

Tetonダムはなぜ壊れたか？——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。その他に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ある。従来の意見とかなり視点を変えて原因を追及し、多くの教訓を提示した。

Key Words : Embankment Dam, rockfilldam, dam failure, piping, seepage, filter, safety management

1. 事故の概要

Tetonダムはアメリカ合衆国開拓局(USBR)により建設された高さ93m、堤頂長930m、堤体積730万 m^3 、総貯水量3.55億 m^3 のロックフィルダムである。1961年に提案されたが環境問題などで反対が多く、1972年にやっと着工し、1975年10月に盛立てを完了し、11月末より湛水を開始した。この年の春は雪解けで河川流量が大きく、貯水位は0.3m/日の予定より急激に上昇し、6月初めには3.1億トン、1616m(満水位1622.9mより6.9m下)まで湛水した。6月3日右岸の地山で漏水が発見され、翌日には別の場所から漏水が見つかった。6月5日朝5時ダム右岸法尻付近から濁った湧水が出た。10時15分ダム本体法尻からの漏水になった。やがて流量が増え、流出穴が拡大し、11時頃貯水池には渦巻きが生じた。11時57分ダム全体が崩壊し、約2時間で1.5億 m^3 の貯水が流出し、750万 m^3 の堤体のうち300万 m^3 と地山の一部が流出した。午後5時には貯水池は殆ど空になった。1億ドルの工費を投じたダムは殆どなくなった。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。この地域の住民は敬虔なモルモン教徒で教会からの連絡に従い素直に避難したので犠牲者が少なくすんだという。もしすぐ避難しない人がいたら犠牲者の数はもっと多かったと考えられる。直ちに事故調査委員会が作られ原因調査を行い、報告書が出された。

2. 従来の見解

標準断面図を見ると、ダム本体は中央に広幅の不透過の粘土コア、その両側にフィルター、ランダムゾーンなどがあり、特に問題はないように見える。問題は河床の堆積層に切り込んだところである。普通に

考えるとコアであろうとフィルター層であろうと天端で最も幅が狭く、下に行くほど幅が広がるべきである。ところが沖積層や基礎岩盤に切り込んだところ(カットオフトレンチ)では逆に下に行くほど幅が狭くなっている。「Tetonダムの場合、兩岸アバットメントならびに河床の岩盤へのコアの接着幅は著しく小さく上下流方向で約10mにすぎない。これは、堆積層、不良岩の掘削を節約する意図なのであろうか。……不透水ゾーン(コア)は上下流方向に現河床上で200mあり、作用水圧がほとんど変わらないとみられる30m下の岩盤上で、この幅を10mとしていることは十分であるとは見られない。……コアのこの部分には大きな水圧の作用が考えられる。これに対して、十分なクリープ長をとることが望まれたのではなかろうか」¹⁾。これは多くの人が断面図を見てまず考えたことであろう。

政府調査団は推定原因として1. ゾーン①材料のひび割れ発生またはハイドロリックフラクチャリング。2. ゾーン①材料と基礎岩盤との接触部添いのパイピング。3. グラウトカーテンを貫通する漏水……などをあげた²⁾。その他にも湛水速度が大きすぎたこと、カーテングラウトが不十分なども問題にされ非難されている。技術的な問題のほかに技術の軽視を産む体制の問題も指摘されている。

3. 事故原因の推定

(1) 浸透防止壁, cutoff trench

吉越は地盤線より下でコアの断面積を小さくしたのが事故の原因の一つと推定したようである。しかし吉越の指摘にもかかわらず、多くのアメリカの設計例では現河床より下に切り込むカットオフトレンチがあり、下に行くほど幅が狭く、さらに基礎地盤とトレンチ内の土の間にはフィルターが必要とは考えていないようである。単にTeton Dam担当者だけの

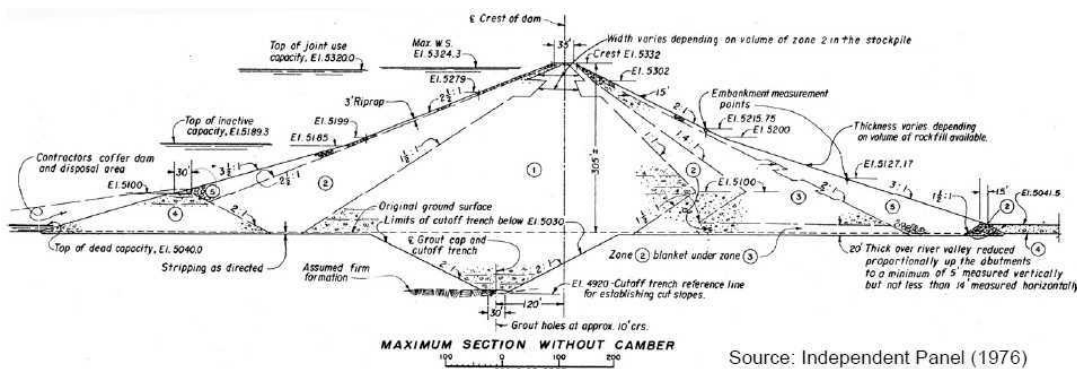


図1 Tetonダム標準断面図

過失の問題ではないようである。

古来割合低いコンクリートの取水堰は必ずしも岩盤の上に作らず、堆積層の上に作る場合も多かった。『しかるに1898年インドのガンジス川においてナロラダム(Narora Dam)の悲惨な破壊事故があってからこの問題が注目されるようになり……土層とダムの底面の接触面に沿う潜掘がパイピングの唯一の原因であるとの仮定を基にして』³⁾研究が進められた。アメリカのBlight(1910)は、堰の下を潜る漏水を防ぐため潜流する流路の長さを十分長くして流速を減らし、洗掘を防ぐことを提案した。Lane(1935)は基礎の成層が大きな影響を与えることを明らかにし最短浸透経路CLの計算は鉛直成分の長さとし水平成分長さの1/3とを加えるとした³⁾。止水壁を作ると図2のように流路が長くなり、浸透水が減る。Laneの考えによれば鋼矢板などを使う止水壁が非常に有効である。

この考え方がアースダムやロックフィルダムにも適用されたようである。止水壁は最初鋼矢板やコンクリート壁であったが、溝を掘ってコアと同じ土で埋戻す例も現れた。『透水性基礎を持つダムサイトでは次にあげた三つの基本的な処理法が可能である。1. 鉛直な基礎浸透防止層(カットオフ)をつくることによって、浸透を無視できる程度にまで防止もしくは軽減する。2……1920年以来、転圧土のカットオフ工法が他の二つの方法(鋼矢板とコンクリート壁)より頻繁に用いられてきた。近年、土の運搬機械の発達により、この方法が非常に経済的となり、現在大部分のアースダムがこの方法によって実施されている』⁴⁾。『ダムはいろいろな基礎の上につくられた。それらの殆どすべてにカットオフトレンチが堆積層を貫いて基岩まで掘り下げられたが、カットオフトレンチの中にコンクリートのカットオフ壁があること

は殆どなかった』⁵⁾。Tieton Dam(1925), H=56.4mではcutoff trenchを縦坑、水平坑を掘りコンクリートで埋めて作った⁵⁾。しかしこれは珍しい例外である。『しかし米国では長年にわたりこの形式の壁が大幅に用いられたことは一度もない。米国においては、人力作業とコンクリート工の経費が高く、溝を機械掘削して転圧土で埋戻す方が経済的であるからである。米国でこの種のカットオフが用いられた最後の大きなダムの一つは1925年に完成した米国開拓局のTietonダムである。このダムでは、幅5ft(約1.5m)のコンクリート壁が130ft(約39m)より深く設けられた。施工中の水位低下と支柱で支えることが困難なために、その後はこのような設計は用いられていない』⁴⁾。止水壁を鋼矢板やコンクリートで作っていたらTetonダムの事故は起こらなかったと思われる。

