

不連続性岩盤における地質調査の進展に伴う
建設コストの変動に関する研究

平成 23 年 2 月 23 日

京都大学地球工学科土木工学コース

太田 康 貴

要旨

トンネルに代表される地下構造物の建設においては、事前に地質調査が実施され、その結果を基に建設コストが推定される。しかし、予算や期間の制約上、事前調査により全ての地盤状況を明らかにすることは困難である。そのため、予見できない地盤条件に起因して、構造物の性能が満たされず、何らかの対策工が必要となる可能性がある。こうしたコストの発生は、プロジェクトの事業性に重大な影響を及ぼすものと考えられる。このような観点から、地盤条件を明らかにするため実施される事前地質調査の量、及び質に関して検討することは重要な課題であると推察される。

本研究では、亀裂性岩盤内における立坑掘削事業を例に挙げ、立坑を掘削する際に要する建設コストを推定する手法を提案する。建設コストは、マトリックス部において要するコストと、亀裂不連続面部において要するコストからなるものとし、それぞれ算出を行う。前者については、地盤統計学手法を用い、立坑位置での物性値を推定した後、岩盤等級分類に基づいて支保工を選択し、掘削コストを算出する。後者については、まず、断層や亀裂等の不連続構造を DFN（不連続亀裂ネットワーク）モデルとしてモデル化する。次に、構築したモデルを用い、地下水流動解析を実施し、得られた結果に基づき対策コストを算出する。これらの過程をモンテカルロシミュレーションにより複数回実施することで、得られた費用の変動をリスクカーブを用いて表現する。また、それぞれの費用の変動を表す指標として、Value at Risk を採用することで、定量的な評価を行う。

さらに、地質調査の進展に伴う情報の蓄積を基にデータセットを作成する。各データセットにおいて推定される建設コストと実際のコストとを比較し、両者にどの程度整合性があるのか確認することで、建設コスト算出法の妥当性に関して検討する。そして、各データセットを作成するにあたり実施された調査より得られた情報が、建設コストの推定にどのような影響を及ぼしたかに関して検討を加えることを本研究の主目的とする。

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 既往研究との関連	2
1.4 本論文の構成	3
第 2 章 建設コスト算出法の構築	4
2.1 健岩部における支保・掘削費の算出手順	4
2.1.1 岩盤等級分類手法	4
2.1.2 地盤統計学手法	4
2.2 亀裂・断層破碎部における湧水対策費，及び補助対策費の算出手順	5
2.2.1 DFN（不連続亀裂ネットワーク）モデルの構築	5
2.2.2 地下水流動解析	9
2.2.3 湧水対策費の算定	9
2.2.4 補助対策費の算定	9
2.3 リスクの定義	10
2.4 リスクカーブ	10
第 3 章 事例検証	11
3.1 対象領域の概要	11
3.2 通常型クリギングによる地質推定	11
3.3 岩盤等級の推定	12
3.4 支保・掘削費の算出	12
3.5 DFN（不連続亀裂ネットワーク）モデルの作成	12
3.5.1 解析領域の設定	13
3.5.2 データセットの作成	13
3.5.3 決定論的亀裂のモデル化	15
3.5.4 確率論的亀裂のモデル化	15

3.6 地下水流動解析	16
3.7 湧水対策費の算出	17
3.8 補助対策費の算出	17
3.9 建設コストの算出	18
3.10 建設コストに関する考察	18
 第 4 章 地質調査の進展に伴う建設コストの変動	 22
4.1 建設コスト変動の概念	22
4.2 建設コスト算出法の整合性に関する考察	22
4.2.1 実際の建設コスト算出	23
4.2.2 支保・掘削費と湧水対策費の和の期待推定値の変動に関する考察 ...	23
4.2.3 建設コストの期待推定値の変動	24
4.2.4 補助対策費に関する考察	25
4.3 建設コストの変動に関する考察	26
 第 5 章 結論	 30
5.1 結論	30
5.2 今後の課題	31
 参考文献	 31
謝辞	34

第1章 序論

1.1 研究の背景

トンネルや地下空洞等に代表される地下構造物の建設プロジェクトにおいては、主に地表面からの物理探査やボーリング調査などの地質調査が実施され、事前の調査段階で地盤状況を予測することにより設計、及び施工が行われる。しかし、どのような地下構造物の建設においても、事前調査に割り当てられる予算や期間の制約、及び地質調査の技術的な限界により、施工以前の設計段階において地下の複雑な地質状況を全て明らかに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分野の研究¹⁾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ひと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（以下、地盤リスクと称する）が発現した場合には、設計変更や追加調査などに伴う事前の積算金額からのコストオーバーランおよび工期遅延が生じる可能性がある。

こうした地盤リスクに関しては、建設プロジェクトの発注者、及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、地盤リスクに起因する建設コストの変動分は発注者において負担されることで請負者のリスク分担は回避されてきた²⁾。これは、従来の建設プロジェクト発注者が主に国・地方公共団体であり、発注者が請負者に比べて資金的余裕があったためと考えられる。しかし、近年は経済不況のため建設投資をはじめとした公共事業費が縮減される傾向にあり、新たな公共事業に対して資金投下を推進する余裕が失われてきた。また、PFI（Private Finance Initiative）やPPP（Public Private Partnership）方式等の導入により社会基盤構造物の調達方式に変化が起こり、地盤リスクに関する取り扱い、主として契約に関する新たな議論が活発化しつつある。さらには、今後海外における建設プロジェクトの受注が拡大することも予想され、プロジェクトに内在する不確実性と、それに起因する建設コストの変動を適切に評価することが重要な課題である。

このような背景のもと、地盤リスクの低減を目的に実施される事前地質調査の量、及び質について検討することは非常に有益であり、合理的な調査方法の提案に繋がるものと推察される。

1.2 研究の目的

従来，不連続性岩盤における地下構造物の建設においては，表 1.1 に示すような破砕帯等の不良地山の出現や突発湧水の発生等により，多大なコストオーバーラン，及び工期遅延を余儀なくされた事例が数多く報告されている³⁾⁻⁷⁾．また，昨今トンネル掘削方式が NATM (New Austrian Tunneling Method) から，急速施工が可能である TBM (Tunnel Boring Machine) 方式に取って変わられてきたことに伴い，突発湧水の発生が，掘削工事を遂行する上で重大な支障となる事例が増大している．これは，TBM では切羽が掘削機により密閉されているために，切羽からの水抜きボーリングや薬液注入などの湧水対策工の施工が困難になることに起因する．このような観点から，建設コストや工期に与える影響が非常に大きい地盤リスクを定量的に把握する必要があるものと推察される．

以上を踏まえ，本研究では不良地山における地盤リスクが発現した際の対策費用と，健岩部における掘削・建設費用を合わせたものを建設コストと称し，地下構造物の建設コストを推定する手法を提案する．さらに，同手法を実際に立坑掘削工事に適用して建設コストを算出し，地質調査の進展による情報の蓄積に伴い建設コストがどのように変動するかについて検討を加えることを目的とする．

1.3 既往研究との関連

本節では，地盤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紹介する．また，一連の研究の中における本研究の位置づけを述べる．

- Einstein⁸⁾は，トンネル施工における地質条件の不確実性に起因する建設コスト変動の重要性を指摘した．建設コストを平均値だけで評価するのではなく，その変動幅について評価することが必要である提案している．
- 大津・尾ノ井ら²⁾は，地質条件の不確実性を実プロジェクトに導入し，地盤統計学手法のひとつであるクリギング手法により基礎地盤を推定した．さらに，期待値からの外れ量をリスクと定義するリスク評価手法を提案している．
- 大津・大西ら⁹⁾は地盤統計学手法を用いた建設コスト変動解析を実際の建設工事における事後評価に適用し，推定される建設コストの変動分布と実際の建設コストの関連について検討した．
- 大津ら¹⁰⁾¹¹⁾は設計段階で全てを予見することのできない岩盤の不連続性に起

因する地盤リスク要因として突発湧水に着目し，それに伴う対策コスト変動リスク評価を実施した．さらに，地質調査に関する情報量の蓄積が，地盤リスクに起因する対策コスト変動リスクに及ぼす効果について事後評価の観点から検討を行った．その結果，不連続性岩盤では，地質調査の進展に伴い観測値と解析値の乖離量が一様に 0 に漸近していくのではないことを示した．つまり，新たな地質情報の発見により，乖離量は増減を繰り返しながら 0 に近づいていく可能性があることが示唆された．

大津らの研究においては，内挿を基本とした地盤統計学手法を用いて建設コストを推定し，その推定建設コストと実際の建設コストとの乖離量について検討している．また，実際の施工段階において，建設コストを推定する段階で得られている観測量の範囲を超える値が出現する可能性がある場合には，地盤統計学に基づく手法を用いて建設コストを推定することは適切ではなく，事前に得られる調査結果に対する対策シナリオを想定した対策コストの推定が必要となると述べている．

本研究は上記の研究を受け，不連続性岩盤における建設コストを定量的に評価する手法の提案を行い，それを実際の事例に適用した．また，調査の進展に伴い建設コストがどのように変動するかに関して検討を行う．

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 5 章からなる．

第 1 章では，序論として研究の背景，目的，及び既往の研究との関連を述べた．

第 2 章では，不連続性岩盤における建設コスト算出法について説明する．また，本研究で援用する，金融工学分野で用いられるリスク評価手法に関して言及する．

第 3 章では，実際の立坑掘削事業を取り上げ，第 2 章で提案した建設コスト算出法を適用し，建設コストを構成する各対策費が，建設コスト全体にどのように影響を及ぼすのか検討を加える．

第 4 章では，提案した建設コストの算出法の整合性に関して検討を加え，情報の蓄積に伴い，建設コストがどのように変動するか検討を加える．

第 5 章では，本研究で得られた知見，及び今後の課題について示す．

第2章 建設コスト算出法の構築

本章では不連続性岩盤における建設コスト算出法の提案を行う。本研究においては、対象とする不連続性岩盤はマトリックス部（以下健岩部と称す）と亀裂不連続面部（以下亀裂・断層破碎部と称す）とに分離されるものと仮定する¹²⁾。それを踏まえ、本研究では、建設コストは健岩部における支保・掘削費，亀裂・断層破碎部における湧水対策費，及び補助対策費からなるものとする。また，建設コストを評価するにあたり金融工学理論を援用することとする。

2.1 健岩部における支保・掘削費の算出手順

支保・掘削費の算出にあたり，まず，対象構造物が位置する地点における物性値を推定する。次に，推定された物性値を基に，健岩部の岩盤等級分類を行い支保パターンを決定する。そして，各支保パターンの累積区間長と各支保単価との積を求めることで，支保・掘削費を算出する。また，岩盤等級分類を行う際に用いる物性値は弾性波速度とし，弾性波速度分布の推定には地盤統計学手法を用いるものとする。

2.1.1 岩盤等級分類手法

事前調査で得られた物性値を基に岩盤等級分類を行い，各等級に応じた支保パターンを決定する。この際，電力中央研究所の岩盤等級分類等¹³⁾¹⁴⁾を参考にして作成した表 2.1 を用いて，支保パターンの決定を行う。

2.1.2 地盤統計学手法

地盤の物性値などを推定する手法については，従来から非常に多くの研究がなされてきている¹⁵⁾。それらの研究を踏まえ，本研究では地盤統計学手法である通常型クリギング，及びガウシアンシミュレーションの2通りの手法を用いる。

1) 通常型クリギング

クリギング手法とは，対象物性値の観測情報を用いて，確率変数としての物性値の空間分布を内挿補間法に基づいて算出する手法である。推定対象の空間場を

連続空間における定常確率場としてモデル化し，観測点から測定された情報をもとに任意の位置における確率場の値を推定する．

数あるクリギング手法の中でも，最も一般的なものが通常型クリギング手法である．これは，推定対象領域を2次固有定常確率場と仮定し，ある推定点における値をその近傍の観測点から得られた値と，重み係数を用いて推定するものである．

2) ガウシアンシミュレーション

ガウシアンシミュレーションは通常型クリギング手法を援用して，シミュレーション解析を行う手法のひとつである．通常型クリギング手法において求まる最尤推定量を平均，推定誤差分散を分散とする正規分布を作成し，その正規分布に従うモンテカルロシミュレーションを実施する．

通常型クリギングと異なり，ある推定点における推定値を正規乱数によって決定するため，確率論的な物性値を議論することが可能となる．これは，推定対象領域の情報量が非常に少ない場合においても地盤の推定を行うことができるという点で，有効な手法であると考えられる．

2.2 亀裂・断層破碎部における湧水対策費，及び補助対策費の算出手順

亀裂・断層破碎部における対策費を求めるにあたり，不連続性岩盤の構造を表現する必要がある．そのため，本研究では原位置調査結果に基づいて統計量を算出し，得られた亀裂情報をパラメータとして与えたDFN（不連続亀裂ネットワーク）モデルを作成する．その際，露頭調査等で確認された大規模な亀裂は決定論的に，それ以外の中・小規模な亀裂は確率論的にモデル化する（以下，前者を決定論的亀裂，後者を確率論的亀裂と称する）．さらに，作成されたDFNモデルを用いて地下水流動解析を行い，立坑内に発生する湧水量を算出する．

2.2.1 DFN（不連続亀裂ネットワーク）モデルの構築

地下構造物の基盤となる岩盤は，連続体として表現される健岩部と，不連続体として表現される亀裂・断層破碎部に分けて考えることができる．一般的に亀裂部の透水性は健岩部の透水性よりも数オーダー高い値であることが知られている¹⁶⁾．それを踏まえ，DFNモデルの作成にあたり，岩盤中の地下水流れは亀裂部の

みで表現され、健岩部には地下水流れが生じないと仮定してモデル化を行う。

1) 決定論的亀裂のモデル化

原位置調査から得られた、各亀裂の走向、傾斜、地表面でのトレース長、及び透水量係数等のデータを基に決定論的に亀裂のモデル化を行う。実際の断層・亀裂はある程度の曲面性を持っていると考えられるが、本研究では亀裂の形状を平面と仮定し、平面の組み合わせによって断層の屈曲構造を表現する。

2) 確率論的亀裂のモデル化

亀裂の形状、方向、半径、及び頻度等の幾何特性と、破碎幅、及び透水量係数の物理特性を亀裂特性パラメータとして確率論的に亀裂のモデル化を行う。これらのパラメータは原位置調査結果から得られた統計量に基づき設定を行う。次項より、各パラメータの導出方法について述べる。

1. 亀裂の形状

実際の亀裂の形状は多種多様であるが、決定論的亀裂と同じく平面としてモデル化を行う。亀裂をモデル化する際は、その形状を円盤もしくは多角形として取り扱うことが多い。本研究では、単位法線ベクトル、半径、及び中心位置のパラメータのみで形状を表現できるため円盤モデルを採用する。但し、事例検証においては簡易的に円盤と等価な面積を持つ正六角形に置き換えてモデル化を行う。

2. 亀裂の方向分布

一般に岩盤内の亀裂方向は巨視的なスケールで見ると、ある傾向を持つことが多く、地下深度が大きくなるほど規則性が高くなることが知られている¹⁷⁾。本研究ではシュミットネット（下半球投影図）を用い、原位置調査結果から得られたデータを基に亀裂の方向分布傾向を分析する。また、得られた亀裂の方向分布に対してクラスター分析を行い、クラスターごとに亀裂方向のパラメータを算出する。

亀裂の方向分布を与える式として代表的なものに Fisher 分布と Bingham 分布が挙げられる。Fisher 分布は卓越方向中心周りの等方的な分布であるのに対し、Bingham 分布は非等方的な分布である。原位置調査から得られた亀裂の方向分布

は必ずしも等方的な分布とはならないため，以下に示す確率密度関数で表現される Bingham 分布を採用する．

$$f(\theta', \phi') = C^{-1} \sin \phi' \exp[(\kappa_1 \cos^2 \theta' + \kappa_2 \sin^2 \theta') \sin^2 \phi'] \quad 0 \leq \phi' \leq \pi, \quad 0 \leq \theta' \leq 2\pi \quad (2.1)$$

$$C = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \phi' \exp[(\kappa_1 \cos^2 \theta' + \kappa_2 \sin^2 \theta') \sin^2 \phi'] d\phi' d\theta' \quad (2.2)$$

θ' 及び ϕ' はそれぞれ亀裂の卓越方向からの方位角，偏向角 [rad] を， κ_1 及び κ_2 は Bingham 分布のパラメータ（分散係数 [-]）を， C は正規化定数を表す．

3. 亀裂の半径分布

亀裂の半径は航空写真やボーリング調査等で観察される亀裂のトレース長から推定する．従来，トレース長の分布としては，対数正規分布が用いられてきたが，大野・小島¹⁸⁾は大小さまざまなスケールで亀裂のトレース長を測定し，その累積頻度分布がべき乗分布で表現されることを示した．それを踏まえ，本研究では，亀裂の半径分布として，以下に示すべき乗分布を採用する．

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r} \right)^b, \quad r \geq r_{\min} \quad (2.3)$$

r は亀裂半径 [m]， $r_{\min}$ は最小亀裂半径 [m] を， b はべき乗指数 [-] を表す．亀裂の最小半径，及びべき乗指数に関しては，それぞれ実際の岩盤観察，観察された亀裂のトレース長分布の傾きを基に設定するものとする．

4. 亀裂の頻度分布

3 次元的に亀裂をモデル化するためには 3 次元亀裂頻度が必要となるが，それを直接的に推定することは非常に困難である．そのため，ボーリング孔から得られる線情報としての 1 次元亀裂頻度 ρ_{10} [本/m] を基に，3 次元亀裂頻度 ρ_{30} [本/m³] または ρ_{32} [m²/m³] の推定を行う必要がある．

亀裂の形状を円形と仮定する場合，3 次元亀裂頻度 ρ_{30} は次式より推定される．

$$\rho_{30} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho_{10}}{\langle r \rangle^2} \quad (2.4)$$

また，亀裂の半径分布の確率密度関数を $f(r)$ と仮定すると，以下の式が成り立つ．

$$\rho_{32} / \rho_{30} = \int_r^\infty \pi r^2 f(r) dr \quad (2.5)$$

ここで，亀裂の半径分布の確率密度関数 $f(r)$ が (2.3) 式に従う場合，3次元亀裂頻度 ρ_{32} は次式のように導出される．

$$\rho_{32} = \frac{4\pi(b-2)^2}{(b-1)(b-3)} \cdot \rho_{10}, (b > 3) \quad (2.6)$$

$\langle r \rangle$ は平均亀裂半径[m]， b は前項で用いたべき乗指数[-]を表す．我が国におけるべき乗指数は概ね 3 より大きい¹⁹⁾と考えられるため，上記の導出式を採用する．

5. 亀裂の位置分布

一般に，大規模亀裂の周辺には小規模な分枝・派生亀裂が密集し，亀裂の疎密構造を形成することが知られており，これを考慮した亀裂の空間分布モデルも存在する．しかし，本研究では分枝・派生による疎密構造は取り扱わず，亀裂の中心位置分布はランダムであるとして，ポアソン過程に基づく **Beacher** モデルを採用する．参考として，代表的な亀裂の中心位置分布を図 2.1 に示す．

6. 亀裂の破砕幅

一般に，亀裂の破砕幅は亀裂のトレース長と強い相関が認められると考えられる．本研究では，亀裂の破砕幅を以下に示す大野・小島²⁰⁾の式を用いて決定する．図 2.2 に次式をグラフとして示す．

$$\log L = 2.7 + 0.70 \times \log W \quad (2.7)$$

ここで、 L は亀裂のトレース長[m]を、 W は亀裂の破砕幅[m]を表す。

7. 亀裂の透水量係数

観測された亀裂の透水量係数は、対数正規分布と非常に類似した分布となることが知られている。それを踏まえ、本研究では、透水量係数をボーリング孔における水理試験から得られる結果に基づく対数正規分布に従うものとする。

2.2.2 地下水流動解析

前項で作成した DFN モデルを用い地下水流動解析を行う。本研究では地下水流動解析を行うにあたり、亀裂ネットワークの発生、及び水理流動シミュレーションコードである FracMan²¹⁾を用いる。このソフトウェアは与えられた亀裂特性パラメータに基づいて亀裂を発生させることができ、構築された亀裂ネットワーク中の水理を正しく解析できるようにコード化されていることが確認されている。

2.2.3 湧水対策費の算定

DFN モデルを用い地下水流動解析を行うことで、亀裂から地下構造物に流れ込む湧水量を求めることが可能となる。そこで、構造物に流入する湧水量に対し閾値を設け、湧水対策コストを設定し、構造物に交差する亀裂 1 本ごとに湧水対策コストの算定を行う。各亀裂における湧水対策コストの和を求めることで、湧水対策費を算出する。

また、DFN モデル作成の際に乱数を使用しているため、得られるモデルが有する亀裂ネットワークの形態は様々であり、そこから生じる湧水対策費にはばらつきが生じるものと考えられる。そのため、モンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行うことで、統計的に湧水対策費の変動を取り扱う。

2.2.4 補助対策費の算定

地下構造物の建設プロジェクトでは、前述のように地質調査に基づき岩盤等級分類を行い支保パターンを決定する。しかしながら、構造物に亀裂が交差している区間が脆弱部であるとみなすと、支保工の変更等の補強・対策が必要であると考えられる。そこで、補強・対策に必要な費用を補助対策費と称し、建設コストを構成するひとつであるとする。補助対策費は、構造物と亀裂の総交差延長[m]

と設定した費用[円/m]との積を求めることにより算出する。

前項と同様の理由で、構造物と亀裂との交差長に基づいて算出される補助対策費に関しても複数回の解析を行い、統計的にコストの変動を取り扱う。

2.3 リスクの定義

従来、工学分野においては、リスクは次式に示す期待値として定義されることが一般的であった²²⁾。

$$R = P \times C \quad (2.8)$$

ここで、 R はリスク、 P は発生確率、 C は帰結を表す。

一方、金融工学分野では、リスクは式(2.8)に示す期待値からのはずれ量として定義されることが一般的である。その指標としては、標準偏差や VaR (Value at Risk)²³⁾等が用いられる。

