

ダム新技術

New Developments in Dam Engineering

松本 徳久 (まつもと のりひさ)

(財)ダム技術センター 技術第一部長・(独)日本大ダム会議 常務理事

1. ダム建設の動向

国際大ダム会議 (International Commission on Large Dams, 以下略称 ICOLD) の統計によると、1950年の時点で5749ダム (ただし ICOLD 加盟国のダムのみ) が発電、灌漑用水、都市用水、洪水調節等のために供用されていたが、1990年にはおよそ4倍の23112個となった¹⁾。10年間ごとのダムの建設数を図示すると図-1となる。すなわち、1950年以来の40年間に、1年当たり平均400個のダムが建設されてきたが、1980年以降は新設のダム数はわずかに減少の傾向にある。ここで、世界のダムの型式を多い順に並べると、アースダム (64%)、重力ダム (19%)、ロックフィルダム (8%)、アーチダム (4%)、バットレスダム (1.4%) となる。なお、本稿でのダムの定義は、高さが15 m 以上かつ貯水を目的としたものである。

それでは、現在世界中でどのくらいのダムが建設されているだろうか。やはり ICOLD が各加盟国から得たデータによると、1998年の現時点では1733個のダムが建設中である (図-2は国別建設数)。1997年の新設ダム数は、27箇国で242個、国別に図示すると図-3となり、多い順に、中国80、トルコ30、日本25、その後、米国、韓国、南アフリカ、スペイン、ジンバブエと続く。1950年以降の1年の平均ダム建設数は先に述べたように約400であるから、昨年のダム完成数242は最近30~40年の平均ペースの約60%である。

最近、世界のダムの建設数が減っているのは、第1に先進国のなかには社会基盤の整備が進み、人口も安定し、ダムの需要が減少している国が多くなっていること、第2に発展途上国では、水資源、発電、洪水調節など

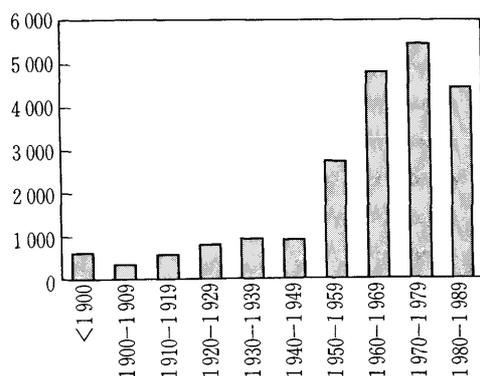
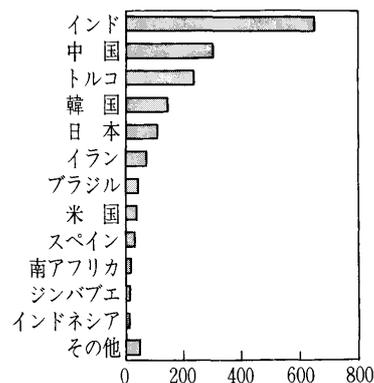
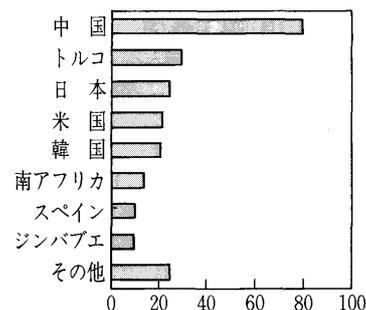
図-1 10年間ごとのダム建設数の推移¹⁾

図-2 1998年現在で建設中のダム数

図-3 1997年に竣工したダム数¹⁾

のためにダム建設の必要性が高くダム建設はこれらの国に移りつつあるが、資金の調達問題および環境問題から、ダムの建設が遅れていることによる²⁾。1998年11月1日 (日) から同月7日 (土) までインドのニューデリーで ICOLD 年次例会および第66回執行理事会が開かれたが、この場でも基調講演は「21世紀における環境的に持続可能なダム事業」³⁾であり、ワークショップのテーマは「水資源事業における資金調達および民間の参加」⁴⁾であった。

ニューデリーの ICOLD 年次例会で環境と資金調達の課題が取り上げられた背景にはナルマダダムの問題がある。この事業は200万 ha の乾燥地帯に灌漑用水を送る (世界最大規模) ほかに都市用水、水力発電を目的とする大事業である。1985年に世銀はこのプロジェクトに対するローンを承認したが、水没者の立き退き問題と環境に対する悪影響の問題があり、世界的な反対を受けた。1992年6月に世銀の独立委員会は住民の移転対策と環境対策が不十分と結論を出し、その後1993年3月にインド当局は、残りのローンの中止を要請した。事業は別の資金を使って水没補償の進展とともに少しずつ進行し