(2) 限界流速と限界動水勾配

Justin(1923)は土粒子の上流側に $v^2/2g$ 、下流側に $-v^2/2g$ の流体圧が働き、これに対し、自重で抵抗するが、流速がある限界より大きくなると粒子は移動しパイピングが発生するとし、この限界値を限界流速と呼んだ。粒子が受ける力は式(1)で表される。

$$P=2A(v^2/2g)\gamma_w \quad (1)$$

ここにP:粒子が受ける力(g), A:水流を受ける粒子の面積(cm^2), v:水の流速(cm/sec), g:重力の加速度(cm/sec^2), γ_w :水の単位体積重量(g/cm^3)。土粒子の水中重量W=抵抗力Pの時が限界流速である。

$$W=P=\gamma_w(Av^2/g) \quad (2)$$

$$\therefore v=\sqrt{Wg/(A\gamma_w)} \quad (3)$$

$$A=\pi r^2, W=(4/3)\pi r^3(\gamma_s-\gamma_w), 2r=d \text{ だから (3) 式は } v=\sqrt{(2/3)dg(\gamma_s-\gamma_w)} \quad (4)$$

になる。

砂が水と共に噴出するのはクイックサンドと呼ばれる。Taylorはこれは砂の種類ではなく砂の状態であるとし厚さLの砂層があるとき底面より上の砂と水との重量は $(G+e)\gamma_w LA/(1+e)$ であるが、下から押し上げる力は $(h+L)\gamma_w A$ である。この力が上からの重量に勝てば噴き上げることになる。その限界では

$$(h+L)\gamma_w A=\{(G+e)/(1+e)\}\gamma_w LA \quad (5)$$

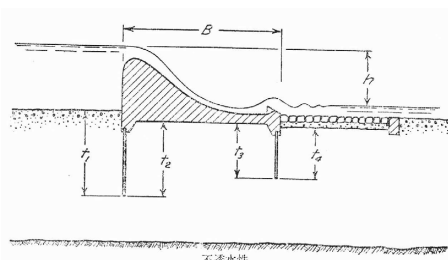


図2 限界動水勾配と止水壁

$$\therefore i = h/L = (G-1)/(1+e) \quad (6)$$

となる。圧力勾配がこれ以上になるとクイックサンド現象が起こるとした。Terzaghiはパイピングによる破壊も同じ現象であるとした³⁾。ダムのパイピングでは下向き流や水平流も起こるのでこれは少しおかしい。しかしBlightやTerzaghiが漏水やパイピングを考えたときのダムは取水用のあまり高くないコンクリートダムであり、流出口はダム下流の河床で、上向きに流出したのでこれでも良かった。

ここで、透水係数 $k \times$ 動水勾配 $i =$ 流速 v の関係があるので、Kozenyの透水係数式を用いて次のように限界勾配から限界流速式を導くことができる。

$$v = ki = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\mu} C_k \frac{e^3}{(1+e)^2} D_s^2 \quad (7)$$

別の考えでは限界流速は液体中の粒子の沈降速度に等しい、沈降速度より上昇水流の速度が大きくなればボイリングを起こすと考えられる。ストークスの法則より、 v_s は

$$v_s = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} d^2 \quad (8)$$

ここに γ_s, γ_w はそれぞれ粒子および液体の密度、 μ は液体の粘性係数、 d は粒子の直径である。

式(7)と比べると(8)式には $18C_k e^3/(1+e)^2$ の項がない。Stokesの式は粒子1個の沈降を考えている。(7)式は砂層の中の水流を考えている。実際に水が流れる有効面積の比率 β は間隙率を n で表せば $\beta = 1 - (1-n)^{2/3}$

になる。さらに流路も曲がりくねっている。これらの効果を合わせ考えると $18C_k e^3/(1+e)^2$ を掛けることになるようである。その他岩垣は実験により水平流の場合の限界流速を求めた。ダム下流法面での限界流速、いろいろの粒径の砂粒も混じっている場合の限界流速の研究もある。以下にはこれらの研究に水理学と斜面上の物体の釣合いを組み合わせ考察する。

速度 U の平行流中の球体(射影面積 A , 半径 r)が受ける抵抗力(流水力) F は

$$F = C_f \rho U^2 A/2 \quad (9)$$

で表され球の場合の C_f の実験値は $C_f = 24/Re$ ($Re < 1$ の場合) $Re = 1 \sim 100$ 区間 $C_f = 24 \sim 1$ で変化, ($Re > 100$ の場合) $C_f = 1$ となる。ここに Re :レイノルズ数, $Re = vd/\nu = vd\gamma\rho/\mu$, ν :動粘性係数, μ :粘性係数, ρ :密度 $=\gamma_w$, $\nu = \mu/\rho$, $A = \pi r^2$, 従って

$$Re < 1 \text{ では } C_f = 24\nu/vd = 24\mu/vd\rho, \quad (10)$$

$$F = (24\mu/vd\rho) \rho U^2 A/2 = 3\pi\mu dv \quad (11)$$

$$Re > 100 \text{ では } C_f = 1 \quad F = \rho U^2 A/2 = \pi\rho v^2 d^2/8 \quad (12)$$

になる。以下の計算では簡単のため $Re < 24$ で C_f の値が変わるとする。

粒子の移動抵抗は下向きには水中重量に等しく $T = (\gamma_s - \gamma_w) \pi d^3 g/6 = (G_s - 1) \pi d^3 g/6$, 水平方向にはこれに摩擦係数 k をかけると求められる。

・鉛直または水平の場合

$$Re < 24 \text{ では } 3\pi\mu vd = k(G_s - 1) \pi d^3 g/6$$

$$\therefore v = k(G_s - 1) d^2 g/(18\mu) \quad (13)$$

$$Re > 24 \text{ では } \pi\rho v^2 d^2/8 = k(G_s - 1) \pi d^3 g/6$$

$$\therefore v = \sqrt{k(G_s - 1) 4dg/3\rho} \quad (14)$$

鉛直の場合には $k=1$ とする。 $Re < 24$ で $k=1$ の時ストークスの式と同じになる。 $Re > 24, k=1$ では、Justin式では $\sqrt{\quad}$ 内の係数が $2/3$ になっているがこれでは $4/3$ になる。Justin式では v が小さく出すぎるのがわかる。

・斜面上の釣り合い——角度 θ の斜面上にある水中重量 W の物体による力は垂直には Wg , 斜面に平行な下向きの分力は $Wg\sin\theta$, 斜面に直角の力は $Wg\cos\theta$, 斜面に平行方向の摩擦力は $kWg\cos\theta$ (斜め上向き)。この摩擦力—水中重量の斜め下向き成分 $Wg\sin\theta$ で水流力 F に抵抗する。 $\tan\theta = k$ になれば自重だけで転落するので、限界流速はゼロである。

$$F = Wg\sin\theta + kWg\cos\theta = Wg(\sin\theta + k\cos\theta) \quad (15)$$

$$W = (\gamma_s - \gamma_w) \pi d^3 g/6 = (G_s - 1) (\pi g d^3/6) \quad (16)$$

$Re < 24$

$$3\pi\mu vd = -(\gamma_s - \gamma_w) (\pi d^3 g/6) (\sin\theta + k\cos\theta) \quad (17)$$

$Re > 24$ では

$$\rho U^2 \pi d^2/8 = -(\gamma_s - \gamma_w) (\pi d^3 g/6) (\sin\theta + k\cos\theta) \quad (18)$$

従って限界流速 v は

$$Re < 24 \quad v = (G_s - 1) (gd^2/18\mu) (k\cos\theta + \sin\theta) \quad (19)$$

$$Re > 24 \quad v = \sqrt{(G_s - 1) (4gd^3/3\rho) (k\cos\theta + \sin\theta)} \quad (20)$$

