

- 33) 牧田武士：水門鉄管 No. 25 (1962)
- 34) 田原製鉄所：水門鉄管 No. 1 (1957)
- 35) 石川島重工：水門鉄管 No. 1 (1957)
- 36) 岩崎正亮：水門鉄管 No. 3 p. 6 (1958)
- 37) 石川島重工業：108 年史 (1951.2)
- 38) 宮地鉄工所：50 年の歩み (1958.10)
- 39) 全電孤熔接による田端大橋に就て，業務研究資料 第24巻19号 鉄道大臣官房研究所
- 40) 田中五郎，進藤俊爾，戸田完夫：全溶接道路橋管鳩橋の製作および架設について，溶接学会誌 (1952.9)
- 41) 村上永一：西海橋の工事概要，土木学会誌，(41—4) (1956.4)
- 42) 横河橋梁：50 年史 (1960.5)
- 43) 加藤真三，児玉元二，堀 保：若戸大橋の塔の製作架設工事記録，カラム No. 4，八幡製鉄 K K (1962)
- 44) 池田 肇，鈴木正一，菊野日出男：若戸大橋 その吊橋部架設工事の計画と施工について，カラム，No. 4 八幡製鉄 K K (1962)
- 45) 吉田徳次郎：鉄筋コンクリート設計方法
- 46) 日本国有鉄道：国鉄の回顧，1952
- 47) 坂 静雄：鉄筋コンクリートの研究
- 48) 日比忠彦：鉄筋混凝土の理論およびその応用
- 49) 川口輝夫：最近の鉄筋コンクリートの設計
- 50) 小沢久太郎：道路橋の変遷（その一）
- 51) 鉄道院：鉄筋コンクリート橋梁設計心得 (1914.7)
- 52) 日本道路協会：鉄筋コンクリート道路橋設計示方書（案）1963.3
- 53) 土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書 (1931～56)
- 54) 日本国有鉄道：鉄道技術発達史 (1959.1)
- 55) 横道英雄：日本におけるコンクリート橋について，土木学会誌，39—12
- 56) 日本工学会：明治工業史土木編 (1929.6)
- 57) 内務省土木試験所：本邦道路橋輯覧 1925.12
- 58) " " (増補) (1928.3)
- 59) " " 第三輯 (1935.11)
- 60) " " 第四輯 (1939.11)
- 61) 横道英雄：コンクリート橋，技報堂
- 62) 土木学会編：土木工学ハンドブック，技報堂 (1964)
- 63) 国鉄信濃川工事事務所：信濃川水力発電工事誌
- 64) Guyon : Beton Pretontaint
- 65) Leonhardt : Spambeton far Praxis

Ⅵ 基 礎 技 術 の 進 歩

土木技術の成果を实らせるには数々の基礎技術と，土木工学に包含される広い分野の学問の進歩が基礎になっている。

本編ではこれら基礎技術の中でも特色のあるいくつかの項目をとりあげてみた。まず，土木工学の中でもっとも重要な計測技術である測量と，すべての土木工事において切り離すことのできない土質工学・基礎工学とは，ともに最近目ざましい発展と変ぼうをとげたという点でユニークな存在である。

ダムとトンネルは自然にいとむという点で典型的な土木技術ということができよう。またこの両分野においては，わが国ではとくに太平洋戦争後，機械化施工の採用によって大革命が遂げられ，世界最大級のものが続々と完成されつつあるという点でも共通性がある。

1. 測 量

1.1 はじめに

いまわれわれが 1/50 000 の地形図にどんなに恩恵をうけているか、また、これが学問や計画の面にどんなに役立ってきたかは、ここに説明をくり返す必要はない。工事にともなう行なわれる測量技術も、基本図作成の技術の進歩に密着して進んできた。測量がわが国でどんな足どりをたどったかを知るには、全国にわたってでき上がっている 1/50 000 地形図の歩みを眺めれば十分であろう。

わが国実測図の始まりは、1800 年（寛政 12 年）伊能忠敬が大日本沿海実測図を完成したことに始まる。現代的な技術に準拠した測量事業は、それから 60 年ほどたった 1869 年（明治 2 年）ということになる。東京湾の測量、横浜新市街地の開設、東京―横浜間の鉄道新設、東京銀座街の施設などにともなう測量が、測量の本格的な開始といえる。

1871 年（明治 4 年）東京府の測量を実施することになり、工部省に測量司（年間予算 14 万円）を設け、イギリスの測量技師数名を雇って三角測量が始められた。

1872 年（明治 5 年）には全国測量の企画が立てられ、まず宮城内富士見やぐらに第 1 点を設け、13 点の三角網で東京全市を包含させた。そのほか、大阪・京都および各開港地の三角測量に着手したが、完成を見ないまま、1874 年（明治 7 年）内務省の地理局にこれらの仕事が移管された。1875 年（明治 8 年）から関東一円に大三角測量を始め、外人技師が招へいされている。一等水準測量が始められたのが 1876 年（明治 9 年）からで、それから三角測量と並行して内務省の手で継続進行されてきたが、1884 年（明治 17 年）これらの仕事は、器材、人員一切を含めて参謀本部に移管された。

内務省の事業と並行して、陸軍でも 1871 年（明治 4 年）から測量を開始した。その後、イギリス、ドイツ、フランス、オランダの諸国の測量技術を吸収し、近代測量法と図式を制定して測量技術の基本が築き上げられた。1877 年（明治 10 年）の西南の役にはすでに九州

全図を編集し、転写石版法によって印刷されている。これが軍用地図の第一号であろう。

1878 年（明治 11 年）陸軍に参謀本部ができ、これに測量課と地図課がおかれ、年間 20 万円の予算で三角測量 5 班、地形測量 48 班の編成で、1/20 000 の測図が開始された。

陸軍における全国的な三角測量の開始は 1881 年（明治 14 年）である。東京湾口で行なった測量結果をみると、観測角の差は $5'' \sim 6''$ 、閉そく差も $2'' \sim 3''$ というよい結果が得られている。千葉県鹿野山においてタルコット法による緯度観測を行ない $N 35^{\circ} 15' 24''$ を得たが、その後 1903 年（明治 36 年）6 月、万国測地学会の精測にくらべて、わずかに $0.543''$ 少ないという驚異的な値が得られている。

基線測量は 1882 年（明治 15 年）、まず相模原において行なわれ、三角測量計算の基礎とした。このようにして、測量事業が欧州の技術を導入しつつ進められ、1/200 000 地形図と 1/100 000 地勢図ができ上がっていった。

しかし、実際に日本の陸地の測量が軌道にのったのは今から 76 年前、1888 年（明治 21 年）に参謀本部に直属する陸地測量部ができたことに始まる。陸地測量部が開設されてからは 1/20 000 の地形図を 1/25 000 の縮尺にあらため、同時に 1/100 000 地勢図も 1/200 000 にあらためて編集することになった。この縮尺の改定は測量事業の促進に大きな役割を果たすことになった。

1/20 000 は市街地付近、そのほか将来発展する産業都市などでは引続き発行されていたが、1910 年（明治 43 年）以降はこれを 1/25 000 の縮尺にあらためられた。

水準測量の進展にともなう、その先達としての基線の増加、験潮場の新設、重力測定などの基本事業も増強され、1926 年（大正 15 年）北海道全部の地形測量とその出版を完了し、1/50 000 の地形図は全国的にでき上がった。

基準点測量は開始以来全国にわたり、三角点の数は三等以上ですでに約 4 万点、水準点は二等以上、1 万点をこし、四等三角、多角点は近く 10 万点にも達することと思われる。

写真測量を初めて利用したのは 1915 年（大正 4 年）桜島爆発地区を写真経緯儀で撮影したときであり、その後台湾蕃地測量にも利用したが、いずれも地上写真測量であり、図化機も完備していなかったため、非常に幼稚なものであった。その後、航空写真測量の研究が進み 1929 年（昭和 4 年）東京と大阪の市街地に航空写真による修正測量が実施され、その翌年に樺太の一部を航空写真によって測量する仕事が始められ、1935 年（昭和 10

年) 縮尺 1/25 000 地形図が完成した。その後写真測量の技術が長足の進歩をとげ、とくに第二次世界大戦を経てその利用範囲が急速に拡大した。

戦後この陸地測量部が解散し、その事業は内務省(後に建設省)に移され、現在の国土地理院がこれらの仕事の主管の官庁となっている。

1949 年(昭和 24 年)に測量法が制定され、測量実施の基準を定め、1961 年(昭和 36 年)からは大規模な国土基本図の作成が始められている。

現在発行されている基本図は、1/50 000 地形図 1 259 面、1/200 000 地勢図 112 面、主要地区を網羅する 1/25 000 地形図 1 565 面、を主力として都市近辺の 1/10 000 地形図や国土実態図などそれぞれ他の目的に応じて各種の地図が刊行されている。とくに航空写真測量を利用して全国的に 1/25 000 地形図でおおう計画を立て、今年から実施の段階に入った。これは 10 年の計画ときくが、これらの成果は今後土木工事の計画や設計にも大きい役割を果たすことになるであろう。

1.2 測量用器械、器具

(1) 距離測量用器具

距離測定用の器具も、正確かつ迅速にという要望にしたがって、いろいろな移り変わりが見られる。竹尺やチェーンの時代はそう昔ではないようだが、いまではまったく顧みられない。布巻尺は安くて簡便、鋼巻尺は温度変化にともなう伸縮が大きい、などそれぞれ得失があるが、最も広く現在でも使用されている器具である。

地形その他の関係で、直接巻尺で測定することは非常に困難であり、またそれほど高精度を必要としないが軽便にという場合がある。こんなとき間接距離測定が用いられる。スタジア測量はその代表的なものであるが、スタジア計算をする手数を省き、また精度を高めるために、これを改良した種々のタケオメーターが開発された。

最近、電波や光の往復に要する時間を測定して、2 点間の距離を測る方法が考え出され、三角測量に代わって三辺測量が話題になってきた。三角測量で角を測る場合には、霧や雲にさえぎられて見通しのきかない場合でも、電波測量にはまったく支障がなく、作業が能率的に進められる。わが国で使われているものには Tellurometer(電波を用いる)と Geodimeter(光を用いる)があり、前者は遠距離用として 50km ぐらいまで、後者は近

距離用で夜間で 10 km から 200 m ぐらいまでの範囲で、約 1/300 000 前後の精度で測定できる。三角点相互の測定に要する時間が 30 分、ヘリコプターで器械を山頂に運び、誠に手軽に測量が完成するのである。

(2) 角測量用器械

従来トランシットの性能を示す方法として 3.5 in トランシットとか 4 in トランシットなどと呼び、目盛盤の大きさが基準になっていたが、最近目盛の刻み方や読取方法の改善で器械全体が非常に小型になり、性能も向上してきた。スイス Wied 社の T2 セオドライトがその代表的なもので、小型だが 1 秒まで読めるという優秀な機械で、わが国でもずいぶんたくさん使われている。さらにダムのためみ測定などには T3 セオドライトがあり、土木技術者の使うものとしては最高精度のものであろう。

望遠鏡がほとんど内部合焦式となったこと、1829 年から使われていた遊標が、最近になって測微鏡に変わりつつあることなど、使用上にも精度のうえからも改良が進んでいる。

(3) 水準測量用器械

ワイレベルが水準測量の王座を占めていた時代は長かった。もちろん測地測量にはダンビー型のものが多く使われてはいたが土木にはあまり行きわたらなかった。

最近になってレベルに大きい変化が起こった。それは微動レベルの普及と自動レベルの開発である。ワイレベルでは観測瞬間に気ほうの位置が確認できず、調整が乱れやすいなどの欠点があったのが、気ほう像合致式を用いることによって水準度を高め、かつ望遠鏡の視野内にその像を導入することによって点検を容易にするなど、能率と精度が飛躍的に改善された。

自動レベルは気ほう管を用いず、コンペンセーターによって自動的に水平視線が得られる仕組みのもので、戦後における測量用機械の最も大きい変革の一つといえるだろう。

1.3 国土調査と大縮尺航空写真測量

わが国が武力によって南方諸域に領土の拡張をはかっていたとき、イギリスやアメリカでは技術的に国土を拡充することをはかっていた。アメリカの TVA 計画がその一つの例であって広く知られている。イギリスでは国土の綿密な調査を行なって、最も合理的にかつ有効に国土を利用することを実行していた。

これらのことが戦後わが国にも大きい刺激となって、国土調査の新しい事業が始められた。国土調査法がつくられて、明治初年につくられた土地台帳しかない地籍の実情を再調査する仕事が始まったのである。地籍測量のうち一筆地をきめる作業は土地境界の問題を含んでなかなかめんどうであるが、これを行なうまえに、まず三角点や多角点の増設を行なわなければならない。また、従来の三角点成果表にある平面直角座標系をあらためることも必要であった。これら一連の作業は国の大事業として、ある部分はすでに完成し、あるものは現在も引続き作業続行中である。

一筆地測量に航空写真測量を利用することの有効であることは、すでに欧州各国でも認められているが、わが国の特殊な環境条件のもとで、どんな方式をとるのが最も能率的であるか現在の課題であるが、これは国際的な共通課題の一つとして大いに研究が進められている。

この成果一大縮尺航空写真測量の技術は、地籍測量の要求とともに発展し、これが土木工事用大縮尺図作成に大きい役割をもつに至ったといえるだろう。

1914 年(大正 3 年)桜島の爆発に地上写真測量を応用してからちょうど 50 年たった現在の写真測量の普及と向上は誠に隔世の観がある。

1.4 航空写真測量と電子計算機の組み合わせ

立体写真を使って、被写体の位置や奥行きを測定する場合、カメラが正しい関係位置にあれば、写真上で対応点の写真座標を測定し、これから計算することができる。写真測量の揺らん期にはこんな方法で作業されていた。しかし、無数にある点を、こんな方法で測定し、地図をつくっていたのでは、能率的な仕事にははるかにほど遠い。

そこで実体精密図化機という機構を考え出し、正しく縮小された立体模像をつくって、これを自動的に地図にしてゆく方法が生まれた。写真測量の飛躍的発展である。現在の写真測量は、非常に進歩した精密図化機械によって上述の方法で図化され、実用化されているのである。

ところが最近電子計算機ができ、ぼう大な計算がいとも簡単にできるようになって、再び昔の写真座標を求めて計算で点の三次元の座標を求めることが行なわれるようになってきた。自動的に図化するにはそのような熟練がいるのに対して写真座標を求めることは割

合簡単な作業ですむことも大きい理由であるが、地図として表わした地形はあくまでもアナログ的な表現で、これを工事の設計や計画に用いる場合には、この地図から再び数値を読み取ることが必要になる。それにくらべて、点の位置を座標値として記録しておけば、これがそのままデジタル的に表現された地図となり、電子計算機の助けをかりて、自由に必要な設計数量を求めることができる。

写真測量は、これからはエレクトロニクスを存分に活用し、ますます能率的にかつ経済的に進められて行くことになる。

測量はポールと平板と巻尺という時代から、すごいスピードで飛躍発展し、航空写真測量にエレクトロニクスを組み合わせた最新の技術の域にまで達しているのである。

2. 土 質 基 礎

2.1 はじめに

(1) 土質基礎問題の建設における意義と日本的課題

土木構造物は一般に直接あるいは間接に土を主体とした地盤の上に構築され、またよう壁やアース ダムのように土そのものを材料とした構造物もある。したがって、これらの土木構造物が満足にその使命を果たすためには、建設の際に土および地盤の性質をよく知ったうえで設計、施工を行なわなければならないし、また維持管理や防災対策に当たっても土についての広い知識が必要となってくる。

ところが土や地盤は自分の好みのものを選ぶことができないし、また均質性を望んでも得られるものではない。地盤はあるがままのものか、せいぜい少し手を加えたぐらいで使わざるを得ないし、土を動かすにしても遠方から大量に運搬するわけには行かない。現地にある土の性質が構造物の設計や施工の方法を左右するようになる。それゆえ外国で開発された技術をわが国にとり入れる場合に土の相違を十分考慮に入れることが必要である。

日本の土の特徴としてはまず第一に火山灰の風化土や火山による変質作用を受けた土が非常に多いことである。このような土は構造が発達していて単位重量が小さい割に強度が

大きい、含水量が多いために乱すと締固めにくく、土を乾燥するのも容易でなく、取り扱いがやっかいである。またわが国の軟弱地盤は形成後日も浅いのできわめて軟弱であり、その上泥炭が至るところで発達している、欧米の洪積期の氷河堆積土から成る軟弱地盤とは力学的性質も異なり、理論的取り扱いにもわが国独得の考慮が必要となる。地すべりや震害などもその多発性と多様性は他に類を見ないものであり、わが国独得の技術の発達もここにあるといえよう。さらに地形の複雑急しゅんや多雨多雪なども土や地盤の条件を悪くし、工事の困難を増すものである。

(2) 土質力学の進歩

土の取り扱い方が経験のみに頼ることから進んで、経験を整理して法則性を見出そうとする努力が始められたのは 17 世紀頃からで、それ以来主として土圧を中心とした理論が展開され、クーロン(Coulomb)、ランキン(Rankine)らの土圧論が発表されたほか、19 世紀の後半までに半無限弾性体内の応力を求めるブーシネスク(Boussinesq)の解法や、土中における重力水の流れに関するダルシー(Darcy)の法則など、今日の土質力学の基礎をなす幾多の理論の展開が見られた。一方これらの理論の対象は観念的な粉体であって、現実の土とはだいぶ異なっており、またこれらの理論で解決のつかない問題がいろいろと出てきたので、現実の土の性質を調べるといふ方向へ向かってきた。そのうちアッターベルグ(Atterberg)の行なったコンシステンシーの研究、テルツァギ(Terzaghi)の圧密理論、プロクターの突固めの原理、レンデュリック(Rendulic)の強度におよぼす間げき水圧の影響の実証などは基本的な土の性質を明らかにしたものであった。わが国においてもテルツァギの名著エルドバウメハニクの影響を受けて 1930 年(昭和 5 年)に鉄道省土質調査委員会が発足し、また内務省土木試験所や諸大学などでも研究設備をととのえ、欧米の土質力学の導入、紹介に努めたのが足がかりとなって、その後の研究推進に大いに役立ったのであった。研究結果を実際問題に適用するために大がかりな実験や実物についての実測をくり返して研究段階から実用段階へと踏み出したのが、1940 年(昭和 15 年)前後であったが、戦争による技術交流の中断でわれわれの目が閉ざされている間に、諸外国では飛行場の急速設定やサンドドレーンによる軟弱地盤の改良促進など目ざましい成果をあげようになってきた。現在では新技術、新材料の開発や施工機械の進歩などでさらに一段と進歩がめまぐるしく、大規模な工事要求と相まってその進展にははかり知れないものがある。

(3) 土質調査法の進歩

土質調査の方法は、土質そのものの性質を計器を使用して直接に測る方法と、土質の変形によって生ずる構造物の変位または破壊によって測定するものがある。前者の方法で土の性質を調査し、その結果に基づいて設計する場合、非常に大きな安全率をとっておかないと十分安全な工事ができない。ところがこのように大きい安全率をとれば著しく不経済になるので、多少安全率を低くしておき、そのかわり工事中に諸種の測定を行なって安全性を確かめながら施工することが行なわれている。あらかじめ土の性質を調査する方法としては土のサンプルを採取して試験を行なうもの、現場の土に荷重を加えたり、貫入棒で硬さを調べたりする機械的試験を行なうもの、弾性波や電気抵抗などによる物理学的試験を行なうものがある。また広範囲の土質調査には航空写真が利用される。これら土質調査の方法は昭和になってから発達したものが多く、特に 1955 年(昭和 30 年)前後から急速な進歩を遂げた。人力掘削による井戸掘りのほか、土総掘りのような孔掘りの道具は明治以前から使われていたが、土のサンプルを採取することによって土層の性質を調べるボーリングは、大正の初期から用いられるようになり²⁾、機械力を利用したボーリングは土層調査の深度を著しく増大した。これは地表面から深いところにある堅固な支持層に達するくいや井筒の根入深さを決定するために行なわれた。支持層だけではなく、すべりや圧密沈下の算定のために、軟弱層の調査も必要となり、自然状態に近い状態のサンプルを採取するサンプラーが製作された。鉄道技術研究所で試作された三重管あるいは二重管式コアチューブは最も初期のものである³⁾。1952 年(昭和 27 年)頃になってシンウォールチューブが現われた。さらに 1958 年(昭和 33 年)頃フォイルサンプラー、1962 年(昭和 37 年)コンポジットサンプラーが使用されるようになった。このほか各種のサンプラーが輸入あるいは考案された。

サウンディングはコーン、スクリーポイントなどを先端に取り付けた貫入棒を地中に押し込みまたは打ち込んで土層の硬軟を判定する方法であるが、ボーリングと同時代に紹介された⁴⁾。昭和の初期に西尾式コアボーラー(core-borer)と称するサンプラーチューブをボーリング孔底に打ち込んで地耐力を判定する方法が考案されたが、これは機構、用途ともに現在の標準貫入試験とほぼ同様のものであって、しかもほぼ同時代の考案であったことは注目に値する。コーンのついた貫入棒で、浅い地層のサウンディングを行なう方

法が、1943～1950年（昭和 18～25 年）頃に実用化され、続いて、1951 年（昭和 26 年）頃にレイモンド サンプラーによる標準貫入（打込み）試験、ダッチ コーン、スウェーデン式サウンディング ロッドなどがさかんに用いられるようになった。

電気抵抗式地下探査や弾性波式地下探査などの物理的試験の方法は、ボーリングやサウンディングのように地面を掘ったり棒をさし込んだりしないで、礫や岩のような硬い地盤を軽易にかつ迅速に広範囲にわたって調査することができるが、この方法は昭和の初期以来用いられるようになった。また最近、津軽海峡や瀬戸内海の海底地質調査のためスパーカーによる音波探査が行なわれた。ボーリング孔内に計器をそう入して地層の電気抵抗を調べる電気検相、弾性波の速度を測定する速度検相がここ数年来実施されている。ボーホール テレビでボーリング孔内の地層の模様を観察する方法も開始された。

原子力の平和利用としてアイソトープが登場したのは 1950 年（昭和 25 年）頃であり、初期には地下水中に放射性物質をトレーサーとして投入し、これを追跡するようなことが行なわれた。ついで 1955 年（昭和 30 年）頃には地すべり地帯などで断層や地下水の位置の調査のために自然放射能の測定が行なわれた。また同じ頃中性子線水分計、ガンマー線密度計が出現し、サンプルを採取せずに土中水分の量、土の密度が測定できるようになった。これからは自然土層の水分と密度の測定に使用されるとともに、盛土の水分と密度の測定にも適用され、締固めの施工管理にも役立つようになった。

工事中あるいは竣工後に構造物に取り付けて力や変形を測定する計器は昭和時代になってから実用化されたが、その中で土圧計は 1935 年（昭和 10 年）頃から、間げき水圧計は 1955 年（昭和 30 年）頃から使用されるようになった。1955 年（昭和 30 年）頃に至って導入されたワイヤ ストレイン ゲージなどの電気機器は測定技術に大きな影響をもたらした。

（4）基礎工法の進歩

鉄道、道路、港湾、河川、建築などで重量構造物を地盤の軟らかい場所にも建設する必要が生じ、これが基礎工法の進歩をうながした。基礎工法としては、ひろがり基礎、くい基礎、ピヤ基礎に分類できる。これらの基礎工法は明治以前にすでに存在していたとも考えられるが、新しい工法と材料が用いられるようになったのは明治以後である。確実、迅速でかつ安価にという目標を目ざして逐次改良が試みられて現在に至っている（基礎工法

については 2.6 参照）。堤防工事の例として利根川堤防（明治以来）、伊勢湾海岸堤防（明治前にもあったが、特に 1955 年（昭和 30 年）頃）などをあげることができる。

路盤路床は、道路、鉄道、飛行場の舗装の基礎として重要な一部分である。道路では 1945 年（昭和 20 年）以前には表層に比較して路盤路床は軽視されがちであったように思われるが、1955 年（昭和 30 年）以後は路盤路床の土の入れ換え、強い締固めが行なわれるようになった。

名神高速道路では盛土部の締固めから始まって路盤路床の完全な施工管理が実施された。アース ダムにおいても厳重な締固め管理がなされている。

2.2 地盤処理

軟弱地盤を形成する箇所は内湾に面する三角州地帯、オボレ谷跡、海岸砂丘地帯背後の入海跡、湖沼沿岸などであって、おもに粘土、シルトあるいは泥炭などの堆積からなっている。このような箇所はかつては不良地盤として見捨てられていたところであるが、近代産業の発達にともなって立地条件の良さから、あるいは高速交通路の通過地域として近年急激に利用されるようになってきた。軟弱地盤はその名の示すとおり強度が小さく、また変形が大きいために、その上に作った構造物が破壊したり、地盤ごとすべったり、傾いたり、あるいは沈下が長期間継続したりするので、その安定性の検討なり、なんらかの対策なりが必要であり、またこれが現在土質力学利用の花

図—6.1 シンウォール サンプラー

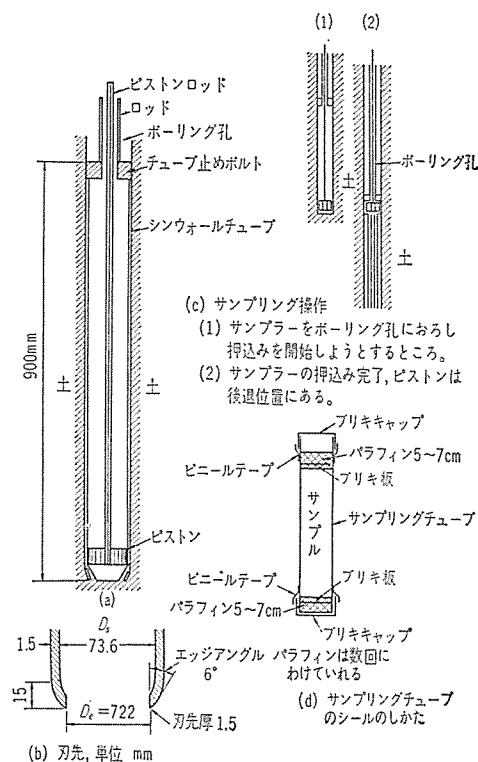
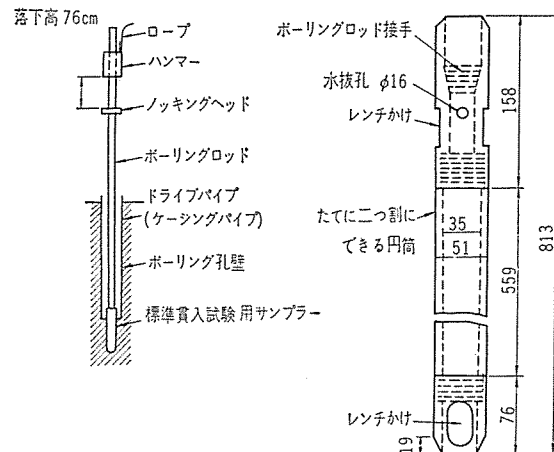


図-6.2 スプリント サンプラー

(a) 標準打込み試験
要領図(b) 標準貫入試験用サンプラー
(レイモンドサンプラー) 単位 mm

ある。

押え盛土も古くから行なわれていたと思われるが、すべて持上がった土の形を初めから作ってやればつりあいを保つという考え方から出た方法であって、1928 年（昭和 3 年）長崎本線肥前山口～肥前七浦間¹⁰⁾で実施された記録があり、この方法は現在でも最も確実な方法として広く利用されている。

以上はいずれも地盤の土に手を加えない方法であるが、土の強度を増したり、地盤に適当な物体をそう入してすべり抵抗させたり、あるいは良質の土と置換したりする方法がある。

強度を増すための最も容易かつ確実な方法は土を圧密させることであって、荷重としては盛土などの過剰荷重が普通用いられるが、ウエルポイントなどによって地下水位を低下させ、有効応力を増大させる方法も利用される。また気密な膜を地表に敷きのべて膜下に真空をかけ、大気圧を作用させる方法もあるが、これはまだ実用に供せられた話はきいていない。地盤の圧密には通常長時間を要するので、圧密促進のためにサンド ドレーン、その他の方法が併用されるが、これについては後述する。

形ともなっている。

盛土荷重による地盤破壊の防止工法は古くからあったと思われるが、敷ソダ、敷丸太や厠木工の技術が明治初年にオランダから導入されて以来各地で使用され、明治中期の鉄道建設にも用いられていたことが文献に残っている^{8) 9)}。この方法は一番危険なすべり円をしゃ断する効果はあるが、全体がすべるのを防止することはできない欠点がある。

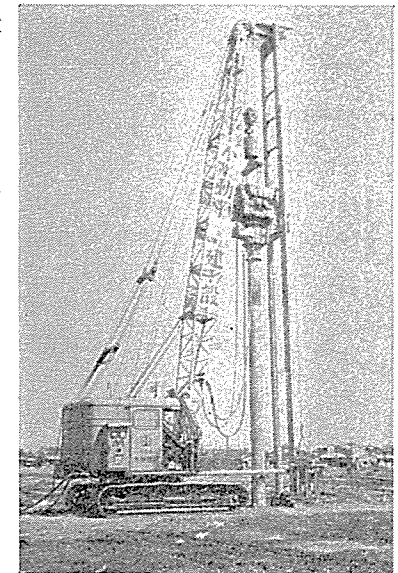
軟弱な粘土またはシルトの強度増加に有望な方法として電気浸透工法がある。これは土に直流電流を流すと間げき水は陰極のほうに向かって流れるので、この水を排除すれば圧密が進行したと同じ状態になるわけであり、同時に粘土粒子に付着しているイオンが電流によって運びこまれるイオンと交換され、また電極の電気分解によって金属塩が土のコロイド物質の間げきに堆積されるので、土の強度が増すことになるのを利用する方法である。これは通常多大の電力量を必要とし、また必ずしも常に効果が確実というわけでもないので、試験的に利用されている程度であるが、1951 年（昭和 26 年）に国道 1 号線熱田伝馬跨線橋の橋脚基礎地盤の固結に利用されたもの¹¹⁾、1954 年（昭和 29 年）に国道 30 号線総橋取合道築堤下の地盤の強化に利用されたもの¹²⁾は著名である。

地盤にそう入する抵抗物体としては木ぐいが古くから使われており、鋼矢板なども使用されているが、最近のものとしてはサンド コンパクション パイルと称する砂ぐいがある。これはサンド ドレーンのような排水のためではなく、地盤のせん断破壊に抵抗するためには砂を十分締固めることが必要なわけで、そのために衝撃あるいは振動で締固める方法が用いられる。コンポーザー工法はその一つであって、1957 年（昭和 32 年）に関西電力大阪火力発電所の原水タンクの基礎地盤に施工¹²⁾したのはその初期における著名なものの一つである。

盛土や構造物の荷重で地盤が破壊しない場合でも、工事終了後あまり大きい沈下が生じたり、沈下が長期にわたって継続するのは困る場合が多い。軟弱地盤の沈下が長期間続くのは、つぎのような理由による。

- ① 土が荷重をささえるには縮まなければならない。
- ② 地下水面以下の土では縮むためには間げき水が流出しなければならない。
- ③ 粘土やシルトは間げきが小さいので、水

写真-6.1 コンポーザー



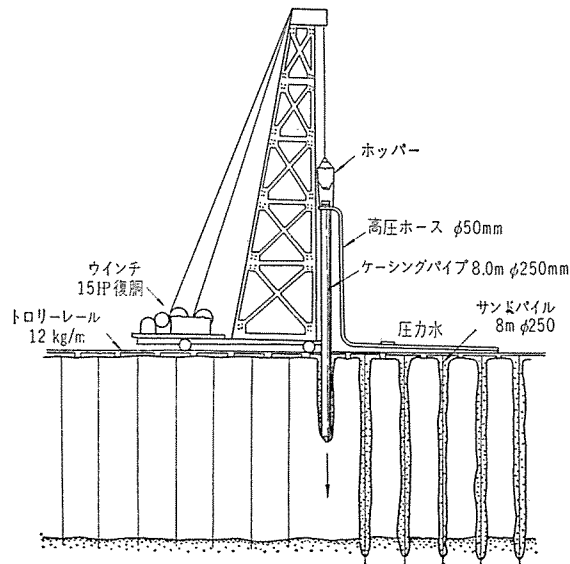
の流動に対する抵抗が大きく、流出が終わるのに時間がかかる。

④ 土の骨組が増加荷重をささえるようになっていても一定の変形でとどまらないで、粒子相互間の移動や粒子間結合部のクリープなどで変形が続く。

①～③ の間げき水が流出するために時間の遅れをともなう圧縮が起こる現象を一次圧密といい、④ の土の骨組の塑性的再配列のために生じる圧縮を二次圧密という。

一次圧密に対する処置としては、間げき水の流出をすみやかにして早期に圧密を終了させるのが最善であり、それには間げき水の排水距離を短くする方法をとればよい。サンドドレーンはこのようなねらいで考案された方法であって、軟弱土層中に鉛直方向に径 30～50 cm の砂柱を多数設けると、間げき水はこの砂柱に達した後は、すみやかに地表へ排出されるようになる。砂柱の配置は正三角形、正方形などいろいろあるが、砂柱 1 本当たりの有効排水範囲の直径の自乗に比例して圧密が終了するので、それを考慮に入れて配置と間隔をきめればよい。サンドドレーンは 1933～1934 年（昭和 8～9 年）頃に試験的に用

