

土木研究所資料 第1546号

昭和54年度

土木研究所講演会

講演集

昭和55年3月7日

建設省土木研究所

Copyright © 1978 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

目

次

1. 長大橋梁の耐風設計に関する最近の課題	構造橋梁部構造研究室長 成 田 信 之	1
2. 火山岩地域におけるダムの地質的問題	地 質 官 岡 本 隆 一	17
3. ダム放流設備の形式, 規模の選定	ダム水工研究室長 藤 本 成	53
4. 地下水涵養技術と地下貯水池	河 川 部 長 土 屋 昭 彦	87

長大橋梁の耐風設計に関する最近の課題

構造橋梁部構造研究室長 成 田 信 之

1. 耐風工学は比較的新しい分野である

人間の社会生活と風とのかかわり合いは古いはずであり、工学面では建物、橋梁などの構造物が強風の被害に悩まされて来たことは良く知られている。他方、昨今のエネルギー情勢に対応して風力をエネルギー源として積極的に活用しようとする動きもあり、風エネルギーの潜在能力に関する研究も進められている。

ところで、同じ風の問題を扱いながらも、このように研究対象が気象学・流体力学・構造力学など工学の各分野にまたがる学際的性格を帯びているため、これらを統一的かつ組織的に解明しようという研究の歴史は比較的新しく、第二次世界大戦後英国の研究者が統合して非航空工学分野 (non-Aeronautical Engineering) の空気力学 (Aerodynamics) の研究グループを Industrial Aerodynamics Group (産業空気力学グループ) と名付けて定期的な研究会を開催したのが最初の組織的な活動である。なお、このグループ設立の礎は橋梁・建築物の風荷重などの問題 (Civil Engineering Aerodynamics) の勉強グループによって造られたことは興味深い。そして、Industrial Aerodynamics Group が活動テーマとして以下の12項目が挙げられている。

(1) 風の構造

- 大気の観測
- 風洞内での大気のシミュレーション

(2) 風の流れ $\vec{v} = (v_x, v_y)$ を求める。

- ・大気汚染 <http://www.city.kanagawa.lg.jp/kankyo/kyosei/kyosei.htm> 東京都環境局
- ・建物、船など構造物の周囲の風の流れ <http://www.city.kanagawa.lg.jp/kankyo/kyosei/kyosei.htm> 東京都環境局
- ・積雪、森林に関する風 <http://www.city.kanagawa.lg.jp/kankyo/kyosei/kyosei.htm> 東京都環境局

(3) 構造物に対する風荷重

- 時間平均荷重
 - 剛構造物に対する風荷重
 - 柔構造物に対する風荷重
 - 樹木に対する風荷重

[illegible]

●**煙突、塔、超高層建物**の風荷重の扱い、集合住宅の風荷重の扱い、同じく、10層以上の高層の風荷重と**吊橋**の風重と吊脚、目立つ体積の存在等について、計画的な見直しや関係の調整・協議・図面・ケーブルの若干**ロッキング**と製品設置型関係、最大風速決定方法の再検討等も必要である。**● 過性の風荷重**の発生原因、発生メカニズムと減振対策方法の整備と関係が特に重要である。**(4) 乗物および角型物体の空気力学**の扱いは、減振対策関係等とは、異なる見直し事項、注意が必要。

・自動車, 船, 列車

(5) 管内の流れ～直管, 曲管, 拡散管など

(6) 熱効果～固体表面の熱交換, 燃焼, 換気

(7) 回転及び往復機関～ファン, カスケード, 内燃機関

(8) 二体流～ガス・固体流, ガス・流体流, 血流

(9) 混合・干渉流～ジェット流, 混合と渦, 後流

(10) 境界層流

(11) 流体装置

(12) 実験装置と技法

・風速計と流速計

・非定常流の影響

この英国のグループを母体とした初の国際会議は1963年6月にInternational Conference on Wind Effects on Buildings and Structuresの名称のもとに国立物理研究所で開催された。これを契機に主要国の専門家による非公式の連絡グループが結成され、4年ごとにオタワ(1967年), 東京(1971年), ロンドン(1975年), コロラド(1979年)と国際会議を継続して来ている。しかし, この間には会議の主要テーマも社会的要請により漸次変更されて来ている。ヨーロッパを中心とするIndustrial Aerodynamicsに対して合衆国では風と人間および風と工学施設の相互作用を扱う分野としてWind Engineering(風工学)なる名称が誕生し, 例えば, 昨年7月のコロラド大会でのテーマは以下の8課題であつた。

1. Social and Economic Impact of Windstorms

2. Characteristics and Description of Wind

3. Wind Energy Applications

4. Local Wind Environment

5. Wind Pressure and Loading

6. Wind-induced Motions of Structures

7. Physical and Mathematical Modeling

8. Wind Engineering Practice

これで判るようにテーマの範囲は構造物に対する風の作用のみならず, 社会経済に対する影響, 風力エネルギーの利用, 環境問題などを含み, 極めて広範囲のものとなつて来ている。

翻って国内について見るならば, 土木工学分野においては, 昭和30年代の中頃より経済の伸展に合せて建設が進められて来た若戸大橋, 関門道路吊橋を経て, 本州四国連絡橋の計画・設計・架設の各段階における耐風設計の研究が大きな原動力となつた。また, 建築工学分野では, 超高層建物に対する風荷重, 都市内における所謂風害問題などが新しい風の問題として取り上げられ研究が進められ

2. 構造物に対する風の作用にはどのようなものがあるか

わが国の橋梁の耐風設計に関する設計示方書は「道路橋示方書」および「本州四国連絡橋耐風設計基準(1975)」によって代表される。前者において上部工に作用する主要な風荷重は周知のように橋軸直角方向で水平に吹く一様風を基本にして定められている。すなわち、設計風速 V_D (m/sec)、橋軸方向単位長あたりの上部工の有効鉛直投影面積 A (m^2/m)、空気密度 ρ ($=0.125 kg \cdot sec^2 \cdot m^{-4}$)、抗力係数 C_D を用いて風圧力 P (kg/m)は次式で求められる。

$$P = \frac{1}{2} \rho V_D^2 C_D A$$

そこで設計風速としては、地上10m10分間平均風速を全国一律に $40 m/sec$ とし、これに構造物の高度、ガストの効果などによる基本風速の割り増し係数を1.4として乗じた風速 $55 m/sec$ ($\div 40 \times 1.4$)を用いることとしている。図-1は基本風速に相当する全国の風速期待値(再現期間100年)の分布図を示したものである。すでに述べたように南北に細長く連なり多くの島嶼より構成されるわが国の場合風速期待値の分布も複雑であり、特に太平洋側の海岸地帯、北海道西部については特別の配慮が必要のように思われる。また、山腹、峡谷など風の収斂が激しい個所に架設する橋梁についても注意が必要となろう。(写真-1)

つぎに抗力係数 C_D の大きさは、従来の風洞実験による測定結果を参考にして主桁構造および活荷重に対して一律に1.6としている。また、円形断面を有する鋼管構造においては設計風速付近では現象が超臨界域(Supercritical range)に入っているものと考え0.8を超えないものとして定められている。したがって主桁構造においては、 $\frac{1}{2} \times 0.125 \times 55^2 \times 1.6 \div 300 kg/m^2$ を風荷重の基本としている。例えばプレートガーダの場合には桁高 h (m)のほかに、高欄・地覆の有効高を0.8 m として加え、更に風上側より第2列以降のガーダの有効荷重は第1列の風荷重の $\frac{1}{2}$ と仮定して次式より求めたものである。

$$P_D = \frac{1}{2} \times 0.125 \times 55^2 \times 1.6 \times (1.5 h + 0.8) \div 450 h + 240 kg/m$$

ところで、長方形柱の抗力係数が断面の幅/高の値で変化することは良く知られているが、「示方書」においては考慮されていない。上式より C_D を h の関数として表示すると、

$$C_D \div 2.4 - \frac{120}{190 h + 150}$$

となる。図-2は英国の設計基準(British Standards)などとの対比を示したものであるが、幅/高が大きくなると抗力係数が漸減する傾向が見られるものの、現行「示方書」の値は実測値に比して60~80%程度大きな値を与えていることが理解される。

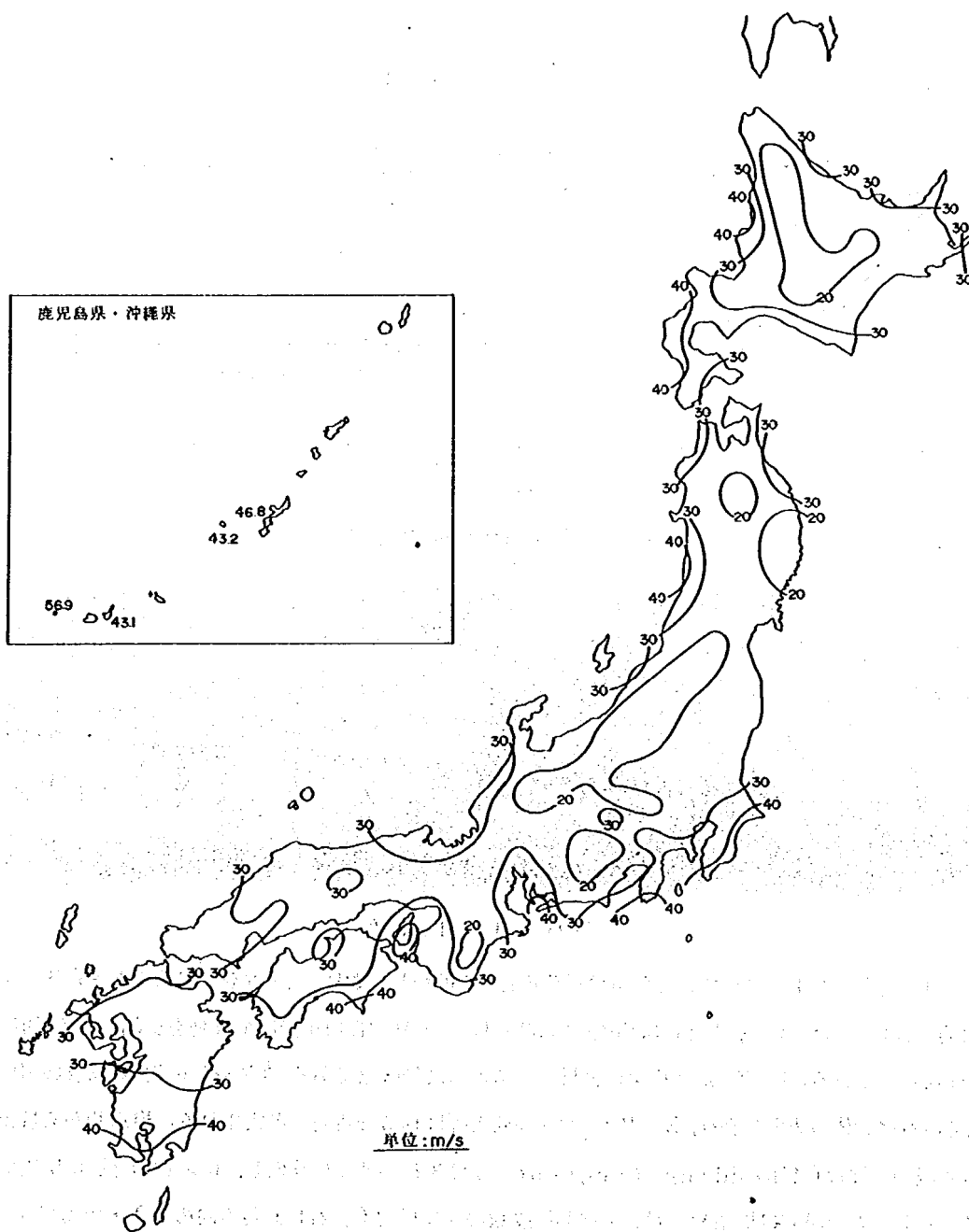


図-1 風速の再現期待値の全国分布図(再現期間100年)

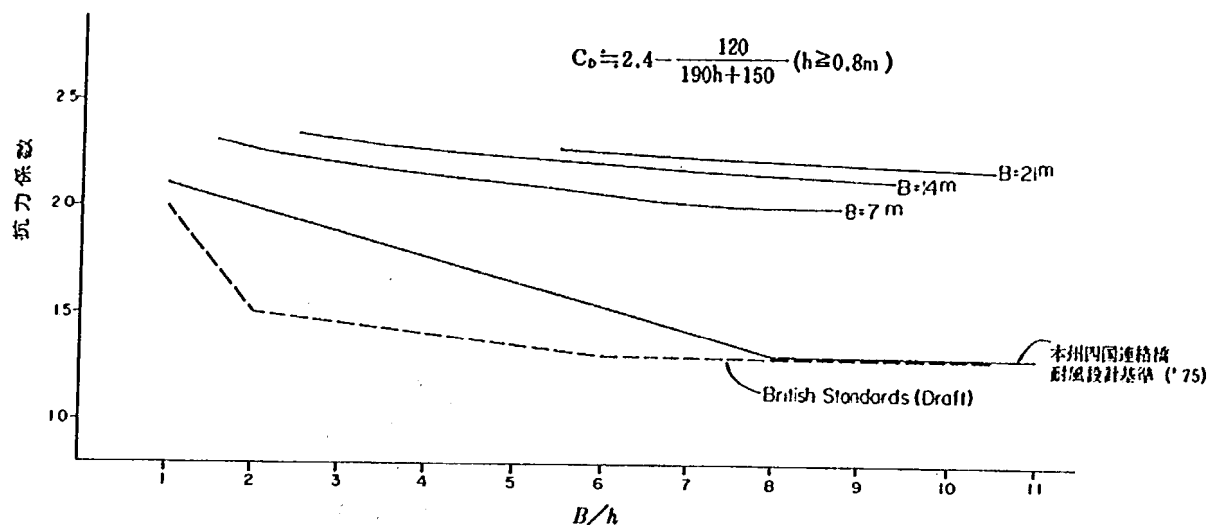


図-2 桁幅／桁高と抗力係数

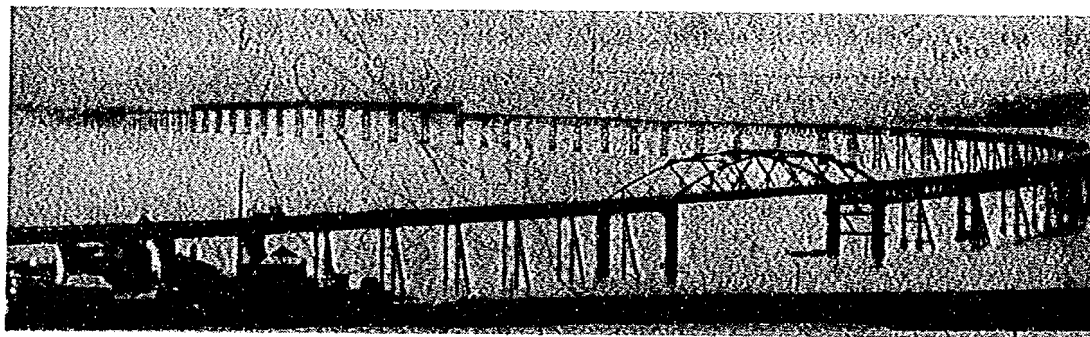


写真-1 Tay 橋

いずれにしても中小橋梁では風荷重は従荷重として扱われており、死荷重や上載荷重などに比べて二次的影響しかもたないが、ときには橋梁の構成部材が風の動的作用を受けて振動を誘起し、局部的破壊を招くことがある。ランガー形式橋梁の吊材の風による振動破壊である。非流線形の物体を流れの中に置くと流れは物体の表面で剥れ、後流にカルマン渦列と呼ばれる交番渦が形成される。構造物から放出される渦の周波数 (Shedding frequency) は流れの速度に比例し、構造物の寸法に反比例する。そしてこの渦列は構造物に対して同じ周波数の変動揚力 (流れに直角方向の力) ・変動ピッチング・モーメント (ねじりモーメント) とその2倍の周波数の変動抗力 (流れ方向の力) を発生させる。そこで、構造物の固有振動数がこの周波数に一致する近傍では構造物に振動が発生することとなる。これが渦励振と呼ばれる現象であり、橋梁吊材の場合、円形断面では流れ直角方向の曲げ振動が、またH型断面吊材ではフランジ・ウェブ比によって曲げ振動・ねじり振動の発生が多く見られる。変動抗力による振動が観測された例はない。後に述べるフラッタの場合は構造物が振動しない限り振動空

気力は生じないが、渦励振では構造物が静止していても振動空気力が作用するところに特徴がある。そこで渦励振を一種の強制振動と見ることも出来るが、構造物の振動振幅と作用空気力の関係を詳細に調べると、共振風速付近では構造物の振動が作用力の特性を支配することが判る。すなわち、自励振動的特徴をもっている振動である。渦励振は空気力の非線形性などのため極端な大振幅に発達することのない振動であり限定振動 (Restricted Oscillation) とも呼ばれる。しかし、振動が発生する風速は低く、橋梁吊材の場合では数 m/sec であるためその発生頻度が高い。そこで長期にわたり渦励振を放置した場合には主として添接部に疲労破壊を発生することがある。

中小橋梁における風の問題として最後に取り上げなければならないのは機能に対する作用である。特に海岸沿いや山岳部に建設される橋梁では橋面の構成により一般部とは異った極端な風速の収斂が生ずることがあり、不測の車両事故を発生することがある。切土部分やトンネル坑口から橋梁に進入する場合などには高欄構造に遮風効果をもたせるなどの配慮が必要である。また、同じ機能の問題として、風切音の問題も残る。高欄の形状によっては流下する気流が一種の笛の効果を示し、曲線橋の場合などには広範囲の風向にわたって騒音を発生することもあるので高欄の形状選定に際してはこの点も留意する必要がある。

以上、主として中小橋梁で問題となる風の作用について述べたが、長大橋梁の場合も含めて総括すると図-3のようにまとめられる。そこで以下では長大橋梁で問題となる風の作用について説明しよ

