

地盤リスクという観点からみた 地質調査の意義に関する研究

大津 宏康¹・大川 淳之介^{1*}・竹内 竜史²・三枝 博光³・太田 康貴¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2棟)

²日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

³日本原子力研究開発機構 福島環境本部 (〒960-8034 福島県福島市置賜町1-29 佐平ビル8F)

*E-mail: okawa@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究は、地下構造物建設プロジェクトにおける岩盤の不連続面の存在等の不確実性に起因する建設・対策工のコスト変動リスク（以下、地盤リスク）に着目し、反射法弾性波探査などの地質構造を面情報として捉える地質調査、あるいはボーリング孔の観察などの点情報として捉える地質調査のそれぞれが、地盤リスク変動に及ぼす影響を事後評価の観点から定量的に評価した。具体的には、不連続性岩盤における立坑掘削工事事例をもとに、地盤リスクとして地下建設プロジェクトにおける突発湧水リスクをコスト次元で示すことで定量的にリスク評価を行った。その結果、地質調査を実施することにより一時的に地盤リスクは増加するが、更なる地盤情報の蓄積により地盤リスクを低減することが可能となることが示された。

Key Words : geotechnical risk, water intruding, discontinuous rock mass, geological survey

1. はじめに

トンネルおよび地下空洞に代表される地下工事の設計としては、まず既存の文献を用いた机上調査に基づく概念設計が実施され、その後追加的に実施されるボーリング調査および弾性波探査調査等の地質調査結果を反映した実施設計が実施されることが一般的である。地質調査により得られる情報としては、対象とする建設サイトの岩盤の強度・変形特性および断層・破砕帯に代表される不連続面の存在等が挙げられる。この地質調査に関しては、概念的には数量が増加するに連れて岩盤特性の推定精度が高まり地盤リスクの低減に寄与するとは考えられるが、その調査情報の蓄積と地盤リスクの低減との関係について定量的に検討を加えた研究事例は数多いとは言えない。

この課題に対して、筆者らはこれまでに地下構造物建設時に実施されるボーリング調査および弾性波探査調査結果による地質情報の蓄積が地盤リスクの低減につながる特性を、金融工学¹⁾分野で発展してきたリスク工学²⁾の知識を援用して定量的に示す試みを行ってきた^{3,4)}。その基本概念は、図-1に示すように要約される。すなわち、フィージビリティ段階は物性に関する情報が少ないため不確実度（地盤リスクと等価）が大きいが、追加的に実施された地質調査結果を反映した実施設計段階ではその

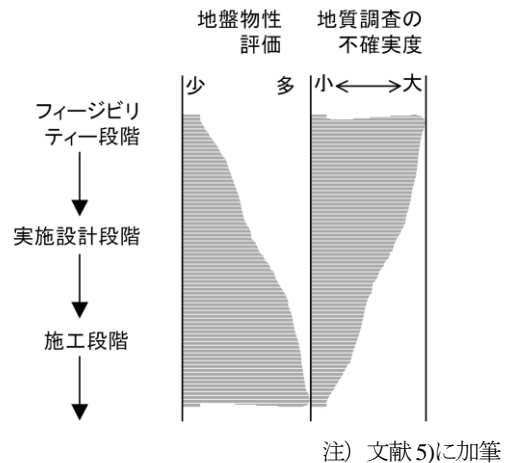


図-1 地盤物性調査ならびに地質調査の不確実度

不確実度が減少することになる。ただし、図-1に示す関係は、岩盤を等価連続体としてモデル化する場合の岩盤強度については当てはまるものであるが、岩盤特有の断層・破砕帯に代表される不連続面情報については異なる傾向となる。もちろん、地質調査結果が不足している場合には、不連続面が存在するか否かという不確実度は高いといえる。しかし、例えば概念設計段階で不連続面情報が不十分な条件下での岩盤のモデル化は、本研究で提唱する定量的な地盤リスク評価において全く異なる結果

