

トンネル掘削時の坑内変位に関する地質工学的研究

竹林 亜夫・滝沢 文教

Engineering-geological study about tunnel deformation during excavation

Tsuguo Takebayashi and Fuminori Takizawa

Abstract

Many studies were available, using accumulated data by measurement monitoring during excavation on NATM which was introduced in Japan 26 years ago. So, when we studied about tunnel deformation, geological ground conditions of large deformation are found to be extremely complexity in many tunnels. These complex conditions are weak rocks that were receiving action of breaking and change in quality during geological term. Generally, these complex conditions bring values of mechanical ground properties on inaccurate. Therefore, rock kind classification in order to consider tunnel deformation, are proposed in this paper. Mechanical ground properties must be examined from rock samples which are estimated by this classification. As a result, nearly tunnel deformation can be solved to connect with competence factor and internal friction of ground that are these examinable values.

Usually, effective face geological observation and tunnel deformation measurement on NATM are basic methods for tunnel excavation of complex geological condition.

(要 旨)

わが国に26年前導入されたNATMの掘削時の計測結果は、多くの施工事例を通して数多くの資料が得られ、最近ではそれらの計測結果を、分析した研究が発表されはじめている。その内で、坑内変位について考察したところ、トンネル掘削時に大きな坑内変位量をもたらした地山は、極めて複雑な地質条件であることが判明した。複雑な地質条件は、主に破碎・変質を受けて岩盤強度が低下している状態であった。またトンネル掘削時の坑内変位量は、地山強度比と内部摩擦角に密接に関係していることも判明した。しかし地山条件が複雑なために、試料の採取位置によって、土質試験結果の値が、バラツキ、実用として使用できないことが多い。その解決策として、まず複雑な地山条件を定性的に地質状態で分類し、その分類に基づいて、切羽の変位挙動に影響を与える地山の弱い部分から試料を採取して土質試験を行う。その試験値から地山強度比と内部摩擦角を決めて、坑内変位量の概略値を算定する実用的な方法を示している。また、複雑な地山条件について、坑内変位量を考慮して作成した岩盤分類を提案している。

このように本報告ではトンネル掘削時に日常実施しているNATMの切羽地質観察と坑内変位測定を、有効に活用することで、複雑な地質条件での大きな坑内変位現象に適切に対応できることを示している。

1. はじめに

トンネルは地中に構築される延長の長い線状構造物のために、縦断方向では岩盤状態、地下水状態、土被り厚さがそれぞれ異なっているので、事前に全区間の調査を充分に行ない難いのが現状である。したがって、施工時に切羽の地質・地下水状態と自立性を観察し、周辺地山を極力緩ませないように吹付けコンクリート、ロックボルトと鋼製支保工を設置し、坑内変位状況を綿密に計測している。トンネルの坑内変位が大きい箇所では、大きな土圧が作用しているので、その区間では支保の剛性を高めるだけでなく、変形余裕を考慮して掘削断面を大きくし、場合により二次覆工厚さも大きくすることもある。

このような現場の日常管理により、作用地圧に対して適切な支保および覆工構造品質をトンネル全延長に涉って出来る限り、均等に確保するように実施されている。

観察・計測を重視して周辺地山を極力緩ませないNATM技術が我が国に定着して26年が経過し、その間に建設された数多くのトンネル工事において膨大な切羽地質観察と坑内変位計測資料が蓄積していて、最近ではそれらの計測資料を分析した研究が発表され始めている。坑内変位計測には、トンネルの掘削幅の変化を示す内空変位計測と支保工の天端部の沈下状況を調べる天端沈下計測が日常実施されている。その中で、内空変位量および天端沈下量が、掘削幅の約0.5%（掘削幅が10mの場合は約50mm）程度になると吹付けコンクリートにひび割

れが入り始め、さらに変位量が大きくなると剥離現象、ロックボルトのベアリングプレートおよび鋼製支保工が変形するなど、支保の変状が出始めることが明らかとなっている^{1) 2)} etc。

本論文では支保に変状を生じるような坑内変位量の大きいトンネルの我国での施工事例を主に「トンネルと地下」および土木学会「トンネル工学研究論文・報告集」等の文献調査に基づいて、岩質、地質構造、地山物性を分析しつつ検討し、坑内変位量に関係する幾つかの知見について記述している。坑内変位の大きい地山条件は、トンネル標準示方書で示されている特殊地山の事項の多くに、すなわち膨張性地山、断層破碎帯、褶曲じょう乱帯、地すべりや崩壊の可能性のある地山、有害ガス等に比較的密接に関係していることが判明したので報告する。さらに坑内変位量が50mm以下の場合の地山条件についても検討を加えて、明らかとなった岩質、地山物性値等についても述べている。

以上のように、NATMでは日常の品質管理として実施されている、切羽の地質観察と坑内変位計測の重要性を指摘しつつ、異常値でもある大きい内空変位量と天端沈下量を切羽で判定できるように、特殊な地質について、地質の成因、地山物性等について考察している。

2. 既往の研究

NATM導入以前の木製支保工および鋼製支保工を使用していたトンネルで、支保工が大きく変形する地山は膨張性地山と称されてしばしば難工事に陥っていた。1960年代には鋼製支保工を用いた矢板工法が普及しはじめ、現場での主な関心は支保工の軸力を計測して、支保工の建て込みピッチを決めることにあったので、間接的に作用地圧が求められていた。1976年にNATMが導入されて以降は、施工時に観察・計測管理として切羽の地質観察と内空変位計測、天端沈下計測を綿密に実施していることから、変位量に関係する研究が多くなっている。

2.1 NATM導入以前の研究

2.1.1 膨張性地山の地質条件

トンネル工事史上、有名な東海道本線の丹那トンネル工事(L=7,804m、1918年~1934年)においてわずか280mあまりの膨張性地質(温泉余土)区間で強大な地圧と湧水に遭遇し、鋼製支保工等当時の最高技術を駆使しても、その区間の工事に6年8ヶ月を要した³⁾。この頃から膨張性地山にトンネルを施工すると、工事の安全性、工程・工事費の不確実性等が発生するために、路線選定の段階で、できる限り膨張性地山区間を避ける方針が確立されていた⁴⁾。

その後、高度成長経済の下で、交通手段の飛躍的な発展に伴う、トンネルの長大化と大断面化が社会的要請となり、やむなく膨張性地山にトンネルを施工する事例が増えてきた。その時代の膨張性地山に対するトンネル技

術について、足立貞彦⁵⁾(1970)は次のように述べている。「膨張性があるかも知れない岩種は頁岩、泥岩、温泉余土、長石、雲母、輝石等を含む風化岩、蛇紋岩等、経験的に比較的是っきりしている。しかし膨張性があるかも知れない地山にトンネルを掘削する場合に一番困ることは、膨張するか、しないかが予測できないことである。現場で直面して、膨張度を判断し、試行錯誤により工法を決定しているのが実状である。」

膨張性地圧が作用したトンネルの事例を分析することにより、高橋彦治⁶⁾(1971)は、膨張性地圧が生じる地質条件には次の3要素が含まれているとして、

- ① 造山帯または褶曲帯
- ② 軟岩または変質帯
- ③ 膨張性粘土鉱物

これらの3要素を含んだ地質条件はトンネル工事に限らずに、切土工事等建設工事全般においても、地質的欠陥の3要素であり、地すべり地帯の素因でもあると明言している。

2.1.2 膨張性地圧に関する研究

高橋彦治⁶⁾(1971)「膨張性地圧とは、トンネル周辺の地山がいかなる原因にせよ内空断面を縮小するような動きに関して示す地圧現象である。」と述べている。鋼製支保工を用いたトンネル工事の計測は、主要部材である鋼製支保工の軸力や応力を計測することにより、支保工ピッチ等を決めていたので、間接的に地圧も求められ、施工上の重要な管理項目でもあったが計測する断面は極めて少なかった。

膨張性地圧の原因には主に吸水膨張説とせん断破壊説があり、現場関係者の間では軟質な粘土が分布していることから、吸水膨張説が長期間にわたり主原因と考えられ、支保工背面にスギの枝材等の緩衝材を入れることもあった。しかし日振トンネル⁷⁾や神居トンネル⁸⁾では、当初吸水膨張説であったが、後に主原因はせん断破壊説に訂正され、作用地圧に耐え得る剛性の高い鋼製支保工で対処するようになった。また高橋彦治⁶⁾は多くの膨張性トンネルの施工事例から、トンネル坑壁に時たま見られる吸水現象は、膨張の原因でなく地山のゆるみによる結果であると述べて、主原因はせん断破壊説と判断した。その後奥新冠および春別発電所のトンネル⁹⁾、頸城トンネル、折渡トンネル、新登川トンネル¹⁰⁾、鬼峠トンネル等では、支保工の軸力計測や地山の土質試験などのデータから周辺地山のせん断破壊説が主原因と判断された。その後の赤倉トンネル¹¹⁾、鍋立山トンネル¹²⁾、嶺岡トンネル¹³⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾等の現場計測結果でもせん断破壊説が主原因と考えられ、それ以降のほとんどのトンネルで適用されている。

1974年3月には仲野良紀¹⁶⁾が農業土木試験所報告で、それまでの農業用水路トンネルの施工実績を分析して、一軸圧縮強度(q_u)と土被り圧(σ_v)の比による支保工の設計(試案)を発表し、同年4月には竹林亜夫¹³⁾

が清水建設社内報の土木クォータリ別冊と鈴木守、吉田善亮、竹林亜夫¹⁴⁾が応用地質で、後述の嶺岡トンネルの現場計測結果をまとめる中で、一軸圧縮強度 (q_u) と土被り圧 ($\gamma \cdot H$) の比を地山強度比 (α) と称して、支保工の変状が著しいのは地山強度比が0.7以下の条件であることを報告している。その両者が協議し、改めて地山強度比と命名してそれぞれ報告を行った。^{15) 17)}

土木学会のトンネル標準示方書¹⁸⁾では地山の膨張性を示す指標の例として、仲野良紀¹⁷⁾(1975)の地山強度比の値により膨張性および地圧の大小を区分する方法の他、次のような研究結果が示されている。日本鉄道建設公団の提案は北越北線の赤倉トンネル¹¹⁾(1977)の工事結果を解析して膨張性地圧の発生の可能性が大きい条件として次のような項目を挙げている。①岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト、② 2μ 以下の粘土分含有率が30%以上 ③塑性指数 (I) が70以上 ④C.E.Cが35 meq/100g以上 ⑤浸水崩壊度D ⑥ボーリングサンプル中破砕部多い。大塚正幸、高野彬は鍋立山トンネル¹²⁾(1980)の施工途中の資料を分析して、赤倉トンネルの指標に、単位体積重量、自然含水比、浸水膨張率の項目を加えている。佐藤昭、佐賀政家、斉藤勝昭は青函トンネルの算用師工区¹³⁾(1980)の施工結果から ①自然含水比20%以上、②単位体積重量 (乾燥) 1.8以下、③地山強度比3以下、④第1回吸水量が自然含水比の2倍以上、⑤浸水崩壊度C~D、⑥モンモリロナイト含有量30%以上、⑦RQDが30%以下としている。

以上のように我国の膨張性地圧の主要原因はせん断破壊 (squeezing) と考えられているが、ドイツのエンゲルベルクトンネルに分布する無水石膏層のように吸水膨張 (swelling) が顕著な地山も存在している。

2.2 NATM導入後の研究

NATMが普及しはじめて、増えつつある施工事例を分析して、谷本親伯²⁰⁾(1982)は内空変位量、天端沈下量などの計測値と支保パターンとの関係を考慮しつつ施工管理を行う要点について報告している。吉川恵也、朝倉俊弘、小島芳之²¹⁾(1988)は著しい膨張性を呈する地山として、①ボーリング時に無水掘りが必要で、かつコア膨張が顕著、②地山強度比は1.5以下、③モンモリロナイト含有量は20%以上、かつ自然含水比が20%以上として、トンネル示方書の指標の一つとなっている。

竹林亜夫、石外宏、大塚正幸²²⁾(1989)は、数値解析により変位量が大きい地山条件は、地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角が小さい場合であることを指摘しつつ、多くの施工事例での変位計測値と土質試験値との関係を検討したが、内部摩擦角の試験値が少ないことから、明確に実証できていない。

田村武、足立紀尚、土居則夫²³⁾(1989)は、鍋立山トンネルで最も膨張性の著しい区間で遭遇した高压ガスを含む泥岩地山を対象として、トンネル掘削時の高压気体の影響と対策について、理論的検討と室内実験でシュミ

レートした結果と現場への適用状況を報告している。同じ鍋立山トンネルについて仲野良紀、清水英良、西村真一²⁴⁾(1991)は、泥岩の含水比と一軸圧縮強度の関係を示し、トンネル全延長の泥岩の含水比分布と膨張性の程度を、室内試験で求めた泥岩の限界状態の含水比と比較することにより指摘している。また高压ガスの分布区間については含有ガス圧を考慮した含水比を算定している。川本眺万、アイダン・オメル、赤木知之²⁵⁾(1992)は、スキューズィング地山の施工事例の土質試験値から一軸圧縮強度、ポアソン比、弾性係数、自然含水比、内部摩擦角等の地山物性値の相関を検討し、さらに変位計測値との関係を考察して、地山強度比が2.0以上の地山では、スキューズィングは見られなく、自然含水比は25%以上であり、膨潤性粘土を含むがその含有量は坑内変位と特別に関係しないと記述している。

今田徹²⁶⁾(1997)、中田雅博、西村和夫、中野清人²⁷⁾(1998)は、データベース化された高速道路トンネルの施工時の計測と観察の結果を用いて、岩石ごとの内空変位量の平均値を示し、後述のような変位量の小さい岩石と大きい岩石を判別できる表を作成し、また岩石ごとの内空変位量と地山強度比の関係を図示し、NATMの多くのトンネルでは変位は問題とならず、変位を問題にしなければならない地山は特定のものになっていることを指摘している。特定の地山は、地山強度比が実測値では大きいものもあるが、理論的には2以下で、かつ内部摩擦角が小さい粘土質の地山である。この研究を参考として、竹林亜夫、三上元弘、国村省吾、奥井裕三、松井保²⁸⁾(2002)は、内空変位の大きいトンネル事例の周辺地山について、それぞれのトンネル地質状態を定性的に分類し、多くの地山では、粘土化した軟質部と母岩の硬質部が混在していて、土質試験結果のバラツキの原因になっていることを指摘し、変位挙動を反映する物性値を求める方法を提案し、かつ坑内変位量を考慮した岩種分類を提案している。

以上のような地質工学的研究以外に、トンネル施工法、支保パターンの剛性、各種補助工法の採用などの組合せにより、坑内変位を許容値内に納めるための研究は、数多く、今後も増加すると考えられる。

2.3 既往の研究の傾向

このように地圧および坑内変位に関する既往の研究は、その時代の施工法と観察・計測技術そして土質試験技術に密接に関係していて、次のような傾向が考えられる。

- ① 鋼製支保工を使用した時代には、支保工の軸力および地圧計測が主なため、計測断面は少なく、かつ土質試験結果も少ない中で、地質観察結果を主要な判定資料として、膨張性地圧およびその原因に関する研究が行われた。
- ② 膨張性地山で難渋したトンネルで、膨張性に関する地山物性項目を、現場ごとに調査検討して施工管理に用いる研究が行われたが、それらの指標はそれぞれ

