

地質調査における不確実性の低減ならびに トンネル工事のリスク要因評価

近 藤 達 敏

Uncertainty Reduction in Geological Investigation and the Risk Factor Assessment for Tunneling

Tatutoshi Kondo

Abstract

The cause of unexpected construction risks producing either hazardous ground water inflow during tunnel excavation or increase of construction costs by means of unfavorable ground conditions are mainly based on some uncertainty in geological investigation carried out through the design stage. On the other hand, there are less advances in research and development with respect to improve uncertainty in geological investigation, which should be one of the most important and essential fundamental for rock engineering.

The author describes firstly that uncertainty of geological investigation would be based on an inductive mapping technique of geological investigation due to much less geological evidences of field outcrops comparing the numbers of unknown geological parameters, secondly that the most of the geological misjudges would be brought from some intuitive and in some cases illogical consideration on geological structure and so on. Concerning the role of geological investigation through the feasibility, design and construction stages, geological investigation should contribute itself to risk assessment in feasibility stage and to site characterization of rock properties mainly in design stage.

Thus, the author proposes Inductive Optimization Method of geological investigation to eliminate uncertainty in geological mapping. One case study work is illustrated to represent some engineering contribution on the tunnel scheme in which much problems of ground water and unconformity of soft layers along tunnel level are expected.

キーワード：地質調査結果の不確実性，帰納的最適化地質調査法，リスク要因評価，地盤物性評価

1 まえがき

トンネル工事において発生する異常出水や崩壊などの事故あるいは工事の進行に伴って余儀なくされる工事費の増加などの原因は、事前に行う地質の予想が実際と大きく相違することに起因する場合が多い。実際のトンネル工事においては、地層の種類や地質構造および地層、岩盤の工学的性状などが的確に予想されていることを前提として、トンネルの設計が行われ、施工計画の検討が行われる。この場合、トンネル工事のリスク評価や地山の安定性の検討は事前に想定された地質構成や岩盤の物性によっているので、実際の地質の状態が予想よりも悪い場合には、大なり小なり工事リスクが発生する事となる。

想定した地質状況に対応するトンネル構造物の力学的安定性を、コンピューターと数値解析プログラムの発達により計算する事が可能となっている。また、施工機械や土木材料の開発に伴って、従来難工事の地山とされるような地質であっても、比較的問題なく工事を行う事が可能となりつつある。その反面、工事にとって重要な地質の予想の確度を高めるための研究開発は殆ど進められていない、といっても過言ではない。従来、土木地質学は地球物理探査ならびに岩盤工学的な試験や測定などの方面で大きく発達してきていて、それらの要素技術の進歩には目覚ましいものがある。その反面、野外における地質踏査の方法に関する研究には見るべきものが無い、といえる。従って、地質調査における不確実性の低減に向けての研究は、特にトンネルを中心とする土木地質において、最重要課題の一つといえる。

本論文の目的は、地質調査における地質予想の不確実性の原因を明らかにして不確実性の低減を目的とした地質推論過程の基本について新しい提案を行うとともに、地質観点からのトンネル工事のリスク要因評価に必要な地質調査の位置づけについて述べる、ことにある。

地質調査の基本は、当該地域の地質図の作成にある。地質図は、異なった地層単元同士を境する地質構造面（例えば、地層面、断層面、不整合面、貫入面など）の分布を必要な縮尺で3次的に図面上に描いたもの（例えば、地質平面図、地質鉛直断面図、地質水平断面図など）である。本論でいう地質調査の不確実性とは、上記の地質構造面が図面上に実際と大きく相違して描かれる事に関わる問題である。地質調査の不確実性の生じる原因は以下のように考えられる。

★ 地質図作成のための地質露頭の3次元測量と図化作業の精度、地層境界面の位置、延長などを帰納

法的手法で推定する事が中心となるため、調査の精度は露頭の数と質に大きく依存し、経験や感、ひらめきなどの個人的判断に左右されやすい。

★ 一般的に、精度の高い地質図作成に必要な地質露頭が限られるため、唯一解を得る事が不可能となることが多い。多くの場合、複数の解の案の客観的検討なしにその内の何れかの案に強く執着して地質図を作成することが多く、結果として予想が実際と相違する地質図となり易い。

★ このような事から、予想される地質構造等に関して考えられる誤差の範囲やその原因などについての客観的な記述が殆ど無く、土木技術者には提供される地質図が唯一の正しい解であるかのような印象を与えることが多い。

地質調査における客観的で論理的な地質の推論を調査の初期段階から逐次繰り返しながら進めて、複数の解の案から唯一の解の案に向かって絞り込む方法として、筆者は帰納的最適化地質調査法（近藤, 1997）の提案を行っている。帰納的最適化地質調査法は、現地踏査から地質図の報告（実用的にみて、費用と工期の制限内における最終成果の報告を指す）までの地質事象データの観察、記載、それに引き続く地質構造解析の検討過程における情報処理システムの基本について提案したものである。そしてその推論過程では、当該地域全体の地質構造を均一最小のブロックに分けて認識する地質構造最小単元の推論と、踏査の都度得られる地質事象データの全てに妥当で整合性のある地質構造の組み立て案を繰り返し反復して検証していく離散的な反復最適化の推論の二つによる情報処理を中心に行うことを提案している。このことにより、個人的かつ主観的な判断を可能な限り排除して、科学的かつ演繹的な論理性と合理的で客観的な帰納的推論の組み合わせに基づいた地質図作成の過程を経ることが可能となり、地質調査の結果に含まれる不確実性の程度を極力低減することが可能となる。

一方、トンネル工事における地質調査の土木地質的な目的は次に述べる二つの項目からなっている。

トンネルの計画から施工に至る過程では、それぞれの段階に必要とされる目的に応じて地質調査を実施し地質状況と工学的な性質などを必要な縮尺と精度で図示する。この場合、トンネルのルート選定、掘削工法の選定、施工手順の検討あるいは対策工法などの検討には、地質的なリスク要因の種類、程度と位置などを知る必要がある。上記によるトンネル工法の基本計画が終了した後には具体的な支保の量や強度などの設計計算に対してトンネル地山の工学的物性値を知る必要がある。本論では前者に

関する地質調査をリスク要因調査、後者に関しては地盤物性調査として定義づけ、トンネル工事のリスク評価の中に位置づけるべきことを主張する。即ち、地質的なリスク要因および地盤物性の両側面からトンネルにおけるリスク評価に貢献することが、土木地質家に課せられた課題である。従って、トンネルの計画からルート選定の段階で可能な限り重大な工事リスクに係る地質要因を明らかにすることが重要課題となる。

2 既往の研究

我が国における最初の近代的トンネルは明治3年(1870)に着工された鉄道の石屋川トンネル(延長61m)で大阪と神戸の間にある天井川を開削したものであり、英人技術者の指導で造られた。旧逢坂山トンネル(延長665m)は明治11年(1878)に着工し、手掘りの頂設導坑式で、始めて日本人技術者のみで行われた。明治13年(1880)に着工した柳ヶ瀬トンネル(延長1,352m)では、日本で初めてのダイナマイト、削岩機、換気用空気圧縮タービンが使用され、三角測量も実施された。明治29年(1896年)に着工した笹子トンネルでは水力自家発電、坑内電灯、坑内電話、電気雷管が使用されるとともに、掘削ずりの運搬にダンプカー、架線式電気機関車が用いられた。ここで特筆すべきは事前の地質調査、工事中のボーリングコアの採取など科学的な地質調査(加納, 桑原, 1963)が行われている。大正期に入り、房総線鋸山トンネルでは生コンクリートおよびコンクリートブロックが用いられるようになり、上越線清水トンネル(延長9,702m)では鉄道院建設局が削岩爆破研究委員会をつくり遅発電気雷管などの研究を進めた。大正9年(1920)に着工した旧丹那トンネル(延長7,840m)は大正9年(1920)に着工し16年を経過して昭和9年(1934)に完成した。丹那トンネルの着工にあたっては、現地踏査や地質調査も行われていた。工事着手の当時、担当の土木技師は地質についての関心が薄かったが、当時の床次総裁が東京帝国大学総長に依頼して横山又次郎博士に地質調査を実施してもらっていた。次いで、仙石総裁は鈴木博士に地質調査を依頼した。結果的には、予想外の地下水の湧水と温泉余土のために工費、工期ともに大幅な変更となった。このような地質予想の齟齬は、土木技術者が地質学の内容を知悉せず、地質学者は工事施工の状態を理解しなかった事(鉄道省熱海建設事務所, 1933)、によるとされている。

第2次大戦後、広田は鉄道省における切り取り法面の掘削難易に関して地層、岩石の硬軟、風化、割れ目など

に着目した切り取り土砂地山分類(広田, 1942)を提案し、後に伊崎がこれに改良を加え、日本国有鉄道におけるトンネル掘削に際しての削岩、爆破などの設計に関する地山の等級分類(伊崎, 1960)の基準となった。池田はさらにこれを発展させ、屈折法弾性波探査による弾性波速度値を利用した岩石の強度分類の方法(池田, 1969)を提案して、以後他の機関においても用いられるようになった。ここにおいて、トンネルの削岩、爆破、火薬量に関する岩石分類から、地圧の大きさ、支保工、覆工、掘削工法を標準的に定めるための岩石分類が出現したといえる。

日本鉄道建設公団による青函トンネルの設計、施工においては海底下のトンネルのため、ゆるみ地圧ばかりでなく真の地圧に関する検討が大きく取り上げられた。上越新幹線中山トンネルの工事は第四紀火山砕屑岩の高圧地下水の湧水と新第三紀緑色凝灰岩のスクイーピング地圧に難航した。中山トンネルの工事では、事前の地質調査と掘削途上における坑内での地質調査の重要性が大きく認識された。

陶山らは、1960年当時に大規模な建設工事に伴う地質調査に関する一般の認識が高まってきたものの各種の地質調査についての正当な認識が欠けていることと、地質調査に対する過大な期待あるいは過小評価が行われている事を指摘し、弾性波探査と地表地質調査の総合的評価を行う事が土木地質調査にとって重要である事(陶山, 村岡, 羽田, 1960)を述べている。陶山らは、路線選定ならびに設計段階での意思決定という概念に触れ、工事における地表地質調査が果たす役割について述べており、当時としては初めての卓抜した方法論が提案された。これは以後の土木地質調査の進め方に関する一つの規範となった。しかし、その考察では地質露頭の質と量により調査結果の精粗の差が生じることは述べられたが、地質の解の多様性や地質調査に本質的に存在する解の不確実性については論及されなかった。

Duddeck(1988)はトンネルの調査から施工に至るまでのフローを分析して地質調査と意志決定分岐点との関係を位置付けた。しかしながら、この方法は、不均一な地層や力学物性値に関する確率論的取り扱いの困難な場合、あるいは地質調査で予見できない地層、岩石の出現に対しては考慮外となっている。また、Bieniawski(1992)はトンネル工事計画の実行に関する判断分岐点について考察を行い、フィージビリティ・スタディの重要性を強調している。この考え方では、地質調査結果に関する確定性の仮定の基に異なる地質体の有する地山物性値の統計的変動の分析から設計、施工のリスク評価

を行う、というものである。しかし、最も重要な問題となる地質の予想を的確にするための方法については触れていない。宮崎(1973)は、地質調査の第一の目的は工事費の節減にあるとし、地質調査の最も適切な利用時期は路線選定段階にあると述べている。そして、実際の工事費の概算を基にした路線比較に関する地質調査の重要な意義について、始めて明確な考察を行った。

Kellerhals(1992)はスイスのアルプスを越えるレッチベルグトンネル(Loetschberg Tunnel)で、地質がよいと判断して作成した地質断面図、悪いと判断して作成した地質断面図の二通りを示し、各々を楽観的診断(optimistische Prognose)、悲観的診断(pessimistische Prognose)として報告している。また、Einsteinほか(1996)は、地質の不確実性がトンネル建設の工事費、工期に影響を与える効果を検討して、トンネル工事の意志決定およびリスク解析を行うための支援ソフトDAT(Decision Aids Tunneling)を開発した。そして、この方法をスイスGotthard Base Tunnelのリスク評価に適用している。しかしながら、上記の二つの例においては地質体の確定性に関する仮定の上に立って、設計や施工に対するリスク評価を行う、というものであることから、地質調査の過程における調査結果の不確実性の分析やその不確実性の地質的評価については触れられていない。

このように土木地質調査の分野に関しては、土木地質調査が責任を持つべき技術の範囲やあり方に関する議論が少なく、これからの的確な地質予想を可能とするような地質調査法の研究は土木地質の重要な課題の一つと考えられる。

3 ケーススタディにみる地質調査の問題点

甚だしく難航して施工中に甚大な事故を被ったトンネル工事の代表として、上越新幹線中山トンネルについてケーススタディを行い、その工事で生じた地質に起因する代表的な災害に対して、地質調査の不確実性がどのように関与したかを分析する。

3・1 上越新幹線中山トンネル

上越新幹線中山トンネルは、東京を起点とし新潟に至る300.3kmの上越新幹線上にあり、図3-1に示すように子持山(標高1,296m)および小野子山(標高1,201m)の両火山が形成する標高400~600mの高原地帯を貫く延長14,83kmの長大トンネルである。本トンネルの工事は1972年2月に6工区(東京方から小野上南工区、小野上

北工区、四方木工区、高山工区、中山工区、名胡桃工区)に分割して着手された本トンネルの特徴は、これまでに例の少ない400mに及ぶ深い立坑を作業坑としていること、2~3MPaに達する高圧で大量の地下水を伴う未固結の火山砕屑岩中を掘削すること、基盤の新第三紀中新世の地層ではスクイーピングによる強大な地圧が発生したこと、の3点に要約される。以下に、上越新幹線工事誌、大宮・水上間(日本鉄道建設公団東京新幹線建設局, 1983)の記載を中心とする引用により地質調査と事故の状況を述べる。

3・1・1 地質調査の進捗の経緯

本トンネルに関しては工事に着工する前の地表地質踏査は行われていなかった。1972~1976年の5年間は主として立坑掘削の期間であり、1974年9月の小野上北斜坑における出水事故の後に実施された地表からのボーリングを主とする地質調査によって、トンネル全体の地質状況と地下水状況の主な問題点が、①スクイーピング地圧、変形、②未固結でゆるい地層中に最高2.7MPaに達する地下水が多量に賦存している、などにあることが判明した。

1976年からは各立坑から本坑へ向かっての掘削が本格的に開始された時期であり、地質調査の目的もトンネル全体の地質構造の把握という観点から切羽前方の地質予測という方向に変化した。また、トンネル坑内からの地質調査に重点がおかれるとともに、始めて坑内地質管理調査が導入され、筆者を含む2名の地質技術者が前後6ヶ月にわたって現地に常駐し、トンネル切羽の観察、坑内での計測、先進ボーリングのコア観察を行い切羽前方の地質予測を常時実施する体制となった。

1979年3月には四方木工区において大出水事故(最大80m³/min)が発生した。また、1980年3月には高山工区においても大出水事故(最大110m³/min)が発生した。この結果、一部の区間においてトンネルルートの変更が行われた。

中山トンネルにおけるボーリング調査は地表からのもので延べ119孔、30,883mに達し、坑内からのボーリングは延べ302孔、19,555mとなり、総計421孔、50,438mに達した。

3・1・2 地質調査の進捗と施工の意思決定への反映

中山トンネルの地質は新生代第三紀中新世の緑色凝灰岩を主体とする猿ヶ京層群および貫入岩類を基盤岩とし、これらを第四紀の火山砕屑岩が被覆していて、東京方の約10kmが火山砕屑岩であり、新潟方の約5kmが新第三紀の緑色凝灰岩からなっている。

(1) トンネル全体の地質構造と層序

中山トンネルの工事に着手した当時における地質の想

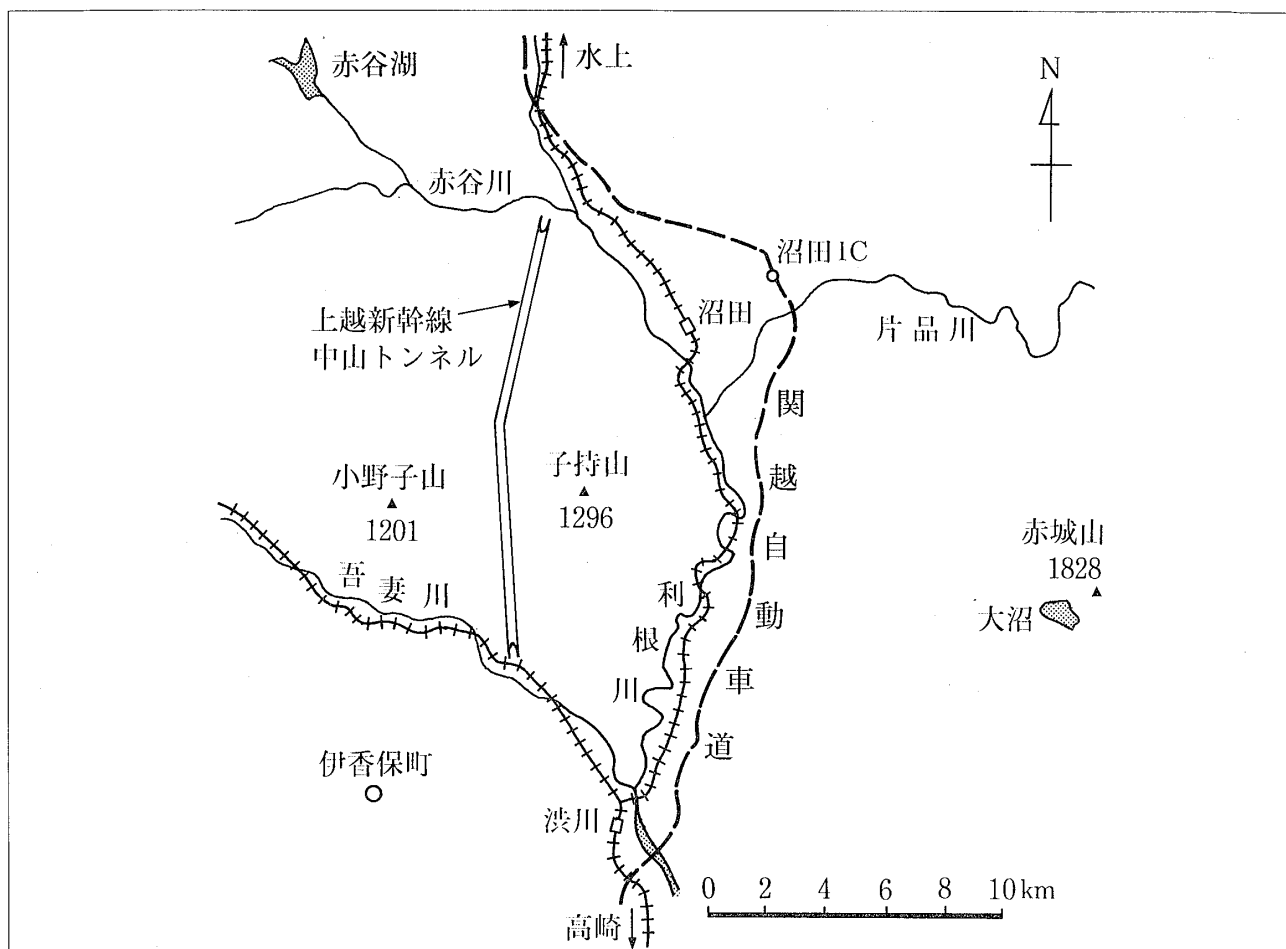


図3-1 上越新幹線中山トンネルの位置図
Fig.3-1 Location of Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen.

