

不連続性岩盤での立坑掘削における
突発湧水リスク評価に関する研究

平成 18 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

酒井悠

要旨

トンネルに代表される地下構造物の建設工事においては、地盤の水理地質構造や力学的特性が事前に把握されていることを前提に建設コストが積算される。しかしながら、事前調査段階で対象地盤の状況を完全に理解することは不可能であり、施工段階において予見されていない地盤条件が出現することで、建設コストが大幅に変動するという事例が数多く発生している。

本研究では地下構造物として立坑を例に挙げ、予見できない地盤条件の中でも断層や亀裂などの不連続構造を取り上げる。そして、それらが立坑の掘削途中に露出することで発生する突発湧水に着目し、この「低頻度かつ重大」な事象の発生に伴う湧水対策コスト変動リスクの評価手法を確立することを主目的としている。

具体的には、断層や亀裂等の不連続構造をモデル化するために、亀裂の物性分布や空間分布を考慮した不連続亀裂ネットワークモデルを作成する。それらを用いた地下水流動解析により湧水量を計測し、閾値を設定することで湧水対策コストを算出する。さらに、モンテカルロシミュレーションにより得られた湧水対策コスト変動をリスクカーブで表現し、その変動を表す指標として **Value at Risk** を採用することで、突発湧水リスクコストを定量的に評価する。

さらに、同手法で得られた突発湧水リスクコストを低減するための手法の構築についても検討を行う。具体的には、先行ボーリングによる止水・排水を想定し、二項分布モデルを採用することでリスクコスト低減効果を定量的に評価することを目的とする。

目次

第 1 章 序論

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 突発湧水リスク評価手法の構築

2.1 リスクの定義	4
2.2 リスク評価の手順	4
2.3 不連続亀裂ネットワークモデルの構築	5
2.3.1 決定論的亀裂のモデル化	5
2.3.2 確率論的亀裂のモデル化	6
2.4 地下水流動解析	9
2.5 湧水対策コストの算定	9
2.6 突発湧水のリスク評価	10
2.6.1 リスクカーブ	10
2.6.2 VaR	10

第 3 章 リスク評価手法の適用事例

3.1 解析対象サイトの概要	11
3.2 解析条件	11
3.2.1 解析領域, 境界条件	11
3.2.2 不連続亀裂ネットワークモデルの作成	12
3.2.3 地下水流動解析の実施	14
3.3 解析結果	14
3.3.1 湧水量, 全水頭変化	14
3.3.2 湧水対策コスト	15
3.3.3 リスクカーブ, VaR	15
3.3.4 解析結果比較	16

3.4	考察	17
3.4.1	VaR に関する考察	17
3.4.2	データセット更新に関する考察	17
3.4.3	掘削モデル変化に関する考察	19
3.4.4	解析諸条件に関する考察	20
第 4 章	先行調査によるリスクコスト低減手法の構築	
4.1	先行ボーリングによるリスク低減	21
4.2	二項分布モデルの適用	21
4.3	解析結果	22
4.3.1	リスクカーブ	22
4.3.2	投資効果における VaR	22
4.4	考察	23
4.4.1	導入した仮定に関する考察	23
4.4.2	解析結果に関する考察	23
第 5 章	結論	
5.1	まとめ, 結論	25
5.1.1	突発湧水リスク評価手法および解析結果について	25
5.1.2	リスクコスト低減手法および解析結果について	26
5.2	今後の検討課題	26
5.2.1	決定論的亀裂に内在する不確実性について	26
5.2.2	大規模亀裂の分布特性について	27
参考文献	28
謝辞	30

第1章 序論

1.1 研究の背景

トンネルに代表される地下構造物の掘削工事においては、地層の種類や水理地質構造、および岩盤の力学的特性などが事前に予測されていることを前提に設計、施工が行われる。構造物の建設コストについても事前調査により想定された岩盤物性に基づいて検討されているので、実際の施工段階において地質状態が予想よりも悪い場合、建設コストが増加するリスクが発生することとなる。特に高レベル廃棄物処分場などの建設工事においては、数キロメートルに及ぶ領域内の深部岩盤中に、延長数百メートルにわたって坑道を構築する。このため、岩盤の不均質性に起因した建設コストの不確実性は非常に大きくなることが予想される。

建設プロジェクトにおいて発注者は主に公共団体であり、建設コスト変動分も大部分は発注者によって負担されてきた。このため近年におけるわが国のように、国全体が深刻な財政難に見舞われている状況においては、建設コストの変動はそのプロジェクトの評価および実施に多大な影響を与えることになる。また、PFI方式(民間資本活用方式)など新たなインフラストラクチャの調達方式を適用する場合、発注者が建設コスト変動を全て負担するという従来のルールにも変化が生じると考えられる。さらに海外における建設プロジェクトの受注拡大という現状を省みた場合、プロジェクトに内在する不確実性とそれに起因するコスト変動を適切に見極めることが国際競争力を高める上で大きな課題となると考えられる。

現在、計算機の発達に伴い、予想される地質状況に対応した地下構造物の力学的安定性を計算することが可能である。また施工機械などの開発により、これまで難工事とされてきた地山に対しても、比較的スムーズに工事を進めることが可能となってきた。その反面、事前調査における地質推定の確実性についての議論や研究開発は殆ど進められていないのが現状である。従来、土木地質学は岩盤試験や地球物理探査などの分野で大きく発達している反面、野外における地質踏査手法に関する研究についてはあまり進展が見られないものと思われる。

以上のような背景から、建設プロジェクトにおいて、その施工過程に含まれる不確実性とそれに起因するコスト変動に関する基本概念を構築することが重要となる。そして、その不確実性を低減する手法の確立についても非常に重要な検討課題であるといえる。

1.2 研究の目的

建設プロジェクトには様々な不確実要因が内在するが、前述した施工自体に関する不可抗力と分類される「予見できない地盤条件」は、出現すると大幅なコスト変動や工期遅延に直結する可能性が高い。事前調査段階では対象領域全体の地盤状況を完全に把握することは不可能であり、実際の施工段階においては、地盤条件の不確実性に起因する建設コスト変動や工期変動をある程度見込んでおく必要があると考えられる。

本研究では、予見できない地盤条件の中でも、地下構造物の建設中に断層や亀裂等の不連続構造から発生する突発的な湧水に着目する。表 1.1¹⁾⁻⁵⁾に具体的な突発湧水事例を示す。この突発湧水という事象は低頻度ながら、発生することにより建設コストや工期に与える影響が非常に大きくなると考えられる。そこで、この「低頻度かつ重大」な事象の発生に伴う湧水対策コスト変動リスク(以下、湧水リスクと称する)を定量的に評価することを本研究の目的とする。

なお、対象とする地下構造物としては立坑を採用する。立坑では、掘削深度が大きくなるに従って周辺の水圧も高くなることから、掘削途中に断層や亀裂が露出した際の突発湧水量も掘削深度に比例して増加することが予想される。

1.3 既往研究との関連

本節では、地盤条件の不確実性をリスク要因としてコスト変動リスク評価手法に関する研究を行った論文を紹介し、本研究との関連から湧水リスクの具体的な評価手法について述べる。

- Einstein⁶⁾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。その中で、建設コストを平均値だけでなくその変動幅をもって評価することが必要であると述べている。
- 大津，尾ノ井ら⁷⁾は、地質条件の不確実性を実プロジェクトに導入し、地盤統計学の補完的手法であるクリギングを用いること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。
- 高橋⁸⁾は、トンネル建設プロジェクトにおいて、地質条件を地盤統計学により推定することで生じるコスト変動の可能性を評価した。具体的な指標として

は、楽観的シナリオと悲観的シナリオの差という形で累積確率 50%の点を採用している。

大津ら、および高橋の研究においては、地盤を連続体として扱うことでトンネル掘削における建設コスト変動リスクを評価している。すなわち、不連続構造を含めた岩盤をひとつの等価な集合体と捉えているので、トンネル掘削の途中で予見されていない不連続構造が突然出現するといった事象は考慮していない。

それに対して、本研究で対象とする不連続性岩盤では、表 1.1 で示したように断層や亀裂からの突発的な湧水による被害が実際に報告されていて、それが建設コストや工期に大きな影響を与えている。しかしながら前述したように、事前調査段階ではこれらの断層・亀裂を完全に把握することは不可能である。そこで本研究では、まず原位置調査結果に基づいた統計量により亀裂情報のパラメータを算出する。そして、それらを用いた確率論的な不連続亀裂ネットワーク (DFN, Discrete Fracture Network) モデル⁹⁾を作成し、金融工学分野の手法を用いて立坑掘削に伴う突発湧水リスクを評価することを主目的とする。さらには、定量的に評価された突発湧水リスクコストを低減する手法の確立についても検討を行うものとする。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 5 章からなる。まず第 1 章において、序論として研究の背景、目的、および既往の研究との関連を述べた。

続く第 2 章では、不連続亀裂ネットワーク作成から地下水流動解析を行い、算出された湧水量から湧水対策コスト算定、湧水リスク評価という一連の突発湧水リスク評価手法について説明する。

第 3 章では、立坑掘削の実プロジェクトを取り上げることにより、第 2 章で提案した突発湧水リスク評価手法の適用性についての議論を展開する。

第 4 章では、先行ボーリングによる止水・排水を例に挙げて、第 3 章で具体的に提示した突発湧水リスクコストを低減する手法について検討を行う。

第 5 章では、第 2 章、第 3 章で示した突発湧水リスク評価手法、および第 4 章で示したリスクコスト低減手法についてのまとめを行い、結論として得られた知見を述べる。最後に、本研究で明らかにされた問題点を検討課題として示す。

第2章 突発湧水リスク評価手法の構築

この章では、本研究の主目的とする突発湧水リスク評価手法の提案を行う。まずリスクの定義について触れ、次にリスク評価の手順を示す。その後、評価手順に沿って具体的なリスク評価手法を順に述べていく。

2.1 リスクの定義

「リスク」という言葉はさまざまな分野で広く用いられているが、その使われ方も多種多様である。古典的工学分野では、リスクは次式に示すように期待値として定義されることが一般的であった¹⁰⁾。

$$R = P \times C \quad (2.1)$$

ここに R はリスク、 P は発生確率、 C は帰結を表す。

それに対し金融工学分野では、リスクは式(2.1)で示される期待値からの外れ量や、極値指標として定義されることが一般的である。その計量化の指標としては、前者では標準偏差、後者では Value at Risk¹¹⁾がある。

本研究では既に述べたように、立坑掘削における突発湧水という、「低頻度かつ重大」である事象の発生に伴う湧水リスクを定量的に評価することを目的としている。ここで、期待値や標準偏差といった指標では、大規模湧水が発生しないという高頻度の楽観的シナリオが主となることから、突発湧水発生リスクを適切に表現できない可能性が高いと考えられる。そこで、本研究ではリスクを極値指標として定義することにより、「考えられ得る最悪に近い結果」を表現する。また、金融工学分野の指標を用いることで、工学を専門としない投資家や金融関係者とのリスクコミュニケーションを図ることも可能となる。

なおリスク対応に関して、「そのリスクを誰が対処するか」という議論が必要となる。その観点から本研究においては、予見できない地盤条件に起因するコスト変動分はプロジェクト発注者が負担するものと仮定し、プロジェクト発注者から見たリスクを議論するものとする。

2.2 リスク評価の手順

本研究における突発湧水リスクの評価手順を以下に示す。

1. **原位置調査データの取得**：リスク評価対象サイトにおいて原位置調査を行い、割れ目帯を含む比較的大きな不連続構造の方向、トレース長、分布密度、透水性などのデータを取得する。本研究で使用した調査データの詳細¹²⁾を表2.1に示すが、データ取得方法についての言及は避ける。
2. **不連続亀裂ネットワークモデルの作成**：原位置調査結果に基づいて統計量を算出し、岩盤中に存在する不連続構造を表現するために、亀裂情報をパラメータとして与えた不連続亀裂ネットワーク (DFN) モデルを作成する。本研究では、水理地質構造が推定されている大規模断層は決定論的に、それ以外の不連続構造は統計量に基づいて確率論的にモデル化する。
3. **地下水流動解析による湧水量算定**：2で得られたDFNモデルを用いて地下水流動解析を行い、トンネル内に発生する湧水量を算出する。
4. **湧水対策コストのリスク評価**：3で得られた湧水量にある閾値を設けることにより、湧水対策コストを算定する。2か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行うことで、湧水対策コスト変動を統計的に扱い、湧水対策コストのリスク評価を行う。リスク評価においては後述するように、湧水対策コスト変動の統計量をリスクカーブ¹³⁾で表現する。さらに、その変動を表す指標としては Value at Risk (以下、VaR と称する) を採用する。

2.3 不連続亀裂ネットワークモデルの構築

岩盤中に存在する不連続構造には、比較的大規模が大きく数の少ない断層面と、比較的小規模が小さく数の多い節理等がある。本研究では、事前調査により走向、傾斜などの構造および一部で水理特性が推定されている大規模断層は決定論的にモデル化する(以下、決定論的亀裂と称する)。その他の不連続構造は、事前調査結果により算出された統計量に基づいて確率論的にモデル化する(以下、確率論的亀裂と称する)。規模の小さい節理等より規模の大きい断層面の方が決定論的亀裂となりやすいが、一般的に、事前調査の段階でサイト内の全ての大規模亀裂が発見され、水理地質構造が推定されるわけではないということに留意されたい。

2.3.1 決定論的亀裂のモデル化

亀裂を決定論的にモデル化するためには、各亀裂の走向、傾斜、二次元頻度、地表面でのトレース長、透水量係数などのデータが必要となる。原位置調査結果

に基づきこれらのデータを設定していく。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、平面の組合せによって断層の屈曲構造を表現する。

2.3.2 確率論的亀裂のモデル化

確率論的な不連続亀裂ネットワークモデルの構築には、亀裂の空間分布(方向, 形状, 半径, 傾度等)と物性分布(破碎幅, 透水量係数等)のモデルパラメータが必要となる。原位置調査結果から算出された統計量に基づき、これらのパラメータを導出, 設定していく。本節では、確率論的亀裂ネットワークの作成に必要なモデルおよび、パラメータの導出方法について述べる。

1) 亀裂の方向分布

一般に岩盤中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亀裂方向の規則性が高くなることが知られている。本研究ではシュミットネット(下半球投影図)を用いることにより、地質データから亀裂の空間分布傾向を分析する。その際、原位置調査から得られた各亀裂に対して重心法を用い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、主なものに Fisher 分布と Bingham 分布がある。Fisher 分布が卓越方向中心周りの等方的な分布であるのに対して、Bingham 分布は非等方的な分布であり、楕円状や帯状の分布をモデル化することができる。本研究では、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ではないため、以下に示す確率密度関数で与えられる Bingham 分布¹⁴⁾を採用した。

$$f(\theta', \phi') = C^{-1} \sin \phi' \exp\left[\left(\kappa_1 \cos^2 \theta' + \kappa_2 \sin^2 \theta'\right) \sin^2 \phi'\right], \quad 0 \leq \phi' \leq \pi, \quad 0 \leq \theta' \leq 2\pi \quad (2.2)$$

ϕ' : 亀裂の卓越方向からの偏向角 [rad]

θ' : 亀裂の卓越方向からの方位角 [rad]

κ_1, κ_2 : Bingham 分布パラメータ(分散係数) [-]

なお、 C は正規化定数であり、次式で表される。

$$C = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \phi' \exp\left[\left(\kappa_1 \cos^2 \theta' + \kappa_2 \sin^2 \theta'\right) \sin^2 \phi'\right] d\phi' d\theta' \quad (2.3)$$

2) 亀裂の形状

実際の亀裂の形状は多種多様であるが，ここでは決定論的亀裂の場合と同じく平面と仮定する．具体的には円盤もしくは多角形として扱うことが多く，円盤モデルは単位法線ベクトル，半径，および中心位置のパラメータのみで形状を表現できるため，本研究ではこれを採用する．ただし計算機の能力を考え，事例検証においては円盤と等価な面積を持つ正六角形に変換してモデル化した．

3) 亀裂の半径分布

亀裂の半径，つまり大きさは，航空写真やボーリング等で観察される亀裂のトレース長から推定する．トレース長の分布としては対数正規分布などが従来から用いられてきたが，大野・小島¹⁵⁾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で表されることを示した．これに従い本研究では，亀裂の半径分布として以下に示すべき乗分布の確率密度関数を採用した．

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r}\right)^b, \quad r \geq r_{\min} \quad (2.4)$$

r : 亀裂半径 [m]

r_{\min} : 最小亀裂半径 [m]

b : べき乗指数 [-]

また，このとき亀裂半径の期待値 $\langle r \rangle$ は次式で表される．

$$\langle r \rangle = \int_{r_{\min}}^{\infty} r \cdot f(r) dr = \frac{b-1}{b-2} r_{\min} \quad (2.5)$$

べき乗分布では，最小亀裂半径 r_{\min} とべき乗指数 b を設定する必要がある．最小亀裂半径が小さくなると亀裂密度が増加し，計算機の性能上望ましくないが，浸

透流解析を行うにあたって透水性に寄与すると考えられる最小の亀裂を考慮しなければならない。ここでは、実際の岩盤観察から適切な最小亀裂半径を決定する。また、べき乗指数は観察された亀裂のトレース長分布の傾きから決定する。

4) 亀裂の頻度分布

原位置調査で取得可能な岩盤中の亀裂密度として、ボーリング孔から線として得られる1次元分布と、リニアメント図で観察される本数から得られる2次元分布がある。本研究では、ボアホールTVデータから得られた1次元亀裂頻度と次式により、3次元の亀裂頻度を導出した。

$$\rho_3 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho_1}{\langle r \rangle^2} \quad (2.6)$$

ρ_3 : 3次元亀裂頻度 [本/m³]

ρ_1 : 1次元亀裂頻度 [本/m]

$\langle r \rangle$: 平均亀裂半径 [m]

5) 亀裂の空間分布

一般に、大規模亀裂の周辺には小規模な分岐・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、このことを考慮した亀裂の空間分布もいくつか存在する。ただし、本研究では分岐・派生亀裂による疎密構造を取り扱わず、亀裂の空間分布はランダムと仮定する。したがって、亀裂の中心位置分布はポアソン過程に基づくBaecherモデル¹⁶⁾を用いた。参考として、代表的な亀裂の中心位置モデルを図2.1に示す。

6) 亀裂の破砕幅

本研究では、亀裂の破砕幅は以下に示す大野・小島の関係式¹⁷⁾を用いて亀裂の大きさと関連を持たせた。図2.2(a)に次式をグラフとして示す。

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

L : 亀裂の大きさ [m]

W : 亀裂の破砕幅 [m]

7) 亀裂の透水量係数

まず亀裂の透水係数について，以下に示す大野・小島の関係式¹⁷⁾より 6)の破碎幅との関連を持たせた．図 2.2 (b)に次式をグラフとして示す．

$$\log K = -5.6 + 2.1 \times \log W \quad (2.8)$$

K : 亀裂の透水係数 [m/s]

W : 亀裂の破碎幅 [m]

亀裂の透水量係数 T [m²/s]は，透水係数 K に破碎幅 W を乗じたものとして表される．式(2.7)，(2.8)より，亀裂の透水量係数と大きさの関係が次式で表される．

$$T = 2.754 \times 10^{-18} \times L^{4.429} \quad (2.9)$$

以上のモデルおよびパラメータから，確率論的不連続亀裂ネットワークモデルを作成する．ただし本研究では，透水量係数が推定されていない一部の決定論的亀裂についても，式(2.9)を適用して透水量係数を設定する．

2.4 地下水流動解析

2.3で作成された不連続亀裂ネットワークモデルを用いて地下水流動解析を行う．解析には，亀裂ネットワークの発生および水理流動シミュレーションコードである FracMan¹⁸⁾を使用する．このソフトウェアは与えられた亀裂パラメータに基づいて亀裂を発生し，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¹⁸⁾．

湧水量算出までの大まかな流れとしては，1.解析対象領域の設定，2.不連続亀裂ネットワークの発生，3.解析対象領域およびトンネル境界における境界条件の設定，4.地下水流動解析となる．

2.5 湧水対策コストの算定

トンネル内に発生する湧水量から湧水対策コストを算出するために，湧水量に閾値を設ける．すなわち，文献等から対象サイトにおける湧水対策工法，対策コストを設定した湧水対策シナリオを作成し，本研究ではこれを立坑に露出する亀

裂 1 本ごとに適用することで湧水対策コストを算出する。

不連続亀裂ネットワークの作成には乱数を使用しているため，そこから導出される湧水対策コストにも不確実性が生じる．例えば大規模な突発湧水が発生した場合，コストが大きく増加することが予想される．ここで，モンテカルロシミュレーションにより複数回の解析を行うことで，湧水対策コストの変動を統計的に扱うことが可能となる．その模式図を図 2.3 に示す．

