

山岳トンネルの事前調査を用いた  
コスト変動リスク評価に関する研究

平成 20 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

吉見 晋平

## 要 旨

トンネルに代表される地下構造物の建設において、設計段階では事前調査結果に基づき建設コストが推定される。しかし、事前の地盤調査に割り当てられる予算の制約から、地盤の状況を完全に把握することは困難であり、施工中に予見されない地盤条件が顕在化しコストオーバーランが生じる可能性がある。コストオーバーラン等の発生は、プロジェクトの実施母体にとって、プロジェクトの事業性に重大な影響を及ぼす。このため、事業主にとっては、コストオーバーラン等が発生する可能性について、何らかの手法を用いて事前に推定することが非常に重要な課題である。

上記の観点から本研究では、山岳トンネル建設プロジェクトにおいて、地盤の不確実性に起因するリスクを地盤リスクと定義し、地盤リスクに起因する建設コスト変動リスクを定量的に評価する手法を構築するとともに、事後評価の観点から実際の建設コストと推定建設コストの乖離について検討を加えることを主目的としている。

具体的には、地盤推定手法として外生ドリフト・クリギング手法を用いて地盤リスクのモデル化を行い、対象構造物建設コストを推定する手法を構築し、乖離量の指標を用いて建設コスト変動リスクを評価する。

さらに事例検証として、この地盤リスクを定量的に評価する手法を実際の事例に適用し事後評価を行うことにより評価手法の妥当性を検証し考察を加えている。

## 目 次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 既往の研究 .....	2
1.3 研究の目的 .....	3
1.4 本論文の構成 .....	3
第 2 章 山岳トンネル掘削プロジェクトと地盤リスク .....	4
2.1 トンネル掘削プロジェクトにおける事前地盤調査 .....	4
2.2 地盤リスク .....	6
2.3 山岳トンネルと都市トンネルにおける事前地盤調査の比較 .....	6
2.4 地盤推定手法 .....	7
2.4.1 クリギング手法 .....	7
2.4.2 外生ドリフト・クリギング手法 .....	9
第 3 章 事例検証 山岳トンネル建設プロジェクト .....	12
3.1 山岳トンネル建設コスト推定手法 .....	12
3.2 R トンネル事例検証 .....	12
3.2.1 R トンネル概要 .....	12
3.2.2 弾性波速度分布の推定 .....	13
3.2.3 屈折法弾性波探査結果を用いた地山区分の推定 .....	14
3.2.4 比抵抗値分布の推定 .....	15
3.2.5 比抵抗電気探査結果を用いた地山区分 .....	15
3.2.6 R トンネル建設コストの推定 .....	16
3.2.7 R トンネル建設コスト変動リスク評価に関する考察 .....	17
3.3 T トンネル事例検証 .....	17
3.3.1 T トンネル概要 .....	18
3.3.2 弾性波速度分布の推定 .....	18
3.3.3 屈折法弾性波探査結果を用いた地山区分の推定 .....	18
3.3.4 比抵抗値分布の推定 .....	19
3.3.5 T トンネル建設コストの推定 .....	19
3.3.6 T トンネル掘削コスト変動リスク評価に関する考察 .....	20

第 4 章 土被り厚さを考慮した弾性波速度分布・建設コストの推定.....	22
4.1 土被り厚さを考慮した弾性波速度分布の推定 .....	22
4.1.1 R トンネルの地山区分の推定 .....	23
4.1.2 T トンネルの地山区分の推定 .....	23
4.2 土被り厚さを考慮した建設コストの推定 .....	24
4.3 建設コスト変動リスク評価に関する考察 .....	24
第 5 章 結論と今後の展望 .....	26
参考文献 .....	28
謝辞 .....	29

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

トンネルや地下空洞等に代表されるような構造物建設プロジェクトにおいては、事前調査の段階で弾性波探査やボーリング調査等が実施され、地盤状況を予測することで建設コストを積算するのが一般的である。しかし、事前調査に割り当てられる予算制約のために、プロジェクト施工前の設計段階において、地下の地盤状況を全て把握することは困難である。これは、地盤状況を推定する上で不確実性が存在するからである。特に、山岳トンネル建設プロジェクトのように、その建設領域が数百メートルから数キロメートルにも及ぶ線形構造物の場合は、特に顕著に現れると考えられる。

また、従来の建設プロジェクトにおける発注者は、公共事業のオーナーとなる国や地方公共団体等であり、潤沢な資金を有しており、多少のコスト変動であれば発注者がその全てを負担することが可能であった。また、地盤の不確実性に起因するリスク要因は一種の不可抗力として取り扱われるものと解釈され、これによる建設コストの変動に関する議論は活発ではなかった。しかしながら、近年、公共事業としての大型インフラ構造物の新規建設数は確実に減少している。また、公的機関が深刻な財政難に見舞われており、新たな公共事業に対し資金投下が難しくなっている。よって、プロジェクトに内在する不確実性と、それに起因する建設コストの変動を適切に評価することが重要となる。

このような状況を踏まえて、実際の地下構造物の建設プロジェクトを例として、建設コストの変動リスクを定量的に評価する手法が提案されつつある<sup>1)</sup>。しかし、これらの変動リスク評価手法は、設計段階において建設コストを推定するものであり、実施工における建設コストとの乖離については十分に検討を加えられていないと言える。よって、リスク評価手法により推定される建設コストと実際の建設コストに乖離が生じる場合、その乖離に起因する対策コストが発生してしまうので、何らかの統計手法を用いて推定する必要があると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、地盤統計学手法を用いてモデル化する検討手

法により、建設コスト変動リスクを定量的に評価した。さらに、事後評価として実際の工事終了時点で確定したコストとの関係についても検討を加えてきた。次節ではこのような既往の研究について概説する。

## 1.2 既往の研究

本節では上記のような背景を踏まえ、地盤リスクが建設コストに与える影響について進められてきた既往の研究について概説する。

- ・ 近藤<sup>2)</sup>は、実際のトンネルにおける事例を挙げ、地質情報には不確実性が含まれていることを示した。この不確実な地質情報に対する方策として、「楽観的予測」と「悲観的予測」の評価手法を提案している。また、トンネル建設におけるリスク要因としての地質調査と地質評価の不確実性に関して概念的に示し、その重要性を主張した。
- ・ Einstein<sup>3)</sup>は、トンネル施工における地盤条件の不確実性を取り上げ、それによって建設コストが変動することの重要性を指摘した。つまり、建設コストは平均値だけで評価するのではなく、変動幅を考慮することが重要であるとしている。
- ・ 大津ら<sup>4)</sup>は、実プロジェクトに対し、地盤の不確実性を取り入れている。つまり、地盤統計学手法のひとつであるクリギング手法を用いることで地質状況を推定し、また、期待値からの外れ量をリスクと定義し、リスク評価手法を提案している。
- ・ 大津ら<sup>1)</sup>は、地盤統計学手法のクリギング手法等を用いて、実際の事例における建設コストを推定し、事後評価を行った。また、推定される建設コスト変動リスクと実際の建設コストとの乖離と調査の進行との関連性について検討を加えている。

以上を踏まえ、本研究では地下構造物の中でも、山岳トンネル建設プロジェクトに着目し、事前調査を用いて推定された建設コストを定量的に評価する手法を提案する。また、既往の研究では事前調査として主に屈折法弾性波探査を用いて建設コストを推定しており、比抵抗電気探査を用いた建設コストの推定について

は十分検討されているとはいえない。よって、屈折法弾性波探査のみではなく、比抵抗電気探査についても取り上げ、建設コストを推定する。また、リスク評価手法を実際の事例に適用し、事後評価を行うことで、評価手法の妥当性を検証するとともに、地盤リスクに関する不確実性と推定建設コストの乖離の関連性について検討を加える。

### 1.3 研究の目的

本研究は、山岳トンネル建設プロジェクトにおける、地盤リスクに起因する建設コスト変動リスク評価手法の確立を目指すものである。具体的に、地盤状況を把握する目的で実施される事前調査において、特に屈折法弾性波探査と比抵抗探査、またボーリング調査に着目し、地盤統計学手法を用い建設コストを推定し、また事後評価の観点から、推定されたコストの変動リスクと実際の建設コストの関係性について検討を加えることを目的とするものである。

### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる。

第1章においては、序論として研究の背景、目的および既往の研究との関連を述べた。

第2章では、山岳トンネル掘削プロジェクトにおける流れと、地盤リスクについて解説する。

第3章では、地盤統計学手法を用いた地盤リスクのモデル化手法として、山岳トンネル建設プロジェクトを2例挙げ、外生ドリフト・クリギング手法を用いて地盤状況を推定する手法について示す。また、屈折法弾性波探査と比抵抗電気探査といった2つの異なる事前調査を用いて、両者の比較を行う。

第4章においては、山岳トンネル建設プロジェクトにおける事前調査の不確実性として、土被り厚さの影響を考慮し、地盤状況を推定し、建設コストを推定する手法について解説する。

第5章においては、本研究の結論と今後の展望について記す。

## 第2章 山岳トンネル掘削プロジェクトと地盤リスク

本章では、山岳トンネル掘削プロジェクトにおいて、施工前の段階に地盤の状況を把握することを目的として事前調査が行われる。一般的に、弾性波探査やボーリング調査等である。また、近年、比抵抗探査を用いた調査も行われている。まずは事前調査で行われるこれらの手法について整理する。

### 2.1 トンネル掘削プロジェクトにおける事前地盤調査

#### (1) ボーリング調査

ボーリング調査は、実際に孔を掘って地質の状態を確認するもので、例えば、ダムや橋等の大規模な構造物を建てる時、地下資源の探査、地盤沈下や地すべり等の災害対策等、これらの地質の状態を知る必要がある場合に実施されるものである。また、原位置で得られた岩盤に対して、強度試験や透水試験を実施することで、力学特性や透水特性を把握することが可能である。さらに、ボーリング孔において、速度検層試験や、電気検層試験等を実施することが可能である。ボーリング調査の長所は、実際に原位置で孔を掘っているので、その地点の地質状況を高精度に把握することができることにある。しかし、費用や工期の制約から、工事対象領域全体においてボーリング調査を行うことは不可能である。また、3次元空間においては、「点」または「線」の情報しか得られないので、地山全体の地質状況を把握することができない欠点が存在する。

#### (2) 弾性波探査

山岳トンネル掘削プロジェクトにおいて、事前調査で実施される弾性波探査のうち、代表的なものは屈折法弾性波探査である。屈折法弾性波探査は、地下深部ほど弾性波伝播速度が速くなる仮定に立脚して地下探査を行う手法である。具体的には、地表において人工的に弾性波を発生させ、弾性波速度が異なった地層の境界で屈折して地表に帰ってくる様子を地表に設置した測定装置で観測する。この探査結果として得られる弾性波速度は、N値や力学定数との相関性が高いと考えられており、トンネル建設プロジェクトにおいては事前の地盤状況を推定する手法として広く用いられている。弾性波探査の長所は、後述するボーリング調査

と違い、地山全体の弾性波速度を面的に得られる点にある。また、弾性波速度解析においては、「はぎとり法」<sup>5)</sup>が用いられることが一般的である。しかし、屈折法弾性波探査が地下深部ほど弾性波伝播速度が速くなる仮定に基づくものであり、解析もいくつかの前提を置いている。主に、

- ・ 弾性波速度は深部に向かうほど増加する
- ・ ある地層内では速度が一定であること
- ・ 側線の直行方向には速度が変化しないこと
- ・ 各層にはある程度の厚さがあること

等を仮定としている。ただし、実際の地盤ではこのような仮定がすべて満たされているとは限らず、そのような場合は実際の地盤と解析結果が異なっている可能性もある。特に山岳トンネルでは、土被りが100～300mとなるような場合もあり、このような状況では地表面で発生させた弾性波が届いていない可能性もある。

以上のことから、屈折法弾性波探査は、地山全体の面的な情報を得られるものではあるが、不確実性の高いものである認識が必要であるといえる。

### (3)比抵抗電気探査

抵抗電気探査は、地盤の比抵抗値分布を把握するための手法である。2次元比抵抗探査が実用化されたことで、地下構造物建設プロジェクトの事前調査においても適用される例が多くなってきている。具体的には、地盤に電極を打ちつけ、そこから人工的に電流を発生させ、生じた地盤の電位を測定することで地盤の比抵抗値分布を推定する。主に、山岳トンネル建設プロジェクトの事前調査では、変質帯や断層破碎帯等を捉える目的で使用されることが多い。つまり、実際の現場では、まず弾性波探査を行い、部分的に変質帯や断層破碎帯が存在する可能性のある時に、その問題箇所を把握するために比抵抗探査を用いるため、その使用用途は限定的である。現状では、弾性波速度のように、定量的に地盤の状況を評価するまでには至っていない。よって、本研究では、第3章に示す事例検証として、RトンネルとTトンネルにおいてこの比抵抗探査を取り上げ検討する。

## 2.2 地盤リスク

事前の地盤調査では、地下の地質状況をすべて明らかにできないことは不可能である。つまり、地盤には不確実性が存在することになる。本研究においては、このような「事前の地盤調査に割り当てられる予算制約に基づいて生じる地盤の不確実性」を地盤リスクと定義した。この地盤リスクが施工中に顕在化することにより、建設コストオーバーランや工期延長が発生することになる。

プロジェクトの進展と地盤リスクに関しては図 2.1<sup>13)</sup> に模式的に示される。すなわち、地盤リスクは事前の地盤調査実施前に最大となり、地盤調査・設計・施工と段階を踏む毎に地質情報が蓄積されていき、地盤リスクは減少していく。ただし、地盤リスクの変化は調査の量だけでなく、質にも依存することは言うまでもないであろう。また、同図の施工段階に着目すれば、地下構造物建設工事は地盤リスクが存在することを容易に理解できるであろう。地盤リスクとは、場所的に不均一性を有するため、図 2.1 で示したように、最終的に工事が終了するまで、プロジェクトサイト特有の地盤条件が確認されないことに起因するものである。つまり、本研究で対象とする地盤リスクとは、理論的にはプロジェクト現場でのボーリングあるいは物理探査等の地質調査をできる限り詳細に実施することで対処可能なものである。もちろん先にも述べたように調査に割り当てられる期間・予算の制限から調査・設計段階で地盤リスクをゼロにすることは不可能である。そのため、そのリスクが顕在化したときのコストに与える影響を、事前の調査・設計段階において確率論を用いて、定量的な評価を行っていかなければならない。

## 2.3 山岳トンネルと都市トンネルにおける事前地盤調査の比較

山岳トンネルでは、都市部で掘削されるトンネルの事前調査において、特にボーリング調査について違いが存在する。都市トンネルでは、土被りが小さい地点にトンネルが施工されることが多く、ボーリング深度も浅くてよいこと、都市部の基礎地盤は軟弱地盤であることが多く、ボーリングを掘削するための施工費が安いこと、また都市部では、既設トンネルや、水道管といったインフラ構造物が多く存在するため、詳細な地盤調査が必要であり、事前調査に対する予算も計上されやすいといった特徴があるため、ボーリング調査が数多く実施される。しか

し、山岳トンネルは、硬岩を主体とする地山に施工することが多く、都市部に比べボーリング施工費が高いこと、また一般に山岳トンネルは土被りが100～200mと非常に大きい地点を掘削するため、トンネル掘削深度の地盤情報を得るには、ボーリング深度を深く取る必要があることにより、多数のボーリング情報を得ることは困難であると言える。実際、山岳トンネルでは2km前後の長大なトンネルを掘削する場合でも、ボーリング調査は、トンネルの坑口付近に2本、また中間部に1本実施するのが一般的である。

また、前述のように、屈折法弾性波探査で得られた弾性波速度に比べ、ボーリング調査の速度検層で得られた弾性波速度はより正確であると仮定した。ここで、少ないながらも、ボーリング調査に速度検層を実施して得られた弾性波速度としての点情報と、屈折法弾性波探査で得られた不確実性が高いながらも面的な情報とを統合するような地盤推定手法として、本研究では外生ドリフト・クリギング手法を提案する。

次節では、地盤推定手法として、地盤統計学手法の基本となるクリギング手法および外生ドリフト・クリギング手法について解説する。

## 2.4 地盤推定手法

### 2.4.1 クリギング手法

クリギング手法とは、得られた点情報としての観測点に基づき、対象とする物性値の空間的な分布を厳密な内挿法に基づき算出するもので、地盤統計学手法において、最もよく用いられている。

クリギング手法において、解析の際、入力するデータは数値情報で、その結果として得られる推定値はある期待値と標準偏差に基づく正規分布を持つ値となる。クリギング手法によって得られる推定値の概念は図2.2に示す通りである。

ただし、クリギング手法は仮定として、推定対象とする場が、2次定常固有確率場であるとの仮定の下で、地盤物性値の推定を行うものである。ここで、2次定常固有確率場とは、推定対象場のある地点の物性値のドリフトと呼ばれる増分が移動不変であり、領域内においては位置に関わらずゼロであること、さらに、その物性値の分散の増分が与えられた距離  $h$  にのみ依存することを満足する確率

場である。具体的には、式(2.1)および式(2.2)を満足する確率場と定義することができる。

$$E[Z(x+h)-Z(x)]=0 \quad (2.1)$$

$$\text{var}[Z(x+h)-Z(x)]=2\gamma(x,h) \quad (2.2)$$

ここで、 $x$  は推定対象場中のある位置ベクトルを表し、 $Z(x)$  は位置  $x$  の物性値である。 $Z(x+h)$  は位置  $x$  から距離  $h$  だけ離れた地点における物性値である。また  $\gamma(h)$  はバリオグラムと呼ばれる分散に基づき算出される値である。

この2次定常固有確率場の下で、推定点  $x_0$  における値を、その近傍に存在する  $n$  個の標本点  $x_\alpha (\alpha=1, n)$  における観測値と重み係数  $\omega_\alpha$  を用いた線形結合で推定する手法がクリギング手法である。クリギング手法において、推定値  $Z^*(x_0)$  は式(2.3)によって表現される。

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha Z(x_\alpha) \quad (2.3)$$

重み係数については式(2.1)に示される定常仮定から式(2.4)の制約条件が導かれる。

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha = 1 \quad (2.4)$$

クリギング手法は、式(2.4)の制約条件下で推定誤差分散を最小にすることにより推定値を決定する。すなわち式(2.5)を満足することにより推定値を決定する。

$$\sigma^2 = E[(Z^*(x_0) - Z(x))^2] \rightarrow \min \quad (2.5)$$

## 2.4.2 外生ドリフト・クリギング手法

前述のクリギング手法は、ボーリング調査で得られるような点情報を内挿法によって線形補間する手法である。したがって、山岳トンネルのように、事前調査において、屈折法弾性波探査で得られた面的な情報が主で、ボーリング調査が少ないといった状況では、単純にクリギング手法を適用して地盤を推定することは不可能である。

