

独立行政法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター第10回シンポジウム

地質リスクとリスクマネジメント ー地質事象の認識における不確実性とその対応ー

平成20年3月11日(火)
秋葉原ダイビル5F 5B会議室

主催

独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター・産学官連携推進部門
社団法人 全国地質調査業協会連合会、地質地盤情報協議会

共催

独立行政法人 土木研究所

地質リスクとリスクマネジメント

—地質事象の認識における不確実性とその対応—

趣旨

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認識における不確実性が存在し、様々なリスクの要因となる。石油や鉱物資源探査分野では資源探査の経済性評価の点から、そのような地質リスクを定量的、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活発になっている。今回、全地連の地質リスク海外調査の成果と地質に関連するリスクマネジメントの現状を議論し、さらに地質リスク低減に貢献する地質情報整備の意義を討論する。

開催日：平成 20 年 3 月 11 日（火） 13:00～17:15

会場：秋葉原ダイビル 5F 5B会議室

東京都千代田区外神田1-18-13秋葉原ダイビル (<http://www.akibahall.com/>)

主催：独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター・産学官連携推進部門
社団法人 全国地質調査業協会連合会，地質地盤情報協議会

共催：独立行政法人 土木研究所

CPD（技術者継続教育）4単位が認定されます。

スケジュール

- 13:00～13:05 開会の挨拶 加藤 碩一（産総研 理事）
- 13:05～13:15 シンポジウム趣旨説明 栗本史雄（産総研 地質調査情報センター長）
- 13:15～13:45
【特別講演】
Supporting Societal Needs for Geoscience Information: The U.S. National Geologic Map Database
（米国地質図データベース：地球科学情報に関する社会的要請に応えるために）・・・1
David R. Soller（米国地質調査所）
- 13:45～14:00 産総研における地質地盤情報整備に向けた取り組みと地質リスク低減
への貢献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
中澤 努（産総研 地質調査情報センター）
- 14:00～14:25 石油探鉱・開発における地質リスク評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7
高山邦明（国際石油開発株式会社）
- 14:25～14:45 土木地質におけるリスクとその管理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
脇坂安彦（独立行政法人 土木研究所）
- 14:45～15:00 休息
- 15:00～15:20 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・・・・・・・・・・15
佐橋義仁（株式会社 建設技術研究所）
- 15:20～15:40 国外における地質リスクの認識とリスクマネジメントの動向
-全地連「地質リスク」海外調査の趣旨と背景-・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19
小笠原正継（産総研 地質情報研究部門）
- 15:40～16:00 米国カリフォルニア州の建設事業における地質リスクマネジメント
-全地連「地質リスク」海外調査の成果-・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
長瀬雅美（応用地質株式会社）
- 16:00～16:20 日本の公共工事リスクマネジメントの歴史と将来の方向性・・・・・・・・・・29
渡邊法美（高知工科大学）
- 16:20～16:40 設計コードにおける地盤パラメータの特性値の推定と地盤調査・・・・・・・・35
本城勇介（岐阜大学）
- 16:40～17:10 総合討論
- 17:10～17:15 閉会の挨拶 佃 栄吉（産総研 地質調査総合センター代表）

各講演の概要

Supporting Societal Needs for Geoscience Information: The U.S. National Geologic Map Database

(米国地質図データベース：地球科学情報に関する社会的要請に応えるために)

David R. Soller (U.S. Geological Survey)

米国地質調査所と州立地質調査機関協議会は、議会の付託を受けて、データベースNGMDBを構築している。このNGMDBは、複雑かつ多面的な問題に直面している社会の意志決定に役立てることを目的に、米国地質名称辞書、地質図目録、数値地図作製技術ワークショップ年報などを提供している。

産総研における地質地盤情報整備に向けた取り組みと地質リスク低減への貢献

中澤 努 (産総研 地質調査情報センター)

産総研では、地質リスク低減に貢献する活動として、地質図類出版や地質データベース公開など、各種地質情報を提供してきた。また、最近では産業技術連携推進会議および地質地盤情報協議会において、自治体・地質調査業界とともにボーリングデータの流通・活用などについて検討している。これら産総研の取り組みについて紹介する。

石油探鉱・開発における地質リスク評価

高山邦明 (国際石油開発株式会社)

石油鉱床は地下深部に存在するために探査に多大なコストを要し、胚胎状況を正確に把握することは困難である。石油の探鉱・開発を進めるためには地下の不確実性を精度良く把握し、それを考慮したプランニング、ディシジョンを行うことが常に求められる。本講演では石油探鉱・開発における地質リスクの評価方法を紹介する。

土木地質におけるリスクとその管理

脇坂安彦 (独立行政法人 土木研究所)

国土交通省所管の道路やダムなど社会資本整備においては、それらの計画、設計、施工に当たって地質・土質調査が行われている。特にダム建設に当たっては計画段階から系統的・段階的な地質調査が行われ、地質に起因するリスクの抽出、評価、管理が行われており、講演ではこれらについて紹介する。

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

佐橋義仁 (株式会社 建設技術研究所)

地質（に関わる事業）リスクを事業コストの増大とその不確実性に着目すると、わが国においては「地質リスク」は予見しがたき事象として、事象出現後に対応する習慣であったが、ここでは、知る立場にある者（特に発注者側技術者）が、情報・技術を事前に駆使（投資）することによってリスクを未然に低減する管理手法に着目した。

国外における地質リスクの認識とリスクマネジメントの動向

—全地連「地質リスク」海外調査の趣旨と背景—

小笠原正継（産総研 地質情報研究部門）

今回の調査の背景となった米国におけるトンネル工事等での地質リスクマネジメント手法の概要とその変遷，および地質リスクが顕在化した場合の米国社会における対応を紹介する．さらに地下地質状況の把握における不確実性の課題をどのようにマネジメントしているかを応用地質から資源地質分野まで範囲を広げて，国外の動向を紹介する．

米国カリフォルニア州の建設事業における地質リスクマネジメント

—全地連「地質リスク」海外調査の成果—

長瀬雅美（応用地質株式会社）

米国カリフォルニア州では，地質リスクの分担を客観的に示す報告書として Geotechnical Baseline Report (GBR) が有効に活用されている．実際に聞き取りを行って得られた発注者における GBR の活用状況や民間コンサルタントの地質リスクに対する考え方などの海外視察成果を紹介する．

日本の公共工事リスクマネジメントの歴史と将来の方向性

渡邊法美（高知工科大学）

日本の公共工事リスクマネジメントの歴史の特徴を大まかに整理した後，その将来の方向性を検討する．これまでのリスクマネジメントでは，建前と実態の乖離が見られた．発表では，今後は両者の乖離を小さくする必要があること，ならびに，そのための方策案について検討する．

設計コードにおける地盤パラメータの特性値の推定と地盤調査

本城勇介（岐阜大学）

最近の設計コード開発の中で議論されている地盤調査に基いた地盤パラメータ特性値の決定方法や，地盤調査の程度に関する議論の推移の概要を紹介する．また，いくつかの典型的方法の理論的な背景を説明し，その問題点を述べたうえで，確率場の理論に基いた特性値の決定方法や，調査規模の決定方法について紹介する．

Supporting Societal Needs for Geoscience Information:
The U.S. National Geologic Map Database
米国地質図データベース：地球科学情報に関する社会的要請に応えるために

David R. Soller (U.S. Geological Survey)
デビット R. ソラー（米国地質調査所）

Abstract

The U.S. Geological Survey (USGS) and the Association of American State Geologists (AASG) are mandated by Congress to provide a National Geologic Map Database (NGMDB, <http://ngmdb.usgs.gov>) of standardized, spatial geoscience information. This USGS-AASG partnership also involves collaboration with geological surveys of other nations, and universities and the private sector. To support both external users and the geologic mappers and GIS specialists who prepare maps and databases, the NGMDB project provides many online resources including: 1) the U.S. Geologic Names Lexicon ("GEOLEX"); 2) the Geoscience Map Catalog; and 3) Proceedings from the annual Digital Mapping Techniques workshops, which document map-preparation techniques, and standards in use or in development by geological surveys. The principal goal is to help users find the information they need to address a variety of societal and research applications. Society, businesses, and private citizens commonly are faced with complex, multi-dimensional issues; in order to facilitate the use of geologic information and its integration with other types of information, it must be provided in a clear, organized, and standardized manner. The NGMDB is strongly invested in the standardization of geoscience terminology, data structure, and cartography, which are critically needed to support societal decisionmaking, both in the public and private sectors.

日本語訳

米国地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey) と州立地質調査機関協議会 (AASG: Association of American State Geologists) は、議会の付託を受けて、標準化された空間的地球科学情報を提供するために、米国地質図データベース (NGMDB, <http://ngmdb.usgs.gov>) を構築している。このUSGSとAASGとの共同作業には各国地質調査所や大学、民間機関も参加している。外部の利用者、地質図作成者、地質図を用意しデータベースを構築する地理情報システムの専門家を支援するために、NGMDBプロジェクトは、米国地質名称辞書 (GEOLEX: U.S. Geologic Names Lexicon) や、地質図目録、数値地図作製技術ワークショップ年報 (地質図作成技術や、各国地質調査所で作成・検討されている標準の報告) などを提供している。その主な目標は、様々な社会的あるいは研究上の課題に応えようとする人々に必要とする情報を提供することにある。社会、ビジネス、そして市民は複雑かつ多面的な問題に直面しており、地質情報を利用してこれに対処できるようにするためには、明確で、よくまとめられ、かつ標準化された形で地質情報を提供する必要がある。NGMDBは、社会の意志決定に役立てるために、地球科学用語やデータ構造、地図作成法の標準化を推し進めている。

Presenting:

David R. Soller, Ph.D.

U.S. Geological Survey

12201 Sunrise Valley Drive

926-A National Center

Reston, VA, USA 20192-0001

e-mail: drsoller@usgs.gov

産総研における地質地盤情報整備に向けた取り組みと 地質リスク低減への貢献

中澤 努（産総研 地質調査情報センター）

1. はじめに

近年、事業の総コストの中で地質の不確実性に係わるリスク、すなわち地質リスクを分析し、マネジメントすることによりコスト削減を実現させようという試みがさかんに行われている（渡邊・佐橋，2007 など）。地質リスクをマネジメントする場合、既存の地質地盤情報データをいかに入手し、解析するかがひとつの大きな要素となってくる。これまで産総研では、地質リスク低減に貢献する活動として、地質図類の出版や地質データベース公開など、各種地質情報を提供してきた。また、最近では産業技術連携推進会議および地質地盤情報協議会において、自治体等関係公的機関・地質調査業界とともにボーリングデータ等地質地盤情報の流通・利活用などについて検討をおこなっている。本講演ではこれら地質リスク低減に貢献する産総研の取り組みについて紹介する。

2. 産総研における地質図類の出版および各種データベースの公開

産総研では、旧地質調査所時代より、さまざまな地質図類の出版を行ってきた。また、産総研の調査研究で得られた個々のデータはデータベースでの公開が推し進められている。以下に、地質リスクマネジメントにおいてこれら地質情報がどのように利用されるかを検討する。

2.1 地質リスクマネジメントにおける地質図類の位置づけ

産総研ではこれまで、5万分の1や20万分の1などの地質図幅のほか、火山地質図、活構造図、海洋地質図、鉱物資源図、重力図など、さまざまな地質図類を発行してきた。また最近では、それらを数値化した数値地質図の発行およびシームレス地質図の作成・公開も行っている。

産総研が発行している地質図類の中で、地質リスクマネジメントに利用されるのは、主に5万分の1地質図幅（図1）であろう。産総研発行の地質図類には独自の地質調査に基づいて作成されるものと既存のデータを基に編集して作成されるものがあるが、5万分の1地質図幅はこのうちの前者に相当するものであり、産総研発行の地質図類の基本図ともいえるものである。ただし、地質リスクを検討する各事業の対象は、多くの場合、事業（工事）が行われる敷地そのものに関するものであり、5万分の1地質図幅はそこまでの精度を保証するものではない。その意味では、基本図である5万分の1地質図幅も、事業の地質リスクの低減に直接貢献するものではない。しかし、既存のあるいは新たに取得した地質データを実際に解釈するとき、その地点の地質学的位置づけを理解することは前提であり、その理解がない場合は、かえって大きなリスクを負うことにもなる。この点で、地質の岩相および分布形態の解釈が示された5万分の1地質図幅は重要な意味合いを持つようになる。すなわち事業に係る地質調査プロセスにおいては、5万分の1地質図幅に示された地域特有の地質分布モデルに基づいて事業対象地域の精細調査を行い解釈するのが合理的であり、そこに産総研と地質調査業との明確な役割分担が生じることになる。また、大学を始めとする近年の地質分野の学術研究が地質調査業界のニーズと乖離してきている状況も地質図類の重要性を高める要因となっている。堆積岩類を一例に考えると、近年の

大学での研究は、堆積モデルの構築あるいは層序の国際対比など、地質現象そのもののモデル構築に主眼を置く傾向がある。このような研究は地質分野の発展において極めて重要であり今後も続けていくべき課題ではあるが、事業を行うにあたり実施される地質調査とは大きな隔たりがあり、そのような研究は事業では直接参照できないことが多い。一方、産総研の地質図類は、大学等で構築された最新の地質現象モデルや最新の手法に基づいてそれぞれの地域を実際に調査研究し、最新の地域地質解釈を表現したものである。つまり地質図類は、大学等の学術研究と地質調査業界とを結ぶ研究として位置づけられるものであり、そこに公的研究

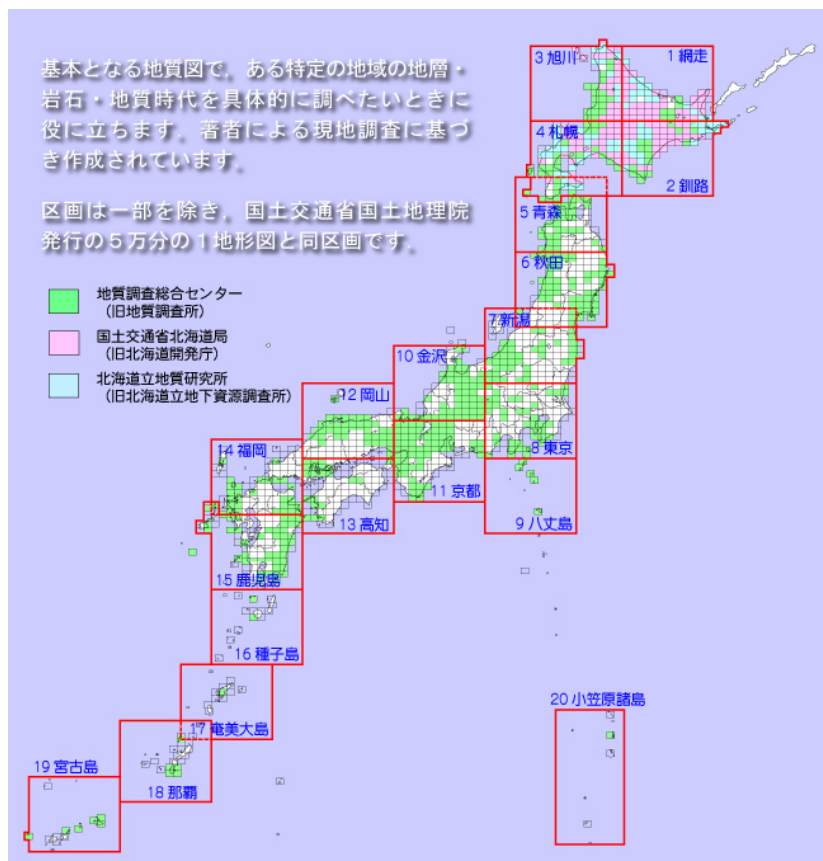


図 1. 産総研地質調査総合センター5 万分の 1 地質図幅の既発行区画

機関としての役割と、近年検討されている事業コストに係わる地質リスク低減という面での産業界への貢献が指摘できる。

地質図 HP : <http://www.gsj.jp/geomap/>

地質図カタログHP : <http://www.gsj.jp/Map/>

オンライン地質図 (シームレス地質図) HP : <http://www.gsj.jp/geomap/online/online.html>

2.2 データベースによる調査研究データの公開

地質リスクマネジメントにおいては、解釈された地質情報のほか、解釈の根拠となるオリジナルデータが重要視される。産総研の調査研究で得られた地質情報は、地質図類あるいは論文等各種報告書によって公表されるが、紙面の都合もあり必ずしも得られた地質情報全てが公表されるとは限らない。地質調査総合センターでは既に公表されたデータのみならず、未公表の詳細オリジナルデータ、コンパイルデータ、研究のトレーサビリティを確保するうえで必要な地質標本の登録データなど、各種地質情報のデータベース化とその公開を推し進めており、それら地質情報を総合地質情報データベース (GEO-DB) として統合化する試みを開始している。

