

## 近代日本におけるコンクリートダム技術の変遷 ーダム技術者の発言から \*

The History of Development of Concrete Dam Engineering in Modern Japan  
ーViewpoint of Dam Engineer' Remarks

樋口 輝久 \*\*・三木 美和 \*\*\*・馬場 俊介 \*\*\*\*

By Teruhisa HIGUCHI, Miwa MIKI and Shunsuke BABA

1900(明治 33)年、神戸市水道の布引(五本松)ダムにわが国で初めてコンクリートダムが導入されて以来、重力ダム、アーチダム、バットレスダムと様々な型式が採用されてきた。特に、曲線形の重力ダム、アンバーセン式やマルチプルアーチ式のバットレスダムなど、現在では造られなくなったこれらの型式は、戦前におけるコンクリートダムの大きな特徴の一つとなっている。

そこで本論文では、近代日本におけるコンクリートダムの変遷を、ダム技術の発展の背景とダムの設計・建設に携わった技術者に着目して、明らかにしようとする。まず、上水道、水力発電、砂防、農業土木などの分野ごとに彼らの業績をまとめた。そして、戦前に刊行された主要な学協会誌・業界誌、ダム関連の教科書、さらに回顧録や座談会の記録から、ダムの技術史を構築する鍵となる技術者の発言を抽出し、誰によって、どのダムの築造の時に、どのような理由で、どのような技術が導入されたか。その後、それがどのように評価され、発展あるいは衰退していったかを追跡した。

### 1. はじめに

近年築造されるダムは、経済性、施工性、地形的要因などにより、画一的なダムが多く、ほとんどが重力ダムかフィルダム(アース、ロックフィル)に二分される。コンクリートダムに限ってみれば、それでも 1970 年代までは、一時もてはやされたアーチダム、見た目は重力ダムと変わらないが中空重力ダム、重力ダムとアーチダムの両方の支持機能を併せ持った重力式アーチダムが築造されていた。

これに対して戦前は、重力ダムが主流であったとは言え、アーチダム、アンバーセン(Ambursen)式やマルチプルアーチ式など特徴的なスタイルのバットレスダムが採用されていた。しかも重力ダムには、アーチダムと見紛う曲線形の重力ダムがあり、形態の上でもバラエティに富んでいた。

設計の面から見ると、戦後は、「河川管理施設構造令」に基づいた「建設省河川砂防技術基準」により、設計洪水流量、各種水位、堤高などを定めて、計算式に代入し、断面形状、安全率など各種条件を検討すれば、技術者の創意・工夫もなく設計基準・規則を満たすダムができあがってしまう。特に重力ダムでは、設計理論・基準がほぼ確立された戦後間も

ない時期から、半世紀も同様の手順でダムの設計が行われている。確かに、これは戦前からのダム技術者による努力の賜であるが、逆にダム型式の選択の幅、技術者の個性を発揮する機会を狭めていると言えるのではないだろうか。

一方、戦前はダム技術の発展段階にあり、その設計理論・基準が統一されておらず、如何に安全に、そして経済的にダムを造るか、技術者それぞれの個性、時代による技術の差が現れていた。では、戦前の技術者達は何を基準にダムの型式を選択し、どのように設計、施工していたのか。そして、ダムの技術はどのようにして発達していったのであろうか。

ダムの技術史については、その概要を記した『水力技術百年史』<sup>1)</sup>、コンクリートダムの施工技術に関する松浦茂樹の研究<sup>2)</sup>がある。そこで、本論文では、戦前の日本におけるダムの特徴である型式の多様性に着目して、“ダム技術の発展の背景と技術者”という観点から、近代におけるコンクリートダムの技術史を確立することを目指す。

まず最初に、どのような人たちがダムの設計・建設に携わっていたのか整理しておく。参考となる人物史として、『電力土木』誌に連載された人物銘々伝の記事<sup>3)</sup>、『土木史研究』

\* Keywords: 近代、技術史、コンクリートダム、技術者

\*\* 正会員 岡山大学助手(環境理工学部環境デザイン工学科)  
(〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

\*\*\* 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科(論文提出時)

\*\*\*\* 正会員 岡山大学教授(環境理工学部環境デザイン工学科)

に毎年投稿されている稲松敏夫の電力土木人物史シリーズ<sup>9)</sup>、他に『近代水道百人』<sup>9)</sup>などがあり、ダム技術者の経歴や活躍を知ることができる。

ダム技術史の構築にあたっては、『土木學會誌』をはじめ、『工學會誌』、『工學』、『水利と土木』、『水力』、『水道協會雜誌』、『農業土木研究』、『セメント界彙報』など戦前に刊行された学協会誌・業界誌に記載された論文・報告の他、当時の教科書や技術参考書の類、さらには技術者の回顧録や座談会の記録から、ダム技術者の間で議論が重ねられていた話題、実際に彼らが携わっていた当時の状況が分かる記録を中心に、ダムの型式に関する発言記事を抽出する。そして、どのダムの築造の際に、どのような技術が、誰によって導入されたのか。それに対する評価はどうであったのか。そして、それがどのように発展、もしくは衰退していったのかを分析し、整理する。

ダム分野における土木史研究もこれまでは個々の事業、構造物が中心であったが、本研究では、技術史の構築を目的に文献の悉皆調査を行い、その中から技術者の発言を抽出して、ダム技術の変遷を辿るという土木史学における新たな方法を試みようとしている。そして、近代のダム技術史が構築されることによって、土木遺産の客観的な評価も可能となる。また、欧米先進国の技術を導入し、わが国の状況に適應するよう改良し、ダム技術を確立していった時期に、当時の技術者がそれをどのように評価し、どう対処していったのか明らかにしてゆくことで、現在、ダムが抱える様々な問題の解決の糸口になるのではなかろうか。

## 2. 戦前にコンクリートダムに関わった技術者

まず、明治から昭和戦前期までの間にコンクリートダムの設計理論の確立、施工技術の開発、実際に現場で、あるいは行政側からダム建設に関わった技術者について、各分野の特徴も含めて紹介しておく。表-1(次ページに掲載)に彼らの生没年もしくは判明している活躍した時期、コンクリートダムに関連する戦前の主な業績や経歴および携わった代表的なダムを示した。

### (1) 上水道

わが国初のコンクリートダムである布引(五本松)ダム、バットレスダムの笹流ダムなどダム界をリードしてきたのが上水道の分野で、佐野藤次郎、小野基樹らの活躍が知られている。佐野は、後に発電、灌漑用ダムにも関与しているし、小野は電力分野の技術者とも交流が深かった。そして、彼らは地方の水道用ダムの建設に指導的立場で招かれることもあった。しかし、地方水道や戦前の特色でもある軍用水道など個々のダム建設で名前の挙がる技師もいるが、彼らのその他の活躍までは知られていない。

### (2) 水力発電

戦前のダム技術のエポックとなる志津川、大井、小牧、塚原ダムなどの建設に、石井颯一郎、石川栄次郎、空閑徳平らダム界を代表する技術者がその中心となって携わった。彼らは、これらのダムの建設に先駆けて、欧米視察を行い、積極的に最新技術の導入を図っていた。群小電力会社に在籍していた多数の技術者は、会社の統廃合もあつてか、各電力会社間で活発に異動し、自らの技術を発揮する場を求めている。また、電力会社と行政側との結びつきも強かった。1939(昭和13)年に電力の国家管理が行われるようになると、通信省の高橋三郎は、市浦繁、新井義輔、高畑政信らを引き抜き、各電力会社の優秀な技術者を集積することによって、ダム技術も含め水力技術の開発が活発化される。このように、電力界全体で技術を開発、共有する技術集団が形成されていたと言えよう。また、久保田豊のように技術者自らが、電力会社を設立することも多く、台湾、満州、朝鮮などへ進出し、盛んに水力開発を行い、ダム建設を行っているのもこの分野の特徴である。

### (3) 農業土木

大正期以降、主要な灌漑排水事業には事業費の1/2を国庫から補助されるようになり<sup>6)</sup>、農林省の権限が強かったためか、県直轄のダム工事でも杉浦翠、安部義正ら農林省の技師や農林省から出向した技師の名が登場する。しかし、戦前の灌漑用のコンクリートダム自体が少なく、上水道や水力発電の分野のように、農業土木界における“ダムの権威”とされる技術者は見られない。

### (4) 砂防

ヨーロッパの砂防工学を学び、わが国で初めて砂防工学を体系づけ<sup>7)</sup>、ダムに関しても解説した諸戸北郎、内務省直轄の砂防事業で、数多くの現場を担当した蒲 孚が代表的な砂防ダムの技術者であろう。戦前を通じて砂防ダムには、アーチ式が採用され、『土木學會誌』や『水利と土木』など主要な雑誌にその工事報告がなされているものの、他の分野ではほとんど認識されておらず、貯水用ダムとはその発展過程を異にしてきた。なお、アーチダムは県営の補助事業でも築造されていたが、地元技術者の名前は挙がっておらず、また内務省の技師がどこまで関与したのか明らかでない。