このように、屈折法弾性波探査で得られた弾性波速度と、ボーリング孔に速度検層を実施することで得られた弾性波速度といった、異なる二つの手法による観測値を統合して、推定値を算出する地盤統計学手法として、外生ドリフト・クリギングが挙げられる。この手法は、まず領域全体において標本が密に得られていると同時に主変数と線形な関係をもつ補助変数群が存在する場合に適用可能である。よって本研究では、屈折法弾性波探査結果と速度検層結果を統合して、弾性波速度分布を推定する手法として外生ドリフト・クリギング手法を採用した。

ここで、推定対象となる山岳トンネルの地盤状況は、屈折法弾性波探査結果と速度検層結果で表わされる物性値が異なる2つの地盤調査手法によって観測されていることが前提である。一方の、速度検層結果のように、正確な物性値を有しているが、観測位置が少ないといったボーリング調査結果が存在する。この正確な点情報に基づき、共分散関数  $C(h)$  が算出されており、これにより2次定常確率場  $Z(x)$  をモデル化することができる。ここで、共分散関数とバリオグラムは図 2.3 に示す関係にあり、共分散関係式  $C(h)$  は式(2.6)により算出される。

$$C(h) = \gamma(\infty) - \gamma(h) \quad (2.6)$$

もう一方は、屈折法弾性波探査結果のように、不確実性は高いが、対象空間領域に対して面的な情報が得られている。これを外生ドリフト関数  $s(x)$  とおく。これら2つの観測値は式(2.7)のような相関が確認される。

$$E[Z(x)] = a + b \cdot s(x) \quad (2.7)$$

ただし  $a$  および  $b$  は定数である。式 2.7 は不確実性の高い状態で全体像を記述

する  $s(x)$  が 2 次定常固有確率場  $Z(x)$  の平均値と線形関係にあることを認めるものである。この仮定を用いることにより外生的な補助変数  $s(x)$  を用いて  $Z(x)$  の推定が可能となり、点情報と面情報を融合することが可能となる。つまり外生ドリフト・クリギング手法を、山岳トンネル建設プロジェクトの事前調査に用いることは、不確実性の高い屈折法弾性波探査結果としての弾性波速度分布を精度の高い速度検層結果を用いて修正を加えることであると言える。

以下には、外生ドリフト・クリギング手法により、具体的に推定値を算出する方法について解説する。推定値の定義はクリギング手法と同様に式(2.3)として表現される。重みが 1 である条件から式(2.8)が導かれる。

$$E[Z^*(x)] = E[Z(x)] \quad (2.8)$$

さらに、式(2.8)は式(2.9)のように展開することができる。

$$\begin{aligned} E[Z^*(x)] &= \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} E[Zd(x_{\alpha})] \\ &= a + b \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} s(x_{\alpha}) \\ &= a + b \cdot s(x_0) \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで、 $s(x_0)$  は推定点  $x_0$  における外生ドリフト関数  $s(x)$  の値である。式(2.9)の後半部が示すところは、 $s(x)$  を厳密に補間するにあたって、重み係数が式(2.4)と矛盾しないことである。すなわち、式(2.10)で示される条件が式(2.7)の仮定により導かれる。

$$s(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} s(x_{\alpha}) \quad (2.10)$$

従来のクリギング手法における制約条件式が式(2.4)のみであることに対し、外生ドリフト・クリギング手法では、制約条件式が式(2.4)と式(2.10)となる。この条件式の下で、式(2.5)を満たすように、推定値を決定する。ここで  $\mu_0$ ,  $\mu_1$  をラグラ

ンジユの未定乗数であるとするれば、式(2.5)を満たす重み係数は式(2.11)により算出される。

$$\frac{\partial Y}{\partial \omega_\alpha} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial Y}{\partial \mu_0} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial Y}{\partial \mu_1} = 0 \quad (2.11)$$

ただし、 $Y$ は式(2.11)により表される。

$$Y = \sigma_E^2 - \mu_0 \left( \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha - 1 \right) - \mu_1 \left( \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha s(x_\alpha) - s(x_0) \right) \quad (2.11)$$

ただし、 $\sigma_E^2$ は推定誤差分散であるとする。結果として、式(2.12)に示す外生ドリフト・クリギングシステムが導かれる。

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta C(x_\alpha - x_\beta) - \mu_0 - \mu_1 \cdot s(x_\alpha) = C(x_\alpha - x_0) \\ \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta = 1 \\ \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta \cdot s(x_\beta) = s(x_0) \end{cases} \quad \begin{matrix} (\alpha = 1 \cdots n) \\ (\beta = 1 \cdots n) \end{matrix} \quad (2.12)$$

この外生ドリフト・クリギングシステムより、重み係数が算出され、式(2.3)により最尤推定値が算出される。また、推定誤差分散については式(2.13)により算出される。

$$\text{var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha C(x_\alpha - x_0) + \mu_0 + \mu_1 \cdot s(x_0) \quad (2.13)$$

このようにして、外生ドリフト・クリギング手法による最尤値および推定誤差分散が算出される。

### 第3章 事例検証 山岳トンネル建設プロジェクト

本章では、山岳トンネル建設プロジェクトを対象として、事前に得られた調査データおよび建設コスト変動リスク評価手法を用いてトンネル建設コストを推定する。対象とする山岳トンネル建設プロジェクトは、RトンネルならびにTトンネルの2プロジェクトである。

#### 3.1 山岳トンネル建設コスト推定手法

本研究で提案する山岳トンネル建設コスト推定手法は、以下に示す手順で行う。

- 1)事前に得られた弾性波速度観測値に対して、外生ドリフト・クリギング手法を用いて地山の弾性波速度分布を推定する。
- 2)コア評価点法を用いて、トンネル掘削深度における地山区分を判定する。
- 3)地山区分と支保パターンの相関から、トンネル支保パターンを決定する。
- 4)決定した支保パターンから必要となる支保単価からトンネル建設コストを推定する。

また、本研究で用いられている事例は既に掘削が終了しているため、実際のトンネル建設コストが判明している。よって、推定された建設コストと、実際の建設コストの関係性についても比較検討を行う。

#### 3.2 Rトンネル事例検証

##### 3.2.1 Rトンネル概要

対象プロジェクトの一つであるRトンネルは、図 3.1 に示すとおり奈良県の中部に位置している。なお、Rトンネルは花崗岩・花崗閃緑岩などが分布しており、全長は 2.45km の2車線トンネルである。Rトンネル建設プロジェクトにおける事前段階では、屈折法弾性波探査およびボーリング調査が実施されており、図 3.2 は屈折法弾性波探査結果である。また、Rトンネル建設プロジェクトでは変質帯や地下水状況の把握を目的に、事前調査として図 3.3 に示す比抵抗電気探査も実施されている。

上記を踏まえ、Rトンネル掘削プロジェクトに関して、得られている上記の事前調査データを基本とした建設コストの推定ならびにリスク評価を行う。なお、本研究と類似した既往の研究では、屈折法弾性波探査結果とボーリング調査結果を元に建設コストを算出されており、比抵抗電気探査結果は地盤の変質や地下水の状況把握に留まっている。そこで、本節では比抵抗電気探査結果を用いた建設コスト推定の可能性も、屈折法弾性波探査結果から推定される建設コスト推定と比較することで検討する。

### 3.2.2 弾性波速度分布の推定

事前調査で得られた屈折法弾性波探査結果は図 3.2 に示すとおりである。Rトンネル掘削深度の弾性波速度は 80%以上が 4.7~5.0km/sec であり、局所的に 3.1~3.8km/sec の低速帯が存在する。ただし、Rトンネルは土被り厚が最大 300m 程度であるため、得られた弾性波速度は 2.1 で述べた仮定が必ずしも成立するとは限らない。したがって、得られた弾性波探査結果は不確実性が高いものであると考えられる。

Rトンネル掘削プロジェクトは、事前の調査において坑口部分に 2 本ならびにトンネル中央部に 1 本、ボーリング調査が実施されている。また、ボーリング孔では速度検層、電気検層、および原位置でのコア評価点を算出するための強度試験や湧水試験等が行われている。速度検層結果は図 3.4 に示すとおりである。また、コア評価点の詳細は 3.2.3 で述べる。

地山の弾性波速度分布の推定には、表 3.1 に示す調査段階を設定した。ここで、**phase1**とは屈折法弾性波探査で得られた結果を直接的に弾性波速度分布とするもので、**phase2**は屈折法弾性波探査結果に加え、ボーリング孔で実施された速度検層結果を用い、外生ドリフト・クリギング手法により弾性波速度分布を推定するものである。なお、**phase2**では解析対象領域を 2500m×360m の領域とし、格子サイズを 10m×10m とした。

**phase2**において外生ドリフト・クリギングの実施では、図 3.5 に示すとおりバリオグラムと指数型モデルを用いたバリオグラムのモデル化関数を算出した。これより、外生ドリフト・クリギング手法によって弾性波分布が推定される(図 3.6)。なお、表 3.1 に示したとおり、調査段階ごとに推定されたトンネル掘削深度にお

ける弾性波速度分布の比較を図 3.7 に示す。これより、phase1 を用いた屈折法弾性波探査で得られた弾性波速度に比べ、速度検層結果に対して外生ドリフト・クリギング手法を適用した phase2 の弾性波は約 1km/sec 程度低い。すなわち、B-2 ボーリング孔で得られた速度検層（図 3.4）におけるトンネル掘削深度での弾性波速度が、屈折法弾性波探査で得られた弾性波速度よりも 1km/sec 程度遅く、この局所的な弾性波速度が地山全体に拡張された結果であると考えられる。

### 3.2.3 屈折法弾性波探査結果を用いた地山区分の推定

一般的なトンネルの支保パターンを決定する手順としては、事前調査で得られた屈折法弾性波探査による弾性波速度を用い、表 3.2 に示す旧 JH の「地山分類法」<sup>8)</sup> に基づいて決定される。しかしながら、旧 JH の地山分類法は地山の一般的な特徴としての地山区分であり、全ての地山に適用できるとは限らない。そこで、実現場では事前調査で得られた情報と旧 JH 地山分類法を総合的に用い、技術者の判断で更に地山区分を決定することが行われてきた。すなわち、旧 JH の地山分類法は技術者の判断に基づく定性的な地山区分の評価法であり、定量的な評価基準を示しているものとは言い難い。一方、トンネル施工段階において支保パターンを決定する際には、表 3.3 に示す切羽評価点法<sup>9)</sup> が用いられる。切羽評価点法は、切羽観察に基づいて圧縮強度、風化状態、割目状態および走向傾斜等（表 3.3）を考慮しつつ、支保パターンを選定する方法である。このため、事前調査段階による地山判定基準（旧 JH の地山分類法）と、施工段階の切羽評価点法による地山判定基準が異なる問題がある。

そこで、本研究では弾性波速度分布から地山区分を判定する手法としてコア評価点法<sup>10)</sup> を採用する。コア評価点法とは、ボーリングコアにおいて切羽評価点法に従い算出されたコア評価点と、速度検層結果における弾性波速度の相関性を用いて地山区分を判定する手法である。

R トンネルにおいては図 3.8 に示す相関が確認された。ただし、これらの相関性を最小 2 乗法に基づく一次関数での近似が可能であると仮定し、次式 (3.1) が得られた。

$$y = 22.18x - 36.508 \quad (3.1)$$

ただし、 $x$  は速度検層結果としての弾性波速度 (km/sec)、 $y$  はコア評価点とする。

式 (3.1) で得られたコア評価点を用いて地山区分を決定する。表 3.4 のとおり、切羽評価点に基づき地山区分が決定される。しかしながら、コア評価点の範囲が曖昧で、同じ評価点でも地山区分が 2 通りに判定される。よって本研究では、表 3.5 に示すとおり、楽観シナリオ、最尤シナリオおよび悲観シナリオの 3 シナリオを設けて評価する。これらのシナリオによって判定された、弾性波探査における地山区分を図 3.9 に示す。この地山区分を用いて 3.2.6 以降に、建設コストを推定し考察を加える。

### 3.2.4 比抵抗値分布の推定

事前調査で得られた比抵抗値分布は図 3.3 に示すとおりである。また、3 本のボーリングコアにおいて図 3.10 に示すとおり電気検層も実施されている。ただし、この比抵抗探査は元来、現場において亀裂や断層破碎帯等の有無の確認のために実施されたものであり、1000~1500m 部分および 2000m 付近に比抵抗値が低い値を示している箇所がある (図 3.3)。

比抵抗探査も弾性波探査と同様、表 3.6 に示す調査段階を設定し、外生ドリフト・クリギング手法を用いて比抵抗値分布を推定した (phase1 および phase2 と同様の手法を適用した)。外生ドリフト・クリギングの適用では図 3.11 に示すとおり、バリオグラムと指数型モデルを用いたバリオグラムのモデル化関数を算出した。これより、外生ドリフト・クリギング手法によって比抵抗値分布が推定される (図 3.12)。ここで、トンネル掘削深度における比抵抗値分布の比較を図 3.13 に示す。

### 3.2.5 比抵抗電気探査結果を用いた地山区分

本項では、比抵抗電気探査結果として得られている比抵抗分布を用いて地山区分を行う。図 3.10 に示すとおり、ボーリングコアにおいて電気検層が実施されており、この電気検層結果とコア評価点においては図 3.14 に示す相関性が確認できる。この相関性は、式 (3.2) に示す最小 2 乗法による近似によって表現される。

$$y = 0.0157x + 43.842 \quad (3.2)$$

ただし、 $x$  は比抵抗値 ( $\Omega \cdot m$ )、 $y$  はコア評価点とする。

また、表 3.6 に示した調査段階に対して 3.2.3 で示した 3 つのシナリオを用いて地山区分を行った結果は、図 3.15 に示している。R トンネル建設コストの推定では、屈折法弾性波探査結果を用いた地山区分 (3.2.3) および比抵抗電気探査結果を用いた地山区分 (本項) を元に、事後評価の観点から考察を加える。

### 3.2.6 R トンネル建設コストの推定

R トンネルの施工完了後に明らかとなった地山区分は図 3.16 に示すとおりである。本項では、施工完了後に明らかとなった地山区分から推定される建設コストと、事前調査段階において推定された推定建設コストとの比較を行い、建設コスト変動リスクを評価することを目的とする。ただし、建設コスト変動リスクを評価する上で、以下の仮定を設ける。

- 1) 3.1.3 に示した弾性波探査に基づき推定された地山区分と、施工完了後に明らかとなった地山区分とは相関しない可能性もある。特に、弾性波探査に基づき推定された地山区分ではトンネル坑口付近は施工の安全性を考慮し、地山状況の如何に関わらず地山区分を D3 としている。そこで、掘削コストの推定において坑口付近の領域は除外する。
- 2) 建設コストにおいて、不良地山の出現に伴う対策費用および補助工に関わる費用は含まない。

R トンネルにおいては、それぞれの地山区分において表 3.7 に示す支保パターンと支保単価が設定されている。表 3.7 に基づき、各調査段階および各シナリオにおいて、表 3.8 に示す推定建設コストが算出される。なお、乖離率とは乖離量を百分率で表現したものであり、式 (3.3) によって示される。

$$D^*_i = \frac{C_A - C_i}{C_A} \quad (3.3)$$

ここで、 $D^*_i$ は乖離率を表し、 $C_A$ は実際の建設コストおよび $C_i$ は推定建設コストを表す。

Rトンネルにおける実際の建設コストは約18億9710万円である。図3.17は推定建設コストと実施工での建設コストとの乖離率の推移である。

### 3.2.7 Rトンネル建設コスト変動リスク評価に関する考察

Rトンネルでの山岳トンネル建設コスト変動リスク評価および事後評価により得られた知見は、以下に整理することができる。

- 1)屈折法弾性波探査においては外生ドリフト・クリギング手法を用いること（phase2）で、図3.17に示すとおり乖離率の減少が確認された。すなわち、外生ドリフト・クリギング手法により弾性波速度分布を推定する手法が有効であることを確認できた。
- 2)比抵抗探査においては、phase2の乖離率がphase1に比べ大きい。この原因として、外生ドリフト・クリギング手法は、ボーリングコアにおいて実施した電気検層の点情報を正確なものと仮定して、内挿法により線形補間する手法であるためである。すなわち、電気検層が比抵抗電気探査結果に比べて抵抗が大きい結果を示したことが原因と考えられる（図3.10）。

ただし、実施工においては、安全性および施工性等を考慮して地山区分および支保パターンが選定されているため、コア評価点や弾性波速度に基づく推定結果と完全に一致しない可能性がある。そのため、本事例における考察は、あくまでもRトンネルの実施工における地山区分が実際の地山状況を正確に反映したものである仮定の下に成り立つ議論であることに留意されたい。また、乖離が少ないということは、実際の施工における支保パターンと推定された支保パターンが精度良く対応しているとは一概には言えないことにも留意されたい。

## 3.3 Tトンネル事例検証

本節では、堆積岩系の地山におけるトンネル掘削コスト変動リスク評価事例としてTトンネルを取り上げ、Rトンネル同様事後評価を実施するとともに、Rトンネルとの比較および考察を行う。なお、前節で取り上げたRトンネルは花崗岩

系の地山であった。

### 3.3.1 Tトンネル概要

Tトンネルは全長約 1.7km の 2 車線道路トンネルである。地質は四万十帯の音無川帯に区分される付加体であり、亀裂の発達した頁岩から成る瓜谷累層と砂岩頁岩互層から成る羽六累層が北落ち傾斜で分布する。

Tトンネル掘削プロジェクトでは事前の調査段階において、地山状況の把握を目的として図 3.18 に示される屈折法弾性波探査、および図 3.19 に示されるボーリング調査等が行われた。ただし、Tトンネルでは、実際の掘削施工段階において事前予測と比べ地山状況の悪化が確認された。そのため、比抵抗探査はTトンネル全体の約 1/3 程度掘削した後、残部約 2/3 部分に対して実施された。この経緯を踏まえ、Tトンネル掘削プロジェクトでは比抵抗探査も実施されている地山の約 2/3 の領域を解析領域とし、比較を行うものとした。

### 3.3.2 弾性波速度分布の推定

TトンネルはRトンネルと同様、表 3.1 に示す調査段階を設定した。なお、外生ドリフト・クリギング手法の適用 (phase2) には解析対象領域を 1780m×210m とし、格子サイズを 10m×10m とした。

図 3.20 は各調査段階で算出されるバリオグラムと指数型モデルを用いたバイオグラム化関数を示している。また、図 3.21 には各調査段階において推定された弾性波速度分布図を示す。さらに、トンネル掘削深度における弾性波速度分布を図 3.22 に示す。これらより、phase1 および phase2 を用いたトンネル掘削深度での弾性波速度分布を比較すると、外生ドリフト・クリギング手法を用いた phase2 は phase1 と比較して弾性波速度が約 1km/sec 程度低い結果となっている。この要因は、図 3.21 に示すボーリングコアの速度検層結果が屈折法弾性波探査結果に比べ約 1km/sec 程度低いためである。