図-6.3 サンドドレーン

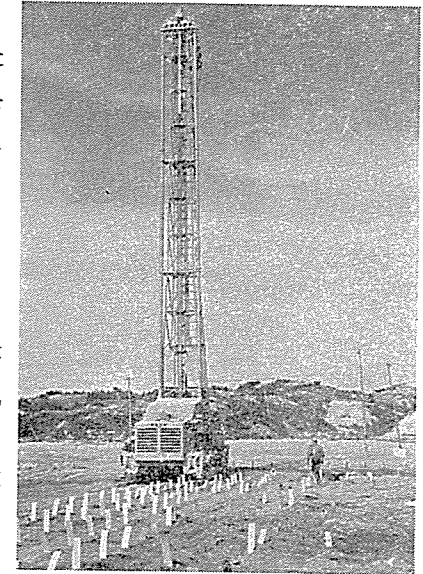


いられたことがあるが、1952 年（昭和 27 年）に長崎港中の島岸壁の基礎地盤に施工したもの¹³⁾、および同じく 1952 年（昭和 27 年）岡山県笠岡市内の国道 2 号線改良工事の金浦道路の盛土下の基礎地盤に施工¹⁴⁾したのが、本格的に用いられた初期のものである。

サンドドレーンと同じ目的をもつ工法にペーパードレーンがある。これは砂柱の代わりに幅 100 mm、厚さ 3 mm の帯状厚紙に断面 3 mm² の通水孔を一列に通したもの

を用いるが、重さ 2 kg/m できわめて軽く、400 m 長さでドラムに巻きつけて運搬する。なお厚紙にはバクテリアによる腐敗防止のために砒素塩を少し入れ、ぬれたときの強度を増すためにメラミン樹脂加工をしてある。この厚紙を地中にそう入するにはヤグラに取り付けたそう入棒を用い、一定の深さに達すると厚紙を残してそう入棒のみ引き上げられ、地表上へ少し出した位置で厚紙を切り取る。この機械が最初に用いられたのは 1963 年（昭和 38 年）に日本鋼管福山製鉄所の建設現場¹⁵⁾であって、このときの最大圧入深度は 20 m、またその後 1964 年には日本道路公団厚木試験盛土において圧入深度 12 m の改良機が用いられた。

写真-6.2 ペーパードレーン

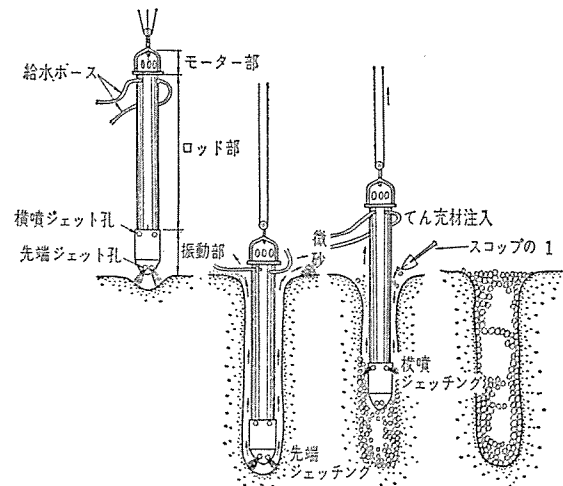


二次圧密に対する処置としては現在過載荷重より先行圧密が最も有効であろう。これは軟弱地盤が荷重をうけているかぎり二次圧密が進行するが、時間とともにその速度が小さくなること、および荷重の一部を取りのぞくとわずかではあるが膨張が生じるので、この膨張と二次圧密による沈下とが相殺して除去荷重に応じてある期間沈下が事実上停止し、またその後再び二次圧密沈下を生じるにしても速度が非常に小さくなっているために問題にはならなくなることを利用したものである。東海道新幹線米原地区で使用されたのはこの二次圧密の除去を目的としたものであり、名神高速道路大垣地区で使用されたもの¹⁶⁾は一次圧密促進を主としたものであるが、いずれも継続沈下の抑制にとられた方法として注目される。

ゆるい砂層は骨組が不安定であって容積減少を生じやすく、特に地下水位が高い場合にはそれがただちに間げき水圧の増大、有効応力の減少、せん断抵抗の減少となるので、振動とか衝撃によって突発的な液状化を生じやすく、このような地盤上に作られた構造物に大きい被害を与えたり、大きい沈下を生じたりする。1964 年 6 月に生じた新潟地震の際

に、新潟市内の信濃川沿いの不良地盤で生じた建造物の被害は、まさにこの液状化によるものであって、しっかりした土層まで基礎を下げていない重量構造物は、ほとんどすべて傾斜や破壊を生じ、はなはだしいものは横倒しになったものもあったほどである。このような箇所をしっかりした地盤にするには、ゆるい砂を締固めて密度を増大するのが最も良い方法である。

図-6.4 バイプロフローテーション



(1) 貫入開始 (2) 所定位置へ貫入 (3) 締固め中 (4) 締固め完了

さにわたって締固めるのに使用¹⁷⁾されたのが実用に供された最初のものである。

また前述のコンポーザー工法は砂地盤にも適用されるが、振動を利用する場合はケーシングの上端に振動機を取り付け砂の投入はケーシングを通じて行ない、振動機を運転しつつケーシングを抜き上げ周囲の地盤を締固めると同時に締った砂柱を形成する。

また地下水面以下の砂地盤を掘削する場合には、地下水の処理を適切に行なわないと、水の湧出のために掘削斜面が崩壊したり、底面が噴き上ったりする。このような事故を防止するには、あらかじめ地下水を汲み上げて地下水面を低下させておくのが最も良い方法で、その代表的なものはウエルポイント工法である。これはウエルポイントと称する吸水管

バイプロフローテーション

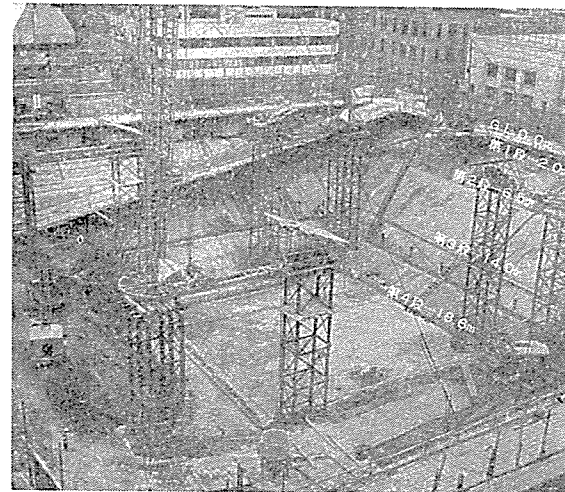
はこのような目的で考案された方法で、偏心回転体を内蔵する筒状振動機をジェットを併用して地中にそう入し、その振動によって周囲の地盤を締固めるとともに、周囲より砂を投入して空洞をてん充しつつ振動機を引き上げて地盤を安定させるものである。この振動機の試作はすでに1954年（昭和29年）に始められたが、種々改良の末1957年（昭和32年）八幡製鉄戸畑工場の埋立地盤を7mの深

写真-6.3 ウエルポイント工法



を工事施工区域の周囲に打ち込んで多数の小型井戸を形成して集水管で連結し、ポンプによっていっせいに地下水を吸み上げて地下水面を低下させる方法である。ポンプによる1段の揚程は6mであるから、6m以上の水位低下を必要とする場合は2段、3段などの多段設置にする。この工法の原型はすでに1931年（昭和6年）に国道1号線の愛知県日光川橋梁の橋梁基礎の根掘¹⁸⁾の際に用いられたが、ウエルポイントとしてはパイプの周囲に多数の小さなスリットをあけたものを用い、打ち込みによって設置した。現在用いられているウエルポイントは保護網、ろ過網、補強網などで保護された吸水管とボールバルブを備え、ジェットによって地盤にそう入設置さ

写真-6.4 ウエルポイント工法



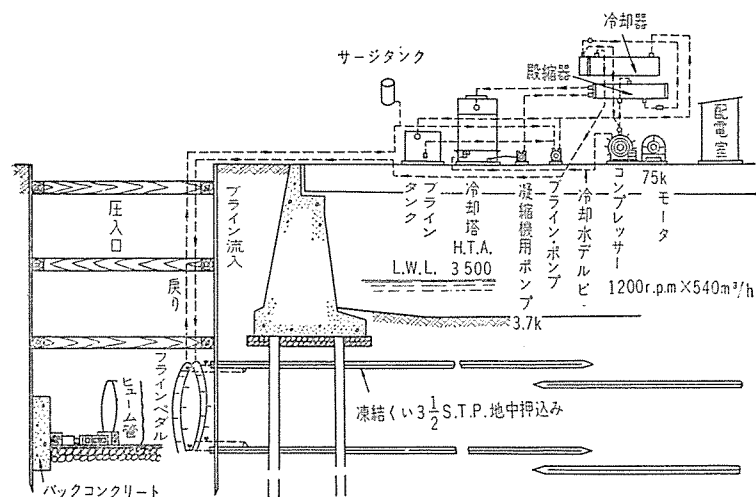
れる。この近代方式によるウエルポイントは1953年（昭和28年）名鉄ビルの基礎根掘¹⁹⁾の際に用いられたのが最初であり、大規模なものとしては、大阪住友商事ビルの基礎根掘では4段のウエルポイントの設置例がある。また地下水位低下は地盤内の有効応力を増加させることになるので、前述のようにウエルポイ

ントは載荷によらずに圧密荷重を加える手段としても用いられる。

排水範囲が比較的せまくてしかも深い場合は深井戸を用いる方が有利である。深井戸の列を集水管で連結して同時揚水を行なうのがジメンス工法である。深井戸が使用されるようになったのはかなり古いことと思われるが、最近の例では 1960 年（昭和 35 年）に都営地下鉄浅草橋の地下掘削²⁰⁾に用いられたもので、揚程 20 m であった。

凍結工法は水を含んだ土を人工的に凍結させる工法で、凍結させようとする地盤に冷却管を配列そう入し、塩化カルシウム溶液などの冷却液を循環させて周囲の土を凍らせるのである。これによって湧水を防ぎ、土の強度を増大させる効果があるので、地下水位の高い

図—6.5 凍 結 工 法



砂地盤や水底工事などに利用されるが、粘土分を含んだ地盤では凍上を生じるので、このような場所では付近に被害をうける建造物がないことを確かめてから使用すべきである。この工法は試験的には 1960 年（昭和 35 年）本州四国連絡橋工事の一環として淡路島岩屋において実施²¹⁾されたが、実際の工事には 1962 年（昭和 37 年）大阪市において河底を横断して内径 1.8 m、延長計 26.73 m のヒューム管を圧入する際に使用²²⁾された。

2.3 土 構 造 物

施工機械の発達とは今日のような大規模工事を可能にした最も大きな原因とみることができよう。施工機械のうち土工機械についてみると、明治初年においては人力と牛馬の力によって掘削や運搬が行なわれていた^{23), 24)}。

この頃人員貨物の大量輸送の手段として鉄道が建設されるようになったが、鉄道工事に貨車が利用された例がある^{25), 26)}。大正年代に入ると大きな治水工事、鉄道建設工事などが各地でさかに行なわれ、動力として蒸気を使用し、軌道の上を走る掘削ならびに運搬機械が採用された。スチーム ショベルと軽便機関車を使用した上越線建設⁴⁾、蒸気ショベルなどの掘削機械を使用した利根川ならびに淀川改修工事^{27), 28)}はその例である。また河川や港湾の工事にはしゅんせつ船が用いられた²⁹⁾。道路やアースダムの締固めにローラーが使用されるようになったのもこの頃であった⁷⁾。明治末期から大正時代にかけての工事には相当思いきった機械化が行なわれ一応西欧の水準に達したようであるが、1926 年（大正末期）頃から 1945 年（昭和 20 年）までの間には大した変化が見られなかったようである。この間に海外の機械は大きく進歩発達した。すなわち動力としてはスチームの代わりに石油が、軌道と鉄輪の代わりに無限軌道やゴムタイヤ車輪が用いられるようになった。作業機械としてもドラグライン、ラダーエキスカベーター、ショベルのほかはブルドーザー、スクレーパーなどが実用化された。また締固め機械として重量の大きい、かつ重量調節可能なローラーが開発された。1945 年（昭和 20 年）以降これらの機械が輸入され、急速に外国のレベルに追いつくに至った。1955 年（昭和 30 年）頃に至って土工機械の作業性能はいっそう向上し、機械の種類もさらに多くなってきた。ゴムタイヤ付振動式締固めローラー、モーターグレーダー、スクレープドーザーなど枚挙にいとまがないほどである。

アースダムはかんがい用水を貯める目的で古くから造られていた。明治末期になって、水力発電のための調整池として造られるようになった。山梨県下桂川筋大野発電所工事の一部として施工された大野調整池のアースダムは、レール上を走る土運車による人力運搬、蒸気グループドローラーならびに電気グループドローラーによる薄層締固め*、土質

* 蒸気グループドローラーは重量 10 t ないし 4 t。電気ローラーは電気ウィンチによって運転したコンクリートローラーで重量 8 t ないし 6 t。

側ならびに九州西北部の第三紀層地帯、本州中部から紀伊半島、四国を縦断し、九州におよぶ中央構造線に沿う破砕帯、および東北、関東ならびに九州などの温泉作用による変質をうけた地域がおもな発生箇所となっているが、そのほかの地域にも見られ、その範囲はほとんど全国におよんでいる。

地すべり対策の歴史はかなり古いものと思われるが、記録に残っているのは徳川時代以降である。この頃の工法は主として砂防ダムと河川付替えであったが、明治に入ってからこの工法が引き継がれ、1900 年（明治 33 年）から内務省直轄工事として実施された長野県茶臼山地すべりの防止工事³³⁾にも石積の砂防ダムが主体となっていた。

大正に入って信濃川大河津分水工事中に生じた地すべり³⁴⁾は人工斜面のすべりの最も顕著なものであって、1914 年（大正 3 年）、1919 年（同 8 年）、1924 年（同 13 年）と 3 回生じたが、これは自然放置で安定化するのを待っていたようである。1931 年（昭和 6 年）に移動を開始した大阪府岸（別名関西本線亀ノ瀬）の地すべりは土質力学導入の初期に生じた著名な地すべりであって、円形すべり面を用いる安定解析を行なって土質試験結果との比較をした³⁵⁾最初のものである。

地すべり防止にくいが使用されたのはかなり古い時代からと思われるが、1913 年（大正 2 年）北陸本線開業直後、能生付近の白山トンネル入口の地すべり防止に長さ 80 m のレール入りコンクリートよう壁の基礎に末口 24 cm、長さ 7 m の松ぐい 1 159 本を打ち込んだ³⁶⁾のは規模の大きいほうである。

また地下排水が地すべり防止に有効なことは古くから気づかれていたが、広く実施されていたのは開きよ、あるいは暗きよによる比較的浅い範囲の排水であった。トンネルによる大がかりな排水が用いられるようになったのは比較的近年のことで、1949 年（昭和 24 年）新潟県大久保地すべり³⁷⁾や、1950 年（昭和 25 年）同じく新潟県中野地すべり³⁷⁾ではトンネルによって多量の地下水が排水され、移動量が急激に減少した。国鉄では 1950 年（昭和 25 年）に篠井線嫉捨の地すべり防止のために施工した排水トンネル³⁸⁾が著名であって、集水用の立井戸を併用したものである。

深部排水を最も簡易に、かつ廉価に行なうことのできるの横ボーリング排水であって、1949 年（昭和 24 年）新潟県において初めて実施され、1951 年（昭和 26 年）以降新潟県栃ヶ原地すべり³⁹⁾で実施されたものは 328 坑におよび、その有効であったのと規

模の大きいことで著名である。

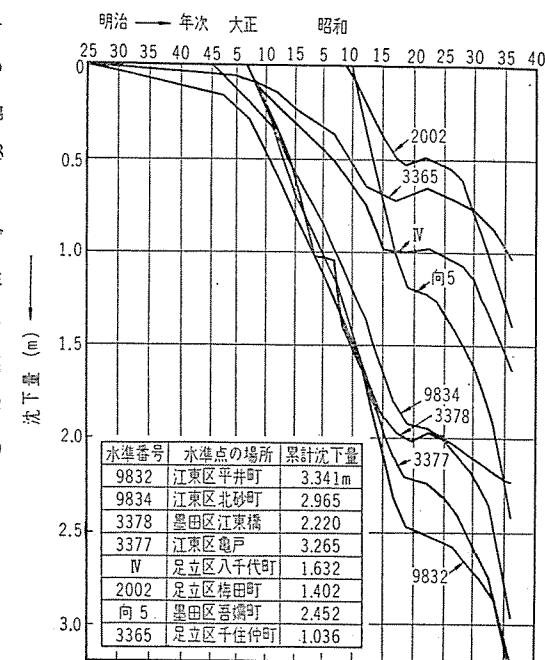
地すべり崩土の大規模な除去は前出の 1961 年（昭和 36 年）の静岡県由比の寺尾地すべりの対策工事で、排土量は 750 000 m³ に達した⁴⁰⁾。

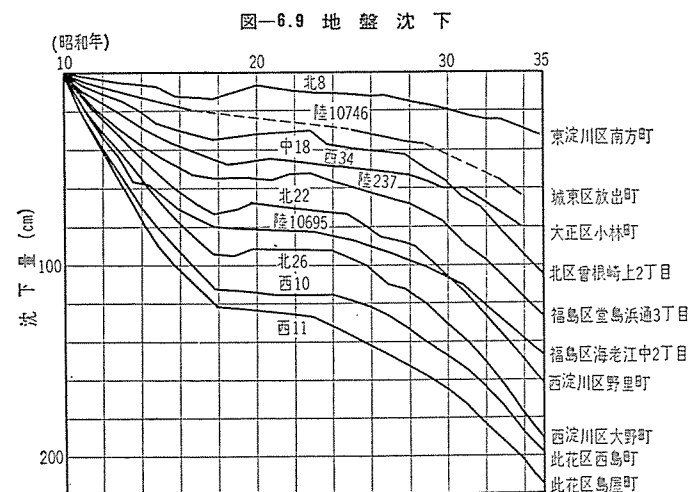
そのほか地下水のしゃ断に注入や電気固結などが実施された例がある。また 1960 年（昭和 35 年）に北陸本線能生一箇石間の藤崎地すべりで試験的に実施された焼結工法⁴¹⁾はボーリング孔中で燃料を燃焼させてその周囲の土を固結させる方法であって、排水によって十分な効果が期待されない粘性土中のすべりの防止にきわめて有効な方法として期待されるものである。

地盤沈下の傾向が顕著となってきたのは東京では大正末期、大阪および尼崎では少し遅れて 1928 年（昭和 3 年）頃からであった。いずれも 1940～1941 年（昭和 15～16 年）頃までに極度に達し、第 2 次大戦後半から戦後にかけて一時停止するように見えたが、1950 年（昭和 25 年）頃を境と

して再び沈下が増大し始め、その速度も年を追って増大してゆく傾向がある。名古屋の臨海地帯においても 1953 年（昭和 28 年）以降沈下の傾向が見られ、新潟においても沈下がはなはだしくなってきたので、1957 年（昭和 32 年）以降水準測量を開始した。これらの地域の年間最大沈下量は 1959～60 年（昭和 34～35 年）頃には東京 20 cm、大阪 15 cm、尼崎 10 cm、名古屋 6 cm、新潟 38 cm に達している⁴²⁾。沈下がはなはだしくなるにつれて、いずれの都市においても水準点を増加して測

図-6.8 地盤沈下





量を頻繁に行ない、また自記沈下計ならびに自記水位計を設置して連続記録をとるようになったが、これらの資料から地盤の沈下量と地下水位の対比が行なわれ、両者の変化速度が一次で比例するということがわかり、沈下の主要原因が新潟以外の都市では工業ならびにビル冷却用としての、新潟においては水溶性天然ガス採取のための地下水の汲み上げによって間引き水圧が減少し、軟弱層の圧密が進行したためであると結論され、揚水を止めないかぎり沈下を停止させることは困難であると考えられるに至った。

それで各都市において多少の時間的なずれはあるにしても地下水採取の規制ならびに工業用水道の建設を推進して地下水位の低下を防ぎ、また高潮から低地を守るために防潮堤の構築、かさ上げ、下水道ならびに排水場の整備を強力に実施するようになった。

そのほか地下水位の復元のための注水加工法が 1951 年（昭和 26 年）尼崎において試験的に実施され、1960 年（昭和 35 年）以降、新潟において本格的に実施されている。

なお地盤ならびに工業生産から見れば川崎も当然同様な運命になるはずであったが、揚水による地盤沈下が 1936 年（昭和 11 年）頃には年間 10 cm を越えるようになったので、1938 年（昭和 13 年）には工業用水道を建設して給水を開始するとともに揚水制限を行なったので、それ以来漸次沈下速度が減るようになった⁴³⁾ のは先見の明があったといえよう。

2.5 土圧、よう壁

クーロンおよびランキンの土圧論はすでに明治時代にわが国に紹介されたが、大正時代は実用面からクーロン土圧の活用に研究の努力が向けられていた。従来石垣が使われていた箇所もコンクリートの普及とともにコンクリートよう壁が用いられるようになり、またコンクリート構造の特徴を生かして昭和の初期には地盤不良の箇所に井筒応用のよう壁⁴⁴⁾が建造され、また格子わくのような壁⁴⁵⁾も使用されている。

また 1923 年（大正 12 年）の関東大震災を契機として、地震土圧が大きい問題としてとり上げられ、その算定法の考案ならびにその裏付けとなる実験研究がさかんに行なわれるようになった。1935 年（昭和 10 年）の静岡地震で被害をうけた清水港岸壁⁴⁶⁾について、その原因ならびに復旧に関し十分な検討が加えられ、それまでの研究が生かされたのはよく知られた事実である。

2.6 基礎工

基礎はつぎのように分類できる。

- a) 直接基礎—独立フーチング基礎、複合フーチング基礎、連続フーチング基礎、ベタ基礎
- b) くい基礎—木ぐい、既成鉄筋コンクリートぐい、場所打ちコンクリートぐい、鋼ぐい、継ぐいおよび合成ぐい
- c) ピヤ基礎
- d) ケーソン基礎—オープン ケーソン、ニューマチック ケーソン

明治以前には、基礎としては石が独立フーチングの形式で使用されていたが、明治以後は材料としてコンクリートと鋼が用いられて、各種の基礎が考案され、しかも施工機械によって能率よく、大規模なものが造られるようになってきた。

地表面付近に堅固な地盤が存在する場合には直接基礎が用いられるが、支持層が深いところにある場合にはくい、ピヤあるいはケーソンを用いる。くいの材料として最も古いものは木ぐいであり、これは明治初年以來（あるいはそれ以前から）使用されている⁴⁷⁾。

コンクリートぐいは腐食に対する抵抗力が強いが大正になってから出現している⁴⁸⁾、⁴⁹⁾。

と沈下が困難となる。沈下に際しては井筒の上に荷重を載せるが、筒の外壁に空気や水を噴出させて土との摩擦を減少させて沈下を容易にする工法が採用された^{60), 61), 62)}。

関東震災以後基礎の耐震性に大きな注意が払われるようになった。地震によって基礎は大きな水平力をうけることになるので、根入深さを大きくしたり、斜ぐいを用いている。

鉄筋コンクリート矢板⁶³⁾は大正初期頃から使われていたが、鋼矢板がさかんに土木工事に用いられるようになったのは大正末期の震災復興事業からである⁶⁴⁾。鋼矢板は橋梁や河・海構造物の締切工事に使用された^{65), 66)}。また切開式地下鉄道工事には I 型钢と併用して土留に使われた⁶⁷⁾。以上のような一時的施設のほか岸壁などの永久構造物にも鋼矢板が使用されるに至った⁶⁸⁾。

床掘(根切、根掘)工事におけるのり面崩壊防止、湧水処理のためにウエルポイントやディープウエルが矢板と併用されたがこれらのことについては 2.2 で述べた。床掘りにとまなう隣接地の沈下防止のためにリチャージウエルで水を注入し⁶⁹⁾、あるいは薬液を注入することも行なわれるようになった。さらにまた地盤に深い溝を掘ってコンクリートを打ち込むか、場所打ちのコンクリートぐいを重ね打ちして地下壁を造り、この壁を構造物の一部として使用することとし、その中に囲まれた土を掘削することによって周囲の地盤に全然変動を与えないような工法もあらわれた。

基礎の支持力が不十分な場合に施工する永久的な補強工事をアンダーピニングという。アンダーピニングの方法としては継ぐい工法、ベノト工法、深礎工法などがある。近年施工された大きな工事の例としては大阪駅高架橋、第 4 有楽町橋と第 1 有楽町橋との交差工事がある⁷⁰⁾。薬液やセメントを注入して地盤を補強する方法も採用されている⁷¹⁾。また約 10 年前には電気固結法が使用された例がある⁷²⁾。

明治初年頃には基礎工事用機械としては、二本子式のくい打ちやぐらがあったにすぎない。これはおもりを人力で引き上げ、ついで自由落下させてくい頭をたたくものである。明治のなかば 復強動式スチームくい打機が輸入され⁷³⁾、最近になってディーゼルハンマーや振動式くい打機が使用されて、径の太いくい、長いくいを能率よく支持層まで十分打ち込むことができるようになった⁷⁴⁾。

3. トンネル

3.1 はじめに

(1) 概説

トンネルは古くは、住居、墓地などのために建設せられ、ついで水運、陸運などの交通路のために造られるようになったが、史上最古の通路トンネルといわれるユーフラテス河を横断したバビロンのトンネルは約 4000 年前に造られたもので、延長は約 900 m、断面は今日の地下鉄道が通りうる大きさであったと推定されている。18 世紀になって登場した鉄道は交通機関の最右翼として驚くべき早さで発達したが、鉄道はその機能からいって線型、勾配に大きな制限があり、したがって好ましくない地形の所に選定される場合もあり、当然トンネル建設の必要性が増大してきた。特にヨーロッパにおけるアルプス山系はその行手をはばみこれを通り抜けるには相当長いトンネルを必要としたが、工事はなかなか着手されなかった。しかしモンスニートンネル(約 13 km)が完成し、ついでサンゴタードトンネル(約 15 km)が完成するや、ヨーロッパにおける商業地図が大きく書きかえられ、これを利用しうる国はきわめて有利な立場を占めるようになった。これが世界最長の鉄道トンネルであるシンプロントンネル(約 20 km)を始め数多くのアルプス越トンネル建設の誘因となった。

事情はわが国においてもほぼ同様で明治以前に琵琶湖用水とか、品井沼用水などのかんがい用トンネルが掘られていた。

鉄道トンネルとして最初のものは大阪・神戸間の石屋川トンネル(61 m)であるが、これは堀割式のものであった。その後、逢坂山、柳ヶ瀬、笹子と数多く建設されたが、鉄道前期におけるトンネル工事は丹那トンネルの工事で代表される。このトンネルは国鉄東海道線における延長短縮と勾配改良のために国府津・沼津間に新設せられた複線トンネルで延長は 7840 m である。掘削着手は 1916 年(大正 7 年)3 月で完成までに 16 年もの

年月をついやすとは当初は思いもなかったことで、この長い工事期間を通じて、トンネル工事におよそ想像できるあらゆる種類の事故に出あっている。そしてこれに打ち勝つためにはセメント注入、圧気工法、シールド工法、排水トンネルの利用などトンネル技術上のあらゆる方策を講じて完成したもので、この貴重な体験によって、いわゆる丹那式と称する掘削方式を生み出し、つぎの関門海底トンネルの掘削の原動力となった。

関門の鉄道、国道両トンネルの完成の意義は連絡船による不便さを解消し、本州と北九州地区とを直結して、わが国産業の大動脈となったもので、その意義はきわめて大きく、さらに国内においては津軽海峡連絡、本州・四国連絡と、また国外においては、英仏海峡連絡などの推進役を果たしている。佐久間ダムおよびそれともなう飯田線代替工事においては、あらゆる重機械を使用しての大工事で、技術的には退歩したといわれた戦後の空白を一挙に取りもどし戦前を抜く技術水準に達し、長大トンネルの施工期間の短縮は、長大トンネルの計画を容易にし、ひいては路線選定の面に大きな変化をもたらした。

すなわち 1955 年(昭和 30 年)には北陸線敦賀・今庄間の勾配改良のために、延長 13 km 余り、世界第 5 位の北陸トンネルが着手され、わずか 6 年でこの大トンネルを完成している(図-6.13 参照)。

また秘境といわれた黒部溪谷に計画された黒部川第四発電所御前沢ダムは、ダム工事用骨材 3 400 000 t をはじめ資材の輸送が最大難関で、したがってこのために設けられた大町トンネルの完成はこのような地点における大建設工事完遂に最大の貢献をなしたといえる。

なお、以上の山岳トンネル、海底トンネルのほか近年における大都市交通緩和の目的から、地下鉄道の必要性が大きくなり、その技術も相当進んできている。

(2) 将来計画

前述のようにトンネル技術の発達には、長大トンネルの施工を可能にし、鉄道道路の線形にかなり思いきったものが採用されるようになり、国土開発縦貫自動車道や青函海底トンネルなどがきわめて実現性のある計画として登場してきた。

(3) 断面形

トンネル断面の決定は、トンネル内を通過するものの大きさ、量、形状によって決まるものであるが、普通上部を半円または多心円よりなるアーチとし、側壁部は垂直または内

表-6.1 (a) 世界長大鉄道トンネル

トンネル名	国名	延長	順位	幅 × 高さ	着手～竣工
		(m)		(m) (m)	
Mt. Cenis	フランス-イタリア	12 847	6	8.00×7.50	1857～1871
St. Gothard	スイス-イタリア	15 000	3	8.00×7.50	1872～1882
Ronco	イタリア	8 300	14	—	1882～1888
Arlberg	オーストリア	10 025	8	8.02×7.62	—～1885
Jenda	イタリア	8 098	15	—	—～1899
Hauenstein	スイス	8 047	16	—	—
Simplon	スイス-イタリア	20 036	1	3.39×5.49	1895～1906
Karawanken	オーストリア	7 976	17	—	—～1906
Tauern	オーストリア	8 525	13	—	1901～1907
Ricken	スイス	8 605	11	—	—～1910
Loetschberg	スイス-イタリア	14 534	4	9.14×6.10	1906～1913
Arthur Pass	ニュージーランド	8 553	12	4.57×5.12	1908～1923
Somport	フランス-スペイン	7 882	20	—	1909～
Rogers Pass	カナダ	7 894	18	8.08×6.63	1913～1915
Apenine	イタリア	18 618	2	8.63×6.43	1920～1931
清水	日本	9 702	10	4.88×6.02	1922～1931
Moffat	アメリカ	9 802	9	4.88×7.32	1923～1927
New Cascade	アメリカ	12 538	7	4.88×7.32	1925～1928
新丹那	日本	7 905	19	9.60×7.80	1941～1964
北陸	日本	13 850	5	8.54×6.44	1957～1962

表-6.1 (b) 世界の長大道路トンネル(換気設備を有するもの)

トンネル名	所在地	延長	車道幅員	車線数	換気方式	工法	工期	工費
		m	勾配	方向・本数	換気量	断面形状		億円
モンブラン	フランス-イタリア国境	11 600	7.0m 2.4%	2 車線 対向×1	上方送気半横流式 600 m³/sec	素掘 馬てい形	1959 1964	113
サンベルナルディーノ	スイス サンベルナルディーノ峠	6 596	7.0 0.95	2 車線 対向×1	上方向横流式 825	素掘 馬てい形	1962 1966 (予定)	
グランサンベルナル	スイス-イタリア国境	5 828	7.5 5.0	2 車線 対向×1	上方向横流式 380	素掘 馬てい形	1959 1964	
関門国道	日本 下関一門司	3 461	7.5 4.0	2 車線 対向×1	上方向横流式 779	素掘・ルーフシールド 円形	1939 1958	76
マーシイ	イギリス リバプール	3 226 980	11.0 3.3	4 車線 対向×1	上方送気半横流式 1 180	シールド 円形	1926 1934	127

図-6.12 関門鉄道トンネル

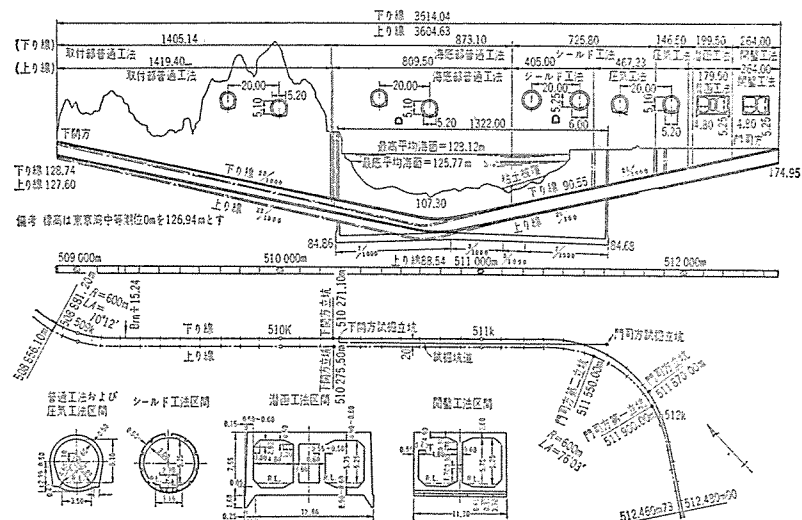
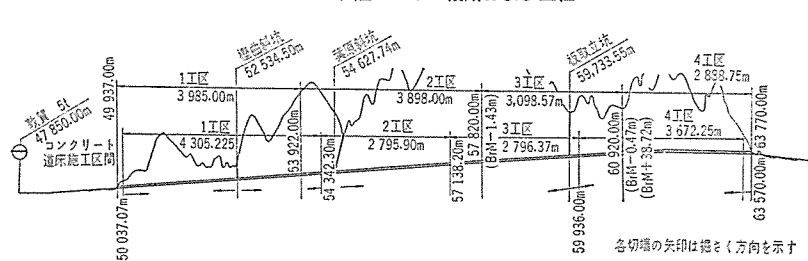


