

現代土木の役割とダムの地質調査および評価技術の課題

平野 勇*

Role of civil engineering and problem of the geological investigation and evaluation technology of the dam geology

Isamu Hirano*

Abstract

Based on the severe social situation of surround civil engineering and the dam these days, the role and significance of those are reconfirmed. The policy and method of the geological investigation and evaluation of the dam geology are reviewed briefly, some technical problems are clarified and some solutions are suggested, more or less from a point of view of succession of the engineering technology.

The basic relation of the human being and civil engineering are contemplated, the importance of the idea and philosophy, theory of the method and process that the nation forms civil engineering as the mental activity, as the social activity, as the system of the solidarity and the collaboration are emphasized.

And the basic relation of the human being and the role of the engineering geology are also contemplated, the scientifically assumption and engineering setting of the external force of the nature, and the geological database construction for the national land use and infrastructure are emphasized as the urgent problem that the engineering geology are faced.

With that in mind, the fundamental function and social role, the situation of the dam these days are reviewed. The policy and method of the geological investigation and evaluation of the dam geology are also reviewed. And the role and succession of the geological engineering technology of the dam, the condition arrangement to carry out the geological investigation and evaluation technology smoothly are mentioned.

Furthermore, advancement and efficiency of the geological survey, the measurement and evaluation technique, some new idea and proposal to the geological problem of the dam, and possibility of some development of the dam engineering are expressed from a new viewpoint.

Keywords: geological investigation, engineering geology, dam engineering, civil engineering philosophy, new dam technology, flood control dam, land slide, deep slope failure, external force estimate

(要 旨)

昨今の土木やダムを取り巻く厳しい社会的状況を踏まえ、土木とダムの役割と意義について再確認した後、ダムの地質調査および評価のあり方や方法についてレビューし、幾つかの技術的課題の整理と提案を行った。

まず、人間と土木の関わりの方々の基本的部分について考察し、「社会や国家とその構成員である市民・国民が精神行為、社会行為としての土木、連帯と協働の仕組みとしての土木を形づくっていく理念と哲学、その方法とプロセスの理論」すなわち「土木哲学、土木社会論」の、現代土木における必要性について述べた。

次に、人間と自然との関わりにおける地質技術の役割と機能について整理した後、地質技術の当面する喫緊の課題として「自然の外力の想定と設定における地質技術の役割」、「国土地質情報の整備・活用」について述べた。

* 応用地質(株)エンジニアリング本部

* OYO Corporation

さらに、ダムの基本的機能と社会的役割、今日のダムの社会的状況、およびダムの地質調査と評価技術の役割、技術と情報の継承、周辺領域の条件整備などダムの地質技術を取り巻く課題について整理した。

その上で、ダムの地質調査・計測および評価技術の高度化と効率化のための課題と方策について、山地の広域に展開される「山地土木」として地質技術的課題や方法の多くを共有している深層崩壊・天然ダム懸念地域における場合と比較しながら述べた。最後に、地質に関わるダム技術の幾つかの新たな発展の可能性について模索した。

キーワード：地質調査、地質技術、ダム技術、土木技術、土木哲学、治水ダム、防災多目的ダム、地すべり、深層崩壊、空中電磁探査、新技術、外力想定

1. はじめに

ダムの設計・施工においては、CSG (Cemented Sand and Gravel) ダムやCFRD (Concrete Faced Rockfill Dam)、造成アバットメント、およびグラウチング適用技術の改善、低品質材料と発生材料の有効利用、環境に配慮した掘削法面の設計・施工など、地質や岩盤に関わる技術の開発や高度化が積極的に進められている。また、地質調査・計測および情報処理技術の進展はめざましい。このため、ダムの地質調査と評価技術においても、さらなる高度化と必要・適切な展開を推し進め、ダムの計画および設計・施工の高度化に貢献する必要がある。

一方では、今日の土木事業やダム事業を取り巻く社会的情勢は厳しく、一層の合理化、コスト縮減を求められることはもちろん、それらのあり方そのものが問われるようになってきている。

このような状況にあって、ダムの地質技術は、その基本的な意義と役割、昨今の情勢を踏まえつつ、機能と責任をしっかりと果たしていかなければならない。

本報告は、土木やダムを取り巻く状況、およびダムの諸技術の役割と動向について概観するとともに、技術の継承という観点も交え、ダムの地質調査および評価技術のあり方や課題についてレビューし、幾つかの技術的提案を行うものである。

2. 土木とその役割と機能を改めて考える

2.1 土木の本質を考える

戦後の荒廃した国土に公共事業が力強く展開された高度成長時代においては、本報告の主題としている地質調査と評価技術、その適用分野である土木事業やダム事業の意義や必要性は明白と信じられ、敢えて考え、議論する必要もなかったであろう。

しかし、今日のわが国の多様化、流動化する国民意識と社会構造、一方では変わることのない厳しい自然条件、多発する自然災害を顧みると、地質調査と評価技術を展開するに当たって、その立ち位置となる自然と人間、個人と社会のあり方や関わりの本質と現状を見つめ、果たすべき役割と責任を明確にしておかなければならない。その上で、対応すべき課題にしっかり

と取り組んでいかなければならない。

ダムの地質調査と評価技術の課題や今後のあり方を考えるとき、その適用分野である土木そしてダムの意義やあるべき姿に触れておかざるをえない。

2.1.1 人間と土木^{1),2)}

動物としての「ヒト」が人間であることの証明は、「人間的な精神活動」にあらう。その芽生えは死者への弔いの心にあるのではないだろうか。そこにある土を穿って埋葬する行為、即ち「掘削と盛土」、これこそ土木（よく言われるような淮南子（えなんじ）の「築土構木」に由来するとされる「土木」という言葉ではなくて、概念としての土木である）の発祥であろう。土木は「人間的な精神活動」すなわち「宗教心」、「他の人々への思いやり心」の一つの具現であろう。

2.1.2 社会と土木^{1),2)}

戦争は人々への憎しみによる破壊行為、土木は人々への平和な思いやりによる建設行為である。そして、「戦争はヒトである人間が未だに克服できない性」、「土木はヒトが人間であることの証明」である。何れも経済行為という一つの行動原理を生み出す遙か以前から存在した人間の精神行為、社会行為である。

戦乱の世や人々の心が荒み、疫病に苛まれ、国が乱れて疲弊した時代には、土木は成り立ち難い。わが国の土木は、平和と豊かな暮らしを願う人々の「思いやり助け合いと未来志向の精神」、英知と汗、なげなしの資財に支えられ、今日まで人々の暮らしの向上と国家・社会の発展の礎を築いてきた。

土木は効率性、経済性は求められるが、経済行為ではない。このため現代の民主主義社会では、土木は自然発生的には生まれず、自立性、能動性も有しない。私たちが民主主義に至上の価値を認める以上、土木は、その理念である市民・国民の平和な「思いやり助け合いと未来志向の精神」によって生み出され、護り、育て、促されなければならない繊細でか弱き存在なのである。

もちろん「思いやり助け合いと未来志向の精神」は、土木に限らず、民主主義社会が成り立ち、共に人々が幸福に生きるための基本的・普遍的理念である。この意味で民主主義国家の土木は、国家・社会の

活力と精神的健全性のバロメータといえよう。

2.2 土木のあるべき形と昨今の状況

2.2.1 人々の連帯と協働の仕組みとしての土木

日本国民は、一連・一体の自然の土地あるいは地盤を遍く区分けして所有し、使っている。これを認めた上で、自然の恵みを享受し、脅威と向き合おうとするとき、一人ひとりの力の限界を知り、自ら、家族、隣人、組織や集団そして未来の人々の安全・安心と尊厳ある生存の実現のために連帯と協働、そのための理念、そして仕組みと機能が必要となる。その仕組みと機能は、他の諸々の社会システム、諸外国との友好・防衛システムと同等のレベルで構築し、発揮させなければならない。

この連帯と協働は、国民や社会が理想とする「思いやり助け合いと未来志向の精神」があつてはじめて成り立つものである。そして、これを集約し、具現化していく機能として人々が編み出した仕組みが、社会であり国家であり、政治であり、行政である。それを動かす力の源泉は、国民一人ひとりであり、様々な領域の団体や企業である。

土木は、このような、安全・安心と尊厳ある社会の物理的、実体的な実現を目指す、人々の連帯と協働、「思いやり助け合いと未来志向の精神」の具体形の一つである。

土木は、社会と国のあるべき姿と目標のもとに、①市民・国民の連帯と協働、②市民・国民のニーズの集約、③自然的・社会的条件の把握と分析、④プロジェクトの構想と計画、実施、⑤市民・国民の負担と受益、などからなる社会的・工学的な仕組みと機能として存在していなければならない。

そして、土木の仕組みと機能は、市民・国民と当該分野の専門家、様々な機関と組織が、それぞれの立ち位置を明確にした上で、義務と責任、連帯と協働からなる確たる社会システムとして位置づけ、構築されていないなければならない。

2.2.2 土木を取り巻く意識の分極化と流動化、分散化

土木は、自然と人間との関わりの部分を物理的、実体的につなぎ、支え、自然の脅威と不安からの解放、暮らしと活動の安定、向上を目指し、社会・生活インフラ整備と国づくりを進めてきた。

その結果、今日の国民経済の発展と人口増加をもたらした、尊厳と繁栄の社会と国家を築き上げた。

個々人が自然の恩恵と脅威を直に受け、自然との関わりの何もかもが自己責任であった太古の時代、人口の大半が第一次産業に携わり、自然と共生していた高度成長期前の時代、これらの時代と比べると、現代日本人の暮らしや活動は自然から切り離され、自然との関わりの意識は流動化、分散化している。

とは言え、そこには顕著な例外が存在する。土地あ

るいは地盤とそれに付随する空間という占有が認められた私財としての自然である。これについての人々の意識は依然として強固である。したがって、人間の自然との関わりのすべてが流動化している訳ではない。

流通化している自然との関わりの部分は、公共財としての自然、すなわち美しく繊細な地球環境や生態系、護るべき地域環境や生活環境、そして怒り狂う脅威の自然に対してである。

現代日本人の公共財としての自然との関わりは、①その意識の有無によらず、自らの生存や職業に直結しているもの、②必ずしも自らの生存や職業に直結しないが、生き方や考え方といった精神的なもの、あるいは、③無関心やそれに近いもの、④先鋭的発信や活動などに分極化し、自然との関わりの意識は流動化、分散化している。

一方、人々の社会や国についての意識や行動は、「思いやり助け合いと未来志向の精神」、社会や国の基本的な規範やシステムから次第に遠ざかり、個人主義、経済至上主義が強まり、日本の社会や国家は次第に機能不全をきたしつつあるように見える。そして、人々の「思いやり助け合いと未来志向の精神」によって生み出され、護り、育て、促されなければならない繊細で脆弱な存在である現代土木は未曾有の危機に直面している^{1),2)}。

2.2.3 現代日本における土木の果たすべき役割と責任

この度の東北地方太平洋沖地震とそれによる東日本大震災（2011.3.11）を挙げるまでもなく、21世紀となった今日にあっても、自然の巨大な営力と不確実性を前に、わが国の過酷な自然条件は未だ克服できず、一方では、これまで構築された社会・生活インフラは次第に劣化し、機能不全を招来しつつある。

そして、高度な科学技術と利便性・快適性に支えられた日々の暮らしの中で、人々の意識と価値観、行動様式は流動化、分散化している。ときとして、自然の与える度重なる試練も迫りくる災害も、先人が築き上げたインフラの恩恵も、今築き上げている人々への労いの気持ちも、そしてインフラの意味さえも忘れがちである。その上、世界経済の激しい発展と競争のもとで、わが国は急速に競争力を失い、少子化社会、低成長・縮小時代を招き、安全・安心で豊かな尊厳ある暮らしの維持は危機に直面している。

しかし、如何なる状況にあっても、国家・社会のすべての部門と機能はそのプロ集団・専門家集団によって強固に支えられていなければならない。

土木も然りである。現代日本の流動化、分散化する意識や風潮に押し流されることなく、それを見据え、土木の理念と機能は力強く支えられていなければならない。

2.3 土木の役割と仕事

2.3.1 社会・生活インフラ整備の着実な展開

日本に住む私たちが、その普遍的願いである豊かで安全・安心な尊厳ある暮らしを守り、発展させるためには、わが国を取り巻く過酷な自然条件と国際社会、特異な歴史と現在、未来のあるべき姿を見据え、考え、行動し、重層かつ強靱でメリハリのある社会・生活インフラ整備と国づくりの努力を続けていかなければならない。

2.3.2 社会・生活インフラの適切な維持・管理

一方、既存の膨大な社会・生活インフラは次第に劣化し、機能不全や災害を招くおそれがある。その対策には膨大なコストを必要としている。そのため、既存インフラの物理的、経済的、社会的な機能と効果、その発現状況を把握・評価し、中長期的な変化とリスクを予測するとともに、ライフサイクルコスト (LCC) を見積もり、最も効果的な機能と性能の維持と補修・補強・更新などを図っていかねばならない。

2.3.3 土木に関わる科学技術発展への努力³⁾

人々の日々の生活を育む慈愛に満ちた自然、東日本大震災を挙げるまでもなく脅威に満ちた自然、その自然と人間との関わりの部分を物理的、実体的につなぎ、支え、対応する土木は、その対象となる地質や地盤、自然事象について、地質学や地球科学など周辺の学術分野と連携しながら、自然の恩恵と脅威の実体、その要因やメカニズムを科学的観点から解明していく必要がある。

その上で、自然の未知と不確実性を前に、人間の限界とあるべき姿を踏まえつつ、工学的方策の理念と方法をさらに高め、自然のもたらす恩恵と脅威について、繊細かつ強靱、大胆に向き合っていかなければならない。

2.3.4 土木の理念の再構築と市民・国民への提示

わが国の専門部門としての土木、プロ集団・専門家集団としての土木に携わる技術者は、土木のあるべき姿と昨今の状況を踏まえつつ、日本に住む人々の願いと努力を物理的、実体的に具体化していく必要がある。

そして、土木の源泉となる社会や国のあり方、市民・国民の意識や人間活動にまで深く掘り下げ俯瞰し、土木の理念を再構築し、あるべき方向を提示していかなければならない。

東日本大震災の与えたものは、この地方に住む人々、日本国民にとって、試練、教訓などと呼ぶにはあまりにも過酷で重いものである。自然とは何か、人間とは何か、さらには自然と人間、個人と家族と隣人、職域、地域、地方、社会、国家、世界のあり方と関わり、そして真に考えなすべきこと、時間軸を越えた根

