

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

京都大学大学院 大津 宏康*¹
 京都大学大学院 (現: 電源開発株式会社) 有菌 大樹*²
 日本原子力研究開発機構 三枝 博光*³
 By Hiroyasu Ohtsu, Hiroki Arizono, Hiromitsu Saegusa

近年, PFI (Private Finance Initiative) 方式, あるいはPPP (Public Private Partnership) 方式の導入に代表される社会基盤構造物の調達方式の変化に伴い, 世界規模で予見できない地質条件に対するリスク対応としての契約に関する議論が活発化しつつある. その議論においては, 建設プロジェクトの事業者と請負者間での適切な地質リスク分担ルールを設定するためには, 入札時にどの程度の地質条件を提示することが必要となるかといった点が注目されている. 概念的には, 建設プロジェクトの実施に当たり地質調査データを蓄積することにより地質リスクを低減されることは理解されるが, そのデータ蓄積がリスク低減にどのような効果を果たしたかについて定量的かつ明示的に示した研究事例は必ずしも多いとは言えない.

このような観点から, 本研究では, 欧米における地質リスク対応としての入札および契約に関する動向を紹介するとともに, それに関連する事項として入札時にはどの程度の地質条件を提示することが必要となるか, あるいは地質リスク対応としてはどのような契約が適切であるかという課題について解説を加えるものとする. 具体的には, 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事例として取り上げ, 不連続性岩盤サイトにおける突発湧水を対象とした地質調査データを蓄積することの価値に関して考察を加える. なお, 突発湧水が発生する危険性の検討においては, 不連続亀裂ネットワークモデルを用いた地下水流動解析を実施した.

【キーワード】地質リスク, 不連続性岩盤, 地質調査

1. はじめに

トンネル・山留め掘削・地下空洞等の地下掘削工事, および杭に代表される基礎工事等においては, 調査段階にボーリング調査あるいは弾性波探査等により地下の地質条件を明らかにするための調査が実施される. しかし, 工事の規模にも依存するが, 一般的には地質調査に割り当てられる予算制約のため, 事前に地質条件をすべて明らかにすることは不可能である. このため, 地下を対象とした掘削工事および基礎工事においては, 想定外事象への対策工などの

ために工期遅延およびコストオーバーランが生じる危険性がある. 本研究においては, この予算制約により地質条件を事前に明らかにできないことにより, 建設プロジェクトの実施に際して好ましくない事態 (遅延・コスト増) を引き起こすリスク要因を, 地質リスクと称する. なお, 本研究で対象とする地質リスクは, 欧米の建設プロジェクトリスクマネジメント分野においては, 予見できない地質条件¹⁾ (Unforeseeable geological condition) と称され, 建設プロジェクトにおいて重大な損失を発生させるリス

*1 工学研究科 075-383-3260 ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

*2 茅ヶ崎研究所土木技術研究室 0467-88-7854 Hiroki_Arizono@jpower.co.jp

*3 地層処分研究開発部門 0572-66-2244 saegusa.hiromitsu@jaea.go.jp

表－1 代表的建設契約約款における地質リスクの分担ルール²⁾

契約約款	発注形式	地質リスク分担	
		事業者	請負者
公共工事標準請負契約約款	設計・施工分離	○	
FIDIC Red	設計・施工分離	○	
FIDIC Yellow	設計・施工一括	○	
FIDIC Silver	EPC／ターンキー		○

ク要因の一つとして分類されている。

この地質リスクに起因する損失は、筆者ら²³⁾が指摘してきたように、従来は設計・施工分離の建設契約では資金力を有する事業者によって負担され、請負者によるリスク分担は回避されてきたと解釈される。また、事業者も、大量かつ多様な工種の建設工事を発注することで一種のポートフォリオ⁴⁾が形成されていたため、地質リスクに起因する損失を低減のために詳細な地質調査を実施することのインセンティブが生じなかったとも解釈される³⁾。

しかし、近年 PFI (Private Finance Initiative) 方式あるいは PPP (Public-Private-Partnership, 以下 PFI および PPP を PPP と統一して表記する) 方式の導入に代表される社会基盤構造物の調達方式の変化に伴い、地質リスクに関する取扱い、主として契約に関する新たな議論が活発化しつつある。具体的には、従来は主として事業者に分担されてきた地質リスクに関する分担ルールをどのように設定するか、加えてその新たなリスク分担ルールを適用するためには、入札時にはどの程度の地質条件を提示することが必要となるかである。この背景には、PPP 調達方式での事業者となる特定目的会社の財務力が、従来の事業者であった政府機関に比べて劣ることが挙げられる。このため、PPP 調達方式での事業者は、リスク分担率の低減、およびプロジェクトのトータルコスト低減の観点からの地質調査コストの抑制を図ることになると推察される。なお、この話題に関して、日本では必ずしも活発な議論がなされていないが、後述するように欧米の学協会では主要な検討課題の一つとなっている。

上記の背景を踏まえて、本研究では、世界規模で地質リスク対応としての契約に関する議論が活発化しつつあることを踏まえて、欧米における地質リスクに関する研究動向を紹介するとともに、その流れ

の中で調査に伴う地質リスクの変動を定量的に評価するとともに、入札時にはどの程度の地質条件を提示することが必要となるかに加えて、どのような契約を実施すべきかについて解説を加える。また、具体的な定量評価の事例としては、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事例として取り上げ、岩盤水理分野における主要なリスク要因である不連続性岩盤サイトにおける突発湧水を対象とした地質調査データを蓄積することの価値に関して考察を加える。ここで、突発湧水が発生する危険性については、不連続亀裂ネットワークモデルを用いた地下水流動解析結果に基づき検討した。

2. 欧米における地質リスクに関する研究動向

表－1 は、筆者ら²⁾の分析による代表的な建設請負契約（公共工事標準請負契約約款⁵⁾、および海外工事において通常適用されている FIDIC^{6)・8)}）における地質リスク分担ルールの要約を示す。同表に示すように、EPC／ターンキーを対象とした FIDIC Silver を除いたいずれの請負契約約款においても、地質リスクは事業者により負担されることが明示されているものと解釈される。

