

# 力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の 評価に関する研究

大津宏康<sup>1</sup>・尾ノ井芳樹<sup>2</sup>・大西有三<sup>3</sup>・高橋徹<sup>4</sup>・坪倉辰雄<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工学士 電源開発株式会社 事業企画部 (〒104-8165 東京都中央区銀座六丁目15-1)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 Ph.D. 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>正会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

<sup>5</sup>正会員 大林組 東京本社 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟)

本研究では、地盤リスクを構成する力学的要因に着目し、地盤統計学を用いて地盤リスクに起因する建設コストの変動と調査費用の関係を定量的に評価する手法について検討を加える。従来の筆者らの研究では地盤リスク評価において、幾何学的要因については計測値を直接用いるクリギング手法を適用したが、力学的要因については岩盤等級等の離散値が用いられることが多いため、計測値を閾値として用いてその確率分布を推定するインディケータクリギングを適用する方法を提案する。さらに、この手法を用いて、実際のトンネル建設プロジェクトでの力学的地盤リスクが建設コストに及ぼす影響について示すとともに、その結果に基づき調査工事の投資対効果についても検討を加える。

**Key Words :** geotechnical risk, financial engineering, PFI, Indicator kriging

## 1. はじめに

トンネル掘削あるいは、地下空洞掘削等の地下工事を  
含む建設プロジェクトにおいては、地下の地質条件の不  
確実性は、そのプロジェクトを実施する上で支配的な要  
素の一つとなる。例えば、設計段階で予期出来ない不良  
な地質条件の出現は、工法変更あるいは支保パターン  
の変更を伴うことになるため、大幅な工期延長あるいは建  
設コストの増加に繋がることとなる。実際の地下工事を  
含む建設プロジェクトでは、この地質条件の不確実性に  
対処するため、ボーリングあるいは弾性波探査等の地質  
調査が実施されると共に、その調査結果に基づき設計が  
なされる。ただし、ここで留意すべきことは、事前調査  
において対象となる建設現場全域の地質を調査すること  
は実質的には不可能であるため、設計(あるいは積算)  
段階の地質情報は不確実性を含んでいることである。こ  
の地下工事を含む建設プロジェクトに含まれる不確実性  
の度合いは、図-1に示す近藤<sup>1)</sup>により提案されている模  
式図を用いて、次のように説明される。すなわち、地質  
条件に関する不確実性の度合いは、事前調査後のフィー  
ジビリティースタディーの段階で最大であり、その後実  
施設計段階および施工段階と、地質情報が明らかになる  
につれて減少するものと解釈される。また、同図に示す

ように、地盤リスクの変化の度合い(図-1においては地  
質調査の不確実度と記載)は、調査の質と量により変化  
することはいうまでもない。

なお、このような地下工事における地質情報の不確実  
性は、工学的には地盤・岩盤の幾何学的不確実性と力学  
的不確実性に区分される。以下、本研究では、地下工事  
における地盤・岩盤の幾何学的・力学的な不確実性に起  
因するリスクを、地盤リスクと総称して議論を進める。

ここで、地盤リスクの特性について整理する意味で、  
現状で最も頻繁にリスクという概念が用いられている、  
金融工学分野のリスクの概念との比較を試みる。言うま  
でもなく、金融工学分野のリスク<sup>2,3)</sup>とは、図-2の模式図  
に示す株価のように、時間空間で複雑に変化し、その予  
測が極めて困難な値を対象とするものである。これに対  
して、地盤リスクとは、時間空間では一定であるが、場  
所的不均一性が高いため、図-1に示したように最終的に  
工事が終了するまで、その建設現場固有の地質条件が確  
認されないことに起因するものである。すなわち、本研  
究で対象とする地盤リスクとは、金融工学分野のリスク  
のように予測不可能なものではなく、理論的には建設現  
場でのボーリングあるいは弾性波探査等の地質調査を出  
来る限り詳細に実施することで対処可能となるものであ  
る。もちろん、調査に要する期間・費用等の制約から現

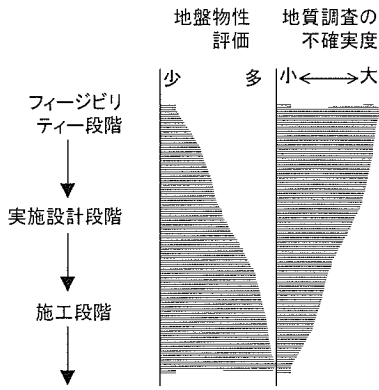


図-1 リスク要因調査と地盤物性調査ならびに地質調査の不確実性<sup>1)</sup>

実的には地質調査に含まれる地盤リスクを全くなくすることは不可能である。このため、建設プロジェクトの予算制約の下で実施すべき調査費用の最適化を図るという観点からは、調査のレベルと図-1に示す事前調査後のフェージビリティースタディーの段階で推定される地盤リスクの度合いとの関係について、定量的に評価することが重要な検討課題となる。

なお、筆者ら<sup>9)</sup>が、これまでの研究において示してきたように、従来は地盤リスクに起因する建設コストの変動については、請負者に比べて資金力を有する公共団体等の発注者が、追加調査あるいは施工段階において明らかとなった情報を基に地盤・岩盤区分を精査し、その結果として単価数量表に基づいて数量精算することで、請負者のリスク分担が基本的には回避される方式が採用されてきた。このため、発注者および請負者のいずれにも設計条件に含まれる地盤リスクと調査費用に対する基本概念が、構築されにくかったといえよう。しかし、今後の公共事業の動向として、プロジェクト数が減少する条件の下での建設コスト縮減および、設計・施工一括発注あるいはEPC/ターンキーによる発注等の調達方式の変化という状況を踏まえた場合には、地盤リスクと調査費用に対する基本概念を構築することが不可欠となる。

このような観点から、筆者ら<sup>9)</sup>は地盤リスクと調査費用の関係について検討する方法として、金融工学理論に基づきリスク期待値平面を用いて、地盤リスクの建設コストに及ぼす影響を評価する方法が有効であることを提案してきた。さらに、実際の地盤構造物の建設プロジェクトを例題として、地盤リスクの内で幾何学的要因に着目し、地盤統計学の一つであるクリギングを用いた検討手法により、限定した条件での議論ではあるが、調査工事の投資対効果についても定量的に評価出来る可能性を示した。

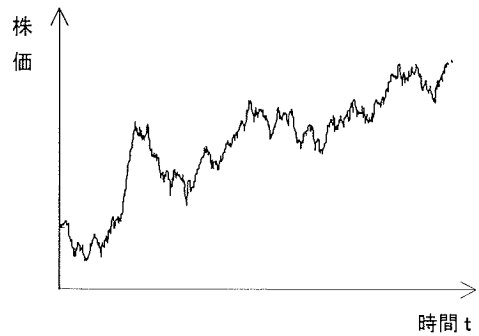


図-2 株価の推移 (模式図)

本研究では、これまでの研究に引き続き、地盤リスクとして力学的要因に着目し、地盤統計学を用いて地盤リスクに起因する建設コスト変動と調査費用の関係を評価する手法について検討を加える。なお、従来の研究では地盤リスク評価において、幾何学的要因については計測値を直接用いるクリギングを適用したが、力学的要因については岩盤等級等の離散値が用いられることが多いため、計測値を閾値化した値として用いて、その確率分布を推定するインディケータクリギングを適用する方法を提案する。さらに、この手法を用いて、実際のトンネル建設プロジェクトでの力学的地盤リスクが建設コストに及ぼす影響について示すとともに、その結果に基づき調査工事の投資対効果についても検討を加える。

