

石 井 文 雄

1. ま え が き

大規模なダムは人間の造る最大の構造物の一つであるが、これが一度決壊するとそのおよぼす影響がきわめて大きいので、特に高度の安全性を要求される点では、ほかの構造物とはちがった技術的なきびしさがある。また一般にダム建設では、主として経済的な理由から大型施工機械力を極力動員して短期間に工事を完成する点と、主として技術的な要請からきめられた地点の地形地質上の悪条件を創意と経験で克服してゆく点で、他の土木工事と違った特長をもっている。

世界的に時代とともに進歩してきたダム技術は、現在ではダム地点の各種の自然的社会的条件に応じて、いろいろな形式のダムが自由に建設され、その規模もますます大きくなり、高さでは Grande Dixence ダム（重力式・スイス）の 284 m、貯水容量では Kariba ダム（アーチ式・南ローデシア）の 1840 億 m³、堤体積では Fort Peck ダム（アース式・アメリカ）の 9500 万 m³ にも達するものがすでに建設された。

日本では明治以来ダムの近代技術を取り入れて、主として水力発電用のダムがつぎつぎと建設され、高さ 30 m 以上のダムの数は 250 に達し、アメリカについて世界第二位を誇ることとなった。特に 1950 年以後の日本のダム技術の進歩はめざましく、ダムの規模は一段と大きくなり、建設されるダム形式も多くなり、短期間に設計知識と施工技術がいちじるしく向上し、世界のダム技術界の注目する所となっている。

たとえばダムの高さでは黒部川第四アーチダムが 186 m で世界第 10 位、総貯水量では奥只見ダムが 6 億 m³ の貯水池を持ち、堤体積では御母衣ダムが 795 万 m³、コンクリート量では田子倉ダムが 195 万 m³ の記録を持つに至った。

以下に世界の中における日本のダム技術について眺め、今後のあるべき方向と問題点について若干ふれてみ

たい。

2. 欧米のダム技術の特色

他の一般技術分野におけると同じく、ダム技術についても、やはり欧米諸国が長い伝統と高い水準と豊かな経験を持っている。

アメリカは豊かな持てる国であるため、施工には機械力を徹底的に駆使して、ダムの断面にも余裕をとり、人力を節約して短期間に建設するのが通例で、そのためにもフィルタイプが多く採用される傾向にある。コンクリートダムの場合も厚い断面の大まかな設計で、セメント量の少ないコンクリートを急速施工する、いわば施工優先方式がとられている。したがって、ダム形式も重力ダムやアーチ重力ダムが多い。

西欧特にフランス、イタリア、ポルトガル等では、非常にすぐれた少数の設計者が、自由に独創的な形式を生出し、複雑微細で人手を要することをいとわず、材料の節約によって経済性を持たせるいわば設計優先方式であり、したがってダム形式としては薄肉アーチダムやバットレスダムが大部分を占める。

なかでもフランスは徹底してアーチダムを採用し、今日ではアーチダムとして採用できる谷幅は単にコンクリートの許容応力いかんによるとすら考えられている。またスイスは、継続的に組織的にアーチダムの各種測定を続け、地道な研究によってその挙動をきわめる努力をしている。

日本はこれらのかかなり特色のある欧米のダム技術から多くを学んできたが、必ずしもこれらにとられることなく、日本の社会的自然的環境と調和した新しい多くの独特のダム技術が生まれている。

3. 日本のダム技術の特異点

日本の自然的条件の特異点として、世界有数の地震多発地帯の中にあることと、さらに台風等のもたらす集中豪雨が、国土の急しゅんな地形とあいまって急激な大洪水を起こすことがあり、これらが日本のダム建設にとって苛酷な自然条件となっている。

したがって、ダム技術においても地震を考慮し克服するために、物部博士の確立した重力ダムに関する耐震理論が現在すべてのダムに用いられている。また施工中や完成後の大洪水のダム越流に対して、重力ダムはほかの形式のダムに比較していっそう経済的で安全である点から、地震と洪水の多い日本の自然条件に最も適するダム形式として、重力ダムが過去においてさかんに建設され、現在もお建設されている。

