

# 世界におけるダムのすう勢

畑 野 正\*

## 1. 概 説

ダムは人間が造る最大の単一構造物で、その建設は土木技術の世界的分野において、今日なお第一級の地位を占めているといつてよいだろう。そして近年になって、ますますその規模が大きくなり、高さ、堤体積、貯水量の記録を更新しつづつある。世界中で一番高いダムは、昨年完成したイタリアの Vajont アーチ ダムで 265 m で

ある。貯水量ではアメリカの Hoover 重力ダムが 1936 年に完成し、365 億 m<sup>3</sup> の記録が今日まで破れなかったが、現在建設進行中のエジプトの Aswan アース ダムが完成すると 1300 億 m<sup>3</sup> という巨大な貯水量でその記録が更新されることになる。堤体積では、アメリカの Fort Peck アース ダムが 9500 万 m<sup>3</sup> で 1940 年に完成し、その記録を保持している。

いつの時代でもダムの建設にはその時代の最大の機械力を動員し、きわめて短時日に巨大な構造物を築造するという、地形地質の悪条件を技術的な創意熟練によって見ごとに克服してゆくということ、この二点が大きな特長であったわけであるが、今日では今日の技術水準に応じ、過去に見られなかった設計力、工事力が示され、さらにもう一つ、精巧なむしろ芸術的ともいふべき美しい線をもつ薄いが大きな平面的大きさをもつコンクリートダム築造という新しい第三の特長が見られるようになった。

今世界的ダムの目録を造ることが世界大ダム会議で進行中であるが、今日のところ紹介するまでに至っていないのでここにやや古い三、四年前の 30m 以上のダムの目録を示すことにする(表一)。ただし共産圏の資料はふくまれていない。ダムの数からいって世界のダム国はアメリカ、日本、イタリア、スペイン、フランスという順序になっている。この表はダムの種類別も示されており、この数の構成内容からその国のダムの傾向がうかがわれる。以下主要な新しいダムについて国別に紹介しよう。

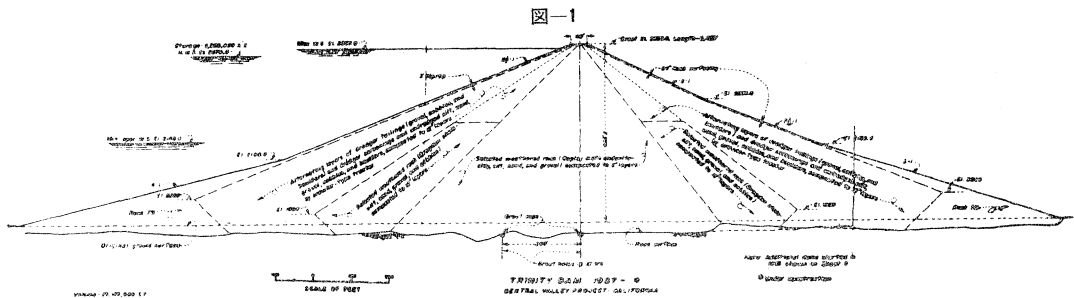
表一

国 名 (a)	国土面積 (mile <sup>2</sup> ) (b)	ダム数 (c)	(b)/(c)	ダムの型式					
				重力	アース	アーチ	ロック フィル	バット レス	マルチ レベル アーチ
アルジェ	847 000	18	47 000	9	3	2	3		1
アンゼン	1080 000	10	108 000	1		4	2	3	
オースト	2974 000	53	56 000	27	18	4	1	2	1
オースト	32 400	21	1 500	11		10			
イギリス	121 000	31	3 900	18	9			4	
カナダ	3 690 000	47	78 000	31	7	2	4	1	2
チリー	286 000	11	26 000	1	3		7		
フランス	213 000	96	2 200	49	3	39		1	4
ドイツ	143 000	38	3 800	29	7	1	1		
インド <sup>1)</sup>	1 852 000	70	26 400	46	24				
イタリア	120 000	164	740	84	3	48	9	14	6
日 本	148 000	222	670	185	20	10	5	1	1
メキシコ	764 000	32	23 500	7	14	3	4	2	2
ニラント	104 000	19	5 500	8	3	7	1		
ポルトガ	35 000	31	1 100	9	4	14	3	1	
ブルート	3 400	14	240	6	5	1	1	2	
南アフリ	912 000	25	36 500	15	1	4	3	1	1
スเปน	195 000	141	1 400	120	2	12	1	6	
スイス	16 000	32	490	16	1	11	1	3	
アメリカ	3 022 000	569	5 300	196	225	87	35	7	19
他		117		59	36	8	4	6	4
合 計		1761		927	388	266	85	54	41

