岩盤分類と標準設計の実際

(1) 地山分類基準

地山の工学的諸性質は、生成時代、地質構造、風化・変質状況、不連続面の状態、地下水の影響等によって異なり、地山の諸性質を工学的に評価することは極めて難しいが、トンネルの設計・施工を効率よくかつ合理的に行うためには、設計・施工と対応した地山評価基準すなわち地山分類基準が必要となる。地山分類の評価基準は、工事発注前の設計・施工計画時から工事に着手した後の施工中に至るまで一貫したものでなければならない。

岩盤の現時点での力学的性状は、地質帯が生成された時点の、ごく新鮮な状態における初生的性質を出発点とし、その後の風化作用や断層、節理の形成などによって初生的性質が劣化してゆく過程のなかで決まる。

初生的性質とは、地質帯の種類とその構造、初生的節理、層理や片理などの岩盤固有のできる方を反映した要素である。劣化の過程とは、各地質時代に生じた地殻変動による岩体の上昇や沈降、種々の方向からの応力によるひずみや、せん断、陸化による侵食や風化、新しい岩体の貫入による熱変成など、物質体が生成後、現在の岩盤に至るまでに経た経歴を反映した要素である。

したがって、地山分類にあたっては、岩盤を初生的な新鮮な状態での強度と、その後の劣化の過程を表す劣化のしかたをもとに、以下の4つの岩石グループに区分する。すなわち新鮮な状態での強度により、一軸圧縮強度が80N/mm²以上の硬質岩(H)、20～80N/mm²の中硬質岩(M)、20N/mm²未満の軟質岩(L)に区分し、劣化のしかたは、節理面が支配的な不連続面となるようなものを塊状、層理面あるいは片理面が支配的な不連続面となるようなものを層状に区分する。これらを、トンネル建設時の挙動の特徴をもとに、表3.3.2.1のように硬質塊状岩盤、中硬質軟質塊状岩盤、中硬質層状岩盤、軟質層状岩盤の4つのグループに区分した。

表 3.3.2.1 岩石グループ

	H (硬質岩)	M (中硬質岩)	L (軟質岩)
塊状岩盤	斑れい岩 花崗岩 花崗閃緑岩 石英斑岩 花崗斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 砂岩、礫岩(中古生層) 石灰岩、チャート 片麻岩	安山岩 玄武岩 石英安山岩 流紋岩 ひん岩 砂岩、礫岩(第三紀層)	蛇紋岩 凝灰岩 凝灰角礫岩
層状岩盤		粘板岩 頁岩(中古生層)	千枚岩 黒色片岩 緑色片岩 泥岩、頁岩(第三紀層)

注)・・・・・・は弾性波速度による区分を示す。

地山判定の指標は、岩質、水による影響、不連続面の状態、不連続面の間隔、ボーリングコアの状態、RQD、地下水の影響、弾性波速度(縦波速度)とする。また、第三紀層等の軟岩地山や断層・破碎帯など、地山の強度と作用する荷重の比率が問題になり、トンネル掘削時の変位が大きくなる岩石に対しては、前記に加えて地山強度比を用いる。

表 3.3.2.2 の地山分類表は、原則として吹付けコンクリート、ロックボルトを主たる支保とする場合の当初設計段階および施工中における地山分類に用いるものとする。また、施工中には、トンネル掘削による地山の挙動、不連続面の状態と内空変位の目安を用いるものとする。

施工中の地山分類は、工事着手後の観察・計測等によって直接的に掘削地山を評価することができる。この場合、まず、トンネル掘削による地山の挙動と変位の目安により地山を分類し、内空変位が 30mm 程度以下でおさまる場合には、岩質、水による影響、不連続面の状態、不連続面の間隔を重視して分類するものとする。

地山分類表の適用にあたっては、次に示す事項について十分に留意しなければならない。

☆「地山分類表」の適用上の留意事項

1. 地山分類表は、原則として、土被り高さが 20m 以上 500m 未満の 2 車線トンネルの計画に適用するものとするが、3 車線トンネルもこれに準ずることができる。
2. この表は、一般的な標準を示すものであるから、坑口部で大きな偏圧が作用する場合、地すべりの発生が予想される場合、地表面沈下を抑制する必要がある場合等、特殊な事情がある場合には適用できない。
3. 地山等級 E は、特殊な岩質(大きな崖錐、大きな断層・破碎帯等の土圧が著しい岩質)で

内空変位が 200mm 程度以上になるもの以外には用いない。

4. 地山判定基準について

当初設計段階における地山分類は、地表地質踏査、ボーリング調査、地山試料試験等の調査結果および弾性波探査を総合的に判断して行うものとする。特に、弾性波速度および地山強度比は地山判定の一応の目安を与えるものであり、できるだけ地表地質踏査、ボーリング調査、地山試料試験等の調査結果を活用し、それらを補完する目的で使用するものとする。

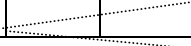
(2) 標準支保パターンによる設計

(a) パターンの適用について

1) 地山等級 B～D においては、湧水が多く施工上問題がある場合等、吹付けコンクリートおよびロックボルト等を支保構造として用いることが不適と考えられる場合を除いて、原則として、当初設計においては標準支保パターンを用いることとする。

2) 地山等級 A の場合は工区に占める比率やその状態により、経済的な見地から考えられる設計・施工方式に幅があるため、岩盤および湧水の状況等を考慮してトンネル毎に設計するべきであると考え、標準を定めない。

3) 地山等級 E は、地山条件の範囲が広く、地山の挙動の差も大きいので、個々のトンネルにおいて数値解析の結果や類似の地山条件の施工状況等を参考にして個別に検討するものとする。

番号	支保構造の種類	地 山 等 級					適用条件と特性
		B	C I	C II	D I	D II	
①	吹付けコンクリート ロックボルト						地山の自立性が比較的良 好な地山に適する。
②	吹付けコンクリート ロックボルト 鋼アーチ支保工						鋼アーチ支保工によっ て、緩み荷重を直接支え る、あるいは吹付けコン クリートに靱性を与える。
③	①の支保構造と インバート						掘削時の変位は小さい が、長期的安定が損なわ

							れる恐れがある場合。
④	②の支保構造とインバート						掘削時の変位が大きい場合。

図 3.3.2.1 地山等級に対応する支保構造の範囲

(3) 標準支保パターン

当初設計における支保パターンは、特に施工上の問題がないと思われるトンネルについては、表3.3.2.2各地山等級に対応した、表3.3.2.3標準支保パターン表を適用し、施工の段階で修正支保パターン変更する。各地山等級に応じた設計手法の適用については、表3.3.2.4に示すとおりである。