総合地質情報データベース (GEO-DB) HP : <http://www.gsj.jp/Gtop/geodb/geodb.html>

3. ボーリングデータの流通・利活用促進に関する取り組み

産総研のさまざまな調査研究では、独自の地質調査データのみならず、既存のデータをも利用して総合的に地質を解釈することがしばしば求められる。特に平野部の調査の場合、

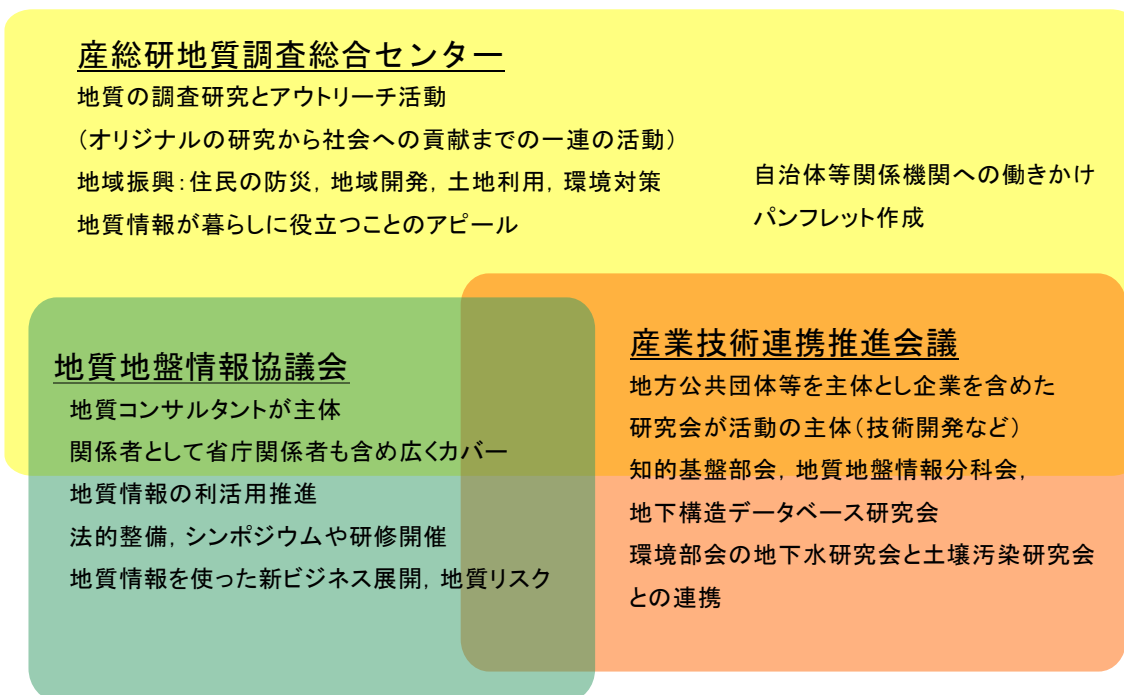


図2. 地質調査総合センターと地質地盤情報協議会, 産業技術連携推進会議との関係

独自に行うことができるボーリング調査は限られているため、その間を補完する大量の既存ボーリングデータ（特に建築・土木工事のデータ）は極めて重要な位置づけにある。このようなボーリングデータの多くは、自治体や他省庁等、さまざまな関係公的機関、大学より提供を受けており、一部の機関では既にデータベースが整備されている。しかし、地質地盤情報整備は必ずしも各機関で重要性が認知されたものではなく、これまでのデータベース整備にはかなりの困難を伴ってきたというのも事実のようである。このような状況を考慮し、産総研は、産業技術連携推進会議地質地盤情報分科会および地質地盤情報協議会を設立し（図2）、自治体等各機関作成のボーリングデータベースのユーザーの一員として、自治体および企業のメンバーとともに既存データの流通・利活用の促進について検討してきた。また、産総研はそれらの活動によりまとめられた意見を関係機関に提言する役割を担っており、今後ともこのような産学官活動を継続する方針である。

3.1 産業技術連携推進会議

産業技術連携推進会議（産技連）は、自治体（公設研）相互、及び産総研との協力体制を強化し、産業技術の向上を図ることによって、産業の発展に貢献することを目的とした会議である。メンバーは自治体および産総研で構成されるが、産技連の下に設けられた研究会には企業を含め誰でも参加できるようになっている。産技連の中で地質地盤に関係する分科会としては、知的基盤部会の地質地盤情報分科会（会長：産総研 栗本氏，事務局：地質調査情報センター）がある。また、この分科会の下に地下構造データベース研究会（会長：埼玉県環境科学国際センター 八戸氏）が設けられている。この分科会および研究会は、地質地盤情報の収集・統合・共有化を効率的に図ることを目的に、これまで自治体相互および産総研との間で、地質地盤情報整備に関する問題点や方向性等について情報交換、意見交換を行ってきた。

産業技術連携推進会議 HP : <http://unit.aist.go.jp/collab-pro/sgr/index.html>

3.2 地質地盤情報協議会

地質地盤情報協議会(会長:産総研 栗本氏)は、関係企業、大学・研究機関、政府関係機関、自治体等の情報交換と広域連携により地質地盤情報をさまざまに活用するインキュベーションを先導し、情報交換や新規事業の可能性を検討することを目的として設置された。協議会は、地質・地盤情報の重要性や施策に関して横断的・双方向的に議論できる場として、これまで意見交換会や講演会・シンポジウムなどを開催してきた。そのひとつの成果として協議会では後述の地質地盤情報の整備・活用に向けた提言書を取りまとめ、関係諸機関に配布・提言した。また、本協議会は地質情報を活用する新たな事業を生み出す協議と連携の場としても活用されている。地質リスクとリスクマネジメントに関する検討も本協議会の大きなテーマのひとつである。

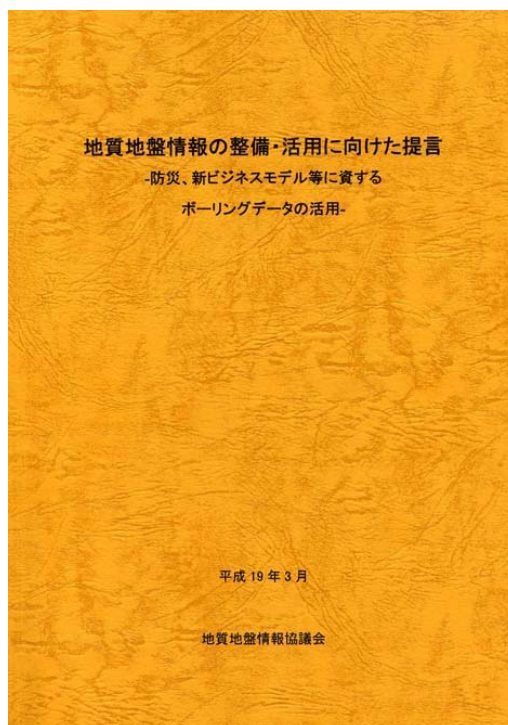


図3. 地質地盤協議会で取りまとめた提言書

地質地盤情報の整備・活用に向けた提言

-防災、新ビジネスモデル等に資するボーリングデータの活用-

地質地盤情報協議会では、平成18年度に、協議会会員をはじめ関係各機関の参加の下、地質地盤情報の整備・活用について5回にわたる意見交換会を実施し、その結果を基に平成19年3月に提言書「地質地盤情報の整備・活用に向けた提言-防災、新ビジネスモデル等に資するボーリングデータの活用-」(地質地盤情報協議会, 2007; 図3)を取りまとめ、関係省庁、地方公共団体、企業等に配布した。本書では、地質地盤情報とその整備の重要性、法的整備を含めた施策策定と関係各機関の連携による新ビジネスモデル創出のためのシステム作りの推進などの必要性を提言している。なお、本提言書は下記地質地盤情報協議会HPからダウンロードが可能である。

地質地盤情報協議会HP: <http://www.gsj.jp/Sgk/consortium.html#annai>

産業技術連携推進会議および地質地盤情報協議会は随時会員を募集しております。

参加のご希望、お問い合わせの際は下記担当者までご連絡ください。

担当: 下川浩一・中澤 努(産総研地質調査情報センター)

Tel: 029-861-3672 / E-mail: t-nakazawa@aist.go.jp

引用文献

渡邊法美・佐橋義仁(2007)地質に係わる事業リスクへの対応と地質情報. JACIC 情報, no. 86, 58-63.

地質地盤情報協議会(2007)地質地盤情報の整備・活用に向けた提言-防災、新ビジネスモデル等に資するボーリングデータの活用-. 地質地盤情報協議会, 38p., CD-ROM付.

石油探鉱・開発における地質リスク評価

高山邦明（国際石油開発株式会社）

1. はじめに

地下深部にある石油鉱床を求めて探鉱井を掘削するには1本あたり数億から数十億円の費用を要するが、石油を発見できる確率は高くない。期待どおり石油が見つかって採掘のための開発となると規模にもよるが数百億円以上の投資が必要となるが、予想どおりの生産の保証は難しい。しかも、初期の莫大な投資を回収できるのは生産が進んだ先になることから、油価や為替が変動すると当初のもくろみが大きく外れることがある。石油探鉱・開発がリスク産業の代表と言われるゆえんである。

「石油探鉱は博打（ばくち）のようなもの。当たるも八卦当たらぬも八卦，失敗を怖れては何もできない」—かつては地質屋（Geologists）の山師的・職人芸的な「勘」を信じて投資が行われてきた。しかし、1990年代の油価の低迷，探鉱の進行に伴う鉱床発見確率の低下に伴い，リスクの程度を把握し，投資判断の材料にすることが求められるようになり，地質リスクの定量化に向けた方法論が議論された。現在ではほとんどの石油会社が地質リスクを定量的に評価し，その結果を踏まえた経済性評価を系統的に実施している。

本講演では石油探鉱・開発に付随する様々なリスクのうち，地下の不確実性に関わる地質リスクについて評価の現状を紹介する。

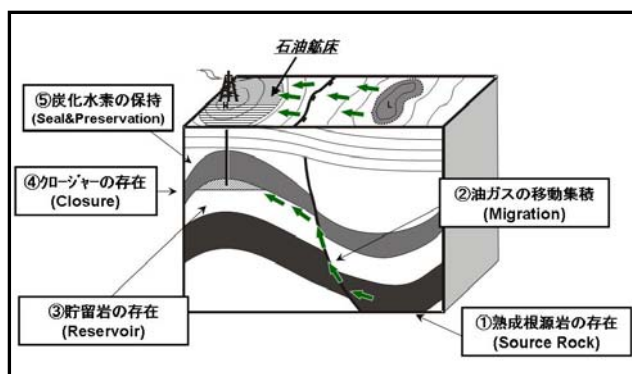
石油鉱床の存在，その規模など地下の事象には様々な「不確実性（Uncertainties）」が存在する。その不確実性を伴う事象に投資という行為を行うことによりはじめて損失の「リスク（risks）」が生まれ，同時に利益を得られる「チャンス（chances）」が生じる。石油探鉱・開発に携わる技術者が評価するのは厳密に言うとリスクではなく不確実性であり，不確実性を精度よく評価することにより，リスクとチャンスを定量的に見積もって投資判断に活用することができる。

2. 石油探鉱・開発の地質リスク

2.1 地質リスクの特徴

石油探鉱が博打と呼ばれるようにリスクが大きい理由の一つには鉱床が地下深部（2～5+km）に存在し，地表からその存在や胚胎状況を直接予測することが難しいことにある。3次元地震探査法など新しい探査技術が生み出され，かつてよりも手法は進歩しているものの，一方で容易に探査可能な対象は減り，地震波が到達しにくい断層下盤，岩塩層下といった難しいプレーや地表条件が厳しい地域での探鉱が増えている。

石油鉱床が成立するためには多くの条件が満たされる必要があることも胚胎予測を難しくしている。大量の有機物が堆積し，時間をかけて地中深く埋没して石油が生成し，主に浮力によって移動する。石油が散逸することなく効率よく構造に集積し，そこに石油を十分貯めうる孔隙を有した貯留岩が存在し，貯留岩が背斜など石油を保持できる形態（クロージャー）を成し，さらに貯留岩は緻密な岩石



石油システム

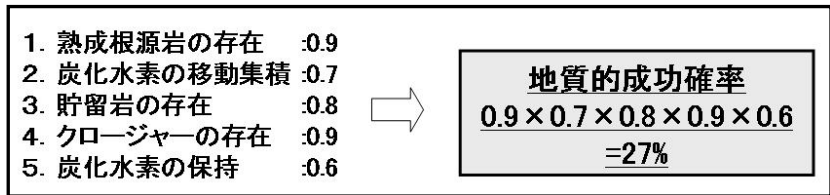
で覆われて（シールされて）石油がそこに留まるような仕組みが必要である。熟成根源岩、石油の移動・集積、貯留岩、クロージャー、シールという5つの条件が満たされた「石油システム」が成立してはじめて石油鉱床が形成されるのであり、条件が一つでも欠けると鉱床にならない。

石油探鉱では石油システムの一つ一つの要素について存在の可能性を評価し、発見する確率として表現する。また、鉱床が存在する場合を想定し、鉱床規模について不確実性を考慮して確率論的に評価する。うまく鉱床が発見されると評価のための井戸を追加掘削して情報を収集するが、情報量が増えても埋蔵量を一つの数字で言い当てることは困難であることから、開発段階にあっても不確実性が残る。

2.2 地質的成功確率の算定

石油の胚胎が期待される構造（プロスペクト）にはじめて井戸（試掘井）を掘削する際には石油が発見される可能性を地質的成功確率（Geological Chance of Success）として算定する。「地質的」と呼ぶのは油田の成立につながるような埋蔵量の発見（経済的成功）と区別するため、試掘井で石油が地表まで流出する最少量の埋蔵量が発見する可能性を指す。

地質的成功確率の算定では、石油システム成立に必要な5つの条件について個別に評価を行い、各条件が成立している可能性を0から1までの数値で示し、その積として成功確率を計算する。積となるのは要素の一つでも存在可能性が低いとそれが確率に大きく影響し、極端なケースでもし一つの要素の存在可能性が0であれば成功確率もゼロになる。



地質的成功確率の計算例

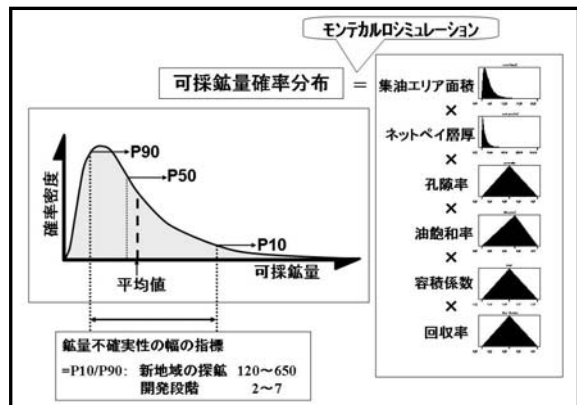
探鉱の難易、情報量によって成功確率は異なり、試掘の場合、一般的に数%から30%代の確率となる。1960～1999年の10年ごとの統計データを見ると、世界の試掘成功率の実績は平均24～27%である。

リスクの数値化には導入当初抵抗が大きかったが、石油システムの各要素について定量的に存在可能性を示しておくことにより、不成功であった場合でも事前評価の妥当性を検討し、技術力の検証や技術課題の抽出につながる事が明らかになっている。

2.3 プロスペクトの確率論的可採鉱量評価

試掘により石油が発見された場合、期待される採掘可能量について不確実性を考慮して確率分布として評価する。可採鉱量は一般的に下記のパラメータの積として計算される。

- 油層の広がる面積（集油エリア）
- 油層の厚さ（ネットペイ層厚）
- 貯留岩中の隙間の割合（孔隙率）
- 孔隙中の石油が占める割合（油飽和率）
- 地下から地表に石油を移した時の



