

コンクリート・ダム特論 V

アーチダム

正 員 工学博士 垣 谷 正 道*

1. 序 説

高いダムの軸線をアーチ型に曲げて、アーチ作用を考慮に入れる設計方法は欧米では既に古くから常套的工法の一つとなつてきているが、我が国では未だそれ程発展していない。これは我が国に於て、アーチダムに対する安定性が確認されていないで、実施に至る勇断がなかつたものと云える。アーチダムはコンクリートダムとして最も理想型であるとか、或いは純粋なアーチダムで未だ決壊した例はないとか、聞かされており、従来でも研究は若干行われていたが、たまたま発電電会社が EBASCO より技術顧問を招いた時、彼等は耳川の上椎葉地点、及び天龍川の佐久間地点にアーチダムを計画するように勧告し、又第4回ダム会議や Savage 氏来朝等の影響を受けて、最近アーチダムによせる朝野の関心は急に深くなつたようである。

凡そダムの建設に當つて、その確実な安定性と耐久性を確保しながら、工費を出来るだけ節減することに努めるべきことは技術の本質から当然である。従来、ダムの厚さは厚い程安全であるという観念がよく聞かれた。この点は一面的に真理に違いないけれども、例えば高さ 100 m の重力ダムの底巾は、90 m 位に設計されるから、コンクリートマス内部に於ける応力状態は硬化熱や多数の継目の影響を考えると、余程厳格な工事仕様を実施しない限り、全く不明に近いと云つてよく、その安全度には相当に疑問の余地を残す。これに反して、適地点に薄いアーチダムを採用することが出来れば、建設費の節約が誠に大きいばかりでなく、硬化熱の対策は遙かに容易になり、且つ一層弾性的となつて設計上の諸仮定は一層真に近くなり易くなるから、ダムの安定性を一段とほつきり把握することが出来る訳である。

現今、諸事業に於て計画途上にあるダム地点の内にアーチダムを採用し得ると思われる地点も少くない。以て建設費を節減して、電力増強或いは洪水調節を促進する方策の一助となすべきである。

2. アーチダムに適する地点

* 財団法人電力技術研究所技師

ダムの計画地点に於て、地形はアーチダム可否決定の第一条件になることは明かである。由来、北アメリカの西部地方或いはヨーロッパのアルプス山系には U 字形の狭谷が多いが、我が国の地点の多くは V 字形或いは抛物線形である。天端長とダム高の比が小さい程アーチダムとして有利である点は常識的に判つている。天龍川の佐久間や鬼怒川の川俣等はこの比の値が 1.6 ~ 1.8 で地形的には極めて好条件を備えている。多くの V 字形地点では定角型アーチダムを設計すれば有利になる。計算の経験によると、比の値が 3.5 程度までは採算上採用することが出来る。併しこれは一般論であつて、細部に関する設計の努力により、例えばフランスの Mareges ダムのように上流側の底の工夫によつて広い谷でも極めて経済的で優れたアーチダムとした実例がある。その他 Ariel, Calderwood, Deadwood, Gibson, Hogan, Waterville 等のダムはいづれも比の値が 4 以上である。

アーチダムを採用することの出来る条件として必須なものはアバットに於ける岩質が強固な点であることは云うまでもない。我が国のダム地点の地質はアメリカの例と異なり複雑な場合が多いから、地質調査に特に念を入れることが最も重要なことの一つである。アバットの位置に出来るだけ多数の試掘坑を設けて肉眼で調べることは、ボーリング調査より重要視したい。粘土をかんだシーム等はアバットの滑動の心配があるから慎重に調べる必要がある。明確な断層がある地点は重力ダムであれば、Morris ダムに於けるような工法もあるけれども、如何に狭谷であつても構造作用の上から、アーチダムを採用すべきではない。

上椎葉地点の地形と地質はアーチダムに適しており、多数のボーリング調査が行われ、アバットには多数の試掘坑を設けて慎重な調査が行われた。

3. 設 計

(1) 形状の選定 ダムのアーチ作用をどの程度までとり入れるように設計するかは、相当程度まで主脳技術者の方針によつて選ぶことが出来る。両アバットの地形と地質の状況から、薄いアーチダムを選び得な