表 3.3.2.3 2車線トンネルの標準支保パターン表

地山 等級	支保 パター ン	標準 1掘 進長 (m)	ロックボルト				吹付け コンク リート	鋼アーチ支 保工		覆工厚 (cm)		変形余 裕 (cm)	掘削工 法
			長さ (m)	施工間隔 (m)		施工 範囲	厚さ (cm)	上半 サイ ズ	下半 サイ ズ	アー チ ・側 壁	イン バー ト		
				周方 向	延長 方向								
B	B-a	2.0	3.0	1.5	2.0	上 半 120 °	5	—	—	30	0	0	補助ベ ンチ付 き全断 面工法 または 上半工 法
C I	C I -a	1.5	3.0	1.5	1.5	上半	10	—	—	30	(40)	0	
C II	C II -a	1.2	3.0	1.5	1.2	上下 半	10	—	—	30	(40)	0	
	C II -b			1.5	1.2			H125	—				
D I	D I -a	1.0	3.0	1.2	1.0	上下 半	15	H125	H125	30	45	0	
	D I -b	1.0	4.0										
D II	D II -a	1.0 以下	4,0	1.2	1.0 以下	上下 半	20	H150	H150	30	50	10	

支保パターンの a、b の区分は、以下による。

a：基本的すべての岩種に適用する標準支保パターン

b：当初設計において、粘板岩、黒色片岩、泥岩、頁岩、凝灰岩等のうち、トンネル掘削にともなう変位が大きくなると予想される場合のみ適用する。

なお、インバートの（ ）は、第三紀泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土などに適用する。

表 3.3.2.4 設計手法の適用

地 山 等 級	設 計 条 件	
	一 般 的 条 件	特 殊 条 件
A	標準支保パターンの適用	類似例，解析結果，施工条件等を考慮し個別に設計
B		
C		
D		
E		

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第三集 トンネル （平成 9 年 10 月）

3.4 水路トンネルにおける地山分類と標準化設計法の現状

3.4.1 発電用水路トンネル

(1) 発電用水路トンネルの構成と要求事項

1) 発電用水路トンネルの種類

発電用水路トンネルの種類には、発電形式、発電規模および内圧・外圧の有無や大きさなどより要求される空洞規模、形状に対応し、以下に示すように、多種、多様なものがある。道路トンネルや鉄道のトンネルに比べて一般に規模は小さく、トンネル径は2～8m程度であるが、トンネル長は比較的長い。

- a. 揚水発電所の導水路・放水路用の圧力トンネル
- b. 揚水発電所の圧力管路（水压管路）
- c. 一般水力発電所の導水路用の圧力トンネル
- d. 一般水力発電所の導水路用の無圧トンネル
- e. 火力発電所の放水路トンネル
- f. その他のトンネル
 - ・配電用トンネル
 - ・搬入・作業用トンネル

など

2) トンネル掘削工法

発電用水路トンネル掘削工法の種類は、矢板工法、NATM工法、TBM工法と、地質状況に応じて適用されており、これらの工法に応じてトンネル断面の形状も様々である。1つのトンネルの中でも異なる工法が採用される場合も多い。

3) 支保工・覆工の種類

支保工は、掘削工法にともない、H鋼および矢板、ロックボルト・吹付けコンクリート、コンクリートセグメントなど、様々なものが採用されている。また、圧力トンネルでは、内圧の大きさ、水密性の確保や地下水圧への対応のため、コンクリート巻き立てなどの覆工が必要となる。

4) 発電用水路トンネルの要求事項

発電用水路トンネルに要求される機能は、施工（掘削）時のトンネルの安定性と、運転時の長期の安全性確保である。施工（掘削）時のトンネルの安定性は支保工により、運転時の

安全性は覆工により確保される。

発電用水路トンネルの施工時には、空洞としての安定性が要求され、適切な支保工により対応される。運転時および保守・点検時には、水路トンネルに内圧、外圧がかかり、これを考慮した永久構造物としての機能が要求される。内圧はサージング圧、外圧は地圧および地下水圧が要因となる。これらの機能確保には、覆工（およびグラウトなどによる岩盤との一体化）設計で対応することとなる。内圧・外圧の大きさに応じて、できるだけ合理化が望まれるが、水密性が要求されるとともに、岩盤負担の適切な評価も必要となる。例えば、揚水発電所の水路トンネルでは、特に大きなサージング圧に対応した構造が要求され、地山、支保、覆工およびグラウトなどにより耐圧、水密性が確保される。揚水発電所の導水路トンネルでは岩盤負担率は比較的大きいが、水压管路では支保、覆工（グラウト）以外に鉄管が存在し、岩盤負担率は比較的小さい。

(2) 岩盤評価の基本的な考え方

1) 発電用水路トンネルのための調査の流れ

発電用水路トンネルの調査は、以下のような流れで構成される。

a. 計画段階の調査

- ・複数の計画ルート of 立案
- ・計画ルートの比較検討

計画段階の調査の目的は、地質・地下水に関する課題の把握にある。これらの課題の大きさを考慮して概略の経済比較を行い、ルートの選定を行なうのが原則である。

b. 設計段階の調査

- ・掘削工法（矢板，NATM，TBM など）の決定
- ・支保・覆工の基本的な設計（断面の大きさ（覆工厚），排水設備など）の決定

設計段階の調査の目的は工事前に設計・施工計画を立てることにあるが、この段階において、工事段階における設計変更を前提とする場合も多い。

c. 工事段階の調査

- ・切羽前方の岩盤・地下水状況の予測
- ・切羽の安定性監視
- ・覆工設計の確定

電力では、この段階の岩盤評価を最も重要視している。地質不良部のみでなく、合理的・経済的な設計に変更できるのであれば、積極的に設計変更を行なう場合が多い。

2) 発電用水路トンネルのための岩盤評価の基本的な考え方

発電用水路トンネルの岩盤評価は、設計（事前調査）段階の岩盤評価と工事段階の岩盤評価に大きく分けられる。設計段階の岩盤評価では、主として支保設計のために、施工時の切羽の安定性を評価する。電力、地域、地質毎に、実績などにもとづき評価している。工事段階の岩盤評価では、主として覆工設計のために、施工時に岩盤状況を確認して当初設計を見直し、永久構造物として設計を確定する評価を行なう。内圧・外圧の大きい部分（揚水発電所の導水路トンネル、水圧管路）では、必要に応じて原位置岩盤試験などにより物性を把握して解析的検討を行なうなどにより、覆工設計を確定する。この意味で、オーダーメイドである。圧力の小さい（無圧）トンネルでは、経済性を確保するため無覆工の検討もされている。

