

## アーチ・ダムについて

岡本 舜三

谷を締切つて貯水するための高い締切工事が堰堤であつて、このとき自己の重量をもつて水壓に抵抗するのが重力式堰堤で、兩岸の岩盤につばつて水壓に抵抗するのがアーチ式堰堤である。筆者は「生産研究」からアーチ堰堤について説明を依頼されたが、たまたま時を同じくして垣谷正道博士の講座が発表されたので（土木學會誌本年1月號）重複を避ける意味から一般的なことは同書にゆずり、こゝにはやや専門的觀點から現在行われている設計法についてその見解を述べてみようと思う。

## 1

高堰堤の様式は重力堰堤とアーチ堰堤の2種であるが、地形地質が適當であれば資材の面からはアーチ堰堤が有利になる場合が多い。アーチ堰堤は19世紀中葉以後アメリカ中部および歐洲南部に造られその實例も多いが、初期のものはその高さは大體20m前後である。1910年頃からは應力計算法、材料、施工法が發達したために急に堤高がまし、いちじるしい高堰堤が相次いで築造されるようになった。著名なアーチ堰堤をあげると第1表の通りである。

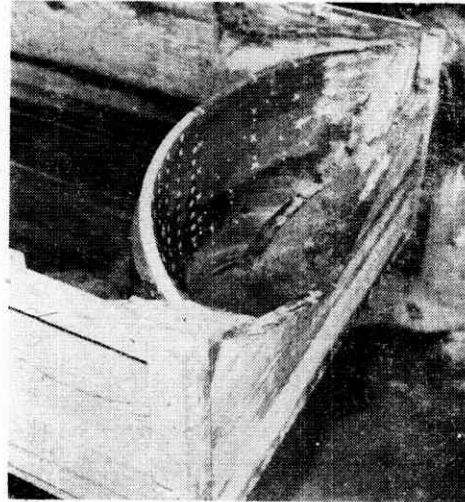
第1表 高拱堰堤一覽表

堰堤名	堰高(米)	竣工年	備考
Boulder*	221	1935	アメリカ
Lumiei	135	1947	イタリア
Diablo	119	1928	アメリカ
Paconia	114	1927	アメリカ
Piave di Cadore	110	1949	イタリア
Shoshone	100	1910	アメリカ
Castillon	101	1930	フランス
Parker	98	1938	アメリカ
Ariel	96	1930	アメリカ
Horse Mesa	93	1927	アメリカ
Marges	90	1936	フランス

\* Boulder は世界最高の堰堤である。平面的にはアーチ型であるが断面は重力堰堤とみるべきであろう。

また計畫中のものには Ross dam (米) 176 m, Sta Giustina (伊) 152 m, Vojont dam (伊) 202 m, Castelo de Bode (葡) 115 m Tignes dam (佛) 180 m Cabril

dam (葡) 125 m 等がある。わが國では從來種々の理由からアーチ堰堤は許可されなかつたが、戦後米國 OCI がこの型式を耳川の上樞葉地點（宮崎縣）天龍川の佐久間地點（静岡縣）に勧告した頃から急にアーチ堰堤築造の氣運が高まりその第一着手として昨年上樞葉堰堤が着工された。この計畫は高さ131mの薄肉形アーチ堰堤として進められているから、これが實現すればわが國にも世界有数のアーチ堰堤ができるわけである。（第1圖）



第1圖 東京都下狛江村電力技術研究所にあるゴム製のアーチ堰堤模型。

## 2

堰堤の安定は重力堰堤では剛體の力學を用いて検討されるが、アーチ堰堤では弾性體の力學によつて計算されるので安定計算は境界條件の影響を多くうけ複雑である。しかし一應その安定が確かめられた後には内部應力はアーチ堰堤に對しては、薄肉であるだけに複雑な施工條件のもとに築造される重力堰堤の巨體内の應力に比すれば、はるかに確實に推定しうる事が期待される。アーチ堰堤の應力計算法のうち最も初期のものは圓筒理論である。これは圓筒が全周から水壓を受ける場合の應力をもつてアーチ堰堤内の應力となすもので、これでは堰堤基礎部の條件所謂境界條件を満足させることができない。ついで發達した弾性アーチ理論は、アーチ堰堤を多くの弾性アーチを水平に積み重ねたものとみなしてその應力を計算する方法であるが、この方法では各個のアーチは互に獨立なるものと假定されるので、變形が別個

