

ニューラルネットワークを用いた  
山岳トンネル地山評価に関する研究

平成 26 年 2 月 21 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

小林 拓

## 要旨

山岳トンネル建設プロジェクトにおいては，事前調査段階において各種地質調査が実施され，その結果に基づいて建設コストが推定される．しかしながら，予算や期間等の制約により地盤状況を完全に把握することは不可能である．そのため，施工時に予見されていない地盤状況により建設コストが変動するリスク(ジオリスク)が生じることがある．よって，事前調査段階における地山評価の精度は，プロジェクトマネジメントの観点からも非常に重要であると推察される．

本研究では，山岳トンネル建設事例を対象とし，事前調査段階における地山評価手法として，ニューラルネットワークを用いた地山評価手法の構築および適用を行う．そして，ジオリスク低減の観点から，従来の地山評価手法との比較検証を行い，ニューラルネットワークを用いた地山評価の有用性を示すことを目的とする．具体的には，事前調査段階で得られるデータとして物性値(弾性波速度  $V_p$ ，比抵抗値  $\rho$ )およびコア評価点( $C_p(V_p)$ ， $C_p(\rho)$ )を用意し，ニューラルネットワークの入力層にどのデータを用いた場合に最も適切な地山評価が可能であるかを議論する．そして，地山評価点数および建設コストの観点から，ニューラルネットワークを用いた地山評価と従来の地山評価の比較を行い，本提案手法の有用性を検証する．さらに，事前調査段階で得られる情報に内在する不確実性の影響因子の一例として，屈折法弾性波探査で測定した弾性波速度に内在する土被り厚さの影響を考慮することで，ニューラルネットワークを用いた地山評価の精度の変化および不良地山把握の可能性を検証する．

以上を踏まえて，ジオリスクの低減の観点から，今後の山岳トンネル建設プロジェクトの事前調査段階における地質調査および地山評価のあり方に対して提言することを最終的な目的とする．

## 目次

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論                       | 1  |
| 1.1   | 研究の背景                    | 1  |
| 1.2   | 研究の目的                    | 2  |
| 1.3   | 既往の研究との関連                | 3  |
| 1.4   | 本論文の構成                   | 4  |
| 第 2 章 | 山岳トンネルにおける地山評価手法         | 5  |
| 2.1   | 山岳トンネルにおける地山評価のフローチャート   | 5  |
| 2.2   | 山岳トンネルにおける事前地質調査         | 5  |
| 2.2.1 | 屈折法弾性波探査                 | 5  |
| 2.2.2 | 比抵抗電気探査                  | 6  |
| 2.2.3 | ボーリング調査                  | 7  |
| 2.3   | 事前調査段階における地山評価           | 7  |
| 2.3.1 | 地山分類表を用いた地山評価            | 8  |
| 2.3.2 | コア評価点を用いた地山評価            | 8  |
| 2.4   | 施工段階における地山評価             | 9  |
| 2.5   | ニューラルネットワーク              | 10 |
| 2.6   | 建設コスト算出方法                | 12 |
| 第 3 章 | ニューラルネットワークを用いた地山評価の適用事例 | 13 |
| 3.1   | R トンネル建設プロジェクトの概要        | 13 |
| 3.1.1 | 屈折法弾性波探査結果               | 13 |
| 3.1.2 | 比抵抗電気探査結果                | 13 |
| 3.1.3 | ボーリング調査内容                | 14 |
| 3.1.4 | コア評価点                    | 14 |
| 3.1.5 | 切羽評価点                    | 15 |
| 3.2   | B トンネル建設プロジェクトの概要        | 15 |
| 3.2.1 | 屈折法弾性波探査結果               | 15 |
| 3.2.2 | 比抵抗電気探査結果                | 15 |
| 3.2.3 | ボーリング調査内容                | 15 |

|            |                                                         |           |
|------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.4      | コア評価点 .....                                             | 16        |
| 3.2.5      | 切羽評価点 .....                                             | 16        |
| 3.3        | 適用事例①(Bトンネルデータを教師データとした場合のRトンネルの地山評価) .....             | 17        |
| 3.3.1      | 構築したニューラルネットワークの概説 .....                                | 17        |
| 3.3.2      | 入力層にコア評価点を用いた場合 .....                                   | 17        |
| 3.3.3      | 入力層に物性値を用いた場合 .....                                     | 18        |
| 3.4        | 適用事例②(Rトンネルデータを教師データとした場合のBトンネルの地山評価) .....             | 19        |
| 3.4.1      | 構築したニューラルネットワークの概説 .....                                | 19        |
| 3.4.2      | 入力層にコア評価点を用いた場合 .....                                   | 19        |
| 3.4.3      | 入力層に物性値を用いた場合 .....                                     | 20        |
| 3.5        | 適用事例全体のまとめ .....                                        | 20        |
| <b>第4章</b> | <b>従来手法との比較 .....</b>                                   | <b>21</b> |
| 4.1        | Rトンネルにおける従来手法との比較 .....                                 | 21        |
| 4.1.1      | 地山評価点数の比較 .....                                         | 21        |
| 4.1.2      | 建設コストの比較 .....                                          | 22        |
| 4.2        | Bトンネルにおける従来手法との比較 .....                                 | 23        |
| 4.2.1      | 地山評価点数の比較 .....                                         | 23        |
| 4.2.2      | 建設コストの比較 .....                                          | 24        |
| 4.3        | 従来手法との比較結果のまとめ .....                                    | 24        |
| <b>第5章</b> | <b>ニューラルネットワークを用いた地山評価(土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いた場合) .....</b> | <b>25</b> |
| 5.1        | 土被り厚さを考慮した弾性波速度分布 .....                                 | 25        |
| 5.1.1      | Rトンネルの土被り厚さを考慮した弾性波速度分布 .....                           | 26        |
| 5.1.2      | Bトンネルの土被り厚さを考慮した弾性波速度分布 .....                           | 26        |
| 5.2        | 土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いた場合の地山評価結果 .....                      | 26        |
| 5.2.1      | Rトンネルにおける地山評価結果 .....                                   | 26        |
| 5.2.2      | Bトンネルにおける地山評価結果 .....                                   | 27        |

|                       |                            |    |
|-----------------------|----------------------------|----|
| 5.3                   | 土被り厚さを考慮した地山評価結果のまとめ ..... | 28 |
| 5.4                   | 事前調査段階における地山評価に関する提言 ..... | 29 |
| 第 6 章 結論, 今後の課題 ..... |                            | 30 |
| 6.1                   | 結論 .....                   | 30 |
| 6.2                   | 今後の課題 .....                | 30 |
| 参考文献 .....            |                            | 31 |
| 謝辞 .....              |                            | 33 |

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

山岳トンネル建設プロジェクトにおいては、事前調査段階において物理探査やボーリング調査等の地質調査が行われ、これにより地盤状況を予測し、施工が行われる。しかし、予算や期間の制約、および地質調査の技術的な限界により、事前調査段階において地盤状況を完全に把握することは不可能である。そのため、建設プロジェクトマネジメントの分野の研究<sup>1)</sup>においては、この地盤条件の不確実性を「予見できない地盤条件(Unforeseeable Geological Condition)」として、建設プロジェクトに支障をきたす主要なリスク要因の 1 つとして定義している。このような地盤条件の不確実性に起因するリスクはジオリスクと称され、顕在化した場合には設計変更や追加調査に伴う工期遅延、および事前の積算金額からのコストオーバーランが生じる可能性がある。

ジオリスクは、従来は建設プロジェクトの発注者および請負者の間で締結される建設契約においては一種の不可抗力として認識されていた。そのため、一般的にジオリスクに起因する建設コスト変動分は、数量積算方式に基づいてプロジェクトの発注者が負担することで、請負者のリスク分担は回避されてきた<sup>2)</sup>と考えられる。これは、主な発注者である国・地方公共団体は請負者に比べて資金的余裕があったためと推察される。しかし、近年は経済不況や高齢化に伴う税収の減少によりこの前提が崩れている。それに加え、PFI(Private Finance Initiative)や PPP(Public Private Partnership)方式が導入され始め、社会基盤構造物の調達方式に変化が起こり、ジオリスクの取り扱いも変化すると推察される。そのため、建設コストの妥当性に加え、その設計の根拠となる事前地質調査の妥当性についても監視の目が厳しくなることが想定される。したがって、事前調査段階における地山評価の精度は非常に重要な問題である。

山岳トンネルの支保パターン決定に用いる施工段階における地山評価としては、切羽観察による定性的評価が行われてきたが、判断基準の不明確さ、判定者の主観的評価になる傾向があること等の理由により、近年では、Barton が提案した Q-system<sup>3)</sup>、Bieniawski による RMR<sup>4)</sup>等の定量的評価が世界的によく用いられている。しかし、これらの方法は、地山が比較的硬質で良好な状態における岩盤評価を目的に考案されたものであり、日本のような複雑な地質構造を有する地山評価

には適用性に問題がある．そこで日本では，Q-system や RMR を参考にし，日本の複雑な地質構造に合わせた定量的評価手法として，新切羽評価点法が提案され，現在用いられている．

また，日本の山岳トンネル建設プロジェクトの事前調査段階における地山評価としては，地山分類表を用いた地山評価が行われてきたが，この評価手法では弾性波速度を地山評価の重要な指標として位置づけているのに対し，施工段階における地山評価である新切羽評価点法では弾性波速度は用いられていない．木村ら<sup>5)</sup>は，このような事前調査段階と施工段階の地山評価における評価指標の違いが，事前調査段階の地山評価と施工段階の地山評価における乖離を生む原因と考え，新切羽評価点法と同様の地山評価を事前調査段階で行う手法として，コア評価点を用いた地山評価を提案している．コア評価点を用いた地山評価とは，ボーリングコアに対して，切羽評価点と同様の点数化を行って得たコア評価点を切羽評価点と一致するとみなして，地山等級区分の判定を行うものである．しかし，例えば本研究で対象とするBトンネルの例を図1.1に示すが，トンネル掘削位置のコア評価点を算出する際に用いる相関式には，相関性の低い線形近似によって求められたものを使用することが一般的であり，信頼性に欠けると推察される．また，ボーリングコアに対して点数化したコア評価点と切羽に対して点数化した切羽評価点を一致するとみなすことにも対象物のスケールの違い，岩石と岩盤の性質の違い等の理由により，課題があると推察される．このように，現在用いられている事前調査段階における地山評価手法は，両者とも大きな不確実性を内在している．

以上のような背景により，事前調査段階における推定建設コストと施工段階に確定する建設コストの乖離の低減が求められており，そのために地山分類表，コア評価点を用いた地山評価に代わる，より精度の高い新たな事前調査段階の地山評価手法が必要とされている．

## 1.2 研究の目的

山岳トンネル建設プロジェクトにおける建設コストは，現場の技術者が施工段階における地山評価である切羽評価点を参考にして選定する支保パターンによって決定される．したがって，事前調査段階で施工時の切羽評価点が予測できれば，事前に建設コストを推定することが可能である．しかし，例えば本研究で対象と

するRトンネルの例を図1.2に示すが、事前調査段階で得られる情報(物性値およびコア評価点)と施工段階で得られる情報(切羽評価点)は線形関係、単純な非線形関係になく、相関式を定式化することは困難である。そこで、複雑な非線形処理が可能なニューラルネットワークを用いて切羽評価点の予測を行い、事前調査段階で得られるどのデータをニューラルネットワークの入力層に用いた場合に最も適切な地山評価が可能であるかを定量的に議論する。また、従来の事前調査段階における地山評価手法である地山分類表およびコア評価点を用いた地山評価と地山評価点数、建設コストの観点から比較し、ニューラルネットワークを用いた地山評価の有用性を定量的に検証する。さらに、事前調査段階で得られる情報に内在する不確実性を考慮することによる、ニューラルネットワークを用いた地山評価の精度の変化および不良地山把握の可能性を検証する。

以上を踏まえて、事後評価の観点から、今後の事前調査段階における地質調査および地山評価のあり方をジオリスク低減の寄与の面から考え、提言を行うことを目的とする。

### 1.3 既往の研究との関連

本節では、ジオリスクに起因する建設コスト変動に関する研究について整理し、一連の研究の中における本研究の位置づけを述べる。

- ・ Einstein<sup>6)</sup>は、トンネル施工における地盤条件の不確実性に着目し、それにより建設コストが変動することの重要性を指摘し、地質調査によって地盤状況を明らかにすることの価値を説いている。
- ・ 大津ら<sup>7)</sup>は、地盤統計学手法の1つであるインディケータクリギング手法を用いて、建設コストの確率分布をリスクカーブとして表現し、建設コストの変動を評価した。また、事前地質調査の価値に関して定量的な考察を行った。
- ・ 大津ら<sup>8)</sup>は、実際の建設工事における事後評価に、地盤統計学手法を用いた建設コスト変動評価を適用し、推定建設コストの変動と実際の建設コストの関連について検討を行った。そして、建設プロジェクトに関する事後評価結果に基づき、新たなジオリスク対応の可能性について提案した。

本節で取り上げた既往研究は、それぞれ建設プロジェクトにおける費用便益分



析に基づいたプロジェクトリスクマネジメントの一翼を担うものであると考えることができる。図 1.3 に示すように、建設プロジェクトの各段階における費用および便益はそれぞれ不確実性を有する。その中でこれらの研究は事前調査段階および施工段階における地盤条件の不確実性というリスク要因に起因する建設コスト変動を定量的に示し、プロジェクトの実施や投融資に関する意思決定に反映させることを目的としている。

これらの研究を受け、本研究では事前調査段階における地山評価に着目し、ジオリスクの低減を目的とした新たな事前調査段階における地山評価手法の提案を行う。また、プロジェクトの実施等の意思決定に反映させることを目的として、事後評価の観点から、提案手法の工学的な有用性について検討を加える。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 6 章からなる。

第 1 章では、序論として、研究の背景、目的および既往研究との関連を述べた。

第 2 章では、山岳トンネルにおける地山評価の流れ、事前地質調査、事前調査段階および施工段階における地山評価について説明する。また、本研究で用いるニューラルネットワーク、建設コスト算出方法について述べる。

第 3 章では、実際の山岳トンネル建設プロジェクトを取り上げ、ニューラルネットワークによる切羽評価点の予測を行い、事前調査段階で得られるどのデータを入力層に用いた場合に最も精度の高い予測が行えるかを定量的に議論する。

第 4 章では、第 3 章を踏まえてニューラルネットワークを用いた地山評価と従来手法である地山分類表およびコア評価点を用いた地山評価を地山評価点数および建設コストの観点から比較し、ニューラルネットワークを用いた地山評価の有用性を定量的に検証する。

第 5 章では、ニューラルネットワークに使用する情報の不確実性を考慮した場合、すなわち、より正確に地盤状況を表していると推察される情報をニューラルネットワークに用いた場合として、土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いたニューラルネットワークによる地山評価を行い、その予測精度の変化および不良地山把握の可能性を検証する。また、事後評価の観点から、今後の山岳トンネル事前調査段階における地質調査および地山評価に対する提言を行う。

第 6 章では、本研究の結論、今後の課題を示す。

## 第2章 山岳トンネルにおける地山評価手法

本章では山岳トンネルにおける地山評価手法について説明する．まず，山岳トンネル建設プロジェクトにおける地山評価の全体的な流れを示し，その流れに沿って，事前地質調査，事前調査段階における地山評価，および施工段階における地山評価について説明する．そして，本研究で用いるニューラルネットワークおよび山岳トンネル建設コスト算出方法について説明する．

### 2.1 山岳トンネルにおける地山評価のフローチャート

山岳トンネルにおける地山評価のフローチャートを図 2.1 に示す．この図に示すように，まず事前調査段階において各種事前地質調査が行われ，地山全体の地盤推定が行われる．本研究では，その結果を踏まえて，地山分類表やコア評価点を用いた地山評価，あるいは本研究で提案するニューラルネットワークを用いた地山評価を行い，地山等級区分と支保単価の関係を用いて建設コストを推定する．そして，施工段階において，切羽評価点を用いた地山評価を行い，現場の技術者が支保パターンを選定することで実際の建設コストが確定される．1.1 で述べたように，事前調査段階の推定建設コストと施工段階の建設コストの乖離の低減が求められている．

### 2.2 山岳トンネルにおける事前地質調査

山岳トンネル建設プロジェクトにおいては，トンネル地山の地盤状況を把握することを目的とした事前地質調査が実施される．その手法として，地山の物理特性を地表面から遠隔的に測定する屈折法弾性波探査・比抵抗電気探査や，ボーリング孔を利用したボーリング調査等がある．以下に本研究が対象とする事前地質調査を説明する．

#### 2.2.1 屈折法弾性波探査

地盤の弾性波伝播速度と地盤状況には相関関係があるため，山岳トンネル建設プロジェクトでは，まず地表面からの弾性波探査を行うことで地山の弾性波速度を測定することが多い．地表で弾性波を発生させると，伝播速度の異なる地層の境界面で屈折して再び地表へ戻ってくる．この波動を任意の点で受振すること

より，地下に存在する弾性波速度境界面の位置および，その伝播速度を測定する手法が屈折法である<sup>10)</sup>．

具体的には，起震点から各受振点までの弾性波初動の到達時間(走時)を読み取ることで走時曲線を作成し，この走時曲線の変化を解析することで地下の速度構造を推定する．走時曲線の解析方法としては「萩原の方法(はぎとり法)」が土木地質調査に広く利用されており，この方法では解析の前提条件として，以下に示すような仮定を設けている．

- (a) 弾性波速度は深部に向かって増加する．
- (b) 同一地層内では速度が一定である．
- (c) 側線の直交方向には速度が変化しない．
- (d) 各層はある程度の厚さを持っている．

屈折法弾性波探査により，対象領域全体の弾性波速度分布を得ることができ，一般的に弾性波速度と一軸圧縮強度との間には比例関係があると考えられているため<sup>11)</sup>，山岳トンネル建設領域における地盤状況を推定することが可能となる．

しかし，実際の地盤では上記(a)~(d)の条件が全て満たされていないことも多く，解析結果が誤ったものとなる可能性がある．また山岳トンネルでは，土被り厚さが数百メートルとなるような場合もあり，このような状況では土被りによる拘束圧の増加によって，対象領域における正確な弾性波速度が得られていない可能性が高い．したがって，屈折法弾性波探査によって得られる弾性波速度分布は対象領域全体に及ぶ貴重な面情報として有用である反面，その速度値は不確実性を含んでいることを認識する必要がある．

### 2.2.2 比抵抗電気探査

比抵抗電気探査は，地表に設置した一対の電極を通じて電流を流し，他の一対の電極でその電位差を測定することによって，各電極の位置や間隔における見掛け比抵抗値を求め，その値の解析を行い地下の比抵抗構造を推定する．比抵抗とは地盤の単位体積当たりの電気抵抗のことで，**表 2.1**に示すように岩石の種類，間隙率，飽和度，粘土鉱物量等と関係があるため，比抵抗電気探査は電流の流しやすい断層破碎帯，変質帯，帯水層等の不良地山を探査するのに利用される．

比抵抗電気探査によって得られる比抵抗値分布はトンネル地山全体に及ぶ面情報として有用であるが、一般的には以下に示すような不確実性を含む。

- (a) 地形形状や地盤構造によって解析結果が大きく変化する。
- (b) 探査精度は電極間隔や探査深度の増加に伴って低下する。
- (c) 低比抵抗に対して感度が良く地盤を不良なものと判断する傾向がある。
- (d) 比抵抗値が同じであれば異なる地盤であっても同じ地盤と判断する。

このような不確実性を含むが、比抵抗電気探査は断層破碎帯、変質帯、帯水層等不良地山を把握するために有用であり、弾性波探査を補完する事前地質調査として行われる。

### 2.2.3 ボーリング調査

屈折法弾性波探査や比抵抗電気探査は地表面から行う物理探査手法であるのに対して、ボーリング調査は鉛直または水平方向に孔を掘って行われる調査であり、試験としては、弾性波速度を測定する速度検層や、比抵抗値を測定する電気検層等が実施される。

ボーリング調査はボーリング打設位置における地盤状況を高い精度で把握することができるが、山岳トンネルのような数キロメートルにも及ぶ線上構造物の場合、予算や工期の制約により、ボーリング調査は限られた数点でしか実施できないため、得られる情報は広大な領域内における点情報である。しかし、ボーリング調査を行うことで地表面探査では把握することが難しい多種多様な地山の特性を把握することができるため、事前地質調査として実施されている。

## 2.3 事前調査段階における地山評価

前節で説明した事前地質調査結果に基づいて、地山評価が行われる。地山評価において、事前地質調査結果を用いて地山の等級区分を行い、各区分に応じた支保パターンを設定する。地山等級区分は岩盤の性質や条件を簡潔な形で表現し、設計・施工を効率的に進め、技術者の理解を助けるために有用である<sup>12)</sup>。本節では、現在日本で用いられている事前調査段階における地山評価手法として2手法について説明する。

### 2.3.1 地山分類表を用いた地山評価

山岳トンネルの地山評価は、地山分類表を用いて行うのが一般的である。弾性波速度と一軸圧縮強度との相関が高いという知見に基づき、弾性波速度を地山等級区分の判定の1つの基準として用いることが多い。

本研究では、表 2.2 に示す旧日本道路公団(現 NEXCO)の地山分類表<sup>13)</sup>を取り上げる。この地山分類表には、2 種類の地山等級区分が想定される重複部分が存在するが、本研究の第 4 章における議論では、この重複部分を中間で振り分けたものを用いる。

事前調査段階における地山分類表を用いた地山評価の問題点としては、施工段階における地山評価と判定指標が大きく異なることが挙げられる。地山分類表を用いた地山評価においては、弾性波速度が重要な指標として位置づけられているのに対し、施工時に切羽において地山等級区分を判定する際には弾性波速度は用いられていない。木村ら<sup>5)</sup>は、このように事前調査段階と施工段階における地山評価に用いる判定指標が異なることにより、事前調査段階における地山評価と施工段階における地山評価との間に乖離が生じると指摘している。こういった問題点により、地山分類表を用いた地山評価は不確実性を大きく含むと考えられる。

### 2.3.2 コア評価点を用いた地山評価

2.4で後述する施工段階における地山評価手法である新切羽評価点法を事前調査段階に援用した地山評価としてコア評価点を用いた地山評価が、近年日本において行われている。コア評価点を用いた地山評価の手順としては、まずボーリングコアに対して、圧縮強度、風化変質、割目間隔、割目状態の4項目について切羽評価点と同様の点数化を行うとともに、ボーリング孔内で実施する湧水圧試験や室内で実施するスレーキング試験等の結果をもとに、湧水量および水による劣化の2項目で点数の補正を行い、ボーリングコアのコア評価点を得る。次に、コア評価点をつけたボーリング孔と同じボーリング孔で実施された速度検層(電気検層)のデータを用いて、図 1.1のような弾性波速度(比抵抗値)とコア評価点との相関式を求める。この相関式を用いて、屈折法弾性波探査(比抵抗電気探査)により得られるトンネル掘削位置における弾性波速度(比抵抗値)から、トンネル掘削位置におけるコア評価点を算出する。そして、コア評価点は施工時の切羽評価点と一致するとみなし、表 2.3 に示す地山評価点数と地山等級区分の関係を用いて地山評価

を行う。

事前調査段階におけるコア評価点を用いた地山評価の問題点としては、主に以下の2点が挙げられる。

- ・ トンネル掘削位置におけるコア評価点を求める際に用いる相関式が、相関性の低い線形近似式である点
- ・ ボーリングコアに対して点数化したコア評価点と切羽に対して点数化した切羽評価点を一致するとみなして地山評価を行うが、対象物のスケールの違い、岩石と岩盤の性質の違い等により課題がある点

このような問題点により、コア評価点を用いた地山評価は不確実性を大きく含むと考えられる。

## 2.4 施工段階における地山評価

施工段階における地山評価手法として新切羽評価点法がある。本手法は、NEXCO(旧日本道路公団)が導入している施工段階における地山評価手法であり、切羽観察記録をもとに評価点をつけ、その評価点をもとに地山等級区分および標準支保パターンを選定するというものである<sup>14)~16)</sup>。具体的には、**表 2.4**に基づいて、支保選定に関して影響が大きい独立した4項目(圧縮強度、風化変質、割目間隔、割目状態)と岩盤強度に関する評価の補正のための2項目(湧水量、水による劣化)について切羽観察により評価区分を決定する。そして、**表 2.5**を用いて各評価区分について点数化し、得られた計100点満点の切羽評価点に対して、**表 2.3**に示す地山評価点数と地山等級区分の関係をもとに地山評価を行い、支保パターンを選定するものである。

しかし、切羽評価点に対応する地山等級区分と実際に施工時に採用される支保パターンとは必ずしも一致するわけではない。これは、施工現場で支保パターンを選定する際は、現場の技術者が切羽評価点を参考にしつつも、工程の迅速性や安全性を考慮して判断することに起因する。実際に施工時に採用される支保パターンは、現場の技術者による工程の迅速性や安全性に対する主観的な判断等の不確実性を含むため、本研究の第4章および第5章では、切羽評価点に対応する地山等級区分に基づく建設コストを用いて議論を行う。

## 2.5 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)<sup>17),18)</sup>とは、人間の脳の構造を模倣して作られた情報処理手法であり、以下のような特徴を持つ。

- (a) ノイズを含んだ複雑な非線形処理を得意とする。
- (b) 並列分散処理を行うため、処理が速い。
- (c) 学習機能を持つため、説明変数と目的変数の相関式を定式化する必要がない。

本研究で ANN を用いる理由としては、**図 1.2** に示すように事前調査段階で得られる情報(物性値およびコア評価点)と施工段階で得られる情報(切羽評価点)は線形関係、単純な非線形関係になく、相関式を定式化することは困難であり、またそれぞれの値がジオリスクによる不確実性というノイズを含んでいるためである。

ANN は階層型ネットワークと相互結合型ネットワークに大別されるが、本研究ではパターン識別に有効な階層型ネットワークを用いる。解析ソフトとしては、NEUROSIM/L を用いたが、これは**図 2.2** に概念図を示すような 3 層階層型 ANN である。なお ANN の学習には誤差逆伝播法を用いている。

本研究で ANN を用いる際の手順は、以下(1)～(3)の通りであり、**図 2.3** にその概要を示す。

- (1) 入力層と出力層に用いるデータを決定する。本研究では、入力層に事前調査段階で得られる物性値およびコア評価点、出力層に施工段階に得られる切羽評価点を用いる。
- (2) 一方のトンネルデータを教師データとして、中間ニューロン数および各パラメータを設定し、誤差逆伝播法により ANN を学習させる。
- (3) 学習させた ANN を用いて、予測データ(もう一方のトンネルデータ)に対して切羽評価点予測を行い、実際の施工時切羽評価点と比較し精度を検証する。

ANN の構成素子であるニューロンの仕組みについて説明する。**図 2.4** に概念図を示すが、各ニューロンは式(2.1)、(2.2)の計算を行い、ある一定の入力値を超えると信号を出力する。

$$i_j^k = \sum_i w_{i,j}^{k-1,k} o_i^{k-1} - \theta_j^k \quad (2.1)$$

$$o_j^k = f_j^k(i_j^k) = \frac{1}{1 + \exp(-i_j^k)} \quad (2.2)$$

ここで、 $i_j^k$ は、第  $k$  層の  $j$  番目のニューロンの入力値、 $w_{i,j}^{k-1,k}$ は、第  $k-1$  層の  $i$  番目のニューロンと第  $k$  層の  $j$  番目のニューロンとの結合荷重、 $o_i^{k-1}$ は、第  $k-1$  層の  $i$  番目のニューロンの出力値、 $\theta_j^k$ は、第  $k$  層の第  $j$  番目のニューロンの閾値、 $f_j^k$ は、第  $k$  層の  $j$  番目のニューロンの入出力シグモイド関数である。

ANN の学習に用いた誤差逆伝播法について説明する．誤差逆伝播法とは、各ニューロン間の結合荷重  $w$  の値を順次調整していく学習法であり、流れを以下に概説する．

まず、入力層、中間層、出力層の順に各ニューロンの出力を計算する．続いて、教師データの出力層の値と ANN の出力値の 2 乗誤差  $E$  を計算する．2 乗誤差  $E$  は、式(2.3)のように表される．

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (c_i^3 - o_i^3)^2 \quad (2.3)$$

ここで、 $c_i^3$ は、第 3 層(最終層)の  $i$  番目の教師信号である．

そして、教師データの出力層の値と ANN の出力値の 2 乗誤差が減少するように、出力層から入力層に向かって、ANN の各層間の結合荷重  $w$  の値を修正する．その際修正される結合荷重の変化量を式(2.4)に示すが、こちらは式(2.3)を偏微分することで得られる．

$$\Delta w_{i,j}^{k-1,k}(t) = -\varepsilon \frac{\partial E(t)}{\partial w_{i,j}^{k-1,k}} + \alpha \Delta w_{i,j}^{k-1,k}(t-1) \quad (2.4)$$

ここで、 $t$  は、学習のタイムステップ、 $\Delta w_{i,j}^{k-1,k}$  は、第  $k-1$  層の  $i$  番目のニューロンと第  $k$  層の  $j$  番目のニューロンとの結合荷重の修正量、 $\varepsilon$ は、学習係数、 $\alpha$ は、慣性定数である．学習係数  $\varepsilon$ は、結合荷重  $w$  を変化させる割合であり、学習の速さ



を決めるものである．また，慣性定数  $\alpha$  は，学習の振動を抑え，収束しやすくするものである．

このようにして得られた結合荷重の修正量を，式(2.5)のように既存の結合荷重に加えることにより，新たな結合荷重を計算する．

$$w_{i,j}^{k-1,k}(t+1) = w_{i,j}^{k-1,k}(t) + \Delta w_{i,j}^{k-1,k}(t) \quad (2.5)$$

これらの計算を順次繰り返し，全ての入力パターンに対する 2 乗誤差  $E$  が設定値以下になるか，設定した学習回数に達すれば，計算を終了する．

本研究では以上のような ANN を用いて地山評価を行う．

## 2.6 建設コスト算出方法

本研究で対象とする R トンネルや B トンネルのような 2 車線道路トンネルでは，**表 2.6** に示す地山等級区分と支保パターンおよび支保単価の関係<sup>19)</sup>が設定されており，この関係を用いて建設コストを算出する．

事前調査段階における推定建設コストを，施工段階における切羽評価点により決定される建設コストと比較検討することで，事後評価による建設コストの変動リスクを評価することが可能となる．

本研究では，事前調査段階における推定建設コストと施工段階における切羽評価点により決定される建設コストを比較するための指標として，次(2.6)に示す乖離量  $D$  を定義する<sup>8)</sup>．

$$D = C_A - C_E \quad (2.6)$$

ここで， $C_A$  は切羽評価点により決定される建設コスト， $C_E$  は推定建設コストである．

乖離量  $D$  が正の値であればコストオーバーランの場合に，負の値であればコストアンダーランの場合に相当する．本研究では，式(2.6)の右辺を  $C_A$  で割った乖離率[%]を用いて，第 4 章および第 5 章における建設コストに関する議論を行う．

## 第 3 章 ニューラルネットワークを用いた地山評価の適用事例

本章では，まず本研究で対象とする 2 事例の山岳トンネル建設プロジェクトについて説明する．そして，一方のトンネルデータを教師データとして ANN を構築し，もう一方のトンネルの切羽評価点の予測を行った結果を示す．ANN を構築する際，入力層に用いる事前調査段階で得られるデータの種類として数ケースを用意し，ANN による切羽評価点予測値と施工時切羽評価点を比較することで，どのデータを入力層に用いた場合が最も精度の高い切羽評価点予測が可能かを議論し，考察を行う．

### 3.1 R トンネル建設プロジェクトの概要

R トンネルは全長約 2.5km の 2 車線道路トンネルであり，花崗岩および花崗閃緑岩を主体とした地山に建設されている．本節では，R トンネルの事前調査結果として，屈折法弾性波探査結果，比抵抗電気探査結果，ボーリング調査内容，コア評価点，施工結果として，切羽評価点についてそれぞれ説明する．

#### 3.1.1 屈折法弾性波探査結果

R トンネル地山全体の屈折法弾性波探査結果を図 3.1 に示す．また，トンネル掘削位置の弾性波速度分布を図 3.2 に示す．これらの結果より，トンネル掘削位置では，8 割以上の区間において弾性波速度が 4.7km/sec 以上の値を示していることが分かる．また，地山全体において，局所的に周辺地山より弾性波速度が 1.0km/sec 以上低い領域が鉛直方向に存在しており，トンネル掘削位置においても局所的に弾性波速度が低下する区間が多数存在することが確認できる．

#### 3.1.2 比抵抗電気探査結果

R トンネル地山全体の比抵抗電気探査結果を図 3.3 に示す．また，トンネル掘削位置の比抵抗値分布を図 3.4 に示す．これらの結果より，トンネル掘削位置では，7 割以上の区間において，花崗岩の一般的な比抵抗値である  $1000\Omega \cdot m$  以上の値<sup>20)</sup>を示しているが，坑口距離 1420m～1560m 付近，2040m～2090m 付近，および 2200m～2230m 付近において，比抵抗値が  $500\Omega \cdot m$  程度まで低下している低比抵抗区間が存在することが確認できる．

### 3.1.3 ボーリング調査内容

R トンネル地山では図 3.1, 図 3.3 に示すように, ボーリング調査として坑口付近に 2 本, 地山の間中部に 1 本の鉛直孔が打設されている. B-1, B-2 および, B-3 孔の全てにおいて速度検層および, 電気検層が実施されており, 強度試験や透水試験等の結果に基づいたコア評価点が算出されている. 図 3.5 に各孔にて実施された速度検層の結果を, 打設地点における屈折法弾性波探査結果と併せて示す. また図 3.6 に各孔にて実施された電気検層の結果を, 打設地点における比抵抗電気探査結果と併せて示す.

### 3.1.4 コア評価点

図 3.7 に R トンネルのボーリングコアに対して得られている弾性波速度とコア評価点( $C_p(V_p)$ )の関係を示す. この関係から線形近似によって導いた以下に示す相関式を用いてトンネル掘削位置のコア評価点を算出する.

$$C_p(V_p) = 27.506 \times V_p - 76.236 \quad (3.1)$$

式(3.1)により, 得られた R トンネルの  $C_p(V_p)$  分布を図 3.8 に示す. R トンネルの  $C_p(V_p)$  は, ほとんどの区間で 53~62 点の範囲で点数が分布しているが, 局所的に点数が大きく下落しており, 前後区間に比べ 50 点以上減少している区間も存在することが確認できる.

図 3.9 に R トンネルのボーリングコアに対して得られている比抵抗値とコア評価点( $C_p(\rho)$ )の関係を示す. この関係から線形近似によって導いた以下に示す相関式を用いてトンネル掘削位置のコア評価点を算出する.

$$C_p(\rho) = 0.0172 \times \rho + 30.51 \quad (3.2)$$

式(3.2)により, 得られた R トンネルの  $C_p(\rho)$  分布を図 3.10 に示す. R トンネルの  $C_p(\rho)$  は, 40~90 点という大きな幅をもった範囲で広く分布していることが確認できる.

