

地質調査

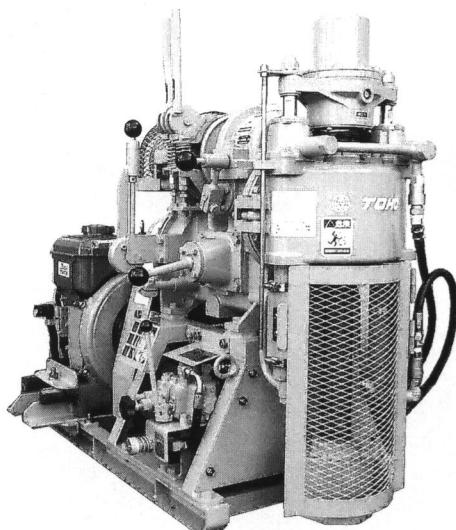
'08 第 2 号

[小特集] 地質リスクマネジメント

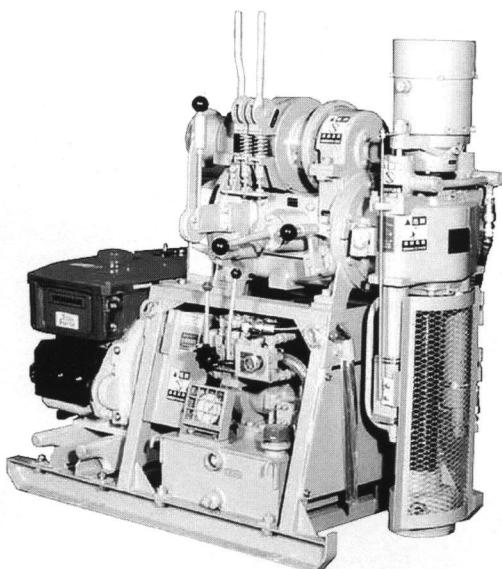
編集／社団法人全国地質調査業協会連合会

発行 土木春秋社

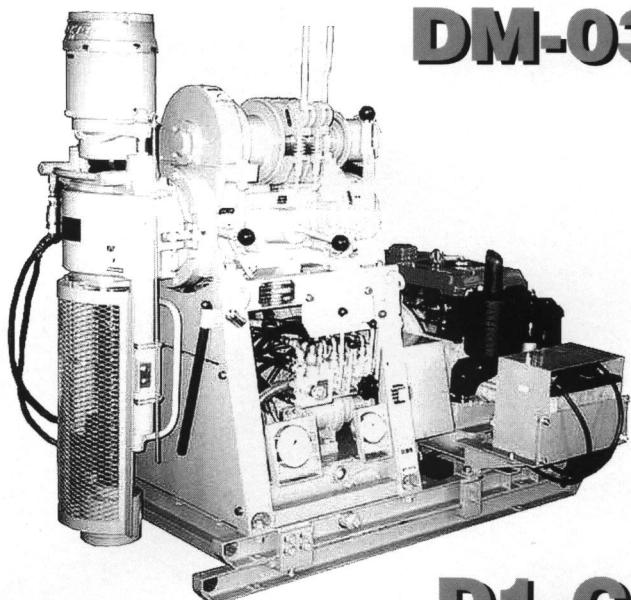
- ニーズに合わせて、ホイストドラムを取り外し
コーンプリータイプに変更することができます。
- ブーリの交換で地質にあったスピンドル回転数
が選択できます。
- 試錐ポンプが内蔵でき、しかも原動機は1台で
すみます。



DM-03



D0-D



D1-C

仕 様

右操作・左操作をご用意しております。

機種名	DM-03	D0-D	D1-C
穿孔能力 m	30	100	280
スピンドル回転数 rpm	65、125、370	(A) 60、170、330 (B) 110、320、625	(A) 65、130、250、370 ※2 (B) 90、170、320、490
スピンドル内径 mm	47	43	48 ※2 58
スピンドルストローク mm	300	400	500
ホイスト巻揚げ能力 KN (kgf) 400	3.9 (400)	5.9 (600)	10.8 (1,100)
フレームスライド mm		※1 油圧式 300	油圧式 300
動力 kW/HP	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質量 kg	180(本体)	315(本体)	550(本体)
寸法 H×W×L mm	960×500×1,115	1,200×660×1,180	1,390×735×1,580

※1 オプション

※2 スピンドル内径58の場合

東邦地下工機株式会社

東京都品川区東品川4-4-7 TEL 03(3474) 4141
福岡市博多区西月隈5-19-53 TEL 092(581) 3031
URL:<http://www.tohochikakoki.co.jp>

福 札 仙 新 名古屋 大 阪	岡 幌 台 濑 湊 大 阪	092(581)3031 011(785)6651 022(235)0821 025(284)5164 052(798)6667 0729(24)5022	松 広 山 口 北九州 熊 本	089(953)2301 082(291)2777 083(973)0161 093(331)1461 096(232)4763
-----------------	---------------	--	-----------------	--

卷頭言 今後の地質リスクマネジメントへの思い
～不安を期待に、そして生きがいへ～

高知工科大学教授 渡邊法美 1

小特集 地質リスクマネジメント

公共工事の発注者責任とコスト構造改善における地質リスクマネジメント	野田 徹 2
地盤リスクを考える	日下部治 4
道路事業において地質リスク低減のために求められる方策	角湯克典 9
地質事象の把握における不確実性と地質リスク	小笠原正継 13
地盤構造物の信頼性設計と地盤調査	本城勇介 17
石油資源探査における地質リスク評価	高山邦明 22
国内公共事業における地質リスクへの対応	佐橋義仁 26
全地連 地質リスク海外調査の成果と展望 ～米国カリフォルニア州における地質リスクへの対応状況調査～	小田部雄二 28
我が国における地質リスクの計量化事例	黛 廣志 31
海外における地質リスクの計量化事例	伊熊俊幸 34

やさしい知識 GBR (Geotechnical Baseline Report) 尾園修治郎 37

大地の恵み 加賀温泉郷（山中温泉）	西田達夫 40
各地の博物館巡り 雲仙岳災害記念館（がまだすドーム）	青木隆弘 42
車窓から見る地形・地質 生駒山地	篠原正男 44

私の経験した現場 リスク対策を考える	小林 保 46
軟弱地盤の盛土管理	滝澤賢東 49

会 告 平成19年度地質調査事業量は867億円 —全地連受注動向調査	51
地質調査技士資格検定試験受験申込者数1,068名 —第43回地質調査技士資格検定試験	53
発表論文は140編—全地連「技術e-フォーラム2008」高知 「全地連奨励賞」受賞式	53
全地連「技術e-フォーラム2008」高知	54
国土交通省の地盤情報をインターネットで試験提供 ～「国土地盤情報検索サイト」(KuniJiban)の開設～	55

小特集 自然保護・世界遺産

自然保護・世界遺産活動への取組み
自然環境と地形・地質の関係の重要性
農村景観・自然環境保全再生パイロット事業の再生
自然保護のための地質調査的アプローチ
世界遺産の文化財としての価値および遺跡保護
白神山地
遺跡の調査・保全

教養読本 地球温暖化と自然（保護）

やさしい知識 生物多様性

各地の博物館巡り
大地の恵み
車窓から見る地形・地質

表紙：雲仙普賢岳（平成新山）山頂CG画像（平成18年CG画像）

長崎県島原振興局林務課が開発した「雲仙普賢岳3次元空間情報システム」は、山体変動の掌握と防災対策を目的として開発された。このシステムは、噴火から現在に至るまでの一連の地形変動（平成3年～20年、全17モデル）をDEM、TINにより高精度・高密度で再現し、当時のオルソ写真をオーバーレイしているため鳥

瞰は臨場感あふれる画像となっている。また、高速で作動し、解析に欠かせない差分体積表示、計算や断面作成、指定範囲のデータの抽出などの機能も有する。雲仙岳災害記念館・砂防みらい館で使用できる。

（画像提供：長崎県島原振興局林務課）（本文42頁参照）

今後の地質リスクマネジメントへの思い ～不安を期待に、そして生きがいへ～

高知工科大学教授 渡邊法美

近年、日本の土木事業においても、予算超過や工期遅延に関するリスクマネジメントが、現場管理の実践的手段として注目されてきた。全国地質調査業協会連合会（全地連）が提唱してきた「地質リスク」の考え方も徐々に浸透しているようである。

従来の地質リスクマネジメントでは、「最小限」の地質調査に基づき、発注者側が「標準的」仕様を詳細に規定した設計図書を作成して工事を発注し、施工時には甲乙協議による設計図書変更を実施する場合が少なくなかった。この方式は、大量の工事を早期に発注し円滑に完成させる上で有効であったといえる。

ただしこのマネジメント方式には、以下の三つの課題が存在する。

第一の課題は、技術者自身への「期待」が充足されにくいことである。例えば、請負者が多くのリスクを取ることができる得意分野であったとしても、標準的工法以外の方法の選択が認められない場合も少なくなかった。このことは、請負者が自己の技術を発揮することによって、困難なリスクに挑戦し、技術者自身への期待を充足することが必ずしも容易ではなかったことを意味する。

第二の課題は、請負者と発注者の双方が「不安」を抱えていることである。請負者の不安は、発注者とのリスク分担の基準が必ずしも明確に示されていないことによって生じている。「変更に伴う対価が必ずしも十分に支払われないのではないか」という、いわゆる「請け負け」の不安である。一方、発注者の不安は、その大部分が地質の専門家を有していないことによって生じている。「請負者からの増額変更提案に対して過払いになっているのではないか」という不安である。

第三の課題は、従来の不安緩和方法が、今後は機能しにくくなることである。請負者と発注者の

不安は、指名競争入札や受注調整に基づく長期的な「貸し借り」の関係によって相当程度緩和されてきた。しかし、今後指名競争入札に代わって一般競争入札が本格的に導入された場合、従来の長期的な「貸し借り」の関係は存在しにくくなる。さらに近年は、大幅な増額変更を「許容」する公共工事の執行手続きに疑惑を抱き始めている納税者が少なくない。

今後は、納税者の疑惑を払拭するためにも、公共事業の執行手続きの透明性を高めた上で、個々の技術者の能力を最大限に活かすことによって、事業を効率的に実施していく必要がある。そのため今、新しい地質リスクマネジメントを構築し実践することが早急に求められている。

以上の課題を鑑み、今後の地質リスクマネジメントの方向性の一つは、発注者側が「適切な」量と質の地質調査を実施した上で、現場の特性を十分に把握した設計図書を作成し、請負者の技術力を活かした工法選択を認め、明確な基準を持って設計図書変更を行うことにあるように思われる。

このリスクマネジメントを実施することによって、請け負けや過払いの不安を緩和・解消し、技術者自身への期待を充足できる可能性が存在する。「不安（リスク）のマネジメント」—不安を丁寧に克服していくことによって、期待（リターン）を充足していくこと—が、技術者の生きがいの創造につながることを願いたい。

本特集号では、新しい地質リスクマネジメントの構築と実践に向けて、果敢に走り続けている方々に、今後の方向性を率直に語り論じて頂いた。

地質リスクの問題には、日本の多くの公共事業リスク問題が集約されている。

本特集号が、大きな転換期を迎えている日本の公共事業にとって、ひとつの光となることを願ってやまない。

公共工事の発注者責任とコスト構造改善 における地質リスクマネジメント

の だ とおる
野 田 徹 *

1. 公共工事における発注者責任

1.1 公共調達における一般競争入札

古い話とお思いになるかもしれないが、国の公共調達は明治 22 年に制定された会計法令に基づき実施されている。もともと一般競争入札が原則とされていたが、往時、不良不適格業者が横行したことから、明治 33 年に指名競争入札が導入され、以来 100 年にわたりわが国の業務や工事の大部分の調達方式として採用されてきた。

指名競争入札の大前提是、発注者が当該工事の技術的特性、現場の自然・社会的条件、競争参加者の施工能力や手持ち工事量等、さまざまな情報をつぶさに把握していることであり、この前提があればこそ、優れた施工実績を持つ信頼性の高い企業を発注者が指名し価格競争を行うことで、良好な品質を確保した上でより経済的な調達が可能だった。

指名競争入札においては、企業は良い仕事をすればそれだけ事後の受注機会の拡大に繋がるため、企業はいっそう良好な品質を目指そうとするインセンティブが働く、いわゆる「好循環」が形成されていた。これを基盤として発注者と受注者の間に良好な工事品質を確保するという点で信頼関係が構築されていた。

しかしながら、一方で指名競争入札は談合を助長しやすい等の指摘を受けてきたさなか、平成 5 年に起きた、地方公共団体の首長とわが国建設業界を代表する企業の幹部の公共工事を巡る贈収賄事件を契機として、ほぼ 80 年ぶりに一般競争入札が復活し、その後適用が拡大してきた。同様に地方自治体の調達においても一般競争入札の導入

が図られてきている。

1.2 建設生産システムを取り巻く状況の変化

わが国の公共事業関係予算に目を転じてみると、現下の厳しい財政を背景に平成 11 年をピークに平成 19 年度はほぼ半額にまで削減された。この結果、建設業界は供給過剰状態が続いている、建設市場における競争は激化の一途を辿っている。

この間、前述のように一般競争入札が大幅に導入されてきたことも相まって、特に平成 17 年度以降、いわゆるダンピング受注が相次いだ。逆に昨今、維持修繕工事のように採算性の低い工事への参加の手控えも大都市圏を中心に顕著になってきており、不調・不落工事が頻発している。

ダンピング受注は下請企業や現場労働者へのしわ寄せに繋がり、工事品質の低下等を引き起こす。また、不調・不落工事の頻発は適切な時期に工事目的物を国民に提供できないなど、結局は納税者である国民に悪影響を及ぼすことに繋がりかねない。

1.3 建設生産システムの再構築

これまでの建設生産システムでは、指名競争入札を前提とした「好循環」が形成されていたことで、発注者は効率的に良好な工事品質を確保することができていた。また、それに合った制度、体制で足りていた。しかしながら、現下、建設市場を巡る競争は激化し、その結果現行の制度や発注者の体制では質の高い調達が十分に担保できなくなってきたおり、これまでの建設生産システムでは対応しきれないさまざまな問題が生じている。加えて、公共工事の受注者である公務員側では定数削減や行政事務の多様化・増大が進んでいる。

これらのことから、発注者の体制面も十分に考慮しながら、現状に即した建設生産システムの再

* 國土交通省河川局海岸室長（前 大臣官房技術調査課
建設システム管理企画室長）

構築が急務である。

1.4 今後の建設生産システムにおける発注者責任

建設生産システムにおいて発注者は、「優れた品質の社会資本を」「適正な価格で」「タイムリーに」調達し、国民に継続的に供給する責任を有している。

今後の建設生産システムを構築していく中で優れた工事品質を確保していくためには、発注者と受注者がそれぞれに工事品質の確保に責任を持つ仕組みを作り、維持していかなければならない。

発注者責任を果たすためには、検査体制の強化、良好な品質を確保した企業には事後の競争参加機会を拡大させ粗雑工事などを起こした企業には適切にペナルティを加えるといった制度・仕組みの導入等に加え、発注者において、プロジェクトの調査・計画・設計から施工・維持管理まで一貫して的確な技術的判断を行えるための技術力や体制の確保が必要である。

1.5 発注者責任を支える発注者支援の仕組みと地質リスクマネジメント

発注者責任を果たすために必要な体制の確保に当たっては、発注者（公務員）の定数削減や行政事務の多様化に伴い職員一人あたりの業務量が増大していることに鑑み、発注者自ら行う業務とアウトソーシングを行うことができるまたは行うべきものとに整理し、具体的に発注者支援の仕組みの検討が必要である。この際、関係者の責任の所在を明確にしておく必要がある。

専門性の高い業務については、専門技術者グループをアウトソーシングすることが考えられる。例えば、発注者の技術者はもともと土木・建築分野が専門の者が大半を占めており、必ずしも地質分野を得意とする者は多くない。後述のように地質リスクマネジメントは、公共事業のコスト構造改善の観点からも重要と言え、今後、専門技術者グループの支援による地質リスクマネジメントの必要性も高まって来よう。

2. 公共工事のコスト構造改善

2.1 国土交通省における公共事業コスト構造改善の取組み

国土交通省では、平成15年度からの5年間で15%の総合コスト縮減率の達成を目指す「コスト構造改革プログラム」に基づき、総合的なコスト

縮減に努めてきており、平成18年度までの4年間で11.5%を達成した。

平成19年度に現行プログラムが完了するのに併せて、今般、平成20年度～24年度の5年間で平成19年度と比較して15%の総合コスト改善率の達成を目標とした「コスト構造改善プログラム」を策定し、運用し始めたところである。

2.2 コスト構造改善の具体的施策

「コスト構造改善プログラム」では、具体的な34の施策が、①事業のスピードアップ、②計画・設計・施工の最適化、③維持管理の最適化、④調達の最適化の4つのカテゴリーに区分され例示されている。もちろんこれ以外の取組みも大歓迎であり、34施策に縛られず各現場で工夫を凝らしてコスト構造改善を行うことが推奨されている。

調査・計画・設計から施工・維持管理に至る各段階でのコスト構造改善が求められているが、一般に、一連のプロセスの中でもより上流側（早い段階）での取組みが、その後のプロジェクト全体のコスト縮減に繋がるものとされている。

2.3 地質リスクの回避とコスト縮減

地質情報の不確実性の故に、初期に実施した地質調査を基にした設計が、結果的に事後的に不適切だったことが判明し設計が手戻りになった、もしくはそのまま施工され、工事着手後に設計変更を余儀なくされ工事費が大幅に増額したなどという例は多数に上るのではなかろうか。

逆に言えば、このような地質リスクを回避できれば、結果的にコスト縮減に繋がるということである。このような分野における専門技術者グループによる発注者支援はますます必要性が高まろう。

3. むすび

以上、発注者支援およびコスト構造改善の観点から、地質リスクマネジメントを考察してみた。地質情報の不確実性がプロジェクト遂行にもたらす影響は大きい。関係者の責任の所在を明確にした上で、地質リスクを極力回避することは現場におけるさまざまなトラブルの解消に繋がるだけでなく、その結果として社会資本の良好な品質の確保に繋がるものと考えられる。

今後の地質リスクマネジメント技術の向上と確立に期待したい。

地盤リスクを考える

くさかべ
日下部 おさむ
治*

はじめに

近時「何々リスク」という言葉が多用されるようになった。為替リスク、事故リスク、健康リスク、環境リスク、災害リスクなどの言葉は日常的に使用され、熊谷徹氏の「歴史リスクと戦うドイツ・放置する日本（中央公論、2005）」のように歴史認識にまでリスクという言葉が用いられる。21世紀に生きる我々の意識の中に潜む、自然・社会環境の不確実性に対する将来不安心理を反映してか、どのような言葉にリスクを付けてもなんとなく納得してしまうまでに、現代ではリスクという概念が拡大し、リスクという言葉がより身近なものになっているようである。

自然科学の本質が、自然現象の観察事実に基づき普遍的な法則を定量的に記述し、その法則をもって自然の変化を予測することにあるならば、高い確率で将来発生が見込まれる自然由来のリスクについての予測は自然科学の重要な役割の一つであり、科学技術の進展はより正確なリスクの同定を可能とし、説得力ある科学技術情報は社会に対して適切なリスク回避行動を促すはずである。彗星の接近、台風進路の予報、地震の予知、海面上昇の予測などは直接的に理解しやすいリスクの予測の事例である。

しかし、近時リスクに関わる問題がこれほどの広がりを示しているのは、リスクが、安心・安全な社会、金融資産、企業経営、法制度、政治体制、異文化問題、国際関係などの多様な社会システムのあり方と強く関連して認識されるからであり、リスクの科学的な予測解析技術の要素分析的アプローチ一辺倒の姿勢から、予想されるリスクに対して全力をあげて回避する方策のみでなく、リス

クと共存するとの前提の上で、リスクをどのようにマネジメントするかというシステムマネジメントの視点が重視される。その意味で、リスクマネジメントは、特定分野の科学技術のみではなく社会・人文科学等と融合した総合的な社会技術の一体系として捉えるべきである。

我が国では大正時代のスペイン風邪の流行や関東大震災の経験から保険制度の概念が普及し、契約件数が飛躍的に増大したと言われる。地震保険は兵庫県南部地震後の10年間にかなり普及・整備されてきた。リスクを直接体験するかあるいは身近に感じると、人は保険というリスク分散の手法に心を寄せる。地震保険の支払い保険料の全国一覧をみると、東京、静岡、和歌山などの地域で高額となっており、それらの地域の近傍での地震発生確率が高く見積もられていることが理解され、地震保険料算定は、地震発生確率と発生したときの損害額との積から評価されていることが窺われる。兵庫県南部地震以降、耐震強度を高めるための耐震補強等の防災投資が実施され、同一の外力に対する構造物損傷の発生確率と損傷程度を低減するリスクコントロールの努力も継続している。

地質・地盤分野においても地質リスク、地盤リスクという言葉が用いられるようになってきた。地質・地盤分野の専門家は、主に調査から得られるボーリング情報と岩石・土質試験からの要素情報を援用して、対象地域の地質・地盤性状を推測し、建設工事などにおける構造物と地盤の挙動を予測してきた。近年の著しい探査技術の進歩はあるものの、得られる地質・地盤情報は依然として多くの不確実性を包含する。それは、対象とする地盤の生成が自然由来であることによる複雑性が存在し、ボーリング・室内試験等で得られる情報が量的に限定的で、いわば離散化した有限の点情報から連続的な体積空間情報を推定する技術的困

* 東京工業大学大学院教授

難さを本的に有していることに起因している。さらに建設工事では、定性的情報ばかりでなく定量的情報が要求される。トンネルのような長大な地下構造物での施工前に得られる情報は限定的で地盤情報の不確実性は高い。さらに都市土木の工事環境では、地下に放置され現在使用されていない埋設物、適切に埋め戻されていない地盤調査ボーリング坑による潜在的な水みちなど、通常の調査方法では同定がきわめて困難な特異性も含まれ、地盤情報の不確実性が増幅している。

金属鉱山、石油油田等の資源産業は、長年地質・地盤の不確実性と向き合いながら、投資と利潤との関係に折り合いを付けてきた。それとは対照的に、この是非は別として、我が国の建設産業では、発注者と請負者関係において、当初地盤調査結果に基づく地盤リスクの予測可能性の厳密な検証を経ずに、地盤リスクに伴う責任負担を個別の設計変更協議の中で調整・解決してきたのではないかと推測される。しかし近時のデザイン・ビル方式やPFI事業、土壤汚染浄化事業、さらに海外事業などでは、地盤リスクに関する経済的危険負担は請負側が負う契約事例が多くなり、地盤リスクが工費と工期に大きく影響し、事業の収益構造を支配するため、建設産業は不可避的に地質・地盤リスクの問題に正面から向き合う必要に迫られ、企業経営上、事業全体のリスクマネジメントへの取組みを本格化させてきたのが実態ではないかと筆者は想像している。

本文は、リスク解析手法、リスクマネジメント手法等の解説や既往文献の包括的なレビューを試みるものではなく、以下筆者が地盤リスクに関して考えていることを述べることとした。

1. 地盤リスク

はじめに地盤リスクが、近年地盤工学分野の主要なキーワーズの一つになりつつあることを確認しておこう。それは関連学会の活動に顕著に表れている。我が国地盤工学会は、2004年に「リスク工学と地盤工学」という講座を6回にわたり掲載した。その内容は、「リスク工学とは」、「リスクマネジメント」、「プロジェクトマネジメント」、「ジオリスクエンジニアリング」、「ライフサイクル費用とリスク工学」、「アセットエンジニアリング」であり、連載講座には柱状図や応力一ひずみ曲線は一切出てこない。講座の目的は、リスク工学分野で採用されているリスク概念や最新の知見を地盤工学に関する技術者に紹介し、地盤工学分野へ

の初期的適用例を示しながら、近い将来、地盤リスクの概念がますます重要となることを強調したものであった。その狙いどおりこの講座は広く地盤技術者に地盤リスクに対する認識を高める契機を与えた。その翌年、2005年に大阪で開催された第13回国際地盤工学会議で筆者が一般報告を行った「Professional Practice and Education」というセッションには、geotechnical risk（地盤リスク）で括られる一群の論文が含まれていた。それらの論文にはrisk identification（リスクの同定）、risk analysis（リスクの分析）、risk assessment（リスクの評価）、risk control（リスクを低減するための対策・コントロール）、risk management（リスクの管理）、risk monitoring（リスクのモニタリング）、risk communication（リスクの表示・伝達・対話）、risk education（リスクの教育）等の単語が並んでいた。現在、国際地盤工学会（ISSMGE）は、地盤リスクに関連した以下の3つの技術委員会（TC）を設けて活発に活動している。TC 16 Ground property characterization from in-situ tests, TC 32 Engineering practice of risk assessment and management, TC 40 Forensic geotechnical engineeringがそれらTCであるが、その活動内容は、国際地盤工学会のホームページを参照されたい。

昨年2007年にはGeotechnical Safety and Riskに関する第一回国際シンポジウムが上海で開催され、引き続き2009年に第二回の国際会議が岐阜での開催が準備されている。また、2005年にはGeotechniqueが地盤リスクに関する特集号を組み、2007年からはGeoRiskと名付けた国際学術季刊誌も刊行されている。このように、地盤リスクは、地盤工学に関する技術的中心課題の一つになり、地盤工学技術分野において一分野を形成しつつあると言える。そこに掲載されている論文の多くは、自然災害、地盤統計学、信頼性解析、リスク解析、確率設計等のrisk identificationやrisk assessmentに関するものが中心で、オランダで開発されGeoQと名付けられたリスクマネジメントシステムの例を除いて、いまだgeotechnical risk managementは社会技術体系として成熟レベルに達してはいないというのが筆者の現在の認識で、これから展開が期待される分野である。

