

Tetonダムはなぜ壊れたか(その2)?—原因と教訓

福島啓一

正会員 技術士 博士(工学) (〒270-1163 我孫子市久寺家1-23-8)

E-mail: kei1fukuq@outlook.jp

USBRにより建設されたロックフィルダム, Tetonダムは初期湛水中に決壊した。直ちに事故調査委員会が設けられ, 報告書も出された。その後も事故原因などについて論じたものがあるが, なお未解明の部分も多い。前報後に入手した資料を加え, 従来の意見とかなり視点を変えて原因を追及し, また多くの教訓を提示した。なるべく前報と重複しないように書いたので, 少し分かりにくい読み合わせをもらいたい。

Key Words : embankment dam, rockfill dam, dam failure, piping, seepage, filter, safety management

1. 事故の概要

ティートンダムはアメリカ合衆国開拓局(または開墾局, USBR)により建設された高さ93m, 貯水量3.55億 m^3 のロックフィルダムである。1975年10月に盛立てを完了したが, 湛水中の1976年6月5日(土)に崩壊した。被害は死者11名, 流出家屋25,000戸, 浸水面積300 km^2 , 被害総額4億ドル以上に及んだ。

「川を150km下ったところにはアメリカンフォールズ貯水池があり, ティートン・ダムの4倍の水を溜めていた……このダムがティートン川の洪水の圧力に耐えられないほど弱いとすれば, その結果どのような惨事になるかは推して知るべしだ……とるべき行動はただ一つ, アメリカンフォールズ・ダムを空にすることだ……1万人の開墾局職員と, 太平洋岸に至るまでの300万を超す住民が, 月曜の早朝貯水池が満たされ始めるのを, かたずを飲んで見守っていた。しかし洪水の残滓は余水路を乗り越えることもなかった」¹⁰⁾。3日間でなんとかアメリカンフォールズダムを空にすることが出来た。このダムは洪水吐部分が重力ダムでその両側にコンクリート遮水壁付きのロックフィルダムがある。ロックフィルダムが越流に弱いことは周知のことである。越流を防げたことは誠に幸いであった。

2. 限界流速, 限界水圧の誤り

土が浸透流を受けると押流そうとする力(d の2乗に比例する)を受けるが, 小さい粒子は抵抗力が小さく(粒径 d の3乗に比例する)押し流される。そこでコア内の流速ないし動水勾配を限界値より低く抑えると安全との理論がかなり広く普及しているが, これは誤りである。その研究は上向きや下向き流の場合だけを考えているが, ダム下流側法面では必ず下向き流れになる。下向き流れで, 粒径が小さければどん

なに流速が小さくても掃流が起こり, パイピングに発展する危険がある。表面張力による法面安定も崩れて流れる。そのためチムニー式のフィルターを堤体中央付近に入れ, 浸透流を堤体下流法面より下に導き, 流出地点では必ず上向きの水流にするのが土石ダム設計の基本である。

ごく小さい細粒が流されるとそのため水の流路が少し大きくなる。径が少し増えれば流速は流量は大きくなる。水路の径 r に対し, 流速 V は $r^{2/3}$ に, 流量 Q は $r^{8/3}$ に比例する。マンニング式を用いれば

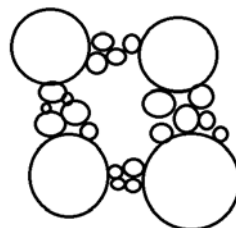
$$\text{流速}V\text{は } V = (1/n) R^{2/3} I^{1/2} = (2.92401/n) r^{2/3} I^{1/2}$$

$$\text{流量}Q\text{は } Q = \pi r^2 v = (2.92401 \pi / n) r^{8/3} I^{1/2}$$

流量 Q の p 倍だけ, 土砂が流出するとすれば, その分流水孔の断面積や流速が増え, これを繰り返して, ついにはダム全体の破壊にいたる。半径が r_1 から r_2 までに増える時間 Δt は $\Delta t = 1.0272 n \ell I^{-1/2} [r_2^{-2/3} - r_1^{-2/3}]$ 。これでパイピングの進行が計算出来る。 $p=0.01$ と仮定するとほぼ半日で3億 m^3 の水が流出する計算になる。

3. フィルターの役割, 必要性, 重要性

パイピングを防ぐ手段はコアの下流側にコアの土



粒子より少し小さい空間があるフィルター層をもうけて, 水は通しても土粒子は通さないようにするしかない。フィルターの中の小さい粒子が流される危険があるときはさらに大きな粒子からなる第2, 第3のフ

ィルター層を作る。さらに流出口では必ず上向きの水流になるようにする。土は大きな粒子が互いに接しているとは限らないので小さな粒子といえども流出させない対策が必要である。これが安全なダム設計の基本である。