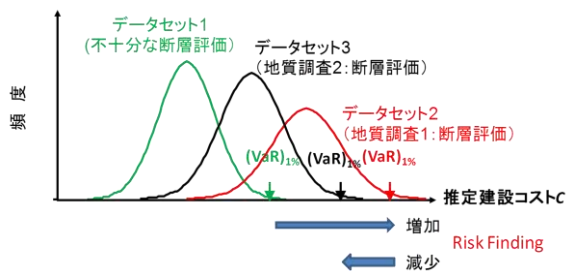
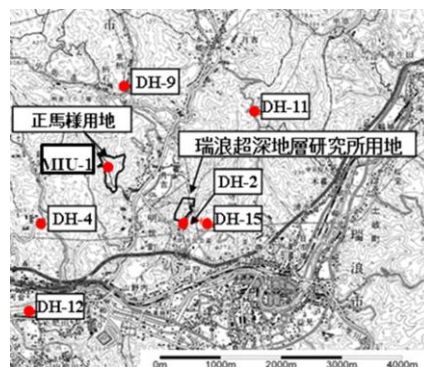


図-2 不連続面を対象とした地質調査の価値 (概念図)

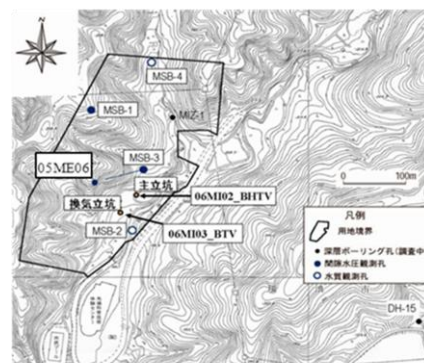
を与える危険性がある。

ここで、金融工学分野でのリスク工学の基本概念は、評価すべき定量的な情報を確率量としてモデル化し、その期待値からの外れ量、あるいは最悪のシナリオに相当する極値を算定し、意思決定の判断指標とするものである。この基本概念を不連続性岩盤での地下工事に適用した場合の地盤リスクと推定建設コストの関係は、模式的に図-2に示すように要約されるであろう。すなわち、データセット1のように不十分な断層評価の下では、岩盤特性のばらつきを考慮したとしても、その超過確率1%に相当する極値⁶⁾ (図中では $(VaR)_{1\%}$ と表記; Value at Risk) は小さい値になると考えられる。これに対して、地質調査1の断層の存在が確認されたデータセット2では、データセット1と異なる確率分布になるとともに、その極値 $(VaR)_{1\%}$ も増加すると解釈される。さらに、断層の物性評価に関する追加的な調査結果を反映したデータセット3では、より詳細な物性が得られているため確率分布でのばらつき幅が減少するとともに、その極値 $(VaR)_{1\%}$ も減少すると解釈される。このような枠組みからは、地下工事での地質調査の価値は、断層の発見により最悪のシナリオに相当する極値を推定するとともに、追加調査により最悪のシナリオに相当する極値が発生する危険性を減少させることであること、すなわちRisk Finding⁷⁾であると解釈される。

このような観点から、本論文では不連続性岩盤内に建設中の立坑を対象として、既に逐次的に実施された地質調査結果が蓄積されている条件下で、突発的な湧水の発生するリスクについて、図-2に示す地質調査の価値に関する関係が成立つか否かについて検討を加える。なお、本研究においては、リスク工学の観点から突発的な湧水の発生するリスクを評価する上で、地質調査で確認される大規模な亀裂は確定情報としてモデル化する一方、中小規模の亀裂については、確率量としてモデル化する。このようなモデル化により、推定される湧水量に対して図-2に示すような確率分布を算定することが可能となる。また、本研究では突発湧水リスクとは、図-2に示すような確率分布における最悪のシナリオの極値に相当するものと定義する。



(a) 全体位置図



(b) 瑞浪超深地層研究所

図-3 ボーリング孔位置

2. 対象サイトとデータセットの概要

突発湧水リスク評価の事例検証として、岐阜県瑞浪市において日本原子力研究開発機構が建設を進めている瑞浪超深地層研究所における立坑掘削工事を取り上げる。対象サイトでは2本の立坑(主立坑、換気立坑)を掘削しており、2011年9月現在では、深度約500mまで両立坑の掘削が進展している。なお、本研究においては、詳細な地質情報が得られている深度400mまでを解析対象領域としている。