### 3.1.5 切羽評価点

R トンネルに関しては，施工時切羽評価点が得られている．**図 3.11** に R トンネルの切羽評価点分布を示す．R トンネルの切羽評価点は，概ね 50～70 点の範囲で分布していることが確認できる．

## 3.2 B トンネル建設プロジェクトの概要

B トンネルは全長約 1.4km の 2 車線道路トンネルであり，対象サイトの地質は基盤岩として花崗岩が分布していて，崖錐堆積物が被覆している．本節では，前節同様に，事前調査結果および施工結果を順次説明する．

### 3.2.1 屈折法弾性波探査結果

B トンネル地山全体の屈折法弾性波探査結果を**図 3.12**に示す．また，トンネル掘削位置の弾性波速度分布を**図 3.13**に示す．これらの結果より，トンネル掘削位置では，6 割以上の区間において弾性波速度が 5.0km/sec 以上の値を示しているが，坑口距離 550m 付近および 1310m 付近において，弾性波速度が 4.0km/sec を下回る区間が存在することが確認できる．

### 3.2.2 比抵抗電気探査結果

B トンネル地山全体の比抵抗電気探査結果を**図 3.14**に示す．また，トンネル掘削位置の比抵抗値分布を**図 3.15**に示す．これらの結果より，トンネル掘削位置では，7 割以上の区間において，花崗岩の一般的な比抵抗値である  $1000\Omega \cdot m$  以上の値を示しているが，坑口距離 160m～220m 付近，480m～580m 付近，および 1250m～1380m 付近において，比抵抗値が  $1000\Omega \cdot m$  を下回る区間が存在することが確認できる．

### 3.2.3 ボーリング調査内容

B トンネル地山では**図 3.12**，**図 3.14**に示すように，ボーリング調査として坑口付近に 4 本，地山の間中部に 1 本の鉛直孔が打設されている．B-1 孔～B-5 孔の全てにおいて速度検層および，電気検層が実施されており，強度試験や透水試験等の結果に基づいたコア評価点が算出されている．**図 3.16**に各孔にて実施された速度検層の結果を，打設地点における屈折法弾性波探査結果と併せて示す．また，

図 3.17 に各孔にて実施された電気検層の結果を、打設地点における比抵抗電気探査結果と併せて示す。

### 3.2.4 コア評価点

図 3.18 に B トンネルのボーリングコアに対して得られている弾性波速度とコア評価点( $C_p(V_p)$ )の関係を示す。この関係から線形近似によって導いた以下に示す相関式を用いてトンネル掘削位置のコア評価点を算出する。

$$C_p(V_p) = -0.175 \times V_p + 71.299 \quad (3.3)$$

式(3.3)により、得られた B トンネルの  $C_p(V_p)$  分布を図 3.19 に示す。B トンネルの  $C_p(V_p)$  は、70 点付近ではほぼ一定値とっていることが確認できる。

図 3.20 に B トンネルのボーリングコアに対して得られている比抵抗値とコア評価点( $C_p(\rho)$ )の関係を示す。この関係から線形近似によって導いた以下に示す相関式を用いてトンネル掘削位置のコア評価点を算出する。

$$C_p(\rho) = 0.0042 \times \rho + 65.257 \quad (3.4)$$

式(3.4)により、得られた B トンネルの  $C_p(\rho)$  分布を図 3.21 に示す。B トンネルの  $C_p(\rho)$  は、70 点前後で小さく変動していることが確認できる。

### 3.2.5 切羽評価点

B トンネルに関しては、施工時切羽評価点を得られていない。そこで本研究では、表 3.1 に示す R トンネルの各支保パターンの切羽評価点の平均点を用いて、B トンネルで施工時に採用された支保パターンを切羽評価点に換算し、定量的な議論を行う。R トンネルおよび B トンネルは、ともに花崗岩を主体とした地山に建設されたトンネルであり、このように換算した施工時切羽評価点は、同一岩種の実際のトンネル施工に基づいた妥当な点数だと言える。B トンネルの切羽評価点分布を図 3.22 に示す。B トンネルの切羽評価点は、ほとんどの区間で 60 点程度だが、坑口距離 430m 付近および 1270m～1380m 付近において、50 点を下回る区間が存在することが確認できる。

### 3.3 適用事例①(B トンネルデータを教師データとした場合の R トンネルの地山評価)

本節では，B トンネルデータを教師データとして ANN を構築し，R トンネルの切羽評価点を予測した場合の地山評価結果を示し，事前調査段階で得られるどのデータを入力層に用いた場合に，精度の高い切羽評価点予測が可能かを議論する．

#### 3.3.1 構築したニューラルネットワークの概説

教師データの入力層用データとして，B トンネルの坑口距離 162.5m～1382.5m まで(但し，722.5m～862.5m はデータが得られていないため除く)の 10m ピッチの物性値(弾性波速度  $V_p$ (図 3.13)，比抵抗値  $\rho$ (図 3.15))，およびコア評価点( $C_p(V_p)$ (図 3.19)， $C_p(\rho)$ (図 3.21))をそれぞれ 110 データ用意し，出力層用データとして，切羽評価点(図 3.22)を同様に 110 データ用意した．これらの B トンネルデータを用いて，ANN の学習を行い，ANN を構築した．ANN の構築における中間ニューロン数は，小さい方から順次増やしていき，平均二乗誤差が最も小さくなったものを採用した．学習回数は 10000 回，許容誤差は 0.2 とし，その他パラメータは NEUROSIM/L の既定値を用いた．

予測データの入力層用データとしては，R トンネルの坑口距離 115m～2405m までの 10m ピッチの物性値(弾性波速度  $V_p$ (図 3.2)，比抵抗値  $\rho$ (図 3.4))，およびコア評価点( $C_p(V_p)$ (図 3.8)， $C_p(\rho)$ (図 3.10))をそれぞれ 230 データ用意した．これらのデータを，B トンネルデータを用いて構築した ANN に適用し，出力値として R トンネルの切羽評価点予測値を 230 データ得た．こうして得た R トンネルの切羽評価点予測値 230 データと，実際の施工結果である R トンネルの施工時切羽評価点(図 3.11)230 データの比較を行った．

#### 3.3.2 入力層にコア評価点を用いた場合

ANN の入力層に用いるデータとして，(Case1) $C_p(V_p)$ ，(Case2) $C_p(\rho)$ ，(Case3) $C_p(V_p)$ および  $C_p(\rho)$ ，の 3 ケースを用意し，出力層は切羽評価点とした．結果をそれぞれ図 3.23 に示す．

(Case1)および(Case3)では，切羽評価点予測値はほぼ一定値をとっており，適切に予測できていないと言える．また(Case2)では，予測値が変動こそしているものの，その変動傾向は予測データの入力層に用いた R トンネルの  $C_p(\rho)$ の変動傾向

に酷似したものであり、予測データの入力値の特徴を結果に上手く反映していると言えるが、施工時切羽評価点の変動傾向とは全く異なるものである。よって、適切に予測できていないと言える。以上より、コア評価点を入力層に用いた場合は、全ケースとも適切な切羽評価点予測が行えなかったと言える。

コア評価点を入力層に用いた場合に、適切な切羽評価点予測ができなかった理由としては、以下の事項が推察される。

- ・ 教師データの入力層に用いた B トンネルの  $Cp(Vp)$  および  $Cp(\rho)$  がほぼ一定値であるため、学習のバリエーションが担保できなかったこと
- ・ そもそもコア評価点は、2.3.2 で述べたように算出の際に相関性の低い線形近似を用いており、大きく不確実性を含むため、地盤状況を適切に表現できていない可能性が高いこと

### 3.3.3 入力層に物性値を用いた場合

ANN の入力層に用いるデータとして、(Case4) $Vp$ 、(Case5) $\rho$ 、(Case6) $Vp$  および  $\rho$ 、の 3 ケースを用意し、出力層は切羽評価点とした。結果をそれぞれ図 3.24 に示す。

(Case4)では、予測値が局所的に変動しているものの、その変動傾向は予測データの入力層に用いた R トンネルの  $Vp$  の変動傾向に酷似したものであり、予測データの入力値の特徴を結果に上手く反映していると言えるが、施工時切羽評価点とは、全く異なるものである。(Case5)および(Case6)では、予測値の変動傾向が施工時切羽評価点の変動傾向と概ね近く、適切に予測できていると言える。そこで、これら 2 ケースについて、施工時切羽評価点との乖離の絶対値の平均を計算すると、(Case5)が、5.70 点、(Case6)が、5.44 点であり、僅かだが(Case6)が精度の高い予測結果と言える。

(Case6)が最も良い予測結果となった理由としては、 $Vp$  と  $\rho$  を両者とも入力層に用いたことにより、互いが相互補完的に作用したため、適切な地山評価につながった可能性があると推察される。具体的には、2.2.1 で述べた屈折法弾性波探査の解析方法であるはぎとり法では、深部になるほど弾性波速度が速くなることを仮定しているが、実際の地山においては上位層の方が下位層より弾性波速度が速い場合があり、このような弾性波速度の逆転層が存在する場合には、屈折法弾性波探査によって得られた弾性波速度は信頼性に欠けたものとなる。 $Vp$  と  $\rho$

を両者とも入力層に用いた ANN では，このような逆転層区間を逆転層の制約を受けない比抵抗値が上手く補完したため，適切な地山評価となったと推察される．

また，物性値を入力層に用いた場合が，コア評価点を入力層に用いた場合より適切に予測できた理由としては，物性値は，相関性の低い線形近似を用いたコア評価点よりも正確に地盤状況を反映している可能性があると推察される．

3.3.2，および本項の以上の結果より，B トンネルデータを教師データとし，R トンネルの切羽評価点予測を行った場合， $V_p$  と  $\rho$  の 2 種類の物性値を ANN の入力層に用いた場合が最も精度の高い予測結果となったと言える．

### 3.4 適用事例②(R トンネルデータを教師データとした場合の B トンネルの地山評価)

本節では，前節とは逆に，R トンネルデータを教師データとして ANN を構築し，B トンネルの切羽評価点を予測した場合の地山評価結果を示し，前節同様，事前調査段階で得られるどのデータを入力層に用いた場合に，精度の高い切羽評価点予測が可能かを議論する．

#### 3.4.1 構築したニューラルネットワークの概説

3.3.1 とは逆に，教師データに R トンネルデータを用いて ANN を構築し，予測データには B トンネルデータを用いて，ANN の出力値と施工時切羽評価点の比較を行った．用いたデータ数は，3.3.1 と同様である．ANN の構築における中間ニューロン数，学習回数，許容誤差およびその他パラメータの設定についても，3.3.1 と同様とした．

#### 3.4.2 入力層にコア評価点を用いた場合

ANN の入力層に用いるデータとして，(Case1) $C_p(V_p)$ ，(Case2) $C_p(\rho)$ ，(Case3) $C_p(V_p)$ および  $C_p(\rho)$ ，の 3 ケースを用意し，出力層は切羽評価点とした．結果をそれぞれ図 3.25 に示す．

(Case1)～(Case3)の全ケースにおいて，切羽評価点予測値はほぼ一定値をとっており，適切に予測できていないと言える．

コア評価点を入力層に用いた場合に，適切な切羽評価点予測ができなかった理由としては，以下の事項が推察される．



- ・ 予測データの入力層に用いた B トンネルの  $Cp(Vp)$  および  $Cp(\rho)$  がほぼ一定値であるため、切羽評価点予測に幅が出なかったこと
- ・ 3.3.2 同様、コア評価点に内在する大きな不確実性の影響を受けたこと

### 3.4.3 入力層に物性値を用いた場合

ANN の入力層に用いるデータとして、(Case4) $Vp$ 、(Case5) $\rho$ 、(Case6) $Vp$  および  $\rho$ 、の 3 ケースを用意し、出力層は切羽評価点とした。結果をそれぞれ図 3.26 に示す。

(Case4)では、切羽評価点予測値はほぼ一定値をとっており、適切に予測できていないと言える。(Case5)および(Case6)では、施工時切羽評価点が低下している坑口距離 430m 付近および 1270m～1382.5m 付近とは数十メートルのずれはあるものの予測値にも減少傾向が見られ、予測値の変動傾向が施工時切羽評価点の変動傾向と概ね近く、適切に予測できていると言える。そこで、これら 2 ケースについて施工時切羽評価点との乖離の絶対値の平均を計算すると、(Case5)が、5.17 点、(Case6)が、4.85 点であり、僅かだが(Case6)が精度の高い予測結果と言える。

(Case6)が最も良い予測結果となった理由および、入力層にコア評価点を用いた場合より物性値を用いた場合がより適切な予測結果となった理由は、3.3.3 と同様であると推察される。

3.4.2、および本項の以上の結果より、R トンネルデータを教師データとし、B トンネルの切羽評価点予測を行った場合も、 $Vp$  と  $\rho$  の 2 種類の物性値を用いた場合が最も精度の高い予測結果となったと言える。

## 3.5 適用事例全体のまとめ

3.3 および 3.4 より、ANN を用いた地山評価を行う際は、事前調査段階で得られる  $Vp$  および  $\rho$  を両者とも入力層に用いると精度の高い地山評価につながる事が確認された。そして、その予測精度は、施工時切羽評価点との乖離が平均して 5 点前後であり、精度の高いものと言える。

また、従来までの地山評価では、弾性波速度による評価と比抵抗値による評価は別々に考えられており、両者を定量的に組み合わせて地山評価を行う手法は確立されていない。ANN を用いた地山評価では、弾性波速度と比抵抗値の両者を用いることで、地山評価の精度が向上したことを踏まえると、両者を用いた定量的な地山評価を実現したと言え、その点でも有用な地山評価手法だと推察される。

## 第 4 章 従来手法との比較

本章では，第 3 章で行った ANN を用いた地山評価結果のうち，最も精度の良い予測結果となった入力層に  $Vp$  と  $\rho$  を両者とも用いた場合と従来手法(地山分類表を用いた地山評価およびコア評価点を用いた地山評価)の比較を行う．地山分類表を用いた地山評価は，地山等級区分を決定するが，地山評価点数をつけて評価するものではないため，建設コストの比較のみを行う．また，コア評価点を用いた地山評価との比較については，地山評価点数および建設コストの比較を行う．

### 4.1 R トンネルにおける従来手法との比較

本節では，R トンネル事例を対象として，ANN を用いた地山評価と従来手法(地山分類表を用いた地山評価およびコア評価点を用いた地山評価)の比較を行う．

#### 4.1.1 地山評価点数の比較

図 4.1 に R トンネルにおける各手法による地山評価点数分布を示す．ANN を用いた地山評価では切羽評価点の予測を行っており，またコア評価点を用いた地山評価では，コア評価点と切羽評価点が一致するものとして地山評価を行う．そのため，施工時切羽評価点と各手法の地山評価点数との乖離を見ることで各地山評価の精度を比較することが可能である．図 4.2 に施工時切羽評価点と各手法の地山評価点数との乖離を示す．この図より，ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価は，点数の乖離が 93%の区間で 10 点以内に，全区間とも 20 点以内に収まっており，乖離が最も大きいところでも 19.8 点であることが確認できる． $Cp(Vp)$ を用いた地山評価は，点数の乖離が 68%の区間で 10 点以内，86%の区間で 20 点以内，乖離が最も大きいところでは，55.0 点もの乖離がある．そして， $Cp(\rho)$ を用いた地山評価は，点数の乖離が 63%の区間で 10 点以内，91%の区間で 20 点以内，乖離が最も大きいところでは，30.1 点もの乖離がある．また，乖離の絶対値の平均は，ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価が 5.4 点， $Cp(Vp)$ を用いた地山評価が 11.3 点， $Cp(\rho)$ を用いた地山評価が 9.2 点である．

以上の比較結果より，以下の事項が言える．

- ・ ANN を用いた地山評価は，従来のコア評価点を用いた地山評価に比べ，より

精度の高い事前調査段階の地山評価となり得ること

- ・  $Cp(Vp)$ ,  $Cp(\rho)$ ともに、切羽評価点と平均して 10 点以上の乖離があり、そもそもコア評価点と切羽評価点が一致するものとみなして地山評価を行うこと自体に課題があること
- ・ ANN を用いた地山評価では、施工段階の情報である他トンネルの切羽評価点を出力層に用いて学習させた ANN により地山評価を行っているため、事前調査段階において、施工段階に即した地山評価が可能であり、結果として事前調査段階と施工段階の地山評価の乖離の低減につながる

#### 4.1.2 建設コストの比較

事前調査段階の地山評価結果に基づいて、建設コストの算出を行う。地山分類表を用いた地山評価として、本研究で地山等級区分の決定に用いる地山分類表を表 4.1 に示す。また地山評価点数と地山等級区分の関係を表 2.3 に示す。2.6 で前述したように、R トンネルや B トンネルのような 2 車線道路トンネルにおいては、表 2.6 に示す地山等級区分と支保単価の関係が設定されている。本研究では、以上の表を用いて、各地山評価手法による各トンネル切羽位置における建設コスト、およびトンネル総延長の建設コストの算出を行う。

図 4.3 に示す各地山評価手法による地山等級区分結果に基づき、各トンネル切羽位置での建設コストを推定した結果を図 4.4 に示す。各地山評価を行うにあたり、10m ピッチのデータを用いているため、各トンネル切羽位置での建設コスト算出結果も 10m ピッチでの表記となっている。事前調査段階の推定建設コストは、実際の施工段階の建設コストに近いほど、精度の高い地山評価と言える。そこで、切羽評価点による建設コストと事前調査段階の各地山評価手法による推定建設コストの乖離をとったものを図 4.5 に示す。この図より、ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )による推定建設コストは、57%の区間において切羽評価点による建設コストと一致、同様に地山分類表による推定建設コストは 19%、 $Cp(Vp)$ による推定建設コストは 45%、 $Cp(\rho)$ による推定建設コストは 40%の区間で一致していることが確認できる。

続いて、図 4.6 に各地山評価手法によるトンネル総延長の建設コストを示す。切羽評価点による建設コストが 1639[百万円]、地山分類表による推定建設コストが 1478[百万円]、 $Cp(Vp)$ による推定建設コストが 1830[百万円]、 $Cp(\rho)$ による推定建設コストが 1700[百万円]、ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )による推定建設コストが 1630[百

万円]である。ここで、比較のために、2.6 で前述した乖離率を図 4.7 に示す。地山分類表を用いた場合が 9.8%， $Cp(Vp)$ を用いた場合が-11.7%， $Cp(\rho)$ を用いた場合が-3.7%，ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた場合が 0.5%である。

以上の比較結果より、以下の事項が言える。

- ・ 各トンネル切羽位置における建設コストの一致率が高いことより、ANN を用いた地山評価は従来手法に比べ、4.1.1 で示した地山評価点数だけでなく、地山等級区分も正確に評価できていること
- ・ トンネル総延長の建設コストの乖離率が小さいことより、ANN を用いた地山評価は従来手法に比べ、事前調査段階と施工段階におけるコスト変動リスクを低減できる可能性があること

## 4.2 B トンネルにおける従来手法との比較

本節では、B トンネル事例を対象として、ANN を用いた地山評価と従来手法(地山分類表を用いた地山評価およびコア評価点を用いた地山評価)の比較を行う。

### 4.2.1 地山評価点数の比較

図 4.8 に B トンネルにおける各手法による地山評価点数分布を示す。また、図 4.9 に施工時切羽評価点と各手法の地山評価点数との乖離を示す。この図より、ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価は、点数の乖離が 85%の区間で 5 点以内に、全区間とも 15 点以内に収まっており、乖離が最も大きいところでも 14.4 点であることが確認できる。 $Cp(Vp)$ を用いた地山評価は、点数の乖離が 0%の区間で 5 点以内、87%の区間で 15 点以内、乖離が最も大きいところでは、21.0 点もの乖離がある。そして、 $Cp(\rho)$ を用いた地山評価は、点数の乖離が 0%の区間で 5 点以内、82%の区間で 15 点以内、乖離が最も大きいところでは、23.8 点もの乖離がある。また、乖離の絶対値の平均は、ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価が 4.9 点、 $Cp(Vp)$ を用いた地山評価が 12.3 点、 $Cp(\rho)$ を用いた地山評価が 13.7 点である。

以上の比較結果より、4.1.1 と同様のことが言え、地山評価点数の観点から、ANN を用いた地山評価の有用性を示したと言える。

#### 4.2.2 建設コストの比較

4.1.2 同様に、図 4.10 に示す各地山評価手法による地山等級区分に基づき、各トンネル切羽位置での建設コストを推定した結果を図 4.11 に示す。また、切羽評価点による建設コストと事前調査段階の各地山評価手法による推定建設コストの乖離をとったものを図 4.12 に示す。この図より、ANN(入力層： $V_p$ ,  $\rho$ )による推定建設コストは、82.3%もの区間において切羽評価点による建設コストと一致、一方地山分類表による推定建設コストは 7.3%の区間で一致、 $C_p(V_p)$ による推定建設コストおよび  $C_p(\rho)$ による推定建設コストは一致している区間が全く存在しないことが確認できる。

続いて、図 4.13 に各地山評価手法によるトンネル総延長の建設コストを示す。切羽評価点による建設コストが 769[百万円]、地山分類表による推定建設コストが 696[百万円]、 $C_p(V_p)$ による推定建設コストが 686[百万円]、 $C_p(\rho)$ による推定建設コストが 688[百万円]、ANN(入力層： $V_p$ ,  $\rho$ )による推定建設コストが 759[百万円]である。ここで、比較のために、2.6 で前述した乖離率を図 4.14 に示す。地山分類表を用いた場合が 9.5%、 $C_p(V_p)$ を用いた場合が 10.8%、 $C_p(\rho)$ を用いた場合が 10.5%、ANN(入力層： $V_p$ ,  $\rho$ )を用いた場合が 1.3%である。

以上の比較結果より、4.1.2 と同様のことが言え、建設コストの観点から、ANNを用いた地山評価の有用性を示したと言える。

#### 4.3 従来手法との比較結果のまとめ

4.1 および 4.2 より、R トンネル事例および B トンネル事例において、ANNを用いた地山評価が従来手法と比較して、地山評価点数および建設コストの両観点から精度の高い有用な地山評価手法であることを示した。事前調査段階に ANNを用いた地山評価を行うことで、ジオリスクの低減につながると言える。

山岳トンネル建設プロジェクトにおいては、建設コストに大きな影響を与える断層破碎帯、風化変質帯および帯水層に代表される不良地山の把握が重要とされる。ここまでの本研究における議論では、この点での適切な検証を行うことができていない。次章において、ANNを用いた地山評価のさらなる精度向上と不良地山の把握の可能性を検証する。

## 第5章 ニューラルネットワークを用いた地山評価(土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いた場合)

2.2.1 で述べたように，山岳トンネルにおいては，土被り厚さが数百メートルとなるような場合もあり，このような状況では，屈折法弾性波探査により得られた弾性波速度は，土被り厚さの影響により，不確実性を大きく含んだ値である可能性が高い．ANN を用いた地山評価では，ANN の入力層に事前地質調査で得られた情報を用いて地山評価を行うため，弾性波速度に内在する不確実性の影響は大きいと考えられる．そこで，本章では，土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いた ANN による地山評価を行い，土被り厚さを考慮しない弾性波速度を用いた ANN による地山評価結果と比較する．そして，事前地質調査で得られた弾性波速度に内在する土被り厚さの影響というジオリスクを考慮することによる地山評価精度の変化および不良地山把握の可能性を検証する．

### 5.1 土被り厚さを考慮した弾性波速度分布

本節では，既往の研究を用いて，R トンネルおよび B トンネルのトンネル掘削位置における土被り厚さを考慮した弾性波速度の算出を行う．

Barton<sup>21)</sup>によると，土被り厚さの大きい場所で得られた弾性波速度は地山を良好側に過大評価する傾向があるとしており，土被り厚さごとの弾性波速度と Q 値の関係を算出している．これより，土被り厚さを考慮した弾性波速度の関係式を算出すると以下になる．

$$\begin{aligned} V_{p'} &= 1.25V_p - 1.625 (25 \leq x(m) \leq 75) \\ V_{p'} &= 1.43V_p - 2.786 (75 \leq x(m) \leq 225) \\ V_{p'} &= 1.67V_p - 4.33 (225 \leq x(m) \leq 475) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここで， $V_{p'}$  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， $x(m)$  は土被り厚さである．また，Barton によると土被り厚さが 25m までの場所で得られた弾性波速度はそのままであると解釈しているため，土被り厚さ 25m までは  $V_p = V_{p'}$  であると仮定する．

### 5.1.1 R トンネルの土被り厚さを考慮した弾性波速度分布

図 5.1 に R トンネルの土被り厚さ分布を示す。R トンネルにおいては、最も土被りが大きい坑口距離 1700m 付近では、土被り厚さがおよそ 300m にも達することが確認できる。図 5.2 に R トンネルの土被り厚さを考慮した弾性波速度分布を土被り厚さを考慮する前の弾性波速度分布と併せて示す。坑口距離 880m 付近においては最も弾性波速度の減少が大きく、土被り厚さを考慮することでおよそ 2.3km/sec 小さくなることが確認できる。

### 5.1.2 B トンネルの土被り厚さを考慮した弾性波速度分布

図 5.3 に B トンネルの土被り厚さ分布を示す。B トンネルにおいては、最も土被りが大きい坑口距離 900m 付近では、土被り厚さがおよそ 100m であることが確認できる。図 5.4 に B トンネルの土被り厚さを考慮した弾性波速度分布を土被り厚さを考慮する前の弾性波速度分布と併せて示す。坑口距離 1000m 付近においては最も弾性波速度の減少が大きく、土被り厚さを考慮することでおよそ 0.7km/sec 小さくなることが確認できる。

## 5.2 土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いた場合の地山評価結果

本節では、土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いることで ANN を用いた地山評価結果がどのように変化するかを示す。

### 5.2.1 R トンネルにおける地山評価結果

本項では、3.3 と同様に B トンネルデータを教師データとして、ANN を構築し、R トンネルの切羽評価点を予測した場合の結果を示す。

土被り厚さを考慮した弾性波速度  $V_p'$  と比抵抗値  $\rho$  を入力層に用いた場合と土被り厚さを考慮する前の弾性波速度  $V_p$  と比抵抗値  $\rho$  を入力層に用いた場合の ANN による地山評価結果、および比較のために施工時切羽評価点分布を併せて、図 5.5 に示す。それぞれの場合において、施工時切羽評価点との乖離の絶対値の平均を計算すると、ANN(入力層： $V_p$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価が、5.44 点、ANN(入力層： $V_p'$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価が、5.30 点である。

また、図 5.6 に両者によるトンネル総延長の推定建設コストを切羽評価点による建設コストと併せて示す。切羽評価点による建設コストが 1639[百万円]、

ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )による推定建設コストが 1630[百万円]，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )による推定建設コストが 1638[百万円]である．ここで，比較のために，2.6 で前述した乖離率を図 5.7 に示す．ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )を用いた場合が 0.55%，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )を用いた場合が 0.06%である．

以上の比較結果より，以下の事項が言える．

- ・ 施工時切羽評価点との乖離が小さいことより，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価は ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価に比べ，事前調査段階の地山評価としての精度が高いこと
- ・ 建設コストの乖離率が小さいことより，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価は ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価に比べ，事前調査段階と施工段階におけるコスト変動リスクを低減できる可能性があること

以上より，R トンネル事例において，土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いることによる，ANN を用いた地山評価の精度向上が認められた．

### 5.2.2 B トンネルにおける地山評価結果

本項では，3.4 と同様に R トンネルデータを教師データとして，ANN を構築し，B トンネルの切羽評価点を予測した場合の結果を示す．

土被り厚さを考慮した弾性波速度  $Vp'$  と比抵抗値  $\rho$  を入力層に用いた場合と土被り厚さを考慮する前の弾性波速度  $Vp$  と比抵抗値  $\rho$  を入力層に用いた場合の ANN による地山評価結果，および比較のために施工時切羽評価点分布を併せて，図 5.8 に示す．それぞれの場合において，施工時切羽評価点との乖離の絶対値の平均を計算すると，ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価が 4.85 点，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )を用いた地山評価が 4.35 点である．

また，図 5.9 に両者によるトンネル総延長の推定建設コストを切羽評価点による建設コストと併せて示す．切羽評価点による建設コストが 769[百万円]，ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )による推定建設コストが 759[百万円]，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )による推定建設コストが 778[百万円]である．ここで，比較のために，2.6 で前述した乖離率を図 5.10 に示す．ANN(入力層： $Vp$ ,  $\rho$ )を用いた場合が 1.30%，ANN(入力層： $Vp'$ ,  $\rho$ )を用いた場合が -1.17%である．



以上の比較結果より，以下の事項が言える．

- ・ 施工時切羽評価点との乖離が小さいことより，ANN(入力層： $Vp'$ ， $\rho$ )を用いた地山評価は ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価に比べ，事前調査段階の地山評価としての精度が高いこと
- ・ 建設コストの乖離率の大きさにほとんど改善が見られなかったが，ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価では，乖離率が正であり，コストオーバーランを示しているのに対し，ANN(入力層： $Vp'$ ， $\rho$ )を用いた地山評価では，乖離率が負であり，コストアンダーランを示しているため，プロジェクト性においては優位性が見られること

また，B トンネル事例においては，ANN(入力層： $Vp'$ ， $\rho$ )を用いた地山評価は ANN(入力層： $Vp$ ， $\rho$ )を用いた地山評価に比べ，切羽評価点予測値に局所的な変化が大きく，特に坑口距離 400m～550m 付近，および 1300m～1382.5m 付近でその傾向が顕著である．これは，不良地山検出の可能性を示している．

以上より，B トンネル事例において，土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いることによる，ANN を用いた地山評価の精度向上および不良地山の把握の可能性が認められた．

### 5.3 土被り厚さを考慮した地山評価結果のまとめ

土被り厚さの影響による弾性波速度の不確実性という事前地質調査で得られる情報に内在する一つの不確実性を考慮することで，R トンネルおよび B トンネルの両トンネルにおいて，ANN を用いた地山評価の精度の向上が認められた．また，B トンネル事例においては，建設コストに大きな影響を与える断層破碎帯，風化変質帯および帯水層に代表される不良地山把握の可能性も見て取ることができた．そもそも，前述した式(5.1)で表される土被り厚さを考慮した弾性波速度の算出式では，土被り厚さを考慮する前の弾性波速度が小さいほど，負の切片の影響が大きく反映され，土被り厚さを考慮した弾性波速度がより低速度になる傾向がある．これは，弾性波速度が小さい，つまり不良地山であるほど，土被り厚さを考慮することでより大きく速度値が低下することを意味しており，式(5.1)を用いることで不良地山検出に対する感度は向上すると言える．この結果として，B トンネル

事例における土被り厚さを考慮した弾性波速度を用いた ANN による地山評価では、不良地山の把握につながったと推察される。

土被り厚さによる弾性波速度の不確実性というのは、山岳トンネル建設プロジェクトに内在するジオリスクの一例であり、より精度の高い事前地質調査結果を用いることで、ANN を用いた地山評価の精度も高まる可能性が示されたと言える。

#### 5.4 事前調査段階における地山評価に関する提言

本節では、本研究を踏まえて、今後の山岳トンネル建設プロジェクトにおける事前調査段階の地山評価に関して提言を行う。

第 3 章では、ANN 内での比較により、ANN の入力層には、事前地質調査で得られる弾性波速度および比抵抗値を両者とも用いることで、最も精度の高い地山評価が可能であることを示した。そして、第 4 章では、ジオリスク低減の観点から、従来手法との比較において、ANN を用いた地山評価の優位性を示した。さらに、第 5 章では、土被り厚さを考慮することで、ANN を用いた地山評価のさらなる精度向上および不良地山把握の可能性を示した。以上のことを踏まえて、今後の事前調査段階における地山評価に関して以下の提言を行う。

- ・ 事前調査段階における地山評価では、地山分類表やコア評価点による地山評価では建設コストを精度良く推定できないおそれがあるため、同一岩種トンネルデータを教師データとして構築した ANN による地山評価を行い、コスト変動リスクを低減することが望ましい。
- ・ 事前地質調査では、屈折法弾性波探査とともに比抵抗電気探査を行い、両データを ANN の構築に用いることで精度の高い地山評価が可能となる。
- ・ 土被り厚さを考慮することで、地山評価の精度がさらに向上し、建設コストに大きな影響を与える不良地山の把握につながることが期待される。
- ・ より高精度な事前地質調査を行い、得られたデータを ANN の構築に用いることで、ANN を用いた地山評価の精度はさらに向上すると推察される。
- ・ ジオリスクの低減を目指した事前調査段階の地山評価のために、ANN のデータベース構築が望まれる。特に、断層破碎帯、風化変質帯および帯水層等の不良地山を多く含む地山に建設されたトンネル建設事例を対象に ANN の追加学習を行い、不良地山把握に対する ANN の精度を向上させることが必要である。

## 第 6 章 結論，今後の課題

### 6.1 結論

本研究では，事前調査段階における新たな地山評価手法として，ANN を用いた地山評価を提案し，手法の構築，従来手法との比較，さらなる検証を行い，ジオリスク低減に対する有用性を示した．得られた結論を以下にまとめる．

- ・ ANN を用いた地山評価を行うにあたり，事前調査段階で得られるデータとして物性値(弾性波速度  $V_p$ ，比抵抗値  $\rho$ )およびコア評価点( $C_p(V_p)$ ， $C_p(\rho)$ )を用意し，どのデータを入力層に用いた場合に最も適切な地山評価が可能か，比較検証を行った．その結果，ANN を用いた地山評価では，入力層に弾性波速度と比抵抗値の両者を用いて切羽評価点の予測を行った場合が，最も精度の高い地山評価につながることを示した．
- ・ 地山評価点数，建設コストの両観点から，ANN を用いた地山評価と従来手法(地山分類表を用いた地山評価およびコア評価点を用いた地山評価)との比較を行い，ANN を用いた地山評価の優位性を示した．
- ・ 事前調査段階で得られる情報に内在する不確実性の影響因子の一例として，屈折法弾性波探査で測定した弾性波速度に内在する土被り厚さの影響を考慮することで，ANN を用いた地山評価の精度向上および不良地山把握の可能性を示した．

### 6.2 今後の課題

本研究では，1 トンネルデータを教師データとして ANN を構築し，他トンネルの地山評価を行ったが，さらなる精度の向上のため，同一岩種のトンネルデータによる追加学習を行い，ANN のデータベースを構築することが今後の課題である．本研究で対象とした 2 トンネルはともに，花崗岩および花崗閃緑岩を主体とした地山に建設されたものであり，他岩種の地山におけるトンネル建設プロジェクトに対して，ANN を用いた地山評価の適用が可能か，検証が必要である．また，本研究で対象とした 2 トンネル事例は，局所的な不良地山が比較的少ない地山に建設されたものであり，不良地山の把握という面で，ANN を用いた地山評価の有用性に対して，さらなる検証が必要である．

## 参考文献

- 1) Zhi,H. : Risk Management for Overseas Construction Projects, International Journal of Projects Management, Vol.13, No.14, pp.231-237, 1995.
- 2) 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下リスク評価及び分担に関する研究, 土木学会論文集 No.721/VI-57, pp.193-205, 2002.
- 3) Barton,N.,F.Loset,R.Lien and J.Lunde : Application of the Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations, Int Conf. on Sub-surface Space, Rockstore, Stockholm, Sub-surface Space, Vol.2, pp.553-561, 1980.
- 4) Bieniawski,Z.T. : Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, 1989.
- 5) 木村正樹, 杉田理, 大塚康範: 評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第 11 巻, pp.87-92, 2001.
- 6) Einstein,H.H. : Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, tunneling and Underground Space Technology, Vol.11 No.2, pp.141-155, 1996.
- 7) 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 境亮介: 地盤統計学に基づく地下工事における地質調査の価値評価に関する一提案, 建設マネジメント論文集, 土木学会建設マネジメント委員会, Vol.12, pp.9-18, 2005.
- 8) 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 F, Vol.63, No.1, pp.35-52, 2007.
- 9) 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 足立純: PFI プロジェクトの地盤に起因する建設コスト変動評価に関する研究, 土木学会論文集, No.777/VI-65, pp.175-186, 2004.
- 10) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強: 建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版, 1993.
- 11) 地盤工学会(編): 地盤工学への物理探査技術の適用と事例, 地盤工学会, 2001.
- 12) 吉中竜之進: 岩盤分類とその適用, 土木工学社, 1989.

- 13) 日本道路公団：設計要領第3集 トンネル，1997.
- 14) 中田雅博，三谷浩二，八木弘，西琢郎，西村和夫，中川浩二：観察記録の分析に基づく新しいトンネル切羽評価システムの提案，土木学会論文集，No.623/VI-43，pp.131-141，1999.
- 15) 赤木渉，佐野理，進士正人，西琢郎，中川浩二：山岳トンネル施工支援のための切羽評価法の適用性に関する研究，土木学会論文集，No.686/VI-52，pp.121-134，2001.
- 16) 城間博通，伊藤哲男，赤木渉：トンネル支保選定支援システムの構築，EXTEC，No.68，pp.21-25，2004.
- 17) 田辺和俊：ニューラルネットワーク入門，日刊工業新聞社，2003.
- 18) 吉富康成：ニューラルネットワーク，朝倉書店，2002.
- 19) NATM 積算研究会編：NATM の施工と積算，(財)経済調査会，2006.
- 20) 土質工学会：土と基礎の物理探査—土質基礎工学ライブラリ - 21 - ，1981.
- 21) Barton,N.：Risk and risk reduction in TBM rock tunneling, Proceedings of the ISRM International Symposium, pp.31-33, 2004.

## 謝辞

最後になりましたが、本論文を執筆するにあたり、本研究にご協力頂いた方々、お世話になった方々に感謝の意を表します。

京都大学工学研究科・大津宏康教授には、研究に取り組む姿勢、問題解決のための考え方等、非常に多くのことを基礎からご指導頂きました。また、ご多忙の中、度重なる質問に対しても親身になって答えて下さり、筆者自身では気づくことのできなかった考え方、本研究の奥深さを教えて頂きました。心よりお礼申し上げます。

京都大学工学研究科・肥後陽介准教授には、本研究の副査を務めて頂き、丁寧で的確なご指摘を頂戴致しました。心より感謝致します。

京都大学工学研究科・塩谷智基准教授には、日ごろから学生との交流を大事にして頂き、明るい雰囲気の中で有意義な研究室生活を送ることができました。深く感謝致します。

防災科学技術研究所・長谷川信介氏には、ご多忙の中、本研究の遂行にあたり必要となるデータの提供をして頂き、また様々な貴重なアドバイスを頂きました。心から感謝致します。

大八木智子秘書には、研究室生活における様々な面でサポートして頂き、大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

大津研究室の諸先輩方には、研究面のみならず生活面においても多くの助言を頂き、特に松塚直也さんには、同分野の研究をしている先輩として、的確なアドバイスや励ましの言葉を頂きました。また、同回生の方々とは、互いに支え合い、協力し合い、切磋琢磨しながら研究に取り組むことができました。大変感謝しております。

皆様方の支えにより、多くの貴重な経験をさせて頂き、この一年間を密度の濃い有意義なものとすることができました。感謝致します。

最後に、いつも心から筆者を支えて下さっている両親に深く感謝申し上げます。大学で勉学に取り組む環境を与えて下さり、ここまで自分を育ててくれたことに心より感謝しております。本当にありがとうございました。

表2.1 主な項目と比抵抗値の関係

| 項目       | 電気比抵抗 |   |      |
|----------|-------|---|------|
|          | 低比抵抗  | ⇔ | 高比抵抗 |
| 間隙水の比抵抗  | 低     | ⇔ | 高    |
| 飽和度      | 大     | ⇔ | 小    |
| 間隙率      | 大     | ⇔ | 小    |
| 粘土分の割合   | 大     | ⇔ | 小    |
| 風化，変質の程度 | 大     | ⇔ | 小    |

表2.2 地山分類表

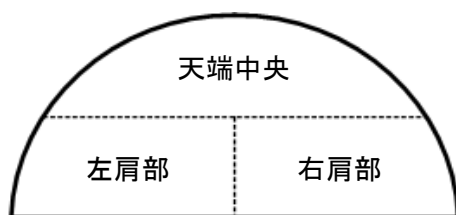
| 地山<br>等級 | 岩石<br>グループ | 代表岩石名                     | 弾性波速度, $V_p$ [km/sec] |     |     |     |     |
|----------|------------|---------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|
|          |            |                           | 1.0                   | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 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, 中古生層頁岩               |                       |     |     |     |     |
|          | 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, 中古生層頁岩               |                       |     |     |     |     |
|          | L 層状       | 黒色片岩, 緑色片岩                |                       |     |     |     |     |
|          |            | 第三紀層泥岩                    |                       |     |     |     |     |
| D 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, 中古生層頁岩               |                       |     |     |     |     |
|          | L 層状       | 黒色片岩, 緑色片岩                |                       |     |     |     |     |
|          |            | 第三紀層泥岩                    |                       |     |     |     |     |
| D II     | H 塊状       | 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, 中古生層頁岩               |                       |     |     |     |     |
|          | L 層状       | 第三紀層泥岩                    |                       |     |     |     |     |



表2.3 地山評価点数と地山等級区分の関係

| 地山等級区分     | 地山評価点数の範囲 |
|------------|-----------|
| <b>B</b>   | 67.5~     |
| <b>CI</b>  | 57.5~67.5 |
| <b>CII</b> | 37.5~57.5 |
| <b>D</b>   | ~37.5     |

表2.4 新切羽評価点法における評価項目と評価区分



＜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

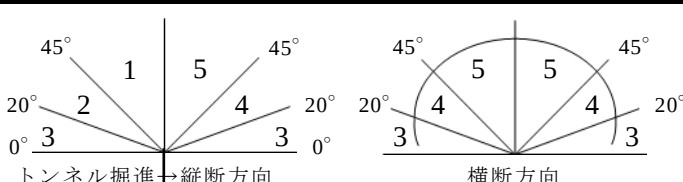
| 観察項目                        |           | 評価区分                                                                                 |                       |                           |                                |                      |                       | 上段：評価区分     |    |    |
|-----------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|----|----|
|                             |           |                                                                                      |                       |                           |                                |                      |                       | 下段：点数       |    |    |
| 圧縮強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 一軸圧縮強度    | $\geq 100$                                                                           | 100～50                | 50～25                     | 25～10                          | 10～3                 | $\leq 3$              | 左肩          | 中央 | 右肩 |
|                             | ポイントロード   | $\geq 4$                                                                             | 4～2                   | 2～1                       | 1～0.4                          | $\leq 0.4$           |                       |             |    |    |
|                             | 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 | 岩片を手にとってハンマーでたたいて割ることができる | 岩片どうしをたたき合わせて割ることができる          | 両手で岩片を部分的にでも割ることができる | 力をこめれば小岩片を指先で潰すことができる |             |    |    |
|                             | 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        |                       | 土砂化・粘土化     |    |    |
|                             | 評価区分      | 1                                                                                    |                       | 2                         |                                | 3                    |                       | 4           |    |    |
| 割目間隔                        | 間隔        | $\geq 1\text{m}$                                                                     | 1m～50cm               | 50～20cm                   | 20～5cm                         | $\leq 5\text{cm}$    |                       |             |    |    |
|                             | RQD       | $\geq 80$                                                                            | 80～50                 | 60～30                     | 40～10                          | $\leq 20$            |                       |             |    |    |
|                             | 評価区分      | 1                                                                                    | 2                     | 3                         | 4                              | 5                    |                       |             |    |    |
| 割目状態                        | 割目の開口度    | 密着                                                                                   | 一部開口<br>(1mm 以下)      | 多くが開口<br>(1mm 以下)         | 開口<br>(1～5mm)                  | 5mm 以上の開口            |                       |             |    |    |
|                             | 狭在物       | なし                                                                                   | なし                    | なし                        | 5mm 以下の粘土                      | 5mm 以上の粘土            |                       |             |    |    |
|                             | 粗度・鏡肌     | 粗い                                                                                   | 割目が平滑                 | 一部に鏡肌                     | 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<br>$\leq 1\text{l/min}$                                                        | 滴水程度<br>1～20l/min     | 集中湧水<br>20～100l/min       | 全面湧水<br>$\geq 100\text{l/min}$ |                      |                       |             |    |    |
|                             | 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＝(右肩＋左肩＋2×天端)／4          |           |                                                                                      |                       |                           |                                |                      | 合計点                   |             |    |    |

表2.5 新切羽評価点法における評価区分と配点

|      |    | 強度区分  |       |       |
|------|----|-------|-------|-------|
|      |    | 硬質岩   | 中硬質岩  | 軟質岩   |
| 風化区分 | 塊状 | グループ1 | グループ2 |       |
|      | 層状 |       | グループ3 | グループ4 |

|         | 評価項目 | 配点 |    |    |    |   |   |
|---------|------|----|----|----|----|---|---|
|         | 評価区分 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5 | 6 |
| 岩石グループ1 | 圧縮強度 | 40 | 32 | 24 | 16 | 8 | 0 |
|         | 風化変質 | 18 | 12 | 6  | 0  |   |   |
|         | 割目間隔 | 16 | 12 | 8  | 4  | 0 |   |
|         | 割目状態 | 26 | 19 | 13 | 6  | 0 |   |
| 岩石グループ2 | 圧縮強度 | 31 | 25 | 19 | 13 | 6 | 0 |
|         | 風化変質 | 22 | 15 | 7  | 0  |   |   |
|         | 割目間隔 | 20 | 15 | 10 | 5  | 0 |   |
|         | 割目状態 | 27 | 20 | 13 | 7  | 0 |   |
| 岩石グループ3 | 圧縮強度 | 32 | 26 | 19 | 13 | 6 | 0 |
|         | 風化変質 | 26 | 17 | 9  | 0  |   |   |
|         | 割目間隔 | 14 | 10 | 7  | 3  | 0 |   |
|         | 割目状態 | 28 | 21 | 14 | 7  | 0 |   |
| 岩石グループ4 | 圧縮強度 | 37 | 30 | 22 | 15 | 7 | 0 |
|         | 風化変質 | 15 | 10 | 5  | 0  |   |   |
|         | 割目間隔 | 21 | 15 | 10 | 5  | 0 |   |
|         | 割目状態 | 27 | 20 | 14 | 7  | 0 |   |

| 評価項目 |      | 湧水  |     |     |     |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
|      | 評価区分 | 1   | 2   | 3   | 4   |
| 劣化   | 1    | 0   | 0   | -5  | -10 |
|      | 2    | 0   | -5  | -7  | -10 |
|      | 3    | -5  | -7  | -10 | -15 |
|      | 4    | -10 | -10 | -15 | -20 |