4. Fontenelleダムの事故と反省

Tetonダムの事故に似た事故が10年前に起きていた。『1964年に完成したフォントネルダムは河床上の高さ39mで……530m³/s容量のダム中央付近にある放水路……放水路の容量が大きいのは洪水吐の容量を増やすより工費が安かったからである』⁹⁾。『1,500mの広い河床にも、右岸の急勾配部にもキートレンチを作った……開拓局の盛立てダムでは初期湛水後に追加の注入をするのが普通であった』¹²⁾。『4億m³の貯水池の初期湛水は1964年4月に始まった……水位が14.9m上がった時、610m下流の土採り場床で漏水が始まり、0.17m³/sの流量で安定した……1965年春の雪解けで湛水は続き、1965年6月初めには約25.9m深さに達した。次いで965m下流の左岸絶壁から漏水し始めた……9月3日の朝、ダムの高さ半分くらいの所の右岸側下流法面に水濡れ点が見えた……その午後の流量は約0.14m³/sと見積もられた。地方事務所は下流住民に立ち退き準備の警報を出した。翌日朝流出量は約0.59m³/sに増え、8,028m³の土砂が下流法面から流出したと見積もられた。浸食を止めるため下流法面の孔に土砂が投入され、浸出水は安定したように見えた。9月5日朝放水路を全開し、6日朝には貯水池水位は当初より2.4m下がった。その午後、上流縁近くのダム堤頂で約6.1m径の陥没が起き、約9.1m沈下し空洞の側面には基岩が露出した。貯水位は漏水が十分停止するまで1日約1.2mの早さで低下した』⁹⁾。『土曜朝危機を脱したと新聞発表……開拓局4地区技師のCrandallはLeak at Fontenelleと言う文書で詳しく事故について記録し、開拓局の内部文書に発表した……編集会議の後、開拓局はこれを印刷しないことにきめた。これらは42年後地元の図書館より発見された』¹²⁾。開拓局は事故隠しをした。

『現在、あるいは当時も開墾局の幹部、ベテラン、新人を問わず内省らしきものはほとんど見せていない……実際には、全部が全部そうだというわけではなかった……フォントネルの後始末をしなければならなかったソルトレーク地方事務所長、デブ・克蘭ダルは……他の者たちが気づいていなかったことに気が付いたようだった。開墾局が傲慢の罪を犯していることに、ベルポートへの手紙の中で……彼は大規模な調査を行うことを局に求めた……「我々の不偏不党と客観性という立場を維持するためにも、私はフォントネルの補修を評価するための調査委員会の設置を強く進言いたします」……委員会には「局とも政府とも無関係のしかるべき専門家」が参加すべきであると鋭くつけ加えた。これに対して、ベルポートは頭ごなしに異を唱えた……アースダムの設計、建設に関しては、当局が一番能力を持っております。国中のコンサルタント会社に勤めるアースダムに詳しい人間を調べれば、相当な割合で当

局か工兵隊の出身であることが明らかになるのではないかと、私は強く疑っております。また、大学の地質学の教授が当局の審査に参加することについても、私はきわめて懐疑的に考えております』¹⁰⁾。

さらにBellportは『ICOLD会議に提出された論文で……“弱点は盛立てでなくアバットメントにあることは明らかである。多くのダムが同じような基礎の上にある……基礎の動きを防止するための浅い位置での十分なグラウトは急な勾配のため圧力が高く出来ず困難であった”……さらにBellportは「1940～60年の20年間のグラウトの列数と量を減らすますすの大胆さはグラウトなんか最も無駄な物だ」という哲学を証明するかの如くだった。開拓局も同じで、欠陥が容易に修理できそうな場合でも、try and see(試しにやってみて具合を見る)」というのがフォントネルダムで事故が起きるまでにますます強く受け入れられてきた成功法だった』⁹⁾と述べている。

1965年11月19日に工兵隊のMissouri河管区(MRD)技術主任K.S.Laneは部下数名、開拓局のFred Walker, Mr. Hatchを伴い現地を訪れ報告書を書いた。またこの報告書は開拓局のBellportにも渡した。「これは岩基礎に接する面でのパイピングによる事故で……パイピングの管路が大きくなると、これがさらに大きな浸食を加速し……これを参考にして工兵隊では設計中および工事中のカットオフトレンチの下流側にフィルターを設けた……開拓局では詳しい情報は伝えられず、原因は地盤にあると言うだけであった。これにより設計方針が変わることはなかった」¹³⁾。開拓局はTetonダムの事故を防げたはずのこの貴重な教訓を生かさなかった。Tetonダムと同じ頃工兵隊は似たような地質の所にRirieダムをつくった。そこにはちゃんとフィルターがあり、事故は起きなかった。

5. なぜ流心部は壊れなかったか(フィルターの謎)

Tetonダム右岸部の地山の設計に問題があったことは勿論であるが、流心部にも問題が無かったわけでは無い¹²⁾。それでもそこでは壊れなかったのはなぜか?そもそも開拓局のアースダム、ロックフィルダムではカットオフトレンチは沢山あり、そのコアの両側には殆どフィルターがない。従って、多くのこの型のダムでパイピング破壊が起きても不思議はない。しかし何故か壊れたのはTetonダムとFontenelleダムだけである。ここにフィルターの不思議な性質が隠されている。

フィルターが径Dの球形粒子から出来ているとすれば、その中を通過出来る粒子の径dは0.15D以下である。しかし実際には粒子同士でアーチが出来て空隙径の1/3径以下の粒子しか通過できないことが多い。さらに湛水速度が非常に遅いとか、水圧が低いとか、粒子が角張っているとか、小さくて粘着力もある

とかの場合にはさらにアーチが出来やすくなり、小径の粒子でも流れ出ないことがある。粉粒体力学の教科書では「容器底の排出口が粒子の大きさよりもはるかに大きいにもかかわらず、流出しないか、しばしば流出が停止することがある。この現象を閉塞(clogging)現象という。また粒子同士がアーチ構造を形成して閉塞する現象を架橋(bridgingあるいはarching)現象という。限界流出孔径(critical outlet diameter)は……通常4.1、粉碎された粒子では6.8、水分を含んだもの、付着性強いものではさらに流れにくい」とある。フィルターが目詰まりして漏水が止まるか、細粒分が流出して透水係数が大きくなりパイピング破壊を起こすかどうかは粒子の粒径、形、表面のでこぼこ、付着性のものが付いているかどうか、水圧、流速などに関係する複雑な現象である。