### (5) その他—耐震・材料・設計論

ダムの専門家ではないが、ダムの耐震設計理論を確立した物部長穂やコンクリートの品質改良、製造技術を開発した吉田徳次郎、真鍋武雄らは、コンクリートダムの設計、施工技術の発展に多大な貢献をした。また、雑誌『工學研究』の社長兼編集者である坂田時和は、国内外の文献を精読し、ダム技術に関する評価、討議を誌上で行った。

表-1 戦前にコンクリートダムに関わった技術者

(著者作成)

| 分野   | 名前                    | 1870 | 1880 | 1890 | 1900 | 1910 | 1920 | 1930 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | コンクリートダムに関連する戦前の主な業績と経歴                                                | 代表的なダム                            |
|------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 上水道  | 吉村 長策<br>(1860-1928)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・神戸市の水道工事で日本初のコンクリートダムを手がける                                            | 布引(1900)                          |
| 上水道  | 佐野 藤次郎<br>(1869-1929) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・日本初のコンクリートダムの建設<br>・日本初のマルチプルアーチダムの指導<br>・水道技師だが、電力、農業土木まで幅広くダム建設に関わる | 布引(1900)<br>大井(1924)<br>豊稔池(1930) |
| 上水道  | 小野 基樹<br>(1886-1976)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・わが国のバットレスダムの先駆者<br>・東京市水道局で、水道用ダムを手がける                                | 笹渡(1923)<br>小河内(1957)             |
| 上水道  | 水野 広之進<br>(?-?)       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・神戸市の水道用ダム建設に従事<br>・地方の水道用ダム建設を指導                                      | 布引(1900)<br>久山田(1924)             |
| 水力発電 | 新井 栄吉<br>(1881-1952)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・東京電力や台湾電力で水力開発に従事                                                     | 田代(1928)<br>武界(1934)              |
| 水力発電 | 鶴田 勝三<br>(1882-1959)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・日本初のアーチダムの設計・建設<br>・工事画報社の社長で、アメリカのダム技術を積極的に紹介                        | 三浦(1942)                          |
| 水力発電 | 森 忠蔵<br>(1883-1952)   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・通信省から日本発送電へ移籍し、三浦ダムの初代所長<br>・『土木学会誌』で欧米の水力技術を紹介                       | 三浦(1942)                          |
| 水力発電 | 菊池 英彦<br>(1884-1973)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・通信省等を経て、球磨川電気、日本発送電などで水力開発<br>・『発電水力学』(アールス)を著す                       |                                   |
| 水力発電 | 石井 翔一郎<br>(1885-1972) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・堤体コンクリートの内部温度に関する初の研究<br>・施工機械の輸入等欧米ダム技術の導入                           | 志津川(1924)<br>小牧(1930)             |
| 水力発電 | 石川 栄次郎<br>(1886-1959) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・機械化施工の推進<br>・大同電力、日本発送電などで中部地方のダム工事に従事                                | 大井(1924)<br>三浦(1942)              |
| 水力発電 | 山本 格<br>(1889-1974)   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・通信省から神戸市水道へ移籍し、千歳ダムを担当<br>・九州送電で九州各地の水力開発に従事                          | 千歳(1919)<br>塚原(1938)              |
| 水力発電 | 萩原 俊一<br>(1890-1978)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・内務省、東北振興電力などで水力開発を指導<br>・『発電水力学』(常盤書房)を著す                             |                                   |
| 水力発電 | 久保田 豊<br>(1890-1986)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・内務省退官後、朝鮮水電等を設立し、朝鮮の水力開発に従事                                           | 赴戦江第一(1930)<br>水豊(1943)           |
| 水力発電 | 佐藤 時彦<br>(1893-1985)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・朝鮮水電でダム建設の現場担当                                                        | 水豊(1943)                          |
| 水力発電 | 高桑 綱一郎<br>(1894-1991) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・中部地方の発電用ダム工事に従事                                                       | 笠置(1936)                          |
| 水力発電 | 山口 直樹<br>(1895-1973)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・物部の「耐震扶壁堰堤」以前にバットレスダムを設計・建設                                           | 高野山(1924)                         |
| 水力発電 | 水田 年<br>(1897-1981)   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・内務省土木試験所で物部長徳の助手として、バットレスダムの耐震設計の研究<br>・東北振興電力や日本発送電などで水力開発に従事        |                                   |
| 水力発電 | 空閑 徳平<br>(1897-1983)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・昭和電力、大同電力などを経て、満洲のダム建設に従事<br>・戦前を代表する数々のダム建設現場を指揮<br>・欧米を視察し最新技術の導入   | 王泊(1935)<br>塚原(1938)<br>豊満(1942)  |
| 水力発電 | 味基 稔<br>(1897-1992)   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・広島電気入社以後、中国地方の水力開発に従事                                                 | 王泊(1935)<br>立岩(1939)              |
| 水力発電 | 野口 誠<br>(1901-1939)   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・東京電灯から通信省技師、電気庁技師<br>・『発電水力概要』(コロナ社)を著す                               |                                   |
| 水力発電 | 伊藤 令二<br>(1902-1990)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・内務省技師、富山県に出身し有峰ダムの主任<br>・『堰堤工学』(アールス)を著す                              | 有峰(1959)                          |
| 水力発電 | 岩本 常次<br>(1903-1993)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・恩師物部の「耐震扶壁堰堤」を採用した丸沼ダム建設に従事                                           | 丸沼(1931)                          |
| 水力発電 | 三野 熊雄<br>(?-1938)     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・東信電気でダム式発電を手がける                                                       | 鹿瀬(1928)<br>豊実(1929)              |
| 水力発電 | 新井 止郎<br>(1907-1970)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・土佐吉野川水力電気をはじめ、四国地方の水力開発に従事                                            | 高敷(1930)<br>大橋(1939)              |
| 水力発電 | 市浦 繁<br>(1912-1989)   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・大同電力で兼山ダムなどに従事した後、通信省の行政官                                             | 兼山(1943)                          |
| 水力発電 | 高橋 清蔵<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・東京電灯、古河鋳業、東北振興電力などで水力開発に従事                                            | 蓬萊(1938)<br>信夫(1939)              |
| 水力発電 | 茂見 東三<br>(?-1973)     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・宇治川電気、上毛電気など各地で水力開発に従事                                                | 丸沼(1931)                          |
| 水力発電 | 松田 又次<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・富山県営電気バットレスダム建設に従事                                                    | 真川(1929)                          |
| 水力発電 | 高橋 三郎<br>(?-1973)     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・鉄道省から通信省に移り水力行政の強化<br>・『発電水力』(岩波書店)を著す                                |                                   |
| 水力発電 | 土屋 洋三<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・日本海電気バットレスダム建設に従事                                                     | 真立(1930)                          |
| 水力発電 | 有坂 誠喜<br>(?-1963)     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・大同電力、鴨緑江水力電気などで水力開発に従事                                                | 笠置(1936)<br>水豊(1943)              |
| 水力発電 | 新井 義輔<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・大同電力を経て通信省の技師<br>・重力ダムの内部応力に関する研究                                     |                                   |
| 水力発電 | 諸川 雄二郎<br>(?-?)       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・富士電力で又又川流域の水力開発<br>・基礎地盤に関する研究で国際ダム会議に論文提出                            | 千頭(1935)<br>大間(1938)              |
| 水力発電 | 高畑 政信<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・宇治川電気を経て、通信省、軍需省水力課の技師<br>・『堰堤』(常盤書房)を著す                              |                                   |
| 農業土木 | 牧 隆泰<br>(1887-?)      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・農林省技師、台北帝国大学教授<br>・バットレスダムをはじめ、各地のダムを農業土木界に紹介                         |                                   |
| 農業土木 | 安部 義正<br>(1901-?)     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・農林省技師で犬上ダムの建設に従事                                                      | 犬上(1946)                          |
| 農業土木 | 木村 久満<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・農林省技師で、バットレスダム、マルチプルアーチダムを農業土木界に紹介                                    |                                   |
| 農業土木 | 杉浦 翠<br>(?-?)         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・農林省技師で豊稔池ダム建設に従事                                                      | 豊稔池(1930)                         |
| 農業土木 | 野呂 勇之助<br>(?-?)       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・兵庫県技師で上田池ダム、山田池ダム建設に従事                                                | 上田池(1931)<br>山田池(1933)            |
| 砂防   | 諸戸 北郎<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・砂防工学を体系づけ、『理水及砂防工学』(三浦書店)を著す<br>・東京帝国大学教授を経て、内務省、農商務省技師               |                                   |
| 砂防   | 蒲 季<br>(?-?)          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・内務省技師で各地の砂防ダム建設に従事し、業界誌に多くの工事報告を行う<br>・『砂防工学』(工業図書)を著す                | 芦安(1928)<br>本宮(1937)<br>白岩(1939)  |
| 砂防   | 鈴木 恭介<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・砂防ダムの断面に関する理論<br>・『實用砂防工学』(丸善)を著す                                     |                                   |
| その他  | 物部 長徳<br>(1888-1941)  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・重力式ダム、バットレスダムの耐震設計論を確立<br>・内務省土木研究所所長、東京帝国大学教授を兼任                     | 恩原(1928)<br>小牧(1930)              |
| その他  | 吉田 徳次郎<br>(1888-1960) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・水セメント比説を説き、コンクリートの品質向上を図る<br>・九州帝国大学教授、塚原ダム顧問                         | 塚原(1938)                          |
| その他  | 坂田 時和<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・工学研究社の社長兼編集者で、ダム技術の紹介とともに誌上での討論                                       |                                   |
| その他  | 真鍋 武雄<br>(?-?)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ・Wa-Ce-Creterの開発(ダム分野では泰泉ダムで初使用)                                       |                                   |