2.6 突発湧水のリスク評価

2.5 で得られた湧水対策コストの統計量を用いて，本研究の主目的である突発湧水リスクの評価を行う．リスク評価手法として，モンテカルロシミュレーションにより得られた湧水対策コスト変動をリスクカーブで表現し，その変動を表す代表値として VaR を用いる．以下にそれらの詳細を述べる．

2.6.1 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ているリスク表現方法のひとつである．図 2.4 に示すように，一般的に横軸にコスト，縦軸に超過確率を設定する．リスクカーブの特徴として，損害額とその発生確率の関係を定量的に表すことができると共に，その関係が視覚的にも理解しやすい点が挙げられる．本研究では，モンテカルロシミュレーションにより湧水対策コストの統計量を取得し，その変動をリスクカーブで表現する．

2.6.2 VaR

VaR とは，リスクカーブと共に金融工学分野で用いられているリスク指標である．図 2.4 に VaR とリスクカーブとの関係を示す．本研究では，超過確率 $x\%$ を想定した場合のコストに対応する値を $(\text{VaR})_{x\%}$ と定義する．例えば $(\text{VaR})_{5\%}$ が 100 [百万円] である場合，コストが 100 [百万円] を超える確率が 5% であることを示している．また，第 4 章において投資効果におけるリスクカーブと VaR に関する議論を展開するが，その際の意義については後述する．

次章において，本研究で提案するリスク評価手法の適用性について議論するために，瑞浪超深地層研究所建設工事を例に挙げて検討を加える．

第3章 リスク評価手法の適用事例

本章では，前章で提案した突発湧水リスク評価手法を実際の立坑掘削工事に適用する．本研究においてリスク評価の対象とするのは，岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所建設工事である．まず対象サイトの概要を説明した後，突破湧水リスク評価手法を用いた解析結果を示すと共に，その結果に対する考察を述べる．

3.1 解析対象サイトの概要

瑞浪超深地層研究所計画は，高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる，深地層の科学的研究の一環として進められている．対象サイト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．花崗岩は一般的に，多くの節理や亀裂，および断層などが発達しており，岩盤中における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向けて数年前から毎年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．本研究では，05 年度に行われた原位置調査に基づくデータを基に，超深地層研究所の主要構造物のひとつである立坑掘削工事(図 3.2 に概念図，写真を示す)を対象として，湧水リスク評価を行う．また，3.3.4 において 04 年度に得られた原位置調査データに基づく解析結果と比較することで，調査の進展に伴うリスクコストの低減効果を確認する．以下，05 年度に得られたデータをデータセット 2 として本研究全般で利用し，04 年度に得られたデータをデータセット 1 として 3.3.4 で利用する．

3.2 解析条件

地下水流動解析を行うにあたって，解析領域，境界条件，および不連続亀裂ネットワーク作成に必要なパラメータを設定する．いずれも，超深地層研究所建設に向けた原位置調査データおよび，それに基づく統計量から導出する．

3.2.1 解析領域，境界条件

解析領域，境界条件の模式図を図 3.3 に示す．まず解析領域として，

1,000m×1,000m×1,000m の空間を設定する．地表面を標高 0m として，空間の中心座標は (0m,0m,-500m) である．本研究では東濃地域の地層構造を反映し，上部と下部の 2 層構造からなる領域を想定する．上部割れ目帯と下部割れ目帯の境界面は地表面に平行で，その標高は -349.5m とする．

次にトンネルの設定を行う．まず，(-27.0m,-106.5m) の位置に地表面から延長 500m の主立坑を設定し，湧水量計測を行う．そして本研究では，(-41.2m,-224.1m) の位置に同じく延長 500m の観測孔を設定し，全水頭計測を行うものとする．主立坑，観測孔の直径はそれぞれ 6.5m，0.2m とする．

最後に解析領域およびトンネル表面の境界条件を設定する．まず，解析領域の上面は境界条件なし，すなわち自由水面とする．側面には原位置調査で得られた $H=160\text{m}$ の水頭を与え，下面は不透水境界とする．そして，主立坑面は圧力水頭を固定とした位置水頭のための境界条件を与える．

3.2.2 不連続亀裂ネットワークモデルの作成

本節では，2.3 で提示した手法を原位置調査データに適用することで，不連続亀裂ネットワークモデルを作成する．

まず，得られた原位置調査データを基に決定論的亀裂をモデル化することで，図 3.4 に示す対象サイトの断層分布図を再現する．図 3.5 に決定論的にモデル化した断層・亀裂を示す．また，表 3.1 に透水量係数が推定されている断層を示す．

次に 2.3.2 で提示した手法に基づき，確率論的亀裂のモデル化に必要なパラメータを導出する．それぞれ順を追って説明する．

1) 亀裂の方向分布

対象サイトの基盤岩類として広く分布している花崗岩は，既往の観察結果によると，互いに直交する 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¹⁹⁾²⁰⁾．この傾向は，図 3.6 に示す原位置調査データをシュミットネットで分析した結果からも確認された．したがって，図 3.7(ただし，下部低密度割れ目帯のみ)に示すように原位置調査から得られた亀裂群をクラスター分析によって 3 組に分類し，Bingham 分布を適用して各クラスターにおける亀裂の方向性のパラメータを算出した．表 3.2 に得られたパラメータを示す．

2) 亀裂の形状

円盤モデルを採用し，円盤と等価な面積を持つ六角形に変換する．

3) 亀裂の半径分布

べき乗分布を採用する．最小亀裂半径は既往の研究²¹⁾から 50m と設定した．大野・小島の関係式(式(2.9))から亀裂半径が 50m のときの透水量係数を算出すると，約 $1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ となり，立坑内に発生する湧水量への寄与は小さいため妥当であると考えられる．また，最大亀裂半径は 2,000m と設定した．

べき乗指数に関しては，一般的には観察された亀裂トレース長分布の傾きによって決定される．本研究で用いるデータは東濃地域で観測されたリニアメントのトレース長のみであるが，図 3.8 に示すようにこの分布が既往のトレース長分布¹⁵⁾とほぼ一致しているため，べき乗指数は既往の研究²¹⁾から 3.1 と設定した．

4) 亀裂の頻度分布

原位置調査のボーリング TV データから得られた 1 次元亀裂頻度と式(2.6)から 3 次元亀裂頻度が算出される．さらに，解析領域上部に存在する堆積岩の 3 次元亀裂密度をキャリブレーションにより $0.2 \text{m}^2/\text{m}^3$ と設定し，それぞれの 1 次元亀裂頻度の比から上部・下部割れ目帯の亀裂密度を算出した．各値を表 3.3 に示す．

5) 亀裂の空間分布

亀裂の中心位置分布として Baecher モデルを採用する．

6) 亀裂の破砕幅

大野・小島の関係式を採用し，亀裂の大きさに関連を持たせた．

7) 亀裂の透水量係数

大野・小島の関係式を採用し，亀裂の破砕幅に関連を持たせた．なお前述したように，決定論的亀裂の内，透水量係数が推定されていないものについては，式(2.9)を用いて設定した．

以上により作成した不連続亀裂ネットワークの一例を図 3.9 に示す．

3.2.3 地下水流動解析の実施

1) 掘削モデル

本研究では，地下水流動解析を行うにあたって立坑逐次掘削モデルを適用する．すなわち，逐次掘削の1掘削ステップごとに湧水シミュレーションを行い，各ステップにおける亀裂ごとの湧水量，および観測孔における全水頭変化を計測するものである．今回は，1掘削ステップを2.6mと設定した．逐次掘削モデルを適用する理由としては以下が挙げられる．

1. 掘削の進展に伴う湧水量および全水頭の変化，影響範囲を確認するため
2. 計測管理に有効となるような全水頭と湧水量の関係について考察するため
3. 各ステップにおける先進調査の有用性について評価するため

2) リアライゼーション回数

モンテカルロシミュレーションにより統計的に有意な出力データを得るために，複数回リアライゼーションの解析を行う必要がある．本研究では既往の研究¹²⁾を参照して，リアライゼーションの回数を30回と設定した．

以上の解析条件に基づき，FracManによる地下水流動解析を実行した．以下にその解析結果を示す．

3.3 解析結果

地下水流動解析により算出された立坑内湧水量，観測孔内全水頭変化の結果を示す．これらの結果に基づき，2.5～2.6で示した手法により突発湧水リスク評価を行う．また，データセット更新や掘削モデル変化によるリスクカーブおよびVaRの比較を行う．

3.3.1 湧水量，全水頭変化

図3.10に立坑内で発生すると想定される湧水量，および観測孔で計測された全水頭減少量を示す．掘削段階が進展するにしたがって，湧水量，全水頭減少量共に増加している傾向が読み取れる．なお，全水頭減少量は観測孔深度280mに発生する亀裂において計測された．この亀裂は決定論的に配置したものであり，全

リアライゼーションにおいて同位置に存在している。また、後述するようにデータセット 1 においても同深度 280m に存在しているため、この亀裂を代表として全水頭を計測した。図 3.11 に湧水量と全水頭減少量の関係を示す。両者には正の相関が見られるが、例えば「全水頭が急激に減少した何ステップ後に湧水量が急増する」といった、計測管理に有効となるような兆候は見られない。

3.3.2 湧水対策コスト

湧水量に閾値を設けて湧水対策コストを算出するために、湧水対策シナリオを策定する。すなわち、湧水量を閾値で分割し、それぞれ対応した対策費用、中断日数および対策案を設定する。本研究では、既往の研究²²⁾を参考に、表 3.4 に示す対策シナリオを策定した。このシナリオを掘削全段階における各亀裂の最大湧水量に適用することで、リアライゼーションごとの湧水対策コストを算出した。なお、以降では突発湧水に対応した対策費用、中断日数の両者をまとめて「湧水対策コスト」と呼ぶことにする。

本研究では、解析領域内に決定論的亀裂のみ存在すると仮定した場合の湧水対策コストを最小費と定義する(図 3.12 に示す)。これは立坑内に必ず発生すると考えられる湧水量に対するコストである。算出された最小費は、対策費用が 2.0[百万円]、中断日数が 10.0[日]であった。また、各リアライゼーションの湧水対策コストにおいて最小費からの増加分を変動費と定義し、コスト変動を表現する。

図 3.12 にリアライゼーションごとの湧水対策費用を示す。対策コスト要因となる亀裂平均本数の割合は、決定論的亀裂が 81%(2.00 本)、確率論的亀裂が 19%(0.47 本)である。また、変動費に占める割合は、決定論的亀裂が 22%(0.13 本)、確率論的亀裂が 78%(0.47 本)となっている。すなわち、確率論的な亀裂ネットワークの連結性によって、決定論的亀裂においてもリアライゼーションごとに湧水量にばらつきが生じている。その結果、決定論的亀裂に起因する湧水対策コストが上記の最小費よりも大きくなる可能性があることを示している。

3.3.3 リスクカーブ, VaR

前節で得られた湧水対策コストの統計量を用いてリスクカーブを作成する。今回、リスク評価の指標としては、2.6.2 で示したように $(\text{VaR})_{5\%}$ を採用した。図 3.13 に対策費用と中断日数に関するリスクカーブを示す。 $(\text{VaR})_{5\%}$ は、対策費用が

152.5[百万円]，中断日数が147.5[日]という結果となった．ここで，前節で示したように，決定論的亀裂のみ存在すると仮定した場合の最小費は対策費用が2[百万円]，中断日数が10[日]であり，図3.12からもわかるように，実に24リアライゼーションが最小費とほぼ変わらない結果を示している．すなわち， $(VaR)_{5\%}$ の値は，低頻度で発生した確率論的な大規模亀裂に起因するコスト増加を評価したものと考えられる．また，30リアライゼーションの平均は対策費用が20.7[百万円]，中断日数が31.5[日]であり， $(VaR)_{5\%}$ とは大きく異なる値が算出された．このことは，本研究のように低頻度かつ重大な突発湧水を対象とし，「考えられ得る最悪に近い結果」を示す必要がある場合，期待値という指標では適切な評価ができない可能性が高いことを示している．

3.3.4 解析結果比較

1) データセットによる比較

前節で得られた湧水リスク評価結果を，04年度に得られたデータセット1を用いて解析を行った結果と比較する．データセット1→2における変化は決定論的亀裂のデータのみであり，確率論的亀裂のパラメータ等に変化はない．表3.5にデータセット1において透水量係数が推定されている断層を，図3.14にモデル化した断層・亀裂を示す．データセット1において判明されている決定論的亀裂は29本であり，データセット2では新たに14本の断層・亀裂が判明した．04年度に既に判明されている亀裂においては，05年度で存在位置が大きく変更されたものも多く，必ずしも名称が対応しているわけではないことに留意されたい．

図3.15にデータセット1を用いて地下水流動解析を行った結果を，図3.16に湧水量と全水頭減少量の関係を示す．決定論的亀裂のデータ以外は全て3.2で示した条件と同じである．全水頭減少量についても，前述したようにデータセット2と同じ決定論的亀裂が観測孔深度280mで発生しているので，その地点で計測された値を示した．3.3.1と同様に，計測管理に有効となるような兆候は見られない．

図3.17にリアライゼーションごとの湧水対策費用を，図3.18にリスクカーブを示す．決定論的亀裂に起因する最小費は，対策費用が21.0[百万円]，中断日数が65.0[日]であった． $(VaR)_{5\%}$ は，対策費用が126.5[百万円]，中断日数が172.5[日]という結果になった．3.3.3で示したデータセット2の場合と同様に，確率論的に発生する大規模亀裂が $(VaR)_{5\%}$ に大きな影響を与えていることがわかる．ここで，

データセット更新により新たな断層・亀裂が判明したことが，リスクコスト低減にどう繋がるかを示すことで，事前調査により得られる情報の価値について考察することができる．それについては 3.4.2 で述べることにする．

2) 掘削モデルによる比較

本研究ではこれまで，1 掘削ステップごとに湧水シミュレーションを行う逐次掘削モデルを採用し，地下水位の変動を考慮に入れた突発湧水リスクを評価してきた．これを一括掘削モデルと比較することで，掘削モデルの違いによるリスクコスト変動を確認することができる．一括掘削モデルでは解析領域上面の水頭を固定し，立坑 500m を一気に掘り抜いたときの湧水量を計測する．

データセット 2 を用いて発生させた 30 パターンの不連続亀裂ネットワークを用いて，境界条件と掘削モデル以外は全て 3.2 で示した条件により地下水流動解析を行った．図 3.19 にリアライゼーションごとの湧水対策費用を，図 3.20 にリスクカーブを示す．最小費は，逐次掘削モデルと同じく対策費用が 2.0[百万円]，中断日数が 10.0[日]であった． $(\text{VaR})_{5\%}$ は，対策費用が 107.0[百万円]，中断日数が 115.0[日]という結果になった．

3.4 考察

3.4.1 VaR に関する考察

本研究における突発湧水リスクの評価結果は全て $(\text{VaR})_{5\%}$ という値で示しているが，あくまで極値としての「考えられ得る最悪に近い結果」であり，「必ずこれだけコストがかかる」という意味合いではない．すなわち，突発湧水という「低頻度かつ重大」な事象を適切に表現するために，超過確率 5% という値を用いていることに留意する必要がある．これらの結果より，立坑掘削における突発湧水という偶発的事象の発生に対応すべき費用および日数を，定量的に提示することが可能となる．

3.4.2 データセット更新に関する考察

3.3.4 において，まずデータセットによる解析結果比較を行った．図 3.21 にデータセット 2 (05 年度版解析) とデータセット 1 (04 年度版解析) のリスクカーブを重ねたものを示す．まずデータセット更新によって，決定論的亀裂に起因する最

小費は，対策費用が 21.0[百万円](1)→2.0[百万円](2)，中断日数が 65.0[日](1)→10.0[日](2)と減少している．これは，04 年度の原位置調査では立坑に露出すると考えられていた亀裂が，05 年度の原位置調査では存在位置が変化していて露出しないと予想されたか，もしくは透水性がより低いことがわかったためと考えられる．立坑に露出すると予想される決定論的亀裂の本数はどちらも 4 本であるが，それらの存在位置や透水量係数は必ずしも対応しているわけではないので，2005 年度で新たに発見された決定論的亀裂が立坑に露出した可能性も高い．

これに対して， $(VaR)_{5\%}$ は，対策費用が 126.5[百万円](1)→152.5[百万円](2)，中断日数が 172.5[日](1)→147.5[日](2)という結果になった．最小費の場合と比べて，対策費用は 05 年度の方が大きく，中断日数もその差がかなり縮まっている．この結果には，確率論的に発生させた大規模亀裂が深く関係していると考えられる．ここで大規模亀裂とは，表 3.4 に示す湧水対策シナリオにおける， $5m^3/min$ 以上の大規模湧水を生じるものをいう．すなわち，立坑内に大規模亀裂が 1 本露出すると，対策費用として 100[百万円]，中断日数として 90[日]が計上されることになり， $(VaR)_{5\%}$ に対する影響が大きくなると考えられる．大規模亀裂の本数は，04 年度版解析では 30 リアライゼーション中 4 本，05 年度版解析では 30 リアライゼーション中 5 本と差は 1 本だけである．しかし，05 年度の 5 本の内，任意の大規模亀裂を 1 本削除して $(VaR)_{5\%}$ を算出すると，対策費用は 102.5～112.5[百万円]，中断日数は 97.5～132.5[日]となることで，確率論的大規模亀裂が大きなコスト変動要因となっていることがわかる．このため，原位置調査で新たに大規模亀裂が発見されない限り，データセット更新における最小費増減が $(VaR)_{5\%}$ に与える影響は小さくなる可能性が高くなる．すなわち，突発湧水リスク評価という面においては，今後原位置調査を継続していく上で，立坑内に露出する可能性のある大規模亀裂について最優先で調査していく必要があると考えられる．

ただし，表 3.4 より中断日数に関しては，湧水量が $2\sim 5m^3/min$ の中規模亀裂の影響が対策費用に比べて大きい．中規模亀裂の本数は，04 年度版解析において平均 2.10 本(うち決定論的亀裂 2.00 本)，05 年度版解析において平均 0.20 本(うち決定論的亀裂 0.13 本)であり，中断日数に換算すると約 60 日の差となる．そのため，05 年度版解析より 04 年度版解析の方が中断日数の $(VaR)_{5\%}$ が大きい値を示す結果となっている．

また，ここでひとつ非常に重要な点について指摘する．04 年度版解析の 30 リ

アライゼーションにおいて立坑に露出した大規模亀裂 4 本の内、1 本は決定論的に存在していると仮定したものであった。すなわち、29 リアライゼーションにおいては大規模湧水を生じなかった亀裂が、あるリアライゼーションでは湧水量 $5\text{m}^3/\text{min}$ 以上の大規模亀裂となったのである。この結果が示唆することは、同じ亀裂の場合でも、亀裂ネットワークの分布状況によって湧水量が大幅に変化する可能性があるということである。上記の亀裂は、29 リアライゼーションでは湧水量が $2\text{m}^3/\text{min}$ 強程度と中規模亀裂に属する。つまり、表 3.4 において湧水量 $2\sim 5\text{m}^3/\text{min}$ の中被害をもたらすと予想される亀裂は、亀裂ネットワークによっては湧水量 $5\text{m}^3/\text{min}$ 以上の大規模亀裂となる「予備軍」であることがわかる。

以上を踏まえて、データセット更新における突発湧水リスクコスト低減効果について考察を行う。前述したように最小費については、対策費用が 19[百万円]、中断日数が 55[日]の低減効果がみられたが、 $(\text{VaR})_{5\%}$ については、確率論的大規模亀裂の影響が卓越しているため、目に見える程の低減効果はない。しかしながら、先に述べた中規模亀裂に着目すると、データセット 1 では決定論的亀裂 2 本が存在すると予想されていたのに対し、データセット 2 では 0 本である。すなわち、場合によっては大規模湧水を生じて $(\text{VaR})_{5\%}$ に影響を及ぼす可能性のある中規模亀裂が、実は立坑には露出しないことがわかったという点で、数字としての値よりも大きな「情報としての価値」があったと考えられる。

3.4.3 掘削モデル変化に関する考察

次に、掘削モデルによる解析結果比較を行った。図 3.22 に逐次掘削モデルと一括掘削モデルのリスクカーブを重ねたものを示す。 $(\text{VaR})_{5\%}$ は、対策費用が 152.5[百万円](逐次) \Leftrightarrow 107.0[百万円](一括)、中断日数が 147.5[日](逐次) \Leftrightarrow 115.0[日](一括)という結果になった。直感的には、一括掘削モデルの方が上面に水頭を固定しているため、湧水リスクも大きくなることが予想されるが、結果は逆であった。この理由としては、湧水対策シナリオを各亀裂の最大湧水量に適用してコストを算出していることが挙げられる。すなわち、立坑内に発生する亀裂は掘削の途中段階で最大湧水量を生じることが多く、一気に立坑を掘削する一括掘削モデルでは各亀裂の最大湧水量を的確に算出することができないためと考えられる。そのため、同じ亀裂ネットワークを用いていても、大規模亀裂の本数が 5 本/30 リアライゼーション(逐次)から 4 本/30 リアライゼーション(一括)と変化