### 3.3.3 屈折法弾性波探査結果を用いた地山区分の推定

Tトンネルにおいても、Rトンネルと同様に、ボーリングコアにおいて切羽評価点法に基づくコア評価点が算出されている。また、コア評価点と速度検層結果によって得られた弾性波速度には図 3.23 に示す相関性が確認できる。この相関性は式 (3.4) で示すことができ、最小 2 乗法による線形近似として表現される。

$$y = 7.8807x + 19.82 \quad (3.4)$$

ここで、 $x$  は弾性波速度 (km/sec) を表し、 $y$  はコア評価点とする。式 (3.4) で表わされたコア評価点に基づき地山区分は、各調査段階において推定することができ、各シナリオに基づく Tトンネルの地山区分は図 3.24 に示す。

### 3.3.4 比抵抗値分布の推定

Tトンネルにおいても、ボーリングコアにおいて図 3.25 に示す電気検層が実施されている。また、ボーリングコアで実施された切羽評価点法によるコア評価点も得られており (3.3.3)、電気検層結果と図 3.26 の相関性が確認される。図 3.26 に示される相関性は、式 (3.5) に示される最小 2 乗法による線形近似によって表現される。

$$y = 0.1338x + 33.782 \quad (3.5)$$

ここで、 $x$  は比抵抗値 ( $\Omega \cdot m$ )、 $y$  はコア評価点を表す。

式 (3.5) で示す比抵抗値とコア評価点の関係から地山区分を推定する。すなわち、表 3.1 に示す各調査段階において、推定された地山区分は図 3.27 に示している。

### 3.3.5 Tトンネル建設コストの推定

TトンネルもRトンネル同様、施工完了後の地山区分が明らかとなっている (図 3.28)。また、RトンネルはTトンネルと同じ 2 車線道路トンネルであり、断面もほぼ同規模であること。したがって、Tトンネルも表 3.7 と同様の支保単

価に基づき建設コストを算出できる。推定された建設コストは表 3.9 に示すとおりである。なお、Tトンネルの実施工における建設コストは約 13 億 4160 万円である。そこで、各調査段階の実施工の建設コストと推定された建設コストの乖離率を、式 (3.3) に基づき算出した。乖離率の比較は図 3.29 に示す。

### 3.3.6 Tトンネル掘削コスト変動リスク評価に関する考察

屈折法弾性波探査と比抵抗探査において得られた地山区分および乖離率から考察できる点は以下に整理される。

- 1)弾性波探査結果に対して phase1 を適用した場合、トンネル掘削深度の弾性波は 3~4km/sec であると推定され、地山区分において C1 が卓越すると推定された。しかしながら、実際の地山区分では D1 が卓越する地山であり、楽観シナリオで約 33%、また悲観シナリオにおいても約 30%の乖離が確認された。一方、外生ドリフト・クリギング手法を用いた場合 (phase2)、楽観シナリオは phase1 と同様に約 33%の乖離が確認されたものの、悲観シナリオでは約 3%まで乖離が減少した。換言すれば、phase1 における屈折法弾性波探査で得られた結果から直接的な弾性波速度分布の推定は、土被りが大きい山岳トンネルにおいて精度良く推定できない可能性があるものと考えられる。しかしながら、ボーリングコアにおける速度検層結果を用いて外生ドリフト・クリギングを行った場合 (phase2)、土被りが大きい場所での弾性波速度を精度良く推定することが可能になると考えられる。
- 2)比抵抗探査に対して phase1 を適用した場合、楽観シナリオで約 30%、最尤シナリオで約 18%、さらに悲観シナリオで約 2%の乖離が確認された。一方、外生ドリフト・クリギング手法を用いた場合 (phase2)、楽観シナリオならびに最尤シナリオともに約 35%、悲観シナリオでは約 3%の乖離が確認された。ただし、比抵抗探査に対する phase1 の適用は、弾性波探査に対する phase1 の適用と比較し、精度良く地山を推定することができた。これは、実際の地山区分では D1 が卓越する地山であったことが考えられる。よって、このような地山の場合、比抵抗探査の方が精度良く地山を推定することができる可能性がある。しかしながら、比抵抗探査に対する phase2 の適用においても乖離が大きく生じた原因は、ボーリングコアで実施された電気検層がボーリングコア全体に実施されておら

ず（図 3.25）、トンネル掘削深度においては電気検層結果が存在しなかったことが考えられる。

## 第4章 土被り厚さを考慮した弾性波速度分布・建設コストの推定

本章では、山岳トンネルプロジェクトにおいて特有な条件である土被り厚さに着目し、土被り厚さを考慮した建設コストを推定する。3.2.6で述べたとおり、山岳トンネルプロジェクトにおける事前調査として弾性波探査が実施される場合、土被り厚さに起因して高精度に弾性波速度分布を推定できない場合がある。よって、本章では土被り厚さを考慮した弾性波速度分布ならびに建設コストの推定を行う。

### 4.1 土被り厚さを考慮した弾性波速度分布の推定

N. Barton<sup>11)</sup>によれば、土被り厚さの大きい場所で得られた弾性波速度は、土被り厚さの小さい場所で得られた同じ弾性波速度と比較して地山を良く見る傾向にある（図 4.1）。ここで、図 4.1 の横軸の Q 値を、コア評価点と同等の関係があるものと仮定する。この時、図から得られる関係式は式(4.1)に示される通りである。

$$\begin{aligned}V_p &= \log Q + 3.5 (0 \leq x(m) \leq 25) \\V_p &= 0.8 \log Q + 4.1 (25 \leq x(m) \leq 75) \\V_p &= 0.7 \log Q + 4.4 (75 \leq x(m) \leq 225) \\V_p &= 0.6 \log Q + 4.7 (225 \leq x(m) \leq 475)\end{aligned}\tag{4.1}$$

またこれら式(4.1)から Q 値を消去して得られた以下の式(4.2)を用いて土被り厚さを考慮した弾性波速度を算定する。

$$\begin{aligned}V_p &= 1.25V_p' - 1.625 (25 \leq x(m) \leq 75) \\V_p &= 1.43V_p' - 2.786 (75 \leq x(m) \leq 225) \\V_p &= 1.67V_p' - 4.33 (225 \leq x(m) \leq 475)\end{aligned}\tag{4.2}$$

ただし、 $V_p$  は土被り厚さを考慮した弾性波速度、 $V_p'$  は土被り厚さを考慮する前の弾性波速度、および  $x(m)$  は土被り厚さである。また、地表面から 25m までは  $V_p = V_p'$  であると仮定する。

#### 4.1.1 Rトンネルの地山区分の推定

Rトンネルにおける弾性波速度による地山区分の推定に対して、式(4.2)を用いて検討する。土被り厚さを考慮した後の弾性波速度分布は図4.2に示す。また、式(4.2)を用いて速度検層結果も同様に土被り厚さを考慮し、その結果は図4.3に示す。さらに、図4.4は、図4.2および図4.3に対して外生ドリフト・クリギング手法を用いて推定した弾性波速度分布を示している。なお、上記から得られたトンネル掘削深度における弾性波速度分布は図4.5に示している。

図4.6は、土被り厚さを考慮した後の弾性波速度分布(図4.2)およびボーリングコアにおける切羽評価点法によって得られたコア評価点の相関を示している。さらに、図4.6において最小2乗法による線形近似を行うと式(4.3)が得られる。

$$y=13.015x+12.521 \quad (4.3)$$

ただし、 $x$ は土被り厚さを考慮した速度検層結果としての弾性波速度(km/sec)、 $y$ はコア評価点とする。

式(4.3)を用いることで得られた弾性波速度分布からコア評価点を算出する。図4.7は、各調査段階および各シナリオにおける地山区分を示しており、この地山区分から推定建設コストが推定される。

#### 4.1.2 Tトンネルの地山区分の推定

TトンネルもRトンネル同様、土被り厚さを考慮した弾性波速度分布の推定を行う。

図4.8は、土被り厚さを考慮したTトンネルにおける弾性波分布を示している。また、速度検層結果も同様に土被り厚さを考慮し、図4.9に結果を示す。また、外生ドリフト・クリギング手法を用いて、図4.10に示す弾性波速度分布を推定した。これらの結果より得られたトンネル掘削深度における弾性波速度分布は図4.11に示している。

図4.12は、土被り厚さを考慮した後の弾性波速度分布(図4.8)およびボーリングコアにおける切羽評価点法によって得られたコア評価点の相関を示している。

さらに、図 4.12 において最小 2 乗法による線形近似を行うと式 (4.4) が得られる。

$$y = 8.4307x + 22.18 \quad (4.4)$$

ただし、 $x$  は土被り厚さを考慮した速度検層結果としての弾性波速度 (km/sec)、 $y$  はコア評価点とする。

式 (4.4) を用いることで得られた弾性波速度分布からコア評価点を算出する。図 4.13 は、各調査段階および各シナリオにおける地山区分を示しており、この地山区分から推定建設コストが推定される。

## 4.2 土被り厚さを考慮した建設コストの推定

建設コストは、4.1 において推定された地山区分ならびに支保単価 (表 3.7) を用いて推定することができる。表 4.1 は、R トンネルおよび T トンネルにおける推定建設コストを示している。また、乖離率の定義 (式 (3.3)) に基づき、各調査段階における乖離率を算出する。図 4.14 および図 4.15 は、R トンネルおよび T トンネルにおける乖離率の推移を示している。

## 4.3 建設コスト変動リスク評価に関する考察

土被り厚さを考慮せず建設コストを推定した場合と、土被り厚さを考慮して建設コストを推定した場合とを比較して、以下のような知見が得られた。

- 1) R トンネルにおいては、**phase1** の楽観シナリオで約 3%、および最尤シナリオで約 1% 乖離が減少した。同様に、**phase2** においても楽観シナリオならびに悲観シナリオにおいて乖離の減少が確認された。R トンネルは土被り厚さ 200m を超える場所が多くを占め、300m を超える場所も確認される。このような山岳トンネルにおいては、土被り厚さによる不確実性が存在するものと考えられ、土被り厚さを考慮する必要があると考えられる。
- 2) T トンネルにおいては、**phase1** の楽観シナリオで乖離が微増したものの、悲観

シナリオでは約 4%の乖離の減少が確認された。一方、phase2 においては楽観シナリオならびに悲観シナリオにおいて変化がなく、最尤シナリオのみ乖離が約 4%減少した。Tトンネルは、土被り厚さ 100m 程度の場所が多く、一番大きな土被り厚さを有している場所が 200m 前後となっており、Rトンネルに比べると土被りが小さい。よって、Rトンネルよりも、土被り厚さに起因する不確実性が小さかったものと考えられる。

- 3) RトンネルおよびTトンネルの事例を検討すると、土被り厚さを考慮する方が、土被り厚さを考慮しない場合に比べて、全体的に乖離が減少する結果が得られた。よって、土被り厚さを考慮することによって、乖離を減少させる可能性がある。

## 第5章 結論と今後の展望

本研究は、地下構造物建設プロジェクトにおける山岳トンネル掘削プロジェクトに着目し、事後評価の観点において地盤リスクに起因する建設コスト変動リスクを定量的に評価することを目的とした。本研究によって得られた成果・知見は、以下にまとめられる。

- (1) 地盤統計学手法を用いた建設コストの推定では、事後評価の観点において乖離量という指標を用いることが可能である。
- (2) コア評価点法の採用は、事前の調査段階においても切羽評価点法と同様に、圧縮強度、割れ目状況ならびに湧水状況を考慮した地山区分が可能である。
- (3) 土被り厚さの大きな山岳トンネル建設プロジェクトでは、事前の地盤調査において得られた屈折法弾性波探査や速度検層結果に対して土被り厚さを考慮することで、弾性波探査における地盤リスクに起因する不確実性を考慮する事ができた。
- (4) 事前の地盤調査として屈折法弾性波探査（面情報）および少数のボーリング調査（点情報）が実施されている山岳トンネル建設プロジェクトでは、外生ドリフト・クリギング手法を用いて弾性波速度分布の推定を行うことにより、屈折法弾性波探査の不確実性を考慮することができた。さらに、コア評価点法を用いた地山区分の選定により、地山分類に起因する不確実性を考慮することができた。
- (5) 一連の山岳トンネル建設コスト変動リスク評価手法は、実プロジェクトに適用し、さらに事後評価の観点から地山区分および推定建設コストを評価することで、実際の地山を合理的に推定することができる手法であることを示した。

ただし、本研究が提案した手法には、今後解決しなければならない課題もあり、以下にまとめられる。

- 1) コア評価点法における不確実性、つまり、最小二乗法を用いた線形近似が適切であるかどうか、また地山区分を決定する上で、楽観、最尤、悲観シナリオを用いる事による不確実性について、どのような考慮が必要となるか今後検討が

必要である。

- 2) トンネル掘削においては、事前に想定された支保パターンの範囲を超える支保パターンなどが出現するといった可能性も考えられる。例えば、亀裂・断層破砕帯の出現および湧水が生じた場合、更なる対策工が必要となるであろう。今後、上記を考慮した検討が必要であると考えられる。

以上のような課題点を満足することが、本研究の示した建設コスト変動リスク評価手法の実プロジェクトへの適用性を向上させることになるであろう。さらに、より多くの事例にこの手法を適用し、データベースの構築を図ることが、評価手法の一般性を高めるとともに、山岳トンネルなどの、地下構造物の建設コストを合理的に推定することにつながると考えられる。

## 参考文献

- 1) 大津宏康・大西有三・浜田信彦・境 亮祐：地盤統計学手法を用いた建設コスト推定方法の事後評価への適用，土木学会論文集，2007.
- 2) 近藤達敏：地質調査における不確実性の提言ならびにトンネル工事のリスク要因評価，応用地質技術年報，No.19，pp.1-33，1997.
- 3) H. H. Einstein: Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.11 No.2, pp141-155, 1996.
- 4) 大津宏康・尾ノ井芳樹・大本俊彦・大西有三・西山 哲・黄瀬周作：PFI 建設プロジェクトでの地価リスク評価および分担に関する研究，土木学会論文集，No.721/VI-57，pp.193-205，2002.
- 5) 佐々宏一・芦田 讓・菅野 強：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版株式会社，1993.
- 6) Hans Wackernagel（原著）／地球統計学研究委員会（訳編）：地球統計学，森北出版株式会社，2003.
- 7) 境 亮祐：地盤リスクに起因する建設コストの評価手法に関する研究，京都大学修士論文，2005.
- 8) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，1997.
- 9) 城間博通・伊藤哲男・赤城 渉：トンネル支保選定支援システムの構築，EXTEC，No.68，pp.21-25，2004.
- 10) 坂井一雄：地下構造物建設プロジェクトにおけるコスト変動リスク評価手法に関する研究，京都大学修士論文，2007.
- 11) Nick Baton: Risk and risk reduction in TBM rock tunneling, Proceedings of the ISRM International Symposium, pp.31-33, 2004.
- 12) 地盤工学会：計測結果の解釈と計測管理，1999.

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、指導教官としてご指導、ご鞭撻いただきました京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・大津宏康教授に心より感謝いたします。研究を進めていく中で五里霧中の中で幾度となくアドバイスをいただき、研究を進めて行く事ができました。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・塩谷智基准教授には、研究においてさまざまなアドバイスなどをもらいました。おかげで研究で躓いていた点が解消され、研究を進めることができました。

京都大学大学院地球親和技術学廊 社会基盤親和技術論分野・勝見 武准教授には、副査として本論文の審査をしていただき、多くのご質問を頂きました。そのおかげで本論分をより良いものにする事ができました。大変感謝いたしております。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・稲積真哉助教には、研究面においてのみでなく、生活面においても非常にお世話になりました。

応用地質株式会社・長谷川信介氏には、お忙しい中、本研究の相談および、お種々のデータ入手にご尽力いただきありがとうございました、大変感謝しております。

また、本研究を進めていくにあたり、京都大学大学院工学研究科土木施工システムの諸先輩方ならびに同回生の方々、ならびに北村瑞絵秘書には、多くの面でサポートをしていただき、大変感謝しております。特に、修士二回の酒井悠さんには、本研究におけるあらゆる面でサポートいただきました。ありがとうございました。

最後に、本研究にだけに留まらず、このようなすばらしい環境を与えてくださった両親、ならびにこれまでの人生を支えてくれた全ての方に心から感謝の意を表します。

表 3.1 R トンネル及びT トンネル調査段階（屈折法弾性波探査）

調査段階	調査内容	面情報	点情報
Phase1	屈折法弾性波探査 ボーリング調査	屈折法弾性波探査	なし
Phase2	屈折法弾性波探査 ボーリング調査	屈折法弾性波探査	ボーリングコアにおける速度検層結果

表 3.2 旧 JH 地山区分法<sup>8)</sup>

地山等級	岩石グループ	代表岩石名	弾性波速度Vp(km/s)					
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
B	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///	///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///	///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///	
C I	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///	///
		中古生層砂岩、チャート					///	///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///	///
		第三紀層砂岩、礫岩					///	///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///	///
	M層状	粘板岩、中生層頁岩					///	///
L層状	黒色片岩、緑色片岩					///	///	
	第三紀層泥岩					///	///	
C II	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///	///
		中古生層砂岩、チャート					///	///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///	///
		第三紀層砂岩、礫岩					///	///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///	///
	M層状	粘板岩、中生層頁岩					///	///
L層状	黒色片岩、緑色片岩					///	///	
		第三紀層泥岩					///	///

表 3.3 切羽評価点法<sup>9)</sup>

トンネル切羽観察記録		地質	日付								
		評価の目安：劣悪な部分が占める割合 30%以上→劣悪な部分の状況で評価 10-30% →両者の中間ランク 10%以下→他の良好な部分の状況で評価									
		記録者									
		Sta	+ m								
		TD	= m								
		支保パターン									
		土被り	m								
観察項目	評価区分					記入欄					
圧縮強度	一軸圧縮強度	100以上	100-50	50-25	25-10	10-3	3以下	左	中	右	
	ポイントロード	4以上	4-2	2-1	1-0.4	0.4以下					
	ハンマー打診	岩片を地面に置きハンマーで強打しても割れにくい	岩片を地面に置きハンマーで強打すれば割れる	岩片を手をもってハンマーでたたいて割れる	岩片どうしをたたき合わせて割ることが出来る	両手で岩片を部分的にでも割ることが出来る	力をこめれば小岩片を指先で潰すことが出来る				
評価区分		1	2	3	4	5	6				
風化変質	風化の目安	概ね新鮮	割れ目沿いの風化変質	岩芯まで風化変質	土砂状風化・未固結土砂						
	熱水変質などの目安	変質は見られない	割れ目に粘土挟む	変質により岩芯まで強度低下	土砂状・粘土化						
	評価区分	1	2	3	4						
割目間隔	間隔	1m以上	1m-50cm	50-20cm	20-5cm	5cm以下					
	RQD	80以上	80-50	60-30	40-10	20以下					
	評価区分	1	2	3	4	5					
割目状態	割れ目の開口度	密着	一部開口 (1mm以下)	多くが開口 (1mm以下)	開口 (1-5mm)	5mm以上の開口					
	挟持物	なし	なし	なし	5mm以下の粘土	5mm以上の粘土					
	粗度・鏡肌	粗い	割れ目平滑	一部鏡肌	よく磨かれた鏡肌						
評価区分		1	2	3	4	5					
走向傾斜	縦断方向										
	横断方向										
湧水量	状態	なし・滴水 1% / 分	滴水程度 1-20% / 分	集中湧水 20-100% / 分	全面湧水 100% / 分以上						
	評価区分	1	2	3	4						
劣化	水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	流出						
	評価区分	1	2	3	4						
評価点						評価点 = (右肩 + 左肩 + 2 × 天端) / 4		合計			