1) インド、パキスタン、アフガニスタン、セイロンをふくむ。  
Proc. A.S.C.E. Sutherland による。

## 2. アメリカのダム

図一に示すのは Trinity ダムで、現存世界最高の embankment type ダムである。1960 年カルフォルニア



\* 正員 工博 電力中央研究所技術研究所

図-2

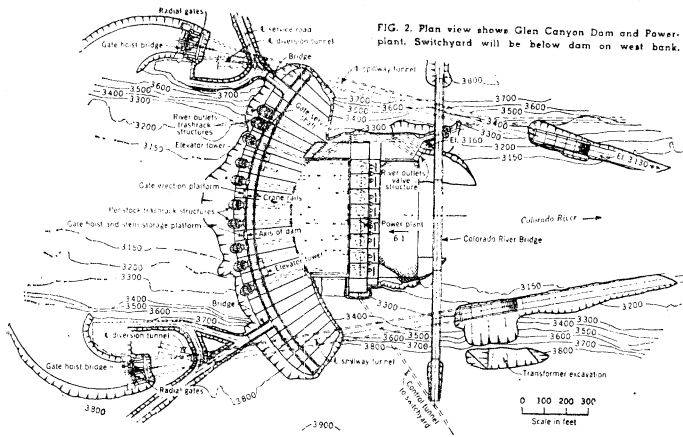
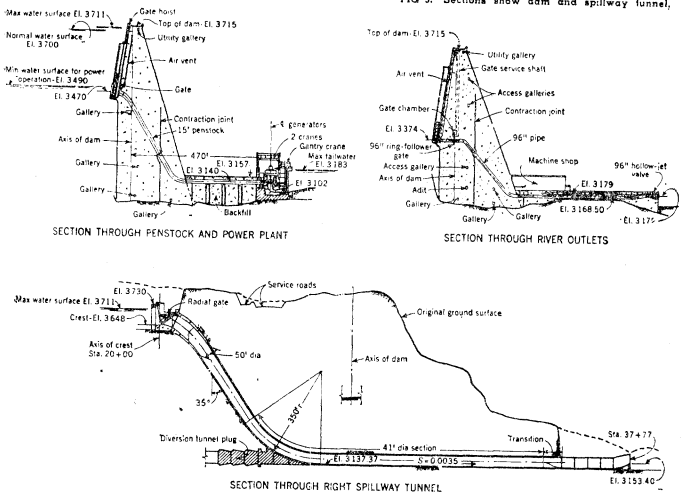


FIG. 3. Sections show dam and spillway tunnel.



