

# 放物線アーチダム

—— 矢作アーチダムの構造設計 ——

岸 本 静 幸\*  
飯 田 隆 一\*\*

## 1. ま え が き

アーチダムの構造作用はきわめて複雑であるため、その設計に際して通常地形条件に合致した形状は選ばれるが、断層等の地質上の問題を考慮に入れて設計することはかなりむずかしい。矢作ダムの設計では、アーチ形状に放物線を採用して極度にフラット化し、地質条件を含めたダム形状の設計を容易にすることができたのでその概要を報告する。

## 2. ダム サイト

矢作ダムは、愛知県東加茂郡旭町、岐阜県恵那郡串原村に接する矢作川上流に位置する。

ダムサイト付近の地形は、矢作川がダムサイトの下流でほぼ直角に左折しているため、左岸側が薄い尾根を形成し、また左右岸とも東北方向に刻まれた支谷をもつという特徴を有する。

ダムサイトの基盤を構成する中粒の結晶からなる両雲母かこう岩は、結晶粒子間の結合力が若干低下しているようであるが、矢作ダム程度のダムの基礎として特に問題になるほどのものではない。

ダムサイトの基礎岩盤には、

- ① EL 240 m 以下は全般的に良好である。
- ② 左岸は弱層の発達がいちじるしく、かつ上部の風化が進んでいる。
- ③ 河を横切る断層 F3 の下流側に良好な岩盤が分布しているが、下流側に行くにしたがって悪くなる。

などの特徴がある。

ダムサイトの節理、断層等の地質構造は右岸では RI (N 50°~60°W/70°~80°N)、左岸では LI (N 35°~60°E/60°~70°N)、LII (E-W/80°~90°N)、および LIII

(N 35°~60°W/70°~80°N) のグループにわけられる。なかでも LI グループはこの地域一帯の地質構造に関係のある主な断層と一致するもので、F<sub>3</sub>、E<sub>L</sub>、H<sub>L</sub> などのように破碎帯幅が大きく、かつ連続性に富むものが多い。河床部には、小さな軟弱層が散在しているだけである。

このように、上流側には大規模な F<sub>3</sub> 断層が河を横切っており、下流に下がると左岸の地形が逃げさらに地質が悪くなるため、ダムの位置を選べる範囲はかなりせまい。一方近年のアーチダムでは基礎岩盤の安定の問題がクローズアップされ、基礎の厚みを大きくとることに重点がおかれるようになった。矢作ダムの設計でもダム本体の設計上の工夫も含めて、断層等の弱層の影響を考慮にいった“厚み”を大きくとるよう予備設計時に種々の検討がなされ、放物線アーチを用いたダムサイト案が示された。

## 3. 放物線アーチの採用

従来アーチダムの中心角は、110°~120°のものが応力状態が良いので最も望ましい値といわれてきた (Treatise on Dams, Chap. 10 Arch Dams, U.S. Bureau of Reclamation)。これは、ダムの応力に着目した場合のことであって、ダムの基礎岩盤を含めて均衡のとれた安全性をもつアーチダムを設計するためには、アーチスラストの方向をこのように大きな中心角の場合よりも山側に向けることが望ましいと考えられるようになってきた。建設省では川俣ダムの設計以来、アーチ中心角を 70°程度まで小さくすることによってアーチスラストを最も山側に向け得、したがって、いわゆる“基盤の厚み”を大きくすることができるのを明らかにした<sup>1)</sup>。

アーチ中心角を小さくとして、フラットなアーチダムを設計する際問題になるのは、形状がビームに近くなり、クラウン付近の曲げモーメントが増大するため、アーチのクラウン下流側の引張応力が増大することであ

\* 正会員 建設省矢作ダム工事事務所長

\*\* 正会員 建設省土木研究所ダム構造研究室長

る。この問題に対しては、~~矢~~木沢ダム~~の~~設計以来、応力状態の検討によって、アーチの曲率半径を小さくすることによって、曲げモーメントを減少させ得ることが明らかにされた<sup>2)</sup>。

