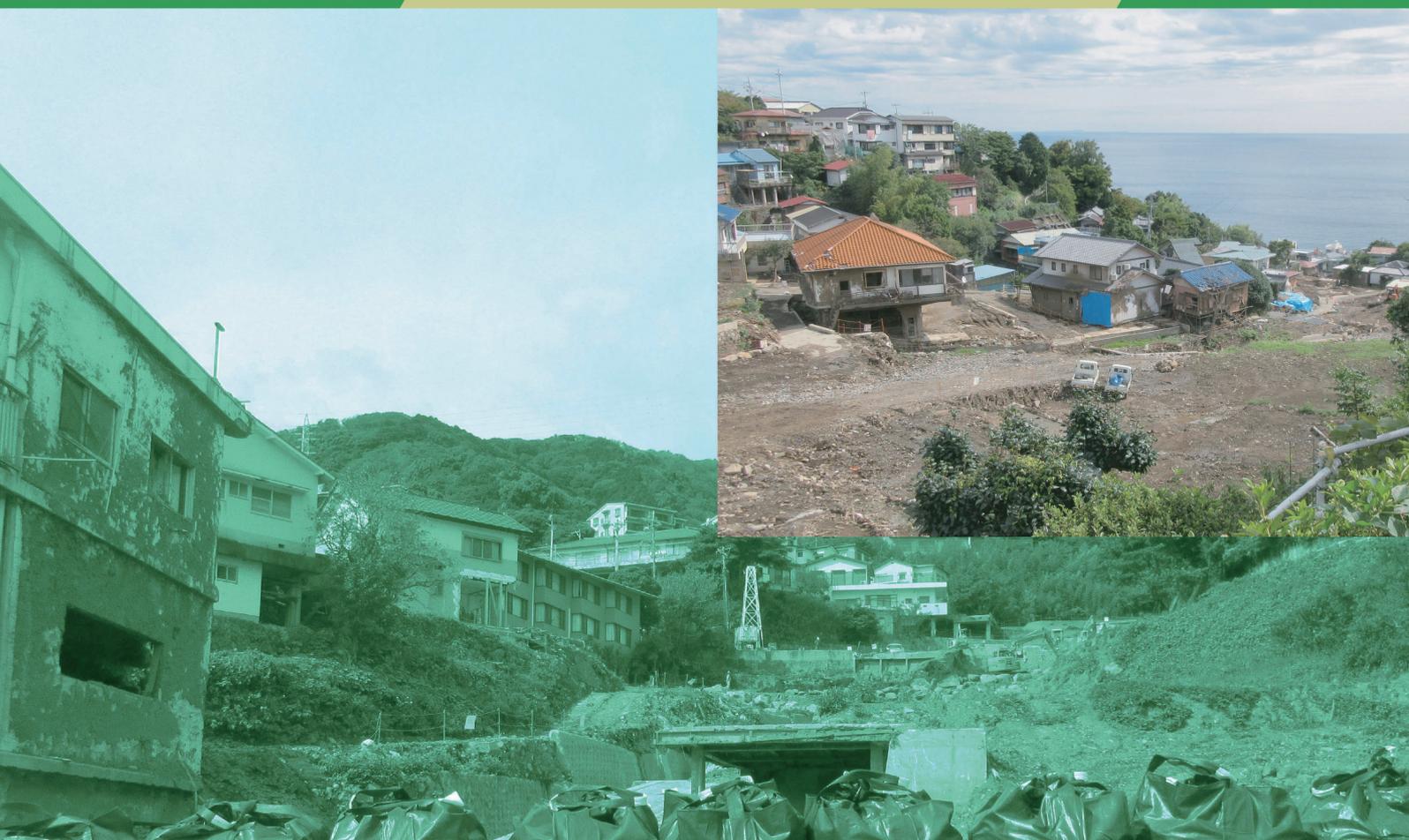


第12回

地質リスクマネジメント 事例研究発表会 講演論文集



令和 3年11月26日（金）

共催：地質リスク学会、一般社団法人全国地質調査業協会連合会
協賛：国立研究開発法人土木研究所

(表紙写真説明)

令和3年7月3日、静岡県熱海市伊豆山の逢初川で土石流が発生し、甚大な被害をもたらした。当時、梅雨前線の停滞から記録的な大雨となり、前日には土砂災害警戒情報が発表されていた。土石流が流下する様子はテレビで報道されたが、泥質分に富んでおり、表紙写真の背景にあるように、建物のかなりの高さまで泥が密着して残っている。土石流発生後の調査等で、土石流発生部には谷を埋めた盛土が存在しており、その盛土の大半が崩壊し、土石流となった可能性が指摘されている。今までは盛土の上に建設された道路や住宅の地質リスクが問題となるが多かったが、今後は、盛土の崩壊に伴う斜面の下部または下流へのリスクの評価がさらに必要となる。

(小笠原正継)

はじめに
ー地質リスクマネジメントという活私開公ー

今年度も、地質リスク事例研究発表会を開催することが出来ましたこと、喜びに堪えませぬ。これもひとえに、投稿・発表して頂いた皆さまの勇気とご努力、会員の皆さまのご支援の賜物であると、心から感謝申し上げる次第です。

新型コロナウイルスによる感染がなかなか収束しない状況は、私たちに、改めて、「建設・土木事業におけるリスクマネジメントとは何か」との問いを投げかけているように思われます。

私には、その回答の一つとして、「豊かだが厳しい自然の下での活私開公」が浮かびます。「活私開公」は、佐々木毅、金泰昌編「公共哲学7 中間集団が開く公共性」東京大学出版会、2003において、金先生が以下のように定義されています。

活私：自立した個人が自発的に参加する多様な中間集団を通して私的動機・発想・欲求・願望・理想・夢・志を活かす

開公：①国家に独占された公を公共の（滅私奉公ではなく公私相生を目指す）方向に開く
②公共を国家のレベルからより高次のレベルへと開くと同時に、より身近なレベルへ根付かせる

「公共」（性・空間・意識）：「みんなとともに」に「たがいのためになること」を考え、議論し、決定して実行するプロセス

私たち地質リスク学会も、活私開公の実現を目的とした「中間集団」と位置付けることができます。地質に関するマネジメントは、事業者・発注者の「専売特許」であったといえます。その中で、私たちは、「地質リスクマネジメント」という新しい「公」を提案し、それを実現する手段として「地質技術顧問」という新しい職能の必要性を提唱し、地質リスクマネジメントが身近な課題であることを訴え続けてきました。

さらに、これらの根拠となる調査・分析として、事例研究を地道に継続して行って参りました。様々な思いを持った技術者の方々が、成功例だけでなく失敗例も勇気を持って発表して頂いた事例研究は、現在、様々な場面で活用されています。事例研究集は、非排除性と非競争性を持った純粋公共財―誰に対してもその使用を妨げず、かつ、どんなに使用されても、その機能が低下することはない財―であるといえます。やや我田引水に聞こえるかもしれませんが、この純粋公共財は、日本の地質技術者の強みが遺憾なく発揮された結晶であり、誇りであると思います。

私としては、地質リスク学会は、今後とも事例研究を大事にする学会でありたいと思います。日本の自然は大きな恵みをもたらしますが、時に大変な脅威ともなり、近年は集中豪雨の頻発など「凶暴化」していると思われる現象さえ発生しています。そのような状況では、各会員の「活私」によって、新しい「公」を開拓し続ける必要があると考えられるからです。いつまでも、学会設立当時の真摯な気持ちを忘れずに、「活私開公」を継続して実践していきたいと思うのです。

これまでの皆さまの絶大なるご尽力・ご協力・ご支援に改めて感謝申し上げますとともに、新型コロナウイルスによる感染の収束を願いつつ、皆さまとご家族の方々の益々のご健勝とご多幸を心よりお祈り申し上げます。

ありがとうございました。

令和3年11月26日
地質リスク学会会長 渡邊 法美

第12回地質リスクマネジメント事例研究発表会

講演論文集 目次

はじめに

第I編 プログラム 1

第II編 全体会

特別講演 「(国研) 土木研究所における地質リスクマネジメントの活動について」 3
宮武 裕昭氏 (国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ)

報告 「「地質リスク調査検討業務の手引き」の発行について」 10
岩崎 公俊 ((一社) 全国地質調査業協会連合会 技術参与)

第III編 事例研究論文

論文 No.1 居川 信之 (株) エイト日本技術開発
山岳道路の維持管理における地質リスクマネジメント (盛土崩壊の事例) 21

論文 No.2 近藤 桂二 (株) ダイヤコンサルタント
暫定2車線区間の4車線化へ向けた地質リスクの検討事例 25

論文 No.3 齋藤 和春 セントラルコンサルタント (株)
3次元電気探査を用いたトンネル拡幅湧水量予測による工事費・工期のリスク低減の一事例 31

論文 No.4 奥田 朱音 応用地質 (株)
地質リスク評価における簡易試験の有効性と適用上の留意点 35

論文 No.5 加藤 智久 中央開発 (株)
落石危険斜面における動態観測によるリスク管理事例 41

論文 No.6 鄭 詩穎 岡山大学
応答曲面法によるため池の破堤リスク評価 47

第 I 編 プログラム

第 12 回地質リスクマネジメント事例研究発表会 開催案内

共催：地質リスク学会、一般社団法人全国地質調査業協会連合会

協賛：国立研究開発法人土木研究所

<開催趣旨>

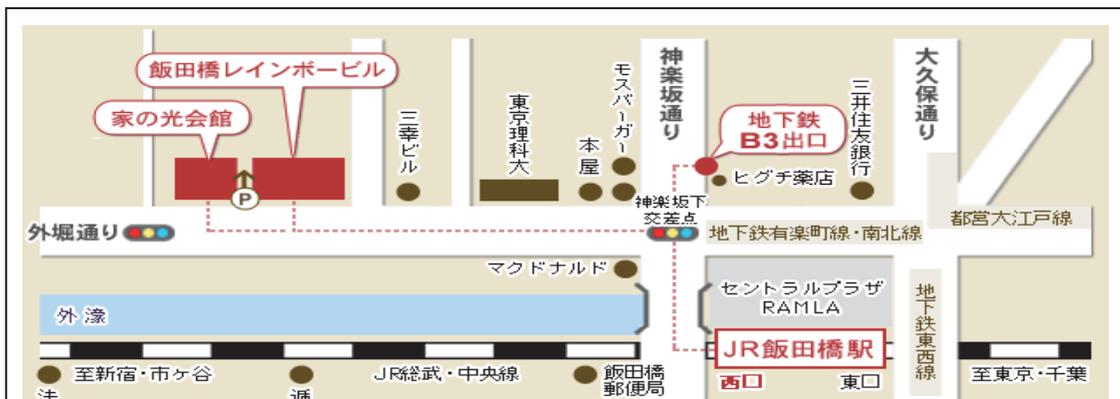
事例研究発表会の主な目的は、建設工事等における地質リスクのマネジメントの実例を紹介し、様々な課題を議論し共有することにあります。

<開催要領>

開催日：令和 3 年 1 月 26 日（金）

開催場所：飯田橋レインボービル 7 階「大会議室」

〒162-0826 東京都新宿区市谷船河原町 11 番地 飯田橋レインボービル TEL 03-3260-4791



<プログラム>

開 場： 12:30

開 会： 13:00～

開会挨拶： 13:05～13:20 渡邊 法美 地質リスク学会 会長（高知工科大学 教授）

特別講演： 13:20～14:00

「(国研) 土木研究所における地質リスクマネジメントの活動について」

宮武 裕昭氏（国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ）

報告： 14:00～14:15

「地質リスク調査検討業務の手引き」の発行について」

岩崎 公俊（(一社) 全国地質調査業協会連合会 技術参与）

事例研究発表会： 14:30～16:30（発表編数は 6 編）

<事例研究発表会について>

(1) 1 セッションの基本時間割

*口頭発表時間は、1 編当たり 15 分とする。

発表編数 6 編

①	セッション開始挨拶（司会者）	1 分程度
②	発表	4 5 分（15 分×3 編）
③	質疑応答	5 分
④	発表	4 5 分（15 分×3 編）
⑤	質疑応答	5 分
⑥	全体質疑応答&まとめ（司会者）	10 分
	合計時間	110 分

(2) セッション司会者

小笠原正継（地質リスク学会 副会長）

事例研究論文一覧

区分	論文No.	発表者	所属先	題 目	事例の種類
道路	1	居川 信之	(株) エイト日本技術開発	山岳道路の維持管理における地質リスクマネジメント (盛土崩壊の事例)	B型
	2	近藤 桂二	(株) ダイヤコンサルタント	暫定2車線区間の4車線化へ向けた地質リスクの検討事例	D型
	3	齋藤 和春	セントラルコンサルタント (株)	3次元電気探査を用いたトンネル拡幅湧水量予測による工事費・工期のリスク低減の一事例	D型
地質リスクマネジメント手法	4	奥田 朱音	応用地質 (株)	地質リスク評価における簡易試験の有効性と適用上の留意点	D型
	5	加藤 智久	中央開発 (株)	落石危険斜面における動態観測によるリスク管理事例	D型
	6	鄭 詩穎	岡山大学	応答曲面法によるため池の破堤リスク評価 Risk evaluation for the breaching earth-fill dams by response surface method	D型

* リスクマネジメント事例の種類は以下の4タイプとなっております。

A型：地質リスクを回避した事例

B型：地質リスクが発現した事例

C型：発現した地質リスクを最小限に回避した事例

D型：上記のA型、B型、C型以外的事例

第Ⅱ編 全体会

特別講演

(国研)土木研究所における地質リスクマネジメントの活動について

国立研究開発法人土木研究所

地質・地盤研究グループ グループ長 宮武 裕昭

1. はじめに

土木構造物のほとんどは、地質・地盤を基礎あるいは材料として利用するため、地質・地盤の分布や性状はその設計や施工、維持管理において重要な要素であるが、地質・地盤の分布はその成り立ちを反映して複雑なものであることが多く、同一の地質・土質区分であってもその性状が不均質なこともある。これに加えて地下は直接確認することが難しいことから、設計や施工で用いる地質・地盤条件の想定には不確実性が内在することは避けられず、平成 28 年 11 月に発生した福岡市地下鉄七隈線延伸工事における道路陥没事故は、このような不確実性に起因する事象の顕著な例である¹⁾。

この事故を始めとする地下空間の事故・事案の顕在化を受け、国土交通省の社会資本整備審議会・交通政策審議会は「地下空間の利活用に関する安全技術の確立について」（平成 29 年 9 月）を答申（以下、答申）し、計画・設計・施工・維持管理の各段階における地盤リスクアセスメントを実施することが、今後の方向性として示された²⁾。

この答申を受け、土木研究所では国土交通省とともに「土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会」（以下、委員会）を平成 31 年 3 月に設立し、令和 2 年 3 月に「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」³⁾（以下、ガイドライン）を公表した。また、地質・地盤リスクマネジメントの実施において参考となる資料も作成した⁴⁾。

ここでは、ガイドラインで示した地質・地盤リスクマネジメントの概念と要点を紹介し、土木研究所における取組みを紹介する。

2. 地質・地盤リスクマネジメントの概念

2. 1 ガイドラインにおける地質・地盤リスクマネジメントの位置づけ

答申²⁾では、地下工事の安全技術の確立に向けた現状と課題として、地質・地盤に関わる想定や条件設定の不確実性について以下の点を指摘した。

○工事着手前に全ての地盤情報を明らかにできないことによる安全性や効率性に対するリスクが常にある ○各事業者は限られた情報の中でリスクアセスメントを実施することとなるが、その技術的手法が必ずしも確立されていない

そして、「福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書」¹⁾で示された、地下空間等での工事における留意事項を引用した上で、

○計画・設計・施工・維持管理の各段階において、地盤リスクアセスメントを実施できるよう、関係する技術体系の確立、手続きの明確化、専門家の育成等を行う ○計画から設計、設計から施工といった次の段階に進む際には、いわゆる“3者会議”（発注者、前段階の実施者および後段階の実施者）を設置し、前段階で得られた技術的知見や情報等を確実に伝達する ○維持管理段階で管理者が留意すべき事項をとりまとめた“取り扱い説明書”を作成し引き継ぐ ○地盤リスクアセスメントに基づくモニタリング計画の作成と実施 ○受発注者間における即時的な情報把握を可能とする情報共有システムの導入

という項目を今後の方向性と対応策として示している。

これらは、リスクを関係者で共有し対応するための手続きの明確化や、技術的知見や情報等を確実に伝達するという、事業のながれに沿ったリスクへの対応の考え方や体系を求めるものである。つまり、地質・地盤のリスクを適切に評価するというアセスメントは継続的に行われるべきものであり、事業全体のながれの中で、関係者が協力して事業の各段階において地質・地盤リスクを総合的に判断（＝意思決定）しながら、得られた技術的知見を設計・施工に反映するという枠組みを示したものである。

ガイドラインにおいては、こういった枠組みを地質・地盤リスクマネジメントとして位置づけ、

○地質・地盤リスクマネジメントを行う事業者及びこれに参画する関係者それぞれが担うべき役割・機能や連携のありかた

○地質・地盤リスクマネジメントの導入及び実施に当たっての手順、手法の考え方

○地質・地盤リスクマネジメントを運用するに当たっての留意事項

について示した。なお、ガイドラインのとりまとめにあたっては ISO 31000（リスクマネジメントー指針）の概念を参考にしている。

2. 2 地質・地盤リスクとその取り扱いの課題

ガイドラインでは「地質・地盤リスク」を「当該事業の目的に対する地質・地盤に関わる不確実性の影響」「計画や想定との乖離によって生じる影響」と定義している。地質・地盤条件に関わる不確実性は「リスク要因」であるが、その分布や性質を正確に把握することが難しいことによる自然的なもの、その取り扱いによる人為的なものがある。

図-1は、文献調査によって収集した地質・地盤に起因する事業への影響が生じた 75 事例について、その原因となった要素で区分したものである⁴⁾。図のように「予測・把握が難しい」という自然的要素が支配的なものは2割に過ぎず、8割は地質・地盤条件の想定や調査の内容、情報の取り扱いといった人為的な要因が関わって影響が生じており、地質・地盤リスクが十分把握できず、リスクを適切に取扱えなかったことが課題となっている。

図-2は、道路事業の設計段階での業務を例に、事業者（発注者）を挟んで、地質調査と設計の間で業務の成果が次に引き継がれている様子を示したものである。図の中の、調査計画や設計条件の設定は、それ以前の業務での設計や調査の成果に基づいたものとなる。事例で課題となった点をこれに当てはめてみると、前段階での地質・地盤の調査で得られた情報の意味や想定が適切に引き継がれな

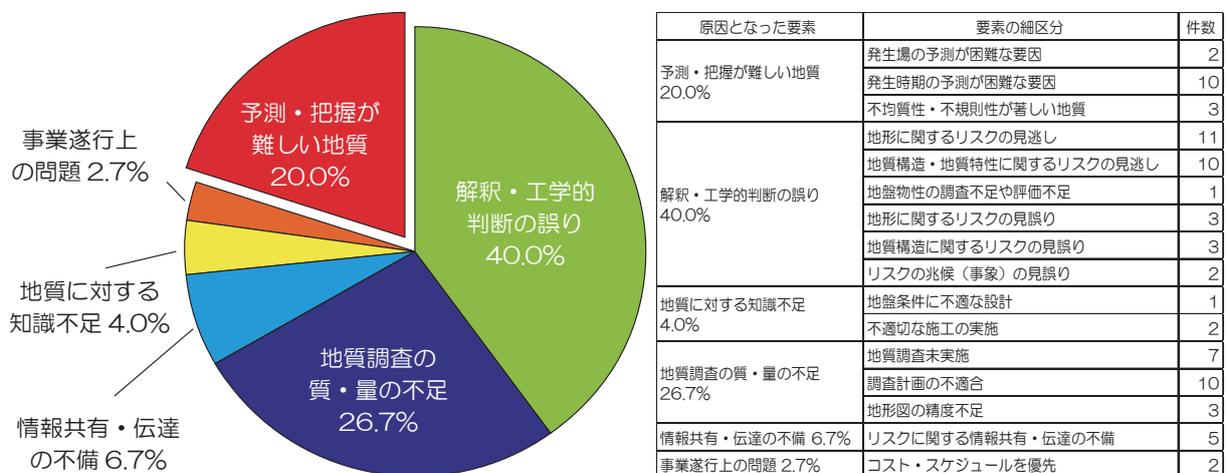


図-1 地質・地盤に起因する事業への影響事例とその要素⁴⁾を改変

いと、設計条件において地質・地盤条件の見落としや見誤りが生じることが懸念される。一方、設計上の地質・地盤条件の考え方や設計上の物性値の意味についての理解が不足した場合には、設計の考え方に適合した調査計画とならず、地質・地盤条件の想定との乖離が生じる原因となる。