フィルターの設計は安全率が大きくて、実際には河床に切り込んだフィルターのないキートレンチでも滅多にパイピングを起こさない。しかも地上に流出する時は上向き流になるので、限界流速則が成り立つ。Tetonダムではトレンチの兩岸の岩盤の割れ目があまりにも大きく(ライスナー¹⁰⁾によればそれは洞窟)、そこにコアが接していたが、フィルターはなく、しかも流出点は絶壁の上で、下向きに流出した。多くのダムでは河床砂礫がフィルターの役をして僥倖により事故にならなただけである。

TetonダムとFontenelleダムは貯水量(3.55億 m^3 と4億 m^3)、洪水吐容量(510 m^3/s と566 m^3/s)はほぼ同じであるが、高さ(93mと39m)と、排水路容量(24 m^3/s と510 m^3/s)と湛水速度(9ヶ月/93mと16ヶ月/39m)が違い明暗を分けた。

6. ダムの歴史と事故の遠因

「20世紀になると次第に大きなダムが出現する傾向となってきた。とくに顕著なことはフィルダムの寸法の増大傾向である……各10年ごとに最高高さは30mづつ増え、ついに1980年代には高さが244mを超えるに至った」⁸⁾。最初は均一型の土堰堤がつけられた。『多分当時の建設機械では砂利材料の取り扱いが難しく、かたや土材料は比較的容易に入手できた。土材料の内部侵食(パイピング)の機構はまだ分かっていなかったが、ダム設計者は貯水池からの浸透による潜在的問題を、カットオフ溝や止水壁により制御しようと努力するなど、理解してはいた。設計者は貯水池からの水頭の2倍より厚い上流の土不透水層をつくった』⁹⁾。しかし下流法面で浸透水によるパイピングが起き壊れることが多かった。「まず下流法尻に、次に下流側堤体下に、排水工をつくり、次には堤体ほぼ中央に鉛直に排水工を造る工夫(チムニー式ドレーン)がされ、下流法面に水が流れ出ないようにした。チムニー式の最初は1915～1918年に造られた

Sherburne Lake Dam(H=87ft)のようである」⁴⁾。この最初のチムニー式ダムは開拓局でつくられたものである。しかしアーサーは『貯水用ダムとして均一型ダムをつくる場合には、内部排水設備を有するように修正すべきである』¹¹⁾と述べて、ダム底に入れるフィルターの図を示しているが、チムニー式はどこにも示されていない(アーサーは当時ダム課技師、Tetonダム崩壊時は主任技師)。技術の伝承が途絶えていたようである。

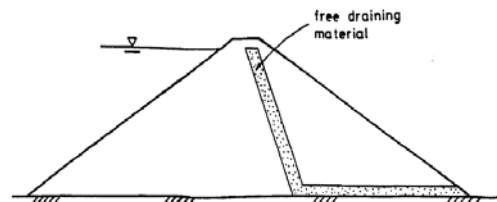


図2
チムニー
式のフ
ィルター

削岩機やダイナマイトが発達し、岩掘削が容易になった。遠くから土材料を運ぶより近くの山を切り崩してつくるダムの方が安く出来るようになった。『1850年頃から、カリフォルニアの金採掘者は木板で遮水するロックフィルダムをつくったが、高さは38mまでで、多くの破壊事故を起こした』⁵⁾。次に木板の代わりに表面をコンクリートで遮水するダムが現れた。これは大成功でSalt Spring Dam(H=101m, 1931年)などの高いダムもつけられた。

『これと原理的に殆ど同じダムが40年以上も前から米国の西部でいくつか作られていた。これらのダムは下流ゾーンが捨石で作られ、上流ゾーンは不透水性土で作られている。このタイプの最も古いものは1893年にニューメキシコ州のPecos河に作られたAvalonダムやLake McMillanダムで、高さは約15mである。これに続いて殆ど同じ断面を持つアースロックダムが少なくとも6個作られた。／しかしこれらのダムには、アースとロックフィルの間にフィルターが設けられなかったため、これら初期のダムは殆どすべてパイピングによって局部的にあるいは完全な破壊を受けた。最近の破壊例は……Schofieldダムで……かろうじて完全な崩壊だけは避けることが出来た。／Schofieldダムの失敗から、岩石を投下して盛り立てたロックフィルの大きな下流ゾーンとし、転圧土のコアとを組み合わせる設計法は長い間考慮されなかった』⁴⁾。開拓局でもこの型のダムがいくつか造られた。しかし「多分開拓局のではないこの型のダムの崩壊のため、この型のダムの建設はなくなった」⁴⁾。

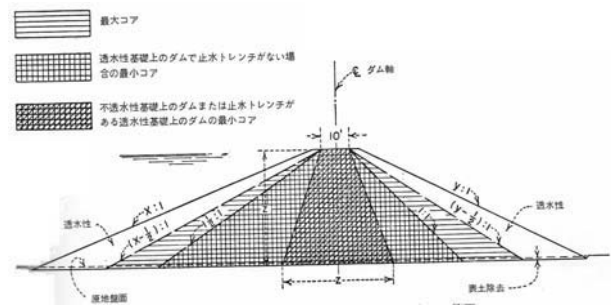
「1942年、米国のアルミニウム会社がノースカロライナ州につくったNantahala Dam(H=250ft)を建設する際に、新しいタイプのダムが紹介された。……堤体の主要部は、採石した岩石からなる大きい下流ゾーンであり、これは高いリフトで岩石を盛り立てて灌水する方法で施工したが、この施工法は上流面に鉄筋コンクリートの不透水性版を設ける従来のロック

