

トンネル掘削コスト変動リスク評価手法 に関する研究

京都大学大学院 大津 宏康^{*1}
日本原子力研究開発機構 見掛信一郎^{*2}
大成建設(株) 井尻 裕二^{*3}
京都大学大学院 坂井 一雄^{*4}

By Hiroyasu OHTSU, Shinichiro MIKAKE, Yuji IJIRI and Kazuo SAKAI

亀裂性岩盤中でのトンネル掘削においては、断層破碎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および、長期にわたる工期延長を余儀なくされた事例が数多く報告されている。そのため本研究では、筆者らがこれまでに示してきた地盤統計学を用いて推定する掘削コストに、破碎帯の出現あるいは突発湧水等の発生に対する対策工の施工に要するコストを加えた建設コストを推定する手法を提案することを目的とする。建設コスト評価手法においては、金融工学分野で用いられるリスクという概念を導入し、リスクカーブや、バリュアットリスクといった評価手法を用いる。具体的には、健岩部については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手法をとる。対策工の施工を要する破碎帯の出現あるいは突発湧水等が発生する可能性の評価については、不連続性亀裂岩盤における地下水解析に用いられる亀裂ネットワークモデルを適用する。さらに建設コスト評価手法を、実際の岩盤データを用いて検証し、掘削コストおよび対策工の施工コストからなるトンネル建設コストの評価結果について示した。

【キーワード】 リスク、建設コスト、亀裂ネットワークモデル

1. はじめに

従来より、亀裂性岩盤中のトンネル掘削においては、表-1に示すように、破碎帯等の不良地山の出現および突発湧水の発生等により、多大なコストオーバーランおよび長期にわたる工期延長を余儀なくされた事例が数多く報告されている^{1)~5)}。また、表-1の事例にも示すように、トンネル掘削方式としてNATMに加えて、急速施工が可能なTBM(Tunnel Boring Machine)工法が適用され始めたことに伴い、不良地山の出現あるいは突発湧水の発生が、掘削工事を遂行する上で、重大な支障となった事例が増加しつつある。これは、TBM工法では、切羽が掘削マシンによって密閉されているため、不良地山に遭遇

した場合には、NATMと異なり切羽から水抜きボーリングや薬液注入等の対策工の施工が困難であることに起因する。このため、最悪の場合には、掘削マシンが土砂化したずりにより圧迫され前後に動くことができなくなり、大幅な工期遅延が発生した事例も報告されている。

これまで、筆者らは実際のトンネル掘削プロジェクトを対象にし、地盤リスクに起因する建設コスト変動リスク評価手法を提案してきた⁶⁾。具体的には、地盤リスクについて地盤統計学を用いてモデル化する手法により、調査工事の投資対効果について定量的に評価する手法を提案してきた。ここで注意すべきことは、筆者らが提案してきた建設コスト変動リスク評価手法は内挿法を基本とした地盤統計学手法

*1 経営管理研究部教授 075-383-3260, ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

*2 地層処分研究開発部門 0572-66-2244, mikake.shinnichiro@jaea.go.jp

*3 原子力本部 03-5381-5315, ijiri@ce.taisei.co.jp

*4 工学研究科都市社会工学専攻博士前期課程学生 075-383-3263

表-1 トンネル工事における突発湧水事例

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⁾	東京電力水殿川導 水路トンネル ⁴⁾	東海北陸自動車道 飛驒トンネル ⁵⁾
トンネル規模	延長 8500m 内径約 10m	延長 370m 内径 6m	延長 6231m 内径 4.9m	延長 3035m 内径 2.6m	延長 10.7km 内径 12.84m
地質	砂岩 花崗閃緑岩	凝灰角礫岩	堆積岩	粘板岩系 チャート系	花崗岩
掘削方式	NATM	NATM	NATM	TBM	TBM
最大湧水量	20m ³ /min	9.6m ³ /min	40m ³ /min	全体で 9m ³ /min	全体で 60m ³ /min
排水方式	水抜きボーリング (総延長 424m)	不明	横孔からの水抜き ボーリング	ポンプによる排水	水抜きボーリング
中断期間	約 2 ヶ月	約 3 ヶ月	約 3.5 ヶ月	不明	不明
備 考	400m ³ の土砂流出		湧水と共に天端 崩落, 800m ³ の 土砂流出	突発湧水に伴い岩 盤が崩落し TBM が停止	トンネル全体で 50m ³ /min を超える 湧水量が一年継続

を適用していることである。そのため、実際の施工段階において出現する値の範囲が、調査段階で得られている観測量の範囲内である場合には、地盤統計学を基本として、建設コストを推定し、コスト変動リスクという概念を適用して、期待推定建設コストからのはずれ量を変動リスクとして設定するという議論が可能であった。

しかし、亀裂性岩盤での破碎帯に代表されるような不良地山の出現といった特殊な地盤リスク、すなわち実際の施工段階において、建設コストの推定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場合には、地盤統計学手法を用いて単純に建設コストを推定することは過少に建設コストを評価してしまう危険性がある。もし、観測量を超えるような値が実際の施工段階で出現し、それが原因で構造物が要求される性能を満足しない場合においては、何らかの対策工が必要となる。そのため、建設コストの推定においては、特殊な地盤リスクについても、それを何らかの統計手法を用いて算定し、対策コストとして別途考慮する必要がある。

多数の事故報告が示すように、亀裂性岩盤におけるトンネル掘削工事では、事前の調査結果に基づいた地盤統計学的手法では捉えることのできない、観

測量を超えるような値が施工段階に出現する可能性が非常に高い。かつ、トンネル掘削方式が NATM から TBM 工法へ変化しつつある中では、破碎帯等の不良地山の出現および突発湧水の発生などの特殊な地盤リスクが建設コストや工期に与える影響が大きくなったことがいえる。そのため、破碎帯や不良地山の出現といった特殊な地盤リスクを統計処理し対策コストを定量的に把握する必要性が高まってきていると推察される。

このような観点から、本研究では亀裂性岩盤におけるトンネル掘削工事を対象プロジェクトとし、施工中に破碎帯や突発湧水といった地盤リスクに遭遇する可能性を統計的に評価する手法を述べると共に、既往の地盤統計学を用いて推定した掘削コストに破碎帯あるいは突発湧水等の不良地山の出現に対する対策工の施工に要するコストを加えた建設コストを推定する手法を提案する事を目的とする。具体的には、対策工の施工を要する破碎帯の出現あるいは突発湧水等が発生する可能性の評価については、亀裂性岩盤における地下水流動解析に用いられる亀裂ネットワークモデルを適用するものである。