源的課題が一瞬にして炙り出されてしまった³⁾。その中で見えたものの一つは、やはり、大自然を前に人間一人ひとりの力の限界を知り、隣人や組織、集団そして未来の人々の安全・安心と尊厳ある生存の実現のために必要となる国民や社会の連帯と協働、「思いやり助け合いと未来志向の精神」の存在である。そして、社会や国家の専門部門とそのプロ集団・専門家集団の役割と責任である。

そのためには、「社会や国家とその構成員である市民・国民が精神行為、社会行為としての土木、連帯と協働の仕組みとしての土木を形づくっていく理念と哲学、その方法とプロセスの理論」すなわち「土木哲学、土木社会論」をしっかりと構築すべきであろう⁴⁾。

3. 地質技術の社会的、工学的役割と機能を考える

社会・生活インフラ整備と国づくりは、地質工学とその実践技術である地質技術の主要課題の一つである(以下、ここでは地質工学を含めて地質技術と呼ぶ)。地質技術は、地圏、水圏、気圏と生物圏が織りなす地表圏システムとそれを構成する地形と地質、地下水などから成り立つ地盤や岩盤を対象としている。そして、地盤や岩盤の地質調査と評価および設計、施工、維持・管理に関わる地質学とその工学的な応用技術の体系を構成している。

地質技術は、自然の原理と事象、自然と人間との関わりの部分を探究し、工学の理念と手法を取り込み、土木と連携しながら、自然と人々との関わりの部分をハード/ソフトの両面からつなぎ、支えてきた。さらに、人々の自然との関わりや束縛と脅威からの解放、日々の生活や仕事の多様化と向上を目指し、安全・安心の暮らしの発展、社会・生活インフラ整備と国づくりにしっかりと貢献してきた。わが国の地質技術の役割と機能は今後も変わることはない。

人間活動における地質技術の社会的、工学的役割と機能には、次のようなものが挙げられよう⁵⁾。

(1) 人々の自然との関わりの意識への寄与

この仕事は地質学や地球科学と目的と方法を共有する。自然の原理と事象の未知、無知に根ざす迷いや呪縛からの解放という永遠の仕事である。自然の存在や関わりの意識が欠けると、往々にして、自然の原理や事象とかけ離れた説明や決定を生みやすい。それは結局、真の課題解決、すなわち人々の幸福につながらず、災いさえ招くおそれがある。

一方では、物質文明と人口爆発は地球環境・地域環境汚染、地球温暖化、資源・エネルギー枯渇を招き、人類の未来は行き詰まりつつある。さらに、東日本大震災のように自然のリスクに常にさらされ、災害は頻発している。有限の地球、自然の脅威を前に、何を知り、考え、なすべきか、地質技術の観点から、理念と方向を示す仕事である。

(2) 暮らしの発展、社会・生活インフラ整備への貢献

地表圏の地質や地盤、自然事象などを対象とした①原材料やエネルギー資源の開発、②安全で便利な機能の産業・経済・生活空間やライフラインの創出・供給、③地球環境・地域環境の対策・保全などへの貢献である。地質技術の軸となるハードとソフトに関わる仕事である。

社会・生活インフラ整備においては、集約・大規模化と分散・コンパクト化、省エネルギー・低環境負荷を目指す、めりはりのある施策が必要である。それには、地質技術の高度化・高品質化と技術開発、その必要・適切な展開が重要となる。

(3) 地球科学的な情報と方策の整備、提供

地震、洪水、土砂災害など地質・自然災害情報とリスク管理を通じた生産・業務空間とライフラインの確保、事業継続計画（BCP）および支援、不動産評価や地質・自然リスク保険分野における地球科学的な情報と方策の整備・提供を通じたソフトの貢献である。

(4) 市民への情報発信と啓発

人々への自然災害とその対応に関わる情報発信、環境・防災および自然と日々の暮らしとの関わりの意識の啓発、教育支援などである。

(5) 社会や国家を支える専門部門としての役割

地表圏の地質や地盤、諸事象の原理やメカニズム、自然と人間との関わりの部分を探究し、他の専門部門の理念と手法も取り込み、社会や国家を支える専門部門として地質技術の発展を図り、(1)～(4)へ展開する仕事である。さらに、幅広く情報発信と連携・協働することによって科学技術と文化、市民生活の発展に貢献する大局的観点からの仕事である。

4. 地質技術の当面する喫緊の課題

4.1 自然の外力の想定と設定、地質技術の役割と課題

自然を対象とし、人々の願いの物理的、実体的な実現を図る工学分野においては、自然の外力に対応する計画・設計のための外力設定とそれに基づく具体的な方策が必要となる。ここでは、東日本大震災で広く注目されることとなった自然外力想定と設計外力設定に関わる地質技術の果たすべき役割と課題について述べる。

4.1.1 外力の想定と設定³⁾

地球科学的な事象によってもたらされる自然の外力は自然科学的に解明され、想定されるべきものである。理学的視点と手法なしに自然の外力の想定はあり得ない。しかし、理学分野には、必ずしも工学的な計画・設計の外力設定に必要な自然の外力想定のための手法や仕組み、伝統や発想が存在している訳ではない。このため、多くの場合、工学分野において外力の想定と設定の両者が行われてきた。

計画・設計のための外力設定は、①自然科学的に導かれた外力の想定と②工学的な評価と判断が組み合わ

されたものとなる。その際、理学と工学の理念と手法、すなわち①、②の境界が曖昧となり、導かれる結果の原理や意味が不明確とならないようにしなければならない。ややすれば、対応可能な計画・設計の範囲で自然の外力が想定されてしまったり、計画・設計のために設定した自然の外力が起こり得る外力の上限と考えてしまったり、日ごろの管理・運用中に起こり得る自然の外力のあり方について特別の関心を払わなかったりするおそれがある。このため、ここでは工学的手法による「想定」を「設定」と呼び、工学的な評価と判断の存在を明確化しておく。したがって、工学的過程を経た場合には、「想定外」ではなく「設定外」の用語を用いることになる。

人間が設計・施工あるいは製造した人工物とその機能・性能そのものは、設定外はあっても想定外はあってはならない。あり得るのは、外力や様々な作用を与えて人工物の機能・性能を試す自然事象の不確実性、および自然事象に対して人工物をもって対応し、効用を得ようとする人間そのものの不確実性、すなわち自然と人間の不確実性によってもたらされる想定外の事態である。

自然の外力の想定と設定の仕事は、理学と工学の理念と手法を持つ地質技術の今後の大課題である。

4.1.2 理学的想定と工学的設定の隔たり³⁾

一般に、強大で不確実性に満ちた自然を前に人間の能力の限界を謙虚に認めざるを得ず、そして、想定される自然の外力の不確実性は避けきれない。その上で、①理学的に想定される自然の外力と②工学的評価と判断に基づいて計画・設計のため設定する自然の外力と間には、隔たりを設けざるを得ない（図-1）。

計画・設計の設定外力の水準は、基本的には、その時代における最善の科学的知見と情報、工学的理論と技術的判断、および社会的要請あるいはコスト面からの許容などに基づいて設定される必要がある。具体的には、①不確実性を含みながらも理学的に想定される外力やそれによるリスクの評価、②工学的な計画・設計理論と実績、③プロジェクトや工事の目的と機能および効果、④施工性、維持・管理性、そして⑤効率性、経済性、社会性などである。

4.1.3 隔たりによるリスクの構成と方策

外力の理学的想定と工学的設定の隔たりは、リスクに置き換わる可能性がある。このため、その隔たりは可能な限り、解消、低減されなければならない。それには、ハードだけでなく、ソフトの手法も使った、様々な水準と方策が必要となる。

その方策として、①フェイル・セーフの設計・管理思想、②計画・設計に安全率や許容値、種々の余裕を設ける先人たちの知恵、および③人間にリスクや災害を避けるための判断と行動を求めるソフトの構築と実行などがある³⁾。

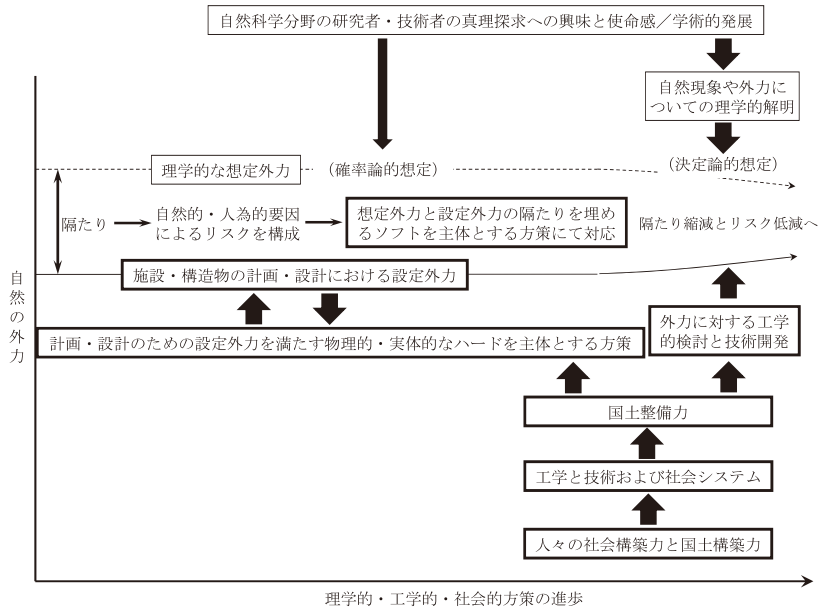


図-1 自然の外力に対する理学的想定と工学的設定の隔たりと方策の概念³⁾

Fig.1 Risk and solution of the gap between scientific assumption and engineering setting for the external natural force.

この「隔たり」の部分に存在しているのは、計画・設計を超えた自然の外力に施設・構造物がさらされる構図、そして自然の巨大な外力に人間が直に向き合う構図である。この極限ともいえる過酷な状況において人間の最後の武器となるのは、自然の外力とそれをもたらす自然事象についての社会や国の、そして一人ひとりの①知恵と知識、②情報取得と判断、③行動であることはいうまでもない。明確な意図と目標のもとに、この三つを組み合わせる「隔たり」の部分に対応しようとするのがソフトの手法である。このソフトの手法は、幾度となく自然の脅威にさらされてきたわが国では、古来より生存・生活の知恵として存在してきた。

しかしながら、それらは、先人が、そして現代人が幾多の生命と財産を犠牲にして学んだ知恵ではあるが、決して十分ではない。ましてや、その知恵、そして脅威の存在さえも忘れ去られていく現代日本にあって、理学と工学の理念と手法を持つ地質技術は、現代科学と技術を幅広く結集し、「隔たり」の部分に対応する確たるソフトの手法を構築しなければならない。

4.2 国土地質情報の整備・活用の仕組み

わが国では、ボーリングデータなど地質情報は、官・民の当該の建設プロジェクトや工事など一次利用が図られた以後は、一部を除き、ほとんど利用されることなく死蔵あるいは廃棄されている。

一方、東日本大震災を挙げるまでもなく、自然災害は頻発し、国民の生命と暮らし、生活・生産インフラは常に脅威にさらされている。このような自然のリスクと災害を解消・軽減するため、そして、わが国の安全・安心な社会・生活インフラ整備と国づくり、暮らしの尊厳と持続的發展を図るためには、高品質、高密

度な国土地質情報と、それに基づく知的（知恵と情報による）な国土管理と利用、ハード・ソフトの対応が必要である。

既に、国土交通省⁶⁾をはじめ一部の公共機関においては、ボーリングデータの集積と公開が図られている。しかし、公共機関の有するデータは、公共事業などに関連した線状または拠点に位置する極めて限定されたものである。一方、民間の建築工事や都市開発においては、面的かつ広範に展開された膨大な数量のボーリングデータが存在している。

一次利用された後の地質情報の特徴や有効性については敢えて述べるまでもないであろう。そこで、地質や地盤に関わる技術者や組織が、広く市民・国民に働きかけ、「地質情報を所有する市民・国民や組織自らが、一次利用の図られた後の地質情報について、その価値と貴重さに気づき、社会・生活インフラ整備と国づくりに不可欠な国民共有の財産として捉え、“思いやり助け合いと未来志向の精神”のもとに、広く持ち寄り、集積し、互いに活用していくための、法整備を含めた連携・協働の仕組みを構築する」手助けを行っていく必要がある。ここで国土地質情報の整備・活用と方策を論じた文献^{7~9)}を挙げておく。

5. ダムの機能と役割および昨今の状況を考える

5.1 ダムの基本的機能と役割¹⁾

人々の暮らしに不可欠な水資源の一つに河川水がある。しかし、降水量は地域によって、また季節や年によってばらつきが大きく、そのため河川の流量は空間的にも時間的にも変動が激しい。恐ろしい洪水をうまく蓄えて必要なときに使い、人々の暮らしの安全と維持・向上を図ることは、エジプトのクフ王朝時代の

BC2750年頃の築造とされるサド・エル・カファラダムや8世紀の弘法大師の再築とされる四国の満濃池の例を挙げるまでもなく、人類の歴史を越えた普遍的願いであり知恵である。このような「水を蓄えて使う知恵」、「液体を扱う技術」は大自然の中で動物としてのヒトが知性と文明を持った人間として歩みはじめたころに獲得した最も基本的な知恵の一つである。

河川は地表圏における水循環システムの重要な位置を占めている。地表にもたらされた降水は重力によって自ら集まって河川となる。ダムは、その河川を流れる水を、特に資源やエネルギーを使ったり、熱や廃棄物を排出したりすることなく蓄え、質や量を変え、必要となしに量を調節しながらそのまま重力を利用して供給する機能を持っている。さらにダムは、発電施設を組み合わせることによって、上流域の河川水の有する位置エネルギーをクリーンな電力エネルギーに転換することができる。このようにダムは、太陽エネルギーによって地表圏にもたらされる無限の水循環システムを利用した巧みな施設である。

昨今、資源エネルギーの有効利用やリサイクル技術、CO₂排出抑制技術が注目を浴びているが、ダムは、特段、資源やエネルギーを消費することなく、また熱やCO₂など廃棄物を排出して環境負荷を与えることなく、地表に存在する洪水という有害・脅威となる膨大な量の物質をたちどころに制御して、人間や環境にとって有益、不可欠な物理化学的特性とエネルギーを持った状態の水に転換するという機能を有している。

このようなダムの有する卓抜する機能と合理性、そして人類の歴史や人々の暮らしに果たしてきた役割の大きさから見て、ダムに優る資源エネルギー生産・リサイクル技術が他に存在するであろうか。ダムは自然の摂理と人類の願いを巧みに調和させ、人々の暮らしの安全と繁栄を支える最も基本的で歴史を越えた文明の礎である。

