

切羽前方探査データの分析に基づく地山判定に関する研究

Evaluation of Geological Conditions based on Drilling Data
ahead of Tunnel Face

2023年1月

長崎大学大学院工学研究科
生産システム工学専攻

阪口 治

目次

第1章 序論	
1.1 本研究の背景	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 既往の研究と現状の課題	
2.1 はじめに	6
2.2 切羽前方探査に対する取り組み	7
2.3 まとめと考察	22
2.4 本研究の目的	24
第3章 切羽前方探査技術について	
3.1 はじめに	27
3.2 切羽観察記録のための切羽評価点	29
3.2.1 切羽評価点	29
3.2.2 まとめと考察	35
3.3 切羽前方の探査技術	36
3.3.1 ボーリング探査	36
3.3.2 穿孔探査	37
3.3.3 物理探査	38
3.3.4 まとめと考察	39
3.4 切羽前方探査システム	40
3.4.1 穿孔データの定義	40
3.4.2 穿孔データの取得方法	43
3.4.3 まとめと考察	46
3.5 実事例と課題	47
3.5.1 はじめに	47
3.5.2 対象工事の概要	47
3.5.3 地質・地形概要	49
3.5.4 切羽前方探査	50
3.5.5 穿孔エネルギーを用いた地山評価	52

3.5.6	補助工法を利用した切羽前方探査	55
3.5.7	切羽前方探査の結果	58
3.6	まとめと考察	60
第4章 対象現場の特徴		
4.1	はじめに	62
4.2	鉄道トンネルの設計手法	62
4.2.1	支保工の設計手法	63
4.2.2	設計時の地山分類	66
4.2.3	設計時の掘削パターン	67
4.3	施工時の特徴	70
4.3.1	工事概要	71
4.3.2	施工時の状況	72
4.4	施工時の修正設計	85
4.5	まとめと考察	87
第5章 穿孔データを用いた切羽評価点の判定について		
5.1	はじめに	88
5.2	穿孔データと切羽評価点の関係	92
5.2.1	分析に用いた穿孔データ	93
5.3	切羽評価点と穿孔エネルギーとの関係	94
5.3.1	切羽の状態との関係	94
5.3.2	素掘り面の状態との関係	96
5.3.3	圧縮強度との関係	97
5.3.4	風化変質との関係	98
5.3.5	破砕部の切羽に占める割合との関係	100
5.3.6	割れ目の頻度との関係	102
5.3.7	割れ目の状態との関係	103
5.3.8	割れ目の形態との関係	105
5.3.9	湧水量との関係	107
5.3.10	水による劣化との関係	109
5.4	穿孔データにおける個別要素の分析	111

5.4.1	切羽の状態との関係	111
5.4.2	素掘り面との関係	112
5.4.3	圧縮強度との関係	113
5.4.4	割れ目の頻度との関係	116
5.5	まとめと考察	117

第6章 穿孔データを用いた地山等級の判定について

6.1	はじめに	121
6.2	対象トンネルの地山等級	122
6.3	穿孔データの分析	123
6.3.1	穿孔エネルギーと地山等級との関係	124
6.3.2	穿孔速度と地山等級との関係	126
6.3.3	フィード圧と地山等級との関係	128
6.3.4	打撃圧と地山等級との関係	130
6.3.5	回転圧と地山等級との関係	132
6.3.6	打撃数と地山等級との関係	134
6.3.7	分析結果のまとめ	136
6.4	穿孔データの判別分析による検証	137
6.4.1	穿孔データの組合せの検証	138
6.4.2	平均するデータ範囲を広げた場合の検証	140
6.4.3	他の要素を加えた場合の検証	142
6.4.4	判別分析結果のまとめ	144
6.5	まとめと考察	145

第7章 AIを用いた切羽前方の地山強度予測について

7.1	はじめに	147
7.2	データの基本情報	149
7.2.1	使用するデータ	149
7.2.2	相関関係	153
7.3	予測モデルの確立	157
7.3.1	回帰分析による分類	157
7.3.2	人工ニューラルネットワーク (ANN) モデル	158

7.3.3 遺伝的アルゴリズムを用いた ANN モデル	165
7.3.4 デシジョンツリーモデル	169
7.4 結果の考察	171
7.5 まとめと考察	176
第8章 結論	181
謝辞	186

第1章 序論

1.1 本研究の背景

山岳トンネルを建設するとき、設計で定められた支保パターンに従って掘削時の支保工を構築する。支保パターンは、地質の調査結果をもとに、施工実績や数値解析の手法を用いて決められることが多い。地質調査は、地表面踏査、弾性波探査、ボーリング調査などの方法で行われるが、地山の内部状況を詳細に把握することは難しい。その理由は、日本の地質構造は海外と比較して複雑であり、トンネルを構築する地山の内部まで詳細に把握することは困難なためである。

このため、山岳トンネル建設時には、想定できない破碎帯や軟弱層などの不良地山に遭遇することがあり、それらの個所では緩みを伴う変状が発生することがある。このような箇所では、供用後、地震時の外力や地下水などの影響で、トンネルに不具合が発生することが懸念される。建設時には、不良地山を事前に把握し、適切な支保パターンを選定することで、完成後のトンネルの安定を保ち、品質を確保することが重要である。

支保工の設計は、事前調査の結果を用いて定められるが、掘削時の切羽性状の評価に基づき修正し実施設計を決定する方法が一般的である。切羽性状の評価は、掘削時に目視で切羽面を観察し、その状態を項目ごとに点数化して切羽評価点を含む切羽観察記録を作成している。最終的には経験者が総合的に地山の良否を判定して、施工する支保パターンを決定している。しかし、切羽前方の地質状況は後方の実績をもとに予測している状況であり、断層や急な岩質変化を予測することは困難である。そのため、切羽前方の地質状況を予測する方法として、切羽前方に対してボーリング調査を行い、得られる探査データをもとに地質の性状を把握しようと試みられている。

ボーリング調査の方法の一つに穿孔探査がある。この探査方法は、トンネルを掘削するために用いられるドリルジャンボを利用して行うため、新たな機械を搬入することなく、探査を行うことができ、時間や費用の面から実施されることが多くなってきている。この探査の特徴は、切羽に向けて岩盤を穿孔し、その時必要となる穿孔エネルギーの大小により前方地山を予測する。このとき、ドリルジャンボに接続した計器で油圧データを計測し、穿孔速度、回転圧、フィード圧、

打撃圧、打撃数を取得する。それらのデータから穿孔エネルギーを計算によって算出し、前方地山を評価するための目安としている。この方法は、一般的には穿孔エネルギー値のみを用いて評価を行う。しかし、穿孔エネルギーの要素となっている個々の油圧データには、地山の特徴を示すデータが含まれている可能性があり、一律に穿孔エネルギーのみで地山を評価することは、得られたデータを最大限に有効活用できていないと考えた。

以上のように、不測の事態を防止し、作業の安全性の確保、工程遅延の防止、適正な支保の選定などを効率的に行うために切羽前方の地山状況を正確に把握する必要がある。そこで、支保パターンを定量的に行うために穿孔データを利用できないかと考えた。トンネル掘削中に、切羽から前方の探査を実施し、これから掘削しようとする地山の地質や性状を把握することで、支保パターンの選定や適切な補助工法を選択し、地山を緩めることなくトンネルを構築することが可能となる。そして、結果的に構築したトンネルを品質の高いトンネルとすることができる。

本研究では、取得した穿孔データと地山性状との関連性を分析し、穿孔データの定量的評価による支保パターン選定の可能性について検討する。方法として、山岳トンネルの施工では、一般的に支保パターンの決定は切羽を観察し、その評価を点数化し、過去に蓄積された評価点と支保パターンの関係を参考に決定されるため、取得した穿孔データと切羽観察時に行った切羽評価との関連性を検証することで、穿孔データが支保パターンを決定する指標となりえるかを検証する。そして、穿孔データを用いた切羽前方の地山評価の手法を提案する。

1.2 本論文の構成

本論文は、山岳トンネルを掘削する前に地山性状を把握し、支保パターンを決定できれば、地山性状に対応した支保構造とすることができると考え、その方法として、切羽前方10～30mを探查可能な穿孔探查に着目した。トンネル掘削段階で多く使用されているドリルNAVIに搭載された穿孔探查機能を用いて、施工時に取得した穿孔データを分析し、切羽前方地山との相関性を検証した。そして、穿孔データから掘削前に切羽前方の地山評価を行う方法について検証している。また、近年、急速に発達している人工知能を用いた地山の評価方法を試みている。このような機械データや人工知能を用いて定量的に評価する方法を確立することで、技術者が不足する社会情勢の中、経験不足の技術者を手助けすることができる。また、事前に掘削しようとする地山性状を把握することで、経済性、安全性に優れた構造物とすることができ、ライフサイクルコストの削減につなげることができる。各章の内容は以下のとおりである。

第1章は、序論で、山岳トンネル建設時の切羽前方の地山状況把握の重要性を記述し、現在用いられている切羽前方探查の方法と問題点を挙げている。その上で、解決方法の案を述べている。そして、本研究の目的と本論文の構成について記述している。

第2章では、トンネル掘削時に実施される切羽前方の地質状況を把握するために実施された方法を年代ごとに整理し、その成果について概説するとともに、切羽前方の探查方法が、どのように進歩してきたかを示し、今後の探查の方向性と研究についての考察を行っている。

第3章では、切羽評価の方法と切羽前方の探查技術を記述し、掘削時に切羽観察の手法を用いて地山等級を判定する方法と、前方探查を利用して切羽前方の地質状況を把握するための方法について解説している。また、それらの課題について考察を行っている。

第4章では、研究の対象とした新長崎トンネルの設計手法と施工時に生じた不具合などの特徴について述べ、課題と改善点を抽出している。

第5章では、九州新幹線（西九州ルート）で建設されたトンネルの掘削時に取得された穿孔データと切羽観察時に行われた切羽評価との関連性を検証し、穿孔データを用

いて切羽の評価点を算出できるかを検証している。

第6章では、切羽前方の穿孔データから切羽評価点を算出して地山等級（支保パターン）の選定というプロセスを経ず、穿孔データから直接地山等級を予測することを考え、穿孔データと地山等級の関係を検証している。

第7章では、人工知能（ANN）を用いて、切羽面を評価する上で主要な項目の一つである切羽前方地山の岩盤の一軸圧縮強度（UCS）を推定し、その有効性を検証している。また、それらの結果をもとに最適な予測モデルを提案している。

第8章は結論であり、本研究で得られた知見を総括的に整理している。

本論文の構成を図1.2.1に示す。

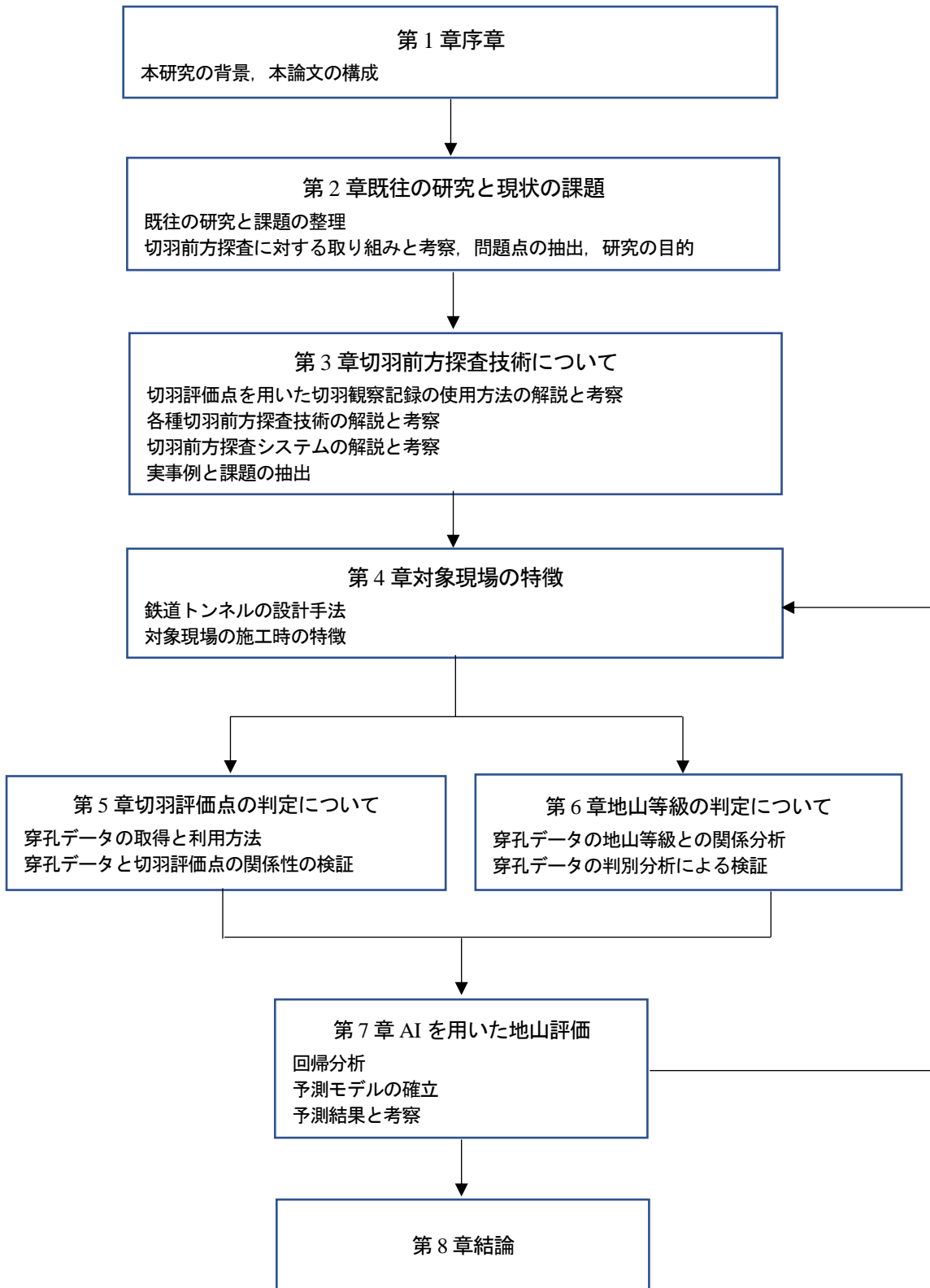


図 1.2.1 論文の構成

第2章 既往の研究と現状の課題

2.1 はじめに

山岳工法でトンネルを掘削する方法として、NATMを採用することが多い。NATMでは掘削時に地山を吹付けコンクリートやロックボルトで支保し、地山と支保を一体化することで、地山自体がもつ保持力を利用した工法である。したがって、地山性状の良し悪しがトンネルの品質を大きく左右することになる。そのような理由から、掘削前に地山の性状を知り、その性状に見合った適切な支保工を構築することで、地山の緩みを防止し、安定したトンネルとすることができる。

NATMにおける掘削時の支保構造の設計は、各発注機関が定めている標準設計を適用、過去の施工実績から類似条件を適用、有限要素法などの解析結果を利用した解析的手法などがある。いずれの場合でも事前に地山の性状を予測することが必要になるが、設計時に行われる調査は地表からの弾性波探査やボーリングなどであり、地山の深部まで詳細に把握することは困難である。

山岳トンネルを掘削するときには、設計で示された支保パターンに従って支保工を構築し、トンネルの安全を確保しながら掘削を進めていく。しかし、必ずしも設計で示された支保パターンが適切な支保パターンを示しているとは限らない。掘削中には、断層破碎帯や耐水層など予期しない地質に遭遇し、設計で示された支保パターンでは、トンネルを安全に構築することが出来ないことがある。一方、設計時に想定していた地山の状態よりも良質な岩盤が出現するときには、支保設計が過大となる。切羽前方の地質状況を予測し、掘削時に生じる事象を予測できれば、事前に準備をして安全にかつ経済的にトンネルを掘削することができる。

本章では、トンネル掘削時に実施される切羽前方の地質状況を把握するための方法を年代ごとに整理し、その成果について概説するとともに、切羽前方の探査方法が、どのように進歩してきたかを示し、今後の探査の方向性と研究についての考察を行う。

2.2 切羽前方探査に対する取り組み

1994年、石山¹⁾らは切羽進行の妨げにならず、切羽前方200mまでの地山状況を効果的に予測しうる新しい調査方法の開発が望まれているとして、稼働現場において、弾性波による切羽前方探査を実施している。弾性波探査の方法は、トンネルHSP法とTSP法を実施し、両者の結果を比較して検証している。その原理は、トンネル坑内(側壁)において地震波を発生させ、その地震波を記録し、伝播(特に反射波)を解明することにより、地山の地質状況を推定するものである(図2.2.1)。検証結果として、低速度帯と反射面を測定できたとしている。

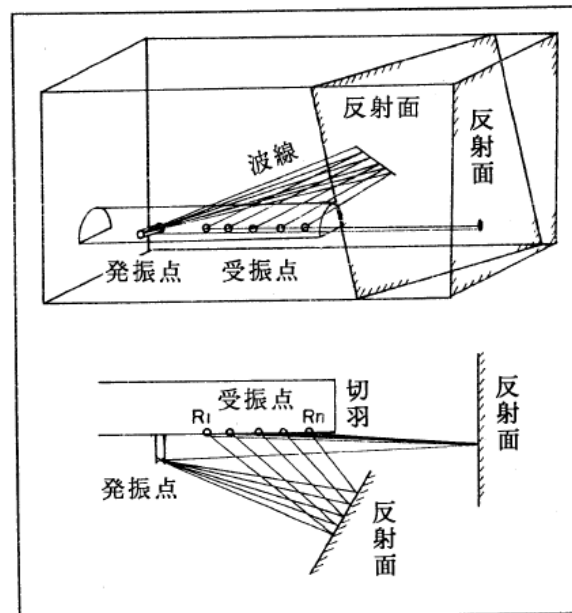


図2.2.1 トンネルHSP, TSPの探査原理

1995年、西野²⁾らは、地質状況の異なる様々なトンネルで実施したTSP切羽前方探査結果と、切羽観察から確認した実際の地山状況とを比較検討することにより、様々な地質条件下におけるTSP切羽前方探査の有効性や適用範囲、問題点等を示している。断層破碎帯や強風化帯等の位置、幅、状況等を的確に予測することができた。また、地層境界についても、地層境界部およびそれに伴う地山脆弱部を精度よく予測することができたとしている。問題点として、切羽手前と切羽前方の地質が顕著に異なる場合に

は、算定される反射面までの距離に誤差が生じる場合があることや反射面の方向性を特定するためには走向または傾斜のいずれかを仮定する必要があるとしている。

1995年、笠³⁾らは、弾性波探査法の一つであるTSP法を現場に適用する上で、機械の配置条件が探査結果に与える影響に関して、現場適用実験結果をもとに検討している。切羽よりの距離が大きい反射面の位置には相対的に大きな誤差を含むものとして探査結果を評価する必要がある。また、受・発振点区間内の低速度部がTSP法の探査結果の位置ずれに影響を与えるとしている。今後の課題として、探査結果について、地質条件を考慮し、ある程度の誤差を見込んだ上で、掘削機械によるさぐりボーリング調査との併用など、現場に即した運用方法を検討する必要がある。さまざまな条件下におけるTSP法の適用性の評価のために、今後、さらに多様な探査条件での結果について検討し、その結果をデータベースとして活用できるように、データの蓄積と整理が必要であるとしている。

1996年、水上⁴⁾らは、TSP探査を行う場合、施工優先の現場状況下では探査機器配置などの探査条件がある程度制限されるケースも起こりうること、そのような場合に際しては、探査精度をおとすことなく、準備と探査に要する作業量の低減を考慮しなければならないとして、条件制約下での最適な探査仕様設定の基礎データとするために、TSP探査の計測方法に関する条件について実験的検討を行っている。実験では、発振に使用する爆薬を爆速の異なる2種類とし、それぞれ同じ条件で使用して探査結果を比較している。また、発振孔数を変化させた場合の解析、及び基準点となるレーザーの位置を固定させて測線距離を変化させた場合の解析を行い、発振孔配置と探査精度の関係について検討を行っている。結果として、高速爆速の火薬の使用が有利であること、発破孔数が多いほど、また測線距離が長いほど、比較的良好な結果が得られたとしている。

1996年、折橋⁵⁾らは、探査時間が短く施工サイクルに影響を与えない、探査距離が数10m～100m程度の前方探査技術が注目されているとして、切羽前方探査技術としてTSP法とノンコア水平ボーリングについて現場実験を行い、その結果について、探査精度の検証、考察を行っている。試験結果として、TSP法は探査時間が短く施工サイクルに組み込むことが十分可能であり、定性的な切羽前方地質の推定が可能であると報告している。また、ノンコア水平ボーリングでは、探査時間に2～3日要したこと、探査結果から掘削エネルギー、一軸圧縮強度の定量的な地質の推定ができ（図2.2.2）、結果を岩盤分類等に反映させることができる可能性があることを報告している。

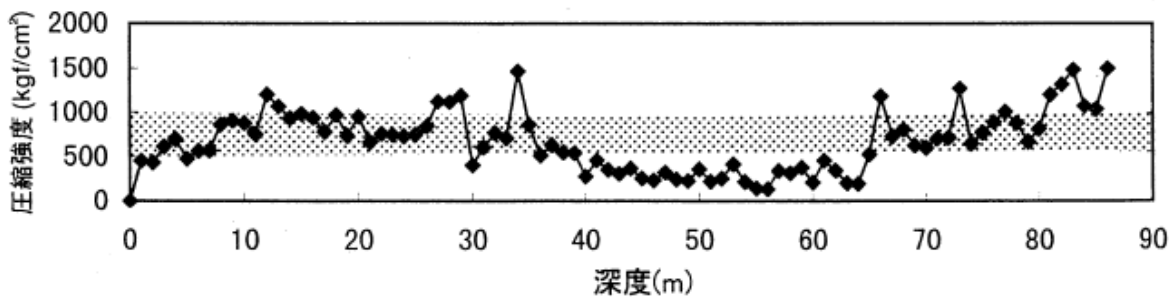


図 2.2.2 掘削エネルギーより推定した一軸圧縮強度

1996年、山下⁶⁾らは、発破孔やロックボルト孔の穿孔作業に用いられる削岩機の油圧式ドリルジャンボ（図2.2.3）の穿孔時に、岩盤から受ける打撃反力を吸収する油圧（ダンピング圧）データに注目し、このダンピング圧を用いて切羽前方の地質性状を予測する探査手法についての基礎的な検討を行っている。検討の方法は、施工中の砂岩泥岩互層を主体とするトンネルで探査を行い、探査時の油圧データを回収し、ダンピング圧の変化から比較的強度の小さいCL級岩盤（弱破碎帯）の出現状況の予測を行うというものである。その結果、CL級岩盤とCL級より強度が高い岩盤の境界は、ダンピング圧で49.9 (kgf/cm²) であるとしている（図2.2.4）。これらを利用してCL級岩盤の出現予測を実施した結果、出現位置を精度よく予測することができたとしている。

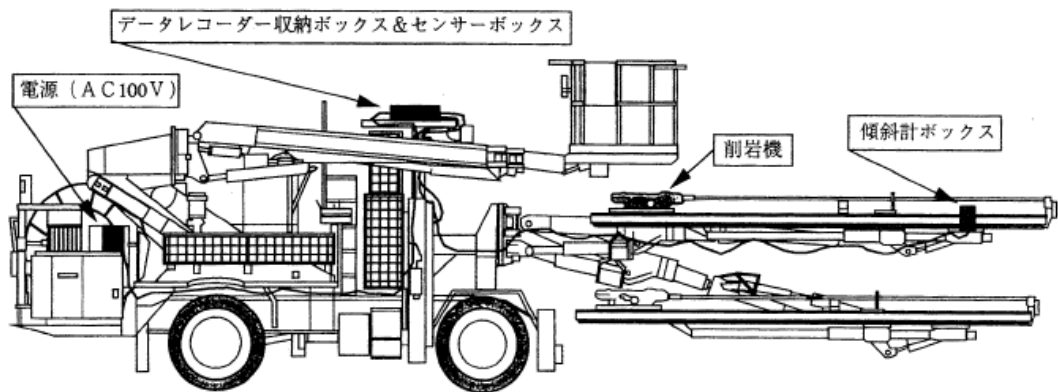


図 2.2.3 ホイールジャンボおよび計測機器設置状況

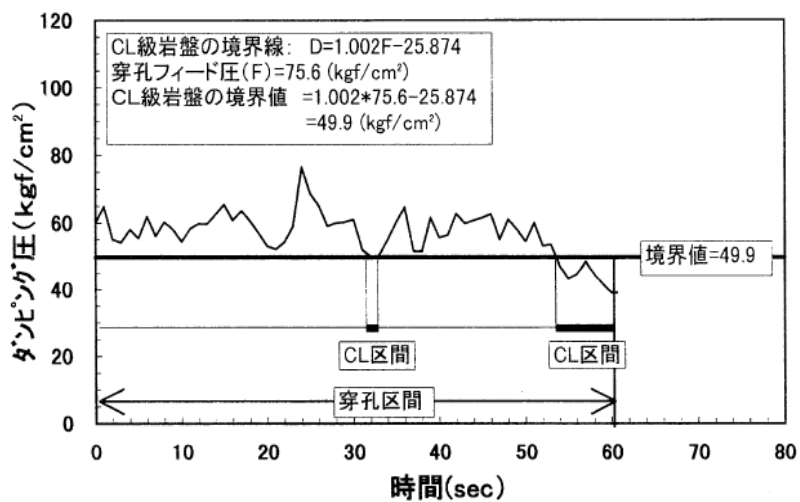


図 2.2.4 CL級岩盤（弱破碎部）区間の識別

1997年、明石⁷⁾らは、切羽前方探査の目的がトンネル施工に対する貢献であることを考えれば、適用性に関するさらなる検討が必要であるとして、TSP探査法の探査精度について注目し検討を行っている。その方法として、TSP探査による地質の推定方法を明確にした上で、これまで行ってきた探査と地質調査結果との対比から探査誤差を求め、推定位置の探査精度について検討している。また、探査精度に影響する地山地質条件と探査実務における注意点についても考察を行っている。そこで、実務における注意点として、誤差範囲 $\pm 5\text{m}$ の頻度が最も多いことを考慮し、推定位置の前後 5m 区間

を含めて地山脆弱部推定区間とする場合等が考えられるとしている。探査誤差の要因として、探査区間に地山脆弱部が1箇所だけ存在するのではなく、断続的に出現してくるようなケースでは誤差が大きくなるとしている。

1997年、山下⁸⁾らは、異なる特性(長所・短所)を持つ2種類の探査法(坑内弾性波探査法、穿孔探査法)を効果的に組み合わせることによりお互いの長所を生かすとともに、短所を補い合わせて総合的に切羽前方の地質性状を解析・予測する手法を提案している。坑内弾性波探査法として、TSP法、穿孔探査法として、油圧式削岩機の穿孔油圧データを利用して、穿孔時の岩盤からの打撃反力を吸収する働きをもつダンピング圧の挙動を地質予測に利用することを最大の特徴としている穿孔探査法を用いている。その方法は、まずTSP法を用いた長区間の探査により断層破碎帯等の有無またはそのおおよその出現位置を把握し(Step1)、その予想出現区間近くまで掘削が進んだ時点において穿孔探査を集中的に適用して地質境界面のより正確な位置を把握する(Step2, 3)というものである(図2.2.5)。検討結果として、効率良くより精度の高い切羽前方地質の想定を行うために、TSP探査および穿孔探査という特性の異なる探査法を組み合わせた探査法を提案している。また、組み合わせによる探査法の現場適用実験を行った結果、TSP探査による地質予測を穿孔探査によって修正することにより、最終的に実際の地質性状をより正確に把握することができたとしている。

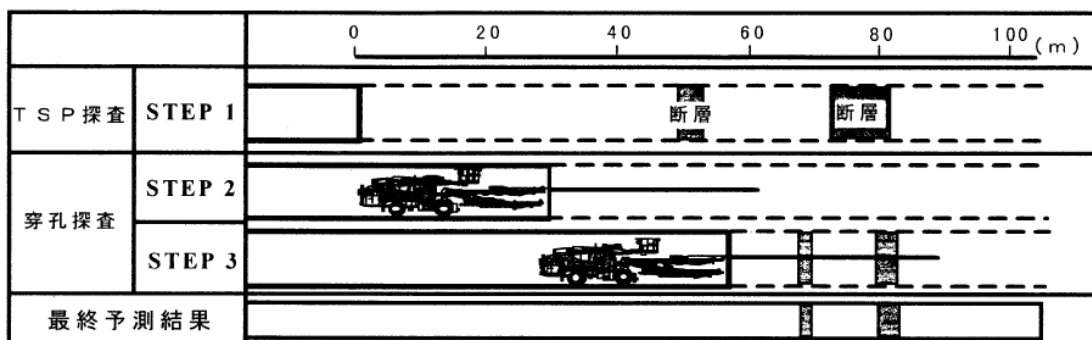


図 2.2.5 組合せによる探査例

1998年、港⁹⁾らは、TSP法は、現状では、地質状況や測定状況により解析結果と地質実績が大きく食い違う場合もありいくつかの問題点が残されている。これまでに予測精度の向上に関する基礎的な研究が行われているが、予測精度向上手法の確立は遅れているのが現状であるとして、現場で実証試験を実施している。トンネル軸と鋭角に交差する地質変化面を測定するため、両側壁に発振孔・受振孔を設置する通常の測線配置による測定に加え同位置で天端および底盤にも受振孔・発振孔を設置（図2.2.6）して実施し、トンネルの地質実績との対比検討により測定精度について評価検討を実施している。その結果、従来正確なTSP探査が困難であった地質条件下での測定精度の向上が確認されたとしている。

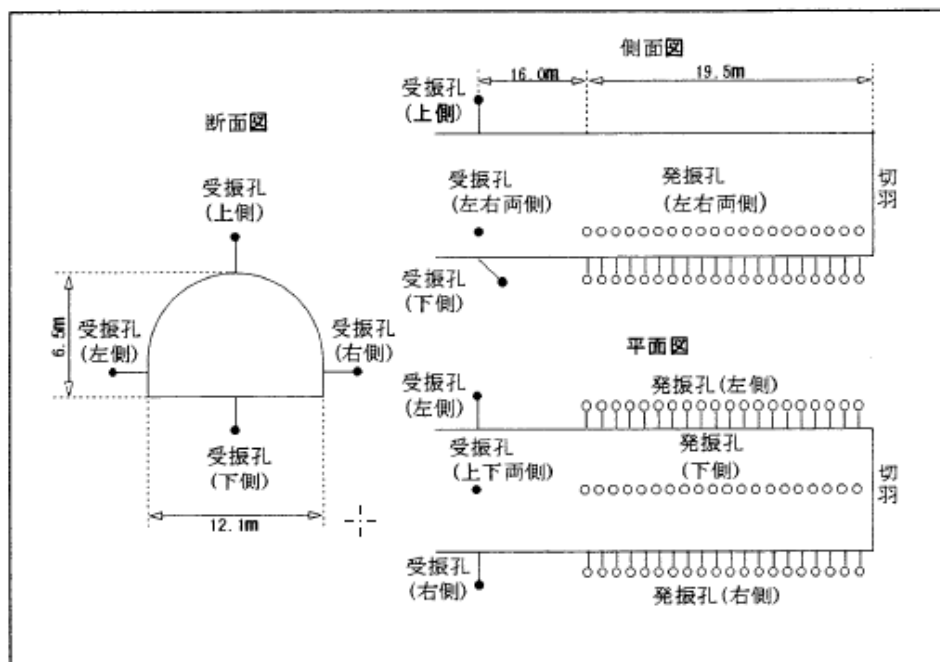


図 2.2.6 側線設定

1998年、笠¹⁰⁾らは、TSP探査法を切羽前方の地質状況の予測という本来の適用目的に加えて、さらに効果的な活用する一つの方法として、トンネル周辺の岩盤評価への応用について検討を行っている。すなわち、坑内弾性波探査より容易に実施できるTSP探査によって、どの程度の岩盤評価が可能であるかについて、基礎的な検討を行ってい

る。その結果として、TSP探査時に得られる弾性波速度のみからは、岩盤の強度や亀裂などの情報を直接的に求めることは困難であるが、坑壁で実施された簡易弾性波試験による速度との比から求められる速度低下率は、支保パターンや施工後における支保の変状の度合いと関連性があることが示されたとしている。

1998年、明石¹¹⁾らは、弾性波を用いて切羽前方の探査を行う方法の一つであるTSP探査による地質推定の可能性について検討している。TSP探査法における地質推定の問題点は、地山脆弱部がどの程度破碎されているかなどの具体的な地質推定が困難であること。また、これまでの実績では地山脆弱部を探知できていない事例があることを指摘したうえで、19事例の分析を行っている。結果として、100m以遠の地山脆弱部が探知できていない。遠方のイベントに関しては弾性波が切羽側の地山脆弱部を通過することにより減衰し、有効な探査距離が短くなっていることをあげている。TSP法による切羽前方探査で得られる結果では、地山脆弱部の位置情報は反射面の密集で推定しうるが、その物性などについては本探査法のみから具体的な推定を行うことはできないとしている。

1998年、皆川¹²⁾らは、関谷トンネル工事において、「さぐり穿孔」の穿孔データを利用し、ジャンボの油圧とノミ下がりから求まる打撃エネルギーによって定量的に地山性状の評価を行う切羽前方探査を施工時の一工種として採り入れ連続的に実施している。その結果、打撃エネルギーの変動から切羽前方の地山性状の変化が推測可能であり、施工管理の一資料として利用できることが示されたとして報告している。また、報告で、穿孔時に湧水量の増加が確認された深度付近で、回転圧、フィード圧が一時的に減少するといった変動が見られたことを報告している（図2.2.7）。

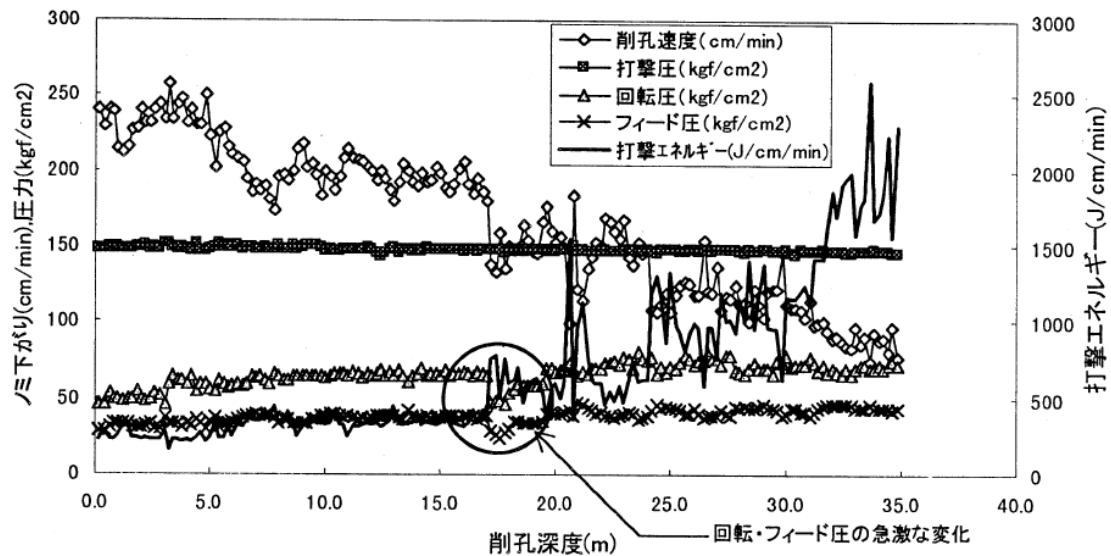


図 2.2.7 大量湧水の認められた区間での穿孔データの状況

2000年、塚本¹³⁾らは、TSP法を適用する機械が多くなるにつれて、TSP法の問題点や課題が明らかになりつつあるとして、反射法地震探査の探査方法と評価方法を工夫し探査精度を向上させることを目的に、数値シミュレーションを行い、適用性を調べている。方法として、複数の受振計を用いた3次元モデルによる反射エネルギー評価と切羽近くに受振計を設置した探査について現場実験および数値シミュレーションを行い、TSP法の解析手順による結果と比較することで、その適用性を検討している。その結果、複数の受振計で計測された観測波形を用いて3次元モデルで反射エネルギー評価することで、真の反射面が明瞭に現れて予測精度が向上すること、受振計を切羽近くに設置し、波形解析の処理方法を工夫することで、より前方の反射面の位置を予測できる可能性があるという知見が得られたとしている。

2002年，原¹⁴⁾らは，高精度で切羽前方を探索する研究を行っている．適用する探査技術として，TDEM法(地表からの電磁法による比抵抗調査)，TSP(トンネル坑内からの地震波による探査)，DRISS(穿孔探査法)の3技術を用いて，総合的検討により高精度な探査システムの構築を試みている．探査によって判明した物性値と地山評価の関連として，TDEM法により得られる比抵抗値と定性的な地山状況との関連（表2.2.1），TSPによる地山分類事例（表2.2.2），DRISSによる穿孔エネルギーと地山状況，補助工法の適用事例（表2.2.3）を報告している．

表2.2.1 TDEM法により得られる比抵抗値と地山状況

地山比抵抗の影響因子	比抵抗値	予想地山状況
飽和度	大	地下水、湧水
水分含有量	大	破碎帯、湧水
温度	高	高温岩盤
間隙水の比抵抗	小	塩水、海水
粘土鉱物含有量	大	変質帯、断層

表2.2.2 TSPによる地山分類事例（2トンネルからの実施例による）

地山分類	A	B	CI	CII	DI	DII
弾性波速度	4.8以上	4.8～4.5	4.5～4.0	4.0～3.5	3.5～3.0	3.0以下

表2.2.3 DRISSによる穿孔エネルギーと地山状況，補助工法の適用事例

Case	削岩機	ビット	フィード圧	岩種	支保パターン	穿孔エネルギー (J/cm3)	地山状況、補助工法との関連
1	アトラス COP1238	クロス・Φ80	3MPa	砂岩・頁岩	DI	>100	AGFなし
					DI	≤100	AGFあり
2	アトラス COP1838	ボタン・Φ64	4MPa	花崗斑岩	DI	>100	先受け工無し
						≤100	特殊充填式およびシリコン注入式フォアローリング
3	古河 HD190	ボタン・Φ64	4MPa	礫層	DI	>100	
						≤100	AGFおよびシリコン注入式フォアローリング

2002年，大窪¹⁵⁾らは，反射法の弾性波探査の評価に着目し，探査の結果，断層の存在や地山等級の予測を評価基準としたため，実際に断層らしい断層が出現しない場合

や地山等級に変化がなかった場合には、予測がはずれたと評価している。しかしながら、探査原理は反射面があれば反射面として検出されることであり、地山の良否を相対的に評価するものである。この面から予測精度の評価方法を見直す必要があるとして、新しい考え方を提案している。現場事例から、評価時の知見として、単に地山等級の変化や断層の存在が、必ずしも反射面を反映していない。同じ地山等級でも反射面は存在し、探査ではこれを把握する。重要なのは、これらの結果をいかに技術的に判断するかということであって、探査をいたずらに疑ってはいけないとしている。また、反射法の弾性波探査は原理上から相対的な予測であり、現実の物理量(弾性波速度、密度など)を定量的に表現することが今後の大きな課題であるとしている。

2003年、木村¹⁶⁾らは、穿孔探査法を実施するにあたり、孔壁の崩壊などが生じる地山に対しては、穿孔探査に必要な約30mの長尺穿孔を安定して実施することが困難である。そこで、穿孔探査法を軟弱地山へ適用するための手法についてまとめている。この中で、物理パラメータに関して、ダンピング圧は削岩機によって計測する機能を有しないものがあるため、穿孔エネルギーを地山評価のための物理パラメータとして使用することにしている。分析結果として、穿孔エネルギーは、適用支保が重くなるほど平均値および標準偏差が小さくなる傾向が概ね認められ、穿孔エネルギーによる岩盤分類は、以下のように概略的に区分できると考えている。

- (1) 約100J/cm³以下の区間：鏡面の安定が著しく損なわれるような断層破碎帯
- (2) 約100～300J/cm³の区間：一部補助工法が必要なぜい弱区間（DI相当層）
- (3) 約300J/cm³以上の区間：比較的安定したCII相当

孔壁の崩れやすい地山においては、ケーシング鋼管を使用する穿孔方法が有効であり、地山性状の変化を穿孔エネルギーによって評価することは可能であるとしている。しかし、鋼管の摩擦による穿孔エネルギーの増加を考慮しなければならないとし、定量的な把握を行うため、今後のリサーチが必要としている。

2005年、木村¹⁷⁾らは、穿孔データと経験者が行った地山の良否判定との関係を学習パターンとして認識し、パターンマッチングによって地山の評価を迅速に、また客観的に判定するためのニューラルネットワークによる評価手法と直接探査法を結び付けた新しい切羽前方の地山評価システムの開発を試みている。この研究では、穿孔エネルギーを用いた穿孔探査法の有用性とニューラルネットワークを組み入れた探査システムの適用性について検証している。まず、探査の初期段階に探査孔箇所の地山強度特性と比穿孔エネルギーの関係を求め、その結果から地山分類を行うための管理値を設定している(表2.2.4)。その後は、比穿孔エネルギーを所得したのちにトンネル掘削を行い、支保パターンの実績が比穿孔エネルギーから想定した支保パターンと合致するかを検証したものである。その結果、トンネル切羽前方の地山調査の有用性及びそれを利用した支保の決定が、経験者によって決められたものとほぼ一致することが実証されたとしている。さらに、ニューラルネットワークによる地山判定システムを構築し、教師データを速度、比穿孔エネルギー、ダンピング圧、回転圧として地山等級を判定している。そして、ニューラルネットワークによる判定結果と、地山評価の経験者が選定した支保パターンを比較したとしている。その結果、ニューラルネットワークによる判定結果が実施支保実績より良好な地山と判定してしまう傾向を示したとしている。

表 2.2.4 比穿孔エネルギーと地山分類の判定基準

岩種	地山分類	比穿孔エネルギー (J/cm ³)	岩種	地山分類	比穿孔エネルギー (J/cm ³)
花崗 閃緑岩	C I	550～	ホルン	C I	600～900
	C II	250～550		C II	300～600
	D III	150～250	フェルス	D III	150～300
	D IV	～150		D IV	～150

2006年、山田¹⁸⁾らは、トンネル地山評価システム（K-tes：Konoike tunnel estimation system）を構築し、切羽前方探査においてトンネルの標準機械であるドリルジャンボの穿孔時の機械データを収集・分析することにより、切羽前方の地質を穿孔エネルギーとして定量的に評価する。一方、施工の進捗とともに得られる支保パターンごとの切羽評価点や計測データを機械データと同様のファイル形式（CSV形式）で保存、更新を行い、リアルタイムに施工情報をデータ化する。システム内に蓄積された施工データと前方探査により得られた穿孔エネルギーを比較し、地山の変化に基づく適切な支保パターンの選定や必要な対策工（補助工法）の検討を行うとしている。試行結果からは、切羽評価点（平均）と穿孔エネルギー（切羽全体の平均値）の間に比較的良好な関係が見られ、切羽前方予測により、補助工法の選定に参考となる資料となりうることが確認できたとしている（図2.2.8）。試行トンネルにおいては、長尺鋼管フォアパイリングの採用に関する閾値としては、切羽評価点（平均）が20点以下、穿孔エネルギーは200J/cm³が妥当な値であると確認されたとしている。

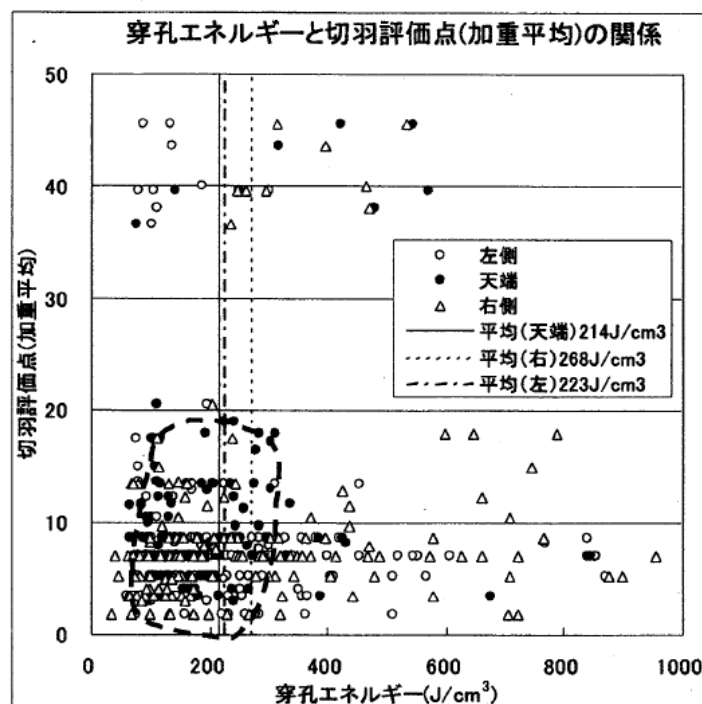


図 2.2.8 切羽評価点と穿孔エネルギーの関係

2008年、桑原¹⁹⁾らの研究では、穿孔速度や打撃エネルギーによる地山評価は、フィード圧一定の大前提があるが、不均質帯、亀裂集中帯、断層破碎帯などの地質の悪い地山では、フィード圧が大きく変動してしまう場合が多い。このような場合、穿孔速度や打撃エネルギーは大きな変動を生じ、波形のピークも多数現れ、どの変化が地山の変化に対応しているのか、判断が難しい状況にあった。そこで、既往のノンコア穿孔データの分析を行い、穿孔パラメータの評価に際してフィード圧の影響を検討している。その結果、ノンコア穿孔切羽前方予測に際しては、フィード圧の変動影響を考慮することは不可欠であり、フィード圧を考慮した「正規化穿孔速度比」を提案している。フィード圧変動補正の結果として、穿孔速度や打撃エネルギーに見られる大きな変動と多数のピークが低減され、判断が容易なデータとなったとしている。

2015年、若林²⁰⁾らは、施工中に実施する切羽前方探査には、経済性、探査時間、予測精度について問題を抱えているとして、穿孔誘導機能を持った全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」に穿孔データを取得して地山診断を行うことができる機能を搭載した。「ドリルNAVI」は、発破孔やロックボルト、補助工法等全ての穿孔作業を高精度に行うとともに、全削岩機に搭載した穿孔探査機で取得した位置情報を持った穿孔データを地山診断に活用できる。

全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」に搭載された地山診断技術を用いて切羽前方の地山を面的に診断する技術に関する研究を行っている。稼働中の新長崎トンネルで、穿孔データを取得し、穿孔エネルギーを指標とし、地山を評価するものである。発破孔の穿孔データから、切羽観察記録と穿孔エネルギーの比較では、切羽の肌落ちや崩落箇所と穿孔エネルギーの低い箇所とが一致していることがわかったとしている（図2.2.9）。穿孔エネルギーと支保パターンとの関係では、平均穿孔エネルギーは、INパターンで100未満～300J/cm³(平均159J/cm³)、IINパターンで100～400J/cm³(平均283J/cm³)に分布していることがわかったとしている（図2.2.10）。穿孔エネルギーとロックシュミットによる岩盤強度の関係から、切羽前方探査(L=30m×1本)で取得した穿

孔エネルギーよりも、短尺で複数の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーのほうが、切羽における原位置での岩盤強度との相関性が高いことがわかったとしている（図 2.2.11）。