また、同手法を実際のトンネル掘削現場で取得された岩盤データを用いて検証し、岩盤の不確実性を

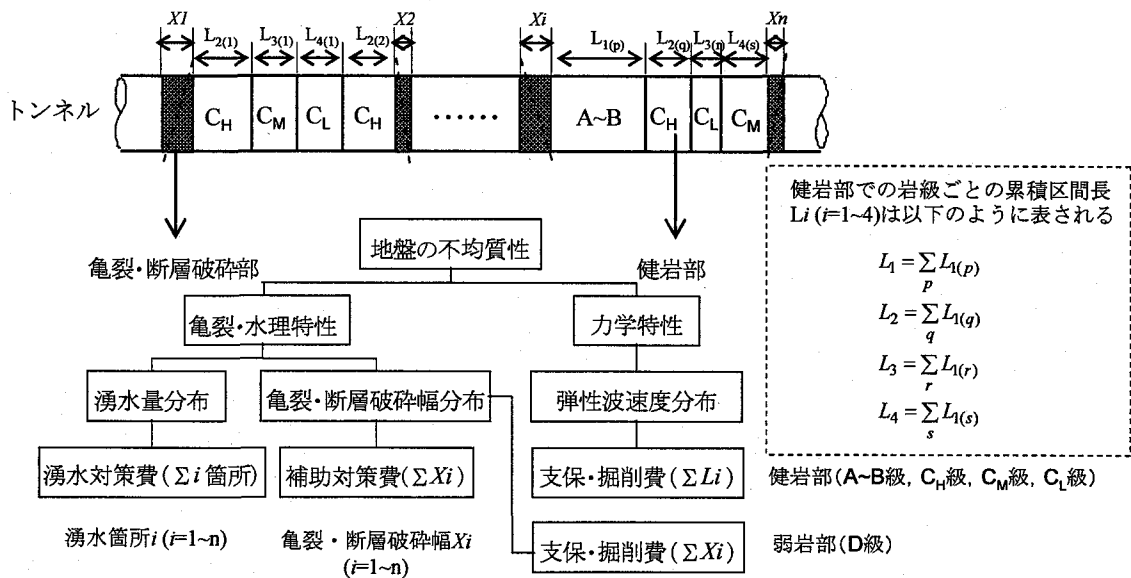


図-1 トンネル建設コスト評価

考慮したトンネル掘削における、掘削コストおよび、推定される対策工の費用の和となる建設コストの評価結果を示す。さらに、そのコスト変動リスクについて、金融工学理論から援用したリスク指標を用いて定量的な検討を加えるものとする。

2. トンネル建設コストの推定方法

本研究においては、トンネル建設コストを算出する上で、対象とする亀裂性岩盤は、図-1に示すようにマトリックス部（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。また、本研究で対象とするトンネル建設コストは、以下に示す各項目からなるものとする。

- ① 支保・掘削費
- ② 湧水対策費
- ③ 補助対策費
- ④ 不良地山支保・掘削費

ここで、上記の①～④の内、①の項目は健岩部を対象とするものであり、地盤統計学手法により算定される弾性波速度分布などに基づき支保パターンを判定し、その施工費用を算定する。一方、②～④の項目は亀裂・断層破碎部を対象とするものであり、亀裂ネットワークモデルを用いたモンテカルロシミュレーションにより亀裂・断層破碎部を想定し、そ

の箇所に対する対策費用および不良地山部の施工費を算定する。以下に、①～④の各費用について、健岩部と亀裂・断層破碎部とに分離して、それぞれの費用の算定手順を示す。

(1) 地盤統計学手法による支保・掘削費の算定手法

地盤統計学手法による支保・掘削費の算定手法のひとつとして、本研究では弾性波速度を用いて、健岩部をモデル化し、トンネルの支保パターンを設定する手法を提案する。

トンネル掘削費用を算出するために、対象とするトンネル周辺地盤の弾性波速度分布を Gaussian シミュレーションにより算定する。Gaussian シミュレーションとは、地盤統計学手法の一つである kriging 手法によって算出される期待推定値および推定誤差分散をそれぞれ、平均値および分散とする正規分布を発生させ、その正規分布に従うモンテカルロシミュレーションを行う事によって、推定値を決定する手法である⁷⁾。

弾性波速度分布の推定結果に基づき、電力中央研究所方式のような岩盤等級分類と従来の TBM 支保パターン事例を利用して、トンネルの支保パターンを図-1に模式的に示すように設定することができる。ただし、この地盤統計学手法に基づく推定結果は、断層破碎帯や亀裂卓越部に起因して分布する弱部のデータが明確にはモデル化に反映されていないもの

と解釈される。このため、不良地山と判定される D 級の出現区間は、後述する亀裂ネットワークモデルで発生させた亀裂の中で、規模の大きい亀裂とトンネルの交差部の幅に相当するものと定義する。なおこの交差部の幅は図-1 中では $X_1 \sim X_n$ のうち大規模亀裂に起因するものに相当する。この定義に基づき、以下の手順に示すように①の支保・掘削費 $C^{(1)}$ を算定する。

- 1) 大規模亀裂に起因する不良地山部の区間長を Y_j と表現すれば、トンネル延長に対する不良地山部の累積区間長は式(1)のように表される。

$$L_D = \sum_j Y_j \quad (1)$$

ここで、 L_D は不良地山部の累積区間長を表す。ただし、不良地山部は後述の亀裂ネットワークモデルによって確率的に算定されるため、 L_D が離散的な確率量となることに留意されたい。

- 2) Gaussian シミュレーションにより算定されたトンネル掘削位置での弾性波速度分布に応じて、各支保パターンの累積区間長 L_i を算定する。ただし、支保パターンは 1~4 を仮定し、それぞれ、A~B 級、 C_H 級、 C_M 級、 C_L 級の岩盤等級に対する地山支保であるとする。この各支保パターンの累積区間長 L_i 、D 級の出現区間長 L_D と処分坑道の総延長 L の関係は、次式のように表される。

$$L = \sum_{i=1}^4 L_i + L_D \quad (2)$$

一般的な原位置条件においては、亀裂・断層破碎部周辺の岩盤条件は複雑に変化するものと想定される。したがって、式(1)、(2)の仮定は概略設計段階において建設コストを算定する上で、議論を簡素化するために設けたものであることに注意されたい。

- 3) 不良地山部以外の健岩部の各支保パターン 1~4 の 1m 辺りの施工費を、それぞれ C_1, C_2, C_3, C_4 とすると、①の支保・掘削費 $C^{(1)}$ は次式により算定される。

$$C^{(1)} = \sum_{i=1}^4 C_i L_i \quad (3)$$

なお、後述するように、不良地山の出現区間 L_D が、亀裂ネットワークモデル手法を用いたモンテカルロシミュレーションにより算定されるため、モンテカルロシミュレーションの回数（以下リアライゼーション回数と称する）毎に異なる。したがって、式(3)により算定される①の支保・掘削費 $C^{(1)}$ は、離散的な確率量となることに留意されたい。

(2) 亀裂ネットワーク手法による補助対策費・湧水対策費評価・不良地山施工費の算定方法

次に、②~④の各費用は、亀裂・断層破碎部に対する対策費用および不良地山部の施工費に相当するものであり、これらの各費用の算定手順における第1ステップは、亀裂ネットワークモデルの構築である。亀裂ネットワークモデルは不連続面分布をモンテカルロシミュレーションによってモデル化することを目的とし、原位置で観察された亀裂情報から算出した亀裂方向性分布や亀裂頻度分布に代表とされる亀裂特性を利用して、構築するものである。この亀裂ネットワークモデルの構築に関する詳細な考え方および手順については、文献8)を参照されたい。