図-6.13 北陸トンネル縦断および工程



方式は自然発生的なものか、欧米の模倣が明らかでないが、トンネル工事草創以来約 40 年にわたって唯一のトンネル掘削方式となっていた。しかし当時諸外国においては、おおむね底設導坑方式を採用しており、1914 年（大正 3 年）に着手した東海道線彦坂山トンネルにおいて初めて新オーストリア式を採用し、以後これが代表的な掘削方式となるに至った。その後アーチ支保工の発達、工用諸機械の発達と相まって掘削断面の拡大が可能になり、最近では全断面工法あるいは半断面工法が多く用いられるようになった。

図-6.14 関門国道トンネル

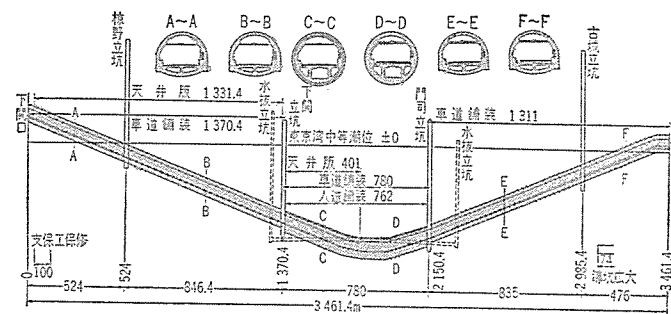
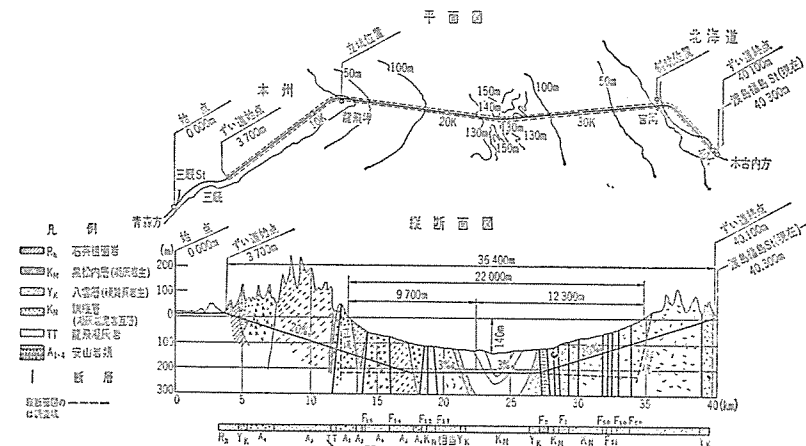
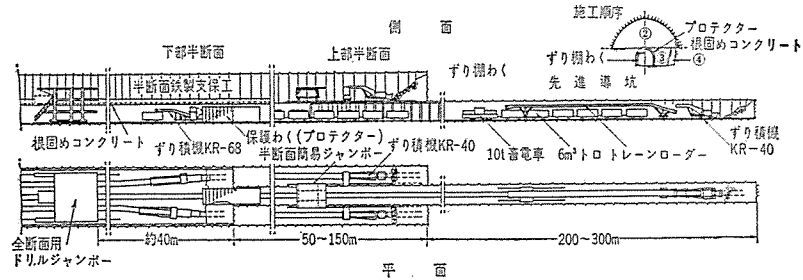


図-6.15 青函海底トンネル（予定）

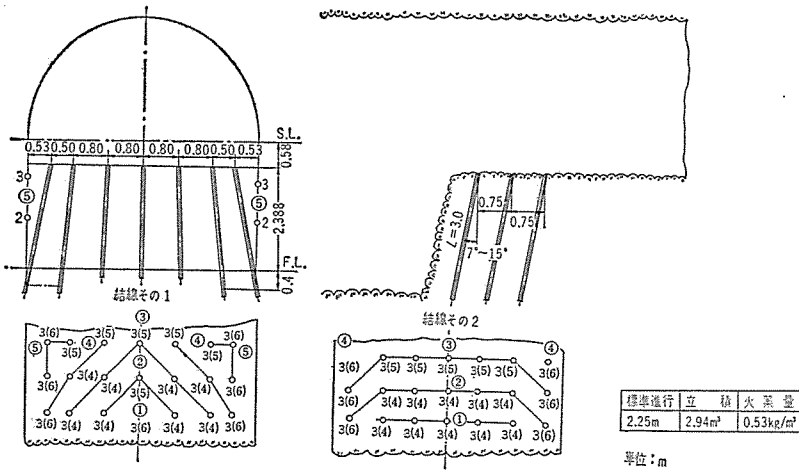


a) 普通掘削方式 断面形などによって必ずしも一律的にいうことはできないが、地質のよくない所やあまり長くないトンネルにおいて、ごく普通に用いられてきた掘削方式で前記日本式、新オーストリア式などがこれに属する。これは所要断面に比して小さい導坑をまず掘削し、その導坑より徐々に切り広げて、所要断面に至るものでその導坑の位置、切広げ、覆工の順序などによって種々の名称が付けられている（図-6.19）。全断面工法あるいは半断面工法などで計画されたトンネルでも坑口付近など地質の悪い箇所では部

図ー6.20 導坑先進上部半断面工法



図ー6.21 第4中山半断面工法



注 1. ○印の中の数字は電気雷管の段割を示す
2. 各孔の数字はダイ本数で()内は低比重ダイナマイト本数

りつつある。

c) 全断面工法 所要断面を一気に掘削する方式で大型、高能率機械の使用が可能で早い進行が期待できるもので、日本で本格的にこの方式で掘削されたのは中部電力東上田発電所第4号トンネルが最初で 220 m/月 の進行が記録されている。掘進速度はおおの断面が異なるので、一律に扱うことは適当でないが 表ー6.2 のとおりである。

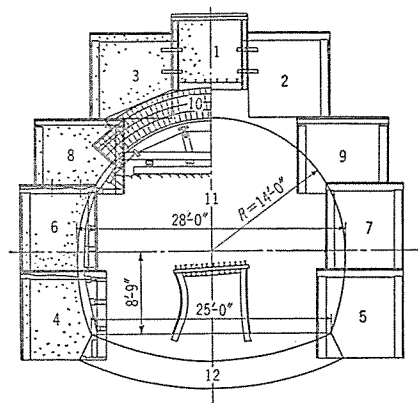
表ー6.2 進 行 記 録

トンネル名	地 質	切羽断面	日進最大 (m) 年	月進最大 (m) 年
(日本)				
欽 明 路	硬 砂 岩	10.8 (導 坑)	12.7 (1933)	202.0 (1933)
仙 山	閃緑質片麻岩	15 (#)	9.6 (1936)	209.5 (1936)
真 那 板 山	硅岩, 粘板岩	12 (#)	11.0 (1937)	231.7 (1937)
大 原	雲 母 片 岩	30 (全断面)	11.9 (1954)	261 (1954)
奥只見15号		29 (#)	14.0 (1956)	275 (1956)
大町ルート	花 崗 岩	36 (#)	20.2 (1959)	340 (1957)
曾 根	石英粗面岩	30 (#)	18.2 (1958)	301 (1958)
黒部ルート	花 崗 岩	22 (#)	25.1 (1960)	540 (1960)
(外国)				
Gren Almond T (North Scotland)	閃 緑 岩	dia 3.2 m	130 m/7日 (1955)	
Allt-na-Lairige T (Argyll)	花 崗 岩	2.0×2.45 m	135 m/7日 (1955)	
4 H T (North Scotland)	閃 緑 岩	2.6×2.6 m	170 m/7日 (1955)	
Eucumbene-Tumut T (Australia)	珪岩, 花崗岩	dia 7.3 m	172 m/7日 (1957)	
Lednock T (North Scotland)	硬 質 斑 岩	dia 2.4 m		494 (1957)
4 H T (North Scotland)	閃 緑 岩	2.6×2.6		560 (1957)
アキモーパー (Czechoslovak)	粘 板 岩	2.9×3.6		870 (1954)
Horrsele T (Sweden)	花 崗 岩	14.9×18		178 (1955)
Stornorrforst T (Sweden)	硬質花崗岩	11.0×16		122 (1956~7)

このように全断面掘削は進行の上からはきわめて有利であるが、地質もかなり良好でないといふと不可能で、またいったん全断面で着手するとなかなか工法を切り替えることもできず、地質変化のはげしい日本においては、小さい断面のものは別として全断面で計画できる所はあまり多くない。また、あらゆる設備が大きくなるのでかなりの施工延長がなければ不経済となることが多い。

d) その他の方式 坑道式と称する、断面の外周に沿って多くの坑道を配列し、各坑道を掘削したらただちにそれにコンクリートを打設する。この作業をつぎつぎに行なうて覆工を完成したあとに、中の残土を取りのぞく方法で丹那トンネルの一部、愛宕山道路

図-6.22 旧丹那坑道式



でも 1850 年代までは手掘りの時代で 1857 年に着手したモンスニー トンネルでも着手後 4 年目の 1861 年に初めて削岩機が実用に供され一躍 10 倍もの進行が出たと記録されている。わが国においては 1878 年（明治 11 年）に着工した東海道線逢坂山トンネルにおいて試用したのが最初で、ついで 1880 年（明治 13 年）着工の北陸線柳ヶ瀬トンネルにて本格的に使用された。削岩機はその動力により、蒸気、水力、電気、圧縮、空気、ガソリンなど種々あり、初期のものは蒸気によるものもあったが、取り扱い、その他から現在ではほとんどが圧縮空気を動力としており、ごく特殊な場合に電動式のものが使われる。またガソリンによるものは明り工事ではよく用いられるがトンネルではほとんど用いられなかったことがない。一般に削岩機には、その使用法により、シンカー、ドリフター、ストーパーの 3 種類がある。以前はコラム、トライボットブーム、クオーリバーなどに取り付けて使用する ヘビィ ドリフターが多く使われていたが、最近エアレッグの発達とともに軽量かつ強力なレッグ ハンマーが発達し、日本人の体格とも 相まって非常に多く使われるようになった。

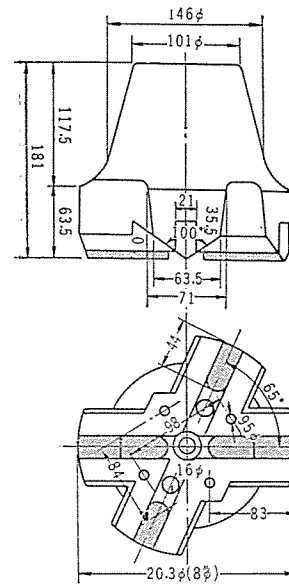
また、特に大型の削岩機としては、神岡線第 4 中山トンネルのバーンホール削孔に使用したデンバー社製、大口径削岩機で、その本体重量 170 kg、性能は削孔径 20 cm のみ、下り 10 cm/min であった。

トンネルなどに採用された。この方式の変形としては新幹線泉越トンネルなどに採用された側壁導坑式がある。いずれも地質不良の場合、もしくは地表の沈下を防ぐとしてこの工法が採用されている。

(2) 削 岩

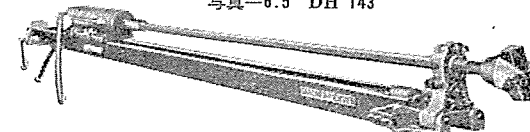
わが国における初期のトンネルはほとんどが手掘りによっており、その能率はきわめて低く、高山線宮トンネルの実績では比較的節理の多い石英斑岩の箇所でのみ下り約 1 cm/min、坑夫 1 日 1 人の削孔長は 0.90 m という結果が出ている。外国におい

図-6.23 大口径ビット



ても削岩機もともに重く、またコラムまたはバーの建込みもかなり手間を要することから、これを移動台車に乗せる試みがなされ、今日、われわれがジャンボと称する巨大なものにまで発達してきた。このような移動台車のわが国における使用実績は、戦前では小型のものが仙山トンネル、真那板山トンネル、釈迦岳トンネルなどで使用された。しかし 2 段以上大型のものは戦後である。写真-6.6、図-6.24 に飯田線大原トンネルに使用された 11 ブーム ジャンボと北陸線北陸トンネルに使用された 21 ブーム ジャンボを示す。

写真-6.5 DH 143



削孔に使用するのみについては手掘りの頃はもちろん機械掘りになった初期には、刃先部およびロッド部を一体に鍛造したものが使用されていたが、漸次刃先部のみを特殊加工するものが現われ、ついで刃先（チップ）を特殊合金で製造して植え込んだもの、および刃先部（ビット）とロッドの損耗程度の不均衡を解決するために考え出された、ビットの着脱可能なもの、すなわち、デタッチャブル ビットなどが順次開発せられている。削岩機の保持方法はシンカー ピックなど下向きに使用するものは別とし、だいたい反力を取る関係上、なんらかの支持器具が必要で、以前はコラムまたはバーを垂直、または水平に渡しそれに装着していた。しかしコラム、バ

写真-6.6 11 ブーム ドリル ジャンボ

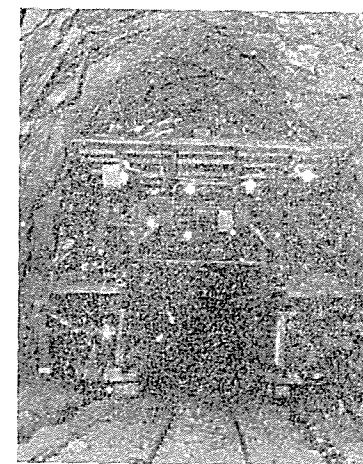
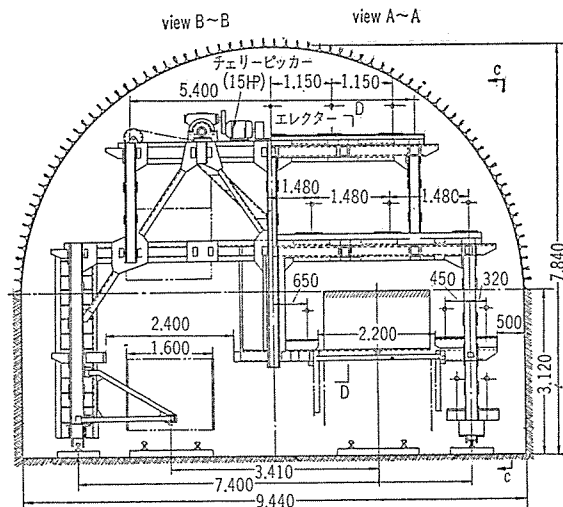


図-6.24 21 ブーム ジャンボー



ダイナマイトが使用されたのが最初でその後、今日までその性能は向上しているが、本質的にはあまり変わっていない。例外的なものとしては、上越線清水トンネルで液体空気爆薬を試用した程度である。カーリットも鉱山関係では使われているが、後ガスがあまり良くないこと、取り扱いが簡単でないなどのため普通のトンネル工事ではほとんど使われていない。ただ近年アメリカでさかんに使用され出したアンホー爆薬は経費の点できわめて安く、また取り扱いに難点はあるが安全性も高く、今後わが国でも多く使用され、いずれはダイナマイトに代わるものとして期待できる。現在施工中の新清水トンネルでこれを大々的に使用する計画で、その成果が期待される。

爆発方式はウェッジ カット、バーン カットに大別でき、今までの大部分のトンネルはウェッジ カットにより掘進されてきた。後者は主として長孔掘削に適しているといわれ、戦後間もなく行なわれた、東海道線新泉越トンネルにおいて、ミリセコンド電気管を使用してのバーン カット工法が行なわれ、ついで前記神岡線第 4 中山トンネルでも大口径削岩機を使用してのバーン カット、全断面工法が試みられた。後者については施工延長も 400 m で短く、また地質上長孔掘削が思うようにできなかったため、ウェッジ カッ

(3) 爆 破

トンネル掘削に初めて火薬を用いたのは、フランスランゲトック運河のトンネルであるといわれ、今から約 300 年昔である。1867 年にはニトログリセリンが初めてアメリカのフォーザックトンネルで使用された。これが今日のダイナマイトの前身で、今日でもこれと同じ性質の爆薬が広く用いられている。わが国では前記北陸線柳ヶ瀬トンネルで

トとの適正な比較は残念ながらできなかった。前記新清水トンネルでは同じ大口径削岩機によるバーン カット工法を採用しており、これも大いにその成果が期待できると思われる。

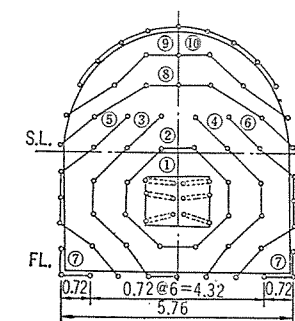
施工中の換気で最も苦労したトンネルは、北陸線柳ヶ瀬トンネルで最初は溪流を引水して小瀑布を作り、これとトローフの組み合わせ、ついでブロワーと水車の組み合わせ、最後に空気圧縮機とタービンの採用と、適当な諸機械のないときに先人がいかに苦心したかがしのばれる。1893 年(明治 26 年)に竣工した碓氷峠のトンネルでは、木樵と離心動扇車を回転して換気を行ない、大正時代に至って初めて換気機が現われ、猪の鼻トンネルで 5 000 ft³/min (150 m³/min) の換気機と径 18 in(45.6 cm) の送風管を使用した。その後丹那、清水と日本の代表的長大トンネルの施工に際しては、いずれもターボブロワーを設備し、以後換気設備に関しては飛躍的な進歩はしていない。部分的な進歩としては化学繊維の発達で従来の金属風管に代わって切羽付近での換気管の伸縮が容易になり、紀勢

線逢神坂、曾根トンネルではアポニール風管を使って、全断面という有利な面はあったが理想的な換気を行なった。最近のディーゼル機関車の使用は坑内空気の面では、より効果的な換気を必要とするはずであるが、残念ながら施工中の換気はほかのものに比して比較的軽視される傾向にあり、掘削方式にも左右されるが作業環境向上の面からも完全な換気設備を有することが最低条件であるという原則を忘れてはならない。

(4) 湧 水 処 理

トンネル工事では大かれ少なかれ湧水、出水はつきもので、程度の差はあるが一度は水

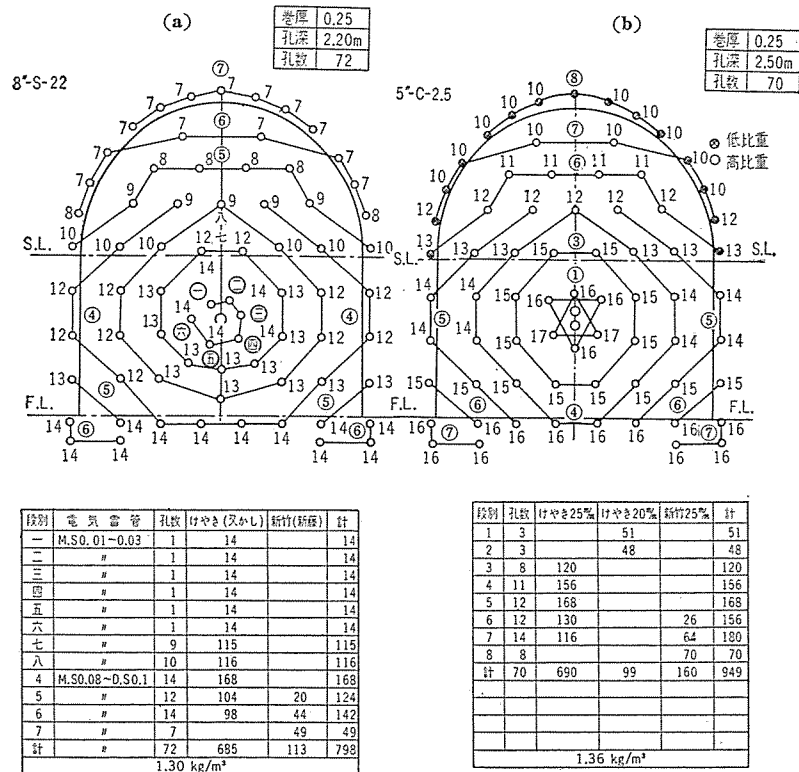
図-6.25 国鉄単線トンネルにおけるウェッジ カット削孔例 15-A-S-1



1 発破進行	1.5m
孔 数	70
掘削断面	30.51m ²
掘削量	45.77m ³
全 装 量	45,300kg
立米当り装量	0.990kg

種別	役別	孔数	1孔当りの重量		種別	役別	孔数	1孔当りの重量	
			100g	200g				100g	200g
心 抜	1	6	2	3	踏前中	5.6	2	1	3
助	2	6	1	3	孤	7	2	1	3
踏前助	2	2	1	3	踏前助	7	2	2	3
助	3.4	2	1	2	踏前中	7	2	1	3
	3.4	2	2	2	助	8	3	1	2
孤 助	3.4	2	2	2	冠 助	8	2	1	2
	3.4	2	1	3	冠	8	2	2	2
踏前助	3.4	2	1	3	冠 助	9	5	1	2
踏前中	3.4	3	1	3	冠	9	2	2	2
助	5.6	2	1	2	冠	10	9	2	2
冠 助	5.6	2	2	2					
孤	5.6	6	1	3					
踏前助	5.6	2	2	3					

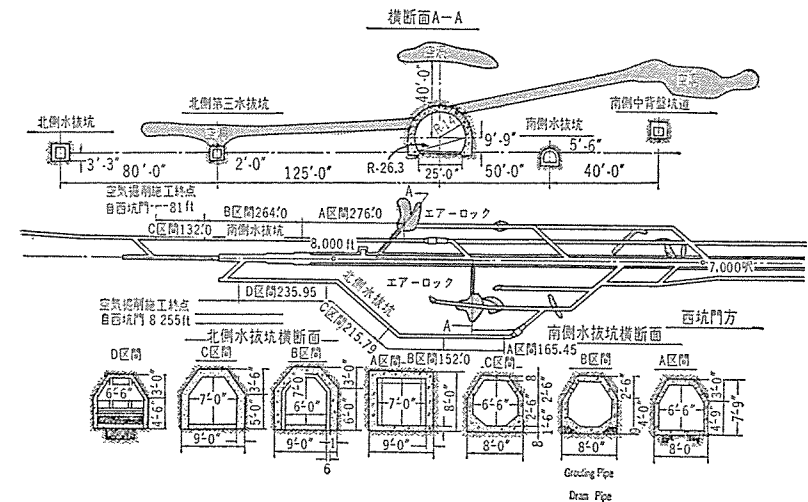
図-6.26 国鉄単線トンネルにおけるバースカット削孔例



による被害があるといっても過言でなく、その処理の仕方が工期に多く響いてくる。要はいかに早く察知し、徹底的な処置をするかが、大切なことと思われる。16 年間の丹那トンネルの工事も結局はこれとの戦いが大部分であり、最近の例でいけば大町トンネルの 7 カ月の苦闘も相手は水だけであったともいえる。諸外国でもサンフランシスコ水道計画のために作られたフートヒル トンネルでは 350~400 lb/□" (25~28 kg/cm²) の高圧湧水、またコロラド河水道計画のサンジャット トンネルでは、14 500 gal/min (55 m³/min) という湧水に遭遇している。丹那でも圧力 300 lb/□" (21 kg/cm²), 123 個 (198 m³/min) の記録があり、大町トンネルでは 50 kg/cm², 650 l/sec (39 m³/min) の大湧水に遭遇してい

る。湧水処理の方法は大別して、水抜坑による排水と、注入などによる止水とがある。前記の丹那ではさらに本トンネルの 2 倍に達する延長の水抜坑が掘削され、また、その中には圧気工法により掘削せられた水抜坑などもあり、本トンネル掘削に非常な効果をあげた。

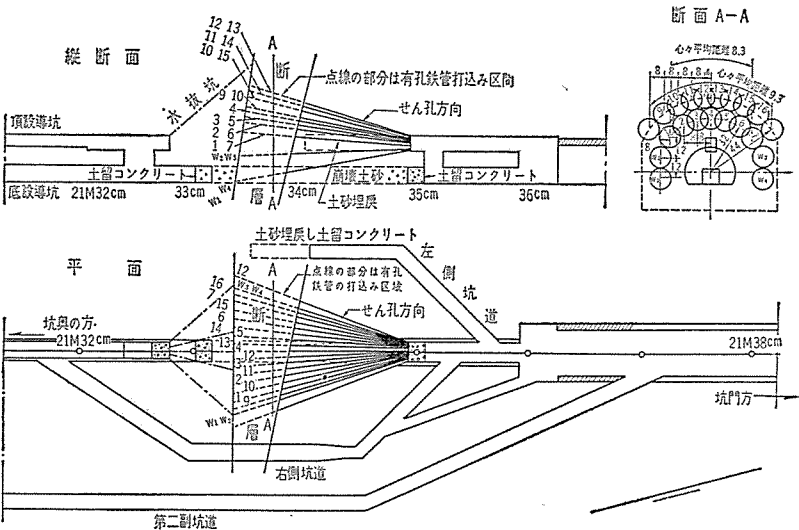
図-6.27 丹那トンネルにおける圧気工法



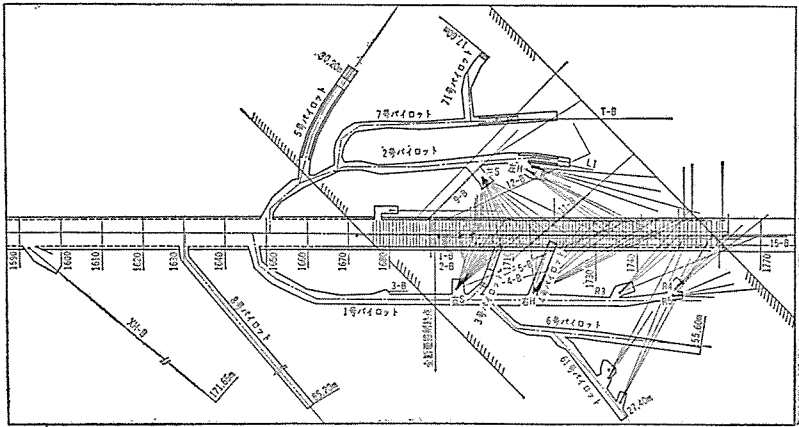
また、丹那では初めてセメント注入が試みられ、さらに珪酸ソーダと硫酸亜土との薬液注入も行なわれた。大町トンネルにおいても同様に水抜坑、セメント、薬液注入の組み合わせにより成功している。丹那の技術は関門鉄道トンネルの施工に当たって大いに活用せられ、関門国道トンネルでは、珪酸ソーダに珪弗化ソーダまたは重曹を加えた薬液注入技術が開発せられた。短区間ではあったが、ケミゼクト工法がきわめて理想的に行なわれた例としては、新幹線蒲原トンネルがある。1963 年 (昭和 38 年) に終了した富士川用水トンネルにおいては、圧気と、前記薬液より、さらに粘性度の高い AM-9 系薬液をセメント注入などと併用し、コストの上ではきわめて高いものにはなったが疎混じり砂層中の掘進に成功している。

以上のほかに止水法としては、凍結法があり、欧米の立坑開削にはよく用いられている

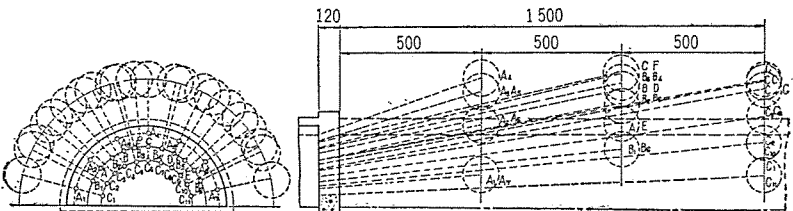
図一6.28 丹那トンネルにおける薬液注入



図一6.29 大町トンネル水抜坑



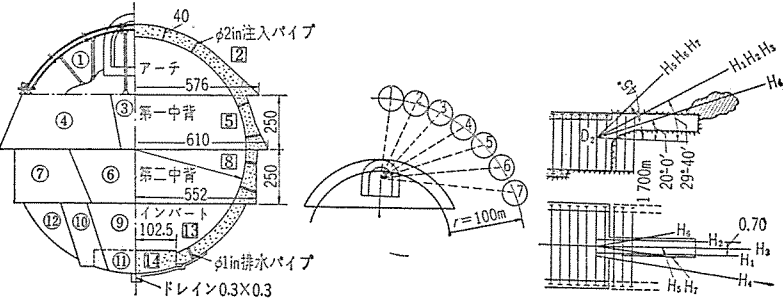
図一6.30 関門鉄道トンネル注入図



A, B, C, D, E (各せん孔延長10m) のおのの後は追加
F (各せん孔延長10m) へは薬液注入を行う

番号	せん孔深 度 (m)	湧水量 (個)	注入セメント量 (袋)	最終圧力 (kg/cm ²)	番号	せん孔深 度 (m)	湧水量 (個)	注入セメント量 (袋)	最終圧力 (kg/cm ²)
モルタル注入			230		C ₁₃	1515	少量	622	30
(A ₁)	(595)	少量	(78)	(10)	C ₆	1525	"	664	30
A ₂	1020	"	164	32	C ₃	1527	"	542	30
A ₄	1017	"	96	28	C ₂	1515	"	570	31
A ₅	990	"	440	30	C ₈	1515	"	380	29
A ₆	1020	"	480	30	C ₁	1520	"	360	32
A ₇	1015	"	727	27	C ₇	1530	"	444	30
A ₈	1025	"	124	26.9	C ₅	1530	"	628	31
A ₉	610	"	496	26	C ₁	1018	"	254	32
B ₁	1102	"	102	30	E	1020	"	190	30
B ₂	1290	"	274	27	B	1016	"	300	32
B ₃	1265	"	480	30	D	1013	"	210	32
B ₄	1278	"	506	31	A	1030	"	190	31
B ₅	1263	"	264	30	計			10 439	
B ₆	1175	"	438	31	総計			10 669	
C ₂	1518	"	416	35					

図一6.31 関門国道トンネル注入図



が、わが国においては国鉄の技術研究所が青函トンネル掘削調査のために実験を行なっただけで、設備その他できわめて高くなる関係もあり実用されたことはない。

3.3 ずり出し

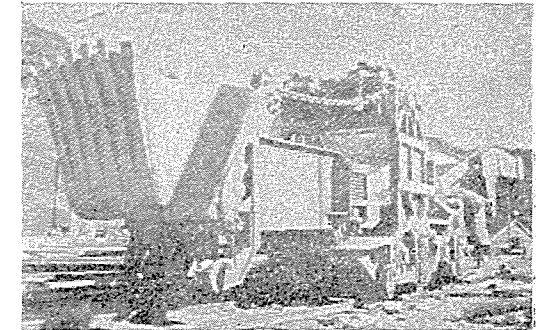
普通のトンネル掘削においてずり出し作業が、掘削所要時間に占める割合は大きく、その中でも特に積込みの能率は掘削進行に大きな影響をおよぼしている。明治初期のトンネル工事においては、積込み運搬はもっぱら人力、畜力によっており、笹子トンネルで初めて運搬に機械が、また棚下トンネルではじめて積込みに機械が使用された。

(1) 積込み

掘削断面、延長、掘削方式にもよるが断面も小さく、ずりも細かくかつ1回の積込み量の少ない場合は今日でも手積みが行なわれており、その能率は 0.5 m^3 トロに2人で10分程度と考えてよい。またはね上げる動作のみをベルトコンベアーのような機械に置き替える場合も多く、能率は約30%程度よくないと考えてよい。機械積みとはすくい上げ、はね上げの両方を機械化したもので、前記棚下トンネルでは、アーム ストログ ショベルローダーを使用して成功し、つづいて1922年(大正11年)に着工せられた清水トンネルではマイヤーホーレス ショベリング マシンが大々的に使用された。このずり積機はその後長く花形ずり積機として活躍したものである。1934年(昭和9年)着手の仙山線仙山トンネルでマイヤーホーレスを使用し、6人、1時間で平均 14 m^3 、最大 21 m^3 の実績を記録している。現在多く使われているずり積機は動力の上では空気動のものが圧倒的に多く、コンウェイ型をのぞいてはほとんどが空気動である。導坑など小断面の掘削に用いられる背部にコンベアーがなく、直接トロにはめ込む形式のものは、だいたい、 $0.8\sim 1.2\text{ m}^3/\text{min}$ 、有効幅 $1.5\sim 2.2\text{ m}$ 、やや大型の加背に使用するコンベアー付のもので、 $1.7\sim 2.8\text{ m}^3/\text{min}$ 、有効幅 $2.7\sim 4.5\text{ m}$ 程度である。コンウェイ型は電動でこの型の最大の100型は1953年(昭和28年)着手の大原トンネルに使用され、月進261mの記録を作ったもので、 $4.6\text{ m}^3/\text{min}$ 、有効幅 6.4 m である。以上のものはいずれもレール上を走行するものであるが、最近キャタピラーを使用したものが開発され、新幹線新丹那トンネル、北陸線親不知トンネルなどに使用され、好成績を収めている。

(2) 運搬

最近のトンネル工事では牛馬など畜力を使用することではなく、小規模のトンネルでも機関車を使用するのが普通である。わが国で初めて機関車を使用したのは前述のように笹子トンネルで、機関車に架線式電気機関車、トロにはダンプカーを用い



写真—6.7 ずり積機

た。清水、丹那でも当時はいずれも架線式電気機関車を使用していたが、蓄電池式電気機関車の出現により施工区間での運搬にはもっぱら蓄電池式のものを用いられるようになった。電池式のもの是有毒ガスの発生もなく、運転もきわめて円滑で坑内運搬にはきわめて有効であるが、蓄電池は値段も高く、1台には2組の電池を準備して1組は絶えず充電するといった使用状態は、初期投資の面でも維持費の面でもかなり高価なものになる。戦後ディーゼル機関車が発達し、とくに坑内用として、排気ガスの処理装置を設けたものが開発され、その簡便さ、運転費の低廉さから最近かなり用いられているが、排気処理をしているとはいえ、坑内空気はどうしても汚れ、良好な作業環境を維持するには換気設備に十分注意しなければならない。