本研究では、複数の費用により構成される建設コストの変動幅の評価を行う。そこで、金融工学分野におけるリスクという指標を導入することで、ある事象が期待値からどれだけばらつきを有するものであるか定量的に評価を行う。

2.4 リスクカーブ

リスクカーブとは金融工学分野で用いられるリスク表現手法のひとつであり、一般的に横軸にコスト、縦軸に超過確率を設定する。図 2.3 にリスクカーブの概念図を示す。なお、図中の VaR ($x\%$)は期待値からのはずれ量の代表値であり、リスクカーブでの超過確率 x に対応するコストを表す。リスクカーブはコストとその発生確率の関係を具体的に理解しやすいという特徴を持ち、定量的に推定コストのばらつきを表現することが可能となる。

次章では、岐阜県瑞浪市における超深地層研究所を例に挙げ、本章で提案した建設コスト算出法を適用する。

第3章 事例検証

本章では、実際の事例として、岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の立坑掘削工事を取り上げ、前章で提案した建設コストの算出を行う。

まず、対象領域の概要を述べ、支保・掘削費の算出を行う。次に、調査の進展に伴う情報の蓄積を表現するためのデータセットを作成し、湧水対策費、及び補助対策費の算出を行う。そして、建設コストを構成する各費用の特性に関して検討を加えるものとする。

3.1 対象領域の概要

瑞浪超深地層研究所では、日本原子力機構により、高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する研究開発の基盤となる深地層の科学的研究が行われている。工事予定としては、総延長 1000m の 2 本の立坑、及び水平坑道の掘削が予定されている。対象領域である岐阜県瑞浪市の東濃地域には、基礎岩類として中生代後期白亜紀の土岐花崗岩が広く分布している。一般に、花崗岩からなる岩盤内には多くの節理や亀裂、及び断層等が発達しており、亀裂ネットワークの分布状況により透水性が大きく変動することが知られている。

瑞浪市東濃地域では、超深地層研究所建設に際し、継続的に原位置での調査が行われている。図 3.1 に実際に打設されたボーリング孔の位置を示す。次項より、図 3.2 に示す超深地層研究所の主要構造物のひとつである主立坑の深度 300m までの掘削工事を対象とし建設コストの算出を行う。

3.2 通常型クリギングによる地質推定

通常型クリギングにより、主立坑位置における弾性波速度分布を推定するにあたり、MIZ-1 号孔において実施された弾性波速度検層の結果を利用する。図 3.3 に示すように、MIZ-1 号孔は研究所用地内に打設されたボーリング孔であり、主立坑近傍に位置している。通常型クリギングを行うにあたり、空間的相関関係を示すセミバリオグラム関数を近似から求める必要がある。本研究では、近似するセミバリオグラムとして地盤工学分野で多用される指数型モデルを採用した。また、モデルの単純化を考慮し、関数形のパラメータの決定法として最小二乗法による近似を適用し、水平方向と鉛直方向の 2 次元異方性は考慮せずセミバリオグ

ラムを作成する。また、解析領域として、主立坑、及び MIZ-1 号孔を包含する 250m×500m の平面を対象領域とし、格子サイズは 10m×10m とする。

以上のような条件のもと通常型クリギングを行った結果を図 3.4 に示す。また、図 3.5 に、結果より得られた主立坑位置における弾性波速度値と MIZ-1 号孔で実施された速度検層結果を併せて示す。両結果は概ね一致していると見受けられる。

3.3 岩盤等級の推定

前項で得られた弾性波速度分布を基に、主立坑位置における岩盤等級分類を実施する。岩盤等級分類を行う上で必要となる物性値と閾値との関係については、表 2.1 の値を用いる。また、支保パターンごとの掘削、及び支保工に要する 1m あたりの概算費用について表 3.1 に示す。概算費用に関しては、超深地層研究所で高レベル放射性廃棄物処理トンネル建設を行う際に、必要であると推定される支保単価を基に算出した¹¹⁾。図 3.6 に前項の通常型クリギング結果に基づいた、主立坑位置における岩盤等級分類結果を示す。

3.4 支保・掘削費の算出

3.2 における通常型クリギングにより得られた最尤推定量を平均、推定誤差分散を分散とする正規分布を作成し、ガウシアンシミュレーションを実施する。本研究では、リアライゼーション（以下、rlz と示す）回数を 500 回とした。その結果、各岩盤等級の出現頻度は B 級以上が約 50%、CH 級が約 28%、CM 級が約 19%、CL-D 級が約 3% であった。ガウシアンシミュレーションにより得られた、岩盤等級の頻度分布を図 3.7 に、以上の結果を基に作成した支保・掘削費に関するリスクカーブを図 3.8 に示す。

3.5 DFN（不連続亀裂ネットワーク）モデルの作成

亀裂・断層破碎部で発生する対策費を求めるにあたり、DFN モデルの作成、及び地下水流動解析を実施する。DFN モデルを用い、岩盤の不連続構造をモデル化する際、亀裂を発生させる領域や境界条件、亀裂のパラメータを決定する必要がある。亀裂のパラメータは原位置調査結果に基づくものとする。

3.5.1 解析領域の設定

解析領域，及び境界条件を図 3.9 に示す．解析領域として地表面の標高が 193.33m，中心座標が (-27.00m, 106.50m, -306.67m) である 1000m×1000m×1000m の空間を設定する．さらに，主立坑を地表面座標 (-27.00m, 106.50m) の位置，換気立坑を地表面座標 (-52.59m, -137.27m) の位置にモデル化し，両立坑の長さは 300m とする．また，東濃地域では，既往のボーリング調査などから地質条件の概略調査が実施されている．それらの調査結果を踏まえ，本研究では，解析領域を上部から堆積岩部，花崗岩上部割れ目帯，花崗岩下部低密度割れ目帯の 3 層構造とする²⁴⁾．それぞれの層の境界面は地表面に平行であるとし，各境界面の標高について表 3.2 に示す．

3.5.2 データセットの作成

本項では，調査の進展に伴う情報の蓄積を表現するためのデータセットの作成を行う．表 3.3 に原位置調査データとデータセットの関係を示す．

1) データセット 0 の概要

データセット 0 は，文献調査段階であることを考慮し，確率論的亀裂のみをモデル化する．しかし，月吉断層は別途詳細な調査が実施されているため，決定論的亀裂としてモデル化を行う．確率論的亀裂に関しては，便宜的にデータセット 1 と同等とする．

2) データセット 1 の概要

データセット 1 では，露頭調査で観測された 5 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する．透水量係数が推定されている亀裂は月吉断層のみである．確率論的亀裂に関しては，対象領域周辺での既往のボーリング孔において得られた情報に基づき，亀裂のパラメータを決定する．

3) データセット 2 の概要

データセット 2 では，新規浅層ボーリング孔 DH-2 において得られた情報に基づき，データセット 1 でモデル化した決定論的亀裂の位置，方向，透水量係数の修正を行う．また，新たに観測された 4 本の亀裂を合わせた総数 9 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する．なお，月吉断層を含む 6 本の亀裂に関しては透水量係数が推定されている．確率論的亀裂に関しては，ボーリング孔 DH-2 において得られた情報に基づき，亀裂のパラメータを修正した．

4) データセット 3 の概要

データセット 3 では，新規深層ボーリング孔 DH-15，MIZ-1 において得られた情報に基づき，データセット 2 でモデル化した決定論的亀裂の位置，方向，透水量係数の修正を行う．また，新たに観測された 3 本の亀裂を合わせた総数 12 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する．なお，月吉断層を含む 9 本の亀裂に関しては透水量係数が推定されている．確率論的亀裂に関しては，ボーリング孔 DH-15，MIZ-1 において得られた情報に基づき，亀裂のパラメータを修正する．

5) データセット 4 の概要

データセット 4 では，新たに実施された孔間水理試験，孔間トモグラフィ試験結果に基づき，データセット 3 までに得られたデータの見直しを行い，総数 26 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する．なお，月吉断層を含む 13 本の亀裂に関しては透水量係数が推定されている．確率論的亀裂に関しては，データセット 3 と同様とする．

6) データセット 5 の概要

データセット 5 以降は，実際の立坑掘削が開始されてからの情報に基づきデータセットを作成する．データセット 5 では，新たに実施された立坑の切羽からのパイロットボーリングから得られたデータに基づき新たに 5 本の亀裂を決定論的にモデル化する．これらにデータセット 4 での決定論的亀裂を加え，総数 31 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する．なお，月吉断層を含む 15 本の亀裂に関しては透水量係数が推定されている．確率論的亀裂に関しては，パイロットボーリングにおいて得られた情報に基づき，亀裂パラメータを修正する．

7) データセット 6 の概要

データセット 6 では，決定論的亀裂に関しては，データセット 5 と同様とする．確率論的亀裂に関しては，立坑深度 200m から 300m にかけて実施された立坑内壁面観察結果に基づき，パラメータを修正する．また，パイロットボーリングから得られた亀裂の透水量係数に関する情報が訂正されたため，新たに得られた情報に基づき，パラメータを更新する²⁵⁾．

8) データセット 7 の概要

データセット 7 では，深度 300m に掘削された研究用水平坑道における調査より得られた情報に基づき，決定論的亀裂をモデル化する．これらにデータセット 5 までに得られた決定論的亀裂を一部見直したものを加え，総数 39 本の亀裂を決

定論的亀裂としてモデル化する．なお，新規の透水量係数に関する調査は行われておらず，15本の亀裂に関して透水量係数が推定されている．確率論的亀裂に関しては，データセット6と同様とする．

9) データセット8の概要

データセット8では，決定論的亀裂に関しては，データセット7と同様とする．確率論的亀裂に関しては，深度300mに掘削された研究用水平坑道において実施された壁面観察結果に基づき，亀裂のパラメータを修正する．

3.5.3 決定論的亀裂のモデル化

各データセットに基づいて，決定論的亀裂のモデル化を行う．図3.10に対象領域の断層分布図を，表3.4に推定されている決定論的亀裂の透水量係数を示す．なお，全ての決定論的亀裂において透水量係数が推定されているわけではない．透水量係数が推定されていないものに関しては，確率論的亀裂と同様，対数正規分布を与えることでモデル化を行う．

3.5.4 確率論的亀裂のモデル化

確率論的亀裂のモデル化を行う際に，必要なパラメータの設定方法を述べる．

1) 亀裂の形状

確率論的亀裂の形状は円盤と仮定し，計算の簡略化のため円盤と等価な面積を持つ六角形に変換してモデル化を行う．

2) 亀裂の方向分布

対象領域の基盤岩種の中で広く分布している花崗岩は，既往の観察結果によると，互いに直行する3組の水平・鉛直方向の亀裂群が卓越することが知られている²⁶⁾²⁷⁾．原位置調査から得られる亀裂の空間分布の傾向をシュミットネットにより分析した結果においても，亀裂群が3組の卓越する方向を有しているという傾向が確認できた．そのため，図3.11に示すように，原位置調査から得られた亀裂群を重心法によるクラスター分析によって3組に分類し，各クラスターにおける亀裂のパラメータを算出した．データセット6やデータセット8における花崗岩上部割れ目帯のクラスター分析結果においては，各クラスターが大円の中心周りに対称に分布している．これは情報の蓄積によるデータセットの更新に伴い，共役関係にある亀裂の方向が表現されたものと推察される．各亀裂の方向分布には，

2.2.1 で述べた Bingham 分布を採用する．表 3.5 に各データセットでのパラメータを示す．

3) 亀裂の半径分布

亀裂の半径分布には 2.2.1 で述べたべき乗分布を採用する．本研究では既往の研究を参考に，対象サイトが位置する東濃地域におけるリニアメントから最小亀裂半径 $r_{\min}$ を 50m，べき乗指数 b を 4.1 と設定した．

4) 亀裂の頻度分布

原位置調査のボアホール TV から得られる 1 次元亀裂頻度 ρ_{10} の各層における比を用いて，3 次元亀裂頻度 ρ_{32} を導出する．なお，対象サイトの堆積岩部において，リニアメントから得られた観測結果，及び既往の研究におけるトレース長分布と合致するようにキャリブレーションを行った結果，堆積岩部における 3 次元亀裂頻度が $0.02[\text{m}^2/\text{m}^3]$ と推定されている．これを踏まえ，堆積岩部，花崗岩上部割れ目帯，及び花崗岩下部低密度割れ目帯の 1 次元亀裂頻度の比より，3 次元亀裂頻度を推定した．また，亀裂の方向分布に基づき，各層はそれぞれ 3 つのクラスターに分類されているが，各層において各クラスターに存在する亀裂数の比より，それぞれのクラスターの 3 次元亀裂頻度を決定した．1 次元亀裂頻度の値を表 3.6 に，3 次元亀裂頻度の値を表 3.7 に示す．

5) 亀裂の位置分布

亀裂の位置分布は，ポアソン過程に基づく Baecher モデルを用いる．

6) 亀裂の破砕幅

亀裂の破砕幅には，式 (2.5) に示す大野・小島の経験式を用いて決定する．

7) 亀裂の透水量係数

亀裂の透水量係数は，対数正規分布を採用する．原位置調査から得られた透水量係数の統計量を表 3.8 に示す．

3.6 地下水流動解析

湧水対策費を求めるにあたり，3.5 で作成した DFN モデルを用い地下水流動解析を行う．その際，立坑内に発生する湧水量を統計的に扱うために，モンテカルロシミュレーションにより複数回解析を実施する．本研究では，rlz 回数を 500 回と設定し，FracMan による地下水流動解析を実施した．

3.7 湧水対策費の算出

前項で実施した地下水流動解析結果を基に，立坑に交差する亀裂 1 本ごとの湧水量を算出する．そして，各亀裂の湧水量に対して表 3.9 に示す湧水対策シナリオを適用することで，各亀裂の湧水対策コストを決定する．その後，それらの和を求めることで，湧水対策費を算出した．なお，湧水対策シナリオを作成するにあたり，湧水量の閾値，及びそれに対応した湧水対策コストは既往の研究²⁸⁾を参考に設定した．このようにして得られた湧水対策費の分布を基に，図 3.12 に示すリスクカーブを作成した．

既往の研究¹⁰⁾においては，地下水流動解析の rlz 回数は 50 回であった．そこで，発生頻度は低いものの，一度発生すると建設コストに重大な影響を与える湧水被害に関する対策費を推定するにあたり，地下水流動解析の rlz 回数を増加させることが対策費の推定にどのような影響を及ぼすかに関して考察を加える．rlz 回数の変更による湧水対策費の推移を比較する際に用いる指標は VaR(1%)，及び VaR(5%)とする．rlz 回数が 50 回の場合におけるデータセットの更新に伴う湧水対策費の VaR(1%)，VaR(5%)の変動を図 3.13 に，rlz 回数が 500 回の場合におけるデータセットの更新に伴う湧水対策費の VaR(1%)，VaR(5%)の変動を図 3.14 に示す．rlz 回数が 50 回の場合に関しては，VaR(1%)と VaR(5%)が概ね同様の値を示しているのに対し，rlz 回数が 500 回の場合に関しては，両者が大きく異なる．VaR(5%)は，データセット 2，及びデータセット 3において大きな値を示しているが，VaR(1%)は，データセット 0 からデータセット 4 にかけて大きな値を示している．これは，発生頻度は低いものの，一度発生すると建設コストに重大な影響を及ぼすという湧水被害の概念に適合する結果であると考えられる．そのため，低頻度重大事象である湧水被害に関する対策費を推定するにあたり，地下水流動解析の rlz 回数を増加させることで湧水対策費の推定精度は向上するものと推察される．

3.8 補助対策費の算出

2.2.4 で述べたように，本研究における補助対策費は立坑とそれに交差する亀裂の総交差延長を基に算出する．立坑と亀裂との交差長を求める際は，設定した立坑の座標と，DFN モデルより得られる各亀裂の平面方程式を用いた．図 3.15 に立坑と亀裂との交差長の算出法の概要を示す．また，脆弱部に必要と考えられる補

強・対策に要する費用 [m/円]を設定するにあたり，本研究では岩盤等級ごとの支保単価に着目した．瑞浪超深地層研究所における実際の立坑掘削工事においては，支保パターンの変更が脆弱部の補強・対策に対する主要な手段とされていたと推察されるためである²⁹⁾．対策費の設定方法は図 3.16 に示すように要約される．

表 3.1 に示すように，岩盤等級が B 級以上，CH 級，CM 級の場合に関しては，それぞれの支保単価に大きな差は見られない．しかし，岩盤等級が CL-D 級の場合に必要な支保単価は，他の岩盤等級の際に必要な支保単価に比べて非常に高額である．これは，CL-D 級と判断された岩盤が有する脆弱性に起因するものであると推察される．そのため，CL-D 級の場合における支保単価と，CL-D 級以外の場合の支保単価との差が脆弱部の補強・対策に要する費用であるとして，対策費の設定を行った．以上のようにして定めた対策費と立坑に交差する亀裂の総交差延長との積を求めることで，補助対策費を算出した．補助対策費に関するリスクカーブを図 3.17 に示す．

3.9 建設コストの算出

前述のように，本研究において，建設コストは健岩部における支保・掘削費，亀裂・断層破碎部における湧水対策費，及び補助対策費から構成される．

上記の 3 つの費用に関するリスクカーブを全て重ね合わせたものを図 3.18 に示す．これが，建設コストに関するリスクカーブとなる．

3.10 建設コストに関する考察

本項では，建設コストを構成する支保・掘削費，湧水対策費，及び補助対策費の算出結果に関して考察を加える．図 3.18 に示す建設コストに関するリスクカーブにおいて，それぞれの対策費が有する特性が大きく表れていると推察される部分を示す．

1) 支保・掘削費

図 3.8 のリスクカーブから見てとれるように，支保・掘削費のコスト変動幅は非常に小さいものとなっている．岩盤等級が CL-D 級における支保単価は，他の岩盤等級における支保単価と比較すると，非常に大きな値である．そのため，リスクカーブにおけるコスト変動幅は CL-D 級がどれだけ発生するかによるものであると推察される．ガウシアンシミュレーションの結果，CL-D 級の発現が約 3%

にとどまったため，コスト変動幅が小さくなったものと考えられる．

本研究においては，ガウシアンシミュレーションの rlz 回数を 500 回としたが，試行回数を増加させることでコスト変動幅は増加し，更に大きな支保・掘削費が発現する可能性も考えられる．そのような事象の推定は，順序統計学の範疇に属する極値統計学手法の援用により可能であると推察される³⁰⁾．

極値は，もともとの確率変数の密度関数における裾部と密接な関係がある．図 3.19 に支保・掘削費の頻度分布に基づく 2 区間移動平均の近似曲線を示す．上方裾部が指数形であるとみなせるため，その最大値分布は漸近的に I 型のタイプとなる．I 型最大値漸近型の累積密度関数を以下に示す．

$$F_{X_n} = \exp[-e^{-\alpha(x-u)}] \quad (3.1)$$

u は位置パラメータであり，原確率変数 X の特性最大値を， α はスケールパラメータであり， X_n の拡がりの大きさを示す逆尺度である．両パラメータを推定するにあたり，適用が容易であり，精度の良い Lieblein による順序統計学に基づく手法を採用する．図 3.20 にパラメータ決定手順を示す．決定したパラメータを用いることにより，今後 N 回の試行により超過する確率 $[-]$ が p となるコストが次式により推定可能となる．

$$x_N(p) \approx u + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{N}{p} \quad (3.2)$$

N が 1000， p が 1.0×10^{-2} の場合に得られるコストは 272 百万円， N が 10000， p が 1.0×10^{-2} の場合に得られるコストは 290 百万円であり，試行回数 500 回のガウシアンシミュレーションで得られた最大値より大きな値である．

2) 湧水対策費

図 3.12 に示すリスクカーブより，湧水対策費が必要となるケースはそれほど多くないことがわかる．しかしながら，大規模な被害が生じた場合においては，高額な対策費が必要となり，コスト変動幅は非常に大きい．

ここで，各データセットの中で最も高額な湧水対策費 320 百万円が発生したデータセット 4 に着目し，同一 rlz 中に大規模被害が複数発生する要因に関して検

討する。

データセット 4 において、掘削深度 300m としてモデル化された主立坑に交差する亀裂の本数は、DFN モデル 1 つあたり約 4 本であった。また、全ての亀裂に対し湧水対策シナリオを適用することで、得られた被害規模ごとに亀裂を分類したものを表 3.10 に示す。データセット 4 において、主立坑に交差する亀裂が 4 本であると仮定すると、同一 rlz 中に大規模被害を引き起こす亀裂が 3 本交差する確率[%]が 3.0×10^{-4} 、2 本交差する確率[%]が 5.0×10^{-2} となる。これらは非常に小さな確率であり、500 回の rlz で何度も発生することは考えにくい。そのため、主立坑に交差する亀裂が 4 本であるという仮定が適切でなかったものと推察される。

それを踏まえ、各データセットでの大規模被害が複数回発生した rlz における、主立坑に交差する亀裂本数に着目する。図 3.21 に各データセットにおける大規模被害が発生した rlz における平均亀裂交差本数と、そのデータセットでの平均亀裂交差本数との関係を示す。図 3.21 より、複数回大規模被害が発生している rlz においては、主立坑に交差する亀裂が多いことが分かる。これは、主立坑近傍に密集した亀裂が亀裂ネットワークの連結性に影響を与え、湧水量が大幅に増加したものと考えられる。

また、データセット 4 において主立坑に交差した亀裂を対象とし、個々の亀裂が有するパラメータと亀裂からの湧水量の関係に着目する。図 3.22 に亀裂の透水量係数と湧水量の関係、図 3.23 に亀裂の破碎幅と湧水量の関係、図 3.24 に亀裂の深度と湧水量の関係を示す。図より、亀裂の透水量係数と湧水量の間には強い正の相関関係が見て取れる。このため、亀裂の湧水量はその透水量係数に大きく影響を受けているものと推察される。

3) 補助対策費

前述のように、補助対策費は主立坑に交差する亀裂の交差長に起因して生じる。DFN モデル作成にあたり乱数を使用しているため、亀裂の総交差長の分布はばらつきを持ったものとなる。そのため、図 3.17 に示すように、コスト変動幅は大きく、建設コストの変動に及ぼす影響も大きいものと考えられる。