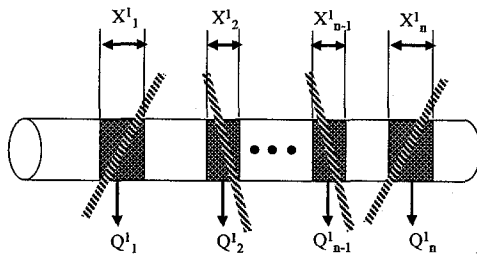
以下に、構築された亀裂ネットワークモデルを用いて、②~④の各費用を算定する方法について要約して示す。

a) 湧水対策費

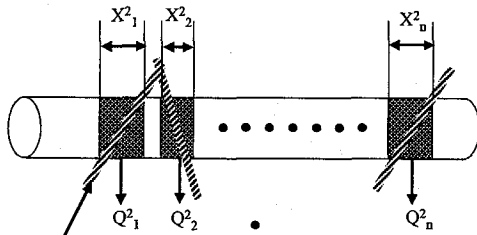
亀裂性岩盤では、主に断層破碎帯や亀裂卓越部で突発的な湧水が発生すると想定し、想定される湧水量にしたがって湧水対策費を計上する。このため、②の湧水対策費については、構築した亀裂ネットワークモデルにトンネル表面を境界条件とした浸透流解析結果に基づき算定する。

例えば、モンテカルロシミュレーションの回数を N として、それぞれのリアライゼーション毎に、図-2 に示すようなトンネルと亀裂が交差したモデルが構築されているとする。この時、浸透流解析により各リアライゼーションでの交差亀裂からの湧水量 Q_j^i が算定される。ここで Q_j^i の添字の、 i はリアライゼーション番号を、 j はそのリアライゼーションでの交差亀裂の番号を表す。リアライゼーション毎の湧水量は式(5)によって算出される。

リアライゼーション番号1

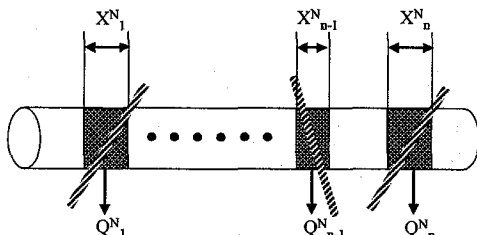


リアライゼーション番号2



亀裂面

リアライゼーション番号N



ただし、亀裂数 n は、
リアライゼーション毎に異なる

図-2 リアライゼーション毎の処分坑道と亀裂の
交差状況

$$Q_{all}^i = \sum_j Q_j^i \quad (4)$$

ここで Q_{all}^i はリアライゼーション番号 i でのトンネル内に発生する湧水量の総量を表す。

次に、本研究では湧水対策に関して、既往の文献、および専門家へのヒアリングに基づき、表-2 に例示するような対策シナリオおよび湧水量の閾値を設定する。この閾値とリアライゼーション番号 i での各交差亀裂からの湧水量 Q_j^i の関係より、リアライゼーション番号 i の解析結果に対する湧水対策費用 $C^{(2)}_i$ が式(5)のように算定される。

$$C^{(2)}_i = \sum_j C_j^i \quad (5)$$

ここで、 C_j^i はリアライゼーション番号 i の亀裂番号 j

表-2 湧水対策シナリオ

閾値-湧水量 (m^3/min)	対策工/対策費
$0 \sim Q_1$	対策なし
$Q_1 \sim Q_2$	対策A/ X_1 円
$Q_2 \sim Q_3$	対策B/ X_2 円
$Q_3 \sim$	対策C/ X_3 円

表-3 補助対策シナリオ

閾値-破碎幅(m)	対策工/対策費
1D以下	対策なし
1D $\sim$ 3D	小規模対策/ Y_1 円/m
3D以上	大規模対策/ Y_2 円/m

に必要となる湧水対策コストを表す。

この手順を、リアライゼーション総数の N 回繰り返すことで、湧水対策費 $C^{(2)}$ の分布が得られる。

b) 補助対策費

既往の TBM 掘削事例から、TBM が亀裂・断層破碎部へ遭遇することにより掘進が困難になるため、掘削前に亀裂・断層破碎部に対して補助工法の費用を計上する。このため、③の補助対策費については、構築した亀裂ネットワークモデルでの亀裂・断層破碎部の規模に応じて算定する。具体的には、それぞれのリアライゼーション毎に、構築した亀裂ネットワークがトンネルと交差する幅 X_i を算定する。図-2 では、リアライゼーション番号 i での亀裂番号 j の亀裂とトンネルとの交差幅を X_j^i と表現している。

次に、本研究では補助対策工に関しては、a)の湧水対策と同様に既往の文献、および専門家へのヒアリングに基づき、表-3 に例示するような TBM の直径を基準とした対策シナリオを設定する。表中の D は TBM の直径を表す。表-3 に示す破碎幅の閾値とリアライゼーション番号 i の亀裂ネットワークでの、処分坑道と各亀裂の交差幅の関係から、補助対策費用 $C^{(3)}_i$ が式(6)のように算定される。

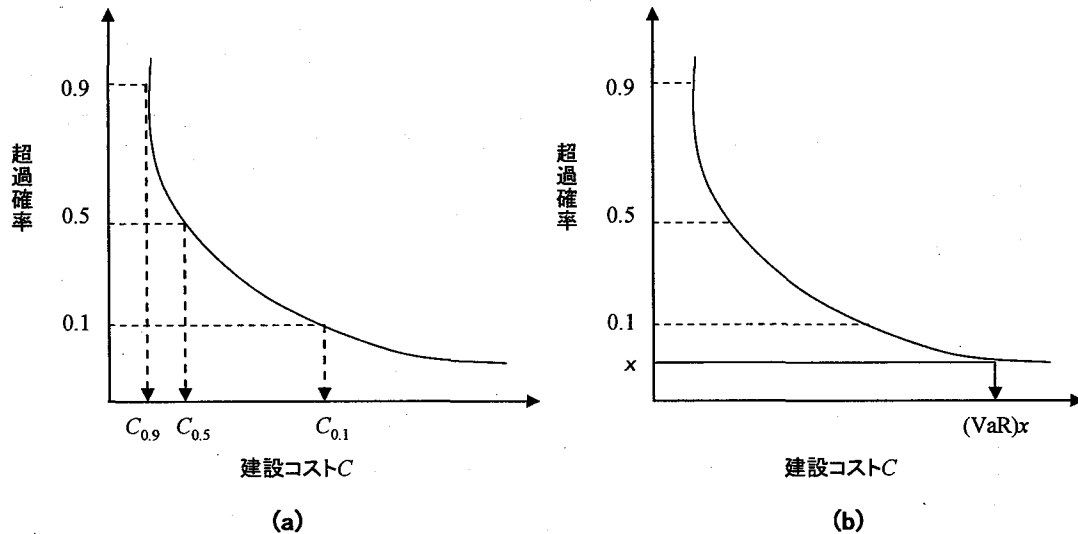


図-3 建設コストの変動性評価モデル

$$C^{(3)}_i = 0 \cdot R_{0(i)} + Y_1 \cdot R_{1(i)} + Y_2 \cdot R_{2(i)} \quad (6)$$