モンテカルロシミュレーションによる期待可採鉱量の算定

容積変化（容積率）

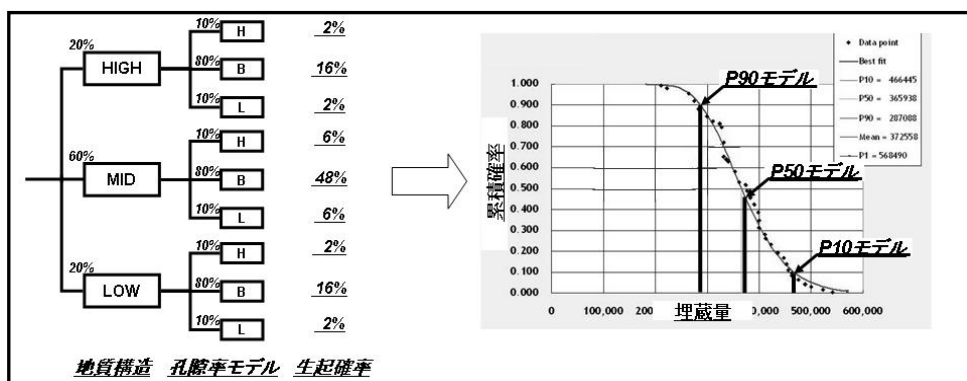
f. 採取できる石油の割合（回収率）

こうしたパラメータの値を一つの数字で言い当てることは不可能であることから、確率分布として表現し、可採鉱量を求める積の計算において、各パラメータの確率分布に従ってランダムに数値を選び出して計算を行うことを繰り返し実施するモンテカルロシミュレーションを適用し、可採鉱量の確率分布を求める。パソコンの性能向上により、数千～数万回の繰り返し計算も簡単に実施することができる。

得られた可採鉱量確率分布はたとえば平均値といった代表値で表現することができるが、それだけでは不確実性の程度を示すことができない。そこで、鉱量の大きい方から確率を加算して累積確率分布を作成し、たとえば、5億バレルを上回る確率が10%（10パーセンタイル：P10）、8,000万バレルを超える確率が50%（50パーセンタイル：P50）、1,000万バレル以上である確率が90%（90パーセンタイル：P90）と表現する。すなわち、P90は悲観的ないし堅めに見積もった鉱量で、逆にP10は楽観的ないし可能性のあるアップサイドポテンシャルの指標となる。両者の比P10/P90は確率分布の幅、つまり不確実性の度合いを示し、情報が増えるに従って一般的にP10/P90は小さくなる。

2.4 開発対象油ガス田の埋蔵量評価

試掘により石油が発見されると追加で評価井を掘削し、油層の広がり、厚さ、貯留岩性状（孔隙率や浸透率等）に関するデータを収集して、埋蔵量の把握に努める。探鉱初期段階で数10～100以上の値を示したP10/P90比は減少するが、開発の段階でも2～7程度と不確実性が残る。評価のために油田に満遍なく坑井を掘削することはコストとの兼ね合いから不可能であり、不確実性を残したまま開発の意志決定を行うことになる。開発には探鉱段階よりもはるかに大きなコストが必要となることから、埋蔵量の不確実性に依拠して生産プラントの規模、生産計画等について想定される様々なシナリオを描いて検討することが求められ、不確実性を考慮して地質モデルを複数作成し、油層シミュレーションを実施して生産予測を行うことになる。地質構造や孔隙分布パターンといっ



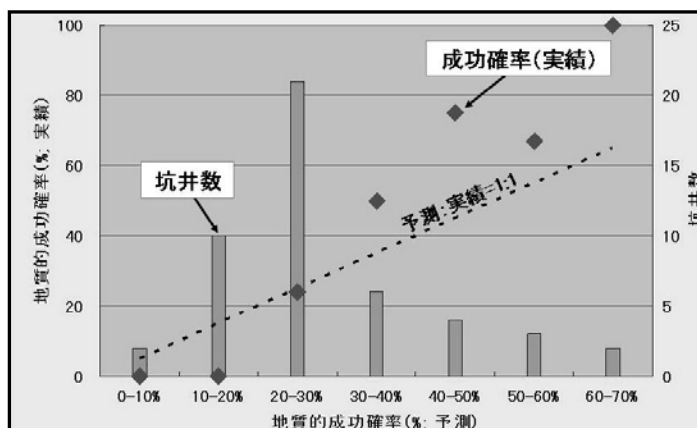
マルチシナリオ法による不確実性評価

た地質モデルの要素を組み合わせる複数の地質モデルを構築し、個々の要素の生起確率から各シナリオの生起確率を求めて累積確率をプロットすることにより、不確実性を評価すると共に埋蔵量の確率（P90、P10等）に相当するモデルを抽出することができる（マルチシナリオ法）。最近では実験計画法も適用されている。

3. 地質リスクの事後評価（ポストオーディット）

地質リスク評価の妥当性を検討するために、井戸を掘削する前の評価と掘削結果、すなわち井戸の成功、不成功、成功した場合の埋蔵量と事前評価を比較することが行われ、ポストオーディット（Post Well Audit）と呼ばれている。

地質的成功確率については、ある程度の数の掘削結果が出た時点で成功確率の予実績を比較する。事前予測の確率に基づいて事例をグループ分けし、各グループについて実際の成功率を計算して予測と比較することにより、事前評価の妥当性をチェックする。さらに、結果が不成功であった場合、その不成功原因である要素を事前評価でも高いリスク要因として認識していたのかを確認する



地質的成功確率の予実績比較

ことも重要なポストオーディットである。たとえば、成功確率算定にあたり、「貯留岩の存在」に0.9と高い可能性の評価を与えていたにもかかわらず、掘削の結果、貯留岩がなかった場合には事前の貯留岩評価の問題が指摘される。

期待埋蔵量評価については、事前評価の確率分布と掘削後の再評価値を比較する。埋蔵量と共に孔隙率、飽和率など埋蔵量算定のパラメータについても予実績を比べて事前評価を見直すことが大切である。確率分布の予実績評価では、掘削結果（結果にもまだ不確実性があるため確率分布で表現されるので、たとえば分布のP50値を代表値とする）が予測のP50や平均値に近いことが予測の妥当性を示すのではなく、複数の事例を集めた場合、確率分布の幅によって示される様々な埋蔵量値となることが良好な評価であることに注意が必要である（時にP90であったり、P10であったりするはずで、もしP50に近い数字ばかりになったとすると、事前評価で不確実性を大きく見込みすぎていたことになる）。

地質リスクは確率論に基づいて評価されていることから、予実績比較には統計的な手法が必要であり、ある程度の数の評価事例が集まらないと適正なポストオーディットは実施できない。ポストオーディットはリスク評価の精度向上につながると共に、技術評価の弱点を知り、課題を抽出するための重要なプロセスになる。

4. おわりに

地質リスクを数値として定量的に表現する方法は石油探鉱・開発において今や一般的となっており、地質リスク評価に基づいた経済性評価が行われている。投資案件ごとにリスクとリターンが示されることにより、案件の組み合わせとしてのポートフォリオを検討し、分散投資によるリターンの安定化、一定のリスクに対してより高いリターンを目指したポートフォリオの最適化といったプロジェクトマネジメントも可能となっている。

定量的な地質リスク評価の導入により、技術者もリスクへの認識が高まり、評価において従来のように最もありそうな姿を一つ描き出すだけでなく、技術的な不確実性を明示することに重点が置かれるようになった。経済性に最も影響を及ぼす要因を把握することができることから、重点評価項目を抽出できる。アップサイド（楽観ケース）、ダウンサイド（悲観ケース）のシナリオを正しく把握することは、たとえば、生産プラントのキャパシティを決めるために求められる。

地質リスク評価は経済性評価だけに役立つのではない。評価が定量的に示されているため、ポストオーディットを通じて技術力を継続的にチェックすることが可能となり、技術評価上の課題を明確にして技術力の改善につながっている。

土木地質におけるリスクとその管理

脇坂安彦（独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ）

1. はじめに

最近の社会は環境リスク、災害リスクなど様々なリスクを含んでおり、リスク社会と呼ばれている。今田(2007b)は、「リスク社会とはたんにリスクが増大しているだけでなく、それ以上に、リスクに対して敏感になった社会を表す」としている。このような情勢を反映して、地質および関連分野の学会誌などでも、リスク関係の特集や講座が多く企画されている（「土と基礎」、52巻，4～9号，2004年；「応用地質」、48巻，6号，2008年など）。

国土交通省では、公共工事の目的物の機能と品質の確保の両立を図りつつ、コスト縮減を可能とするため、総合評価落札方式など新しい入札契約方式の活用を図っている。この新しい入札契約方式の一つに「設計・施工一括発注方式」がある。従来、公共工事における設計と施工は分離して発注されてきたが、工事の内容によっては設計と施工を一体的に発注する方が、発注者にとって有利な調達が期待できるとしてこの方式が始められた。設計と施工が分離発注される場合は、施工者は設計に関与しないことから設計段階のリスクは発注者が担っている。また、施工段階で発生するリスクは、設計が確定した時点で内在化するため、設計を確定した発注者が担っている。よって、リスクアセスメントは発注者側に必要であった。一方、設計・施工一括発注方式では、受注者が設計と施工を一体として行うため、リスクに関する上述の考え方は必ずしも成立せず、発注者と受注者とでリスクを分担する必要がある（設計・施工一括発注方式導入検討委員会，2001）。したがって、発注者、受注者の双方にリスクアセスメントが必要と考えられる。

リスク社会を迎え、また、入札契約方式に新方式が導入されている中で、公共工事の計画・設計・施工に当たって実施されている地質調査にも、調査結果を評価するに当たって、リスクアセスメントを行い、リスクを管理する必要性が生じている。本稿では、国土交通省の公共工事の中で特に地質調査が系統的に実施されているダム建設事業を対象に、そこで生じる地質に起因するリスクとその管理の現状について述べる。

2. 土木地質におけるリスク

2.1 リスクの定義

リスクには様々な定義がある。たとえば、日本リスク研究学会(2008)におけるリスクの記述を要約すると次のようになる。

- ① <一般>潜在的な悪影響，望ましくない影響。
- ② <一般>事態の確からしさとその結果の組み合わせ，事態の発生確率とその結果の組み合わせ（事態とは，必ずしも危険な事態を意味するのではなく，ある状況では，予想との乖離のこと）。
- ③ <健康影響・疫学>原因によってもたらされる悪影響の確率が計算できるにすぎない悪影響。
- ④ <保険・金融>危険事故により損失が発生する可能性。
- ⑤ <安全工学>危害（事象）の発生確率およびその危害の重大さ（事象の結果）の組み合わせ。
- ⑥ <原子力・放射線>線量を受ける確率と，その被爆によって生じる放射線学的影響との積。

JIS Q 2001「リスクマネジメントシステム構築のための指針」では、リスクを上記の②と同一の定義としているが、備考では、「ある状況では、リスクとは予想との乖離のことである」としている。昨年刊行された「リスク学入門」全 5 巻（橋木ほか，2007；橋木，2007；長谷部，2007；今田，2007a；益永，2007）を通して、一般的なリスクの定義は、望ましくない事象の生起確率とその事象の大きさの組み合わせである（たとえば、益永(2007)）。以上のようにリスクの定義には、かなりの場合、確率の概念が含まれている。

しかし、私たちが日常使用しているリスクという用語に、確率という概念が常に含まれているだろうか。広辞苑第 5 版（新村，1998）では、リスクは①危険，②保険者の担保責任とされており、確率の概念は含まれていない。日常使用しているリスクは、この「危険」に極めて近いものと思われる。一方、リスクという言葉が生まれた欧米の辞書（Gramercy Books, 1989）では、chance または degree of probability という表現がされており、確率の概念が含まれている。リスクという用語の起源には、確率的な概念が含まれていたが、用語がわが国で使われ始めたときには、その概念が抜け、単に危険を指すようになったものと推察される。

リスクにかかわる確率に関しては、吉川(2007)によれば、ヨーロッパ環境庁のレポート（EEA, 2001）の区分では、ハザードと確率がわかるものは「リスク」、ハザードは同定できるが確率が未確定のものは「不確実性」、ハザードも確率も未確定のものは「無知」とされている。

2.2 地質分野におけるリスクの定義

リスクの一般的な定義に従うと、地質におけるリスクは、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なる。しかし、一般的なリスクと同様に地質におけるリスクの定義も様々であることが推察されるので、日本地質文献データベースでリスクをキーワードとして抽出された 165 件の文献のうち、入手できた 70 件について、リスクの定義の有無、確率の概念の有無を調べてみた。

図-1 のように 70 件の文献のうち、それぞれの文献で用いているリスクの定義がされているのは約 30%，確率の概念があるのは同じく約 30%である。定義、確率の概念ともに分野によって割合は異なっており、確率の概念が多いのは地震の分野で約 60%，その他の分野では 20～30%である。地質の諸分野において扱われているリスクには、あまり確率の概念はないようである。

確率の概念がない文献のリスクの定義には次のようなものがある。

- ① 地震災害に対して有する潜在的な危険性を地震リスクと定義する（国吉ほか，2004）。
- ② 土木地質に限っていえば、リ

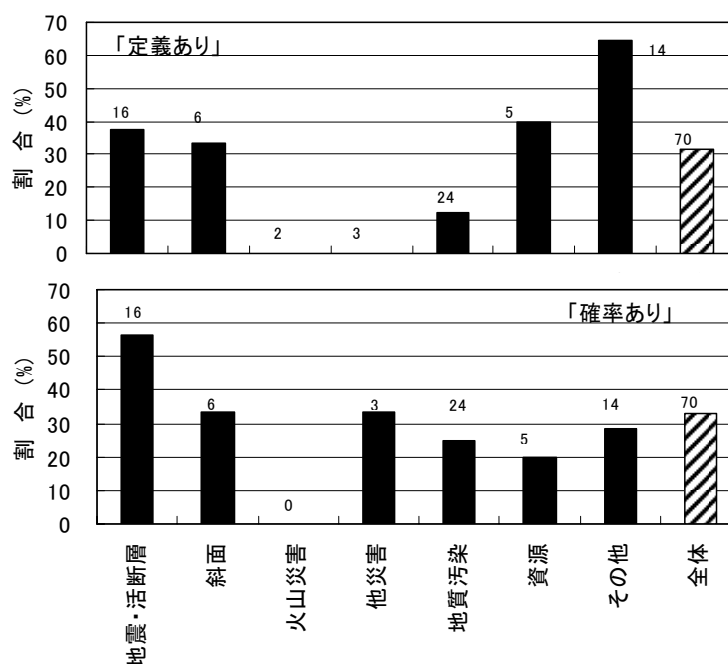


図-1 リスクを扱っている地質分野の文献におけるリスクの定義と確率の概念があるものの割合。図中の数字は文献数。

スクとは「プロジェクトにおける期待値からのはずれ量」であり、「想定地質からのはずれの程度と内容」と言い換えることができる（フィールドの達人編集委員会, 2007）。

③ 地質条件の不確実性に起因するリスク要因（以下地質リスクと称す）（大津ほか, 2007）。

④ 土壌汚染状況調査を適切に実施しても把握できない土壌汚染が何らかの契機で顕在化し、問題が生じることがある（見逃しリスク）（前川, 2004）。

また、70件の文献には含まれていないが、（社）全国地質調査業協会連合会(2007)は、地質リスクを地質調査結果の不確実性と定義し、不確実性要因を地質条件推定時に潜在している誤差（地質的・地質工学的な属性値の幾何学的な分布形状のずれ、属性値の想定以上の変化）、予見できない地質条件の急変（断層、軟弱層、変質帯の出現など）としている。

2.3 土木地質におけるリスクの定義

土木地質におけるリスクの定義は、土木構造物の設計・施工に反映することを考慮すれば、できるだけ定量的であることが望ましい。したがって、ここでは理想的に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する。ただし、EEA(2001)に基づくと、土木地質の場合には地質事象の生起確率が未定の場合が多いため、「土木地質の不確実性」を呼ぶべきであろう。

2.4 土木地質における望ましくない地質事象

土木地質における望ましくない地質事象とは、土木構造物の立地場所の変更、設計変更、事後対策などを要する事象である。望ましくない地質事象には、活断層や地すべりのように自然状態で望ましくない地質事象が生じるもの（自然現象）と、土木構造物の存在や施工過程が望ましくない地質事象を生起させるもの（たとえば切り土によって発生する斜面崩壊など）（人為的現象）とがある。

土木地質における望ましくない現象のうち、人為的現象は対象とする土木構造物によって異なる。具体的には、重力式コンクリートダムでは、安定性上、望ましくない事象として、大規模断層破碎帯、低角度不連続面、深層風化、熱水変質、流れ盤など、止水処理上は、開口割れ目、深層風化などがある。他方、フィルダムでは、低角度不連続面は安定性上の望ましくない事象ではない。