5.2 ダムを取り巻く昨今の状況とあるべき形³⁾

わが国は多雨な気候の上、急峻な島国である。無数の河川が国土を刻んで海に注ぎ、その流域の一つひとつに河川のもたらす恩恵と脅威のもとに、私たち日本人の歴史と暮らしが存在している。この掛け替えのない暮らしを守り発展させるため、人々の弛まぬ汗と努力によってダム建設は進められてきた。

ところが、ダムの発揮する治水、利水などの機能は、基本的には、それぞれの河川や流域内に限定されてしまう。ダムは、それぞれの河川や流域の専用施設であり、その流域に住む私たちの共有財産である。

わが国の一つひとつの河川や流域の整備状況は、①そこに生活する私たち一人ひとり、すべての生命と暮らしの尊厳を守り、安全・安心と豊かさを互いに願って助け合う視点、②人間の都合や期待、説明や釈明とはまったく無関係に人間の行為を冷徹に評価し、何の

躊躇いもなく回答を与える大自然の厳しさを謙虚に見つめる視点、そして、③これらを踏まえ、自然や河川に対する物理的、実体的な対応策を先人たちが学び、伝え、発展させてきた専門分野としての河川工学、ダム工学の負うべき歴史的、社会的責任から考えると、まだまだ不十分である。

私たち一人ひとりの、そして子々孫々の幸福に思いを馳せ、生命と暮らしの尊厳と安全・安心を守り、発展させるために、まずは、今より遥かに貧しく技術も未熟で機械力もないような時代に、血のにじむ汗と気高い助け合いの精神によって営々として築き上げられてきた今日の国土と社会資本、そこにある先人たちの志に思い至る必要がある。

文明との関わり、歴史的、社会的、本質的意義を踏まえ、ダム事業そして公共事業は、これからも時代を越えてしっかりと継承し、発展させていかなければならない。そして、これからの日本のあるべき姿を考えると、災害に強い強靱な国土づくり、電力エネルギー資源の分散・多様化、国土資源の有効利用、環境負荷・地球温暖化抑制など、人々の願いに対してしっかりと実体をもって応えるダムの意義は高まりさえすれ減じるものではない。

6. ダムの地質技術の役割を考える³⁾

6.1 ダムの地質技術の果たしてきた役割

ダム事業の技術的過程のいずれの段階も、地質や岩盤について理学的、工学的な知識と情報および評価を必要としている。ダムの地質技術は土木と連携しながら、技術的役割と責任をしっかりと果たしてきた。すなわち、ダムの地質技術は土木とともに、岩盤や地山の調査と試験・計測および評価、地質図作成とモデル化、数値解析、さらには設計、施工、維持・管理まで、理学と工学の理論と経験によって組み立てられた実践的な技術体系を築いてきた。そして、ダムの基礎岩盤と貯水池地山や斜面における水理的、力学的諸条件が連成する複雑な問題を実体的に解決してきた。

6.2 地質技術を取り巻く昨今の状況と責任

近年、「性能仕様」に象徴される公共調達の基本理念の転換や情報化施工などに見られるように、地質調査と評価の領域においても、技術的理念と方法の変革がはじまっている。このことは、調査から設計、施工、管理まで具体的に仕事を形づくっていく現場技術者が、個々の現場の地形・地質条件に応じた判断を行い、「実仕様」を決定し、物理的、実体的解決を図っていく重みが増していることを意味する。この点、技術的選択肢が広がり、新しい着想や創意工夫が具体的な形となり、さらにはプロジェクトの合理化、技術の発展に直接反映できるおもしろさが拡大しているといえる。一方では、これまでの下支え的な一律的、標準的手法によって排除されてきた地質調査不足や人為的な

地質のリスクが高まる可能性も否定できない。

そのため、地質技術者一人ひとりが、自然の仕組みと事象の本質について理学的な知識と洞察力を身につけることがますます重要となっている。そして、設計・施工サイドの工学的な条件や要求の本質や物理的意味を掘り下げ、既存の形にとらわれない豊かな想像力と創造力、しっかりした技術力と対応力を身につけることが、これまで以上に重要となっている。

6.3 地質技術の対象領域における条件整備

6.3.1 組織やシステムのあり方

前述(6.2)を前提とした上で、必要・適切な手法と数量の地質調査を展開し、得られ地質情報の評価と利用の高度化、円滑化を図るための技術者およびコンサルタントの努力が必要である。同時に、それを実現するための組織やシステムのあり方や理念についても議論されなければならない。特に、公共調達の理念の転換、業務の分業化と細片化、断片化の流れにあって、

地質調査と評価の高度化、品質と信頼性、継続性の確保はいかにあるべきか、地質技術に関わる領域の条件整備についてしっかりと議論されるべき課題である。

6.3.2 技術と情報の継承

これまで多くのダムが建設され、様々な知見や経験が蓄積、継承されながらも、それらは文献¹⁰⁾の指摘にもあるように個々の技術者や現場に埋没している。これら個に閉ざされている知見や経験としての“暗黙知”を他に伝達するための“形式知”に変換し、広く組織に共有される“集合知”にまで高め、業務の効率化や新たな価値の創造、展開に結びつけようとするナレッジマネジメントの手法を意識しながら、若手技術者へ体系的に移転していく必要がある。

一方、昨今、すべての技術情報が電子化されているといっても過言ではない。これらをきちんと集積、保存するとともに、計画・調査から設計・施工、完成に至る技術的プロセスと情報の集大成であるダム工事誌の充実を図る必要がある。それは当該ダムの担当者の備

表-1 ダム建設プロジェクトの技術的段階と地質調査技術の適用および展開方法の主な改善策

Table 1 Improvement of the application and development of the geological investigation technology on the technical stage of the dam construction project.

調査段階	調査目的と項目	主な調査技術	調査技術の適用と展開方法の主な改善策
初期段階 (概略調査) (中間調査)	地形・地質的に有利な地点や欠陥箇所を抽出して、それらの工学的な特徴や広がり把握し、ダム建設適否の判断、ダムサイト候補地選定、ダム型式・規模、道路計画、貯水池保全計画等の概略検討に反映させる。	<ul style="list-style-type: none"> 既存資料調査(地質図、土地利用図、活断層図、工事記録等) 地形図および空中写真判読 空中電磁探査 地表踏査 地表物理探査 少数のボーリング調査 	<ul style="list-style-type: none"> 先行ダムにおける技術情報の収録および工事誌の充実、技術と情報の継承 レーザープロファイラー地形図による地形判読 空中電磁探査による被覆層厚、風化層・緩み層厚、基盤岩深度の三次元広域把握 地表弾性波探査の計測および解析技術の改良・改善 広域山地の地山性状および物性値の三次元把握 第四紀断層の概査および評価手法の改良・改善 地形や地質事象の知見と情報の集積と共有 地表踏査技術の維持向上と継承
中期段階 (詳細調査)	個々の調査箇所についての地質的特徴の大枠を把握し、ダムサイト決定、ダム型式、規模、道路計画、貯水池保全計画等について地質的側面から煮詰め、概略設計や工事費の概算等に反映させる。	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査 横坑調査 孔坑内および孔坑間物理探査 原位置岩盤試験 グラウチング試験 その他、特定の地質的問題についての各種調査・試験 	<ul style="list-style-type: none"> 高品質ボーリングコア採取と孔壁撮影および孔内計測のパッケージ化による高精度ボーリング調査技術の適用 ジオトモグラフィによる基礎岩盤の物性値の三次元的把握技術の適用 岩盤の緩みの把握および評価技術の開発 クリープ斜面、初生地すべりの評価技術の開発 低角度弱層の強度評価技術の開発 地球統計学等による地質工学図作成の合理化 地形・地質事象についての新知見と地域情報の集積共有 岩盤の観察と評価技術の維持向上と継承
終期段階 (詳細調査)	個々の調査箇所についての工学的判断に必要とする地質的特徴の全容を明らかにするとともに、工学的性質を定量的に把握、評価し、岩級区分図、ルジオンマップ等の地質モデルや岩盤分類基準等に取りまとめ、実施設計および施工計画に反映させる。	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤掘削面観察 堤体材料判定 グラウチング試験 施工、注入・改良状況の把握 岩盤掘削面計測 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削面観察および評価への画像処理技術の適用 掘削法面の緩みおよび挙動計測と評価技術の改良・改善 グラウチング施工データの地球統計学等による評価技術
施工段階	ダムサイト基礎掘削面、材料採取地掘削面において地質観察、岩盤・斜面計測等を行い、設計・施工の前提としている地質条件や解析モデル、予測・管理値と照査し、施工および設計変更、安全管理に反映させる。グラウチング試験施工を行い、注入範囲、注入パターン、注入仕様等のグラウチング施工計画を決定する。	<ul style="list-style-type: none"> 目視点検 基礎岩盤および斜面計測 堆砂状況調査 	<ul style="list-style-type: none"> 管理ダムにおける貯水池地すべりの調査および評価技術の開発 斜面安定工の保守・補強技術の開発 構造物および貯水池管理のASETマネジメントシステムの開発 データベースおよび共有システム構築
管理段階	湛水時の基礎岩盤および斜面挙動ならびに堆砂状況等について点検・計測・調査を行い、ダムの安全管理、円滑運用に反映させる。		

忘録であってはならない。後継となる人々が後発のダム事業を展開していく上での具体的なお手本であるべきことが意識されていなければならない。計画・設計・施工の前提となる地形・地質を含めた諸々の場の条件や背景、そして技術的な考え方や調査・分析、評価および判断のプロセスと内容がしっかりとトレースできるように記述されていなければならない。それがないと、当該ダムについて知識も経験も持ち合わせていない後継のダム技術者にとって参考にはならない。

7. ダムの地質調査・計測技術の高度化と効率化

今日の急速に高度化する地質調査・計測技術や知見・情報を積極的に取り込んで、ダムの地質技術の高度化、効率化を図っていく必要がある。それには、導入する地質調査・計測技術について、適用のための改良・改善、既存技術との比較評価、既存技術も含めたパッケージ化、設計・施工への利用の体系化、実績データの集積・共有を図る必要がある。表-1にダムの地質調査技術の適用と展開における主な課題と改良・改善策について、プロジェクトの技術的段階に沿って整理した。

7.1 広域の概略調査技術の高度化と効率化

7.1.1 高度化と効率化の基本的考え方

ダムの概略調査における地質調査・計測技術の高度化と効率化の問題は、山地の広域に展開される“山地土木”として、近年多発する深層崩壊・天然ダムにおける問題と多くを共有している。そこで、深層崩壊・天然ダム懸念地域に対する場合と比較しながら述べる。図-2に広域の“山地土木”における概略調査と評価の展開方法についてダムと深層崩壊・天然ダム懸念地域の場合を対比して示している。

ダムなど広域に展開される“山地土木”における概略調査の主な調査および評価項目は、ダム基礎岩盤や斜面の安定性評価や解析に必要なとする地質情報などからもわかるように、①斜面勾配とその広がり、②被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり、③斜面の挙動や変動とその広がりである。

これら①～③について、まずは、その属性や物理的・工学的意味を定性的に把握した上で、可能な限り定量的情報を取得する必要がある。なお、断層の活動性の調査と評価については別途考えることとする。

広域の概略調査における地質情報の取得対象は、箇所や項目によって濃淡はあるものの、基本的には設定した調査範囲のすべてとなる。

(1) 広域の概略調査の展開

a. 概略調査の展開において考慮すべき要素

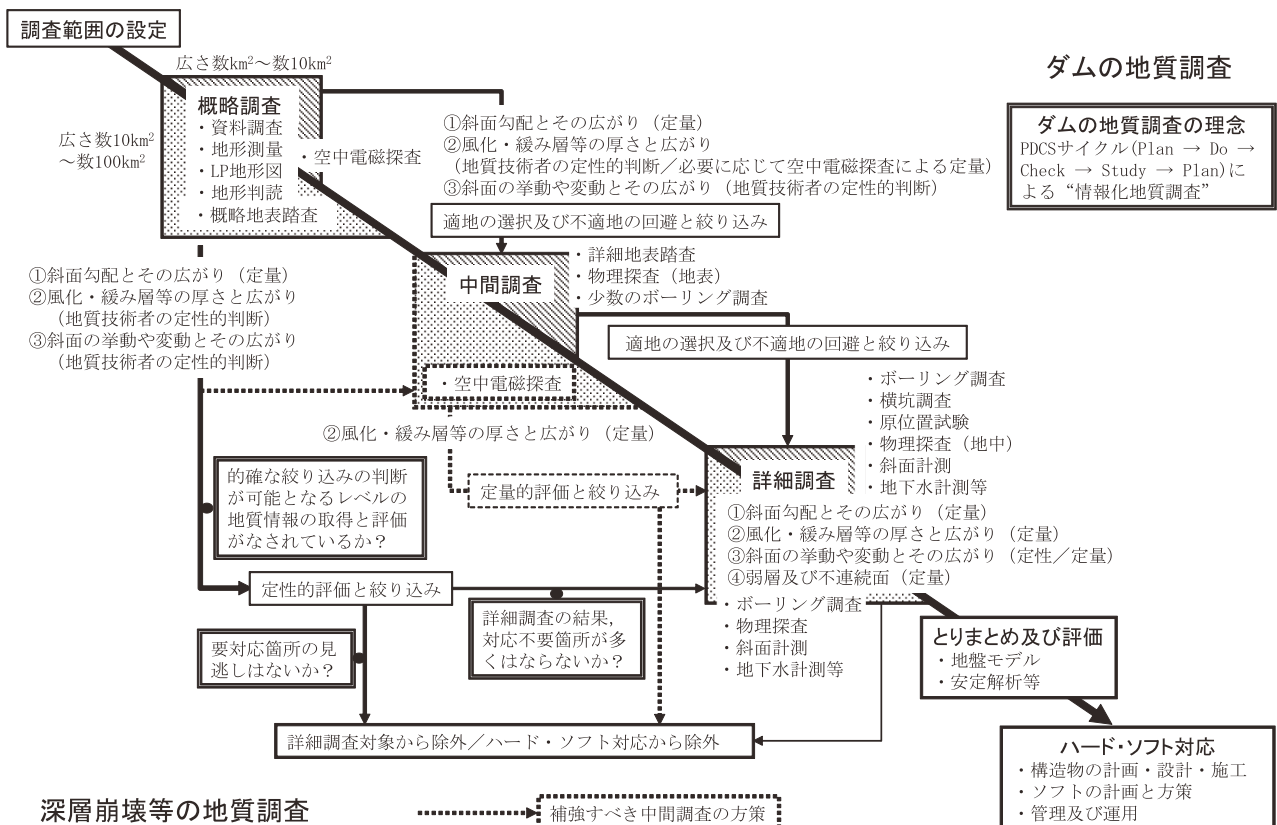


図-2 広域の“山地土木”における地質調査の展開の考え方と手法（ダムと深層崩壊等の場合の比較）

Fig. 2 Concept and methods of the geological investigation for the civil engineering projects in the mountainous area (in comparison dam geology and deep slope failure).