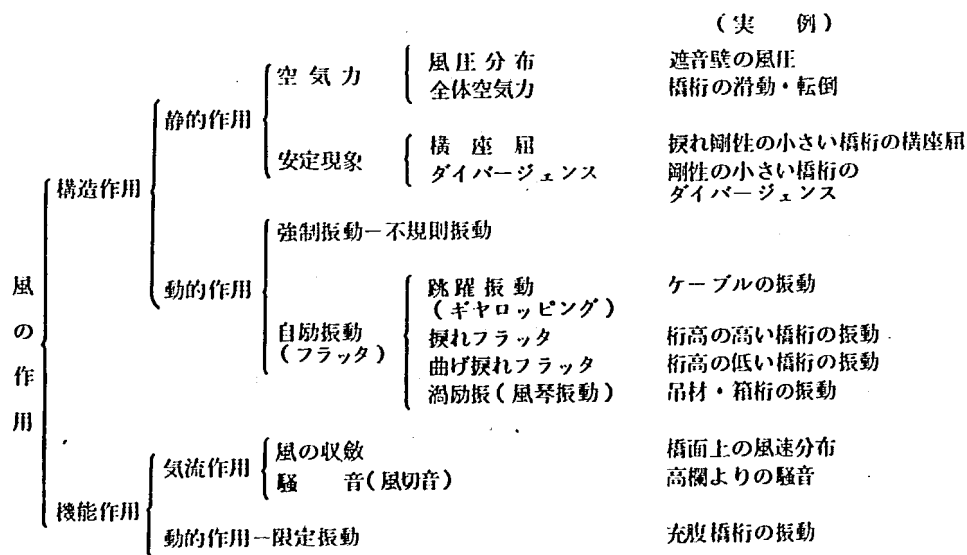


図-3 風の作用の分類

う。図-3は橋梁構造物に対する風の作用を構造・機能の別で分類したものであり、強風に曝された橋がどの現象に支配されるかは、風の特性、構造物の動力学的特性と空気力学的特性によって決定されるものであり、必ずしも橋梁の規模のみによって定まるものでないことを予めお断りしておかねば

ならない。

さて、長大橋梁といえば、斜張橋および吊橋が経済的に有利になる。ところで、この二つの橋梁はいつも撓み性が大きく、桁橋・トラス橋・アーチ橋などの剛橋梁に対して柔橋梁として分類される。それ故、耐風設計においては静的作用の他に風の動的作用が主要な事項となる。

耐風設計上考慮すべき風の動的作用には、フラッタ、バフエツティングそれに渦励振（この場合は上述の部材振動ではなく、橋桁全体の振動を意味する）の3項目があるが以下では各現象について簡単に説明する。

まず、フラッタは空気力の連成によって生ずる弾性構造物の自励振動であり、航空機翼の場合については理論的にも整備された現象である。橋桁などの弾性構造物に風が作用したときの応答を模式的に書けば図-4のようになる。すなわち、自然風を受けた構造物の変位に伴って生ずる付加空気力によって動的な循環現象が生じ、これが

発散すればフラッタと呼ばれる自励振動となる。ところが橋梁構造物は断面形状がさまざまで、且つ非流線形の角張った部材より構成されているため流

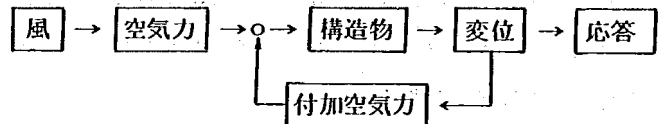


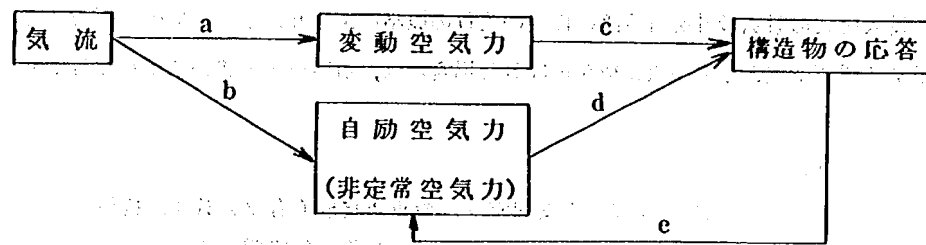
図-4 フラッタ現象の模式図

れは剥離流となり、その理論的取扱いは困難であってまとまった理論はない。また、橋梁はいうまでもなく地表面（または海面）に近く建設されるため、乱れの大きな大気境界層の中に置かれているため、構造各部に作用する風速は時間的にも空間的にも変動しており、いわゆる息づきを伴っている。これはフラッタ現象の解明を困難にしているもう一つの要素である。何れにしてもフラッタは構造物を破壊に導く振動（Catastrophic Oscillation）であるため、絶対に発生させてはならない種類の振動である。

次にバフエツティングであるが、この現象は本来風上の構造物の後流の乱れにより風下構造物に生ずる強制振動について名付けられたものであるが、耐風設計では自然風の乱れによるものもバフエツティングとして取り扱われる。一般の振動問題では振動系の特性は変化しないが、風を受ける構造物の場合には風速に応じて空力減衰性が変化するため取扱いが異なる。バフエツティングの応答は図-5のように模式化される。一般にバフエツティングの影響は平均風速による静的風荷重を割増すことにより処理される。

すでに説明した渦励振を含めた代表的な三つの空力弾性現象には当然のことながら、橋梁自体の動力学・空気力学特性が大きく影響する。現代の橋梁は従前のそれに比してより詳細な構造解析を施され、またより高強度の材料を多用し、また溶接構造を多用して製作されているため、益々剛性が減って撓み性が増し、振動減衰性は低下しているように見受けられる。これら動力学的特性の変化は耐風設計を行う際、常に念頭に置いておかねばならない事項である。また、この傾向に打勝つためには空

気力学特性の向上が是非とも必要となる。



- a : 空力アドミタンス
三分力係数
空力モーメントに対する
揚力の寄与率
- b, e : 非定常空気力係数
c, d : 空間相関係数
構造減衰定数
振動モード

図-5 バフティング現象の模式図

3. 長大橋梁の耐風設計手順と対策

長大橋梁の耐風設計を行う際の作業の流れの概略を図-6に示す。架橋計画で与えられた条件を満足する橋梁形式として長大橋梁が選ばれた場合には、道路橋示方書の適用範囲外であるため架橋現場

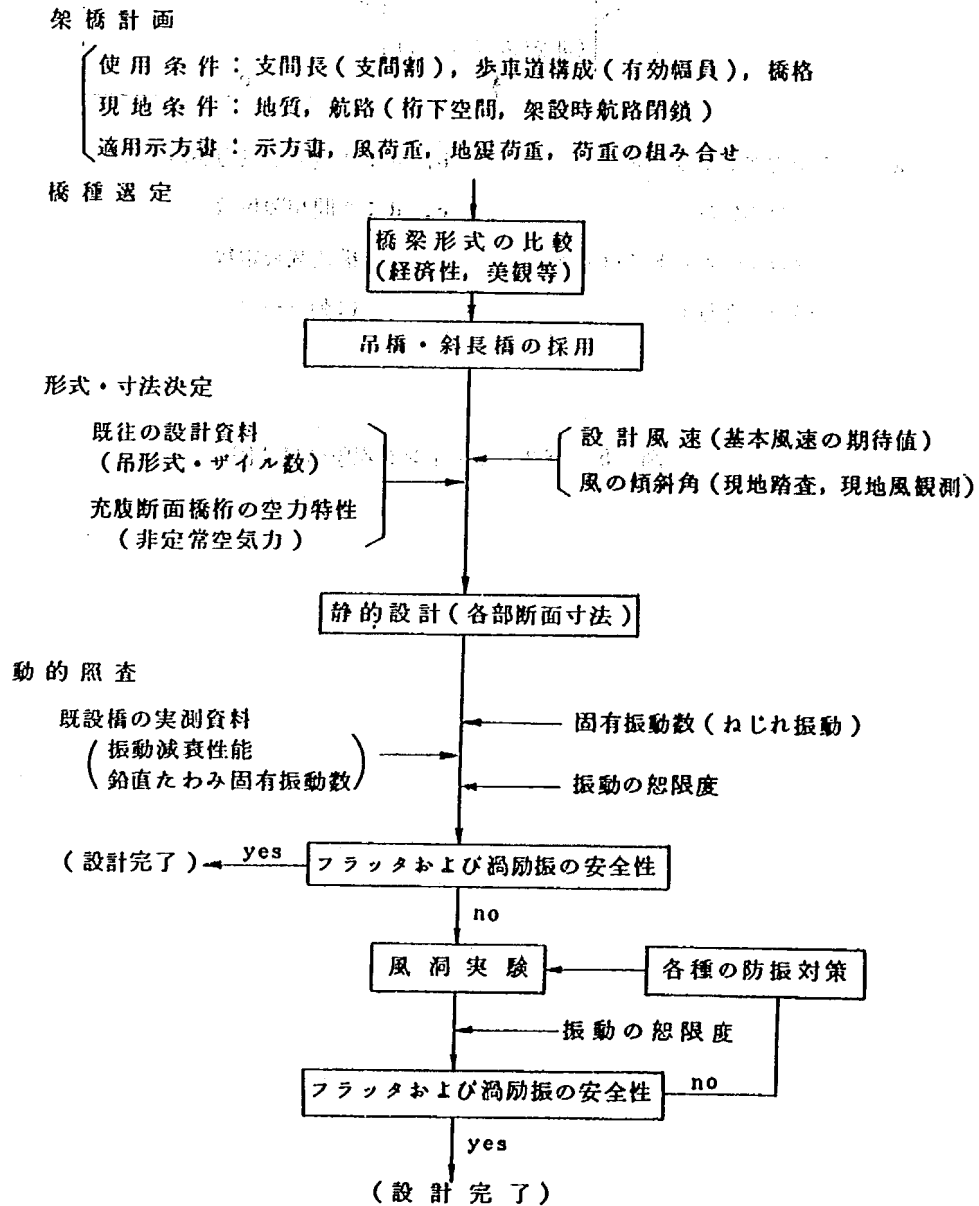


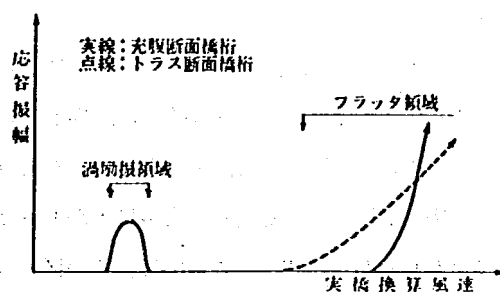
図-6 長大橋梁の耐風設計手順

の自然風の特徴を調査することがまず最初に必要となる。架橋地点の風速の再現期待値を近隣の気象官署等の資料などを用いて推定して設計基本風速を求めると共に、現地踏査や現地風観測を通じて耐風設計に大きな影響を及ぼす風の傾斜角（周辺の地形により生ずる鉛直面内の風の吹上げまたは吹下げ角度）を推定することが必要となる。これらの資料をもとに既往の設計資料・実験資料を参照して橋桁の基本断面の形式・寸法を定め、各部の所要剛性を決定するプロセスは一般橋梁の場合と同様である。但し、長大橋梁の場合には良好な耐風性を確保できるような基本断面を選定すると共に、固有振動数（特にねじり振動数）に代表される所要剛性の確保に意を払う必要があることを特に注意しておきたい。

次に、静的設計を終えた設計案は動的照査を行うが、用いた橋梁断面形状についての非定常空気力特性と橋梁全体系の構造特性が明らかになっている場合には数値計算によって動的挙動の概略を推定することは可能であるが、現状では資料の不備な点もあって風洞実験に付されることが多い。

設計案の動的照査は通常の場合橋桁のある長さを縮小した剛体模型を風路内に剛性を相似するバネで支持し、風洞風に対する模型の応答から実橋の応答を推定する部分模型試験の手法が用いられる。その際、模型には現地の風の傾斜角を考慮して水平風のみならず、吹上げ及び吹下げの風に対しての応答も検討する。風洞風速の上昇に従

って模型がどのように挙動するかを図一7に模式的に示す。まず箱桁・ガーダーのような充腹断面の橋桁では比較的低風速で渦励振による鉛直撓み振動が発生する。図では渦励振の領域が一つしか示されていないが、断面形状によっては二つ以上の領域で発生するこ



図一7 風洞試験結果の模式図

ともある。また、より高風速の領域でねじり振動が生ずることもある。渦励振の発生は狭い風速領域に限られ、また、その振幅は有限値に止まる。

更に風速を上昇させ限界風速を超えるとフラッタが発生するが、この振動は風速の上昇と共に急激に発散する性質がある。一方、トラス断面の場合の橋桁の場合には充腹断面橋桁でみられたような顕著な渦励振は観察されず、いきなりフラッタが発生することが多い。然し、トラス形式斜張橋などでザイルの碇着装置をトラス面内に設けるとトラス面の空隙率が減少し、低風速での渦励振が発生することもあるので、注意が必要となる。トラス断面橋桁のフラッタは充腹断面橋桁のそれに比してやや緩やかに成長することは図に示した通りである。

さて、長大橋梁の耐風性を良好なものとするためには渦励振については、少くともこれを供用性及び材料疲労の両面より許容できる範囲の振幅に抑制し、またフラッタについては設計風速に安全率を

乗じた風速まで発生しないよう努めなければならない。材料疲労面からは、衝撃荷重をも含めた活荷重を用いて定められた許容振幅を上限とする考え方がある。また供用性の観点からは歩行者及び走行車両の振動感覚特性の資料が不備のため明確な基準はない。図-8は造船関係の振動許容限界を示したものであるが、鉛直振動では1 Hzで80 gal、0.5 Hzで170 gal程度の許容値を与えている。

一方、橋梁についての提案は少く、

BucklandとWardlawによる次の許容値でも周波数特性は考慮されておらず一つの目安と理解すべきものである。

- 風速30 mph以下
重力加速度の2% (約20 gal)
- 風速30～70 mph
重力加速度の2% (約50 gal)
- 風速70 mph以上
考慮せず

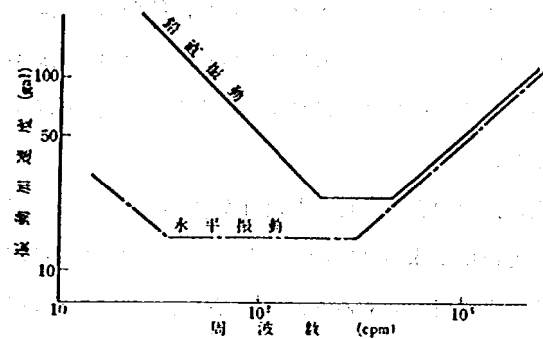


図-8 振動許容限界

次に、フラッタについては、その発生が構造物に対して致命的であることから、例えば本州四国連絡橋の設計基準では限界風速を設計基準では限界風速の1.2倍以上とし、十分な安全率を確保するように求められている。その場合にも、図-7に示したようにトラス断面橋桁と充腹断面橋桁とでは限界風速以上の風速の増加に対する振動の成長に差があるため、両者を区別した安全率を与えるべきであるという議論もあるが、現在のところでは、その区別は考慮されていない。

これまで述べてきた望ましくない振動を抑制するために、設計者は種々の耐風対策を案出しているが、充腹断面についてはこれらは次の3種に分類される。

- (1) 剛性を増加して橋桁の固有振動数を高める方法
 - (2) 質量を増加させ、或は、構造減衰を増して応答を小さくする方法
 - (3) 橋桁の断面形状を改良し、空気力学的性質を変える方法
- (1), (2)の方法のうち、剛性及び質量の増加することは長大橋梁の場合不経済な設計を強いることとなる。また、付加減衰器を設備するとは長期に亘る所要減衰特性の維持に難点が多く実用性に乏しい。結局、(3)の空力的手段によるのが普通となり、橋桁においては次の何れかを用いる。
- (a) 渦の剥離をできるだけ弱めるために、フラップやフェアリングを付す方法
 - (b) 渦を小さくし、或は壊して渦力を減殺する方法
 - (c) 断面背後の交番渦の規則性を弱める方法
 - (d) 橋桁軸方向の渦の位相の分布を不規則にする方法

これらの手段は主として渦励振を抑制する対策として考案されてきたものであるが、空気力を弱める手段はフラッタ現象に対しても有効である。耐風対策として何れの方法を採用するかは、橋梁の用途、架設位置の自然風特性、経済性などを十分考慮して決めねばならない。これまでに設計に用いられてきた対策の例を図-9ととりまとめて参考に供する。然し、注意しなければならないことは、これまでの経験では基本断面形状が悪い場合には、これらの対策を講じても振動を抑制することが困難となることである。良好な基本断面形状の選定が最も重要であることを忘れてはならないと考える。なお、トラス断面についても各種の防振対策が提案されているが、現在のところまとまった考えとはなっていないのでここでは省略する。

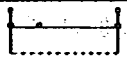
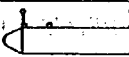
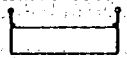
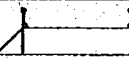
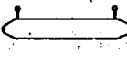
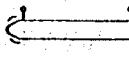
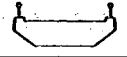
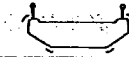
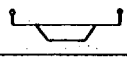
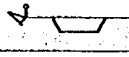
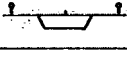
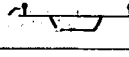
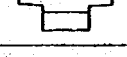
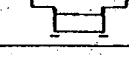
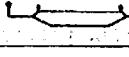
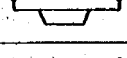
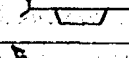
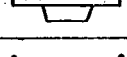
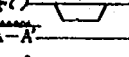
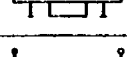
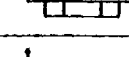
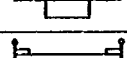
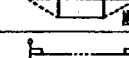
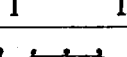
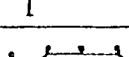
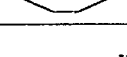
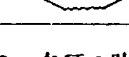
種別	原設計	改良設計	適用橋梁
フェアリング			石狩川河口橋
			Long's Creek橋
フラップ			Lillebaelt橋
			St. Nazaire橋
			末広大橋
			かもめ大橋
			安治川橋(計画案)
			永才橋
(スリット)ドリフゼン	トラス補剛桁		Severn橋
			新水野大橋
			Lower Yarra橋
ディフオーム			荒川大橋
			Strömsteil橋
			尾道大橋
			Humber橋

図-9 各種の防振対策

4. 今後の問題点～これから何をすべきか

長大橋梁の耐風設計を行う際の問題点と対策についてその一部を紹介したが、設計から竣工までには紙面の都合で割愛した幾つかの問題点がある。

(1) 架設時の耐風性の確保

いうまでもなく、長大橋梁は架設工事の進捗に従って、その構造特性、空力特性は著しく変化する。そこで工事の各段階における耐風安全性の確保は架設時期との関係を十分に考慮して慎重に進められねばならない。その目的を達成するためには、架設現場の自然風の季節的特徴（季節風、台風など）を事前に調査すると共に、風洞実験や数値計算を通じて架設各段階における耐風応答特性を的確に推定して架設計画を立案し、必要な防振対策を講じなければならない。

(2) 長期観測体制の確立

現在のところ橋梁の耐風設計のための基礎資料は風洞を用いた模型実験を通じて得られている。設計の立場からすれば、自然風に曝された橋梁の動的挙動を把握することが最終課題であるが、そのゴールは遥かに遠いといわねばならない。その差を埋めるためには実橋の自然風の挙動を十分に管理された状態のもとで数多く観測することが是非とも必要である。筆者らも関門橋、末広大橋、水郷大橋、平戸大橋等わが国の代表的橋梁において長期観測を実施しているが、これらの体制をより充実させてゆくことの重要性を御理解頂きたいと考えている。これらの観測を通じて、自然風の乱れに起因するパフティング現象への知識が深まり、また、風向変動（所謂斜風）の効果についての資料がより多く得られて耐風設計に対する信頼性を向上させることが可能となるのである。

分風調査		
風速観測		
風向観測		
風力観測		

図1 橋梁の風環境観測体制

参 考 文 献

- 1) 橋梁と基礎Vol. 12, №8
- 2) 充腹断面橋桁を有する斜張橋の耐風設計に関する基礎的研究, 成田信之, 昭和53年2月
- 3) 構造物のフラッタ, 中村泰治, 日本宇宙航空学会誌第21巻, 第235号
- 4) Construction and Design of Cable Stayed Bridges,
W. Podolny, Jr. and J. B. Scalzi, John Wiley & Sons, 1976
- 5) 振動の許容限界について, 金沢武, 造船協会誌第410号

The following information was obtained from the records of the Department of the Interior, Bureau of Land Management, regarding the land in question:

The land in question is located in the County of [County Name], State of [State Name]. It is situated in the [Section] of the [Township] and [Range] of the [Meridian]. The land is owned by [Owner Name] and is being offered for sale at a public auction on [Date].