に完成した。基礎は風化した変成岩で付近からの同種の岩を粘土、シルト、砂、砂利と混ぜて、15 cm 層で転圧すると、水密性が十分得られるという試験結果から rolled earth fill type が選ばれた。構造高 163 m、堤体積 2 500 万  $m^3$ 、堤長 740 m、最大底巾 900 m である。堤体材料を最初 2 mile のコンベアーベルトで運ぶことが計画されたが、請負業者は 3 mile の 8% の下り勾配一本のトラック輸送が優れていると結論し、これで工事を完成した。アメリカでは現在カリフォルニアの奥地に Oroville ダムという高さ 220m の earth fill type ダムが計画されており、やがて Trinity の記録は破られることになる。

図-2 は同じくアメリカのコンクリートダムの例である。すなわち Glen Canyon ダムで Colorado 河の上流に 1957 年から建設されている。基礎岩盤上 213m のアーチダムで堤長 460 m、厚さが 10.5~92m、堤体積 364 万  $m^3$ 、最大洪水量 7 800  $m^3/sec$  がトンネル余水吐で処理される。アーチ断面は非常に厚くヨーロッパ式の薄いアーチ形式とは対照的である。基礎岩盤は砂岩である。コンクリートは 3  $m^3$  のミキサ 6 台で練られる。

セメント使用量は 112  $kg/m^3$  で 56  $kg/m^3$  のポゾランを使用している。2 台の 50 t ケーブルクレーン、1 台の 25 t ケーブルクレーンを使用し、リフト 2.3 m、最大 7 300  $m^3/day$  の速度をもつ。

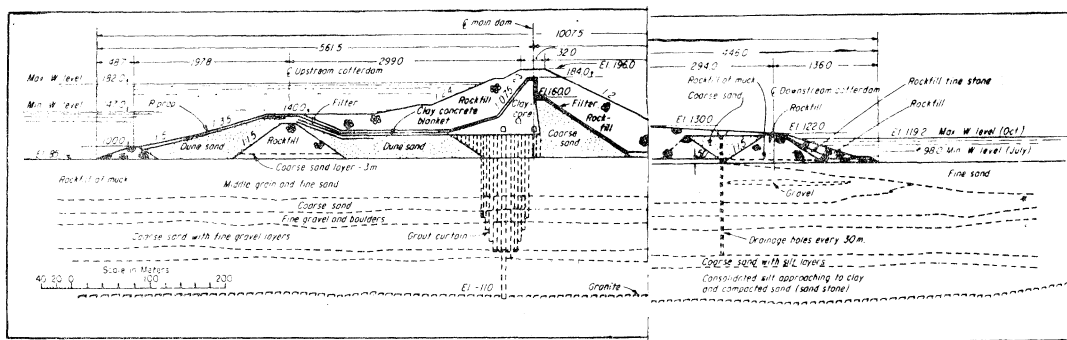
アメリカのダムは以上のように機械力を豊富に使って余裕のある断面をとり反面人力を節約して早期に築造しようとしており、表-1 に示すように fill type の多いのもこの理由による。コンクリートダムの場合も厚い大まかな設計で、セメント量の少ないコンクリートを急速に打つ、いわば施工優先の方式がとられている。

### 3. ソビエト ロシアの技術で築造される Aswan ダム

ソ連のダム技術は情報が少なくよくはわからないのであるが、エジプトの Aswan ダムはソ連の資本と技術で築造されつつあり、Volga そのほかの大河川で採用されている築造技術の応用とみることが出来る。大体においてアメリカ式の大型機械による築造方式が採られ、昨年増加借款が決ってから建設活動が活発になった。最近の施工は 60 m 巾 75 m 深さの付替水路の掘削で、4  $m^3$  のロシア製の電気ショベルでロシア製の 25 t トラックに爆破岩を積んでいる。65 人のソ連技術者、200 人のエジプト技術者と 3 000 人のエジプト労働者が働いている。

