



Title	ベイズの推定を用いた屈折法地震探査と速度検層による岩盤弾性波速度の推定精度の向上
Author(s)	岡崎, 健治
Citation	北海道大学. 博士(理学) 甲第12870号
Issue Date	2017-09-25
DOI	10.14943/doctoral.k12870
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/71516
Type	theses (doctoral)
File Information	Kenji_Okazaki.pdf



[Instructions for use](#)

博士学位論文

ベイズの推定を用いた屈折法地震探査と速度検層
による岩盤弾性波速度の推定精度の向上

岡崎 健治

北海道大学大学院理学院
自然史科学専攻
平成 29 年 9 月

目次

1. 序章	
1.1. 研究の背景と目的	1
1.2. 研究概要	2
2. 岩盤評価における現状と課題	
2.1. 弾性波速度による地山評価	3
2.2. 変状を生じたトンネルにおける岩石の劣化事例	7
2.3. 岩石に生じる亀裂の評価	14
2.4. まとめ	31
3. 屈折法地震探査と速度検層の岩盤弾性波速度の分析	
3.1. 既存資料の収集と分析	32
3.2. 地表からの深さに応じた弾性波速度	36
3.3. 事前調査時と施工時の地山分類の適合状況	39
3.4. まとめ	42
4. ベイズ推定による岩盤評価法の提案	
4.1. ベイズ推定の概要	43
4.2. P波速度の統計分析	46
4.3. ベイズ推定による屈折法地震探査によるP波速度の補正	51
4.4. トンネル計測データを用いた検証	53
4.5. まとめ	63
5. 結論	64

参考文献

謝辞

1. 序章

1.1. 研究の背景と目的

地質工学的課題を有する岩盤，とくに，熱水変質作用を受けた火山砕屑岩類等の岩盤に建設された土木構造物は，その完成後に押し出しや変形等の変状の発生した事例が多数報告されている．これらの変状は，岩盤の掘削に伴う応力解放，新たに空気や地下水との接触等の環境や状態の変化を受けて，経時的に地質性状に変化が生じることに起因している．また，このような変状は，中～長期的に岩盤の劣化が進行することで生じる場合がある．この変状の補修や対策は，地域社会や道路利用者の安全安心，利便性，経済性等の観点から，大きな課題となっている．このため，地質調査時や施工時に岩盤状態をより正確に把握するための評価方法を確立する必要がある．

一般に，地下に分布する岩盤の強度等の物理的性質を推定する方法として，物理探査法が用いられている．物理探査法は，地表からの物理量の測定結果に基づき，地下内部の岩盤における物理的性質を推定する．そのため，現地の地形や地表条件によって，測定できる場所が限られることがある．また，測定データには，自然に存在するノイズや人工的ノイズが含まれる．解析によるデータ処理においても，必ずしもすべてのノイズが除けるわけではなく，解析手法に含まれる一意性等，その精度には一定の限界があることが指摘されている．

しかし，このような問題を有しても，物理探査法による地下岩盤の評価法は，実用的に多く用いられている．とくに，屈折法地震探査によって得られるP波速度は，岩盤の強度特性と関係があり，トンネル，ダム，斜面および道路工事等における岩盤を対象とする作業を安全かつ経済的に進めるため，岩盤強度の事前評価法として使われている．

その信頼性は，上記のような問題があるため，疑問視されることも少なくない．このようなP波速度による評価法の精度を向上させるためには，実際に地下に分布する岩盤での測定結果と比較して検証していくことが必要である．また，そのような測定値を参照する補正法も必要である．

1.2. 研究概要

本研究では、はじめに、岩盤評価における現状と課題を整理するため、トンネルの地山分類の実態を分析するとともに、トンネルの完成後に発生した変状事例を収集して、その原因を分析した。また、実際に変状が生じたトンネルを対象として、その施工時の地質調査や計測データを変状の発生箇所と未発生箇所と比較した。あわせて、変状の補修対策時に採取した岩石について、経時的な変化を把握するため、一定の時間を経過した後、同じ試験を行うことで、岩石自体の変化や試験結果の違いについて分析した。

次に、地下における岩盤の観察や直接測定が連続的に可能であるトンネルの掘削作業で得られる豊富なデータを用いて、地表探査から得られる屈折法地震探査のP波速度と、トンネル孔内で得られる速度検層のP波速度のデータを収集分析し、それらの間に差が生じる原因について議論を行った。また、地下岩盤の速度を推定する際に、ボーリング等で取得したコアの試験結果から岩盤の評価を行うことがあるが、そのようなコアは、取得後、短期間のうちに亀裂が発生し、それを岩盤評価に用いると大きな誤差が生じる可能性があることを明らかにした。しかし、この速度検層のP波速度は、局所的な値であり、その広がりや推定し、たとえば、現在の掘削地点よりも先の岩盤の評価を行うためには、この孔内の測定値を用いて屈折法地震探査による弾性波探査の値をより正しい値に補正して用いることが必要と考えられる。また、そこで得られた補正值は、他の場所における補正法の根拠としても用いることができる。

そこで、屈折法地震探査で得られるP波速度を事前分布、先進ボーリング孔内の速度検層で得られるP波速度を尤度としたベイズ推定を行い、これまでに、いくつかのトンネルで複数測定された屈折法地震探査のデータを、新たに追加した複数の速度検層のデータで補正したP波速度を事後分布として得る方法を提案した。

このようなベイズ推定による統計的扱いは、補正法として、これまで使われたことがなく、物理探査結果を参照した岩盤評価を改善させる一つの有力な方法と考えられる。また、この方法は、今後の地下岩盤のP波速度の推定精度を向上させるとともに、電磁気探査、重力探査、磁気探査法等の他の物理探査法による岩盤評価法に適用できる可能性を含むものである。このため、断層の周辺や火山内部の岩盤の評価等、広く地球物理学に関連する分野への発展も期待できる。

2. 岩盤評価における現状と課題

2.1. 弾性波速度による地山評価

トンネルの地山分類（国土交通省北海道開発局 2017）は、屈折法地震探査により得られる P 波速度を主な指標として行われている。

表 1 に地山分類表を示す。現状の地山分類では、代表的な岩種を「剥離性に富む古生層～深成岩」、「剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩」および「第三紀堆積岩類」の 3 つに区分して、主に、その岩種に応じた弾性波速度、RQD、亀裂係数、および地質状況によって地山分類を設定している。なお、地山分類とは、トンネルの支保構造を構成する使用部材を選定するため、各試験結果に基づいて A～DII まで区分するものである。ここで、RQD (Rock Quality Designation) は、一定の掘削長さ、通常は 1m のボーリングコアにおける任意の計測寸法、例えば 5cm として、それより大きいコアの長さを集計して採取率とした値である。また、亀裂係数とは、岩盤の割れ目の発達状況を表わす指標であり、岩石コアの超音波伝播速度と地山の弾性波速度の比によって定義される。一般的に、亀裂係数が大きくなるほど岩盤は悪く評価される。

通常、弾性波速度は、一定の深度までは、精度のよいデータが取得されるといえるが、より深部では、起振エネルギーが到達しないこと、また、弾性波速度の解析条件では、深度方向に高い速度が分布していることが前提となること、さらに、速度層が層状かつ一定の層厚であるため、深部での精度は低いことがあげられる。このため、近年では、深部の地質性状や、より広域な範囲のデータを測定する方法など、トンネル地山の調査に適用されている (Okazaki et al., 2011, Abd Allah et al., 2013)。

地表からの屈折法地震探査は、吉田 (2010) によって、測定技術、解析過程および地質構造の違いによって測定できる P 波速度に限界を有することが示されている。あわせて、林・他 (2010) は、トンネルの設計と施工で一致しない原因が、測定や解析の違いだけでなく、地質解釈や地山分類に起因するものも多いことを言及している。また、斎藤 (2015) は、解析時の往復走時や原点走時の一致、走時曲線の平行性が確認できないハギトリ法での解析結果は間違いであることをダムサイトで実施された探査事例の分析結果をもとに指摘している。

以上のような問題点があるため、トンネルの施工時には、切羽からの先進ボーリング調査によって地質状況が確認される場合があり、その孔内における速度検層で測定される P 波速度や室内の岩石試験によるコアの P 波速度（超音波伝播速度）を測定し、地山

表1 トンネルの地山分類（国土交通省北海道開発局 2017）

地 山 区 分	剥離性に富む 古生層～深成岩		剥離性に富まない 古生層～ 深成岩, 火山岩		第三紀堆積岩類		亀裂係数 K (%)	主な地質状況
	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)		
A	4.8以上	60以上	4.5以上	60以上				1. 新鮮にて亀裂ほとんどない 2. 肌落ちほとんどない
B	4.5～4.8	50～60	4.0～4.5	50～80	3.0以上	60以上	25以下	
C I	4.0～4.5	30～50	3.5～4.0	30～70	2.5～3.0	40～60	25～50	1. 新鮮にて亀裂少ない 2. 肌落ち少ない
C II	3.5～4.0	20～30	3.0～3.5	20～50	2.0～2.5	30～40	50～70	1. わずかに風化, 亀裂やや多い 2. 肌落ち多い
D I	3.0～3.5	20以下	2.5～3.0	40以下	1.5～2.0	20～30	70～80	1. 風化受け亀裂多い 2. 一部変質破砕帯あり
D II				30以下	1.0～1.5	20以下	80以上	1. 風化強く受け亀裂多い 2. 一部に変質破砕帯

分類を見直している。しかし、現状のトンネルの設計では、トンネル掘削箇所における物理強度や地質の状態の定量化が必要であるため、屈折法地震探査が実施され、そのP波速度が主に利用されている。そこで、木村・大橋（2002）は、掘削の進行したトンネル坑内において、切羽後方の地山路面を対象として屈折法地震探査を実施し、深さ方向の緩み状況を調べるとともに、地山分類に用いるP波速度を修正するための提案を行っている。トンネルの施工では、同じトンネルの掘削でそれまでに得られた地質の情報等を次の掘削に利用することで、安全な施工や地質性状に起因するリスクやコストの急激な変化を抑制している。

海外でも、Guan et al. (2012) は、トンネル掘削時の切羽における岩石の硬さ、亀裂、不連続面の性状、地下水の状態を支保構との対応を統計分析するとともに、地表から実施したボーリング調査の結果から、掘削前の切羽前方の地質状況を推定し、その効果を

検証している。また、Felletti and Beretta (2009) は、トンネル掘削箇所が存在する巨礫の分布を、それまでの掘削情報と地表からのボーリング調査結果をもとに、マルコフ連鎖モンテカルロ法によって、その発生確率を予測している。さらに、Spackova et al. (2013) は、トンネルの地質状況に応じた掘削時間を分析し、地質的問題が発生した際に遅延する掘削時間を統計的手法によって推定している。このような統計的手法は、トンネルの地盤情報の分析以外にも活用されている。例えば、Kwon and Roel (2011) は、地盤の間隙率と飽和度をより効果的かつ正確に求めるため、弾性波速度や比抵抗の測定時におけるノイズに着目し、その入力値を変えたベイズ推定によるシミュレーションを岩種ごとに行うことで、影響の度合いを明らかにし、不確実性を低減できることを示している。Chen and Thomas (2009) は、弾性波速度と比抵抗を利用する場合の不確実性の影響を明らかにするため、設定した地盤モデルにおける岩石の物理強度特性をランダム関数として扱うことで、測定結果における不確実性を定量的に扱うことができることを示している。また、Chen and Hoversten (2013) では、情報量の多寡に応じた精度を定量化するため、地盤の物理特性値の推定にマルコフ連鎖モンテカルロ法を適用し、実測値と推定値の残差を分析している。さらに、ボーリングによる地質情報を加味することで、P波とS波の速度比と密度の実測値と推定値の差を改善できることを確認している。山中 (2013) は、微動探査における位相速度の逆解析にマルコフ連鎖モンテカルロ法を適用することで、仮定した地盤モデルの確率分布から期待値や分散等の統計パラメータを定量的に評価することに有効であることを示した。

これらの研究の中でも、先進ボーリング孔内で測定する速度検層によるP波速度は、原位置において、直近の地山の物性値を把握できるため、地山分類の見直しと精度向上に有用な情報として用いられている。この施工時の速度検層によるP波速度の情報を設計時の地山分類の再検討に適用することができれば、施工中にその後、遭遇する地山に対して精度の高い地山の分類を与えることが可能となり、また、トンネル建設コストの軽減や安全な施工に資することが期待できる。

表2に国土交通省北海道開発局が、現在使用している地山分類におけるボーリング調査、弾性波探査、室内試験、及び現地試験の結果による測定値の取り扱い方法を示す。

トンネルの地質調査では、掘削前の地表踏査やボーリング調査で得られる岩石のコア試料等を用いて、室内での物理強度特性を求めるための試験を行うとともに、原位置と室内での状態の違い、すなわち、亀裂の影響を考慮して、室内試験の結果を補正して、地山分類を設定するための情報としている。

ここでは、例えば、準岩盤圧縮強をみると、室内試験結果により得られる一軸圧縮強さに対して、地山と試料（ボーリングコア）の比を掛けることで補正し、地山分類の評価に用いている。つまり、亀裂の有無を考慮して、評価に用いていることになる。ただし、通常は、地山の弾性波速度は、亀裂がない、供試体コアの値よりも小さいことが前提としているが、スレーキングや地表からの深さ等、現地条件によっては、地山がコアの値より大きく得られることがある。この場合、逆転している状況であるが、たとえ地山の値が大きくても、亀裂のないコアの値と同等の値として評価することになっている。

このことは、コアの状態を基本とした評価を前提としていることになるが、実際のコアは、掘削後、応力解放や含水状態の変化に起因して、マイクロクラックの発生（ケーガン, Y. and パウシアウスカス, V. 2012）や時間の経過に応じて、潜在的な亀裂が顕在化してくる場合があり、岩盤の評価に用いると大きな誤差が生じる可能性がある。また、本来の岩盤の状態を正しく評価できているかどうかは課題といえる。

表 2 地山分類における測定値の扱い

区分	ボーリング調査			弾性波 探査	室内試験									現位置試験				
	コア観察	ボーリング孔内試験			物理・力学試験						分析試験			岩盤直接		載荷試験		
得られる 事項 (番号)	地質・性状 RQD	降伏値 P_c^*	変形係数 E^*	地山のP波速度 V_p^*	圧縮強度 σ_c	静弾性係数 E	ポアソン比 ν (静的)	超音波伝播速度試験 弾性波速度 V_p, V_s	単位体積重量試験 単位体積重量 γ	二軸試験 粘着力 C	内部摩擦角 ϕ	吸水膨張試験 膨張率 P_s	風化しやすさの程度の判定	X線分析 粘土鉱物の有無	粘着力 C^*	内部摩擦角 ϕ^*	降伏値 P_c^*	変形係数 ED^*
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱

岩盤分類の要因	岩種・岩質・区間延長	準岩盤圧縮強度 σ_c^* $\left[\sigma_c^* = \sigma_c \left(\frac{V_p^*}{V_p} \right) \right]$	岩盤の変形係数 E^* $\left[E^* = E \left(\frac{V_p^*}{V_p} \right) \right]$	ポアソン比 (静的) ν^*	粘着力 C^*	内部摩擦角 ϕ^*	地山強度比 $\sigma_c^* / (\gamma H)$
資料となる調査・試験値 (番号表示)	①, ④, ⑫, ⑬, ⑱	②, ④, ⑤, ⑧, ⑱	③, ④, ⑥, ⑧, ⑱	⑦	⑩, ⑮	⑪, ⑯	②, ④, ⑤, ⑧, ⑨, ⑱

V_p^* : 地山の弾性波速度 (km/s) V_p : コアの超音波伝播速度 (km/s)

一般的に $V_p^* \leq V_p$ であるが、スレーキングや地表からの深さ等の関係で $V_p^* \geq V_p$ となる場合は、 $V_p^* = V_p$ として、取り扱われている。

2.2. 変状を生じたトンネルにおける岩石の劣化事例

地質工学的に問題を有する岩盤，例えば，熱水変質作用を受けた火山砕屑岩類や堆積軟岩の分布する地域で建設されたトンネルでは，完成後に，盤膨れや覆工の押し出し等の変状が発生する事例が報告されている（表3）．このような変状は，トンネルの施工時に，適正な評価や発生の予測が難しいこと，また，その補修や対策では，通行規制やコスト等の観点から大きな課題となっている．

一方，掘削にともない出現する新鮮な岩石や岩盤は，応力解放，空気や地下水との接触などによって急速に劣化する場合がある．その結果，岩石の表面や亀裂における水酸化鉄や石膏の析出，潜在亀裂の顕在化や岩石自体の細片化や粉状化などの様々な現象が生じる．このような変化において，岩石や岩盤は，膨張する場合があることから（日本トンネル技術協会，1977，土居・他，1991，阿南・他，2003），土木構造物への長期的な影響に着目した評価や検討が必要となる．さらに，風化作用や鉱物の溶脱により，岩石に体積変化が生じることで劣化が進行する事例も報告（田中，1985，大山・他，1998，鹿園・他，2002，五十嵐・他，2002，加藤・他，2011）されており，これらに起因した変状の発生も十分考えられる．

そこで，この節では，完成後のトンネルで発生した変状の事例を収集し，その実態を整理した．また，北海道の火山岩地山で建設されたトンネルの供用開始後に，実際に変状が発生した事例において，施工記録ならびに変状の経時変化を整理するとともに，変状の補修対策時に地山から採取した岩石の試験結果をもとに，変状の発生要因をトンネル地山の地質との関連性を分析した．

表 3 完成後のトンネルで発生した変状の事例

トンネル (地域)	種別	完成～ 変状発生 までの年数	施工中 の変状	工法	主な地質	主な変状
朝日 (新潟)	一般国道7号	1	あり	NATM	破砕質凝灰岩類	盤ぶくれ
関 (三重)	一般国道25号	0.5	—	—	花崗岩・礫岩	盤ぶくれ、覆工ひび割れ
礼文華 (北海道)	一般国道37号	0.5	あり	—	角礫凝灰岩、安山岩	覆工の押し出し、盤ぶくれ
仙岩 (秋田・岩手)	一般国道46号	20	—	—	変質凝灰岩	盤ぶくれ
送毛 (北海道)	一般国道231号	3	あり	—	角閃石安山質溶岩	覆工の押し出し、盤ぶくれ
黒岩 (北海道)	一般国道231号	2	—	—	火山角礫岩、凝灰角礫岩	盤ぶくれ、覆工ひび割れ
三国 (北海道)	一般国道273号	15	—	—	凝灰角礫岩、変朽安山岩	路盤の隆起 (風化岩盤の凍上)
四ツ峰 (北海道)	道道	24	あり	—	破砕質泥岩、角礫岩	覆工・インバート部のひび割れ
小山田 (岩手)	県道	0.5	—	NATM	花崗岩・流紋岩	盤ぶくれ
盃山 (山形)	山形自動車道	17	—	—	変質凝灰岩	盤ぶくれ
風波 (新潟)	北陸自動車道	20	あり	—	凝灰角礫岩	覆工・インバート部のひび割れ
浅間山 (群馬)	上信越自動車道	1	—	NATM	安山岩・凝灰角礫岩	盤ぶくれ
恵那山 (長野・岐阜)	中央自動車道	14	—	—	花崗岩・溶結凝灰岩	覆工ひび割れ
嬭野 (佐賀)	長崎自動車道	0	あり	NATM	凝灰角礫岩・安山岩	盤ぶくれ、覆工ひび割れ
俵坂 (長崎・佐賀)	長崎自動車道	1	あり	NATM	凝灰角礫岩・安山岩	盤ぶくれ
神居 (北海道)	鉄道	18	あり	—	蛇紋岩、黒色片岩	覆工の押し出し、盤ぶくれ
礼文浜 (北海道)	鉄道	6	—	—	安山岩質凝灰岩、変朽安山岩	盤ぶくれ
一ノ瀬 (長野)	鉄道	11	あり	NATM	凝灰角礫岩・凝灰岩	インバート破損
碓氷峠 (長野)	鉄道	9	—	NATM	安山岩溶岩・火山角礫岩	盤ぶくれ
塚山 (新潟)	鉄道	0.5	あり	—	砂岩泥岩・砂質頁岩	覆工の押し出し、ひび割れ

2.2.1. 完成後のトンネルで発生した変状事例

表 3 に、完成後のトンネルで発生した 20 の変状事例(林・他, 1977, 松尾・他, 1980, 今村・他, 1989, 鈴木・他, 1990, 市原・他, 1991, 北海道開発局石狩川開発建設部, 1992, 平井・他, 1995, 片寄・他, 1997, 下川・他, 1997, 中田・他, 2000, 土木学会岩盤力学委員会, 2003, 渡邊・他, 2007, 小林・他, 2009, 佐久間・他, 2009, 二瓶・他, 2010) を示す。

文献調査の結果から、供用開始後に変状が発生した事例を地域別にみると、北海道が 7 例と最も多く、東北地方が 3 例、関東地方が 1 例、中部地方が 6 例、近畿地方・九州地方が 3 例であった。また、トンネル完成から変状発生までの年数は、5 年以内のものが 10 件と半数を占めるが、中には 20 年後に顕在化したものもある。

各トンネルで発生した主な変状は、盤ぶくれや覆工の押し出しであり、内空断面の減少に伴い、車両の通行や安全性への影響、または維持管理上の問題が生じたことから対策が行われた。

これらの事例におけるトンネル箇所の子な地質は、火山岩・火砕岩類 (安山岩・

凝灰角礫岩類)を主体とするものが14例、花崗岩が3例、堆積岩類が2例、蛇紋岩・黒色片岩が1例となっており、火山岩・火砕岩類がとくに注意を要する地質である。

トンネルの工法は、主に矢板工法であるが、NATM (New Austrian Tunneling Method)により建設されたトンネルでも変状が発生した。また、施工中に変状が発生して対策を実施したトンネルでも再び変状が発生している事例があった。

ここで、堆積岩や蛇紋岩を地山とするトンネルでは、その施工時の掘削に伴い、変状が発生することがあり、その多くは、施工時に対策が行われていることから、中長期的な時間の経過した後に、変状が発生することは少ないといえる。逆に火山岩を地山とするトンネルでは、その施工時に、問題なく掘削されて完成しても、その後の周辺環境や含水状態の変化やその繰り返しによって岩石の劣化が進行することで、岩石の物理強度特性も変化し、その後、変状に影響するような状態になることが考えられる。

2.2.2. 変状したトンネルでの調査例

調査は、北海道日本海沿岸に建設された延長2.1kmの国道トンネルを対象とした。このトンネルでは、供用開始後、まもなく盤膨れ(路面部の隆起)が発生したことから補修対策が行われたが、補修後、その周辺部でさらに盤膨れが生じたことから追加して補修が行われた。別の2箇所では、長期的に盤膨れが継続し、建築限界を確保できなくなることが予測されたことから、補修対策が実施されている。

調査では、トンネル施工時の計測データである切羽観察記録、内空変位量、天端沈下量、支保工パターンの変更状況、先進ボーリング調査および岩石試験の結果を整理し、変状との対応について分析した。また、盤膨れによる路面隆起量の経時変化を整理するとともに、その挙動と地質との関連性について考察した。さらに、変状の補修対策時に地山の岩盤から直接採取した岩石について、採取時と1年経過後の薄片観察、X解回折試験、乾湿を繰り返したスレーキング試験を行い、その結果をもとに、変状に関わる鉱物的な特徴について考察した。