## 2. 地下工事を含むプロジェクトにおける地盤リスク評価と地盤調査との関係

### (1) 建設契約における地盤リスクおよび調査費の取り扱いに関する基本概念

従来トンネル掘削のような地下工事を含む建設プロジェクトの多くは、国内外を問わず他工種のプロジェクと同様に設計・施工分離方式で調達されてきた。この設計・施工分離方式での代表的な建設契約としては、日本の公共工事標準請負契約約款<sup>9)</sup>および、国際建設プロジェクトにおいて最も用いられることが多いFIDIC Red<sup>7)</sup>等が挙げられる。これらの建設契約では、発注段階までに実施される地盤調査は発注者の負担により実施されると共に、地盤リスク要因によるコスト変動は、原則的に発注者によって負担されることとなる。

ここで、発注者が負担する費用、すなわち建設コストは、地盤リスク要因のみならず施工方法および工期等の様々な条件によって変動することはいうまでもない。しかし、本研究ではこれらの建設コストに影響を及ぼす

要因の内、地盤リスク要因にのみ限定して、その要因による建設コストの変動を定量化するものとする。

上記の前提条件の下では、この地盤リスクに起因する建設コストの変動を定量的に評価するためには、次式に示すように、地盤リスクに起因するコスト変動を含む工事費 $C$ と地盤調査費用 $I_G$ との和で表される費用 $T$ （以下事業費と称す）を用いることが適切であると推察される。

$$T = C + I_G \quad (1)$$

しかし、現状での建設コストの議論においては、工事費 $C$ の地盤リスクに起因する変動額が強調され、地盤調査費用の額とその精度の関係について言及されることは稀であった。例えば、Einstein<sup>9</sup>の研究にも示されているように、地盤リスクを確率モデルにより表現したモンテカルロシミュレーションにより、建設コストおよび建設工期の変動について検討した事例は挙げられるが、その確率モデルを構築するために実施される、調査レベルおよびその費用との関係については議論されていない。

これは、筆者らがこれまでの研究において指摘したように、建設プロジェクト数が多い状況での、広義のポートフォリオ理論に準じた数量精算によるリスク対応が主体であったため、地盤調査の費用対効果を議論するという概念が構築されなかったことによるものと推察される。しかし、1.において述べたように、今後建設プロジェクト数が減少することおよび、建設コスト縮減という課題に対処することが必要となる状況下では、地盤調査の費用と、地盤リスクによる建設コスト変動の関係について定量的に議論することの重要性が、高まるものと推察される。

なお、筆者らがこれまでの研究において示してきたように、従来の公共工事の請負契約においては、従来は地盤リスクに起因する建設コストの変動については、公共団体等の発注者が負担する方式が採用されてきた。これに対して、PFI方式による調達に関するEPC/ターンキー契約<sup>9</sup>では、地盤リスク要因によるコスト変動は、請負者となるEPCコントラクターにより負担されることとなる。また、この調達方式による請負契約約款であるFIDIC Silverにおいては、発注者より入札時に提供される資料に関して、以下のように記述されている<sup>9</sup>。

「発注者は、調査結果に基づき入札条件を提示するが、請負者はその資料に不足があると判断した場合には、自己の出費により追加調査を実施し入札に応じる。」

この条項が地質調査についても適用されるものとするれば、PFI方式に関するEPC/ターンキー契約では、地質調査も請負者となるEPCコントラクターにより負担され

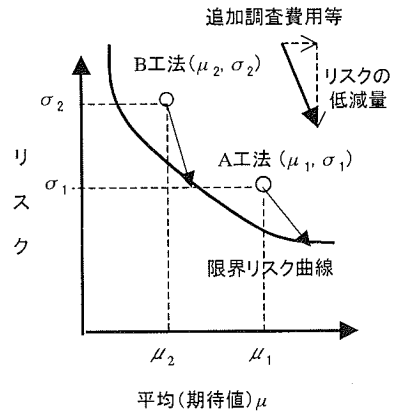


図-3 地盤リスク評価の模式図

ることになる。

この契約方式においては、地盤リスク対応として、以下のような課題が挙げられる。

- 1) PFI方式での発注者となるプロジェクトカンパニーの出費による事前の地盤調査結果が、どの程度の精度であるか、あるいはその調査の質および量が十分であるか否かが不明となる。
- 2) 請負者となるEPCコントラクターは、追加調査に関する費用および、施工時に予測される地盤リスクによる建設コスト変動分のリスクプレミアムを請負金額に含めることとなる。

この内、1)に関しては、従来の資金力を有する公共団体に比較して、発注者となるプロジェクトカンパニーは資金力が限られるため、入札段階で必ずしも十分な調査の質および量が確保されない可能性がある。この課題は、施工時の地盤リスクによる建設コストの変動が顕在化した場合には、プロジェクトの成否にも繋がるものである。

したがって、建設コスト縮減および、設計・施工一括発注あるいはEPC/ターンキーによる発注等の調達方式の変化という状況を踏まえた場合、建設コストの妥当性は、式(1)に示す事業費 $T$ に基づき議論することが必要となる。

## (2) 幾何学的地盤リスクに起因するコスト変動と調査費用の関係

筆者らは、これまでの研究において、地盤リスクと調査費用の関係について検討する上で、図-3に示すリスク（標準偏差）-期待値平面を用いて評価する手法の有効性について示してきた。この手法の基本概念は、想定される建設プロジェクトのコスト分布について、その期待値および標準偏差をプロットするものである。この表示の下で、金融工学理論に準拠して、地盤条件に含まれ

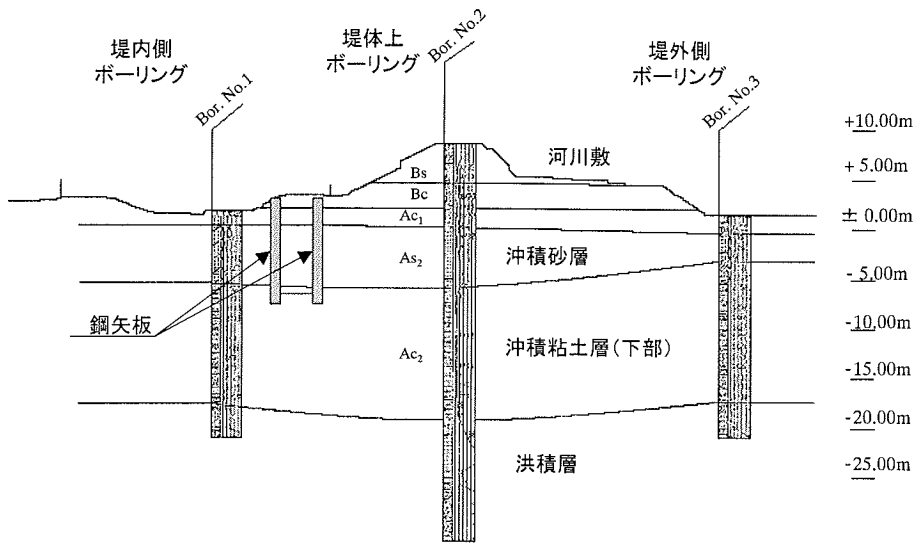


図-4 断面図

る不確実性に対する、調査費とリスク低減効果との関係を議論することが可能となる。

この手法の概要について明確にするため、筆者らがこれまでに示してきた、地盤統計学の一つであるクリギングを用いて幾何学的地盤リスクを評価した事例を用いて説明を加える。