総説

ている。

2. 世界のダムに関する技術課題

さて以上のようなダム建設の動向の中で、ダムに関する国際的技術課題をレビューしてみよう。

2.1 環境

古来、貯水池を造ることにより、灌漑用水を確保し農業を営み、さらに生活用水とエネルギーを得、あるいは洪水から生命財産を守り人類は文明を築いてきた。したがって、貯水池を造ることによる環境への働きかけは歴史と共にある。先に述べたように1950年以降ダム貯水池の数は4倍、総貯水容量は10倍に増え、規模の大きい貯水池も増えたことからダムを挟んで上流と下流の水質、魚類等の生態系、土砂移動、地形、文化遺産への影響も大きくなった。環境の保護が100%変化無しに自然状態を保つことであれば、ダム湖と環境の共生は難しいが、従前と同等かそれ以上の平衡状態への移行を許容すれば共生は可能となる。そのための、自然への悪影響を低減する、あるいは積極的に同等以上の環境を創造する技術が必要となっている。

2.2 コスト縮減策

工学であれば、所要の目的を達する条件のもとでコストの低減を図るのは当然である。ダム技術も昔からコスト縮減を図ってきたが、今の時点でのコストの縮減は、契約、事業体の組織、施工中のリスク対応、ダム貯水池の管理など、事業のハード・ソフトのあらゆる面からコスト縮減策を検討しているところに特徴がある。例えば発電ダムに事例のあるBOT方式(Build, Operate, and Transfer)は、資金量の不足する発展途上国において、政府や民間からなるコンソーシアムを組織し、民間の資金を使い、ダム発電所を建設し、一定期間発電所を運転し、買電収入で資金を回収したら、政府に引き渡す方式である。BOTによれば、政府の必要とする資金は少なく、早く電力を得られ、かつ一定期間後に施設は政府財産となる。

低コストのダム型式として、上流面はコンクリート遮水壁、下流はRCC(Roller Compacted Concrete)、上下流勾配は1割から7分程度の同一勾配、内部はハードフィル(砂礫にわずかなセメントを混ぜたもの)のFSHD(Faced Symmetrical Hardfill Dam)も検討されている⁵⁾。この型式の利点は水圧を上流面で受けるため水圧の合力は地盤方向に働き揚圧力が生じたとしてもすべりに対する安定性が高いこと、堤体材料にセメントが添加されており通常のロック材よりも変形が小さく遮水壁のひずみは小さいこと、下流面をRCCで施工すれば洪水の越流に耐えられること、洪水吐きを堤体に設置できることなどが挙げられている。

2.3 既設ダムの管理、補修、改造

1950年に5196のダムがあったということは、今およそ5000のダムが建設後50年以上経ったということである。50年代、60年代には早いピッチでダム建設を進められたから、今後10年、20年すると急速に築50年以上

のダムが増加する。したがって既設ダムの計測管理、補修、改造の技術はますます重要になる。例えば英国では1800年から1900年の19世紀に多くの水道ダムが建設されており、その大部分はフィルダムである。そしてこれらのダムのなかには外部浸食(オーバートップング)、内部浸食、すべり、沈下などのトラブルのあるものもあり、これらの兆候を知るための計測管理、補修、改造が実施されている。また米国等では水文資料の見直しにより設計洪水量が増加し、洪水吐きの能力を増加させた改造もある。もちろん単純に漏水が多いダムに対する効率の良い補修技術も重要な課題である。

2.4 フィルダム

全世界のダムのおよそ72%はフィルダムであるから、数の上からは、フィルダムはダムの主要な型式である。ただし、堤高の低いダムの大部分がフィルダムであるから、高いダムや大河川のダムではコンクリートダムとフィルダムの数は接近してくる。我が国では、1986年から1995年の10年間に建設されたダムの型式はアーチ式コンクリートダム1、重力式コンクリートダム117、重力フィル複合3、アースフィルダム36、ロックフィル77、計234ダムである⁶⁾。つまり、およそ50%がフィルダムであり、日本では毎年平均10数個のフィルダムが竣工している。海外の割合に比べると我が国ではややフィルダムの割合が少ないが、これは堤体の大きさに比べ洪水吐きが相対的に大きくなる河川の特徴が影響している。