※ 生没年が不詳の場合は、関わったダム、論文や著書などから判明した活躍時期を実線(—)で示している。

※ 「代表的なダム」は、戦前のコンクリートダム(戦前着工で戦後完成のダム、台湾・朝鮮・満洲など外地・準外地のダムを含む)で、括弧内は完成年を示す。

### 3. 技術者の発言から見たコンクリートダム技術の変遷

前述したように戦前のコンクリートダムには多様な型式が見られたが、その支持機構から、①水圧を重力で支える重力ダム、②水圧の大部分をアーチ作用によって兩岸の岩盤に伝えるアーチダム、③遮水壁で受けた水圧を扶壁（バットレス）で支えるバットレスダムに分類できる。①では、その形態から、直線形と曲線形に、③では、遮水壁の形態から、スラブ式とマルチプルアーチ式に分類できる。なお、スラブ式のうち、バットレスを水平材で連結したアンバーセン式がわが国のバットレスダムの主流であった。以下、技術者の記述をもとに、型式ごとにダム技術の変遷をまとめた。なお、型式ごとに戦前までに竣工したダム（現時点で判明しているもの、直線重力式は代表的なもの、および、外地、準外地を含む）の一覧を示した。下段には、各型式に関連した国内外の出来事を記している。

#### (1) 重力ダム

##### a) 最も信頼されていた型式

1900(明治 33)年、わが国で最初のコンクリートダムが重力式で築造されて以降、その評価は、「…安全率大きく従て他の型式の堰堤に比し不経済たるを免れざるも、設計施工比較的簡単なるため既設堰堤の大半は之に屬す、殊に混凝土堰堤の殆んどが之に屬すると云ふも過言ではない」<sup>8)</sup>と述べられているように、多量の資材を必要とするため、あまり経済的ではないが、設計理論が確立されており、安全性の点で最も信頼できる型式であった。

実際にその施工数はコンクリートダムの中では最多で、「人口稠密なる我國に於ては萬一之が缺潰を見れば被害の甚大なることは歐米の比にあらざるを以て築造箇所如何に依ては多少の不経済を忍んでも、本型式を採用す可きであらう」<sup>8)</sup>とまで言われている。戦後すぐに出版されたダムのテキスト『堰堤工学』(1947年)の冒頭においても、「安全の點に於てはコンクリート重力堰堤を第一とするを以て、堰堤建設計畫の主流は何處までも重力堰堤とすべきであり、殊に高さ 70~80m 以上の高堰堤に於ては、先づ餘程の特殊事情なき限り重力堰堤以外の型式を採用す可からざるものと考へる」<sup>9)</sup>とあるように、戦前戦後を通じて重力ダムの安全性に対する評価は揺るぎないものであった。

したがって、この型式における当時の議論の焦点は、堤軸を直線にするか曲線にするかということであった。以下、堤軸を曲線にした曲線形重力ダムの優劣に関する話題に絞って、その変遷を辿る。

##### b) 曲線形重力ダムの採用理由

わが国で最初に曲線形の重力ダムを鳥原(立ヶ原)ダム(1905 年)に採用した佐野藤次郎は、その理由を「横拱ノ働キヲ計算ニ加ヘタルニ非ス只温度ノ變化ニ抵抗シ易カラシメ

ンガ爲メナリ」<sup>10)</sup>と、アーチ作用は設計に考慮していないが、温度の変化に対応するためと述べている。また、小牧ダム(1930 年)の曲線形について、工事主任であった石井頼一郎は、後年の座談会(1954 年 11 月)の場で、「前からダムというものはストレートがいいという説もあつた。しかし高いダムを作るにはやはりグラビテーセクションで少しでもカーブをつけるのが一番安全だという当時の思想に基いてアロロックが出来、そのエンジニアが来て、そのタイプを踏襲した訳です」<sup>11)</sup>と、アメリカのアローロック・ダム(Arrowrock, 1916 年)を手本としていることを述べて、「…地面を掘つたら丁度右岸の川底に大きな断層が現れたが、断層をよけるのに丁度あのカーブがよかつた」<sup>11)</sup>というエピソードも語っている。

##### c) 曲線形重力ダムの有利論

アメリカではどのように捉えられていたのであろう。アメリカ事情を紹介した日本の雑誌『工學研究』には、曲線形の採用理由を「第一、余分の安全を期する爲め…(省略)…第二、曲線式として立積を減じ得る…」<sup>12)</sup>のように紹介されている。「第一」については、「…曲線式では伸縮の自由が利く、そして垂直亀裂の發生並に擴大を妨げる、又一體に、殊に滑出に對して安全の度を増す…」<sup>12)</sup>と述べられている。すなわち、曲線にすることによって、①引張応力による亀裂の發生を減らす、②ダムの安定性を増加させることができると指摘している。ただ、実際にはアーチ計算を行っているわけではなく、どの程度安定性が増加するのか定かではなかった。なお、「第二」の立積に関して詳しい解説はなされていない。

わが国においても同様で、「…堰の應力計算設計等總て普通の重力堰と同様になし拱形をなす爲めの拱の働きを考へざるものにして、只單に餘分強度を與へ其安定を増加せしむるため…」<sup>13)</sup>と、曲線形の導入は安定度を増すためであると明言している。アーチ計算は行っていない点も同じであった。この点について坂田時和は、皮肉をこめて「…米國では事情が許せば大概是曲線式を用うる。それは殆ど一の感情乃至信仰ともいふべきである…」<sup>12)</sup>と発言している。

##### d) 曲線形重力ダムの不利論

一方、アメリカにおける直線形の主唱者の意見として、「…曲線式には過大な應力を發生する危険がある。又温度變化に對する變形が直線式より大きい。無論立積は増加するがそれよりも混凝土打ちが困難な爲めに工費は著しく嵩む」<sup>12)</sup>と、応力と温度變化による變形の影響と施工による工費の点で曲線形が不利であることを紹介している(堤の立積に関する効果は、上記 c)の傍点部の記述と相矛盾する)。そして、先の坂田時和自身も、「…曲線式は仕事場の設備殊に索道の使用を困難にすることを忘れてはならぬ」<sup>12)</sup>と施工性の面から曲線形の不利な点を指摘している。

## e) 曲線であることの有利さの消失

この議論について、わが国における重力ダムの耐震設計を確立した物部長穂は、「何れにしても数十年來論議盡きざる點より見て兩者の安定上の優劣は、若し存在するとしても極めて軽度のものたるは明かにして、我國の現時の方針を見るも其の何れたるを問はず、合理的に設計施工さるれば可なりとして居る…」<sup>14)</sup>と、特にその差は問題ではなく、設計、施工が合理的になされていれば良しとしている。しかし、続けて、「唯我國の如き地震の危険を豫期せざるべからざる國土にありては巨大なる斷面の堰堤に於ては必ず目地に依て適當に區分する事」<sup>14)</sup>と、ダムの大型化に伴って、導入されるようになった収縮継目(横継目)の必要性について説いている。

この収縮継目は、わが国では大井ダム(1924 年)以降、導入されるようになったが、堤体積の大きな重力ダムでは、コンクリートの温度応力を解放して亀裂の発生を防ぐために、アーチダムのように収縮継目にグラウチングが施されていない。

すなわち、収縮継目によってアーチ作用が期待できなくなり、曲線形であることの有利さが失われてしまう。

さらに、前述した戦後間もなく出版された『堰堤工學』では、「…堤體内部應力の理論より考察すれば、應壓力の最も大なる下流部に於ては同一高さの直線式の場合よりも應壓力度大となるを以て、曲線式は不利なりとの説をなす者ある…」<sup>15)</sup>と、曲線形を否定する技術者がいることを述べている。