の現場の地山条件と少ない土質試験結果に拘束されているために他のトンネルに一般化できず、参考資料として用いられている。

- ③ NATMに移行する中で、坑内変位計測と切羽地質観察の複数の実施例をまとめた研究が行われ、変位の大きい地山、岩石は限定されてきて、地山物性値との相関も明らかになりつつあるが、土質試験資料が少ないためにバラツキはあるものの、変位の程度を評価できはじめている。
- ④ NATMは切羽の地質観察と変位計測を蜜に実施することにより、支保パターンの決定、補助工法の採用結果等の現場報告とそれに関連した研究は今後も継続し、変位量の予測精度は向上すると考えられる。

3. トンネルの坑内変位計測と測定結果

3.1 坑内変位量の管理

NATMが定着してから、切羽観察とともに坑内変位状況を把握するために内空変位測定と天端沈下測定が行われている。内空変位測定は図-1に示すようにトンネル掘削幅の変位状況を、天端沈下測定は図-2に示すように支保工の天端部の沈下量を計測する。切羽観察は一日に1~2回、内空変位測定と天端沈下測定はトンネル縦断方向に通常の地山では20m間隔に、軟質地山では10m間隔に、変位量が大きくなると5m間隔で行なわれる。この坑内変位計測はトンネル工事の品質管理の上で次のような役割を有している。

- ① 吹付けコンクリート等支保の変形の落ち着きを確認し、周辺地山と支保の適性を評価する。
- ② 支保の変形量を計測管理することにより、余掘り量、余巻量、覆工巻厚、内空断面等の出来形および品質管理が合理的にできる。
- ③ 支保の変形状況の落ち着きを確認することにより、二次覆工コンクリートの施工時期を判定する。

とくに設計巻厚を確保することは、トンネル構造物の品質管理の上で重要なことであるが、切羽の地質観察を疎かにすると、坑内変位の大きい区間であるにもかかわらず、他の区間と同じ断面で掘削することになり、坑内変位の小さい区間に比較して二次覆工の巻厚が結果的に薄くなり、設計巻厚を確保出来ない可能性も生じる。

この点がトンネル品質管理の基本的な問題の一つで、現場では切羽の地質観察を適切に行って、坑内変位が大きくなると予想される区間では、変形余裕を考慮して、断面の大きい支保工を設置したり、支保工を上越して設置する等の管理を行っている。

3.2 岩種毎の内空変位量

我が国のトンネル事例で、これまでに数多くのデータが収集分析され、表-1の岩石ごとの内空変位量がまとめられている²⁷⁾。

この表は高速道路トンネルの掘削時の切羽の地質観察と

内空変位計測結果を計測断面ごとにまとめたもので、以下のことが示される。なお平均内空変位量は最終内空変位量の平均値を示している。

- ① 深成岩、脈岩の全ての岩石と変成岩のホルンフェルス、火山岩の流紋岩、安山岩、石英安山岩、中・古生層の凝灰角礫岩、砂岩、チャート、第三紀層の砂岩、凝灰角礫岩、礫岩等が分布する地山では内空変位の平均値は20mm以下である。この平均値の数値から内空変位が局部的に大きくなったとしても、吹付けコンクリートに変状を与える50mm以上にはなり難いことが示されている。
- ② それに対して、変成岩の黒色片岩、緑色片岩、千枚岩、中・古生層の粘板岩、第三紀層の凝灰岩、泥岩、頁岩では内空変位量の平均値が大きい。これらの平均値の数値から、内空変位が大きい箇所では、吹付けコンクリートに変状を与える50mm以上になることも考えられる。特に千枚岩、泥岩、頁岩では平均値が既に80mmを示しているが、これは内空変位量が200~350

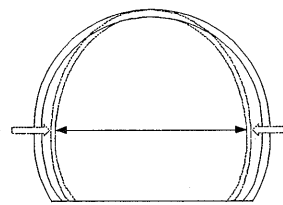


図-1 内空変位測定

Fig-1 Measurement of convergence,

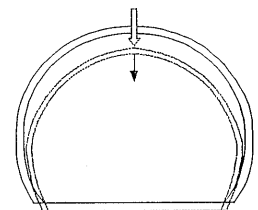


図-2 天端沈下測定

Fig-2 Arch crown settlement

表-1 岩石ごとの内空変位量²⁷⁾
Table-1 Convergence of each rock

	岩石名	総データ数	平均内空変位量
深成岩	斑れい岩	23	4 mm
	花崗岩	482	8
	花崗閃緑岩	47	10
脈岩	花崗斑岩	98	10
	石英斑岩	6	11
変成岩	ホルンフェルス	22	3
	黒色片岩	170	24
	緑色片岩	19	36
火山岩	千枚岩	12	80
	流紋岩	86	5
	安山岩	44	17
中古生層	石英安山岩	42	22
	角礫岩	23	5
	砂岩	108	16
第三紀層	チャート	40	19
	粘板岩	599	30
	砂岩	47	9
第三紀層	凝灰角礫岩	82	9
	礫岩	48	14
	凝灰岩	150	26
第三紀層	泥岩・頁岩	405	88

mmに達する変状した断面の計測値に影響されていることによる。これらの岩種でも多くの区間で内空変位量が50mm以下と考えられる。

3.3 内空変位量と地山強度比の関係

同様に計測事例をまとめた中で、内空変位量が地山物性値との相関を比較的明確に示すのは、地山強度比であると報告されている^{27)、28)、29)}。この地山強度比(α)は次式で示され、内空変位量と地山強度比の関係を岩種毎に示したのが図-3、4である。

$$\alpha = \frac{qu}{\gamma H} \quad (1)$$

qu : 地山の軸圧縮強度、 γ : 地山の単位体積重量
 H : 土被り厚さ

図-3の岩種は内部摩擦角が概ね30°以下でC地山とし、図-4の岩種は内部摩擦角が概ね30°以上で ϕ 地山としている。図-3、4より以下のことが考察される。

- ① 岩種によらず地山強度比が4以上になると内空変位量は50mm以下となる。地山強度比が4以上とは、地山の軸圧縮強度が土被り荷重の4倍以上のケースで、硬岩、中硬岩トンネルでは一般的な条件で、トンネル延長の大部分の区間が相当する。
- ② 図-3のC地山では、地山強度比が4以下になると大部分で内空変位量が50mm以上になる。内空変位量が50mm以上になると、吹付けコンクリートに亀裂が発生しはじめ、さらに内空変位量が大きくなると、ロックボルト、鋼製支保工の変状が発生する。
- ③ 図-4の ϕ 地山では地山強度比が2以下になると大部分で内空変位量が50mm以上となる。内空変位の大きい箇所の地質は、基盤の岩質とは異なって、破碎変

質や熱水変質で粘土質になった断層破碎帯や変質帯の部分であり、C地山と同様な地質性状である。

- ③ 岩種によらず、地山強度比が4以下の場合でも内空変位量が50mm以下の場合があるが、切羽現象を代表する地山部分より軟質な箇所の軸圧縮強度を採用しているためと考えられる。

3.4 天端沈下量と地山強度比の関係

同様に文献調査で、天端沈下量と地山強度比の関係を泥岩地山について作成したのが図-5である。この図より以下のことが考察される。

- ① 天端沈下量も内空変位量と同様に、変位量が50mm以上になるのは地山強度比が2以下の状態である。なお地山強度比が2以下でも、内空変位量が大きい場合には、支保の変形形状から天端沈下量が小さくなることもある。
- ② 地山強度比が5~8の場合でも天端沈下量が50mmに達することがあり、支保工脚部の支持力不足と考えられる。

文献調査の中で、天端沈下量が大きいと考えられるトンネルでは、設計段階で側壁導坑先進方式や中壁分割工法等の掘削工法で沈下対策が行われたり、施工時に脚部補強工等の補助工法が採用されていて効果をあげて天端沈下量が小さい事例も多く見られた。

支保工の剛性が弱い場合には鉛直作用土圧により支保工が変形して天端沈下量が大きくなることがあるが、このケースは支保の選定が不適切なケースである。

支保工の天端沈下現象は図-6に示すように、鉛直作用土圧に対する、支保工脚部の地盤の支持力との関係により、支持力が弱い場合に沈下現象が発生する。また内空変位が大きい場合には、支保工全体の変形形状から天端沈下量が小さいこともある。このように天端沈下現象

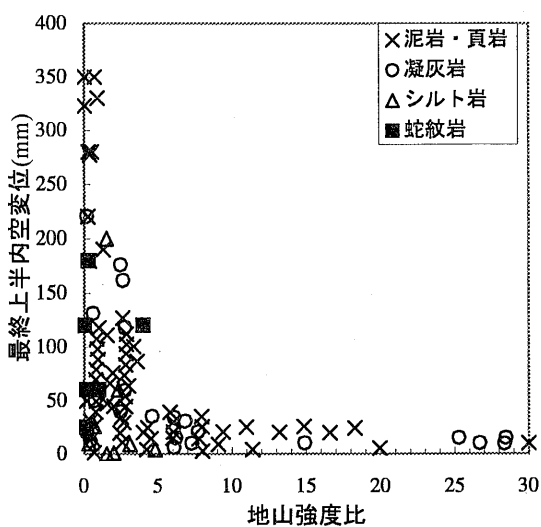


図-3 内空変位量と地山強度比 (C地山)

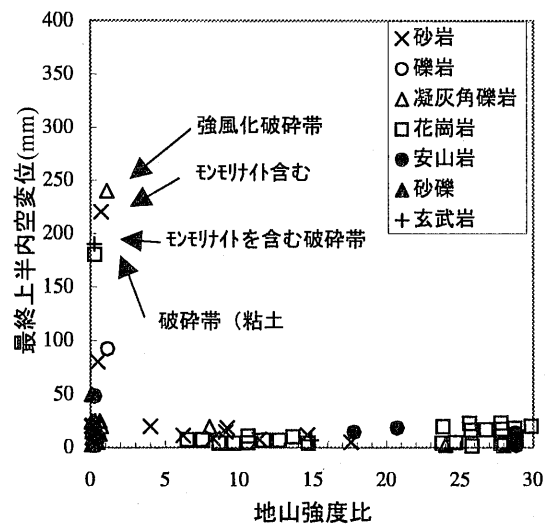


図-4 内空変位量と地山強度比 (ϕ 地山)

Fig-3 Relationship between competence factor and convergence (C-ground), Fig-4 (ϕ - ground)

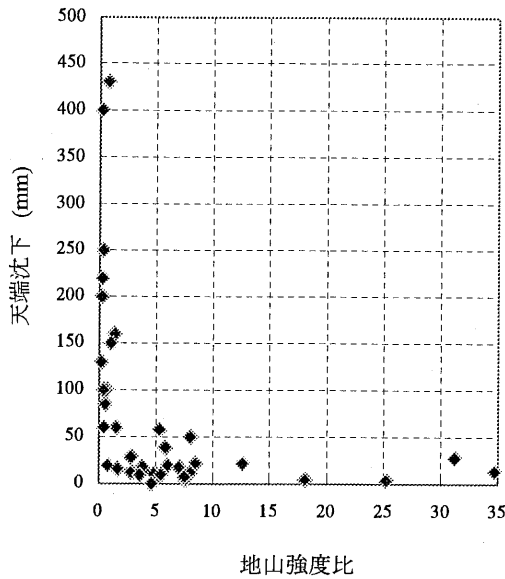


図-5 天端沈下量と地山強度比 (泥岩)
Fig-5 Relationship between competence factor and arch crown settlement (mudstone)

図-5のデータの一部は、(財)高速道路技術センター：北陸自動車道上越～朝日間総合検討(昭和62年度)第三紀層泥岩地帯におけるNATMの計測管理検討委員会報告書(総括)(日本道路公団新潟建設局委託)1988年9月 PP138～139による。

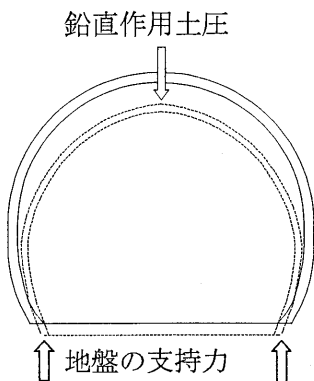


図-6 天端沈下と地盤の支持力
Fig-6 Arch crown settlement and bearing capacity of ground

は必ずしも内空変位量と相関するものでないことから、天端沈下測定の意義が存在している。

以上のことから、地山条件と天端沈下については、次のように考えられる。

- ① 一般に硬岩、中硬岩地山では、鉛直作用土圧は小さいのに対して地盤の支持力は大きいことにより、また吹付けコンクリートと地山との附着性が良いので天端沈下量は小さい。
- ② 地山強度比の低いトンネルでは、一般に鉛直作用土圧が大きいのに対して地盤の支持力が弱く、天端沈下量は大きくなり、施工法または補助工法で支持力対策が行われている。時には内空変位が大きい場合には、

支保の変形形状から、天端沈下が小さくなることもある。

- ③ 坑口部等に分布する、風化岩や未固結地山では地盤の支持力が弱く、小さい鉛直作用土圧でも天端沈下量は大きくなり、施工法または補助工法等で支持力対策が行われている。

4. 坑内変位に関する解析的考察

トンネル掘削による周辺地山の変位挙動を、理論的解析と数値解析により考察する。

4.1 理論的解析

理論的解析手法は、Kastnerの無限地山内の円孔における完全弾塑性解を用いて、側圧係数1.0とした場合の円形素掘りトンネルにおける塑性領域の算定式³⁰⁾を、(1)式の地山強度比で整理して(2)式となる³¹⁾。

$$\frac{\rho}{a} = \left[\frac{2}{\zeta+1} \frac{\gamma H(\zeta-1) + qu}{qu} \right]^{\frac{1}{\zeta-1}} = \left\{ \frac{2k}{\alpha} + (1-k) \right\}^{\frac{1-k}{2k}} \quad (2)$$

ただし ρ : 塑性領域の半径 a : トンネル掘削半径

$$\alpha : \text{地山強度比} \quad \zeta = \frac{1+k}{1-k}$$

$$k = \sin \phi \quad \phi : \text{地山の内部摩擦角}$$

解析結果は図-7に示すように、素掘りトンネル(側圧係数1.0)の場合に塑性領域が生じるのは、地山強度比が2以下の場合である。地山強度比が1よりも小さくなると塑性領域は大きくなり、内部摩擦角が小さい程塑性領域は大きくなる。この解析では、塑性領域が大きい程、坑内変位量が大きいことを示している。

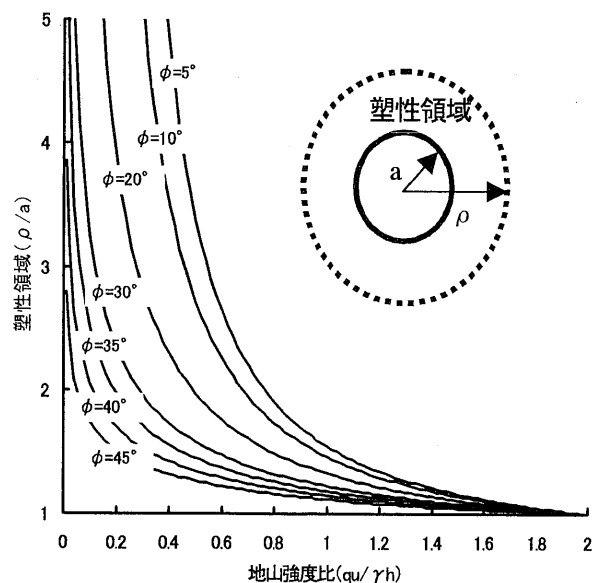


図-7 円形素掘りトンネルの塑性領域と地山強度比の関係
Fig-7 Relationship between competence factor and plastic area around circular tunnel