ただし、 $R_{1(i)}$ 、 $R_{2(i)}$ 、 $R_{3(i)}$ はそれぞれリアライゼーション番号 i において、亀裂とトンネルの交差幅が 1D 以下、1D~3D、3D 以上となる交差幅のトンネル延長での合計を表す。

この手順を、リアライゼーション総数の N 回繰り返すことで、補助対策費 $C^{(3)}$ の分布が得られる。

c) 不良地山支保・掘削費

不良地山と判定される D 級の出現区間については、前述のように、亀裂ネットワークモデルで発生させた亀裂の中で、大規模亀裂と判定される亀裂のトンネルとの交差部の幅に相当する。大規模亀裂の判定基準に関する明確な定義はないが、事例検証においては、トンネル規模を考慮して、1.0km 以上の亀裂長さを有する亀裂と定義した。具体的には、不良地山となる D 級支保パターンの延長は、次式に示す大野・小島⁹⁾の断層破碎帯の破碎幅と断層・亀裂の長さの相関式を用いて算定する。

$$\log L = 2.70 + 0.7 \times \log W \quad (7)$$

ここに、 L は断層・亀裂の長さ(m)、 W は破碎幅(m)を表す。

すなわち、式(7)に示す関係式から、リアライゼー

ション番号 i の亀裂ネットワークモデルでの、大規模亀裂に起因する不良地山部の破碎幅 W (式(7)右辺第 2 項に相当) を求め、その延長に 1m 辺りの施工単価を掛けることで、不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}_i$ が式(8)に示すように算定される。

$$C^{(4)}_i = L_{D(i)} \cdot C_D \quad (8)$$

ただし、 $L_{D(i)}$ はリアライゼーション番号 i での不良地山部の延長を表し、 C_D は 1m あたりの不良地山部での施工単価を表す。

この手順を、リアライゼーション総数の N 回繰り返すことで、不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}$ の分布が得られる。

(3) 建設コスト変動リスク評価手法

(1) および (2) において示した $C^{(1)} \sim C^{(4)}$ の各費用は、いずれもモンテカルロシミュレーションによる離散的な確率量となる。このため、各費用の算定結果に関する評価には、図-3 に示す縦軸を超過確率、横軸をコストとしたリスクカーブを用いる。

ここで、リスクカーブとは、金融工学分野において収益と超過確率の関係から、いわゆる収益の不確実性を表現する方法として一般的に用いられているものである。そして、リスクカーブを用いた判断指標としては、確率分布における期待値からのはずれ量を表わすボラティリティ V 、あるいは超過確率 x を

想定した場合の収益に対応する値 $(VaR)_x$ （バリュアットリスク）が用いられる。

筆者らは、この金融工学分野の知見を援用し、地盤の不均一性に起因する建設コスト変動リスクの判断指標となるコスト変動のボラティリティ V を、図-3(a)に従い、以下の手順で、次式に基づき算定する方法を提案した。

$$R = \text{Max}[R_u, R_d] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} R_u &= C_{0.5} - C_{0.9} \\ R_d &= C_{0.1} - C_{0.5} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $\text{Max}[\cdot]$ は、 $\cdot$ の最大値を表わす記号である。また、 $C_{0.1}$ 、 $C_{0.5}$ および $C_{0.9}$ は、それぞれリスクカーブにおける超過確率が、0.1、0.5および0.9に相当する建設コストを表わす。なお、式(10)に示す R_u および R_d は、それぞれアップサイドリスクおよびダウンサイドリスクの偏差を表わすものである。

次に、リスクカーブに示す建設コストとその超過確率の関係が、一般的には正規分布のような対称分布となることが想定されるため、超過確率0.5に相当する建設コスト $C_{0.5}$ を期待値に準ずる値と仮定し、建設コストのボラティリティ V を次式のように定義した。

$$V = R/C_{0.5} \quad (11)$$

ただし、上記の手法は、本研究では①の支保・掘削費 $C^{(1)}$ に相当する、不良地山を除く岩盤でのトンネル建設コスト評価において適用したものである。これに対して、金融工学分野でも、近年は突発性の高い金融リスク評価においては、図-3(b)に示す $(VaR)_x$ が判断指標として用いられる事例が多くなりつつある^{10),11)}。本研究は、湧水あるいは不良地山のような突発性の高い要因に起因するコスト変動を評価することを目的としているため、その判断指標としては $(VaR)_x$ を用いるものとする。

ここで、 $(VaR)_x$ を算定する上で必要となる、具体的な超過確率 x の設定に関しては、明確な規準は定められていないが、金融工学では超過確率 x を5%（確率値では95%）とする事例が一般的である。本

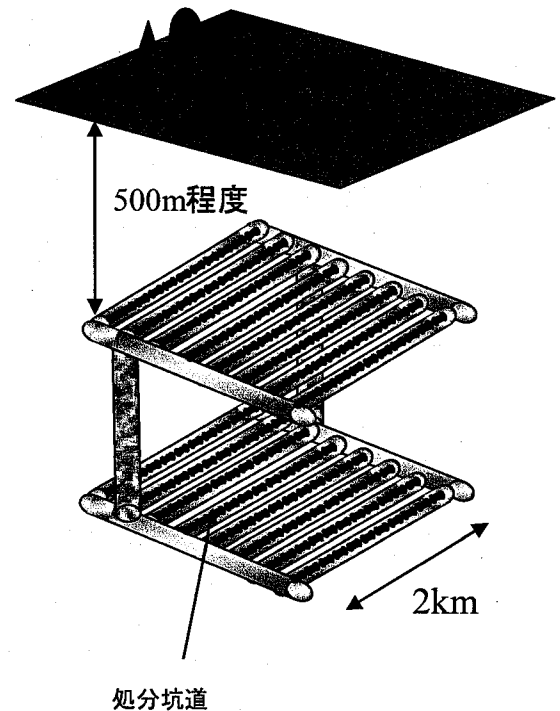


図-4 処分坑道模式図

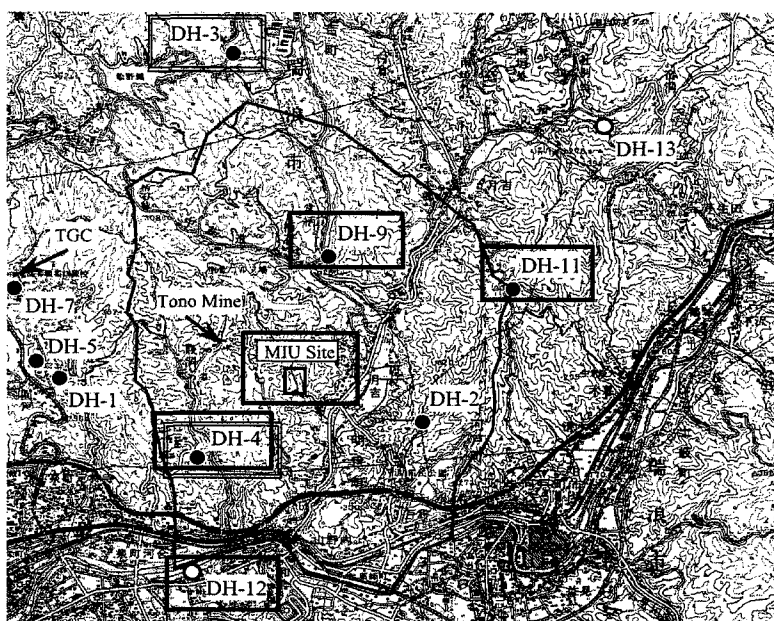
研究では、この事例に準拠して、超過確率 x を5%とした $(VaR)_{0.05}$ を評価指標とし、以下この値を VaR と称する。