このようにリスクを適切に取り扱うには、地質・地盤に関する情報が、設計や施工、維持管理で行うべき判断に足るもので

あるか、想定からの乖離がどの程度見込まれるかといった観点で、互いの持つ情報や求める情報を議論する必要がある。

ガイドラインでは、こういった技術的知見や情報等を伝達・共有し判断するにあたって、関係者全体でのコミュニケーション及び協議が重要であることを示し、そのための組織・体制を事業者が構築することが必要であることを示した。また、リスクの状況の変化を捉えたマネジメントの改善や、コミュニケーション及び協議の結果の記録、引き継ぎについても示している。

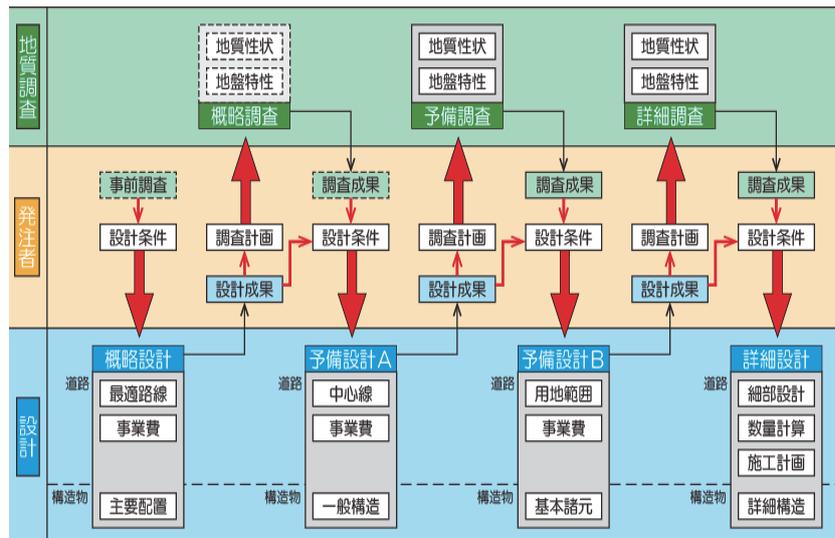
2. 3 リスクマネジメントの進め方

ガイドラインでは地質・地盤リスクマネジメントを、事業全体の最適な計画を立てることによって事業の効率的な実施という新たな価値を創造することを目指すものと位置づけている。これは、地質・地盤リスクマネジメントが、地質・地盤に起因するトラブルを防止するという戦術ではなく、リスクマネジメントのプロセスあるいはその繰り返しの中で、どの事業段階や工程でリスクに対応することが効率性や安全性といった事業の目的に合致するかを考え、地質・地盤リスクへの対応を最適なものとするという戦略を立てる手段となるということである。

一般的には地質・地盤リスクへの対応は、事業の初期段階ほど自由度があり多くの選択肢があるため、経済性や効率性の観点からは事業のより早い段階からリスクマネジメントを開始することが必要である。ただし、リスクマネジメントを早期に開始することと、早期にリスク対応を確定することは異なることに留意が必要である。

地質・地盤リスクの特徴の一つは、事業の進捗によってその情報が変化することである。調査が増えることによって地質・地盤条件の想定精度が向上することもあるが、対象となる地質・地盤の種類や事業の特性によっては設計段階での想定に限界があることもしばしばである。このため、地質・地盤リスクには、いわゆるフロントローディングによって調査段階等事業の初期段階で対応を早めに決定することが有利なもの、施工段階の現場条件が把握できる状況で対応をとることが有利なものなど、リスク対応の決定時期には様々なケースがある。

このためガイドラインでは、事業のどの段階でリスクに対応することが最適かをリスクマネジメントの実施にあたっての計画立案で検討すること、リスクの情報やその状況の変化に応じたリスクマネ



図一 2 事業における業務成果の利用のイメージ
(道路事業の設計段階の例)

ジメントのプロセスを継続的に実施し、必要に応じた見直しを行う必要があることを示した。

図-3はリスクマネジメントのプロセスがどのような構成となるか示したものであり、①コミュニケーション及び協議を基盤として、②リスクマネジメントの計画、③リスクアセスメント、④リスク対応というながれを、⑤リスクマネジメントの継続的な改善によって見直しながら、継続していくという枠組みを提示している。

3. 地質・地盤リスクに ONE-TEAM に対応するために

ガイドラインには“関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために”という副題がある。

“ONE-TEAM 体制”とは、事業者、地質・地盤技術者、設計技術者、施工技術者、点検技術者、およびそれを支援する産官学の専門家等の関係者が、リスクマネジメントに参画し、リスクに関する情報を共有し、役割を分担し、また強く連携してリスクに対応しようとする意識とその体制であり、ガイドラインで示した地質・地盤リスクマネジメントの最も重要な考え方である。

これは、関係者がそれぞれの役割を果たすだけでなく、他の関係者が役割を果たすために必要なことにも配慮して相互に補うことで、個別に役割を果たした場合よりも大きな成果を得ることを期待するものである。

表-1および図-4は、参画する関係者の役割とその体制の例を示したものである。

ガイドラインでは地質・地盤リスクマネジメントの体制・組織について、画一的な組織・体制を求めるのではなく、リスクマネジメントに関連した既存の仕組みや取り組みを活用し、必要な部分を追加、改善するなど、事業の目的や特性に応じてその時点で取り得る最適な体制・組織を構築するよう事業者に向けている。

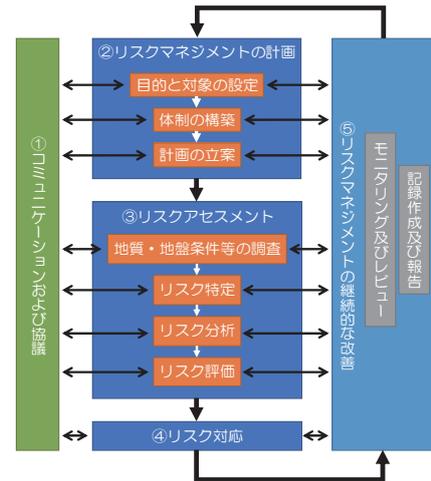


図-3 リスクマネジメントのプロセス³⁾

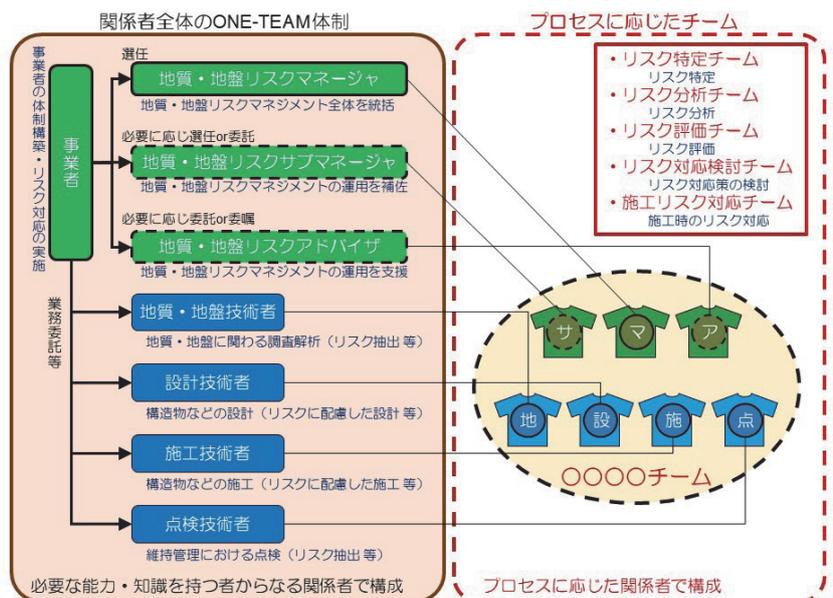


図-4 地質・地盤リスクマネジメント体制の例³⁾

ONE-TEAM 体制の構築には地質・地盤に関する専門的な知識やマネジメントに関する知識を持つ専門家をはじめとする、様々な専門的な知識や経験を有する者が参画することが重要であり、事業者はリスクマネジメントの計画立案にあたって、事業の状況等を検討した上で必要な機能や知識を持った体制・組織となるよう内部・外部からこれら専門家を参画させる必要がある。

また、ONE-TEAM 体制における関係者の役割分担の設定や、連携のためのコミュニケーション及び協議の場の設定など、関係者の役割に応じた能力・機能が十分に発揮できる環境を整備することも重要である。関係者の連携では、リスクに関する情報の結果・結論のみではなく、その情報の前提、限界、判断の根拠等も共有し、判断に必要な情報は何かを他の関係者に伝える図-5の様な双方向のコミュニケーション及び協議によって、最適な判断がなされるよう努力することが重要となる。

こういった体制は事業全体で構築するだけでなく、リスクマネジメントのプロセス（リスク特定、分析、評価及びリスク対応検討、施工リスク対応 等）に応じたチームで対応することを基本とした（図-4右側）。このようなプロセスに応じたチームにおいても、複数の領域にまたがる構成メンバーによって、重層的かつ多面的な検討を行うことが重要である

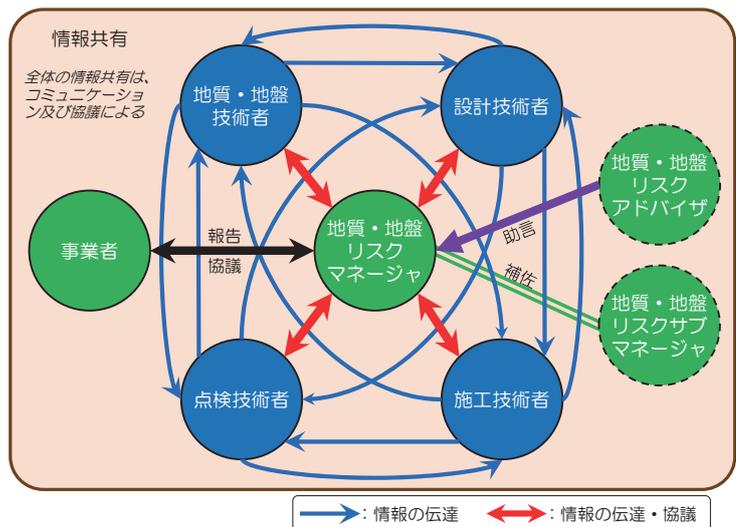


図-5 連携における情報共有・伝達³⁾

4. 地質・地盤リスクマネジメントの運用に参考となるもの

4.1 既存の仕組み、取り組みの活用

参考資料⁴⁾には地質・地盤リスクマネジメントに関連する、これまでの制度や取り組みについて紹介した。これらは地質・地盤リスクを主題としたものではないものが多いが、これらの仕組みや取り組みを活用し、機能やプロセスを追加、統合することで、効率よく地質・地盤リスクマネジメントの導入・運用を進めることができると思われる。

(1) リスクマネジメントの導入・運用に関する既往の取り組み

「構想段階における計画策定プロセス」は、事業の構想段階における計画案の選定とそれに伴うコミュニケーション等を実施するもので、「プロジェクトマネジメント」は事業者が責任者として意思決定を行う枠組みであり、これらに地質・地盤リスクマネジメントを統合することが考えられる。

また、近畿地方整備局の「地質リスク低減のための調査・設計マニュアル(案)」は、道路事業において地質リスク低減を目的として、地質リスク調査検討業務を活用したリスクアセスメントを事業の各段階で行うものであり、リスクの観点から事業を遂行するという点で地質・地盤リスクマネジメントの考え方を先取りしたものとなっ

表-1 地質・地盤リスクマネジメント関係者の例³⁾

関係者	役割
事業者	事業の実施、地質調査等の計画・管理、リスク対応の実施にあたっての意思決定を行う者
地質・地盤リスクマネージャ	事業者の中で地質・地盤リスクマネジメント全体を統括する責任者
地質・地盤リスクサブマネージャ	地質・地盤リスクマネージャが行うリスクマネジメントの運用を補佐する者
地質・地盤リスクアドバイザー	専門的な立場で地質・地盤リスクマネージャやリスクマネジメントの運用を支援する専門技術者
地質・地盤技術者	地質・地盤に関わる調査・解析を行う者
設計技術者	構造物等の設計を行う者
施工技術者	設計資料を基に構造物等の施工を行う者
点検技術者	構造物の維持管理における点検を行う者

ており、運用の参考となる。

(2) 体制・組織、専門家の参画

「事業促進 PPP」「プロジェクトマネジメント」は事業促進を目的とした制度であるが、地質・地盤リスクマネジメントの体制・組織と多くの部分で共通する。「地質技術顧問制度」「アドバイザー・コンサルタント制度」は外部の専門家の助言、運用の補助といった形で、活用可能なものである。

(3) 関係者の連携、コミュニケーション及び協議

品質確保や条件明示のための事業上の取り組みとして詳細設計や施工着手段階で実施、試行されている「地質技術者を参画させた合同現地踏査、三者会議」は、関係者の情報共有とリスクの引き継ぎのための仕組みとして大変有効である。これはコミュニケーション及び協議の枠組みと運用の一つの形態であり、これらを地質・地盤リスクマネジメントの仕組みとして活用することが考えられる。

4. 2 リスクアセスメントの手法

ガイドラインでは、リスクアセスメントにおいて、リスクの内容、結果の大きさ及び起こりやすさ（これをリスクレベルという）を整理して“リスクの見える化（見せる化）”を行うという考え方を示している。ガイドラインでは“リスクの見える化”の具体的手法を提案するには至っていないが、参考資料⁴⁾には参考となるものとして「地質・地盤リスク調査検討業務」におけるリスクレベルの設定の事例について紹介した。また、地質・地盤の不確実性を考慮するための工夫は、様々な事業で個別に検討されているものもあり、“見える化”やそのための検討の考え方の事例についても紹介している。

こういった事例も参考としながら“リスクの見える化（見せる化）”を図り、関係者の認識をより深めて多面的な視点でリスクを取り扱うことが望まれる。

5. 土木研究所の取り組み

ガイドラインの策定に前後して、土木研究所では、地質・地盤リスクマネジメントの充実にに向けた取り組みを行っている。

5. 1 地質・地盤リスクマネジメント技術の体系化に関する研究の推進

土木事業によって構築される施設のほとんどは地盤を基礎として安定を保つか、土や岩石といった地盤材料を材料とする、あるいは地盤を掘削したスペースに構築されるものであり、地質・地盤リスクマネジメントはほとんどすべての土木事業に関係する。ただし、その関わり方は事業や施設の種類、目的によって千差万別である。土木研究所では、地質地盤・研究グループを中心として道路技術研究グループ、橋梁構造研究グループと連携した「地質・地盤リスクマネジメント研究会」を設置し、橋梁やトンネルといった個別具体の事業における地質・地盤リスクマネジメントの実態及び課題の把握、事業へのリスクマネジメントを導入するための方策についての議論を行っている。

土木研究所では、令和4年度から第5期中長期研究計画に着手する予定であり、現在、計画の策定と計画を構成する研究課題の立案に向けた作業を行っている。地質・地盤研究グループでは、これから取り組む地質・地盤に関する様々な調査研究課題について、地質・地盤リスクマネジメントの概念のもとで、どのような位置づけとなるのか、の棚卸整理を行っている。

5. 2 地質・地盤リスクマネジメントの現場への実装

土木研究所では、国土交通省技術調査課と連携し、国土交通省の事業の現場への地質・地盤リスクマネジメントの具体的な実装を図るための取り組みを行っている。そのためには、モデル事業を設定して、地質・地盤リスクマネジメントを導入し、導入に際しての様々な課題の把握、その効果の計測な

どを行うことが望ましい。ただし、地質・地盤リスクマネジメントの効果は、しばしば潜在的な損失の発生を未然に防止するという形で現れることもあるため、その効果測定が難しい。現在は、現場へのヒアリングなどを行い、慎重にモデル事業を抽出する作業を行っているところである。

また土木研究所には、全国の事業者から技術的な相談が持ち込まれることが多い。その範囲は、災害対応から高度な技術力を必要とする事業の実施に先立つ事前相談まで及ぶ。これらの案件に共通することは、複雑な条件下での高度な技術的課題を抱えた案件であるということである。一般論として、これらの事業では単に技術的な課題解決にとどまらず、高度な行政的、政策的判断の色合いを帯びることが多い。またこうした技術相談に対応することができるというのも土木研究所の特徴の一つである。土木研究所では、ガイドラインの策定以前から様々な技術相談に地質・地盤リスクマネジメントの概念を導入したアドバイスを行ってきた。そのいくつかはガイドラインに事例として収録されている。今後は、土木研究所の技術相談の機会を通じて、地質・地盤リスクマネジメント実装事例を充実していく方針である。

6. おわりに

ここで述べた地質・地盤リスクマネジメントの概念は新しいものではあるが、これまで全くなかったものではない。地質・地盤の調査によって明らかになった課題に対する設計・施工上の対応を考えるということ自体は、これまでも行われてきたものである。つまり、地質・地盤リスクマネジメントはこれまで暗黙知であった地質・地盤リスクの取り扱いを、形式知として体系的に取り扱うというものである。このため、ガイドラインでは地質・地盤リスクを意識して事業を進めるための組織・体制やプロセスについて、実施のための手順を例示している。

しかしながら、地質・地盤リスクに主眼をおいたマネジメントの事例は少なく、またリスクアセスメントやリスク対応についての技術的手法も開発途上の状態であるため、地質・地盤リスクマネジメント技術の継続的な発展と向上が必要である。また、地質・地盤リスクマネジメントを担う人材を育成することも大きな課題である

土木研究所では、地質・地盤リスクマネジメントの事例分析を進め、既存の仕組みや制度の活用や効果的な運用方法について検討を進めたいと考えている。また、業界団体や国土交通省との連携によって地質・地盤リスクマネジメントの技術体系の充実と人材育成を行っていくことを目指している。

【参考文献】

- 1) 福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する委員会（国立研究開発法人土木研究所）：福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する委員会報告書，2017.5，
<https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/pdf/houkokusyo.pdf>
- 2) 社会資本整備審議会・交通政策審議会：「地下空間の利活用に関する安全技術の確立について」2017.9，
<http://www.mlit.go.jp/common/001200765.pdf>
- 3) 国土交通省大臣官房技術調査課・国立研究開発法人土木研究所・土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン—関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために— 令和2年3月，2020.3，
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001337772.pdf>
- 4) 土木研究所：地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン—参考資料，2020.3，
<https://www.pwri.go.jp/jpn/research/saisentan/tishitsu-jiban/iinkai-guide2020.html>

「地質リスク調査検討業務の手引き」 の発行について



(一社) 全国地質調査業協会連合会
技術参与 岩崎 公俊

ガイドライン及び近畿マニュアルと 本手引きの関係と役割

ガイドライン(2020.03)

「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」
国土交通省技術調査課・国立研究開発法人土木研究所
【対象】主として事業者

基本的考え方

近畿マニュアル(2021.03)

「地質リスク低減のための調査・設計マニュアル(案)改訂版」
国土交通省近畿地方整備局
【対象】事業者と受注者(調査・設計・施工)

具体的
手順・手法

本手引き(2021.07)