3. 土木地質におけるリスク管理

3.1 土木地質におけるリスク管理

土木地質におけるリスク管理（リスクマネジメント）は、他の分野におけるリスク管理と同様、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リスクの評価、④リスクが許容可能かどうかの判断、⑤リスクの対策から構成される。以上のうち、①～③はリスク分析、①～④はリスクアセスメントである。

3.2 望ましくない地質事象の特定

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る。このためには、公共工事の計画段階から系統的な地質調査をおこなう必要がある。ダム事業では、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おこない、望ましくない地質事象の見逃しがないように努めている。

3.3 望ましくない地質事象の生起確率

土木地質における望ましくない地質事象の生起確率は、その事象が当該箇所が存在するかどうかを表す存在確率とその事象が存在する場合に望ましくない事象となるかどうかを表す狭義の生起確率に区分されると考えられる。したがって、広義の生起確率は、存在確率と狭義の生起確率を掛け合わせたものとなる。

存在確率は、ある程度、過去の事例から地質ごとに帰納的に求めることができるが、精度はよくない。狭義の生起確率を求めるには、過去の事例に基づく帰納的な推定と演繹的な推定とがある。過去の活動履歴から将来の活動確率を推定する活断層などは、帰納的な推定である。演繹的な推定をおこなうには、信頼性設計の破壊確率などを算出する必要がある。いずれにしても狭義の生起確率を求めることは、困難である。現状では、生起確率の高低を帰納的に求めるか、安定解析の安全率から推測している。存在確率、狭義の生起確率の双方を求めることが困難であるため、地質事象には不確実性があるといわれるのである。

3.3 望ましくない地質事象の影響度

望ましくない事象の影響度は、現状では各種の安定解析などから所用の抑止力などを求め、その大きさをもって影響度とみなされている。

3.4 リスクの評価と対策

リスクの評価は、望ましくない地質事象の影響度とその事象の生起確率の組み合わせによって行われる。ダム事業の予備調査段階では、図-2の1)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、回避、すなわちダムサイトの変更が行われる。実施計画段階から建設事業段階の設計時には、2)のような低減すべきリスクが残っている。依然として影響度、生起確率が未確定であるので、それらを絞るためにさらに詳細な地質調査が行われる。現状ではダム設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、事象によって定められた所定の安全率を満足するか否かによって、0または1に区分される(図-2の3))。生起確率が1となった場合には、影響度の大きさが安定解析などによって算出され、回避、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(断層を掘削し範囲を狭めるなど)、構造物の大きさを大きくし、生起確率を減じることなどがある。

2)の段階でそれ以上の詳細な地質調査が行われない場合は、安全率に準じて生起確率が0または1に区分される。この際、最高のリスクを想定すると不経済になる場合があり、逆に最低のリスクを想定すると危険な設計となる場合がある。

4. 土木地質におけるリスク管理

限られた予算の中で公共工事を安全かつ経済的に行うため、また、説明責任の向上のためにも、土木地質に関わるリスク管理は今後ますます重要になっていくものと思われる。

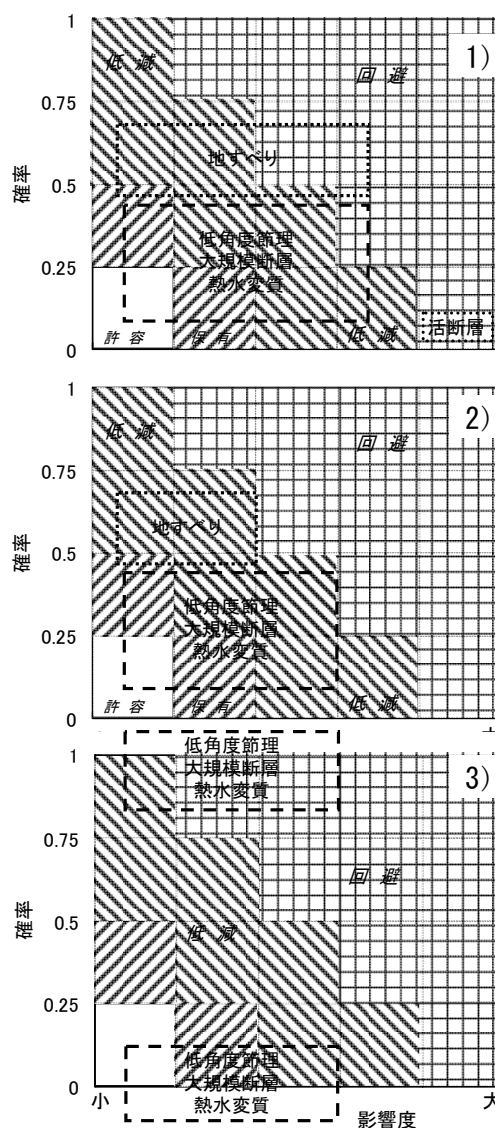


図-2 ダム事業の各段階における土木地質リスク

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

佐橋義仁（株式会社 建設技術研究所）

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ない。

「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。

また全地連は、地質に関わる学界との連携の中で技術を磨いてきたことから、学界的性格も有しており、開発した技術を公共調達の技術標準として提案することも行ってきた。ここで開発しようとしている、地質リスクの計量化方法、リスクのプロセスマネジメント手法、データ収集様式などの技術は、国内公共調達の技術標準になることを目指している。

2. 地質リスクに取り組む上での課題

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、コスト削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。先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行くもので、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は何らかの基準を満足する必要があると考える。

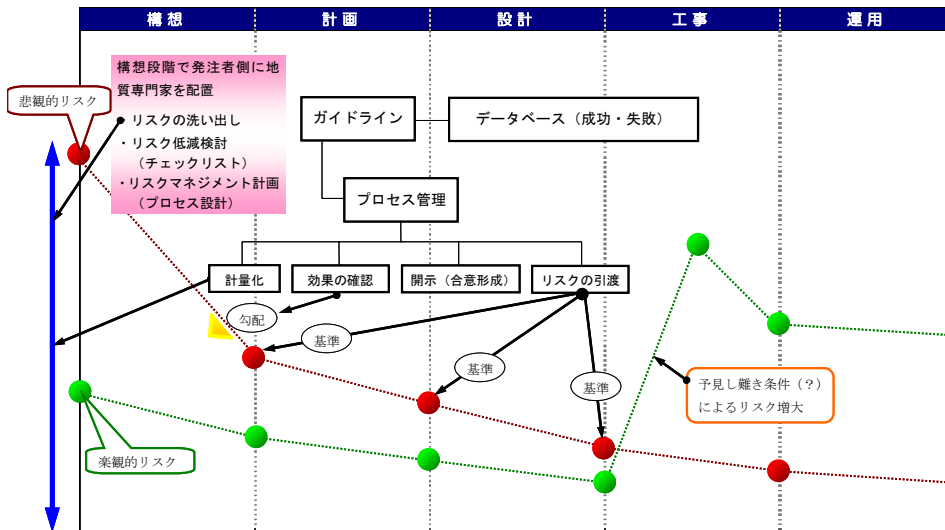


図-1 地質リスクマネジメントのイメージ

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、図-2に示すように法務顧問・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とは立場が異なる。

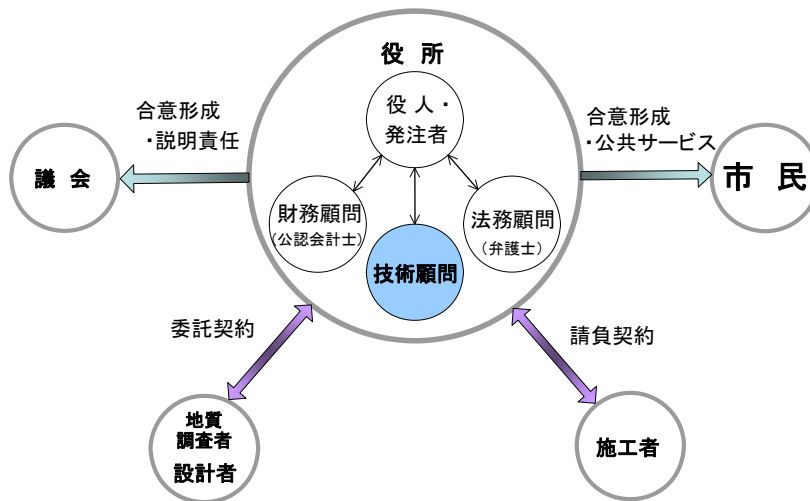


図-2 技術顧問の位置づけ

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. 計量化へのアプローチ(事例収集とデータ様式の作成)

地質リスクマネジメントの3点セットのうち,「技術顧問」と「プロセスマネジメントシステム」について説明したが,残る1つ「計量化」は最大の課題である.

4.1 事例収集

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を,

$$\text{効果} = (\text{当初工事費}) - (\text{変更後工事費}) - (\text{リスク対応費用}) \quad (\text{式1})$$

と考える.

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,

$$\text{効果} = (\text{変更後工事費}) - (\text{当初工事費}) - (\text{リスク対応費用}) \quad (\text{式2})$$

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し様式化できるなら, データの蓄積・共有化が可能となり,
- ・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

などを推進できる.

また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.

一方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ト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表の登録を義務付けるならば, データを自動収集することができる.

国外における地質リスクの認識とリスクマネジメントの動向

—全地連「地質リスク」海外調査の趣旨と背景—

小笠原 正継（産総研 地質情報研究部門）

1. はじめに

全地連（全国地質調査業協会連合会）は平成18年度に「企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会」を設置し、地質リスクに関する調査・研究を行い、報告書をまとめた（全地連，2007a）。その委員会に委員として参加し、主として国内における地質事象の把握の不確実性に起因するリスクの事例を検討する機会を得た。近年、国内において、地質状況を把握する際の不確実性の議論（近藤，2000）や、地質リスクや地質調査におけるリスクマネジメントについての議論が行われている（大津ほか，2007，物理探査評価研究小委員会基盤内弱層検討ワーキンググループ，2003）。そこで、委員会では海外における地質リスクに関連する状況把握の必要性が議論され、海外調査の準備も始まった。ここでは平成19年9月30日から10月3日にわたり米国カリフォルニア州で実施された全地連「地質リスク」海外調査の趣旨とその背景を示し、国外における地質リスクの認識とリスクマネジメントの動向の概要をまとめる。

2. 全地連地質リスクWGによる海外事例の検討

平成17年度に全地連の技術委員会の中に地質リスクWGが設置され、「地質に係わる事業リスク検討報告書」が公表されている（全地連，2006）。地質リスクWGでは公共建設事業等における地質に起因するリスクに関して、リスクの定義付けやリスクマネジメント手法の研究事例についての調査を行っている。その報告書には幾つかの海外の事例が紹介されている。スイスアルプスを貫く長大山岳トンネルの計画段階での地質構造解析例では、悲観的解釈と楽観的解釈の2種類の地質平面図と断面図を作成し、施行時に困難が生じると考えられる地質体についての不確実性の変動幅が示されている。また、欧州の山岳トンネル建設プロジェクトでは地質工学的不確実性による建設コストと工期への効果の評価手法の紹介や、国際トンネル技術協会の「トンネル建設工事におけるリスクマネジメントのガイドライン」が紹介されている。

平成18年度の「地質リスクに関する調査・研究」報告（全地連，2007a）では、海外における事例について、さらに詳細な調査を行い、スイス、フランス・イタリア、スウェーデン、ネパール、マレーシア、カナダ、米国の事例から地質リスクの要因、リスク計量化手法等が評価された。上記のスイスアルプスの山岳トンネルの例は、伊熊(2006)がその詳細を議論している。これまで地質リスクに関する調査は文献をもとにしており、より直接的・最新の情勢を把握するため、海外調査の必要性が地質リスク委員会およびWGで認識されていた。また文献調査では、地質リスクが工事に大きな影響を与える長大なトンネル工事における事例が多いが、それ以外の各種建設工事における事例が少なく、それらの調査も必要であることが指摘されていた。こうして、海外調査の必要性が示された。

3. 金属鉱物資源の評価における地質的要因把握の不確実性の取り扱い

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は多い。特に石油資源探査部門では地質リスクとその

リスクマネジメント手法が開発されている。石油資源探査では地下数千メートルに存在する鉱床を探査する事が多く、その様な地下深部の地質状況の把握には不確実性が大きい。したがって、その不確実性に起因するリスクのマネジメントの必要性は高い。

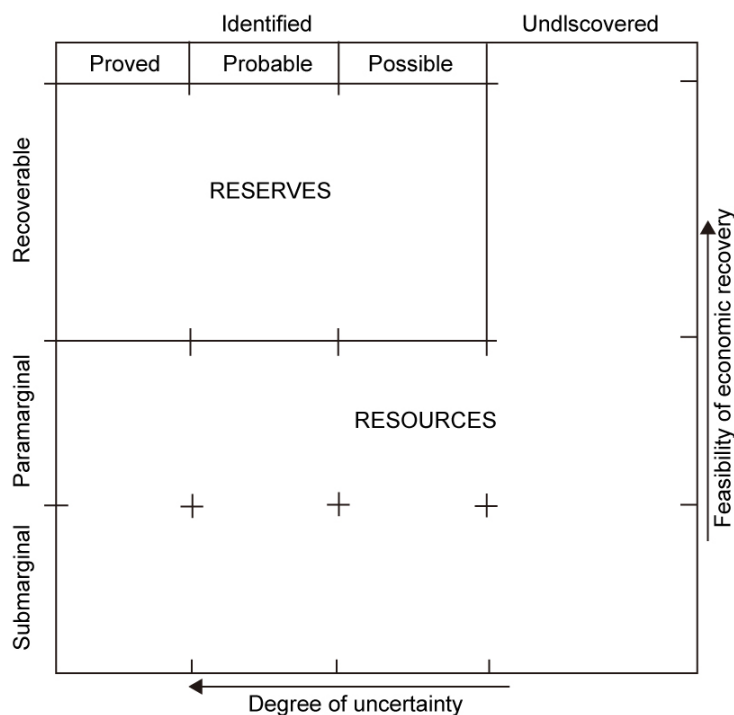
一方、金属鉱物資源探査では、地下数百メートルに存在する鉱床の探査が主であり、地質状況把握の不確実性とそのリスクの程度は石油資源探査とは異なる。金属鉱床の場合、鉱床の単位体積当たりの価値（金属価格）が大きく、その価値に見合っただけの地質調査が可能となる。また金属鉱山における採掘技術の物理的制約と経済性の点から採掘可能深度が限定される。そのため、各種の探査手法により、3次元的な鉱床形態の把握が可能となっている。

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(ore reserve または reserve)である。McKelvey (1973)は横軸に「地質学的確実性(certainty)」, 縦軸に「経済性」をとって定義した。確実性(certainty)は不確実性(uncertainty)の反対の指標である。第1図に示すように、確実性の程度により、埋蔵鉱量は確認埋蔵鉱量(proved reserve), 推定埋蔵鉱量(probable reserve), 予想埋蔵鉱量(possible reserve)に分けることができる。すなわち、地質学的不確実性の低いものから、不確実性がより高いものまで、その程度により区分されている。

McKelvey(1973)の埋蔵鉱量の定義後、幾つかの定義が提唱されてきたが、最近では国連による埋蔵鉱量の定義(UNFC: United Nations International Framework Classification for Reserves/Resouces)が一般的になってきている。この分類では資源を表現する指標として、経済性(economic and commercial viability), 可能性 (field project status and feasibility), 地質条件(geological knowledge)の3つの軸で区分している。地質条件については地質情報が増えればその不確実性がより減少し、より確実な鉱量が定義される。

すでに述べたように金属鉱物資源の場合、採掘が始まる前に精度の良い鉱量評価が行われており、そのデータをもとに効率的な採鉱計画を立てられる。また鉱山開発は選鉱・精練工場の建設や必要なインフラストラクチャーの建設を含む事もあり大きな投資が必要である。そのため、多数のボーリングデータに基づく綿密な鉱量評価があり、鉱山開発の工事開始時には地質的不確実性が限りなく低いという状況になっている。この点は、公共建築工事の工事開始時での地質条件の把握における不確実性の程度と大きく異なる。また採鉱の開始後も、一般に日々の鉱床調査が行われており、その後の採掘計画に反映されている。

金属鉱物資源開発においては、新しい地域での探査を担当する探査地質専門家(exploration geologist)と鉱山内で採掘に伴い新たに露出する地質を記載する鉱山地質専