VaR が少頻度大事象となるような突発的なリスク要因を考慮したコスト変動リスク評価指標であることを考えれば、施工者や事業者にとって VaR は、不良地山対策としての予備費をどの程度計上すべきであるかを判断する材料となると推察される。

ただし、 VaR はコスト変動を表現するリスクカーブの一つの代表値であることに注意し、最終的にコスト変動を評価する際には、リスクカーブの形状と合わせて総合的に判断すべきである。

3. 事例検証

本章では、2章で述べたトンネル建設コスト推定手法を実際の岩盤データを用いて検証し、手法の適用性を検討する。具体的には、日本原子力研究開発機構が開発を進めている瑞浪超深地層研究所周辺において、仮に高レベル放射性廃棄物処分坑道の建設を想定した場合のトンネル建設コスト変動リスクを試



力学特性

DH-3, DH-4

亀裂・水理特性

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

ただし、MIU-1はMIU site内
の調査ボーリング孔を表す。

図-5 調査ボーリング配置

算するものである。なお、対象とする地域の岩質は土岐花崗岩である。

高レベル放射性廃棄物処分坑道の建設工事においては図-4で模式的に示すように、数キロメートルに及ぶ広大な領域内の地下数百メートルの深部岩盤中に、延長数百キロメートルにわたって処分坑道を建設する。この処分坑道の建設にはTBM工法が適用される予定であるため、湧水を伴うであろう断層や破碎帯の位置、規模を事前の調査によって把握し、かつ、それらの影響を事前にコスト変動リスクという観点から定量的に把握することは極めて重要な検討課題となると想定される。

対象地盤の力学および亀裂・水理特性データを取得するために施工された調査ボーリング孔の配置は図-5に示すとおりである。

(1) 地盤統計学手法による解析モデル

本研究で対象とする処分坑道は、直径を2.6mとする小口径TBMによる施工を計画している。岩盤の強度特性のモデル化領域は、地球統計学手法によって得られた相関長が4m程度であることから、モデルのグリッド間隔を相関長より小さい2.5mとし、その大きさは統計的に十分な大きさとして500m×500m×125mの領域とした。

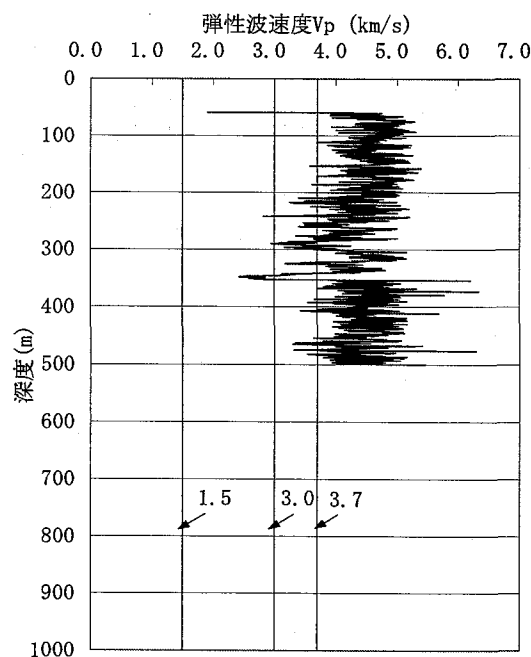


図-6 弾性波速度—深度分布(DH-4孔)

一例として図-6に示す調査ボーリング孔(DH-4孔)を始めとして、各調査ボーリング孔において測定された弾性波速度分布を入力値とした、Gaussianシミュレーションに基づく解析結果より得られた、解析領域全域での弾性波速度分布の不均質モデルを構築する。上記のGaussianシミュレーションによる、

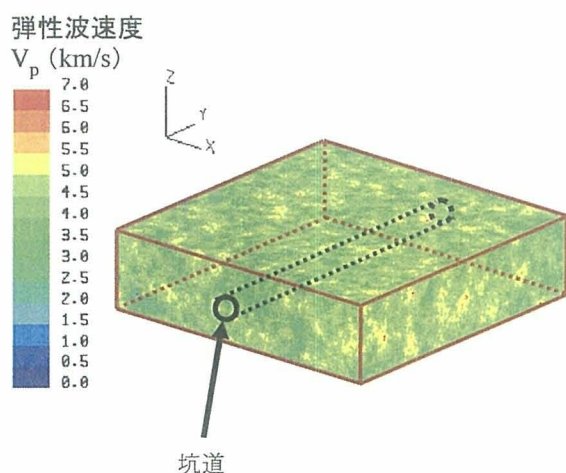


図-7 あるリアライゼーションに対する
岩盤不均質モデル（弾性波速度分布）

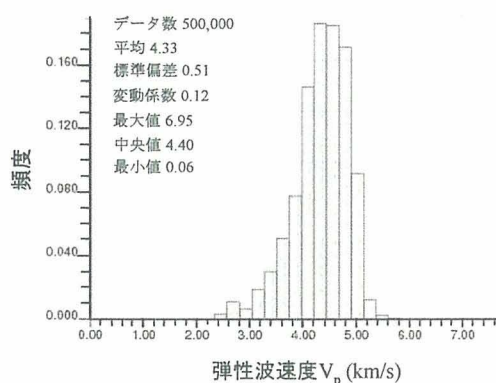


図-8 弾性波速度頻度分布

岩盤不均質モデルの一例を図-7に示す。また、岩盤不均質モデル中央に掘削した水平坑道上の弾性波速度のヒストグラムを図-8に示す。

図-8に示すように、確率論的に作成した複数の不均質モデルに対し、電力中央研究所方式の岩盤等級分類および小口径TBMの支保パターン事例¹²⁾を参考にして作成した表-4を用いて、弾性波速度を閾値とした支保パターンを決定する。各支保パターンの平均出現頻度は、弾性波速度 3.7km/s 以上の A~B 級（パターン 1）で 90%，3.0~3.7km/s の C_H 級（パターン 2）で 8%，1.5~3.0km/s の C_M 級（パターン 3）で 2%であり、弾性波速度が 1.5km/s 以下のパターン 4 に相当する領域は算定されなかった。