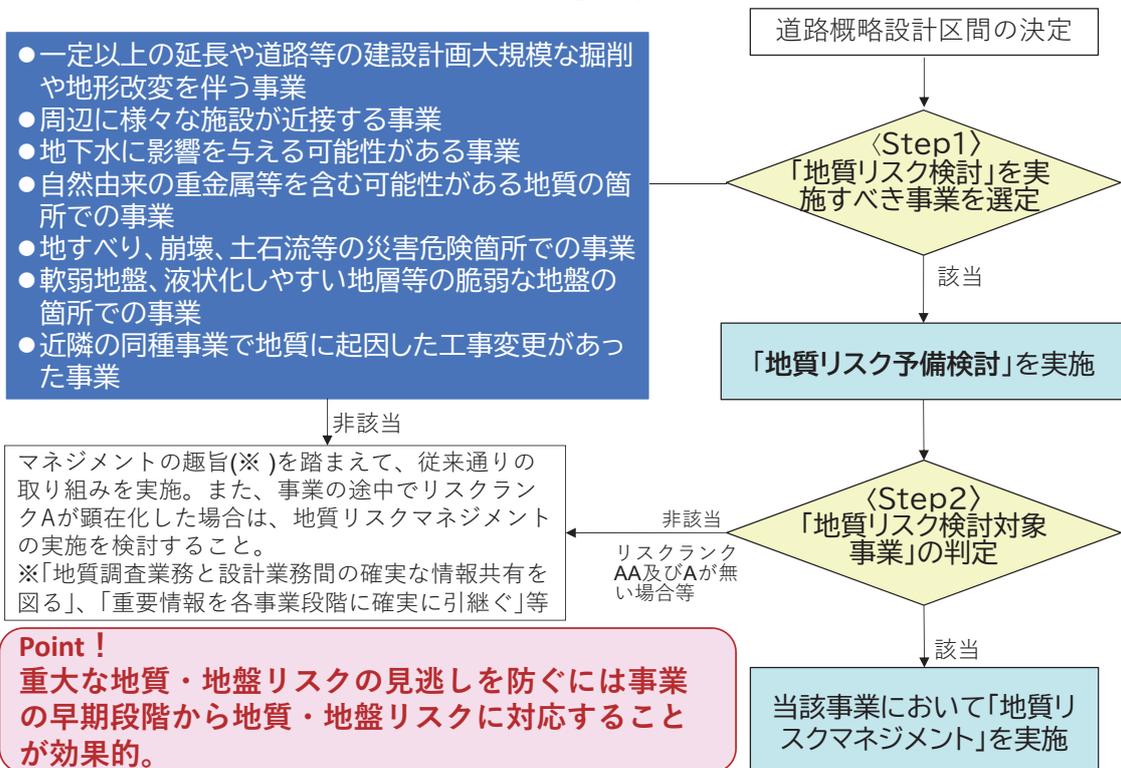
「地質リスク調査検討業務の手引き」
一般社団法人全国地質調査業協会連合会
【対象】主として **事業者と受注者の実務担当者**

発注・実施
の手引き

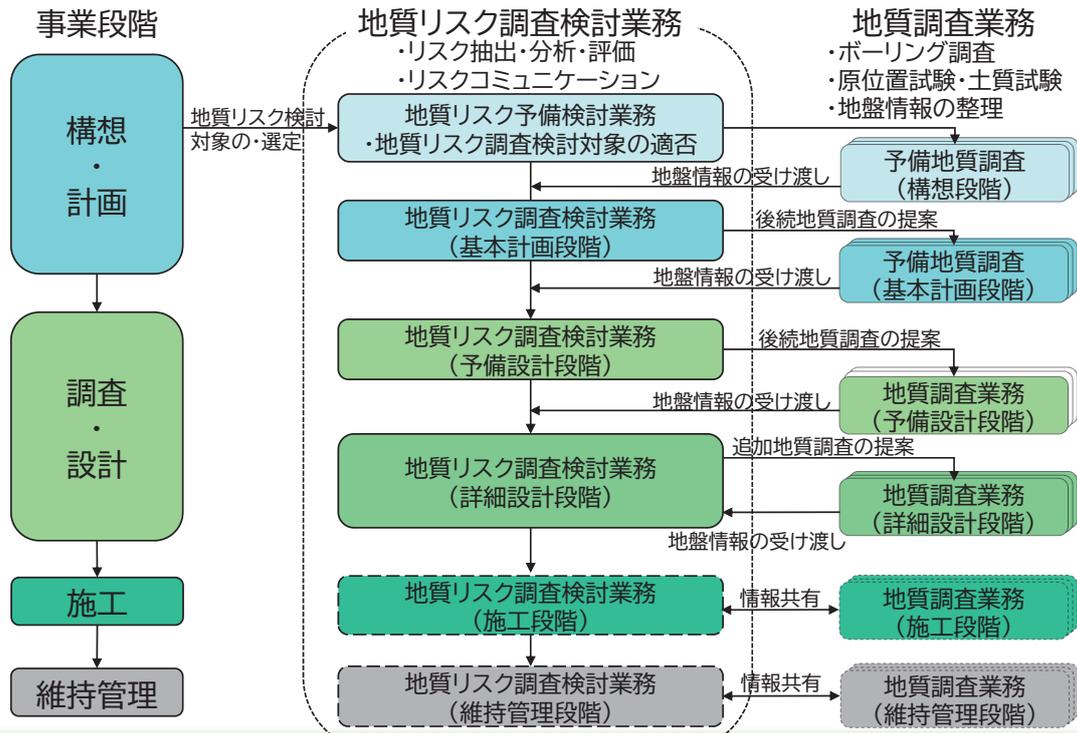
手引きの目次構成

1. 本手引きの概要	目的、適用範囲、用語の定義
2. 地質リスクマネジメントの基本事項	ガイドライン等の概要 適用すべき事業(業務)の選定 事業の流れと地質リスク調査検討業務 リスクコミュニケーション
3. 地質リスク調査検討業務の実施方針	地質リスク調査検討業務の役割 調査検討内容
4. 地質リスク調査検討業務の発注方法	発注方法、推奨資格 特記仕様として記載すべき内容 積算方法
5. 地質リスクアセスメント技術	地質調査、解析技術 地質リスクの見える化技術
6. 今後の課題	発注契約に関する事項 地質リスク情報に関する事項
<参考資料>	各種の事例、新技術、参考文献等

適用すべき事業の選定



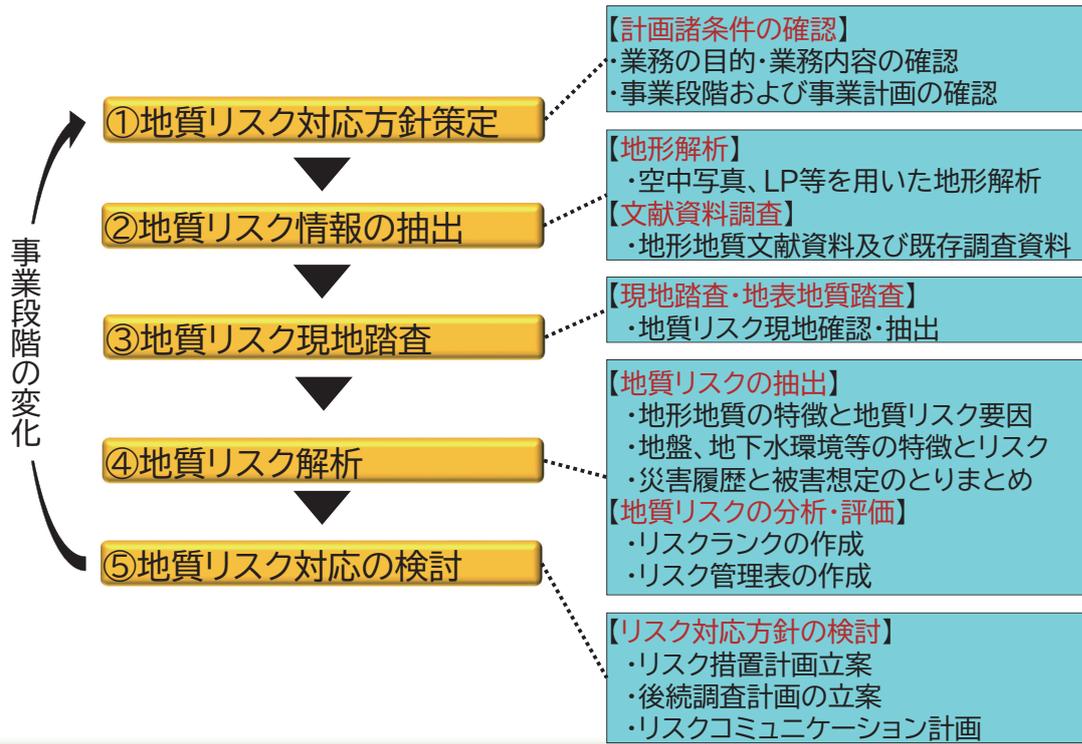
事業の流れと地質リスク調査検討業務の位置づけ



通常の地質調査業務との違い

	地質リスク調査検討業務	一般地質調査業務
目的	事業における地質・地盤の不確実性を“見える化”し、地質・地盤リスクに関する情報を事業関係者で共有する	個々の工事における設計に必要な地質・地盤情報を得る
実施内容 と成果	※事業に影響する“地質リスク”を抽出・評価・分析し対応方針を策定する。 ※地質リスク抽出結果図、地質リスク基準、地質リスク管理表、措置計画、後続調査計画	※個々の業務における各種地質調査 ※ボーリング柱状図、土質試験結果、調査結果成果図(平面図・断面図)等
留意点 及び課題	※出来るだけ 事業の早期段階から実施 することが有効 ※事業進捗(各事業段階)を通じて 継続的に実施 することが重要 ※ 不確実性を有する地質情報に対する理解を関係者間で共有	※調査成果は個々の業務(実施者)でバラつきが生じる。 ※事業全体のリスクを“見える化”することはできない。

地質リスク調査検討業務の基本的な流れ



地質リスク調査検討業務の内容

④地質リスク解析:地質リスクの分析・評価

地質リスクランク (AA~C) の設定例 (定量化の試み)

		可能性の高さ(発生確率) L				
		非常に低い 評点:1	低い 評点:2	中程度 評点:3	高い 評点:4	非常に高い 評点:5
影響度 E	非常に高い 評点:5	B (R=5)	A (R=10)	A (R=15)	AA (R=20)	AA (R=25)
	高い 評点:4	C (R=4)	B (R=8)	A (R=12)	A (R=16)	AA (R=20)
	中程度 評点:3	C (R=1)	B (R=6)	B (R=9)	A (R=12)	A (R=15)
	低い 評点:2	C (R=1)	C (R=4)	B (R=6)	B (R=8)	A (R=10)
	非常に低い 評点:1	C (R=1)	C (R=2)	C (R=3)	C (R=4)	B (R=5)

表中(R=)は、リスクスコア(R=E×L)

—地質リスクランク(AA~C)の定義とリスクスコア—

AA:回避:リスクを回避することが望ましいリスク事象(R=20以上)

A :回避・低減:回避または詳細な地質調査を実施して、完全なリスク低減対策を講じるべきリスク事象(R=10~19)

B :低減:地質調査を行い、調査結果に応じた適切なリスク低減対策を講じるべきリスク事象(R=5~9)

C :保有:リスク回避や低減対策を必要とせず、施工段階へリスクを保有することが可能な事象(R=5未満)

地質リスク調査検討業務の内容

④地質リスク解析:地質リスクの分析・評価

地質リスクのランク付け定義例

地質リスクランク	対応方針	具体的な対応	想定事象
AA	回避	計画の見直し・大幅な変更	・事象が発現した場合、通常考えられる対策工で対応ができない事象。例:大規模な地すべりや深層崩壊等の発生で、対策工での対応が困難なため、構造も含めた計画路線を変更
A	回避・低減	計画の見直し・大幅な変更、もしくはリスク対応することを前提に詳細な調査や検討を実施し、確実なリスク低減策を講じる	・事象が発現した場合、構造形式の変更が必要となる場合や安全性が著しく低下する事象。 例1:切土で地すべりが発生、追加調査や追加対策工が必要 例2:支持層が予測より深く、基礎形式を変更 例3:自然由来重金属類を含む掘削土があり相当の対策が必要
B	低減	リスク対応することを前提に詳細な調査や検討を実施し、結果に応じて低減策を講じる	・事象発現でも軽微な追加対策や対策範囲の変更により対応できる事象。例:軟弱地盤の改良範囲が軽微な範囲で変更
C	保有	次の事業段階へリスクを保有	・事前の低減対策等の必要性が低いため、施工段階や維持管理段階にリスクを保有する事象。例:基礎地盤にわずかな不陸があるが現場対応で対処可能

地質リスク調査検討業務の内容

④地質リスク解析:地質リスクの分析・評価

リスク管理表（登録表）の例

番号	リスク内容	リスク詳述	状況	リスク分析手法	影響度 E		発生確率 L		リスクスコア (E×L)	地質リスクランク	リスク分析結果	対応計画概要	優先度
					重大性	評価点	可能性	評価点					
①	緩斜面の成因が不明確	地すべりか崖錐堆積物により不安定化する範囲が異なり、対策工の規模が問題となる。	C	写真判読、地表踏査の実施。	高い	4	中程度	3	12	A	判断ミスは、その後の対策方針や費用に大きく影響する。	写真判読、地表踏査等の結果踏まえ、ボーリング調査などの追加調査を実施。	1
②	地下水の変動が不明確	地下水位の変動が不明なため斜面の安全率が低下する可能性がある。	C	地表踏査、既存報告書を吟味し追加調査を実施。	低い	2	低い	2	4	C	①のリスク分析結果にもよるが、追加調査により判定。	詳細調査時に地下水位測定、地下水検層等を実施。	2
③													
④													
⑤													

【凡例】

<状況>

L:リスクが発生し、その程度が特定された状態

C:リスクが発生しているが、どの程度なのか特定されていない状況

P:リスクが取り除かれた状態

G:リスクではない状態

T:危機

O:好機

<地質リスクランク区分> リスクスコア(リスク程度 $R=E \times L$)

AA:リスクを回避することが望ましいリスク事象($R=20 \sim 25$)

A:詳細な地質調査を実施して、完全なリスク低減対策を講じるべきリスク事象($R=10 \sim 19$)

B:地質調査を行い、調査結果に応じた適切なリスク低減対策を講じるべきリスク事象($R=5 \sim 9$)

C:リスク回避や低減対策を必要とせず、施工段階へリスクを留保することが可能な事象($R=1 \sim 4$)

地質リスク調査検討業務の内容

⑤地質リスク対応の検討:後続調査計画とリスクコミュニケーション計画

・後続調査計画のPoint!

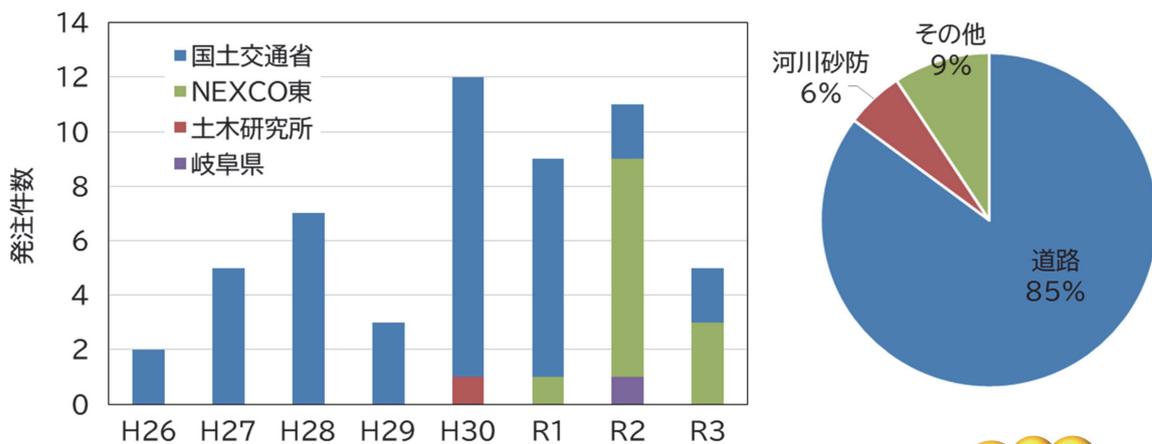
設計に必要となる通常のボーリング調査計画に加え、分析・評価した地質リスク事象に対応した調査計画を立案

調査計画は優先度や新技術の適用も考慮した効率的、効果的計画となるよう留意

・リスクコミュニケーション計画のPoint!

リスク措置計画や残存リスクを確実に後続業務や関連業務に引き継ぐため、いつ(時期)、誰が(主催者・参加者)、どの内容を(具体的リスク項目)、どのように(目的や手段)、リスクコミュニケーションを図るか具体的に計画

地質リスク調査検討業務等の発注実績 －発注件数の推移－



当初は通常業務
の変更処理での実
施が多かった

R1よりNEXCO
東の発注が急増

道路分野が圧
倒的に多い

資格要件(活用を推奨する資格要件)

資格	役割	資格概要
・地質リスク・エンジニア(GRE)	・管理技術者 ・担当技術者 ・地質技術顧問	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地質リスクに起因する事業損失を地質に関する技術力とマネジメント力により回避・予防・低減する能力を有する技術者 ➢ 地質リスク調査検討業務の管理技術者や、リスクマネジメントの発注者側責任者を補佐する地質技術顧問
・応用地形判読士 (国土交通省登録資格)	・担当技術者(地質リスク情報の抽出) ・地質技術顧問	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地形図や空中写真などを用いて大地のなり立ちを読み解く“応用地形判読技術”の専門家 ➢ 地形・地質リスク情報の抽出に大きな効果を発揮する
・地質調査技士 (国土交通省登録資格)	・担当技術者	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地質調査の現場業務に従事する主任技術者の資格 ➢ 地質調査法等に関する熟練した経験と知見がある
・地質情報管理士 (国土交通省登録資格)	・担当技術者	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地質情報の電子化・利用に係わる能力(IT関連、座標情報、電子認証など)を有する地質調査技術者を認定する資格 ➢ 3次元化した地質情報を設計・施工などに活かすことでインフラ分野全般の効率化や高品質化につながる

積算歩掛構成

大項目	実施項目
①計画準備	◆ 計画準備
②打合せ協議	◆ 業務打合せ
③関係機関協議	◆ 関係機関との協議
④地質リスク対応方針策定	◆ 計画諸条件の確認
⑤地質リスク情報抽出	◆ 地形解析
	◆ 文献資料調査
⑥地質リスク現地踏査	◆ 現地踏査
⑦地質リスク解析	◆ 地質リスクの抽出
	◆ 地質リスクの分析・評価
⑧地質リスク対応の検討	◆ 地質リスクマネジメント対象事業判定
	◆ リスク対応方針の検討
⑨三者会議	◆ 三者会議
⑩報告書作成	◆ 報告書作成

全国標準積算資料(土質調査・地質調査)
積算基準(案)

(地質リスク調査検討業務)

令和3年8月

一般社団法人全国地質調査業協会連合会
積算委員会

詳細は地質関連情報WEB(全地連HP)

https://www.zenchiren.or.jp/sekisan/sekisan_sonota.html

活用が期待される新技術

No.	調査手法	目的	構想・計画段階	調査・設計段階
			現地立入不可 (公共地制限)	現地立入可能
①	航空レーザー計測 UAVレーザー計測	・高精度微地形解析による地すべり判読 ・傾斜量図、CS立体図を用いた落石等危険個所の抽出	◎	◎
②	空中物理探査	・3次元地盤物性の把握	○	○
③	干渉SAR を用いた 地盤変動解析	・地盤変動の把握	◎	○
④	携帯型蛍光X線分析装置	・自然由来重金属の含有量分布状況把握	○	◎
⑤	ハンドヘルドレーザー計測	・高精度微地形調査		○
⑥	高品質ボーリング	・高品質コアの採取		◎
⑦	浅層反射法探査	・支持地盤の連続性の確認		◎
⑧	微動アレイ探査	・支持層分布の推定(一次元微動アレイ探査、2次元・3次元微動探査)		◎
⑨	3次元電気探査	・地質、地下水の3次元分布状況の把握		○

ご清聴有難うございました



第Ⅲ編

第2部 事例研究論文

【論文 No. 1】 山岳道路の維持管理における地質リスクマネジメント（盛土崩壊の事例）

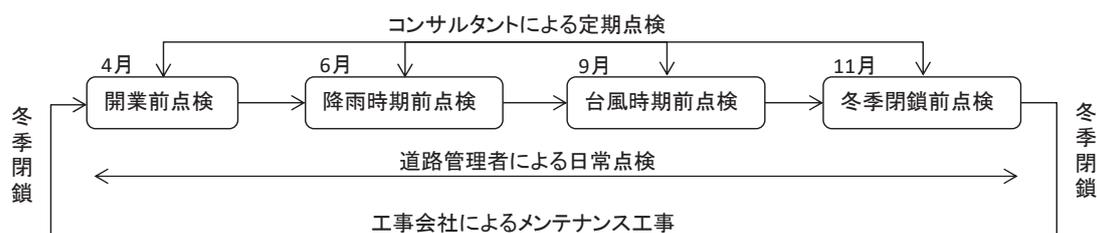
株式会社エイト日本技術開発 ○居川信之
（地質リスク・エンジニア 登録番号 27）