表2.6 地山等級区分と支保パターンおよび支保単価の関係

| 工種            |         | 地山等級区分 | 支保単価 [円／m] |
|---------------|---------|--------|------------|
| トンネル掘削工       |         | B      | 270,100    |
|               |         | C I    | 273,200    |
|               |         | C II   | 292,900    |
|               |         | D      | 306,400    |
| 支保工           | 吹付け工    | B      | 89,980     |
|               |         | C I    | 131,900    |
|               |         | C II   | 156,000    |
|               |         | D      | 246,470    |
|               | ロックボルト工 | B      | 44,070     |
|               |         | C I    | 74,370     |
|               |         | C II   | 95,600     |
|               |         | D      | 174,240    |
|               | 鋼製支保工   | C II   | 62,730     |
|               |         | D      | 103,200    |
|               | 金網工     | D      | 26,690     |
| 覆工コンクリート      |         | B      | 219,900    |
|               |         | C I    | 205,000    |
|               |         | C II   | 195,000    |
|               |         | D      | 187,900    |
| インバート掘削工, 本體工 |         | D      | 235,760    |

| 地山等級区分 | 支保単価 [円／m] |
|--------|------------|
| B      | 624,050    |
| C I    | 684,470    |
| C II   | 802,230    |
| D      | 1,280,660  |

表3.1 Rトンネルの各支保パターンの切羽評価点の平均

| 支保パターン | 切羽評価点の平均 |
|--------|----------|
| B      | 68.7     |
| C I    | 65.2     |
| C II   | 59.1     |
| D      | 49.4     |

表4.1 本研究で用いる地山分類表

| 地山等級区分 | 弾性波速度[km/sec] |
|--------|---------------|
| B      | 4.5~          |
| CI     | 3.5~4.5       |
| CII    | 2.3~3.5       |
| D      | ~2.3          |

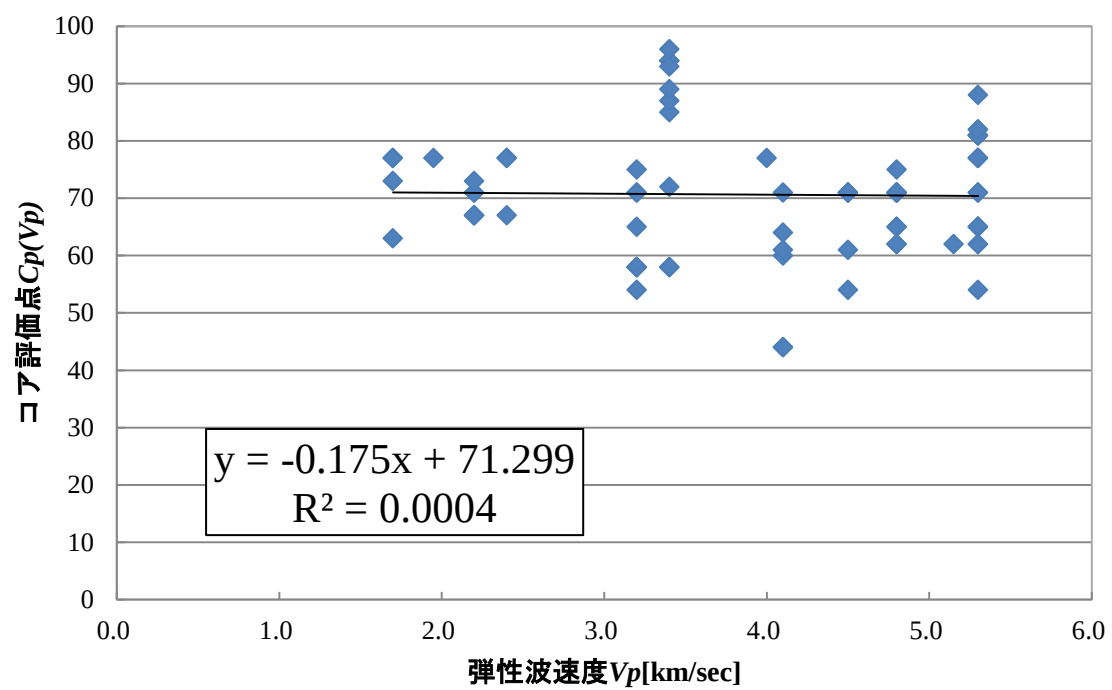
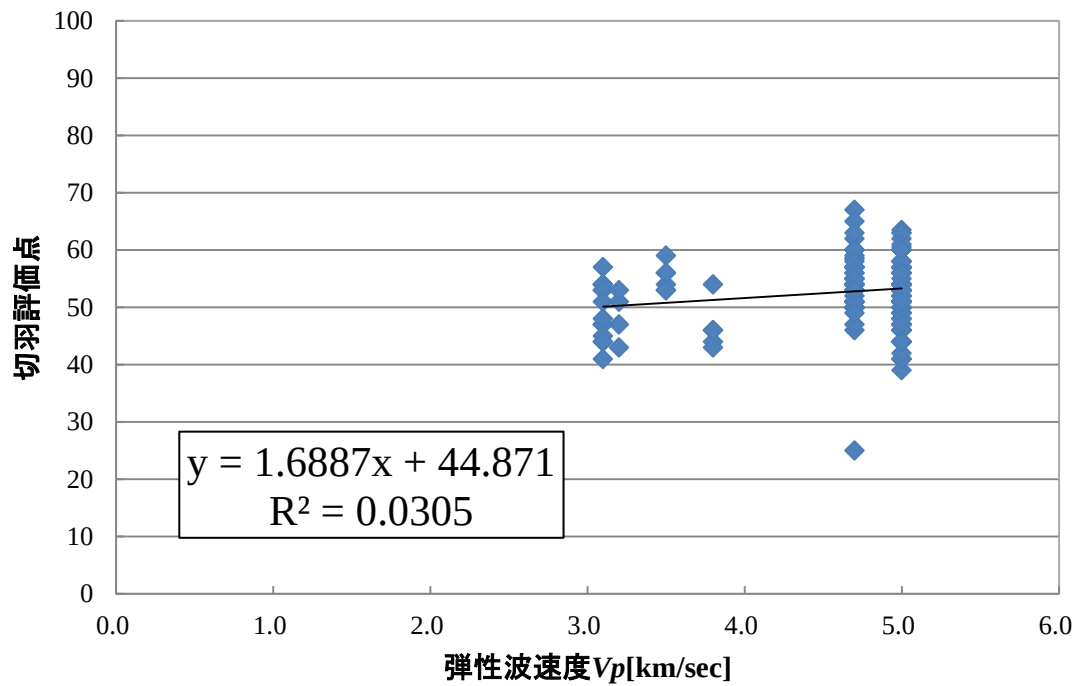
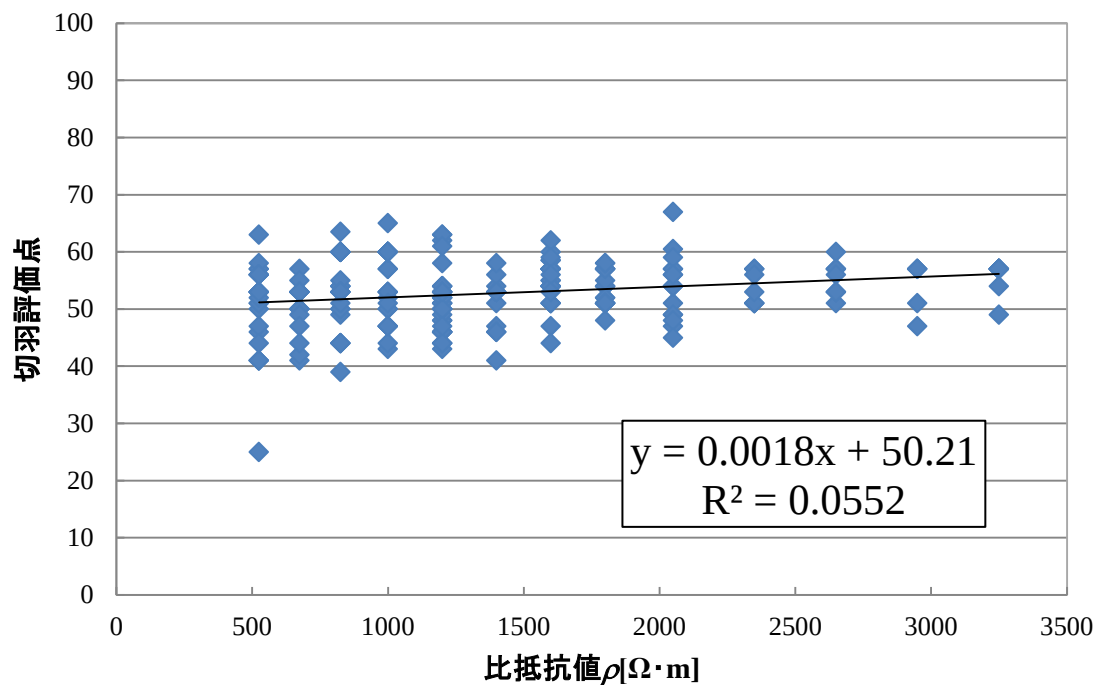


図1.1 弾性波速度とコア評価点の関係例（Bトンネル）



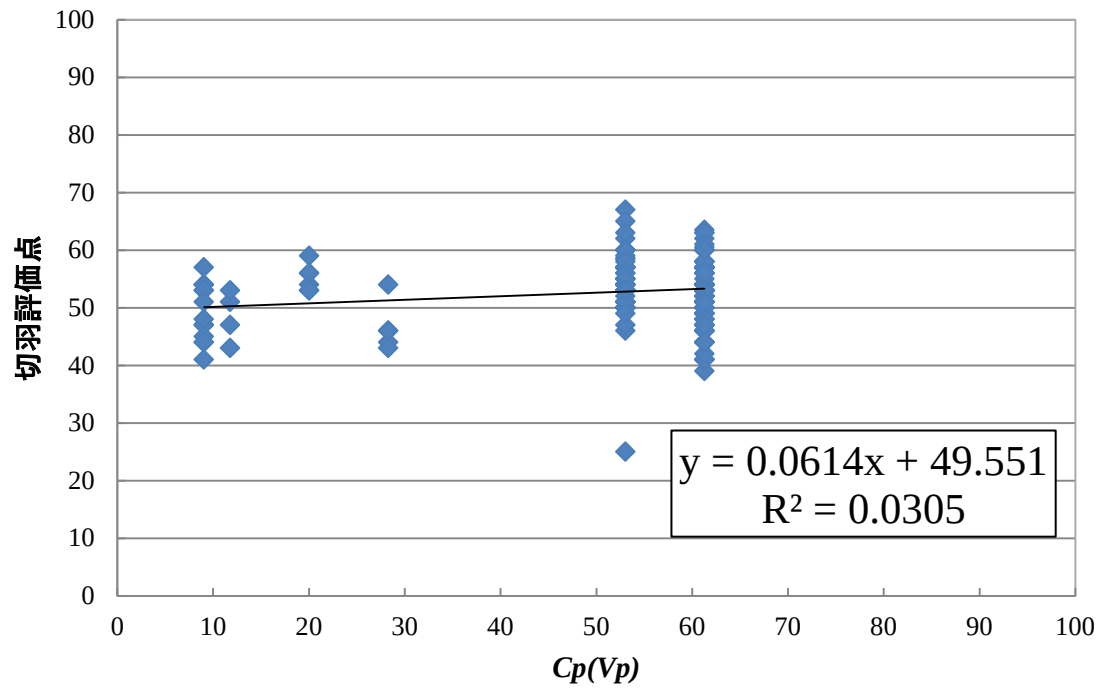
(a) 弾性波速度  $V_p$  と切羽評価点の関係



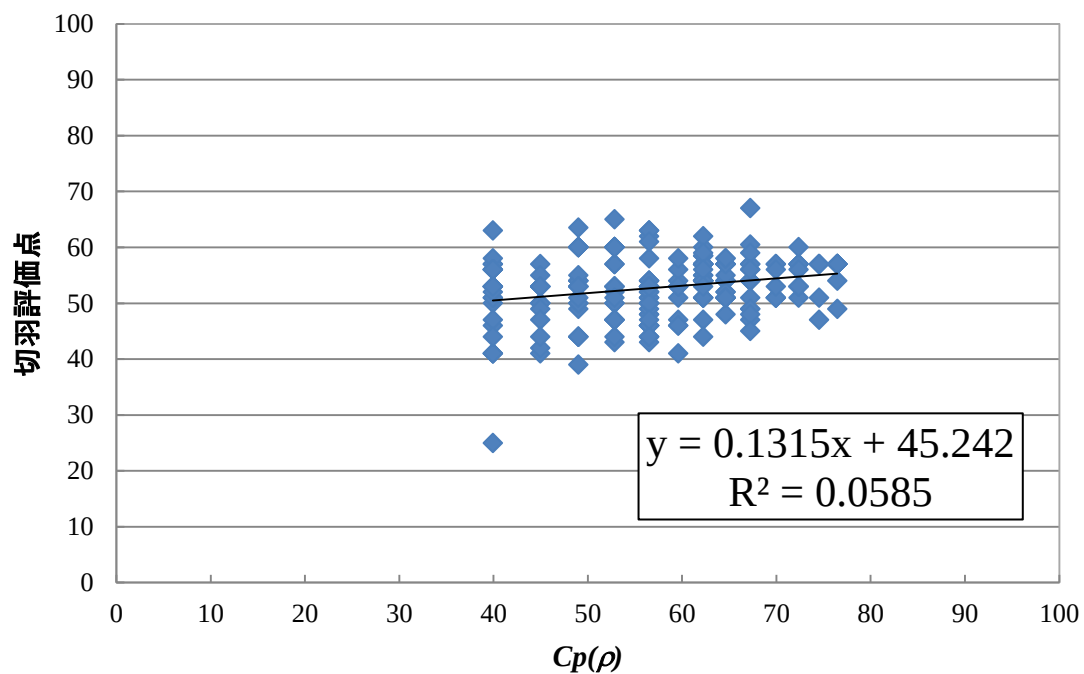
(b) 比抵抗値  $\rho$  と切羽評価点の関係

図1.2 事前調査段階で得られる情報と施工段階で得られる情報の関係例 (Rトンネル)





(c)  $Cp(Vp)$ と切羽評価点の関係



(d)  $Cp(\rho)$ と切羽評価点の関係

図1.2 事前調査段階で得られる情報と施工段階で得られる情報の関係例 (Rトンネル)

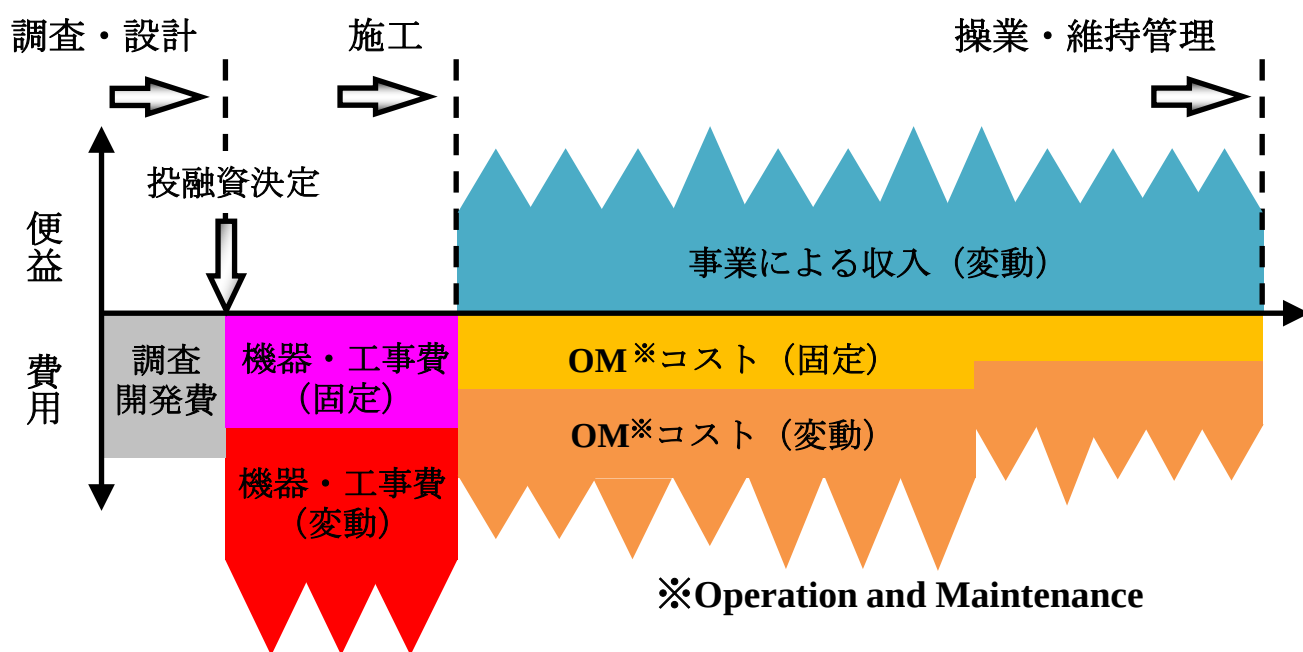


図1.3 建設プロジェクトの費用・便益に関する不確実性<sup>9)</sup>

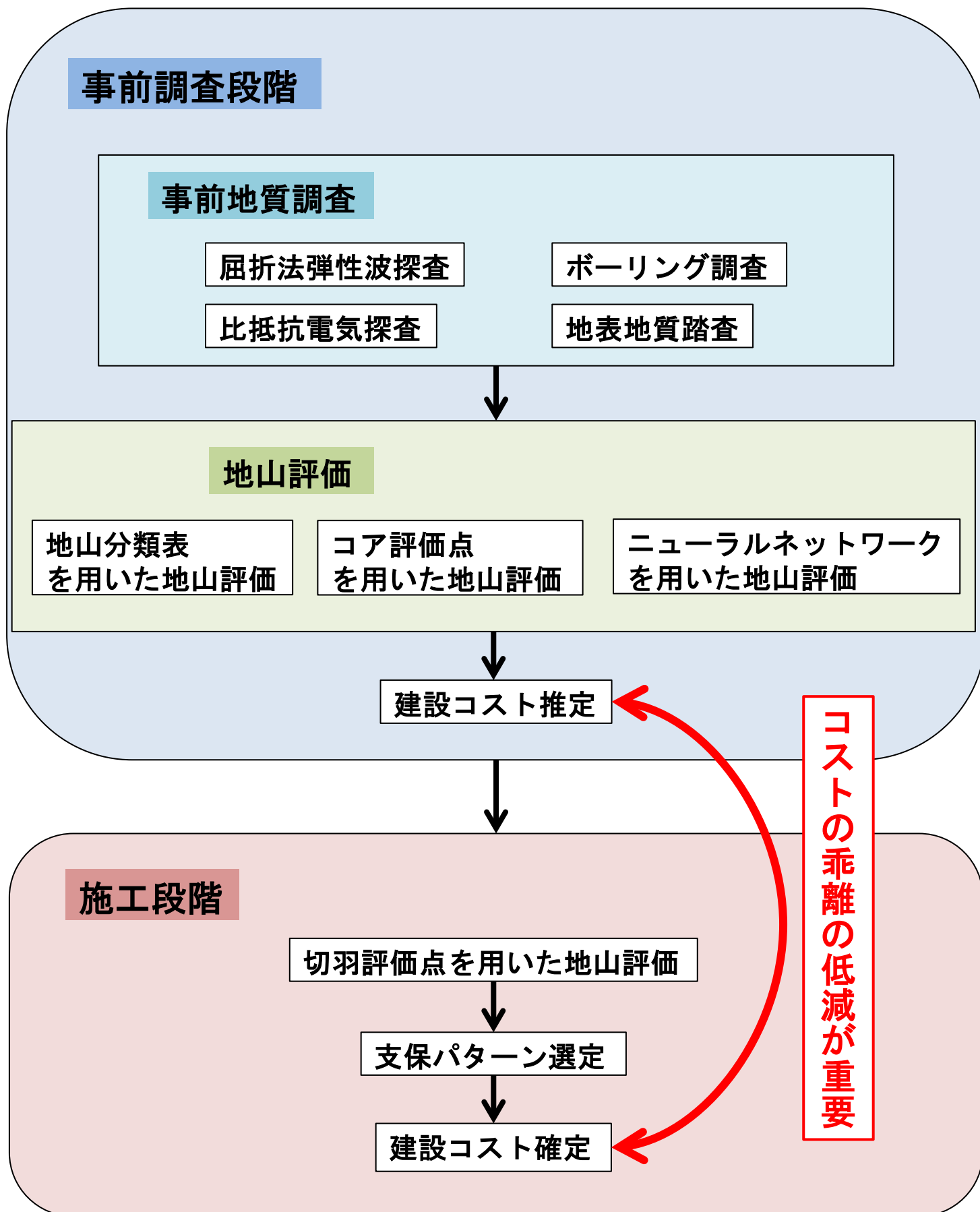


図2.1 山岳トンネルにおける地山評価のフローチャート

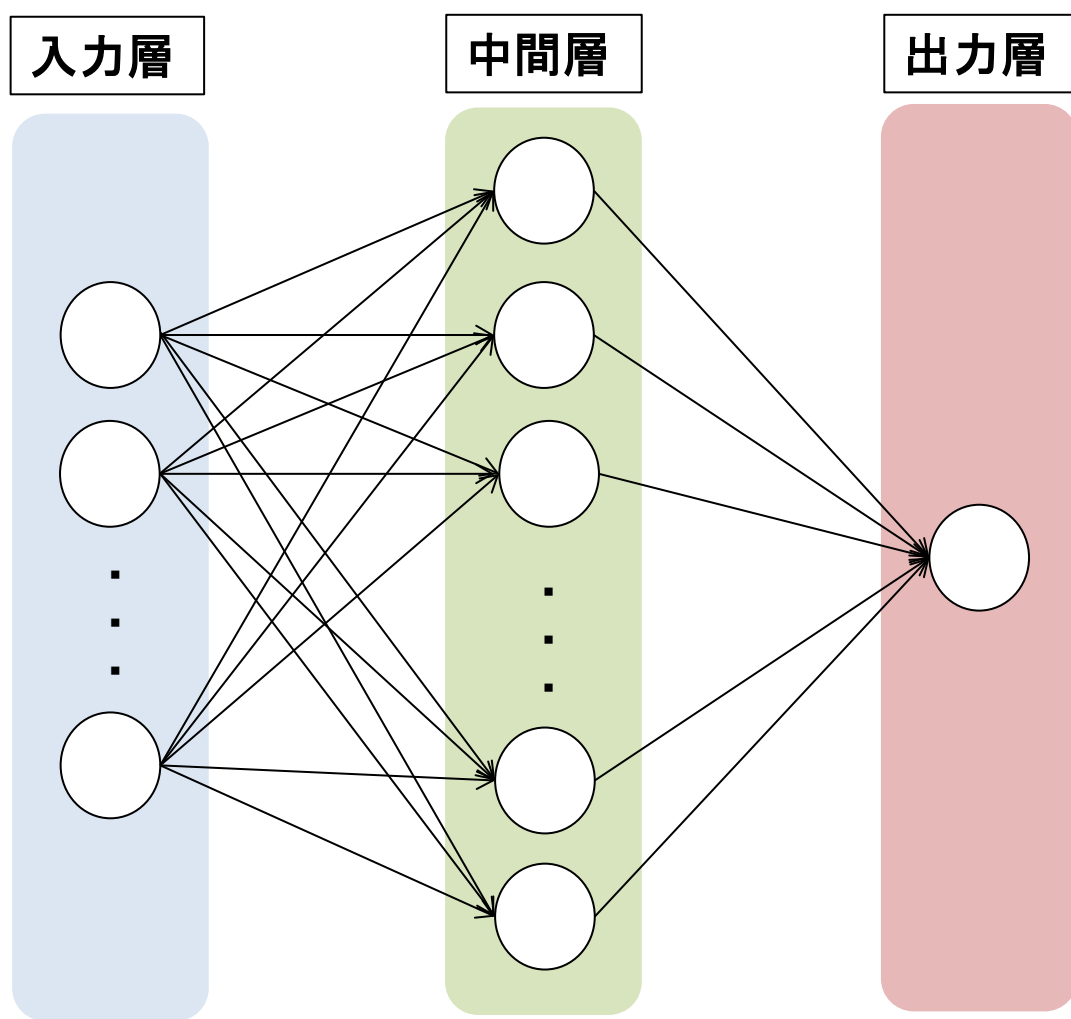


図2.2 3層階層型ANNの概念図

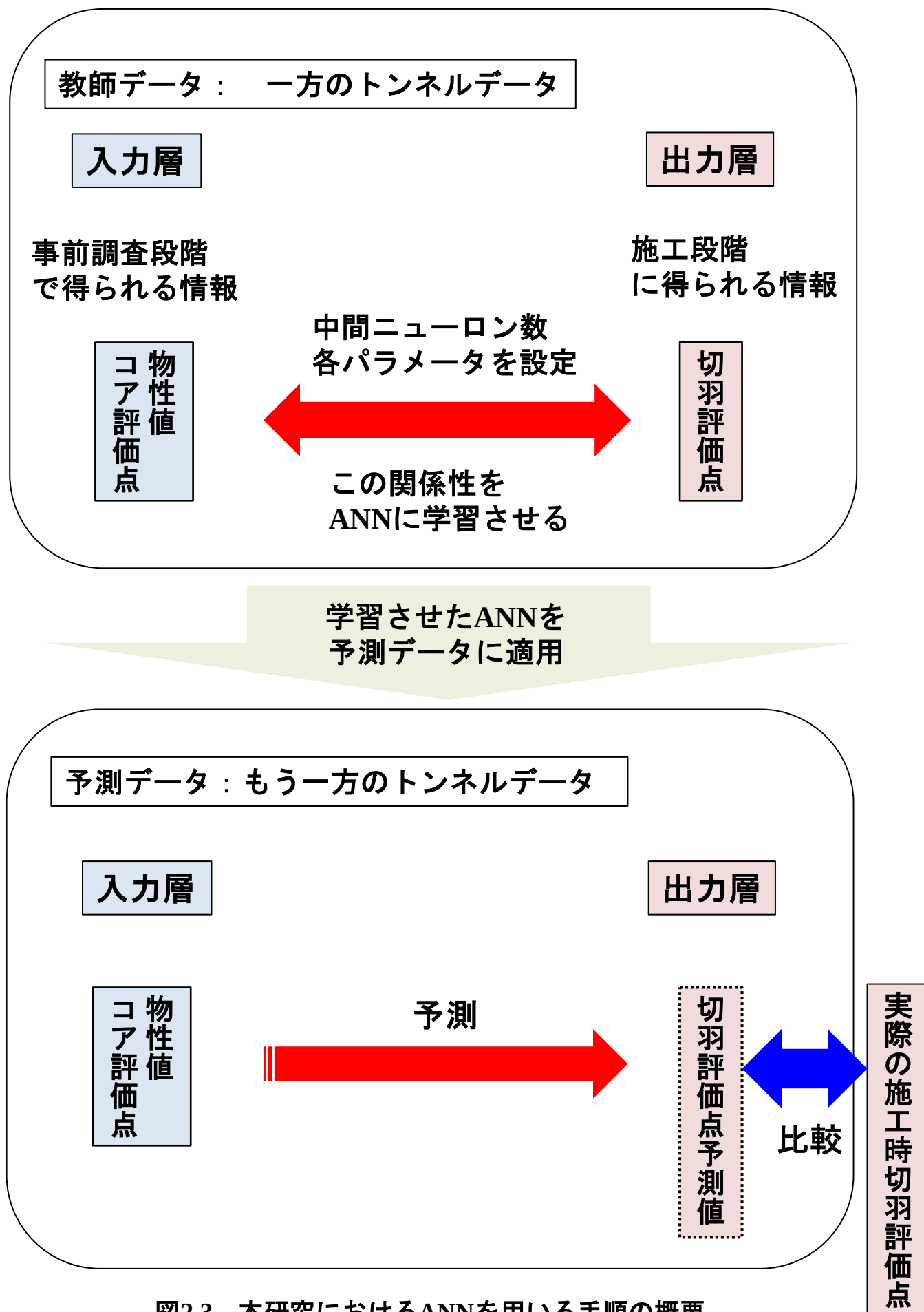


図2.3 本研究におけるANNを用いる手順の概要

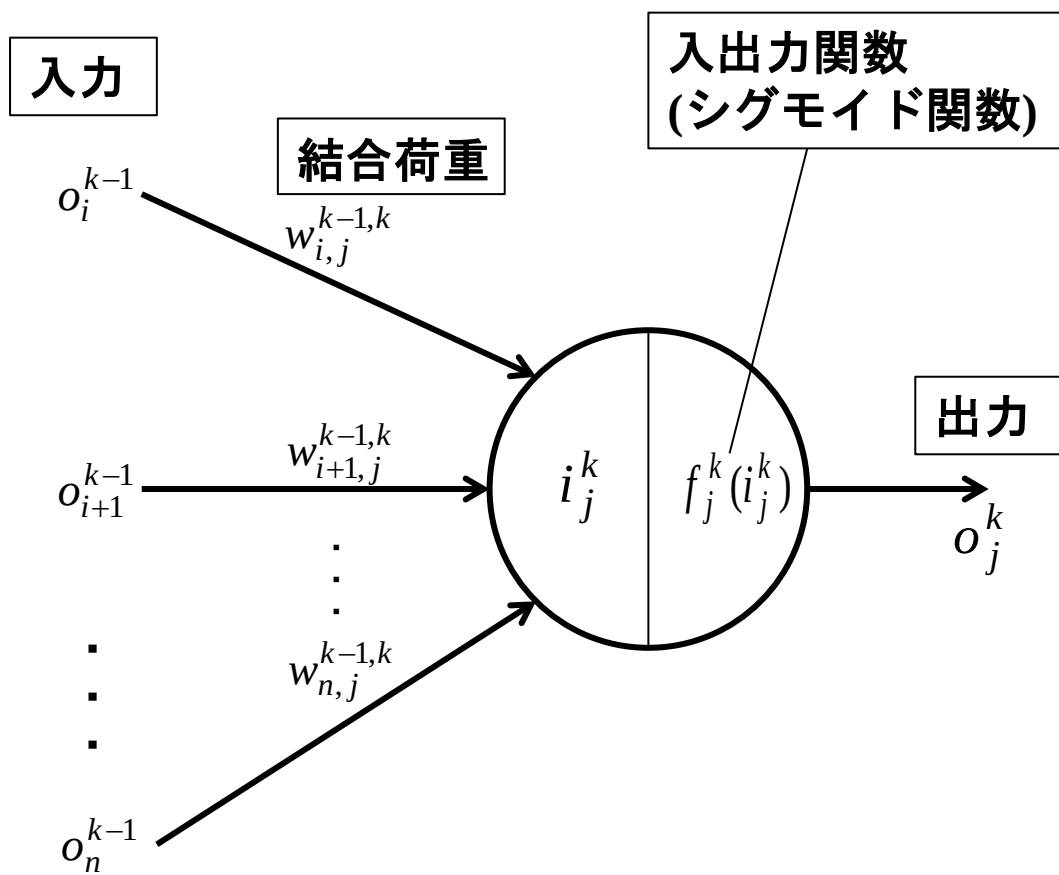


図2.4 ニューロンの仕組みの概念図

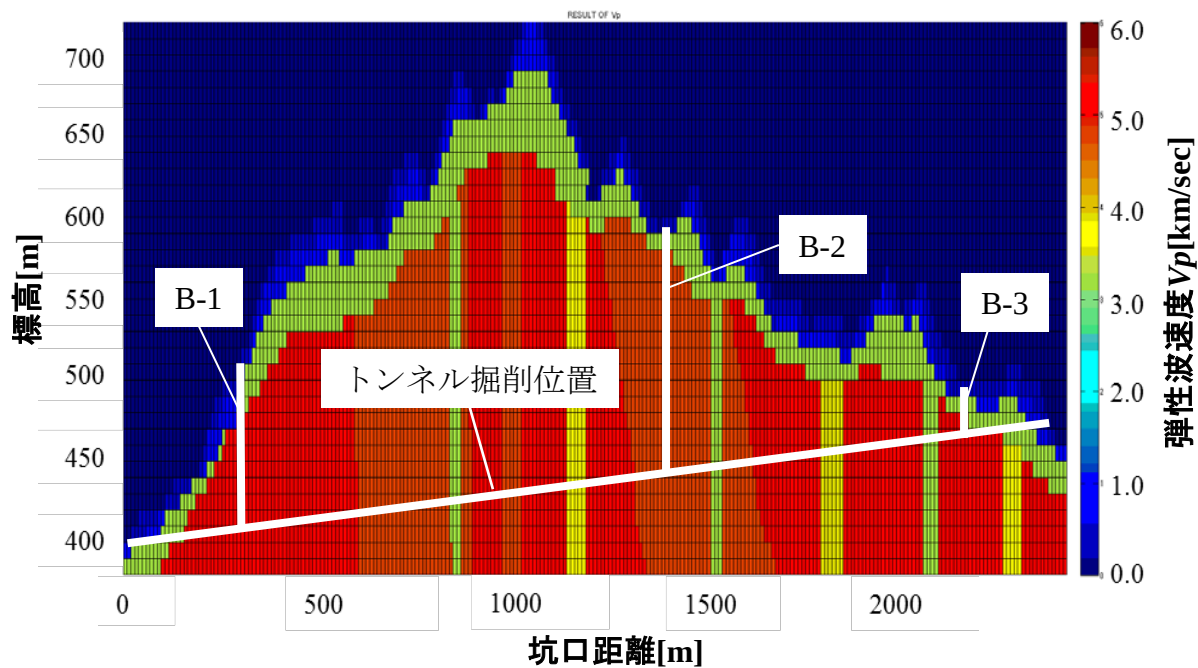


図3.1 屈折法弾性波探査により得られた弾性波速度分布（Rトンネル）

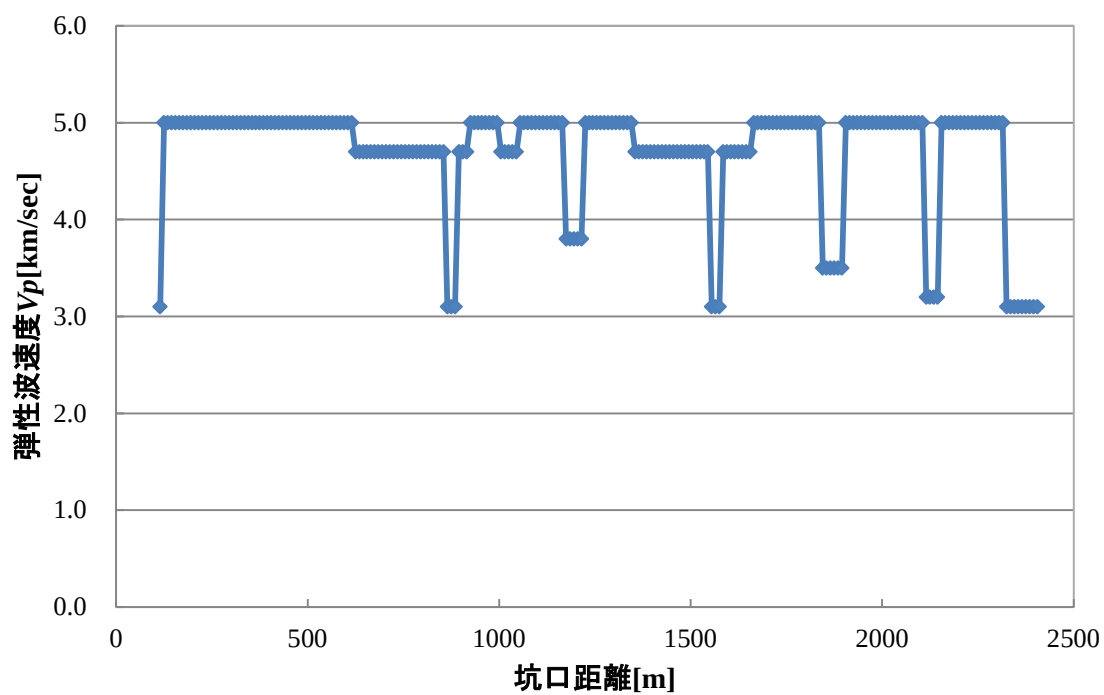


図3.2 トンネル掘削位置の弾性波速度分布（Rトンネル）

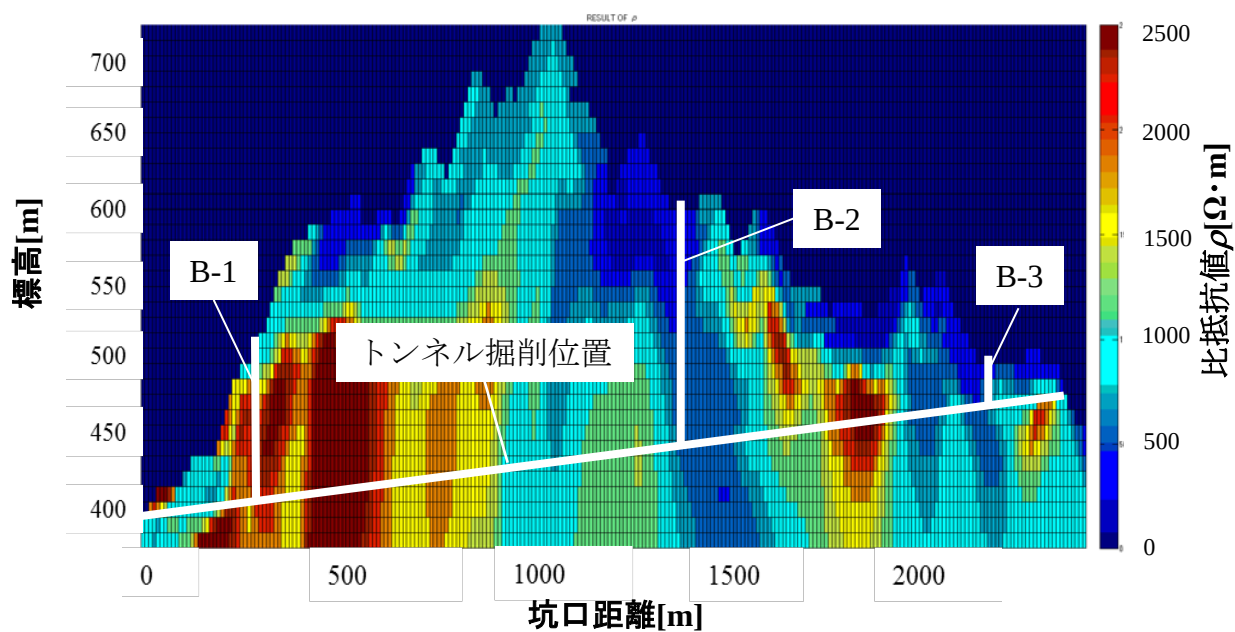


図3.3 比抵抗電気探査により得られた比抵抗値分布（Rトンネル）

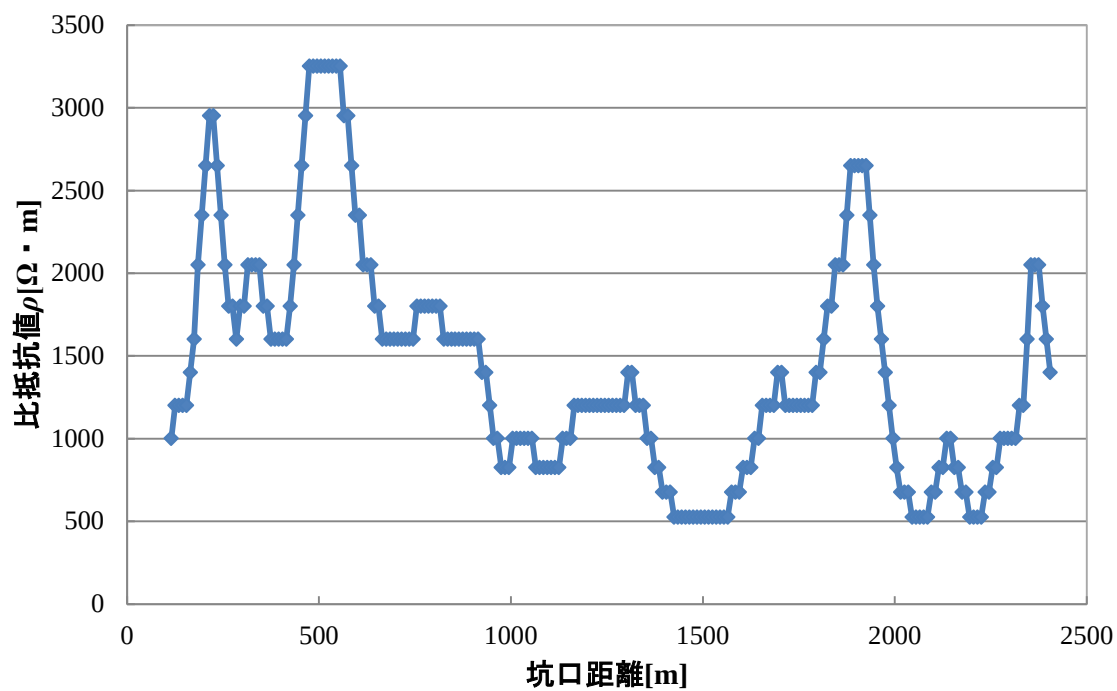
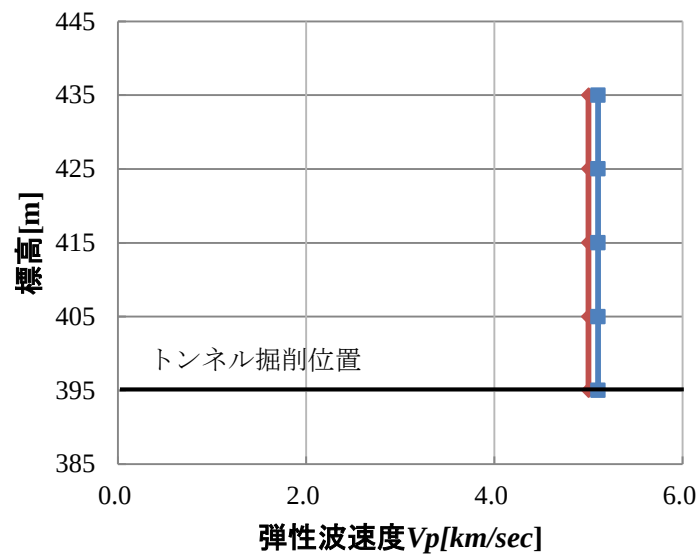
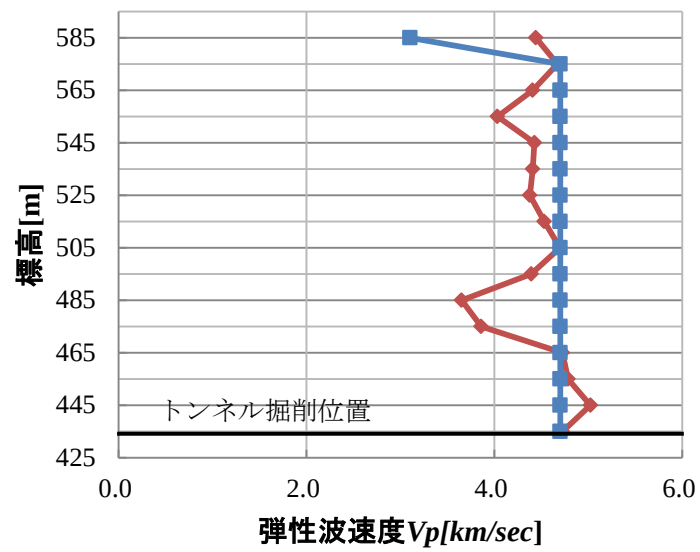