流速は平均流速でなく、有効断面で考えるべきである。面積間隙率 β は $1 - (1-n)^{2/3}$ で、有効流速 V は $V = v/\beta$ となる。この他土粒子付近で流速が大きくなる。これを合わせて $18e^3/(1+e)^2$ を掛ける方がよい。さらに大径の粒子のそばにある小径の、微小な粒子の場合は、ビル風と同じで強い流れが当たり流されやすくなる。Koslovaは実験でこれを求めた。

$$vc = 26d^2(1+1000d^2/D^2) \quad (d, D; \text{cm}) \quad (21)$$

これは $D=d$ の時は

$$vc = 26000d^2$$

$$d/D = 0.1 \text{ の時は } vc = 286d^2$$

$$d/D = 0.01 \text{ の時は } vc = 28.6d^2$$

となる。大きな石に挟まれているほど、限界流速は遅く、小さくなるのがわかる。

土粒子は必ずしも球形ではない、泥流の場合液体の比重が大きくなり掃流されやすい等考慮すべき要素は他にもあるが、以上の研究より分かることは下向き流れで、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。限界流速設計でパイピングを防ぐことはできない。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、浸透流が堤体下流法面に出ないようにし、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と言うことである。最近これが忘れられているようである。

(3) 貫孔作用 (piping)

Sherardらは『パイピングに抵抗するような密実で均質なコアをつくるため、施工中の含水比と密度の管理を強調するきびしい規定がつけられている。以上のような規定やダム下流部におけるフィルター材料の粒度調整を導入することによって、最近の重要なダムではパイピングによる崩壊はほとんどなくなった……パイピングに対する抵抗性には、堤体の締固め法よりもその土性とくに細粒分の塑性指数が大きな影響を与えると結論づけられている』⁴⁾とした。Tetonダムでも『填充コア材のパイピングに対する安全性についても検討が行われた(……浸透流速は 2×10^{-6} cm程度であり、このコア材のパイピングに対する限界流速 3×10^{-4} cmと対比して十分余裕のあることが認められた)』²⁾。しかし事故は起きた。大きい粒子が互いに接触して密に詰まっていれば、間に挟まった小さな粒子が流れ出しても流出孔はそれほど大きくならず、流量や流速がさらに連鎖反応的に増え速やかに破壊に至ることはない。つまりパイピングにはならない筈である。つまり土質により、パイピングに対する抵抗性が変わるので従って抵抗性の大きい土を選ぶことも必要であるが地中のひび割れ、不等沈下などに沿って浸透流が発生することもある。また大きな土粒子同士が接触するように粒度分布を調節し転圧することは現実には難しい。パイピングを防ぐフィルターがあることの重要性、フィルターの役割が十分理解されていなかった。これがダム破壊の一つの原因であろう。

(4) 貫孔作用の進行計算

微細粒子が流失すると土中に水路(パイプ)ができる。管路の、流速、流量は下記(22)のマンニングの式(m-sec単位)を用いると計算出来る。

$$V = (1/n) R^{2/3} I^{1/2} \quad (22)$$

この式はあまり細い管、流速の小さい流れには適用出来ない。ここにR:径深, I:動水勾配, 単位はm, sec, 円形管では $2R=r$, $4R=d$, $n=0.025 \sim 0.033$ (土の場合), 流水路は円形水路とし, cm単位に直すと $R=r/200$, $V=v/100$ だから

$$v = (100/n) (r/200)^{2/3} I^{1/2} = (2.92401/n) r^{2/3} I^{1/2} \quad (23)$$

従って 流量Qは $A=\pi r^2$ を乗じて

$$Q = \pi r^2 v = (2.92401 \pi / n) r^{8/3} I^{1/2} \quad (24)$$

孔壁から土砂が流れ去ると孔は大きくなる、つまり水路の径rは時間tの関数で増える。水の流量Qのp倍だけ土砂が流出すると仮定すれば、その分流水孔の断面積が増え、さらにこのため流速が増え、そうするとさらに大きな粒径の土砂も流出し、という繰り返して連鎖的に、流速、流量が増えついにはダム全体の破壊にいたる。これが求まると、パイピングの時間

的進行の様子がわかる。

土砂の流出量は水の流量Q×土砂の含有率p×時間で求められる。Δt時間内の土砂の供給量は面積の増分ΔA×地下水路の長さℓ×時間差Δtになる。これを数式で表すと

流出量は

$$Q \times p \times \Delta t = (2.92401 \pi p/n) r^{8/3} I^{1/2} \times \Delta t \quad (25)$$

土砂の供給量は

$$\frac{dA}{dt} \cdot \Delta t \cdot \ell = 2 \pi r \frac{dr}{dt} \Delta t \cdot \ell \quad (26)$$

流出量と供給量は等しい。故に

$$\frac{\Delta t}{p} \cdot \frac{2.92401 \pi}{n} r^{8/3} I^{1/2} = 2 \pi r \frac{dr}{dt} \Delta t \cdot \ell \quad (27)$$

$$\therefore \frac{dr}{dt} = \frac{p}{n \ell} \cdot \frac{2.92401 \pi}{2 \pi} r^{5/3} I^{1/2} \quad (28)$$

$$\therefore dt = \frac{n \ell}{p} \cdot \frac{2}{2.92401} \cdot \frac{1}{I^{1/2}} r^{-5/3} dr \quad (29)$$

積分すると

$$\therefore t = \frac{2n}{2.92401 p} \cdot \frac{\ell}{I^{1/2}} \cdot \frac{r^{-2/3}}{-2/3} \quad (30)$$

これでパイピングの進行を計算出来る。

実際にはpは一定値ではない。より正確に計算するには地山の粒度分布などが必要になるので今回は省略した。

この計算式をTetonダムに適用すると

貯水位水位1616m, 漏水位置1539m, 漏水までの水位差ΔH=77m, 漏水路長さℓ=216m, キートレンチだけではℓ≒15m, 動水勾配i=0.35 またはi=77/15≒5.1 マンニング式の係数 c=0.03, 平均土砂含有量p=1/100 (仮定), 結果を図3に示す。

今まで一定粒径の砂で現象を考えたので、このようにだんだん流速が増え、流量が増え、穴が大きくなり、大きな径の土砂も流れ出し、急速にダムの破壊につながる筋書きが書けなかった。後退浸食ばかり心配したが、侵出孔が拡大することが危険なのである。この一連の現象がキチンと理解されていなか

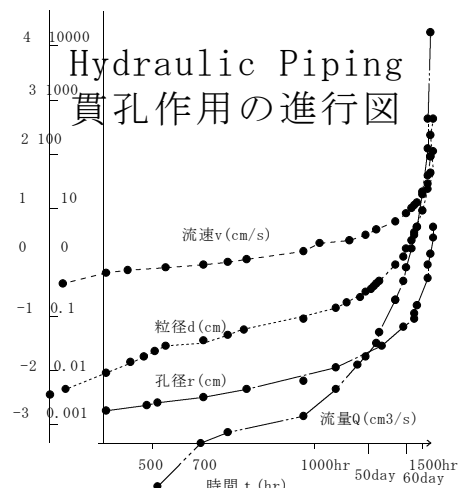


図-3
パイピング
の進行計算
例

ったことが事故の一つの原因ではなからうか。

(5) フィルターの役割, 必要性, 重要性

土構造物が壊れる原因で最も危険なのはパイピング(貫孔作用, Hydraulic piping)であろう。これを防ぐ手段はコアの下流側に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必要がある。Terzaghiも『パイピングによる破壊は……ダムに対して最も危険な脅威の一つであり, また最も破滅的なダム破壊のうちの一つの原因となるものである。浸食は大量の土が地盤から次第に洗い流されるのでなければ起こりえないから, 泉が発達するような場所にフィルターを作ることによって有効にこれを防止することができる』³⁾とした。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。さらに流出口は間違っても下流法面に出ないように, 必ず上向きの水流になるようにするのが良い。これが近代的なダム設計の基本方針である。フィルター土を径Dの球形の粒子からなると仮定すれば, 空隙の大きさは0.15Dになるのでそれより大きい粒子は通り抜け出来ない。しかし短い時間内に小さな粒子が沢山押し寄せると粒子間にアーチができ, 目詰まりすることがあるので0.05D以下の粒子なら通り抜ける。フィルターが目詰まりして透水係数が小さくなるかどうかは粒子の含有量, 流速などに関係する複雑な現象で, これについてはまだ未知の点もある。