一方で、リスク工学の先進分野である金融工学における多様な手法を、地盤リスク分野に無批判に適用することについては十分注意したいと筆者は考えている。それは地盤リスクにおいて、risk

identification, risk analysis, risk assessment, risk controlまでの項目とrisk managementとの間には本質的な差異があると思えるからである。金融工学で扱う株価の動向予測と地盤リスクの予測とは本質的に異なる部分がある。金融工学の諸問題は、主に人間と人間、企業と企業等の社会経済的要因による動的なインタラクティブなリスクを取り扱うと考えられるが、地盤リスクは、自然と人間との準静的なインタラクティブな問題であるといえよう。したがって、事前の適切で十分な調査を実施してリスクの同定・分析・評価を行い、適切なリスクコントロールによってリスク低減に有効な対策を採用することによって、リスク発生の頻度はかなり低減できる可能性が高い。それが自然科学の成果活用というものである。したがって、多くの地盤技術者にとっての主要な役割は、依然としてrisk identification, risk assessmentとrisk controlにあると筆者は考えている。もちろん建設工事の施工過程における地盤リスクマネジメントの場面では、より複雑で動的なインタラクティブなリスクが内在し、金融工学等他分野で用いられている総合的なシステムマネジメントと同様な手法が有効であるはずである。

では、地盤リスクの同定や地盤リスクの分析・評価には、どのような情報が求められるのであろうか？そして地盤リスクの同定や地盤リスクの分析・評価に関わる地盤技術者には、どのような能力が要求され、その能力はどのようにして育成され獲得されるのであろうか？

2. 地盤調査・試験の重要性

地盤リスクの同定・分析・評価に関して、効率的で質の高い地質・地盤の調査・試験の重要性は強調しすぎることはない。もちろん定型的な地質・地盤情報をワンセット整備すればそれで事足りるという訳ではなく、単なる構造物設計の情報としての層構成や各層ごとの地盤係数の選定のみを目的とした調査に止まるものでもない。地盤リスクを想定して、どのような種類の調査を、どの範囲と密度で実施し、どのような情報を得るかを、事前に十分検討した調査・試験と、科学的根拠に基づくその結果の整理と解釈が必要なのである。地盤リスクの同定・分析・評価に有効なボーリング位置・深さ・本数、試験種類・条件・本数・計測項目等の選定と調査結果の総合的検討のために、事業計画開始初期の段階から経験豊かな地盤技術者の判断を必要とする。特に当該地域や類似

工事に熟練した地盤技術者のアドバイスはきわめて有効である。

しかし筆者の経験では、全ての事例で必ずしもそのようになってはいないのが現実のようである。調査・試験は実施されているが、調査・試験の種類の選定根拠や条件、試験地点選定の根拠などが不明確・不適切であったり、取得データが不十分であったり、そもそも何の目的で実施したのか不明な調査・試験項目があつたりもする。事前に厳密な検討もせずに定型的な地質・地盤調査が発注され、実施に移されている事例も少なからずあるのではないだろうか。地盤に関するトラブル集や事故例を見るたびに、発注者も含め地質・地盤調査の計画・実施・解釈の技術力向上が不可欠であると感じる。リスクマネジメントという華麗なシステム論に入る前に、地盤リスクの同定・分析・評価と対策案の策定に必須な、地質・地盤の調査と試験から得られる地盤リスク情報の質的向上をまず目指すべきである。

全事業費と比べ、地質・地盤に関する調査と試験に投するお金が少ないと言われる。基礎工事など対象区域が限定されている条件下では、調査・試験から得られる地盤情報の対費用効果は高いはずである。しかし、最近専門誌に報道された例のように、未だに橋脚一基に対して、限られた本数のボーリングデータと不適切な土質試験データしか与えられないままに設計・施工が行われ、工事中止に追い込まれる事例は無くなってはいない。もちろんやたらに費用をかけて調査密度・調査種類を増やし調査期間を延ばすことは必ずしも得策ではない。先に指摘したように、地質・地盤の調査・試験が持つ本来的な制約から、得られる有効な情報量と情報の確実性向上には一定の限界がある。どのくらい調査・試験に費用を投ずるのが最適か、どこの段階で地盤の不確実性と地盤リスクとの調和をもたせるかに対して、説得力のある手法・指標を開発・提示することは、依然として重要な課題として残されている。一般論として優秀な経験豊かな技術者がいる環境では、十分吟味され計画された調査・試験であるならば、それに伴って調査・試験経費と調査期間が増大しても、全体事業費を減少させる効果を生む可能性が高いというものが、筆者の経験である。

当初調査で地盤リスクが予測可能な事態であるならあらかじめ設計変更、地盤改良、補強工法等の対策を講じ、安全の余裕代や工事に冗長性を持たせることでリスクのコントロールを行うことが可能である。問題は当初調査では予測不可能な事

態が発生したときに、地盤リスクが重要なインパクトを与える時である。その際すぐに「現状の技術では事態の発生は予測不可能であった」と拙速に結論つけるのではなく、まず問われるべきは「当初調査・試験の質と量の選択判断が適切であったか？調査・試験の結果の解釈が適切であったか？」である。その問い合わせその後の調査・試験の情報の質の向上につながり、地盤リスクの同定・分析・評価の精度向上に寄与する。

3. リスク経験の蓄積と類型化

調査・試験に加えて、地盤リスクの同定・分析・評価・対策において重要な役割をするのが、施工経験や事故事例等の地盤リスク経験の蓄積と分析・類型化である。不確実性の中で事業を行う建設産業では、施工経験の蓄積はきわめて重要である。その経験の系統的蓄積から、リスクの類型化とそれぞれの類型形態に対して対処法が帰納的に取りまとめられる可能性がある。香港の Geotechnical Engineering Office が出しているトンネル工事における地盤リスクとその対処方策の一覧にその好例を見る能够である (Geotechnical risk management for tunnel works, GEO Technical Guidance Note 25)。一覧表にはリスク低減を目指す複数の option が記載されている。各種の設計・施工指針、マニュアル等も同様な役割を果たすものと考えられる。

畠村洋太郎氏の失敗から学ぶ失敗学は、近年広範囲な製造産業界へその適用範囲の広がりを見せている。また科学技術振興機構では「JST 失敗知識データベース：科学技術分野の事故や失敗の知識と教訓」を作成・公開している。ここで他の製造業が取り扱うリスクと比して、地盤リスクは 2 度と同じ状況が存在しないという本質的な差異に注意しておきたい。JST 失敗知識データベースには建設分野の 221 事例も含まれているが、地盤に関する国内事故事例はきわめて限定的にしか記載されておらず、効果的な分析と類型化に必要なデータベースには育っていないのが現状である。その一因が、先に推測したように我が国の建設産業では、発注者と請負者関係において、事前の地盤調査の量と質の適否や、当初地盤調査結果に基づく予測可能性の厳密な検証を経ずに地盤リスクの負担を、個別の設計変更協議の中で調整・解決してきたため、事例の公開が妨げられていることがあるとしたら、それは地盤リスクの分析と管理技術の進展にとって大変不幸なことである。積極的

な情報開示が望まれる。

リスク経験の蓄積と類型化に有効な他の情報源は訴訟事例であるが、地盤リスクの視点から訴訟事例の整理されたデータベースの存在を筆者はまだ知らない。宅地造成や土壤汚染などの訴訟事例は、現在までに一定量の潜在的な情報源が蓄積されていると想像される。事故原因の科学的究明と、法律的判断としての構造物建設における瑕疵、構造物の管理瑕疵、専門職業人としての業務上過失か重過失の判断、賠償責任分担等々が訴訟事例から蓄積・類型化されると期待される。

4. 技術者の育成

どのような問題も行き着く先は人材育成である。地盤リスクを同定・分析・評価する技術力、能力はどのようにしたら身に付くのであろうか？当然ながらシステム工学の専門家が、直ちにそのまま地盤リスク管理の技術者になれるわけではないし、確立した地盤リスクの考え方、捉え方などというハウツーがあるわけでもない。まず科学技術知識としての地質学・地盤力学の知識と、それら知識を運用して構造物や地盤挙動を予測できる工学的運用能力が必須であることに異論はない。技術者の育成においては、「効果的な教材を整備する」、「当該分野に関わることへのモチベーションを持たせる」そして「能力向上のための訓練の場を提供する」、この 3 点が相まって効果を生む。設計・施工指針やマニュアル、事故のデータベースの整備は有効でそれらは効果的な教材になる。しかし、教材を学ばせるだけで地盤リスクを同定・分析・評価する技術力・能力が身に付くほど、問題は簡単ではない。地盤リスクに関わることの社会的重要性と貢献度を理解させ、技術的興味を熱く語り、技術的挑戦課題を明示してモチベーションを高めることがなければ自己研鑽への継続的意欲は生まれない。訓練の場では、調査と施工を含め多様な分野の経験を豊富にもつ技術者集団との地盤リスクを軸とした対話を繰り返すことが有効である。その中で、悲観的な立場で最悪のシナリオを描いてあらゆる地盤リスクの可能性を危惧・追求し注意を喚起する姿勢と、楽観的な立場から地盤リスクの回避・低減策、施工の代替案を柔軟に考える姿勢の、二つの相反する思考姿勢を学ぶことが重要である。さらに構造物自体の安全性と、構造物施工時の労働安全性とは同一ではないことを理解し、何よりも人命安全を優先させる姿勢を身につけることが必須である。その過程で、調査・

施工実態への注意深い理解と作業する人々の安全配置に対する配慮が自ずと思考の中に根付く。

おわりに代えて

地盤工学会関東支部では、本年3月に「地盤工学におけるリスクマネジメントに関する事例研究委員会」を発足させた。その設立趣旨は以下のとおりである。「最近、地震などの自然災害が増加し、地盤建造物に関するリスクが問題となってきている。これらの突発的な災害リスクに加えて、地盤工学に係わる従来からの安全上のリスクや環境面でのリスクについても注目される。…地盤工学に携わる技術者は、すでにこうした施工時のリスクを含むさまざまなリスクや責任の一端を担っているが、実際には実務で関わるリスクや直接関係す

る法令を断片的に学んでいるに留まっていることが多い。当委員会では、さまざまなりスクや法令を体系的・有機的に整理し、またそれらに関連するマネジメント手法や裁判の判例などの事例を検討し、保証・保険制度やリスクコンサルタントなど地盤工学分野での考え方やあり方を取りまとめる。…」。具体的活動内容として、① 地盤リスクの事例研究（地盤沈下、斜面災害、地震災害、地盤汚染など）② 法律制度の事例研究（法律のレビュー、判例研究）③ 保険制度の事例研究（保険のレビュー、事例研究）④ 地盤リスクマネジメントの事例研究（地盤リスクマネジメントのハード・ソフトの事例研究）⑤ 地盤リスクマネジメントの提言（地盤リスクマネジメントの今後の課題と提言）を掲げている。委員会活動はまだ始まったばかりである。3年後の成果を期待して頂きたい。

「地質と調査」投稿募集

当誌は、常日頃地質調査に携っておられる方々と、その周辺の方々とにご愛読いただけるように企画された雑誌です。特に、技術能力の向上を計ることの一助となり、それについて業界の発展に少しでも役立つことができればと願っております。そういう意味からも、多数の方からの投稿をお待ちいたしております。

学術論文的なものはもちろんですが、できる限り、毎日の現場で経験された事例に立脚した報告等をいただきまして、技術面の問題・情報の交換など、十二分にこの誌面をご活用いただきたいと存じます。

要項

●掲載ページ 4ページ以内

400字詰原稿用紙20枚以内（図表・写真を含む）。

ページ数を超えた場合には、ご諒解を得た上で、削除あるいは分割掲載することもありますので、お含みおき下さい。

●原則として、寄せられました原稿は返却いたしません。

●寄せられました原稿の採否、掲載号、用語等につきましては当編集委員会にご一任下さい。

●掲載いたしました原稿については規定の原稿料をお支払い致します。

なお、掲載いたしました内容に対するご意見、これから掲載希望の分野（項目）、質問などおよびその他のお問い合わせは下記にお願いいたします。

社団法人 全国地質調査業協会連合会事務局

電話 03(3818)7411

株式会社 土木春秋社

電話 03(3370)5020

道路事業において地質リスク低減 のために求められる方策

かど ゆ かつ のり
角 湯 克 典*

1. はじめに

道路事業において、当初想定していなかった地すべり・軟弱地盤・断層・破碎帯等に遭遇し、そのための対策に多大な費用を要し、供用が遅延することがある。また、供用後においても、防災対策等へ継続的に追加投資を余儀なくされることがある。これらは道路事業に内在する地質リスク（地質条件の不確実性とそれに起因する事業コスト損失）に対する認識や対処が十分でなかったことに起因しているものと考えられる。本稿では、道路事業の各段階において、地質リスクを軽減するために今後どのような方策が必要かについて述べる。なお、本稿で述べる内容は著者の個人的な見解によるものであることを冒頭にお断りしておく。

2. 地質リスク低減のための基本的考え方

道路事業を実施する範囲（エリア）においては、即地的に大なり小なり「土木地質における望ましくない地質現象」が生起する可能性のある範囲が存在し、これが道路事業の実施により何らかの形で顕在化することがある。ここで、「土木地質における望ましくない地質現象」とは、土木構造物の立地場所の変更、設計変更、事後的な対策などを要する事象であり、望ましくない地質現象には、活断層のように自然状態で望ましくない地質現象が生じるもの（自然現象）と、土木構造物の存在や施工が望ましくない地質現象を生起させるもの（たとえば、多段切土斜面の崩壊や切土によって発生する地すべり）（人為的現象）とがある¹⁾。道路

事業は計画（ルート選定）、設計、施工と順をおって実施されるが、事業の実施段階を地質リスクとの関連でとらえると、それぞれの段階における地質リスク低減の基本的な考え方は次のように整理することができる。

① 計画段階：地質リスクの高い箇所を回避したルート選定

既存の資料や現地調査結果等を参考に判明している地質リスクの高い箇所を回避し、費用対効果面やアクセス性等の面から最も有利となるようなルート選定を行う。

② 設計段階：土木地質における望ましくない地質現象を誘発しない設計

選定されたルートをもとに行われる縦断設計（通常は計画段階に含まれると考えられるが、ここでは設計に含まれることとした）や構造物の概略設計が、土木地質における望ましくない自然・人為的現象を誘発せず、望ましくない人為的現象の潜在的な発生可能性を低下させる（たとえば、多段切土を避けトンネルとする）ように細心の注意を払い設計を行う。

③ 施工段階：顕在化した地質リスクの適切なマネジメント

地質リスクを回避した計画とし、望ましくない自然・人為的現象を誘発しない設計を行ったとしても望ましくない現象が顕在化することがある。この場合は事前に望ましくない地質現象の顕在化を想定したマネジメント計画や施工計画等を立案・準備し、これにしたがって望ましくない地質現象のマネジメントを行う。

以下、上記の基本的な考え方についたがって、地質リスクを低減するために、今後必要になると考えられる方策について述べる。

* (独)土木研究所 道路技術研究グループ（トンネル）
総括主任研究員

3. 計画段階

地質リスクの高い箇所を回避したルート選定を行うためには、これらの箇所を事前に明らかにしなければならない。計画段階では地質リスクの高い箇所を把握するため通常、既存資料の収集と現地調査が実施される。このことから、地質リスクの高い箇所を正確に把握するには、既存資料と現地調査のいずれか一方もしくは両方の精度を高める必要がある。このうち既存資料の精度を高めるには時間と費用をかけて調査結果を地道に蓄積し、これを利用しやすい形で公開していくことが重要であり、関係各位のなお一層の努力が望まれるところである。一方、現地調査としては地表地質踏査、また場合によってはボーリング等が実施されているが、地表地質踏査は広範な地質情報を比較的安価に入手することができ、一定の技術力を持った地質技術者であれば、ある程度正確に地下の地質構造を予測することができる。しかしながら、その精度や信頼性は地質技術者の技術力や踏査した量や密度に左右されることから、こうしたばらつきをなくすためにも、道路事業を実施する箇所に応じてどういった踏査ルートを選定し、踏査ルート上の何を、どの程度、調査する必要があるかを示したマニュアルを整備することが望まれる。

また、このようにして実施された地表地質踏査の結果の精度や信頼性をさらに高めるためには、調査を実施した地質技術者のみならず、官側のインハウスエンジニアや第三者である地質の専門家が異なった視点からその結果を確認し、チェックすることが重要であると考えられる。これについては地質リスクマネジメントの先進国である英国において参考となる制度を構築しているので後述する。

さらに現場の技術者からは、地表地質踏査の結果とあわせて地質リスクの高い箇所を把握するためにリモートセンシング技術等を用いて面的にある程度の深度(50~100 m程度)までの地質情報を一括して入手できる技術の開発が望まれている。

4. 設計段階

この段階においては、計画段階で地質リスクの高い箇所を回避したルート選定を行ったとの前提のもと、道路により土木地質における望ましくない自然・人為的現象を誘発せず、望ましくない人為的現象の潜在的な発生可能性を低下させるよう

な道路設計とする必要がある。このためには、その地域の地質で想定される望ましくない地質現象とそれぞの構造物の存在や施工により生起される望ましくない地質現象を認識し、その地域で発生が想定される望ましくない地質現象を正確に特定する必要がある。これまでこうした望ましくない地質現象の特定は、各構造物の技術基準図書の離散的な記述を参照して行われていたことから、今後は、それぞれの地質と構造物で想定される望ましくない地質現象を横断的に整理しとりまとめた図書や実際に現地で発生した望ましくない地質現象等を収集・整理した事例集やデータベースを整備することが望まれる。

また、想定された地質現象の発生可能性や発生範囲等を正確に把握するために、これらの地質現象に即した調査マニュアルを整備することも望まれる。一方で、むやみに地質調査の量を増やしても、得られる地質情報のさらなる精度や信頼性の向上が望めない場合もあることから、現場の状況に応じた最適な地質調査の量を明らかにしていく必要があると考えられる。

5. 施工段階

計画、設計段階で十分に地質リスクを回避し軽減したとしても施工中に望ましくない地質現象に遭遇することがある。この場合においては顕在化したリスクを如何にマネジメントするかが重要になる。これについては事前にマネジメント計画等を準備しこれにしたがってマネジメントすればよいが、安全を求めるあまり過大な対応になることがある。このことから、望ましくない地質現象に応じた、最も効果的・効率的な対応手法を明らかにしていくことが望まれる。

6. 諸外国における取組み

リスクの定量化にもとづクリスクアセスメント、リスクマネジメントは欧米においては一般的に行われている。ここでは欧米における取組みのうち現時点で著者が調査した範囲で、我が国に参考となるものについて述べる。

(1) 英国における取組み

英国においては、我が国と同様道路事業において当初想定していなかった望ましくない地質現象に遭遇し多大な費用を要していたことから、地質調査分野で30年ほど前からリスクマネジメントを導入している。同国においては道路事業でDB

(デザインビルト) や PFI が一般的に行われており、地質情報の精度が特に重要であることから、官側の立場を代表する地質技術者あるいは第三者である地質の専門家が民側の地質技術者と協働して地質の評価や道路事業に与える影響について検討している。

(2) ニュージーランドにおける取組み

ニュージーランドにおいては、地質のみならず道路事業に関する広い範囲のリスク（例えば、健康、安全、環境等）についてリスクマネジメントを実施している。同国においては、脅威のみならず好機（例えば、救命やコスト縮減等）についてもリスクマネジメントを実施し、リスクの大きさに応じた行動を起こすことがシステム化されている。以下、ニュージーランドのトランジット社（道路管理会社）「リスクマネジメントプロセスマニュアル」について説明する。

「リスクマネジメントプロセスマニュアル」

リスクマネジメントは図1のプロセスに従って実施されている。

○ リスクの特定

ここでは、最終的に道路管理会社の活動に影響をおよぼす全てのリスクを特定する。リスクとしては、例えば、健康、安全、環境、コスト、時間等の損害を網羅し、この時点で不明なリスクもある程度見込むこととしている。また、マニュアル中にはリスクの特定を容易にするためにリスクリストをあらかじめ準備している。地盤条件に関するコストリスクとしては、「地盤条件がよくわかつていない、または不十分」や「施工中に予期しない地盤条件に遭

遇し、時間・コストに影響が出る」などがあげられている。これらのリスクは記録簿に記録しておき、どのような状態に

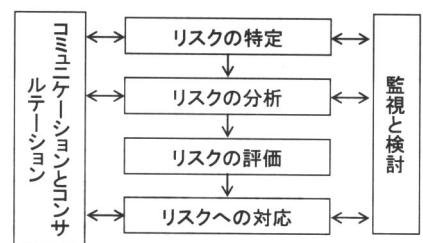


図1 リスクマネジメントプロセスの概要

あるのか（新規、進行中、休止、終了）を明示しておくこととしている。また、より高度な手法でリスク分析を行う場合は、リスクを確率分布関数によりモデル化することとしている。

○ リスクの分析

ここでは、リスクを発生する可能性と発生した結果から分析する。リスクの可能性は表1（ここでは脅威の可能性のみを例示）に示すとおり5段階で評価し、リスクの結果も表2（ここでは脅威の結果のみを例示）に示すとおり5段階で評価することとしている。リスクの分析においては、最善と最悪のシナリオを想定するとしている。

○ リスクの評価

ここでは、リスクを可能性と結果を掛け合わせ

表1 脅威の可能性評価

可能性	確率（資産改善などの短期的業務用）	頻度（資産管理や企業活動などの長期的業務用）	内容	評価
Likely (ありそうな)	>50%	1年に1度以上	脅威が生じると予想できる または、脅威についてほんの少しあわからない	5
Quite Common (非常に頻繁)	20%~50%	1年~5年に1度	脅威は非常に頻繁に起こる または、脅威について少しわからぬ	4
Unlikely (ありそうもない)	10%~20%	5~10年に1度	脅威はまれにしか起きない または、脅威についてそこそこわかっている	3
Unusual (あまりない)	1%~10%	10年~50年に1度	脅威はまれにしか起きない または、脅威についてはよくわかっている	2
Rare (まれ)	<1%	50年に1度以下	脅威は例外的状況でなければ起きない または、脅威について非常によくわかっている	1

表2 脅威の結果評価

	分類	健康・安全	イメージ・評判	環境	関係者利益	コスト	時間	評価
脅威	Substantial (重大な)	複数の死傷者	国際的なメディアによる報道	恒久的な環境被害が広がる	調査委員会	+1 千万ドル	何年にも渡る	100
	Major (大規模な)	数人の死傷者	全国レベルでの報道	大規模な環境被害、復旧にかなりの費用がかかる	行政調査	+百万ドル~1千万ドル	複数年	70
	Medium (中規模な)	重傷	地域メディアによる報道または短期的な全国レベルの報道	大規模だが復旧可能な環境被害	行政審議または第三者による調査	+10万ドル~100万ドル	数ヶ月	40
	Minor (小規模な)	軽症	地元メディアによる報道	限られてはいるが中期的な影響あり	公式情報請求	+1万ドル~10万ドル	数週間	10
	Negligible (無視できる程度)	ごく軽症	地元メディアによる短い報道	短期的被害	ちょっとしたクレーム	+0ドル~1万ドル	数日	1

表3 脅威の分類と対応の種類

結果（損失）					
可能性	無視できる(1)	小規模(10)	中規模(40)	大規模(70)	重大な(100)
Likely (ありそうな) (5)	5 小さい脅威 アクティブに受け入れる - 可能性を最小化するシステムの改善 - 受け入れる - 補修する	50 中規模な脅威 アクティブに受け入れる - 可能性を最小化するシステムの改善	200 非常に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 可能性を最小化するシステムの改善	350 極端に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 活動をやめる	500 極端に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 活動をやめる
Quite Common (非常に頻繁) (4)	4 小さい脅威 アクティブに受け入れる - 受け入れる - 補修する	40 中規模な脅威 アクティブに受け入れる - 可能性を最小化するシステムの改善 - 保険を掛ける	160 非常に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 可能性を最小化するシステムの改善	280 非常に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 緊急計画	400 極端に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 活動をやめる
Unlikely (ありそうな もない) (3)	3 無視できる脅威 パッシブに引き受ける - 補修する	30 中規模な脅威 アクティブに受け入れる - 可能性を最小化するシステムの改善 - 保険を掛ける - 緊急計画	120 大きな脅威 アクティブに受け入れるまたは移転する - すぐ行動に移す - 保険を掛ける - 緊急計画	210 非常に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 回避する - 緊急計画	300 非常に大きな脅威 回避する - すぐ行動に移す - 回避する - 緊急計画
Unusual (あまりない) (2)	2 無視できる脅威 パッシブに引き受ける - 補修する	20 小さな脅威 アクティブに受け入れるまたは移転する - 補修する	80 大きな脅威 アクティブに受け入れるまたは移転する - すぐ行動に移す - 保険を掛ける - 緊急計画	140 大きな脅威 回避するまたは移転する - 監視する一保険を掛ける - 緊急計画および防災計画	200 非常に大きな脅威 回避するまたは移転する - 監視する一保険を掛ける - 緊急計画および防災計画
Rare (まれ) (1)	1 無視できる脅威 パッシブに引き受ける - 補修する	10 小さな脅威 アクティブに受け入れるまたは移転する - 補修する	40 中規模な脅威 アクティブに受け入れるまたは移転する - すぐ行動に移す - 保険を掛ける - 緊急計画	70 大きな脅威 回避するまたは移転する - 監視する一保険を掛ける - 緊急計画および防災計画	100 大きな脅威 回避するまたは移転する - 監視する一保険を掛ける - 緊急計画および防災計画

たリスクスコアにより評価し分類する（表3参照）。例えば、リスクの可能性が「ありそうな（スコア5）」に、リスクの結果が「大規模な（スコア70）」に評価された場合リスクスコアは350となり、リスクは「極端に大きな脅威」と評価される。評価、分類された各リスクのスコア、分類をリスク記録簿に記録する。また、極端に大きなリスクが1つまたは非常に大きなリスクが5つあるとリスクの対応計画においてより高度な手法を適用することとしている。

○ リスクの対応計画

ここでは、リスクへの対応の種類を選定し、対応を特定する（表3参照）。例えば、リスクの可能性が「ありそうな（スコア5）」に、リスクの結果が「大規模な（スコア70）」に評価された場合、「回避しすぐ行動に移すか活動をやめる」。対応の種類が選定されると適切な対応行動を作成し、リスクへの対応行動の経過を、リスク記録簿に要約することとしている。また、活動には時間リスクが発生することから、活動における重要工程の通常の見込み日数や保守的な見込み日数を示し、予算

には評価したコストリスクを見込み、活動における通常の見込み予算額や95%タイル予算額を示すこととしている。より高度な手法でリスク対応を行う場合は、時間リスクやコストリスクについてモンテカルロシミュレーションを用い重要工程やコストの分布グラフを示すこととしている。

7. おわりに

従来から土木技術者は地質リスクを認識し事業を進めてきたものの、地質リスクという概念が普及し、これを体系的にマネジメントしようとする取組みは緒についたばかりである。今後、関係各位と協力しつつ、ここに挙げた方策の実現等により地質リスクの適切なマネジメント手法の構築に向けて取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) 地質リスクとリスクマネジメント、地質調査総合センター研究資料集, no. 472, pp. 13, 2008. 3.