し、コスト変動が生じたと考えられる。ここでも、大規模亀裂の本数がコスト変動要因として卓越していることがわかる。実際の立坑工事は当然逐次掘削で行われるので、亀裂の最大湧水量を測定できない一括掘削モデルでは、危険側の解析結果を示す可能性があると考えられる。

3.4.4 解析諸条件に関する考察

1) 地表面近くに発生する大規模亀裂について

本研究で確率論的亀裂の中心位置分布として用いられた **Baecher** 分布は、ポアソン過程に基づいて解析領域内に亀裂中心をランダム発生させるため、領域上面に突き出た形で大規模亀裂が発生することがある。実際の原位置調査では、地表面でリニアメントとして確認できる程度の断層・亀裂は既に発見済みである可能性が高い。本研究ではそのような亀裂も確率論的に発生させているので、解析結果としては安全側の評価をしている可能性があると考えられる。

2) 亀裂の二重発生領域について

本研究では、解析領域として上部・下部の2層構造を想定している。それぞれの領域について独立に確率論的亀裂を発生させているため、上部で発生させた亀裂が下部に侵入することがあり、またその逆もあり得る。したがって、亀裂密度が設定よりも大きい図 3.23 のような二重発生領域が存在することになる。立坑掘削の後半段階がこの領域で行われるので、そこで大規模亀裂が露出する可能性が高まる。つまり 1) と同様に、解析結果としては安全側の評価をしている可能性が高いと考えられる。

上2点の対策案として、地表面に露出している確率論的大規模亀裂や、二重発生領域に存在する亀裂を制限することが考えられる。ただ、単純に亀裂を削除するのではなく、まず大規模亀裂の分布特性を定量的に評価することが必要である。

以上でリスク評価手法の適用および考察を終える。提示された問題点に関する改善策については、検討課題として第5章に示すものとする。次章では、本章で算出された湧水対策リスクコストを低減するための手法についての考察を行う。

第4章 先行調査によるリスクコスト低減手法の構築

実際のトンネル掘削工事では、定期的にもしくは次の掘削で大規模湧水が発生しそうな段階において、先行調査により湧水量を測定、または止水・排水等を行う。本章では、前章で提示された突発湧水リスクコストを低減するための手法構築について考察する。先行調査としてボーリングによる止水・排水を取り上げ、リスクコスト低減効果を定量的に評価することを目的とする。なお、ここではデータセット2を用いて算出した湧水対策コストの値(3.3.2を参照されたい)を用いるものとする。

4.1 先行ボーリングによるリスク低減

実際のトンネル掘削工事で打設するボーリングには、湧水量や化学成分調査、グラウトによる止水、排水などの目的がある。表4.1²³⁾⁻²⁵⁾に実際に先行ボーリングが打設された例を示す。本研究では、先行ボーリングによる止水・排水を想定し、打設したボーリングに当たる亀裂からの湧水は全て止水・排水できるものと仮定する。すなわち、ボーリングを打設することで、湧水対策費用を削減、および中断日数を短縮することができると考える。また、立坑掘削段階を1期:0~100m地点から5期:400~500m地点まで100mずつ5段階に分割し、各期の先頭で先行ボーリングを行うかどうかを判断する。図4.1に概念図を示す。なお、先行ボーリングの長さは100mとし、各期全てにボーリングを打設した場合、立坑に露出する亀裂から湧水は発生しなくなるものとする。

4.2 二項分布モデルの適用

各期の先頭で先行ボーリングを行うかどうか判断する、というボーリング打設モデルを作成するために、DT(Decision Tree)とよばれる二項分布モデル²⁶⁾を採用する。図4.2のように、1期の先頭から順に判断していくと、全32パターン of 打設モデルが作成される。

本研究では、3.3.2で示したように、30回のリアライゼーションにおいてそれぞれ湧水対策コストを算出しているため、ある打設モデルにおいても30通りの「削減できる対策費用」、「短縮できる中断日数」が存在する。本章では、前章で示した突発湧水リスクコストを低減することを目的としているので、リスクコス

トの算出方法は 3.3.3 と同じく $(\text{VaR})_{5\%}$ を用いることにする。例として、1 期と 3 期にボーリングを打設するモデルを考える。この場合、1 期 (0~100m) と 3 期 (200~300m) に立坑に露出する亀裂に起因する湧水対策コストは 30 パターン存在し、それらの統計量に基づく $(\text{VaR})_{5\%}$ の値がそのまま低減できるリスクコストの値となる。すなわち、考えられ得る最悪に近い形で大規模亀裂が露出した場合を想定し、それによるリスクコストを低減するためにボーリングを打設すると考える。

このようにして、全 32 パターンのボーリング打設モデルにおいて、それぞれ「削減できる対策費用」および「短縮できる中断日数」を算出することができる。これらをボーリングの打設本数 (0~5 本) ごとに分類することで、どこに何本打てばよいかという先行ボーリングの有用性について議論することができる。

4.3 解析結果

本節では、4.1~4.2 の条件に基づいて解析を行った結果を示す。まず突発湧水リスク評価の場合と同様に、各ボーリング本数における投資効果のリスクカーブを示し、 VaR を算出する。その際、投資効果における VaR の意義について触れる。

4.3.1 リスクカーブ

全 32 パターンのボーリング打設モデルにおける各本数の内訳は、0 本:1 通り、1 本:5 通り、2 本:10 通り、3 本:10 通り、4 本:5 通り、5 本:1 通り、である。それぞれリスクコスト低減量も同数だけ存在する。そこで、1~4 本におけるリスクコスト低減量の統計量を用いてリスクカーブを作成する。4 本のリスクカーブを重ねたものを図 4.3 に示す。当然ながら、本数が増えるにしたがってリスクコスト低減量も増加していく傾向が読み取れるが、各本数共に投資効果の値にかなりばらつきが見られる。

4.3.2 投資効果における VaR

上で得られたリスクカーブから VaR を算出する。今回は投資効果におけるリスクを評価するため、 $(\text{VaR})_{95\%}$ を用いる。すなわち、2.6.2 で示した定義によると、前章の湧水対策コストに関しては「考えられ得る最悪に近い結果」として超過確率 5% の値である $(\text{VaR})_{5\%}$ を用いているので、本章の投資効果に関しては、超過確率 95% の値である $(\text{VaR})_{95\%}$ を採用する。

図 4.4 に本数と投資効果の関係を表したグラフを示す。(VaR)_{95%}の他に、参考として平均および最もリスクコスト低減が期待できるパターンも提示する。後二者からすると、少ない打設本数でもそれなりの投資効果があり、本数が増えるにつれて投資効果も増加するよう見える。しかし、(VaR)_{95%}を見る限りでは1~4本のいずれも投資効果はほとんどない。これが意味するところは、立坑全長にわたって止水・排水を行わない限り、いくらボーリングを打設しても思うように投資効果が現れない可能性があるということである。

4.4 考察

本節では、4.3 で得られた解析結果についての考察を述べる。その前に、本研究の解析条件および目的について言及しておく。

4.4.1 解析条件および目的に関する考察

本研究では重要な仮定として、ボーリングに当たる亀裂から湧水が全く発生しなくなるという前提を設けているので、今回設定した解析条件はかなり理想的なものであると言わざるを得ない。実際のトンネル掘削中に止水・排水を行う場合、ボーリング孔から何ヶ月も排水し続けたり、その間に新たな排水設備を調達したりして湧水リスクを低減するような事例が多い。そういった追加事項に伴う費用や工期遅延日数と湧水リスクの低減量を比較することで、実質的なリスクコスト低減量を定量的に評価できるものとする。本研究では、その前段階として一考察を行うことを目的としているので、ボーリングの打設費用やそれに伴う工期遅延といった要素は考慮していないことに留意されたい。

4.4.2 解析結果に関する考察

本研究では、リスクコスト低減量の評価指標に(VaR)_{95%}を採用する場合、たとえ立坑内に大規模亀裂が露出すると仮定したとしても、費用対効果の面であまり望ましい結果にならない可能性が示唆されたことになる。

しかし、ここで注意しなければならないことは、この結果は本研究で対象としたサイトにおいてのみ適用されるということである。データセット2を用いて作成した30パターンの不連続亀裂ネットワーク中に確率論的大規模亀裂は5本存在するが、この5本の立坑での露出位置を調べると、実に4本が5期(400~500m)

で露出していた。この偏在性により、図 4.4 のような結果が提示されたことは容易に判断できる。原位置調査から導出された亀裂方向分布や頻度分布等のパラメータが、立坑での大規模亀裂の露出位置に影響を与えていると仮定すると、他のサイトでパラメータを得た場合には結果が全く異なる可能性も十分考えられる。仮に、大規模亀裂 5 本が各期に散在して立坑に露出したとすると、 $(\text{VaR})_{95\%}$ として図 4.4 の平均で示したグラフに近い値が算出されるであろう。したがって、本研究で定量的に評価された突発湧水リスクコスト低減量の値は、確率論的大規模亀裂が偏在的に露出するという悲観的なケースを想定したものであるといえる。

以上により、今回得られたリスクコスト低減量を一般論として提示することはできないが、逆に言えば、この偏在性を評価できる可能性が示唆されたと考えることもできる。すなわち、確率論的大規模亀裂の分布特性を定量的に評価することで、先行ボーリングをどこに打設すればよいかという議論を展開することができるだろう。

以上でリスクコスト低減手法とその適用結果、およびそれらに関する考察を終える。次章では、本研究に関するまとめと得られた知見を述べ、残されたさまざまな問題点に関する改善案を今後の検討課題として示すことにする。

第5章 結論

本章では、これまで示してきた突破湧水リスク評価手法，リスクコスト低減手法，およびそれらの解析結果についてのまとめを行い，結論を述べる．最後に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 まとめ，結論

5.1.1 突発湧水リスク評価手法および解析結果について

第2章，第3章において突発湧水リスク評価手法を構築し，その手法を実際の立坑掘削工事に適用することで検討を加えた．原位置調査から得られた統計量に基づいて不連続亀裂ネットワークを作成し，FracManを用いた地下水流動解析では，掘削ステップごとに湧水シミュレーションを行うことで，掘削の進展に伴う湧水量および全水頭の変化を確認した．また，湧水対策シナリオを設定することで，湧水量から湧水対策コストを算出した．さらに，モンテカルロシミュレーションにより得られたコスト変動をリスクカーブで表現し，その代表値として $(\text{VaR})_{5\%}$ を採用することで，突発湧水リスクコストの定量的評価を行った．得られた知見として，以下が挙げられる．

- 湧水対策コストにおいて，立坑掘削面に露出すると想定される確率論的大規模亀裂が大きな変動要因となっている．そのため，今後の原位置調査においては，立坑に露出する可能性のある大規模亀裂を優先的に調査していく必要がある．
- 透水量係数が確定している決定論的亀裂においても，亀裂ネットワークの分布状況により，低頻度ではあるが予想される湧水量と大幅に異なる可能性がある．すなわち，湧水量が $2\sim 5\text{m}^3/\text{min}$ 程度の中規模亀裂が低頻度で大規模湧水を発生するという事態を想定しておく必要がある．
- 事前調査で発見されている可能性が高い地表面付近の大規模亀裂や，亀裂の二重発生領域等を考慮に入れているため，安全側(保守側)の解析結果を提示している可能性が高い．

5.1.2 リスクコスト低減手法および解析結果について

第4章において、第2、3章で得られた突発湧水リスクコストを低減するための手法構築についての考察を行った。立坑掘削を5段階に分割し、二項分布を適用することで先行ボーリングの打設モデルを作成した。また、突発湧水リスク評価と同手法を用いることで、リスクコスト低減量の定量的評価を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 立坑に露出する大規模亀裂の存在を仮定して先行ボーリングによる止水・排水を行っても、亀裂の分布状況によっては望ましい効果が得られない可能性がある。
- 今回の解析結果は、大規模亀裂の偏在性が顕著に現れる対象サイトにおいて算出されたものであり、悲観的な結果を示している可能性が高い。すなわち、他のサイトを対象とした場合には、より望ましい結果が算出される可能性が十分考えられる。
- 大規模亀裂の分布特性を定量的に評価することで、ボーリングを打設する掘削段階について検討を行うことができ、より優れたリスクコスト低減手法を確立できる可能性がある。

本研究では、突発湧水リスク評価手法および、リスクコスト低減手法の構築という二つの命題に対する何らかの解答を提示することを主目的としてきた。以上については、一定の結果がもたらされたと考えることができる。しかし、さまざまな仮定を含みもつことから、これら2手法から導出される具体的な数値については必ずしも信頼性が高いとは言えず、まだまだ検討・改良の余地が残されているものとする。次節において、それらの問題点を改善するための検討課題を述べる。

5.2 今後の検討課題

5.2.1 決定論的亀裂に内在する不確実性について

3.4.2で示したように、データセット1においてある決定論的亀裂が低頻度で大規模湧水を生じた。推定透水量係数は $2.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とそれほど大きくなく、これが示すところは、他の同程度の透水性を持つ亀裂もネットワークの連結性によ

っては大規模湧水を生じる可能性があるということであり，リスク評価においてもその危険性を適切に評価するべきである．今後の原位置調査においても，優先すべき「大規模亀裂」の範疇をかなり広げる必要があるだろう．

また，「決定論的」として事前調査で発見された亀裂にも，地質構造や透水量係数について同系列の亀裂から推定されているものが存在する．今後は，決定論的亀裂の中でも水理地質構造が明確にされているものとそうでないものの区別をはっきりさせるべきである．曖昧な推測しかされていない亀裂については，湧水量の変動を大きく評価する必要がある．

以上から，決定論的亀裂に内在する不確実性には，亀裂ネットワークの分布状況および原位置調査の精度という２種類の発生要因が存在すると考えられる．今後，決定論的亀裂における不確実性の評価および低減について検討を行う場合には，それぞれに起因する不確実性を区別して考える必要があるだろう．

5.2.2 大規模亀裂の分布特性について

3.4.4 で示したように，地表面近くの大規模亀裂や二重発生領域等の問題から，突発湧水リスクについては安全側の評価結果を提示している可能性が高い．また，4.4.2 で示したように，大規模亀裂の偏在性から，リスクコスト低減量については悲観的な評価結果を提示している可能性が示唆された．これらは全て大規模亀裂の空間分布特性に関する問題である．今後の重要検討課題として，クラスター分析や頻度分布等のパラメータから，「立坑掘削のどの段階で大規模亀裂が露出しやすいか」を定量的（確率統計的）に評価することが挙げられる．その定量的な値が，ある掘削段階において先行ボーリングを打設するための動機となり，費用対効果の面で最適なリスクコスト低減パターンを決定することができるものとする．また，亀裂の分布特性を定量的に評価することで，確率論的亀裂をモデル化する際に，地表面に露出すると考えられる大規模亀裂をあらかじめ制限しておくといったことも可能となる．ただし，これらの検討を行うためには，信頼性の高い統計量および理論とそれに基づくパラメータ，さらにはボーリング打設費用の評価など，改善・導入すべき要素は多いことを念頭に置いてから取り掛かるべきであろう．

参考文献

- 1) 大島洋志：毎分 23t の異常湧水に挑む，トンネルと地下，pp12-21，1973
- 2) 平沢市郎，飯田茂，森喬，山本松生，串山純孝，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
- 3) 田代邦弘，江藤誠一，折田増実，藤田肇司：大量湧水に挑む，トンネルと地下，pp.15-22，1992
- 4) 西岡勲，松本大二郎，岩上宜久，山口忠：沢部直下の断層破碎帯を貫く，トンネルと地下，pp.15-22，1992
- 5) 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
- 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，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
- 8) 高橋徹：トンネル施工における地盤条件変動に伴うプロジェクトリスク評価に関する研究，京都大学修士論文，2003
- 9) 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による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, 2004
- 10) Benjamin,J.R. and Cornell,A.A.：Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp.578-580, 1970
- 11) 山下智志：市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店，2000
- 12) 大成建設株式会社：確率論的 DFN による断層の分布特性に着目した地下水流動のモデル化・解析，核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書，2005
- 13) 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
- 14) Dershowitz,W.S.：Jointed Rock Mass Deformability：A Probabilistic Approach. S.M. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1979

- 15) 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
- 16) Baecher,G.B., Lanney,N.A. and Einstein,H.H.: Statistical description of rock properties and sampling, Proc. of the 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 5C1-8m, 1977
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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
- 20) 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国の岩盤における亀裂特性について, JNC TN8400 99-091, 1999
- 21) 核燃料サイクル機構: 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999
- 22) 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
- 23) 大俣敏文, 横内静二, 長沢教夫, 長谷川正明, 鴨川悦夫: 高圧・多湧水を伴う山岳トンネル工事(三池トンネル), 第56回施工体験発表会配布資料, 日本トンネル技術協会, 2005
- 24) 中村純治, 岩崎光, 安井啓祐, 横山哲哉, 近藤義裕: 多量湧水を伴う鉱化帯の施工, 第56回施工体験発表会配布資料, 日本トンネル技術協会, 2005
- 25) 永利将太郎, 大久保幸也, 北菌秀彦, 青柳貢司, 山根祐輔: 多量・高圧水下的におけるトンネルの構築, 第56回施工体験発表会配布資料, 日本トンネル技術協会, 2005
- 26) Ang,A.H. and Tang,W.H., 著, 伊藤學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三, 共訳: 土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善, 1988

謝辞

最後になりましたが，本論文を締めくくるにあたり，本研究にご協力いただいた方々，お世話になった方々への感謝の意を表したいと思います。

まず，この1年間，非常に熱心な指導をしていただいた京都大学大学院工学研究科・大津宏康教授に心から感謝いたします。研究室への配属直後，将来について思い悩んでいた私に大学院へ進学することを勧めていただきました。その時の「大学院生は学生ではなく研究室のスタッフなのだから，誇りをもって進学しなさい」という先生の言葉のおかげで，今の私があるのだと思っております。指導面でも常に的確なアドバイスをいただき，時には親身になって相談に乗っていただいたりもしました。本当に心からお礼申し上げます。

また，京都大学大学院工学研究科・大西有三教授には，研究生活の場所を提供していただき，大西研究室の方々と生活を共にさせていただいたことに心から感謝いたします。中間発表や研究室旅行など，数々のイベントで学生生活を非常に有意義なものにしていただいたおかげで，本研究を無事遂行することができたと思っております。

京都大学大学院工学研究科・西山哲助教授，上原真一助手，矢野隆夫技官，伊藤榮利子秘書には，研究面と生活面の両方で非常にお世話になりました。心から感謝いたします。特に西山哲助教授には，副査として研究全体の批評および非常に綿密かつ的確なアドバイスをいただき，また伊藤榮利子秘書には，研究生活のあらゆる面で常にサポートをしていただいたことを心からお礼申し上げます。

大成建設株式会社・井尻裕二氏，本島貴之氏には，ご多忙の最中においても多くの資料を提供していただくと共に，度重なる質問にも親切にお答えいただいたことに心から感謝いたします。また，同社原子力本部への研修期間中には，お二方のみならず多くの方々にお世話になりましたことを厚くお礼申し上げます。

大津研究室ならびに大西研究室の諸先輩方には，研究の相談から人生のアドバイスに至るまで，私の研究生活を非常にかげがえのないものにしていただき，大変感謝しております。また，4回生の方々には，よきライバルとして時に励まし合い，時に刺激し合いながら苦楽を共にできたことに大変感謝しております。

最後に，お世話になった多くの方々と，親愛なる友人，そして最も近くで見守ってくれた家族に，改めて感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

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 ¹⁾	中山トンネル (四方木立坑) ²⁾	加久藤 トンネル ³⁾	木ノ下 トンネル ⁴⁾	東京電力 水殿川導水路 トンネル ⁵⁾
トンネル 規模	延長 8,500m 内径 約10m	延長 370m 内径 6m	延長 6,231m 内径 4.9m	延長 981m 内径 12m	延長 3,035m 内径 12m
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	20m ³ /min	9.6m ³ /min	40m ³ /min	0.4m ³ /min	トンネル全体 で9m 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注入	不明	RBSレジン, OH等注入
中断期間	約2ヶ月	約3ヶ月	約3.5ヶ月	不明	不明
備考	土砂流出 400m ³		湧水と共に天端 崩落および800m ³ の土砂流出		突発湧水と共 に岩盤崩落, TBM停止