① 設計（事前調査）段階における岩盤評価

設計段階（工事発注前）の調査は、事前調査とも呼ばれる。事前調査での岩盤評価の目的は、トンネル建設のための設計・施工計画の立案にあり、また工事費にもとづく予算枠を確保することにある。設計段階の岩盤評価では、事前調査の結果から岩盤性状を想定して岩盤分類し、経験的設計や類似設計による支保基準（標準パターン）から支保区分を行なう。岩盤分類に弾性波速度や岩石の一軸圧縮強度なども加えて総合的評価を行い、各電力、各地域の実績を踏まえて、経験的に支保や覆工の設計を決めている。設計段階の岩盤評価結果は確定されたものではなく、工事段階での再評価が重要となる。特に、圧力トンネルでは、内圧、外圧（地圧、地下水圧）、水密性などの考慮のため覆工設計がもっとも重要となり、施工時の切羽観察や計測などから岩盤や地下水の状況の評価して、覆工の確定あるいは変更が可能な設計を行なう。

設計段階の岩盤評価において、電力大での統一された評価基準（岩盤分類基準）は存在しない。また、これを踏まえ統一化した支保パターンも存在しない。各電力、各地域、各地質（花崗岩、堆積岩など大区分）およびトンネルに要求される条件に対応して個別に基準を設定しており、必要に応じて、前例や実績を参考としている。一例として、硬質岩においては電中研式岩盤分類基準¹⁾（表3.4.1.1）や菊池・斎藤の岩盤分類基準²⁾（表3.4.1.2, 表3.4.1.3）などが岩盤評価に使用されている。また軟質岩については、岩相毎に得た物性や実績を参考にした評価や、菊池・斎藤の岩盤分類基準²⁾（表3.4.1.2）などによる評価が行われている場合がある。その他、電発式岩盤分類基準³⁾（表3.4.1.4, 表3.4.1.5）のように、要素分類基準に基づき、その組み合わせにより岩盤評価を行なっている例もある。岩盤分類基準のほかに、弾性波探査による速度値や一軸圧縮強度（地山強度比）も参考として、岩盤評価や設計が行われている。設計段階では、地質・地下水の問題、特に特殊地山など地質不良部を避けることが重要とされており、できれば無支保での設計が望まれている。電中研式岩盤分類基準は、ダム建設のために発展してきたものであり、風化等級とも呼ばれるものである。各ランクに応じた岩盤物性値が多数、得られており、地下空洞の特質に合わせて各地点毎に評価基準を修正して用いている。菊池・斎藤の岩盤分類基準も、電中研式岩盤分類より出発したものであり、物理定数の範囲が明示されている。これらの分類基準により地山の区分を行い、各電力の実績を参考とし

て、支保や覆工の設計を行なっている。支保設計においては、必要に応じて道路、鉄道などの実績（道路、鉄道の支保パターン）も参考にされている場合も多く、特にトンネル径が大きい場合や、特殊地山の場合には顕著である。しかし、道路、鉄道と比較すると、電力のように小規模トンネルの場合には、経済性への要求が厳しく合理化を図ることが重視されている。

② 工事（施工）段階の岩盤評価

工事段階で必要とされるのは、発電計画のうえで重要な工期を守ること、そして合理的、経済的に施工することを前提とした岩盤評価である。このために、情報化施工が主役となり、管理基準に則った計測や切羽観察による地山評価から覆工設計・施工を確定することが重要となる。

工事段階（施工時）の岩盤評価では、設計段階の岩盤分類や支保基準に照らして問題がないか、実際の岩盤状態を再評価し、設計時の予測と実際の岩盤状態の差に対応する。このため、工事段階（施工時）では、設計・施工法の妥当性確認のための岩盤評価を重要と考えており、岩盤性状によっては良好でも不良でも設計変更を行なうことが検討される。また覆工設計も、工事段階の岩盤評価による岩盤性状をもとに、必要に応じて岩盤物性値を得て、設計または設計変更を行なうこととなる。工事段階における岩盤評価においても、電力大での統一された評価基準（岩盤分類基準）は存在しない。また、統一化した支保パターンも存在しない。各電力、各地域、各地質においてオーダーメイド的に基準を設定しており、必要に応じて、前例や実績を参考としている。また、施工段階において、合理的であれば、岩盤評価基準の変更も検討される。最近では、複数の岩盤分類基準を採用して切羽観察などによる岩盤評価を行なっている例が多い。工事段階の調査では、設計段階にも増して岩盤評価を重視しており、設計変更の検討にも使用されている。

3) 支保・覆工設計における岩盤分類の位置づけ

設計段階では、水路トンネルの仕様（形状、工法）、工事費と工期を確定させることを岩盤評価の目的とする。このための岩盤分類の利用方法には種々のものがあり、以下の点について合理的な設計をするために用いる。

- ・断面の規模など、トンネル仕様検討
- ・支保設計
- ・覆工設計
- ・積算（工事費）

共通して言えることは、基礎情報として、地山の情報（岩盤の分類とその時点での評価）が必要ということである。

工事段階では、安全な永久構造物を建設するため、情報化施工、すなわち、掘削しながら地質、岩盤、地下水情報を得て、設計・施工を確定させることを岩盤評価の目的とし、岩盤分

類が利用される。まず、多目的なトンネルへの要求を考慮して、観察、計測により支保の効果や安定状況を確認し、必要に応じて、不良部の安定化や良好部の合理化のため、設計変更を行なう。また、発電用水路トンネルへの多様な要求を考慮して、観察、計測、必要に応じて岩盤試験により、覆工の設計を確定する。重要な構造物については、設計段階の調査で岩盤試験を行う場合も多く、周辺の重要構造物（ダム、地下発電所の岩盤等級と岩盤試験）データを留用する場合がある。運転中の発電所にトラブルが生じないように、永久構造物として設計することが重要である。このように、電力では、規模の大きいトンネル、内・外圧の大きい部分など、重要と考えられる場合には、原則的に岩盤物性値を得て（岩盤分類を介して岩盤物性値の得られているダム箇所などの設計値も流用する）、必要に応じて解析的検討を行い、目的に応じた合理的な設計を行っている。このため、使用する岩盤分類は地山を正確に、かつ適切に区分できれば、統一化されたものでなくてもよい。

岩盤分類基準は、岩盤をランク付けして、支保設計や覆工設計のパターンを決めるために用いられる。しかし、電力の水路トンネルの支保設計には、道路トンネルや鉄道トンネルのような標準設計に対応した統一的岩盤分類基準はなく、電中研式岩盤分類や菊地・斎藤の岩盤分類などを参考に、各電力での実績を踏まえて、経験的に支保工および覆工の設計を行っている。必要に応じて解析的検討も行なわれている。無圧トンネルにおいては、経済性を追求するためにできる限り無支保、無覆工であること、圧力トンネルでは、覆工を重視することから支保はできる限り合理的に行なうことが望まれる。このため、岩盤分類基準は、できるだけ岩盤物性値と対応したものであり、実績があるとともに、道路や鉄道とは異なり、できる限り簡易な支保パターンに対応させることが望まれる。