運搬機器は、積込み方法、けん引方法、排出方法などよりその形式がきまるもので、手積み、手押しの時代にはだいたいが木製で、箱わくと台車が分離する形のものがもっぱら使われ、高さもはね上げの関係から1mくらいが限度で容量も $0.5\sim 1.2\text{ m}^3$ で小さかった。機械積みになると積込み能力がいくらあっても、トロの入換え時分によっては所定の能率が上げられないので、トロも必然的に容量が大きくなり、機関車の大型化より列車編成も長大なものとなってきた。現在使われているトロの容量は箱型で $4\sim 6\text{ m}^3$ 、側開きで $2\sim 4\text{ m}^3$ 程度のものが多く用いられている。

また、一度に多く運ぶ目的で、 $10\sim 20\text{ m}$ くらいの長さのトロを作り、床部にコンベアーを装置したシャトルカーとか、さらに多軸関節式にして曲線部を通りやすくしたバンカートレインなどが開発され、前者は新丹那トンネルに使用された。以上はいずれもレー

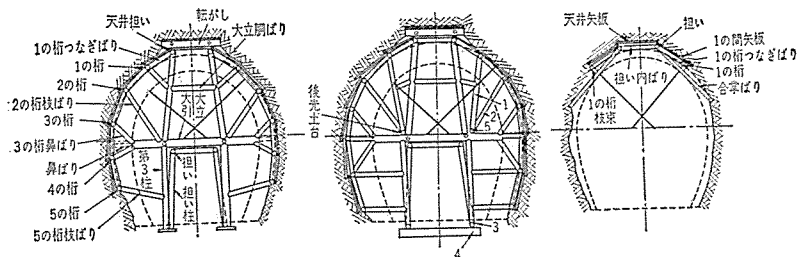
ル上を走行するものであるが、最近ではタイヤによるずり運搬が行なわれるようになり、運搬台が前後両方向に自由に使えるダンプ自動車なども使用されている。

トロで運搬されずりは人力またはチップラーなどの機械を使用してあげられるが、その場でかきならされる場合は少なく、さらに自動車、ベルコンなどで運ばれる場合が多い。1957 年（昭和 32 年）に着手された北陸トンネル葉原斜坑では、延長 460 m のロープサスペンションコンベアーが使用された。一般に連続的に大量に運搬するにはコンベアーが有利で、前記北陸トンネルに使用されたコンベアーもその運搬能力は 400 t/h であった。最近鉱山など半永久的にずり運搬をする設備にケーブルコンベアーがある。これは在来コンベアーのようにベルトを直接駆動させるのではなく、ケーブルを駆動させるその上にベルトをのせる形式で所要馬力も小さく、その延長も 10 km にもおよぶものがあり今後が期待される。さらに特殊なものとして水力輸送によるものがある。

3.4 支保工および覆工

(1) 支保工

図—6.32 支保工形式

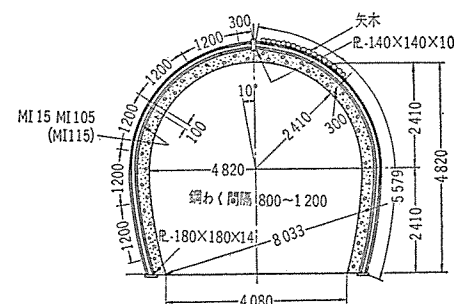


わが国のトンネル掘削は日本式掘削を基調にして発達してきた関係上、支保工も支柱式が基本になり、また材料も木材が大部分で、岩質により合掌式、板ばり式、後光ばり式の 3 種類がおもなものであった。アーチ式支保工は前記丹那トンネルや仙山トンネルで試用され、1937 年（昭和 12 年）に着工された釈迦岳トンネルでは延長 1500 m にわたって使用されたが、いずれも十分な結果が得られず、わが国ではアーチ式支保工は不適當であると思われていた。戦後、佐久間ダム建設に当たって、アメリカ式の全断面工法が導入せ

られ、機械が大型化すると必然的に作業空間の広くとれるアーチ式支保工の効果が認められ、大原トンネル以来鋼アーチ支保工の普及は目ざましいものがあり、とくに以前にくらべて、木材が鋼材に比して決して安くはない。最近では、熟練した斧指の少ないことも加わって、木製支柱式支保工で施工している現場を探すのに苦労するほどである。木製支保工では生松丸太が主で、鋼製支保工には当初は古レールなど、いわゆる再用品が主であった。これは鋼材が高く埋殺することに非常に抵抗を感じたからで、初期の時代には、支保工が取りはずされる箇所のみ鋼製支保工を使用するといった非常識な使い方すら行なわれたこともあったが、最近では埋殺するのが常識になり、材料も支保工材として加工製作された H 形、I 形、V 形鋼などが各種市販されるようになった。

鋼材断面および材質に要求される性質は、なるべく、直交二軸の断面係数が等しいもので、この点からは円形が最上で新丹那トンネルなどで試用されたこともあるが、取り扱いにまだ検討を要する所が多く、現在では H 形、I 形がごく普通である。V 形鋼はその可縮性が特徴で、膨張性地質の所に用いて効果を發揮するもので、辺富内線日振トンネルに使用さ

図—6.33 鋼アーチ支保工



れ、時間とともに増大する強大な地圧下におけるトンネル施工を容易にし、また道路トンネルでは新宇津谷トンネルに使用されて効果を上げた。以上のほか支保工材として、ルーフボルトがあり、アメリカなどでは全面的に使用されているが、わが国では鉱山関係のぞいては、全面的にルーフボルトによったというものはなく、部分的に浮石などの押えに使用されるのみである。また吹付けによって、支保工に代えようとする方式が、ヨーロッパとくにドイツでさかんに行なわれており、これに使用する機械の開発が進んでいる。電源開発の水路トンネル、青函海底トンネル試掘坑に使用しようと目下検討中で、今後の発展が期待される。

(2) 覆工

初期の覆工はレンガ巻きが主で逆巻きが多く、その厚さを表現するには、レンガの枚数

表-6.3 鋼製支保工諸元

種 別	寸 法 $A \ B \ t_1 \ t_2$ (mm)	単位重量 W (kg/m)	断 面 係 数		Z_x/Z_y	Z/W_x
			Z_x (cm ³)	Z_y (cm ³)		
H 形 鋼	100×100×6×8	17.2	76.5	26.7	2.9	4.4
	125×125×6.5×9	23.8	136	47.5	2.9	5.7
	150×150×7×10	31.5	219	75.1	2.9	7.0
	175×175×7.5×11	40.2	330	112	2.9	8.2
	200×200×8×12	49.9	472	160	3.0	9.4
	250×250×9×14	72.4	867	292	3.0	12.0
I 形 鋼	180×100×6×10	23.6	186	28.2	6.6	7.9
	230×100×7.5×11.5	30.7	291	33.5	8.7	9.5
	200×150×9×16	50.4	449	103	4.4	8.9
坑 わ く 鋼	(MI 105) 105×84×9	22.7	93.4	24.1	3.9	4.1
	(MI 115) 115×95×11	28.7	127	32.4	3.9	4.4
可 縮 坑 わ く 鋼 (V 形 鋼)	(MU 21) 113×102	21.0	59.5	58.6	1.0	2.8
	(MU 29) 133×120	29.0	97.4	95.8	1.0	3.4
レ ー ル	(30 kg) 103×108	30.1	108	28.0	3.8	3.6
	(37 kg) 122×122	37.2	149	37.0	4.0	4.0
	(50 kg) 144×127	50.4	225	55.0	4.1	4.5

注：(1) ただし古レールについてはつぎのような割合で各数値を減ずるのが適当とされている。
(断面の摩耗および疲労のため)

重量……20% Z_x ……30% Z_y ……20%

(2) A は高さ, B は幅, t_1 は腹部の厚さ, t_2 は底部の厚さ

で表わしていた。その後コンクリートブロックが用いられるようになり、1917年(大正6年)に竣工した房総線館山トンネルで初めてアーチ部に生コンクリートを使用した。しかしこのトンネルでも迫部はコンクリートブロックであった。その後もしばらくはコンクリートブロックの全盛で、これは生コンクリートの施工の不確実さが嫌われたためである。上越線棚下トンネルで当時アメリカでも最新式であった移動性型わくを用い、60m/月の記録を作ってから、全面的にコンクリートによる覆工が行なわれるようになった。巻厚は断面の大きさ、地質によってきまるもので丹那トンネルでは2.5mに達する所もあるが、最近では巻厚をいたずらに厚くせず、むしろ裏込め注入などの手段を講じて、悪地質の所を大きく掘るという不利をのぞくような傾向にある。また水路における圧力トンネルのように内部から圧力のかかるもの以外は無筋が普通であるが、伊東線宇佐見トンネルでは、温

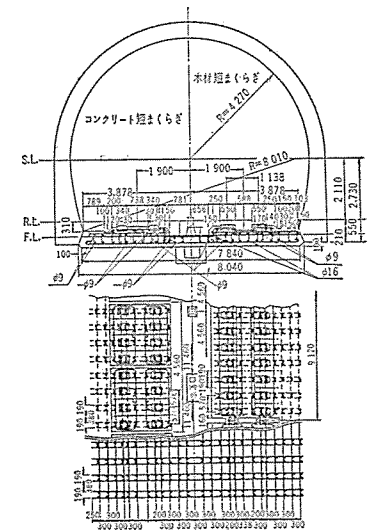
泉余土地帯の強烈な地圧に対抗するために、鉄筋コンクリートが用いられたこともあり、そのほかでも坑門付近とか比較的偏圧のかかりやすい所では鉄筋を入れる場合がある。

打ち込み方法は、手打ちであったが、1943年(昭和18年)に着手した北陸線倶利伽羅トンネルでは初めてコンクリートポンプを使用し、その後大原トンネルでは、移動式型わくとブレーサーを用いて覆工速度も格段の進歩をとげた。現在ではポンプまたはブレーサーによる打ち込みが常識になっている。

(4) 内部工事

一般にトンネル内の保守作業は、明りにおける場合と異なって手間のかかるもので、鉄道トンネルにおいてはまくらぎ下がハンマーリング作用により噴泥化し、軌道の寿命を短くしている。したがってとくに地質の悪い場合または長大トンネルの場合には道床コンクリートを施工することになっているもので、本格的に施工されたのは清水トンネルからである。その後欽明路(3117m)、仙山(5361m)、真那板山(3125m)などに施工された。最近では北陸(13850m)や延長は短いが急勾配トンネルである信越線碓氷峠のトンネルなどに施工されている。

図-6.34 北陸トンネル道床コンクリート



3.5 換気および照明

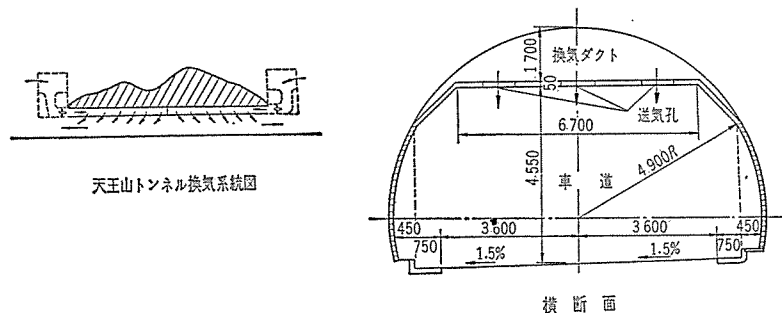
(1) 換 気

近年自動車交通の急激な増大とともに、長大トンネルの換気の必要性が問題にされてきたが、1958年(昭和33年)3月関門トンネルの開通により、わが国初めての本格的長大道路トンネルの換気が実現した。関門トンネルの換気設備は海底部円形断面のうち、下部は人道をはさんで両側に送気ダクトが設けられ、上部空間を排気ダクトとする上方向横流式の換気方式が採用され、1946年(昭和21年)から10年にわたる基礎実験研究の結果完成を見たものである。

このような換気のために要する経費としては、トンネルの総工事費 80 億円 1952 年（昭和 27 年度換算）に対し送気ダクトの掘削増、天井版立坑などの土木工事費 16 億 2 000 万円、送風機、ダンパー、制御装置、Co 検出器などの換気設備費 4 億 8 000 万円であり、総工事費の実に 26% を占めるものである。

The figure contains two technical drawings of a tunnel. On the left is a circular cross-section labeled '機断図' (Machine Section Diagram). It shows a central '車道' (roadway) with a width of 7,500 units, flanked by '歩道' (sidewalks) with a width of 3,850 units. Above the roadway is a '排気ダクト' (exhaust duct) and below it is a '送気ダクト' (supply duct). Dimensions 1,530 and 2,500 are also indicated. On the right is a longitudinal section labeled '換気系図' (Ventilation System Diagram). It shows the profile of the tunnel with various vertical shafts labeled '下間立坑', '横野立坑', '下間立坑', '門司立坑', and '古立坑'. A '門司口' (Munakoshi Mouth) is also marked. The diagram includes a series of elevations and stationing data: 504m, 421.4m, 425m, 380m, 400m, 406m, 429m, 456m, and a total length of 3,461.4m. A specific point is marked at 3,421.4m. The vertical scale on the right is 20m.

図一6.36 天王山トンネル換気概要図



本トンネルは本坑がないので坑門付近の換気所から連絡ダクトによりトンネルの天井ダクトに接続し、送風機は横型軸流送風機を使用し車道内の煤煙濃度計と連動して自動制御運転される。

1964 年（昭和 39 年）6 月に首都高速道路 4 号線の三宅坂インターチェンジトンネル（2460 m）、同じく 1 号線の羽田トンネル（300 m）が完成し、三宅坂トンネルは都市の地下における立体交差で長方形断面の上部ダクトを利用した横流換気方式を採用し、一部場所によって側部ダクトを利用している。羽田トンネルは海底トンネルで長方形断面の上部

図-6.37 三宅坂インターチェンジ トンネル換気概要図

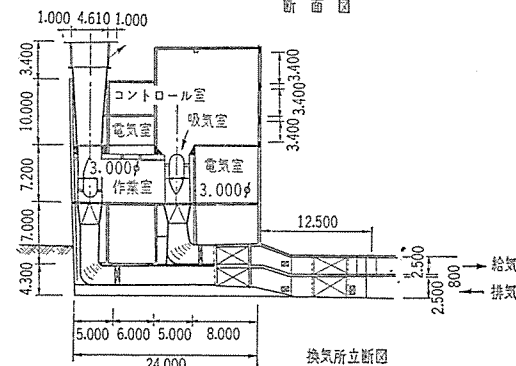
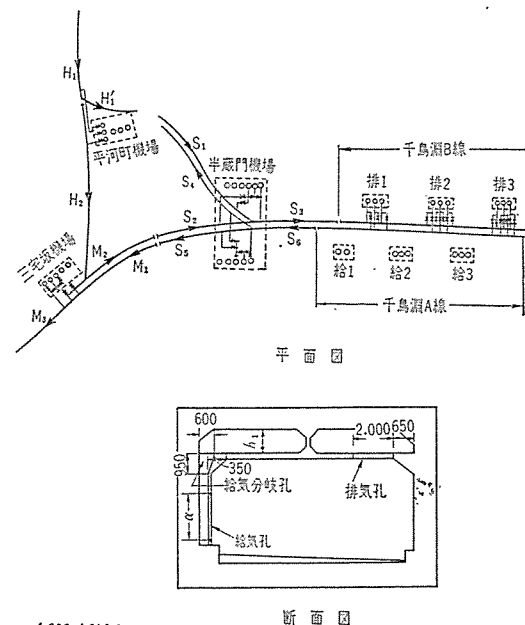
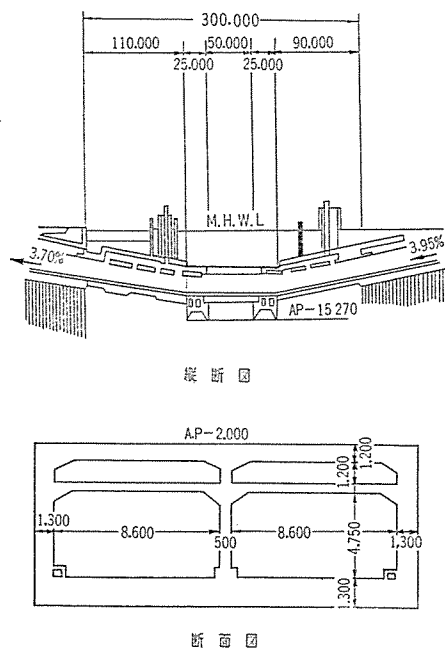


図-6.38 羽田トンネル換気概要図



ダクトを排気を使用し、全長の中に 9 カ所の排気ポートがあり車道内圧の中性点の位置により適当に排気ポートを開放して排気を行なう局所抽気式縦流換気方式が採用されている。

笹子トンネルは 1958 年（昭和 33 年）12 月開通したのであるが、開通当初の予想交通量が少なかったために換気設備としては路面下に送気ダクトが設けられたのみで換気所、送風機等の設備は将来交通量が増大した場合に設置される計画であった。しかしながら最近になって交通量が急激に増大したために早急に換気設備が必要となり、当初計画どおり両坑門付近に換気所を設置し、上方向半横流方式としての換気設備工事が着工されることになった。

関門、天王山、三宅坂、羽田、笹子各トンネルの主要な換気設備内容は表-6.4 のとおりである。

図-6.39 笹子トンネル換気概要図

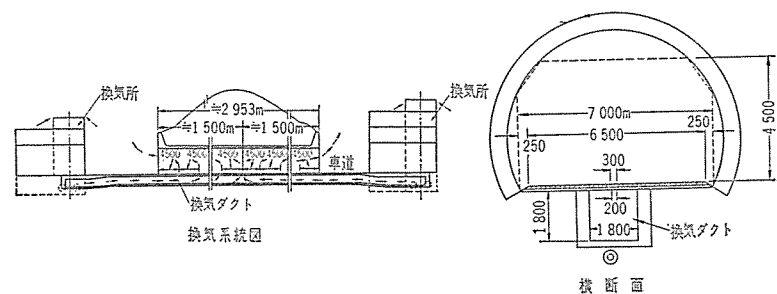


表-6.4 換気設備概要

トンネル名	関門	天王山	三宅坂	羽田	笹子
延長	3 461 m	1 434 m	2 460 m	300 m	2 953 m
交通量 (方向)	2 000 台/時 (対面)	2 000 台/時 (1 方向)	2 800 台/時 (1 方向)	2 800 台/時 (1 方向)	可能交通容量 10 000 台/日
設計速度	35 km/時	80 km/時	50 km/時	50 km/時	
許容 CO 濃度	0.04%	0.025%			
許容煤煙濃度	100 m 透過率 50%	" 50%	" 50%	" 50%	
換気量	779 m³/s /2 車線	600 m³/s /4 車線	1 270 m³/s /4 車線	300 m³/s /4 車線	160 m³/s /2 車線
換気方式	上横方向式	下方向送気 半横流式	横方向式	選択抽気 縦流式	上方向送気 半横流式
換気区間	8	2	18	1	2
勾配	0~4%	-0.85~ +1.50%	-3.55~ +5.9%	±3.7~ ±3.95%	
換気所 (立坑)	4 カ所 (4 本)	2 カ所	9 カ所	2 カ所	2 カ所
送風機形式	立型可動翼 1 段軸流	横型可動翼 1 段軸流	立型 1 段 軸流	"	横型 2 段 軸流
口径	3 000 mmφ	3 000 mmφ	3 000 mmφ (2 200 千鳥ヶ淵)	2 600 mmφ	1 700 mmφ
風量	送気 58~77.5 m³/s 排気 87~116 m³/s	75 m³/s	83 m³/s (2 200 千鳥ヶ淵)	50 m³/s	90 m³/s
風圧	送気 20.1~29.1 mmaq 排気 23.1~33.4 mmaq	80 mmaq	33 mmaq	43 mmaq	165 mmaq
電動機動力	送気 40 HP 排気 47 HP	100 kW	40 kW 25 kW 千鳥ヶ淵	35 kW	110 kW
台数 (送気)	12 台	8 台	11 台 8 台 (千鳥ヶ淵)	—	4 台
" (排気)	12 台	—	12 台 9 台 (千鳥ヶ淵)	6 台	—
電動機回転数	送気 270/200 rpm 排気 260/195 rpm	1 200/900 rpm	1 000/750 /500 rpm	400 rpm	750/375 rpm

トンネル名	関門	天王山	三宅坂	羽田	笹子
風量調節	12段階 (自動)	12段階 (自動)	5段階(自動)	4段階(手動)	4段階(自動)
その他	CO検出器1台 煤煙濃度計	CO検出器1台 煤煙濃度計5台	CO検出器4台 煤煙濃度計12台	CO検出器 煤煙濃度計4台	CO検出器 煤煙濃度計

(2) 照明および保安設備

a) 照明設備 トンネル内照明は昼間、夜間におけるトンネル内交通の安全をはかるとともに、自動車の快適な運転を保つために設けられるもので、近年自動車交通の激増にともなって快適な視界をあたえる光源と照度ならびに均整度、保守の容易さと経済性などについて研究開発が行なわれ、道路照明とともに急速な進歩をとげたものである。すなわちトンネル内の一般照明は対面交通に対し、げんわく防止のため自動車のヘッドライトを減灯または、下向きにした場合でも設計速度で安全かつ快適に走行できるだけの明るさが必要であり、また昼間明るい坑外から暗いトンネル内に入る場合、眼が暗さになれるのを容易にするための緩和照明も必要となった。

光源については関門トンネルでは効率がよく輝度の小さい蛍光灯が用いられ、平均照度を 20 lx としたのが名神高速道路の天王山トンネル、梶原トンネルなどは効率がいっそうよく、煙霧中での透過率の大きいナトリウム灯が用いられ平均照度も 50 lx と明るくなった。

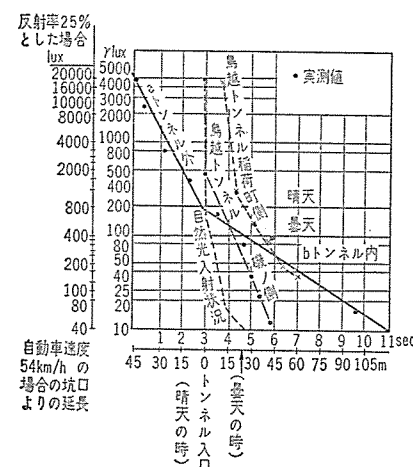
灯具の配列も天井と側壁の間に取り付けられ壁体に埋め込んで美観をよくするとともに照度分布も均斉になるように考慮された。

緩和照明としては鹿児島県道の鳥越トンネルのように坑門を拡幅することにより自然光をトンネル内にできるだけ多く入れ、緩和照明の増灯部を減らすことができるが、これでは一般に不十分なので自動車の走行速度に応じ暗順応を円滑にし、視力を容易に回復できるように坑門から一定距離にわたって増灯照明を行なう例が増えてきている。

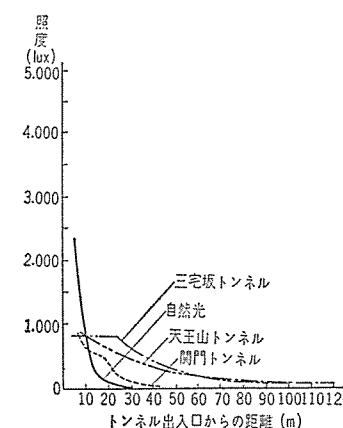
図—6.40 は、実験から求めた暗順応に必要な緩和照明の照度曲線と、鳥越トンネルの自然光の入射状況を示すものであり、図—6.41 は、関門トンネル、天王山トンネル、三宅坂トンネルの緩和照明の照度曲線を示すものである。

照明の制御方法としては、天候と昼、夜間の区別、交通量の変動を考慮して最も経済的、なつぎの 4 段階に自動点滅方式により制御されている。

図—6.40 所要緩和照明と鳥越トンネル自然光入射状況図



図—6.41 緩和照明曲線図



表—6.5 照明の点滅方法

照明段階	晴天	一般照明全点灯	緩和照明全点灯
	曇天	一般照明全点灯	緩和照明 1/2 点灯
	夜間	一般照明 1/2~2/3 点灯	緩和照明 消灯
	深夜	一般照明 1/4~1/3 点灯	緩和照明 消灯

表—6.6 は主要なトンネル照明の実例を示したものである。

表—6.6 主要トンネル照明の実例

トンネル名	平均照度	均斉度	灯具	灯具間隔	灯具配列	灯具取付	緩和照明		制御方式
							照度	延長	
関門	20 lx 歩道 10 lx	最大/平均 1.03 平均/最小 1.19	40 W 1 灯 蛍光灯	6 m	対称	側壁上 埋込	~20 lx		
二居	15 lx	最大/平均 1.11 平均/最小 1.31	40 W 1 灯 蛍光灯	8 m	千鳥	側壁上 露出	60 W ×72 灯 100 lx ~15 lx	95 m	昼間夜間激る 段階 自動点滅

天王山 梶原	50 lx	最大/平均 1.03 平均/最小 1.03	60 W 1 灯 ナトリウ ム灯	4 m	対称	側壁肩 埋込	800 lx ~50 lx	150 m	昼間(晴)全点灯 昼間(曇)緩和照明1/2点灯 夜間 1/2 点灯 深夜 1/4 点灯 4 段階自動点滅
三宅坂	50 lx	最大/最小 1.6 平均/最小 1.3	40 W 1 灯 蛍光灯	25 m	千鳥	側壁肩 露出	800 lx ~50 lx	110 m	昼間(晴)全点灯 昼間(曇)緩和 2/3 点灯 夜間 20 lx 3 段階 自動点滅

ｂ）保安設備 トンネル内の防災と交通流の円滑をはかるため、実験研究の結果つぎの保安設備が関門トンネル、天王山トンネル、三宅坂トンネルなどに設けられるようになり、中央管理所において一元的に管制を行なっている。

表-6.7 主要トンネルの保安設備

トンネル名 保安設備	関門	天王山	三宅坂
交通信号	色灯 2 位式 360 m 間隔	色灯 3 位式	色灯 3 位式 分岐点、入口等 14 か所 ほかに電光標示板 ブザー
非常電話	ビニール製防水型 ボックス 180 m 間隔	200 m 間隔	100 m 間隔
火災報知機	空気管式自動火災報知 器(電話ボックスの上 部に 2 個) 40 か所	熱線型自動火災感知器 12 m 間隔	100 m 間隔
消火設備	消火栓 2 1/2 50m 間隔 70 個 (ホースとノズル付) 給水管 150 m トンネル片側 化学消火器 50 m 間隔 { 粉末体 監視路側 泡沫体 エアフォーム体	消火栓 38 mmφ 50m 間隔 (ホースとノズル付) 送水管 200 m 側部床下ダ クト 化学消火器 2 個 50 m 間隔 (粉末)	泡式消火栓 50 m 間隔 (50 m ホース 3 本 ノズル付) 化学消火器 " 砂 袋 "
ダクト内スプリ ングラーまたは ダクト内噴霧冷 却装置	2 1/2 ガス管 100 m ノズル 20 個 立坑下部排気ダクト内 スプリングラー	換気ダクト内スプレー ヘッド 16 個による噴 霧冷却装置	
監視設備			I. T. V インターチェ ンジ 分岐点

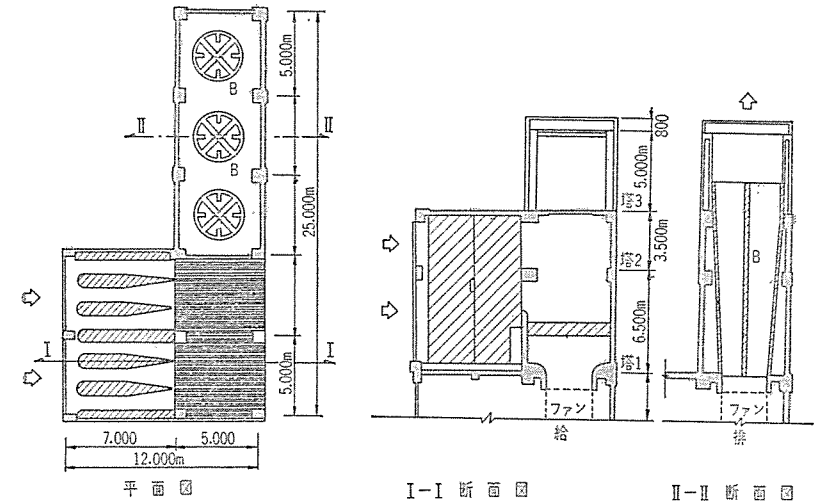
ｃ）騒音対策 騒音としては、トンネル内の自動車によるものと、換気所における送風機によるものがあげられる。

トンネル内の自動車による騒音は壁面に吸音材を使用することにより多少緩和されるが、名神高速道路の各トンネルでは吸音材として多孔質のパーライトブロックを両側壁に使用し自動車騒音防止にある程度の効果をえた。

換気所内の送風機による騒音はとくに都市内では問題となるので、首都高速道路三宅坂インターチェンジトンネルの騒音対策として2年間におよぶ実験研究の結果、送風機の騒音を換気口（空気の入、排出口）に至るまでの間に圧力損失をあまり低下させない程度の吸音材の使用によって、約 20 dB 程度減少させることが可能となった。

図-6.42 は三宅坂換気所の実例で、給排気筒にセル型スプリッターなどの吸音層を空気の流と平行に設けて減音している。吸音材としてグラスウール、ロックウール厚 50 mm をサランなどで表面被覆したものが使用されている。

図-6.42 三宅坂換気所騒音防止概要図



6.6 特殊工法

(1) 圧気およびシールド

ａ）圧気工法 この工法はトンネル内の作業箇所を密閉し、水圧よりやや高い圧縮空気を送り込み、作業箇所を無水状態にして掘削する方法で、シールド工法と併用されることが多い。圧気工法を最初にトンネル工事に応用したのは、外国では偶然にも 1879 年にアントワープとニューヨークで同時に行なわれ、わが国では 1926 年（大正 15 年）丹

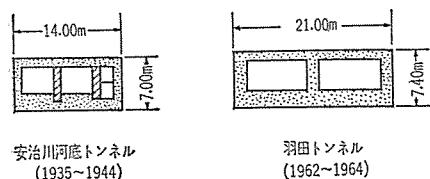
向となっている。わが国では、古く、大阪の安治川河底にこの工法によるトンネルが造られており、さらに現在、羽田の海老取川横断に採用されている。

沈埋工法とは、ドックなどで作製した 50~100 m 長のトンネル函体に隔壁を付して進水させて現場にえい航し、水底に掘った溝の中に沈め、継ぎ合わせ、土砂で埋め戻して水底トンネルを築造する方法である。1906 年にアメリカでミシガン セントラル鉄道のデトロイト河底トンネルで用いられたのが最初で、現在までに鉄道 4 本、道路 19 本のトンネルがこの工法で建設されている。

安治川河底トンネルは、大阪市土木部により“源平渡し”に代わるものとして造られたもので、調査研究は土木学会関西支部が委嘱をうけて行ない、実施設計は市の堀経夫の手になるものである。両坑口到人車用の立坑をもつ延長 81 m の道路トンネルで、1935 年（昭和 10 年）12 月起工、時局が幾多の難間に遭遇したが、9 年の歳月と 260 万円の工費を投じて 1944 年（昭和 19 年）9 月開通した。このトンネルは、沈埋函本体が長方形断面のものとしては世界最初で、車道の仕切り壁にワーレン トラスを用いた独特の構造を有している。この沈埋函を、ケーソンによって沈下させた兩岸の支台上に架けた一種の水中橋ともいえるものである。

東京羽田の海老取川河底のものは、首都高速道路公団によって建設され、1962 年（昭和 37 年）7 月着工、1964 年 6 月竣工した。このトンネルは全延長 300 m のうち沈埋部

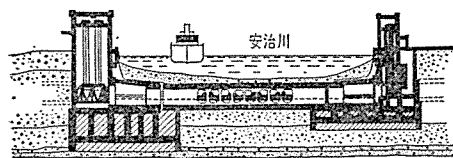
図—6.45 沈埋函断面



安治川河底トンネル
(1935~1944)

羽田トンネル
(1962~1964)

図—6.46 安治川河底トンネル

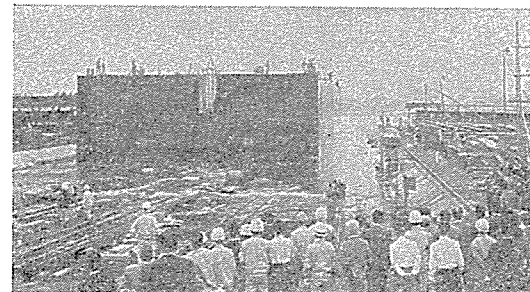


56 m の 4 車線道路トンネルで、安治川と同じく沈埋函はケーソン架台の上に置かれている。

(3) トンネル ボーリング マシン

岩石を機械的に削り取って、トンネルを掘進することは、地山をいためず、余掘りが少なく、かつ掘進速度も早いという利点があり、トンネル建設者の理想といっても過言でない。この機械が初めて使用されたのは、1883 年 英仏海峡トンネルのフランス側試掘坑で径約

写真—6.8 羽田トンネル沈埋函の進水



2 m の坑道を 4.8 m/h という驚異的な速度で掘進したわが国では本格的に使用された例はまだなく、実験的な範囲を出ないが、横浜市の水道工事に一部使用されたことがある。1964 年 4 月より別子鉱山水路トンネルにおいて、アメリカで数々の実績を上げているロビンス式のもの本格的に使用され出しており、その成果が期待される。同じくオーストリアで研究開発されたオールマイヤー式も近くわが国に到着し、青函トンネル試掘坑や、電発九頭竜川開発工事に使用される予定である。