4.2 二次元数値解析²⁸⁾

理論解析で、円形素掘りトンネルの変位挙動を把握したが、ここでは現実のトンネル条件に近似して、2車線道路トンネルの馬蹄形で全断面掘削とし、支保はDIIパターン（吹付け厚20cm、H-150、1mピッチ）で二次元弾塑性解析を行った。数値解析における地山強度比の設定に際しては、一軸圧縮強度（ q_u ）を4N/mm²と固定し、地山強度比が0.3、0.5、0.7、1.0となるように土被り高さを変化させた。内部摩擦角（ ϕ ）は10°、15°、30°の3ケースとし、地山の弾性係数（E）はE=100 q_u 、粘着力（C）は一軸圧縮強度（ q_u ）と内部摩擦角（ ϕ ）から（3）式を使用して算出した。

$$q_u = \alpha \cdot \gamma \cdot H = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{(1 - \sin \phi)} \quad (3)$$

ここに q_u : 一軸圧縮強度、 α : 地山強度比、
 c : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角

変位量は上半内空変位を示し、インバートを設置する前の状態で解析している。そのために変位量は実際の場合よりも大きい値の傾向にあると考えられ、解析結果は図-8に示すとおりで次のように考察できる。

- ① 地山強度比が1.0の場合には内空変位量は50mm以下であった。
- ② 地山強度比が0.5の場合には内部摩擦角が30°の地山では、10°の変位量の半分になり、さらに地山強度比が0.3の場合には1/3程度であり、内部摩擦角が小さいほど内空変位量は大きくなる。

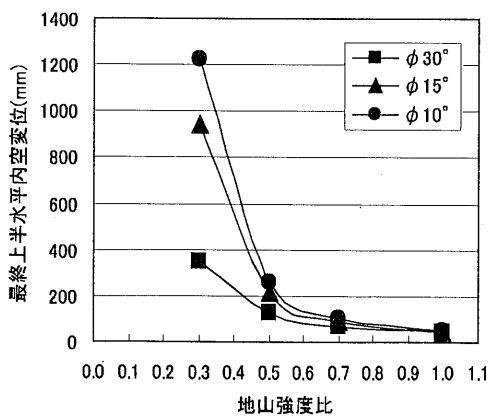


図-8 弾塑性解析から得られた内空変位と地山強度比の関係

Fig-8 Relationship between convergence and competence factor by elasto-plastic analysis

4.3 三次元数値解析³²⁾

切羽近傍と周辺地山の塑性領域の発生状況を検討するために、地山強度比と内部摩擦角をパラメータとして、三次元FEM弾性解析を行い、得られた地山内の応力分布の中で、モール・クーロンの破壊基準を越える部分を

塑性領域として算定した。解析モデルは、地山を線形弾性体、トンネルの半径は5mの上半円断面とし、解析領域はトンネル下方に10D、トンネル側方に10Dをとり、トンネル軸方向は108mの範囲とし、対象性を利用した1/2モデルとした。

支保として15cm厚さの吹付けコンクリートの閉合断面を想定し、解析手順としては掘削長40m、5m、3m、2m、1m、1m、1mの逐次掘削解析とした。解析条件は表-2に示す。なおせん断定数については（3）式を用いて計算した。

なお切羽周辺の塑性領域の概念図を図-9に示す。

表-2 解析条件

Table-2 Analytic condition

地山強度比 α	単位体重量、 γ (kN/m ³)	土被り H(m)	ポアソン比 ν	初期側圧係数 K	変形係数 E(MPa)
0.3 ~ 1.0	23	200	0.3	1	E=100 q_u

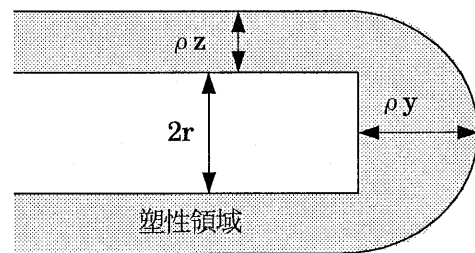


図-9 塑性領域の分布

Fig-9 Distribution of plastic area around tunnel

解析の結果を図-10に示す。三次元解析の結果では、地山強度比が1.0以下になると、内部摩擦角と地山強度比が小さくなるほど、トンネル周辺地山の塑性域は大きくなる。

図-10では、内部摩擦角が0で、地山強度比が0.5の地山条件で支保工の剛性を2倍に上げると塑性領域は約3割小さくなり、5倍に上げると塑性領域は半分以下の結果となっている。従って、坑内変位の大きいトンネルでは支保工の剛性が変位抑制効果を有していることが示されている。

同様に図-11は切羽前方の塑性領域についての解析結果である。

この図によると、地山強度比が1.0で、内部摩擦角が0°の場合には、30°の場合と比較して、切羽前方の塑性領域は約2倍となり、地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角が小さい程、切羽前方の塑性領域は深くなる。また内部摩擦角が0で、地山強度比が0.5の地山条件で、支保の剛性を2倍にしても、切羽前方の塑性領域深さは変化していない。すなわち支保の剛性を強くした場合は、図-10のようにトンネル周辺地山の塑性領域は小さくなるが、

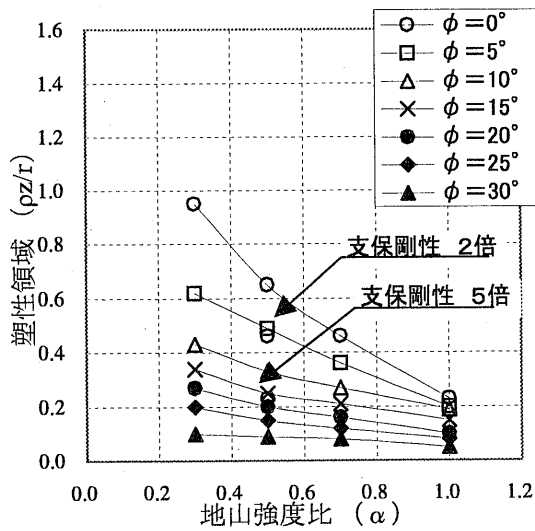


図-10 地山強度比と周辺地山の塑性域の関係
Fig-10 Relationship between competence factor and plastic area around tunnel

切羽前方の塑性領域を小さくできないことを示している。地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角の小さい地山条件ではトンネル掘削時に切羽前方に塑性領域が形成されることが示されていて、切羽前方の塑性領域を小さくするには、切羽前方補強工等の自立性対策工法が必要と考えられる。

4.4 解析結果についての考察

以上のように理論解析と数値解析を行った結果、以下のことが考察できる。

- ① NATMで支保に変状をもたらすレベルの、坑内変位量が50mm以上になるのは地山強度比が1.0以下の場合である。一般に2.0といわれて来たが、それは素掘りトンネルの場合で、2.0から1.0に低減しているのは支保剛性の効果と考えられる。
- ② 地山強度比が0.7以下になると、内部摩擦角が小さい地山ほど、地山強度比が小さくなるほど、トンネル掘削時の坑内変位量は大きくなる。
- ③ 地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角が小さい地山は、後述のように地殻変動、構造運動等により破碎変質を受けて、割れ目に粘土が充填されたり、岩石自体が粘土化している地質状態と推定される。
- ④ 地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角が小さい地山では、トンネル掘削により切羽前方に塑性領域が発生し、塑性領域の深さは両強度定数が小さい程大きい。切羽前方の塑性領域を小さくするには、トンネル支保の剛性に関係せず、別途切羽補強工が必要になると考えられる。

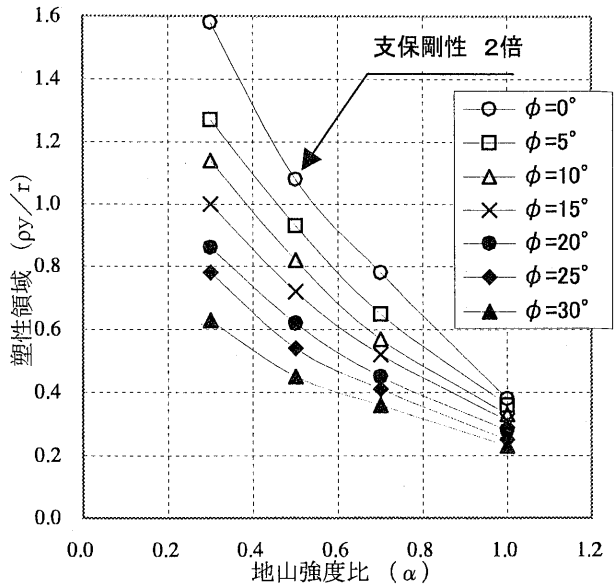


図-11 地山強度比と切羽前方の塑性領域の関係
Fig-11 In front of face

5. 大きい坑内変位を生じる岩質と地山物性値

大きい坑内変位が生じる地山は、昔より膨張性地山と呼ばれ、しばしば強大な土圧が作用して支保工が変形したり、切羽崩壊等で、難工事に陥っている。これまでの施工事例で明らかな膨張性地山の典型には、蛇紋岩と泥岩とがあり、地山の成因の異なりも影響して、トンネル掘削時の地山の判定に若干の相違があるので、それぞれのトンネル事例と地山物性について考察する。

5.1 蛇紋岩地山

蛇紋岩は三郡変成帯、三波川変成帯、神居古潭変成帯、日高変成帯等に部分的に分布している。蛇紋岩の成因は、地殻深部より固体状で貫入およびメランジュ構造等で地表近くに至ったもので、地殻内の上昇過程で周辺岩盤を破碎すると共に、自らも破碎変質し、葉片状～粘土化していく。蛇紋岩の岩盤性状は、巨礫状の硬質な塊状蛇紋岩、葉片状に細かく薄い割れ目が発達する葉片状蛇紋岩、粘土質蛇紋岩に分けられるが、多くの場合には、これらが図-12のように混在している。新登川トンネルにおける切羽観察と支保工に作用する土圧の計測結果から、切羽に塊状蛇紋岩が占める面積比率と作用土圧の関係を図-13¹⁰⁾に示す。この図で、葉片状～粘土質蛇紋岩が切羽に占める面積が多いほどトンネルに作用する土圧が大きくなり、支保の変形量が大きくなることを示している。近鉄志摩線の青峰トンネル³⁰⁾では延長600m区間に蛇紋岩が分布しているが、大部分の区間が塊状蛇紋岩のために空変位量も30mm以内と小さいことが報告されている。国道128号線嶺岡トンネル^{13) 14) 15)}は房総半島の南部を東西に分布する嶺岡山地を南北に横断する延長720m

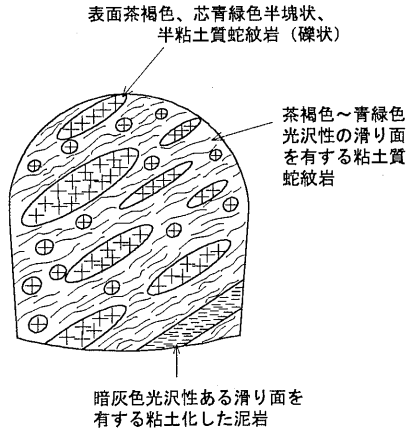


図-12 蛇紋岩の切羽スケッチ (嶺岡トンネル)
Fig-12 Sketch of face section in serpentinite

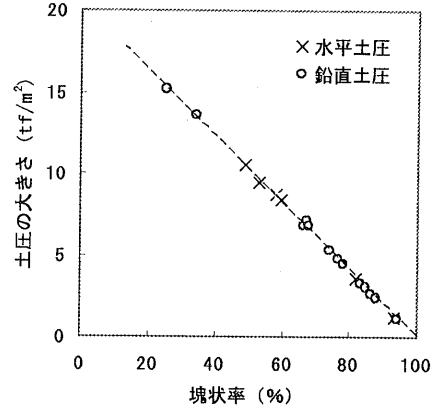


図-13 トンネルに作用する土圧と蛇紋岩の塊状率の関係¹⁰⁾
Fig-13 Relationship between earth pressure and massive rate of serpentinite

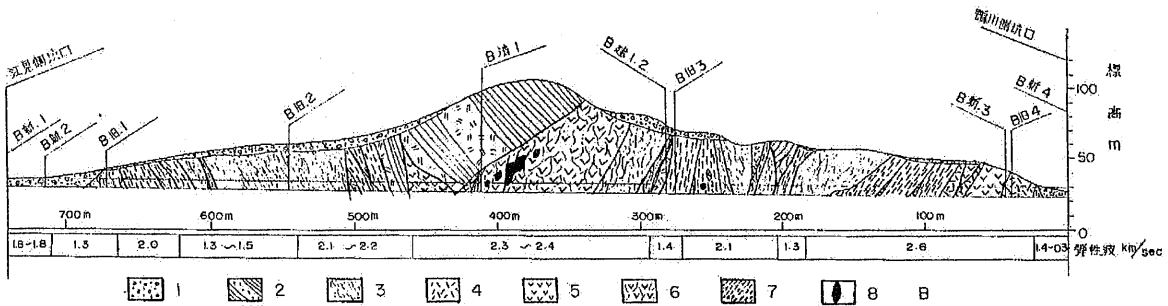


図-14 嶺岡トンネル地質縦断図と支保の変状区間と地山強度比分布
Fig-14 Longitudinal section of geology and distribution of competence factor in Mineoka Tunnel

の道路トンネルで、トンネル掘削終了時の地質縦断面図は図-14に示す。トンネルには、蛇紋岩、玄武岩、泥岩、砂岩、凝灰岩、斑れい岩等が分布し、全延長にわたり蛇紋岩、玄武岩、泥岩は破碎されて葉片状～粘土化していて、その中に蛇紋岩、玄武岩、砂岩、凝灰岩、斑れい岩の塊状部が取り込まれている。トンネル施工法は在来工法の側壁導坑先進上部半断面工法で、全延長にわたって工事中に強大な土圧が作用して、鋼製支保工の座屈変状、矢板の破損等で難工事を強いられた。

図-14に示すように、鋼製支保工が座屈変状し、矢板の破損が著しい区間はいずれも葉片状～粘土質蛇紋岩、鱗片状破碎質玄武岩、鏡肌の多い粘土化した泥岩が分布して地山強度比も概ね0.7以下であった。それに対して変状の比較的少ない区間では、蛇紋岩、玄武岩、砂岩、凝灰岩、斑れい岩の塊状部が主に分布している区間でその間に破碎された葉片状～粘土質岩が存在しているが、この区間の地山強度比は概ね1.0以上であった。図-14に示すように蛇紋岩が分布するトンネルでは、分布域周辺までも破碎変質を受けていることがあり、トンネル縦断方向で作用地圧の程度が地山状態により大きく変化していることが示されている。

嶺岡トンネルで上部半断面を掘削中に、鋼アーチ支保工の基礎である側壁コンクリートが約50mm沈下したために、導坑内で平板載荷試験を行った結果は、表-3³³⁾のとおりで、掘削後の経過日数とともに地山の支持力は

表-3 粘土化した泥岩の短期許容支持力

Table-3 Allowable bearing capacity a short term of clayish mud stone in Mineoka Tunnel