表-4 岩盤区分と支保パターン

支保	弾性波速度の閾値	岩盤等級	支保工
1	3.7km/s 以上	A~B	吹きつけコンクリート5cm
2	3.0~3.7km/s	C _H	吹きつけコンクリート5cm溶接金網+フラットバー アンカーボルト
3	1.5~3.0km/s	C _M	吹きつけコンクリート14cm 鋼製支保工
4	1.5 km/s 以下	C _L	スチールセグメント 充填モルタル

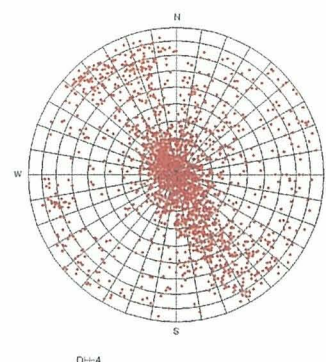


図-9 ボーリング孔で観測された亀裂情報

(2) 亀裂ネットワークモデル

亀裂ネットワークのモデル化領域は、断層破碎帯をモデル化することから、最低限処分場を包含する 2km×2km×1km（深さ）の領域とした。なお、亀裂ネットワークモデルの作成と地下水流動解析には、FracMan5¹³⁾を用いた。図-9に示すような調査ボーリング孔（DH-4 孔）で得られたシュミットネットデータを始めとして、各調査ボーリング孔および原位置で観察された亀裂情報から、表-5に示す亀裂特性をモデル化した。その情報に基づき作成した亀裂ネットワークモデルの一例を図-10に示す。

ここで、処分坑道の建設コストを試算する上での条件として、その位置および諸元は以下のように設定した。

- ・ 処分坑道は、図-10に示すモデル岩盤の中央部に水平に構築される。
- ・ 処分坑道の諸元は、直径 2.6m の円形断面で延長

表-5 亀裂特性

特性	設定値
亀裂群数	3群
中心位置分布	Baecher分布
方向分布	Bingham分布, N28E16S, N55E58W, N83E71S
半径分布	べき乗分布 $f(r) = \frac{b-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r} \right)^b, r \geq r_{\min}$ b: べき乗指数3.0, r: 半径, $r_{\min}$: 最小半径50m
頻度分布	3次元密度0.02m ² /m ³
透水量係数分布	対数正規分布, 平均-5.54m/s 標準偏差1.51m/s

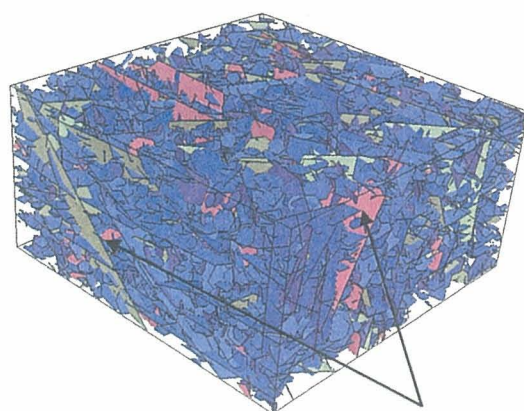


図-10 亀裂ネットワークモデルの一例

を1.0kmとする。

まず、湧水対策費の算定に必要な亀裂ごとの湧水量は、確率論的に作成した複数の亀裂ネットワークモデルに対して地下水流動解析を実施して求めた。この地下水流動解析は亀裂ネットワークモデルに対し、境界条件、初期条件を与えた、有限要素法を基本として行われる。全リアライゼーション中、坑道に交差する亀裂からの湧水量ヒストグラムを図-11に示す。事例検証においては、湧水量を閾値とした対策シナリオ及び対策コストは当プロジェクトに関わる専門家へのヒアリングや文献調査によって表-6に示すように設定した¹²⁾。なお、表-6中の対策費用には工期遅延に伴う諸経費、人件費などを含む。

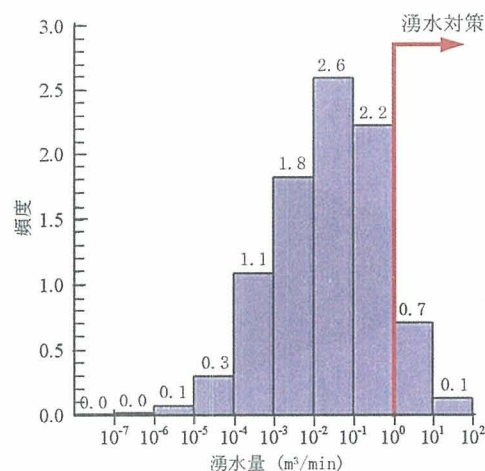


図-11 1.0kmあたりの湧水量頻度分布

表-6 湧水対策シナリオ¹²⁾

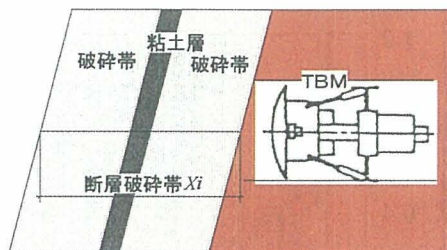
閾値-湧水量 (m³/min)	対策工／対策費
0.0~1.5	対策なし
1.5~3.0	湧水処理／100万円
3.0~5.0	湧水処理+水抜きボーリング／ 1,000万円
5.0~	湧水処理+水抜きボーリング+ 排水トンネル／5,000万円

表-7 補助対策シナリオ¹³⁾ (対策シナリオ)

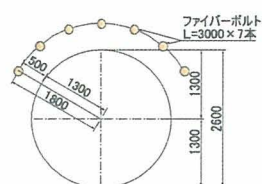
閾値-破碎幅 (m) 1D=2.6m	対策工／対策費
1D以下	対策なし
1D~3D	小規模対策(ファイバーボルト)／ 20万円/m
3D以上	大規模対策(迂回坑+薬液 地盤改良)／245万円/m

表-6に示した湧水対策シナリオの閾値を勘案すると、湧水対策が必要となる亀裂は、坑道に交差する全亀裂の内9%程度(頻度の割合0.8/8.9=0.09)であることが分かる。

次に、補助対策費に関しては、湧水対策費の算定と同様に、当プロジェクトに関わる専門家へのヒアリング、文献調査から表-7および図-12に示すような対策シナリオと対策コストを設定した¹⁴⁾。



1) 小規模対策 ($1.0D < X_i < 3.0D$)



2) 大規模対策 ($X_i \geq 3.0D$)