ここで、表－1 に示す FIDIC Silver における地質リスク分担ルールについては、筆者らの解釈によるものであり、以下の事項について留意する必要がある。すなわち、FIDIC Silver のガイドラインにおいては、この約款を適用することが不相当である場合に関する記述もあり、条件が整わない場合でもすべてのリスクを請負者に分担させることを戒めている。しかし、地質リスクをどのように取扱うかについては、明示的に記述されていない。しかし、現状では欧米では PPP 方式のプロジェクトにおける地質リスクをどのように取扱うかが重要な検討課題となってきた

表—2 第 36 回 ITA 総会・コンgress Open Session のプログラム

Ground Reference Information for Bidding Tunnel Projects – Current Practice, Shortcomings / Benefits and Future Challenges	
08:45 – 08:50	Introduction
08:50 – 09:10	Requirements Concerning Geotechnical Investigations and Reports for a Minimization of Risks in Tunnelling
09:10 – 09:30	Client View
09:30 – 09:50	Bringing Certainty to the Unknown: The Role of Law in the Apportionment of Underground Construction Risks
10:30 – 10:50	International Experience Contractors View
10:50 – 11:10	Ground Reference Requirements for EPBs / Experiences
11:10 – 11:30	Risk Sharing: Planners / Clients' View
11:30 – 11:50	Experiences / Contractors View
11:50 – 12:00	Discussion

注) Open Session Web ページ (http://www.wtc2010.org/02-opensession_e.shtml#open) を修正

いる。

その事例として、以下に示す世界トンネル協会 ITA (International Tunnelling Association) の年次総会における Open Session での Discussion Theme を挙げられる。

1) 第 33 回 ITA 総会・コンgress (2007)

"New financing trends and consequences on the tunnelling contracts"

2) 第 36 回 ITA 総会・コンgress (2010)

"Ground Reference Information for Bidding Tunnel Projects - Current Practice, Shortcomings/Benefits and Future Challenges"

また、第 36 回 ITA 総会・コンgressにおける Open Session での詳細プログラムを、表—2 に示す。

現在、上記に示すように、いずれの Open Session においても、トンネルを対象とした契約 (Contract)、入札 (Bidding) および入札において提示される地質条件に関する事項が取扱われている。さらに、ここで注目すべきことは、表—2 に示すように、地質リスクに関して、事業者の観点 (Client View) と請負者の観点 (Contractors View) の両者から意見が提示されるとともに議論されていることである。これらは、近年ヨーロッパにおいては、EU 内での鉄道整備事業がすすめられており、その多くが PPP 方式で調達さ

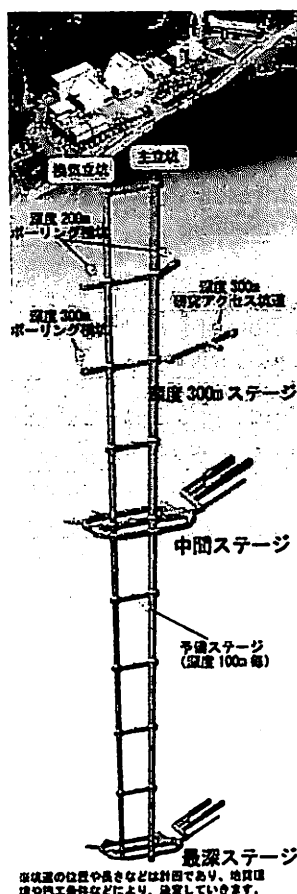
れていることに起因する。このため、PPP 方式の導入より、表—1 に示す地質リスクの分担ルールの変化が重要な検討課題となっているものと推察される。

なお、前述のように、日本においてはこのような新たな社会基盤構造物の調達方式導入に伴う地質リスクを対象とした契約管理に関する議論は、必ずしも活発ではない。しかし、今後日本の事業者が PPP 方式の海外建設プロジェクトへの参画の機会が増加することが想定される中、当該分野の研究は今後その重要性が増すものと推定される。

3. 地質データセットの構築事例

概念的には、建設プロジェクトの実施に当たり地質調査データを蓄積することにより地質リスクを低減されることは理解されるが、そのデータ蓄積がリスク低減にどのような効果を果たしたかについて定量的かつ明示的に示した研究事例は必ずしも多いとは言えない。

この理由は、前述のように地質調査に割り当てられる予算制約により、段階的に詳細な調査が実施されることが極めて稀であるため、その調査データの蓄積が地質リスクの低減に寄与するプロセスを明示的に把握することが困難であることによる。



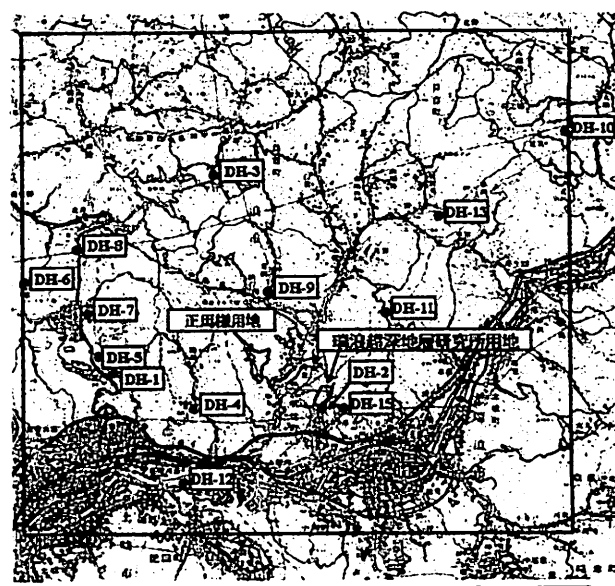
図一1 瑞浪超深地層研究所の研究坑道イメージ図

このような観点から、本研究においては、図-1 に示す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事例として取り上げる。同工事における立坑の掘削予定深度は1,000mであり、2010年2月現在では、深度450m程度までの両立坑の掘削やその深度までの水平坑道群の掘削が完了している。

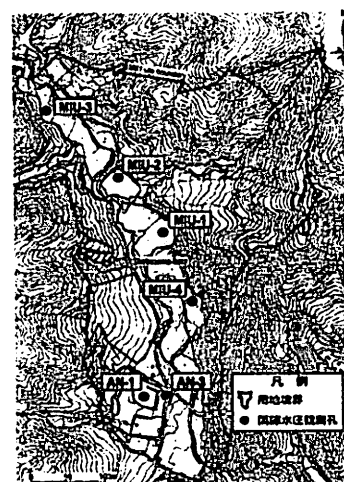
(1)対象サイトにおける原位置調査データセット

本工事は、単なる立坑掘削ではなく、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、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤を整備するために実施されているものである。このため、図-2および表-3に示すように、段階的に各種地質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に基づきデータセット0～データセット7として、計8種類のデータセットが蓄積されている。詳細な調査項目については、参考文献9)および10)を参照されたい。