表2.1 調査データ詳細

種類	データ名	目的と実施内容
文献調査	地形図	地形の把握
	地質図	地質構造の把握
空中調査	航空写真	リニアメントの把握
	ランドサット画像	リニアメントの把握 広域領域10km×10kmで実施
	スポット画像	リニアメントの把握 広域領域10km×10kmで実施
地上調査	弾性波探査	地質構造の把握
	電磁探査(MT法)	地質構造の把握
	地下水位観測	観測：全158孔 連続観測：全40孔
試錐孔	コア観察	地質学的性状などの把握
	削孔時逸水量	高透水割れ目深度の把握 ボーリング孔(DH孔, MIU孔)で実施
	ボアホールテレビ	割れ目の深度, 走向, 傾斜, 開口幅, 充填鉱物の有無等の把握 ボーリング孔(DH孔, MIU孔)で実施
	検層	キャリパー検層, 密度検層, 流速, 自然γ線, 見掛比抵抗, MICRO比抵抗, 中性子検層, 中性子間隙率, 間隙率, RQD, 音波検層, 自然電位, シングルポイント検層, 温度検層
	水圧観測	試錐孔内での深度方向の水圧分布の観測
	水頭観測	試錐孔内での深度方向の水頭分布の把握
	透水試験	透水係数分布の把握 ボーリング孔(DH孔, MIU孔)で実施

表3.1 断層の透水量係数（データセット2）

断層の主方向	断層名	透水量係数 [m ² /s]
—	Tsukiyoshi	5.62E-05
NE	DH15FZ01	5.85E-04
NE	DH15FZ06	4.06E-05
NE	MIZ1FZ05	5.35E-05
NE	IF_LB0(L116_169)	5.62E-05
NE	L209	5.35E-05
NE	L216	5.35E-05
NE	DH15FZ04	6.46E-06
NNW	DH2FZ03/MIZ1FZ04	3.99E-05
NNW	IF_SB0_01	3.98E-05
NNW	MIZ1FZ02	9.86E-05
NNW	MIZ1FZ03	1.60E-05
NW	2-B/MIZ1FZ07	5.18E-08
NW	2-D/MIZ1FZ06	9.28E-08
NW	2-I	9.28E-08
NW	L215	9.28E-08
NW	MIZ1FZ08	1.66E-07
NW	DH2FZ01	3.29E-04
NW	DH2FZ02	3.29E-04

表3.2 Bingham分布により得られたパラメータ

上部割れ目帯	クラスター1	走向 [度]	41.20
		傾斜 [度]	65.77
		分散係数 $\kappa 1$ [-]	-5.24
		分散係数 $\kappa 2$ [-]	-2.95
	クラスター2	走向 [度]	314.75
		傾斜 [度]	24.68
		分散係数 $\kappa 1$ [-]	-19.53
		分散係数 $\kappa 2$ [-]	-3.70
	クラスター3	走向 [度]	182.57
		傾斜 [度]	32.03
		分散係数 $\kappa 1$ [-]	-7.38
		分散係数 $\kappa 2$ [-]	-2.88
下部低密度割れ目帯	クラスター1	走向 [度]	8.15
		傾斜 [度]	70.65
		分散係数 $\kappa 1$ [-]	-4.80
		分散係数 $\kappa 2$ [-]	-3.65
	クラスター2	走向 [度]	170.84
		傾斜 [度]	45.63
		分散係数 $\kappa 1$ [-]	-5.28
		分散係数 $\kappa 2$ [-]	-4.56
	クラスター3	走向 [度]	251.66
		傾斜 [度]	1.47
		分散係数 $\kappa 1$ [-]	-7.45
		分散係数 $\kappa 2$ [-]	-3.97

表3.3 1次元亀裂頻度および3次元亀裂密度

	堆積岩	上部割れ目帯	下部低密度割れ目帯
1次元亀裂頻度 [本/m]	2.54	4.03	2.55
3次元亀裂密度 [m ² /m ³]	0.02	0.031738	0.020037

表3.4 湧水量の分類，被害評価および対策案

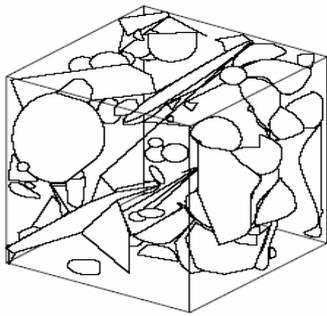
対策シナリオ	湧水量 [m ³ /min]	対策費用 [百万円]	中断日数 [日]	対策案
シナリオ1： 被害なし	～0.5	0	0	設計範囲内のため特別な 対策工は不要。
シナリオ2： 小被害	0.5～2.0	1	5	湧水量は排水設備容量内。 先進探り穿孔による先進 調査を実施。
シナリオ3： 中被害	2.0～5.0	10	30	通常の排水設備の容量を 越える湧水量。非常排水 設備および調査ボーリン グと止水注入工実施。
シナリオ4： 大被害	5.0～	100	90	非常排水設備を超える湧 水量。調査ボーリング， 大規模止水工，復旧工事 を実施。

表3.5 断層の透水量係数（データセット1）

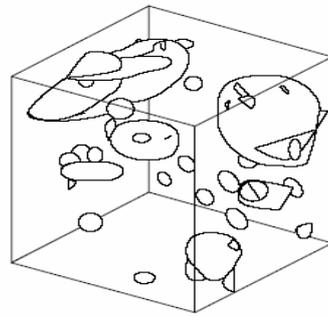
断層の主方向	断層名	透水量係数 [m ² /min]
—	Tsukiyoshi	5.62E-05
NE	L116_169	5.85E-04
NE	L216	5.85E-04
NE	L209	5.85E-04
NNW	SB0_001	2.48E-05
NNW	SB1_004	2.48E-05
NNW	IF_SB2a_005	2.48E-05
NNW	IF_SB2a_009	2.48E-05
EW	IF_SB2a_001	4.39E-05
EW	IF_SB2a_002	4.61E-05
EW	IF_SB1_003	3.29E-04
NW	IF_SB2a_007	5.18E-08
NW	L215	5.18E-08

表4.1 先行ボーリングの打設例

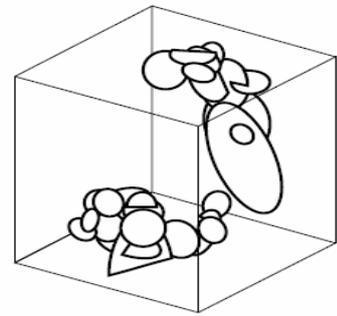
トンネル名	三池トンネル ²³⁾	八甲田トンネル ²⁴⁾	九州新幹線 筑紫トンネル ²⁵⁾
トンネル規模	延長 5,360m	延長 26,455m	延長 11,935m
地質	花崗閃緑岩	閃緑岩, 変朽安山岩他	花崗岩
最大湧水量	6m ³ /min (切羽 全体6.5m ³ /min)	8m ³ /min (pH2.8~ 3.8の酸性水)	9m ³ /min
最大水圧	1.2MPa	不明	1.5MPa
排水方式	先進水抜き ボーリング	中尺ボーリング (40m超級)	長尺さぐりボーリ ング, 短尺水抜き さぐり孔
排水効果	1ヶ月で湧水量約 2.5m ³ /min, 水圧 0.15MPa程度まで 低下	酸性水を中和させ, 既存の排水設備を 利用できるように した	孔埋め注入と合わ せて湧水量 4.5m ³ /minまで低 下
止水方式	シリカレジジン系 注入 (平均注入 量5.6kg/m)	不明	さぐり孔の孔埋め 注入
止水効果	素掘り面からの 湧水は滲み程度 まで低下	酸性水は流入しな かった	湧水量1.5m ³ /min 減少 (さぐり孔), 0.6~0.7m ³ /min減 少 (坑口)



Enhanced
Baecher



Nearest
Neighbor



Levy-Lee

図2.1 亀裂の中心位置モデル

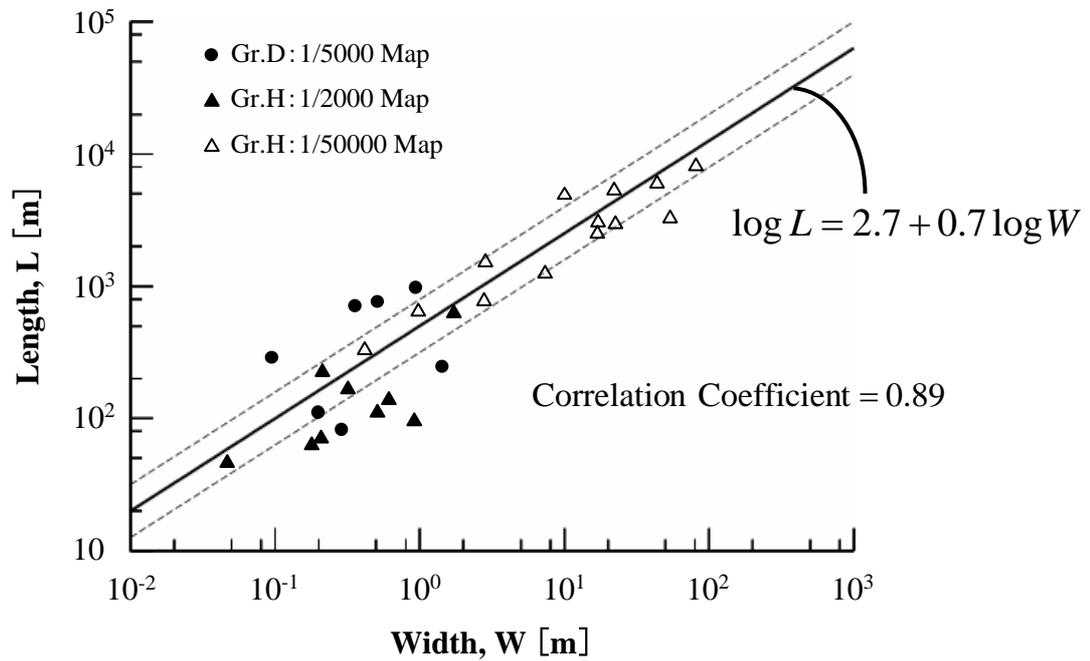


図2.2(a) 亀裂の長さ と 破砕幅 の 関係 (大野・小島, 1989)

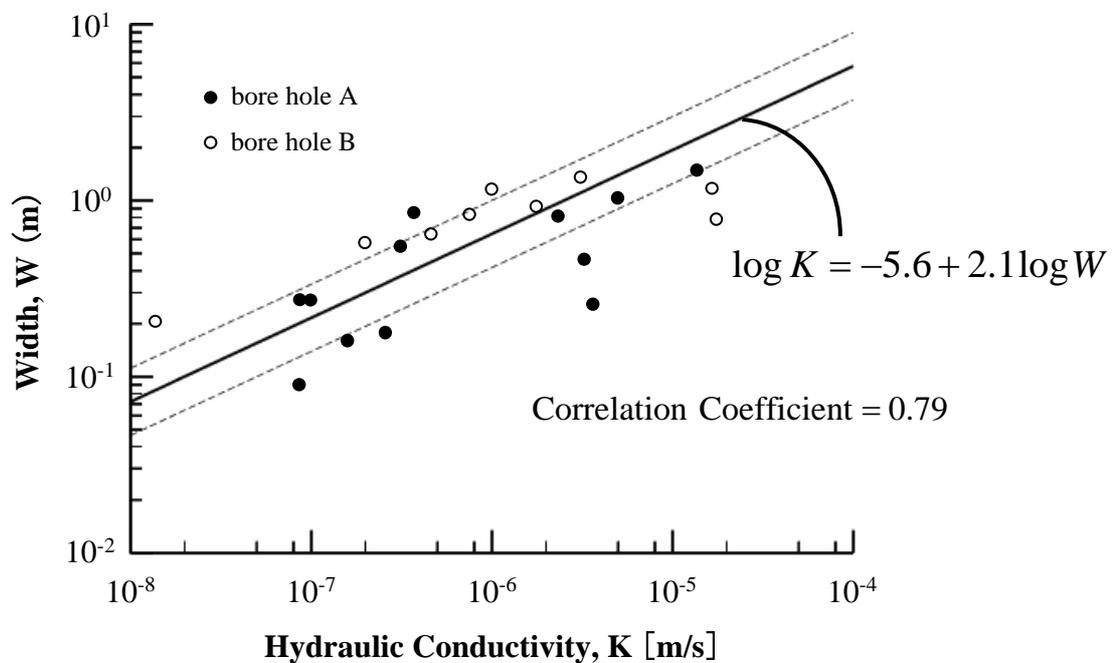


図2.2(b) 亀裂の透水係数 と 破砕幅 の 関係 (大野・小島, 1989)

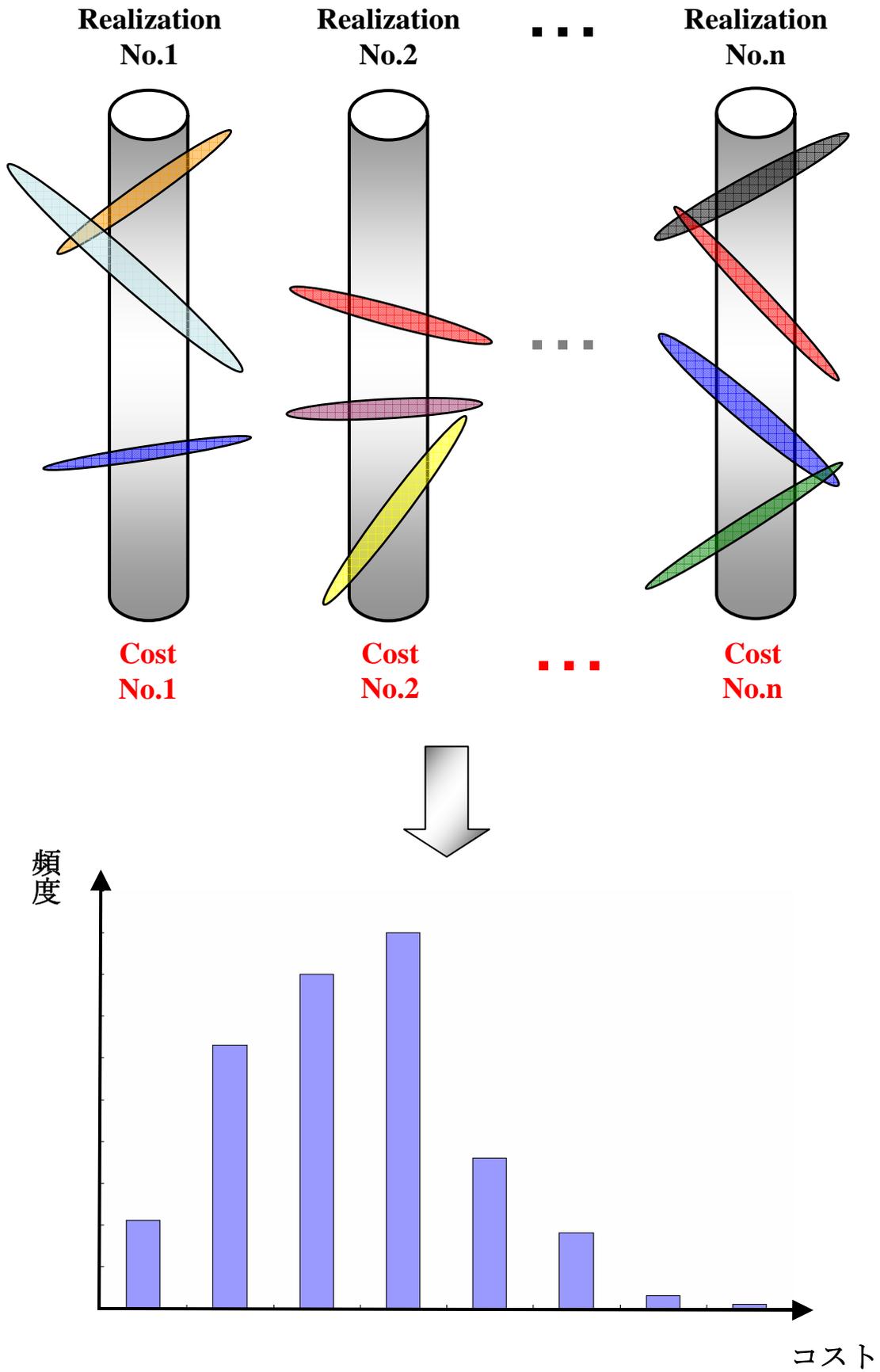


図2.3 モンテカルロシミュレーションによる統計量算出

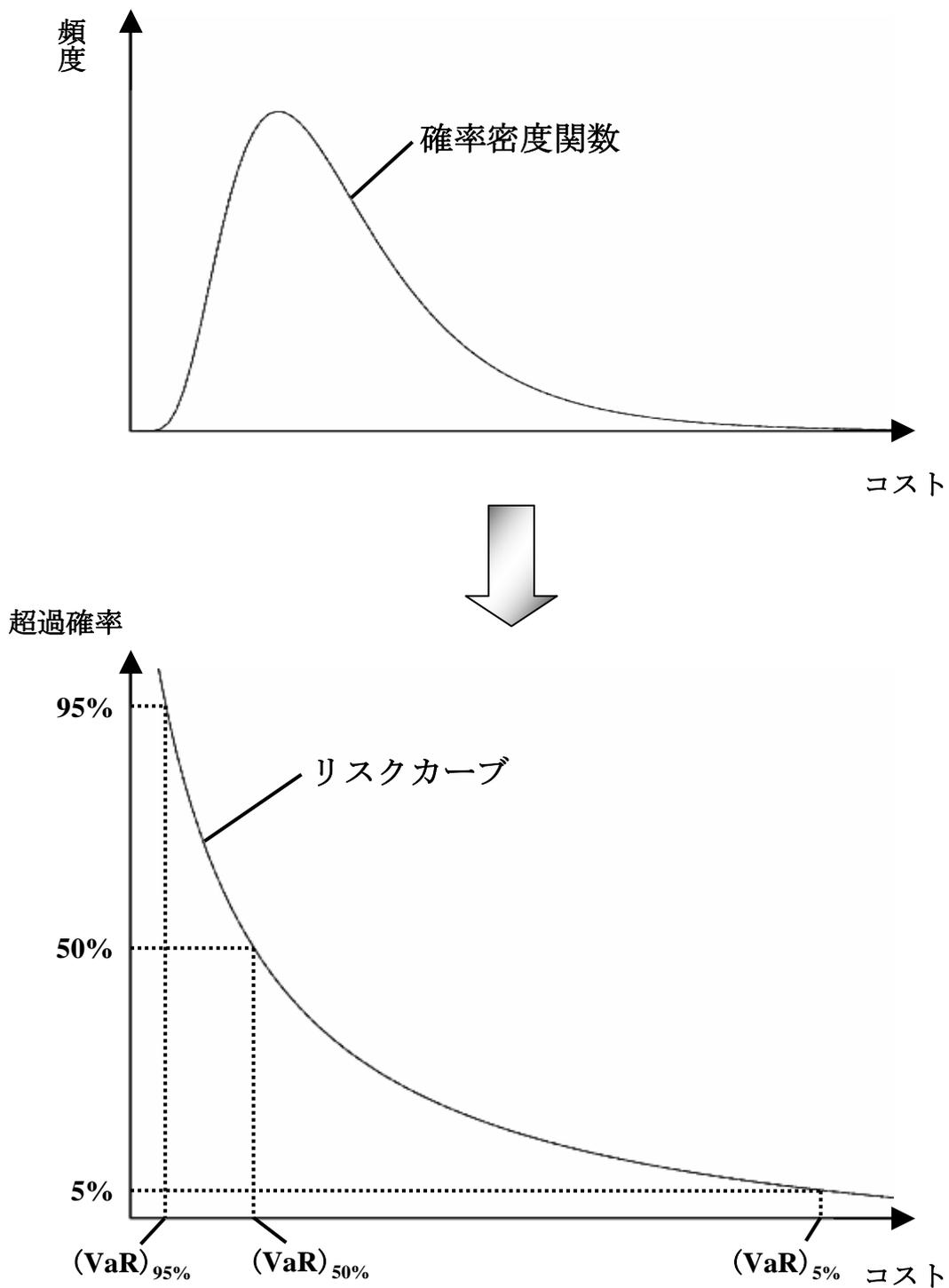
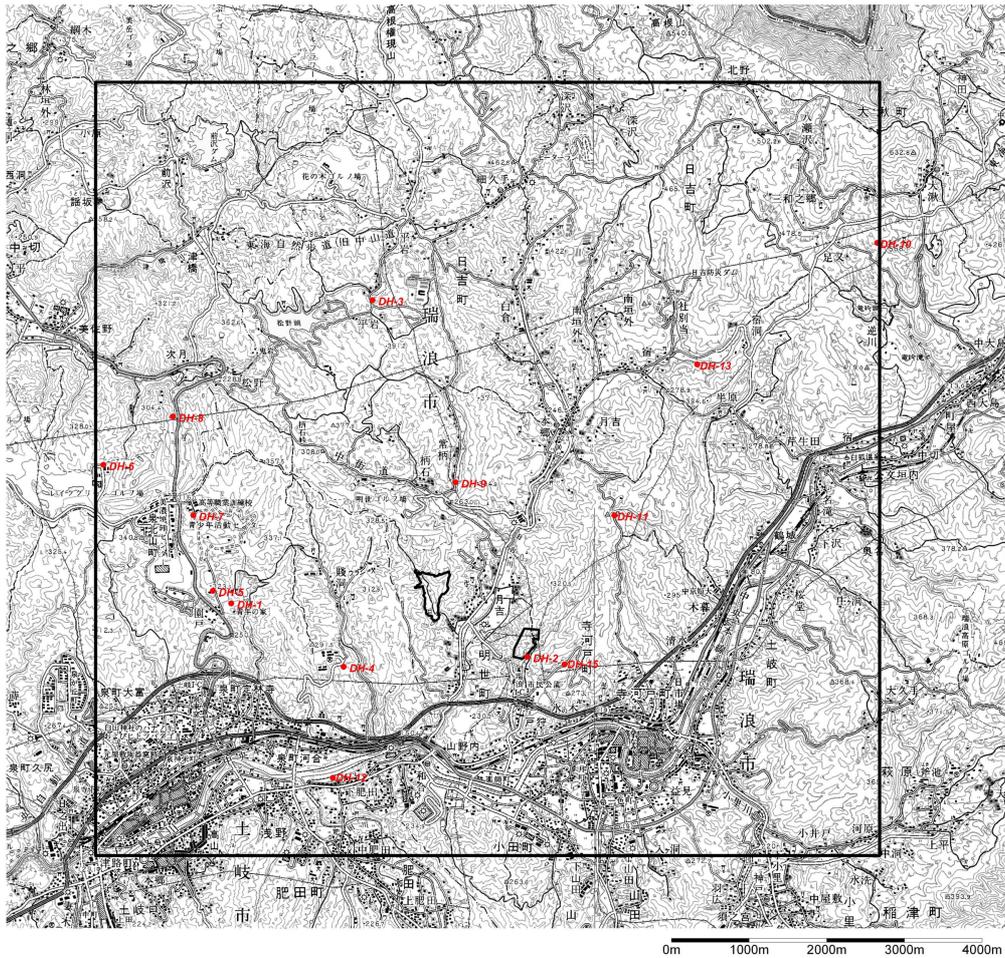
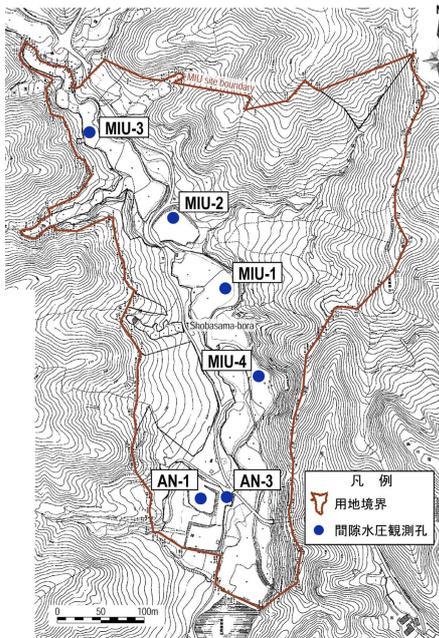