したがって、アーチ クラウン付近の曲率半径を小さくすることによって、前述のようにアーチ中心角を小さくとっても、ダムの応力上問題のないダム形状を求めることができる。このように、アバットメントからクラウンに近づくにつれ曲率半径が小さくなる、連続したなめらかな曲線の一つとして放物線があげられ、矢作ダムのアーチ形状はこれを採用することにした。

わが国では放物線アーチの実施例がないため、その採用に際して問題となることは、型わく設置に困難がないかという点であるが、電子計算機による座標計算を行なうので、これまでの円弧の組合せアーチと全く同様であると判断された。なお設計図等の作成には、コンパスを使用していた従来のものに比し、かなりの労力を要するが、構造上の利点から考え、やむをえないものと判断された。

つぎに、放物線の幾何学的特性を検討してみよう。この放物線の形は次式で示されるものとする。

$$y^2 = 4px$$

この放物線の焦点を  $C_0(p, 0)$  とし、放物線上の任意の一点を  $P(x, y)$  とする。 $P$  点における放物線の法線と  $x$  軸が交わる点を  $C$  とし

$$\angle PCO = \phi$$

$$\angle PC_0O = \theta$$

とする。いま  $P$  点をとって  $x$  軸に平行な線  $PE$  をひくと、放物線の性質から

$$PC_0 = \frac{2p}{1 + \cos 2\phi} = p \sec^2 \phi$$

$$x = PC_0 - p = p \sec^2 \phi - p = p \tan^2 \phi$$

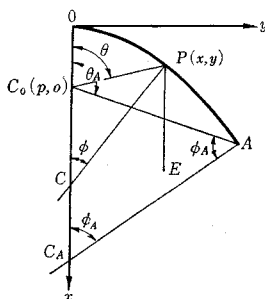
$$y = PC_0 \sin 2\phi = 2p \tan \phi$$

ゆえに、曲率半径は

$$r = 2p \cos^{-3} \phi = R \cos^{-3} \phi$$

すなわち、円形アーチの曲率半径は  $r = R$  であるが、物線の曲率半径は  $r = 2p \cos^{-3} \phi$  である。

図-1 放物線と記号



厚さが

$$T = T_C + (T_A - T_C) \frac{\text{vers}(\phi - \phi_A)}{\text{vers}(\phi_A - \phi_A)}$$

$T_C$ : クラウンの厚さ

$T_A$ : アーチ アバットメントの厚さ

$\phi$ :  $P$  点の法線とクラウンの法線のなす角

$\phi_A$ : 等厚部の中心角

$\phi_A$ : アバットメントの法線と、クラウンのなす角

で表わされる場合は、上流面は

$$u_x = x - \frac{T}{2} \cos \phi$$

$$u_y = y + \frac{T}{2} \sin \phi$$

下流面は

$$d_x = x + \frac{T}{2} \cos \phi$$

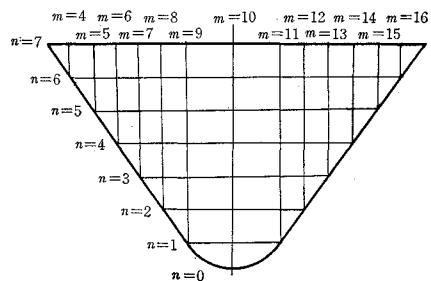
$$d_y = y - \frac{T}{2} \sin \phi$$

で示される。

応力計算に使用した電子計算機によるアーチ ダムの解析方法では、 $R$  を入力データとして用いると、実際上かなりの不便をとまうので、アーチ中心線のスパン ( $2l_n$ ) とアバットメントの中心角 ( $L\phi_{An}, R\phi_{An}$ ) を入力に用い、 $R, x, y$  は機械が計算するようにした。

計算は図に示したエレメントの記号を用いる。片持ばり要素は、ダム軸上の定点 ( $x_{m,n}, y_{m,n}$ ) をとおり、各標高でその標高の半径方向の面をもち、かつベースがアーチのアバットメントと一致する。またアーチ要素と片持ばり要素の交点は  $(m, n)$  で示される。なお左岸側では  $n = m - 10$ 、右岸側では  $n = 10 - m$  で示される。