特に、圧力トンネルでは、覆工設計に工事段階での岩盤評価結果を反映することが重要となる。このことから、工事段階において使用する岩盤分類が重要視されており、利用される分類基準も多様化し、また複合して使用される場合も増加している。設計段階では経験的設計や類似設計を行っているが、その岩盤分類と標準支保パターンの詳細を公開した例は少ない。しかし、工事段階の例は比較的多い。このことは、各トンネルにおいて掘削時の岩盤評価によりオーダーメイドの設計が行なわれていると考えると理解しやすい。

(3) 発電用水路トンネルの岩盤評価の実態

上述したように、発電用水路トンネルは、発電方式やその規模などによりトンネル断面形状、規模、掘削工法、支保・覆工の種類が様々であり、各電力、各サイトにおいて、オーダーメイド的に建設が行なわれている。このため、各電力、各サイトにおいて、それぞれ異なる評価基準を用い、それぞれの実績を参考として、経験的設計、類似的設計が行なわれている。実施工では、地山の安定性を確認しながら、情報化施工により合理的・経済的な施工が行なわれており、鉄道や道路とは違い施設の規模・形状がそれぞれ異なり、内圧や外圧（土被り圧、地下水圧）も多様なため、支保設計に対応する岩盤分類基準は必要ではあるが統一的な基準は必要なく、圧力トンネルでは、サージング圧等の内圧への対応、地下水圧などの外圧への対応も個別に必要となる。また同じ地質、岩盤等級でも、トンネルに求められる要求水準（内圧、外圧（地圧・地下水圧））によっては、支保や覆工のランクを変更する必要がある、施工時には地山の構成要素を正確に記述することが大切となっている。

発電用水路トンネルの岩盤評価に用いられる岩盤分類には、前述のように統一化した分類はないが、トンネルが小規模であること、圧力トンネルでは工事段階で岩盤・地下水状況を確認しなければ覆工設計を確定できないこと（情報化施工）、また無圧トンネルでは岩盤・地下水状況によっては無支保の領域を拡大するなどの合理化を図ることなどから、工事段階での情報化施工を重要視してオーダーメイドで岩盤評価し設計および施工計画を決めている。小規模断面のトンネルにおいては、経済性を考えた場合、このような岩盤評価の方法が最も合理的であると考えられる。

表-3.4.1.1 電中研式岩盤分類基準¹⁾

記号	特 徴
A	きわめて新鮮なもので、造岩鉱物および粒子は風化、変質を受けていない。亀裂・節理はほとんどなく、あってもよく密着し、それらの面に沿って風化の跡は見られないもの。岩質はきわめて堅硬でハンマーによって打診すれば、澄んだ音を出す。
B	岩質堅硬で開口した（たとえ1mmでも）亀裂あるいは節理はなく、よく密着している。ただし造岩鉱物および粒子は部分的に多少風化・変質がみられる。 ハンマーによって打診すれば、澄んだ音を出す。
C _H	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けてはいるが、岩質は比較的堅硬である。一般に褐鉄鉱などに汚染せられ、節理あるいは亀裂間の粘着力はわずかに減少しており、ハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の薄層が残留することがある。 ハンマーによって打診すれば、少し濁った音を出す。

C _M	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は多少減少しており、ハンマーの普通程度の打撃によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の層が残留することがある。 ハンマーによって打診すれば、多少濁った音を出す。
C _L	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟質化しており、岩質も軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は減少しており、ハンマーの軽打によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質が残留する。 ハンマーによって打診すれば、濁った音を出す。
D	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて著しく軟質化しており、岩質も著しく軟らかい。節理あるいは亀裂間の粘着力はほとんどなく、ハンマーによってわずかな打撃を与えるだけで崩れ落ちる。 剥脱面には粘土質物質が残留する。 ハンマーによって打診すれば、著しく濁った音を出す。