	掘削後の経過日数		
	1日	4日	8日
粘土化泥岩	110	81	45 t/m ²

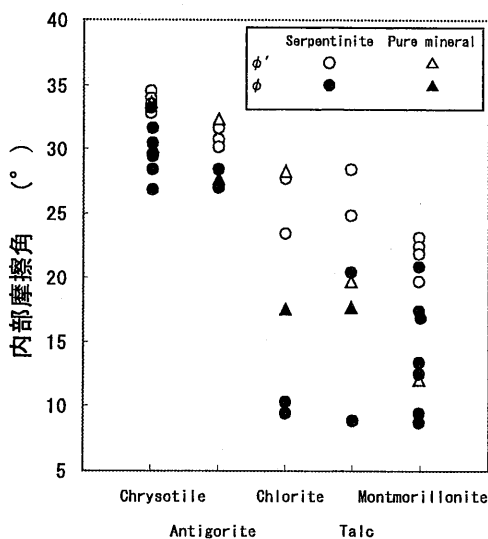


図-15 粘土質蛇紋岩の鉱物と内部摩擦角³⁴⁾

Fig-15 Distribution of internal friction Angle and mineral of clayish serpentinite

低下している。

図-15は地すべりににおける粘土化した蛇紋岩の構成粘土鉱物の内部摩擦角の試験結果である³⁴⁾。これによるとクリソタイル、アンチゴライトの内部摩擦角が約30°であるのに対して緑泥石、滑石、スメクタイト（モンモリロナイト）の内部摩擦角は30°以下と小さい。葉片状および粘土質蛇紋岩地山はこのように、地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角が30°以下の粘土鉱物含有していることから、坑内変位が大きくなると考えられる。このように蛇紋岩地山は、硬質岩と軟質岩が混在していて、支保の変形現象を代表する地山部分を土質試験することは一見困難に考えられる。嶺岡トンネルでは、現場に土質試験室を設置して、切羽の軟質部の試料を用いて数多くの一軸圧縮強度試験を実施した結果、図-14のように比較的精度の良い地山強度比分布と支保の変状との相関が得られたと考えている。

5.2 泥岩地山

割れ目の少ない泥岩は、一般的に良質地山で、トンネル掘削による内空変位量は小さいが、北陸自動車道の地蔵トンネル³⁵⁾において地すべり域の下を通過する区間では、図-16のように割れ目の多い破碎された泥岩が分布し、内空変位量は大きく、導坑支保の変状により縫返し掘削を行っている。このような泥岩地山の破碎変質帯は頸城トンネル³⁶⁾、能生トンネル³⁷⁾、春日山トンネル³⁸⁾でも遭遇し、いずれも内空変位が大きく難工事であった。これらの地山では、基盤岩が破碎変質されているために、地表面は地すべり域になり易く、一般に膨張性地山の地表面には地すべりが分布すると認識されている。

我国の泥岩質地山のトンネルで、最も難渋した工事は新潟県北越北線の鍋立山トンネルであるが、その地質縦断面図¹²⁾を図-17に示す。地質は第三紀中新世ないし鮮新世に属する寺泊層(T)、椎谷層(S)、西山層(N)からなっている。ほぼ中央の儀明背斜軸は構造主軸の一つで、顕著な褶曲をなし、寺泊層がこれに沿って狭い範囲に分布していて、これを軸として両側に椎谷層、西山層が対象的に分布している。この図にトンネルの掘削工程と地山強度比、自然含水比を併記しているが、儀明背斜軸と蒲生背斜軸付近で、切羽崩壊と支保工の大変形で難渋している。とくに蒲生背斜～向斜軸区間では破碎細片化された低強度暗灰色泥岩で、自然含水比も他の区間より高く30%近くあり、かつ可燃性ガスが加圧された状態で存在し、単線の小断面トンネルにもかかわらず、中央先進導坑式の円形トンネルで剛性のある支保工を採用したが、切羽崩壊や支保の変形が発生し、縫い返し掘削を余儀なくされた。そして蒲生背斜～向斜軸区間では薬液注入工法で周辺地山強度を改良してトンネル施工を完成することができた。

仲野良紀は長年の研究により²⁰⁾、鍋立山トンネルについて、泥岩が破碎変質して、粘土化し、泥岩強度が限界状態にある含水比を試験で、土被り厚が150mの場合は

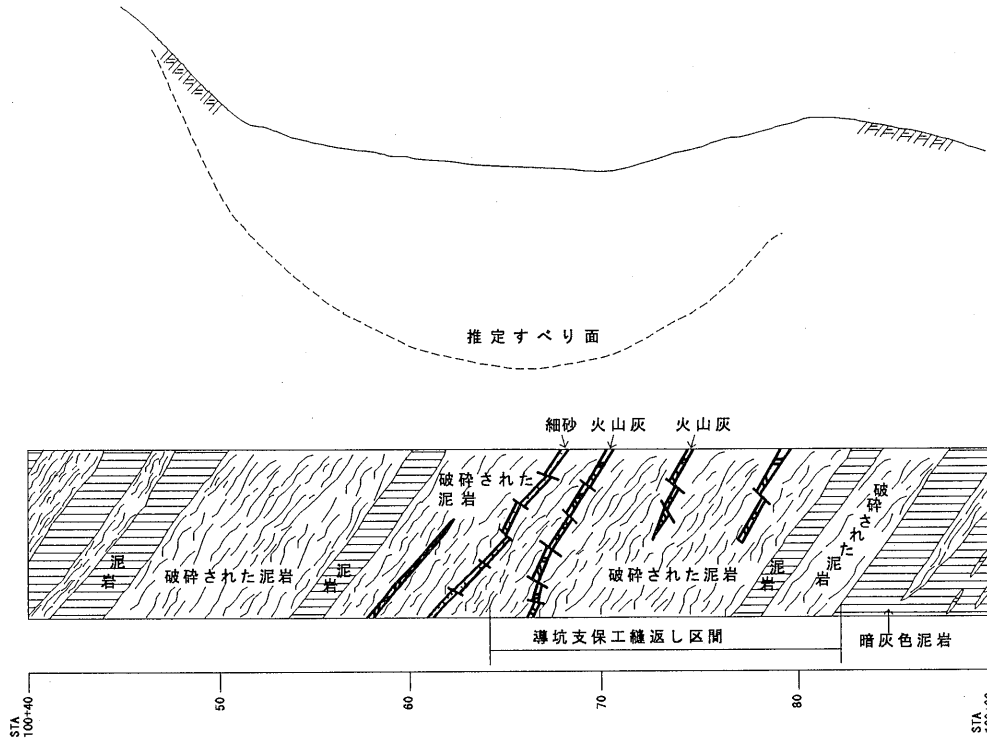


図-16 地蔵トンネルの地すべり域の地質縦断面図
Fig-16 Longitudinal section of geology in Jizo Tunnel

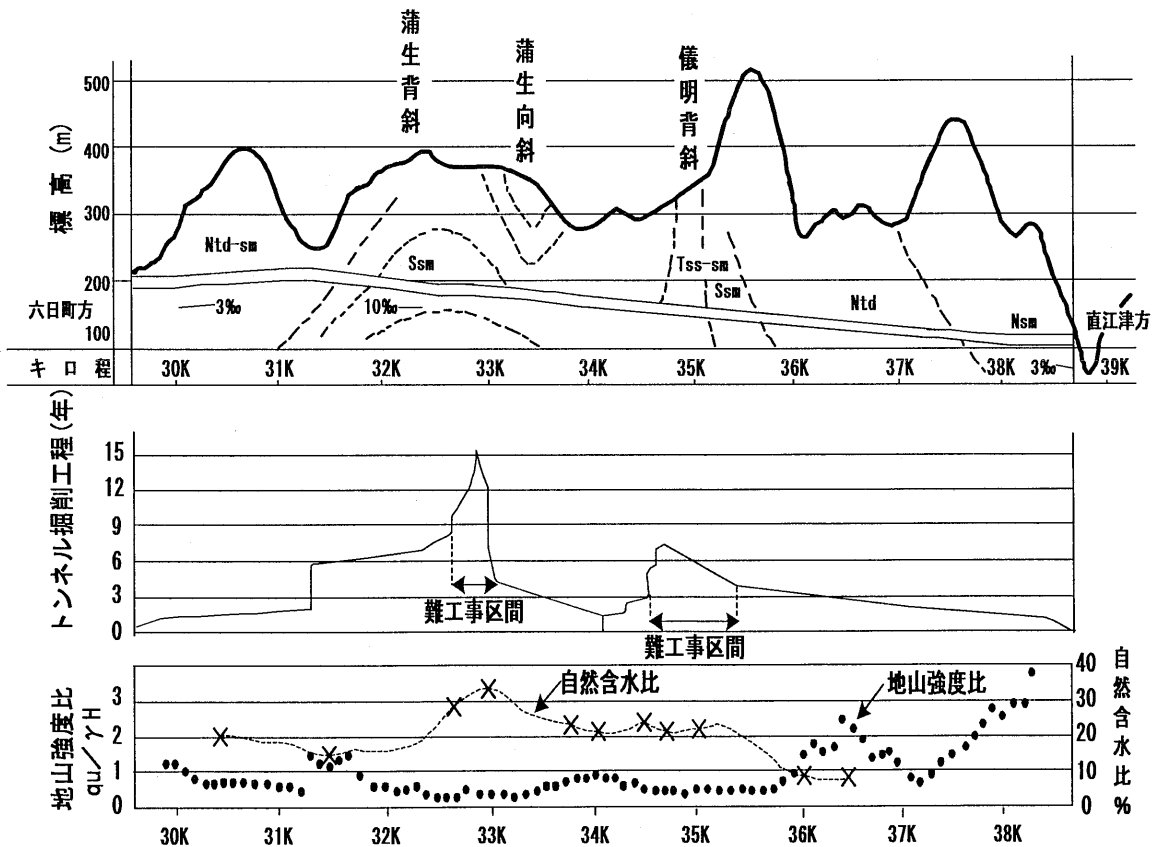


図-17 鍋立山トンネルの地質縦断面図、工事工程表、地山強度比と自然含水比
Fig-17 Longitudinal distribution among geology, construction process, competence factor and water content in Nabetateyama Tunnel

25%、さらにガス圧が存在する場合は28%を算定し、トンネル縦断方向の自然含水比と膨張性の程度との関係について報告している。

5.3 坑内変位の大きい地山の物性値

坑内変位量の大きいトンネルの周辺地山の物性は、前述のように理論的に地山強度比が1よりも小さく、内部摩擦角も30°より小さい場合であることが判明している。その地山状態は岩種に関係せずに、割れ目が発達している、割れ目に粘土が介在している。その一例として、図-18に砂岩と頁岩の互層地山に小断層が分布する切羽の地質観察例を示す。

小断層により砂岩層には段差変位が生じているのに対して、頁岩部では断層に沿って割れ目が広がり、頁岩内の接触により割れ目に粘土が生じる。

図-19は泥岩の割れ目に介在する粘土部分の含水比と、泥岩部分の含水比の分布状態を計測した事例で、割れ目の粘土部分の含水比は基盤部分に比して高いために、割れ目が存在する泥岩は、割れ目が多いほど含水比が高くなり、圧縮強度は低下する。

割れ目の存在する泥岩の内部摩擦角の値は、粘土鉱物にスメクタイトや緑泥石が存在したり、2μ以下の粒子の含有率が大きく、自然含水比が高い場合には、一般的

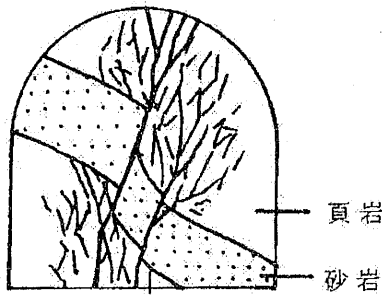


図-18 砂岩と頁岩の断層分布の例 (頁岩部の割れ目の広がり)

Fig-18 State of broken rock around small fault

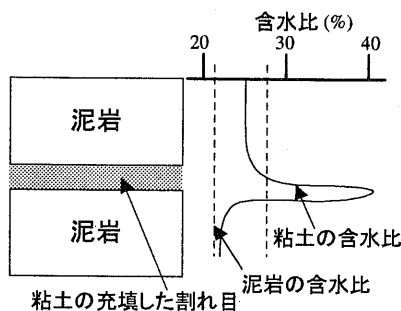


図-19 泥岩の割れ目付近の含水比分布¹⁷⁾

Fig-19 Distribution of water content around crevices in mudstone

に低くなる。

図-20は、蛇紋岩(塊状、葉片状、粘土質)と新潟付近の泥岩、横浜付近の土丹、泥岩について一軸圧縮強度と自然含水比の関係と単位体積重量と自然含水比の関係を示し、それぞれトンネルの内空変位量が50mm以上と以内に区分している。

この図より、数値のバラツキは存在するが、泥岩の場合には地層の生成環境により異なるが、それぞれに一軸圧縮強度と自然含水比との相関がみられる。蛇紋岩は葉片状~粘土質になると、含水比は20%前後と低くても、泥岩に比して一軸圧縮強度が著しく低い。このことから、葉片状~粘土質蛇紋岩は土被り厚さが小さくても、坑内

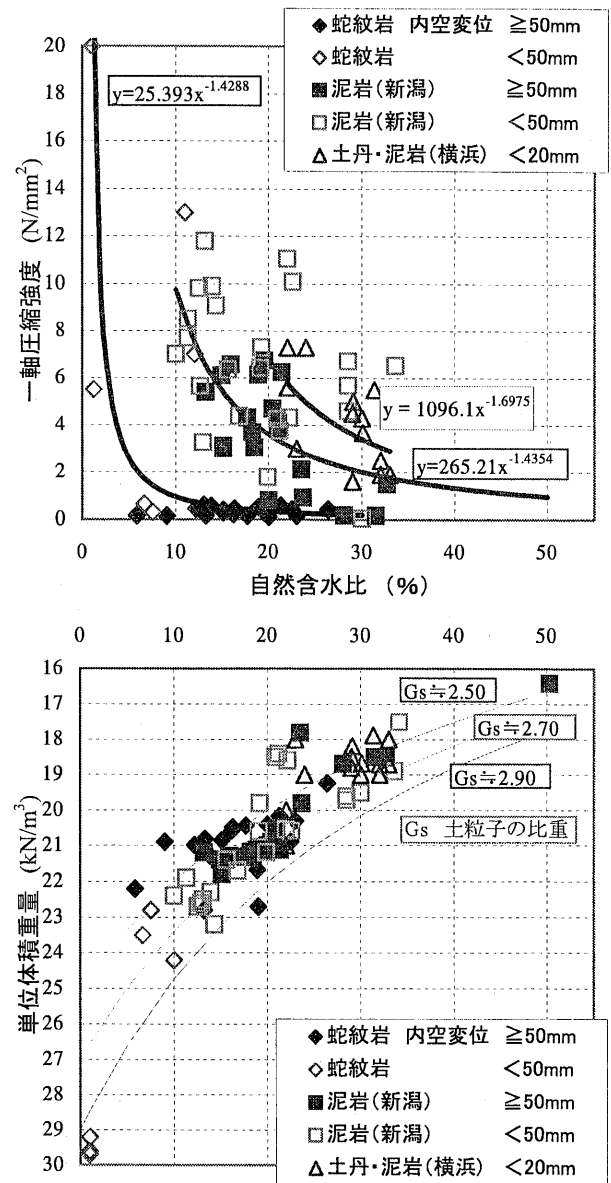


図-20 一軸圧縮強度含水比、単体体積重量の関係

Fig-20 Relationship among unconfined compressive strength, water content and weight

