

報 文

欧米のアーチダムについて*

正 員 田 代 信 雄**

ARCH DAMS IN EUROPE AND THE UNITED STATES OF AMERICA

(JSCE Jan. 1954)

Nobuo Tashiro, C.E. Member

Synopsis This is a summarized report of the inspection tour to Europe and the United States of America. The present author spent about three months especially to inspect the arch dams in these areas, of which most of those constructed during the post-war period, to his surprise, are arch dams. The following is brief description of the dams in various countries in order he inspected—Italy, France, the United States of America, etc.

1. 欧米のアーチダムの概観

今回は欧米の水力特にアーチダムを約3ヶ月にわたり視察した。欧州では戦後に築造せられたダムは大半がアーチダムであるのに一驚した次第である。訪ねた順に各国の施設の概況を説明する。

イタリアは戦後多くの水力を開発しているが、なかでアーチダムと中空ダム及び地下発電所に特徴が認められる。アーチダムの設計に関しては応力解析には特に目新しい方法はないがモデルテストでは欧州の一權威である。近年築造のアーチダムは新しい形で非常に薄く谷の形を対称形とし、アバット周辺に接手を設けている。この設計には一部に反対もあるが一応成功しているように思う。

スイスは水力が唯一の資源であるので小国にかかわらず水力の大規模な開発を行つている。現在高さ 237 m のアーチダムを築造している。応力解析は Stucky 氏の発展させた Trial Load Method を主として用いている。特に基礎岩盤の弾性変形に対する調査では他国に先んじ応力計算にこれを考慮している。またダムや基礎の変形を長年にわたり測定しダムの基礎的研究に寄与している。

フランスの水力ではその設計に独創的な点が多い。アーチダムの設計に関する限り特に他国を凌駕していると思う。この設計は主として Coyne 氏の指導によつている。応力解析には Effective Arch 及び Diving Arch 法が主に用いられている。また一方モデルテストによりアーチダムの新分野を開拓しつつある。このほかに既設アーチダムの応力及び変形を実測して理論

の進展及び安全率の低下に寄与している。アーチの設計では新しい大胆な試みがあるが、洪水吐では発電所の屋上にスキージャンプ式余水路を試みている。コンクリートについては近年骨材の配合に Vallete 氏の発明になる不連続配合を用い 250 mm の骨材を使用しセメントの節約を計つている。ブロックの接手グラウトに再注入グラウト方式を用い人工冷却の費用を節減している。

米国もアーチダムの歴史は古いようであるがボールダーダム以来は理論及び施工の上では新しい進展は認められない。内務省開拓局で Trial Load Method を完成したが応力解析については必ずしも同法を用いていない。ダム技術については戦後我国に広く紹介せられているので割愛する。

以上ひととおりアーチダムに関する各国の状況を御伝えしたが、一方我国ではアーチダムは在来耐震性に対する不安及び重力ダムに比し応力解析の複雑な点、あるいは地形地質や洪水処理の困難さから敬遠せられたきらいがある。以下これらの問題につき欧米の最近の傾向を説明したい。

2. アーチダムの応力解析と安全率

アーチダムの応力解析は各国各様であるのは意外であつた。いずれもこれまでのモデルテストや実測の結果からみて理論的あるいは実用上に多少の欠点があるのも一因と思う。以下主な方法につき概説する。

Trial Load Method はドイツの Ritter 教授が始め、米国の開拓局が完成した理論である。水平アーチ及びカンチレバーの荷重分担及び基礎地盤の変形を考慮している点で理論的には最も進んでいる。しかしながら実測では垂直荷重はカンチレバーで支えられていると

* 依頼原稿

** 九州電力株式会社土木部次長

いうより垂直面のアーチ作用により支えられているという結果や、基礎地盤の弾性係数が実測困難のために普通はコンクリートのそれと同一と仮定しているのであるが、このような仮定に無理があるほかに実用上は多大の人手と時間を要し、しかも誤りの発見が困難であつたり、基礎掘鑿の結果当然起りうる設計変更に対しても容易に応力の検算ができかねるなど欠点もある。以上の理由からフランスではこの方法は歓迎されない。しかしながら実用上にはスイスのようにクラウンカンチレバーのみで荷重分割をなし、半径方向の調整のみとすれば以上の欠点を多少除き、しかも好結果が得られるように思う。今後は基礎の弾性係数の調査はなるべく実測して決定するのが望ましい。