になり鉛直方向には變位の不連続性が存在することになる。これは少なくとも變形の小さなうちには實際とは合致しない。1921年、アメリカの F.A. Netzli はアーチ堰堤を多數の水平のアーチと鉛直な片持梁よりなる格子状構造物として解析することを提案し、今日の荷重試算法 (trial load method) の濫觴をなした。この考え方は單純であるが種々の条件を加味することが可能であり、すでに實用解法として發達する素地をもつていたわけである。最初は不十分かつ煩雜な方法であつたが逐次改善され、水壓による應力のほかに溫度應力、岩盤の變位、地震力、コンクリートのポアソン比等による複雑な諸影響を明かにしようと共に、計算を機械化し迅速にするための數表および計算書の様式等が整備されるにおよんで非常に有用な解法となつた。特に注意すべきはその信頼性が多數の實驗によつて檢計されていることである。これはこの理論の最も強味とするところである。すなわち 1926 年には高さ 60 呎の Stevenson Creek dam が純粹に實驗の目的のために作られ、あらかじめ設置された多數の計器によつて測定が行われその結果は荷重試算法によつてなされた計算および Princeton 大學で行われたセルロイド模型試驗と比較檢討されたのであつた。荷重試算法はこの徹底的な實驗によつてその有用性を示したのであるが、その後さらに Gibson dam, Boulder dam, Ariel dam, Calderwood dam において行われた模型實驗或は現場測定によつてますますその確實性が證明され、今日では斯界の先進國であるアメリカではアーチ堰堤設計における最も合理的かつ實用的方法とみなされているのである。堰堤技術をアメリカより採り入れつつあるわが國で今後廣く荷重試算法が採用されることは大體確實なところであろうが、それにはまずそのよつて立つ理論の基礎に對して明確な認識をもち採用されている假定等をよく理解し檢討しなければならない。堰堤設計法の確立のために、アメリカの技術者が今日まで拂つた非常な熱意と努力およびその經驗に敬意を表するにやぶさかでないが、彼我風土の相異を思えば無批判にこれをうけ入れるべきではない。われわれは關東地震に際し米國技術を直輸入して作られた丸ビル東京會館が大破し、歐米の技術に日本の特殊事情を加味して慎重に設計された興業銀行が無被害であつた事實を想起せねばならない。

## 3

荷重試算法は逐次近似法であり膨大な演算を要するので、その計算課程を追跡するにはかなりの根氣を要するが、今これらの計算の基礎をなす事項のみを整理配列してみればその全貌を把握するに便利のようである。

## (1) 一般的事項

この法ではアーチ堰堤を水平なアーチと鉛直な片持梁よりなる格子状構造とみる。アーチの數および片持梁の

數は多くとるほどよいのであるが、演算の都合上それぞれ 8~10 個とする。外力の一部はアーチが受け残部は片持梁が受けるがこれら要素的構造物の外力のみによる變形は相互に適合せず、これを調節するために兩者に内力を作用させるのである。外力として考慮されるものは水壓、堆泥壓、揚壓力、地震力であり、内力として考慮されるものはアーチの周方向の力 (すなわち片持梁の側方向の剪斷力) アーチの軸線の廻りの振りモーメント (すなわち片持梁の曲げモーメント) アーチの鉛直軸の廻りの振りモーメント (すなわち片持梁の振りモーメント) である。この際地震力は震度理論により靜的外力に換算され、地震時動水壓は最深水深に對して Westergaard の公式を用いて計算される。揚壓力については不明な點があり、特に堰堤に大きな張應力が生じない場合は考慮されない時もある。堰體の自重、溫度變化、コンクリートの收縮の影響は施工法を考慮してきめられ、ことに收縮應力は適當な施工法をとることを前提として僅かしか考慮されないのが普通である。要素的構造物の變形は Hooke の法則に従う彈性體として、また地盤との接觸部は彈性支承として取扱われる。