地質事象の把握における不確実性と地質リスク

お がさ わら まさ つぐ
小 笠 原 正 繼*

1. はじめに

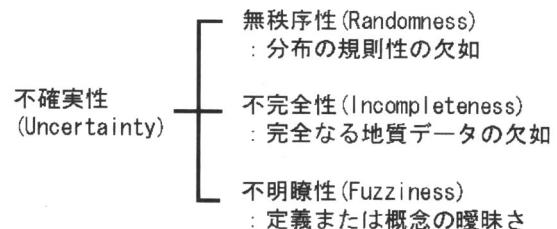
地質分野におけるリスクまたはリスクマネジメントの議論は、2002年の本誌のリスクマネジメントの特集¹⁾があるように、最近さまざまな場でなされている。また地震等の自然災害の分野ではリスクという概念が以前から普遍的に用いられている。一般にリスクとは、(1) その事象が顕在化すると好ましくない影響が発生する、(2) その事象が顕在化した場合の影響の大きさが明らかでないという結果の不確定性、(3) その事象がいつ顕在化するか明らかでないという発生の不確定性があるという性質を含むと考えられている²⁾。リスクとは影響の大きさ（重大さ）とその発生確率により表されると考えられることが多い。

地質調査においてはボーリングの本数や各種調査の量は有限であり、そのため地質事象の把握における不確実性が存在し、リスクの要因となる。石油や鉱物資源探査分野では、資源の経済性評価の点から、地質に起因するリスクを定量的、定性的に取り扱うリスクマネジメントが行われている。トンネル工事等における応用地質分野でも地質に起因するリスクの議論が多く見られる。全地連（全国地質調査業協会連合会）地質リスクワーキンググループでは地質リスクを地質に係わる事業リスクと定義し、事業コスト損失そのものと、その要因の不確実性を指すとした³⁾。ここでは自然災害を含めて地質に関連するリスクの特徴を概観し、さらに地質現象把握における不確実性とそれに起因する地質リスクを議論する。

2. 地質事象の把握における不確実性

地質事象の把握または地盤状況の把握における不確実性（Uncertainty）は表1のように無秩序性、不完全性、不明瞭性の3要因に区分されるとvan Staveren⁴⁾は示している。無秩序性は地質分布の規則性の欠如を意味する。付加体メランジ中の岩石ブロックの分布などはこの例である。不完全性は完全なる地質・地盤データの欠如に由来する。不完全性の存在が地質リスクの主たる要因となる。これらの不確実性は地質情報に関連するものとされ、不正確なデータや不完全なデータが原因となる。不明瞭性は定義または概念の曖昧さとされるが、地質の解釈が進めばこの要因に区分される不確実性は削減できると考えられる。すなわち地質の解釈に起因する。

表1 地質事象の把握における不確実性の要因 (van Staveren (2006) による。)



地質調査量を増やすれば不完全性は減少させることができるが、完全なる地質・地盤データを得るためにには対象とする地質体をすべて掘り起こさなければならない。例えば、トンネル工事等において掘削された部分の地質は工事の進行とともにその部分の記載を継続的に行えば完全なデータが得られる。ただしその場合でも、もし岩相区分等に曖昧さがあり、そのために不明瞭性が残れば、地質の把握には不確実性が存在する場合が考えられる。地質の把握における不確実性の議論において

* 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 主任研究員

表2 地質に関連するリスクとその要因

		発生要因		不確実性			リスクを受ける主体		
		自然	人間活動	発生時期	場所	規模	社会	国・自治体	企業
自然現象に起因するリスク	火山噴火	◎		◎	○	○	◎	◎	◎
	地震	◎		◎	◎	◎	◎	◎	◎
	津波	◎		◎(○)	◎(○)	◎	◎	◎	◎
	地すべり	◎	○	○	○	○		◎	◎
	天然ガス ^{*1}	◎			○	○			◎
	ラドン	◎							◎
人間活動に起因する地質環境リスク	地盤沈下		◎		○	○	◎	◎	◎
	土壤汚染		◎		○	○		◎	◎
	地下水汚染		◎		○	○	◎	◎	◎
開発事業に伴う地質リスク	建設工事 ^{*2}	◎	◎		◎	○		◎	◎
	資源探査 ^{*3}	◎	○		◎	○		◎	

◎:該当する項目、○:一部該当する項目、*1:天然ガス爆発リスク、*2:建設工事に伴う地質リスク、*3:資源探査と開発に伴う地質リスク

はこのように不確実性の要因についての分析も重要である。

3. 地質に関連するリスクとリスク対策

火山噴火リスクや地震災害リスク等、地球科学が対象とする分野にはリスクとして考えられる事象が多い。ここでは地質に関連したリスクについて、発生の要因、リスクを生じる不確実性の存在する要因(発生の時期、場所、規模)、リスクを受ける主体について見てみる。表2に各種のリスクとその特徴を示した。ここではそれらのリスクを、自然現象に起因するリスク、人間活動に起因する地質環境リスク、開発事業に伴う地質リスクに大きく分類した。

3.1 自然現象に起因するリスク

火山災害リスクはその発生時期に不確実性がある。地質学的手法を用いて、詳細な火山活動の歴史を解明し、次の噴火時期の予測がなされるものの、その発生時期には不確実性がある。ただし、マグマが地下浅部に供給されその動きが観察されれば噴火活動の発生時期についてはより確実な予知も可能となる。火山噴火については発生の場所はかなり限定される。また噴火の規模と様式については噴火活動の歴史からある程度の精度で推定される。これらの情報をもとにハザードマップの作成が可能となる。リスクを受ける主体は、社会、国・自治体、企業、個人である。巨大噴火の場合は地球環境や気候へのリスクが生じる。また火山災害リスクには火山ガスによるリスクも含まれる。

地震災害リスクについては発生時期、場所、規模に不確実性があるが、最近の詳細な研究調査から全国規模での地震動予測の確率論的な取り扱いが可能となってきている⁵⁾。また活断層について

は活断層活動確率図の作成がある⁶⁾。津波災害リスクは表2に示した項目上では地震災害リスクと同じ性格をもつが、より詳細に見れば、津波被害リスクの発生場所は海岸線からある限定された範囲となり、また被害範囲は地形にも依存する。このことから、津波災害の場合はハザードマップの作成がなされている。津波災害リスクについては、地震により津波が発生してから、津波が各地に到達するまで時間があるので、津波予報(到達時刻、規模)が可能となっている。すなわち津波災害リスクマネジメントとしてはハザードマップの作成とともに津波予報が重要な要素となる。また最近では、地震についても緊急地震速報による地震動到達時刻の予報がなされており、地震被害リスクの低減に貢献すると期待される。このように津波や地震の発生自体には不確実性があるものの、それらがある特定の場所に影響を生じるまで時間がある場合は、その場所においてリスクが発現する時間に高い確実性が得られる。

地すべり(斜面災害)リスクは台風、集中豪雨、地震や火山噴火を引き金として発生する。豪雨による斜面災害の発生時期については降雨量に関連する場合が多いので、災害発生の可能性が高くなる時期を把握することは可能と考えられる。したがって、リスクマネジメントとして避難命令等の発令がなされる。ただし、地震や火山噴火を引き金とする地すべりは突発的に発生することもある。また地すべりの発生には、新たな道路の建設や森林の伐採による土壤の保水力の変化なども一要因となり得る。その結果引き金となる豪雨時に地すべりや斜面災害を発生することもあり、人間活動も要因となる場合がある。地すべりの発生場所と規模については、地形と地質状況から推定され、道路沿いや人の生活している範囲を中心にハザードマップが作成される。地すべりでもゆっくりとクリープしているような場合は、地すべりに

より家屋が破壊される前に、家財道具等の持ち出しが可能なケースもあり、被害を低減できる。この例は津波予報等と同様に、地すべりの発生後、特定の場所にリスクの発現する時間まで有意な時間が存在し、確実性が高く把握できるためである。リスクを受ける主体は道路の管理者である国や自治体、対象地域に生活している個人となる。ここでは洪水リスクについては地質関連リスクには含めないが、地震による地すべりや火山噴出物が河川をせき止めて形成された自然ダムが決壊することによる大規模洪水のリスクは地質に関連したものである。

天然ガスが地下から流出し建築物内に滞留すると、ガス爆発や火災が生じる危険がある。また温泉ボーリングの掘削中や温泉とともに流出する天然ガスによるリスクは、地下深部にあるガスを強制的に取り出す点で一部は人間活動に起因する。また天然ガスが建築物内に滞留しないで継続的に大気に放出されればリスクはない。滞留するような人工物の存在がリスクを生じているとも言え、必ずしも自然現象のみが起因するとは言えないかも知れない。場所としては天然ガスを胚胎する堆積盆の地域である。リスクの主体は個人または企業になる。

日本ではあまり指摘されないが、イギリスやチエコではラドンリスクが挙げられている。ウランを含む鉱物に富んだ花崗岩等の露出地域では、地下からのラドンの放出が大きな健康被害のリスクとなっている。ここでリスクを受ける主体は個人である。

自然現象に起因するリスクについては発生する場所と規模の推定がなされると詳細なハザードマップの作成が可能となる。火山噴火、津波、地すべり（斜面災害）の場合はハザードマップが準備され、その地域の住民等に、そのリスクを理解してもらう上で重要な資料となる。すなわちリスクコミュニケーションに役立つ。

3.2 人間活動に起因する地質環境リスク

地盤沈下、土壤汚染、地下水汚染はいずれも人間活動に伴い発生したリスクであり、発生場所やその要因に地質体が含まれる。ただし、人間活動に起因しない自然由来の重金属による土壤汚染や地下水汚染も考えられる。

地下水の汲み上げや、天然ガスの採取による地盤沈下は広域的な社会的影響を及ぼす。そのリスク対策として地下水汲み上げ量の制限、天然ガス採取の制限等のマネジメントがなされる。地下水

の流れについてはシミュレーションにより把握することが可能で、不確実性の要因を定量的に低くすることができる。

土壤汚染は地下水等への溶出の危険性があるが、比較的汚染源に近い限られた範囲となる。リスクマネジメントとしては汚染土壤の浄化等が行われる。リスクの主体は汚染の排出側を含めその土地に直接関係した個人や企業となる。地下水汚染は土壤汚染より広範囲に影響が出る。そのためリスクの主体は個人を含め広く社会となる。

3.3 開発事業に伴う地質リスク

建設工事や資源探査における地質リスクは、国土開発や資源開発に伴う地質リスクの顕在化であり、予見できない (unforeseeable) 好ましくない地質状況の場所に開発が進むことによりリスクとなる。開発事業の進行とともにある時期にリスクが顕在化する。ただし、発生時期の不確実性をリスクの要因としているわけではない。基本的には地質状況の把握における不確実性を要因としている。

(1) 資源開発事業に伴う地質リスク

資源開発には金属鉱物資源、工業原料鉱物資源、石油資源、地熱資源などが含まれる。リスクの主体はいずれも開発企業となる。金属鉱物資源や石油資源探査分野では、資源探査の経済性評価の点から地質状況の把握の不確実性に関する取り扱いの議論が多い。

金属鉱物資源探査では、地下数百メートルに存在する鉱床の探査が主であり、地質状況の把握の不確実性とそのリスクの程度は石油資源探査とは異なる。金属鉱床の場合、鉱床の単位体積当たりの価値（金属価格）が大きく、その価値に見合っただけの地質調査が可能となる。また金属鉱山における採掘技術の物理的制約と経済性から採掘可能深度が限定され、各種の探査手法により、3次元的な鉱床形態の把握が可能となっている。鉱物資源の場合、鉱床の規模を示す量として重要な情報は埋蔵鉱量である。それは地質学的確実性 (certainty) と経済性を指標に定義される⁷⁾。すなわち、金属鉱物資源探査においては鉱量に関する地質リスクが存在する。

鉱山開発時にはさらに岩盤工学リスクが存在する。坑内採掘の場合は、土木地質におけるトンネル工事と同様に岩盤工学的な地下地質状況の把握が必要となる。

(2) 建設工事における地質リスク

建設工事における地質リスクは、工事執行上望

ましくない地質事象が存在する場所と規模に関する不確実性を要因とする。またリスクの主体は工事の契約内容に依存し、発注者（国または地方自治体および企業）または工事請負者（企業）となる。

建設工事はさまざまな地盤条件(Ground conditions)の影響を受ける。地盤条件としては狭い意味での地盤である土壤、岩盤等の状況、地下水、地質汚染状況、地下の人工構造物が含まれる。地盤リスク (Geotechnical risk) としてはそれらの要因を含み、狭い意味での地質リスク (Geological risk) は地下の人工構造物のリスクを除いて考える。例えば、都市における新たな地下鉄の建設工事では既存の人工構造物の存在は地盤リスクに含まれる。広い意味での地質リスクは地盤リスクやジオリスク (Geo-risk) と同義である。

工事に困難な地質状況であっても、計画段階で予見できていれば、ルート変更等工事の場所の変更、または適切な工法の採用など様々な対策がなされ、リスクの発現とはならない。他方、予見できない好ましくない地質状況が地質リスクを生じる。なぜ予見できなかったと言えば地質事象の把握における不確実性が存在するためで、すでに示したように、1) 地質分布の無秩序性、2) 地質情報の不完全性、3) 地質把握における不明確性を要因とする。1) と2) の不確実性の低減には地質調査量が重要な要素となる。工事対象地域の地質の地域的特質や出現する地質体の性質等を熟知した地質専門家の判断による適切な調査量の設定が可能なシステムが地質リスクマネジメントの基礎となる。全地連地質リスクワーキンググループでは地質リスクマネジメントの検討を行っている。その中で、工事の構想段階において地質技術者の積極的な係わりの重要性を示している。構想段階で地質リスクの洗い出しを行えば、リスクの回避または低減が可能となる。この段階では工事対象地域の既存の地質地盤情報は重要で、不確実性の低減に役立つ。

最近、海外のプロジェクトでは、GBR(Geotechnical Baseline Report) を用いるケースが出てきている⁸⁾。GBR については本号に解説があるが、地質リスクの分担を示し、リスクが顕在化したとき発注者と請負者間の責任の分担が明確となる。

米国ではこの GBR は DSC(Differing Site Condition) 条項と問題が生じた時に調停する DRB (Dispute Review Board) とともに地質リスクマネジメントの重要な部分となる。ただし、これらはいずれも地質リスクが顕在化した後のためのマネジメント手法である。

建設事業完了後は保守管理が必要となり、また資源開発終了後は環境への影響も考えられ、そこには地質に関するリスクが存在する。すなわち開発事業終了後は、開発事業に伴う地質リスクから人間活動に起因する地質環境リスクへと移行する。

4. まとめ

本報告では地質に関連したリスクの特質について概観してみた。不確実性の要因とリスクの主体を見ることでそれぞれのリスクの特質が明らかになる。いずれのリスクにおいても地質に関する不確実性を少なくすること、すなわち基礎となる地球科学情報の整備、および適切な地質調査の実施、さらに地質専門家の適切な判断の重要性が見えてくる。

参考文献

- 1) 岡田憲夫：リスクマネジメントの時代と社会基盤整備の新潮流、地質と調査, pp. 2-6, no. 4, 2002.
- 2) 中嶋秀嗣：リスク工学と地盤工学3. リスクマネジメント, 土と基礎, pp. 33-40, vol. 52, 2004.
- 3) 全国地質調査業協会連合会：H 17 年度 地質にかかる事業リスク検討報告書, pp. 64.
- 4) van Staveren, M.: Uncertainty and ground conditions: a risk management approach, pp. 321, Elsevier, 2006.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書, pp. 121, 2005.
- 6) 吉岡敏和・栗田泰夫・下川浩一・杉山雄一・伏島祐一郎：全国主要活断層活動確率地図、構造図(14), pp. 127, 産業技術総合センター, 2005.
- 7) McKelvey, V. E.: Mineral resources estimates and public policy, American Scientist, vol. 60, pp. 32, 1972.
- 8) Essex, R. J.: Geotechnical baseline reports for construction, The American Society of Civil Engineers, pp. 62, 2007.

地盤構造物の信頼性設計と地盤調査

本城 勇介*

1. はじめに

最近、設計コードの性能規定化や信頼性計法の概念に基づいた改定が盛んである（本城, 2004 a, 2004 b, 2007)^{1)~3)}。地盤構造物の設計では、個々のサイトで行われる地盤調査に基づいて地盤パラメータの特性を決定するという、他の構造物とは著しく異なる事情のため、得られた地盤調査結果からどのように信頼性設計を行うかということが、大きな問題である。

地盤調査を行ったジャストポイント（橋脚建設予定地点の直下）や比較的調査地点近傍で信頼性設計を行う場合と、その調査を行った地盤全体（コンテナヤード建設予定地全体の地盤）の一般的特性に基づいてこれを行う場合では、そのやり方が大きく異なるはずである。この論文では、構造物建設予定地点やその近傍で行う調査により特性値を推定し設計しようとする場合を局所推定（設計が問題となるときは、局所信頼性設計）、一般的な地盤特性によりこれを行う場合を一般推定（同、一般信頼性設計）と呼び、区別するとともに、その違いが地盤工学の信頼性設計と、一般的な構造工学の信頼性設計の差異であることを説明し、読者の参考としたい。

2. 一般推定と局所推定

2.1 空間的バラツキ vs. 統計的推定誤差

信頼性設計法では、通常次のような不確実性要因を考える。

- ① 物理的不確実性：地盤特性の空間的バラツキ、材料の品質のバラツキなど。
- ② 統計的不確実性：限られた調査から地盤特

性を把握するときに生じる推定誤差。

- ③ モデル化誤差：複雑な現象を単純化・理想化したモデルで近似する誤差。
- ④ ヒューマンエラー：人為的に混入する不確実性。勘違い、計算間違いなど。

実際に信頼性設計を行う場合、これらの不確実性が相互にどの程度の大きさで解析結果に影響を与えるかを把握することは、きわめて重要である。特に地盤構造物の設計では、地盤パラメータの空間的バラツキの程度と、地盤調査などに伴う統計的推定誤差の関係を適切に把握することが必要となる。

2.2 確率場による地盤のモデル化

地質学的に同一と見なされる土層を、統計的にモデル化する場合、地盤の特性（強度、変形特性等）を、トレンド成分とランダム成分に別けて、モデル化するのが標準的である（Lamb 1982；Vanmarcke, 1977 等）^{4),5)}。ここでトレンド成分とは、データの全体的な傾向を示す成分であり、ランダム成分とはその全体的な挙動からのずれを表す成分のことである。ランダム成分は定常確率場により記述できると仮定する。その上で、次の3つの典型的なモデルを定義する（松尾, 1984）¹²⁾。なお、 $x=(x_1, x_2, x_3)$ は、地盤内の空間座標を示し、特に、 x_3 を地盤の深度方向にとられた座標軸とする。

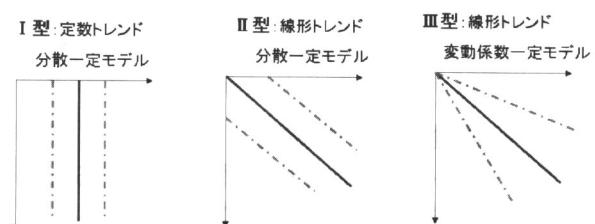


図1 地盤のモデルの類型

* 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授

I型：定数トレンド・分散一定モデル

$$z(x) = \beta_0 + \sigma\epsilon(x)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2, \theta)$$

II型：線形トレンド・分散一定モデル

$$z(x) = \beta_0 + \beta_1 x_3 + \sigma\epsilon(x)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2, \theta)$$

III型：線形トレンド・変動係数一定モデル

$$z(x) = (\beta_0 + \beta_1 x_3) + Cov(\beta_0 + \beta_1 x_3)\epsilon(x)$$

$$(\beta_0 + \beta_1 x_3)\epsilon \sim N(0, (Cov(\beta_0 + \beta_1 x_3))^2, \theta)$$

図1に示したI～III型のどのモデル式も前項がトレンド成分、次項がランダム成分を表現している。また θ は、自己相関距離を表すパラメータであり、水平方向に θ_h 鉛直方向に θ_v である。さらに全体的な自己相関関数は水平方向と鉛直方向の自己相関関数の積で表される（分離可能な構造の仮定）として、指指数関数を用いる。

2.3 局所平均と分散の低減

地盤パラメータ値を推定する問題を考えるときの一つの重要な視点は、構造物の設計に影響を与えるのは、地盤の個々の点におけるバラツキというよりは、ある長さ、ある面積、ある体積に関する地盤パラメータの平均値のバラツキが重要であると言うことである。局所平均の重要性は、次のような点にある。

- (1) 地盤の支持力、安定、変形等で問題となるのは、地盤内のある一点における地盤の性質と言うよりは、ある面積や体積についての平均値である場合が多い。
- (2) 局所平均場の平均値は、元の確率場と同じであるが、その分散は場合によっては著しく減少する。（この分散の低減は、確率場の自己相関関数の性質に大きく依存する。これは、信頼性解析等を行うとき相当大きな影響を結果に与える。）
- (3) 局所平均場は、ある分布に従う確率変数の平均を対象としているので、中心極限定理により、正規確率場に近づくことが期待され、扱いが圧倒的に容易になると考えられる。

局所平均確率場の地盤工学における重要性を早くから指摘し、その解析のための道具を用意したのはVanmarcke (1977)⁵⁾である。

2.4 局所推定と一般推定

地盤パラメータ値の推定の問題を考えるとき、次の2つの問題を分類しておく。

- (1) 局所推定 (LE: Local Estimation) : 設計

に関連して、地盤内のある指定された線、面積または体積についての、地盤パラメータの平均値を推定する問題。

$$z_k = \frac{1}{L} \int_L Z(x) dx$$

ここに、 L は局所平均を求める線長、 z_k は特性値である。局所平均はその地点で生じている局所平均である。

- (2) 一般推定 (GE: General estimation) : 同様の問題で、ある比較的広い地盤内の任意の一点、線、面積または体積についての、地盤パラメータの平均値を推定する問題。

$$z_k = E[Z(x)] = \mu$$

ここに μ は、 $Z(t)$ の母平均である。一般推定の特性値は、母平均に一致する。

①は、構造物建設地点が特定され、その地点または近傍で地盤調査が行われている場合の特性値決定の問題となる場合である。一方②は、港湾地域でコンテナヤードを建設し、その一般的な地耐力が問題となるような場合が考えられる。

局所推定のもっとも一般的な形は、Krigingにより与えられる(町田他, 2008; 本城他, 2008)^{8),9)}。

3. 例題

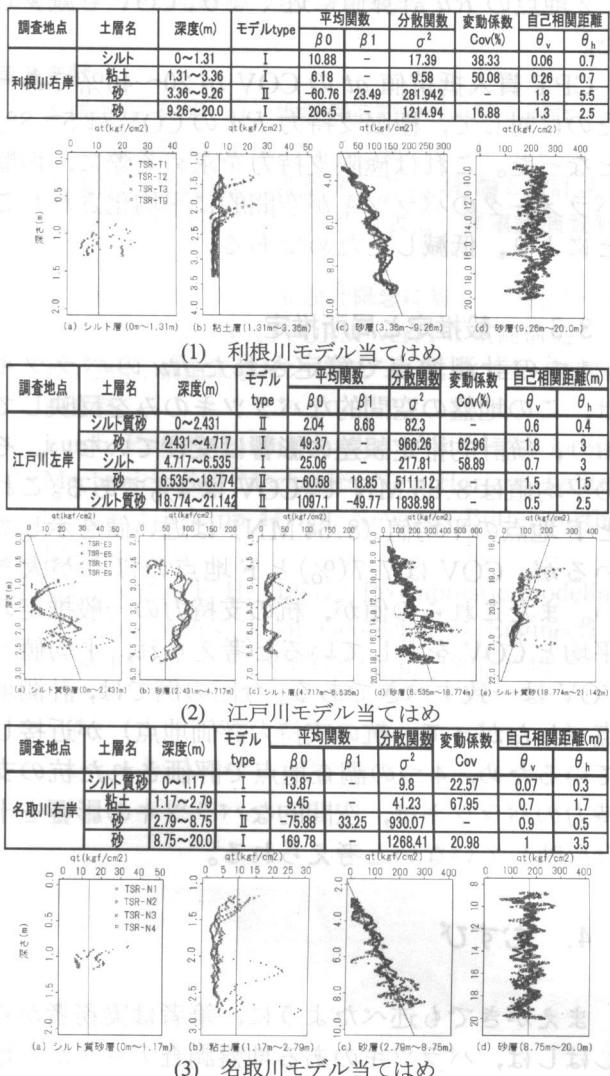
3.1 地盤の統計的モデル化

本研究で取り扱うデータは、土木研究所と全国地質調査業協会連合会が共同で行った江戸川、利根川、名取川、3地点の地盤調査結果である(土木研究所, 1998)⁶⁾。これは、凍結サンプリング地点周辺で行った標準貫入試験やコーン貫入試験の結果である。今回は地盤パラメータの推定を目的にしていることから、連続したデータのある3成分コーン試験の結果を使用する。それぞれ4本のコーン試験は、半径5m程度の範囲で高密度に行われている。