Effective Arch 法はフランスで多く用いられている。カンチレバーの作用も基礎の変形も考慮しない水平アーチとして取扱う。しかもアーチの張応力を除いた内部アーチを考える法で理論的には欠点もあるが、薄いアーチでは実用上支障のない結果をあたえとせられている。またアーチが破壊する際にはこの結果に近い状態で起るという。

Diving Arch 法はフランスの Coyne 氏の発明で、Trial Load Method の矛盾である主応力がアバット附近では基礎に直角に近いという結果から出発した方法で、厚いアーチでは実用上支障のない結果をあたえとせられている。

次に設計荷重については重力ダムと多少異なる点は気温及び水温すなわち温度の影響がないことである。次に地震については軸と平行あるいは直角方向からの影響を考慮せねばならぬ。イタリア及び米国西部の地震地帯に多くのアーチダムがあるが未だに決定的な被害を受けた例はない。なお薄いアーチに対しては欧州ではコンクリートの湿潤による膨脹の影響をも考慮している。以上の要素はいずれも計算上同一程度の応力をあたえる。

アーチダムの安全率 アーチダムは欧州では安全率の非常に高い構造物と考えられている。イタリアのルミエダムのモデルテストでは安全率7の設計であるのに、破壊試験の結果は安全率12をあたえたと報告されている。一方重力ダムに対しては転倒に対する安全率を考えるとある意味では1であるといわれている。両者を比較してみると重力ダムは特に高い場合は安全率が不平均であるに対し、アーチダムは全体に平均していると思ふ。

在来欧米のアーチダムでは設計上の安全率は4~7が採用せられてきたが、近年フランスでは安全率を3とし許容圧応力を100 kg/cm²で設計し破壊強度300

kg/cm²としたものもあるようで、安全率は次第に低下せられる傾向にある。コンクリート張応力については圧応力の15%程度を許容する国と、フランスのごとく認めない国とある。

3. アーチダムの設計

アーチダムの谷の形については巾と高さの比が小さいほど有利と考えられてきた。近年は次第に巾の広い谷にもアーチダムが築造せられていてこの比が7のものもある。アーチの形については谷の形に応じ定半径型、定角型、あるいはその中間の型が普通に採用せられている。このほか谷の形としては対称的で勾配のほぼ一定な地点が理想的であるが、近年は各種の工夫により比較的不規則な谷に対しても適当な解決法が見出されている。例えば河底の狭谷部は栓として取扱ひ以上を規則的な谷としてアーチを設計するとか、兩岸の地形の不規則な部分に重力ダムあるいはスラストブロックを置きアーチに適する谷として取扱つている。なお近年イタリアではアーチを対称的にすることを理想として谷の地形を掘鑿により大体対称形にすると同時に、アバット周辺に接手を設けてアーチを対称形に築造している。

アーチダムの基礎 地質は特に良質岩盤が要求せられてきたが、過去の経験を通じ次第に最上とは云えぬ基礎に対しても、かなり高いアーチダムが築造せられつつある。弾性係数で云えばコンクリートの1/10~1/5程度では何等支障はない。フランスの例では二つの異なつた岩質の上にアーチダムを築造している例もあるが、両者の接触部でスロットジョイントを設け、自重による変形を完了した後に、これを填充している。また局部的に悪い地盤はコンクリートで置き換えこれを克服している。このように我国で在来考えられていたよりかなり悪い基礎に対しても、アーチダムの築造は可能のようである。基礎のグラウトは各国とも特に入念に行つているが、その効果についてはイタリアの Oberti 氏の実験では弾性係数を50%増加した例もある。

アーチダムの設計 アーチダムの設計の際に特に問題となるオーバーハング、アバットの形及び洪水吐につきひととおり解説する。オーバーハングと云うのはアーチの縦断面の一部が底巾より外に出つる状態であるが、V字谷で定角型のアーチでは一部に起る。ダムの上部が下流にオーバーハングしていることの得失は、(1)天端より洪水を溢流させる場合にはダム基礎よりできるだけ下流に水を落下させるに有利である。(2)水が空虚のときに下流より地震が揺らぐ場合にアーチ作用が揺らかないのでこれが有効となる。(3)そのほかにも多少スラストを下に向けることの利点もある。欠点

としては、(1)水圧のほかにも自重がアーチに働らくこと及び断面積が増すので不経済である。(2)施工上に多少の困難性があるのと、(3)各ブロックを同一レベルに打ち上げねばならぬ不便さがある。(4)オーバーハングがいちじるしいとコンクリートの収縮のためにアーチが収縮し、これがカンチレバーのクラックの原因となつた例もある。上流側へのオーバーハングはカンチレバーの上流側の張力を減ずるが、自重がアーチで支えられぬので安定上不利である。特に空虚時に温度上昇により上流側に膨脹変形するとその影響と重なり下流側にクラック発生の原因となる。すなわちアーチの下部では上流側にオーバーハングするのは有効であるが上部では小さい方がよい。以上のとおり設計上の事情により上下流ともに多少のオーバーハングはやむをえぬが、いちじるしいのは応力上経済上また施工の上でも不利のようである。