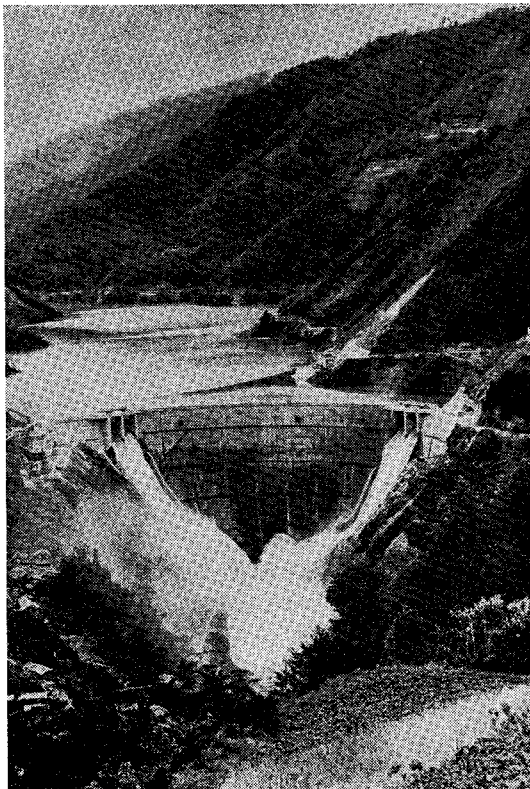
日本においてアーチダムの建設が諸外国に遅れていたのは、アーチダムの耐震性に関する諸問題が解明されていなかったため、その所要コンクリート量が小さく経済的であることは早くから注目されていた。戦後訪日したアメリカ海外技術顧問団が、経済的なダム形式としてアーチダムまたはフィルタイプダムを採用することを勧告し、その技術援助を得て、高さ110mの上椎葉ダムが初めてアーチ形式で1956年完成した。

現在ではダム基礎の地震度、アーチダムの振動性状についても高精度の資料が集まり、地震時の動荷重による応力の算出が可能になり、アーチダムの耐震性の検討が正確に行なえるようになった。

アーチダムでの洪水放流処理については、最も経済的な堤頂越流方式もある程度までは技術的に安全確実に採用でき、ダムの両側にシュートを設けたり、堤内放水管方式も技術的に自信をもって使用されている。放流水の減勢処理についても水じょく池方式のほか、ときには滝落し方式も採用され経済的に処理されている。

日本の洪水調節用ダムの場合には、利用水深が比較的深いので、堤内放水管を洪水吐として設けるのが通例で、その水理的構造的な問題点もほぼ究明され、これを制御する高圧ゲートもいちじるしく進歩している。この種のもので最大のものは、二瀬ダムの69m、水頭の元で

放水の中の上椎葉ダム
〔日本の建設〕より転載)



部分開扉できる高さ3.6m、幅5.3mの高圧ラジアルゲートで、任意開度での水密を確保し振動を防ぐために、偏心軸方式による圧着装置を持っている。また天ヶ瀬ダムでは高さ4.6m、幅3.4m、水圧35mのパーチカルリフトローラーゲートが使用された。

日本におけるダムサイトは、一般に地質的に複雑で、断層やしゅう曲等の欠陥を持つことが多い。また河川勾配は急で極度に浸食され、生産された土砂礫が貯水池に流入して有効貯水量を減少させる。さらに洪水量と平水量の比率が一般に大きく、全流出流量に対する河水の有効利用率は余り高くない。高いダム高さの割に貯水効率もあまりよくないが、高水頭を発電に利用できる点もある。日本の独特のダム技術は、こうした諸外国とはちがった自然的基盤の上に築き上げられたものである。

日本でダムが数多く建設される理由の一つに、世界的にめぐまれた降水量と急しゅうな地形を利用して、水力電気を安価に得ようとする目的がある。つぎに日本では洪水調節、かんがい、給水のための多目的ダムを必要とし、またこの種の開発に適したダムサイトがまだ多数残されていることである。

外国でも同じようだが、日本でもダムを建設する企業者が建設省、農林省、府県、水資源開発公団などに分れている。しかし、企業形態がまったくこれらと異なる電源開発会社と九電力会社の中の若干の手によって、日本の大規模かつ重要なダムが建設されることが多いようである。