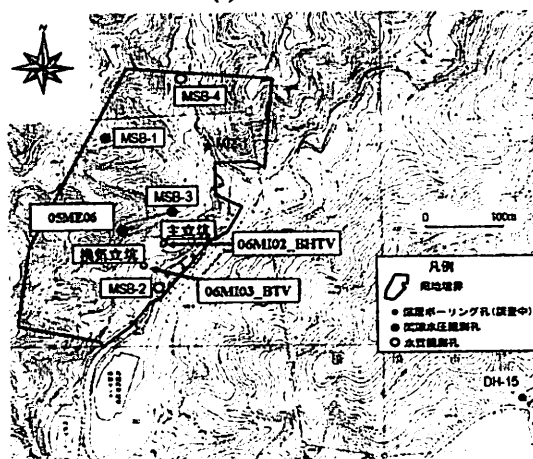
なお、同地域の地質・地層構造は上位から堆積物（瀬戸層群），堆積岩（瑞浪層群），および基盤岩



(8)全体位置図



(b)正馬様用地



(c) 瑞浪超深地層研究所用地

図-2 ボーリング孔位置

(土岐花崗岩)の3つに大きく区分される¹⁰⁾¹³⁾。さらに、基盤岩である土岐花崗岩は、30°以下の低角度傾斜の割れ目が卓越する岩盤(以下、花崗岩上部割

表—3 データセットと調査項目

	調査項目	データ取得地点
データセット 0	既存情報の収集	ボーリング孔 (DH-4, DH-9, DH-11, DH-12, MIU-1)
データセット 1	露頭調査 反射法弾性波探査	データセット 0 と同様
データセット 2	既存ボーリング調査 浅層ボーリング調査	データセット 0 + ボーリング孔 (DH-2)
データセット 3	深層ボーリング調査	データセット 2 + ボーリング孔 (DH-15, MIZ-1)
データセット 4	孔間水理試験 孔間トモグラフィ探査	データセット 3 と同等
データセット 5	立坑壁面観察 (堆積岩部) 先行ボーリング調査 (深度 500m まで)	データセット 4 + ボーリング孔 (06MI02, 06MI03)
データセット 6	立坑壁面観察 (花崗岩部, 深度 300m まで)	データセット 5 +立坑内壁面 (深度 200m~300m)
データセット 7	水平坑道壁面観察 (深度 300m ステージ)	データセット 6 と同等

れ目帯と称す) と, その下位の比較的割れ目密度が低い岩盤 (以下, 花崗岩下部低密度割れ目帯と称す) の 2 つに区分されている¹⁰⁾。

表—3 に示すように, 本サイトで実施された地質調査項目は, 主に以下のように分類される。

- 1) 既存情報の収集
- 2) 反射法弾性波探査
- 3) ボーリング調査 (浅層・深層)
- 4) 孔間水理試験・孔間トモグラフィ試験
- 5) 先行ボーリング調査
- 6) 立坑掘削
- 7) 水平坑道掘削

なお, 上記 5) は, 図—2(c)において 06MI02 孔および 06ME03 孔と表記した, それぞれ掘削途中の主立坑, および換気立坑の深度約 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を用いたものである。

(2)地質リスク評価に関する基本思想

ここで, 本サイトで蓄積された表—3 に示すデータ

セット (調査項目) は地質調査を目的としたものであることから, 通常のトンネル等の地下工事において一般的に実施される地質調査との比較を行う。

通常のトンネル等の地下工事では, 表—3 に示す既存情報の収集に相当する机上調査, 数量が限定されたボーリング調査および反射法弾性波探査での調査結果に基づき基本設計がなされることが一般的である。このため, 通常のトンネルの設計に用いられる地質情報は, 表—3 に示す内容ではデータセット 0～データセット 2 もしくはデータセット 3 に相当することになる。また, データセット 4 の孔間水理試験・孔間トモグラフィ探査については, 事前に不良地山に遭遇することが懸念される場合を除いて, 調査段階で実施されることは稀である。さらに, データセット 5 の先行ボーリング調査を実施することで, 理論的には掘削する領域の地山条件を事前に明らかにすることが可能となるが, 実際の工事において実施されることはほとんどない。

ここで, 本研究における地質リスクに関する検討の基本思想について明らかにする。不連続性岩盤に

立坑やトンネルを掘削する場合には、力学的な安定性のみを検討するのであれば、先行ボーリング調査を実施することで、事前に掘削する領域の地質条件を明らかにすることが可能であると考えられる。したがって、力学的安定性評価の観点からは、入札時に提示すべき地質条件は、机上調査である表—3 に示すデータセット 0 と先行ボーリング調査結果に基づく分析結果が最適であると解釈される可能性が高い。しかし、不連続性岩盤に立坑やトンネルを掘削する場合には、前述の力学的安定性評価に加えて、岩盤水理学の観点から、掘削に伴い突発湧水が発生する危険性（以下突発湧水リスクと称する）を検討することも重要な検討事項となる。この際には、地下水流動解析を通じた場の評価が必要となるため、岩盤内での点情報あるいは線情報となる先行ボーリング調査結果のみでは対応可能であるか否かが疑問となる。さらに、突発湧水リスクを対象とした地下水流動場の評価においては、表—3 のデータセットに示すような地質情報の蓄積が、どのような効果を果たしているかが工学的に重要な関心事項となるはずである。

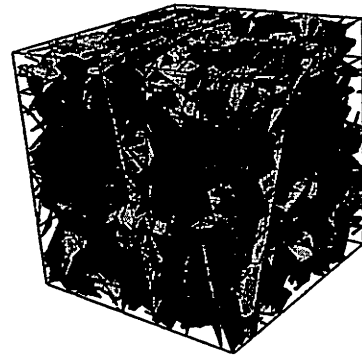
このような観点から、本研究では、次章において、表—3 に示すデータセット毎に得られている解析用物性値を用いて、地下水流動解析を実施する。さらに、その結果に基づき、不連続性岩盤サイトにおける突発湧水リスクを対象とした地質調査データを蓄積することの価値に関して考察を加える。