ここで示す事例は、図-4に示す河川堤防に隣接する山留め掘削工事を対象として、地盤リスク要因の中で地層の深度分布という幾何学的な不確実性要因に着目する。具体的には、山留め壁としても使用する鋼矢板の長さ(本質的には断面と等価)が、根入れ層の深度分布という幾何学的な不確実性要因により変動すると想定される幅を用いて、その鋼矢板の長さの変動幅に起因する建設コストの期待値および、その変動リスクについて試算するものである。この試算条件は、以下のように要約される。

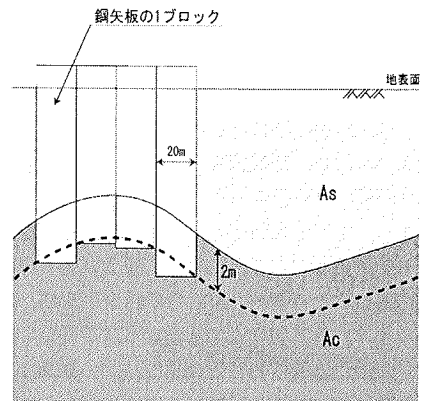
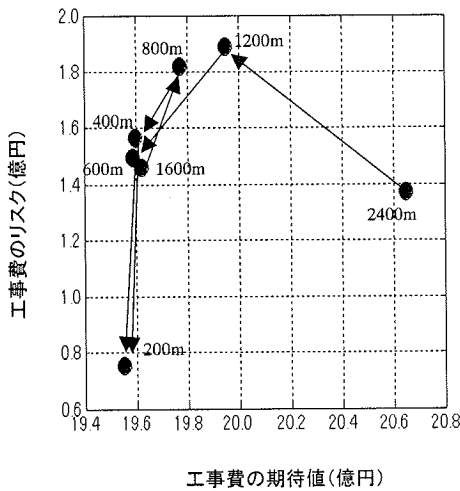


図-5 鋼矢板の表面積の算定方法

- 1) 山留め掘削には鋼矢板を用いるものとし、その鋼矢板の根入れ長は、概算として図-4に示す沖積粘土層へ2mと設定する。
- 2) 河川堤防に隣接する建設現場での、縦断方向の沖積粘土層深度を幾何学的な地盤リスクとし、その深度を所定の縦断方向のボーリングピッチで得られている沖積粘土層深度を用いたクリギングにより、その縦断方向の深度の最尤値および、最尤値土推定誤差標準偏差(以下標準偏差と称す)を算定する。この手順については、参考文献4)を参照されたい。
- 3) 2)で算定された沖積粘土層深度の最尤値および、最尤値土標準偏差の縦断方向の分布に対して、図-5に

示すように鋼矢板の長さが同じブロックの幅を20mとし、所定の鋼矢板の根入れ長(2m)を満足する鋼矢板のレイアウトを設定する。さらに、縦断方向の全長を約4.8kmとして、沖積粘土層深度の最尤値および、最尤値土標準偏差結果の分布に対する、それぞれの条件において必要となる鋼矢板の断面積を算定する。

- 4) 2)~3)の手順を、異なる縦断方向のボーリングピッチ毎に繰り返す。なお、ここで用いた具体的なボーリングピッチは、200m・400m・600m・800m・1200m・1600m・2400mの計7パターンである。
- 5) 異なる縦断方向のボーリングピッチ毎に得られる、沖積粘土層深度の最尤値および、最尤値土標準偏差



注) 図中の数字は、ボーリングピッチを表す。

図-6 建設コストに関するリスク-期待値の関係

結果の分布に対して必要となる鋼矢板の建設コストは、以下の条件に基づき算定する。すなわち、1 mあたりに必要となる鋼矢板の費用を鋼矢板の型や打ち込みにかかる費用、切梁などを考えた上で試算として直接工事費を 12,000 円と設定し、4) で算定された断面積にこの数値を乗ずることで建設コストを算定する。

- 6) 5) で算定された鋼矢板の建設コストを用いて、以下の方法により、その値をリスク・期待値平面上にプロットする。
  - ・期待値としては、沖積粘土層深度の最尤値に対して算定された建設コストを用いる。
  - ・クリギングの原理から、最尤値周りの分布は対称となる。また、実際に最尤値+標準偏差および最尤値-標準偏差に対して得られる、それぞれの建設コストの最尤値に対する変動量はほぼ同等であった。このため、リスクとしては、最尤値+標準偏差に対する建設コストと、最尤値に対する建設コストの差分を用いる。
- 7) 各ボーリングピッチでの地質調査に要する費用としては、ノンコアで地層分布のみを調べるボーリングに要する費用を想定し、その単価を試算として直接工事費を 1m 当り 60,000 円と設定する。
 

なお、筆者らのこれまでの研究においては、1) ~5) の手順に基づき山留め工の部材数量の変動幅についてのみ検討結果を示したのみである。これに対して、ここでは従来の研究に 6) ~7) の手順を加えて、建設コス

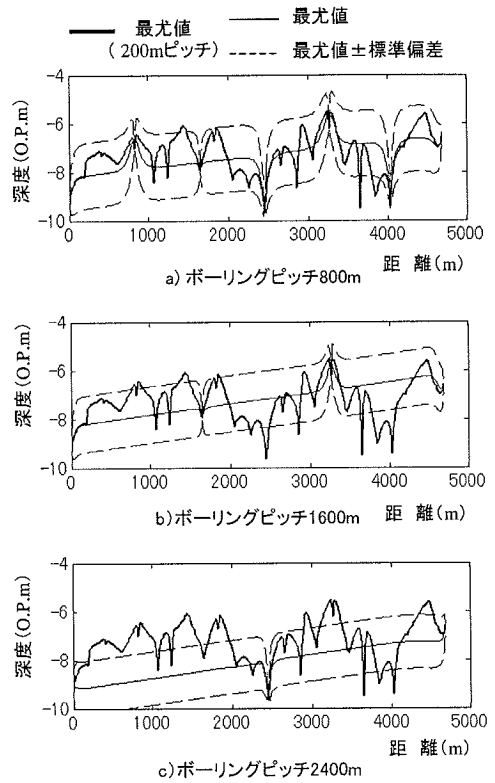


図-7 200m ピッチでのクリギング結果の最尤値とその他のピッチでのクリギング結果の比較

トの変動幅および、そのコストと調査費との関係について示すものである。

上記の手順に基づく算定結果として、まず 7 パターンの縦断方向のボーリングピッチ (200m~2400m) に対する建設費を、リスク・期待値平面上にプロットした結果を図-6 に示す。なお、同図に示す結果では、調査費を考慮せず工事費の変動のみに着目している。このため、同図に示される結果は、従来の設計・施工分離方式での地盤リスクに起因する請負価格の変動について示すものに相当する。