1. 事例の概要

当該道路は、中部地方の山岳地域に位置し、標高 200m～1200m の区間を通る全長約 17km の一般自動車道である。ほぼ全線にわたり切土・盛土法面や急峻な自然斜面が連続し、表 1 に示すような地質リスク要因が存在する。これらに対応するため、道路管理者（事業者）・コンサルタント・工事会社の 3 者により図 1 に示す体制で防災対策が行われている¹⁾。

表 1. 当該道路に存在する地質リスク要因

地形要因	地質要因	災害種別	対応策
自然斜面	風化・亀裂の発達した岩盤、転石・浮石	斜面崩壊・落石	発生源対策・待受け対策
切土法面	風化・亀裂の発達した岩盤、経年劣化	法面崩壊	法面保護工
盛土法面	軟質な盛土材料、排水不良、経年劣化	法面崩壊	盛土補強・排水工
谷地形	谷底堆積物	土石流・土砂流出	谷止工



（12月～3月の冬期間は積雪のため通行止めとなる）

図 1. 本道路における年間の防災対策の流れ¹⁾

本事例は、降雨を要因として発生した盛土の崩壊である。施工過程や詳細な形状が不明な盛土地盤を地質リスク事象とする事例で、リスク発現によって多大な復旧費用と通行止め期間中の通行料収入の減少を招いた。この盛土は、施工後 50 年以上が経過した古い盛土で、自然植生の繁茂により周囲の自然斜面と同化したために盛土範囲の特定や表面排水施設の状況把握が困難となり、変状の予兆をとらえる事ができなかった。そのため管理の手が行き届かず、台風に伴う地表水の流入により大規模な崩壊に至った。

2. 事例分析のシナリオ

(1) 盛土崩壊の状況

2018 年 9 月 30 日～10 月 1 日にかけて紀伊半島に上陸し本州を縦断した台風 24 号に伴う豪雨によって、本道路の盛土が崩壊した。崩壊の規模は、幅（道路延長方向）約 50m、長さ（法面方向）約 180m で、崩壊土量は約 10000m³ である(図 2)。崩壊土砂は下流の沢を約 50m 流下したのち支川と合流し、さらに約 100m 下流までの間で分散し定置した。盛土下方（支川との合流部より上流の沢部）はボトルネック地形となっているが、この部分の溪岸斜面に顕著な表土の削剥、土砂の駆け上がり等は認められないことから、崩壊土砂は一気

に滑落したのではなく、土石流化することなくある程度の時間をかけて流出したものと推定される。

(2) 崩壊要因

崩壊発生前後の連続雨量は325mm（崩壊地から直線距離約3.5kmに設置された雨量計による）であり、当地域・当年度における最大の雨量であった。本道路の通行止め雨量基準は連続100mmであり、崩壊発生時は通行止め中であった。



図2. 崩壊箇所の全景写真

当該箇所の道路を挟んで上方の斜面は集水地形となっているため、相当量の地表水が横断管路を介して盛土側に流入したものと考えられる。なお、盛土上部を横切る道路には排水溝が整備されており、路面排水の流入はなかったものと思われる。法面には岩座張り水路（雑割石による練石張りの縦排水溝）が設置されており、道路から目視できる範囲においては破損は確認されていなかったが、下方では経年劣化による破損が進み斜面を侵食していた可能性がある。上述のように土石流化していないことからみて、水路末端部から徐々に侵食が進み、斜面下部の抑えを失った道路際の土砂が崩落したものと推定される。

今回のリスク発現の要因を整理すると、以下のようなものである。

- ①集水地形部に構築された盛土であり、降雨時には地表水が流入する地形となっていた。
- ②施工年次が古く詳細な形状が不明な盛土であり、道路維持管理においてその存在に注意を払っていなかった。そのため維持管理の手が届かなかった。
- ③盛土の排水施設が道路から目の届かない箇所では破損していた可能性がある。

(3) 復旧工事

復旧工法は、原形復旧を基本とし盛土斜面を再構築することとした。ただし原斜面の勾配が一般的な盛土勾配（1:1.8）よりも急であったため、フトンカゴを併用した補強盛土とした。復旧に要した土量は約15000m³である。また排水工として幅2mのコンクリート製水路を盛土中央に設置した(図3)。



図3. 復旧工事平面図

(4) 事後調査

復旧工事完成後、本道路の他の箇所における同様のリスク箇所を把握する目的で、路線全体の航空レーザー測量を実施した。LP地形図を用いて路線全体にわたって表1に示したよ

うな地質リスクを把握し、今後の予防保全対策に生かすこととした。

3. データ収集分析

崩壊直後に、崩壊範囲の把握及び対策工設計のためにドローンによる写真測量を実施した。崩壊面の目視観察により崩壊した盛土の土質状況や地山の地質状況の把握が可能であったため、ボーリング調査等の地質調査は実施していない。なお、崩壊部からの湧水や谷埋土・旧表土のような軟弱地盤の存在は確認されなかった。

当該盛土は、昭和40年頃の道路建設時に施工されたものである。盛土の諸元は不明であるが、施工当時の平面図を確認したところ当該箇所は「残土処理場」と記載されており、土工により発生した残土による谷埋め及び腹付盛土であることがわかった。集水地形部に造成されており、盛土の規模は、幅約120m、長さ約180m、高低差約70m、盛土層厚は最大10m程度であったと推定される。

盛土の材質は岩ズリを主体とした粗粒土であり、盛土の末端は井桁組擁壁により補強されている。法面排水は石張りの水路工が構築されていたようであるが詳細な構造は不明である。崩壊前の法面には低木を主体とした自然植生が繁茂し、周囲の自然斜面と見分けがつかない状態であった。そのため、日常の維持管理点検や定期防災点検においては、変状の兆候を把握することはできていなかった。

4. マネジメントの効果

「盛土の存在をリスクと認識してその健全性の調査を行い、排水工の破損や法面侵食の状況を把握して予防保全対策を行った」と想定して、コスト比較を行った結果を表2に示す。

表2. 盛土崩壊対策想定コスト比較

費用		費用 (千円)		工期
①復旧工事 (実績)	測量・設計	1,000	127,000	6ヶ月
	盛土工	112,000		
	水路工	14,000		
②予防保全対策 (想定)	レーザ測量、現地踏査	6,000	16,000	2ヶ月 (測量・調査期間除く)
	水路補修	5,000		
	法面補修	5,000		
マネジメント効果 (①-②)			111,000	

5. データ様式の提案

本事例では、発現した地質リスクに対して予防保全対策を行う場合のコストを想定することによって地質リスクマネジメントの効果を計量化した。これらを考慮してB表に記入したが、道路の維持管理段階における事象であることから、対象工事の欄は空欄とした。また維持管理におけるリスクの楽観的評価の内容について追記した(表3)。

<参考文献>

- 1) 居川信之・斎藤正朗・中川遼也 (2015) : 山岳道路における落石発生に関する要因分析と防止対策の検討例, 全地連「技術フォーラム2015」名古屋

表3. データ収集様式B表（地質リスクが発現した事例）

大項目	小項目	データ	
対象工事	発注者		
	工事名		
	工種		
	工事概要		
	① 当初工事費		
	当初工期		
リスク発現事象	リスク発現時期	盛土法面完成後約 50 年経過	
	トラブルの内容	台風に伴う豪雨により盛土全体が崩壊した。	
	トラブルの原因	排水工の破損が原因と考えられる。	
	原因となった(楽観的)リスク評価	施工後長期間が経過し、見かけ上自然斜面と一体化したため安定性に問題があるとは考えなかった。	
	事業への影響	盛土全体を再構築することとなり、長期間の通行止めが必要となった。	
復旧工事の内容	追加調査の内容	ドローンによる測量	
	復旧設計内容	補強盛土及び排水工の設計	
	対策工事	フトンカゴを併用した補強盛土の構築	
	追加工事	コンクリート製縦排水路の設置	
	追加費用	追加調査	700 千円(写真測量)
		復旧設計	300 千円(盛土設計)
		対策工	112,000 円(盛土復旧)
		追加工事	14,000 円(コンクリート水路設置)
		② 合計	127,000 円
	延長工期	6 ヶ月	
間接的な影響項目※	通行止め期間の道路通行料収入(約 45,000 千円)の減少		
負担者	運営事業者		
リスク管理の理想像	対応(すべき)時期	降雨時期前	
	対応(すべき)者	道路事業者及びコンサルタント	
	対応(すべき)内容	予防保全対策の実施。変状(法面侵食)の兆候を察知し、速やかに水路の補修及び法面変状箇所の補修を行う。	
	判断に必要な情報	盛土法面の変状の把握(航空レーザー測量)	
	対応費用	調査	6,000 万円
		対策工	—
		③ 合計	6,000 円
	想定工事	工事概要	法面水路工及び法面侵食箇所の補修
④ 工事費		10,000 円	
工期		2 ヶ月	
リスクマネジメントの効果	費用 (((①+②※)-(③+④))	156,000 千円	
	工期	4 ヶ月	
	その他	航空レーザー測量は路線全体の広域測量を実施し、他の箇所のリスク把握にも利用する	

濃い網掛け：原案(様式)修正箇所

※間接的な影響項目にかかる費用も追加費用に含めたため、表2に示す金額と違っている。

【論文 No. 2】 暫定2車線区間の4車線化に向けた地質リスクの検討事例

株式会社ダイヤコンサルタント北海道支社 ○近藤 桂二、渡辺 一樹
(地質リスク・エンジニア 登録番号 44)

1. 事例の概要

北海道では近年の激甚化・頻発化する災害からの復旧や交通混雑の緩和及び交通事故低減による安全性向上、アクセス性改善によるインバウンド観光の振興等を目指し、国土幹線道路ネットワークの機能強化対策が行われている。このような背景の中、建設事業における地質リスクの抽出不足や評価の見誤りは工事遅延や事業費増大に直結するため、これらの諸問題を解決することを目的として地質リスクマネジメントが活用されており、その事例について紹介するものである。

本事例の特徴は、暫定2車線区間（Ⅰ期線）を4車線化（Ⅱ期線）に向けた事業であり、すでに供用路線が並走していること、対象範囲が100km以上と非常に長いことである。そのため、本検討区間は地質リスクも多種多様であり、起点側の平地部の泥炭性軟弱地盤の分布、中間部丘陵地～山岳地帯における第三紀泥岩の地すべりや蛇紋岩によるトンネル区間の変状、終点側山脈の急峻な沢地形による土石流などがある。

これらについて、特にⅠ期線調査時や施工時・供用時の情報は、Ⅱ期線を施工するに向けて非常に重要かつ有用である。そのため、まずはこれらの資料収集・整理を行い、調査地全体の地質リスクを把握し、地質リスクの評価・検討を行うという方針とした。

2. 事例のシナリオ

本検討で実施した地質リスクの検討フローを図1に示す。

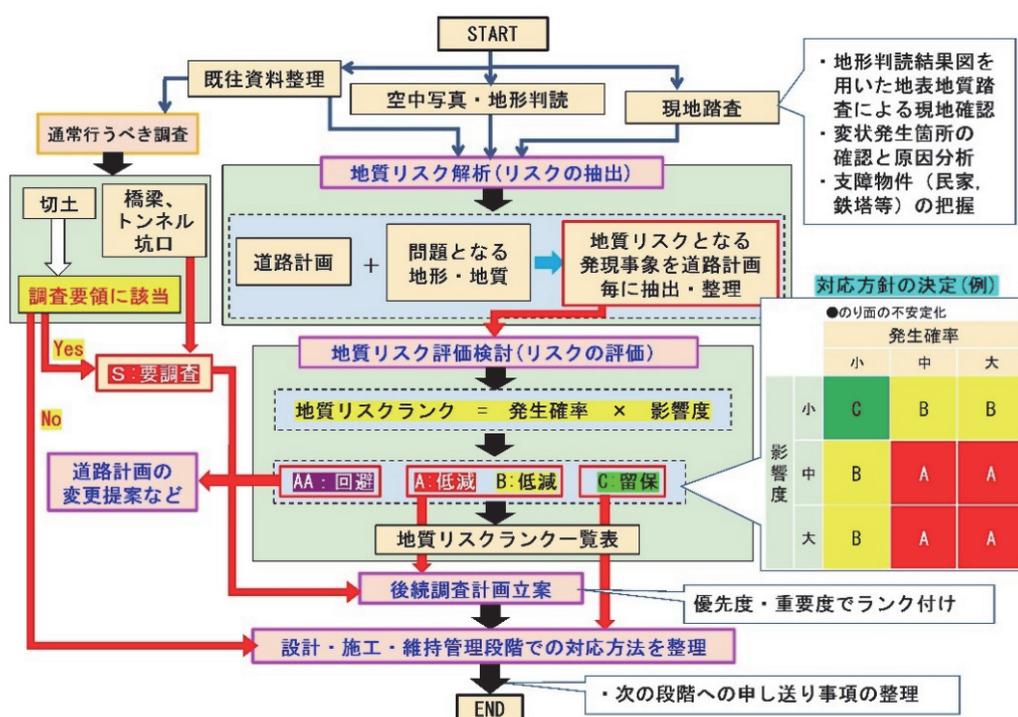


図1 地質リスクの検討フロー

本事例では図1のフローに従って既往資料の収集、地形判読、現地踏査から得られた情報を基に、地質リスク解析（リスク抽出）を行い、地質リスクとなる発現事象を道路計画毎に整理し、発生確率と影響度から地質リスクの評価を行った。最終的には地質リスクを低減する必要性が高い箇所（地質リスクランクA）について、後続調査計画を立案した。

3. データ収集分析

3.1 既往調査及び変状発生事例の情報収集分析

I期線における地質調査は、調査段階、工事段階で数年にわたり多数行われており、各地質業者間で不統一・不整合である場合が多く、地質平面図や地質縦断図が全体の統一性が損なわれており、特に接続部分が問題となった。そのため、本事例ではまず収集した既往資料を基に全体の地質平面図・縦断図を更新し、それらを基に各IC間で地質層序表をとりまとめた。

また、これら既往資料の他に各種文献（北海道地方土木地質図：日本地質学会北海道支部など）や地理情報システム（GIS：国土地理院）を利用し、地形傾斜角や陰影図などを作成した。これらには、路線の線形やトンネル区間を表示するとともに、地すべり地形、断層、鉱床等の位置を記載した。さらに、I期線の地質調査時の留意点や施工段階あるいは供用後における災害事例等については、地すべり、切土のり面およびトンネル毎に一覧表や図面・写真等でとりまとめ、今後の地質リスクの抽出で活用できるようにした（表1、表2、写真1）。これらの図面や資料は現地踏査の際に活用し、地質リスクの抽出を漏れなく、見逃さないように留意した。

表1 I期線供用後の災害事例

番号	発生した災害	発生した日時	主な誘因	連続雨量(mm)	地質	切土高H(m)	盛土高H(m)	勾配	崩壊規模
①	切土のり面表層崩壊	H28.8.29	降雨(台風)	388.5	崖錐堆積物(dt)	5	-	1:1.5	切土1段の表層崩壊
②	トンネル坑口土砂流出	H28.8.29	降雨(台風)	388.5	日高上部花崗岩(Hgr)	-	-	1:1.5	約50,000m ³ 土砂流出
③	切土のり面崩落	H28.8.29	降雨(台風)	388.5	日高上部花崗岩(Hgr)	37	-	1:1.5	切土1~2段目の表層崩壊
④	切土のり面崩落	H28.8.29	降雨(台風)	388.5	日高上部花崗岩(Hgr)	25	-	1:1.2 ~ 1:1.5	切土1~4段目の表層崩壊

表2 I期線施工時における災害事例（トンネルの例）

トンネル名	地すべり名・変状内容	対策工など	変状箇所番号	
トンネル（本坑）	起点側坑口	「トンネル西坑口」地すべり 天端の崩落、鏡面の肌落ちが収まらない、地表面沈下も顕著	なし	39-1b
	一般部① (ワタマイ層分布域)	STA632+76.8 天端崩落(100m ³) STA633+27.8、633+43.8 天端の崩落	空洞充填工、縫い返し	39-2t
	一般部② (蛇紋岩分布域)	STA640+68.7、641+66.7、647+08、 649+62.0、651+75.5切羽天端の崩落 STA655+98.8切羽から大規模な土砂の崩落(230m ³)	空洞充填工、縫い返し	39-2t
	終点側坑口	「A地区」地すべり	集水井工、水抜きポリング、垂直縫地工	32a



写真1 I期線トンネル掘削後の盤膨れの状況

3.2 地質リスクの抽出及びとりまとめ

(1) 地質リスクの抽出

当該路線の道路計画と地質リスク要因の関係から地質リスクの発現事象を整理した結果、主に6つのパターン（①のり面の不安定化、②盛土の不安定化、③近接施工（JR線等）、④液状化、⑤土石流、⑥トンネル施工）となった（表3、表4）。なお、これらの中に該当しない地質リスクもあるため、それらについては個別に対応した。

また、特に本事例ではI期線が供用されていることから、地すべりや蛇紋岩地帯におけるトンネル坑口施工や軟弱地盤上のII期線拡幅盛土施工により、I期線供用路線への影響が懸念されることが、通常の新規路線の地質リスクと比べて大きく異なるところである。

表3 道路計画と地質リスク要因の関係
(切土とトンネルの例)

		道路計画		
		切土	トンネル	
			坑口部	一般部
地形	地すべり	①-a 滑動誘起、のり面の不安定化	①-a 滑動誘起、坑口斜面の不安定化	⑥ 滑動誘起 ⑥ 断面変形 ⑥ 天端崩落
	集水地形、沢地形	-	-	⑥ 沢部(土被りの小さい区間)での断面変形 ⑥ トンネル内の湧水
地質 構成	未固結堆積物	①-b のり面の不安定化、表層崩壊	①-b 坑口斜面の不安定化	⑥ 偏土圧の発生 ⑥ 切羽の不安定化
	強風化岩盤	①-b のり面の不安定化、表層崩壊	①-b 坑口斜面の不安定化	⑥ 偏土圧の発生 ⑥ 切羽の不安定化
	スレーキング	①-c 既往のり面のスレーキングの進行 a のり面の不安定化、表層崩壊	a 坑口斜面の不安定化	・路盤の膨張 ・切羽の不安定化
	葉片状蛇紋岩	-	-	・路盤の膨張 ・切羽の不安定化 ⑥ 断面変形
	粘土化した凝灰岩	①-b のり面の不安定化、表層崩壊	-	-
	断層破砕帯	-	-	⑥ 天端崩落 ⑥ 断面の変形
	水理地質	湧水・地下水	c のり面の浸食・不安定化	c 坑口斜面の浸食・不安定化
表流水・河川水	c のり面の浸食・不安定化	⑤ 土石流堆積物による坑門工の不安定化、路面への土砂流出	-	

表4 地質リスクの発現事象とタイプ分け

地質リスク	発現事象のタイプ分け
① のり面の不安定化に関する事象	①-a 地すべりが関与するのり面の不安定化
	①-b 未固結堆積物、強風化岩盤、粘土化した凝灰岩によるのり面の不安定化
	①-c スレーキング進行によるI期線のり面の不安定化
② 盛土の不安定化に関する事象	②-a 軟弱地盤上の盛土の不安定化
	②-b 捨土上の盛土の不安定化
③ 近接施工に関する事象	③-a 近接施工(JR、I期線)への影響
	③-b 橋台背面盛土による側方移動
	③-c 盛土そのもの沈下
④ 液状化に関する事象	④ 液状化に伴う盛土の不安定化
⑤ 土石流、土砂流入に関する事象	⑤ 土石流堆積物による構造物の不安定化、路面への土砂流出
⑥ トンネル施工に関する特有の事象	⑥ 切羽の不安定化、偏土圧の発生、断面の変形、天端の崩落など

(2) パターン別の詳細な地質リスクランクの設定

地質リスクランクの設定は、前述した6パターンの発現事象で行い、その内、例としてのり面の不安定化に関する事象を図2に示す。地質リスクランクの設定はガイドライン¹⁾にも示されている[影響度]×[発生確率]を用いて行い、可能な限り定量的に評価できるように設定した。

影響度	地すべりや強風化部等を不安定化させる道路計画 層厚2m以上の強風化や未固結堆積物による崩壊		
	変状範囲が のり面1段程度 (現場対応が可能)	変状範囲がのり面 2~4段程度 (対策工が必要)	変状範囲がのり面5段以上、 あるいはトンネル坑口部や 橋梁基礎床掘り (追加調査、対策工が必要)
II期線のみ 影響	小	中	大
I期線、JR線、国道、 民家等に影響	中	大	大