『フィルターはその浸透水が自由に流出出来るほど十分に荒く, しかもその間隙から土粒子が逃げないぐらいに十分に細くなくてはならない』³⁾。この条件を満たす粒度の研究がされた。『土の内部浸食(internal erosion piping)を防ぐのに必要なフィルター作用は細粒から粗粒への粒度分布により準備される。Terzaghi博士はフィルター基準の理論的基礎を作り始めた。彼の研究結果, およびTerzaghiとArthur Casagrandeの協力によるGeorge E. Bertramの研究は論文にまとめられ, フィルター原理の最初の文献として認められた。工兵隊は1940年代はじめフィルターについての研究を独自に行った……IV期(1945-1975)……開拓局のフィルターについての研究はK.P. Karpoffにより指揮され, 1955年に出版された』⁵⁾。フィルター粒度についての研究はその後も行われた。

(6) フィルターの必要範囲

ダム本体のフィルターについてはマニュアルが作られた。Tetonダムでも, ダム本体ではフィルターの基本はちゃんと守られている(フィルターの粒度には少し疑問があるが)。しかし, 水はダムの下に設けた止水壁の中にも, 基礎地盤内にも流れているし, 土質材

料で作ったcutoff trench止水壁からも, 基礎地盤割れ目内の土からも小さな粒子が流れ出し, 失われる危険があることは同じ筈である。しかし基礎岩盤や基礎の砂利層とコアの間のフィルターについてはマニュアルに規定はない。そんなことは滅多にないから, そんな場合についてまで示方書には書いてない。マニュアルにはそんなに滅多にないことについてまで書き切れない。もしそんなことになったら, その時は現場で考えてくれ, と言うのがマニュアルを作る人の本音ではなからうか。そうなら示方書の細かい規定の前に, 前文, 目的などの項を設けてフィルターの原理をちゃんと書き, 技術者がそれをちゃんと理解してそれを応用していたらこんな事故は防げたかもしれない。そもそもそれが書いてなくても, 示方書に書いてあることの理由を考えれば, 示方書を技術的に考えて読めば, フィルターを設ける理由は, コアの中の細粒子の流出を止めることが目的であるのだから, コアに接するのが, ロック層, ランダム層, 砂利層であろうと, 岩盤やコンクリートであろうと, その粒子間の隙間, 割れ目のひらきがコアの細粒子の流出を防ぐような狭さである必要がある。高温で溶結した凝灰岩, 流紋岩などでは幅数cm~数10cmの割れ目はざらにある。Tetonダムの基礎岩盤はまさにこのような状態であった。「この溶結凝灰岩は多孔質で縦横に多くの割れ目を持っている。中には大きな空洞もあり, 特に右岸側の観測井の付近には6ft(1.8m)もある人間の入れるような大オープンクラックがあった」⁶⁾。あるいは洪水吐などのコンクリート構造物と地山やロック材との接触面にも大きな隙間が生じやすい。このような層にコアが接するのであればコアの細粒子が流出しないように境目にフィルター層を入れるべきである。技術者であれば示方書の内容を理解し, 現場に即した解釈をすべきである。「地下浸透流量が大きいダムでは……必要ならば浸食防止のためにフィルターを設けなければならない」⁴⁾という特別に親切な記述のある本もある。

「ダム破壊に根本的に関係した重要な要因は, ゾーン1フィル材が開いた節理を通して下流側基礎岩盤の中に流出してゆくのを防ぐ完全な対策を講じなかったことであり」⁶⁾。『1977年4月にIRGは“Tetonダムの破壊調査レポート”として「当ダムはゾーン1不透水性コア材料が内部浸食を受けないように適切な保護対策を講じてなかったことから破壊したと述べている。もちろんその後の調査継続によっても, この結論を変更するような事実はなにも一つ出ているわけではない。もし設計者が正しいダムのフィルターとドレインを備え, 適切な基礎表層処理を含めた防護的設計を与えていたなら, 安全なダムが出来上っていたであろう。」との結論を下している……ダム破壊に根本的に関係した要因は, ゾーン1フィル材が

開いた節理を通して下流側基礎岩盤中に流出してゆくのを防ぐ完全な対策を講じなかったことであり⁸⁾と事故後には指摘されてはいるが、事前にはそこまで考えが至っていなかった。

限界流速は細粒の粒子ではごく小さく細粒子は容易に流れ出るので、コアの下流側(貯水池の水位の昇降がある揚水発電などではコアの両側)に十分なフィルター層を設ける必要がある。遮水層、コアの厚さが十分に設計されていたとしても、施工誤差、木の根や小動物が穴を掘る、洪水吐、取水管などの構造物、計測用のケーブル周辺などに締め固め不足が起こる、コア内の局部的アーチ作用などでひび割れができるなど不測の事態も考えられるので、フィルターは是非必要である。パイピングが起きれば、破壊は連鎖反应的に急速に進行する。これは長柱の座屈、火薬の爆発、原子力発電所の臨界事故に似ている。いったん始まればこれを止めることは難しい。このためもし起きたときの対策として、フェイルセーフ構造、防護壁等の別の対策をとることが重要である。ダムでこの役をするのがフィルターである。

なぜcutoff止水壁や基礎地盤割れ目の下流側にフィルターを設けなかったのか疑問である。その理由は推測するしかないが、USBRの職員の多くが、現場の技術者が示方書や指針、設計基準の条文でしかフィルターを考えなかった、フィルターの必要性を原理から考えなかったことがその原因であろう。アメリカ内務省開拓局(USBR)といえバフバーダムを作り、多くの盛土式ダムを造った世界のダム技術界の最高峰、最先端として活躍している役所である。そのため100mクラスのダムを甘く見て⁹⁾技術の精神を理解していない未熟練技術者を配置したのか、示方書を墨守すればできる程度のダムと甘く見たのか、ダム技術に自信があるとの思い上がりのせい。完璧なマニュアルがあるので、それに従えば素人に毛の生えた程度の技術者でもダムは出来るとみて、その程度の体制を組んだのか、とにかくこのような信じがたい事故が起きた。

遮水壁cutoff trenchの両側にフィルターがあれば、漏水は多少あったとしてもダムは壊れなかったと考えられる。特に割れ目の多い右岸流紋岩内のトレンチにフィルターがないことが事故の第1の原因ではないか。ここはグラウトではとても改良出来ないと言うことで止水壁を掘る設計に変更されたと言うから地質が悪いことは周知のことであった。『キートレンチの幅が狭く、かつ側壁のコウ配が急だったこと、およびゾーン1材をキ裂の多い岩盤と直接接触させたことが、今回の決壊の原因を考える上で重大な意味を持っている』⁶⁾。『堤体コアと同一の材料で填充した場合は、コアとキートレンチを単一体としてつまり堤体としてとらえる方が構造物のはたらきを

検討するのに適していると思われる。Teton ダムのコアゾーンとキートレンチとの単一体は、水圧の余計にかかる深部において形状が急変し、厚さが減少し、フィルターが欠除し、全体として統一を欠く不合理な構造となっており……要するにコアは堤体、キートレンチは基礎として別個に扱い、異なる概念で設計を行うならば、両者の間の統一は得られず、思わぬ所に弱点を生じることになる』⁷⁾。USBRではお節介は嫌われる風土があったのだろうか。

David Rogers⁷⁾は同じ時期に、似たような地質の所に工兵隊で作られたRirieダムを例にあげて、Tetonダムの破壊も地質だけの原因ではないとした。これを見ると、同じくカットオフトレンチがあるが、フィルターがきちんと、しかも2層もある点が違う。厚さもキッチンととってある。法面勾配が緩いのは盛立て材料がさらに悪かったのか？コアの厚さはカットオフ部も本体と同じである。トレンチの掘削面のひび割れは底面は貧配合コンクリートで、斜面は鋼繊維入り吹付けコンクリートで保護する等の丁寧な工事をした⁷⁾。Tetonダムの破壊は地質が悪いだけではない。

地山内のパイピング対策にはダム下流の地山内に排水トンネルまたはリリーフウエルを掘り、フィルター材で埋め戻し、パイピング破壊を防ぐ必要があったろう。しかしこのような対策は今まで提案されていないようである。コアの粒度分布、必要厚さについての記述、心配に比べてフィルターの必要性についての技術者の関心が低いのではないか、事故報告書を読んでもそれが感じられる。フィルターの重要性をもっと研究する必要がある。