フィルダムと変わるところはなかった。しかし Nantahala ダムでは、遮水層としてコンクリートスラブを使用する代わりに、厚さと粒度を変えたフィルターで上下両側を保護された薄い傾斜した転圧土のコアを使用した⁴⁾。「4.5m 厚さの第1フィルター層は25～7.5cm のフルイ分けた材料より、第2フィルター層は2.0m 厚さで7.5cm 以下～1.3cm 以上の細粒碎石、第3フィルター層は2.0m 厚さで1.3cm 以下の砂からなる。指定された厚さの碎石によってつくられた粒度分布は大きな粒子の間の空隙はより細粒の材料の侵入を防げるようにそれより小さい粒子で詰まっていることという要求を満足している。各フィルターはロックフィルの沈下により破損する恐れなく、困難なく施工できる十分な厚さに設計された」¹⁴⁾ コアの上流側にもフィルターを設けた。

「Nantahala ダム挙動は完全に満足できるものである……この形式のダムは“Alcoa”ダム、あるいは設計に大いに貢献したコンサルタント技術者 J. P. Growdon 氏にちなんで“Growdon”ダムと呼ばれることがある。これらのダムで得られた成果に伴い、同様な構造を持ついくつかのダムが米国でつくられた」⁴⁾。現在多くの盛立て式ダムはこの型である。しかし開拓局と TVA ではほとんどこれを無視し、幅広いコアとその外側のランダム層からなる設計を採用し続けた。「第二次大戦直後に米国開拓局によって建設されたアースダムの法面勾配は、一般のダムよりやや緩やかにされたが、これは長期間、ダムが建設されなかったため、すぐれた堤体をつくる技術者がいないことを恐れたためであった」⁴⁾。しかしその後多くのダムを造る間に開拓局は自信を持った。その自信にはコンクリートダムの成功も含まれていたようである。IV 期（1945～1975）には2.5 : 1～3.5 : 1 と勾配は急になった⁵⁾。開拓局の技術の伝承は第2次大戦とともに切れたが、根拠の乏しい自信と傲慢が残ったようである。厚いコアのダムを造り続けた。「内部に不透水性コアをもったゾーン型のダムで、上流ゾーンと下流ゾーンに次第に透水性が大きくなる材料を使用していくつかのゾーンを設ける場合には、特別に粒度調整したフィルターゾーンを設けずに連続したゾーンをつくり細粒から粗粒に移行するようにすると、パイピングを防止できることが多い。例えば米国開拓局のダムでは、材料が次第に変化してゆく大きなゾーンを設けるので、フィルターがつくられることはまれである」⁴⁾。

フーバーダムその他の成功で開拓局の名声は高く、多くの教科書的な本を出版した。この中の Design of small dam（フィルダムの項の筆者は H. G. Arthur）でコア幅を決める指針を示している。コア幅の最小は水頭の100%、普通250%、最大は300%で非常に大きい¹¹⁾。コアの両側にフィルターは無い。通常の30%～

50%のコア幅に比べると大幅にコアが厚い。



「図120に示される「最小コア」の大きさは、実用上と、理論上の両方の理由から選定されたものである……どの標高でもコアの厚さは、その標高から上のダムの高さより大でなければならないと基準で決めているのは、コア内の平均水頭勾配が1より小さくなるようにするためである。水頭勾配が1より急になると、高い浸透圧が作用しこのため良質のフィルターゾーンが必要になってくる。低いダムに対して良質のフィルターゾーンをつくるのは施工管理の点から考えて、経済的でもないしまた実際のでもない。さらに、コアを薄くすれば、基礎の不同沈下によって、コアが破壊する危険性も大きくなる」¹¹⁾。これに続いて、コアの幅やダムの法面勾配の推奨値を示しているが、基礎地盤の関係でコア幅が決まるような論調であり、何を考えているのか不明である。限界流速説の亡霊に取り憑かれているとしか思えない。フィルターの幅はそれほど大きくなくても良いので経済的でないとか施工管理が難しいという理論も信じがたい。Growdon 型の方がはるかに経済的である。

一方河床より下のキートレンチ部のコア幅は薄い。「キートレンチの底部の幅が20ft 以上あれば通常十分である……低いダムにおける止水トレンチの適当な幅は次式で計算して良い。 $w=h-d$ （2）ここに w =止水トレンチの底幅、 h =地表面より貯水位までの水頭、 d =地表面以下の止水トレンチの深さ 底幅の最小値としては、掘削機械や締め固め機械がトレンチの中で、能率的に運転できるように20ft 位は必要である」¹¹⁾とある。コアが薄くても大丈夫なことはフォートネルやティートンのカットオフトレンチが薄くてもその部分では事故にならなかったことが最大の証明ではないか。つまり開拓局は Schofield ダムの失敗を機に上流側の土で遮水するダムから手を引いたが、より優れた Growdon の改良を取り入れなかった。なぜか？あまりにも誇り高く（傲慢で）民間アルミ会社の改善に学ばなかったのか？

7. 体制、人事、組織・職員の風土

開拓局は地質調査所の一部署から独立して1902年に作られた。「開墾局は上昇の一途をたどり、単なる部から局へと変貌した。職員は19,000人にも拡大し、年間5億ドルの予算を意のままにし、現代世界の驚異の