モデルパラメータの推定は、最尤法で行い、モデル選択にはAICを用いた。図2は、今回解析したすべてのサイトの平均値関数(トレンド成分)の型とパラメータ値、分散関数および自己相関距離(ランダム成分)の最尤推定値を示している。

表1は、Phoonら(1995, 1999a, 1999b)¹¹⁾の収集・整理した地盤パラメータと変動のスケールの範囲を本研究の値と比較したものである。今回調査した地点では、砂層でCOV≈29(%)、粘土層でCOV≈40%程度で砂層が粘土層に比べ、ばらつきの少ない層であった。図2(1)(d)や図2(3)(d)が対象としている砂層であり、一様に分布し

ている。また、文献と比べて粘土層やシルト層でばらつきが大きくなっているが、これは調査地点



(1) 利根川モデル当てはめ

調査地点	土層名	深度(m)	モデルtype	平均関数	分散関数	変動係数	自己相関距離(m)		
江戸川左岸	シルト質砂	0~2.431	II	$\beta_0 = 2.04$	$\beta_1 = 8.68$	$\sigma^2 = 82.3$	$Cov(\%) = -$	$\theta_v = 0.6$	$\theta_h = 0.4$
	砂	2.431~4.717	I	$\beta_0 = 49.37$	$\beta_1 = -$	$\sigma^2 = 966.26$	$Cov(\%) = 62.96$	$\theta_v = 1.8$	$\theta_h = 3$
	シルト	4.717~8.535	I	$\beta_0 = 25.06$	$\beta_1 = -$	$\sigma^2 = 217.81$	$Cov(\%) = 58.89$	$\theta_v = 0.7$	$\theta_h = 3$
	砂	8.535~18.774	II	$\beta_0 = -60.58$	$\beta_1 = 18.85$	$\sigma^2 = 5111.12$	$Cov(\%) = -$	$\theta_v = 1.5$	$\theta_h = 1.5$
(2) 江戸川モデル当てはめ	シルト質砂	18.774~21.142	II	$\beta_0 = 1097.1$	$\beta_1 = -49.77$	$\sigma^2 = 1838.98$	$Cov(\%) = -$	$\theta_v = 0.5$	$\theta_h = 2.5$
	シルト質層(0m~2.431m)	0~2.431	-	-	-	-	-	-	-
	砂層(2.431m~4.717m)	0~4.717	-	-	-	-	-	-	-
	シルト層(4.717m~8.535m)	0~8.535	-	-	-	-	-	-	-
	砂層(8.535m~18.774m)	0~18.774	-	-	-	-	-	-	-
(3) 名取川モデル当てはめ	シルト質砂層(0m~1.7m)	0~1.7	-	-	-	-	-	-	-
	粘土層(1.7m~2.79m)	1.7~2.79	-	-	-	-	-	-	-
	砂層(2.79m~8.75m)	2.79~8.75	-	-	-	-	-	-	-
	砂層(8.75m~20.0m)	8.75~20.0	-	-	-	-	-	-	-
	シルト質砂層(0m~1.7m)	0~1.7	-	-	-	-	-	-	-

図2 解析結果一覧

表1 空間的バラツキの評価（他文献比較）

(1) CPTで測定される先端抵抗qtの空間的バラツキ

測定項目	土層名	パラメータ値		パラメータのCOV(%)	
		範囲		範囲	
		本研究	他研究	本研究	他研究
qt (MN/m ²)	砂	3.15~21.37	0.4~29.2	14.0~67.7	10~81
	平均	14.2	4.1	28.5	38
qt (MN/m ²)	シルト質砂	0.83~1.89	-	9.8~27.4	-
	平均	1.4	-	22.4	-
qt (MN/m ²)	シルト	0.59~2.83	0.5~2.1	8.5~78.9	5~40
	平均	1.79	1.59	40.8	27
qt (MN/m ²)	粘土	0.47~1.65	0.4~2.6	0.6~61.6	2.0~17.0
	平均	0.84	1.32	39.5	8

(2) 先端抵抗qtの変動のスケール

土層名	鉛直方向		水平方向	
	変動のスケール δ_v (m)		変動のスケール δ_h (m)	
	本研究	他研究	本研究	他研究
砂	1.2~5.4	0.1~2.2	1.0~11.0	3.0~8.0
平均	2.73	0.9	5.50	4.79
シルト質砂	0.6~2.2	-	0.8~5.0	-
平均	1.08	-	2.9	-
シルト	0.04~1.6	-	1.4~6.0	-
平均	0.71	-	3.70	-
粘土	0.26~2.0	0.2~0.5	1.0~3.4	2.30~6.60
平均	0.96	0.3	2.20	4.45

のこれらの層が表層付近であり、色々な土質が混在しているためと思われる。また、過去の文献にないシルト質砂層のCOVが4層中で最も小さくなっているが、この層は、名取川サイトのデータしかなく、しかも表層近くでデータ数も少ないため、信頼性に欠ける。

また、どの層どの地盤でも鉛直成分の自己相関距離に対して水平方向の自己相関距離が2倍近くになっており、地盤の生成過程に起因すると類推される。また、細粒分の多い粘土層やシルト層に比べて砂層の自己相関距離が長くなる結果となった。今回の解析で水平方向の自己相関距離が相対的に短く推定されていることの理由の一つは、調査点間の距離が10 m未満であることも影響していると考えられる。

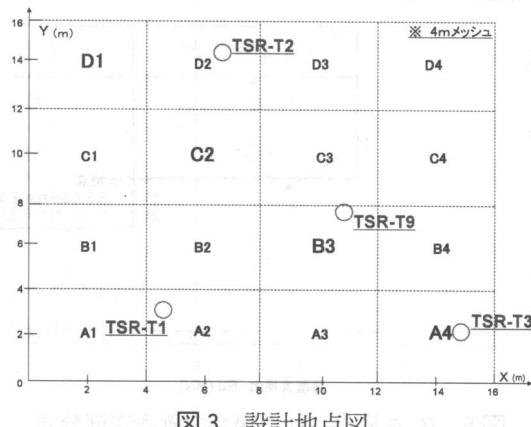
3.2 杭の支持力の推定

利根川サイトの調査結果を元に、空間的バラツキと統計的推定誤差が設計に与える影響を検討するため、建築基礎構造設計指針に基づいて、杭の支持力を局所推定および一般推定で行った（日本建築学会, 2001)¹⁰⁾。CPT試験値を換算式を用いてN値に変換した。なお、想定した杭は杭径1.0 m、杭長19 mの閉端杭とする。

表2は、図3に示す地盤調査地点と選択地点(A 4, B 3, C 2, D 1)およびF地点（これは一般推定に当たる）で求められた極限支持力Ruの平均値、標準偏差およびCOV(%)、図4はRuが正規分布すると仮定した場合の確率密度関数を描いた

表2 各地点の杭の支持力

地点名	Ru (MN)	σ_{Ru}	COV (%)
TSR-T1	9.08	-	-
TSR-T2	8.74	-	-
TSR-T3	8.45	-	-
TSR-T9	9.13	-	-
A4	8.50	0.44	5.2
B3	8.87	0.59	6.7
C2	8.76	0.65	7.4
D1	8.63	0.65	7.5
F	8.54	0.66	7.7



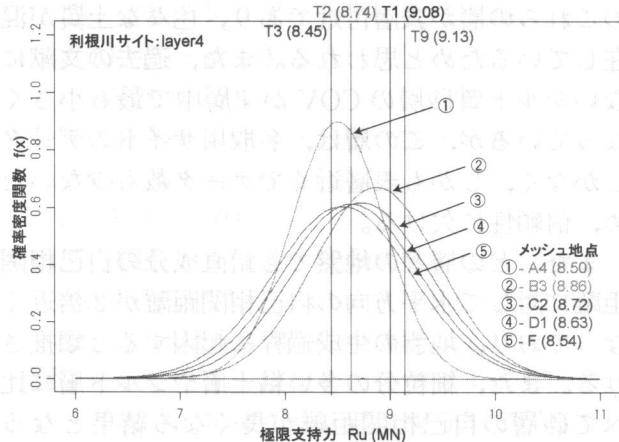


図4 極限支持力の確率密度分布

ものである。表2のCOVから分かるように地盤調査地点では R_u は確定値を取り、A4～F地点になるにつれCOVが増加している。これは、Krigingによる統計的推定誤差が、計測点から離れるほど大きくなることを表しており、一般推定であるF地点でそのCOVは最大となる。つまり、計測情報が近傍で得られていない場合の一般的な支持力の不確実性を表している。一方、計測点TSR-T3にきわめて近いA4点での予測値はTSR-T3の R_u 計算値に近く、さらにCOVも相対的に小さい。

前節で推定した水平方向自己相関距離 θ_h は、計測地点範囲が狭いこともあり、この値を過小評価していると考えられる。事実既存の文献(Phoon他, 1999等)¹¹⁾では沖積砂地盤の θ_h は数十mに及ぶのが普通である。そこで $\theta_h=20\text{ m}$ としてD1地点における杭の鉛直支持力の推定をやり直した結果を表3に示し、図5にその場合における確率

表3 θ_h を変化させた場合の比較 (D1)

地点名	R_u (kN)	σ_{R_u}	COV (%)
D1 ($\theta_h=2.5$)	8.63	0.651	7.5
D1 ($\theta_h=20$)	8.78	0.378	4.3

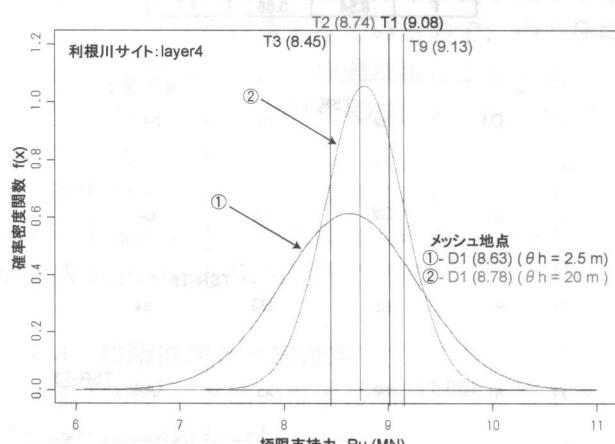


図5 θ_h を変化させた場合の確率密度分布

密度関数を描いた。図5から分かるように、 θ_h を長くすることでD1地点の R_u 計算値はTSR-T2地点の R_u 計算値に近くなり、COVも減った。

CPT貫入抵抗値 q_t のCOVが20～40%であつたのに対して、極限支持力 R_u のCOVは5～8%となった。これは極限支持力を求める際に、地盤パラメータのバラツキが空間的に平均化されたことにより、低減したためである。

3.3 一般推定と局所推定

4つの計測地点で算定された R_u のバラツキは、この地盤の空間的なバラツキのみを反映しており、統計的推定誤差の影響は受けていない。その平均値は8.85 MNで、COVは4%である。これとF地点の平均値(8.54 MN)は近い値を示しているが、COVは7.7(%)とF地点のほうが大きい。またこれらの値が、杭の支持力の一般推定の平均とCOVを示していると考えられ、平均値とCOVは一致すべきである。今回の例では、計測地点(したがって、杭の支持力評価地点)が近接しているため、4つの調査地点で評価された杭の支持力のバラツキは、空間的なバラツキの影響を十分反映していないと考えられる。

4. むすび

まえがきでも述べたように、筆者は実務者からしばしば、バラツキのある地盤調査データから地盤パラメータの特性値をどのように決定すべきか、また何個位のサンプルを取れば充分なのか、さらに調査ボーリングの間隔をどの位にすべきかを問われる。しかしこれらの間に答えるためには、「何をどの程度正確に知りたいのか」という前提が明確でなければ、答えることができない。

ここで提案したのは、我々が多くの場合知りたいのは、地盤パラメータのある線、面または体積についての局所平均である場合が多く、またこの局所平均を地盤のある特定の地点で知りたいのか(局所推定)，あるいは任意の地点で知りたいのか(一般推定)により、その答えは変わることである。しかし一方、これらの条件が明確に指定され、また精度についても確率的に信頼度で定義されれば(例えば、「その局所平均が必ず95%の確率で、その推定値より大きくなる推定値を求めたい」等)，この問題にかなり明確に答えることができるようになる。

高密度でコーン貫入試験が行われた3つのサイ

トについて、統計的な地盤のモデル化を行い、これに基づいて杭の支持力を計算することにより、上記のことの説明の一助とした。

参考文献

- 1) 本城勇介 (2004 a) : 地盤構造物の設計論と設計コード, 土と基礎, Vol. 52, No. 12, pp. 10-14.
- 2) 本城勇介 (2004 b) : 地盤構造物の設計論と設計コード, 第39回地盤工学会研究発表会 展望講演資料, 144 pp.
- 3) 本城勇介 (2007) : 性能設計概念に基いた設計コードの開発: code PLATFORM ver. 1 と基礎構造等の設計原則, 構造工学シンポジウム (土木学会) 特別講演資料,
- 4) Lumb, P. (1974) : Application of Statistics in Soil Mechanics, Soil Mechanics-New Horizon (edited by Lee, I. K.), pp. 44-110, Newness Butterworths, London.
- 5) Vanmarcke, E. H. (1977) : Probabilistic modeling of soil profiles, J. of Geotechnical Engineering (ASCE), Vol. 103, No. GT 11, pp. 1227-1246.
- 6) 建設省土木研究所耐震技術研究センター動土質研究室, 社団法人全国地質調査業協会連合会 (1998) : 地盤の液状化抵抗の評価に関するサウンディング・サンプリング手法の実証実験報告書, 1998. 9
- 7) 鈴木康嗣 (2006) : 地盤調査の信頼性, 2006年度日本建築学会大会(関東), 構造部門(基礎構造) PD基調講演資料, pp. 15-34.
- 8) 町田裕樹 他 (2008) : 高密度コーン貫入試験に基づいた地盤の統計的モデル化, 地盤工学研究発表会概要集(広島).
- 9) 本城勇介 他 (2008) : 高密度コーン貫入試験データに基づきモデル化された地盤の不均質性が構造物の信頼性に与える影響, 地盤工学研究発表会概要集(広島).
- 10) 本建築学会 (2001) : 建築基礎構造設計指針, pp. 200-218.
- 11) Phoon, K. K. and F. H. Kolhawy (1999 a) : Characterization of geotechnical Variability, Canadian Geotechnical J., 36, 612-624.
- 12) 松尾稔 (1984) : 地盤工学—信頼性設計の理念と実際, 技報堂出版.

『地質と調査』広告募集

地質と調査に広告を掲載してみませんか?

広告掲載料金は以下のとおりです。

サイズ(180×260)	全地連賛助会員	会員外	カラー金額
表2・表3	105,000円	126,000円	200,000円
後付:1頁	63,000円	73,500円	150,000円
後付:1/2頁	36,750円	42,000円	

会社PR・製作機械等のPRをご利用下さい。

まずは電話にてお問合せください。

(株)土木春秋社 03-3370-5020

石油資源探査における地質リスク評価

たかやまくにあき
高山邦明*

1. はじめに

1本あたり数億から数十億円を要する井戸を掘削しても油ガス層に遭遇する確率は平均2~3割。うまく石油が見つかっても鉱床の大きさを把握するためには追加で井戸を掘る必要があり、鉱床規模が小さければ探査に費やした費用は戻ってこない。開発に至るまでの確率は数%程度。さらに、鉱量が十分あると判断して数百億円規模の追加投資をして開発を進めても期待どおりの生産が上がらなかったり、油価や為替変動により収支が悪化したりということが起これ得る。「石油開発は博打(ばくち)だ」と言われるゆえんである。

参加費600円を払ってサイコロを1回ふり、もし1の目が出たら3,000円もらえるというゲームに参加するか否かを問われたら、高校数学の知識がある人ならば期待値を計算してゲームの経済性を検討するだろう。同様の計算を行うことにより、石油資源探査の経済性を検討することができる。しかし、サイコロゲームと異なり、当たる確率(サイコロだと1の目が出るのは1/6)も見つかった場合の報酬(ゲームでは賞金3,000円)の基礎となる地下深部にある鉱床の規模もどこにも明示されていない。そこには大きな不確実性があり、経済性を検討するためには不確実性を正しく認識し、評価することが求められる。

本論では石油資源探査における地下の地質に関連した不確実性・リスクの評価方法について以下に紹介する。

2. 石油資源探査に関するリスク

石油の発見が難しい理由は第一に鉱床が地下深

部に存在することにある。一般的に深度2~5kmで、さらに深いケースも珍しくない。地震探査を中心としたさまざまな探査技術が開発されてはいるが、砂層せん滅による層位トラップ、複雑な集油構造、断層や岩塩層の下にある鉱床など探査が難しいプレーが増えているために油ガス層の分布を地表から検知することは依然困難である。

石油鉱床の成立に多くの要素が関わっていることも存在予測を困難にしている原因である。鉱床成立条件には、大きく5つの要素がある(図1)。

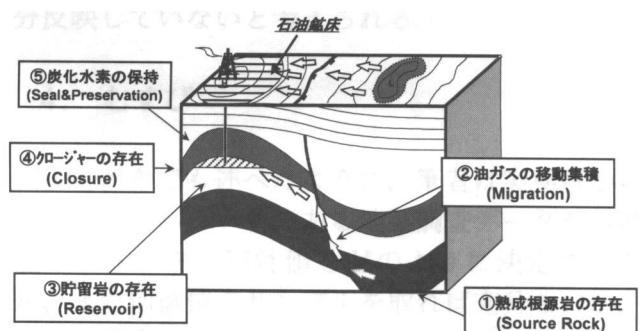


図1 石油システム

- ① 熟成根源岩の存在(大量の有機物が堆積し、地下深く埋没して石油を生成すること)
- ② 油ガスの移動集積(石油が根源岩から移動し、効率よく構造に集まること)
- ③ 貯留岩の存在(石油が移動した先に石油を貯めうる性状の岩石が存在すること)
- ④ クロージャーの存在(背斜構造など貯留岩が石油を貯めうる形状をしていること)
- ⑤ 炭化水素の保持(貯留岩が緻密な岩石で覆われ、また断層による破壊などがらく、石油が維持されていること)

石油資源探査には油価や為替など非技術分野のさまざまなリスクも存在するが、ここでは地下地質に関連したリスク(地質リスク)として経済性評価の期待値計算に用いられる石油を発見する確

* 国際石油開発(株)

率と発見された石油鉱床の大きさの不確実性について一般的な評価手法を述べる。

3. 石油の発見確率

石油胚胎が期待される構造に井戸を掘って石油が見つかる確率を地質的成功確率と呼ぶ。「地質的成功」と呼ぶのは油田として開発できるような量の石油の発見（経済的成功）と区別するため、石油が地表まで流出する最低量の鉱床が見つかる可能性を指す。

石油鉱床が存在するためには前述した石油システムを構成する5条件が成立していることが必要になることから、各要素について成立可能性を評価して0から1までの数値で確信度を表現し、その積を地質的成功確率とみなす（図2）。積となるため、一つでも成立可能性が低い条件があった場合にそれが確率に大きく影響する。要素の数やその評価方法は石油会社によって異なっている。ここで紹介したのは石油天然ガス・金属鉱物資源機構が採用している手法であり、詳細は佐藤ほか（2004）¹⁾を参照されたい。

1. 熟成根源岩の存在	0.9
2. 炭化水素の移動集積	0.7
3. 貯留岩の存在	0.8
4. クロージャーの存在	0.9
5. 炭化水素の保持	0.6

地質的成功確率

$$0.9 \times 0.7 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.6 = 27\%$$

図2 地質的成功確率の計算事例

地質的成功確率は対象となる探鉱プレーの難易度や得られる情報の量によって異なり、試掘井の場合には一般的に数%～40%である。1960～1999年の世界の統計データによると実際の試掘成功率の平均値（10年ごと）は24～27%である。

4. 埋蔵量の不確実性評価

石油鉱床の埋蔵量は下記のパラメータの積として計算することができる。

- ① 油層の広がる面積（集油エリア）
- ② 油層の厚さ（ネットペイ層厚）
- ③ 貯留岩の孔隙率
- ④ 孔隙中の石油が占める割合（油飽和率）
- ⑤ 地下から地表へ石油を移した際の容積変化（容積係数）
- ⑥ 採取できる石油の割合（回収率）

いずれも地下深部にある鉱床に関わるパラメータであり、地震探査データ、周辺にある油ガス田や坑井からの情報等を参考にして予測することになるが、不確実性が存在するが故に一つの数字で

表すことはできないことから、パラメータが取りうる値の幅を評価し、確率分布で表現される。確率分布で表現されたパラメータ間の計算では分布に基づいて各パラメータをサンプリングして計算することを複数回行うモンテカルロシミュレーションを適用し、数千～数万通りのパラメータの組み合わせによる計算を短時間で行い、埋蔵量の確率分布が求められる（図3）。

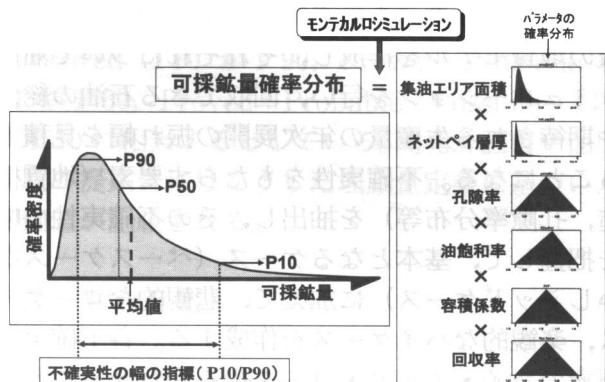


図3 埋蔵量の確率分布算定

不確実性を示すための指標として確率分布のパーセンタイル値が用いられる。パーセンタイルとはその値を超える確率がある数値になる値を示し、たとえば「90パーセンタイル（通常P90と呼ぶ）が1,000万バーレル」とは1,000万バーレルを超える確率が90%という意味で、確度の高い堅めの埋蔵量値である。一方、P10はそれを上回る可能性が10%しかない実現可能性が低い楽観的な評価値を示す。統計学では不確実性がある事象について幅を持った推定（区間推定）を行い、通常99%や95%といった信頼係数に対する信頼区間を評価する。しかし、不確実性が非常に大きい石油探鉱で同様の確率の信頼区間を採用すると幅が非常に大きくなり、また評価方法のわずかな違いによって信頼区間が変動しがちなことから、一般的に信頼係数80%を用いて、P90とP10を両端値の指標としている。確率分布の平均値やP50値（メディアン）も代表値として用いられるが、必ずP90とP10と一緒に表示される。

情報が少ない鉱床では不確実性が大きく、小さな埋蔵量から大きな値までさまざまな値を取りうる幅広い確率分布となるが、探鉱、開発が進んで情報が増えるに従い、分布幅は狭まる。不確実性の程度（確率分布の幅）の指標としてP10/P90比が用いられる。情報が少ないエリアでの探鉱の場合、P10/P90が100を超えることも珍しくない。情報が増えるに従って比率は下がり、探掘のための開発ステージでは一般的にP10/P90が一桁（2～7）になる。

探鉱初期段階での埋蔵量の不確実性評価は数式に基づいたモンテカルロシミュレーションで行われるが、油層を発見して情報が増えると地質モデルの作成が行われ、モデルの不確実性評価が求められる。地質モデルは貯留岩の分布やその内部の孔隙率、油飽和率などの分布を三次元的にコンピュータ上に表現したもので、油ガスの流動シミュレーションに用いられて生産量や開発計画の検討が行われる。モデルの不確実性を評価するには複数の地質モデルを作成し、それについて油層シミュレーションを行い、回収できる石油の総量や期待される生産量の年次展開の振れ幅を見積ることになる。不確実性をもたらす要素（地質構造、孔隙率分布等）を抽出し、その不確実性の幅を把握して、基本となるケース（ベースケースないしミッドケース）に加えて、悲観的なローケース、楽観的なハイケースを作成する。各不確実性要素のハイ・ミッド・ローを組み合わせることにより数多くのモデルを作り、油層シミュレーションを行って各モデルの埋蔵量を求める。各シナリオが起こり得る確率を与えることにより埋蔵量の確率分布を描き、P90やP10の埋蔵量や対応するモデルを抽出することができる（図4）。

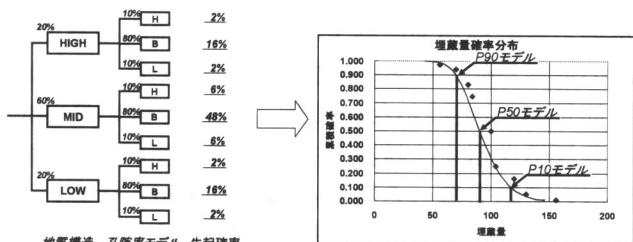


図4 マルチシナリオ法による埋蔵量不確実性評価

5. ポストオーディット

地質リスク評価を行った構造に試掘井が掘削されると石油の存否が明らかになり、発見があった場合には埋蔵量規模についての再見積もりが行われる。試掘結果とリスク評価を照らし合わせて事前評価の妥当性を検討することをポストオーディット（Post well audit, 事後評価）と呼ぶ。