地質調査を効率的に展開するために考慮すべき要素として、地形・地質条件や前述①～③の他に、対象領域の広さ、実施の段階性の二つがある。

対象領域の広さは、例えば、「ダムサイトや原石山など特定の地区や地点」、「ダム計画地域や道路計画路線沿いなど特定エリア」、「深層崩壊・天然ダム懸念地域を対象とするような広域エリア」などの違いである。

段階性は、各調査手法の特色を生かして段階的に手法と数量を適用し、地質情報の取得と評価を概略調査、中間調査、詳細調査などに分け、効率的に進めようというものである。

b. 概略調査の展開と対象箇所の絞込み

対象領域の広さや調査箇所数は地質調査の効率性、経済性に直結する。このため、地質調査を進める過程において対象箇所の絞込みが必要となる。この絞込みは、調査と評価項目、適用する手法と数量・密度、および調査結果と評価に基づいて段階的に行われる(図-2)。このプロセスには、地質情報の取得および評価による整理と絞込み、工学的・事業的評価も含めた適地選択と不適地回避による絞込みの二つが存在する。前者は広域の“山地土木”において一般的に成立する。しかし、後者はプロジェクトの目的や性格によっては成立しない。

(a) ダム計画地域や道路計画路線沿いなどの場合

ダムの地質調査は伝統的に Plan (調査計画) → Do (調査業務の実施) → Check (調査業務の評価) → Study (調査結果の評価) → Plan (調査計画)、すなわち PDCS サイクルによる“情報化地質調査”の理念に基づいて段階的に展開されてきた³⁾。

加えて、ダム計画地域や道路計画路線沿いなどでは、工学的・事業的評価も含めた適地選択、不適地回避のプロセスが成立する。

このため、一定の目処をつけて絞り込んだとき、不確実な部分を残したとしても大きな見逃しや手戻りにはならない。回避すべき箇所は調査の初期の段階で判断し、実行した方が効率的である。適地選定については、詳細地表踏査、ボーリング調査など精査的な調査手法を段階的に適用して調査精度を徐々に高めていくことにより、候補箇所を絞り込んでいくことが可能となる。

(b) 深層崩壊・天然ダム懸念地域などを対象とする場合

一方、例えば、広域エリアにおける深層崩壊・天然ダム懸念地域を対象とするような場合は、選択、回避のプロセスは成立し得ない。このため、当初設定した調査領域のすべてについて「的確な絞込みの判断が可能となるレベルの地質情報の取得と評価」が必要となる。それがないと、要詳細調査箇所、要対応箇所の見逃しに直結する。つまり、精度の高い情報と判断が工学的評価に踏み込む以前の、概略調査に求められている。

c. 対象領域の広さと対象箇所の絞込みにおける問題点

深層崩壊・天然ダム懸念地域などの概略調査においては、ボーリング調査など精査的な手法も取り込んで段階的に調査精度を高めていく方法は、甚だ非効率、不経済となる。もちろん、概略調査において見逃された深層崩壊・天然ダム懸念箇所は、実際に発生するまで明らかになることはない。つまり、調査目的、事業目的を達しない。広域エリアにおける深層崩壊・天然ダム懸念地域の概略調査を対象とする地質技術には、非常に厳しい業務的条件での展開を求められている。

一方、ダム計画地域や道路計画路線沿いの概略調査では、精査的な調査手法も一部に取り込んだ PDCS サイクルによる“情報化地質調査”と適地選択、不適地回避のプロセスが存在している。

何れにしろ、広域に面的に展開可能な調査手法は限られている。概略調査における見逃しを避け、品質と信頼性を確保するには、広域の山地斜面の地形・地質条件について多面的に捉えるとともに、適切、高精度な手法を綿密かつ重層的に適用しなければならない。

(2) 概略調査の手法

広域の“山地土木”における前述①～③の各項目について面的に適用可能な調査手法として次のようなものがある。

a. 斜面勾配とその広がり

これは、測量技術、地形図作成技術の範疇であり、わが国では高度に発達した技術が存在する。近年、LP (レーザープロファイラー) 地形図も一般化してきた。

b. 被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり

被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度については、「地質技術者の地形判読や地表踏査による考察や判断」、「弾性波探査やボーリング調査」などがある。地質技術者の考察や判断は定性的なものである。敢えて数値化したとしても、ばらつきが大きく、倍/半分あるいはそれ以上の誤差はつきまとう。一方、弾性波探査やボーリング調査では定量的に求めることができる。しかし、概略調査での適用は、コストおよび効率性の面から極めて限定的で、汎用はできない。

c. 斜面の挙動や変動とその広がり

計測技術の発展を背景とし、空間と時間を限定すれば斜面の挙動や変動を精度良く把握できる。

しかし、現在のところ、広域、面的に適用できる実務的手法は存在していない。ましてや、数百年、数千年、それ以上の長い時間で形成され、変動している斜面について過去に遡って計測することはできない。

このため概略調査における斜面の挙動や変動の調査は、過去の変動の痕跡を調査することになる。代表的な痕跡は地形に残された微地形である。地形判読によって、斜面の挙動や変動を定性的ではあるが把握できる。この部分の仕事は、挙動や変動の痕跡であるこ

との判定を含め、地質技術者の考察や判断にたよらざるを得ない。

(3) 概略調査の項目と方法における課題

広域の“山地土木”の概略調査における、①斜面勾配とその広がり、②被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり、③斜面挙動や変動とその広がり、の各調査および評価項目のうち、①、③については、一般的な考え方や手法が存在しており、高精度化、効率化の課題はあるにしても、それに向けた努力によって品質や信頼性を高めることができると考えられる。

しかし、②すなわち、概略調査における被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり、の把握については大きな難題がある。概略調査において一般的に用いられる地形判読や地表踏査による地質技術者の考察や判断は定性的なものであって、被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり、の定量的、三次元的把握は原理的に不可能だからである。

このため、詳細な地形判読とでき得る限りの地表踏査を行うことは当然として、概略調査の高精度化および効率化のための広域エリアにおける「②被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり、の三次元的把握手法」の導入が不可欠となる。

その手法は、精査的手法を投入し難い厳しい業務的条件のもとで、「的確な絞込みの判断が可能となるレベルの地質情報の取得と評価」を行い、見逃しを避け、品質と信頼性を確保しなければならない広域エリアにおける深層崩壊・天然ダム懸念地域を対象とした概略調査あるいは中間調査に有効でなければならない。

もちろん、その手法が広域エリアに有効であれば、ダム計画地域や道路計画路線における概略調査に、さらには効率的、経済的で高い品質と信頼性の事業展開に役立つものとなる。

7.1.2 概略調査における高度化技術

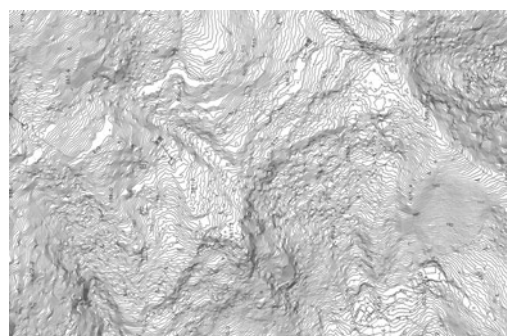
ここでは、「地質技術者の考察や判断」の高精度化としてLP（レーザープロファイラー）地形図判読、「被覆層厚や風化・緩み層厚、基盤岩深度とその広がり、の三次元的把握手法」として空中電磁探査を挙げる。

(1) LP（レーザープロファイラー）地形図判読

LP地形図判読は、地形判読という1960代、例えば高速道路路線調査¹¹⁾に連なる既存技術の高度化である。

地形判読は、地形図および空中写真を使ってダムサイトや貯水地周辺の地形的特徴を判読し、斜面状況や形成過程を読み取り、斜面の緩みや風化、地すべり地形などを抽出する。さらに、その平面的な分布と地形的特徴について、判読図と記載によって明らかにするものである。

近年、LPによる航測細密地形図（LP図）の作成と利用が一般化し、地すべり、深層崩壊斜面やその懸念のある斜面の抽出に大きな効力を発揮するようになってきている（図-3）。



(1) レーザープロファイラーによる細密地形図



(2) 航空写真測量による地形図

図-3 レーザープロファイラーによる細密地形図と航空写真測量による地形図の比較事例¹²⁾

Fig. 3 Comparison of the topographical map between by the laser profiler (1) and by the aerial photo surveying (2)

地形判読は、①深い風化、岩盤クリープ、緩みなど斜面変動の素因を示唆するような山頂部や稜線部の緩斜面、②同じく山頂部や稜線部の緩斜面の二重（多重）山稜や線状凹地、③斜面の段差や滑落崖など遷急線や凹地、④斜面の膨らみや緩斜面、遷緩線、⑤規模の大きな露岩、⑥崖錐や崩積土、段丘など堆積地形などに着目して行う。

もちろん、LP地形図判読は、地形判読士¹³⁾など地形判読および地表踏査の豊富な経験によって培われた①～⑥などの判読能力と地形・地質についての深い識見が基本となる。

(2) 空中電磁探査

空中電磁探査は、有人／無人航空機を用いて斜面や地山の比抵抗値の三次元分布を求めるものである。空中電磁探査は1980年代、地下資源の広域探査を目的として導入されはじめた手法である¹⁴⁾。土木分野では1990年代ころから使用されはじめた¹⁵⁾。

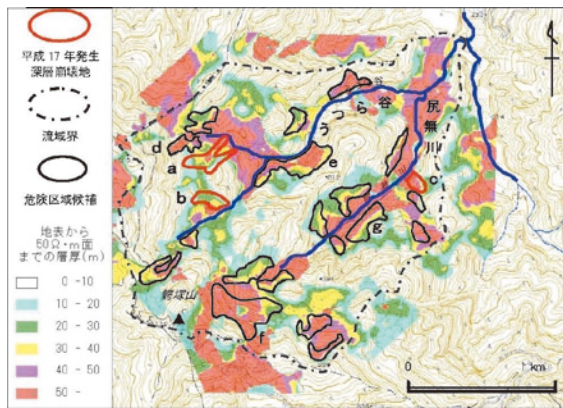
比抵抗値は、斜面や地山の含水状態を反映することから被覆層、風化層、緩み、あるいは岩盤性状や岩級区分など地質性状の定量的把握に有効である。

空中電磁探査の最大の特徴は、広域の“山地土木”の概略調査あるいは中間調査手法として地質性状の定量的、三次元的分布の把握が可能にあることにある。

このため、空中電磁探査は、広域エリアを対象に、深層崩壊の概略調査の手法として、斜面の安定性を規定する地質性状や予想される深層崩壊の基底面や移動



(1) 調査位置



(2) 50 Ω・m程度までを示す風化層の底に基づく風化厚

図-4 空中電磁探査による風化層厚の三次元把握の事例¹⁷⁾

Fig. 4 Three-dimensional investigation of the thickness of the weathering layer of the mountain area by the aerial electromagnetic exploration method.

塊の三次元分布の把握を目的として実施されている(図-4)^{16), 17)}。

また、ダムサイト、貯水池地山、トンネル・橋梁・切土・盛土など付替道路、貯水池地すべり、原石山などダム建設に関わる地質調査のすべてが地質性状とその広がり、定量的、三次元的分布の概略調査による広域把握が出発となる。このため、ダム分野では、堤体材料調査^{18), 19)}や貯水池地すべり調査¹⁵⁾、付替道路トンネル計画調査²⁰⁾などに適用されている。

概略調査においては、地形判読や地表踏査による地質技術者の経験に基づく定性的判断が、従来から適用されてきた。しかしながら、この手法によって広域エリアを偏りなく、かつ定量的、三次元的に把握することは、原理的に困難である。しかし、空中電磁探査はそれを可能とする。

ここで、国土交通省・土木研究所・応用地質(株)が共同して行った付加体堆積物からなる広域山地の深層崩壊懸念箇所の抽出を目的とする空中電磁探査の事例^{16), 17)}を改めて挙げておく。

本事例では、詳細な地形判読、地表踏査、ボーリング調査および電気探査を行い、空中電磁探査の精度を

確認している。空中電磁探査とボーリングのコア形状、岩級判定を組み合わせ、D～CLの低比抵抗値(50 Ω・m程度まで)を示す風化層の厚みとその下面の勾配を三次元的に把握し、不安定斜面を抽出している(図-4)。

(3) 概略調査技術のパッケージ化

LP地形図判読、空中電磁探査、地表踏査をパッケージ化し、ダム計画区域など広域の“山地土木”の概略調査手法として展開する必要がある。これまで調査原理的な限界から、地形・地質的な適地や欠陥箇所の見逃しを生じやすかった従来の概略調査手法を補強すべきものと期待される(図-2)。

さらに7.2.1に述べるボーリング調査技術を組み合わせると、広域山地における岩盤性状と工学的特性の定量的な三次元的分布の把握の高度化が可能となる。

7.2 詳細調査技術の高度化と効率化

7.2.1 ボーリング調査技術の高度化

(1) 高品質コア採取

近年のコア採取技術の進歩によって、岩盤や地山の原位置の組織や構造の円筒形の断面をそのまま観察可能といえるほど高品質なコア採取が可能となっている。かつてはボーリング掘進時の循環水で細粒分を流出させたり、無水掘りで原位置の構造を乱したりしていたような斜面の被覆層や強風化岩、割れ目が多く不均一で脆弱な地質、変位や変動の痕跡など、土質・地質構成や構造の詳細な観察が可能となってきている。

コアの品質と採取率低下の要因を除去、改善するために、①ダブルコアパレルやコアパックチューブ、②スイベル型ダブルコアパレルなどの資機材、③発泡流体などの高性能循環流体、④大孔径ボーリング、⑤最適掘進条件の検討などの方策が行われている。③、④は調査目的と地質性状を考慮して適用される。亀裂性の不均一で脆弱な地質について特に精度の高い評価を必要とするとき、両者を併用することが多い³⁾。

ここで、高品質コア採取技術の一つとして、応用地質(株)の気泡ボーリング工法+LWLP工法(低送水量低給圧工法)(TECRIS番号4006573754)を挙げておく。

また、地すべりのすべり面を含むコアを保存して構造を詳細に観察するための方法として、透明樹脂によって高品質コアを固化して半割りし、切断面を研磨した標本を作成する樹脂固定法²¹⁾が土木研究所において開発されている。硬軟など工学的性質は別途判定を要する。

(2) 孔壁撮影³⁾

孔壁撮影は、光源を付属した小型の撮像装置を孔内に挿入して、定深度・定方位の孔壁画像を撮影する孔壁の可視化技術である。孔壁撮影技術の進歩は、高解像度のカラーのシームレス画像、さらには割れ目など解析画像の提供が可能となった。