変位が大きい場合が有りえることを示唆していると考えられる。

岩石を構成する土粒子の比重 (G) は岩石毎にほぼ一定であるので、単位体積重量および自然含水比が試験で求められると、図-20により一軸圧縮強度が推定できることになる。この方法により、軟質地質が分布して、力学試験の供試体が整形できない場合でも、自然含水比および湿潤単位体積重量を把握することにより、地山の一軸圧縮強度を推定できる。

従来の方法では一軸圧縮強度試験を行った切羽のみ地山強度比が求められたが、この方法は、一軸圧縮強度試験を行わなくても地山強度比が推定できることから、多くの切羽で計測値と理論値の乖離は少なくなる可能性が高い。そして現場においてトンネル施工管理としての、支保工の断面管理の技術向上に役立てられることが期待できる。

6. 坑内変位の大きいトンネルと切羽地質状態の分類

坑内変位が大きいトンネル事例を文献調査した内で、地質状態と内空変位量、天端沈下量が50mm以上の事例を検討し、定性的に切羽の地質状態を分類したのが図-21である。この図では、トンネル事例を軟質部の形状ごとにまとめて、変位量50mm以上の区間長さが100m以内、100~500m、500m以上の3つに区分していて、かつ内空変位量と天端沈下量が共に50mm以上の場合と内空変位量のみが50mm以上の場合とを区分している。なおNATM以前のトンネルの場合には、支保工の変状発生区間を基本としていることから、膨張性地山トンネルが該当している。図-21に分類した切羽の地質状態の特徴は下記に述べる。

- ① 上越新幹線中山トンネル³⁹⁾のように、軟質の堆積岩が地質構造的変形を大きく受けていないで整然とした地層にもかかわらず、土被りが大きいために地山強度比が小さく、かつスメクタイトのような粘土鉱物を有するために内部摩擦角も小さい場合で軟岩質地山に該当する。坑内変位量は土被りが深い箇所大きく、その区間は土被りの深い区間長さに規定され、変位量の大きい区間が長くなるケースが多い。
- ② 東北新幹線岩手トンネル⁴⁰⁾は、軟質の堆積岩で地質構造的変形を大きく受けていない整然層であるが、土被りが大きいために地山強度比が小さく、かつ内部摩擦角も小さい。さらに、初期水平応力が土被り荷重(初期鉛直応力)の数倍に達すると想定されたために、切羽から実施した水平調査ボーリングのコアがディスク現象を呈したり、トンネル天端部の支保の剥離現象等が発生している。変位量の大きい区間は、軟質地層の分布でかつ初期水平応力の大きい区間となる。
- ③ 北越北線鍋立山トンネルや国道128号線嶺岡トンネルのように、切羽全面に破碎された泥岩や粘土質~葉片状蛇紋岩および断層粘土等の一軸圧縮強度の低い地質が分布する場合は、地山強度比が小さい程、また内

部摩擦角の小さい粘土鉱物の含有率が多い程、坑内変位量は大きい。また図-24のメランジュの例を含めて、このような地山の前後には、基盤岩を角礫状に含み、その間の基質部は基盤岩が破碎された状態の区間が存在することが多い。この場合、基盤岩の角礫が切羽に占める面積が大きい程、坑内変位量は小さくなる。坑内変位量の大きい区間は、破碎変質した地質区間の長さとなり、一般的に長くなる場合が多い。

- ④ 軟質部と硬質部が互層状に分布して、軟質部が破碎変質を受けている場合で、軟質部が泥岩、千枚岩および粘板岩のメランジュ地山などが該当する。切羽で軟質部が占める面積が大きく、その部分の地山強度比が小さいほど、坑内変位量は大きくなる。坑内変位量の大きい区間は破碎変質を受けた地質の分布区間に関係するが、一般的にその延長は長くなる場合が多い。
- ⑤ 切羽に軟質部が帯状に分布して、その両側の基盤岩も弱く変質を受けている場合で、断層破碎帯粘土、および破碎された凝灰岩や泥岩層等がある。軟質部が切羽に斜めに分布する場合には、偏圧と盤ブレが発生し、軟質部が水平から流れ目の場合には、切羽のすべり崩壊や、大きな坑内変位が発生する。坑内変位の大きい区間は、帯状の軟質部とトンネルとの交差区間で、トンネルに平行状に軟質部が分布する場合には、延長が長くなり、トンネルと直交に近い場合は短くなる。このような地質が分布する切羽では、軟質部が難透水性を有するために背後の滞水層を遮水していて、掘削の影響で湧水を伴った急激な崩壊を生じることがあるので注意が必要である。
- ⑥ トンネル掘削域内は非変質~弱変質の基盤岩であるが、近接して軟質部が分布する場合で、切羽観察では把握できないことが多く、主に偏圧状に変形したり、時には地下水が変状を助長することがある。切羽が進行するにつれてロックボルト施工時に軟質部の存在にはじめて気付くことが多い。さらに進行すると軟質部が切羽に出現し、前項の形状に移行することが多い。
- ⑦ 藤枝バイパス谷稲葉トンネル⁴¹⁾等の一部区間では、トンネル掘削により地すべり挙動を誘発し、地すべり面がトンネル断面内の場合とトンネル天端上の場合いずれも、内空変位または切羽の押し出し量は大きい。これらのトンネルでは、図-16のように地質構造的に破碎変質を受けた地山の既地すべり域内、または地すべり土塊の下を通過しており、移動土塊だけでなく基盤岩部分の地山物性値も低い場合に内空変位は大きい。

図-21で示した地山状態と地質区分のおおよその対応をみると、整然層の場合は第四紀層と第三紀層で、全面破碎変質と硬軟混在の場合は第三紀の泥岩・頁岩、蛇紋岩、凝灰岩等の火成岩類、断層破碎帯、等からなる地山に、硬軟混在、硬軟互層、帯状軟質、断面外軟質の場合には中・古生層の断層破碎帯と壁開やクラックの著しいメランジュ地山に多い。また図-21の全ての状態に多

地質状態		地山状態		変位量50ミリメートル以上の区間長さとトンネル名 (注1、2)	
全面軟質	整然層①②		地層の変形、変質は少ない軟岩で一軸圧縮強度は小さく、スメクタイト等の粘土鉱物を含み、一軸圧縮強度に比し土被り変形は特に大きい。	100m未満	M: 金田一、塩谷川放水路 T: 駒止、
	破碎変質全面③		断層破碎帯、構造運動等で岩質全体が大規模に破碎変質を介在する。断層破碎帯の場合、変質粘土帯の背後に帯水部が存在すると急激に崩壊することがある。	100~500m	M: 鍋立山、折渡、頸城、赤倉、飯山、能生、第一白坂、日振 S: 神居、新登川、横岡、大清水 F: 恵那山、朝日 Gr: 大杉 T: 青函、折爪
全面混在	硬軟混在③		硬質岩を角礫状に含み基質部は上の項と同様な破碎変質を受けているメランジュ地山等。硬質礫部が切羽に占める面積が多し、土圧は小さい。破碎変質部の一軸圧縮強度のばらつきは一般に大きい。		M: 大頭、信濃川水力第一、新榎 T: 新宇津 S1: 明神
	硬軟互層④		硬質と軟質が互層状に分布し、大半は軟質部で、上の項と同様な破碎変質を受けている。硬質部の一軸圧縮強度を算定すると大きすぎることとなる。		M: 妙口、浦佐、第二白坂、会田、堀越第三、聖ヶ丘、郷ノ峰、太刀野 T: 丸子 I: 宜名真、大山、
部分的混在	带状軟質⑤		非変質部は中硬岩〜軟岩で、軟質部は破碎帯粘土や破碎性凝灰岩、泥岩の場合でアーチ支床には偏圧状に土圧が作用し、インバートは軟質部に盤ぶくれを生じることがある。軟質部の地山強度の影響が大きい。		M: 御牧原(水平) F: 池田第三、新神戸、新芦谷、下久野 T: 釜山、
	断面外軟質⑥		トンネル掘削域内は非変質の軟岩であり、掘削直後は軟質部の存在に気付かないことがある。軟質部は断層破碎帯や破碎変質岩が分布し、時に地下水が変状を助長する。この場合地山強度比は大きくなる。		F: 新親不知
	地すべり⑦		地すべり面がトンネル内およびトンネル上部にあつて、基盤岩は破碎変質を受けている。トンネル掘削により地すべり挙動を誘発し易く、誘発した場合にはトンネルに作用する土圧も大きい。		M: 第三大沢、日暮山、谷稲葉 S: 嶺岡、

注1) T: 凝灰岩、M: 泥岩、頁岩、S: 蛇紋岩、C1: 温泉余土、F: 断層破碎帯、S1: 粘板岩、片岩、Gr: 塩基性緑色岩類
 注2) アンダーラインのあるトンネルは内空変位、天端沈下量が50mm以上の場合、無印のトンネルは内空変位量が50mm以上の場合

図-21 変位量の大きいトンネルの地山状態の分類と変位区間長 Fig-21 Geological classification and section length with large deformation

く適応しているのは、第三紀層の泥岩・頁岩の断層破碎帯や変質帯を主としているが、地表では見分けの難しい潜在的破碎帯が少なくないようである。

このように切羽の地質状態を、定性的に分類することにより、設計段階で有限要素法等の解析に際し地山モデルを作成する場合には、単純に地山を等方等質と仮定せずに現実に近い地質分布をインプットできるので解析精度が向上すると考える。とくに土質定数は、軟質部と硬質部のそれぞれについて試験で求められれば、解析結果の精度はさらに向上すると考えられる。

前述の図-3, 4の計測値が、4章に示した解析値に比してバラックのは、地山強度比を算定する際に使用した一軸圧縮強度の試料採取箇所の岩質が地山の変位挙動を反映する部分でなかったことに起因していると考えられる。

したがってトンネル掘削時には、切羽の地質分布を確実に記載するとともに、地山状態を考慮して軟質部および硬質部の土質試験を多く実施することがバラッキの少ない変位挙動を推定できる手法と考えられる。なお前述のように軟質部の力学試験の試料採取が出来ない場合には、図-20に示すように、地山の含水比および単位体積重量を試験することにより、一軸圧縮強度を推定する方法が提案できる。

7. 地質構造と粘土の成因

我国のトンネル事例の内、坑内変位が50mm以上発生した区間の地質、地質構造および地質の状態をまとめた

のが表-4である⁴⁸⁾。いずれの場合も破碎変質を受けて、粘土化している様子が示されている。このような地質が切羽に現れた時に、現場技術者は、変位量について検討すると共に、トンネル延長での地質分布を知る必要性に迫られる。また、破碎変質を受けているために、地質構造が複雑であることから地質分布の予測も困難であることが多い。地質分布や性状を調べるには、現在の地質状態が形成された過程および成因を知ることが大切である。蛇紋岩については既に述べているので、ここでは中・古生層の付加体と第三紀泥岩について述べる。

7.1 中・古生層の付加体における構造特性

日本列島の中・古生層（四万十帯では古第三系を含む）の大半は、メランジュを含む付加体の堆積岩類からなる。付加体ではない正常な古期堆積岩類は、南部北上山地（全部）や飛騨山地・中国地方の一部などに分布している。付加体の地層の成因・形成過程は第三紀層など通常の堆積岩類とは根本的に異なるため、岩相や地質構造に特徴があり、断層や割れ目が多く複雑である。変位の大きい中・古生層のトンネル地質に対処するためには、その形成過程特に地質構造を理解しておくことが肝要である。付加体堆積岩の構造的変形過程には、以下に述べるように、少なくとも4-5回の年代を異にする段階がある。

まず堆積時ないし堆積直後の現象として、① チャート・玄武岩質火山岩・石灰岩・珪質頁岩といった遠洋性堆積物がプレート運動により陸側に移動し、海溝部で次々と陸側に付加する。付加の際、陸源碎屑物の砂岩・泥岩

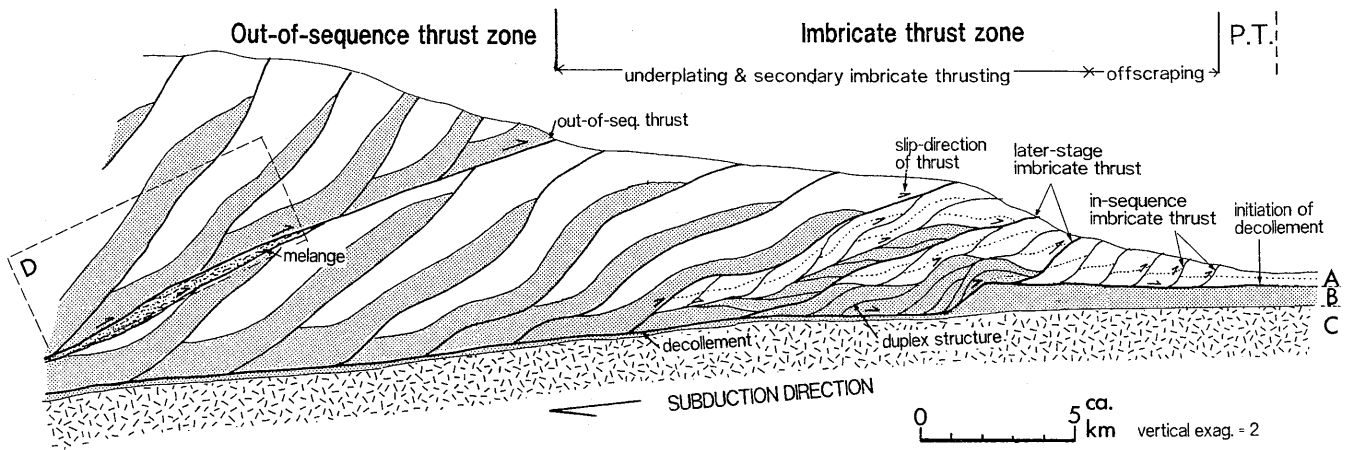


図-22 ジュラ紀付加体（美濃帯）の構造形成復元図（Kimura, 1997）⁴⁹⁾
 瓦を斜めに重ねたような覆瓦構造が特徴で、多数の衝上断層（thrust: 図中太線）によって、地層が繰り返す。
 A: 砂岩・頁岩の碎屑岩相, B: チャート・珪質頁岩・緑色岩など, C: 海洋性地殻で主に玄武岩層
 Figure-22 Schematic cross section suggesting the geological evolution of the Jurassic accretionary body in the Mino Belt. It is characterized by the imbricated structure with many thrust faults and the repeated accretionary prisms. A: clastic sediments such as sandstone and shale, B: pelagic sediments composed mainly of chert, siliceous shale, limestone and greenstone, C: subducted oceanic crust mainly composed of basaltic rocks.