アーチのアバットの形状は各国で多少考え方が違っている。(1)フランスや米国でみる不等厚アーチでアバットで厚くする型、(2)スイスで多く用いるアーチのアバット附近で小さいファイレットをつけて拡げる型、(3)イタリアで近年用いている周辺接手の型等である。アバットは普通は半径方向に切るが、高い重力ダムで Shear Friction Factor に問題があるのに、薄いアーチダムにこれがない理由でもある。一般に兩岸の基礎は大体河心に平行であるから、半径方向のアバットは上流端を良質岩に深く切り込むことになり施工上からはできるだけ少なくしたい点でもある。米国防拓局がアバットの downstream 半分を半径方向に切り上流半分は角度をつけているのは応力上と施工上からみて適切な設計と思う。特にアーチダムの底部は Shear Friction Factor を考慮しそのアバットの方向を決定するのがよい。日本の在来のダム地点の基礎岩盤の状況からすれば普通はスイスのごとくファイレットをつけるのが無難のようである。

洪水吐 洪水の処理は重力ダムに比べ完成後も施工中にも多少困難がある。アーチダムで普通に採用せられる洪水吐は兩岸基礎に設けるトンネル式余水路、堤体中に設けた排水管及び、重力ダムと併用されたものはこれを溢流式としたのがある。このほかに多少趣向の違う方式に堤頂よりの自由落下あるいはスキージャンプ方式がある。これらにつき簡単に説明する。

堤頂の自由落下方式は最も経済的な設計である。落下部のエプロンをコンクリート張りとするのが普通である。欠点は洪水の落下の衝撃エネルギーがアーチ基礎の近くで吸収されるので、基礎岩盤の状況が特に良質であることが第一で、そのほか溢流量、落下高及び流水位の状態を考慮して決定せねばならぬ。下流水位

の低い場合には落下点にデフレクターを設け衝撃を緩和する法もある。次に頂溢流による堤体の振動の原因に2つあるが、溢流ナップ背面の真空による振動を防ぐには堤頂の適当な間隔に真空破壊用のピヤーを設ける必要がある。次に落下水の衝撃のために振動が起つた実例もあるようで、共鳴の現象その他により大小があるらしく、これの解明は今後の研究にまたねばならぬ。イタリアの高いアーチダムでは普通の洪水はトンネル余水路により排出し、異常洪水のみを堤頂より自由落下させる例がある。米国には大きな洪水量で、下流水位が高い場合に本方式を用いた例がある。

スキージャンプ方式はダム下に発電所を設ける場合に堤頂より発電所屋上にスキージャンプ台にた余水路を設ける。洪水は屋上より本河中に放出しそのエネルギーの一部を霧として減殺する。下流河床の洗掘は非常に少ないと云われている。また他の方式よりも経済的とも云われる。これはフランスの Coyne 氏により試みられてきた。放水口の形は下流の状況に応じ各種の形が設計せられている。本方式の欠点はアーチダムが厚い形となること、余水路の自重と水重を支えるために発電所の壁を丈夫な構造とせねばならぬ上に、アーチの変形を発電所に伝えぬために余水路に接手を設けねばならぬ。次に洪水の流下の際に発電所に多少振動を与えるようである。また下流に多くの霧が発生するので、電気設備の配置に考慮を要する。

4. 欧米のモデルテスト及び実測

アーチダムが高くかつ薄い場合とか、谷の形がいちじるしく非対称な場合などに、応力解析に平行してモデルテストにより応力を検討するのが普通である。これはアーチダムが非常に安全な構造物と考えられる反面に、高級な構造物でその応力解析が必ずしも完全と云いにくく、なお近年築造せられるアーチダムの中には谷の形やアーチの形状が複雑で、応力解析が計算のみでは、充分とは云えぬことなどの理由による。しかし、モデルの材料、荷重作用の方法及び応力の測定に困難な問題が多々ある。イタリアのモデルテストは、Oberti 氏により指導せられている。模型は大きく作り材料は特殊骨材のコンクリートなどを用い、荷重は水圧ジャッキを採用している。この方法はモデルの破壊試験を行うに便利と思う。これまでのイタリアの試験の結果ではアーチダムは安全率の高い構造物であることが証明せられている。フランスのモデルテストは比較的小さい模型で材料はゴムやプラスターが多く用いられている。荷重方法は水圧を用いているが、これは破壊試験が困難である。近年のフランスのアーチダム計画のなかには非常に独創的なのがあつてアーチ