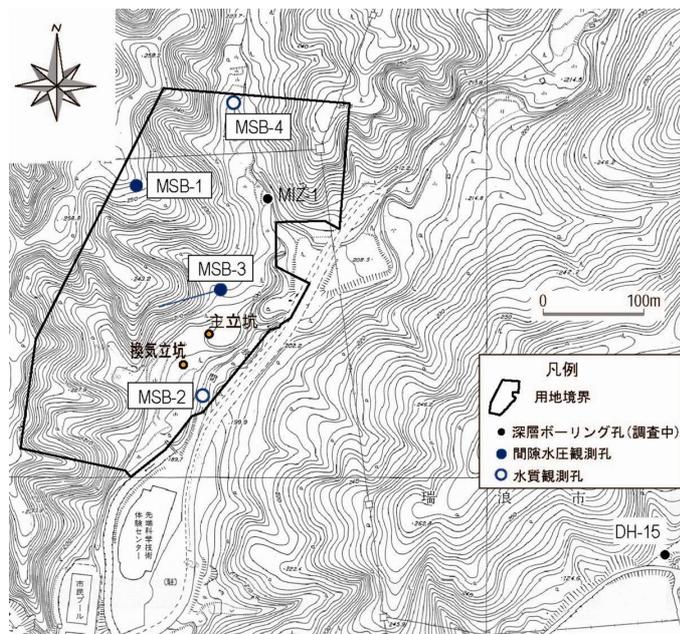
図2.4 VaRとリスクカーブとの関係



全体位置図



正馬様用地



瑞浪超深地層研究所用地

図3.1 東濃地域ボーリング孔位置図

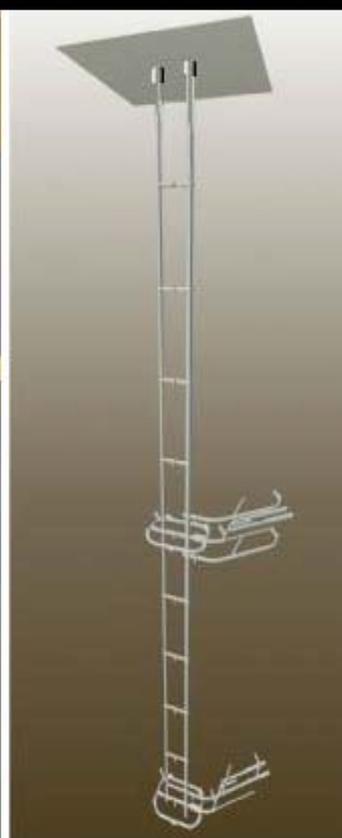


図3.2 立坑掘削工事イメージ, 写真

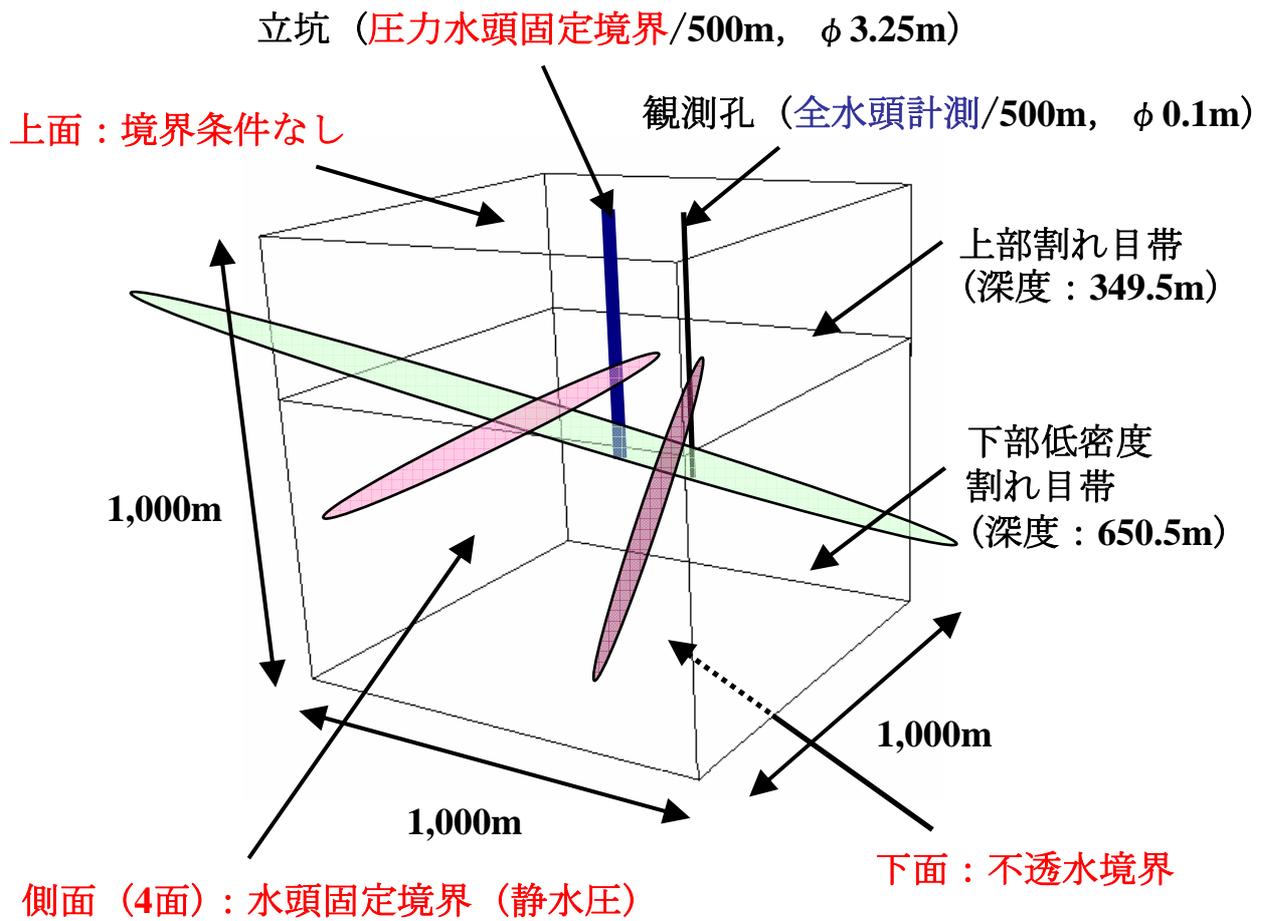
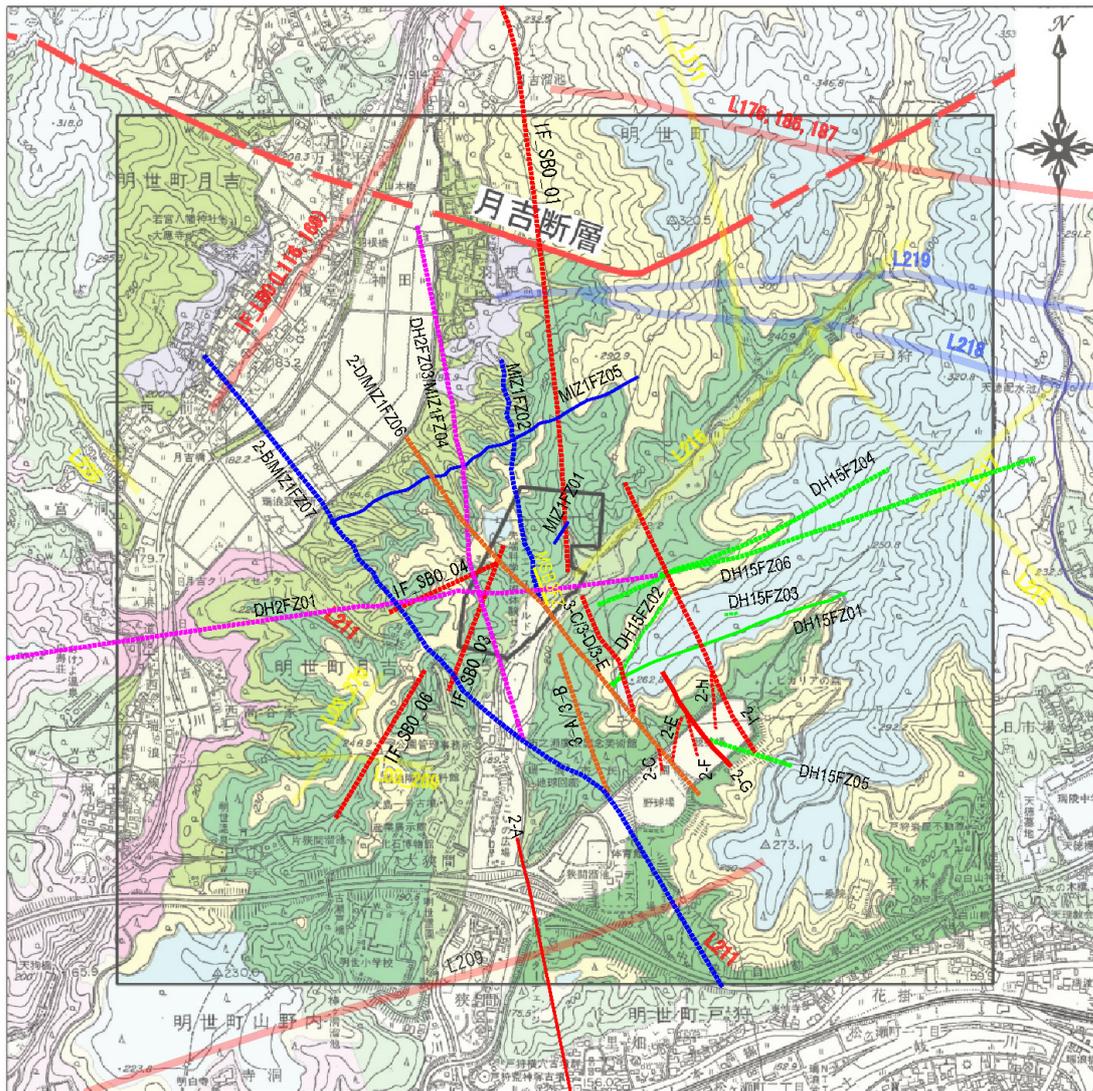


図3.3 解析領域, 境界条件

35°23'13"



35°21'52"

137°13'38"

地形図：1:10,000 瑞浪市全図（平成11年編集）を使用

137°15'17"

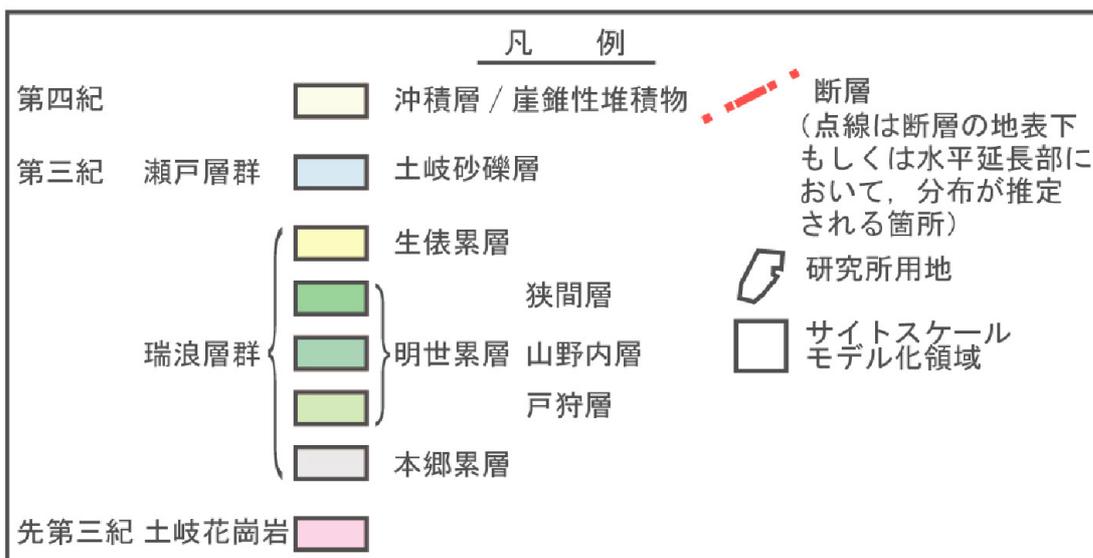
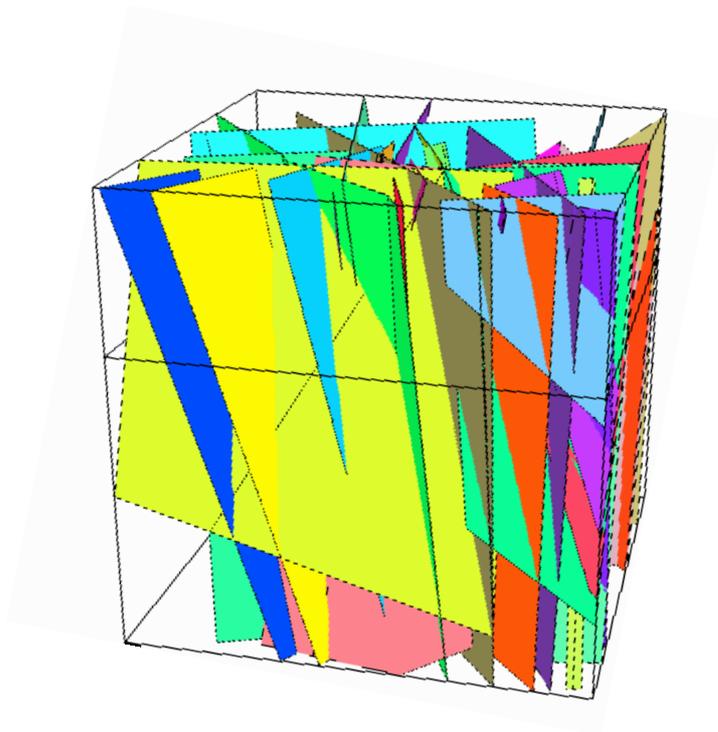
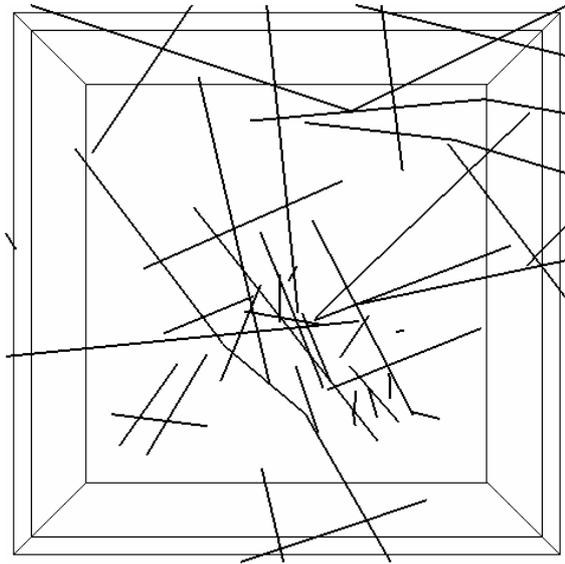


図3.4 断層分布図（データセット2）



鳥瞰図



リニアメント図

図3.5 決定論的にモデル化した断層・亀裂（データセット2）

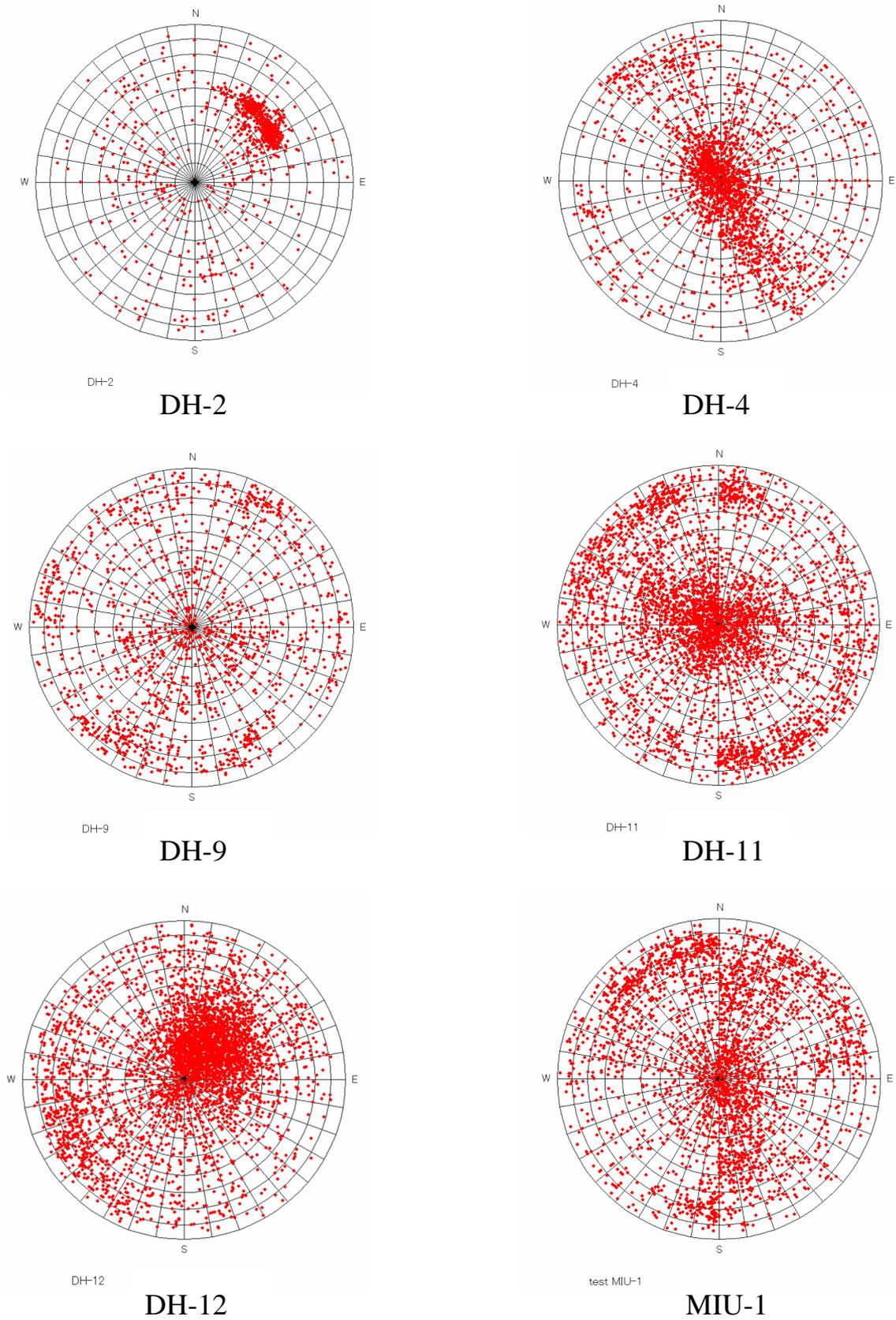
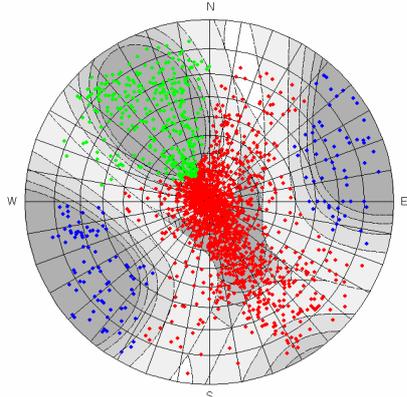
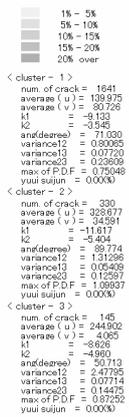