4. 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—3 に示すデータセット毎に得られている解析用物性値を用いて、地下水流動解析を実施する。

(1) 原位置調査データに基づく 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。また、それらのデータに基づき、不連続亀裂ネットワーク（以下 DFN（Discrete Fracture



図—3 DFN モデルの一例

Network) と称する) モデルを構築するが、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¹¹⁾。

まず、決定論的亀裂とは、露頭調査、あるいはボーリングコア観察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断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、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基に、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、確率論的亀裂のモデル化における各種亀裂特性パラメータは、亀裂の方向分布、亀裂の形状、亀裂の大きさの分布、亀裂の頻度分布、亀裂の空間分布、亀裂の破碎幅、および亀裂の透水量係数であるが、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 12)を参照されたい。

そして、決定論的亀裂に確率論的亀裂を重ね合わせることで、図—3 に示すような DFN モデルを構築する。

具体的には、表—3 に示すデータセットのように原位置調査が段階的に実施されている場合には、各調査段階において得られる決定論的亀裂、および確率論的亀裂に関する情報が更新されると解釈される。そのため、各調査段階で構築される DFN モデルが変更されることに留意されたい。

表-4 立坑深度 $X[m]$ と全水頭固定境界 $H[m]$

立坑深度 $X[m]$	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$H[m]$ (DS0-5)	160	160	160	160	160	160	160	160	160
$H[m]$ (DS6,7)	160	150	148	148	139	135	135	135	134

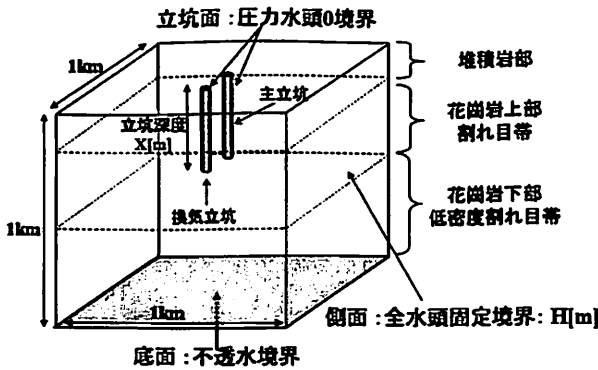


図-4 解析領域および境界条件

(2) 地下水流動解析条件

(1)で示した調査段階ごとに構築した 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、複数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 n ケース構築し、そのケース数に相当する回数（以下、リアライゼーション回数と称す）の地下水流動解析を実施する。
- 2) リアライゼーション毎の解析結果において、立坑に露出する亀裂1本毎の湧水量を抽出し、その量を合計し総湧水量とする。

構築したデータセットに基づき、DFNモデルを作成するが、そのためにはモデル化を行う領域や境界条件を設定する必要がある。その模式図を図-4に示す。同図に示すように、解析領域としては主立坑を地表面の中心とする1,000m×1,000m×1,000m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）間の水平距離はおよそ40mである。なお、深度300mまでの両立坑掘削が完了していることから、立坑深度 $X[m]$ を随時増加させることによって、深度300mまでの地下水流動解析を実施する。

本解析においては、表層付近の堆積物は考慮せず、図-4に示すように上部から堆積岩、花崗岩上部割れ目帯、および花崗岩下部低密度割れ目帯の3層構造からなる領域を設定する。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、解析領域に水平に分布するという仮定を設けた。

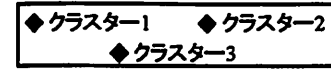


図-5 クラスター分析結果の一例
(花崗岩上部割れ目帯、データセット3)

境界条件については、解析領域の上面は自由浸透境界、側面は全水頭固定境界、下面は不透水境界、立坑面を圧力水頭 0 境界と設定する。また、立坑の掘削深度 $X[m]$ は、掘削の進展を表現するために、両立坑において深度 100m から 300m まで 25m 間隔で逐次立坑深度を増加させる。その際、側面の全水頭固定境界 $H[m]$ は表-4 に示すように与えるものとする。つまり、データセット 0 から 5 ではいずれの立坑深度においても原位置調査結果に基づき、 $H=160m$ の固定水頭を与える。一方、データセット 6、および 7 では、実際の施工の進展に伴って、解析領域の端に位置するボーリング孔 DH-15（図-2 参照）において全水頭の低下が確認されているため、DH-15 孔における全水頭変化と合致するように表-4 のように全水頭固定境界を設定した。

(3) 亀裂特性パラメータ

各データセットにおける確率論的亀裂のモデル化に必要なパラメータについて、以下に概略を示す。なお、詳細については、参考文献 9)、11)を参照されたい。

a) 亀裂の方向分布

表-5 Bingham 分布におけるパラメータ

地質構造	クラスター		DS0,1	DS2	DS3,4	DS5	DS6,7
堆積岩部	クラスター1	平均走向[°]	95.20	DS1 と同等	92.97	DS3 と同等	DS3 と同等
		平均傾斜[°]	5.85		13.84		
		分散係数 κ_1	-8.88		-6.50		
		分散係数 κ_2	-6.12		-1.90		
	クラスター2	平均走向[°]	342.52		179.64		
		平均傾斜[°]	11.48		7.08		
		分散係数 κ_1	-10.67		-12.39		
		分散係数 κ_2	-3.84		-4.09		
	クラスター3	平均走向[°]	168.50		196.59		
		平均傾斜[°]	88.74		87.47		
		分散係数 κ_1	-6.63		-7.16		
		分散係数 κ_2	-6.34		-6.40		
花崗岩上部 割れ目帯	クラスター1	平均走向[°]	139.34	30.91	41.20	343.34	33.60
		平均傾斜[°]	14.82	63.24	65.77	10.03	9.18
		分散係数 κ_1	-2.63	-3.88	-5.24	-2.99	-10.27
		分散係数 κ_2	-1.36	-2.15	-2.95	-1.48	-5.66
	クラスター2	平均走向[°]	22.03	159.07	182.57	249.04	141.38
		平均傾斜[°]	21.43	28.55	32.03	23.96	0.48
		分散係数 κ_1	-11.97	-7.59	-7.38	-25.15	-11.12
		分散係数 κ_2	-8.67	-6.93	-2.88	-6.47	-2.90
	クラスター3	平均走向[°]	324.62	224.95	314.75	190.55	292.01
		平均傾斜[°]	86.06	33.29	24.68	82.67	86.04
		分散係数 κ_1	-11.37	-12.26	-19.53	-10.74	-10.96
		分散係数 κ_2	-7.86	-5.86	-3.70	-5.93	-6.86
花崗岩下部 低密度 割れ目帯	クラスター1	平均走向[°]	27.82	DS1 と同等	170.84	DS3 と同等	DS3 と同等
		平均傾斜[°]	74.36		45.63		
		分散係数 κ_1	-4.53		-5.28		
		分散係数 κ_2	-1.85		-4.56		
	クラスター2	平均走向[°]	235.43		8.15		
		平均傾斜[°]	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3	平均走向[°]	83.03		251.66		
		平均傾斜[°]	18.57		1.47		
		分散係数 κ_1	-24.78		-7.45		
		分散係数 κ_2	-7.51		-3.97		