図3.4 トンネル掘削位置の比抵抗値分布（Rトンネル）

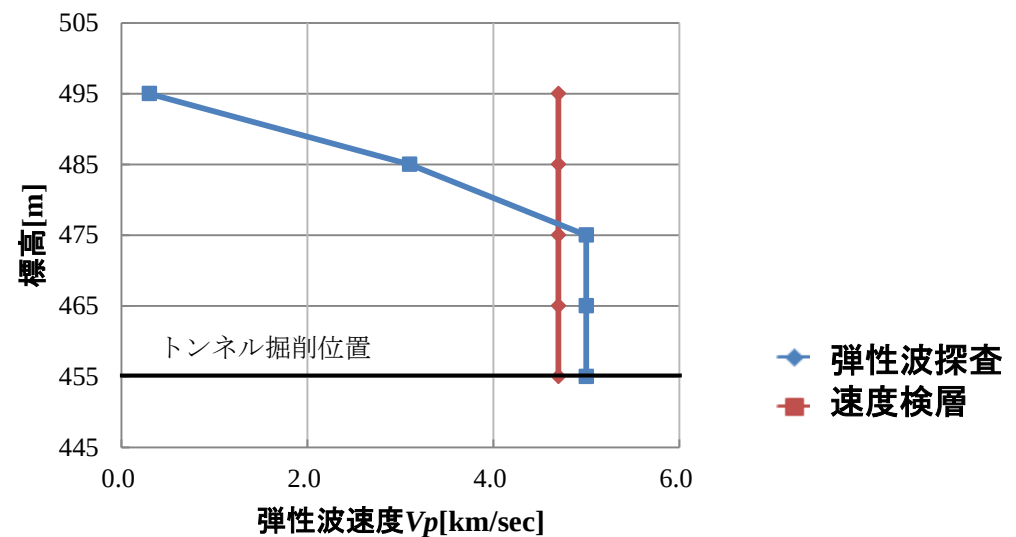




(a) B-1 孔

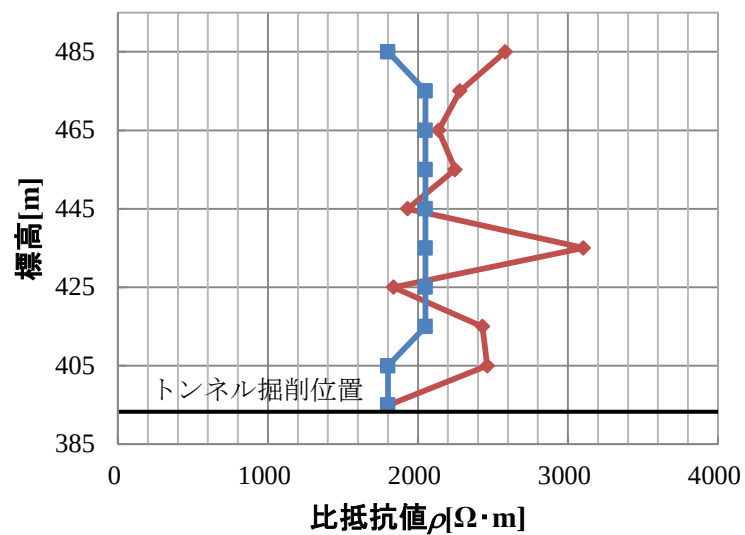


(b) B-2 孔

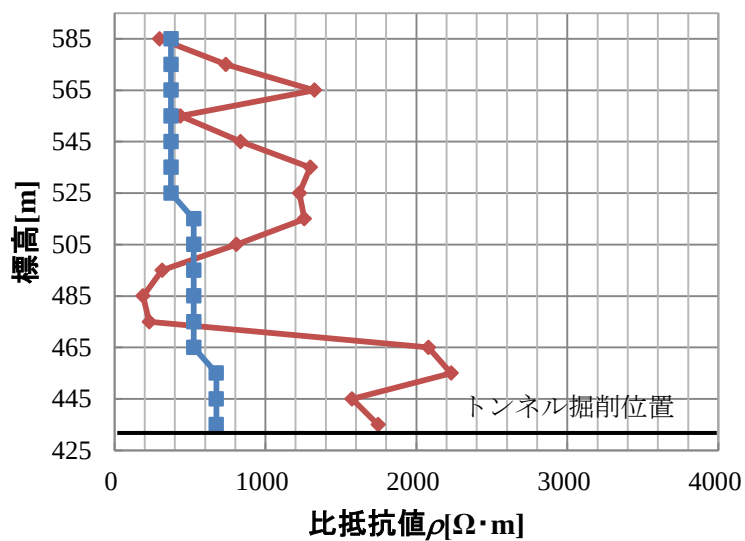


(c) B-3 孔

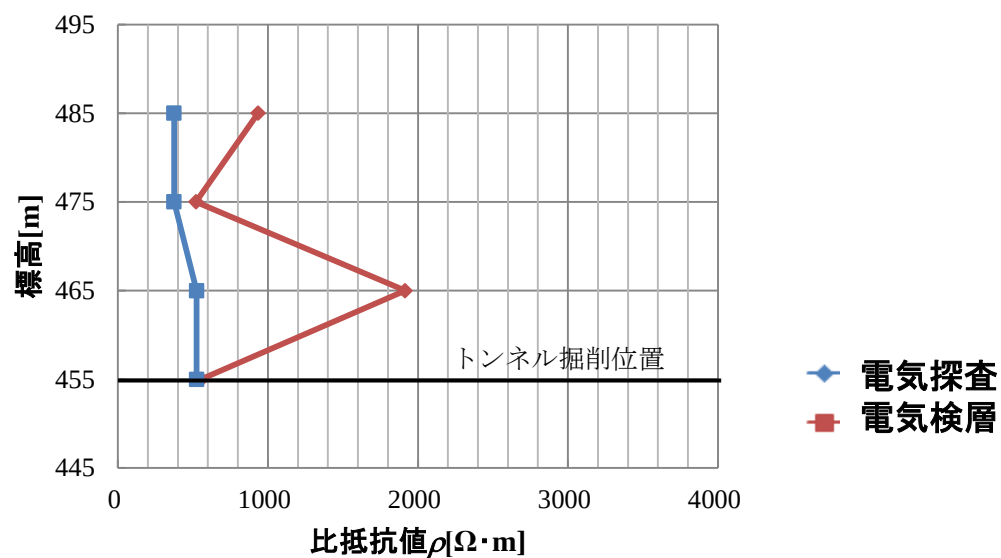
図 3.5 屈折法弾性波探査結果と速度検層結果の比較 (Rトンネル)



(a) B-1 孔



(b) B-2 孔



(c) B-3 孔

図 3.6 比抵抗電気探査結果と電気検層結果の比較 (Rトンネル)

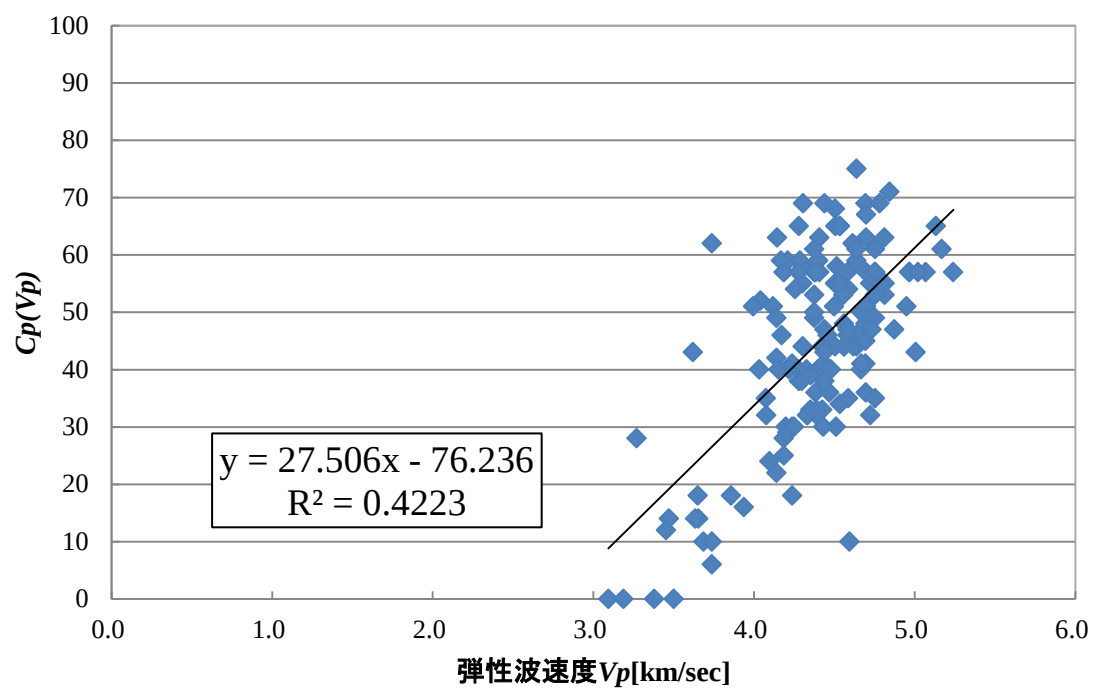


図3.7 弾性波速度 $V_p$ とコア評価点 $C_p(V_p)$ の関係（Rトンネル）

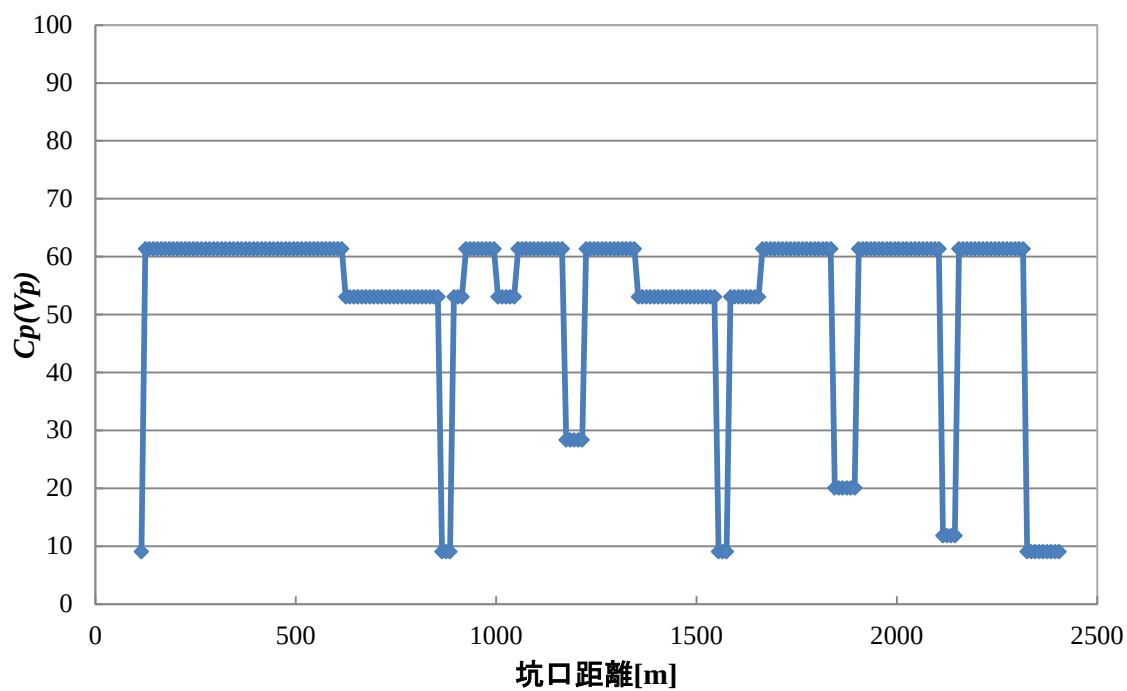


図3.8 トンネル掘削位置の $C_p(V_p)$ 分布（Rトンネル）

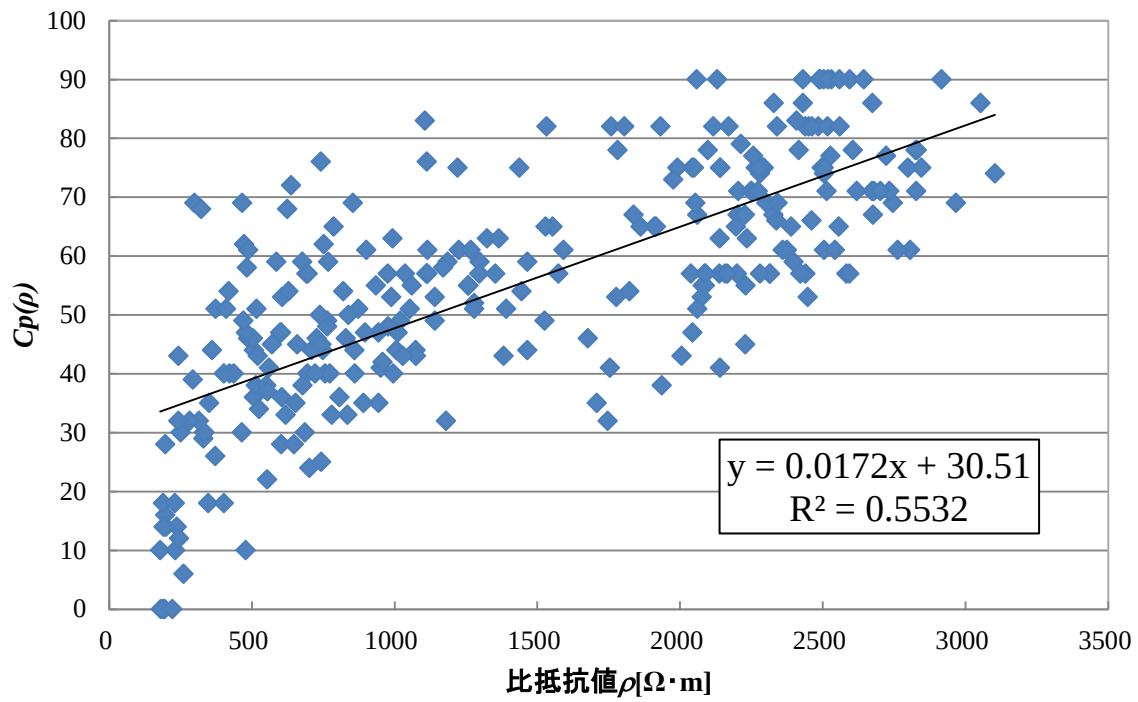


図3.9 比抵抗値 $\rho$ とコア評価点 $C_p(\rho)$ の関係（Rトンネル）

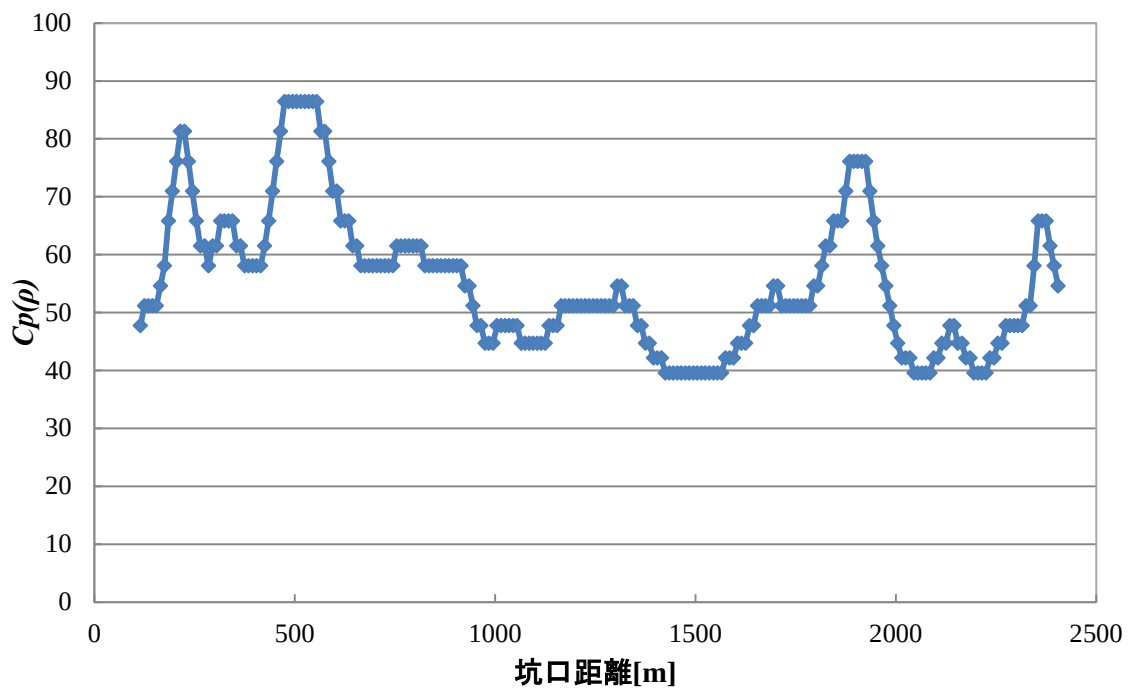


図3.10 トンネル掘削位置の $C_p(\rho)$ 分布（Rトンネル）

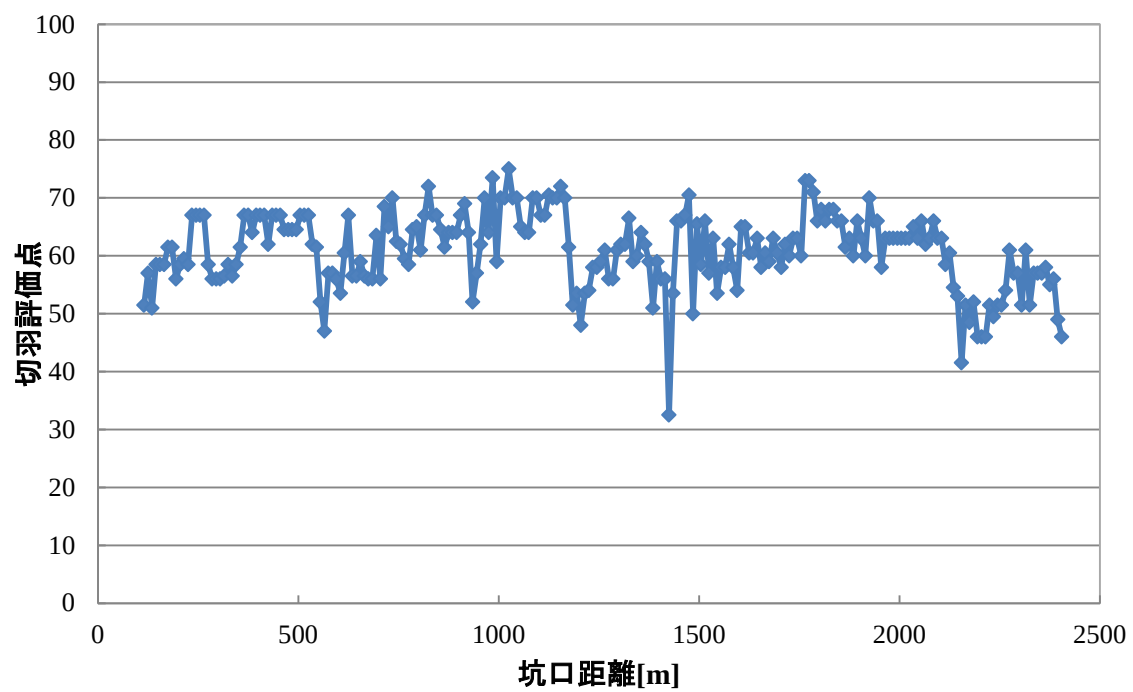


図3.11 切羽評価点分布（Rトンネル）

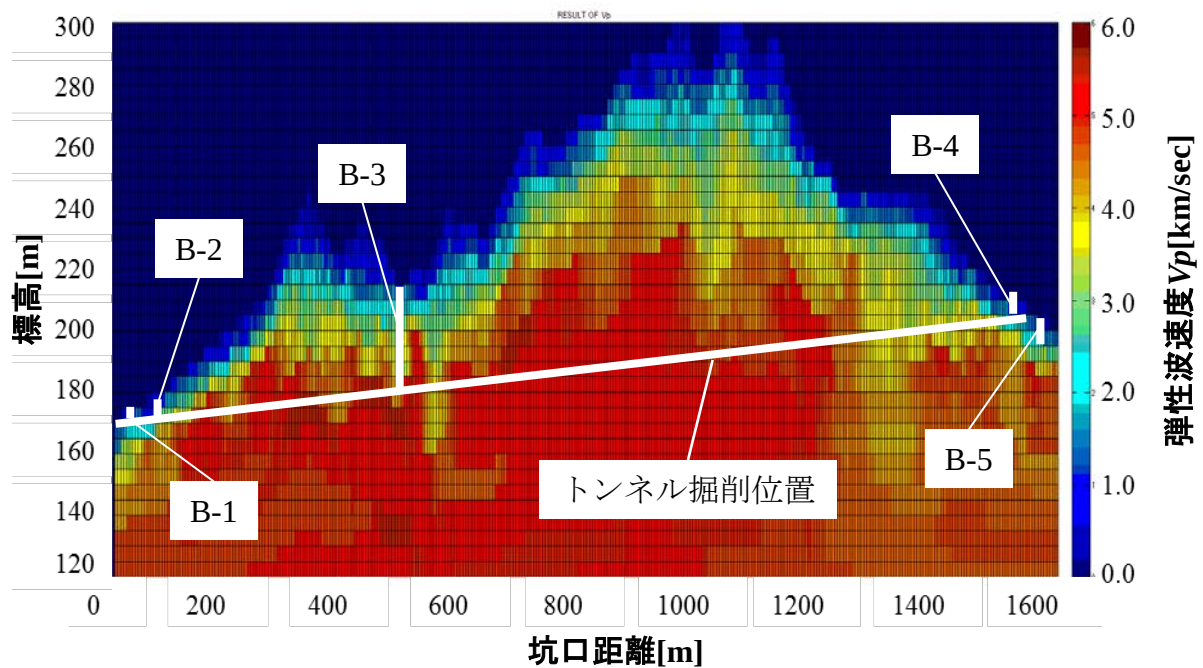


図3.12 屈折法弾性波探査により得られた弾性波速度分布（Bトンネル）

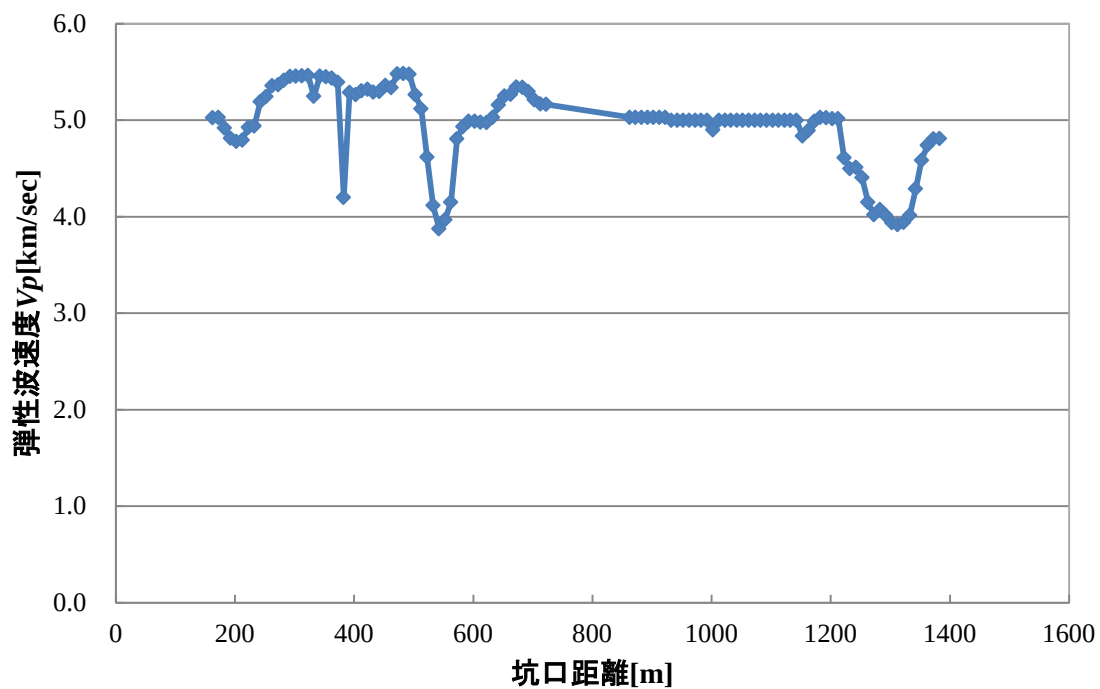


図3.13 トンネル掘削位置の弾性波速度分布（Bトンネル）

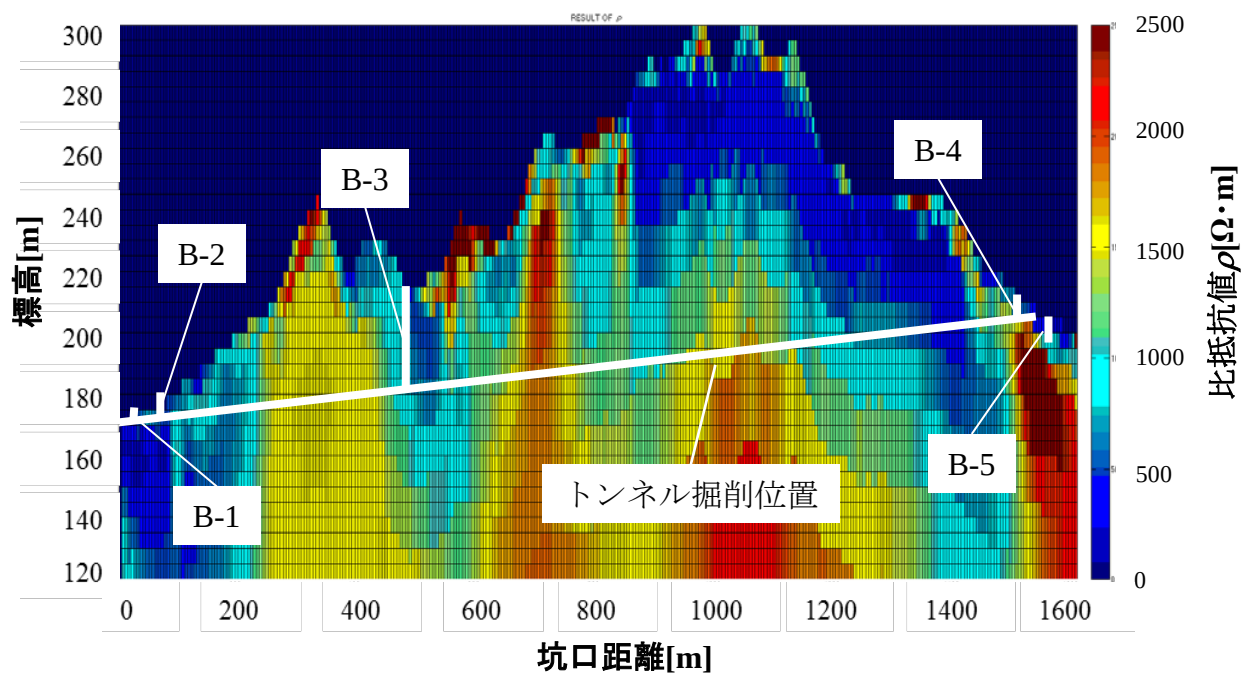


図3.14 比抵抗電気探査により得られた比抵抗値分布 (Bトンネル)

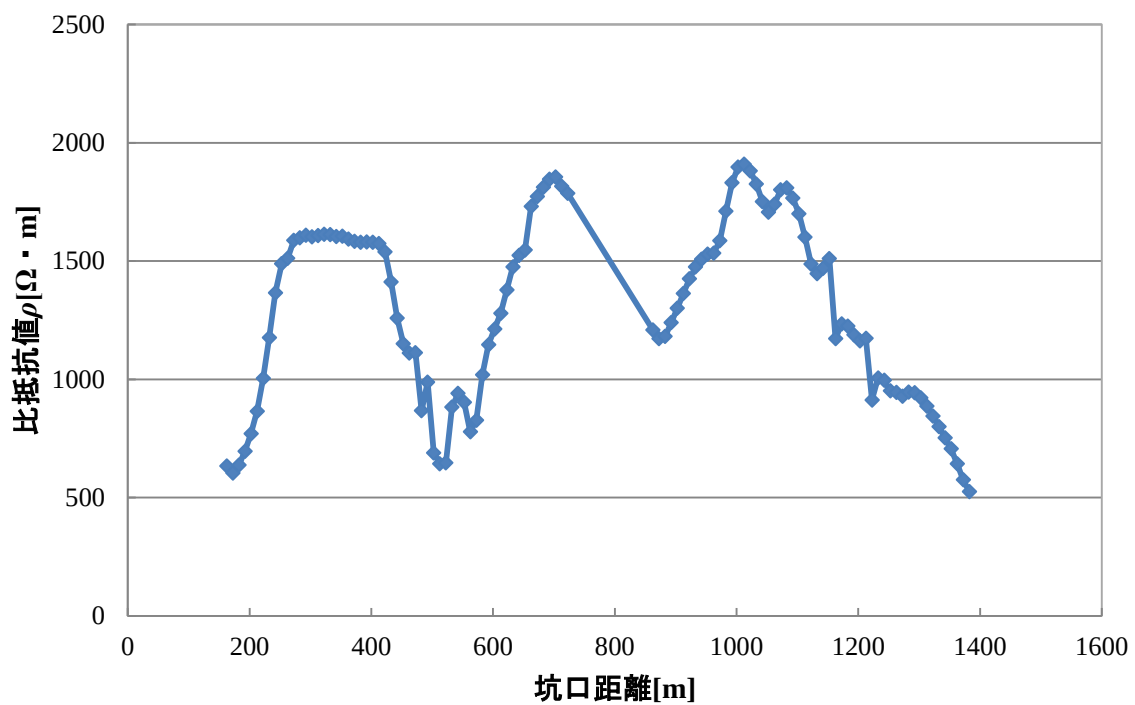
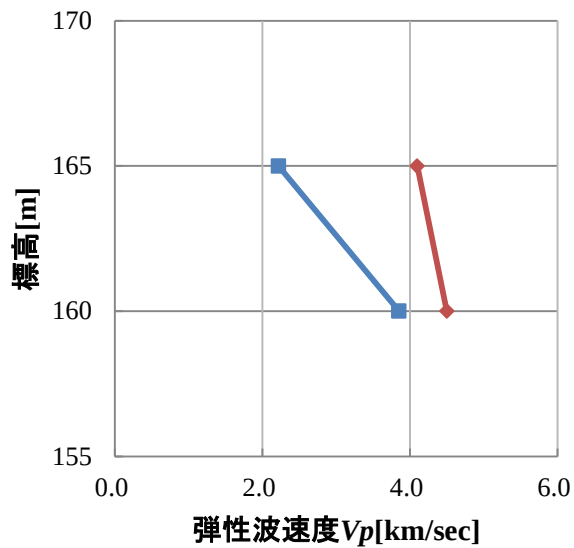
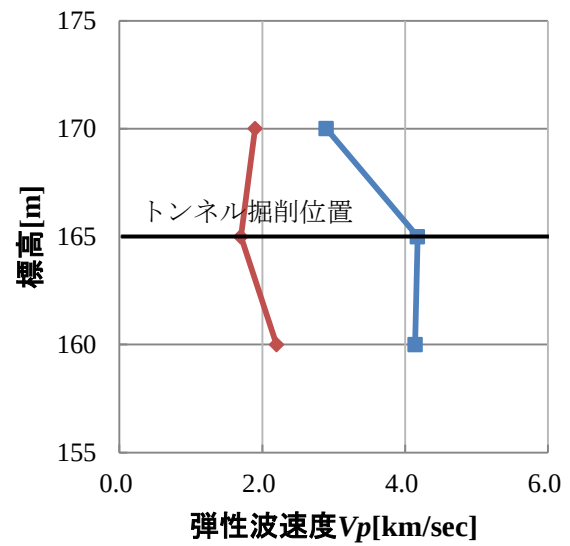


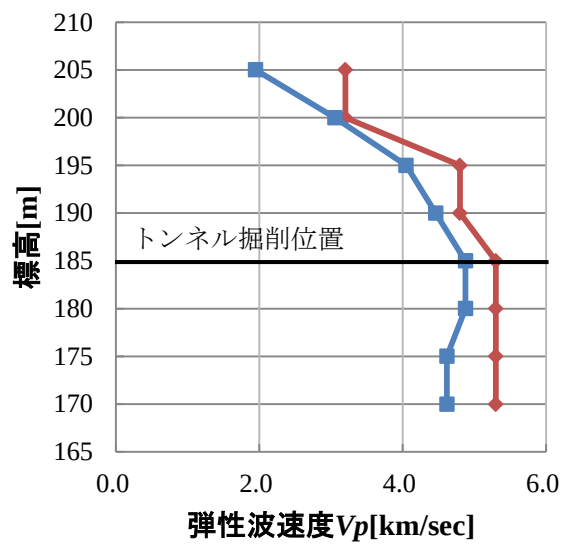
図3.15 トンネル掘削位置の比抵抗値分布 (Bトンネル)



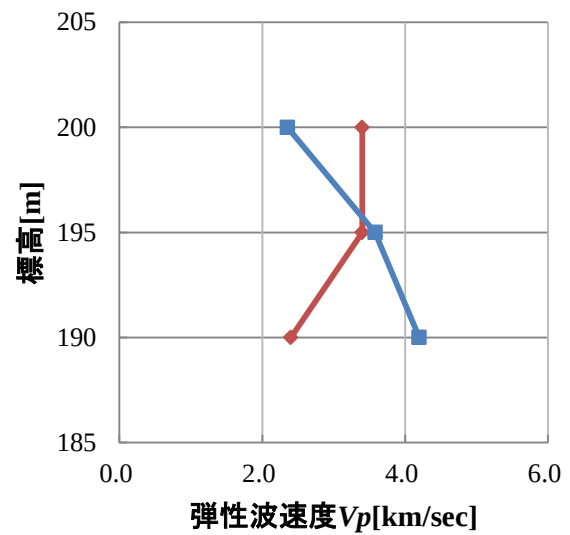
(a) B-1孔



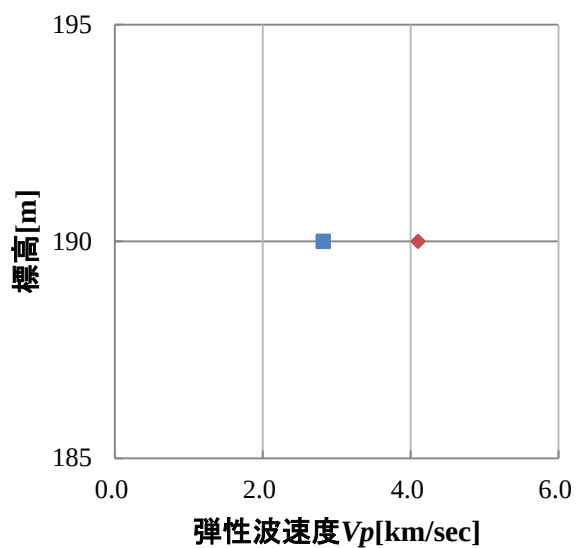
(b) B-2孔



(c) B-3孔



(d) B-4孔

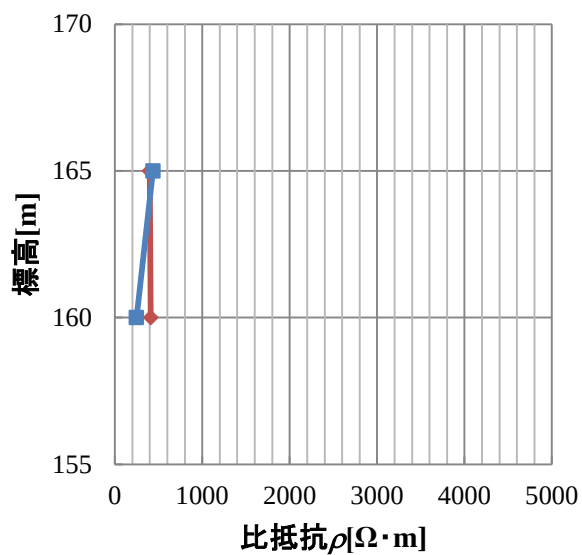


(e) B-5孔

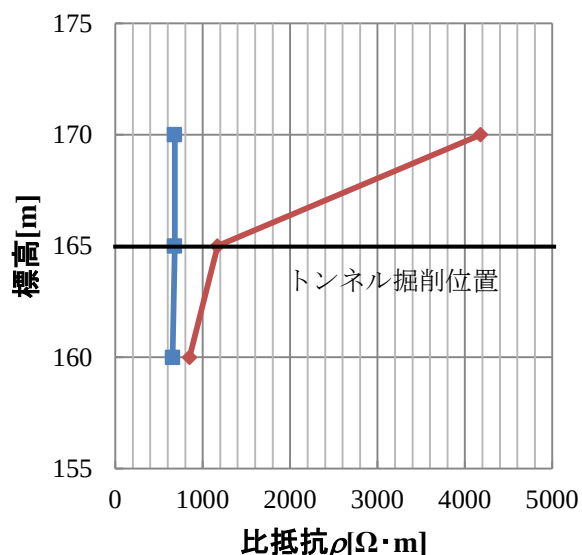
◆ 弾性波探索  
■ 速度検層

図 3.16 屈折法弾性波探索結果と速度検層結果の比較 (Bトンネル)