戦前からコンクリートの内部応力に関する研究をしていた新井義輔は、「…斷面は直線重力堰堤と全く同様にして定めるのであるが、應力はその曲率の影響により直線重力堰堤の場合と異つてくる。一般に曲率の影響を無視することは危険側の誤差となる…」<sup>16)</sup>と述べているとおり、曲線形にすると断面の曲げ抵抗が減る分、直線形よりも応力状態が危険になることが次第に指摘されるようになっていた。

現時点で判明している限り、1940(昭和 15)年の三永ダム以降、わが国で曲線形の重力ダムは築造されていない。

表 2-1 直線形重力ダム

(著者作成)

| 竣工年         | 名称      | 当初の所管   | 所在地  | 諸元                    | 目的 |
|-------------|---------|---------|------|-----------------------|----|
| 1900(明治 33) | 布引(五本松) | 神戸市     | 兵庫   | 堤高 33.33m, 堤長 110.30m | 水道 |
| 1900(明治 33) | 桂       | 海軍      | 京都   | 堤高 12.4m, 堤長 43.6m    | 水道 |
| 1903(明治 36) | 本河内低部   | 長崎市     | 長崎   | 堤高 22.71m, 堤長 115.15m | 水道 |
| 1910(明治 43) | 千歳第一    | 王子製紙    | 北海道  | 堤高 6.401m, 堤長 69.842m | 発電 |
| 1916(大正 5)  | 芦安*     | 内務省     | 山梨   | 堤高 11.5m, 堤長 41.12m   | 砂防 |
| 1918(大正 7)  | 野花南     | 富士製紙    | 北海道  | 堤高 21m, 堤長 264m       | 発電 |
| 1919(大正 8)  | 千苅      | 神戸市     | 兵庫   | 堤高 36.36m, 堤長 106.67m | 水道 |
| 1924(大正 13) | 大井      | 大同電力    | 岐阜   | 堤高 53.4m, 堤長 276m     | 発電 |
| 1928(昭和 3)  | 鹿瀬      | 東信電気    | 新潟   | 堤高 32.60m, 堤長 304.24m | 発電 |
| 1930(昭和 5)  | 赴戦江第一   | 朝鮮水電    | (朝鮮) | 堤高 72.80m, 堤長 402m    | 発電 |
| 1932(昭和 7)  | 上田池     | 兵庫県     | 兵庫   | 堤高 41.21m, 堤長 131.06m | 灌漑 |
| 1933(昭和 8)  | 釜ツ沢     | 内務省     | 栃木   | 堤高 19.7m, 堤長 64.0m    | 砂防 |
| 1934(昭和 9)  | 武界      | 台湾電力    | (台湾) | 堤高 53m, 堤長 ?m         | 発電 |
| 1935(昭和 10) | 王泊      | 広島電気    | 広島   | 堤高 55m, 堤長 128m       | 発電 |
| 1935(昭和 10) | 千頭      | 第二富士電力  | 静岡   | 堤高 64.0m, 堤長 178m     | 発電 |
| 1936(昭和 11) | 笠置      | 大同電力    | 岐阜   | 堤高 40.8m, 堤長 154.9m   | 発電 |
| 1936(昭和 11) | 泰阜      | 矢作水力    | 長野   | 堤高 50m, 堤長 143m       | 発電 |
| 1937(昭和 12) | 本宮      | 内務省     | 富山   | 堤高 22.00m, 堤長 107.40m | 砂防 |
| 1938(昭和 13) | 大谷      | 山口県     | 山口   | 堤高 27.3m, 堤長 59.1m    | 灌漑 |
| 1938(昭和 13) | 塚原      | 九州送電    | 宮崎   | 堤高 87.0m, 堤長 215m     | 発電 |
| 1939(昭和 14) | 大橋      | 四国中央電力  | 高知   | 堤高 73.5m, 堤長 187m     | 発電 |
| 1939(昭和 14) | 白岩      | 内務省     | 富山   | 堤高 63.00m, 堤長 76.00m  | 砂防 |
| 1942(昭和 17) | 三浦      | 日本放送電   | 長野   | 堤高 83.2m, 堤長 290m     | 発電 |
| 1942(昭和 17) | 豊満      | 満州国     | (満州) | 堤高 91.0m, 堤長 1100.0m  | 発電 |
| 1943(昭和 18) | 水豊      | 鴨緑江水力発電 | (朝鮮) | 堤高 107m, 堤長 900m      | 発電 |

### <重力ダムに関する主な出来事>

1925(大正 14) : 物部長穂が「貯水用重力堰堤の特性並に其合理的設計方法」を発表

※ 戦前までに竣工したダムで、代表的なものを示した。

※ 影付きの行のダムは現存しない。

※ 灌漑用ダムで、県直営の事業で行われたものは、「当初の所管」に県名を示した。

※ 外地(朝鮮、台湾、南樺太)、準外地(満州)のダムを含み、「所在地」欄で ( )で示した。

\* : 嵩上げ(1925 年のアーチダム増築)前の竣工当初の部分を示す。

表 2-2 曲線形重力ダム

(著者作成)

| 竣工年         | 名称      | 当初の所管      | 所在地  | 諸元                    | 目的 |
|-------------|---------|------------|------|-----------------------|----|
| 1905(明治 38) | 烏原(立ヶ原) | 神戸市        | 兵庫   | 堤高 30.61m,堤長 122.42m  | 水道 |
| 1910(明治 43) | 大湊第一    | 海軍         | 青森   | 堤高 7.9m,堤長 26.5m      | 水道 |
| 1913(大正 2)  | 黒部      | 鬼怒川水力電気    | 栃木   | 堤高 33.9m,堤長 150.00m   | 発電 |
| 1915(大正 4)  | 飯豊川第一   | 新潟水電       | 新潟   | 堤高 36.85m,堤長 49.60m   | 発電 |
| 1916(大正 5)  | 本庄      | 海軍         | 広島   | 堤高 25.4m,堤長 97.0m     | 水道 |
| 1916(大正 5)  | 大又沢     | 不明(現・東京電力) | 神奈川  | 堤高 18.7m,堤長 90.40m    | 発電 |
| 1917(大正 6)  | 乙原      | 別府町        | 大分   | 堤高 16.36m,堤長 60.6m    | 水道 |
| 1917(大正 6)  | 高原      | 大和電気       | 奈良   | 堤高 20m,堤長 70m         | 発電 |
| 1918(大正 7)  | 大鰐      | 大正水利組合     | (朝鮮) | 堤高 21.21m,堤長 257m     | 灌漑 |
| 1923(大正 12) | 桂ヶ谷     | 小郡町        | 山口   | 堤高 13.4m,堤長 23.6m     | 水道 |
| 1924(大正 13) | 中岩      | 鬼怒川水力電気    | 栃木   | 堤高 26.26m,堤長 107.87m  | 発電 |
| 1924(大正 13) | 帝釈川     | 両備水電       | 広島   | 堤高 62.1m,堤長 35m       | 発電 |
| 1924(大正 13) | 志津川(大峯) | 宇治川電気      | 京都   | 堤高 27.58m,堤長 91.29m   | 発電 |
| 1925(大正 14) | 久山田     | 尾道市        | 広島   | 堤高 21.5m,堤長 75m       | 水道 |
| 1928(昭和 3)  | 羽根越     | 小郡町        | 山口   | 堤高 18.2m,堤長 44m       | 水道 |
| 1928(昭和 3)  | セバ谷     | 京浜電力       | 長野   | 堤高 22.7m,堤長 42m       | 発電 |
| 1929(昭和 4)  | 七番川     | 四国中央電力     | 愛媛   | 堤高 25m,堤長 72m         | 発電 |
| 1930(昭和 5)  | 小牧      | 庄川水力電気     | 富山   | 堤高 79.248m,堤長 300.84m | 発電 |
| 1930(昭和 5)  | 高敷      | 土佐吉野川水力電気  | 高知   | 堤高 11.6m,堤長 53.4m     | 発電 |
| 1930(昭和 5)  | 柿原第一    | 宇和島市       | 愛媛   | 堤高 18m,堤長 50m         | 水道 |
| 1930(昭和 5)  | 芋洗谷     | 九州配電       | 宮崎   | 堤高 25.5m,堤長 69.7m     | 発電 |
| 1934(昭和 9)  | 猪鼻      | 洲本市        | 兵庫   | 堤高 29.55m,堤長 89.21m   | 水道 |
| 1940(昭和 15) | 三永      | 海軍         | 広島   | 堤高 14.2m,堤長 100m      | 水道 |

## &lt;曲線形重力ダムに関する主な出来事&gt;

1889 : San Mateo(Lower Crystal)ダム竣工(アメリカ、堤高 52m,堤長 207m、世界初のすべてコンクリートによるダム)

1916 : Arrowrock ダム竣工(アメリカ、堤高 106.7m,堤長 350.5m)

1925(大正 14) : 物部長穂が「貯水用重力堰堤の特性並に其合理的設計方法」を発表

1928 : St Francis ダム崩壊(アメリカ、完成後間もなく)