対象サイトにおいて広く分布している花崗岩は、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¹⁴⁾¹⁵⁾。当該サイトにおける原位置調査から得られる亀裂の方向分布の傾向について、図-5 に示す一例のようにシュミットネットを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傾向が確認されたため、クラスター分析により 3 群の亀裂特性を算出する。

また、亀裂の方向分布を与える式としては、亀裂群が必ずしも等方的な分布ではなかったため、楕円

状や帯状の分布をモデル化するのに適した次式に示す Bingham 分布に従うものとした。

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

$$(0 \leq \phi' \leq \pi, 0 \leq \theta' \leq \pi)$$

ここで、 ϕ' は亀裂の卓越方向からの偏向角[rad]、 θ' は亀裂の卓越方向からの方位角[rad]、 κ_1 、 κ_2 は Bingham 分布パラメータである分散係数を表す。また、各データセットの各クラスターにおける Bingham 分布のパラメータを表-5 に示す。

b) 亀裂の形状

表－6 3次元亀裂頻度 $\rho_{32}[\text{m}^2/\text{m}^3]$ の設定

データセット		DS0,1	DS2	DS3,4	DS5	DS6,7
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
	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
	クラスター2	0.003607	0.005047	0.005854	0.005672	0.020865
	クラスター3	0.021391	0.002459	0.006081	0.004398	0.004830
	合計	0.04375	0.040083	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
	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		

実際の亀裂の形状は多種多様であるが、本研究では平面としてモデル化を行った。なお、決定論的亀裂については、平面を組み合わせることで屈曲構造を表現している。また、亀裂の形状は円盤、もしくは多角形としてモデル化することが一般的であり、本研究では円盤モデルを採用した。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変換してモデル化を行った。

c) 亀裂の半径分布

亀裂の半径分布には、次式に示すべき乗分布を採用した。

$$f(r) = (b-1) \cdot r_{\min}^{b-1} \cdot r^{-b}, \quad r \geq r_{\min} \quad (2)$$

ここで、 r は亀裂半径、 $r_{\min}$ は最小亀裂半径、 b はべき乗指数を表す。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 $r_{\min}$ は 60m、べき乗指数 b は 4.3 と設定した¹⁶⁾。

d) 亀裂の頻度分布

解析領域の最上部に位置する堆積岩部における 3 次元亀裂頻度 $\rho_{32}[\text{m}^2/\text{m}^3]$ は、リニアメントから得られた観測結果および既往研究におけるトレース長分布を参考に、キャリブレーションにより $0.02[\text{m}^2/\text{m}^3]$ と推定されている。

ここで、亀裂の 3 次元亀裂頻度 $\rho_{30}[\text{本}/\text{m}^3]$ は、次式により推定した。

$$\rho_{30} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho_{10}}{\langle r \rangle^2} \quad (3)$$

ここで、 ρ_{10} は 1 次元亀裂頻度[本/m]、 $\langle r \rangle$ は亀裂半径の期待値である。亀裂の半径分布を c) で述べたべき乗分布 $f(r)$ と仮定すると、以下の式が成り立つ¹⁶⁾。

$$\frac{\rho_{32}}{\rho_{30}} = \int_r^\infty \pi^2 f(r) dr \quad (4)$$

ここで、 ρ_{32} は 3 次元亀裂頻度[m^2/m^3]である。式(3)、および式(4)より、3 次元亀裂頻度は以下の式で表される。

$$\rho_{32} = \frac{4\pi(b-2)^2}{(b-1)(b-3)} \cdot \rho_{10}, \quad (b > 3) \quad (5)$$

つまり、べき乗指数 b が 3 より大きいならば、3 次元亀裂頻度 $\rho_{32}[\text{m}^2/\text{m}^3]$ はボーリング孔などで観測可能な 1 次元亀裂頻度 $\rho_{10}[\text{本}/\text{m}]$ に正比例する。本研究では、べき乗指数 b を 4.3 と設定しているため、原位置調査によって観測された 1 次元亀裂頻度 $\rho_{10}[\text{本}/\text{m}]$ と、堆積岩部における 3 次元亀裂頻度 $0.02[\text{m}^2/\text{m}^3]$ の相対的な関係から、表－6 のように 3 次元亀裂頻度 $\rho_{32}[\text{m}^2/\text{m}^3]$ を設定した。

e) 亀裂の空間分布

大規模な亀裂の周辺には、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ており、この亀裂の疎密構造を表現するモデルも存在する。しかし、本研究では、亀裂の疎密構造は取り扱わず、亀裂の空間分布はランダムと仮定し、亀裂の中心位置分布はポアソン過程に基づく Baecher モデル¹⁷⁾を採用した。

f) 亀裂の破碎幅

亀裂の破碎幅には、次式に示す大野・小島の経験式を用いて決定する。

$$\log L = 2.7 + 0.70 \times \log W \quad (6)$$

ここで、 L は亀裂の大きさ、 W は亀裂の破碎幅を表す。

表-7 透水量係数分布のパラメータ

データセット	DS0,1	DS2	DS3,4	DS5	DS6,7
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

g) 亀裂の透水量係数

亀裂の透水量係数は、原位置調査によって得られた実測値に基づく対数正規分布から与えた。各データセットに与えた透水量係数の対数正規分布パラメータを表-7に示す。なお、透水量係数データの更新がなかったデータセット 1, 4, および 7 では、それぞれ前のデータセットと同様の対数正規分布を与えた。なお、透水量係数の推定されていない決定論的亀裂に関しても、確率論的亀裂と同様の対数正規分布を与えてモデル化していることに留意されたい。