(7) 実際の漏水、破壊の進行・経過

1975年11月末より湛水を開始したが、冬の間は流量も少なく、湛水速度は遅い。4月10日頃から水位上昇が早くなり(0.6m/日)、5月10日頃からさらに早くなった(0.9m/日)。4月10日には最初の漏水地点とは35m位、6月3日では80m位の水位差があった。4月頃からじわじわとパイピングが始まったのであろう。①1976年6月3日最初に漏水が右岸のダム法尻より400m～460m下流の2カ所、1539.2m等高線の下で(3.8ℓ/sと2.5ℓ/s、澄んだ水)発見された。②翌6月4日夜には最初の漏水点より約330m河心によった右岸のダム付け根、法尻より約50m、標高1537.7m地点で別の漏水があった(1.2ℓ/s)。このときの漏水はまだ澄んでいた。③6月5日濁った湧水が午前7時30分と8時00分の間に観察された。8時30分には0.57m³/s～0.85m³/sと測定された。9時30分の二回目の測定では1.13～1.42m³/s。④6月5日午前7時少し過ぎにはさらに高くさらにダム法尻近くの標高1585mの地点で濁った漏水0.6～0.8m³/sが見られた。⑤標高1,585mと1,538mの間のダムの右岸付け根沿いに、ゾーン5の上に乗った細粒土に食い込

む水路の浸食が6月5日朝のある時(7.00とも)起きた。9時10分には $0.05\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。⑥盛立から漏水が最初に発見された場所(前記の⑤),標高1,585m点より86.3m下流では10時00分および10時30の間に濁った水が増えて $0.42\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。⑦ほぼ11時00分には上記ダム法面の浸食溝は拡大した。⑧ダム軸14+00点より39.6m上流で11時00分に貯水面に渦巻きが発生した。⑨午前11時00分～11時45分に浸食溝がさらに発達し上流に伸びた。⑩11時45分頃14+00地点,標高1620m法面に陥没孔が発生した。⑪11時00分上流に浸食溝が伸び11時57分ダムを突き破った⁸⁾。①②の番号はここに省略した図中の番号に対応。「午前10時30分に $0.4\text{m}^3/\text{s}$ の大量の漏水が,標高1585mでアバットメントから4.5mのところ,この標高で以前に発見された少量の漏水に隣接して発見されたが,これはその時刻に聞こえた大きな爆発音とおそらく関係があったものと想像される。この新規の漏水は増大し,直径約1.8mのトンネルとなって漏れ出した。このトンネルはほぼダム軸に直交し,ダム軸上の測点4+64.82のところでダム内に少なくとも11m食い込んでいた。この漏水トンネルはダムの上方に延びて浸食谷を形成し,アバットメントの方に少しカーブしていた」⁸⁾「次々と進行してゆく浸食によって漏水トンネルの直径は拡大し続け,ついに約10時30分頃には大きな水圧により突如急激にゾーン2フィル材を突き破り,ダム表面に噴出したものと考えられる」⁸⁾。フィルターは遮水層ではないので破られたという説明は少しおかしい。

観測井戸の水位を見てみよう。『5月中旬頃までは右岸側キートレンチ上流側の観測井中の水位は貯水位の上昇と同時に上昇しているが,キートレンチ下流側の観測井中の水位はほとんど上昇しておらず,少なくともこの時点まではキートレンチおよびグラウトカーテンは一応その止水作用を果たしていたことが分かる。また,6月5日のダム決壊当日のDH-5(キートレンチ下流)の水位はEL5200ftによりやく達しようとする程度であり,右岸アバットメントEL5200ft付近で発生した漏水カ所との間にはほとんど動水勾配がな』⁶⁾かった。最初の漏水路は途中でフィルターの作用をする地層があり,湧出水は澄んでいたが,やがてフィルター層の役をする地層のなかで目詰まりがおき,さらに高い標高の位置から水が出たようである。翌々日には濁った水が出た。次にダム本体からの漏水が始まった。断面図を見るとこの付近は地山の斜面の上に薄くランダム材が乗っている状態であり,これがダム本体内を通った漏水と断定出来ない。漏水の湧出し地点はほぼ直線に並んでいて,これは地山の割れ目方向と一致している。そこで地山の割れ目沿いの漏水はキートレンチ内の漏水トンネルを通ったと考える方が説明がつく。このト



図4 右岸地質と地山の抉られた様子

ンネルの天端が抜け,その土砂で一時水流が止まり,水圧が高まりこれが抜けるとき大きな音がした。ダム底に孔が開いたと考えると,流速は $v = C\sqrt{2gh}$ で求められる。 $h=80\text{m}$ とすると $v \div 30\text{m/s}$ であり, $1.5\text{億}\text{m}^3$ の水が2時間で流出したとすると $\phi 30\text{m}$ 位の孔が開いたことになる。地山はそんなに堅くない。軟弱な地山内のトンネルでは天井が落ちて地表には陥没孔ができ,下では一瞬トンネル水路が塞がれ,それが破られる時大きな音が聞こえた。貯水池には吸い込み渦巻きができた。トンネルの天井はさらに落ち,トンネルが塞がれて,水流はダム表面に噴き上げさらに勢いよくなり,その僅か5時間後にはダムは崩壊してしまった。地山の透水係数はかなり大きく,キートレンチ幅9m～30mの中で約80mの水位差が生じ,次にここでパイピングが起きたものと考えられる。ダム崩壊後この部分の地山がキートレンチの深さ21mの半分以上,10～15m抉られていることからこのように推定される。

(8) ダムの断面設計

Tetonダムの設計断面を見るとなんとも不思議な気がする。このダムの設計者は何を考えてこのように複雑怪奇な断面を考えたのだろうか。遮水層やフィルター層の厚さをきめる基準はどうなっているのだろうか。遮水層の厚さはほぼ水圧に比例すると考えるのが普通ではないだろうか(国内実績では高さの15～20%)。遮水層の厚さはTetonダムでは天端EL1625mでの幅8.5mからEL1554.5mまで1-1/2:1と1:1の勾配で増え233.5mまで厚くなる。そこから上流側はそのままの勾配で下るが,下流側は1-1/2:1の逆勾配で下る,つまりそこから下は同じ幅で河床高さまで続く。この複雑な設計はダム中心とカットオフトレンチ中心が36mずれているからである。これはUSBRの慣例的設計である。理由はよく分からない。河床面高さ1533.1mから下はカットオフトレンチという名前になり,幅は233.5mから81.1mも急に狭くなり152.4mとなる。そこからは上下流とも2:1の勾配でさらに狭くなり,33.5m下の岩着高さ1499.6mでは18.3mになる(実際は予想より早く岩着したので

24.4m). コア部分の厚さは平均的には日本のダムに比べてうんと広いが、肝心の所は狭い。両岸部の直接岩着するところではキートレンチを設け、コア(土)で埋め戻した。『深さ30mまでの基礎岩盤の大部分は非常に透水性に富み、グラウトカーテンは困難で膨大な量になり工費も大であろうと推定された。…よって標高1554.5mより上方の両岸アバットメントの上層の比較的グラウト不可能な岩盤部分は掘削除去することにした』⁸⁾。このキートレンチは底幅9m、深さ21m、法勾配1:0.5である。ここの地山は『開拓局が今まで手がけた火山岩地帯では経験したことがないほどに、節理、割れ目および空洞が多く見られた。この部分でグラウティングテストをしたところ最も濃いセメントミルクでさえもティートン川の峡谷の岸壁から流れ出してしまったので代わりにキートレンチを掘削し、その下からグラウティングを行うことにしたものである』²⁰⁾。