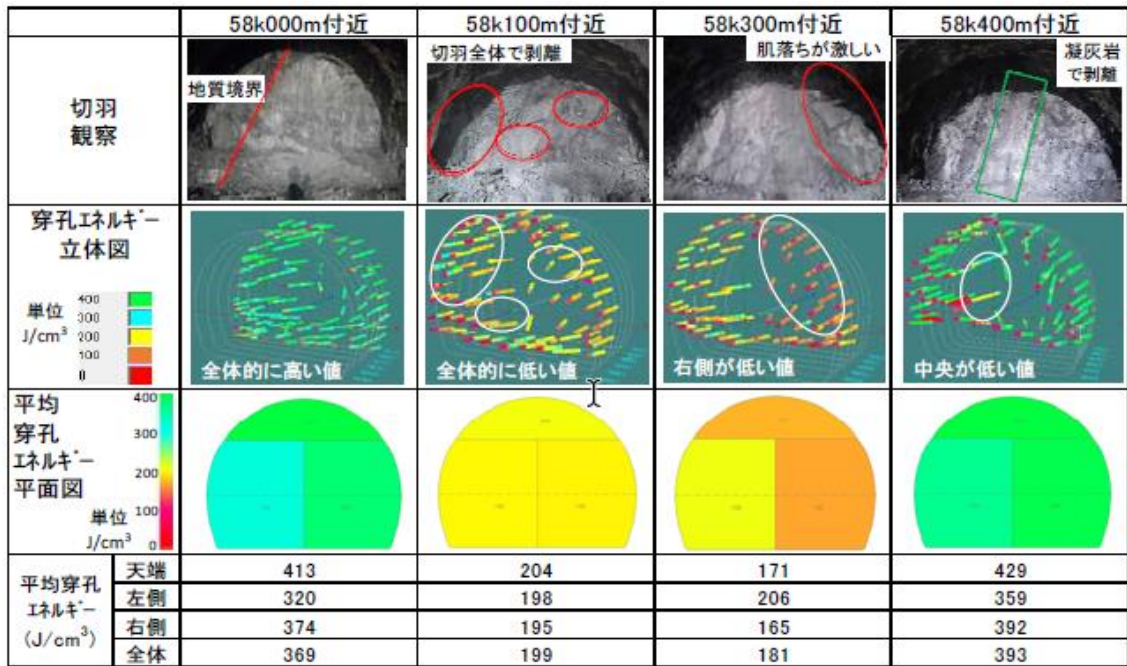


図 2.2.9 切羽評価点と穿孔エネルギーの関係

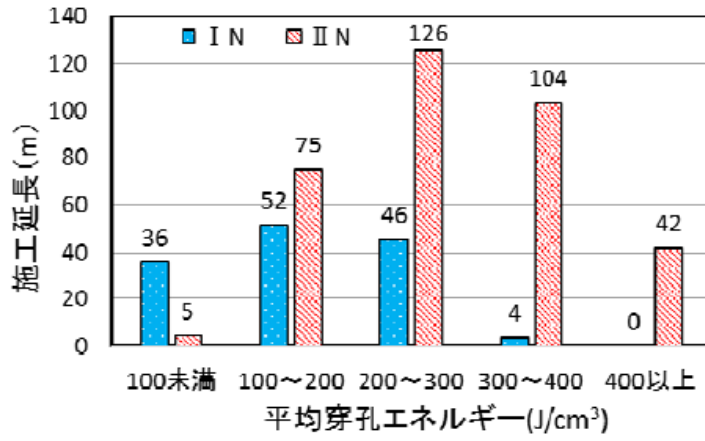


図 2.2.10 穿孔エネルギーと支保パターンとの関係

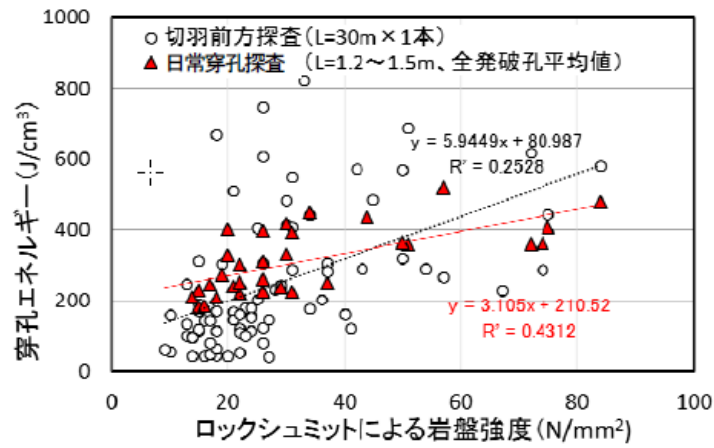


図 2.2.11 穿孔エネルギーと岩強度の関係

2.3 まとめと考察

1990年代は、山岳トンネルの掘削工法が矢板工法からNATMに本格的に移行した時代である。NATMの普及に従ってトンネルが長距離化、大断面化している。そのため、切羽前方の地質状況を把握するために弾性波探査法が多く用いられるようになっていく。弾性波探査の測定方法としてTSP法とHSP法が採用されている。採用件数はTSP法が多い。坑内から行われる弾性波探査は、主に発破を用いて弾性波を発震し、受震機で反射波を捕らえて反射面の位置を推定するものである。破碎帯などの脆弱部では岩盤亀裂が多く、反射波が多いことを利用して主に脆弱部を探査する目的で使用されるようになる。しかし、探査精度に誤差があることや探知できていない事例があることも指摘されている。1990年代後半には、弾性波探査法を用いて切羽前方の岩盤を評価する研究もされている。しかし、具体的な地質推定が困難であることが報告されている。

弾性波探査は、切羽前方100～150m程度を探査する目的で使用されているのに対し、切羽前方10～30m程度を探査する目的で、油圧式ジャンボの穿孔時のデータを用いて岩盤の硬軟を探る研究も一部で報告がされている。穿孔時の速度を計測して地山の硬さの程度をさぐる方法は、「さぐりノミ」と言われ、専用の機械などが不要であり、比較的手軽に実施できることから多く用いられている。報告されている方法は、穿孔探査と言われ、「さぐりノミ」を進化させた方法で、切羽前方に向かってさぐり穿孔を行い、穿孔時の油圧データを取得してそのデータを解析することによって岩盤の性状を把握しようとするものである。利用したデータとしてダンピング圧や打撃エネルギーを用いたことが報告されている。

2000年代に入ると、弾性波探査と穿孔探査を組み合わせた方法や探査データを定量的に評価する研究がされている。穿孔探査では、定量的に評価する方法として地山を穿孔する際の打撃反力から求められるダンピング圧や穿孔エネルギーが用いられるようになる。油圧データの取得方法やそれらの評価の仕方が主な研究対象となっている。一部では、データから地山の性状

を地山等級や支保の分類材料として使用する研究もされるようになってきている。しかし、適用現場ごとに条件が変わるため定量的に評価することが難しいことも多く報告されている。

2010年代に入ると、穿孔データから求めた穿孔エネルギーの定量的な評価方法に関する研究がされている。その多くは、穿孔エネルギーと地山分類の関係である。また、穿孔エネルギーと支保パターンとの関係、穿孔エネルギーと補助工法との関係なども報告されている。一部で、切羽評価の方法として利用されるようになってきた切羽評価点との関係も研究され始めている。

本章では、切羽前方探査の方法を時代ごとに整理し、それぞれの長所や短所を抽出してきた。しかし、多くの場合、地山を定量的に評価することが難しく、さまざまな工夫をして前方地山を評価していることがわかった。

2.4 本研究の目的

山岳工法でトンネルを構築する場合、設計図書で示された支保パターンに従って掘削して支保工を構築していく。設計時には、地表面からの弾性波探査やコアボーリングの資料を観察することによって地山性状を把握し、設計を行っている。しかし、トンネルは、地山を貫いて構造物を構築する特殊性から設計通りの支保構造では、安全性・経済性が確保できないことがある。そこで、事前に切羽前方の地山状況を把握する必要性が生じている。弾性波探査や穿孔探査によって地山性状を把握する取り組みがなされているが、定量的に評価する段階にまで至っていない。

建設段階の支保構造は、掘削時に切羽観察を行って、地山の性状を点数化し、その点数を元にあるいは参考にして支保パターンを決定している。しかし、突発湧水や断層破碎帯など急な地山性状の変化に対応できていない場合もある。

そこで、掘削する前に地山性状を把握し、支保パターンを決定できれば、地山性状に対応した支保構造とすることができると考えた。その方法として、切羽前方10～30mを探査可能な穿孔探査に着目し、掘削段階で多く使用されているドリルNAVIに搭載された穿孔探査機能を用いて、施工時に取得した穿孔データの分析を行い、穿孔データから前方地山の性状を定量的に評価する方法の確立の可能性について検証する。そうすることで、急な地山性状の変化に対し、事前に支保部材や補助工の準備が可能になり、安全で経済的なトンネルを構築することが可能となる。

【参考文献】

- 1)石山宏二, 土屋彰義, 千田敬二, 中村康夫, 弾性波による切羽前方探査の現地適用実験(その1), トンネル工学研究発表会・論文・報告集, 第4巻, pp.439-444, 1994.11
- 2)西野治彦, 山本松生, 中村創, 稗田肇, 中村康夫, 様々な地質条件下におけるTSP切羽前方探査の適用性, トンネル工学研究発表会・論文・報告集, 第5巻, pp.347-352, 1995.11
- 3)笠博義, 大沼和弘, 猪狩哲夫, 武藤光, TSP法による機器配置条件が探査結果に与える影響についての一考察, トンネル工学研究発表会・論文・報告集, 第5巻, pp.353-356, 1995.11月
- 4)水上雅裕, 村上晃生, 明石健, 石山宏二, 稲葉力, 弾性波を用いたトンネル切羽前方探査の計測条件についての実験的検討, トンネル工学研究論文・報告集, 第6巻, pp.89-94, 1996.11
- 5)折橋恒春, 徳永豊, 飯尾正史, 増尾重義, 切羽前方探査技術の現場への適用, トンネル工学研究論文・報告集, 第6巻, pp.101-106, 1996.11月
- 6)山下雅之, 石山宏二, 稲葉力, 早坂茂, 塚田純一, 油圧式削岩機のダンピング圧を利用した切羽前方探査法, トンネル工学研究論文・報告集, 第6巻, pp.107-112, 1996.11
- 7)明石健, 稲葉力, 切羽前方弾性波探査の探査精度についての基礎的検討, トンネル工学研究論文・報告集, 第7巻, pp.141-146, 1997.11
- 8)山下雅之, 石山宏二, 稲葉力, 塚田純一, 森田誠, 穿孔探査法と坑内弾性波反射法を組み合わせた切羽前方探査法, トンネル工学研究論文・報告集, 第7巻, pp.225-230, 1997.11
- 9)港高学, 上野光, 太田幸信, 佐野信夫, 坑内弾性波反射法における測定・解析手法の再検討, トンネル工学研究論文・報告集, 第8巻, pp.123-128, 1998.11
- 10)笠博義, 前田信行, 斉藤篤, 越野洋一, 坑内弾性波反射法を用いた岩盤評価の試み, トンネル工学研究論文・報告集, 第8巻, pp.129-132, 1998.11
- 11)明石健, 稲葉力, 切羽前方弾性波探査による地質推定の可能性, トンネル工学研究論

- 文・報告集, 第8巻, pp.133-138, 1998.11
- 12)皆川聡, 荒川宗久, 伊藤毅浩, 橋詰茂, さぐり穿孔による切羽前方予測と地山挙動について, トンネル工学研究論文・報告集, 第8巻, pp.139-144, 2000.11
 - 13)塚本耕治, 浜田元, 篠原茂, 寺田道直, トンネル切羽前方探査における高精度化の検討, トンネル工学研究論文・報告集, 第10巻, pp.191-196, 2000.11
 - 14)原敏昭, 熊谷成之, 木村哲, 平野享, 山岳トンネルにおける切羽前方探査の高精度化の試み, トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, pp.189-194, 2002.11
 - 15)大窪克己, 宮脇工, 芦田譲, 山本和義, 反射法弾性波探査の適正評価に関する考察, トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, pp.33-38, 2002.11
 - 16)木村哲, 山下雅之, 西山哲, ぜい弱地山における穿孔探査法の適用, 「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan), Vol.52, No.5, pp.494-499, May2003
 - 17)木村哲, 大西有三, 西山哲, 石山宏二, 穿孔データを指標としたトンネル切羽前方の地山評価システムの研究, 情報地質, 第16巻, 第3号, pp.191-198, 2005
 - 18)山田浩幸, 原田雅也, 田中英男, 三木秀二, トンネル地山評価システムを用いた補助工法選定に関する一考察, トンネル工学研究論文・報告集, 第16巻, pp.93-100, 2006.11
 - 19)桑原徹, 畑浩二, 稲川雄宣, 平川泰之, 変換解析システムによるノンコア穿孔トンネル切羽前方予測技術, トンネル工学研究論文・報告集, 第18巻, pp.1-10, 2008.11
 - 20)若林宏彰, 富澤直樹, 森山祐三, 高田篤, 福井正規, 全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」の開発, 鴻池組技術研究報告, pp.1-6, 2015

第3章 切羽前方探査技術について

3.1 はじめに

山岳トンネルは、一般的な土木構造物と違い、坑口部を除き、地中奥深くに構築する特殊な線状構造物である。設計時には、地山性状を把握するための調査を行い、その調査結果から得られる地山等級に応じて支保工を決定する。しかし、我が国の地山状況は変化に富み、頻繁に岩種や性状が変化することが少なくない。そのため、設計時の調査では、地山の内部の状況まで詳細に把握することが難しく、必ずしも設計図書に示された通りにトンネル工事を進めることができないことが多い。

トンネル掘削時に構築する一次支保工は、トンネル掘削後の地山の緩みを防止し、将来にわたってトンネルを安定的に支える重要な構造物である。一次支保工の設計は、地山状況や施工実績などを考慮し、発注者ごとに決められた支保パターンから選定する。設計で示された支保パターンに従って掘削を進めるが、設計時に想定された地山性状と違う性状の地山に遭遇することが少なくない。その場合には、地山性状に応じた支保パターンを選定し、施工を行うことになる。

施工時の支保パターンの選定方法は、掘削直後の切羽面の観察や計測データから地山等級や性状を判定し、それに見合った支保パターンを選定する。切羽観察時には、地質性状、硬軟の程度、割れ目、断層、湧水、切羽の安定性などについて、その程度を点数化して評価する。評価された切羽評価点を参考に、地山等級を判定し、施工時の支保パターンを決定する。切羽の評価や地山等級の判定には、経験と技術力が必要であり、誰でもできるわけではないのが現状である。

複雑な地質性状の地山を掘削する時には、急激に地山性状が変化し、トンネルの変状や地山の崩壊が発生することがある。その場合には、重い支保構造や補助工法を採用する必要があり、地山の急激な変化を予測し、重い支保構造を構築する資材や補助工法の方法などを事前に準備しておく必要がある。しかし、切羽観察から前方の地山性状、特

に断層破碎帯や帯水層などのトンネルの構造に悪影響を及ぼす性状の変化を予測することは難しく、事前に切羽前方の地質状況を把握するための調査が行われるようになっている。

本章では、掘削時に切羽観察を用いて地山等級を判定する方法と、切羽前方の地質状況を把握するための方法について概説し、それらの課題について考察を行う。

3.2 切羽観察記録のための切羽評価点









トンネルの掘削は、発破孔の穿孔、装薬・発破、掘削ずり搬出、一次支保工の構築を1サイクルとし、それを繰り返すことによって掘削を進めていく。1サイクルの掘進長は1.0～2.0m程度で、地山等級によって決められている。

切羽観察は、発破後に行い、切羽全面の地山性状を観察する。観察項目ごとに点数化し、切羽の状態を評価する。掘削期間中は毎日記録し、支保パターンの妥当性を確認するとともに、連続して性状変化を捕らえることによって、切羽前方の地山性状を予測する。また、計測結果をもとに、トンネル変状の程度を確認、評価して、既施工箇所の支保工の妥当性を検証する。

3.2.1 切羽評価点

地山を評価する方法として、切羽の状態を項目ごとに点数化して評価する方法が用いられることが多い。評価項目や評価点の区分は、発注者によって若干違う部分もあるが、評価する項目は概ね同じである。鉄道トンネル工事で用いられている例を図3.2.1に道路トンネルで用いられている例を図3.2.2に示す。工事中は、切羽の評価点を参考に、掘削時の地山等級を決定している。

切羽観察記録

トンネル名	九州新幹線(西九州)、 新長崎トンネル(東) 他	位 置	起点からの距離程 57k 867.6m 坑口からの距離程 本坑坑口より 27.6m			
土 被 り	6.8 m	総合判断	地山区分あるいは パターン区分の判定 IN-A(RC)			
岩 種	安山岩、閃緑岩、凝灰角礫岩	岩石名 形成地質年代	風化閃緑岩 第四紀中新世 牧島火山岩 類			
特殊条件 状 態	膨張性土圧・偏圧・流動性・土被り小()m・重要構造物近接・谷の直下・その他()					
この切羽で採用 している補助工 法						
地質構造	1. 互 層  2. 不整合  3. 岩脈貫入  4. 微褶曲  5. 断 層  6. その他					
掘削地点の地山の状態と挙動				特記事項		
A	切羽の 状 態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が 抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを 生じる	4. 鏡面は自立せず 崩落あるいは流出	
B	暴露面 の 状 態	1. 自立	2. 時間がたつと緩み 肌落ちする	3. 自立困難、掘削後 早期に支保する	4. 掘削に先行して山を 受けておく必要がある	
C	圧 縮 強 度	1. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ ハンマー打撃で跳ね返る	2. $100 > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$ ハンマー打撃で砕ける	3. $20 > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ ハンマーの軽い打撃で砕ける	4. $5\text{MPa} > \sigma_c$ ハンマー刃先がくい込む	
D	風 化 変 質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、 強度やや低下	3. 全体に変色、 強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、礫 状 当初より未固結	
E	破砕部の切羽 に占める割合	1. $5\% > \text{破砕}$	2. $20\% > \text{破砕} \geq 5\%$	3. $50\% > \text{破砕} \geq 20\%$	4. 切羽面の大部分が 破砕されている状態	
F	割れ目 の 頻 度	1. 間隔 $d \geq 1$	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 破砕 当初より未固結	
G	割れ目 の 状 態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む 当初より未固結	
H	割れ目 の 形 態	1. ランダム方形 	2. 柱状 	3. 層状・片状 ・板状 	4. 土砂状・細片状 当初より未固結	
I	湧 水 目視での量	1. なし、滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水 (ℓ/min)	4. 全面湧水 (ℓ/min)	
J	水による 劣 化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出	
	割れ目 の 方 向 性	縦断方向 (切羽鏡面)	1. 水平($10^\circ > \theta > 0^\circ$) 2. さし目($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ ・ $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 4. 流れ目($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 6. 垂直($\theta \geq 80^\circ$)		3. さし目($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 5. 流れ目($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ ・ $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 【最大傾斜角】	
		横断方向 (切羽鏡面)	1. 水平($10^\circ > \theta > 0^\circ$) 2. 右から左へ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ ・ $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 4. 左から右へ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 6. 垂直($\theta \geq 80^\circ$)		3. 右から左へ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 5. 左から右へ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ ・ $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 【見掛け傾斜角】	
評価点					31.0	

評価点:観察項目別の一つを選びその点数の和とする。但し、特記事項は含まない。

図 3. 2. 1 鉄道トンネル工事で用いられる切羽観察記録例 (JRJT)

様式-1

切羽観察表〔全岩質共通〕

1. 切羽基礎情報

トンネル名				<p>切羽に良好な部分と劣悪な部分が混在する場合の見方 ※「(C)圧縮強度」、「(D)風化変質」、「(E)割れ目の頻度」を評価する場合に適用 劣悪な部分が30%以上の場合→劣悪な部分で評価 劣悪な部分が10%以下の場合→その他の良好な部分で評価 劣悪な部分が10%~30% →両者の中間的な部分で評価</p> <p>注) H:上半掘削高さ B:掘削幅</p>
観察年月日	平成	年	月 日	
測点	No.	+	m	
断面番号	No.			
坑口からの距離	m			
土被り高さ	m			
地表地形				
岩石名	地質時代:		区分:	岩石グループ:
湧水状況	<切羽> 湧水量: L/min 色:	湧水箇所:	<切羽全体> 湧水量: L/min 色:	

2. 切羽観察記録

評価区分 (掘削地点の地山の状態と挙動)				評価区分		
				左肩	天端	右肩
(A) 切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる			
(B) 素掘面の状態	1. 自立 (普請不要)	2. 時間がたつと緩み肌落ちする (後普請)	3. 自立困難掘削後早期に支保する (先普請)			
(C) 圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ ハンマー打撃はね返る	2. $100\text{MPa} > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$ ハンマー打撃で砕ける	3. $20\text{MPa} > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ 軽い打撃で砕ける			
(D) 風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下			
(E) 割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$			
(F) 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口			
(G) 割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状			
(H) 湧水	1. なし・滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水			
(I) 水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化			
連続掘削面目の方向 (切羽をみて)	1. 水平 ($10 > \theta > 0$) 2. さし目 ($30 > \theta > 10$, $80 > \theta \geq 60$) 3. さし目 ($60 > \theta \geq 30$) 4. 流れ目 ($60 > \theta \geq 30$) 5. 流れ目 ($30 > \theta \geq 10$, $80 > \theta > 60$) 6. 垂直 ($\theta \geq 80$) (最大傾斜角をとる)					
連続掘削面目の方向 (卓越する不)	1. 水平 ($10 > \theta > 0$) 2. 右から左へ ($30 > \theta \geq 10$, $80 > \theta \geq 60$) 3. 右から左へ ($0 > \theta \geq 30$) 4. 左から右へ ($60 > \theta \geq 30$) 5. 左から右へ ($30 > \theta \geq 10$, $80 > \theta \geq 60$) 6. ($\theta \geq 80$) (切羽面の見かけの傾斜角をとる)					

3. 火薬量

評価項目・区分	1	2	3	4	5	評価区分
火薬	火薬量 1.0kg/m ² 以上	B相当 (1.0kg/m ²)	C相当 (0.8kg/m ²)	D相当 (0.6kg/m ²)	0.6kg/m ² 以下	

図 3.2.2 道路トンネル工事で用いられる切羽観察記録例 (近畿地方整備)

トンネル掘削時に実施する切羽観察について、観察時に評価する地山の状態に関する評価項目を示し、観察時の注意点について以下に述べる。

A. 切羽の状態

切羽の状態とは、トンネル掘削中の正面に当たる地山部分の状態のことで、鏡面の状態ともいう。トンネル掘削では、全断面掘削工法、もしくは上半先進掘削工法で掘進するため、鏡面は素掘りの状態で、トンネル掘削高さに当たる数mを垂直に掘削する。不良な地山では、切羽の崩落、崩壊、押し出し、流出が発生することがある。観察では、安定、鏡面から岩塊が抜け落ちる、鏡面の押し出しを生じる、鏡面は自立せず崩落あるいは流出から選択する。

B. 素掘り面の状態

素掘り面の状態とは、1.0～2.0m を掘削したときのトンネルの周囲にあたる地山の状態のことである。1回の掘削長が長いほど素掘り面の面積は増加する。地山の状態が不良な場合は、1サイクル1.0mの掘進長で施工し、地山の状態が良い場合は、1.2m、1.5m、2.0mと1サイクル当たりの掘進長を伸ばす。観察では、自立、時間がたつと緩み肌落ちする、自立困難掘削後早期に支保する、掘削に先行して山を受けておく必要があるから選択する。

C. 圧縮強度

圧縮強度とは、岩片自身の圧縮強度のことである。圧縮強度が大きいほど、トンネルの強度は増す。地山の強度は、支保構造を決める上で、大きな判断材料となる。そのため、定量的に把握しておくことが望ましい。切羽観察時には、簡易な方法として切羽に出現している岩盤と同等の岩塊を選択し、ハンマーで打撃して評価する。ハンマー打撃で跳ね返る、ハンマー打撃で砕ける、ハンマーの軽い打撃で砕ける、ハンマー刃先が食い込むから選択する。また、打撃した時の音を聞き強度を推定する。簡易な試験器具を

用いた評価方法では、点載荷試験（ポイントロード試験）やシュミット式ロックハンマー試験なども併用する。しかし器具を用いた試験では、採取する資料の強度試験であり、切羽全体の評価でないことに留意する必要がある。

D. 風化変質

風化変質では、風化による岩盤の変質を観察する。風化には物理的風化と科学的風化がある。物理的な風化は、坑口付近で多く見られる風化で、応力解放、重力、などの力学的な作用により岩盤が細分化する状態である。化学的風化は、岩盤の内部でも見られる現象で、空気や地下水に接触することによって、化学的な反応を起こし鉱物の変質する現象である。切羽観察では、なし・健全、岩目に沿って変色強度やや低下、全体に変色強度相当に低下、土砂状粘土状礫状当初より未固結から選択する。

E. 破砕部の切羽に占める割合

トンネルを掘削時に現れる破砕帯の程度を切羽に占める割合で表したものである。破砕部は規模の小さい岩盤の亀裂に介在するようなものから、断層破砕帯と呼ばれる数 m ～数十 m に及ぶものまで存在する。それら破砕部では、地山強度の低下、破砕部が耐水層となっている、破砕部が遮水層となっているなど、岩盤の劣化や湧水の原因となる場合があり、トンネルの変状に注意が必要である。切羽観察では、破砕部が切羽面のどの程度の面積を占めているかを評価するもので、5%以下、5%以上 20%未満、20%以上 50%未満、切羽面の大部分が破砕されている状態より選択する。

F. 割れ目の頻度

割れ目の頻度では、切羽の岩盤の割れ目の間隔を評価するものである。割れ目の間隔が小さいほど風化や応力などの影響で岩盤が劣化している状態である。小規模な岩塊の崩落が起こりやすく、切羽が不安定化する原因となる。間隔が広い場合、切羽は安定しているが、大きなブロックで崩落する可能性があるため注意が必要である。割れ目の間

隔が 1m 以上，20cm 以上 1m 未満，5cm 以上 20cm 未満，5cm 未満で評価する。

G. 割れ目の状態

割れ目の状態では，割れ目の幅を評価する。割れ目が掘削時の振動などで，開口している場合は，崩落の危険性があるため注意する。また，脆弱部では割れ目に粘土が介在する場合がある。土被りが小さい場合は，地表からの湧水などの影響で割れ目に浸透していることが考えられ，深部において見られる場合は，断層や貫入岩などの影響があることが考えられる。粘土を介在する場合は，割れ目に沿って滑りやすく，切羽が不安定はしやすい。密着，部分的に開口，開口，粘土を挟む当初より未固結で評価する。

H. 割れ目の形態

岩盤の割れ目の形態では，そのでき方や特徴から掘削時に注意が必要となる場合がある。柱状の割れ目は火山性の岩盤で見られ，柱状の岩塊群で構成されている。溶岩が冷え固まるとき，体積の収縮を伴って応力が解放され，多角形の集合体となったものである。層状は，層状節理であり，堆積岩に見られる。堆積時には水平であったものが，様々な作用を受けて，傾いたり，曲がったりしていることが多い。片状は片理であり，変成岩に見られる。板状は，板状節理であり，火山岩で見られる。

土砂状は，坑口付近や低土被り，著しく破砕された岩盤であり，強風化して割れ目を認識できない状態である。ランダム方式，柱状，層状・片状・板状，土砂状・細片状・当初より未固結で評価する。

I. 湧水目視での量

切羽に発生している湧水の量を目視で判定する。湧水が発生している場合には，地山に緩みや岩塊の崩落を引き起こす原因となることがあり，正確に把握することが重要である。また，切羽ごとの湧水量から前方の耐水状況なども予測する。湧水が発生している位置が切羽の上部から生じている場合は，崩落などの危険性がある。判定は，なし，

滴水程度，集中湧水，全面湧水で評価する．集中湧水の場合は，湧水量を測定し記入しておく．

J．水による劣化

湧水が発生する切羽では，劣化が生じていることがある．その劣化の程度は，地山の硬さ，割れ目の程度・方向，水による風化などによって左右される．硬質な岩盤の切羽では，水による劣化は少ないが，亀裂が多い岩盤では，岩塊の剥落や抜け落ち，軟弱な地山では，緩みや泥濘化などが生じる場合がある．また，湧水が多い場所では，土圧と水圧によって支保工が変状する場合もあるので，計測結果も注意して確認する．

3.2.2 まとめと考察

トンネル工事では，設計時の調査による地山等級の設定を施工時の地山性状に合わせて変更しながら施工を進めていく．切羽の観察は，地山等級を決定するための重要な要素のひとつであり，切羽を観察することによって，支保構造の妥当性，補助工法の採用の有無，切羽前方の予測など様々な事項を決定していく．

掘削支保パターンを決定するための基準となる地山等級は，切羽評価点を参考に決められることが多い．切羽評価点の合計，または天端部などに重み付けを行った上で合計する方法などで切羽評価点を算出する．そして，切羽評価点の合計点を目安にして，地山等級を決定する．

切羽の評価は地質学的な要素が強く，専門的な知識が必要である．そのため，その評価には経験豊富な技術者があたることが多い．しかし，現場施工においては必ずしも経験豊富な技術者が常駐しているわけではない．

そこで，経験者でなくても切羽の評価をできる方法があればよいと考える．

3.3 切羽前方の探査技術

地質調査は、トンネルを経済的かつ安全に施工するために重要であり、設計段階で実施される地表からの調査と施工段階に実施される坑内からの調査がある。設計段階で実施される調査は、地表からの弾性波探査や鉛直ボーリング、水平ボーリングである。それらの調査結果をもとにトンネル全線の地質性状を想定し、地山等級を決定する。そして地山等級から支保パターンを設計して工事の設計図書となる。工事費は設計図書をもとに積算され、工事価格となる。しかし、施工時には設計時に想定された地山等級と違った地質状況に遭遇することが少なくない。設計時には、トンネルを構築する地山の深部まで正確に把握することが難しいからである。また、我が国は山岳地帯の成り立ちの特殊さから非常に複雑な構成をしており、さらに断層などの破砕帯も多く分布している。そのため、設計時には想定されなかった軟弱地山が出現することが多くある。施工時には、それらの複雑な地山状況を正確に把握し、事前に備えておくことが重要である。例えば、剛性の高い支保構造に変更するための資材や補助工法の準備などである。そのため、施工時には事前に地山の状況を把握するために、さまざま切羽前方探査が実施されるようになってきている。

切羽前方の地質状況を把握するために施工段階で実施される坑内からの調査方法について示し、その課題を考察する。

3.3.1 ボーリング探査

ボーリング探査（写真 3.3.1）は、切羽から掘進方向へ向かって、水平または傾斜をつけて穿孔する方法である。基本的にはオールコアリングで実施し、採取したコアを観察することによって切羽前方の地山の状態を判定する。また、穿孔速度やトルクから地山状況の推定も可能である。その他、パーカッションワイヤラインサンプリング工法では、穿孔に打撃を加えることにより穿孔速度を大幅に上げた工法であるが、サンプルが

砕けた状態で採取されるため、RQDなどの亀裂に関する情報は得られない。



写真 3.3.1 水平コアボーリング実施例

3.3.2 穿孔探査

穿孔探査（図 3.3.1）は、切羽から掘進方向へ向かって、水平または傾斜をつけて穿孔する方法である。ノンコアボーリングを行い、穿孔作業時に削岩機から得られる油圧データを測定し、地山性状に対する定量的な評価を行う。油圧データから得られる項目は、フィード圧、打撃圧、打撃数、回転圧、穿孔速度、ダンピング圧などであるが、機械の種類によって測定できないものがある。測定結果から穿孔エネルギーを算出し、地山の状態を評価する。また、穿孔時には湧水量やくり粉の状態などを目視観察によって確認する。

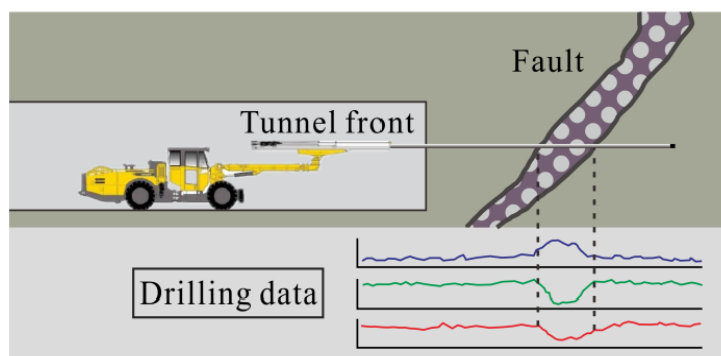


図 3.3.1 穿孔探査実施模式図

3.3.3 物理探査

切羽前方への物理探査の方法として、弾性波を利用したものと電磁波を利用したものがある。弾性波探査では、発破などによって弾性波を発生させ、切羽前方へ岩盤内を伝播させ、硬軟の変化点で反射して戻る弾性波を受信機で受信する（図 3.3.2）。弾性波速度と反射波の伝搬速度から反射面の位置や規模を予測することができる。岩盤の硬軟変化点の反射を受信することから、破碎帯や層境界の位置や幅の予測に適している。探査可能距離は 150m 程度である。電磁波探査は、電磁誘導による二次地場を測定する方法で、地質変化や地下水帯、粘土層などの相対変化を比抵抗分布として可視化して捉える（図 3.3.3）。

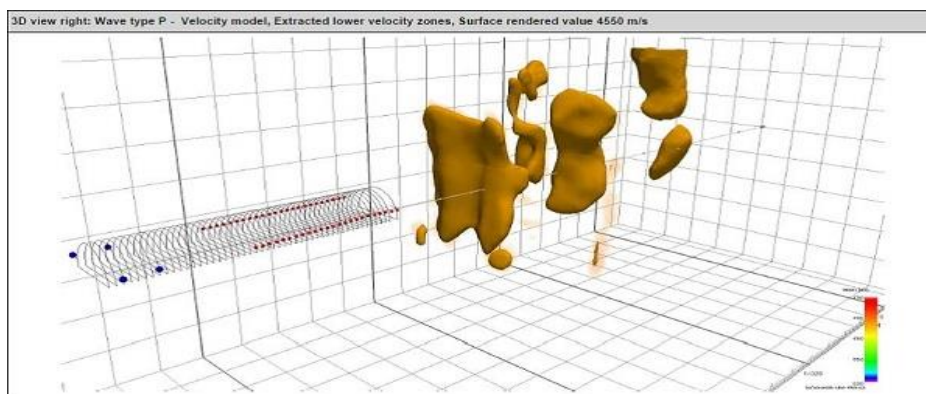


図 3.3.2 弾性波探査解析例（TSP303）

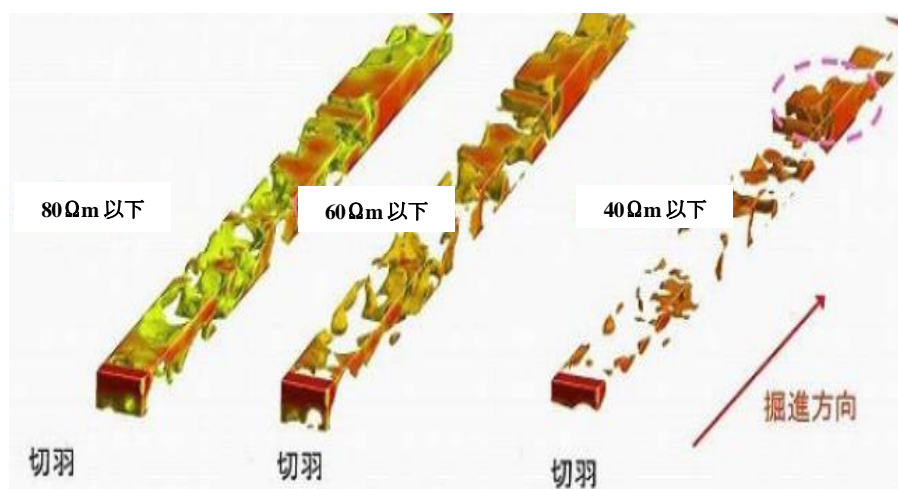


図 3.3.3 電磁波探査解析例（FDEM）

3.3.4 まとめと考察

切羽前方探査の方法は、大きく分けて水平コアボーリング、穿孔探査、物理探査である。それぞれに長所、短所があり使い分けることが必要になる。

水平コアボーリングは、前方数十 m を探査可能であるが、坑内に専用のボーリング機械を持ち込み、数日に渡って作業を行うことが必要である。そのため、切羽作業を中断する必要がある。また、調査費用も高くなる。しかし、コアを採取して目視できることから、岩種、硬軟、亀裂の程度、破碎の有無などを確実な情報として把握することができる。

穿孔探査は、穿孔エネルギーを利用した探査である。掘削時の穿孔機械であるドリルジャンボを利用して行われる。作業をトンネルの作業員で実施できるので、大きな工程上の遅延が発生しない。比較的安価で、手軽にできる方法である。しかし、穿孔時の油圧データを取得して評価するため、その評価方法の確立や定量的な評価が難しいといった課題がある。前方 10～30m の探査が可能である。

物理探査では、弾性波探査で 150m 程度、電磁波探査で、50m 程度までの探査が可能である。両者とも専用の測定機械が必要になる他、弾性波探査では震源として火薬を用いることが必要である。探査の時間は数時間であるが、切羽作業を中断する必要がある。

切羽前方探査は、その重要性が認識され採用されることが多くなってきたが、現状では、それぞれに課題がある。

3.4 切羽前方探査システム

トンネル掘削時においては、切羽前方の断層破碎帯や地下水脈など、工事の進捗に支障となる脆弱な部分を事前に高精度で予測することが要求されている。切羽前方探査システムは、トンネル掘削に使用する削岩機から得られる各種油圧データを自動測定し、これらのデータをもとに解析処理をすることにより、精度の高い地山評価を行うことができる。計測する穿孔時の油圧データとして、フィード圧、回転圧、打撃圧、穿孔速度、およびダンピング圧などが挙げられる。

取得できる油圧データは穿孔作業に利用するドリルジャンボのメーカーによって、多少の違いが見られる。これらの取得したデータを地山評価に利用するために穿孔エネルギーなどのデータに変換し、穿孔時の湧水量やくり粉の状態などの目視データとともに切羽前方の地山状況の想定を行う。

探査の方法は、ロッドを継ぎ足しながら穿孔を行う、継ぎノミ長孔穿孔であり、地山の状態により異なるが、切羽前方から 30m の区間を一度に探査することが可能である。穿孔作業に要する時間は、数時間である（探査距離により異なる）。油圧データを解析によって穿孔エネルギーなどへ変換するのに約 1 時間程度（解析データの内容により異なる）の時間を要する。

3.4.1 穿孔データの定義

穿孔エネルギーをはじめとした切羽前方探査システムから得られる穿孔データの定義について以下に示す。

①穿孔エネルギー

単位体積あたりの岩盤を穿孔するのに要したエネルギー量を示し、より硬質な岩盤ほどより多くの穿孔エネルギーが必要となる。

各データから穿孔エネルギーを式 (3.1) によって算出する。

$$Ed(J/cm^3) = \frac{Ep(J) \times Np(bpm) \times T(\%)}{Vd(cm/min) \times S(cm^2)} \quad (3.1)$$

ここに、 Ed は穿孔エネルギー、 Ep は打撃エネルギー、 Np は打撃数、 T は伝達効率、 Vd は穿孔速度、 S は穿孔面積である。

穿孔エネルギーは単位体積当たりの削岩機の仕事量を表している。

②打撃エネルギー

ドリフタ（削岩機）で発生させた打撃のためのエネルギーである。岩盤を穿孔するとき、打撃と回転によって岩盤を破壊しながら前進する。破壊された岩片（くり粉）は、穿孔水で孔外へ排出される。その作業を繰り返しながら前進する。打撃を行うためにドリフタで生み出されたエネルギーである。

打撃エネルギー Ep は式（3.2）により得ることができる。

$$Ep(J) = \frac{PH (MPa)}{PH_0 (MPa)} \times E_0(J) \quad (3.2)$$

ここに、 Ep は打撃エネルギー、 PH は計測された打撃圧力、 PH_0 は定格打撃圧力、 E_0 は定格打撃エネルギーである。

③打撃数

穿孔時、岩盤を破碎する際にビットで岩盤を叩く単位時間あたりの回数である。穿孔には、ロータリーパーカッション方式を用いているため、ビットで岩盤を叩きながら回転を加えて対象の岩盤を破碎する。

④伝達効率

削岩機で発生させたエネルギーと岩盤に伝達されたエネルギーの比率である。削岩機で発生させたエネルギーは、すべて岩盤に伝達させるわけではなく、損失が発生する。

損失の比率は打撃圧とフィード圧のバランスによって変化するが、各メーカーによって、固有の値を取っている。損失係数と表示する場合もある。

⑤穿孔速度

穿孔時にビットが進む速度である。ゆわゆるノミ下がりである。切羽面から前方を探る方法として以前から用いられている。この速度が大きいほど脆弱あるいは軟質な地質であると判断できる。しかし、穿孔速度で地山の硬軟を判断する場合は、フィード圧を一定に保つ必要がある。

⑥穿孔面積

穿孔する孔の面積であり、穿孔作業に用いるビットの大きさによって決まる。山岳トンネルで一般的に用いられるビット径は、 $\phi 45\sim 65\text{mm}$ 程度である。補助工法として鋼管パイプなどを打設するような場合には、さらに大きな径のビットを使う場合もある。

⑦フィード圧

穿孔時にビットを岩盤へ押し付ける圧力である。一定の穿孔速度を維持したまま穿孔を行う場合には、硬質な岩盤であるほど、高いフィード圧が必要になる。

⑧回転圧

穿孔時にビットを回転させる圧力である。ドリフタでロッドおよび先端に装着したビットを岩盤に押し付けたまま打撃と回転を加えることにより岩盤を破壊して穿孔する。

⑨区間湧水量

穿孔は、ロッド 1 本 (3or4m) を順次継いでいく継ぎのみ方式で行う。継ぎのみ作業時に孔口から排水される湧水量を測定し、ロッド 1 本あたりの区間ごとの地山からの湧水量を計算したもの。切羽前方の掘削時の湧水箇所と量を予測する。

3.4.2 穿孔データの取得方法

穿孔データは、トンネル掘削に使用するドリルジャンボで岩盤を穿孔する際の油圧データである。専用の機械を用いて収集し、回収して解析作業を行う。収集するデータは、フィード圧や回転圧などであるが、メーカーや使用するシステムにより若干異なる。しかし、穿孔時の油圧データを取得するという点では大きな違いはない。いくつかある計測システムの中で、本研究では「ドリル NAVI」(図 3.4.1) に搭載されている機能の一つである地山診断技術「ドリル EXPLORE」を採用している。以下は全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の詳細である。

全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」は、穿孔誘導技術と地山診断技術で構成されている。全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」は、山岳トンネルで標準的に使用するドリルジャンボに穿孔誘導技術と地山診断技術を搭載することで、山岳トンネル工事における施工中や完成後の品質や安全性確保、コスト縮減や工程確保を可能としたものである。

以下にそれぞれの技術について説明する。

a.穿孔誘導技術「ドリル NAVIGATION」

切羽に設置したドリルジャンボの位置を搭載した3ヶ所のプリズムを自動追尾式トータルステーションで測定し、3次元で機械位置を確定する。穿孔位置はジャンボのブームの動きを検知するセンサーにより把握する。これにより、穿孔位置や角度を3次元で把握し、運転席に設置したガイダンス用モニターにしたがって予め計画した穿孔位置(位置、さし角、穿孔長)へ正確に誘導することができる。

b.地山診断技術「ドリル EXPLORE」

日常の穿孔作業である発破孔の穿孔あるいはロックボルト孔の穿孔時にデータを取得し、その情報を活用するものである。穿孔時の油圧データ(打撃圧、フィード圧、穿孔速度、打撃数、回転圧)を取得できる穿孔探査器を全削岩機(ドリフタ)に搭載し、

得られた油圧データから切羽周辺の地山の穿孔エネルギーを所得する。本機能と穿孔誘導技術で取得した穿孔位置データとを結合することで、位置情報を持った穿孔エネルギーとして周辺地山を評価し、把握することができる。

本機能により、長尺の切羽前方探査で得られる穿孔データと、日常の穿孔作業で得られる短尺かつ複数の穿孔データを利用することで、切羽前方、切羽全面、トンネル周辺を含むトンネル全長について詳細かつリアルタイムに地山診断を行うことが可能である。探査時の状況を（写真 3.4.1, 写真 3.4.2）にドリル NAVI の諸元を（表 3.4.1）に地山の硬軟を図化した例を（図 3.4.2）に示す。

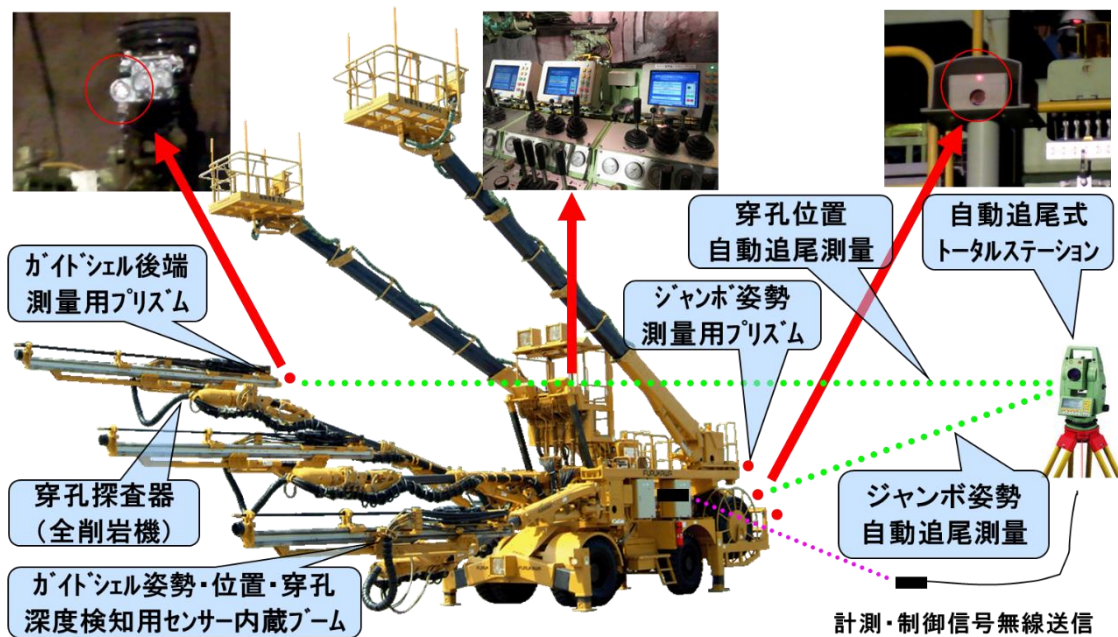


図 3.4.1 ドリル NAVI システム概要図



写真 3. 4. 1 前方探査の状況

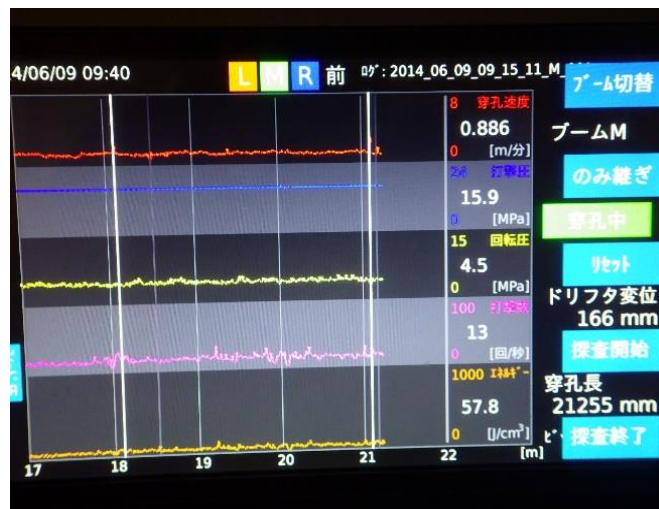


写真 3. 4. 2 ドリルジャンボに搭載したモニター

表 3. 4. 1 トリル NAVI の諸元

機械メーカー	古川ロックドリル
型式	JTH3200R-Ⅲ
ドリフタ	HD210
ロッド	3m×15本=45m
ビット径	φ=65mm

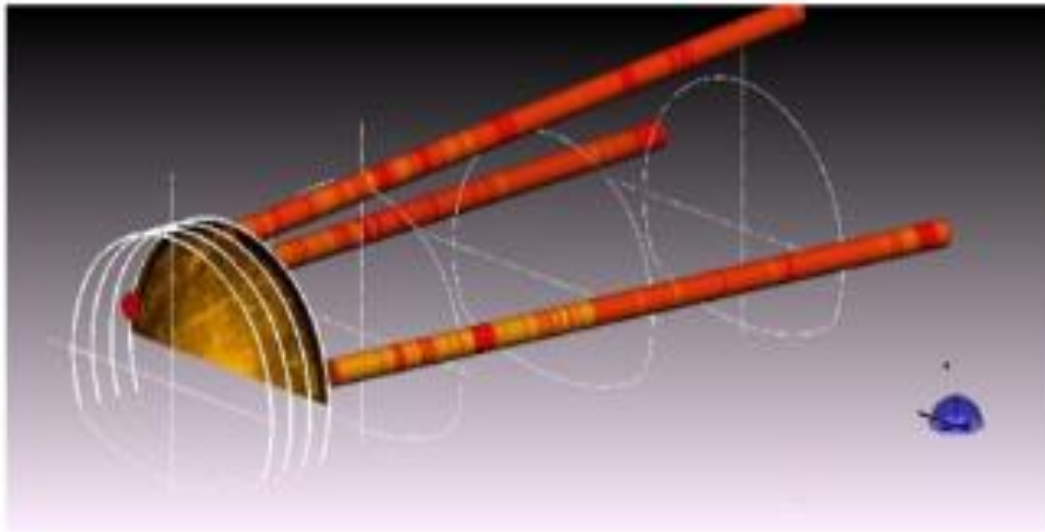


図 3.4.2 穿孔データ表示例図

3.4.3 まとめと考察

切羽前方探査の方法の一つである穿孔探査は、穿孔時の油圧データを取得して、そのデータをもとに穿孔エネルギーを計算し、エネルギーの大きさに前方地山の硬軟を評価する。現在、穿孔探査が可能なシステムとして「ドリル NAVI」を用いた方法と、「DRISS」を用いた方法がある。今回「ドリル NAVI」で取得した穿孔データを研究の対象とし、穿孔時に取得した油圧データとトンネル掘削時に実施された切羽評価点との相関を検証する。それによって、穿孔データから切羽評価を推定できるかを検証する。それが可能になれば、切羽評価を行う上で、必要とされている知識と経験を補うことができ、今後、技術者が少なくなっていく中で、地山を判定するための一助になると考える。