表-3.4.1.2 菊地・斎藤の岩盤分類基準²⁾

岩 盤 等 級	硬 質 岩		
	一応の日定としては新鮮な岩石のテストピースの乾硬一軸圧縮強度が $\geq 800\text{kg/cm}^2$ 以上のものである。岩石ハンマーによる打撃では一般に金属音を発する。	中・硬質岩	軟質岩
A	岩質は極めて新鮮で、火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩の構成粒子は全く風化変質しておらず、また節理はほとんど分布していない。岩盤としては極めて堅牢、固密である。	一応の日定としては新鮮な岩石のテストピースの乾硬一軸圧縮強度が $\geq 800\text{kg/cm}^2$ ～ $\geq 200\text{kg/cm}^2$ の範囲にあるものである。岩石ハンマーによる打撃ではかなりしなった音を発するが一般には金属音を発しない。この範囲にあるもののうち、軟質側のものは岩石ハンマーの尖頭部による打撃で岩石の表面におずかにくぼみを生ずる場合もある。	一応の日定としては新鮮な岩石のテストピースの乾硬一軸圧縮強度が $\geq 200\text{kg/cm}^2$ 以下のものである。岩石ハンマーによる打撃ではにぶい地味した音を発し、時には面壊する場合もある。岩石ハンマーの尖頭部による打撃では岩石の表面に容易にくぼみが生ずる。
	岩質は新鮮で、火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩の構成粒子はほとんど風化変質していない。また節理の分布は疎らであり、密着している。岩盤としては堅牢、固密である。	岩質は新鮮であり、構成粒子は二次的な風化変質をまったくうけていない。また節理等の割目はほとんど分布していない。岩盤としては堅固である。この場合軟質岩に近いものについては、上記のような性質であっても、すでにこのクラスに属さずC下級に属するものがある。	
C	岩質は概ね新鮮、堅硬であるが、火成岩では造岩鉱物中、長石類および雲母、角閃石などの有色鉱物がわずかに風化変質している場合もあり、また堆積岩類では構成粒子として二次的に存在する長石類および有色鉱物がわずかに風化変質している場合もある。 節理はかなり分布しており、また節理面は風化変質をうけて変色汚染されている場合が多く、時には風化物質がうすく付着していることもあるが、一般には概ね密着している。岩盤としては堅固である。	岩質は新鮮であり、構成粒子は二次的な風化変質をうけていない。また節理の分布は疎らで密着している。岩盤としては概ね堅固である。ただしこの場合、硬質岩に近いものについてはこのような性質でもB級に属するものがある。	このクラスの対象となる岩石は、中硬質岩に近いもの（新鮮な岩石の乾硬一軸圧縮強度が $\geq 150\text{kg/cm}^2$ 程度以上）である。岩質は新鮮で、構成粒子は風化変質をまったく受けておらず、また節理はほとんど分布していない。
	岩質は一般にやや風化変質している。このうち火成岩では石英を除き、長石類および有色鉱物は風化を受け、しばしば褐色あるいは赤褐色を呈している。また堆積岩類では構成粒子として二次的に存在する長石類および有色鉱物が風化変質し、火成岩の場合と同様、しばしば褐色あるいは赤褐色を呈している。 節理は開口し、しばしば粘土あるいは風化物質を挟在している。このクラスの岩石中には細かな毛髪状割目が多量に延在していることが多く、岩石ハンマーで強化すれば、この毛髪状割目を分離面として崩壊することがしばしばある。この他岩質は新鮮であっても、開口節理の分布が著しく、フラッキーな状態を示すものもこのクラスに含まれている。	構成粒子として二次的に存在する長石類および有色鉱物がやや風化変質しているものが多い。風化程度としてはあまり進んでいないが、原岩が中硬質の岩石であるので、絶対的な硬さとしてはやや軟質を感ぜる。節理は開口し、また風化物質を感ぜる。節理は開口し、また風化物質、粘土層を著しく挟在している。このクラスの岩盤は毛髪状割目がある程度存在するので、岩石ハンマーによる打撃ではこの毛髪状割目を分離面として、しばしば崩壊する。	岩質は新鮮であり、構成粒子も二次的な風化変質をうけていない。また、節理はほとんど分布していないか、あるいは分布していても疎かでありしかも密着している。岩盤としては風化をほとんどうけていないが、原岩が軟質な岩石であるので、絶対的な硬さとしては、軟質を感ぜる。この場合、乾硬一軸圧縮強度が $\geq 100\text{kg/cm}^2$ ～ $\geq 70\text{kg/cm}^2$ 程度以下のものではすでにこのクラスに属さずC下級に属する。
	火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩の構成粒子は著しく風化を受けているために、岩石全体としても一般に褐色あるいは赤褐色を呈する。 節理は開口し粘土および風化物質の挟在が著しい。このクラスの岩石では細かな毛髪状割目の分布が著しくさらにこの割目に沿って風化も進んでいるので、岩石ハンマーによる軽打によって容易に崩壊あるいは節理面が著しく、石積状の崩壊を示すものもこのクラスに含まれる。	構成粒子は風化変質し、固結程度はかなり低くなっている。原岩が中硬質の岩石であるので、絶対的な硬さとしては、かなり軟質を感ぜる。節理は開口し、また風化物質、粘土層を著しく挟在している。このクラスの岩盤では毛髪状割目に沿って、かなり風化がすすんでいるので、岩石ハンマーによる軽打撃によっても容易に崩壊する。	構成粒子はやや風化変質を受け、固結程度は著しく低下している。岩盤としての絶対的な硬さとしては、極めて軟質を感ぜる。岩石ハンマーの尖頭部で打撃すると、しばしば尖頭部は岩盤に突きささる。
D	火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩の構成粒子は著しく風化を受け、しばしば砂状および粘土状を呈する部分が見られる。このクラスの岩盤では節理の分布はむしろ不明瞭である。	構成粒子は風化変質が著しくすすみ固結程度は著しく低下し、しばしば砂状および粘土状を呈している。このクラスのものは、割目の分布はむしろ不明瞭である。	構成粒子の固結程度は極めて低くなり、大部分砂状あるいは粘土状を呈している。
	(1) 深成岩、半深成岩および火山岩等の火成岩類がこれに該当する。 (2) 中生代以前の砂岩、礫岩、チャート、石灰岩および輝緑岩等の堆積岩および火山砕屑岩がこれに該当する。ただし粘板岩、頁岩は原則的には除外する。 (3) 変成岩のうち、比較的塊状の片麻岩は、これに該当する。ただし結晶片岩類は除外する。 その他、新第三紀の堆積岩および火山砕屑岩にもこれに該当するものもある。	新第三紀中新世以前の第三紀の堆積岩（泥岩、シルト岩、砂岩および礫岩）および火山砕屑岩（凝灰岩、凝灰角礫岩、火山角礫岩および溶結凝灰岩）の大部分がこれに該当する。ただし第四紀の溶結凝灰岩にはこれに該当するものもある。	新第三紀新世以降の堆積岩（泥岩、シルト岩、砂岩および礫岩）および火山砕屑岩（凝灰岩、凝灰角礫岩および火山角礫岩）の大部分がこれに該当する。ただし第四紀の火山砕屑岩には、これに該当するものもある。
備考	田中式岩盤等級に対応する。		

岩 盤等 級	岩盤の 変形係数 (kg/cm ²)	岩盤の 静弾性係数 (kg/cm ²)	岩盤の 粘着力 (kg/cm ²)	岩盤の 内 部 摩擦角 (°)	岩盤の 弾性波 速度 (km/sec)	ロケット ハンマー 反発度	孔内載荷試験による		引き抜き試 験によるせん断強度 (kg/cm ²)
							変形係数 (kg/cm ²)	接線弾性係数 (kg/cm ²)	
A~B	50,000 以上	80,000 以上	40 以上	55~65	3.7 以上	36 以上	50,000 以上	100,000 以上	20 以上
C _H	50,000~ 20,000	80,000~ 40,000	40~20	40~55	3.7~3.0	36~27	60,000~ 15,000	150,000~ 60,000	
C _M	20,000~ 5,000	40,000~ 15,000	20~10	30~45	3.0~1.5	27~15	20,000~ 3,000	60,000~ 10,000	
C _L	5,000 以下	15,000 以下	10 以下	15~38	1.5 以下	15 以下	6,000 以下	15,000 以下	10~5
D									5 以下

表-3.4.1.4 岩盤分類基準（ボーリングコア以外に適用）³⁾

風 化	1	全く風化が認められず構成鉱物まで新鮮なもの	硬 さ	A	ハンマー打でナイフエッジをなして割れる。特に硬い	亀 裂 間 隔	I	100 cm以上
	2	一部の鉱物がわずかに風化しヘアクラックが見えるが分離していない		B	ハンマー打で粉を伴って割れる。硬い		II	40~100 cm
	3	一部の鉱物が風化し、亀裂等に沿って分離し、角礫状になったもの		C	ハンマー軽打で小岩片となる。もろい		III	20~40 cm
	4	未風化の部分が角礫～円礫状に風化物中に含まれている状態		D	やや固結しているが両手で粉碎できるもの。ハンマーで穴		IV	5~20 cm
	5	構成鉱物の大部分が風化し二次鉱物状に変わっている状態		E	粉状粒状(湿っている場合には乾燥状態を考慮して判断)ハンマーで掘れる		V	5cm 以下

表-3.4.1.5 岩盤分類基準（ボーリングコア）³⁾

風化（W）		硬さ（H）		コアの長さ（C）	
1	未風化	1	非常に堅硬	1	30 cm以上（50 cm以上）*
2	↑	2	↑	2	10～30 cm（20～50 cm）
3	↓	3	↓	3	3～10 cm（5～20 cm）
4	↓	4	↓	4	1～3 cm（1～5 cm）
5	風化分解	5	非常に軟質	5	1 cm以下（1 cm以下）

*コアの長さの分類基準は岩種により変更してもよい。

参考文献

- 1) 日本応用地質学会： 日本の岩盤分類．応用地質特別号，1992.
- 2) 菊地宏吉・斎藤和雄他： ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について，大ダム，No.102，103 合併号，1982.
- 3) 日本応用地質学会： 国内各機関の岩盤分類．応用地質特別号，1984.