ダムに応用とも言うべき計画で、この応力の推定は計算だけでは困難であるから、モデルにより確かめるほかに方法はない。このようにフランスのモデルテストでは応力の大体の傾向を知るのが第一の目的と思われる。モデルテストには多々困難な問題もあるが、今後一步前進するには我国においてもこれが整備の必要を痛感する。

アーチダムの実測 フランス及びスイスでは既設のダムにつき長年にわたり実測が行われている。これらの結果を総合すると大体下記のとおりである。(1)アーチダムの荷重は水平アーチのほかにかんてレバーが相当にこれを分担している。(2)アーチの応力に対し基礎の変形の影響もかなり大きい。アバットの応力が計算値よりも40%も小さくなつた例もある。これまでの基礎の弾性係数の実測ではその値はコンクリートの1/5~1/10の場合が多い。また地層の方向によりかなりの相違がある。層に平行な場合が垂直の場合に比し2倍以上大きい。(3)主応力の方向はアバットの近くでは下に傾き基礎に対し直角に近い。(4)貯水池が満される場合と空になる場合では変形はほぼ同一であるが歪や応力は両者の間に相違がある。貯水が急激に上昇する場合と緩慢の場合とでも同様な現象がある。(5)年間の温度変化によるダムの変形は水圧による変形と同じ程度に大きい影響がある。(6)地形は対称であつても応力は対称でなかつた。(7)応力を Effective Arch として求めた場合にその張力によるクラックは実際には認められなかつたが、破壊試験をする場合は Effective Arch の仮定に近い状態でクラックが発生した。以上の実測の結果からみて応力解析の理論はいずれも多少の欠点が認められる。基礎地盤の弾性変形の影響やコンクリートの可塑性に対してはなお問題が多いようである。

以上のとおりアーチダムの設計はその応力解析の結果を一目安として、モデルテストあるいは既設ダムの実測の結果を総合してなされるべきものと思う。

アーチダムの実測に関し在来のアーチの外形及び基礎の変位を測定すると、内部の状態を測定する場合がある。前者には兩岸の基準点からの三角測量、水準器による堤体の傾斜の測定、及び堤頂より底に到る下げ振りによる堤体の変位の測定がある。後者は堤体内に埋込んだ計器による内部の歪、温度、接手間隔及び湿潤を測定する。歪計には2種類あるが、米国では弦の伸縮による電気抵抗の変化を求める。欧州では弦の伸縮による振動数の変化を求める原理のものが用いられている。

5. アーチダムの施工

重力ダムと本質的な違いはないが、基礎の調査は特に入念になされるべきである。すなわち良質岩盤線の決定及び断層、シームの位置性質を充分に把握して工事中に設計が重大な変更を受けることのないようにすべきである。アーチダムの基礎は半径方向に切らねばならぬので特に底部においてはアーチアバットの下流端の位置の変更が上流端にいちじるしく影響して掘鑿段取にまで影響をあたえることがある。またシームの処理も重力ダムに比し入念になされるべきである。基礎の状態は原則的には良質であるべきではあるが場合によってはコンソリデーションを要することもある。その注入圧力が低い場合にはその効果は補助的なもので、より以上に期待すべきでない。止水グラウトは重力ダムと違い底巾も薄く監査廊を設けないので特に入念にすべきである。ダムのコンクリートに関しても重力ダムと本質的な相違はない。最大骨材は応力の状態より重力ダムより小さくとるべきことを主張する人もあるが、欧州の実例では連続配合では150mm、不連続配合では250mmを使用した例もある。

ダムブロックの寸法は15~12mでスロットジョイントあるいはグラウトジョイントが使用されている。最近では後者が多い。これは人工冷却法の発達及び接手の再注入グラウト方式の採用にともない後者が施工上有利となつたことによると思う。コンクリートの1リフト高は欧州では3~0.5mが使用せられている。自然冷却のみに頼るときは1.5m以下が普通であるが、人工冷却の際は1m以上を用いている。いずれにしてもコンクリートの温度調節と施工能力にかかると、両者を総合判断の上決定すべきである。