半分を築き上げた。……全能なる開墾局に指示するそれは、いったい何様なのだろうか？……名目的には開墾局は内務省の一部である。総裁は、理論上は、内務長官と大統領に直接責任を負い、ホワイトハウスを占めるいかなる政権——自分を任命した政権であろうとあるまいと——の意思を実行に移すのだ。現実には、開墾局を何年かにわたって観察すれば誰でも気づくことだが、そのようにはなっていない。開墾局は議会の手先であり、ほとんどの大統領は天気や報道機関同様、局をコントロールできなかった¹⁰⁾。

1930年代には開拓局は最盛期を迎え、フーバーダムは人智の記念碑としてそびえ立っていた。「何より驚くのは、ダムが建設されたスピードである。国全体が大恐慌の中で活気を失い、工場が次から次へと遊休化し、会社がばたばたと倒産しているときに、フーバーダムは息をのむ速さで造られた……地球上で最も偉大な建造物、アメリカ合衆国で建設されたもっとも偉大な建造物は、3年とかからずに建てられたのだ……フーバーダムは大きい。シャスタダムはそれより5割り方大きい。グランドクーリーダムはその二つを合わせたものよりさらに大きい……グランド・クーリーダムの——そしてその時代全体を通じて——驚くべきところは、あまり考えずに造ってしまった、どうやって造るのか、あるいは出来るのかどうかすら正確には分からずに何もかも建設してしまったということだ。対策本部もなければ特別委員会もなく、考える試験的勧告だの予備的アウトライン案だののような面倒なものも一切ない。すさまじい環境への影響はあったが、環境影響評価報告はなかった¹⁰⁾。

この成功には地盤が良かったなどの幸運もあったが、記録に残らない多くの工夫や努力、人知れぬ失敗やその後始末、苦労、反省など後輩に伝わらぬものもあった筈である。しかし、先輩が定年などで退職し、後輩がその地位を引き継いだとき、自信と傲慢が引き継がれ、人知れぬ、あるいは人に知られたくもない失敗、後悔、後始末、工夫は失われた。設計図、計算書、示方書などは残るが、その裏に秘められた魂も、血と汗と涙も消えた。そしてまた失敗が繰り返された。ましてコンクリートダムの成功は盛立てダムの担当者には殆ど傲慢しか残さなかった。

同じようにダムや水路を造る工兵隊との競争も激しかった。ダム立地地点で争うばかりでなく、技術的にもなんとかとメンツ争いをした。「このように川を一つとしてあるがままにしておきたくないという病的なまでの意思の裏には、無論忍び寄る陸軍工兵隊の影があった……1960年代末には、開墾局と工兵隊の対立は、必要な事業ではなく無用なものをめぐる争いの連続へと堕していた¹⁰⁾。

経済化への要求も強かった。かつてフーバーダム

は発電からの利益だけでも建設費をまかなえた。グランド・クーリー・ダムから生まれる電力は21世紀まで使い道がないだろうと言われるほど大きく(213万8000kw)、安かった¹⁰⁾。しかし今や多くのダムの経済効率は1以下にしかない。

時代は経験工学から理論的工学へと変化した。「F.F.Smithは“大きなアースダムの安全に責任を持つ技術者の間では、使い古した経験的方法は徹底的な試験工事による研究や、注意深い理論的設計、土質力学の原理原則や知識に基づいた工事に道を譲った”と書いた(1938年)……第一次大戦後土質力学が始まり……Terzaghiは……1933年ICOLD設立……1923年に開拓局最初の出版……2冊目は」⁵⁾。ダム建設は経験より学術へと進んだ。しかし、理論的は本当に良いことか。

しかし理論で片づくほどダム工事は簡単ではない。「データーはまた、多くの種類の普通の土の挙動特性は既存の試験法や手続きでは十分に指定出来ないことを示した。従って使用された盛土構造の施工法は、必ずしも希望した結果を生まなかった。これらの心配事や問題点を解決するため、開拓局では歴史的に使われ、成功した、経験的設計や工事手順が使われ続けた」⁵⁾。どうやら開拓局は理論と経験の悪いところだけを、経済的にダムを造るのに都合の良いところだけを採用したのではあるまいか。

『1960年代、1970年代の開拓局は「標準設計」の時代だった。開拓局の多くの構造物は驚くほど類似した断面である。一般に広い、可塑性の低い、沖積層由来の粘土コアと、粗粒の雑多のシェルからなるが、コアはシルトまたはシルト質砂のときもある。ゾーン型ダムとされているが、均一型ダムとすることも出来る。設計者は一番近い土採り場を使い、盛立ては下流に向け順次荒くなるように心がけた。通常カットオフトレンチがあり、……当時は電話とファックスしかなかった……現場まで遠かった設計者は滅多に現場に行かなかった。……地質屋はダムサイトを調べ、設計者はダムを設計し、施工技術者はダムを造る。地質屋は設計や施工に最小限の関与しかしない。設計技術者は構造物を設計し、構造物をつくる工事事務所に示方書を渡す。調査中や工事中に、設計技術者は現場に行くにしても、それは稀である。現場技術者と設計者の間にはかなりの摩擦がある。施工部隊はデンプーにあまり頼らずに施工中に起きた問題を解決するものとされていた……開拓局では1940年から1970年の間にコンクリート技術とダム構造の技術は大幅に進歩したが、一方アースダムの設計細部は殆ど変化しなかった……開拓局では1960年代と1970年代は標準設計の時代であった。開拓局の構造物は著しく相似た断面である。広いコア……工兵隊のダムの断面を調べると驚くほどの多様性があった』¹³⁾。開拓局は