## (2) アーチに關する事項

アーチはほぼ等厚の圓形アーチに造られその應力計算に便利な數表が準備されている。それで數表を利用するために不等厚アーチの場合にはアーチ頂から起拱點までの中心角を 4 等分して各部分をその平均厚をもつ等厚圓形アーチとみなし、また起拱部に肉付けせるアーチの場合にもこれに準じた方法がとられるのである。アーチの變形は彈性理論によつて計算されその際軸壓力および剪斷力による影響も考慮される。このとき断面内に生ずる曲げ應力は直線的に分布すると假定され、剪斷變形の比例係數は 1.25 ととられる。溫度變化は一つのアーチ片についてはどこでも一定であると假定されているが、アーチ堰堤では普通柱状工法がとられそのスロットのグラウト工はコンクリートの内部溫度が年平均氣温程度まで降下した頃外氣温の低い時期に行われるので、これをあまり大きく見込むことはしていない。アメリカの實例に基づいて作られた年間溫度變化の最大振幅を表わす公式が設計に用いられている。アーチの變形の計算ではアーチの振り荷重、すなわちこれは剪斷應力の相等性によりアーチの振りモーメントであるが、これによるアーチの半徑方向および周方向の變位および換れも考慮されている。アーチ堰堤においては起拱部の上流側ならびにアーチ頂部の下流側に引張應力を生じないようにすることは困難であるので (不可能かどうかは疑問である) 重力堰堤の場合と異なり通常引張應力を許容している。すなわち引張應力 50 封度/吋<sup>2</sup> を許容しこの應力に達するとひびわれが生ずるものとみなし、そのひびわれの先端の達する所までのコンクリート断面は變形の計算からも除外

して考えている。しかし一部分ひびの入つたアーチの計算は煩わしい上に、その考慮がアーチ堰堤の變形におよぼす影響は小さいので、この考慮は極めて重要な場合にしか行われぬ。

### (3) 片持梁に関する事項

要素的片持梁は一連の水平微小要素片の積み重ねる構造と考えられるが、その際各微小要素片の側面は堰堤の上下流面ならびにその要素片の標高における曲率半径の中心にて交わる鉛直半径方向平面とする。コンクリートの自重および水壓の鉛直成分は片持梁が受けるものとされ、温度應力は構造が静定であるとして考慮されない。片持梁の曲げ應力分布は直線的と假定され、それは堤體底部では上流側で、堤體頂部では下流側で張應力となることが多い。それで張應力が生じた場合には應力が0となる位置までひびわれが入るものと考え、その部分のコンクリート断面を除外して撓みを計算する。水面下の片持梁の面に水平なひびわれを生ずる場合は揚壓力が楔力となつて働らくが、この力は不確實なもので、かつ荷重試算法にはその影響をとり入れにくいので必要に応じて考慮されている。片持梁の半径方向の撓みを計算する際には曲げモーメント、軸壓力および剪斷力を考慮し、周方向撓みを計算する際は周方向の剪斷力のみしか考慮されない。振りモーメントによる回轉の計算方法は断面が漸次變化していても部分的には断面を一樣とみなして振り角を求め、これを簡単に求和して求め、さらに周方向剪斷力がその作用断面以外の断面に對して偏心しているための回轉を2次的につけ加えている。ひびわれは半径方向の變位には大きな影響をおよぼすが周方向の變位や迴轉角には影響が小さいので、その計算には無視されるのが普通である。

### (4) 基礎に関する事項

アーチおよび片持梁は基礎を通じて岩盤に壓力、振りモーメント、曲げモーメントを作用させ、このために岩盤は變位する。荷重試算法の發達の當初はこの變位は考えられなかつたが、その後發達した方法ではこれを弾性變形として考慮している。そして基礎の變位はアーチと片持梁に對してそれぞれ影響を與え、その結果堰堤の撓みはまし、應力は一般に基礎のあたりで小さくその他の部分で大きくなる。基礎の變形を求めるには變形はその面積上に直接作用する荷重だけによつておきることを、貯水池の周壁に作用する水壓荷重によつて堰堤の支點は移動しないことを假定して、次のような方法がとられている。すなわちまず堰堤と岩盤の接觸面を1平面に展開しこれと大體等しい形状をもつ矩形を考える。次に要素的構造物が地盤におよぼす荷重強度と等しい強さをもつ分布荷重が與行はその構造の基礎部における厚さに等しく形が先に述べた全基礎面と等價なる矩形基礎面と同形の矩形の上に働らくときの半無限弾性體の載荷面に生ずる