対象サイト(図-3)においては、表-1および図-4のように段階的に各種調査が実施されており、その段階ごとに不連続性岩盤における亀裂情報がデータセット(以下、DSと省略する)として蓄積されている。ここで、ボーリング調査等の点情報によって構築されるDSおよび反射法弾性波探査によって構築されるDSを作成しているのは、点情報・面情報のそれぞれが突発湧水リスクの変動にどのように寄与しているかを考察するためである。なお、表-1のDS⑥に示す06MI02孔および06ME03孔は、それぞれ掘削途中の主立坑、および換気立坑の深度200mにおける切羽から深度500mまで掘削した先行ボーリング孔であり、それら最終的な地質調査によって構築されるDS-M4モデルが本研究における最も信頼性の高いモデルとここでは仮定する。また、詳細な調査項目については、参考文献7) および8) を参照されたい。

表-1 地質調査項目とデータ取得地点

	調査項目	データ取得地点
①	既存情報の収集	ボーリング孔(DH-4,9,11,12,MIU-1)
②	露頭調査+反射法弾性波探査	
③	既存ボーリング調査+浅層ボーリング調査	ボーリング孔(DH-2)
④	深層ボーリング調査	ボーリング孔(DH-15,MIZ-1)
⑤	孔間水理試験+孔間トモグラフィ探査	DH-2とMIZ-1の孔間
⑥	立坑壁面観察(堆積岩部)+先行ボーリング調査(深度500mまで)	ボーリング孔(06MI02,06MI03)

表-2 各 DS とモデル化の概要

点情報によるモデル	DS	DS-B1		DS-B2					
		決定論的亀裂本数	3(3)	6(6)					
構造特性	確率論的亀裂Lv.	1	2						
水理特性	透水量係数Lv.	1	2						
混合モデル	DS	DS-0	DS-M1	DS-M2	DS-M3	DS-M4			
	構造特性	決定論的亀裂本数	0	8(5)	11(8)	24(11)	29(13)		
	確率論的亀裂Lv.	0	1	2	2	3			
水理特性	透水量係数Lv.	0	1	2	2	3			
面情報によるモデル	DS	DS-R							
	構造特性	決定論的亀裂本数	4(0)						
	確率論的亀裂Lv.	0							
水理特性	透水量係数Lv.	0							

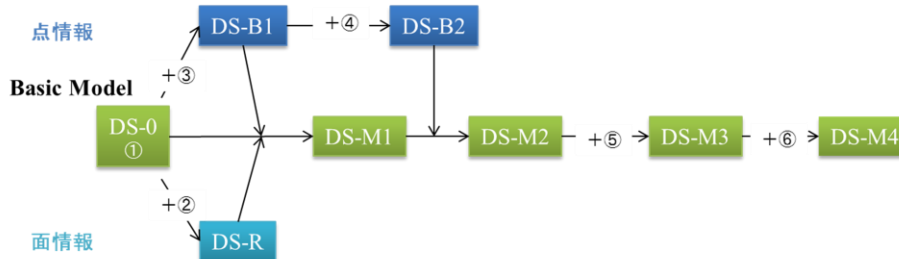
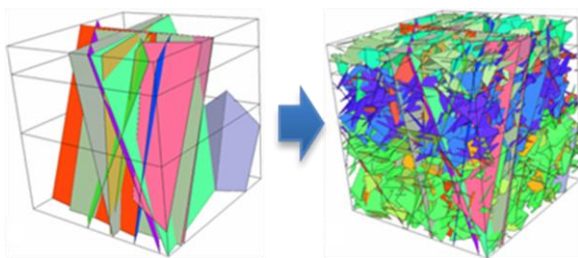


図-4 地質調査と DS の関係



(a) 決定論的亀裂モデル (b) 混合モデル

図-5 DFN モデルの一例

3. 突発湧水リスク評価手法

本研究で適用する突発湧水リスク評価の基本概念は、不連続性岩盤における地下水流動は不連続面に沿う流れが支配的であると仮定するものである。この仮定の下、表-1に示すデータセット毎に得られた解析用物性値を用いて、地下水流動解析を行う。