大きくなり、縄張り争い、縦割り行政の欠陥が生じた。現場の経験が軽視され、標準化、規格化、分業化が進んだ。

「ダムを造るのにちょうどいい場所がなくなってきていた……開墾局は今や40年、50年、60年前に却下された立地にダムを造らざるを得なくなっていた」¹⁰⁾。Tetonダム地点も昔ならダムを造らないような地点である。入念なグラウトが必要だった考えられる。地質が悪いにも拘わらず地質調査もカーテングラウトも問題が多い。『開墾局のグラウト試験計画には一つだけ間違いがあった。南西数キロにあるシュガーシティからダム予定地まで、一本の道が延びていた。だが、北からの道は一本もなかった。グラウチング試験はすべてダムの南側壁で行われた。ダムの右側壁——注入された毎分300ガロン(1.35m³/分)の水が来る日も来る日もただ消えていった側の岸——では何も行われなかった』¹⁰⁾。崩壊した右岸に行くには北からの道路がなかった。だから調査しなかった。地質調査部を軽んじるのも困るが、坊主憎けりや袈裟までと、地質調査そのものを軽んじるのはなお悪いことである。

設計はどうか。『深いキートレンチは開拓局では初めてであり、この設計は費用効果に貢献したとして設計賞を受けたが、あとで撤回された……1,585m以下のデンタルコンクリートには支払いはなく、現場の他の場所での残りコンクリートを使うのでごく限られたものである。この岩表面処理が破壊を促進した。スラッシュコンクリートもグラウトの残り物を使ったので同じ問題……時には大きな割れ目にコンクリートを流し込んだ』¹³⁾。開拓局ではキートレンチの設計を素晴らしい、工費節減に役立つものだと自慢していたわけである。

『F. C. Walkerによれば、Granbyダム(H=71.6m, 1948)は工事中にいくつかの問題が生じたが、うまく処理できた。盛土用土採場の大きな変更も工程に影響なく済んだ。通常の数回のボーリングをせずに地質平面図で済ませた。しかしながらこの方法(他の場所でも使った)の使用はダムサイトの複雑な地質のために不適当と分かった。Granby Damの工事経験はF. C. Walkerの論文で論じられている。「運転開始後追加のグラウトをする必要が生じた。しかしながら、このグラウトはあまりにも経済的に済んだので、他のダムの同じような部分でもその後実際の挙動で必要と分かるまでグラウトしないことになった」。アースダム部門の当時の首席による開拓局の基礎グラウト設計の基本方針についてのこの省察はFontenelleやTeton Damについて議論するときもっと深い意味を持つてくる』⁹⁾。湛水後地盤注入するには堤頂からボーリングして工事をすることになる。そのためか開拓局では傾斜コア式(Growdon式)を避け、中央コア方式

を採った。30年後のTetonダムの事故の種はGranbyダムでまかれたのではないか。Fontenelleダムの事故はその誤りを正すことが出来る良い機会であった。Fontenelleダムでは「基礎岩盤の表面は予想以上に破碎されていたので、カットオフ溝は1.8m深くした……湛水は非常にゆっくりであり、もし漏水が起きても本格稼働の前に止められる(Granbyダムでの予備湛水と追加グラウトの経験を思い出せ)。ゾーン1のコアの下の基礎の、例えば貧配合セメントによるお粥グラウトとかデンタルコンクリートによる基礎表面均しとかの表面処理はしなかった」⁹⁾。Bellportは地盤が悪く事故が起きたと事故の原因を地盤に押しつけ、あまり反省しなかった。

「1974年2月……右側壁の大きな秘密を発見した。5年に及ぶボーリング、注水、グラウチング試験でも見つからなかった発見であった。何を見つけたのか？

局の事業担当官ロビー・ロビソンは上司へのメモの中で、峡谷岸壁内の「異常に大きい」岩の亀裂と書いている。「異常に大きい」というのはあまりふさわしい表現ではない。亀裂は巨大だった。それらは洞窟だった。そのうち一つは幅が3.3m、長さが30mあった。また一つは、幅が所によっては2.7m、長さは60mだった。一つ、また一つと、別の亀裂が見つかった。峡谷の右岸全体が亀裂の巣だった……亀裂が安全上問題がなかったとしても、それを見過ごしてきたのは驚くべきことである——彼が提言する行動方針は著しい精神の鈍磨を示している……岩の間にぽっかりとあいた洞窟はショッキングな発見であったが、ロビソン、建設業者、ハロルド・アーサー、そして局の一握りの官僚以外誰もそのことを知らなかった。総裁のギル・スタムには、おそらく知らされなかった。……もちろん彼らが空洞について知っていたにしても、いずれにせよそんなことは問題ではなかっただろう。何しろ開墾局には世界一の技術者がいるのだ」¹⁰⁾。