平均變位を求め、これを以てその位置における地盤の變位とする。この場合の平均變位は Fred, Voigt の與えた公式によつて求められるが、上記の設計法そのものは多分に經驗的なもので理論的根據は乏しいものである。

### 4.

以上に簡単に荷重試算法を大觀したがこれで見るとこの方法は、すでに應用力學その他において知られていた個々の學理をアーチ堰堤設計法なる一つの目的に結集した綜合的業績であつて、米國技術の特徴をよくあらわしている。その場合たとえばひびわれに對する取扱いのように個々の理論の適用にはかなり強引な納得のゆきかねる所もあるが、なおこの理論が充分な強味をもつてゐるのはそれが大規模な實驗と現場測定に裏付けられ、かつこの方法によつて造られた相當數の堰堤が現に健在する事實である。しかし理論はそれの裏付けが經驗による部分が多いほど風土を異にする地に適用する場合には慎重でなければならぬことも留意すべきであろう。

次にこの理論について考えられる2,3の問題をあげると、最初にこの理論の根本をなす思想、すなわち連續體を格子でおきかえることについて考えて見よう。一體アーチ堰堤においてこれを個々のアーチを水平にならべたものとして設計するのがよいか、片持梁とアーチの格子とみて設計するのがよいかは議論の大きく分れる所であつて、今日まだいづれとも結論されておらないのである。フランスにおけるある實驗では片持梁の作用は認められるが主應力線の方向は必ずしも荷重試算法の示す方向とは一致せず、かつ破壊の際の應力分布は片持梁を考えず單獨アーチを考えた方がよいようであるとの結論がでている。この結果を鵜呑みにはできないが、しかしこれは堰堤を格子でおきかえる考え方になお問題があることを示唆している。これに對する一つの考え方としては材料が弾性をもつ範圍では弾性理論に基づく荷重試算法が正しいが、大きな應力の下ではコンクリートは弾性を有せず Hooke の法則にそわないために片持梁の剛度はいぢるしく落ち、水壓の大部分がアーチによつて受けられるようになることも考えられる。そしてこれらのことは塑性理論を加味した荷重試算法の研究の必要性を思ひしめるのである。なお一つの問題はイタリアで廣く用いられる徳利のような曲面をもつ薄肉アーチ堰堤 (Cupola arch dam) である。この場合は鉛直片持梁もまた、かなりの曲率をもつておりこれがアーチ作用をする。したがつて片持梁も不静定構造となり荷重試算法がそのままの形で用いうるや否やは問題である。

第2に温度應力の問題がある。薄肉であるからコンクリートの冷却がゆきとどくことはその利點であるが、半面また外界の温度變化に敏感に感應する性質を持つてい

(9頁へ續く)

う。しかし開發が進むにつれて、國民の生活が複雑になつてくればくるほど、異つた問題が同じところで發生するようになり、互に競合して開發それ自身を次第に困難にしていく。私達はすでにこのような事態を経験している。他の面との摩擦を避けようとするれば電源開發はまだ残された地點での水路式に向つていくであろう。今日の主力は依然としてそうである。水路式で湧水量を基準にとるならば、比較的安い原價で常時電力を得るではあるがこれには限度があり、かつての水力調査はこれを教えてくれる。使用水量を上げていくとすれば、今日の火力の原價を考えるとすると總合されたものでは高い價格につくであろう。高いばかりではなく、石炭がこの上供給されるかどうかという問題さえ起きるであろう。ダム式とすれば多くの場合、遭遇する困難に打勝たなければならない。そしてこの場合の電力はまた補給電力を必要とするものである。

電源開發に當つてはこの間の事情を十分に理解しなければならない。水力開發に當つて私達が當面する諸問題

(12 頁から続く)