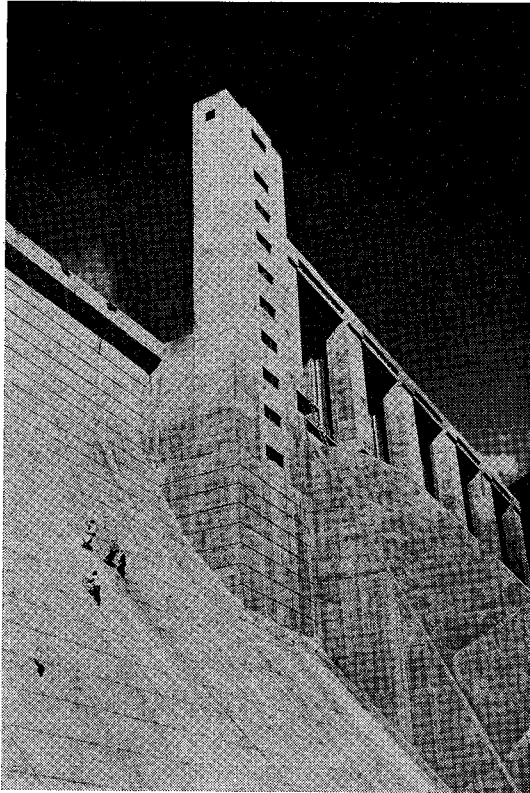
4. 日本のダム施工の機械化

日本のダム技術の水準を眺めるために、最近のダム技術を以下にふりかえって見よう。

日本では、ダムの設計はダム企業者または所有者の技術部門が行ない、必要に応じて公私のまたは内外のコンサルティングが行なわれる。また工事の施工は一般に請負業者が企業者の監督を受けてこれにあたる。

戦前の施工法とはちがって、最近の近代的機械化施工法によって、現在の日本のダム建設は世界一流にランクされるまでに成長した。その先駆と考えられるのは、高さ150mの佐久間ダムで、ダムサイトは人を近づけない急しゅうな谷で、最大既往洪水量 $10,000\text{ m}^3/\text{sec}$ の大天竜川で、川床砂利の深さ30mという悪条件であった。工事に当っては、大胆にアメリカから大型施工機械に関する技術を導入した。輸入された大型機械は従来の日本の機械よりはるかに大容量のものばかりで、直径11m、長さ1,000mの仮排水トンネルを全断面工法で、わずか3ヵ月で掘削し、 50万 m^3 のダム基礎掘削を3ヵ月で完了し、ブレイクリングおよびパイプクリーニングを実施しなが

佐久間ダムの偉容
(土木学会発行「建設/創造/技術」より転載)



ら、日平均 3 000 m³、日最高 5 180 m³ の速度でコンクリートを打設し、3 年半という日本に於いては短期間に全工事を 1956 年に完成した。ダム工事を請負ったのは間組であった。

この工事は、その後田子倉、奥只見、御母衣、黒四その他の大ダム建設の先駆となり、さらに導入した大型施工機械は国内メーカーを刺激し、その後のダム技術の飛躍的発展の契機となった。

重力ダムの内部コンクリートのセメント使用量は、日本では従来コンクリート 1 m³ 当り 220 kg 前後であったが、奥只見ダムでは骨材に碎石と砕砂を用いたにもかかわらず、セメント 98 kg、フライアッシュ 42 kg、合計 140 kg にすぎず、この間いかに機械化施工に助けられてコンクリート技術が進歩したかがうかがえる。

また奥只見ダムでは、骨材プラントに 3 000 HP の動力を使用し、1 時間 600 t の製造能力をもって、166 万 m³ の堤体コンクリートに対し、400 万 t の骨材を製造した。ケーブルクレーンは 25 t 2 基、10 t および 9 t 各 1 基を使用して、月間 147 000 m³、年間累計 110 万 m³、1 日最大 8 462 m³ のコンクリートを打設した。