Tetonダムの非常放水路の容量は小さく(24+96m³/s)、雪解けで湛水速度は速かった(最大93cm/日、 $Q \approx 80\text{m}^3/\text{s}$)。現場所長Robisonは湛水速度の制限値(30cm/日)の緩和を主任技師Artherに要請した。「1日に30cm以下にすべし……理にかなった規則であった。そして理にかなった規則の例にもれず、すでに何度も破られていた。ティートン山地から貴重な水があんなにも流れてこようというのだから、もう一回くらい規則を緩めてもいいではないか。1976年3月3日、ロビソンはハロルド・アーサーに、1日60cmの湛水の許可を正式に求める手紙を送った。皮肉にも、ロビソンが自分の主張を正当化するために使った主張の一つが、湛水速度を速くすれば、局はそのグラウチング計画がどれほど効果的であったかを観測することができるというものであった……ハロルド・アーサーはこれほど急速に貯水池が満た

される事に対して無頓着であった」¹⁰⁾。Robisonが求めたグラウトカーテンの試験結果はTetonダムの決壊という答えになった。しかし80m³/sの雪解け水に対し、放水路の容量が24m³/sで湛水を始めるちは何を考えていたのだろうか(96m³/sの主放水路は工事中だった)。

優れた研究も立派なマニュアルもこれを真面目に守ろうという精神、組織の風土がなければ絵に描いた餅である。FontenelleやTetonに関係したのはBellportやArthurである。「現在、あるいは当時も開墾局の幹部、ベテラン、新人を問わず内省らしきものはほとんど見せていない……危険をはらんだダムを建設することで、何をしようというのかと、彼らは自問していないようだ……ロビー・ロビソンは30才になったばかりで、これが最初の大事業だった。この事業は初めから面倒続きで、遅れに苦しめられていた。経費は上がり、工期は遅れた……惨事のあとの公式発表は……責任の所在を匂わせるものもなければ、洪水の被災者への思いやりさえなく、ダムを建設すべきでなかったかもしれないとほのめかすこともなかった……誰一人解雇されなかった。ハロルド・アーサーは自発的に退職し……コンサルタント会社を始めた……ロビー・ロビソンはいずこかへ姿を消した」¹⁰⁾。

「ティートンダムの崩壊は開拓局を局の歴史で出会ったことのない局面に直面させた。連邦政府を含む法務専門家はダム崩壊による損害に法律的には責任がないと結論した。フォード政権の立場は違った。政府は洪水による被害者に対し損害賠償をする道徳的責任があると決断した。災害の1週間以内に、ティートンダム崩壊の責任と特定せず、大統領は被害に対する当初支払い分として2億ドルの政府支払いを要求した」¹⁵⁾。「コントラクターを責める発言は今のところ見られない」¹⁾。

8. 改善

「盛立てダムの設計はV期(1976～2002)でいくつかの重要な点で変化した。コアと下流側シェルの間のチムニーフィルター/排水層は内部侵食/パイピングを防ぐために選別した材料を使うように改めた。カットオフトレンチのコア埋め戻しと下流側沖積層の間にはフルイ分けた転移/フィルター層を設けた。下流側基礎にはブランケット排水層を設けた」⁵⁾。

9. 教訓・まとめ

◎法律には前文とか総則というものがあり、目的、原則などを述べ、その後で個々の具体的な細則が続くことが多い。細則だけでは全部を書き尽くせないからである。示方書、指針などにも同じ工夫をすべきで、細則が決まった精神をちゃんと書くべきである。

◎設計、計画の例を多くの教科書が載せているが、も

とになる考え方、精神、その例の成り立つ条件、問題点、注意点、改良すべき点を載せてないのが多い。条件が違うのに、それに似た設計や計画をして、同じ失敗を繰り返す恐れもある。失敗例も載せておくのが良い。◎構造物の設計にはとにかく安全率を大きくとればよいとの思い込みがあるが、それより破壊するまでの途中にブレーキがあることが大事である。土粒子の流れ出しに対し、安全率を大きくする(コアを厚くする)のではなく、パイピングを起こしダム崩壊に至る途中にブレーキ(フィルター)があることが必要である。

◎ある会社なり、役所なりの技術水準が高いとか低いとか云われることがある。時間がたち、技術者が入れ替わる時、技術の伝承がきちんと言われていけばそうなる。しかし先人の苦勞、創意工夫、文章に表せないコツなどは肩書きが引き継がれるようにはちゃんと引き継がれない。ましてコンクリートダムでの名声がフィルダムの技術の証明にはならない。より高いダム、より悪い地質のところ、ダムをつくる時にはさらなる進歩、改善が必要である。絶えざる努力、革新がなければ、名声ただちに地に落ちる。

◎失敗は成功の元と言うことわざがある。逆に成功は失敗の元とも言える。僥倖により危機を免れていてもそれに気がつかない。図面にフィルターと書いてなくてもフィルターの役をする地山もある。これは僥倖以外の何物でもない。Fontenelleダムの事故はまさにその例である。ここで気がつくべきだった。謙虚であるべきだった。成功も失敗もそこから学ぶ姿勢がなければ何の役にも立たない。予告編みたいな事故があったことに対して、このような自然のはからいに対して謙虚に感謝して、再考察すべきである。

◎try and seeで物事を進めるのは非常に危険である。しかしtry and seeをやらざるを得ない時や、場合もあるかも知れない。それは緊急に対策が必要で、他の方法や何かを考える時間も暇も無い時、代替え案がないとき、小規模なもので例え壊れても被害がそれほど大きくないときである。観測や計測やらをしながらtry and seeをやれば良いという人もいるが、その現象の本質を十分考えてからすべきである。パイピングのように急激に現象が進行するものにたいしてtry and seeを用いるべきではない。計測や観察で危険と気づいてから対策がとれるのかどうかを考えておく必要がある。ダムの場合について言えば、必要な場合にすぐ水位が下げられるか、もし壊れても下流に及ぼす被害が小さい場合のみ、try and seeと言う方法が許されるのではあるまいか。