(1) Discrete Fracture Networkモデル (DFNモデル) の構築

対象サイトにおいて実施された原位置地質調査に基づき、割れ目帯を含む比較的大きな不連続構造の走向、傾斜、トレース長、分布頻度等のデータを収集する。そし

て、それらのデータに基づき、本研究ではDFNモデルに用いる亀裂を、決定論的亀裂および確率論的亀裂の2種類に分類する⁹⁾。

まず、決定論的亀裂とは、露頭調査、あるいは反射法弾性波探査等の調査において存在が明らかになっている比較的大規模な層や亀裂を決定論的にモデル化したものである。決定論的亀裂については、調査によって確認された走行・傾斜等の幾何学的情報や透水性などの水理学的情報を固定値で設定することによって、図-5(a)のように決定論的にモデル化を行う。

一方、確率論的亀裂とは、比較的小規模な亀裂に関して、調査によって得られた統計量をもとに、各種亀裂特性を確率的にモデル化したものである。具体的には、各種調査結果による亀裂の走向・傾斜、亀裂頻度等の幾何的分布、および透水量係数等の物性値分布に関する統計量に基づいて、確率論的に亀裂をモデル化する。なお、これらのパラメータの詳細な導出方法、および亀裂ネットワークの発生方法については、参考文献10)を参照されたい。

そして、図-4で示したDS毎に、上述した決定論的亀裂に確率論的亀裂を重ね合わせ、図-5(b)に示すような混合モデルを構築する。ここで、表-2に各DSとモデル化した際に更新した解析パラメータの概要を示す。決定論的亀

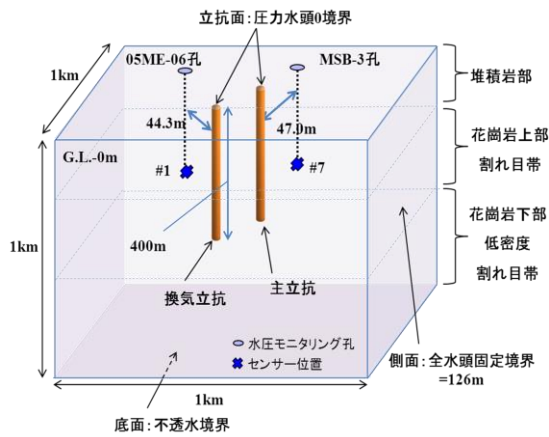


図-6 解析領域および境界条件

裂本数の括弧内に示した数字は透水量係数が推定されている亀裂本数を示し、透水量係数が未知の決定論的亀裂に対しては、各DSの段階に確率論的亀裂に用いられた対数正規分布より得られる期待値と、標準偏差の和によって算出される透水量係数を与えた。また、確率論的亀裂および透水量係数についてはLv.と表記しているが、これは各段階でそれぞれのパラメータが更新されたことを示している。ここでは、パラメータの詳細に関しては参考文献7)等に譲る。

(2) 地下水流動解析条件

(1)で示したデータセットごとに構築したDFNモデルを用いて、地下水流動解析を実施するが、DFNモデルは一部亀裂を確率論的にモデル化しているため、以下に示すモンテカルロシミュレーションの手順により、100回の地下水流動解析を実施する。

- 1) 各調査段階において決定論的亀裂と確率論的亀裂を組み合わせたDFNモデルを100ケース構築し、そのケース数に相当する回数地下水流動解析リアライゼーションを実施する。
- 2) リアライゼーション毎の解析結果において、全水頭観測センサー位置における全水頭値を抽出する。また、主立坑および換気立坑の湧水量の和を総湧水量とし、全水頭値および総湧水量とそれぞれの実測値との比較により、DFNモデルの精度に関する検証を行う。
- 3) 主立坑および換気立坑に露出する亀裂1本毎の湧水量を抽出し、表-3に基づき亀裂一本あたりの湧水量を湧水対策費に変換し、立坑に露出する亀裂本数を掛け合わせることでリアライゼーションあたりの湧水対策費を算出し、これを各DSにつき100回のリアライゼーションを実施する。