表-4 大きい内空変位トンネルの地質 Table-4 Geological state of tunnel with large deformation⁴⁸⁾

地質分類	主岩盤	共存岩盤	地質構造	地質状態	粘土鉱物	トンネル名
第三紀層	泥岩	砂岩、凝灰岩	同斜構造	粘土化、細片化、破砕化、軟弱	Sm, I, K, Ze	赤倉、美唄、儀明第二、地蔵、小平、第一中の二股、新折渡
	泥岩	なし	背斜構造	粘土化、軟弱	Sm,	頰城、能生、新榎、塩箱
	泥岩	砂岩	背斜・向斜構造	粘土化、破砕化、軟弱	Sm, I, K, C	鍋立山、第一白坂、谷稲葉
	泥岩	頁岩、凝灰岩	褶曲擾乱帯	粘土化、破砕化、鏡肌	Sm	春日山、志賀、第二白坂、新宇津
	泥岩	礫岩、砂岩	断層擾乱帯	粘土化、破砕化、節理は粘土	C	新牧の原、浦佐、由比
	頁岩	なし	同斜構造	均質軟質	不明	満水
	頁岩	砂岩	背斜構造	粘土化、細片化、脆弱化	不明	聖ヶ丘
	頁岩	なし	擾乱帯	破砕化、粘土化(熱水変質)	SM, K	日振
	緑色凝灰岩	頁岩、礫岩	同斜構造	粘土化、破砕化、鏡肌	Sm, H, K, Mi	中山、折爪、朝日(新潟)、第一広谷地、院内、仙岩
	緑色凝灰岩	安山岩	不整合	風化、破砕化(熱水変質)	Sm	月山第一
	緑色凝灰岩	玄武岩	断層擾乱帯	粘土化、細片化、破砕化、	Sm, C, S	青園、大日坂、駒止、
	泥質凝灰岩	砂質凝灰岩			Sm	岩手、
	流紋岩質凝灰岩			熱水変質		盃山
	凝灰角礫岩			熱変質		一ノ瀬
	凝灰角礫岩	頁岩、砂岩、礫岩	不整合	鏡肌、低固結		丸子、神長
凝灰岩			強風化、粘土化、軟弱		中尾	
変成岩	蛇紋岩	なし	貫入	葉片状、粘土化、鏡肌	S, C, T	新登川、岩清水、大所川第二、嵐山、北小谷、第二今泉
	蛇紋岩	塩基性緑色岩	同斜構造	葉片状、粘土化、	S, T, C	神居、小川
	蛇紋岩	塩基性緑色岩	接触変成帯	粘土化、緑泥化、鏡肌	S, T, C	大清水、岩清水
	蛇紋岩	石炭片岩	同斜構造	破砕化、粘土化、葉片状	SM, S, C	藤白、長峰第二
	蛇紋岩	粘板岩、頁岩	貫入	粘土化、葉片状、網状片理発	不明	稲里、仁波川第三放水路、逢阪山
	蛇紋岩	泥岩	貫入	破砕化、粘土化、鏡肌	S, Sm, I, C	嶺岡、椋儀谷
	蛇紋岩	粘板岩	断層破砕帯	破砕化、鱗片状	Sm, T	子不知、鬼峠
	塩基性緑色岩	石炭片岩	同斜構造	不明	不明	赤良木
	塩基性緑色岩	粘板岩	断層破砕帯	破砕化、粘土化、鏡肌	S	大杉、春別
	滑石片岩	なし	同斜構造	粘土化、脆弱	T, C, Ce	篠栗
	黒雲母片岩	なし	断層破砕帯	破砕化、粘土化	不明	鳴鼓、長沢
	丘砕岩	片麻岩	断層破砕帯	風化、破砕化(粉状)	不明	大原
	花崗岩	礫岩	不整合	著しく風化、節理は粘土化、	不明	関
	花崗岩	なし		風化部と破砕部	不明	新芦谷
	花崗岩	ホルンフェルス	断層影響帯	破砕化、粘土化、鏡肌	Sm	恵那山、八田原、新神戸、新深沢
花崗岩	岩脈、破砕帯	岩脈、破砕帯	軟岩、粘土	Sm, I, K,	下久野	
火山岩	温泉余土	変朽安山岩	同斜構造	粘土化、軟弱化、(熱水変質)	Sm, C,	第一熱海、新泉越、新丹那、新宇佐美
	流紋岩	なし	貫入	著しく粘土化、(鉱化変質)	Ce, P, K, D	みちのく
	変朽安山岩	なし	同斜構造	粘土化、破砕化、軟弱(熱水変)	Sm, C, I, K	礼文浜、定山溪
	石炭千枚岩	なし	同斜構造	著しく風化、片理は粘土化、脆	不明	大山
古生層	粘板岩	なし	同斜構造	千枚化、粘土化	不明	大豊、地蔵寺川道水路
	粘板岩	なし	同斜構造	破砕化、脆弱化、鏡肌(熱水変)	不明	層雲峡道水路
中生層	粘板岩	塩基性緑色岩	断層破砕帯	破砕化、粘土化、鏡肌	不明	宜名真、明神、奥新冠、多紀連山
	粘板岩	なし	断層破砕帯	破砕化、粘土化、鏡肌	不明	
その他	地すべり	凝灰角礫岩、泥	地すべり面は不	地すべり堆積物は未固結	SM	第三大沢
	堆積物他		基盤は背斜構	造は風化、粘土化		

Sm:スメクタイト(モンモリロナイト)、Ce:絹雲母、Mi:雲母、I:イライト、P:パイロフライト、S:蛇紋石、K:カオリン、D:ドイツカイト、T:滑石、C:緑泥石、Ze:沸石、H:ハロサイト

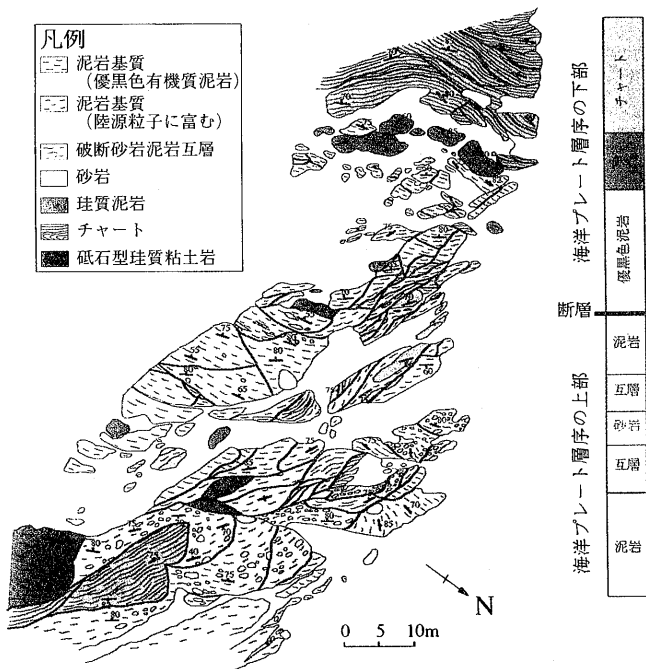


図-23 美濃帯ジュラ紀メランジュの露头スケッチ
より遠洋性で砂岩を含まないメランジュ(上半部)と、大小の砂岩塊を含むメランジュ(下半部)が断層を介して接している。チャートは元来前者に特徴的であるが、後者のメランジュ型にも含まれる。脇田(2000)による⁴³⁾。

Figure-23 Sketch of the melange facies in the Jurassic Mino Belt, central Japan.
Pelagic type melange (upper part) and sandstone lense-bearing melange (lower part) contact with the faults. Chert lenses and blocks are contained in both of the two types. After Wakita (2000)⁴³⁾.



図-24 丹波帯のジュラ紀メランジュ
マトリックスは層理面に平行な劈開が発達する頁岩。明色部は砂岩(右半部)及びチャート(左側)のレンズ。断層破砕帯ではない。木村克巳氏提供

Figure-24 Photograph of the melange facies in the Jurassic Tamba Belt, central Japan.
The shale' matrix is accompanied by bedding-parallel cleavage and contains many sandstone and chert lenses in parts of light colored. This rock facies is apt to regard to fault-shear zone.

と接合し、部分的には遠洋性堆積物と陸源砕屑物とが混在して複雑な積層岩体を形成。付加作用の進行に伴い低角衝上断層と覆瓦構造を形成(図-22)。この過程で不規則な小規模褶曲(特にチャート層の)や小断層も生まれる。表層部では海底地滑りや海山斜面の崩壊によるオリストストローム(堆積性メランジュ)が形成され、深層部では底付け作用によりデュープレックス構造も形成される。②付加体が成長して、先に形成された覆瓦構造を大きく切断する順序外スラスト(out of sequence thrust)による大規模な低角剪断帯と構造的メランジュの形成、それに伴う付加体内の変形と表層部の崩壊性堆積物(メランジュ)が生ずる。より深部では剪断作用の継続による鱗片状劈開、さらに沈み込み帯深部の高圧下では千枚岩・結晶片岩化する変成作用が進行。③陸側への付加作用の終了後、広域的圧縮応力により付加体全体が長波長の褶曲作用・断層運動を受け、軸面が急傾斜の正立褶曲群-丹波帯や美濃帯で顕著で波長10-15km位一が形成された。以上の断続的変形によって地層群は固化し、更に花崗岩の貫入も加わり、大陸または陸地の一部として固定される。

付加体に特有な岩相といえるメランジュは異なる岩石が混在する岩相であり(図-23)、その成因には上記のように堆積性と構造的性があり、両者の識別は前者が後者の変形を受けている場合もあって結構難しいのが実態である。堆積性メランジュは泥岩(頁岩)をマトリックスとする礫岩様の岩石で、構造変形を受けていない場合は固結性が高く、それほど脆弱ではない。一方、構造的メランジュは亀裂に富み劈開を伴うことも多く(図-24)、より脆弱化しているため、トンネル工事に要注意の岩相である。メランジュ相の付加体に占める割合は、地域によって差が大きいが5割を越えることはないと思われる。美濃帯の延長である足尾山地や八溝山地では地層全体の1割前後である。種々の岩相が混在化せず整然と重なっている整然層が実際には多いのである。

美濃帯-丹波帯では、付加の後数千万年という長期の時間間隙を経て、④新第三紀の構造運動が、主として断裂型の脆性破壊として中・古生層にも影響した。南北方向の急傾斜の断層破碎帯や節理など微小割れ目を生じせしめ、フォッサマグナや棚倉断層の活動に代表されるように、中部日本の中・古生層に特に著しい。⑤第四紀の活断層群による脆性破壊。丹波帯の山崎断層・有馬高槻断層・花折断層、美濃帯の根尾谷断層・神谷-梓川断層など付加体を切る活断層は以外に多く、付加体自体の本来の脆弱さが増幅されて破碎帯と亀裂帯が幅広く発達する。この場合、主断層は基盤の付加体の構造に無関係で大きく斜交しているが、その近傍では上記②、③の古い破碎帯(低角のことが多い)が新期の地殻変動の際に弱線となって再変形し、新旧の重複した破碎帯となる。メランジュ相の粘板岩は粘土化まで至らなくとも、原岩構造を保持した状態で粉砕化していることもある。新期の主断層の破碎帯ばかりでなく、それと斜交する古

期の破碎帯や片状面などに注目して再変形・再破壊の及んでいる範囲をよく調べておくべきである。主断層の変位量が大きい場合、その破碎影響範囲は幅1km以上に及ぶこともある。

以上のように付加体は複数の構造変形が加わっており、断層にしても低角、高角様々で破碎様式にもバラエティに富む。現在のところこれらの複雑な構造の解析は学界でも十分には進んでいない実状であるが、破碎帯や亀裂の状態を詳査・把握して施工計画を立てないと、着工後大きな変更を余儀なくされやすい。中・古生層は岩石自体は堅硬であり、弾性波速度値は5km/sec前後と高いが、上記のような重複した構造変形を蒙った部分では、粘土を介在した潜在割れ目・亀裂が多いため、地山強度が低下している。掘削によって初期地圧が解放されるので、坑内変位量が大きくなることが多い。付加体でも砂岩の優勢な部分より、頁岩・粘板岩の泥質岩優勢な岩相は、メランジュ相や鱗片状劈開・微小割れ目を伴うことが多く厄介である。破碎帯や亀裂に様々な方位が存在することが多く、特にメランジュ相の泥質岩では主要な地質構造を良く把握しておくことが肝要である。付加体では地質構造が急傾斜か緩傾斜かの判別が必ずしも易しくなく、主要な破碎帯の傾斜も誤認しがちである。これは受け盤か流れ盤かといった単純な問題にとどまらず、トンネルの設計にも関わる要素を持っている。地表踏査から把握された地質構造及び岩相分布がトンネルレベルと地表面とで全くつながらない事例をしばしば耳にする。付加体の構造は上に述べたように幾つもの衝上断層で切断されており、特に順序外スラストの存在(out of sequence thrust)は、露頭で観察される地層の配列を切っているためその上下で全く異なる地層が現出することもあり得る。

7.2 第三紀層における擾乱帯

坑内変位が大きく発生するトンネルの地質に、北陸・東北地方の第三紀層泥岩がある。第三紀層は東北地方の約7割の面積を占めて分布するほか、北海道西部・中部地方・山陰地方などにも広く分布する。特に海成層の部分が褶曲運動とその後の第四紀における隆起運動によって、出羽山地・頸城山地や中越地方の丘陵など地形的突部として、山岳トンネルの対象となっている場合が少ない。

1) 変形区間の岩質の特徴

表-4に掲げる事例を含め第三紀層のトンネルにおける、坑内変位の大きさと地質構造との関係をチェックしてみると、次のような特徴を挙げることができる。

- ① 背斜・向斜の褶曲軸部で変位量が最大を示すのは1-2割程度と少なく、大部分は褶曲構造の翼部、すなわち同斜構造部で大きな変位が生じている。
- ② 変位量の大きい区間では、亀裂が密に発達し、泥質岩が細片状に剥離する微小割れ目、油目、鏡肌等が数多く観察されている。

- ③ 中・古生層や花崗岩などの場合と異なり、明瞭な断層破碎帯を必ずしも伴っていない部分で大きい変位や崩壊が生じている。恐らく肉眼的に見出しにくい潜在的脆弱部とも言えるべき存在で、微細な破碎帯の集合部と思われる。
- ④ 泥岩の年代は、中新世後期-更新世前期と幅広いが、間隙率は大部分20-50%、含水比も15-30%程度で、かなり塑性を保持した泥岩に限られていると判断される。間隙率や含水比が低下する中新世中期以前の、第三紀層の中でも年代の古い泥岩では稀である。その境目は粘土鉱物の続性作用から見ればスメクタイトが減少してイライトが増加する部分に相当する。

以上の諸特徴から、大きい変形の原因は、岩盤の地質構造形成時に受けた構造的要因と岩質特性が大きく、膨潤性鉱物の含有や褶曲軸部の要素などはむしろ副次的と考えられる。

2) 脆弱部の地質構造上の位置と変形構造

まず、第三紀層の褶曲構造について吟味してみると、

褶曲軸部が岩盤強度的に弱いという地質学的根拠は、多分軸部に断層や亀裂が多いと考えられていることにある。第三紀層の褶曲作用には先第三紀基盤の垂直的ブロック運動による横曲げ褶曲 (bending folds) (非圧縮性) と、水平的な圧縮応力による座屈型 (buckling folds) とがあり、東北日本の第三紀層の褶曲構造は、鮮新世末-第四紀における東西方向の広域的圧縮応力下で形成されたことが判っており、多くは座屈型と推察される。地下深部の封圧下では褶曲軸部に圧密が強く働き岩石の密度は翼部よりも増しているはずで強度は高い筈である。特に亀裂が発達しない限り軸部が常に脆弱化する根拠はない。ただし、地層が急傾斜部分が優勢なclosed foldsであったり、背斜と向斜が近接して繰り返すなど過度な褶曲作用 (鍋立山Tなど) や、堆積盆地の形を強く反映した褶曲変形 (フォッサマグナ地帯など) によって、軸部が壊れて断層となっている場合はこの限りではなく、褶曲軸部において脆弱化が著しいと考えられる。