3.5 実事例と課題

3.5.1 はじめに

不良地山が想定される寺山トンネル工事で、設計時に長尺先受け工が計画された180m区間において、前方探査を実施した。探査はトンネル切羽面の天端、左右の計3ヶ所で行った。さらに補助工法である長尺先受け工の施工を利用して、穿孔時のエネルギーを取得し、三次元ソリッド解析を用いてトンネル周辺の地山性状の予測を行った。本節では、対象トンネルの前方予測の方法と予測結果を用いた追加の補助工法の選定方法について述べる。

3.5.2 対象工事の概要

寺山トンネルは、現在建設中の中村宿毛道路の一部、延長 $L=485\text{m}$ の山岳トンネル工事である。施工は終点側から開始し、2%の下り勾配で掘削を行った。

終点側坑口から約 75m 付近に土被り 9m ($0.7D : D$ は掘削幅) 程度の沢部 (区間長 $L=30\text{m}$) があり、起点側坑口部は約 180m にわたり土被り $1D$ 以下の区間が連続している。事前の地質踏査の結果や終点側坑口付け時の切土面の地山状況から、当初より脆弱な地山であることが判明し、掘削開始時から全線に渡り、前方探査を実施した。表 3.5.1 に工事概要一覧を図 3.5.1 に地質縦断図を示す。

表 3.5.1 工事概要

工 事 名 称	中村宿毛道路 寺山トンネル工事	
工 事 場 所	高知県宿毛市平田町中山地先	
工 期	平成29年3月～平成30年10月	
発 注 者	国土交通省 四国地方整備局	
施 工 者	株式会社 鴻池組	
工 事 内 容	延 長	L=485m
	断 面	掘削断面積A=105.7㎡（盤下げ含む） 2車線道路トンネル
	施 工 法	NATM
	掘削方式	機械掘削（ロードヘッド）
	掘削工法	DIIIハターン、DIハターン（補助工法併用）
	補助工法	天端安定対策：小口径長尺鋼管フォアパイリング （L=12.5m, φ76.3mm, @450mm, 打設間隔9m） 小口径長尺鋼管フォアパイリング（多段式） （L=13.5m, φ76.3mm, @450mm, 打設間隔5m） 鏡面の安定対策：鏡吹付（t=50mm） 長尺鏡ボルト （L=13.5m, φ76.3mm, @1.5m, n=6本/断面） 脚部の安定対策：YMウィングコーン（φ485mm） 吹付けインバート（t=200mm、）

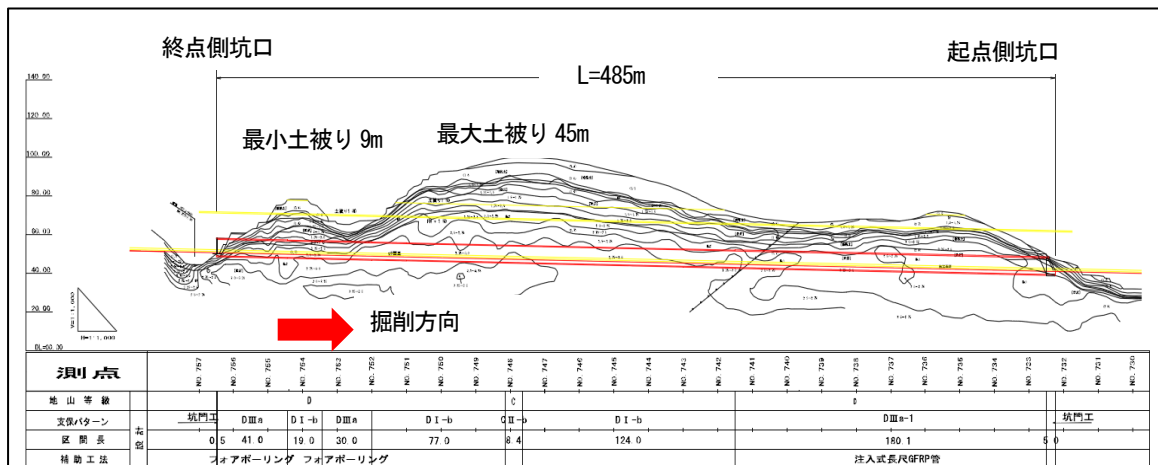


図 3.5.1 寺山トンネル地質縦断図

3.5.3 地質・地形概要

トンネルの掘削に先立ち、トンネル計画路線の直上付近の地表を踏査し、地質の分布状況や空中写真と地形図から抽出したリニアメントを図3.5.2に示す。リニアメントとは線状の地形の特徴のことであり、断層・断層破碎帯・多亀裂帯などの弱層部を反映していることが多い。以下に地形・地質の特徴を示す。

- ・ 終点側坑口部から沢部にかけては、地表に崩落地形が多く存在し、土被りも小さく、地質は石灰質混じりの泥岩地山で亀裂が発達し、脆弱な状態で部分的に 50L/min 程度の湧水があった。
- ・ トンネル中間部から起点側坑口部にかけては、リニアメントに一致する沢地形が多く存在し、トンネルの地山は砂岩系の玉石を含む泥岩で亀裂が細かく破碎質な状態で掘削時の緩みの影響を受けやすい状況であった。

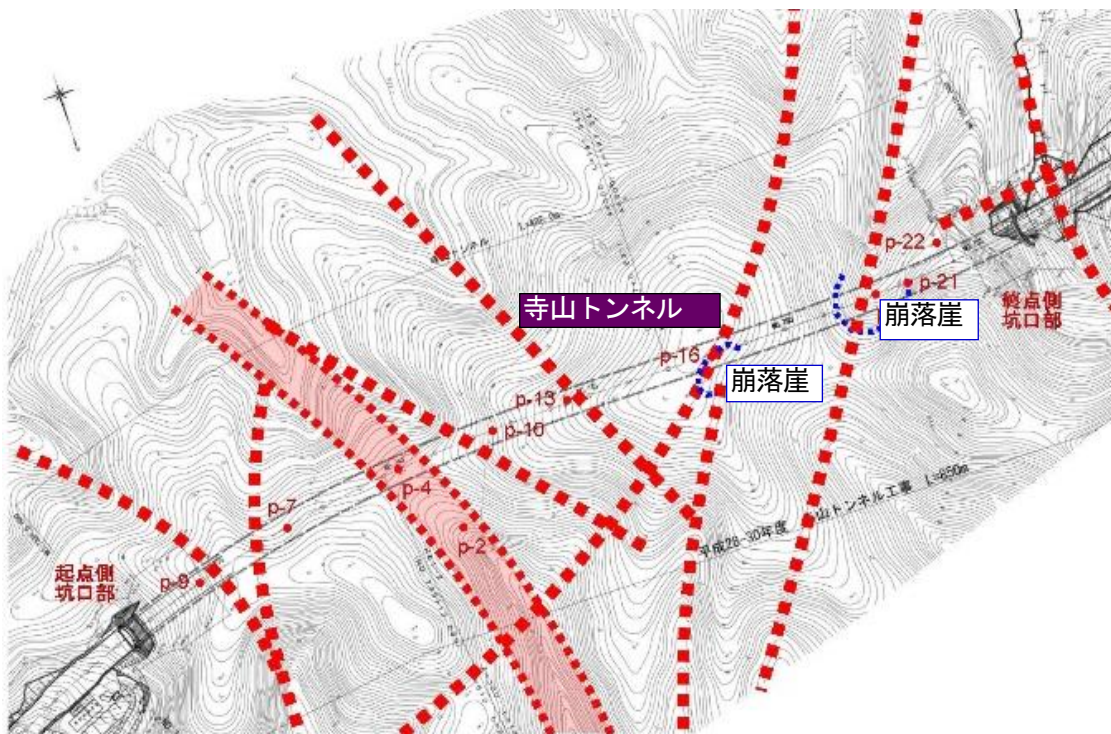


図3.5.2 抽出したリニアメント図

3.5.4 切羽前方探査

事前地質踏査結果および坑口付け掘削時の地山状況の確認結果から判断すると、終点側坑口部は、起点側同様土被りも小さく地山が脆弱であり、湧水の発生も確認された。また、終点側坑口部上部にはブロック積み上に里道が存在しており、トンネル掘削時の緩みの影響が懸念された。

地山が脆弱であるため、トンネル掘削時に天端の崩落や肌落ちが想定されることから、危険予知および補助工法の事前検討（採用区間等）・妥当性確認のため、トンネル掘削に先行して前方探査を実施した。終点側に関しては、トンネル切羽面で3箇所（天端、左右）L=30mの穿孔を行い、実績の多いDRISSシステムによる穿孔エネルギーによる評価を行った（写真3.5.1）。

また、前方探査により得られた穿孔エネルギーを指標にして、穿孔エネルギーから三次元クリギング法を用いて穿孔エネルギーの空間予測を行い、次に、指定した領域に対してボクセルモデル（三次元解析メッシュ）を生成し、穿孔エネルギーの空間予測結果から各節点（座標）に該当する穿孔エネルギー値を付与する。最終的に、三次元統合可視化ソフトのポスト機能を用いて、解析結果として穿孔エネルギー分布を表現した。

図3.5.3は切羽前方探査の精度向上手順を示す。また、切羽前方探査の効果については、以下に示す。

- ①長尺の探査（L=30m）により、補助工法必要区間の検討を事前に行い、工程遅延を防止できる。
- ②前方地山が良好な場合には補助工法の軽減が可能。
- ③前方地山の性状を事前に把握することで、地山の急変に対応ができる。
- ④地山が急に悪くなることを把握し、切羽の肌落ち等の危険予知ができる。
- ⑤前方地山の湧水状況を把握することにより効果的な湧水対策が取れる。



写真 3. 5. 1 切羽前方探査実施状況

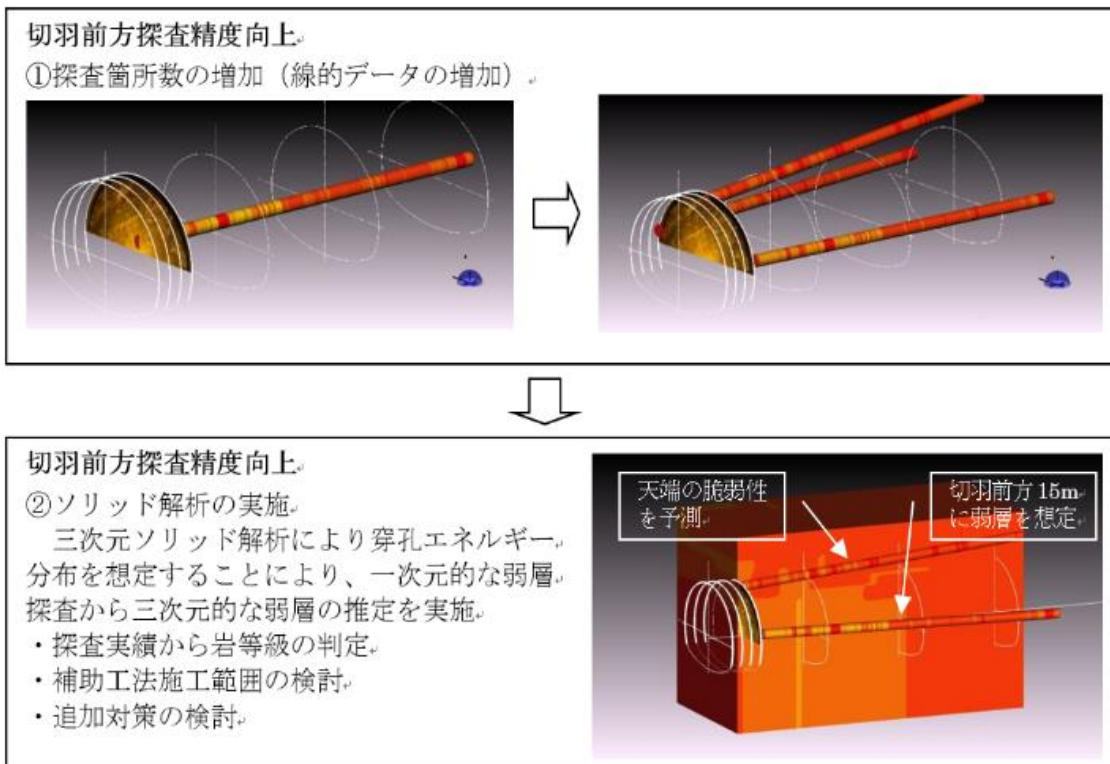


図 3. 5. 3 切羽前方探査の精度向上

3.5.5 穿孔エネルギーを用いた地山評価

穿孔エネルギーと地山等級の関係は、岩種や岩質によって様々であり、個々のトンネルで違いがあるが、判定の目安として、探査の初期段階で得られた穿孔エネルギーと地山特性の関係から、概ね0～50 J/cm³を脆弱層、50～100 J/cm³をDII地山相当、100～150 J/cm³をDI相当、150～250 J/cm³をCII相当、250以上 J/cm³をCI相当とした。坑口部より30m区間で実施した3本（天端、両側壁部）の切羽前方探査結果では、穿孔エネルギーが3本全てで概ね100 J/cm³以下となっていた。また、天端部の穿孔エネルギーは50 J/cm³以下となっており、天端部は脆弱な状態が続くことが予測された（図3.5.4）。

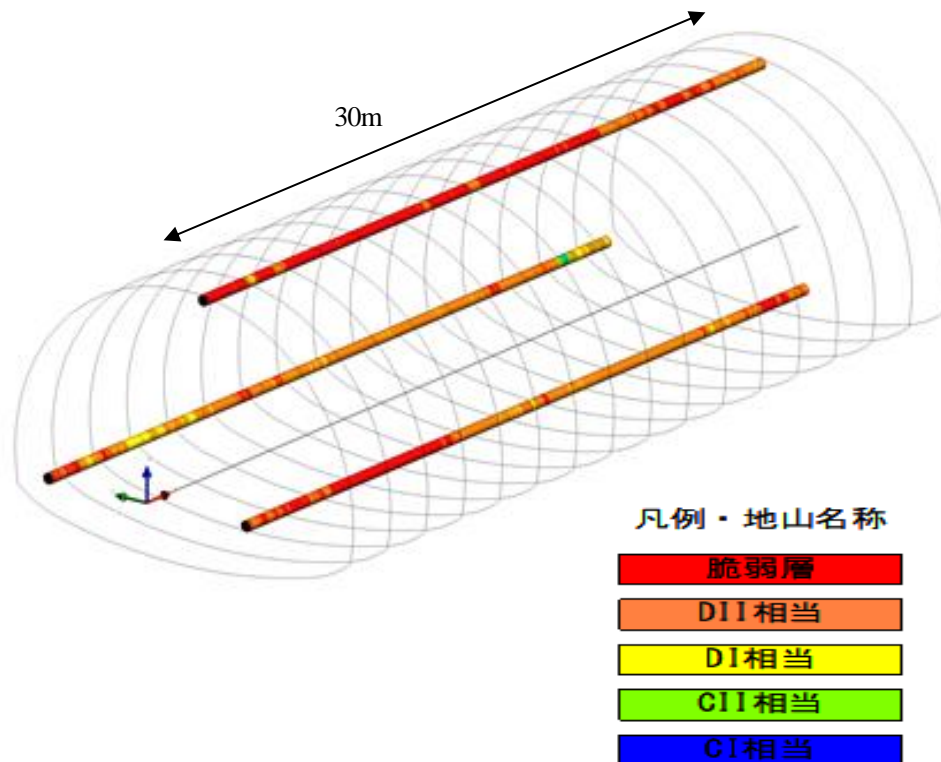


図 3.5.4 穿孔エネルギー図 (0-30m)

次に3箇所の穿孔エネルギーデータを用いて三次元ソリッド解析を実施し、脆弱層を三次元的に推定した(図3.5.5)。概ね天端付近が脆弱層であることが分かる。

これらの切羽前方探査の結果より、坑口部は脆弱な地山が連続していて、天端の崩落が予測されたため、注入式長尺鋼管先受け工を採用した。実際の切羽の状況と解析結果を検証するため、切羽と同じ測点の解析結果を二次元で切り出し、切羽写真と比較した。支保工No.10(坑口から10m)の切羽は、切羽左下部分が泥岩を主体とする地山であり、その他の部分はソイルセメントによる押え盛土部が出現している。支保工No.18(坑口より18m)の切羽では、泥岩を主体とする地山であるが、天端付近は風化により変色が見られる。支保工No.30(坑口より30m)の切羽では、全面が軟弱な泥岩を主体とする地山である(図3.5.6)。3箇所の切羽状況と解析結果の比較から概ね一致していることがわかる。

同様に、前方探査を30m毎に実施して切羽前方地山を予測しながら掘削を進めた。穿孔エネルギーの値が概ね $100\text{J}/\text{cm}^3$ 以上となった箇所から崩落や肌落ちなどの現象が少なくなり、安定した地山になったため先受け工の必要が無くなり、先受け工を終了した(図3.5.7, 8)。その後、概ね穿孔エネルギーは $100\text{J}/\text{cm}^3$ 以上後で推移しており、 $100\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の箇所に連続性がなく、切羽も大きな崩落や肌落ちもなく掘削が進行した。

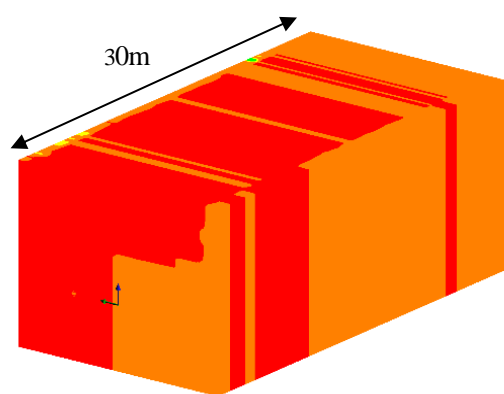
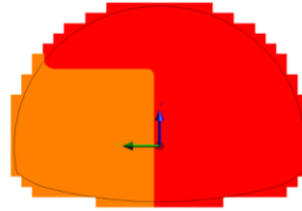
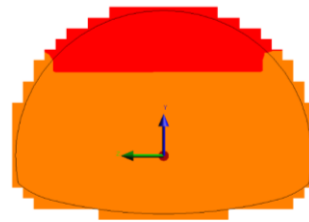


図 3. 5. 5 三次元解析結果図 (0-30m)

支保No. 10 (Nb. 756+0.4) 切羽観察写真とDRI SS探査 3次元解析結果の比較



支保No. 18 (Nb. 755+12.5) 切羽観察写真とDRI SS探査 3次元解析結果の比較



支保No. 30 (Nb. 755+0.5) 切羽観察写真とDRI SS探査 3次元解析結果の比較

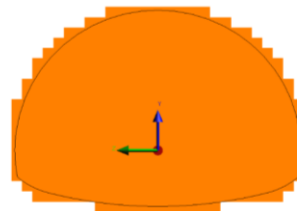


図 3.5.6 切羽観察と三次元解析結果との比較

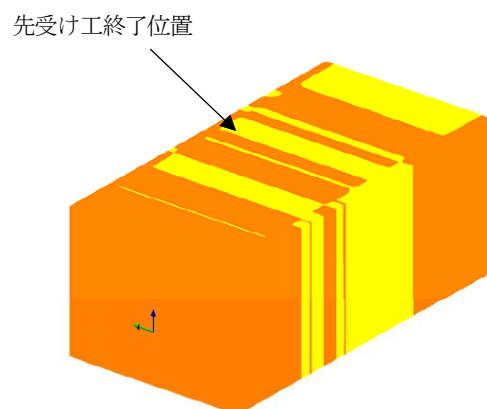
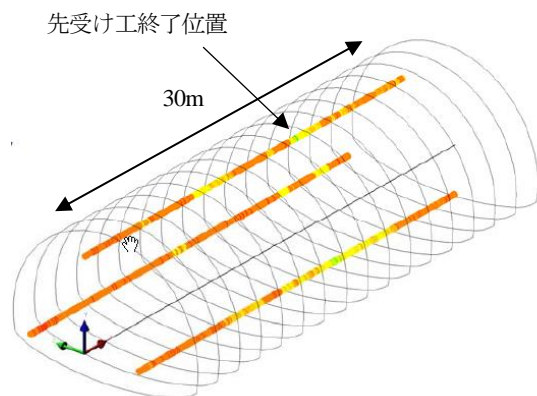


図 3.5.7 穿孔エネルギー分布（区間 87-117m）

図 3.5.8 三次元解析結果（区間 87-117m）

3.5.6 補助工法を利用した切羽前方探査

トンネル中間部から起点側坑口部（到達側）にかけては、砂岩の玉石（人頭大）を含む泥岩主体の混在岩（メランジェ）であり、スレーキング性が高く破砕質で脆弱な状況であった。掘削を進めると、徐々に天端の崩落や肌落ちが見られるようになり、坑口より 225m 地点から小口径注入式長尺鋼管先受け工を実施した。先受け工は多段式とし、13.5m の鋼管を 5m 掘進毎に 16 本/断面と 15 本/断面の千鳥で打設した。先受け工を実施した区間の前方探査は、実施手間や作業時間の増加による費用の増加を軽減するため、先受け工施工時の穿孔を利用してエネルギーを取得した。エネルギーの取得は、10m 掘削毎に行い、先受け工の天端、両肩の計 3 本で実施した（図 3.5.9）。取得できる穿孔エネルギーは、13.5m/回と短いですが、切羽前方の 10m 程度を精度よく探査することができた。286m より実施した前方探査の結果より、切羽面の左側が脆弱であることが示されていた（図 3.5.10, 11）。掘削時には、291m の切羽面で、左側を中心に鏡吹付けコンクリートが崩落した（写真 3.5.2）。これにより、前方探査から得られた解析的予測は、ある程度実地山の状況を把握できたと思われる。291m 以降の掘削は、前方探査の結果をもとに、鏡ボルトを採用し、打設位置や本数を決定して掘削を行った。

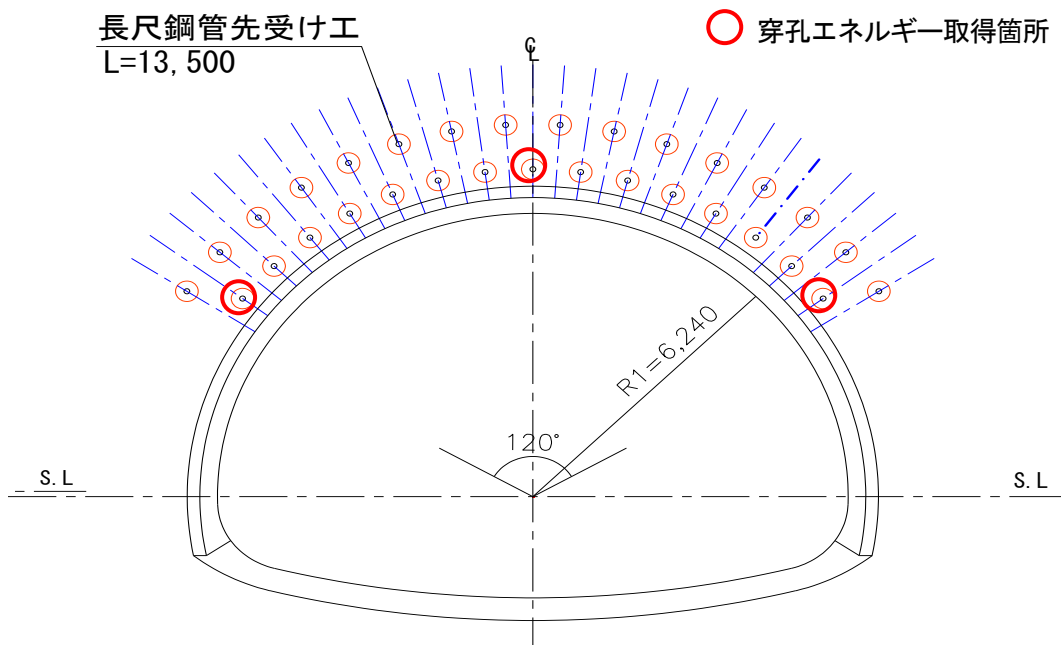


図 3.5.9 長尺鋼管打設パターンとエネルギー取得箇所

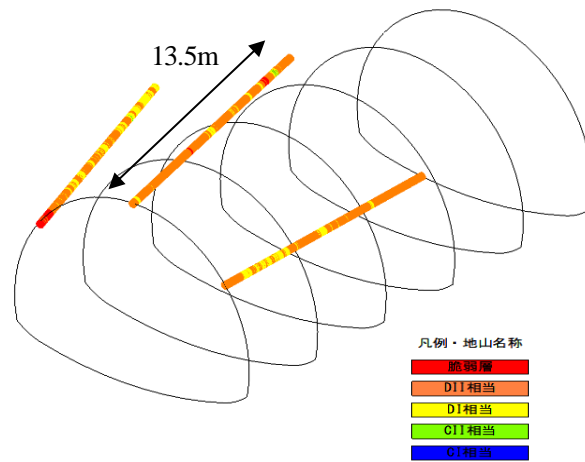


図 3.5.10 補助工法を利用した穿孔エネルギー分布
(区間 286-297m)

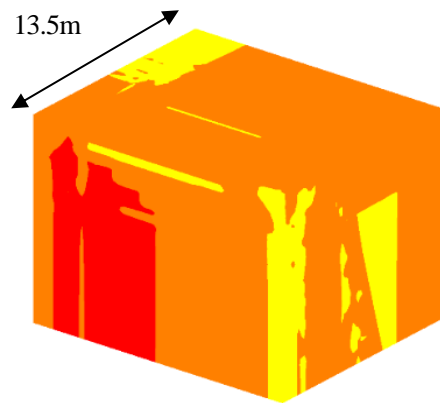


図 3. 5. 11 三次元解析結果（区間 286-297m）



写真 3. 5. 2 291m 地点鏡吹付け崩落状況

前述した掘削291m地点の前方探査では、前方の地山に対して、切羽面付近の地山の穿孔エネルギー値が極端に小さくなっている。これは掘削により地山が緩んでいることが原因であると思われる。補助工法を利用した前方探査では、3m程度の区間をラップしてエネルギー値を取得しているため、先に取得したエネルギー値と後に取得したエネルギーの値を比較した。後に取得したエネルギー値は切羽面近傍において、先に取得したエネルギー値の50%程度となっていることが分かった。また、切羽面より1m前方では先に取得した値と後に取得した値はほぼ同程度となっていたため、地山の緩みは1m以内に留まっていると思われる（図3.5.12）。

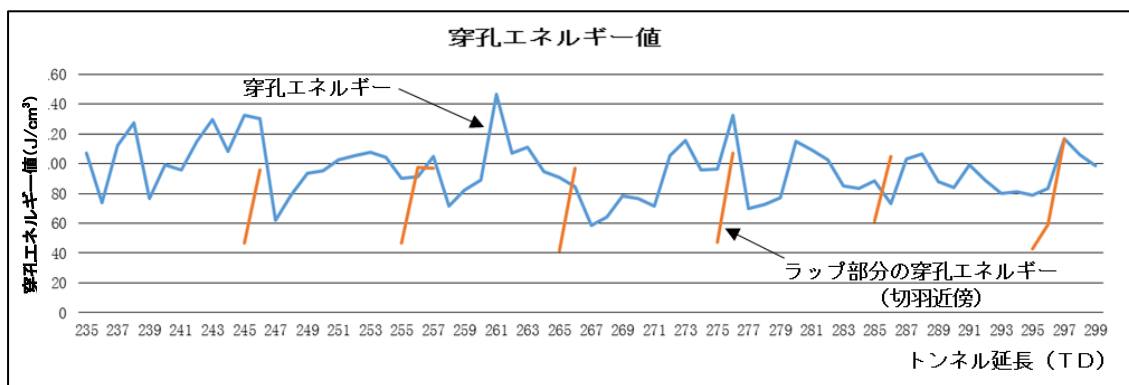


図 3.5.12 穿孔エネルギーとラップ部分の穿孔エネルギーとの比較

3.5.7. 切羽前方探査の結果

掘削完了後、全線にわたって取得したトンネルの天端部の穿孔エネルギーをプロットし、地山形状と比較し、その結果を図3.5.13に示す。土被りが大きくなると穿孔エネルギーが増加するが、逆に小さくなると穿孔エネルギーも小さくなる傾向が見られ、地山形状に良く似たグラフとなっている。これは、今回の寺山トンネルは全線にわたり土被りが小さく、地表面からの風化の影響がトンネル近傍に達していることを示していると思われる。

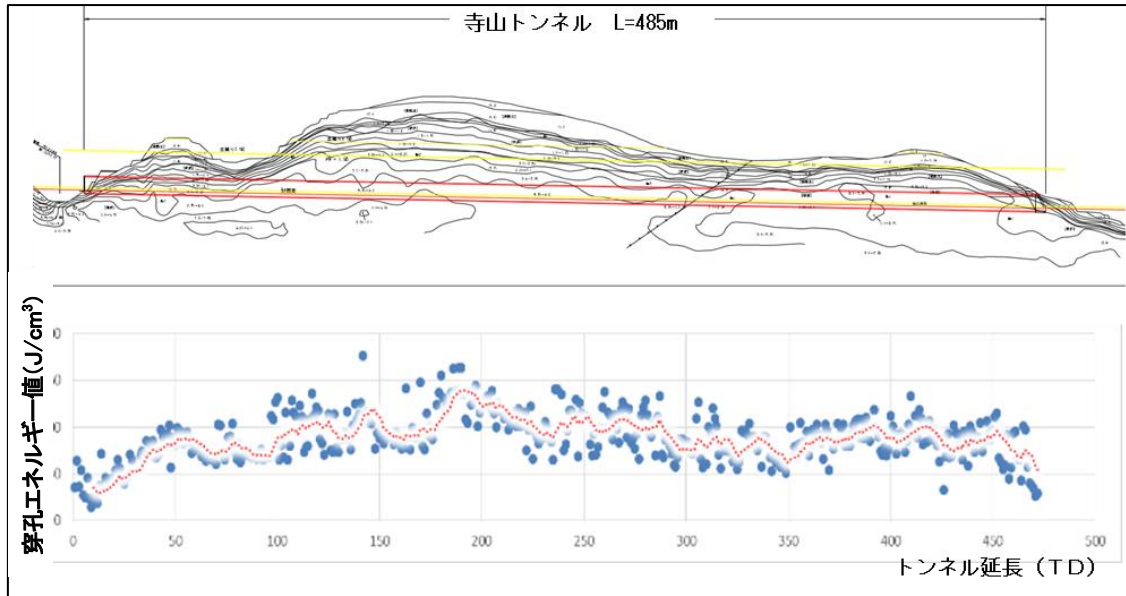


図 3.5.13 全線の穿孔エネルギーと地山形状との比較

3.6 まとめと考察

実現場では、切羽観察記録、計測結果、前方探査結果などから総合的に地山評価を行い、支保パターンを決定する。今回の事例は、道路トンネルであり、切羽観察や切羽前方探査の方法として穿孔探査法を用いた一事例である。付加体と呼ばれる軟弱地山で土被りが小さく、地山全体がほぼ一律な地山性状であり、部分的な弱層はあったが、大きな地層境界や断層などは見られなかった。そのため、比較的安定した探査結果を得られたが、他の地山へ同様に適用することは難しい。

しかし、今回の事例では、補助工法の採用や区間の決定において、指標とすることができた。また、探査区間をラップすることで、掘削時の地山の緩みの程度を把握することもできた。

前方探査を実施する上で様々な工夫により、切羽前方の地山状況をより正確に予測できると思われるが、定量的な評価を行うには岩質の違い、岩盤の強度、割れ目の状態など地山の評価に影響するさまざまな項目を予測する方法が確立されていないことが課題である。

【参考文献】

1)土木学会：トンネル標準示方書，2016

近畿地方整備局道路部道路工事課：トンネル地山等級判定マニュアル（試行案），（平成18年9月施行案の改訂版），平成28年7月

2)JTA 山岳工法小委員会地山評価ワーキング：切羽観察のための基礎知識 Q&A(1)，トンネルと地下，Vol.51，No.11，pp.973-979，2020

3)JTA 山岳工法小委員会地山評価ワーキング：切羽観察のための基礎知識 Q&A(2)，トンネルと地下，Vol.51，No.12，pp.1067-1075，2020

4)JTA 山岳工法小委員会地山評価ワーキング：切羽観察のための基礎知識 Q&A(3)，トンネルと地下，Vol.52，No.1，pp.81-89，2021

5)JTA 山岳工法小委員会地山評価ワーキング：切羽観察のための基礎知識 Q&A(4)，トンネルと地下，Vol.52，No.2，pp.165-170，2021

6)JTA 山岳工法小委員会地山評価ワーキング：切羽観察のための基礎知識 Q&A(5)，トンネルと地下，Vol.52，No.3，pp.241-248，2021

7)JTA 山岳工法小委員会地山評価ワーキング：切羽観察のための基礎知識 Q&A(6)，トンネルと地下，Vol.52，No.4，pp.331-340，2021

8)山田浩幸，山本浩志，北野敬太，藤田浩史：小土被りの脆弱地山における補助工法の設計と施工に関する一考察，第53回地盤工学会研究発表会概要集，pp.1571-1572，2018.7.

9)山田浩幸，山本浩志，北野敬太，藤田浩史：小土被りの脆弱地山における切羽前方探査に基づく補助工法の施工に関する一考察，第73回土木学会年次学術講演会概要集，pp.137-138，2018.8.

第4章 対象現場の特徴

4.1 はじめに

山岳トンネルを施工する時には、工事が発注され施工者によって工事が進められる。工事発注時には、予算確保、競争入札などが必要になり、できる限りの適正な価格の算出が必要になる。工事価格の算出や施工計画を作成するために設計図書が作成され、トンネルの掘削時の支保パターンも設計される。設計時には、トンネルを構築する地山の地質性状の調査を行い、地山内部の性状までを予測する必要がある。しかし、我が国の地質構造は複雑で変化に富み地上部からの調査によって内部構造まで詳細に把握することは、難しい。そのため、施工時の地山性状や計測結果から適正な掘削支保パターンに変更を行い、工事を進める必要がある。

本章では、研究の対象とした新長崎トンネル工事の設計方法と施工時の特徴を取りまとめ、実施工における地山評価の課題と改善点を抽出する。

4.2 鉄道トンネルの設計手法

山岳トンネル（NATM）の設計は、他の設計手法すなわち構造物に作用する荷重に対応した設計手法と異なり、過去の実績を重視した設計手法を用いる。この手法では、標準支保パターンを適用する、類似条件のトンネルで用いられた設計を適用する、解析的手法を適用する、の3つの方法が用いられている。一般的な地山条件で断面形状も一般的な場合は、標準の支保パターンを採用する。特殊な条件で、掘削の影響が周辺地山におよぶ場合には、解析的手法を用いる。

標準の支保パターンや断面形状は、トンネルの目的によって違う。道路であれば、自動車が通行するための建築限界によって断面形状が決まり、鉄道であれば列車が通行するための建築限界で定まる。また、水路トンネルなどでも違ってくる。

本研究で対象とした新長崎トンネルは新幹線用の鉄道トンネルであり、設計断面や標準支保パターンも鉄道の設計手法に則っている。

4.2.1 支保工の設計手法

特殊地山や近接構造物への影響がある場合，特殊な断面形状など，特殊な条件下でなければ，標準支保パターンによる設計が行われる．支保工の設計は，踏査やボーリング調査によって得られた情報から岩種の分類を行う（表 4.2.1）．岩種は，A から G の 7 種類に分類され，A から G に向かって硬度が小さくなる．すなわち地山の状態として不良になっていく．分類された岩種ごとに，弾性波速度，地山強度比または，相対密度と細粒分含有率によって地山等級を決定する（表 4.2.2）．弾性波速度は，早いほど岩石が密実な状態でよい岩盤を示す．地山強度比は，小さいほど地圧が大きいと推定される．地山等級の分類は岩盤地山の $I_N \sim V_N$ の 5 等級に粘性土や砂質土の特殊地山として特 L $\sim I_s$ の 4 等級に区分している

表 4.2.1 岩種分類表

岩種	地層名・岩石名
A	① 古生層，中世層，（粘盤岩，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） 塊状の硬岩（亀裂面の剥離が小さい）
B	① 剥離性の著しい変成岩（片岩類，片麻岩） ② 剥離性の著しい細層理の古生層，中世層（粘板岩，千枚岩，頁岩等） 硬岩でありながら，亀裂が発達し，著しい剥離性を示す
C	① 中世層（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	洪積岩，新第三紀層の一部（低固結層，未固結層，土丹，砂岩）
G	表土，崩積土等

（出典：独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構）

表 4. 2. 2 計画段階における地山分類基準

	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	$2.5 > V_p$	$2.9 > V_p$	$2.5 > V_p$	$1.5 > V_p$	$1.5 > V_p$	$2 > G_n \geq 1.5$	—
I _L				あるいは $2 > G_n \geq 1.5$	あるいは $2 > G_n \geq 1.5$	—	$80 \leq D_r$ かつ $10 > F_c$
特 S				$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	—
特 L				—	—	$80 > D_r$	

V_p:弾性波速度(km/sec), G_n:地山強度比, D_r:相対密度(%), F_c:細粒分含有比(%)

(出典:独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構)

4.2.2 設計時の地山分類

新長崎トンネルの地山状況は、設計段階において比抵抗二次元探査結果や弾性波探査結果並びにボーリング調査および地質地表踏査結果を用いて、トンネルルート沿いの地山状況や湧水の有無を予測している。その調査結果に基づいて、地山分類がなされ、トンネル掘削時の掘削パターンが決定されている。設計時の地山分類表を表4.2.3に示す。

表 4.2.3 長崎トンネル地山分類表（設計時）

No.	計画距離程	区間長 (m)	最大土被り (m)	地質	岩種	一軸圧縮強さ qu (MN/m ²)	地山P波速度 Vp (km/s)	地山強度比 Gn	地山等級
①	57k850m ~ 57k930m	80	~2D	輝石安山岩(PA)	A岩種		~2.5		坑口部
②	57k930m ~ 58k300m	370	91	輝石安山岩(PA)	A岩種		4.4		Ⅲ _N
③	58k300m ~ 58k540m	240	86	輝石安山岩(PA)	A岩種	184.5	4.1	48.5(68.4)	Ⅲ _N
④	58k540m ~ 58k990m	450	84	輝石安山岩(PA)	A岩種		3.6		Ⅱ _N
⑤	58k990m ~ 59k320m	330	78	輝石安山岩(PA)	A岩種	39.7	2.7	19.2(29.3)	I _{N-2}
⑥	59k320m ~ 60k230m	910	309	輝石安山岩(PA)	C岩種		3.4		Ⅱ _N
⑦	60k230m ~ 60k900m	670	273	輝石安山岩(PA) 角閃石安山岩(HA)	C岩種		3.3		Ⅱ _N
⑧	60k900m ~ 61k610m	710	124	角閃石安山岩(HA) 凝灰角礫岩(PTb) 輝石安山岩(PA)	C岩種		3.5		Ⅱ _N
⑨	61k610m ~ 61k970m	410	117	輝石安山岩(PA) 凝灰角礫岩(PTb)	C岩種	42.5	3.0	9.9(11.1)	Ⅱ _N

4.2.3 設計時の掘削パターン

新長崎トンネルの設計時の掘削パターンを図4.2.4示す。掘削パターンは、坑口部よりIN-A（110m）、IIN-A（100m）、IIIM-A（970m）、IIN-A（1760m）、IN-A（930m）とされている（表4.2.4）。

表 4.2.4 新長崎トンネル（東）工事の設計時の掘削パターン表

測点	延長（m）	掘削パターン
57km850m～57km960m	110	I N-A
57km960m～58km060m	100	II N-A
58km060m～59km030m	970	IIIM-A
59km030m～60km790m	1,760	II N-A
60km790m～61km720m	930	I N-A
合計	3,870	—

設計時の掘削パターン（図4.2.1）は、調査に基づいて決められている。しかし、事前に地山の内部まで詳細に把握することは、難しく、施工時には切羽観察、坑内観察、計測結果等の情報を用いて、適正な掘削パターンに変更していく必要がある。当初設計では、IN-Aの支保パターンは、上半に鋼製支保工を配置し、吹付けコンクリートを厚み125mmで吹付ける、ロックボルトは3mを上下半で10本打設する（図4.2.2）、IIN-Aは、吹付けコンクリートを厚さ100mmで吹付ける、ロックボルトは3mを上半のみ10本打設する（図4.2.3）。IIIM-Aは、吹付けコンクリートを厚さ100mmで吹付ける掘削パターンを採用している。

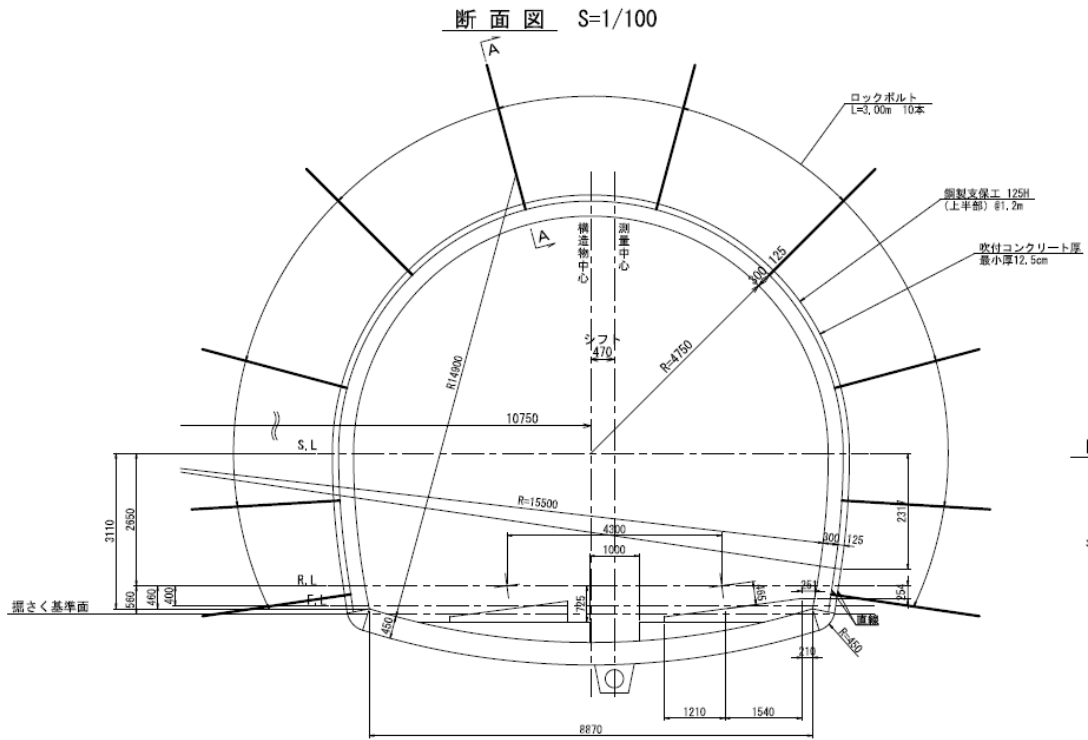


図 4.2.2 IN-A 標準支保パターン図

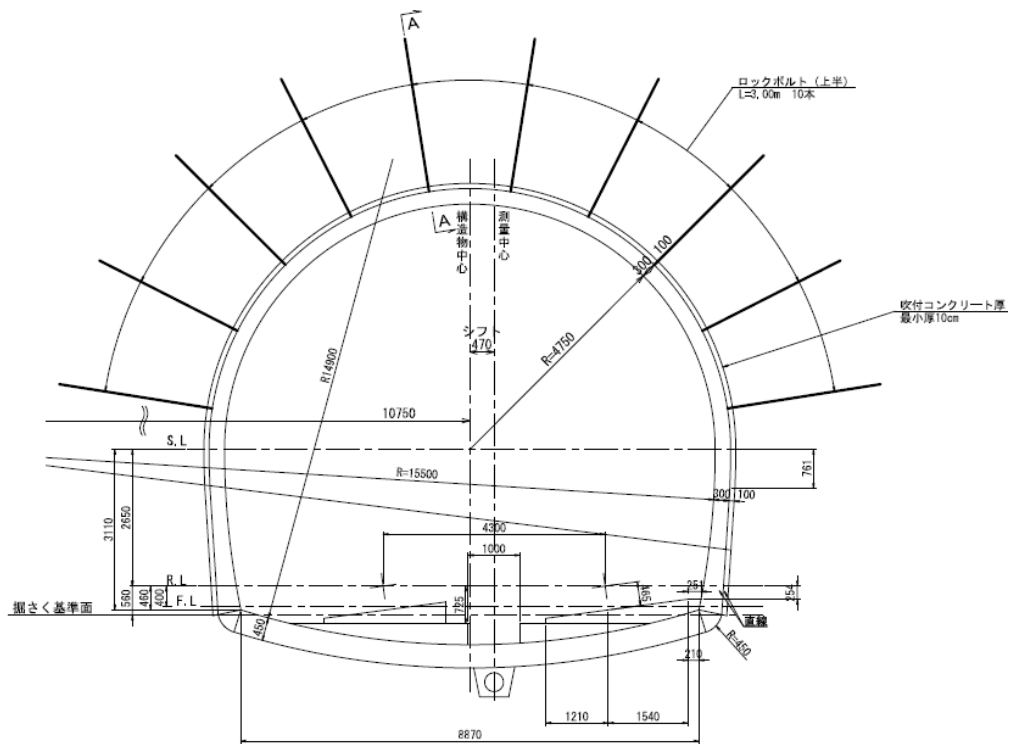


図 4.2.3 II N-A 標準支保パターン図

4.3 施工時の特徴

今回、研究の対象とした現場は、九州新幹線（西九州ルート）で建設するトンネルのうち、終着駅である長崎駅に最も近い新長崎トンネル（L=7,460m）の東側（L=3,885m）を山岳トンネル工法（NATM）で構築する工事である（図 4.3.1, 4.3.2）。地質は長崎火山岩類と呼ばれる熱水変質安山岩・凝灰角礫岩類を主体（図 4.3.3）とし、比較的硬質であるものの、破碎帯の出現や湧水の発生が懸念されていた。そのため、トンネル掘削時には、ドリルNAVIを用いた切羽前方探査を計画し、探査を実施しながらの掘削を行っている。そのため、多くの研究データを蓄積しており、研究の対象とした。



図 4.3.1 西九州ルート図



図 4.3.2 施工箇所図

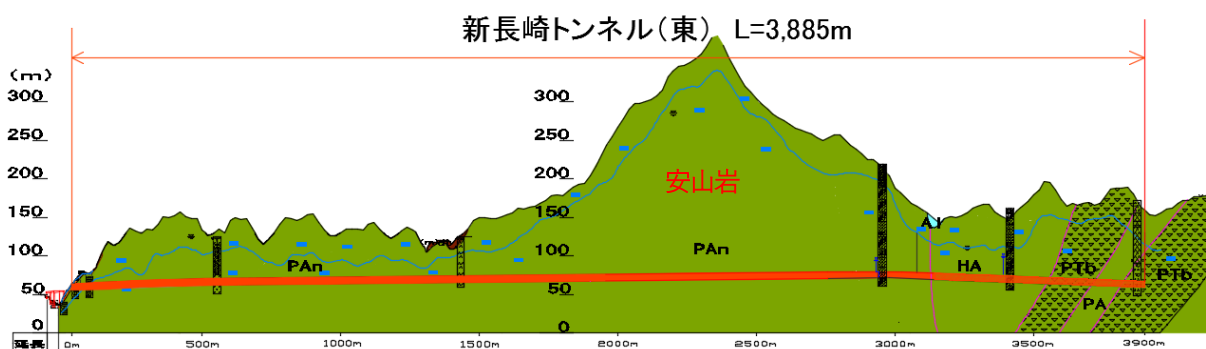


図 4.3.3 新長崎トンネル地質縦断図

4.3.1 工事概要

新長崎トンネル（東）工事の概要を表 4.3.1 に示す。工事延長 L=3,941m、トンネル工 L=3,885m、橋りょう工 L=47m を含むトンネル工を主体とした工事である。トンネルの幅員は W=8.255m、内空断面積 A=66.8 m²である。発破を用いた補助ベンチ付き全断面工法で掘削を行った。