(1) トンネルの施工記録

図1に、トンネルの地質断面図、切羽に出現した地質、支保工パターン(設計と施工)、変位量(上半最終内空変位量と最終天端沈下量)および収束日数を示す。また、供用開始後に盤膨れの発生した3箇所を補修区間a(42m)、b(80m)およびc(167m)として示す。

トンネルの掘削で判明した地質は、中新世の安山岩、火山角礫岩、凝灰角礫岩(以下、

An, Vb, Tb) であり、その割合は An が 50%, Vb が 15%, Tb が 35% である。

An は、比較的硬質で部分的に亀裂が発達する。また、弱い熱水変質作用を受けた部分も存在した。自破碎状部は、比較的軟質で亀裂部が繰り返して出現した。Vb は、全体的に弱い熱水変質作用を受けており軟質である。また Tb は、主に塊状であるが軟質で脆く、部分的に破碎状を示す。

施工時の支保パターンは、設計で CI に分類された SP62, 800~63, 200 や SP63, 500~63, 700 付近で、1 ランク以上の構造的上位に変更されている。また、設計で CII に分類された SP62, 200 や SP62, 400 付近では DI 以上の支保パターンに変更されている。

これらの区間では、亀裂が発達するとともに、粘土化した破碎帯が存在したことから、施工時には鏡吹付や AGF (All Ground Fasten) などの補助工法も適用されている。

一方、設計で CII に分類された SP62, 700~62, 800 や設計で DII に分類された SP63, 850~63, 950 付近では、それぞれ CI, DI と 1 ランク構造的下位な支保パターンに変更されている。これらの区間では、硬質な An や Vb が存在し、地山が比較的安定していたものと考えられる。

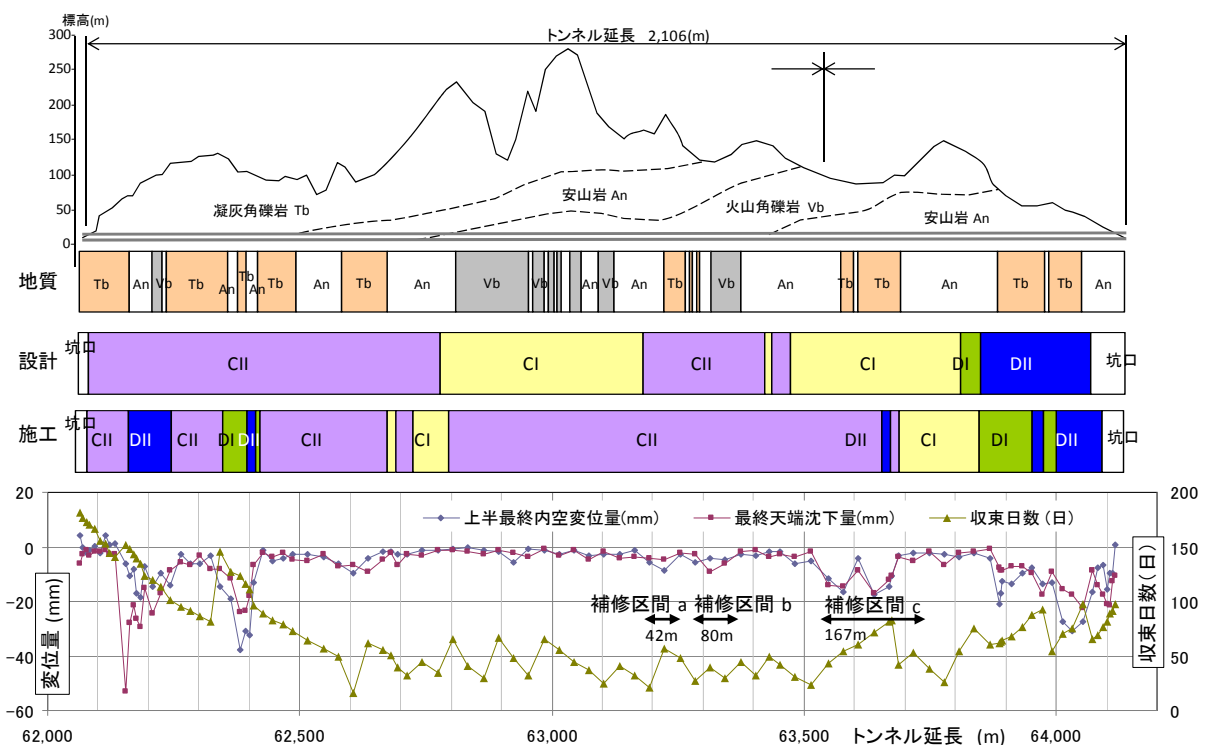


図 1 変状が発生したトンネルの施工記録

支保パターンの変更割合を整理すると、構造的低位への変更が約 2 割、変更なしが約 4 割、構造的上位への変更が約 4 割である。

構造的上位の支保パターンに変更されて施工された区間は、地層境界や互層部に該当している。なお、完成後に盤膨れを生じた箇所は、CII で施工されている。これは、各種試験や変位量の計測結果から比較的良好な地山であると判断された結果であるが、施工中の評価では、このような時間依存する変状の発生についての予測が難しく、現状の膨張性の判定方法（土木学会，1992，日本道路協会，1993，地盤工学会，1999，土木学会，2016）とあわせて、新たな指標による検討が必要といえる。

(2) 先進ボーリングコアの岩石試験

本トンネルの先進ボーリングコアを試料とした岩種別の一軸圧縮強さと弾性波速度の関係を図 2 に示す。試験の結果、一軸圧縮強さは $An > Vb > Tb$ の傾向が認められ、 Tb は、概ね 20MPa 以下を示す。また、弾性波速度についても $An > Vb > Tb$ の傾向が認められる。このように岩種に応じて力学特性が異なることから地質別の地山評価がトンネル施工にとって有効といえる。

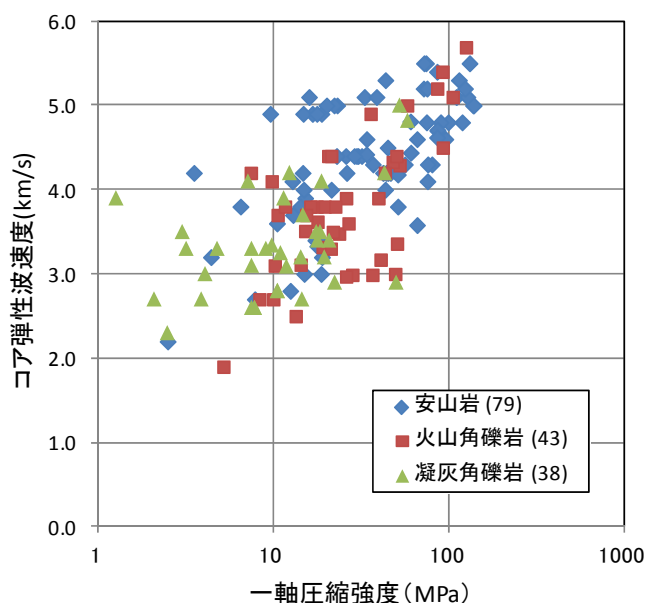


図 2 トンネル岩石の強度特性

(3) 変状トンネルの地質性状

本トンネルの補修対策時（路盤掘削時）に地山から岩石を直接採取し、岩石の薄片観察とX線回折試験を行い、変状に関わる岩石の鉱物的な特徴について整理した。ここで、薄片観察とX線回折試験は、採取時とその1年経過後（実験室内で保管）の岩石を試料とした。

写真1に地山から採取した3試料の状態を示す。採取した試料はSP63, 337付近の火山角礫岩中の礫（安山岩）礫である。なお、試料①～③は、定性的な強度と固結度の違いをもとに採取した。

写真2に薄片岩石の採取直後とその1年経過後の状況を示す。両者を比べると、1年経過後の試料では、基質部に亀裂が生じていること、基質と岩片や鉱物が分離している様子を確認でき、経時的に岩石は劣化したことがわかる。



写真1 変状トンネルの補修時に採取した試料

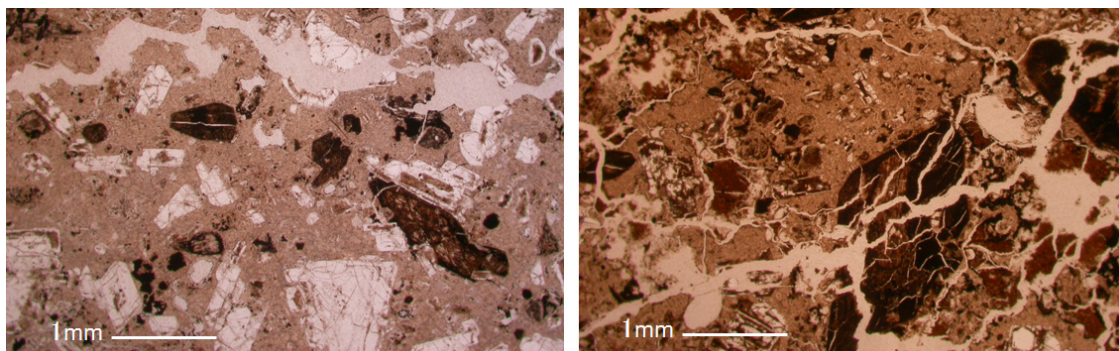


写真2 採取直後と1年経過後の薄片岩石の状況

表 4 X線回折試験の結果

分析コア		同定鉱物					
試料		Pl	Cri	Cal	Py	Gy	Sm
①	補修時の 路盤部(地山) から採取	○	○	◎	—		△
②		○	○	△	+		○
③		○	○	△	+		○
④	試料①の1年後	◎	◎		+	—	△

鉱物名>Pl:斜長石 Cri:クリストバライト Cal:方解石 Py:黄鉄鉱
Gy:石膏 Sm:スメクタイト
鉱物同定量>◎極多量 ○多量 △中量 +少量 —微量

表 4 に、X 線回折試験の結果を示す。試料は、上記の試料①～③と試料①の 1 年経過後の試料を④とした。ここで、試料は①<②<③の順に劣化している。

試験の結果、炭酸塩鉱物である方解石は、試料②と③では試料①より少なく、劣化にともない溶脱していることが推定される。また、試料②と③は、試料①よりもスメクタイトの含有が多い。

次に、試料①と④を比較すると、試料④では方解石が消失し、硫酸塩鉱物である石膏が確認されている。このことは、黄鉄鉱の酸化と分解にともなう硫黄と炭酸塩鉱物が反応した結果であると考えられる。このような岩石の鉱物の組み合わせによる反応によって、化学的変化が促進されることで、溶脱と体積変化が生じ、膨張圧としてトンネルに作用することが想定される。また、岩石の劣化が地山内で進展することで、トンネルへの塑性圧として作用することも推定される。

2.3. 岩石に生じる亀裂の評価

トンネルの地山分類における主な指標は、一軸圧縮強さ、弾性波速度および RQD であり、岩種ごとに設定されている。これらの値は、原位置ならびにボーリングコアから求められる。原位置では、地山の亀裂を含む状態で求められるのに対し、コアの値は、室内試験が可能な整形試料で求められている。その差は、低減比率である亀裂係数によって修正され、地山分類の評価に用いられており、一軸圧縮強さや弾性波速度は、亀裂の存在に依存することを示している。

一方、掘削に伴うトンネル地山の岩盤は、応力解放に伴う緩みや飽和状態の変化が繰り返されることで不安定化する場合がある。とくに、熱水変質作用を受けた地山では、膨張性粘土鉱物の細脈が存在し、岩盤強度が低下していること、また応力解放時には地山が膨張することで内空変位が大きくなる可能性が指摘されている(長谷川・他, 1999)。このため、大きな地山の変位、また支保部材に変形、変状が生じる場合には、湧水対策や一次インバートによる早期閉合等の対策が実施されている(土木学会, 2013)。

なお、熱水変質作用により生成する鉱物は多数あるが、生成する珪酸塩鉱物の組合せに注目して、多くの帯に分けられている。また、これらは、天然の産状や合成実験の成果から、(アルカリイオン+アルカリ土類イオン)活動度/水素イオン活動度の違いから3つの群に分けられる(歌田, 1977)。これらは、酸性帯、中性帯(K系, Ca-Mg系)、アルカリ性帯(Ca系, Na系)と呼ばれる。

表5に各群に生成する鉱物を表に示す。各表は左側が低温側、右側が高温側で安定な鉱物組合せを示している。このような熱水変質の違いや含有鉱物によって、トンネルの岩盤の長期挙動が異なることが考えられる。

また、岩石コアにおいても、拘束圧や含水状態が変化することで、潜在的な亀裂の開口やその連結による微視的な構造の変化が生じ、一軸圧縮強さや弾性波速度が変化する(宇野・他, 2002)。ここで、丹羽・他(2016)は、変質安山岩のボーリングコアを試料として、乾湿繰り返しサイクル後の弾性波速度を測定するとともに、劣化を生じたコアは体積弾性率や剛性率が低下することを示している。

また、長田・他(1999)は、吸水させた凝灰岩の乾燥過程における体積ひずみと弾性波速度の経時変化を測定し、堆積面に直交する方向に大きく収縮することを確認するとともに、飽和度の変化に応じて弾性波速度が変化することを示した。奈良・金子(2008)では、安山岩と花崗岩を試料としてダブルトーション試験を行い、大気中の亀裂進展速度は、温度と湿度の高い条件で高く、さらに水中では大気中よりも高くなり、含水状態の違いが大きく影響することを明らかにしている。

表 5 熱水変質帯の分類 (歌田 1977)

酸性帯		ハロイサイト帯	カオリナイト帯	パイロフィライト帯	ダイアスポア帯
中性帯	K系	モンモリロン石帯	混合層粘土鉱物帯	絹雲母帯	カリ長石帯
	Ca-Mg系	モンモリロン石帯	混合層粘土鉱物帯	プロピライト帯	
アルカリ性帯	Ca系	束沸石帯	輝沸石・菱沸石帯	濁沸石帯	ワイラケ沸石・湯河原沸石帯
	Na系	モルデン沸石帯	方沸石帯	曹長石帯	

↓ アルカリ・アルカリ土類イオン活動度
 ↓ 水素イオン活動度
 → 温度

以上のように、これまでの先行研究では、含有鉱物や含水状態の変化によって、岩石に亀裂の発生する状況が異なることを指摘している。そこで、本研究では、北海道の熱水変質を受けた安山岩質地山に建設された国道トンネルの供用中に変状が発生した区間において、地質状況の確認を目的としたボーリング調査を実施し、そのコアを掘削直後から劣化の進行や亀裂発生の状態変化を観察、また、浸水後の状態変化を X 線 CT 装置で撮影し、岩石の劣化の過程を分析した。

2.3.1. 調査トンネルでのボーリング調査

対象としたトンネルは、昭和 52 年に供用開始した延長 1,901m の矢板工法によるトンネルであり、施工中から現在まで、劣化した地質に起因する覆工背面の変状が 5 つの区間で継続した。このトンネルの変状が発生した区間において、地質、水理地質

構造，地山の弾性波速度の確認を目的として，ボーリング調査を3孔（総延長90.0m）実施した。

図3にボーリング調査の結果を示す。ボーリング調査のコアの経過時間に応じた状態の変化を把握するため，一定期間継続した亀裂や膨張の発生状況の観察と浸水時のX線CTによる岩石画像撮影を行った。なお，コア観察の結果は，岩級区分（日本建設情報総合センター，1999）に応じて行った。岩級区分は，コアの硬軟，形状及び割れ目の状態からCH，CM，CLおよびD級の4つに区分した（図4）。

2.3.2. 一定期間継続したコアの観察

トンネル坑内で新たに実施したボーリング調査のコア試料について，亀裂（潜在亀裂の顕在化）や膨張の発生と変化を経時的に把握するため，採取直後から3週間（採取深度により異なる），コアの写真撮影と亀裂等の観察を実施した。

コアの写真撮影は，原則として採取日から休日を除く毎日撮影し，コア箱1箱ごとに時系列で比較した。亀裂等の観察は，亀裂と膨張を対象として，前日までに確認した亀裂と膨張に，新たに発生した亀裂や膨張を記載するとともに（図5），亀裂の発生数を経日変化として整理した。

また，近傍の同じ地質の調査で実施された別のボーリングコア試料について，コアの性状の中長期的な経時変化を把握するため，掘削直後，掘削から1週間後，掘削から586日後に観察を実施した（Okazaki et al., 2015）。なお，掘削直後と掘削から1週間後のコアは，観察時にトンネル坑内に保管されていた状態での観察結果となるが，掘削から586日後のコアについては，屋外に長期間，ブルーシートに覆われた状態で暴露されていたものを観察した（写真3）。なお，掘削から586日目までの保管時の気温，湿度は計測していない。

本研究では，新たに掘削したボーリングコアの短期間の観察結果と中長期に観察したコアの状態をもとに，亀裂の発生予測式を提案し，コアの掘削からの劣化の進行について分析した。また，熱水変質を受けた安山岩質地山の道路トンネルで実施された先進ボーリングコアの掘削から室内試験までの経過日数とP波速度の関係を調べた。さらに，P波速度は，有効間隙率と相関があることから（例えば，安藤，2009），両者の関係を経過日数ごとに調べた。

はじめに，近傍の同じ地質の調査で実施されたボーリングコアの中長期的な経時変化の観察結果を掘削直後，掘削から1週間後，掘削から586日後の順に写真4に示す。

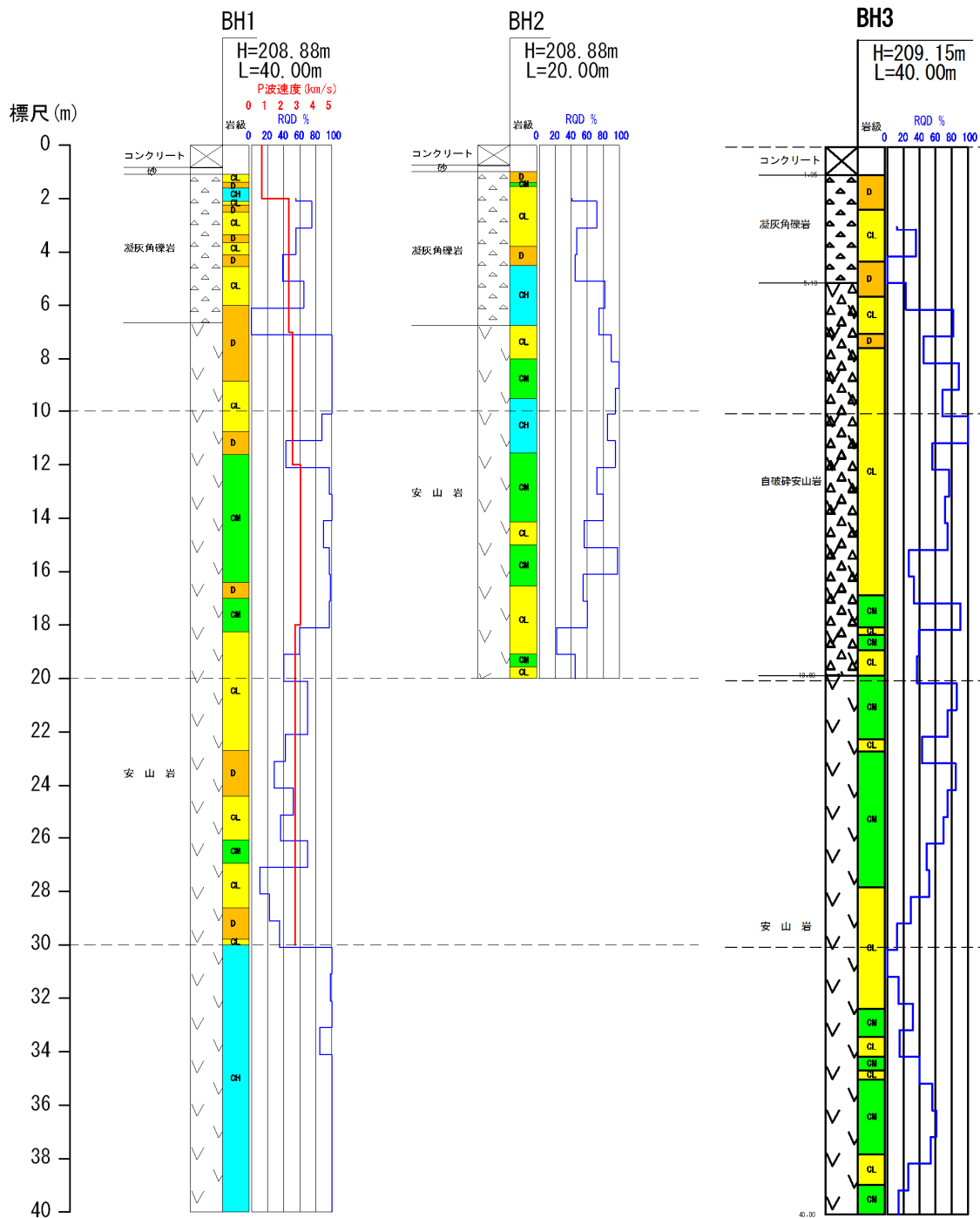


図3 調査トンネルで実施したボーリング調査の結果
地質区分, 岩級区分, RQD(10) および速度検層 (実施した孔のみ)

岩級	硬さ	形状	割れ目
CH	B	II	b
	B~C	I I~II	
CM	B~C	I~II	c
		II	b
		II~III	c
		III	b
		III	c
	C	II	b
			c
CL	B~C	III~IV	c
	C	II~III	
		III	
		III~IV	
		IV	
	C~D	II	
		II~III	
		III	
		III~IV	
		IV	
		IV~V	
	D	II	
		II~III	
		III	
IV			
IV~V			
D	D~E	II	c
		II~III	
		III	
		III~IV	
	E	IV~V	d
		IV	
		V	
		VI	
		VII	
		VIII	

硬さ
 B ハンマー打音キンキン
 C ハンマー打音ゴンゴン
 D ハンマー打音ボソボソ
 E ハンマー打音発しない

形状
 I 50cm以上
 II 15~50cm
 III 5~15cm
 IV 5cm以下~外周のある岩片状
 V 礫状
 VI 砂状
 VII 粘土状
 VIII スライム