(4) その他

最近の水力発電では、発電所を設ける際に効率上からまた美観上から完全に地下式にする場合が多く、戦後利根水系の諸発電所工事でも、地下発電所が建設せられた。1956 年（昭和 31 年）に着工した黒部川第四発電所は図のような大空洞を地下に建設している。その相互間隔は弾性学的にいろいろの実験を行なって、応力状態を解明して決定されたが、かかる大空洞、トンネル群の開削成功のポイントは、ほとんど地山状態の良否にかかって

図—6.47 配置断面図

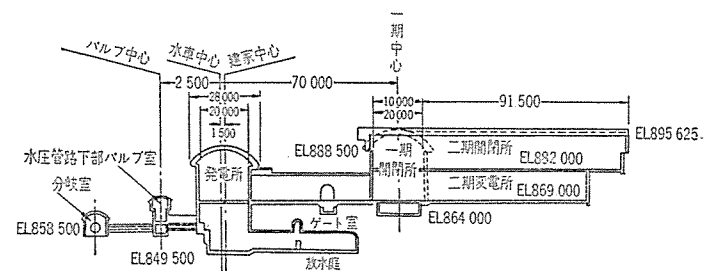
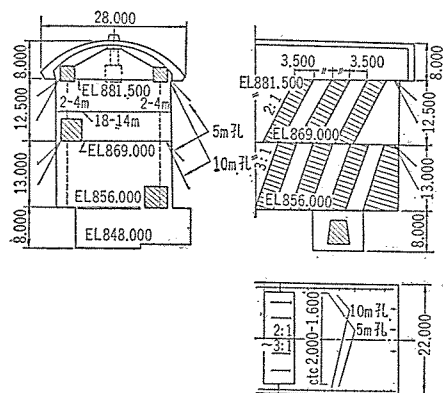


図-6.48 掘削断面図



くる。したがって地山の安定確保のために、掘削、覆工方法の検討に慎重を期しコンソリデーショングラウト工、ルーフボルト工を大幅に採用している。

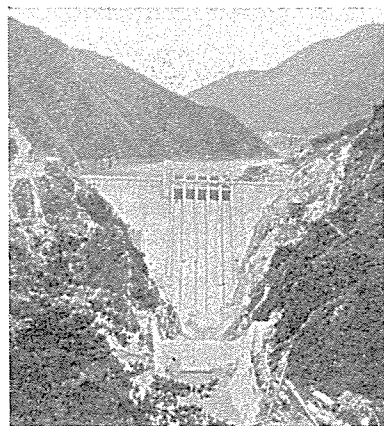
以上記述したように、わが国のトンネル技術は、50 年の歴史が示すように、技術の進歩は著しいものがある。これからは新鋭工事機械の導入などにより、ますますその発展にばく進するかたわら、広く海外に技術進出するなど技術者の努力に期待するものである。

4. ダム

4.1 はじめに

ダムの歴史は古い。人類の生活に水はかかせない。河をせきとめ水を貯めることは大古の時代から行なわれていたと考えられる。すでに紀元前 5 世紀には、エジプトにおいてピラミッド工事の奴隷の飲料水供給を目的としてフルメルジェルザ (Fourmel Gerza) ダムが建設されたことが記録に残されている。わが国においても、ダム建設の始りは崇神天皇の御代 (4 世紀の終り) に勅命によりかんがい用としてつくられた依網 (よしみ) 池、反折 (さかおり)

写真-6.9 佐久間ダム
(高さ 155.5 m, 重力式ダム)
天竜川 1956 年完成



池、荇坂 (かりさか) 池にまでさかのぼることができる。ダムは文明の発達とともにかんがい、上水道、工業用水道に必要な水を確保するために、または洪水を調節するために、あるいは水のもつエネルギーを利用するために世界各地でさかんに建設され今日におよんでいる。この間ダムに関する技術も進歩の一途をたどり、始めはごく原始的であったものが、現在ではダム地点の条件に応じていろいろの合理的な形式のダムが考案され、また規模も大きくなり、高さにおいてはグランドディキサンズダム (Grand Dixence, 重力式, スイス) の 284 m, 貯水容量においてはカリバダム (Kariba, アーチ式, 南ローデシヤ) の 1840 億 m^3 にも達するものが実現しているほどである。

大規模なダムは人類のつくる最大の構造物の一つにかぞえられるものであるが、これがひとたび決壊すればそのおよぼす惨害ははかり知れないものがあり、したがって、高度の安全性が要求される点では他の構造物とは違った技術的なむずかしさがある。とくにわが国は世界有数の地震国であり、さらに加えて台風のもたらす集中豪雨は国土の急しゅんな地形とあいまって、しばしば急激な大洪水をひきおこすなど、ダム建設にとって、かこくな自然条件の下にあるといえる。わが国の独特なダム技術はこのような諸外国とは違った基盤の上に築き上げられたもので、その進歩の足どりを見ると、いかにわれわれの先輩が自然を克服するために肝たんを砕いたかはその苦心のあとがしのばれて感慨深いものがある。降水量に恵まれているわが国は世界のうちでも最も多くダムをつくっている国の一つである。現在わが国に存在する高さ 30 m 以上のダムの数は 240 に達し、これはアメリカについて世界第 2 位であるが、最近の数年間にかざれば建設されるダムの数ばかりでなくその規模においてもまさに世界一といってもよいであろう。狭い国土にこのように多くの貯水池が建設されていることは石油、石炭などの天然資源に乏しいわが国にとって水がいかに重要な資源であるかを雄弁に物語るものである。

最近わが国経済の高度な成長に応じて、農工業生産増加のため、また国民生活一般の向上のため水の需要は急増し水資源開発の重要性が増し、ダムの建設がますますさかに行なわれようとしている。このときに諸先輩の輝かしい業績をふりかえり技術者としてのものの考え方を学びとることはまことに意義のあることといえよう。

4.2 文明開化とダム ——アースダム より コンクリートダムへ——

明治維新後、先進欧米諸国の技術、制度の流入によるいわゆる文明開化と呼ばれた産業革命は、ダム建設の分野においても例外ではなかった。この時代わが国のダム技術は近代的な設計方法および、新しい材料を使用することを修得して一大飛躍を行なうことになるのである。

それ以前のわが国のダムはすべて農業用の溜池を作るための小規模なアースダムであって、江戸時代末期までに全国にわたりおびただしい数が建設されていた。

明治に入ってから新政府の農業振興政策もあって以前にもましてかんがい用にアースダムがさかんに建設されたが、この間欧米諸国の技術を採り入れ、設計施工方法に著しい進歩のあとが見られる。すなわち 1877 年（明治 10 年）頃にはわが国在来のアースダムにはなかった中央シャ水壁がフランス、イギリスなどから伝えられて比較的大規模なアースダムに採用されるようになった。その後安定計算方法、洪水量の算出方法、土の締固め方法などもつぎつぎにわが国に伝えられて、従来の経験を主としていたわが国のアースダム築造に初めて科学的技術の新風を吹きこんだのである。

図—6.49 は 1887 年（明治 20 年）代より建設されたわが国の近代的アースダムの断面を示すもので、堤体の中央に砂利と粘土を混ぜて突き固めたシャ水壁を設け、その上流下流側は比較的透水性のある土で盛立て、さらにその上流のり面には石張工を施している。なかでも 1913 年（大正 2 年）に完成した大野ダム（高さ 49 m、桂川・山梨県）、1924 年（大正 13 年）に完成した村山ダム（高さ 24 m、多摩川・東京都）などは、その代表的なものとして知られているものである。

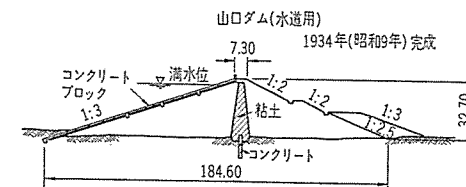
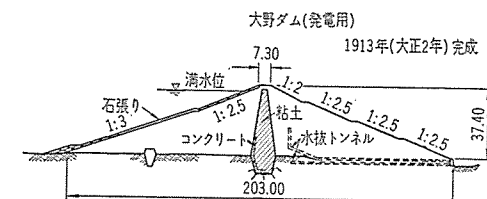
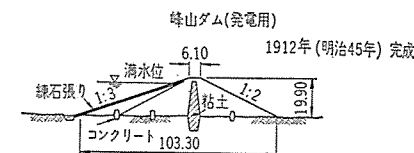
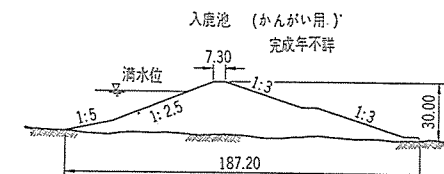
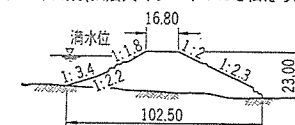
しかし、これら欧米直輸入の技術はわが国とはかなり異なる自然条件のもとに発達したものであったため、そのまま適用することは種々問題を生じた。なかでも計画洪水量については、諸外国の公式によって算出した値はわが国のように地形が急しゅんで台風や不連続線などによって集中豪雨を受ける場所には過少であって、洪水の天端越流によってダムが流失する事故が起こった。またわが国の土は一般には過度の湿潤状態にあるが、このような材料を使用する場合のアースダムの施工方法が不適当なために土のせん断強度が不足してダムが破壊した例もあった。当時はダム工事といっても他の土木工事と同様にトロッコ

と人肩による施工であって、工事には多くの日時がかかり、洪水の多いわが国においては工事中に越流されることなしにダムを作るとは考えられなかった。したがって、アースダムは集水面積の少ない場所に建設するほかなく、その利用範囲は農業用溜池以外には小規模の水道用貯水池、水力発電所の調整池など、ごく限られたものでしかなかった。わが国においてアースダムもふくんで一般的にフィルタイプ (Fill Type) と呼ばれる形式のダムが、コンクリートダムと競争できるようになったのは後に述べるようにごく最近のことであって、当時においてもコンクリート造りが確信をもって本格的な貯水池建設に利用する形式と考えられていたのである。

石材が豊富で、また地震の少ない国々においてはかなり古い時代から石を積みその目地を石灰でつめて水密にした石造りのダムがつくられていた。これがポルトランドセメントの発明により容易に近代的なコンクリート重力ダムに発達していったのは当然であって、すでに明治初年頃には欧米諸国では、高さ 30 m 前後のコンクリート重力式ダムがつぎつぎとつくられていた。これらのコンクリ

図—6.49 わが国初期のアースダム

清濃池（かんがい用）
750年完成（弘法大師がつくったと伝えられる）

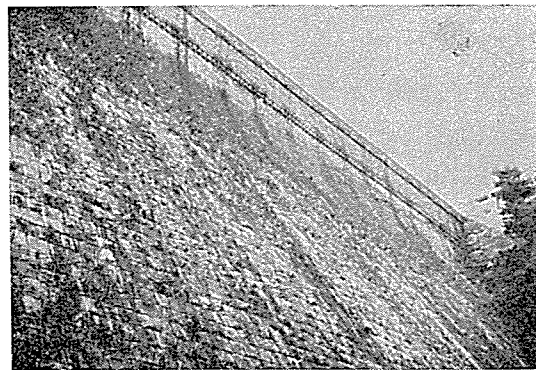
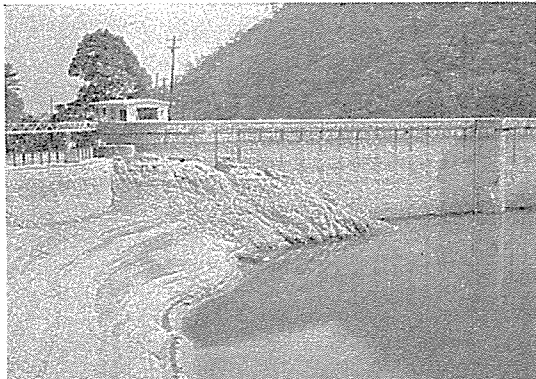


ート ダムの安定感ある力強い姿は、新しい日本の国づくりにふさわしい構造物として、当時の新進気鋭のわが国土木技術者の心をとらえたであろうことは想像にかたくない。

しかし、明治の初期においてはセメントはすべて外国より輸入されていたため量も少なくまた高価であり、コンクリートはわずかに橋台、橋脚、トンネルの巻立、護岸などの一部に使用されていた程度で、ダムのような大量のコンクリートを必要とする構造物の建設が可能となるには、国産セメントが大量に出まわるまで待たなければならなかった。

わが国のセメントの歴史は 1871 年（明治 4 年）深川に官営工場が設立されたときに始

写真—6.10 布 引 ダ ム
（わが国最初のコンクリートダム、高さ 33.3 m、コン
クリート重力式、布引川 1900 年完成
（神戸市水道局提供）



まる。さらに 1881 年（明治 14 年）には小野田セメントが東京において本格的なセメント製造を開始して以来次第に製造技術が進歩し、これにつれて品質も改良され、価格も安くなったが、一方わが国の産業の急速な発達には資本主義のぼや興と都市への人口集中をもたらし、大規模なダムをつくらせて水資源を利用する機運を生じ、ここにコンクリートダム建設の技術的、経済的基盤ができあがったのであった。

4.3 最初のコンクリートダム

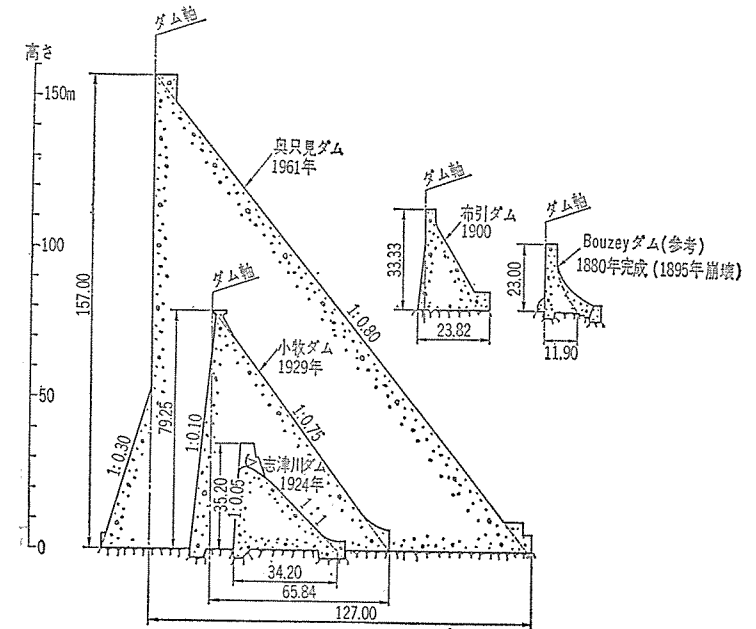
わが国で最初につくられたコンクリートダムは布引ダムである。このダムは別名五

本松ダムとも呼ばれ、神戸市の上水道用として生田川水系生田川に建設されたもので、1900 年（明治 33 年）に完成した高さ 33.3 m、堤頂長 110.3 m の重力式ダムである（写真—6.10）。

布引ダム工事の少し以前に、ヨーロッパにおいては有名なブーゼイダム（Bouzey）の崩壊事故が起こっている。この事故は、それがきっかけとなって以来、ダムの設計方法に大きな変革をもたらしたためダム技術史上きわめて重要なできごとであった。

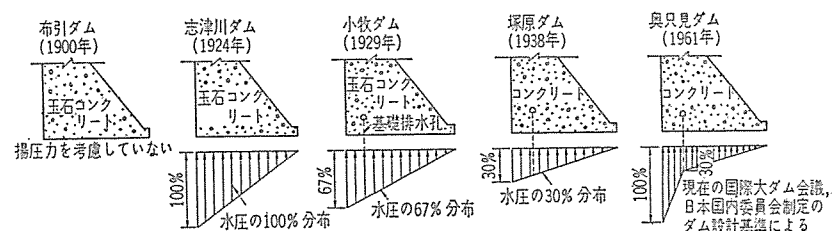
ブーゼイダムは、フランス北部ライン河流域地方の運河に水を供給するために建設された高さ約 23 m、長さ約 510 m の重力式ダムで、コンクリートダムといっても上下流面は型わくがわりに石積みとし、内部は粗石をならべその空げきにモルタルまたはコンクリートをつめて施工する当時のいわゆるメーソンリーダム（Masonry）の典型的なものである。ブーゼイダムの工事は 1878 年（明治 11 年）に着工され 1880 年（明治 13 年）

図—6.50 わが国の重力式ダム断面の変遷



に完成したが、貯水を開始したところダムに種々欠陥が発見されたので、その後補強工事を行っていた。このダムが崩壊したのは 1895 年（明治 28 年）4 月で、ダムの上部高さ約 12 m の部分が約 180 m にわたって突然転倒し、死者多数を出す大事故となったものである。事故の直後ダムの崩壊原因につきフランス政府の手により種々調査が行なわれたが、その結果、ダムの上流側に働く引張応力によりダムに水平方向のひびわれが生じ、このひびわれに貯水池の水が浸透してダムに揚圧力をおよぼしたためであることが確かめられた。この事故が契機となり、以後重力ダムの断面の決定にあたっては水圧を自重でささえること以外に、ダムの上流側に引張応力の生じないことがその条件に加えられるようになり、今日におよんでいる（図—6.50）。またブーゼイ ダムの崩壊の直接原因となった揚圧力については、その後フランスはもとよりドイツ、アメリカ、イギリスなどの諸国においても種々研究され、国によりまたは技術者によってそれぞれ独自の見解がとられて今日に至っているが、ダムの設計計算にとり入れる方向は大体定まってきたようである。事故に直接関係のあったフランスでは、重力ダムの近代的設計方法の創始者として有名なモーリス レビー（Maurice Lévy）が揚圧力についてきわめて厳格な考え方を主張し、そのため重力ダムの断面を著しく厚くせざるをえなくなり、以後この国においては揚圧力の影響の少ないアーチ ダムが重力ダムにかわって発達する一つの原因をつくった。わが国の揚圧力を設計にとり入れる方法は 図—6.51 に示すようにいろいろな曲折を経て現在の設計基準に達したものである。

図—6.51 揚 圧 力 の 設 計 基 準



布引ダムの設計にはブーゼイ ダムの事故によりえられた新しい考え方がいち早くとり入れられているのは興味深いことである。

すなわち、ダムの安定検定にあたっては水圧と自重の合力が、どの標高の水平断面をとっても中央 1/3 の中に入るようにしている。また揚圧力を設計において無視するかわりに、堤体内に鍛鉄製の 1.5 m ϕ 管に多数の小孔をうがったものを水平間隔、上下間隔とも 3.0 m で総数 157 本を水平に設置して浸透水の排除をはかり、さらにダム基底部には地質により、1~4.5 m 深さの止水壁（カット オフ）を設け、ダムの基底部から貯水池内に延びていた粘土をかんだ断層は石灰コンクリートで置きかえて、ダムの基礎に貯水池の水が浸透しないように努力している。

このように布引ダムにおいては、当時としては最善の手段をつくしたものであったが、現在では例外なく設けられる基礎岩盤のグラウト工および排水工を欠いていること、また地震力、滯泥圧を考慮していないことなどその設計および施工方法に若干問題があるが、建設後 60 年以上経た今日でもなお完全な姿で存在し、いささかもその機能を失っていない。

これは地形、地質、洪水量などダム地点の条件が良かったことにもよろうが、初めてコンクリートを使用し高さ 33.3 m という当時としては画期的なダム工事で取組み、これを立派に完成させた関係技術者の努力は高く評価されるべきであろう。

この布引ダムの建設がきっかけとなって、それから日本全国にわたってコンクリート ダムがつくられる機運が生じ、主として水力発電用としてコンクリート ダムがつぎつぎと作られてゆくことになるのである。

4.4 産業の発達に寄与するダム

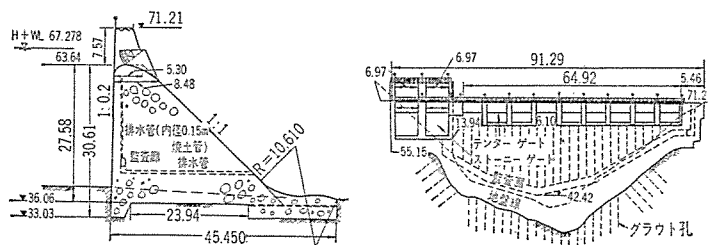
日清、日露の両戦役に勝利をえてわが国の国力は大いにのびたが、さらに 1914 年（大正 3 年）ヨーロッパに始まった第 1 次世界大戦によって、わが国の産業界には史上まれにみる繁栄がもたらされ、その結果、大正の後半から昭和の始めにかけて日本の工業化は著しく進んだ。この産業改革の大きなさえとなっていたのはわが国の豊富低廉な水力エネルギーであったことはよく知られているとおりである。

わが国で、水力発電による電気が一般に供給されたのは 1892 年（明治 25 年）京都市で琵琶湖疎水工事に付随してつくられた蹴上発電所である。これは、パリ市近郊セルメーズにおける世界最初の水力発電におくれることわずかに 11 年であった。その後、送電技

に進歩し、とくにコンクリートダムにおいてはその設計施工方法に一つの定式化が進みつつあったのである。わが国のダム技術者が以下に述べる志津川、大井ダムなど大規模ダムの建設に踏切ることのできたその自信をささえてたものは、このアメリカのダム工事の実例であったといえよう。

関西電力の前身で当時京阪神地方に電力を送っていた宇治川電気が、発電用として宇治川に 1924 年（大正 13 年）に完成した志津川ダムは、高さ 35.2 m、堤頂長 91.3 m のコンクリート重力ダムで、わが国で初めて大河川の本流を締切り、容量 500 万 m^3 の貯水池をつくったものとして有名である（図-6.53）。このダムは、下流に宇治、大阪をはじめ多くの人家が密集する地域をひかえているため、安全性については当時いろいろと論議されたといわれている。その結果、ダムの断面決定にあたっては揚圧力が 100% ダムに働くものとし、また貯水池内の堆砂による影響および地震力も考慮して図-6.54 に示すようにダムの下流面勾配を以前に建設された布引ダムよりも大きい 1:1 とした。現在この程度の高さの重力ダムの下流面勾配は 1:0.8 程度であるのにくらべると著しく安全な設計としていたことがわかる。志津川ダムにおいては、わが国で初めて今日のダムのよう

図-6.54 志津川ダム上流面および断面



当時人々の耳目をあつめた志津川ダムも、ごく最近完成した天ヶ瀬ダム（高さ 73 m、アーチ式、宇治川・建設省）によって湖底に沈む運命をたどった。志津川発電所は完成後今日までに実に 57 億 kWh の発電を行ないその使命をはたし、なお引続き活躍されることが期待されていたが、京阪神工業地帯の発展のために欠くことのできない宇治川の水資源を、大規模に開発する目的の前に廃止のやむなきに至ったのである。今後わが国産業の発展につれて、このようにしてさらに大きなダムにその席をゆずって姿を消すダムも多くなってくるであろう。

志津川ダムより 2 年おくれて、当時わが国でもっとも有望な大水力電源の一つと考えられていた木曾川において着工した大同電力の大井発電所は、出力 45 000 kW の本格的な大水量低落差のダム式発電所である（写真-6.11）。

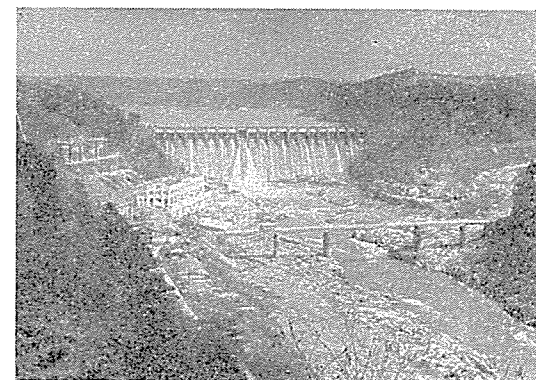
ダムは重力式で 53.4 m、頂長 276 m、コンクリート体積 153 000 m^3 と志津川ダムよりはっそう大規模なものであった。これに加えて大井ダムの場合には最大洪水量が 5 000 m^3/sec にもおよび、その処理が工事の困難さを倍加させていた。

したがって工事にあたっては、万全を期するためアメリカの技術者を招き指導にあた

らせ、またミキサ、ガソリン機関車、固定型 6 t ケーブル クレーンなどの工用機械をアメリカより輸入して使用した。

コンクリートは、ダム頂の高さに河川を横断して設けた鉄製トレススルの上にガソリン機関車のけん引するトロッキにより運搬し、所定の位置でダンプし、シュートを利用して打込み、6 t 固定ケーブル クレーンで玉石を打込み現場に運び玉石コンクリートを施工した。わが国のそれまでのダム コンクリートは斜シュートにより流しこんでいたの

写真-6.11 大井ダム
（高さ 53 m、コンクリート重力式、木曾川・1924 年完成）
（関西電力 KK 提出）

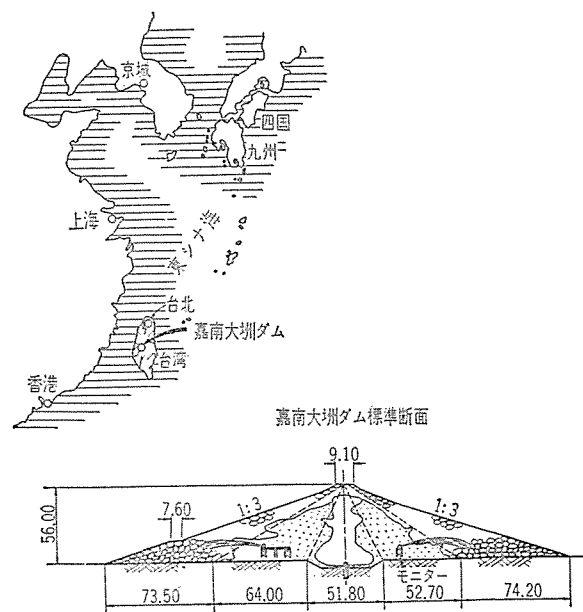


の工法により 1 カ月最高 12 300 m³ のコンクリートを打込むことは全く新しい試みであった。

このように工事関係者が多大な苦心を払ったにもかかわらず、何分にも当時の技術に於ては未経験の大工事であったため工事中種々計画にそごをきたし、またしばしば洪水に襲われ、さらに関東大震災による経済恐慌の影響を受けて資金面でも制約をうけるなど完成にいたるまでには幾多の試練を経なければならなかった。しかし、これらの困難には打勝って約 2 カ年という短時日で完成させたことは当時としては画期的なできごとであったといえる。

ダムは、それを建設して企業に直接もたらす利益の大きいことはもとより、ずっと後世まで祖先の残した偉大な遺産として永く人類がその恩恵をうけることは、つとにわが国のダム技術者の認識するところであった。そしてこの誇りが心のささえとなって幾多の困難とたたかい、わが国のダム技術を今日のような世界的水準にまで急速に発達させたという

図—6.55 嘉南大圳ダム位置および標準断面



ことができる。

1920 年（大正 9 年）に着工し 1929 年（昭和 4 年）に完成した台湾の嘉南大圳ダムにまつわるエピソードはこのようなダム技術者の生甲斐について語る場合に常に引用されるものである。

嘉南大圳ダムは台南付近にかんがい用としてつくられた高さ 61 m、長さ 1 270 m、容積約 600 万 m³ におよぶ大規模なアースダムである（図—6.55）。

このダムの施工には大型の土工機械のなかった当時において大量の土を処理するために、セミハイドロリック工法というトロックで土採場から現場に運搬してきた土に射水して締固める特殊な方法を採用している点、技術的にみてもわが国のダム建設史上重要なダムである。しかし嘉南大圳ダムの名が現在に至るまでわが国のダム技術者の心に深く刻みつけられているのは、このような技術的な業績だけからではない。祖国を遠くはなれた未開の植民地で、工事資金を負担させられた農民の怨嗟、工事の完成を危ぶんで動揺する人心、関係諸機関の派ばつ意識と工事に対する無理解などの真只中での苦闘 10 年の末、ついに所信を貫きとおし、この大工事を完成させた技術者の心意気こそ幾十年たった今日においても常にわれわれに新しい感激を覚えさせてくれるものであろう。

嘉南大圳ダムの完成により多大の恩恵をうけることになった 100 万の農民は、初めてこの工事の偉大なことを知り以後日本人に対する感情が著しく好転したといわれる。とくに工事の完成に大きな推進力となった八田与一に対しては、彼らは“台湾の恩人”と呼んで尊敬し故人になられた後も自分たちの手で湖畔に建てた墓碑に毎年春秋 2 回の供養を怠らず今日に至っているのである。台湾とは現在においてもなお友好的な関係が続いているが、その裏にはこのようなダム技術者の献身的な努力があったことを忘れてはならない。

4.5 地震国とダム

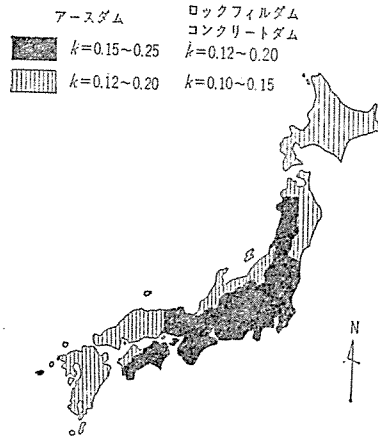
志津川ダム、大井ダムなどで本流を締め切ること成功したわが国のダム技術は、昭和に入り小牧ダム、祖山ダムにつづいて塚原ダムなど、始めて 80 m 級の高ダムに及ぶことになった。しかしダム建設のむずかしさは高さの自乗、または 3 乗に比例するといわれるとおり、これらの高ダムの建設には設計、施工両面の技術レベルの新しい飛躍が必要であった。

明治初年以降逐次外国より導入されたダム技術は、日本人技術者の手により実地にうつされ、多くの経験を経てわが国の技術として消化されてきたが、わが国は世界有数の地震国であり、とくに 1923 年（大正 12 年）9 月に起こった関東大震災によりじんだ被害をこうむった経験が生々しい当時においては、小牧ダムを初めとする高ダムの建設は地震に対する技術的解決方法が確立されないかぎり不可能であった。ところが地震力を考慮して構造物を設計することは、地震のない欧米諸国ではほとんど行なわれないことで、この間

題の解決はわが国ダム技術者みずからの手で行なわれなければならない課題であった。物部長穂のダム設計方法に関する研究は、その独創的なダムの耐震理論においてその価値を高く評価されているのは実にこのことによるといえよう。

物部は水圧、自重の他に堆泥圧、揚圧力、氷圧、動水圧、地震力など、およそダムに働くと考えられるすべての外力を考慮して、しかも簡単な数式によりコンクリート重力ダムの合理的な断面を求める方法を提示しているが、この中で地震力は重力ダムを実用上剛体と仮定して、堤体の各部に働く水平方向の力（慣性力）のみで表現し、その大きさを重力

図-6.56 わが国における等値水平震度
(k の分布)



に対する係数 k で表わしている。この係数 k は等値水平震度と呼ばれ、地震の性質、大きさ、ひん度、ダム地点の地質などによって変わるものとし、実際の設計においては日本全国をいくつかの地域にわけて、それぞれ採用すべき k の値を決めている。この方法は一見大胆な仮定であるが実はきわめて合理的かつ实际的であって、わが国のみならず諸外国においても現在にいたるまで一つの確立した手法として、重力ダムおよびそれに類似した構造物の耐震設計においてさかんに利用されているものである。

わが国のダム技術者が小牧ダムを初めこの時代の高ダムの建設に踏み切り、さらにその後佐久間を始めとする大型重力ダムが建設されてわが国のエネルギー開発に重大な役割をはたすことになった裏には、このような重力ダムに関する耐震理論の確立が大きな力となっていることは否めない事実であろう。

この時代になると、諸外国においては重力ダム以外にアーチダム、バットレスダム、フィルタイプダムなどの異なった形式のダムに関する技術が進歩し、さかんに建設されるようになっていた。しかるにわが国ひとり重要なダムはすべて重力ダムによって築造していたのは、実にこの地震を考慮しなければならないというわが国特有の自然条件によるものであったことを認識しなければならない。

すなわち、アーチダムはその平面形状を曲線形とし、ダムに作用する外力をアーチ作用で両岸へ伝えるため、比較的狭いダム地点に恵まれていた当時としては経済的なダム形式としてとくに注目されていたが、重力ダムに比して複雑な構造物であるためその耐震性を検討することは当時の技術では不可能であって、このような構造物をもって貯水池を建設する冒険をおかすことは良心的な技術者としてはとうていできなかった。

バットレスダムは当時急速に発達した鉄筋コンクリート構造技術を利用して、堤体のコンクリート体積を減少させかつコンクリートの硬化熱の放散が容易な合理的なダム形式として1921年代（大正10年代）に笹流ダム（高さ23.6m、亀田川・函館市）、高野山ダム（高さ19.6m、中津川・新潟県）など小規模ながら二、三建設された。しかしバツ