定が小野上北斜坑に発生した湧水と土砂崩壊事故を契機として実際と異なっていることが判明し、その後の8年間に及ぶ工事期間中に地質調査が継続的に実施された。それにより地質状況の詳細が工事の進行とともに逐次明らかとなった。ここでは、地質調査の進捗とそれに伴う工事の成果、工事の意思決定への反映について述べる。

1972年2月の工事着工当時は地質調査として中山立坑における3孔のボーリング調査が実施されていた。1973年に始めて作成したトンネル沿いの地質断面図を図3-2に示す。この段階でのボーリング調査は約3,000m間隔程度で、しかもボーリングのコア採取率が著しく悪かった。また、地表は殆ど更新世の火山灰で被覆されていることから地層の露頭が無く、地層の判断に誤りが多かった。全体の層序関係が不明であり、地下水と崩壊で難航するような地層の存在に気づいておらず、結果として施工上の問題点は指摘されなかった。

1974年9月に発生した小野上北斜坑における大出水と土砂流出の後、斜坑の出水箇所周辺で地表から14孔延べ

3,597mのボーリング調査が行われた。このボーリング調査ではコア採取率が著しく向上し、全く未固結の火山砂についてすら100%の採取率となった。その結果、古子持火砕岩層および八木沢層群の二つの地層名を新しく命名し、古子持火砕岩層は八木沢層群および綾戸安山岩を不整合に被覆していること、古子持火砕岩層基底の軽石層が大量の地下水を賦存していて土砂流出の対象層となったことなどが判明した。そして、中山トンネルにおける地層層序ならびに地質構造の基本を組み立てることが出来た。

図3-3は1981年12月に作成された地質断面図である。

図3-4は、106km300m~106km600mにおける掘削前と掘削後の地質断面図を示したものであり、実際の不整合面の形状は予想に比べて起伏に富んだものであった。地質の予想がトンネル掘削に先立ってなされたことにより、薬液の注入計画などトンネルの施工計画の立案について大変役に立つ情報となった。この時点で始めて事前調査の役割が認識されることとなった。

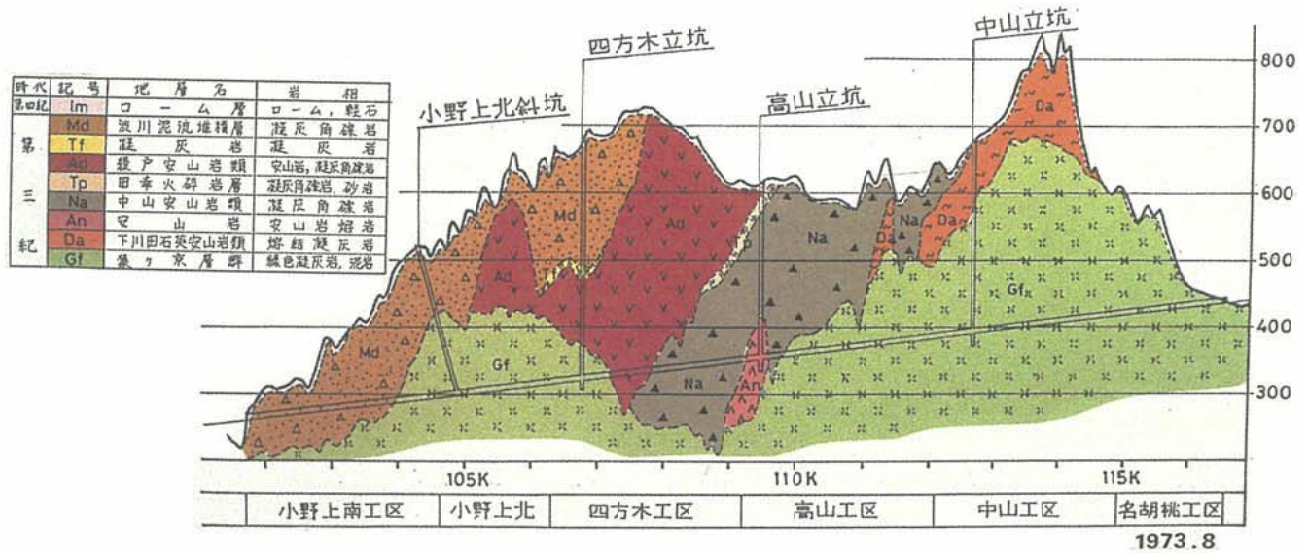


図3-2 上越新幹線中山トンネル地質縦断面図 (1973年8月作成)
 Fig.3-2 Geological profile of Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen (in August, 1973)

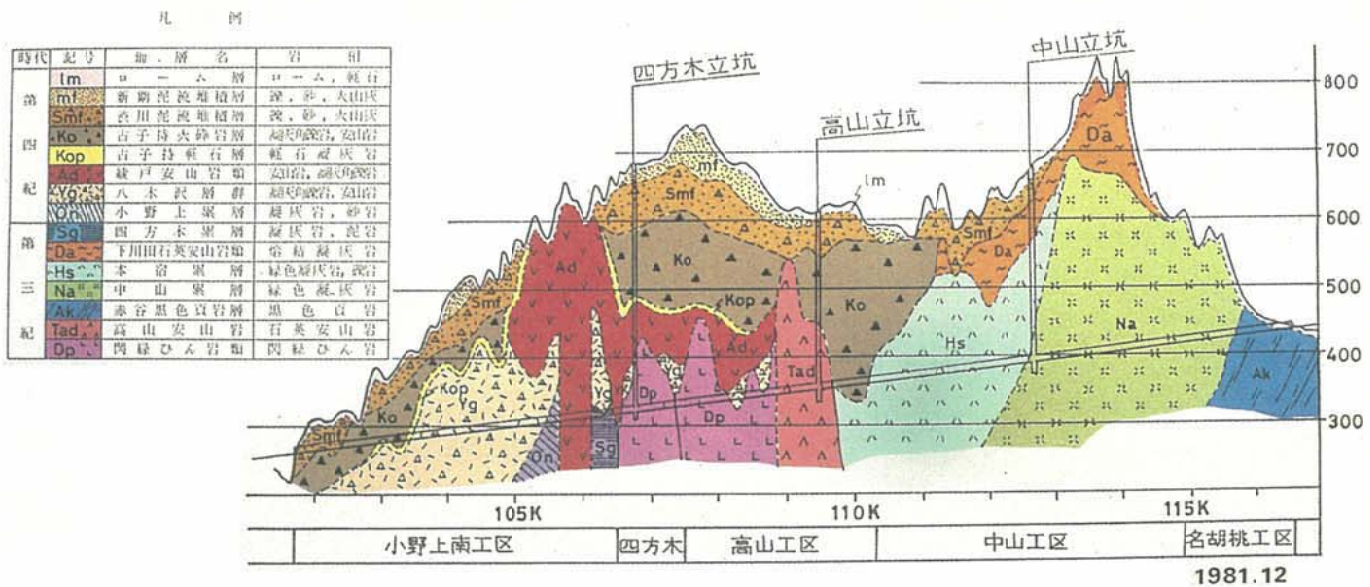


図3-3 上越新幹線中山トンネル地質縦断面図 (1981年12月トンネル完成時作成)
 Fig.3-3 Geological profile of Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen (after the completion of the excavation in December, 1981)

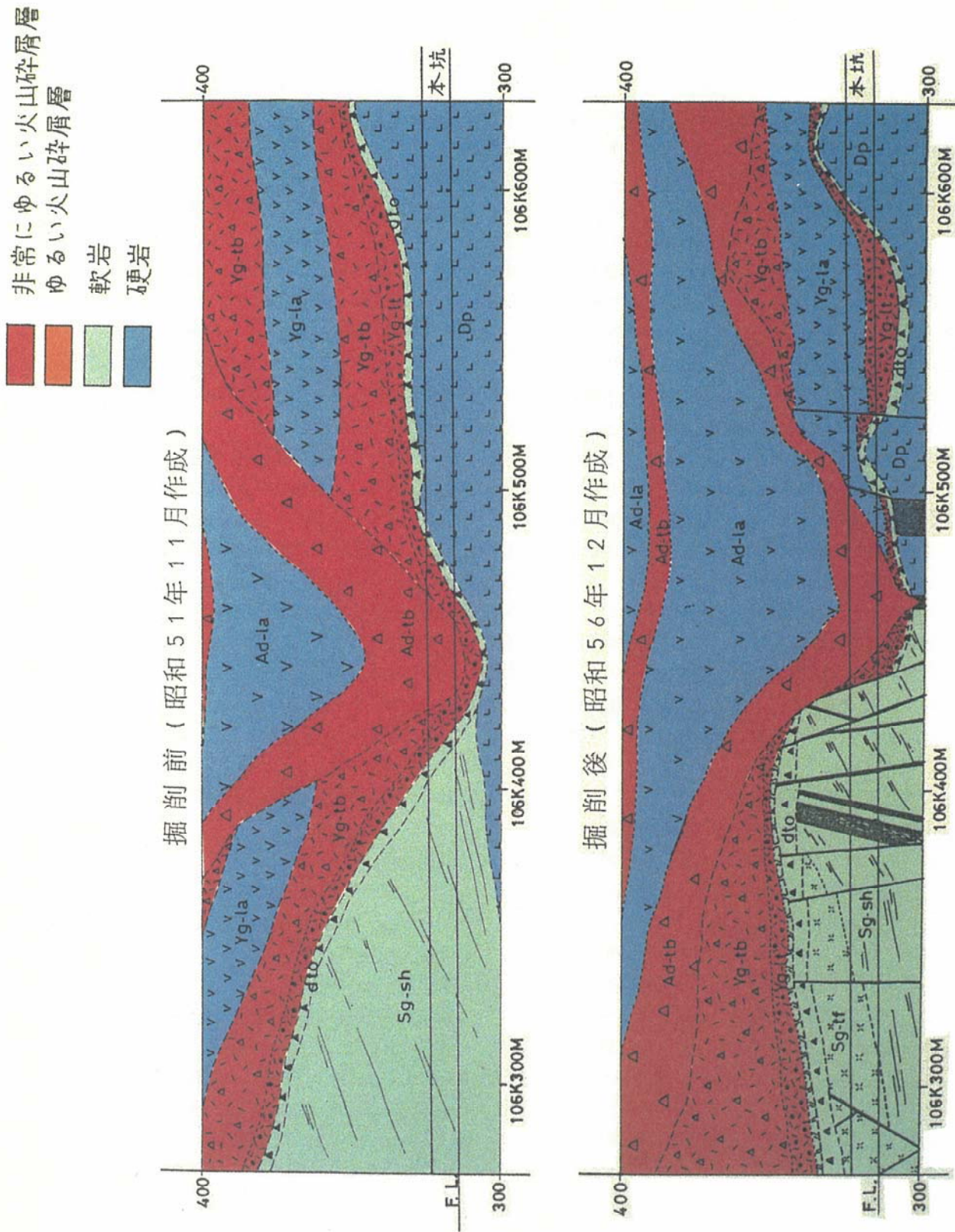


図3-4 上越新幹線中山トンネルにおける本坑の掘削前後における地質の対比

Fig. 3-4 Geological profiles of Nakayama Tunnel, the upper : before the excavation and the lower : after the excavation.

(2) 四方木工区の出水

四方木工区のトンネルは基盤岩の閃緑ひん岩と八木沢層群との境界部に位置することと基盤岩の起伏が大きくボーリング調査を実施する場所により地質が全く異なるということが随所にみられた。この区間の八木沢層群は火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩が分布し、地下水の水圧は2.3MPaに達していることが判明した。また、トンネルの東側には非常に堅硬な閃緑ひん岩が分布していることも明らかとなった。そのため、工期短縮を目的として、隣接の高山工区の方に迂回坑と注入基地を閃緑ひん岩中に設けることとなった。注入作業の効率化のため注入基地は出来るだけ本線に近づけたい、という要望があり、本線の右側40m離れた位置に設けることとした。注入基地の掘削に当たっては、先進ボーリングにより八木沢層群の不整合位置を常に確認した。その結果、不整合面上に小さい谷地形が存在することが判明したので、その地形の凹凸に合わせて迂回坑のルートも柔軟に変更した。

四方木工区107km086m、本線右40mの注入基地において1979年3月18日に大出水事故が発生し、最大湧水量は80m³/min、総湧水量は約35,000m³に達した。注入基地の切羽から斜め上向きのボーリングを9本行い、坑壁から八木沢層群までの高さを確認して約4m確保できる位置で切羽を止めた。坑道の天端の岩盤はかろうじて強大な水圧約2MPaに耐えていたが、岩盤の亀裂に沿って次第に水が浸出するに伴い急激なゆるみが生じて岩盤の崩落につながったものである。

(3) 高山工区における出水事故

高山工区108km100m～108km300m付近は、基盤岩の表面の谷地形を被覆して火山砕屑岩が堆積した地質構造であったが、本線左側に閃緑ひん岩が分布していたことから、ここに迂回坑を設け、本線に到達した後、地質の悪い部分を挟んで北および南から掘削する計画が立てられた。地上のボーリング調査によると坑道天端から閃緑ひん岩表面の八木沢層群不整合までの高さは0～50mで、坑道上部の閃緑ひん岩の厚さについて十分注意する必要があった。迂回坑ならびに大宮方からの施工にあたっては、上向きの探りボーリング(L=50m)を常に先行させ慎重に掘削した。特に本線に入ってから閃緑ひん岩の被りが薄くなるのが明白となったので探りボーリングの施工密度を増やした。108km100mからは導坑天端3.5mで閃緑ひん岩が切れることを確認したため、八木沢層群に注入することが決定された。注入は導坑天端3.5mを注入ゾーンとし、延長を30mとした。2列配置で孔尻ピッチ2m、孔数67孔を設けた。高山立坑で実績のある高圧ロッド注入によるLWおよび無機溶液型

LG-3の複合注入とし、注入率48%、残湧水殆ど無し状態で注入を終了した。1980年3月6日108km125mまで左右側壁導坑を進めた時点で、次の注入のための探りボーリングを実施し、既掘削区間の仮巻きコンクリート打設準備を進めていたところ、3月7日23時30分より108km110m付近の矢板の変状が発生した。翌8日9時30分頃、山鳴りとともに約40m³/minにおよぶ出水となった。3月9日17時30分頃、第二次崩壊が発生して最大119m³/minの大出水となり、遂に、四方木工区、高山工区ともに水没事故となった。これは四方木工区の水没事故の復旧が完全に終了した直後のことであった。

(4) 四方木工区および高山工区のルート変更

未固結で高圧地下水の出水と崩壊が、四方木工区と高山工区で発生したことから、本線ルートの変更を余儀なくされた(図3-5～図3-7)。これらの出水事故は、堅硬ではあるが、20～40cm間隔で発達する岩盤が高圧地下水によりゆるみ、崩壊に至る危険性がある事ならば、基盤岩を不整合に被覆する未固結の火山砕屑岩が容易に地下水の湧水とともに流出する危険性についての確かな予見が出来なかった点にあるといえよう。即ち、四方木工区、高山工区の水没事故に関しては地質予測よりも高圧地下水下にある未固結地層の力学的安定性についての確かな判断が出来なかったものといえる。

① 第一次ルート変更

1979年3月18日の四方木工区における大出水を契機にして、1979年9月にルート変更の決定を見た。変更ルートの選定は以下の3条件を中心にして検討された。

★ 地質条件

図3-8に示す106km600mでの地質横断面図に見るように、本線から75m東に離れた位置は硬岩からなることが判明した。

★ 隣接工区との関係

小野上南工区は導坑が105km600mに来ていることから、縫い返し延長を短縮することを考慮して始点を決定する。高山工区には108km130.350mから半径6,000mの曲線に接続する緩和曲線が既に設計されており、この曲線は変更しないこととなった。

★ 新幹線鉄道構造規則

上越新幹線の設計最高列車速度は260km/時となっており、新幹線基本構造基準規程を厳守することが原則であるため、最小曲線半径、曲線間最小直線長等の条件を考慮することとなった。

② 第二次ルート変更

1980年3月9日、高山工区の108km110m付近の

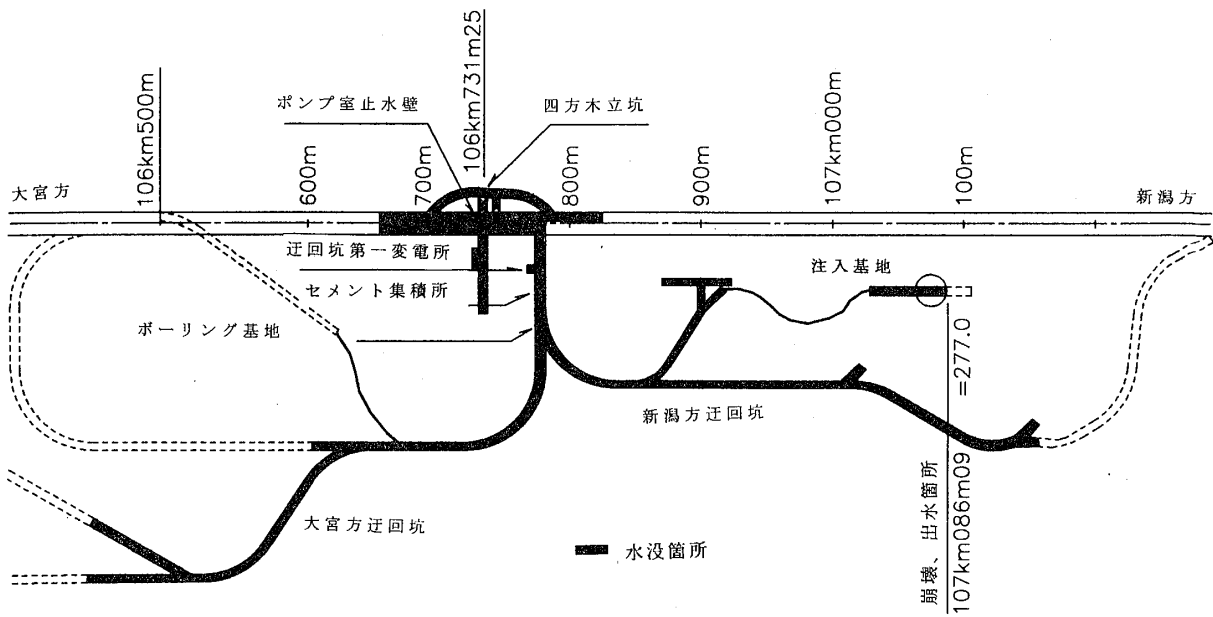


図3-5 上越新幹線中山トンネル四方木工区の出水事故による坑内の水没範囲

Fig.3-5 Submerged area of the adits due to ground water inflow at Shihogi-division, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen.