図-6 に示す関係において、特徴的な事項は以下のように要約される。

- ・期待値は、ボーリングピッチが 2400m の場合に最大値となると共に、ボーリングピッチが 1600m の場合に逆に小さな値となっている。その他の場合には、期待値はボーリングピッチが細くなるに連れて減少するが、800m ピッチから 200m ピッチでの減少量は僅かである。
- ・リスクは、ボーリングピッチが 2400m あるいは 1600m

から細かくなる場合に、一度増加する傾向を示す。

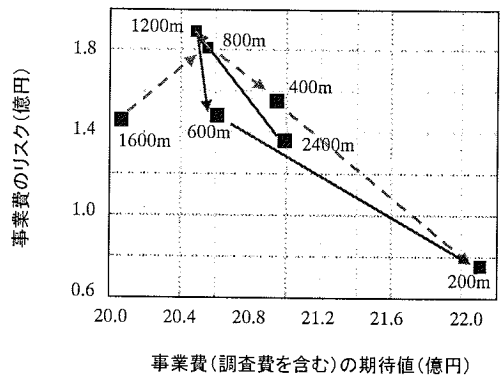
上記の事項の内、ボーリングピッチが 2400m あるいは 1600m から細かくなる場合にリスクが一度増加することは、具体的には、図-7 に示すようにボーリングピッチが粗い場合には、粘土層上限面の細かな起伏を表現できない、すなわちこの事例では数少ないボーリングデータの影響が大きく反映されていることに起因するものである。

また、期待値についてもボーリングピッチが 2400m あるいは 1600m の場合に、その他のボーリングピッチに対する結果と異なる傾向を示していることも、同様にこの事例では数少ないボーリングデータの影響が大きく反映されていることに起因する。すなわち、図-7b) に示すように、この事例でのボーリングピッチが 1600m の場合には、200m ピッチの最尤値に比べて、クリギングに適用される地層境界の深度として、比較的小さい値のみが用いられるため、期待値（最尤値）が小さめの値として評価されることになる。また、この事例でのボーリングピッチが 2400m の場合には、図-7c) に示すように 200m ピッチの最尤値に比べて地層境界として、200m ピッチの最尤値に比べて、地層境界としてその深度が比較的大きい値のみがクリギングに適用されるため、期待値（最尤値）が小さめの値として評価されることになる。

これに対して、この事例でのボーリングピッチが 800m 程度以下の場合には、ボーリングピッチを細かくして地質調査の質を向上させることにより、粘土層上限面の細かな起伏を表現することが可能となるため、リスクが減少するという傾向が認められる。この結果は、従来の設計・施工分離方式による建設契約においては、発注者が調査の質を高めることすなわち、調査費を充分に掛けることにより、発注者に加えて請負者のリスクも回避されるということを示すものである。

しかし、(1)において述べたように、本来プロジェクトの建設コストの妥当性を議論する上では、式(1)に示すように建設費に調査費を加えた事業費における、地質調査の投資対効果について検討することが必要である。このため、図-6 に示す結果に、それぞれのボーリングピッチでの調査費を加えた事業費を、リスク-期待値平面にプロットした結果を図-8 に示す。なお、同図において、横軸の期待値は式(1)の定義式に基づく事業費を表すものであるが、縦軸のリスクは、最尤値と最尤値+標準偏差の差を取った場合には、調査費が同額であり差し引きされるため、図-6 に示したリスクと同じ値となることに留意されたい。

図-8 に示すように、横軸の期待値は、全般にボーリングピッチを細かくするに連れて増加する傾向を示す。ただし、図-6 に示したように、建設費用の期待値のボ



注) 図中の数字は、ボーリングピッチを表す。

図-8 事業費に関するリスク-期待値の関係

ーリングピッチによる差は僅かであるため、図-8 に示す結果での横軸の増加量は主に調査費用の増加に起因するものである。そのピッチを小さくするために必要となる調査費が増加する傾向を示している。一方、リスクについては、図-6 に示した結果と同じであり、ボーリングピッチが 1600m あるいは 2400m と粗い場合から、そのボーリングピッチを細かくした場合に一度増加するのは、前述のように地盤リスクを過小評価していることによるものである。

図-8 に示す結果で、ボーリングピッチが粗い場合を除いて、リスク-期待値平面上にプロットした点は、そのピッチを細かくするに連れて、図-3 の模式図に示した追加調査費とリスク低減に関するベクトルと同様に、右下方向に移動する傾向が認められる。したがって、クリギング手法を用いて地盤リスクの内幾何学的要因をモデル化することで、概念的には理解されるであろう、追加調査の効果が定量的に評価されることになるとともに、発注者あるいは EPC コントラクターに多様な意思決定の情報を与えることになる。

例えば、ボーリングピッチが 800m から 200m までの場合に着目すると、横軸の追加調査費が 1.6 億円程度増加しているのに対して、縦軸のリスク低減量は 1 億円程度である。この関係から、追加調査費に対して、多少リスク低減量が下回っていることから、200m ピッチまでの追加調査を実施せず、800m ピッチに相当する場合にリスクを予備費として計上するという選択も可能となる。

もちろん、実際の基本設計では、幾何学的要因だけではなく力学的要因に対する不確実性を評価する必要があるため、上述の追加調査の投資対効果に対する議論は、多少異なる結果になる可能性があるかと推察される。しかし、その場合においても、本研究で提案する、不確実性要因を地盤統計学を用いてモデル化し、その不確実性に

起因する建設コスト変動について、金融工学理論に基づき、その最尤値と変動リスクを表現する検討する手法が有効であると推察される。このため、次章では同様な考え方にに基づき、力学的な不確実要因に起因する建設コスト変動を評価する手法について検討を加えるものとする。

### 3. 力学的要因による建設コスト変動の評価方法

#### (1) インディケータクリギングによる力学的地盤リスクの評価方法

2. では、クリギング手法を用いて地盤リスクの内で幾何学的要因をモデル化することで、追加調査の効果が定量的に評価可能となることを示してきた。しかし、トンネル掘削等の地下構造物の基本設計は、ボーリングあるいは弾性波探査結果に基づき、その力学的パラメータ（指標）としては、岩盤分類・地山分類のような離散値が用いられる。このため、その離散値の不確実性を評価する場合に、クリギングのような数値データに基づく内挿による推定方法は適用できない。

しかし、仮にこれら岩盤分類が、ある数値基準値、例えば RMR や Q 値<sup>10</sup>等と一対一に対応している、あるいはある範囲内に存在していることが判明しているならば、インディケータクリギングを用いて、目的とする箇所物性値を直接算定するのではなく、おおよその程度の範囲の値となりえるかを推定することが可能となる。

ここで、インディケータクリギングとは、物性値そのものをクリギングによって推定するのではなく、物性値が目的とする箇所にどの値域でどの確率で存在するかを推定する手法である。クリギングは計測された値が確定した数値でないという目的とする箇所物性値の推定はできない。ところが、計測された値がある範囲内に存在することが判明している場合は、その情報をインディケータクリギングによって活用することが可能である。つまり、計測された数値がある特定の値以下（あるいは以上）であるという情報、すなわち不等式で表現されている情報を物性値推定に活用できるという特徴がある。

インディケータクリギングは、基本的にはクリギングにおける手法と流れは同じであり、推定量の不偏性と推定誤差分散最小化の条件を満たし、不偏推定量を求めるにあたって入力値に重み付けをして求めるものである。以下に、インディケータクリギングの定式化を示す。