い場合もある。従来アメリカの開発局では、厚いアーチダム建設の優れた経験があるし、アメリカのその他の機関やイタリー等では極めて薄いアーチダムの例が多い。

我が国に於て、地形と地質等の調査の結果、高いアーチダムを選ぶことが出来るとされた場合に、この2つの傾向の内、いづれを選ぶべきかについて考えてみよう。尤も所謂純粋なアーチダムと云い、重力型アーチダムと云つても、これらは極めて観念的な呼称であつて、その中間は明確な区別をすることは出来ない。それ等の安全率に差異があるという類のものでもない。アーチダムはアーチ作用を確保することが根本問題となる。これにはダムを一体化しなければならぬ。ダムの一体化に対して障壁となる原因は、硬化熱の放散によつて温度降下を行うときの収縮の影響によるものが最も大きい。継目をグラウト注入か間隙填充によつて閉塞するまでに、ブロックコンクリートの収縮を殆んど行わせて了うことが必要である。硬化熱はダムが厚い程、放散しにくいから、それだけ冷却工が困難になる。設備の整つた高度の人工冷却によつて工事を促進するか、或いはダム厚を出来るだけ薄く設計して、自然冷却によつて工事を延引するかは、経済的採算の必要はあるが、現在の経済事情から判断すると、後者の方が工費が節約出来るものと考えられる。即ち、極めて一般的に云つて、現場事情が許せば、間隙継目工法を用いた薄いアーチダムを選ぶ方針をとる方がよい。薄いアーチダムの強みについては、アメリカの Stevenson Creek アーチダムの実験やイタリーの Corfino アーチダムに於て実証された。

アーチダムの形状は地形の影響を受けることが極めて大きく、一般には定角型を選ぶべきである。定半径型は形状が簡単であるが、明らかなU字形の谷を除いては、実用性に乏しいものとする。定角型の場合、地形に応じて更に半径を変化させたり、拋物線形に一部修正したりすれば一段と経済的になることもある。定角型の薄いアーチダムは谷の下方半径を小さくするから、よちれたような形状となり、中央部の鉛直断面では、天端附近が下流側に傾き、両アバット附近の鉛直断面は天端附近が逆に上流側に傾く傾向を持つ。中央部のこのような若干のオーバーハングは、力学的に有利な影響を持つから、寧ろ与える方がよからう。A.T. Larned は中央部のオーバーハングはダム高の5%程度とするのが、薄いアーチダムの工法として適当だと云つている。若干のオーバーハングは型枠工の問題に過ぎないのであつて、工事上の困難はない。併し、甚しいオーバーハングは工事中の地震による心配がある

から、注意を要する。両アバット附近の上流側へのオーバーハングについては、この部分は比較的上方に位置する片持梁であり、貯水位が低くなると、水圧を受けなくなるのが普通である。このとき、地震慣性力が上流向きに作用すると、アーチの他、特にこの片持梁は引張応力が大きくなるから、安定上好ましくない。従つて両アバット附近のオーバーハングは避ける方がよい。併し、アバットの上流側の岩盤が張り出している場合に、ダムコンクリートが丁度、この健岩の上に乗るようにすることが出来れば、オーバーハングによる上述のような不都合がなくなる。

一般的に云つて、V字形の谷に於ける薄い定角型アーチダムの中央鉛直断面はほぼ徳利に似た形になる。天端附近は薄く、それから若干急に厚くなり、中高の大部分はゆるやかに増厚し、底附近で急に厚くなる。天端は若干下流側に傾いた形となる。中心角を大きく保つことは、薄いアーチダムに於ては、最も大切な点である。理論上、アーチの最も経済的な中心角は通常 $140^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 程度で、極値は作用応力と荷重強度の比によつて異なる。極値附近の変化割合が小さいことと掘鑿、型枠の影響を考えれば、中心角はこの理論値より若干小さく選ぶ。天端の中心角は $120^{\circ} \sim 140^{\circ}$ とし、下方の各アーチでは、最小 100° を維持するように設計したい。