図-2 非対称の場合のエレメント



標高  $n$  のクラウンにおけるアーチ中心線の法線と、兩岸のアバットメントを結ぶ直線のなす角を  $\theta_n$  とすれば、

$$2l_n \sin \theta_n = R_n \int_{R\phi_{A,n}}^{L\phi_{A,n}} \cos^{-2} \phi d\phi$$

$$2l_n \cos \theta_n = R_n \int_{R\phi_{A,n}}^{L\phi_{A,n}} \sin \phi \cos^{-3} \phi d\phi$$

$$\therefore R_n = \frac{2l_n}{\left[ \left\{ \int_{R\phi_{A,n}}^{L\phi_{A,n}} \cos^{-2} \phi d\phi \right\}^2 + \left\{ \int_{R\phi_{A,n}}^{L\phi_{A,n}} \sin \phi \cos^{-3} \phi d\phi \right\}^2 \right]^{1/2}}$$

で求められる。積分は  $L\phi_{A,n}$ ,  $R\phi_{A,n}$  をそれぞれ 64 等分し、シンプソンの数値積分を行なうようにしている。

各標高のアーチ中心線のアバットメントは、左岸では

$$x_{m,m-10} = x_{c,m-10} + R_{m-10} \int_0^{L\phi_{A,m-10}} \sin(\phi_{m-10} + \phi) \cos^{-3} \phi d\phi$$

$$y_{m,m-10} = y_{c,m-10} + R_{m-10} \int_0^{L\phi_{A,m-10}} \cos(\phi_{m-10} + \phi) \cos^{-3} \phi d\phi$$

右岸では

$$x_{m,10-m} = x_{c,10-m} + R_{10-m} \int_0^{R\phi_{A,10-m}} \sin(\phi_{10-m} + \phi) \cos^{-3} \phi d\phi$$

$$y_{m,10-m} = y_{c,10-m} + R_{10-m} \int_0^{R\phi_{A,10-m}} \cos(\phi_{10-m} + \phi) \cos^{-3} \phi d\phi$$

$x_{c,n}$ ,  $y_{c,n}$ ; 標高  $n$  のアーチ クラウンの座標で求められ、 $R_n$  と同様の数値積分を行なう。

片持ばり要素とダム軸の交点  $(x_{m,7}, y_{m,7})$  は、その中心角を  $\phi_{m,7}$  とすれば、左岸側では

$$x_{m,7} = R_7 \int_0^{\phi_{m,7}} \sin \phi \cos^{-3} \phi d\phi$$

$$y_{m,7} = R_7 \int_0^{\phi_{m,7}} \cos^2 \phi d\phi$$

$(x_{m,7}, y_{m,7})$  と  $(y_{m,m-10}, y_{m,m-10})$  を結ぶ直線は  $x$  軸と  $\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10}$  角をなすから

$$\frac{y_{m,7} - y_{m,m-10}}{x_{m,m-10} - x_{m,7}} = \tan(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10})$$

$$y_{m,7} \cos(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10}) + x_{m,7} \sin(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10}) = x_{m,m-10} \sin(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10}) + y_{m,m-10} \cos(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10})$$

これから

$$R_7 \int_0^{\phi_{m,7}} \cos(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10} - \phi) \cos^{-3} \phi d\phi - [x_{m,m-10} \sin(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10}) + y_{m,m-10} \cos(\phi_{m-10} + L\phi_{A,m-10})] = 0$$

の積分方程式が得られ、これを数値積分によって解き、 $\phi_{m,7}$  を求めることができる。右岸側についても同様にして求めることができる。これから  $x_{m,7}$ ,  $y_{m,7}$  が計算できる。