人工骨材の製造技術はめざましく、ダム地点付近に適当な天然砂礫のないことは、今やコンクリートダム建設にとって何ら制約とはならなくなった。

5. 日本のアーチダム技術

日本最初の上椎葉ダム以来、高さ 60 m 以上のアーチダムの数は 20 を越し、日本のアーチダム技術は急速に進歩した。

アーチダムの形状については、定角型や定半径型の簡単な形状のほか、現在では地形条件や洪水条件にあわせて多心円アーチ、変厚アーチ、フィレットアーチ、または変半径アーチ等を適宜用い、形もいわゆるドーム型としてダムの応力状態や安定状態を向上させている。また多少非対称のアーチ形状も用いられ、特に地山の安定から推力が地山の肩部に向うような形状を採用することが多い。

特異な例として、大倉ダムは非対称でかつ広い谷幅に対処するため、中央に人工アバットをおいたダブルアーチとした。

アーチダムの厚さの決定に関係するダムコンクリートの設計最大応力は、現在坂本ダムで 90 kg/cm² まで高められ、その断面最大厚は 12.19 m で、高さ 103.0 m に対して 11.8% と、かなり薄肉の経済的な設計となった。

アバットメントの地山安定性の問題については、岩盤の変形性や強度に関して、最近各種の調査研究が行なわれ、岩盤力学の急速な発展は、特に目ざましいものがある。特に黒部第四ダムでは、世界に前例のない大規模な現地岩盤試験が行なわれて注目を集めた。

不良岩盤の改良処理工法は、岩盤試験や模型実験の助けを借りて、各ダムサイトの特質に応じて種々の創意工夫がなされている。黒部第四ダムでは、不良岩盤の 6 万 m³ をコンクリートで置換え、川俣ダムでは推力伝達壁を岩盤中に設け、この壁と地山をプレストレスする工法を採用した。

アーチダムの片持ばり要素に水圧の大部分を負担させ、アーチ要素の負担を両岸アバットの安定許容範囲内におさめる新しい試みとして、ダムの断面形状を従来の重力ダムより薄くし、平面形状をアーチダムより曲率の小さいものとしたセミアーチダム形式が大島ダムに採用された。

アーチダムの応力計算は試算荷重法によるのが普通であるが、一般にその計算はばく大なものであるので、現在では電子計算機によってきわめて短時間に処理している。そのため形状設計の吟味が十分行ないうだけでなく、地山の安定をも含めた形状の決定を検討している。

また計算によって把握しがたい複雑な応力状態や、地山の地質条件を加味した場合の安定性を検討するために、重要なダムはすべて構造模型実験を実施するのが通例になっている。

6. 黒部川第四アーチ ダムの難工事

発電機室や開閉所その他すべてを地下に持つ世界最大の地下発電所である黒部第四は、アーチダムの設計や施工においても世界的な難工事であった。水力界の多年の懸案であった黒部第四ダムは、関西電力会社が世界銀行からの借款を得て、1956年着工し7年を要して1963年竣工した。

ダムサイトへの接近がきわめて困難であったため、北アルプスの山を貫いて大町から21.2kmの輸送道路が新設されたが、その最終の5.4kmの大町トンネルで幅80mの破碎帯を7ヵ月かかって突破したことは余りにも有名である。

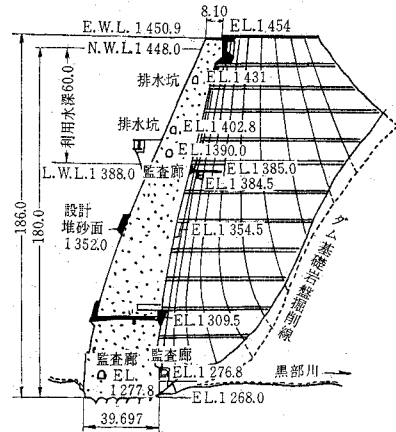
ダムサイトでは骨材を経済的に確保できなかったため、大町付近の高瀬川の堆積砂礫を掘削使用した。碎石およびふるい分けプラントは、あらゆる点で近代であり、1時間700tの製造能力を持ち、分級された骨材は20t級ダンプトラック45台で、15kmをトンネル入口の扇沢まで運び、ここからダムまでは大町トンネルの中をベルトコンベヤで運んだ。