ダム本体は高さ 111 m、堤長 3 500 m、底巾 1 000 m、堤体積 4 000 万  $m^3$  の規模をもっている (図-3)。ダムそのものの規模としては特に大きくはないが、貯水量が 1 300 億  $m^3$  となり、この点で世界一のダムとなる。設計上の注目すべき第一点は全容積の相当の部分に当る量を付近の河床からとれる細粒の dune sand を用いて築造することである。またダム基礎が約 200 m の深さに達する、シルト、砂、砂利であって、これをどう処理するかが第二の問題点である。最初ドイツ技術者が予備設計をし、さらに国際技術顧問団が本設計をした。これによると 25 m の海底に dune sand を沈殿させたその上に rock fill shell をもつ粘土コア型式のダムをのせる。そして沈殿した dune sand とその下の天然シルトを振動締固めし、さらに河床から岩盤までの 200 m の間をグラウトで固め、さらに砂とシルトの上流に blanket をおく計画になっていた。また径 16 m のトンネルを 7 本右岸に仮排水路として掘り、径 14 m の 4 本のトンネルを左岸に発電用として造る考えであった。ソ連技術者がこれを引継いだとき大体の断面はそのまま採用したが、

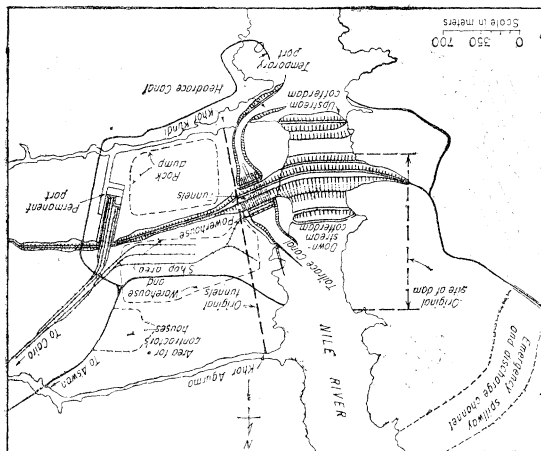
図-3 (a)



CROSS-SECTION OF DAM shows how cofferdams up and downstream will be incorporated in final structure. A considerable part of

both cofferdams will have to be built under water.

図-3 (b)



上流の blanket を除き、またダムを上流に約半マイル移すように変更された。これはフランスの Serre Poncon ダムでセメントと粘土の混合物を 100 m の深さに注入して、沖積層のろう水止めに成功したという情報にもとづいたものであり、グラウトの効果に自信をもって上流 blanket をやめ、さらに仮排水路トンネルを開きよに変えて、発電所を右岸に移し、排水路開きよを後に導水路にするというわけである。さらに大規模な現地試験により河床は自然状態で十分堅固で、振動締固めにより水密性を増加する必要がないと結論された。締切りダムは将来本体の一部になるが現河床に 3m 厚の粗砂をおき、その上にロック フィルダムを造る。これに dune sand をかぶせてその空げきを満たすようにする。以上の工事が現在進行中である。主ダム本体の基礎グラウトは 60 m 巾の粘土コア

の下 150 m にわたり堅い水密層を造り、さらにこの下 50 m は巾の薄いカーテンで岩までつける計画である。上部の細砂の部分には、ベントナイトを混ぜたケミカル ミックスを用い、下部の粗砂の層には 80% のアスワン粘土 20% のセメント混合物を注入することになっている。全工期は 10 年とみられ 1968 年に完成する予定になっている。

#### 4. 西ヨーロッパのダム

西ヨーロッパのダムに目を転ずると大分様子が異なってくる。ここに西ヨーロッパとはフランス、イタリア、ポルトガルなどのラテン系の国を指すのであるが、非常にすぐれた少数の設計者が、縦横に独創的な形式を生み出して、微に入り細をうがう人手のかかることはおかまいなしに資材の節約に重点を置き、アメリカの施工優先にくらべて、いわば設計優先というような方式である。