火山岩地域におけるダムの地質的問題

地質官岡本 隆一

まえがき

洪水による災害を防止するためには、ダムの一時的貯留機能に期待するところが大きく、同時に上水、工業用水、灌漑および発電等の多目的用途のためにダムが数多く建設されてきた。

最近では生活様式の改善によって、とくに生活用水需要量が急速にのびてきており、一昨年の福岡市、昨年の首都圏渇水のように大都市を中心とする水需給の不安要因が懸念されてきている。

治水と水の有効利用と言う見地からダム建設の必要性はますます高まっており、今後もその傾向はしばらく続くものと思われる。それによって、今後のダム計画は二つの大きな特徴があらわれてくるものと考えられる。その一つは、既開発水系から新規に開発水量を生みだすためにダムを大型化し貯水容量を大きくする。もう一つは、流域面積の小さい未開発水系にも、大きな貯水容量が期待できなくとも、くまなくダムを計画していくということである。

この両者いずれの傾向でも、ともに地質的には非常に困難な条件が増えていくものと考えられる。すなわち、ほぼ同一条件の岩質、地質構造では、従来よりはるかに高い高さのダムであったり、またあまりダムを建設した事例のない地質条件でダムを建設するような必要性がでてきたりする。たとえば、半固結の第三紀層（軟岩）、数十米と言うような非常に風化の深い風化花こう岩、片状構造が著しく、かつ風化も著しい片岩等にでもできるだけ高いダムを建設しようとするものである。なかでも、日本の地質の特色の一つである火山岩地域の火山岩や火砕岩を基礎としてダムを建設する場合の地質的問題点の克服が、ダム地質学上の一つの大きな命題になっている。

1. ダムと地質条件

ダムの建設に際して、計画・設計・施工のために行うべき地質調査や解析の課題を项目的に指摘すれば次のようなものがある。

- ① 広域地質構造
- ② 基礎岩盤の強度
- ③ 基礎岩盤の透水性
- ④ 貯水池周辺の斜面安定（新設計画道路を含む）
- ⑤ 良好な材料の確保（原石山、採土場など）
- ⑥ 周辺環境調査（現・旧鉱山、温泉、採石場など）

火山岩地域の地質には、上記のいずれの項目についてもそれぞれ問題があり、慎重な検討を必要としている。

ちなみに、現在迄に、建設省直轄および補助事業関連で建設されたダム、および建設中のダムについて、基礎岩盤の地質とダムタイプ、ダム高との関係を調べてみると、図-1、図-2のようである。

過去に建設されたダムについて言えば、火山岩類を基礎とするダムは、アーチダム4、重力ダム30、フィルダム1、計35であり、建設中のものでは、アーチダム0、重力ダム21、フィルダム6、計27である。このように火山岩地域では、重力ダムが圧倒的に多く採用され、過去は高さ40～70m、現在建設中のものは高さ50～85mと他の地質に比べて低い所に集中するような特色がある。

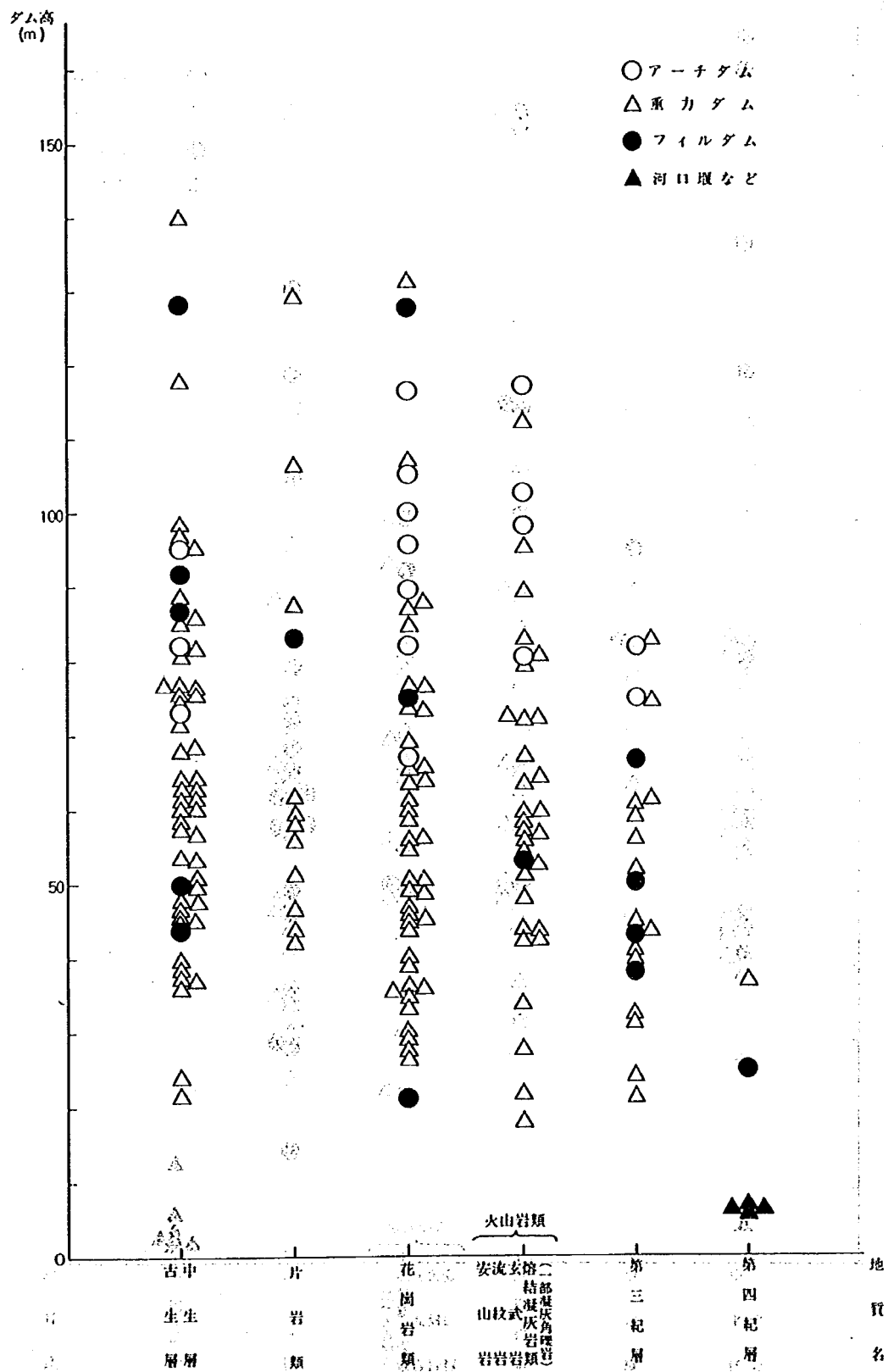


図-1. ダム基礎岩盤の地質的分類 (竣工後のダム)

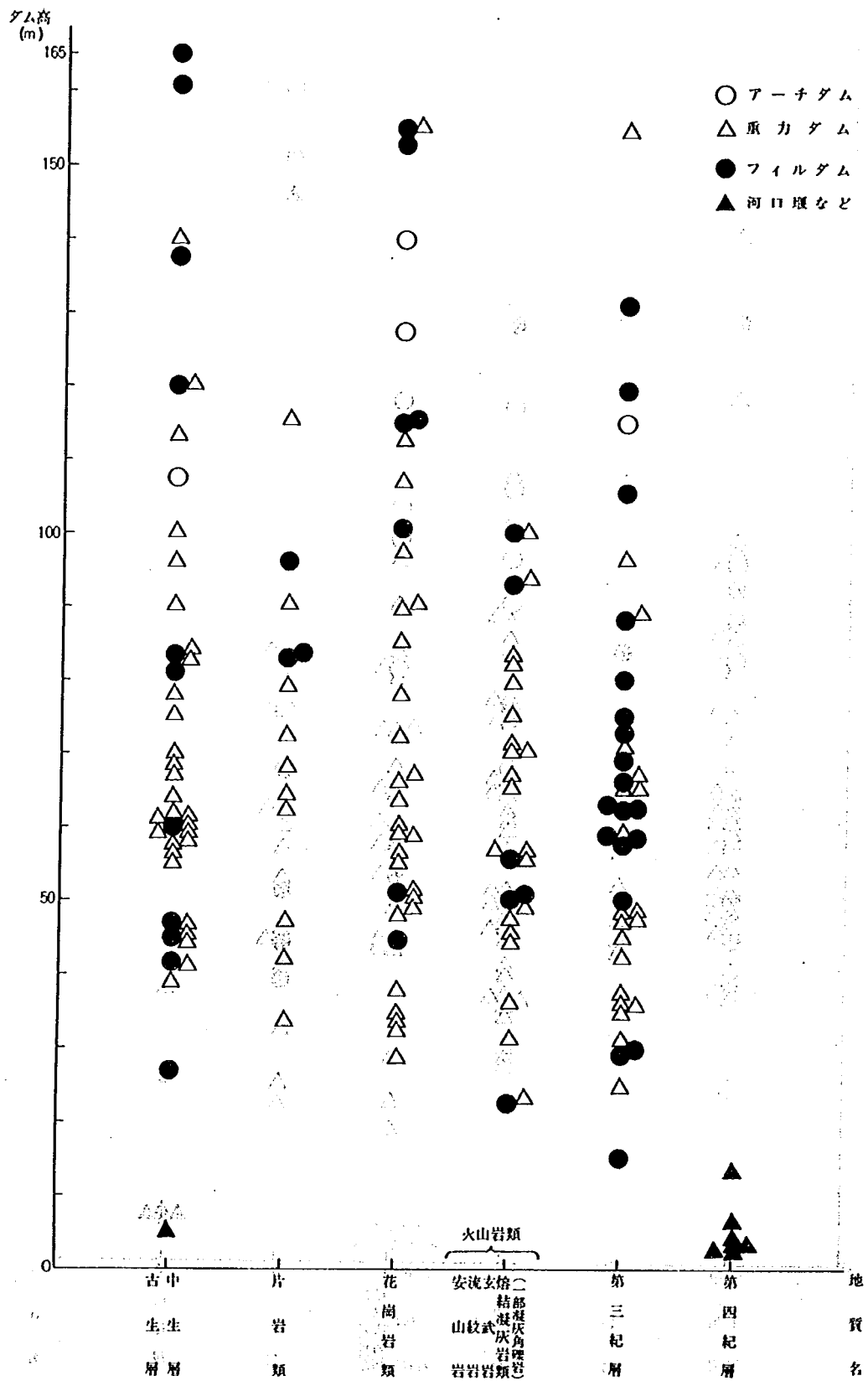


図 2. ダム基礎岩盤の地質的分類 (建設中のダム)

2. 火山岩と火山岩地域

今これから述べようとする火山岩地域とは、主として第三紀以降の火山活動が活発であったと目される地域で、火山岩や、火山活動に起因する火山砕せつ岩類が多く分布する地域と言うような意味で使っているものである。そのようなことであるから厳密な立場では技術的な表現とは言えないかも知れない。しかし、ダムを建設する場合に、土地地質の立場から技術的な問題を検討しようとする、非常に特徴的な問題が生じてくるので、とくにそれを取り上げて述べようとするものである。それ故に、単に火山岩類のみでなく堆積岩も含めて考察すべきであり、岩質上の問題もさることながら、地質構造上の問題点の検討と言うことが非常に重要になってくると思われる。

第三紀火山岩類および第四紀の火山の分布の概略は図-3に示すとおりである。日本列島には新第三紀から数多くの火山活動がみられ、火山岩類や火山砕せつ岩類の分布もかなり広範囲にわたる。現在もこの活動は継続しているとみて差支えなく、活火山も約65に達する。火山の帯状配列を追跡して、千島・那須・鳥海・富士・乗鞍・大山（白山）・霧島（琉球）火山帯などと呼ばれている。これらの火山帯は火山の地理的配列であって、岩石学的にはそれぞれの火山帯が特徴づけられると言うようなものではない。しかし、火山が集中する地域は第三紀の火成活動とかなりよく一致し、火山岩地域と言った考えで共通してダム建設の問題を考えて差支えないと思われる。

建設省直轄および補助事業のダムも、この火山岩地域において数多く計画され建設されている。既に竣工したダムおよび現在建設中のダムの位置を示すものが図-4である。地域的にみて、東北地方、北関東、長野北部～北陸、北部九州地区に集中している。（現在予備調査および実施調査中のダムについても同様である）これらのダムの形式、規模、基礎岩盤の地質および地質的問題点をまとめたものが表-1である。多くのダムが、それぞれ大なり小なり地質的問題点を有していたわけであるが、それらを克服して建設されているものである。これらのダムの問題解決にあたって、地質調査の方法や岩盤評価の認識も発展進歩し、設計に対して適切な資料を提供できるように経験を積んで来ている。しかし、ダムの基礎岩盤としては非常に困難な地質条件も多く、設計や地質処理工上の問題解決に苦慮している例も少なくない。

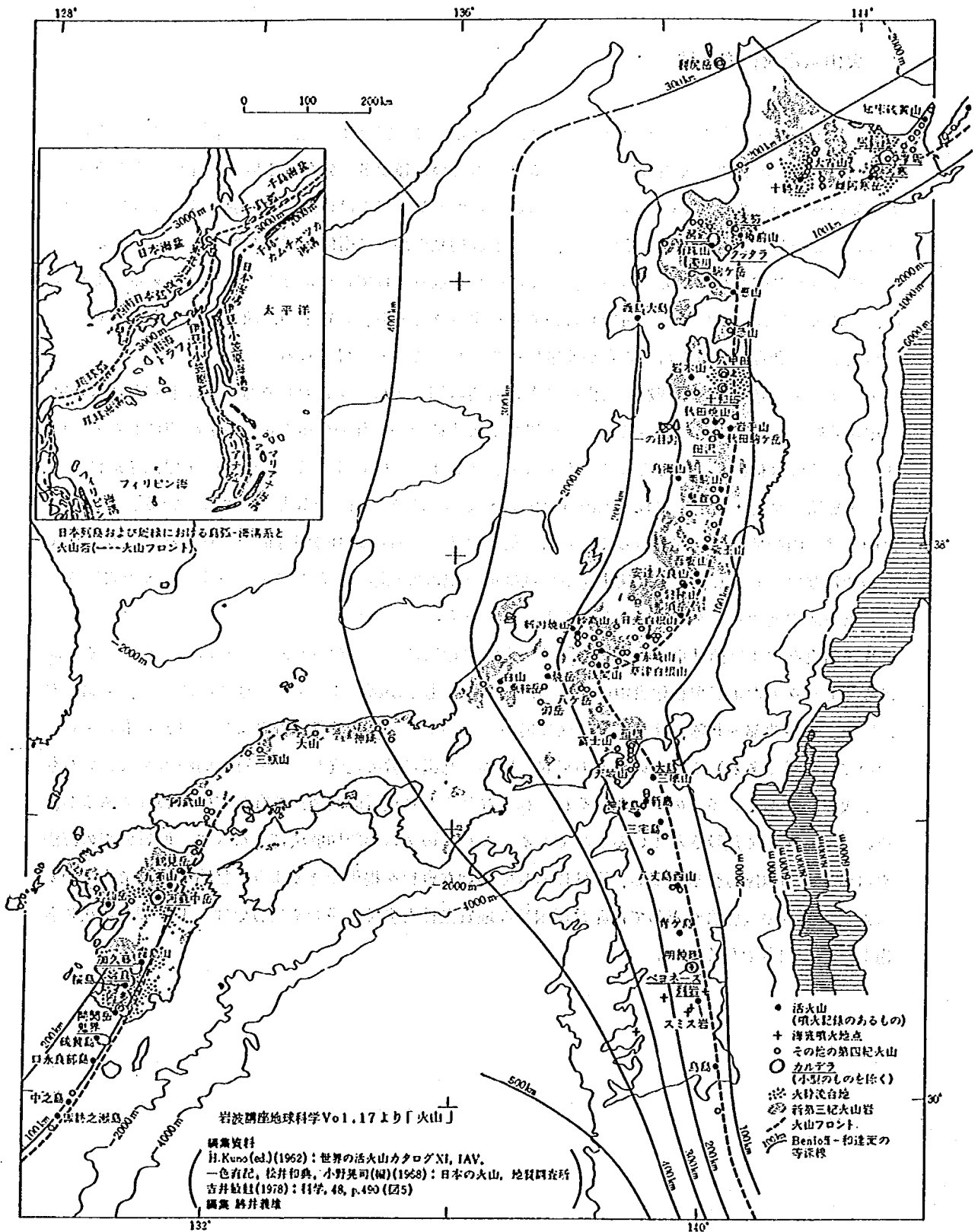


図-3. 日本列島における第三紀火山岩および第四紀火山の分布

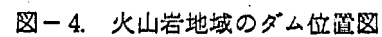


表-1. 火山岩地域のダム（完成および建設中）

水系河川名	ダム名	型式	高さ(m)	基礎岩盤	地質的問題点	完成年度
石狩川	豊平峡	アーチダム	102.5	角礫凝灰岩, 集塊岩, 安山岩熔岩	河床部が軟質自破碎熔岩	S. 47
"	漁川	ロックフィル	42.0	軽石凝灰岩, 熔結凝灰岩	ダム敷部に軽石凝灰岩が分布し, 強度が小さく, 左右岸の熔結凝灰岩が透水性高い	建設中(55)
"	定山溪	重力ダム	11.25	石英斑岩, 石英安山岩	割れ目が多い	" (60)
常呂川	鹿の子	重力ダム	55.5	輝石安山岩	一部の崖錐が厚いことを除いて殆んど問題はない	" (57)
後志利別川	美利河	ロックフィル, 重力ダム	34.0	緑色凝灰岩	固結度が低い	" (60)
岩木川	目屋	重力ダム	58.0	安山岩		S. 35
"	浅瀬石川	重力ダム	96.5	凝灰角礫岩, 安山岩, 石英安山岩, 泥岩, 砂岩	砂岩, 泥岩および石英安山岩が軟質	建設中
北上川	石剱	ロックフィル	53.0	石英粗面岩		S. 28
"	御所	重力, ロックフィル	52.5	右岸安山岩質集塊岩, 左岸凝灰岩	左岸は凝灰岩, 凝灰質頁岩互層で軟質	建設(56)
"	四十四田	重力ダム, アースダム	50.0	輝緑岩, 輝緑凝灰岩	右岸に軟質な火山砕屑物	S. 43
名取川	釜房	重力ダム	45.5	石英安山岩, 凝灰角礫岩, 凝灰質泥岩	左岸尾根の凝灰岩にパイピングの心配があった	S. 45
"	大倉	アーチダム	82.0(河谷) 42.0(合地)	凝灰岩, 安山岩		S. 36
雄物川	皆瀬	ロックフィル	66.5	凝灰岩, 凝灰質砂岩・泥岩	軟質泥岩に洪水吐基礎, リップラップ材の耐久性	S. 38
"	玉川	重力ダム	100.0	熔結凝灰岩, 玄武岩	左岸部風化が厚い, 河床堆積層厚い	建設中
阿武隈川	七ヶ宿	ロックフィル	93.0	凝灰岩, 安山岩, 石英安山岩	河床部変質帯, 右岸崖錐堆積層	建設中