2014年5月より本坑へ進入するための横坑（L=21m）掘削を開始し、同年7月より本坑の掘削に着手した。同年12月よりインバート、2015年2月より覆工コンクリートの施工を開始した。ベルトコンベアによる掘削ずりの搬出は、掘削が900mを超えた2015年3月より開始した。掘削期間中、3回の大規模な崩落を経験しながらも2017年5月、約3年の歳月をかけて3,885mの掘削を完了した。その後、2019年1月インバート、覆工コンクリートを含め全線のトンネル施工を完了している。

表 4.3.1 工事概要

工 事 名 称	九州新幹線(西九州)、新長崎トンネル(東)他工事	
工 事 場 所	長崎県長崎市現川町	
工 期	2013年3月1日～2019年6月28日	
発 注 者	(独)鉄道・運輸機構 九州新幹線建設局	
施 工 者	鴻池組・日本国土開発・西武建設・竹下建設	
延 長	工事延長L=3,941m、トンネル延長L=3,885m、橋りょう工L=47m	
施 工 法	断 面	内空断面積A=66.8m ² 、幅員W=8.255m
	施 工 法	NATM
	掘 削 方 式	発破掘削
	掘 削 工 法	補助ベンチ付き全断面工法
	補 助 工 法	長尺鋼管先受け工、注入式フォアポーリング工
	濁水プラント	120m ³ /h → 240m ³ /h → 360m ³ /h（増設）

4.3.2 施工時の状況

新長崎トンネルは、脆弱層や被圧層に遭遇しつつ、掘削パターンの変更や補助工法などを実施しながら、掘削を完了している。施工時の状況を以下に示す。

4.3.2.1 地山崩落と補助工法

トンネル掘削は、本坑の始点側坑口部へ進入できなかったため、坑口部より内部へ 50m の地点へ横坑で進入し、坑口から 900m の位置まで内部へ向かって掘削後、反転して 50m を掘削し、始点坑口側へ貫通させた。その後、本坑約 3,000m を掘削した。本坑の地山は当初想定されていたよりも軟弱で、掘削中湧水を伴った崩落が 3 箇所が発生している。トンネル坑内の湧水量は掘削が進むにしたがって増加し、処理量は最大で 7m³/分に達した。湧水量が多い箇所では、水抜きボーリング工や先受け工を併用して掘削を行った。掘削時の崩落の原因は、集中湧水によるものと脆弱層の出現によるものであった。崩落した位置は、TD914m、TD1608m、TD3364m であった(図 4.3.4)。

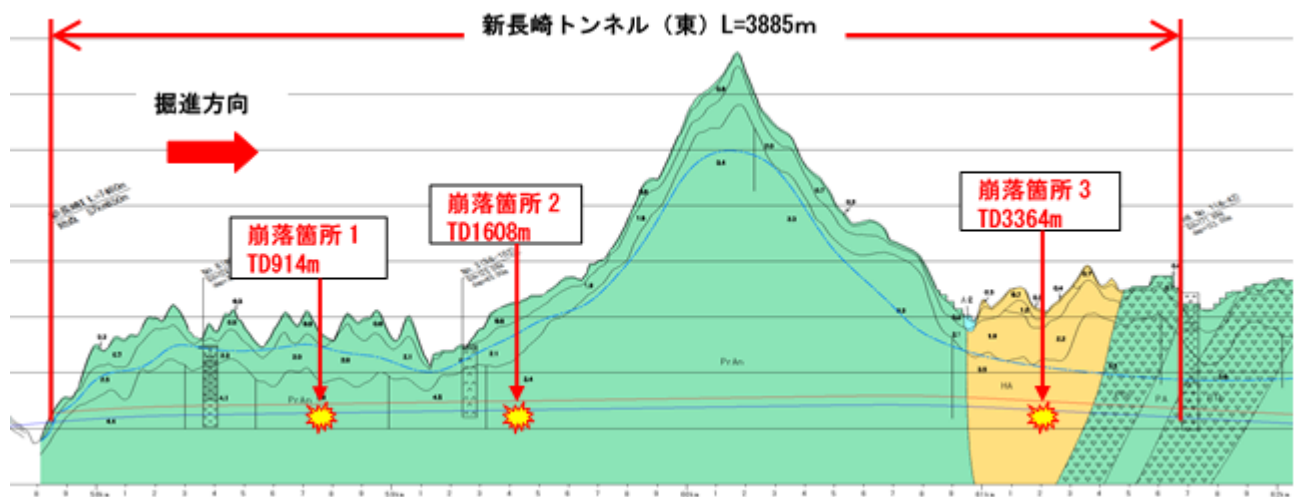


図 4.3.4 新長崎トンネル崩落位置図

4.3.2.2 崩落時の状況

①突発湧水による崩落（崩落個所1）

TD914m 付近を掘削中、切羽左側の地山が後方の支保部材とともに崩落した。崩落部からは、 $2\text{m}^3/\text{分}$ の湧水が発生していた（写真 4.3.1）。応急対策として切羽作業を中止し、支保耐力の補強を目的に TD874m から TD910m にかけて 36m の区間で、上半全周に、増吹付けコンクリート(5~15cm)、増ロックボルト 11 本/断面を施工した。その後、掘削再開に向けて、切羽前方の湧水圧を下げる目的で、水抜きボーリング($\phi 135$, L=50m)を実施した。また、湧水として発生している清水を濁水と分離して排水した。



写真 4.3.1 TD915m の崩落状況

②集中湧水による崩落（崩落個所2）

掘削位置 TD1604m より切羽右肩部に弱層が出現し、湧水が増加したため、水抜きボーリング工および注入式フォアボーリング工を併用した掘削を行っていた。しかし、TD1608m を掘削中、集中湧水($300\text{l}/\text{分}$)を伴って、切羽右肩部周辺が大規模に崩落し、一次支保が崩壊した（写真 4.3.2）。崩落した土砂は約 60 m^3 であった、崩落箇所では、複数の岩盤亀裂から集中湧水が確認された。

さらに、掘削を完了していた切羽後方 18m の区間で右側下半部に押し出しが見られた。応急対策として崩落箇所と変状区間に対して押さえ盛土を施工した（写真 4.3.3）。また、崩落箇所の水圧を軽減する目的で、右側壁部より切羽方向に向けて水抜きボーリング($\phi 76.3\text{mm}$, $L=12.5\text{m}$, $N=3$ 本)を実施した。その結果、トンネルの変状を止めることができた。

掘削再開に向けて、崩落に伴い緩んだ地山を補強する必要があり、崩落部分を中心に上半右側に小口径長尺鋼管フォアパイリング($\phi 76.3\text{mm}$, $L=12.5\text{m}$, $N=18$ 本)を施工し、空隙充填及び地山改良を実施した（図 4.3.5）。また、改良による湧水の閉塞を防止するため、水抜きボーリング($\phi 76.3\text{mm}$, $L=12.5\text{m}$, $N=10$ 本)を実施した（写真 4.3.4, 図 4.3.6）。

掘削再開後の約 25m の区間で集中湧水を伴った小崩落を繰り返し、その都度水抜きボーリング工と小口径長尺鋼管フォアパイリング工を併用して掘削を行った。

これまでの崩落経緯から、この先も広い範囲にわたり滞水層及び水道となる大きな亀裂が存在することが推測できた。このため、この地点より切羽前方地山の水圧を低下させることを目的として、左右側壁より切羽前方への長尺水抜きボーリング($\phi 135\text{mm}$, $L=100\text{m}$, 各 1 本)を実施した。さらに、短尺水抜きボーリング($\phi 76.3\text{mm}$, $L=12.5\text{m}$)を左右各 4 本実施して、ようやく集中湧水の影響を受けることなく安全に掘削できるようになった。

その後は、長尺水抜きボーリング ($\phi 135\text{mm}$, $L=100\text{m}$) を 90m 毎に実施し、切羽前方の水圧を広範囲にわたって低下させるとともに、30m 毎に実施していた穿孔探査で湧水が確認された場合は短尺の水抜きボーリングを 3~5 本程度実施しながら掘削を進めた。その結果、集中湧水に伴う地山崩落を防止することができた。



写真 4. 3. 2 TD1608m の崩落状況



写真 4. 3. 3 崩落変状箇所の押さえ盛土状況写真

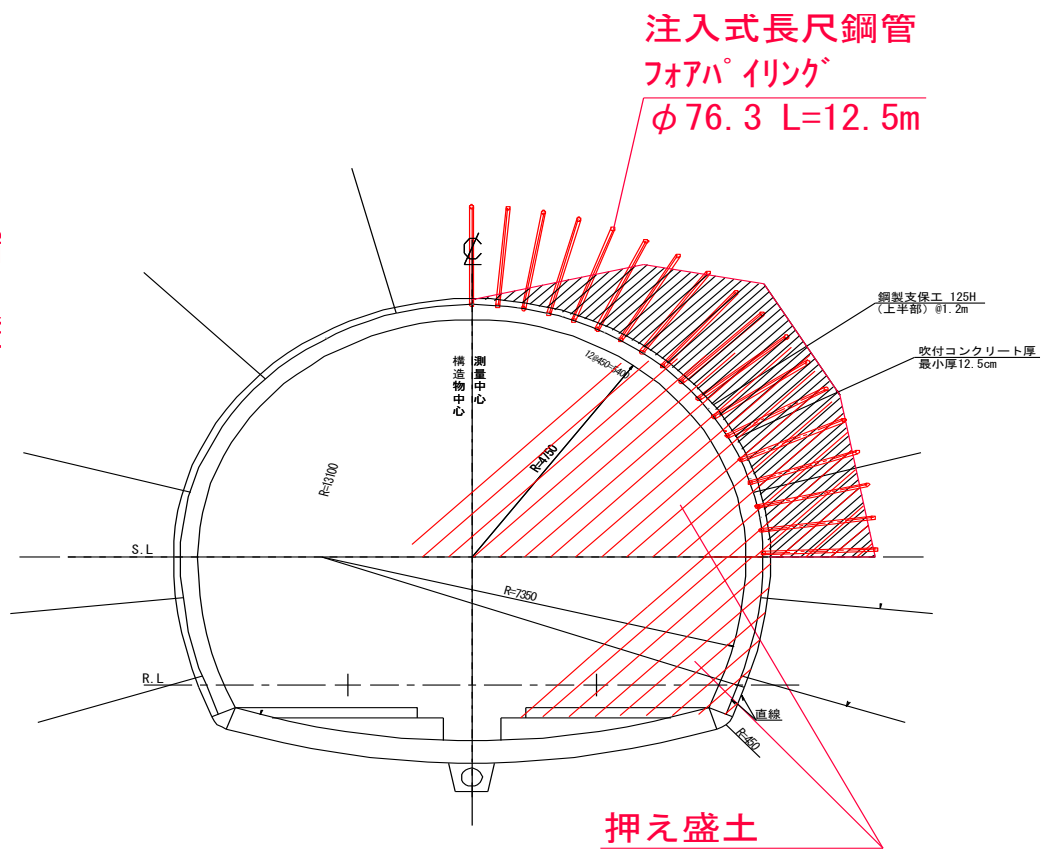


図 4.3.5 崩落部補助工法概略断面図



写真 4.3.4 水抜き工および地山補強工写真

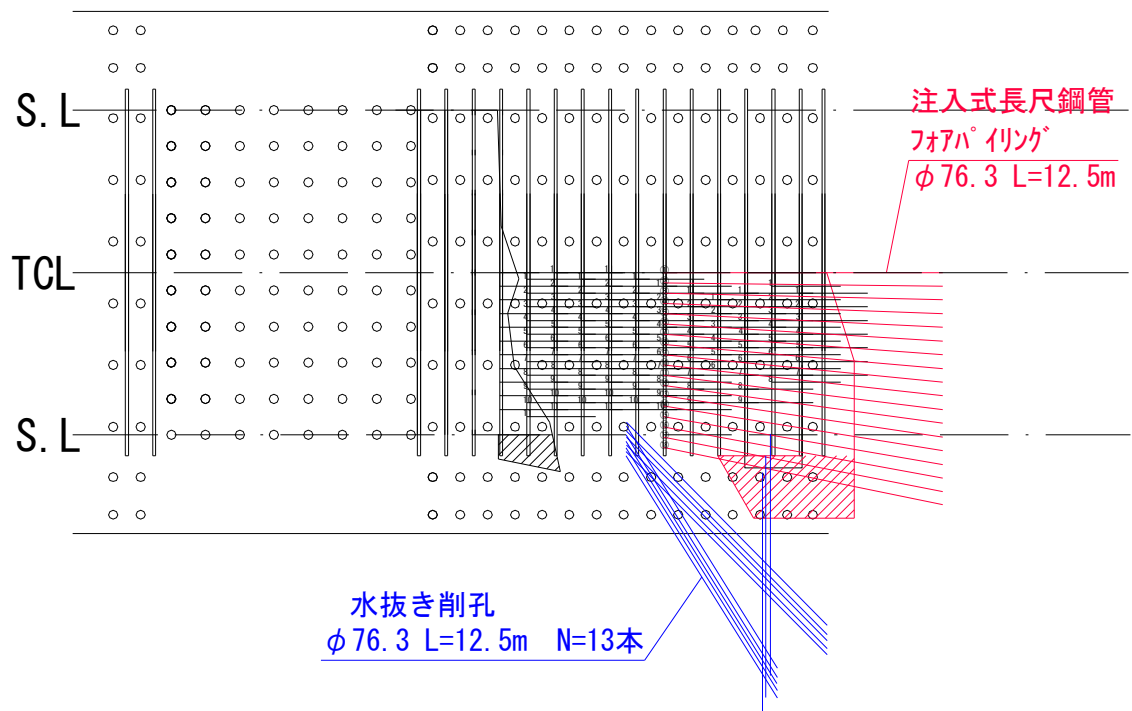


図 4.3.6 崩落部補助工法概略展開図

③局所的な脆弱層に伴う崩落（崩落箇所3）

TD3363m の切羽より上半左踏前部に粘土化した地質を含む脆弱層が出現していた。掘削中、TD3367m の左肩より左側壁部にかけて支保工5基6mにわたり、崩落土塊に押し出される形で、鋼製支保工の左半分が破損した。崩落部の深さは最大3m程度であった。また、破損した支保工より坑口側6基7.2m区間の左側壁が押し出され、一部吹付コンクリートが剥落していた（図4.3.7、写真4.3.5）。崩落ずりは粘土と強度が著しく低下した岩塊が主体となっており、崩落土量は約50m³であった。

崩落土塊背面の地山は、粘土と脆弱層であり、滲む程度の湧水を確認した。掘削時、切羽において出現していた脆弱層がさらに広がりをもって分布していたことを確認した。この脆弱層が切羽の進行とともに緩み、崩落および左側壁部の押し出しに繋がったと考えられる。

崩落時の支保パターンは、下半に鋼製支保工を設置しないパターンであり、下半部の支保剛性が不足していたことが原因であると推測できた。

対策工として、押し出しのあった区間に対して、下半の鋼製支保工を再施工し、穿孔探査で確認していた脆弱層エリアには、左右の下半鋼製支保工を設置し、支保剛性を強化することとした。その後は変状することなく、無事脆弱層エリアを通過することができた。

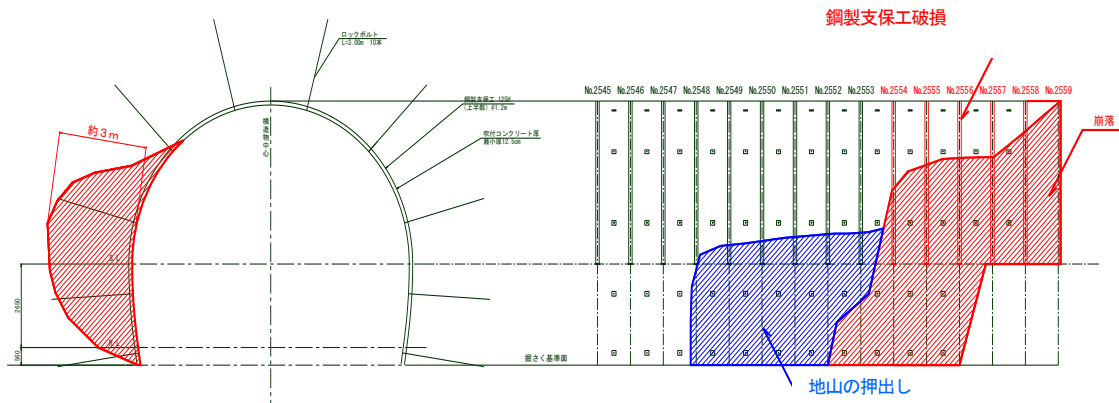


図 4.3.7 崩落状況図



写真 4.3.5 崩落位置状況写真

4.3.2.3 湧水の状況

施工前から、地下水位が比較的高く、地上に多数の沢地形が存在することがわかっており、多亀裂帯掘削時には、大量の湧水が発生することが予測できた。そこで、トンネル掘削に際しては穿孔探査を実施し、切羽前方の地質、岩強度、帯水状況を確認した。これらの結果と掘削時の切羽観察より、切羽前方の地下水の状況を予測した。切羽前方に被圧水が存在し、掘削時にトンネルへ影響が出ると予測された場合には、長尺水抜きボーリング(φ135mm)を実施した(表4.3.2)。実施箇所は、大量湧水想定箇所が中心となった(図4.3.8)。

表 4.3.2 長尺水抜きボーリング実施一覧表

No.	トンネル距離	位置	径(mm)	削孔長(m)	湧水量(ℓ/分)	備考
1	TD900m	左側壁	φ135	50.5	300	集中湧水に伴う崩落箇所
2	TD910m	左天端部	φ135	16	100	
3	TD1044m	左側壁(拡幅)	φ135	100	150	
4	TD1140m	左側壁(拡幅)	φ135	150	300	
5	TD1239m	左側壁(拡幅)	φ135	90	60	
6	TD1616m	左側壁	φ135	100.5	550	集中湧水に伴う崩落箇所
7	TD1616m	右側壁	φ135	100.5	410	
8	TD1706m	左側壁	φ135	100.5	55	
9	TD1706m	右側壁	φ135	95	160	

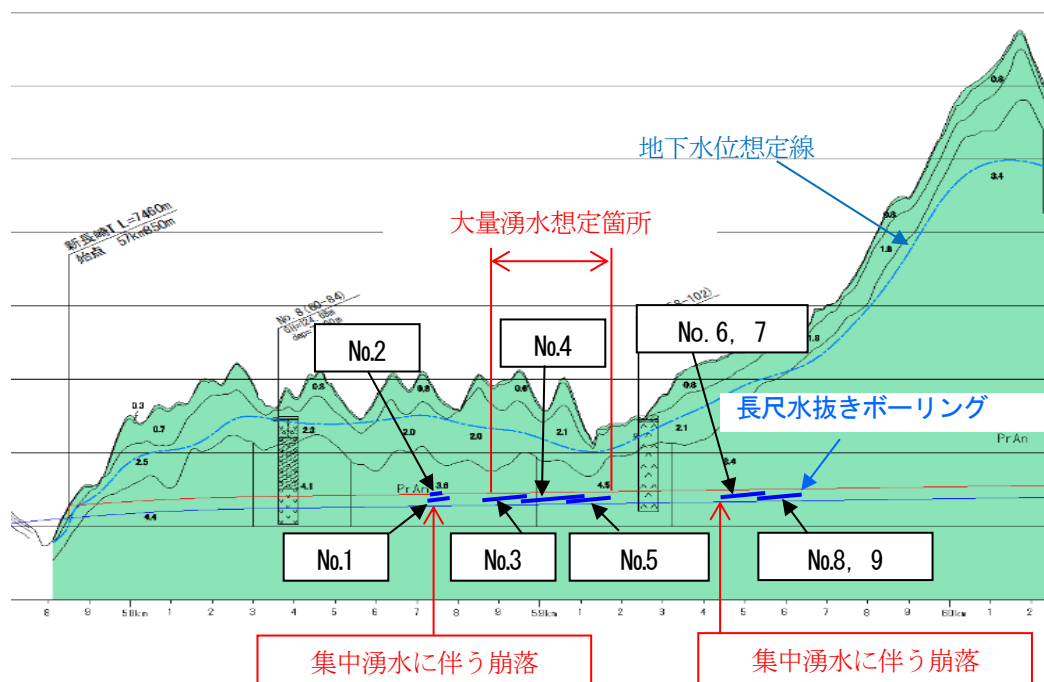


図 4.3.8 長尺水抜きボーリング実施位置図

① No.1, No.2 長尺水抜きボーリング

TD914m 掘削中、集中湧水に伴う崩落が生じた。この時、湧水は左肩部の亀裂から噴出するような状況であったため、かなり被圧していると考えられた（写真 4.3.6）。そこで、切羽背面の地下水圧を低下させる目的で TD900m 左側壁部より $\phi 135\text{mm}$ の水抜きボーリング(No.1)L=50m を実施した（写真 4.3.7）。さらに、TD910m の天端付近に水圧が作用したと思われる吹付けコンクリートの亀裂が生じており、ここにも集中湧水を確認したため、早急に水圧を低下させる必要があると判断し、集中湧水箇所から切羽方向に向けて補助的な水抜きボーリング(No.2)L=16m を実施した。



写真 4.3.6 TD916m 湧水状況



写真 4.3.7 TD900m 水抜き状況

② NO.3～No.5 長尺水抜きボーリング

地質調査結果からTD1310m (59k150m)を中心として、比抵抗値の落込みが見られた(図4.3.9, 4.3.10)。この区間では、事前の電気探査より大量の地下水が賦存すると予測されていた。そこで、TD1044m を水抜きボーリングの開始位置とし、連続して長尺水抜きボーリングを実施することとした。実施位置は、湧水が想定される切羽に向かって左側とし、トンネルに沿わせるため、下半の一部を拡幅して実施した。終了位置は、孔からの湧水量の低下が見られるまでとした。

長尺水抜きボーリング工は、No.3(L=100m)、No.4(L=150m)、No.5 (L=90m)で実施した(写真4.3.8)。

湧水量の最大は、No.4 ボーリングの300ℓ/分であった。これらのボーリングの結果、切羽上半部で湧水は無くなり、集中湧水に伴う崩落を防止し、無事大量湧水想定区間を通過することができた。

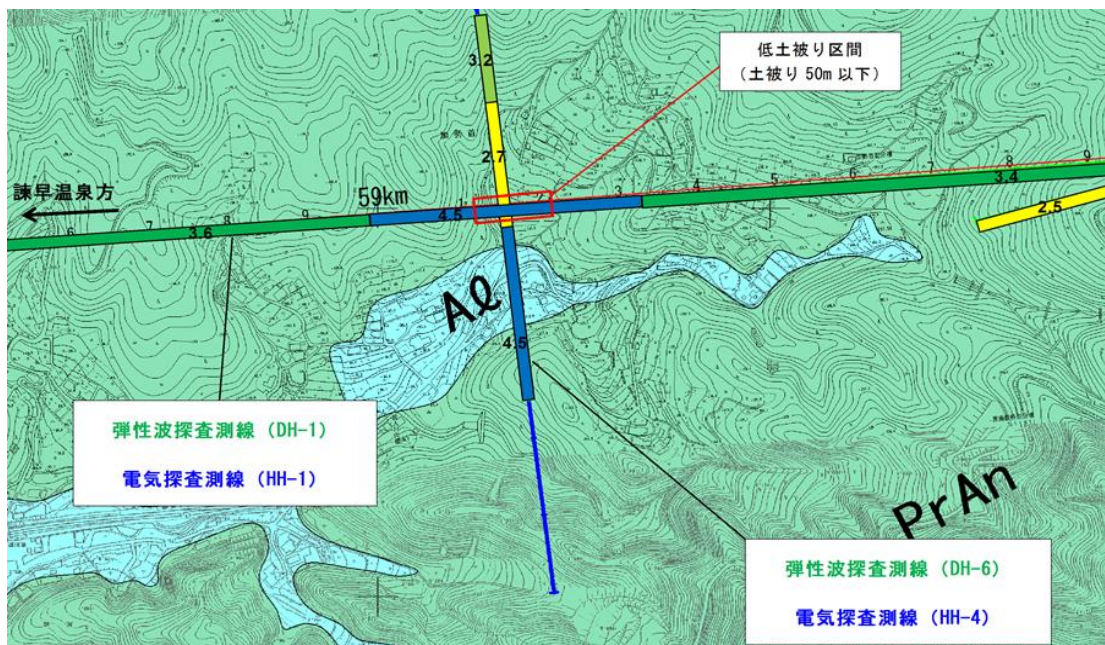


図 4.3.9 電気探査実施位置図

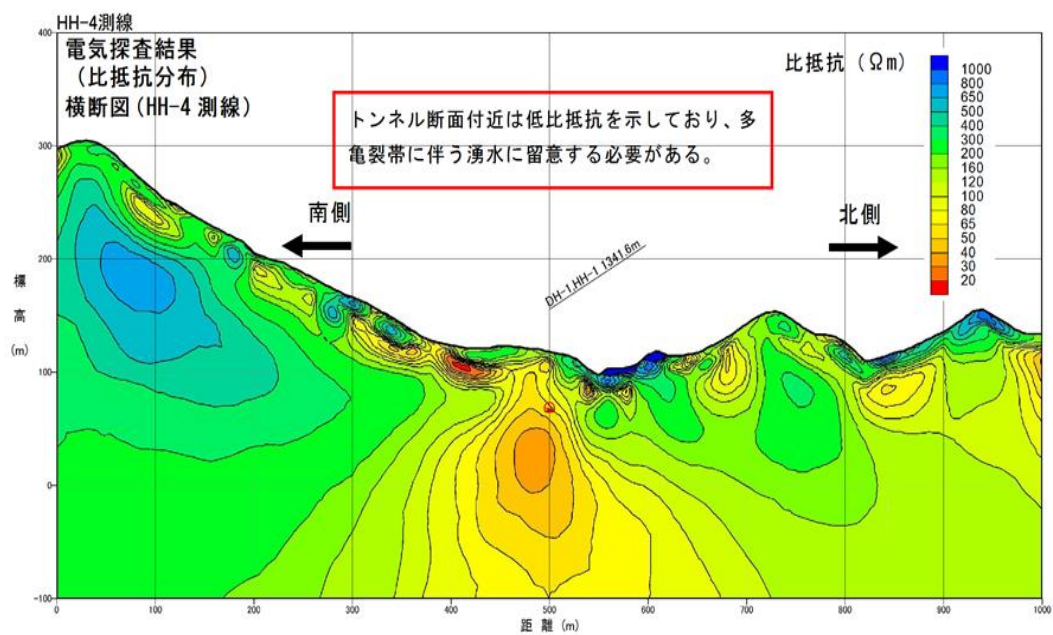


図 4.3.10 電気探査による比抵抗分布図



写真 4.3.8 No.3 長尺ボーリング実施状況

③ No.6～No.9 長尺水抜きボーリング

D1608m 位置で、集中湧水に伴う崩落が生じ（崩落箇所 2）、水抜きボーリング工により切羽背面の水圧を低下させながら掘削を進めたが、多亀裂な地山が継続することから、広い範囲で湧水が生じると思われた、このため、長尺水抜きボーリング工を実施した。

亀裂方向が不規則であったため、TD1616m の左右側壁部から切羽前方へ向けて長尺水抜きボーリング No.6, 7 (φ135mm, L=100m) を実施した。湧水量は No.6 で 550ℓ/分（写真 4.3.9）、No.7 で 410ℓ/分を観測した。2 日程度で湧水量、湧水圧ともに減少し、ボーリングの効果が確認できた。



写真 4.3.9 No.6 ボーリング孔湧水状況

4.3.2.4 湧水処理の方法

坑内湧水は、集中湧水や水抜き孔からの湧水により一時的に増加し、地下水圧の低下とともに減少することを繰り返しながら、トンネル掘進延長とともに徐々に増加していった。特に、TD3760m 付近で SL 下からの湧水量が極端に増加し、総湧水量は最大 7m³/分まで達し、坑内が一

時水没した。

濁水処理設備の能力は当初 120t/h で処理していたが、処理量が能力の 80% に達する毎に設備を段階的に増設し、最終的に処理能力 360t/h まで増設することとなった。また、突発湧水(水抜きによる湧水を含む)や多雨による急激な湧水の増加に対応するため、積極的に清水分離を実施し、清水を直接河川へ放流することで濁水処理量を削減し、濁水が流出することによる環境への影響がでないようにした。

4.4 施工時の修正設計

長崎トンネルを設計するときには、全線にわたって比較的良質な岩盤で、部分的に多亀裂部や湧水が多くなる区間あることを想定している。しかし、施工実績で示した通り、実施工時には、トンネルの変形や岩盤の崩落を伴う変状が発生している。

そのため、施工時には頻繁に支保パターンを変更し、地山性状に合わせた掘削支保パターンが採用されている（表 4.4.1）。

写真 4.4.1 施工時の支保パターン延長表

新長崎トンネル支保パターン別延長表								
	支保No.			基数	1掘進長	延長	測点	
		～						
I-2-A(B)(RC)	1	～	51	50	1.2	60	57K840.0	～ 57K900.0
I-2-A(B)	51	～	91	40	1.2	48	57K900.0	～ 57K948.0
II-A(B)	91	～	237	146	1.5	219	57K948.0	～ 58K167.0
I-2-A(B)	237	～	314	77	1.2	92.4	58K167.0	～ 58K259.4
II-A(B)	314	～	433	119	1.5	178.5	58K259.4	～ 58K750.9
II-A(B)(b)	433	～	436	3	1.5	4.5		
II-A(B)	436	～	617	181	1.5	271.5		
II-A(B)(c)	617	～	641	24	1.5	36		
II-A(B)	641	～	642	1	1	1		
I-2-A(B)	642	～	655	13	1.2	15.6	58K750.9	～ 58K766.5
II-A(B)	655	～	661	6	1.4	8.4	58K766.5	～ 58K860.4
II-A(B)	661	～	718	57	1.5	85.5		
I-2-A(B)	718	～	743	25	1.2	30	58K860.4	～ 58K890.4
II-A(B)	743	～	996	253	1.5	379.5	58K890.4	～ 59K269.9
I-2-A(B)	996	～	1120	124	1.2	148.8	59K269.9	～ 59K418.7
II-A(B)	1120	～	1127	7	1.5	10.5	59K418.7	～ 59K430.3
	1127	～	1128	1	1.1	1.1		
I-2-A(B)	1128	～	1142	14	1.2	16.8	59K430.3	～ 59K745.9
	1142	～	1153	11	1	11		
	1153	～	1154	1	1	1		
	1154	～	1185	31	1	31		
I-2-A(C)	1185	～	1250	65	1	65		
I-2-A(B)	1250	～	1251	1	1.2	1.2		
	1251	～	1407	156	1.2	187.2		
	1407	～	1409	2	1.2	2.4		
I-2-B(B)	1409	～	1410	1	1.2	1.2	59K745.9	～ 59K747.1
II-B(B)	1410	～	1416	6	1.5	9	59K747.1	～ 59K756.1
I-2-B(B)	1416	～	1684	268	1.2	321.6	59K756.1	～ 60K077.7
II-B(B)	1684	～	1744	60	1.5	90	60K077.7	～ 60K167.7
	1744	～	1745	1	0.7	0.7	60K167.7	～ 60K168.4
I-2-B(B)	1745	～	1828	83	1.2	99.6	60K168.4	～ 60K268.0
I-2-B(B)C	1828	～	1834	6	1.2	7.2	60K268.0	～ 60K275.2
II-B(B)	1834	～	2039	205	1.5	307.5	60K275.2	～ 60K582.7
I-2-B(B)	2039	～	2141	102	1.2	122.4	60K582.7	～ 60K705.1
I-2-B(B)C	2141	～	2266	125	1.2	150	60K705.1	～ 60K855.1
I-2-B(B)	2266	～	2559	293	1.2	351.6	60K855.1	～ 61K206.7
I-2-B(B)D	2559	～	2572	13	1.2	15.6	61K206.7	～ 61K222.3
I-2-B(B)E	2572	～	2582	10	1.2	12	61K222.3	～ 61K234.3
I-2-B(B)	2582	～	2986	404	1.2	484.8	61K234.3	～ 61K719.1
I-2-B(B)F	2986	～	2987	1	0.9	0.9	61K719.1	～ 61K720.0
						3880		

4.5 まとめと考察

新長崎トンネルを設計する際には、さまざまな調査がなされ、設計時の掘削支保パターンが計画されている。施工時には地山状況に合わせて切羽観察、坑内観察、計測結果などから最終的に適切な掘削支保パターンに変更し、施工を行っている。しかし、施工実績で示したように、崩落や湧水によりトンネルの変状が発生している。このような場所では、トンネルの周辺に緩みが広がり、その対処に補助工法や支保構造の強化などが必要になり、施工時の費用が増加する。また、将来に地山の緩みが広がり、トンネルが変状する懸念がある。このような事象を防止するため、現場では、切羽前方探査を行って、事前に対処しようと試みていた。しかし、数か所で適切な支保構造を事前を選択するには至っていない。それは、前方探査の評価方法が主に岩盤の硬軟を探査するものであり、地山を定量的に評価できない、地山性状が不明であるなどが原因である。

施工中の支保パターンの決定は、切羽観察、坑内観察、計測結果などから総合的に判断される。そこで、切羽前方探査（穿孔探査）のデータから切羽観察で行う切羽評価点の算定をできないかと考えた。穿孔探査で取得するデータは、穿孔速度、打撃圧、回転圧、フィート圧、打撃数であり、これらの情報から穿孔エネルギーを算出して岩盤の硬軟を判定している。しかし、個々のデータには経験上、地山の特徴を示すデータがあり、これらのデータを利用することで、切羽評価点を算出できるのではないかと考えた。そこで、穿孔データと切羽評価点の関係を詳細に分析し、その可能性について検証を行う。

第5章 穿孔データを用いた切羽評価点の判定について

5.1 はじめに

研究対象とした九州新幹線（西九州ルート）で建設されたトンネルの掘削時に取得された穿孔データと切羽観察時に行われた切羽評価との関連性を検証することで、穿孔データを用いて切羽の評価点を算出できるかを検証する。

新長崎トンネルで実施した前方探査データは、記録して保存される。保存されているデータは、穿孔時刻、穿孔長、穿孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧、打撃数、穿孔エネルギーである（表 5.1.1）。これらのデータは、毎秒 5 回の油圧データを記録したもので、現場で評価する場合は、グラフ化してその変化や平均的な大きさを読み取り、岩質の変化を予測する（図 5.1.1）。その他、穿孔データの大きさと既掘削部の穿孔データを比較することにより、既掘削部分より硬質か軟質かを判断する。この方法は、現在広く用いられている方法である。しかし、地山性状には、さまざまな特徴があり、穿孔エネルギーを用いるこれまでの方法では、地山の硬軟を判断するにすぎず、掘削を行ったときに、切羽がどのような状況であるかまでは、予測することが難しい。現場における利用例を図 5.1.2 に示す。

表 5.1.1 保存された穿孔データ（一部抜粋）

時	分	秒	総穿孔長	穿孔速度	打撃圧	回転圧	フィード圧	打撃数	穿孔エネルギー
12	55	58	0.022	2.199	15.4	2	8.3	12	64.3
12	57	31	0.067	4.81	15.8	0	1.8	20	30.7
12	57	32	0.182	4.596	16.1	0.1	3.9	20	32.9
12	57	32	0.203	4.199	15.9	0	2.7	19	35.4
12	57	32	0.216	4.016	15.9	0	1.2	20	36.9
12	57	32	0.222	1.985	15.9	0	2.4	21	74.6
12	57	33	0.235	2.382	15.8	0	2.4	22	62
12	57	33	0.247	3.573	15.8	0.1	2.5	25	41
12	57	33	0.258	3.558	15.8	0.1	2.3	25	41.3
12	57	34	0.26	0.229	15.9	0	1.2	21	651
12	57	34	0.265	0.764	15.8	0	1.7	19	193.1
12	57	36	0.266	0.244	15.9	0	1.4	21	606.9
12	57	36	0.268	0.412	15.9	0	1.2	21	360.1
12	57	36	0.27	0.611	15.8	0	1.6	18	242
12	57	36	0.272	0.672	15.8	1.3	1.2	17	218.3
12	57	36	0.274	0.626	15.7	3	1.1	20	232.9
12	57	37	0.277	0.626	15.7	2.9	1.5	21	232.2
12	57	39	0.282	0.366	15.9	0.2	1.2	22	406.5
12	57	39	0.293	1.664	16	0	1.6	25	90.2
12	57	39	0.304	2.962	16	0	1.8	25	50.5
12	57	39	0.321	3.94	15.8	0	2.9	26	37.3
12	57	40	0.331	3.909	15.8	0	2.6	22	37.5
12	57	40	0.339	3.42	15.6	0.1	2.1	20	42.3
12	57	40	0.34	1.054	15.6	0	1.3	22	137.6
12	57	42	0.341	0.321	15.8	0	1.3	14	458.4
12	57	43	0.343	0.428	15.7	0	1.5	14	339.6
12	57	43	0.346	0.657	15.7	0	1.4	16	221.8
12	57	43	0.349	0.809	15.6	0.1	1.6	15	178.7
12	57	43	0.352	0.855	15.5	0	1.6	13	167.3

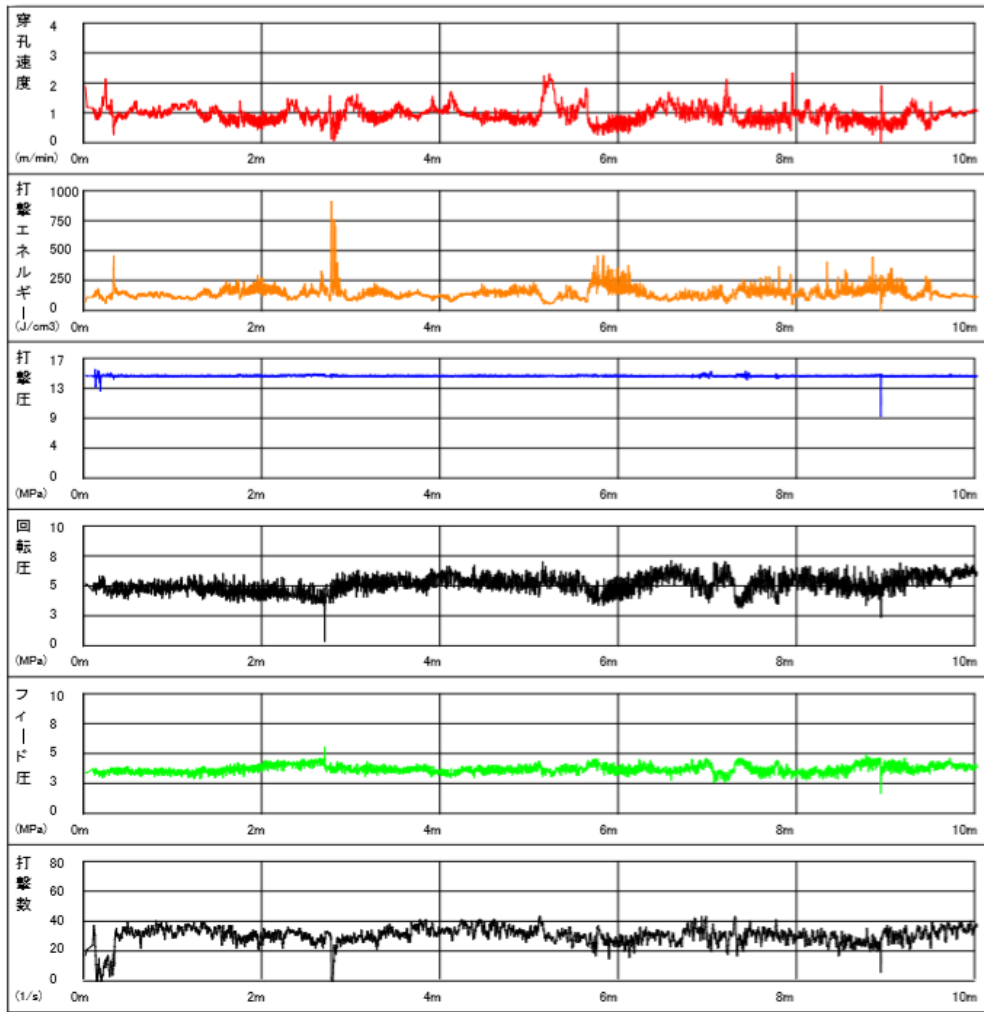


図 5.1.1 前方探査により取得した穿孔データ例

前方探査結果 (TD3821.5m)

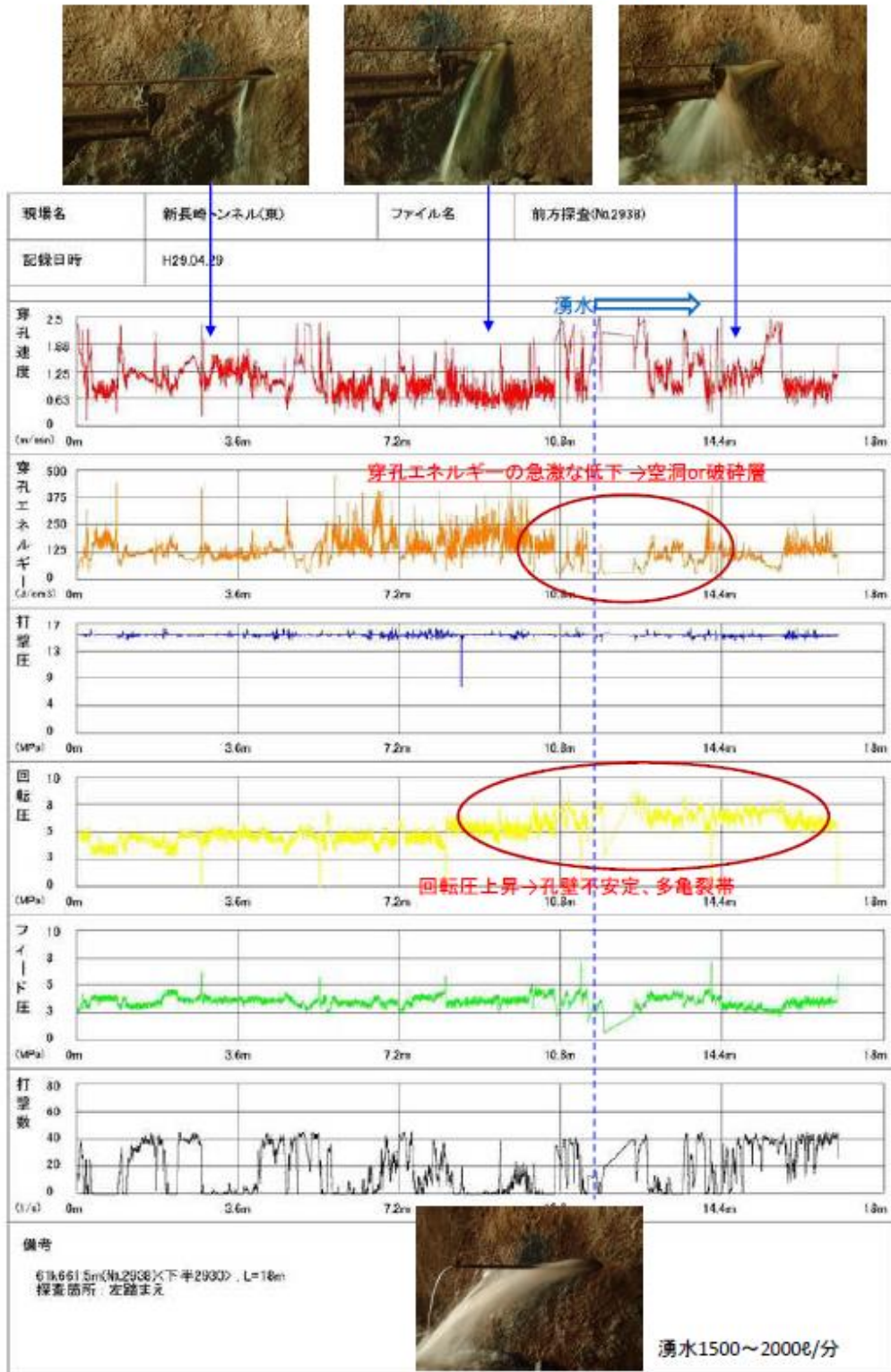


図 5.1.2 現場における探査データの利用例

5.2 穿孔データと切羽評価点の関係

切羽評価点は、切羽観察時に記録された地山の状態と挙動を項目毎に点数化されたものを使用した。評価項目は、A切羽の状態、B素掘面の状態、C圧縮強度、D風化変質、E破碎部の切羽に占める割合、F割れ目の頻度、G割れ目の状態、H割れ目の形態、I目視での湧水量、J水による劣化である。それぞれ1～4点で評価が区分されている¹⁾

(表5.2.1)。評価点は、点数が低いほど地山の状態が良いことを表している。これらの評価点は支保パターン決定時の参考値として用いられている。本報の分析に使用する切羽評価点は、掘削時に切羽評価を実施し、かつその切羽位置で穿孔データを取得している410断面のデータを用いた。

表 5.2.1 新長崎トンネル切羽観察表

掘削地点の地山の状態と挙動					
A	切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩落あるいは流出
B	素掘面の状態	1. 自立	2. 時間がたつと緩み肌落ちする	3. 自立困難、掘削後早期に支保する	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
C	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ ハンマー打撃で跳ね返る	2. $100 > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$ ハンマー打撃で碎ける	3. $20 > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ ハンマーの軽い打撃で碎ける	4. $5\text{MPa} > \sigma_c$ ハンマー刃先がくい込む
D	風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、礫状当初より未固結
E	破碎部の切羽に占める割合	1. 5% > 破碎	2. 20% > 破碎 \geq 5%	3. 50% > 破碎 \geq 20%	4. 切羽面の大部分が破碎されている状態
F	割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1$	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 破碎当初より未固結
G	割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む当初より未固結
H	割れ目の形態	1. ランダム方形 	2. 柱状 	3. 層状・片状・板状 	4. 土砂状・細片状当初より未固結
I	湧水量目視での量	1. なし、滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水 (10 l/min)	4. 全面湧水 (l/min)
J	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

5.2.1 分析に用いた穿孔データ

穿孔データは、穿孔中の油圧データを連続的に数値として記録したものである。そこで、連続したデータから切羽観察記録がある切羽面のデータを抽出した。

穿孔データの抽出の方法は、切羽観察記録が存在する切羽面の前後 0.5m、計 1.0m で取得されたデータを平均化し、その切羽における穿孔データの数値とした。これにより、数値の変動をなくし、取得時の誤差を軽減する。探査データと切羽面の関係を図 5.2.1 に示す。

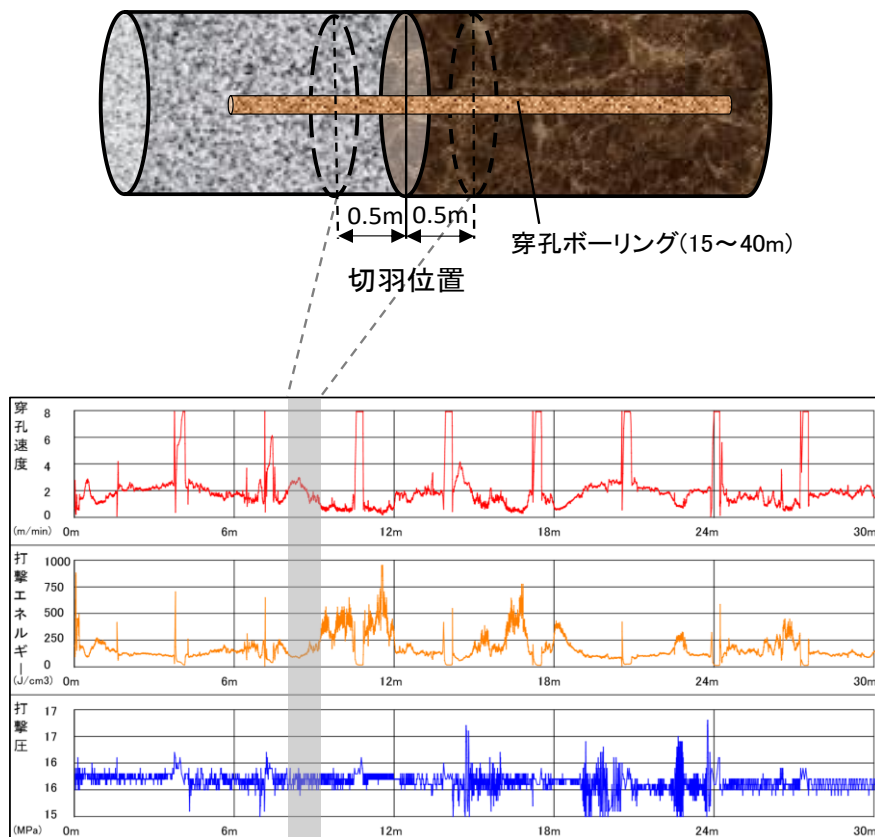


図 5.2.1 探査データと切羽面の関係

5.3 切羽評価点と穿孔エネルギーとの関係

トンネルの支保パターンは、技術者が切羽面を観察し、地山を評価項目ごとに点数化することにより決定されている。本章では、穿孔エネルギーと切羽評価点との相関関係を分析することにより、支保パターンの決定における穿孔エネルギーの有用性と課題について考察を行う。なお、対象トンネルの切羽評価は、A～Jの10項目を用いて点数化を行っているが、それぞれの項目について、穿孔エネルギーとの相関性を検証する。なお、検証に用いた穿孔データは、切羽面の前後0.5mの範囲である1.0m間の平均値とした。