3.4.2 農業用水路トンネル

(1) 農業用水路トンネルの変遷と分類

農業用水路トンネル（以下、水路トンネルと略記）とは、一般に用水および排水を導水する目的で地下に設置される構造物と定義されている(武田ほか, 1974)。内空断面の大きさは、計画流量によって異なるが直径は5 m以下のことが多い。我が国におけるトンネルの発祥は、かんがい用水路トンネルであると言われている。歴史的に見て最も有名な水路トンネルは箱根用水トンネルであり、延長約1.28 km, 断面約4 m²を5年間かかって農民達が自力で掘削したもので、1670年(寛文10年)に完成している。

明治時代に入り、水路トンネルとしては1890年(明治23年)に我が国最初の運河兼かんがい用水トンネル（琵琶湖疎水トンネル）が建設され、琵琶湖の水を京都市へ導水した。このトンネルは延長約3.4 km, 断面としては高さ2.4 mの馬蹄形である。明治時代の終わり頃からは水力発電が始まり、各地に圧力トンネルが建設され始めた。また、この時期には耕地整理法（明治42年4月公布）が施行され、かんがい排水を目的とする水路トンネルも数多く建設され始めた。戦後になると、トンネル技術の進歩・発展が著しく、掘削・覆工とも全面的に機械化される作業へと変化してきた。その代表例として、1953年(昭和27年)に着工された佐久間ダム建設に伴う国鉄飯田線付替えの大原トンネル工事(全断面掘削工法)をあげることができる。その後、1957年(昭和32年)から建設が開始された愛知用水事業での長い延長をもつ岩トンネルは全て全断面掘削工法を採用し、機械力を全面的に使用しスピード化を図り、かつ安全に施工された。

最近では、水資源開発事業も増加しており、水路トンネル計画は明かり構造物と比べ用地取得に比較的問題が少ないことや、完成後の維持管理面もスムーズに行えるという利点から増えつつある。さらに省力化施工の観点から山地・丘陵部における岩(岩盤)トンネルにおけるトンネルボーリングマシン(TBM)工法や軟弱地盤および市街地周辺での土砂トンネルにおける各種のシールド工法での施工技術が改良され、各地で採用されている。

水路トンネルは、水理上からは①計画流量が自由水面をもって流れる無圧トンネル、②計画流量が満流し、内水圧を受ける圧力トンネルに分けられる。また、地質の上からは①主として岩盤から構成される地山内に構築される岩トンネル、②風化した岩盤や土砂地山に構築される土砂トンネルに分類される。

(2) トンネル地山における岩盤評価の基本的な考え方

水路トンネルの設計とトンネル地山を構成する地質・岩盤状況との関係は主としてトンネルタイプを選定することにある。水路トンネルの設計・施工ではトンネル地山の物性が大きな影響を与える。それらは、各地質の生成年代(地質の新旧)、地質構造、岩盤の硬軟、節理・層理・片理面などの不連続面の状況、風化・変質状況、地下水の影響、土被りなどの地山状況によっ

て異なるが、設計・施工を効率良く、かつ合理的に行うためには、地山の物性を類型化して評価する必要がある。具体的には、類似した地質をグルーピング化し、さらにそれらの地山状況の程度に応じた等級分類を行い、その分類と設計・施工の類型化を行うことにより効率化を図っている。

1) トンネルタイプの判定基準

水路トンネルでのトンネルタイプは表 3.4.2.1 に示す 4 種類から選定しており、調査・設計段階における「地山分類」はトンネルタイプの判定基準によっている。

表 3.4.2.1 トンネルタイプの分類
(「土地改良事業計画設計基準 設計『水路トンネル』基準書
技術書；平成 8 年 農林水産省構造改善局」より引用)

トンネル タイプ			地 質 状 況	矢板工法による場合		吹付け・ロックボルト工法による場合					
				支 保 工	ライニング	吹付け厚 (cm)	ロックボ ルト長さ (cm)	ロックボルト間隔 周方向 (m)	延長方向 (m)	鋼製支保工 建込間隔 (m)	ライニング
A			亀裂の少ない新鮮な岩	無支保又はロックボルト	無筋コンクリート又は吹付けコンクリート	0又は5	—	—	—	—	無筋コンクリート又は吹付けコンクリート
B	B1	亀裂のあるやや風化した岩、又は軟岩	鋼製支保工 (アーチ、側壁とも掛矢板)	無筋コンクリート	5	0.4 D_0	1.5	2.0	—	無筋コンクリート	
	B2				10			1.5			
C			風化岩、破碎帯、硬土	鋼製支保工 (アーチ：送り矢板、側壁：掛矢板)	無筋コンクリート	10	0.5 D_0	1.2～1.0	1.2	1.2 (H-100程度)	無筋コンクリート
D	D1	著しい風化岩、断層破碎帯、軟質土砂等	切羽が自立する地山	鋼製支保工 (アーチ：縫地矢板、側壁：掛矢板及び縫地矢板)	無筋コンクリート又は鉄筋コンクリート	15	0.6 D_0	1.0以下	1.0	1.0	無筋コンクリート又は鉄筋コンクリート
	D2					20			0.8 (H-100程度)		

- (注) ① 圧力トンネルについては内外水圧を考慮してライニングの種類を決定する (基準11参照)。
 ② D_0 はトンネル掘削断面の直径である。
 ③ 吹付けコンクリートの厚さは平均厚であるが、余吹き厚さは含まない。
 ④ ロックボルトは、表から計算した長さの直近の市販品を使用する。
 ⑤ 吹付け・ロックボルト工法による場合、タイプCではロックボルトと鋼製支保工の採用判断を行い、タイプDでは両方を採用する。
 ⑥ 矢板工法による場合の鋼製支保工の規格と建込み間隔については表-8を参照。