本線側壁導坑から大出水とともに土砂崩壊事故が発生して、記述のように四方木工区、高山工区は水没した。第一次ルート変更のルートよりもさらに東へルートをふれば、図3-9に示すように、注入区間を短縮することが出来る。しかし、施工の完了している区間への取り付けは設計速度260km/時で定められた最小曲線半径4,000mでは対処できないことも判明した。検討の結果、設計速度を160km/時とし、曲線半径は1,500mとすることが1981年1月に決定されて、これが最終ルートとなった。

3・2 中山トンネルの工事費の概要

中山トンネルに要した工事費について工事誌からの引用を中心にまとめる。

立坑関係工事費単価

四方木立坑	372m	13,305,365千円	35,767 (1m当)
高山立坑	295m	11,092,073	37,600
中山立坑	313m	11,243,874	35,923

中山トンネルの工事費の特徴(笹尾禎, 1995, 5未公表)をまとめると、図3-10のようである。四方木立坑の全作業日数は2,100日に及んだが、その内75%は立坑の掘削作業に費やされ、水没による復旧作業については15%程度であった。立坑は本来トンネル本坑掘削の準備作業

表3-1 中山トンネルの年毎の工事費の推移 (日本鉄道建設公団、1983)

年	契約件数	契約合計金額 千円
1971	1	13,305,365
1972	4	34,529,394
1973		
1974		
1975		
1976	1	4,039,799
1977	3	8,635,862
1978	4	13,198,417
1979	3	4,593,329
1980	13	42,522,511
1981	5	2,241,206
1982	1	55,524
合計	35	123,121,407

であるが、四方木立坑の掘削が終了する頃には、上越新幹線の他のトンネル工事の大方は完成に至っていた。このように立坑工事の難易はトンネル全体の工程に大きい影響を及ぼすので、その位置決定はトンネルルート選定

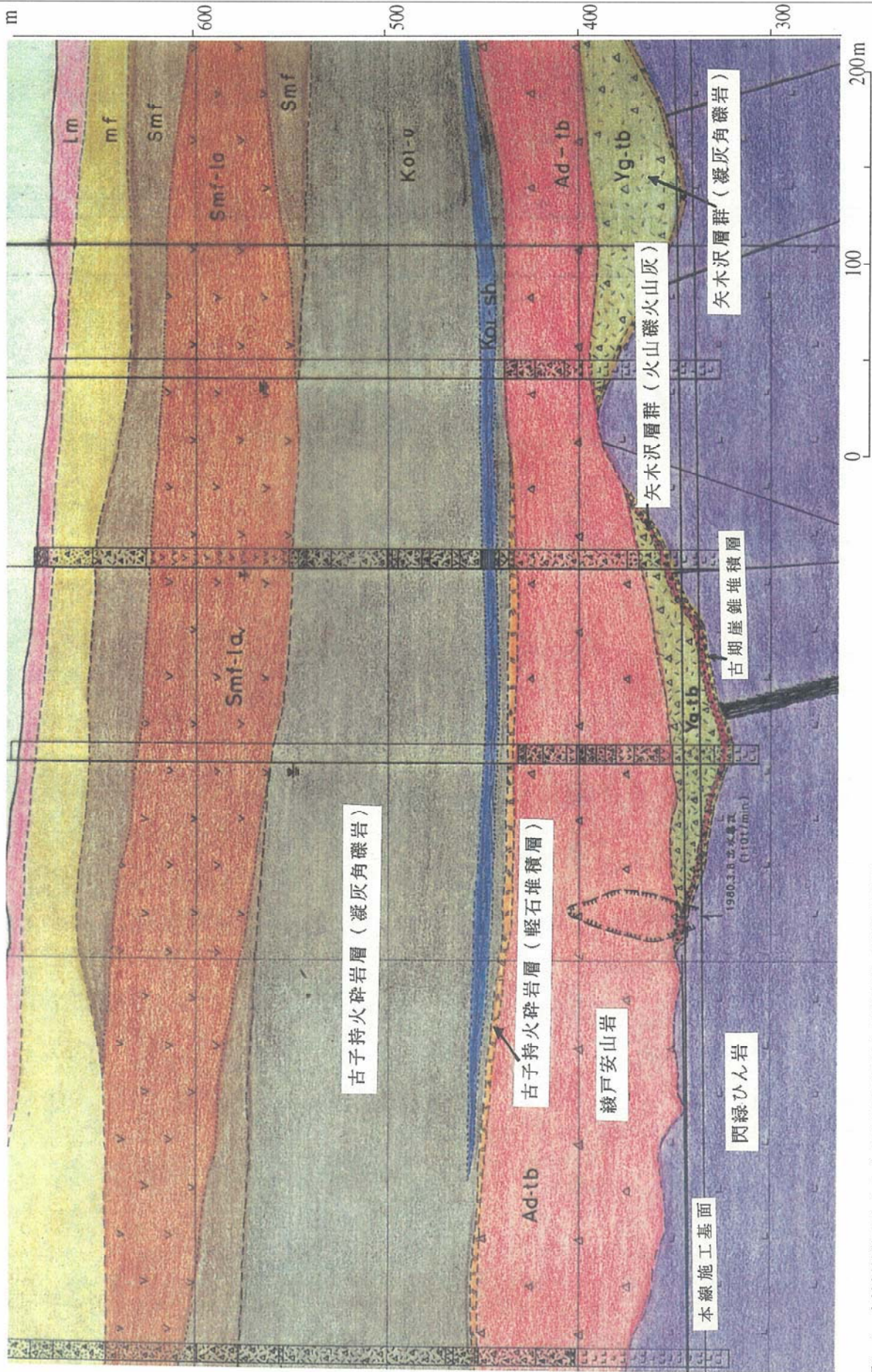


図3-6 上越新幹線中山トンネル高山工区の出水崩壊箇所地質断面図

Fig. 3-6 Geological profile near the collapsed tunnel face caused the disastrous ground water inflow accident at Takayama-division, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen.

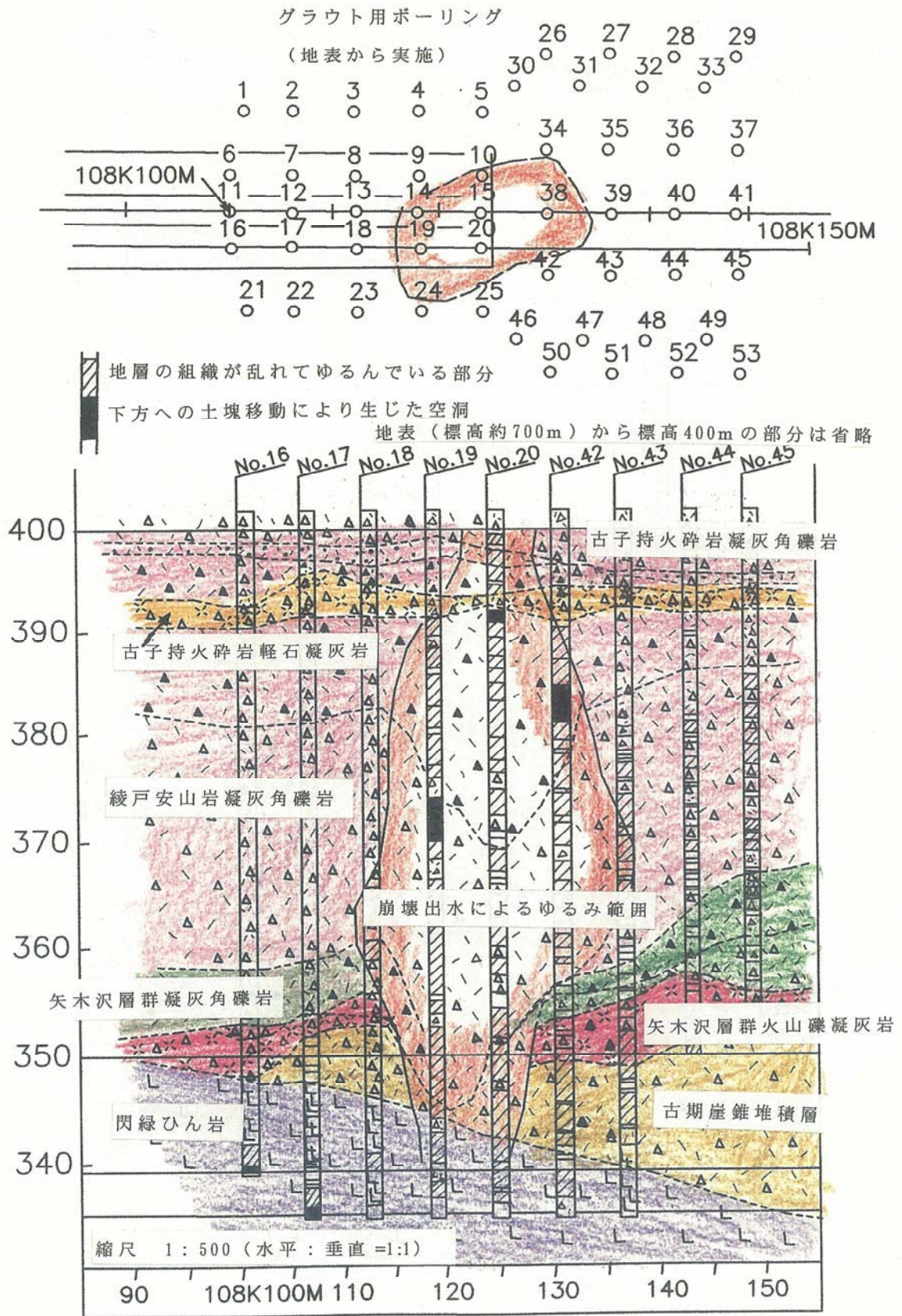


図3-7 上越新幹線中山トンネル高山工区の出水崩壊箇所上方の地層の乱れ

Fig.3-7 Disturbed geological structure of the layers above the tunnel face due to the disastrous ground water inflow at Takayama-division, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen.

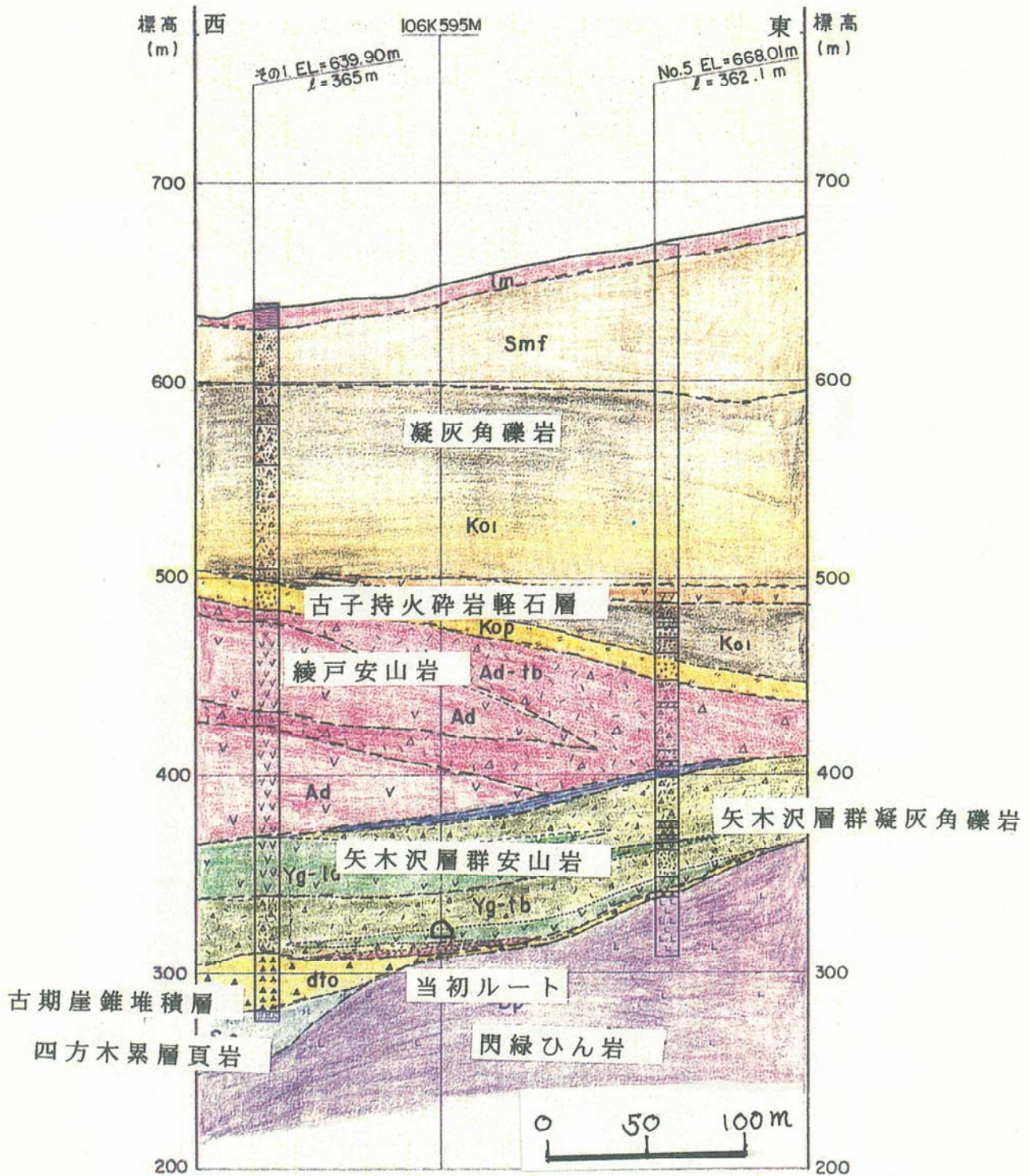


図3-8 上越新幹線中山トンネル四方木工区106km600mにおける地質横断面図
 Fig.3-8 Transverse geological profile at 106km600m, Takayama-division, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen.

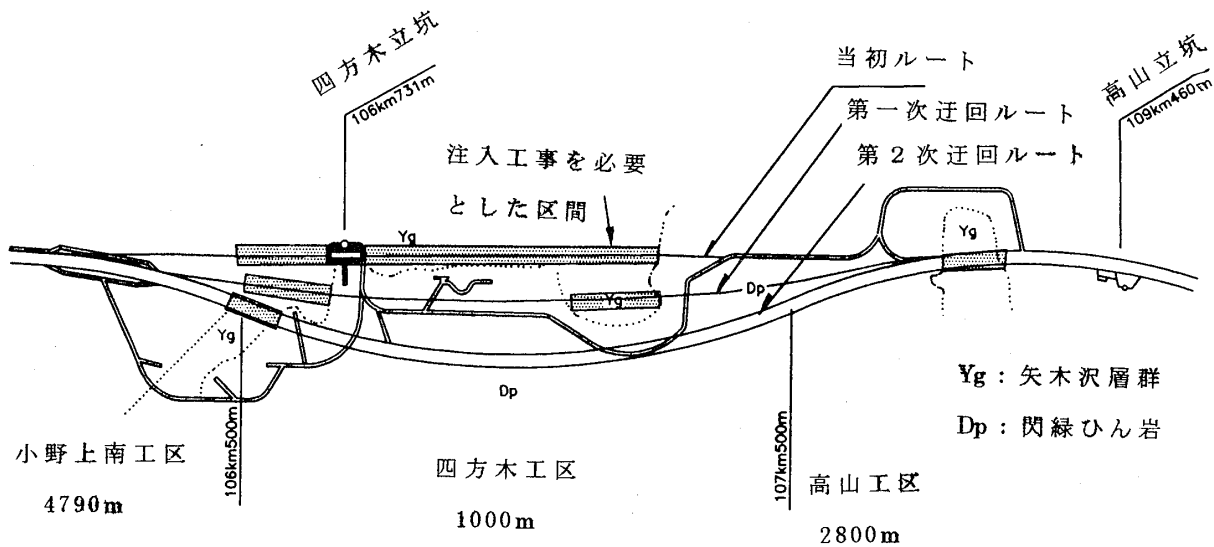
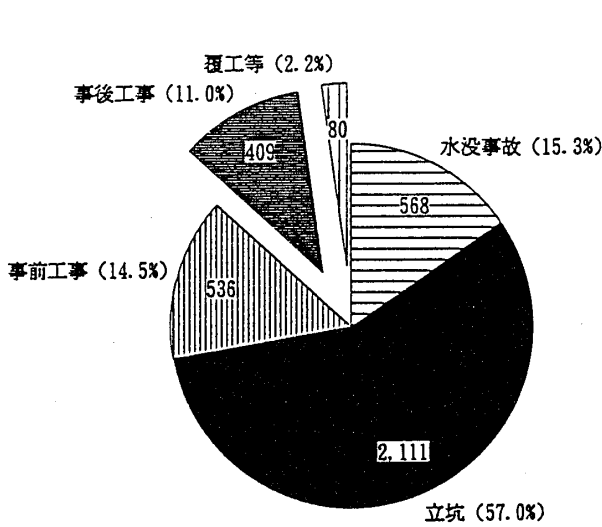


図3-9 上越新幹線中山トンネル四方木工区一高山工区におけるルート変更

Fig.3-9 The tunnel alignment finally detoured between the area of Shihogi- and Takayama divisions, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen.