建設プロジェクトを実施するにあたり、地盤リスクの発現によりコストオーバーランや工期遅延が生じる可能性があることは前述の通りである。そうした観点から、建設コストを構成する 3 つの対策費のなかでも、プロジェクトの事業性に

重大な影響を及ぼす可能性があるのは、コスト変動幅が大きい亀裂・断層破砕部で要する対策費であると考えられる。

第4章 地質調査の進展に伴う建設コストの変動

前章では，実際の事例に建設コスト算出法を適用することで，各データセットにおける建設コストを算出した．それを踏まえ，本章では，調査結果に基づき推定された建設コストが，実際の建設コストとどの程度整合性があるかに関して検討を加える．さらに，地質調査の進展による情報の蓄積に伴い建設コストがどのように変動するかについて検討を加える．

4.1 建設コスト変動の概念

図 4.1 に地盤統計学に基づく建設コスト変動リスク評価手法の基本概念について示す⁹⁾．地盤統計学により得られる情報は本質的には確率量であるから，推定される建設コストも確率量となる．

ここで，金融工学分野の考え方に準じて，建設コスト C_i の確率分布が期待値 μ_i ，標準偏差 σ_i を有する正規分布に従うと仮定する．この仮定条件下で，点 A_1 から点 A_n として示したように建設コストの期待値は変動する．概念的には，調査の進展に伴い，期待値は実際の建設コストに近づき，ばらつきの幅も低減されるものと解釈される．このため，各建設コスト C_i の標準偏差 σ_i については，以下の関係式が成り立つものと推察される．

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \cdots > \sigma_n \quad (4.1)$$

4.2 建設コスト算出法の整合性に関する考察

第 2 章で提案した建設コスト算出法は，建設プロジェクトを実施する上での事前評価を対象としたものである．その算出法より得られた結果に基づいて，情報の蓄積に伴う推定建設コストの変動を議論するにあたり，事前に推定された建設コストが，施工終了時点で確定する実際の建設コストとどの程度整合性があるかという点は非常に重要であると推察される．それらを踏まえ，本項では，瑞浪超深地層研究所で主立坑を深度 300m まで掘削するのに要したと考えられる実際の費用を算出する．そして，第 3 章で得られた推定建設コストと比較を行い，建設コスト算出法の整合性に関して検討を加える．

4.2.1 実際の建設コスト算出

本研究では、建設コストが支保・掘削費、湧水対策費、及び補助対策費からなるものと想定した。補助対策費に関しては、立坑と亀裂との交差長に起因して生じるものと設定したため、事後評価の観点から実際に要した費用を算出することは非常に困難である。そのため、施工後得られた情報を基に、実際に要した支保・掘削費、及び湧水対策費に関して算出を行うものとする。

1) 実際に要した支保・掘削費

主立坑の掘削に伴い、得られた地質観察結果に基づいて岩盤等級分類が実施された結果を図 4.2 に示す。図より、堆積岩部、花崗岩部ともに岩盤等級 CL-D 級が卓越しており、主立坑位置は脆弱な岩盤が分布していることが読み取れる。地質観察結果と表 3.1 で設定した岩盤等級ごとの支保単価を基に算出した、主立坑を深度 300m まで掘削した場合に要する支保・掘削費は 370 百万円であった。

実施された地質観察結果はバイアスの影響を考慮することが必要であり、施工時に採用された岩盤等級が、その地点における岩盤の特性を正確に反映しているわけではないものの、実際の岩盤等級と施工時に採用された岩盤等級は概ね一致しているものと推察される。

2) 実際に要した湧水対策費

瑞浪超深地層研究所では主立坑の掘削にあたり、グラウトの注入など、未然に湧水被害を防ぐ試みが実施されていることもあり、湧水対策費が必要となるような湧水は発生していない。そのため、湧水被害は生じなかったものとし、実際に要した湧水対策費は 0 百万円とする。

実際に要した支保・掘削費と湧水対策費はそれぞれ 370 百万円、0 百万円であるから、その和は 370 百万円である。

4.2.2 支保・掘削費と湧水対策費の和の期待推定値の変動に関する考察

提案した算出法により、得られた建設コストの分布は正規分布に従わない。しかしながら、概念的には 4.1 で述べたように、調査の進展に伴い、推定された期待値は実際の建設コストに近づき、ばらつきの幅も低減されるものと推察される。

9).

4.2.1 で求めた実際の費用は、支保・掘削費と湧水対策費の和である。そのため、実際のコストと期待推定値とを比較するにあたり、期待推定値に関しても補助対策費については考慮せず、第 3 章で得られた各データセットにおける支保・掘削費と湧水対策費の和の期待推定値を用いて比較を行う。図 4.3 にデータセットの更新に伴う期待推定値と標準偏差の変動を示す。

標準偏差に関しては、データセット 1 からデータセット 2 にかけて大きく増加している。データセット 0、及びデータセット 1 においては、情報の蓄積が十分ではなく、湧水による被害を適切に評価することができないため、推定されるコストがほとんど変動しない。その後、調査の進展に伴い、より精度良く湧水による被害を評価することが可能となり、推定されるコストに変動が生じたため標準偏差が増加したものと推察される。データセット 2 においては大規模な湧水被害が多数発生した。図 4.4 に各データセットにおける大規模な湧水被害の発生回数を示す。大規模な湧水被害が発生した際に要する費用は 100 百万円であり、それが発生した場合としなかった場合とでは、対策費に大きな差が生じる。そのため、標準偏差が大きくなったものと推察される。データセット 2 からそれ以降にかけては、大規模な湧水被害発生の減少に起因し、概ね減少傾向を示している。

期待推定値に関しては、データセットの更新に伴う変動がほとんど見られない。コスト変動幅が小さく、値も大きいため、期待推定値に与える影響が大きいと考えられる支保・掘削費は、各データセットで同じ値を用いている。また、湧水対策費に関しては、大規模な被害が発生した場合は、全体のコストに与える影響は大きいものの、発生頻度は非常に小さいため、期待推定値の変動にはそれほど影響を及ぼさないものと考えられる。それらの理由で、情報の蓄積に伴うコストの変動が生じなかったものと推察される。

また、期待推定値と実際のコストとの間には大きな乖離が確認できる。ここで、期待推定値の変動を検討する際、考慮に入れなかった補助対策費を加えた場合、コスト変動の様子がどのように変化するか検討を加える。

4.2.3 建設コストの期待推定値の変動

図 4.5 にデータセットの更新に伴う建設コストの期待推定値、及び標準偏差の変動を示す。

標準偏差に関しては，4.2.2 の場合と同様，データセット 1 からデータセット 2 にかけて増加しているものの，全体としては減少傾向にあることが見て取れる．期待推定値に関しては，データセットの更新に伴い，実際のコストに近づいている．推定コストと実際のコストとの整合性を議論する上で，補助対策費を加えた結果，建設コスト変動の概念により整合する結果が得られた．次項において，この理由に関して検討を加える．

4.2.4 補助対策費に関する考察

補助対策費を推定コストに加えた結果，建設コスト算出法の精度向上が確認できたことに関して，支保・掘削費算出結果と関連づけて考察を加える．

本研究では，支保・掘削費を算出するにあたり，地盤統計学手法である通常型クリギングを適用した．その結果，得られた主立坑位置における岩盤等級は図 3.6 に示すようなものであった．それを，図 4.2 に示す地質観察結果に基づく主立坑位置における岩盤等級分類の結果と比較する．実際の等級は CL-D 級が卓越しており，両者に整合性は見られない．主立坑位置における岩盤の脆弱性は，断層群の存在に起因するものであると推察される．施工段階において実施されたパイロットボーリングの孔口（主立坑深度 180m）までの立坑の壁面地質調査の結果，主立坑において堆積岩から孔口深度まで断続的に分布する 3 条の断層が確認されている²⁹⁾．図 4.6 に事前に想定されていた断層位置と主立坑位置の平面的な関係を，図 4.7 に壁面地質調査の結果確認された断層群を示す．

この結果，不連続性岩盤における亀裂，及び断層等が分布している地点においては，地盤統計学手法を用いた物性値の推定が困難であり，通常型クリギングにより得られる岩盤等級分類結果が安全側に評価される可能性が示唆された．そのため，支保・掘削費が実際に要する費用より過小に評価されることとなり，推定建設コストが減少するが，補助対策費を設けることにより，その減少分が補正されたものと推察される．

本研究で対象とした領域においては，立坑位置における深度 300m までの地質観察を基に岩盤等級分類が行われた結果，堆積岩部に岩盤等級 CL-D 級の卓越が確認できた．しかしながら，立坑位置において岩盤等級 CL-D 級が存在しない，または，非常に少ないような領域においては，補助対策費を設けることで，建設コストの推定精度が悪化する可能性がある．そのような領域においては，通常型

クリギングを適用することで推定された立坑位置の岩盤等級がどのようなものであれ、補助対策費を設けることにより、推定建設コストの期待推定値が実際の建設コストを上回る可能性がある」と推察されるためである。

4.3 建設コストの変動に関する考察

本研究では、情報の蓄積に伴いデータセットの更新を行った。そして、更新されたデータを用い、各データセットでの亀裂・断層破碎部における湧水対策費、及び補助対策費を算出した。支保・掘削費に関しては情報の蓄積に伴う更新を行っていないため、亀裂・断層破碎部における対策費の変動に起因して、建設コストの変動が生じる。本項では、亀裂・断層破碎部における対策費のデータセットの更新に伴う変動に関して考察を加える。ここで、データセット 0 からデータセット 2 までを調査初期段階、データセット 3 とデータセット 4 を調査後期段階、データセット 5 以降を施工段階とする。建設コスト変動の概念を踏まえ、施工段階で得られた情報に基づいて算出された各対策費、及び建設コストは実際のコストに近い値が得られているものと推察される。そのため、事前調査段階で推定されたコストと施工段階で推定されたコストとを比較することで、事前調査段階における情報の蓄積により、地質情報がどれほど明らかにされているか検証する。

また、建設コストの変動に関して考察を加えるにあたり、コスト評価の指標として $VaR(1\%)$ （以下、 VaR と称す）に着目する。 VaR は意思決定者の不利になる側の値であるダウンサイドリスクを評価するための尺度であり、 VaR の測定では分布の両裾の部分に着目し、通常 95%、99%あるいはそれ以上の信頼水準で計算される。なお、具体的な超過確率をどのように設定するか明確な基準は定められていないため、本研究では金融工学分野で用いられる超過確率 1%の値を用いた。この VaR によって、施工者や事業者はコストをどの程度準備しておくべきか判断することができる。

1) 湧水対策費の変動、及びその要因

図 4.8 にデータセットの更新に伴う湧水対策費の VaR の変動を示す。 VaR は調査初期段階において増加し、調査後期段階において減少、施工段階において更に減少している。

データセット 0 とデータセット 1 について比較すると、 VaR はほとんど変化し

ていない。データセット 1 を作成するに当たり実施された露頭調査により新たに大規模な亀裂が発見されたが、それらの亀裂は主立坑位置における地下水流れに影響を及ぼさなかったものと推察される。

データセット 1 からデータセット 2 にかけて VaR は大きく増加している。データセット 2 では、既存ボーリング調査、及び浅層ボーリング調査結果に基づき、新たな大規模亀裂が発見された。3.10 において亀裂の透水量係数と湧水量の間に正の相関関係を確認したが、新たに発見された亀裂の多くは、データセット 1 までに発見された大規模亀裂より大きい透水量係数を有している。そのため、これらの亀裂は主立坑に交差はしていないものの、亀裂ネットワークの連結性に影響を与え、立坑へ流入する湧水量が大幅に増加したものと推察される。

データセット 2 からデータセット 4 にかけて VaR は減少している。データセット 3 を作成するにあたり実施された深層ボーリング調査により、データセット 2 までの花崗岩上部割れ目帯における 3 次元亀裂頻度 [m^2/m^3] が大きく推定されていることを確認し、下方に修正を行った。花崗岩上部割れ目帯に存在する亀裂は、立坑に交差するといった直接的な影響、及び亀裂の連結性といった間接的な影響の両面から主立坑位置における地下水流動に及ぼす影響は大きいものと推察される。そのため、その領域における亀裂頻度の減少が湧水被害の減少に寄与するところは大きいと考えられる。さらに、深層ボーリング調査、孔間水理試験、及び孔間トモグラフィ試験に基づき、大規模亀裂の透水量係数が順次修正され、小さな値となった。それらの結果、VaR が減少したものと推察される。

データセット 4 からデータセット 5 にかけても、VaR は減少している。データセット 5 では、立坑の切羽からのパイロットボーリングで得られた情報に基づき、中・小規模亀裂の透水量係数が下方修正された。そのため、立坑に流入する湧水量が低減し、湧水対策費が減少したものと推察される。

施工段階であるデータセット 5 以降においては、VaR は大きく変動せず、一定の値へと漸近している。実際の施工に伴う亀裂情報の蓄積により、湧水対策費を想定するのに十分な情報が得られたものと推察される。

データセットの更新に伴う湧水対策費の VaR の変動要因に関して考察を加えた結果、変動の推移は大規模亀裂、及び中・小規模亀裂の透水量係数に大きな影響を受けているものと推察される。

湧水対策費の VaR は、調査前期段階においては、新たな大規模亀裂の発見等に

起因して増加した。しかし，調査後期段階においては，亀裂情報が順次明らかにされたことで VaR は減少し，緩やかではあるが施工段階における値に接近している。以上の結果，湧水対策費を推定する上で，事前調査段階における情報の蓄積が有益であるものと推察される。

2) 補助対策費の変動，及びその要因

図 4.9 にデータセットの更新に伴う補助対策費の VaR の変動を示す。事前調査段階においては増減を繰り返しているが，施工段階では増減を示さず，VaR は補助対策費として取り得る最大値を示している。

上記のように，データセット 3 では 3 次元亀裂頻度を下方に修正した。そのため，概念的には，立坑と亀裂の交差長に基づいて算出される補助対策費は減少するものと考えられるが，VaR は増加している。これは，調査結果に基づき決定論亀裂，及び確率論的亀裂の方向を修正したことにより，主立坑と亀裂との交差長が増加したためであると推察される。

施工段階において補助対策費の VaR が増加した要因としては，先述した主立坑位置に存在する断層群の影響が大きいと考えられる。図 4.7 に示すように，主立坑位置で確認された断層は，走向がほぼ同一であるが F134.40 断層は上下の断層と傾斜が異なる。また，それぞれを単一断層とした場合，特に F146.60 断層の浅部方向への延長部で該当するような断層が確認されていない。これらを踏まえ，主立坑とその周辺には雁行断層による一連の断層群が形成されていると想定した。データセット 5 以降では，こうした調査結果に基づいて決定論的亀裂，及び確率論的亀裂がモデル化されたため，情報の蓄積に伴い補助対策費の VaR が上昇したものと推察される。また，データセット 7，及びデータセット 8 では，断層群が決定論的亀裂として主立坑位置にモデル化されたため，図 3.12 に示すようなリスクカーブの形状になったものと考えられる。

以上を踏まえ，主立坑と亀裂，及び断層との交差長を推定するにあたり，実際の施工に伴い行われたパイロットボーリング調査以降の調査結果が非常に有益であったと考えられる。交差長を推定するためには，対象構造物周辺における亀裂，及び断層の分布状況を正確に把握する必要があり，構造物の近傍にて行われた調査が推定の正確性に寄与するところが大きかったものと推察される。

しかしながら，調査後期段階においても，補助対策費の VaR は増減を示して

おり，その変動の傾向を捉えることはできない．そうした結果を踏まえ，事前調査段階において補助対策費を推定することは困難であると推察される．

3) 建設コストの変動，及びその要因

湧水対策費，及び補助対策費の変動を踏まえ，建設コストの変動に関して考察を加える．図 4.10 にデータセットの更新に伴う建設コストの VaR の変動を示す．

データセット 1 からデータセット 2 にかけて VaR は増加しているが，それ以降においては減少傾向を示している．これは，湧水対策費の VaR の変動と同様の傾向である．図 4.4 に示すように，データセットの更新に伴い，大規模な湧水被害の発生回数は概ね減少傾向を示した．大規模な湧水被害が発生した際に要する対策費は 100 百万円と非常に高額であり，建設コストに及ぼす影響も大きいと考えられる．そのため，建設コストの VaR の変動が，湧水対策費の VaR の変動と同様の傾向を示したものと推察される．また，補助対策費に関しても，各データセット間における変動幅は大きな値を示しており，建設コストの変動に及ぼす影響は大きい．その影響は，各データセット間の建設コストの VaR の変動幅と湧水対策費の VaR の変動幅が大きく異なることより確認できる．そのため，建設コストの変動を議論する際，湧水対策費の変動と共に，補助対策費の変動に関しても検討を加えることが重要であると推察される．施工段階であるデータセット 5 以降では VaR は一様に変化し，一定の値へと漸近していく様子が確認できる．

建設コストの変動は，亀裂・断層破碎部で要する費用に起因して生じるものである．そのため，1)，及び 2)での考察を踏まえ，建設コストの変動は，対象領域における亀裂の透水量係数，及び対象構造物周辺における亀裂の分布状況に強く影響を受けるものであると推察される．

また，推定精度が高いと推察される施工段階における VaR と，事前調査段階における VaR とを比較する．事前調査段階において，情報の蓄積により，VaR は施工段階における値へと接近している．しかしながら，上述のように，建設コストの変動を決定する一因である湧水対策費の変動は精度よく推定出来ていたと言えず，補助対策費の変動に関しては，推定が困難であった．それらを踏まえ，得られた建設コストの VaR の変動は信頼性が高いものではなく，事前調査段階において建設コストの VaR の推定は困難であると推察される．

第5章 結論

本章では，前章までに示した建設コスト算出法，事例検証，及び地質調査の進展に伴う建設コストの変動に関する結論を述べる．また，検討課題について言及し，今後の研究に繋げるものとする．

5.1 結論

本研究では，不連続性岩盤における地下構造物の建設コスト算出法を提案し，実際の事例として，岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の立坑掘削工事に適用した．さらに，地質調査の進展による情報の蓄積に伴い，推定される建設コストがどのように変動するかに関して考察を加えた．得られた結論として以下が挙げられる．

- 不連続性岩盤における建設プロジェクトにおいて，プロジェクトの事業性に大きな影響を及ぼすのは，亀裂・断層破碎部で要する湧水対策費，及び補助対策費であることを定量的に示した．また，大規模な湧水被害が複数回発生するのは，亀裂の密集による亀裂ネットワークの連結性に起因することを示した．
- 不連続性岩盤における亀裂，及び断層等が分布している地点においては，地盤統計学手法を用いた物性値の推定を基に岩盤等級分類を実施すると，岩盤等級が安全側に評価される可能性があることを確認した．
- 地質調査の進展に伴う建設コストの変動は，湧水対策費，及び補助対策費の変動に起因するものである．両変動はそれぞれ，亀裂の透水量係数，立坑周辺における亀裂の分布状況に強く影響を受けるため，建設コストの変動はそれらに起因して生じるということを示した．
- 本研究では，不連続性岩盤を健岩部と亀裂・断層破碎部に分離されるものと仮定し，建設コストの算出を行った．しかしながら，そうした手法では，事前調査段階において，建設コストを構成する湧水対策費，及び補助対策費の $\text{VaR}(1\%)$ の推定は困難であるため，建設コストの $\text{VaR}(1\%)$ の推定も同様に困難であることを示した．

5.2 今後の課題

前述のように，本研究で提案した建設コスト算出法では，事前調査段階において建設コストを精度よく推定するのは困難であった．そのため，今後，不連続性岩盤における建設コスト算出法の改善，または再提案等が必要であると推察される．健岩部における支保・掘削費に関しては内挿補間法である地盤統計学手法を用いて算出を行ったが、内挿で求められないものをどのように算出するか検討する必要がある、それに伴い、亀裂・断層破碎部における補助対策費の設定の見直し等も必要であると推察される。

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) 大島洋志: 毎分 23t の異常湧水に挑む, トンネルと地下, pp.12-21, 1973.
- 4) 平沢市郎, 飯田茂, 森喬, 山本松生, 串山純考, 小林素一: 立坑の多量湧水と対策湧水と戦う立坑工事, トンネルと地下, pp.46-57, 1974.
- 5) 田代邦弘, 江藤誠一, 折田増美, 藤田肇司: 大量湧水に挑む, トンネルと地下, pp.15-22, 1992.
- 6) 寺田幸太郎, 川北眞嗣, 小林伸次, 築地功: 不良地山・高圧大量湧水との戦い(大量湧水編), トンネルと地下, pp15-25, 2004.
- 7) 江川顕一郎, 谷中保男, 志村厚: 多量湧水を伴う軟弱層を TBM で突破, トンネルと地下, pp.15-25, 1996.
- 8) Einstein,H.H. : Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, tunneling and Underground Space Technology, Vol.11 No.2, pp.141-155, 1996.
- 9) 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, pp35-52, 2007.
- 10) 大津宏康, 堀田洋平, 三枝博光, 井尻裕二, 尾上博則: 不連続性岩盤における突発湧水リスク評価手法の事後評価への適用, 土木学会論文集 F, Vol.64, No4, pp353-368, 2008.
- 11) 大津宏康, 有薊大樹, 三枝博光: 不連続性岩盤における突発湧水を対象とした地質調査の価値に関する考察, 土木学会論文集 F4, Vol.66, No1, pp77-90, 2010.
- 12) 大津宏康, 見掛信一郎, 井尻裕二, 坂井一雄: トンネル掘削コスト変動リスク評価手法に関する研究, 建設マネジメント論文集, Vol.13, pp.101-114, 2006.
- 13) 日本応用地質学会: 日本の岩盤分類, 応用地質特別号, 1992.
- 14) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, p31, 1996.