図-4

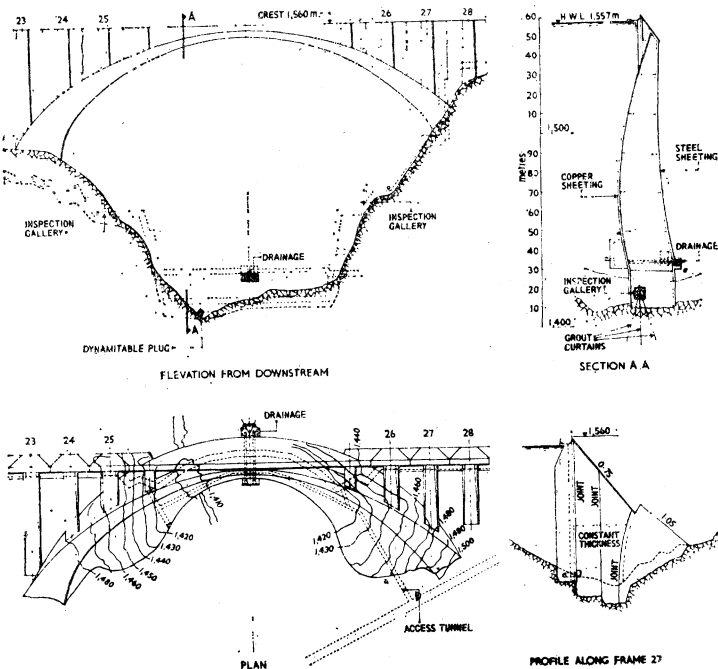


図-5

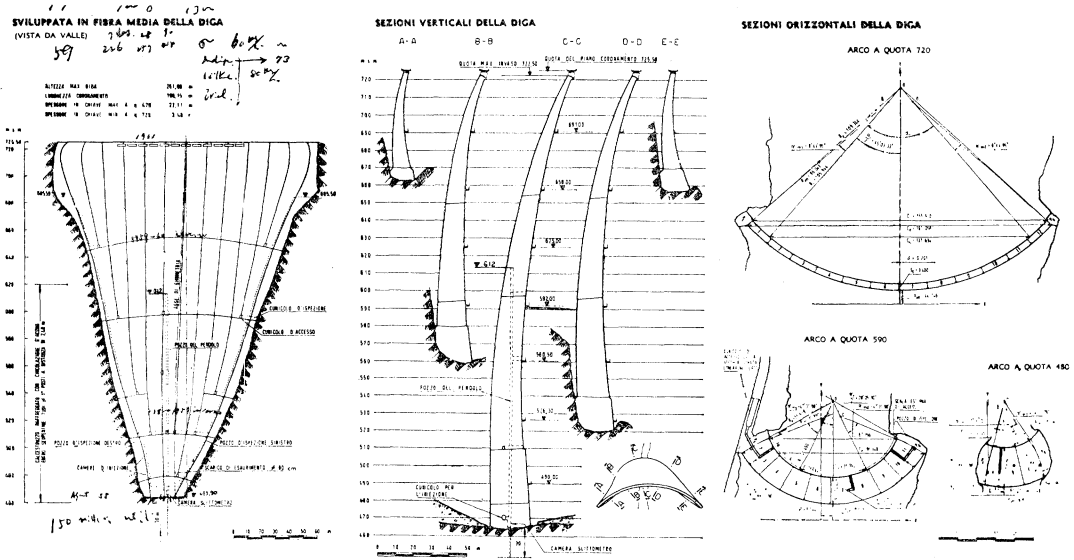


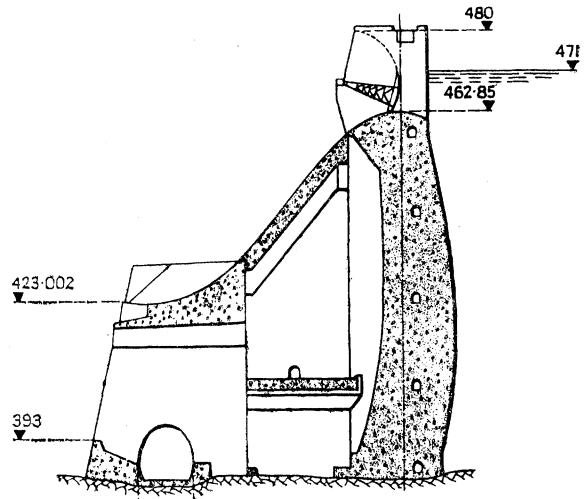
図-4 はフランスの Coyne が設計した Roseland ダムである。フランスの東南部に 1957 年から建設が行なわれているアーチダムとバットレスの複合体である。高さ 150 m、堤長 800 m、堤体積 92 万  $m^3$ 、岩盤は良好の結晶片麻岩で、左岸が  $45^\circ$  の傾斜をなしているが、右岸は崖の高さが足りず、アーチダムとしては自然岩の支持が得られない。この地形を克服するために種々の設計が考えられた。重力バットレス、マルチプルアーチ各種型式の比較が行なわれ図のような「おわん」を半分に切ったようなアーチを造り、その上にバットレス型ダムを接合するというきわめて独創的な設計が決定された。応力計算、模型試験により形の修正が行なわれ最大圧応力  $80 \text{ kg/cm}^2$  におさえられた。コンクリートにはセメント  $225 \text{ kg/m}^3$  使用、骨材最大粒径 160 mm の碎石、2.50m リフトで打設されている。

図-5 はイタリアの Semenza の設計になる Vajont ダムである。ダムサイトは兩岸屹立したせまい谷で、ドロマイトをふくんだ石灰岩の堅岩である。このようなサイトに鉛直断面をもつアーチダムを考えることは静力学的に適切でなく、薄いアーチをかけるとアバット付近でオーバーハングがきつくなるなどの理由で結局図に示すように鉛直曲率を中段以上の部分は制限したドーム型が採用された。アーチはペリメータージョイントの上のり、下流面三心円、上流面単心円となっている。