		●のり面の不安定化 発生確率		
		小	中	大
影響度	小	C	B	B
	中	B	A	A
	大	B	A	A

		地すべりと道路計画との関係	
発生確率(地すべり)		地すべりをあまり不安定化 させない道路計画 (地すべり頭部切土など)	地すべりを不安定化 させる道路計画 (地すべり末端切土)
【II期 線すべり の活動性 】	・現地踏査で不明瞭 な地すべり地形とし て認識されたもの	小	小
	・現地踏査もしくは地 形判断のどちらかで 明瞭な地すべり地形 が認識されたもの	小	中
	・現地踏査で滑動性 や変状の認められる もの	中	大

地質リスク ランク		地質リスクの措置	
回避	AA リスク 回避	地質リスクを回避しないと、のちに膨大な事業の工費増大や工期遅延の問題が発生するもの	
低減	A リスク 大	現地調査等(詳細な地表踏査、地質調査、物理探査、孔内試験、室内試験、安定解析等)を実施し、対策工の検討を行うことで地質リスクの低減を行わないと、のちに膨大な事業の工費増大や工期遅延の問題が発生する恐れが高いもの	
	B リスク 中	現地調査等を実施し、対策工の検討を行うことで地質リスクの低減を行わないと、のちに膨大な事業の工費増大や工期遅延の問題が発生する恐れは高いものがあるもの	
保有	C リスク 小	施工・維持管理段階で対応可能なもの (例えば、盛土のり尻の洗掘等は、地質調査は通常必要ないため、設計・施工段階で対応可能であるなど)	

図2 地質リスクランクの設定方法(のり面の不安定化の例)

4. マネジメントの効果

(1) 地質リスク評価

既往資料から地質リスク評価までを取りまとめたものの例を表5及び図3に示す。表には各土工・構造物における既往資料の取りまとめ結果(I期線施工時および供用後の変状記録)や今回調査時における地形判読・現地踏査結果を取りまとめるとともに、地質リスクの発現事象とそれに対する発生確率と影響度から評価した地質リスクランクを示した。

表5 地質リスク評価一覧表(本事例から一部抜粋)

主要構造物名	既往資料等によるとりまとめ				本業務における地形判読・現地踏査・地質リスクの評価						
	I期線詳細調査時の 指摘事項 (代表的な 既往ボーリング等)		I期線施工時・供用後の記録		地形判読・現地調査結果		地質リスク				
	報告 番号	報告 番号	問題となる地形・地質の出現 および予想される地質リスク 対策前に発生した変状	追加調査・観測工 ・対策工	地形・地質状況	想定される地 質リスク	発現事 象の タイプ	発生確率 要因	影響度 評価事項	リスク ランク	
起点 坑口	B46 B54 B68	SM-70	<p>層厚5m程度の崖壁および強風化岩が分布する。斜面と平行な小断面が数条分布する。崖壁斜面の崩壊が予想される。</p> <p>地すべりが指摘されているが、動態観測では有意な変動は検出されない(B54)。 B1-61号孔でGL-12.5まで地すべり堆積物(B46)</p>	<p>緩みは切羽の前方で起こるため、注入式長尺先受け工ですべり面付近を縫い付ける。</p> <p>・脚部沈下対策SM-70。</p>	<p>・坑口北側の土被りが薄く、偏圧を生じやすい斜面形状となっている。</p> <p>・北側隣接斜面に地すべり地形が判読されている。坑口周辺もやや起伏のある斜面</p> <p>・現河床から計画坑口にかけて大規模チャートブロックが分布。</p> <p>・I期線坑口上方斜面に計器観測孔(跡)。</p>	<p>・I期線と比較的薄く、偏圧を生じやすい</p> <p>・坑口周辺斜面に小規模地すべりの有無について確認しておくことがぞましい。</p> <p>・天端からのチャートブロックの抜け落ちに留意</p>	<p>地すべり地形の末端部で、地すべり崩積土(?)が確認されている変状はないが、I期線坑口周辺斜面に対して対策工が実施されている。</p> <p>追加の調査が必要</p>	中	トンネル坑口	大	A

[論文 No. 3] 3次元電気探査を用いたトンネル拡幅湧水量予測による工事費・工期のリスク低減の一事例

齋藤 和春¹・平塚 賢二郎²・三原茂人³

¹セントラルコンサルタント株式会社 東京事業本部 (〒203-0034 東京都中央区晴海二丁目5-24)
E-mail: ksaitou@central-con.co.jp

²平塚地質株式会社 技術開発部 (〒359-1143 埼玉県所沢市宮本町本町一丁目7-2)
E-mail: hiratuka@hageco.co.jp

³セントラルコンサルタント株式会社 東京事業本部 トンネル G (〒203-0034 東京都中央区晴海二丁目5-24)
E-mail: smihara@central-con.co.jp

既往の老朽化したトンネルを拡幅する場合、拡幅掘削に伴う地山の崩落、突発的地下水の湧水の発生などの問題を生じることが多い。これら問題のリスクを低減するために、風化状況や地下水分布状況を高精度に予測することが施工安全性、工事費用の抑制に重要である。また、当該トンネルでは坑口部、内天盤から湧水が多数みられたことから、比抵抗電気探査が有効である。本調査では、トンネル背面の地盤の風化・劣化状況、地下水賦存状況を事前に予測・評価するためにトモグラフィ弾性波探査及び電気探査を実施した。電気探査は2次元比抵抗調査を複数の測線で実施し、FEMによる順・逆解析の繰り返しにより3次元モデルを作成した。また、ボーリング調査を併せて行い岩盤の劣化状況 地下水賦存状況等を総合的に評価した。

Key Words: three-dimensional electrical porosity method, tunnel geological investing, ground water, elastic wave exploration, hotline widening tunnel

1. 調査地と調査概要

1.1 調査地

調査地は、千葉県房総半島に位置する供用中のトンネルで実施した。図1に調査地の平面図を示す。当該トンネルは、戦時下の物資を輸送するために造られたら道路トンネルで、トンネル断面が小さいために近年の大型コンテナ等の通過に問題を生じている。また、トンネル断面が小さいことから地域住民の方の安全性が確保されないことから現況トンネルの直近海側に歩道トンネルが増設されている。トンネル本線及び歩道トンネルからは多数の湧水が確認された。特に両坑口部のトンネル天盤は土被りが薄く竹藪が密集しており、降雨時・後にはトンネル内亀裂から多量の湧水を生じている。

調査地周辺の地質は、新第三紀中新世三浦層群の砂岩、泥岩、凝灰岩の互層であり、トンネル付近の表地質は風化が進行している。地層は平行な互層で、走行N35°E、傾斜30°Nで、山地部から海側への流れ盤構造となっている。また、調査地周辺には既往地質図には断層が明示されている。トンネルは周辺地山の中の凹状地形で、延長は短く(延長140m)、土被りが小さい。トンネルを形成しているコンクリートも経年劣化し、一部には側壁等に水平クラックが認められ遊離石灰が湧水と共に析出している。歩道トンネルではさらに亀裂が多く、湧水を伴う遊離石灰の析出が顕著である。このようなことから地山の

ゆるみ、トンネル構造体の崩壊などが懸念される。

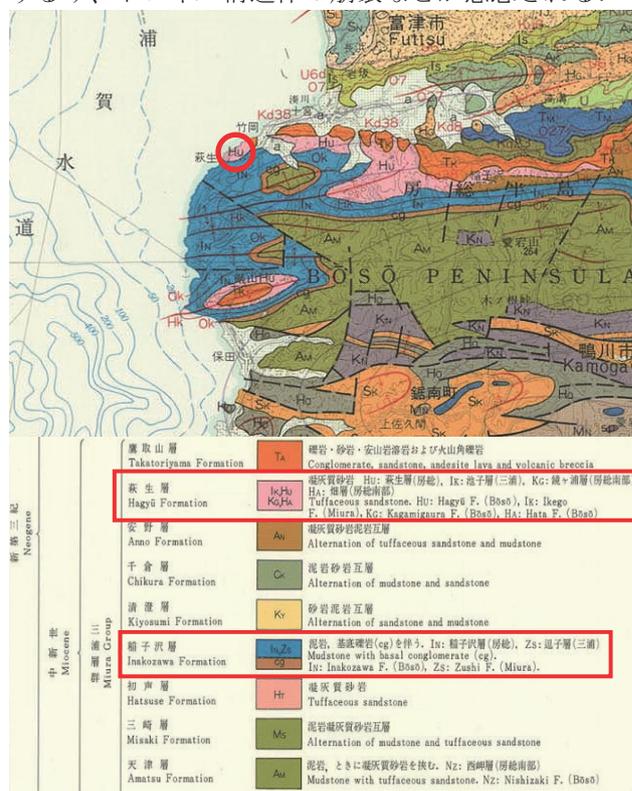


図1 調査地点位置図と地質

(出典：富津地域の地質 5万分の1 (独)産業技術総合研究所)

1.2 調査概要

トンネル現況の周辺地山の風化・堅硬状態、地下水賦存状況を精査しトンネル拡幅掘削時の課題・問題を明らかにし拡幅設計及び施工方法を確立するために、トモグラフィー弾性波探査、省力型3次元電気探査、ボーリング調査及び周辺山地地質踏査を実施した。調査は、トモグラフィー弾性波探査4測線、省力型3次元電気探査4測線、ボーリング調査2地点で実施した(図2参照)。

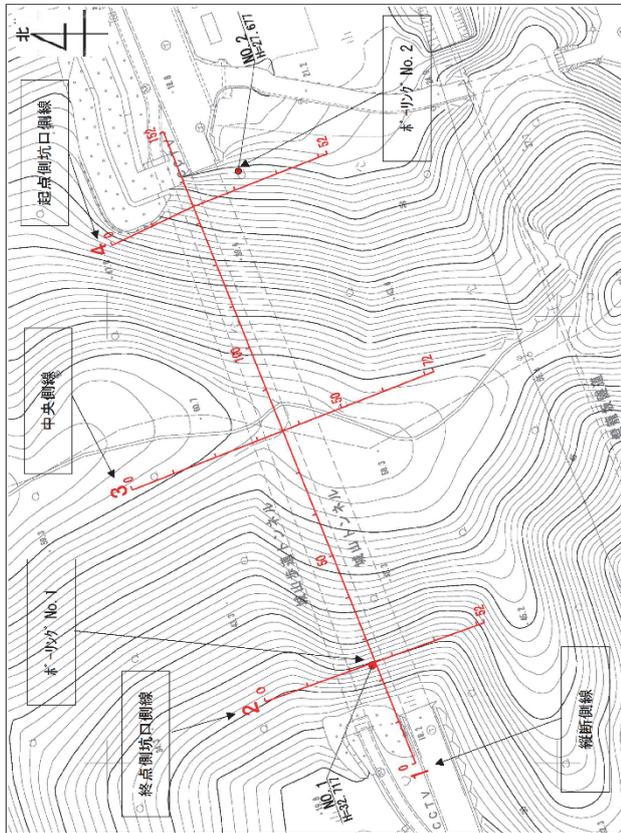


図2 探査側線位置及びボーリング地点位置図

トモグラフィー弾性波探査は、通常の地表部に起振点と受振点を設置して波の伝播速度を求める「はぎ取り法」では深部の低速度値、例えば断層破碎帯、岩盤劣化部が把握できないことの解析限界を大きく拡張することができるもので、深部の低速度帯等を明確に表示でき、近年の調査で活用されている。

省力型3次元電気探査は、これまでの電気探査法とは異なり、比較的少ない2次元電気探査測線を調査地に配置してデータを取得し、得られたデータを3次元解析する手法である。特徴としては、従来の2次元探査よりも解析誤差が少なく、3次元電気探査よりも低コストでの探査が可能である。3次元解析により、測線以外の比抵抗構造を推定できるため、切羽の状況を連続して推定できる。今回調査では特に、地下水の賦存状況を明らかにできた。省力型3次元電気探査では、FEMによる3次元解析を行う。

その手法は、下記の図3に示すように、3次元の初期モデルを2次元電気探査で得た全ての見掛け比抵抗の平均値による均一モデルとして、FEMにより

見掛け比抵抗の理論値と実測値の誤差を最小にするように順解析と逆解析を繰り返し収束させた理論値による3次元モデルを作成する手順となる。

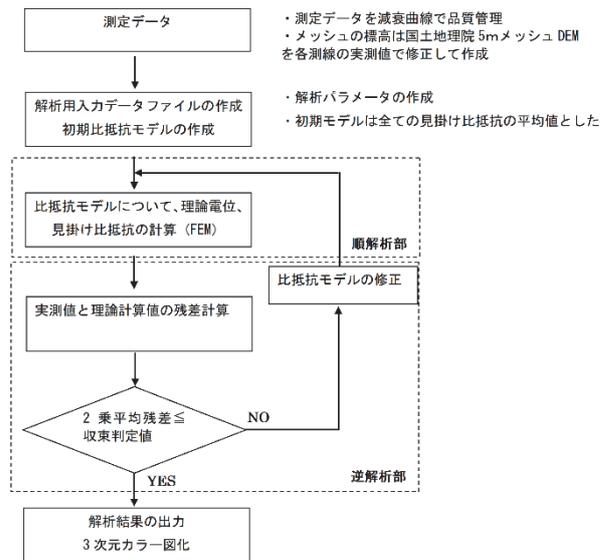


図3 3次元解析の手順

ボーリング地質調査は、ビニールコアパックを用いた高精度ボーリング調査でコアを採取した。採取したコア判定から岩盤の硬軟、岩級区分を弾性波探査結果と併せてトンネル施工区分の判定を行った。また、精緻なコア観察と地表地質踏査により断層破碎帯、連続する亀裂の有無をも推定した。

3. 調査・解析結果

3.1 調査結果

弾性波探査と省力型3次元電気探査の測線位置は同一としたが、省力型3次元電気探査による3次元解析の出力範囲は、下記の図4に示す既存トンネルを含む144m×92m×深さ48mのブロックである。

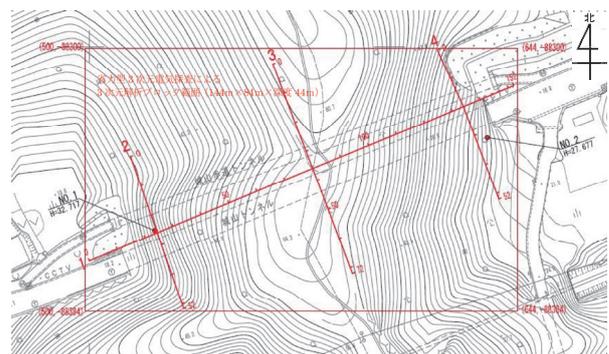


図4 省力型3次元電気探査解析範囲図

トモグラフィー弾性波探査結果と省力型3次元電気探査結果及びボーリング調査結果を併せて解析し統合した(図5)。図から終点側の青色(低比抵抗地帯)で示した位置は細粒化した岩盤が賦存し、多量の地下水が胚胎していることが推定される。両探査は降雨後の翌日(晴天)に実施した結果である。

図からは含水を多く含む位置の直下は不透水となっていると考えられる。

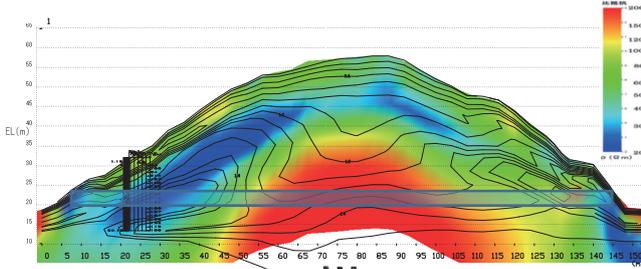


図5 トモグラフィー弾性波探査結果と省力型3次元電気探査解析結果の統合

図5の終点側坑口のボーリング調査は、両物理探査後に行ったため、表層からトンネル天盤部まで採取されたコア（深度0～20m）は比較的乾燥している（図6）。



図6 起点側坑口部の天盤のコア写真

3.2 解析結果

図5の各調査結果を総合した各断面から3次元比抵抗立体図を作成した（図7）。図7では水色のレンズ状の低比抵抗部が地下水賦存地帯である。

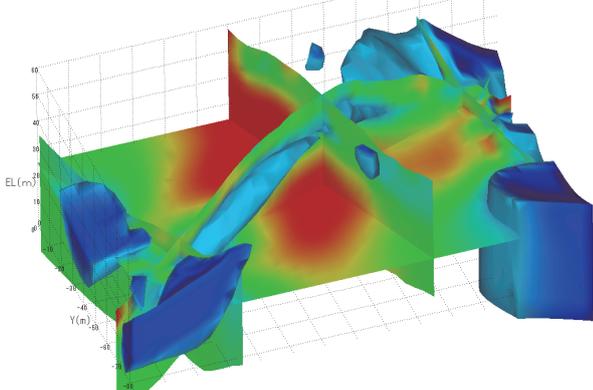


図7 3次元比抵抗立体図（パネルダイアグラム）

ボーリング掘削時の地下水位は深度 GL-10m 付近の開口亀裂付近に認められた。

また、図の両坑口部にある濃い青の低比抵抗部分は、鉄筋コンクリート坑門工の影響（偽像）である。

図4で示した範囲で実施した3次元 FEM 解析結果の解析精度はイタレーション5回の平均残差（RMSE）で、5回目ではほぼ収束し、実測値と理論値の残差は約5%と良好であった（図8）。その結果の理論値より作成した比抵抗立体図が図9である。3次元解析で得られた比抵抗値は、約20～200 Ωmを示した。このため比抵抗凡例はログスケール表示とした。

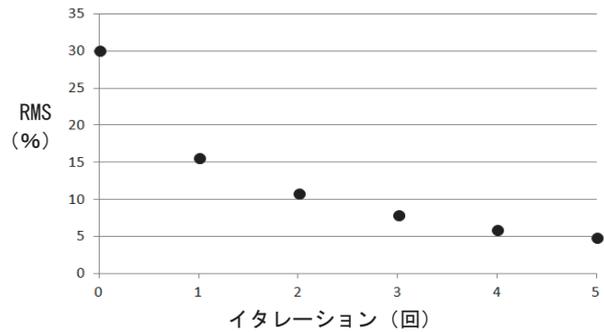


図8 3次元比抵抗 FEM 解析の残差

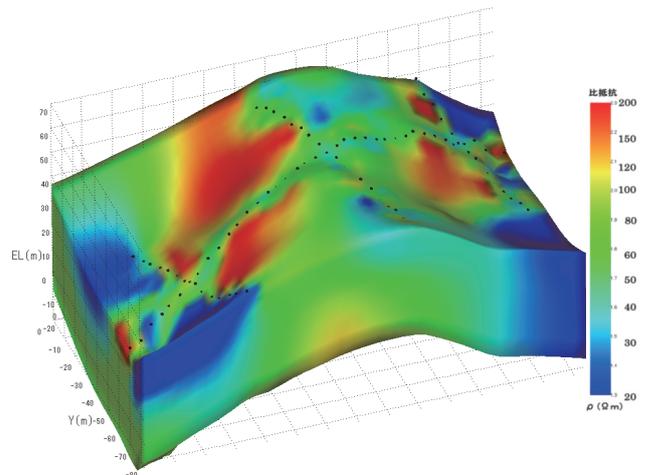


図9 3次元解析結果の比抵抗立体図

図5、図7で、深部の赤色の高比抵抗領域は不透水層となり、降雨時には表層から地下浸透した地下水はこの不透水層の上部を地下水として賦存、あるいは岩盤割れ目中に貯水する。その後岩盤割れ目や強風化帯を水ミチとして低い場所に流れ込むことが推定される。終点坑口の海側には、古くから枯れることのない井戸が観られる。トンネル頂部に降った雨は、岩盤割れ目中を裂隙水となり、この井戸のある低地帯付近に流れ込む場合も推定される。

トモグラフィー弾性波探査の結果からは、トンネル両坑口とも速度値で0.4～0.6km/sの低速度が表層から2～3mの厚さで分布することから地山の緩みが懸念される。比抵抗電気探査結果と併せると1D程

度と推定される。

3次元立体図で解析した岩盤に賦存する地下水と地形等高線との関係を見ると、下記の図10のように、トンネルは痩せ尾根の底部凹状の地形を通して、トンネル坑口に降雨時地下水が滞水・賦存することは明らかである。