岩質/評価区分		1	2	3	4	5	6	
圧縮強度	塊状	硬質岩	36	29	22	14	7	0
		中硬質・軟質岩	32	26	19	13	6	0
	層状	中硬質岩	36	29	22	14	7	0
		軟質岩	39	31	24	16	8	0
風化変質	塊状	硬質岩	19	12	6	0		
		中硬質・軟質岩	19	13	6	0		
	層状	中硬質岩	22	15	7	0		
		軟質岩	20	13	7	0		
割目間隔	塊状	硬質岩	19	14	9	5	0	
		中硬質・軟質岩	24	18	12	6	0	
	層状	中硬質岩	9	7	4	2	0	
		軟質岩	12	9	6	3	0	
割目状態	塊状	硬質岩	26	20	13	7	0	
		中硬質・軟質岩	25	19	12	6	0	
	層状	中硬質岩	33	25	16	8	0	
		軟質岩	29	22	14	7	0	

		湧水量の評価区分			
		1	2	3	4
劣化の 評価区分	1	0	0	-5	-10
	2	0	-5	-7	-10
	3	-5	-7	-10	-15
	4	-7	-10	-15	-20

表 3.4 切羽評価点と地山区分の関係

コア評価点	地山区分
80~100	B
65~85	C I
40~75	C II
0~50	D I

表 3.5 楽観・最尤・悲観シナリオ

コア評価点 (楽観)	地山区分	コア評価点 (最尤)	地山区分	コア評価点 (悲観)	地山区分
80~100	B	83~100	B	85~100	B
65~80	C1	70~83	C1	75~85	C1
40~65	C2	45~70	C2	50~75	C2
0~40	D1	0~45	D1	0~50	D1

表 3.6 Rトンネル及びTトンネルにおける調査段階（比抵抗探査）

調査段階	調査内容	面情報	点情報
Phase1	比抵抗電気探査 ボーリング調査	比抵抗電気探査	なし
Phase2	比抵抗電気探査 ボーリング調査	比抵抗電気探査	ボーリングコアにおける電気検層結果

表 3.7 支保パターンと支保コスト

工種	種別	細別	地山区分	支保単価 (円/m)
トンネル 掘削工	掘削工	トンネル掘削	B	270,100
			C I	273,200
			C II	292,900
			D I	306,400
			D III	400,000
支保工	吹付工	吹付け	B	89,980
			C I	131,900
			C II	156,000
			D I	246,470
			D III	380,000
	ロックボルト工	ロックボルト	B	44,070
			C I	74,370
			C II	95,600
			D I	174,240
			D III	200,000
	鋼製支保工	鋼製支保	C II	62,730
			D I	103,200
			D III	169,000
	金網工	金網	D I	26,690
			D III	30,000
覆工	覆工コンクリート工	覆工コンクリート	B	219,900
			C I	205,000
			C II	195,000
			D I	187,900
			D III	180,000
インバー ト工	インバート掘削工、 本体工	インバート	D I	235,760
			D III	339,000

支保パターン	支保単価 (円/m)
B	624,050
C I	684,470
C II	802,230
D I	1,280,660
D III	1,698,000

表 3.8 Rトンネル 各調査段階及び各シナリオにおける推定建設コスト

弾性波	Phase1	乖離量	乖離率	Phase2	乖離量	乖離率
楽観	¥1719279200	¥177826659	9.37%	¥1799129500	¥97976359	5.16%
最尤	¥1818641000	¥78464859	4.14%	¥1866548300	¥30557559	1.61%
悲観	¥2006248900	¥-109143041	-5.75%	¥1929700100	¥-32594241	-1.72%
比抵抗	Phase1	乖離量	乖離率	Phase2	乖離量	乖離率
楽観	¥1710199700	¥186906159	9.85%	¥1595806700	¥301299159	15.88%
最尤	1759177900	¥137927959	7.27%	¥1630203500	¥266902359	14.07%
悲観	¥1769776300	¥127329559	6.71%	¥1689903300	¥207202559	10.92%

表 3.9 Tトンネル推定建設コスト

弾性波	Phase1	乖離量	乖離率	Phase2	乖離量	乖離率
楽観	¥895114200	¥446486200	33.28%	¥890329900	¥451270500	33.64%
最尤	¥895114200	¥446486200	33.28%	¥1206093700	¥135506700	10.10%
悲観	¥928604300	¥412996100	20.78%	¥1383112800	¥-41512400	-3.09%
比抵抗	Phase1	乖離量	乖離率	Phase2	乖離量	乖離率
楽観	¥933388600	¥408211800	30.43%	¥866408400	¥475192000	35.42%
最尤	¥1091270500	¥250329900	18.66%	¥866408400	¥475192000	35.42%
悲観	¥1311348300	¥30252100	2.25%	¥1383112800	¥-41512400	-3.09%

表 4.1 土被り考慮した弾性波探査における推定建設コスト

Rトンネル	Phase1	乖離量	乖離率	Phase2	乖離量	乖離率
楽観	¥1779997100	¥117108759	6.17%	¥1809654000	¥87451859	4.61%
最尤	¥1958997100	¥-61891241	-3.26%	¥1877146700	¥19959159	1.05%
悲観	¥2006248900	¥-109143041	-5.75%	¥1915347200	¥-18241341	-0.96%
Tトンネル	Phase1	乖離量	乖離率	Phase2	乖離量	乖離率
楽観	¥890329900	¥451270500	33.64%	¥890329900	¥451270500	33.64%
最尤	¥904682800	¥436917600	32.57%	¥1253936700	¥87663700	6.53%
悲観	¥1341600400	¥226408400	16.88%	¥1383112800	¥-41512400	-3.09%

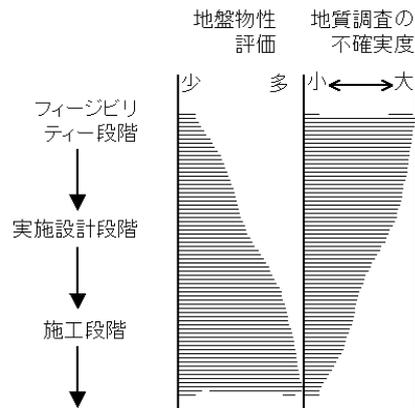


図 2.1 調査の進展と地盤調査の不確か性 <sup>13)</sup>

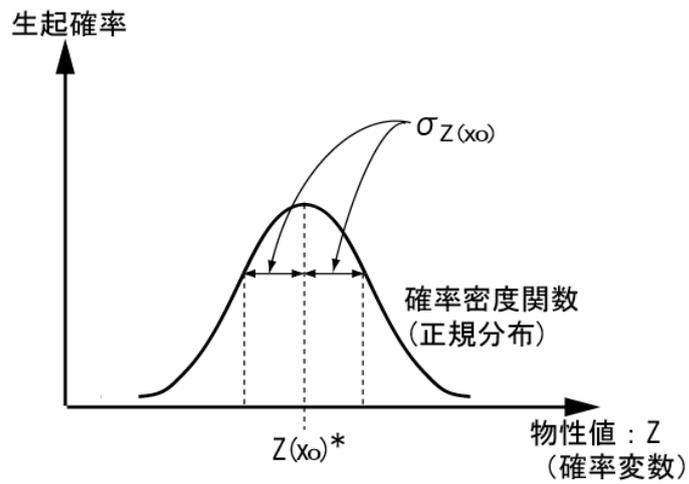


図 2.2 クリギング手法による推定値の概念図

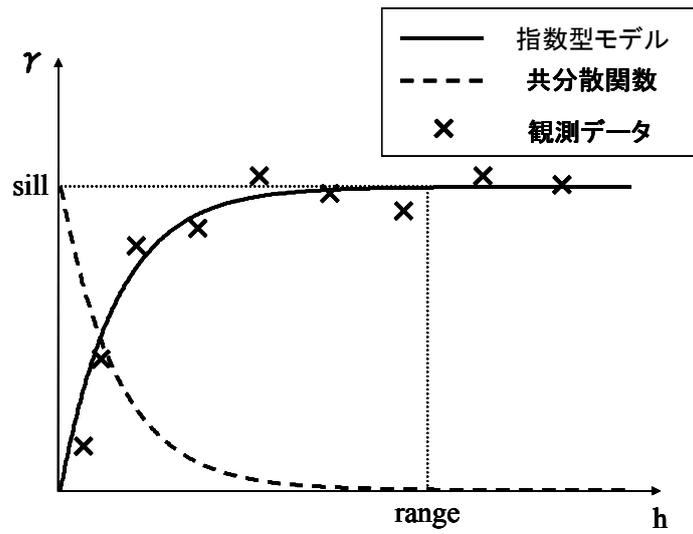


図 2.3 バリオグラム概念図

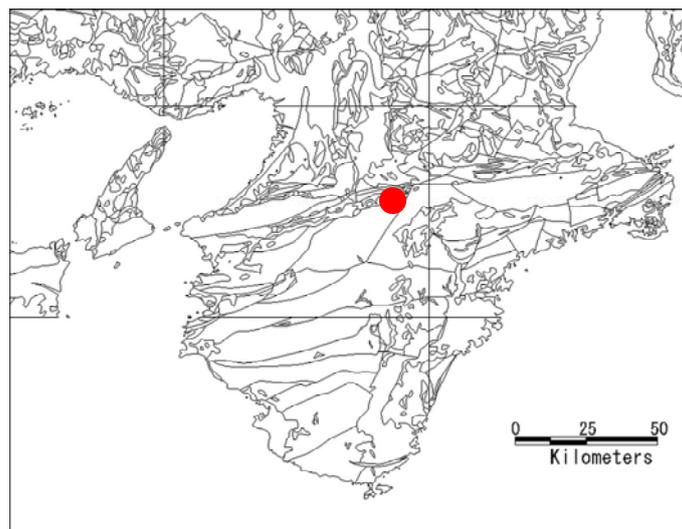


図 3.1 Rトンネル位置

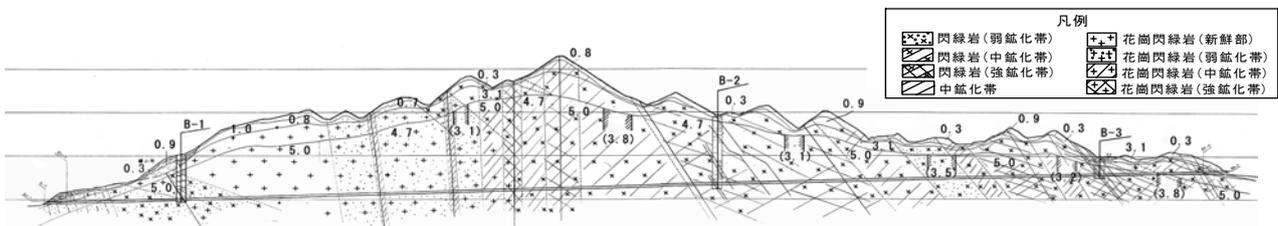


図 3.2 Rトンネル屈折法弾性波探査結果

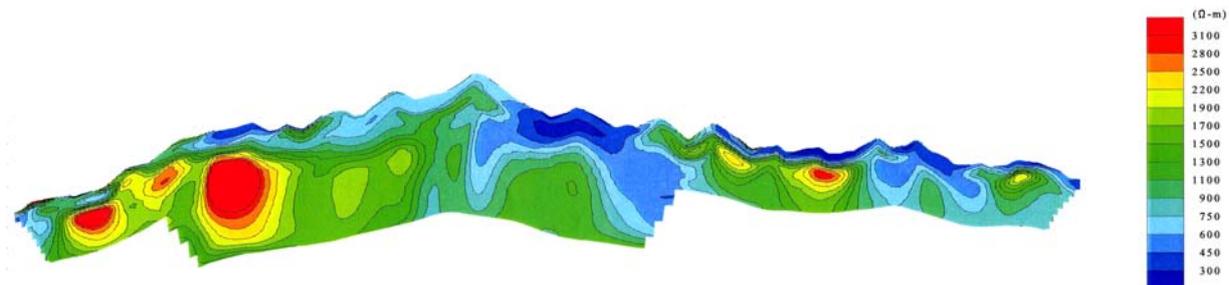


図 3.3 Rトンネル比抵抗電気探査結果

◆ 速度検層結果      ■ 弾性波探査結果      — トンネル掘削深度

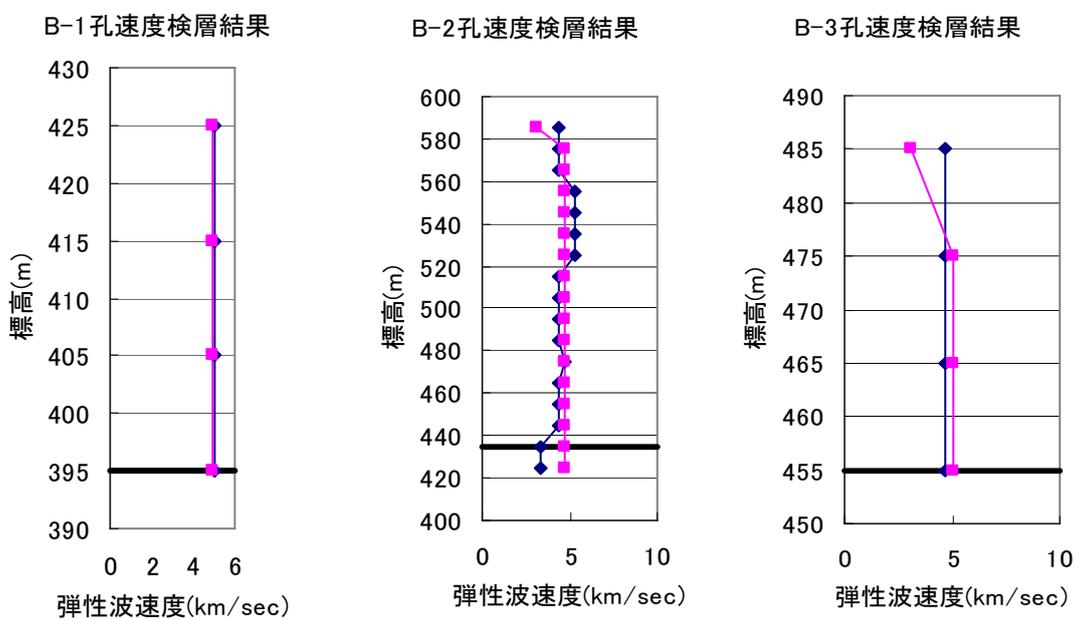


図 3.4 速度検層結果と屈折法弾性波探査結果

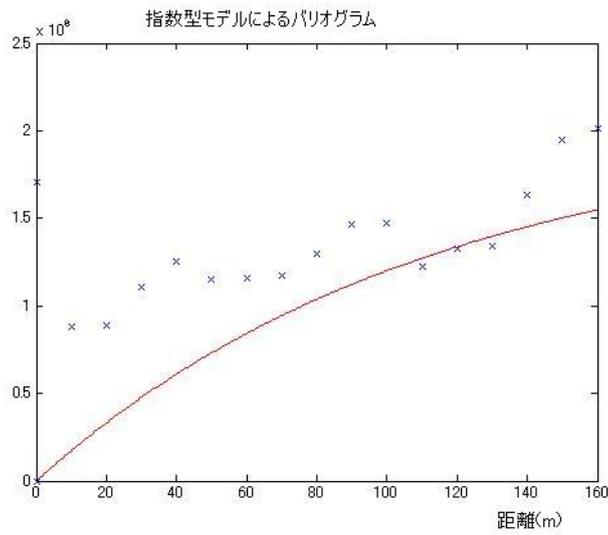
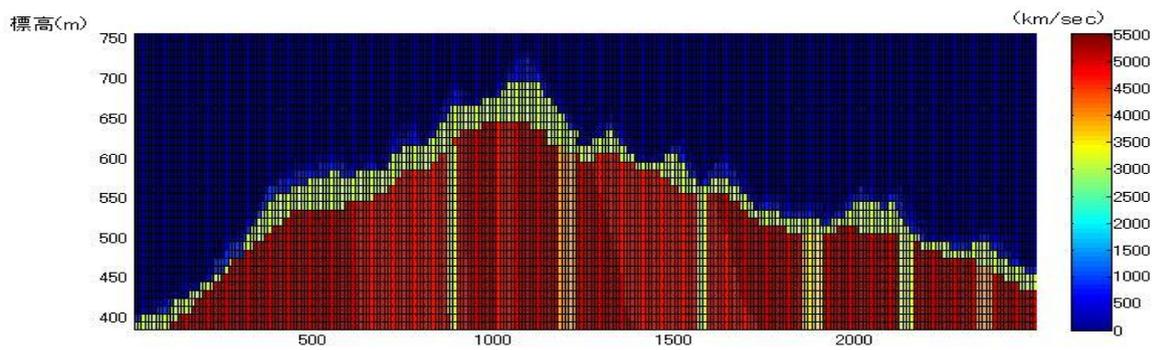
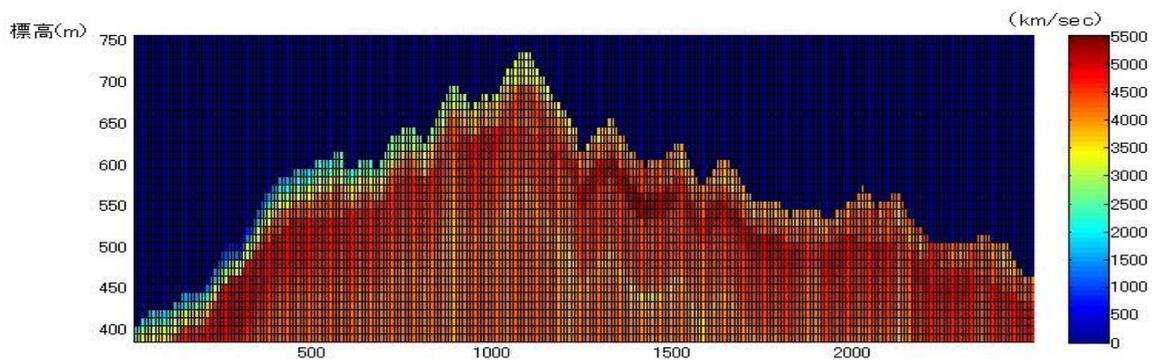