図-25に示すように、東北・北陸地方の第三紀層では、褶曲の軸部よりも翼部に最も規模の大きい断層や擾乱帯

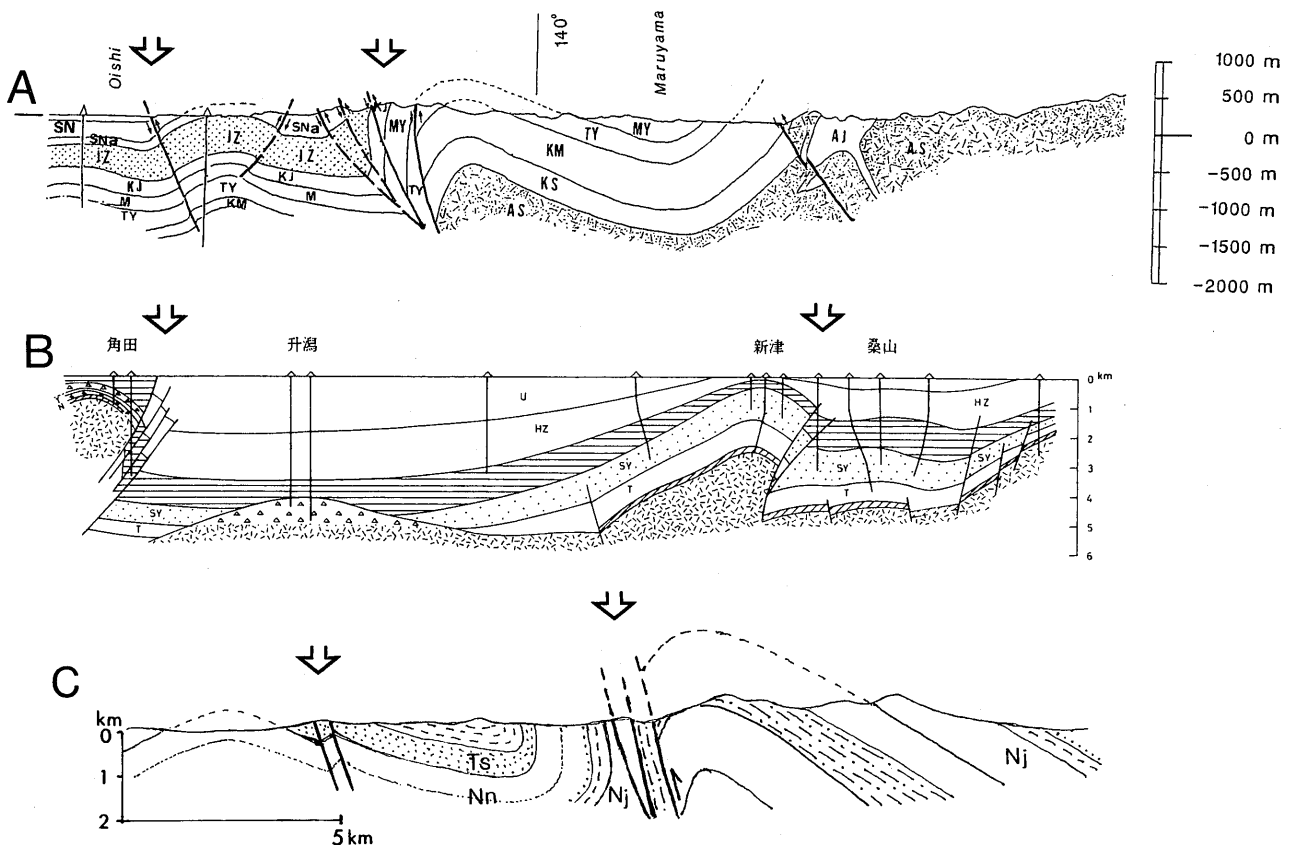


図-25 第三紀層の広域的地質断面

断層-擾乱帯が褶曲構造の翼部に発達する(矢印で示す)

A: 山形県北部 (佐藤, 1986)⁴⁴⁾, B: 新潟市南方 (小松, 1990)⁴⁵⁾, C: 上越西頸城 (赤羽, 1975)⁴⁶⁾

Figure-25 Some regional geologic cross-sections of the Tertiary strata.

It is noticeable that many large faults and disturbed zones are developed at the wing part of those folding structure. A section :northern district of Yamagata Prefecture, B section :southern part of Niigata City, C section :Nishikubiki district of Niigata Prefecture. The trends of these sections are in an eastward direction.

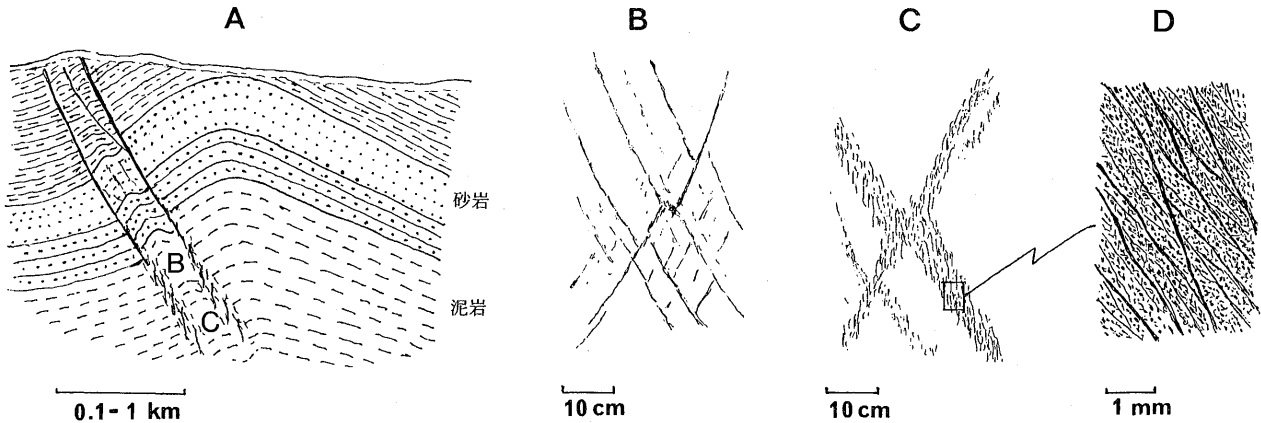


図-26 泥岩層における延性変形構造と剪断性微小割れ目の形態（概念図）

A : 背斜構造翼部の破砕帯において、浅部及び砂岩層では断層であるが、深部の泥岩層では延性（図中C部）、脆性一延性の中間型（同B部）の変形が生じた場合を示す。B（A図のB部分を想定）：網目状割れ目が発達、しばしば共役性（方位を考慮せず）、C（A図のC部分を想定）：流動状延性破砕で微小割れ目が発達、D：C図の枠部分の拡大で、肉眼では確認されないような微小割れ目を示す。B&CはHoshino et al. (1972)⁴⁷⁾の写真を参考に描出。いずれもスケールはおおよそその目安。

Figure-26 Schematic illustrations suggesting the occurrence of ductile deformation and micro-shear fracture within the Tertiary mudstones.

A : Thrust-fold structure and deformation patterns of mudstone in relatively deeper and confined conditions. B & C : mode of deformation pattern in mudstones. B : network shear fracture in a ductile-brittle transitional condition. C : ductile shear band or ductile flow band with thick closed micro-fractures. D : illustrated closed micro-fractures, a close-up view of the small frame in figure C.

が発達していることが多いのである。その翼部に見られる断層や破砕帯は水平圧縮を反映して、その多くが東傾斜の剪断性衝上断層の性状を有している。巨視的構造では褶曲軸部は特に擾乱帯もしくは脆弱部とはなっていない。これに対し、大きな断層が認められないが、褶曲構造の翼部に規模の小さい擾乱帯が発達し地層が乱れていることがある。背斜構造の前縁部に局部的に剪断性の応力集中帯が生まれたものの、衝上断層の形成（破壊）に至らない状態のまま、造構運動が終了した場合も考えられる。そのような場合、岩石中に応力集中の何らかの痕跡-変形構造が残されている可能性があり、細片化現象や、泥岩の「油目粘土」はその痕跡ではないかと推察する。油目は、剪断的のり作用によって含水の碎屑物中から最も細粒な粘土質物質が滲出・絞り出されることによって形成されると考えられる。この場合マイロナイトのような構成物質の細粒化は起こさない代わりに、図-26のように第三紀泥岩では剪断応力に応じて構成物の一部再配列、細粒物質の濃集と含水による潤滑の助長によって、フィルム状の微小剪断面が形成されると考えられる。

堆積岩中の碎屑物の粒度は垂直的にも水平的にも変化しているので、同じ地層の中の泥岩であっても、元々の堆積環境の変化に対応して、より細かくて粘土分を多く含む泥岩もあれば少ない泥岩もある。同じ場所ではほぼ同年代あれば、粘土分の多い泥岩の方が変形に対して弱いはずである。また、含水比の高い泥岩では剪断による地

層内のり作用は飛躍的に増大する。石油地質学で言われる「高圧泥岩」は、火山岩をキャップ・ロックとしてその下位の泥岩の脱水作用が遅れるなどの原因で、標準より間隙水圧の高い泥岩が存在していることが知られている。この種の泥岩は剪断応力に対する変形に極端に弱いと推察される。ちなみに、付加体の泥質岩で普遍的に知られる「鱗片状劈開」は沈み込み帯深部の封圧下での剪断作用によって形成されると考えられているが、この場合も堆積物に水を含んだ状態での変形であろう。第三紀層泥岩に作用した剪断変形も、より深い部分では、これに似た潜在的変形構造を有しているに違いない。

7.3 地質的解明に向けての課題

北陸本線の頸城トンネルと木浦トンネルの地質は、先述の鍋立山トンネルと全く同様な寺泊層・椎谷層相当の泥質岩主体の地層（能生谷層・川詰層）から成り、工事の際強大な膨張に伴いブロック状崩壊・大規模な押し出しが生じている。頸城Tの問題の箇所³⁶⁾は褶曲の軸部ではなく、翼部に相当している。実際に現地付近の地表で露頭観察をしてみると、波長2-5kmのオーダーを示す褶曲構造において、一見安定した構造の翼部でも局部的に緩い傾斜部分と急傾斜を示す部分とが隣り合わせに折れ曲がっているように傾斜が急変したり走向も乱れた部分がある。小規模な剪断性の断層群の発達した一種の擾乱帯というべき地質構造の不安定部分である。このよ

うな構造が観察できるのはトンネルレベルより上位層準の砂岩泥岩互層であり、能生谷層のように泥岩主体の地質では見だしにくい。ここでは明瞭で大きな断層破碎帯は認識されないが、小さな剪断面が多数発達して地層全体としては脆弱化している可能性が高い。

要するに、明瞭な断層破碎帯でなくとも、トンネル掘削において大きな膨張性地圧を生ずる第三紀脆弱泥岩の形成要因の一つとして、肉眼では不明瞭で見過ごし勝ちな微小割れ目の集中帯（図-26C&D）があって、ductile faultと呼ばれるような塑性的変形部分が地中に伏在していることが考えられる。この種の塑性的変形は、冒頭の研究史でも紹介したように、細粒粘土分含有率、塑性指数、自然含水比（図-20）、モンモリナイト含有率（または粘土鉱物のイライト化の程度）などの諸性質とも関連している。それらの性状把握と共に、露頭、切り羽及びコアの直接的観察（顕微鏡観察を含む）による“潜在的”微小割れ目帯の予測・検出が何よりも期待される。

一方、素材の観察が不十分であるため、今回は言及しなかったが、火山岩類や花崗岩などの火成岩類における“粘土化”については、熱水変質のほか、上記の第三紀泥岩の場合に類似した潜在的微小割れ目が関与している可能性がある。これらの変質岩石は粒状鉱物から主に構成されるので、地質学的には粘土とは呼べないが、粘性度を有した塑性物質である。石英はそのまま堅硬であるが、雲母類が緑泥石化、長石類及びガラスが粘土鉱物化し、岩石全体が脆弱化しているのである。また、見かけ上、通常の花崗岩と変わらず、石英粒など鉱物粒は元来の形状を保持しているのに、ルーペなどで拡大視して見ると、微小なクラックがネットワーク状に入っていてハンマーの打撃によって粉々に割れるような岩体も見られる。それらの近傍や延長部には顕著な断層帯がある場合が多い。火成岩体の“粘土化”の原因の究明にも顕微鏡観察やX線分析など詳しい検討が必要である。

8. 特殊な地山条件との関連

坑内変位の大きいトンネルの地質条件は、トンネルの設計、施工上の特殊な地山条件とも関連することがあるので坑内変位以外の問題点にも注意する必要がある。トンネル標準示方書では、特殊な地山条件として

- ① 地すべり等の移動性地山および斜面災害が予想される地山
- ② 断層破碎帯、褶曲じょう乱帯
- ③ 含水未固結地山
- ④ 膨張性地山
- ⑤ 山ハネが予想される地山
- ⑥ 高い地熱、温泉、有毒ガス等がある地山
- ⑦ 高い水圧や大湧水の発生が予想される地山

これらの内、坑内変位が大きくなる地質条件に直接的に関係するものには、「地すべり等の移動性地山、断層破碎帯、褶曲じょう乱帯、膨張性地山、有毒ガス等があ

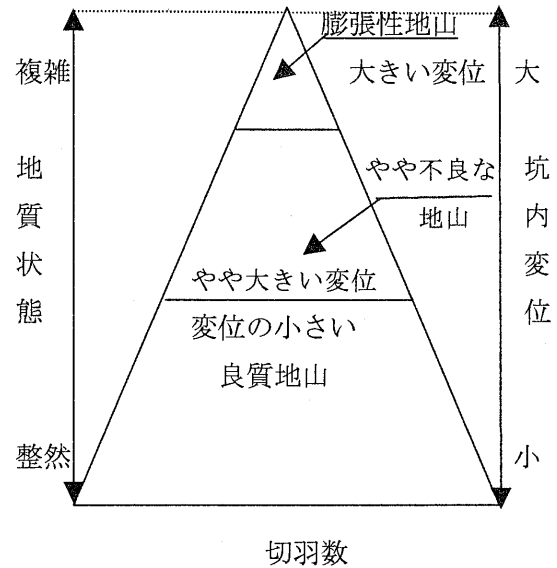


図-27 坑内変位と地質状態

Fig-27 Geological state and tunnel deformation

る地山」が挙げられる。地すべり等の移動性地山では、移動土塊だけでなく基盤岩が破碎変質を受けていることが多く、トンネル掘削の影響により、坑内変位現象と切羽の押し出し現象、および地表面の沈下変位、地すべり現象等を早期に把握観察する計画と防止工法について配慮する必要がある。地下水位が影響する場合には、地下水位低下工法の採用についても検討を行う。断層破碎帯、褶曲じょう乱帯では、坑内変位とともに切羽の押し出し現象、特に湧水を伴う場合には急激に切羽崩壊が発生することがあるので、地下水の調査ボーリングを実施し、地下水位低下工法について検討する必要がある。

膨張性地山は、坑内変位現象以外に切羽の自立性が不足して、切羽崩壊が発生し易い地山なので、天端および切羽崩壊防止工について検討する必要がある。

有毒ガスの内、硫化水素は第三紀火山岩分布域の断層に沿って湧出する場合があります。石炭層の分布域では断層に沿って可燃性ガスが湧出する場合があります。また石油分布域では、褶曲構造の背斜軸および褶曲じょう乱帯に可燃性ガスが湧出することがあるので、調査の実施と対策方法の検討が必要となる。

また湧水と地圧が同時に問題となるのは、比較的稀で恵那山トンネル⁴⁹⁾では湧水を伴う断層破碎帯に数度も遭遇して、大変な難工事であったことで有名である。

このように坑内変位が大きくなる地質状態は複雑であり、特殊な地山条件とも密接に関係しているので、切羽観察は通常区間以上に綿密に行い、岩盤性状を把握すると共に、破碎岩盤の成因、破碎変質岩の分布等を地質工学の専門家の意見を反映することが望まれる。