(3) 境界条件

上記の地下水流動解析を実施するにあたりモデル化を

表-3 湧水対策シナリオ

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、復旧工を実施

行う領域および境界条件を図-6に示す。同図に示すように、解析領域として主立坑を地表面の中心とする1km×1km×1kmの空間を設定する。なお、主立坑(内径6.5m)と換気立坑(内径4.5m)間の距離はおよそ40mである。また、主立坑および換気立坑の掘削深度は、ともに400mと設定した。また、側面の全水頭固定境界については、解析領域の端に位置するボーリング孔DH-15(図-3(a)参照)において、立坑掘削深度400m時点で観測された実測値126mを全水頭固定境界として与えている。また、図-6に示すように全水頭観測センサーとしてMSB-3孔#7センサー(主立坑水平相対距離47.0m, G.L.-163.2m)および05ME06孔#1センサー(換気立坑水平相対距離44.3m, G.L.-178.0m)を設定した。

本解析においては、表層付近の堆積物(瀬戸層群)は考慮せず、図-6に示すように上部から堆積岩部(瑞浪層群)、30°以下の低角度傾斜の割れ目が卓越する花崗岩上部割れ目帯(土岐花崗岩)、その下位の比較的割れ目密度が低い花崗岩下部割れ目帯(土岐花崗岩)の3層構造からなる領域を設定する^{8) 11)}。なお、各層の境界は両立坑において推定、もしくは確認された地層境界の遭遇深度に基づき、水平に分布するという仮定を設けた。

4. 解析結果と考察

(1) 全水頭分布からみたDFNモデル精度

ここでは、地下水流動解析によって得られたセンサーにおける全水頭分布と実測値とを比較することで、全水頭値という解析領域の一点の値からDFNモデルの精度に関して議論する。図-7はDS-0における主立坑の切羽の掘削深度と、それに伴うセンサー位置における全水頭分布の変動を示している。同図に示すように、立坑切羽が全水頭観測センサーを通過するとともに全水頭分布は大きく低下し、ばらつきに関しても大きくなる。ここで、本研究で突発湧水リスク評価を実施した掘削深度400m

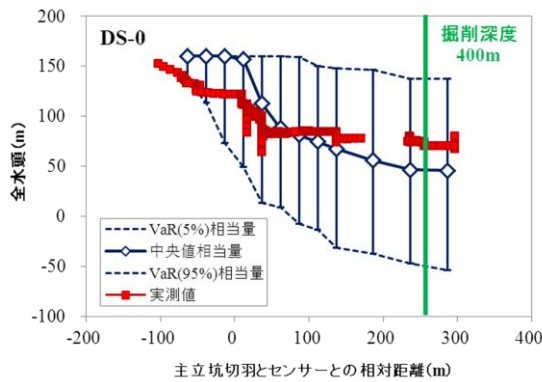


図-7 主立坑掘削深度と MSB-3 孔#7 センサー

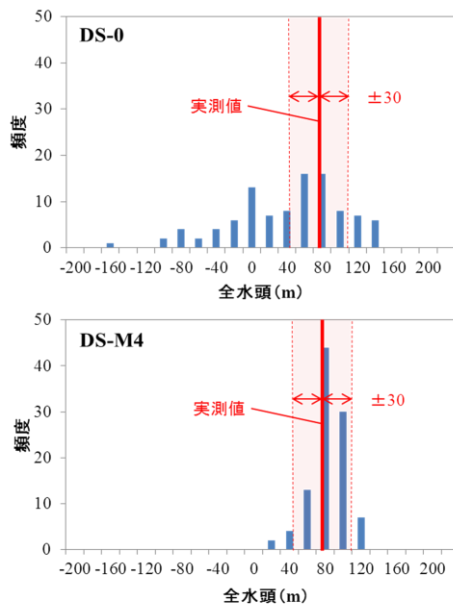


図-8 全水頭分布 (立坑深度 400m 掘削時)

時点でのDS-0における全水頭分布を図-8に示す。DS-0の段階では実測値に対して全水頭値のばらつきが大きかったが、後述するように最終段階のDS-M4段階では実測値まわりに分布し、ばらつきに関しても小さくなっている。ここで、DFNモデルの精度を定量的に議論するために、最も信頼性の高いDS-M4段階での全水頭の分布が実測値±30mの範囲に100ケース中約80ケースおさまるということを基準として、他のDSについても全水頭分布が実測値±30mの範囲にどの程度おさまるかについて示す。