図3.6 全亀裂割れ目方向分布 (シュミットネット)

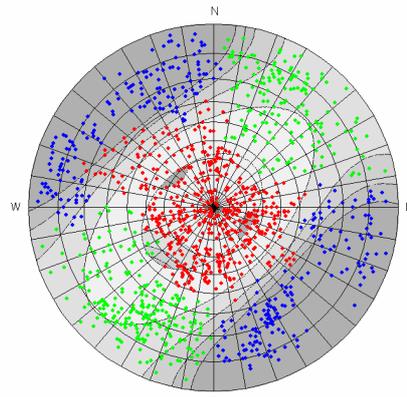
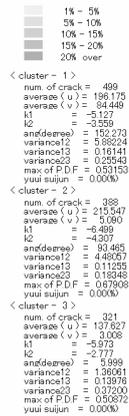
Bingham 分布図



DH-4

DH-4

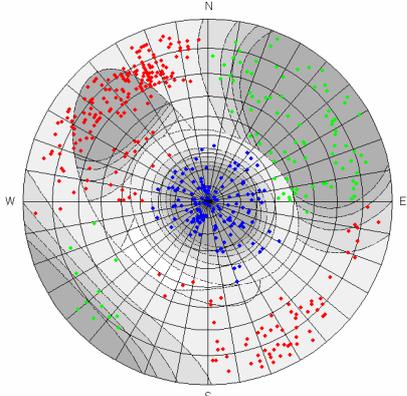
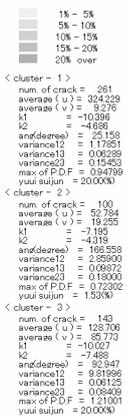
Bingham 分布図



DH-9 toki granite

DH-9

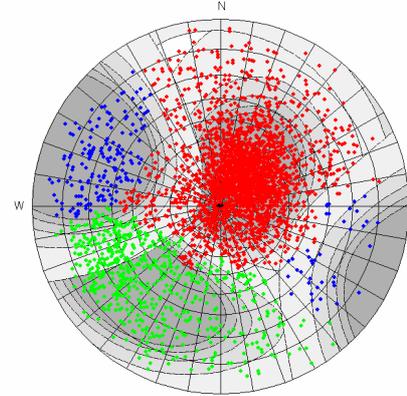
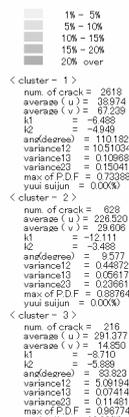
Bingham 分布図



DH-11 toki granite

DH-11

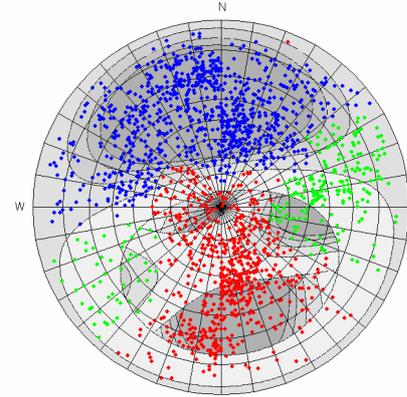
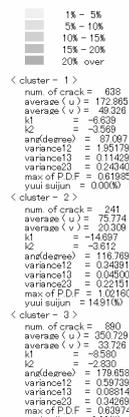
Bingham 分布図



DH-12

DH-12

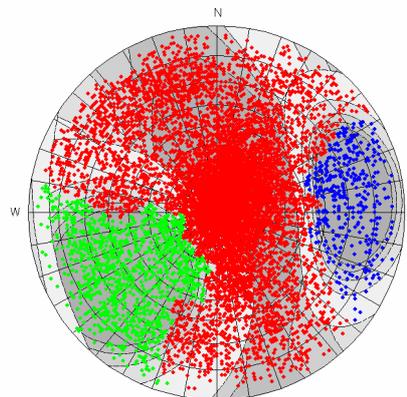
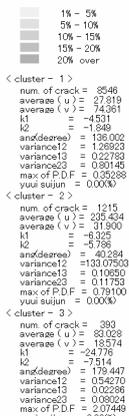
Bingham 分布図



MIU-1 toki granite

MIU-1

Bingham 分布図



MIU-1, DH-4, 9, 11, 12 toki granite

DH-4, 9, 11, 12, MIU-1 合計

図3.7 クラスター分類図

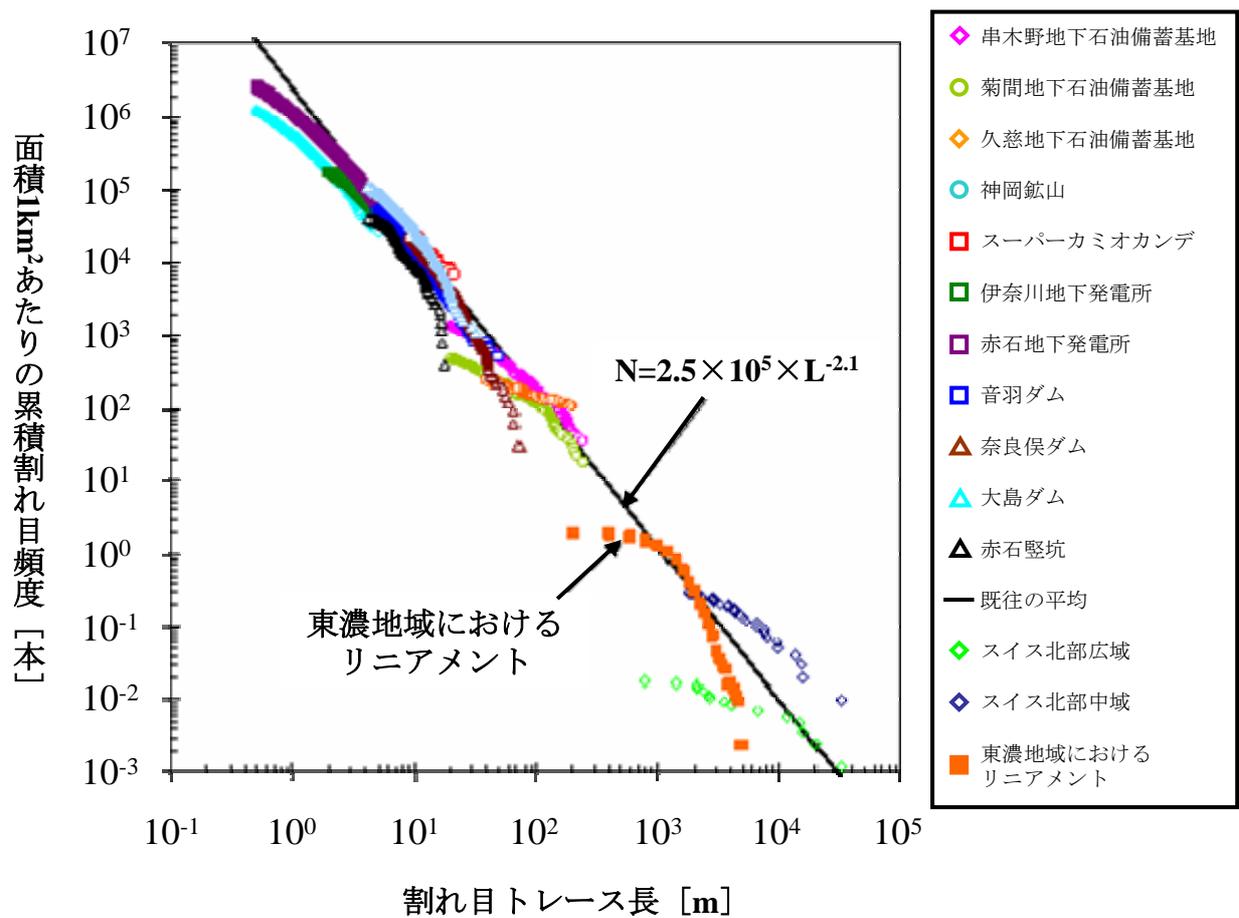
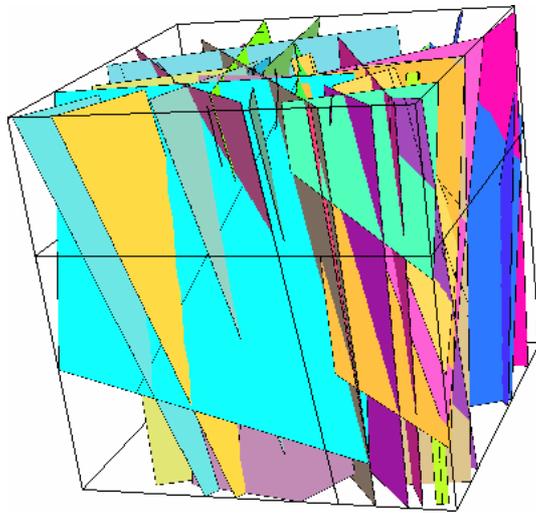
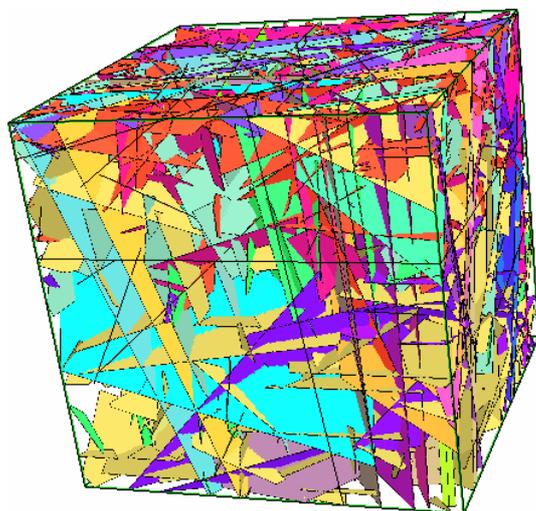
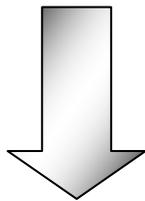