図-6.57 耐震構造のバットレスダム

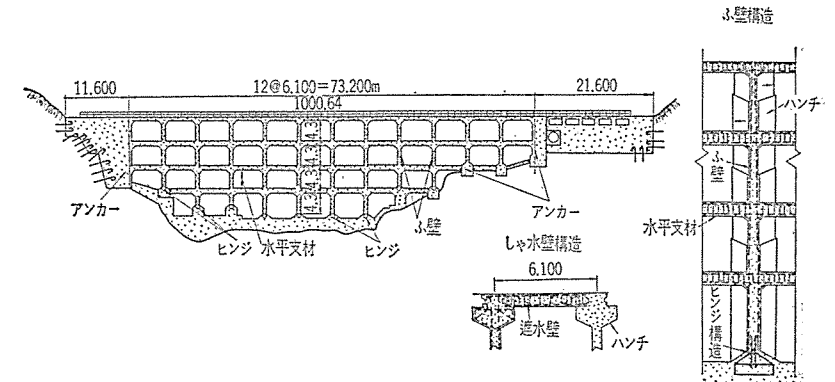
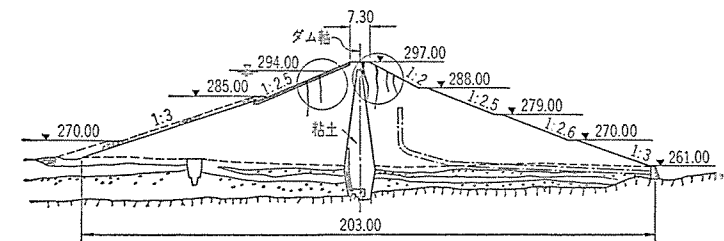


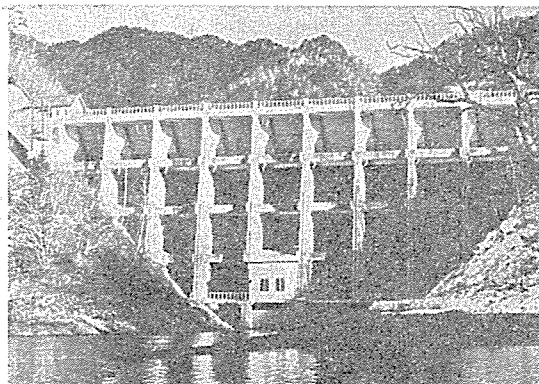
図-6.58 関東大震災によりひびわれを生じた大野ダム



トレス ダムは、耐震性が重力ダムに比して劣るため、その後物部により種々改良が加えられいわゆる耐震構造のバットレス ダムの出現をみた。このダムはバットレス ダムの安定上とくに問題であったダム軸方向の地震力の対策として 図—6.57 に示すように水圧を基礎岩盤に伝えるバットレスをヒンジ構造とし、かつ水平支材を補強し両岸に定着するわが国独自の構造をもつものである。

この形式のダムとしては真立ダム（高さ 21.8 m, 小口川・北陸電力）、丸沼ダム（写真—6.12, 高さ 32.9 m, 片品川・東京電力）、三滝 ダム（高さ 24.3 m, 千代川・中国電力）などがある。

写真—6.12 丸 沼 ダ ム
（高さ 32.9 m, 耐震構造バットレス 片品川 1937 年完成）



耐震性の点は解決したものの、ダムにこのような極端に薄い構造物を使用したことにより、当時のコンクリート技術では耐久性とくに凍結融解に対する耐久性の点で種々問題が生じ、かつまた補修費がかさむなどの理由で大規模なものに進むことなく 1921 年代（昭和 10 年代）頃までに全く建設されなくなってしまった。

アース ダムもこの頃までにはすでに述べたように大野ダム、村山ダムなどかなり高いものがつくられていたが、これらが関東大震災の際に堤体にひびわれを生じたり、またのり面のすべり出しを起こすなど、かなりの被害をうけた（図—6.58）。

これにひきかえコンクリート重力ダムの被害は皆無であったので、重力ダムの耐震性は理論面ばかりでなく実地にも立証されたこととなり、後に述べるようにごく最近になってアーチ ダムの耐震性が解明されまた大規模なフィルタイプ ダムの建設が可能になるまでかなり長い間コンクリート重力ダムが他の形式を圧してその規模、数においてまさにわが国のダムの主役として各地に建設されることになったのである。

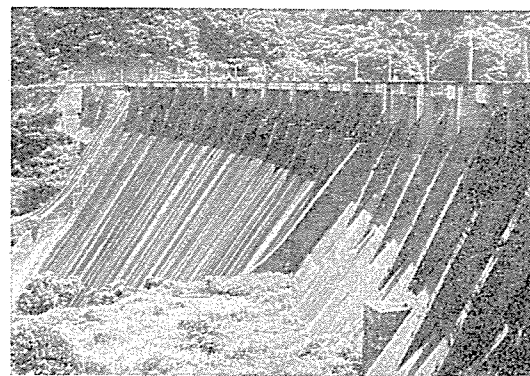
4.6 発展する重力ダム

わが国においては当時重力ダムのみが耐震的なダム形式と考えられていたことは前節で述べたとおりであるが、そのほかにも重力ダムは施工中または完成後の洪水の越流に対しほかの形式にくらべはるかに経済的でしかも安全であるので、この点、地震のみではなく洪水も多いわが国の自然条件に最も適するダムとして、その後さかんに建設され、またこれに関する技術も急速に進歩していったのは当然のことといえよう。

小牧、祖山、塚原などのダムは関東大震災後建設された大型重力ダムとして、設計、施工の面でそれぞれダム技術史上特筆すべきいくつかの特徴をもっている。

小牧ダムは庄川（富山県）に庄川電気の手で 1929 年（昭和 4 年）完成した高さ 79.2 m, 堤頂長 132 m, コンクリート体積 288 800 m³ の重力ダムで（写真—6.13）、設計上等値水平震度は満水時 $k=0.15$, 空虚時 $k=0.075$ を採用し、上流面勾配は 1 : 0.1, また下流面勾配は 1 : 0.75 としている。平面形状を曲線型としたのは当時としては 50 m 級から 80 m 級へダム高さがいっきに大きくなったことにより、構造的に少しでも安全

写真—6.13 小 牧 ダ ム
（高さ 79 m, コンクリート重力式, 庄川 1929 年完成）
（日本ダム協会提供）



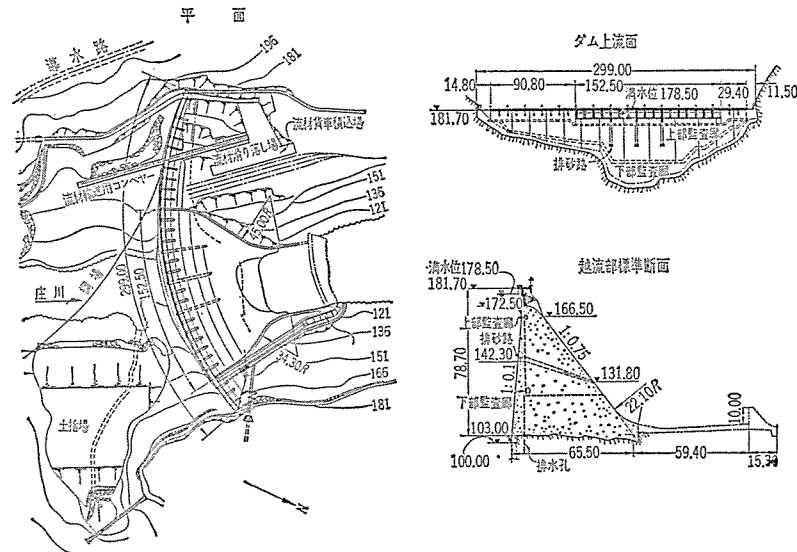
性を増加させようとしたこと、および洪水をできるだけ川の中心に集めようとしたことなどによるものと思われる（図—6.59）。

このダム地点の選定にあたっては、まず小牧付近一帯の岩盤が高ダムの築造に適するかを調べるため、岩をくり抜いてコア（Core）を取りだすことのできるボーリングを多数行ない、その結果

によってダム位置を決めた。さらに岩石コアについて強度試験を行なって、ダムの最大応力によって基礎岩盤が破壊しないかどうか検討した。このような地質調査の方法は現在で

はどのダム工事でも行なわれているが、当時としては初めての試みであった。また構造上の特色としてダムに横継目を設けてブロックに分け、硬化熱によっていったん上昇したコンクリート温度が低下することにより生ずるダムのひびわれを防ぐことにした。これに関連して白金温度計を 28 個堤体に埋込み、その導線をダム監査廊に集めてここから測定を行ない、ダム コンクリート温度とひびわれについての解析を行なった。これまではダムをつくっても、それを測定して実際に技術者が考えていたとおりのものになっているかどうかを検討し、さらに合理的な設計の資料を得るということは考えられていなかったもので、ここにわが国のダム測定の源をみることができる。さらにダムに働く揚圧力に対してはこれまでの内部排水工に加えて初めて基礎排水孔がカーテン グラウト工の後に設けられた。

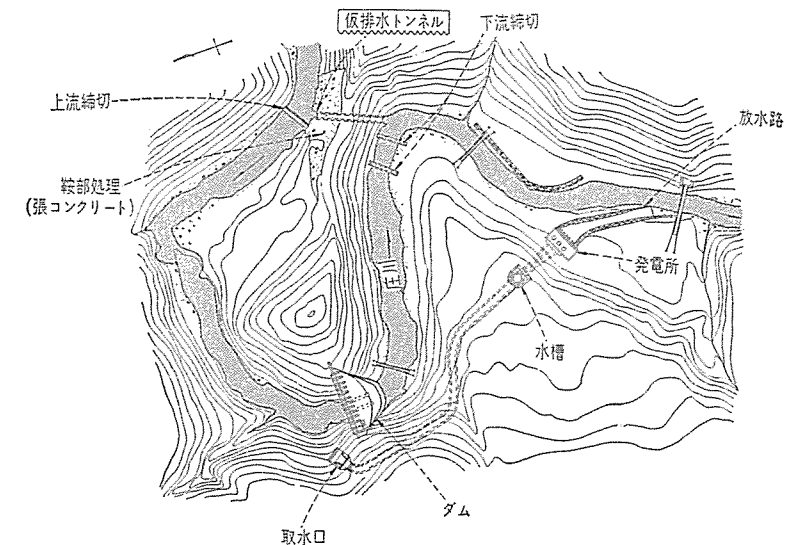
図-6.59 小 牧 ダ ム



ダム コンクリートの打込み方法などはこれまでのダムとほとんど同じであったが、このダムでは初めて本格的なコンクリート試験室を設け、スランプ試験、供試体の採取と強度試験、砂利、砂のふるい分け試験、表面水量の測定試験などを行ない、すでにコンクリートの品質管理に努力した跡がうかがわれる。

小牧ダムと時を同じくしてその上流に同じような規模の祖山ダムが完成した。このダムの設計、施工は、ともに小牧ダムと大同小異であるが、わが国で初めて大規模な仮排水トンネルにより工事中の河流のつけかえを行ない、堤体の基礎岩盤の掘削、コンクリートの打込みを行なっているのは注目に値しよう。この仮排水トンネルは 図-6.60 に示すとおり本流がにわかにはアピン状に屈曲している箇所を利用し、その断面は幅 50 m、高さ 5.5 m、延長は開き部 20 m、トンネル部 117 m でその計画通水量は $250 \text{ m}^3/\text{sec}$ のものである。仮排水トンネルを掘って工事中の河流をつけ替える工法は、現在わが国では狭いダム地点において最も普通に行なわれる工法で、地形条件の悪い場合またはフィルタイプダムのように底幅が広い場合は河岸に平行に 1000 m 以上掘削するものもまれではない。

図-6.60 祖山ダムの仮排水トンネル平面

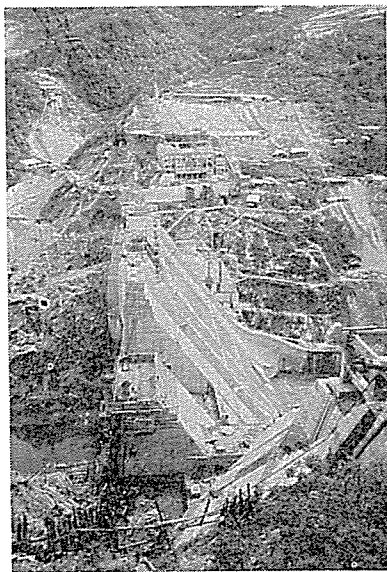


これらのダムに引き続きいずれも発電用として千頭ダム (高さ 64 m、寸又川・中部電力)、笠置ダム (高さ 41 m、木曾川・関西電力)、泰阜ダム (高さ 50 m、天竜川・中部電力)、小屋平ダム (高さ 62.5 m、黒部川・関西電力)、などのダムがつぎつぎとつくられた

が、塚原ダムに至るまで小牧、祖山ダムの域を出てその進歩のあとが、顕著にあらわれたのはなかった。

塚原ダムは 1938 年（昭和 13 年）に耳川（宮崎県）に九州電力の前身である九州水力電気の手で完成したもので、その高さは 80 m、堤頂長 215 m、コンクリート体積 350 000 m³ の直線重力式ダムである。このダムの 特長としては 布引ダム以来尾を引いていた粗石をならべその間をモルタルまたはコンクリートでつめるメーソンリー ダム（Masonry Dam）の考え方が完全に払拭され、今日のような均質なマス コンクリートが施工されたことおよび、それまでのわが国のダム工事では部分的に施工機械を使用していたものを骨材の採取からコンクリートの打込みに至るまで一貫して機械化し、現在のダム工事における機械化施工の先鞭をつけたことにある。とくに片側走行型ケーブル クレーン（能力 9 t）を設備して、これにより吊下げたバケット（容積 3.0 m³）でコンクリートを打込み

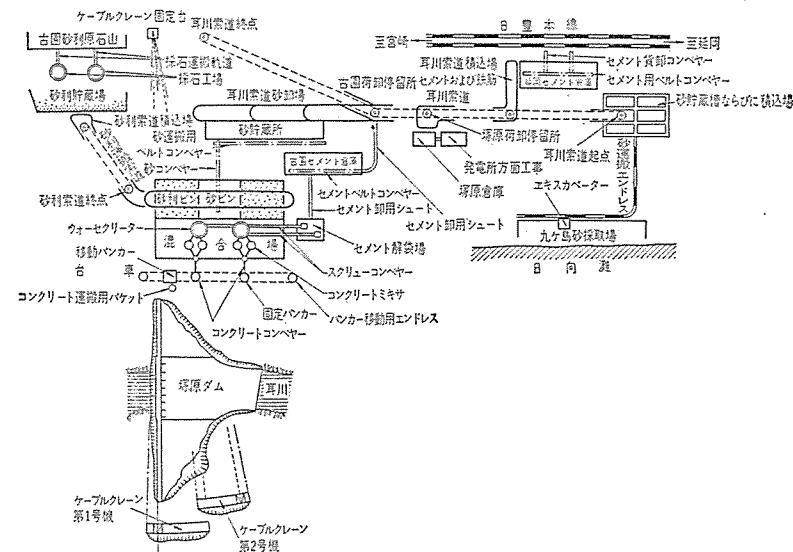
写真—6.14 工事中の塚原ダム
（高さ 87 m、コンクリート重力式、耳川
1938 年完成）
（九州電力 KK 野田氏提供）



現場まで運搬し、圧縮空気を使用したバイブレーターで締め固めるコンクリートの施工法はわが国では初めての試みで、シュートによるコンクリートの打込みに比しそのセメント使用量を大幅に減じ、しかも十分な強度を持つコンクリートを施工することができた。

また、ダム コンクリートの粗骨材はすべて原石山より採取した岩石をクラッシャーで破碎して人工的につくり、細骨材は 40 km 離れた海岸より毎時 60 m³ の能力を有する電動エキスカベーターにより採取し、これを毎時 40 t の運搬能力を有する索道で運搬使用した。この原石山を利用して粗骨材を採取使用した実績はダム付近に適当な滞積骨材のない所でもダムを建設することができるという自信をわが国ダム技術者に植えつけ、その

図—6.61 塚原ダム工事用設備系統図



後各地のダムでこの骨材生産法は利用されている（図—6.61、写真—6.14）。

セメントについては、当時は早期強度の高いセメントが高級であるかのように一般に考えられていた。しかし、ダム コンクリートに使用するセメントとしては早期強度は必要ではなく、むしろ安定度が高く材令とともに強度が漸増し同時に水和熱が大きくないものが望ましいことはいうまでもない。塚原ダムにおいては吉田徳次郎の指導により、このようなセメントの使用を決意し、その製造方法の研究依頼をうけた日本セメントは種々研究を重ね日本で初めてのダム用セメントの製造を開始した。今日わが国のコンクリートダムに使用しているセメントはおおむねこの型のものであって、これは当時わが国のセメント製造技術がすでに高い水準にあったことを示すものである。

塚原ダムに続いて大橋ダム（高さ 73.5 m、吉野川・四国電力）、立石ダム（高さ 64.4 m、大田川・中国電力）、岩屋戸ダム（高さ 57.5 m、耳川・九州電力）、三浦ダム（高さ 86 m、王滝川・関西電力）などの大規模なコンクリート重力ダムが発電水力用に建設された。このうち三浦ダムは木曾川水系王滝川に 1936 年（昭和 11 年）に工事に着手し、1947 年（昭

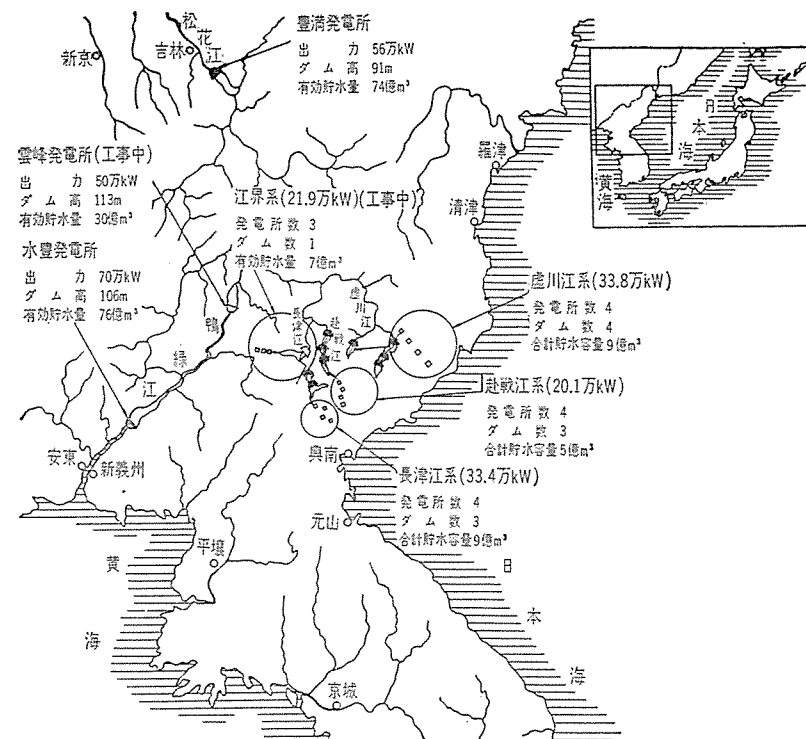
和 17 年)に完成したもので、1957 年(昭和 27 年)丸山ダムが完成するまで約 10 年間わが国の最高のダムであった。また、東京の水道貯水池として 1938 年(昭和 13 年)着工した小河内ダムは、その高さ 149 m で三浦ダムをはるかに上まわる規模であったが、1943 年(昭和 18 年)に至って、当時としては最新、最大を誇る工事用設備を完成させ、まさにコンクリート打込みを開始しようとするとき戦争のため工事を中止しなければならなかった。小河内ダムは 1932 年(昭和 7 年)にはすでにその建設について東京市議会の承認を受けていながらその後、水利権をめぐる争い、戦争、つづいて戦後の混乱、資金難などのために長い間陽の眼を見ることがなく、結局その実現が後に述べる佐久間ダムより遅れてしまったものである。このため他のダムにおくれをとった感があるが、ダム技術の歴史の上では、わが国の重要なダムの一つであることは疑いない。

小牧、祖山、塚原および三浦ダムなどの設計、施工方法は基本的には現在と異なっているところはほとんどなく、重力ダムに関する日本独自の近代的ダム技術はこの頃に確立されたといってもよいであろう。

4.7 戦時下のダム建設

中国大陸に戦雲が暗くたちこめ始めたころ、満州国はわが国北辺の守りの基地としてそこには巨大な軍需産業がぼつ興しつつあった。また、北朝鮮地方は化学工業地帯としてそのすぐれた工業立地条件のゆえに、にわかに時代の脚光を浴びつつあった。これら両地方の産業発展のためそのエネルギー源たる電力の必要性が叫ばれるようになり、この要請に答えて 1935 年(昭和 10 年)頃よりこの地方の水力開発がさかに行なわれるようになった。なかでも鴨緑江の水豊ダム、および、松花江の豊満ダムはアメリカのグランド クーリー(Grand Coulee, 高さ 167.2 m, コンクリート重力式)、フーバー(Hoover, 高さ 222 m, アーチグラビティダム)などの当時建設された諸外国の大ダムにも匹敵する、いわば世界的な規模を有するダム工事であった。この工事は戦時下における資材調整の困難、あるいはゲリラからの攻撃の驚威などの困難を克服するとともに、日本内地の河川とは異なり、大陸のしかも大河川にダムを建設するという技術的難問も解決して行なわれたもので、非常時体制下とはいえ、当時のダム建設関係者の精神力とその労苦には、まったく敬服のほかはない。この 2 つの大ダムはダム建設技術史上戦後つぎつぎと建設されたわが国

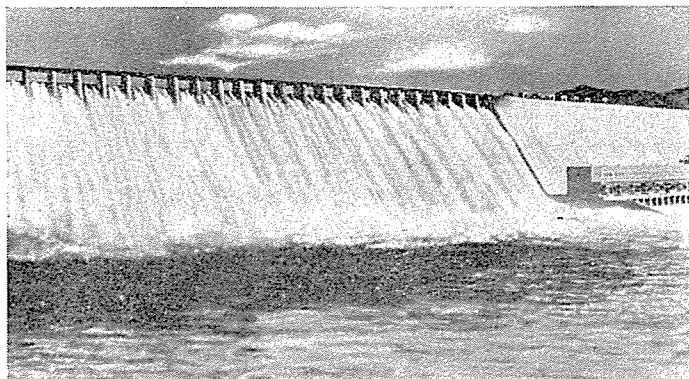
図—6.62 南満州・北朝鮮電力開発図



の大型ダム建設への大きな自信を植えつけるものとなった(図—6.62)。

水豊ダムは、鴨緑江の河口から 90 km の地点に位置し、高さ 106 m、頂長 900 m、コンクリート体積 3 270 000 m³ の直線重力式ダムで、これによって形成される貯水池の総容量は 120 億 m³、有効貯水量は 76 億 m³ に達する大規模なものであった。また 7 台の発電機によって最大出力 700 000 kW の発電が行なわれ、発電機 1 基の出力も 100 000 kW であって、これは当時わが国最大のものであった(写真—6.15, 6.16)。ダム地点の調査は 1936 年(昭和 11 年)より機関銃に護衛された朝鮮、満州両当局の合同調査隊によって初めて行なわれ、1938 年(昭和 13 年)にダムの基礎掘削が開始された。この工事には

写真—6.15 水 豊 ダ ム
(高さ 106 m, コンクリート重力式, 鴨緑江 1943 年完成)



ダム工事としては、わが国初めてという電気ショベル、ジブクレーンなどが使用され、ダム地点付近に専用のセメント工場の新設、あるいは延長 120 km の資材輸送用の鉄道の新設など、当時としては画期的な機械化施工により着工後 5 年という短期間で完成をみた。

写真—6.16 工 事 中 の 水 豊 ダ ム



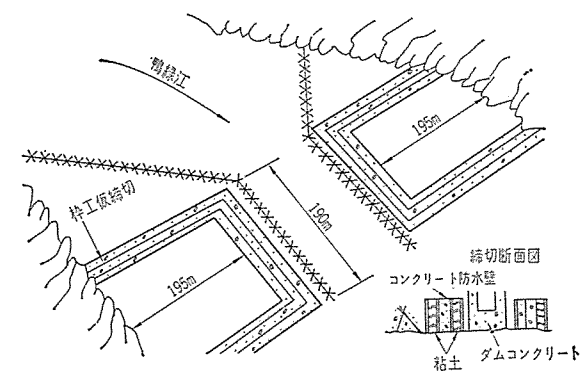
100 万 m^3 , 1 日平均 2700 m^3 の打ち込み速度で施工されたが、これはもちろん当時としては記録的なことであった。

外地においてはこれら的大ダムが建設される一方、内地においても石油、石炭などの燃

また、最大洪水量が 42000 m^3/sec , 年平均流量が 800 m^3/sec という大河川の河流つけ替えは 図—6.62 に示すように、河川を 1/3 に区切って適宜流路を切り換えることによって行なった。

コンクリートは 3 m^3 バケットを使用して 14 台のジブクレーン、16 台の 6 t ガソリン機関車によって、年平均

図—6.63 水豊ダムの締切り



料資源の乏しいわが国のエネルギーのにない手として、戦略上水力開発がおしすすめられた。1939 年（昭和 14 年）には、電力産業が国防力の充実を目標とするわが国の基幹産業であるとして国家管理下におかれ、新しく成

立をみた日本発送電により、平岡、有峯、丸山ダムなど、つぎつぎと大ダムの建設が始められていた。しかし、1941 年（昭和 16 年）第 2 次世界大戦がはっ発し、その結果、軍需産業が異常な勢いで伸長したため、政府は最少の資材で最大の効果をあげるため、もっぱら水路式発電所を建設し、竣工までに長い期間と大量の資材を要する貯水池式発電所の建設、すなわち大ダムの新規着工は行なわない方針を決定した。さらに 1944 年（昭和 19 年）には鋼材、セメントなどの資材の不足はますます強まり、丸山、有峰などのダム工事は未完成のまま中止のやむなきにいたり、その後はほぼそと水路式発電所の建設が行なわれていたが、1945 年（昭和 20 年）に入るや、戦災と海外からの資材の輸送が途絶したため、電力需要は激減しこれらの工事まったく停止されることになった。この悪夢のような戦争に、多くのダム技術者、ダム建設に必要な各種の施工機械もつぎつぎと前線にかり出され、その犠牲も多大なものがあつたが、一方国内に残ったダム技術者はダムの耐爆実験などを行なうかたわら、工事再開を夢みてこれらの工事中途中で放置されたダムを計画どおりの高さにかかにして完成させるかを調べるため、かさ上げダムの研究、実験などをほそそと続けていた。

4.8 戦後におけるダム施工法の革命

4.7 に述べたように太平洋戦争後半には数多くのダムが工事中止となったが、さらに 1945 年（昭和 20 年）終戦となるにおよんでまったく日本の社会は混乱に落込んで、もは

やダム建設どころではない時代がしばらく続いた。

しかし 1949 年（昭和 24 年）頃になり、わが国産業の復興から、ようやく電力不足の現象を呈するにいたり水力開発が国策として強力におしすすめられにおよんでダム建設が復活することになってきた。

この時代の要請に応じて日本発送電は平岡、丸山などの戦時中やむをえず工事を中止した地点から至急着工することに決定し着々と建設の準備が進められた。1951 年（昭和 26 年）集中排除法によりわが国の電力再編成が行なわれ、その結果日本発送電、および九配電会社は解散し、これに代って全国を 9 つの地域に分割しそのおのこの地域で発送配電を一貫して行なう九電力会社が誕生し、日本発送電の各建設地点はそれぞれ電力会社に引き継がれた。

ついで 1952 年（昭和 27 年）には大規模かつ困難な水力地点の開発を担当する政府出資の特殊会社である電源開発が設立され、以後のわが国の水力の開発は主としてこの 10 社が担当することになった。

この時代の水力開発の特徴として、当時にわかに重要性を加えてきた新鋭火力発電所と最も有効に組み合わせられる貯水池式発電所の建設が必要であると考えられるようになった。ここに電源開発と九電力会社が時代の要求に答えて大水力発電所すなわち大ダムを建設する時代が始まり、100 m 級の丸山ダム、つづいて 150 m 級の佐久間、田子倉、有峰、奥只見、小河内などの世界的な規模のダムが相続いて完成された。これら大型ダム建設の技術的裏付けとなっていたものは、戦後重土工機械の発達により革命がもたらされた施工法である。

関西電力によって木曽川に建設された丸山ダムは、高さ 88 m、体積 50 万 m³ のコンクリート重力ダムで当時わが国最大のダムであり、1954 年（昭和 29 年）完成した。戦時中立ち遅れていたわが国のダム技術を取りもどすため、このダム建設にさいしては施工方法および工事用機械にかなり外国技術が取り入れられたが、この工事経験は、つぎに述べるダム施工法に革命をきたしたとして有名な佐久間ダム建設への一足がかりとなっている。

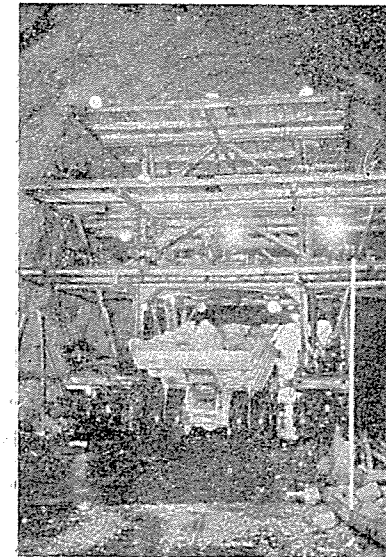
天竜川中流に位置する佐久間ダムは、わが国における初めての 150 m 級のダムであるばかりでなく、この建設工事はあらゆる点から、わが国史上最大の工事といえるものであ

て、このダムの建設はひとりダム技術者ばかりでなく、敗戦により沈滞していた日本国民の志気をふるい立たせるに十分なものであった。このダム地点は昭和の初めから発電に絶好な地点として名古屋電灯、日本発送電、中部電力など天竜川に関係を持つ歴代の会社によって開発が計画されながら、現場は小舟でしか近づけないような急しゅんな峡谷であり、既往最大 10 000 m³/sec を記録した大天竜の洪水をかぶりながら深さ 30 m にもおよぶ川床砂礫を掘削しなければならないという悪条件のためにいずれも開発が断念されていたものである。

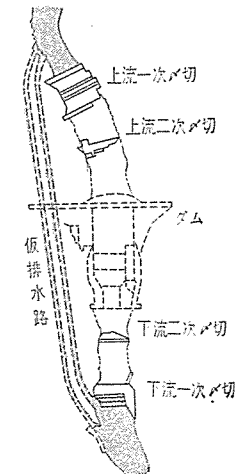
佐久間ダムの開発を担当することになった電源開発は、この工事が会社として初めての大工事であったので、文字どおり社運をかけてこの工事に取り組み、種々検討の結果わが国の従来工法ではこれが建設は不可能と判断し、アメリカから大型施工機械に関する技術を導入することにした。

当時アメリカは、第 2 次世界大戦において飛行場建設などの軍事的要請に応じて開発さ

写真—6.17 排水トンネル掘削に活躍するジャンボー
（佐久間ダム）



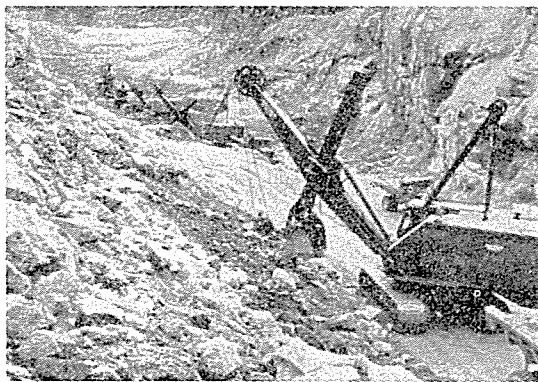
図—6.64 佐久間ダム締切平面



れた重土工機械を駆使して、パインフラット (Pine flat, 高さ 130.8 m, コンクリート重力式), ハングリー ホース (Hungry Horse, 高さ 172 m, アーチ グラビティ) などの大ダムを短時日にしかも経済的に建設していたのである。これらの輸入大型機械は 15 t ダンプトラック, D-8 型ブルドーザー, 2 m³ ショベル, 20 t セメント トレーラー, 112 切ミキサ 4 台を有するワンマン コントロールのミキシング プラント, 延長 2000 m の骨材運搬コンベヤ, 25 t 高速度ケーブル クレーン, 19 本のドリフターを有するジャンボ, 650 t/h の骨材プラント, 20 in 300 HP のバーチカル ポンプなど, どの一つをとってみても従来のわが国の機械とけた違いの能力を有するものばかりであった。

これらの機械の助けにより, 直径 11 m, 長さ 1000 m の仮排水トンネルを全断面工法によってわずか 3 カ月で掘削し, 天竜川を締め切って仮排水トンネルに付替える作業を重土工機械の集中投入によりわずか 55 分で完了し, 洪水期までに締切を完成することに成功した (写真—6.17, 6.18, 図—6.64)。ひきつづき 50 万 m³ におよぶダム基礎掘削を, 約 3 カ月間の短時日で終了させた。基礎掘削中一度冠水したこともあったが, 機動力のある重土工機械を使用していたので, 工事中断はわずか 4 日間にすぎなかった。この場合従来の工法では掘削機械を浸水させ再起不能の打撃をこうむったであろうと想像される。このようにしてそれまで開発をこぼんでいたさしもの天竜川も近代土木技術の前にかぶとを脱がざるをえなかったのである。

写真—6.18 基礎掘削中の状況
(佐久間ダム)



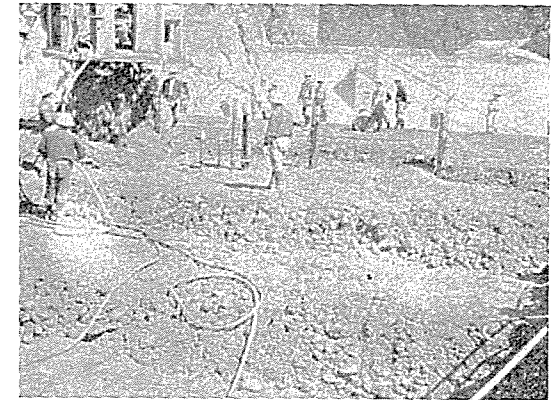
また, 佐久間ダムのコンクリートは平均日打ち込み量, 3000 m³, 最高日打ち込み量 5180 m³ という従来にない速度で打ち込まれたが, この場合のコンクリートの温度上昇を防ぐためにダムを縦継目, 横継目によってわけたブロック工法が採用されたほかに, さらに粗骨材, セメント, 水などのコンクリート材料をね