各アーチの寸法は設計水位、堆砂、及び温度変化をアーチに作用させて、表から簡単に応力を求めて決定する。この場合、各アーチの鉛直厚さは 1m として考え、選ぶアーチの数はダム高にもよるが、5~7個でよい。最大応力はダムの重要性、工事規模、コンクリートの設計によつて決められるが、このような計算の場合、普通、圧縮を 40kg/cm^2 、引張を 5kg/cm^2 程度とする。尚、天端巾の決定は通常の考え方でよい。

フランスの A. Coyne は Tignes ダムの設計以来、同氏が考案した dipping ring method という応力計算方法を実用している。同氏の寄せた手紙には、この方法を僅かばかりほのめかしている。ダム天端と同一標高にあり、且つダムの上流側に位置する水平直線を定め、此の直線を通る多数の平面でダムを切つて出来る斜めの各アーチについて応力を求める方法だと云い、これによると、上流側の引張応力の値の精度は悪いが、最大圧縮応力を求めるのには良い方法だと云つている。此の手紙から推定すると、アーチダムをこのように斜めに切ることは、アーチダムの主応力曲線の方向と近似的に一致するような方向の軸線を有するアーチを解析することを意味するから、荷重試算方法とは違つて、直ちに最大応力を求めることが出来るのだと思

う。本節で説明したような設計の段階では、此の方法は相当に有効になるのではないかと思われる。

前に述べた簡易設計は案として、多数作製し、これらについてダム形状に対する力学的判断、コンクリート容積、兩岸アバットの形状と地質、余水処理の方法等を考え併せて、比較検討する。この段階を余りおろそかにすると、事後の仕事に困難することが多い。この設計を単に計画設計にするか、或いは実施設計にするかはダムの重要性によるが、高さが30m程度以下であれば、使用コンクリートによる許容応力の検討を行つた後、そのまま施工計画に移してよいと思う。比較的高さの低い薄いダムに於て困難な点は、温度応力が大きくなる点である。温度応力が最も大きくなる冬期に貯水池が満水して、これらの応力が重畳されることは先づないと考えられるけれども、低くて薄いダムの継目填充或いは注入は気温が出来るだけその最低月平均値に近いときに行う配慮が必要である。所謂溪流に於ける低い砂防ダムのような場合には矩形断面の数個のアーチ片を重ね、一面を鉛直とし、他面を階段状に設計すれば、型枠工其の他の工事が簡単となり、極めて経済的である。砂防の立前から各アーチの工期をずらすことも出来る。この場合でも中心角の大きさについては配慮しなければならない。

(2) 温度変化 アーチダムの設計に考慮する荷重は、石工ダム設計基準によるものでよいが、これらの外、更に温度変化を考慮に入れなければならない。アーチ構造は温度変化により相当に大きい応力を生ずる。温度降下の場合に水压等による応力と重畳されて最大応力を生ずるから、一般には温度降下量を設計の考慮に入れる。コンクリート内部の温度は上下流面の気温と水温の影響を受けて曲線分布をなすが、応用力学的取扱いをする為には、一様分布或いは直線分布と近似的にみなして考える。温度降下の設計量は、継目を填充或いは注入するときの内部温度の値と其の後の月平均最低値との差を用いればよい。即ち、継目を填充或いは注入した時にアーチが成立したことを意味し、この時の内部温度を基準として温度変化を考慮すればよい。従つて前にもふれたように、継目を填充或いは注入する時期は、コンクリート内部の平均温度が出来るだけ低いときにすれば、それだけ好条件を提供することになる。極めて薄くて低いダムでは、ブロックの収縮を待つてから気温の最低時或いはそれ以後出来るだけこれに近い頃填充すべきであり、高いダムではブロックの収縮後3~4月頃継目の填充或いは注入を行うべきである。この場合気温の最低と内部平均値の最低には時間的に1~2月のずれがある。厚さ16m、中心線