第1図. 資源量の分類

門家(mine geologist)の役割が分かれている。鉱山地質専門家はその鉱山の地質に関するホームドクターのような役割があると考えられる。鉱山開発開始後は鉱山専門家の役割が大きい。

4. 米国における公共事業の発注と施工における課題とリスク管理システム

今回の米国調査では、地質リスクマネジメントの情報を得るため、米国内での公共事業等における地質調査業務の実施形態を把握する事も大きな課題であると考えられた。そのため、事業の構想、計画、発注から工事完成まで、また保守管理の各段階での地質調査の役割を見る必要がある。米国は良く知られている様に、何らかの問題が生じると、訴訟を起し、裁判所での最終判断を得る事が一般的な社会である。公共事業等においても、工事の様々な段階で各種の技術的困難に直面するとその責任の所在を裁判所で争うことになる。このような社会の中では、地質リスクをどのように捉え、そのリスクをどのように管理するかが大きな課題となっている。

米国における、地質技術者の判断に起因すると考えられる工事の失敗における賠償請求等のケースは、米国地質学会の特集号に“地質技術者と法的責任”というタイトルで詳述されている(Waggoner and Kiersch, 1991)。

米国政府発注の土木工事の請負契約においては、Differing Site Conditions (DSC)の条項を含めることが求められており、州や地方政府の発注工事においても同様な処置がとられている。この条項により、当初の計画では推定されていないような地質状況により施工上の問題が発生した場合、工事請負業者は発注者へ追加費用に関して請求ができることを規定している。同様な条項は米国以外の国でのプロジェクトでも認められる(清水, 2005)。

地質状況の把握に不確実性を多く残す、トンネル工事等の地下構造物の建設工事においては、予測できなかった地質状況の変化に伴うリスクマネジメントの必要性はさらに高い。このような状況で、Geotechnical Baseline Reports(GBR)が明確に定義され、工事入札において非常に重要な情報となってきた。GBRにより発注者と工事請負業者との間のリスクの分担が明確に示され、裁判所における判断にゆだねることが減ると考えられる。GBRの特徴とそのガイドラインの解説書の第2版が2007年に出版された(Essex, 2007)。今回、海外調査の前にGBRの内容を検討することが出来たことの意義は大きい。

応用地質分野における地盤状況の把握における不確実性の課題とリスクマネジメント手法についてはvan Staveren (2006)に解説されている。その中で、米国におけるGBRの現状についても解説されている。

今回のカリフォルニア州における調査では、米国の工事の発注における一般的状況は事前に把握していた情報とは大きく異なっていなかった。しかし、カリフォルニア州では大規模なトンネル工事等の地下構造物の工事の例が少ないため、GBRによるリスクマネジメントの認識は少なく、またその実例は少なかった。今回第4日目に地すべり対策としてCaltransが建設しているDevil's SlideトンネルではGBR作成されており、Caltransとしては数少ない例の一つである(全地連, 2007b)。

5. まとめ

今回地質リスクWGが米国カリフォルニア州を海外調査の最初の地域として選択するにあたり、様々な検討が行われた。今回の調査結果の内容を見ていただければ、最初の海外調査地域として最適な選択をし、今後の海外調査を行う上でも貴重な情報が得られたと理解していただけるだろう。

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位置している。付加体等の共通する地質体の存在、活断層に伴う地震活動など日本と共通の地質リスクの存在が考えられる。日本同様に、地すべり等のリスクも大きく、詳細な地すべりマップの作成も行われている(Pike, 1997)。このような地域における工事事業発注者や地質コンサルタントを訪問することで貴重な情報が得られた。

またサンフランシスコ郊外のメンロパークには米国地質調査所西部支所があり、地質情報の整備状況、またそれらをアウトプットすることで、いかに社会の受けるリスクを軽減するかと言う課題について米国の状況が把握できた。

文献

- 物理探査評価研究小委員会基盤内弱層検討ワーキンググループ (2003) トンネル地質調査におけるリスクマネジメントシステム導入の提唱. 応用地質, 44, 36-47.
- Essex, R. J. (2007) Geotechnical baseline reports for construction. The American Society of Civil Engineers, 62pp.
- 伊熊俊幸 (2006) 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, 50, 21-28.
- 近藤達敏 (2000) 地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価. 応用地質, 40, 340-345.
- McKelvey, V. E. (1972) Mineral resource estimates and public policy. American Scientist, 60, 32.
- 大津宏康・酒井悠・尾ノ井芳樹 (2007) 地質リスクがプロジェクトの事業性評価に与える影響に関する研究. 材料, 56, 858-865.
- Pike, R. (2006) Index to detailed maps of landslides in the San Francisco Bay region, California. U. S. Geological Survey, Circular 1290, 44pp.
- 清水国夫 (2005) 'unforeseeable'への備え. 応用地質, 46, 189.
- 全地連 (2006) H17年度 地質にかかわる事業リスク検討報告書. 64pp.
- 全地連 (2007a) 「企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会」報告書 - 地質リスクに関する調査・研究 - . 61pp.
- 全地連 (2007b) 「地質リスク」海外調査ミッション報告書ー米国カルフォルニア州における地質リスクへの対応状況調査ー. 49pp.
- van Staveren, M. (2006) Uncertainty and ground conditions: a risk management approach. Elsevier. p.321.
- Waggoner, E. B. & Kiersch, G. A. (1991) The geologist and legal responsibilities. Geological Society of America, Centennial Special Volume3, 559-573.

米国カリフォルニア州の建設事業における地質リスクマネジメント

ー全地連「地質リスク」海外調査の成果ー

長瀬雅美（応用地質株式会社 ジオテクニカルセンター）

1. 米国訪問の概要

全地連では平成17年度に、地質条件に起因する建設事業リスクを軽減するための方策を検討することを目的としたWGを設置し検討を行ってきた。本WGの米国訪問は、これまでの日本国内の研究成果を踏まえて、建設工事の契約において責任分担とリスク分担が明確にされていると考えられる米国内で実際に発注者や受注者の地質リスクに関する対応を調査することを目的としたものである。

米国訪問は、平成19年9月30日から平成19年10月3日間であり、米国地質調査所(USGS)、カリフォルニア州運輸局(Caltrans)¹、民間の発注企業であるPacific Gas and Electric社²、民間の地質コンサルタントであるFuguro West社³、カリフォルニア大学ディビス校(UCDAVIS)などを訪問してヒアリングを実施した。

ここでは、上記の訪問先の中から建設事業に関係する機関である、Caltrans、Pacific Gas and Electric社、Fuguro West社の調査結果を報告する。

2. GBRのガイドライン（米国土木学会）

この報告では、GBR(Geotechnical Baseline Report)、GDR(Geotechnical Data Report)という名称が使われる。GBRおよびGDRは、米国土木学会(ASCE)が2007年にガイドラインとして制定した「Geotechnical Baseline Reports for Construction- Suggested Guideline」の中で定義されている名称である。

2.1 GBRの位置づけ

GDRは、地質調査の結果を事実に基づいて記載した報告書であり、日本でも通常見られる報告書である。

GBRは、GDRに記載された事実を解釈して、地盤条件に起因する建設工事のリスク分担と管理手段を検討して基準となるベースラインを記載した報告書である。ガイドラインでは、建設工事におけるリスクマネジメントツールとしてのGBRの合理的な使い方を示し、GBRの構成や内容を含めた提案をしている。GBRは、建設工事の契約における発注者と受注者の地質リスク分担の基準値(ベースライン)を示す文書である。このため、GBRは、地質リスクに対するリスク管理のツールとしても利用される。

米国でも、建設工事の入札や契約において、地質に関する多くのデータは受注者にとって非常に重要なものであるが、地質データの最終的な解釈は受注者(契約者)が行い、コストや工期を決めてきた。また、工事の契約書では、一般的に、発注者がデータ解釈に伴うリスクを負担しないことが一般的であった。

このような状況の中で、発注者と受注者が地質に関するリスク分担を共有するツールの

¹ 州内の道路やサンフランシスコ近郊の鉄道の整備等を行う州政府機関でカリフォルニア州における土木工事の主たる発注者。州内各地に多くのプロジェクトを抱えており職員数も多く、また地質技術者も含まれる。

² カリフォルニア州北部と中央部にガスと電気を供給する会社で1905年に設立された。約2万人の職員がいる。カリフォルニア州の1,500万人の住民にガスと電気のエネルギーを供給している。

³ Fuguro社はオランダのハーグに本社を置く企業連合で、従業員数は9,800人以上、世界50カ国以上に事務所を置いている。主たる業務は海洋・陸上の地質・地層、環境などの調査、石油・ガス開発やパイプライン敷設などへのサービス、地球物理探査などで、2006年の売上額約2,256億円。Fuguro West社は米国西部を営業エリアとしている。

必要性が認識され、リスクのベースラインを記載した GBR が提案されて ASCE によって呼称が定義された。

2. 2 ガイドラインで示される GBR の内容

GBR は、地質に関するリスクの幅に対してベースラインを示すことによって契約を確定するための根拠となる。たとえば、実際の地質条件が想定されたベースラインを超過した場合、発注者は追加の工事費用を支払うことになるが、ベースラインを超えない場合には受注者がすべてのリスクを負担することになる。このような考え方は、米国に從前から存在する入札を伴う設計・施工 (Design-Bid-Build) や通常的设计・施工 (Design-Build) の調達方法とは異なるものであり、GBR は以下のように利用される。

<GBR の主な利用>

- 建設工事の工法や手順などの詳細検討のための参考資料
- 受注者が、設計・施工の組織や建設コストの評価をするための参考資料
- 受注者が予測する地質リスクの評価資料、および、工法、手順、ツールなどを選択するための参考資料
- 予測できない地質条件と遭遇した場合の、状況判断や発注者と受注者のリスク分担に関する資料
- GBR に示されたベースラインを超過する状態と遭遇した場合の対処の方法を検討する資料

ASCE の GBR ガイドラインでは、GBR の目的や必要性、GBR の記載内容、種々の地盤条件に対するベースラインのコンセプト、ベースラインの設定コンセプト、契約書との関係などが示されている。表 2-1 には、GBR ガイドラインの目次を示した。

表 2-1 GBR ガイドライン目次 (ASCE)

| | |
|------|-------------------------|
| 1. | まえがき |
| 1.1. | レビューの必要性 |
| 1.2. | GBR とは |
| 1.3. | GBR の目的 |
| 1.4. | この文書の概要と目的 |
| 2. | 背景 |
| 3. | 地質調査報告書 |
| 3.1. | GDR |
| 3.2. | 設計のための記録 |
| 3.3. | GBR |
| 4. | ローカルコンディションの相違 |
| 5. | ベースラインのコンセプト |
| 5.1. | ベースライン |
| 5.2. | 契約上の請負条項 |
| 5.3. | どこにベースラインをセットするか |
| 5.4. | ベースラインは予測できない状態への保証ではない |
| 5.5. | 他の契約文書とのリンク |
| 6. | GBR の準備 |
| 6.1. | 構成と目次 |
| 6.2. | GBR の執筆 (誰が、いつ、どのようにして) |
| 6.3. | リスクの記録 |
| 6.4. | 提案の表現 |
| 6.5. | ベースラインの例 |
| 6.6. | 調和、両立、堅実さ |
| 6.7. | 準備の時間と報酬 |
| 6.8. | オーナー (発注者) との連座 |
| 7. | 掘削や基礎の解釈 |
| 7.1. | 影響の増大 |
| 7.2. | 小さなプロジェクトのベースライン |
| 7.3. | リスクファクターの確認 |
| 7.4. | 検討 (考察) のためのベースラインパラメータ |
| 8. | デザインビルドの調達 |
| 8.1. | 現地踏査 |
| 8.2. | GDR |
| 8.3. | GBR |
| 8.4. | 最近の適用例 |
| 9. | オーナーの客観性 |
| 10. | 役割と責任 |
| 11. | 学習と教育 |

3. 行政発注機関における地質リスクマネジメント

3. 1 Risk Breakdown Structure (RBS) の利用

カリフォルニア州運輸局 (Caltrans) では、建設事業における地質リスクを含む一般的なリスク評価を Risk Breakdown Structure (RBS) で行うことが多い。RBS は、欧米では一般的なリスク評価手法の一つである。

RBS は図 3-1 に示すようなマトリックス (例) であり、図 3-1 の例では、発生の可能性 (Probability) を 1~5 の一定増分スコアで評価し、リスクが顕在化した場合に予想されるインパクトを 1~16 の倍数増分スコアで評価する。評価されるべきスコアは、縦軸の発生可能性のスコアと、横軸のインパクトのスコアを乗じて評価スコアとし、評価スコアの大きさから図 3-1 に示すように、1~6 を「低いリスク」、7~14 を「中程度のリスク」、15~80 を「高いリスク」と評価する。インパクトに関する具体的な規準は時間、コスト、スコープ、品質について各々例示されている。また、発生確率のランク付けも予想される発

生確率に応じて例示されている。

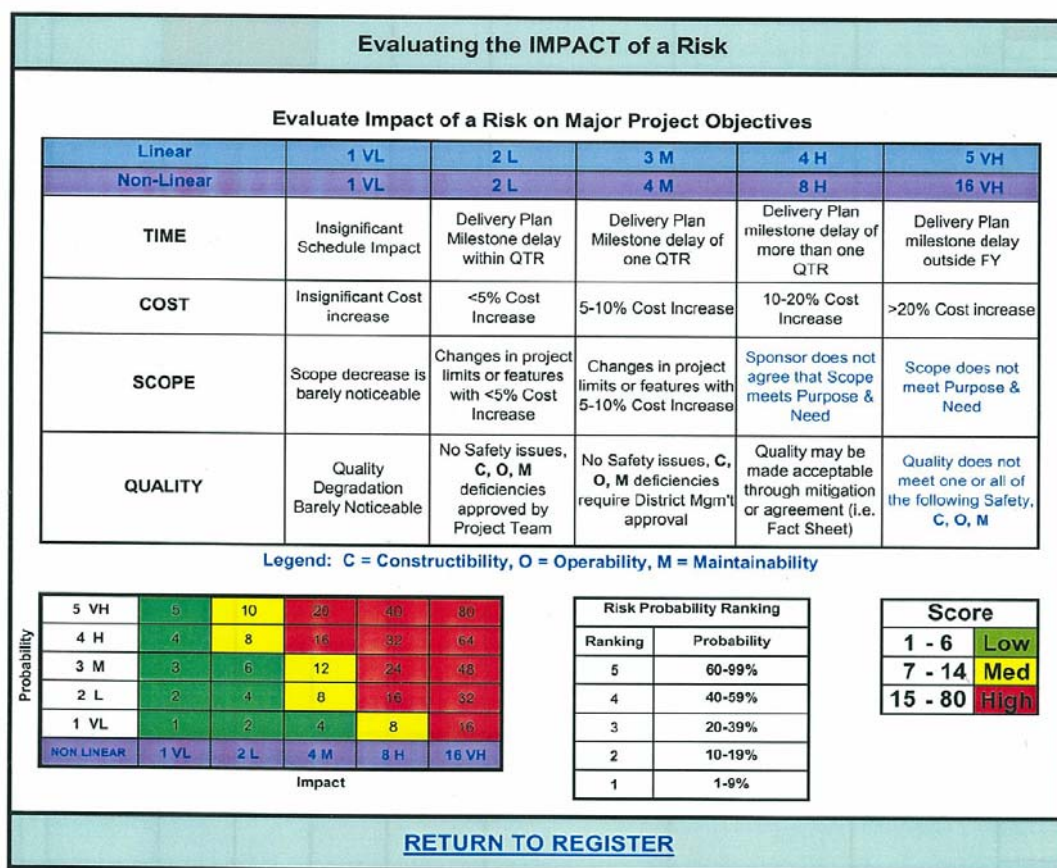


図 3-1 Risk Breakdown Structure (RBS) の一例 (Caltrans 提供資料)

3. 2 地質リスクへの対応

カリフォルニア州運輸局 (Caltrans) では、ベイブリッジ (New East Span San Francisco-Oakland Bay Bridge) プロジェクトのために 2002 年から本格的にリスクマネジメントシステムを構築してきた。

このリスクマネジメントシステムは、Caltrans で公表している “Project Risk Management Handbook” (2007. 5. 2nd Ed.) に準拠している。

建設事業で発生が考えられるリスクについては、「①最初の設計段階から建設完了段階まで」と、「②いわゆる維持管理段階」の 2 つに分けて評価している。

建設終了後の全てのリスクについては Caltrans が責任をもつが、建設する施設の種類によって、建設後の地質に起因するリスク (Geotechnical risk) の許容度を分類している。