マスコンクリートの温度の調節は米国では人工冷却を行う場合が多いが、欧州では普通は自然冷却に待っている。アーチダムでは設計上は灌水前にブロックの温度を平均気温まで下げるのが普通であるが、自然冷却のみではこのような状態まで温度を下げることは不可能であるから、近年は通常のグラウトシステムのほかに再注入によるグラウトシステムを併用している。この方法によつて灌水数年後に完全冷却を待ち、さらにグラウトをすることになる。再注入方式のグラウトボックスは人造ゴムの蓋を持ち逆流困難のやうになつてゐる。米国籍人工冷却は割愛する。欧州式の再注入方式は米国籍に比し理論的に多少疑問があるが、経済的であるので今後我国にも応用されることと思う。接手の注入圧は米国が3kg/cm²程度であるに比し欧州は10kg/cm²で一般に基礎の注入圧力も欧州の方が多少は高い。

アーチダムの施工機械及び施工法は重力ダムと同様である。欧州では小規模のダムではタワークレーン及びデリックがコンクリート打設に用いられている。フランスのボールドでは多少目新しい工法が使用されている。アーチダムの幕板の位置の決定は兩岸に設けた2基準点より各ブロック及び各リフトごとの位置を計算上より求め、これを現地に移すのが普通でこの点は多少重力ダムより複雑である。

6. 結 論

以上欧米のアーチダム視察の結果を取りまとめ報告

したが、欧州では戦後は主としてダムはアーチダムを築造している、その設計は米国より一步前進しているように思えた。また米国はアーチダムの歴史は古いがボールドダム以来特に新しい進展は見られないようである。しかしダム施工の面ではその施工機械及び工法とも参考になる点が多々ある。

また各国とも独創を尊び新しい技術を生むことに努力している点は敬服に値すると思う。

(昭.28.11.10)

電解重合による土の新固結法*

正 員 工学博士 村 山 朔 郎**
准 員 三 瀬 貞***

A NEW CONSOLIDATION METHOD OF SOIL BY MEANS OF ELECTROLYTIC POLYMERISATION

(JSCE Jan. 1954)

Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member, Tadashi Mise, C.E. Assoc. Member

Synopsis This is the explanation of principle and a report of the experiments on the new method invented by the authors to consolidate soft clayey soil with hard material which is polymerised with ions induced by direct electric current.

By our method, some demerits in the Casagrande's method—which has been the only method to consolidate the clayey soil using the aluminium electrodes—can be removed.

要旨 本法は土中に直流を通電し、それによつて重合硬化性イオンを誘導し、その会合の結果生ずる硬化性物質をもつて、粘土質軟弱地盤の固結を図る目的で著者等の考案した方法であつて、本文はその原理と実験の報告である。本法によれば、従来粘土に対しては唯一の固結法とされてきたアルミニウム電極による電気化学的固結法(L. Casagrande 法)のいくらかの欠点は除去できるものと考えられる。

1. 緒 言

軟弱土を固結または硬化して、物理的、化学的に安定な地盤とすることは、地盤支持力の増加、あるいは地沈り、侵蝕、漏水の防止などの対策として大いに要望されるところである。現今実用、あるいは研究されている土の固結法としては、表-1のごときものがある。これらのうち、表面固結法は薬品を土と混合し、あるいは地面に撒布し、主として表面に近い部分の土を固結させる方法で、侵蝕防止、路面強化などに利用

表-1 土の固結法

施工方法	主 固 結 剤	適用土粒径
表面固結法	瀝青質材料, ソイルセメント, メタアクリル酸カルシウム, フルフルール樹脂, 珪酸ナトリウム	
内 部 固 結 法	セメント注入 セメント	約0.6 mm 以上 砂
	薬液注入 珪酸ナトリウム	約0.1 mm 以上 質 土
結 法	Al 電極による固結法 アルミニウム	約0.1~0.05 mm以上
	電解重合による固結法 珪酸ナトリウム その他	シルト質土, 粘土質土

される。内部固結法のうち、多く用いられているのは注入法であるが、注入法は比較的粒径の大きい土に適用範囲が限定され、粘土のごとき微粒土には適用できない。強化対策を特に必要とする粘土質軟弱土に対しては、いままでのところわづかに L. Casagrande の考案した電気化学的固結法¹⁾が存在するだけである。なおこの方法については著者等はさきにもその機構上の新たな事実を発見して、種々の土に対しても適用可能な改良法²⁾を発表したが、これらの方法は施工が簡単に行ける長所はあるけれども、いずれにしても固結範囲が帯状の比較的狭い範囲に限られ、その硬化強度は

* 関西工学連合講演会(昭.27.10.19), 土, 粉体, 粒体に関する連合講演会(昭.27.12.13)にて発表

** 京都大学教授, *** 京都大学助手, とともに工学部土木工学教室