※ 戦前までに竣工したダムを示した(現時点で判明しているもの)。

※ 外地(朝鮮、台湾、南樺太)、準外地(満州)のダムを含み、「所在地」欄で( )で示した。

※ 影付きの行のダムは現存しない。

## (2)アーチダム

## a)わが国初のアーチダム

わが国で初めてアーチダムを設計・建設した鶴田勝三は、アメリカの大学を卒業し、現地の水力開発に詳しく、『土木學會誌』や自らが社長を務める『工事畫報』を通じて、アメリカの技術をわが国に多数紹介している。

鶴田は、アメリカのアーチダムの視察をもとに、「我日本ノ如キせめんとノ高價ナル國ニ於テハ此容積ノ最尠キ經濟的ナル拱堰堤ノ方式ノ採用ニツキテハ充分考慮スルノ餘地アルヘント思惟ス」<sup>17)</sup>と、わが国の経済状況を考慮して、アーチダムの導入について所感を述べている。

また、日本のような急流河川でアーチダムを採用した場合に問題となる洪水の処理についても、「…あーち・たいぶハ我日本ノ如キ洪水ノ多キ國ニアリテハ堤頂ノおぼー・ふろーニ堪ヘ得ルヤ疑ナキ能ハサレトモ是ハだむノクレストニおぼー・ふろーでふすニ應シテ適當ノカーウヲ設クレハ越流ハ必スだむ基礎ヨリ充分下流ニ落下スルニ至リ…」<sup>17)</sup>と解決策を打ち出して、日本初のアーチダムとなる浦山ダム(1919 年)

の建設を、次のように『土木學會誌』に報告している<sup>17)</sup>。「…武藏水電株式会社ノ浦山川取入ハ子此型ヲ採用スルニ最好適ナルヲ以テ高サ四十五尺敷巾四尺半徑四十八尺ノ堰堤ヲ目下建築中ナリ…」

## b)アーチダムの設計理論

残念ながら、完成後の浦山ダムに対する鶴田本人や周囲の具体的な評価がこれまでのところ見つかっていない。しかし、後の座談会(1954 年 11 月)の場で、鶴田の言葉ではないが、「まだアーチダム理論の完成していない時分でシリンドリカルフォーミュラという一番簡単な計算式で設計したが、それを許すかどうかという問題になったが肉を少し厚くしておけということ…」<sup>18)</sup>と語られている。

この設計理論である「円筒公式(cylindrical formula)」は、アーチ作用のみで水圧に抵抗するよう計算するもので、当時から「今日迄設計された拱作用のみに依る拱堰堤は弾性理論により拱の解法に依らなければならぬものを大部分單に圓筒公式(cylindrical formula)を使用して居たのである。」<sup>18)</sup>と、その不合理さが指摘されていた。

したがって欧米では、「円筒公式」の後、アーチ作用とカンティレバー作用の両方で水圧に抵抗するものとして計算する「拱頂片持梁法(Crown Cantilever Method)」、続いて、その両者の撓みが一致するように繰り返し計算を行う「試算荷重法(Trial Load Method)」が開発されている。

しかし、わが国ではこれらの設計理論を用いて積極的にアーチダムを建設しようとはしていなかった。それは、この設計理論が、「…非常に複雑なる力学上の假定条件を入れた多くの公式を用ひる非常に面倒なものである」<sup>18)</sup>と計算が複雑であることと、地震の影響が大きいわが国では安全性に対する不安もあった。このような状況に、石井頼一郎は、「…拱状式にすれば工費は可成り減じ得るが唯心配なのは地震の影響である此點新進の技術者に解決を望むこと切なるものがある」<sup>19)</sup>と、アーチダムの利点を主張し、わが国に適した理論の開発を期待している。

一方、重力ダム、バットレスダムの耐震設計論を確立した物部長徳は、わが国ではその理論が未発達で、地震の影響を考慮した場合、非常に危険であることを以下のように指摘している<sup>20)</sup>。「…拱堰堤は其の理論未だ明確ならざるのみならず、空虚時上流向きの地震力を受くる時は拱環に軸張力の作用を免れず極めて危険なるを以て…(省略)…我國に於ては未だその發達を見ざるも…」

そして、欧米で新たに開発された「拱頂片持梁法」等(前述)について、物部は、「…應力計算の方針としては大體最新の合理的方法に據り堤體各點に於て拱と桁との分擔荷重を定むる事となり居るも、今日の方法に於ては充分精確に之を決定するは到底不可能なりと信ぜらるゝ」<sup>20)</sup>と述べ、その正確さに限界を感じている。結局、彼は期待されながらも、アーチを手がけることなく 1941(昭和 16)年に亡くなってしまふ。

#### c) アーチダムの否定論

重力ダムと比較して資材が少なく済むアーチダムについて、「高地に澤山の材料を運び上げる勞は一通りではない」<sup>21)</sup>と、輸送面における有利性が主張される一方で、b)で述べたように、設計理論が未発達であったことから、①安全性に対する不安と、②施工面からアーチダムを否定する意見が多かった。

①については、当時内務省の技師で、物部の助手として耐震設計にも携わった永田 年は、わが国に適したダムの設計法を連載した『水利と土木』誌で、「…未だ理論の完成には至らない…(省略)…拱堰堤の設計理論の現状は前述の如くであるから、貯水池の容量小なるか又萬一缺潰しても被害少き箇所にてのみ築造し得るものである」<sup>22)</sup>とアーチダムの規模、築造場所を制限している。

②の施工面については、「…工事施工上には曲面皆異り

頗る手数を免れず…」<sup>23)</sup>、「…施行方法に於て複雑にして熟練なる技術が大切である、又型枠等も相當費用がかかる」<sup>24)</sup>と述べられているように、その複雑さに伴う、熟練技術の必要性和工費の上昇が指摘されている。

さらに、雑誌『工學研究』には、1931(昭和6)年5月24日の「日刊工業新聞」で「アーチ、ダムの採用論起る」として、次のような逓信省の意見が紹介されている<sup>25)</sup>。「アーチ、ダムは技術的に見て日本向のものではない。それは日本の如き地震國では米國邊りの技術をその儘採用しては到底危険の見地から許可に對し忍びないものがある。勿論アーチ、ダムとグラヴィティ、ダムの建設費はその差も甚しい。併し日本向の所謂耐震性のアーチ、ダムを建設するとすれば結局グラヴィティ、ダムと同様程度の建設費となるから之に對しては尚研究を續けた上で善處することゝしたい」

当時、水力開発で指導的立場にあった逓信省が、アーチダムの採用には消極的であったことも戦前にアーチダムが広まらなかった要因の一つと考えられる。

#### d) 砂防分野におけるアーチダムの評価

結局、戦前の貯水用のアーチダムは浦山ダムのみで、以降一つも造られていなが、砂防分野ではアーチダムに対してどのような評価がなされていたのであろうか。

数多くの砂防工事を担当してきた内務省の蒲 孚は、「…拱堰堤には直線堰堤に比し其體積が遙に小さくて済むから兩岸の岩盤にして信頼し得るものならば是非拱堰堤となすべきである」<sup>26)</sup>と積極的にアーチダムを採用するよう述べている。

砂防ダムで最初にアーチ式を採用した沓沢ダム(1923年)について、「…沓沢堰堤は其の箇所極めて狭い、且つ兩岸の岩石質にして龜裂少く拱形となし工費を節約するを得たる…」<sup>27)</sup>と地盤条件が良く、狭い谷で、アーチダムを採用したことによって工費を節約したことが述べられている。他の施工例(大源太川第一、1939年)でも同様に、「堰堤箇所は河床、兩岸共堅硬緻密な硬砂岩より成り狭く…」<sup>28)</sup>、「…當堰堤の貯砂量一立方米當り堰堤工費は桁違いの安價であり…(省略)…拱堰堤として重力堰堤の二分の一以下の立積で済めた…」<sup>29)</sup>と述べられ、重力ダムと比較して堤體積を半分以下に減らせたことも報告されている。

一方、同じく蒲が担当しながらも、アーチ式を採用しなかった鬼怒川水系の稻荷川筋の砂防工事では、「堰堤の平面形状は總て直線形とす、拱形を用ひざりしは堰堤箇所兩岸が何れも軟岩にして拱座として不充分なるに因る」<sup>30)</sup>と記しているように、砂防ダムにおいては、基礎岩盤が堅固ならアーチ式を選定するのが当然とも受け取れる表現がなされている。事実、砂防分野では戦前に少なくとも10基のアーチダムが築造されている<sup>31)、32)</sup>(次ページの表-3 参照)。