まず、サンプル位置を  $x_0$ 、推定対象量を  $z$  とした場合に、推定対象量  $z$  に関する情報として、次式に示すようにある値  $a$  以下あるいは、ある値  $b$  以上という存在範囲のみが与えられているものと仮定する。

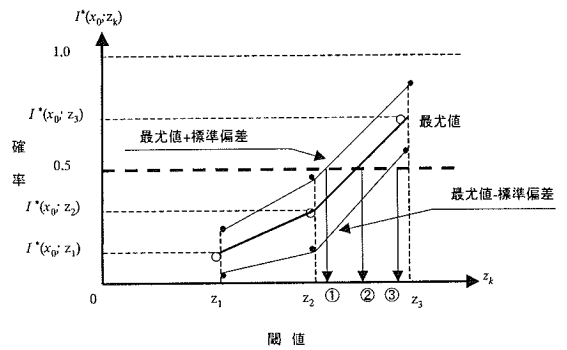


図-9 点  $x_0$  におけるインディケータ変換及び推定値の算出

$$z(x_i) < a \text{ or } z(x_i) \geq b \quad (2)$$

このように不等式で表現される情報を活用するために、具体的には推定対象量が、事前に設定した幾つかの閾値  $z_k$  に対して、それぞれの閾値を超過しない確率（非超過確率）を算定するものである。例えば、図-9 の模式図に示す事例は3種類の閾値 ( $z_k, k=1,3$ ) を設定している場合に相当する。

まず、インディケータクリギングを用いて目的とする箇所の物性値がおおよその程度の範囲の値となり得るかを推定するために、対象領域内での全てのサンプル位置  $x_i$  の値に対するインディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  を定義する。このための第一段階として、次式に示すように、インディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  として、サンプル位置  $x_i$  の値が、ある閾値  $z_k$  を越えていると推定される場合に 0 という情報を、また閾値  $z_k$  以下と推定される場合には 1 という情報を与える。

$$I(x_i; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(x) \leq z_k \\ 0 & \text{if } z(x) > z_k \end{cases} \quad (3)$$

なお、インディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  の期待値は  $z(x)$  の累積分布関数であるとすると、次式に示すように、期待値は位置に依存しなくなる。

$$\begin{aligned} E[I(x_i; z_k)] &= 1 \cdot \text{prob}[z(x_i) \leq z_k] + 0 \cdot \text{prob}[z(x_i) > z_k] \\ &= \text{prob}[z(x_i) \leq z_k] \\ &= F(z_k) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $E[\cdot]$  は  $\cdot$  に対する期待値を表す記号であり、 $F(z_k)$  は累積確率分布関数を表す。

次に、インディケータクリギング手法では、任意の推定箇所  $x_0$  での物性値のある閾値  $z_k$  に対する非超過確率

$I^*(x_0; z_k)$ は、式(3)に示した対象領域内での全てのサンプル位置  $x_i$  の値に対するインディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  を用いて、次式のように表現される。

$$I^*(x_0; z_k) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(z_k) I(x_i; z_k) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(z_k) = 1 \quad (6)$$

ここに  $\lambda_i(z_k)$  は、閾値を  $z_k$  に設定した際の重みである。すなわち、図-9 の模式図に示す事例は、任意の推定箇所  $x_0$  において、全サンプル位置  $x_i$  の値について  $z_1 \sim z_3$  という3種類の閾値を設定して得られるインディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  と重みを掛けられた値の線形結合式により、それぞれの閾値に対する非超過確率  $I^*(x_0; z_k)$  を算定する場合に相当する。

なお、対象とするインディケータ変換値に対して2次のモーメントまでの定常性を仮定すると、閾値  $z_k$  に対する位置  $x$  についてのインディケータ変換値  $I(x; z_k)$ 、その位置から  $h$  だけ離れた位置の値を  $I(x+h; z_k)$  とする時、この2点間での変換値の空間的分布特性を表す、インディケータセミバリオグラムは、以下のように定義される。

$$\gamma_{z_k}(h) = \frac{1}{2} E[I(x+h; z_k) - I(x; z_k)] \quad (7)$$

ここで、式(7)の左辺は閾値  $z_k$  に対するインディケータセミバリオグラムを表し、この値は式(4)に示した関係より位置に依存しない。

式(7)に示すインディケータセミバリオグラムの関数形としては、指数関数、球関数及び線形関数等の様々な関数形が提案されており、その計測結果に対する関数近似の最適化手法としては、最尤法、赤池情報基準 AIC を用いた方法あるいは、非線形最小自乗法等が適用される。

次に、式(5)～式(7)の関係式において、未知数となる重みを合理的に算定する上で、不偏性と推定誤差最小化の仮定を導入する。ここで、誤差を最小化するためにラグランジュの未定係数  $\mu$  を導入し、クリギング手法と同様な手順により変数  $\lambda_i(z_k)$  および  $\mu$  と共に、非超過確率  $I^*(x_0; z_k)$  が得られる。具体的な手順については、参考文献4)を参照されたい。

さらに、推定点  $x_0$  における推定誤差標準偏差  $s_{z_k}$  は、 $h_0$  を推定点  $x_0$  と調査により既知情報を有する点  $i(i=1, 2, \dots, n)$  の2点間の距離ベクトルとすると、次式のように

表される。

$$\sigma_{z_k}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma_{z_k}(h_{i0}) + \mu \quad (8)$$

このような手順をその他の閾値に対しても繰り返すことで、図-9 に示すように推定点  $x_0$  における推定値の閾値に対する確率分布を算定することができる。なお、同図では模式的に、式(5)～式(7)に示す手順により算定される確率分布を最尤値に対する分布として示し、またその最尤値に式(8)に基づき算定される推定誤差標準偏差(以下標準偏差と称す)を考慮した確率分布も併せて示した。

## (2) 力学的要因に起因する建設コスト変動リスクの評価方法

本研究では、離散的な値として与えられる、トンネルの支保パターンに関わる岩盤等級と相関がある補助的な力学パラメータとして RMR を取り上げる。すなわち、岩盤等級と RMR の相関に着目し、RMR を閾値として設定したインディケータクリギングにより、トンネル建設位置の各箇所での RMR の確率分布を算定する。

ただし、インディケータクリギングにより算定されるものは確率分布であるので、建設コスト変動リスクの算定には、得られた確率分布の代表値として、以下の3種類の定義に基づく RMR を用いるものとする。

①式(5)より算定される関係において、図-9 に示す確率分布が正規分布のように期待値に対して対称な分布関数とならないため、期待値に準ずる値として超過確率が50%となる値を推定箇所における最尤推定値(図-9中②に相当)と設定する。

②①で期待値に準ずる値として超過確率50%の値を推定箇所での最尤推定値と設定するため、最尤推定値周りのはずれを評価する量としては、図-9 に示す推定誤差標準偏差  $s_{z_k}$  を考慮した確率分布での超過確率が50%となる値を用いる。すなわち、式(5)より算定される値に、図-9 に示す標準偏差値を考慮した2種類の確率分布において、図-9 に示す確率分布超過確率が50%となる値を、それぞれ悲観的推定値(図-9中①に相当)、楽観的推定値(図-9中③に相当)とする。