ドームは高さ 50 m おきにほぼ水平のジョイントをもっており、標高 510 m 付近でプラグにのせる。プラグの最大高さは 50 m でその厚さはドームよりほんの少し広がっている程度である。ダムの厚さは堤頂で 3.4 m、底部で

2.2 m である。堤長 190 m、堤体積 36 万  $m^3$ 、その大きさにくらべてきわめて薄い構造である。設計計算は各種の方法で行なわれ、最大応力は水平アーチ法で計算して  $68 \text{ kg/cm}^2$  となった。実物の  $1/35$  という大きな模型により応力分布の検討が行なわれた。堤体の表面は急な温度勾配による大きな温度応力に対応して水平に  $\phi 16 \text{ mm}$  の鉄筋を 3 本/m、鉛直に  $\phi 22 \text{ mm}$  の鉄筋を 1.5 本/m の割合で全面に配筋してある。コンクリートは 35% の天然ポゾランをふくめて  $250 \text{ kg/m}^3$  のセメントを使用しており、骨材は最大粒径 100 mm の天然骨材であった。

図-6 はスペインとポルトガルの国境に造られたきわめて独創的な形式のダムである。ポルトガルの Rocha などにより設計されたもので、洪水処理に面白い形式を

図-6



採用した。

ダムの高さは 100 m, 堤長 94 m, 厚さは堤頂で 11.6 m, 底部で 17.5 m となっている。洪水吐として 4 門の 20 m 巾, 8.6 m 高のセクター ゲートが堤頂に用いられ, 越流数上約 15 m の水深で, 10 400 m<sup>3</sup>/sec の洪水を流す。ダムと独立したエプロンが造られバケットによって空中に放出される。実際の洪水放流は工合よく行なわれている。