大町トンネル貫通の遅れでダム基礎掘削工事の着手が遅れ、仮設工事を含めたダム付近の総掘削量130万 m^3 の処理が非常に困難となった。その後数度洪水に見舞われたが、一部基礎掘削を残したまま、1959年9月コンクリート打込みを開始した。翌1960年には日最大8653 m^3 、月最大147300 m^3 、7ヵ月で100万 m^3 のコンクリート打設記録を樹立した。そして、この年10月には中間たん水を開始した。

コンクリートバケットは9 m^3 ものを使用し、コンクリートの締固めにはバイブルドーザーを併用する等、機械化施工を採用し、1回の打上がりリフトも3mとした。また最大骨材は180mmを使用した。

アーチダムの最初の基本設計は、イタリアのElectro Consult社に依頼し、その後種々検討し打コン前に設計を変更して、ウイングダムを両岸に上流に向かって設計、

図一2 黒部第四ダム標準断面図

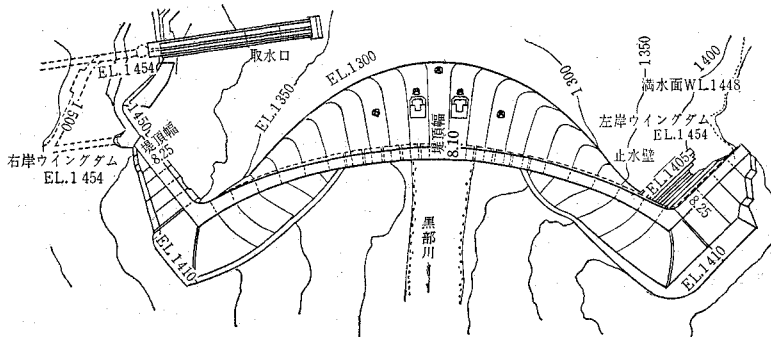


右岸アバットメントをやや上流に移した。ついでマルパッセダムの事故を契機に世界銀行の技術顧問団が協議に訪ずれ、大規模岩盤試験や大型模型実験など幾多の画期的な技術的検討を経て、ダム形状の最終設計変更が行なわれた。

すなわち傾斜アーチの理念を生かすために、ダム上部の軟弱岩盤に推力がかからないように両端の肩を切落とすとともに、オープンジョイントを設け、左岸側のアバットメントをかなり深く地山に突込み、下流へのオーバーハングをいくらか少なくし、アバットメントを増厚した。こうして基礎岩盤に対応した設計が図一1、2のようにまとめ、最終的なコンクリート総量は160万 m^3 となった。

黒四を通じて、われわれが教えられたことは、アーチダムにおいては基礎岩盤の性状を十分に把握することが最も重要であること。また岩盤を改良するに当たってコンソリデーショングラウトは、ジョイントや節理等を填充して均質性を得る程度で止めるべきで、弾性係数または強度の大幅な向上を期待して無理なグラウトをやることはむだであること。カーテングラウトによる透水係数の改善にも限度があり、ある程度以上になれば、岩盤の安定性を増加するためには、むしろドレーン孔を相当

図一1 黒部第四ダム平面図



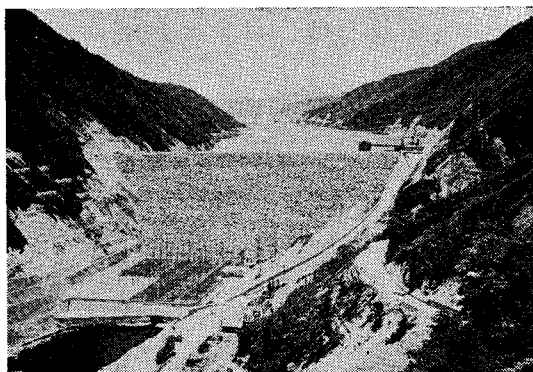
数掘って、地下水面を下げる工法をとるべきであること。またアバットメント近傍のアーチの形状と厚さに特に注意すべきこと。特に岩盤掘削に際しては表面にクラックを入れないよう、入念に仕上げるのが大切なこと等々である。