- 15) Wackernagel,H. (原著), 地球統計学研究委員会 (訳編): 地球統計学, 森北出版, 2003.
- 16) 井尻裕二, 澤田淳, 坂本和彦, 内田雅大, 石黒勝彦, 梅木博之, 大西有三: 割れ目ネットワークモデルの水理特性に及ぼす割れ目スケール効果の影響, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.179-194, 2001.
- 17) 木村敏雄: 断層, とくに断層破碎帯の見方, 考え方, 応用地質, 第 22 巻第 1 号, pp4-16, 1981.
- 18) 大野博之, 小島圭二: 岩盤割れ目のフラクタル (その 2) -フラクタル特性と分布のばらつき-, 応用地質 34 巻 2 号, pp.12-26, 1993.
- 19) 本島貴之, 鈴木俊一: 理論式に基づく亀裂半径分布推定手法の検討, 土木学会論文集 C, Vol.65, No4, pp353-368, 2008.
- 20) 大野博之, 小島圭二: フラクタルを考慮した岩盤割れ目の寸法評価と透水性, 第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.157-162, 1989.
- 21) Dershowitz,W.S., Lee,G., Geier,j., Foxford,T., Lapointe,P., and Thomas,A. : FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation, User documentation, Version 2.6, Golder Associates Inc,Seattle WA, 1998.
- 22) 山下智志: 市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, 2000.
- 23) Benjamin,J.R. and Cornet,A.A. : Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp.578-580, 1970.
- 24) 糸魚川淳二: 瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, No1, pp.1-50, 1980.
- 25) 鶴田忠彦, 竹内信司, 竹内竜史, 水野崇, 大山卓也: 瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書, JAEA-Research 2008-098, 2009.
- 26) 羽出山吉裕, 大津宏康, 大矢敏雄, 岡本淳: クラックテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察, 第 25 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.176-189, 1993.
- 27) 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国における亀裂特性について, JNCTN8400 99-091, 1999.
- 28) 納多勝, 戸井田克, 延藤遵, 下野正人: 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討 (平成 15 年度), JNC TJ7400 2004-16, 2004.

- 29) 納多勝，須山泰宏，延藤遵，井尻裕二，見掛信一郎，松井裕哉：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 19 年），JAEA-Technology 2009-009，2009.
- 30) 伊藤學，亀田弘行，黒田勝彦，藤野陽三：土木・建築のための確率・統計の応用，pp207-296，1988.

謝 辞

最後になりましたが，本論文を作成する上で，本研究にご協力頂いた方々，お世話になった方々に感謝を表します．

京都大学工学研究科・大津宏康教授には，素晴らしい研究環境を提供して頂くと共に，研究に取り組む心構えに関してお教え下さったことをはじめ，多くのご指導を頂きました．幾度となく研究に行き詰まる私に対し，その都度，的確なご助言を下さったおかげで，研究を遂行することができました．厚くお礼申し上げます．

京都大学地球環境学堂・乾徹准教授には，副査を務めて頂き，的確なご指摘を頂きました．心から感謝致します．

京都大学工学研究科・塩谷智基准教授は，日ごろから励ましの言葉をおかけ下さり，多くのご支援を頂きましたことを大変感謝致します．

京都大学工学研究科・稲積真哉助教には，研究面だけでなく生活面においても，非常にお世話になりました．心よりお礼申し上げます．

大成建設株式会社・井尻裕二氏，本島貴之氏には，ご多忙の中，研修を受ける機会を与えて下さったこと，本研究に関する様々な助言を頂きましたことを大変感謝致します．日本原子力開発機構・三枝博光氏には，本研究を進める上で必要となる多くのデータを提供して頂き，度重なる質問に対しても丁寧にお答え頂きました．心から感謝致します．

伊藤宏美秘書には，研究生活を様々な面でサポートして頂き，研究に打ち込む環境を整えて頂きましたことに大変感謝致します．また，大津研究室の諸先輩方，同回生の方々のおかげで，研究面のみならず，生活面においても非常に充実した学生生活を送ることができました．心からお礼申し上げます．

皆様方の支えにより，多くの貴重な経験をさせて頂き，この一年間を有意義なものとすることができました．大変ありがとうございました．

最後に，大学で勉学に取り組む環境を与えて下さり，これまで自分を育ててくれた両親に心から感謝致します．

表1.1 突発湧水事例

トンネル名	山陽新幹線 福岡トンネル	中山トンネル (四方木立坑)	加久藤 トンネル	木ノ下 トンネル	東京電力 水殿川導水路 トンネル
トンネル規模	延長 8,500m 内径 10.0m	延長 370m 内径 6.0m	延長 6,231m 内径 4.9m	延長 981m 内径 12.0m	延長 3,035m 内径 12.0m
地質	砂岩 花崗閃緑岩	凝灰角礫岩	堆積岩	粘板岩	花崗岩
掘削方式	NATM	NATM	NATM	NATM	TBM
最大湧水量	20.0 ³ /min	9.6m ³ /min	40.0m ³ /min	0.4m ³ /min	9.0m ³ /min
排水方式	水抜き ボーリング (総延長424m)	不明	水抜き ボーリング	ディープウェル 工法	ポンプによる 排水
止水方式	不明	セメントミルク LW アマイド注入	セメントミルク LW	不明	RBSレンジ OH等注入
中断期間	約2ヶ月	約3ヶ月	約5ヶ月	不明	不明
備考	土砂流出400m ³		天端崩落 土砂流出800m ³		岩盤崩落 TBM停止

表2.1 岩盤等級分類基準

岩盤等級	堆積岩部 弾性波速度 (km/s)	花崗岩部 弾性波速度 (km/s)
B級以上	4.2-	3.6-
CH級	3.4-4.2	3.0-3.6
CM級	2.6-3.4	1.5-3.0
CL-D級	-2.6	-1.5

表3.1 岩盤等級ごとの支保単価

岩盤等級	支保単価 (円/m)
B級以上	702, 000
CH級	728, 000
CM級	832, 000
CL-D級	1, 248, 000

表3.2 境界面の標高

	標高[m]
地表面	193. 33
堆積岩部— 花崗岩上部割れ目帯	33. 41
花崗岩上部割れ目帯— 花崗岩下部低密度割れ目帯	-313. 44
底面	-806. 67

表3.3 データセットと調査内容

データセット	調査項目	決定論的亀裂	確率論的亀裂
DS0	既存情報の収集	月吉断層	データセット1と同等
DS1	露頭調査 反射法弾性波探査	露頭調査で得られた断層	対象領域外から得られた亀裂の方向をもとに推定。 頻度分布は、リニアメント及び反射法で得られた断層から推定
DS2	既存ボーリング調査 浅層ボーリング調査	DH-2孔におけるデータ及び水理試験結果に基づき、 リニアメントの位置、方向、透水量係数を修正	DH-2孔および堆積岩中のボーリングデータに基づき、 方向、透水量係数を修正
DS3	深層ボーリング調査	DH-15、MIZ-1孔におけるデータ及び水理試験結果に基づき、 リニアメントの位置、方向、透水量係数を修正	DH-15、MIZ-1孔におけるデータに基づき、 方向、透水量係数を修正
DS4	孔間水理試験 孔間トモグラフィ試験	孔間水理試験及びトモグラフィ調査により、 立坑部、DH-2、DH-15周辺の断層の位置、方向、 透水量係数を修正	データセット3と同等
DS5	立坑掘削(堆積岩部) 先行ボーリング調査	立坑切羽からの先行ボーリング06MI02、 06MI03孔におけるデータ及び水理試験結果に基づき、 リニアメントの位置、方向、透水量係数を修正	06MI02、06MI03孔におけるデータに基づき、 方向、透水量係数を修正
DS6	立坑掘削(花崗岩部)	データセット5と同様	花崗岩上部における立坑内壁面観察に基づき、方向を決定
DS7	深度300mステージ 水平坑道掘削	水平坑道掘削における調査に基づき、 水平坑道周辺のリニアメントの位置を修正	データセット6と同等
DS8	水平坑道壁面観察	データセット7と同様	水平坑道壁面観察結果に基づき、方向を決定

図3.4 決定論的亀裂の透水量係数

データセット	断層名	透水量係数 (m ² /s)
DS0	月吉断層	5.62E-05
DS1	月吉断層	5.62E-05
DS2	月吉断層	5.62E-05
	IF_SB1_001	3.29E-04
	IF_SB1_002	3.29E-04
	IF_SB1_003	3.29E-04
	IF_SB1_004	5.56E-08
	IF_SB1_005	3.40E-05
DS3	月吉断層	5.62E-05
	IF_SB1_09	3.29E-04
	IF_SB2a_05	5.56E-08
	IF_SB2a_07	4.39E-05
	IF_SB2a_08	4.61E-05
	IF_SB2a_10	2.48E-05
	IF_SB2a_11	5.85E-04
	IF_SB2a_12	9.86E-05
	IF_SB2a_13	5.18E-08
DS4	月吉断層	5.62E-05
	IF_SB3_02_2	5.56E-08
	IF_SB3_07	4.06E-05
	IF_SB3_08	6.46E-06
	IF_SB3_09	1.23E-05
	IF_SB3_09_1	3.65E-06
	IF_SB3_11	5.85E-04
	IF_SB3_13	1.00E-08
	IF_SB3_13_2	1.26E-05
	IF_SB3_13_2_1	1.60E-05
	IF_SB3_13_3	1.66E-07
	IF_SB3_15_2	9.86E-05
	IF_SB3_16	5.86E-06
DS5, 6	IF_SB3_02_2を除く データセット4の亀裂	
	06MI02-01	1.17E-06
	06MI02-02	4.48E-08
DS7, 8	データセット5, 6と同等	

表3.5 亀裂方向に関するパラメータ

		データセット	DS0, 1	DS2	DS3, 4	DS5	DS6, 7	DS8
堆積岩部	クラスター1	亀裂数	47	DS0, 1と 同等	497	DS3と 同等	DS3と 同等	DS3と 同等
		走向[°]	95.20		92.97			
		傾斜[°]	5.85		13.84			
		分散係数 κ_1	-8.88		-6.50			
	クラスター2	分散係数 κ_2	-6.12		-1.90			
		亀裂数	22		137			
		走向[°]	342.52		179.64			
		傾斜[°]	11.48		7.08			
	クラスター3	分散係数 κ_1	-10.67		-12.39			
		分散係数 κ_2	-3.84		-4.09			
		亀裂数	776		776			
		走向[°]	168.50		196.59			
花崗岩上部 割れ目帯	クラスター1	傾斜[°]	88.74	DS0, 1と 同等	87.47	DS3と 同等	DS3と 同等	DS3と 同等
		分散係数 κ_1	-6.63		-7.16			
		分散係数 κ_2	-6.34		-6.40			
		亀裂数	2537		4187			
	クラスター2	走向[°]	139.34		41.20			
		傾斜[°]	14.82		65.77			
		分散係数 κ_1	-2.63		-5.24			
		分散係数 κ_2	-1.36		-2.95			
	クラスター3	亀裂数	488		1238			
		走向[°]	22.03		182.57			
		傾斜[°]	21.43		32.03			
		分散係数 κ_1	-11.97		-7.38			
花崗岩下部 低密度 割れ目帯	クラスター1	分散係数 κ_2	-8.67	DS0, 1と 同等	-2.88	DS3と 同等	DS3と 同等	DS3と 同等
		亀裂数	2894		1286			
		走向[°]	324.62		314.75			
		傾斜[°]	86.06		24.68			
	クラスター2	分散係数 κ_1	-11.37		-19.53			
		分散係数 κ_2	-7.86		-3.70			
		亀裂数	8546		2745			
		走向[°]	27.82		170.84			
	クラスター3	傾斜[°]	74.36		45.63			
		分散係数 κ_1	-4.53		-5.28			
		分散係数 κ_2	-1.85		-4.56			
		亀裂数	1215		8245			
	クラスター4	走向[°]	235.43		8.15			
		傾斜[°]	31.90		70.65			
		分散係数 κ_1	-6.33		-4.80			
		分散係数 κ_2	-5.79		-3.65			
	クラスター5	亀裂数	393		1305			
		走向[°]	83.03		251.66			
		傾斜[°]	18.57		1.47			
		分散係数 κ_1	-24.78		-7.45			
		分散係数 κ_2	-7.51		-3.97			

表3.6 1次元亀裂頻度

データセット	DS0, 1	DS2	DS3-8
堆積岩部[本/m]	2. 40	2. 40	2. 54
花崗岩上部割れ目帯[本/m]	5. 25	4. 81	4. 03
花崗岩下部低密度割れ目帯[本/m]	3. 07	3. 07	2. 55

表3.7 3次元亀裂頻度

データセット		DS0, 1	DS2	DS3, 4	DS5	DS6, 7	DS8
堆積岩部 [m ² /m ³]	クラスター1	0. 001112	DS0, 1と 同等	0. 007050	DS3, 4と 同等	DS3, 4と 同等	DS3, 4と 同等
	クラスター2	0. 000521		0. 001943			
	クラスター3	0. 018367		0. 011007			
	合計	0. 020000		0. 020000			
花崗岩上部 割れ目帯 [m ² /m ³]	クラスター1	0. 018752	0. 032578	0. 019798	0. 021662	0. 006037	0. 005304
	クラスター2	0. 003607	0. 005047	0. 005854	0. 005672	0. 020865	0. 019444
	クラスター3	0. 021391	0. 002459	0. 006081	0. 004398	0. 004830	0. 006984
	合計	0. 043750	0. 040083	0. 031732	0. 031732	0. 031732	0. 031732
花崗岩下部 低密度 割れ目帯 [m ² /m ³]	クラスター1	0. 021532	DS0, 1と 同等	0. 004483	DS3, 4と 同等	DS3, 4と 同等	DS3, 4と 同等
	クラスター2	0. 003061		0. 013465			
	クラスター3	0. 000990		0. 002131			
	合計	0. 025583		0. 020079			

表3.8 透水量係数

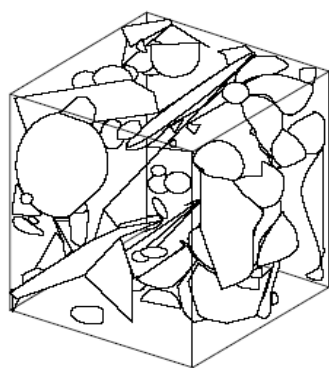
データセット	DS0, 1	DS2	DS3, 4	DS5	DS6, 7, 8
対数平均 [log(m ² /sec)]	-5.95	-5.92	-5.87	-6.68	-6.65
対数標準偏差 [log(m ² /sec)]	1.60	1.57	1.56	1.25	1.34

表3.9 湧水対策シナリオの設定

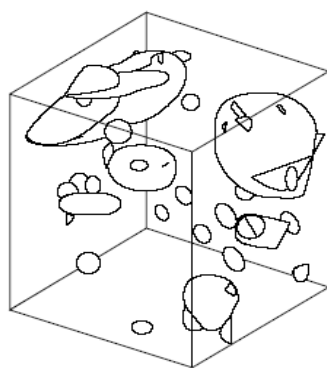
対策シナリオ	湧水量 [m ³ /min]	対策費用 [百万円]	対策案
シナリオ1： 被害なし	～0.5	0	設計範囲内のため特別な対策工は不要。
シナリオ2： 小被害	0.5～2.0	1	湧水量は排水設備容量内。先進探り穿孔による先進調査を実施。
シナリオ3： 中被害	2.0～5.0	10	通常の排水設備の容量を越える湧水量。非常排水設備および調査ボーリングと止水注入工実施。
シナリオ4： 大被害	5.0～	100	非常排水設備を超える湧水量。調査ボーリング、大規模止水工、復旧工事を実施。

表3.10 DS4において主立坑に交差した亀裂の分類

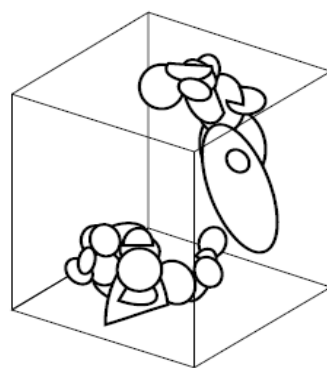
	湧水量[m ³ /min]	対策費[百万円]	亀裂本数	発生確率(%)
被害なし	0～0.5	0	1844	91.4
小被害	0.5～2.0	1	118	5.9
中被害	2.0～5.0	10	36	1.8
大被害	5.0～	100	19	0.9



Enhanced
Baecher



Nearest
Neighbor



Levy-Lee

図2.1 亀裂の中心位置モデル

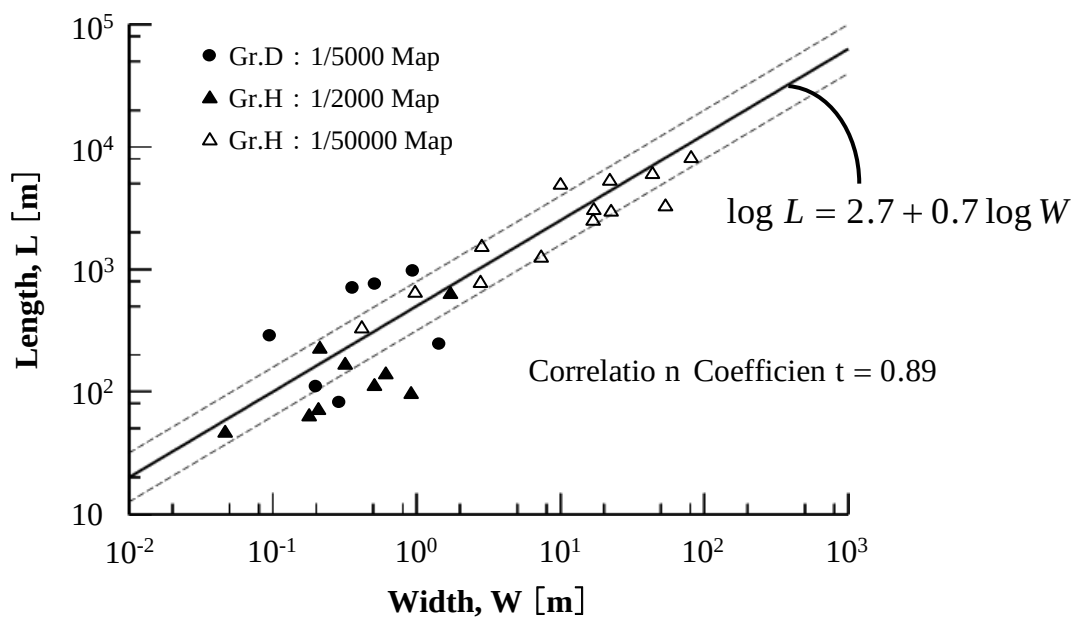


図2.2 亀裂の長さ と 破砕幅 の 関係 (大野・小島、1989)

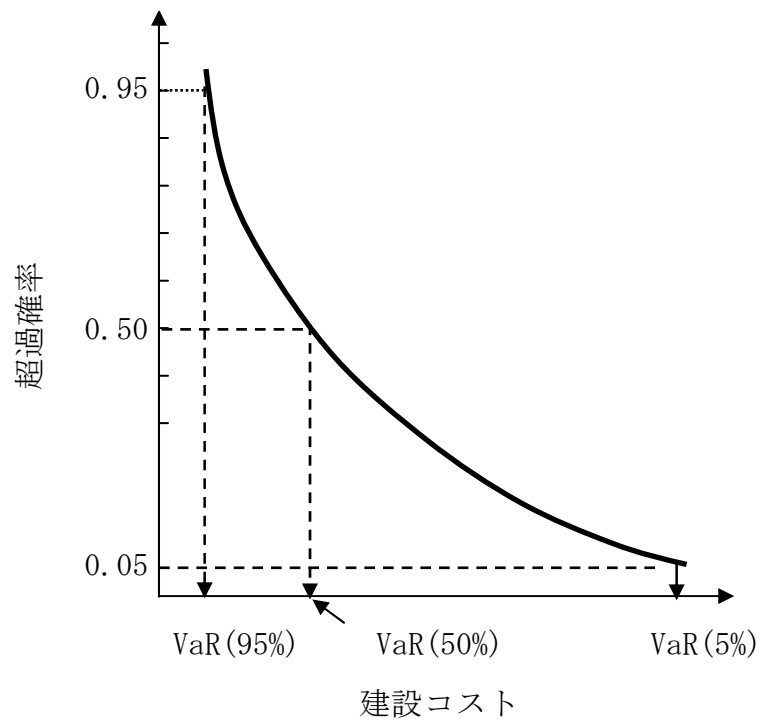
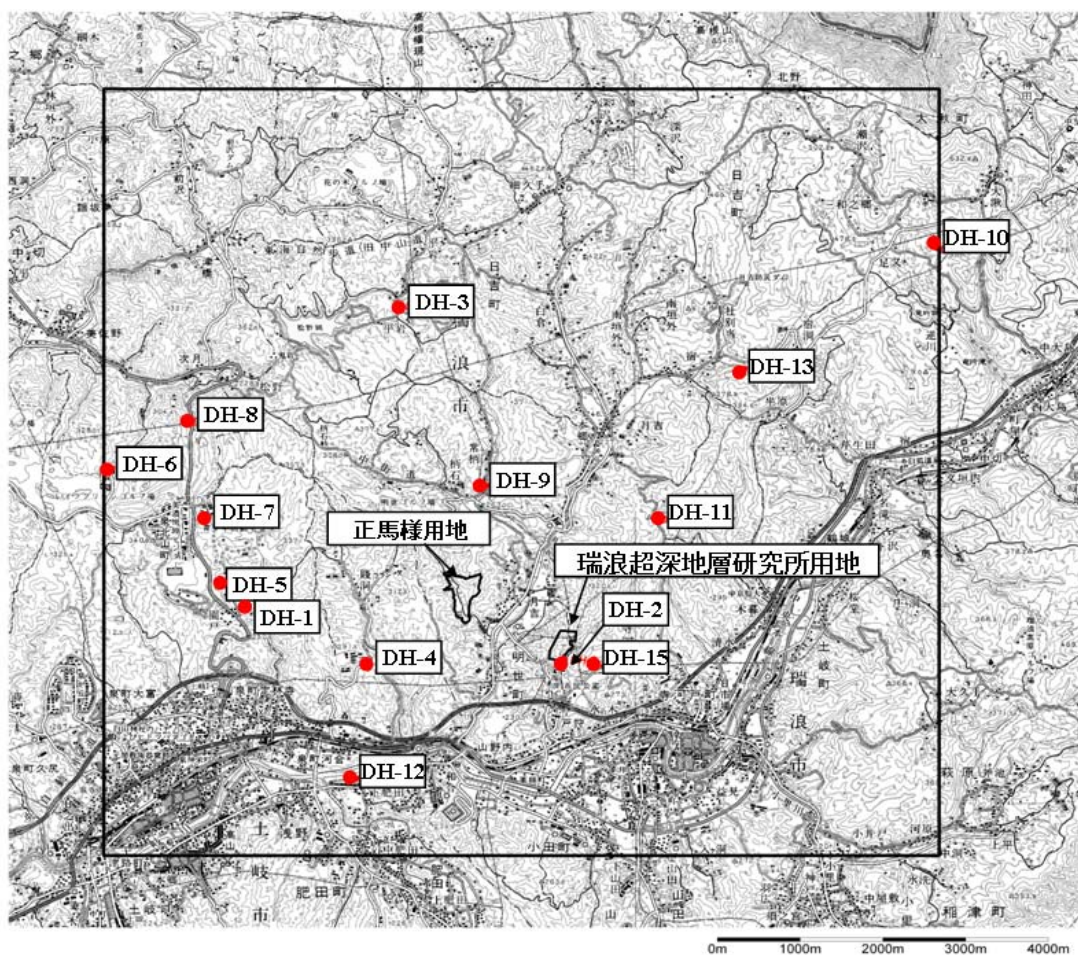
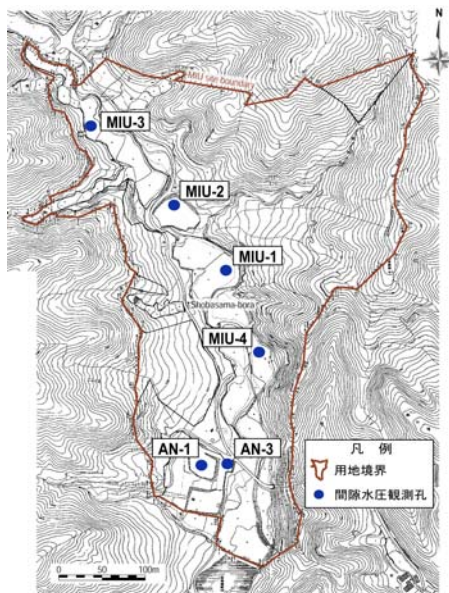