5. 解析結果および考察

既に掘削が完了している、深度 300m までの主立坑および換気立坑の掘削工事に関して、地下水流動解析の結果および考察を以下に示す。

なお、モンテカルロシミュレーションのリアライゼーション回数は、いずれのデータセットにおいても 50 回と設定した。このため、算定される物理量（湧水量・全水頭等）は確率量として得られるため、それらを図-6に示すリスクカーブとして表現するとともに、突発湧水リスクの評価指標として VaR を用いる¹⁸⁾。ここで、リスクカーブは、主として金融工学分野で用いられるリスク表現方法の1つであり、あるコストとそのコストの超過確率を関連付けるものである。その確率分布特性を表す VaR 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り、超過確率 $x\%$ に対するコストを $VaR(x\%)$ と定義する。本研究においては、図-6に示すように湧水対策コスト分布の代表値として、それぞれ $VaR(5\%)$ 、 $VaR(50\%)$ 、および $VaR(95\%)$ に着目する。

(1) 先行ボーリング情報に基づく解析結果

3. において述べたように、地下水流動解析を通じた場の評価においては、岩盤内での点情報あるいは線情報となる先行ボーリング結果のみでは対応可能

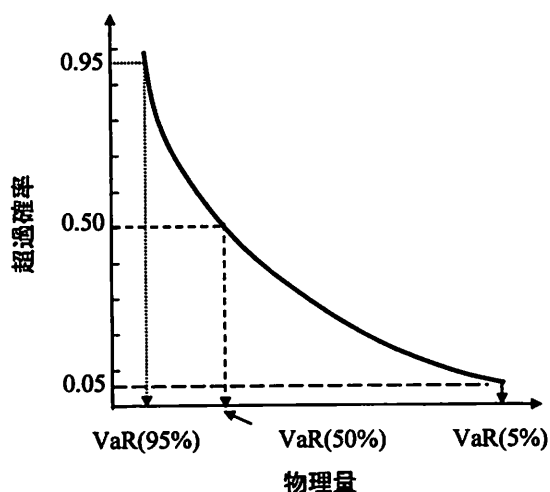


図-6 リスクカーブと VaR (バリュエットリスク)

であるか否かが疑問となる。この課題を研究するために、まず表-3に示すデータセット 0 と先行ボーリング情報（以下データセット Pilot と称す）に基づく解析を実施した結果を以下に示す。

データセット Pilot においては、花崗岩上部割れ目帯の方向分布、および亀裂の透水量係数は先行ボーリング調査に基づく統計量から、その他の情報については、データセット 0 と等価であると仮定する。なお、データセット Pilot の透水量係数は、対数正規分布により対数平均-7.12[log(m²/sec)]、対数標準偏差 0.74[log(m²/sec)]を与えた。

構築したデータセット Pilot の情報に基づき、DFN モデルを作成し、図-4に示す解析条件で地下水流動解析を実施した。なお、立坑深度 X は 300m、全水頭固定境界 H は 160m と設定した。その結果得られた立坑内湧水量分布を図-7に示す。

なお、原位置で観測された立坑内湧水量や、グラウトを実施しなかった場合の地下水流動解析による推定値¹⁹⁾は、両立坑の掘削深度 200m から 300m において、総湧水量（主立坑、および換気立坑からの立坑内湧水量の合計）が 10^{-1} から 10^0 [m³/min]の間で推移しているため、その間に立坑内湧水量の真値があると仮定される。図-7中の着色部は、この立坑内湧水量の観測値の真値が存在すると仮定される範囲であることから、図-7に示す結果より、先行ボーリング調査の情報のみでは、観測値と比較して非常に過小評価された湧水量が算出されたことになる。これは、先行ボーリングにおける水理試験結果の透水性が比較的低かったためである。

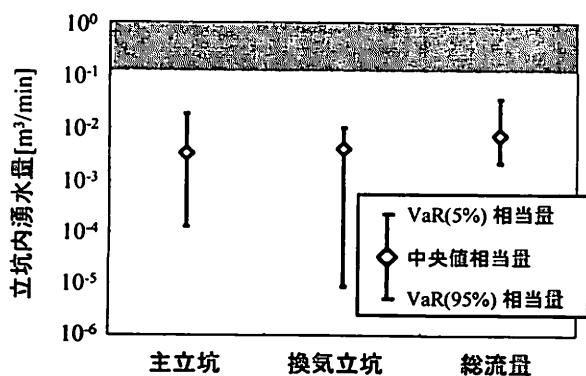


図-7 データセット Pilot の湧水量分布の算定結果

ここで、湧水を引き起こす地下水流れは、周辺の間からの地下水の供給を受けて、対象構造物に流入するものである。つまり、図-7 に示すデータセット Pilot における亀裂情報では、対象構造物上における亀裂情報しか取得できていないため、観測値と合致するような解析値が得られなかったと推察される。

以上の結果より、湧水は周辺の間から地下水の供給を受けて発生するため、単なる力学的安定性の評価とは異なり、先行ボーリングなどの対象構造物上の亀裂情報のみならず、対象構造物周辺の間における透水性などの亀裂特性を調査する必要があることが確認される。

(2) データセット情報に基づく解析結果

図-8 に、表-3 に示すデータセット情報に基づき、立坑深度 300m 時の立坑内総湧水量の観測値と解析値の比較を表す。なお、同図中の網掛け部は、前述の湧水量観測値の真値が存在すると仮定した範囲である。同図から、データセットの更新に伴い、湧水量のばらつきが低減し、更には湧水量分布が観測値に合致していく様子が分かる。特にデータセット 5 以降は、観測値と解析値が非常に良く合致している。データセット 5 では、原位置において先行ボーリング調査が実施され、それに伴い亀裂情報が更新された。つまり、データセット 4 までに蓄積された亀裂情報に加えて、先行ボーリングにおける亀裂情報を追加したデータセット 5 では、非常に精度良く立坑内湧水量分布を表現できたということである。この地質情報の蓄積に伴う観測値との乖離状況の変動は、以下のように要約される。