表 3.4.2.2 に現在用いられている水路トンネルにおけるトンネルタイプの判定基準を示す。本基準は無圧トンネルおよび圧力トンネルの両者に共通する。

表 3.4.2.2 トンネルタイプの判定基準

タイプ	地 質 状 態			弾性波速度 (km/s)	見かけの地山 強度比 F_c	岩盤等級 (参考)
A	亀裂の少ない 新鮮な岩	亀裂状態	α : マッシブなものから、かなり多いものまでの範囲 β : 少ないものから多少ある程度のもので γ : ほとんどない	α 群 : 4.5 以上 β 群 : 4.0 以上 γ 群 : 3.0 以上	10 以上	A, B
		岩石試料 圧縮強度	α : 1,200 kgf/cm ² 以上 β : 800 kgf/cm ² 以上 γ : 500 kgf/cm ² 以上			
		地山ポア ソン比	0.16~0.23			
		地 山	作用しない			
B	亀裂のあるや や風化した岩 又は軟岩	亀裂及び 破碎状況	α : 亀裂多く所々小断層をはさみ、場所によっては破 砕質帯 β : 亀裂多く所々小断層をはさむ γ : 亀裂が多少ある軟岩 δ : 軟岩	α 群 : 3.0~4.5 β 群 : 2.5~4.0 γ 群 : 2.0~3.0 δ 群 : 2.0 以上	6~10	C_H, C_M
		岩石試料 圧縮強度	α : 600~1,200 kgf/cm ² β : 400~1,000 kgf/cm ² γ : 200~500 kgf/cm ² δ : 50~200 kgf/cm ²			
		地山ポア ソン比	0.18~0.35			
		地 圧	一般には作用しないが、破碎質や湧水で作用すること あり			
C	風化岩、破碎 帯、硬土	亀裂、破 砕、軟質 状況	α : 破碎帯 β : 破碎帯もしくは、亀裂や小断層が多い γ : 亀裂が多く破碎帯又は軟岩 δ : 軟岩又は固結度の悪いもの（よく締まった硬土砂 も含む） 一般に切羽全面又は一部が崩壊してくるような場合に 適用する	α 群 : 1.8~3.0 β 群 : 1.5~2.5 γ 群 : 1.0~2.0 δ 群 : 0.8~2.0	2~6	C_M, C_L
		岩石試料 圧縮強度	50 kgf/cm ² 以下			
		地 圧	作用する			
D	著しい風化 岩、断層破碎 帯、軟質土砂	亀裂、破 砕、軟質 状況	$\alpha \cdot \beta$: 破碎帯及び湧水区間 γ : 破碎帯又は軟質岩で固結度が低い δ : 破碎帯又は固結度が非常に悪い 一般に未固結の堆積土等で、切羽全面が湧水により自 立せずに流動化するような場合や、湧水が著しく多い 破碎帯に適用する	α 群 : 1.8 以下 β 群 : 1.5 以下 γ 群 : 1.0 以下 δ 群 : 0.8 以下	2.0 以下	C_L, D
		岩石試料 圧縮強度	50 kgf/cm ² 以下			
		地 圧	作用する			

(注) ① $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta$ 群別の岩石区分は表-6に示す。

② 特に $F_c < 0.3 \sim 0.5$ では切羽が自立しないおそれがある。

③ 岩盤等級（参考）は菊地、斉藤による分類であり、目安として示した。

この表の地質状態については、昭和 38 年から施工が開始された豊川用水事業で使用された岩の分類法(愛知用水公団, 1968)および武田ほか(1974)に準拠し、一部修正されている。

愛知用水公団(1968)による岩の分類法では、岩を新鮮、やや風化、風化、著しく風化、風化が著しく土壌化の 5 つに区分し、それに対応する主記号 A~E を付している。A~C についてはさらに細区分し、AU, AL 等と表記している。添字 U は比較的良好なもの、L は比較的不良

なものを示す。

表 3.4.2.2 では上記 5 区分のうちの E を D に含み 4 区分とし、トンネルタイプ区分と岩盤区分とを対応させている。地質状態を判定する項目としては、岩盤の亀裂状態、岩石試料の一軸圧縮強度、地山のポアソン比、地圧の作用度合いをあげている。支保工に作用する地圧については、特別な場合を除き、B～D タイプにおいては緩み高さの値(0.5～2.0 D D：掘削断面の直径)を標準として算定する。また、特別の場合とは、① 地質が堅硬な岩石で極めて良好な場合、②地質が著しく不良で、かつ湧水もあり土砂が流動状態になりやすい場合、③大きな押出し性および膨潤性地圧が生じる場合である。

弾性波速度区分については、主として日本国有鉄道技術研究所での検討結果(池田，1975)を参考にし、水路トンネルの施工実績(特に愛知用水，豊川用水ほか岩トンネルの実績)とを照合して作成している。なお、弾性波速度値については、 $\alpha \sim \delta$ 群に分類した岩石名との関連で区分している。岩石区分については表 3.4.2.3 に示した。

表 3.4.2.3 岩石区分

群	岩 石 名
α 群	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，斑レイ岩等）
	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）
	⑤ 変成岩（結晶片岩，千枚岩，片麻岩，ホルンフェルス等）
β 群	① 剝離の著しい変成岩
	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）
γ 群	古第三紀層～新第三紀層（泥岩，頁岩，砂岩，礫岩，凝灰岩，角礫凝灰岩，凝灰岩等）
δ 群	① 新第三紀層～洪積層（泥岩，シルト岩，砂岩，砂礫岩，凝灰岩，段丘，崖錐，火山碎屑物等）
	② 洪積層～沖積層（粘土，シルト，砂，砂礫，火山噴出物ローム，扇状堆積物，崖錐，段丘等）
	③ 表土，崩壊土

地山の判定の指標となっている。特に表 3.4.2.2 では $F_c' < 0.3 \sim 0.5$ では切羽が自立しないおそれがあるとしている。

2) トンネルタイプと適用地山

表 3.4.2.1 に示した各トンネルタイプの適用地山状況について以下に解説する。

(1) Aタイプ

キレツの少ない新鮮な岩盤で、発破掘削後素堀りのままで長時間自立可能な地山に適用する。局部的にキレツが存在しても、ロックボルトや吹付けコンクリート等を施工することによって肌落ちを防止し、一定期間地山を自立させることができる場合にも適用する。

(2) Bタイプ

硬い岩質であるがキレツが発達し、掘削直後の切羽は自立するが湧水等の影響で時間の経過とともに風化が進み、肌落ちが生じるような地山、または軟岩で掘削後、切羽は自立するが時間の経過とともに地圧が発生するおそれのある場合に適用する。さらに施工性の面から、切羽および素堀りの状態で比較的長期間安定し、肌落ちも軽微な硬質な地質から構成される地山を B1 タイプ、軟岩および時間の経過とともに肌落ちが生じる地山を B2 タイプにそれぞれ細分類している。

(3) Cタイプ

風化岩、破碎帯および硬質土等で、掘削後速やかに支保工を設置して地山を支えなければ、ずり出し作業に危険が及ぶような場合に適用する。

(4) Dタイプ

著しく風化した岩、断層破碎帯および湧水の多い軟質な土砂地帯等で地圧が大きく作用する場合に適用する。Dタイプは D1 および D2 に2つのタイプに細分類されている。