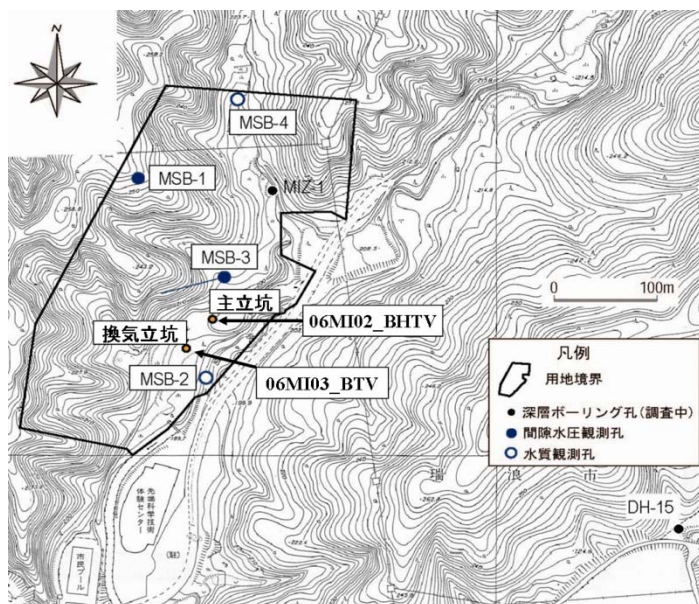
図2.3 リスクカーブ概念図



全体位置図



正馬様用地



瑞浪超深地層研究用地

図3.1 ボーリング孔位置図

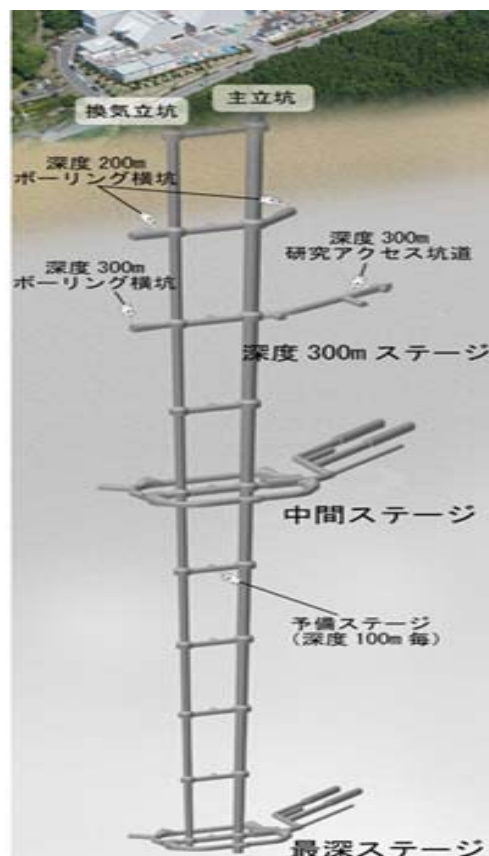


図3.2 瑞浪超深地層研究所における研究坑道レイアウト

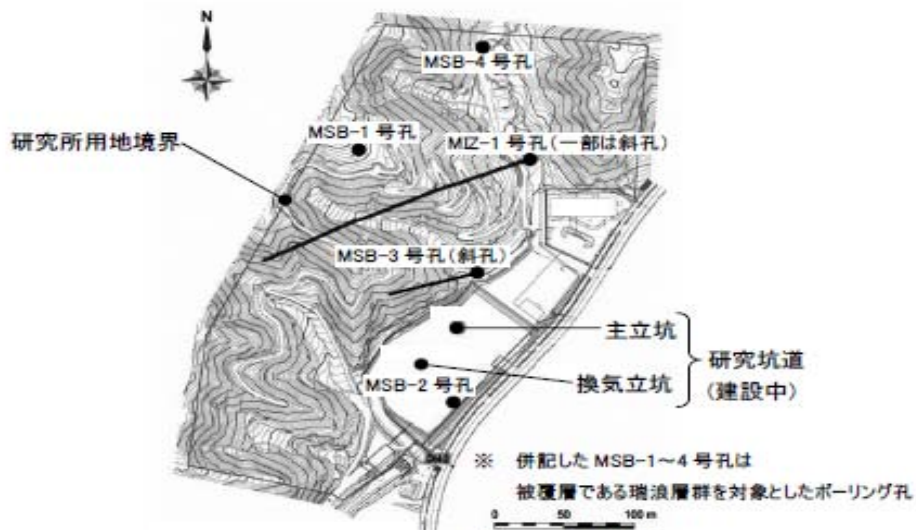


図3.3 研究用地

解析領域：水平方向250m,垂直方向500m

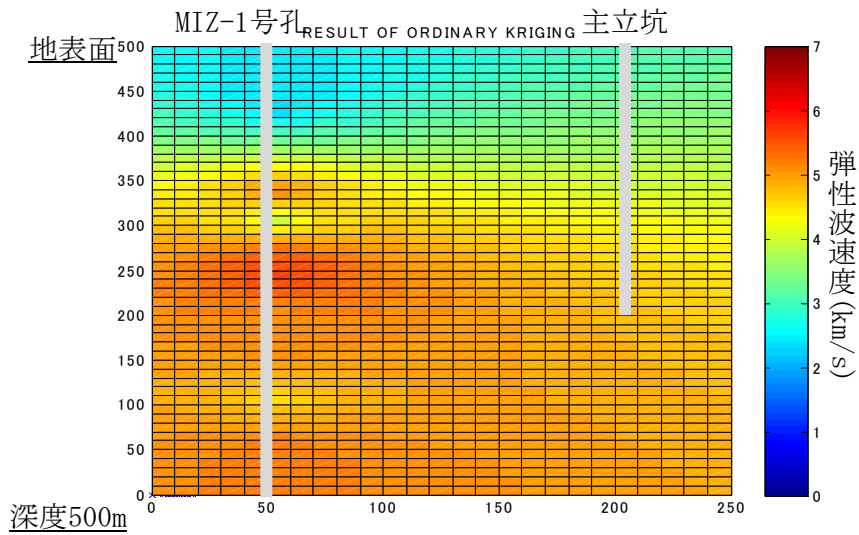


図3.4 通常型クリギング結果

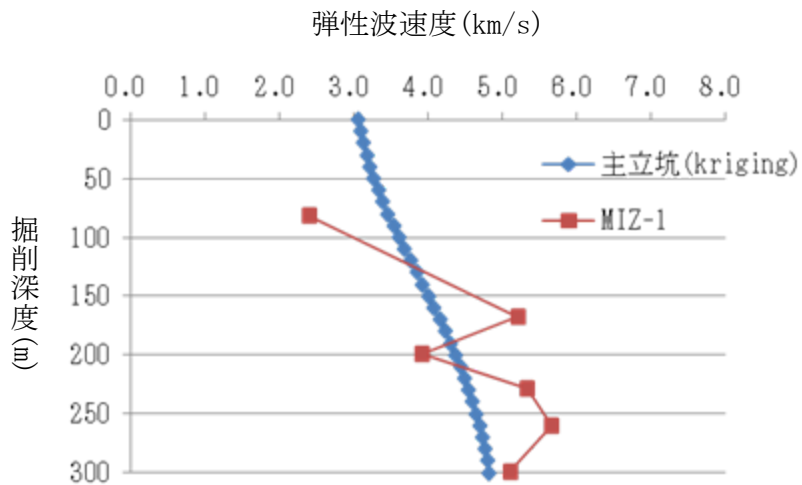


図3.5 主立坑とMIZ-1号孔の弾性波速度比較

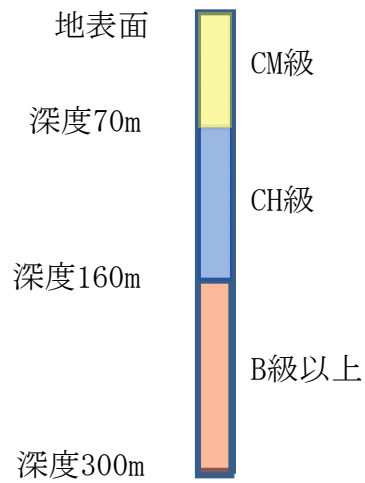


図3.6 主立坑位置での岩盤等級

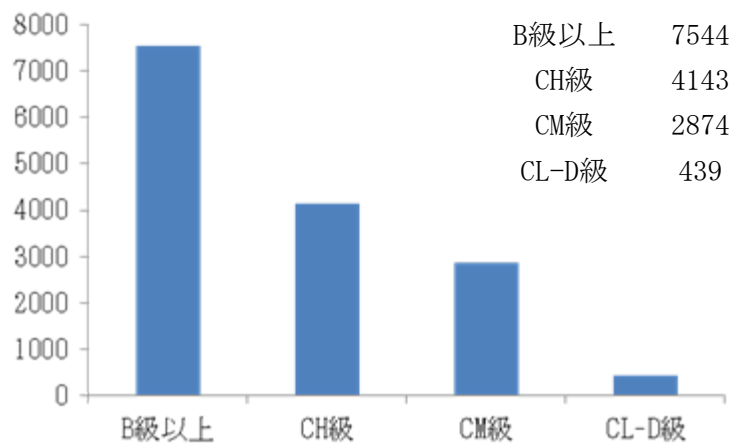


図3.7 ガウシアンシミュレーション結果ーヒストグラム

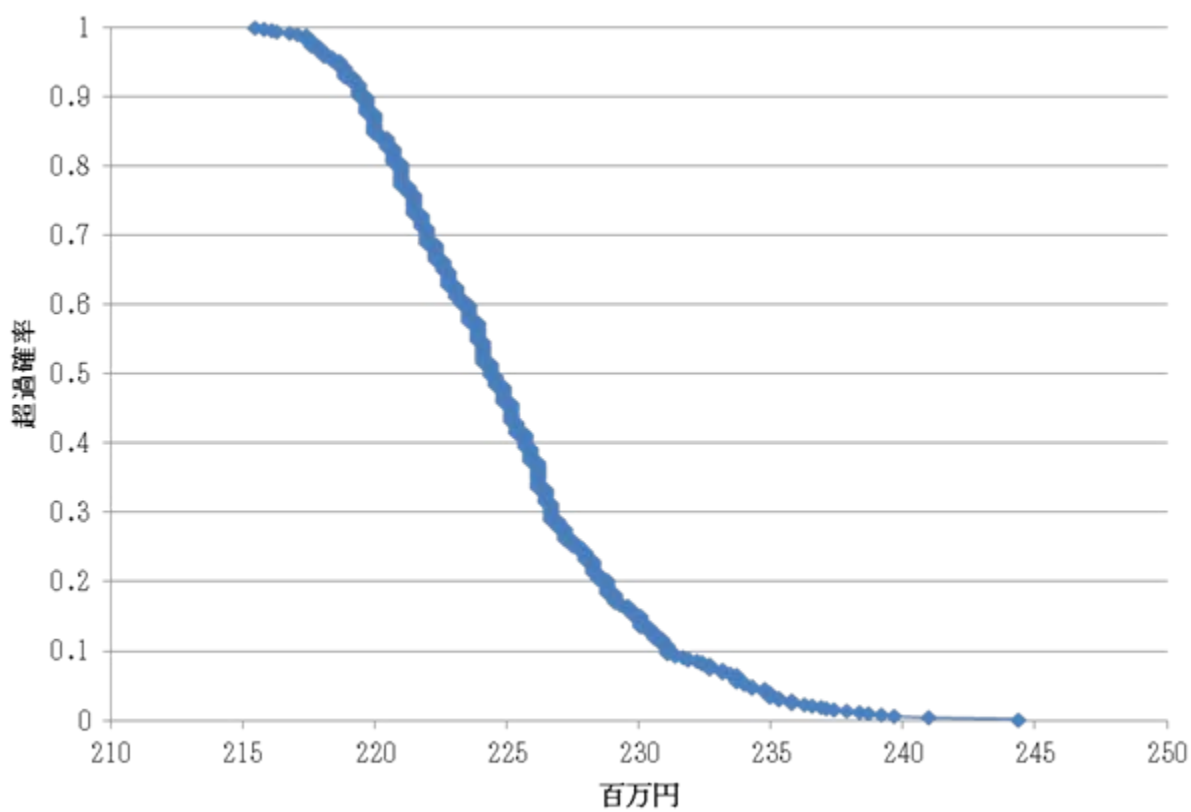


図3.8 支保・掘削費に関するリスクカーブ

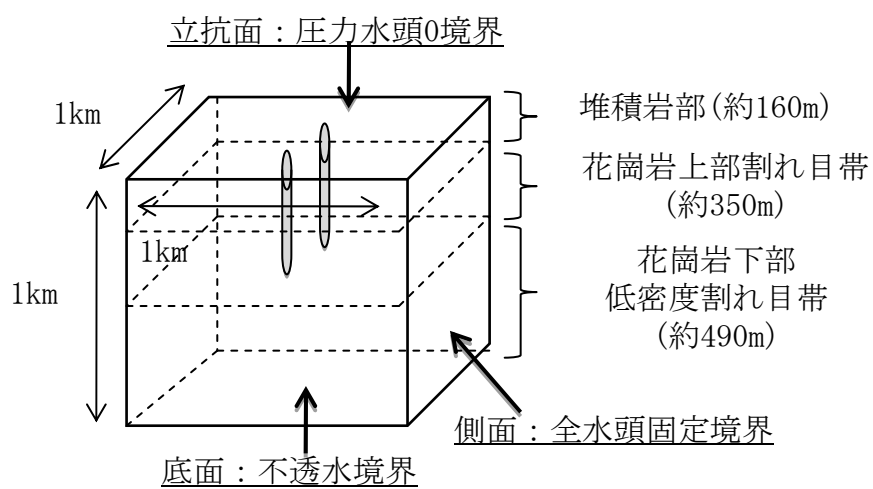
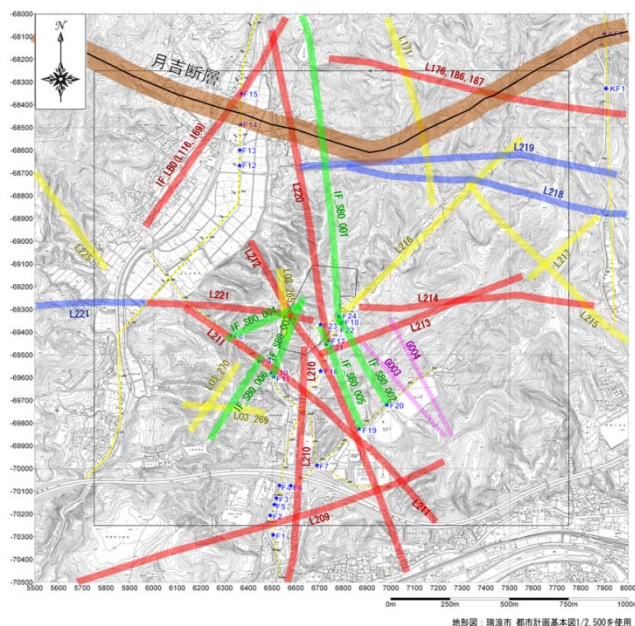
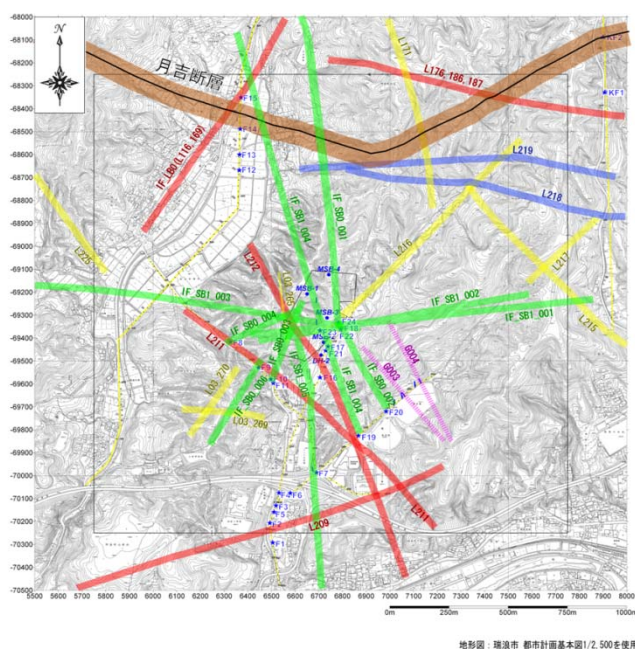