最近、海外でしばしば採用されフィルダムにコンクリートの表面遮水式ロックフィルダム(Concrete Face Rockfill Dam, 略してCFRD)がある。CFRDは1900年代始めに主として米国で建設されたが、漏水量が多く、1940年代以降はダム型式として土質コアフィルダム(Earth Core Rockfill Dam, 略してECRD)がより多く選択された。漏水が多かったのは、堤体が投石工法のロックフィルで変形が大きく遮水壁の継ぎ目が開いたからである。ただし漏水は多くても、ロックフィルは浸透水を安全に排水する能力を持ち、安定上の問題は生じなかった。1960年以降、ロック材を振動ローラーで締め固めることにより、沈下は従前の投石工法に比べ1/10以下となり、遮水壁の損傷によるCFRDの漏水は極めて減少した。遮水壁はスリップフォームで連続打設するから、水平継ぎ目は設けない。遮水壁の裏には細粒を含むトランジションを配置するから、継ぎ目からの漏水があっても、トランジションで漏水量は制御される。堤体積が小さく、土質コア材も不要、かつ工期も早いこの型式は、経済性と工期短縮の利点があるとされる。そのほか、堤体がドライで地震時に強度低下することなく、水圧はほとんど中央より上流で地盤に伝えられ、安全性についても信頼できるとされる。CFRDの技術は最近20年の間に大きく発展し、ロックの粒度とゾーニング、止水板、トウスラブ、トランジション等の設計技術、遮水壁の水平継ぎ目を省略するスリップフォーム打設、工事中的出水対策、材料の運搬方法などの施工技術での進歩が大きい。

そのほか、フィルダムの技術としては、ジオメンブレンの使用、瀝青材による表面遮水、頁岩や風化残積土などの使用、フィルター、材料のベルトコンベヤーによる運搬がある。

2.5 ダム基礎

ダムの基礎は、水圧と堤体の自重を支え、浸透水を制御することを要求されており、基礎地盤は常にダム工学上の重要課題である。条件の悪い基礎処理（止水壁やグラウチング）、効率的な地質調査法開発、第四期断層の調査法と評価法などが注目の課題である。

2.6 計測

コンピューター、計測器、通信等の電子機器の進歩に伴いダムのモニタリングの技術は急速に変わりつつある。また計測値を通信で必要な所へ情報伝達し、即座に結果の判定をすることも可能となってきた。ただし、計測された値が信頼できるものか、また何を意味するかという基本については立ち返るべき点がある。

2.7 コンクリートダム

フィルダムは土工量は多いものの、機械化施工、省力化施工であり、人件費が材料費に比べ相対的に高い工業国では合理的施工法である。これに対して、従来のコンクリートダムの施工は、施工設備が汎用性の低いものを使い、省人化の難しい工種が多かった。そこでコンクリートダムの合理化施工として開発されたのがローラー転圧コンクリート（RCC、日本ではRCD）である。これにより工期が短縮し、経済性も向上した。この分野は現在も進化を継続中である。

3. 我が国における技術課題

さて、我が国の技術課題が海外のそれと基本的に異なるものではなく、コスト縮減と環境負荷軽減が大きな課題である。日本大ダム会議の技術委員会は現時点で大ダム会議が組織として取り組むべき緊要な課題は、①耐震設計とダムの安全、②合理化施工、③堆砂対策、④ダムの管理としている⁷⁾。

3.1 耐震設計とダムの安全

1995年の兵庫県南部地震でダムは軽微な変状を除き、被害を受けなかった。したがって、現在の方式で決められている断面が地震時の安全に対して十分であろうが、震度法による設計震度の値が重力ダムでは0.12が多く、ほかの構造物に比べ小さな値のため、簡明な説明が難しい。そこで設計の基本論から議論し、主として重力式コンクリートダムの耐震設計法を見直す予定である。なお、ロックフィルダムについては、現行設計法は震度法であるが、別に応答を考慮して設計震度を定める修正震度法も試行しているので今回の対象からは除かれている。

3.2 合理化施工

コンクリートダムの合理化施工はRCD工法により、ある程度標準化施工の域に達した。プレキャスト化、スリップフォームの利用、運搬システムの合理化などの課題は残っているものの、今後は低品質の材料をうまく使う材料の合理化に技術開発をシフトしていく必要がある。

また、先に述べたFSHDもコンクリートダムとフィルダムの中間の型式であり、超合理化施工のテーマの一つである。

3.3 堆砂対策

堆砂は貯水容量を減らす、取水装置などの機能を損う、上流の河床・河川水位を上昇させる、下流河床の低下とarmoring（河床の砂礫がなくなり、岩石のみとなり生態系にも影響）などの問題を生じさせる。また、水系の土砂管理の問題もある。ただし堆砂問題は全国一律の課題ではなく、中央構造線など土砂生産の多い地質の地域で特に問題となる課題である。排砂が一つの解決策であり、人為的に除去する方法と河川の流れのエネルギーで下流に流す方法とがある。あるダムの機能をほかのダムに振り替えられれば、そのダムは一定期間休めるからその間に底部から排砂できる可能性がある。また堆砂の質によっては、有効利用の技術開発も期待される。