孔壁撮影は、孔内載荷試験やルジオンテストのように岩盤に応力や水圧など負荷を与えることなく、もちろん、岩盤の塑性変形や破壊、コア流失などを生じさせるおそれもない、いわば非破壊調査である。コア観察では困難となる不連続面や空洞の走向・傾斜、開口幅などの測定が孔壁撮影では可能となる。

孔壁撮影は、近年の撮像および画像解析技術の急速な進展にともなう撮影画像の高品質化、地質調査と評価の精度向上に対する設計・施工からのニーズなどを背景として広く普及している。

(3) コア性状および地形・地質学的過程の簡易定量化³⁾

地表から掘進した深度方向のボーリングコア性状変化と物性値を組み合わせることによって、緩みや風化にともなう岩質や岩盤性状の深度変化、さらには三次元的変化について定量的な把握と評価が可能となる。

ここでは、秩父帯の混在岩からなる付加体堆積物の地すべりにおけるコア性状の深度変化の簡易定量化と評価の事例を文献²²⁾・²³⁾によって挙げる。コア性状の簡易定量化の手法として“コア箱重量測定法”による単位体積重量測定が行われたものである。

“コア箱重量測定法”は、近年の高品質、高採取率のコア採取技術の発展を背景として、コアパックチューブに包んだ採取率100%と見せる採取直後のコアについて、コア箱に収納したまま重量測定し、相応の精度の単位体積重量を極めて簡便に求める方法である。

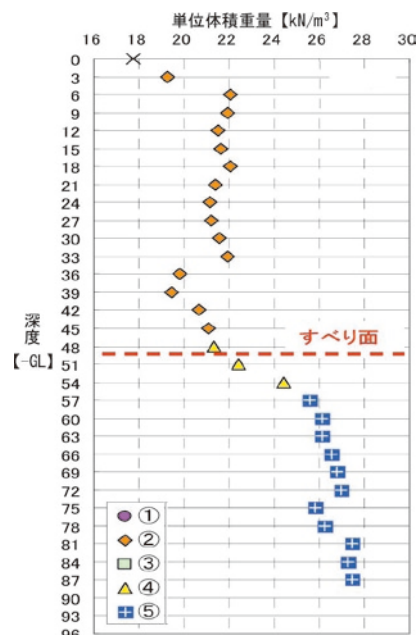
本事例では、高品質コアを採取し、一般的なコア観察による地質区分やコア形状区分に加え、斜面の形成史や地すべりの発達過程を念頭においた詳細なコア観察によるコア性状区分を行っている。さらに、地すべり土塊やすべり面などの判定と評価を行うとともに“コア箱重量測定法”による単位体積重量測定を実施している。

図-5は、コア性状および単位体積重量の深度変化の一例を示したものである。これによると、風化岩盤の下底付近にすべり面が形成され、地すべり土塊の単位体積重量は、おおむね一様であることがわかる。

また、新鮮な原岩を基準として、コア形状の細区分の組合せ(いわゆるJACIC解説書²⁴⁾表3.3.1～表3.3.5に基づく)によるコア性状と単位体積重量の減少率を求め、次のような値を得ている。

- ①: EⅦdε 単位体積重量の原岩からの減少率 27%
- ②: CⅣcδ 単位体積重量の原岩からの減少率 12%
- ③: BⅢcβ 単位体積重量の原岩からの減少率 4%
- ④: DⅦdβ 単位体積重量の原岩からの減少率 17%
- ⑤: BⅢaα 単位体積重量の原岩からの減少率 3%

複数孔の区間ごとに取得した離散的なコア性状および単位体積重量などのデータを組み立て、斜面の地質構造や地すべりの発達過程を念頭に置きながら総合的な地質解析を行うことによって、地すべり土塊と安定岩盤の定量的かつ三次元的な性状把握と判別、地すべ



凡例 (コア性状区分)

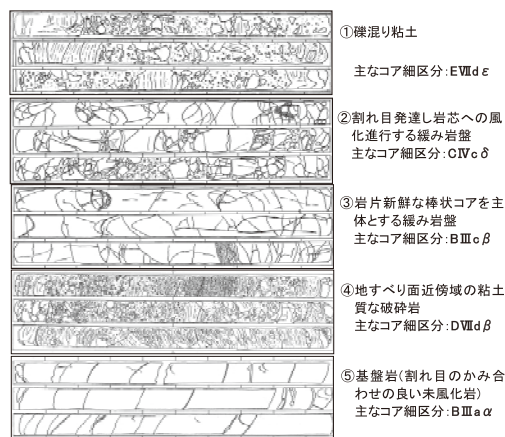


図-5 付加体堆積物における地すべりのコア性状と単位体積重量の深度変化の事例²²⁾・²³⁾

Fig. 5 Change by the depth of the unit volume weight and property of boring core of the landslide of the accretionary prism sediment.

り面的確な抽出が可能となる。

また、本事例は、コア性状を定量的で簡易な物性値への転換を図っている。このことは、簡易な物性値を媒介として、これまで容易でなかった岩盤性状や岩級区分と物理探査による弾性波速度や比抵抗値など、各種物理量との簡便で定量的な対応づけや転換を可能にすることを意味する。斜面や岩盤の物理的・力学的特性、岩級区分の深度変化、さらには三次元的な把握、評価手法の高精度化、効率化、簡便化に役立てることができる。

なお、本事例では、地すべり土塊の単位体積重量の深度分布は、地質解析のほか、地すべりの安定解析と必要抑止力の算定の合理化に利用されている。

7.2.2 物理探査および計測技術の高度化と適用

複数のボーリング孔や横坑、地表などを組み合わ

せ、送受信点を設けて測定するジオトモグラフィの手法を使えば、岩盤や地山の物理量の二次元、三次元の分布構造を可視化することができる。用いる物理量によって弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィ、レーダ（電磁波）トモグラフィがなどの手法がある。ジオトモグラフィでは、地質構造図や岩級区分図、ルジオンマップ作成、グラウチングによる改良効果の評価などのための有効な資料を得ることができる。

また、ダム基礎岩盤および貯水池斜面、掘削法面の安定性評価と管理を目的として変位・変動や地下水位など岩盤や斜面の力学的、水理的な挙動の計測が必要となる。高精度化とともに長期計測に必要な計測・処理の自動化・即時化および効率化を一層進めていく必要がある。

7.3 地質情報処理の高度化、効率化

7.3.1 掘削面の観察および評価と画像処理技術

断層や節理などの不連続面の抽出、風化などに関連する色相・色差などを指標とする岩級判定、および画像データ収録などを目的として、トンネル切羽などで適用されている岩盤の画像処理技術のダムの掘削面観察への適用、普及を図る必要がある。

7.3.2 地球統計学などによる地質工学図作成³⁾

地質構造図や岩級区分図作成においては高度な地質学的考察や解釈を必要とするため、完全な電算化はダムの分野では馴染まず、CAD化や電算支援による地質図作成にとどまっている。しかしながら、ルジオン値やグラウチングの注入量など離散的に得られる大量のデータ、かつ、地質構造などとの関連を系統的に求めるに物理量の空間分布について、クリギング法に代表される地球統計学（Geostatistics）など統計的手法を用いた三次元的、定量的表示と評価手法について、ダム技術分野においても積極的に導入する必要がある。特に、ルジオンマップ、注入量などグラウチング施工関係マップ作成の高度化、効率化を図っていく必要がある。

8. ダムの地質調査と評価における最近の技術的課題

8.1 第四紀断層調査および評価法

活断層の問題が土木工学分野において広く認識されるようになったのは昭和40年代の終わり頃からである。ダム建設に関わる第四紀断層についての個別ダムにおける体系的な取り組みは、昭和50年初頭にはじまる。その後取り組みは発展し、昭和59年5月建設省河川局では、「ダム建設における第四紀断層の調査と対応に関する指針（案）」が取りまとめられた。この指針は、計画・調査および建設中のダムにおける第四紀断層の調査と評価の実務に適用され、今日に至っている。

この指針が出されて30年以上が経過し、この間、プ

レートテクトニクス理論の確立、第四紀地殻変動や地震、地方地史や地形発達に関する研究など、地球科学は著しく進展している。一方では、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震、2004年中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震など、地震断層や、地震動に関連するとみられる地表変位をもたらした地震が頻発している。この間、地震と活断層の関係が広く再認識され、文部科学省「地震調査研究推進本部」によるトレンチ調査など活断層調査が積極的に進められ、多くの知見が集積されてきている。

さらには、兵庫県南部地震を契機として、内陸やプレート境界における断層や変位などに起因する地震動の土木構造物に対する影響評価、あるいは耐震性能照査に用いる地震動の想定に関連して、活断層の調査や評価を必要とする耐震性能照査がはじまっている²⁵⁾。

また、この指針を受けた第四紀断層の調査法については、順次様々な要領や資料が提示されているものの総合的、体系的に取りまとめられたものはない。

以上のように、昭和59年に、この指針が出されて以降、第四紀断層に対する科学的知見や情報は増加し、調査や評価の手法や考え方も著しい進展を見せている。また、ダムの立地だけでなく、地震動のダム構造物などに対する影響評価、あるいは耐震性能照査など、第四紀断層の調査と評価に関わる取り組みも多様化している。このようなことから、ダムの第四紀断層の調査および評価方法に関する総合的な技術体系の提示が望まれる。

8.2 重力式ダムにおける低角度弱層の調査と評価

重力式コンクリートダムの堤敷きにおける低角度の断層や軟質層などの弱層は堤体の安定上、大きな影響を及ぼすことがある。特に、基礎掘削において予期しない位置や規模の低角度弱層が現れると、掘削量の増大や設計変更を招き、工期、工事費に及ぼす影響も大きい。

このため、横坑調査とともに、高品質コア採取と孔壁撮影をパッケージとしたボーリング調査による綿密な位置と規模、性状、および強度の把握と評価が必要となる。弱層の強度の把握、評価は、原位置剪断試験、および幾何学形状や挟在物、壁面の岩質などに基づいて推定することになる。データの集積と共有、および簡易判定手法の確立が必要である。

かつて、低角度弱層について立坑を用いた調査も行われていたが、ボーリング調査技術が発達した今日、立坑を設置する例は非常に少なくなっている。

8.3 グ라우チング技術の再評価³⁾

8.3.1 グ라우チングの発揮する多面的効果

グラウチングは、カーテン、コンソリデーション、ブランケットなど、いずれかの工法に区分されていたとしても、間隙や割れ目へのグラウトミルクの注入と

固化という基本原理に基づいて相応の効果を発揮する。このため、グラウチングは、各工法における目的や期待する機能を越えた多面的、相補的な効果を発揮しているものと考えられる。不可視で不確実性に満ちた岩盤について、先人たちが今日まで築き上げてきたグラウチング技術とその信頼性は、そのような多面的、相補的な効果と機能によって支えられている面は否定できないであろう。

いずれにしても、従前と同等の信頼性を確保しつつ、積極的に合理化を進めていくためには、①地山や岩盤はサイトごと、箇所ごとに固有性が見られ、他のサイトの実績や統計値を適用しにくいこと、②水みちを求めて浸透する浸透流の予測と把握は困難をとまなうこと、など不可視で複雑・多様な岩盤の特徴と不確実性を踏まえ、機械的になり過ぎることなく、緻密かつ周到に対応していく必要がある。

8.3.2 試験湛水を受けての追加対策と配慮の必要性

試験湛水の中で、漏水など所要の機能を十分に発揮しない箇所や徴候が確認された場合、その状況を見極め、必要に応じて試験湛水の中断、あるいは試験終了後に、追加グラウチングなどの対策を行うことになる。

このため、万全の調査と設計・施工をもって試験湛水に臨む必要がある。また、試験湛水において予想される様々な事態に備えた設計上の配慮や事前に対応策を準備しておくことも必要となる。設計上の配慮の一つに、迅速かつ低コストで確実、容易に追加グラウチングを可能とするコンクリートダムの、監査廊からのカーテングラウチングが挙げられよう。

8.4 貯水池斜面の調査と評価³⁾

8.4.1 トップリング性の斜面クリープ

細互層や粘板岩、結晶片岩など平行な不連続面群が発達した板状岩からなる岩盤の斜面においては、流れ盤が不安定であることはもちろんであるが、不連続面群が緩傾斜の場合、受け盤ではトップリング（転倒）、流れ盤では流れ盤すべり（図-6(1)）、不連続面群が急傾斜の場合は、受け盤、流れ盤ともにトップリング

を生じやすい（図-6(2)）。板状岩のトップリングは変位の形に着目した用語であるが、変位速度に着目すると重力による緩慢な一定速度のクリープ的な動きである。

板状岩のトップリング性の斜面クリープは地すべりの範疇に入らない斜面変動現象である。これが進行し、明瞭なすべり面を生じてすべれば地すべり、すなわち、「トップリング性の斜面クリープから移行した地すべり」、同じく斜面クリープが進行して歪みが限界に達し、急速な変位と破壊に転化すれば「斜面崩壊」となる。

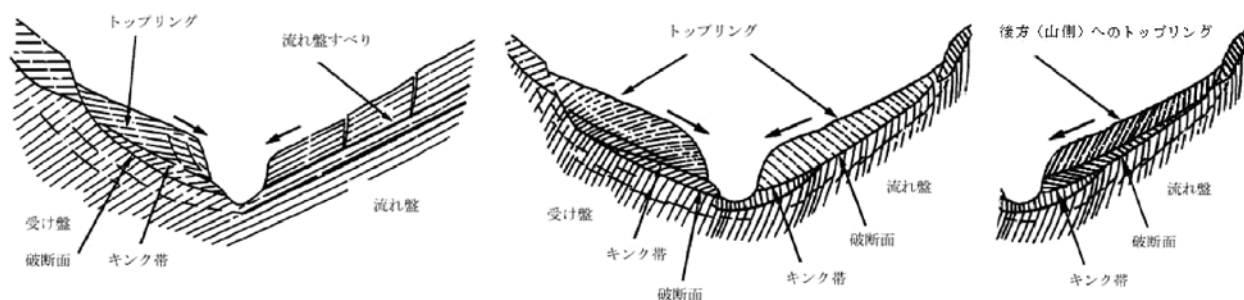
橋梁などの支持地盤を確認する程度のボーリングなど、工事箇所の局所的な地質調査では、トップリングを把握することは不可能に近い。工事箇所を含めた広い範囲（平面的、深度的に）の調査、そしてトップリング性の斜面クリープの可能性の認識が必要である。

トップリング性の斜面クリープを把握する方法として、層理面や片理面など地質的分離面の走向・傾斜について、斜面変動の影響を受けていない安定した岩盤との比較がある。広域地質調査による大局的な地質構造、河床部の“横盤”などの安定した岩盤との対比、ボーリングによる深部の安定した地質構造の把握、周辺の自然斜面や掘削法面の変形状態の把握が必要となる。

一般に斜面は植生に覆われ露岩に乏しい。その上、受け盤は安定なものとの認識が強く、トップリング性の斜面クリープの存在は必ずしも一般的には知られていない。まずは、粘板岩や結晶片岩、細互層など板状岩におけるトップリングをとまなう斜面クリープの存在の一般的認識が不可欠である。

8.4.2 試験湛水中に不安定化しやすい貯水池地すべり

試験湛水中における貯水池斜面変状の問題に関わってきた経験をもとに、ここでは、遭遇するおそれのある地質調査の困難さや湛水中のトラブルの想定例を図-7に示した。ここに挙げた想定は、対策工の能力不足（計画安全率や必要抑止力の過小設定）によるというよりも、それ以前の、あるいはそれにつながる地質調査と評価あるいは地質図作成、対策計画の適否に



(1) 緩傾斜の板状岩のトップリングと流れ盤すべり

(2) 急傾斜の板状岩のトップリング

図-6 板状岩の受け盤および流れ盤におけるトップリングとすべり（文献²⁶⁾を加筆修正）

Fig. 6 Toppling and slide on the reverse-dip slope and dip slope of the stratified formation.