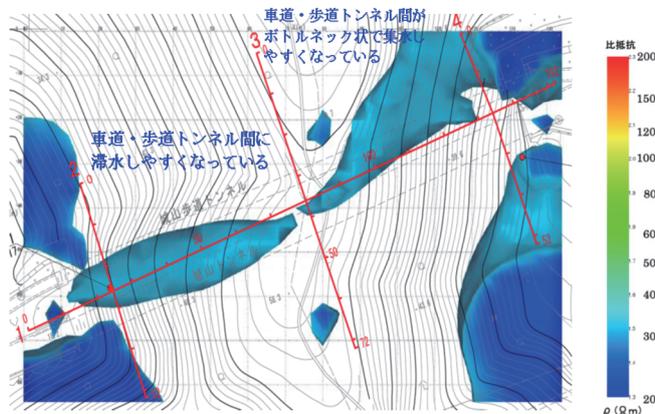


図10 地形と地下水滞水域の比較

また、図6で示したコアの含水状態から降雨時に滞水、貯水した地下水は数日後には流出し、乾燥が早く岩盤は湿潤状態程度となることが推定される。

4. まとめ

本調査の結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 本地区において2次元電気探査結果を用いてFEM解析の理論値による3次元比抵抗モデルを立体図として可視化する省力型3次元電気探査はトンネル岩盤状況、特に地下水賦存帯を把握するために極めて有効な探査方法である。
- 2) 高精度ボーリング調査及びトモグラフィー弾性波探査をも併せて実施したことで、地下水賦存帯の把握、岩盤の硬軟、風化・劣化状況をも詳細に把握することが出来た。また、ここでは降雨による浸透地下水は比較的早急（数日後）には流出することが推定された。
- 3) 当該トンネルにおいては、トンネル上部岩盤では風化・劣化が進行し地山の緩みが懸念され、掘削時には降雨による突発的湧水が多いことが予想される。これらのことが予見されたことは、拡幅工事時の安全性、施行性、経費等のリスク低減に大きく寄与されるものと考えられる。

謝辞

本調査で実施した省力型3次元電気探査は、（一般社団法人）省力型3次元地中可視化協会（竹内睦雄会長）の解析手法を活用させて頂きました。又、同協会会員によるご指導を頂きました関係各位様に、ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中里裕臣, 竹内睦雄他：省力型3次元電気探査法, pp. 34-35, 地盤工学会誌 No57, 2009.
- 2) 鬼頭雄也, 竹内睦雄, 平塚賢二郎他：3次元比抵抗分布から推定した地すべり地の地下水供給源と流下経路, pp. 39-42, 日本応用地質学会 中部支社研究発表会予稿集, 2014.
- 3) 岡崎健治, 伊藤佳彦, 竹内睦雄他：省力型3次元電気探査法のトンネル調査への適用, pp. 164-167, (公社)物理探査学会129回学術講演会論文集, 2013.
- 4) 神尾重雄, 太田直樹, 齋藤和春他：屈折法地震探査既往データのトモグラフィ的解析法適用の有用性と課題, pp. 249-258, 日本応用地質学会誌 No45, 2004.
- 5) 齋藤和春, 三枝博光, 渡辺邦夫, 宋元泰：推移確率行列と情報論的エントロピーを用いた岩盤割れ目系の解析, pp. 143-155, 日本応用地質学会誌 No43, 2002.
- 6) 椿雅俊, 笠谷政二, 竹内睦雄, 平塚賢二郎, 齋藤和春：省力型3次元電気探査による埋立地の調査・探査の適用性について, 第23廃棄物資源循環学研究会研究発表 セッション1D2-8, 2012.
- 7) 西川祐輔, 佐藤壽則, 渡辺寛, 寺田剛：山形県七五三掛地すべりにおける省力型3次元電気探査の事例, pp. 179-180, 日本地すべり学研究発表会講演集 No52, 2013.
- 8) 木下篤彦, 小杉賢一朗, 小川内良人, 内田太郎：平成23年台風12号で深層崩壊が発生した赤谷地区斜面の水文特性に関する研究, vol.66, No.66 pp. 3-12, 砂防学会誌, 2013.
- 9) 齋藤和春, 渡辺邦夫, Mahesh Raj GAUTAM：数量化理論およびニューラルネットワーク(ANN)によるトンネル湧水量予測に関する考察, pp.170-180, 日本応用地質学会誌 No42 3号, 2001.

【論文 No. 4】 地質リスク評価における簡易試験の有効性と適用上の留意点

応用地質株式会社 ○奥田 朱音
坂井 ころろ
清水 豊
(地質リスク・エンジニア 登録番号 65)
荒谷 忠

1. はじめに(事例の概要)

地質・地盤リスクは、地形地質を適切に区分・記載してその空間的分布を明らかにし、発現しうる事象の機構やリスク源の所在を明らかにする地質工学的側面と、地盤物性等を評価して解析・設計を行う地盤工学的側面があり、そのどちらが欠落しても適正なリスクマネジメントが困難となる。事業初期段階においては、地質・地盤情報が少ない状況でリスクを予見することが求められる。特に、山岳部の新規道路・斜面防災事業においては既往情報が乏しいのが一般的で、机上・現地調査で地形地質の概略は把握できても、その属性は記載・判断が難しく、評価上の課題となることが多い。

事業初期段階ほどリスク対応の選択肢が多いため¹⁾、事業に重大な影響を及ぼす地質リスクであっても、早期に把握すれば大きな手戻りなく低減・回避できる可能性がある。しかし、事業初期段階では地質調査成果が蓄積されておらず、リスク評価が難しいというジレンマが生じる。

そこで、地質調査で従来から用いられている簡便で低コストの試験法や、ハンドヘルド蛍光X線分析計²⁾のような可搬性が良く専門技術がなくとも現場で操作が容易な機器による試験計測（以下、簡易試験と呼ぶ）の適用の効果が期待される。簡易試験により、限られた予算・調査期間でも肉眼判定では評価し難い属性の推定、地質区分と物性値の相関性の検討、属性の空間分布等の概略検討が可能となる。

本論では、山岳部の新規道路ルート選定と岩盤崩壊の地質リスク評価において簡易試験を適用した事例を2件紹介し、簡易試験の有効性と留意点を考察する。

2. 簡易試験の適用事例(事例分析のシナリオ)

(1) 事例1: 新規道路のルート選定におけるシュミット式ハンマー試験の適用

① 調査検討の概要と簡易試験の目的

西南日本外帯の山岳部に計画された新規道路のルート選定にあたり、山岳トンネル、切土・盛土、橋梁等の建設を想定し、地質リスクの調査検討を行い、複数ルート案の優劣を比較した。当該地域は付加体（中生層）の整然相（砂岩と頁岩が互層する層状岩盤）と混在相（泥質岩、砂岩、チャート、石灰岩、緑色岩（塊状・片状））が分布し、計画ルートをどちらの地質帯に振れば地質リスクがより軽減されるかが評価上の焦点となった。



図1 シュミット式ハンマー試験の実施状況

文献調査、地形判読および現地調査を含む地質リスク検討において、地表地質踏査時に露頭を目視観察やハンマー打撃音による強度の推定に加え、シュミット式ハンマー試験を調査地域全域で実施した（図 1）。ハンマー反発度（打撃に伴うはねかえり量）は岩盤分類の指標のひとつとされ、一軸圧縮強度、変形係数、弾性係数等の概略評価に有効である³⁾。露頭スケールの硬岩～中硬岩の評価に適し、試験の実施・評価が簡易でコストが低廉であり、現場で多数の試験を実施できることから本試験を採用した。

② 試験方法

地表地質踏査とあわせて現地の露頭 52 箇所において岩盤のシュミット式ハンマー試験³⁾を実施した。使用した機器は、シュミット・ロックハンマーKS 型（PROCEQ 社製）である。測定方法は、露頭上でできるだけ平滑で新鮮な面を選定したのち、単打法で数十回程度の測定を実施し、整然相と混在相の構成する岩相毎にハンマー反発度（R 値）を得た。

③ 試験結果

シュミット式ハンマー試験のハンマー反発度（R 値）を岩相ごとに整理した（図 2）。最頻値に着目すると、整然相では、互層を構成する砂岩と頁岩で反発度差が明瞭で、砂岩は 60 付近であるのに対し、頁岩は 25 以下と 40 付近の二峰性分布を示し、砂岩よりも反発度が低い。

一方で混在相では、基質をなす泥質岩は 20 以下と明らかに他の岩相よりも低いのに対し、砂岩、チャート、石灰岩、緑色岩（塊状）のブロックではいずれも 60 付近と高い値を示し、基質部とブロックで反発度差のコントラストが大きい。緑色岩（片状）のブロックは、25 以下であり、基質部の泥質岩と同程度に低い。また、泥質岩と頁岩を比較すると、全体的に同様な分布傾向を示すものの、泥質岩は頁岩より低いモードが卓越し、鱗片状劈開が発達している岩盤状況を反映する。これらのことから、整然相主体部は強度差が比較的小さく、混在相主体部は強度差が大きい傾向が把握できた。

④ リスクマネジメント上の効果

新規道路のルート選定において、シュミット式ハンマー試験による岩盤強度特性の比較結果や露頭観察から、混在相は、地質リスク要因として岩相および強度の不均質性が高く、地山状況の予測や対応が困難である。よって地質リスクのうち、整然相のほうが不確実性

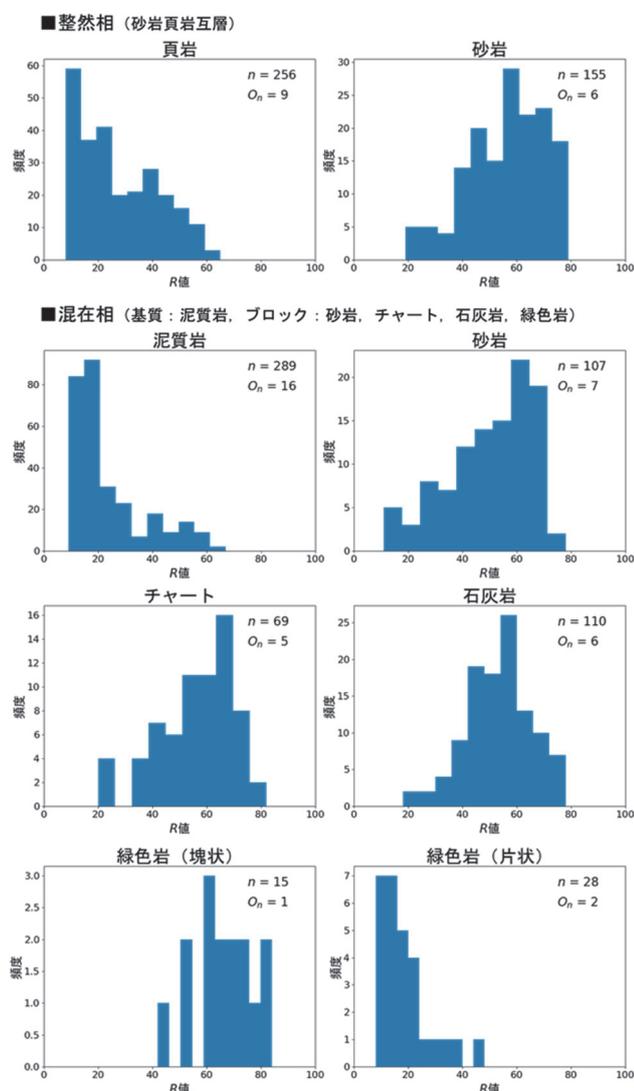


図 2 整然相、混在相の岩種別 R 値ヒストグラム (n : 測定数, O_n : 露頭数)

に起因したリスクが存在する可能性が低いと推定した。これを事業者・設計技術者に伝達し、リスク対応としての後続調査計画の基礎資料とした。

(2) 事例 2: 岩盤崩壊リスク評価におけるシュミット式ハンマー試験と帯磁率測定の適用

① 調査検討の概要と簡易試験の目的

供用中の幹線道路に近接する岩塔状の急崖斜面において岩盤崩壊のリスク評価、安定解析および対策検討を行った。対象となる急崖斜面は中新統火山岩類からなり、急崖斜面の基部には奥行 2~3 m の帯状の窪み（ノッチ⁴⁾）がみられる。ノッチ付近には硫酸塩鉱物の析出が確認された。ノッチが発達すれば岩盤斜面が不安定化することから、その形成要因や岩盤強度を把握することが評価検討上の焦点となった。ノッチが形成された要因としては、弱層の存在による差別侵食や風化作用（凍結融解や塩類風化）が考えられる⁵⁾。そのため、ノッチを構成する岩盤の強度を把握することを目的として、シュミット式ハンマー試験を実施した。また、ノッチを構成する火山岩には軟質部が認められることから、風化度の指標として帯磁率測定を適用した。

② 試験方法

急崖部でもっともノッチが発達する箇所を対象に、斜面縦断方向に測線を設け、ノッチの最奥部から斜面下方へ 20 cm 間隔でシュミット式ハンマー試験と帯磁率測定を実施した（図 3）。シュミット式ハンマー試験は、事例 1 と同じ測定器を使用し、1 測点あたり単打法で約 10 cm 四方の範囲で 10 回試験を行い、各測点のハンマー反発値（R 値）の平均値と標準偏差を求めた。帯磁率測定は、携帯型帯磁率計 KT-10（Terraplus 社製）を使用した。

③ 試験結果

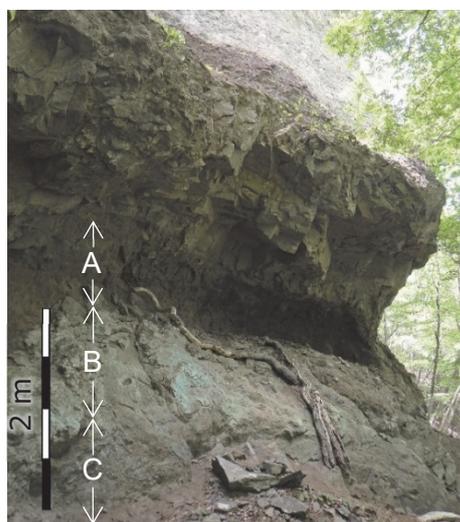


図 3 測定したノッチの全景

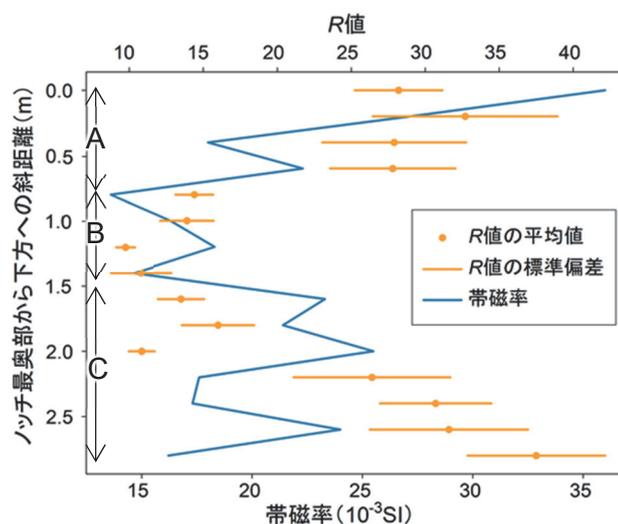


図 4 ノッチの R 値と帯磁率の鉛直プロファイル

試験結果をもとにハンマー反発度（R 値）と帯磁率の鉛直プロファイルを作成した（図 4）。反発度（R 値）は、A 区間（0.0-0.6 m）では 28-32 を示すのに対し、これより下方の B 区間（0.8-1.4 m）では 10-15 と最も低く、C 区間（1.6-2.8 m）では斜面下方につれ高くなる。

帯磁率は、A 区間では 20-35(10^{-3} SI)と比較的高く、ノッチの最奥部が最も高い。B 区間では、帯磁率は 15-18(10^{-3} SI)と最も低く、C 区間では 18-25(10^{-3} SI)と B 区間よりもやや高

い。ノッチ奥部（A 区間）と下部の直立部（C 区間）は、 R 値・帯磁率とも高いことから、比較的新鮮で硬質な岩盤であり、その間の傾斜区間（B 区間）は岩盤表層に残留した風化部とみられる。

④ リスクマネジメント上の効果

ノッチ付近での硫酸塩鉱物の析出や簡易試験結果から、ノッチの成因は塩類風化によるタフォニ⁴⁾の形成に類似するものと推定した。岩盤崩壊の発生機構については、ノッチ部で想定された弱層部をすべり面または分離面とする大規模なすべり崩壊の可能性は低く、ノッチの拡大・発達に伴う小規模な岩盤崩落が主であると判断した。

また、より詳細に岩盤斜面の安定性を把握するために FEM 解析を提案・実施し、応力分布状況からノッチ部周辺の不安定領域を抽出した。これらの結果を踏まえて後続調査計画とモニタリング計画を提案した。

3. 簡易手法の有効性と留意点(マネジメントの効果)

(1) 地質リスクマネジメントにおける簡易試験の有効性

本論で挙げたシュミット式ハンマー試験や帯磁率測定の外にも、地盤特性を定量化でき、野外で容易に扱うことができる簡易試験（例えば針貫入試験³⁾、ハンドヘルド蛍光 X 線分析計による元素分析²⁾、簡易 pH 試験⁵⁾など）はよく知られている。地質調査における簡易試験は、欠点を伴うが、正規試験（主に試験室や手軽に運搬できない機材を用いて行われる規格化された試験）に比べて迅速、簡便、安価であるといった利点がある（表 1）。

地質リスクマネジメントは、各事業段階で利用可能な情報を基に地質リスクとその特性を正しく把握し、最も適切な段階で地質リスクに対応するものである¹⁾。簡易試験は事業初期段階でも容易に実施でき、地質リスクの「見える化」¹⁾やスクリーニングに有効である。このような地質リスクマネジメントにおける簡易試験の有効性について以下に示す。

表 1 簡易試験の特性整理

	長 所	短所および留意点
測 定	<ul style="list-style-type: none"> ・簡便性 ・現地性 ・迅速性 ・可搬性 ・再現性 ・経済性 	<ul style="list-style-type: none"> ・測定条件の制約を受ける ・事前の試験計画の必要性 ・対象が地表付近となる場合がある
分 析	<ul style="list-style-type: none"> ・統計処理が容易 ・値のばらつき（不均質性）の把握 ・現地での分析が可能 ・分析の自由度が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・少数の試験値では評価困難 ・正規試験より精度、信頼性が劣る ・正規試験で検証するのが望ましい ・評価上必要な属性が直接得られるとは限らない ・基準化されていないものもある ・簡易性による安易分析も起きる
見える化	<ul style="list-style-type: none"> ・多点測定による分布の可視化 ・短期間（初期段階）で提示 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質学的な意味を理解して利用するのが望ましい

① 多点測定による地質リスクの絞り込みとゾーニング

簡易試験は現場で誰もが短時間で容易に行えるので、多点（測定箇所数および測定回数）のデータが取得可能である（多点測定と呼ぶ）。簡易試験の多点測定は、肉眼判定ではわかりにくい評価項目に関する傾向分析や差異の認識を可能とし、地質リスクを発見する際の着目点の絞り込みに有効である。事例1では、シュミット式ハンマー試験による多点測定の結果、整然相と混在相の強度特性の傾向が示され、これらの特性に基づいた正規試験の計画を立案した。さらに多点測定は地質地盤のゾーニングに有効であり、露頭やボーリングコアで高密度な測定を行うことで、データの連続性や空間変化が高分解能で可視化できる。

② 簡易試験の組み合わせによる地質リスク特性の把握

複数の簡易試験を組み合わせることでリスク源としての地質特性の理解が深まることがある。ボーリングコアを対象に、熱水変質作用を受けた安山岩に対して帯磁率測定とエコーチップ硬さ試験⁶⁾⁷⁾を組み合わせた事例を挙げる（図5）。帯磁率とエコーチップ反発度（L値）のプロファイルは正の相関があり、変質作用によって岩盤強度が低下していると推定した。この事例では、地質リスク特性として、岩盤強度の低下が熱水変質作用に強く影響を受けていることが把握できた。事象に応じた簡易試験の組み合わせは、地質リスク特性の理解につながり、後続調査を効果的に進める判断材料にすることができる。