水系河川名	ダム名	型式	高さ (m)	基礎岩盤	地質的問題点	完成年度
利根川	藤原	重力ダム	94.5	緑色変質安山岩		S. 33
“	相俣	重力ダム	67.0	輝石安山岩	上位の礫層から漏水	S. 34
“	川俣	アーチダム	117.0	熔結凝灰岩 (石英粗面岩質)	大きな割れ目の発達	S. 41
“	ハツ橋	重力ダム	131.0	変質凝灰角礫岩	基礎の強度、湧水	建設中
“	川治	アーチダム	140.0	凝灰角礫岩、閃緑岩	大きな割れ目の発達	“ (56)
相模川	宮ヶ瀬	重力ダム	155.0	火山礫凝灰岩、火山角礫岩		建設中
筑後川	下釜	アーチダム	98.0	複輝石角閃石安山岩、黒雲母複輝石角閃石安山岩	割れ目が発達している	S. 46
“	松原	重力ダム	83.0	安山岩、凝灰角礫岩、集塊岩質凝灰角礫岩	“ 漏水性	S. 46
緑川	緑川	重力、ロックフィル	76.5	熔結凝灰岩、片麻岩質閃緑岩	熔結凝灰岩とその下部の旧河床砂礫層の透水性	S. 46
菊池川	竜門	ロックフィル	100.5	熔結凝灰岩、閃緑岩	熔結凝灰岩とマサとの接触部の弱層	建設(60)
山国川	耶馬溪	重力ダム	65.0	凝灰角礫岩、安山岩	断層沿いに変質粘土をはさむ	建設(57)
淀川	室生	重力ダム	63.5	斜長流紋岩質熔結凝灰岩	割れ目からの漏水	S. 48
汐泊川	矢別	重力ダム	33.6	粗粒玄武岩		S. 50
亀田川	新中野	重力ダム	74.9 21.9 (かさ上げ)	安山岩熔岩		建設(57)
浅瀬石川	沖浦	重力ダム	40.0	玄武岩、安山岩、凝灰岩、凝灰角礫岩	河床部が軟質、断層	S. 20 39.40 改修
平川	遠部	重力ダム	43.0	凝灰角礫岩、玄武岩	河床が軟質	S. 51
堤川	下湯	ロックフィル	65.0	角礫凝灰岩、軽石流堆積物、熔結凝灰岩、泥岩、砂岩	右岸部軽石流堆積物のパイピングと熔結凝灰岩の透水性	建設中

水系河川名	ダム名	型式	高さ (m)	基礎岩盤	地質的問題点	完成年度
夏油川	入畑	重力ダム	80.0	石英粗面岩	変質劣化帯	建設(63)
鳴瀬川	漆沢	ロックフィル	80.0	凝灰角礫岩, 安山岩, 石英粗面岩	断層破碎帯	建設(55)
増田川	樽水	ロックフィル	43.0	角礫凝灰岩, 安山岩, 火山角礫岩	下位に旧崖錐堆積物	S. 50
吉田川	南川	重力ダム	44.0	凝灰角礫岩, 安山岩, 石英安山岩		建設(60)
迫川	花山	重力ダム	47.8	安山岩, 玄武岩	良好な地形, 地質	S. 32
七北田川	七北田	ロックフィル	73.0	凝灰岩, 凝灰角礫岩, 砂岩	オープンクラックが多い	建設(57)
小マ川	森吉	重力ダム	62.0	輝石安山岩		S. 28
粕毛川	桑波里	重力ダム	72.0	角閃石安山岩	良好な地形・地質	S. 45
旭川	旭川	重力ダム	51.5	角礫凝灰岩, 集塊岩	風化と厚い表層堆積物	S. 47
早口川	早口川	重力ダム	61.0	粗粒玄武岩	変質部	S. 51
三内川	岩見	重力ダム	66.5	凝灰角礫岩		S. 54
赤川	荒沢	重力ダム	61.0	集塊岩		S. 30
鮭川	高坂	重力ダム	57.0	角閃石流紋岩		S. 41
月光川	月光川	重力ダム, ロックフィル	48.0	凝灰角礫岩, 礫層	粘土層の分布, 礫層の透水性	S. 53
前川	前川	ロックフィル	50.0	火山礫凝灰岩, 安山岩, 泥岩	左岸段丘堆積物, ゆるみ	建設中
白水川	白水川	重力ダム	54.5	凝灰角礫岩	透水性がやや高い	"
湯川	東山	重力ダム	40.5	石英安山岩, 凝灰角礫岩	割れ目	建設(56)
押切川	旧中	ロックフィル	105.5	緑色凝灰岩	スレーキング	" (60)
竜神川	竜神	重力ダム	45.0	安山岩質火山碎屑岩		S. 53
西荒川	西荒川	重力ダム	43.5	石英斑岩	断層	S. 43

水系河川名	ダム名	型式	高さ(m)	基礎岩盤	地質的問題点	完成年度
荒川	東荒川	重力ダム	70.0	花崗岩、石英斑岩	左岸に浮石質凝灰岩が露出	建設(61)
霧積川	霧積	重力ダム	59.0	輝石安山岩、凝灰角礫岩	変質帯	S. 50
吾妻川	品木	重力ダム	43.5	輝石安山岩	酸性水	S. 40
河内川	三保	ロックフィル	95.0	安山岩質角礫凝灰炭	キレッツが発達している	S. 53
笠堀川	笠堀	重力ダム	74.5	凝灰岩、石英粗面岩	変質(グリーンタフ)	S. 40
新保川	新保川	重力ダム	29.0	凝灰角礫岩		S. 47
内の倉川	内の倉	中空重力ダム	82.5	斜長流紋岩	割れ目の発達	S. 47
大野川	大野川	重力ダム	47.0	安山岩、凝灰岩	本体下流端に断層	建設(54)
刈谷田川	刈谷田	重力ダム	83.5	安山岩、緑色凝灰岩	左岸高標高部に脆弱部、変質部	" (55)
破間川	破間川	重力ダム	93.5	プロピライト、石英安山岩質凝灰岩	左岸中腹に軟弱ゾーン	" (59)
五十嵐川	五十嵐	ロックフィル	75.0	緑色凝灰岩		" (58)
久知川	久知川	重力ダム	51.0	石英安山岩	全体に風化	" (59)
裾花川	裾花	アーチダム	83.0	安山岩、角礫凝灰岩、一部泥岩	軟質な泥岩の処理	S. 44
湯川	湯川	重力ダム	50.0	凝灰角礫岩	そで部に未固結火山砂層	S. 53
内村川	内村	重力ダム	51.3	凝灰角礫岩、石英粗面岩、砂岩	右岸側は小さな沢にはさまれたやせ尾根である	建設(59)
井田川	室牧	アーチダム	80.5	安山岩、一部集塊岩	良好	S. 36
上市川	上市川	重力ダム	64.0	緑色凝灰岩、安山岩岩脈	漏水	S. 39
角川	角川	ロックフィル	58.5	凝灰角礫岩	河床部の強度	S. 53
熊野川	熊野川	重力ダム	89.0	安山岩質凝灰角礫岩	基礎岩盤の強度、クラック	建設(58)
上市川	上市川第2	ロックフィル	69.0	流紋岩、手取層	熱水変質	" (60)

水系河川名	ダム名	型式	高さ(m)	基礎岩盤	地質的問題点	完成年度
境川	境川	重力ダム	120.3	流紋岩, 輝緑岩, ひん岩		建設(63)
小川	朝日小川	重力ダム	82.0	流紋岩	右岸下流熱水変質	" (61)
布施川	布施川	ロックフィル	58.5	安山岩, 砂岩, 泥岩	泥岩層上部に粘土層	" (64)
大聖寺川	我谷	重力ダム	56.5	安山岩, 凝灰岩	挟在する凝灰岩の強度が劣るが全体として良好	S. 40
犀川	犀川	重力ダム	72.0	安山岩, 凝灰角礫岩	地表部は堅硬な安山岩であるが内部(15~30m)は軟質凝灰岩	S. 40
大日川	大日川	重力ダム	83.9	角礫凝灰岩, 凝灰岩, 流紋岩	破碎帯	S. 42
内川	内川	重力ダム	81.0	石英安山岩, 凝灰角礫岩	断層破碎帯	S. 48
梯川	赤瀬	重力ダム	38.0	流紋岩, 凝灰質流紋岩	断層と軟弱な軽石質部	S. 53
大聖寺川	九谷	重力ダム	71.0	凝灰岩, 凝灰角礫岩, 安山岩熔岩	河床部の風化厚い	建設(60)
鷺飼川	小屋	ロックフィルダム	59.5	安山岩質角礫凝灰岩, 凝灰岩	左岸上部の地山がゆるんでおり透水性大	" (59)
伊藤大川	奥野	ロックフィルダム	63.0	安山岩, 凝灰角礫岩	深部で大きいルジオン値, 熱水変質	" (58)
竹田川	山口	重力ダム	79.5	火山礫岩, 凝灰岩	右岸崖雖厚い河床10m下に水平断層	" (61)
千代川	百谷	重力ダム	18.0	安山岩		S. 48
浜田川	浜田	重力ダム	58.0	暗灰緑色石英粗面岩質凝灰角礫岩	右岸尾根薄し	S. 37
八戸川	八戸	重力ダム	72.0	安山岩質凝灰岩, 流紋岩質凝灰岩	河床部にダム軸に直交する断層破碎帯	S. 51
美田川	美田	重力ダム	26.8	安山岩質凝灰岩, 凝灰角礫岩		S. 52
矢部川	日向神	重力ダム	79.5	輝石角閃石安山岩	割れ目からの漏水, 岩盤は強堅	S. 35
巨瀬川	藤波	ロックフィル	51.0	凝灰角礫岩, 泥質砂礫層	泥流堆積物の強度	建設

水系河川名	ダム名	型式	高さ(m)	基礎岩盤	地質的問題点	完成年度
白川	有田	重力ダム	27.5	石英粗面岩	良好	S. 35
岩屋川内川	岩屋川内	重力ダム	59.5	カンラン石玄武岩, 凝灰角礫岩	湧水	S. 48
広瀬川	竜門	重力ダム	42.2	流紋岩, 砂岩主頁岩	右岸急峻で崖を形成	S. 50
郡川	萱瀬	重力ダム	51.0	複輝石安山岩および集塊岩	集塊岩部がやや軟質	S. 36
福江	福江	重力ダム	21.6	玄武岩	右岸玄武岩の風化	S. 50
石木川	石木	重力ダム, ロックフィル	56.5	安山岩, 玄武岩	基礎部の透水性	建設(60)
長与川	長与	重力ダム	35	安山岩, 凝灰角礫岩	河床部に断層, 左岸の透水性	" (57)
後勝川	勝本	重力ダム	31.0	流紋岩	河床, 地質境界部の脆弱部	" (56)
永田川	永田	重力ダム	23.0	玄武岩	凝灰岩の薄層を挟有	" (57)
芹川	芹川	重力ダム	52.2	角閃安山岩, 輝石安山岩	割れ目からの漏水	S. 31
岩瀬川	岩瀬	重力ダム	55.5	中生層砂岩, シラス, 湖底堆積層	シラス層と下位の砂礫層の透水性	S. 42

3. 火山岩地域におけるダム基礎岩盤の岩質的特徴

火山活動によって、新たに地下から地表へ放出される物質にはさまざまなものがある。第三紀の活動によるものも、現在の火山活動から想定できる。地下のマグマが地表へ噴出することが火山活動であるから、高温高压で液体状のものから地表の条件に急激に変わると、ガスと固体噴出物に変化する。この固体噴出物が次のように大別される。

- (1) 熔 岩
- (2) 降下火砕堆積物
- (3) 火砕流堆積物

そして、二次的現象として

- (4) 泥流堆積物

が生じることがある。マグマの性質や噴出の様式によって、噴出物の特徴が少しずつ異なるが、相互の関係は漸移的である。それらの関係を簡略に表わしたものが表-2である。

表-2. マグマの性質と噴出物の特徴

マグマの性質	SiO ₂ の含有量(%)		— 49 —	51-53 —	60 —	68 —	70 —
	相当する岩石名		かんらん石を含む玄武岩	安山岩質玄武岩	安山岩	石英安山岩	流紋岩
噴出物の特徴	岩	温度(℃)	1200	1100	1000	950	
		流動性	高い ←				→ 低い
		特徴	薄く広く熔岩流		厚い熔岩流 やや厚い熔岩流	固い熔岩の盛り 固化熔岩の堆上	
		表面の傾斜	きわめて緩傾斜(3~6°) ←				→ きわめて急傾斜(30°~70°)
主な火山地形	火砕流	特徴	スコリア流		熱雲	軽石流	
		表面の傾斜	かなり緩傾斜(10°) ←				→ きわめて緩傾斜(3°)
		特有の形をもつもの	ベレーの毛 ベレーの涙		火山弾 多量のスコリア	火山弾	火山弾
		特有の形のないもの				多量の火山灰・軽石	巨大岩塊
主な火山地形		溶岩台地	溶岩台地		火砕流台地	泥流丘陵	
		楕状火山	楕状火山		成層火山	熔岩円頂丘 火山岩尖	
			カルデラ		カルデラ	爆発カルデラ	

3-1. 熔 岩

熔岩とは、マグマが地表へ流出し高温状態のまま液体に流動しているもの、およびそれが冷却固化した火山岩体のことである。流動状態やその固化した岩体を熔岩流と呼ばれることもある。

陸上噴出の熔岩流の運動や形態構造は、現在の火山活動の観察研究から、パホイホイ型、アア型、ブロック型に大別されている(図-5)。我が国では、玄武岩の一部がアア型で、他の安山岩、流

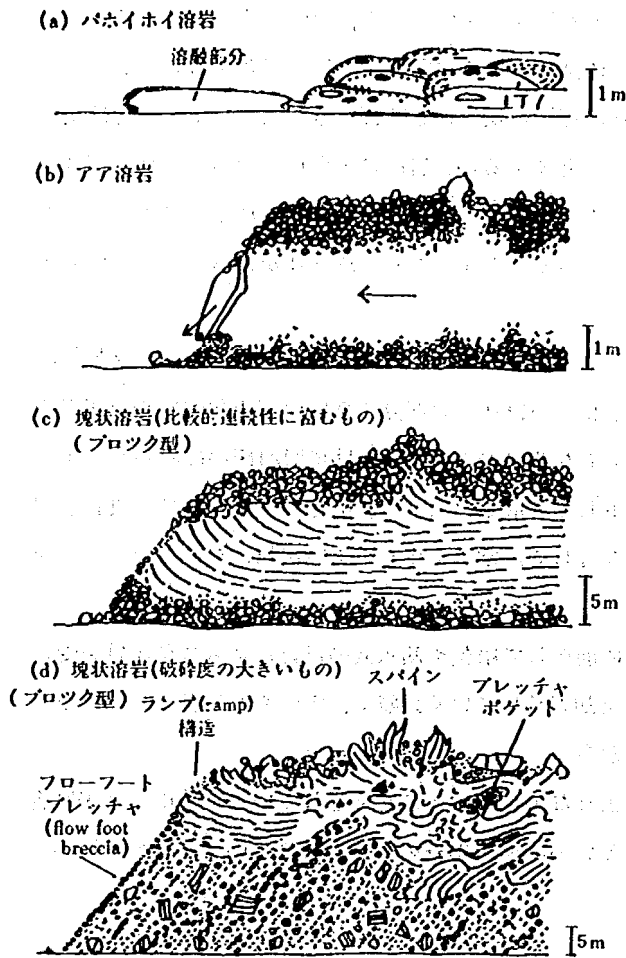


図-5. 溶岩流の型式と内部模式構造

安山岩や流紋岩のような粘性の高い岩石では枕状溶岩になることはまれで、全体に破碎された岩片の集合となり、集塊岩のような火砕岩と間違えるような構造になることが多い。岩片の表面には、急冷相を示すガラス質～微晶質薄層が存在することが多く、極端な場合には岩体のほとんど全部がガラス質の真珠岩、松脂岩となる。これらの岩石はじん性が極端に小さいので、地殻応力によって無数のクラックを生じ、岩体としての強度が小さくなっていることが多い。

火山岩は、衆知のように構成鉱物や化学成分の相違等によって玄武岩、安山岩、流紋岩とに大別され、さらに細分される。(表5-2参照)。これらの間には流出時の粘性が若干異なるので、溶岩流の形態も異なるようになるのは前に述べた通りである。この粘性の違いによって噴出や貫入形態が若干異なったり、火山岩体の構造や地形に特徴がでることがある。ダム基礎岩盤として考える場合は、日本においては溶岩流はほとんどブロック型であるから、下記のような共通の問題点を持つものと考えてよい。

紋岩のほとんどがブロック型である。第三紀の火山岩溶岩については、現在の三つの型に準じて考えるが、その後の地質現象の影響によって、生成時の状態をよく保存しているとは限らない。