半径48mの円形等厚アーチでは2次的にこの差は約1月半である。アーチダム工事に於ては、工期がこのような設計応力に影響を及ぼす。そこで重要性をもつアーチダムについては、工期、工事仕様に関連して適当な温度解析を行うべきである。アメリカの開発局では、温度変化の設計量の為、一般的な実験公式を發表している。

(3) 地震 従来我が国ではアーチダムは地震に対して弱いか、或いは少くとも疑問であると一般に考えられている。併し、外国では地震地帯の故に、重力型をすててアーチダムを選んだ実例もある。アーチダムは厚い重力ダムに比較すると、剛性が小さいことは明かであるが、振動論上では、端的に云つて剛体的振動を行う厚い構造物より弾性的振動を行う薄い構造物の方が有利である。さて実際にアーチダムが地震動によつて弾性振動をするか否かは、目下上椎葉地点の例について研究中であるけれども、地震動の卓越周期も計画ダムの固有周期も、設計と地点が異なる毎に違う場合があるから、一般的に結論することは困難であろう。併し、アーチダムは重力ダムより遙かに弾性振動を行い易いと云うことは明らかである。現在設計を行う場合には、重力ダムの場合と同じように、慣性力としての取扱を行う外はない。地震時最大応力を生ずるのは、満水時に下流向きの慣性力を考慮する場合である。谷の流れに直角な方向の慣性力を考慮するとき、荷重試算方法によつて半径方向の撓みと切線方向の撓みの調整を行えば上椎葉地点の例から作用応力は $\pm 4 \text{ kg/cm}^2$ 程度であつて、一般に考えられている程大きい引張応力は現われない。これはアーチダムの切線方向の抵抗成分が意外に大きい為であると考えられる。

地震波による両アバットの変位の位相差によつて生ずる応力については、断層はないものとして考え、ダム地点に於て今までに実測した最大振幅3mmを用いて荷重試算方法を行うと、応力の値は極めて小さい。

理論上、構造物の共振現象は特に警戒すべきものである。ダム地点の地震動記録によると、その様相は極めて複雑多岐であり、同一周期が連続することはないし、ダムの周辺は健岩で囲まれていて、岐立する煙突等とは違つた立場にあり、岩盤のエネルギー吸収性等を考慮するときは、地点の卓越周期とダムの固有振動周期が近くても、地震動によるダムの共振現象を極端に心配するには及ばないようである。アーチダムの第1次固有振動周期がダム地点の実測から得た履歴曲線のピークの領域と一致する場合には、アーチダムの形状と厚さについて適当な修正を行つて、設計変更により対処することが出来る。外国の実例によると、ダム按

術史上有名な Corfino ダムを含め、地震動によつてアーチダムが決壊したものはない。

終りに、著しい断層のある地点では、これを境界として著しい変位の差を生ずるから、アーチダムの採用は避けなければならない。

(4) 引張応力 重力ダムは現在の設計方法では、一般に引張応力を少しも許容することは出来ないけれども、アーチダムに於ては、引張応力が若干生じてても何等支障はない。通常外国の設計では、許容圧縮応力の $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8}$ に相当する引張応力を許容しているようである。少くとも $\frac{1}{10}$ の値は許容してよいものと思う。引張応力が許容限度を越すと、引張応力が零になる深さまでクラックを生ずるものと仮定し、この引張力領域を除去した残りの圧縮力領域だけで平衡状態になると考える方法が実用されている。鉛直片持梁はこのようなクラックの仮定によつて剛性が小さくなるから、受持つ荷重が減少し、水平アーチに作用する荷重は増加する。この場合に求められる最大圧縮応力が許容限度内にあれば、ダムは安定であると考えることが出来る。この考え方は安全側であり、現今アーチダムの設計上、大きい引張応力が現われる場合の唯一の解決方法となつているようである。このように外力によるクラックは生じてても、ダム安定性には何ら影響を及ぼすものではない。寧ろ、コンクリート表面の耐久性に關係する問題である。併し決して好ましいものではなく、材料節約の上から考えても、引張応力の除去には、設計上努力を払うべきである。