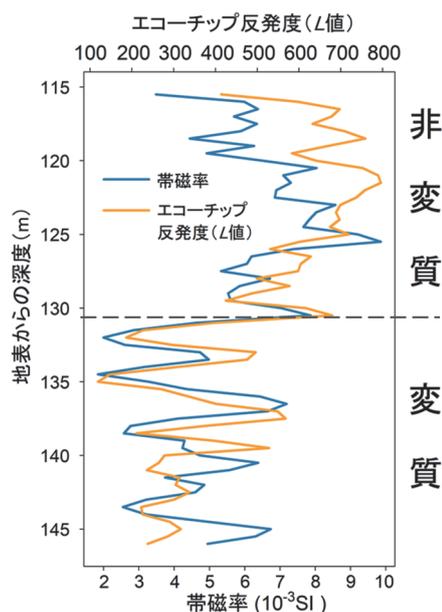


図5 安山岩のボーリングコアの帯磁率とエコーチップ反発度の鉛直プロファイル

③ 機動的・即時分析による解析プロセスの改善・可視化

簡易試験は機動力が高く、結果をその場で見直して再測定することも可能である。また、試験結果の傾向に異変があればその原因を考え、その特異な分布を広域追跡することができる。事例1・2ではその場で試験結果を思考吟味し、調査の中で分析や解析をすることができた。地質リスク調査検討の解析プロセスを可視化することで、地質リスク評価の妥当性・説明性の向上も期待される。

(2) 簡易試験を地質リスクマネジメントで扱う際の留意点

簡易試験は、現場条件や人為的要因の影響を受けやすく、その手法そのものがもつ精度や信頼性に限界があるなど、正規試験に比べて結果の取り扱いには十分な注意が必要である。また、簡易試験は傾向の把握には有効であるが、地質リスクが存在しないことの決定や照査に短絡するのは危険で、正規試験で検証するなど慎重に評価する必要がある。

簡易試験は事業初期段階の地質リスク抽出、物性値の分布や不確実性の把握、正規試験箇所の選定の根拠づけ（代表性の担保）等には特に有効であると考えられる。また、簡易試験は専門技術者でなくとも現場で実施・評価が可能であるため、地質リスクとの対応が十分に分析されていれば、施工～維持管理段階のモニタリングにおいても活用が期待される。簡易試験は、事業の様々な段階での活用が可能である。

営力論地形学の分野において、「岩石物性を…ただやみくもに計測してもデータの山に埋もれてしまいかね」ず、「その地形を形成する地形プロセスを知って、そのプロセスに対応した測定項目を吟味する必要がある」ことが課題として指摘されている⁸⁾。各種の簡易試験を適用できる地質学的意味を理解していることが、簡易試験の結果の重大性や説明性を増す。

一方で、簡易試験を試みる過程は、地質学的意味を考察する機会にもなっている。特に事業初期段階においては、地質リスクの機構や所在が不明確な状況で調査を行うことも多い。試行錯誤しながらやみくもに計測し、思いもよらない結果に遭遇するものが、地質リスク要因そのものであることもあるだろう。

4. まとめ

簡易試験の適用事例から、簡易試験は、多様な地質リスク要因や発現事象に対し、①多点測定による地質リスクの絞り込みとゾーニング、②簡易試験の組み合わせによる地質リスク特性の把握、③簡易試験の機動性による解析プロセスの可視化、といった地質リスクマネジメント上の効果が期待できる。現地の地形地質と想定される地質現象のプロセスを正しく理解し、それに応じて適切な試験・分析手法を適用するのが前提となることは論を俟たない。地質現象のプロセスが予測困難であっても、簡易試験はその簡便性や経済性を活かして積極的に試してみることも、地質リスクマネジメントのなかの調査手法のひとつとなり、事業の様々な段階での活用が期待される。

引用文献

- 1) 土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン，国土交通省大臣官房技術調査課・国立研究開発法人土木研究所，2020.3.
- 2) 中井 泉（編著）・日本分析化学会 X線分析研究懇談会（監修）：12章 ハンドヘルド蛍光 X線分析計．蛍光 X線分析の実際 第2版，朝倉書店，pp.180-189，2016.7.
- 3) 地盤工学会地盤調査企画・基準委員会（編）：地盤調査の方法と解説—二分冊の1—，地盤工学会，1300p，2013.3.
- 4) 松倉公憲：地形変化の科学—風化と侵食—，朝倉書店，242p，2008.11.
- 5) 堀川滋雄・松崎達二・森山哲郎：酸性水発生の事前予測手法—簡易 pH 試験—．土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，III-265，pp.529-530，2010.9.
- 6) 川崎 了・吉田昌登・谷本親伯・舛屋 直：簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発—試験条件の影響と基本特性に関する調査—，応用地質，Vol. 41，No. 3，pp.230-241，日本応用地質学会，2000.
- 7) 青木 久・松倉公憲：エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する—考察，地形，Vol. 25，No. 3，pp.267-276，日本地形学連合，2004.
- 8) 松倉公憲：地形学からみた風化研究の問題点と今後の課題．地学雑誌，Vol. 126，No. 3，pp.271-296，東京地学協会，2017.

【論文 No. 5】 落石危険斜面における動態観測によるリスク管理事例

中央開発株式会社 札幌支店 加藤 智久

1. 事例の概要

本事例は、施工中の現場において落石化する可能性がある岩塊が複数確認されたため、工事中の安全確保を目的として動態観測を実施した事例である。対象地域は集落の上流側の谷あいであり、浄水場における導水管の災害復旧のための推進工事（L=73.5m）と、それに付帯するダクトイル铸铁管布設工、ライナープレート式立坑、薬液注入工が予定されていた。工事起点側の発進立坑と仮設道路の直上斜面に不安定岩塊が発見された。これらの不安定岩塊は、5月の融雪期に小規模な落石が発生したことを受けて、施工箇所の上方面を詳細に踏査した結果発見された。岩塊の大きさは最大のもので幅3m×高さ5m×奥行3m程度で、鉛直方向と水平方向の亀裂によって斜面から分離しかかった状態だった（写真1）。この不安定岩塊が落石化した場合、施工ヤードに向かって転落する可能性が高く、人的及び物的被害が発生するリスクがあると判断した。また、落石対策工を施工する場合も、工事費用の増大や工期の遅れが発生するリスクがあるため、安全確保と費用や工程への影響を極力抑えた対策が望まれた。



写真1 不安定岩塊（図1中の岩体5）の状況

2. 事例分析のシナリオ

本事例での地質リスクは、不安定岩塊が落石化することによる被害である。また、落石対策を行うことによる工事費用と工期の増大もリスクとして捉える必要がある。発現のプロセスとしては、降雨・強風・地震・寒暖差を誘因として不安定岩塊が落石化し、下方の工事現場に落下して人的および物的な被害が発生することが想定される。リスクへの対処としては、①リスク要因（落石発生源）の除去と、②リスクの保有（落石の監視）の2つ

のパターンが考えられた。

3. データ収集分析

(1) 現状の斜面不安定性の評価

不安定岩塊への対応方針を策定するにあたり、現地踏査により不安定岩塊および周辺斜面の状態を確認した。現地踏査は、施工業者からの依頼を受けて5月初期に実施した。対象地域は狭長なV字谷であり、谷底で導水管の修繕工事を実施していた。谷の両側は平均傾斜30°以上の急斜面が高さ50m程度にわたって分布している。斜面には未舗装の林道がある程度で、車両が通行するような道路は通っていない。

周辺の地質は第四紀の火山碎屑岩類を主体としていて、対象斜面には凝灰角礫岩が分布する。この凝灰角礫岩は、岩片自体は比較的硬質なものの鉛直方向と水平方向の節理が発達していて、これらによって落石状に分離しやすい特徴が見られた。また風化の進行にむらがあるため、浮石状の硬質部が残存しやすい。対象斜面の周辺には、こうした凝灰角礫岩の露岩が多く見られ、斜面上には小規模崩壊や転石が多く、落石が頻発していた。踏査の結果、落石化する可能性が高い露岩が5箇所確認された(図1)。これらは、斜面から分離しかかっているものの、節理の一部はまだ密着しているため、ただちに落石化する可能性は低いと判断した。ただし、降雨や強風、地震等を誘因として将来的に不安定化する可能性が高いと判断した。踏査した時期が5月だったため、今後は特に降雨に注意が必要と考えた。

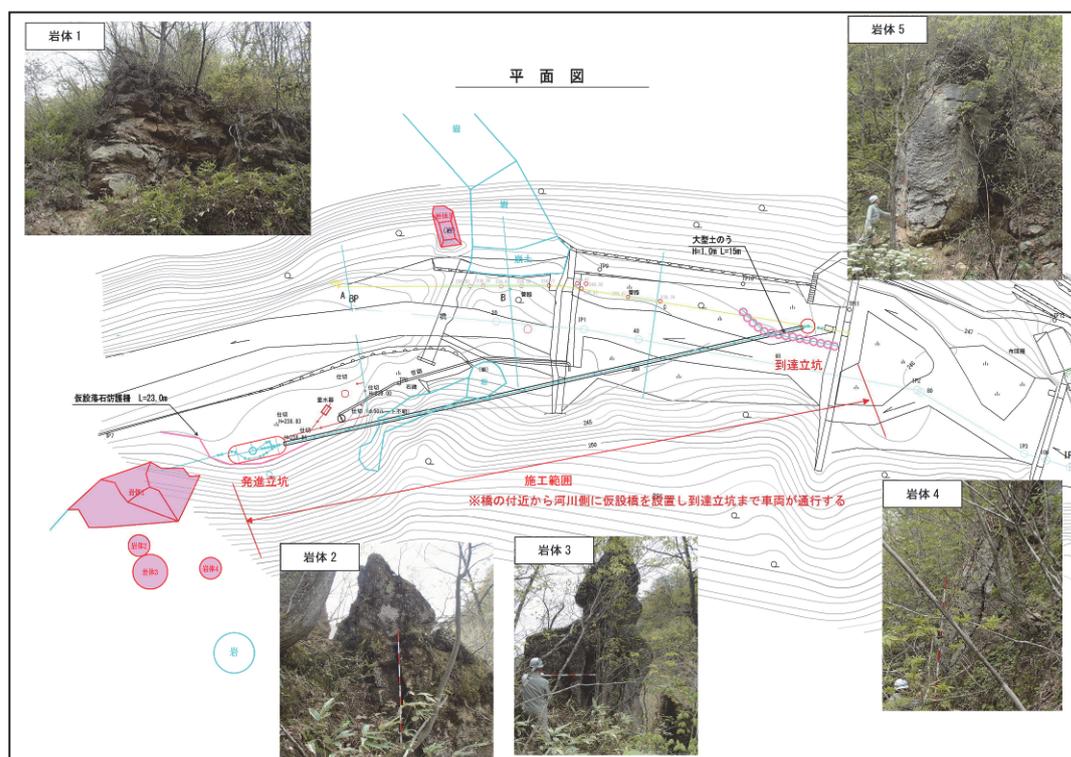


図1 不安定岩塊の位置図

(2) 斜面監視計画の提案

確認された不安定岩塊は将来的に不安定化する可能性があるものの、ただちに不安定化する可能性は低いと判断されたことと、工事費用や工程への影響を極力抑えるために、不安定岩塊を監視しつつ工事を進めることを提案した。監視方法として、不安定岩塊に直接崩壊検知センサー（傾斜センサー）を設置し、リアルタイムで監視を行う方法を選択した。センサーはインターネットに接続し、24時間Webで監視できるように観測網を構築した。また、管理基準値を超過する変動を観測した際には関係者の携帯電話にメールが配信される他、現地に設置された警報機が発動して作業員に危険を周知するように設定した。管理基準値については後ほど詳述する。また、落石発生の主要な要因として降雨を想定したため、現地に雨量計（転倒杓式の簡易雨量計）を設置して、傾斜センサーと同じくWebによる監視を行った。観測機器の配置図を図2に、通信系統図を図3に示す。

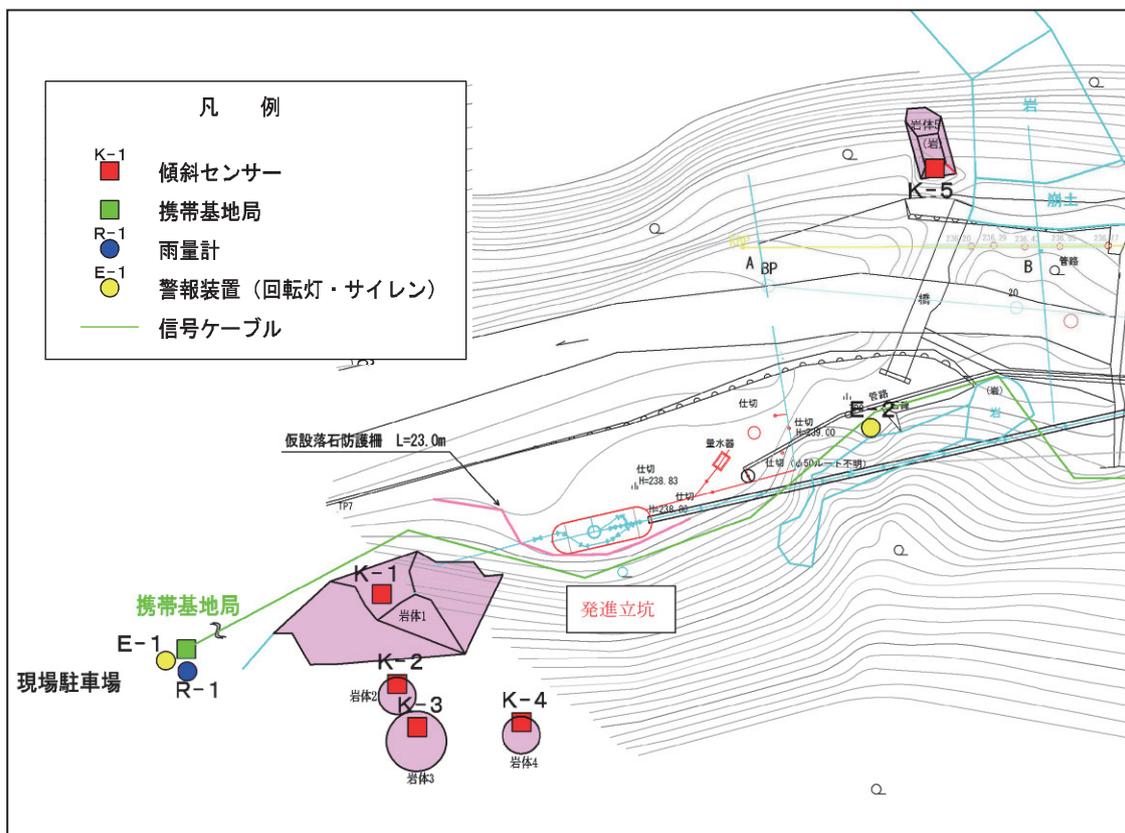


図2 観測機器配置図

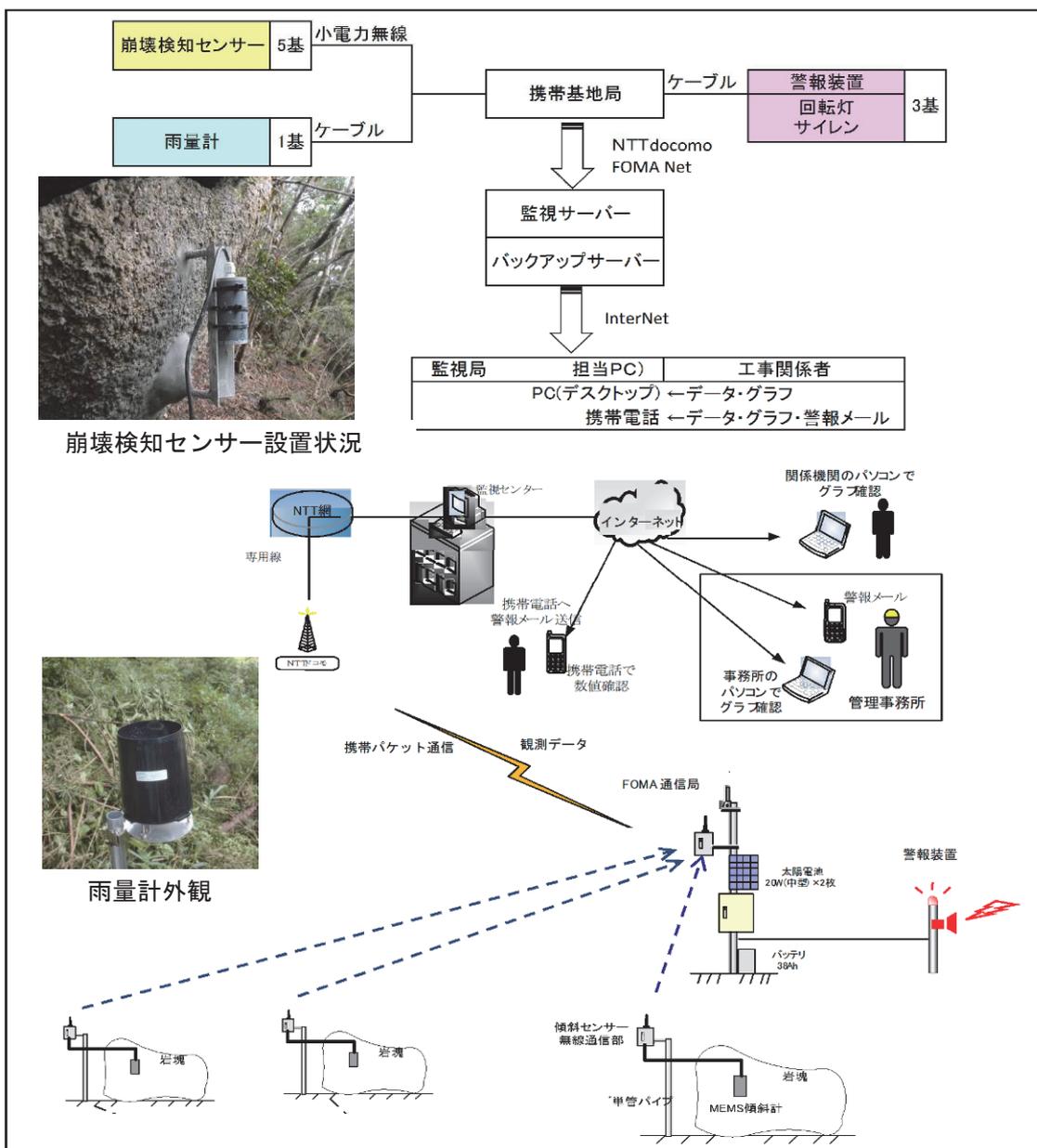


図3 観測機器通信系統図

(3) 警報発令基準の検討

この現場で採用した警報発令の管理基準値を表1に示す。警報発令の基本的な考え方は、以下の通りとした。

平常時においては、岩塊は不動であることを前提とした。したがって、理想的には、平常時は何の変化も観測されない。何らかの（測定精度である 0.0025° 以上の）変化があれば、それを崩落等の前兆とみなすことを基本方針とした。ただし、現実的には、センサーの電気的な特性（誤差）や、センサー・取り付け器具・岩体に生じる温度変化（変形）等

によって、実際には岩体が不動であっても、測定データにはある程度の変化が観測されることが想定された（ここでは、これを「平時挙動」と称することとした）。「平時挙動」ではない値が観測された場合に警報を発するものとし、「平時挙動」は、統計学的な根拠により、平均値±3σ（σは標準偏差）以内の値とした。なお、「平時挙動」は、傾斜角度θおよび傾斜角度の変化率Δθ（10分毎の測定値の差）について、観測機器の設置後ある程度の期間データを収集し、それぞれの平均値と標準偏差（σ）を求めて決定（この期間に崩落等が発生していないことを前提とする）した。なお、この値が決まるまでは、暫定基準値（Δθ≥0.05（°/h））を適用した。

また、雨量計の警報発令の管理基準値については、同地域における過去の災害事例を踏まえ、施主と協議して決定した。

表 1 警報発令の管理基準値

【崩壊検知センサー（管理基準項目：傾斜速度）】

対応	地点	傾斜速度	備考
		Δθ（°/h）	
避難	岩体 1	0.05	瞬間的な速度ではなく、明瞭な累積が読み取れる場合に限る。
	岩体 2	0.13	
	岩体 3	0.05	
	岩体 4	0.06	
	岩体 5	0.10	