図 3.5 R トンネル 弾性波探査における  
外生ドリフト・クリギング手法によるバリオグラム



(a)phase1 弾性波速度分布



(b)phase2 弾性波速度分布

図 3.6 外生ドリフト・クリギング手法による各調査段階の弾性波速度分布

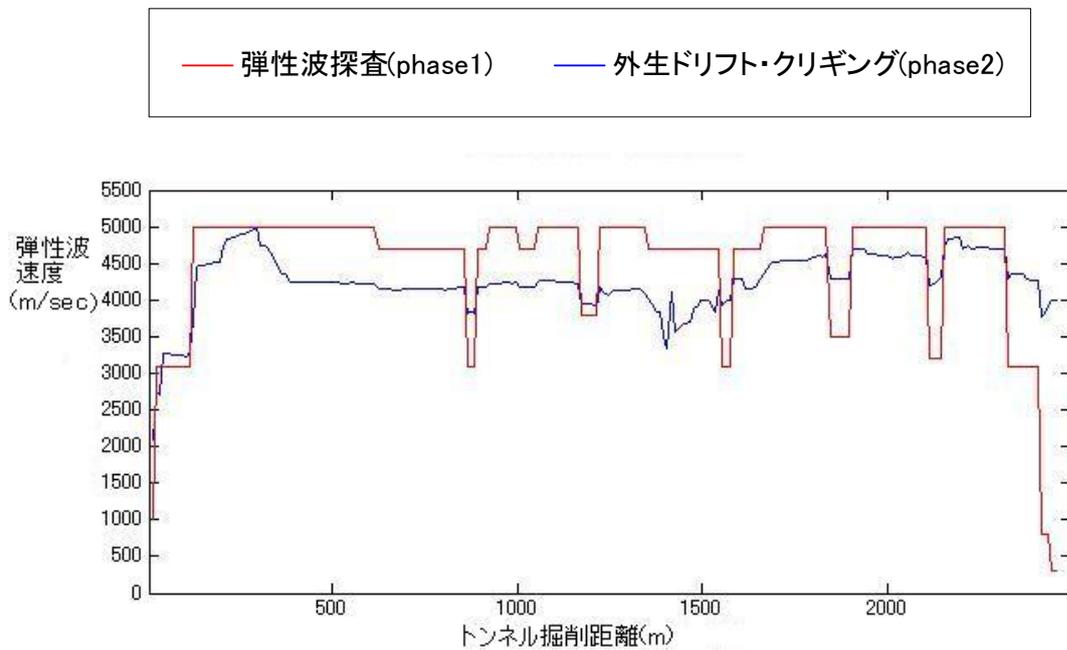


図 3.7 R トンネル掘削深度における弾性波速度

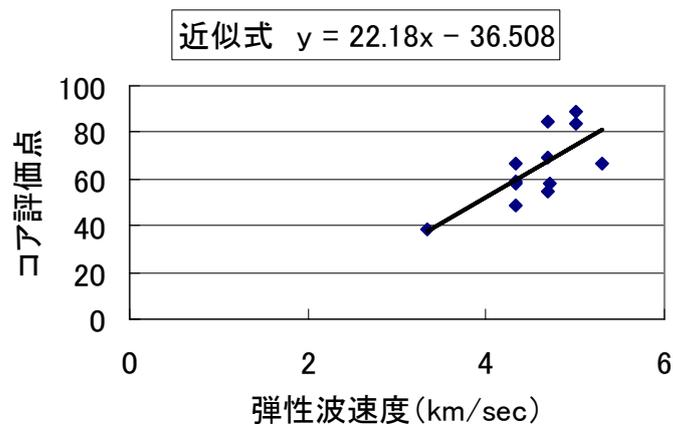
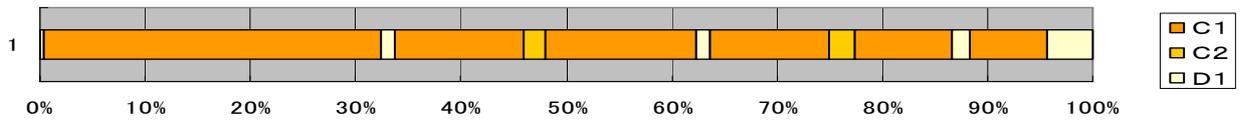
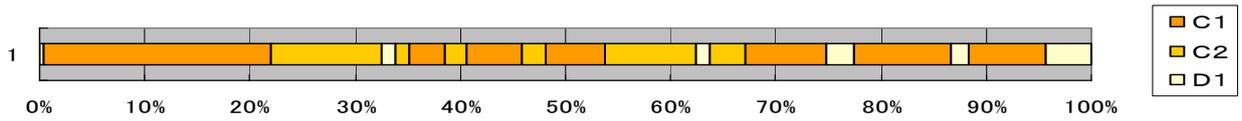


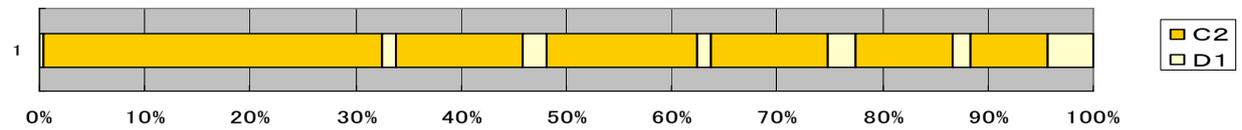
図 3.8 R トンネルのコア評価点と弾性波速度の相関



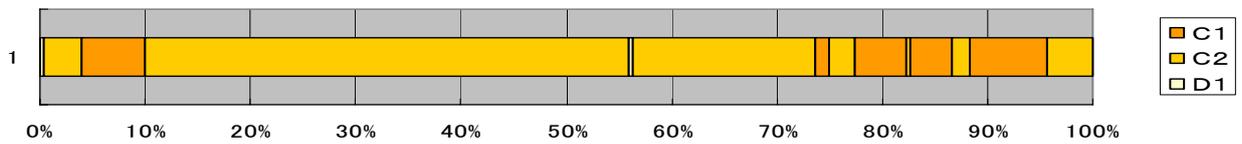
R トンネル phase1 弾性波探査～楽観支保パターン～



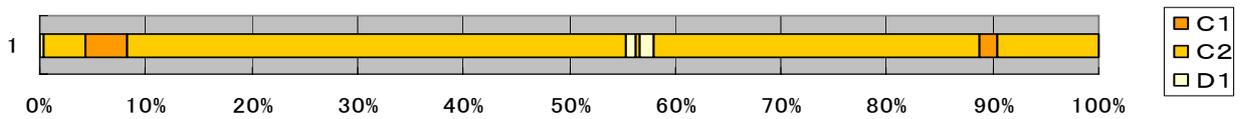
R トンネル phase1 弾性波探査～最尤支保パターン～



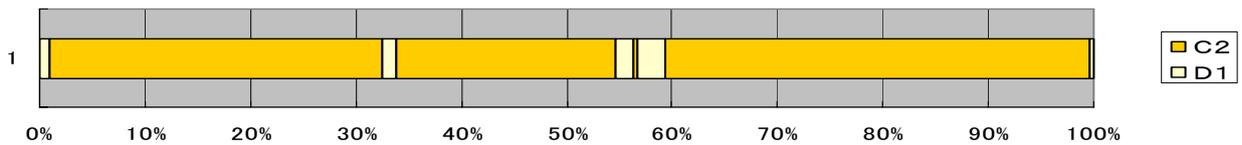
R トンネル phase1 弾性波探査～悲観支保パターン～



R トンネル phase2 弾性波探査～楽観支保パターン～



R トンネル phase2 弾性波探査～最尤支保パターン～



R トンネル phase2 弾性波探査～悲観支保パターン～

図 3.9 R トンネルにおける地山区分

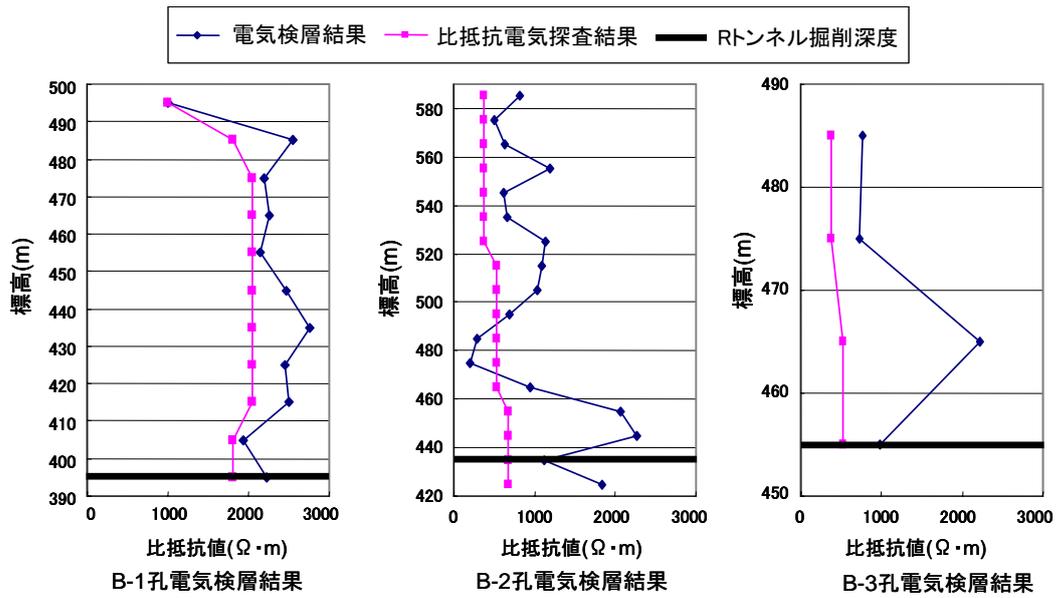


図 3.10 電気検層結果と比抵抗電気探査結果

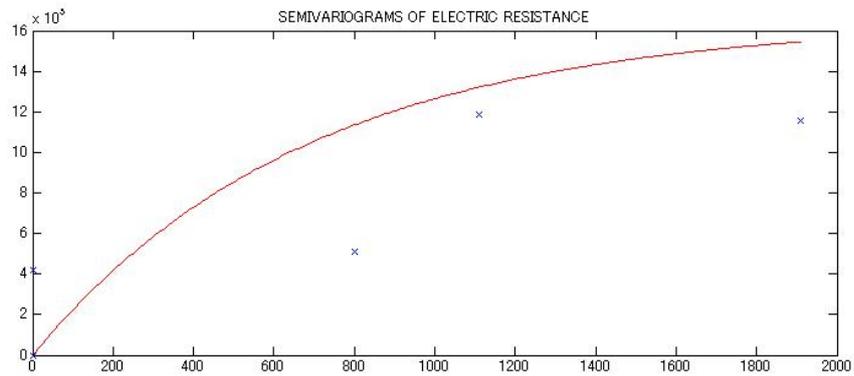
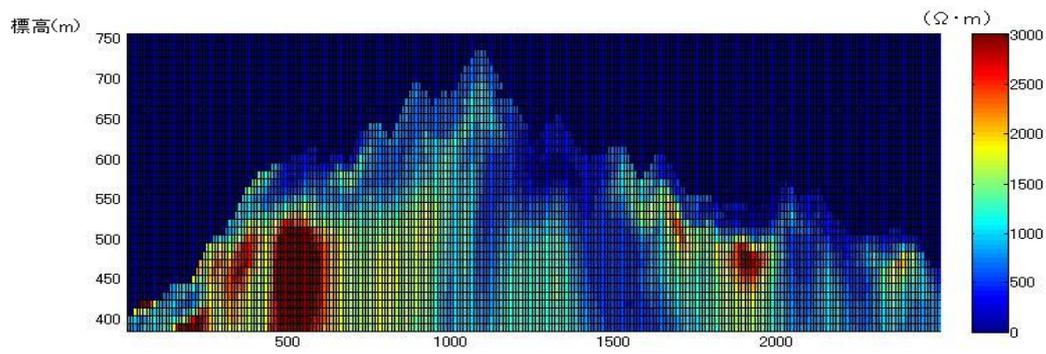
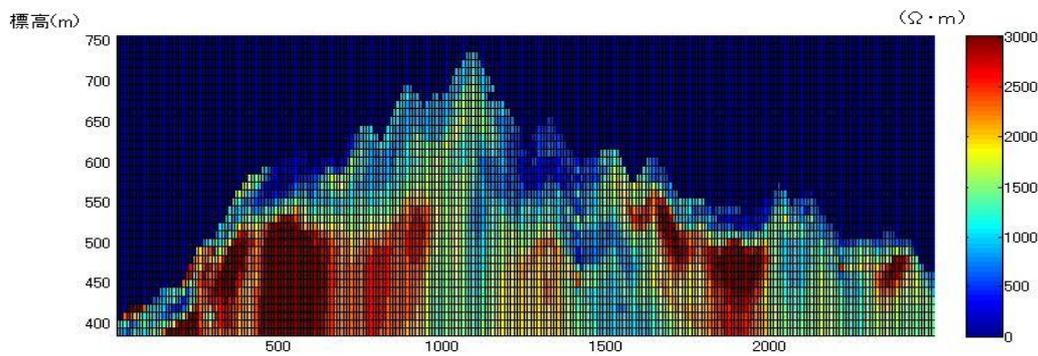


図 3.11 Rトンネル 比抵抗探査における  
外生ドリフト・クリギング手法によるバリオグラム



(a)phase1 比抵抗値分布



(b)phase2 比抵抗値分布

図 3.12 外生ドリフト・クリギング手法による各調査段階の比抵抗値分布

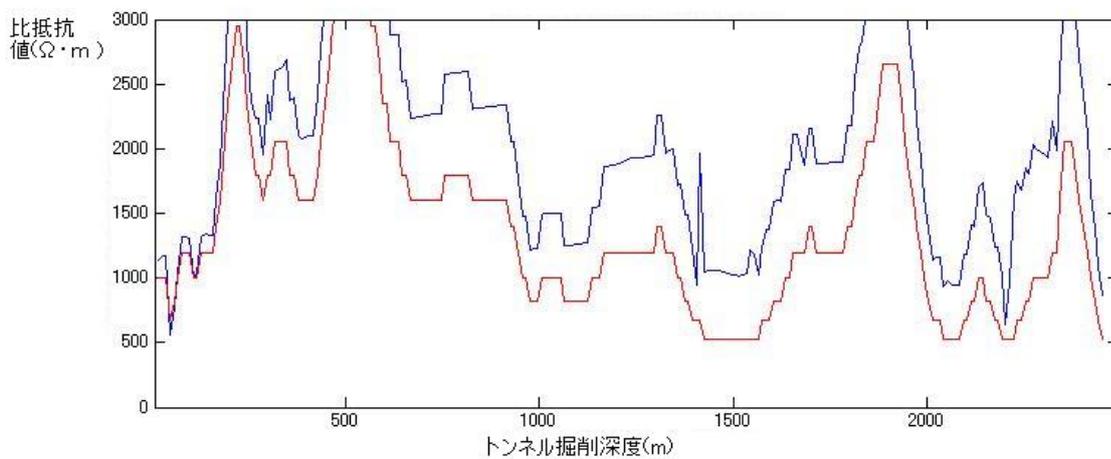
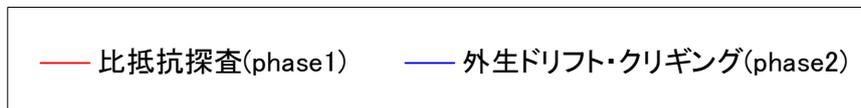


図 3.13 R トンネル掘削深度における比抵抗値

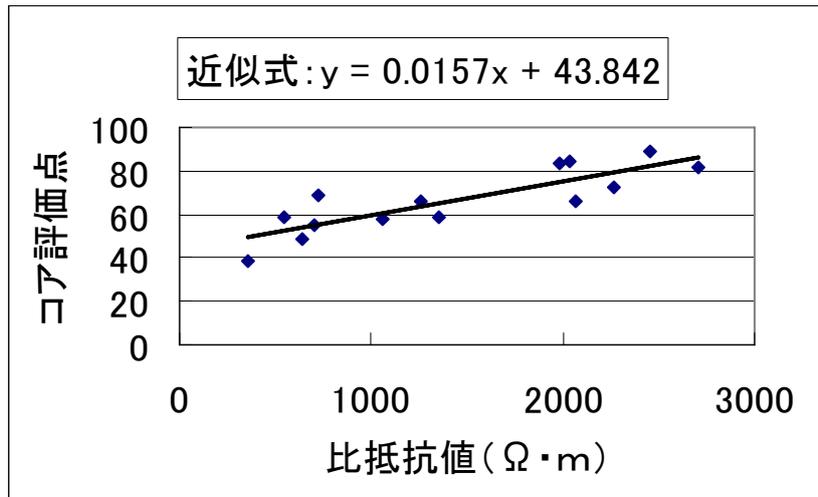
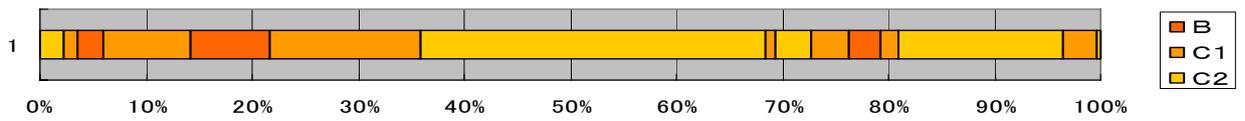
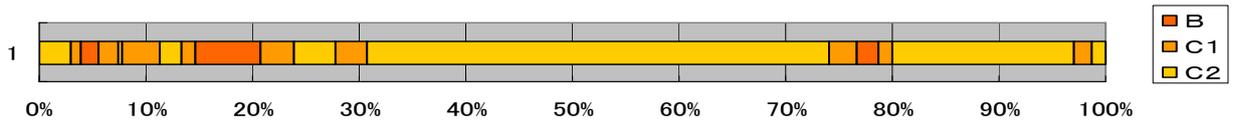