逆に第四紀の火山岩溶岩は、新規の堆積物などによる圧密を受けないで、現在の火山活動による溶岩流の形態構造がそのまま残っている条件が多い。

同じ岩種の火山溶岩でも、安山岩や流紋岩では、第四紀の溶岩は第三紀のものに比べてブロック型溶岩流としての構造をのこし、空隙やオープンクラックがはるかに多いことから、透水性が著しい。そのために、ダムの計画や設計上、第三紀の溶岩流を基礎とする場合より一段と困難な条件となることがある。火山の噴出が海底のような水中で行われたり、陸上の溶岩が水中にはいるような場合には、溶岩の表面は水によって急冷却される。玄武岩のような粘性の低い岩石は、断面がちょうど枕をならべたような構造を示す枕状溶岩になることが多く、

火山岩熔岩には、陸上噴出の場合には冷却固結の際に収縮を伴うので、岩体内部の高温であった部分に比較的規則正しい節理状の割れ目が生じ、岩体全部（地山の深部まで）に存在することが多いという特色がある。割れ目は、形態的特徴から板状節理、柱状節理と呼ばれる。水中噴出の場合は割れ目は規則的な節理の形をとらず、不規則な割れ目が発達するか、岩片の集合状になる。また、ガスが放散した跡がのこった非常に多孔質な部分があることがある。また割れ目に流入粘土をはさむことも多い。このようなことから、岩盤の異方性は強く、ゆるみを生じたり、透水性が異常に高い事例も多い。

火山岩類では熔岩1枚の厚さが100m以上になるということはまれで、数m～数十mの場合が多い。熔岩と熔岩の間には、急冷相（ガラス質）や縁辺相（角礫状）の部分や軟質の凝灰角礫岩や凝灰岩のような火山砕せつ岩をはさむことが多い。時代の異なる熔岩と熔岩との間に旧河床の砂礫層や火山灰をはさむこともある。また熔岩が旧地表上を流下して堆積した場合に、風化した旧地表の地質状態が熔岩の下位にかくされていることや、接触部が変質して非常に風化しやすい状態になっていることがある。

火山岩類では火山活動に関連して、熔岩流出に前後して噴気や熱水液の影響によって自変質を受けて軟質になっている場合があり、流動しながら冷却固結していく段階で、空気や旧地表にふれて早く冷却した部分が破砕される自破砕部を伴うことが多い。

このように火山岩ではダム建設上問題となるような欠点が地下にかくされていて、簡単な地表踏査では見のがしやすいし、分布も不規則な場合が多いので地質調査のもっとも難しいタイプの岩石の一つである。

3-2. 火砕流堆積物（熔結凝灰岩）

熔結凝灰岩という言葉は、火山岩地域で土木工事を実施する場合の地質調査ではさほど珍しくなくなってきた。どのようなものであるかについても、土木の方々にもよく知られて来ているように思われる。

この熔結凝灰岩は分類の上からは火砕流堆積物の一種である。火砕流は、火山の爆発によって火山灰、火山岩片が高温状態でガスと共に斜面を下たる現象であり、その堆積物を火砕流堆積物と呼ぶものである。（表-3）

表-3. 火砕流の分類

火砕流（狭義） (pyroclastic flow)	発泡度の低い小規模火砕流 (dense, small-scale)	熱雲 (nuée ardente, glowing avalanche, block-and-ash flow)
	中間型火砕流 (intermediate)	軽石流 (pumice flow) スコリア流 (scoria flow)
	発泡度の高い大規模火砕流 (vesicular, large-scale)	軽石流 (pumice flow) 火山灰流 (ash flow)

この場合は泥流、土石流は一応除外して考えている。火砕流は高温のガスと固体（火山灰と岩片）が大量に混合して、流体のように高速で流動することが知られているので、火砕流堆積物の分布も大規模なものでは火口部から100 kmにも遠く迄達することがあり、また距離による粒度分布の違いもあまりない。むしろ、温度とその冷却速度の相違によって熔結度が異なり（高熔結～低熔結）、構造や強度が垂直的に変化するのが特徴である。旧地表と接する部分は非熔結～低熔結であり、中心部では高熔結となる。さらに上位は中～低熔結に漸移的に移行する。それに伴って多孔質になり、強度は急激に減少していく傾向がある。そのあたりの状況を九州地方の阿蘇火砕流堆積物（所謂阿蘇熔岩）を例として模式断面図に示す（図-6）。火砕流堆積物のうち熔結度が高いものに対して熔結凝灰岩と呼ぶ傾向がある。

高熔結の場合は前述の火山岩熔岩と工学的性質が非常に似ていて、堆積のしかたも共通のものであるので同様の問題点が存在する。すなわち、火山岩よりもさらに連続性の強い節理が発達し、また下

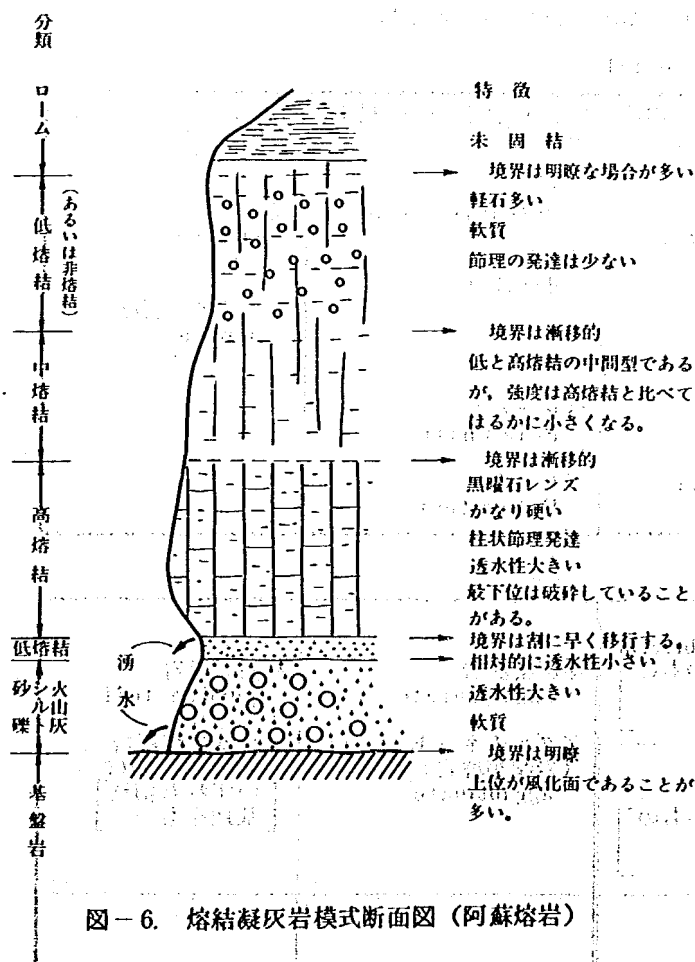


図-6. 熔結凝灰岩模式断面図（阿蘇熔岩）

低部に低熔結部、火山灰、軽石、しまっていない砂礫層などが存在することが多いので、ダム基礎としてはもちろんのこと、貯水池周辺についてもその透水性に関する注意が必要である。

熔結凝灰岩も高熔結で火山岩とほとんど変わらない場合はコンクリートダムが建設された事例があるが、一般には、高熔結部のみで高いコンクリートダムが建設できる程の厚さはなくどうしても低熔結部にかかってしまう。そのようなことからフィルダムを建設する機会が増えてくると思われるが、低熔結部のみについていえば、未固結な火山灰状、軽石堆積物状になり、それらと同じような性質を示すため、基礎としての支持力も非常に小さいし、パイピングのような基礎の破壊にもつながる危険も予想されることがある。

火山岩類とやや異なる点は、比較的第四紀の新しい火山活動の行われた所にややまとまって存在することが多いという点がある。例えば阿蘇熔岩のように火口と思われる地点から数十kmあるいは100kmを越すような広範囲な分布をし、同一の岩体として火山岩類とは規模が比べものにはならない位広い分布をするものがある。(ただし阿蘇熔岩の活動は4～5回にわたると考えられている。)

3-3. 火山碎屑物(火山碎屑岩, 火砕岩)

火山碎屑物とは、広義に火山活動によって生じた岩片や火山灰など細粒～粗粒の物質の集合体を言う。それらが固結したものが火山碎屑岩であり、省略して火砕岩と言われることも多い。火山碎屑物(岩)は、成因から細かな分類が試みられている場合があるが、一般には粒径や構造によって分類されたものが広く知られている。もっとも新しい分類表を表-4に示す。なお火山碎屑岩は、粗粒物質と細粒物質の集合体であることが多いので、その相互の関係をみるには図-7の様な表示方法もある。

表-4. 火山碎屑物(岩)の分類

火山碎屑物 (pyroclastic material)

粒子の直径	粒子が特定の外形や内部構造をもたないもの	粒子が特定の外形(構造)をもつもの	粒子が多孔質のもの
> 64mm	火山岩塊 (volcanic) block	火山弾 volcanic bomb	軽石 pumice
64～2mm	火山礫 lapilli	熔岩餅 dribblet スパター spatter	アコリア(岩滓) scoria
< 2mm	火山灰 (volcanic) ash	ペレーの毛 Peles hair ペレーの涙 Peles tear	

火砕岩 (pyroclastic rock)

> 64mm	火山角礫岩 pyroclastic breccia [細粒基地をもつもの] 凝灰角礫岩 tuff breccia	凝灰集塊岩 agglomerate	軽石凝灰岩 pumice tuff
64～2mm	ラピリストーン lapillistone [細粒基地をもつもの] 火山礫凝灰岩 lapilli tuff	アグルチネート (岩滓集塊岩) agglutinate	スコリア凝灰岩 scoria tuff [いずれも細粒] 基地をもつ
< 2mm	凝灰岩 tuff		

(岩波講座, 火山による。)

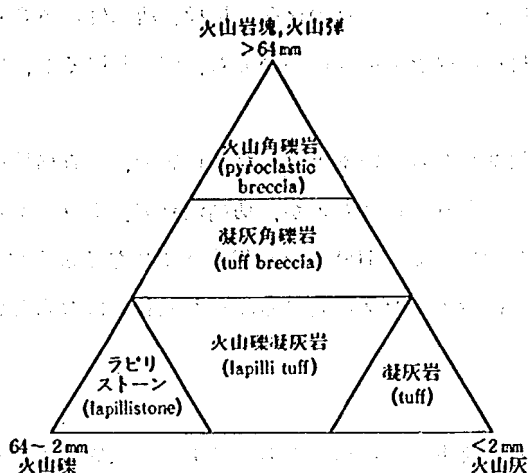


図-7. 火山碎屑岩の粒径構成による分類

3-3-1. 火山角礫岩、凝灰角礫岩

これらは粒径によって一応の区分がされているが、マグマの性質、角礫と基質の量比、粒度分布、風化、変質によって強度をはじめとする工学的性質が変わる。粗粒なものは自破砕熔岩と、細粒なものは凝灰岩と区別し難い。

この種の岩石の特徴は一般にやや硬い角礫とそれを固めるやや軟かい基質の組合せからなることである。角礫、基質とも十分堅硬であり、かつそれぞれのかみ合いが良ければ70~80m規模のコンクリートダムの基礎になり得るし、さらに条件が良ければアーチダムすら建設されている。しかし、

その成因上火山岩類に伴って存在することが多く、熔岩との接触部の風化が著しい場合、角礫の風化による強度が著しく小さい場合、基質が極度に軟質であったり透水性の高い場合などは急速にダム基礎としての条件が悪くなる。さらに基質の粘土鉱物が多い場合、広範囲に温泉変質を受けている場合、厚い軽石層、火山灰層をはさむ場合などでは、いずれのタイプをもってきてもダムの可能性がうすくなってくる。分布は火山岩類に隣接する場合が多く、新第三紀層の代表的な構成岩石でもある。相互の関係については、詳細な地質調査を行わなくては細かい構造や分布を把握することはできない。一般的傾向として第三紀あるいはそれ以前のものは比較的堅硬であるが、熱水変質を受けていることがあり、第四紀のものは固結度が低いと言える。

3-3-2. 凝灰岩

凝灰岩は、一般には噴火によって空中へ噴出して、遠方迄運ばれた後に降って来た火山灰が堆積した後に固結したものを指している。しかし、降下した火山灰が流水で二次的に再堆積したもの（火山の噴火に直接関係のない粒子も混ざっている）も、ダムの基礎として考える場合は同様に扱った方がよい。

このようなことから、火山活動に関連して生成された凝灰質岩（凝灰岩、凝灰質砂岩、凝灰質泥岩など）の中には劣化がはやく、軟弱な状態になり易い傾向のものがある。掘削によって応力解放が行われ、水や空気にあふれることなどによって当初固結した状態のものが急速に（数日~数カ月）膨潤し泥化する。これはスレーキングと呼ばれている現象であり、乾湿の繰り返しによっておこっている。ダム基礎岩盤の場合には、掘削後裸岩のまま放置せず、すみやかな処理が必要である。新第三紀、中新世のグリーンタフと呼ばれる凝灰質岩にはとくにこの傾向が強い。また、軽石を多く含む降下軽石層の場合は風化によって粘土化するものや、非常に透水性の高い層になっていることがある。

このように、凝灰質岩は一般にダムの基礎としては強度の点で問題が多く、ダムの形式としてはフ

イルダムを選ぶのが妥当であろう。また凝灰質岩の場合は、地すべりの存在、規模、活動性に留意し、ダムサイト周辺だけでなく貯水池周辺地山あるいは材料採取予定地等についても、回避し得るか、処理し得るかの慎重な検討を行う必要がある。

軽石流堆積物で、軽石質凝灰岩として軟岩程度の強度をもっていると見られた地層で、調査横坑を掘削したところ、顕著なクラックのないほぼ均質の地層とみられたものが、切端廻りで、クラックが次第にあらわれて開いていき、それにつれて湧水量も増加して、100 L/sec程度までになるようなパイピング現象がみられたことがある。この種の岩石ではパイピングに対する注意も忘れてはならない。

3-4. 泥流堆積物

泥流堆積物は、崩壊した山体の一部が斜面を氷と共に流下して堆積したものであり、火砕流と異なる点は、ガスと水の違いであり、泥流の方が低温である。火山噴火に直接関係ある場合に火山泥流と呼ぶことがある。火砕流の末端が泥流になることもあり、固結したものは凝灰角礫岩と似た性状のものが多い。基盤の岩石など異質の岩片を多く含み、また、第四紀のものが多く見られる所から固結度、強度は小さく、ダムの基礎としてみた場合は、凝灰角礫岩よりさらに慎重な検討を要する。

4. 火山岩地域におけるダム基礎岩盤の地質構造的特徴

火山岩地域においては、火山岩、火山性堆積岩の岩質上の特徴と共に、火山活動と言う特異な地質現象の結果になる地質構造上の特徴を、ダムの基礎岩盤の検討を行う場合に十分配慮する必要がある。

4-1. 熔岩の節理、自破碎、層状構造および熔岩洞

火山岩類は前に述べたように、地表に噴出した後、高温の熔融状態で流動し、冷却して固結するのが一般であるが、冷却の際に体積収縮により比較的規則正しい数多くの割れ目（節理）を生じる。形態によって柱状節理あるいは板状節理と呼ばれる特徴をもつことがあるが、火山岩体の内部までよく発達し、地下内部に数多くオープンクラックが存在する状態となり全体的に透水帯を形成する。これは熔結凝灰岩の場合も同様である。とくに熔結凝灰岩は地表地形上の集水範囲より広い地域から地下水が集中することがあり、逆にダムの基礎岩盤としてはかなり広範囲の影響を考慮しておかなければならない。火山岩類に発達する節理による透水はその量も大きく、地表からの深度が数十mにおいてもルジオン値が数十というオーダーに達することがまれでなく、カーテングラウチングによる止水を必要とする範囲も地山の奥の方へ長くなることも止むを得ない。漏水量が数t/min という例は、火山岩を基礎とするダムにみられることが多い。熔岩の流出が繰り返し行われると、新旧の熔岩の接触部は早期冷却による割れ目や空隙の多い部分になり、それが層状に連続する傾向がある。これらが基盤の透水性を著しく高める恐れともなる。

また、火山岩熔岩は流動して冷却固結していく過程で、元の地表に接した末端部や空気中にさらされた表面では急冷相を示し、岩体内部の緩やかに冷却固結した部分に比べると軟質で空隙に富む部分を形成する。熔岩流の側面の熔岩堤防の部分についても角礫質で空隙の多い状態となる。このような部分は風化作用を強く受けやすいことと共に、透水帯を形成することが多い。また、熔岩流の流動によって中空のチューブが形成されたり、ガスの発散によるガス孔、空洞もその連続性が透水性と大きな関係があるので注意を要する。熔岩の岩体は一樣な厚みや方向性をもっている場合だけでなく、むしろ不規則である場合が多いので、地質調査の数量が少ない概査段階では、透水性についての判断を誤まることもある。

4-2. 不整合 熔岩の流出は、既成岩表に上から流れて堆積するもので、これは火山岩の場合には、陸上、水中を問わず、既存の地表上を新しく熔岩として被覆するので、普通には堆積の連続のような関係がみられずほとんどの場合が不整合になる。不整合は岩層の不連続であるから、地質的不連続であるばかりでなく、物理的、工学的性質も不連続となる。

その上、熔岩は通常の場合既存の地表の低所をたどって流動するので、断層に起因する谷や、砂礫に富む旧河床あるいは軟弱な砂・シルトなどの堆積した旧湖沼あるいは風化著しい旧地表などを被っ