片持ばり要素の定点  $(x_{m,7}, y_{m,7})$  が求まると、アーチ要素と片持ばり要素の交点  $(x_{m,n}, y_{m,n})$  をつぎのようにして計算する。

$$x_{m,n} = x_{c,n} + R_n \int_0^{\phi_{m,n}} \sin(\phi_n + \phi) \cos^{-3} \phi d\phi$$

$$y_{m,n} = y_{c,n} + R_n \int_0^{\phi_{m,n}} \cos(\phi_n + \phi) \cos^{-3} \phi d\phi$$

$(x_{m,n}, y_{m,n})$  と  $(x_{m,7}, y_{m,7})$  とを結ぶ直線は、 $x$  軸と  $\phi_n + \phi_{m,n}$  の角をなすから

$$\frac{y_{m,7} - y_{m,n}}{x_{m,n} - x_{m,7}} = \tan(\phi_n + \phi_{m,n})$$

これから

$$R_n \int_0^{\phi_{m,n}} \cos(\phi_{m,n} - \phi) \cos^{-3} \phi d\phi - [(x_{m,7} - x_{c,7})$$

$$\sin(\phi_n + \phi_{m,n}) + (y_{m,7} - y_{c,n}) \cos(\phi_n + \phi_{m,n})] = 0$$

の積分方程式が得られ、 $\phi_{m,7}$  と同様にして  $\phi_{m,n}$  を計算でき、 $x_{m,n}$ ,  $y_{m,n}$  が求められる。

クラウンから  $(x_{m,n}, y_{m,n})$  までのアーチ中心線に沿う曲線長は

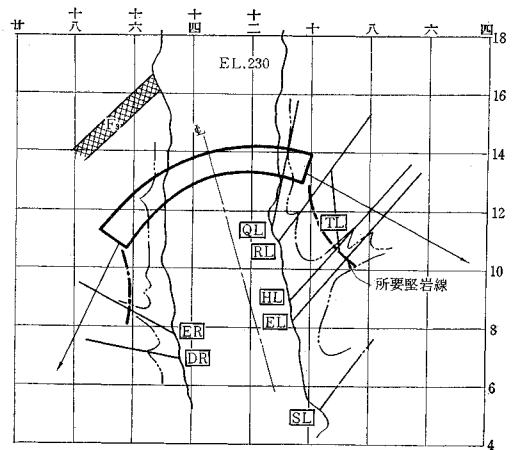
$$S_{m,n} = \int_0^{\phi_{m,n}} R_n \cos^{-3} \phi d\phi$$

として求められる。

## 4. 設 計

ダム設計に当って、その地点の地形、地質によく適合するようにすることが最も合理的で、かつ経済的であることはいうまでもない。この場合の地形とは、ダムの基礎として十分な強さを有する堅岩の形状であって、堅岩等高線で示される。従来、堅岩等高線は設計者の主観によって決定されることが多かったが、矢作ダムでは地質技術者の協力を得て、地質、割れ目の間隔や状態等に基づく、個人差の入りにくい基準を設けて基礎岩盤の評価を行なって決定した<sup>3)</sup>。これらは、主要な断層等の弱層を含めてダムの水平スライス図(図-3)に示されるとおりである。

図-3 水平地質断面



設計の基本になるこれらの地形、地質図によると、1. で述べたように、左岸上部の地形の開き、および F<sub>3</sub> 断層を避けてダムの位置を選定しているの、すべりやすい方向に斜交する推力を作用させないかぎり、断層群に対する非常に大規模な地質処理は必要ないものと判断される。したがって、経済的な設計をするためには、基礎表面からのアーチアバットメントの根入れをどのくらいにとるかが最も大きな影響を与える。そこで、“所要堅岩線<sup>4)</sup>”を参考として、ダムの各部分が所定の安全度を保ち、かつダムの整形を満足するような最小の根入れを