工区名	延長 m	着手 年月日	竣工 年月日	作業日数
四方木	1,070	S47.02.081	S57.03.31	3,704

図3-10 上越新幹線中山トンネル四方木工区の作業日数の内訳 (笹尾禎未公表資料, 1995. 5)

Fig.3-10 Working days in the Shihogi-division, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen (unpublished documents by Sadashi Sasao, 1995. 5)

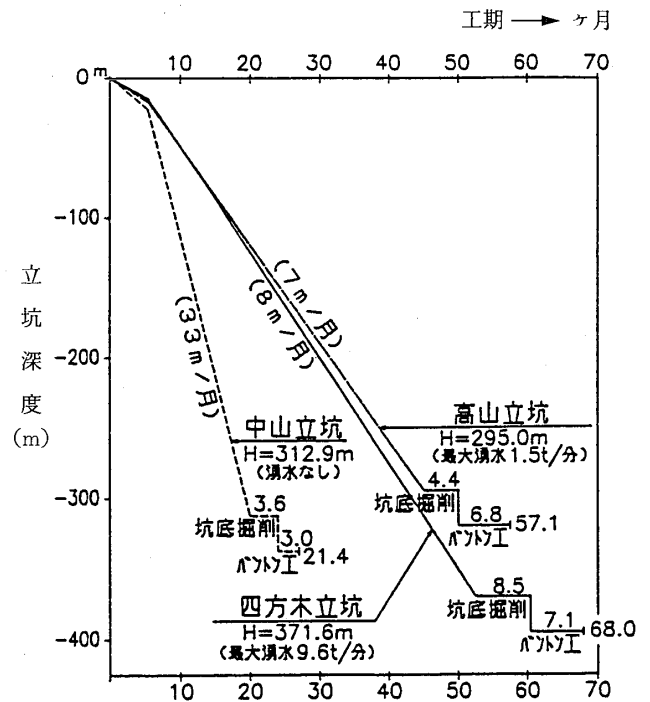


図3-11 上越新幹線中山トンネルの立坑掘進 (笹尾禎未公表資料, 1995. 5)

Fig.3-11 Excavation rates of three shafts, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen (unpublished documents by Sadashi Sasao, 1995. 5)

とあわせて重要な問題となる。図3-11は中山トンネルの3本の立坑(四方木, 高山, 中山)に関して掘削の進行実績をみたものである。中山立坑では1ヶ月当たりの進行が33m程度であったのに反して, 四方木, 高山両立

坑では1ヶ月当たり7~8mでしかなかった。図3-12は青函トンネルと中山トンネルにおける1m当たりの作業日数を比較したものであるが, 青函トンネルの本坑掘削は1ヶ月当たり30m, 中山トンネルでは10m程度であ

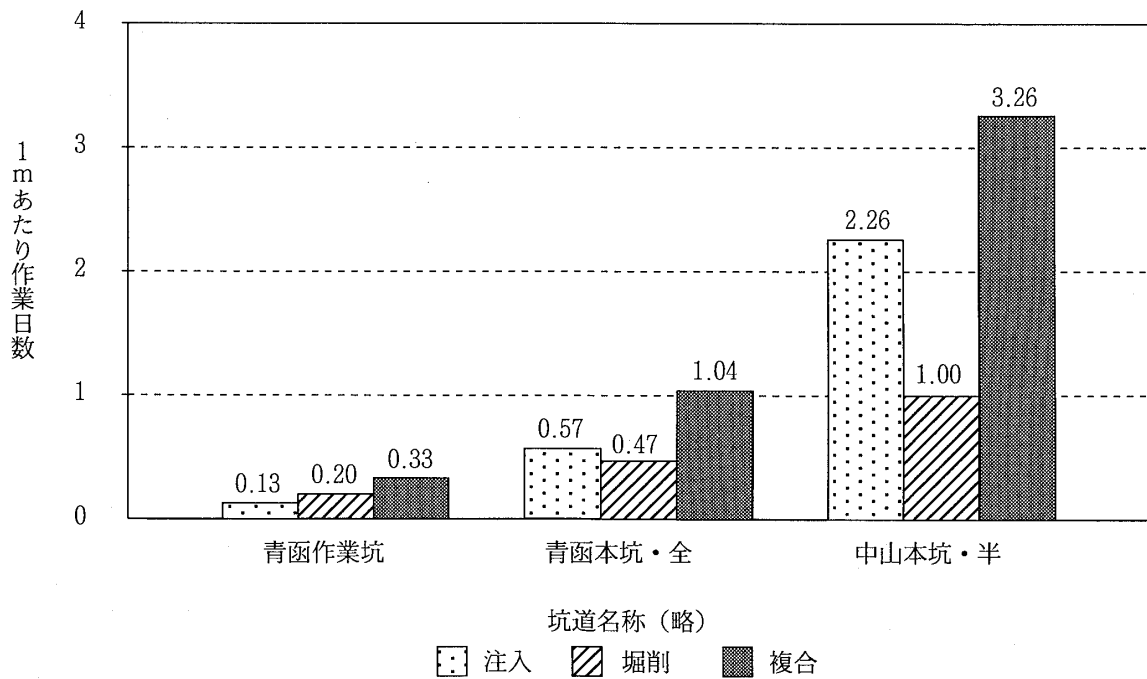


図3-12 青函トンネルと中山トンネルにおけるトンネル1 m当たりの作業日数 (笹尾禎未公表資料, 1995. 5)
 Fig.3-12 Working days required tunnel excavation for every meter advance in Seikan Tunnel and Nakayama Tunnel (unpublished documents by Sadashi Sasao, 1995. 5)

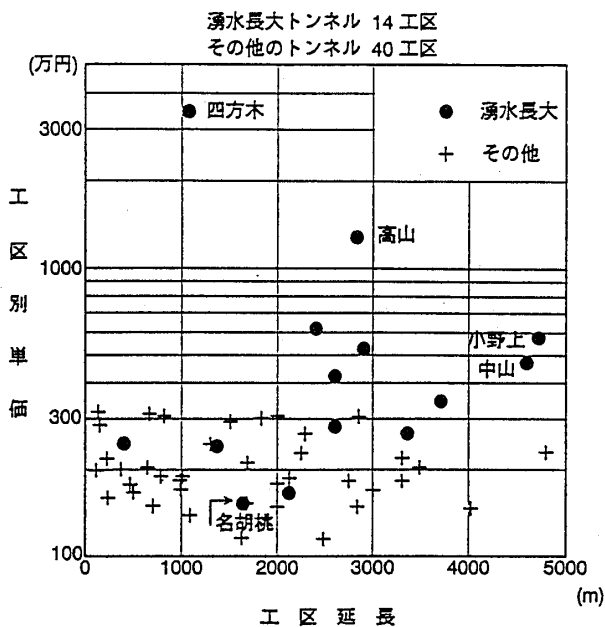


図3-13 上越新幹線トンネルの工区別でみたトンネル1 mあたりの工事費単価 (笹尾禎未公表資料, 1995. 5)
 Fig.3-13 Construction cost of full face excavation for every meter advance in Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen(unpublished documents by Sadashi Sasao, 1995, 5)

た。青函トンネルの軟岩への注入に比べて、中山トンネル(108km高山工区の例)では未固結の火山砕屑岩のため、注入に要する1 m当たりの作業日数は約4倍となった。図3-13は上越新幹線の22ヶ所のトンネルを施工した54工区の延長と1 m当たりの工事単価を見たものである。中山トンネルの四方木工区、高山工区、小野上南工区など湧水の著しかった工区では工事費の単価が大きく、難航の程度が読み取れる。

4 地質調査の不確実性

4.1 地質調査の基本

地表地質調査は地質踏査とも呼ばれるように、道路、沢、山腹、崖などの地表を歩いて自然の露頭を対象に調査することが一般であるが、ここではボーリングコア、横坑、トレンチなどの地質観察も含めて行う地質調査を指すこととする。本論における「地質調査」は特に断らない限りこの地表地質調査を指すものとする。

工場施設あるいは機械施設などにおける安全管理、保守管理等においては、高精度の検知センサーとコンピューターネットワークによる種々の防災システムが実際に稼動している。これらの方法は原因をなす素因が確定しているかつ、素因と結果との因果関係が1対1に対応する

ことが予め分かっていること、さらにその原因と結果との間の関係が数式で明確に表現出来るものが多く、原油等の岩盤タンク貯蔵の安全確保などに関する安全工学的検討手法（土木工学会，危険物保安技術協会，1976）として利用されている。しかし，地質事象の露頭は，系統的に一連の反応系列を形成しないで，本質的に空間的，時系列的に互いに大きい不連続性をもって独立に存在していることから，その調査に当たっては帰納的に相互の関係を推定するしか方法がない。そのため，論理判断に関する演繹的な数式の組み立てを行うことが不可能である。

地層や岩石からなる岩盤は，鉄鋼材料，コンクリート材料を用いた土木建築構造物とは基本的に異なり，地層生成の歴史性と地域性を有しかつその地層生成過程の詳細な情報に欠けていることから，演繹的かつ理論的に断層位置などを明らかにすることは一般に不可能といえる。

陶山ら（陶山，村岡，羽田，1960）によると，「地表地質調査とは，地表で見られる岩石，地層の状態から，地下の地質を判断する一連の野外作業である。すなわち，調査地域の河床や道路沿いを踏査して，露頭を観察し，記載しながら（“点”の調査），ルートマップを作る（“線”の調査図）。ルートマップを作っていく過程で，毎日の野外資料をもとにして，地形図を面積的に塗りつぶしていき，調査地域の地質図が作られる（“面”の調査図）と述べ，さらに，「地質図の作成作業は地形図の測量と類似している…中略…，地表地質調査においても，露頭が少なければ，表土はぎ，つば堀などによって，出来るだけ多くの“点”の調査を行うことが必要となってくる」としている。また，陶山らによると地質図とは，「地表に露出している，いろいろな地質時代の地層，火成岩，変成岩，地質構造（断層や褶曲）などの発達状態を，層位学や岩石学など地質学の基礎知識をもとに観察し，記載しながら，地質図学を用いて色と記号で地形図に図示したもので，普通は地質年代による地層区分を基準にして作られる」と述べている。図4-1に地表地質踏査におけるルートマップとルートマップから作成した地質平面図（陶山ほか，1960）を示す。河床部の左右岸には岩盤が比較的連続して露出しているため，河岸の地層や断層の連続性が良く捉えられている。しかし，両岸とも河床から山腹上方へ登るに従って風化土や樹木，下草などのため露頭が少なくなり地層の表現が大雑把となるとともに，断層などの地質構造も推定の部分が多くなっている。このように，露頭のよい河床部と風化土の厚い山腹とではその地質表現の精度に大きい差が生じることが多い。

地質家が山野を踏査する場合，簡単な地質構造の地域であっても踏査の初期の時期に地域全体をラフに歩き地質概況つまり出現する地層，岩石の特徴，化石，含有鉱物，断層，褶曲，節理，片理などの特徴から地質構造の地域性や層序の組み立て，効率的な踏査を行うためのルートを選定など種々の項目の検討を行う必要がある。

地質構造や層序の組み立てに関して，地質家は最初のラフな踏査では複数の解の候補を持つが，その候補の中の何れかに対して確信を持ち，その候補に釘付けになり，以後，毎度整理するルートマップは一つの地質構造，一つの層序にまとめられ，結果として一つの地質図が描かれることが多い。

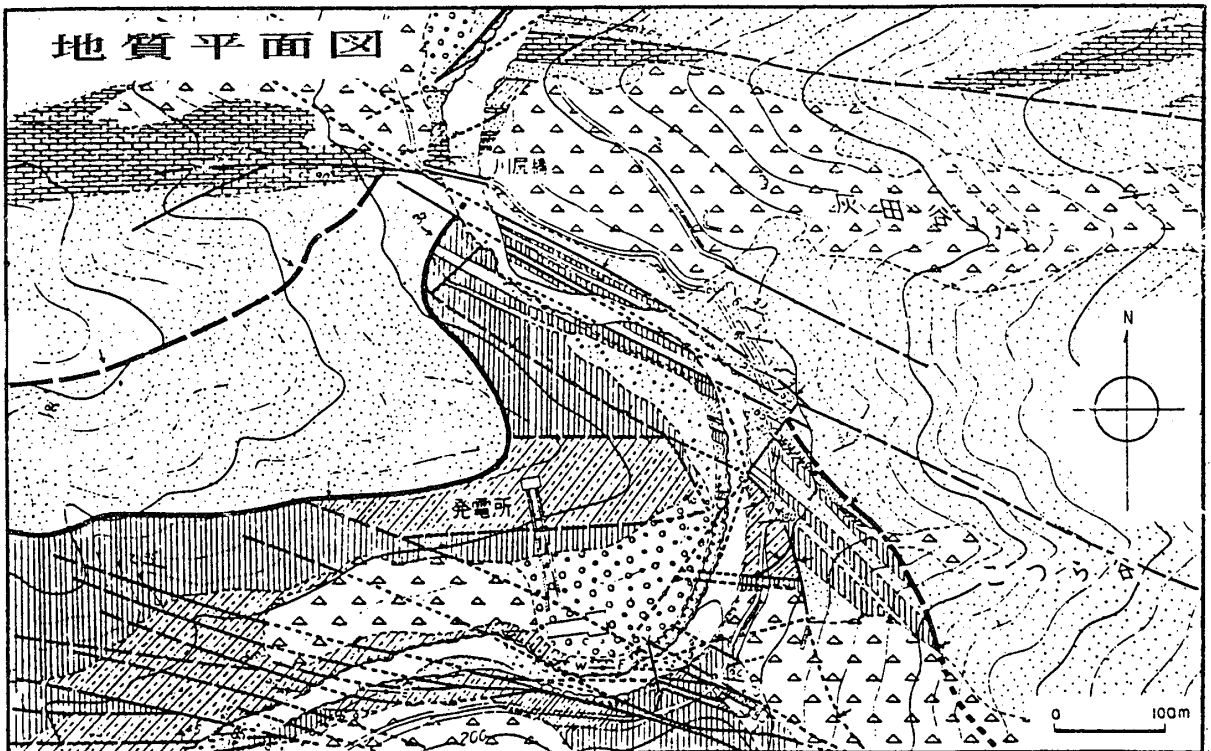
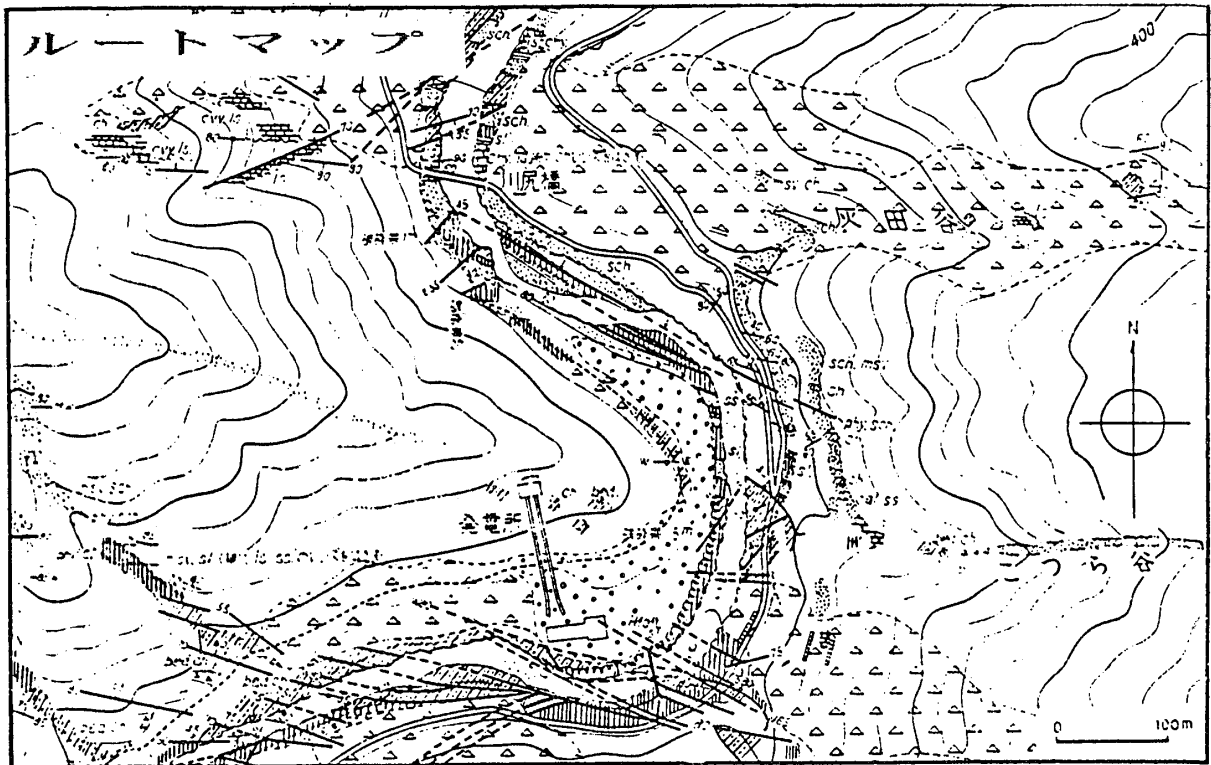
踏査の初期の時点で複数の地質図の候補があったとしても，地質構造や層序の複数案を客観的に議論の場に広げるといえることは少ないといえる。このような過程を経て作られた地質図が実際の状況と一致すれば的中する地質図であり，優れた地質家ということとなる。しかし，地質の悪い側実際に大きく不一致が生じる時には大きい工事リスクが生じることとなる。地質調査のあり方として考えるべきことは，どのようにすれば実際と一致する地質図を作ることが出来るか，という点に凝集される。