フィルター層の厚さはさらに不可解である。上流側は2-1/2:1と1-1/2:1の勾配で、下に行くほど広くなる。上流締切りと交差する高さ1545.3mからは上流締切りの勾配2:1で狭くなり、河床高さでは約38.7mになっている。下流側フィルターは天端の3.5mから1:1と1:1.4の勾配で下り、標高1554mで幅31.8mになる。そこから下は同じ厚さで河床高さまで続く。そこからチムニー式のアースダムと同じで、下流側法尻までフィルター層が水平に続いている。カットオフトレンチ内のコアの両側、キートレンチ内のコアの両側にフィルターがないのは前記の通りである。フィルター層の厚さを決める基準もはっきり示されていないが、水深が深くなれば増えることはあっても、上流締切りの天端から下は狭くして良いという理論はどうしても思いつかない。上流締切りはランダム材でできていて、とてもフィルターの役をしそうではない。こんな複雑な断面設計にどんな意味があるのだろうか。各ゾーンの幅は天端から着岸部まで直線的に変化するだけで十分である。せいぜい法表面だけは滑り計算により勾配を変えても良いが。

コアとフィルターの粒度は示方書から外れている。「ゾーン①(コア)の材料には、両岸の台地方面に多量に存在する風積土層のシルト(厚さ10数m)が使用された。この種のシルトは比較的もろく、流水による浸食に対する抵抗力が十分でないが、ゾーン②(フィルター)の材料を適切に選択、配置すればPalisadesダム(高さ83m、1957年竣工)その他の実績の裏打ちもあるので解決出来るとし、自信を持って使用された」²⁾。「ゾーン2は河床砂レキであって、統一分類法ではGPないしGP-GMに属するものである。大レキは取除いたが河床掘削時に出るものをそのまま用いた。前述したように、ゾーン1は浸食に弱いので、このゾーン2でゾーン1を保護するサヤ土として用いた。これは

同時にフィルターおよびドレインとしての役割も果たしている。……フィルターに……切込み砂利を用いるときはこの規準を緩めてよいとされている。Tetonダムでは切込み砂利を用いたのでこの規準を満足しないでもよいとされた(事実ゾーン1とゾーン2の粒度分布曲線を見ると、この規準は満たされていない)」⁶⁾。「ゾーン2の透水性は低く、ゾーン1の透水性とあまり変わらない程度であったろうと推定される」⁶⁾。『1977年4月にIRGは…「当ダムはゾーン1不透水性コア材料が内部侵食を受けないように適切な保護対策を講じてなかったことから破壊した……もし設計者が正しいダムのフィルターとドレインを備え、適切な基礎表面処理を含めた防護的設計を与えていたなら、安全なダムが出来上がっていたであろう」との結論を下している』⁸⁾。適切なフィルターがあれば使用出来るコア材料を、つまり普通は使っていけない材料をキートレンチのカットオフ部にも使って、そこにフィルターがないのはどう言う神経なのだろうか。その上キートレンチの掘削勾配は急で、コア内に沈下差によるひび割れが出来たのではないかといわれている。Fontenelleダムの断面構成もTetonダムと似ている。浅いカットオフトレンチがあり、コア材料で埋め戻したがフィルターはない。Tetonとまったく似た事故を起こした。大急ぎで湛水位を下げダム崩壊を免れた。ここでも地山が崩壊している。「弱点はダム本体でなく地山内にあったことは明らかである」⁹⁾

(9) カーテングラウト

地質が悪いにも拘わらずカーテングラウトは簡単で、問題が多い。『第1に、施工管理基準が甘い……注入終了の判定が甘い……第2に…チェックホールによる透水試験が行われていない。これはTetonダムに限らず、開拓局の習慣にないもののようであるが、一般的な地質条件の、従って従来の経験で判断出来るような基礎ならば問題ないであろうが、Tetonダムは異例の地質であってみれば、施工管理基準はより厳しく、チェックホールも、より密にすることが常道ではなかろうか。第3に、グラウトの流失を防ぐために塩化カルシウムを本格的に使用しているが、……疑問が残ると言えよう。第4に、両岸とも地質不良箇所では3列のカーテングラウトを実施しているが、……注入間隔も6mどまり……第5に……ブランクセットグラウティングは、開口節理や割れ目の顕著な箇所だけに限定され……単位注入量は桁はずれに多いが……本来、注入を要する箇所で実際には施工されなかったものがない多いものと推定される』²⁾。この背景にはグラウトについての研究も少ないし、経済問題もあったようである。

(10) 体制・人事・組織・職員の風土

開拓局は1902年に作られた。1930年代には最盛期を迎えた。フーバーダムは人智の記念碑としてそびえ立っていた。「当時(IV期1945～1975)開拓局の技術者は土質工学の新分野の進歩を助けたとして、また盛立てダムを本質的に研究し、報告書を出し、専門学会に論文を出したとして全国的に、また世界的に絶賛されていた。開拓局は開発を続け、技術的仕事の報告を出した。1951年にはアースマニュアルの試験版が6000部、第1版が28,000部も出された。……計測器、……大型施工機械……より大きなダムも作った」⁵⁾。しかし研究論文は必ずしも現場で尊重されなかった。「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、歴史的に開拓局で使われ、成功した、経験的設計や工事手順が使われ続けた」⁵⁾。しかし環境問題が生じたり、ダム適地が少なくなり、一方ダムを経済的に造ることが強く求められるようになった。「開拓局が1960年代、1970年代に作ったダムの全て、あるいは大部分が危険というのは間違いである。しかしこれらのダムの費用は経済的利益よりも大きく上回っていると、また開拓局の個人が承知の上でダムが出来るだけ魅力的に見えるように数字をいじったと推察することは間違いではない。Tetonダムは全く悪い場所に造ったわけではない。しかしその費用は便益よりもはるかに大きく、1960年代、1970年代に造った多くのプロジェクトと同じく水の利用者に殆ど利益をもたらさなかった……局が最初に提案した時、利率は3-1/4として計算したが、工事が始まった時は5-3/8になるのが普通であった。低く見積もっても費用対便益比は一以上であった……開拓局は多くの方法で数字をいじった。驚くに当たらないが、多くの場合工費は当初見積もりよりも多くなった。書類上の工費を下げるために、局は5年も10年も前の物価を使った。また、第2次世界大戦前には認められなかったレクリエーションや、生息地の改良、汚染の減少などを計算外の利益として計上した」⁹⁾。

『議会調査団は……開拓局が、ダムの建設をひとたび開始すれば、工事中どのような悪条件に遭遇しようとも、また部外から安全に関するいかなる警告を受けようとも、工事を続行し、その動きはとどまることなく、すなわち、そのモーメンタムによって、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、また、あらゆる問題を何でも“エンジニアリング”してしまおうと指弾されている。過去70年余の間に300以上のダムを建設し、Teton までには一つの事故もなく、Hooverダムを初め著

名なダムを数多く造り、世界のダム技術をリードしてきた開拓局のエンジニアリングも、Tetonダムの事故によって、いま、厳しい批判を浴びている。一つの過誤は幾百の業績を以ても、あがなわれることはないと云うのであろう』²⁾。エンジニアリングを辞書で引くと工学の他に巧みな策略、工作、処理という裏の意味もある。正しい工学を身につけることが、実践と倫理がすべての技術者に強く求められる。

USBRの体制は時代とともに変わった。「1945年に……体制の変更……このことは建設技師にとって、地区監督Regional Directorと主任技師Chief Engineerという二人の主人を持つという問題を生じた。……1953年には主任技師の資格はさらに高められて、名前も変えられた。この名前はさらに変えられて…」⁵⁾。このような体制の変化がどう影響したか、細かいことはわからない。しかし例えば、「Granbyダム(1948)は……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。アースダム部門の首脳による開拓局の基礎グラウト設計に関する基本方針についてのWalker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……Fontenelle Damの主任技師Bellportの報告では「弱点は地山アバットメント内にあり、盛立て堤体内でないことは明らかである。多くのダムが似たような基盤の上に築かれている。……岩壁は急傾斜で、基礎の動きを予防するために浅い部分は低い圧力しか掛けられないので十分にグラウトをすることは困難である。1列のグラウトカーテンでは不十分と判定され……1940年から1960年の20年間には、グラウトの列数と量を減らす大胆さはグラウトなんか最も無駄なものだという哲学を証明するかの如くだった。開拓局でもそうだった。欠陥が容易に修理出来るような場合でもTry and see(試しにやってみて、具合を見る)がFontenelle Damの事故が起きるまでのますますの成功のやり口だった……この困難は初期湛水時に起きたが、それは異常に大きい流入量とまだ修理中なので放水設備が使えなかったせいである。この経験は地盤が悪いときは貯水池をゆっくり、管理しながら湛水する必要があることを示している」⁵⁾。しかしTetonダムの非常放水路の容量は小さく(24m³/sと96m³/s(右岸)があるが右岸のはまだ工事中、主洪水吐の容量はもっと大きいが高位置にあった)、湛水速度は速かった(最大93cm/日≒110m³/s)。現場所長は湛水速度の「制限値(30cm/日)の緩和を本局に要請したが、その折、早期湛水で得られる利点を挙げ、特に、グラウトカーテンの試験が早く出来ること、発電開始が早くなることおよびレクリエーションの利