トンネル、橋梁、大規模擁壁などの大型構造物では、かなり低いリスクしか許容しない。特に、トンネルについては、個々のプロジェクトについて GBR を作成している。

地質リスクについては、非常に重要な問題と考えているが、定量的な手法で解析することが難しいため Caltrans としても現段階では具体的な解析手法をもっていない。

過去に、地質リスクが顕在化する事象の一つである地下水湧水量の事前予想との大きな相違に関する建設会社からのクレームを受け、この対応で問題を抱えたことがあった。

この問題について、最近の大規模プロジェクト (New East Span San Francisco-Oakland Bay Bridge) では特別条項 (special provision) で地下水の湧水量を決めるための地盤定数

に関する情報を GBR で事前に与えている。しかし、このプロジェクトは現在、計画段階のため GBR を利用した成果は現段階で把握されていない。

4. 民間発注機関における地質リスクマネジメント

Pacific Gas and Electric 社 (PG&E) のリスクマネジメントは始まったばかりである。しかし、ここ 10 年から 12 年の間に既存施設のリスク評価 (Risk Assessment) を行ってきた。

4. 1 リスクマネジメント

リスク評価は主に地盤工学の技術者が実施している。リスク評価では地盤災害や地震災害による施設被害の大きさを主に地盤技術者が行っている。評価では、時々ミスもあるが、優れたリスク評価は優れた技術者が解決できると考えている。PG&E は地震リスクをその大きさに応じて、できるだけ定量的に区分し評価している。米国西岸では非常に多くの地震災害が起こる。地震に起因する施設の地震リスク評価としては、Management Assessment と PRA (Public Risk Assessment) がある。

地震被害のリスク評価は、発生確率または超過確率と被害量のイベントカーブから得られるリスクカーブを用いて定量的に予測を行っている。また、地震が起こった場合の被害については市民とのリスクコミュニケーションを行うように心がけている。リスクコミュニケーションについては日本の発電所などの地震リスクマネジメントが非常に参考になると考えている。

4. 2 工事契約

発注者は契約にあたって、受注者に最善の情報を与える必要がある。ASCE の GBR の詳細は承知していないが、同様の考え方はこの 10 年間取り入れている。もちろん、データベースも共通の情報として使用するが、地質情報の共有は、PG&E と契約者の間の共通ベースラインである。情報を共有しても工費の変更は生じることがある。

PG&E は独自の工事調達を行っている。州、郡、市等の自治体の調達とは関連を持っていない。特に、道路やパイプラインの調達方法は 20 年前間大きく変化していない。

地質調査の調達は、PG&E がアライアンスを結んでいる数社と話し合いで契約先と金額を決めている。しかし、交渉の基本となる工事金額は PG&E のエンジニアが決めている。契約先の選定では、工事費も重要であるが工期を非常に重要視している。

4. 3 地盤技術者の役割と GIS の利用

PG&E では、全体で 2,000 人の土木エンジニアに対しての 15 人の地盤技術者がいる。地盤技術者は人数が少ないため、特に重要なプロジェクトに参画する。

PG&E ではデザインビルドの発注はほとんど実施していないが、工事の性能は評価する。水路などの路線計画は、地質的な条件で決められたことはほとんどなく、別の要因で決定されることが多い。PG&E は、インハウスで地質調査を実施しない。地質調査は外部機関に委託する。しかし、調査内容や成果は自社のエンジニアが十分に検討する。また、PG&E では施設計画に際して GIS 等に集約されている地盤データベースを利用する。また、2,000 箇所程度の施設管理も GIS で管理を行っている。地盤データは Caltrans のボーリングデータを利用することがあるし、USGS の震度マップを利用することもある。

パイプラインなどの建設では環境アセスメントも重要である。アセスメントは内部の組織で実施する。

4. 4 地質リスクへの対応

PG&E では地質リスク (地質に起因する事業費変動リスク) を大きなリスクとして捉えていないようである。しかし、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

クマネジメントには大変注力している様子がうかがえた。このため、リスクカーブの活用などで地震災害のリスクマネジメントを定量的に行っているが、工事段階の地質リスクの計量化は行っていないと考えられる。このため、建設時の地質リスクに関するマネジメントも特に区別して行われていないようである。

しかし、ASCEのGBRを具体的には利用していないものの、発注者と受注者の地質情報の共有は確実に行われている。PG&Eでは、契約者の選定を日本のように見積りや入札などの金額競争だけで行わず、金額と工期(Cost Time)を基準にして行っている。このため、工期に係わる地質情報の位置づけを非常に高く置いていると感じた。

日本と異なり、非常に細かい事項までが契約書に盛り込まれ、責任分担とリスク分担が契約段階で明確にされる米国型の契約方法にとって、GBRが有効な文書の一つとなり得ることを実感した。

5. コンサルタントにおける地質リスクマネジメント

Fuguro West社では、CH2M Hill社⁴とWilliam Lettis & Associates社⁵の2社が同席して議論が行われた。議論では、William Lettis & Associates社から地盤リスクマネジメントにおける地質技術者の役割(Role of Geologist in Geo technical Risk Management)についての紹介があり、Fuguro West社とCH2M Hill社から、全地連があらかじめ準備して送付済みであった質問に対する回答と説明を受けた。

5. 1 地盤リスクマネジメントにおける地質技術者の役割

地質リスクマネジメントの概念的な方針としては、まずリスクを

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

と考え、図5-1に示すような流れでマネジメントする。

この流れの中で地質技術者が果たす役割は、現地の地盤評価ベースライン(Baseline Geotechnical Characterization)を明らかにして、何がどのように(場所、規模、頻度など)災害になりうるのかを地盤工学技術者(Geotechnical Engineer)に伝達することである。また、地盤工学技術者は、地質技術者からの情報を受け、災害を被る対象物の脆弱性を踏まえて理想的にはリスクの除去、それが無理なら土木工事によるリスクの低減、警戒システム、住民移転、保険、リスク保有などのリスクマネジメント戦略を検討する。

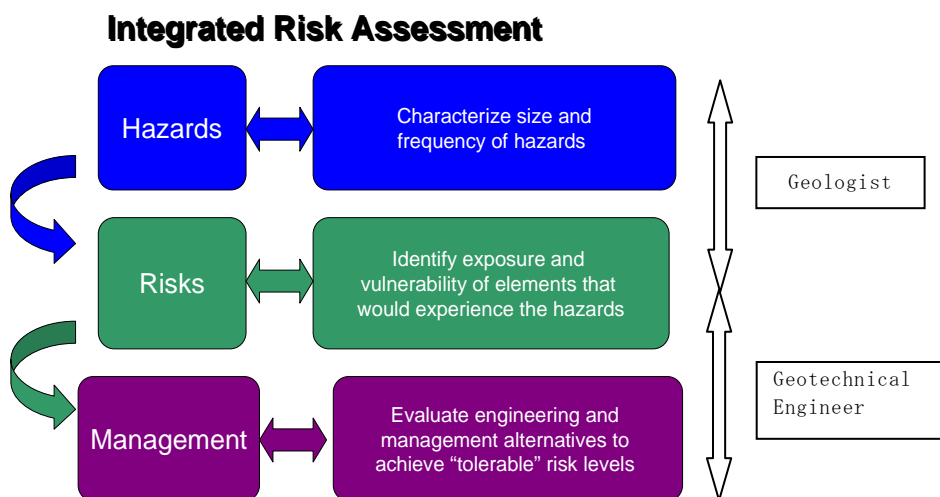


図5-1 リスクマネジメントの概念図
(William Lettis & Associates, Inc. 社提供より引用して加筆)

⁴ CH2MHill社はアメリカのデンバーに本社を置く運輸・エネルギー関連のエンジニアリング・コンサルタント会社で、2006年の売り上げは4兆6千億円(JV案件含む)、従業員は全世界で2万人。

⁵ William Lettis & Associates, Inc. は米国カリフォルニアに本拠を置く応用地球科学のコンサルタント会社で、特に原子力、エネルギー、水資源関連施設の地震ハザードアセスメントを主たる業務としている。従業員数は75名以上。

5. 2 米国コンサルタントにおける地質リスクマネジメントの知見

ヒアリングの結果次のような知見が得られた。

- ① 米国における Construction Management (CM) チームの地質リスクに対する役割は小さい。これは、設計施工分離方式の場合、発注者側の地質コンサルタントが提供する地質情報が契約条件となるためである。一方、デザインビルドにおいてはデザインビルドチームが全ての地質リスクを負っているため CM の役割はさらに小さい。
- ② オーナーが予備費を計上する際の技術支援は、発注者側の地質コンサルタントが行っており、CM チームは責任を負っていないようである。
- ③ リスクは、それを最も上手にマネジメントできる組織が負うべきとの考えがある。そうすることで最もスムーズに事業を進めることができ、結局は工期遅延もなくトータルコストも下がるということと考えられる。
- ④ デザインビルドチーム内に地質コンサルタントがいる場合は、建設会社に対してコストと予想される地質的課題についてアドバイスする。その場合のコスト変動リスクの分担については Alliance Contract の例が沢山あり、それらが参考になると考えられる。
- ⑤ 地質リスクマネジメントにおいて地質技術者が求められる役割は、リスク緩和のための最善策の提案、またリスクが発現した場合の最善のリカバリー策の提案などと考えられる。これらは、表現は異なるものの、サイトの地盤評価ベースライン (Baseline Geotechnical Characterization) を正しく行って想定されるハザードに対するリスクを特定し、適切なマネジメント策を提案するということと同義である。

6. まとめ

今回の米国訪問では様々な成果が得られた。この中で特筆すべき成果を以下にまとめた。

6. 1 有効な概念の導入

米国ではリスク研究が盛んで公共土木工事の調達にもその概念が導入されているが、その中でも GBR (Geotechnical Base Line Report), RBS (Risk breakdown structure) などは、有益な概念でありその適用実績を入手できたことは大きな成果である。

また、RBS は、いわゆる「悲観的リスク」からのリスク評価のアプローチを示唆するものと考えられ、当初に考えられるリスクの全てを洗い出すことの重要性を明らかにする優れた方法でもある。

6. 2 地質リスクの現場での取り組み状況の把握

行政発注機関 (Caltrans), 民間発注機関 (PG&E), コンサルタント (Fuguro West など) の訪問成果から、米国におけるそれぞれの立場での地質リスクへの取り組み方が把握できた。コンサルタント会社は、発注者側の技術者として、いわゆる「CM・技術顧問」として活躍している状況が把握できた。また、Geologist と Geotechnical Engineer の役割分担も興味深い。地質情報・地質技術を利用して自社の施設を管理している企業においては、工事費リスクよりも地震リスク (運用時リスク) の方が重要との認識があるが、両方とも事業リスクの要素と考えられ、今後の地質リスクマネジメントの応用・発展の方向性を伺うことができた。

日本の公共工事リスクマネジメントの歴史と将来の方向性

渡邊法美（高知工科大学）

1. はじめに

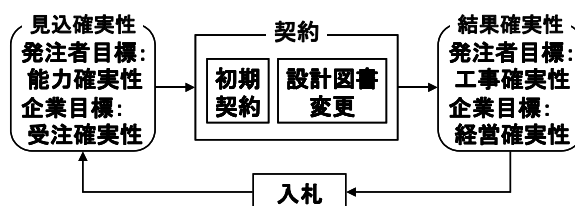
現在、わが国の公共工事の調達方式は大きな転換期を迎えている。その中で、リスクマネジメントの変革が最も重要な対応策の一つになると考えられる。本稿では、リスクマネジメントを具現化する入札・契約方式に焦点を当て、その歴史の変遷を概括する。その上で、地質リスクのマネジメントを念頭に置きながら、将来の入札・契約方式の方向性を検討することを試みる。

2. 入札・契約方式の基本目標

本来、入札の目的は、経営の確実性に富む企業の中から、公共工事の執行者である発注者の目標を実現できる企業を選抜することにある。契約行為とは、企業は発注者の目標を達成することを約束し、発注者は企業にその対価を支払う約束を交わした後、相互の約束を果たす一連の行為と捉えることができる。

したがって、理想の入札および契約制度とは、発注者が要求している工事の確実性と建設企業経営の確実性の好循環を実現できる制度であるといえる（図－1）。

以下では、入札・契約の実態の変遷を大まかに見ていくことにする。



図－1 公共工事の入札・契約制度設計の基本目標

3. 戦前入札・契約の実態

わが国では、公共工事に競争入札制度が導入されたのは、1890年の会計法制定以降である。しかし、図－1で示した工事と経営の確実性の好循環は、容易に実現されなかった。その第一の原因は、少額の保証金で参加することが可能であった価格競争入札制度であり、第二の原因は公共工事請負契約における片務性の存在であった。

第一に、総体的に請負者の技術力が低い状況の中で、少額の保証金を積めば参加できた競争入札制度を導入したことにあった。その結果は、特権的な大会社の没落と小企業の多数乱立であった。武田は工事の結果について「安い賃金で労働者をむさぼりながら、工事のノウハウなどの知識不足のために不完全な施工しかできないものがあとを絶たなかった。手抜き工事も起きた¹⁾。」と述べている。

第二の要因について、川島と渡邊²⁾はまず、契約書で示されるところの法規範命題に以下のように片務的性質が存在することを指摘した。「土建請負契約は、対等な法主体者との間の規範関係のカテゴリーであるところの「権利」・「義務」によって構成されているのでなくして、上級者から下級者への下命と、上級者から下級者への自由意思にもとづく恩恵的給付とを、その重要な構成要素としている、この点において、請負契約は、明瞭に片務的性質を有するものと認められなければならない。…法律規範の内容が、一方当事者の自

由意思にゆだねられているようなものは、近代法的な法律規範ではない。」次に川島と渡邊は、契約実務に現われる現実の規範関係は人情関係に基づくものであり、注文者と請負人との関係は、対等な関係ではなく、上級者下級者という権力支配関係にあると主張する。

以上から、川島と渡邊は、片務契約性を有する法規範命題、現実の法規範関係、上級者下級者という権力支配関係から構成される注文者と請負人の契約関係は、封建的契約関係にあること、並びに「封建的契約関係が近代的観念型態をとっているということのもっとも重要な意味は、それらの封建的な諸関係における権力関係が、近代法的範疇を通して国家権力の支持を得、それによってその強制力を補強しているという事実である。」と結論付けた。図-2において、川島と渡邊が明らかにした土建請負の封建的契約関係の構造を筆者の解釈に基づき図示した。

この解釈に基づいて、戦前の入札・契約の実態を図-3に示した。戦前の一般競争入札制度と封建的契約関係との組み合わせは、選抜された企業の能力の不確実性が経営の不確実性を増大させ、その結果、能力の不確実性がさらに増大するという「悪循環」が形成された一面があったと考えられる。このような状況において、入札の秩序を定着させるために展開された議論が、牧野の談合擁護論³⁾であった。

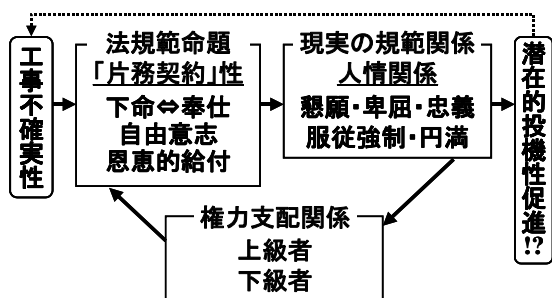


図-2 土建請負の封建的契約関係の一解釈

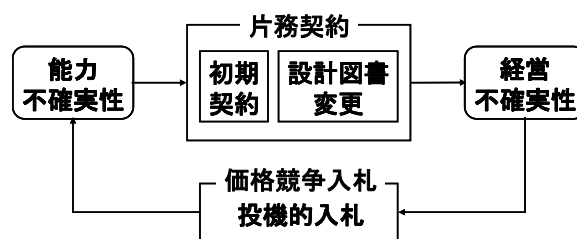


図-3 一般競争入札制度下における入札・契約の実態

4. 高度経済成長期以降の入札・契約の実態(1) - 談合・官製談合実施の根源的一因

戦後、指名競争入札の範囲が大幅に拡大する中で、「発注官庁側も、談合による受注を当然の前提として発注を行うようになり」、談合金によらないで利益調整を行う談合システムが形成されていった⁴⁾。ここでは、高度経済成長期の始まりを、東京オリンピック開催に向けて建設事業が飛躍的な発展を遂げはじめた1957,58年頃と設定する。本章では、談合ならびに官製談合実施の根源的一因を考察する。