ある程度の数の掘削結果が得られた時点で、同じような成功確率を事前に評価していたグループについて実際の成功率を計算し、事前評価との整合性を検討する。たとえば、成功確率20～30%と評価されたケースについて複数事例をまとめて実際の成功率を計算し、それが期待した確率となっているか否かを比較する（図5）。その場合、成功確率が20%のものを10本掘削しても成功数が2

本となるのは稀で、もし100本掘削すれば成功数が20本に近づいてくることが予想されるように、ある程度のサンプルがないと評価が正しくても予実績が近づかない点を留意すべきである。

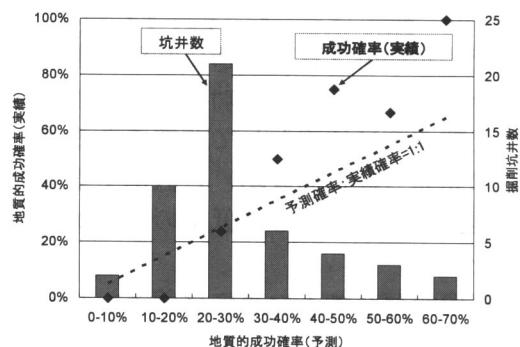


図5 地質的成功確率のポストオーディット

結果が不成功だった場合、その不成功理由についての検討が行われる。成功確率の算定にあたり、鉱床成立の5要素について数値として評価が行われており、このうち最も低い値に評価された要素が不成功理由となる可能性が高いはずである。したがって、事前評価で高い評価点を与えられた要素が不成功理由となっていた場合にはリスクを過小評価していたことになり事前評価の方法に問題があったと考えられる。不成功理由に関するポストオーディットはリスク評価だけでなくその背後にある技術評価の妥当性の検証につながり、技術的な弱点を知る重要なプロセスとなる。

石油を発見した場合、掘削によって得られた情報に基づいた埋蔵量再評価値と事前評価の比較が行われる。新しくデータが得られても依然不確実性が残るために再評価値も確率分布で表現されることから、掘削前後の確率分布を比較することになり、たとえば分布のP50値を代表値として検討が行われる。この場合、両代表値が近い値を示すことが必ずしも妥当な評価ではないことに注意が必要である。確率分布で表現されるということはその分布内のいろいろな埋蔵量の結果となる可能性があることを示しており、平均的には10回に1回はP90を下回ったり、P10を上回ったりすることが起こるはずである。したがって、数多くのケースで掘削前後のP50が類似した値を示していた場合には、事前評価で不確実性の幅を広く予測しすぎていたことが考えられる。

地質リスク評価は確率論に基づいているため、ポストオーディットを適正に行うためにはある程度の数の事例が揃う必要があり、場合によってはサンプル数を考慮した確率論的な予実績の比較が求められる。

ポストオーディットは評価の妥当性を検証して

問題点を把握し、評価や場合によっては評価手法の改善を行う端緒となる重要なプロセスであり、地質リスク評価やひいては技術評価の精度向上に貢献する。

6. 地質リスク評価の活用

冒頭に述べたように地質リスク評価の目的は経済性の評価にある。最もよく用いられる経済性指標は期待値であり、石油会社の多くが投資の意志決定における重要な指標としている。

埋蔵量確率分布の中である埋蔵量を下回ると経済性が成り立たなくなる。経済計算によってこの経済限界埋蔵量の値が求まると、確率分布からその埋蔵量値を上回る確率をパーセンタイル値として読み取ることができる。たとえば、経済限界埋蔵量が確率分布の P 30 に相当した場合、地質的成功確率を 20% とすると経済的成功確率は $20\% \times 30\% = 6\%$ となる。一方、試掘で地質的に成功して評価を続けたが経済的には不成功となる確率は、 $20\% \times (100\% - 30\%) = 14\%$ である。試掘までに要する費用を 70 億円、経済性が判明するまでに要するコストを 100 億円、開発できた場合の平均的な利益を 1,000 億円とすると、

$$\begin{aligned} \text{期待値} &= 6\% \times (1,000 \text{ 億円} - 100 \text{ 億円}) - 14\% \\ &\quad \times 100 \text{ 億円} - (100\% - 20\%) \times 70 \text{ 億円} \\ &= -16 \text{ 億円} < 0 \end{aligned}$$

となり、期待値が負であることからこの投資は経済的合理性に欠けていると判断される。

個々の石油探査案件についてリスクとリターン（埋蔵量）の評価が行われることにより石油会社の探鉱投資対象について、ハイリスク・ハイリターン、ローリスク・ローリターンの案件の組み合わせを検討し（図 6）、リスクを回避しつつ収益を安定的に確保していく、いわゆるポートフォリオマネージメントによるリスク管理も可能となる。組んだポートフォリオについてシミュレーションによりリスクを考慮した収益の不確定性を評価することもでき、会社の探鉱戦略の策定など種々の意志決定

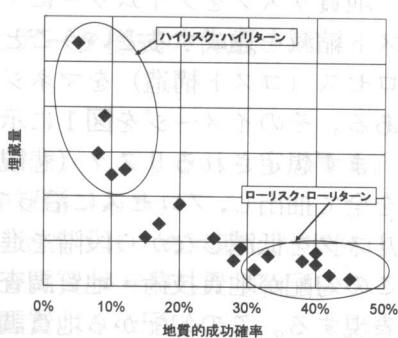


図 6 リスク vs. リターンプロット

に利用される。

油ガス田は石油会社の資産であり、投資対象であることから不確定性がある埋蔵量を公表する際には明確な定義が必要となる。埋蔵量定義のガイドラインとして最も広く用いられているもの一つに SPE/AAPG/WPC/SPEE の基準²⁾がある。この基準では埋蔵量を確度が高いカテゴリーから低い方へ Proved → Probable → Possible の 3 つに区分し、確率論的な評価が行われている場合には Proved (1 P) が P 90, Probable (2 P) が P 50, Probable + Possible (3 P) が P 10 に相当するとしている。開発計画書や油田買収の提案書にはこうした埋蔵量定義に基づいた評価値が記載される。

7. おわりに

ここは絶対当たる！ 1 億バーレルは堅い！… ひと昔前の石油資源探査では地質屋の山師的な直感や思い入れに基づいた決定論的な手法によって投資判断が行われてきた。1990 年代に入り、油価の低迷や難易度の高い探鉱プレーが増加することにより、地下の不確定性を正しく反映した地質リスクの評価が求められるようになった。地質評価の手法が変わったのではなく、入手可能なデータに対して最善の技術評価を行い、どこまでが分かりどこが分からぬのかを明らかにし、分からぬ点はそのまま不確定性として確率論的な手法で定量的に示すのが地質リスク評価である。地質リスク評価により、期待値やポートフォリオ解析、分散投資の検討などさまざまな投資判断が可能となった。ただし、地質リスク評価をすれば良い投資案件が見つかるのではないことに気をつけなければいけない。リスク評価の前にそれに値する投資案件を見つけ出すことが必要であり、そのためには地質屋の技術力やアイデア、ある種の直感やセンスが求められるのは今も昔も変わらない。

参考文献

- 1) 佐藤大地・藤井康友・高山邦明：ポストオーディット導入によるプロジェクト評価精度向上、石油技術協会誌、第 69 卷、第 6 号、pp. 661-667, 2004.
- 2) SPE (Society of Petroleum Engineers), AAPG (American Association of Petroleum Geologists), WPC (World Petroleum Council), SPEE (Society of Petroleum Evaluation Engineers) : Petroleum Resources Management System, 2007.

国内公共事業における地質リスクへの対応

さ ばせ よし ひと
佐 橋 義 仁*

1. 地質リスク研究の着目点

工事コストのみならず維持管理費を含めた事業コスト、さらに社会的費用、時間的費用を含めた総コストの形成要素・形成プロセス（これらをコスト構造という）の中で、「地質条件そのもの」と「その不確実性」が大きな影響力を持っている。しかし、事業執行プロセスにおいては地質条件の不確実性（予見し難き条件）が故に、地質リスクは顕在化してから対応せざるを得ない、あるいは顕在化してから対応したほうが効率的であると考えられている側面もある。

事業コストと工事コストに責任を有する立場にある者は、専門家であるという社会的責任において、大幅なコスト変化が本当に予見し難き事象であったか、予見できるとしたならば誰がどのような条件のもとで不確実性を小さくできるか、などの議論を提起し説明責任を果たさなければならぬ。

「リスク」の定義は未だ確定していないが、ここでは「事業コスト損失」そのものと、その要因の「不確実性」の両方をさす。また、「地質リスク」は、「地質（に係わる事業）リスク」と定義した。

地質業界は、業者としての側面と、発注者の黒子としての側面を持っており、後者が「提言」の習慣となって今に至っている。今回の「地質リスクマネジメント」は、後者の立場から「コスト縮減」を提言するもので、それを実現する地質技術者は民間人ではあるが、立場は発注者側の「技術顧問」として具現化しようとしている。

2. 地質リスクに取り組むまでの課題

従来の公共事業では、構想段階および計画段階

の中盤までは主に官側の技術者が担当し、民間の技術者はそれ以降の業務から参画することが多い。

このことは、民間技術者が参画する前に、事業リスクの多くが決定されていることを意味する。

一般に地質調査は民間への発注によって民間の地質技術者が担当するが、民間技術者に期待されるのは計画後の設計条件を設定する役割に止まっていることが多い。

最近、設計変更・事業費増大が議会の合意を得られず工事がストップする事件が起きている。そのため、地質リスクを早期に予測し対策を講じる必要が生じているが、以下のような技術的・政策的課題があり簡単には改善できない。

- ① 地質リスクの概念・体系が不明確
- ② 地質リスクに係わるデータが不足
- ③ リスク計量化手法が未確立
- ④ 地質リスクを扱う者（地質技術者）の位置づけが不明確
- ⑤ 官側の技術を支援する行為（発注者支援）が正業化されていない

3. 地質リスクマネジメント・3つの要素

地質リスクをタイムリーにマネジメントし、コスト縮減を達成するということは、コスト形成プロセス（コスト構造）をマネジメントすることである。そのイメージを図1に示す。

まず想定されるリスク（悲観的リスクと呼ぶ）を全て抽出し、プロセスに沿って一つ一つ処理し、リスクを低減しながら段階を進めていくもので、この勾配が地質技術・地質調査の「投資効果」を表現する。この勾配から地質調査妥当投資額を導きたいと考えており、勾配を大きくするために技術顧問・CM（発注者支援者）を雇うことも考えられる。なお、前段階から後段階への移行に当たって

* 全地連地質リスク WG 座長

(株)建設技術研究所 常務取締役

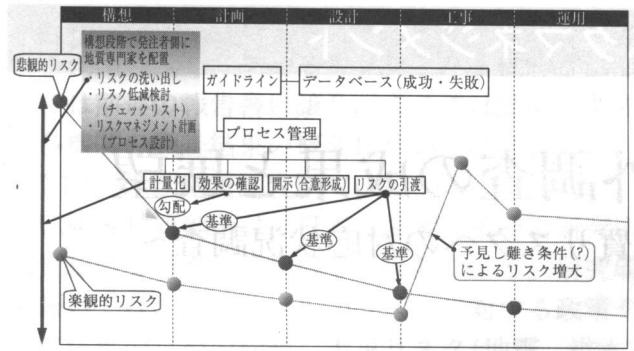


図1 地質リスクマネジメントのイメージ

はこれらを満足する必要があると考える。

このマネジメントシステムを運用するためには、以下の3つの要素が必要である。

- ① 発注者の側に立つ技術顧問
- ② リスク計量手法
- ③ プロセスマネジメントシステム

このうち、地質の技術顧問は、法務顧問・弁護士、財務顧問・公認会計士と同様、発注者側に位置づけられ、受注者側の地質調査者は立場が異なる。

上記の3点セット、「地質の技術顧問」「リスクの計量化」「プロセスマネジメントシステム」によって公共工事のコスト構造改革は以下のような進展が期待できそうである。

- ① リスクへの予防措置による工期短縮・コスト縮減
- ② 楽観的リスクからの出発による工期延長・コスト増大（市民の不信）からの脱皮
- ③ 事後対応（設計変更など）から事前対応への変更により合意形成に寄与
- ④ 悲観的リスクから出発するプロセスマネジメントによって説明責任とリスクコミュニケーションに寄与
- ⑤ プロジェクトの各段階の後段へのリスク引渡し内容の明確化
- ⑥ リスクの事前把握により民間とのリスク取引（PPP）が進展

4. 事例収集とデータ様式の作成

4.1 事例収集

地質リスクマネジメントの3点セットのうち、「計量化」は最大の課題である。

事例のタイプを「地質リスクを回避した事例（Aタイプ）」と「地質リスクが発現した事例（Bタイプ）」に分けて収集した。Aのタイプは、リスクを管理することによって当初工事費の縮減を達成したもの、すなわち、「効果=当初工事費-変更後工事費-リスク対応費用」（式1）と考える。

表1 データ収集項目（案）

(A. 地質リスクを回避した事例)		(B. 地質リスクが発現した事例)	
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	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
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期 予測されたトラブル 回避した事象 工事への影響	リスク発現事象	リスク発現時期 トラブルの内容 トラブルの原因 工事への影響
リスク管理の実際 (リスクを減少させた判断) (因果関係の因)	判断(した)時期 判断した者 判断の内容 判断に必要な情報	変更工事の内容 (含: 調査・設計・対策) (因果関係の果)	追加調査 修正設計 対策工 変更工事 ②合計
リスク対応の実際	内容 追加調査 修正設計 対策工 費用 追加調査 修正設計 対策工 ②合計	変更工事の内容 (含: 調査・設計・対策) (因果関係の果)	変更費用 追加調査 修正設計 対策工 変更工事 ②合計
変更工事の内容 (含: 調査・設計・対策) (因果関係の因)	工事変更の内容 ③変更工事費 変更工期 間接的な影響項目 受益者	リスクリスク管理の理想像 (改善によりリスクが減少したであろう対応) (因果関係の因)	リスクリスク管理の理想像 (改善によりリスクが減少したであろう対応) 対応費用 調査 対策工 ③合計 工事概要 想定工事 ④工事費 工期
リスクマネジメントの効果	費用(③-①+②) 工期 その他	リスクリスクマネジメントの効果	費用(②-③) 費用((①+②)-(③+④)) 工期 その他

一方、Bのタイプは、発現した事象（変更後工事費）から、リスク管理を行っていれば（リスク対応費用を掛けていれば）工事費の変更はなかったと推定するもので、「効果=変更後工事費-当初工事費-リスク対応費用」（式2）と考える。

事例収集にあたっては、（式1）、（式2）によってリスクマネジメント効果を算出するためのデータを収集する。データ項目は表1のようなものである。

4.2 データ様式の作成

データ収集様式を統一できるなら、データの蓄積・共有化が可能となり、以下の推進に寄与できる。

- ・地質リスク研究（リスク計量化・マネジメントシステム）の発展
- ・マネジメントツール（ガイドライン・プロセスマネジメントシステムなど）開発
- ・地質技術の取引・妥当投資の概念導入

A表は、設計変更の経緯説明・VE効果の計量証明、すなわち地質の技術顧問の成功報酬の請求書に利用できる他、入札時の技術評価において地質技術者の実績評価に利用できる。

B表は、設計変更の経緯説明・コスト増大要因の説明などアカウンタビリティの向上に寄与する。一定基準以上のコスト増大に対してB表の登録を義務づけるならば、データを自動収集することができる。

全地連 地質リスク海外調査の成果と展望

～米国カリフォルニア州における地質リスクへの対応状況調査～

おたべゆうじ*

1. はじめに

社団法人 全国地質調査業協会連合会(以下「全地連」という)では、2007年9月30日～10月5日の6日間、アメリカのサンフランシスコに“「地質リスク」海外調査ミッション”を派遣した。このミッションの目的は、全地連で進めている「地質リスク」に関する活動を進める上で、海外の事情・動向を迅速かつ的確に把握することにあり、研究機関・政府機関・企業等を訪問し、関係者と精力的に意見交換を実施した。

本ミッションの団長は高知工科大学の渡邊法美教授、副団長は(独)産業技術総合研究所の小笠原正継主任研究員、この他に委員会メンバーと一般参加者等を含め、総勢12名での訪問となった。本活動は、報告書¹⁾として全地連のホームページ(<http://www.zenchiren.or.jp/>)に公開中であるので是非ご覧頂きたい。以下に、本報告書のエッセンスを抽出して紹介する。

2. 行 程

本ミッションの行程は以下のとおりである。

- ◎第1日目 フィールド見学
 - ・米国地質調査所 (USGS) 施設見学
 - ・サンアンドレアス断層 等
- ◎第2日目 USGS 公式訪問
- ◎第3日目 カリフォルニア州運輸局 (CALTRANS) 訪問
- ◎第4日目 Fuguro West Inc. 社 訪問
 - ・Pacific Gas and Electric Company 訪問
 - ・UCDAVIS (カリフォルニア大学 DAVIS 校)
 - ・現場見学—Devil's Slide Tunnel Project—

3. 報 告

3.1 訪問先の選定

サンフランシスコが位置するカリフォルニア州は、太平洋を挟んで日本の反対側にあり、日本と同様に太平洋を構成するプレートの動きに起因する変動帯の中にある。そのため、日本と同様な付加体等の地質体の存在、活断層に伴う地震活動など地質に関するリスクが内在し、これらの「地質リスク」に対するさまざまな活動が展開されていると予想した。特に、太平洋岸のカリフォルニア州南部から西部にかけて約800マイル(約1,300km)にわたって続く巨大断層であるサンアンドレアス断層は有名であり、訪問先として選定する材料となった。

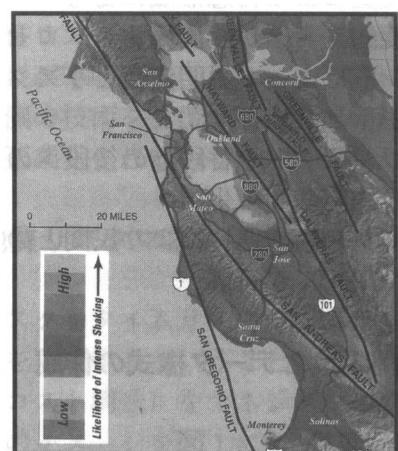


図1 サンフランシスコ湾周辺地域の断層と地震発生確率²⁾

今回は、このような地域における研究サービス機関、行政機関、大学、地質専門会社、ユーザーなど多様な機関を訪問し、それぞれの立場の地質リスクへの取組み方を調査した。

* 大成基礎設計(株) 取締役首都圏事業本部長

3.2 各機関の調査結果

各機関の調査やフィールド見学などの詳細については前述の報告書に譲り、ここでは誌面の関係上各機関の調査結果の概要について紹介する。

(1) 米国地質調査所 (USGS)

USGS 地質部門は、日本の産業技術総合研究所地質総合センターと類似した機関である。研究成果報告では、国家レベルのリスクに対する政策や意志決定のための枠組、天災リスク(地震、洪水)に対する考え方の説明があった。

道路網の情報ネットワークでは、CALTRANS や USGS 等の関係機関を包含した REDARS (Risks from Earthquake Damage to Roadway Systems) という危機管理システムが存在し、機能していることの紹介があった。リスクアセスメントへのアプローチでは、リスクシナリオに対する分散程度を計量化し、削減するための研究報告があった。これらのプロジェクトには 100 もの企業や機関が参加し(産官学横断)，いずれの研究も盛んに行われ、社会全体のリスク管理は構築されていた。しかし、専門家からみると市民のリスクに対する意識レベルは決して高くなく、十分な備えが行き届いていない実態があり、現状における取組み課題の一つとして捉えていた。

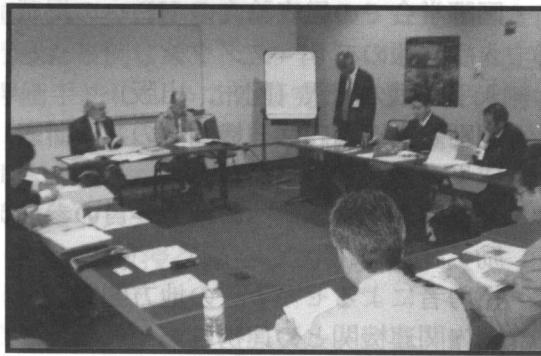


写真 1 USGS の意見交換会風景¹⁾

(2) カリフォルニア州運輸局 (CALTRANS)

CALTRANS は、州の道路やサンフランシスコ近郊の鉄道整備等を行う州政府機関であり、カリフォルニア州における土木工事の主たる発注者である。リスク評価手法として、図 2 に示す RBS (Risk Breakdown Structure) の紹介があった。これは当初に考えられるリスクの全てを洗い出し、リスクの大きさと発生頻度に区分して検討するもので、欧米ではよく利用されている。トンネルでは、個々のプロジェクトについて GBR (Geotechnical Base line Report) を作成している。これは、地質に関わる設計条件や施工条件を

明示し、発注者と受注者の責任領域を明確にしようとするものであり、入札者から見れば見積もり条件に該当するものである。

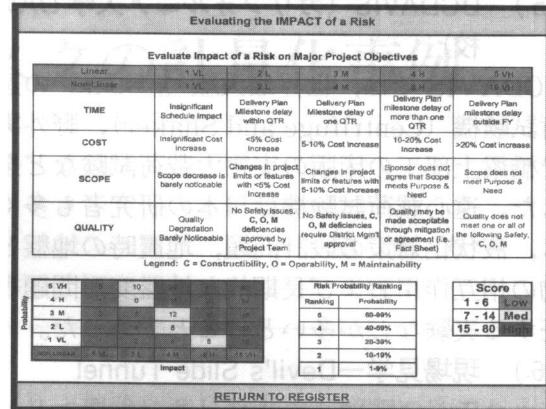


図 2 RBS によるリスク評価¹⁾

(3) Fuguro West Inc. (フグロ ウエスト社)

フグロ ウエスト社はオランダのハーグに本社を持つ企業連合で、世界 50 カ国以上に事務所を置く地質調査専門会社である。今回の訪問に際し事前に質問状を送付していたこともあり、具体的のやりとりを行うことができた。米国における発注方式や CM の役割、地質リスクマネジメントにおける地質技術者 (Geologist) や地質工学技術者 (Geotechnical Engineer) の役割の説明を受けた。地質リスクマネジメントの概念としてリスクを、

$$\text{Risk} = (\text{Geological Hazard}) \times (\text{Time}) \text{Exposure} \times \text{Vulnerability}$$

と考え、図 3 に示す流れでマネジメントしている。

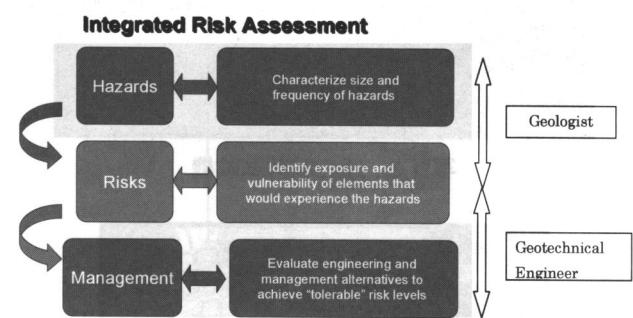


図 3 リスクマネジメントの概念図¹⁾

(4) Pacific Gas and Electric Company (PG & E 社)

PG & E 社は、米国西海岸におけるガスと電気の供給会社である。PG & E 社のリスクマネジメントは始まったばかりであり、現状の取組み状況について事例報告を受けた。現時点では、地質に起因する建設時の事業費変動リスクより、はるかに大きい地震災害リスクマネジメントに主眼を置いているようである。ただし、米国の契約方法では、細かい事項まで契約書に盛り込まれるので、

責任分担とリスク分担がある程度契約段階で明確にされ、前述の GBR が有効な文書の一つとして位置づけられているようである。

(5) UCDAVIS (カリフォルニア大学 DAVIS 校)

UCDAVIS では、世界最大級 ($r=9$ m) の遠心載荷試験機 (Centrifuge and Shaker)，野外実験場で橋梁上部工の床版の実物大載荷試験などを見学した。遠心載荷試験機は日本の研究者も多く利用し、液状化対策の設計問題、地震時の地盤と構造物の相互作用および長期的な地盤変形問題等を実証する実験などが多いとのことであった。

(6) 現場見学—Devil's Slide Tunnel Project—

Devil's Slide 地区は、図 4 に示すようにカリフォルニア州中央西端部の太平洋に面した沿岸部にあり、サンアンドレアス断層から西方向に約 8 km の距離にある。

この地区は名前からわかるように、海岸沿いに約 30~70° の急斜面が連続し、波浪による侵食と風化の進行により斜面が不安定な地すべり地帯となっている。本プロジェクトは海岸線を走る主要

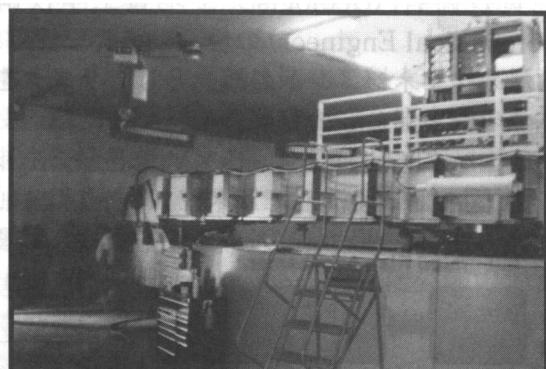


写真 2 遠心載荷試験機



図 4 Devil's Slide Tunnel Project 周辺地質図¹⁾

道路 1 号線の危険回避を目的に、内陸側でトンネルを建設するものである。この現場では前述の GBR を活用し、比較的多くの地質調査を実施し地質リスクの軽減化を図っている。

4. 今回の成果と今後の展望

(1) 今回の成果

今回の主要成果としては、以下の項目を上げることができよう。

- ① 全地連が国際舞台へ登場
- ② 研究内容・レベルの国際化
- ③ 有効な概念の導入
- ④ 地質リスクの現場での取組み状況の把握
- ⑤ 継続的情報交流の窓口形成

(2) 今後の展望（取組み課題）

今後の展望としては、以下の主要取組み課題を見据えた継続的な活動を考えている。

- ① 国際交流の継続
 - ・ミッションの継続
 - ・セミナーの開催
 - ・国際学会での発表
- ② 米国の業界との情報交換
 - ・海外英語版の HP の作成
 - ・国際学会での発表論文の HP への掲載
- ③ 入手情報のブレークダウン
 - ・入手文献の翻訳（配布、出版）
 - ・個別研究（国内関連機関との共同研究）
- ④ 成果の普及・特に会員へ
 - ・今後のミッションへの地方委員の参加奨励
 - ・招聘者によるセミナーの地方開催
- ⑤ 国内関連機関との連携
 - ・国内関連機関との横の連携を強化
 - ・海外情報ネットワークの核的活動

「地質リスク」の研究は発展途上であり、今後益々、みなさまの積極的な参画をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 全国地質調査業協会連合会：「地質リスク」海外調査ミッション—米国カリフォルニア州における地質リスクへの対応状況調査—報告書，2007.11. (<http://www.zenchiren.or.jp/>)
- 2) 米国地質調査所 (USGS) : Protecting Your Family From Earthquakes, p. 3.