表-3 アーチダム

(著者作成)

| 竣工年         | 名称     | 所管   | 所在地 | 諸元                  | 目的 | 設計理論     |
|-------------|--------|------|-----|---------------------|----|----------|
| 1919(大正 8)  | 浦山     | 武蔵水電 | 埼玉  | 堤高 13.5m, 堤長 21m    | 発電 | Cylinder |
| 1923(大正 12) | 沓沢     | 内務省  | 山梨  | 堤高 22.0m, 堤長 24.19m | 砂防 | Cylinder |
| 1925(大正 14) | 芦安*    | 内務省  | 山梨  | 堤高 7.51m, 堤長 66.60m | 砂防 | Cylinder |
| 1939(昭和 14) | 大源太川第一 | 内務省  | 新潟  | 堤高 18.0m, 堤長 40.09m | 砂防 | 不明       |
| 1939(昭和 14) | 宮海道    | 内務省? | 長野  | 堤高 15m, 堤長 34m      | 砂防 | 不明       |
| 1940(昭和 15) | 尾添第一号  | 石川県  | 石川  | 堤高 16.0m, 堤長 20.83m | 砂防 | Cylinder |
| 1941(昭和 16) | 土合     | 群馬県  | 群馬  | 堤高 11.0m, 堤長 47.00m | 砂防 | 不明       |
| 1942(昭和 17) | (青川)   | 三重県  | 三重  | 堤高 10.0m, 堤長 38.20m | 砂防 | Cylinder |
| 1943(昭和 18) | 釜ヶ淵上流  | 内務省  | 長野  | 堤高 29.0m, 堤長 79.00m | 砂防 | Ziegler  |
| 1943(昭和 18) | (櫛田川)  | 三重県  | 三重  | 堤高 6.0m, 堤長 47.57m  | 砂防 | Cylinder |
| 1944(昭和 19) | 鷺尻川第二号 | 石川県  | 石川  | 堤高 6.0m, 堤長 48.17m  | 砂防 | Cylinder |

#### <アーチダムに関する主な出来事>

- 1854 : Zola ダム竣工(フランス、堤高 42m, 堤長 66m、最初に設計計算を行ったとされるアーチダム)。  
 1866 : F.X.P.Emile Delocre(フランス)が「円筒公式」を発表  
 1904 : Silas H. Woodard(アメリカ)が「拱頂片持梁法」を発表  
 1905 : Lake Cheesman ダム竣工(アメリカ、堤高 68.1m, 堤長 205m、最初に「拱頂片持梁法」を採用したダム)  
 1913 : Hugo F.L. Ritter(ドイツ)が「試算荷重法」を堤唱?  
 1929 : Howell(アメリカ)、Jaquith(アメリカ)が「試算荷重法」を開発  
 1929 : Gibson ダム竣工(アメリカ、堤高 60.7m, 堤長 292.6m、最初に「試算荷重法」を採用したダム)

※ 戦前までに竣工したダムを示した(現時点で判明しているもの)。

※ 影付きの行のダムは現存しない。

※ 「名称」欄で( )で示したものは、名称不明のため河川名を示した。

※ 「設計理論」欄で、「Cylinder」は「円筒公式」、「Ziegler」は「拱頂片持梁法」の一種「Ziegler 法」と呼ばれる理論を意味する。

\* : 嵩上げ後のアーチダムの部分を示す(「諸元」は嵩上げ前の重力ダムの部分は含まない)。

### (3) バットレスダム

#### a) わが国初のバットレスダム

これまでわが国最初のバットレスダムは、1923(大正 12)年の笹流ダムとされてきたが、当時日本の領土であった南樺太に製紙会社の樺太工業によって、1918(大正 7)年にアンバーセントタイプの手井ダムが築造されている<sup>33)</sup>。この樺太工業の社長であった大川平三郎は、後に丸沼ダム(1931 年)を造った上毛電気の社長でもあり、彼がダムに関する技術的知識を持ち得ていたかどうかは定かでないが、どちらも自ら現地踏査を行い、ダム地点を選定している<sup>34)</sup>。

#### b) 笹流ダムと小野基樹

笹流ダムを手がけた小野基樹は、その工事報告をした『土木學會誌』の梗概で、「…鉄筋混凝土造のホロー・ダムの本邦内地に於ける最初の試みにして…」<sup>35)</sup>と述べているだけで、手井ダムの存在については明確にしていない(南樺太が内地となるのは 1943 年なので矛盾はしていない)。

さらに、小野は、これまでにバットレスダムを実際に見たことがなかったにもかかわらず、設計理論が明確な上、経済性、工期の点からこの型式をわが国に広めるため、笹流ダムで採用したことを次のように述べている<sup>36)</sup>。「著者はこの中空式堰堤の推奨者の一人にして、従来迄未だ其現物を實見せし事無しと雖その設計理論の基く所適確にして、而も経済且

迅速工法なるの點は國益上より考ふるも本邦に採りて以て博く普及せしむることを切望し居りたるなり…」

#### c) バットレスダムの利点

バットレスダムがわが国に導入された大正期から昭和 10 年代の初め頃までの、バットレスダムの利点としては、一般的に、①資材の運搬が困難な場所で、②重力ダムが適さない悪い地盤で、③工費が安く、④工期も短く、⑤中空構造のため維持管理が容易なことが挙げられている。

具体的な引用で紹介すると、①と③については、「…混凝土の容積少なく將に山中深き所でセメントの運搬困難な様な所では大に經濟的となるであらう…」<sup>37)</sup>と述べられている。②～⑤については、当時、水力発電事業を監督する立場にあった内務省の萩原俊一は、「…基礎地盤の支持力不足する場合に於ては、全く重力式を採用し能はざるべし。斯かる場合、中空式堰堤(ホローダム)の如き自重少き、従つて比較的 materials を要せざる構造に依らしむるときは、工費及工程を節約し得べきのみならず、其の構造中空なる爲、完成後に於ても、堰堤内部を容易に検査し得られ、工作物の維持、修繕上甚だ有利なり…」<sup>38)</sup>と述べている。

#### d) バットレスダムの耐震問題

一方、バットレスダムが華奢な構造であることから、耐震性に関しては当初から、「まるちぶるあーち及びあんばーせん

たいふモノハ其構造ガ甚シク薄イモノデ高イ構造トシテハ  
震災其他天災地變ニ遭遇スル場合ヲ豫想スル時ニハ獎勵  
スベキモノデナカラウト思ヒマス」<sup>39)</sup>ように指摘されていた。バ  
ットレスダム の有利さを説いている前記の萩原も、先の引用  
に続いて「…之を耐震構造と爲すことに於て尚相當研究の  
餘地を存し…」<sup>38)</sup>と懸念を示すことを忘れていない。

#### e) 物部長穂の耐震設計理論

地震力を考慮した重力ダムの設計理論を確立していた物  
部長穂は、バットレスダムに対する耐震理論について発表し  
た 1928(昭和 3) 年の「支壁式鉄筋混凝土堰堤の耐震法に就  
て」で、「…從來の鉄筋混凝土堰堤は、大地震の災厄を経験  
せざる歐米諸國に於て發達せるものにして、其の設計法を  
視るも何等耐震上の考慮を爲さず。…(省略)…我國の如き  
地震國に於ては、耐震上特別の改良を施さざるに於ては其  
の築造は極めて危険なりと云はざるべからず」<sup>40)</sup>と、わが国  
に適したバットレスダムの必要性を説いている。そして、特に  
バットレスダムの構造上問題となる水平方向の地震力に対し  
て、次の 2 点を提案している<sup>40)</sup>。

- (1) 「建築構造の如く構造物の各部分に作用する水平力  
を構造主體の内力として直下の地盤に傳達すること」
- (2) 「支壁を連續して特別の水平材を設け構造主體に作  
用する水平力を水平に兩岸の岩盤に傳達すること」

特に、(2)は断面の大きな多数の水平材によってバットレスを  
連結するもので、小野が笹流ダムに用いていた手法、すな  
わち、「堰堤は其全延長を略相等しき長さの三部分に区分し、  
各部間は互に連繫を斷絶せるが如き構造となし以て気温變  
化に起因する堤長の伸縮並に震災に基く不測の衝撃等に  
對し各部單獨に抵抗せしむるが如くなす」<sup>41)</sup>と記しているよう  
に、堤体を 3 等分して単独で地震力に抵抗させるものとは対  
照的であった。

#### f) 物部理論に対する評価と施工事例

かくして、物部によりわが国に適したアンバーセン式バット  
レスダムの耐震理論が確立され、「…工學博士物部長穂氏  
の研究に依つて、耐震池壁…(省略)…が考案されたので、  
此の理想的なホローダムを、耐震的に築造する事が可能に  
なり、斯界に於ける多年の宿望が達せられ、容易に實用化  
し得る事となつた」<sup>42)</sup>と高く評価されて、恩原ダム(1928 年)、  
真立ダム(1929 年)、真川ダム(1930 年)、丸沼ダム(1931  
年)と続けて建設されていった。