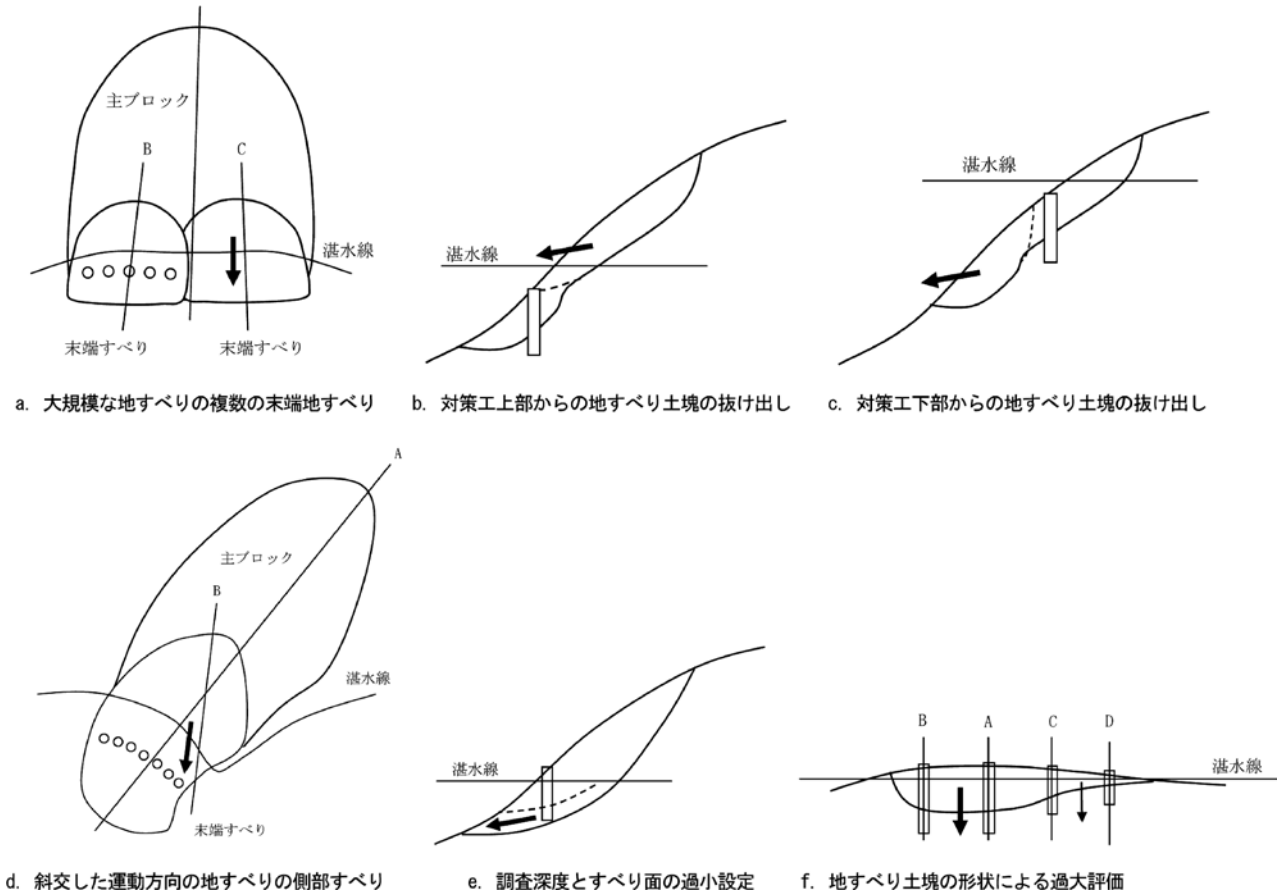


図-7 地質調査やブロック設定など地質技術に起因する地すべり対策の不十分さの想定例³⁾

Fig. 7 Assumption example of the shortage of the landslide measure plan caused by geological investigation and block setting.

関連するものである。

8.4.3 管理ダム・再開発ダムの貯水池地すべり調査

管理ダムにおいて時折、貯水池地すべり挙動や変状が見られることがある。また、近年、ダム事業に対する社会的ニーズの多様化を反映して、貯水池運用の変更やダムの再開発事業が増え、貯水池地すべりの再調査が必要となる場合が多くなっている。このため、管理ダムにおける貯水池地すべりの調査と評価および対策の体系的な考え方や方法が必要となる。しかしながら、指針^{27)・12)}では十分にカバーされていない。

管理ダムでは、湛水に対する地すべり斜面の水利特性や安定性に関する“実物試験”を行っていると思われることができる。

湛水中の斜面変状や挙動計測データは、地すべりの安定性評価の重要な指標となる。このため、管理ダムでは、新設ダムを対象とした調査や評価方法をそのまま適用するのではなく、斜面変状や地下水位変動など、地すべりの湛水中の活動状況や水利特性の把握と評価、すなわち、水利特性や安定性に関する“実物試験”に重きを置いた観点が重要となる。

(1) 解析条件の整理と見直し

湛水中に変動の認められる貯水池地すべり、貯水位の引き上げや運用方法の変更、再開発などを検討して

いるダムの貯水池地すべりについては、貯水位変動に対する安全率変化を求め、地すべりの安定性を評価する必要がある。さらに、対策工の要否の判定、必要抑止力の算定、対策工の計画検討を行う必要がある。そのために必要な安定計算における解析条件の整理と見直しである。

a. 地すべりの斜面状況の確認と整理

地すべりの湛水前・対策前の挙動や変状と変動区分、対策工の計画・設計、湛水中の挙動や変状など、貯水池斜面の地すべりの状況について確認し、整理する。

b. 地すべりの境界条件の整理と見直し

貯水位変動域の湖岸観察や湛水中に生じた地表変状の詳細観察を行う。必要となれば新たにボーリング調査などを実施する。土質・地質構成および構造、すべり面やブロックの範囲など境界条件の整理と見直しを行う。

c. 残留間隙水圧に関わる項目の検討

管理中のダムにおいては、貯水位観測と気象観測は当然のこととして、必要に応じ、地すべりの計測・管理の一環として地下水位観測が行われている。管理ダムや再開発を検討しているダムにおいては、残留間隙水圧の残留率の“実物試験”を利用して地すべり対策の信頼性と経済性を高めることができる。

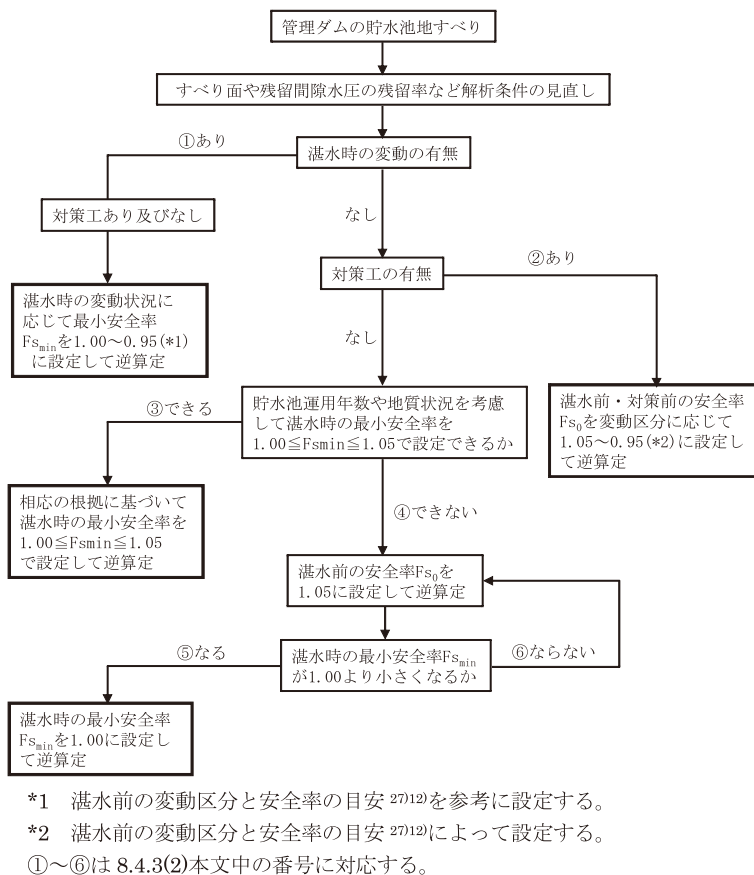


図-8 管理ダムにおける貯水池地すべりのすべり面の土質強度定数を逆算定するための手順の一案³⁾

Fig. 8 Procedure of setting the safety factor to obtain the shear strength of the slide surface by the reverse calculation for the slope stability analysis of the reservoir slope landslides of the operating dam.

すなわち、貯水位変動に対する地下水位の応答など地すべり斜面の水利特性を把握し、湛水前の地すべりの安定解析と必要抑止力の算定に用いた残留間隙水圧の残留率を検証し、新たに必要となる安定解析における残留率について実測的に求めることができる。

- i) 貯水位と地下水位データをもとに、貯水位と貯水位降下速度をパラメータとして当該地すべり斜面の残留間隙水圧の残留率を求める。
- ii) さらに、地すべりの土質・地質構成や勾配、規模などをパラメータに加え、系統的に整理しておく、当該ダムの他の貯水池地すべり、さらには、他ダムの類似した貯水池地すべりにおける残留間隙水圧の残留率の設定に利用できる。
- iii) 残留間隙水圧の残留率の設定を、より一般化するためには、原位置透水試験などによって地すべり斜面の飽和・不飽和の透水特性などを求め、斜面のモデル化と浸透流解析を行う。そして、実測と解析を照査し、現況あるいは再開発などの貯水池運用計画に沿った残留間隙水圧の残留率を求める。これを用いて、合理的な安定解析と必要抑止力の算定を行い、経済的な高い信頼性の地すべり対策を実施できる。

d. 単位体積重量の検討

岩盤地すべりや風化岩地すべりでは、よく引用され

る平均的な地すべり土塊の単位体積重量（一般的には $\gamma_t = 18 \text{ kN/m}^3$ ）に比較して大きいことが多い。

このため、前例などによる単位体積重量を用いた安定計算が行われている場合は、7.2.1(3)に述べた“コア箱重量測定法”による系統立てたデータ取得を行い、構成材料の土質やコア性状の分布比率などを考慮して単位体積重量の設定を行うとよい。

(2) 土質強度定数の整理と見直し

前述(1)解析条件の見直しを行った上で、安定解析に用いる土質強度定数の検証と見直しを行う。

管理ダムの貯水池地すべりでは“実物試験”を利用して、湛水前・対策前に逆算法によって求めた土質強度定数を検証し、見直すことができる。ここでは、その一つの考え方と方法について述べ、図-8に手順を示す。以下の本文中の①～⑥の番号は図-8による。

a. 湛水中に変動が見られる地すべり

湛水中に変動が見られることから、ダム建設時の調査と評価、解析および判定などが、基本的には十分でないことを意味しており、それらの分析が必要となる。

湛水時に変動が見られる地すべりは、①対策工の実施の有無にかかわらず、指針^{27) . 12)}を参考に湛水時の変動状況に応じて最小安全率を $F_{s_{min}} = 1.00 \sim 0.95$ に設定し、土質強度定数を逆算定して求める。

b. 湛水中に変動が見られない地すべり

湛水中に変動が見られないことから、ダム建設時の調査と評価、解析および判定が、基本的には適切であることを意味している。

(a) 対策工が実施されている地すべり

湛水時に変動が見られず、かつ、②対策工が実施されている地すべりについては、指針²⁷⁾・¹²⁾によって湛水前・対策前の変動区分に応じて安全率 F_{s0} を 1.05 ~ 0.95 に設定し、逆算定して求める。

(b) 対策工が実施されていない地すべり

湛水時に変動が見られず、かつ、対策工が実施されていない地すべりについては、③貯水池運用年数や地質状況などを考慮して湛水時の最小安全率を $1.00 \leq F_{smin} \leq 1.05$ に設定可能と判断できるときは、それに基づき、逆算定して求める。

一方、④貯水池運用年数や地質状況を考慮して湛水時の最小安全率を $1.00 \leq F_{smin} \leq 1.05$ に設定可能と判断できないときは、湛水前の安全率 F_{s0} を 1.05 に設定し、逆算定して求める。ただし、その値を用い、⑤湛水時の最小安全率 F_{smin} が 1.00 よりも小さくなるときは、湛水時の最小安全率 F_{smin} を 1.00 に設定し、逆算定して求め、⑥湛水時の最小安全率 F_{smin} が 1.00 よりも小さくならないときは、そのまま④とする。

なお、湛水時の最小安全率 F_{smin} に対応する貯水位変動条件は、当該地すべりにおけるこれまでの最も厳しい、すなわち最小の安定率を与えるものと考えられるが、地すべりの変動状況と貯水位変動の関係を分析して設定する必要がある。

c. 崖錐や崩積土など未固結堆積物からなる斜面

崖錐や崩積土など未固結堆積物からなり、かつ、明確なすべり面が形成されていない斜面で、湛水前・対策前に土質試験による土質強度定数を用いて安定解析を行った斜面については、“実物試験”の結果を利用し、設定した土質強度定数の妥当性を検証する。変動が見られる場合は、試料採取の位置や数量、試験方法などに留意して改めて土質試験を行うか、または、前述 a. に基づいた逆算定によって土質強度定数を求める。

d. 留意点

無対策の地すべりが湛水中に変動の見られないことを根拠として、湛水前に変動の見られない地すべりの安全率 $F_{s0} = 1.05$ に倣って、最小安全率を機械的に $F_{smin} = 1.05$ とするには無理がある。なぜなら、湛水前に変動の見られない地すべりの安全率 $F_{s0} = 1.05$ は、それまでの自然の様々な負荷を経て安定している地すべりが、湛水にともなう安全率の低下幅が 0.05 に達しない範囲では安定が保たれている¹²⁾ ことや地すべりに対する土工の実績などに基づいている。したがって、貯水位変動という新たな負荷を加えた上で、最小安全率を $F_{smin} = 1.05$ とするには、貯水池運用年数や地質状況などに基づいた相応の根拠がない限り無理がある。