5.3.1 切羽の状態との関係

切羽の状態の評価は、1から4点の評価基準のうち、1点か2点で評価されている。1点と評価されている個数が少数であり確度は低いが、81.8%の切羽で穿孔エネルギーが 350 J/cm^3 以上となり、2点と評価されている切羽では、82.6%が 350 J/cm^3 以下の穿孔エネルギーとなっている（図5.3.1）。2点でも 350 J/cm^3 以上の比較的高い穿孔エネルギーを必要とする箇所もあるが、この原因としては、穿孔探査を行った箇所が、部分的に硬質で、高い穿孔エネルギーを必要とする岩質であったが、切羽面全体としては、岩盤に亀裂があり、鏡面から岩塊が抜け落ちるという状況であったと考えられる。おおむね、 350 J/cm^3 以上では、1点になると考えられる。

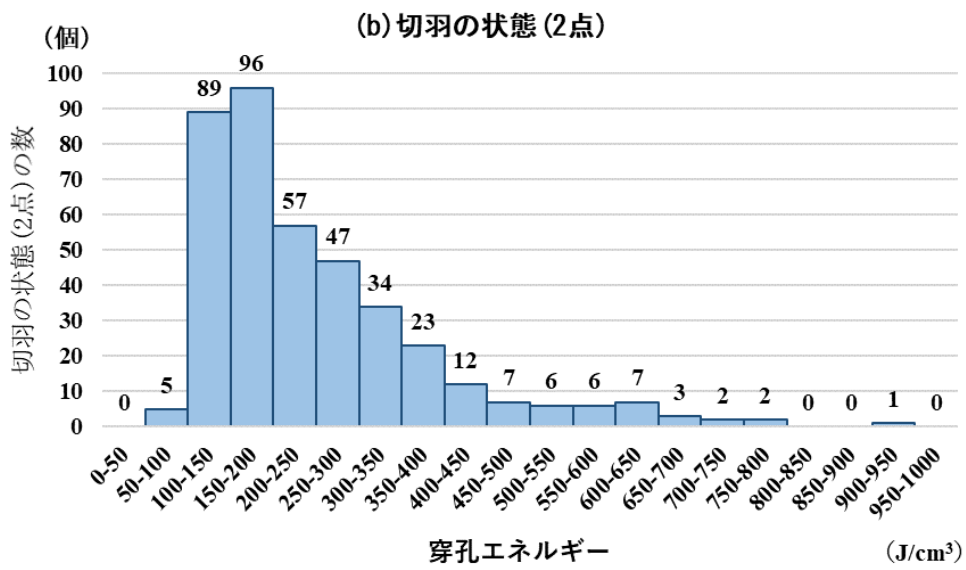
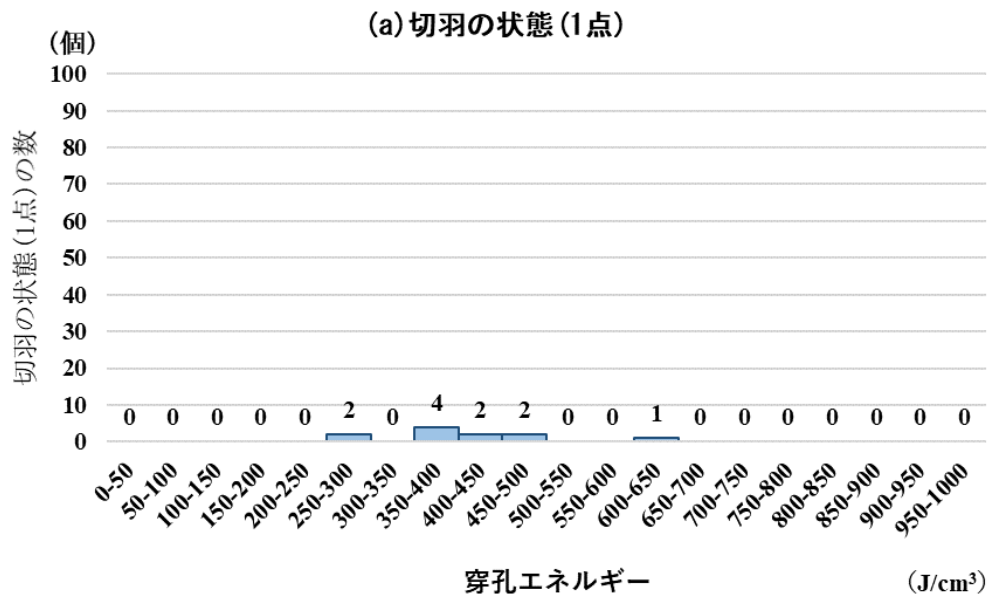


図 5.3.1 穿孔エネルギー分布図 (切羽の状態)

5.3.2 素掘り面の状態との関係

素掘り面の状態は、切羽の状態とほぼ同じ評価となっている。すなわち、切羽が安定しているときは、素掘り面が自立しており、鏡面から岩塊が抜け落ちる切羽状態のときは、素掘り面は時間がたつと緩み肌落ちする。切羽の状態と同様に穿孔エネルギーが 350 J/cm^3 以上で1点、以下で2~4点の評価になると考えられる（図 5.3.2）。

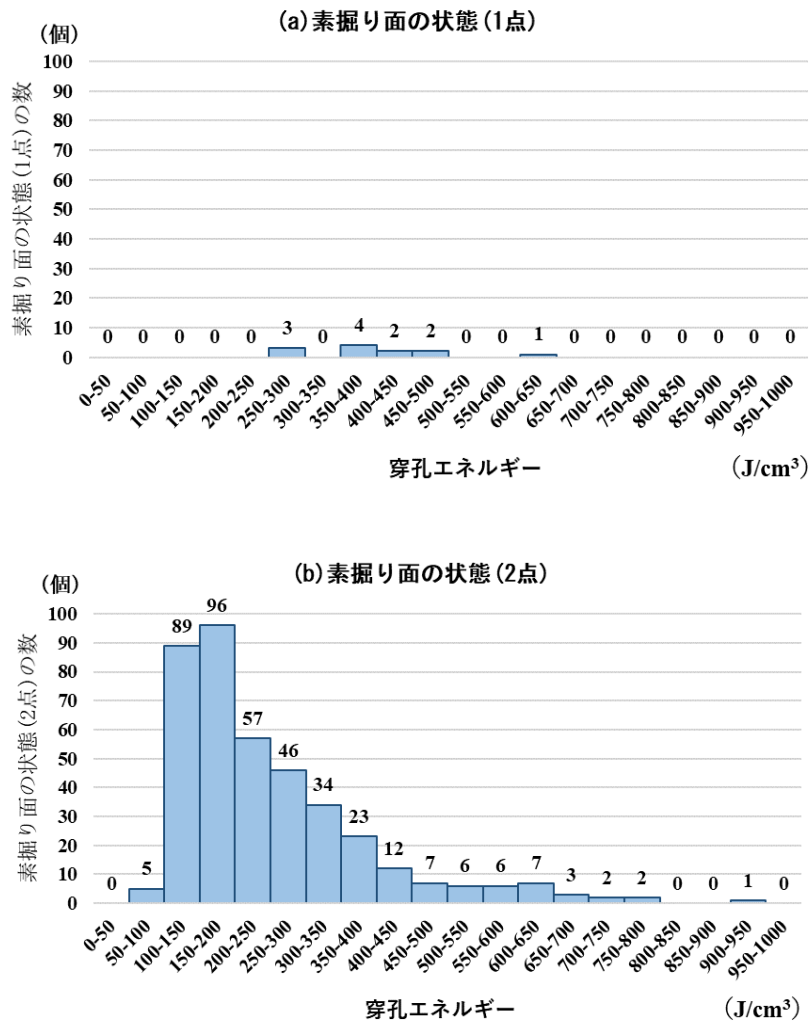


図 5.3.2 穿孔エネルギー分布図
(素掘り面の状態)

5.3.3 圧縮強度との関係

圧縮強度は、2点か3点で評価されている。地山は安山岩が主体であったが、全体の約62%が20MPa以下の3点と評価されている。熱水などの影響を受けて変質している状態であったと思われる。2点と評価されている穿孔エネルギーは、約74%が200J/cm³以上であり、3点と評価されている切羽では約59%が200J/cm³以下となっている（図5.3.3）。つまり200J/cm³付近が2点と3点の評価の分岐点であると考えられる。

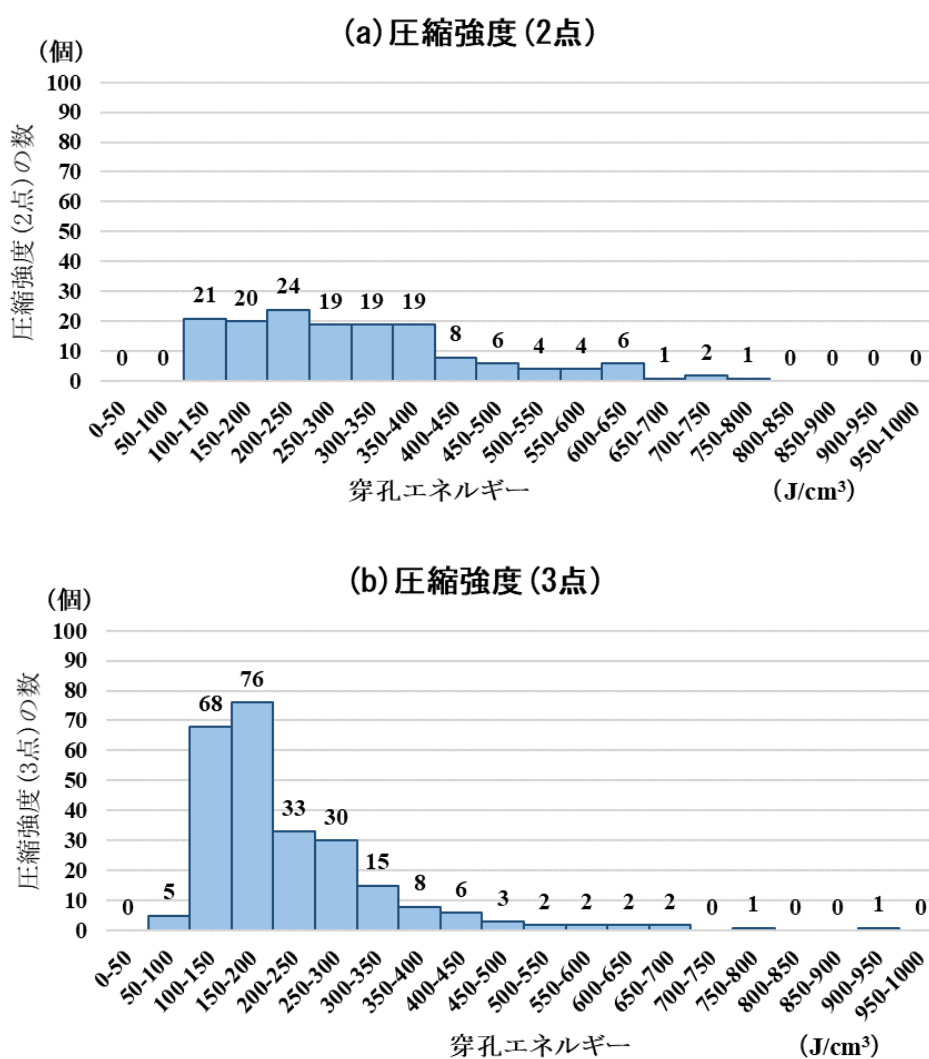


図 5.3.3 穿孔エネルギー分布図 (圧縮強度)

5.3.4 風化変質との関係

風化変質は、1～3点の3ランクで評価されている。それぞれの穿孔エネルギー分布は、1点と評価されている切羽は少数であるが、全て $250\text{J}/\text{cm}^3$ 以上となっている。2点と3点はともに $250\text{J}/\text{cm}^3$ 以下に6割が集中しているが（図5.3.4）、分布割合に大きな違いは見られない。このことから、 $250\text{J}/\text{cm}^3$ 以上であれば、1点の確率が高いが、以下の場合は、2点か3点の判定になる。

風化変質の項目は、その程度を色などで評価する項目のため、穿孔エネルギーで判断するのは困難であることが分かる。

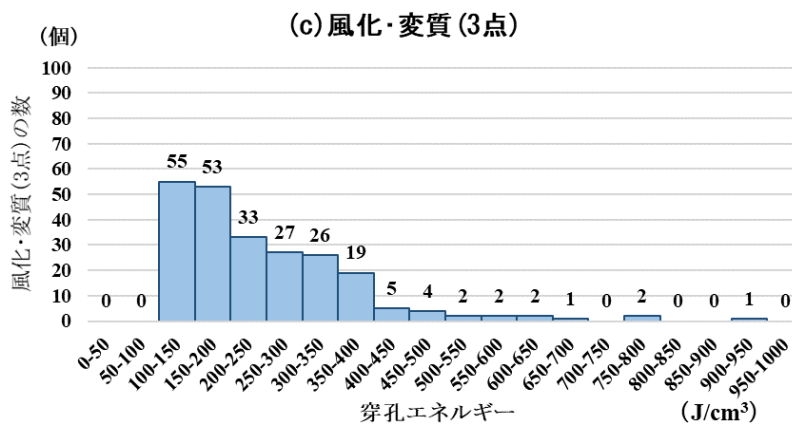
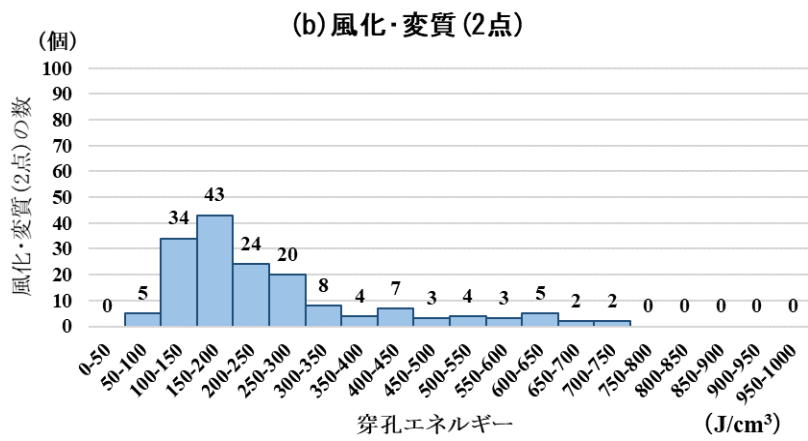
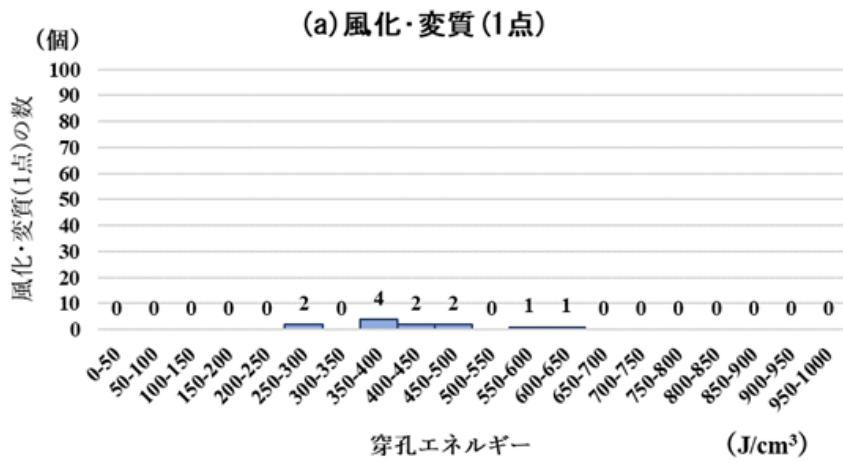


図 5.3.4 穿孔エネルギー分布図
(風化・変質)

5.3.5 破砕部の切羽に占める割合との関係

破砕部の切羽に占める割合は、2～4点で評価されている。穿孔エネルギーが $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の分布割合を見ると、それぞれ45%、48%、86%となっている（図5.3.5）。4点の評価では、穿孔エネルギーがおおむね $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の値であることから、破砕部の穿孔エネルギーは $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下であったと判断できる。破砕部の切羽に占める割合が増すにつれ、穿孔位置が破砕部に該当する確率が増加していくことで、 $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の分布割合が大きくなっていると思われる。4点と評価されている切羽では、大部分が破砕されている状態なので、穿孔エネルギーの低下部分が高い確率で出現している。

破砕部の切羽に占める割合は、穿孔探査が切羽面に対して、点で行われるため破砕部の広がりをつかえることは困難であるが、 $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の時には、破砕部が出現する可能性が高い。

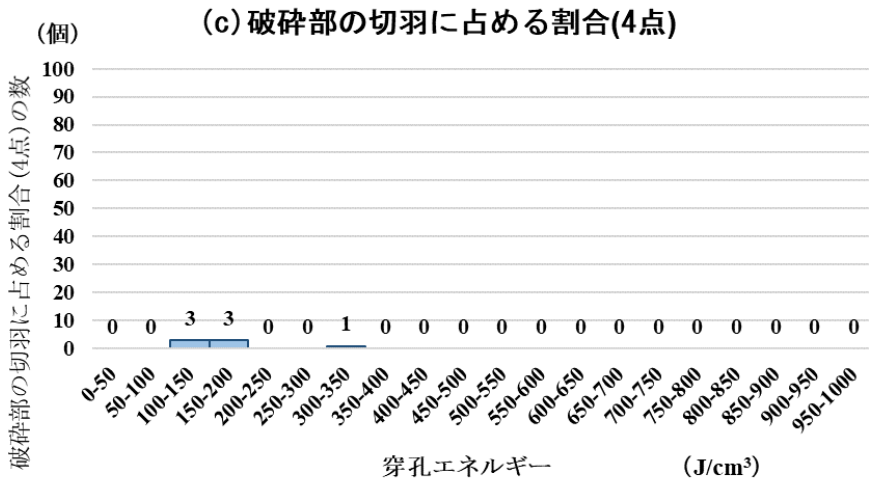
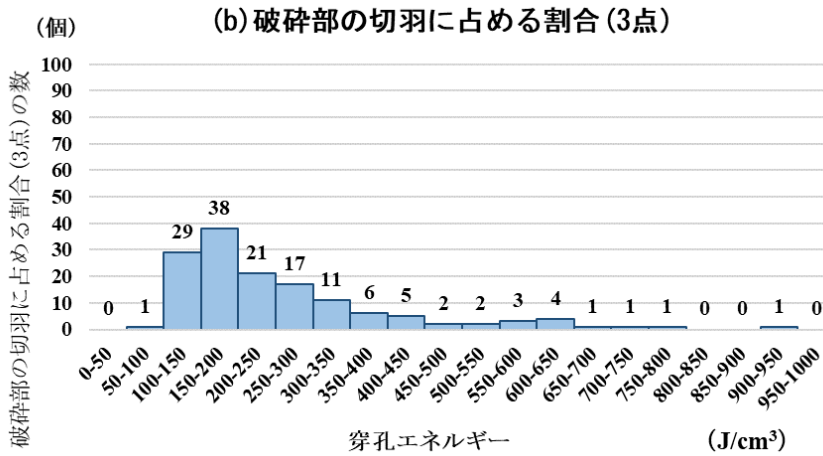
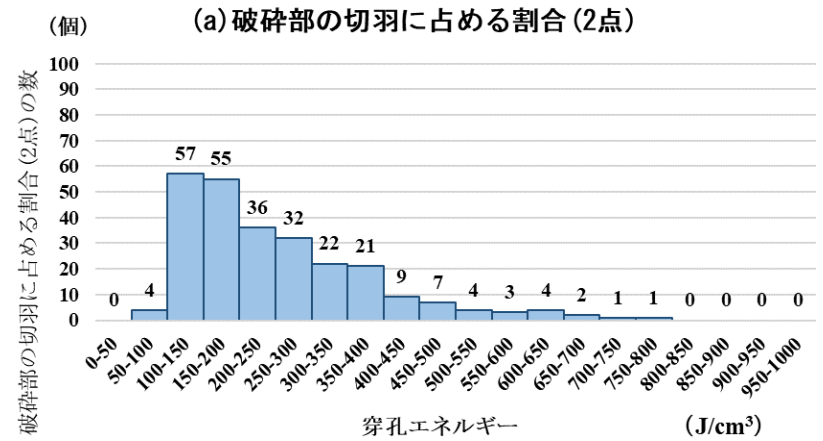


図 5.3.5 穿孔エネルギー分布図
(破碎部の切羽に占める割合)

5.3.6 割れ目の頻度との関係

割れ目の頻度は、2点もしくは3点で評価されている。それぞれの穿孔エネルギー分布は、2点では、200J/cm³以下に27%が分布しているのに対し、3点と評価されている場合は、53%が集中している（図5.3.6）。このことから、200J/cm³以下の場合には、3点の可能性が高い。つまり、割れ目の間隔が狭くなると、穿孔エネルギーは低下する傾向にある。

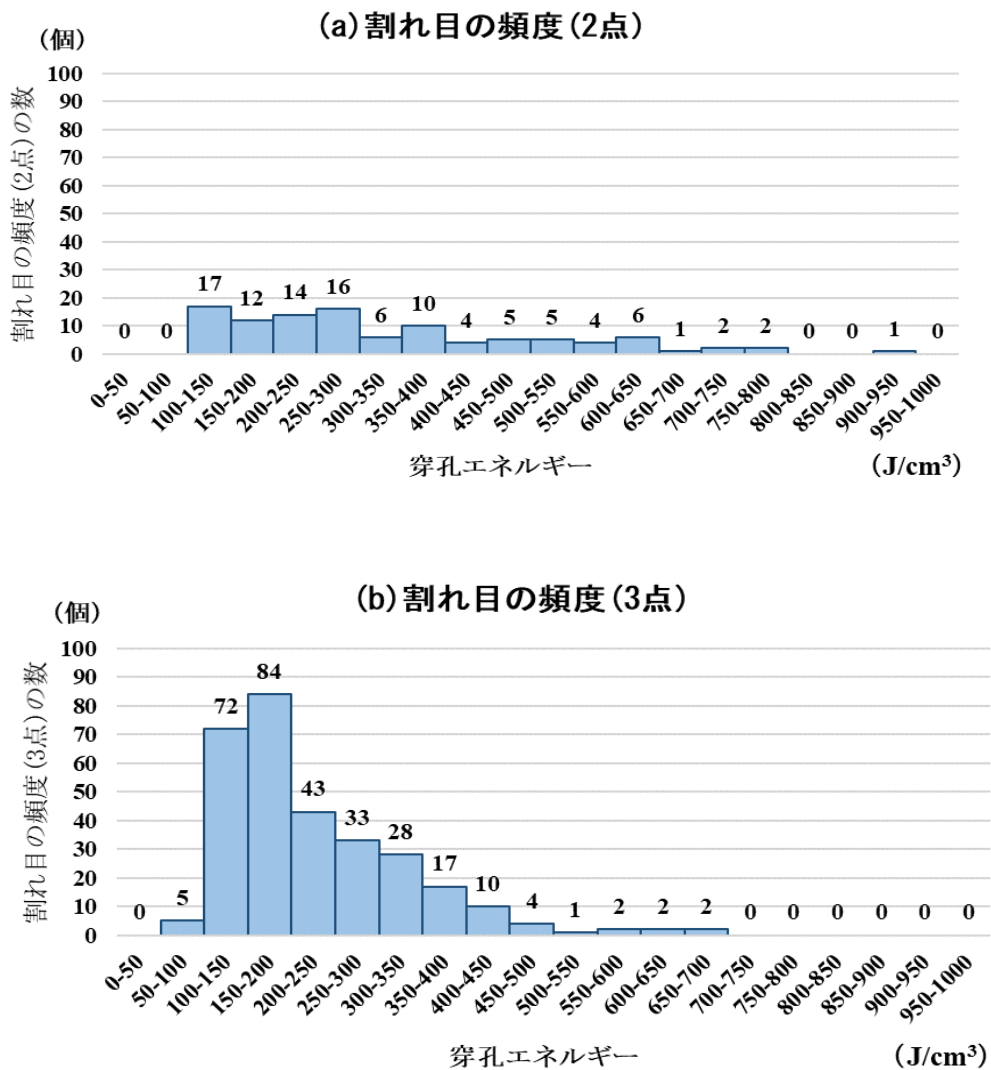


図5.3.6 穿孔エネルギー分布図
(割れ目の頻度)

5.3.7 割れ目の状態との関係

割れ目の状態は、2～4点で評価されている。4点は少数のため比較対象にはならないが、2点と3点の穿孔エネルギー分布は、それぞれ $150\sim 200\text{J/cm}^3$ 、 $200\sim 250\text{J/cm}^3$ が最も多くなっている（図 5.3.7）。2点より3点の穿孔エネルギーが大きい傾向にある。この原因は、割れ目が3点の「開口」の場合は割れ目の密度が小さく、大きいと開口部が分散されて、開口幅が小さくなっていたためである。したがって、「部分的に開口」の2点の方が破碎の程度が大きく、穿孔エネルギーが小さくなり、逆転が生じたためと考えられる。これらの特徴は穿孔エネルギーでは判定できないと思われる。

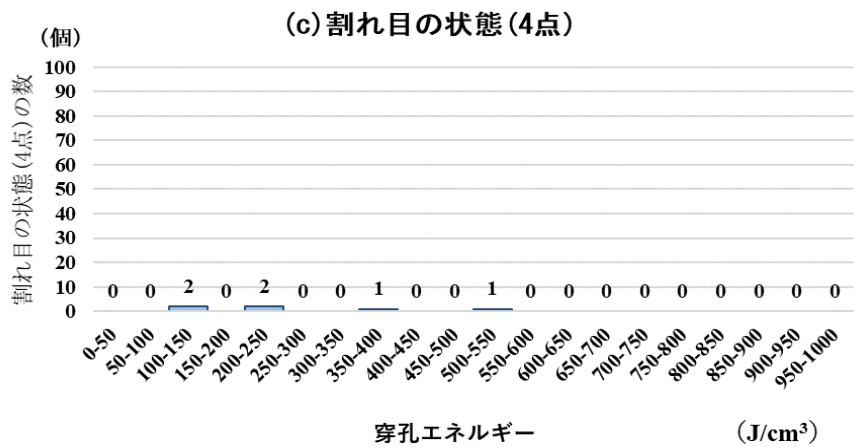
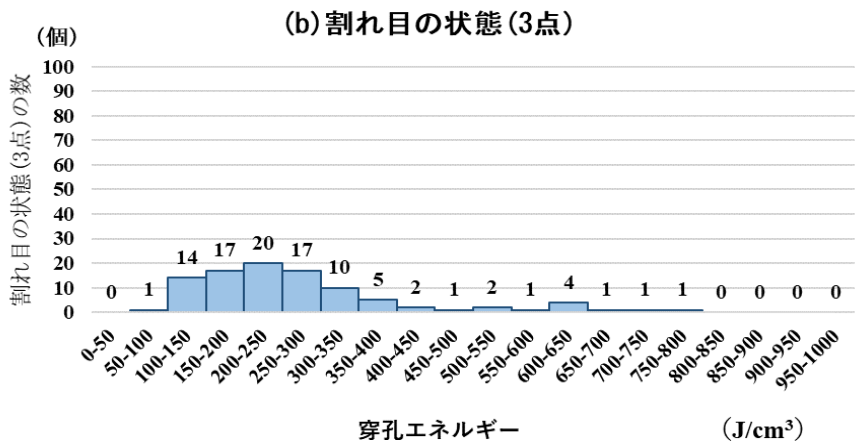
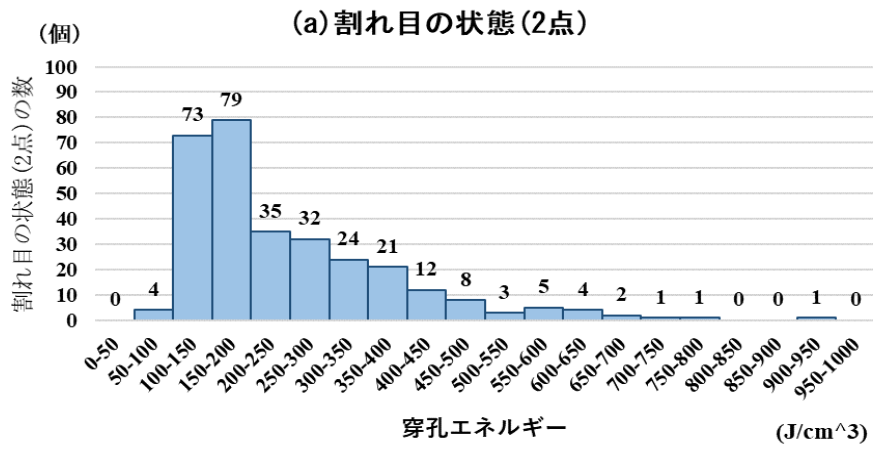


図 5.3.7 穿孔エネルギー分布図
(割れ目の状態)

5.3.8 割れ目の形態との関係

割れ目の形態は、1～4点で評価されている。1～3点の穿孔エネルギー分布はそれぞれ、 $150\sim 200\text{J}/\text{cm}^3$ 、 $150\sim 200\text{J}/\text{cm}^3$ 及び $200\sim 250\text{J}/\text{cm}^3$ 、 $100\sim 150\text{J}/\text{cm}^3$ で最も多くなっており、点数の違いによる特徴は見られない（図 5.3.8）。4点の土砂状・細片状当初より未固結は、ごく少数であるが、すべて $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下となっている。しかし、その他の評価点でも $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下が多数あったため、穿孔エネルギーによる判定は困難である。

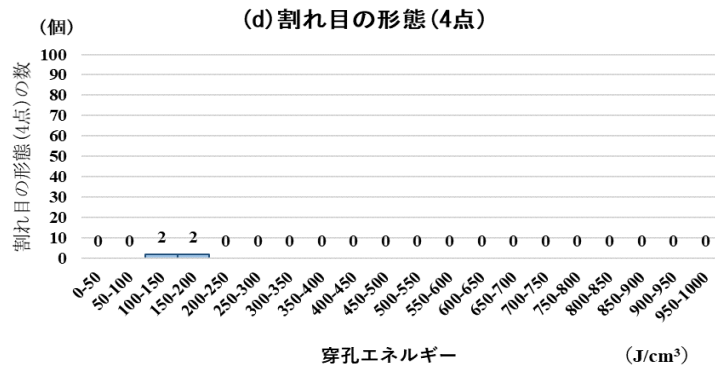
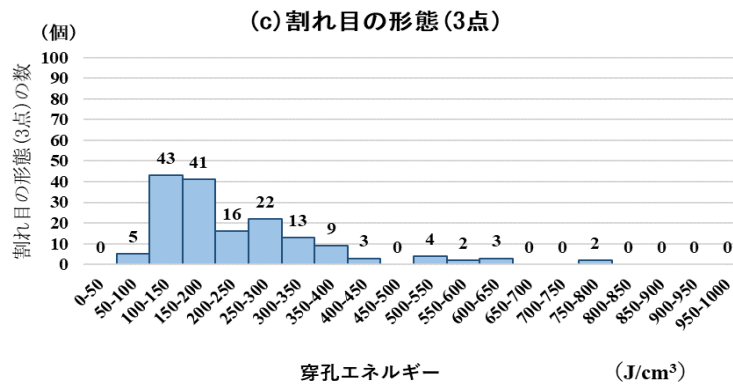
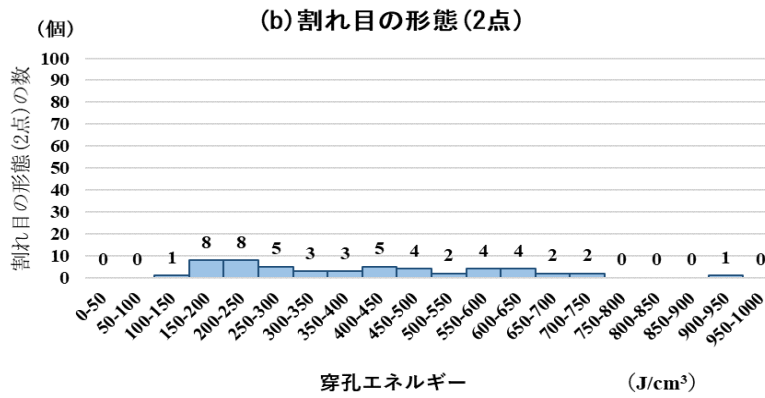
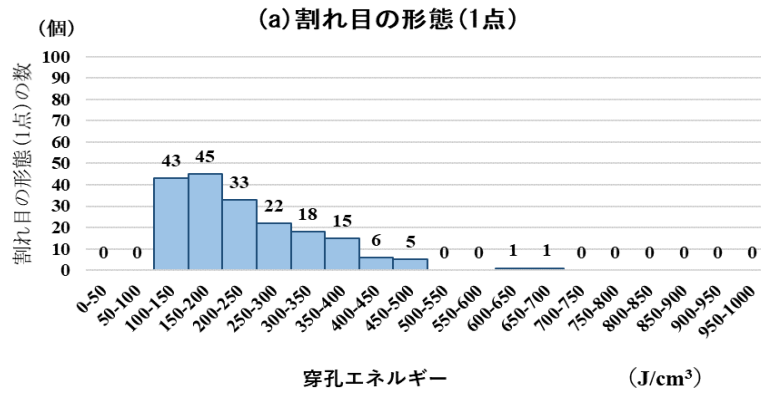


図 5.3.8 穿孔エネルギー分布図 (割れ目の形態)

5.3.9 湧水量との関係

目視で推測する湧水量に応じて、切羽評価点は、1～4点で評価されている。穿孔エネルギー分布は、ともに $100\sim 200\text{J}/\text{cm}^3$ 付近が最も多くなっており、点数の違いによる特徴は見られない（図 5.3.9）。つまり、湧水量と穿孔エネルギーとの間に明らかな相関がないため、穿孔エネルギーから湧水量を読み取ることは容易ではない。

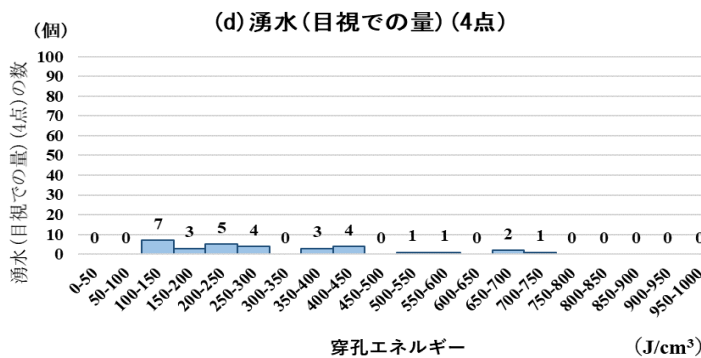
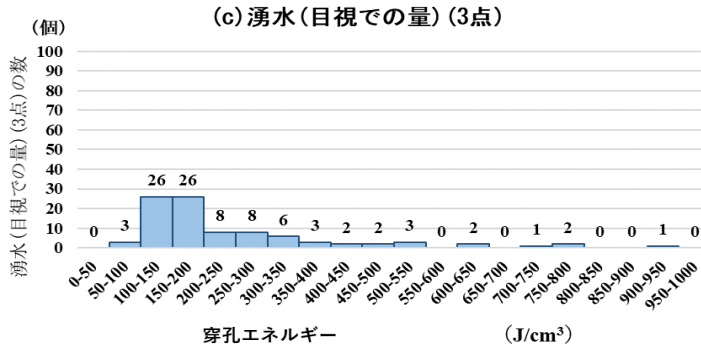
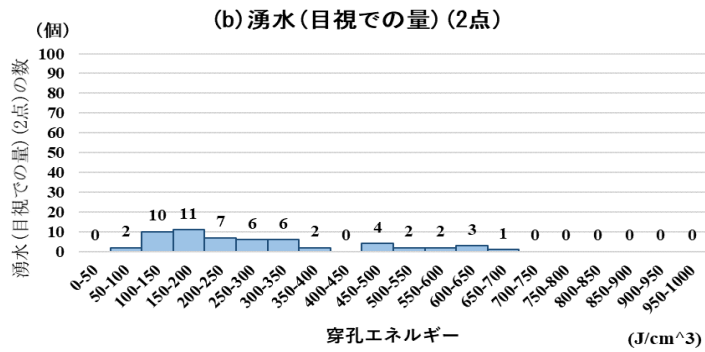
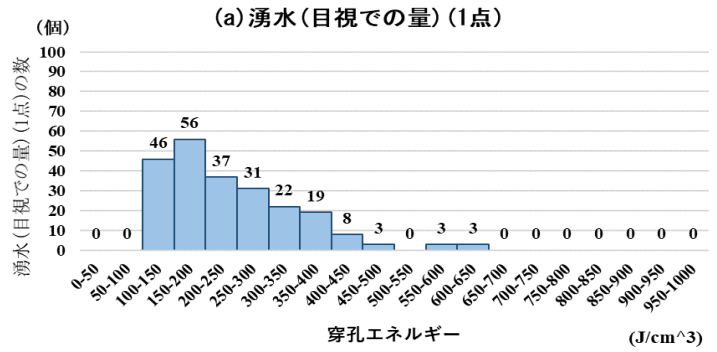


図 5.3.9 穿孔エネルギー分布図
(湧水量)

5.3.10 水による劣化との関係

水による劣化は、2～4点で評価されており、それぞれの穿孔エネルギー分布は、ともに100～200J/cm³付近が最も多くなっている。点数の違いによる特徴は見られないので（図5.3.10）、穿孔エネルギーから水による劣化を読み取ることは困難である。評価点は全体の95%が3点の軟弱化と評価している。湧水量との関係で1点の湧水なしの評価が多いにも関わらず、3点が多い原因として、水抜きボーリングやトンネル掘削により切羽付近の地下水位が低下して、掘削時に湧水はないが地下水位が高い状態のときに水による劣化が生じているためである。

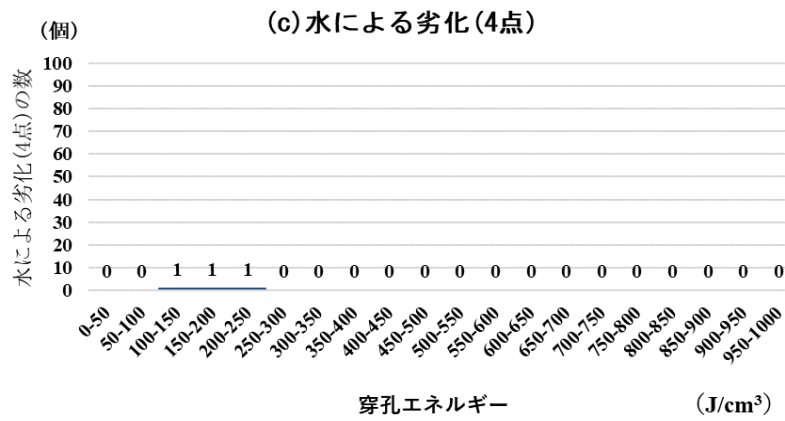
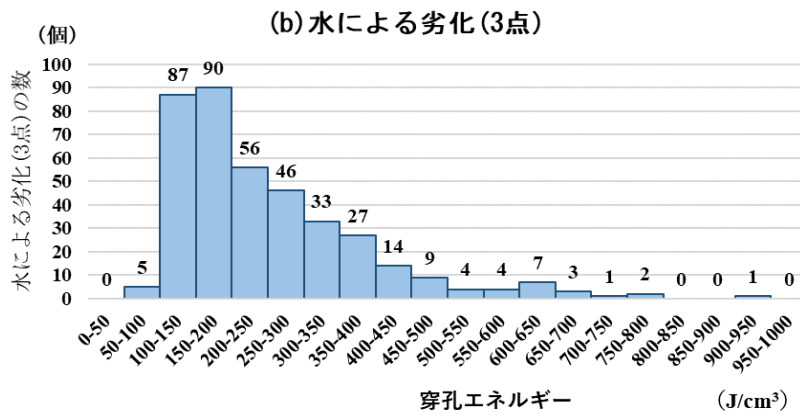
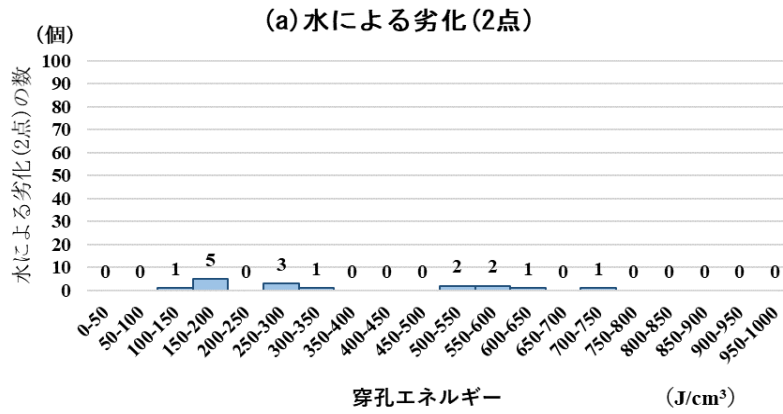


図 5.3.10 穿孔エネルギー分布図
(水による劣化)

5.4 穿孔データにおける個別要素の分析

取得した個別要素である穿孔速度、回転圧、フィード圧、打撃圧、打撃数のうち、切羽評価点との関係で特徴的な傾向を示すデータについて、検証を行う。

5.4.1 切羽の状態との関係

切羽の状態と穿孔データの相関関係を見ると、フィード圧と弱い負の相関（相関係数： -0.260 ）にある。これは、フィード圧が大きくなると評価点が小さくなり、地山状況が良くなる方向に評価されていることを示している。

評価点ごとのフィード圧分布は、1点と評価されている切羽数が少数ではあるが、おおむね 5.0MPa 以上となっている。2点と評価されている切羽では、その約 85% が 5.0MPa 以下となっている（図 5.4.1）。この結果から、フィード圧の1点と2点の分岐点は、 5.0MPa 付近にあると推測できる。

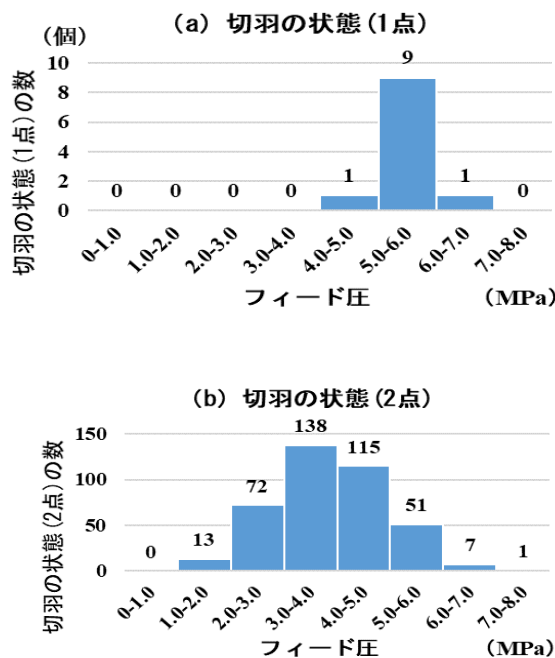


図 5.4.1 フィード圧分布図（切羽の状態）

5.4.2 素掘り面との関係

切羽の状態と同様にフィード圧と弱い負の相関（相関係数-0.247）にある。フィード圧の分布は、1点と評価されている切羽では、約83%が5.0MPa以上であり、2点と評価されている切羽では、約85%が5.0MPa以下となっている（図5.4.2）。このことから、フィード圧の1点と2点の分岐点は、5.0MPa付近にあると思われる。

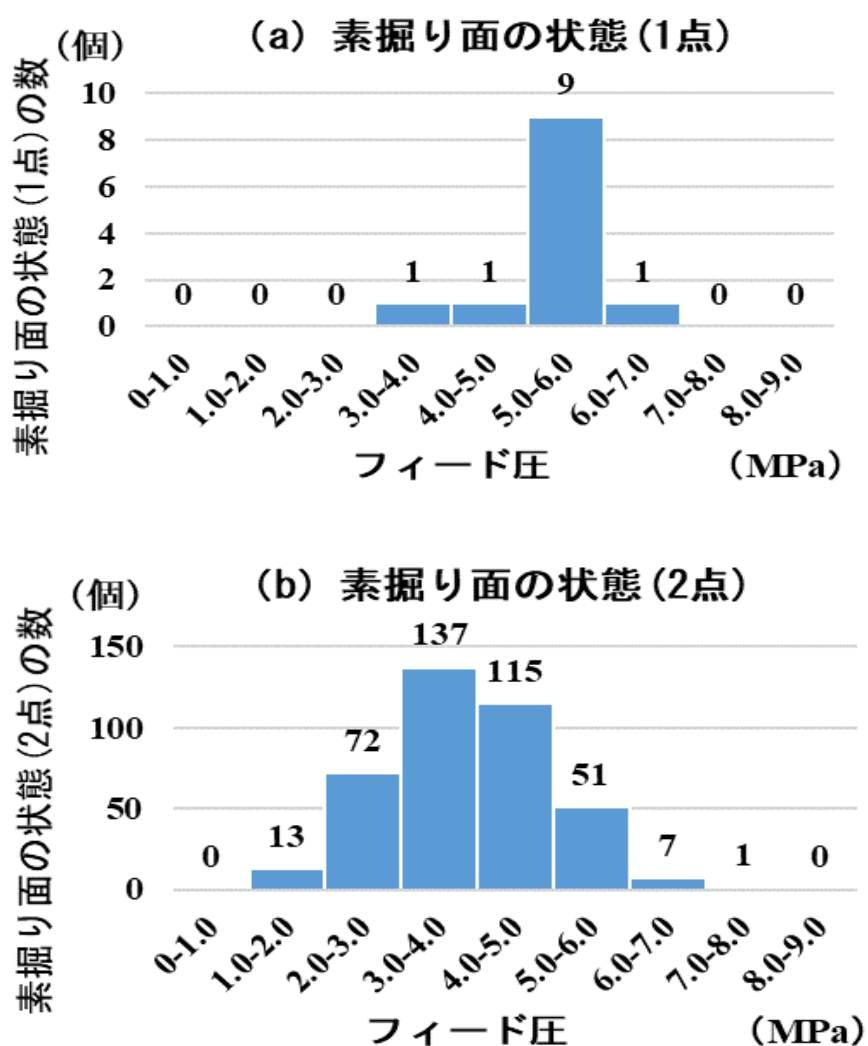


図5.4.2 フィード圧分布図（素掘り面の状態）

5.4.3 圧縮強度との関係

圧縮強度は、フィード圧と弱い負の相関（相関係数：-0.235）を有し、また、回転圧と弱い正の相関（相関係数：0.270）にあるので、フィード圧が大きくなると圧縮強度が大きくなることを示し、回転圧が大きくなると、圧縮強度が小さくなることを示している。

原因としては、岩盤の強度が増すと穿孔速度が低下するので、オペレーターはフィード圧を上げて穿孔速度を上げようとするためだと考えられる。しかし、オペレーターごとに適正と考える穿孔速度に違いがあり、フィード圧の程度の評価は難しい。回転圧が大きくなる原因は、圧縮強度が小さい岩盤を穿孔するとき、孔壁の崩壊によるロッド部分の摩擦抵抗の増加で回転圧が上昇した箇所もあったと思われる。

評価点が2点の切羽では、フィード圧が4.0MPa以上に約60%、3点のとき4.0MPa以下に約64%が分布している（図5.4.3）。一方、回転圧は評価点2点で5.0MPa以上に約67%、3点で5.0MPa以下に約58%が分布している（図5.4.4）。

圧縮強度と穿孔速度の関係では、相関関係が認められない結果になったが、岩盤の強度がそれほど大きくなかったために、フィード圧の調整で穿孔速度を保つことができた結果であると思われる。