【雨量計（管理基準項目：時間降雨量および累積降雨量）】

対応	時間降雨量	累積降雨量	備考
	(mm/h)	(mm/日)	
避難	30	100	暫定値として運用する。

4. マネジメント効果

(1) 有効性の検証

観測結果の一部を図 4 に示す。最終的に 7 箇所（工事の進捗に伴って 2 箇所を観測地点に追加）で工事終了までの約 6 ヶ月間観測を実施したが、観測期間中に警報発令基準を超過する変動は発生しなかった。また、周辺斜面も含め、目立った斜面崩壊は発生しなかった。観測結果を見ると、6 月に日雨量 60mm 程度の降雨があり、わずかながらセンサーが変位を検出している。この傾向は他のセンサーでも確認されたため、危険性はないものの、岩体の微小な挙動を捉えていたものと考えられる。また、施工業者からの情報では、工事の完了後に今回の監視対象としていた不安定岩塊のひとつが実際に崩落したとのことであり、今回のリスク評価は適切だったと考える。崩落が起きた際には観測機器も撤去済みだ

ったが、この段階で観測を継続していれば壊発生時のデータが取得でき、他現場での監視にも活かせるデータを得られた可能性があったため、その点は反省点である。

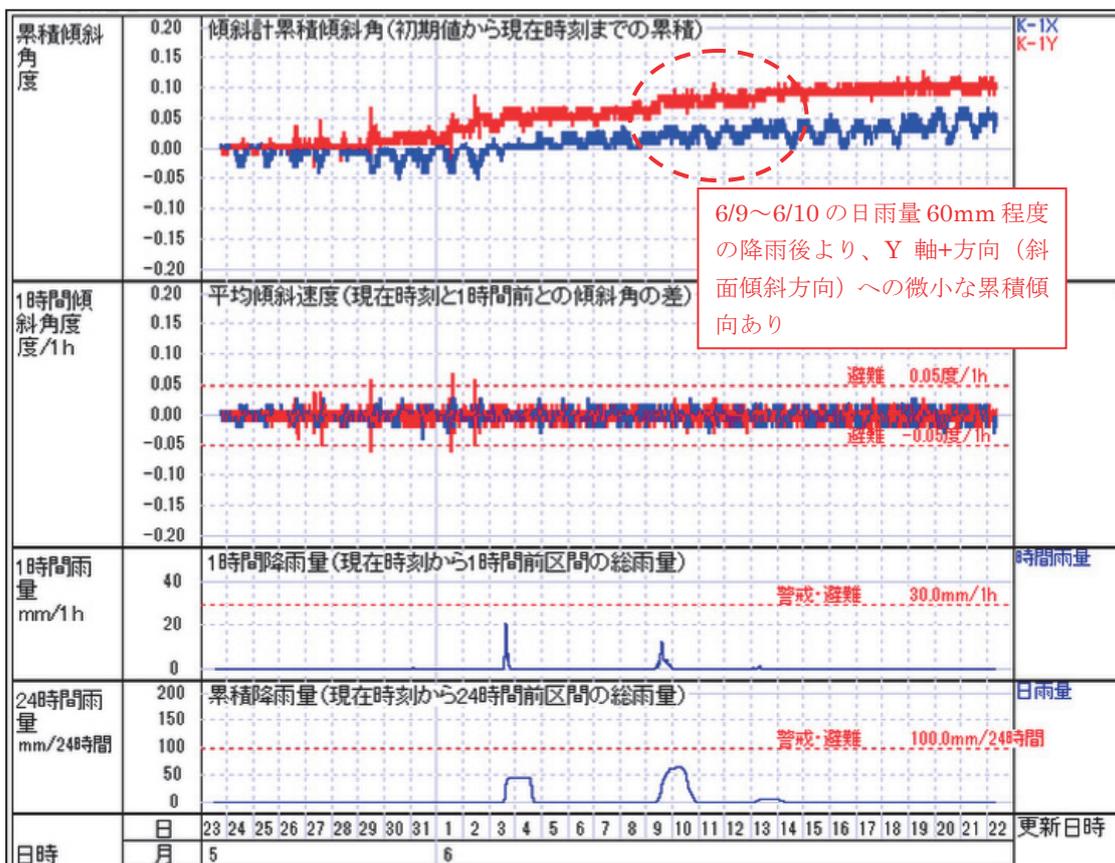


図 4 岩体 1 の観測結果 (部分)

(2) リスクの計量化

今回の観測に要した費用は、材料費込みでおよそ 230 万円程度だった。7 箇所の不安定岩塊を対象として落石対策工 (ワイヤロープ掛工) を実施した際の費用は、概算で 966 万円程度 (対象範囲 460m²、岩と土の比率は 1 : 1 として算出) である。このため、今回の提案で少なくとも 736 万円の節約となった (実際には落石対策工の施工中は推進工を実施できないため、さらに損失が発生する)。

5. おわりに

施工ヤードに隣接する斜面で発見された不安定岩塊を対象として動態観測を実施し、地質リスクを管理した事例を紹介した。このような事例の場合、適切な管理基準値を設定することが、工事の安全とスムーズな進行を確保する上で重要だと感じた。今回は管理基準値を超過する変動は発生しなかったが、変動が発生した事例についてもデータを蓄積して今後のリスク管理に役立てていきたいと考える。

[論文 No. 6] 応答曲面法によるため池の破堤リスク評価

鄭 詩穎¹⁾・西村伸一¹⁾・柴田俊文¹⁾・立石 翼²⁾

1) 岡山大学大学院環境生命科学研究科

2) (株) 三祐コンサルタンツ

Levee breach risk evaluation for earth-fill dams by response surface method

Shiying Zheng, Shin-ichi Nishimura, Toshifumi Shibata, and Tsubasa Tateishi

全国には約 16 万個のため池が存在し、その 7 割が江戸時代以前に構築されたものであるため、脆弱な状態にあり、災害要因となることも多発している。行政も、防災重点ため池を指定し、対策を講じているが、数の多さからすべてのため池を改修することは不可能である。この事態に鑑み、豪雨によるため池の破堤被害を効率的に防ぐため、リスクに基づいた改修の優先順位をつける方法を提案する。

本研究は、岡山県および広島県の 29 か所ため池を研究対象として選定している。第一に、周辺の土地利用状況から、破堤による氾濫が下流域にもたらす被害を簡便に算定する方法を提案する。第二に、有限体積法を利用した氾濫解析を実施し、当該ため池下流域における氾濫被害額を算定する。この作業には、多大な計算コストと労力を要するため、この計算を簡略するための「応答曲面」の導出を行っている。解析対象池を対象に、氾濫解析を伴う詳細な計算法「詳細法」と、応答曲面法による被害額を比較し、最適な応答曲面を決定する。

リスク算定のため、豪雨による破堤確率を決定する必要がある。この作業について、第一に、岡山と広島の観測所で得られた降雨データを基に、年最大 72 時間連続降雨の確率モデルを作成する。これから得られる豪雨の発生確率と、平成 30 年西日本豪雨ので得られた実際の豪雨波形を用いて、任意年のため池破堤確率を算定する方法を提案する。破堤は、豪雨による、ため池への流入量が、洪水吐の流出能力を上回ったときに発生するものと仮定している。最終的に、破堤確率と推定被害額から、ため池の破堤に伴うリスク算定を行う。各池のリスクを算定し、詳細法と応答曲面法によるリスク順位、すなわち改修優先順位を比較し、応答曲面の精度を評価する。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 提案する被害算定法によって、簡便にため池の氾濫被害額が算定できることが確認された。

(2) 詳細法と応答曲面法によるリスクを比較した場合、リスク値には乖離が生じる場合があるが、リスク順位比較では、大凡満足な結果を得ることができた。すなわち、本研究による提案法（応答曲面法）は、改修のための優先順位決定という作業に対して、実用性があると判断された。

1. Introduction The breaching of the earth-fill dams due to natural disasters are frequently reported in recent years. After the disaster in July 2018, conducting an emergency inspection by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, the Act on the Management and Conservation of Earth-fill dams was enacted in July 2019. It is necessary to reselect the ponds for disaster prevention, and evaluate their failure risk. In this study, the probability of the levee breach due to the overflow is calculated using detailed analysis and response surface method for the selected 29 sites (Table 1), and finally evaluated the risk of the overflow failure.

2. Flood analysis Detail analysis and the response surface methods are used to determine the cost of damage. By plotting the maximum inundation depth according to the coordinates, it is possible to reproduce the inundation of the reservoir water in the downstream area of the earth-fill dams selected as the target site.

In flood analysis, the two-dimensional shallow water equation is used as the basic equation, and the analysis is used by the finite volume method from approximate Lehman solution method (Equations (1)-(3)).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$G = \begin{pmatrix} uh \\ uvh \\ v^2h + gh^2/2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$S = S_0 + S_f = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{0x} \\ ghS_{0y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

t : time, h : water depth, u , v : the flow velocities in the x , y directions, S_{0x} , S_{0y} : the river gradient, S_{fx} , S_{fy} : the friction gradient.

Table 1. 10 examples of 29 sites.

Pond	Flooding ability (m ³ /s)	Basin area A (km ²)	Water storage (km ³)
O-A	2.121	0.634	39,000
O-B	0.735	0.268	11,000
O-C	1.724	0.192	57,000
O-D	2.298	0.534	29,400
O-E	2.025	0.321	17,000
H-A	2.62	0.24	10,300
H-B	0.35	0.11	12,000
H-C	0.23	0.709	13,700
H-D	3.04	0.193	49,600
H-E	1.96	0.32	66,210

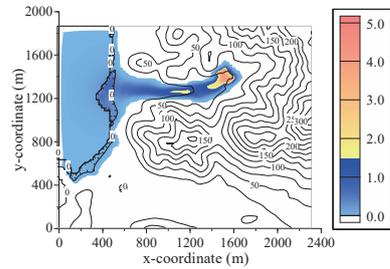
O-: Okayama, H-: Hiroshima

Manning formula is used for the friction gradient shown as Equation (4).

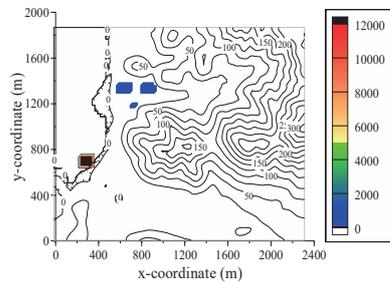
$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (4)$$

n : roughness length of Manning formula



(a) Submergence depth (m)



(b) Damage cost (1,000JPY)

Fig.1. Result of flood simulation.

Fig.1 shows the maximum inundation depth obtained from the flood simulation at a

representative site.

3. Land use and asset data In land use, in order to easily calculate the damage cost of the earth-fill dams, a method was proposed according to the national regulations (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries Rural Development Bureau Development Department, 2015) by the asset data. The example of land use is shown as Fig. 2.

The damage is divided into direct damage and indirect damage. Direct damage includes assets such as residential damage, office building damage, crops damage. Indirect damage are loss of business suspension, first-aid measures costs at home, and first-aid measures costs at business establishments.

$$\text{Residential building damage} = \text{house damage} + \text{household furniture damage} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Household furniture damage} = & \text{value of house furniture per household (except automobiles)} \\ & \times \text{number of households per cell} \times \text{number of inundated cells} \times \text{damage rate by inundation depth} \end{aligned} \quad (6)$$

emergency measures (7)

Redemption and inventory assets are calculated by the number of employees at the per unit per employee.

The amount of business suspension loss is shown as equation (8).

$$D_{ss} = M \times \left(n_0 + \frac{n_1}{2} \right) \times p \quad (8)$$

M : the number of employees that number of inundated cells \times number of employees per cells, n_0 : the days of business suspension by the inundation depth, n_1 : the days of business stagnation by the inundation depth, p : value added per employee of the business establishment by industry classification.

Since the main crops in these areas are paddy and soybeans, the cost of damage about the crops are calculated by paddy and soybeans.

$$\begin{aligned} \text{Paddy field damage} = & \text{normal yield per area} \\ & \times \text{unit price of rice} \times \text{percentage of crop acreage of paddy field} \times \text{inundation area} \times \text{damage rate by inundation depth} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{Soy field damage} = \text{normal yield per area} \times \text{unit price of rice} \times \text{percentage of crop acreage}$$

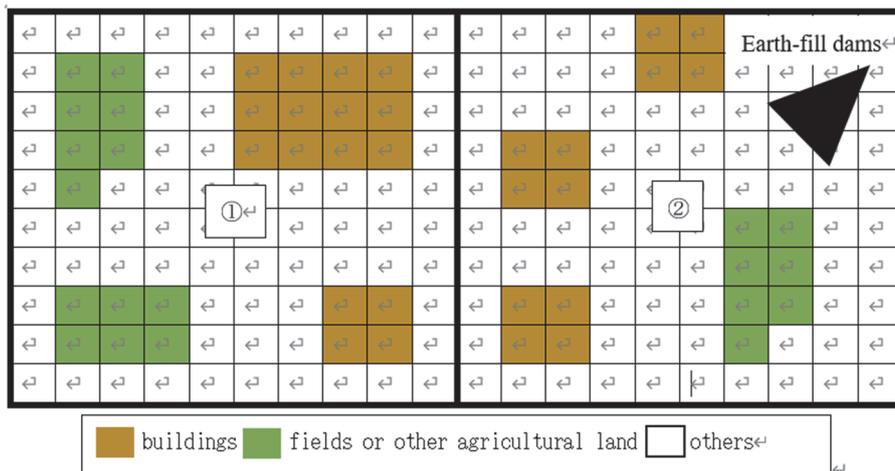


Fig. 2. The example of land use.

Office building damage = redemption and inventory assets + damage of business suspension and stagnation + cost of

of soy field×inundation area×damage rate by inundation depth (10)

4. Detail approach and response surface methods

In the detail approach, the damage cost according to the land use and asset data is calculated by the inundation analysis mesh in units of 25m. The damage cost is divided into the industrial sector and the agricultural sector in general, the total of two sectors is the cost of damage.

Table 2 shows that the results of calculating the damage cost by detail approach for the 10 examples of 29 ponds in this study.

Four factors obtained from sensitivity analysis a , c , e and f affecting the damage cost are selected, and the response surface to present the damage cost is created from the variables requested by the regression methods. From the 29 cases of the evaluated damage costs, the response surface methods is created as the Equation (11).

The cost of damage=

$$-1.04 \times 10^6 \ln a - 5.02 \times 10^7 \ln c + 5.64 \times 10^6 \ln a \cdot \ln c + 1.67 \times 10^3 e + 1.07 \times 10^4 f \quad (a < 11000) \quad (11)$$

$$-7.30 \times 10^4 \ln a - 2.33 \times 10^7 \ln c + 2.01 \times 10^6 \ln a \cdot \ln c - 6.29 \times 10^2 e + 4.29 \times 10^3 f \quad (a > 11000)$$

a : effective water storage (km³)

c : median gradient of the main inundation channel (%)

e : average density of the number of households in the inundation area (households /km²)

f : average density of employees in the flooded area (person/km²)

Table 2. Detail approach of 10 examples.

Pond	Industry (1000JPY)	Agriculture (1000JPY)	Detail approach (1000JPY)
O-A	23,351.26	12,295.16	35,646.41
O-B	534,485.4	4,708.3	539,193.8
O-C	2,249,471	20,477.85	2,269,949
O-D	277,068	2,682	279,750.2
O-E	6,568,840	11,525.75	6,580,366
H-A	4,680,750	727	4,681,478
H-B	5,965,054	5,884	5,970,939
H-C	168,148	922	169,070
H-D	214,581	11,930	226,511
H-E	5,566,045	9,796	5,575,842

O-: Okayama, H-: Hiroshima

Since a regression equation with a high coefficient of determination ($R^2=90.0\%$) is obtained, this equation is used as the response

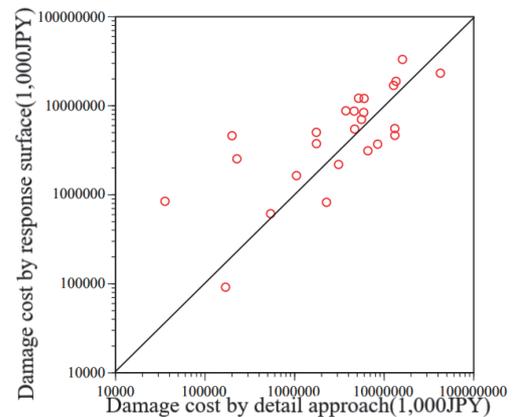


Fig.3. Comparison of damage cost by two methods

surface methods to calculate the cost of damage. The comparison of damage cost by two methods is shown as Fig.3.

5. Risk assessment As for the probability of breach breakage, the breach was assumed to be an overflow. In this study, Gumbel distribution is used to predict the probability hourly rainfall

for each probability year (Fig.4), and the peak flood flow was obtained from the probability hourly rainfall.

The following formula (2.4.1), (2.4.2) is used to calculate the peak flood discharge

$$Q_p = \frac{r_e \cdot A}{3.6} \quad (12) \quad r_e = f_p \cdot r \quad (13)$$

Q_p : peak flood flow rate (m^3 / s), A : catchment area (km^2), r_e : average effective intensity within the flood arrival time (mm / hr), r : maximum rainfall intensity (mm / hr), f_p : peak outflow coefficient.

It is assumed that the design flood discharge capacity of the reservoir is given by Q_d (m^3 / s) and the overflow levee probability P_f is given by the following equation.

$$P_f = \text{Prob}[Q_d < Q_p] \quad (14)$$

The calculated levee risk and ranking of 29 earth-fill dams in detailed approach and the response surface methods are shown in the Figs.5 and 6. According to the Figure, the risk of Okayama seems to be lower, but the risk ranking is scattered over a wide range. It is show that the appropriate risk is evaluated by the response surface methods.

6. Conclusion In this study, the damage cost of 29 ponds is estimated using detailed approach and response surface methods. The detail approach is composed of the flood analysis and the land use and asset data, while the response surface methods is based on the regression equation of the influential parameters $a, c, e,$ and f .

According to the comparison of the risk and the ranking of the risk by detail approach and response surface methods, two methods could present similar order of the risk, and the response surface method is clarified to be possibly applied to determine the priority of the renovation works of the earth-fill dams.

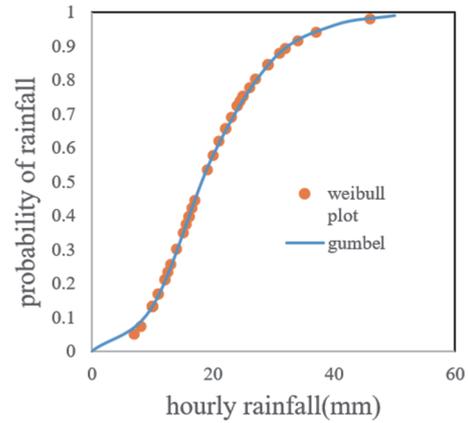


Fig.4. the probability of rainfall.

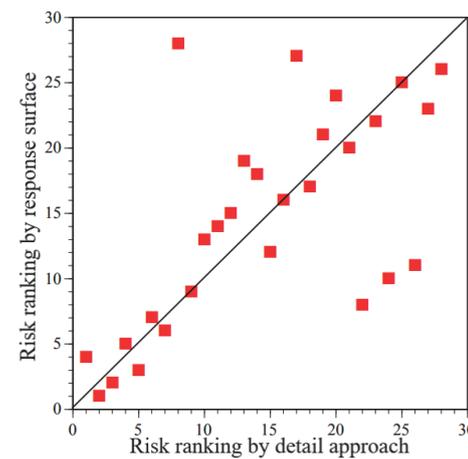
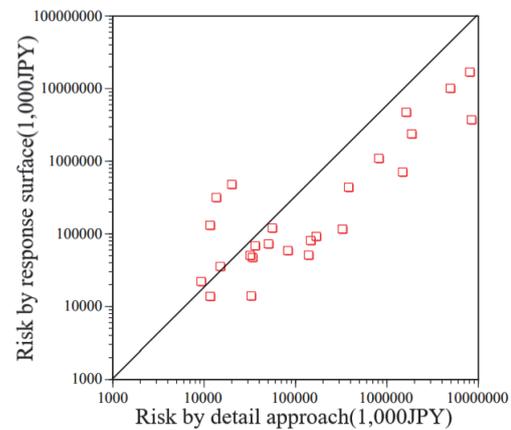


Fig.6. Risk ranking by two methods.

REFERENCES 1) Mizuma, K., *et al.*. Simplified method for estimating risks due to earth-dam breaches using response surface method IRRIGATION, DRAINAGE AND RURAL ENGINEERING JOURNAL Volume.84 No.1 p. I_47-I_55, 2016

※本論文集は、地質リスク学会のホームページで公開しています。

URL ⇒ <http://www.georisk.jp/>