3.4 管理

我が国でも世界と同様、竣工後時間の経ったダムが増えてくる。したがって、既設ダムの計測管理、安全性評価、補修などの技術開発が期待される。また、ダムサイトの適地が少なくなっており、水資源開発のためには、既設ダムの再開発は有効な手段である。

3.5 その他の地盤工学上の課題

以上は日本大ダム会議が組織的に取り組んでいる技術課題であるが、それとは別に学官民の各分野で取り組まれているフィルダムあるいは地盤工学上の技術課題を述べよう。

- 亀裂性の岩盤に対して亀裂の分布調査に基づき異方性を考慮した水理地質モデルを構築し、浸透流制御を高度化する⁸⁾。
- ジオトモグラフィを基礎の地質構造、水みち調査に適用し調査の精度向上と効率化を図る⁹⁾。なお基礎だけでなく、非抵抗トモグラフィをアースダムの水みち調査に適用した研究もある^{10),11)}。
- 軟岩の非線形変形性を把握し、ダムの堤体および基礎の変形予測を向上させる¹²⁾。
- 地震国の日本としては、兵庫県南部地震もあり、耐震設計の課題は継続する課題である。
- フィルダムの工期を短縮するためには、コア施工の迅速化が欠かせない。特に降雨の多い地域では、コアの締固め層厚の増大が検討されている¹³⁾。また、CFRDは工期短縮では効果があるダム型式である。
- 大規模地震あるいは不同沈下等でコアに損傷があったことを前提としたフィルターの研究が進められている¹⁴⁾。これは米国土壌保全局でスタートしたNEF (No Erosion Filter) のフィルター研究の進化である¹⁵⁾。
- 基礎の透水性で問題のあるダムサイトが多くなっていく現在、より効果的なグラウチングの技術開発は重要である。この方面の研究には、粉体圧送グラウチング¹⁶⁾、割裂の方向を制御した2重管ダブルパッカーグラウチング^{17),18)}がある。材料の技術につ

総 説

いては、膨潤促進剤を添加したセメントベントナイト材、ベントナイトの膨潤時間の最適制御がある¹⁹⁾。グラウチングの効果判定を合理化するためにジオトモグラフィを適用する技術開発もある^{9),20),21)}。

- 砂礫基礎上の大規模フィルダムとして忠別ダムが建設中であるが、これに関連し、耐震性、連壁による浸透流制御、コア直下のアスファルト保護工などが研究されている²²⁾。
- フィルダムのかさ上げが白川ダム（奈良県）²³⁾、狭山ダム（大阪府）²⁴⁾、山王海ダム（農水省）²⁵⁾で実施されており、これらに代表されるフィルダムの再開発の課題がある。

4. 水資源の持続的開発に関する技術開発

ほかの資源と同様、水資源も地球上に偏在している。世界では、清潔な飲料水を飲んでない人が10億人おり、灌漑用水が不足している地域は全耕地の83%もある。中国北部、インド、パキスタン、中東、北アフリカ、中央アジア、サハラ以南のアフリカ、メキシコ、南米西部などは水資源の危機的状況にある。二酸化炭素を発生させないクリーンなエネルギーとしての水力発電も求められている。しかも、これらの地域では人口の増加が大きく、水不足に拍車をかけている^{26),27)}。

我が国では、全面積の10%の沖積平野に人口の50%と資産の75%が集中して洪水被害を受けやすい構造にあり、都市化が早く水資源開発が追いついてない地域もある。揚水発電の需要は続くし、農業の基盤整備も必要である。

ダムは一つとして同じものではなく、1ダムごとに現地条件に基づき技術を傾注して建設する。ダム技術は土質力学のハード技術から環境対策、コスト縮減策、資金調達などのソフト技術まで幅広い。特に若い人に水資源の持続的開発技術に興味を持っていただき、我が国で、また海外で、文明の誕生とともに歩んできたこの分野で活躍されることを期待する。