4・2 地質調査の帰納的方法と不確実性

地質調査において個々の露頭で観察される地質事象に関しては，層位学的，堆積学的，構造地質学的あるいは岩石学的，古生物学的な解釈，説明についてそれぞれ，科学的理論からの演繹的手法が用いられる。しかし，露頭同士の地質事象の相互対比を行い，地質図を描くには，地層境界面，断層面，貫入面など地層，岩石の境をなす面構造の位置，走向，傾斜，分布などを的確に把握することが基本である。この後者の方法は主として帰納的方法によるのである。

図4-2は野外の地質データから種々の推論が導かれ

*本論文で使われている「地質家」という表現については，英語でいえばジオロジスト、あるいはエンジニアリング・ジオロジストの意である。日本では一般にジオロジストも技術者として扱われ、応用理学の技術士の対象にもなっている。アメリカでは技術士は工学部出身者に対する資格でジオロジストは対象ではない。ジオロジストはエンジニアリング・ジオロジストとして登録され専門の科学者としての評価を受けている。そのようなことから、地質屋、地質家、地質技術者などいろいろな表現が考えられるが、あえて、「地質家」という表現とした。



- | | | | | | | | | | | |
|----|--|---------|--|------|--|------------|--|----------|------------------|--------------------|
| 凡例 | | 崖錐体積物 | | 石灰岩 | | 地層の走向及び傾斜 | | 正断層 | <i>nod</i> -団塊状 | <i>sdv</i> -砂質 |
| | | 河床並びに | | チャート | | 同 | | 同 | <i>msu</i> -塊状 | <i>Hf</i> -ホルンフェルス |
| | | 低位段丘堆積物 | | 粘板岩 | | (地層が垂直な場合) | | 同 | <i>bed</i> -層状 | <i>sil</i> -硅質 |
| | | 高位段丘堆積物 | | 砂岩 | | 破砕帯 | | 衝上断面 | <i>cry</i> -結晶質 | <i>cal</i> -石灰質 |
| | | 輝緑凝灰岩 | | | | | | (数字は傾斜角) | <i>phy</i> -千枚岩質 | <i>dist</i> -破砕部 |

図4-1 地質調査におけるルートマップと地質平面図 (陶山ほか, 1960)

Fig.4-1 Examples of geological route map and geological plan (Suyama et al., 1960)

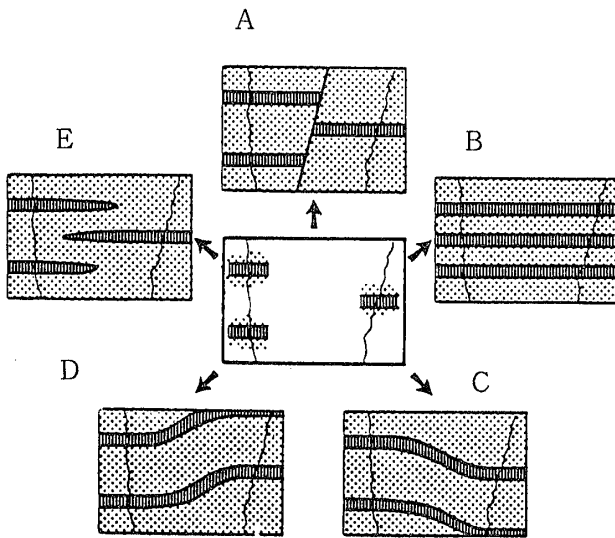


図4-2 野外データ（中央に示す）から様々な結論が導かれる例（坂，1993）
 Fig. 4-2 Example of many possible solutions from the geological data (Saka, 1993)

る例（坂，1993）を示すもので、図の中央に示したように3ヶ所の露頭で観察された地層が類似して相互に連続している可能性が否定出来ない、という情報に立脚して地質図を作成する時、最低5通り（A～E）の可能性が生じることが分かる。ここでもし、もう一つの情報、例えば、図4-2の中央の野外データにおいて二つの沢の間で沢に平行な断層が存在して地層にずれが生じている、というデータが別に得られた場合には、Aに示す結論に近いものとなるであろう。地質家は過去の経験、周辺地域における地層の連続性の癖など種々のデータ、これらは極めて漠然として何ら確とした証拠を示さないこともあるが、これらの特徴を基にして、地質家特有の感あるいは洞察を働かせて、一つの結論を採用するに至る。地質家は露頭の観察を行っている時点から、地質構造の結論を導くための証拠集めに血眼となるのである。たとえば、地質家のあげる結論を証拠立てるのに必要で十分な条件が揃っていない場合でも、地質家は自分の経験と判断に基づく結論を自信をもって提出することとなる。ここにおいて、事前段階の地質調査結果は一義的に確定したのではなく、不確実性が含まれることを避けることは不可能といえる。

土木工事におけるボーリング調査や試掘横坑などは地下に隠された地質情報の取得にとって非常に重要であり、有効である。しかしながら、地質の生成発達における1回性、空間的1回性などによる再現性の無いことから、ボーリング他のデータが如何様に増加しても、事前調査

においては論理的に不可知部分を避けることが不可能である。図4-3に上越新幹線中山トンネル106km00m～106km700m間の最終的な地質断面図（日本鉄道建設公団東京新幹線建設局，1983）のデータを基にして、地質柱状図を作成して示す。ここで、数少ない地質情報から地質断面図を作成する場合、何通りの解が考えられるか、どのような地質情報が解の最適化に寄与するかなどについて考察してみる。同区間内には地表からのボーリング調査が6本ある内の2本のデータを用いてある。そこで幾つかの基本的な仮定条件を設定して地質断面図の作成を以下のように試みる。ただし、トンネルは地表から約350mの深さにあり、ボーリング柱状図は上部の約100m分は省略してある。ボーリングコアの観察から判明した事実は以下のようなものである。

事実1：基盤岩はSg-sh（四方木累層頁岩）とDp（閃緑ひん岩）であり、Sg-shはスクイージングしやすい頁岩からなり、地層面はほぼ水平である。Dpは花崗閃緑ひん岩である。

事実2：dt0（古期崖錐堆積層）は基盤岩が地表に露出していた当時の古期崖錐堆積層である。

事実3：Kop（古子持火砕岩層軽石凝灰岩）は古子持火山の活動の初期に噴出した降下軽石堆積物である。

<推論1> Sg-shがDpを不整合に被覆していると仮定した場合

<推論2> DpがSg-shの中に貫入していると仮定した場合

<推論3> Sg-shとDpは断層関係で接してして、Dpの方がSg-shよりも古い時代に貫入したと仮定した場合

この問題は、基盤岩の地質構造の推定に中心があり、それらを不整合で被覆する上位の地層については、事実2、3によってほぼ確定的な地質断面が得られる。推論1、2、3の内、図4-4に推論3のケースの場合を示すが、トンネルの掘削によって実際に判明した地質状況は、図4-5に示す通りであった。Sg-sh（四方木累層）はDp（花崗閃緑ひん岩）より若い時代の地層であり、この両者はこの地点では断層で接している。正断層である。dt0（古期崖錐堆積層）の堆積ときに四方木累層と花崗閃緑ひん岩が地表に露出していて多くの谷地形が形成され、このトンネルルート上でもその内の一つの谷地形が形成されていた。基盤岩の谷部は断層の弱部にそって発達したと思われ、これを不整合で被覆したYg-lt（八木沢層群火山礫層）、Ad-lb（綾戸安山岩凝灰角礫岩）は未固結でゆるく、地下水の湧水とともに切羽

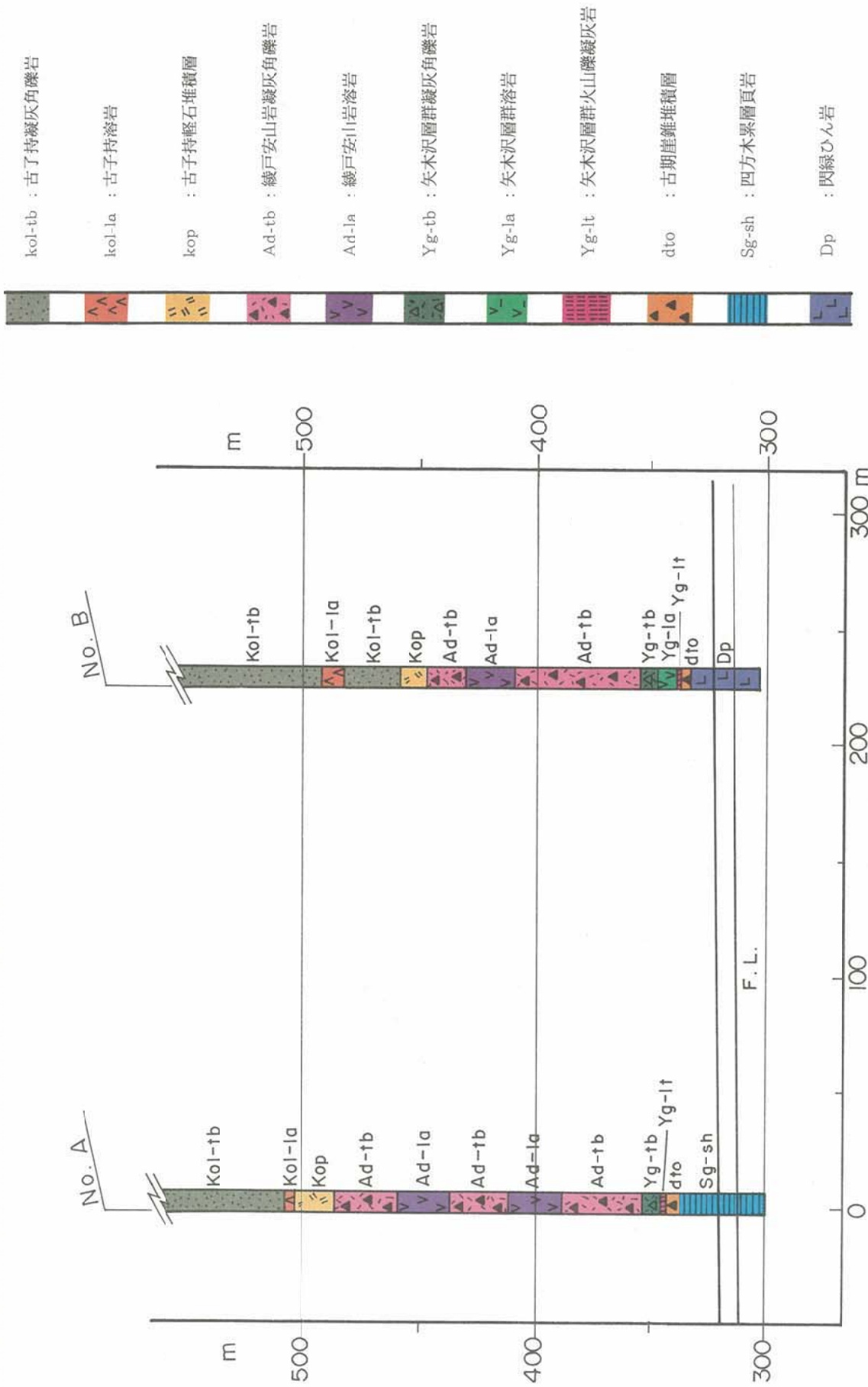


図4-3 地質柱状断面図
Fig. 4-3 Geographical columnar profile of Takayama-division, Nakayama Tunnel

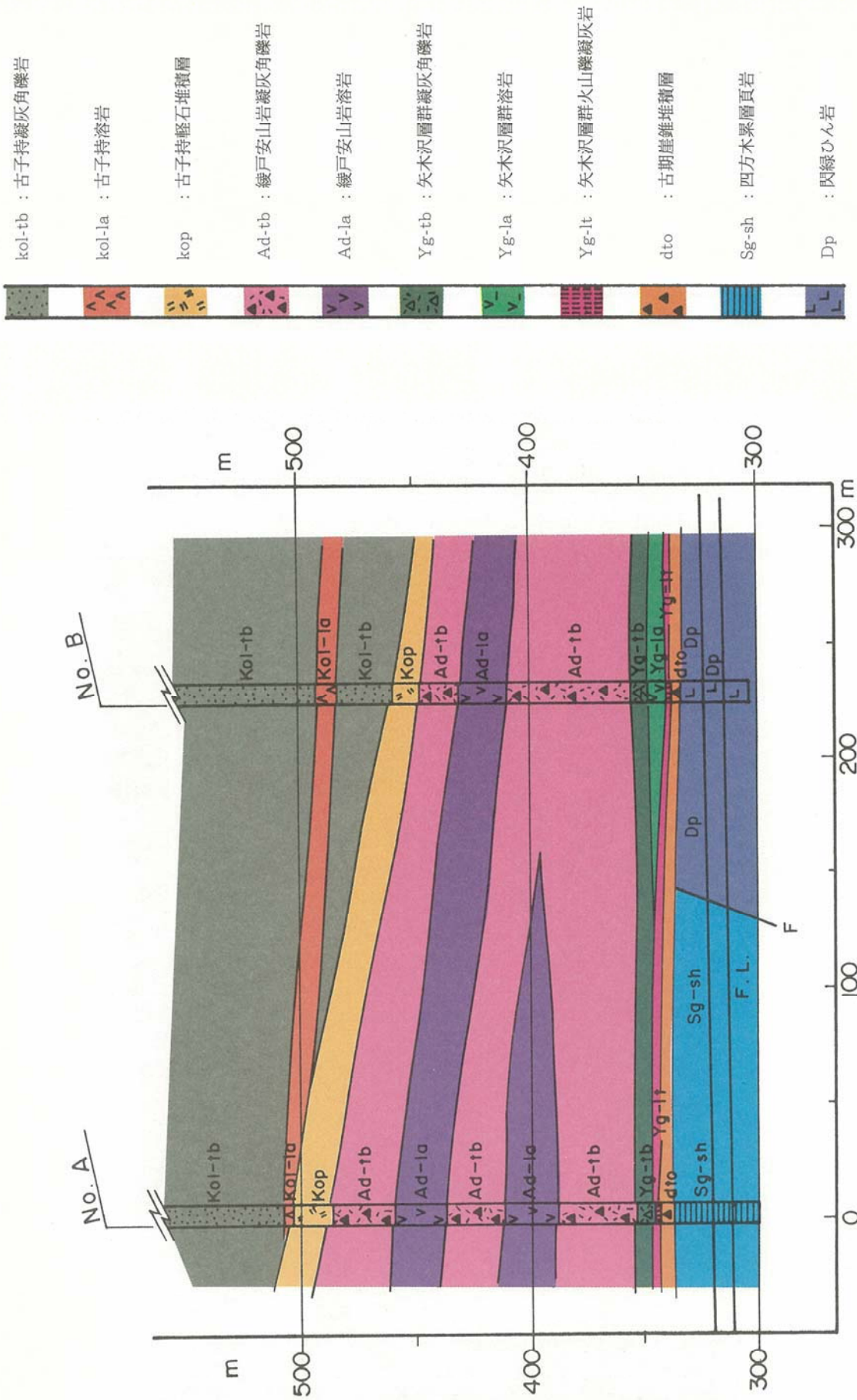
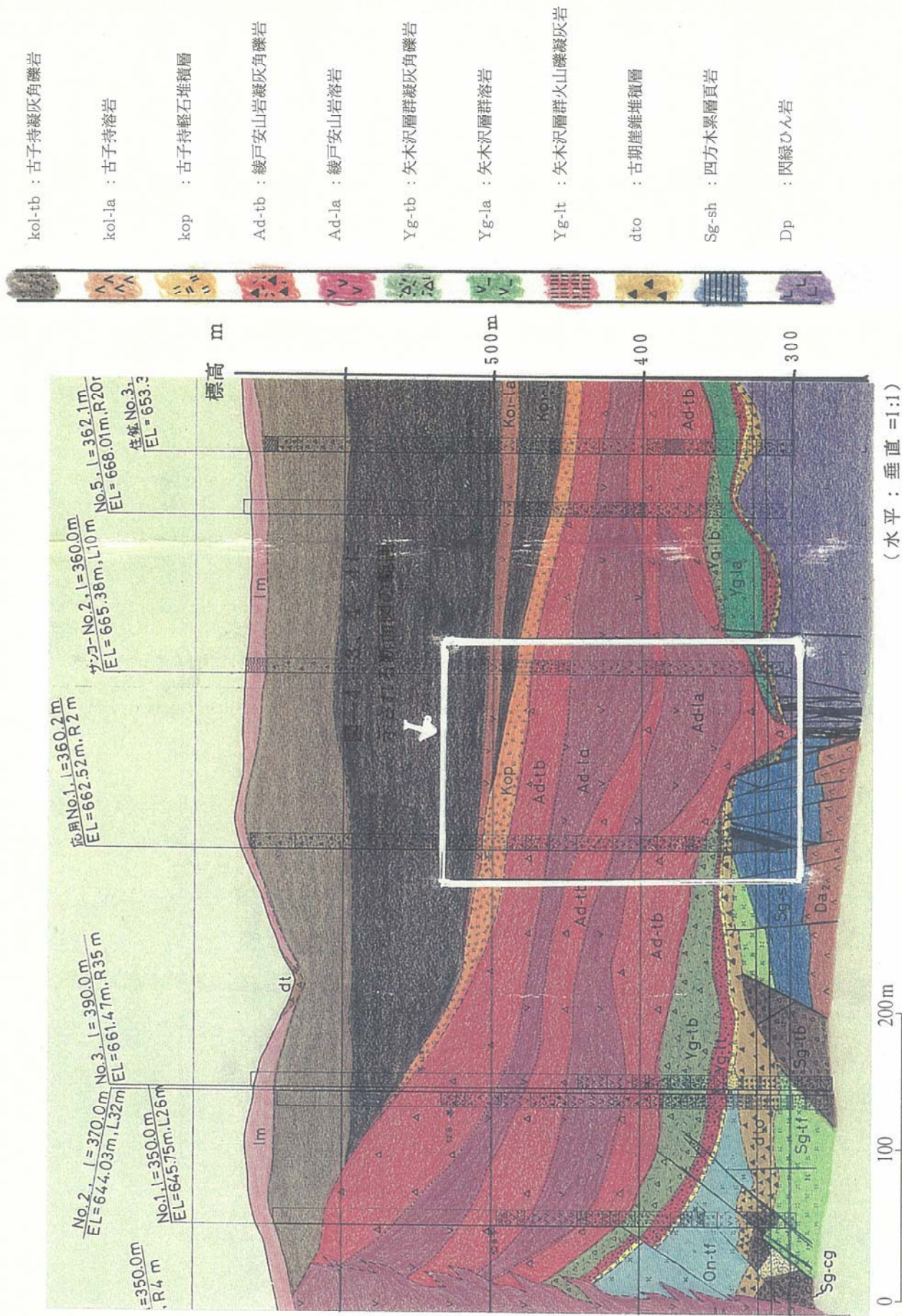