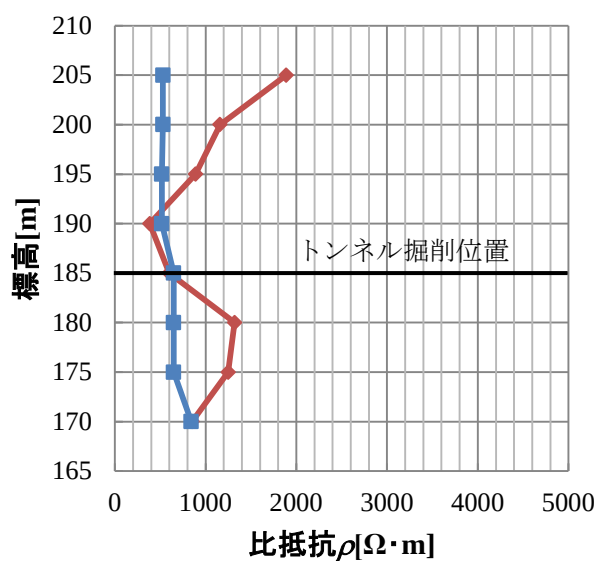




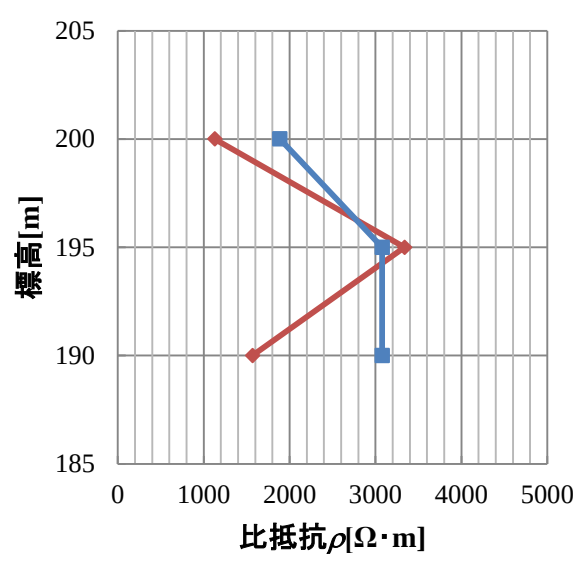
(a) B-1孔



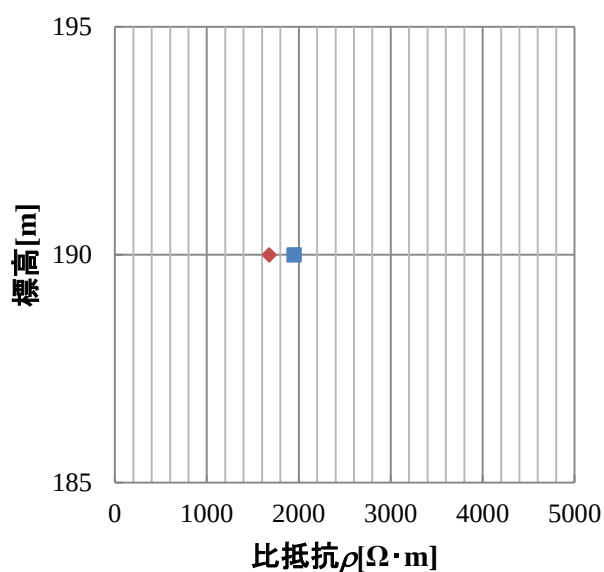
(b) B-2孔



(c) B-3孔



(d) B-4孔



(e) B-5孔

◆ 電気探索  
◆ 電気検層

図 3.17 比抵抗電気探索結果と電気検層結果の比較 (Bトンネル)

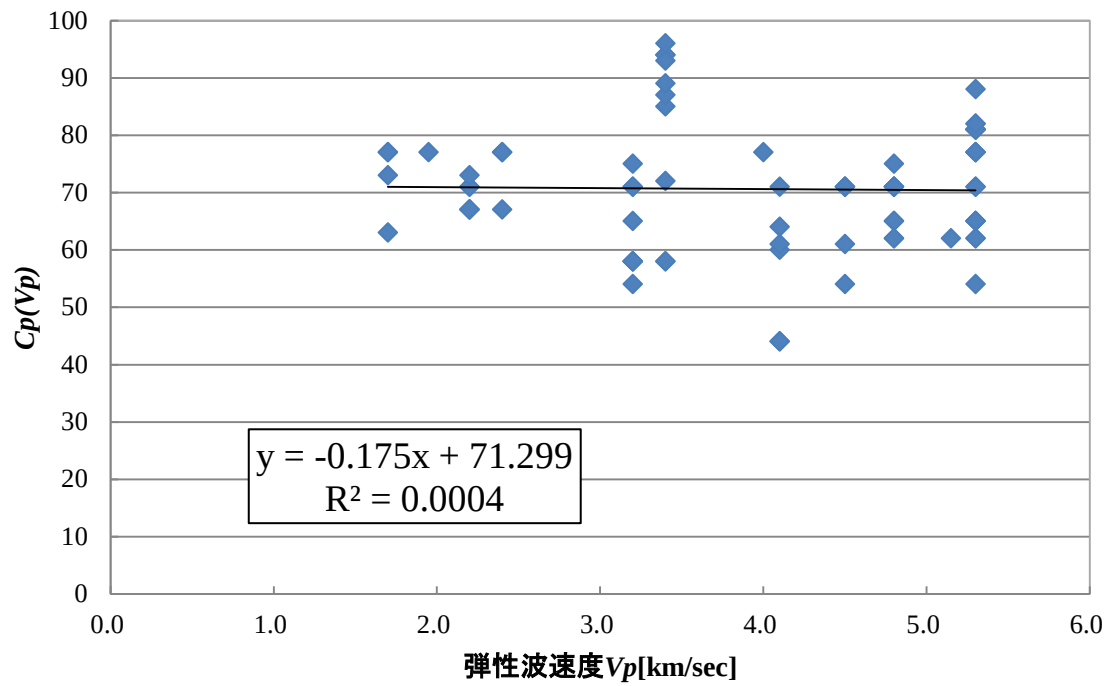


図3.18 弾性波速度 $V_p$ とコア評価点 $C_p(V_p)$ の関係（Bトンネル）

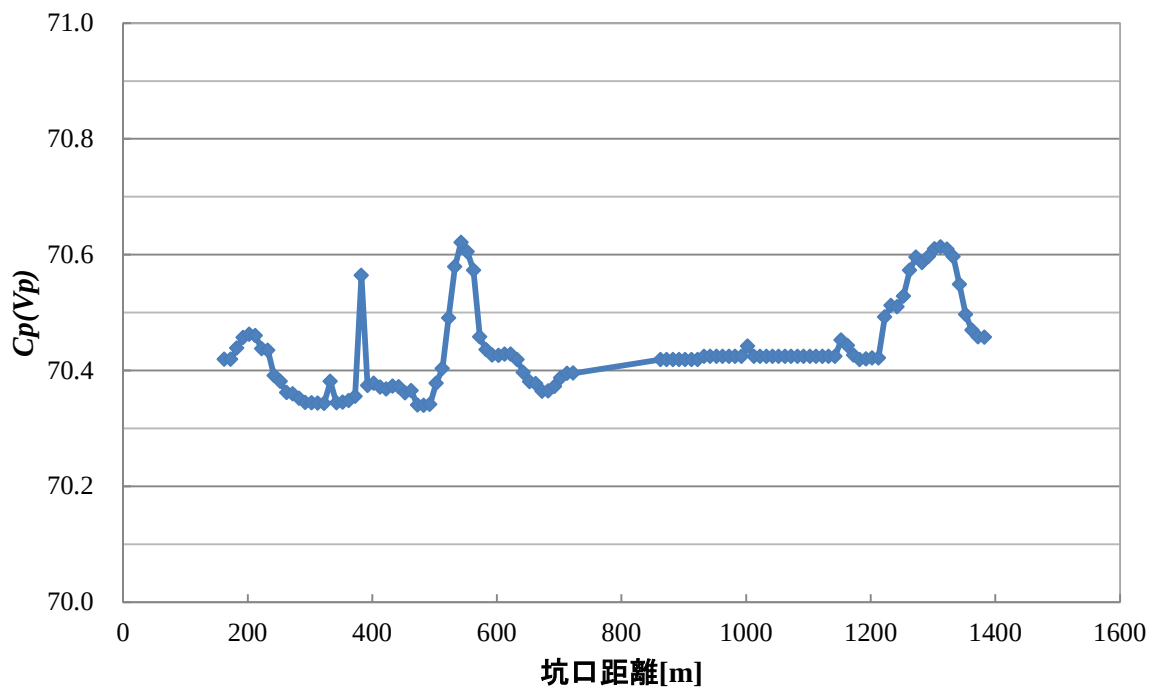


図3.19 トンネル掘削位置の $C_p(V_p)$ 分布（Bトンネル）

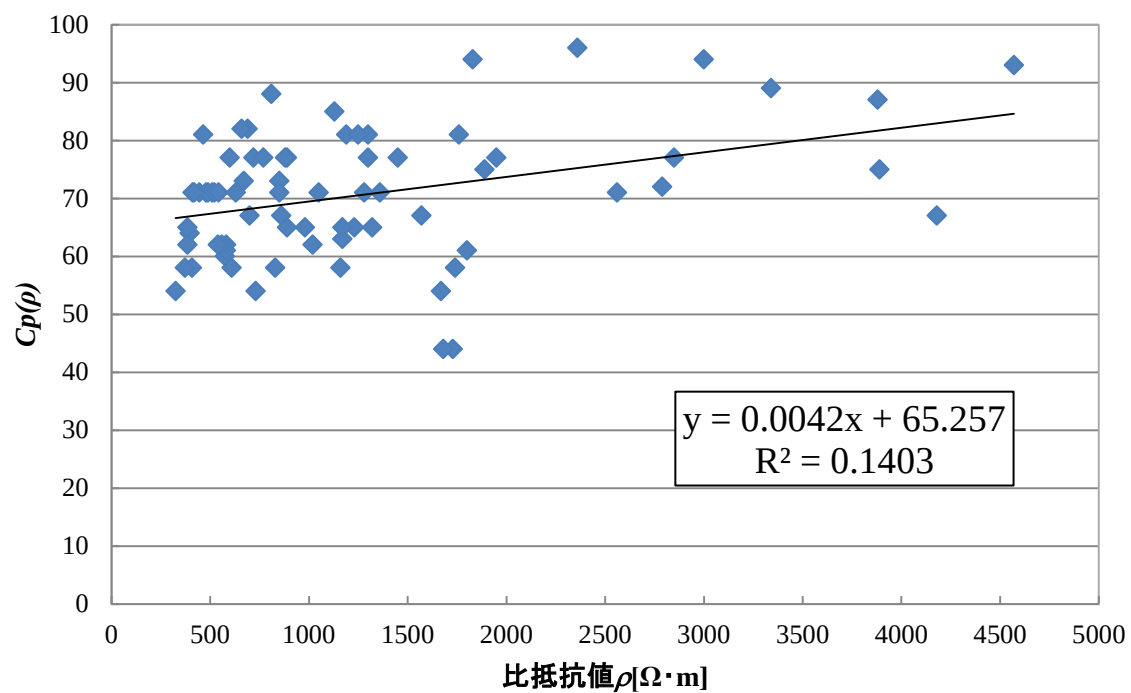


図3.20 比抵抗値 $\rho$ とコア評価点 $C_p(\rho)$ の関係 (Bトンネル)

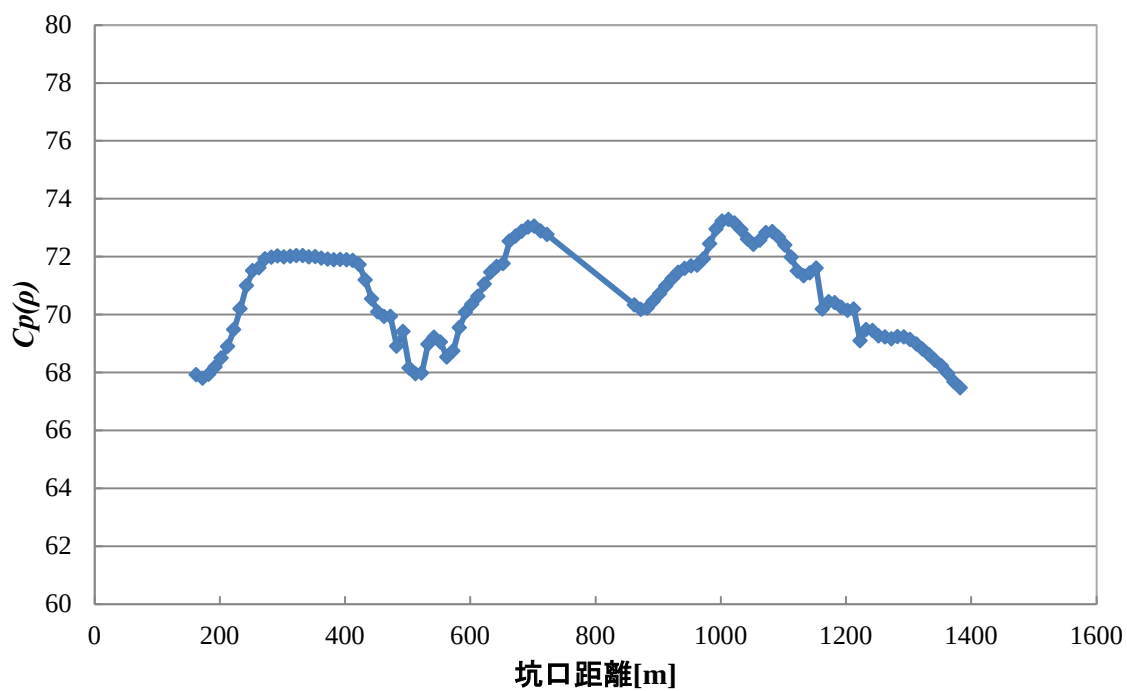


図3.21 トンネル掘削位置の $C_p(\rho)$ 分布 (Bトンネル)

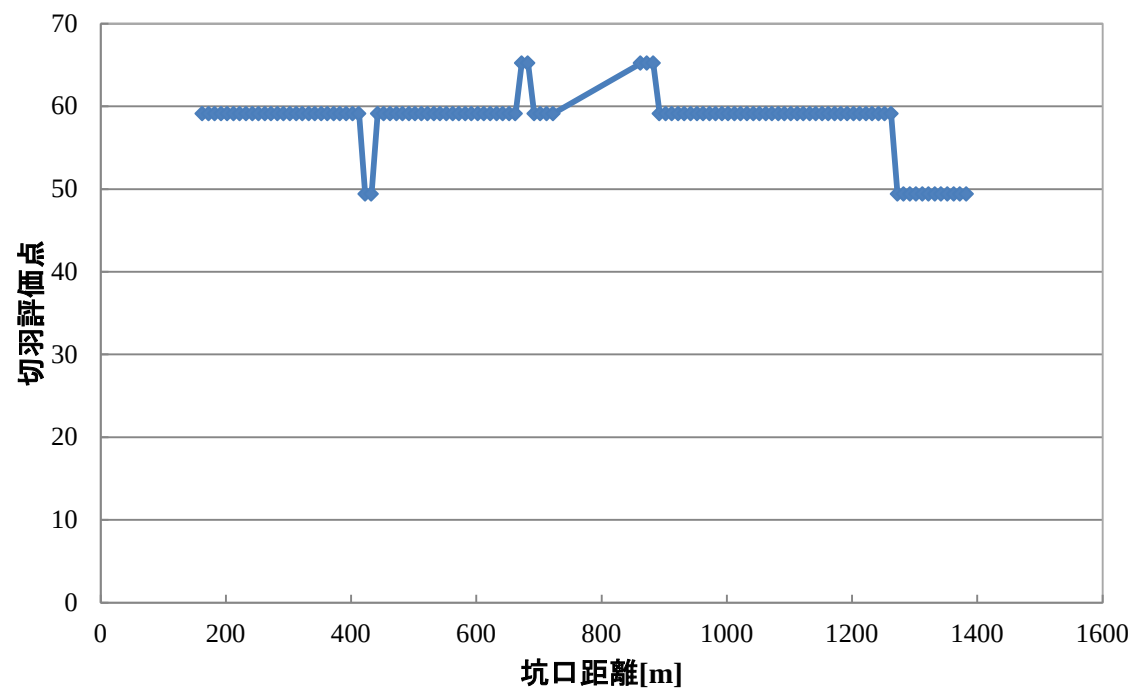
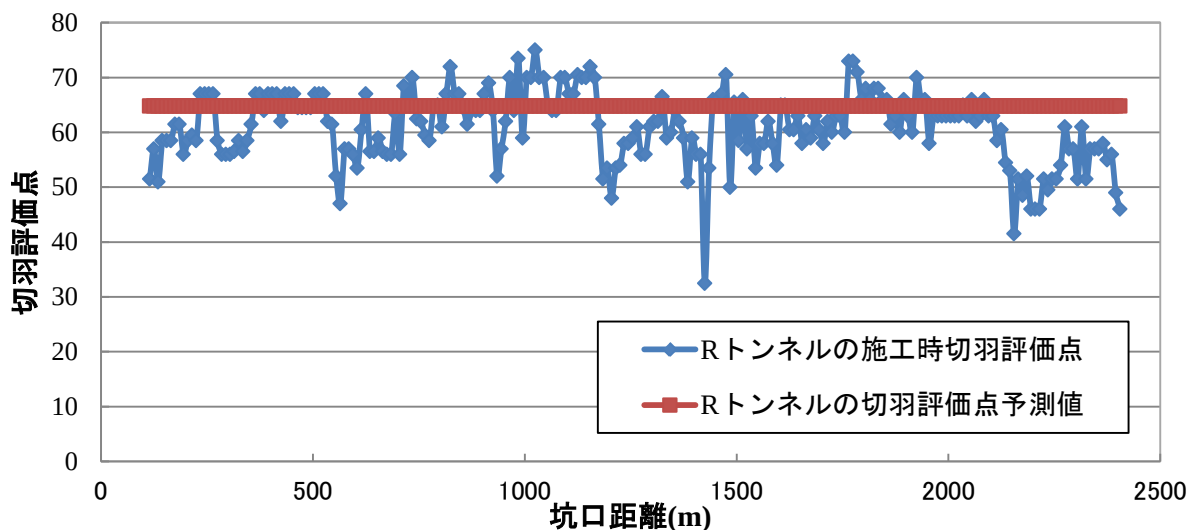
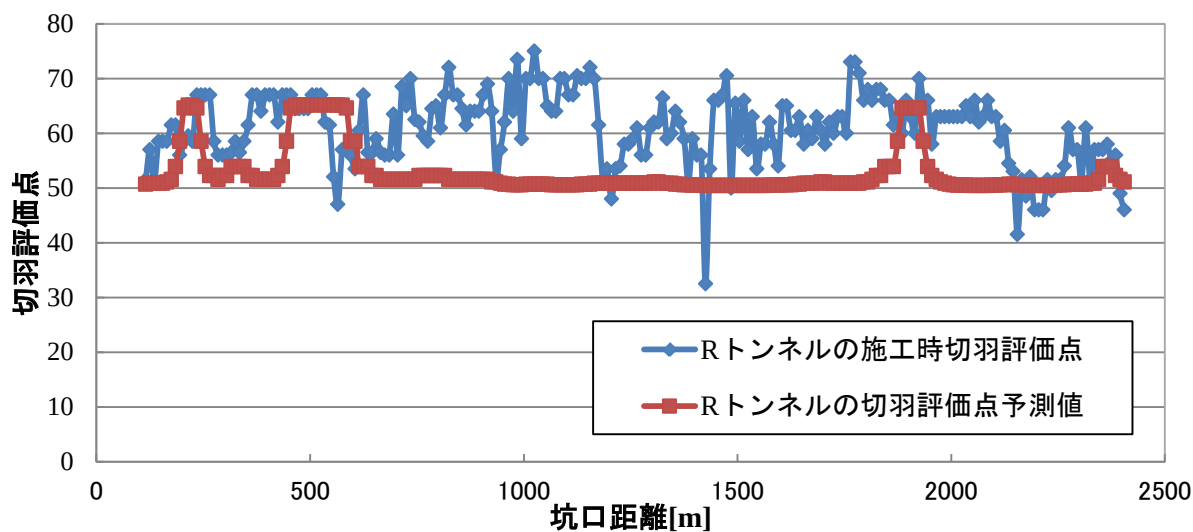


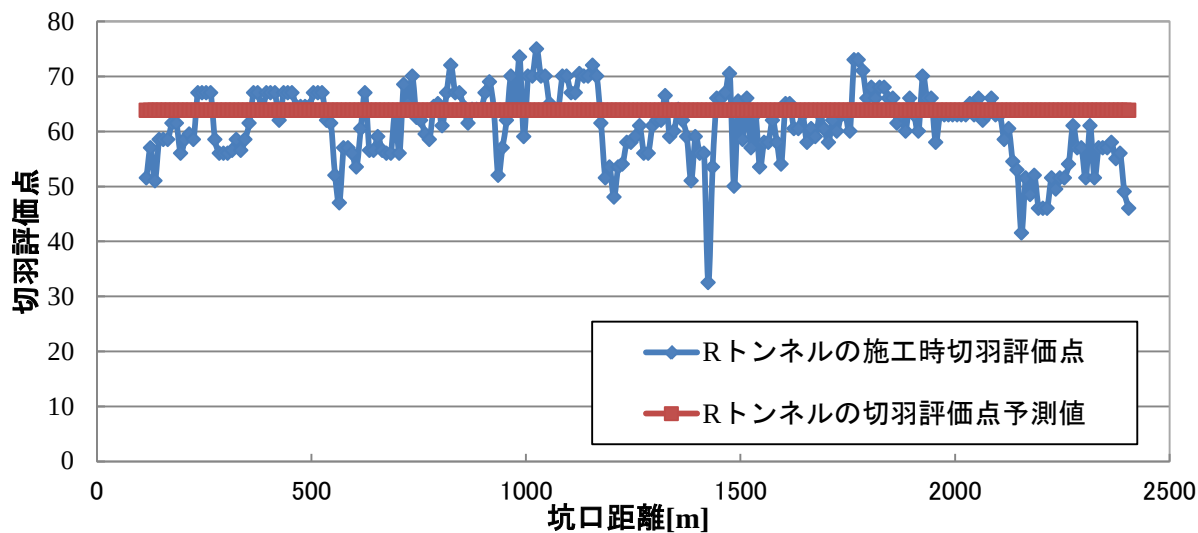
図3.22 切羽評価点分布 (Bトンネル)



(a) (case1)入力層 :  $C_p(V_p)$

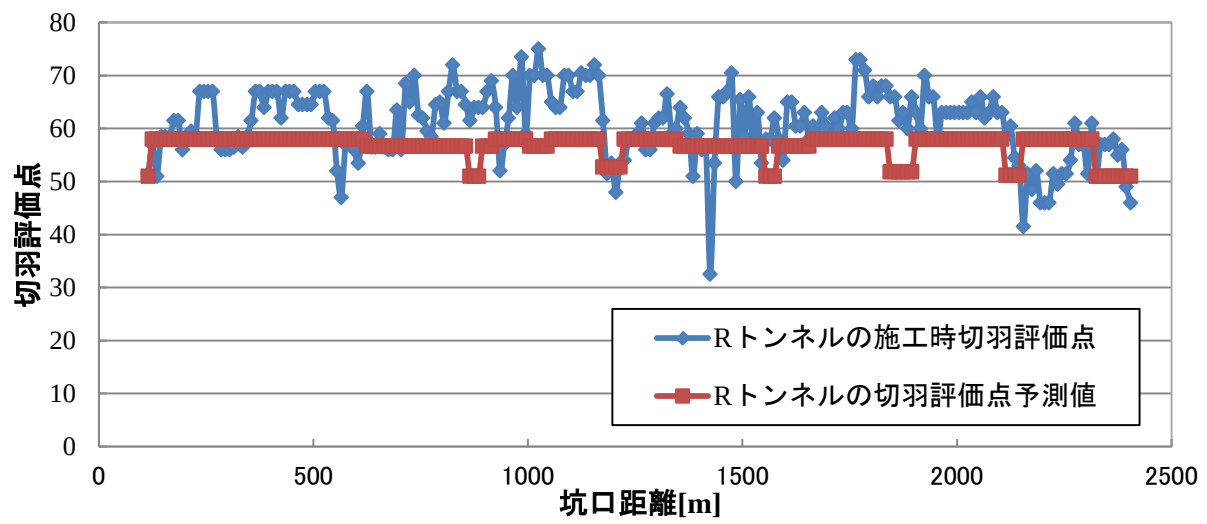


(b) (case2)入力層 :  $C_p(\rho)$

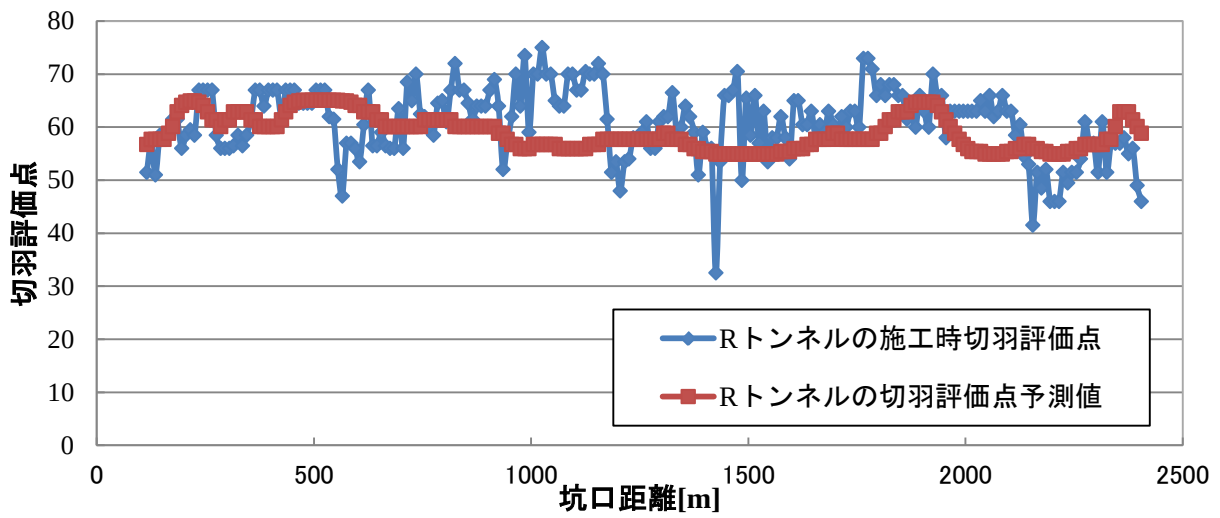


(c) (case3)入力層 :  $C_p(V_p), C_p(\rho)$

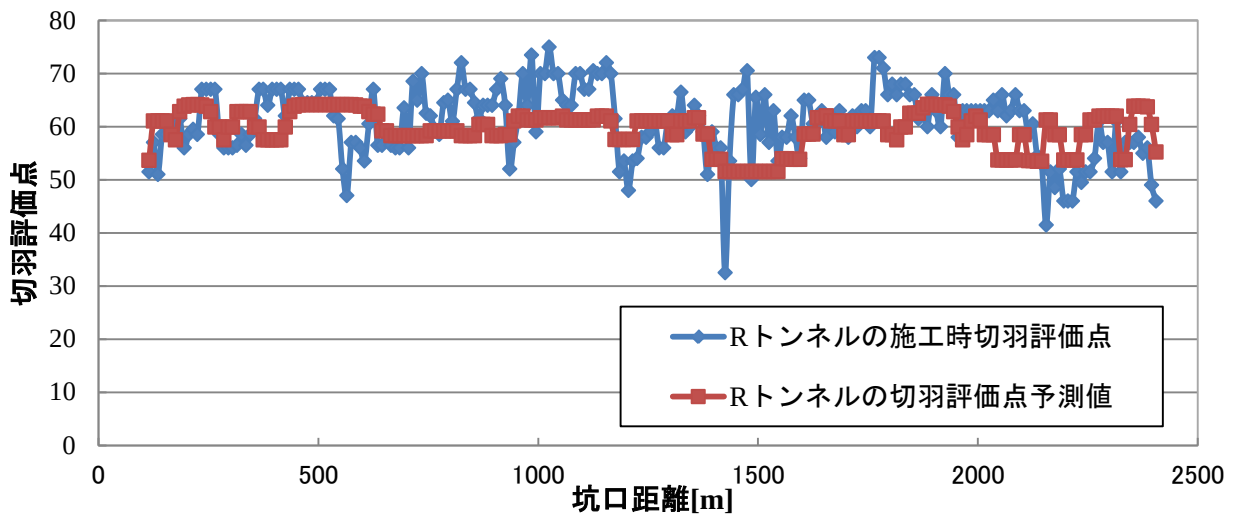
図3.23 入力層にコア評価点を用いた場合のANN予測結果 (Rトンネル)



(a) (case4)入力層 :  $V_p$

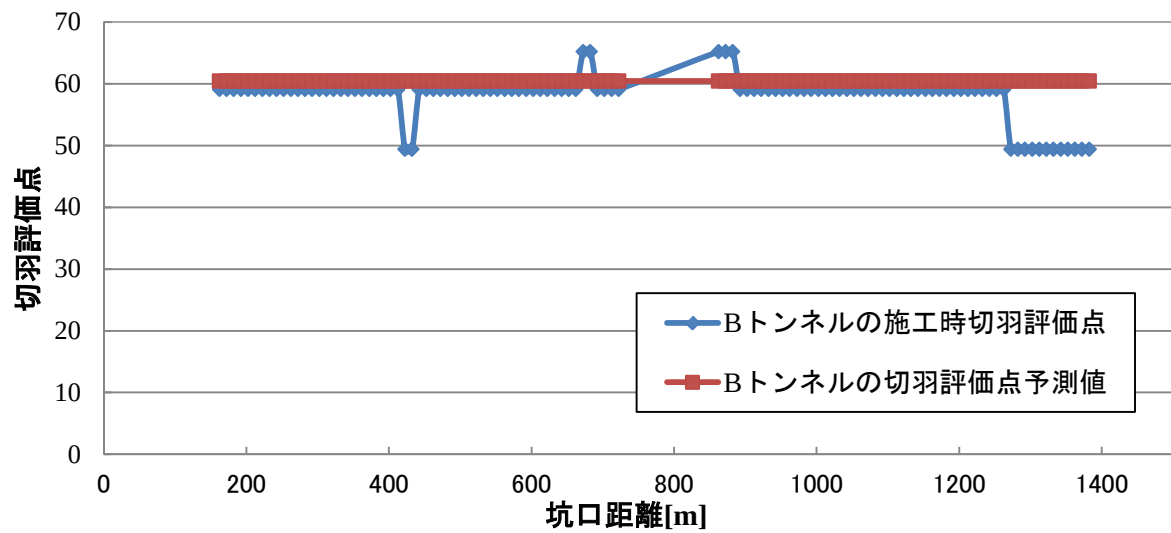


(b) (case5)入力層 :  $\rho$

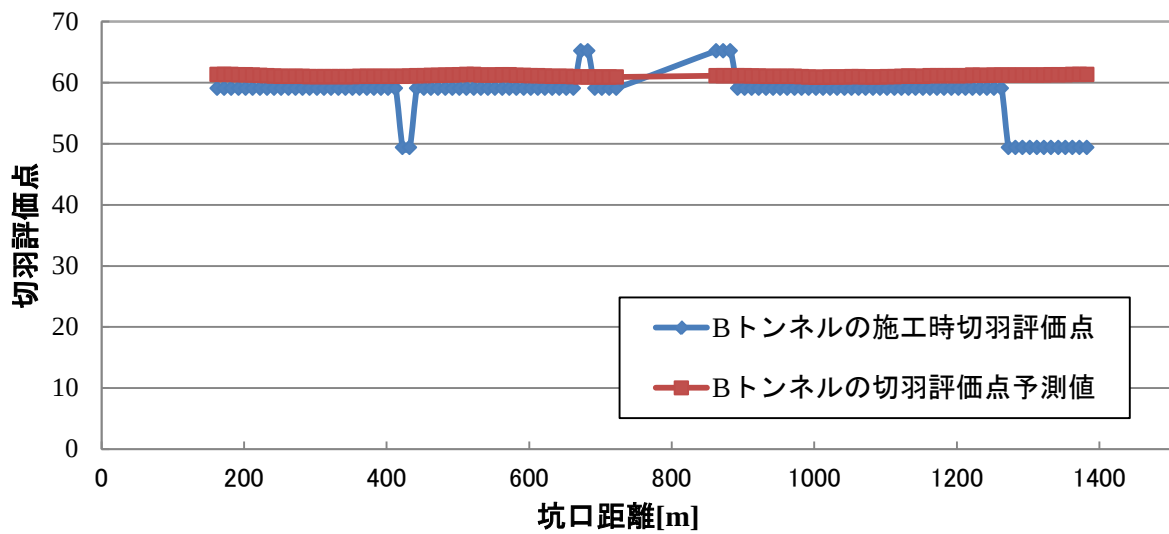


(c) (case6)入力層 :  $V_p, \rho$

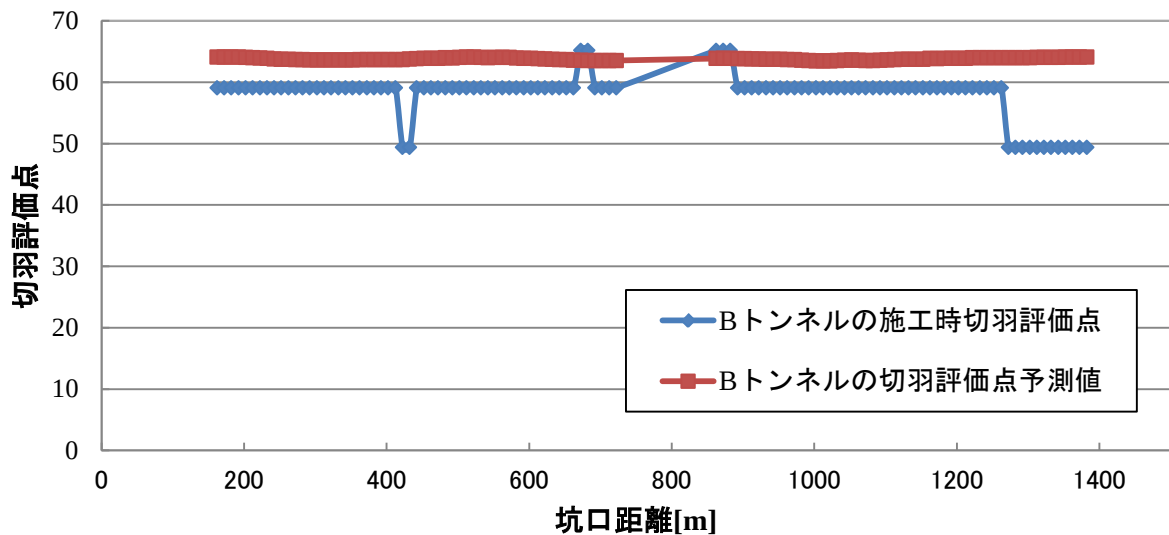
図3.24 入力層に物性値を用いた場合のANN予測結果 (Rトンネル)



(a) (case1)入力層 :  $C_p(V_p)$

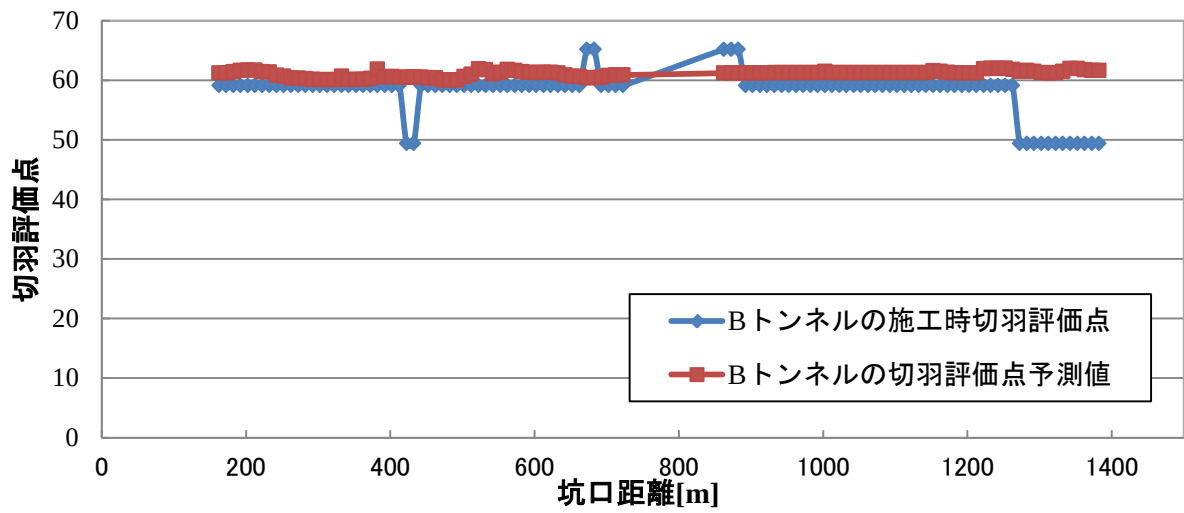


(b) (case2)入力層 :  $C_p(\rho)$

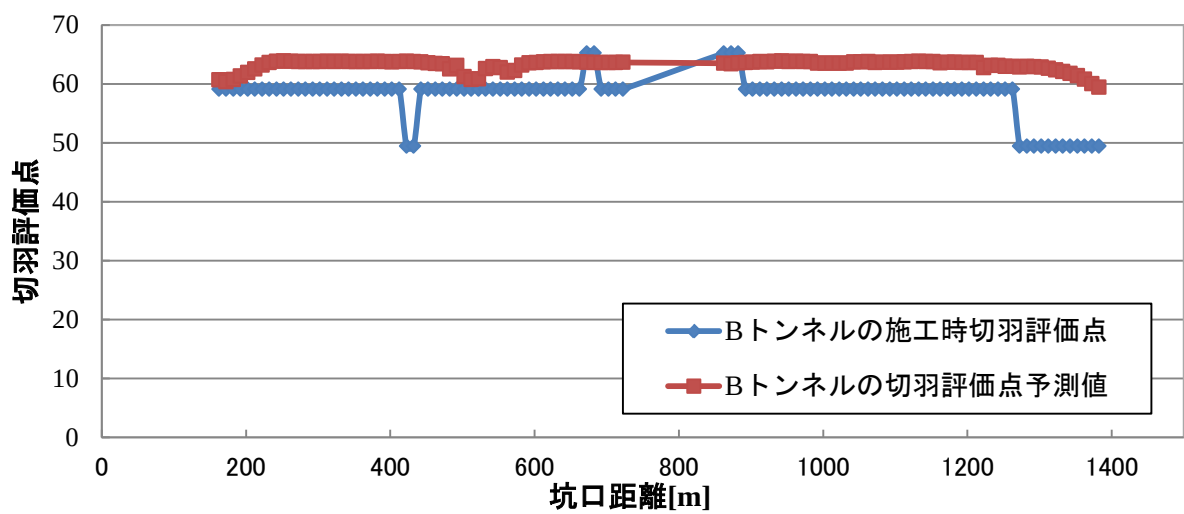


(c) (case3)入力層 :  $C_p(V_p), C_p(\rho)$

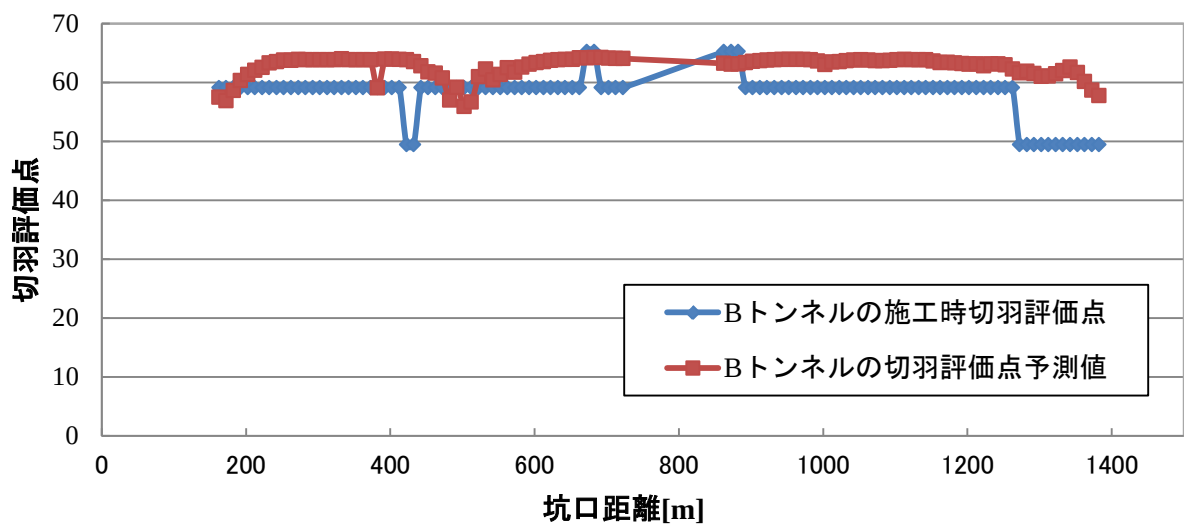
図3.25 入力層にコア評価点を用いた場合のANN予測結果 (Bトンネル)