我が国における地質リスクの計量化事例

まゆづみ ひろ し
黛 廣 志*

1. はじめに

従来、予見できない地質条件の出現による建設コストの増大については、やむを得ない条件変更として事業者が負担し、請負者にリスク分担が求められることはなかった。しかし、コスト構造改革の延長線上では納税者への説明責任もあり、建設コストの増大について正当な理由を提示することが必要となる。このような社会環境の変化の下では、調査・設計段階において、地質リスクに起因する建設コストの変動可能性について定量的な評価を行うことが重要である。しかしながら、我が国においては実務的にこのような定量的な評価を行った事例はなく、この10年ほどの間に定量的な評価手法についての研究が始まった段階である。本稿では、いくつかの計量化事例について紹介する。

2. 大津教授グループの研究事例

京都大学・大津教授のグループは、地盤リスクに起因する建設コスト変動の定量評価手法や評価事例について精力的に研究成果を上げておられるが、そのうちの数例を紹介する。

2.1 金融工学理論に基づく地盤リスク評価

大津ら¹⁾は、金融工学理論に基づいて地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価する方法論を提案し、実際の建設プロジェクトにおいて地盤リスクが建設コストに及ぼす影響評価事例を示している。得られた知見は以下のとおりである。

1) 従来の数量積算を基本とした地盤リスク対応は、公共事業数が多い場合には、広義のポート

フォリオ理論に準じたものと解釈できるため、従来の状況では最適なリスク対応であった。

2) しかし、今後の公共事業の動向として非エンジニアのプロジェクトへの参画や公共事業量が減少するという状況を踏まえると、新たな検討方法としてリスク～期待値平面を用いた地盤リスクの建設コストに及ぼす影響の評価方法が有効であり、そのリスク評価に基づいて建設コスト増大への対応として、事業予算に予備費を計上することの重要性が高まることが示された。

図1は大津らが提案するリスク(標準偏差)～期待値平面であり、地盤リスクと調査費用の関係を評価する上で有効性が示されている。

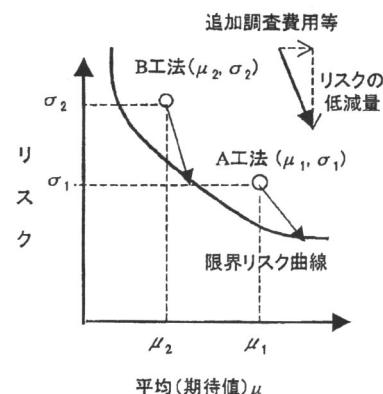


図1 地盤評価リスクの模式図

図1のA工法をシールド工法、B工法を都市NATM工法とすると、シールド工法を適用した場合の期待値は都市NATM工法に比較して大きく、リスクは小さい。逆に都市NATMを適用した場合の期待値は小さく、地山条件が想定より悪い場合には多大な補助工法に対する金額増となるため想定されるリスクは大きくなる。また図中のベクトル水平成分は追加調査費用を模式的に示したものであり、鉛直成分が追加調査を行うことで得られたリスクの低減量を表している。

* 川崎地質(株)技術本部 技術統括部長

3) 地盤統計学の一つであるクリジング手法を適用し、地盤の幾何学的不確実性に着目して地盤調査工事の投資効果についても定量的に評価できる可能性があることを示した。

2.2 力学的地盤リスク要因によるコスト変動評価

大津ら^{2),3)}は、地盤リスクを構成する力学的要因に着目し、地盤統計学のインディケータクリギングという手法を用いて、地盤リスクに起因する建設コストの変動と調査費用の関係を定量的に評価する手法について検討している。具体的には、図2に示す揚水式発電所プロジェクトで、放水路トンネル掘削工事（外形8m、内径6.4m、全長1,430m）での建設コスト変動リスク評価に適用している。この建設地の地質条件は第三紀の砂岩・シルト岩で構成されており断層は存在しない。

同サイトではフィージビリティ(F/S)段階から詳細設計(DD)段階までの間に図1および表1に示すボーリング調査ならびに探査トンネルを用いた地質調査が行われている。探査トンネルは、施工連絡用に放水路トンネルと平行に先行掘削されたものである。

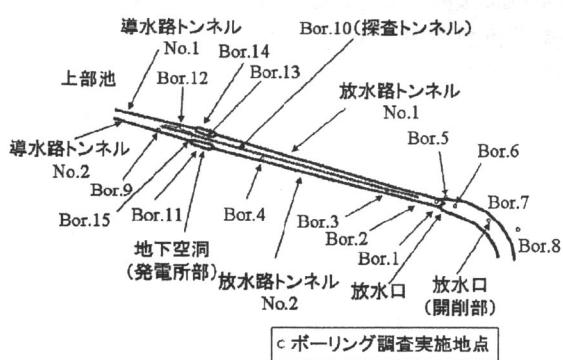


図2 事前調査ボーリング孔平面配置図

表1 調査段階と調査内容

調査実施段階	調査内容
F/S	ボーリング番号 Bor.1～Bor.4
D/S ₁	ボーリング番号 Bor.5～Bor.8
D/S ₂	探査トンネル (Bor.9～Bor.10)
D/S ₃	ボーリング番号 Bor.11
D/S ₄	ボーリング番号 Bor.12～Bor.14
D/D	ボーリング番号 Bor.15

図3は最尤シナリオ事業費とリスク変動幅の関係を示したもので、調査段階を経ることによる横軸の増加はほとんどが調査費の増加に相当する。D/S₁からD/S₂の間で最尤値が大きく増加するのは、他段階に比べて探査トンネルの掘削費が

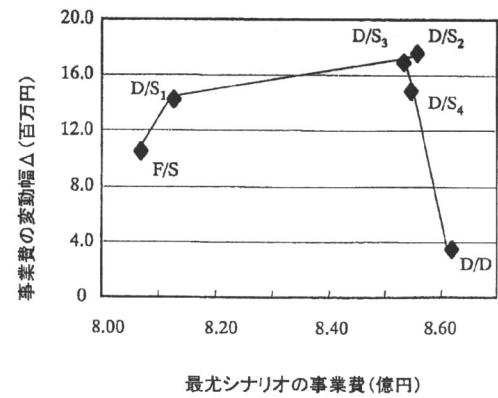


図3 最適推定事業費と変動幅の関係

卓越することに起因する。図3のリスク変動幅に着目すると、F/S～D/S₁段階で比較的小さく、D/S₂段階で最大になった後、D/Dまで調査量が増加するにつれてリスクは減少する傾向を示す。特に注目すべきは、D/S₃以降の調査段階で横軸の増加に比べてリスクの低減量が卓越していることであり、F/S以降の追加調査の投資効果がきわめて高いものであったことが示されている。

3. 土木研究所の事例

脇坂⁴⁾は、土木地質におけるリスクを「望ましくない地質事象の生起確率とその事象の大きさの組み合わせ」と定義し、「土木地質の不確実性」とも呼んでいる。また、土木地質におけるリスク管理(リスクマネジメント)を、① 望ましくない事象の特定、② その事象の生起確率と事象の影響度によるリスク算定、③ リスク評価、④ リスクが許容可能かどうかの判断、⑤ リスクの対策、以上の5項目に分類している。

リスク分析においてはまず望ましくない地質事象を特定する必要があり、ダム事業においては予備調査段階から建設段階まで、広い範囲の概略調査から狭い範囲の詳細調査までを系統的に実施して望ましくない地質事象の見逃しがないように努めており、各調査段階における土木地質リスクの状況を図4のようにまとめている。

ダム事業の予備調査段階では図4a)のように、あらゆる望ましくない地質事象の概略の生起確率と影響度が推定され、それらの組み合わせによって長大地すべりや活断層が存在する場合はダムサイトの変更、すなわち回避が行われる。

実施計画段階から建設事業段階の設計時には、図4b)のような低減すべきリスクが残っている。この段階では影響度、生起確率が未確定であり、さらに詳細な地質調査が行われる。現状、ダム設

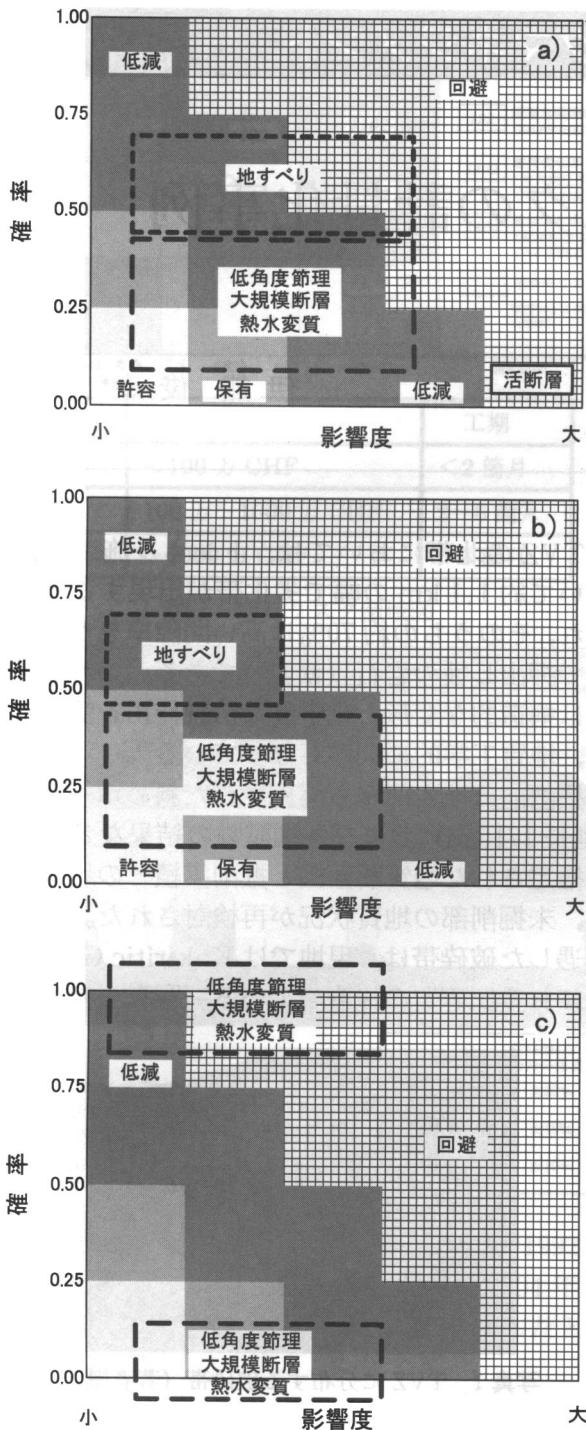


図4 ダム事業各段階における土木地質リスク

計は安全率法によって行われているので、事象の生起確率は所定の安全率を満たすか否か、すなわち0または1に区分される(図4c))。生起確率が1の場合は影響度の大きさが安定解析などによって算出され、回避あるいは低減などのリスク対策が検討される。低減策としては、地質事象そのものの大きさを減じること(断層を掘削して範囲を狭めるなど)、構造物のサイズを大きくして生起確率を減じることなどを示している。

4. 全地連のアプローチ

全地連⁵⁾では、地質リスクをタイムリーにマネジメントしてコスト縮減を達成するために、以下の3つの要素が必要であると考えている。

- ① 発注者の側に立つ技術顧問
- ② リスク計量化手法
- ③ プロセスマネジメントシステム

これらのうちリスク計量化手法を確立するため、「地質リスクを回避した事例(Aタイプ)」と、「地質リスクが発現した事例(Bタイプ)」に分けて事例収集を行っている。Aタイプは、リスクを管理することで当初工事費の縮減を達成したもので、次のような効果を考える。

$$\text{効果} = \text{当初工事費} - \text{変更後工事費}$$

-リスク対応費用

一方、Bタイプは発現した事象(変更工事費)から、リスク管理を行っていれば(リスク対応費用をかけていれば)工事費の変更はなかったと推定するもので、次のように考える。

$$\text{効果} = \text{変更後工事費} - \text{当初工事費}$$

-リスク対応費用

現在、これらによってリスクマネジメント効果を計量化するためのデータを鋭意収集中であり、地質リスク計量化手法の確立に向けて準備を進めているところである。

参考文献

- 1) 大津宏康・尾の井芳樹・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.
- 2) 大津宏康・尾の井芳樹・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.
- 3) 大津宏康・大西有三・浜田信彦・境 亮祐：地盤統計学手法を用いた建設コスト推定方法の事後評価への適用、土木学会論文集F, Vol. 63, No. 1, 35-52, 2007.02.
- 4) 脇坂安彦：土木地質におけるリスクとその管理、産総研地質調査総合センター第10回シンポジウム, 2008.
- 5) 佐橋義人：国内公共事業における地質リスクの発現とその対応の分析、産総研地質調査総合センター第10回シンポジウム, 2008.

海外における地質リスクの計量化事例

い　くま　とし　ゆき
伊　熊　俊　幸*

1. はじめに

海外における土木構造物の建設における地質リスクの評価および計量化については、確率論的な手法であるマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション、定性的な手法としてのリスクマトリックス解析、総ボーリング調査長での評価および定量的な分析手法であるイベントツリー法、フォールトツリー法などで検討されている¹⁾。本稿では海外における山岳トンネルの事例を紹介しつつ、それぞれの事例におけるリスク計量化手法について概要を紹介する。

2. 地質リスクの計量化事例

2.1 スイスアルプスの長大山岳トンネル

スイスでは ALP Transit の一環としてアルプス山脈の低標高部を貫く Gotthard Basis Tunnel (GBT: 延長 57 km) の建設が 1996 年から開始された。

トンネル地山は主として古期の片麻岩体から構成されているが、その間にタヴェチェンゾーン (TVZ) およびピオラゾーン (PM) という岩盤劣化帯が存在することが事前段階の調査で判明していた。本トンネルの土被りは最大 2,500 m にも達し、岩盤劣化帯の存在も含め、大土被り、破碎帶の規模、高圧湧水、山はね、高温環境などが地質リスクとして施工上問題となった。2008 年 5 月 1 日現在、付帯施設を含め地下構造物の約 71% の掘削が完了しているが、ここではセドルン工区に分布する TVZ の岩盤劣化部の地質リスクの扱いについて紹介する。

TVZ の北帶においては、トンネル施工基面において約 1.1 km の幅で劣化帯が出現すると推定され、そのうちの約 70% は高い間隙率をもつ低強度で押出し性の岩石（軟岩）である。これらの岩石は構造的な変形と化学的な溶脱作用を受けており、地質工学的に問題となっている²⁾。

掘削前に地表部から実施された斜めボーリング（延長 1715 m）および各種試験の結果などに基づき推定された地質断面図と掘削実績との比較を行い、未掘削部の地質状況が再検討された。坑内で遭遇した破碎帶は、現地では Kakiritic Gneiss と呼ばれる圧碎質の片麻岩である（写真 1 参照）。



写真 1 TVZ に分布する破碎带 (著者撮影)

地質学的に大きな問題を抱えた TVZ および PM ゾーンについては、1998 年に工程および建設費用計画が見直された。さらにこれらのゾーンでは原位置での前方探査ボーリングや切羽からの反射法地震探査などが実施され、調査結果からはリスクコントロールが可能であることが示された。

セドルン工区における地質リスクを規模、発生確率を両軸にとったリスク領域図にまとめたものを図 1³⁾ に示した。

なお、これらのリスクは建設工事の進展に伴う各種の調査・探査により減少しているのが図 2 から読み取れる⁴⁾。

潜在地質リスク (geologische-risiko-poten-

* (株)ダイヤコンサルタント本社 プロポーザル対応室長

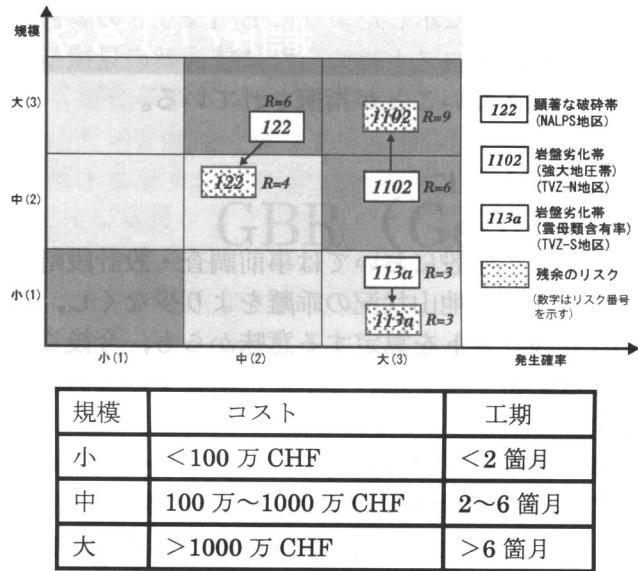


図1 地質リスク領域図

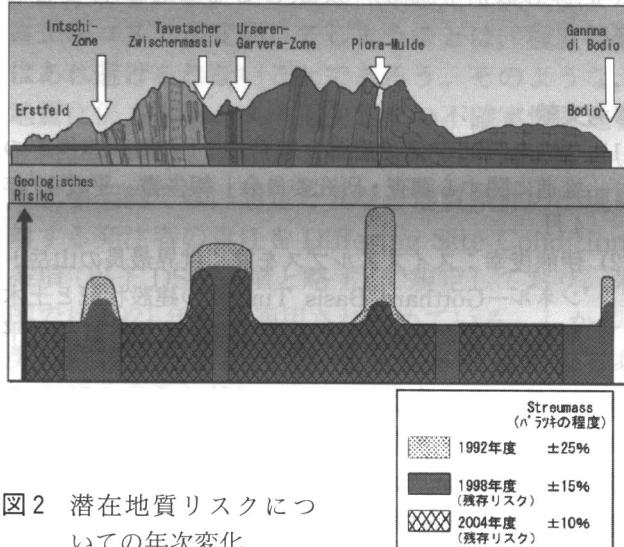


図2 潜在地質リスクについての年次変化

tial) は 1998 年においては ±15% となり 1992 年の推定値を減らすことができた。また、2004 年 10 月末の段階ではリスクは ±10% 以内に達したと判断されている。

2.2 ネパールの導水路トンネル

最近、ネパールのヒマラヤ山脈での水力発電所建設に際して 4 本の導水路トンネルが計画され、いずれも中央衝上断層 (Main Central Thrust) 近傍に位置することから、高頻度で破断された岩盤、せん断帶、深層風化、地山の押し出しなどの地質リスクが計画・建設段階で問題となつた。

事前段階の調査としては、各サイトにおいて表 1 に示す項目が実施された⁵⁾。

これらの調査は、サイトごとに導水路トンネルについて最適なルートを見つけること、トンネル安定性検討における地質リスクの把握および不確実性を低減することを目的として実施された。さ

表1 各導水路における調査項目

ステージ	サイト名 調査項目	Khimti I	Kali-Gandaki "A"	Modi Khola	Middle Marsyangdi	備考
予備調査段階	既往資料に基づく室内解析	○	○	○	○	予備調査前に行われた地質調査は非常に限定されていた。
	空中写真判読・解析	○	○	○	○	縮尺: 1/50,000~1/125,000
	地表地質踏査	○	○	○	○	プロジェクト範囲のみ実施。
	屈折法弹性波探査	○	○	○	○	サーダンクおよび頭首工に履定し実施。
	比抵抗探査	-	-	-	○	断層が疑われる箇所および取水部に限定して実施。
	コアボーリング調査	○	○	○	○	取水部、サーダンクおよび発電所建設位置に限定して実施。
	室内試験	○	○	-	○	岩石の強度定数および鉱物学的試験も含む。
設計・契約段階	予備調査段階で実施された調査のレビュー	○	○	-	○	
	詳細な地表地質踏査	○	○	-	○	Khimti I: 2~3日の踏査
	追加コアボーリング調査	-	○	-	○	取水部および発電所建設位置に集中して実施。
	追加物理探査	-	-	-	○	断層帯が疑われる箇所について比抵抗探査を実施。
	坑道掘削探査	-	○	-	○	
	岩盤応力測定	-	○	-	○	Kaligandaki "A": 水圧破碎法 Middle Marsyangdi: 小ジャッキテスト
	室内試験	-	○	-	○	ダイラトメーター試験を含む追加調査。

○: 実施 - : 未実施

らに調査結果の総合解析により建設コスト、工期の縮減に対して重要な役割を演ずることも強調されている。

しかし、サイトごとに調査項目も異なっており、かつ、頭首工や発電所エリアでの調査が主体であり導水路トンネル本体での調査はあまり行われていない。このことが、建設コストの乖離の原因の一つにあげられている。

トンネル地山等級は 7 区分されているが、岩盤区分の予測については、バートンの Q 値を利用し @リスク不確定性分析シミュレーションによっている⁶⁾。図 3 には 2 つのサイトにおける各支保の建設前後での変動比を示す。最終的な支保コストは Khimti I で約 5 倍、Kaligandaki A で約 2 倍増となっている。これは事前と施工時における地山等級評価の差異によるとされ、基礎データとな

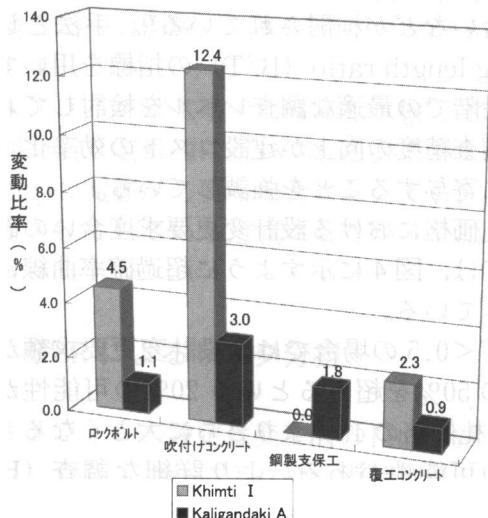


図3 予測と実績でのトンネル支保の変動比率

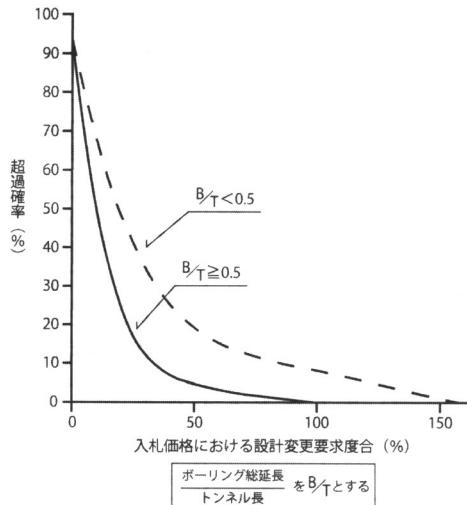


図4 入札価格における設計変更要求度合いの確率

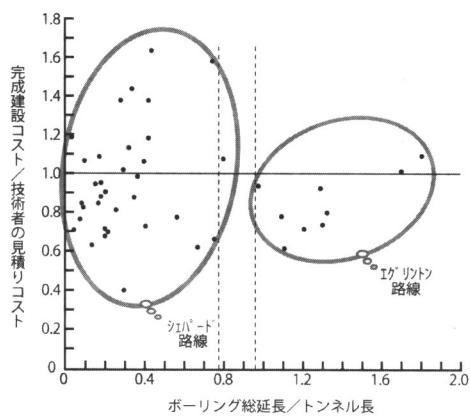


図5 B/T と建設・見積りコストとの関係

る調査数量の不足も指摘されている。

2.3 カナダの都市トンネル

カナダのトロント市域では、地下鉄建設に際し地表下に分布する氷河期堆積物の著しい層相・変化特性が地質リスクと考えられた。

本事例ではトンネル建設における事前調査段階での総ボーリング長と建設コスト、設計変更コスト度合いなどが検討されている⁷⁾。手法としてはBoring length ratio (B/T) の指標を用いて事前調査段階での最適な調査レベルを検討しており、地質調査精度の向上が建設コストの効率化（縮減化）に寄与することを強調している。

入札価格における設計変更要求度合いの確率については、図4に示すように超過確率曲線により解釈している。

B/T<0.5の場合では、設計変更要求額が入札価格の50%を超えるという20%の可能性が、また、入札価格の10%よりさらに大きくなるという60%の可能性がある。より詳細な調査 (B/T≥0.5) が実施される場合、これらの見込みは5%および38%までそれぞれ低下する。

また、図5に示したようにB/T≥0.8の場合、完成建設工事コストはめったに技術者の見積りコストを超えないことが指摘されている。

3. おわりに

トンネル建設においては事前調査・設計段階と施工段階での地山状況の乖離をより少なくし、適切な建設コストを算定する意味からも、今後このような解析手法を用いて事前に研究する価値は大きい。

我が国のような多変動を受けたプレート収束域での地質・岩盤状況の特異性を念頭に置き、「複雑系」としての地山状況を事前段階でより定量的に評価し、不確実性評価も踏まえ地質リスクを正しく把握し設計・施工へ反映させが必要となる。

参考文献

- (社)全国地質調査業協会連合会：「企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会」報告書 平成19年4月.
- 伊熊俊幸：スイスアルプスを貫く世界最長の山岳トンネル—Gotthard Basis Tunnelの建設状況と土木地質から見た課題—, 充てん, 第50号, pp. 21-28, 平成18年.
- Ehrbar, H. und Keller, S.: Geologische Risiken und Massnahmenplanung am Beispiel des Teilstücks Sedrun, Löw (Herausgeber) Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg, pp. 35-46, 2006.
- Sieber, A. und Zbinden, P.: Herausforderungen und Lösungen beim Bau des längsten Eisenbahntunnels der Welt, F Heinrich, H. Klapperich (Herausgeber) Ehrenkolloquium Prof. Friedhelm Heinrich—FELSMECHNIK—, 2004.
- Panthi, K. and Nilsen, B.: Predicted versus actual rock mass conditions—A review of four tunnels projects in Nepal Himalaya, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 173-184, 2007.
- Panthi, K.: Analysis of Engineering Geological Uncertainties Related to Tunnelling in Himalayan Rock Mass Conditions, Doctorial Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2006.
- Westland, J. et al.: Managing Subsurface Risk for Toronto's Rapid Transit Expansion Program, North American Tunneling '98, Ozdemir (ed.), pp. 37-45, 1998.