図3.8 リニアメントから得たトレース長分布



決定論的亀裂のモデル



確率論的亀裂を加えたモデル

図3.9 不連続亀裂ネットワークの一例

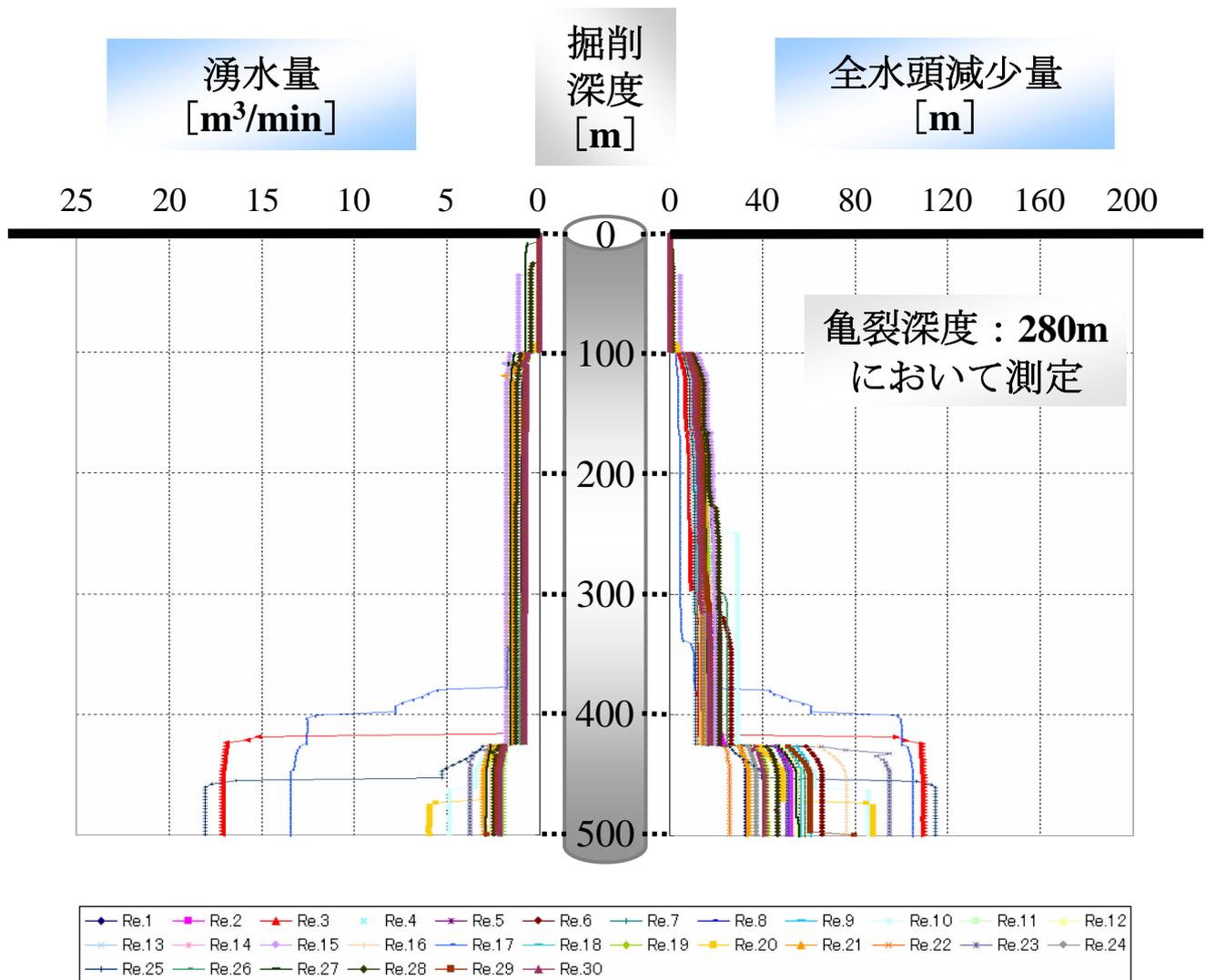


図3.10 湧水量，全水頭変化の解析結果（データセット2）

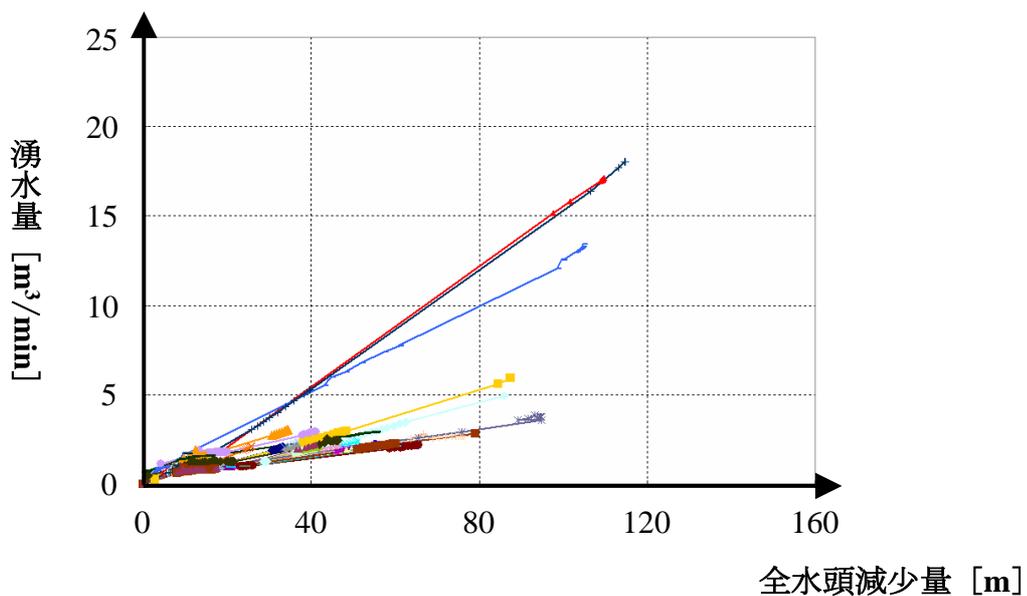


図3.11 湧水量と全水頭減少量の関係（データセット2）

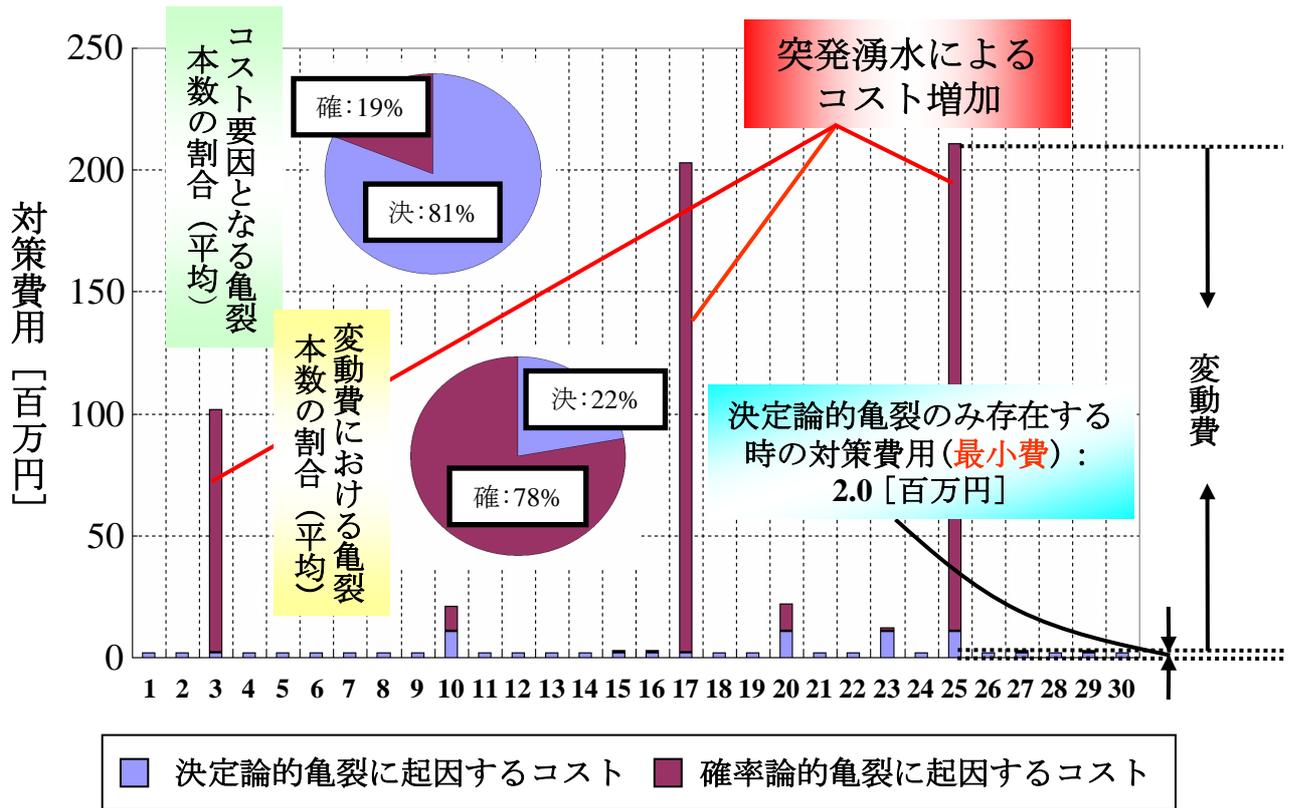


図3.12 リアライゼーションごとの湧水対策費用変動（データセット2）

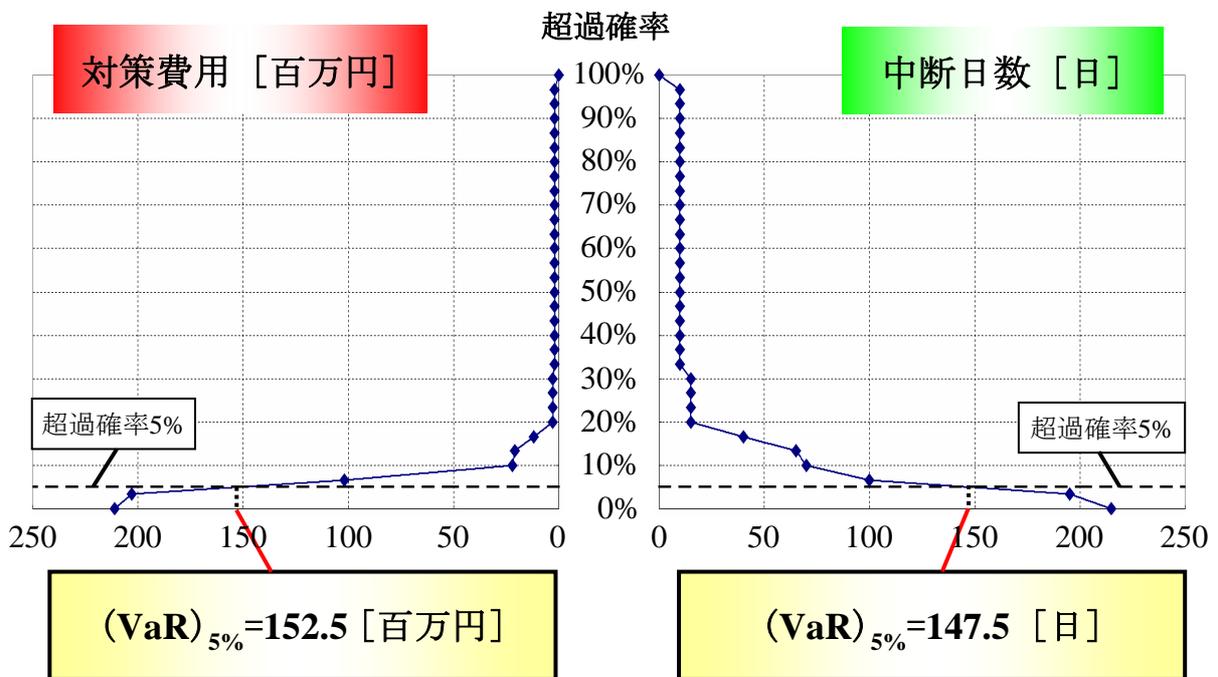
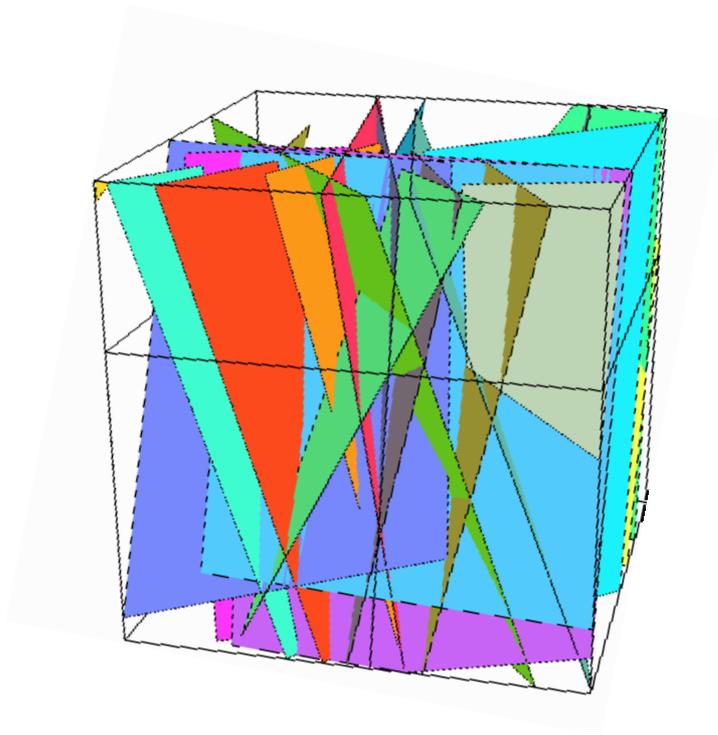
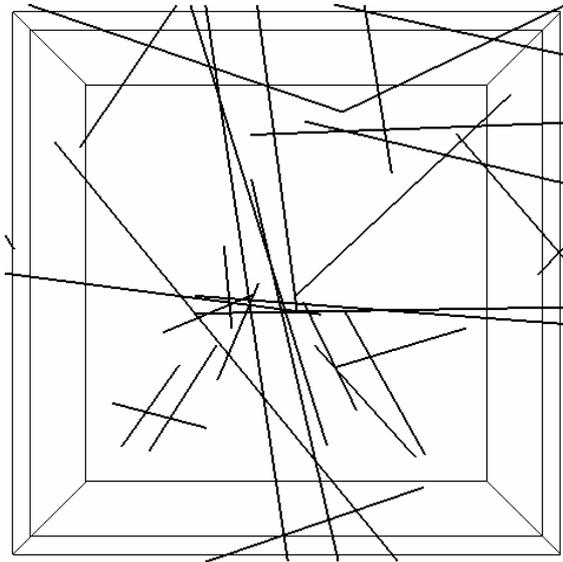


図3.13 リスクカーブおよび $(VaR)_{5\%}$ （データセット2）



鳥瞰図



リニアメント図

図3.14 決定論的にモデル化した断層・亀裂（データセット1）

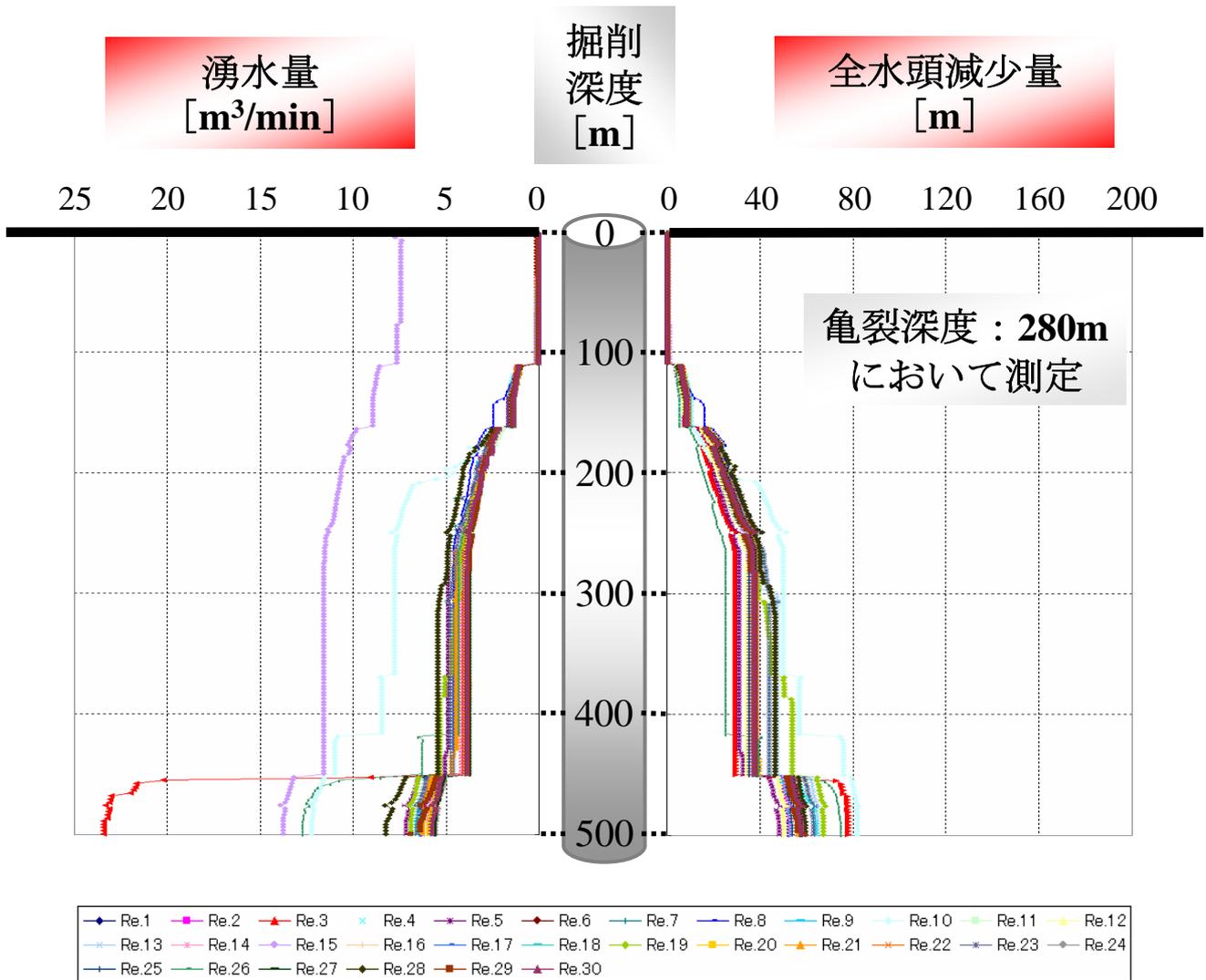


図3.15 湧水量，全水頭変化の解析結果（データセット1）

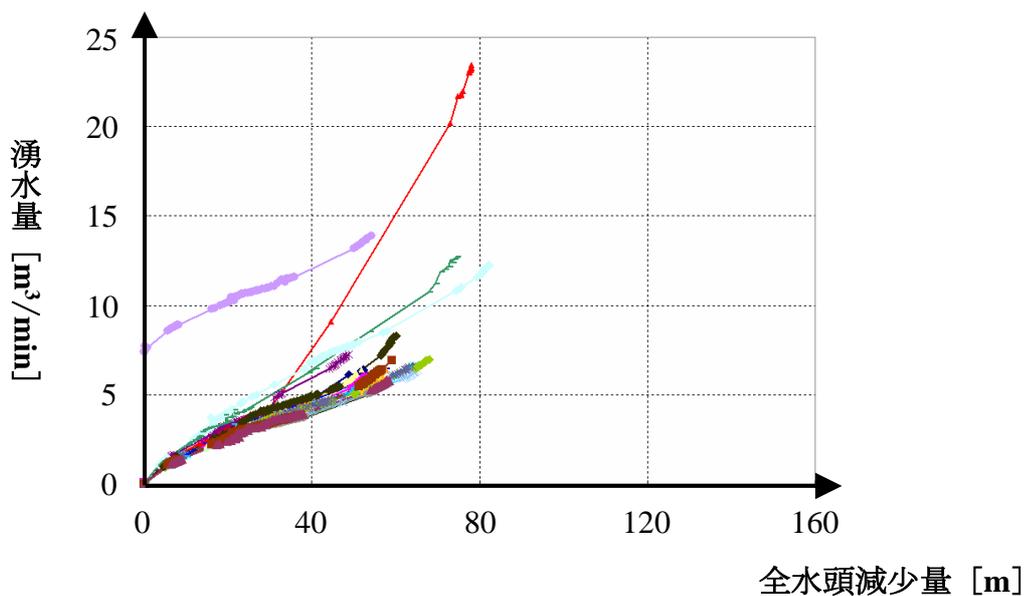


図3.16 湧水量と全水頭減少量の関係（データセット1）

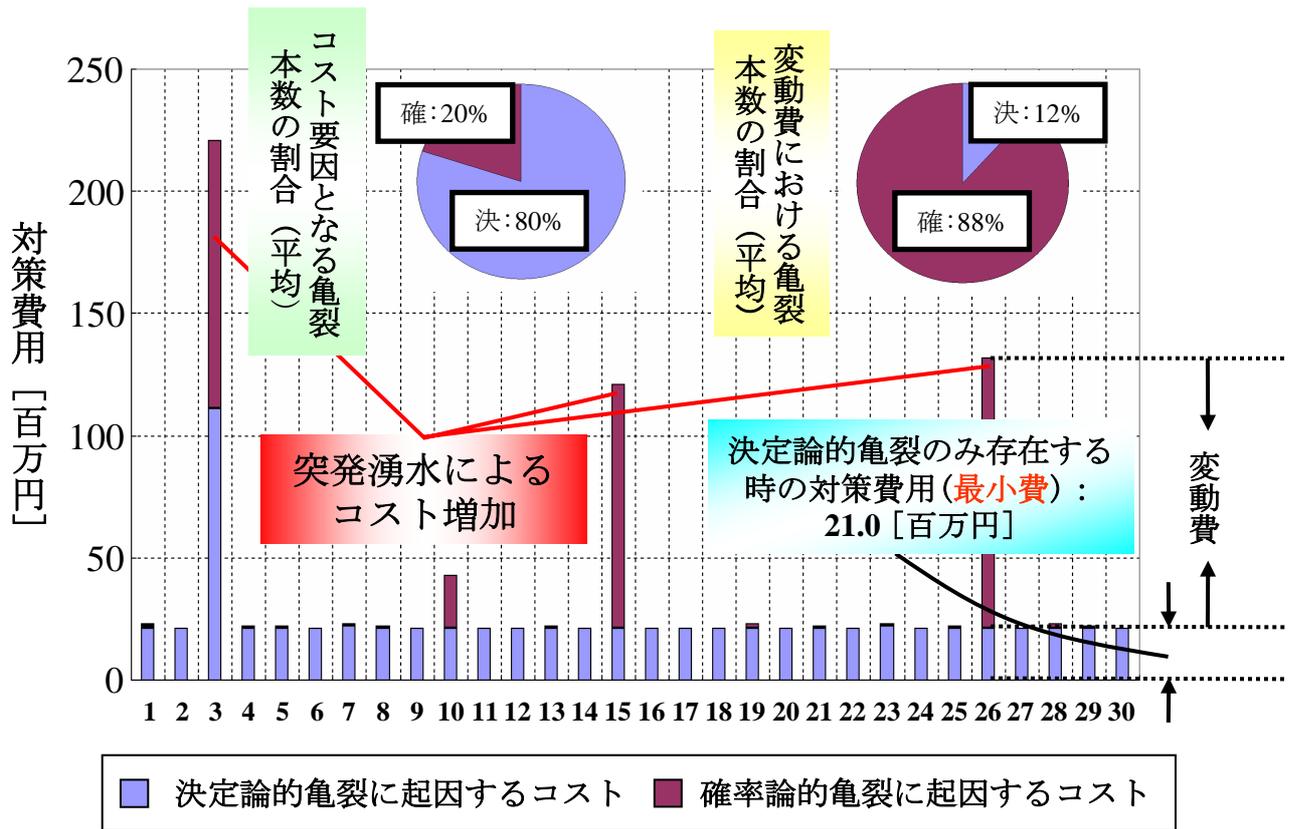


図3.17 リアライゼーションごとの湧水対策費用変動 (データセット1)

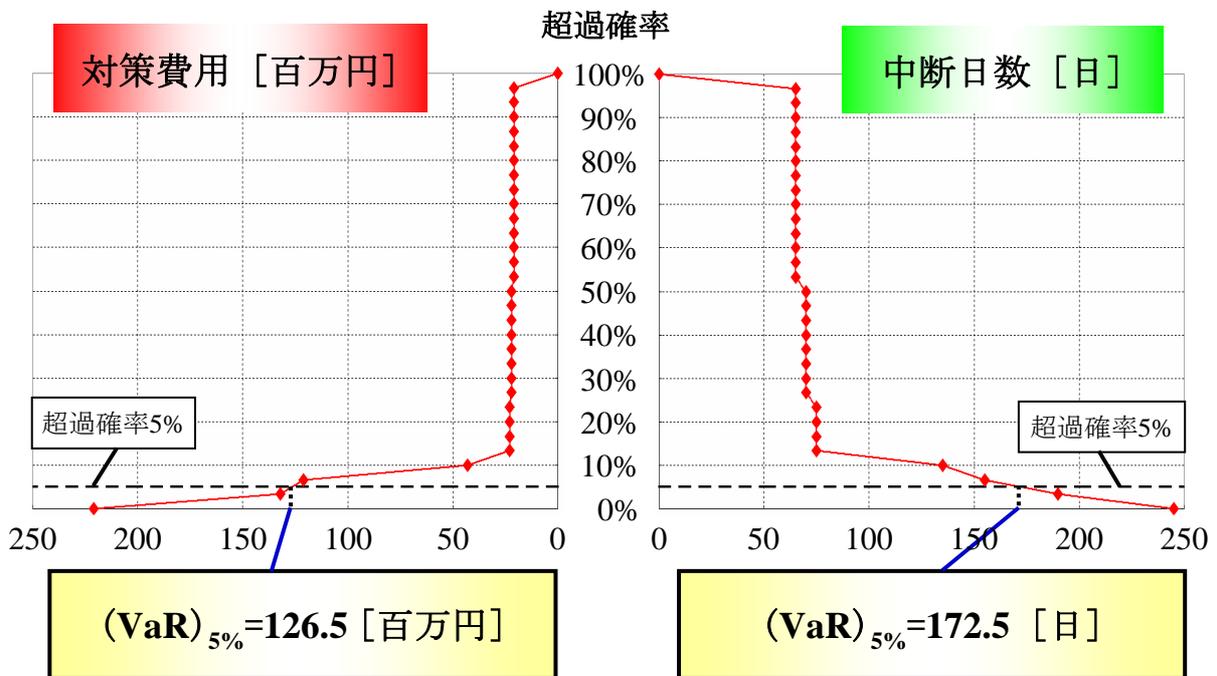


図3.18 リスクカーブおよび(VaR)_{5%} (データセット1)