(a) (case4)入力層 :  $V_p$



(b) (case5)入力層 :  $\rho$



(c) (case6)入力層 :  $V_p, \rho$

図3.26 入力層に物性値を用いた場合のANN予測結果 (Bトンネル)



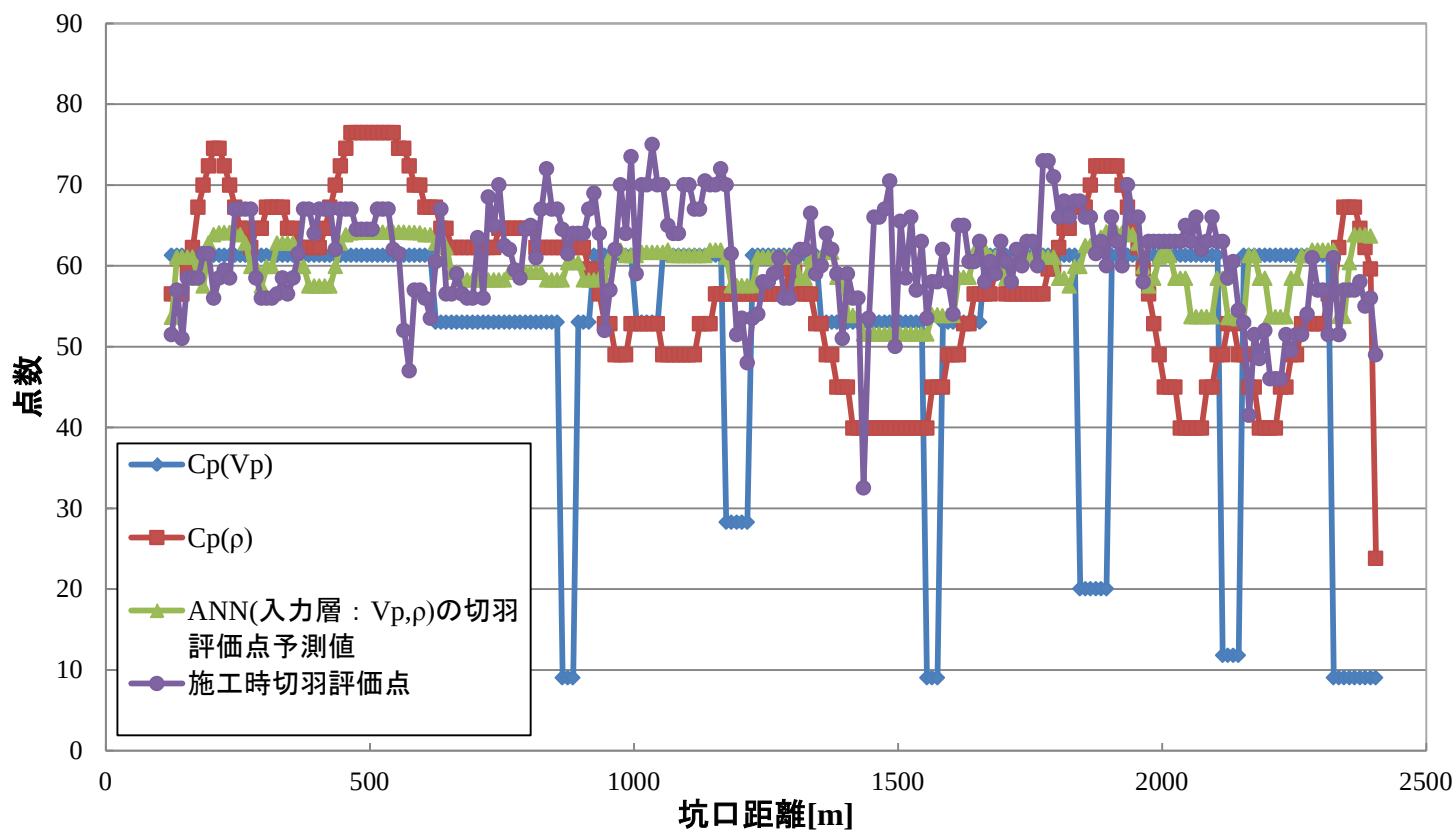


図4.1 各地山評価点数分布（Rトンネル）

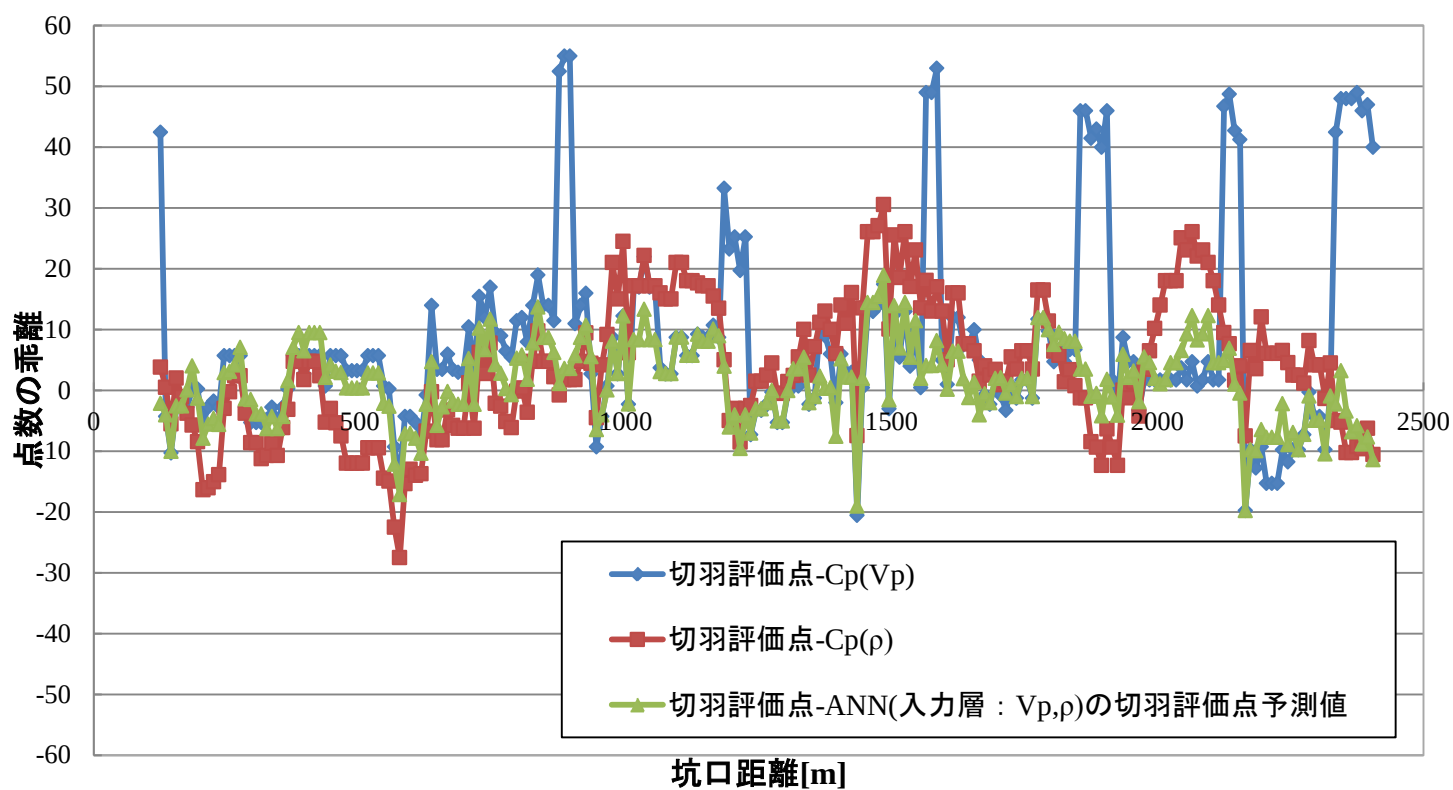


図4.2 各地山評価点数の切羽評価点との乖離（Rトンネル）

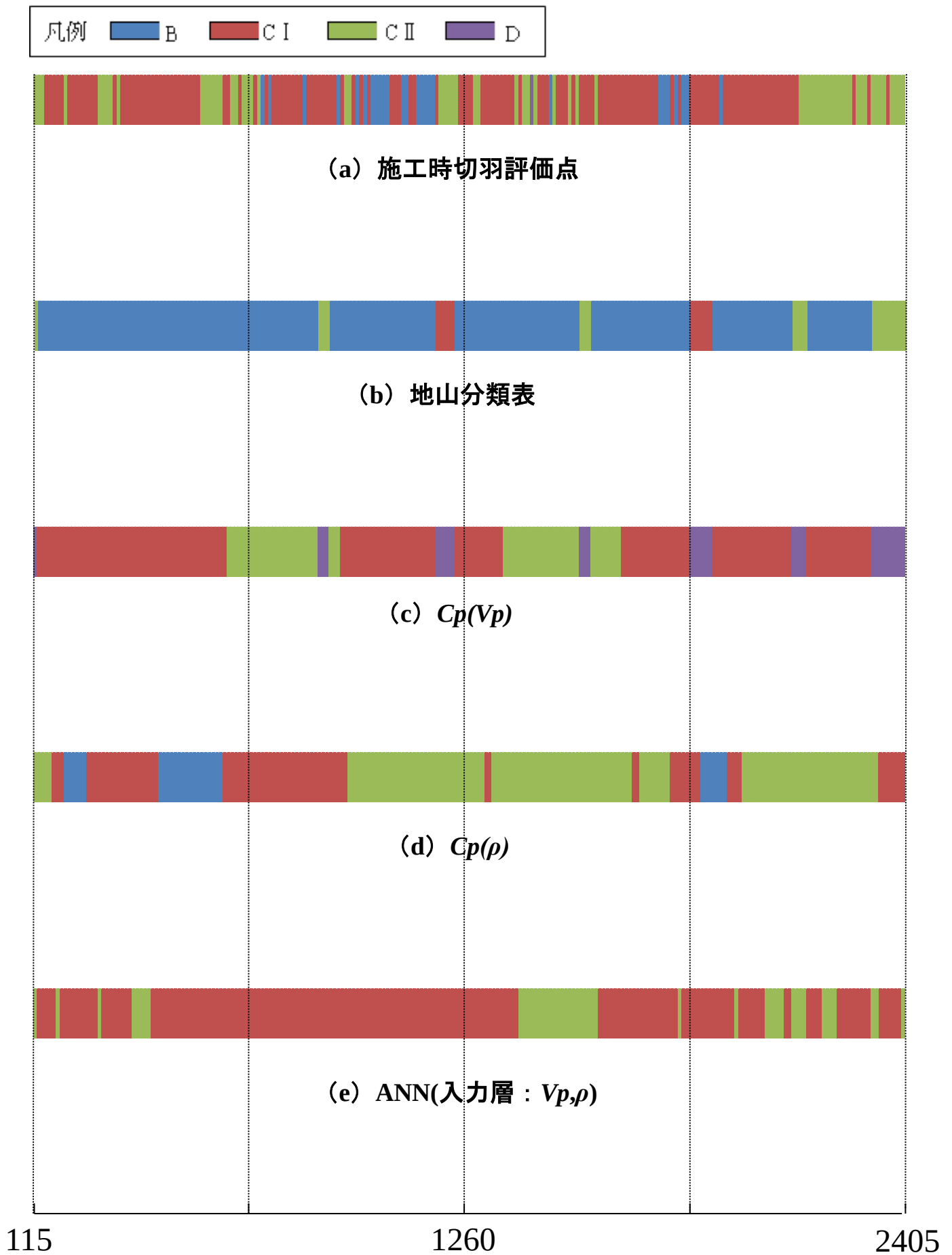
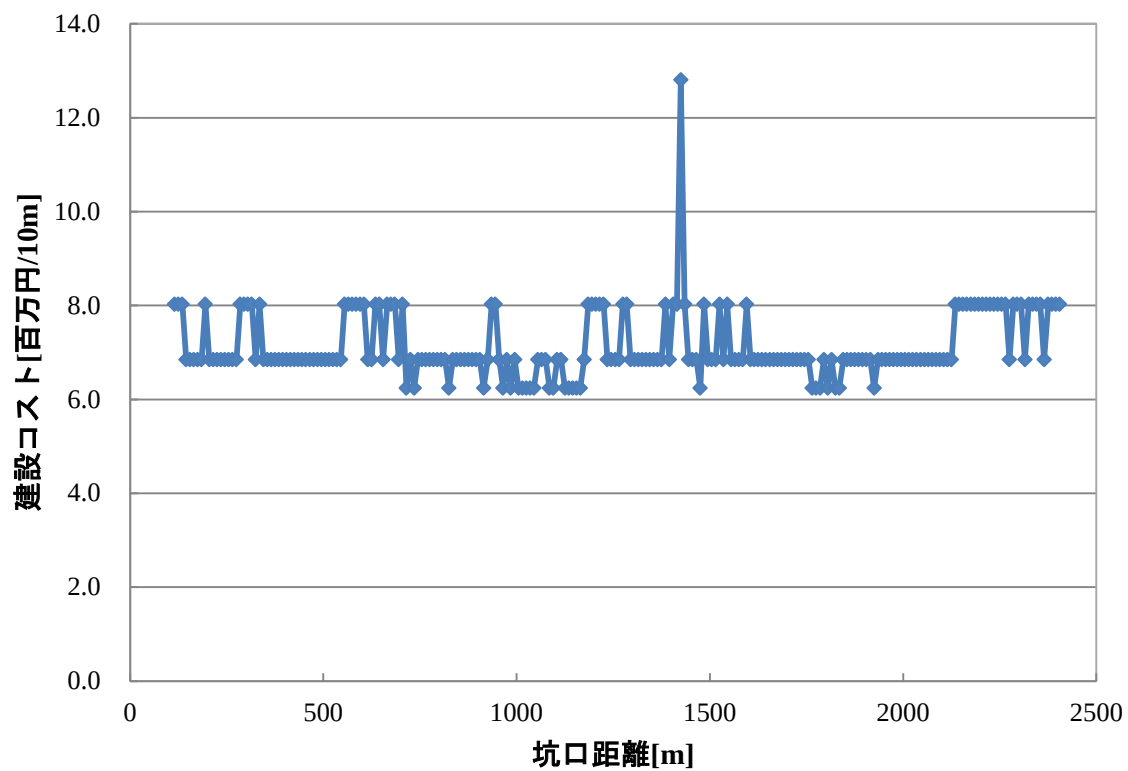
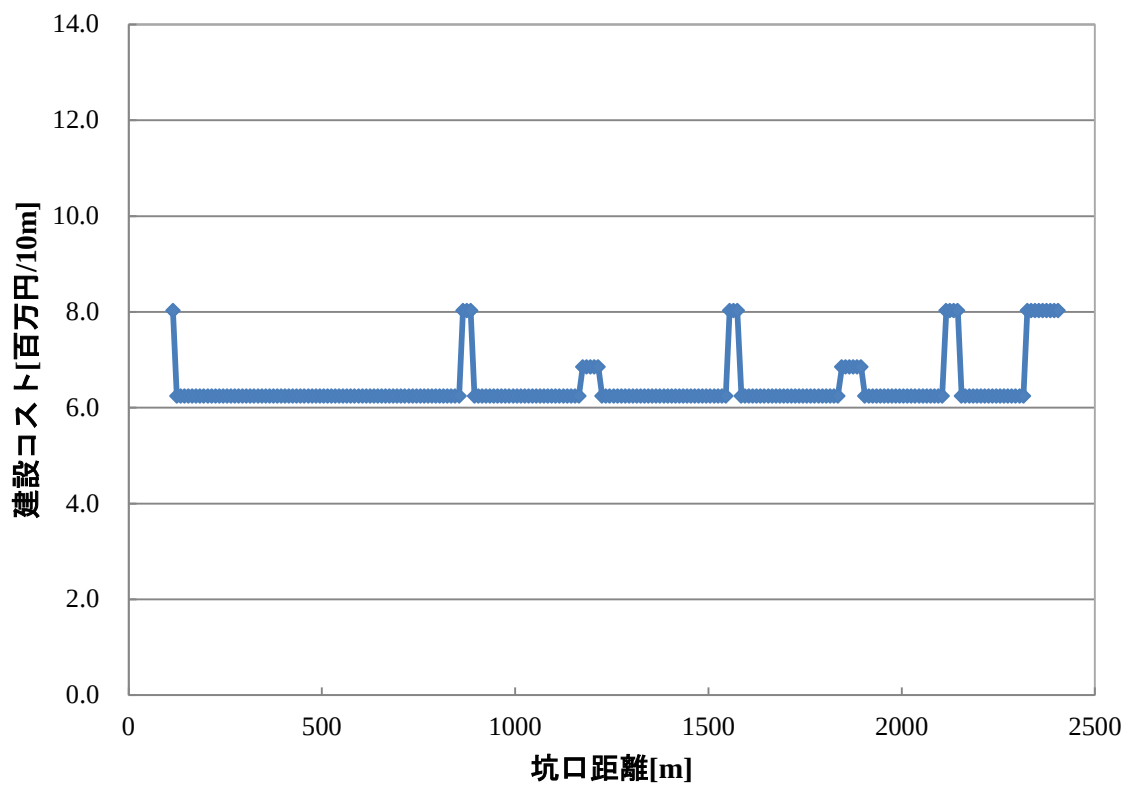


図4.3 各地山評価手法による地山分類結果 (Rトンネル)

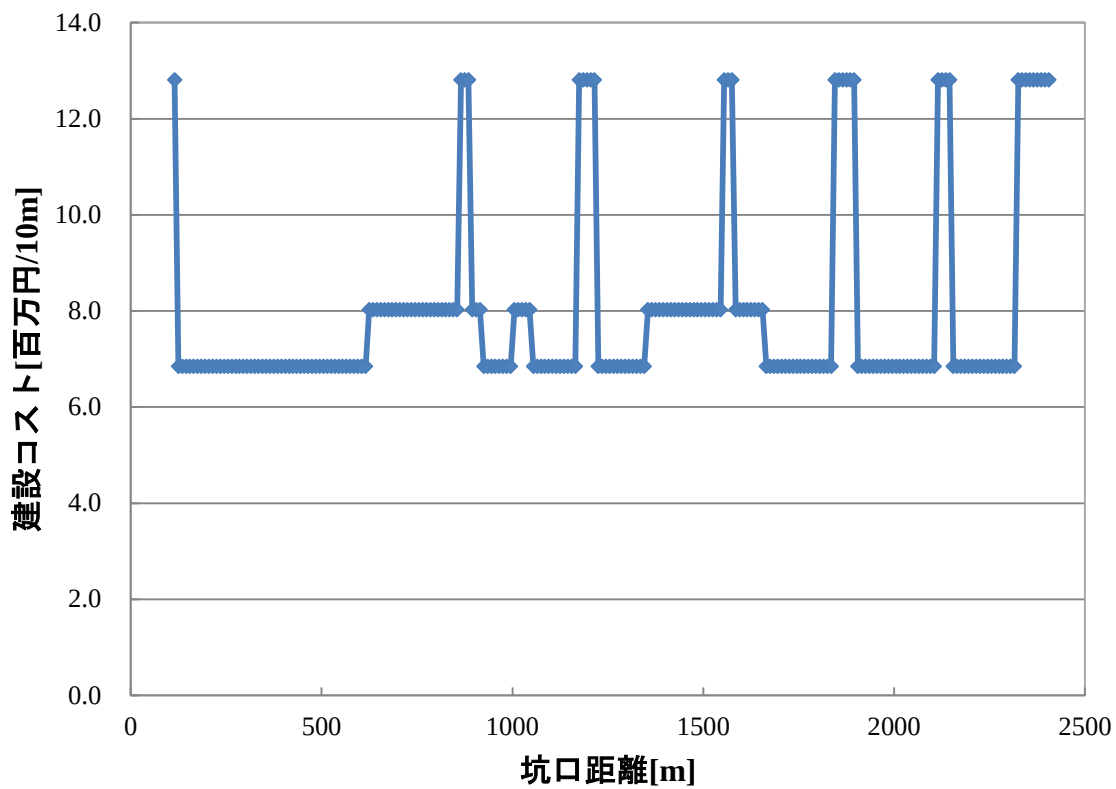


(a) 切羽評価点による建設コスト

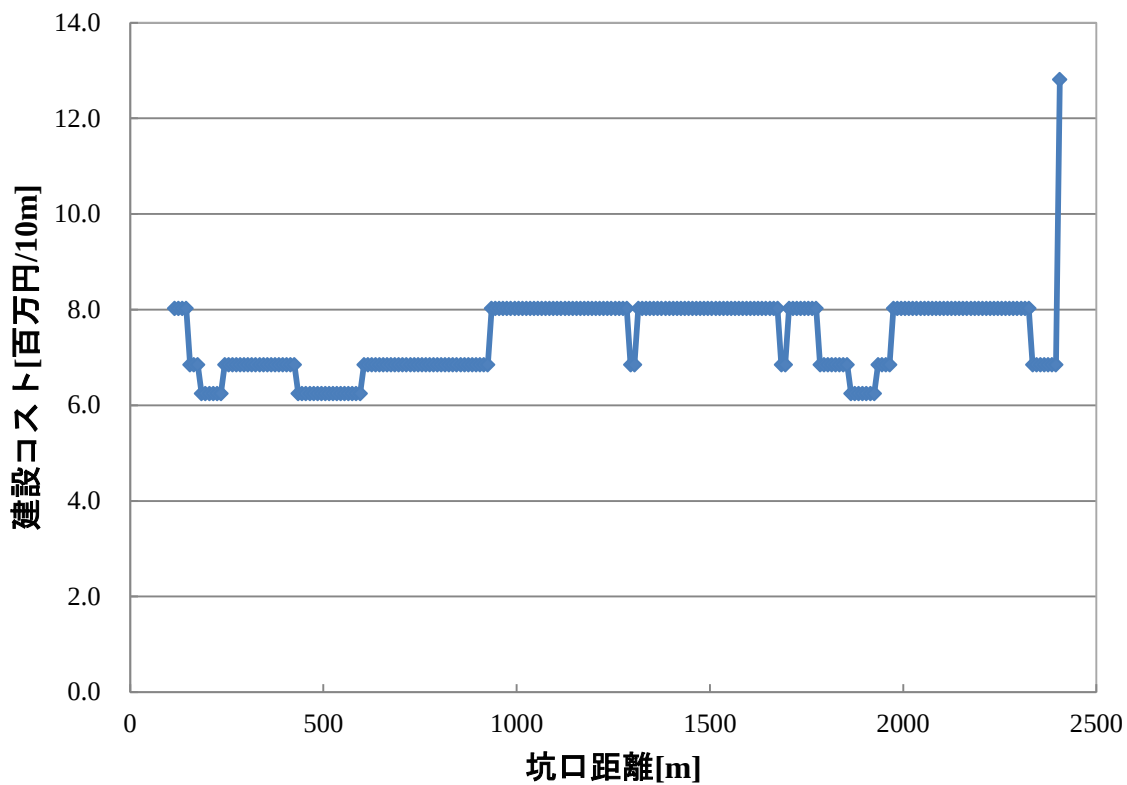


(b) 地山分類表による推定建設コスト

図4.4 各トンネル切羽位置における建設コスト (Rトンネル)

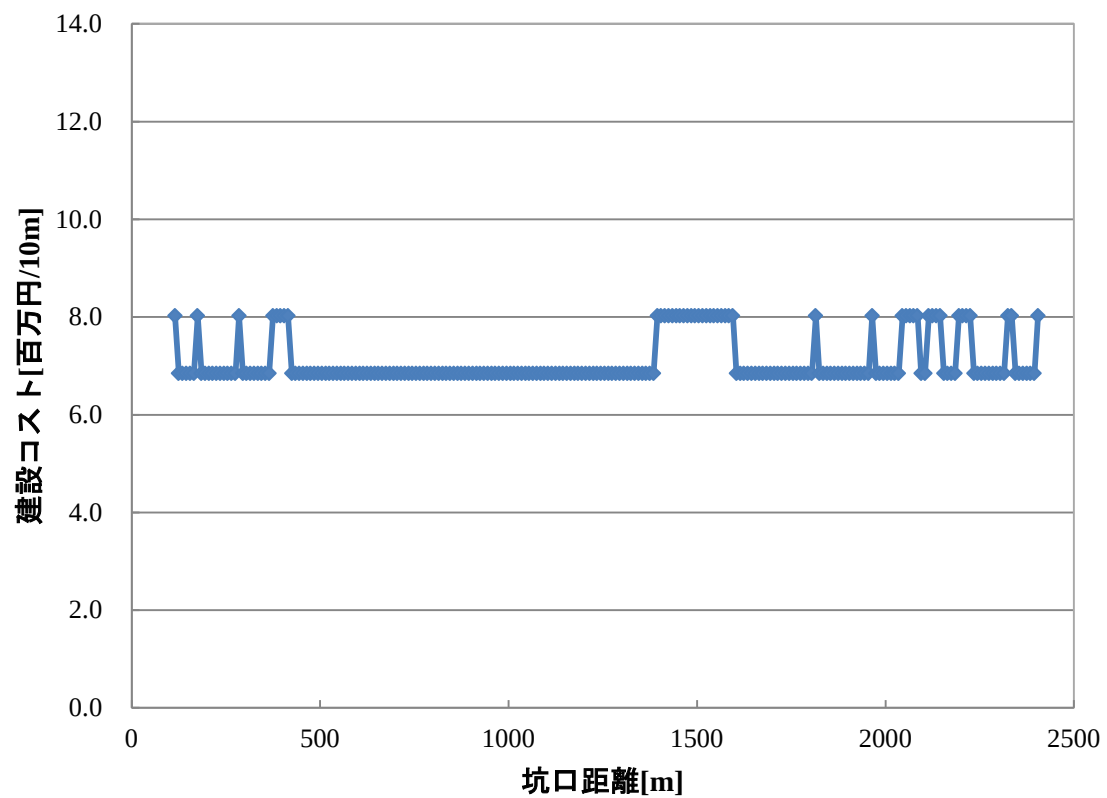


(c)  $C_p(V_p)$ による推定建設コスト



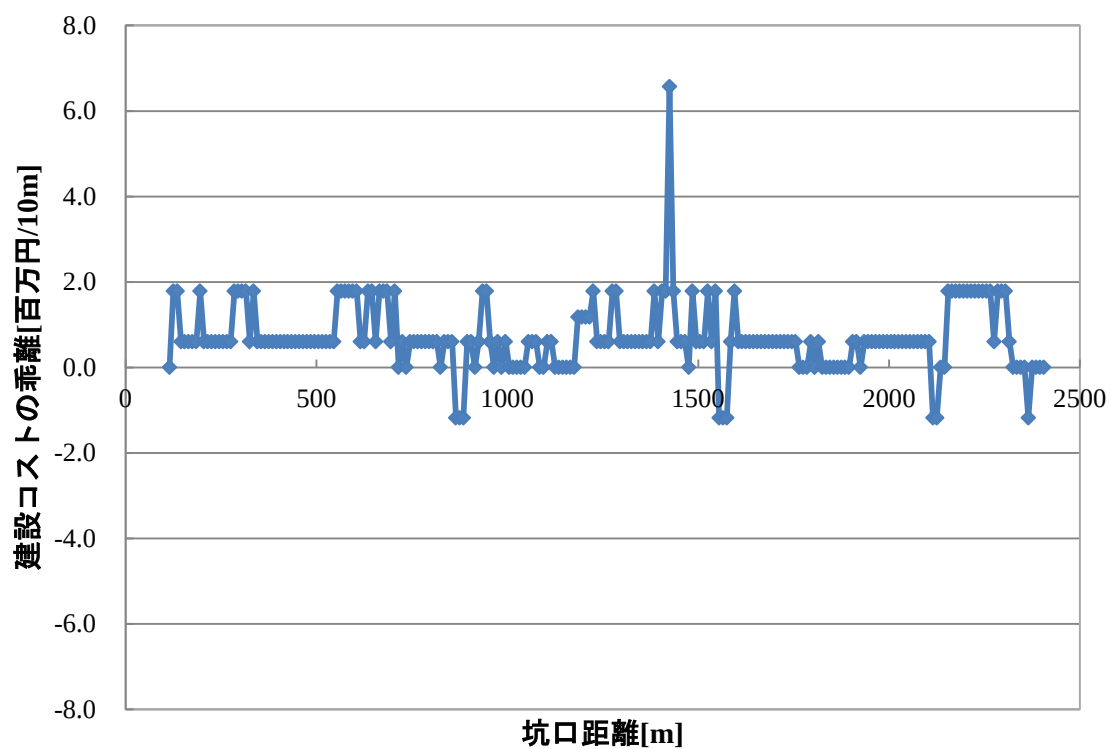
(d)  $C_p(\rho)$ による推定建設コスト

図4.4 各トンネル切羽位置における建設コスト (Rトンネル)

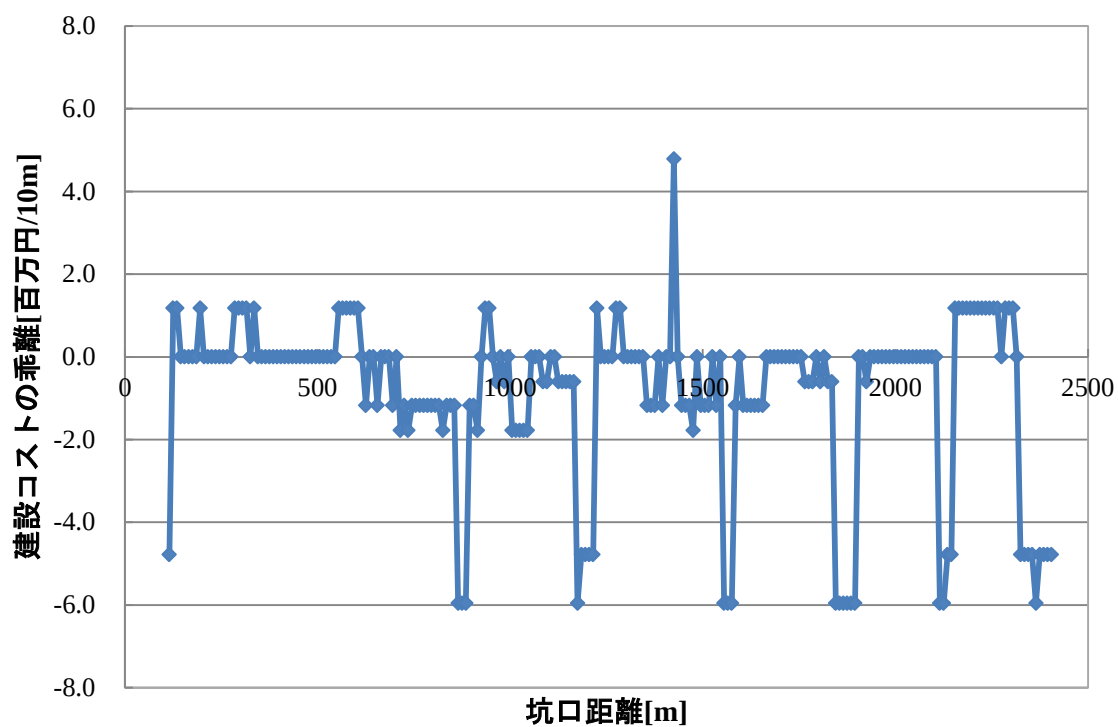


(e) ANN(入力層 :  $V_p$ ,  $\rho$ )による推定建設コスト

図4.4 各トンネル切羽位置における建設コスト (Rトンネル)

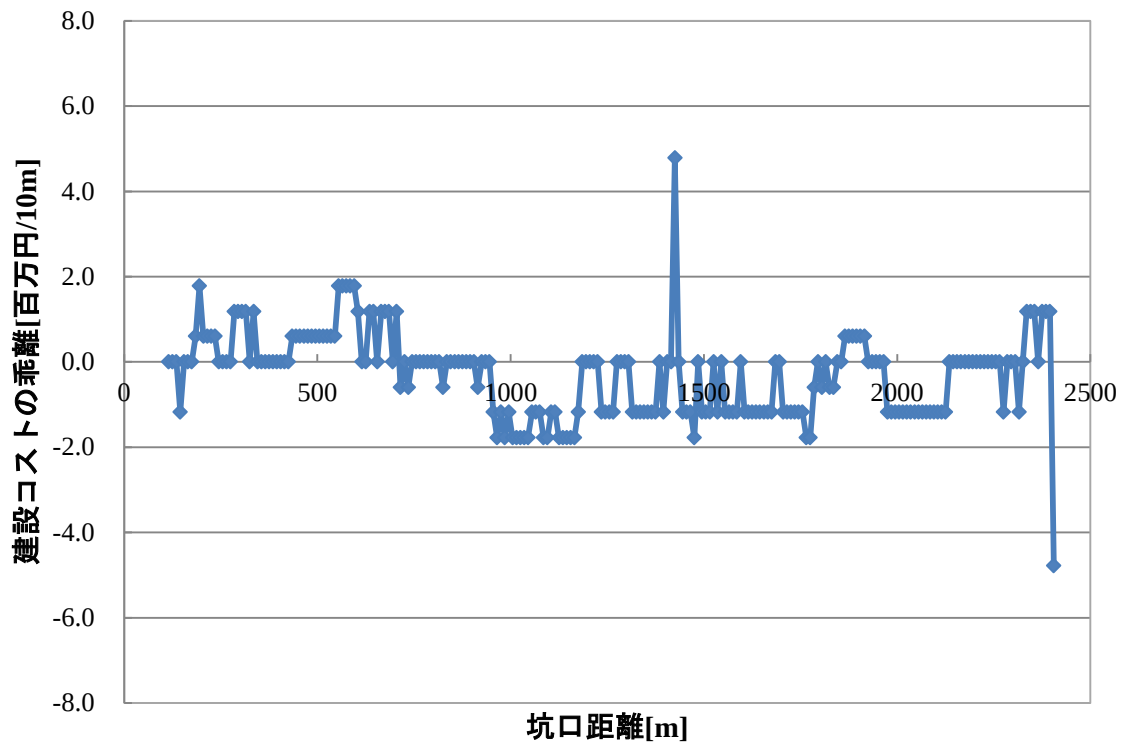


(a) 切羽評価点による建設コストー地山分類表による推定建設コスト

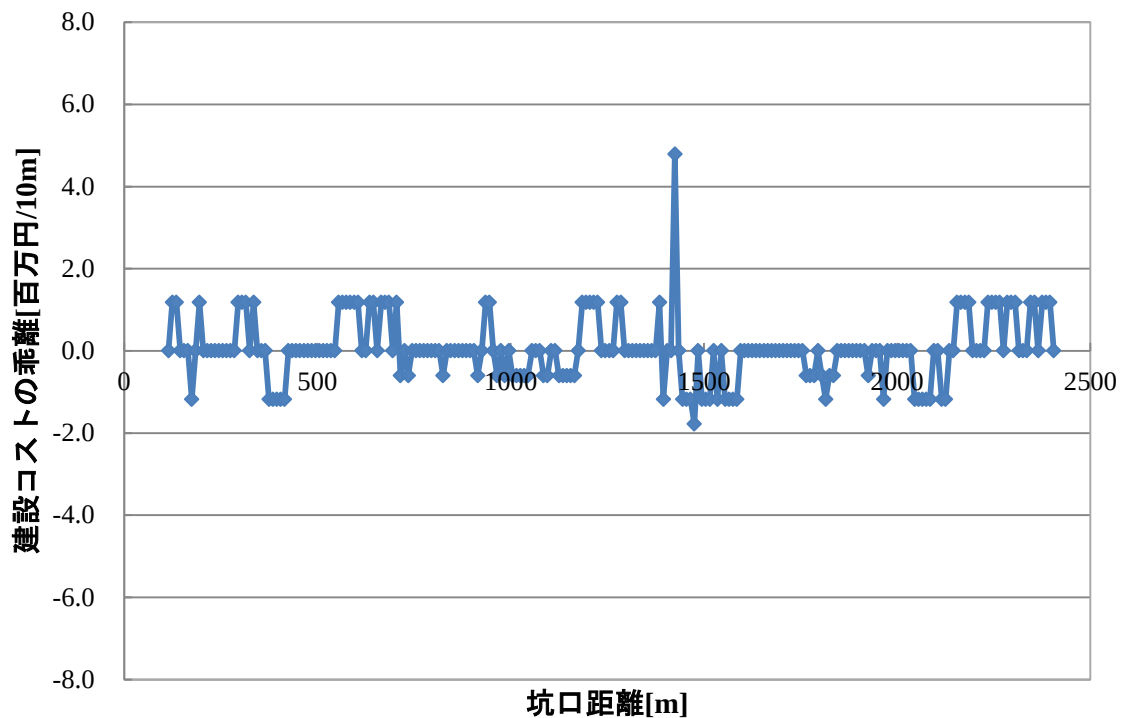


(b) 切羽評価点による建設コストー $C_p(V_p)$ による推定建設コスト

図4.5 各トンネル切羽位置における推定建設コストと切羽評価点による建設コストの乖離（Rトンネル）



(c) 切羽評価点による建設コスト- $C_p(\rho)$ による推定建設コスト



(d) 切羽評価点による建設コスト-ANN(入力層： $V_p$ ,  $\rho$ )による推定建設コスト

図4.5 各トンネル切羽位置における推定建設コストと切羽評価点による建設コストの乖離（Rトンネル）

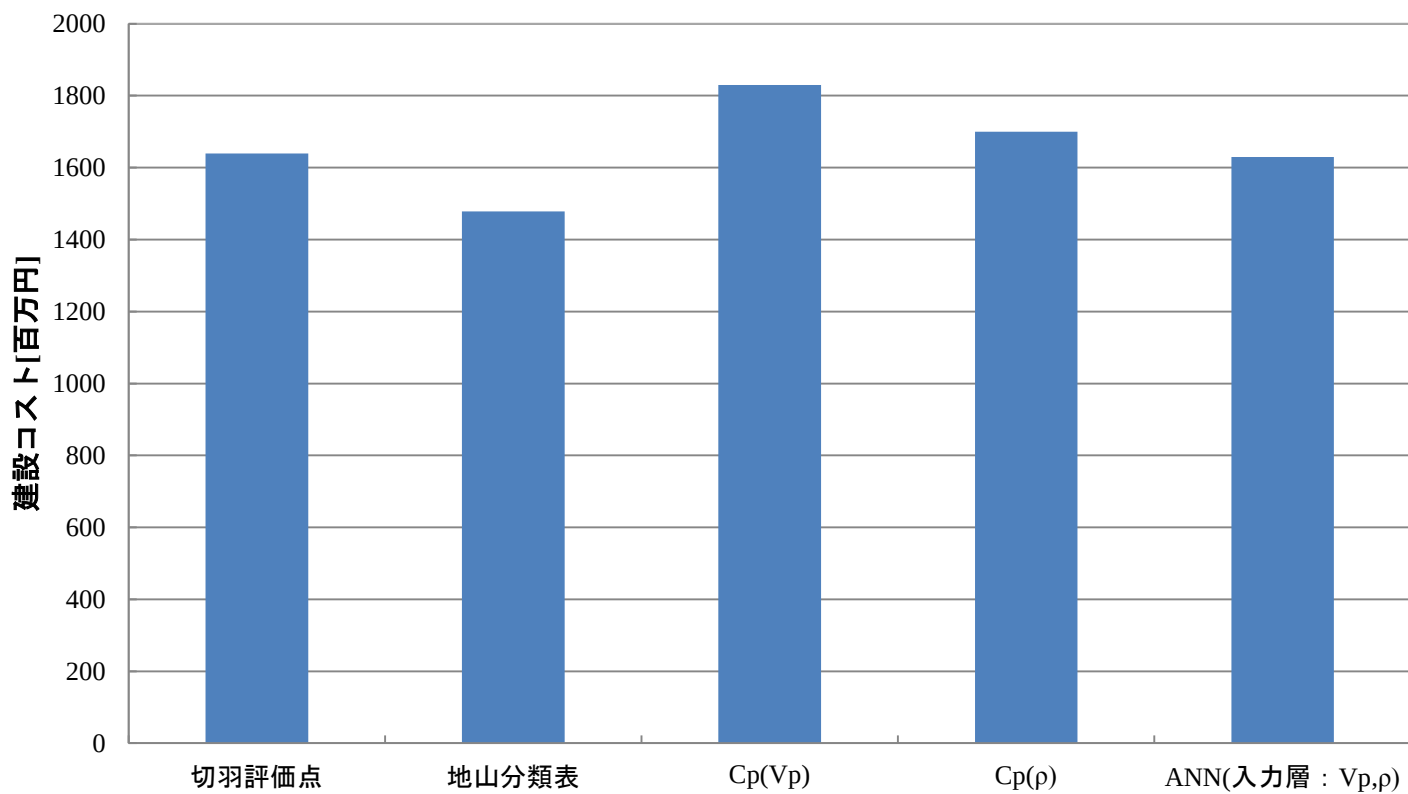


図4.6 各地山評価手法によるトンネル総延長の建設コスト(Rトンネル)