割れ目
 a 劣化なし
 b 僅かに劣化
 c 内部に劣化が及ぶ
 d 割れ目として認識できない

図4 岩級区分とその区分項目

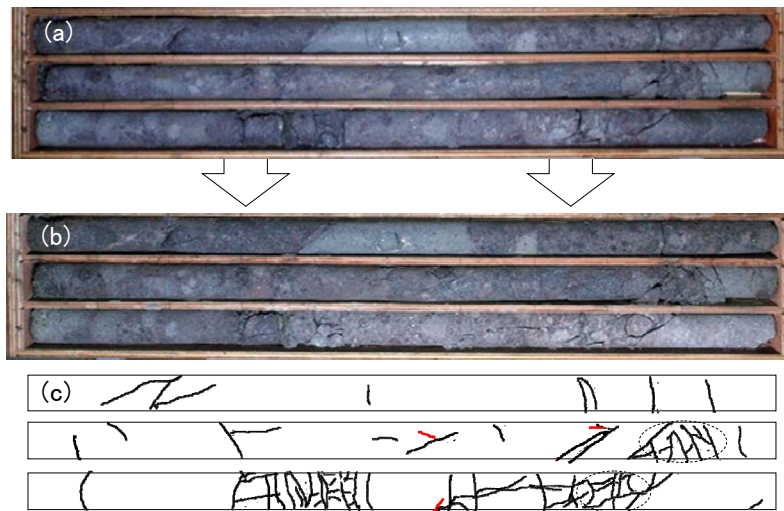


図5 ポーリングコアの状況と亀裂発生を観察例

(—亀裂, ○膨張部分)

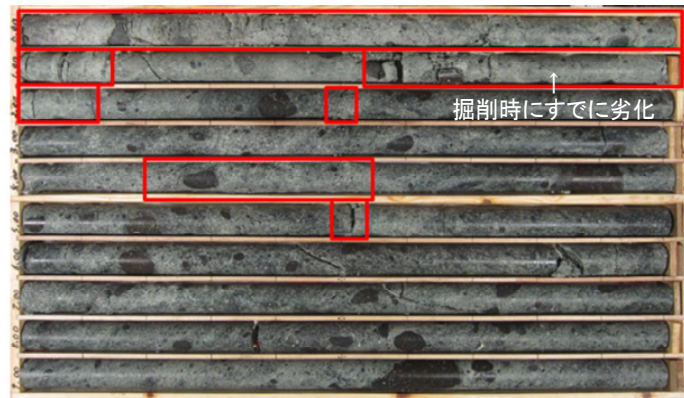


写真3 屋外でのコアの保管状況

観察の結果、亀裂沿いや1週間後に劣化が認められた箇所とその周辺において、劣化の範囲が進行していることを確認した。ただし、その範囲は、概ね1週間後に劣化を確認した範囲と同程度であることがわかった。

このことから、岩石の劣化の進行は、比較的早期に出現する場合があります。ポーリングの掘削直後から、概ね1週間後にコアを再観察することで、中長期的に劣化する範囲を特定できる場合のあることが示唆された。

掘削直後



掘削後1週間経過



掘削後586日経過

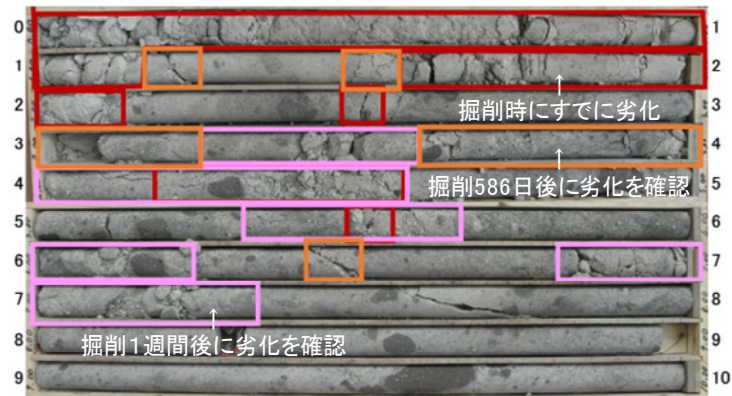


写真4 中長期的に観察したコアの状況（近傍での類似した地質箇所）

BH1 孔 23m 付近

BV1 孔 11m 付近



採取直後



1 日後



2 日後



3 日後



・経時劣化がほとんど認められない部分

BH1 孔 : 13~19m 付近・30~40m 付近

BV1 孔 : 17~18m 付近・21~25m 付近

採取直後のコアは、スライムやマッドケーキを除去するため表面を水洗いしており、それ以後に表面が乾いた状態で撮影されたものと色調がやや異なる。

BH1 35~36m 採取直後



BH1 35~36m 20 日後



図 6 トンネル坑内で新たに実施したコア観察結果

次に、新たにトンネル坑内で実施したボーリング調査のコアにみられる亀裂の進展状況の経時について整理した。本調査で採取したボーリングコアは、ほとんど変化が起きない場所もあるが、多くの場合採取後比較的短時間（数時間～数日）のうちに、ひび割れ（潜在亀裂の顕在化）や膨張の発生が認められた（図6）。

新たに実施したボーリングコアについて、岩級区分に応じて発生した亀裂数の経時変化を図7に示す。亀裂の発生数にはCH, CM, CLおよびD級の順に少なくなる傾向がみられる。初期の亀裂数が多い場合、その後の発生数も多くなる傾向がみられる。また、亀裂は比較的初期の段階で多く発生し、その後、緩やかまたは収束するように変化する傾向を示している。この傾向は、掘削直後から概ね5日程度までに亀裂が増加する傾向として捉えることができる。

以上のことから、掘削直後のコアの観察結果とあわせて、一定の時間が経過した後にコアを再観察することで、長期的な亀裂の発生による岩石の劣化を評価予測できる場合があるといえる。

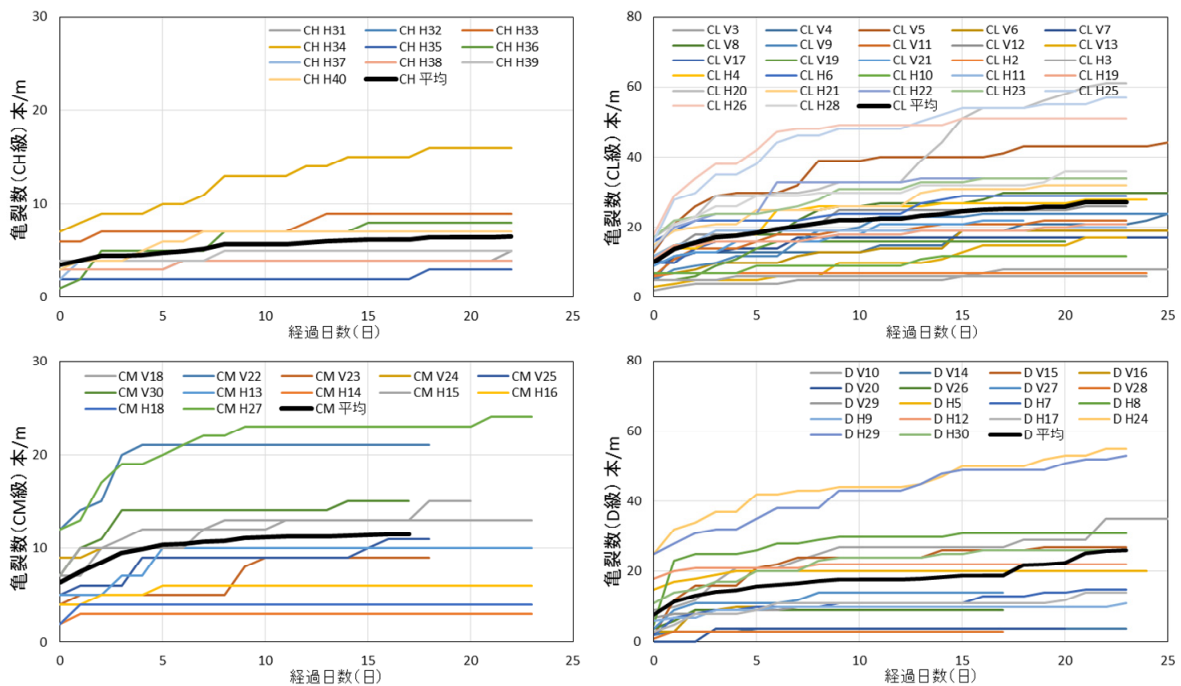


図7 岩級区分に応じた亀裂数の経時変化
V：鉛直孔，H：水平孔，数字は対象深度

2.3.3. ボーリング掘削から室内岩石試験までの経過日数と試験結果の関係

ボーリングの掘削から室内試験までの経過日数とP波速度の関係を調べた。さらに、P波速度は、有効間隙率と相関があることから、両者の関係を調べた。

図8に有効間隙率とP波速度の関係を示す。有効間隙率とP波速度には負の相関が確認できる。また、有効間隙率の区分ごとにP波速度に差が認められる。

図9にボーリング掘削から試験までの日数とP波速度の関係を有効間隙率別に示す。図中の直線は有効間隙率ごとの近似直線である。P波速度は、コアの掘削から3～18日後（平均8.8日）に測定されていた。

そのコアの試験結果について、有効間隙率を10%ごとに区分して V_{pc} との関係をみると、15日経過した段階では、有効間隙率が20～30%の場合で23%の低下、有効間隙率が30%以上の場合で42%が低下しており、経過日数が多くなると V_{pc} が低くなることが推定できる。

以上のことから、コアによるP波速度の評価では、その掘削からの経過時間により、発生する亀裂の状況によってはP波速度への影響があることから、 V_{pc} が低下して、 $V_{ph} > V_{pc}$ になることがあると考えられる。

従って、岩盤の弾性波速度の評価には、ボーリング孔内での速度検層による原位置での測定結果を用いて評価することが望ましい。

2.3.4. 亀裂発生数の予測式の提案

コア1mごとの亀裂発生数を岩級区分ごとに集計後、Y軸を亀裂発生数、X軸を経過時間として作図し、非線形最小自乗法によって対数近似した(1)式を1mごとに設定した(図10)。ここで、(1)式のaは回帰係数であり亀裂数の増加に関わる比例定数、bは切片であり初期の亀裂数、 ϵ は誤差である。なお、経過時間は、コアを掘削された直後から観察していることから、初期値は0でなく0.1日経過した段階を初期値として対数近似式をあてはめた。

$$Y = a \ln(X) + b + \epsilon \quad (1)$$

一般に、回帰分析は、測定データから関数である回帰式が求められる。回帰式では、全データの誤差が最小となるように回帰係数が一義的に決められる。しかし、1mごとの

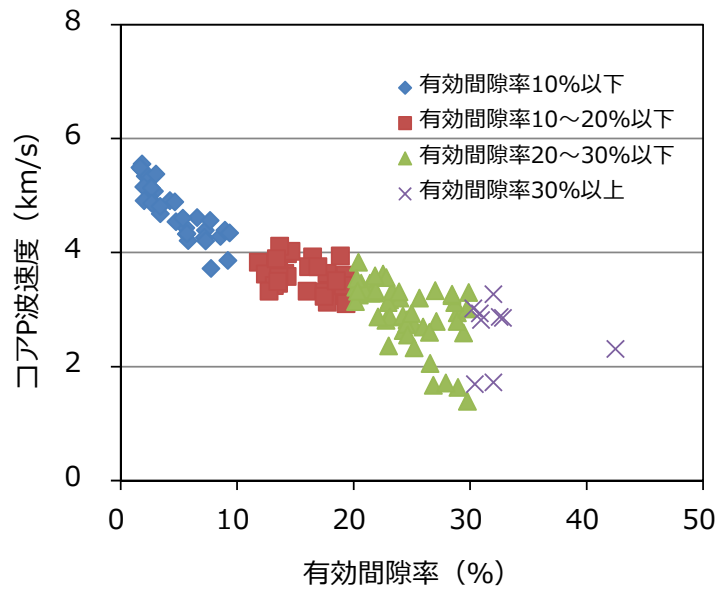


図 8 有効間隙率と P 波速度の関係

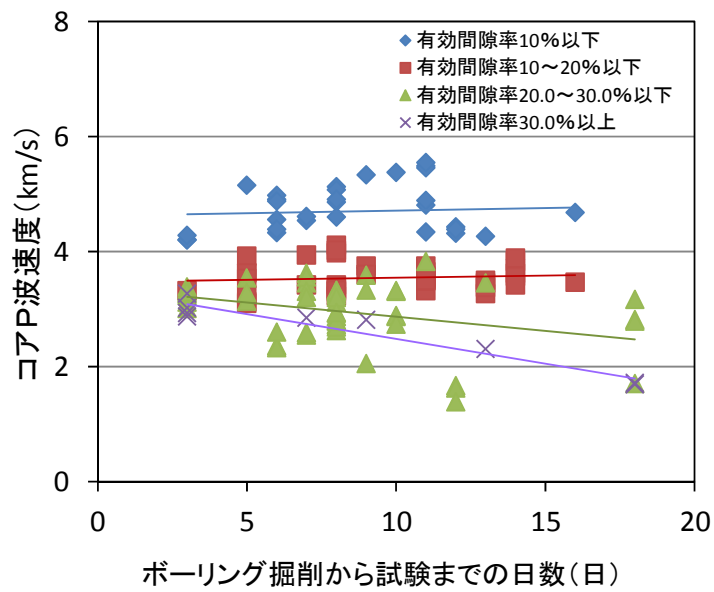


図 9 掘削からの経過日数と P 波速度の関係

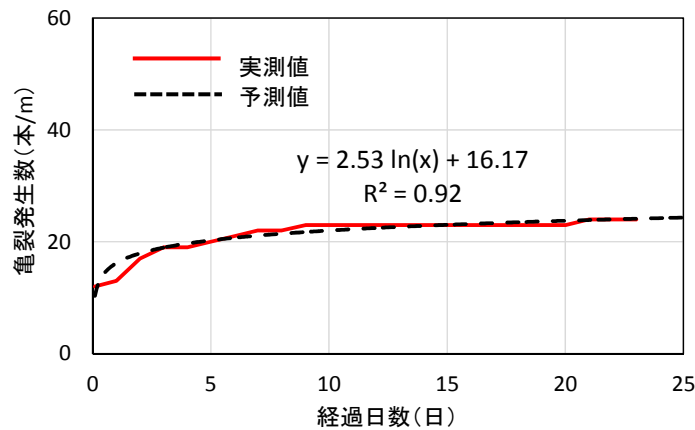


図 10 亀裂発生数の経日変化と対数近似

亀裂発生数は、図 7 のように同じ岩級区分でも、誤差ではなく、バラツキを有している。そのため、本論文では、回帰分析とは異なり、全データをもとに、発生確率が最大となる回帰係数とそのバラツキを同時に求めることができるベイズ推定 (例えば、古澄, 2008, 和合, 2005) を適用して回帰係数を計算し、岩級区分ごとに亀裂発生数の予測式を作成した。なお、バラツキは、確率分布において分散となる。ベイズ推定によって、回帰係数を確率分布として扱うことで、どの程度の分散を有するのか、また、新たなデータが追加された場合、回帰係数や分散がどのように更新されるのかを比較することができる。

ここで、(1)式の Y と X は、測定されるデータであり既知数となる。一方、回帰係数 a は未知数のパラメータである。また、 b の切片は、全ての標本において回帰係数が 1 となる定数で $1m$ ごとの初期の亀裂数に該当し、 ε は誤差である。

標準的なベイズ推定による回帰分析では、誤差の分布が平均値 0 の正規分布に従うものと仮定される (古澄, 2008)。このとき、 Y にはランダムな正規誤差 ε が含まれると見なされ、 Y は平均値と分散の正規分布に従うベイズ推定での回帰モデルとなる。また、誤差は、誤差が従う分布の分散によって推定される。このことが誤差を事前分布として求める回帰モデルのベイズ推定を導入する概念とされる。なお、ベイズ推定は、事前分布と尤度である測定データに基づく関数をもとに事後分布を求める方法である。事後分布は、従来の情報に尤度の情報が追加されることで、新たな情報を含む値として示される。なお、ベイズ推定については、「4.1 ベイズ推定について」で述べる。

表 6 に、ベイズ推定によって求めた回帰係数とその分散を示す。あわせて、岩級区分ごとの亀裂発生数の亀裂予測式を示す。なお、初期の亀裂数 b である切片は、全ての標

本において回帰係数が1となる定数であること、また、個別の観察時に付け加えることが望ましいことから、1mごとの岩級区分に応じた測定値の平均値とした。

次に、このベイズ推定によって求めた岩級区分ごとに予測式に、短期と長期の日数を入力することで、初期に発生する亀裂の割合を求めた。ここで、短期日数は、前節で調べた平均日数9日とした。また、長期日数は、これまで類似した岩石の長期観察で、コアの劣化範囲が拡大しなくなった状態を確認した日数である586日を入力値とした。

表7に、初期に発生する亀裂発生数の割合の計算結果を示す。ここでは、岩級区分ごとの予測式に、 $X=9$ と $X=586$ を入力して Y_9 と Y_{586} を求めた。

計算の結果、586日後の亀裂発生数に対する9日後の割合は、61~68%であった。このことから、本調査地での岩石は、比較的早い段階で最終的な亀裂の半数以上が発生していたことが確認された。

表6 亀裂発生数の予測式

Rock classification	The number of data (m)	The regression coefficient "a" of the approximate expression and variance by Bayesian inference		Prediction formula for crack initiation number X: observation days b: Initial number of cracks
		a	σ^2	
C _H	9	0.85	1.15	$Y_{C_H} = 0.85 \ln(X) + 4.26$
C _M	27	3.44	5.05	$Y_{C_M} = 3.44 \ln(X) + 14.69$
C _L	12	1.28	0.98	$Y_{C_L} = 1.28 \ln(X) + 8.34$
D	18	2.43	4.38	$Y_D = 2.43 \ln(X) + 12.16$

表7 初期に発生する亀裂発生数の割合

Rock classification	Predicted value of crack occurrence number Y: according to observation days		Initial crack occurrence rate Y_9 / Y_{586}
	Y_9	Y_{586}	
C _H	6.1	9.7	0.63
C _M	22.2	36.6	0.61
C _L	11.2	16.5	0.68
D	17.5	27.6	0.63

2.3.5. X線CTによる岩石の画像撮影

本試験では、1~2cmの立方体に成形したコアの岩片を容器内で浸水させて、経時的な亀裂の発生状況を北海道大学工学部が所有しているMicro focus X-ray CT scanner (Toscaner301300 μ hd) によって複数の断面のCT画像を撮影した(写真5)。

X線CT画像は、浸水前、浸水1時間後、浸水6時間後および浸水24時間後に撮影した。なお、X線CT画像は色が明るいほど高密度、低いほど低密度で表示される(写真6)。

よって、画像で白い部分は相対的に高密度な部分、逆に黒い部分は空気であるため、亀裂や空隙などに相当する。なお、本スキャナーから得られる画像のCT値は、あくまで相対的な密度コントラストとして扱った。また、X線CT画像の解像度は25~30 μ m程度である。

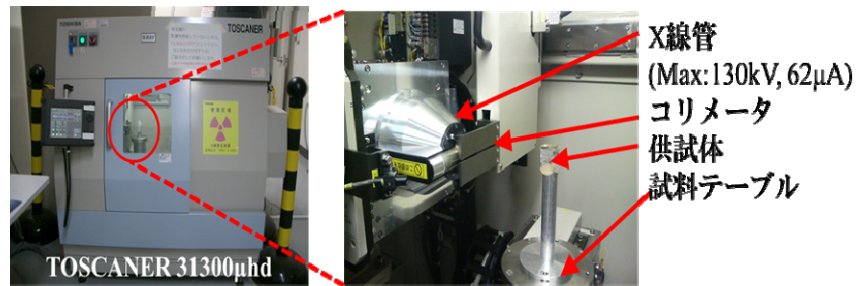


写真5 X線CT画像撮影装置(北海道大学工学部所有)

白い部分：相対的に高密度
黒い部分：低密度で空気など

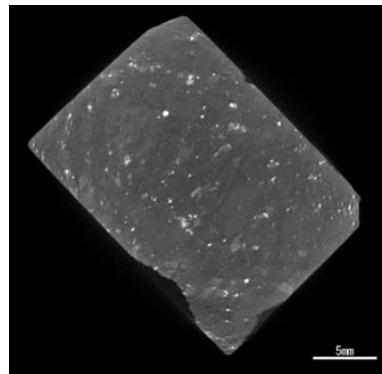


写真6 X線CT画像の撮影例

写真7に試験前後の試料の状態と、浸水時間に応じた岩石内部の亀裂の進展状況を示す。試料は、最終的には細片化したが、浸水から24時間後までの亀裂の発生状況を確認することができた。

まず、浸水1時間後には、比較的大きな亀裂が写真の左上端部で発生した。浸水6時間後、上部右方向に亀裂が進展するとともに、亀裂沿いに細片化が進行する状況が確認できる。浸水24時間後では、岩石全体に亀裂が複数発生し、脆弱な状態になっている様子が伺える。このように、浸水させることで、岩石の内部の崩壊する様子を捉えることができた。また、亀裂は大きく発生した亀裂面から細片化が進むことを確認することができた。

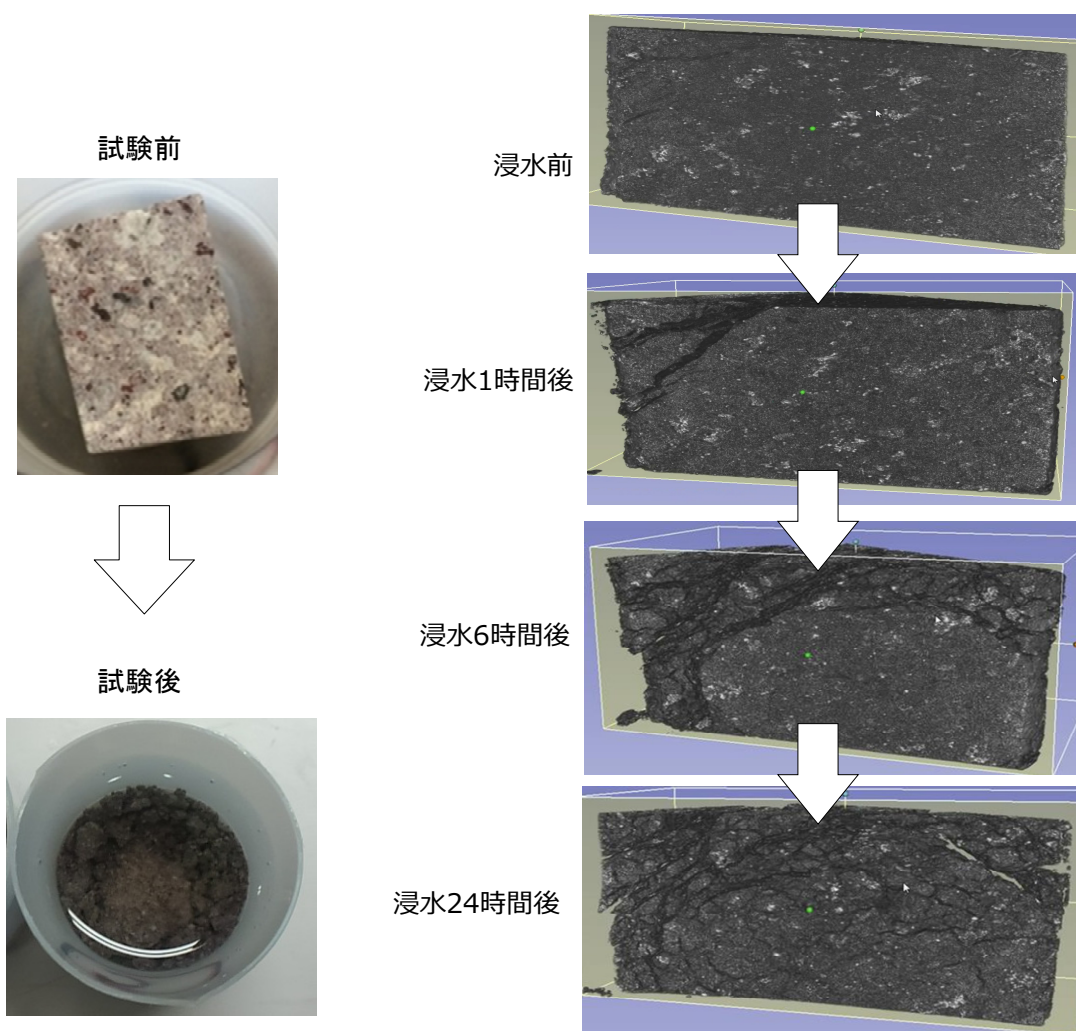


写真7 試験前後の試料の状態と浸水時間に応じた岩石内部の亀裂の進展状況

次に、岩片内部の CT 画像の白色部と黒色部を Pickmap64 という解析ソフトを用いて二値化した。その二値化した黒色部のピクセル数の増加の割合をもとに、Y 軸を二値化したデータ、X 軸を経過時間として作図し、近似式を求め、浸水過程における亀裂発生数の予測式とした。なお、経過時間は、岩片の浸水後から観察しているため、初期値は 0 でなく 0.1 時間経過した段階を初期値として、対数近似式をあてはめた。