以上の3種類の定義に準じて、トンネル全長に渡り算定される RMR の分布および、それに相当する岩盤等級分類・支保パターンを設定し、それぞれを最尤シナリオ、悲観的シナリオおよび楽観的シナリオと称する。さらに、その算定された各支保パターンに、支保部材の数量および単価を乗ずることで、最尤シナリオ、悲観的シナリオ



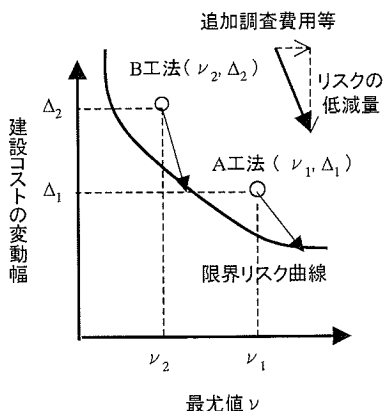


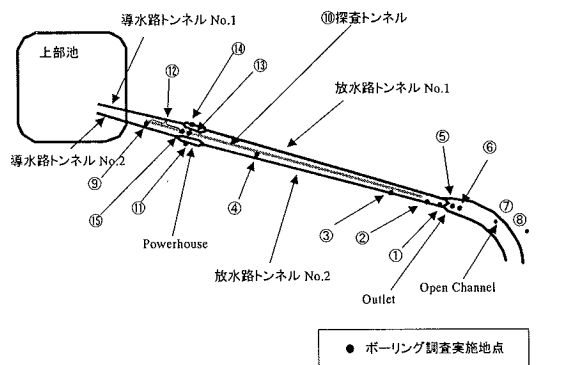
図-10 建設コストの最尤推定値と変動幅

および楽観的シナリオに対する建設コストを算出される。

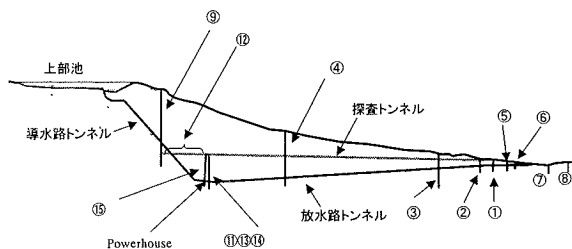
次に、各シナリオでの建設コストを、2. で述べたリスク-期待値平面にプロットし、調査費と建設コストとの関係について議論する方法について述べる。ここで、2. に示した幾何学的要因に対して適用したクリギングでは、その手法の原理から最尤値周りの分布は対称となるため、実際に最尤値+標準偏差および最尤値-標準偏差に対して得られる、それぞれの建設コストの最尤値に対する変動量はほぼ同等であった。これに対して、本研究に示すインディケータクリギングに基づく手法では、最尤値+標準偏差および最尤値-標準偏差に対して得られる、それぞれの建設コストの最尤値に対する変動量は異なるものとなる。

このために、本研究では図-10 に示す方法により検討を加える。すなわち、同図に示すように、横軸としては工事費に調査費を加えた事業費  $T$  の分布の最尤推定値  $\nu$  を採用する。

次に、図-10 の縦軸として示す、建設コスト変動の設定方法について述べる。想定される建設コスト分布が正規分布としてモデル化される場合には、期待値（この場合には最尤推定値と等価）周りの分布が左右対称であるため、図-3 に示すように金融工学理論に準拠して、期待値からのはずれの代表量として標準偏差を用いることが可能となる。しかし、想定される建設コスト分布が正規分布としてモデル化されない場合には、最尤推定値周りのはずれ量を表す新たな指標が必要となる。このため、本研究では図-10 に示す縦軸としては、金融工学分野でのダウンサイドリスクに相当する量として、次式に示す想定される建設コストの変動幅  $\Delta$  を採用する。



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-11 ボーリング孔配置図

$$\Delta = C_p - C_m \quad (9)$$

ここに、 $C_p$  は地質条件に関する悲観的シナリオに対する建設コストおよび、 $C_m$  は地質条件に関する最尤値に相当するシナリオに対する建設コストを表す。

以上の手順に基づき、次章では実際のプロジェクトを対象とした、建設コスト変動リスクと調査費の関係について検討を加える。

#### 4. トンネルを対象とした力学的要因による建設コスト変動リスクの評価結果

##### (1) 対象プロジェクトにおける地質調査結果

本章では、3. において述べた手法を、図-11 に示す海外で実施された揚水式発電所建設プロジェクトの中で、放水路トンネル掘削工事（外径 8m, 内径 6.4m, 全長 1430m）での建設コスト変動リスクの評価に適用する。この放水路トンネルが建設される地点の地質条件は、第三紀の砂岩・シルト岩の互層から構成されており、断層等は存在していない。

同サイトでは、フィージビリティスタディー（以

表-1 基本設計における岩盤分類

岩盤分類	岩種	RMR	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	P波速度 (km/s)
A1	砂岩	60以上	9.8×10 <sup>3</sup> 以上	3.5以上
A2	砂岩	50-60	約9.8×10 <sup>3</sup>	約3.0
A3	砂岩	40-50	約4.9×10 <sup>3</sup>	3.0以下
B1	シルト岩	50-60	約9.8×10 <sup>3</sup>	3.5以上
B2	シルト岩	40-50	約4.9×10 <sup>3</sup>	約3.0
B3	シルト岩	30-50	4.9×10 <sup>3</sup> 以下	3.0以下

表-2 調査実施段階と調査内容

調査実施段階	調査内容
F/S	ボーリング番号①～④
D/S <sub>1</sub>	ボーリング番号⑤～⑧
D/S <sub>2</sub>	探査トンネル(番号⑨～⑩)
D/S <sub>3</sub>	ボーリング番号⑪
D/S <sub>4</sub>	ボーリング番号⑫～⑭
D/D	ボーリング番号⑮

下 F/S と称す) 段階から詳細設計 (以下, D/D と称す) に至るまでの間に, 図-11 に示すボーリング孔および探査トンネルを用いた地質調査が実施されている。なお, 同図に示す探査トンネルとは, 本来地下発電用地下空洞の施工用連絡トンネルとして放水路トンネルに先行して掘削され, その後に点検用トンネルとして用いられたものである。

また, これらの調査結果に基づく基本設計として, 支保パターンと関連付けられる岩盤分類は, 表-1 に示すように砂岩およびシルト岩に対して, 岩質・風化・堅さ・亀裂間隔より A1, A2, A3, B1, B2, B3 の 6 種類に分類されている。なお, 同表に示すように, これらの岩盤分類は, 室内実験および原位置試験に結果として, RMR, 変形係数および P 波とそれぞれ関連付けられる。

## (2) 基本条件

図-11 に示す F/S 段階から D/D 段階までに実施された地質調査に伴う, 建設コストの変動リスクを定量的に評価するための基本条件は, 以下のように要約される。

- ① F/S 段階から D/D 段階までに実施された地質調査の内容を, その実施時期に応じて, 表-2 に示すように F/S, D/S<sub>1</sub>~D/S<sub>4</sub> および D/D の 6 段階に分類する。
- ② インディケータクリギングに適用する値としては RMR を採用する。なお, このプロジェクトでの地質調査において, D/S<sub>2</sub> 段階の探査トンネルでは切羽観察結果に基づき RMR が算定されているが, その他のボ