D1 タイプはアーチ部の地圧は大きい、側圧は小さく切羽が自立するような地山に適用する。一方、D2 タイプはアーチ部の地圧はさらに大きく、湧水あるいは地山の強度が低いと切羽は自立せず、鏡止め等の補助工法が必要となる地山や、地盤の支持力がないため支保工が沈下したり、側圧によって押出されたりする地山に適用する。

3) 標準断面

水路トンネルの内空断面形状は水理学的な面、経済性および施工性を考慮して決定する。内空断面形状の選定にあたっては以下のような指針が示されている。

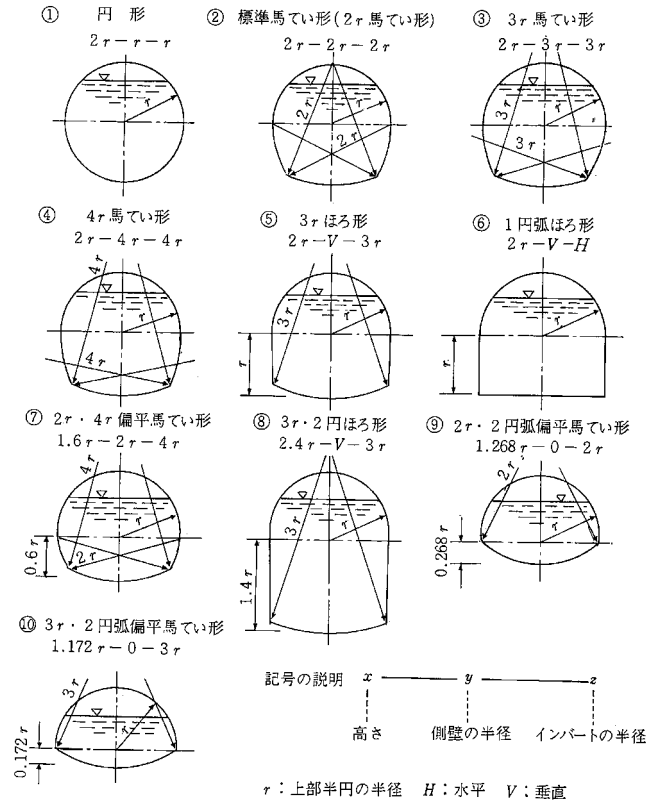
① 圧力トンネルの場合、内空断面形状は原則として円形とするが、内水圧が 1 kg/cm^2 未満の場合には構造上の検討を行って標準馬てい形を採用することができる。

② 内空断面の直径がおおよそ 2.0m 以上の無圧トンネルは原則として標準馬てい形が望ましい。

③ 大きな静水圧または静水圧的性質をもつ地圧(膨潤性地圧)が作用する場合は、内空断面を円形またはこれに近い馬てい形断面とするのが望ましい。

④ 矢板工法での施工の場合、側圧が大きく作用するおそれのある地山では側壁が垂直な断面の採用は極力避けるべきである。また、単位トンネル内での内空断面形状は原則として同一とし、トンネルタイプ別の変更は行わない。

図 3.4.2.1 に水路トンネルの内空断面形状図を示す。また、図 3.4.2.2 には矢板工法でのトンネルタイプ別の標準断面図を、図 3.4.2.3 には吹付け・ロックボルト工法による標準断面図をそれぞれ示す。



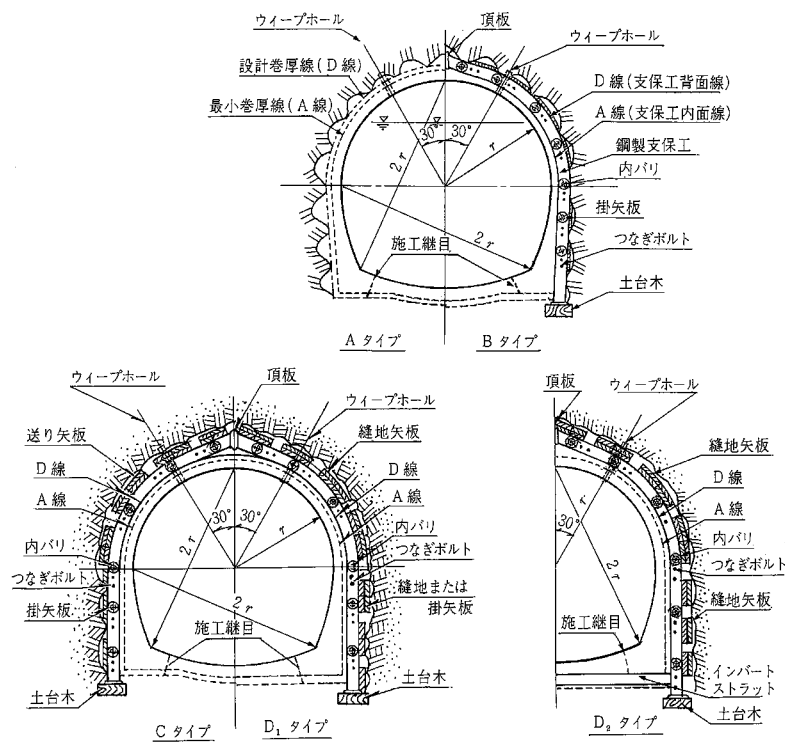


図 3.4.2.2 矢板工法標準断面図(標準馬てい形の場合)

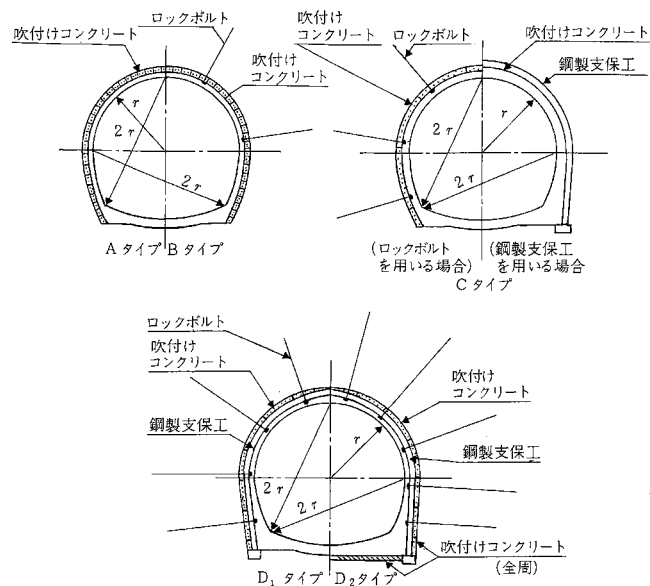


図 3.4.2.3 吹付け・ロックボルト工法標準断面図(標準馬てい形の場合)