図 11 に、二値化した岩片の内部における X 線 CT 画像の代表例を示す。二値化した画像では、時間の経過に応じて、岩片の内部においても亀裂が発生している様子を確認できる。その変化は、右側の反転画像でも判別できる。また、図 12 に浸水直後（初期）、浸水 1 時間後、浸水 6 時間後および浸水 24 時間後の黒色部をピクセル数として求めた面積の変化の割合、ならびに対数近似曲線と近似式を示す。

亀裂に対応する黒色部の増加の割合は、浸水 1 時間で 8%程度である。その後、24 時間後までに漸増して、最終的に 12%程度であった。このことから、本調査地区の岩石について、その岩片の内部における亀裂の進展状況を確認できたとともに、亀裂発生数の変化の割合を定量的に把握することができた。

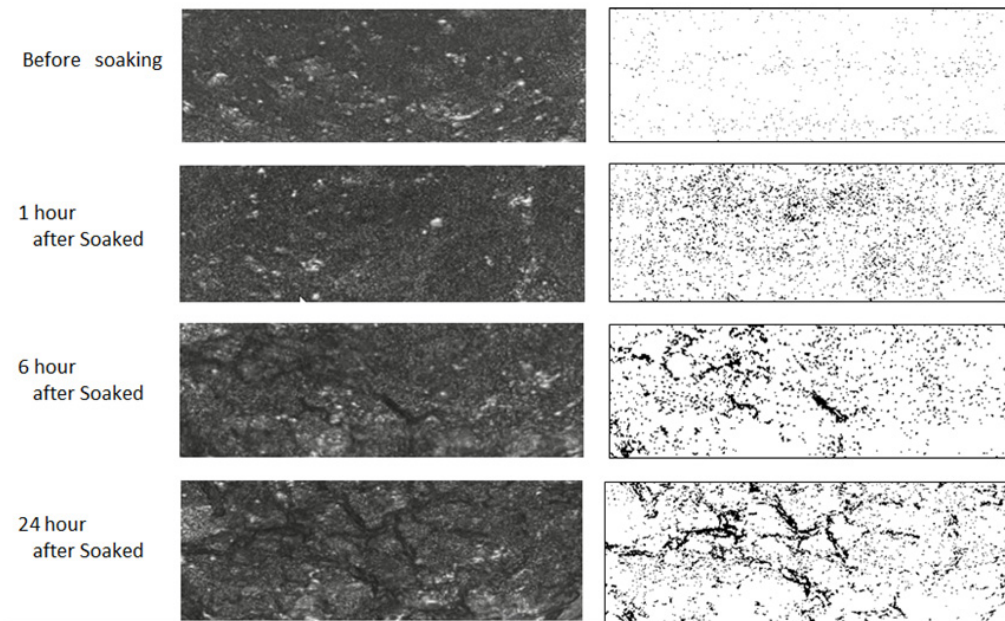


図 11 岩片内部における X 線 CT 画像（左）と二値化した画像による亀裂（右）

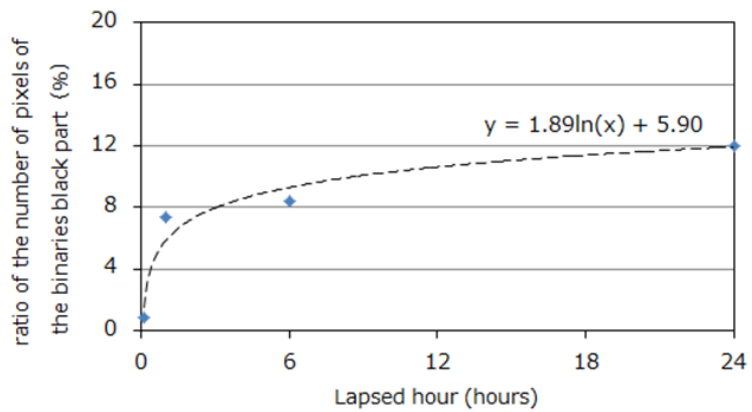


図 12 浸水直後，浸水 1 時間後，浸水 6 時間後および浸水 24 時間後の黒色部をピクセル数とした面積の変化の割合とその対数近似式

2.4. まとめ

- 1) コアにおける亀裂の発生数を観察した結果、岩級区分がCH級で最も少なく、以下、CM、DおよびCL級の順に少ない傾向を確認した。また、初期の亀裂数が多い場合、その後の発生数も多いことがわかった。
- 2) 亀裂の発生数は、比較的初期の段階で多く、その後、緩やかまたは収束するように変化する傾向を示した。亀裂発生数の予測式を作成し、経過日数(X)をパラメータとして、亀裂発生数を計算した結果、586日後の値に対する9日後の亀裂発生数は61~68%であった。このことから、本調査地での岩石では、比較的早い段階で最終的な亀裂発生数の半数以上が発生することがわかった。
- 3) 先進ボーリングコアのP波速度は、掘削から室内試験までの経過日数と有効間隙率と負の相関がある。また、有効間隙率が20%より大きくなると、経過日数が大きいときに、コアのP波速度が小さい場合がある。これは、時間の経過に応じて、岩石内部にマイクロクラック等が発生し、初期の力学特性と異なることが示唆された。
- 4) 浸水状態において岩石の状態が変化する様子をX線CT画像で撮影した結果、岩石は、大きく発生した亀裂面から細片化が進み、その後、岩石全体が細片化する状況を確認した。また、調査地の岩石について、浸水させた際に亀裂が発生する状況を二値化した画像のピクセル数の変化をもとに定量的に把握することができた。
- 5) ボーリングコアの観察結果をもとに、コアの亀裂発生数の予測式を提案した。しかし、コアによる評価では、コア自体が、状態を経時的に変化させる場合のあることがわかった。一方、現地位置での速度検層によるP波速度は、孔内の岩盤を直接測定できることから、コアよりも地山の状態を反映している。そのため、孔内で直接測定したP波速度を利用して評価する方が望ましいといえる。ただし、地山のP波速度よりも低く測定される場合があるが、岩盤や地質の悪い状態を反映していることから、実用上は問題ないといえる。

3. 屈折法地震探査と速度検層の岩盤弾性波速度の分析

3.1. 既存資料の収集と分析

これまで、北海道で建設された16の国道トンネル（総延長31km）について、測定箇所（事前の地質調査時における地山（以下、地山）、施工時の先進ボーリング調査の孔内（以下、孔内）およびコア供試体（以下、コア））における測定方法別（屈折法地震探査、速度検層および超音波伝播速度測定）の弾性波速度を岩石と地表からの深さ別に区分し、それらの関係について分析した。なお、分析に用いた岩石は、トンネルの地山分類（国土交通省北海道開発局2017）における「剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩（以下、富まない）」が55%（416断面）、「剥離性に富む古生層～深成岩（以下、富む）」が22%（165断面）および「第三紀堆積岩類（以下、堆積岩類）」が23%（171断面）である。富まない岩石は、主に塊状または火成岩類であり、富む岩石は、主に層状または変成岩類である。

図13に、岩石、地表からの深さ別の弾性波速度を測定箇所別に示す。なお、富む岩石では、200mより深い位置での調査結果はない。まず、岩石別の弾性波速度は、地山では、概ね、富む>富まない>堆積岩類の順に大きい傾向が確認できる。このことはコアの値でも確認できる。

ここで、富む岩石は、異方性を有すると考えられるが、地山や孔内で拘束されている状態では、潜在的な亀裂が顕在化しないことが弾性波速度の高い理由として考えられる。

次に、地表からの深さ別の弾性波速度は、50～200mではバラツキが多いが、50m以浅と200m以深では、岩石別にかかわらず、50m以浅の方が明瞭に低い。このことは、前者では風化の影響を受けていることが理由として考えられる。さらに、測定方法別の弾性波速度は、富まない岩石では、地山と孔内は類似した傾向であるが、コアは孔内よりも大きい値を示す。

富む岩石では、地山～孔内～コアは同程度である。堆積岩類では、孔内>地山の順に大きい傾向が確認でき、またバラツキはあるがコアと孔内は同程度であることがわかる。

以上のことから、富まない岩石と堆積岩類では、測定方法、岩石および地表からの深さに応じて弾性波速度に差が生じることから、弾性波速度を地山分類の指標として用いることは有効といえる。ただし、地山～孔内～コアの弾性波速度が同程度で比較的变化の少ない富む岩石は、弾性波速度以外の指標を用いることが地山分類において有効になる場合があると考えられる。

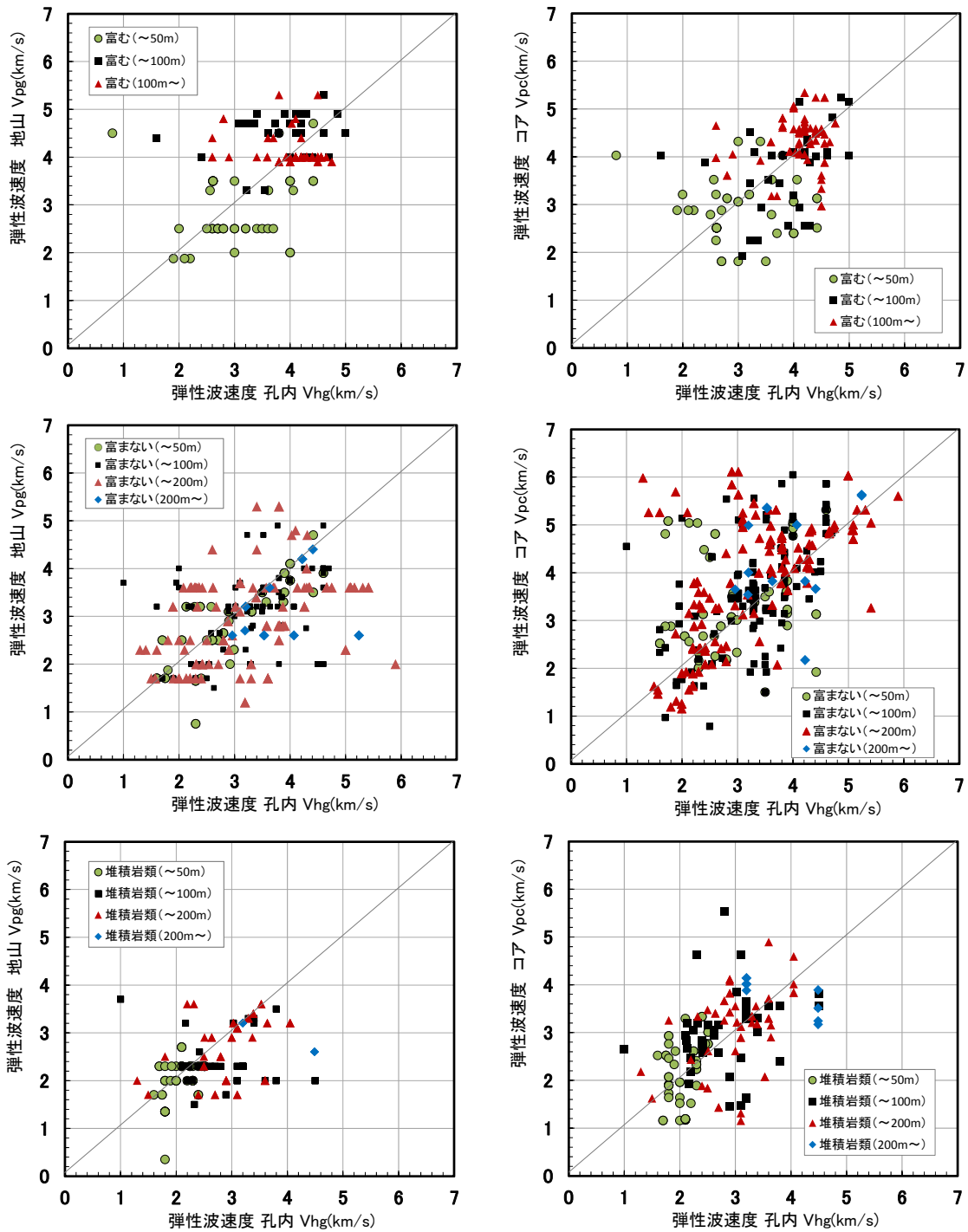


図 13 岩石と地表からの深さ別の弾性波速度

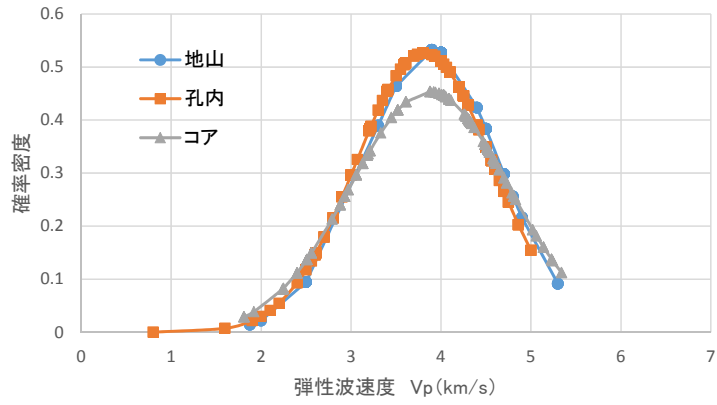
次に、図 14 に、岩石別の弾性波速度の確率密度を示す。まず、岩石別の弾性波速度は、富む＞富まない＞堆積岩類の順に大きい傾向が確認でき、前述と同様に岩石の違いに応じて評価することが有効であることがわかる。

次に、測定方法別の弾性波速度は、富む岩石では、弾性波速度が大きく、分散は他の岩石と比較して少ないが、測定方法による差は確認できない。このため、富む岩石は、いずれかの測定箇所での結果をもとに同一な評価が可能といえるが、剥離性を有することから、トンネル施工時においては、新たな指標を含めた評価も必要といえる。

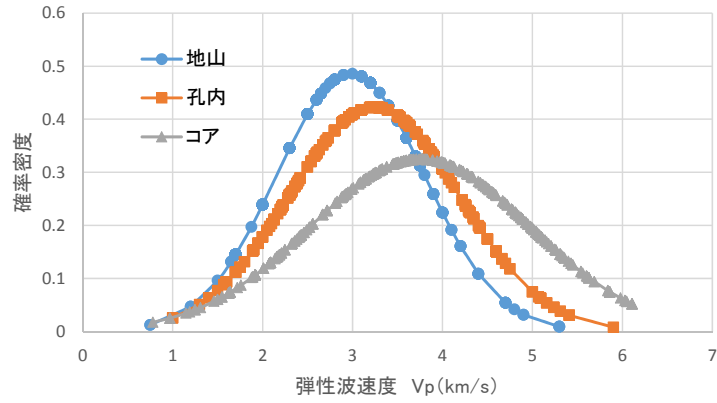
一方、富まない岩石と堆積岩類では、コア＞孔内＞地山の順に大きい傾向、また、地山＞孔内＞コアの順に分散の少ない傾向を確率密度の分布曲線の形状から確認できる。

以上のことから、蓄積データをもとに、確率密度の分布曲線を作成することで、これまでの 2 軸の項目による相関関係での評価とあわせて、統計的に分散を考慮した評価が可能になるといえる。

剥離性に富む岩石
層状・変成岩類



剥離性に富まない岩石
塊状・火成岩類



新第三紀堆積岩類

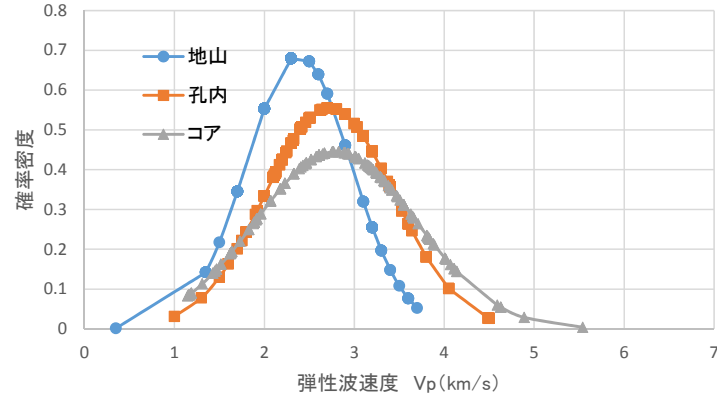


図 14 岩石別の弾性波速度の確率密度分布

3.2. 地表からの深さに応じた弾性波速度

本研究では、これまで北海道で建設された火山岩地域を貫通する国道10トンネル、総延長19.0kmを対象とした。

はじめに、設計時の地質調査で実施した屈折法地震探査による地山のP波速度(以下、 V_{pg})と施工時の先進ボーリング調査での速度検層による孔内のP波速度(以下、 V_{ph})を収集分析し、その違いについて考察した。

V_{pg} は、弾性波探査の解析に通常用いられるハギトリ法(SEGJ, 2014a)による解析結果から求められており、各トンネルの設計に利用された値である。なお、本調査の V_{pg} のデータは、解析時の資料が存在していないため、往復走時や原点走時の一致、走時曲線の平行性、施工基面へのパスの到達状況などの情報は確認できていない。しかし、実際に設計に用いられたデータであることから、データを破棄しないで活用する方法を考へることとした。なお、 V_{ph} は施工時の切羽面から掘削された先進ボーリング孔内でダウンホール法(SEGJ, 2014b)で測定した値である。使用したデータは、380区間、平均101mのボーリング孔内で得られたデータである。

図15に、 V_{pg} と V_{ph} の関係を地表からの深さ別に示す。 V_{pg} と V_{ph} は比例関係にあり、全データの回帰係数をみると、 V_{pg} は V_{ph} の80%程度の値として測定されている。また、50m以浅と200m以深を比べると前者で低い傾向にあることがわかる。

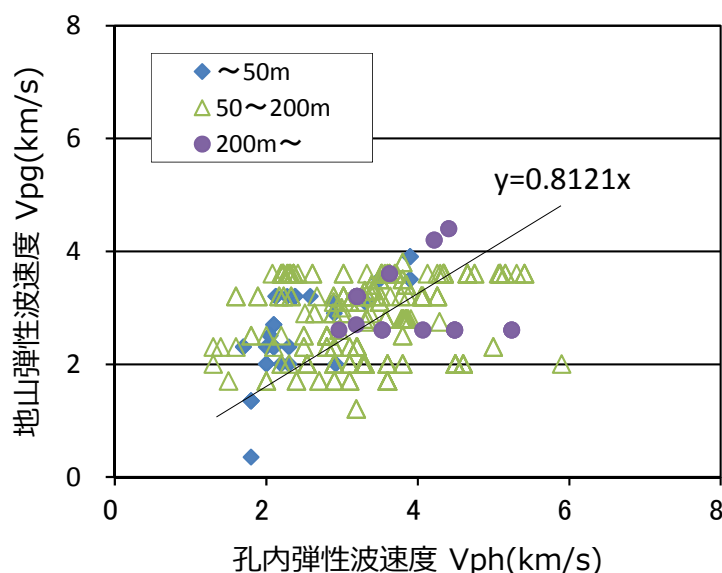


図15 V_{pg} と V_{ph} の関係を地表からの深さ別の関係

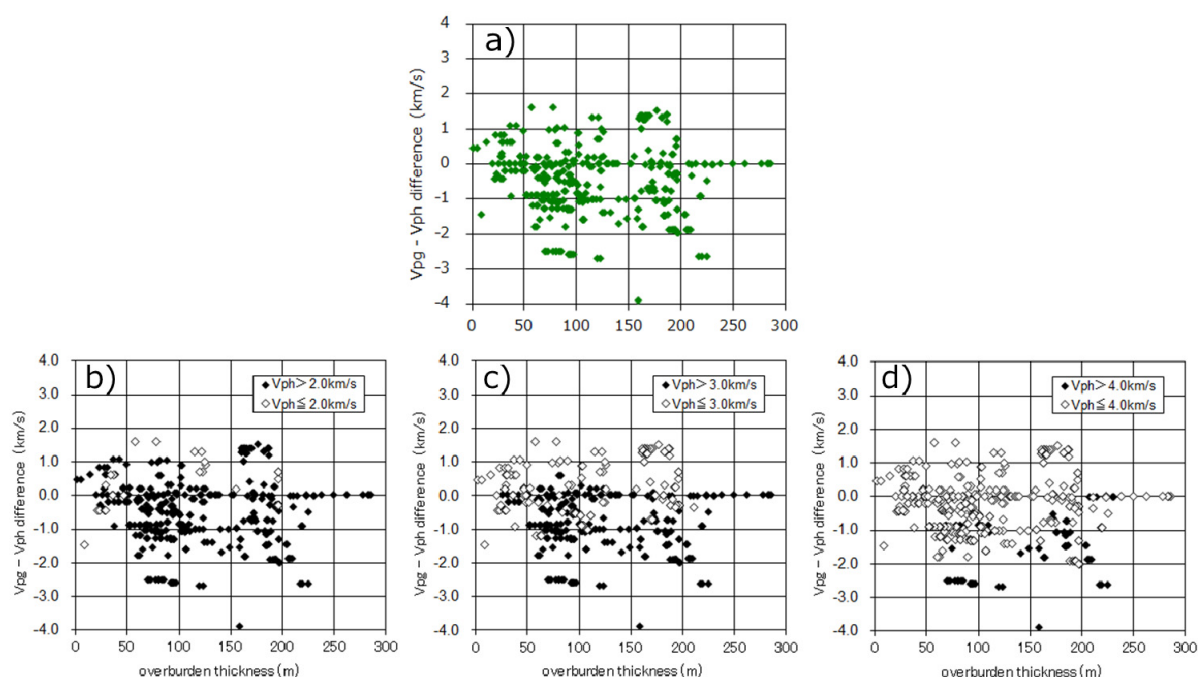


図 16 Vpg と Vph の速度差と地表からの深さ別の関係

図 16 の a) に Vpg と Vph の差と地表からの深さの関係を示す。速度差がマイナスの場合、 $V_{pg} < V_{ph}$ の領域となり、速度差がプラスの場合、 $V_{pg} > V_{ph}$ となる。速度差は、200m 以深で比較的少なく、50m 以浅では概ね $\pm 1\text{km/s}$ 以内である。