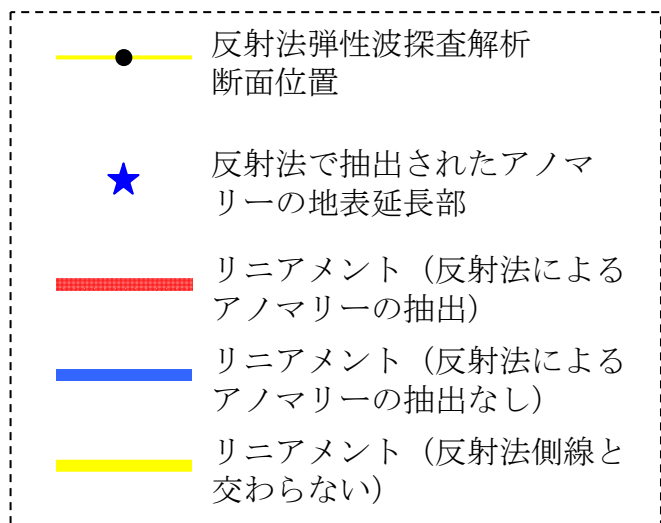
図3.9 解析領域、境界条件



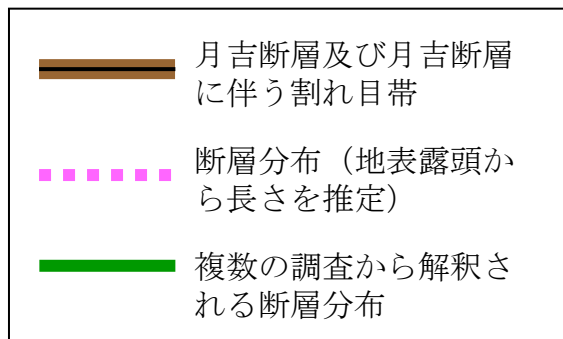
データセット1



データセット2



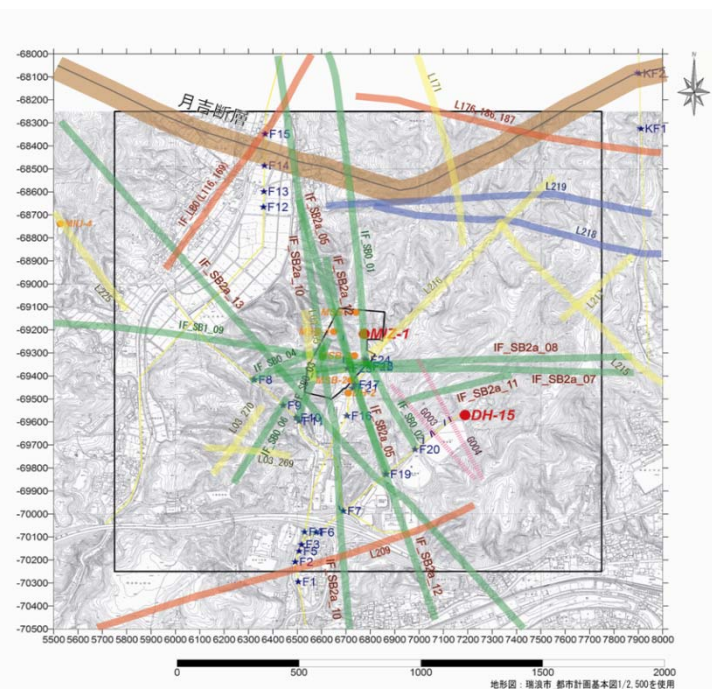
推定される断層



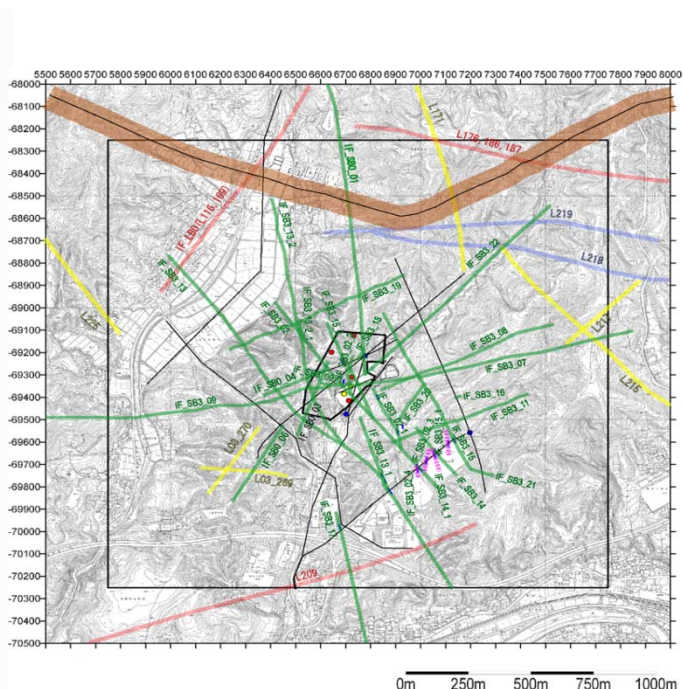
実際に確認された断層

※アノマリーとは
物性の局所的な異常のこと

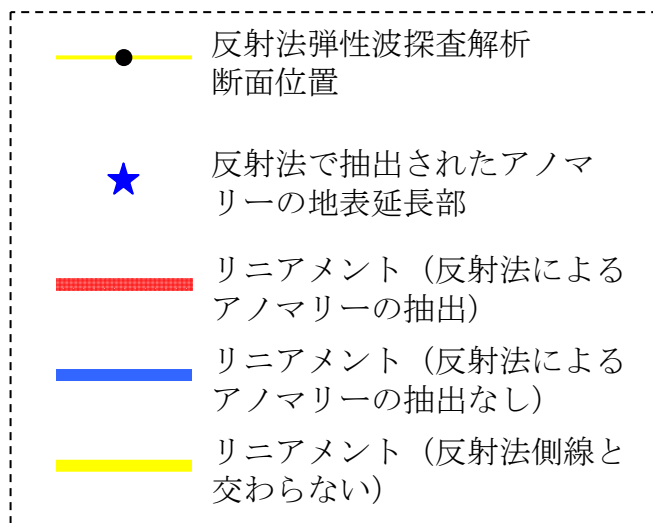
図3.10(a) 断層分布図



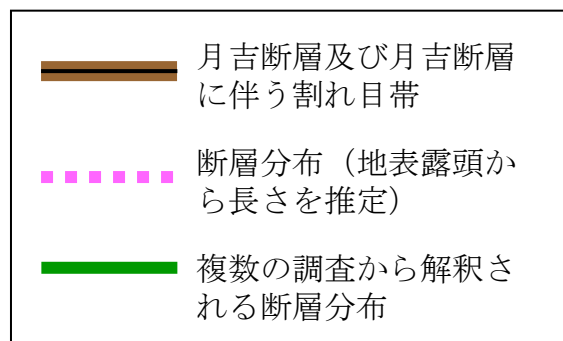
データセット3



データセット4



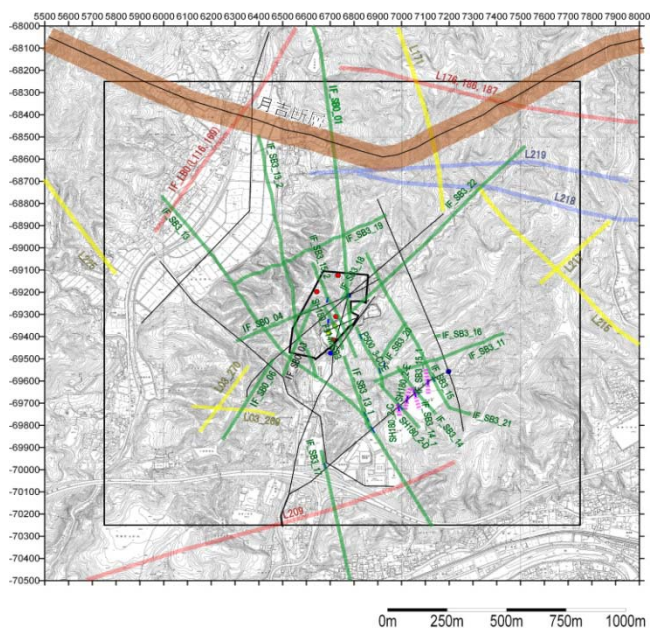
推定される断層



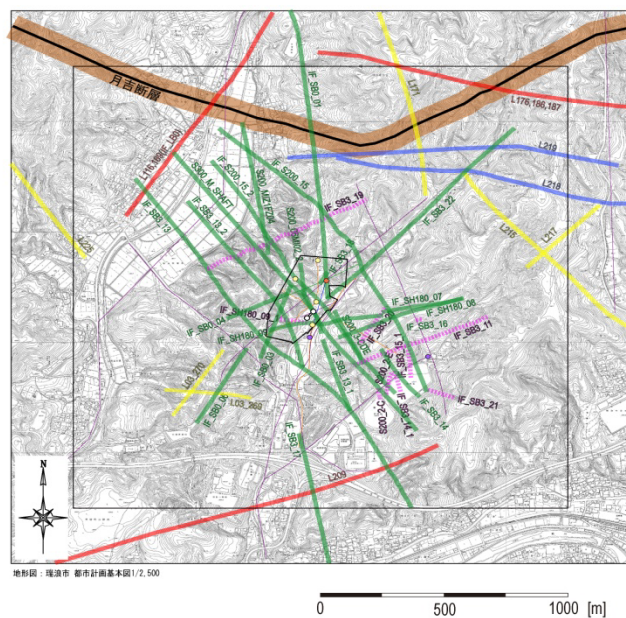
実際に確認された断層

※アノマリーとは
物性の局所的な以上のこと

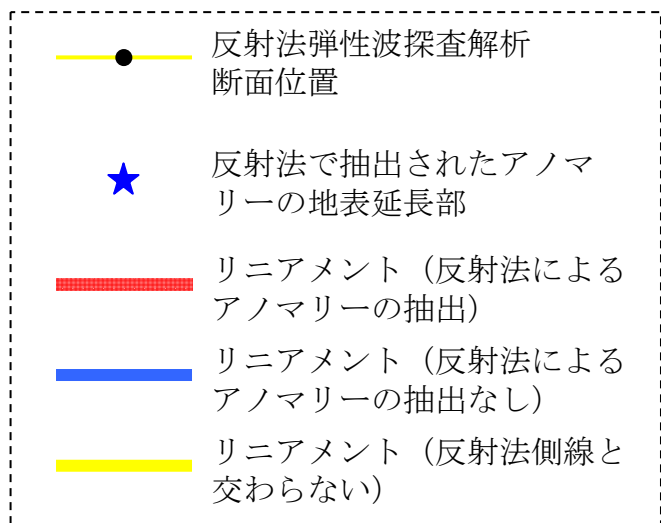
図3.10(b) 断層分布図



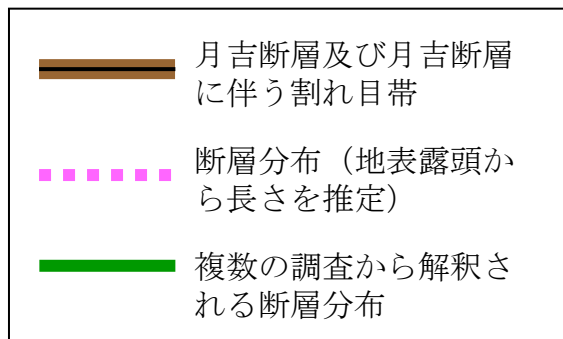
データセット5, 6



データセット7, 8



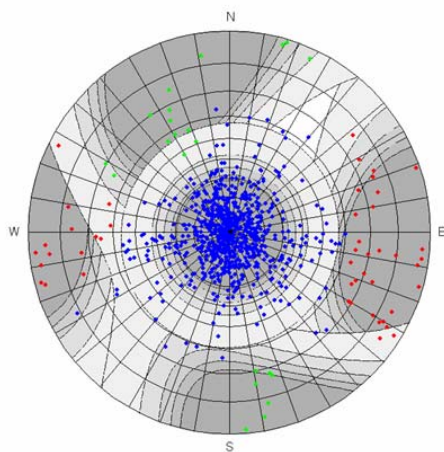
推定される断層



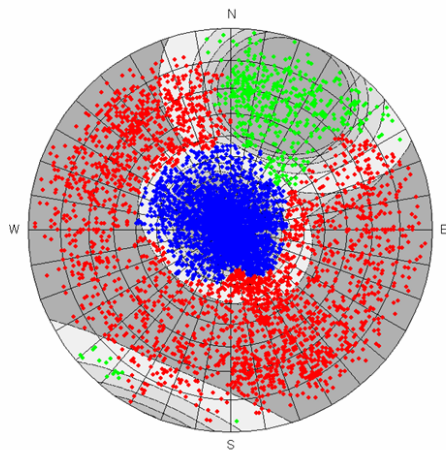
実際に確認された断層

※アノマリーとは
物性の局所的な以上のこと

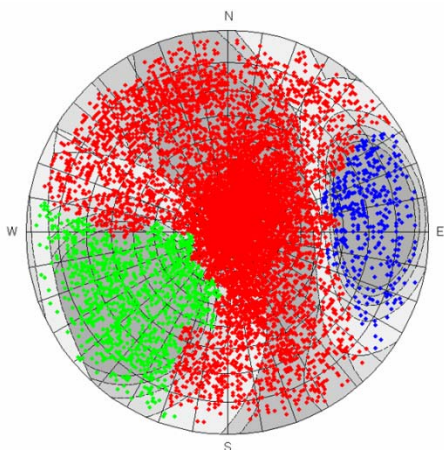
図3.10(c) 断層分布図



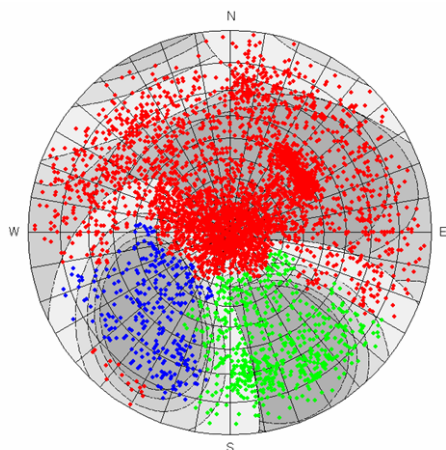
DS1 堆積岩部



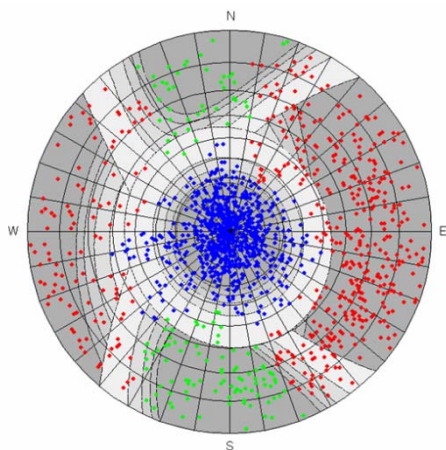
DS1 花崗岩上部割れ目帯



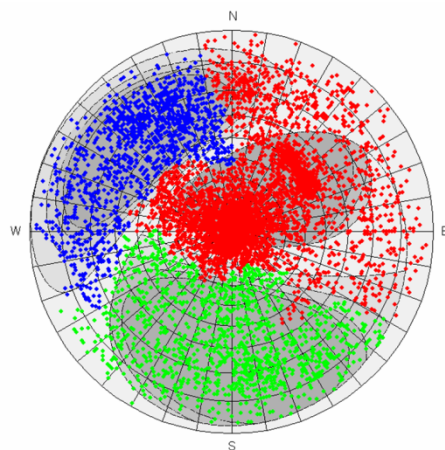
DS1 花崗岩下部低密度割れ目帯



DS2 花崗岩上部割れ目帯



DS3 堆積岩部



DS3 花崗岩上部割れ目帯

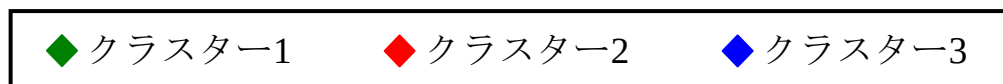
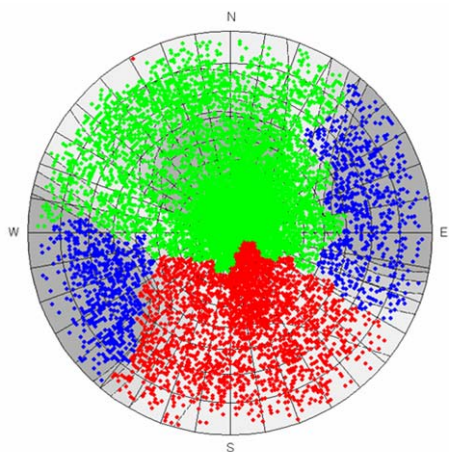
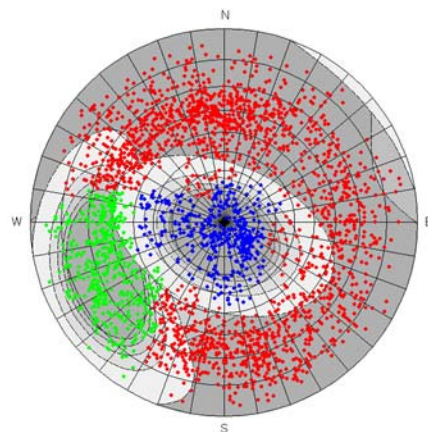