りまぜ前に冷却し, または氷片を混ぜるなどしてプレクーリングを行ない, さらにコンクリートに埋込んだパイプに冷水をとおすことによりコンクリートの冷却に力をつくした。これにより冷却を行なわない場合は 60°C 以上にも達したと考えられるダムコンクリートの最高温度を 38°C におさえることができて所期の目的を達成したのである (写真—6.19, 図—6.65)。

佐久間ダムに続いて建設された 150 m 級の大型重力ダムには, 佐久間ダム工事で成功をおさめた技術が基本的にはそのまま採用されている。しかし, これらの技術はその後種々改善されたことは当然で, とくにコンクリート施工技術の面で改善のあとが著しい。

大規模な重力ダムを建設する場合, 所要の強度, 耐久性,

写真—6.19 コンクリート打込み中の状況
(佐久間ダム)



水密性のえられる範囲で, 使用するセメント量をできるだけ少なくすれば, 大量の資材費を節約できるばかりでなく, コンクリート硬化熱が減少して, 技術的および経済的に有利であることは論をまたない。したがって, このように工事にたずさわる技術者の関心はいかにしてこの条件を満たすようなコンクリートを作るかにあるといっても過言ではないのである。表—4.8 は, 重力ダムの内部コンクリートのセメント使用量の変遷を示すものであるが, 三浦ダムではセメントをコンクリート 1 m³ 当り 220 kg も使用していたものが建設を重ねるとともに減少し, 奥只見ダムでは骨材に砕石, 砕砂を用いているにもかかわらず, セメント 98 kg, フライアッシュ 42 kg, 合計 140 kg にすぎず, この間の技術の進歩を物語っている。

このように貧配合のダムコンクリートが施工できるようになったことは AE 剤, フライアッシュなどの戦後開発された新しい材料によるところが大きいといえよう。

図-6.65 佐 久 間 ダ ム
ダ ム 平 面

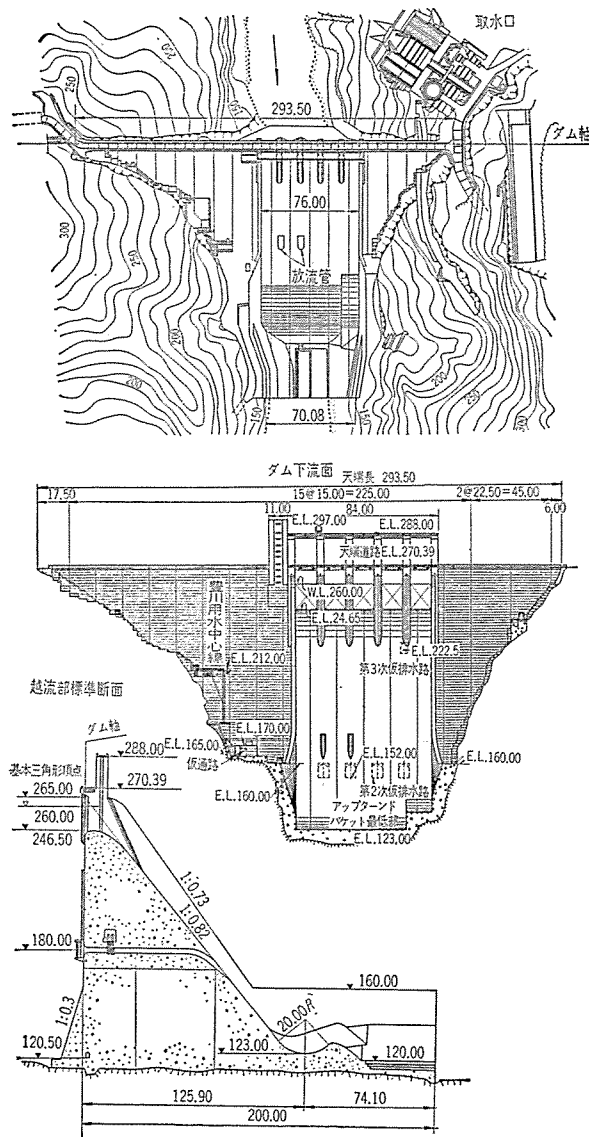


表-4.8 わが国ダム コンクリートの単位セメント量

	ダム名	竣工年	コンクリート 1m ³ 当りの セメント 量	フライ アッシュ 量	骨材最大 寸法 (mm)	スランブ cm	骨材種類	A E 剤	設計施工 監 督
重 力 ダ ム	塚 原	1938	220	0	100	3.0	海 砂, 砕 石	な し	九州電力
	三 浦	1943	220	0	125		川 砂	な し	日 本 発 電
	丸 山	1954	160	0	150	4	川 砂, 川 砂 利	ビンゾール	関西電力
	佐 久 間	1956	160	0	150	2.5±0.5	川 砂, 川 砂 利	ドレシネートメ	東京電力
	藤 原	1958	160	0	150	7.0±1	川 砂, 砕 砂, 砕 石	ビンゾール	電源開発
	須 田 貝	1954	180	15%	150	4	川 砂, 砕 砂, 砕 石	ビンゾール	東京電力
	風 屋	1960	150	30%	150	3.5±0.5	川 砂, 川 砂 利	ビンゾール	電源開発
	奥 只 見	1961	140	30%	150	2.5±0.5	砕 砂, 砕 石	ビンゾール	電源開発
ア ー チ ダ ム	上 椎 葉	1955	190	0	150	4~6	砕 砂, 砕 石, 海 砂	プロテックス	九州電力
	鳴 子	1957	190	0	150	4±1	川 砂, 川 砂 利	ダレックス	建 設 省
	黒 部 川 第 一	1963	190	0	180	3.0±1	川 砂, 川 砂 利	ホ ゴ リ ス	関西電力
	坂 本	1961	230	30%	180	2±1	川 砂, 川 砂 利	ア ス パ ー ズ	電源開発

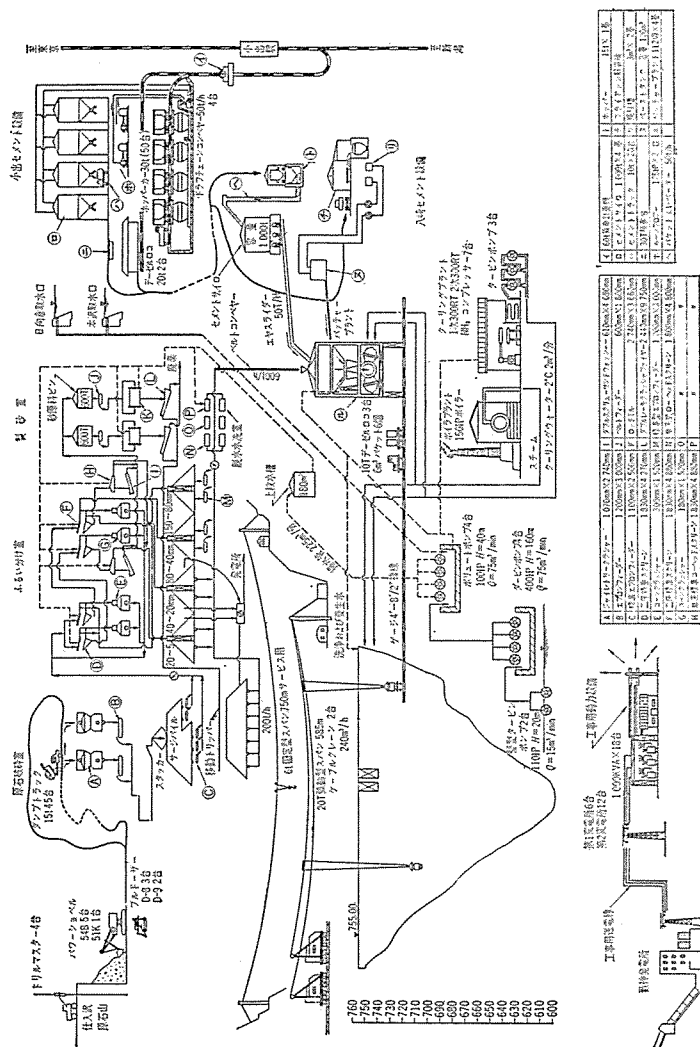
A E 剤は、すでに 1951 年（昭和 26 年）平岡ダムにおいて始めて使用されて以来ダムに用いる貧配合コンクリートのワーカビリチーを改善する有効な手段として認められ、それ以後わが国のダム工事に例外なく用いられてきた。

また、フライアッシュは資材費の節減、コンクリートの水和熱の緩和、ワーカビリチーの改善の点から相当以前からダム コンクリートに使用することが考えられ 1951 年（昭和 26 年）頃から火力発電所におけるフライアッシュの回収方法、ダム コンクリートへの適用方法など、各方面で研究されていた。1954 年（昭和 29 年）東京電力が利根川に建設した須田貝ダムでこれを使用したのを始めとして、つづいて関西電力の鳩ヶ谷ダム、電源開発の黒又川第一ダム、秋葉ダムなどで使用され所期の成果をあげた。

人工骨材の製造についてもこの間の技術の進歩は著しいものがあり、ダム地点付近に適当な天然砂礫のないことはコンクリート ダム建設の制約とはならないようになった。

粗骨材を人工的に作ることは前にも述べたとおり塚原ダム以来行なわれていたが、1956

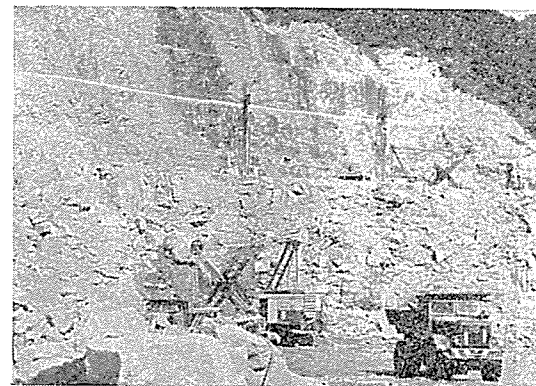
図—6.66 最近の大規模ダム工事用設備（奥只見ダム）



写真—6.20 奥只見ダムの工事用設備



写真—6.21 ベンチ カットによる骨材原石採取状況（奥只見ダム原石山）



年（昭和 31 年）に十勝川水系音更川に電源開発が完成した榑平ダムは、わが国で始めて粗骨材のみならず細骨材までも全部人工骨材を用いたダムとして知られている。

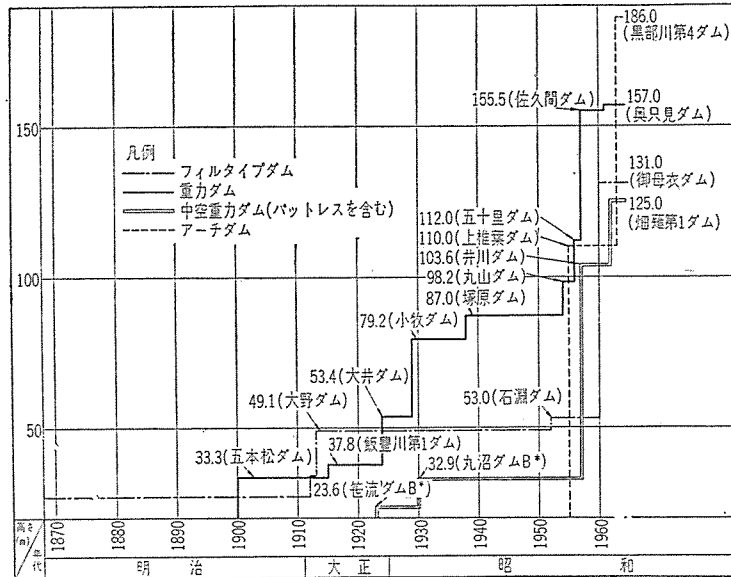
奥只見ダムではさらに大規模な人工骨材生産が行なわれ、1 カ月間約 100 000 m³ のコンクリートを打ち込むに必要な原石を採取し、1 時間 600 t の砕石、砕砂を生産する骨材プラントが作られた（図—6.66、写真—6.20、6.21）。

かくして重力ダムは佐久間ダム以後しばらくの間、わが国ダム建設の主役として活躍し、これらのダムで確立された近代的大型機械工法およびコンクリート技術は現在なお他の形式のダムに引き継がれその威力を発揮しているのである。

4.9 重力ダムからアーチ ダムへ

表—6.9、図—6.67 は、わが国のダム形式の変遷を示すものであるが、これを見るといままで述べてきたとおり、1955 年（昭和 30 年）頃までは重要なダムは例外なくコンクリート重力ダムであって、それまでのわが国のダムの歴史はとりもなおさず重力ダムの歴史

図-6.67 わが国のダム高さの変遷(形式別)



であるともいえる。しかし 1955 年以降になると急速に重力ダム以外の形式、すなわちアーチダム、中空重力式ダム、フィルタイプダムなどが登場してその数においてもまたその規模においても重力ダムをしのぐものがあり、ここに重力ダムは完全にその主役の位置をこれら新形式のダムにうばわれた餓がある。このようにいろいろの形式のダムが重力ダムと同様に技術的に確信をもって建設できるようになったことは、従来に比して水資源開発の可能範囲を拡げたことで、適当なダム形式を選定することによっていかなるところにでもダムを建設することができるようになり、また経済的なダムの設計の追求もこれによりいっそう可能性が増したといっても過言ではない。

この年代は、ダム以外の分野においてもわが国の経済、技術がその 1 年は過去の 10 年に匹敵するといわれたほど急速に発展した時代で、ダム建設においても技術革新の所産である電子工学、統計学、機械工学などの近代科学の助けをかりて格段の飛躍をしたのは当然である。しかしこのような輝かしいダム技術の発展は実はわが国ダム技術者がそれまで営々として築き上げた技術基盤のうえに成り立っていることを忘れてはならない。

表-4.9 1868 年(明治元年)から現在までに建設されたわが国の高さ 30 m 以上のダム数

完 成 年	(m) 高 さ	重力ダム	ア ー チ ダ ム	中空重力ダム (バットレスを含む)	フィルタイ プダム	計
1868~1912 (明治時代)	30~60 60~	2 0	0 0	0 0	1 0	3 0
1913~1926 (大正時代)	30~60 60~	7 0	0 0	0 0	4 0	11 0
1927~1945 (昭和元年~20年)	30~60 60~	45 10	0 0	1 0	16 0	62 10
1946~1955 (昭和21~30年)	30~60 60~	28 18	1 2	0 0	12 0	41 20
1956~1960 (昭和31~35年)	30~60 60~	38 29	2 4	1 3	8 1	49 37
1961~ (昭和36~)	30~60 60~	32 20	2 17	3 5	16 5	53 47
計	30~60 60~	152 77	5 23	5 8	57 6	219 114
合 計	30~	229	28	13	63	333

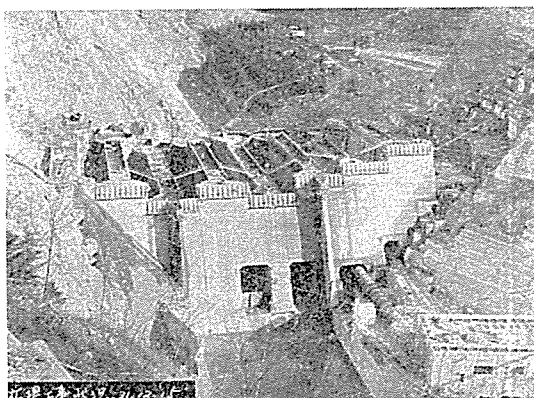
これらの新形式のダムのうちで、基本的には重力ダムと同じ考えに基づきながら、さらに一歩重力式ダムよりも合理的な形式としてまず登場したものが中空重力ダムである。中空重力ダムは主としてイタリアにおいて開発された比較的新しい形式のダムであって、一般にこの形式の採用によって重力ダムに比べて 10~25% のコンクリートが節約されるといわれている。

1957 年(昭和 32 年)中部電力がイタリアより技術輸入を行なって大井川に完成した高さ 103.6 m の井川ダム(写真-6.22)は、わが国における中空重力式ダムの最初のもので、ひきつづき、諸塚ダム(高さ 56 m, 耳川・九州電力),大森川ダム(高さ 72 m, 吉野川・四国電力),畑畑第一ダム(高さ 125 m, 大井川・中部電力),畑畑第二ダム(高さ 69 m, 大井川・中部電力)などが完成している。

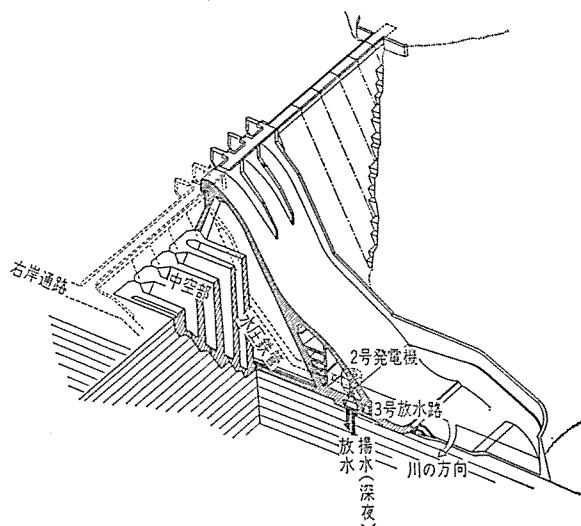
アーチ ダムは欧米諸国、とくにヨーロッパにおいて最も普通のダム形式であって、1955 年（昭和 30 年）頃までにすでにチーニュ（Tigne 高さ 181 m）、ルミエイ（Limi-ei 高さ 134 m）、サンタ ギューステーナ（Stanta Guestina 高さ 152.5 m）などの高さ 150 m 級のアーチ ダムが建設されていて、そのコンクリート量の小さいことはわが国技術者のつとに注目するところであった。1950 年（昭和 25 年）に日本発送電は、大戦により生じたわが国の水力発電技術のおくれを急速に取りもどすために、アメリカ海外技術顧問団（Overseas Consultants Inc 略して OCI）を招へいしたが、この OCI がアーチ ダムまたは後に述べるフィルタイプ ダムを採用することを勧告するにおよんで、わが国にもよ

うやくアーチ ダムが建設される気運を生じた。わが国最初のアーチ ダムは OCI の技術指導と勧告に基づき日本発送電が計画し、これを引継いだ九州電力が耳川上流に建設した

写真—6.22 工事中の井川ダム
（高さ 103.6 m、中空重力式 大井川・1957 年完成）



図—6.68 中空重力式ダムの構造（畑藤第一）



のが高さ 110 m の上椎葉ダムである（写真—6.23）。工事は 1956 年（昭和 31 年）完成した。

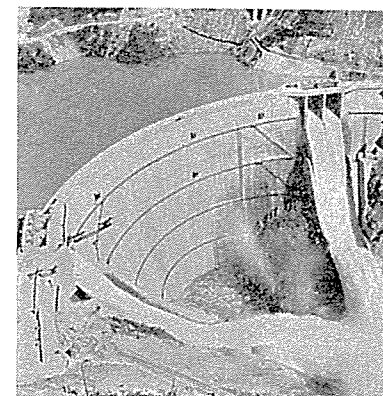
わが国においてアーチ ダムの実現が諸外国におくれていたのは、アーチ ダムの耐震性に関する諸問題が解明されていなかったためであることはすでに述べたとおりである。上椎葉ダム建設にあたってこのダムの耐震性を究明するために、まず地震観測によってダム地点岩盤の卓越周期、地震波形の特性を知り、九州における過去の地震記録によってダム地点の地震活動性と震度を調査した。

また模型実験によってダムの固有周期振動形状が検討され、この結果ダムが共振する場合が予想されるが、共振によるたわみの増幅の程度はダムの安定性に問題となるほどでもないことが予想できたので、工事の実施に踏切ったものである。

上椎葉ダムの建設と前後して東京電力は利根川上流の須田貝ダムの仮締切りを設けるに際し、この仮締切り用ダム（高さ 12.8 m）を特に実験用のアーチ ダムとして設計し大がかりな実験を行なった。この実験においては、試算荷重方法によって計算されたダムの応力やたわみは、ダム内に埋め込まれた計器による実測値と比較されたほかに、ダム上に起震機をすえてダムを人工的に振動させて、その固有周期を測定し、また貯水池内でダイナマイトを爆発させて動水圧のダムにおよぼす影響を調べ、アーチ ダムの耐震性に関する資料をうることができて、わが国のアーチ ダム技術の発達に寄与した。

上椎葉ダムについて建設省が鳴子アーチ ダムを建設し、さらに関西電力が殿山アーチダムを建設するにおよんで、アーチ ダム建設に対する自信がわが国に植えつけられ、これ以後続々とアーチ ダムが建設され現在におよんでいる。

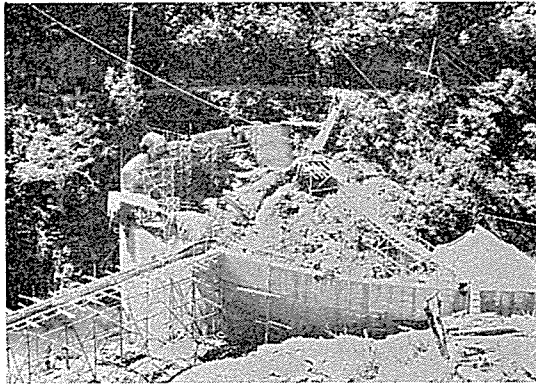
写真—6.23 上椎葉ダム
（高さ 110 m、アーチ式、耳川・1956 年完成）
（日本ダム協会提供）



4.10 アーチ ダム技術の進歩

上椎葉ダム、殿山ダムが建設された時代は、いわばわが国におけるアーチ ダムの初期の段階であり、これ以後現在までに建設された高さ 60 m 以上のアーチ ダムの数はほぼ 20

写真—6.24 実験中の櫛俣ダム
(高さ 13 m, アーチ式, 東京電力 須田貝ダム仮縮切)
(電力中央研究所 君島氏提供)



に達し、この間わが国のアーチ ダム技術は急速に進歩した。ここにわが国のアーチ ダムの進歩のあとをたどる方法として、アーチ ダムを計画設計する場合の問題点をあげ、これらの問題点が上椎葉ダム以降どのような取り扱いを経てきたかを述べることにしよう。

アーチ ダムを計画する場合も、他の形式と同じように

まず洪水処理が問題となる。どの形式のダムでもダム構造物を越流して洪水を処理することができれば、経済的であることはいうまでもない。アーチ ダムの場合これは、滝落し方式となるが、洪水量の大きい場合は、落下した洪水がダム直下の岩盤を傷め、ダムの安定を脅かすおそれがあるので当初上椎葉ダムでは、ダムの両側にシュートを設け、また殿山ダムでは堤内オリフィスを採用して、洪水はダムに影響を与えないように遠くまで飛ばす方法がとられていた。その後ダムの高さ(落下高)、洪水量ないしは越流水深および下流水深などと減勢の水理現象の関連が、一方では天然の滝と滝つば形成の観察や、他方模型実験の結果、少しずつ明らかになってきたので、基礎岩盤の条件が許すかぎり、滝落し方式が採用されるようになった。中国電力の佐々並川ダム、電源開発の坂本ダムその他多くのアーチ ダムではこの方式が採用され、アーチ ダムにおける洪水処理を著しく経済的にしている。また、二津野ダム(高さ 76 m, アーチ ダム)では、洪水時に下流水位が上昇し、越流の上下流水位差の少なくなる点に着目して、熊野川(十津川)の 9 600 m³/sec と

いう巨大な洪水を越流させているのは、注目すべきことである(写真—6.25)。

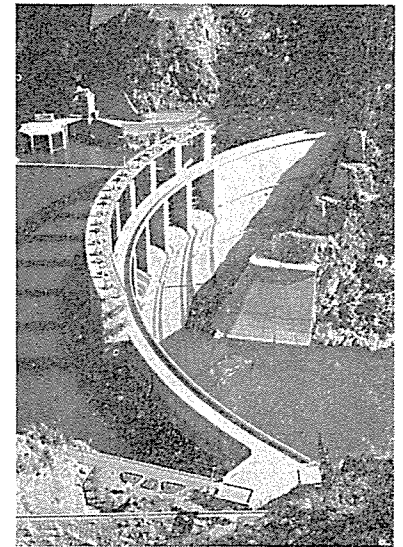
洪水をダムの基礎より遠くはなれたところに飛ばすためだけでなく、地形の関係で貯水池容量の少ないわが国においては洪水時にまえて貯水池水位を下げるために、洪水調節を目的とするダムの堤内にオリフィス型の洪水吐を設ける例が多い。このため高圧水門が最近著しく進歩している。

建設省が荒川の上流に 1961 年(昭和 36 年)完成した二瀬ダム(高さ 95 m, 容積 360 000 m³, アーチ重力式)の洪水吐ラジアルゲートはその寸法が高さ 3.6 m, 幅 5.3 m で 60 m の水圧の下で中開時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もつものである。また天ヶ瀬ダムにおいては高さ 4.6 m, 幅 3.4 m, 水圧 35 m のバーチカルリフトローラゲートが採用された。

つぎに、耐震性の問題は、前に述べたとおり上椎葉ダム設計時において一応の検討が行なわれたが、その方法はまだ十分とはいえない点があった。

アーチダムは比較的剛性の少ない弾性の構造物であってその固有周期がダム地点岩盤の卓越周期とほぼ同じ範囲にある可能性があり、共振現象によってダムの安定性がそこなわれる危険性がある。したがってアーチダムの固有周期、強震がダムに作用した場合の減衰性およびダム地点岩盤の卓越周期、最大加速度を究明することがアーチダムの地震に対する安定性を検討する場合の重要な問題である。問題解決の手がかりとしてまずダム地点の地震の特性を調べるために重要なダムの基礎に地震計を備えつけ、岩盤地帯の地震度を調べることが上椎葉ダム以後さかんに行なわれるようになった。また、アーチダムの固有周期、振動性状などは振動模型実験あるいは実物ダムについての実験、実測技術の進歩につれて逐次高い精度のものがえられるようになり、これら諸資料からアナログコ

写真—6.25 二津野ダム
(高さ 76 m, アーチ式, 十津川・1962 年完成)



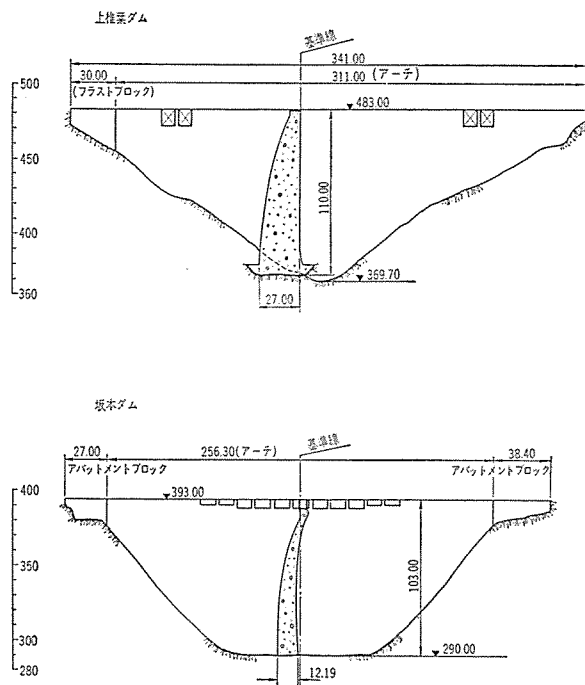
ンピューターなどによって地震時にダムに生ずる動荷重による応力の算出が可能になってアーチダムの耐震性の検討がいっそう正確に行なわれるようになってきた。

ダムの形状については、初期のアーチダムは主として本体そのものの応力度の観点から各アーチ要素の働きを有効に利用するために十分な中心角をもたせた定角形とするか、または岩盤が悪い場合はアバットメントの増厚および荷重を下向きにする目的で定半径

形とするかのいずれかで、一般に簡単な形状をもっていた。しかし、現在では定角形や定半径形にこだわらず、地形条件あるいは洪水条件にあわせて、多心円アーチ、変厚アーチ、またはフィレットアーチなどを適宜用い、形もいわゆるドーム型としてダムの応力状態、安定状態を向上させている。1961 年（昭和 36 年）に富山県が完成した高さ 83.5 m の室牧ダムはわが国ではじめての変厚アーチダムである。また同じ年に建設省が広瀬川支流の大倉川に建設した大倉ダムは非対称でかつ幅の広い谷に対処するため 写真—6.26 に示すように中央に人工アバットメントを設計、ダブルアーチの設計とした。

図—6.70 は電源開発がほぼ完成した池原ダム（長さ 111m、長さ 460 m）の形状を示すものであるが、この例は従来アーチダムが不適当とされていた谷幅の広い地点において、頂部アーチを厚くしアーチ要素に特殊四心形状を用いるなど種々工夫をこらすことによ

図—6.69 初期のアーチダムと最近のアーチダムの比較



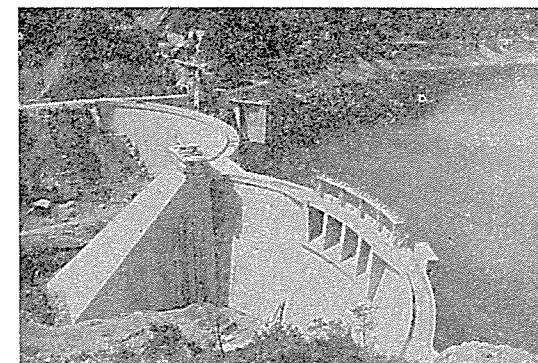
て、経済的にアーチダムを建設することに成功したものである。

アーチダムの厚さの決定に深い関係のある、ダムコンクリートの許容応力、またはダムの設計最大応力は表—4.8 に見るダムコンクリートの著しい進歩につれて向上し、上椎葉ダムにおける 50 kg/cm^2 から坂本ダムの 90 kg/cm^2 まで高められ 写真—4.27 の坂本ダムの例に示すように薄い経済的な設計となってきた。

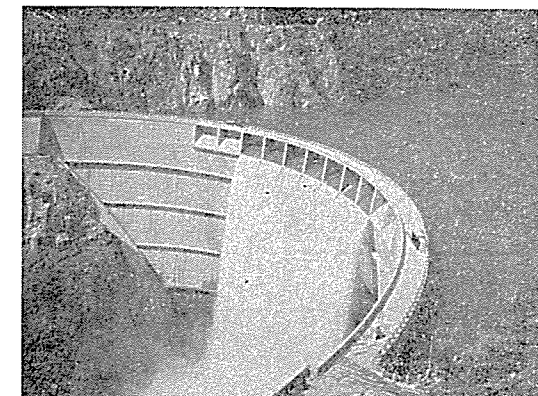
さらに、アバットメントの地山の安定は、昔から重要な問題とされていたが 1959 年（昭和 34 年）フランスのマルパッセダム（Malpasset、高さ 60 m）がアバットメント地山のすべりによって崩壊して以来、わが国でもとくに重大な問題としてとりあげられ、いまやアーチダムの一番重要な問題点となってきた。

岩盤の力学的性質は、節理の存在や地下水の影響から非常に複雑なものであって、いまだはっきりと解明されない点が多いが、岩盤の変形性や強度に関して、最近種々調査研究され、貴重なデータがつつぎとえられている。関西電力が 1963 年（昭和 38 年）に完成したわが国最高を誇る高さ 186 m の黒部川第四ダム（写真—6.29）の工事においては、

写真—6.26 大倉ダブルアーチダム



写真—6.27 坂本アーチダム
（高さ 103 m、アーチ式、北山川・1962 年完成）



意外に悪い基礎岩盤に遭遇し、その変形性および強度に関して、世界に例を見ない大がかりな現地試験が行なわれ注目を集めた。一方、不良岩盤の処理工法は、岩盤試験、岩盤模型実験などの助けをかりて、地点地点の特質に応じいろいろ工夫されてされている。黒部

図-6.70 池 原 ダ ム

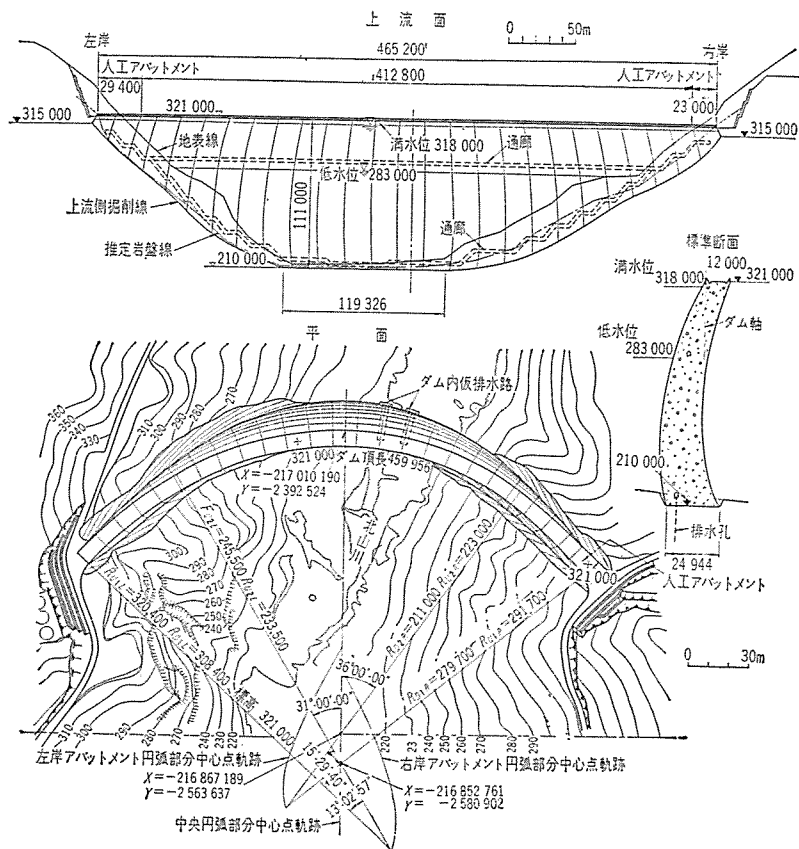


写真-6.28 アーチ ダムの振動模型実験
(池原ダム, 電源開発土木試験所)