ーリング孔の箇所では, コア観察結果と弾性波探査結果に基づき, 表-1 に示す岩盤分類の情報のみが得られている。このため, 探査トンネルで得られた値に加えて, 表-1 に示す岩盤分類と RMR の相関関係から, 砂岩およびシルト岩について 40, 50, 60 を閾値としたインディケータクリギングを実施する。これにより, 3. に示した手順に基づき, 放水路トンネルでの最尤シナリオ, 悲観的シナリオおよび楽観的シナリオに相当する RMR の分布を算定する。

なお, ②に示す RMR の分布に基づき放水路トンネルの建設費用を算定する上で, 議論を簡素化するために, 以下のようなモデル化を行う。

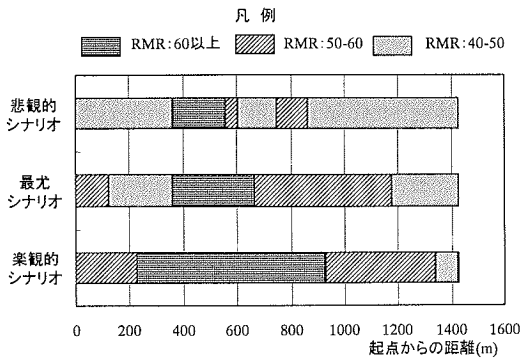
- ・放水路トンネルは, 起点 (図-11 の最深部の地下空洞との交差点) から 100m までの区間は 2 本に分岐して施工されているが, この区間は 2 本のトンネルに分離しないものとする。
- ・放水路トンネルの実際の施工では, スチールライニングが用いられているが, この費用は考慮しない。すなわち, トンネル建設コストは, 掘削費および支保部材 (ロックボルト・吹付コンクリート・コンクリート覆工) の費用のみを考慮し, プロジェクト実施時の通貨レートをを用い日本円表示する。

## (3) 解析結果

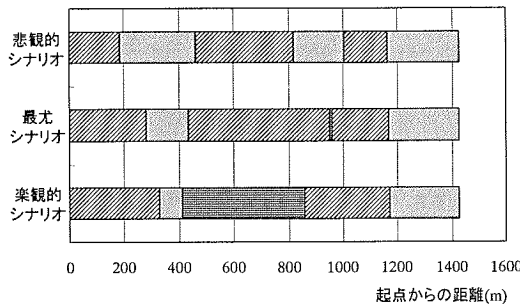
(2) に示した条件の下で, F/S, D/S<sub>1</sub>~D/S<sub>4</sub> および D/D の各調査段階での地質データに基づき, 3. に示したインディケータクリギングを用いた方法により, 放水路トンネル位置での最尤シナリオ, 悲観的シナリオおよび楽観的シナリオの 3 種類のシナリオに相当する RMR の分布を算定する。なお, ここでのインディケータクリギングにより RMR を算定する位置は, 放水路トンネル断面の重心位置で 1m ピッチとする。

RMR の算定結果の中で, 代表的な結果として, F/S および D/D での調査結果に基づく, 3 種類のシナリオに対するトンネル軸方向の RMR 分布を図-12 に示し, またそれぞれの結果でのヒストグラムを図-13 に示す。図-12 および図-13 に示すように, 地質調査の量が少ない F/S 段階で算定される RMR は, その分布幅が大きくなるのに対して, 地質調査の量が増した D/D 段階で算定される RMR は, その分布幅が小さくなる傾向を示す。

次に, 各調査段階で算定された RMR の分布に基づき, 表-1 に示す RMR と岩盤等級の関係を用いて, それぞれの支保パターンの単価を乗ずることで建設コストを算定する。図-14 は, F/S, D/S<sub>1</sub>~D/S<sub>4</sub> および D/D の各調査段階での, 最尤シナリオ, 悲観的シナリオおよび楽観的シナリオの 3 種類のシナリオに相当する工事費の分布を示す。同図に示す結果は, 以下のように要約される。



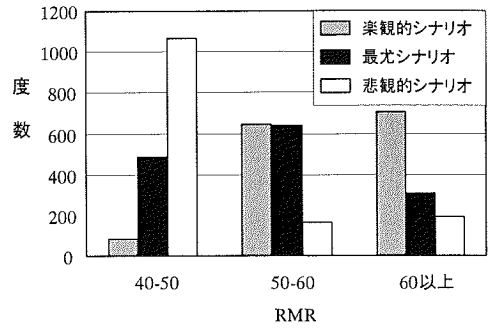
(a)FS 段階



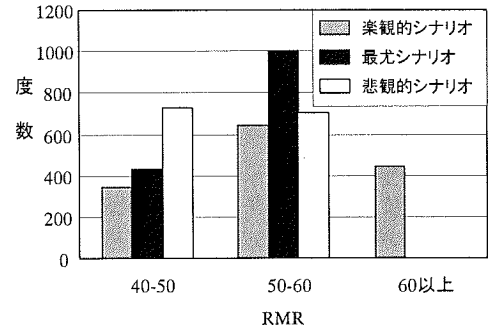
(b)D/D 段階

図-12 算定された RMR 値の分布の比較

- 1) 最尤シナリオに相当する工事費は、FS、 $DS_1 \sim DS_4$  および D/D の各調査段階で多少変動するが、その変動量は、悲観的シナリオと楽観的シナリオに相当する工事費の差の変動量に比べて小さい。また、最尤シナリオ周りの、それぞれ悲観的シナリオと楽観的シナリオとの差異はいずれの調査段階においても異なっており、ここで取り扱う力学的要因に起因する建設コストの分布は最尤値に対して対称とならないことが明らかとなる。
- 2) FS $\sim DS_1$  段階での、悲観的シナリオと楽観的シナリオに相当する工事費の差は、 $DS_2$  段階以降と比較して小さくなっている。これは、2. で幾何学的要因による工事費の相違において述べた、ボーリングピッチが粗い場合と同様に、地質調査の質が劣るため、建設コストの変動リスクを過小評価していることによるものである。
- 3)  $DS_2$  段階での悲観的シナリオと楽観的シナリオに相当する工事費の差は、それ以前に比較して大きくなっている。これは、この調査段階で探査トンネルが掘削され、放水路トンネル全域における地質状況が把握されたことによるものである。



(a)FS 段階



(b)D/D 段階

図-13 算定された RMR 値のヒストグラム

4)  $DS_3 \sim D/D$  段階での悲観的シナリオと楽観的シナリオに相当する工事費の差は、調査段階を経るに連れて減少する傾向を示す。これは、2. で幾何学的要因による工事費の相違において述べた、ボーリングピッチを細かくするに連れて、建設コストの変動リスクが減少する傾向と整合性のある結果となっている。すなわち、この傾向は地質調査の質と量を高めることで建設コストの変動リスクの低減が可能となり、請負者のリスクが回避されることを意味する。

以上の結果に示すように、力学的要因に着目した建設コストの変動リスクの評価結果は、2. で述べた幾何学的要因に着目した結果とほぼ同様の関係が得られたといえよう。

次に、図-14 に示した工事費の算定結果に調査費を加えた事業費に対する変動リスクおよび、その変動リスクと調査結果の関係について考察を加える。ここでは、図-10 に示した新たなリスクー最尤値平面を用いて検討を加える。