図4-4 ケース3の地質断面図
Fig.4-4 Geological profile of case 3



(水平 : 垂直 = 1:1)

図 4-5 上越新幹線中山トンネル106km000m—106km700m間の地質縦断面図
 Fig. 4-5 Geological profile between 106km000m and 106km700m, Nakayama Tunnel, Joetsu-Shinkansen

が崩壊して著しく掘削は難航した。ここで注目したい点は、実際の解が推論3と基本的には同じであるものの、基盤岩の不整合面が深く谷となってトンネルを横切っていたことで、これによりトンネル掘削上の土木の意味は全く異なったものとなったことである。この場合、断層部分にそって谷地形が発達していることが事前に認識されており、予見されていたとすれば、トンネル施工に役立つ情報の提供が可能となったといえる。

地質調査において、地表の露頭ならびにボーリング等の地質データから地質図を3次的に推定する場合、多くの地質家は上述のような幾つかのケースを検討しながら、しかし、最終的には地質家特有の洞察をもって決定論的に、その人の選択する解を提出するのである。客観的にみて、このような極めて単純な地質構造ですら少なくとも三つの解が同時に存在し、地質の予想と実際が大きく乖離することがあるのには驚かされるものがある。

5 帰納的最適化地質調査法

地質調査の場合、露頭での観察と記載は、その野外作業を行った地質家にしか実際の認識を得ることは出来ない。その観察が如何に綿密で正確であり、また写真、スケッチを伴う詳細な記述であったとしても、他の地質家が後にそれを読んだ場合、その文章と観察記録の枠内におけるデータの認識と抽象化された内容での理解となり、実際の現象把握とは異なったものとなる。従って、地質構造や地質層序などの組立のアイデアは踏査を担当する地質家の直感や洞察の結果に排他的に依存する。出来上がった地質図は実際にその通りになっているかの如き印象を受けるが、それは担当した地質家の考えを表したものにしか過ぎず、地質推定の複数の解の一つにしか過ぎないのである。

5・1 地質構造最小単元

一方、既述のように土木構造物の建設、特にトンネルやダムなどの建設に必要な地質調査においては、異なった地層、岩石の相接する境界面を3次的に地質図に描いて、力学特性、水理特性などの工学特性の分布、工事の難易などを明らかにする必要がある。この場合の境界面は主として地層面、不整合面、貫入面、断層面などの何れかである。これらの何れかの境界面で境された地質体の大きさを、その中の地質構造要素、例えば地層面の走向傾斜、節理群や片理の方位パターンなどがほぼ均一であり、これ以上分解できないと思われるようなブロックの組合せとして全体の地質図を構成することが可能と

なる。このような地質構造の均一性からみた最小のブロックは、地質構造最小単元 (Minimum Unit Body on Geological Structure, 近藤, 1997) と呼ばれる。地質家は、野外における地質調査において意識するとしないうちに拘らず、この地質構造最小単元を何らかの方法で見出し、地質図として描いているのである。土木地質的には、ここで定義した地質構造最小単元の考え方は非常に重要であることは明白である。即ち、調査の対象地域内における地質構造最小単元の代表的なブロック内で原位試験あるいは現場測定を行い、その地点での工学特性と地質の関係が把握されたとするならば、その関係を同一の地質構造最小単元内の他の地域にも拡張することが可能となるからである。つまり、同一の地質構造最小単元は工学的にも同一の母集団とみなすことが可能となると同時に、当該の構造物の設計施工の検討を効果的に行う上で欠かすことの出来ない地質の最小区分となる。

5・2 離散的反復最適化

地質調査において、連続した地質事象を洞察する基礎となる露頭の数には限りがある。一方、調査の期間、費用にも限りがあることを考慮すると、どのように大規模な調査を行っても全ての地質事象を事前に把握することは論理的に不可能である。また、空間的に不連続な露頭の観察のためデータの地域的分布が断片化し、その地質体に関するデータの分布は空間的に離散的である。新しい露頭の観察により、あるいはボーリングや横坑、トレンチの観察により、時としてその時点までに構築した地質事象の解釈に対して全く矛盾するような地質事象が得られることもある。そのため、地質構造の組立てを行っているその最中においても、矛盾する事象のためそれ以前に得た解の案を棄却せざるを得ないようなことも有り得る。

このような考え方は、離散的反復最適化 (Discrete Repetition Optimization, 近藤, 1997) と呼ばれる。

以上に述べた二つの基本的な考え方、即ち地質構造最小単元と離散的反復最適化によって帰納的最適化地質調査法 (Inductive Optimization Method for Geological Mapping : MGM) が構成される。

5・3 帰納的最適化地質調査法

1) 調査の初期段階

地質観察による論拠の有無に拘らず、考えられる全ての仮説を取り上げて、各仮説に基づく解の候補からの絞り込みを行うための調査計画、踏査のルート、地質事象観察の重要地点などを計画する。

2) 上記による仮説毎の地質構造、層序に関して、1) で検討した踏査ルートを中心に踏査する。その踏査で観察された地質事象をその都度整理してそれぞれの仮説が成立するかどうか、一つ一つルートマップから考えられる仮説の数だけの地質図を別々に作成して、妥当性の検証を行う。矛盾する解の候補についてはどこがどのように矛盾するかに関して、地質図と記述により明確にする。踏査を行っている間は毎日、ルートマップの整理を行うが、全ての解の候補に対して複数の地質図を作成しながら、仮説の妥当性の検証を進める。この場合、このような不確定で離散的な事象においても、個々の露頭における地質事象そのものに関する解釈や解析については地質学の研究で得られている理論や知見、試験測定などを可能な限り行って、理論的かつ演繹的に推考を進める必要がある。

3) 以後、調査期間中において、個々の妥当性の検証を進める。

4) 当該の調査期間の終了時点で、上記の過程を総合的に整理して、各仮説毎にその妥当性の検証結果をチェックする。唯一の解に到達することもあるが、露頭の量と質によっては複数の地質の解の候補が残ることも有り得る。

5) 最終的に複数の地質図の解が残るのであれば、その何れも公平に記載して、報告することとし、その観察の記載と理由を付す。そして、一つの解に絞り込むために必要となる今後の調査計画案も併せて提出すべきである。ここで、担当する地質家の重要な義務の一つは、複数の地質の解の候補のそれぞれが当該の工事プロジェクトの設計施工に関して与える難易の影響の程度を明らかにすることである。工事の難易、経済性および工期という観点から見て、予測される地質の変動の幅が工事に与える影響の度合いについて記述しなければならない。

以上をダイアグラムで表現すると、図5-1のようになる。ここで考慮すべきことは、地質においては上記のような方法を取ったとしても、その解はあくまでも候補であり、真であるかどうか分からないことである。そして、その後現れるたった一つの地質事象データによって、これまでに得られた地質の解とは全く異なったものにも変わることも有り得る、ということである。そのようなところに地質調査の不確実性が存在し、工事のリスクが発生する可能性を秘めているといえる。従って、地質調査の過程の全ての時点で、その時点での地質の予測に関する変動の幅を可能な限り公平に認識して、それらを土木技術者に報告することが重要である。

自然現象として捉えた場合、地質現象あるいは地層の分布と地質構造については、構造物の基礎地盤の力学的、水理的問題とは全く異なる範疇と考えざるを得ない。それは既述のような地質の歴史的、地域的特性に対して地質家の現地における任意性に満ちた観察と独自の判断に加えて、抽象化された地質図がその産物として得られることをみれば明瞭である。地質事象の歴史的1回性、空間的1回性により、地層岩石の分布、層序および構造などの解析は確率的取り扱いを不能とし、他の演繹的理学あるいは工学と基本的に異なるところが存する。そのようなことから、出来る地質家とそうでない地質家が存在し、同じ地質家でも非常に的中する地質図を作成する時と全く的中しない時が存在する理由の一端が理解される。

図5-2は、中山トンネル106km-107kmの四方木立坑周辺の水平地質断面図（日本鉄道建設公団東京新幹線建設局、1983）で、昭和51年（1976年）から昭和57年（1982年）にかけての地質調査と工事の進捗とともに地質図が変化する有り様を示している。ここでは、閃緑ひん岩、八木沢層群、四方木累層、綾戸安山岩の相互の不整合、貫入、層序関係などの把握に注目することとする。これらの水平断面図はトンネル施工基面に沿って作成したものである。

図5-2(A)では、B1-B7の地表から実施した垂直ボーリング調査により閃緑ひん岩、八木沢層群、綾戸安山岩などを区別することが出来た。B6で把握された泥岩については、その層序的位置づけが不明で八木沢層群の一部あるいは八木沢層群より古い地層と考えられた。閃緑ひん岩と八木沢層群と泥岩との関係は不整合（A点）あるいは断層関係と推定し、綾戸安山岩はこれより新时期（B点）であると推定した。

図5-2(B)では、B11、B12、B13の立坑作業基地坑内からの水平ボーリングにより、閃緑ひん岩と八木沢層群の境界が大きく波状にうねっていて明らかに不整合面の存在（図中で矢印を付した）を読み取ることが出来た。立坑の新潟方107km手前の位置にルートを横断して八木沢層群と閃緑ひん岩の不整合面が存在すること（図中の推定印）は想像である。

図5-2(C)では、地表からのボーリングB14-23、坑内からの水平ボーリングB24-25により、八木沢層群の詳細が把握されたが、全体の地質構造と地層分布にはB)の段階の推定と比べて大幅な変化はない。この段階での目覚しい地質の知見は八木沢層群の基底に古期崖錐堆積層が存在すること、ならびに八木沢層群基底の古期崖錐堆積層の直上にある火山礫凝灰岩が連続して不整合面に沿って広く分布すること、四方木累層は八木沢層群の古

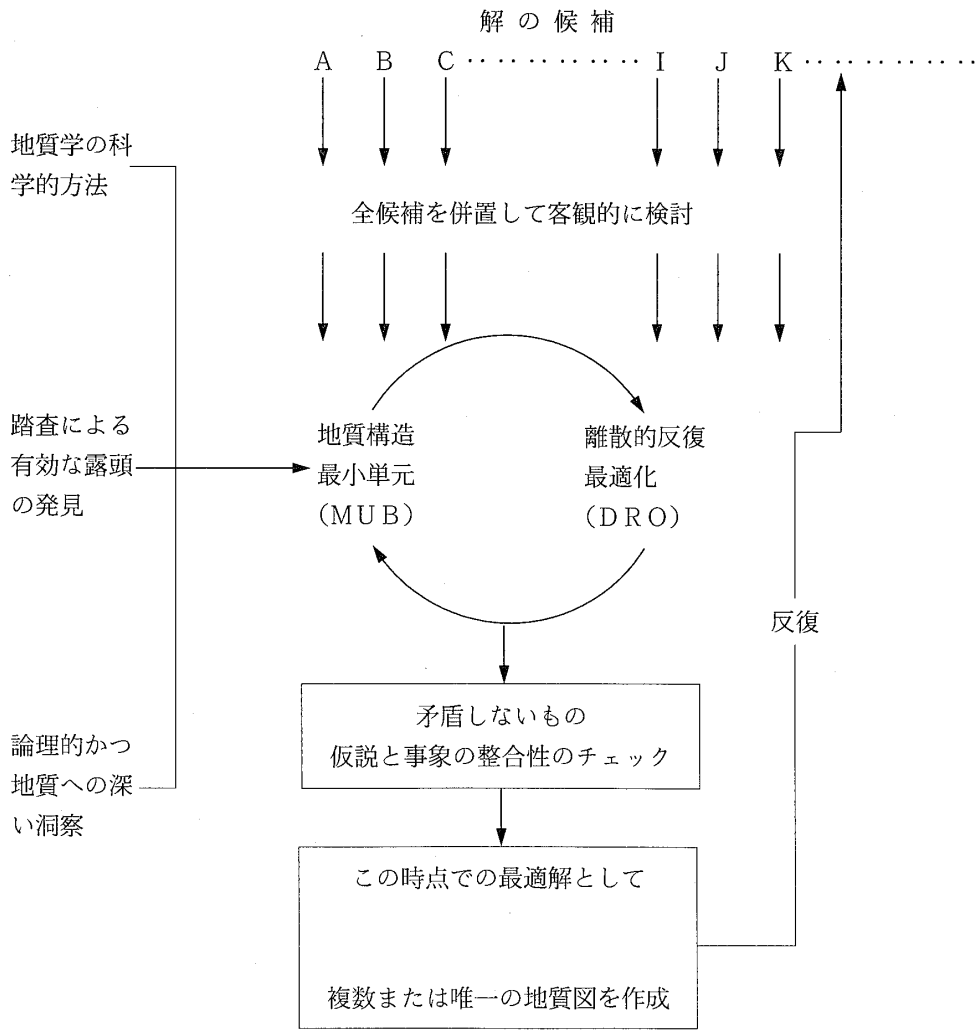


図5-1 帰納的最適化地質調査法

Fig. 5-1 Illustrated diagram of Inductive Optimization Method of Geological Investigation

期崖錐堆積層に被覆されていることが把握された点にある。これにより、四方木累層は閃緑ひん岩より新しいがここでは断層で接し、八木沢層群よりは古いという点が読み取れ、八木沢層群の堆積が開始される時の基盤下位層（ここでは閃緑ひん岩、四方木累層を指す）が地表に露出して沢、谷、尾根のなす斜面に広範囲にわたって古期崖錐堆積層からなる表土が存在したことが判明した。

図5-2(D)では、坑内からの水平ボーリングB26-B29により閃緑ひん岩と四方木累層の境界面付近に地形的な谷状の落ち込みが存在していて、綾戸安山岩の凝灰角礫岩などが分布することが推定された。B30, B31は高山方への迂回坑掘削にあたって閃緑ひん岩の分布の確認に有効であった。

図5-2(E)では、四方木工区、高山工区における出水事故の後のルート変更によるトンネル掘削によって、閃緑ひん岩と四方木累層の間を画する断層がトンネルル

トにほぼ直交して多数発達していることが判明した。

このように、四方木工区周辺の地質については、1972年2月の工事着工に対して1976年10月から1978年3月までの約2ヶ年間の調査で大局的な地質構造が把握され、大方の工事の意思決定に貢献することが出来た。1976年の調査結果と最終の1983年の結果とでは問題の八木沢層群の分布と閃緑ひん岩の分布に大きい違いが認められ、1976年の調査結果に対しては著しい地質調査の不確実性が認められるといえよう。

ここで、図5-2で塗色された岩相の分布に注目すると、同一の塗色で区切られた範囲内を同一の岩相が分布するものとして地質図が表現されている。これは地質家ならば誰でも衆知の問題で極く当然のことであるが、意識するとしないうに拘らずこのような取り扱いを地質構造最小単位として定義している。複数の地点で見られる岩石の岩石学的な同一性あるいは類似性、地層の場合では

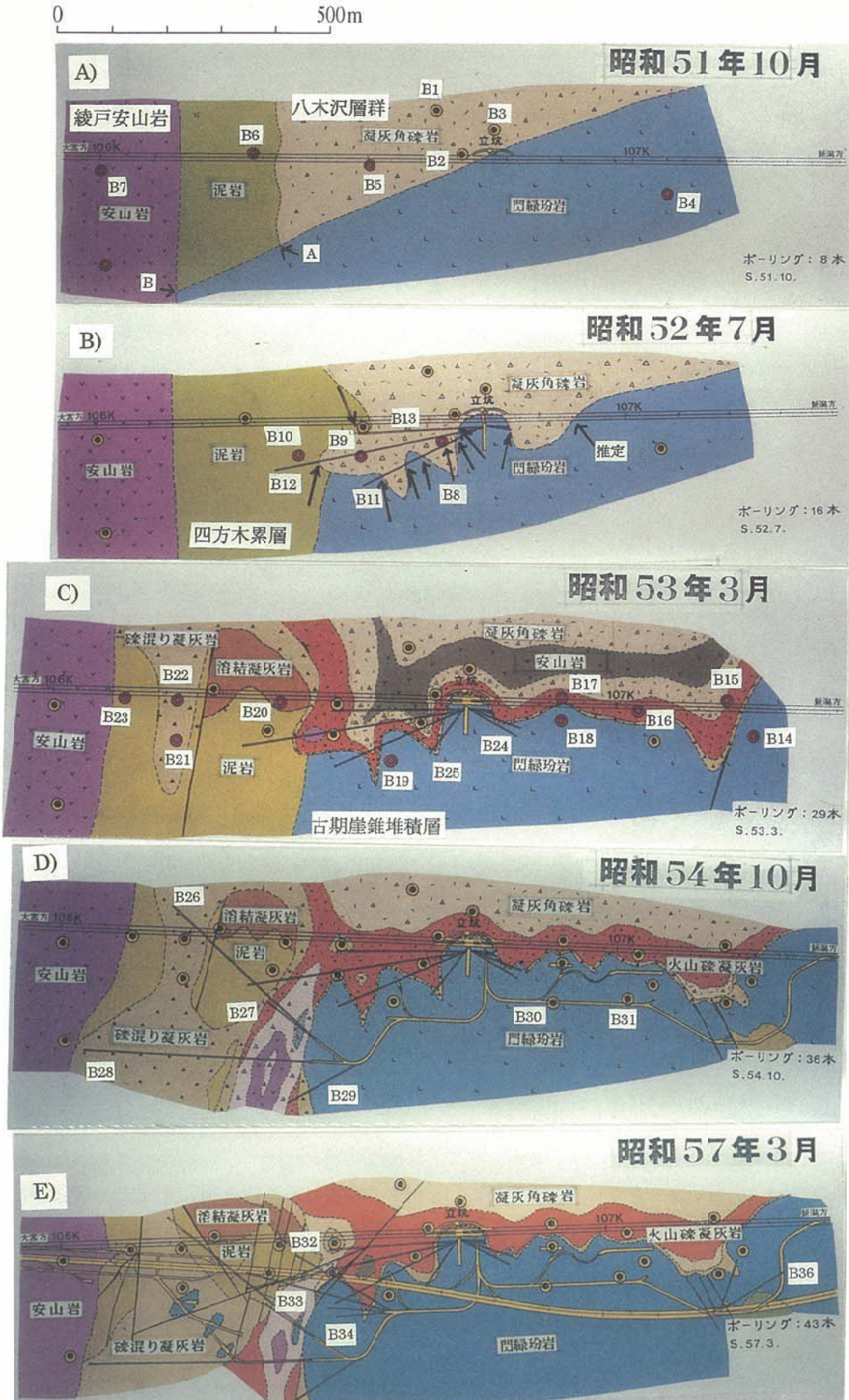


図5-2 上越新幹線中山トンネル四方木立坑周辺における地質図(工事進捗に伴う地質露頭の増加により詳細な地質図が得られる)
 Fig.5-2 Sliced geological plan near the Shihogi Shaft of Nakayama Tunnel