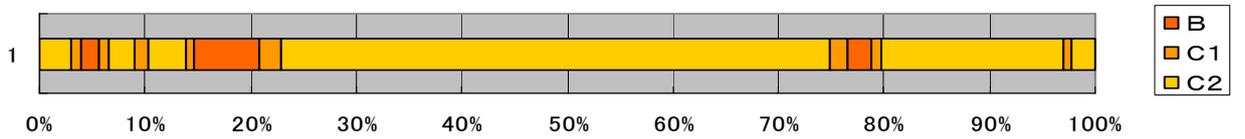
図 3.14 R トンネルにおける比抵抗値とコア評価点の関係



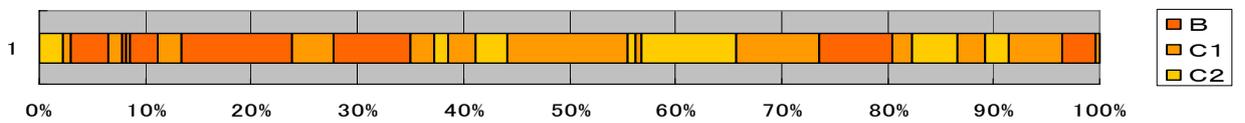
Rトンネル phase1 比抵抗電気探査～楽観支保パターン～



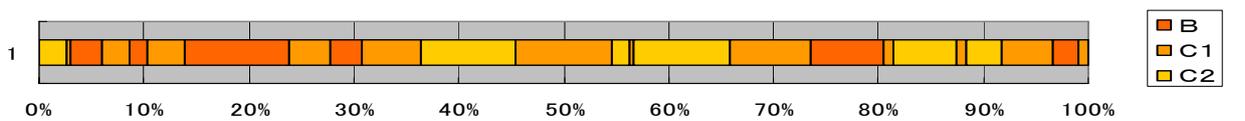
Rトンネル phase1 比抵抗電気探査～最尤支保パターン～



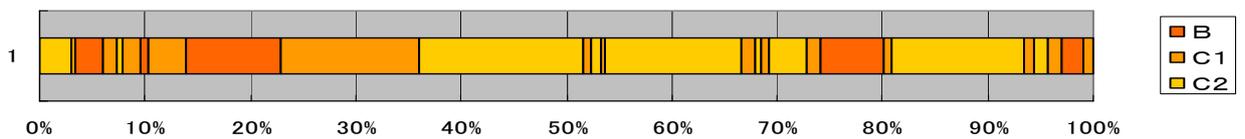
Rトンネル phase1 比抵抗電気探査～悲観支保パターン～



Rトンネル phase2 比抵抗電気探査～楽観支保パターン～



Rトンネル phase2 比抵抗電気探査～最尤支保パターン～



Rトンネル phase2 比抵抗電気探査～悲観支保パターン～

図 3.15 Rトンネルにおける地山区分

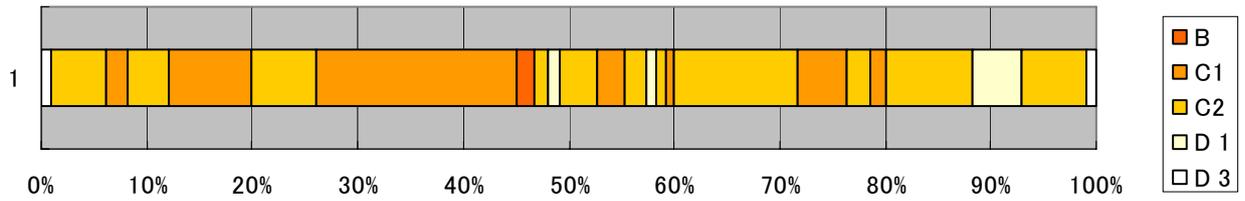
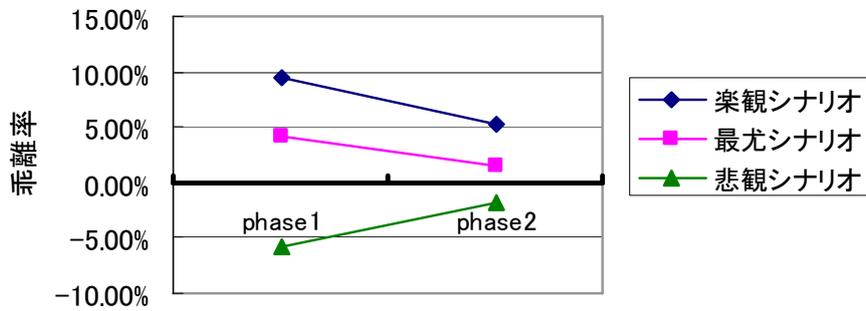
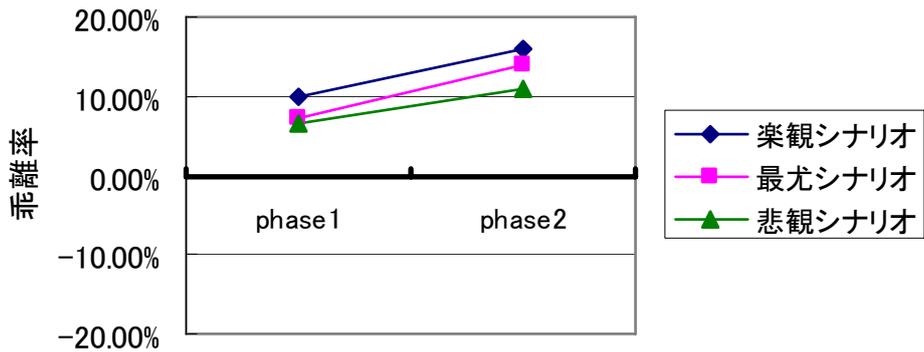


図 3.16 R トンネルの実際の地山区分



R トンネル 弾性波探査による推定建設コストの乖離率



R トンネル 比抵抗探査による推定建設コストの乖離率

図 3.17 実施工との乖離率の推移

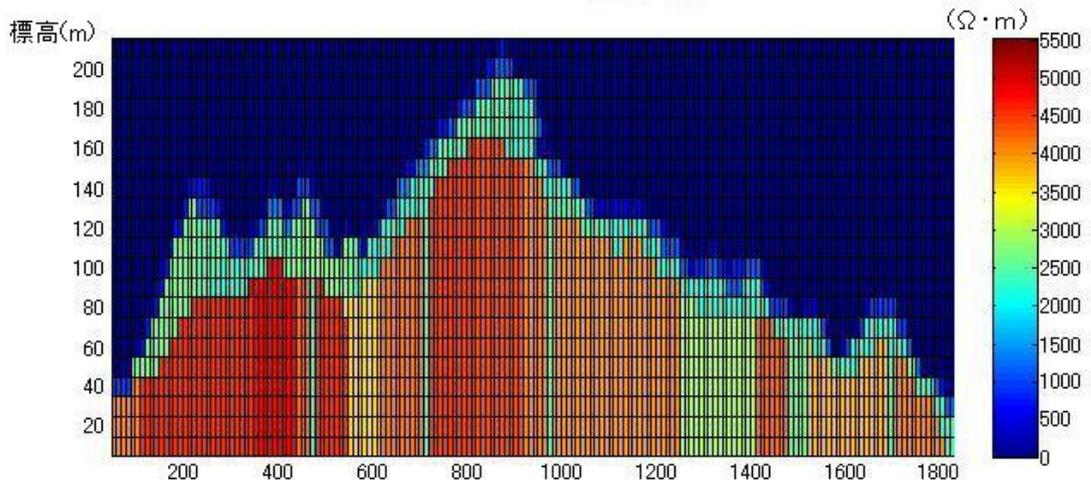


図 3.18 Rトンネル 屈折法弾性波探査結果

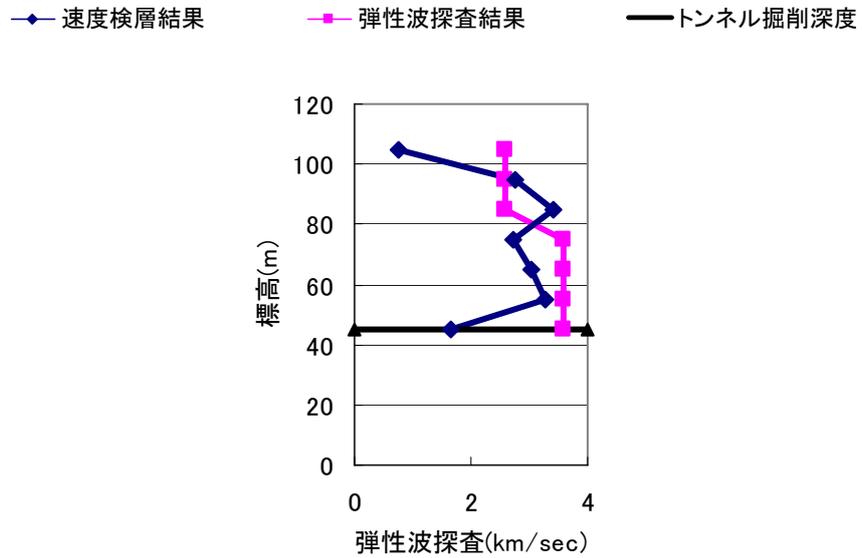


図 3.19 Tトンネル ボーリング孔における速度検層結果

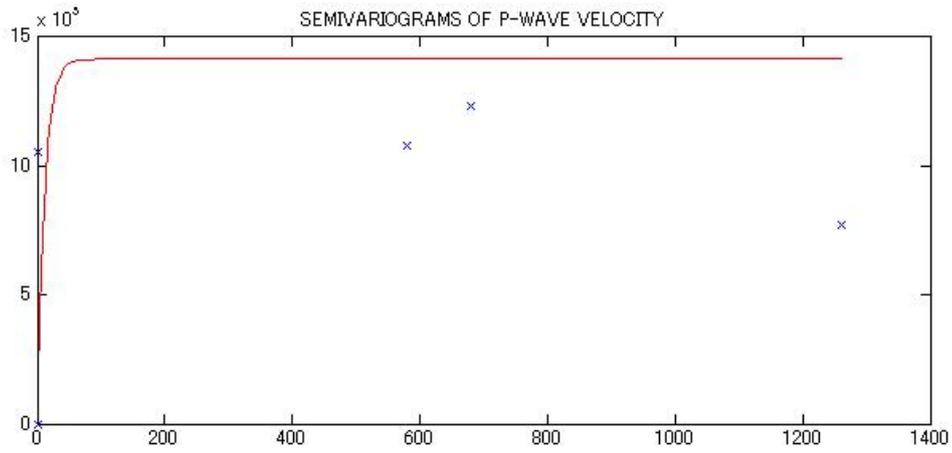
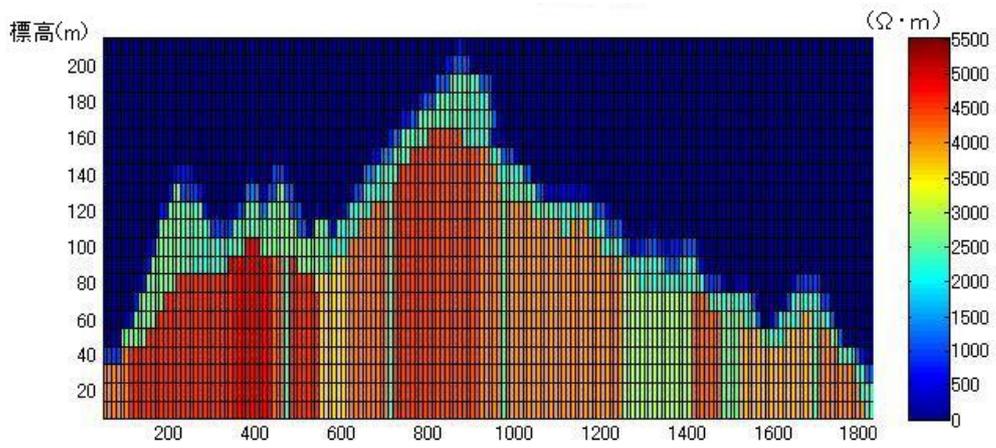
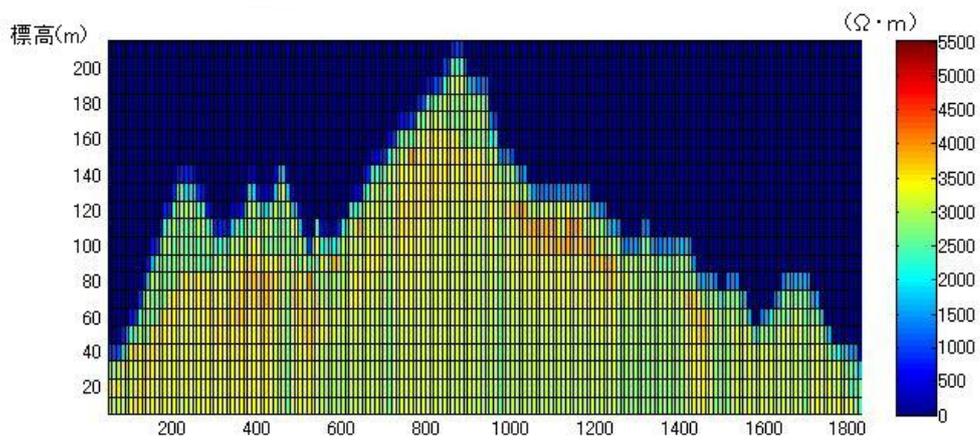


図 3.20 外生ドリフト・クリギング手法におけるバリオグラム



(a)phase 1



(b)phase 2

図 3.21 外生ドリフト・クリギング手法における各調査段階の弾性波速度分布

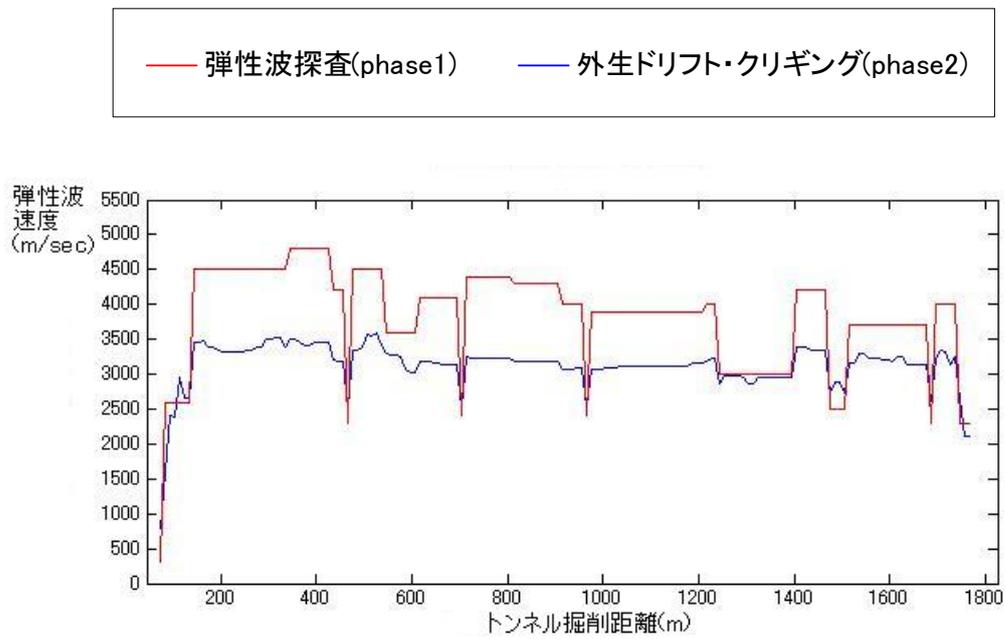


図 3.22 Tトンネル掘削深度での弾性波速度分布

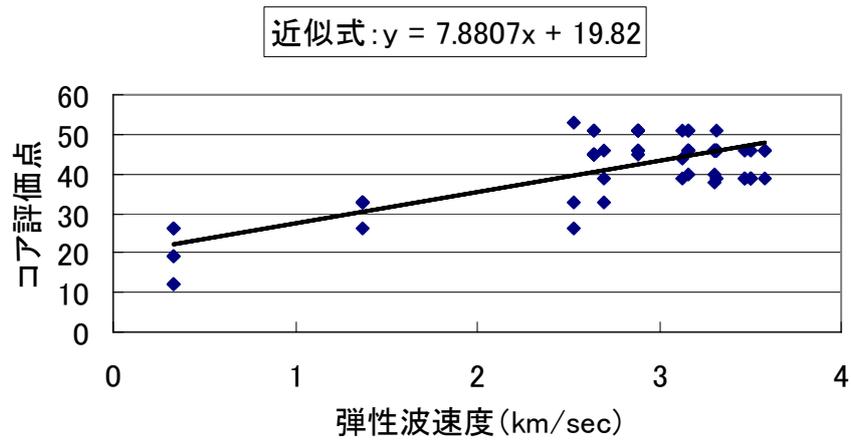
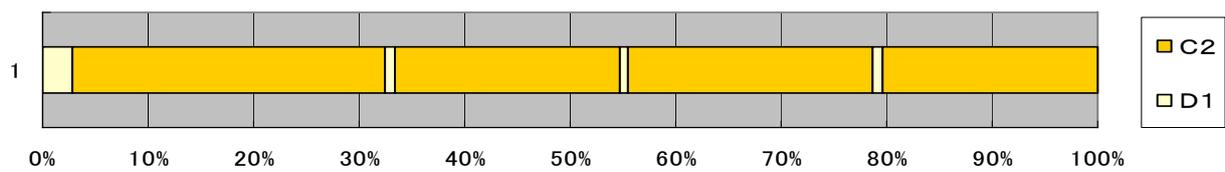
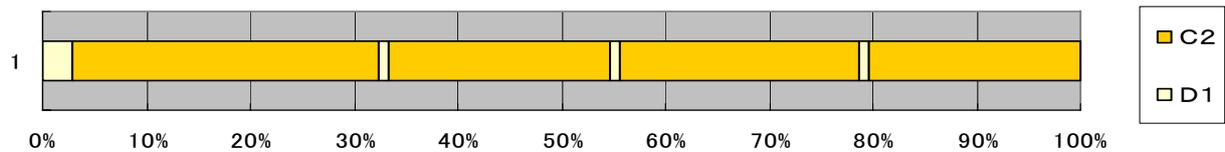