ている場合が多いのでダムの基礎として、とくに透水性の上で重要な地質構造（普通には欠陥条件である）となっている。

このような不整合は、熔岩類の透水性が一般に高いことから、しばしば湧水構造となっていることが多い。一例としてあげれば図-8のような例がある。

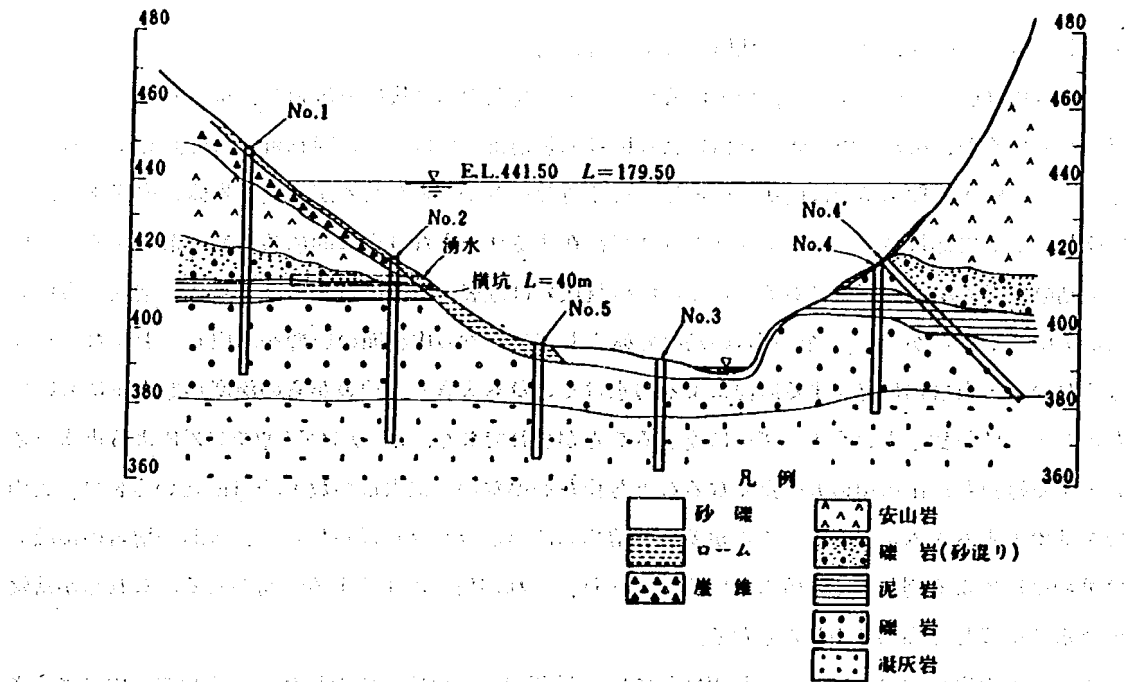


図-8. 不整合からの湧水

この地質構造は、割れ目のよく発達した透水性の高い安山岩熔岩と同じく透水性の高い礫層があり、その下位に不透水層となる泥岩層がほぼ水平に左右岸に連続しているものである。左岸の地表付近ではじむ程度の湧水であったが、熔岩（および礫層）と泥岩層との境界付近に調査横坑（深度40m）を入れたところ、多量の湧水があり、数十L/secに達した。湧水はその後止らず、地下水の集中機構となる熔岩あるいは礫層と泥岩層との関係は地山奥深くまで連続し、かつ泥岩層の下位の礫層も透水層であることが判ったためダムサイトとして不適であると判断され他に変更された。

このような熔岩の下位の礫層の代りに、火山活動の前駆現象としてよくみられる火山灰や大量の軽石の放出があれば、それらの堆積によって生じた火山灰層、スコリア層、軽石層はその透水性が高いため、礫層の場合と同様な地下水の滞留層となっている可能性が高い。さらにそのような未固結～半固結で比重の小さい地質であればパイピングの恐れすらある。

4-3. 熔岩と火山碎屑岩の互層

火山活動において、熔岩流の流出と火砕流の流出が交互に行われることはごく普通のことであり、さらにその間に火山灰のような降下火山碎屑物をはさむことも多い。熔岩は強度の面では十分な性質を持っていたとしても、割れ目の発達から、透水性の面からは基礎として難がある。一方堆積層は一部を除いて、強度は足りないが、相対的には不透水層となることが多い。

このような強度と透水性の異なる地層が、それぞれ数m～数十mの厚さで層状に重なり合う地質構造の場合には、基礎の設計上で慎重な配慮を必要とする。すなわち設計強度の決め方、地下水面の判断、止水工法の種類、グラウチングの範囲など非常に困難な問題を生じてくる。

4-4. 変質（熱水変質・温水変質）

変質は、地質構造と直接的な関係は薄いですが、火山岩地域の問題点としては避けて通れない重要な課題である。

火山活動に関連して、活動期を過ぎた終末期や、活動中心から離れた位置で高温のガスや水蒸気が岩体の割れ目を通して地表近くへ上昇し、地下水と混って温泉や噴気となり地表へふき出す現象がよくみられる。地表近くへ出てくる過程で周辺の岩石を変質させることを熱水変質作用と呼び、岩石を構成する鉱物が粘土鉱物へ変じ、全体が粘土質になると温泉余土と呼ばれている。熱水は高温であり化学反応が活発である上に、熱水が硫酸性（硫黄と化合して）の場合や、炭酸ガスを含む場合も多いため、岩石の変質作用は進行し、永い時間が経てばかなり広範囲にわたって変質した岩盤が広がることもある。このような場合、ほとんどの岩石は劣化し、強度が低下するばかりでなく、透水、パイピングにも関連深い地質状態になる例がある。

あるダムサイトにおいて、凝灰角礫岩および安山岩中に不規則な脈状に白～黄～褐色の硬質粘土が挟在している。この粘土は普通の状態では硬質でシルト岩程度（ $qu 14 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ ）であるが、乾燥状態になったものを水浸させると微小音をたてて瞬時に崩壊し、1%前後の微小片になってしまうという性質をもっている。

このような変質岩石（鉱物）の性質、分布などを調査しておくことは非常に大切なことであるが、調査・予測が非常に困難であるため、ダムサイトの地質調査でもっとも大きな問題の一つである。

なお、スウェリング（膨潤）、スレーキングの問題も多い。

膨潤は、粘土質の岩石が水を含み膨張する現象で、膨張率によって膨潤土と分類される。膨潤土は、膨張率によって膨潤土と分類される。膨潤土は、膨張率によって膨潤土と分類される。

スレーキングは、粘土質の岩石が水を含み膨張する現象で、膨張率によって膨潤土と分類される。膨潤土は、膨張率によって膨潤土と分類される。

膨潤土は、膨張率によって膨潤土と分類される。膨潤土は、膨張率によって膨潤土と分類される。

5. ダムの地質調査上留意すべき着眼点

これまで述べてきたように、火山岩地域にダムを建設する場合には、それぞれ岩質上あるいは地質構造上の特徴を十分考慮しながら、計画、調査を進め施工しなければならない。

地質調査は、ダム計画に留意すべき下記の問題点を解明するようになされなければならない。

- ① 基盤岩の強度が不均一である。
- ② 透水性の高い部分が連続する。
- ③ パイピングの恐れのある岩層を挟むことがある。
- ④ 基礎あるいは材料とした場合の耐久性をチェックする。

①について、火山岩地域では堅硬な熔岩類と相対的に軟質な火山砕せつ岩（物）とが、成層状態で交互に堆積するような互層状の地質構造の場合が多い。また熔岩流にも堅硬な中心部と軟質な周辺自破碎部との差があり、熔結凝灰岩においても熔結度の違いから同様の傾向がある。節理の発達程度や形態構造にも差がある。火山砕せつ岩は、比較的堅硬な角礫と軟質な基地からなり、それらの量比やかみ合せの程度によって強度はかなり不均一になる。熱水（温泉）変質を受けている場合には、断層や節理の部分から劣化が進み、強度の小さい変質部（その後の風化の影響もある）が、不規則に分布することも珍しくない。また、熔岩や熔結凝灰岩が不整合関係で存在する場合は、下位の基底部に強度の小さい未固結層が存在して、強度の不均一の要因となることもある。

②についても、①と同様非常に重要な問題であり、透水上の問題点が強度上の問題点と共通することも多い。熔岩、熔結凝灰岩の冷却節理や自破碎部は、岩体内部まで同様の傾向が連続することが多く、非常に透水性の高い岩盤を形成することが多い。

同様なことは、火砕流堆積物の多孔質な未固結部についても同様である。また、熔岩や熔結凝灰岩と下部層との間の不整合部は、非常に透水性の高い礫層などが旧河床のように連続する場合が多い。これは狭い範囲のみの地質調査では十分よく把握できないこともあるので、注意を要する。

③については、ダムの安全性に関係する非常に重要な問題であるから、パイピングの可能性については事前の調査、透水試験時の限界圧力、動水勾配などから慎重な検討を行っておく必要がある。凝灰質岩で固結度の低い地層についてはとくに注意が必要である。

④は基礎掘削面の安定性や、コンクリート骨材、フィルダムのロック材の耐久性の問題である。とくに変質作用の徴候には十分配慮し、有害鉱物、粘土鉱物のチェックが必要であろう。これらは、調査よりむしろ耐久性試験によって明らかになる。また、潜在的な割れ目が発達する岩石は耐久性が劣る傾向がある。とくに、グリーンタフについては耐久性に問題のある場合が多い。

地質調査を実施するにあたっては、火山岩地域特有の着眼点、あるいは注意事項がある。それは広域調査と有効な調査手法の適用である。

火山岩地域については、地質構造が複雑なことによって、単にダムサイト周辺のみを細かく調査して

6. 火山岩地域のダム基礎止水工法（九州地方の例）

火山岩地域で実際に築造されたダムにおいて、とくに基礎岩盤の止水のためにどのような処理工法が選択され実施されたかについて、九州地方を対象として検討してみたい。

九州の火山岩地帯に建設されたダム群の中から、火山岩、火砕岩を基礎とする高さ15m以上のダムについて、資料の得られる比較的近年に完成した25ダムを選び、地質、地質構造、ダムの形式規模と止水工法および湛水結果の相関について検討を行った。まず、この25ダムの基礎岩盤の物質構造とその特徴は、表-5のようにまとめられる。これは前節でのべた強度の不均一性や透水性が大きいと言う問題点をも代表する。25ダムの諸元、基礎岩盤の状況と透水性についてまとめたものが表-6であり、透水性調査、基礎処理と試験湛水および本湛水時の状況をまとめたものが表-7である。

表-6からわかるように、火山岩地域に建設されるダムはダム高の割に貯水容量が小さいものが多い。有効貯水容量が小さいことは、それだけ漏水を少しでも止めたいということになる。しかし、不透水層となる地層が浅い位置に存在するサイトは少なく、むしろ、不透水層となるべき地層が全くなくて、地下水位がぐらと下がっていると言う例が圧倒的に多い。

そのようなことから、地質調査と並行して各種の透水性調査が行われ、グラウチングテストを実施した上で、止水工法を決定するという手順をふんでいる。竣工後の湛水も、一回で常時満水位まで上げることがしないで、段階的に水位を上げて試験湛水を行ない、漏水の有無や状況をチェックしている。もし、下流側に漏水箇所が発見された場合は、水位を下げて、あらためて漏水原因の追求と止水工法の追加を行っている。

カーテングラウチングによる熔結凝灰岩とその下位層の止水効果について、緑川ダムの例を簡単にのべる。

緑川ダムは、図-9に示すように、主ダム（コンクリート重力ダム）は花こう閃緑岩を基礎岩盤としているが、右岸には、基盤岩を被って熔結凝灰岩が厚く分布し、旧河床砂礫層も存在している。満水面下になる鞍部には、副ダム（ロックフィルダム）を設けている。副ダムの基礎は熔結凝灰岩と一部砂礫層である。カーテングラウチングはグラウチングテストの結果によって、多列内そう法が有効であることが判ったので、4列、一部6列、孔間隔2mで実施した。透水性の改善の状況は表-8に示すとおりである。部分的にルジオン値の高い部分はさらに孔間1m、0.5mと詰めていき、透水性の改善をはかっている。

25ダムの止水対策工法を、水理地質構造と地下水位から検討しまとめてみると表-9のようになる。現在まで一部をのぞいて、主としてカーテングラウチングによって一応の止水に成功し湛水実績を持っているが、他の地質条件を基礎とするダムと比べて、若干漏水量が大きい傾向があることは否定できない。とくに、新期の熔岩や火砕岩類を基礎とするもので、地下水位が現河床より低い例があり、この場合はブランケットなどを併用しなければ止水が非常に困難となっている。

表-5. 火山岩地域の一般的地質構造（九州地方のダム基礎岩盤）

		熔岩（自破砕熔岩を伴うことが多い）	熔岩、火砕岩互層	凝灰角礫岩類	熔 結 凝 灰 岩		不整合、旧河床砂礫層
					高 熔 結	低熔結～シラス	
模 式 断 面 図							
		A, B, C 熔 岩 B', C' 自破砕熔岩	A, B 熔 岩 a, b 火 砕 岩	a 凝灰角礫岩	A 基盤岩, a, c 熔結凝灰岩 (低) B 堆積層, b " (高)	A 基盤岩 B 旧河床砂礫層 a 新期熔岩 b ローム層	
問 題 点 と 注 意 事 項	透 水 性	熔岩は板状あるいは柱状節理が発達し、透水性が高い。 自破砕熔岩も新しい時代のものほどゆるみが多く透水性が高い。 異種熔岩の接触部が透水性が高いことがある。 新しい時期の熔岩ほど透水性が高い傾向がある。	熔岩と比べて火砕岩の方が透水性が低い場合が多いが、風化や破碎によっては高い場合がある。 変質の場合は透水性が急変することがある。	一般的には透水性が低い。	高熔結部は熔岩に似た傾向であるが、柱状節理がよく発達し、透水経路は熔岩より遠距離に達することがある。 熔結凝灰岩の下位には、必ずと云って良いほど砂礫層が存在する。また基盤岩の上面が風化していて透水性が高いことがある。 低熔結部では多孔質で軟質であり、見かけより浸透し易い場合があり、とくにパイピングには慎重な配慮が必要。	不整合面が地表から分らないことがあるので地質構造の把握に留意する必要がある。 不整合面では基盤岩の風化、未固結の砂礫層、新期熔岩の割れ目など透水条件が高いことが多い。	
	強 度	自破砕熔岩は強度が小さい場合が多い。変質作用を受けると強度がずっと小さくなる。	火砕岩の強度が小さい場合は地質構造の把握に留意すべきである。	第四紀のものは泥流堆積物に近く、強度が非常に小さい。	高熔結部は熔岩に準ずるが、低熔結部は非常に強度が小さい。シラスについては二次シラスの判定が重要である。熔結凝灰岩の下部は透水性ばかりでなく強度からも要注意である。	不整合面附近は強度が小さい。	
代 表 ダ ム		下笠ダム、松原ダム、日出生ダム	葦瀬ダム、重井田ダム	並石ダム、花取ダム	芹川ダム、大谷ダム	緑川ダム、氷川ダム	