7. フィルタイプ ダムの技術

アーチ ダムはその構造上堅硬な基礎を必要とするが、こうした有利な地点は次第に少なくなり、基礎処理費が増大してアーチ ダムの経済性がいちじるしく低下する傾向を生じた。一方、重土工機械が発達して、短期間に低廉に大量の土石を掘削できるようになり、フィルタイプダムが最も経済的なダム形式となることが多くなった。

中でも内部に土質しゃ水壁を持ったロックフィルダムが有利とされ、御母衣ダムは最初のこの種形式のダムとして1960年完成した。ダム サイトですぐれた花こう岩および石英斑岩が利用できることと、右岸基礎の大きい断層のためコンクリート重力ダムに適しなかったことよって、高さ131m、長さ405m、堤体積800万 m^3 の規模をもつ傾斜しゃ水壁型とされ、コア材料には風化花こう岩を粘土に混ぜたものを使用し、重土工機械を用いて3カ年で完成した。

御母衣ダム全景
〔日本の建設〕より転載



その後、岩洞、牧尾、大白川、魚梁瀬、本沢の各ダム等がこの形式で建設され、長野ダムは高さ125m、盛立量630万 m^3 の規模をもって工事中である。

このほか、重力ダムを合理化した中空重力ダムが日本において建設されている。主としてイタリアで開発されたダム形式で重力ダムより10~25%のコンクリートが節約できるといわれる。

すなわち1957年完成した井川ダムを始め、諸塚、大森川、畑薙第二、横山等がこの形式で、中でも畑薙第一ダムは高さ125mで、ダム下流面の内部に発電所を包蔵している。

8. 日本のダム技術の将来のあり方

現在の日本のダムは技術水準上に述べたように、長年にわたってダムを建設してきた各国が築き上げたものと同じランクに格づけされ、むしろ多くの点で世界的水準に達したものと考える。たとえば、請負業者は機械化施工技術をマスターして驚ろくべき施工能力を持ち、また日本の機械メーカーの機械設備は複製ではあるが世界中で最良のものを製造できる。ダム技術者は高度の能力を持ち、しかも必要と思ったときに外部の忠告を受けることに誤まった誇りをもたないし、他所で成功した技術には何でも興味を持ち、以前より多くのダム形式を将来十分消化しうるようになった。

しかし、火力発電が水力より安く早く増設できる現在では、日本の水力電気のためのダム建設は、その峠に達し、1400万kW容量、624億kWhの輝やかしい開発を終った今後、開発しうる地点は電源開発だけでは経済的に高すぎるようになってきた。だが新鋭火力の増加に対応して、ピーク需要を自由に経済的に受け持ちうる貯水池式水力を常に一定割合以上保有する必要があるので、水力発電用ダムの建設はわずかずつでも続けられねばならない。また今後は揚水式のピーク発電用として大規模ダムが、できるだけ低廉に、数多く建設されてゆくべきであると考えられる。

多目的ダム地点は、河川の治水および利水上の要請から、今後まかなりハイテンポでダム建設が続けられねばならない。

こうした日本国内におけるダム建設とは別に、上にも述べたように、日本のダム技術は佐久間ダム以来飛躍的な革新がもたらされ、その技術水準はようやく海外諸国の間でも評価が高まりつつある。特に東南アジア、アフリカ、中近東、南米等の低開発国の要請によって、日本のダム技術が輸出され始めたが、これによって同時に建設資材の輸出の道も開け、日本の経済発展と低開発国との経済協力に資することができる。

未開発国は、一般に技術とともに資金に欠けることが多いので、今後積極的にダム技術を輸出するためには、資金面についても各種の借款や経済援助資金を、日本からこれらの国に積極的に投ずることがまず必要である。

また今後日本のダム技術が海外に積極的に進出するためには、政府機関はもちろん、ダム関係の機関や組織が、あらゆる機会をとらえて日本のダム技術を海外に紹介し、国際会議や技術論文誌を通して、地道に日本のダム技術水準を高く評価させる努力を必要とする。