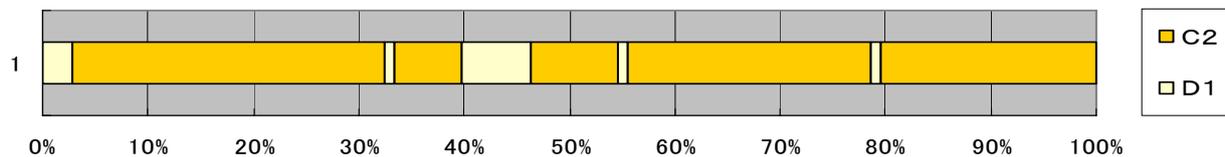
図 3.23 Tトンネルにおける弾性波速度とコア評価点の相関



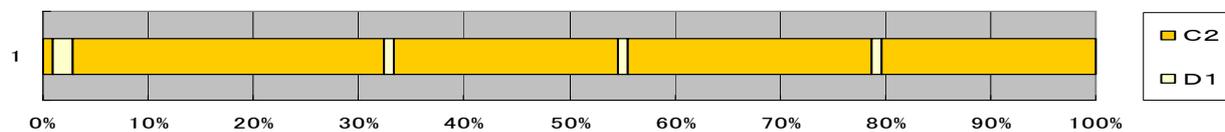
Tトンネル 弾性波探査 phase1 楽観支保パターン



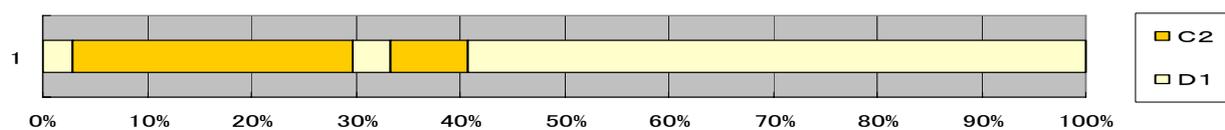
Tトンネル 弾性波探査 phase1 最尤支保パターン



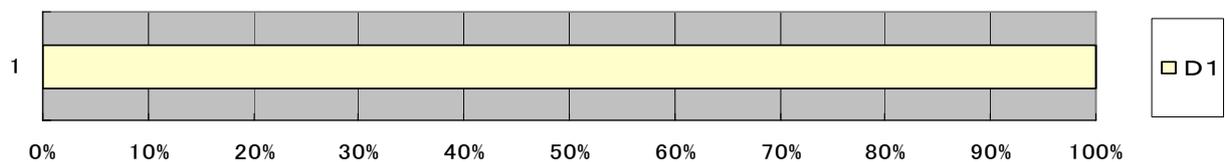
Tトンネル 弾性波探査 phase1 悲観支保パターン



Tトンネル 弾性波探査 phase2 楽観支保パターン



Tトンネル 弾性波探査 phase2 最尤支保パターン



Tトンネル 弾性波探査 phase2 悲観支保パターン

図 3.24 Tトンネルの各調査段階における地山区分

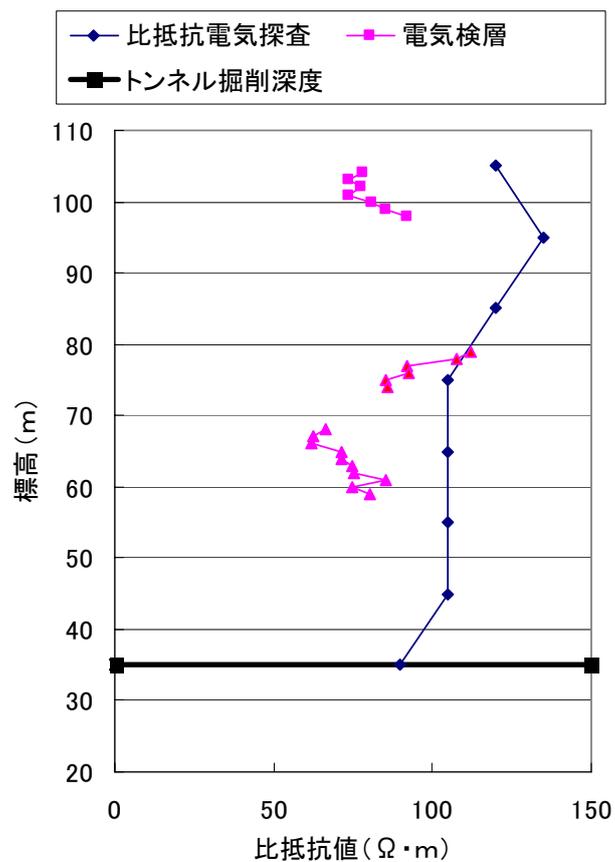


図 3.25 Tトンネルにおける電気検層と比抵抗電気探査結果

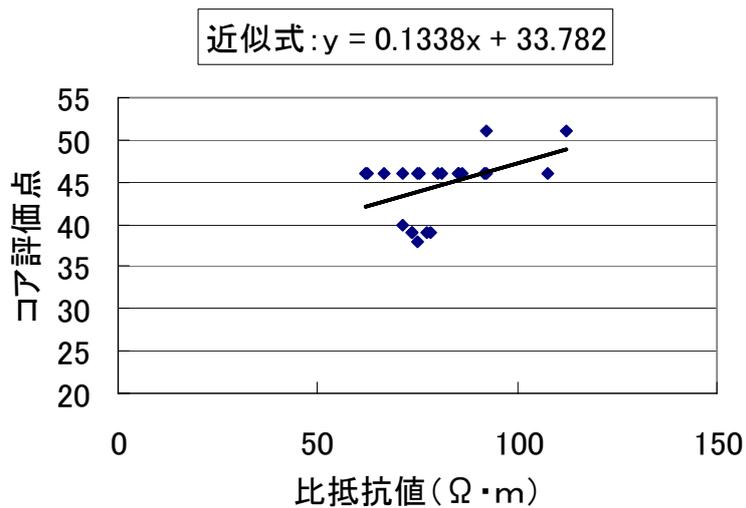
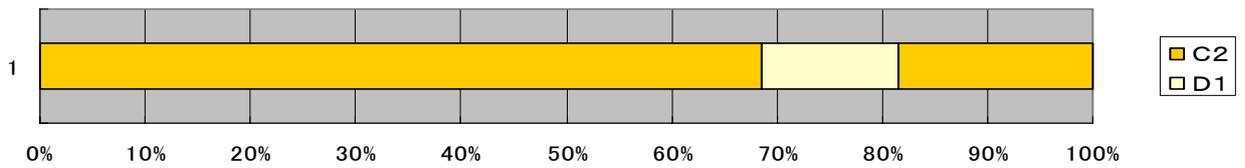
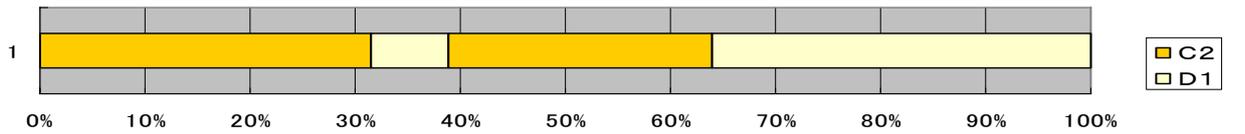


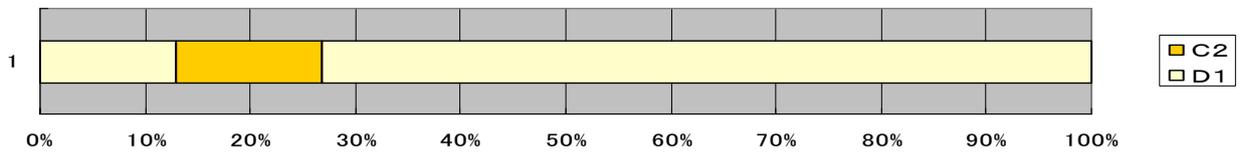
図 3.26 Tトンネルにおける比抵抗値とコア評価点の相関



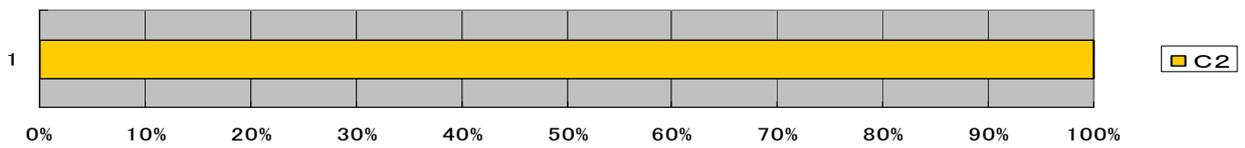
Tトンネル 比抵抗探索 phase1 楽観支保パターン



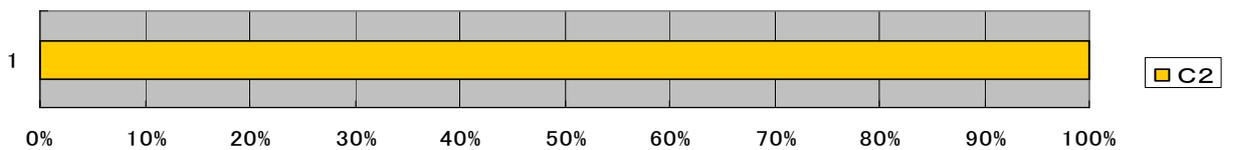
Tトンネル 比抵抗探索 phase1 最尤支保パターン



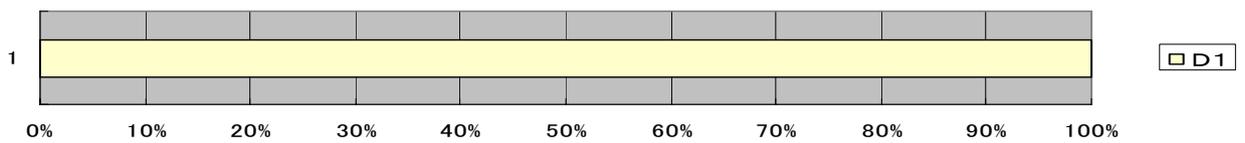
Tトンネル 比抵抗探索 phase1 悲観支保パターン



Tトンネル 比抵抗探索 phase2 楽観支保パターン



Tトンネル 比抵抗探索 phase2 最尤支保パターン



Tトンネル 比抵抗探索 phase2 悲観支保パターン

図 3.27 Tトンネル 比抵抗探索における地山区分

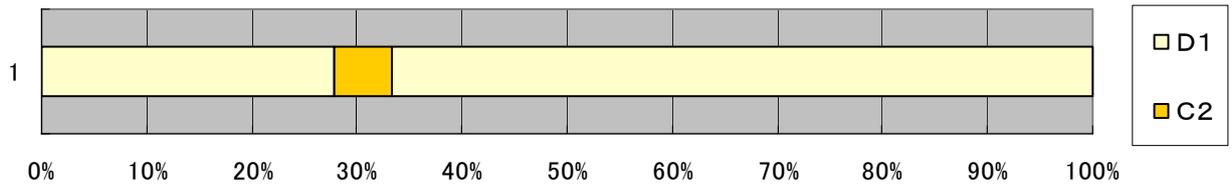
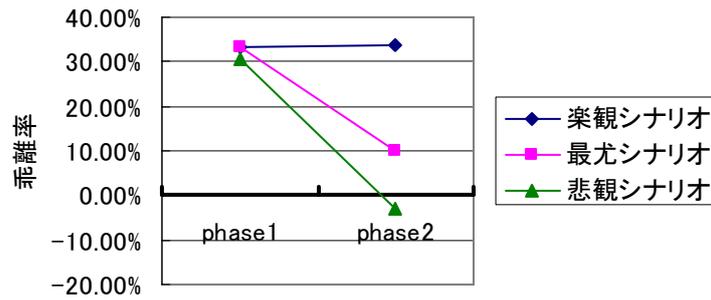
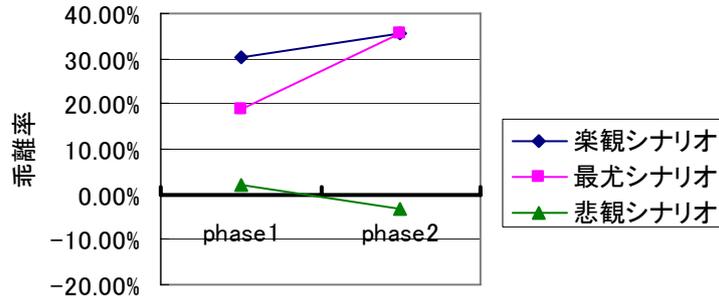