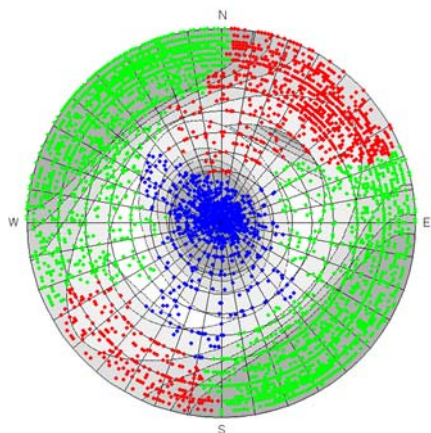
図3.11(a) クラスタ分類



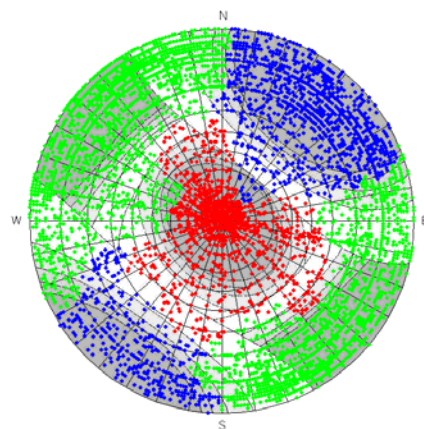
DS3 花崗岩下部低密度割れ目帯



DS5 花崗岩上部割れ目帯



DS6 花崗岩上部割れ目帯



DS8 花崗岩上部割れ目帯

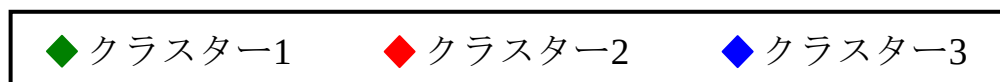


図3.11(b) クラスター分類

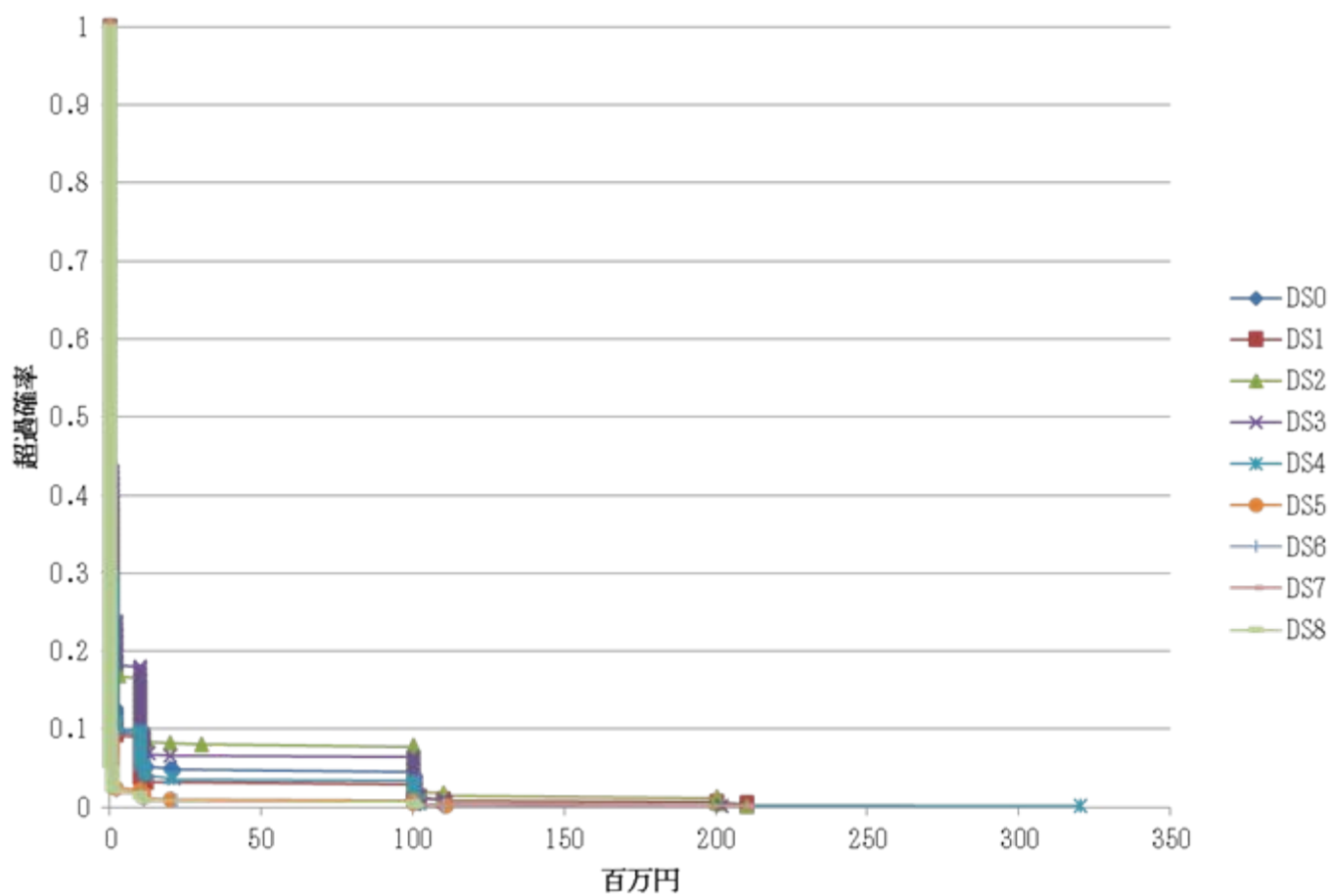


図3.12 湧水対策費に関するリスクカーブ

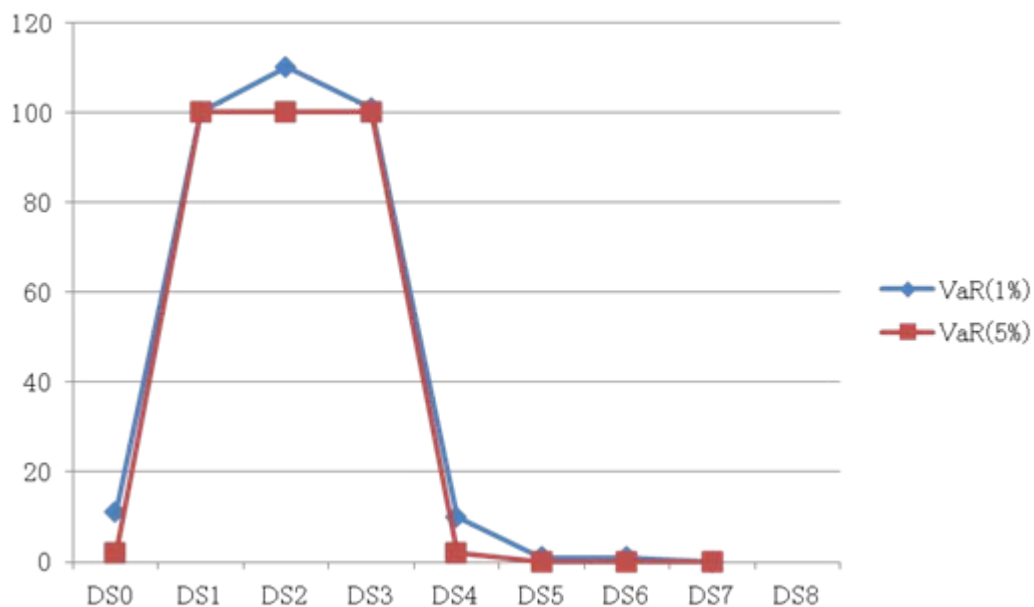


図3.13 地下水流動解析のrlz回数50回の場合におけるデータセットの更新に伴う湧水対策費のVaR(1%)、VaR(5%)の変動

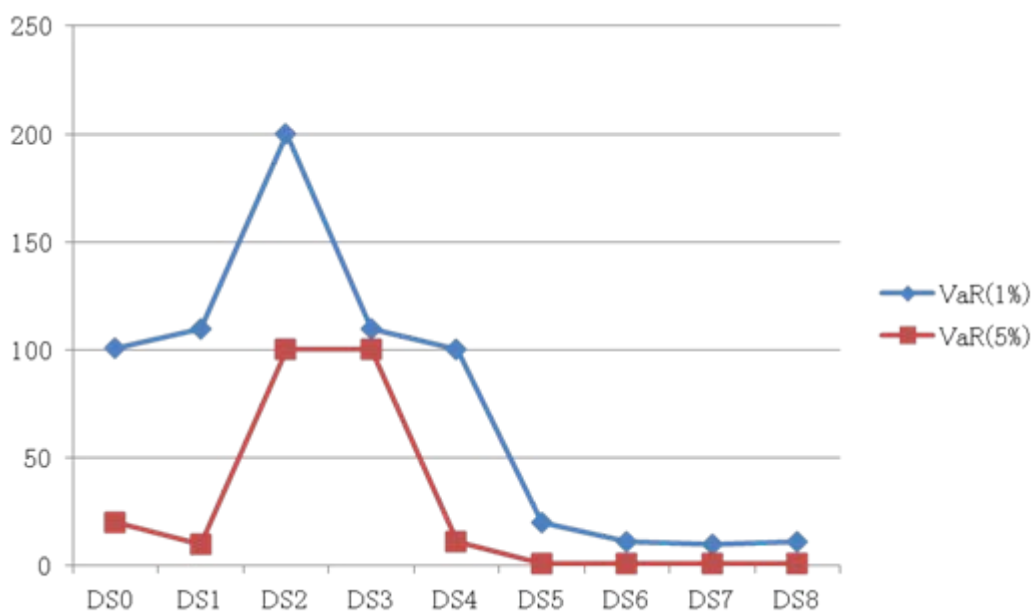


図3.14 地下水流動解析のrlz回数500回の場合におけるデータセットの更新に伴う湧水対策費のVaR(1%)、VaR(5%)の変動

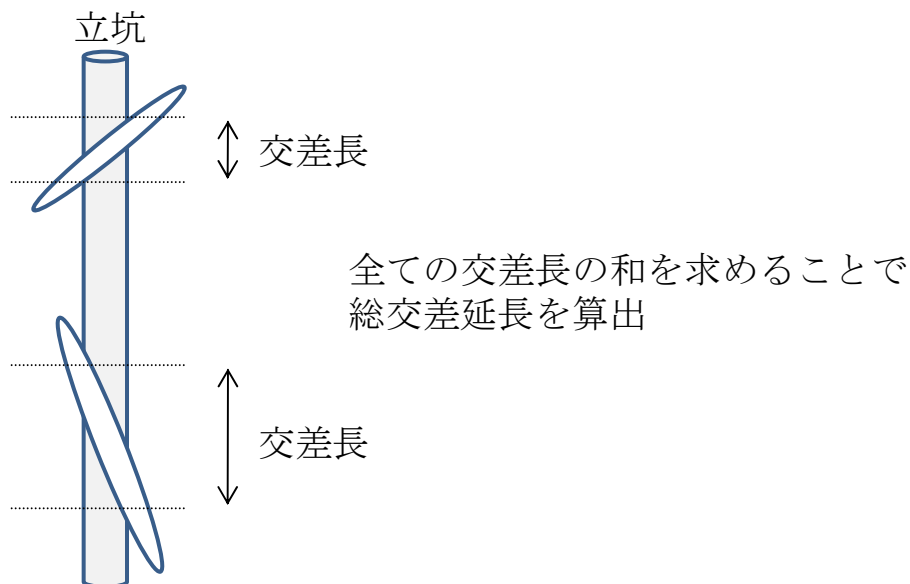


図3.15 立坑と亀裂との交差長の算出方法

ガウシアンシミュレーション結果より

	支保単価	発生頻度
B級以上	702,000	7544
CH	728,000	4143
CM	832,000	2874
CL-D	1,248,000	439

重みつき平均
735,000円/m

ガウシアンシミュレーションから得られた
支保・掘削費(単位当たり)の平均735,000円

岩盤等級CL-D級の際に用いる支保単価1,248,000円



両者の差である513,000円/mが脆弱部の補強に
必要であると考え、これをrlz中の総亀裂交差長と
かけあわせたものを補助対策費とする

図3.16 補助対策費の設定方法

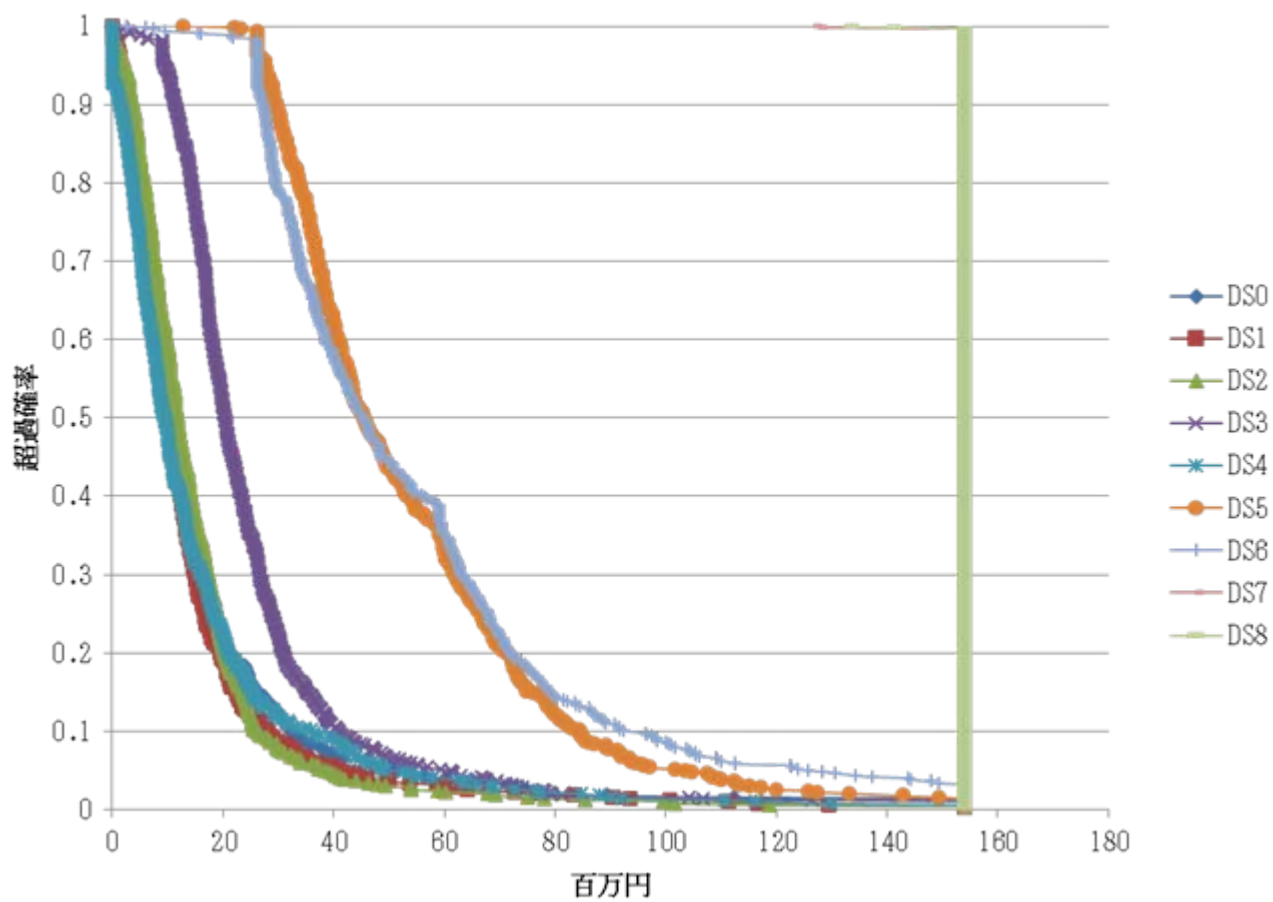


図3.17 補助対策費に関するリスクカーブ

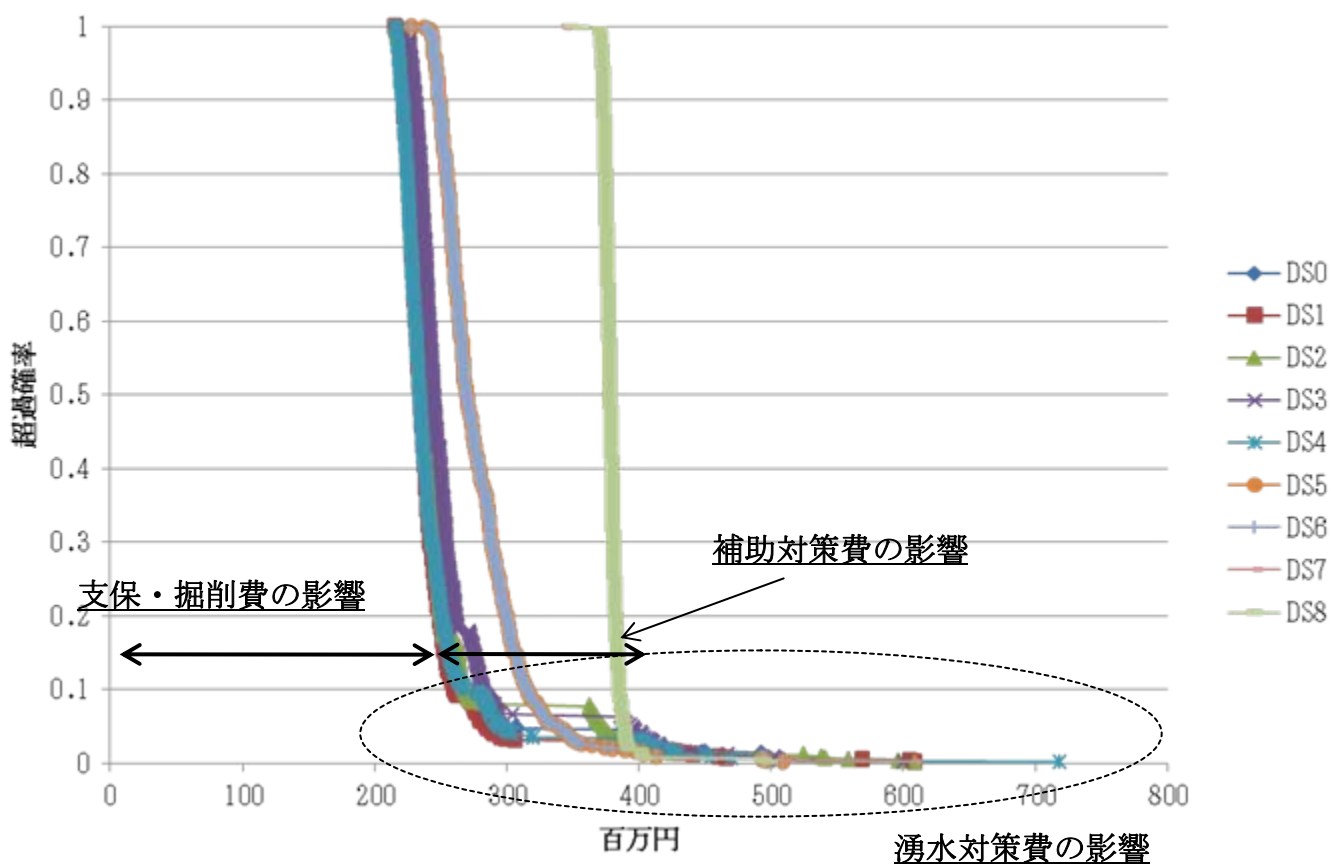


図3.18 建設コストに関するリスクカーブ

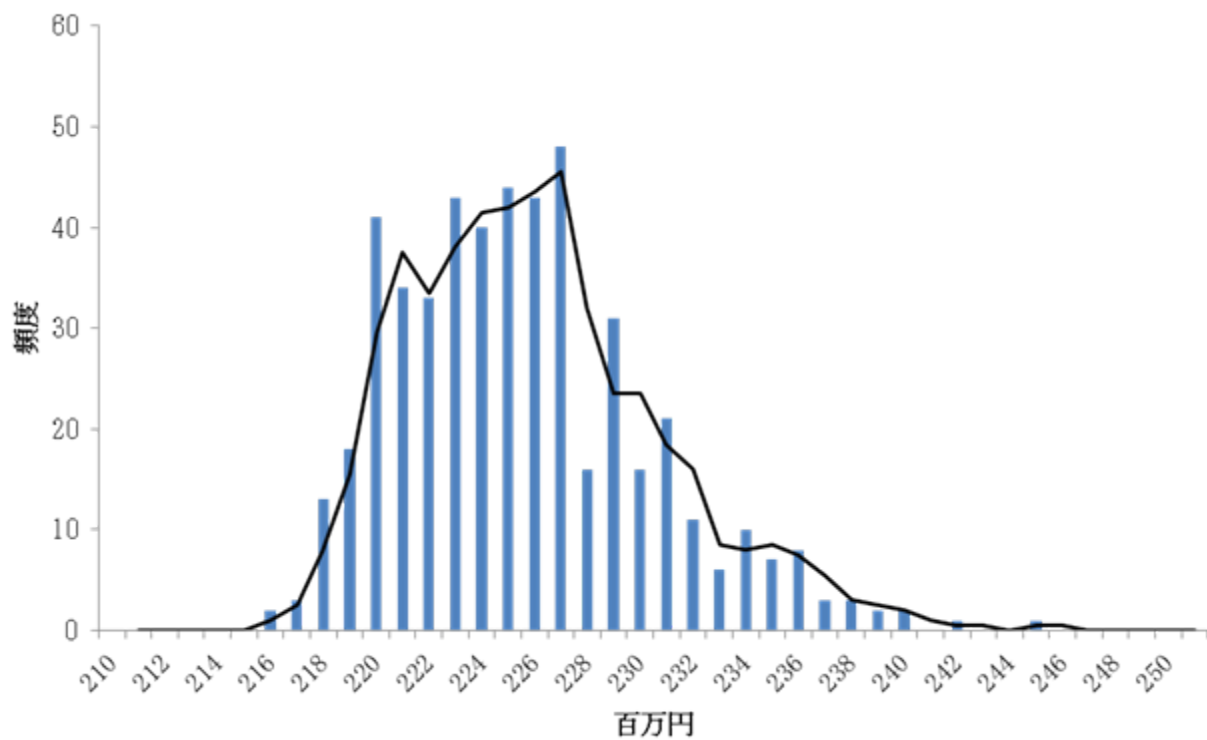


図3.19 支保・掘削費の頻度分布に基づく2区間移動平均による近似曲線

ガウシアンシミュレーションにより得られた
500個の支保・掘削費をn=5のサブグループに分ける

...x(n-3) x(n-2) x(n-1) x(n) x(n+1) x(n+2) x(n+3)...

サブグループ内
の支保・掘削費を並べ替え

$$\begin{matrix} x(n) < x(n-1) < x(n+2) < x(n+1) < x(n-2) \\ i=1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix}$$

サブグループに対して
u, α の推定値を求める

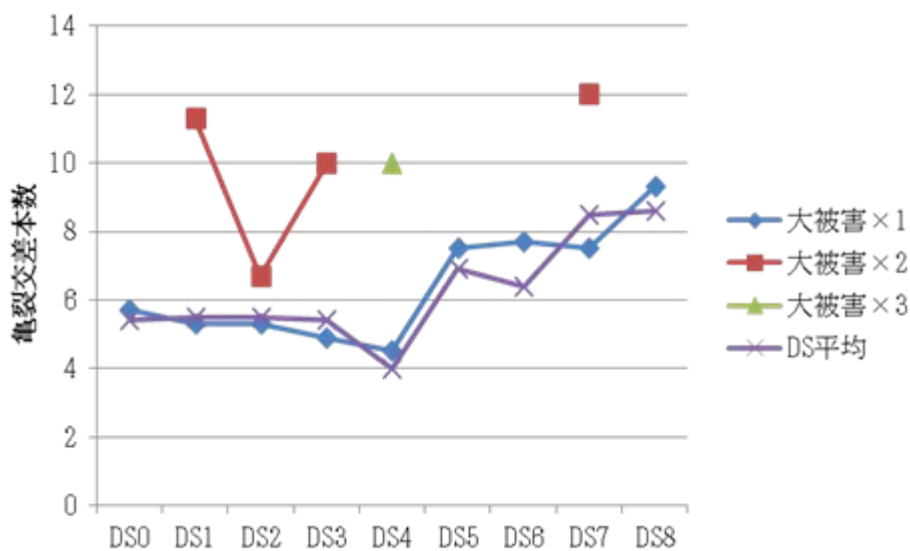
$$\hat{u}_n = \sum_{i=1}^n a_i x_i, \frac{1}{\hat{\alpha}_n} = \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad (a_i, b_i \text{ は既知の係数})$$

標本数を重みとして
個々のu, α の平均を持って
最終推定値とする

$$\hat{u} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i \right)_j, \frac{1}{\hat{\alpha}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n b_i x_i \right)_j$$

k: サブグループ数

図3.20 順序統計学に基づくパラメータ決定の概要



- ◆ 大規模被害が1度発生したrlzにおける平均亀裂交差本数
- ◆ 大規模被害が2度発生したrlzにおける平均亀裂交差本数
- ◆ 大規模被害が3度発生したrlzにおける平均亀裂交差本数
- × 各DSでの平均亀裂交差本数