そして、物部の理論によって、c) で述べた利点が、実現さ  
れるに至った。恩原ダムでは、「現場は地盤が割合軟弱で堤  
の支持力に乏しく、殊に山奥のため材料の運搬に不便で、  
併も工事を速成せねばならぬ事情から、重力堰堤に依らず

此の新式工法に依つたのであるが昭和 2 年 5 月に起工し、  
寒中には混凝土の工事を休止したにも拘はらず、3 年 5 月  
には竣功してしまつた。重力堰堤に較べて工期が大部節約さ  
れたわけである」<sup>43)</sup>と報告されているように、地盤条件、資材  
運搬の他に、工期の短縮が強調されている。

また、真川ダムでは、「…附近の地質は…(省略)…右岸半  
分は黒雲母片麻岩にして剥離性あり、左岸は火山泥流にし  
て暗青灰色凝灰質にして石目無きも粗鬆にして水を滲透す  
る性あり…(省略)…火山泥流の深さは少なくとも 7.80 尺～  
100 尺に及ぶものゝ如くなるを以て重力式堰堤築造は不適  
當と認め物部式耐震構造のホローダムを採用することゝし  
…」<sup>44)</sup>と、極めて悪い地盤でも施工可能であったことが報告さ  
れている。

#### g) 農業土木界におけるバットレスダムの評価

とりわけ、民間の電力会社と異なり、建設費の多くを地元  
で負担しなければならない灌漑用のダムでは、経済性が重  
視されていた。そこで注目されたのが、マルチプルアーチ  
(多拱式堰堤)も含むバットレスダムであった。現在の『農業  
土木学会誌』の前身となる『農業土木研究』では、「多拱式  
堰堤は多くの場合石造高堰堤より経済的である。乃ち此種の  
堰堤は同一断面位置に築造せられたる標準断面の重力式  
堰堤に要する混凝土の 25～50%位で済む」<sup>45)</sup>とその経済性  
が着目されている。

他にも、「…中空式鉄筋混凝土堰堤は他の種の堰堤に比  
して築造せられる地盤の如何を問はず設置せられ比較的經  
済的で而も農業上の旱魃工事は迅速を必要とするから若し  
工事施行期間が遅延した場合は其の逐年の損害は激甚な  
る故に此の種の堰堤は非常に有利である」<sup>24)</sup>と経済性と併  
せて、地盤の問題および農作業の観点から見た工期の点で  
も有利であることが述べられている。

重力ダムに適さない地盤で築造が可能なこともバットレス  
ダムの利点であったが、バットレスダムの一種であるマルチ  
プルアーチをわが国で戦前、唯一、採用した豊稔池ダム  
(1930 年)の状況が、次のように報告されている<sup>46)</sup>。「堰堤とし  
て多拱式が採用されたのは基礎岩盤の関係によるものであ  
る。それは築造當初、岩盤の掘鑿工事進捗するに従ひ岩層  
は漸次緻密の度を加へたが、豫期した如き程度には容易に  
至らず…(省略)…當初設計の重力型石堰堤に比し築堤材料  
に於て約 5 割の増加を要することになり、種々差支あるを以  
て多拱式に設計が變更されたのである」

1932(昭和 7)年の『農業土木研究』、すなわち豊稔池ダム  
完成後のマルチプルアーチの評価として、「現今築造され  
る石造高堰堤の中で堰堤の各部が最も有効に働き且つ經  
済的であるのは先づ此の多拱式堰堤であると斷定しても差  
支へない」<sup>45)</sup>とまで言われている。

## h) バットレスダム の 欠 点

物部の理論により耐震性も考慮され、利点ばかりが強調されて、もてはやされたバットレスダムであったが、施工面および凍害という観点から問題点が指摘された経緯がある。

まず、施工面に関しては、バットレスダム導入の初期段階で、すでに、イタリアのグレノ・ダム(Gleno, 1923 年)の崩壊事故を受けて、「…マルティブル、アーチなどは仕事の性質が細かいものであるからそれだけの注意を拂つて作らなければ安全を期し難い」<sup>47)</sup>と指摘されている(グレノ・ダムは、施工不充分で完成後すぐに崩壊した<sup>48)</sup>)。

凍害に関して、まず、標高 2700m の高所に造られたアメリカのマルチプルアーチダムの被害状況が、「…氷は単に表面のみでなく、薄い層ではあるが、或る深さ迄堰堤面に於て結氷して居ることが分つた即ち損害は唯表面に張詰めた氷のみではなく、分解は中高迄も達し、冬渗透水が生じたのであつた…(省略)…とにかく多拱式堰堤は非常の高地には適さぬ」<sup>49)</sup>のように報告されている。

また、笹流ダムを手がけた小野基樹は、1936(昭和 11)年、第 2 回大堰堤会議(アメリカ・ワシントン)に出席した際のことを、後年、次のように述べている<sup>50)</sup>。「…北欧諸国・スウェーデン(実際にはノルウェー)からのレポートによれば凍害による壊滅的な被害によってコンクリートダムを作り直したとの数例も報告され今さらながらその恐ろしさに驚愕とした次第であつた」

凍害に関する報告に衝撃を受けた小野は、ただちに函館市に調査を指導する。そして、1940(昭和 15)年に行われた笹

流ダムの風化調査では、「…風化せりと認められる部分は扶壁の外面 6cm 位に達していた」<sup>51)</sup>と最大で 6cm の深さまでバットレスに凍害が進行していることが判明した。このことが契機となったか、ならないかははっきりしないが、昭和 10 年代からバットレスダムの建設がめっきり少なくなっていくた。

## i) バットレスダム の 衰 退

コンクリートダムの“権威”石井頼一郎は、1938(昭和 13)年発行の『セメント界彙報』で、「…プレーンコンクリートの代りに鉄筋コンクリートにしなければならぬし、やつて見ると始め思たより多額の工費を要する。そして其成績は餘り香ばしくない。此故にバットレス式は將來餘り行はれまいと思ふ…」<sup>19)</sup>と、工費と施工実績の面から、バットレスダムが今後広まらぬと予測している。

事実、その前年の 1937(昭和 12)年に完成した三滝ダム以降、アンバーセン式(いわゆる物部の「耐震扶壁堰堤」)は造られていない。バットレスダムとしては、1940(昭和 15)年頃に海軍の手で小笠原諸島父島に境浦ダムが築造された例はあるが<sup>52)</sup>、このダムは水平材がないためアンバーセン式ではなかった。マルチプルアーチについても、結局、戦前は豊稔池ダム(1931 年)のみに終わった。戦後、大倉ダム(1961 年)が登場するが、スパン 100m を優に超す 2 連のアーチを敷幅が 50m 以上もある特異な形式(バットレスというよりもアンカーで支える構造)で、小アーチが多数連なる典型的なマルチプルアーチとは異なるものであった。

表 4-1 スラブ式バットレスダム

(著者作成)

| 竣工年          | 名称  | 当初の所管  | 所在地   | 諸元                    | 目的  | 型式      |
|--------------|-----|--------|-------|-----------------------|-----|---------|
| 1918(大正 7)   | 手井  | 樺太工業   | (南樺太) | 堤高 21.21m, 堤長 145.44m | 製紙? | アンバーセン式 |
| 1923(大正 12)  | 笹流  | 函館市    | 北海道   | 堤高 25.30m, 堤長 199.39m | 水道  | アンバーセン式 |
| 1924(大正 13)  | 高野山 | 信越電力   | 新潟    | 堤高 21m, 堤長 124m       | 発電  | アンバーセン式 |
| 1927(昭和 2)   | 小諸  | 東信電気   | 長野    | 堤高 15.15m, 堤長 94.5m   | 発電  | アンバーセン式 |
| 1928(昭和 3)   | 恩原  | 中国合同電気 | 岡山    | 堤高 24.03m, 堤長 93.64m  | 発電  | アンバーセン式 |
| 1929(昭和 4)   | 真立  | 日本海電気  | 富山    | 堤高 21.8m, 堤長 61m      | 発電  | アンバーセン式 |
| 1930(昭和 5)   | 真川  | 富山県    | 富山    | 堤高 19.1m, 堤長 105m     | 発電  | アンバーセン式 |
| 1931(昭和 6)   | 丸沼  | 上毛電力   | 群馬    | 堤高 32.1m, 堤長 88.2m    | 発電  | アンバーセン式 |
| 1937(昭和 12)  | 三滝  | 山陽水力電気 | 鳥取    | 堤高 25.00m, 堤長 82.50m  | 発電  | アンバーセン式 |
| 1940(昭和 15)頃 | 境浦  | 海軍     | 東京    | 堤高約 10m, 堤長 25.2m     | 水道  | (水平材なし) |