調査初期段階においては、データセット 0 から 1

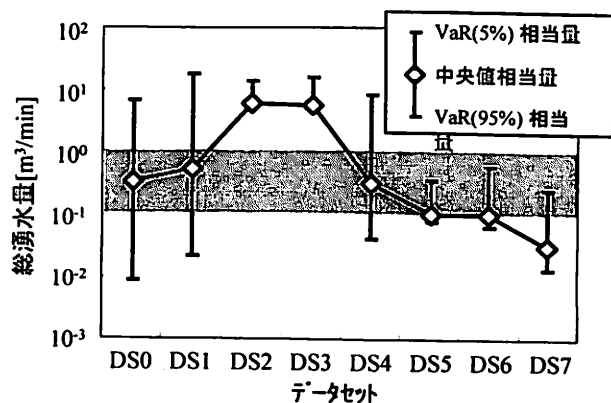


図-8 総湧水量の観測値と解析値の比較

にかけて湧水量分布のばらつきが増大している。この要因としては、亀裂情報が不足しており、適切な亀裂のモデル化がなされていない可能性が考えられる。また、いずれのデータセットにおいても、同等の亀裂特性パラメータで確率論的亀裂をモデル化しているが、乖離量分布のばらつきが増大したということは、決定論的にモデル化を行った大規模亀裂が大きな影響を与えていることが示唆されたと推察される。

次に、データセット 2 から 3 の調査中期段階においては、比較的透水性の高い大規模亀裂が発見されている。これら的大規模亀裂が直接坑道に露出することによって、VaR(95%)における湧水量が増大するという推定結果が得られる。これは、大規模亀裂と、確率論的にモデル化した中・小規模亀裂が水みちネットワークを形成することで、想定される湧水量が増加したものと解釈される。

さらに、データセット 4 の調査後期段階では、孔間水理試験が実施され、調査中期段階で推定された大規模亀裂の透水性の見直しが実施された。結果として大規模亀裂の透水性は低下し、原位置に即した大規模亀裂の透水性となり、推定される湧水量分布が更新したと解釈される。また、孔間トモグラフィによって、原位置における大規模亀裂構造が比較的精度良く推定されたことも、観測値との乖離量が改善した一要因であると考えられる。

データセット 5 以降の施工段階においては、先行ボーリングの掘削や実際の施工の進展に伴い、さらに詳細な亀裂情報が十分に蓄積されたと解釈される。決定論的にモデル化している大規模亀裂に関しては、

施工の進展に伴い、ほぼ原位置に即したモデル化がなされていると推察される。また、確率論的亀裂に関しては、広域から、構造物周辺に亀裂情報の取得領域を絞り込んでいったことにより、周辺の亀裂の幾何的、物理的特性を適切に表現していると考えられる。その結果として、観測値との乖離量分布がほぼ0となるという結果を得られたと推察される。

(3)地質情報蓄積に関する考察

立坑内湧水量に関して、観測値と解析によって得られた分布を比較することで、事後評価の観点から突発湧水リスクや DFN モデルの適応性に関して議論を行ってきた。これらの結果から得られる考察を以下に示す。

本研究で対象としたような不連続性岩盤では、調査の進展に伴い一様に乖離量が0に漸近していくのではなく、図-9に示すような挙動を示す可能性が示唆された。つまり、地下水流動に影響をもたらす大規模亀裂の新たな発見（以下、Risk-Finding と称す）に伴い、乖離の程度が悪化する可能性があることである。ここで、Risk-Finding は、事前調査段階等で新たな地下水流動の可能性を発見したことによって、追加的な地質調査を実施すべきか否かという意思決定に資する情報を提供できるという意味合いがあると考えられる。本研究から、不連続性岩盤における湧水対策コスト等の乖離量は、図-9に示すように一様に0（図中の点線部）に漸近していくのではなく、Risk-Finding の影響により増減を繰り返しながら乖離量0に近づいていく可能性が示唆されたと考えられる。

また、地下水流動は構造物近傍のみならずその周辺から地下水の供給を受けて生じるものである。つまり、構造物周辺における亀裂特性、特に透水性に関する情報が蓄積して初めて適切な地下水流動を表現できるものであると考えられる。対象サイトにおいては、データセットという形で、構造物の周辺から近傍へと亀裂情報の取得領域の絞り込みが行われている。その結果、図-8に示した総湧水量分布のように、施工段階であるデータセット5以降は、観測された湧水量と解析によって得られた湧水量分布が非常に良く合致している。しかしながら、図-7に示した先行ボーリングの情報のみに依存したデータセ

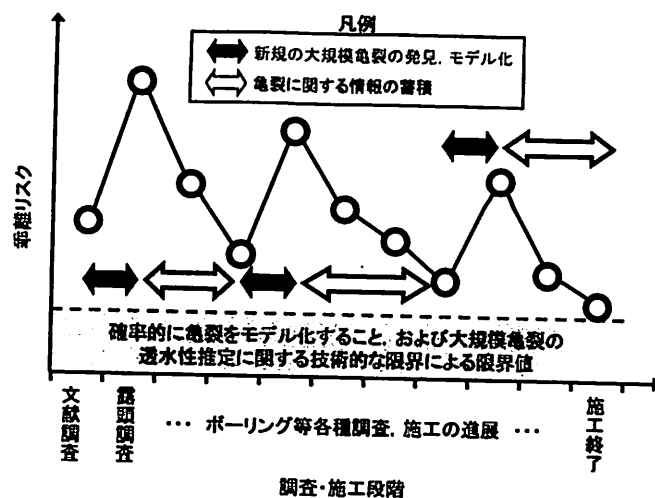


図-9 不連続性岩盤における乖離量の変遷の概念

ット Pilot では、観測値と解析値に大きな乖離が生じ、適切な湧水量を評価することができていない。つまり、構造物上の情報である先行ボーリングのみでは、適切な地下水流動を表現することは困難であることが示唆されたとはいえる。地下水流動を適切に表現するには、データセット0から5のように、構造物の周辺から近傍に亀裂情報の取得領域を絞り込んでいくことが有効である可能性が示されたと推察される。