以上の例のように西ヨーロッパのダムは, 独創的な設計優先ともいべき方式で, アメリカ方式とは対照的である。

## 5. 日本のダム

日本のダムは 表-1 に示したように世界第二の数を誇っており, さらにここ一, 二年の建設数からいえばまさに世界第一である。一昨年は 15 m 以上の高さのダムが実に 91 完成し, 昨年は約 100 建設されている。この中には 150~160 m 以上のダムが数個ふくまれている。この日本のダムの建設の現状と将来の展望を昨年暮に Engineering News Record の記者が発表しているが, 客観的な意見として興味あるので紹介して見る。彼は次のように述べている。「戦前の日本のダムには, その形式大きさにおいて注意をひくものはなかったが, 1950 年以降日本人によって試みられたダムはその大きさはいちじるしく増大し, 形式の変化が導入された。これらの事実は設計と建設についての大きく増加した知識によって生まれた自信を物語っているもので, かつこれらはきわめて短時間に達成されたものである。このダム建設の主要因は経済成長のための電力に対する強い要求によるものである。施工の面では最初アメリカの機械が導入されて今や完全に機械化された。設計の面では, 重力, アーチ, 中空, ロック フィルとあらゆる形式のものが行なわれた。日本の今日のダム建設の技術は, この国が長い間ダムを建設してきたほかの技術的先進国のどの国とも同じランクに並ぶること, そして多くの点ですでにこのレベルに達していることを物語っている。請負業者は驚くべき程度に機械化建設の技術に熟達した。日本製の設備は世界中の最良のものを複製した。日本の技術者は高い能力をもつが, 彼らが本当に必要と思った時には, 外国からの忠告をうけるのに誤まった誇りをもっていない。彼らは他国で成功した何事にも, 非常に興味をそそられ過去において行なったよりも, もっと多くの型式のダムを将来実現するだろう。」

以上の論評は日本のダム技術について, まさに本当のことをいっているように思われる。この 10 年間に日本

はダム建設に大きな進歩をし, 外国からの技術を撰取するのに確かに誤まった誇りを持たなかった。否, むしろ持たなすぎたといった方が適当かと思える。われわれはいつまでも外国からの技術を吸収することばかりに汲々とししないで独自の日本のダム技術を生み出し, 世界のダム技術に貢献しなければならない時に来ている。日本のダム建設はもう峠であってこれからは下り坂になると考えなければならない。東南アジア, 中南米, 中近東に技術輸出をすべき時期にきている。

今までのわれわれが示した技術を独自のものに高めて欧米のダム技術の輸出に競走することを真剣に考えなければならない。

## 6. 今後のダム技術の問題点

最後に今後のダム技術に関する一, 二の問題点にふれて見たい。ダムの技術は世界的にいちじるしい発達をとげたが, しかしますます問題がむずかしくなってきたということも事実である。例えば堤体に関する力学について考えて見れば, 計算機の発達により複雑な計算をきわめて短時間にやり, 従っていろいろな比較計算を行なってよい結論を得ることが容易になった。また各種の模型試験によって複雑な応力状態を検討することもできる。しかし戦後のすべての土木工学が, 現物についての観測測定の進歩によって, 従来の机上の理論を大きく修正し, さらに飛躍しなければならないのと全く同様に, ダム工学もまた修正改良をせまられている。すなわち現物ダムの測定結果は, 従来の力学による解析をさらに根本的な点から見なおす必要のあることを教えている。またダム基礎岩盤の点では, 堤体本体に関するものよりも取扱いの精度がいちじるしく落ちており, 経験によるいわば技術的段階にとどまっている。

ダム地点が次第に悪条件になって行く今日, 基礎岩盤に関する力学を急いで体系づけなければならぬ事態に至っている。

一昨年決潰したフランスの Malpasset アーチ ダムの悲劇は基礎岩盤の取扱いに慎重を欠いた結果と見なされるが, われわれはこの悲劇を, ダムというものの取扱いに対して慣れ過ぎてはいけぬ。いかなるときもダムに対しては最大級の慎重さをもって臨まなければならない。特にまた基礎岩盤の取り扱いにはあらゆる点から検討をおしまず, もっともっと努力を払わなければならないということを教える教訓であると感じるとして, 将来のダム技術のために生かして行かねばならぬと考える。

(1961 年 5 月 28 日, 名工大において講演)