### <スラブ式バットレスダムに関する主な出来事>

- 1903 : Nils F. Ambursen がバットレスダムの特許を取得
- 1928(昭和 3) : 物部長穂が「支壁式鉄筋混凝土の耐震法に就て」を発表
- 1928(昭和 3) : 小諸ダム崩壊
- 1936(昭和 11) : 第 2 回国際大堰堤会議(小野基樹がノルウェーの凍害に関する報告に衝撃を受ける)
- 1939 : Passum Kingdom ダム竣工(アメリカ、堤高 57.8m, 堤長 835m、スラブ式の世界最高)

※ 戦前までに竣工したダムを示した(現時点で判明しているもの)。

※ 外地(朝鮮、台湾、南樺太)、準外地(満州)のダムを含み、「所在地」欄で( )で示した。

※ 影付きの行のダムは現存しない。

表 4-2 マルティプルアーチ式バットレスダム

(著者作成)

| 竣工年                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 名称  | 施工  | 所在地 | 諸元                   | 目的 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|----------------------|----|
| 1930(昭和 5)                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 豊稔池 | 香川県 | 香川  | 堤高 31.12m, 堤長 128.0m | 灌漑 |
| <マルティプルアーチ式バットレスダムに関する主な出来事><br>1804 : Mir Alam (Meer Allum)ダム竣工(インド、堤高 12m, 堤長 750m)<br>1908 : Hume Lake ダム竣工(アメリカ、堤高 12m, 堤長 206m、初の鉄筋コンクリートのマルティプルアーチダム)<br>1923 : Gleno ダム崩壊(イタリア、完成後間もなく)<br>1934? : 水社ダム(台湾・日月潭水電)をマルティプルアーチダムからアースダムに設計変更<br>1939 : Bartlett ダム竣工(アメリカ、堤高 87.48m, 堤長 243.8m、戦前世界最高) |     |     |     |                      |    |

※ 戦前までに竣工したダムを示した(現時点で判明しているもの)。

#### 4. 結論

戦前のダム技術者の発言をもとにして、型式ごとに欧米技術の導入、その評価、発展・衰退の過程を明らかにし、ダム技術の変遷を辿った。その結果として、以下のような結論が得られた。

##### (1)重力ダム

- ・重力ダムは最も安全で信頼できる型式という評価で一致しており、関心は曲線形重力ダムの優劣であった。
- ・亀裂の発生を防ぎ、安定性を増加させる目的で曲線形の重力ダムが採用された。
- ・ダムの大型化に伴う収縮継目の導入で曲線形の有利性が失われたこと等から曲線形重力ダムは衰退していったと推測される。

##### (2)アーチダム

- ・経済性の面から期待されながらも、戦前のわが国ではアーチダムが受け入れられなかった。
- ・その要因として、設計方法の不合理性または複雑さ、および施工の煩雑さが挙げられる。
- ・地震国のわが国では安全性が疑問視され、その採用に消極的であった。
- ・砂防分野では、その経済性が高く評価され、可能な限りアーチ式が採用されていた。

##### (3)バットレスダム

- ・日本最初のバットレスダムは、1918(大正 7)年に樺太工業が手がけた手井ダムである。
- ・物部長穂が、わが国に適した設計理論を開発したことにより、地盤の悪い所、資材運搬が困難な所、工期の制限がある所などで、一時もてはやされた。
- ・凍害問題、施工性の面からバットレスダムは衰退していったと推測される。
- ・マルティプルアーチも同様に、戦前は豊稔池のみ。

本論文では、紙面の都合もあり、型式ごとの変遷にとどめたが、今後は、①設計(安全率、設計荷重、収縮継目など)、②堤体材料(材料、配合など)、③施工(基礎処理、打込み、

機械など)へも展開させて、近代日本におけるダム技術史の確立を目指す。

#### 謝 辞

土木資料探索会を主宰される藤井肇男氏には、資料の収集、人物史に関して貴重なご教示をいただきました。心から感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 『水力技術百年史』、水力技術百年史編纂委員会、電力土木技術協会、1992
- 「コンクリートダムにみる戦前のダム施工技术」、松浦茂樹、土木史研究、18、1998、pp.569-578
- 「電力土木人物銘々伝」、電力土木、215-217・219-221・223-232・234・236-237、1988-1992
- 「電力土木の歴史―第2章 電力土木人物史」、稲松敏夫、土木史研究、13-22、1993-2002
- 『近代水道百人』、近代水道百人選考委員会、水道新聞社、1988
- 『日本土木史―大正元年～昭和15年』、日本土木史編集委員会、土木学会、1965、p.476
- 『日本砂防史』、全国砂防治水協会、1981、p.448・p.515
- 「堰堤の設計に就て〔一〕」、永田 年、水利と土木、1.2、1928、p.26
- 『堰堤工学』、伊藤令二、アルス、1947、p.11
- 「神戸市水道擴張水源工事」、佐野藤次郎、工學會誌、285、1906、p.211
- 「発電水力の歴史を語る座談会(1)」、発電水力、15、1955、p.40
- 「高堰堤に就いて」、坂田時和、工學研究、1、1923、p.2
- 「拱堰」、小川敬次郎、工學、5.4、1918、p.194
- 「伊太利貯水用堰堤條令に就て〔二〕」、物部長穂・中野稔、水利と土木、3.7、1930、p.25
- 前掲 9)、p.127
- 『発電水力(下) 高堰堤』、新井義輔、佐々木図書出版、1951、p.86
- 「北米合衆國輓近ノ水力 討議」、鶴田勝三、土木學會誌、6.4、1920、p.743
- 『コンクリート堰堤』、良本正勝、淀屋書店出版部、1932、p.77
- 「堰堤を主としたるコンクリート工法の趨勢に就て」、石井頼一郎、セメント界彙報、364、1938、p.326
- 前掲 14)、p.29
- 「拱堰堤に就て」、工學研究、88、1931、p.11
- 前掲 8)、p.29

- 23)『発電水力之設計並實例』, 山里尚行, 1934, p.141
- 24)「中空式鐵筋混凝土堰堤の理論と設計」, 木村久満, 農業土木研究, 2.3, 1930, p.250
- 25)「堰堤の温度應力」, 工學研究, 91, 1931, p.37
- 26)「砂防堰堤に就て(四)」, 蒲 孚, 工學, 10.4, 1923, p.220
- 27)「富士川支川御勅使川砂防工事」, 蒲 孚, 土木學會誌, 14. 3, 1928, p.347
- 28)「信濃川支川魚野川小支大源太川第一號堰堤」, 蒲 孚, 水利と土木, 13.7, 1940, p.18
- 29) 前掲 28), p.19
- 30)「鬼怒川支川大谷川小支稻荷川砂防工事」, 土木學會誌, 蒲 孚, 15.12, 1929, p.896
- 31)「砂防アーチダムについて」, 中村二郎, 河川, 92, 1953, pp.29-30
- 32)「長野縣・犀川支薄川筋砂防堰堤工事」, 水利と土木, 13.3, 1940, 口絵
- 33)「豊眞線寫眞状況」, 工事畫報, 4.12, 1928, pp.16-17
- 34)『大川平三郎君伝』, 竹越三叉, 圖書出版社, 1990, pp.140-141・p.168
- 35)「函館市水道貯水池に築造せる中空式鐵筋混凝土堰堤」, 小野基樹, 土木學會誌, 10.4, 1924, p.739
- 36) 前掲 35), p.742
- 37)『水力電氣』, 高橋三郎, 日本工人俱樂部, 1926, p.119
- 38)「水利發電事業者に望む」, 萩原俊一, 水利と土木, 1.3, 1928, p.8
- 39)「北米合衆國輓近ノ水力」, 岡崎文吉, 土木學會誌, 6.1, 1920, p.27
- 40)「支壁式鐵筋混凝土堰堤の耐震法に就て」, 物部長穂, 地震研究所彙報, 5, 1928, pp.125-126
- 41) 前掲 35), p.743
- 42)「中國合同電氣會社恩原貯水池に就て」, 工事畫報, 5.8, 1929, p.14
- 43) 前掲 42), p.16
- 44)「眞川發電所工事報告」, 松田文次, 土木學會誌, 16.5, 1930, p.181
- 45)「多拱式堰堤の理論と設計」, 木村久満, 農業土木研究, 4.1, 1932, p.49
- 46)『本邦灌溉排水工事圖譜』, 農業土木学会, 1933, p.16
- 47)「伊太利グレン堰堤の破壊(一)」, 工學研究, 11, 1924, p.16
- 48)「グレン溪谷に於ける堰堤の破壊」, 土木學會誌, 10.3, 1924, p.692
- 49)「多拱堰堤に就て」, 工學研究, 50, 1928, p.33
- 50)『水到渠成一東京の水源・多摩川と共に六十年』, 小野基樹, 新公論社, 1973, p.105
- 51)「函館市水道貯水池堰堤のコンクリート風化について」, 水道協會雜誌, 165, 1948, p.38
- 52)『小笠原村戦跡調査報告書』, 小笠原村教育委員会, 2002