図-15 は、図-14 に示した工事費の算定結果に基づき、事業費に関するリスクー最尤値をプロットした結果を示す。同図において、図-14 に示したように工事費の変動幅は比較的小さいため、調査段階を経ることによる横軸

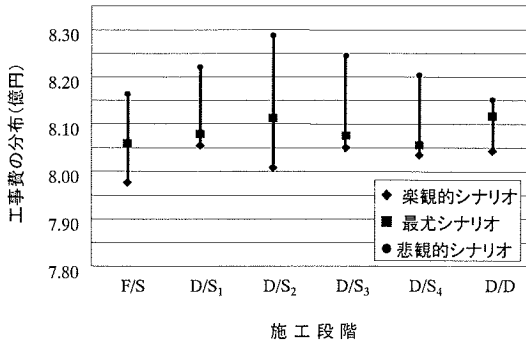


図-14 推定結果に基づく工事費の算定結果

の最尤値の変化は、ほとんどが調査費の増加に相当する。中でも、D/S<sub>1</sub>からD/S<sub>2</sub>の間で最尤値が顕著な増加を示すのは、他段階でのボーリング調査に比べて、探査トンネルの掘削費が卓越することに起因するものである。

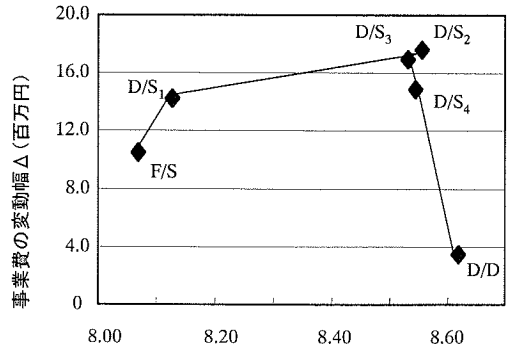
次に、図-15 に示すリスクすなわち、悲観的シナリオと最尤シナリオに相当する工事費の差に着目すると、F/S～D/S<sub>1</sub>段階で比較的に小さく、D/S<sub>2</sub>段階で最大値となった後、D/D 段階まで調査量が増加するに連れて、リスクは減少する傾向を示す。さらに、同図に示す結果で注目すべきことは、D/S<sub>3</sub>以降の調査段階で、横軸の増加に比べて、リスクの低減量が卓越していることである。すなわち、図-3 および図-10 に示した概念図に準拠すれば、ここに示した事例は、F/S 以降の追加調査の投資対効果が極めて高いものであったことが明らかとなる。

もちろん、この事例は探査トンネルが検討対象とする放水路トンネルにほぼ平行に掘削されたという特異なものであり、追加調査の投資対効果が高いと判定されるであろう。しかし、本研究で提案したインディケータクリギングを用いて力学的要因に起因する建設コストの変動リスクを評価する手法は、このような調査の質を高めることによる投資対効果を客観的かつ定量的に説明することが可能である。

したがって、本研究で提案した手法は、今後 PFI による調達方法に代表される、限られた予算条件下で地下工事を含む建設プロジェクトを実施する場合に、その予備費の設定、資金計画の立案および、追加地質調査を実施するか否かの意思決定において、重要な情報を提供する手法になり得るものと推察される。

## 5. まとめ

本研究では、地盤リスクとして力学的要因に着目し、計測値を閾値として用いてその確率分布を推定するインディケータクリギングを適用する方法を提案すると共に、



最尤シナリオの事業費(億円)

図-15 プロジェクトに必要な最適推定金額と変動幅の関係

この手法を用いて、実際のトンネル建設プロジェクトでの力学的地盤リスクが建設コストに及ぼす影響および調査工事の投資対効果についても検討を加えた。この結果として得られた知見は、以下のように要約される。

- ① インディケータクリギングを適用した検討結果として、最尤シナリオ周りの、それぞれ悲観的シナリオ・楽観的シナリオとの建設コストの差異は、いずれの調査段階においても異なることから、力学的要因に起因する建設コスト変動の分布は、最尤値に対して対称とならないことが明らかとなった。
- ② 力学的要因に起因する建設コスト変動のリスクは、幾何学的要因に着目した検討結果と同様に、初期の調査段階では過小評価され、その後の地質調査の質および量を高めることにより、減少することが数値的に検証された。このことから、以下の事項が指摘される。
  - ・ F/S段階のような初期の調査段階では地盤リスクが十分な精度では評価されない危険性が指摘される。これは、PFI方式のプロジェクトにおいては、従来の資金力を有する公共団体に比較して、発注者となるプロジェクトカンパニーは資金力が限られるため、入札段階で必ずしも十分な調査の質および量が確保されず、プロジェクトの成否にも繋がる問題が顕在化する危険性がある。このため、請負者となるEPCコントラクターも、追加調査に関する費用および、施工時に予測される地盤リスクによる建設コスト変動分のリスクプレミアムについて検討することが不可欠の課題となる。

- ・ 本手法を適用することで、従来から概念的には理解されてきた追加調査の効果が定量的に評価されることになる。このため、今後 PFI による調達方法に代表される、限られた予算条件下で地下工事を含む建設プロジェクトを実施する場合に、その予

備費の設定、資金計画の立案および、追加地質調査を実施するか否かの意思決定において、重要な情報を提供する手法になり得る。

本研究では、一事例を対象として検討を加えたが、今後は、他の事例についても同様な検討を行うことにより、本手法のプロジェクトのファイナンス面からの検討手法としての適用性についても検討を加えていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 近藤達敏：地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価，応用地質，第40巻，第6号，pp.340-345，2000.
- 2) 山下智志：市場リスクの計量化とVaR，朝倉書店，2000.
- 3) 野口悠紀夫：金融工学，こんなに面白い，文春新書，2000.
- 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：PF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.
- 5) 大津宏康，尾ノ井芳樹，大西有三，李圭太：建設プロジェ

クトにおける地盤リスク評価に関する一方策について，第20回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，pp.155-158，2002.

- 6) 中央建設業審議会：公共工事標準請負契約約款，改訂版，1989.
- 7) FIDIC: Conditions of Contracts for Construction for Building and Engineering Works Designed by the Employer, First Edition, 1999.
- 8) Einstein, H. H.: Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, Tunnelling and Underground Technology, Vol. 11, No.2, pp.141-151, 1996.
- 9) FIDIC: Conditions of Contract for EPC/Turnkey Projects, First Edition, 1999.
- 10) 日本材料学会編：ロックメカニクス，技報堂出版，2002.

(2003. 6. 2受付)

## A STUDY ON ESTIMATION OF THE CONSTRUCTION COST VARIATION OF UNDERGROUND CONSTRUCTION PROJECTS CAUSED BY VARIATION OF MECHANICAL PROPERTIES

Hiroyasu OHTSU, Yoshiki ONOI, Yuzo OHNISHI, Toru TAKAHASHI  
and Tatsuo TSUBOKURA

In this paper, methodology associated with the evaluation of cost variation in underground construction projects due to geotechnical risk is presented. In detail, indicator kriging is adopted to evaluate spatial distribution of mechanical parameter, RMR (Rock Mass Rating), which associates with rock mass classification and support patterns. Consequently, results pointed out that the evaluation method proposed in this study is applicable to predict cost variation in underground construction projects due to geotechnical risk, and useful to discuss the cost-benefit of additional in-situ investigation to reduce cost overrun risk.