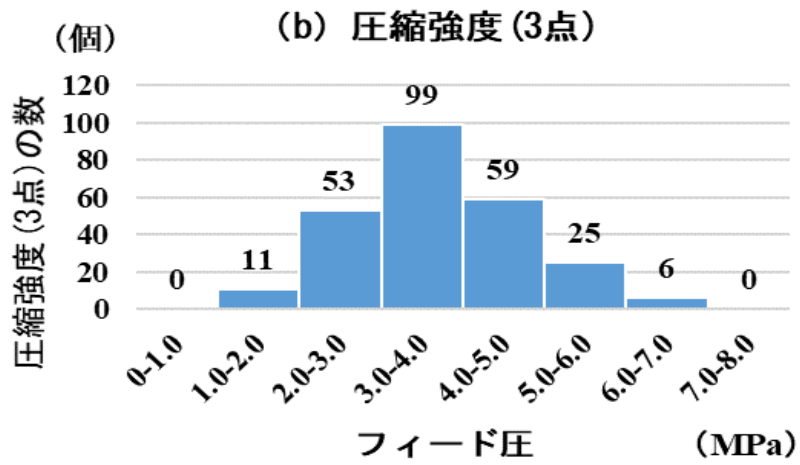
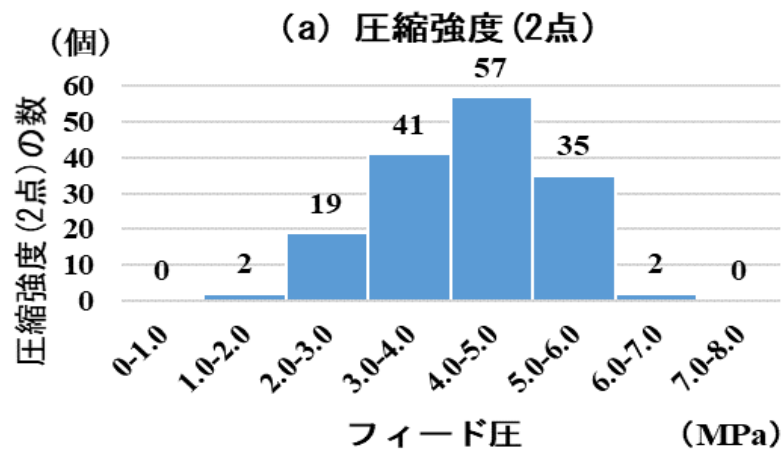


図 5.4.3 フィード圧分布図 (圧縮強度)

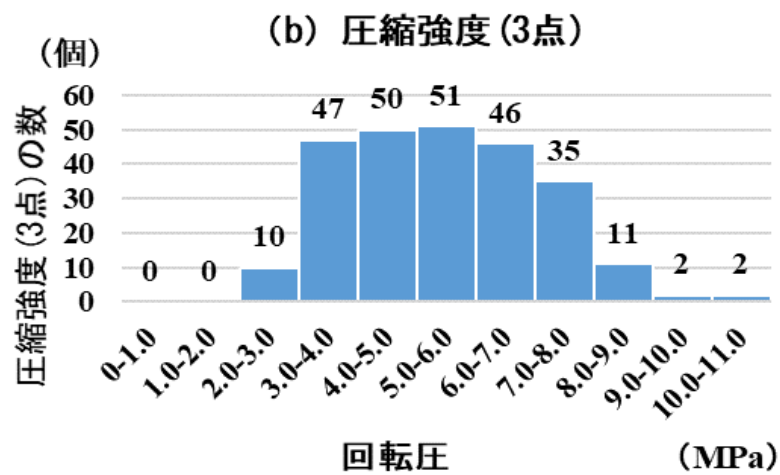
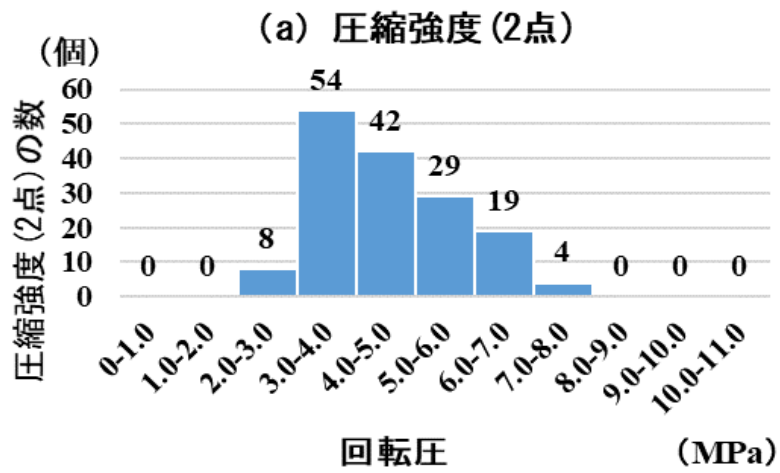


図 5.4.4 回転圧分布図 (圧縮強度)

5.4.4 割れ目の頻度との関係

割れ目の頻度と穿孔データとの相関関係を見ると、回転圧に対して正の相関（相関係数：0.400）にある。2点のとき5.0MPa以下の割合が88%に対し、3点のとき5.0MPa以上の割合が61%となっている（図5.4.5）。回転圧の上昇は、圧縮強度で示したのと同様に亀裂によって孔壁が崩壊し、圧力が上昇したと思われる。つまり、割れ目の頻度が高くなると回転圧が上昇し、穿孔エネルギーが低下する傾向にある。

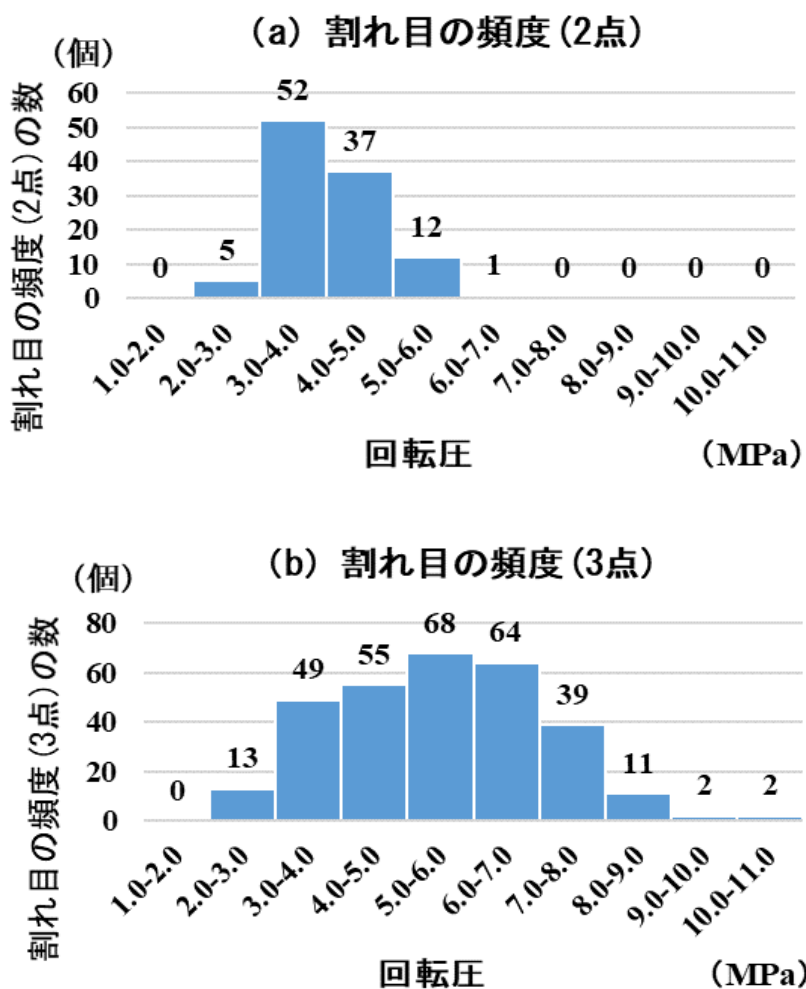


図5.4.5 回転圧分布図（割れ目の頻度）

5.5 まとめと考察

山岳トンネル掘削時に実施した切羽前方探査のデータを詳細に分析し、切羽評価点との関連について検証した。その結果、穿孔エネルギーのほかに回転圧、フィード圧のデータが、地山状態の特徴を示す可能性があることを確認することができた（表 5.5.1）。検証結果を取りまとめると、以下のとおりである。

- ①切羽の状態と素掘り面の状態は、穿孔エネルギーが大きいほど評価点が小さく、
350J/cm³以上で1点、以下で2点以上になる確率が高い。フィード圧は高いほど評価点が低く、5MPa以上で1点、以下で2点以上となる確率が高い。
- ②圧縮強度は、穿孔エネルギーが200J/cm³以上で1～2点、以下で3～4点、回転圧は大きいほど評価点が大きく、5MPa以上で3～4点、以下で1～2点になる確率が高い。また、フィード圧は大きいほど評価点が低くなり、4MPa以上で1点、以下で2～4点となる確率が高い。
- ③風化変質は、穿孔エネルギー250J/cm³以上で1点、以下で2～4点の確率が高い。
- ④破砕部の切羽に占める割合は、200J/cm³以下のとき、破砕部が高い確率で出現する。
- ⑤割れ目の頻度は、穿孔エネルギー200J/cm³以下の場合には3～4点の確率が高く、回転圧は、5MPa以上で3～4点、以下で1～2点となる傾向が強い。

表 5.5.1 穿孔データと切羽評価点の相関関係

	項目	穿孔エネルギー	回転圧	フィード圧
A	切羽の状態	350J/cm ³ 以上は1点、以下は2～4点	判断できない	5MPa以上は1点、以下は2～4点
B	素掘り面の状態	350J/cm ³ 以上は1点、以下は2～4点		5MPa以上は1点、以下は2～4点
C	圧縮強度	200J/cm ³ 以上は1～2点、以下は3～4点	5MPa以上は3～4点、以下は1～2点	4MPa以上は1点、以下は2～4点
D	風化変質	250J/cm ³ 以上は1点、以下は2～4点	判断できない	判断できない
E	破砕部の切羽のに占める割合	200J/cm ³ 以下で破砕部出現の可能性が高い		
F	割れ目の頻度	200J/cm ³ 以下で3～4点の可能性が高い	5MPa以上は3点以上、5MPa以下は2点以下	
G	割れ目の状態	判断できない	判断できない	
H	割れ目の形態			
I	湧水量			
J	水による劣化			

第5章では、切羽の穿孔データを利用して支保パターンを決定するための指標となる切羽評価点との関係を検証した。今回の検証では、穿孔エネルギーのほかに、穿孔速度、フィード圧、回転圧に着目して検証した結果、いくつかの項目で切羽評価の可能性を示した。しかし、穿孔データを用いて切羽評価を行うには、以下のように幾つかの課題が残っている。

- ①穿孔データの個別要素同士は、密接に関連しており、組合せで検証すべきものがある。
- ②切羽を判定する上で、1つの項目に対して複数要素で判定できるものがあり、それらのデータの優先順位や重みの程度は不明である。
- ③評価点と同じ点数に集中しており、4段階の判定をすることができない箇所があり、また、穿孔データから判定できない項目が存在する。
- ④今回の穿孔データは、安山岩に対するものであり、他の岩種に対しては、更なる検証が必要である。
- ⑤穿孔探査は、切羽面に対して点で実施するため、切羽面に層境や破砕帯が出現した場合には捕らえない可能性がある。

参考文献

- 1)土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説， p.32， 2016.
- 3)独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説， p.272， 2008.

第6章 穿孔データを用いた地山等級の判定について

6.1 はじめに

山岳トンネルは、地山の内部を貫いて構築する構造物であることから、全線にわたって地山性状を詳細に把握することが難しい。そのため、施工時には不良地山を事前に把握し、適切な支保パターンを選定する目的で切羽前方探査が行われる。施工時に実施する切羽前方探査の方法として、先進ボーリングの一種である穿孔探査法が多く採用されている。穿孔探査法では、削岩機を活用して、切羽前方の数m～数十mを穿孔し、穿孔時の機械の油圧データをもとに算出される穿孔エネルギーやダンピング圧を用いて地山評価が行われている。また、穿孔エネルギーを用いた取組みでは、穿孔エネルギーの大きさによって地山等級などを予測する施工事例があり、補助工法の選定に利用されるケースも報告されている^{2),3)}。一方、近年において行われた前方探査事例を詳しく分析した報告⁴⁾では、地質評価に対する便益の定量化が進んでいないことを指摘している。これは、切羽前方の地質の状況を穿孔エネルギーの定量化によって評価する場合、地山の特性を十分に把握しきれないためと考えられる。そこで、穿孔データを利用して地山特性を定量的に評価する方法として、第5章で示した通り、穿孔データから切羽評価点を算出できないかを検証したところ、穿孔データからは、評価できない項目があることがわかった。そこで、第6章では、評価指標として地山等級を採用し、穿孔データとの関係を詳細に分析することにより、切羽前方探査データの活用方法を考察した。分析に用いたデータは、掘削時に切羽評価を実施し、かつその切羽位置で穿孔データを取得している407断面とした。以下に得られた知見について述べる。

6.2 対象トンネルの地山等級

トンネル掘削時に、地山等級 I_N と II_N が採用されている。鉄道トンネルにおける地山等級は、一般的な硬岩地山の場合、 I_{N-1} 、 I_{N-2} および $II_N \sim V_N$ の6等級で分類され、地山等級を示すローマ数字が大きくなるほど良好な地山であることを示している⁸⁾。施工時に採用された支保パターンは、 I_N の標準支保パターンとその変形パターンで計5種類、 II_N が標準支保パターンとその変形パターンで計3種類である。これは、施工時の地山状況に合わせて、標準支保パターンを部分的に変更したものが採用されたためである。

本論では、支保工の細かな違いを判定することは困難であると判断して、地山性状の違いが比較的に分かりやすい地山等級 I_N と II_N について、掘削時の切羽前方探査データを用いて地山等級（ I_N 232箇所、 II_N 175箇所）を判定できるかを検証することにした。

6.3 穿孔データの分析

掘削時に取得した5種類の穿孔データ（穿孔速度、フィード圧、打撃圧、回転圧、打撃数）とそれらのデータから算出した穿孔エネルギーの計6種類のデータからヒストグラムとボックスプロットを作成し、分析を行って地山等級 I_N と II_N の判定が可能かを検証する。

ヒストグラムからは、データの分布割合を、ボックスプロットからは、ばらつき具合を視覚的に見ることができる。ボックスプロット図とは、データを大きき順に並べ、個数を4分割した図で、上端は最大値を、下端は最小値を示している。中央の長方形はデータ中心付近の50%を示し、長方形を上下に分けた線分がデータの中央値である。さらに、中央のバツ印が平均値を示している（図6.3.1）。

分析に用いた穿孔データは対象切羽面の前後0.5mを平均した値を用いた。分析の前提条件としては、実施工で採用された切羽の地山等級が正しい地山等級を選択していたとした。以降の各節において穿孔データごとにその関係性について詳細な考察を行う。

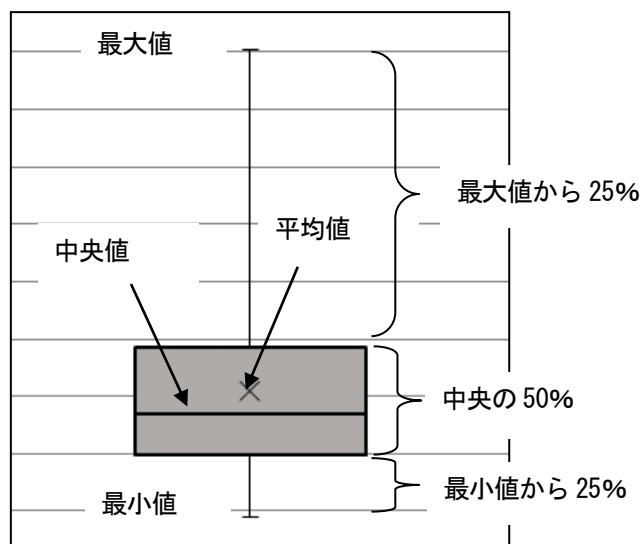


図6.3.1 ボックスプロットの見方

6.3.1 穿孔エネルギーと地山等級との関係

地山等級 I_N より II_N の方が地山の状態が良いことを表している。このため、 II_N の方が、より大きな穿孔エネルギーが必要となる。地山等級ごとのヒストグラムを用いた穿孔エネルギー分布（図 6.3.2）より、穿孔エネルギーが $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下では I_N の採用数が多く、7割近くを占めている。穿孔エネルギー $200\sim 350\text{J}/\text{cm}^3$ では、 I_N と II_N は、ほぼ同数となり、穿孔エネルギー $350\text{J}/\text{cm}^3$ 以上では II_N が多くを占めていることが分かる。このことから、穿孔エネルギーが $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下では I_N 、 $350\text{J}/\text{cm}^3$ 以上では II_N の可能性が高く、穿孔エネルギー $200\sim 350\text{J}/\text{cm}^3$ では判断が付かないことが言えよう。また、 $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下でも I_N と II_N の比率は1:3程度であり、約 25%の区間では II_N を採用していることが判明した。穿孔エネルギーが比較的小さな値であるにも関わらず、 II_N を採用している理由としては、良好な切羽面であるが、穿孔箇所が部分的に弱層であったことや、切羽面の前後が良好な地山で等級を変更しなかったこと、などが推測される。

一方、ボックスプロットを用いたグラフ（図 6.3.3）から、穿孔エネルギーの平均値は、地山等級 II_N で $300\text{J}/\text{cm}^3$ 程度、 I_N で $200\text{J}/\text{cm}^3$ 程度となっている。中央値については、地山等級 II_N で $270\text{J}/\text{cm}^3$ 程度、 I_N で $180\text{J}/\text{cm}^3$ 程度となり、良好な地山性状を示す地山等級 II_N の値が大きい。しかし、両方とも中央値より平均値が上方にあり、大きな値が平均値を押し上げていることを示している。そのばらつきの具合は、地山等級 I_N では $150\sim 250\text{J}/\text{cm}^3$ 付近の比較的限られた箇所に分布が集中しているのに対し、地山等級 II_N では、 I_N よりばらつきが大きい。その分布割合は約 75%が $200\text{J}/\text{cm}^3$ を超えている。これらにより、穿孔エネルギー $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の場合には地山等級 I_N である可能性が高く、穿孔エネルギー $250\text{J}/\text{cm}^3$ を超えると地山等級 II_N となる可能性が高いことが言える。両方のグラフの分析結果より、穿孔エネルギー $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下では地山等級 I_N 、 $350\text{J}/\text{cm}^3$ 以上では地山等級 II_N と判断することができる。

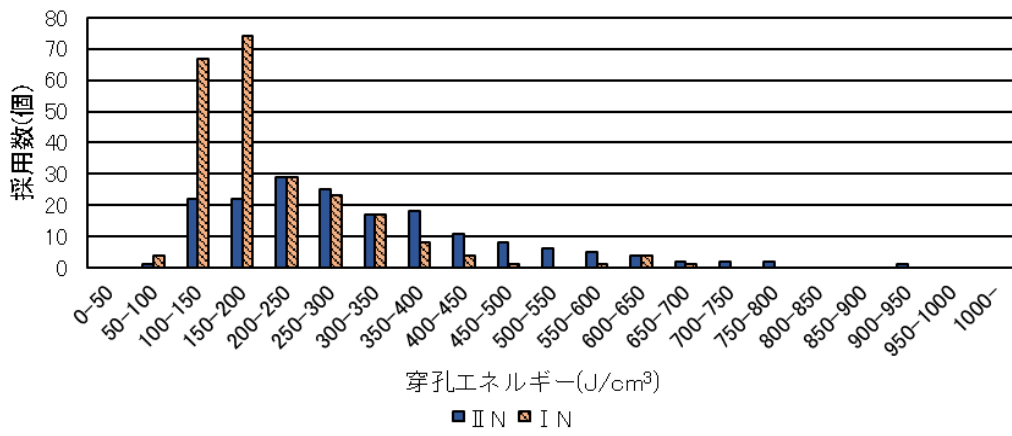


図 6.3.2 地山等級ごとの穿孔エネルギー分布 1

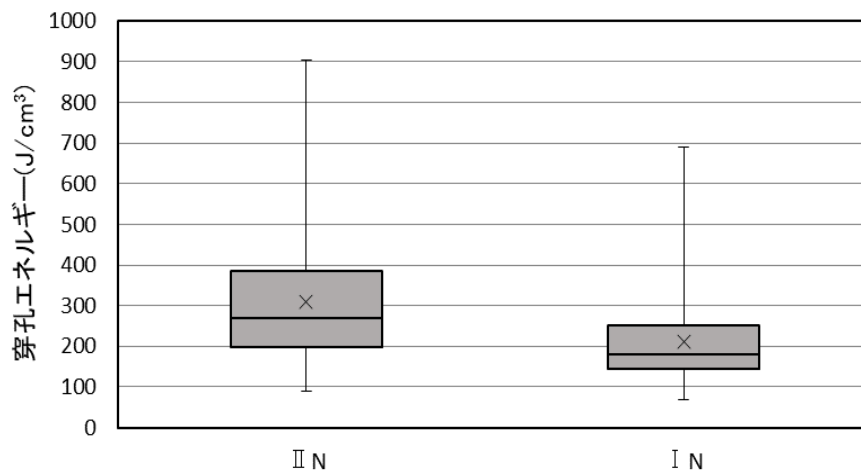


図 6.3.3 地山等級ごとの穿孔エネルギー分布 2

6.3.2 穿孔速度と地山等級との関係

穿孔速度は同じフィード圧で穿孔した場合には、岩盤が硬質であるほど穿孔速度は遅く、軟質であるほど速くなるので、地山等級Ⅱ_Nの方が穿孔速度は遅くなると推測できる。穿孔速度との関係（図6.3.4）より、特徴は、0.25～2.50m/minに地山等級Ⅱ_NとⅠ_Nの両方が分布していること、Ⅰ_Nの分布割合が0.50～1.00m/minに集中していること、Ⅱ_Nの分布割合が、Ⅰ_Nより穿孔速度の遅い方に幾分偏っていることである。しかし、明らかな違いとまでは言えない。

ボックスプロットから穿孔速度は、地山等級Ⅱ_NとⅠ_Nの平均値、中央値ともに大きな違いがみられない（図6.3.5）。穿孔速度は、フィード圧を変化させることで変わるため、操作するオペレーターが考える最適な穿孔速度になるようにフィード圧を操作しているためである。ただ、地山等級Ⅰ_Nの場合の穿孔速度は範囲0.5～1.0m/minに集中しており、比較的軟弱な岩盤を穿孔するときは、この範囲で多くが穿孔作業を行っていることがわかる。これらより、穿孔速度で地山等級Ⅰ_NとⅡ_Nの違いを判断することは容易でなことが言えよう。

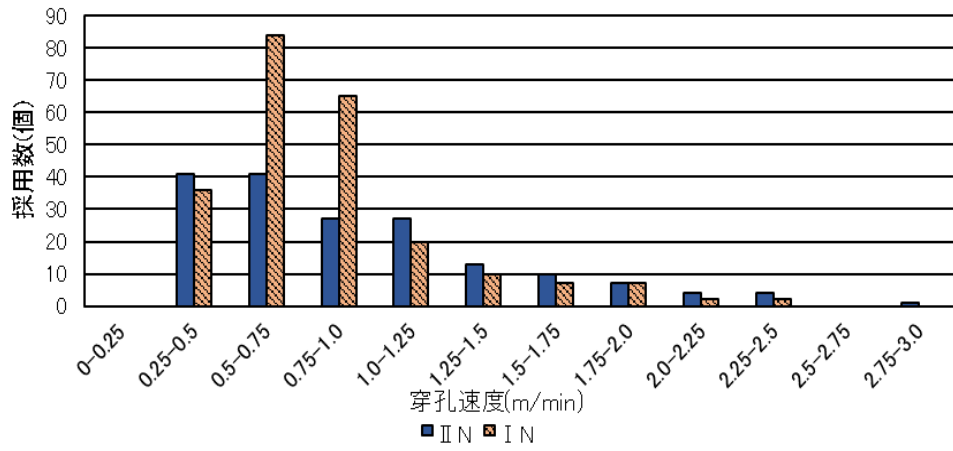


図 6.3.4 地山等級ごとの穿孔速度分布 1

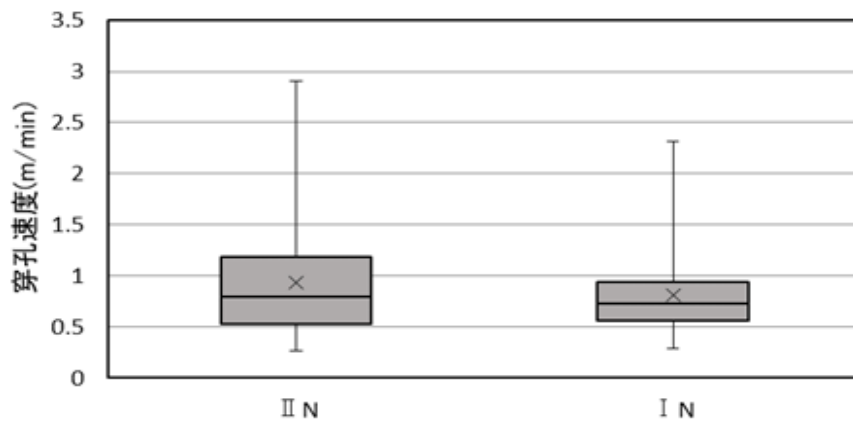


図 6.3.5 地山等級ごとの穿孔速度分布 2

6.3.3 フィード圧と地山等級との関係

フィード圧は、穿孔ビットを地山へ押し付ける圧力であり、大きいほど強く押し付けている。フィード圧は操作可能であり、オペレーターが自身の経験をもとに決めている。地山等級ごとのフィード圧分布（図 6.3.6）より、地山等級 I_N の分布割合は 3.5~4.0MPa を頂点とした正規分布に近い形状である。それに対し地山等級 II_N は I_N より幾分圧力の高い方へ分布割合が偏っている。硬い岩盤を穿孔する際に、オペレーターが穿孔速度を保つためにフィード圧を上げていることが分かる。全体の傾向としては読み取れるが、両者に大差はない。

ボックスプロットを用いた地山等級ごとのフィード圧分布を図 6.3.7 に示す。地山等級 I_N に比べて、地山等級 II_N のフィード圧が高い傾向にあるが、ヒストグラムによる分析と同様に大きな違いは見られない。ばらつき具合は、地山等級 I_N より II_N の方がばらつきの程度が大きく、フィード圧の調整範囲が広いことを示している。なお、フィード圧は、人為的な操作で決められているために、地山の判断指標として用いるのは妥当ではないと考える。

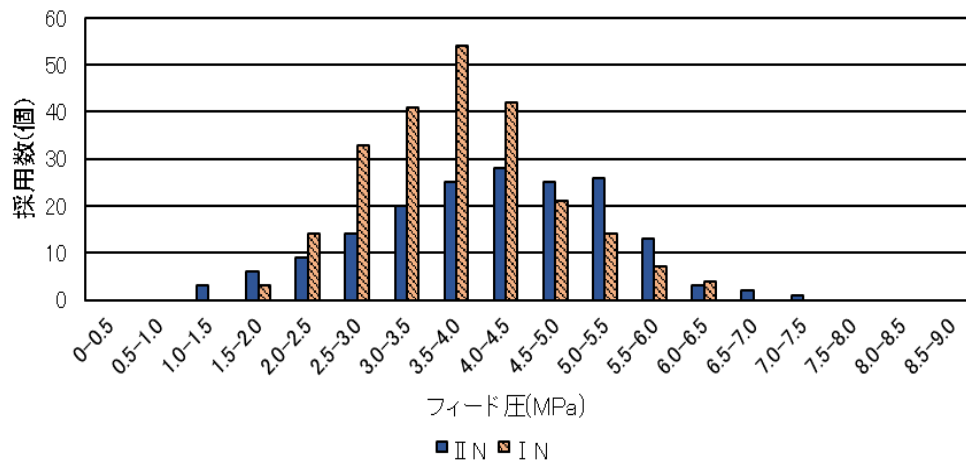


図 6.3.6 地山等級ごとのフィード圧分布 1

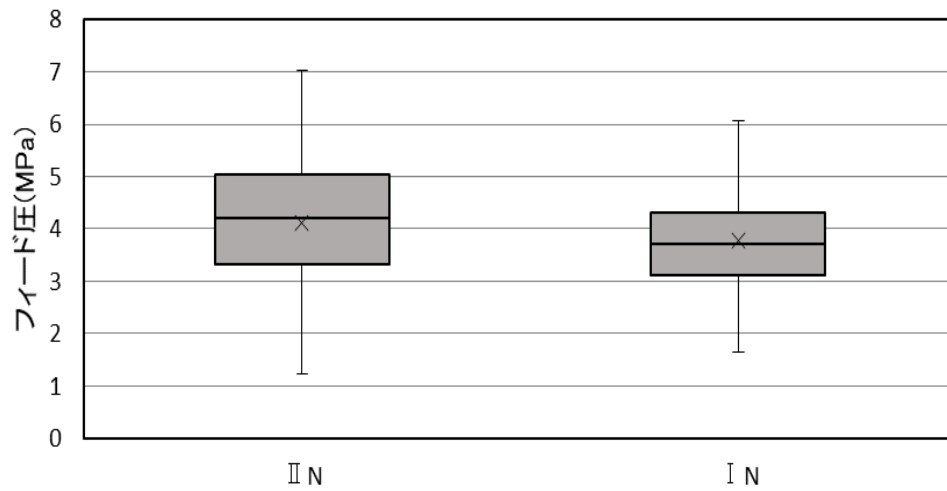


図 6.3.7 地山等級ごとのフィード圧分布 2

6.3.4 打撃圧と地山等級との関係

打撃圧は、機械の構造上、一定に保つように設定されている。穿孔データ取得時は、15MPa である。このため、判断基準にはならない。打撃圧分布にばらつきがあるのは、測定時の油圧にゆらぎがあり、そのゆらぎを含めて 1.0m 間を平均化しているためと考えている（図 6.3.8）。ボックスプロットによるグラフ（図 6.3.9）も同様に、地山等級 II_N と I_N ともに、15MPa 付近に集中している。したがって、地山等級 II_N と I_N を判別する指標にはならない。

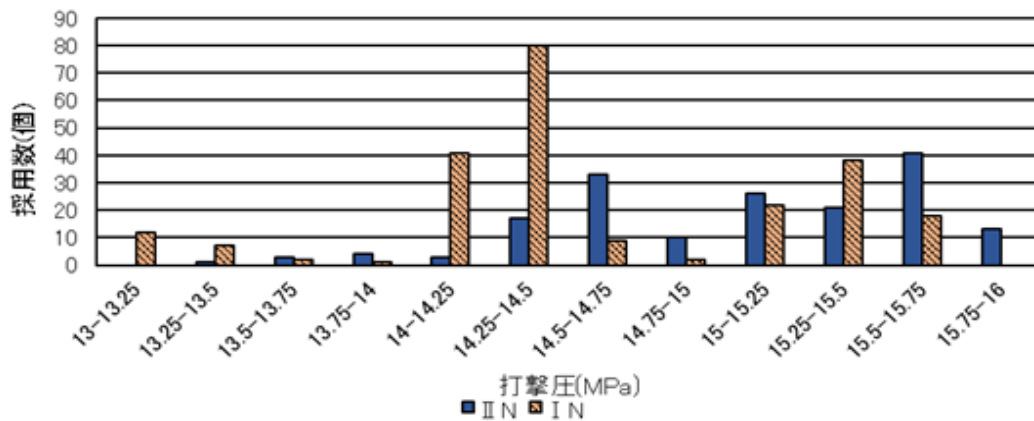


図 6.3.8 地山等級ごとの打撃圧分布 1

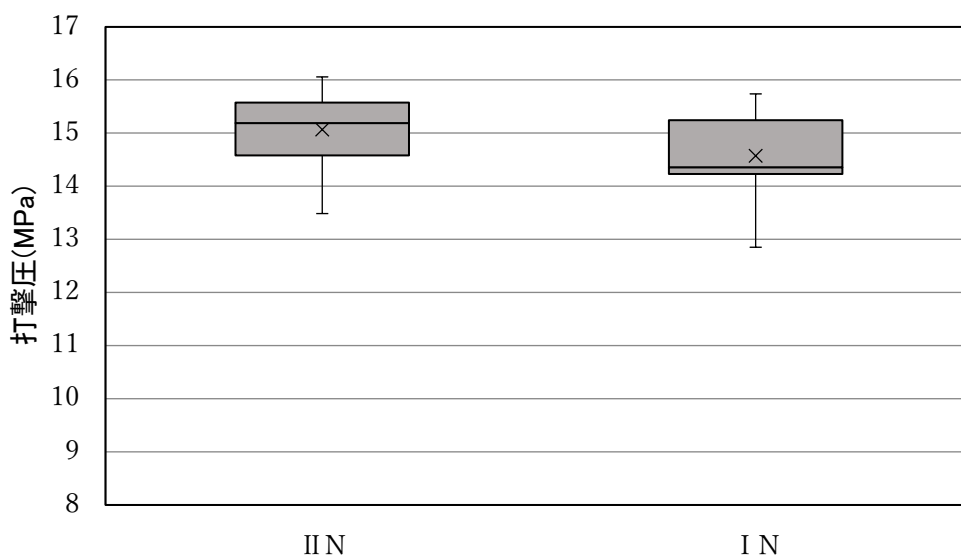


図 6.3.9 地山等級ごとの打撃圧分布 2

6.3.5 回転圧と地山等級との関係

回転圧は、ビットおよびロッドを回転させる圧力である。地山等級ごとの回転圧分布（図 6.3.10）より、地山等級Ⅱ_Nでは 5.0MPa より小さい値が多く、地山等級Ⅰ_Nでは 5.0MPa より大きい値が多いことが分かる。回転圧はⅡ_N とⅠ_N で分布割合に明らかな違いがみられ、Ⅱ_N の約 80%が 5.0MPa より小さく、Ⅰ_N の約 70%が 5.0MPa より大きい。この結果からは、回転圧は、地山等級を判定する指標となる可能性があると考えられる。

ボックスプロットを用いた分布を図 6.3.11 に示す。地山等級Ⅱ_N とⅠ_N で明らかに違いがある。地山等級Ⅱ_N の中央値が 4MPa 強、地山等級Ⅰ_N の中央値が 6MPa 弱であり、分布の中心付近 50%は、Ⅱ_N で 3.5～5.0MPa、Ⅰ_N で 5.0～7.0MPa に含まれている。これらの結果は、回転圧が地山の判定要素としての可能性を示している。回転圧は岩盤亀裂が多くなる、粘土化しているなどの場合、ビットやロット部分の摩擦抵抗が増加し、圧力が上がっているものと考えている。閾値は 5.0MPa で、それより小さい場合は地山等級Ⅱ_N、大きい場合は地山等級Ⅰ_N と判断する。

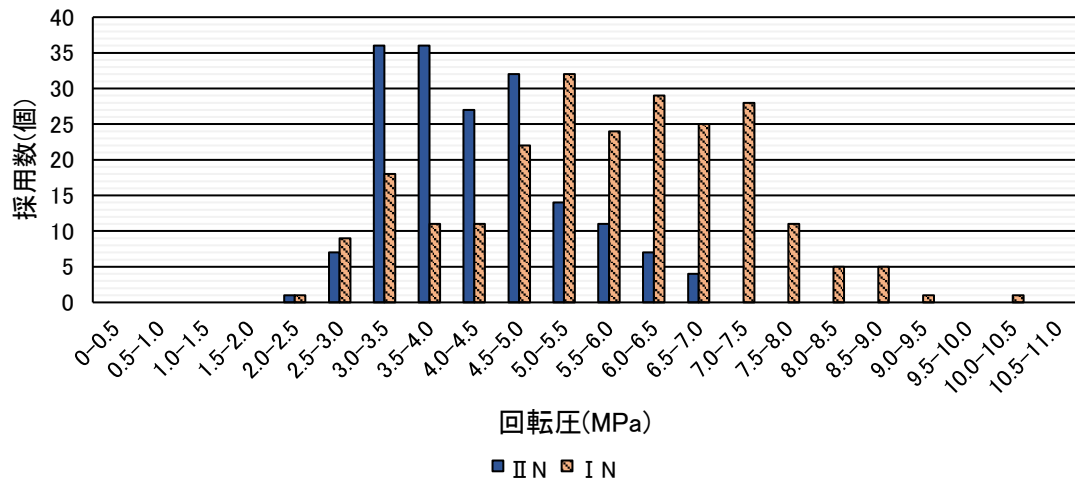


図 6.3.10 地山等級ごとの回転圧分布 1

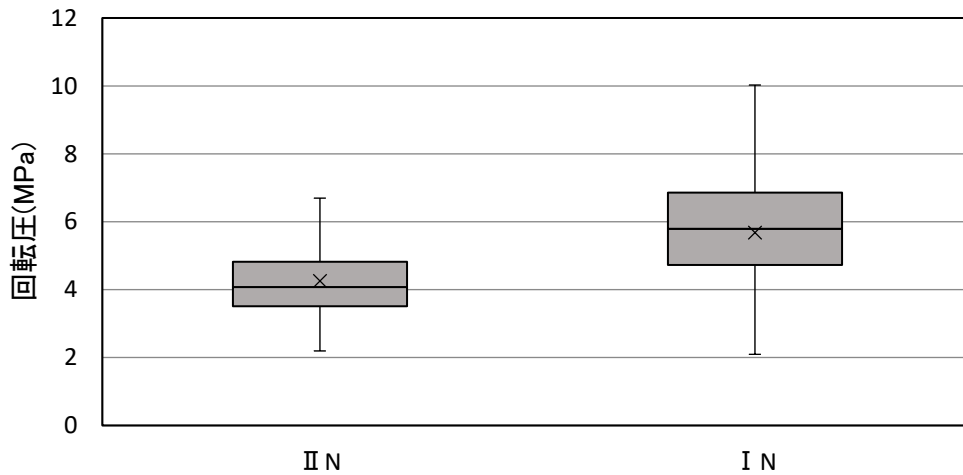


図 6.3.11 地山等級ごとの回転圧分布 2

6.3.6 打撃数と地山等級との関係

打撃数は、岩盤を穿孔するときビットが岩盤を打撃する回数であり、打撃が自動で制御されているので、岩盤が硬くなるほど打撃回数が増える。打撃数と地山等級との関係をヒストグラムに整理すると図 6.3.12 に示すように、地山等級 I_N では打撃数が少なく、地山等級 II_N では増える傾向にあることが分かる。地山等級 I_N の場合は 35 回以下に 66%、地山等級 II_N の場合は逆に 35 回以上に 62%が分布している。打撃数 35 回前後は地山等級の分岐点になると考える。

地山等級ごとのボックスプロットによる打撃数の分布(図 6.3.13)では、地山等級 II_N 、 I_N ともにばらつきが大きくなっている。とくに I_N は、0~55 回の間大きく散らばっている。これは、線状構造物であるトンネルの周辺地山の状態が一定ではなく、硬質な部分と軟質な部分が混在しているためと考えられる。打撃数の中央値は、地山等級 II_N で 38 回程度、地山等級 I_N で 23 回程度であり、回数にはばらつきがあるものの硬質な岩盤では、打撃回数が増える傾向にある。

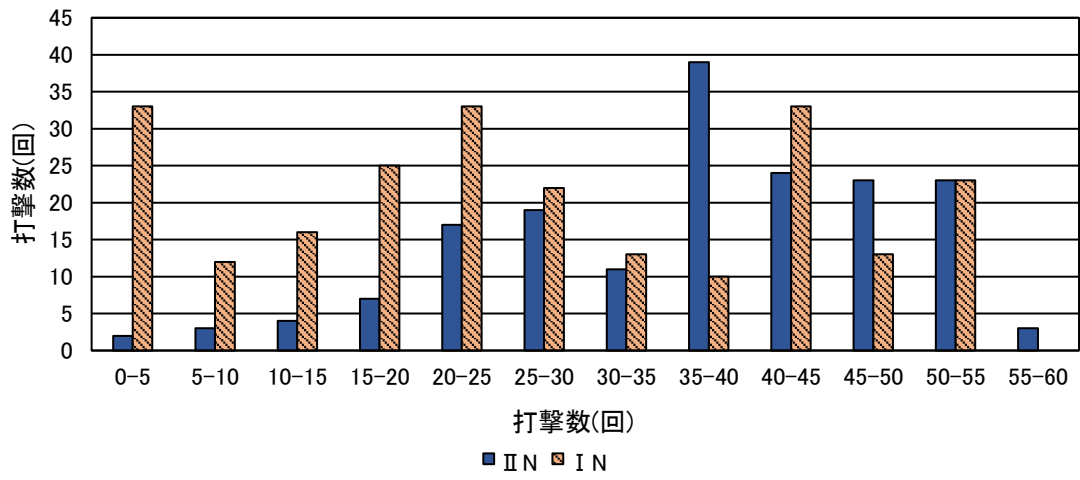


図 6.3.12 地山等級ごとの打撃数分布 1

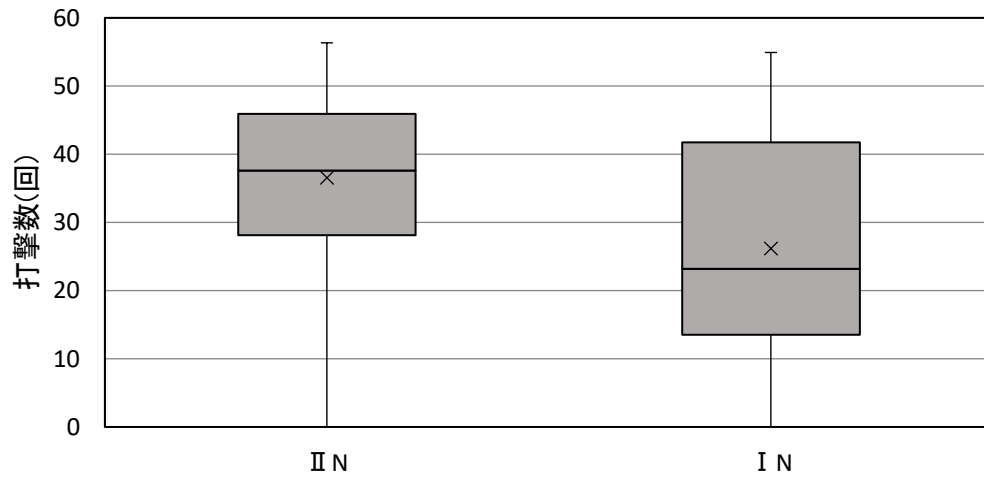


図 6.3.13 地山等級ごとの打撃数分布 2

6.3.7 分析結果のまとめ

穿孔データと地山等級との関係をヒストグラムとボックスプロットで表現し、検証した結果、穿孔エネルギー、回転圧、打撃数の分布においては、地山等級による穿孔データの分布割合に違いが見られた。

穿孔エネルギーでは、 $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下では地山等級 I_N 、 $350\text{J}/\text{cm}^3$ 以上では地山等級 II_N と判断する。

回転圧では、 5.0MPa より小さい場合は地山等級 II_N 、大きい場合は地山等級 I_N と判断する。

打撃数では、地山等級 I_N の場合は35回以下、地山等級 II_N の場合は35回以上と読み取れる。これらの結果から、穿孔データは、穿孔エネルギーの他に回転圧や打撃回数に地山等級を判定するための地山の特徴を示す可能性があると考えられる。

6.4 穿孔データの判別分析による検証

単体の穿孔データでは、いくつかの項目で地山の特徴を示す可能性があることを確認できた。そこで、各データの有効性および組合せによって判別精度を向上させることが可能かを検証するために、判別分析を行った。判別分析とは、単独あるいは複数の連続変数（ここでは主に穿孔エネルギー、穿孔速度、フィード圧、回転圧、打撃圧、打撃数を指す）によりどのグループ（ここでは I_N 、 II_N ）に属するかを判別する分析方法である。解析には、統計解析ソフト **JMP Pro** を用い、連続変数に等分散性が不要な二次判別法で行った。二次判別法では、二条距離が最小のグループに分類される。

一方、前節でフィード圧と打撃圧による影響について、人為的あるいは機械的に制御されていることを述べたが、この二つの項目も含めて連続変数とする場合、どのような影響があるかについて検証することにする。

得られた結果の判定には、間違ったグループと判定された誤判別の割合を用いる。誤判別の割合は、低いほどより明確に連続変数（穿孔エネルギー、穿孔速度、フィード圧、回転圧、打撃圧、打撃数）によるグループ（ I_N 、 II_N ）の分類ができることを示している。その結果から、どの連続変数がグループの判定に有効であるかを判断できる。

6.4.1 穿孔データの組合せの検証

連続変数として、穿孔エネルギー、取得した各穿孔データ単体、穿孔エネルギーを除いた全ての穿孔データ（以下穿孔データ 5 種）、穿孔エネルギーを含む全穿孔データ（以下穿孔データ 6 種）のそれぞれについて二次判別法で分析を行った。その結果について考察する。

表 6.4.1 と図 6.4.1 に纏めているように、穿孔エネルギーによる誤判別割合は 33.2% という結果になった。これは約 2/3 の割合で、穿孔エネルギーから地山等級 I_N と II_N の判別が可能であることを示している。すなわち、穿孔エネルギー結果のみから地山等級を推定した場合には、約 66% の割合で正しい地山等級を判定できることになる。それに対して穿孔速度、フィード圧、回転圧、打撃圧、打撃数のそれぞれの単体では、回転圧を除き誤判別割合が穿孔エネルギーで地山を判定した場合より大きくなっており、穿孔エネルギーによる判別より劣ることがわかる。しかし、回転圧単体では、28.5% という誤判別割合であり、穿孔エネルギーによる判別よりもやや優れた結果になった。

穿孔データ 5 種と穿孔データ 6 種による判別の誤判別割合は、それぞれ 16.7%、16.0% となり、穿孔エネルギー単体の判別よりも優れた結果になった。今回の分析では、穿孔データ 6 種を用いて判別した場合、約 84% の割合で判別が可能であることを示している。

表 6.4.1 組合せ別地山等級の誤判別割合

穿孔エネルギーのみ		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	199	33	14.2%	33.2%
	II N(175)	102	73	58.3%	
フィード圧単体		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	182	50	21.6%	35.9%
	II N(175)	96	79	54.9%	
打撃圧単体		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	152	80	34.5%	36.9%
	II N(175)	70	105	40.0%	
穿孔エネルギーを除く穿孔データ5種		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	187	45	19.4%	16.7%
	II N(175)	23	152	13.1%	
穿孔速度単体		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	202	30	12.9%	39.3%
	II N(175)	130	45	74.3%	
回転圧単体		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	145	87	37.5%	28.5%
	II N(175)	29	146	16.6%	
打撃数		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	126	106	45.7%	36.1%
	II N(175)	41	134	23.4%	
穿孔エネルギーを含む穿孔データ6種		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	196	36	15.5%	16.0%
	II N(175)	29	146	16.6%	

黄色着色部は誤判別の個数

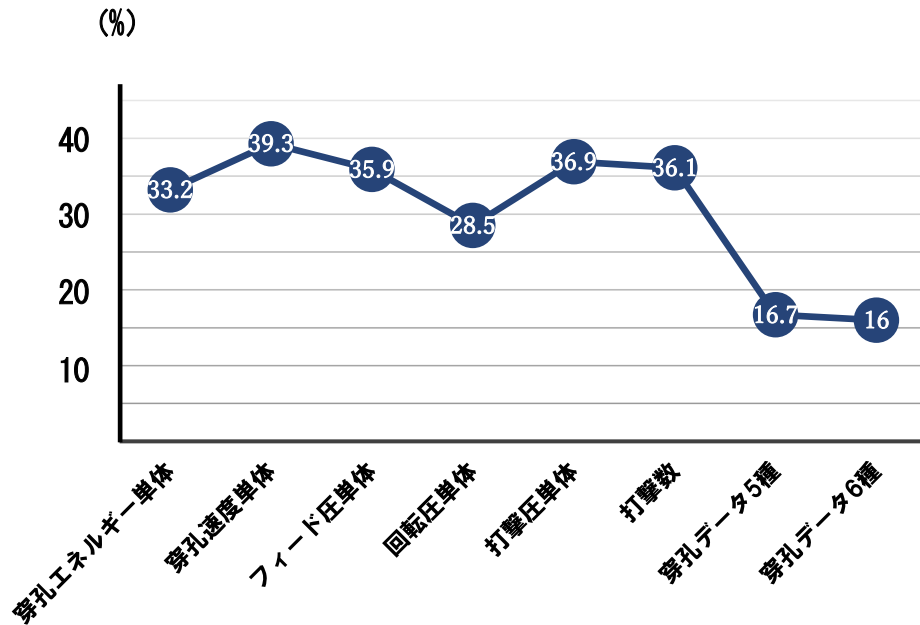


図 6.4.1 組合せ別地山等級の誤判別割合

6.4.2 平均するデータ範囲を広げた場合の検証

判別に用いた穿孔データは、地山等級を判定する切羽面の前後 0.5m の平均値をその切羽面における穿孔データの値として分析を行うことにした。次に、平均する範囲を広げ、切羽面の前後 0.5m の他に切羽面の前後 1.0m, 同 2.5m, 同 5.0m, 同 10.0m の平均値を対象の切羽面の穿孔データ値とした分析も行った。なお、平均化する条件として、ある切羽面で平均化に使用した穿孔データは次の切羽面で使用しない、平均化する延長が不足している場合は、不足したまま平均化することとした。