ハギトリ法の解析では、深部ほど高い速度であることが前提のため、200m 以深で Vpg が高く求められ、Vph との差が少ないと考えられる。また、50m 以浅では、速度差が概ね $\pm 1\text{km/s}$ 以内である。このことは、風化や緩みの影響が他の深度よりも大きく P 波速度がともに比較的 low に測定されることが原因と考えられる。これらのことから、地表からの深さの違いは、地山分類の評価に影響していることがわかる。

これまでの分析では、地表からの深さが 50m 以浅と 200m 以深において、P 波速度は岩種にかかわらず、後者で相対的に高い値であることを確認している(岡崎・倉橋, 2015)。また、三木 (2015) は、地すべり地で実施したトモグラフィ解析による P 波速度と地表からの深さの関係を分析し、地表からの深さが概ね 50m を境界として、それよりも深い場合では、基盤の速度が測定されていることを示している。

以上のことから、地表からの深さは、50m を境界として P 波速度の分布傾向を表すことができると考えられる。

次に、図 16 の b)～d)に V_{ph} を 2.0km/s, 3.0km/s および 4.0km/s を境界とした場合の速度差と地表からの深さの関係を示す。 V_{ph} が 2.0km/s 以下では (図 16 の b)), 地表からの深さが 50～200m の場合、速度差が 0～2.0km/s にプロットされるものが存在する。このことは、ボーリング孔周辺では、P 波速度の伝播を阻害する亀裂や軟質化した劣化ゾーンが存在し、その影響を受ける場合、 V_{ph} が低下して $V_{pg} > V_{ph}$ になることが考えられる。

今回の事例では、380 試料のうち 93 試料と全体の 24%が $V_{pg} > V_{ph}$ の領域にプロットされる。ただし、この領域の値は、 V_{ph} が低くても、 V_{ph} 自体が施工時に得られるため、地山の状態を掘削直前に把握することができる。また、 V_{ph} が 3.0km/s より大きい場合、380 試料のうち 287 試料と全体の 76%が $V_{pg} < V_{ph}$ の領域にプロットされる (図 16 の c))。

一方、 V_{ph} が 4.0km/s を超えると (図 16 の d)), 地表からの深さが 50～200m の場合、速度差が -2.0～-4.0km/s にプロットされるものが存在する。この区間は、 V_{ph} 自体は高いことから、 V_{pg} がより低く測定されている区間である。このような区間は、より安全側の評価や設計が行われる場合があると考えられる。

3.3. 事前調査時と施工時の地山分類の適合状況

トンネルの地山分類における指標とその適用範囲は、過去の設計や施工時に蓄積された実績値から設定されている。これらの値は、随時、見直しと修正が行われることで、より最適な範囲が決定され、精度良い地山分類や合理的な施工に資するといえる。

北海道の国道トンネル事業では、供用後の維持管理の円滑化、関連事業の計画立案や調査設計に供するため、施工前から施工時の地質調査成果や各種計測データなどが蓄積され整理されている。これらのデータをもとに、地山分類の指標のうち、弾性波速度、亀裂係数およびRQDの施工時の結果を岩種別に整理し、現在の地山分類表の設定範囲との対応について比較した。使用したデータは、前節と同じ、これまで北海道で建設された16の国道トンネル、総延長31kmのデータであり、岩種別の亀裂係数とRQDの関係について分析した。

図17に、岩種別の亀裂係数とRQD(5)の関係を示す。岩種別の亀裂係数（全体の速度分布から、概ね中央値である3.0km/sを境界として区分）は、富む岩石では、概ね40%以下であり、地山が良好との評価になるが、速度の違いによる明瞭な差は認められない。このため、富む岩石では、他の指標を重視した地山分類が、より有効であることがわかった。今後、トンネルの方向と岩盤の走向傾斜との対応について検討を進めたい。

富まない岩石の亀裂係数は、0~80%の範囲であり、概ね50%以下では速度が3.0km/s以上で、50%以上では3.0km/s未満であり、亀裂係数による評価も有効であることがわかる。

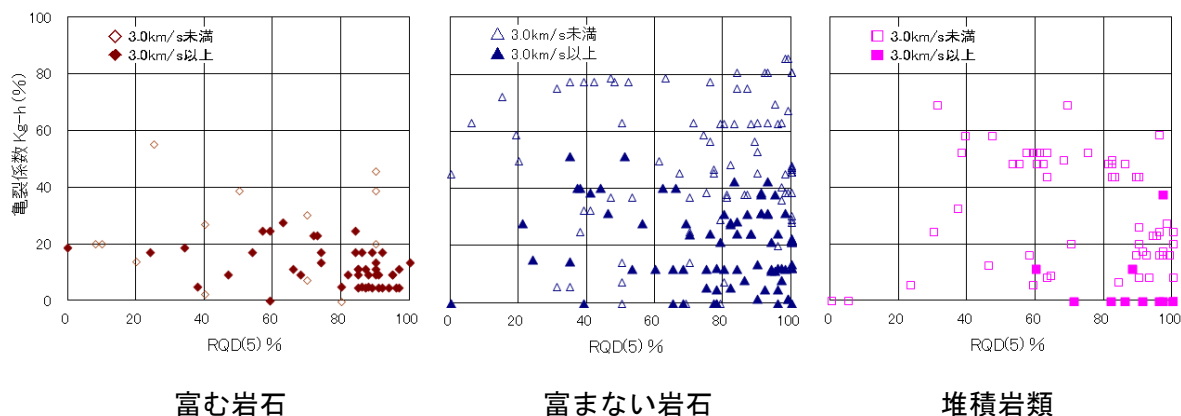


図17 岩種別の亀裂係数とRQD(5)の関係

堆積岩類の亀裂係数は、0～70%の範囲であることから、亀裂係数による評価も有効であると考えられる。また、速度の分布範囲は全般的に低い、3.0 km/s 以上で亀裂係数が小さく、3.0km/s 未満で大きい傾向が伺えることから、堆積岩類の評価においても亀裂係数による評価が有効であることがわかる。

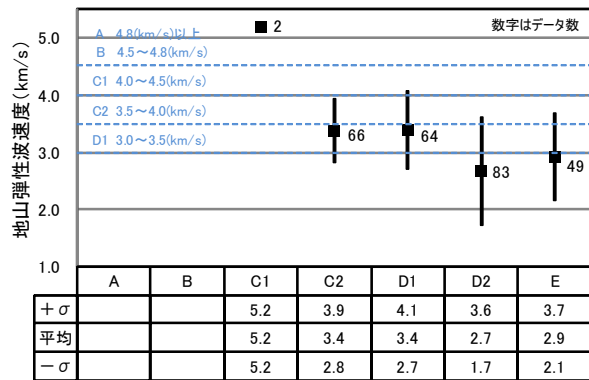
一方、RQD(5)は0～100%の範囲を示す。また、RQD(5)は、全ての岩種で、値が大きい（亀裂が比較的少ない）と速度が3.0km/s 以上であり、値が小さいと速度が3.0km/s 未満である傾向を確認でき、亀裂の状況を加味した地山分類の指標として有効といえる。

図 18 に、岩種別、地山分類別の地山弾性波速度と RQD(5)の関係を示す。速度は、地山分類が構造的上位（A から E へ）となるに従い低下し、地山が軟質または速度の伝わり難い状態を反映すると想定できる。

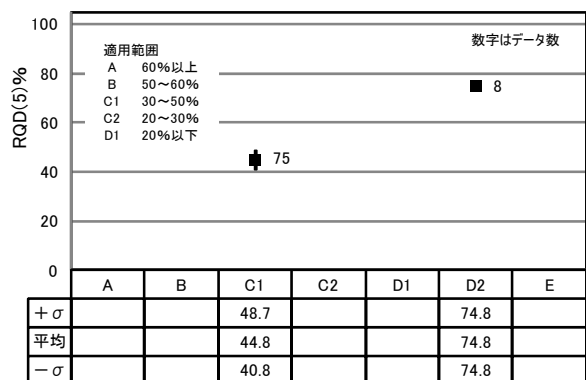
岩種別には、富む岩石では、バラツキが多いが、右下がりの傾向を確認できる。また、富まない岩石と堆積岩類では、地山分類の区分に応じて、速度が低下する傾向が顕著に認められ、地質の違いに応じた評価は有効といえる。

現在の地山分類表の適用範囲と比べると、富む岩石では、バラツキは多いが、概ね対応している。富まない岩石と堆積岩類は、概ね対応するが、構造的上位側で P 波速度が高いことから、適用範囲を見直しするなど、精度向上に向けて検討する余地のあることを示唆している。RQD は、構造的上位となるに従い低下し（富む岩石を除き）、地山の亀裂の多い状態を反映すると想定できる。

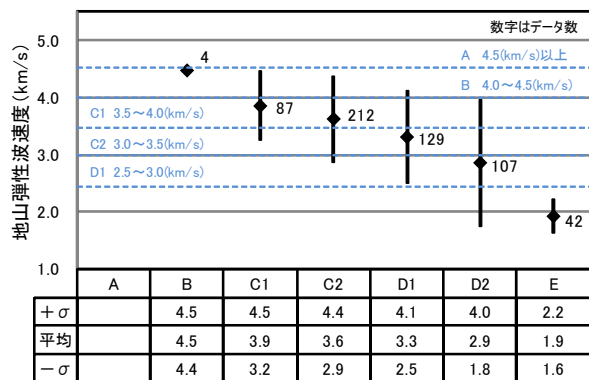
地山分類表の適用範囲と比べると、富む岩石では、バラツキが多いが、富まない岩石では、概ね適用範囲に対応する。堆積岩類は、適用範囲に対して 20～30%程度高い傾向が確認でき、現在の地山分類表の適用範囲が、速度と同様に、その適用範囲の精度向上に向けて検討の余地があることを示唆している。



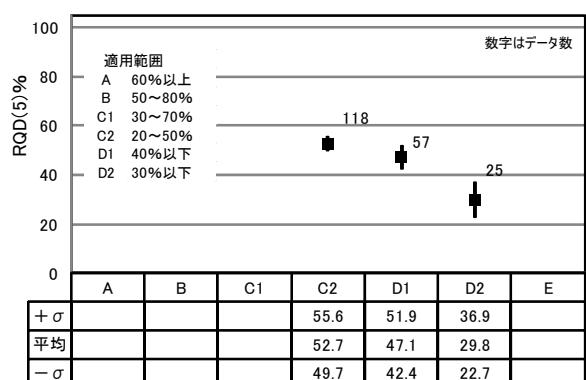
剥離性に富む古生層～深成岩



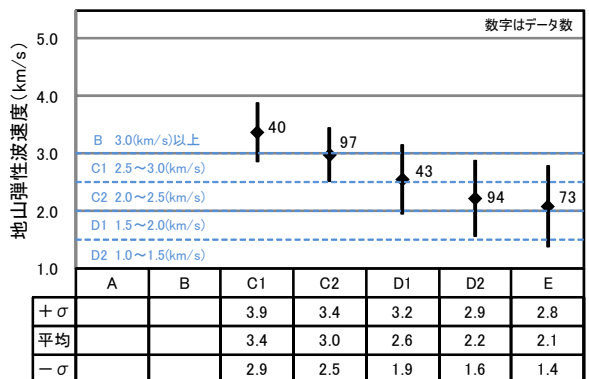
剥離性に富む古生層～深成岩



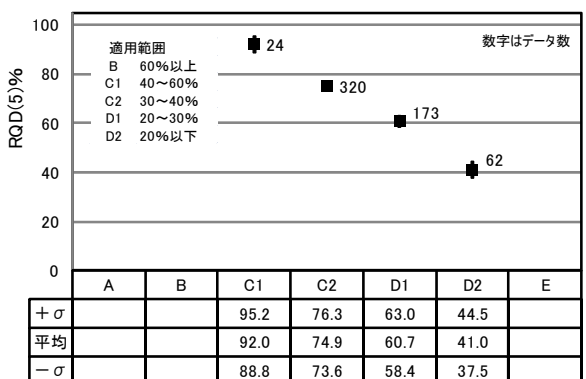
剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩



剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩



第三紀堆積岩類



第三紀堆積岩類

図 18 岩種別・地山分類別の地山弾性波速度と RQD(5) の関係

3.4. まとめ

火山岩のトンネル地山で蓄積された屈折法地震探査と速度検層による P 波速度の分析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 屈折法地震探査の P 波速度は、速度検層の P 波速度の 80%程度の値であることがわかった。
- 2) 屈折法地震探査と速度検層の P 波速度の差は、地表からの深さによって異なり、地山分類における P 波速度の評価に影響することを確認した。そのため、地表からの深さ別に P 波速度を評価することが必要である。
- 3) 事前の調査時と施工時の地山分類の適合状況を調べた結果、地山分類表の適用範囲と比べると、岩種ごとのバラツキや適用範囲に対して 20~30%程度高い傾向等、現在の地山分類表の適用範囲の精度向上に向けて検討の余地があることが分かった。
- 4) 岩種や測定方法に応じた弾性波速度を、これまでのデータをもとに分析し、弾性波速度の確率密度分布を作成した結果、岩種や測定方法によって値やバラツキが異なることを確認した。

以上のとおり、2 章と 3 章の結果から、コアを用いた評価よりも現地位置での孔内速度検層による評価が望ましいこと、また、屈折法地震探査と速度検層の P 波速度の差は、地表からの深さによって異なり、地山分類における P 波速度の評価に影響する。

このため、次章では、屈折法地震探査で得られる P 波速度を事前分布、先進ボーリング孔内の速度検層で得られる P 波速度を尤度としたベイズ推定を地表からの深度に応じで行い、現状の地山分類における適用範囲との関係を明らかにするとともに、これまでに、いくつかのトンネルで複数測定された屈折法地震探査のデータを、新たに追加した複数の速度検層のデータで補正した P 波速度を事後分布として得る方法を考案して、その結果について検証した。

4. ベイズ推定による岩盤評価法の提案

4.1. ベイズ推定について

ベイズ推定は、事前分布と尤度をもとに事後分布を求める方法である（例えば、和合、2005）。事後分布は、従来の情報に尤度の情報が追加されることで、新たな情報を含む値として示される。本分析では、事前分布を V_{pg} 、尤度を V_{ph} として、事後分布である補正後の V_{pg} をベイズ推定によって求めた。また、ベイズ推定は、連続変数の場合、以下の(2)式によって定義される。

$$f(D|\theta)\pi(\theta) \propto \pi(\theta|D) \quad (2)$$

ここで、 $\pi(\theta|D)$ は事後分布、 $f(D|\theta)$ は尤度、 $\pi(\theta)$ は事前分布であり、事後分布は、尤度と事前分布の積に比例する。また、尤度は確率密度関数であり、分散が既知の場合、観測データ列 $D = \{x_1 \cdots x_n\}$ の積として、以下の(3)式のとおり求められる。

$$f(D|\theta) = \prod_{n=1}^N f(x_n|\mu) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu)^2\right) \quad (3)$$

また、事前分布も同様に正規分布に従う場合、以下の(4)式のようになる。ここで、式の N 、 n は観測データ数、 μ は平均値、 σ^2 は分散、 x_n は観測値である。

$$\pi(\theta) = \pi(\mu) = N(\mu_0, \sigma_0^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left(-\frac{(\mu - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (4)$$

よって、ベイズ推定では、以下の(5)式のとおり、この尤度と事前分布の関数の積から、事後分布の確率密度関数を求めて、母数である平均値と分散を確率標本として計算する。

$$\begin{aligned} \pi(\theta|D) &\propto f(D|\theta)\pi(\theta) \\ &= \left(\frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu)^2\right) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left(-\frac{(\mu - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

また、分散が未知の場合、母数である平均値は正規分布に従う(6)式、分散は逆ガンマ分布に従う(7)式によって求められ、事前分布は(8)式として示される。

$$\pi(\mu | \sigma^2) = N\left(\mu_0, \frac{\sigma^2}{m_0}\right) = \frac{\sqrt{m_0}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{m_0(\mu - \mu_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$\pi(\sigma^2) = IG\left(\frac{n_0+1}{2}, \frac{n_0 S_0}{2}\right) = k(\sigma^2)^{-\frac{n_0+1}{2}-1} \exp\left(-\frac{n_0 S_0}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

$$\pi(\theta) = \pi(\mu | \sigma^2) \pi(\sigma^2) \quad (8)$$

よって、ベイズ推定では、分散が未知の場合、以下の(9)式のとおり、母数である平均値と分散から確率標本を計算する。

$$\begin{aligned} \pi(\theta | D) &\propto f(D | \theta) \pi(\theta) = f(D | \mu, \sigma^2) \pi(\mu | \sigma^2) \pi(\sigma^2) \\ &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu)^2\right) \frac{\sqrt{m_0}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{m_0(\mu - \mu_0)^2}{2\sigma^2}\right) k(\sigma^2)^{-\frac{n_0+1}{2}-1} \exp\left(-\frac{n_0 S_0}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

ベイズの基本式は(10)式のとおりであるが、分母の $P(D)$ は、データの得られる確率である。しかし、ベイズ推定では、データ D が得られた後の状態で計算していることから、この値は定数として扱われている。そのため、(10)式は、一般に(11)式のとおり示される。

$$\pi(\theta | D) = \frac{f(D | \theta) \pi(\theta)}{P(D)} \quad (10)$$

$$\pi(\theta | D) = k \cdot f(D | \theta) \pi(\theta) \quad (11)$$

ここで、(11)式の $k = \frac{1}{P(D)}$ は、データ D を得る確率の逆数となり、(12)式のとおり示される。しかし、この積分計算を解析的に求めることが難しいことから、通常は、共役分布やマルコフ連鎖モンテカルロ法ギブスサンプリング (Hastings, 1970, 中西ほか, 2007, 古澄, 2008) などによって求められている。

$$\frac{1}{P(D)} = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} f(D | \theta) \pi(\theta) d\theta} \quad (12)$$

また、ベイズ推定における事前分布は、事前分布が持つ情報を、対象となる確率モデルの推測に及ぼす影響を関連させて評価することが重要となる（森，2010）．すなわち、事前分布は、求めたい事後分布と関連するデータであることが望ましい．このため、無情報の事前分布ではなく、不確かさは含まれるが V_{pg} を用いて分析することが有効と考えられる．このことで、事後分布である補正後の V_{pg} には、従来の地山分類で用いられていた地山の P 波速度の情報が加味されることになる．

なお、本論文で取り扱う P 波速度は、地表からの屈折法地震探査による P 波速度 (V_{pg}) と先進ボーリング孔内の速度検層による P 波速度 (V_{ph}) を地表からの深度（土被り厚さ）ごとに、 V_{pg} を事前分布、 V_{ph} を尤度として、ベイズ推定後の V_{pg} を以下の(13)式のとおり求めている．

$$\begin{aligned}
\pi(\theta_g | D_h) &\propto f(D_h | \theta_g) \pi(\theta_g) = f(D_h | \mu_g, \sigma_g^2) \pi(\mu_g | \sigma_g^2) \pi(\sigma_g^2) \\
&= \frac{1}{(2\pi\sigma_g^2)^{N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_g^2} \sum_{n=1}^N (V_{ph_n} - \mu_g)^2\right) \\
&\cdot \frac{\sqrt{m_0}}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \exp\left(-\frac{m_0(\mu_g - \mu_{g0})^2}{2\sigma_g^2}\right) k(\sigma_g^2)^{\frac{n_0+1}{2}-1} \exp\left(-\frac{n_0 S_0}{2\sigma_g^2}\right)
\end{aligned} \tag{13}$$

4.2. P 波速度の統計分析

本論文では、ベイズ推定による P 波速度の補正方法を提案するが、そのためには、まず、 V_{pg} と V_{ph} のデータの正規性の検定を行った。図 19 に、本研究におけるフローを示す。検定では、はじめに期待値を計算した。期待値は、順位を修正した後の観測値について、その累積確率の逆数として求めた。その後、期待値と観測値から正規確率図を作成した。また、期待値と観測値に対する等分散の仮定の適否を確認するため、F 値とその有意確率を求めた。有意確率が 0.05 未満の場合、期待値と観測値の分散が等しいと仮定しない条件で t 検定を行い母平均の差を検定した。なお、t 検定による有意確率が 0.05 未満の場合、帰無仮説「母集団分布は正規分布である」は棄却されるものと判断した。

検定によって、 V_{pg} と V_{ph} のデータに正規性があることを確認した場合、 V_{pg} と V_{ph} の各データの μ (平均値) と σ^2 (分散) をもとに、事後分布である V_{pg} を計算する。

一方、正規性がないことを確認した場合、同時条件確率とした正規分布と逆ガンマ分布に従う μ と σ^2 をマルコフ連鎖モンテカルロ法ギブスサンプリングによって、あらかじめ求め (図 20)、その値を正規分布によるベイズ推定のための μ と σ^2 とした。