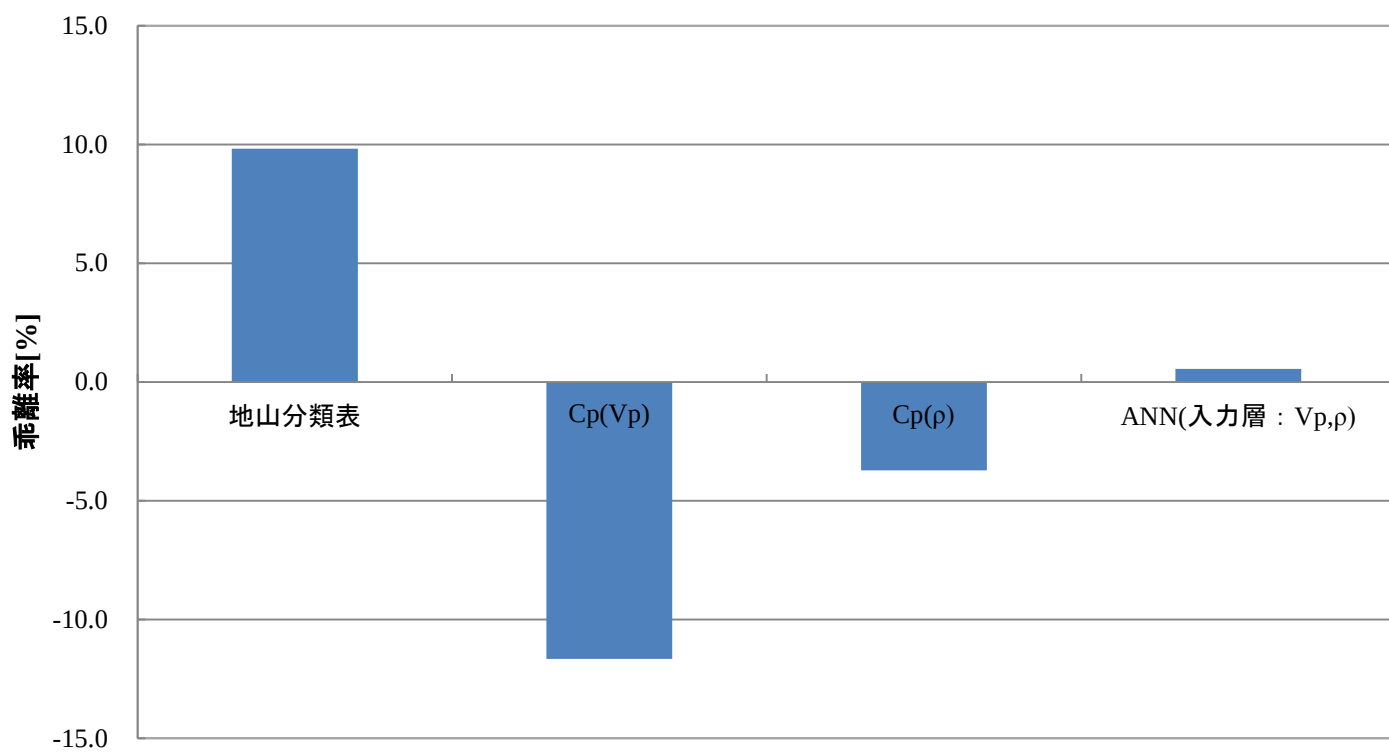


図4.7 各地山評価手法による乖離率 (Rトンネル)



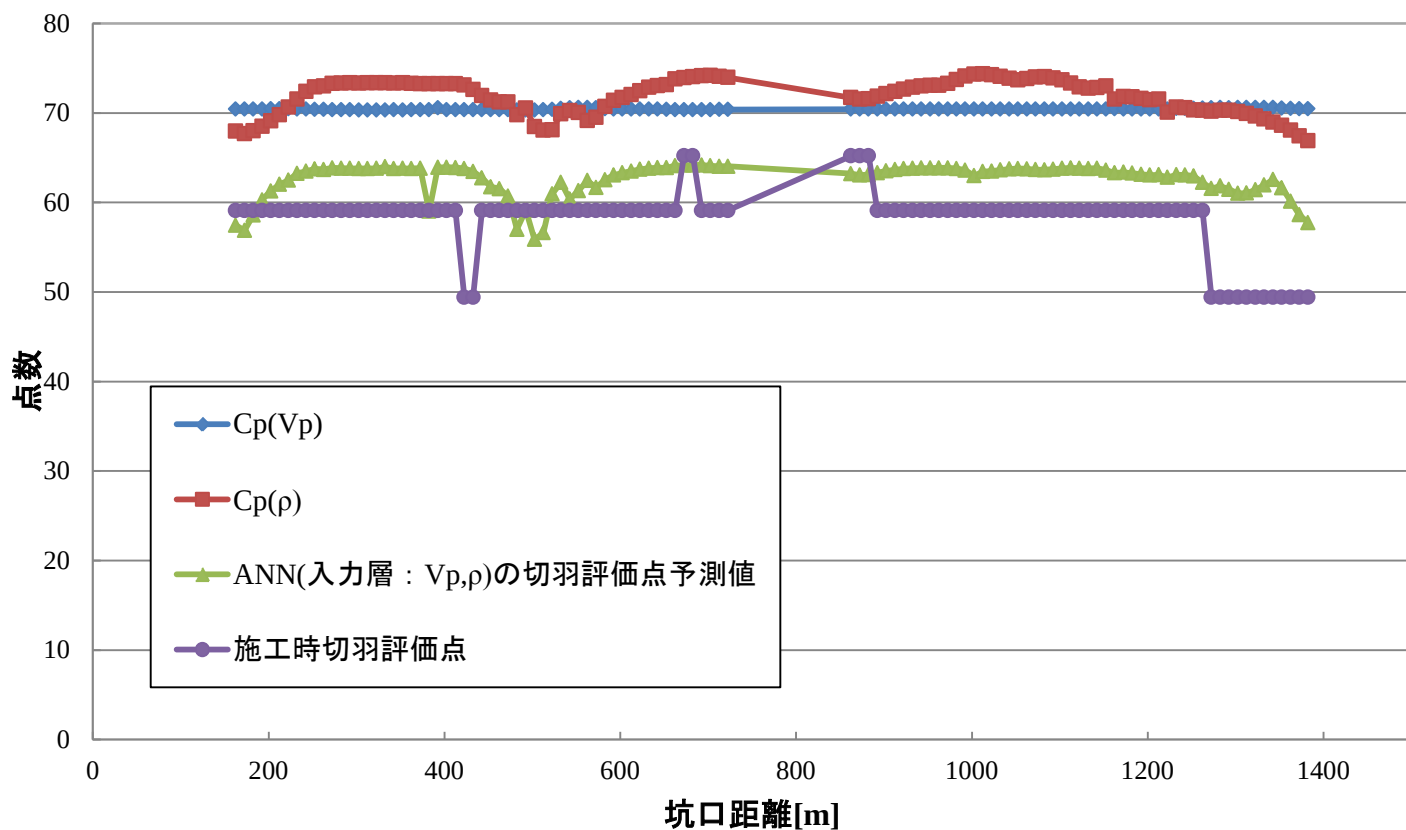


図4.8 各地山評価点数分布 (Bトンネル)

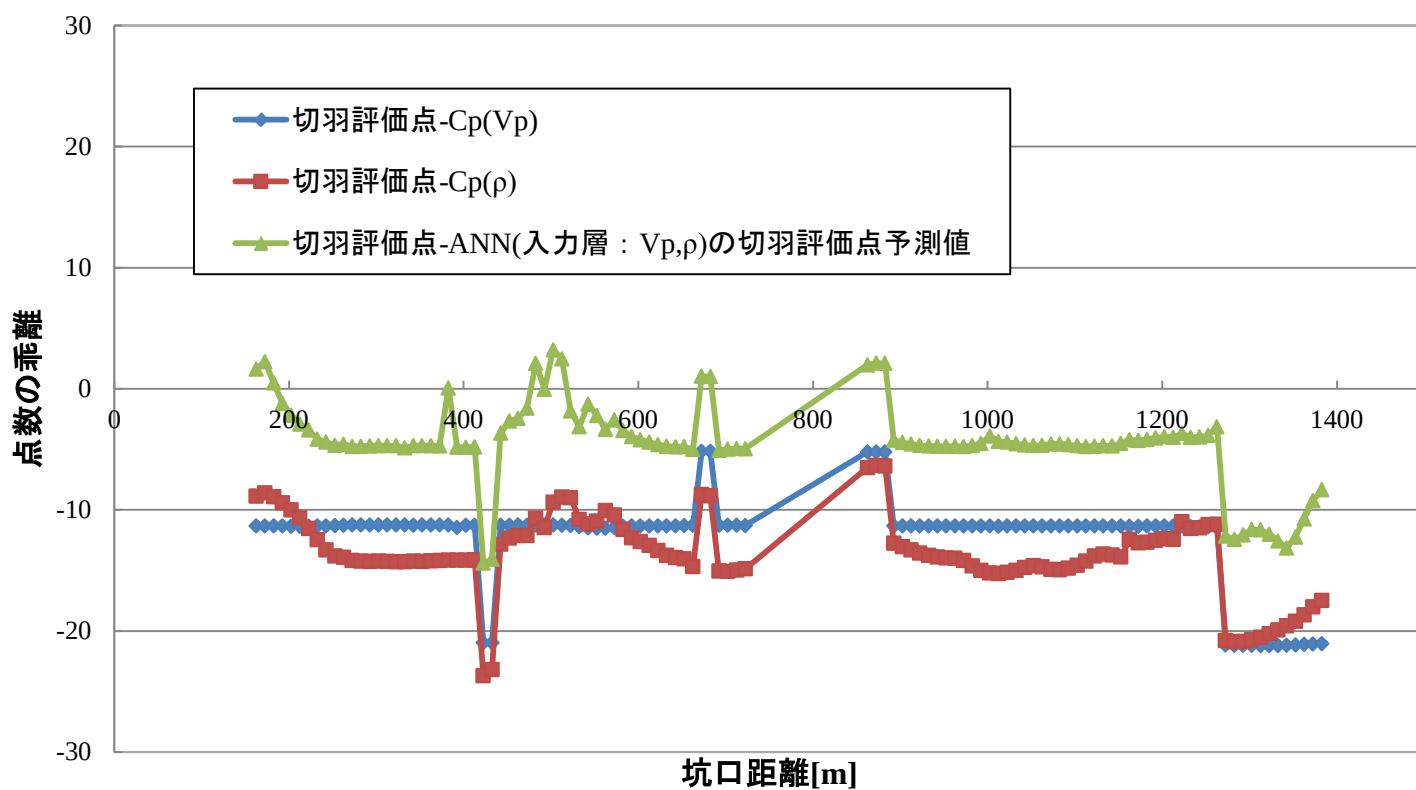


図4.9 各地山評価点数の切羽評価点との乖離 (Bトンネル)

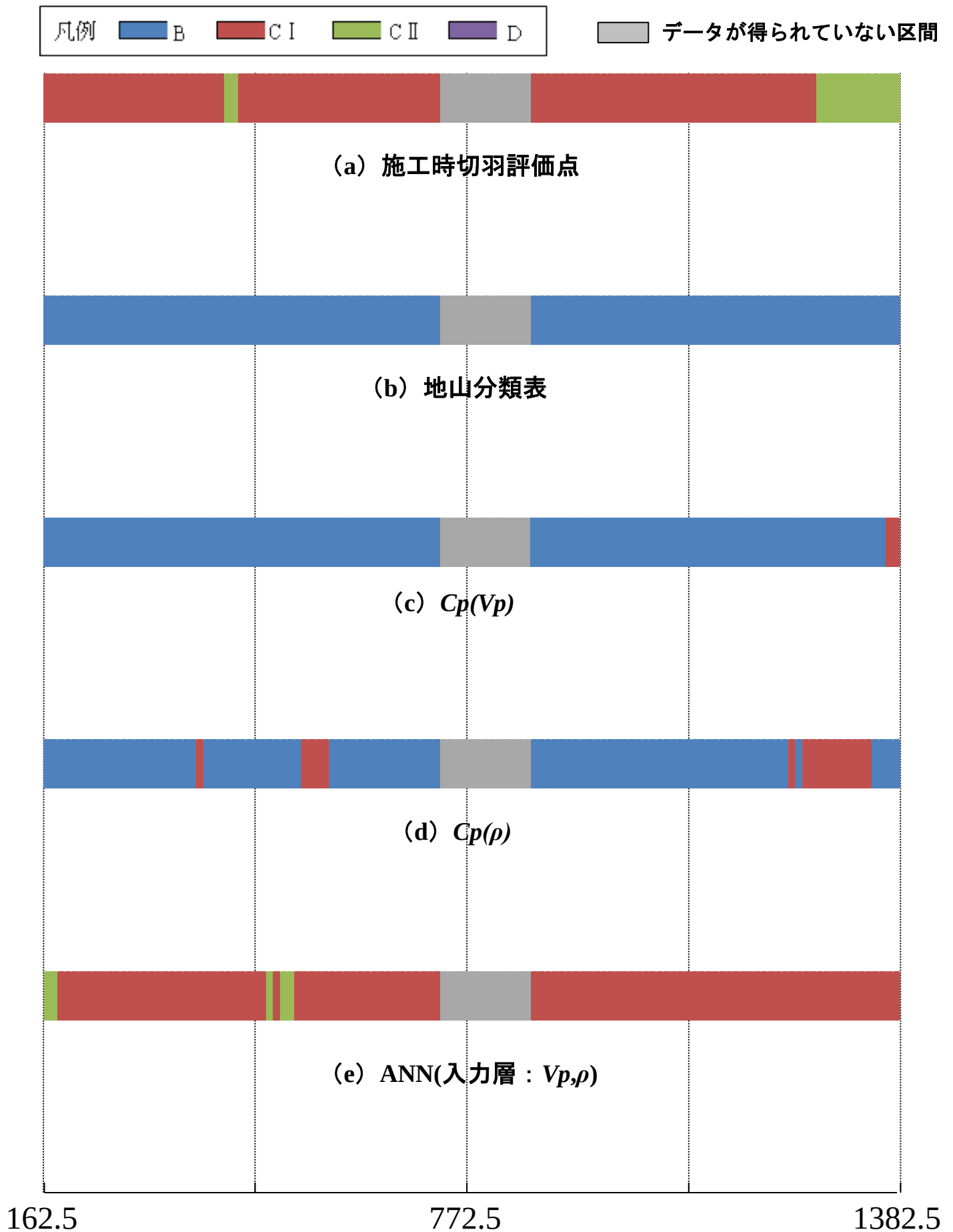
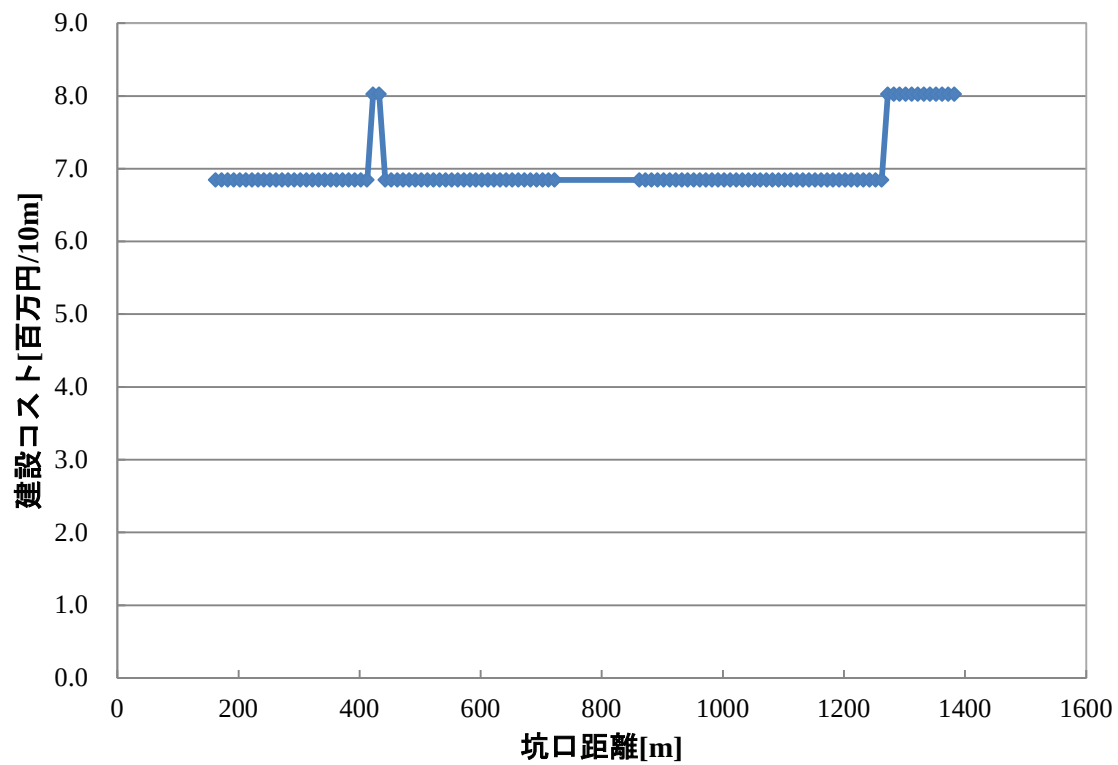
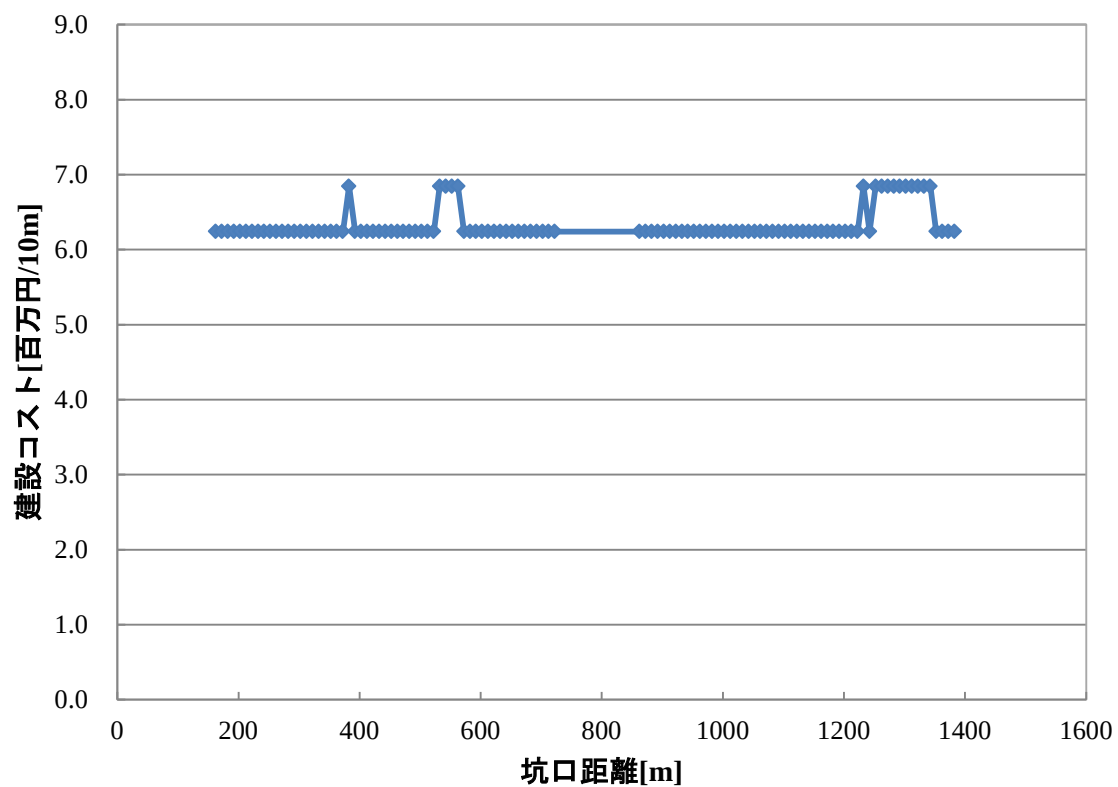


図4.10 各地山評価手法による地山分類結果 (Bトンネル)

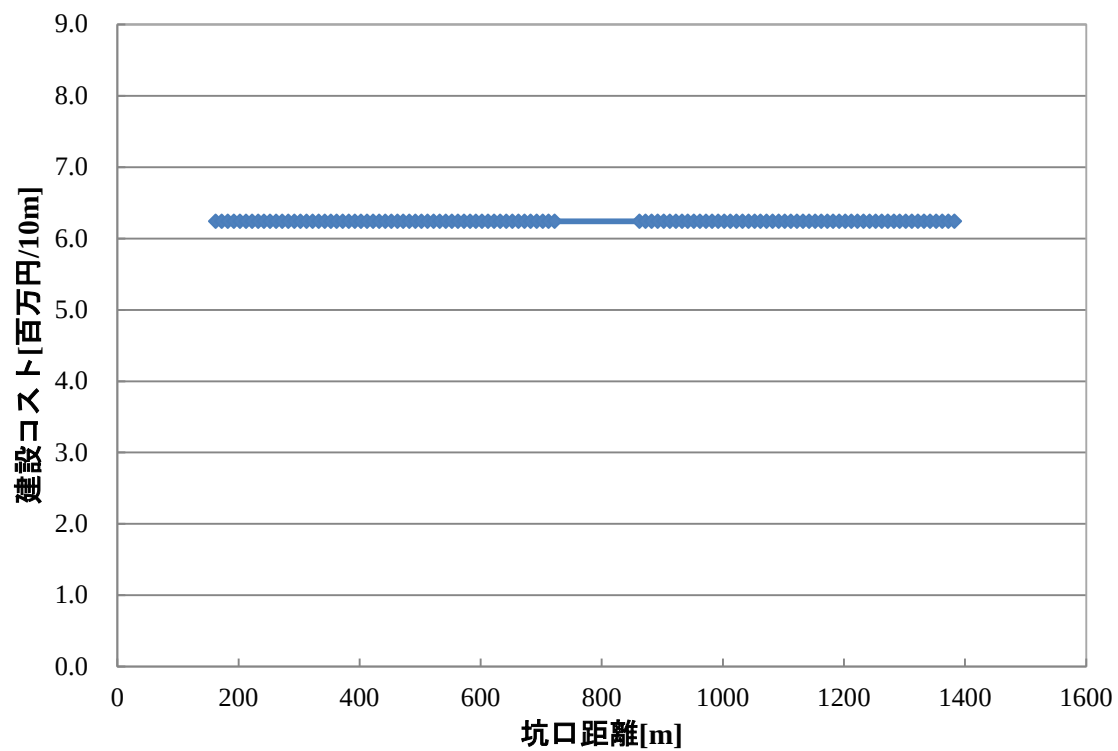


(a) 切羽評価点による建設コスト

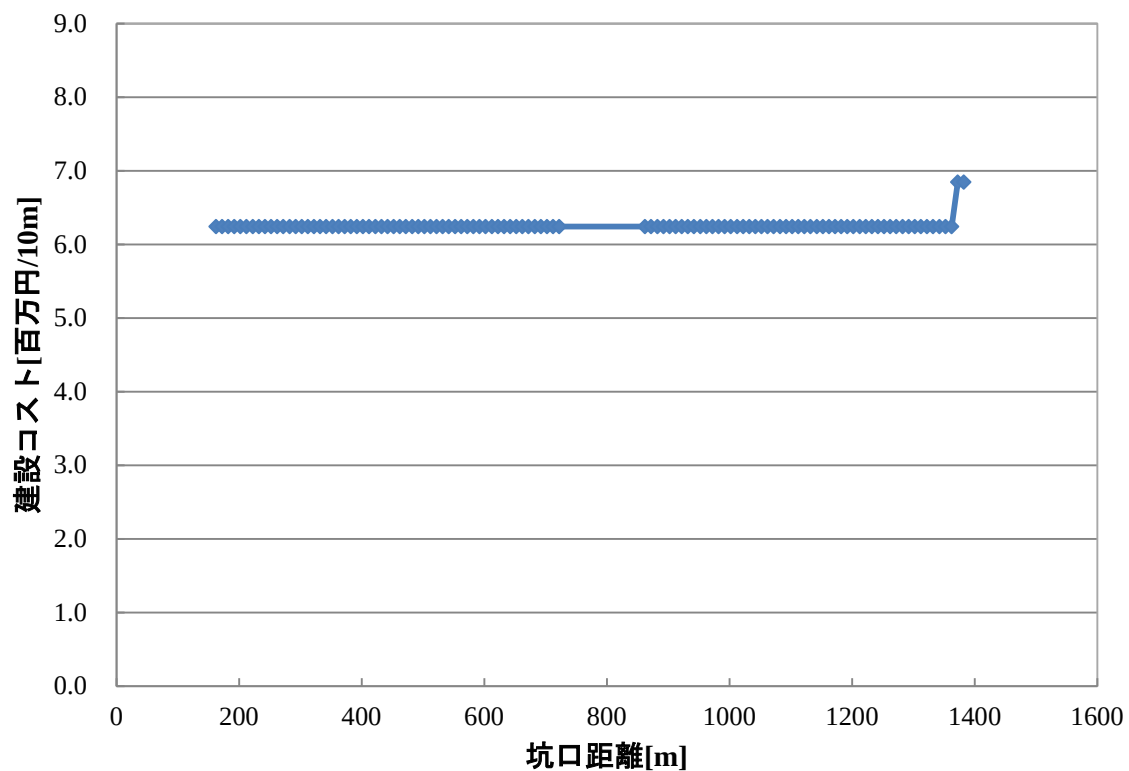


(b) 地山分類表による推定建設コスト

図4.11 各トンネル切羽位置における建設コスト（Bトンネル）

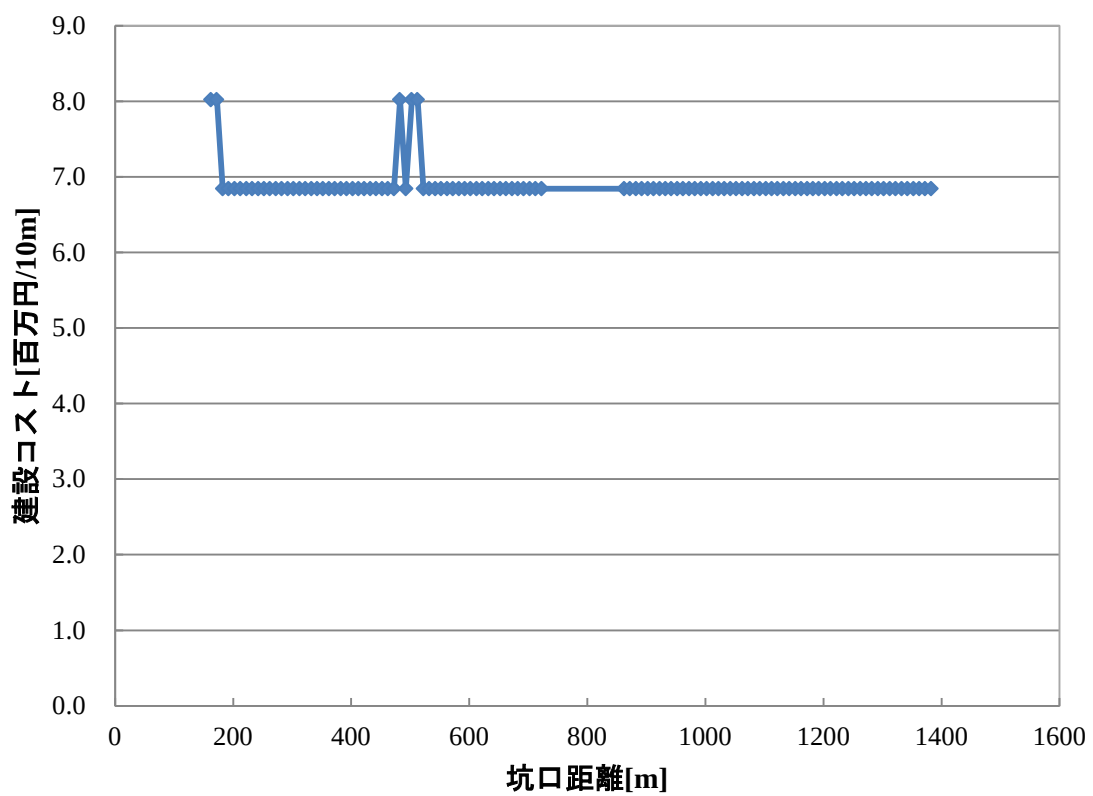


(c)  $C_p(V_p)$ による推定建設コスト



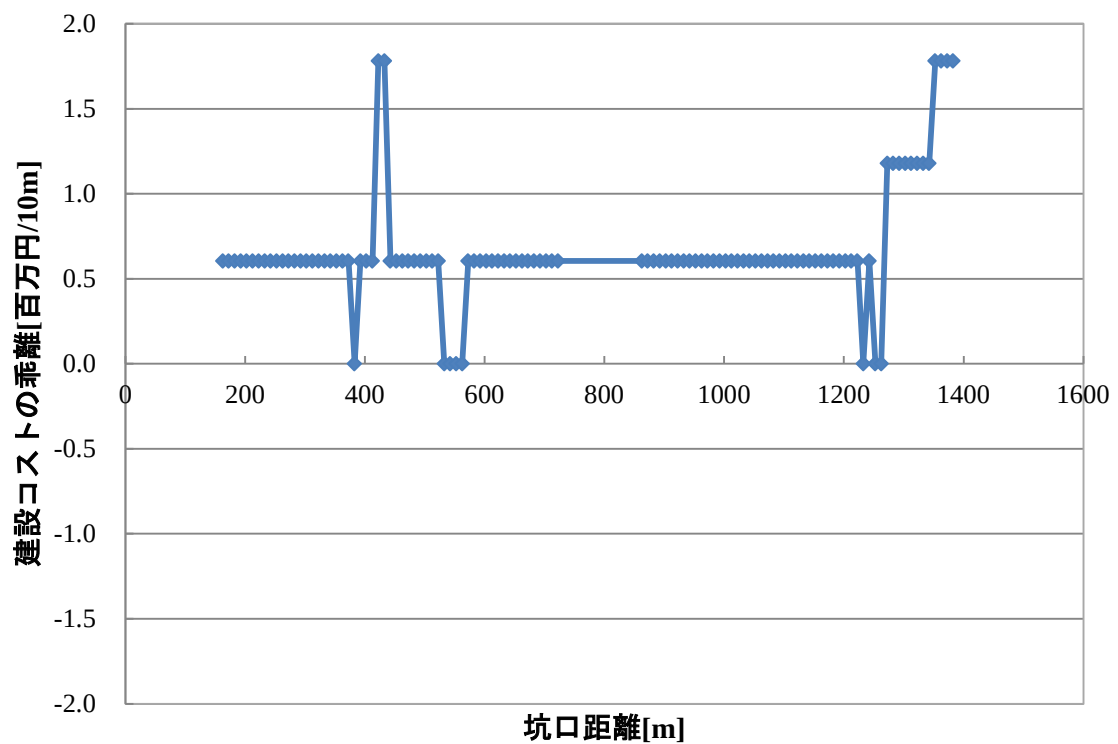
(d)  $C_p(\rho)$ による推定建設コスト

図4.11 各トンネル切羽位置における建設コスト (Bトンネル)

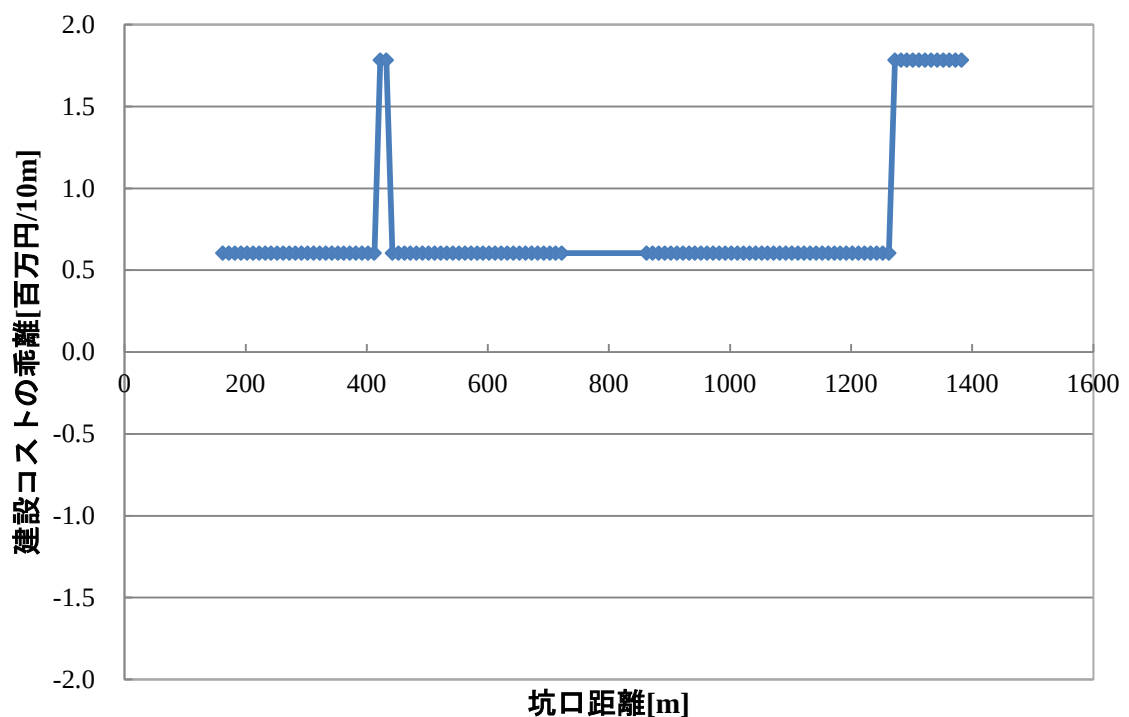


(e) ANN(入力層 :  $V_p$ ,  $\rho$ )による推定建設コスト

図4.11 各トンネル切羽位置における建設コスト (Bトンネル)

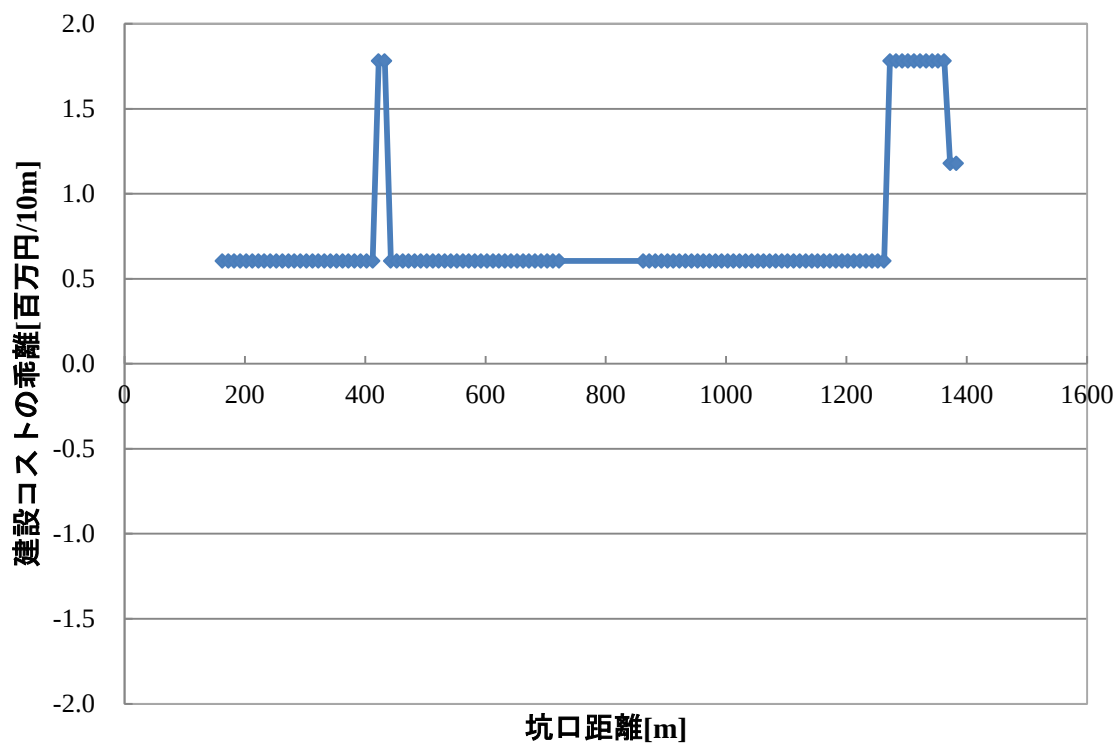


(a) 切羽評価点による建設コストー地山分類表による推定建設コスト

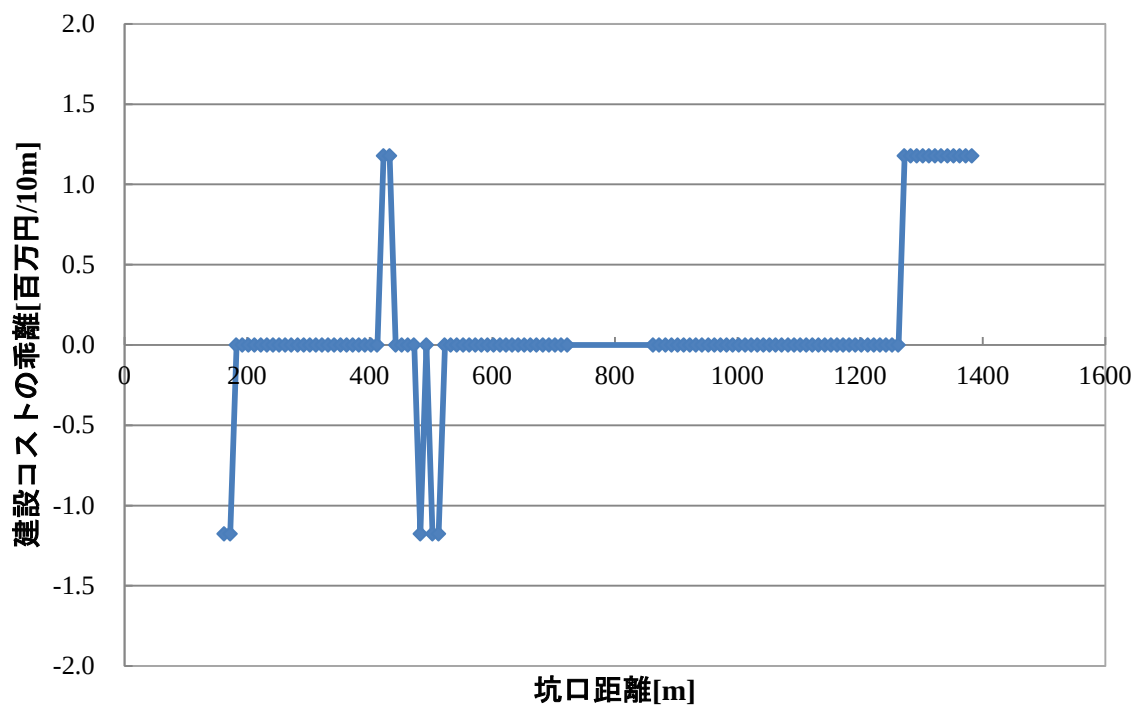


(b) 切羽評価点による建設コストー $C_p(V_p)$ による推定建設コスト

図4.12 各トンネル切羽位置における推定建設コストと切羽評価点による建設コストの乖離（Bトンネル）



(c) 切羽評価点による建設コスト- $C_p(\rho)$ による推定建設コスト



(d) 切羽評価点による建設コスト-ANN(入力層： $V_p$ ,  $\rho$ )による推定建設コスト

図4.12 各トンネル切羽位置における推定建設コストと切羽評価点による建設コストの乖離 (Bトンネル)