図-9からは全体的な傾向として地質データが蓄積され、モデルの精度が向上していることが読み取られる。これはデータの蓄積により各段階のDFNモデルがより実際の地盤条件を反映していることを意味している。

ただし、DS-0～DS-R、あるいはDS-M2～DS-M3のようにデータセットが更新しているにもかかわらず、モデルの精度が一時的に低下している場合がある。この理由として、DS-0～DS-Rでは反射法弾性波探査、DS-M2～DS-M3では孔間トモグラフィー探査等により面情報が追加され

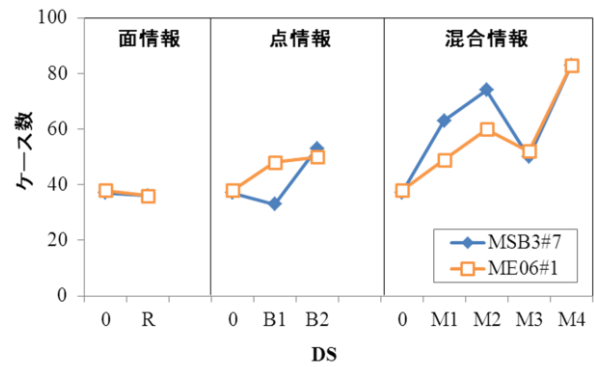


図-9 全水頭分布からみた DFN モデルの精度の変動

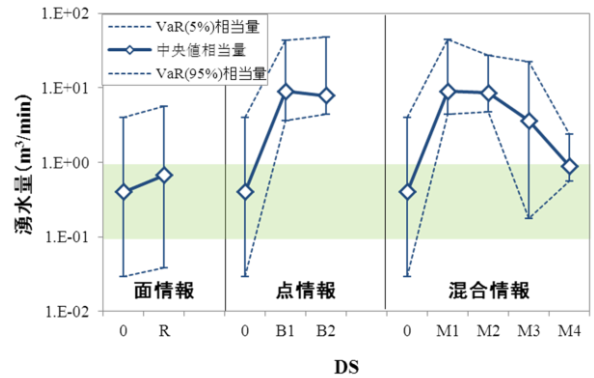


図-10 湧水量分布からみた DFN モデルの精度の変動

たことで、透水量係数が未知の決定論的亀裂が多数モデル化されたことがあげられる。但し、同図に示すように精度の低下は一時的なものであり、ボーリング調査等により透水量係数の情報が追加されると精度が改善することが示されている。

(2) 突発湧水リスクの変動に関する解析結果

突発湧水リスクを評価する前に、湧水量（ここでは、主立坑と換気立坑に流入した総量を示す）という観点からもDFNモデルの精度に関して検討する。図-10は湧水量という観点からDFNモデルの精度の変動を示している。なお、図の網掛けの部分については、実際に立坑内で観測された湧水量の実測値($10^{-1} \sim 10^0 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度)を表している。DS-0およびDS-R等の初期のDSにおいて湧水量の中央値が実測値をとらえているようにみえるが、これは表-2に示すように単純に初期のモデルで決定論的亀裂のモデル化本数が少なかったためである。また、点情報の追加が行われたDS-B1およびB2においては表-2より、透水量係数が推定されている決定論的亀裂がモデル化されたにも関わらず実測値から大きく外れているという結果が得られている。これは表-2に示すように、決定論的亀裂における未知の透水量係数の減少により分布のばらつきは減少したが、モデル化した決定論的亀裂が立坑への湧水に対して支配的であったことが原因であると推察される。混合モデルをみると最終的にばらつきは小さく