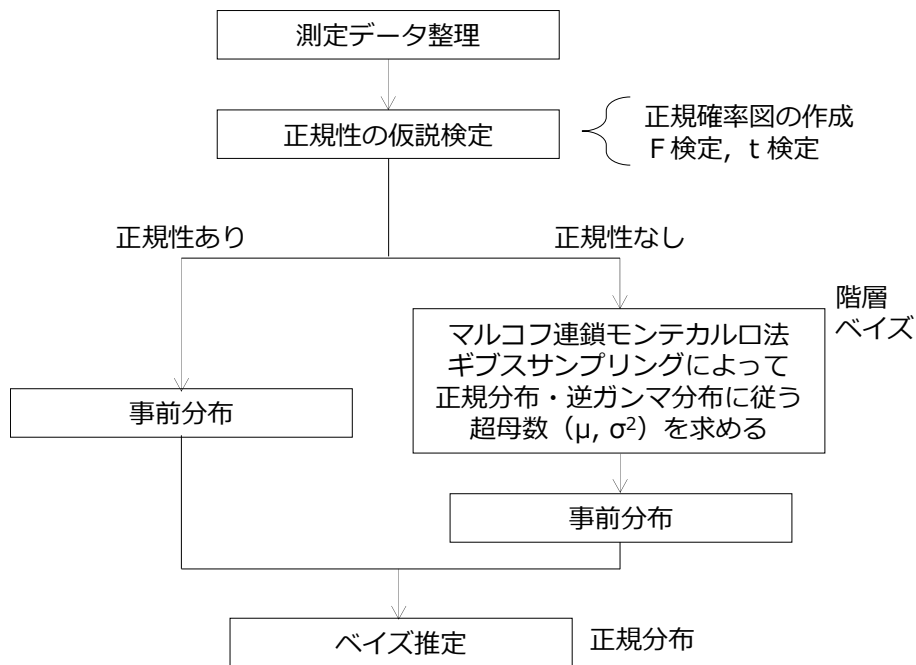


図 19 V_{pg} をベイズ推定するためのフロー図

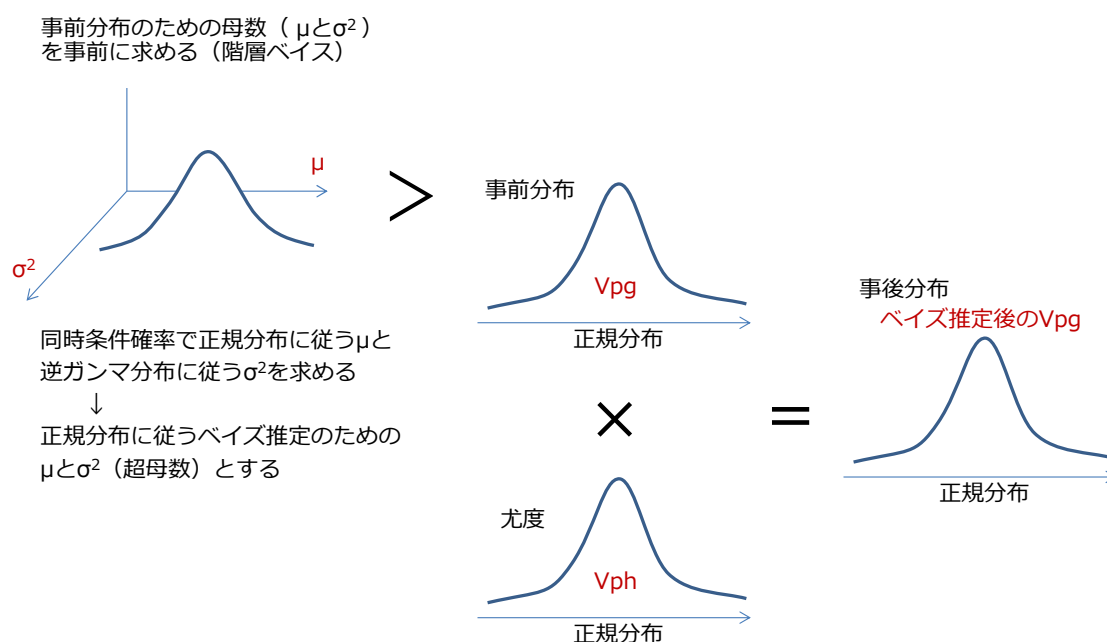


図 20 階層ベイズによって超母数を求めるためのイメージ図

ここで、ベイズ推定の前に μ と σ^2 を求めることが、階層ベイズ (豊田, 2008) による超母数 (ハイパーパラメータ) を求めることに該当する。本論文では、正規性がないことを確認した場合、事前分布のための母数を事前に求めることで分析を進めた。

この超母数の事後分布は、マイクロソフトエクセルを使用し、マルコフ連鎖モンテカルロ法ギブスサンプリングで計算した。ギブスサンプリングは、事後確率密度関数を直接求めることが難しい場合に、各パラメータの条件付き事後確率密度関数を用いて、反復的に母数の確率標本を、疑似乱数を発生させることにより、事後分布からの母数の確率標本を獲得する方法である (下村・他, 2009)。計算方法は、次のとおりである。

- 1) 分散 σ^2 の初期値を与える
- 2) 分散 σ^2 を用いて、準備した確率密度関数の累積分布の逆関数に 0 から 1 の範囲で乱数を入力して平均値 μ を求める
- 3) 上記 2) で求めた平均値 μ を用いて、累積逆ガンマ関数によって、分散 σ^2 を求める
- 4) 上記の 2) と 3) を必要数だけ繰り返す

具体的には、正規分布に従う n 個の観測データ x_1, x_2, \dots, x_n について、それらの分散 σ^2 と平均値 μ の条件付き事前分布を以下の以下の (14) 式と (15) 式の積としたとき、

$$\text{逆ガンマ分布 } IG \left(\frac{n_0}{2}, \frac{n_0 S_0}{2} \right) \quad (14)$$

$$\text{正規分布 } N \left(\mu_0, \frac{\sigma^2}{m_0} \right) \quad (15)$$

分散 σ^2 と平均値 μ の条件付き事後分布は、以下の(16)式と(17)式の積となる。

$$\text{逆ガンマ分布 } IG \left(\frac{n_1 + 1}{2}, \frac{n_1 S_1 + m_1 (\mu - \mu_1)}{2} \right) \quad (16)$$

$$\text{正規分布 } N \left(\mu_1, \frac{\sigma^2}{m_1} \right) \quad (17)$$

$$\text{ここで, } \mu_1 = \frac{\bar{nx} + m_0 \mu_0}{m_0 + n}, \quad m_1 = m_0 + n, \quad n_1 = n_0 + n,$$

$$n_1 S_1 = \frac{m_0 n}{m_0 + n} (\bar{x} - \mu_0)^2 + n S^2 + n_0 S_0$$

$$n S^2 = (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \quad \text{となる} \quad (\bar{x} \text{ はデータの平均値}).$$

なお、 m は分布の形状を決めるための自由度に関わるパラメータであり、 S^2 は標本分散である。また、添字の 0 は事前分布、1 は事後分布を示す。

本計算では、母数である分散 σ^2 の事前分布は逆ガンマ分布 $IG(0.01, 0.01)$ 、平均値 μ の事前分布は正規分布 $N(5, 4\sigma^2)$ 、仮定した (涌井, 2009)。これらを(14)式と(15)式にあてはめると、

$$\text{ガンマ分布 } IG \left(\frac{n_0}{2}, \frac{n_0 S_0}{2} \right) \text{ には, } IG(0.01, 0.01) \text{ を仮定したので, } n_0 = 0.02, S_0 = 1$$

$$\text{となる。また, 正規分布 } N \left(\mu_0, \frac{\sigma^2}{m_0} \right) \text{ には, } N(5, 4\sigma^2) \text{ を仮定したので, } \mu_0 = 5, m_0 = 0.25$$

となる。これらを入力値として(16)式と(17)式にあるパラメータを求めると、

$$m_1 = 0.25 + n, \quad n_1 = 0.02 + n, \quad \mu_1 = \frac{\bar{nx} + 0.25 \times 5}{0.25 + n},$$

$$n_1 S_1 = \frac{0.25 \times n}{0.25 + n} (\bar{x} - 5)^2 + n S^2 + 0.02 \times 1 \quad \text{となる。}$$

なお、上記の計算では、事後分布の確率標本を 5,500 個作成し、初期値の変化に影響するバーンイン区間のデータを除くため、最初の 500 個を除いた 5,000 個から求めた。なお、モンテカルロシミュレーションによる標準不確かさの最尤推定値からのズレは 1,000 回で±5%であり、試験的な計算では多くの場合、5,000 回であれば十分であることを示している (QUAM, 2012)。

図 21 に、 V_{pg} と V_{ph} の地表からの深さ別の正規確率図、表 8 に正規性検定の結果を示す。両者の正規確率図を比べると V_{pg} よりも V_{ph} で期待値と観測値の対応がよい。また、 V_{pg} では、速度の低い側と高い側の両方で期待値と観測値にズレが生じている。

正規性の検定の結果、 V_{ph} の有意確率は、全てのケースで 0.05 以上となることから、正規分布すると判断した。一方、 V_{pg} の有意確率は、50m 以浅を除いて 0.05 未満であることから、正規分布しないと判断したが、 V_{ph} との対応を把握するため、その超母数としての平均値は正規分布、分散は逆ガンマ分布に従う確率分布モデルに当てはめて、マルコフ連鎖モンテカルロ法ギブスサンプリングで計算することとした。

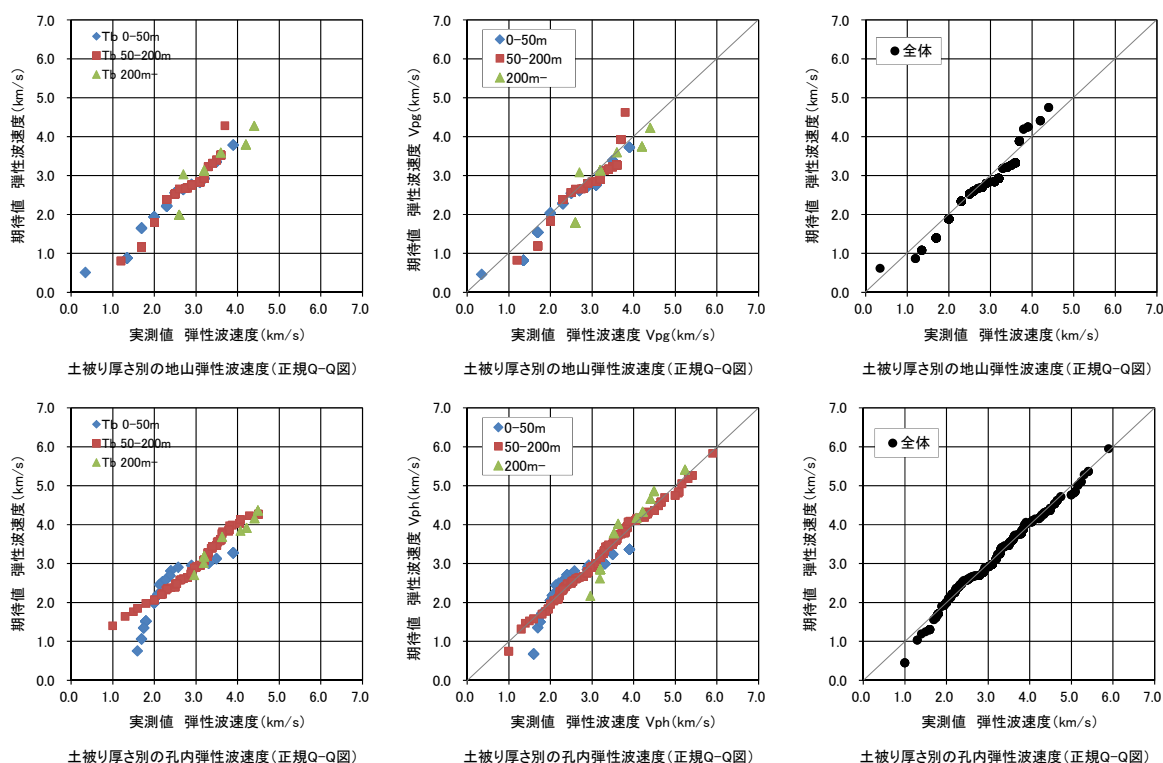


図 21 V_{pg} と V_{ph} の地表からの深さ別の正規確率図

表 8 正規性検定の結果

正規性の検定		全体	50m以浅	50~200m	200m以深
Vpg	F値	0.851	0.654	0.832	0.537
	有意確率	0.308	0.378	0.263	0.044
	t値(両側)	1.963	1.980	1.964	2.006
	自由度	828	122	644	53
	有意確率	0.004	0.258	0.001	0.038
Vph	F値	0.851	0.654	0.832	0.537
	有意確率	0.433	0.463	0.485	0.043
	t値(両側)	1.963	1.980	1.964	2.006
	自由度	828	122	644	53
	有意確率	0.615	0.413	0.620	0.931

4.3. ベイズ推定による屈折法地震探査による P 波速度の補正

図 22 に、 V_{pg} の確率標本のうち、50m 以浅の平均値と分散の計算結果を示す。また、表 9、図 23 に、ベイズ推定による計算結果、P 波速度の事前分布、尤度、事後分布の関係を示す。

ベイズ推定の結果、全体のデータにおける、事後分布 (V_{pg} を補正した値) と事前分布 (V_{pg}) の比を求めると 1.07 となり、高い値に変化した。同様に、深度 50~200m では 1.08、200m 以深では 1.12 と更新された (表 9)。

一方、50m 以浅では 0.97 と低い値へ変化した。これらの値の変化は、 V_{ph} が原位置における測定値であるため、トンネル掘削箇所の直近の状況が反映された状態に起因すると考えられる。すなわち、ベイズ推定によって、新たに情報が追加されることで、屈折法地震探査による P 波速度は、精度の良い値に更新されたと考えられる。

また、全体のデータのベイズ推定による事後分布と事前分布の比は 1.07 であることから、この値をトンネル設計時の地山分類に用いる屈折法地震探査の P 波速度に掛けることで、原位置での測定値に近い値として補正することができる。

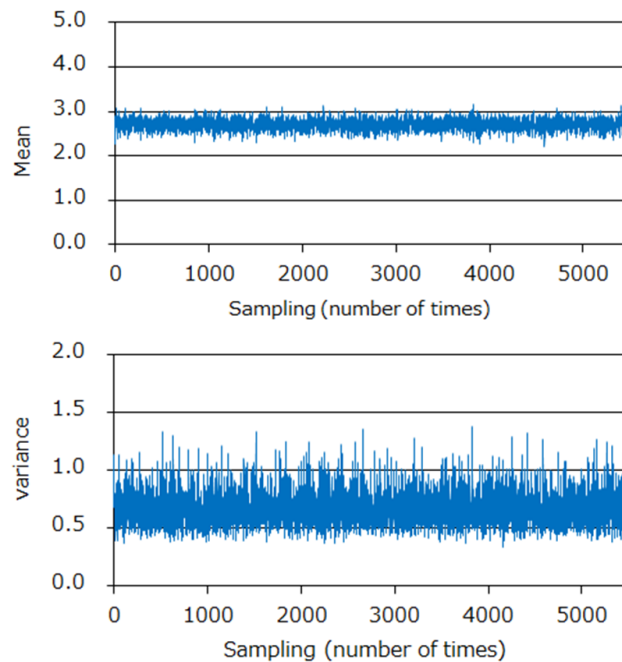


図 22 V_{pg} の確率標本のうち 50m 以浅の平均値と分散の計算結果の例

表9 ベイズ推定による計算結果

Parameter		All data	~50m	50~200m	200m~
Mean	Prior distribution	2.81	2.70	2.80	3.10
	Likelihood	3.29	2.58	3.34	3.88
	Posterior distribution	2.99	2.64	3.01	3.46
	Posterior/Prior	1.07	0.97	1.08	1.12
Variance	Prior distribution	0.47	0.67	0.46	0.41
	Likelihood	0.75	0.52	0.69	0.48
	Posterior distribution	0.29	0.29	0.28	0.22
	Posterior/Prior	0.61	0.44	0.60	0.54

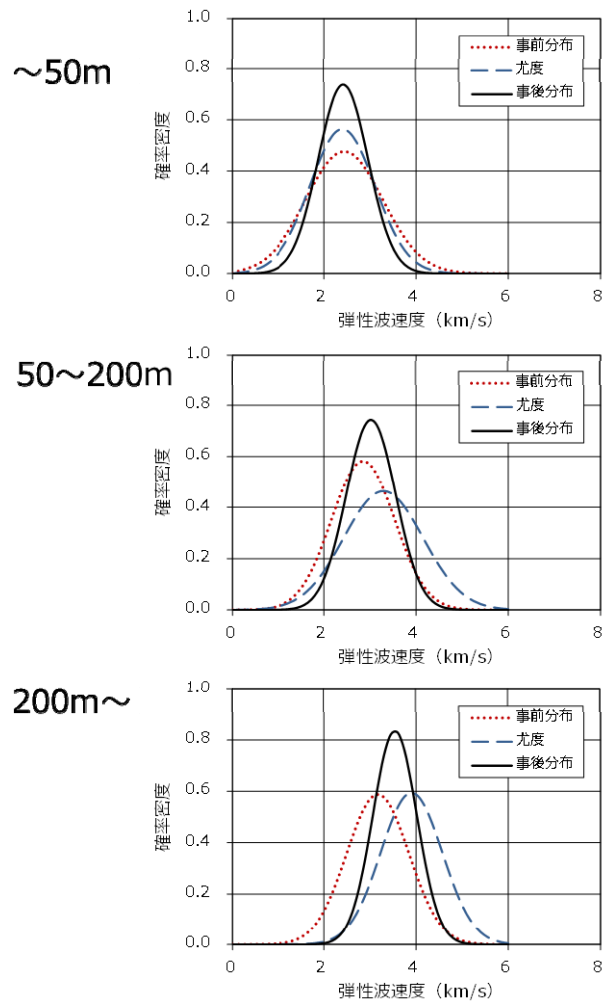


図23 P波速度の事前分布，尤度，事後分布の関係

4.4. トンネル計測データを用いた検証

4.4.1. 全データを用いた掘削前の予測

ベイズ推定によって求めた事後分布の妥当性を確認するため、実際のトンネル施工時における測定データと照合することで検証した。検証では、図 24 に示す $V_{pg} > V_{ph}$ のデータを用いた。 V_{ph} が V_{pg} よりも低い値で測定される場合、ボーリング孔周辺に亀裂や軟質化したゾーンが存在することが考えられる。そのため、掘削する地山の状態が良好でない測定値を尤度とすることで、事後分布として計算される値は、不良な状態を示すといえる。

表 10 に、図 25 の V_{ph} を事前分布とした場合の事後分布の計算結果、事後分布と事前分布の比を示す。ベイズ推定の結果、全体のデータにおける、事後分布と事前分布の比を求めると 0.94 となり、低い値に変化した。また、50m 以浅では 0.94、深度 50~200m でも 0.94、200m 以深では 0.98 と低い値へ変化した。

図 26 に火山岩を地山とするトンネルの V_{ph} 、 V_{pg} のベイズ推定値、および掘削で生じた地山の変位量である天端沈下量と内空変位量の関係を示す。ここで、 V_{pg} のベイズ推定値は、表 10 の事後分布と事前分布の比を地表からの深さに応じて V_{pg} に補正係数として掛けた値である。なお、本トンネルは、今回の分析でも対象とした延長 4,098m の道路トンネルであり、その施工時の測定データを検証に用いた。

本トンネルでは、測点 53,700 周辺において、掘削にともなう天端沈下量が 35mm、内空変位量が 25mm 生じており、その対応として補助工法が適用されて工事が行われている。掘削にともなう天端沈下量と内空変位量は、測点 53,410 から 53,680 まで徐々に増加している。

これに対して、 V_{pg} のベイズ推定値は、測点 53,410 から 53,580 までは 3.5km/s を示し、それ以降、測点 53,640 までは減少し、その後、1.6km/s と一定の速度になった。 V_{pg} のベイズ推定値が 1.6km/s となる区間では、天端沈下量と内空変位量が 20mm を超過している。

一方、 V_{ph} は、測点 53,410 から 53,500 まで 3.1km/s を示すが、その後、低下して、1.0~2.4km/s の範囲で測定された。ここで、測点 53,410 から 53,630 までは、 V_{pg} のベイズ推定値よりも V_{ph} が低い状態であるが、測点 53,630 以降は逆転している。つまり、この逆転した区間では、 V_{pg} のベイズ推定値が、 V_{ph} よりも低い値として補正されており、その違いは 1.0km/s 程度である。また、この区間では、実際に掘削が進んだところ、さ

らに 1.5 倍程度、変位量が増加した。そのため、補助工法を追加して工事が進められた。

このように、本研究で提案した方法を施工時のトンネルデータに適用したところ、変位量が大きくなった区間をベイズ推定によって補正した P 波速度で捉えることができた。また、このような情報を取得することができれば、その対策が事前に可能となり、この方法が、工事の安全に寄与できることが実証された。

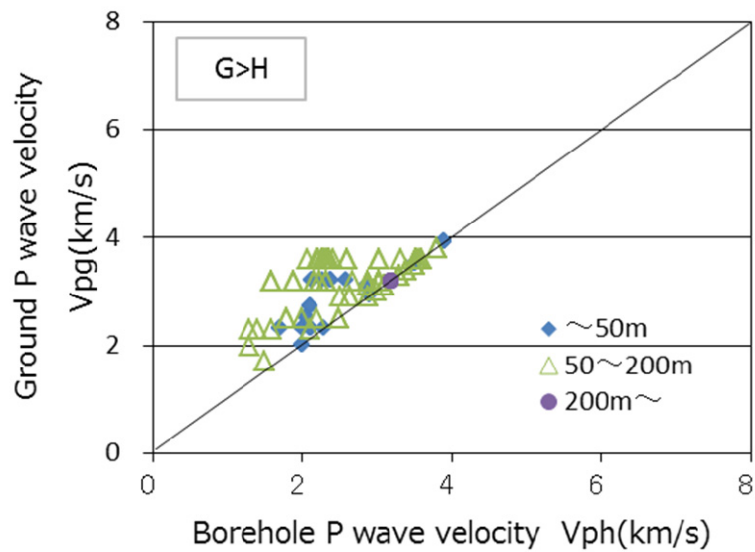


図 24 Vpg>Vph のデータ

表 10 Vph を事前分布とした場合の事後分布の計算結果

Parameter		All data	~50m	50~200m	200m~
Mean	Prior distribution	3.16	2.90	3.25	3.26
	Likelihood	2.67	2.52	2.68	3.20
	Posterior distribution	2.98	2.73	3.06	3.20
	Posterior/Prior	0.94	0.94	0.94	0.98
Variance	Prior distribution	0.24	0.40	0.20	0.13
	Likelihood	0.41	0.46	0.40	0.00
	Posterior distribution	0.15	0.21	0.13	0.00
	Posterior/Prior	0.63	0.54	0.67	0.00