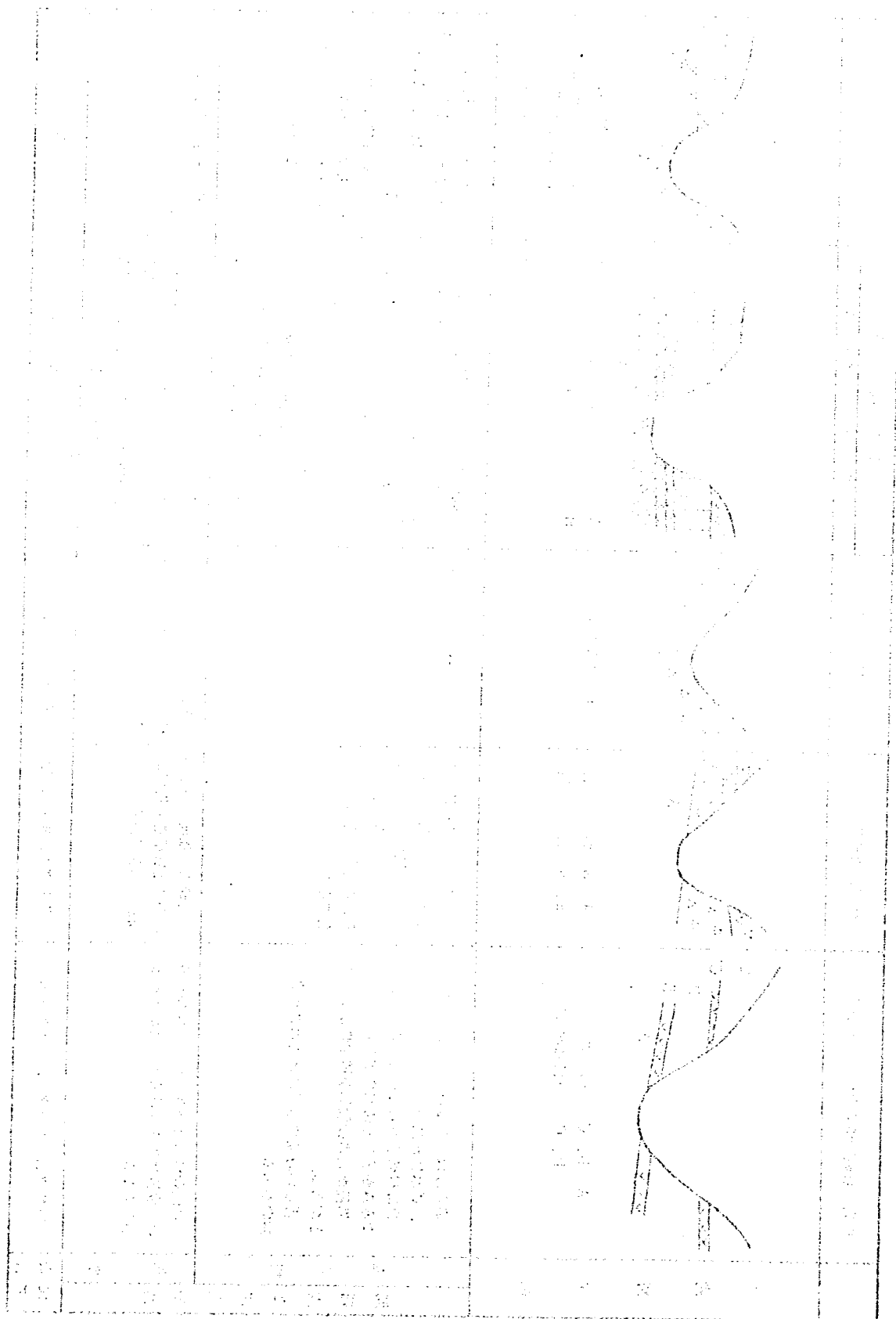


表-6. 各ダムの基礎岩盤の透水性の要因別分類

項 目		ダム 名	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	凡 例		
			荇瀬 ダム	別 所 ダム	梅 ノ 木 ダム	重 井 田 ダム	花 取 ダム	岩 屋 川 内 ダム	打 上 ダム	下 釜 ダム	松 原 ダム	芹 川 ダム	若 杉 ダム	日 出 生 ダム	日 指 ダム	深 見 ダム	並 石 ダム	松 木 ダム	緑 川 ダム	氷 川 ダム	大 谷 ダム	大 切 畑 ダム	深 迫 ダム	岩 瀬 ダム	高 隈 ダム		市 来 ダム	永 吉 ダム
タム 諸 元	県 名	長 崎	左 同	左 同	左 同	佐 賀	左 同	左 同	大 分	大 分	大 分	大 分	大 分	大 分	大 分	大 分	大 分	熊 本	熊 本	熊 本	熊 本	熊 本	宮 崎	鹿 児 島	左 同	左 同		
	目 的	F.N.W	A.W	A	F	A	F.W.N	A	F.P	F.P	F.N.P	F	A	A	A	A	A	F.N.P	F.A N.W	A	A	A	F.P	A	F	F.A		
	形 式	G	E	E	E	E	G	R	A	G	G	G	R	E	G	R	G	G. R	G	G	E	E	G	G	R	R		
	堤 高	51.0	19.3	33.4	41.0	23.0	48.5	36.7	98.0	83.0	52.2	33.5	46.7	40.0	38.5	38.5	48.5	76.5	56.5	27.1	23.0	19.0	55.5	47.0	41.0	36.5		
	総貯水量(一部有効貯水量)(千m³)	3,030	1,923	632	634	244	2,500	1,450	55,930	54,600	27,500	750	8,000	4,880	1,250	1,550	1,300	46,000	6,300	2,000	851	1,268	57,000	13,900	2,103	1,174		
	完 成 年	36	43	51	58	45	49	54	44	45	31	42	43	44	44	49	49	45	48	15	50	49	42	43	59	60		
(I) ダム基礎を構成する地質	地 質	① 安 山 岩 熔 岩	◎	◎		◎			◎	◎	◎	○	○	○	◎										◎		◎ 主に分布 ○ 部分的に分布	
		② 玄 武 岩 熔 岩			◎	◎		◎	◎																			
		③ 自 破 砕 状 熔 岩	◎							◎	◎		○	○									◎					
		④ 溶 結 凝 灰 岩										◎			○			◎	◎	◎	◎			○				○
		⑤ 凝 灰 角 礫 岩	○	○	○	○	○	○		○	○				○	○	◎					◎	○			○		
	同 題 点	① シラス～低熔結の火山灰が存在する																○						○	○			○ 存在が確認されたもの △ 可能性があるもの又は、ダムの漏水とは直接関係ないもの
		② 旧河床砂礫等の未固結層を挟む			○				○	○			○	○			○		○	○		○		○				
		③ 洪水池内やダム地点に大断層が存在する		△									△			○		△					△					
		④ 漏水経路となりやすい地質名および地質構造	(熔岩の境界 脈 岩)	(安山岩 断 層)	(玄武岩)	(玄武岩 安山岩)	(玄武岩)	(多孔隙 玄武岩 未固結 凝灰岩)	(玄武岩 旧河床 堆積物 花崗岩 の真砂)	(安山岩)	(安山岩)	(旧河床 砂 礫) (低熔結 凝灰岩)	(旧崩壊 堆積物 断 層)	(自破砕 状溶岩)	(凝 灰 角 礫岩)	(安山岩 断 層)		(低熔結 凝灰岩)	(溶結凝 灰 岩) (旧河床 砂 礫)		(溶 結 凝灰岩)	(未固結 砂 層)	(自破砕 溶 岩)	(シラス)	(シラス)	(安山岩)	(旧河床 砂 礫 凝灰岩)	
		⑤ 不透水性地盤又は難透水層を形成する地質	(凝灰角 礫 岩)		(古第三 紀 層)				(凝灰岩)	(花崗岩)		(旧 期 安山岩)					(凝 灰 角 礫岩)		(花 崗 閃 緑岩)	(四 十 万 層)				(四 十 万 層)	(四 十 万 層)	(旧 期 安山岩)	(四 十 万 層)	
(II) 岩盤の透水性	不 透 水 性 地 盤 が 存 在 し な い	① 不透水性地盤が d=h 内に存在する	×	×	△	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	○	○	×	○	× 存在しない △ 確定ではないが可能性強い ○ 確実	
		② 兩岸の地下水位が比較的浅い	○						○					○	○		○		○	△	○					○		
		③ 〃 が深い河床より上			○	○				△	△	○						○	○									
		④ 〃 河床以深		○			△						○			○							○					
		⑤ その他の特記事項							右岸中腹に湧水がある。	旧河床堆積層中に地下水がある。							地下水位は何れから30m以深					ダム地点が地下水の自噴地帯	ダム地点が地下水の自噴地帯					

ダムの目的 F: 洪水調節または防災, N: 不特定用水または河川維持用水, A: 灌漑, W: 上水道用水, P: 発電
 ダムの型式 G: 重力式コンクリートダム, A: アーチダム, R: ロックフィルダム, E: アースダム

表-7. 各ダムの透水性調査基礎処理および止水状況の要因別分類

ダム名		① 五瀬 ダム	② 別所 ダム	③ 梅ノ木 ダム	④ 重井田 ダム	⑤ 花取 ダム	⑥ 岩屋川内 ダム	⑦ 打上 ダム	⑧ 下笠 ダム	⑨ 松原 ダム	⑩ 井川 ダム	⑪ 若杉 ダム	⑫ 日出生 ダム	⑬ 日指 ダム	⑭ 深見 ダム	⑮ 並石 ダム	⑯ 松木 ダム	⑰ 鎌川 ダム	⑱ 水川 ダム	⑲ 大谷 ダム	⑳ 大切畑 ダム	㉑ 深迫 ダム	㉒ 岩瀬 ダム	㉓ 高隈 ダム	㉔ 市来 ダム	㉕ 永吉 ダム	
透水性調査	グラウチングテスト		○				○	○	○	○	○		○					○	○	○			○		○		
	各種検層		○						○	○						○		○									
	揚水・注水試験										○																
	孔内微流速測定									○									○								
	トレーサー測定								○	○		○					○										
	水質測定		○							○							○										
止水工法	浸透流解析								○	○	○																
	① カーテングラウトの範囲 $d = h/3 + (5 \sim 15)m$	○		○	○		○	○					○	○					○	/	/		○		○	○	○
	・ $d = h/2 \sim h$		○						○	○	○	○			○	○	○	○	○	/	/			○			
	・ 不透水性地盤まで実施							○							○	○	○	○	○	/	/		○	○	△	△	
	② コンクリート遮水壁を設置						○				○						○		○					○			
	③ ブランケット ・ カーテングラウト行なわず湛水池全面にブランケット ・ カーテングラウトと併用して部分的なブランケット				○															△	○	△					
止水状況	④ 未固結層に対する止水工法			(5列のカーテングラウト)			(コンクリート遮水壁)	(キャップコンクリートコールドセメントグラウト)			(2列のカーテングラウト)	(コンクリート遮水壁)				(4列のグラウト一部水ガラス使用)	(コンクリート遮水壁)	(4列のカーテングラウト)	(グラウトキャラリ-を遮水壁に使う)				(コンクリートウェルによる表面止水)	(コンクリート遮水壁)			
	① 未だ試験湛水を行っていないダム				○			○					○												○	○	
	② 試験湛水の結果異常が認められないダム	○		○		○	○							○		○		○	○		△		○	○		△	
	③-1 漏水箇所はダムの直下流								○	○	○						○		○	○							
	③-2 漏水箇所はダムから100m以上離れた地点		○									○			○		○	○	○								
	④ 湛水池内のブランケットにクラックが生じた																				○						
湛水後の対策	① 当初カーテングラウトだけの湛水池全面にブランケットをはる														○												
	② 当初カーテングラウトだけの湛水池の一部にブランケットをはる		○								○																
	③ 左右岸のリムグラウトを追加したダム		○						○	○	○						○	○		○							
	④ 堤体にかかる揚圧力を低下するためドレーンホールを設置																○										
	⑤ その他の特記事項										追加グラウトの結果大巾に漏水量が減少した						追加グラウトを行ってより漏水量は減少した。	追加グラウトの結果漏水量が減少した。	追加グラウトを行ってより漏水量は減少した。	貯水位に安定が保たれる。	漏水量が多いが問題としていない。						

○ 実施
△ 一部実施

○ 該当
△ 確定ではないがほぼ該当

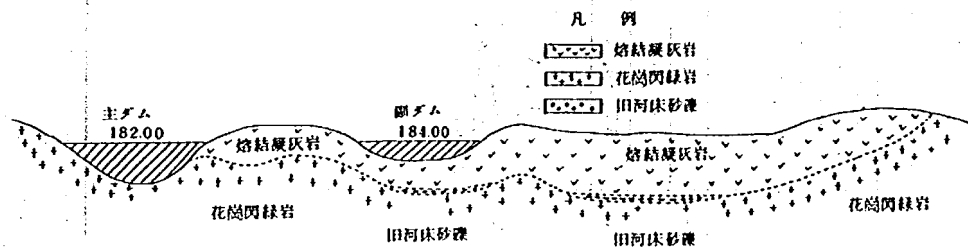


図-9. 緑川ダム地質模式断面図

表-8. 緑川ダム副ダムカーテングラウチングの透水性の改善 (Lu 値)

工区	状 態	低熔結凝灰岩	高熔結凝灰岩	古期堆積層	花崗閃緑岩
I	グラウト前	2.4	3.2	3.1	3.3
	“ 後	5.1	3.5	2.6	4.1
II	グラウト前	2.5	2.1	8.6	1.4
	“ 後	2.0	0.4	0.7	0.4
III	グラウト前	—	2.4	1.4	1.6
	“ 後	—	0.8	0.9	1.0
IV	グラウト前	—	—	3.2	7.3
	“ 後	—	—	1.0	1.0

※ グラウト後のLu値はチェック孔における値である。

表-9. 水理地質構造と地下水位による止水対策工法検討

地質構造区分		地質構造区分				
地下水位区分		熔岩(自破砕熔岩を含む)	熔岩・火山砕屑岩互層	凝灰角礫岩	熔結凝灰岩	
					高熔結	低熔結～シラス
A 比較的浅い	止水対策	G ₁	G ₁ , (C)	G ₂ , G ₃	/	/
	試験湛水の結果	A	A	A		
	漏水経路, 湧水地点	—	—	—		
	追加止水対策	—	—	—		
	追加止水対策後の湛水状況	—	—	—		
	検討	グラウトにより止水可能	グラウトにより止水可能 [ただし, 特殊な透水層 にはコンクリート遮水 壁を併用している。]	グラウトにより止水可能		
B 深いが河床標高より上	止水対策	G ₁	G ₁ , G ₂	/	G ₁ , G ₂ , C, B-1	G ₁ , G ₂ , G ₃ , C, B-1
	試験湛水の結果	B	A, B, C		B, C	A
	漏水経路, 湧水地点	An, N	An, N		WT, N, Fa	WT, C, rd, N
	追加止水対策	G ₂	G ₂		G ₁ , G ₂	—
	追加止水対策後の湛水状況	B'	B'		B'	—
	検討	グラウトにより改良可能, ただし漏水量は少ない。	グラウトによりパイピング を起さない程度に改良 可能, グラウトの方法に より止水可能。		グラウトによりパイピング を起さない程度までは 止水可能であるが貯水 池内の処理(プランケット コンソリデーション グラウト)も必要。	充分なグラウトを行ない 遮水壁・貯水池内のプラン ケットなどを併用すれば 止水可能。
C 河床以深	止水対策	/	G ₂ , C, B-2	B-2	/	/
	試験湛水の結果		C	A		
	漏水経路, 湧水地点		An, rd, F, Fa	—		
	追加止水対策		G ₂ , B-1, Go	—		
	追加止水対策後の湛水状況		B', A	—		
	検討		ダムサイトのグラウトの みでは止水不可。貯水池 内の処理(プランケット, コンソリデーショングラ ウト)が必要。	プランケットなど貯水池 内の処理が必要。		

記号 ①止水対策 ・カーテングラウト $d = H/3 + (5 \sim 15m)$ G₁
 $H/2 \sim H$ G₂
 $d = \text{不透水性地盤まで}$ G₃
 ・コンクリート遮水壁 C
 ・湛水池内のプランケット貯水池の一部にプランケット B-1
 貯水池全面プランケット B-2
 ・湛水池内のコンソリデーショングラウト G-0

②湛水状況 二 現在工事中で試験湛水を実施していないダム T
 ・貯水池の漏水量は問題がない A
 ・貯水池の漏水量が若干多いが, パイピング等の発生のおそれがない B'
 ・貯水池の漏水量が多く止水対策の必要あり B
 ・貯水池からの漏水量が多くなり貯水位を下げる C

③漏水経路の地質 安山岩 An, 熔結凝灰岩 WT, 凝灰角礫岩 T B, 旧河床砂漠等の未固結物 rd, 断層 F

④貯水池からの漏水による湧水地点 ダム直下流 N, ダム及び湛水池から 200m 以上離れた遊距離の地点 Fa

まとめと謝辞

火山岩地域にダムを計画する場合は、以上に述べたような地質条件の特徴をよく把握して調査、設計を実施する必要がある。とくに、透水性と耐久性については他の地質条件と比べて格段の注意を払う必要があり、当然のことながら、止水工法は大規模で入念な工法の検討が必要となってくる。

本報告は、非常に短期間にまとめたもの故に、かなり粗いまとめをしているので、後日資料を追加しあらためる機会を得たいと考えている。

九州の火山岩地域のダム資料は、九州地方建設局において企画された「北部九州ダム基礎処理研究会」(本省、土研、地建、国土開発技術研究センター)の研究調査過程において得られたものを基としている。これらの関係者に謝意を表すると共に、資料を提供していただいた農林水産省九州農政局、長崎、佐賀、熊本、大分、宮崎各県の関係者各位に、心からなる謝意を表するものである。

参 考 文 献

- ① 火山及び火山岩：1954年，久野 久，岩波全書
- ② 第四紀研究
 テフクロノロジー特集号：1963年，日本第四紀学会
- ③ 地 学 事 典：1970年，平 凡 社
- ④ 日本の多目的ダム：1972年，建設省河川局監修，山海堂
- ⑤ 岩石学Ⅱ（岩石の性質の分類）：1975年，都城秋穂，久城育夫，共立全書
- ⑥ Geology and Mineral Resources of Japan：1977年，Geological survey of Japan
- ⑦ 多目的ダムの建設：1977年，建設省河川局監修
- ⑧ 地球科学 岩波講座No 3 地球の物質科学Ⅱ
 —火成岩とその生成—：1978年，久城育夫・荒牧重雄編 岩波書店
- ⑨ 地球科学 岩波講座No 7 火 山：1979年，横山 泉・荒牧重雄・中村一明編 岩波書店
- ⑩ 全 国 ダ ム 図：1979年，建設省河川局

ダム放流設備の形式、規模の選定

ダム水工研究室長 藤 本 成

1. ま え が き

本論は、ダム放流設備の形式、規模の選定問題について最近の話題を中心に取りまとめたものである。

ダム放流設備とは、余水吐き（Spillway）放流工（Outlet work）のようにダム貯水池の流水をダム下流の河道に直接導く設備の総称であるが、ダム下流の河道に直接放流するための設備（ダム放流設備）以外の専用水路に流水を導き河道以外に取水するための設備（取水設備）あるいは発電施設に導くための設備（発電設備）などについても貯水池の流水管理という機能においては同一の役割を担っているのでここではこれらの総称として使用している部分もある。

ダム放流設備の主たる機能には、ダム貯水池築造後の付替河道としての機能、貯水池の貯留水あるいは貯留効果を有効に利用するための機能ならびに流水に対してダム堤体の安全を保障するための保護装置としての機能などがある。付替河道としての機能とはダム貯水池にダム放流設備を組合せることによって築造前の自然河道が本来有していた河道機能を擬似させることであり、ダム貯水池築造の結果生ずる負の効果を除去するための機能である、2番目の機能はダム貯水池の築造の目的を適切に履行させるための機能であり、3番目の機能はダム堤体の越流させないことを前提として設計されるためこの設計条件を満たすように貯水池の水位上昇を制御する機能である。また、保護装置として緊急時にダム貯水池の水位を急降下させる機能が要求される場合もある。

ダム放流設備の計画、設計ではこれらの機能を十分発揮できるように形式規模を選定することが必要になる。ここにダム放流設備の形式とは、放流時にそこに生ずる流れの形式のことであり、放流設備の構造形式が関係する。また、規模とは設備の絶対寸法（たとえば、流量調節断面の幅と高さ）のことである。

ダム放流設備の形式、規模は最終的には、個々のダム貯水池固有の諸条件（たとえば、ダム堤体の構造特性、ダム地点の河道特性、貯水池の使用計画、流域の出水特性など）によって決定されるべき性格のものであり、これを一般的な選定問題として議論することには非常な困難さをともなうので、ここでは、形式・規模の選定を行う前提となる考え方についてのみ議論の対象としている。

ダム放流設備の形式、規模の選定は、ダム貯水池の貯留特性、流域の出水特性、ダム堤体の構造特性、ダム地点の河道特性、貯水池の使用計画、流域の出水特性などによって決定されるべき性格のものであり、これを一般的な選定問題として議論することには非常な困難さをともなうので、ここでは、形式・規模の選定を行う前提となる考え方についてのみ議論の対象としている。

2. 問題の背景

ダム放流設備の形式選定は、ダムに付随した問題であるから、すでにわが国においても数十年以上の歴史を有しており決して新しい問題ではない。洪水調節用ダムに関してもすでに30年前後の経験の積重ねがあり、そのイメージがほぼ固定化しつつあることも事実である。しかし、最近のダムをとりまく環境の変化ならびに技術の革新によって、このような古典に属する問題が昨今またいろいろと話題となり、問題となる場合も少なくない。

それにはいろいろな理由を挙げることができるが、大別すれば次の3つの理由にまとめられる。

1. フィルダムの増加に対処するために、ダムの最大放流能力ならびにその洪水処理方法の再検討が必要になったこと。

フィルダムは、周知のように堤体越流は堤体材料の流出すなわち堤体破壊に直結する恐れが大きく、洪水に対する耐久性はコンクリートダムに比べて著しく小さいと考えられている。このため、フィルダムの放流設備は異常に大きな洪水が生じても水位をダムの非越流部の高さより低いある限度以下に常に収めるだけの能力が要求される。

戦後わが国の洪水調節用ダムは、この異常洪水時における耐久性の不足を懸念してコンクリートダムを主体としてダム事業を進めて来た。しかし、最近ではコンクリートダムとしての基礎地盤に適さない地点に対してもダム建設の要請が大きく、フィルダムを回避することが不可能な状況になっている。そこで、ダムの最大放流能力の再検討がまず必要となった。

コンクリートダム主体の時代では、コンクリートダムの設計流量は、主として100年確率洪水流量を設計洪水流量とし、この2割増しの流量を異常洪水流量として、フィルダムではいずれもこの1.2倍の流量を設計流量としてダムの放流設備の放流能力を検討することとなっていた。しかし、この設計基準値は統計的にみても小さすぎるものが指摘でき、フィルダムに対しては特に問題があることが懸念され、設計流量に対する考え方ならびにその基準値の設定方法について各種の調査研究が集中的に実施された。^{1), 2), 3), 4), 5)}

昭和51年に制定された河川管理施設等構造令では、ダムの設計流量と次のように規定している。

- (1) 「河川管理施設等構造令⁶⁾」とは、河川法第13条(河川管理施設等の構造の基準)第2項の規定により、河川管理施設や河川法第26条の許可を受けて設置される工作物のうち、ダム、堤防その他主要なものの構造について河川管理上必要とされる一般的・技術的基準を定めた政令である。主要な河川管理施設としては、ダム、堤防、床止め、堰、水門及び樋門、揚水機場、排水機場、取水塔、橋ならびに伏せ越しまでが考えられており、治水上の影響が小さいものや設置される事例が少ないものは対象となっていない。