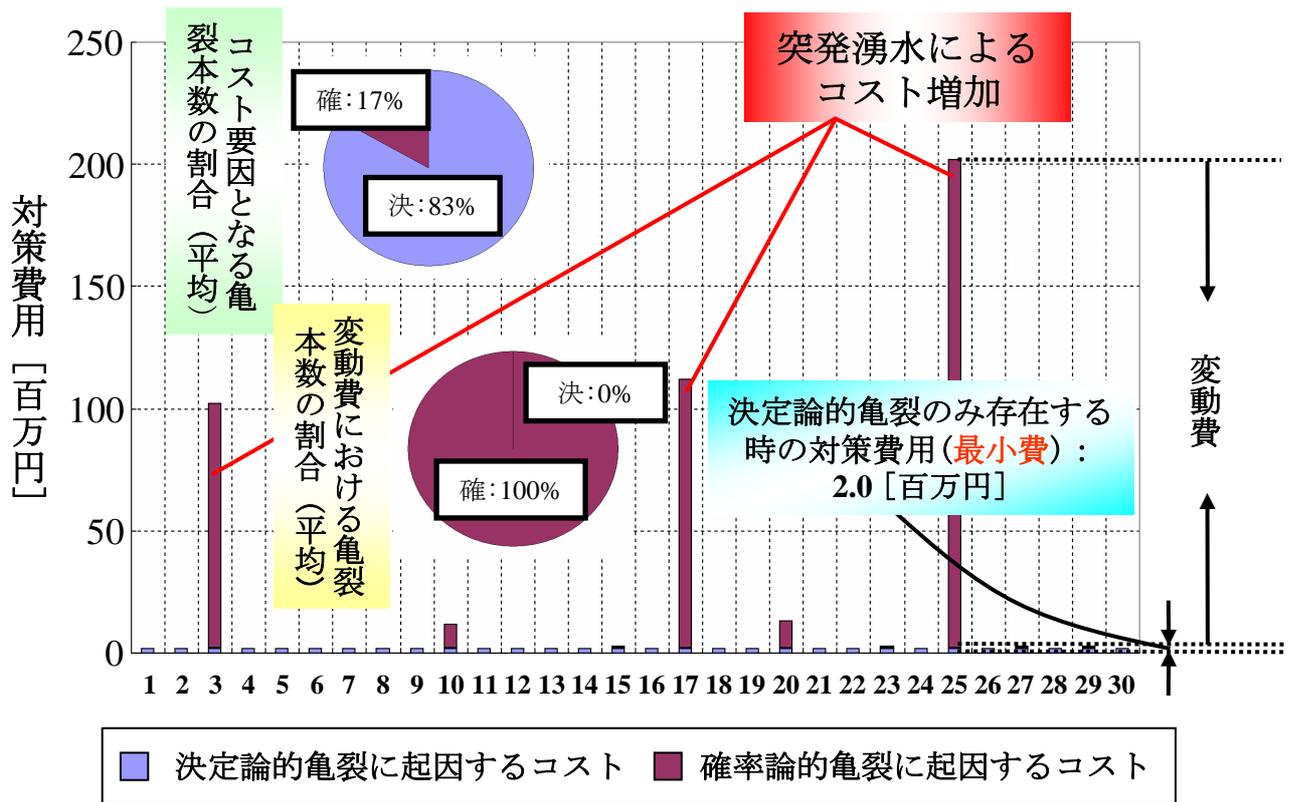


図3.19 リアライゼーションごとの湧水対策費用変動（一括掘削モデル）

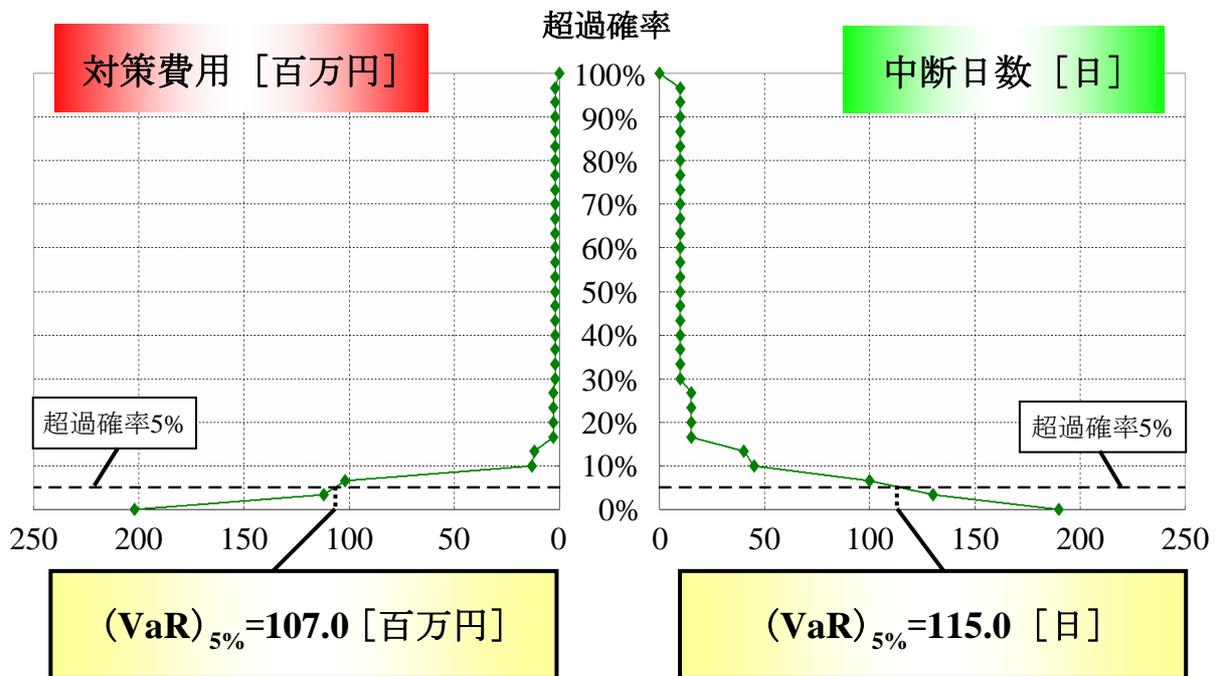


図3.20 リスクカーブおよび $(VaR)_{5\%}$ （一括掘削モデル）

() 内は大規模亀裂の数

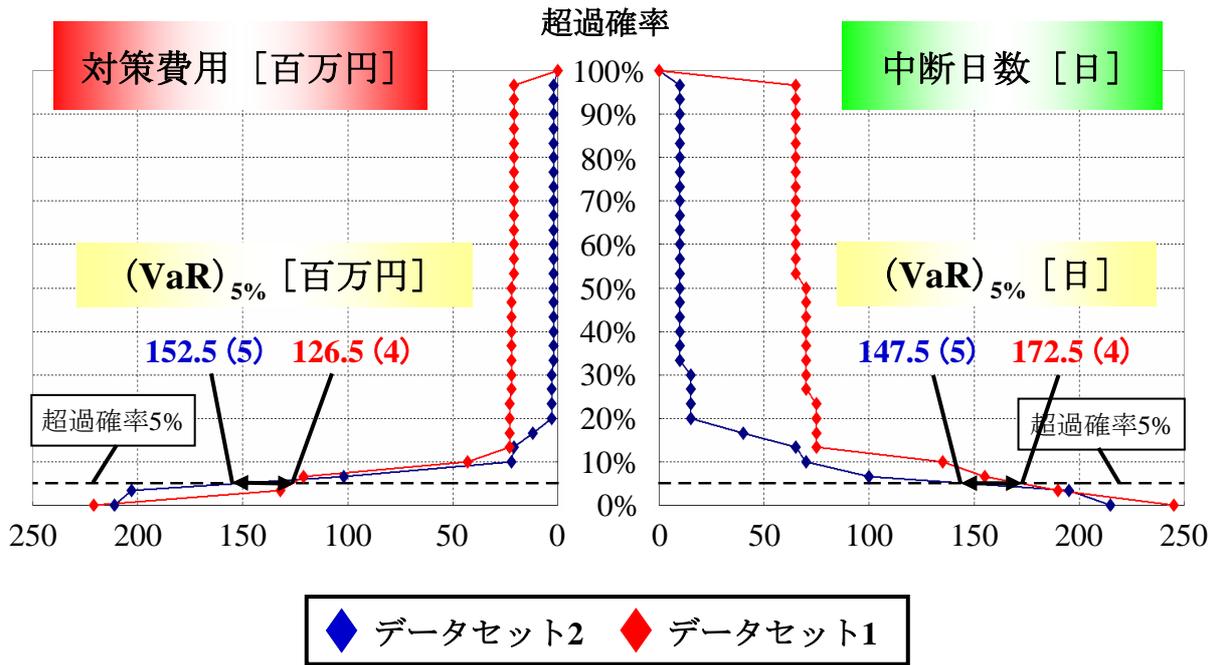


図3.21 データセット更新によるリスクカーブ変動

() 内は大規模亀裂の数

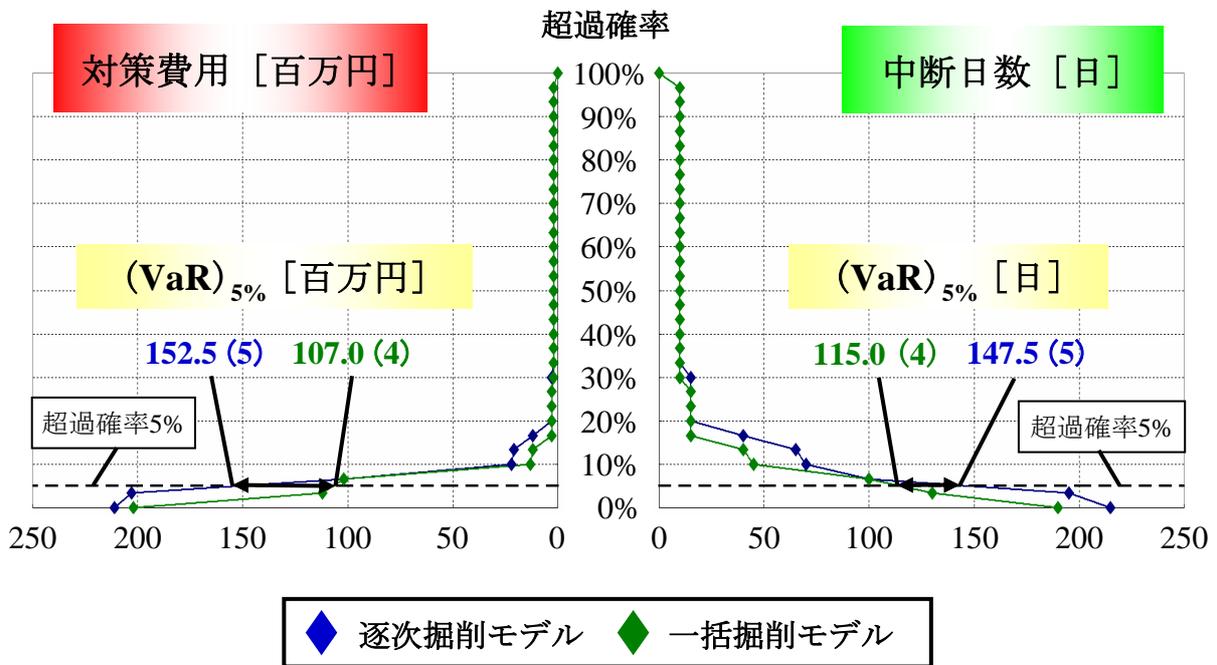


図3.22 掘削モデル変化によるリスクカーブ変動

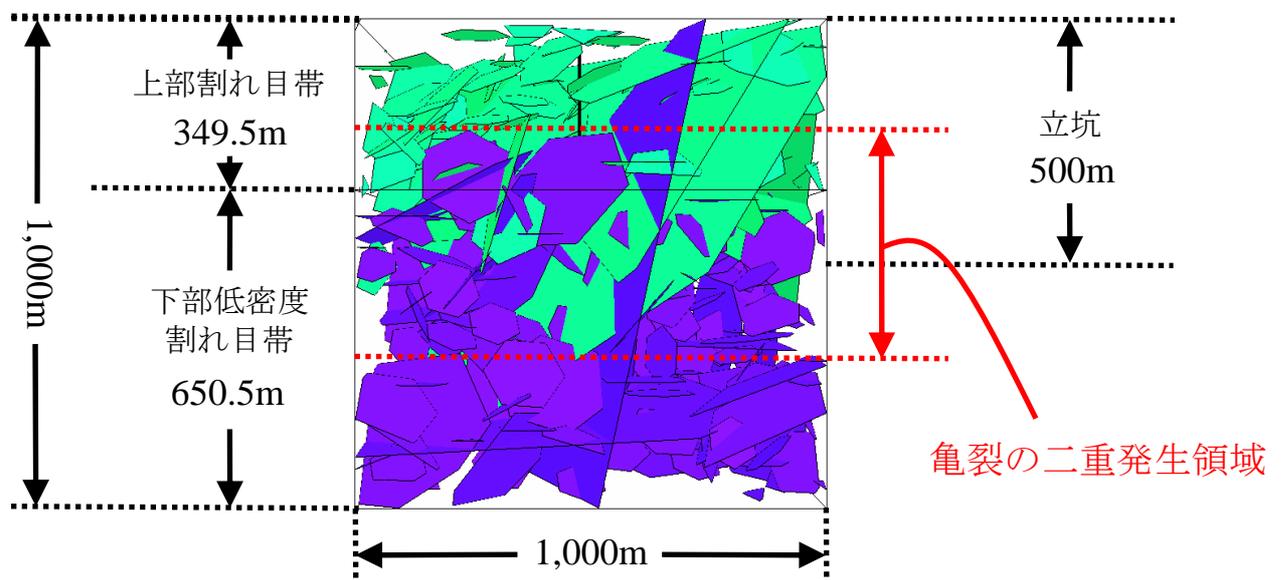


図3.23 亀裂の二重発生領域

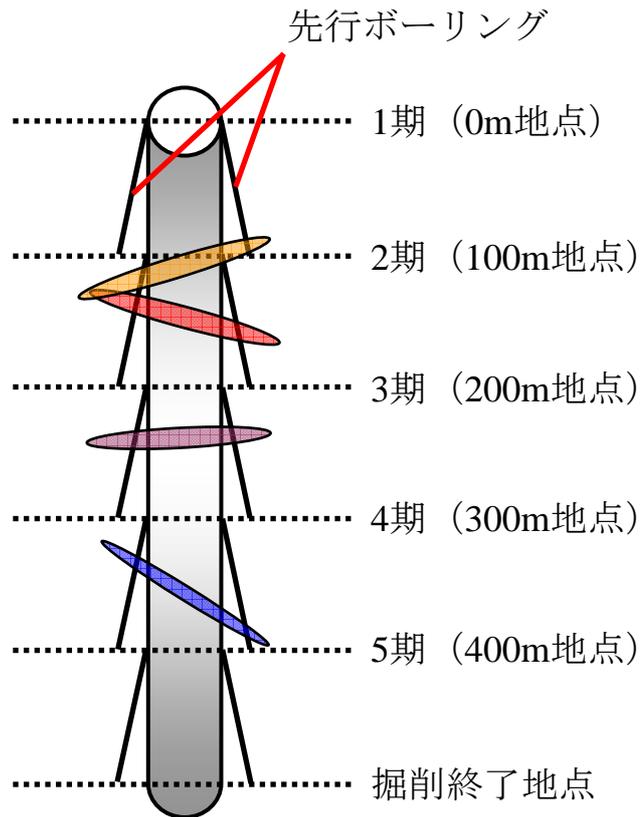


図4.1 先行ボーリング打設モデル

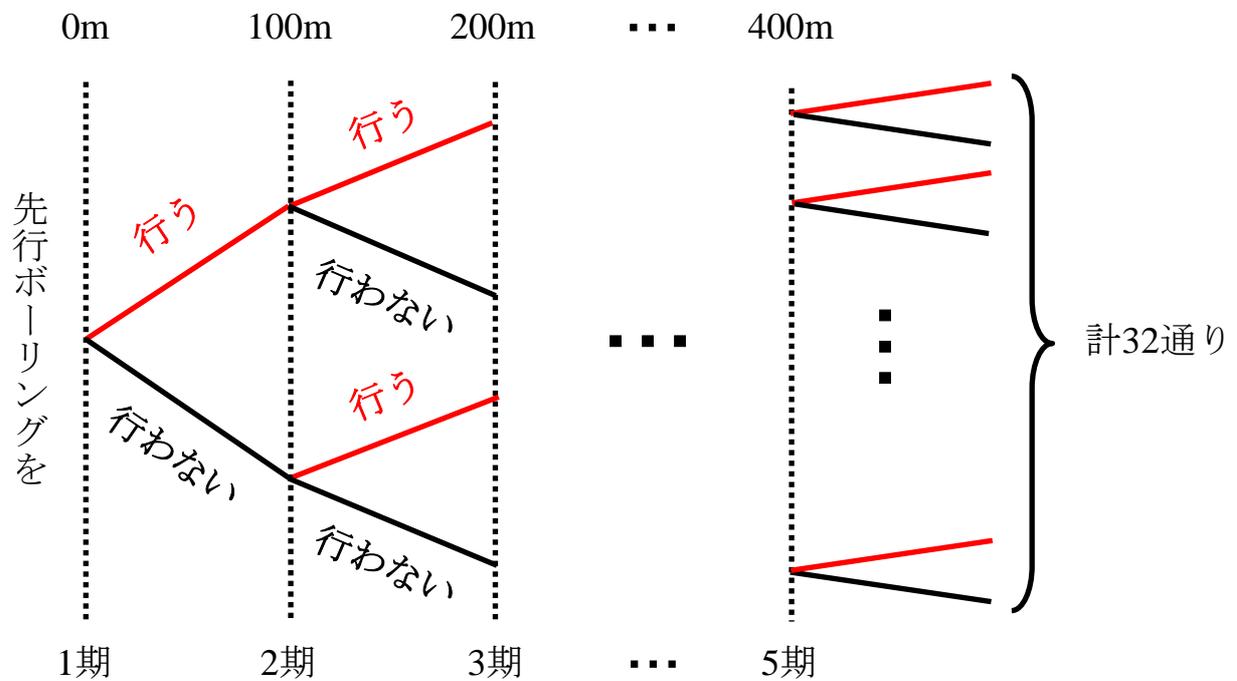


図4.2 二項分布モデル概念図

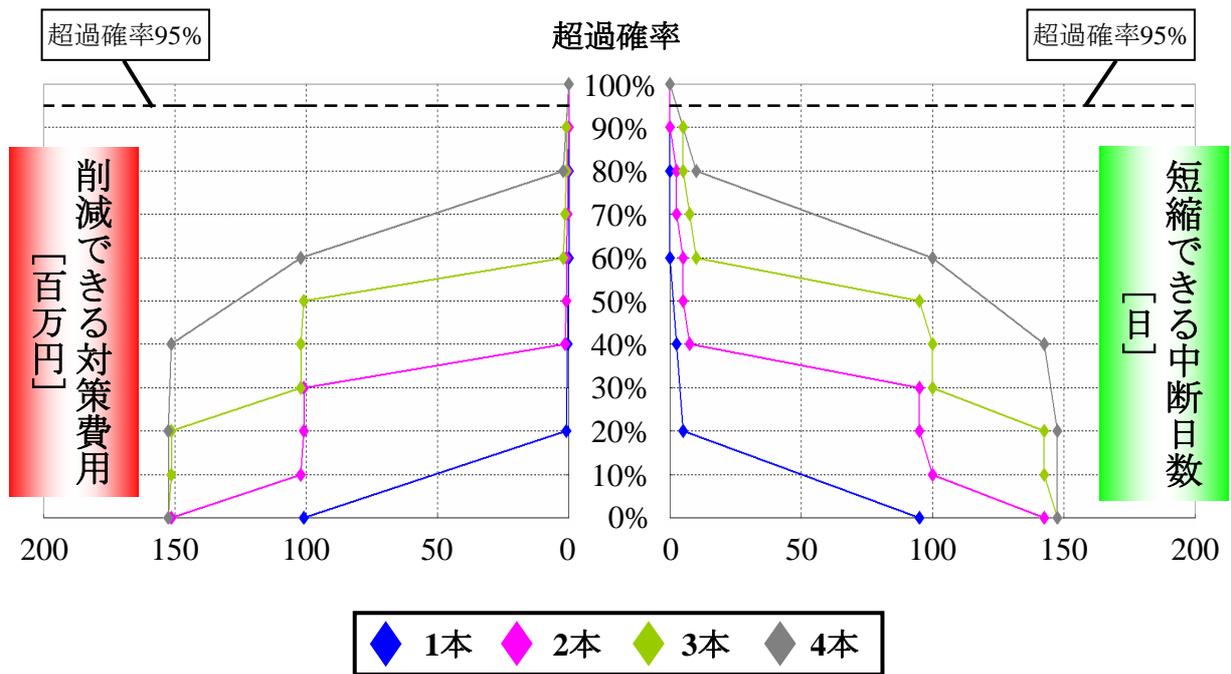


図4.3 ボーリング打設本数ごとのリスクカーブ

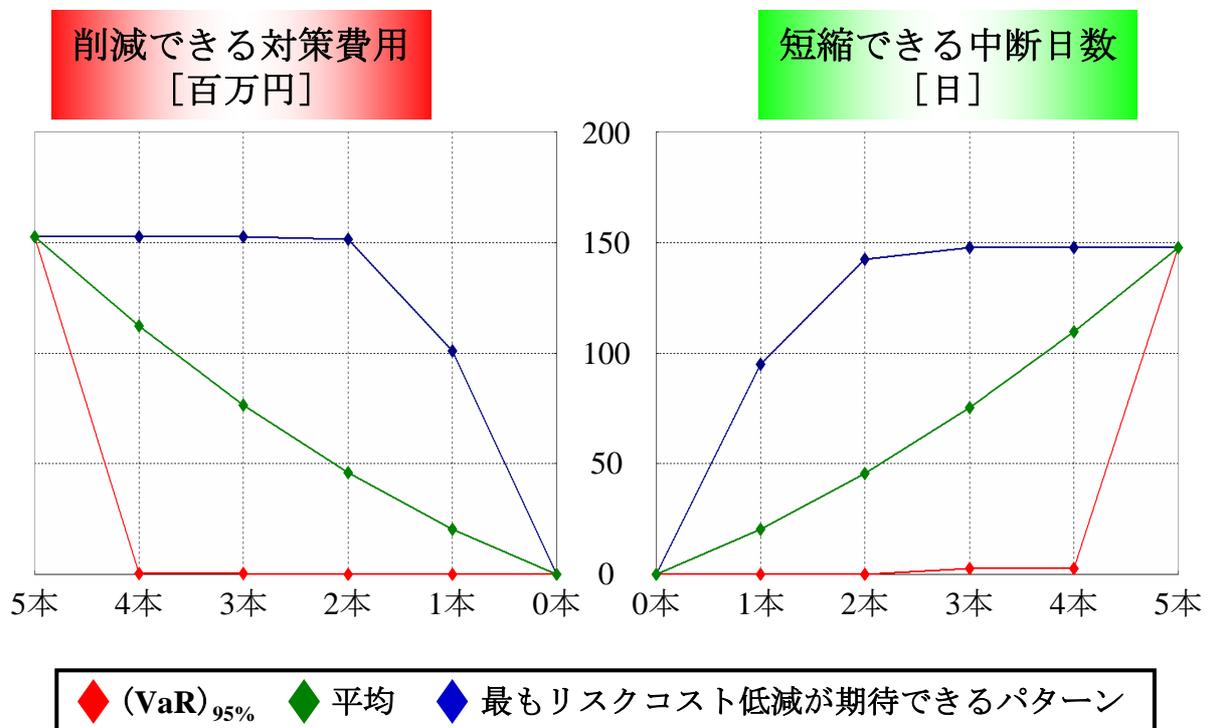


図4.4 ボーリング打設本数と投資効果の関係