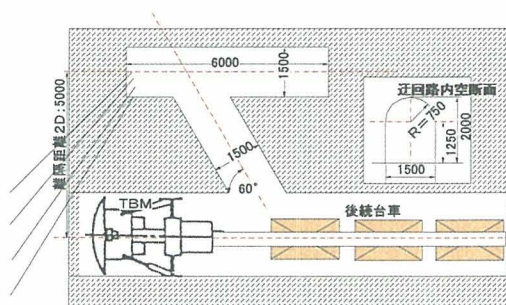


図-12 補助対策工

最後に、原位置で観察された亀裂情報を用いて作成した亀裂ネットワークモデルを用いて、不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}$ の算定に必要な支保パターンの累積距離を算定する。不良地山の判定は、大規模亀裂の破砕幅に起因する。大規模亀裂は、亀裂長さが 1.0km 以上の亀裂と定義した。これは、式(7)により、亀裂長さが 1.0km 以上の亀裂は、破砕幅が約 2.6m 以上となり、表-7 に示すように、破砕幅がトンネルの直径を超え、対策工が必ず必要な亀裂であることを考慮に入れて設定した。前述のように、この支保パターンの累積距離は、離散的な確率量となるが、その平均値は延長 1.0km に対して 8.0m と極めて微小な値となった。この結果より、(1) に示した地盤統計学手法により得られた支保パターンと合わせて、平均値としての支保パターンの比率は、A～B 級 89.2%， C_H 級 8.0%， C_M 級 2.0%，D 級 0.8% となり、不良地山の出現による、①の支保・掘削費 $C^{(1)}$ の変動に及ぼす影響は小さくなるものと推定される。

4. 建設コスト変動リスク

3 章に示した解析結果に基づき、坑道延長 1km 当りの建設コストを構成する、以下に示す各費用を算定する。

- ① 支保・掘削費 $C^{(1)}$
- ② 湧水対策費 $C^{(2)}$
- ③ 補助対策費 $C^{(3)}$
- ④ 不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}$

その結果として得られる、上記の各費用に対するリスクカーブを図-13～図-16 に示す。

まず、図-13 に示す支保・掘削費 $C^{(1)}$ のリスクカーブにおけるコスト変動量は極めて微小である。この特性は、当該サイトでの地盤統計学に基づく弾性波速度分布の推定結果で、弾性波速度が 3.7km/s 以上の領域が 90% 程度となっていることに加えて、確率量となる不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}$ の算定に必要な支保パターンの累積距離が極めて小さいことによるものである。

次に、図-14～図-15 に示す湧水対策費 $C^{(2)}$ および補助対策費 $C^{(3)}$ のリスクカーブでは、原位置データより推定した亀裂特性の不確実性が大きいいため、その亀裂特性を用いた亀裂ネットワークモデル手法に基づき算定されたコスト変動も比較的大きな値となる。すなわち、支保・掘削費 $C^{(1)}$ のコスト変動幅が数百万円のオーダーであるのに対して、湧水対策費 $C^{(2)}$ および補助対策費 $C^{(3)}$ のリスクカーブでのコスト変動幅は 5～7 千万円程度と 1 桁大きな値となっている。

また、図-16 に示す不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}$ のリスクカーブでは、前述のように支保パターンの増強を必要とする不良地山の出現する確率が比較的小さいため、リスクカーブでのコスト変動幅は、最大で 15 百万円程度となっている。

以上の $C^{(1)} \sim C^{(4)}$ の各費用に対するリスクカーブにおけるコスト変動幅の関係は、図-17 に示すように、支保・掘削費 $C^{(1)}$ に、その他の $C^{(2)} \sim C^{(4)}$ のリスクカーブを順次重ね合わせることによってより明らかとなる。なお、図-17 に示す関係において、 $C^{(1)} \sim C^{(4)}$ の各費用に対するリスクカーブをすべて重ね合せたものが、言うまでもなく延長 1.0km 当りの建設コストに対するリスクカーブとなる。

次に、 $C^{(1)} \sim C^{(4)}$ の各費用に対するリスクカーブの

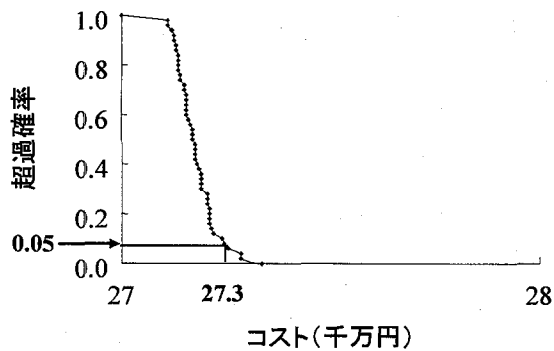


図-13 支保・掘削費のリスクカーブ

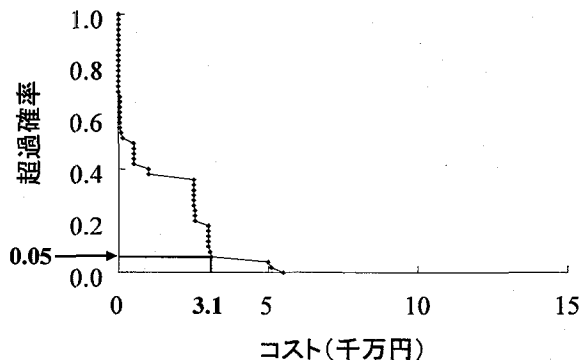


図-14 湧水対策費のリスクカーブ

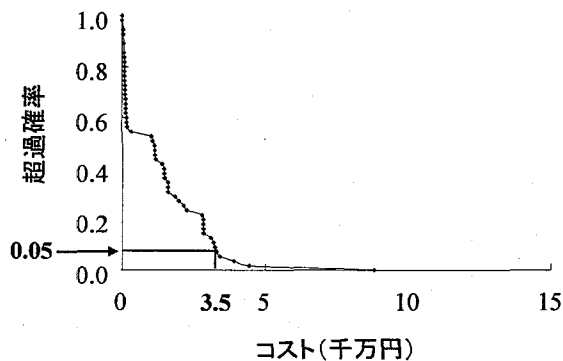


図-15 補助対策費のリスクカーブ

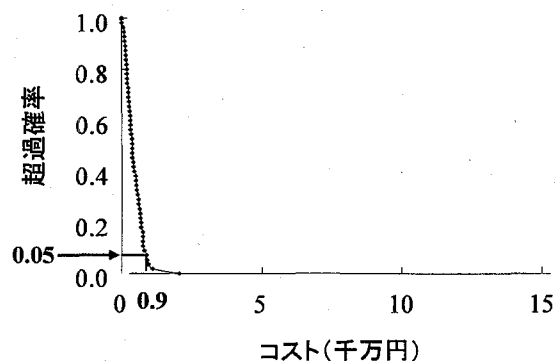


図-16 不良地山支保・掘削費のリスクカーブ

内、コスト変動の小さな $C^{(1)}$ を除く各費用に対して、リスク評価指標となる VaR (前述のように図-3(b)