GBR (Geotechnical Baseline Report)

おぞのしゅうじろう
尾園修治郎*

1. GBR とは

土木工事において地質条件が想定と異なるために工事コストが変動してしまうことは、程度の差はあれ避けられないことであろう。そのような、地質に係る事業コスト損失とその不確実性を地質リスクと呼ぶことがある¹⁾。欧米で用いられている工事契約では、想定と異なる地質条件の出現に対する発注者の責任を Differing Site Conditions 条項（以下 DSC 条項と略す）で規定しており、米国では 1921 年より適用され始めている。しかし、契約図書に記述されている地質条件は曖昧であり、どのような状況であれば想定と異なると言えるのか、常に係争のもととなり続けた。

このような背景から、近年、地下工事を含むプロジェクトにおける地質リスクを発注者と受注業者が分担する際のツールとして、Geotechnical Baseline Report（以下 GBR と略す）が欧米で用いられている²⁾。調査・試験結果の事実だけを述べる Geotechnical Data Report に対して、GBR は当該サイトで遭遇することが想定される地質状況について発注者が現実的・合理的な解釈を明示するものである。そして入札業者・受注業者が依拠することのできる唯一の報告書として契約文書に含まれるべきものであり³⁾、DSC 条項、つまり地質条件による設計変更を適用する際のベースライン（閾値）とする情報を記述したものである。ベースラインは発注者の免責範囲を定めるものと言え、この値を越えるような状況が出現すれば、それは予見不可能な特異な地質条件として発注者の責任に帰し、逆にこの値の範囲内の地質条件に対しては工事受注業者が責任を負うとする。

ただし、予想される地質条件に対して工事受注

業者がどのように取り組むかが最重要であり、GBR の主目的は工法や施工計画に関連する地質条件などについて適切な解釈をあらかじめ示すことである点に留意する必要がある。

2. GBR の構成と留意点

2007 年に改訂された米国のガイドライン³⁾は、初版を発行した 1997 年以後のさまざまな経験や議論を踏まえたもので、対象工事に深部基礎、オーブンカットパイプライン、山留め掘削工事、高速道路が加えられ、また DB(Design-Build) 契約による調達への適用が追加されている。

このガイドラインには GBR を作成する際に検討すべき事項のチェックリストが示されている。プロジェクトによって記述が不要な事項も含まれるが、単独で読まれた場合でも他の文書を参照する必要がないよう多岐にわたる。例えば、プロジェクトの歴史など概要的事項から地盤・岩盤の物理・力学的性質、地下水分布、化学組成、湧水量、既知・未知の断層破碎帯などの地質工学的特性、周辺構造物への影響、工程遅延につながる事象などである。

ベースラインは工事中に計測して検証できるよう可能な限り定量的に記述される必要がある。また定性的な記述が必要な場合においても、一般的に受け入れられている定義にしたがった語法で記述する。

3. GBR によるリスク分担

ベースラインの設定は発注者の自由な裁量に委ねられており、これにより発注者は地質リスク分担の度合をコントロールすることができる。

発注者がベースラインをより高い水準に設定す

* (株)建設技術研究所

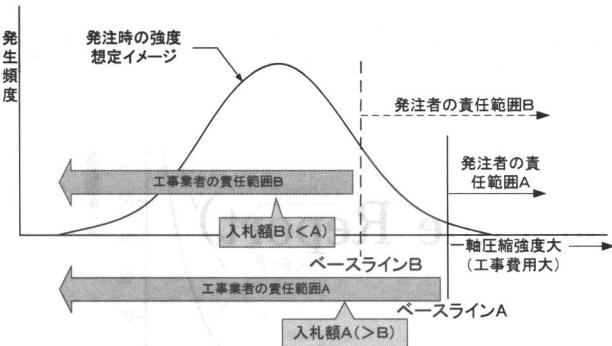


図1 一軸圧縮強度を例にしたベースラインのイメージ図（入札額は、単に相対的な大小を示す）

れば(図1のベースラインA)，地質リスクをより厳しく受注業者に負担させることになる。この場合，入札業者は予備費を十分に見込むであろうから入札価格は高くなると考えられるが，DSC条項の適用機会は減り，当初契約額と最終工事金額との乖離を小さくできる。逆に低い水準に想定すれば(図1のベースラインB)，入札業者はリスク負担を軽減されるので入札価格を下げることができる。ただしDSC条項の適用機会は増え，最終工事金額が当初契約額を上回る可能性は高くなる。

逆に，実際の工事において遭遇した地質条件がベースライン内であれば設計変更による増額は避けられ，発注者は結果的に低い価格で工事を完了することができる可能性がある。

このように，ベースラインを明確に設定することによりDSC条項の適用がスムーズに管理され，不要な係争を避けることができる。

4. GBRの適用例

具体例として米国カリフォルニア州運輸局の発注により現在建設中の Devil's Slide Tunnel プロジェクトのGBR⁴⁾から，一軸圧縮強度のベースラ

表1 一軸圧縮強度のベースライン⁴⁾

Lithology	Unconfined Compressive Strength, q_u (MPa)		
	Data Range	Average	Baseline Maximum
Siltstone/Claystone, fresh to slightly weathered	2.1 to 238	30	300
Siltstone/Claystone, moderately to intensely weathered	0.1 to 34	10	40
Sandstone, fresh to slightly weathered	11.6 to 267	110	330
Sandstone, moderately to intensely weathered	9 to 73	10	90
Conglomerate, fresh to slightly weathered	3 to 239	50	300
Conglomerate, moderately to intensely weathered	0.1 to 0.3	15	30
Granitic Rock, fresh to slightly weathered	3.9 to 226	30	280
Granitic Rock, moderately to intensely weathered	0.3 to 91	7	115

インを表1に示す。この例では，掘削工法に関するベースラインとして一軸圧縮強度の最大値が設定されている。その値は試験データを十分広くカバーするように設定されている（試験データが少ないために特に大きな値に設定されているものもある）。

このように高い水準のベースラインを設定することにより，同運輸局は自己の免責範囲を大きくし，地質リスクを受注業者にあらかじめ負担させていると考えられる。その代わりに契約額は高くなっていると考えられるが，係争は避けられ，工事はスムーズに進捗するものと考えられる。

5. 日本国内での適用可能性

これまで国内の公共土木工事においては，想定と異なる地質条件は「予見しがたき事項」と扱われ，そのほとんど全てが設計変更の対象とされてきた。これはベースラインを限りなく低い水準に設定していることに相当する。すでに述べたように，ベースラインを低い水準に設定することによって当初契約額は低く抑えられる可能性があるので，必ずしも不経済な方式とは言えない面がある。しかし，地質条件が複雑なために十分な地質調査が実施されないまま発注されることが少なくない我が国では，重大な地質リスクが発現して発注者の想定しえない，著しい設計変更が必要となる場合が少くないと考えられる。

効率的かつ透明性の高いインフラ整備・維持が求められている昨今，着工後のコスト変動を必要最小限とし，総事業コストを縮減する努力が求められる。地質条件の複雑な我が国においては，この目的のために地質リスクマネジメントが重要であり，そのためのツールとしてGBRを活用する必要がある。しかし，ベースラインが適切な水準に設定されない限り，いたずらにリスク対応のための予備費を膨らませるばかりになる可能性も孕んでいる。ベースラインは，地質リスクの大きさに応じた適切な量と質の地質調査を実施したうえで，[当初契約額+変更増額]の期待値が最小になるよう設定される必要がある。

6. 多様な調達方式への適用性

設計施工一括発注方式などにより効率的な調達を行う試みがなされている。特に設計施工一括発注方式では設計が不確定な時点での入札が行われるため，入札時にリスク分担表を提示している。し

かし、地質リスクが発現した場合に工事受注業者と発注者間で解釈が異なる場合がある⁵⁾。このような課題に対しても、入札時の GBR 提示や落札者のリスク評価を踏まえた受発注者共同の GBR 修正・合意などのプロセスを経ることにより、GBR が地質リスク分担ルールを明確にするツールとして活用できると考えられる。

さらに、PFI など土木事業への民間投資を促進するためにも、地質リスクの分担ルールをあらかじめ明確にしておくことが重要と考えられる。すなわち投資家にとってはコスト変動リスクの大小が投資判断に際して重要であり、工事受注業者との間でどのようにリスク分担するか事業者が明確に説明する必要がある。そのためには、GBR により負担する地質リスクのレベルを定め、それに応じたコスト変動リスクを計量化するなどの技術が求められる。

参考文献

- 1) 社団法人全国地質調査業協会連合会：「企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会」報告書, 2007.
- 2) Martin Th. van Staveren and Johan G. Knoeff : The Geotechnical Baseline Report as Risk Allocation Tool, 2004.
- 3) Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council, American Society of Civil Engineers : Geotechnical Baseline Reports for Construction-Suggested Guidelines, 2007.
- 4) HNTB Corporation, ILF Consultants, Inc. and Earth Mechanics, Inc. : GEOTECHNICAL BASELINE REPORT, Devil's Slide Tunnel Project for The California Department of Transportation, 2005.
- 5) 直轄事業の建設生産システムにおける発注者責任に関する懇談会品質確保専門部会：平成 19 年度とりまとめ, 2008.

大地の恵み

加賀温泉郷（山中温泉）

1. はじめに

石川県南部には、粟津温泉（小松市）、片山津温泉・山代温泉・山中温泉（加賀市）があり、加賀温泉郷と呼ばれています。片山津温泉を除けば開湯の歴史が古く、1300年ほど前に行基や泰澄によって開湯されたと伝えられています。

温泉街には、大小さまざまなホテルや旅館、物産店のほか、保養施設も建ち並び、北陸地方はもとより、全国各地から年間を通じて多くの観光客が訪れています。今回は、加賀温泉郷のうち、山中温泉についてまとめます。

山中温泉は、加賀温泉郷の中で最も奥まったところに位置します。行基開湯後は一時荒廃したものの、長谷部信連によって再発見され、以降、病を治す名湯として多くの人々に知れわたりました。古くは、北前船の船乗り衆が冬の間湯治に訪れ、民謡の「山中節」の前身が誕生し、また、松尾芭蕉は山中温泉をこよなく愛し、奥の細道のなかで「山中や 菊は手折らじ 湯の匂ひ」と詠ん

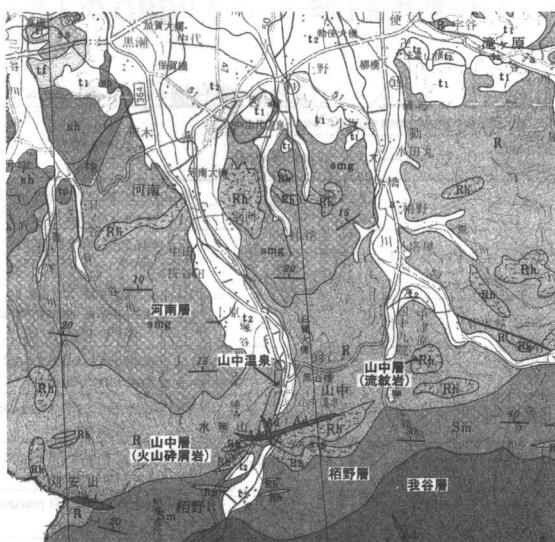


図1 山中温泉周辺の地質図¹⁾



写真1 鶴仙渓に架かるこおろぎ橋と渓岸に露出する火山碎屑岩

でいます。

2. 周辺の地質

山中温泉街の周辺に分布する地質は、新第三紀中新世中期に形成された山中層と呼ばれている火山岩類と火山碎屑岩類で、これらの上位には温泉街を流れる大聖寺川によって造られた段丘堆積物が被覆しています。

火山岩は、ほとんどが流理の発達した流紋岩溶岩です。また、火山碎屑岩類は流紋岩質な凝灰角礫岩や火山角礫凝灰岩で、大聖寺川河岸によく露出し、鶴仙渓と呼ばれている見事な渓谷をつくり出しています。

3. 温泉の湧出状況

「加賀山中温泉縁起」絵巻にある湯座屋をみると、地面を深さ1mほど掘り下げ、湧出した温泉を張っています。つまり、段丘堆積物を掘り下げると温泉が湧出している状況が推測されます。

段丘堆積物の厚さは数mあり、その直下には火山碎屑岩類が分布しています。山中温泉は当初、

火山碎屑岩に発達する亀裂などの断裂系を伝って上昇し、段丘堆積物に拡散していたと考えられます。絵巻の湯座屋は、まさに温泉が上昇する亀裂の直上付近にあたり、段丘堆積物内の地下水と混合して適度な温度になっていたのではないかと推測されます。

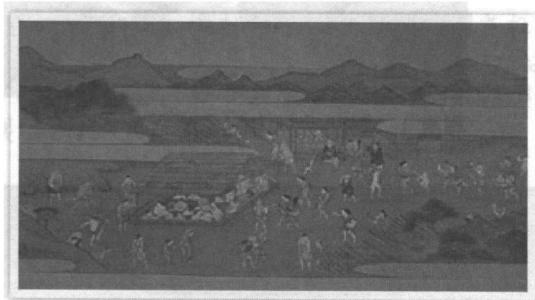


図2 山中温泉縁起絵巻²⁾

戦後、旅館やホテルの建設とともに、温泉の需要が増大したため、掘削して温泉を採取するようになりました。温泉街中心部の源泉では、深度250~500 mの掘削で40~48°Cの温泉が湧出しています。湧出量の総計は毎分1000 lを超える能力があり、泉質は低張性弱アルカリ性のカルシウム・ナトリウム-硫酸塩泉です。

近年、温泉街中心部の源泉から少しあなれたところで大深度の掘削が行われ、65°Cを越える温泉が毎分400 lを越える湧出量をみることができ、高温の温泉を安定供給できるようになりました。

これで温泉たまごもできるようになり、総湯の前では自由につくることができる施設があり、山中漆器の籠とスプーンが付いたたまごも販売されています。

また、これらの掘削資料から、山中温泉の湧出機構は、地下に流紋岩の岩体が伏在して熱源を形成し、この岩体に発達する極めて大きく開口した亀裂を通じて上昇していることがわかつきました。亀裂面をみると、炭酸カルシウムなどの鉱物が晶出して大きく成長するくらい開口しており、ガマが生成されています。このように、伏在する流紋岩の岩体と開口した亀裂の存在が、山中温泉湧出のキーとなる地質構造です。



写真2 菊の湯前の広場

4. 温泉と地域のコミュニティー

日本の温泉地には、地域の人々が共有し、共同で大切に利用する外湯が各地に存在します。その呼び方は、共同浴場や湯元、大湯などありますが、石川県では総湯と呼ばれています。これは13世紀末ごろから農村の自治組織として「惣」が誕生し、集落単位の集まりが「惣村」と呼ばれました。「惣村」の人々が共同して温泉を利用するようになったので、温泉を「惣湯」と呼ぶようになりました。後に「総湯」と書き改められました。「総湯」は加賀温泉郷すべてにあります。

「加賀山中温泉縁起」絵巻にもありますように、湯坪の周りには広場があり、広場を囲むように店が並び、人々が集う中心地になっていたことが伺えます。店のほかに宿もできるようになりました。湯治目的で訪れる人々とともに、地域の人々のコミュニティーの場になっていたことは確かです。

山中温泉の総湯は、現在「菊の湯」と呼ばれ、男女別の建物になっています。この間に広場がつくられており、今でも地域の人々や観光客のコミュニティーの場として保たれています。



写真3 菊の湯（男性）

5. おわりに

温泉という大地の恵みは、地域の温泉文化を形成し、産業を形成する生活の場となっていると同時に、その活動における癒しの場があります。しかしながら、温泉は有限な資源でありますので、保全を図りながら長い歴史を維持していく必要があると考えます。

参考文献

- 1) 細野義夫：新版・石川県地質図、石川県・北陸地質研究所、1993.
- 2) 加賀山中温泉縁起絵巻：医王寺所蔵。
- 3) 山中町：いい花さがそ夢さがそ北陸山中温泉、北國新聞社、2001。

(西田 達夫 [(株)エオネックス])

各地の博物館巡り

雲仙岳災害記念館 (がまだすドーム)

※ 「がまだす」とは、島原地方の方言で「頑張る」という意味です。

火山を見る・遊ぶ・学ぶ・憩う

全国初の火山体験学習施設

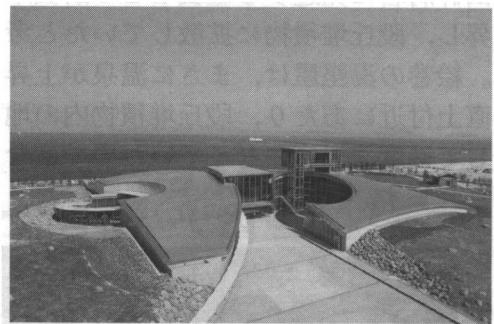


写真1 雲仙岳災害記念館全景

はじめに

平成2年11月、198年ぶりに噴火した雲仙・普賢岳は、頻発する「火碎流」や「土石流」により麓の市や町に大きな被害をもたらしました。

その後、噴火災害からめざましい復興をとげた島原市に、平成14年7月1日、火山学習の新たな拠点施設として「雲仙岳災害記念館（愛称：がまだすドーム）」がオープンしました。

雲仙岳災害記念館は、「島原地域再生行動計画（通称：がまだす計画）」の重点事業の一つとして計画され、噴火災害の状況や災害に立ち向かった人々の姿、全国から寄せられた温かいご支援などを後世に伝え、また島原半島における火山観光・火山学習の中核施設として、長崎県が整備したものです。館内は、噴火災害の貴重な資料が収集され、最新の装置や模型により、噴火活動の状況を体感し、火山のしくみや復興への取り組みをわかりやすく学習できる「火山体験型」ミュージアムとなっています。

平成19年11月19日から23日にかけて、アジアで初めてとなる『第五回火山都市国際会議島原大会』が、本記念館において開催され、世界中から著名な火山学者が集結し、活発な議論が繰り広げられました。

記念館は、土石流被災地の下流海浜に位置し、雲仙普賢岳の噴火に伴う火山噴出物を埋め立てて造成された土地に建設されています。噴火によって形成された平成新山の景観や、波静かな有明海の潮騒を間近に楽しむことができます。

まさに火山活動やそのしくみを学び、噴火災害からの復興を語るのに、これ以上の場所はないと言えるでしょう。

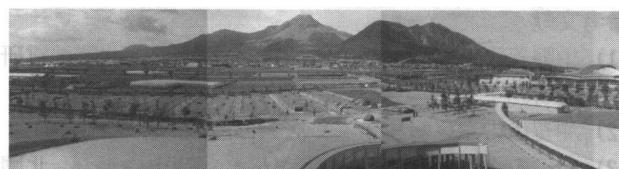


写真2 記念館展望台から望む平成新山（中央）と眉山（右手）

記念館の見どころ

記念館の有料展示ゾーンを中心に、その見どころを紹介します。

（1）雲仙普賢岳空間情報システム（平成20年度設置）

近年、産官学が蓄積してきた多くの航空写真、空中探査、レーザ計測データ等の空間情報が時系列的に整理統合されています。これらの空間情報を定量比較することは、災害発生のメカニズムの解明や、防災対策に役立つと考えられています。

雲仙普賢岳においては、長崎県農林部林務課が開発した、活火山地域における時系列化した空間情報システムを世界に先駆け着手し、その整備を進めています。

この最新技術を来館者は、ゲーム感覚で体感することができます。リアリティーあふれる三次元コンピューターグラフィックで、普賢岳の時系列的な山体変化、斜面の侵食や流出土砂の堆積変化などを、砂防技術者になった感覚で体験することができます。

（2）平成大噴火シアター

直径14mのドーム型スクリーンに映し出される火碎流や土石流の映像と合わせて震動する床、吹き上がる熱風により、噴火災害を体全体で感じていただけるシアターです（定員80名、立席）。

（3）島原大変劇場

1792年（寛政4年）、「島原大変肥後迷惑」と呼ばれる火山災害が発生しました。この災害では普賢岳の前面にある眉山の大崩壊により、有明海に大津波が発生し、対岸の熊本・天草地方を合わせて、約1万5千人の犠牲者が出了ました。



写真3 普賢岳3D映像(左が平成3年、右が平成18年)

この劇場では、当時の島原城下の人々の人間模様を中心に、数々のエピソードを立体紙芝居風に紹介しています。

(4) 焼き尽くされた風景

火碎流被災直後の北上木場「農業研修所」付近(島原市の情景を約15m×12mのスペースにジオラマとして再構成し、炎ゆらめくたばこ烟、灰をかぶった石垣、倒れた電柱などが再現されています。ここでは、実際に火碎流で被災した公衆電話やバス停標識、ガラス瓶などの実物資料が併せて展示されています。



写真4 焼き尽くされた風景

(5) その他の主な展示内容

火碎流で被災した木々を展示した長さ39mのガラス張りの床を火碎流と同じスピードで光が駆け抜ける「火碎流の道」。陸上自衛隊が被災地で使ったジープと、撮影した映像を使った被災地の疑似走行体験。

被災と復興に携わった地元の人々が全国からの支援に感謝の気持ちを込めて語るビデオレターのコーナー。

そのほかにも、「火山としての雲仙岳」、「世界の火山」、「火碎流」、「土石流」、「溶岩ドームの成長」、「科学掘削」、「噴火と予知」、「防災監視」、「防災シミュレーション」「復興の姿」など、約250の展示アイテムがあります。

(6) メディアライブラリー(無料ゾーン)

噴火災害や復興に関する貴重な映像資料(ビデオライブラリー)を始め、島原半島の歴史・観光情報についての最新のメディア装置を使っての検索閲覧のほか、火山図書コーナーなど自由に閲覧・学習できるゾーンがあります。

平成新山フィールドミュージアム構想と
ジオパーク認定第一号をめざして

「平成新山フィールドミュージアム構想」は、こ

れらの遺構や各種防災施設などの火山学習資源をまるごと一つの野外博物館ととらえる構想です。

この構想において、記念館は中核施設(コア施設)として、火山や災害の基本的な知識の学習や各学習拠点施設の情報提供を行う役割を担います。

記念館の近くには、火山学習に適した場所がたくさんあります。その一部をご紹介いたします。記念館で火山や災害の知識を学んだ後、ぜひ足を運んでください。

■ 土石流被災家屋保存公園

道の駅「みずなし本陣ふかえ」の一角に土石流で被災した家屋11棟を現地保存(うち1棟は移設)。土石流災害の凄まじさを伝えています。

■ 旧大野木場小学校校舎

火碎流による熱風で平成3年9月15日焼失した校舎をそのまま保存しております。

■ 国土交通省「大野木場砂防みらい館」

旧大野木場小学校に隣接して、平成14年9月15日に開館しました。雲仙・普賢岳の砂防工事のために開発された無人化施工技術や砂防事業の重要性について学習できる施設です。

■ 環境省「平成新山ネイチャーセンター」

噴火災害時に火碎流の直撃を受けた垂木台地に平成15年2月5日に開館しました。平成新山を間に仰ぎながら、噴火災害から再生した自然の姿を観察することができます。

雲仙岳災害記念館では、火山学習の中核施設として、さらに、国内認定第一号を目指して、島原半島の「ジオパーク」(地質公園)に取り組んでいます。
((株)親和テクノ 青木隆弘)

〔記念館へのお問い合わせ〕

雲仙岳災害記念館(愛称:がまだすドーム)

〒855-0879 長崎県島原市平成町1-1

電話(0957)65-5555 予約専用電話(0957)65-5551

ホームページアドレス <http://www.udmh.or.jp>

駐車場:一般400台、バス20台

管理運営:(財)雲仙岳災害記念財団

入館料:大人 1000円

中高生 700円

小学生 500円

(20名以上の団体は2割引、障害者の方は半額)

※いずれも有料展示ゾーン料金

メディアライブラリーなど無料ゾーンあり。

開館時間 9:00~18:00

(17:00まで入場可能)