図3.21 各DSでの大規模被害が発生したrlzにおける平均亀裂交差本数とそのDSでの平均亀裂交差本数との関係

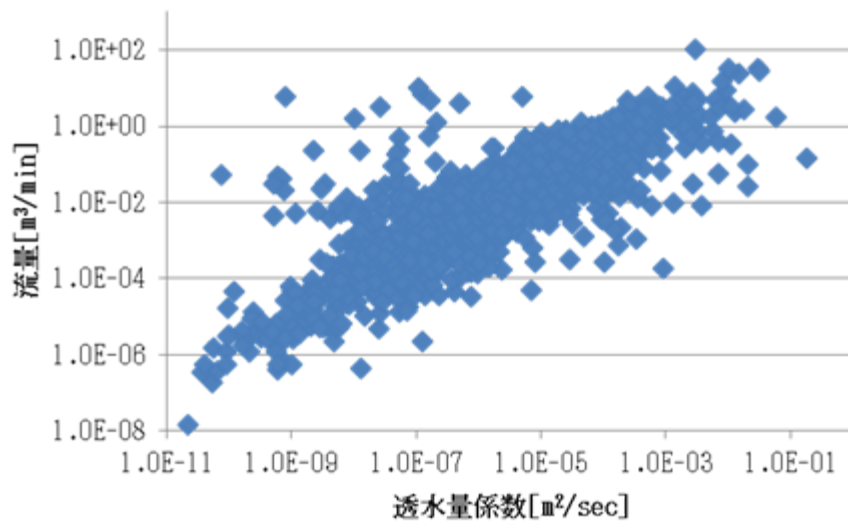


図3.22 亀裂の透水量係数と湧水量の関係

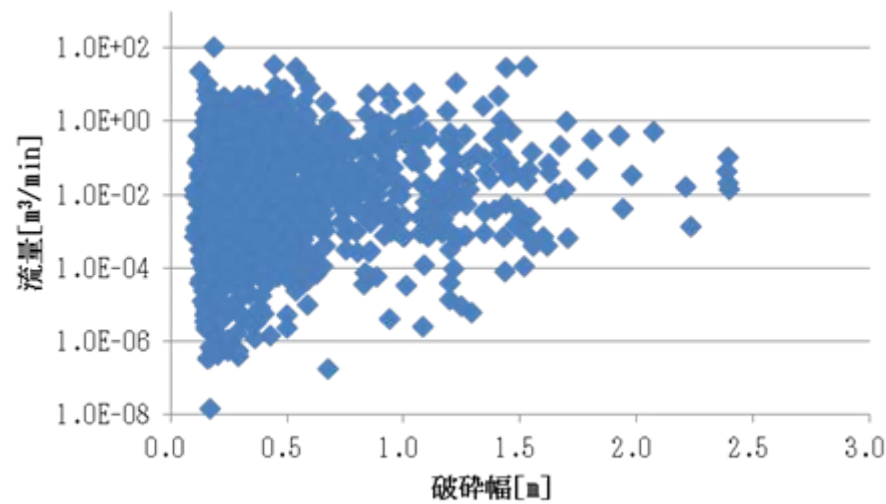


図3.23 亀裂の破砕幅と湧水量の関係

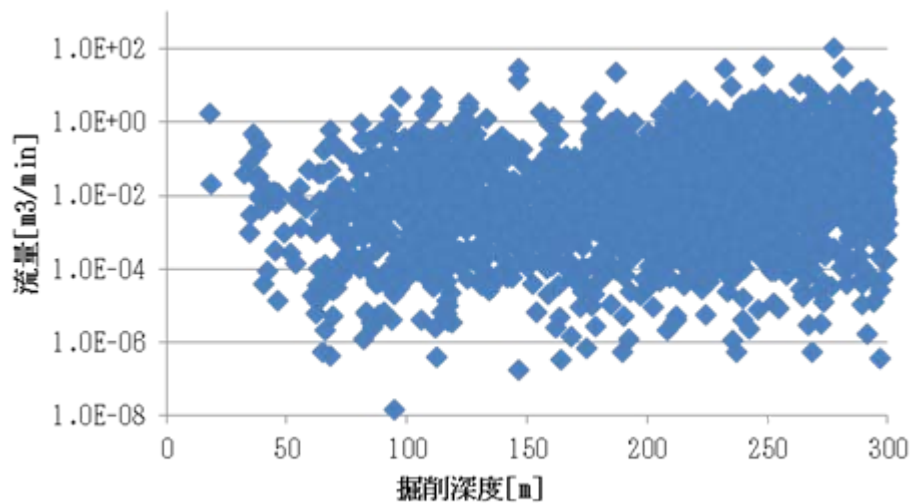


図3.24 亀裂の深度と湧水量の関係

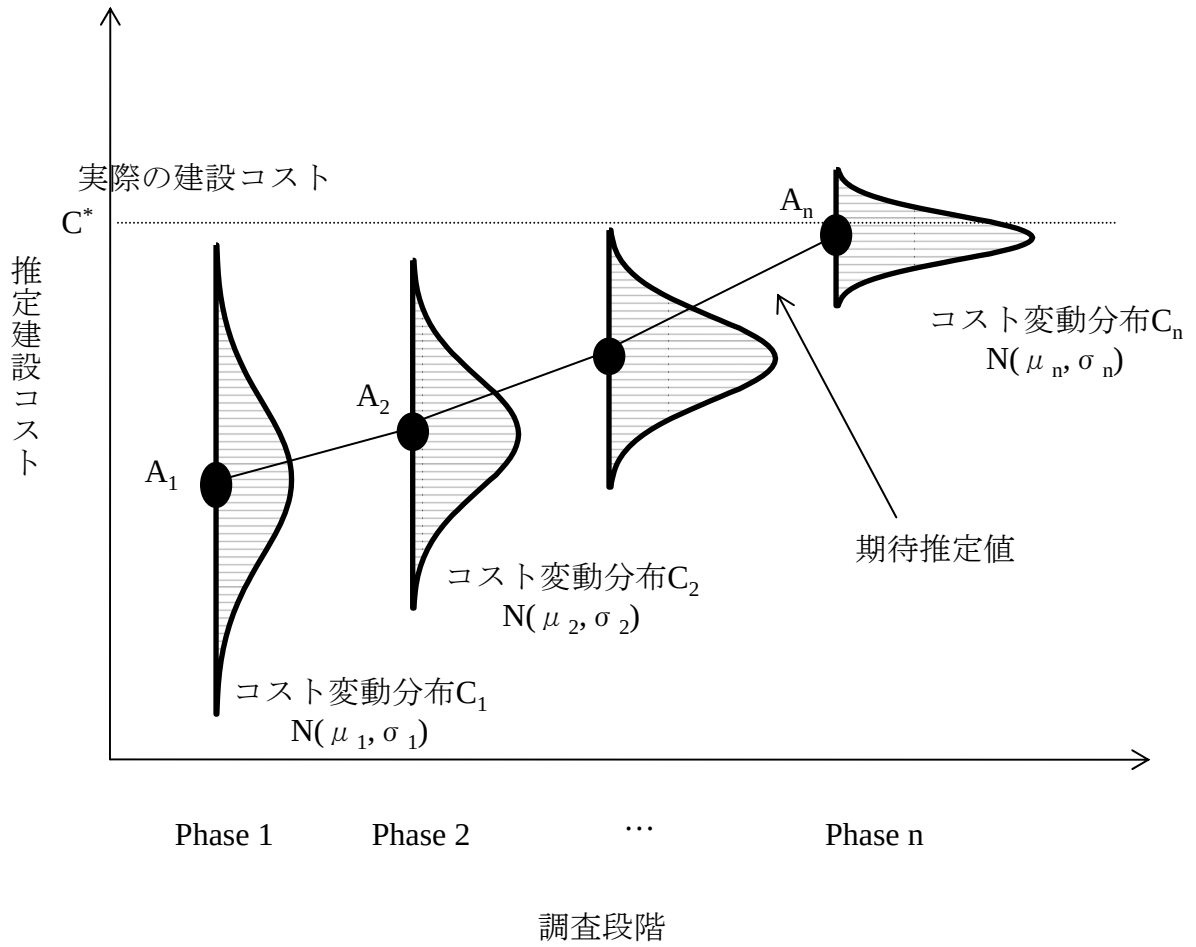


図4.1 建設コスト変動の基本概念

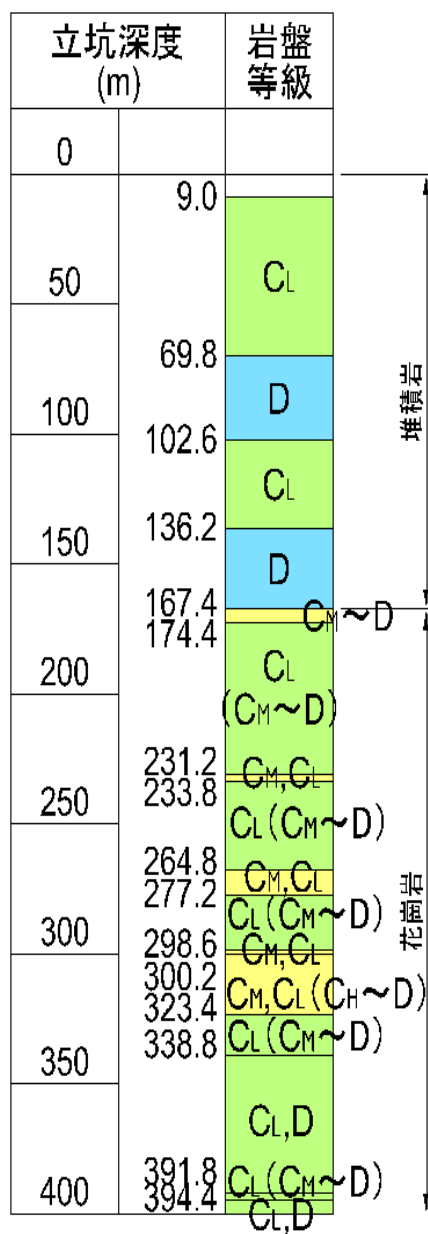


図4.2 主立坑地質観察結果に基づく岩盤等級分類結果

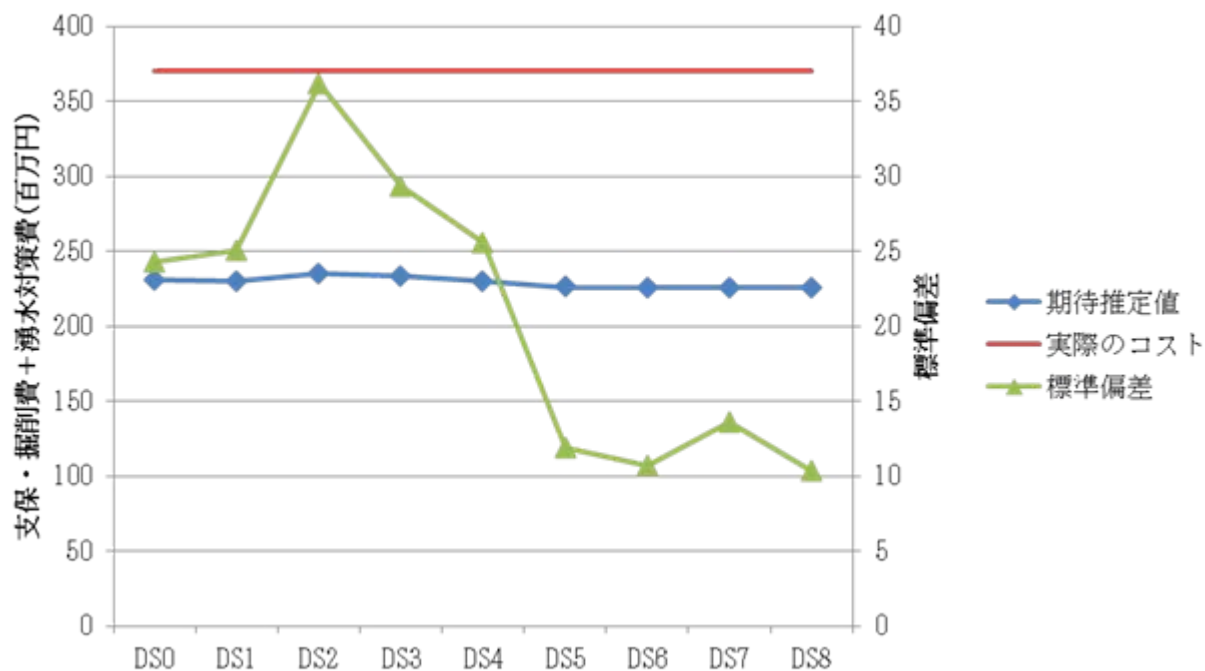


図4.3 データセットの更新に伴う
期待推定値(支保・掘削費＋湧水対策費)と標準偏差の変動

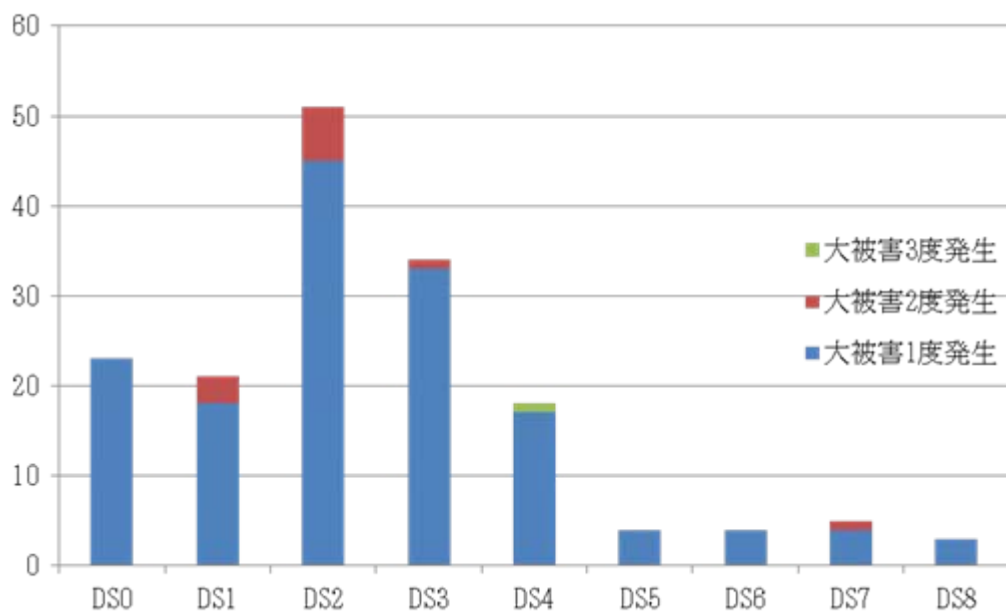


図4.4 各データセットにおける大規模な湧水被害の発生回数

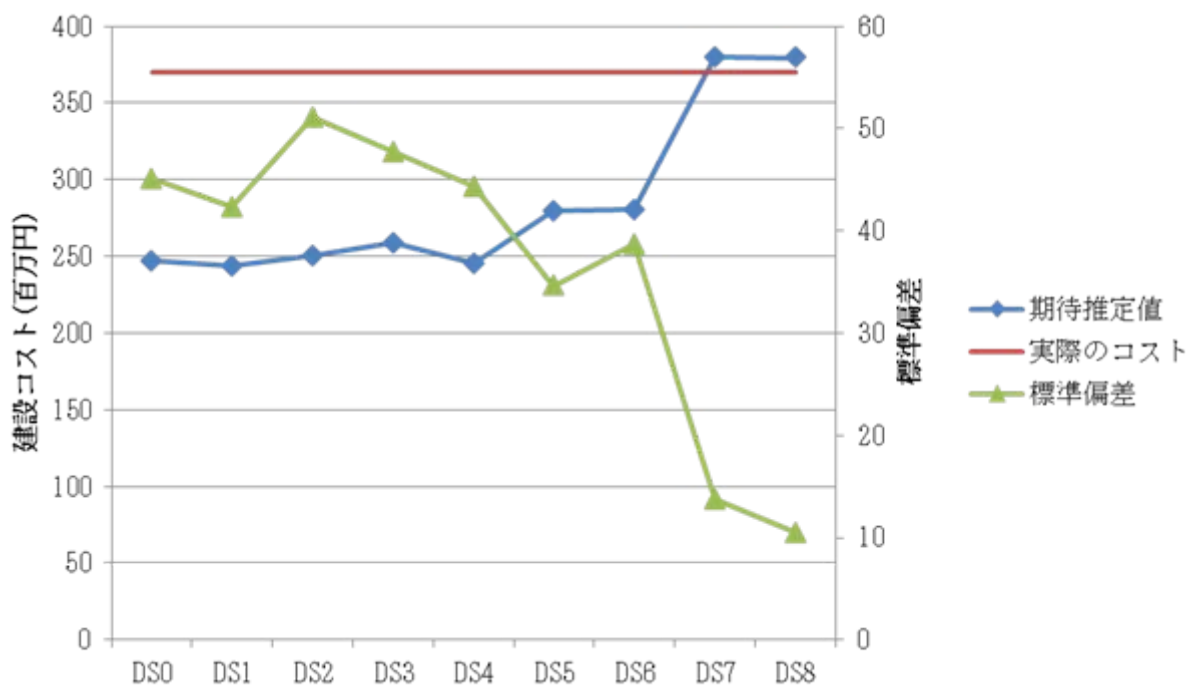


図4.5 データセットの更新に伴う
期待推定値(支保・掘削費＋湧水対策費＋補助対策費)と標準偏差の変動

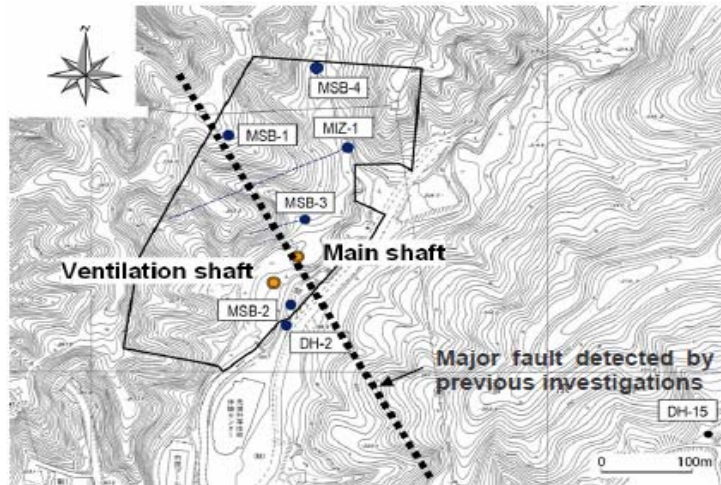


図4.6 断層と主立坑の位置関係

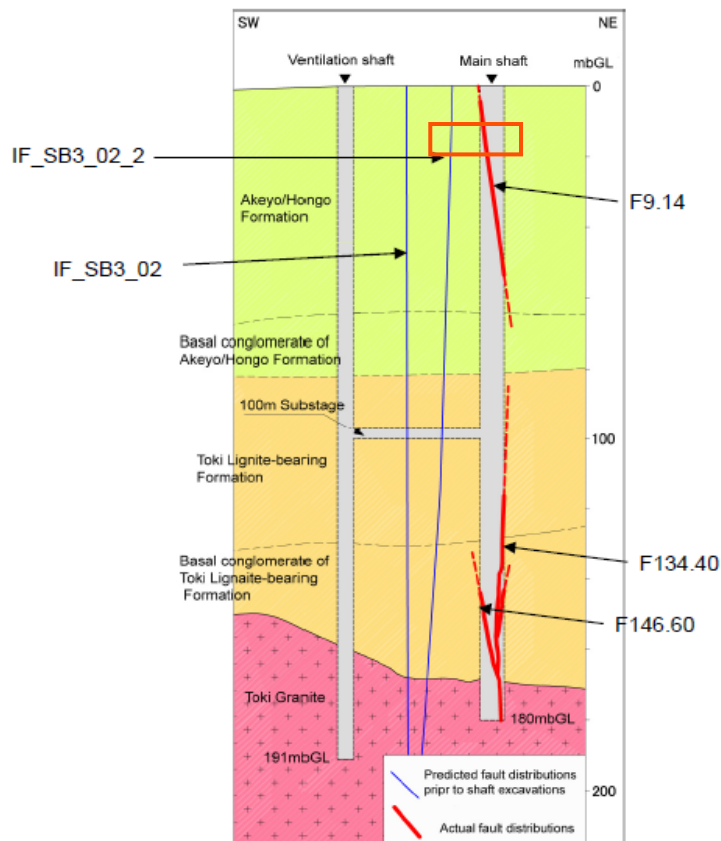


図4.7 主立坑位置における断層群

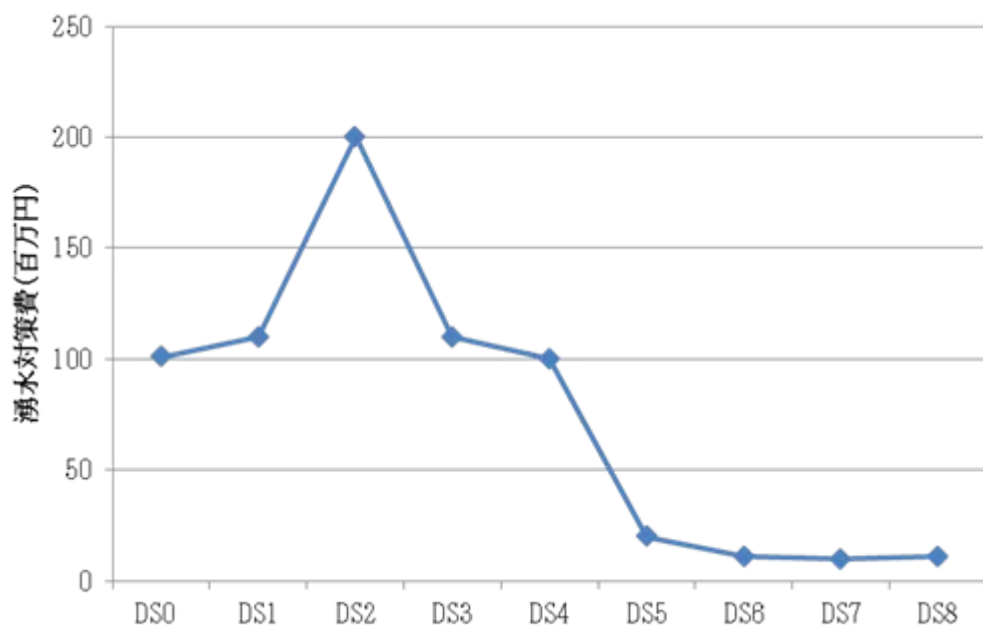


図4.8 DSの更新に伴う湧水対策費のVaR(1%)の変動

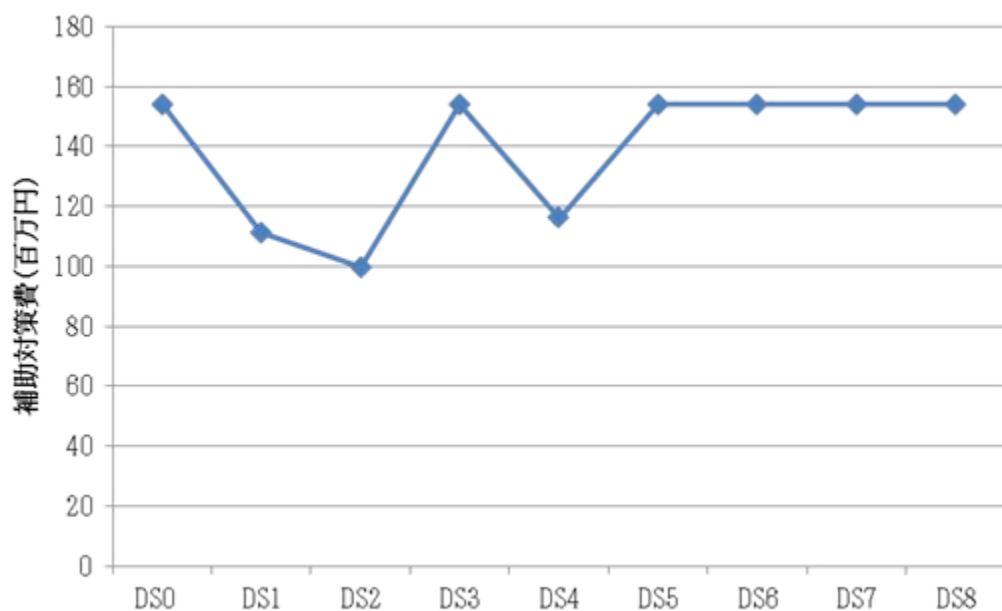


図4.9 DSの更新に伴う補助対策費のVaR(1%) の変動

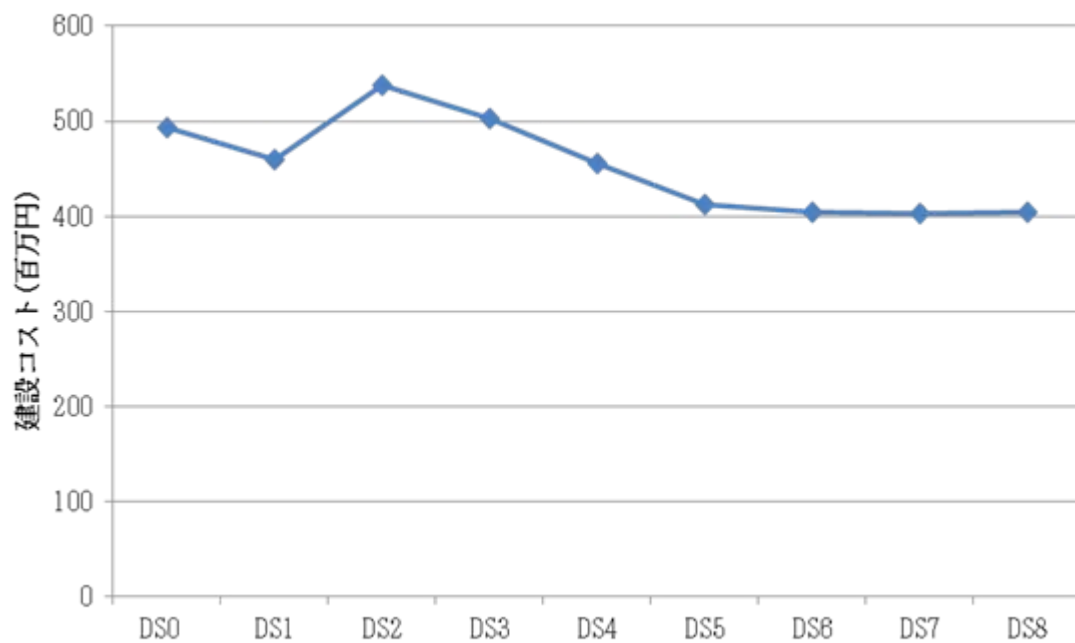


図4.10 データセットの更新に伴う建設コストのVaR(1%)の変動