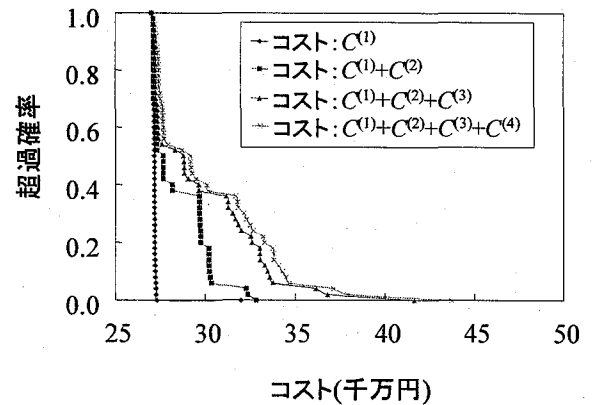


図-17 各費用のリスクカーブ重ね合わせ

において超過確率 5%と設定) を算定した結果を図-18 に示す。同図に示すように、湧水対策費 $C^{(2)}$ 、補助対策費 $C^{(3)}$ および不良地山支保・掘削費 $C^{(4)}$ の VaR は、それぞれ 3.1 千円程度、3.5 千円程度、0.9 千円程度となる。ここで、図-13 に示す支保・掘削費 $C^{(1)}$ のリスクカーブでのコスト変動幅が数百万円のオーダーであることから、概算としてこれを 0 と仮定すると、 $C^{(2)} \sim C^{(4)}$ の費用に対する VaR の和である 7.5 千円が、この処分坑道を 1km 掘削する上での、破碎帯あるいは突発湧水等の不良地山の出現に対するコスト変動リスクの代表値になるものと解釈される。このコスト変動量は、図-13 に示す支保・掘削費 $C^{(1)}$ の VaR が 27.3 千円程度であることを考慮すると、概算の掘削費用に対して、27% ($7.5/27.3=0.27$) に相当することになる。すなわち、このコスト変動リスクは、現状の原位置調査結果に含まれる不連続面に関する情報の不確実性に起因するものと解釈される。言い換えれば、本研究において提案する手法は、原位置調査結果に含まれる不確実性の度合いを、建設コスト変動リスクと言うコスト次元で表現するものである。したがって、例えば今後原位置での追加調査を実施した場合には、その追加調査が情報の不確実性を低減する度合いについて、コスト次元で定量的に評価することが可能になるものと推察される。さらに、建設コスト変動リスクの大きさと地盤調査に必要となった費用の関係から、地盤調査の費用対効果に関する有益な情報の提示が可能になるものと推察される。

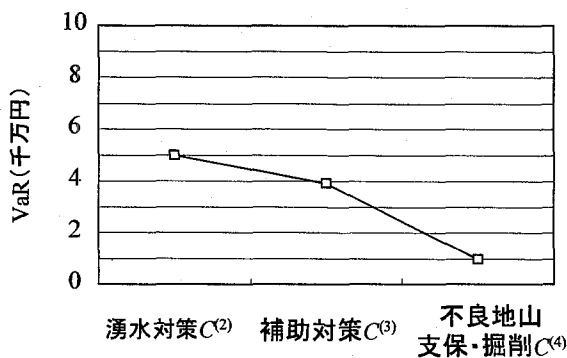


図-18 各費用に対する VaR 算定結果の比較

5. まとめ

本研究においては、不連続性岩盤を対象として、トンネル掘削工事における、岩盤の力学的不確実性要因に加えて、破碎帯あるいは突発湧水等の不良地山が出現する危険性を考慮した建設コスト評価手法を提案した。また、その評価手法を、具体的な適用事例として、花崗岩中に建設を仮定した処分坑道に適用し、その建設コスト変動リスクについて検討を加えた。本研究によって得られた知見は、以下のよう要約される。

- 1) 事例検証として用いた瑞浪超深地層研究所周辺の岩盤状況のように、硬岩を主体とした不連続性岩盤での小口径 TBM による掘削では、破碎帯や不良地山の出現に起因する湧水対策費および補助対策費といった対策工の施工コストが建設コスト変動において支配的な要因となることを、建設コスト変動リスクという定量的な指標を用いて明らかにした。また、VaR を用いて建設コスト変動リスクの代表値を表現したことで、事業者や施工者に対し、不良地山対策として予備費をどの程度計上しておくべきか提案することができると推察される。
- 2) 1) の知見から、原位置調査結果に含まれる不確実性の度合いを、建設コスト変動リスクと言うコスト次元で表現することが可能であるため、今後原位置での追加調査を実施した場合には、その追加調査が情報の不確実性を低減出来る度合いについて、コストを指標として定量的に評価出来る可能性がある。

本研究で対象とした、破碎帯あるいは突発湧水等の不良地山の出現は、トンネル掘削プロジェクトにおける初期投資を大きく変動させるものであり、そのプロジェクトの事業性自体に大きな影響を与えるものである。したがって、事業の初期段階において、そのような特殊な地盤リスクの危険性を反映したリスク評価手法は、初期段階でリスクを適切に把握し、リスク低減を考慮するうえで非常に重要なものである。

本研究の事例検証においては、瑞浪超深地層研究所周辺の地質調査結果を用いて、地盤リスクに着目した事業初期の建設コスト評価に関する検討を実施したが、今後、事業の進み具合に応じた調査と建設コストの評価方法について検討していく所存である。

【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，pp.12-21，1973
- 2) 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
- 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) 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.27-35，1991
- 5) 寺田光太郎，川北眞嗣，小林伸次，築地功：不良地山・高圧大量湧水との闘い（大量湧水編），トンネルと地下，pp.15-25，2004
- 6) 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
- 7) Clayton V. Deutsch, Andre G. Journel: GSLIB (Geostatistical Software Library and User's Guide), Oxford University Press, 1998
- 8) 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.179-194，2001
- 9) 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
- 10) 山下智志：市場リスクの計量化とVaR，朝倉書店，2000
- 11) Jorion P.：杉本正隆訳：新版バリュー・アットリスクのすべて，シグマベストキャピタル，2003
- 12) 日本トンネル技術協会：TBMハンドブック，2000
- 13) W. S. Dershowitz, G. Lee, J. Geier, T. Foxford, P. Lapointe, A. Thomas: FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation User documentation Version 2.6, Golder Association Inc, 1998
- 14) 核燃料サイクル開発機構：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 2004-016，2004

A STUDY ON ESTIMATION OF COST VARIATION ON TUNNEL CONSTRUCTION PROJECTS

By Hiroyasu OHTSU, Shinichiro MIKAKE, Yuji IJIRI and Kazuo SAKAI

It is well known that encounter of unforeseeable geological condition such as fault and fractured zones or water intruding in a tunnel construction project leads to substantial cost overrun and delay of construction term. From such a view point, in this paper, a methodology associated with evaluation of cost variation of tunnel construction projects in discontinuous rock mass was presented. The concept of risk, which was ordinary applied to financial engineering, was adopted to the evaluation of cost variation. And the evaluation method such as risk-curve and Value at Risk was adopted. In detail, this paper proposed a method to combine geo-statistics model and discrete fracture network model. In this methodology, geo-statistics model was employed to decide the support pattern, and discrete fracture network model, which was often used for seepage analysis in discontinuous media, was employed to conduct evaluation of discharge along excavated a tunnel. Furthermore, the proposed methodology was applied to evaluate cost variation risk of tunnel excavation by Tunnel Boring Machine, TBM. Finally, results made it clear that the proposed methodology is very useful to clarify dominant risk factors involved in information on in-situ discontinuous rock mass.