4.1 発注者に求められる完璧性の要件

ここではまず、わが国の公共工事執行において発注者と建設企業経営において求められる要件をそれぞれ整理する。

わが国の多くの行政組織には、膨大な量の公共工事の「完璧な」執行、すなわち、過不足のない予算執行、一定水準の工事品質の確保、工事の年度内完工、会計検査への「無難な」対応といった「完璧性（無謬性）」の要請を実現することが求められてきた。

碓井は、「日本において行政に対する期待、逆に言えば、行政が自己に課している行政責任には、よく引き合いに出されるアメリカとは異なるものがある。それは、およそ工事が投げ出されるとか極端な疎漏工事などは絶対にあってはならないという考え方である。

事後的な損害賠償の議論などは、行政責任を重視する立場からすれば、ほとんど意味のないことなのである。工事の完成についての完璧主義と言ってよい⁵⁾。」と述べ、日米では行政の完璧性に対する期待感には大きな差異があることを指摘している。

4. 2 企業に求められる受注の絶対的現実性

わが国の建設企業経営では、受注の絶対的現実性が要請されてきた。

これは第一に、継続的に雇用している自社の従業員や傘下の下請業者への仕事を絶えず確保する必要があったからである。第二に、旧来の経営事項審査制度の客観的事項による得点において、完成工事高が占める割合が高かったからである。わが国の公共発注者は、この客観的事項の得点等に基づいて、各企業の格付けを決定する。企業が、目標としていた完成工事高を確保できない場合、その企業の次回の格付けは低下し、完成工事高も低下することを意味する。このように受注時期を明確にしつつ一定水準の受注量を確保することが極めて重要であった。

4. 3 発注者が採ってきた行動

発注者は、完璧性の要件を満たすために、a) 設計図書の精度が不十分なまま発注する、b) 施工者の現場生産性向上手段を制限する、c) 設計図書変更を「柔軟に」実施する、などの行動を採ることが少なくなかった。

a)については、設計の不備のために工事途中で修正を余儀なくされて、余分な費用が必要となる場合が少なくないといわれている。設計図書の精度が不十分なままの発注は、膨大な工事量を年度内に実施するためにされている手段の一つと解釈することができる。

b)については、旧来の指名競争入札制度では、一社しか保有していない技術は、標準技術とはならないという指定工法制度が存在していた。これは、予定価格を効率的に算出するための手段といえる。また仮設については、建前は任意仮設であるが、実際には指定仮設、或いは準指定仮設として扱われる場合が少なくない。これは、会計検査に対して無難に対応するための手段であるといえる。

c)については、海外の建設市場では、増額設計変更のための根拠として厳格な定量的根拠が求められる。これに対して、日本では別の工事名目で予算化することが多く、そのような厳格な根拠が求められない場合が多い。齋藤は、「個々の変更について発注者・受注者間で十分な協議が無いまま工事完成に至り、最終的に一括して契約金額の変更ないし工期の変更が、受注者の十分な納得の無いまま曖昧な形で決着する場合が多い⁶⁾」ことを指摘している。また、変更額の支払いについては、予算が十分に無い場合は、業者が損害を被り、予算が潤沢な場合に不足分を受け取るといった予算執行状況に応じた柔軟な対応策が採られている場合も少なくない。このような柔軟な設計図書変更対応は、過不足のない予算執行を実現するための手段の一つと解釈することができる。

4. 4 企業の潜在的な行動特性

建設企業には受注の絶対的現実性が求められている。このため受注競争が激化した場合企業は、工事利益を犠牲にする、或いは極端な場合は赤字工事も厭わずに受注を図ることが少なくない。このことは、目標利益水準が潜在的に不確定であることを意味する。

さらに、わが国の建設労働市場は歴史的に買い手市場であった。例えば内山は、日本の企業を「平均利潤の追求ではなく、別のもの、すなわち単に生きるために自家労働力を売る場としての企業⁷⁾」と表現している。受注競争が激化した場合、労働賃金は真っ先に「しわ寄せ」を受けることになる。労働賃金もまた潜在的に不確定であるといえる。

4. 5 談合と官製談合の意義

以上を要約すると、発注者は工事の年度内完工、無難な会計検査対応、確実な予定価格の算出、過不足の無い予算執行といった完璧性の制約を担保するために、柔軟な対応策を採ってきた。ただしこれらの柔軟な対応策は、入札者や請負者の不安を増大させている一面がある。さらに、わが国の建設企業経営と労働市場の特性から、目標利益水準と労働賃金に関する潜在的な分散もまた大きい。

これは、わが国の公共工事の落札価格は、潜在的に不確実であり大きな分散を有していることを意味する。すなわち、談合が成立せずに真の価格競争が行われた場合の落札価格相場は、入札者によって大きく異なっている可能性がある。事実、ダンピング入札では、入札価格が大きくばらつくことが多い。

ここに談合が不可避である一因がある。すなわち、競争入札によって決定される落札価格が潜在的に不確実な状況の下では、建設企業経営の見通しを立てることは容易ではない。このため、建設企業経営の要件である安定した受注量を確保することは著しく困難となる。一方、4. 2節で見たように、安定した受注量の確保こそ、わが国の建設企業経営の最大の目標である。目標を達成する有力な手段の一つは、談合によって競争入札を回避することであった。

発注者にとっても、談合は完璧性の制約を達成する上で好都合であった。まず、競争による落札価格の低下は、過不足のない予算消化の原則に反する。また、従来の不確実な監理体制下では、落札価格低減に伴って発生する可能性が高い品質低下の不安を払拭することも困難であったからである。落札価格や品質の不確実性低減の必要性こそ、発注者が談合を黙認することがある一因であり、自らが主導的な立場をとる官製談合が生まれた背景の一つでもあったと考えられる。

渡邊は、高度経済成長期以降の従来の実行方式を「安心」システムと呼んだ⁸⁾。安心システムは、談合入札と「安心」契約から構成されていたが、これは納税者意識が希薄であったことと潤沢な予算が存在したからこそ、存立が可能であった(図-4)。

しかし現在、安心システムを取り巻く二つの環境が大きく変化している。安心システムに代わって、見込みの確実性と結果の確実性の好循環を達成する新しいシステムの開発と運用が求められている。

5. 新システムの方向性

図-5に、新しい制度の構成を示す。

第一に、制度設計と運用の目標の一つであった「行政の完璧性(無謬性)の担保」を「国民の負託実現の担保」に変革する必要がある。過不足のない予算執行、会計検査院への無難な対応といった行政の完璧性は、行政以外の主体が本来負担すべきではないリスクを負担する誘因となっている。何が国民にとって真の利益かを再度明確にし、その実現を図るべきである。

第二に、片務的契約を信頼契約に変革する必要がある。発注者の片務的対応は、建設企業に不要なリスク負担を強いてきた。このような慣行は、直ちに廃止すべきである。設計図書精度を高め、設計図書変更の発注者の対応における論理性と一貫性を高めることによって、企業経営の確実性を高めることが可能になると考えられる。そのために、出来高部分払い制度の導入は不可欠である。

第三に、談合入札を総合的競争入札に変革することが必要となる。総合的競争入札の設計において留意すべき点は、わが国の今後の企業経営において、完成工事高の確保が依然として大きな役割を占めると考えられる点である。完成工事高確保の要請は、赤字工事も

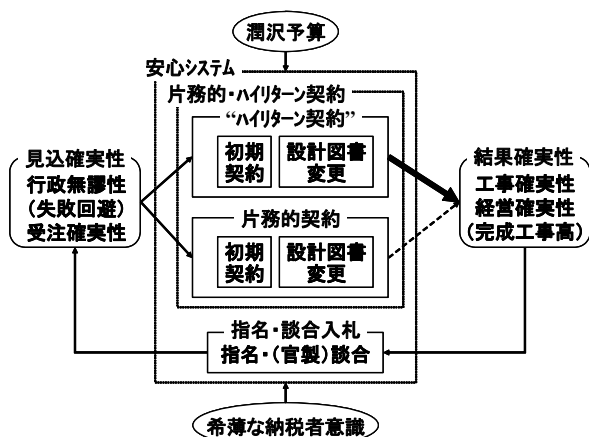


図-4 安心システムの構成

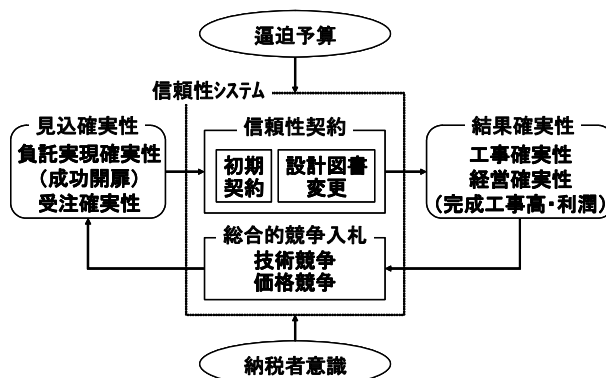


図-5 新システムの構成案

辞さないという入札姿勢を生むため、投機的入札を促進する可能性がある。利潤だけでなく一定水準の完成工事高を確保するために、企業が健全なリスクを負担するインセンティブを持つ制度を設計し運用することが極めて重要である。

6. 地質リスクマネジメントの現状と今後に関する一考察

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、「標準的」仕様が詳細に規定された設計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前提とする方式が実施される場合が少なくなかったと考えられる。

このマネジメント方式においては、請負者である乙は「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」の不安を抱える。一方、発注者である甲は、「乙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」という不安を持つ場合もあるようである。多くの場合、両者の不安は、指名競争や談合に基づく長期的な「貸し借り」の関係によって解消されてきたと考えられる。

しかし、これらの長期的な貸し借りの関係は、今後容認されにくくなると考えられる。発注者は、「適切な」量と質の地質調査を実施し、現場の特性を十分に把握した設計図書を作成し、設計図書変更に対しては、明確な基準を持って対応することが望ましいと考えられる。

そのためには、発注者の地質リスクマネジメント力を向上するとともに、「適切な量と質の地質調査とはどのような調査か」を明確にしていくことが求められる。

今後の地質リスクマネジメントにおいても、信頼性契約を実現していくことが必要であると考えられる。

7. 参考文献

- 1) 武田晴人：談合の経済学，集英社文庫，1999.
- 2) 川島武宜，渡邊洋三：土建請負契約論，日本評論社，1950.
- 3) 牧野良三：競争入札と談合，建設新書 都市文化社，1984.
- 4) 郷原信朗：独占禁止法の日本的構造，清文社，2004
- 5) 碓井光明：日本の入札制度について，公正取引，No.521，pp.22-25，1994.
- 6) 齋藤隆：受注者責任に基づく公共工事システム改革に関する研究，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.113-124，2005.

- 7) 内山尚三：談合問題への視点，都市文化社，1988.
- 8) 渡邊法美：リスクマネジメントの視点から見たわが国の公共工事入札・契約方式の特性分析と改革に関する一考察，土木学会論文集 F，Vol.62/No.4，pp.684-703，2006.

設計コードにおける地盤パラメータの特性値の推定と地盤調査

本城勇介（岐阜大学 工学部 工学研究科 社会基盤工学専攻）

1. はじめに

最近10年ほどの間、特にWTO/TBT協定に基く日本政府の政策、欧州におけるStructural Eurocodesの制定が明確になったことなどを背景に、設計コードの性能規定化や限界状態設計法の概念に基いた改定が盛んである（本城, 2000, 2002, 2004a, 2004b, 2007; 本城・松井, 2004, Honjo, 2007）。特に地盤構造物関連の設計コードの改定では、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値を決定するという、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設計に用いる地盤パラメータの特性値を決定するかと言う問題が、一つの焦点となっている。特にEurocode7の開発では、この問題が終始議論され、多くの関心を今も集めている（CEN, 2004; Orr and Ferrell, 1999）。この関連で、どの程度の地盤調査を行うべきかという問題も関心を集めている。この発表では、この特性値決定の問題について、最近の設計コードにおける動向を述べ、さらにこの問題に対する筆者の考えを述べたい。

特性値決定の問題に関連して、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。本発表では特にこの点を強調したい。

2. 設計コードにおける地盤パラメータ特性値の定義

2.1 設計コードの開発と特性値の定義

松尾(1984)は地盤構造物の設計を、「調査と試験、設計計算、設計代替案の評価、実施の全ての作業段階で生じる不確実性を認め、かつ理解しながら、現時点での最善の意志決定を下し、要請される安全性、使用性、経済性等を出来る限り満たす構造物を作っていく作業」と定義している。すなわち設計とは、不確実性下における意志決定問題として定式化できる。これとほぼ同様の事項を、別の表現で示したものに、Ovesen(1993)が

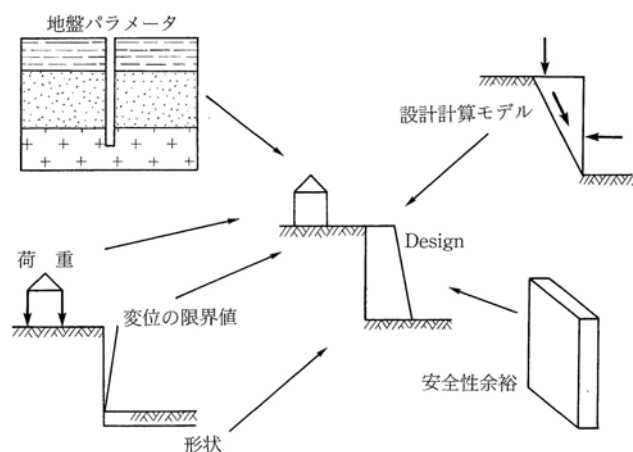


図-1 地盤構造物の設計に関わる諸要素

Eurocode7の開発の中で提案した図-1がある。この図は、地盤構造物の設計を構成する要素を説明したものである。設計では、荷重、地盤パラメータ（各土層の力学特性、土層構成、地下水の状態等）を決定し、計算モデルにより照査を行って構造物の諸元等を決定する。このときそれぞれの要素は不確実性を持つので、これを考慮して、その上で適切な安全性の余裕を導入する必要がある。この安全性余裕の程度を合理的に与えるのが、設計コードの役割であり、設計の課題である。

このような点が認識されると、地盤工学における設計が、鋼やコンクリートといった工業的に規格化された材料を用いる場合と大きく異なることが理解される。自然が提供する材料である地盤では、サイトごとに地盤調査と試験を行い、その地盤パラメータの値を決定しなければならない。どのようなサイトに建設される地盤構造物でも、コード作成者が意図した、種々の限界状態に対する均質な安全性余裕を確保するためには、各サイトで求められる地盤パラメータの特性値の決定方法が、ある程度標準化されている必要がある。そうでないと、地盤調査者や設計者の恣意的な判断により、導入される安全性余裕が、まちまちになってしまう。この理由により、特性値の決定方法は、常に大きな問題となってきた。例えば Eurocode7 では、これを「特性値は、限界状態の発生に影響を与える値の注意深い推定値 (cautious estimate)」と定義している。しかし、この定義をめぐる議論は依然として決着していない。

2.3 地盤工学会の設計原則 (JGS4001-2004) における特性値の定義

地盤工学会 (2005) の「性能設計概念に基づいた基礎構造物等の設計原則」(JGS4001-2004) では、地盤パラメータの特性値の定義を、次のように与えている (2.4.3 節)。

- a) 特性値は、設計で検討する限界状態を予測するための基礎・地盤のモデルに最も適切な値として推定された地盤パラメータの代表値である。
- b) 特性値の決定にあたっては、理論や過去の経験に基づき、地盤パラメータのばらつきや単純化したモデルの適用性に十分留意しなければならない。
- c) この特性値は、原則として導出値の平均値 (期待値) である。この平均値は、単なる導出値の機械的な平均値 (算術平均値) ではなく、統計的な平均値の推定誤差を勘案しなければならない。また、地質学的・地盤工学的な知見や過去の類似のプロジェクトで得られた経験を十分に反映し、複数の調査・試験法の計測結果の整合性 (調和性) などとも総合的に判断して求めた注意深い平均値の推定値でなければならない。

ここで、もっとも重要視されなければならないのは、地盤パラメータの特性値を平均値と規定していることである。このことによりこの値の決定に「安全側を見よう」等の、地盤調査者や設計者の恣意的な判断が入ることを避けようとしている。一方で、平均値を求めると言う明確な目標を与えることで、地盤調査結果の解釈に必要な多くの有益な工学的な判断 (Engineering judgment) は、これを奨励している。

なお、特性値に平均値を採用すべきであるという大きな理由に、設計計算で用いるモデルが複雑になるほど、基礎構造物の設計では、地盤と構造物の相互作用のため、個々のパラメータの値を割りいたほうが安全か、割増したほうが安全かは一概にいえない場合が多くあると言う点がある。

さらに、設計者が設計のなるべく最後の段階まで、構造物のもっともありそうな挙動を追跡できるような設計法が、特に地盤構造物のように工学的判断を必要とする構造物の設計では、好ましいということも、特性値に平均値を用いるべきであるという理由である。

2.3 特性値の決定と地盤調査

さらに設計原則 (JGS4001-2004) では、一般的な統計理論を用いて、下記のように特性値を決定することを、その備考で述べている (2.4.3 節の備考) :

ばらつきを持った導出値の頻度分布に基づいて特性値を設定する場合、データを地質学的・地盤工学的知見や過去の経験に基づいて十分に吟味し、異常値と判断されるものを取り除いた後、算術平均値を算出する。特性値は、平均値の統計的な推定誤差を次の式により考慮して決定する。

$$R_k = m_R \pm t_{\alpha, \nu} \frac{s_R}{\sqrt{n}}$$

ここに、 R_k : 特性値,

m_R : 標本平均,

s_R : 標本標準偏差,
 $t_{\alpha, \nu}$: 自由度 ν の t -分布の $\alpha\%$ 点, $\nu = n - 1$
 n : 標本数 である.