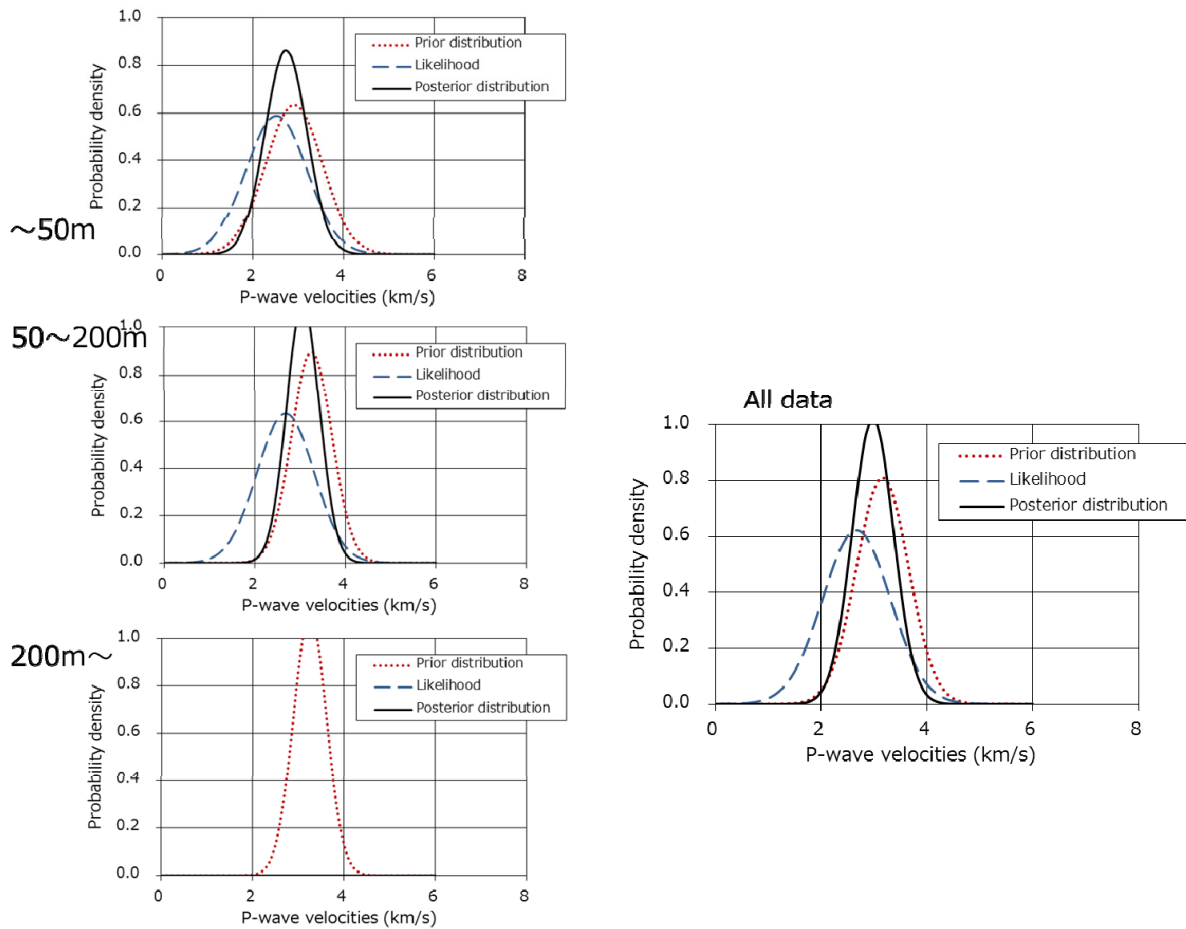


図 25 Vph を事前分布とした場合の事後分布の計算結果

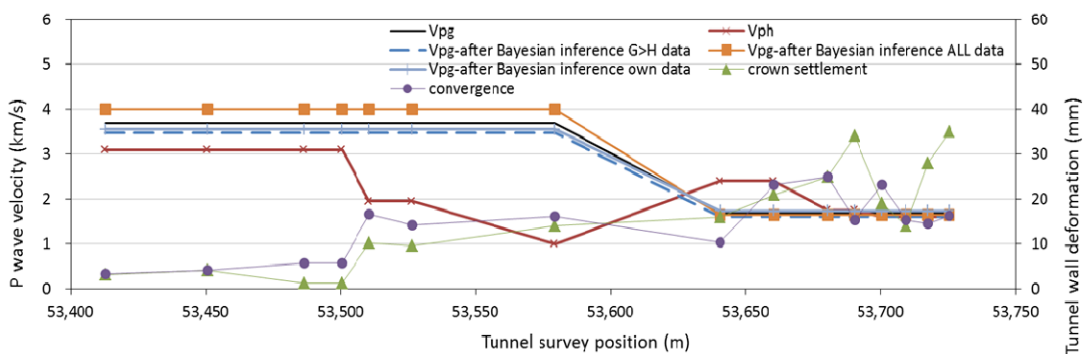


図 26 火山岩を地山とするトンネルの V_{pg} , V_{ph} , V_{pg} のベイズ推定値 (条件: $V_{pg} > V_{ph}$, 11 トンネルのデータによる V_{pg} , 本トンネルのデータのみによる V_{pg}) および掘削で生じた地山の変位量である天端沈下量と内空変位量の関係

表 11 地山分類表の火山岩における P 波速度とベイズ推定後の P 波速度の関係

地 山 区 分	剥離性に富む 古生層～深成岩		剥離性に富まない 古生層～ 深成岩，火山岩		第三紀堆積岩類		亀裂係数 K (%)	主な地質状況
	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)		
A	4.8以上	60以上	4.82- 4.5以上 -4.23	60以上				1. 新鮮にて亀裂ほとんどない 2. 肌落ちほとんどない
B	4.5～4.8	50～60	4.28-4.82 4.0～4.5 3.76-4.23	50～80	3.0以上	60以上	25以下	
C I	4.0～4.5	30～50	3.75-4.28 3.5～4.0 3.29-3.76	30～70	2.5～3.0	40～60	25～50	1. 新鮮にて亀裂少ない 2. 肌落ち少ない
C II	3.5～4.0	20～30	3.21-3.75 3.0～3.5 2.82-3.29	20～50	2.0～2.5	30～40	50～70	1. わずかに風化，亀裂やや多い 2. 肌落ち多い
D I	3.0～3.5	20以下	2.68-3.21 2.5～3.0 2.35-2.82	40以下	1.5～2.0	20～30	70～80	1. 風化受け亀裂多い 2. 一部変質破砕帯あり

次に，図 23 と表 9 のベイズ推定による計算結果（11 トンネルのデータを用いたベイズ推定後の Vpg），図 25 と表 10 のベイズ推定による計算結果（Vpg が Vph より大きくなるデータを用いたベイズ推定後の Vpg）をもとに，事前分布と事後分布の比を求めて，現状の地山分類表における本調査で対象とした岩種である火山岩の P 波速度の設定範囲に対し，補正される値を掛けた後の値を求めた（表 11）。

11 トンネル全体のデータでは，ベイズ推定後の Vpg は 7%増加，11 トンネルの Vpg > Vph のデータでは，ベイズ推定後の Vpg は 6%低下した。その結果を，前者は上段，後者は下段に記入した。地山分類表で設定されている P 波速度の設定範囲と比べると，例えば，CI では，本来の 3.5～4.0 に対して，前者が 3.75～4.28，後者が 3.29～3.76 となった。それらの値は，6～7%更新された値であるが，前後の地山分類で設定されている速度の範囲に変更されることがわかる。つまり，数%の更新の割合でも，地山分類の変更に対応できることがわかった。

4.4.2. 個別トンネルでの検証

次に，ベイズ推定の効果を検証するため，さらに，以下の 4 トンネル（北海道の道路トンネル，2008）の測定データである変位量との対応を分析した。ベイズ推定では，各トンネルの「地表からの深さ 50m まで」「50～200m」のデータから，事後分布を求めた後，

事後分布／事前分布の比を各トンネルの V_{pg} と比較した．その結果を図 27～30 に示す．

各トンネルでは，トンネルの V_{pg} , V_{ph} , V_{pg} のベイズ推定値（条件： $V_{pg} > V_{ph}$, 11 トンネルのデータによる V_{pg} , 各トンネルのデータのみによる V_{pg} ）および掘削で生じた地山の変位量である天端沈下量と内空変位量の関係を示すとともに，各トンネルのデータのみによる V_{pg} の計算結果とその確率密度分布を示した．

1) 一般国道 229 号キナウシトンネル 44 データ

$L=1,008.0m$ 火砕岩類・安山岩溶岩，変位量 5mm 程度

図 27 に示した結果によると，本トンネルでは，全体のデータにおける事後分布と事前分布の比を求めると 1.10 となり，高い値に更新された．また，50m 以浅では 1.01，深度 50～200m では 1.15 と高い値へ更新された．このトンネルの変位量は概ね 5mm 程度であり，大きな変位量ではない．また， V_{pg} と V_{ph} もトンネル全区間で大きな変化はないが， V_{ph} よりも各 V_{pg} は低い値として更新されている．

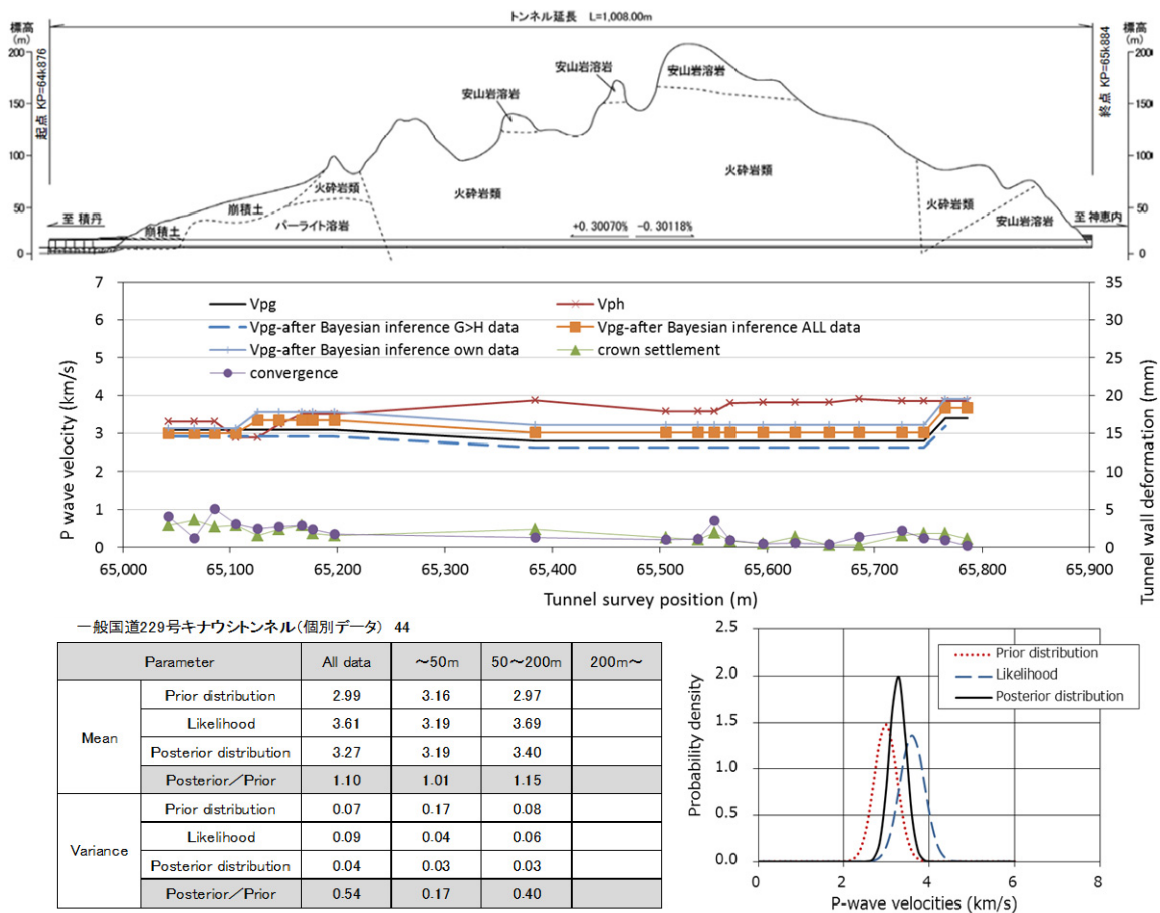


図 27 一般国道 229 号キナウシトンネルのベイズ推定

2) 一般国道 229 号沖歌トンネル 78 データ

L=2,050.5m 凝灰角礫岩・火山角礫岩・砂質凝灰岩, 変位量 局所的に 30mm

図 28 に示した結果によると, 本トンネルでは, 全体のデータにおける事後分布と事前分布の比を求めると 1.03 となり, 高い値に更新された. また, 50m 以浅では 0.87 と低い値, 深度 50~200m では 1.04 と高い値へ更新された. このトンネルの変位量は概ね 5mm 程度であるが, 局所的に 30mm を超過する箇所が存在している. また, V_{pg} と V_{ph} もトンネル全区間で大きな変化はないが, V_{ph} よりも各 V_{pg} は低い値として更新されている. ただし, このような, 局所的な変位量の大きい, 地質的に問題のありそうな区間を抽出することは難しい結果であった.

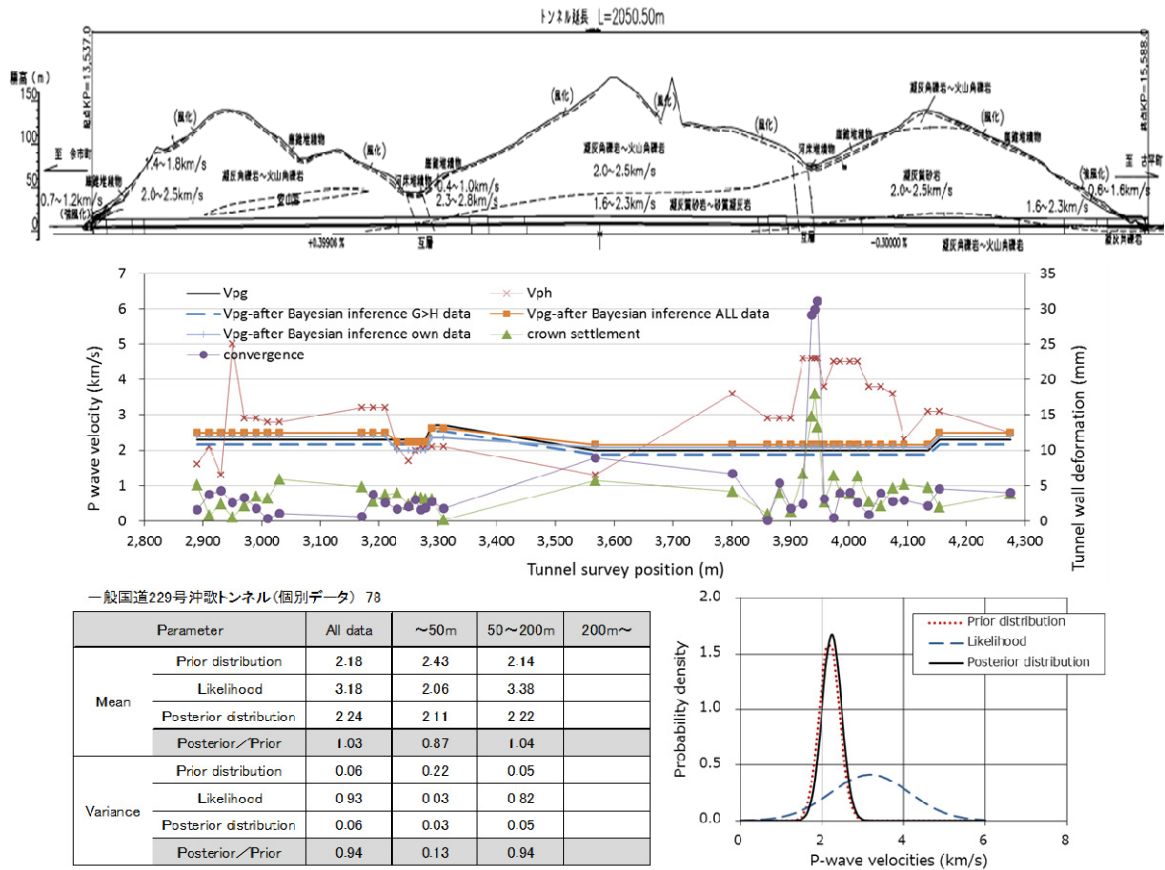


図 28 一般国道 229 号沖歌トンネルのベイズ推定

3) 一般国道 231 号ニツ岩トンネル 98 データ

L=1,793.0m 安山岩・火山角礫岩, 変位量 5~25mm

図 29 に示した結果によると, 本トンネルでは, 全体のデータにおける事後分布と事前分布の比を求めると 1.03 となり, 高い値に更新された. また, 50m 以浅では 1.07, 深度 50~200m では 1.03 と高い値へ更新された. このトンネルの変位量は概ね 5~25mm 程度である. また, V_{pg} は高い区間と相対的に低くなる区間が混在しているが, 各 V_{ph} は測点 200~600 付近で, V_{ph} よりも低い値, 測点 600~800 では, V_{ph} と同程度の値として得られている. ない, 測点 800~1,800 では, V_{ph} の測定結果とは異なり, 一様な分布として推定されていた. これは, V_{ph} で測定できて, V_{ph} では推定できない, 地質の状態が反映されていると考えられる.

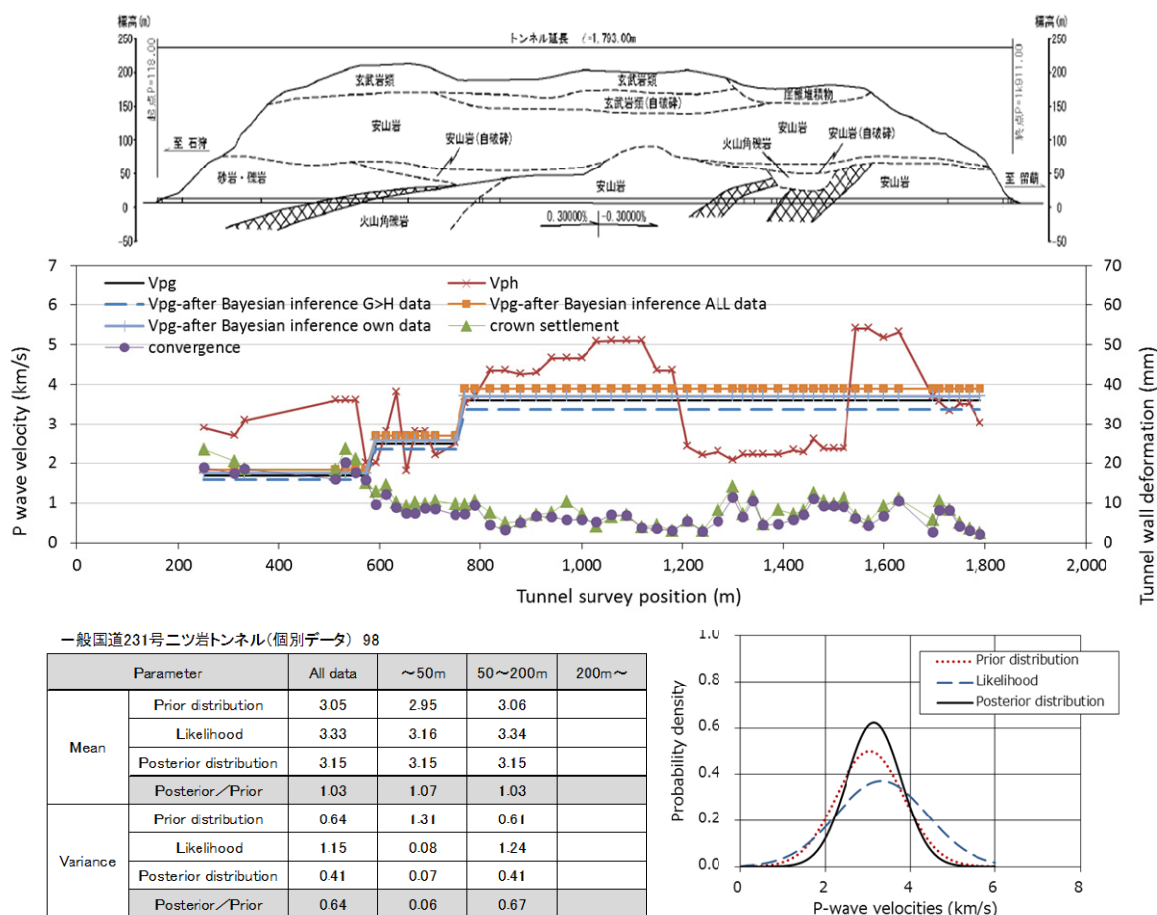


図 29 一般国道 213 号ニツ岩トンネルのベイズ推定

4) 一般国道 450 号北大雪トンネル 15 データ

L=4,098.0m のうちトンネル坑口部の 350m, 変位量 5~35mm

図 30 に示した結果によると, 本トンネルでは, 全体のデータにおける事後分布と事前分布の比を求めると 0.85 となり, 低い値に更新された. また, 50m 以浅では 1.02 と高い値, 深度 50~200m では 0.96 と低い値へ更新された. このトンネルの変位量は概ね 5~35mm 程度である. Vpg のベイズ推定値は, 測点 53,410 から 53,580 までは 3.5km/s を示し, それ以降, 測点 53,640 までは減少し, その後, 1.6km/s と一定の速度になった. Vpg のベイズ推定値が 1.6km/s となる区間では, 天端沈下量と内空変位量が 20mm を超過している. 一方, Vph は, 測点 53,410 から 53,500 まで 3.1km/s を示すが, その後, 低下して, 1.0~2.4km/s の範囲で測定された. ここで, 測点 53,410 から 53,630 までは, Vpg のベイズ推定値よりも Vph が低い状態であるが, 測点 53,630 以降は逆転している. つまり, この逆転した区間では, Vpg のベイズ推定値が, Vph よりも低い値として補正された.