◎理論化・専門化には利点と欠点がある。新しい研究、開発も必要だが、地味な改善、問題点の除去、なども必要である。事故報告書ではFEM計算を駆使して事故原因を解明しようとした計算が詳しく示されている

が、この計算は層流を前提にしている乱流が問題になるパイピング現象を再現できるとはとても思えない、というより見当外れの計算しか出来ない。

◎均一型ダムに対しチムニー式のフィルター層を設ける工夫を世界の先駆けて開発した開拓局の技術者は浸透水が下流法面からしみ出すことの危険性を知っていたと考えられる。Forschheimerは1917年に流線網の計算法や描き方を開発した。これを使えば下流法面から流出するかどうかを判定できる。BertramやKarpoffはフィルターについて詳しい研究をした。しかし次の世代の開拓局の技術者は、チムニー式ダムの形は知っていたかも知れないが、その精神は全然知らなかったようである。堤体の80%が不透水層のダムを設計するのならチムニー式フィルターを設けるべきである。それをフィルターは経済的でないと葬り去った。不透水層の厚さを厚くし、平均流速を遅くすることだけを考え、下流法面では絶対に下向きに浸透水を流出させてはいけない、そのためチムニー式フィルターが有効とは考えてもみなかった。流速がいくら遅くても下向き流では土の中の細粒分を押し流し流出させる。土はいろんな粒径の集まりだから、細粒分が流れ出すとどこかに大きな空隙が出来る。大きな流出孔が出来、流速が増し、ついには崩壊に至る。これを避けるためのフィルターであり、流線網の計算ではないのだろうか。

◎アリストテレスはこの世の森羅万象について論じた。しかしそこにはかなり多くの間違いが含まれていた。ガリレオやニュートンが論じたのはかなり限定した問題である。高いところから石を落としたときの問題は論じたが、木の葉や紙切れを落としたときまでは論じていない。しかし本質は把握していた。Terzaghiらの学者も、開拓局の技術者も多くの論文や解説書、マニュアルを書いたが、あまりにも広く論じて、間違いも含まれている。N値、岩盤分類、転圧法など一見科学的だが、あまりにも割り切りすぎていて、多くの例外を含んでいることを注意すべきである。N値に基づき地耐力が十分として建設した建物が新潟地震では地盤の液状化で倒れたのなどもその例である。「議会報告書の中で……内務省開拓局が、ダムの建設をひとたび開始すれば……その動きはとどまることなく……行きつくところまで行き、ついに事故を招くに至った……開拓局は、どのような問題でも“エンジニアリング”してしまうと指弾されている」²⁾。理屈は多いが、魂の入っていない議論ばかり多いのではないか。また厚いコアのような間違いをGrowdonに学んで修正することをしなかった。

◎経済性を追求することは悪いことではない。企業として、あるいは事業官庁として財政的な健全性を保つためには、ちゃんと経済性を追求すべきである。それを単に請負単価を下げたり、利率や品質基準や

設計安全性を下げたりして達成しようとしてはならない。経済性の要求や、従来の経験、理論などでは困難なものに挑戦することは時には大改革、技術発展の機会である。Growdonはコンクリートの代わりに土を使うことを考え、そのためにはフィルターが必要とし、その研究をし、経済的にNantahala Damを造った。開拓局とTVAはこれを軽視、ないし無視した。

◎世間では学者や研究者の意見を重んじ、民間人の経験から学んだ意見を軽視する傾向がある。若い人、学業成績の優れた人ほどこの傾向が強い。開拓局では世界大戦で技術の伝承が途絶え、学者、研究者の論文に頼るようになったのか？ 民間のGrowdonの改良を学ばなかった。Nantahalaダムは1940.7～1942.7に施工されたが、論文が発表されたのは20年もたった1960年である。1941年にシュタイマンが書いた吊橋の論文はアメリカ土木学会を牛耳っていた一派により拒絶されなかなか掲載されなかったという(川田忠樹:だれがタコマを墜としたか)。同じようなことがGrowdonにも起きたのかどうかは確認できなかったが、ありそうな話である。

◎事故は技術者、事務職員を含めた全員の意識、組織の制度、慣習の不健全さ、謙虚さの不足、契約制度、示方書、職員の教育の不備、研究の姿勢の欠陥などあらゆる不備、不足、欠点を反映しているので、これを研究することは正常化、進歩などに役立つ。

参考文献

- 10) マーク・ライスナー：砂漠のキャデラック—アメリカの水資源開発、築地書館、1999(原著1986,1995)
- 11) 米国開拓局：ダムの計画と設計、日本大ダム会議、1966(原著はDesign of small dam,1960,第1版,第5章アースダムの筆者はH. G. Arthur)
- 12) Mark E. Baker:The Fontenelle Dam Incident, The Investigation, Likely Causes, and Lessons (Eventually) Learned, 2011
- 13) Snorteland, N.: Fontenelle Dam, Ririe Dam, and Teton Dam: An Examination of the Influence of Organizational Culture on Decision-Making. ASDSO Annual Conference. Hollywood: Association of State Dam Safety Officials. 2009
- 14) US commission on Large Dam : Development of Dam Engineering in the US prepared in commentation of the 15 Congress on Large Dams, 1988
- 15) Eric A. Stene : The Teton Basin Project(Second Draft) Bureau of Reclamation History Program Denver, Colorado Research on Historic Reclamation Projects, 1996

(2017. 4. 10受付)