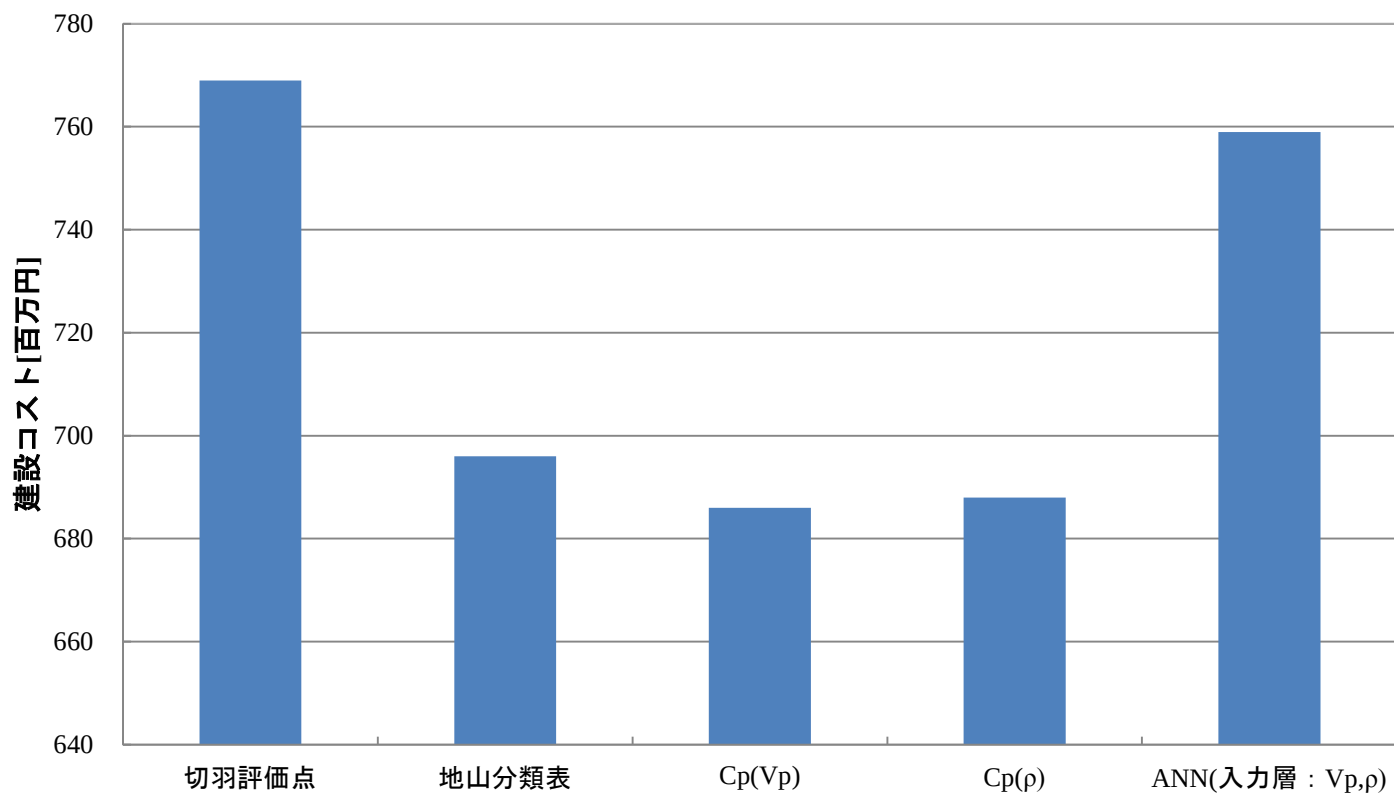


図4.13 各地山評価手法によるトンネル総延長の建設コスト(Bトンネル)

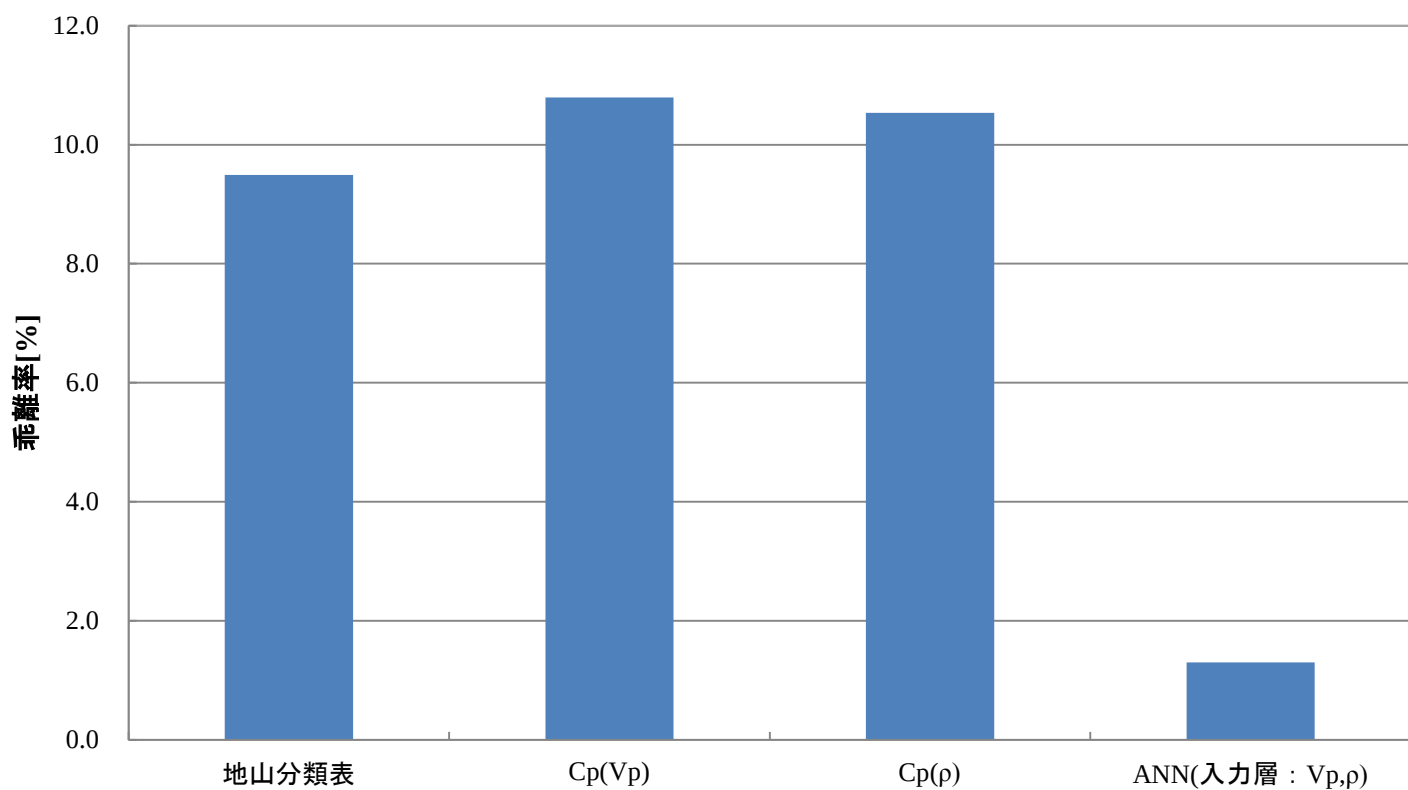


図4.14 各地山評価手法による乖離率 (Bトンネル)



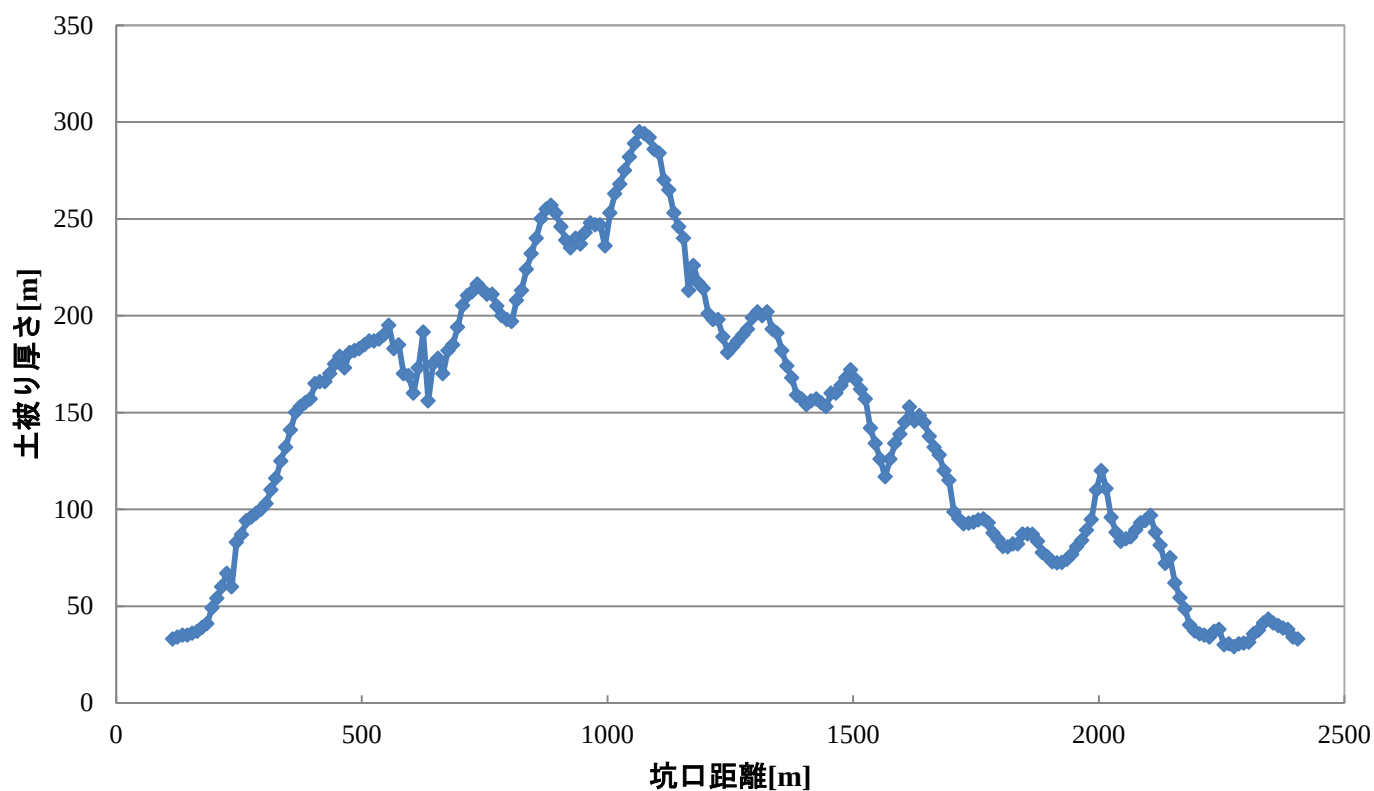


図5.1 土被り厚さ分布（Rトンネル）

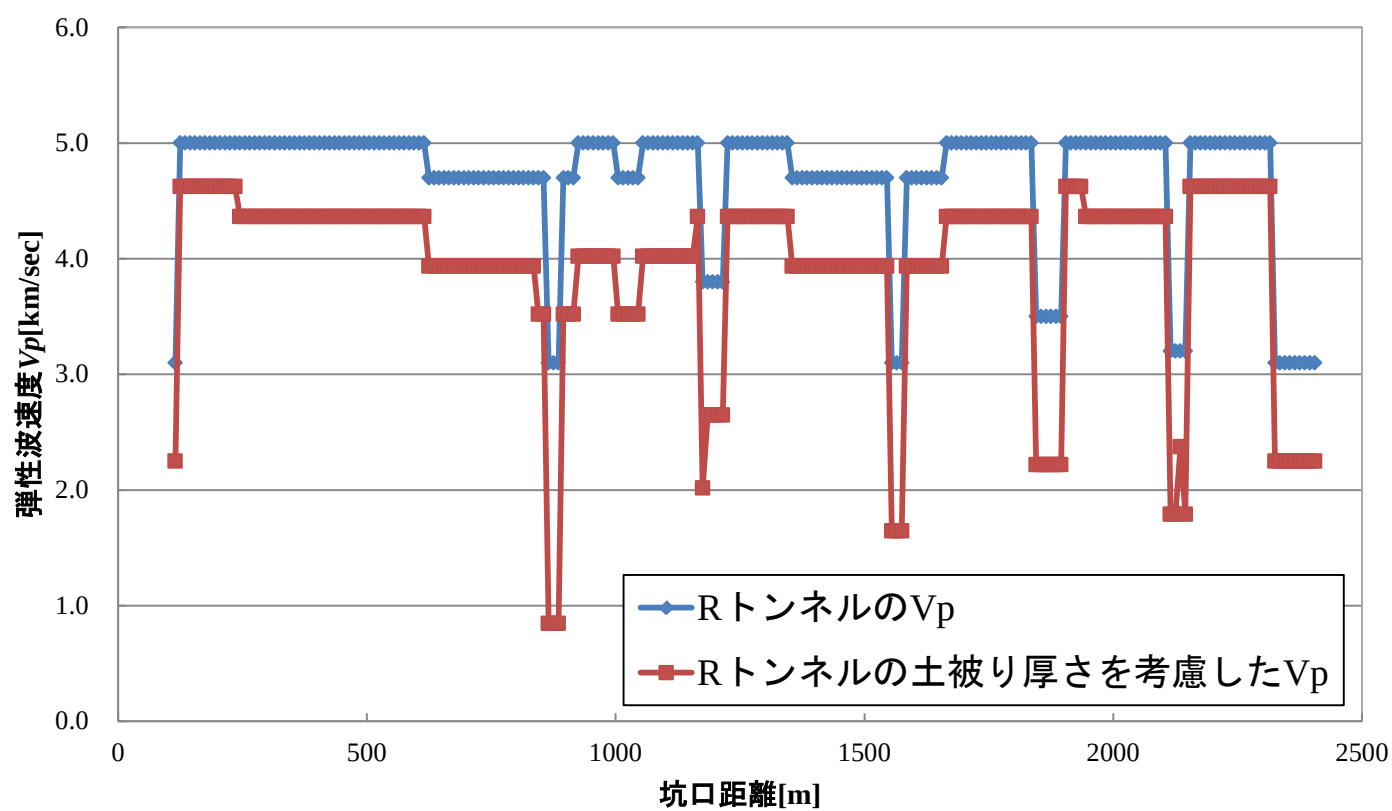


図5.2 土被り厚さを考慮する前の弾性波速度分布と土被り厚さを考慮した弾性波速度分布（Rトンネル）

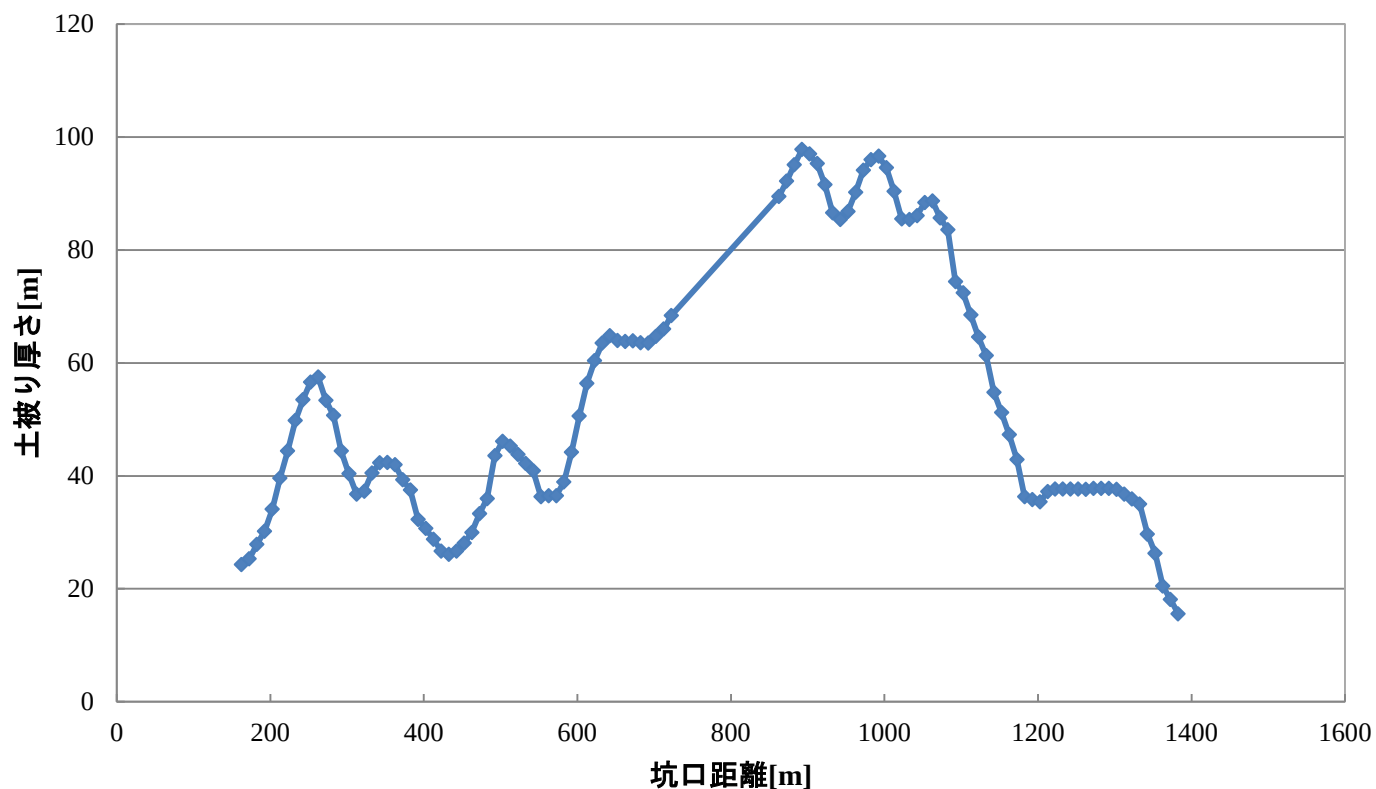


図5.3 土被り厚さ分布（Bトンネル）

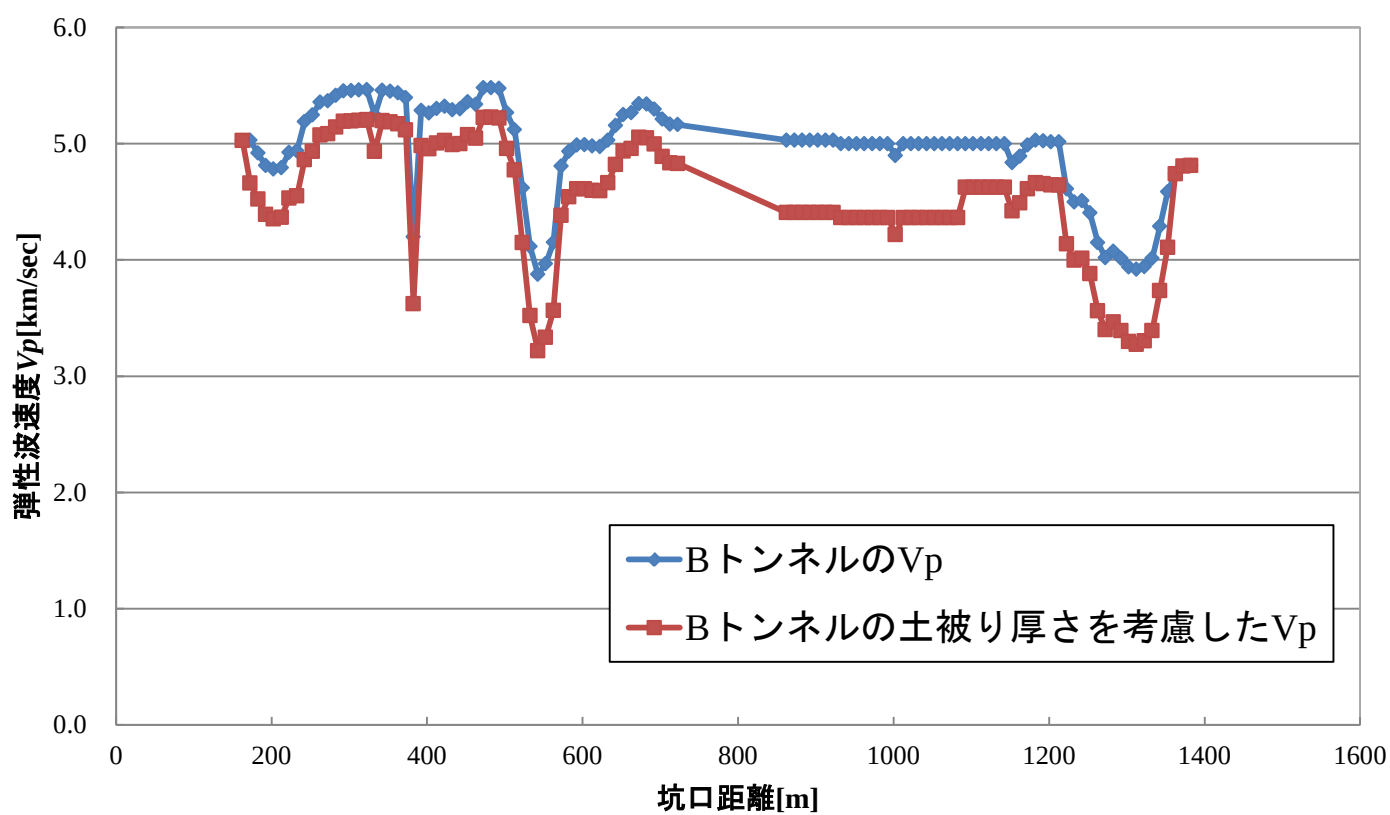


図5.4 土被り厚さを考慮する前の弾性波速度分布と土被り厚さを考慮した弾性波速度分布（Bトンネル）

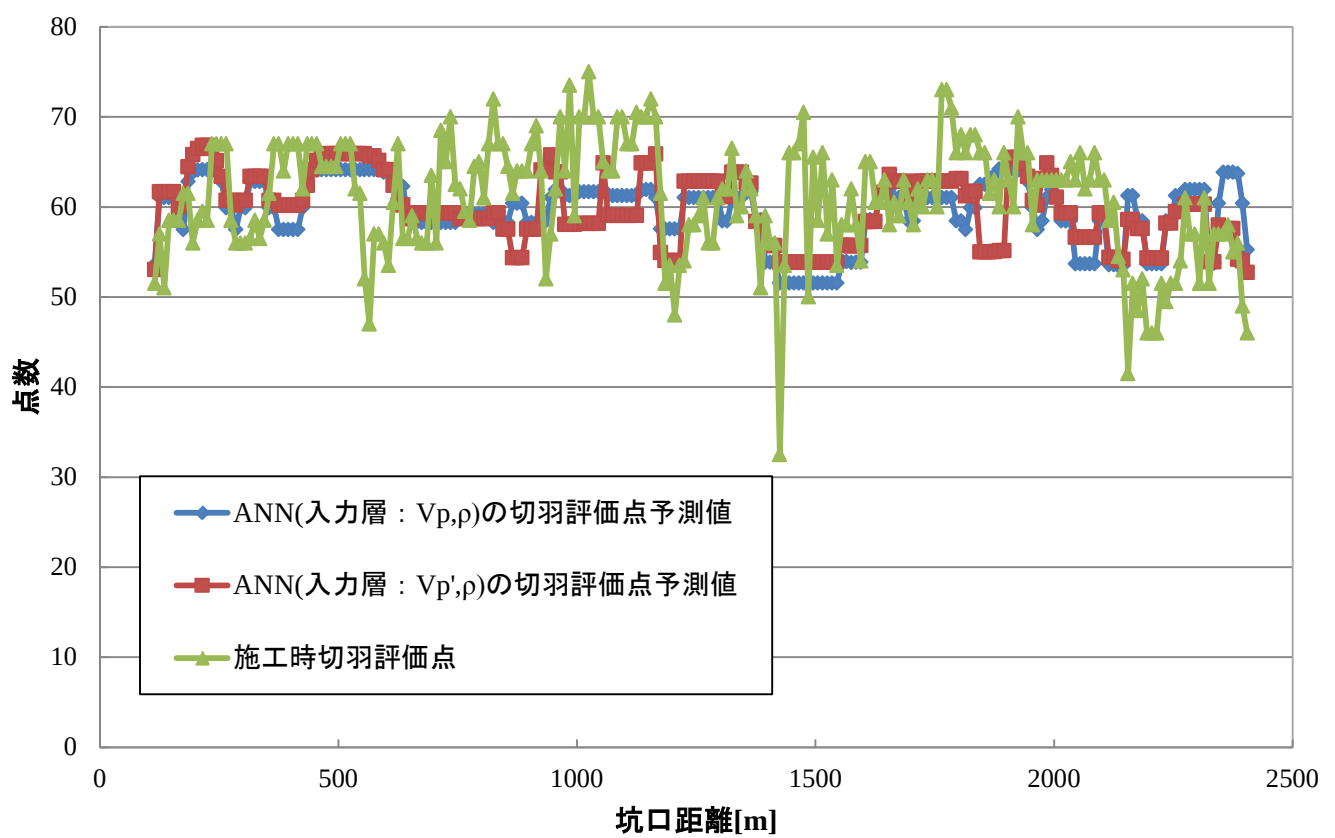


図5.5 各地山評価点数分布（Rトンネル）

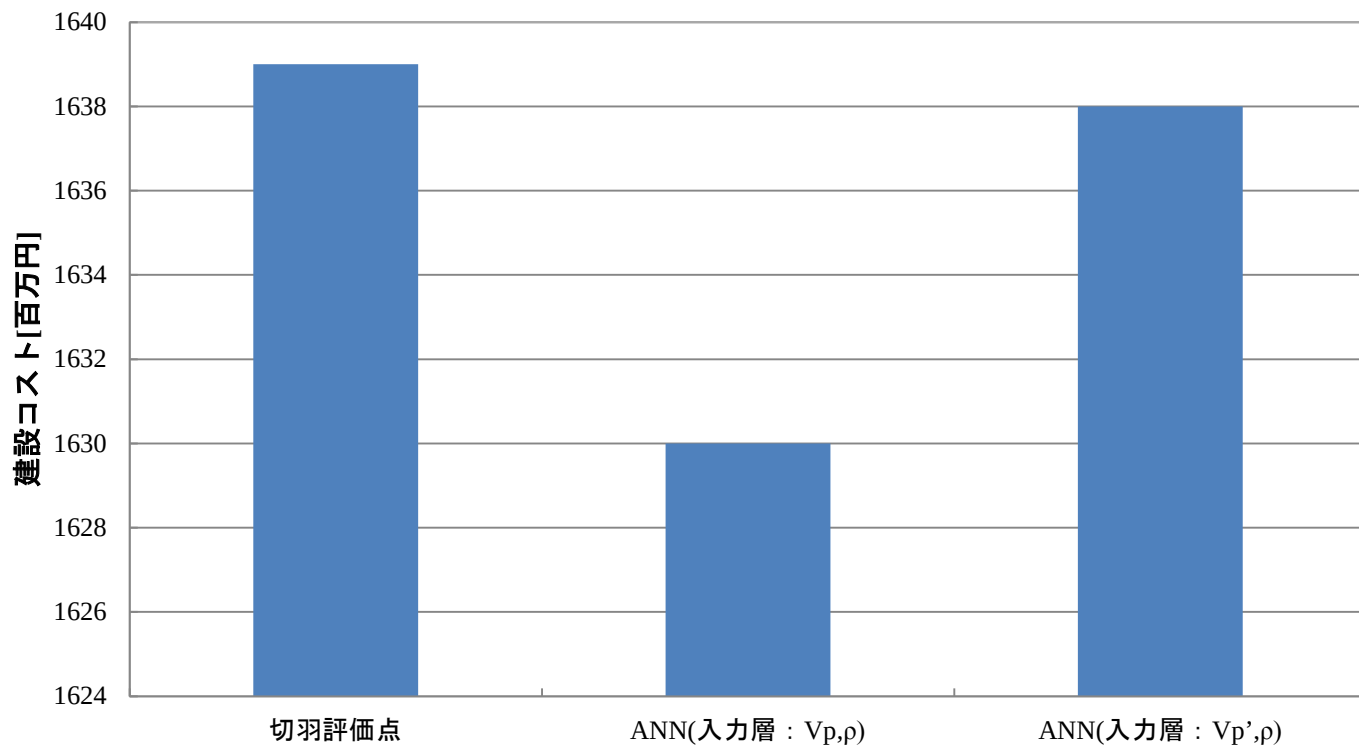


図5.6 トンネル総延長の建設コスト（Rトンネル）

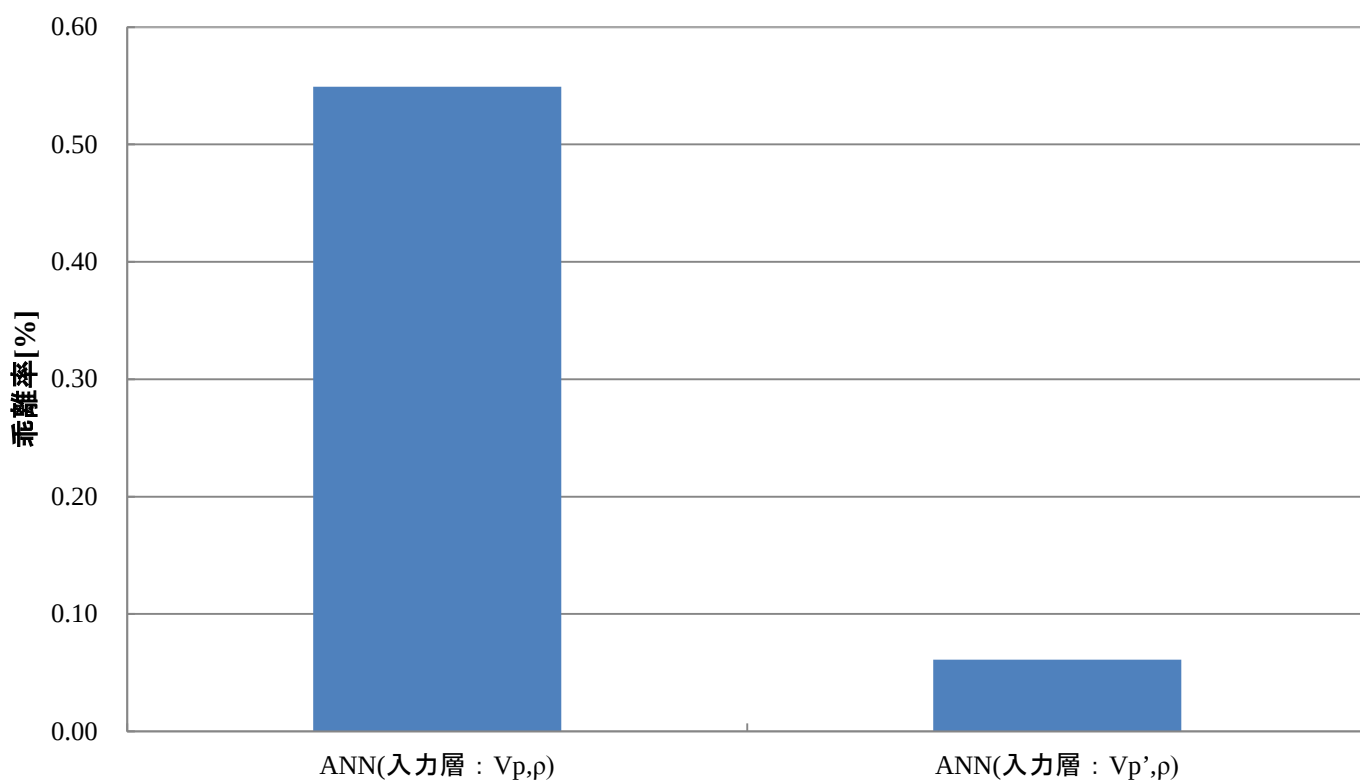


図5.7 乖離率（Rトンネル）

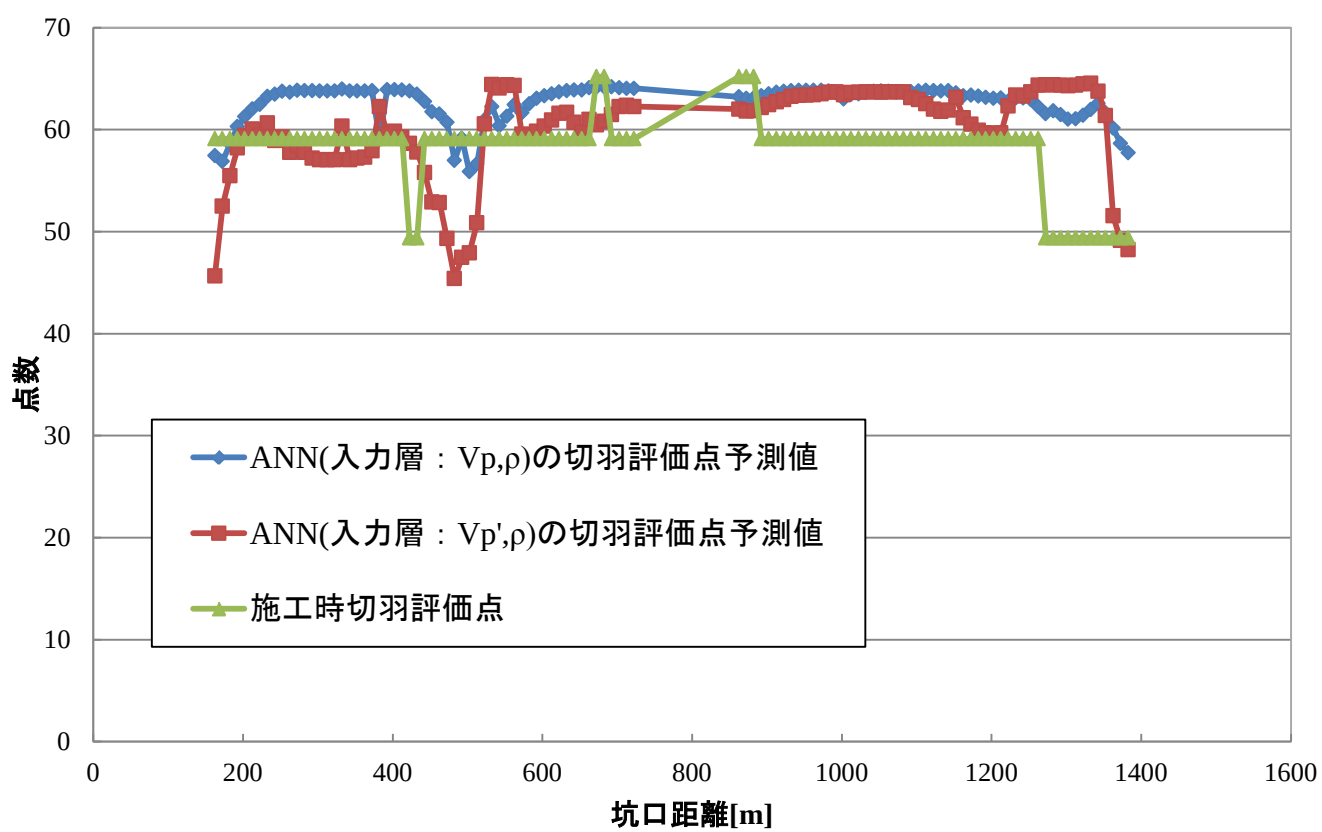


図5.8 各地山評価点数分布（Bトンネル）

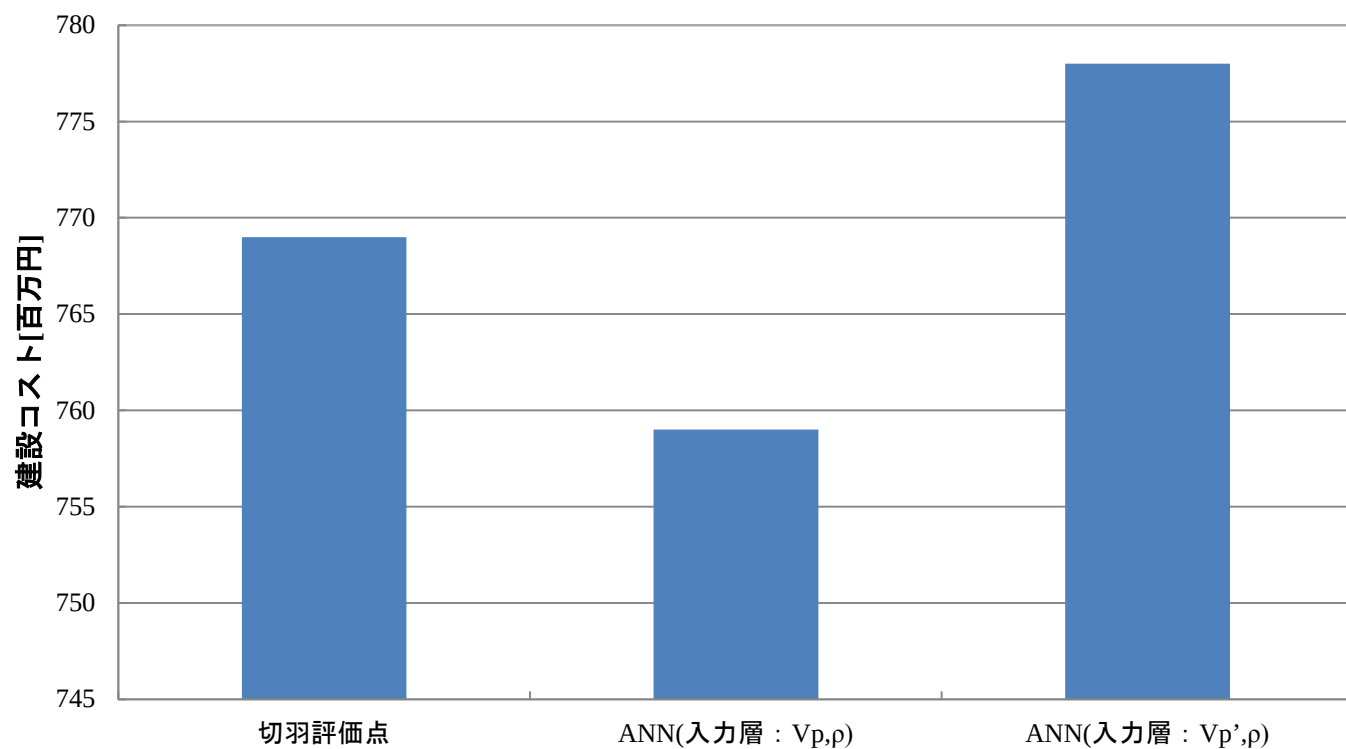


図5.9 トンネル総延長の建設コスト (Bトンネル)

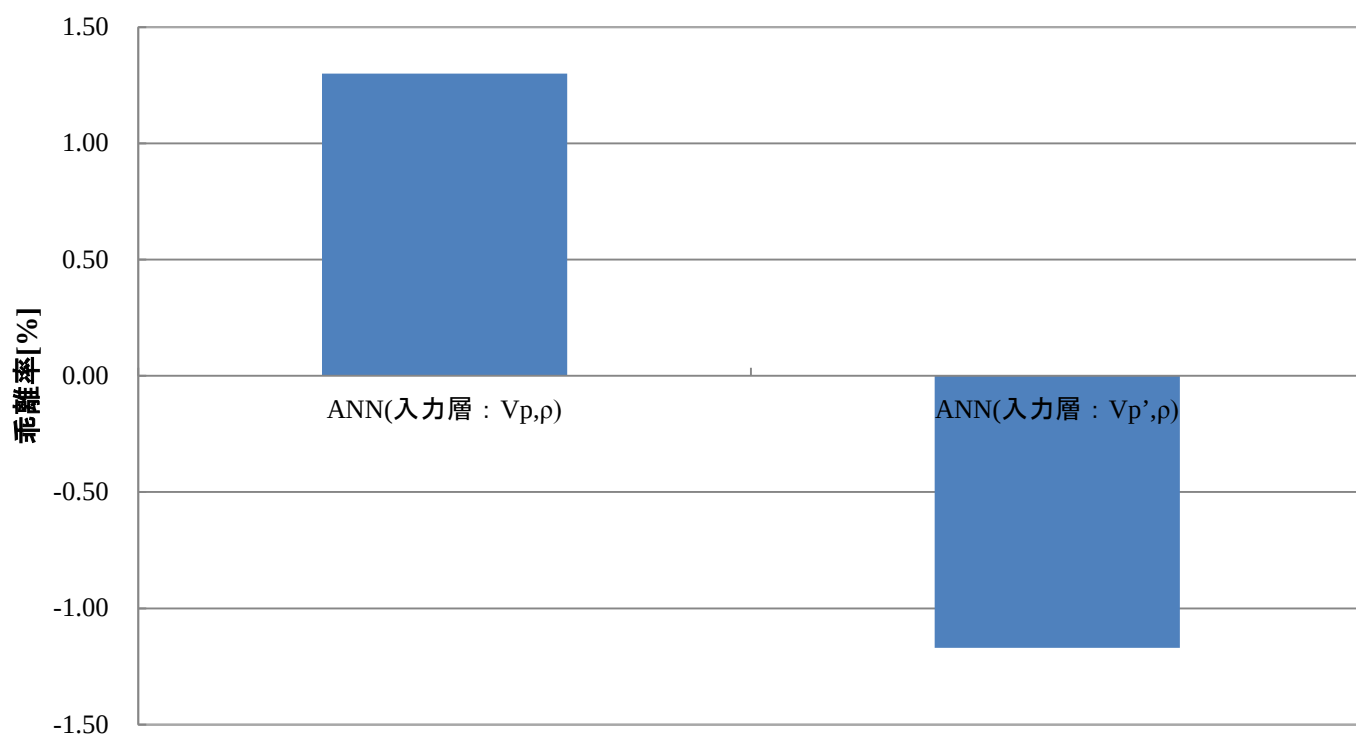


図5.10 乖離率 (Bトンネル)