求めた。

アーチ ダムの応力は、計算と模型実験を併用して求めるのが普通である。計算は近年の電子計算機の発達にともない、模型実験に比べると瞬時といえるくらいの短時間で、しかもきわめて少ない労力で行なえるようになった。計算法は U.S. Bureau of Reclamation によって、Trial-load Analysis というきわめて精巧な方法が完成されているが、模型実験値や実測による挙動と合わない値を示す部分がある。その原因は、基礎岩盤を半無限弾性体とし、さらに等価展開法によって載荷面とするなどの仮定に基づいて、基礎の変形を取り入れているためと考えられており、模型実験によってこれを補なうのが最もよい。しかし、模型実験には莫大な労力と時間を要し、さらに自重や温度荷重を含めることが困難なので、計算で補なう必要があるなど、計算と模型実験によって応力を求める方法にはそれぞれ長短があり、それを上手に利用するのが得策である。

これまで、建設省はじめその他の機関によって多くの実験が行なわれたが、それらをとおしてつぎにあげる傾向がみられる。

- ① クラウン キャンティレバー上流側の底に、半径方向調整計算によって示される鉛直な引張応力は、

模型実験では 20~40 kg/cm<sup>2</sup> 圧縮側に移行する。

- ② アーチ クラウン下流側の下部標高の水平応力は、実験値では 5~10 kg/cm<sup>2</sup> 引張側に移行する。  
 ③ サイド キャンティレバー下流側の上部方向のベースの鉛直応力は、実験値では 5~10 kg/cm<sup>2</sup> 引張側に移行する。

前述のように計算による応力値はきわめて短時間に、かつ低廉な費用で求めることができるので、矢作ダムの設計では上述の模型実験値との間の傾向を考慮に入れ、半径方向調整計算による形状設計を行ない、その後模型実験による検証、修正を行なうことにし、現在実験中である。

昭和 40 年 5 月にアーチ ダムの設計基準が改定され、中でも、特に地震力の取扱いが大幅に変更された(第 6 条, 第 7 条)。さらに矢作ダムは本邦で最初の大規模な放物線アーチを採用し、フラットアーチにするので、その動力学的特性を研究する必要がある。このため振動模型実験を行なうことになり、東京大学生産技術研究所において、円型アーチの設計との比較を含めて現在実験中である。それらの成果は別途報告する。

計算は土木研究所が作成したプログラム<sup>5)</sup>によって、IBM 7090 を使用して行なった。

図-4 アーチ 応力

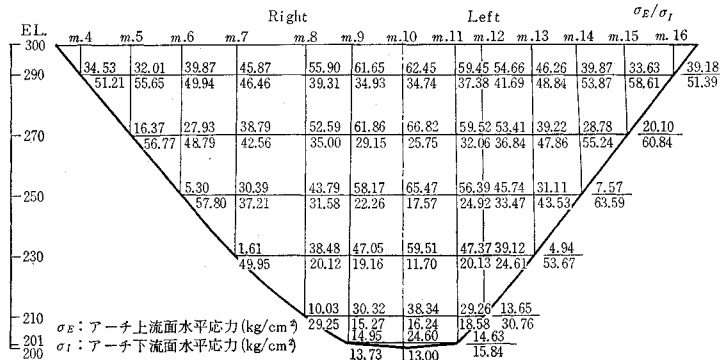
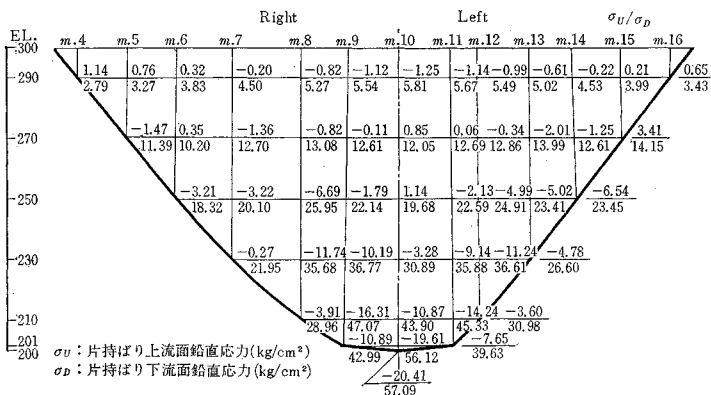