分析の組合せは、穿孔エネルギーのみ、穿孔エネルギーを含む全穿孔データ（穿孔データ 6 種）、それぞれについて同様の分析を行ったので、以下はその結果について考察する。

表 6.4.2 と図 6.4.2 に示すように、平均範囲の違いによって誤判別の割合が穿孔エネルギー単体で 2.7%、穿孔データ 6 種で 1.7% の違いが現れていることがわかる。穿孔データ 6 種を用いた判別では、範囲が切羽面の前後 5.0m 以上の平均値が最も誤判別割合が小さい値となっており、14.3%であった。これは、平均する範囲を増加させることで、部分的に硬質あるいは軟質な岩盤データを周辺地山と平均化することによって、誤判別割合を減らすことができたと考えている。このことから、短い区間の穿孔データでは、切羽全体の代表値としての課題があることがわかり、また、平均する範囲を切羽面の前後 5.0m 以上にした場合に誤判別割合が小さくなることを明らかにした。

表 6.4.2 平均するデータ範囲別誤判別割合

穿孔エネルギーのみ (切羽前後0.5m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合		穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 (切羽前後0.5m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合	
	I N	II N					I N	II N			
実測分類	I N(232)	199	33	14.2%	33.2%	実測分類	I N(232)	196	36	15.5%	16.0%
	II N(175)	102	73	58.3%			II N(175)	29	146	16.6%	
穿孔エネルギーのみ (切羽前後1.0m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合		穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 (切羽前後1.0m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合	
	I N	II N					I N	II N			
実測分類	I N(232)	198	34	14.7%	33.2%	実測分類	I N(232)	196	36	15.5%	15.2%
	II N(175)	101	74	57.7%			II N(175)	26	149	14.9%	
穿孔エネルギーのみ (切羽前後2.5m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合		穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 (切羽前後2.5m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合	
	I N	II N					I N	II N			
実測分類	I N(232)	197	35	15.1%	32.7%	実測分類	I N(232)	194	38	16.4%	14.7%
	II N(175)	98	77	56.0%			II N(175)	22	153	12.6%	
穿孔エネルギーのみ (切羽前後5.0m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合		穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 (切羽前後5.0m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合	
	I N	II N					I N	II N			
実測分類	I N(232)	198	34	14.7%	30.5%	実測分類	I N(232)	195	37	15.9%	14.3%
	II N(175)	90	95	51.4%			II N(175)	21	154	12.0%	
穿孔エネルギーのみ (切羽前後10.0m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合		穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 (切羽前後10.0m平均)	判別分類		誤判別割合	全体の 誤判別割合	
	I N	II N					I N	II N			
実測分類	I N(232)	198	34	14.7%	30.5%	実測分類	I N(232)	195	37	15.9%	14.3%
	II N(175)	90	95	51.4%			II N(175)	21	154	12.0%	

黄色着色部は誤判別の個数

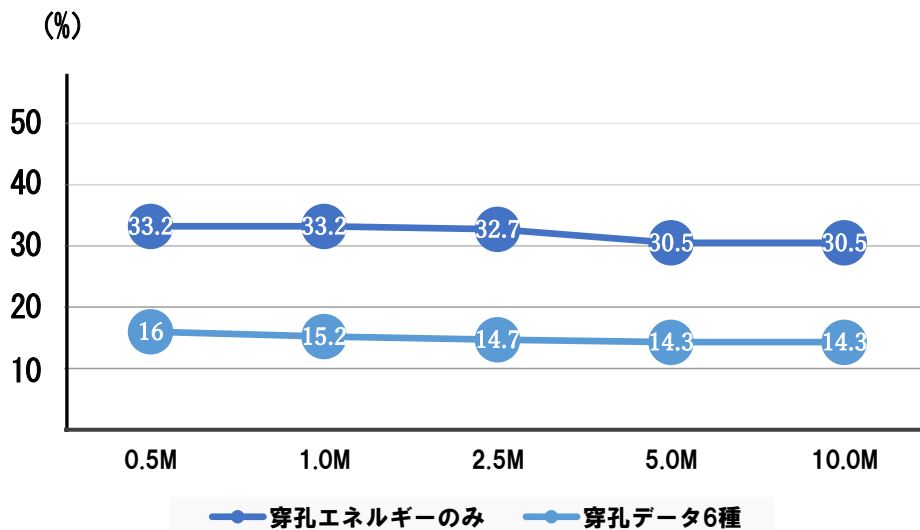


図 6.4.2 平均するデータ範囲別誤判別割合

6.4.3 他の要素を加えた場合の検証

誤判定の割合を小さくする方法として、穿孔データに他の情報を追加して判別する方法が考えられる。そこで、設計段階からわかっている地山条件の特性を示し、穿孔データと同区間で連続変数として取り扱うことが可能なデータを判別の指標として加える。これにより、穿孔データに他の要素を加えた場合に有効に働くかを検証する。なお、穿孔データに加える要素としては、土かぶりと弾性波速度を用いた。

判別に用いるデータの組合せは、土かぶり単体、弾性波速度単体、穿孔データ（6項目）と土かぶり、穿孔データ（6項目）と弾性波速度、穿孔データ（6項目）と土かぶりと弾性波速度との5パターンとした。また、穿孔データの値として、対象切羽面の前後0.5mの平均値と前後10.0mの平均値の2種類を採用した。得られた結果について以下のように考察する。

表6.4.3と図6.4.3に判別の結果を示すが、土かぶりだけによる判定では、誤判定の割合が27.0%となっている。坑口付近では I_N 、山の中心部付近では II_N が選択されていたものとする。弾性波速度単体による判定では23.3%であった。弾性波速度は設計時の地山等級の決定に用いられている指標であることから、本分析の妥当性が検証できたといえる。なお、誤判定となっている切羽は、施工時に地山等級が設計と違う等級に変更されたものと考えられる。

穿孔データによる判別と穿孔データに土かぶりと弾性波速度を加えて判別した結果を比較すると、平均範囲が対象切羽面の前後0.5m、前後10.0mの両方の誤判定割合が減少する結果となった。土かぶり、弾性波速度は、設計時に地山等級を決定するための参考資料であり、設計通りの地山等級を採用している場合は、有効に働いていると考える。

本研究では、判別方法に二次判別法を用いて、穿孔データ値に切羽面の前後10.0mの平均値を採用し、土かぶりと弾性波速度を追加した場合の判別のとき、誤判別割合が最小になり、その割合は11.8%となった。

表 6. 4. 3 他の要素を加えた場合の誤判別割合

土被りのみ		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	155	77	33.2%	27.0%
	II N(175)	33	142	18.9%	
弾性波速度のみ		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	211	21	9.1%	23.3%
	II N(175)	74	101	42.3%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 (切羽前後0.5m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	196	36	15.5%	16.0%
	II N(175)	29	146	16.6%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +土被り (切羽前後0.5m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	195	37	15.9%	15.0%
	II N(175)	24	151	13.7%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +弾性波速度 (切羽前後0.5m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	196	36	15.5%	16.7%
	II N(175)	32	143	18.3%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +土被り (切羽前後10.0m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	195	37	15.9%	14.3%
	II N(175)	21	154	12.0%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +土被り・弾性波速度 (切羽前後0.5m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	197	35	15.1%	14.7%
	II N(175)	25	150	14.3%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +土被り (切羽前後10.0m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	195	37	15.9%	12.3%
	II N(175)	13	162	7.4%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +弾性波速度 (切羽前後10.0m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	199	33	14.2%	13.5%
	II N(175)	22	153	12.6%	
穿孔エネルギーを含む 穿孔データ6種 +土被り・弾性波速度 (切羽前後10.0m平均)		判別分類		誤判別割合	全体の誤判別割合
		I N	II N		
実測分類	I N(232)	198	34	14.7%	11.8%
	II N(175)	14	161	8.0%	

黄色着色部は誤判別の個数

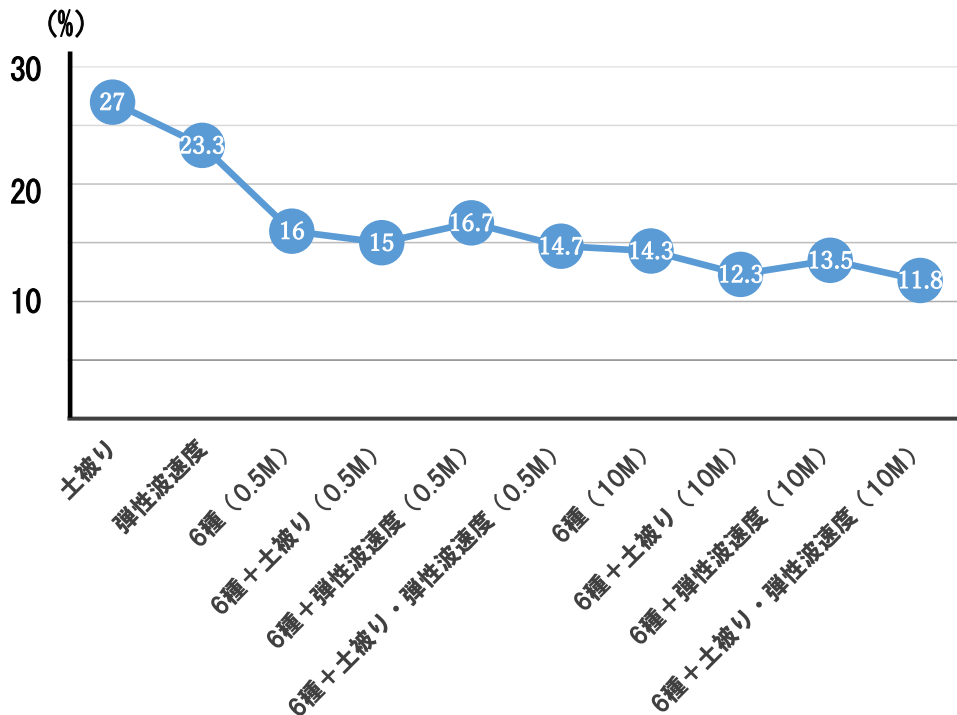


図 6. 4. 3 他の要素を加えた場合の誤判別割合

6.4.4 判別分析結果のまとめ

判別分析を用いた検証では，取得した穿孔データを単体もしくは組合せで地山等級を判別した．その結果，穿孔エネルギーを単独で用いた判別に比べて，個別の穿孔データを組み合わせて判別した方が，より正確に判別できることがわかった．また，対象切羽面の穿孔データとして採用するには，切羽面の前後 5.0m 以上の範囲の平均値を採用すれば，より正確に判別できることがわかった．さらに，穿孔時のデータに地山性状を示す他の要素を加えた方が，より正確に判別できることも確認できた．

6.5 まとめと考察

本研究では、実工事で実施した切羽前方への穿孔データを用いて地山等級を判別できるかについて詳細に分析して、以下の知見を得た。

- ① ヒストグラム、ボックスプロットを用いた穿孔データの分析では、穿孔エネルギー、回転圧、打撃数に地山等級の違いによる特徴が見られた。
- ② 判別分析の結果から、穿孔エネルギー単体で地山を判別するよりも、取得した全てのデータを組み合わせて評価する方がより地山等級を正しく判別できる。
- ③ 判別に用いる穿孔データの値は、切羽面の前後 5.0m 以上の平均値を用いることで、より精度よく判別できる。
- ④ 地山条件の特性を示し、連続変数として取り扱うことができるデータを追加した場合、判別に有効に働く。

本研究では、穿孔データを用いて地山等級の判別が可能であるかを検証した。ここで、地山等級としては2区分ではあるが、比較的高い割合で判別が可能であることを示した。また、判別の精度を上げる方法についても知見を得ることができた。しかし、これは施工後の判別であり、予測ではない。今回の検証から施工の初期段階で同様の手法でデータを収集し、分析を行うことで、その後の地山が同様の特徴を示す場合には、切羽前方の予測が可能になると考えている。

第6章によって得られた知見は、AIを用いた切羽前方予測にも応用が可能であると考えているが、実施工では、岩種、破碎や風化の程度、割れ目の方向、湧水状況などによりデータの特徴が変わってくることが予想される。このため、穿孔データから前方地山を予測するには、さらに様々な地山条件における膨大な教師データを用いてAI評価予測モデルを構築する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 木村哲, 大西有三, 西山哲, 石山宏二: 穿孔データを指標としたトンネル切羽前方の地山評価システムの研究, 情報地質, 第 16 巻, 第 3 号, pp.191-198, 2005.
- 2) 山田浩幸, 山本浩, 北野敬太, 藤田浩史: 小土被りの脆弱地山における切羽前方探査に基づく補助工法の施工に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 28 巻, I-38, 2018.
- 3) 阪口治, 山本浩, 山田浩幸, 蔣宇静: 軟弱地山トンネルにおける切羽前方探査の実施と効果に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 28 巻, I-31, 2018.
- 4) 村山秀幸, 岡崎健治, 山崎秀策, 倉橋稔幸, 亀村勝美: 切羽前方地質の調査方法と地山評価における現状と課題に関する考察, トンネル工学報告集, 第 29 巻, I-9, 2019.
- 5) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, p.46, 2016.

第7章 AIを用いた切羽前方の地山強度予測について

7.1 はじめに

トンネル地山の軸圧縮強度の測定は、切羽前方の地質を評価するための重要な要素のひとつである。一般的に、岩盤の軸圧縮強度を測定する場合、ボーリング時のコアサンプルを利用して室内の実験室で強度試験を行い、確認を行う。しかし、軸圧縮強度試験を行うには試験に必要なコアを採取することが条件で、岩石の強度が弱い、破碎されていて必要な長さの供試体が採取できないなどの場合には、容易に試験をすることができない。

また、トンネル掘削時には、岩盤の強度を早期に把握する必要があるため、シュミットロックハンマー、キャスボルなどによる岩強度を推定する方法が用いられている。これらの方法には、簡易で低コストという利点がある一方、現地で代表的な供試体を採取して試験を行うため、選ぶ資料によって結果にばらつきが生じる、露出している岩盤の強度の推定のみができるなどの弱点も持ち合わせている。また、これらの既存の試験方法では、切羽前方の地山強度を推定することは、非常に難しいと言える。

近年、探査技術の発展によって、切羽前方の地山性状の推定がされるようになっている。探査から得られた情報は効果的に分析される場合には、切羽前方の地山性状を予測するのに有効な方法となり得る。

切羽前方の地山性状を把握する方法として、穿孔探査法がある。この方法では一般的にトンネル掘削で使用されている削岩機を用い、切羽前方に向けて数mから数十mの穿孔を行い、穿孔時の油圧データを取得する。得られた穿孔データを分析することにより、切羽前方の地山性状を予測する。しかしながら、これらの予測方法は、得られたデータを最適に分析し、結果を導き出しているとは言えない。

取得できる穿孔データは、毎秒5個程度であり1回の穿孔探査では、数万個におよぶ膨大なデータが得られる。通常、得られたデータをグラフ化し、視覚的に分析を行っている、このような膨大なデータを生かして結果を得る方法として、ニューラルネットワークを用いた人工知能(ANN)がある。

ここ数十年で、ANNは急速に発展し、土木の分野でも用いられるようになっており、切羽画像を利用した落石予測¹⁾やトンネル湧水量の予測²⁾に関する報告がされている。ただし、ANNを構築するためには、教師データを用い、ニューラルネットワークを構築し、その後、膨大なデータを用いて機械学習を行う必要がある。その結果、ANNの判断の正確性が向上する。しかしながら、ANNの内部はブラックボックスになっていて、どのような判断基準で結果を導き出しているか不明な部分もあり、信頼性の高いANNを構築するには、その有効性の検証が必要である。

第7章では、人工知能(ANN)を用いて切羽前方地山の一軸圧縮強度(UCS)を推定し、その有効性を検証する。それらの結果から最適な予測モデルを提案するもので、本提案は、トンネル掘削において、品質、安全性の向上に寄与し、ライフサイクルコストを低減することが可能であり、社会に貢献することができるものである。第7章で示す切羽前方地山の一軸圧縮強度を推定するための概略図を図7.1.1に示す。

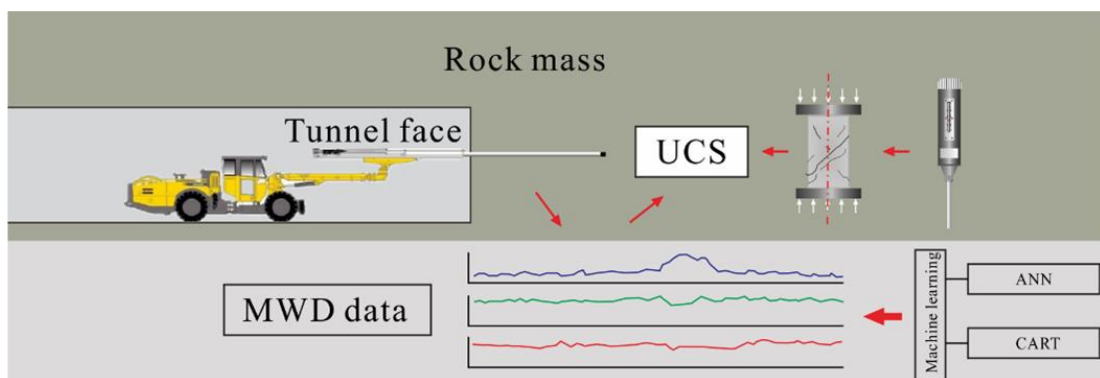


図 7.1.1 切羽前方の一軸圧縮強度推定手法の模式図

7.2 データの基本情報

7.2.1 使用するデータ

新長崎トンネル掘削時には穿孔探査による穿孔データや一軸圧縮強度などのデータを取得した。穿孔データは、切羽から前方に数十mを探査し、一軸圧縮強度は、切羽観察時にシュミットロックハンマーを用いて測定している。

しかし、いくつかの切羽観察時には、大量湧水などの影響で、一軸圧縮強度を測定することが困難であった。そのため、本稿で使用する穿孔探査データの分析はすべての観察データを用いて行ったものではない。

穿孔探査データは、トンネルの切羽作業である発破孔、ロックボルト孔の穿孔に使用するドリルジャンボを用いる。探査は、ドリルジャンボに搭載した油圧式ロータリーパーカッションドリルを用いて切羽前方の数十m区間を穿孔して、その時の油圧データを取得する。得られるデータは、穿孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧、打撃数とデータから計算される穿孔エネルギーである。

穿孔探査データ (MWD) と各パラメータとの関係を図 7.2.1 に示す。

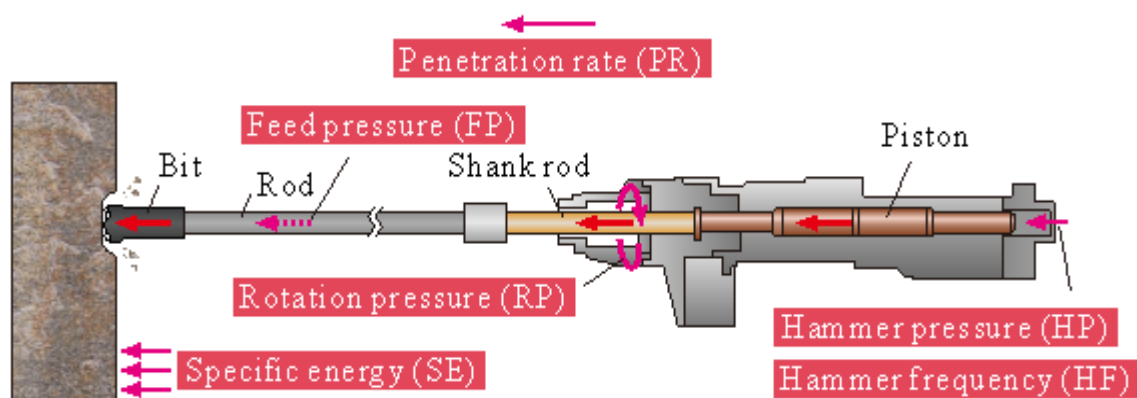


図 7.2.1 穿孔データ取得時の機械と取得データ

室内試験で実施する岩石の一軸圧縮強度試験は、時間と費用がかかるため、間接的に一軸圧縮強度を推定する方法であるシュミットロックハンマー試験を用いることが一般的である。この方法は、供試体の準備の必要がなく、現地の代表的な岩石を用いて試験を行い、すぐに結果が得られるという利点がある。シュミットロックハンマー試験の地盤工学会基準の測定方法は以下の通りである。

- ・代表的な地盤面において、15～50cm 四方の大きさを確保し、測定面内に9点以上の測定点を設ける。ハンマーで9点を打撃し、そのはね返り量を測定する。9点の平均値を求め、換算表から一軸圧縮強度を推定する。

新長崎トンネル東側工区の建設では、切羽の観察記録を用いてトンネル周辺地山を総合的に評価している。岩盤の一軸圧縮強度は、切羽観察の重要な要素のひとつであり、換算表（表 7.2.1）に基づいてロックシュミットハンマーの平均数値より算出する。

第7章では、新長崎トンネル東側工区工事において得られた1350箇所の切羽面の穿孔探査データと一軸圧縮強度を利用し、穿孔探査データから切羽前方地山の一軸圧縮強度を推定する。その方法は、インプットデータを穿孔データの、穿孔速度（PR）、打撃圧（HP）、回転圧（RP）、フィード圧（FP）、打撃数（HF）、穿孔エネルギー（SE）の6種類とし、アウトプットデータを岩盤の一軸圧縮強度（UCS）とする人工知能（ANN）を構築して推定する。使用するそれぞれのデータをボックスプロットで図 7.2.2 に示し、表 7.2.2 に統計的な数値にまとめた。これらのデータから、穿孔データは一部に異常値が含まれていることを確認した。本研究では、人工知能の正確さを評価するために、これらのデータをそのまま使用している。

表 7.2.1 シュミットロックハンマー強度換算表

反発値 (R)	一軸圧縮強度 (±0°)	一軸圧縮強度 (±45°)	一軸圧縮強度 (±90°)
10	5.0	5.9	6.3
11	5.4	6.4	6.8
12	5.8	6.9	7.3
13	6.2	7.4	7.8
14	6.7	7.9	8.4
15	7.1	8.5	9.0
16	7.7	9.1	9.7
17	8.2	9.8	10.4
18	8.8	10.5	11.2
19	9.5	11.3	12.0
20	10.2	12.1	12.9
21	10.9	13.0	13.8
22	11.7	13.9	14.8
23	12.6	14.9	15.9
24	13.5	16.0	17.0
25	14.5	17.2	18.2
26	15.5	18.4	19.5
27	16.7	19.7	20.9
28	17.9	21.1	22.4
29	19.2	22.6	24.0
30	20.6	24.2	25.7
31	22.1	26.0	27.5
32	23.7	27.8	29.4
33	25.5	29.8	31.5
34	27.3	31.9	33.7
35	29.3	34.2	36.0
36	31.5	36.6	38.6
37	33.8	39.2	41.3
38	36.3	42.0	44.2
39	38.9	44.9	47.3
40	41.8	48.1	50.6
41	44.9	51.5	54.1
42	18.1	55.1	57.9
43	51.7	59.0	61.9
44	55.4	63.1	66.2
45	59.5	67.6	70.8
46	63.9	72.3	75.7
47	68.5	77.4	80.9
48	73.6	82.8	86.6
49	79.0	88.7	92.6
50	84.7	94.9	99.0

一軸圧縮強度の単位は (N/mm²)

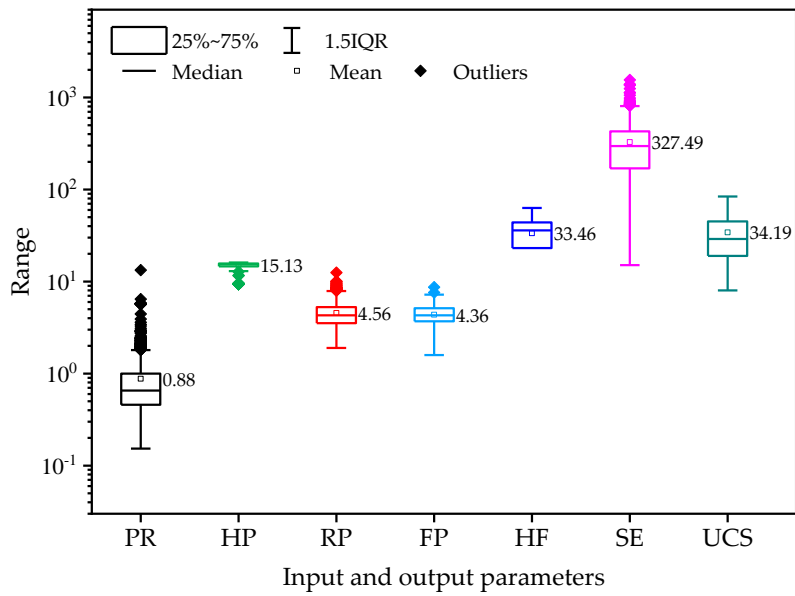


図 7.2.2 穿孔データの分布図

表 7.2.2 データセットの基本統計表

Item	Symbol	Unit	Mean	Min	Max	Std. Dev
Input	PR	m/min	0.88	0.15	13.30	0.80
	HP	MPa	15.13	9.40	16.10	0.97
	RP	MPa	4.56	1.90	12.50	1.35
	FP	MPa	4.36	1.59	8.70	1.05
	HF	1/s	33.46	0.00	63.00	13.96
	SE	J/cm ³	327.49	15.10	1549.80	191.40
Output	UCS	MPa	34.19	8.00	84.00	19.16

7.2.2 相関関係

次に、一軸圧縮強度の推定に使用する現場で取得した穿孔データ 6 種と岩盤の一軸圧縮強度の相関関係について検証する。分析に用いた各穿孔データ間の相関関係のマトリックスを図 7.2.3 に示す。

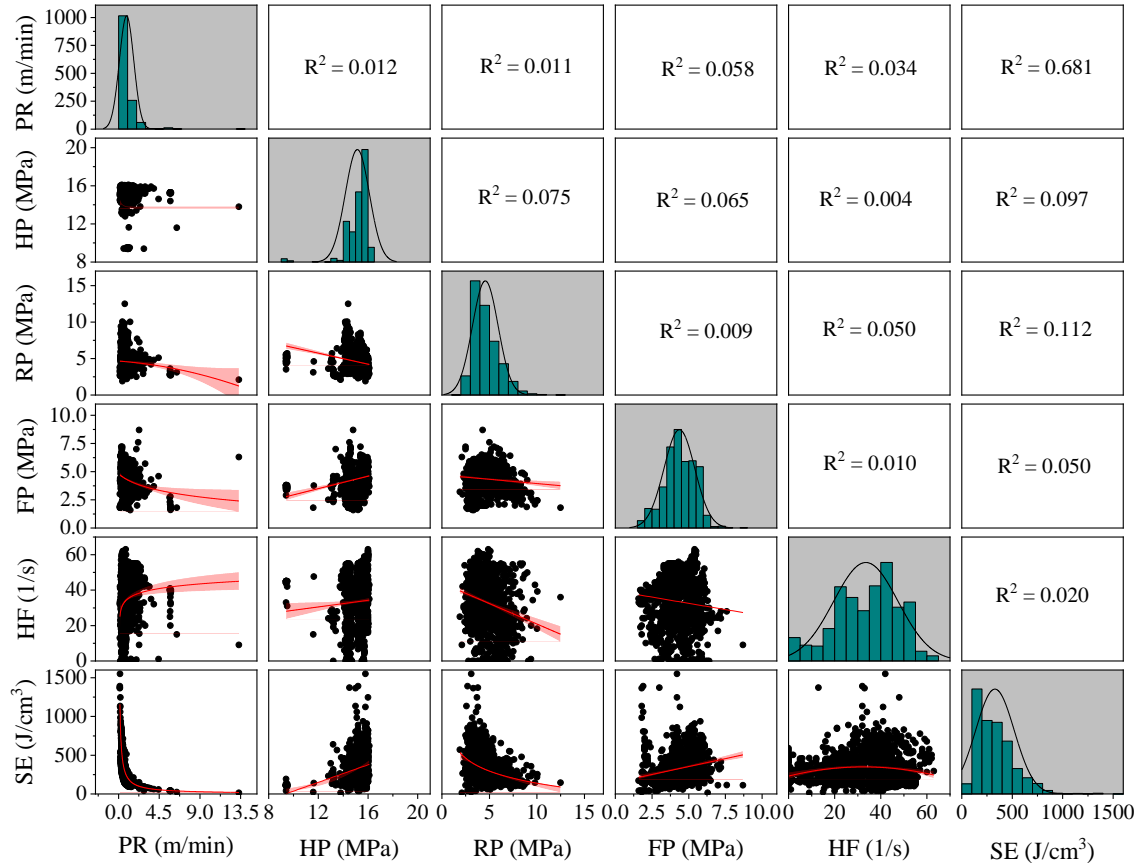


図 7.2.3 各穿孔データ間の相関関係

入力パラメータ (PR, HP, RP, FP, HF, SE) と出力パラメータ (一軸圧縮強度 UCS) の間の相関は、簡単な回帰モデルとして表すことができる。回帰モデルの性能評価は、予測値と実測値の差である予測誤差によって評価し、予測誤差が小さいほどモデルの性能が良いことを示す。評価の指標としては、相関係数 (R^2)、平均平方二乗誤差 (RMSE)、分散勘定 (VAF) が開発されたモデルの能力を評価するための指標として使用されることが多い。それぞれの指標を算出するために用いられる式を (7.1) ~ (7.3) に示す。

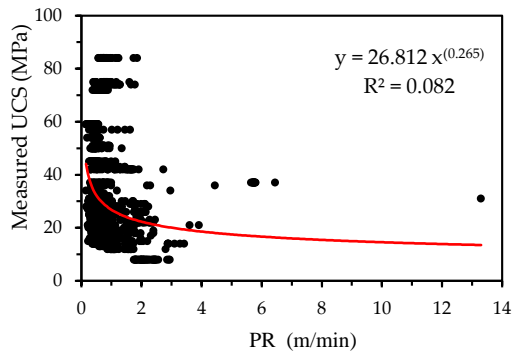
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y - y')^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (7.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - y')^2} \quad (7.2)$$

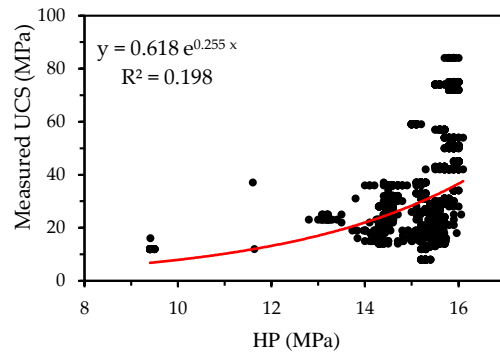
$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)} \right] \quad (7.3)$$

ここで、 y は i 番目の測定値、 y' は i 番目の予測値、 \bar{y} は y の平均値と n はデータのセット数を示す。
 R^2 と VAF の値が高く、 $RMSE$ の値が低い場合は、予測精度優れていることを示している。 R^2 が 1、 $RMSE$ が 0、 $VAF100$ の場合、モデルの精度は優れていると言える。

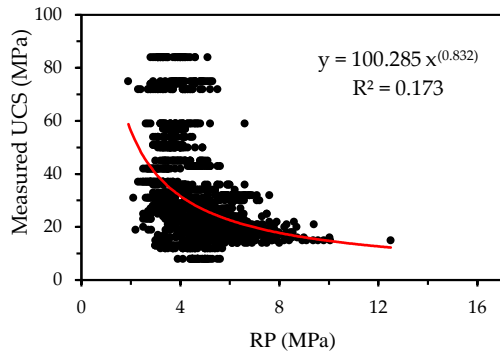
入力パラメータ (PR, HP, RP, FP, HF, SE) と出力パラメータ (一軸圧縮強度 UCS) の間の相関を単純な回帰モデルによって表した。地山の一軸圧縮強度を予測するための最も適切な方程式のタイプを評価する方法として、べき乗方程式、指数方程式、線形方程式がある。これらの方程式を相関係数 (R^2) で評価した。UCS の予測に使用した方程式を図 7.2.4 に示す。相関係数 (R^2) は、PR, HP, RP, FP, HF, SE について、それぞれ 0.082, 0.198, 0.173, 0.117, 0.003, および 0.276 となった。一軸圧縮強度 USC と穿孔エネルギー SE の間の相関は、他のパラメータの相関よりも優れている。ただし、弱い相関係数 ($R^2=0.276$) に留まっている。これらの結果から穿孔データを単一で使用した場合には、一軸圧縮強度との相関関係は低いと言える。したがって、穿孔データの全部、または一部を用いて予測モデルを開発するには、さらなる検証が必要である。



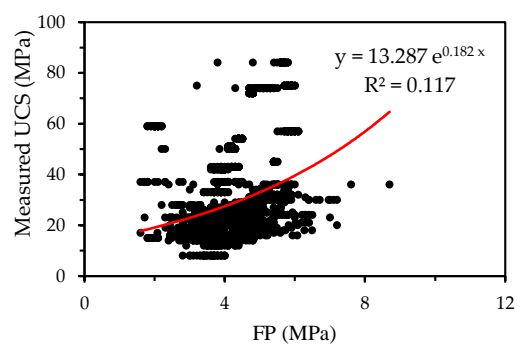
(a) PR



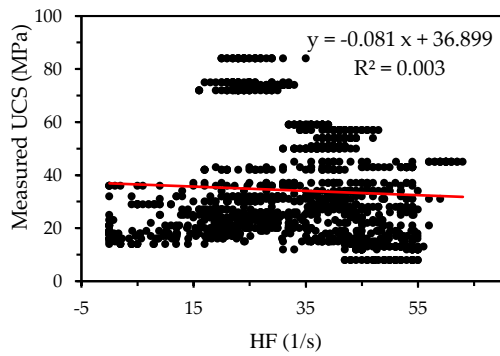
(b) HP



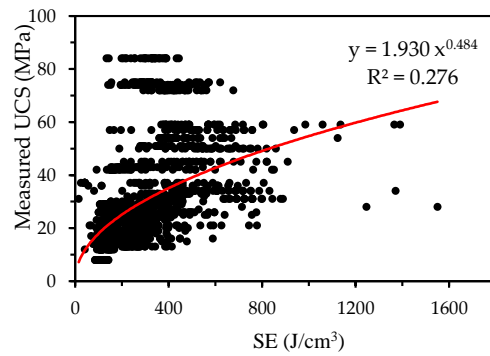
(c) RP



(d) FP



(e) HF



(f) SE

図 7.2.4 各穿孔データと一軸圧縮強度との回帰曲線

次節では、予測モデルを作成して、複数の穿孔エネルギーデータから一軸圧縮強度を予測する試みを行う。

予測モデルを開発する前に、予測結果に対する影響を最小限に抑えるために、データベースを式 (7.4) で、0~1 の範囲に正規化を行った。

$$X_{norm} = \frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \quad (7.4)$$

ここで、 X_{norm} と x は、正規化されたデータと測定データである。

x_{min} と x_{max} は、それぞれ最小と最大の値を表している。

予測モデルの開発に使用するデータをトレーニングデータとテストデータに分割した。

Swingler³⁾ (1996) , Looney⁴⁾ (1996) は、分割の割合として、80% , 75%をトレーニングデータとして使用することを提案している。本研究では、全 1350 個のデータをランダムに 80%

(1080 個) と 20% (270 個) に分割し、1080 個を用いて予測モデルを構築し、残りの 270 個を構築したモデルを評価するためのテストデータとして使用した。

7.3 予測モデルの確立

7.3.1 回帰分析による分類

線形重回帰分析 (MLR) は, 単純な線形回帰技術の開発に基づいており, 測定データから方程式を見つけて, 2つ以上の解釈変数 (特性) と従属変数 (出力) を両者の関係式として見つけ出す方法である. MLR は, 科学技術のさまざまな分野で広く利用されている. MLR に用いる式 (7.5) を以下に示す.

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + c \quad (7.5)$$

ここで, x_i , y , c および b_i は, i 番目の説明変数, i 番目の目的変数, 誤差, および回帰係数である.

一方, 多重非線形回帰方程式 (MNR) の形式は, 一般に, 説明変数 (入力変数) と目的変数 (出力変数) の関係より決定される.

本研究では, MLR と MNR の手法を用いて, 入力データの穿孔データ (PR, HP, RP, FP, HF, SE) と出力データの一軸圧縮強度を関連づけた. 式 (7.6) は線形回帰分析から得られた結果を示している. また, 式(7.7)は多重非線形回帰方程式 (MNR) から得られた結果を示している.

$$\begin{aligned} \text{UCS} = & -36.498 - 0.381\text{PR} + 5.052\text{HP} - 4.022\text{RP} \\ & + 2.776\text{FP} - 0.181\text{HF} + 0.021\text{SE} \end{aligned} \quad (7.6)$$

$$\text{UCS} = e^{-2.879 - 0.025\text{PR} + 0.443\text{HP} - 0.141\text{RP} + 0.095\text{FP} - 0.007\text{HF} + 0.0002\text{SE}} \quad (7.7)$$

穿孔データと一軸圧縮強度との関係を求めた MLR および MNR の評価については, 第 7.4 節で解説する.

7.3.2 人工ニューラルネットワーク (ANN) モデル

人工ニューラルネットワーク (ANN) は、生物の脳の機能を数学的にモデル化したものである。ANN は大規模なデータを並列的に処理できる構造である。ANN を有効に機能させるためには、生物学的なニューラルネットワークをデータ処理に適合させることである。多層階によるデータ処理は、ANN の発展した形である。一般的な ANN の構造は、入力層、1つ以上の隠れた階層、および出力層で構成されている。ANN モデルは、非線形の多変数を用いたモデルで高いパフォーマンスを発揮するため、地盤工学の分野における重要な手法の一つである。

インプットデータ (x_i) は、各処理層で重み付け (w_{ij}) され、閾値 (θ_j) が割り出される。この結果は、各階層で非線形伝達関数 f のインプット (H_j) として使われ、処理層のアウトプットデータ y_j を生成する。個々のアウトプットデータは次の層の個々のインプットとして使われる。このプロセスは式(7.8)と式(7.9)に要約できる。

$$H_j = \sum_i^n w_{ij} x_i + \theta_j, \quad (7.8)$$

$$y_j = f(H_j) \quad (7.9)$$

伝達関数は、活性化関数とも呼ばれ、ニューロン (ノード) または層の出力を実際出力とマッチするように設計されている。単純な線形または、非線形のステップ関数を含むこれらの伝達関数をどのような関数にするかは、ANN の目的によって異なる。

最も一般的な伝達関数は、シグモイド関数である。本研究では、伝達関数としてシグモイド関数を用いる。シグモイド関数の一般式を、式(7.10)に示す。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (7.10)$$

ANN に適用できる方式は数多くあるが、誤差逆伝播法 (BPNN) は最も一般的な方法である。

誤差逆伝播法 (BPNN) は ANN の学習時に効果を発揮する方法である。本研究の目的の1つが ANN に採用する重みを可能な限り最良にすることである。誤差逆伝播法 (BPNN) では、出力された結果に応じて各ニューロン (ノード) から次のニューロンへ伝達するときの重みを最適化してネットワークを構成する。

図 7.3.1 は、誤差逆伝播法 (BPNN) によるニューラルネットワークモデルの概念図である。BPNN モデルでは、入力データ (X_n) から複数の中間層を経由して出力データ (Y_n) を排出する。中間層には、複数の隠れ層が存在し、各隠れ層には、ニューロン (ノード) と呼ばれる判断が行われる節が存在する。各層のニューロンで判断が行われ、各ニューロンと繋がったエッジと呼ばれるネットワークを経由して次のニューロンへ伝達される。その時、重み付けが行われる。それらの処理を複数回繰り返し、出力データとして排出される。排出されたデータが間違っただけの結果を示していた場合には、重みの変更が行われる。図 7.3.2 にフロー図を示す。

上記内容の ANN モデルを構築し、入力パラメータ (PR, HP, RP, FP, HF, SE) から出力パラメーター (一軸圧縮強度 UCS) を予測する。

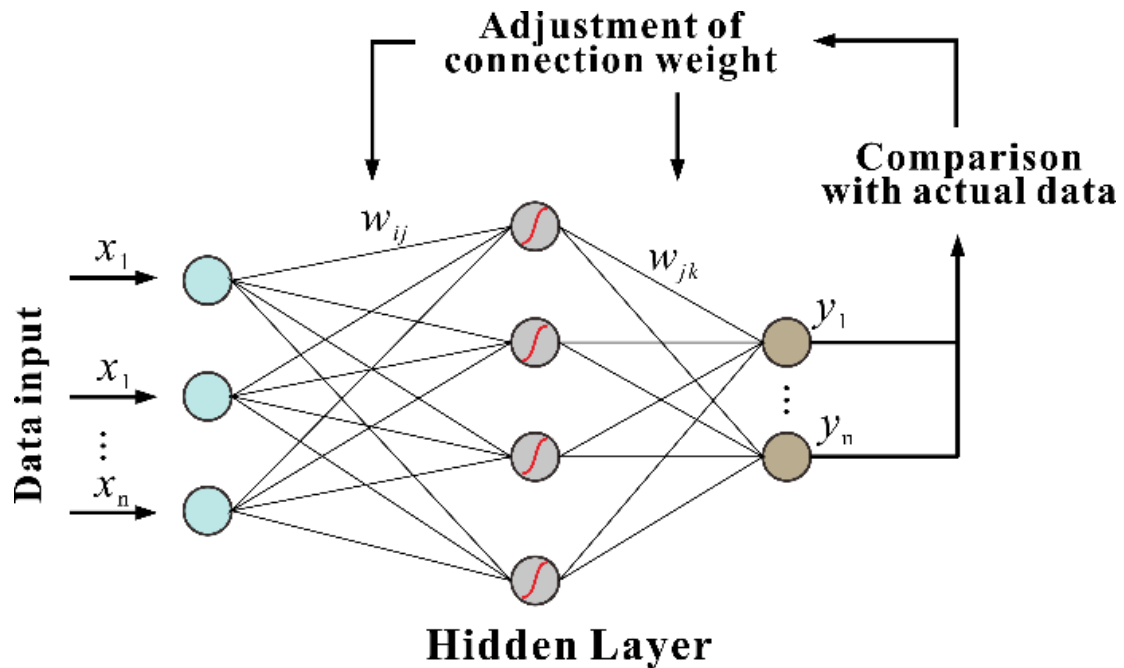


図 7.3.1 誤差逆伝播法のニューラルネットワーク構造

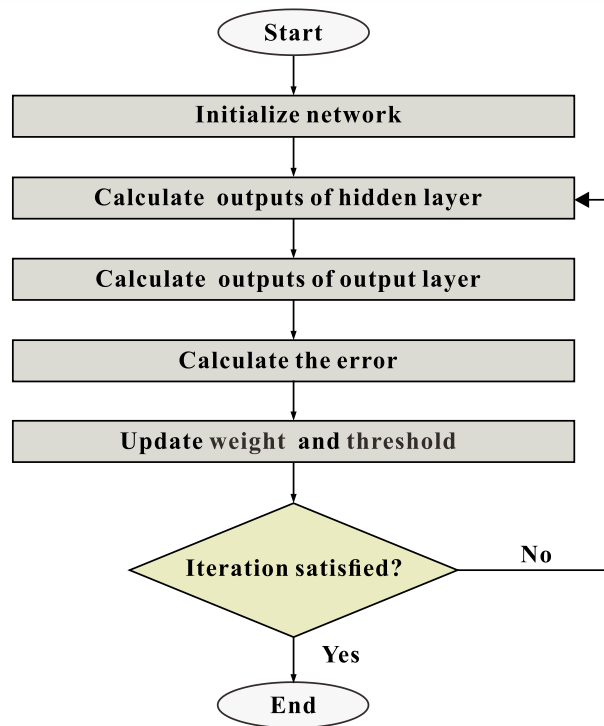


図 7.3.2 人工ニューラルネットワークを用いた手法のフロー

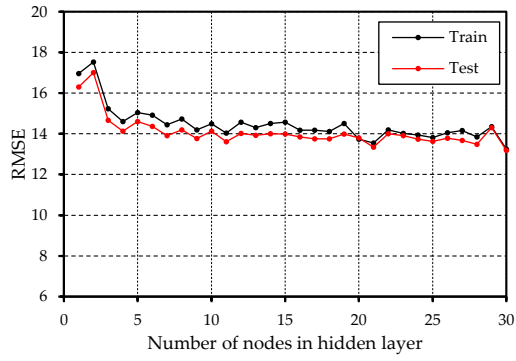
7.3.2.1 ANN のパラメータ

ANN の機械学習に効果的なパラメータは、学習率 (η)、運動量 (α)、隠れ層の階数、隠れ層のニューロン (ノード) 数である。ANN 予測モデルの確立は、これらの主要なパラメータを決定することである。一軸圧縮強度 (UCS) を予測するために、これらのパラメータを詳細に調べて、最適な ANN に用いるパラメータを決定した。Hasanipanah⁵⁾ ら (2016) の提案によると、Levenberg Marquardt algorithm (減衰最小二乗法 DLS) 法はニューラルネットワーク予測モデルの機械学習に使用できる。多くの研究者 (Hecht-Nielsen⁶⁾ 1987; Hornik et al⁷⁾ 1989) が紹介しているように、ANN が持つ隠れ層は、多数の技術的な課題を解決する能力を有している。したがって、この研究では、全ての予測モデルで隠れ層を使用して設計した。また、有効な ANN モデルを開発するためには、学習率、運動量、隠れ層の階数、隠れ層のニューロン (ノード) 数を決定する必要がある。

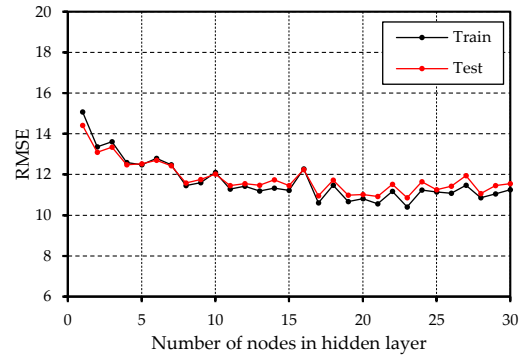
7.3.2.2 トレーニング機能

トレーニング関数は、一般に2つのタイプに分けられる。1つは、弾性逆伝播法(`trainrp`)や勾配降下法に従って重みと偏りの値を更新する可変学習率逆伝播法(`traingdx`)などのヒューリスティックアルゴリズムであり、経験則や先入観によって、効率よく答えを導き出す方法である。もう1つは、スケーリング共役勾配法 (Scaled Conjugate Gradient:`trainscg`)やレーベンバーグ・マルカート法 (Levenberg–Marquardt:`trainlm`)などの標準的な数値アルゴリズムである。最適なトレーニングの手法を選択するため、4つのトレーニング手法を用いて、モデルを開発した。

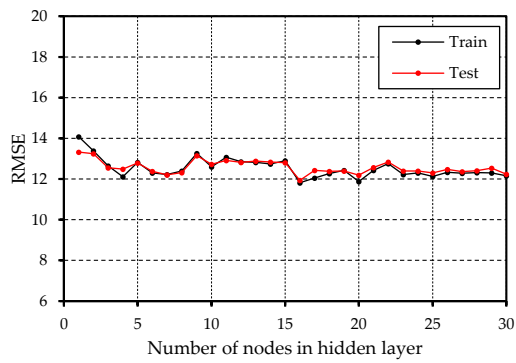
入力値6個、ニューロン(ノード)数15個、出力値1個の6-15-1のANN構造、0.01の学習率、0.5の動作量を使用してモデルを開発し、二乗平均平方根誤差(RMSE)を開発したモデルの評価基準として使用した。1~30の階層を持ったANNの機械学習結果を図7.3.3に示す。4つの中で、可変学習率逆伝播法(`traingdx`)の二乗平均平方根誤差(RMSE)が一番大きいことがわかる。4つの中では、レーベンバーグ・マルカート法 (Levenberg–Marquardt :`trainlm`)の結果がトレーニングとテストの両方で1番優れた結果となり、`Trainlm` が最も優れた機械学習の機能であることがわかった。