地山の物性値を試験する場合にも、定性的に切羽の地質状態を把握し、変位挙動だけでなく特殊な地山条件を反映した試験項目を必要な頻度で実施することが肝要である。

複雑な地質条件下では、地質状態が不明な地山物性値を変位予測に使用するとバラツキと、判断を間違える原因になり易い。従って、切羽観察で、定性的に地質状態を把握して、地山挙動を代表する軟質部分から採取し、土質試験を行い、その試験結果で坑内変位量を予測する方法が現実的である。この方法により、予測値のバラツキも少なくなり、理論と計測値の乖離を少なくすることが期待できる。

9. 坑内変位を考慮した岩種区分

日本道路公団の設計要領に示されている岩石グループ⁵⁰⁾の分類を基本として、坑内変位を考慮しつつ作成した岩種区分が表-5である²⁸⁾。この表では、塊状岩盤をφ地山(φが概ね30°以上)、層状岩盤をc地山(φが概ね30°未満)に相当すると考え、内部摩擦角の大きさを考慮して一部修正を加えて分類し、さらに区分S(破碎・変質岩と土砂)を追加している。区分Sは、既往の事例や解析結果から得られた地山の内部摩擦角に相当する地山の地質状態を考察した結果から、その必要性を認めている。この区分Sの地質状態は、前項のように特殊な地山条件にも該当することがあるので、坑内変位挙動だけでなく幅広いトンネル掘削時の諸現象に対して配慮する必要がある。

なお表-5の作成に際し、下記の点に配慮している。

- ① φ地山の内、粘土化していないものは、地山強度比が小さくても内部摩擦角が30°以上なので、内空変位は比較的小さい値であることが多く、S-aに分類する。この地山は支持力が不足する場合があるので、支保の脚部沈下や天端沈下に配慮する必要がある。
- ② φ地山でも粘土化した場合(特にスメクタイトを含む場合)は、内空変位と共に天端沈下が大きくなる傾向があり、S-bに分類する。
- ③ 破碎・変質などにより地山強度比が1以下となるc地山は、坑内変位が大きいケース(概ね50mm以上)が多く、S-bに分類する。この地山は内空変位が大きだけでなく、切羽崩壊および支持力が不足する場

合もあるので、切羽の自立性対策および支保の脚部沈下や天端沈下対策にも配慮する必要がある。

- ④ C地山のL(軟質岩)に分類される岩石でも、土被り厚さによって地山強度比が小さくなることがあるので注意を要する。

この岩種分類に基づいて、地山強度比、内部摩擦角、そして弾性波速度値を指標としたトンネルの岩盤分類を行うことが今後の課題と考えている。

10. まとめ

我国で施工されたトンネル事例の切羽地質観察と坑内変位計測データについて分析、研究を行い、数値解析にも適応する掘削時の坑内変位を予測する方法について本文で述べてきたが、その要点を以下に記述する。

- ① 大きい坑内変位を生じるトンネルの地山強度比は1以下と小さく、かつ内部摩擦角は30°以下の場合が圧倒的に多い。このような地山は、多くの場合破碎変質を受けていて複雑な地質状態にあり、特殊地山にも該当するので、トンネルの諸現象に配慮する必要がある。
- ② 坑内変位量の大きい地山は、複雑な地質状態であるので、切羽の硬質部から採取した試料の試験結果による、地山強度比、内部摩擦角は理論値との乖離が生じて、変位予測等に適応できない。従って、まず定性的に切羽の地質状態を明確にした後に、地山挙動を代表する部分の試料による地山物性値を求めることにより、理論値に近似した変位量が予測でき、施工管理に利用できる。
- ③ 主として地山強度比は切羽の軟質部から採取した試料の一軸圧縮強度から求められるが、力学的供試体が形成できない場合には、地山の含水比および湿潤単位体積重量から間接的に一軸圧縮強度を求める実用的な方法を提案している。また一軸圧縮強度試験か三軸圧縮試験のいずれかを選択する場合には、三軸圧縮試験を行い、試験結果から、一軸圧縮強度を求める。
- ④ 一軸圧縮強度試験および三軸圧縮試験自体の結果は、バラツキが生じ易いので、地質状態を明確にすると共に、試験個数を多くすることにより試験精度を上げる

表-5 坑内変位を考慮した岩種分類

Table-5 Rock kind classification in order to consider tunnel deformation

	H (硬質岩)	M (中硬質岩)	L (軟質岩)	S (破碎・変質岩と土砂)
φ地山 (塊状岩盤)	花崗岩類、ホルンフェルス、片麻岩、斑れい岩、角閃石岩、石灰岩、チャート、砂岩(中生層)等	安山岩、玄武岩、石英安山岩、流紋岩、ひん岩、礫岩、砂岩(第三紀層)、砂質片岩、蛇紋岩(塊状)	砂質凝灰岩 凝灰角礫岩	S-a
				左記の各種岩石の破碎変質の内、粘土化していない場合。および第四紀砂層・礫層
C地山 (層状岩盤)		粘板岩、頁岩(中生層)	凝灰岩、千枚岩、蛇紋岩(葉片状)、泥質片岩、泥岩、頁岩(第三紀層)	S-b
				層状岩盤の破碎・変質したもの。塊状岩盤で破碎・変質して粘土化したもの。および第四紀シルト・粘性土層

必要がある。

- ⑤ 中・硬岩地山のように、内部摩擦角が 30° 以上で、かつ地山強度比が1以上の地山の場合には内空変位量は小さい。天端沈下量は支保工脚部の支持力が小さい場合には大きくなる可能性があるため、支保工脚部の地耐力状態に注意する必要がある。
- ⑥ 内部摩擦角が 30° 以上でも地山強度比が1より小さい地山の場合には、内空変位は小さい傾向にあるが、支保工の沈下変位が懸念されるため、支保工脚部の地耐力状態に配慮する必要がある。
- ⑦ これまでのトンネルの岩種分類では、新鮮な岩種に基づいて行われているが、坑内変位の大きな地山は多くの場合破碎・変質を受けている状態にあるため、その部分を加えて従来の岩種分類を見直したものを提案している。
- ⑧ 提案した岩種分類に基づいて、地山強度比、内部摩擦角、そして弾性波速度値を指標としたトンネルの岩盤分類を作成することは、今後の課題である。

以上、トンネル掘削時に日常実施している切羽地質観察と坑内変位測定を、有効に活用することで、複雑な地質条件での大きな坑内変位現象に適切に対応できることを示している。

謝 辞

最初に経験した嶺岡トンネルから約30年、坑内変位の大きいトンネルの地質工学的考察について、これまで幾つかの研究報告を共同研究者と共に行って来たことが本論文の基礎となっている。ここに、これまで共同研究を行った多くの先輩、友人諸氏に改めて感謝申し上げます。

本論文の構想がまとまりつつある時に、卒琢同時に、原稿作成をご提案いただいた岡部幸彦本部長に謝意を表します。本論文を査読いただき細部までご指導いただいた川本眺万顧問および引用文献に関係する多くのトンネル事例に示唆をいただいた下河内技師長に感謝申し上げます。また本文の図表作成に協力いただいた技術本部の、三上元弘氏、国村省吾氏、奥井裕三氏、佐戸井泉さんに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 伊藤友太郎・川名英二：軟岩層の湧水地帯をNATMで掘る, トンネルと地下, Vol.18, No.5, 1987, p.35~46
- 2) 白木博昭・丸山博久：複雑な地質を克服した北陸新幹線トンネル群, トンネルと地下, Vol.28, No.5, 1997, p.7~16
- 3) 鉄道省熱海建設事務所：丹那トンネルの話, 1933-12, p.127~137
- 4) 渡辺貫：地質工学, 古今書院, 1935, p.232~237
- 5) 足立貞彦：膨張性地山におけるトンネル施工法, 第6回トンネル工学シンポジウム, 1970
- 6) 高橋彦治：トンネル工事と崩壊しやすい地層の問題, 第14回トンネル工事講習会, 日本ダム協会, 1971-4, p.18~19
- 7) 野沢太三：膨張性地山におけるずい道の土圧と施工法について(その2), 土と基礎, Vol.42, 1994, p.31~39
- 8) 小竹豊・鈴木和也・溝畑靖雄：蛇紋岩トンネルの特性とその設計施工—国鉄神居トンネルの例—, 土木学会誌, Vol.54, No.8, 1969, p.45~51
- 9) 鈴木守：奥新冠および春別発電所の隧道の地質, 日本地質学会札幌支部総会講演, 1965-03, p.19~51
- 10) 足立貞彦・重松治・水出康雄：紅葉山線・新登川トンネルの蛇紋岩区間の施工法と膨張土圧の測定結果について, 第五回トンネル工学シンポジウム, 1969, p.51~67
- 11) 日本鉄道建設公団東京支社：北越北線赤倉ずい道・膨張性地質の総合解析, 1977-09, p.124
- 12) 大塚正幸・高野彬：膨張性泥岩におけるトンネルの挙動と地質特性, 土と基礎, Vol.28, No.7, 1980, p.34~36
- 13) 竹林亜夫：トンネル工事における膨張性地圧の理論と実際, 清水建設社内報土木クォータリ別冊, 1974-04, p.18~37
- 14) 鈴木守・吉田善亮・竹林亜夫：千葉県鴨川市嶺岡隧道の地質と膨張性地圧について, 応用地質, Vol.15, No.1号, 1974-04, p.1~13
- 15) 竹林亜夫・大塚義之：膨張性トンネルにおける施工管理の一例, 土と基礎, Vol.22, No.11, 1974, p.35~41
- 16) 仲野良紀：水路トンネルの地圧と設計—特に押し出し性~膨張性の場合について—, 農業土木試験場報告, 第2号, 1974-03, p.89~133
- 17) 仲野良紀：膨張性地山の実態, トンネルと地下, Vol.6, No.10, 1975, p.15~25
- 18) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳編)・同解説, 1986, p.25
- 19) 佐藤昭・佐賀政家・斉藤勝昭：青函トンネルの施工(13) 算用師工区, トンネルと地下, Vol.13, No.3, 1982, p.7~17
- 20) 谷本親伯：NATMにおける情報化施工, 土と基礎, Vol.30, No.7, 1982, p.63~70
- 21) 吉川恵也・朝倉俊弘・小島芳之：NATMのための膨張性泥質岩の地山分類, 応用地質学会, 1988, p.25
- 22) 竹林亜夫・石外宏・大塚正幸：トンネル施工事例にみる膨張性地山の実態, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1989, p.361~365
- 23) 田村武・足立紀尚・土居則夫：トンネル掘削における岩盤内の圧縮気体の影響, 第44回土木学会年次講演会講演概要集, 第3部門, 1989, p.222~223
- 24) 仲野良紀・清水英良・西村真一：断層粘土化した第三紀凝灰質泥岩の含水比の工学的意義と膨張性ト

- ネル, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第1巻, 1991, p.171~176
- 25) 川本眺万・アイダン・オメル・赤木知之: 日本におけるスクィーズィングトンネルの実態, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1992, p.191~195,
- 26) 今田徹: NATM20年 我々は何を学んだか, ハイウェイ技術, No.9, 1997-12, p.9~15
- 27) 中田雅博・西村和夫・中野清人: 岩石ごとの地山挙動に関する研究, トンネルと地下, Vol.29, No.1, 1998, p.53~63
- 28) 竹林亜夫・三上元弘・国村省吾・奥井裕三・松井保: 内空変位の大きいトンネルの周辺地山物性に関する研究, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, 2002, p.17~24
- 29) 竹林亜夫・三上元弘・国村省吾・奥井裕三: 山岳トンネル工法における岩盤の強度定数と内空変位の関係に関する研究, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, 2001, p.183~188
- 30) Hermann Kastner: Statik des Tunnel-und Stollenbaues auf der Grundlage geomechanischer Erkenntnisse, Springer-Verlag, 1962, p.66~80
- 31) 竹林亜夫: トンネル工学と応用地質, 加藤誠教授退職記念論文集, 1997-03, p.451~461
- 32) 竹林亜夫・山本和義・泉谷泰志・上岡真也: 切羽の不安定現象の分類と対策に関する考察, トンネル工学研究論文・報告集, 第9巻, 1999, p.1~8
- 33) 坂本成彦・都司尚・金口正幸・大黒昭久: かぶりの浅い蛇紋岩地山を掘るー近鉄志摩線青峰トンネル, トンネルと地下, Vol.24, No.3, 1993, p.53~57
- 34) 矢田部龍一・横田公忠・八木則男・野地正保: 蛇紋岩地すべりの発生機構に対する検討, 地すべり, Vol.34, No.1, 1997, p.27
- 35) 高松真・羽根田汎美・竹林亜夫: 地すべり域におけるトンネル施工の一例, 土と基礎, Vol.27, No.7, 1979, p.13~20
- 36) 日本国有鉄道岐阜工務局: 北陸本線糸魚川・直江津間線路増設工事誌, 1969-10, p.256~339
- 37) 佐藤正彦・安川正春・矢野尚彦・糸田俊男: 能生トンネルの変位特性と支保効果, トンネルと地下, Vol.18, No.9, 1987, p.25~35
- 38) 城間博道・江口和義・中川健二・櫻井雄二郎: 地すべり地におけるⅡ期線施工 北陸自動車道春日山トンネル, トンネルと地下, Vol.28, No.12, 1997, p.13~24
- 39) 新井田四郎・須賀武: 膨圧トンネルにおけるロックボルト工 上越新幹線・中山トンネル, トンネルと地下, Vol.8, No.4, 1977, p.12~20
- 40) 奥村皓一・和地強・怡土一美: SFRC覆工で収束しない変位に対抗 東北新幹線・岩手トンネル女鹿工区, トンネルと地下, Vol.29, No.5, 1998, p.7~18
- 41) 林幸一・吉田信: 陥没性地すべり地帯に挑む 藤枝バイパス谷稲葉トンネル, トンネルと地下, Vol.10, No.10, 1979, p.7~15
- 42) Kimura K.: Offscraping underplating and out-of-sequence thrusting process of an accretionary prism: On-land example from the Mino-Tanba Belt, central Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, vol.48, 1997, p.313-337.
- 43) 脇田浩二: 美濃帯のメランジュ, 地質学論集, No.55, 2000, p.145-163
- 44) 佐藤比呂志: 東北地方中部地域(酒田-古川間)の新生代地質構造発達史(第Ⅱ部), 東北大, 理, 地質古生物研報, Vol.89, 1986, p.1-45.
- 45) 小松直幹: 新潟油田地域の褶曲, 地質学論集, No.34, 1990, p.149-154.
- 46) 赤羽貞幸: 新潟県上越市西部山地における新第三系の層序と地質構造, 地質雑, vol.81, 1975, p.737-754.
- 47) Hoshino K., Koide H., Imai K., Iwamura S. & Mitsui S.: Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressures, Rep. Geol. Surv. Japan, No.144, 1972, 200p. with 23 plates.
- 48) 土木学会: 軟岩評価一調査・設計・施工への適用一, 1992, p.131
- 49) 長友茂樹・三川清・政谷二三男・原田史也: 山鳴りと大湧水に挑む 恵那山トンネル中津川方, トンネルと地下, 第2巻12号, 1971-12, p.43~56
- 50) 日本道路公団: 設計要領第三集(トンネル), 1997, p.69~70