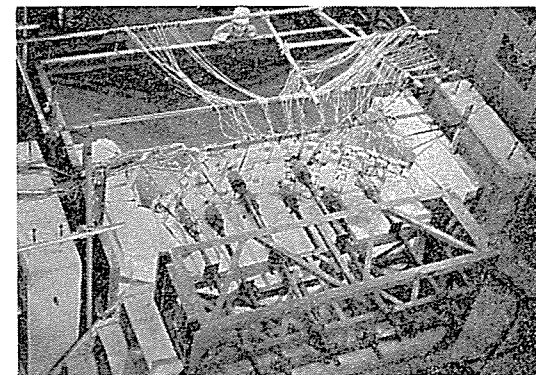
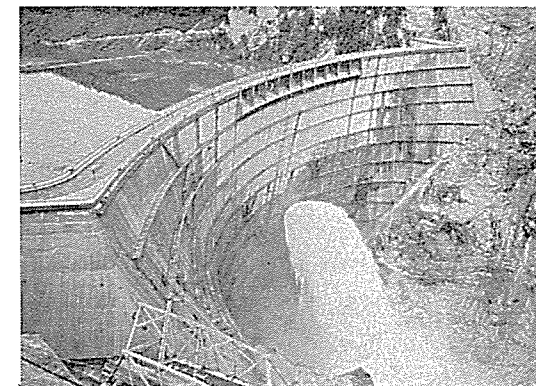


写真-6.29 黒部川第四ダム
(高さ 186 m, アーチ式, 黒部川・1963 年完成)
(日本ダム協会提供)

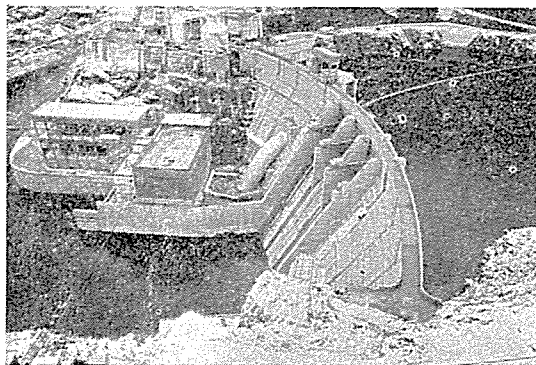


川第四ダムでは不良岩盤が 6 万 m^3 もコンクリートによって置き換えられ、また建設省の川俣ダムでは推力伝達壁を岩盤中に設け、この壁と地山を高張力鋼棒によって締めつけるプレストレス工法が採用され、アーチダム基礎の改良、補強の工法に進歩をもたらしたが、同時にこれらの補強の工事費はダム本体の工事費に匹敵するほど大きいことも教えた。

最近アーチダムをわが国の自然条件に適合させるために新しく工夫がこらされたダム形式としてセミアーチダムがある。これはアーチダムの築造に適するような狭い谷において基礎岩盤があまり堅硬でなく、また洪水が多量でこれの処理に当たって適当でしかも経済的な方法が考えられないような場合に、アーチ作用を利用しながら岩盤の安定と洪水の処理を可能にしようとする点が特徴である。

電源開発が 1964 年に只見川上流部に建設した高さ 83 m の大鳥セミアーチダムは、この形式によるもので写真-6.30 に示すように、その断面形状は従来の重力ダムに比較して薄く、また平面形状はアーチダムに比して曲率が小さい。ダムに作用する水圧は湛水

写真—6.30 大 鳥 ダ ム
(高さ 83 m, セミアーチ式, 只見川・1964 年完成)



アーチ ダムの応力計算は上椎葉ダム以降すべてアメリカ 開拓局の試算荷重法 (Trial Load Method) によって行なわれるのが普通であるが, これはぼう大な計算であって, 初期のアーチ ダム設計時におけるように人間によってこれを行なう場合には, 熟練した技術者が行なっても 3 人で 3 カ月にかかるといわれているほど長い期間を必要とするものであった。1959 年 (昭和 34 年) 頃よりこの計算を電子計算機によってきわめて短時日に行なうことに成功して以来, きわめて能率よく設計検討ができるようになって, 大いにアーチダム発展の助けとなった (写真—6.31)。一方模型実験によってダムの応力を検討する 方法 は, 計算によって把握しがたい複雑なアーチ ダムの応力状態を定性的に求めることができる利点があるので, 佐々並川ダム, 鳴子ダムなどで用いられて以来ほとんどのアーチ ダムの設計において計算と併用されている。

4.11 フィルタイプ ダムの復活

重力ダムにかわる 主役としてアーチ ダムとならんで近年ますますその重要性を加えてきたのは,

と継目グラウトの時期を適当に選ぶことによって, 片持ばり要素がその大部分を負担するようにした。その結果アーチ要素に受け持たれる 水圧 は, 左右両岸アバットメントの安定上許される範囲内に収めることができるとともにアーチ要素と片持ばり要素に働く応力を均等化させたものである。

写真—6.31 模型によるアーチ ダムの応力測定
(坂本ダム, 電源開発土木試験所)



フィルタイプ ダムである。

アーチ ダムは地形および地質条件の良い場合にはきわめて経済的な形式であるが, その構造特性から基礎として堅硬かつマッシブな岩盤が必要である。しかし河川の開発が進むにつれて, このような有利な地点はしだいに少なくなり, 基礎処理費の増大はアーチダムの経済性を著しく低下させる傾向を生じた。

一方, パワー ショベル, ダンプトラック, ブルドーザ, キャリオールなどの重土工機械の発達, 短期間に大量の土石を掘削, 運搬することを可能にし, かつこれによって工事単価も大幅に減少したので, フィルタイプ ダムが最も経済的なダム形式である場合が多くなってきた。

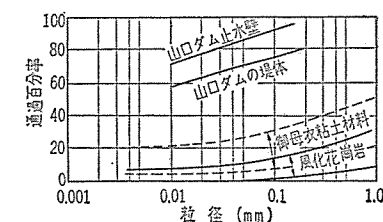
日本における最も古いダム形式はアース ダム, すなわちフィルタイプ ダムであったが明治後期にコンクリート ダムが出現して以来, 大規模なダムはもっぱらコンクリート造りとなり, アース ダムはわずかに小規模なダム, とくにかんがい用ダムとしてつくられてきたことはすでに述べたとおりである。

これらのアース ダムの設計施工は経験によって行なわれ, このやりかたは大正末期に村山貯水池の山口ダムが作られるまで続いた。山口ダムにおいて初めて近代的施工が行なわれたものでダム材料の土について仕様が制定されているのは注目すべきことといえる。この仕様によれば, 土は粘土分のものでなければならないとされ, わざわざ遠くから粘土が運搬されたものであった (図—6.71)。

欧米諸国における 近代的な大規模アースダム理論の基本は 1933 年 (昭和 8 年) プロクター (Proctor) によって土の最適含水比の理論が確立され, またテルツァギ (Terzaghi) が水の条件を加えた圧密理論を発表し, さらにアッターベルグ (Atterberg) が水の条件から土を分類するにおよんで大体できあがったといつてよいであろう。

わが国にも間もなくプロクターの理論は導入されたが多雨多湿なわが国においては粘性土の自然含水比が一般に高く最適含水比施工を実地に適用することがきわめて困難であっ

図—6.71 フィルタイプ ダム土質材料の粒度
(山口ダムと御母衣ダムとの比較)

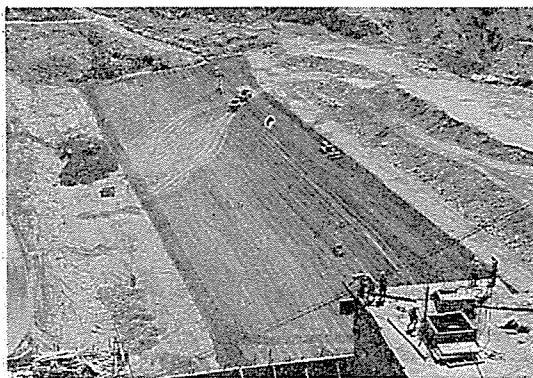


かって次第に小粒のものになり上流面ではシルトになって、ダム全体として固く締めおどろくべき水密性を持っていること、またこれらのダムが数千年の年月に耐えていることを発見したことに由来するといわれている。

電源開発が庄川に建設し 1960 年（昭和 35 年）完成した御母衣ダム（図—6.72）はこの形状によるものであり、高さは 131 m、長さ 405 m、体積は 800 万 m^3 に達するもので図—6.72 に示すようにダム内部の薄い土質しゃ水壁は下流ロックフィルによってささえられ、さらに上流ロックフィルによって保護されている。また、上下流のロックフィルとしゃ水壁の間には厚さ 5~10 m 程度の厚さの砂利、および砂からなる中間層を設けフィルター作用および力の伝達を行なわせるものである。

御母衣ダム建設にあたっては、しゃ水壁の土質材料は種々の調査の結果ダム地点付近に豊富にある風化カコウ岩を粘土に混ぜたものを使用することにした。このような土質材料を使用することにより初めて大型ローラ（20 t シープスフート ローラ）を用いて最適含水比付近で締め固めることが可能となり、わが国のいままでのアースダムとは全く異なる大きなせん断力をもつ土質しゃ水壁を作ることができたといえるであろう（写真—6.33）。

写真—6.33 シャ水壁の締め固め
（工事中の御母衣ダム）



し、佐久間ダム以来急速に発達したわが国の重土工機械を用いる近代土木施工技術はここでもいかに発揮され、御母衣ダムは着工後わずか 3 年間で完成されたのである。

御母衣ダムの成功は、この形式のダムが大規模なフィルタイプダムとして、わが国に

また、堤体の大部分をしめる 700 万 m^3 におよぶロック材料は、大発破およびベンチカット法によって採取され（写真—6.34）、4.5 m^3 ショベル 3 台と 22 t ダンプトラック 25 台によって能率よく盛立箇所へ運搬された。

ダム建設にはこのほかに D-9 型ブルドーザ、D-8 型ブルドーザなど数十台を使用

においても経済的に作れることを実証し、以降岩洞ダム（高さ 40 m、北上川・農林省）、牧尾ダム（高さ 106 m、木曾川・愛知用水公団）、大白川ダム（高さ 95 m、庄川・電源開発）などの大型ロックフィルダムが、すべてこの形式によって続々と建設されている（図—6.73）。

写真—6.34 ロック材料採取のための大発破
（御母衣ダム）



4.12 むすび（これからのダム建設）

わが国のダムが主として発電を目的として発達してきたことはすでに述べたとおりであるが、これからのダム建設はどのようなになるであろうか。

まず水力発電については、現在までに約 1400 万 kW、624 億 kWh の開発を終っているが、わが国の包蔵水力は河川流量および地勢から理論的に算出すれば実に 6000 億 kWh ともいわれ、このうち具体性のある未開発のものだけでも 1960 年（昭和 35 年）に行なわれた通産省の調査、いわゆる第 4 次水調によれば約 2200 万 kW、750 億 kWh にもおよぶ。これには低落差水力地点、純揚水地点が含まれていないので上記未開発包蔵水力はさらに増え、理論包蔵水力からみてもわが国の水力開発はやとその緒についたといえるであろう。

ただし、発電コストの低い有利な地点はすでに開発されて残り少なく、一方残された地点は水力技術の目ざましい進歩発展により工事の技術面的問題が解決しても、他種水利権補償問題などの社会的条件による建設費の値上りが原因となって水力開発をはばむ例が多い。一方火力発電所の建設費は技術の進歩により大幅に減少し、また重油の国際価格の低落により、水力発電はこれまでのように安価なエネルギーの供給源ではなくなった。

しかし、このことは水力開発を今後行なう必要がなくなったことを意味するものではな

図-6.73 わが国のロックフィル ダムの断面

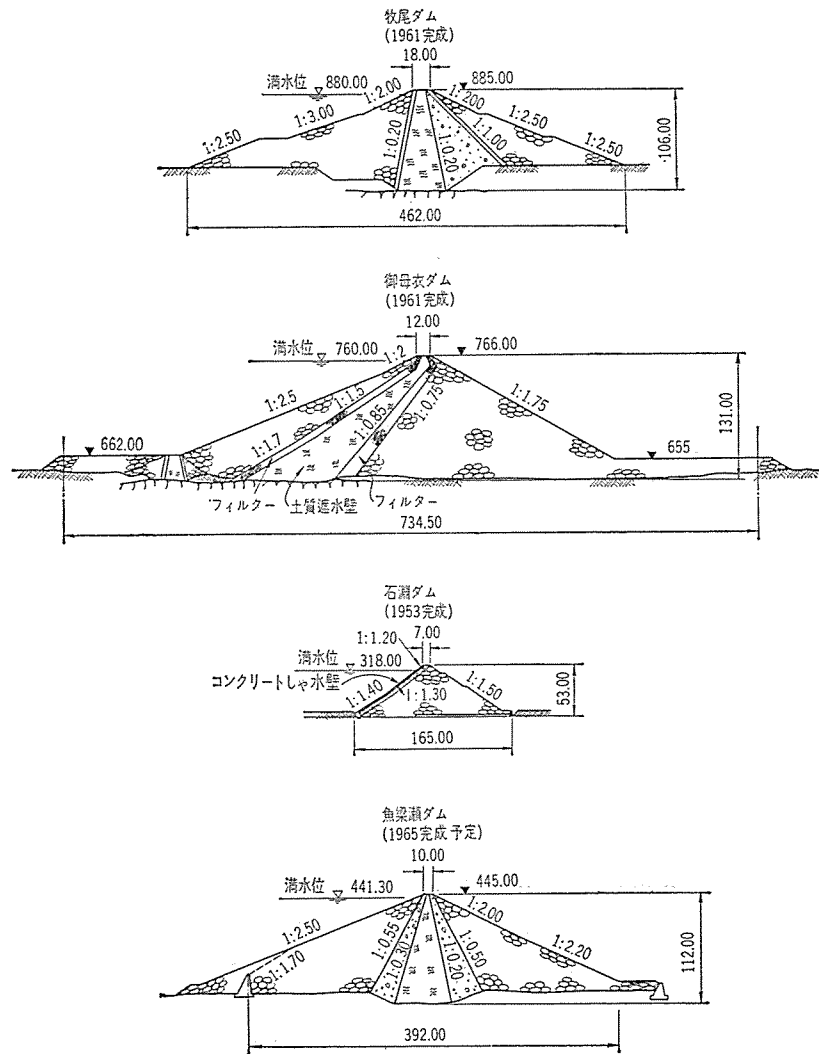
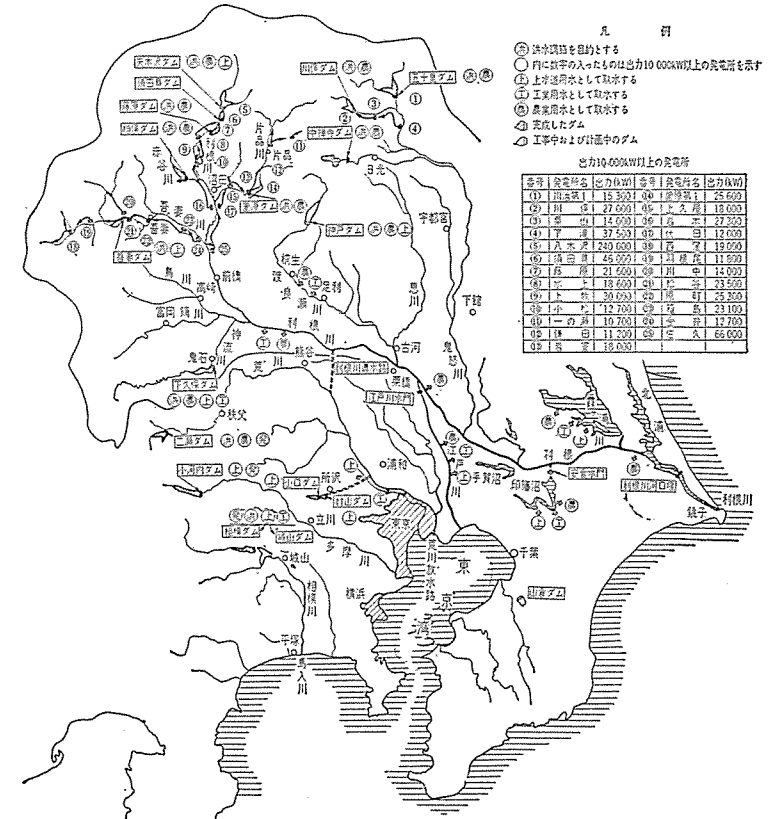


図-6.74 利根川一貫開発計画 (総合的な水資源の利用)



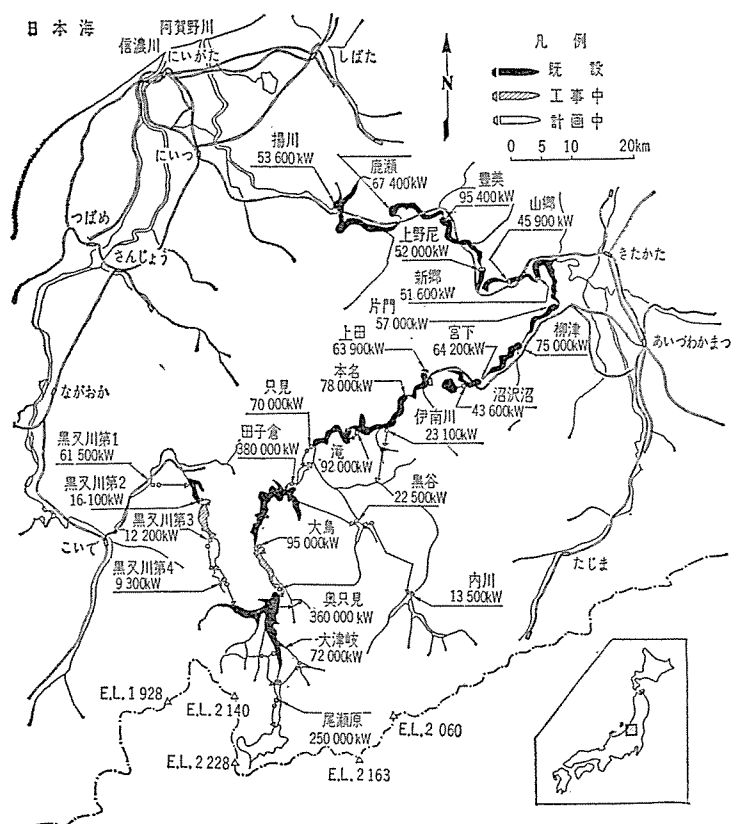
い。すなわち、水力発電には増大する電力需要において、新鋭火力、ひきつづき原子力発電所と組み合わせて主としてピーク発電を担当する重要な使命を新しく与えられたもので、この新事態に対処するために今後つくられる水力発電所はすべて大規模なダムによる貯水池式発電所、および揚水式発電所になるものと考えられる。

戦後、たびかきなる洪水災害の発生がきっかけとなって治水対策が根本的に再検討された結果、わが国の洪水の特徴として最大洪水量は大きいがそれに比して1回の出水による流出総量は少ないので、長大な河川堤防をかさ上げして洪水を防ぐよりはダムによって洪

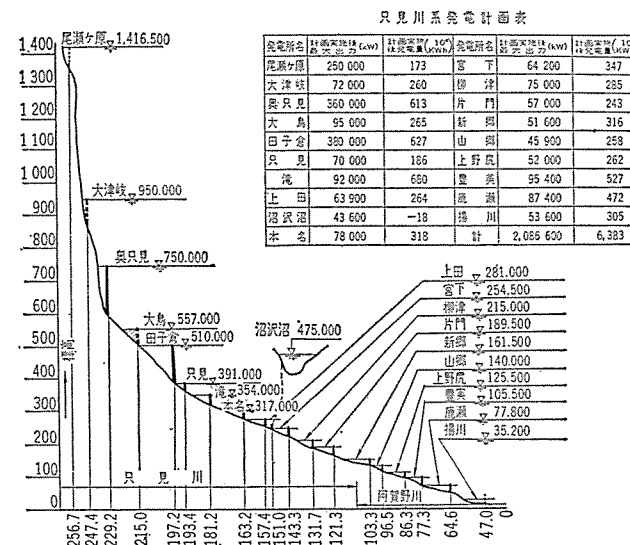
水を一時的に貯溜し、流量を調節する方法が有利であることが認められて、この方面からダムが必要さが叫ばれ、すでに各地に洪水調節を主目的としたダムが全国各地につぎつぎと作られている。また、人口の都市集中化、産業の急速な発展にともない近年とくに上水道、工業用水などの需要が激増し、すでに水の絶対量が不足しているところもある。その抜本的な対策としては、ダムを築造して豊水期の水を貯溜して、渇水期に放水してこれを使用する以外に方法はなく、この目的のためのダム建設も必要となってきた。

図—6.74 および 図—6.75 はそれぞれ利根川、および只見川の開発計画を示すものであ

図—6.75 (a) 只見川一貫開発計画 (電力を主とした水資源の利用)



図—6.75 (b) 只見川一貫開発計画



るが、前者は多目的開発、後者は電力のみを対象としている違いはあっても、河川のもつ水資源を有効に開発するためには、日本各地の河川に上流から河口にいたるまで階段状にダムを建設する必要があるといえるであろう。

最近わが国のダム技術がすぐれていることは諸外国も認めることとなり、とくに東南アジア、アフリカ、中近東、南米などの低開発国の要請により、わが国のダム技術がその国土開発の一翼をになって活躍し始めた。わが国ダム技術のこれらの国々への進出は技術輸出のみならず、これにより発電機器、セメント、鉄鋼、土木機械などの資材輸出の道も開けるのでわが国の国際収支の点からも好ましく、国際情勢の推移からみても将来有望と考えられる。

このように国内においてもまた国外においてもダム建設は今後ますますさかんに行なわれることは確実である。この社会的要請に答えるためには、ダム建設条件の多様化に伴ない新しく生じた技術的問題の解決をめざして、よりいっそう研さんに努めなければならないことはもちろんであるが、ダム建設のように自然を改良することにより人類の福祉に貢献することを職務とするわれわれダム技術者はこの際、より広い社会的、国際的視野をも

つように努力することが一段と望まれるものである。

参 考 資 料

- 1) 宮 地 線 建 設 1916
- 2) 利 根 川 道 路 橋 1921
- 3) 鉄道技術研究所試作 1934
- 4) 大阪駅沈下対策 1952
- 5) 山 田 線 建 設 1930
- 6) 中央線多摩川橋梁 1932
- 7) 那波光雄：佐伯線津久見川橋梁工事に就て，帝国鉄道協会々報 16-5 p. 389～390, 1915.10
- 8) 鉄道技術発達史：施設編(Ⅲ) p. 1760, 1951.1
- 9) 同 上：p. 1658, 1951.1
- 10) 同 上：p. 1793, 1951.1
- 11) 松尾新一郎：土と基礎の新工法，p. 186, 1952.2
- 12) 庄野 勝・小川充郎：土と基礎特集号 4，p. 44, 1961.1
- 13) 石井靖丸：軟弱地盤工法，p. 88, 1959
- 14) 青柳晴一・山根孟・竹下春見：土と基礎 1-1，p. 17, 1953.5
- 15) 水野組：ペーパードレーン工法（パンフレット）p. 9, 1964.1
- 16) 名神高速道路大垣試験盛土工事第 4 次報告書，p. 25, 1963.3
- 17) 渡辺 隆：パイプフロートション工法に関する研究，p. 2, 1962
- 18) 橋内徳治：土と基礎 3-8，p. 31, 1955.1
- 19) 森 博・鷹野昭治：土と基礎 1-3，p. 38, 1953.10
- 20) 関谷健治：国鉄第 27 回土木工事施工研究会記録，p. 122, 1960.2
- 21) 鉄道技術研究所速報 61-155，p. 5, 1961.5
- 22) 安倉安範・岡崎楠雄：鉄道土木 5-8，p. 10, 1963.8
- 23) 鉄道建設，1868
- 24) 横浜・神奈川間鉄道建設
- 25) 敦賀線建設，1882
- 26) 山手線建設，1884
- 27) 上越線建設，1919
- 28) 淀川改修
- 29) 中利根川改修，1921
- 30) 小樽埋立，1915
- 31) 大野調整池
- 32) 久保 茂：大野調整池工事報告，土木学会誌 1-3, 1915.6
- 33) 小野基樹：竣工せる山口貯水池，水道協会雑誌 11, 1934.4
- 34) 菰田淳夫・大根義男：東郷アースダム工事，土木施工 3-11, 1962.11

- 35) 谷口敏雄：地すべり調査と対策，p. 7, 1963
- 36) 渡辺 貫：地質工学，p. 256, 1938
- 37) 鉄道省土質調査委員会報告 3，p. 104, 1934.7
- 38) 渡辺 貫：地質工学，p. 246, 1938
- 39) 高野秀夫：地すべりと防止工法，p. 241, 1960
- 40) 池田政治：国鉄第 23 回土木工事施工研究会記録，p. 23, 1955
- 41) 高野秀夫：地すべりと防止工法，p. 237, 1960
- 42) 谷口敏雄：地すべり調査と対策，p. 148, 1963
- 43) 山田剛二・杉野 勇：土と基礎特集号 4，p. 62, 1961.1
- 44) 地盤沈下対策都市協議会：沈みゆく工業都市（パンフレット），1962.1
- 45) 蔵田延男：地盤沈下と地下水開発，p. 38, 1961
- 46) 青野 勇：鉄道時報 1497，p. 8, 1928.6
- 47) 鉄道省東京建設事務所報 27 参考資料，p. 1, 1929
- 48) 松尾春雄：土木学会誌 23-12，p. 1359, 1937.12
- 49) 鉄技発：木ぐい使用 p. 1760, 1870.5
- 50) コンクリートぐい使用東京難波橋，土木学会誌 1-4, 1915.4
- 51) 宮本武之輔：小名木川閘門工事計画概要，土木学会誌 7-6, 1921.12
- 52) ペデスタルぐい試験，土木学会誌 3-2, 1915.4
- 53) 土と基礎の新工法，土質工学会，1960
- 54) 中島 武：新しい基礎工法，1961
- 55) 平山復二郎：横浜港にて移動式空気潜函工使用「地底に基礎を掘る」，1902～1905
- 56) 坂出鳴海：横浜岸壁工事に使用せし Phneumatic Caisson（潜水函）に就て，工学会誌 271, 1905.2
- 57) 韓国清江江架橋工事報告，帝国鉄道協会々報 11-3, 1910.6
- 58) 名四国道木曽川橋，日本道路会議座談会，1963
- 59) 若戸橋工事報告書，土木学会，1963
- 60) 鉄技発：レンガ井筒使用，東海道本線大津京都間，p. 1760, 1879
- 61) 那波光雄：佐伯線津久見川橋梁工事に就て，帝国鉄道協会々報 16-5, 1871.10
- 62) 満鉄四平衛：井筒の水射式沈下工法，土木工学 8-2, 1922
- 63) 二つの新しき井筒沈下工法，土木学会誌 12-6, 1926.12
- 64) 千歳橋，土と基礎，1957
- 65) 護岸工に鉄筋コンクリート矢板の応用，帝国鉄道協会々報 16-5, 1915.10
- 66) 釘宮 盤：シートパイル施工法に就て，第 1 回橋梁会議記録，鉄道省建設局編，1926.14
- 67) 宮本武之輔：鋼矢板の話（信濃川補修メモ），土木建築雑誌 9-11.12, 1930.11
- 68) 大川一郎：青森駅第 2 渡船場岸壁新設工事に就て，第 4 回改良講演会記録，鉄道省工務局編，1929.7
- 69) 遠武勇熊：切開式地下鉄道工事の内鉄坑引抜機に就て，土木建築雑誌 12-8, 1933.3

- 70) 鋼矢板物揚場岸壁の実施例, 工学 203.204, 1931.7
- 71) 土と基礎の新工法, 土質工学会, 1960
- 72) 多菊忠道: 熱海線新崎橋梁橋脚外2箇所セメント注入工事報告, 鉄道省熱海建設事務所, 鉄道工事現場実績 2, 鉄道建設局編, 1924.9
- 73) 電気固結・国道1号線熱田, 1951
- 74) 清原・中村: 基礎杭の手曳打と機械打との支技力の比較, 鉄道省盛岡建設事務所建設工事現場業績 249, 1929
- 75) トンネルと掘削工法, 土木学会, 1935
- 76) 丹那ずい道工事誌, 鉄道省熱海建設事務所, 1939.6
- 77) 北陸ずい道工事誌, 国鉄岐阜工事局, 1963.3
- 78) 能勢線逢神坂曾根ずい道工事誌, 国鉄岐阜工事局, 1960.3
- 79) 神岡線第4中山ずい道工事誌, 国鉄岐阜工事局, 1963.3
- 80) トンネルの話, 岩波書店, 1939.6
- 81) トンネル, オーム社, 1961.5
- 82) 運輸省下関地方施設部, 関門ずい道: 土木学会, 1949.8
- 83) 関門トンネル工事誌編さん委員会: 関門トンネル工事誌, 土木学会, 1961.8
- 84) トンネル施工法, 山海堂, 1963.11
- 85) 飯田線中部天竜大岡間線路付替工事誌, 国鉄, 飯田線工事事務所, 1956.8
- 86) トンネル機械化
- 87) 上野英三郎・吉光平一: 溜池築造法, 1919
- 88) C.F. Courtney: Masonry Dams, 1897
- 89) Henney: Transaction of A.S.C.E.
- 90) 伊藤令二: 堰堤工学, 1944
- 91) 相沢時正: 堰堤と擁壁, 1913
- 92) 琵琶湖治水会: 琵琶湖治水沿革誌, 1925
- 93) U.S. Bureau of Reclamation: Dams and Control Works, 1938
- 94) 通産省公益事業局水力課: 日本発電用高堰堤要覧, 1954
- 95) 宮崎林造: 大同電力株式会社沿革史, 大同電力KK, 1941
- 96) 物部長穂: 貯水池重力堰堤の特性並びにその合理的設計法, 土木学会誌, 11—5, 1925
- 97) 物部長穂: 耐震扶壁堰堤の理論, 地震研究所所報第5号, 1926
- 98) 土木学会: 震災報告, 1913
- 99) 石井頌一郎: 小牧発電所工事報告, 土木学会誌, 18—4, 1932
- 100) 田口信治: 祖山発電所, 1931
- 101) 山本 格: 塚原ダムについて, 発電水力協会誌, 1940
- 102) 山本 格: 塚原ダムに使用したマスコンセメント, 発電水力協会誌, 1951
- 103) 日本産業再建技術協会: 朝鮮の電力
- 104) 土木学会編: 土木工学の概観, 日本學術振興会刊, 1950

- 105) 日本放送電KK: 日本放送電社史, 1954
- 106) 関西電力KK: 丸山発電所工事誌土木編, 1956
- 107) 永田 年: 大河川における締切りと排水設備, 土木学会誌, 47—7, 1962
- 108) 電源開発KK: 電源開発株式会社 10 年史, 1963
- 109) 吉越盛次: 混和剤としてのフライアッシュに関する研究, 土木学会論文集第31巻, 1955
- 110) 国分・三村・上野・細谷: フライアッシュのペーストによる使用法に関する研究, 土木学会論文集 4-3, 1960
- 111) 三村・上野・細谷: ロッドミルによる製砂方法に関する研究, 土木学会論文集 3—1, 1959
- 112) 永田 年: ダム コンクリートの品質管理について, 土木学会論文集第84号, 1962
- 113) 中部電力KK: 井川発電所工事誌, 1961
- 114) Symposium on Arch Dams, A.S.C.E. 1957
- 115) 九州電力KK: 上椎葉ダムの計画と施工, 1957
- 116) 東京電力アーチダム委員会: アーチダム実験報告, 1955
- 117) 関西電力KK: 殿山ダム工事誌, 1959
- 118) 宮崎 明: 鳴子アーチダム工事報告: 土木学会誌, 44—7, 1959
- 119) 岡本舜三: 地震工学講座「震害」, 土木学会誌, 48—7, 1963
- 120) 吉越盛次: 地震工学講座「ダム」, 土木学会誌, 48—10, 1963
- 121) 電源開発KK編: 坂本アーチダム, 土木学会, 1963
- 122) 野瀬正儀: 岩盤力学講座「岩盤試験」, 土木学会誌 48—10, 1964
- 123) 新井義輔: 菊池 昭: 二津野ダムの設計(主として模型実験について), 発電水力第46巻, 1961
- 124) 吉越盛次: ロックフィルダムについて, 発電水力第50巻, 1961
- 125) 駒井・柴田: アーチダムの岩盤処理「川俣ダム」, 土木学会誌, 47—11, 1963
- 126) 高野 稔: アーチダムの基盤の安全性に対する実験的検討方法に関する研究, 土木学会論文集第48巻, 1963
- 127) 浅尾 格: 御母衣ダム, 発電水力第50巻, 1961