これらより、以下の考察が可能であると考えられる。支保工等の、岩盤を等価連続体と解釈できる力学的要因に関しては、先行ボーリング等の構造物上の情報を得られれば適切な建設コスト推定が可能であると考えられる。しかしながら、本研究で対象とした突発湧水という事象は、周辺の場合から地下水の供給を受けて発生する水理学的要因に影響を受けるものであり、構造物上の情報のみでは、適切な評価をできない可能性がある。つまり、図-7に示した例のような構造物上の情報のみならず、周辺における地質・亀裂情報を蓄積して初めて適切な地下水流動を推定できるものと推察される。対象サイトでは、周辺から構造物上へと亀裂情報取得領域の絞り込みが実施されており、先行ボーリングを掘削することで、図-8に示すようにデータセット5以降、観測値との乖離が非常に小さくなったと解釈される。

以上の事項より、建設契約における適切な地質情報の提示に関して、以下のような考察がなされるであろう。すなわち、地下水流動等の水理学的特性を表現する際は、広い場からの亀裂情報の蓄積が必要

であり、支保工等の力学的要因を調べるための調査よりも多くの地質調査が必要となる。したがって、今後は、上記のような地質調査に関して力学的要因のための調査と、水理学的要因のための調査の差異を認識して、地質調査を実施していく必要がある。

しかし、現実の多くの地下構造物の建設プロジェクトにおいては、本事例において示したような詳細な地質調査が実施されることは極めて稀である。したがって、本事例に示すような不連続性岩盤を対象とする地下構造物の建設プロジェクトにおいては、入札段階ではすべての条件を提示することが一般的には不可能な不完備契約とならざるを得ない。このため、不完備契約であることを前提とした、施工課程での Risk-Finding に基づく再交渉を認めた契約とすることが望まれる。

6. まとめ

本研究では、社会基盤構造物の調達方式の変化に伴い、世界規模で地質条件に対するリスク対応としての、入札・契約対応に関する議論が活発化しつつあること踏まえ、その一対応事例として、調査の量と地質リスクの変動との関係について議論を加えた。具体的な定量評価の事例としては、不連続亀裂ネットワークモデルを用いた地下水流動解析結果に基づき、岩盤水理分野における主要なリスク要因である不連続性岩盤サイトにおける突発湧水を対象とした地質調査データを蓄積することの価値に関して考察を加えた。本研究から得られた知見として、以下のものが挙げられる。

- 1) 本研究ではデータセットを更新することで地質調査の進展を表現したが、それに伴う情報の蓄積は、図-8 に示すように基本的には地質リスクの低減に寄与していることを確認した。しかしながら、図-9 に示す概念図のように大規模亀裂の発見という Risk-Finding によって、地質リスクが増大する可能性を示唆した。Risk-Finding によって地質リスクは一時的に増大するが、これは追加的な地質調査を実施するか否かという意思決定に資する情報を提供していると解釈できるものと推察される。
- 2) 突発湧水等の水理学的要因を適切に評価するためには、支保工等の力学的要因を評価するための調査よりも多くの地質調査が必要となる可能性を示し

た。これは、力学的要因は比較的連続体としての性質を有しているが、水理学的要因は不連続性が強いためである。また、水理学的要因としての地下水流動は、周辺の場合から地下水の供給を受けて生じるものであり、先行ボーリング等の構造物上の情報のみでは適切な評価ができない可能性を示した。また、突発湧水を適切に評価するうえでは、構造物の周辺から近傍へと、地質調査を実施する場所を絞り込んでいくことが有効である可能性を示した。

- 3) 2) に対して、現実の多くの地下構造物の建設プロジェクトにおいては、本事例において示したような詳細な地質調査が実施されることは極めて稀である。したがって、欧米における地質リスク対応としての入札および契約に関する動向への一提言として、以下のような事項が挙げられる。すなわち、本事例に示すような不連続性岩盤を対象とする地下構造物の建設プロジェクトにおいては、入札段階ではすべての条件を提示することが一般的には不可能な不完備契約とならざるを得ない。このため、不完備契約であることを前提とした、施工課程での Risk-Finding に基づく再交渉を認めた契約とすることが望まれる。

【参考文献】

- 1) Flanagan, R. and Norman, G.: Risk Management and Construction, Blackwell Science, 1993.
- 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) 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 李圭太: 金融工学理論に基づく地盤リスク評価・対応に関する一考察, 土木学会論文集, No. 742/VI-60, pp.101-113, 2003.
- 4) Bodie, Z. and Merton, R. C. 著, 大前恵一郎訳: 現代ファイナンス論, ピアソン・エデュケーション, 2001.
- 5) 中央建設業審議会: 公共工事標準請負契約約款, 改訂版, 1989.
- 6) FIDIC: Conditions of Contracts for Construction for Building and Engineering Works Designed by the

- Employer, First Edition, 1999.
- 7) FIDIC: Conditions of Contract for Plant and Design-Build for Electrical and Mechanical Plant, and for Building and Engineering Works, by the Contractor, First Edition, 1999.
 - 8) FIDIC: Conditions of Contract for EPC Turnkey Projects, First Edition, 1999.
 - 9) 大津宏康, 堀田洋平, 三枝博光, 井尻祐二, 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, No.4, pp.353-368, 2008.
 - 10) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 逆巻昌工: 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 井尻祐二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国における亀裂特性について, JNCTN840099-091, 1999.
 - 16) 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 No.4, pp.353-368, 2008.
 - 17) 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.
 - 18) Ohtsu, H., Sakai, Y., Saegusa, H., Onoe, H., Ijiri, Y. and Motoshima, T.: Risk Evaluation of Water Inrush during Shaft Excavation in Fractured Rock Masses, Proc. of ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, CD-ROM, 2006.
 - 19) 鶴田忠彦, 竹内真司, 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-Research2008-098, 2009.

A Consideration on the Value on Geological Investigation Focusing on Water Inrush in Discontinuous Rock Masses from Viewpoints of Construction Contract

By Hiroyasu OHTSU, Hiroki ARIZONO, Hiromitsu SAEGUSA

This paper focused on the value on geological investigation from a viewpoint of construction contract, 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 the Mizunami Underground Research Laboratory construction project carried out by the Japan Atomic Energy Agency. Finally, it is pointed out that the accumulation of geological information help to mitigate losses due to geotechnical risk, and the contract of construction projects including unforeseeable geological condition should be regarded as incomplete contract, considering necessity of negotiation.