図-5 片持ばり 応力



半径方向調整計算による応力は図-4, 5 に示すとおりであり、これらの応力値は模型実験によって得られる値との差を考慮にいれても、十分満足できる値である。なおこれらの応力は、模型実験を実施して検証する。

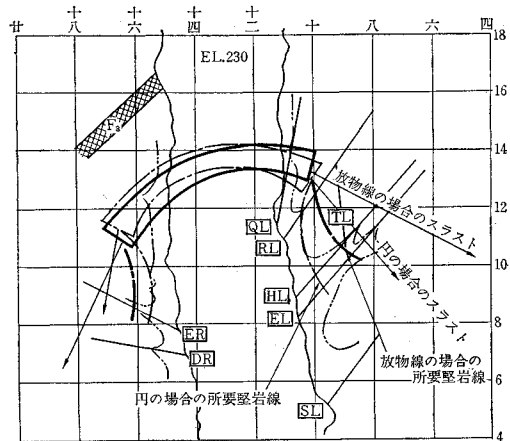
ダム水平地質断面図を図-3 に示したが、図-3 でみられるように、ダムサイト最大の断層 F<sub>3</sub> をできるだけ避けて下流側に位置させていること、左岸で下流側にすべりやすい走行を示し、かつ規模もかなり大きい E<sub>L</sub>, H<sub>L</sub>, R<sub>L</sub> などの断層群に直角にスラストを作用させていることなどによって、基礎岩盤の安定、処理に最も有利になるよう重点的考慮が払われている。

なお、中心角を約 100 度にとった円弧の組合せによる比較設計の水平断面の例を図-6 に示すが、スラストの作用方向はいちじるしく異なり、かつアーチアバットメントの根入れ深さを増大する必要があることが示されており、放物線を採用した設計が有利なものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 駒井 勲・柴田 功：アーチダムの岩盤処理，土木学会誌 47-11
- 2) 飯田隆一：アーチダム設計への電子計算機の利用，土木技術資料，8-3。  
矢木沢アーチダム設計報告，建設省土木研究所

図-6 放物線アーチと円弧アーチの比較



- 3) 岡本隆一：ダム基礎岩盤の地質区分に関する一試み，土木学会岩盤力学に関するシンポジウム  
岡本隆一・安江朝光：ダムサイトにおける岩盤区分の試み——矢作ダムサイトの例，土木技術資料，9-1。
- 4) 柴田 功・小倉昭三：矢作アーチダムの構造設計，建設省土木研究所資料，第 213 号
- 5) 飯田隆一：電子計算機によるアーチダムの解析法，建設省土木研究所資料，第 1 号

(1967. 12. 23・受付)

## 建設産業の機材管理

飯吉精一著

A5・定価 700円

本書は建設産業の特殊性とその内容にふれることにより、建設産業とはいかなるものか！機械管理とは何かその概念を述べ、さらに機械を含めた資材管理の実際を長年、生産の場で過してきた著者が現実に基いて、きわめて明快に解説する資材管理読本！業界人必読の書。

〔主要目次〕 I 資材管理の概説〈材料自体のための資材の事務的管理／人間を主体とした資材の機能的管理／資材管理のための科学的管理技法〉 II 建設産業における機材管理〈建設産業の概要／建設産業における材料の事務的管理の実際／建設産業における機材管理の実際〉



技報堂 東京都港区赤坂1-3-6

## 新版 土木工学通論

八十島義之助／奥村敏恵共著 A5・900円

〔主要目次〕 概論／鋼および鋼構造／コンクリートおよび鉄筋コンクリート／橋／土と基礎工／トンネル／河川／ダム発電／砂防／海岸／港湾／鉄道／交通／道路／空港／都市計画／上水道／下水道／大気汚染／水質汚濁

### 近刊

## 応用力学

荒井利一郎著 A5・950円

## 構造力学における還元法

ケルステン著／伊藤学他訳 B5・1500円

TEL.(584) 4 7 8 6

\*総合図書目録送呈