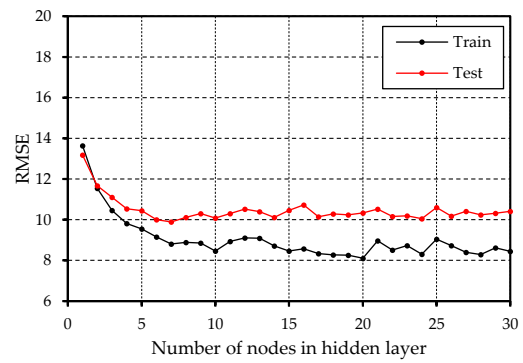
(a) Traingdx



(b) Trainrp



(c) Trainscg



(d) Trainlm

図 7.3.3 4 種類のトレーニング法によるノード数と RMSE の関係

7.3.2.3 学習率 (η) , 運動量 (α) のパラメータ

学習率 (η) と運動量 (α) の最適な値を得るために、0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 の学習率と 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 の運動量を用いて、ANN モデルを構築した。ANN モデルは、6-15-1 の構造として、Trainlm をトレーニング機能として採用した。

これらのモデルを評価する手法として二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。評価結果を図 7.3.4 に示す。RMSE が最も小さい学習率と運動量の値は、それぞれ 0.02, 0.9 とり、これらの値が最適な値と考えた。

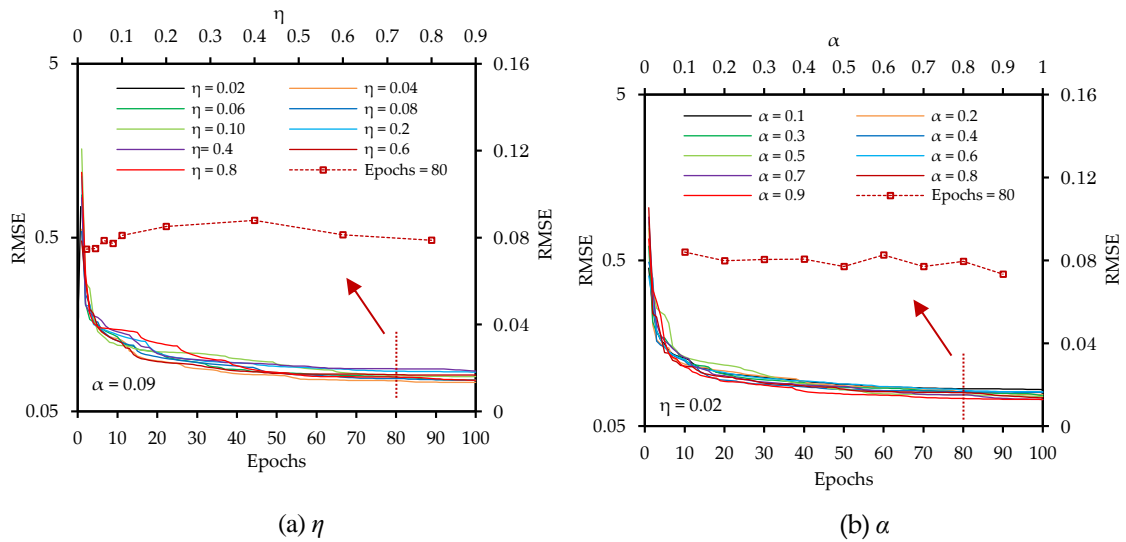


図 7.3.4 ANN に対する学習率と動作量

7.3.2.4 隠れ層のニューロン（ノード）数

隠れ層のノード数は、ANN の予測能力に大きな影響を与える。この影響を評価するために、付録（A）に示すように、1~60 の隠れ層を持ち、6 つの入力データから 1 つのデータを出力する、人工ニューラルネットワークを構築して、繰り返し実験を行った。

開発したモデルの予測能力を二乗平均平方根誤差（RMSE）と相関係数（ R^2 ）によって評価した。優れたモデルでは、二乗平均平方根誤差（RMSE）の値が小さく、相関係数（ R^2 ）の値が大きくなる。しかしながら、最適な予測モデルを導き出すのは非常に難しい。そこで、Zorlu⁸⁾(2008)からは、データの集合を一定の規則に従って並べるソート法に基づく簡易な方法を推奨している。この方法に基づいて、データを並び替えた。並び替えた値は、予測能力の高さを示す。

例えば、二乗平均平方根誤差（RMSE）の値 13.72, 11.87, 10.42, 9.86, 9.22, 9.75, 9.48, 9.22, 9.06, 8.42, 9.02, 7.98, 8.84, 8.87, 9.09, 8.30, 9.78, 7.95, 8.66, 8.64, 8.15, 8.50, 8.68, 7.81, 8.18, 8.39 は付録（A）に示すモデル 1~26 の機械学習の方法から取得した。そのときのソート法による結果は、それぞれ 1, 2, 3, 4, 9, 6, 7, 8, 11, 19, 12, 24, 14, 13, 10, 21, 5, 25, 16, 17, 23, 18, 15, 26, 22, 20 となる。

相関係数 R^2 も同様の計算を行った。付録（A）に示すように、学習段階とテスト段階をそれぞれならべ、合計をランク付けした。

付録（A）に示す通り、今回開発した全モデルの中で最も優れた能力を発揮したモデルが No.12 のモデルであった。平均 RMSE はそれぞれ 7.98, 10.11 であり、 R^2 はそれぞれ 0.827, 0.721 であった。したがって、6-12-1 の ANN 構造が、一軸圧縮強度を推定するためのモデルとして最良であると考えた。ANN の最適な予測モデルについては、7.3.3 項でさらに考察する。

7.3.3 遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic algorithm) を用いた ANN モデル

GA は、ミシガン大学の Holland 教授によって 1992 年に開発された。GA は最適化問題を解くためのコンピューターサイエンス分野のアルゴリズムであり、よりよい結果を導き出すヒューリスティックサーチアルゴリズム (発見的教授法) である。このアルゴリズムは、最適化および検索ソリューションで使用されている。GA では、遺伝、突然変異、自然淘汰、交配が使用される。単純な原理と操作で、一般的、制約なし、並列処理、幅広いソリューション検索機能を持つ利点があり、組合せの最適化問題で広く用いられている。ただし、最大の欠点は、活性化関数の選択が適切でない場合、GA が局所的な最適値にのみ収束し、全体の最適値に収束しない可能性があることである。GA プログラムは、生物学的に言うと、染色体適合性評価、親染色体選択、および親染色体への遺伝子演算子の適用という 3 つの段階に分かれている。生成された新しい染色体は次世代の集団になり、停止条件に達するまでこのプロセスが繰り返される。GA は優れた性能により、土木工学、交通工学、その他の工学分野で多数の採用実績がある。

最終的な収束と局所最適化の問題を解決するために、多くの研究者が GA を用いて ANN の重みと偏りを最適化し、多くの工学的な課題に用いて、結果を出している。今回、この GA と ANN を組み合わせてハイブリッドの人工知能 (GA-ANN) を構築した。その手法のフローを図 7.3.5 に示す。

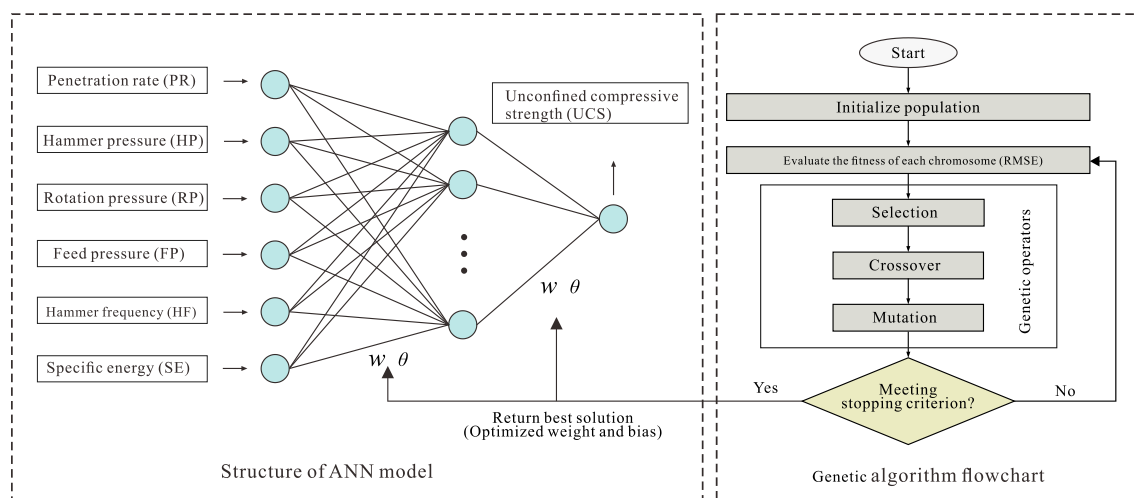


図 7.3.5 ANN モデルの構造と GA のフロー

7.3.3.1 GA パラメータ

GA モデルを開発するには、母集団のサイズ (Spop) , 選択方法, 世代数 (Ngen) , 突然変異確率, およびクロスオーバー確率 (異なる要素がお互いの境界を越えて交じり合う確率) の重要なパラメータをユーザーが設定する必要がある。この研究では、試行錯誤した結果、突然変異の確率を 25%、クロスオーバー確率を 70%とした。クロスオーバーの設定では、親から2つの子孫を作成することがよくあるため、本研究では、クロスオーバー操作にルーレット盤法を採用し、どちらか一方を選択する方法とした。

7.3.3.2 母集団サイズの評価

表 7.3.1 に示すように、最適な個体数を選択するために多くの GA-ANN モデルを開発した。モデルは、母集団サイズ (Spop) を 25~600 に、ANN 構造を 6-12-1 に、最大世代を 100 に設定した。前節と同様に、能力の評価指標として RMSE と R^2 を適用して開発したモデルを単純なランク付けをし、最適なモデルを選択した。総合順位の結果に示すように、モデル No.12 は他のモデルと比較して最高の予測性能を持っている。したがって、500 が最適な母集団サイズ (Spop) であると考えた。

表 7.3.1 GA-ANN による UCS 予測時の母集団数の違いによる影響

No.	Population size	GA-ANN results				Rank value				Total rank
		Training		Testing		Training		Testing		
		R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	
1	25	0.797	8.636	0.711	10.226	1	1	4	4	10
2	50	0.807	8.434	0.700	10.452	2	2	2	3	9
3	75	0.833	7.821	0.742	9.736	8	8	7	7	30
4	100	0.844	7.596	0.733	9.947	10	10	5	5	30
5	150	0.830	7.924	0.753	9.487	7	6	12	12	37
6	200	0.817	8.195	0.748	9.535	4	4	9	11	28
7	250	0.836	7.770	0.698	10.718	9	9	1	1	20
8	300	0.829	7.913	0.761	9.300	6	7	14	14	41
9	350	0.821	8.085	0.746	9.567	5	5	8	9	27
10	400	0.848	7.495	0.737	9.849	12	12	6	6	36
11	450	0.846	7.520	0.749	9.593	11	11	11	8	41
12	500	0.854	7.334	0.755	9.467	14	14	13	13	54
13	550	0.808	8.369	0.704	10.560	3	3	3	2	11
14	600	0.851	7.412	0.748	9.562	13	13	10	10	46

7.3.3.3 世代 (Ngen) の数

最適な世代数 Ngen を決定するために、世代数を 1000 として固定し、母集団 Spop を 25~600 の値として、様々な GA-ANN モデルを構築した。図 7.3.6 に示すように、全てのモデルの RMSE 値は、700 世代を超えてた段階で、収束して一定の値となっている。この結果から、世代数は 700 が最適であると考えた。

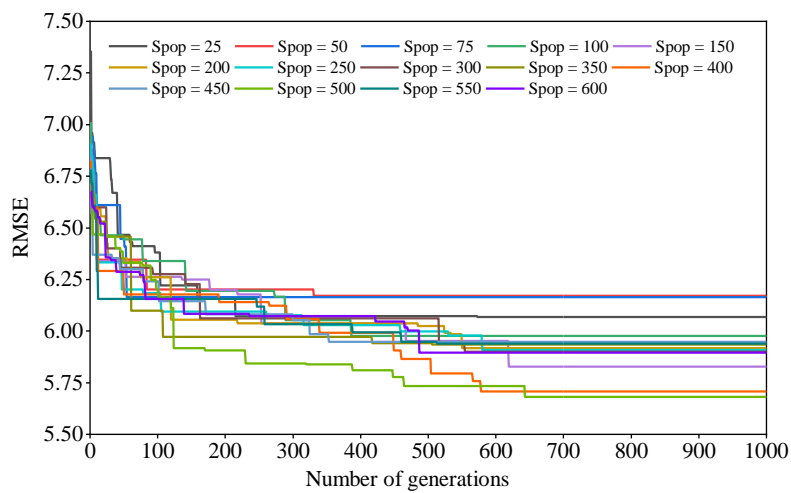


図 7.3.6 GA-ANN モデルの母集団の違いによる GA-ANN 世代数と RMSE の関係

7.3.3.4 ネットワークのモデリング

ハイブリッドモデルである GA-ANN モデルの構造を 6-12-1 として、最適な GA パラメータと組み合わせて人工知能を構築した。そして、構築したモデルに対して 5 回のトレーニングを実施して GA-ANN モデルとした。

7.3.4 デシジョンツリー（決定木）モデル

デシジョンツリー（決定木）は、予測モデルであり、一種の機械学習アルゴリズムである。決定木は樹木のような構造で、連なったモデルで構成されている。大きく分けると回帰分析と分類に分けられ、前者は、相関関係にある変数を用いて、答えを予測する方法であり、後者は、データの分類に用いられる。ツリー内の各ノード（節）はオブジェクトを表し、各フォークパスは可能な属性値を表し、各リーフノードは、ルートノードからリーフノードへのパスによって表されるオブジェクトの値に対応する。決定木モデル（CART）は、分類と回帰に適用できる古典的な決定ツリーアルゴリズムである。CART ツリー分類の主な手順は次の通りである。決定ツリーの生成、デシジョンツリーのプルーニング（影響力の小さい重みを削除して精度をなるべく落とさないようにパラメータの数を減らす方法）。今回の研究では、Metlab ソフトウェアを使用して、一軸圧縮強度（UCS）の値を予測する CART モデルを構築した。図 7.3.7 は、UCS 値を予測するために確立した最終的なツリー予測モデルを示している。

7.4 結果の考察

予測モデルの開発最終段階で、MLR, MNR, ANN, GA-ANN, CART の各モデルを上記のように開発した。これら5つのモデルを R^2 , RMSE, VAF を評価指標として用いて評価し、ランク付けを行い、表 7.4.1 に取りまとめた。合計ランクの値が大きいほど信頼性が高いことを示す。

また、開発した全てのモデルの総合的なランクを表 7.4.2 に取りまとめた。ANN モデル No.1 と GA-ANN モデル No.3 の合計ランクはそれぞれ 30 と 27 であり、モデリング手法のパフォーマンスが最も高いことを示している。

表 7.4.1 開発したモデルの性能指数

Type	Phase	No.	R^2	RMSE	VAF	Rank value			Total rank
						R^2	RMSE	VAF	
MLR	Training	1	0.365	15.324	0.365	1	1	1	1
	Testing	1	0.405	14.536	0.405	1	1	1	1
MNR	Training	1	0.456	14.222	0.453	1	1	1	1
	Testing	1	0.490	13.505	0.487	1	1	1	1
ANN	Training	1	0.846	7.538	0.846	5	5	5	15
		2	0.842	7.658	0.841	3	3	3	9
		3	0.774	9.149	0.774	1	1	1	3
		4	0.845	7.567	0.845	4	4	4	12
		5	0.828	7.968	0.828	2	2	2	6
	Testing	1	0.784	8.768	0.783	5	5	5	15
		2	0.770	9.120	0.767	4	4	4	12
		3	0.677	10.909	0.666	2	2	2	6
		4	0.764	9.174	0.763	3	3	3	9
		5	0.610	12.555	0.556	1	1	1	3
GA-ANN	Training	1	0.865	7.056	0.865	3	3	3	9
		2	0.881	6.629	0.881	5	5	5	15
		3	0.881	6.641	0.881	4	4	4	12
		4	0.845	7.600	0.844	2	2	2	6
		5	0.841	7.677	0.841	1	1	1	3
	Testing	1	0.802	8.430	0.800	3	3	4	10
		2	0.818	8.175	0.697	4	4	1	9
		3	0.819	8.102	0.815	5	5	5	15
		4	0.793	8.629	0.791	2	2	3	7
		5	0.783	8.892	0.779	1	1	2	4
CART	Training	1	0.938	4.77	0.938	1	1	1	1
	Testing	1	0.800	8.851	0.785	1	1	1	1

表 7.4.2 開発した全てモデルの総合ランク

Type	No.	Total rank
MLR	1	1
MNR	1	1
ANN	1	30
	2	21
	3	9
	4	21
	5	9
GA-ANN	1	19
	2	24
	3	27
	4	13
	5	7
CART	1	1

開発したそれぞれのモデルについて、もっとも良い性能を示したときの指標を表 7.4.3 に示す。結果は、ANN モデルを開発することにより、重回帰モデル (MLR) のパフォーマンスレベルを相関係数 R^2 で約 0.40 から約 0.78 に上げることができることを示している。さらに、GA-ANN モデルを開発することにより、 R^2 の数値で ANN モデルと比較すると、約 0.78 から約 0.82 にパフォーマンスレベルを向上させることができた。また、CART モデルを開発することによって、ANN モデルのパフォーマンスレベルを、 R^2 の値で約 0.78 から約 0.80 にすることができた。

表 7.4.3 それぞれの最適モデルの性能指数

Type	No.	Training			Testing		
		R^2	RMSE	VAF	R^2	RMSE	VAF
MLR	1	0.365	15.324	0.365	0.405	14.536	0.405
MNR	1	0.456	14.222	0.453	0.490	13.505	0.487
ANN	1	0.846	7.538	0.846	0.784	8.768	0.783
GA-ANN	3	0.881	6.641	0.881	0.819	8.102	0.815
CART	1	0.938	4.77	0.938	0.800	8.851	0.785

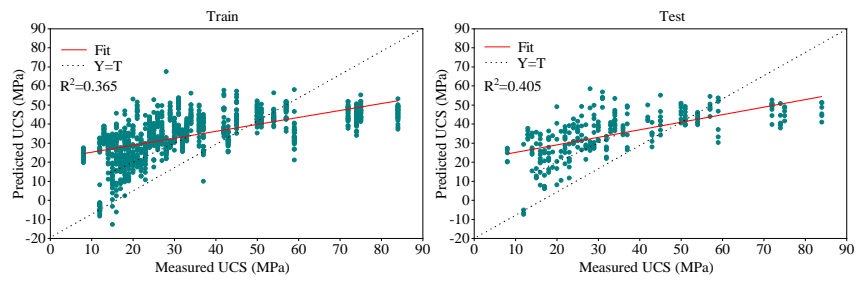
また、UCS の測定値と最適な MLR, MNR, ANN, GA-ANN, CART モデルで予測された予測値との相関係数 R^2 の値を図 7.4.1 に示す。次に、構築した 5 つのモデルを使用して USC の測定値と予測値を比較したグラフを図 7.4.2 に示す。これらの結果では、ANN, GA-ANN, および CART モデルが MLR, MNR よりも優れた予測能力を持っている。その中で、GA-ANN モデルが他のモデルと比較して、わずかに高い予測性能を持っていることを示している。

最後に、USC 予測性能に対する地質条件の影響を調査するために、新長崎トンネルで掘削した異なる 4 つ区間における地山条件を用いて比較テストを実施した。比較テストで使用した予測モデルは、本研究で開発し、性能が最も良いと判断した GA-ANN モデルであり、10 回予測したときの、相関係数 R^2 の平均値を評価指標として使用した。

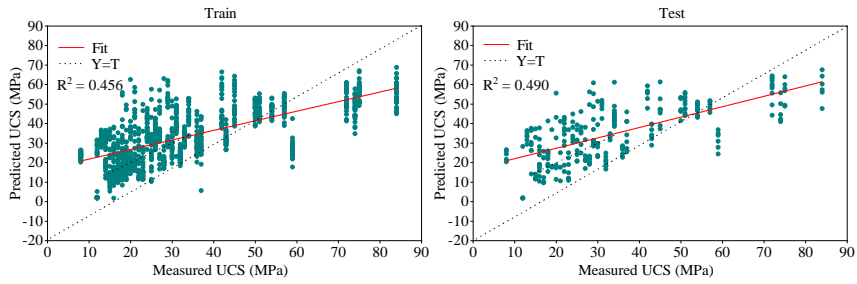
地山条件が良好な区間 1 と区間 3 の予測性能が、地質条件が悪い区間 2, 区間 4 よりも優れた予測結果になった (表 7.4.4)。この結果の理由としては、トンネル切羽の地質条件が良好であるほど、岩盤が周辺地山と一体化して同じ性状を示しており、単一のボーリング孔の穿孔データが切羽全体の代表値として使用できるためであると考えられる。したがって、機械学習アルゴリズムを用いて、一軸圧縮強度 (USC) を予測する場合、その予測性能は、トンネル切羽の地質条件の影響を受けると結論付けることができる。さらに、トレーニングサンプル数が少ない区間では、予測パフォーマンスが低下することを確認した。

表 7.4.4 異なる 4 区間における予測性能比較

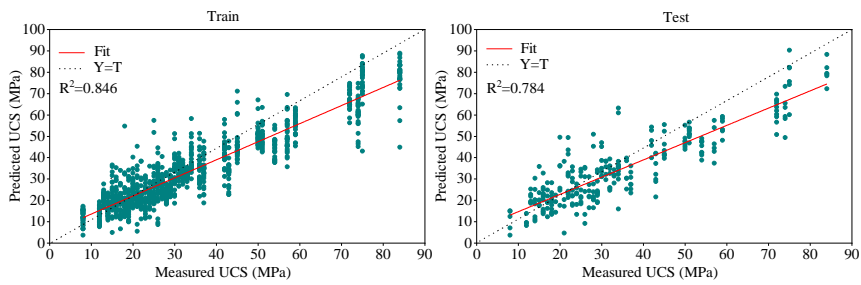
Interval	Geological conditions	Average R^2
Interval 1	Good	0.762
Interval 2	Poor	0.548
Interval 3	Good	0.732
Interval 4	Fair	0.273



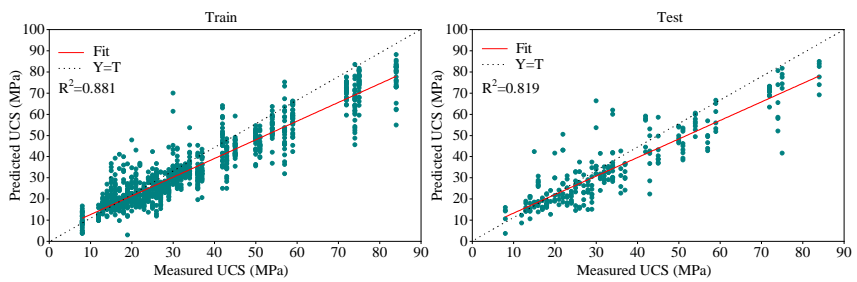
(a) The MLR model



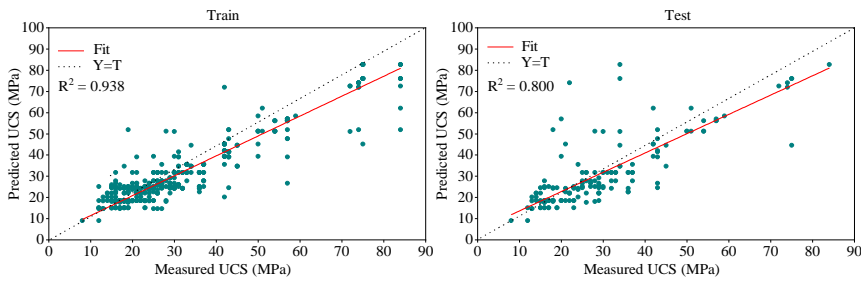
(b) The MNR model



(c) The ANN model

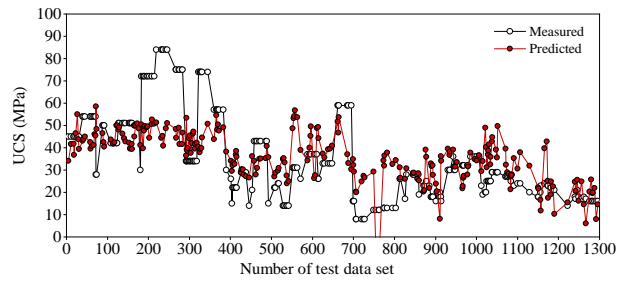


(d) The GA-ANN model

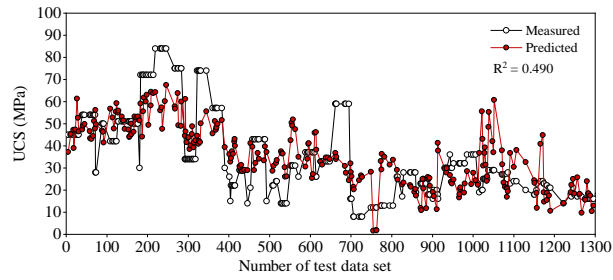


(e) The CART model

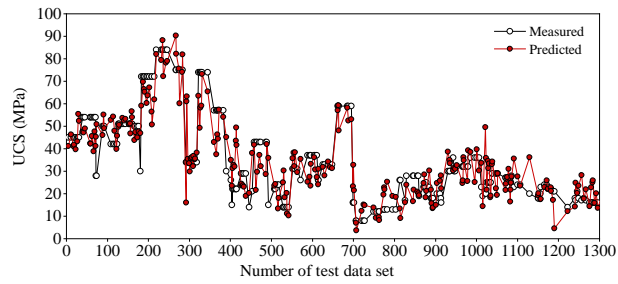
図 7.4.1 最適モデルの相関係数



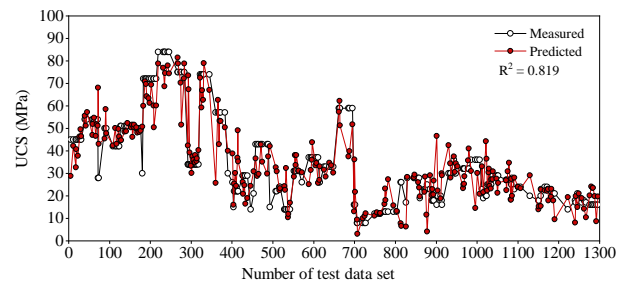
(a) The MLR model



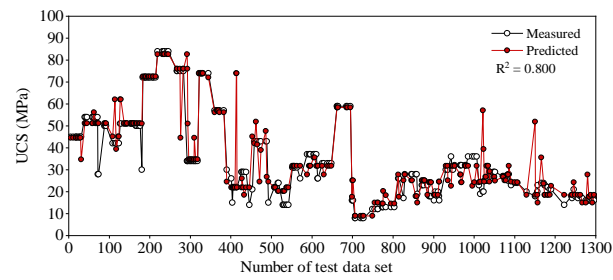
(b) The MNR model



(c) The ANN model



(d) The GA-ANN model



(e) The CART model

図 7.4.2 各最適モデルによるの UCS 予測

7.5 まとめと考察

トンネル掘削において、切羽前方探査データを利用した岩盤の強度予測は、トンネルを安全に掘削するための重要な要素を事前に知る術の1つである。人工ニューラルネットワーク (ANN) を利用した予測方法の利点の1つは、複雑な多変量非線形で示されるデータを処理できることである。しかし、ANN を用いた手法には、学習速度が遅く、極小値に陥りやすいという欠点がある。したがって、本研究では遺伝的アルゴリズム (GA) の最適化手法を用いて、ハイブリッドモデルである GA-ANN を開発し、切羽前方岩盤の一軸圧縮強度を推定した。しかし、ANN は内部がブラックボックスのモデルであり、モデルの予測結果に対して、各入力データの重要性や相互の関連性を判断することができない。そこで、分類や回帰分析から構成される決定木 (CART) を用いる手法を開発した。この手法はホワイトボックスであり、通常は解釈しやすく、内部の動作原理を説明しやすい構造となっている。

新長崎トンネル (東) 工事でトンネル掘削中に取得した穿孔データである穿孔速度 (PR) , 打撃圧 (HP) , 回転圧 (RP) , フィード圧 (FP) 打撃数 (HF) , 穿孔エネルギー (SE) の6つのパラメータからなる 1350 個のデータセットを用いて、6 つの穿孔データをインプットデータとしてアウトプットデータである一軸圧縮強度 (UCS) を推定することを目的として、ANN および GA-ANN を開発した。また、GA-ANN の予測性能を評価するために、MLR および MNR モデルも開発した。さらに、決定木 (CART) を用いる手法を開発した。

これらのモデルの比較方法として、 R^2 、RMSE、VAF の3つの性能指数で評価を行った。これらの結果から、GA-ANN モデルと CART モデルの性能が高いことが判明した。

また、地質条件がモデルに影響するかを調査するために、4つの異なる地質性状の掘削区間で性能を調査した。その結果、予測性能が切羽の地質条件に影響されていることがわかった。

今回、複数の予測モデルを構築し、比較した結果、GA-ANN と CAET の手法が一軸圧縮強度を推定するモデルとして優れていることがわかった。しかしながら、更に高い信頼性を得るためには、異なるモデルを組み合わせることが有効であると考えている。

トンネル切羽前方の岩盤の一軸圧縮強度は、ANN モデルを用いて穿孔データから推定するこ

とが可能であるが、今回の研究では、いくつかの問題点をさらに考慮する必要がある。

より効果がある最適化手法を適用して、予測精度をさらに向上させる方法や予測結果に対する穿孔探査パラメータの様々な組み合わせによる影響など。これらは、未解決の問題であり、今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 久保田恭行, 西山哲, 矢吹信喜, 福田知弘, 手塚仁, 尾畑洋, 村上治: 画像解析技術を用いたトンネル切羽の落石監視システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.77, No.2, L_77-I_88, 2021.
- 2) 齋藤和春, 渡辺邦夫, Mahesh Raj GAUTAN: 数理化理論およびニューラルネットワーク (ANN) によるトンネル湧水量予測に関する考察, 応用地質, 第42巻, 第3号, pp.170-180, 2021
- 3) Swingler K (1996), Applying neural networks: a practical guide. Morgan Kaufmann, Tayyebi A, Pijanowski BC (2014), Modeling multiple land use changes using ANN, CART and MARS: Comparing tradeoffs in goodness of fit and explanatory power of data mining tools. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 28:102-116.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.008>
- 4) Looney CG (1996), Advances in feedforward neural networks: demystifying knowledge acquiring black boxes. *IEEE Transactions on Knowledge Data Engineering*:211-226.
- 5) Hasanipanah M, Noorian-Bidgoli M, Jahed Armaghani D, Khamesi H (2016), Feasibility of PSO-ANN model for predicting surface settlement caused by tunneling. *Eng Comput*, 32:705-715. <https://doi.org/10.1007/s00366-016-0447-0>
- 6) Hecht-Nielsen R (1987), Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. In: the international conference on Neural Networks, New York, 1987. IEEE Press New York, New York, pp 11-14.
- 7) Hornik K, Stinchcombe M, White H (1989), Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, 2:359-366.
- 8) Zorlu K, Gokceoglu C, Ocakoglu F, Nefeslioglu HA, Acikalin S (2008), Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Eng Geol*, 96:141-158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.10.009>

Appendix (A) The results of the developed ANN models with different number of hidden layer nodes

Model No.	Nodes in hidden layer	Index	Result										Average result		Rank value		Total rank
			Iteration 1		Iteration 2		Iteration 3		Iteration 4		Iteration 5		Train	Test	Train	Test	
			Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test					
1	1	R ²	0.445	0.465	0.498	0.522	0.508	0.531	0.507	0.524	0.508	0.535	0.493	0.516	1	1	2
2	2		0.695	0.646	0.598	0.619	0.591	0.542	0.626	0.647	0.583	0.606	0.619	0.612	2	2	4
3	3		0.679	0.597	0.729	0.704	0.711	0.681	0.726	0.688	0.686	0.623	0.706	0.658	3	3	6
4	4		0.752	0.694	0.738	0.731	0.717	0.643	0.750	0.699	0.733	0.658	0.738	0.685	4	6	10
5	5		0.811	0.781	0.751	0.705	0.731	0.602	0.777	0.711	0.778	0.737	0.770	0.707	9	18	27
6	6		0.749	0.681	0.772	0.739	0.700	0.663	0.686	0.674	0.803	0.759	0.742	0.703	6	17	23
7	7		0.718	0.643	0.751	0.706	0.798	0.692	0.789	0.713	0.728	0.678	0.757	0.686	7	8	15
8	8		0.813	0.727	0.754	0.689	0.759	0.669	0.794	0.729	0.726	0.601	0.769	0.683	8	5	13
9	9		0.798	0.698	0.702	0.655	0.783	0.695	0.809	0.714	0.790	0.683	0.776	0.689	11	9	20
10	10		0.843	0.732	0.808	0.711	0.710	0.665	0.870	0.762	0.796	0.691	0.805	0.712	20	20	40
11	11		0.842	0.743	0.826	0.715	0.696	0.619	0.737	0.644	0.783	0.708	0.777	0.686	12	7	19
12	12		0.846	0.784	0.842	0.770	0.774	0.677	0.845	0.764	0.828	0.610	0.827	0.721	24	25	49
13	13		0.764	0.711	0.793	0.710	0.785	0.666	0.799	0.696	0.803	0.709	0.789	0.698	14	13	27
14	14		0.791	0.715	0.803	0.700	0.779	0.713	0.780	0.655	0.785	0.664	0.788	0.689	13	10	23
15	15		0.795	0.697	0.636	0.641	0.815	0.697	0.815	0.740	0.808	0.735	0.774	0.702	10	16	26
16	16		0.748	0.683	0.799	0.717	0.840	0.778	0.883	0.556	0.792	0.734	0.812	0.693	21	12	33
17	17		0.708	0.659	0.608	0.600	0.782	0.704	0.804	0.722	0.790	0.696	0.738	0.676	5	4	9
18	18		0.844	0.720	0.787	0.718	0.888	0.721	0.804	0.697	0.813	0.733	0.827	0.718	25	23	48
19	19		0.743	0.666	0.820	0.704	0.743	0.680	0.842	0.756	0.828	0.765	0.795	0.714	16	21	37
20	20		0.761	0.691	0.892	0.739	0.785	0.703	0.762	0.695	0.776	0.675	0.795	0.701	15	15	30
21	30		0.849	0.772	0.842	0.722	0.856	0.715	0.741	0.676	0.803	0.706	0.818	0.718	23	24	47
22	40		0.747	0.664	0.789	0.710	0.801	0.753	0.849	0.758	0.829	0.687	0.803	0.714	19	22	41
23	50		0.771	0.690	0.801	0.698	0.762	0.665	0.807	0.713	0.838	0.730	0.796	0.699	17	14	31
24	60		0.844	0.742	0.798	0.706	0.845	0.780	0.803	0.685	0.879	0.635	0.834	0.710	26	19	45
25	70		0.868	0.771	0.898	0.739	0.725	0.685	0.805	0.725	0.774	0.699	0.814	0.724	22	26	48
26	80		0.803	0.719	0.641	0.646	0.918	0.631	0.801	0.732	0.844	0.726	0.801	0.691	18	11	29

Appendix (A) Continue

Model No.	Nodes in hidden layer	Index	Result										Average result		Rank value		Total rank
			Iteration 1		Iteration 2		Iteration 3		Iteration 4		Iteration 5		Train	Test	Train	Test	
			Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test					
1	1		14.499	13.944	13.633	13.152	13.485	12.943	13.507	13.058	13.489	12.916	13.723	13.202	1	1	2
2	2		10.618	11.291	12.197	11.751	12.373	12.779	11.763	11.234	12.414	11.876	11.873	11.786	2	2	4
3	3		10.919	12.036	10.014	10.312	10.340	10.736	10.060	10.591	10.774	11.790	10.421	11.093	3	3	6
4	4		9.597	10.439	9.850	9.781	10.231	11.393	9.637	10.346	9.968	11.334	9.857	10.659	4	10	14
5	5		8.368	8.829	9.602	10.333	9.982	12.205	9.081	10.266	9.063	9.718	9.219	10.270	9	20	29
6	6		9.638	10.728	9.217	9.683	10.587	10.967	10.779	10.846	8.542	9.307	9.753	10.306	6	18	24
7	7		10.260	11.557	9.590	10.237	8.636	10.657	8.843	10.250	10.048	10.731	9.476	10.686	7	8	15
8	8		8.322	9.998	9.544	10.624	9.440	11.032	8.728	9.887	10.070	12.369	9.221	10.782	8	7	15
9	9		8.647	10.405	10.497	11.155	8.950	10.503	8.410	10.253	8.813	10.678	9.063	10.599	11	11	22
10	10		7.628	9.993	8.443	10.413	10.404	11.092	6.937	9.330	8.696	10.620	8.422	10.290	19	19	38
11	11		7.640	9.649	8.036	10.256	10.608	11.731	9.867	11.340	8.963	10.335	9.023	10.662	12	9	21
12	12		7.538	8.768	7.658	9.120	9.149	10.909	7.567	9.174	7.968	12.555	7.976	10.106	24	25	49
13	13	RMSE	9.346	10.277	8.748	10.418	8.923	11.132	8.624	10.432	8.536	10.307	8.835	10.513	14	13	27
14	14		8.799	10.113	8.526	10.429	9.047	10.099	9.023	11.203	8.959	11.143	8.871	10.598	13	12	25
15	15		8.764	10.532	11.701	11.461	8.277	10.613	8.290	9.739	8.430	9.816	9.092	10.432	10	16	26
16	16		9.827	10.955	8.638	10.239	7.697	8.970	6.580	14.303	8.768	9.802	8.302	10.854	21	6	27
17	17		10.421	11.234	12.158	11.987	8.982	10.347	8.509	10.070	8.840	10.688	9.782	10.865	5	5	10
18	18		7.590	10.276	8.885	10.158	6.434	10.482	8.520	10.544	8.328	9.879	7.952	10.268	25	21	46
19	19		9.756	10.989	8.170	10.555	9.745	10.800	7.645	9.436	7.972	9.151	8.658	10.186	16	23	39
20	20		9.410	10.629	6.334	9.991	8.917	10.348	9.421	10.506	9.123	10.921	8.641	10.479	17	15	32
21	30		7.477	9.079	7.641	10.135	7.298	10.506	9.784	10.796	8.529	10.366	8.146	10.176	23	24	47
22	40		9.666	11.066	8.835	10.276	8.581	9.425	7.481	9.306	7.949	10.931	8.503	10.201	18	22	40
23	50	9.207	10.616	8.576	10.598	9.394	11.018	8.456	10.262	7.778	10.032	8.682	10.505	15	14	29	
24	60	7.603	9.742	8.648	10.450	7.581	8.858	8.542	10.749	6.691	12.347	7.813	10.429	26	17	43	
25	70	7.002	9.278	6.154	10.052	10.095	10.648	8.488	10.003	9.150	10.425	8.178	10.081	22	26	48	
26	80	8.534	10.118	11.702	11.401	5.518	12.929	8.577	9.851	7.601	10.182	8.386	10.896	20	4	24	

第8章 結論

我が国の社会資本は高度経済成長期に集中的に整備され、建設後既に 30～50 年の期間が過ぎているものが多いことから、今後急速に老朽化が進行すると考えられる。

老朽化したインフラは、本来適切に補修・修繕を行い、機能維持を図ることが望ましいが、中には、適切な補修・修繕がされないことにより損傷程度が悪化し、供用することが出来なくなったインフラも発生している。補修・修繕が出来ない原因として、少子高齢化等による社会福祉費などの歳出の増加により、財政は急速に悪化しており、社会資本に費やす予算が限られている。また、インフラの管理者が維持管理・更新の役割を担っているが、予算や技術者の不足等により必ずしも十分でない。土木は経験工学といわれることもあり、技術者が現場で経験を積み、それが世代間で継承されていくことにより、技術的ノウハウの確保・蓄積が可能となるが、現状では担い手不足により、十分とは言えない。

山岳トンネルの分野においても同様に、構造物の老朽化と技術者不足が課題になっている。そのため、工事費の低減、工期の短縮、品質向上によるライフサイクルコストの低減、環境負荷などの社会的コスト低減、工事の生産性向上によるコスト低減が必要である。

計画段階においては、地山条件、立地条件等に関する必要な調査を行い、工事の安全を確保するとともに、将来の維持管理を含めた総合的なライフサイクルコストを低減する必要がある。特にトンネル工事の特性として、当初の調査結果のみで地形、地質、地下水等の状況などを完全に把握することが難しい場合が多く、施工中に遭遇する地山の状態によって、適切に当初計画を変更していく必要がある。しかし、大幅な変更は、工期、工費の増大を招き、好ましくない。

施工段階においては、トンネルを安全かつ経済的に施工するため、掘削中の地質調査を必要に応じて行うことが求められる。施工時には、調査、設計時に予測されていなかった地質状況に遭遇する場合や、予測しなかった問題が発生する場合がある。こ

のような場合は、速やかに必要に応じた地質調査を実施することが求められる。そして、適切な支保パターンを選択することで、品質を向上し、トンネルを安定させ、将来にわたって維持管理費の少ない構造物とすることができる。

このような目的のため、施工中に切羽前方探査を実施し、地山の評価を行っているが、現状では、定量的に評価をすることが難しく、適切な支保パターンを選択できていない場合もある。

そこで、本研究では実施工で取得した膨大な切羽前方探査データを詳細に分析し、前方地山を適切に評価する方法を提案することを目的として取りまとめている。

以下に、各章ごとのまとめを要約して結論とする。

第1章は、序論である。本章では、山岳トンネルを建設するときの設計手法の概要、設計時の地質調査の必要性、方法、問題点などを述べた。また、施工時に採用する支保パターンの決定手法の概要と掘削中に実施する前方探査の重要性について述べた。

次に、前方探査の方法の1つである削孔検層法の特徴と課題について述べ、課題を解決するための手法として、前方探査データの有効な活用方法を見出すことが必要であることを示し、研究の位置づけを行った。そして、本論文の構成を示した。

第2章は、既往研究と現状の課題である。本章では、既往の研究を年代ごとに整理し、切羽前方探査の方法とそれらの発展の歴史、また、課題とそれらの解決手法について整理を行っている。その結果、弾性波探査や削孔検層によって地山性状を把握する取り組みがなされているが、定量的に評価する段階にまで至っていないことが確認された。そこで、本研究では、施工時に実施した穿孔データと切羽観察記録との相関性を詳細に分析して、穿孔データから切羽前方の地山性状を定量的に評価することを目的とした。

第3章は、切羽前方探査技術についてである。本章では、掘削時の切羽観察記録を用いた地山等級を判定する方法と、切羽前方の地質状況を把握するための方法について整理し、それらの課題について考察を行った。また、本論文で使用している前方探査技術の方法、穿孔データの取得方法を解説した。また、一般的に行われている評価方法を解説するとともに、現場で行われた切羽前方探査の評価方法を示した。

第4章は、対象現場の特徴である。対象とした鉄道トンネルの設計手法について概説し、施工時に発生した突発湧水による切羽の崩壊の様子や支保工変状時のメカニズムなどを示し、切羽前方探査の重要性と有効性について考察した。そして、問題点を抽出し、本研究の意義を示した。

第5章は、穿孔データを用いた切羽評価点の判定についてである。トンネル支保パターン決定の重要な要素である切羽評価点を切羽前方探査で取得したデータから、予測する方法について、両者の関係を相関係数やヒストグラムを用いて示し、切羽評価点を予測する方法について検証し、穿孔エネルギーのほかに回転圧、フィード圧のデータが、地山状態の特徴を示す可能性があることを確認した。検証結果を取りまとめると、以下のとおりである。

- ① 切羽の状態と素掘り面の状態は、穿孔エネルギーが大きいほど評価点が小さく、 $350\text{J}/\text{cm}^3$ 以上で1点、以下で2点以上になる確率が高い。フィード圧は高いほど評価点が低く、 5.0MPa 以上で1点、以下で2点以上となる確率が高い。
- ② 圧縮強度は、穿孔エネルギーが $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以上で 1~2 点、以下で 3~4 点、回転圧は大きいほど評価点が大きく、 5.0MPa 以上で 3~4 点、以下で 1~2 点になる確率が高い。また、フィード圧は大きいほど評価点が低くなり、 4MPa 以上で 1 点、以下で 2~4 点となる確率が高い。
- ③ 風化変質は、穿孔エネルギー $250\text{J}/\text{cm}^3$ 以上で1点、以下で2~4点の確率が高

い.

- ④ 破砕部の切羽に占める割合は， $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下のとき，破砕部が高い確率で出現する.
- ⑤ 割れ目の頻度は，穿孔エネルギー $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の場合には3~4点の確率が高く，回転圧は， 5MPa 以上で3~4点，以下で1~2点となる傾向が強い.

第6章は，穿孔データを用いた地山等級の判定についてである．第5章の研究結果から，切羽評価点を用いて地山等級の選定に必要な評価項目すべてを予測することは難しいことが判明したため，穿孔データを用いて支保パターン決定の重要な要素である地山等級を判定する方法について，判別分析を用いて様々な条件における穿孔データと地山等級の関係についての分析を行った．その結果，穿孔エネルギーのみで，地山等級を判定するよりも，取得した穿孔データすべてを用いた判別の方が有効であることがわかった．また，より判別の精度を上げようとする場合には，他の要素を判別の材料とすることが有効であることがわかった．得た知見を以下に述べる．

- ① ヒストグラム，ボックスプロットを用いた穿孔データの分析では，穿孔エネルギー，回転圧，打撃数に地山等級の違いによる特徴が見られた．
- ② 判別分析の結果から，穿孔エネルギー単体で地山を判別するよりも，取得した全てのデータを組み合わせて評価する方がより地山等級を正しく判別できる．
- ③ 判別に用いる穿孔データの値は，切羽面の前後 5.0m 以上の平均値を用いることで，より精度よく判別できる．
- ④ 地山条件の特性を示し，連続変数として取り扱うことができるデータを追加した場合，判別に有効に働く．

第7章は，AIを用いた切羽前方の地山強度予測についてである．AIを用いて地山の軸圧縮強度を推定する方法について，ANNモデル，GA-ANNモデル，また，MLR，

MNR, CART の各モデルを開発し、様々な検証を行って、それぞれの有効性を考察し、ランク付けを行った。その結果、GA-ANN モデルと CART モデルの性能が高いことが判明した。

今回、複数の予測モデルを構築し、比較した結果、CAET の手法が最も妥当な地山の一軸圧縮強を推定することができた。

トンネル切羽前方の岩盤の一軸圧縮強度は、AI を用いたモデルで穿孔探査データから推定することが可能であるが、より信頼性が高い AI モデルとするには、いくつかの問題点をさらに考慮する必要がある。より効果がある最適化手法を適用して、予測精度をさらに向上させる方法や予測結果に対する穿孔探査パラメータの様々な組み合わせによる影響など。これらは、未解決の問題であり、今後さらに検討する必要がある。

本研究成果として、切羽前方の地山を判定する手法として AI モデルを開発した。これらのモデルを進化、機械学習させることで、さまざまな地山に対応したモデルとすることができる。そして、これらの判定手法は今後の経験が少ない技術者にとっての一助になると考えている。

謝辞

本論文は、著者が長崎大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に行った切羽前方探査時に機械の油圧データを利用して取得する穿孔データを用いて行う切羽前方評価手法の確立方法について行った研究成果を纏めたものです。本論文を纏めるにあたり、長崎大学大学院工学研究科の蔣 宇静教授をはじめ、多くの方々にはご指導ならびにご鞭撻を賜りました。

蔣 宇静教授には、研究の方向性を示して頂くとともに研究の各段階において的確な指導や方向修正、また多忙な業務のなかで研究を進めていく上でのご助言を頂きました。長期の在籍期間になりましたが、長い間ご指導いただきまして、感謝申し上げます。

また、論文の内容構成などについて、大嶺 聖教授、奥松俊博教授より貴重なご指摘とアドバイスを頂き、感謝申し上げます。

本論文を取り纏めていく過程のなかで、学会等の多くの公表論文を読み、先輩の方々の多くの知見を確認しました。このことは私にとって今後の大きな財産であり、非常に有意義な時間であったと思います。

また、本研究に関するデータ整理やグラフの作成、また、解析業務などお手伝いいただきました学生のみなさまに感謝申し上げます。特に長崎大学大学院の劉 建康氏には人工知能の構築あたり協力を頂き、張 学朋氏には海外での学会発表にあたり大変お世話になりました。膨大なデータの整理には、石津綜大氏にデータを整理いただき、心より御礼申し上げます。

蔣 宇静先生をはじめこれまでご指導頂いた多くの方々に書面を借りて感謝いたします。本当にありがとうございました。