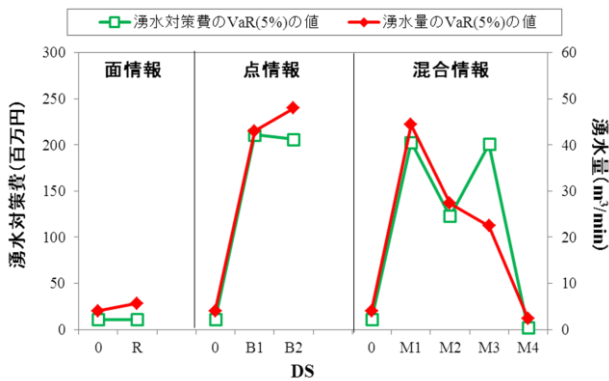


図-11 湧水量と湧水対策費の VaR(5%)の変動

なり、実測値付近をおおよそ捉えていると考えられ、DFNモデルの精度に関して(1)と同様のことがいえると推察される。

図-11において、上述した全水頭および湧水量の観点からのDFNモデルの精度を踏まえて考えると、初期段階における湧水リスクは小さい値をとるが、モデルの精度そのものが低いと考えられるので、モデルの精度が最も高いと考えられるDS-M4でのリスクの値と同等に扱うことはできない。また、DS-B1,B2,M1等で湧水リスクは高まるが、これは上記の湧水量の精度に関する記述で述べたことと同じ理由であると考えられる。なお、DS-M3で湧水対策費が湧水量と別の挙動を示しているのは、立坑に露出した決定論的亀裂が支配的要因となり、表-3に示す一本あたりの湧水量が非常に多くなるため、結果的に湧水対策費が多額になっているものと推察される。

5. まとめ

本研究では事後評価の観点から、DFNモデルの精度について検討を加え、その精度に基づく突発湧水リスク評価を行った。このモデルの精度という概念を取り入れることで、図-2の概念図のように不十分な断層評価段階における突発湧水リスクの過小評価、あるいはリスクが一時的に増加する結果に対して説明することが可能となった。

また、点情報あるいは面情報によってのみ構築されるDSを構築することで、図-11に示すようにそれぞれの地質情報がどのように突発湧水リスクの変動に影響を及ぼすかを確認した。これにより、今後事後評価の観点から最適な地質調査方法に関して検討する際にも、モデルの精度という概念を用いることで、突発湧水リスクをより定量的に扱えることが可能になった。

参考文献

- 野口悠紀夫：金融工学、こんなに面白い、文春新書、2000。
- 大津宏康：リスク工学と地盤工学-5。ジオリスクエンジニアリング、土と基礎、52(7)、pp.27-34、2004。
- 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、193-205、2002。
- 大津宏康、尾ノ井芳樹、大西有三、高橋徹、坪倉辰雄：力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究、土木学会論文集、No. 756/VI-62、pp.117-129、2004。
- 近藤達敏：地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価、応用地質、第40巻、第6号、pp.340-345、2000。
- 山下智志：市場リスクの計量化とVaR、朝倉書店、2000。
- 大津宏康、有菌大樹、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一考察、土木学会論文集F4(建設マネジメント)特集号、pp.77-90、2010。
- 三枝博光 et al.：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書、JAEA-Research 2007-043、2007。
- 大津宏康、坂井一雄、井尻祐二、下野正人、本島貴之：亀裂性岩盤におけるトンネル掘削に伴う突発湧水リスク評価、材料、Vol.55、No.5、pp.464-470、2006。
- 井尻祐二、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利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。
- 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質、瑞浪市化石博物館専報、No.1、pp.1-50、1980。

A STUDY ON THE MEANING OF GEOLOGICAL INVESTIGATION FOCUSING ON WATER INRUSH FROM VIEWPOINT OF GEOLOGICAL RISK

Hiroyasu OHTSU, Junnosuke OKAWA, Ryuji TAKEUCHI,
Hiromitsu SAEGUSA and Yasutaka OTA

This study focused on the meaning of geological investigations on the geological risk, focusing on the risk caused by water inrush into underground structures such as tunnels/shafts constructed in discontinuous rock masses. In detail, water inrush evaluation using Discrete Fracture Network Model has been conducted focusing on what kind of geological investigation contributes to mitigation of losses due to geological risk. As a result, it is pointed out that it becomes possible to reduce a geological risk by accumulation of the further geological investigation although the risk increases temporarily by some geological investigation.