用が早まることを指摘している」²⁾。グラウトカーテンの試験を早めることは、危険な行為でもあり、真意がはかりかねる。放水設備工事が終わらぬうちに湛水を始める人と、湛水速度は30cm/日以下にと決める人とは互いに何の連絡もしなかったようである。

現場技師と本部の担当技師との間の連絡は不十分であった。「地質上の重要な点をダム設計担当者に明瞭に理解させるようには記録されていなかった。……開口部が6cmもの主要な節理が走っていることが、決壊後の調査で分かったが、施工中に作成された地質図に示されていなかった」⁶⁾。「そのときの観察でトレンチの上方に非常に亀裂が多いことが分かったので、設計官の一人Harber氏がコンクリート吹付けによる岩盤表面処理を行うようにとの覚書きを書いた。しかし、これはどういう訳か現場の施工担当者に渡らなかった。結局、現場の判断でスラリグラウチングが採用された」⁶⁾。「連絡官は、設計担当者と現場の施工担当者との間の連携を密にするための役割をある程度果たしてはいたが、1972年の初めから1976年6月のダム決壊時まで現場に6回しか行っていない。設計担当者にいたっては、この全期間中2度しか現場を訪れていない。設計担当者はダム建設中もっと頻繁にダム建設現場を訪れ、設計時に仮定した条件と現場の状況が合っているかどうか調べる必要があった」(IRG報告書より)⁶⁾。「開拓局は今回の事故で明らかとなった問題点を検討し、今後は設計責任者と地質担当責任者を明確にするとともに、地質部門と地質工学部門の組織改変をすることにしたと最近の情報は伝えている」⁶⁾。「表層グラウトは標高1587mで停止されたが、設計者も連絡技師もダム事故の発生後まで、その停止の事実を知らなかった。また現場の人の説明では、現場地質技師もその停止決定には関与していないことが判明した。……このダム設計段階の初期に書かれた設計ノートによれば、種々の設計上の諸問題とか、その対策や代替案が書き残されていた。しかし次の三項目を示す記録・書類・報告のいずれも残されていない。すなわち、(1)各種の設計問題で提起された事象の合理的な解決法、(2)何ゆえに個々の実施設計案が満足なものとして他案をしりぞけて決定されたのか、(3)何ゆえに提起された設計案は重要または非重要と判断され、棄却されたり採用されたり、検討されたりしたのかというような論議の内容。事務所内、本局と出先間の風通しの悪さが最悪であったようである。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。

4. 教訓・まとめ

Sherardらは「堤頂の越流を除けば、他のどんな原

因によるよりも集中漏水の進行性浸食、すなわちパイピングに起因する崩壊が多い。したがって、アースダムの設計・施工の最新の技術の多くは、この現象に対処するために発達したものである。……最近の重要なダムではパイピングによる崩壊は殆どなかった」⁴⁾と述べている。しかしこの本が書かれた13年後にTeton Damの崩壊は起こった。技術はまだ十分に発達していなかったことになる。

◎各報告書ではTetonダム破壊の原因追及をしている。FEMで透水計算などを行っているが、パイピング現象は僅かな水流で細粒子が動き、平均的な透水係数が変わり起こる現象である。透水係数一定の計算では現実と合わない架空のものになる。連続体力学でなく、粉粒体力学で考える必要がある。

トンネル屋は湧水が澄んだ水であるとあまり危険でないが、濁った水であるとやがて大湧水になる前兆であると考ええる。ダムでも同じことである。Tetonダムでも最初の地山からの湧水は澄んでいたが、その翌々日濁った水が出てからわずか5時間でダムは崩壊した。これはパイピングによる連鎖反応である。

構造力学と言うとすぐ作用応力と強度の比、安全率を十分とることと考える傾向があるが、それ以上に変形に伴い作用力が増えるかどうかをよく考えておく必要がある。微小変形の仮定で計算してはダメである。土構造と水の関係では限界透水勾配とかでなく、フィルターにより透水に伴う粒子の流出を防ぐことが大事である。フィルターがちゃんと配置されているか、どうかを考えるべきである。従来の教科書や事故報告書はフィルターの粒度分布など細部には注意しても、フィルターがあることの重要性を忘れている、ないし気がついていない。

◎ダム工事は多くに人が協力して仕事をするのであるから、具体的に仕事の仕方、品質管理の方法などを示方書に事細かに定める必要があるし、皆がそれに従う必要もあるが、一人でもよいからその精神を理解し、現場の状況が示方書で想定したものと違うときは、適切に変更、修正して仕事を進めることが絶対に必要である。そのためには示方書に細かいことを定めるだけでは駄目で、それが制定された精神も示す必要がある。示方書などで細かいことだけ定めると、その文面、言葉、数値に囚われすぎて、例えば地山内にフィルターを入れるという考えに至らない。

◎天網恢々疎にして漏らさずという。しかし人間の作る示方書、指針はどんなに詳しくしても必ず漏れがある。それを定めた精神を考えて解釈し実行しないと漏れが出る。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。細則をどれだけ細かくしても、それだけで全部を書き尽くせないことが多いからである。示方書、指針などにも同じ工夫をすべき

である。

◎規則は守れば良いとは限らない。ドイツではよく前の車が急減速して驚くが、これは制限速度変更の標識のせいだという。このようにルールの徹底したドイツも対照的なイタリアに比べ事故が少ないわけではない。イタリア人は「われわれは誰もルールを守らないので絶えず周囲に気を配っている。ドイツ人は人や状況を見ずに規則通りに運転するから事故が多い」という。土木工事でも同じことであろう。

◎2014.4.16韓国でセウォル号の沈没(死者295名,行方不明9名)という事故が起きた。その最大の原因は過積載であるが、驚かされたのは傾き、沈没していく船の中で多くの高校生が船内放送の指示に従って船室内から動かず、脱出しなかったことで死者が増えたことである。韓国では儒教の影響が強く、長老の指示に従う文化があるという。工学分野でも原理、原則に従って設計や施工を進め、自分で考えることよりも、現に目の前で起きていることから判断するよりも指針、示方書の条文に従うことを重視する人も多い。多くの人が示方書を守ることが必要であるが、示方書の想定と現実が違うことに気がつき、修正する人もいなくてははいけない。1000人のうちに一人でも、毎日でもなくても時々でも自分で考えることが必要であろう。USBRでは大事な規則を無視したり(例えばフィルターの粒度)、逆に規則に囚われ過ぎたりして適切な判断をする人がいなかったようである。

◎本部と出先の間、技術者と事務官の間、土木屋と地質屋、研究者、設計者と現場の施工担当者の間の連絡不十分、反目、不信があってはよい構造物はできない。

◎日本人は空気を読むのがうまい、空気を読みすぎる。日本はタテ社会で上からの命令に唯々として従う人が多い。そのため無謀な戦争に反対・抵抗出来なかったと言われる。アメリカでは学生の時からdebateを訓練し、自分の意見をはっきり言う、ヨコ社会だという。しかしTetonダムの経過を見てみるとアメリカでも日本とはある程度ニュアンスは違うが、やはり上司に遠慮し意見をはっきり言わない、自分でちゃんと考えない、専門分野に閉じこもる、自分の意見をはっきり言わない、悪い風習はあるようである。欧米の先進技術、学理、示方書を輸入するのは良いが、それなりに欠点もあるので十分に検討し、良い点だけを採用するという努力を怠ってはいけない。