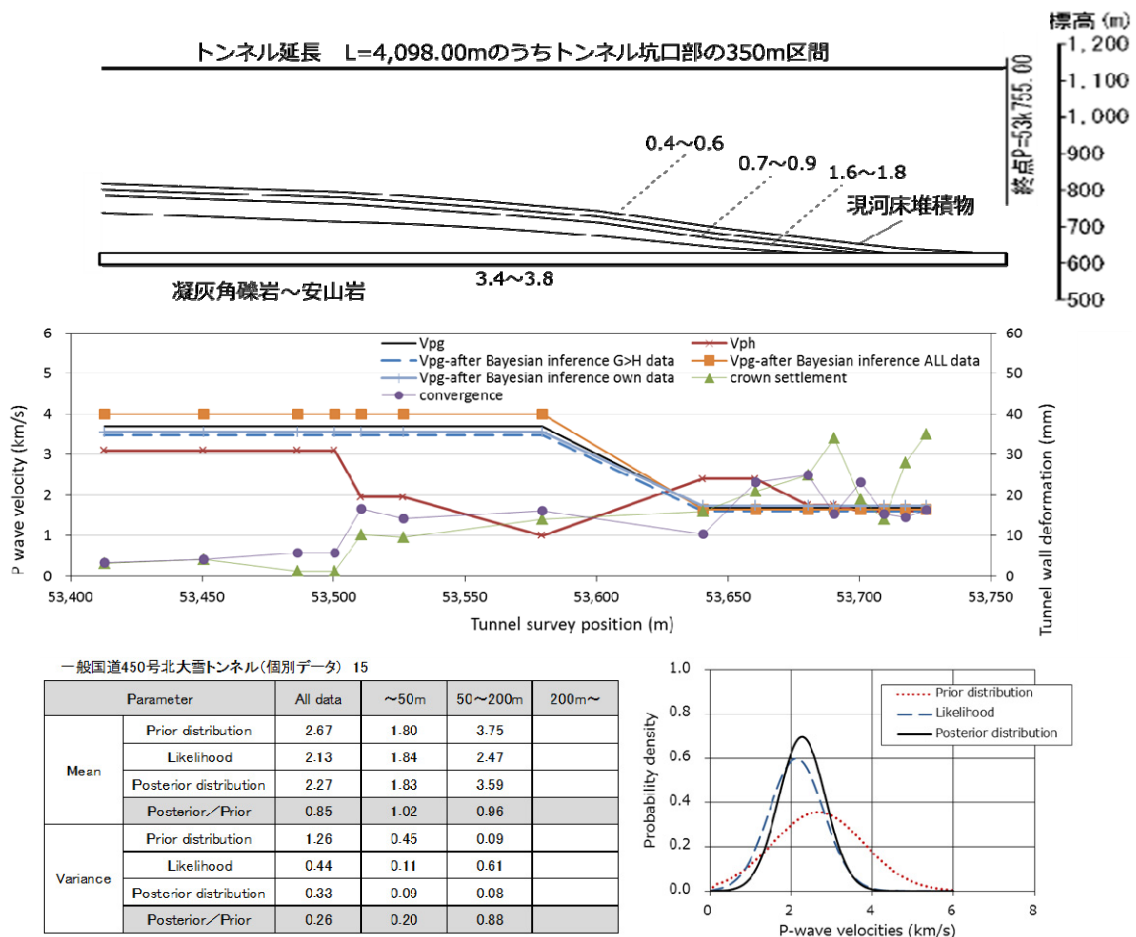


図 30 一般国道 450 号北大雪トンネルのベイズ推定

4.4.3. 掘削中における予測の検証

さらに、ベイズ推定の適用性を検証するため、Vpg, Vph のデータを有する完成後のトンネルを対象に、その施工時を想定し、それまでに得られた Vph をもとに、未掘削区間の Vpg を、どの程度予測できるのかについて分析した。図 31 にその流れを示す。

対象としたトンネルは延長 1,793m であり、すでに完成し、供用されている。また、そのトンネルでは、Vph が全線で測定されている。分析では、全区間の Vph の平均値を正解として、ベイズ推定の結果との対応を把握した。この検証は、個々のトンネルが、実際に施工される場合を想定して、調査で段階的に得られる Vph の情報を追加して、ベイズ推定することで、掘削する直前の地山の Vpg を補正する方法として活用できる。

ベイズ推定では、事前分布を地表探査 Vpg, 尤度を 1/3 掘削時までに得られた Vph, 1/2 掘削時までに得られた Vph として事後分布を求め、全区間の Vph の平均値との割合を試算した。表 12 に計算結果を示す。

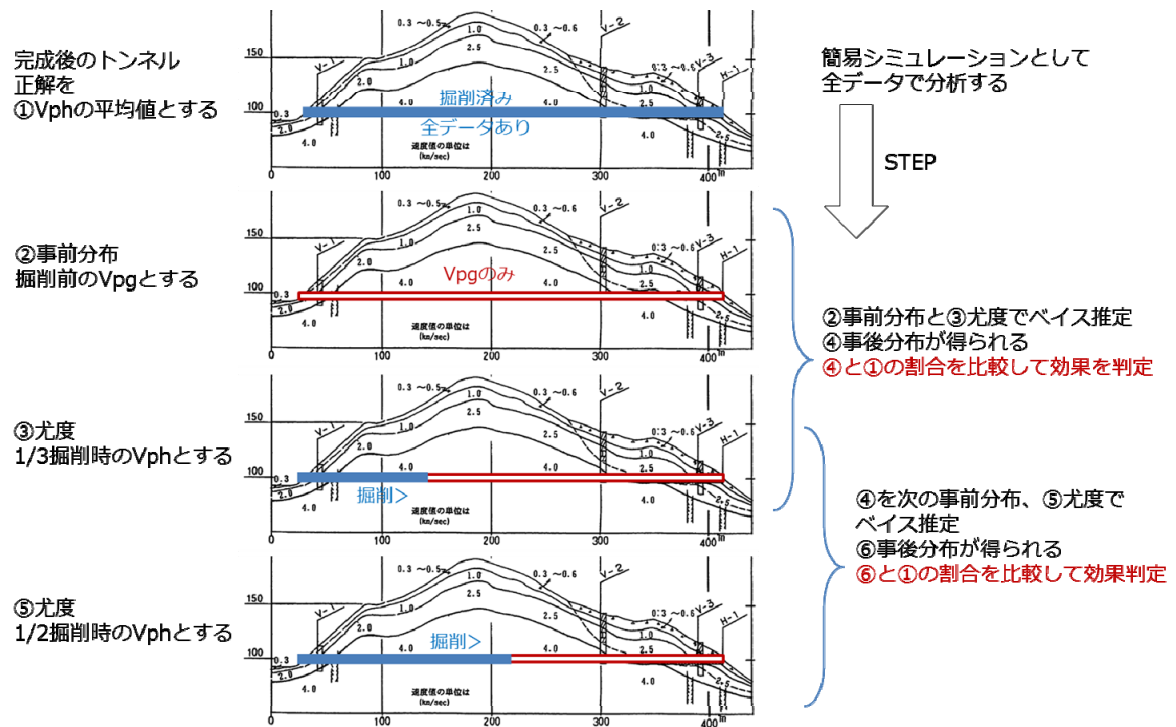


図 31 完成トンネルの測定データを用いた検証の流れ

表 12 完成したトンネルの測定結果を用いたベイズ推定の結果

分析の流れ	P波速度	効果
①トンネル全体のV _{ph} 平均値	3.38	
②事前分布(トンネル全体のV _{pg})	3.19	
③尤度(1/3掘削時のV _{ph})	2.29	
④:②と③によるベイズ推定V _{pg}	3.09	
④/①		91.4%
④:次のステップの事前分布V _{pg}	3.09	
⑤尤度(1/2掘削時のV _{ph})	3.51	
⑥:④と⑤によるベイズ推定V _{pg}	3.18	
⑥/①		94.1%

ベイズ推定の結果、1/3掘削時のV_{ph}に対するV_{pg}の割合は、91.4%であった。さらに、1/2掘削時のV_{ph}に対するV_{pg}の割合は、94.1%であった。

以上のことから、掘削に伴い、91.4%から94.1%と約3%精度が向上し、ベイズ推定を実施することで、その評価の精度向上と有効性を確認した。

4.5. まとめ

火山岩のトンネル地山で蓄積された屈折法地震探査と速度検層による P 波速度の統計的分析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 屈折法地震探査の P 波速度の母数を正規分布と逆ガンマ分布に従う確率標本から求めた。その母数を事前分布、速度検層の P 波速度を尤度としてベイズ推定を行い事後分布を求めた結果、屈折法地震探査の P 波速度は全体で 7% 高い値に変化した。
- 2) この変化は、速度検層による P 波速度を取り込むことでトンネル掘削箇所の直近の状況が反映され、より精度良い値に更新された結果といえる。また、ベイズ推定による事後分布と事前分布の比を掛けることで、地山分類に用いる屈折法地震探査の P 波速度を実際の状況に近づけるよう補正できる。
- 3) ベイズ推定によって求めた事後分布の妥当性を検証するため、その事後分布を実際のトンネル施工時における測定データと照合した結果、掘削にともなうトンネルの変位量が増加する区間を本研究で提案した方法で速度検層の情報を反映した P 波速度を推定できることを確認した。
- 4) また、ベイズ推定による弾性波速度の検証では、4 トンネルの施工時の測定データと V_{pg} の関係について分析した。その結果、火山岩全トンネルのデータよりも個別のトンネルのデータを用いたベイズ推定が、 V_{ph} に近い値を示す傾向が受けられたが、変位量が少ない場合、また、局所的に変位量が大きい区間には対応が難しいことがわかった。ただし、 $V_{pg} > V_{ph}$ のデータを用いることによって、ベイズ推定後の V_{pg} は低い値を示すことから、トンネル施工時には、安全側の情報として活用できると考えられる。
- 5) 完成後のトンネルを対象に、それまでに得られた V_{ph} をもとに、未掘削区間の V_{pg} を、どの程度予測できるのかについて分析した結果、1/3 掘削時の V_{ph} に対する V_{pg} の割合は 91.4%、さらに、1/2 掘削時の V_{ph} に対する V_{pg} の割合は 94.1% となり約 3% 精度が向上し、交差妥当性の効果を確認できた。

5. 結論

本研究において、実際に地下での岩盤の観察や直接計測が連続的に可能であるトンネル掘削作業から得られるデータを用いて分析した結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 地表探査から得られるP波速度と地下での計測で得られるP波速度の違いを調べ、その差が生じる原因について豊富なデータを用いて議論を行った。その結果、岩盤が存在する深度（トンネルの計測値としては土被り深度）により、P波速度の違いによって、それらの差が異なる挙動を示すことを示した。
- 2) また、地下岩盤の速度を推定する際に、ボーリング等で取得したサンプルを用いて、岩盤評価の参考とすることもあるが、そのようなサンプルは取得後、短期間のうちに亀裂の分布が変わり、それを岩盤評価に用いると大きな誤差が生じる可能性があることを示し、先進ボーリング孔における掘削直後のP波速度の測定値がもつとも評価に用いる値として適していることを示した。
- 3) しかし、この値は、局所的な値であるから、その広がりを推定し、たとえば、現在の掘削地点より先の岩盤の評価を行うためには、この孔内測定値を用いて弾性波探査の値をより正しい値に補正して用いることが必要と考えられる。また、そこで得られた補正值は、他の場所での補正法の根拠として用いることもできる。

そこで、弾性波探査で得られる多数のP波速度を事前分布として扱い、孔内の速度検層によるP波速度を尤度として用いることにより、ベイズ推定によって孔内測定値をもとに探査で得られたP波速度を事後確率として得る方法を提案した。

このようなベイズ推定による統計的扱いは、補正法として、これまで使われたことがなく、物理探査結果を参照した岩盤評価を改善させる新しい方法として検証し、その有効性を確認した。

また、この方法は、今後の地下岩盤のP波速度の推定精度を向上させるとともに、電磁気探査、重力探査、磁気探査法等、他の物理探査法による岩盤評価法に適用できる可能性を含むもので、それによって、断層の周辺や火山内部の岩盤の評価を改善させるものであり、広く地球物理学に関連する分野への発展も期待できる。

参考文献

- Abd Allah S., Mogi, T., Ito, H., Jomori, A., Yuuki, Y., Fomenko, E., Kiho, K., Kaieda, H., Suzuki, K. and Tsukuda, K. :Three-dimensional resistivity characterization of a coastal area: Application of Grounded Electrical-Source Airborne Transient Electromagnetic (GREATEM) survey data from Kujukuri beach, Central Japan, Journal of applied geophysics, 99, 1-11, 2013.
- 阿南修司, 脇坂安彦, 伊藤雅美, 佐々木靖人 :濁沸石によるコンクリート劣化機構—濁沸石による膨張圧の発生—, 平成 15 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.105-108, 2003.
- 安藤 誠 :弾性波速度と比抵抗を組合せた物理探査結果解釈の概要, 地質ニュース, 第 655 号, pp.12-18, 2009.
- 物理探査学会, SEGJ(The Society of Exploration Geophysicists of Japan), Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems, 2, The Seismic Refraction Method, pp.49-99, 2014a.
- 物理探査学会, SEGJ(The Society of Exploration Geophysicists of Japan), Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems, 17.1, Downhole PS Logging, pp.605-617, 2014b.
- Chen Jinsong and Michael Hoversten :Joint inversion of marine seismic AVA and CSEM data using statistical rock-physics models and Markov random fields: Stochastic inversion of AVA and CSEM data, Lawrence Berkeley National Laboratory Paper, LBNL-5270E, <https://escholarship.org/uc/item/0dg491bg>, 2013.
- Chen Jinsong and Thomas A D. :Effects of uncertainty in rock-physics models on reservoir parameter estimation using seismic amplitude variation with angle and controlled-source electromagnetic data, Geophysical Prospecting, 57, pp.61-74, 2009.
- 土木学会岩盤力学委員会 :トンネルの変状メカニズム(変状事例集), pp.214-269, 2003.
- 土木学会 :軟岩の調査・試験の指針(案), 1992.
- 土木学会 :山岳トンネルのインバート, トンネルライブラリー第 25 号, pp.295-319, 2013.
- 土木学会 :トンネル標準示方書, 山岳工法編・同解説, 2016.

- 土居繁雄, 針谷 宥, 鈴木哲也 : 変質安山岩質骨材に含まれているスメクタイトの性状, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp. 61-70, 1991.
- Felletti Fabrizio and Giovanni Pietro Beretta : Expectation of boulder frequency when tunneling in glacial: A statistical approach based on transition probability, Engineering Geology, 108, pp. 43-53, 2009.
- Guan Zhenchang, Tao Deng, Saizhao Du, Bo Li and Yujing Jiang : Markovian Geology Prediction Approach and its Application in Mountain Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 31, pp. 61-67, 2012.
- 長谷川修一, 菅原大介, 吉田幸信, 中川浩二 : 熱水変質地山ではトンネル地山評価を2度間違え, 平成23年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp. 225-226, 1999.
- Hastings, W. K. : Monte Carlo Sampling Method Using Markov Chains and Their Application, Biometrika, Vol. 57, No. 1, pp. 97-109, 1970.
- 林 幸一, 御堂島章一, 山中博之 : 変状トンネルの改築(1)・国道25号線関トンネル, トンネルと地下, Vol. 8, No. 3, pp. 22-27, 1977.
- 林 宏一, 斎藤秀樹, 赤澤正彦, トンネル物理探査研究委員会 : トンネル弾性波速度の高度化における解釈補助のためのデータベース及びソフトウェアの検討, 物理探査, 第63巻, 第4号, pp. 357-369, 2010.
- 平井公康, 鈴木照行, 秋月 亨, 八重樫 栄 : 供用中のNATMトンネルの盤ぶくれ・一般県道宮古港線小山田トンネル, トンネルと地下, Vol. 26, No. 12, pp. 19-25, 1995.
- 北海道開発局石狩川開発建設部, 豊平川ダム統合管理事務所 : 定山溪ダム工事記録, pp. 862-865, 1992.
- 北海道の道路トンネル : 北海道土木技術会トンネル研究会, 第4集(2003~2007), 2008.
- 市原健五, 下畑明夫, 青沼克貴 : 送毛トンネル補強対策について, 第34回(平成2年度)北海道開発局技術研究発表会講演集, pp. 73-78, 1991.
- 五十嵐敏文, 丸山 悠, 朝倉國臣, 服部修一 : 黄鉄鉱起因酸性水の抑制のための方解石含有岩石の利用に関する実験的研究, 応用地質, 第44巻4号, pp. 234-242, 2002.
- 今村 仁, 藤田圭一 : 恵那山トンネルの補強対策, 第18回日本道路会議論文集, pp. 292-293. 1989.
- 地盤工学会 : NATMにおける予測と実際, 1999.
- 片寄紀雄, 興石逸樹, 松本武海 : 緩やかな膨圧現象と付き合って30年, JR信越本線塚山トンネル, トンネルと地下, Vol. 28, No. 3, pp. 7-15, 1997.

- 加藤孝幸, 米島真由子, 岡崎健治, 伊東佳彦 : 蛇紋岩の風化作用による膨張現象—変状の引き金としての相転移, 平成 23 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 3-4, 2011.
- ケーガン, Y., パウシアウスカス, V. (西澤 修, 金川久一訳) : 岩石物性入門, 丸善, pp. 59-81, 2012.
- Kwon Myoung Jae Kwon and Roel Snieder : Uncertainty analysis for the integration of seismic and controlled source electro-magnetic data, *Geophysical Prospecting*, 59, pp. 609-626, 2011.
- 木村正樹, 大橋弘紀 : 弾性波速度の低減を考慮した合理的な支保の選定について, 応用地質技術年報, No. 22, pp. 117-125, 2002.
- 小林弘元, 白濱 龍, 畝田篤志, 柴田勝博, 永渕 洋, 山本拓治 : 塑性圧によるトンネルの変状と対策事例について (その 1 調査および設計) 土木学会第 64 回年次学術講演会論文集, pp. 631-632, 2009.
- 国土交通省北海道開発局 : 道路設計要領, 第 4 集トンネル, 第 2 章, pp. 13-29, 2017.
- 古澄英男 : 21 世紀の統計科学, マルコフ連鎖モンテカルロ法入門, 日本統計学会, pp. 257-289, 2008.
- 松尾茂生, 滝沢俊次, 大谷政敬 : ロックボルトを利用した盤ぶくれ対策, 国道 7 号朝日トンネル, トンネルと地下, Vol. 11, No. 11, pp. 19-29, 1980.
- 三木 茂 : 大規模地すべりとゆるみ岩盤における物理探査の適用, 日本応用地質学会平成 27 年度シンポジウム予稿集, pp. 53-58, 2015.
- 森 治憲 : ベイズ法における事前分布の持つ情報の評価法, 日本統計学会誌, 第 40 巻, 第 1 号, pp. 1-22, 2010.
- 中田正夫, 伊藤 洋 : 供用中トンネルにおける変状と対策, 上信越自動車道路浅間山トンネル, トンネルと地下, Vol. 31, No. 4, pp. 7-14, 2000.
- 中西準子, 花井荘輔, 蒲生昌志, 吉田喜久雄 : 不確実性をどう扱うか—データの外挿と分布—, 丸善, pp. 210-235, 2007.
- 奈良禎太, 金子勝比古 : 岩石のサブクリティカルき裂進展の環境依存性, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム論文集, 岩の力学連合会, pp. 869-876, 2008.
- 二瓶益臣, 中曾根茂樹, 生杉嘉良 : トンネル覆工と路面変状の保全対策検討事例 (一般国道 46 号仙岩トンネル), 土木学会土木技術者実践論文集, Vol. 1, pp. 23-31, 2010.
- 日本建設情報総合センター : ボーリング柱状図作成要領 (案), 1999.
- 日本道路協会 : 道路トンネル維持管理便覧, 1993.

- 日本トンネル技術協会, 膨張性地山における鉄道トンネルの NATM の適用性に関する文献資料の調査研究報告書, 1977.
- 丹羽廣海, 村山秀幸, 岡崎健治, 山崎秀策, 伊東佳彦 : 劣化にともなう岩石の物性値変化に対する含水状態の影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演集, III-441, 2016.
- 岡崎健治, 倉橋稔幸 : トンネルの地山分類における地山, 孔内, コアの弾性波速度に関する考察, 物理探査学会第 133 回学術講演会論文集, pp. 21-22, 2015.
- Okazaki, K., Mogi, T., Utsugi, M., Ito, Y., Kunishima, H., Yamazaki, T., Takahashi, Y., Hashimoto, T., Yamaya, Y., Ito, H., Kaieda, H., Tsukuda, K., Yuuki, Y. and Jomori, A. : Airborne electromagnetic and magnetic surveys for long tunnel construction design, *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, pp. 1237-1246, 2011.
- Okazaki, K., Niwa, H., Murayama, H., Ito, Y., Sasaya, T. and Kurahashi, T. : Case study of the reconsidering of the measurement data and geological survey results of the tunnel with time-dependent, Proceedings of the 10th Asian Regional Conference for IAEG, The International Association for Engineering Geology, Tp3-P20, USB, 2015.
- 長田昌彦, T. N. Illankoon, N. M. Adikaram : 乾燥に伴う念願の弾性波速度の異方性について, 平成 23 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp. 225-226, 1999.
- 大山隆弘, 千木良雅弘, 大村直也, 渡部良朋 : 泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ, 応用地質, 第 39 巻 3 号, pp. 261-272, 1998.
- QUAM (Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement), EURACHEM CITAC Guide CG4, Third Edition, Appendix E, Useful statistical procedures, pp. 104-120, 2012.
- 斎藤秀樹 : 物理探査の品質確保と適用上の留意点, 土木学会・日本応用地質学会, 平成 27 年度シンポジウム予稿集, pp. 47-52, 2015.
- 佐久間 智, 菅原徳夫, 多田 誠 : 供用トンネルに発生したインバート隆起 (最大 95cm) とその復旧対策について—山形自動車道盃山トンネル上り線—, 第 44 回地盤工学会講演集, pp. 1271-1272, 2009.
- 鹿園直建, 木村進一, 岩井修平 : 化学的風化作用に伴う石膏の生成と源岩鉱物組成との関係, 応用地質, 第 43 巻 3 号, pp. 134-142, 2002.
- 下川多米男, 喜多孝次, 岩尾哲也 : うれしの, 俵坂トンネルの盤ぶくれ対策工事, ハイウェイ技術, No. 9, pp. 149-155, 1997.
- 下村泰造, 小林潔司, 貝戸清之, 小濱健吾 : 空港コンクリート舗装のハイブリッド劣化

- モデル, 土木学会土木計画学研究論文集, Vol.26, No.1, pp.47-58, 2009.
- Spackova Olga, Jiri Sejnoha and Daniel Straub :Probabilistic assessment of tunnel construction performance based on data, Tunnelling and Underground Space Technology, 37, pp.62-78, 2013.
- 鈴木哲也, 岩渕 武, 林 満, 森田英俊 :変質した地山中のトンネルにおける変状調査と対策, 開発土木研究所月報, No.449, pp.2-9, 1990.
- 田中芳則 :方解石の溶出にともなう組織と物性の変化, 応用地質, 第26巻3号, pp.19-25, 1985.
- 豊田秀樹 :マルコフ連鎖モンテカルロ法, 統計ライブラリー, 朝倉書店, 2008.
- 宇野晴彦, 田坂嘉章, 石田 毅, 水田義明, 工藤奎吾 :空洞掘削時挙動計測結果に基づく岩盤のゆるみ領域評価と解析手法, 土木学会論文報告集, No.722/III-61, pp.13-24, 2002.
- 歌田 実 :鉱床母岩の変質作用, 立見辰雄編, 現代鉱床学の基礎, 東京大学出版会, pp.145-159, 1977.
- 和合 肇 :ベイズ計量経済分析, 東洋経済新報社, pp.2-37, 2005.
- 涌井良幸 :道具としてのベイズ統計, 日本実業出版社, pp.150-159, 2009.
- 渡邊康夫, 監郷一博, 鈴木 尊 :供用中の新幹線トンネルで発生した路盤隆起の原因とその対策, トンネルと地下, Vol.38, No.9, pp.7-16, 2007.
- 山中浩明 :マルコフ連鎖モンテカルロ法による表面波の位相速度の逆解析, 物理探査, 第66巻, 第2号, pp.97-100, 2013.
- 吉田壽壽 :山岳トンネル地質調査としての弾性波探査の適用, 物理探査, 第63巻, 第4号, pp.289-309, 2010.

謝 辞

本論文の作成にあたり、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター地下構造研究分野（現、北海道大学大学院工学研究院環境循環システム部門国際資源環境研究室）の茂木 透教授、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター地下構造研究分野の橋本武志教授には、後期博士課程自然史科学専攻の在学中、また、本論文の審査から関わる全ての取り組みにおいて、多大なるご指導を頂いたことについて、ここに記して厚くお礼申し上げます。さらに、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター長である谷岡勇市郎教授には、本論文の審査にあたり、適確にご指導いただいたことに関して、ここに、記して厚くお礼申し上げます。

北海道大学大学院工学研究院の児玉淳一准教授、ならびに、福田大祐助教には、X線CT画像の撮影で、ご指導いただきました。ここに、記して厚くお礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり、現地調査ならびに地質調査等、貴重な岩盤の評価に関する資料を提供していただいた国土交通省北海道開発局の関係各位には、ここに記して、深謝致します。あわせて、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所の伊東佳彦地質研究監、西本 聡寒地基礎技術研究グループ長、倉橋稔幸防災地質チーム上席研究員、および防災地質チームの各研究員のみなさまには、トンネルの地質評価に関する研究業務全般を進めるにあたり、ご指導、ご助言いただいたことに関して、ここに、記して厚くお礼申し上げます。

(株)フジタ技術センター土木部の村山秀幸主席研究員、丹羽廣海主任研究員、新井智之研究員には、変状が生じたトンネルでの現地踏査や地質調査等において、各種の情報提供や情報交換、さらに貴重なご助言をいただいたことを、ここに、記して厚くお礼申し上げます。また、ジオベスト(株)の竹内睦雄氏には、物理探査の結果における地質の解釈について、多大なるご指導をいただいたことに、ここに、厚くお礼申し上げます。

最後に、北海道大学大学院理学研究院後期博士課程自然史科学専攻への入学を理解してもらい、心から支援してくれた妻と二人の娘に、ここに改めて、最大の感謝を申し上げます。