同一層準としての対比の判定が重要である。この地層対比の判定が図5-2(A)から図5-2(E)にかけてボーリング調査(鉛直, 水平)や坑道掘削の結果を待って変遷しているのが分かる。その様子は図5-2(A), (B)と(C), (D), (E)のグループで大きく異なっている。その代表的なものは八木沢層群に見られる。つまり, 調査の初期では凝灰角礫岩として一括取り扱っていたものが, 火山礫凝灰岩および古期崖錐堆積層の存在が八木沢層群の基底部に於ける層準対比にとって重要であることとトンネルの施工上極めて重大なリスクの多い地層であることが判明したことから, これらを分けて定義する必要が生じて図5-2(C), (D), (E)のような表現を行っている。ここにおいて, 層序的な区分けとしての地質構造最小単元がトンネル施工の難易と直結して重要な分類となり得ることを示している。

一方, 図5-2(A)から(E)に至る間での地質図の変遷は以上に述べた問題のほか各地層同士の境界の分布の作る構造のあり方にある。その顕著な例は図5-2(A)と同(E)を比較すると良く分かる。(A)においてはボーリングの数が少なく坑道も未掘削のため, 地質露頭の非常に少ないことと, 従って地質層序や構造が不確定の状態にあり, いわば, 手探り状態で推定を行ったものである。図上でA点における凝灰角礫岩と泥岩の境界が閃緑ひん岩に切られていると考えた。つまり, 閃緑ひん岩の方が前2者より新しいと考えた。これは, 凝灰角礫岩と泥岩が第三紀中新世の地層と誤認したことから生じたものである。また, B点において綾戸安山岩が泥岩と閃緑ひん岩の両方を切っていて綾戸安山岩がこの両者より新しい貫入であると考えた。

図5-2(B)において, 凝灰角礫岩と閃緑ひん岩の境界に関して, 水平ボーリングB8, B11, B12などによって起伏の多い不整合が存在することが分かり, 106km900付近のルート上にも凝灰角礫岩が広く分布するであろうと推定されている。図5-2(C)以降の調査において, 凝灰角礫岩などの火山碎屑岩はボーリングコア採取率の向上により, その実態が的確に把握されて第三紀の閃緑ひん岩を不整合に被覆する鮮新世の地層と判断された。また, これらの鮮新世の凝灰角礫岩, 火山礫凝灰岩などの八木沢層群と綾戸安山岩との関係も図5-2(C)から図5-2(E)の時期にかけて明らかとなり, 地層の判定に二転三転があるものの坑内からの水平ボーリングと本坑の掘削で実際の確認が進む中で地層の判定も確実なものとなった。図5-2(A)から同(E)に示されるように, 同じ場所, 地域であっても増加する露頭の観察結果から二転三転しながらも次第に一つの地質図に向かってまとまっていく

様子が伺われるが, このような推論過程を先に述べた離散的な反復最適化と呼ぶのである。

次に注目すべきは, 図5-2における八木沢層群の地層の細分の問題で, 図の(A)から(E)においてその細分の色分けに若干の差異が認められる。基本的には, 八木沢層群最下層の古期崖錐堆積層のすぐ上位にある火山礫凝灰岩がトンネル掘削にとって高圧湧水, 土砂崩壊流出などの重大問題を提起するものであったことから, この地層を一つの単元として表示することが最重要課題であった。このような観点から, 付近の地質に関する地層細分を行っている。図5-2(C)における八木沢層群の安山岩は角礫の多い集塊岩状であることから細別したが, その後の調査ではその上下にある凝灰角礫岩との区別が難しいことから同図の(D), (E)では安山岩として表現しないで凝灰角礫岩に一括して含めて表現している。このように均一で最小のユニットとして扱うことが出来て, 土木的にも意味のある細分化された地層単元は, 先に述べた地質構造最小単元と呼ぶものに相当する。このような地質構造最小単元を精度良く表現することにより, 地層の分布を知るばかりでなく, 地層の層準を考えた対比と連続性をも読み取ることが可能となり, 全体の地質構造の発達過程をも読み取ることが出来るようになる。

6 リスク要因評価における地質調査の役割

6・1 トンネル工事のリスク

土木における地質調査の主たる目的は, 計画, 設計から工事完了に至る何れの段階に対しても工事の難易, 問題点の把握, 著しい難航があるか, その代替案の検討, 設計施工に必要な物理的, 力学的物性値などに関する基礎資料を提供することにある。従って, 土木地質調査の役割や方法などは, それを利用する設計施工側がどのようなニーズを土木地質調査に対して持っているか, あるいはどのようなことを必要としているか, について熟知しなければ生まれてこない。

ここで, 土木地質調査の主たる目的は以下の2側面(近藤, 1997)になる。

- ★ 重大な工事リスク発生の可能性の検討と, 経済的かつ安全な工事の選択の検討に必要な地質の基礎資料提供を目的とするリスク要因調査
- ★ 予備設計, 実施設計や施工計画, 施工法検討など具体的な設計図面の作成および工事費算定の基礎となる地盤の物性値を求めることを目的とする地盤物性調査

前者は主として工事におけるリスクを回避して最適な

案を求める意思決定に資するものであり、後者は主として、設計上の構造物の形状、寸法、数量や工事費などの具体的で詳細な図面と数量表の作成や施工手順を検討するために必要となるものである。

リスク発生につながり易い地質として、土木学会ではトンネル標準示方書（山岳編）・同解説（1992）の中で、「場合によってはトンネルルートの変更を検討しなければならないもの」を以下のように分けている。

- ★ 地滑り、斜面崩落などが予想される地山
- ★ 小さな土被りの場合
- ★ 断層破碎帯
- ★ 滞水した未固結層
- ★ 高い地熱、温泉、有毒ガス
- ★ 近接した構造物への影響が予想される地山

表6-1は上記の土木学会トンネル標準示方書（山岳編）・同解説（1992）に示されたリスク発生につながり易い地質に関して、事前の予想や工事への影響度合いなどの一般傾向を整理したものである。日本トンネル技術協会は、トンネル工事に際して遭遇する異常出水の原因と形態を検討し、図6-1(A), (B)（日本トンネル技術協会、1981）に示した。図に示されている地質の特徴と湧水形態は経験的に十分整理されているが、問題はこれらの地質と地下水の障害に関する事前の予想が的中するかどうか、にあり、トンネルの設計以前の地質調査の不確実性に最も大きい問題点が存する。

表6-1 トンネルの工事リスクの発生と影響の程度
（土木学会トンネル標準示方書（山岳編）・同解説、1992）

	事前の予想	被害の程度	工事費への影響	工程遅延の程度
坑口部他の地滑り、斜面崩壊	容易に予想	徐々に発生被害甚大	多大の影響	長期間となる
小さな土被り	容易に予想	中程度	中規模	短期化
断層破碎帯	事前に予想は困難あり	小-中	小-中	短期
滞水未固結層	予想困難	大-極大	大-極大	長期化
スクイーピング地山	予想可	小-中	小-中	問題ない
高熱地山、温泉有毒ガス	予想困難	人身事故	極大	長期化
近接施工	予想可	第三者への影響大	大-極大	長期化

6. 2 リスク要因評価の検討フロー

以下に、トンネルの設計の流れにおけるリスク要因調査と地盤物性調査が検討フローの中で占める位置づけを示す。

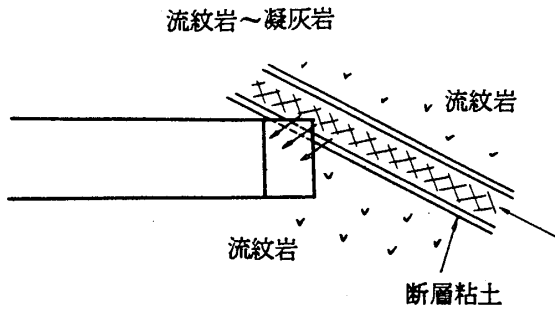
表6-2 トンネル設計の流れにおけるリスク要因調査と地盤物性調査の役割

【計画から実施設計の段階】…リスク要因調査が主である
主要な問題点の抽出…少ない資料での確な地質の見通しを得なければならない
★ 避けるべき致命的問題は何か
★ 不可避ではあるが克服が可能な問題は何か
★ 問題の少ない路線の選定は可能か
調査計画の立案…地質の不確実性を考慮する
★ 路線選定のためのリスク評価を行う
★ 経済的で安全なトンネル工事の可能性を探る
★ 工費と工期の基本情報を得る
この段階での地質調査のまとめ…地質の不確実性とリスクの種類、程度を評価すべきである
★ 地質平面図、地質断面図の作成
★ 地質調査の不確実性がどの程度かを評価する
★ その不確実性から生じるリスクの種類、程度の評価
★ 発生の可能性のある出水、崩壊などの指摘
★ 複数のトンネル案に対する概略設計と経済比較
★ 地域社会、自然環境への影響の評価
★ 維持管理上の問題点について見通しを得る
【実施設計段階】…地盤物性調査が主で地質と地盤の力学特性値の関係を把握する必要がある
設計上、特に留意すべき地盤条件は何か
★ 地質構造、層序が予想と異なった場合を想定して、トンネル掘削の安定性を検討する
★ 破碎帯、熱水変質帯、メランジェなどの分布とスクイーピング、スエリングの可能性と安定性を調べる
★ 湧水と周辺地下水への影響の程度
施工上の問題に対する検討
★ 線形、施工基面、坑口位置
★ 掘削の加背割、掘削方式
★ 切羽の自立性と対策工
★ 水抜き、グラウト工
★ 近接施工による既存構造物への影響

1) 火成岩型

岩盤の破碎されたものあるいは亀裂発達帯に地下水が充満している。

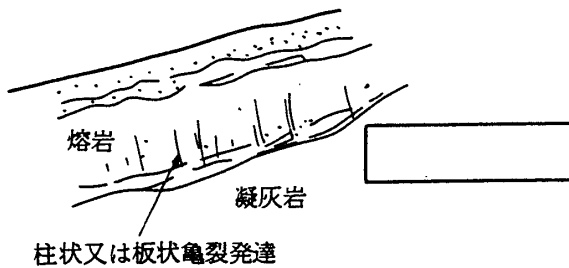
(恵那山トンネル、青函トンネル、葛老山トンネル)



1a) 火山岩型 A

火山山麓など、火山岩地帯のトンネルの場合、透水性の悪い凝灰岩を掘削中は水が出ないが、それを下から突き破って、溶岩の亀裂地帯に入るといわゆる裂か水が多量に噴出する。

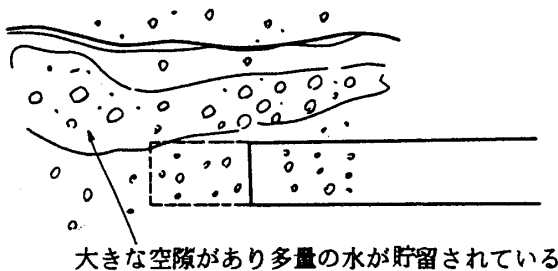
(南郷山トンネル、丹那トンネル)



1b) 火山岩型 B

火山泥流堆積物（凝灰角礫岩）の中を掘削中しばしば遭遇する。空隙の発達した部分がレンズ状に分布し、水脈を形成している。

(榛名トンネル)



1c) 第三紀層型

不透水の泥岩を掘削して、砂岩の帯水層を突き破った場合、多量の突発湧水が発生する。この場合は水量よりもむしろ切り羽の崩壊（砂の流砂流動）を生ずることが大きな問題である。

(薬師トンネル、赤倉トンネル)

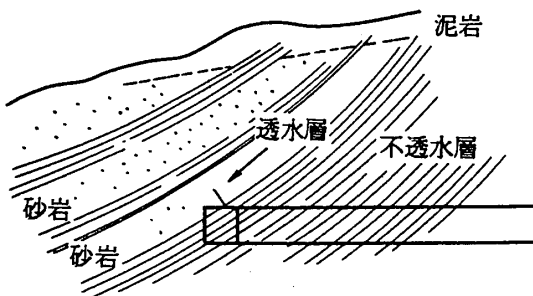
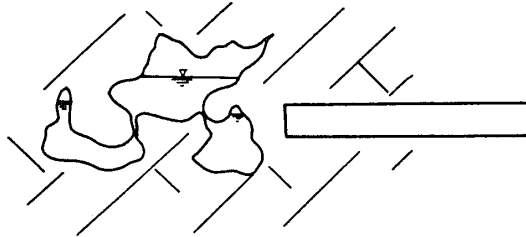


図 6-1(A) 異常出水の形態 (日本トンネル技術協会, 1981)

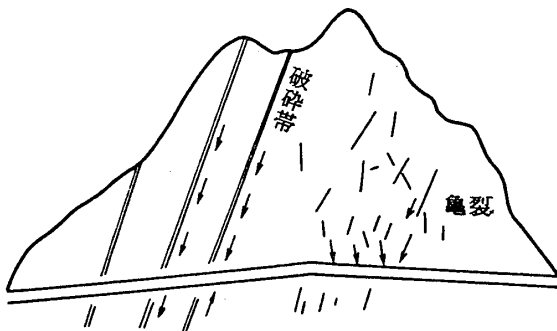
Fig. 6-1(A) Schematic view of ground water inflow (Japan Tunneling Association, 1981)

(イ) 石灰岩型



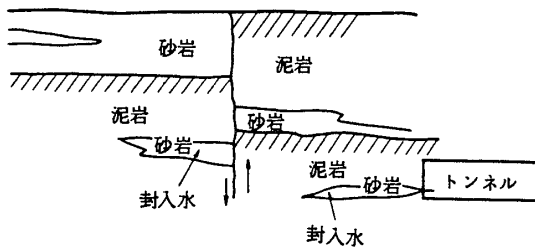
石灰岩など空洞の発達している所では、山体に水溜が形成されていて、ダムの底を破ったような大湧水が起こる。

(エ) 高圧湧水(被圧地下水)



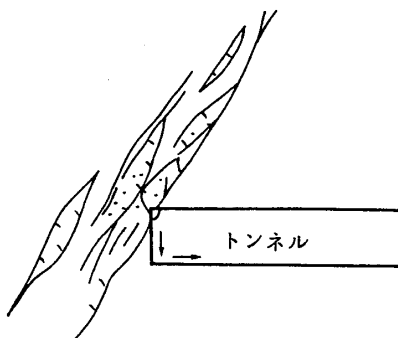
被りの大きなトンネル100m-1000m級のものになると、10kg/cm²や100kg/cm²のあるいはそれ以上の水圧が発生する。このように、湧水の圧力が大きなものを高圧湧水という。発生条件として被りが大きいこと (恵那山トンネル)

(ト) 地層型



地質構造的に、長い間地層の中に封入されており、水の循環速度が殆ど0か非常に遅い水である。地表には流出しないので、これを知るには間接的に予測する。トンネルの湧水に際し、初期の湧水は多いが、封入された水が出てしまうと、湧水は無くなってしまいか、あるいはわずか

(チ) 断層型



雁行状に封入された水が断層に沿ってレンズ状に分布。地層型が地層の褶曲や断層により図のように帯水層が封入される型をとる。水質は非常に塩分が高く、ナトリウム+カルシウムの値が大きい。恵那山で湧水の年代測定したら4500年-5000年の値であった。

(恵那山トンネル、青函トンネル)

図6-1 (B) 異常出水の形態 (日本トンネル技術協会, 1981)

Fig. 6-1 (B) Schematic view of ground water inflow (Japan Tunneling Association, 1981)

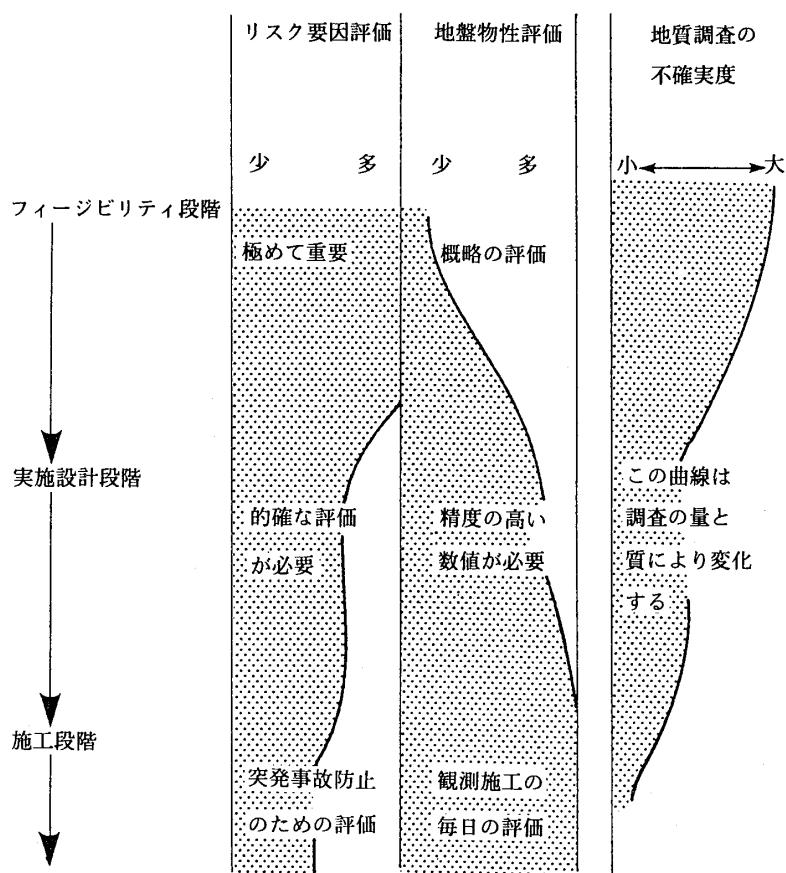


図6-2 リスク要因評価と地盤物性評価ならびに地質調査の不確実性
 Fig. 6-2 Risk assessment, site characterization and uncertainty of geological investigation.