る。荷重試算法では一つのアーチについては温度は一様であるとされているが、實際には日照部と日蔭部ができて計算とはかなり異なつた状態にもなりうるであろう。薄肉アーチは温度變化に敏感であることを考えれば堤體の温度應力については、堤體の内部までわたつてさらに詳細な検討を施す必要があるように思われる。

第3に地震の問題がある。この方法では震度論が採用されているが、もともと震度論は佐野利器博士の創案にかかり地震學の先進國たる日本から米國に輸入されたものである。したがつてそれが機械的にとり入れられているのは止むを得ないとするも、震度論は正確には剛體にのみあてはまるもので薄肉アーチ堰堤のような薄くて巨大な構造で、その自己振動週期が地震動のそれに接近する可能性のあるような場合にはこれを適用することは適當でない。わが國が世界有数の地震國であり、人口もまた稠密なことを考慮すれば、地震時應力の解析はよほど入念に行わねばならないのである。ただ強みはアメリカ西海岸やイタリアもまた地震地帯であるが、今までに地震によつて破壊したアーチ堰堤がないとの彼地の學者の説明である。これは喜ばしい事實には違いないが、ただそれだけですつかり安心してしまうことは早計であろう。

最後に先の理論においてはなほだしく不満足に思われるのは、岩盤の變形の影響の計算方法である。その方法は經驗的なものであると斷つてはあるが、これが事實と合致することの驗證は非常に困難であることは確かであるし、理論的にはほとんどこじつけに等しい。地盤の變形を加味することが種々の困難を含んでいることを考えると、このあまり意味のありそうにもない方法も非難

については先に述べた通りであるが、私達はこれらの問題の解決に努力すると同時に火力發電についても大きな關心を持つ必要がある。今日の日本の火力發電所は過半が建てられてから25年を経過しており、非常にその效率が悪るい。新しい設備ならばおそらくその半分の石炭で間に合うであろう。輸入するなら重油の方が好都合である。私達はこればかりではなく、エネルギーが適正に使われているかどうかをも検討する必要がある。さらにいわゆる餘剰電力という季節的な電力を使いこなすことをも考えねばならない。

何はともあれ、電源開發は今後の私達の生活を考えれば何んとかして促進させなければならないが、これは巨額な投資を必要とするものであり、複雑な問題を含んでいるのであるから、これは技術的な問題であると共に經濟的な問題であり、私達の生活に直接つながるものであることを理解しなければ目的は達せられないであろう。(1952・5・23)

することはできないが、ここになお大きな問題が未解決に残つてゐることはたしかである。佛伊兩國のような薄肉アーチ堰堤を多く作つてゐる國では、特にこの境界附近の應力を問題にし、これについての大規模な實驗的研究が行われているので、これらの困難もやがて解決される日がくるであろう。その他これに關聯する問題としては、コンクリートおよび岩盤の彈性係數の決定がある。これは變形を計算し不靜定應力を求めるための基礎的數字であるが、コンクリートの彈性係數は材齡によつて變化するし、岩盤の彈性係數は供試體の大きさによつて異なる。これらも解決を要する問題である。

##### 5.

このようにアーチ堰堤は非常な長所を持つてゐる反面なお種々の未知の問題が残つており、基本的な問題についても技術者間に意見が一致しない點もあつて、われわれ研究者の分擔すべき仕事も少なくないのである。しかし多くの文献が、實際に作られたアーチ堰堤の安全率や模型實驗によつて得られた安全率が高いことを述べてゐることは意を強くさせるものがある。今わが國にもはじめてアーチ堰堤が出現しようとし、もしこの新技術に成功すれば今後の電源開發もはるかに低廉にできるのである。われわれにはこの新技術の前に石橋をたたいて渡る慎重さをもつと同時に、ただいたずらに恐惶であつてはならないと思う。幸にわが國には電力研究所を中心としたアーチ堰堤築造に強い熱意をもつ技術者の一群がある。筆をおくにあたり私はこれら技術者諸氏の健闘を祈るとともに多數の優秀な學者技術者がこの問題に協力されることを願つてやまない次第である。(1952・5・23)