9. 新たなダムの地質技術の可能性の模索

ダム建設を着実に推し進めるには、ダムの地質技術においても確立された概念や方法をさらに改良、発展させ、しっかりと適用、継承を図っていく必要がある。それと同時に、既存の枠や手法にとらわれず、現場の物理的、技術的諸条件を俯瞰し、当該ダム固有の課題解決を図るための発想や創意工夫も必要である。

9.1 夏期制限水位直上付近の貯水池地すべり排水工

地すべりの規模が大きく、排水工が有効と考えられても、その設置標高が貯水で水没しないサーチャージ水位以上となると、貯水位降下時の残留間隙水圧の低減効果はほとんど期待できない。一方、夏期制限水位（夏期制限水位の設定のないダムでは常時満水位）～サーチャージ水位に設けると排水工を通じて貯水が地山に浸透するなどとして、この標高での排水工の設置は避けられてきた。

しかしながら、貯水位変動を物理的事象として捉えようと、排水工と同じメカニズムはそもそも貯水池斜面・地山において生じている。一概に対策工として排水工を除外するには疑問が残る。排水工からの貯水の浸入や細粒分の吸い出しが有害となれば、それを防ぐ工夫もあり得るであろう。

貯水位上昇時の空気の残留による浮力の発生、すべり面の下位に残留する消散されにくい間隙水圧の軽減など、多面的な観点から夏期制限水位の直上付近における排水工の可能性について検討する必要がある。

9.2 河床部の緩み岩盤の基礎掘削前の仮補強

ダム工学分野では、岩盤掘削とグラウチングは別の技術体系として捉えられてきた。古くから岩盤掘削や法面技術が存在し、ダム分野にも導入されている。ダムサイトの掘削に適用されている逆巻き工法や斜面安定工も斜面工学分野の一般技術である。

一方、ダム技術はグラウチングによる岩盤改良の理念と手法を有している。斜面安定工とグラウチングを結びつける視点は、現在、存在していない。しかしながら、①岩盤斜面の不安定化の素因に岩盤の割れ目や緩みがあり、その拡大が斜面変状の誘因となること、②岩盤の割れ目や緩みにセメントミルクを圧入、固化して岩盤を一体化させ、力学特性の改良を図ることがグラウチングの物理的原理と効果であること、にまで遡って考えると、斜面安定工とグラウチングを組み合わせたハイブリッド型の技術展開も考えられよう。

まず、考えられるのは図-9に示すような、ダムサイト河床部の緩んだ岩盤の基礎掘削によって生じる緩み領域の掘削法面への、特に流れ盤の掘削法面への波及や変状誘発と不安定化の抑制である。河床掘削前に弱部補強のコンソリデーションまたはブランクットグラウチングを施工して緩みを充填し、それらのリスクを軽減するものである。斜面安定工の縮減、あるいは定

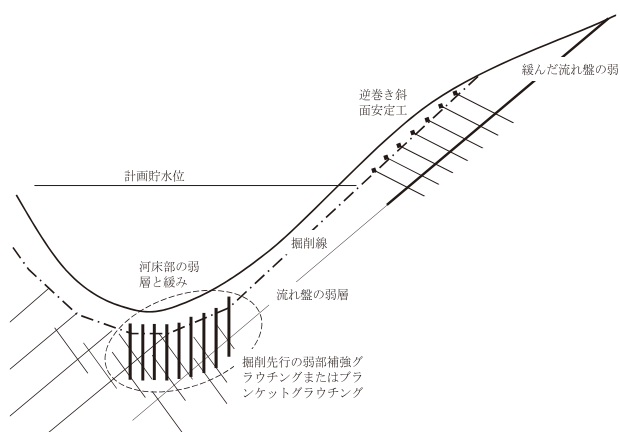


図-9 緩んだ河床部の基礎掘削に先行するコンソリデーションまたはプランケットグラウチングによる補強と掘削法面の安定性向上策

Fig. 9 Improvement of the stability of the cut slope by reinforcement consolidation grouting of the loose riverbed rockmass prior to slope cutting.

性的ながらも安全・安心の確保が図れるものと思われる。

もともと、堤敷きの弱部補強のためのコンソリデーションまたはプランケットグラウチングが必要である。そこで、河床掘削に先行してグラウチングを実施し、その効果を掘削法面の安定性確保、不安定化のリスク低減に利用する発想である。斜面荷重によってグラウチングの効果が損なわれる可能性に対する対応は、通常のグラウチングの手法によって、最終規定孔さらには追加孔やチェック孔によって確認、仕上げを行えばよい。

9.3 治水専用ダムの新たな観点による透水性／遮水性試験および評価技術の模索

9.3.1 地質技術に関連する水理的特殊性と方策の模索

(1) 治水専用ダムの水理的特殊性

治水専用ダムの水理的な特殊性について基礎岩盤や地山、貯水池斜面など地質技術の視点から考えてみる。

- i) 貯水による水理的負荷からみると、治水専用ダムの最低水位以上は、一般の多目的ダムにおける夏期制限水位（夏期制限水位の設定のないダムでは常時満水位）以上に相当する。一般のダムの常時満水位以下は、治水専用ダムには存在しない。
- ii) 洪水調節による水位変動は、一般に洪水時の数日程度の期間となる。
- iii) 利水を目的とする貯水の場合に比較すると、無害な漏水に対する許容値は大きなものとなろう。
- iv) 貯水位が上昇するときは、それなりの豪雨時である。ダムサイトや貯水池の地山は飽和されて地下水水位が上がり、自然の湧水、表流水が増加する。貯水は地山に向かって浸透し難く、漏水も生じ難い傾向となる。

v) 洪水調節時の基礎岩盤、貯水池地山に対する貯水による浸透流の水理的負荷は、数十日から数ヶ月を要する一般的な方法による試験湛水よりも遥かに小さい。

vi) 一方、地すべりなど貯水池斜面に対しては、残留間隙水圧による水理的負荷は一般に大きくなる。

vii) 洪水調節による貯水池斜面の景観や植生環境に対する影響は、一般的な方法による試験湛水よりも遥かに小さいものと考えられる。

viii) なお、試験湛水における貯水および放流のための閉塞ゲートと放流施設が必要となる。これらの施設はダム運用開始後、利用されない。

(2) 治水専用ダムの要件と合理化方策

ダムサイトおよび貯水池において、①ダムの機能を損なうような過度の漏水を生じないこと、②堤体と基礎岩盤および地山において許容以上の有害な間隙水圧や揚圧力、流速の浸透流を生じないこと、③ダム下流の地盤や斜面の安定、環境、景観に支障をきたすような漏水を生じないこと、④貯水池斜面の安定が保たれていること、などが要件として挙げられる。

一般に、これらの要件の充足状況は、調査段階における透水試験、施工段階におけるグラウチングと透水試験、および試験湛水などによって評価される。

一方、①～③の要件を満たすための基礎岩盤と地山、および遮水対策工に求められる物理的機能の水準は、治水専用ダムの水理的特殊性を考慮すると、利水のための長期貯水を行う一般のダムの場合よりも、緩やかなものと考えられる。

そこで、充足すべき要件とその試験、評価の物理的意味に立ち戻り、貯水期間の短い治水専用ダムの水理的特殊性に基づいた「実湛水と同様な原理の負荷試験」はあり得ないのか、模索してみる。

それぞれのダムに固有なダムサイトや貯水池とその周辺の地形・地質特性、景観・植生環境、水系や水路、水理的な土地履歴（水田など）、および貯水池運用計画など自然的、社会的、工学的条件を俯瞰した現場サイドの実務的観点からの模索である。もちろん、検討すべき技術的課題は多いだろう。

ここでは、①冷却節理が発達し、高透水で地下水位の低い広大な熔岩台地からなるダムサイトとリム部を仮定して、透水性／遮水性について、②一般的な状況の貯水池地すべり斜面の安定性について、新たな観点からの試験と評価技術の可能性を模索する。

これらの模索が成り立てば、一般的な試験湛水による水理的負荷のために必要とする遮水工などの縮減、試験湛水の省略、貯水池内の植生や生態系に対する影響も回避、軽減できる。

なお、これらの模索は一般のダムにも通じるところもあるだろうが、まずは、貯水による特殊な水理的負荷の治水専用ダムにおいて模索したものである。

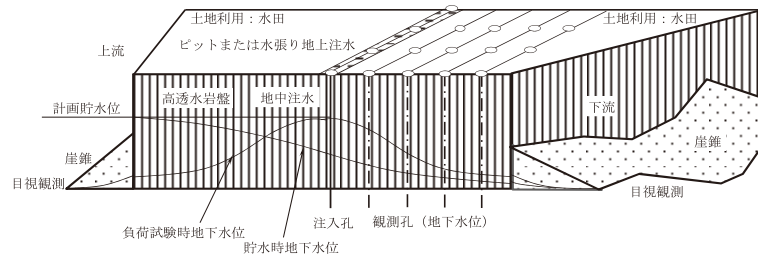


図-10 リム部地山の透水性および遮水機能の実大の原位置試験

Fig. 10 Full-scale permeability and cut-off function test on the bedrock of the rim of dam site.

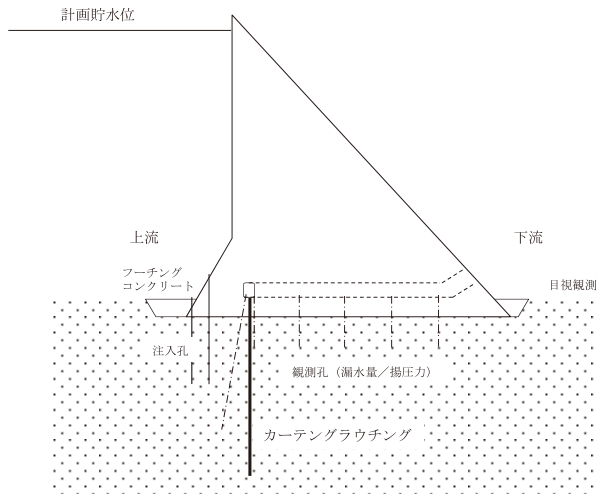


図-11 ダム基礎岩盤の遮水機能確認の試験湛水代替試験

Fig. 11 Permeability and cut-off function test substitute for the water reservoir-storing test on the dam foundation rock.

9.3.2 リム部の地山の遮水機能の原位置試験

リム部のルジオンテストによらない、かつ当該ダムの貯水を想定した水理的負荷による透水性/遮水性の調査と評価手法の模索である。ここでは、貯水を想定した遮水線の上流側における一斉注入による負荷試験を考える(図-10)。

ルジオンテストは1本・1区間の注入孔周りの透水性や遮水性を試験し、離散的に得られデータを内外挿してルジオンマップなどによって一定領域の透水性/遮水性を評価する手法である。すなわち、ダムサイトで一般的に行われているボーリング孔におけるルジオンテストとルジオンマップによって評価する方法は、貯水による水理的負荷を受けた状態における基礎岩盤や地山の透水性/遮水性を直接試験、評価するものではない。このため、直接それを評価する方法として試験湛水が行われるのである。

注入はボーリング孔や地表に設置したピット、注水池によって行う。注入圧力は、最高貯水位相当の水頭あるいは地表からの静水圧程度となる。注入時間は洪水調節期間を想定した長さが基本となる。

遮水線下流側の地下水位、地表への浸出・湧水量、地盤や斜面、環境、景観などへの影響について評価する。

9.3.3 試験湛水の代替試験

(1) ダム基礎岩盤の遮水機能の検証の代替試験

ダム貯水を想定した水理的負荷を与えるカーテングラウチング改良ゾーンの遮水性能および漏水量、揚圧力軽減効果の確認、評価への利用の模索である。

ここでは、堤敷き部の遮水線の上流側における一斉注水による貯水を想定した負荷試験を考える(図-11)。

注水圧は、最高貯水位に相当する水頭を超えず、かつ、生じる揚圧力は堤体に貯水圧荷重が作用していない状態、すなわち堤体の自重のみで許容される範囲とする。注入時間は洪水調節期間を想定した長さが基本となる。

堤体内の観測孔で一般的な手法による基礎岩盤の漏水量、揚圧力などを計測する。試験結果は、堤体設計における許容値、下流地表への支障をきたす漏水の有無、景観などの観点から評価することになる。

(2) リム部の遮水機能の検証の代替試験

ダム貯水を想定した水理的負荷を与えたカーテングラウチング改良ゾーンの遮水性能の確認、評価への模索である。

ここでは、リム部の遮水線の上流側における一斉注水による貯水を想定した負荷試験を考える(図-12)。9.3.2と9.3.3(1)の組合せである。

注入はボーリング孔や地表に設置したピット、注水池によって行う。注入圧力は、最高貯水位相当の水頭あるいは地表からの静水圧程度とする。注入時間は洪水調節期間を想定した長さが基本となる。遮水線下流側における地下水位、地表への浸出・湧水量、および地盤や斜面の安定性、環境、景観への影響などの観点から評価する。

(3) 貯水池斜面の安定性の検証の代替試験

貯水池斜面に対しては、一般的なダムにおける夏期制限水位とサーチャージ水位における水位変動を想定した負荷試験を考える(図-13)。

まず、貯水池斜面について、指針^{27)・12)}にしたがって高精度、綿密な調査と対策を行う。

次に、精査以上の対応を必要とした地すべり斜面が存在しなかった場合について、貯水池斜面の安定性確認を対象とした試験湛水は不要とすることが考えられる。

一方、湛水によって不安定化する可能性のある地す

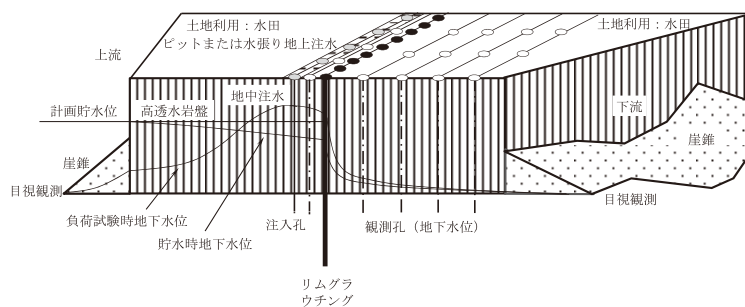


図-12 リム部地山の透水機能確認の試験湛水代替試験

Fig. 12 Permeability and cut-off function test substitute for the water reservoir-storing test on the bedrock of the rim of dam site.