日本のダム技術は国内では比較的小さい河川に実績をもつが、国によっては桁がいの大きな河川や、河川勾

配の極度にゆるやかな場合もあり、その国の地形その他の自然条件に支配されて、従来の日本の河川でのダム技術の原則や経験をそのまま適用できないことも考えられる。したがって、特に大河川での経験を今後数多く積み重ねなければならないのではなからうか。

9. 日本のダム技術の問題点

日本のダム技術は現在世界的水準にあるとはいえ、技術の問題点が数多く残され解決の困難なことも多い。

たとえば、堤体内部に埋設された各種計器の観測結果が、従来の構造解析結果と必ずしも一致しない点がある。また、ダムの基礎岩盤についても、かなり未知の点

が数多く残されており、その取扱いかい精度や安全性の検討、結果の信頼性が、堤体自体よりかなり落ちており、多分に経験とカンにたよる部分が多い。したがってダムの基礎改良処理についても、セメント注入を始め浸透水の問題等、目に見えない処理効果の判然としないことが多い。これらのほかにも、ダムの理論と設計と施工の間にギャップが存在する可能性が懸念される。

その他細かく見れば、今後の調査、計画、設計および施工面で発展改良すべき技術の問題が数多く残されている。ダムの建設は特に慎重でなければならないだけに、今後ますますダム技術の向上に努力せねばならないと考える。

(筆者・正会員 建設省土木研究所ダム部長)

水理公式集頒布

— 昭和 38 年増補改訂版 —

水理公式集の初版が発行されたのは昭和 17 年です。それから 2 回の改訂が行なわれましたが、昭和 38 年に刊行された本書は現在世界中で使用されている代表的な公式をすべてとり入れ、第 1 編 河川、第 2 編 発電水力、第 3 編 上下水道、第 4 編 港湾および海岸の 4 つ大項目に分け、それぞれを 7~11 の中項目を設け詳細に解説した世界でも珍しいユニークな公式集ですので参考書としてぜひご利用下さい。

体 裁 : A 5 判 603 ページ
定 価 : 1400 円

会員特価 : 1100 円
送 料 : 150 円

J.A. タロブル 著
進 藤 一 夫 訳

工博 岡本舜三 監修
工博 吉越盛次

〔好評・発売中〕

岩盤力学

A 5 判 上製箱入
434 頁 定価 2,000 円
〒 120 円

本書は「岩盤力学」なる言葉の命名者として、理論的にも実際経験上においても世界的な権威者であるタロブル氏の名著“La Mécanique des roches”の全訳であります。

本書は単なる数式を並べた本ではなく、著者の豊富な経験に基づき「岩盤力学とは何か」「いかにして岩盤工事を行なうか」「岩盤工事にあたってはどのような心構えが必要か」といった基本的な観点から、掘削・トンネル・ダム基礎・グラウト工・爆破工等実際工事への適用法はもとより、岩盤の地質調査と測定に亘って岩盤関係の技術全体を有機的に関連づけている点で極めて有益なものといえる。

〔主要内容〕

土木工事における岩盤の調査

第 1 部 岩盤力学とその実験——岩盤のひび割れの状態、岩盤の自然内部応力とその測定、岩盤の変形と強度およびその測定、削孔および爆破に対する岩盤の性質、水と岩盤、一般的な岩盤の性質。

第 2 部 岩盤力学とその理論——変形と破壊、基礎岩盤の理論、支保工と覆工の理論、岩盤内部の水の流れ。

第 3 部 岩盤力学とその応用——削孔と掘削、基礎岩盤、岩盤における支保工、覆工、高圧を受けるトンネル、グラウト工および岩盤のしゃ水等。

工博 河上房義 著 土質力学 A 5・300 頁 800 円・〒120
工博 河上房義 著 土質工学計算法 A 5・232 頁 650 円・〒120

理博 小貫義男 著 土木地質 A 5・376 頁 900 円・〒120
工博 内田一郎 著 道路工学 A 5・300 頁 800 円・〒120

◎ 他に関係図書多数 目録呈 ◎

東京都千代田区
神田小川町 3 の 1 0

森 北 出 版

振替 東京 3 4 7 5 7
電話 東京 (292) 2601 (代表)