閉館日 原則として年中無休

車窓から見る地形・地質

生駒山地

大阪府 東大阪市

奈良県 生駒市

近畿日本鉄道 奈良線

はじめに

近畿日本鉄道（近鉄）奈良線は、大阪市とそのベッドタウン化している奈良県 生駒市・奈良市とを結んでいる。

近鉄奈良線は、正式には大阪府東大阪市の布施駅と奈良市の近鉄奈良駅(26.7 km)とを結ぶ鉄道路線であるが、一般的には難波線（難波駅—上本町駅間）と大阪線の一部（上本町駅と布施駅）を含めて、近鉄難波駅から近鉄奈良駅間が奈良線(32.8 km, 24 駅)として運行されている（図1）。

奈良線沿線には奈良駅周辺では春日大社、東大寺、興福寺、大和西大寺周辺では秋篠寺、西大寺、生駒では生駒ケーブルに乗り換えて宝山寺、また大阪側では枚岡神社や石切神社といった有名な寺社が多く存在している。また、大和西大寺の奈良側には平城京跡があり、2010年には大極殿正殿の復元工事が完成し、平城遷都1300年の記念事業が行われることになっている。奈良線は30 km少しという近鉄では短い路線であるが、車窓から見える地形や町並みはバラエティに富んでいる。

奈良駅を大阪に向かって出た電車はしばらくす

ると平城京跡の広い原っぱに入る。左手に朱雀門、右手に工事中の太極殿を見ることになる。その後、しばらく平坦地を走り、富雄付近から緩い登り勾配になり、矢田丘陵に差し掛かる。矢田丘陵は新向谷トンネルで通過し、生駒山地と矢田丘陵に挟まれた低地部（生駒谷）に入る。生駒を出るとすぐに新生駒トンネル(3,494 km)に入り、トンネルを抜けると急に視界が広がり、右手に東大阪市域、阪神高速東大阪線、近鉄けいはんな線を見下ろすとともに、遠方には大阪市内の高層ビル群や北摂山地や六甲山、天気の良い日は淡路島まで望める。夜はこの夜景が一望に望め、電車に乗りながら最高の景色を満喫できる（写真1）。この後、電車は生駒山地の西側斜面を高度を下げながら徐々に大阪平野に入っていく。



写真1 新生駒トンネル西側 石切付近から見る大阪平野

生駒山地

生駒山地は、大阪平野と奈良盆地とを隔てる山地で、かつては河内国と大和国との国境で、現在では大阪府と奈良県の府県境となっている。

生駒山地は北側の大阪府枚方市付近から南の高安山、信貴山を経て大和川に至る南北約30 km、幅約5 kmの細長い山地であり、標高300~400 m

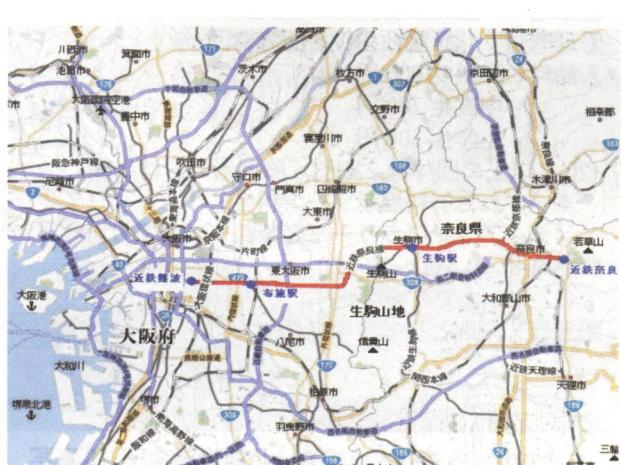


図1 近鉄奈良線 路線図

前後のなだらかな山々からなっている。主峰は生駒山で、その標高は 642.3 m である。大阪平野側の地形は急勾配であるのに対し、奈良県側は緩やかで山裾の広がりが見られ、緩傾斜部の東生駒～学園前間には住宅地が広がっている。

大阪側の急崖地形は、断層運動により断層東側の地盤が持ち上がってできた断層崖で山裾部の地形変換部には生駒断層が走っている。しかし、生駒山地山麓部は崖錐堆積物や扇状地堆積物で覆われており、断層の位置は明瞭でない（図2）。

生駒山地は主に花崗岩類と斑糈岩からできている。斑糈岩は生駒山頂を中心とした地域に見られ、その他の地域では主に花崗岩が分布している。生駒山頂付近が他に比べて高いのは、浸食に強い斑糈岩が分布しているためである（図3）。

奈良線が走る地域にみられる南北方向の山地や盆地の形成は約100万年前頃から始まっている。この頃に隆起を始めた生駒山地は奈良盆地を大阪湾と切り離した。このような生駒山地の隆起は東西性の圧縮応力場に生じた断層によるもので、100万年前以降1100mに及ぶ上下変動が生じたものと推定されている。生駒山地を含めた奈良線地域の地形は、東側から西側に突き上げる同規模（上下変位200m程）の逆断層が、生駒山地にはほぼ平



図2 近畿日本鉄道 奈良線 大阪側の地形¹⁾
(地学団体研究会大阪支部, 1999に加筆)

行して配列している構造が見られ、この断層運動によってもたらされたと考えられる(図4、図5)。

2003年10月から西大阪高速鉄道が阪神西大阪線の近畿難波駅への延伸工事を行っており、2009年春には阪神難波線として開業予定である。

[篠原正男（サンコーコンサルタント（株））]

参考文献

- 1) 地学団体研究会大阪支部：大阪のおいたち, 1999.
 - 2) 地学団体研究会大阪支部：おおさか自然史ハイキング, 1987.
 - 3) 断層資料研究センター：大阪直下の上町断層をさぐる, 2007.

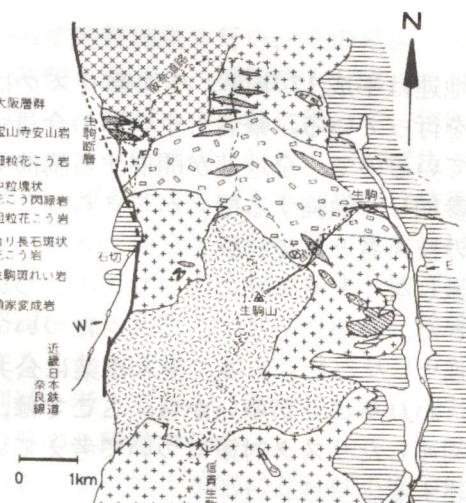


図3 生駒山周辺の地質概略図²⁾



図4 大阪湾・大阪盆地周辺の活断層（佐野正人原図）³⁾

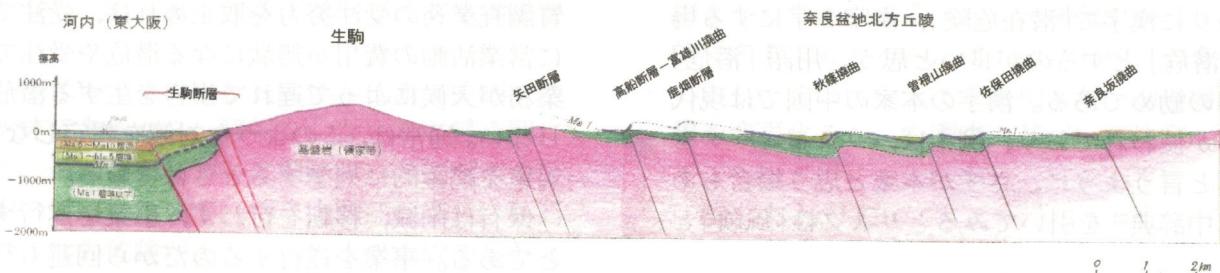


図5 大阪平野東部一生駒山—奈良盆地北方丘陵にかけての東西断面 (佐野正人原図)³⁾

リスク対策を考える

こ ばやし たもつ
小林 保*

1. はじめに

全地連は平成17年度より地質リスクについて調査を行っている。筆者も全地連の会員企業に勤務しているので、全地連が開催する講演会や講習会に参加し、勉強する機会が与えられた。また、土木の技術者として経験を積んできたので、明確に意識しなくとも業務の中でリスクについて配慮してきた。必要に応じて、リスクについて体系的に勉強¹⁾したこともある。土木事業は公共事業として行われることが多いから、ここでは、公共事業に関連したリスク対策について考えていることを記述する。

2. 用語「潜危」の使用の勧め

リスクは危険、危機、損害、損失、事故、災害などと関連した意味を持つ外来語である。未だ十分に日本語としてなじんでいないカタカナ語であり、意味が曖昧なまま使われる場合も多い。場合により、人により意味が微妙に異なるから、注意が必要である。漢字は、日本に伝えられて1000年以上の歴史を経て、日本語の中に溶け込んでいる。漢字は表意文字であるから漢字を適切に用いれば、意味が明確になる。漢字を2字組み合わせた言葉は日本語において安定が良いらしく、単語の数が多い。意味を特定するために、用語「リスク」の代わりに漢字で「潜在危険」、漢字2字にする場合は「潜危」とするのが良いと思う。用語「潜危」の使用の勧めである。漢字の本家の中国では現代も漢字が使われており、例えば、コンピュータを「電腦」と言うように、さすが本家と思う場合もある。日中辞典²⁾を引いてみるとリスクは「風險」と

出てくる。「風」は日本語においても、気象現象としての空気の流れの他に、「風説を流布する」のように使われ、「根拠の無い、曖昧な」を意味するので、曖昧な危険の意味である。筆者は「潜在」が重要と考えるので、「潜危」を勧める。

用語「潜危」であるが、危険が潜在しており、顕在化するとは限らない。危険が顕在化すると損害を被るが、顕在化しなければ損害を被らない。危険を顕在化させないために対策をすれば、対策費用が伴う。危険が潜在したまま顕在化しなければ損害が発生しないのだから、その場合には、対策費用は無駄になる。潜在した危険が顕在化するか、しないか、それはわからない。潜在した危険が顕在化する確率を想定して判断するしか方法は無いだろう。用語「潜危」から用語「顕在化確率」が派生する。両方とも筆者の思い付きである。多くの類似事例を扱っていれば、統計的に過去の顕在化率を求めることができ、それを近似的に将来の顕在化確率と解釈する。調査対象が他のどの事例と類似かを判断する経験、知識が重要である。

3. 潜危の保有の勧め

リスク対策は、削減、保有、移転、回避の4つに分類されると言われている。

回避は潜危を伴う事業そのものを廃止することである。例えば、コンサルタントがある道路の地質調査業務の受注努力を取止めれば、受注できずに営業活動の費用が無駄になる潜危や受注できた業務が天候によって遅れて損害を生ずる潜危は生じない。通常は、このような対策を想定しないが、対策を網羅的に列挙するときは含める。

保有は削減、移転を行わず、事業を遂行することである。事業を遂行するのだから回避も行わない。対策になっていないが、対策を網羅的に列挙

* (株)ダイヤコンサルタント技術顧問

するときは含める。潜危の顕在化確率が非常に小さいと判断されるときは、対策費用を伴わないのだから、保有が最も合理的な対策である。損害が顕在化しなければ、保有が削減、移転に比べて安い対策であることは明らかである。「リスク」の意味を潜危と特定すれば、顕在化確率が小さい場合に保有が合理的な対策であることを理解することができる。潜危を保有すべきか削減すべきかの境界の顕在化確率は調査費用、対策費用、復旧費用がわかれれば計算することができる。

保有を行うためには顕在化確率が非常に小さいとの判断を持たなければならぬし、もし顕在化したときには損害を被る。顕在化すれば金銭的には、事前に対策を講じたときよりも高い費用が復旧と対策のために必要になる。充分な検討を行って、全体的に考えて保有が最も安上がりであると判断したならば、もし顕在化しても損害を受け入れると覚悟もできる。公共事業の場合には、担当者が個人的にその責任を取ることはできないので、顕在化確率が非常に小さいとの判断を共有する必要があり、もし顕在化したときに備えて、復旧と対策の費用を支出する予備費を持ち、予備費の支出についての手続きを定めておく必要がある。

4. 移転の意味

移転は金銭的な潜危について保険を掛けることである。保険を受けた人は、潜危を保有することになる。その意味で、社会全体で見ると移転は対策になっていない。保険を引き受けるときは、潜危が顕在化して損害を被っても耐えられる範囲で引き受ける。損害が顕在化した場合の損害を多くの部分に分割し、多くの人がその部分を引き受ける。損害の分割によって、引受け人にとって、損害が耐えられる範囲に収まる。潜危が顕在化しなかったときは保険の掛け金が引受け人の収入になる。本来の潜危の保有者にとって、保険を掛けると、掛け金の支払いが発生し、潜危が顕在化しなくとも費用が必要である。保険は潜危が顕在化してもしなくとも、必要な費用を同じくする効果がある。

公共事業の主体は、社会全体を代表する国や地方自治体であるから、移転をしないかと言う間に對して、道路事業について興味深い事例がある。供用中の道路について、特に山間部の場合、落石や土砂崩れの危険があり、通行中の車両や歩行者が巻き込まれる事故の危険がある。事故が有った

とき道路管理者は道路の管理瑕疵を問われ、瑕疵の有無に応じて金銭的な賠償をすることになる。この費用について、道路管理者である県は保険会社に引き受けてもらって保険をかけるが、道路管理者である国は保険を掛けない。国は単一の主体としては巨大であり、単一の主体として耐えられる損害額も巨大である。国の予算の予備費の範囲で賠償に応じている。県は国に比べれば小さく、耐えられる損害額も小さいので、保険によって処理している。

5. 潜危の削減

例えば、道路の設計に当たって、仮決めされた路線に沿って地質調査を行い、その結果に基づいて路床や路盤を設計し、橋梁やトンネルを設計する。このとき、路線の中心線に沿って一定距離ごとの点について地質調査を行う。いわば抜き取り検査である。調査地点と調査地点の間は技術者の経験と勘に頼って補完する。地質が良くなければ対策を取り込んで設計するし、あまり地質が悪いときは路線位置を変更する場合もある。路線位置を変更することを回避と考える場合もあるが、ここでは削減と考えている。潜危の削減は地質調査と対策設計の2段階で行う。

地質調査の調査地点を密にとれば不確実性が減るが費用がかかる。いたずらに密に取れば良いというわけにはいかない。調査地点と調査地点の間の地質は、技術者の経験と勘に頼っての補完であるから、多かれ少なかれ潜危を保有することになる。保有する潜危を削減するためにどの程度費用を掛けるかをよく検討すべきである。潜危の顕在化確率が小さいならば、潜危を削減せずに保有するほうが、経済的である。

例えばトンネル工事では、着工前に支保工の設計を確定するための地質調査の費用は多額であるが、着工後に技術者が切羽を観察すれば、切羽の近くの未掘削部分の支保工を設計するための地質調査の費用は少額ですむ。支保工の工事費がいくらになるかわからない潜危を、着工前に多くの費用をかけて削減するよりも、保有するほうが経済的である。もちろん、着工前にも地質調査は必要であり、ここにトンネルを掘るか、別の場所に路線を変更するか、を調査に基づいて決定する。

6. おわりに

潜危の顕在化確率を何らかの方法で調べ、顕在

化確率が小さければ、潜危を保有する方が削減するよりも経済的である。国のような主体の意思決定については、個人と異なり、判断を共有するための制度的な仕組みを作ることが必要である。顕在化確率の評価を社会全体が共有し、顕在化確率が小さければ国が潜危を保有するという決定をすることが、社会全体の利益になる。

参考文献

- 1) 文部科学省：技術士制度における総合技術管理部門の技術体系(第2版), 日本技術士会発行, 2004年1月31日.
- 2) 日中辞典, 小学館発行, 1987年. 簡体字で電腦→电脑, 風險→风险と表記されている.

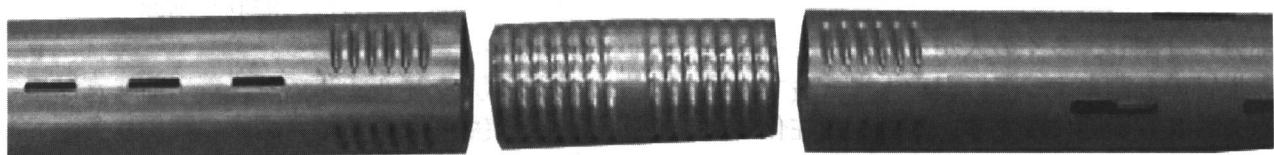
恒久集水ボーリング保孔管

割れない・抜けない！

剥げない・錆びない！

サビレス100

NETIS No.KK-030021



接続部の引張・曲げ強度とも約50kN(塩ビ管の10倍以上)

抜群の低ライフサイクルコスト 高強度・長寿命(100年)

高強度・長寿命サビレス管のお問い合わせ。ご注文は

有限会社 太田ジオリサーチ

<http://www.ohta-geo.co.jp/> TEL 078-907-3120(担当:太田)

<http://www.anshin-shitai.jp/>
あんしん宅地. JP

軟弱地盤の盛土管理

たき ざわ けん とう
滝 泽 賢 東*

1. はじめに

本業務はあるテーマ施設建設に伴う造成盛土についてである。

この業務は平成14年度から地盤調査が開始され、平成18年度に盛土造成工事が開始（写真1）、平成20年の現在まで動態観測（沈下観測）が継続的に実施されている。そして、テーマ施設の建設は平成21年以降に計画されており、テーマ施設が解放（オープン）されるのは、平成22年～23年以降になる予定である。



写真1 盛土造成工事開始 (H 18年)

2. 周辺の地形・地質概要

本業務地は、一級河川信濃川と一級河川阿賀野川との間に形成された新潟平野で、海岸部には、砂丘が発達している。砂丘は、平野内陸部でも数列認められている。これらの砂丘間は、氾濫原性低地であり、湿地帯が形成されているため多くは、水田や、住宅造成等に利用されている。業務地は、信濃川右岸の水田地帯で、近年、公園・スポーツ施設整備により景観が変化しつつある。業務地付近にある潟は、砂丘群の間にある残存湖沼である。

業務地付近の地層は、深さ10m付近まで粘性土と腐植土が主となって分布し、以深に旧砂州堆積物と考えられる砂層が深さ60mまで連続して分布する構成にある。砂層は、N値20～50の範囲にあり、深さ20m付近を境に砂の粒子が微細となり、締まりが良くなっていく傾向にある。一方、浅層に分布する粘性土と腐植土は、N値0～2程

度の軟らかい地盤を形成するため、圧縮性に富み、建築や道路の建設に対して種々の問題を生じている。業務地地盤は、ボーリング結果から深さ約5mまで腐植土を主とした軟弱地盤が形成されている。この腐植土は、未分解の腐植物が多く、スポンジ状を呈しているため、大きな圧密沈下が予想される。

3. 業務概要

当業務の概要はテーマ施設建設のため、計画地において、当時、水田であった敷地内で図1に示すように、ボーリング地質調査および補助調査としてオランダ式二重管コーン貫入試験を実施し、基礎地盤資料の作成とともに土のサンプリングによる室内土質試験結果をもとに圧密沈下の解析を実施した。このテーマ施設の計画地は、潟の近くにあり、表層部から非常に軟弱な地層が数メートルにわたり分布することから、当初から盛土による大きな圧密沈下が予想されていた。

その後、以上に示した地盤調査および解析結果をもとに、対策工法の選定を行った。なお、対策工法の選定で採用されたサーチャージ工法を用いて、圧密沈下の促進をはかり、沈下の状況を、動

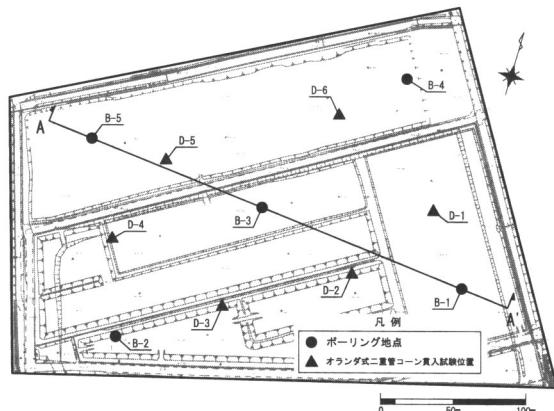


図1 調査位置平面図

* (株)新協地質

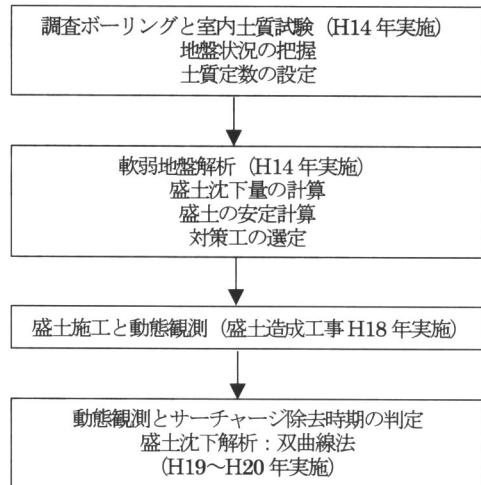


図2 施工管理の流れ

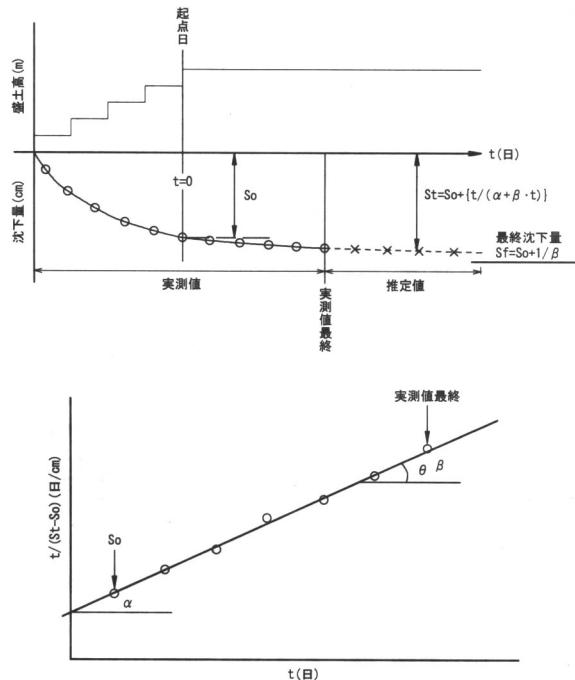


図3 双曲線法の概略図

態観測にて、定期的に計測した。最終的には、この動態観測の実測値をもとに双曲線法(図3)を用いた解析により、残留沈下量を推定し、サーチャージ盛土の除去時期を判断した。

4. 沈下解析結果

テーマ施設建設予定地では、推定沈下量を見込んで計画盛土高以上にサーチャージ(余盛土:約50 cm)を実施した。サーチャージの目的は計画盛土高以上の荷重載荷としてサーチャージ(余盛土)を行い圧密沈下量を促進させ、目標の圧密沈下に達した後、余盛土を除去させ、圧密沈下を抑制するものである。この余盛土の除去時期を見極めるため、盛土施工時から測定している実測値(動態

表1 沈下量予測結果

地点名	予測法	将来沈下量(cm)				
		1ヶ月後	3ヶ月後	6ヶ月後	1年後	最終沈下量
No.1	双曲線法	44.04	44.38	44.80	45.43	48.19
No.2	双曲線法	42.77	43.45	44.29	45.57	51.59
No.3	双曲線法	26.06	26.27	26.52	26.88	28.36

表2 残留沈下量一覧表

項目	測点No.			備考
	No.1	No.2	No.3	
A 実測値(H20/3月)	43.80cm	42.90cm	26.00cm	実測値
B 双曲線法による1年後の沈下量(推定)	45.43cm	45.57cm	26.88cm	推定値(双曲線法)
C 双曲線法による最終沈下量(推定)	48.19cm	51.59cm	28.36cm	推定値(双曲線法)
C-A H20/3月時点の残留沈下量	4.39cm	8.69cm	2.36cm	残留沈下量
C-B 1年後の残留沈下量	2.76cm	6.02cm	1.48cm	残留沈下量

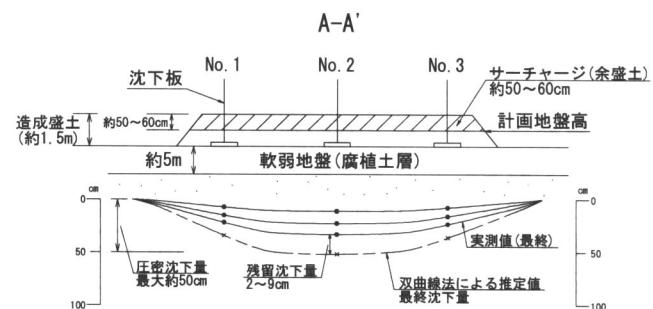


図4 沈下解析概略断面図(代表)

観測)のデータを用いて図3に示す双曲線法による沈下量予測(解析)を実施した。表1, 2に双曲線法による今後の沈下量予測結果と残留沈下量一覧表をまとめて示す。

以上の結果より、当施設計画地の圧密沈下は概ね平成20年3月時点で残留沈下量約2~9 cmを示し、1年後(平成21年)では残留沈下量約1~6 cmの範囲と双曲線法による最終沈下量に非常に近づいている結果を示した。また、テーマ施設の工事開始が平成22年以降に計画されていることから施設建設時には、概ね圧密沈下は終了した状態にあると考えられる。

5. まとめ

以上の業務結果により、施設計画地の地盤状況が明確となり、N値0~1を示す軟弱層(腐植土層)を対象とした室内土質試験結果(物理試験の他、一軸・三軸・圧密)と軟弱地盤解析結果(平成14年度)より、施設計画地に適した対策工法を提案することができた。また、この対策工法(サーチャージ工法:余盛載荷重工法)の施工後、引きつづき沈下動態観測を実施することにより、盛土の管理はもとより、実測値を用いたさらに詳しい沈下解析(双曲線法による予測)を行うことで、圧密沈下の残留沈下量(10 cm以下)を確認し、安全な状態でテーマ施設建設時期を待つことができた。