観測施工のための計測計画…設計と施工の問題点に焦点を合わせた計画にする

- ★ 支保工，周辺地山，近接構造物に対する影響の許容値を考慮して計画する
- ★ 逆解析手法とデータの整理方法
- ★ 対策工実施の判断に必要な管理しきい値と対策工の検討
- ★ 現場における意思決定の組織と意思決定の手順
- ★ 土木地質家は工事終了まで参画して地質図の見直しと修正を行う

このように，計画から実施設計に至るまでの段階ではリスク要因調査が重要であり，実施設計終了後の工事への意思決定の後の段階ではルート変更などの基本計画の変更が困難であることから，計画の初期段階において誤りのない見通しを得ることは非常に重要である。従って，ルート選定などの計画段階から実施設計に至る段階においては，地質調査の重要性が強調されるべきである。

トンネルの計画から施工に至る過程で幾つもの地質調査が実施され，概略の地質から詳細な地質までの調査

結果が得られる。これらの地質の情報を基にしてその都度の設計で必要となるリスク要因および地盤物性評価を行うこととなる。その場合の地質調査はその都度不確実性を排除しながら的中度の高い内容とすべきである。ここでリスク要因調査ならびに地盤物性調査とは地質調査による不確実性の低減過程と相互に縦横の関係で密接に影響し合うこととなる。図6-2にこれらの関係を概念的に示した。

7 地質の不確実性に基づくリスク評価の例

ここでは地質的に困難な状況の長大トンネルの計画を想定して，地質の不確実の変動幅ならびに想定される工事費の関係を模式的に検討して，工事リスク回避の参考例を示す。

7・1 危険側および安全側の二通りの地質断面図

図7-1に示すボーリング柱状断面図において，基盤岩は堅硬で節理の少ない新鮮な花崗岩を想定する。その花崗岩を不整合に被覆して鮮新世に堆積した砂礫層と粘

土層を想定した。上位が粘土層、下位が砂礫層であり、ゆるく崩れやすく、特に地下水の湧水に伴って著しく崩壊し易いものと仮定する。トンネルの両坑口は標高300mと380mに計画され延長3,000mと想定した。トンネル施工基面からの土被り高さは最大で500mに達する平坦な尾根部を横断してトンネルが計画されているものとする。この尾根部には鮮新世時代に盆状の地形あるいは幅の広い谷地形が存在して、これらの凹地に砂礫層と粘土層が堆積したものとす。

地層境界の主な点に関して、地表の両坑口上方のA、Bの両地点で基盤の花崗岩と被覆層の鮮新世の地層との不整合が確認されているものとする。また、この時点で地表地質調査に加えて3本のボーリング調査(表7-1)が地表から実施されているものとする。

表7-1 模式断面図におけるボーリング調査

	孔口標高 m	延長 m	粘土層と砂礫層の 境界の標高 m	砂礫層と花崗岩 の境界の標高m
No.1	810	520	510	370
No.2	790	470	620	590
No.3	830	490	640	430

これらの地質データから、危険側、安全側の二通りの地質解釈を行ってその地質断面図を図7-2および図7-3の上半部に示した。地表の地層境界の位置B地点からボーリングNo.2およびNo.3にかけての部分には両断面ともに変化が無く同じ解釈とする。ボーリングNo.1とNo.2の間に関しては、距離が離れていることから地質の解釈に二通りが想定される。つまり、図7-2のケース1では砂礫層と花崗岩の不整合境界をNo.1からNo.2にかけてそのまま結ぶ案である。図7-3のケース2については、砂礫層と花崗岩のなす不整合面がNo.1から一旦深く下がってまた、上昇しNo.2の点2を通過するという案である。No.2とNo.3における砂礫層と花崗岩の境界深度の標高差が約170m程度あることから、No.1周辺においても170m程度の不整合面の上下を予想する。

不整合面に関して推定される変動の幅の内、図7-2(ケース1)はトンネル全延長について花崗岩中を掘削するという楽観的想定(危険側)であり、図7-3(ケース2)はトンネルのほぼ中央部で延長約740mにわたって未固結でゆるく崩れ易い砂礫層を掘削するという悲観的想定(安全側)となる。地下水に関しては、水頭の位置を粘土層と砂礫層の境界より少し高い位置に想定しており、被圧地下水の構造としている。トンネル部分での被圧地下水の水頭は300mの高さとなる。従って、トン

ネル切羽が花崗岩から砂礫層に入った瞬間に約3Mpaの高圧地下水が湧水して砂礫層は崩壊流出し、湧水と共に坑内が土砂で埋没する事故となることが想定されている。花崗岩中の掘削に関しては、滴水あるいは節理面にそう小規模の湧水を想定する。

7・2 概略工事費の比較

最も危険側でリスクの大きいケース1と最も安全側で工事費の大きくなるケース2について、概略工事費の比較を行うとリスク変動の幅をおおよそ想定することが可能となる。概略工事費の算出に関しては、直接費に関わる部分のみの比較とし、試算にあたっての条件の仮定は以下の通りとする。

- 1) トンネルは2車線道路トンネルで、平均の縦断勾配を3%とする。
- 2) 掘削方式は原則としてNATMとする。
- 3) 工事費の概算比較のため、換気設備、照明設備、非常設備、非常駐車帯については両ケースに共通であるので考慮しない
- 4) 地下水の処理に関しては、掘削に必要な対策は考慮するが、完成後の地下水復水工については考慮しない。
- 5) 地下水の湧水に関しては、工事費の点からトンネル切羽からの注入とし、水抜き工や注入導坑は考慮しない。
- 6) トンネル支保パターンならびに注入個所の各区間長に関しては、簡略のため、地層境界が施工基面と交わる位置をもって機械的に区分けした。また、坑口や花崗岩と砂礫層との境界付近における掘削工法や支保パターンの漸移などについても簡略のため考慮しないで機械的に区分けした。

概略工事費の試算を表7-2に示す。ここで用いた工事費の単価は一般的なトンネル設計の工事費積算例を参考にして数量計算、サイクルタイム、岩区分などから試算した。

以上により、ケース1の場合、直接工事費で5,248百万円、ケース2においては16,800百万円となり、約3倍の差異が生じることが分かる。これはケース2の未固結砂礫層が存在することを始めから仮定して工事費を見たものであり、注入工事の程度如何によってはこれよりも低い工事費となり得る。ここでは上越新幹線中山トンネルの四方木工区と同程度の注入工を仮定しておこなった。しかし、ケース1の想定で着工後に突発湧水と土砂崩壊事故に遭遇する場合には、その被害と回復による損害、対策工事、工期の大幅な遅延その他を含めた費用は上の

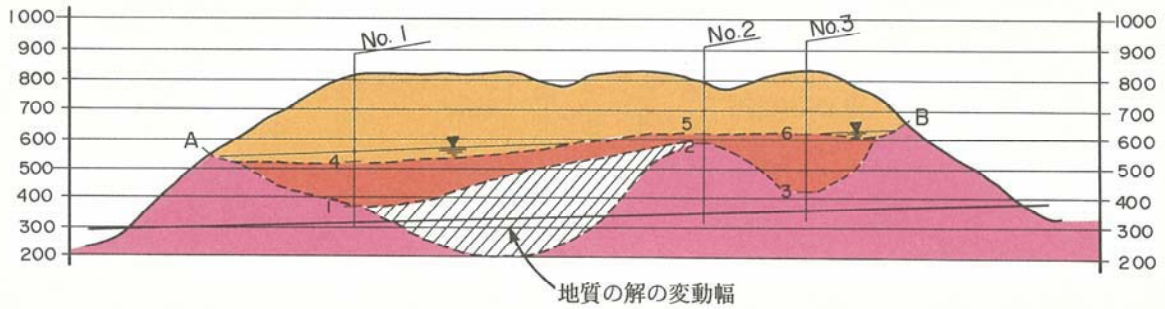


図7-1 複数の解の候補を有する地質断面図の例

Fig. 7-1 Example of geological profile having many possible solutions

ケース1

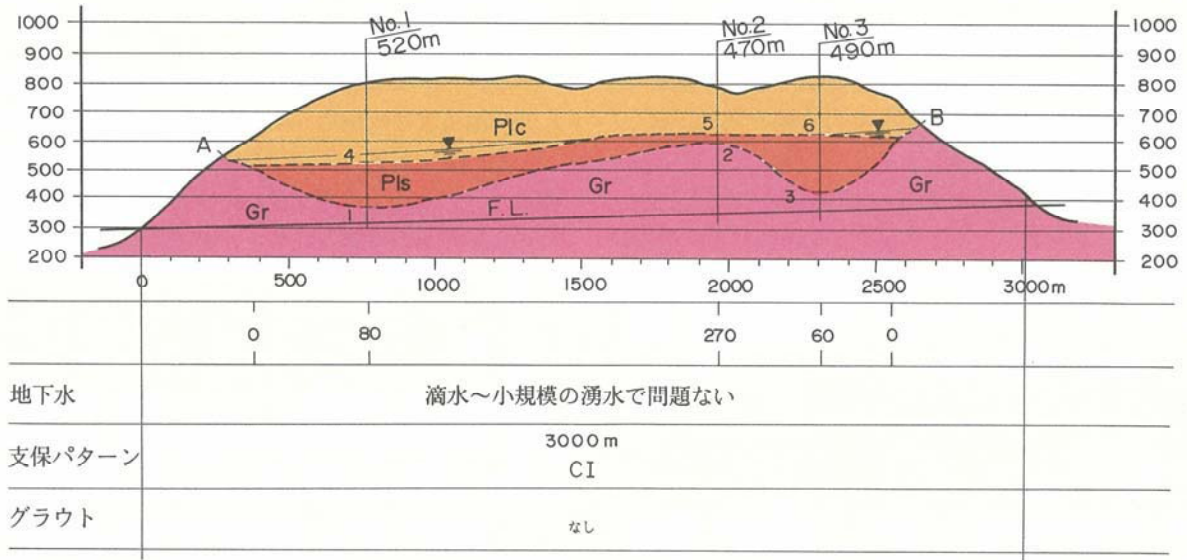


図7-2 危険側に表現した地質断面図

Fig. 7-2 Geological profile showing optimistic idea

ケース2

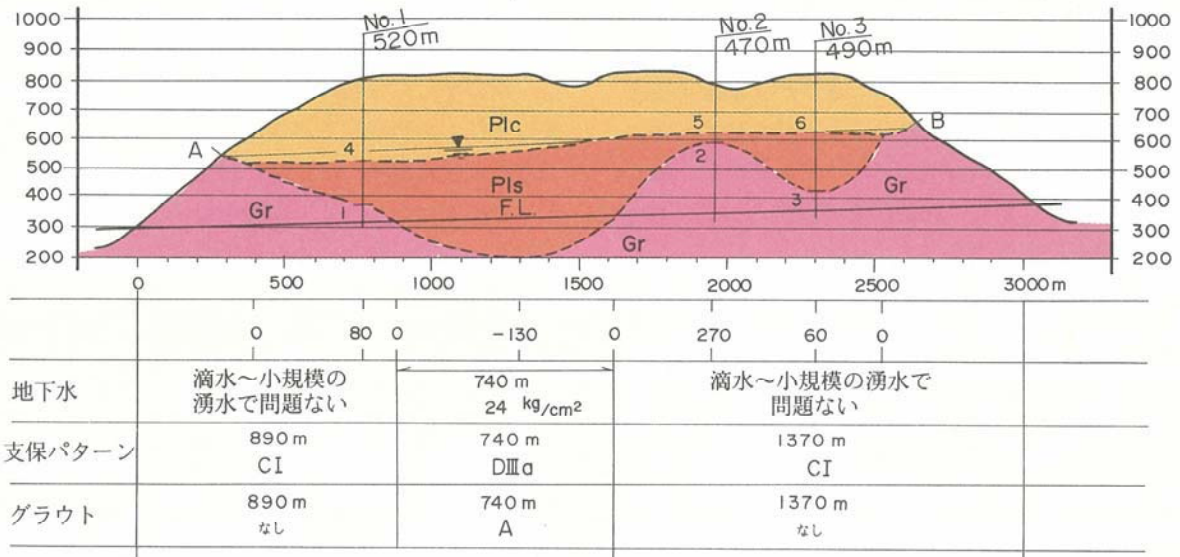


図7-3 安全側に表現した地質断面図

Fig. 7-3 Geological profile showing pessimistic idea

表7-2 ケース1、ケース2の概算工事費の比較

トンネル工事費	ケース1 (3,000m)			ケース2 (3,000m)		
	延長m	単価 千円	金額 百万円	延長m	単価 千円	金額 百万円
区分C1	3,000	1,744	5,232	2,260	1,744	3,941
D3a	0		0	740	3,256	2,409
坑門工	式1		16			16
小計			5,248			6,366
注入工			0	740	14,100	10,434
小計			0			10,434
合計			5,248			16,800

ケース2の工事費をはるかに上回ることが推定される。

このように、地質の不確実性が残った状態で設計や施工に移る場合が多いことから、予め地質の解釈の変動幅を客観的に評価して工事費の変動し得る幅を知っておくことは、工事のリスク回避にとって有意義なこととなる。

また、このようなリスクに対する経済的評価を行うことによって、例えば、No.1とNo.2の中間に2-3本の追加ボーリング調査を行うことの経済的合理性を提案できることとなり、その実施により不確実性の範囲を狭めて行くことが可能となる。

8 あとがき

筆者は応用地質株式会社に奉職して37年の間、地表地質踏査から始まって土木の各分野におけるコンサルタントに深く関わってきた。特に、上越新幹線中山トンネルにおける10年間の地質調査とNATMの日本初の経験は筆者の目を地質とトンネルの岩盤工学の結合に向けさせる大きい契機となった。近年において、トンネルの施工機械や施工技術の進歩、数値解析技術の新しい開発などの姿を見る一方で、地質踏査技術の進歩が土木施工技術の大きい進歩に比較して遅れていることならびに大学における地質踏査の教育の衰退が目立ってきている。このことは、日本ばかりでなく汎世界的な現象として、将来の地表地質踏査技術の衰退およびProduct Liabilityなどに対して極めて重大な影響を与えるものと考えられる。

筆者の主張する帰納的最適化地質調査法に関しては、既存の地質調査資料に基づく妥当性の検証や具体的な方法の提示に足るデータを見出すことが困難であった。地質家は誰でも筆者の考えと同じことを野外で無意識に行っているにも拘らず、その推論過程や論拠を客観的に第三者に示す仕組みに不足する所以である。本論では上越新幹線中山トンネルに関する公表された資料から可能な限

りの説明を試みたが、具体性に欠けたものとなり筆者の力不足を恥じるものである。

ともあれ、地質調査の将来を担うべき若い技術者の方々と共に地質工学の創造へ向かっての新たな前進をするべく、応用年報を通じて問題の所在と将来の方向を知って頂きたく本稿をまとめた次第である。その意を汲んでいただき何らかの発展を見ることが出来れば幸いである。

謝辞

本論は著者の学位論文『トンネルのリスク評価に影響を与える地質調査の不確実性(東京大学,平成9年3月)』に基づいて完全に稿を改めたものである。学位論文に関して、深田淳夫会長、大矢暁社長の両氏に多大な便宜と激励をいただいた。技術顧問笹尾禎氏には氏ご自身がまとめられた貴重な未公表資料を使わせていただくとともに、技術本部岡部幸彦氏には帰納的最適化地質調査に関係して、終始有益なご意見をいただいた。

元応用地質株式会社阿部求氏には中山トンネルの地質調査における6年間の現場作業の労苦に感謝するとともに、氏の手になる当時の地質図原図の一部を引用させて頂いたことを明記しておきたい。

また、社内の多くの先輩、同僚などの方々からご理解とご支援をいただいた。本論を起すにあたって何よりも先ず、以上の方々から心から深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 伊崎晃:地震探査によるトンネルの地質調査, 物理探査, Vol.13, No.3, 1969
- 2) 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 (施設編第301号), 日本国有鉄道

技術研究所, 1969

- 3) 加納俊二, 桑原弥寿雄: トンネル施工法, 最新土木施工法講座, 第18巻, 山海堂, 1963
- 4) 近藤達敏: トンネル工事のリスク評価に影響を与える地質調査の不確実性, 東京大学大学院工学研究科, 学位論文, 1997年3月
- 5) 坂幸恭: 地質調査と地質図, 朝倉書店, p.65, 1993
- 6) 社団法人土木学会, 危険物保安技術協会: 岩盤タックの安全確保に関する調査報告書, 1976
- 7) 陶山国男, 村岡秀記, 羽田忍: 地震探査における地質調査の役割—地質調査を計画される土木技術者へ—, 物理探鉱, Vol.13, No.1, 1960
- 8) 鉄道省熱海建設事務所: 丹那トンネルの話 (1933), 復刻版, 鹿島出版会, 1995
- 9) 土木学会: トンネル標準示方書 (山岳編)・同解説, 1992
- 10) 日本鉄道建設公団東京新幹線建設局: 上越新幹線工事誌 (大宮・水上間), 1983
- 11) 日本トンネル技術協会: トンネル工事の安全—山岳編—, 1981
- 12) 広田孝一: 鉄道地質学, 1942
- 13) 宮崎政三: トンネル地質調査の必要性, 物理探鉱, 日本物理探鉱社内技術報告, 1973
- 14) H. Duddeck: Guideline for the design of tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, No.3, 1988
- 15) H.H. Einstein, V.B. Halabe, J.P. Dudt, F. Descoedres: Geologic uncertainties in tunneling, Proc. Geotech. Engr., Congress, Madison 1996
- 16) P. Kellerhals: Geologie des Loetschberg Basistunnels, Die Alptransit Basistunnel Gotthard und Loetschberg, Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein, Dokumentation SIA D085, 27, Maerz 1992, Zurich
- 17) Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein: Empfehlung SIA199 Erfassen des Gebirges im Untertagbau, 1975
- 18) Z.T. Bieniawski: Design Methodology in Rock Engineering, Theory, education and practice, A.A. Balkema, Rotterdam, 1992