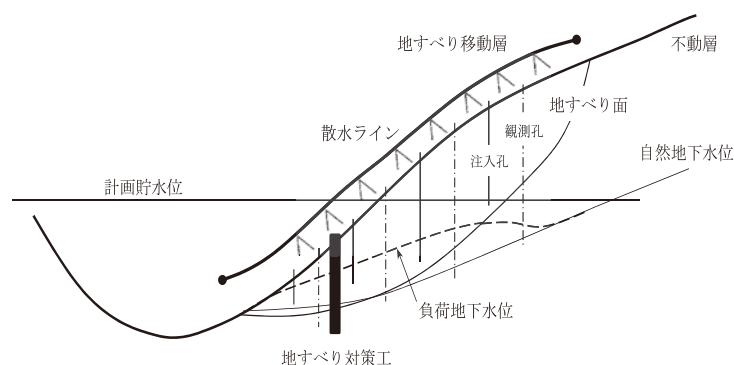


図-13 貯水池斜面の安定性確認の試験湛水代替試験

Fig. 13 Stability test of the landslide substitute for the water reservoir-storing test on the reservoir slope.

べりとして精査を実施した斜面，具体的には，①対策工を実施した地すべり，②貯水位変動による安全率の変化が $F_{\text{min}} = 1.05 \sim 1.00$ に止まって対策工を不要とした地すべり，③その他，地すべり形状や湛水の影響度などを考慮して精査までに止めた地すべりについて，地表からの散水やボーリング孔からの注水による負荷試験を行うことが考えられる。散水，注水によって地すべり斜面の地下水水位を上昇させ，一般的な試験湛水の場合の最小安全率を与える水理的負荷に相当する負荷を加えることによって，試験湛水を代替しようというものである。

なお，試験湛水時の貯水池斜面の散水・注水による負荷試験については既の実績がある²⁸⁾ことを添えておく。

10. 地質に関わるダム技術の展開の可能性の模索

不確実性に満ちた自然の中に築造されたダムは，“ひとり”大自然と物理的，実体的に対峙し，人間の意図した目的や設定を超えた機能や効果を発揮する。

このようなダムの機能と自然の事象をありのまま，多面的に捉えて分析し，従来のダム事業の概念や枠組みにとらわれず，ダムの優れた特性と機能を再評価し，積極的に活用していくことが必要である。

10.1 堆砂機能の積極的評価と大規模土砂災害対応

ダム堆砂は，ダムの貯水機能を失わせるものとして

マイナスに評価されている。しかしながら，ダム堆砂はダム築造にともなう物理的現象である。それに対する評価の如何に関わらず発生する。

それであるならば，貯水池に起こる堆砂現象を“前向きに捉え”，その効果を積極的に評価する逆転の発想もあり得るだろう。もちろん，従前どおりのダム堆砂に対する計画と評価に基づいて，ダムの治水や利水機能の部分は維持されることが大前提である。

近年，深層崩壊やいわゆる“天然ダム”が頻発し，これを受けて，警報・避難を主体とするソフトの対応が全国展開されている。深層崩壊の中には，その社会的影響の大きさから，ハードの予防対策を施さざるを得ない箇所が想定される。この場合，斜面安定工の導入もあろうが，規模や個数など条件によっては，砂防ダムの範疇を超え，治水，利水，発電などと組み合わせた“砂防治水専用ダム”や“防災多目的ダム”の築造も選択肢となろう。これは，火山活動にともなう中・小規模の土砂災害対策への選択肢ともなる。

そのためには，排砂技術の発展は非常に重要であり，ダムの再評価の一つの鍵のように思える。

10.2 水力発電の再評価

降水に凝縮された太陽エネルギーは，上流域の河川水の有する位置エネルギーとなり，ダムに発電機能を組み合わせた水力発電によって高密度・高圧の水流による運動エネルギー，さらにクリーンな電気エネルギーとなる。この電気エネルギーとなる水資源は，火

力発電や原子力発電のように地下資源の採取・採掘、分離・精製と廃棄物処理、加工、運搬を必要とせず、地表に降り注いだ雨が自ら集まって河川となってダムによって蓄えられたありふれた水であり、持続可能な太陽エネルギーの凝集そのものである³⁾。

水力発電は、常温の高密度・高圧の水流を対象とするため、コントロールしやすく発電効率は高く、稼働コストは低い。水力発電は、自然に存在する水という人間にとって最も身近な物質をそのまま使い、質も量も変えることもない。また、何かの資源を消費したり、廃熱やCO₂など廃棄物を生成・排出したりして、環境負荷やコスト負荷を与え続けることもない。それどころか、発電に至るまでの降水と河川水は豊かな生態系と自然景観を育み、注意深く使用された水は下流域に戻され、人々の生活を支えて環境を維持する³⁾。

わが国では明治中期以降、様々な規模の水力発電が行われ、電力供給と国民生活の安定と産業経済発展に大きく貢献していることはいうまでもない。

水力発電は、暮らしの環境や地球環境への負荷の少なさ、稼働コストの低さなどの面から再評価される必要がある。

わが国の急峻な地形、多雨な気候、樹枝状に広がる稠密な水系や水路を活用し、それぞれの地点の水量、落差、流速など水理的条件および自然的、社会的状況などに応じ、大・中規模水力発電から“ミニダム”あるいは堤高15m以下の堰の設置による小規模水力発電まで、発電コストや投資効率を考慮し、可能な地点を積極的に見だし、実現していく必要がある。

地質技術においても、地形・地質条件や土砂災害などからの回避・安全確保など、施設立地や維持・管理の観点から、積極的に貢献していく必要がある。

11. 土木そしてダムと市民・国民との接点強化を図る

日本に住む私たちは、自然の恩恵を享受し、脅威を甘受しつつ、不確実性に満ちた自然に無為に命と生活を委ねることなく、知恵と汗を注ぎながら、安全・安心の暮らしを送るべく、日々努力している。

市民・国民は、土木事業そしてダム事業を生み、護り、育て、発展を促し、その恩恵を享受するものである。この分野に関わる人々や組織は、専門部門の立場から市民・国民の負託を受け、具体的に仕事を形づくり、推進しているに過ぎない。土木事業やダム事業はあくまでも市民・国民が主体である。

そのため、私たち市民・国民は、大自然の脅威のもとに、「思いやり助け合いと未来志向の精神」、「安全・安心で豊かな尊厳ある地域づくり、国づくりの観点」から、先人たち、いま共に生きる人々、未来の子どもたちに対し、重い義務と責任を負っている。

市民・国民の自然や社会、国家に対する流動化、分散化しつつある意識の中で、わが国の社会や国家を支える専門家集団としての土木技術者や地質技術者は、

「市民・国民が自然の恵みと脅威、不確実性を理解し、土木事業やダム事業を生み、護り、育て、発展を促し、そして、恩恵をしっかりと享受する理念や仕組み」が現代日本においてもしっかりと成り立つように、情理を尽くして語りかけ、自然と人間、土木やダムと市民・国民の接点を強化しなければならない。

そのための方策の一つとして、ダムや水源地域における人と自然とのつながり、優れた景観性、社会性、文化性、そして科学性、技術性を素材とした、市民・国民の学習・憩い、オンサイトツーリズムの場として、また、地域の人々と共にあるダムを地域活性化の受け皿として、質の高い充実した情報とともに提供する仕事がある。すなわち、ダム地域の豊かな自然を学び、楽しむ場として、エコパークやジオパーク、シビルテクノパークなど、地域とダムの個性に応じた様々な形のオンサイトパークを市民に提供する仕事である。詳細については拙著^{29~32)}に譲ることにする。

12. おわりに

ダム建設の品質向上とコスト縮減を求められている今日、諸々の与えられている自然的条件や自然事象、プロジェクトや工事の目的、求められる要件や機能などの基本的意味や物理的原理、そして計画・設計や対策・対応の理念や原理、原点まで遡って考えてみる必要がある。それらをしっかりと満足しつつ、既存の概念や手法にとわれない、新たな観点と仕事の形、技術の改良・開発の方策が生まれてくる可能性がある。

筆者は1976年長島ダムを振り出しに立野ダム、津見ダム・尾原ダムの各工事事務所において旧建設省のダム事業に、土木研究所、旧水資源開発公団試験研究所などにおいてダムの地質調査と評価技術に関わる実務と研究に携わってきた。現在、応用地質(株)に在籍し、ダムの地質調査と評価技術について、それを取り巻く土木事業やダム事業の状況も含めて、幅広くレビューする機会を得た。本報告はそのまとめである。

本報告の多くの部分は、ダム工学会地質・基礎研究部会(部会長 平野 勇)において出版を予定している「総説 岩盤の地質調査と評価—現場技術者必携 ダムのボーリング調査技術の体系と展開—、古今書院」³⁾の執筆に反映させている。この「総説」を無事発刊できた際には、是非とも手にしてお読みいただくことをお薦めしたい。なお、本報告では、広く「総説」の紹介を兼ね、記述および図の多くを「総説」の引用・転用という形で整理させていただいた旨を記しておく。

参 考 文 献

- 1) 平野勇(2007):ダムや土木、公共事業を少し離れて見つめてみませんか、ダム技術, No.245, 3-13.
- 2) 平野勇(2008):土木と市民・地域との新たな接点

- を模索する, (1) 土木を少し離れて見つめてみませんか, 土木技術資料, **50**, No. 5, 6-9.
- 3) ダム工学会編(2012):総説 岩盤の地質調査と評価—現場技術者必携 ダムのボーリング調査技術の体系と展開—, 古今書院.
 - 4) 平野勇(2008):土木と市民・地域との新たな接点を模索する, (5) 土木哲学, 土木社会論への期待, 土木技術資料, **50**, No. 9, 4-5.
 - 5) 平野勇(2011):「人間活動分類」の観点から応用地質学の役割と責任を考える, 巻頭言, 応用地質, **52**, No. 6, p127.
 - 6) 土木研究所:国土地盤情報地盤検索サイト Kuni Jiban, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>
 - 7) 地盤情報の集積および利活用に関する検討会(2007):地盤情報の高度な利活用に向けての提言—集積と提供のあり方—, 国土交通省大臣官房, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/13/130302_.html
 - 8) 全国地質調査業協会連合会編:地盤情報の活用と新ビジネス—地盤情報の資源化への道のり—, <http://www.zenchiren.or.jp/geoinfo/katuyou.html>
 - 9) 地質地盤情報協議会(事務局:産業技術総合研究所地質調査情報センター)編(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—.
 - 10) 佐々木靖人(2008):応用地質学におけるナレッジDBの利用の可能性, 平成20年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集.
 - 11) 岡本隆一(1965):道路調査における空中写真地質判読, 土木研究所資料, No. 143.
 - 12) 国土技術研究センター編(2010):改訂新版 貯水池周辺の地すべり調査と対策, 古今書院.
 - 13) 全国地質調査業協会連合会:応用地形判読士資格検定試験制度について, <http://www.zenchiren.or.jp/ouyouchikei/index.html>
 - 14) 菱田元・武田哲(2004):北薩地域の金鉱床探査における物理探査結果とその解釈, 地質ニュース, No. 601, 56-63.
 - 15) 竹林征三・中村康夫・佐々木靖人ほか(1995):新地盤探査技術の開発 斜面の探査技術の開発に関する共同研究報告書(その2)—空中電磁法による斜面の概査技術—, 建設省土木研究所共同研究報告書, No. 113.
 - 16) 中山文也・内田太郎・鈴木隆司・田村圭司・村上弘行・結城洋一・土野将司・中川昌浩・中村晋・堤宏泰・下西浩治(2007):空中物理探査を用いた深層崩壊危険箇所抽出手法の検討, 第117回物理探査学会学術講演会講演論文集, 231-234.
 - 17) 中山文也・村上弘行・内田太郎・鈴木隆司・田村圭司(2009):深層崩壊発生斜面の特定に向けた空中物理探査の適用例, 72, 全地連「技術e-フォーラム2009」松江.
 - 18) 上村寿一・田野弘明・市原裕之(1995):空中電磁法によるコア材料調査, ダム技術, No. 109, 48-59.
 - 19) 金内剛・山田光雄・白戸智(2001):津軽ダム原石山候補地調査における空中電磁探査技術の応用, ダム技術, No. 180, 39-45.
 - 20) 杉本利英(2010):空中電磁探査法による花崗岩類トンネルの地山評価, 現場報告, ダム技術, No. 288, 34-40.
 - 21) 武士俊也・杉本宏之・本間宏樹・宇都忠和(2012):樹脂固定法によるすべり面標本の作成マニュアル(案), 土木研究所資料第4227号.
 - 22) 山田政典・永野潤・竹澤悠人(2011):高品質コアを用いた地すべり土塊の単位体積重量, 第50回日本地すべり学会研究発表会講演集, 155-156.
 - 23) 堀川耕輔・山田政典・一色弘充・森山豊・久保美和・竹澤悠人(2011):付加体を原岩とする地すべりの構造と単位体積重量, 斜面・地すべり(1), 平成23年研究発表会講演論文集, pp. 5-6, 日本応用地質学会.
 - 24) 日本建設情報総合センター編(2003):ボーリング柱状図作成要領(案)解説書, 改訂版.
 - 25) 国土交通省河川局(2005):大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説.
 - 26) 平野勇(1995):最新地盤調査ハンドブック, 第2章 地盤の生成と地質構造, 建設産業調査会.
 - 27) 国土交通省河川局治水課(2009):貯水池周辺の地すべり調査と対策に関する技術指針(案)・同解説.
 - 28) 摺上川ダム工事事務所:摺上川支川中津川右岸の林道における亀裂の状況と今後の対応について(第二報), 記者発表資料, 平成17年1月28日, http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/4289_kisya_preview.html
 - 29) 平野勇(2008):土木と市民・地域との新たな接点を模索する, (2) オンサイトツーリズムの提案, 土木技術資料, **50**, No. 6, 4-7.
 - 30) 平野勇(2008):土木と市民・地域との新たな接点を模索する, (3) シビルテクノパークの提案, 土木技術資料, **50**, No. 7, 6-9.
 - 31) 平野勇(2008):土木と市民・地域との新たな接点を模索する, (4) 国づくり, 地域づくりとしてのジオパーク, 土木技術資料, **50**, No. 8, 8-11.
 - 32) 平野勇(2008):ジオパーク—地質遺産の活用—オンサイトツーリズムによる地域づくり—, オーム社.