また土は、当該基本変数の性質により、安全側となるようにとる。

この定義は、得られているサンプルが独立に同一の正規分布に従っているという、標準的な統計学のもっとも一般的な仮定に基づいている。このような考え方は、Eurocode7 の特性値の推定でも応用されている (Orr and Farrell, 1999)。しかしこの考え方は、地盤からのサンプルに適用する場合は、後述するように相当問題がある。

3. 特性値の決定：一般推定と局所推定

3. 1 空間的バラツキ vs. 統計的推定誤差

種々の不確実性を考察の対象とし、これらの不確実性に対して適切な安全性の余裕を持つ構造物の設計を行う信頼性設計法では、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。

実際に信頼性設計解析を行う場合、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した上で、地盤パラメータの特性値を決定することは、極めて重要である。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。

3. 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

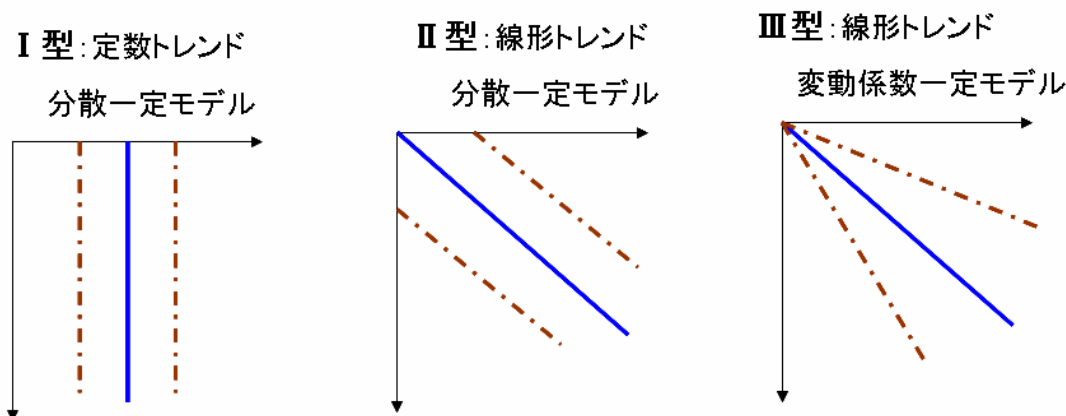


図2 地盤のモデルの種類

(Lamb 1982; Vanmarcke, 1977 等)。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)。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。

I型: 定数トレンド・分散一定モデル

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

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

II型:線形トレンド・分散一定モデル

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

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

III型:線形トレンド・変動係数一定モデル

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

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

図2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、指数関数を用いる。

3.3 局所平均と分散の低減

地盤パラメータの特性値を決定す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いうことである。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) 移動平均場の平均値は、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) 移動平均過程は、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、信頼性解析、閾値通過等の問題の扱いが圧倒的に容易になると考えられる。

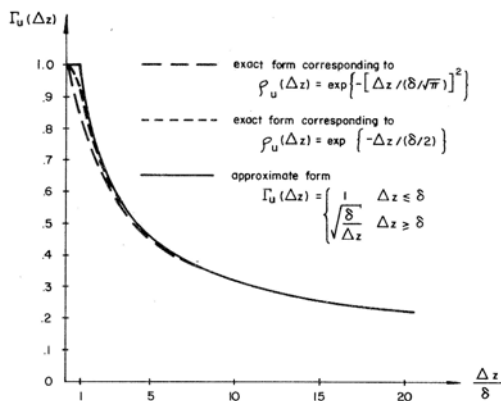


図3 局所平均の分散の低減(分散関数)(Vanmarcke(1977)より)。

移動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)である。Vanmarckeが求めた、一次元の確率場の局所平均の分散の低減値を、図3に示す。縦軸には低減値を、横軸には局所平均の大きさを変動のスケール(自己相関関数を指数関数型と仮定した場合は、変動のスケールは自己相関距離の2倍の長さである。)で正規化した値が示されている。例えば変動のスケールの4倍の長さの局所平均値の分散は、元の確率場の分散の約半分に低減する。これは標準偏差で言うと、約7割の低減である。

3.4 局所推定と一般推定

地盤パラメータの特性値の決定の問題を考えると、地盤パラメータの推定について、次の2つの問題を分類しておく。

- ① 局所推定: 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。

② 一般推定：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。

①は、構造物建設地点が特定され、その直下の地盤の情報が問題となる場合であり、その構造物が浅い基礎を持てばある体積についての、杭を施工する場合であれば深度方向のある線についての、支持層までの深さが問題であればある面についての平均値が問題となる。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。

局所平均は、その確率場の性質により、平均値とかなり異なる値をとり得る。それは、確率場の自己相関距離 θ と局所平均を考えている長さ L の相対的な大きさに依存する。ここでは、この関係を次の正規化層厚 $L_n = L/\theta$ により表す。(以下詳細は、Honjo et al., 2007 参照)

局所平均の一般推定値(GE)の推定分散は、次式により定義できる。(なお、サンプル値の算術平均として定義された推定量の、期待値は定常確率場の平均値である。)

$$s_{LG}^2(n, L_n) = E \left[\left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} X(z_i) - \mu \right\}^2 \right]$$

一方、局所平均の局所推定値(LE)の推定分散は、次式により定義できる：

$$s_{LL}^2(n, L_n) = E \left[\left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} X(z_i) - \frac{1}{L} \int_0^L X(z) dz \right\}^2 \right]$$

s_{LG}^2 や s_{LL}^2 は、単にサンプル数 n の関数であるばかりでなく、正規化層厚 L_n の関数でもある点は注意を要する。導出の詳細はHonjo et al.(2007)に譲るが、 s_{LG}^2 や s_{LL}^2 は、次のように記述される。

$$s_{LG}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{Cov}[X(z_i)X(z_j)] = \sigma^2 \Lambda_G^2(n, L_n)$$

ここに $\Lambda_G^2(n, L_n)$ は一般推定分散関数と定義する。次の関係があることは、興味深い：

$$\lim_{L_n \rightarrow 0} \Lambda_G^2(n, L_n) = 1.0, \quad \lim_{L_n \rightarrow \infty} \Lambda_G^2(n, L_n) = \frac{1}{n}$$

同様に、局所平均の局所推定の推定分散を、局所推定分散関数 $\Lambda_L^2(n, L_n)$ により表す：

$$s_{LL}^2(n, L_n) = \sigma^2 \Lambda_L^2(n, L_n) = \sigma^2 \left\{ \Lambda_G^2(n, L_n) - \frac{2}{nL} \sum_{i=1}^n c(z_i) + \Gamma^2(L_n) \right\}$$

ここに、 $c(z_i)$ は、指数型の自己相関関数を仮定すると、次のように与えられる：

$$c(z_i) = 2\theta - \theta \exp\left(-\frac{z_i}{\theta}\right) - \theta \exp\left(-\frac{L-z_i}{\theta}\right)$$

なお、 Γ^2 は Vanmarcke(1977) が定義した分散関数である。また次の結果は、興味深い：

$$\lim_{L_n \rightarrow 0} \Lambda_L^2(n, L_n) = 0, \quad \lim_{L_n \rightarrow \infty} \Lambda_L^2(n, L_n) = \frac{1}{n}$$

$\Lambda_G^2(n, L_n)$ と $\Lambda_L^2(n, L_n)$ を、 $n = 2, 4, 8$ と 16 について、 $L_n = L/\theta$ を 0.5 から 100 まで変化させて計算したのが図 4 である。次の事が観察できる：

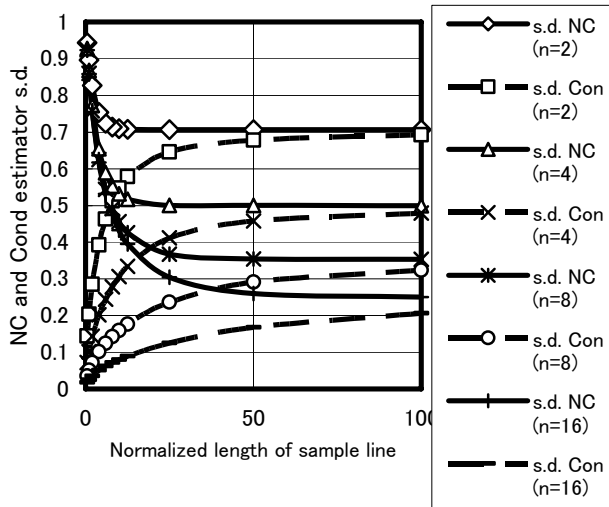


図4 推定分散関数の計算値

(1) 一般推定の推定分散では、 L_n がゼロに近いとき1.0であり、局所推定のそれでは0.0である。すなわち、このような状態では一般推定の推定分散は大きい、局所推定の分散はきわめて小さく、正確な推定ができることがわかる。

(2) 一方 L_n が大きくなると、一般推定でも局所推定でも $1/n$ に近づく。これは、サンプルをいわゆる同一独立な分布(*i. i. d.*)に従う母集団からとった場合で、伝統的な統計学の示すとおりの結果である。

以上のように、一般推定及び局所推定の分散関数が、特に正規化層厚が、小さいとき全く異なる挙動を示すことは、地盤パラメータの推定の問題にも少なからぬ示唆を与える。

3. 5 特性値やサンプル数の決定への応用

特性値の決定法や、必要なサンプル数の決定は、伝統的な統計学を用いて、主に区間推定の考え方を元に行われてきた(Lumb,1974)。そこでは、サンプルが *i. i. d.* に従い、従って推定分散は、 $1/n$ で低減すると仮定された。伝統的な統計学のこの $1/n$ を、前節で導入した NCE 及び CE 分散関数に置き換えることにより、これらの問題に、解を与えることができる。

特性値の決定の一例として、ここでは Eurocode7 の解説書 Orr and Farrel (1999)の例題を取上げた。これは、約 10m 層厚の均質な砂地盤で、10 個の供試体についての三軸試験による内部摩擦角の特性値を決定する問題である。特性値は、サンプル数、正規化層厚、COV 及び設定された有意水準 α により、次のように決定できる：

$$\phi_{kLG} = \bar{\phi} (1 - z_{\alpha} \cdot \Lambda_G(n, L_n) \cdot COV), \quad \phi_{kLL} = \bar{\phi} (1 - z_{\alpha} \cdot \Lambda_L(n, L_n) \cdot COV)$$

表1 特性値決定の結果

| θ (m) · | 1.67 | 0.8 | 0.4 | 0 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| L_n | 6 | 12.5 | 25 | <i>i. i. d.</i> |
| $\Lambda_{NC} (n=10, L_n)$ | 0.538 | 0.411 | 0.341 | 0.316 |
| $\Lambda_C (n=10, L_n)$ | 0.100 | 0.142 | 0.194 | 0.316 |
| 一般推定 | | | | |
| $\alpha=0.05$ | 32.0 | 32.5 | 32.9 | 33.0 |
| lower bound | | | | |
| 局所推定 | | | | |
| $\alpha=0.05$ | 33.9 | 33.8 | 33.5 | 33.0 |
| lower bound | | | | |

表2 片側信頼性区間による必要サンプル数

| α | 一般 / 局所推定 | 正規化層厚/サンプル線長 (L_n) | | | | | | |
|----------------|-----------|------------------------|-----|-----|-----|----|-----|----------|
| | | Δ | 0.1 | 0.5 | 1.0 | 10 | 100 | ∞ |
| 0.05 ($z=$ | 一般推定 | 0.2 | NP | NP | NP | NP | NP | 63 |
| | | 0.5 | NP | NP | NP | NP | 11 | 11 |
| | | 1.0 | NP | NP | NP | 3 | 3 | 3 |
| 1.645) | 局所推定 | 0.2 | 1 | 3 | 5 | 11 | 31 | 63 |
| | | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 5 | 9 | 11 |
| | | 1.0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |

(Note) NP: 50 個以下のサンプル数では、推定不能。

決定の結果は、いろいろなパラメータの組合せに関して表1のようになった。自己相関距離 q のもっともありそうな値が0.8mであるとする、このとき一般推定は32.5度の特性値を、局所指定は34度の特性値を与える。この2者は同じ信頼度を持つが、前者は与えられた地盤の任意地点で構造物を設計するとき用いるべき値であるのに対し、後者は調査を行った特定の地点での構造物の設計に用いるべき値である。ちなみに、古典的な統計学を用いた*i.i.d.*の仮定の下では特性値は33度である。

一方、必要なサンプル数 n についても、信頼性区間の考え方を応用して、決定することができる。表2は、その計算の一例である。この表より分かるように、一般推定であるか、局所推定であるかにより、特に正規化層厚が短いとき、必要なサンプル数は全く異なる。さらに一般推定では、層内任意点の局所平均値の推定は、一つの観測線(=ボーリング)のみからのサンプルでは不可能な場合があることを示している。このような時は、充分離れて相関がないと思われる地点で、さらに観測線(=ボーリング)を追加する必要がある。

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、その答えは変わるということである。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。

さらにこのとき、局所平均の分散は、地盤の各点での計測値から得られる値の分散からかなり低減するので、局所平均値自身の統計的な推定誤差の方がより大きな不確実性の源になることも多いことに注意する必要がある。

参考文献

1. CEN 2004, 1997-7: *Eurocode7: Geotechnical Design, Part1: General Rules.*
2. 本城勇介(2000): 包括基礎構造物設計コード「地盤コード21 Ver.1」の提案, 土と基礎, Vol. 48, No.9, pp.17-20.
3. 本城勇介(2002): 地盤構造物の性能設計, 土と基礎, Vol.50, No.1, pp.1-3
4. 本城勇介・松井謙二(2004): 地盤工学分野における国際的な設計コードの動向と展望, 土と基礎, Vol52, No.2, pp.17-20
5. 本城勇介(2004a): 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.
6. 本城勇介(2004b): 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, 144pp.
7. Honjo, Y.(2006): A keynote lecture 'Some movements toward establishing comprehensive structural design codes based on performance based specification concept in Japan', TAIPEI2006 International Symposium on New Generation Design Codes for Geotechnical

- Engineering Practice, Nov. 2-3, 2006, Taipei, Taiwan, Proc. Taipei 2006 (eds, M.L. Lin et al.), pp.7-8 and the paper in CDROM (25 pages)
8. 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,
 9. Honjo, Y. and B. Setiawan (2007): On general and local estimation of local average and their applications in geotechnical parameter estimations, *Georisk*, Vol.1, No.3.
 10. 地盤工学会(2005): 「性能設計概念に基づいた基礎構造物等の設計原則」(JGS4001 -2004)
 11. Lumb, P. 1974, Application of Statistics in Soil Mechanics, *Soil Mechanics – New Horizon* (edited by Lee, I.K.), pp. 44 – 110, Newness Butterworths, London.
 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.
 13. Orr, T.L.L. and E.R. Farrell 1999, *Geotechnical Design to Eurocode 7*, Springer – Verlag, London.
 14. Ovesen, N.K.(1993): Eurocode 7: A European code of Practice for Geotechnical Design, Proc. International Symp. Limit State Design according to Eurocode 7, pp.1-20,
 15. Vanmarcke, E. H. (1977): Probabilistic modeling of soil profiles, *J. of Geotechnical Engineering* (ASCE), Vol.103, No.GT11, pp.1227-1246.