図 3.28 T トンネルの実施工での地山区分



T トンネル 弾性波探査における実施工との乖離率



T トンネル 比抵抗探査における実施工との乖離率

図 3.29 T トンネル 実施工における建設コストと推定建設コストとの乖離率の比較

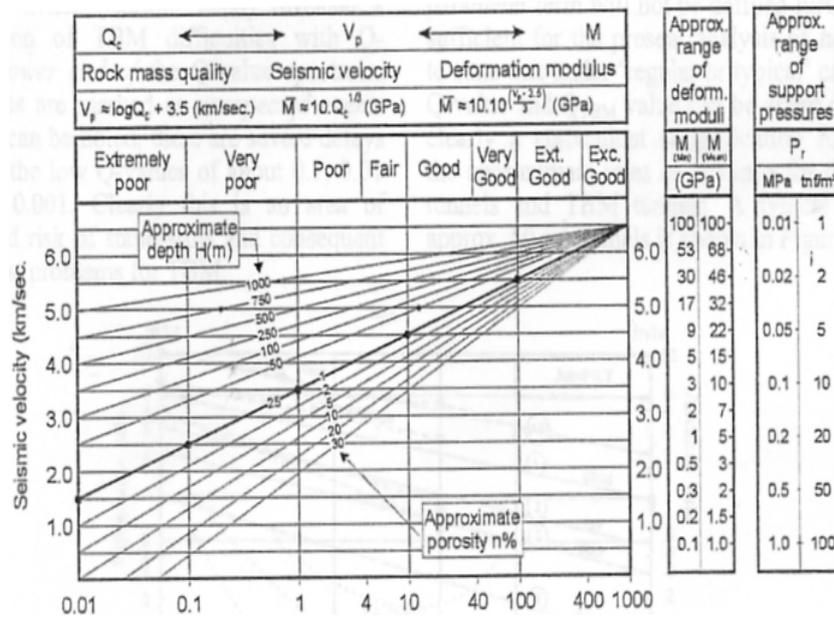


図 4.1 土被りと弾性波速度の関係

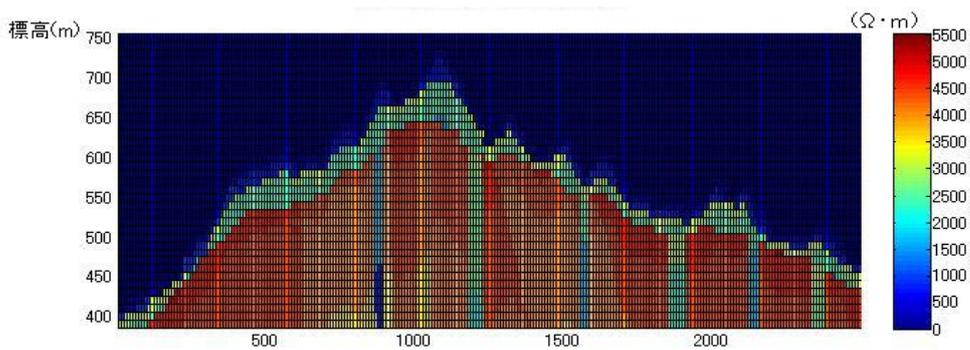


図 4.2 Rトンネル 土被り考慮における phase1 の弾性波速度分布

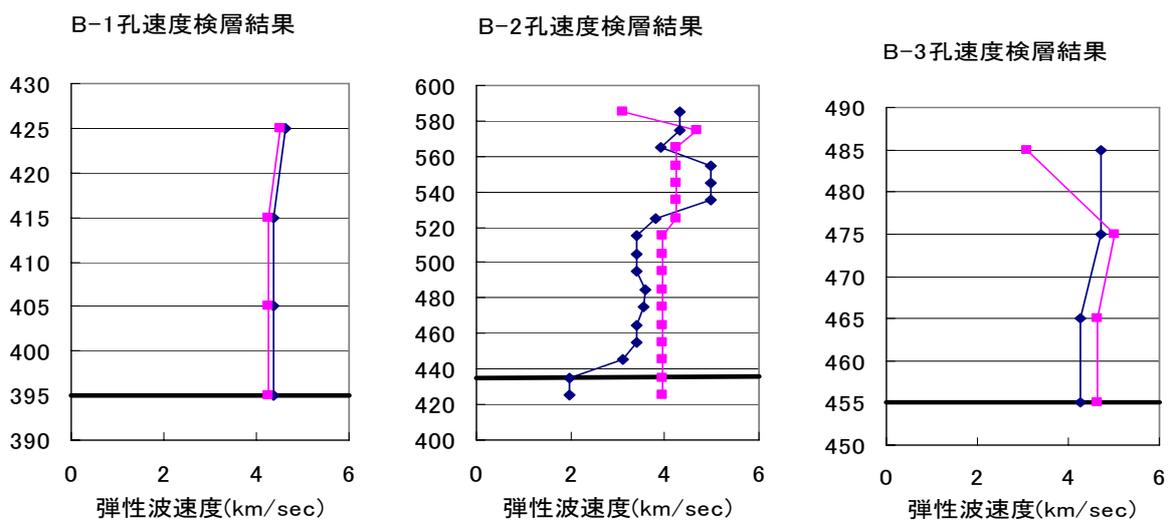


図 4.3 Rトンネル 土被り考慮における速度検層結果

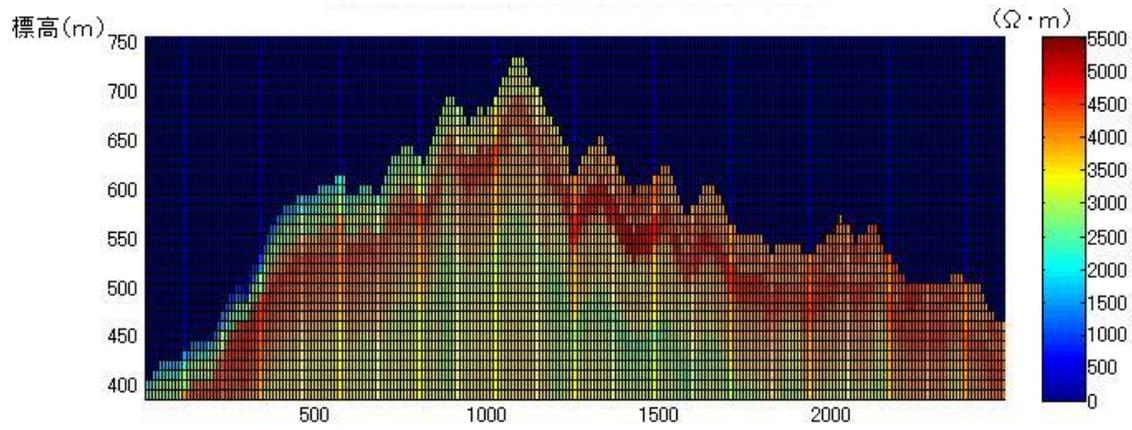


図 4.4 Rトンネル 土被り考慮における phase2 の弾性波速度分布

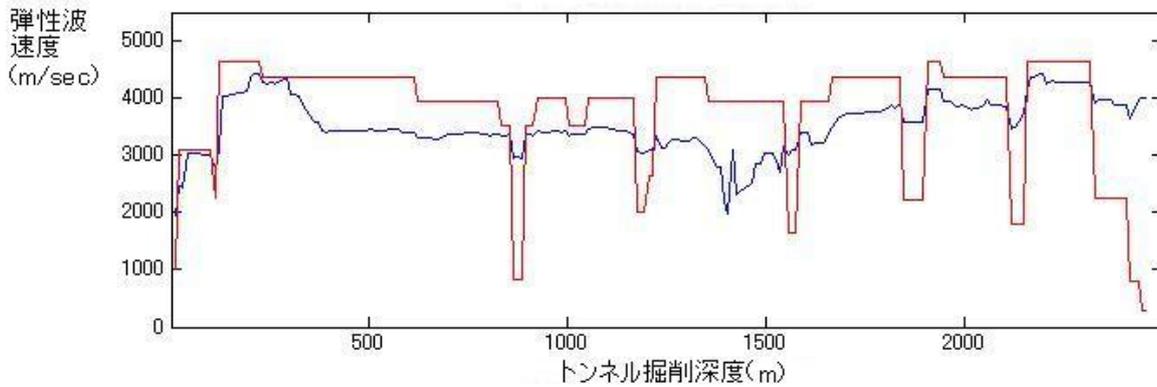


図 4.5 Rトンネル トンネル掘削深度における弾性波速度分布

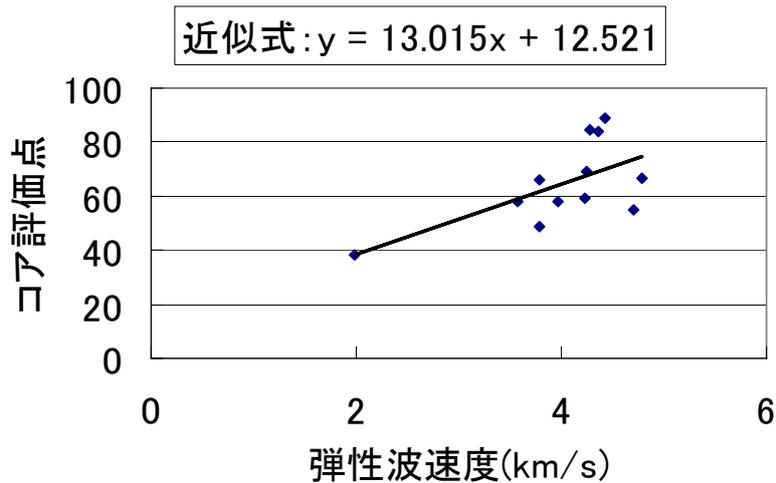
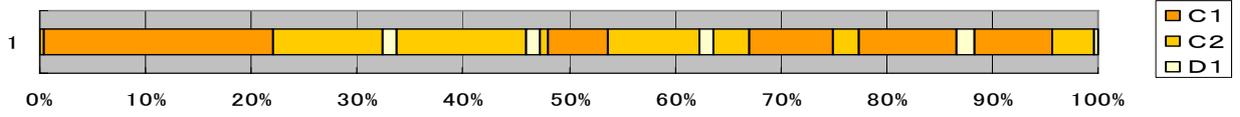
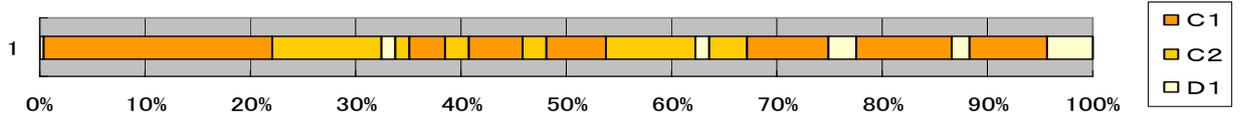


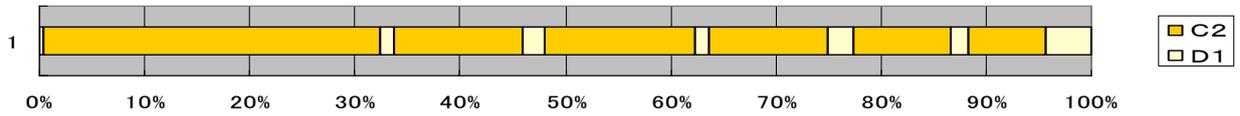
図 4.6 Rトンネル 土被り考慮による弾性波速度とコア評価点の相関



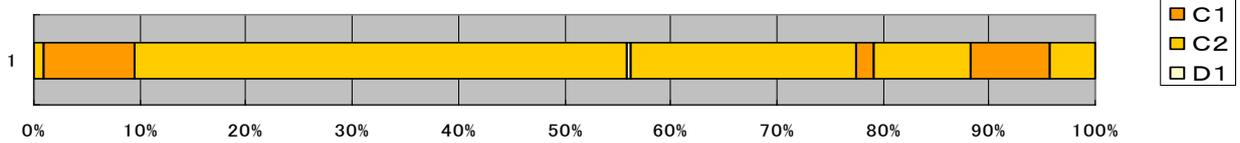
Rトンネル 弾性波考慮 phase1 楽観支保パターン



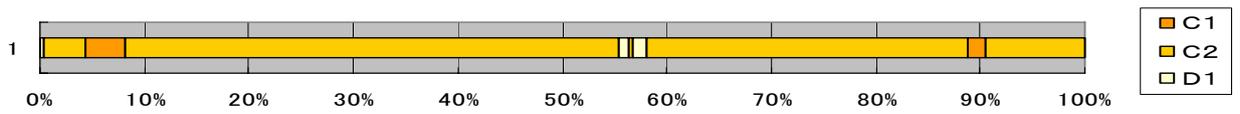
Rトンネル 弾性波考慮 phase1 最尤支保パターン



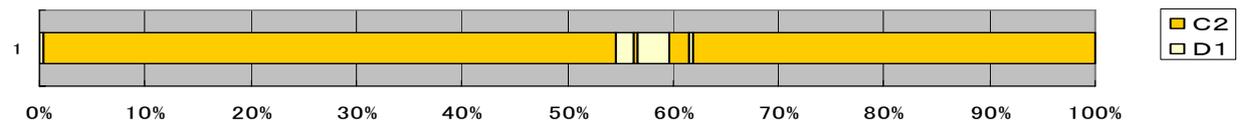
Rトンネル 弾性波考慮 phase1 悲観支保パターン



Rトンネル 弾性波考慮 phase2 楽観支保パターン



Rトンネル 弾性波考慮 phase2 最尤支保パターン



Rトンネル 弾性波考慮 phase2 悲観支保パターン

図 4.7 Rトンネル 土被り考慮した地山区分

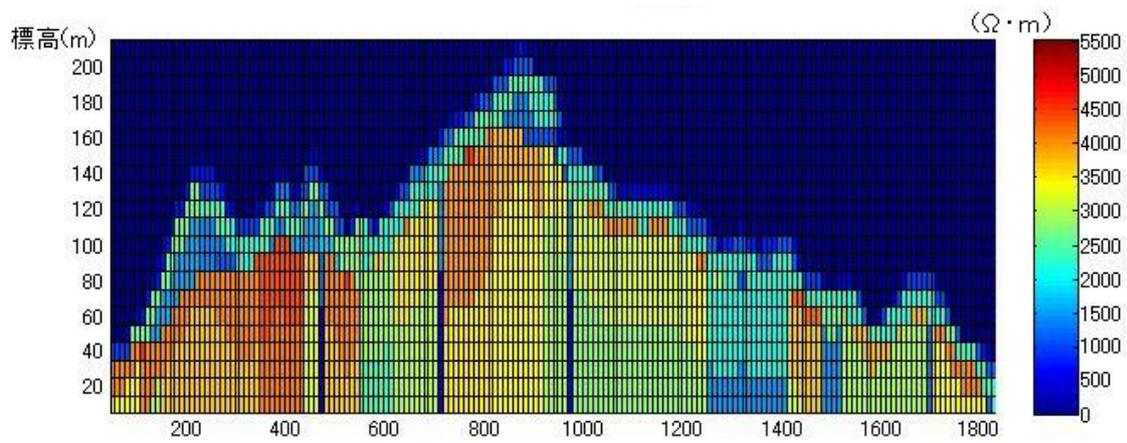


図 4.8 Tトンネル 土被り考慮した弾性波速度分布 (phase1)

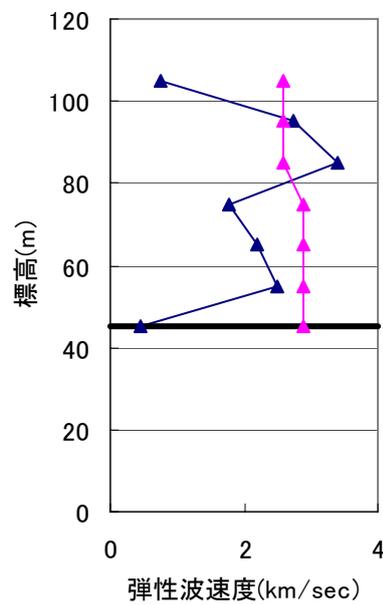


図 4.9 Tトンネル 土被り考慮した速度検層結果と弾性波探査結果

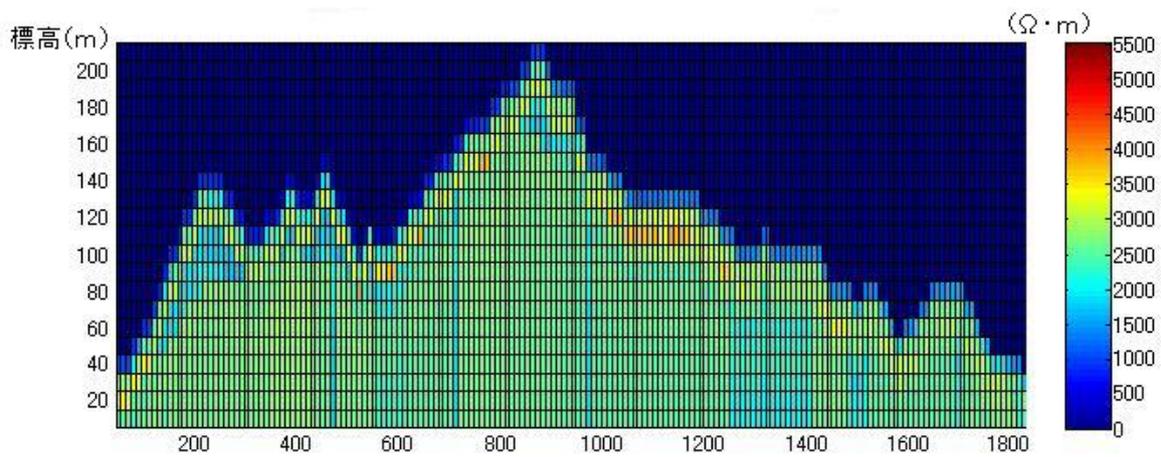


図 4.10 Tトンネル 土被り考慮した弾性波速度分布(phase2)

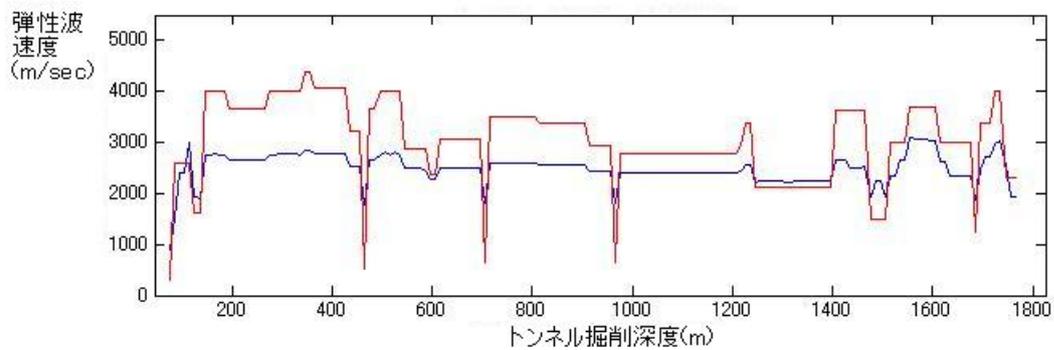


図 4.11 Tトンネル 土被り考慮したトンネル掘削深度における弾性波速度分布

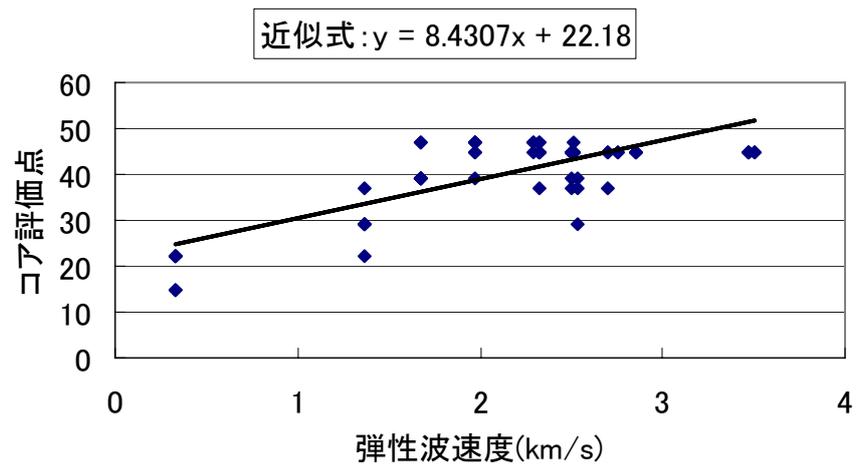
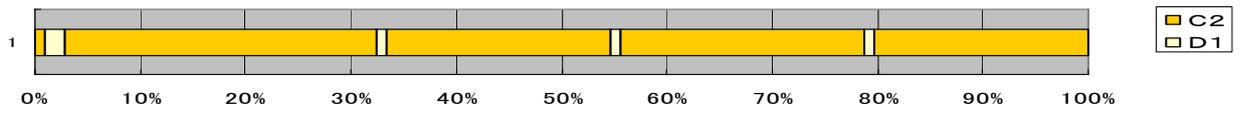
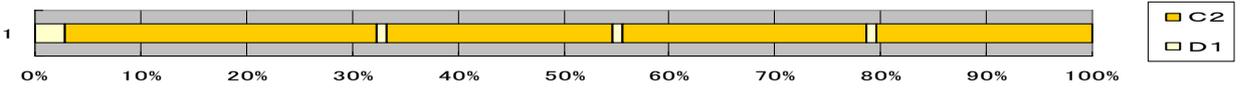


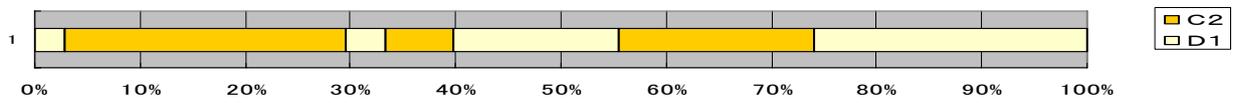
図 4.12 Tトンネル 弾性波考慮した速度検層結果とコア評価点の相関



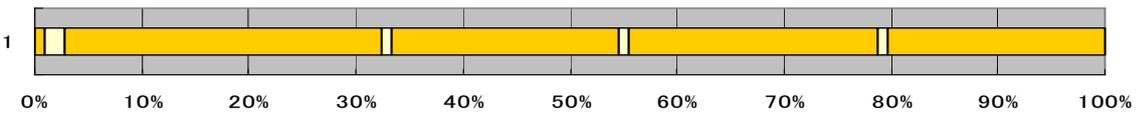
Tトンネル 弾性波考慮 phase1 樂觀支保パターン



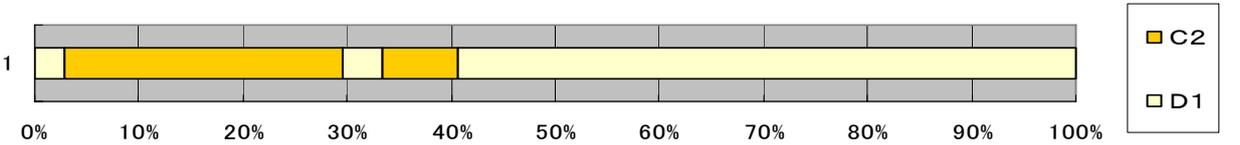
Tトンネル 弾性波考慮 phase1 最尤支保パターン



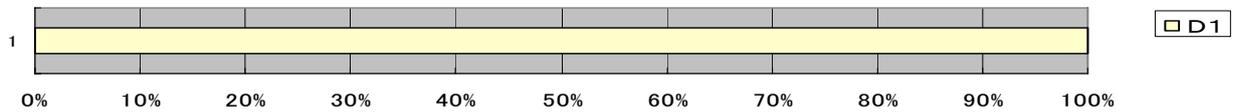
Tトンネル 弾性波考慮 phase1 悲觀支保パターン



Tトンネル 弾性波考慮 phase2 樂觀支保パターン



Tトンネル 弾性波考慮 phase2 最尤支保パターン



Tトンネル 弾性波考慮 phase2 悲觀支保パターン

図 4.13 Tトンネル 土被り考慮した地山区分

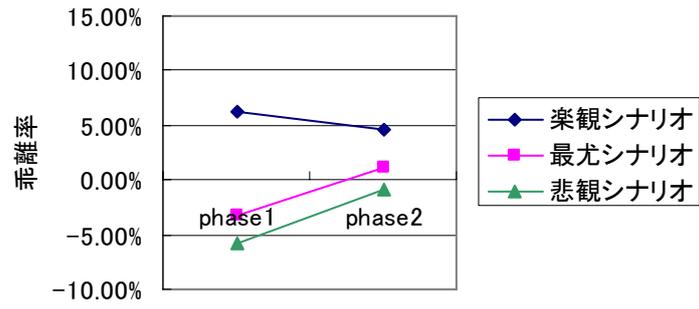


図 4.14 R トンネル 土被り考慮した推定建設コストの乖離率

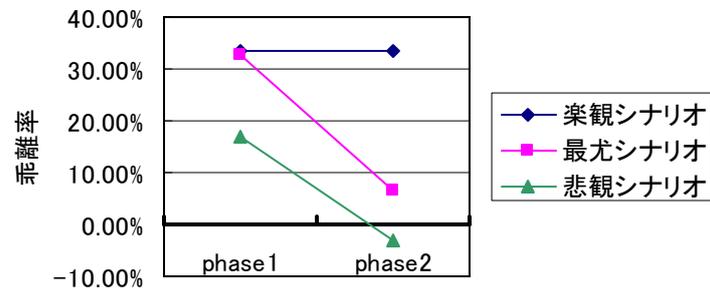


図 4.15 T トンネル 土被り考慮した推定建設コストの乖離率