◎欧米は日本に比べると、契約社会、分業社会、階級社会である。発注者と請負会社の関係も日本とは違う。職種別の組合があり、大きな力を持っている。本局と出先の力関係、設計者と工事屋、地質屋、グラウト屋の関係もそれぞれに微妙である。学者と実務に従事する技術者、請負会社の技術者、技能工、職人の間に身分や権限の差、考え方の違いがある。役所内では担当部署によっても、事務屋と技術者の間でも対立や競争

がある。そのせいかダム本体とダム基礎では担当者も別、専門家も別になっていたようである。ダム本体では必要であったコア部分の厚さ、コアの両側のトランジション、フィルターがカットオフトレンチ、キートレンチでは省略された。しかし近代科学の進歩の原動力は天上も、地上も同じ法則に支配されているという信念ではなかったろうか。アリストテレス学派は天上は完全で、円と直線からなると主張した。これに対しガリレオは月にも山があることを見だし、ケプラーは地球の回転軌道は楕円であることを発見し、ニュートンは林檎が落ちるのも、月が落ちてこないのも同じ万有引力の法則による(月には遠心力が働くので引力と釣り合う)ことを発見し、その後の近代科学の礎を築いた。ダム本体でもカットオフでも基礎地盤でも水圧が働く限りパイピングが起きるとTetonダムの関係者は考えなかったのだろうか。

◎飛行機的设计などでフェイルセーフが重要視されるが、ダムで言えば、フィルターがこの役割を担う。多少の漏水があってもフィルターが適切に配置されていれば破滅的な連鎖反応はそれ以上に進行しないし、ついに崩壊になることはない。コアのなかに多少ひび割れがあるかどうかより、コアの粒度や転圧などを厳密に管理するより、この浸食の進行を止めるフィルターの存在が重要である。

◎事故が起きると施工不良のせいにされることが多い。しかし研究不足によることもある。Terzaghiは「パイピングによる破壊は二つの異なった過程で起こる……第1の部類に属する破壊は地下浸食による破壊……下流側から始まって…上流に進む破壊…この型のパイピングの機構は理論的な取り扱いは無理である」³⁾としてあっさり諦めているが、これをちゃんと解明しなかったことが、事故につながった。パイピングの本質は後退進行より流出孔の拡大にある。

◎ダムを浸透して流れる水の量は上流面から下流面まで同じであるから、流速はどこでもほぼ一定である。ゾーン分けしたフィルダムのパイピングに対する設計の要点は上流側に粒径も透水係数も小さい細粒土や粘土(コア層、遮水層)を配置し、その下流側にはフィルター層を配置して、コア層から僅かに流出する細粒分をここで捕らえ、コア層内の透水孔が拡大するのを防ぐ。フィルターの厚さは理論的にはかなり薄くて良いが施工誤差を考えて設計する。フィルター層の下流側にはロック材、ランダム材を配置し、フィルター層のなかの細粒分が流出するのを防ぐ。ロック層の下流法面は安息角より少し緩い勾配にする。フィルター層やロック層は細粒土を除き、透水係数を大きくしてフィルター層やロック層の中の流水は重力で下に下がり法面から流出しないようにする。法面で下向きに水が流れると粒径が大きくて

も洗い流される危険があるからである。各層の間の粒径の比はフィルター則に従う。この原則はダム本体だけでなく地山にも適用しなければならない。地山内はコア層の代わりにはカーテングラウトを施工する。必要ならフィルター付きのリリーフウエルを施工し、地下水を集めた後、フィルターを通して上向きに放流する。最近の教科書などはコアのパイピングに対する抵抗やフィルターの必要な粒度を詳しく論じて、フィルターの必要性・重要性を見落としている。

◎健全な構造物をつくるためには、学問・研究も、設計・指針も重要であるが、設計、調査、施工、保守管理などに当たる組織、管理責任者から末端までの職員、技術者、技能工、労働者、あるいは事務職員までの技術、知識、経験、互いの協力、熱心、良心、謙虚さ、陰日向なく黙々と任務を果たすことその他すべてが健全である必要がある。会社、組織も健全でなければならない。組織や会社、学会も油断するとたるみ、腐敗がおきる。橋梁で事故30年周期説が提唱された。常に油断せず、努力することが必要である。

◎研究はどんどん細部に入り込み、専門化、細分化される傾向にある。しかし狭い視野で物事を見ていると全体を見失う。木を見て森を見ないことになる。技術が進歩するためには数式化、厳密化、理論化も必要であるけれども、個々の技術分野をつなぐinterfaceも必要である。大局的に事故例を見て、詳細研究に潜みがちな弱点に光を当てる必要がある。分析的な考察（分けて考える）と総合的な配慮が両方必要である。日本で幸い大きなダム事故はないが、例えば同じ構造の河川堤防の事故はかなりある。この事故例研究が今後の安全の一助になれば幸いです。

◎医学に臨床医学と基礎医学とがある。西洋医学と漢方医学、東洋医学とがある。進歩のためには両方が必要である。一つの見方だけでなく、立体的に眺め、落ちがないようにするのが失敗をなくし、事故を防ぐために必要である。工学にも基礎工学と応用工学が必要であり、さらにこれを総合した観点も求められる。研究には独創性が求められ、一方技術者や職人には一定の水準を守ること、失敗のないことが強く求められる。一口に工学技術と云っても求められるものが違う。現状では基礎工学的なものが重視され、応用工学が未発達であり、これがTetonダム事故の原因の一つとなっているのではなからうか。

◎NTSBは飛行機事故から学んだ知識で飛行機を危険なものから安全なものへと変えた。進歩のためには成功例を研究することが大切であるが、失敗や事

故再発を防ぐためには失敗例を研究することも大切である。成功体験も必要、成功例に学んで積極的に攻める必要がある。失敗例に学んで、取りこぼしがないように、細かいことにも気を配る必要もある。

◎学問が未発達の際は自分で経験し、学習しながら憶えたので、物事をよく見ると共に、目の前の現象がどう言う原理原則で動いているかを自分で考えて憶えたり判断したりする。現代は意味も分からず、教科書や示方書の条文だけを憶えたり、数式やコンピューターのプログラムに数値を入れて判断したりしている人が多い。そのため大きな過ちを犯すことがある。記憶するだけの教育や示方書から、想像力、応用力、創造力を重視した教育や示方書へ変え、原理を学び、応用力を高めることが大切である。

◎ダム本体の研究に比べ地盤やグラウトの研究は遅れている。品質管理も計測出来る項目については詳しいが、求められる真の品質でなく、計測出来る仮の目標値だけを追っかけている場合が多い。計算や実験のできる分野の研究は進むが、手のつけにくい、よく分からない分野にも目をつぶってはいけな

参考文献

- 1) 吉越盛次：アメリカ合衆国Tetonダムの決壊に思う、土木学会誌、1976.8
- 2) 藤井敏夫：ダムの事故について、大ダム、1977.6
- 3) Karl Terzaghi, Ralph B Peck:土質力学、基礎編、応用編、丸善、1969
- 4) Sherard, Woodward, Gizienki & Clevenger: Earth and Earth Rock Dams、河上房義他訳、森北出版、1972、原著1963
- 5) Richard Lyman Wiltshire:100 Years of Embankment Dam Design and Construction in the U.S. Bureau of Reclamation, 2002.9
- 6) 仲野良紀:Tetonダム決壊事故の原因について、農業土木学会誌、1978.5
- 7) J. David Rogers: COULD A SAFE DAM HAVE BEEN CONSTRUCTED AT THE TETON DAM SITE?, 1976
- 8) Robert B. Jansen、君島博次訳：ダムと公共の安全——世界の重大事故例と教訓、東海大学出版会、原著1983
- 9) The Bureau of Reclamation: History Essays from the Centennial Symposium,2008

(2016. 4. 11 受付)