参 考 文 献

- 1) ICOLD: World Register of Dams, 1998.
- 2) ICOLD Committee on Public Relations: Benefits and Concerns about Dams, 和訳, 日本大ダム会議広報分科会: ダムについての便益と問題点 (その1), 大ダム, No. 164, pp. 8~24, 1998. (その2), 大ダム, No. 165, pp. 1~18, 1998.
- 3) Lecture on "The Necessity of Environmentally Sustainable Large Dam Projects for 21st century", ICOLD Annual Meeting, New Delhi, 1998.
- 4) Workshop on "Financing and Private Sector Participation in Water Resources Projects", ICOLD Annual Meeting, New Delhi, 1998.
- 5) Londe P., Lino M.: The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC, Water Power and Dam Construction, pp. 19~24, 1992, Feb.
- 6) 日本ダム協会: ダム年鑑, 1998.
- 7) 日本大ダム会議技術委員会: 平成8年度技術委員会活動報告, 大ダム, No. 161, pp. 71~98, 1997.
- 8) 杉村淑人・森田 豊・渡辺邦夫: ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み, 土木学会論文集, No. 582/III-41, pp. 229~246, 1997.
- 9) 建設省: 官民連帯研究 "新地盤探査技術の開発" 報告書, 71p., 1995.
- 10) 吉田 等・山口嘉一・今林 豊・小嶋光博: 高密度電気探査によるフィルダム堤体内の構造調査と浸透流監視, ダム技術, No. 131, pp. 46~53, 1997.
- 11) Yamaguchi, Y., Imabayashi, Y., Yoshida, H. and Sakamoto, T.: Survey on seepage through heightened earthfill dam with high-density electrical prospecting method, the 4th Int. Conf. Case Histories in Geotechnical Engineering, pp. 424~429, 1998.
- 12) 川崎将生・山口嘉一・吉田 等・今林 豊: 平板載荷試験及び実測挙動によるダム基礎軟岩の変形性評価, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 635~640, 1998.
- 13) 豊田光雄・吉田 等・堀田洋一・橋本忠助: RI法によるコア材料の盛立試験と転圧厚さに関する実験的検討, ダム技術, No. 135, pp. 17~28, 1997.
- 14) 中村 昭・山口嘉一・小嶋光博・藤澤侃彦・矢萩賢仁・田原則雄: 非侵食試験によるフィルタ機能の評価, 建設省土木研究所資料, No. 3236, 221p., 1994.
- 15) Sherard, J. L. and Dunnigan, L. P.: Filters and leakage control in embankment dams, Proc. Symp. Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, pp. 1~30, 1985.
- 16) 藤澤侃彦・中村 昭・山口嘉一・小林正宏・小沼栄一・山縣秀年: 粉体圧送グラウチングの適用地盤と標準的な注入仕様に関する研究, 土木学会論文集, No. 582/III-41, pp. 183~196, 1997.
- 17) 藤澤侃彦・中村 昭・山口嘉一・松井 孝: 割裂方向制御グラウチングに関する基礎的実験, ダム工学, No. 18, pp. 13~22, 1995.
- 18) 藤澤侃彦・中村 昭・山口嘉一・吉田 等・松井 孝: 割裂方向制御グラウチングの原位置試験, ダム工学, No. 19, pp. 4~15, 1995.
- 19) 吉田 等・山口嘉一・佐藤弘行・石川浩行・阿部義宏: セメントベントナイト (CB) グラウトに関する基礎的実験, 建設省土木研究所資料, No. 3595, 261p., 1998.
- 20) 川上俊器・中江兼二・山田啓一・永山 功・片平 博・首藤美誠: ジオトモグラフィと原位置岩盤変形試験によるグラウチング効果の判定, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 337~342, 1994.
- 21) 山口嘉一・今林 豊・石川浩行・吉田 等: 亀裂性岩盤におけるグラウチング試験と弾性波トモグラフィによる効果判定, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 443~448, 1998.
- 22) 芳賀敏二: 忠別ダムの施工について, ダム日本, No. 648, pp. 15~32, 1998.
- 23) 亀田正彦: 白川ダムの設計・施工について, ダム日本, No. 601, pp. 27~38, 1994.
- 24) 田河勝一・木村昌弘・西園恵次: 狭山池ダム事業について, ダム技術, No. 108, pp. 87~93, 1995.
- 25) 豊島弘三・森山信弘: 山王海ダムの再開発—ロックフィルダムの嵩上げ—, ダム日本, No. 629, pp. 27~47, 1997.
- 26) 高橋 裕: 世界の水危機と日本の役割, ダム技術, No. 124, pp. 3~9, 1997.
- 27) 竹内邦良: ダム建設の現状と将来〈持続的開発の争点〉, ダム技術, No. 119, pp. 3~14, 1996.

(原稿受理 1998.11.24)