(5) 荷重試算方法 重要性のあるダムに於ては、(1)に説明した段階を経た後に、安全度を一層正確に知り、且つダム厚を加減して、一層経済的にする目的で、行うべき応力計算方法は荷重試算方法が最も良い。後者の目的は、寧ろコンクリートの再配分をせよと云う方が正しいかもしれない。この方法は理論は簡単であるが、計算は極めて複雑であるから、相当時間を要する。半径方向の撓みの調整では1人で2ヶ月を要する。アーチが円形等厚でなくて、且つ他の撓み成分の調整を行う場合には、時間も更に倍加する。アメリカに於ては、円形等厚アーチの撓みの表が発表されている。

(6) 継目 継目はアーチダムの構造上根本をなす。ブロックコンクリートの硬化熱が放散して、収縮が始り終つたとき、継目を閉塞する工期を丁度ブロックコンクリートの内部温度の変化が極小となるように工程を定めることが出来れば最もよい。

コンクリートの硬化熱の放散によつて生ずる収縮の為に、かつてコンクリートアーチダムの建設は断念しなければならぬと考えられた時代があつたが、やが

てアメリカに於てはグラウトの圧力注入工法、ヨーロッパに於ては Stucky による間隙継目工法が考案されるに至り、夫々実用されて成果を収めている。通常継目の間隔は 10~15 m とし、継目の面には梯形型歯形を与える。歯形の山巾を 15 cm、高さを 15 cm、斜面巾を 30 cm とするアメリカの開発局の工法は最も良いようである。歯形を有する継目の表面は、乾燥収縮と温度変化によつて、クラックが極めて入り易いから、養生の問題と型枠取外しの時について注意を払うべきである。グラウトの圧力注入工は高度に専門化された仕事と云われるが、グラウトストップ据付け時の検査、注入時期、ブロック内部の温度測定、仕様通りの冷却工、使用セメント、グラウトポンプ等に特に慎重な注意を払うならば不可能な筈はない。この工法については、実験的研究の必要を強調したい。

間隙継目工法は継目を約 1 m 程度空けておいて、グラウト工法と同様時期にブロックコンクリートと出来るだけ同じ性質のコンクリートを填充する。間隙コンクリートの打込みは縦シュートによるのが適当であると思われる。この為の段取りとして、ジブクレーンを設備する必要もあろう。併し、Savage 氏はこのコンクリート打込みはポンプクリートによるのがよいと云つた。

(7) アバット 岩盤の掘鑿は重力ダムの場合より多くなるのが普通である。健岩を不必要に掘鑿することは避けるべきである。厚さと中心線半径の比が $\frac{1}{3}$ で、中心角が 100° の円形等厚アーチの端に於ける力が半無限体とみなした岩盤面に作用する場合、弾性学的取扱いの結果によると、ダム厚の下流側約 45% の部分では、力はアーチ中心線の方向より下流側に傾いており、中央部の僅かの部分では、少し上流側に傾いているが、上流側約 30% の部分は再び明瞭に下流側に傾いている。応力の大きさは下流側 $\frac{1}{3}$ の部分が相対的に大きく、残りの上流側 $\frac{2}{3}$ の部分は一段と小さい。岩盤の弾性係数がコンクリートのそれより大きくなるに従つて、下流端の点を除いては下流側の応力集中の傾向は小さくなり、全体の分布は応用力学の結果に近くなる。これを基礎として岩盤の有効な掘鑿を剪断応力が小さくなるように行うことが出来る。2~3段の角を掘鑿面に与えることになるが、コンクリートに鋭角を与えてはならない。又上の結果は一例であつてアーチの厚さや中心角によつて、多少違つて来る。

4. 結 語

与えられた頁が少いので、気付いた点だけを説明したが、個々の設計に當つては、其の外、餘水処理の適当な方法を検討し、又重力ダムの場合と同様に、優れた性質のコンクリートを経済的に而も均等に作り出すことが出来る方法を深く研究しなければならない。