なお、河川管理施設等構造令(昭和51年第199号)には、これを補完する河川管理施設等構造

令施行規則（昭和51年建設省令第13号）ならびに施行、運用について述べた河川管理施設等構造令及び同令施行規則の施行について（昭和51年河川局長通達）、同運用について（昭和52年、水政、開発課長通達）などがある。」

構造令では、ダムの保安上対象とする洪水流量を「ダム設計洪水流量」と呼び、この流量がダム放流設備を流下するときの貯水池水位を「設計洪水位」と呼んでいる。このダム設計洪水流量および設計洪水位は、ダム地点を流下する洪水に関して保安上想定される最大の設計基本量と定義され、ダム設計では、設計洪水位はダム堤体の安定計算、非越流部の高さの決定、ダム設計洪水流量はダム放流設備の放流能力の決定のために使用することとしている。

コンクリートダムのダム設計洪水流量は、

- (1) ダム地点において200年につき1回の割合で発生するものと予想される洪水流量
- (2) ダム地点の既往最大洪水流量
- (3) ダム地点の流域と水象もしくは気象が類似する流域で発生した既往最大の水象の観測資料よりダム地点に発生すると客観的に認められる洪水流量

のうちいずれか最大の流量を採用することとしている。また、フィルダムでは、コンクリートダムの設計洪水量の1.2倍の流量をダム設計洪水流量とすることとしている。

構造令で示される算出方法は、政令としての性格上技術的には従前の方法を踏襲しつつ合理的な最大流量を定めるように配慮したものであって、既往の洪水に関する観測資料を基礎として求め得る最大の流量を考えている。

わが国においては、100年確率洪水流量の1.2倍の流量と200年確率洪水流量とはほぼ同一の値となることから⁷⁾、数値的には、従前の異常洪水流量と構造令のダム設計洪水流量(1)とは一致するものと考えてよい。したがって(1)および(2)は従前と同一のものであり、(3)についても従前の基準において近傍類似河川を参考にすることが明記されており、構造令で新たに設けられたわけではない。しかし、構造令では、従前の取扱いでは異常洪水流量として設計のチェックに用いられていた基準量をダム設計洪水流量と設計の基本量に格上げしたこと、ならびに(3)の取扱いにおいて近傍類似、河川の設定をさらに厳密に実施すべきであることを強調している点が大きく異なっている。

この(3)に示す洪水流量の算定方法として、水政、開発課長通達では土木研究所旧ダム水理研究室で調査研究された地域別比流量図により求められる流量を基準値とすることが述べられている。

地域別比流量図は全国を水象および気象の類似する地域に区分し、地域ごとに既往最大洪水時の比流量—流域面積資料をプロットし、これらを包絡する曲線を描いたもので、Creager, Justin および Hinds の共著による高名な図書“Engineering for Dams”に示される曲線と類似の曲線を使用しているため、クリーガ曲線図とも呼ばれている。

全国は、水象および気象の類似する地域として11地域（北海道、東北、関東、北陸、中部、近

畿、紀伊南部、山陰、瀬戸内、四国南部、九州および沖縄)に区分され、この地域内では同一の曲線を使用することとしており、従前の近傍類似河川の適用例に比べれば地域は大幅に拡大されることになりそれだけ求められる流量の最大流量としての信頼度は増大するものと考えられている。

地域別比流量の値は次式で求められる。

$$q = CA^{\alpha} \quad \alpha = A^{-0.05} - 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに q は比流量 ($m^3/s \cdot km^2$)、 A は流域面積 (km^2)、 C は地域係数であり、表-1 に示される。また、地域別比流量図ならびに地域区分図は図-1 および 2 に示される。

この地域別比流量図は既設の各ダムの洪水観測資料を収集し取りまとめられたもので、河川における洪水のピーク流量とは異なり、ある時間内の平均的な洪水ピーク流量の観測記録によるものである。これは、ダムにおいて観測される洪水流量とは次式で求められる値だからである。

$$\bar{Q}_{in} = \bar{Q}_{out} + \Delta V / \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\bar{Q}_{in}$ は貯水池流入量 (m^3/s)、 $\bar{Q}_{out}$ はダム放流量 (m^3/s)、 ΔV は ΔT 時間 (sec) 内の貯留量の変化量 (m^3) であり、 ΔT としては通常30分間前後の値とされる。

したがって、地域別比流量図の基礎となった流量資料は時間的流量であり、瞬間的な洪水ピークの流量ではない。しかし、ダムの場合には、貯水池流入量に対しては貯水池の貯留効果に関係してくるため、放流設備に適切な配慮を加えれば、瞬間的なピーク流量は必ずしも必要としないことになり、この地域別比流量図で十分対応できることになる。

ただ、このような性格の基礎資料であるため、流域面積が小さい場合の資料が欠除しており、地域別比流量図の適用は流域面積が $20km^2$ 以上に限られている。⁸⁾

流域面積の小さいダムにおけるダム設計洪水流量の算定法ならびに設計洪水位の合理的決定法については、現在土木研究所水資源開発研究室において鋭意研究が進められている。

ダム設計洪水流量流下時の貯水池水位である設計洪水位については、構造令では貯留効果を考慮して決定してもよいことが示されているが貯留効果を考慮してダムの放流能力をダム設計洪水流量より小さくするに十分な水文資料がまだ整っていないことから、運用上はこの貯留効果は積極的に認めないこととしている。これは、ダム設計洪水流量の洪水処理に関する問題であり、ダム放流設備の形式選定問題において昨今再検討の対象となったもう1つの問題でもある。

わが国のダム放流設備は、貯水池を有効に利用するために、いずれもゲート等の調節構造物を有する放流設備が大部分を占めている。すなわち、ゲート等を閉じることによって貯水池の貯留効果を増し、これらを開けるとによってダムの放流能力を確保しようとするダム設計が主体をなしてきた。このダム設計では、ゲートの開閉によりダムの放流能力すなわち極限では、ダムの

表-1 地域別比流量値

比流量曲線式 $q = C \cdot A^{(A^{-0.05}-1)}$

q : 比流量 ($m^3/sec/km^2$) A : 集水面積 (km^2) C : 地域係数

地 域	地域係数 C	適 用 地 域
① 北 海 道	17	北海道全域
② 東 北	34	青森・岩手・宮城・秋田・山形・福島(阿賀野川流域を除く。)の各県
③ 関 東	48	茨城・栃木・群馬(信濃川流域を除く。）・埼玉・東京・千葉・神奈川の各都県, 山梨県のうち多摩川, 相模川流域及び静岡県のうち酒匂川流域
④ 北 陸	43	新潟・富山・石川の各県, 福島県のうち阿賀野川流域, 群馬県のうち信濃川流域, 長野県のうち信濃川・姫川流域, 岐阜県のうち神通川・庄川流域及び福井県のうち九頭竜川流域以北の地域
⑤ 中 部	44	山梨県及び静岡県のうち③に属する地域を除く地域, 長野県及び岐阜県のうち④に属する地域を除く地域, 愛知県及び三重県(淀川流域及び滝田川流域以南の地域を除く。)
⑥ 近 畿	41	滋賀県, 京都府のうち淀川流域, 大阪府, 奈良県のうち淀川流域及び大和川流域, 三重県のうち淀川流域及び兵庫県のうち神戸市以東の地域
⑦ 紀伊南部	80	三重県のうち滝田川流域以南の地域, 奈良県のうち⑥に属する地域を除く地域及び和歌山県
⑧ 山 陰	44	福井県のうち④に属する地域を除く地域, 京都府のうち⑥に属する地域を除く地域, 兵庫県のうち日本海に河口を有する流域の地域, 鳥取, 島根の各県, 広島県のうち江の川流域及び山口県のうち佐波川流域以西の地域
⑨ 瀬 戸 内	37	兵庫県のうち⑥及び⑧に属する地域を除く地域, 岡山県, 広島県及び山口県のうち⑧に属する地域を除く地域, 香川県, 愛媛県のうち⑩に属する地域を除く地域
⑩ 四 国 南 部	84	徳島県, 高知県, 愛媛県のうち吉野川・仁淀川流域及び肱川流域以南の地域
⑪ 九州・沖縄	56	九州各県及び沖縄県

(注) 地域④のうち長野県に属する信濃川流域及び地域⑤のうち長野県に属する天竜川流域については, 当該地域の地域係数Cを35以上とすることができる。

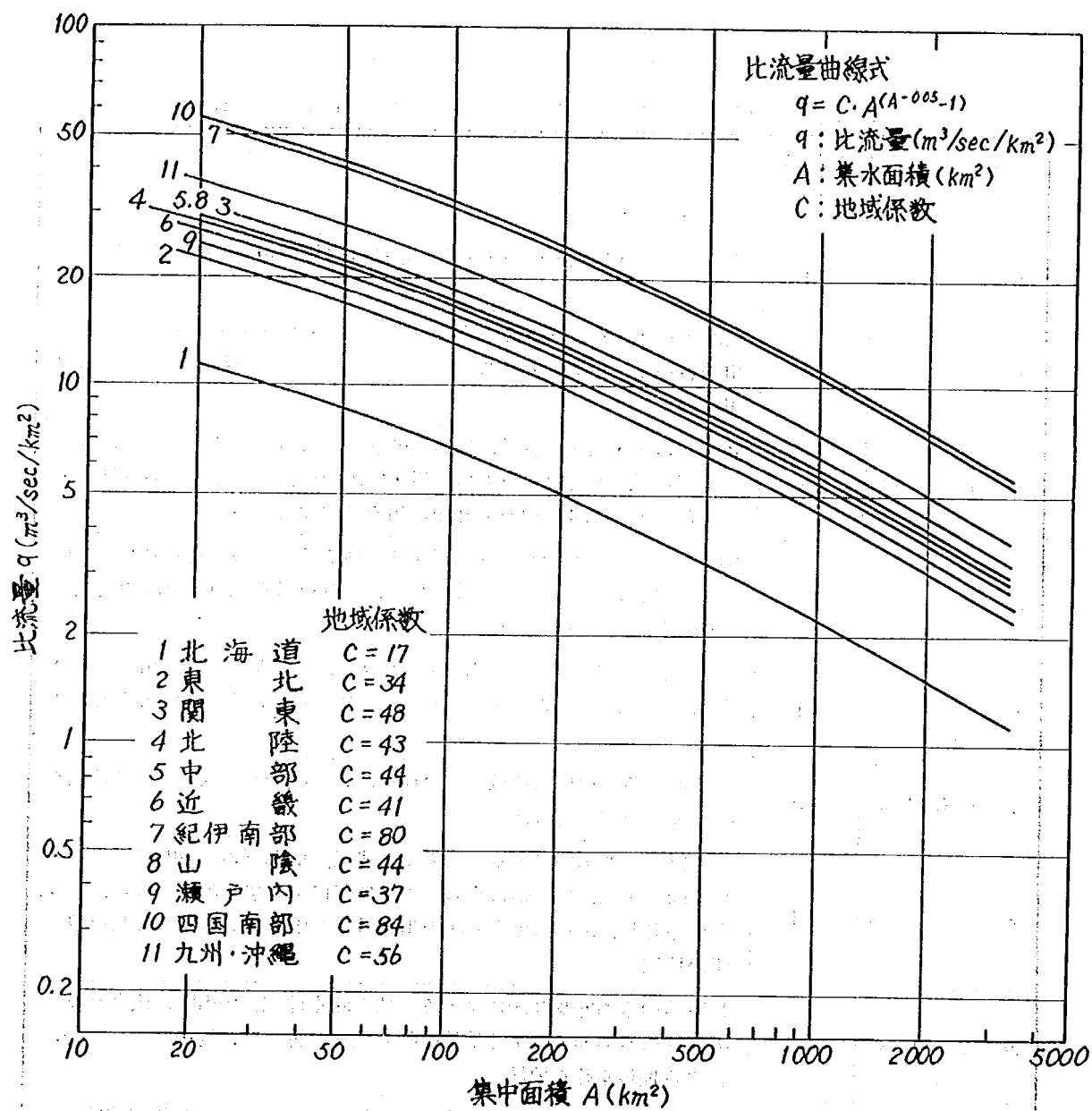


図-1 地域別比流量図

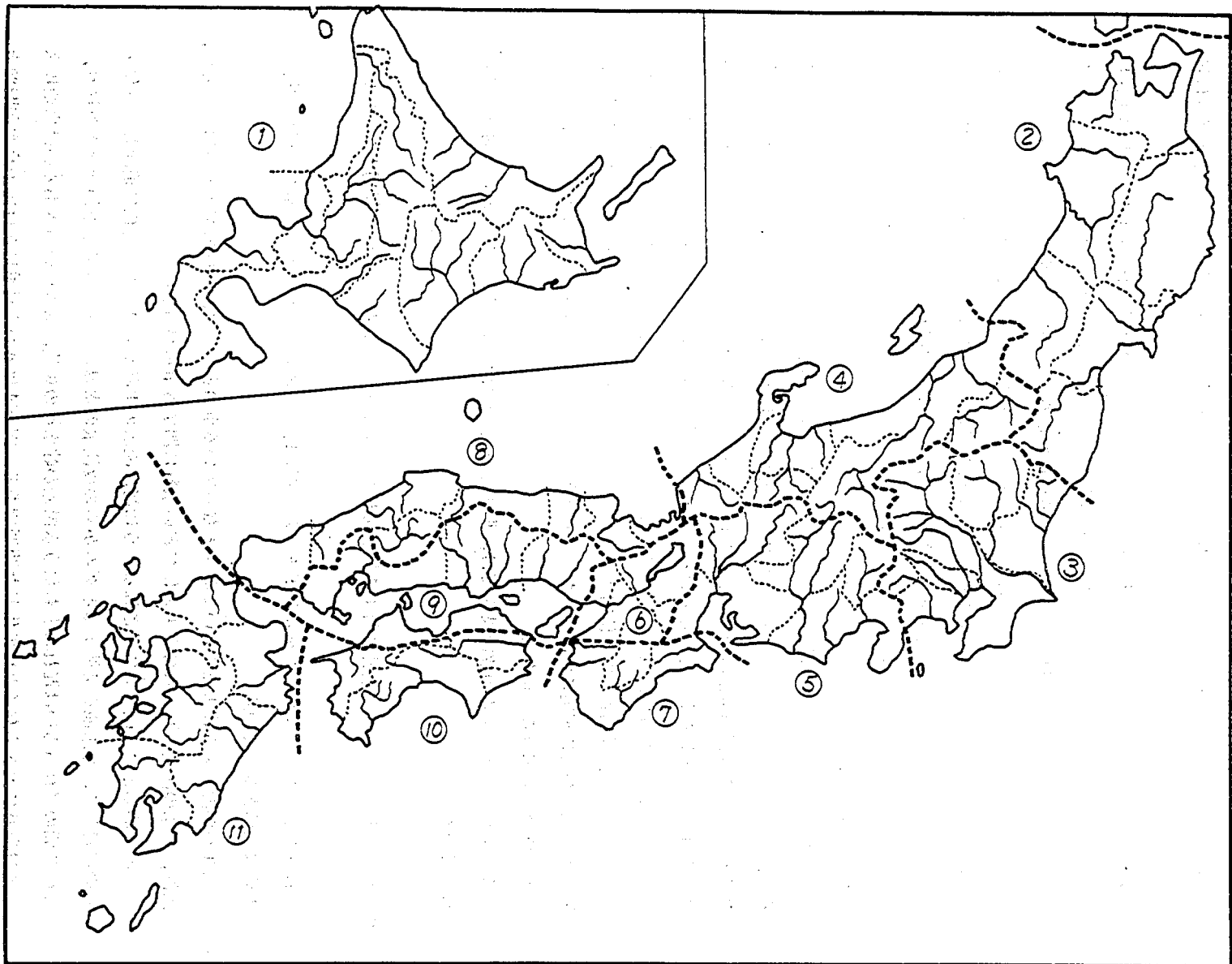


图-2 比流量地域区分图

洪水に対する安全性が左右されることになり、この規模ならびにその限界が特にフィルダムに対して問題になったわけである。

また、フィルダムでは構造令で堤体に放流設備やその他の水路構造物を設けることが禁止されている。⁹⁾ これはフィルダムの堤体内に堤体を横断してコンクリート構造物等、フィルダムの堤体材料と弾性係数の異なる材料から形成される構造物があると堤体の不等沈下や地震時の振動に対する応答の相違等によって構造物に対して予期しない外力が働き、破壊や損傷を生じること、堤体内に埋設された構造物が水路であるときは水路が破壊または損傷してその周辺の堤体にダムの貯留水が漏水し堤体材料の性状を変化させたり、また水路が使用できないため貯水池水位を調節することができず堤体からの越流等不測の事態を生ぜしめること¹⁰⁾ など不測の災害を防止するためとされている。

このため、フィルダムの放流設備はすべて分離型となり基礎地盤上に直接設けられることになるが、実際には設置するスペースを確保することが非常に困難な場合が多く、特に山腹斜面が急峻である場合には掘削量が激増するとともに完成後も長大な掘削斜面を残すことになり、フィルダム設計上最も困難な問題となっている。この対策として放流設備の規模をできるかぎりコンパクトに収めることが設備配置上の困難さを緩和し工費の節減に結びつくことになるため、深いゲートを有する放流設備として単位幅当りの流量をできるかぎり大きくすることが有利になるが、ゲートの操作が常に確実に保障されないと放流能力が効果的に生かされないことになり、フィルダムの安全性を損うことになる。

このようにフィルダムの放流設備では、形式と規模の選定に対してとくに厳密な検討が必要になっている。

2. 貯留水および放流水の水質に対する社会の関心が高まり、その保全が重要な課題となっていること。

自然開発において環境の保全が前提とされ、ダム貯水池においても流水の正常な機能の維持が重要な課題となっている。

現在わが国のダム貯水池において問題となっている事項としては、水量に関する事項とともに、水温、流水の濁度、貯留水の富栄養化などの水質に関する事項がある。

水温の問題とは、図-3に示されるように河川流水の水温が気温の季節変化に追随して変化するのに対して、貯水池を築造するとダムからの放流水の水温の変化が気温の季節変化より遅れ、この時間の遅れあるいは遅れにともなう水温差が貯水池の規模、取水口の高さあるいは構造によっては非常に大きくなるために生じた問題である。図-4は春から夏季にかけての冷水が問題となったダム貯水池の典型的な事例であって、貯水池の流入水温（自然河川の流水の水温）に比べて放流水温の上昇の遅れが明らかであり、かつ冬季には水温が高く維持されることがわかる。

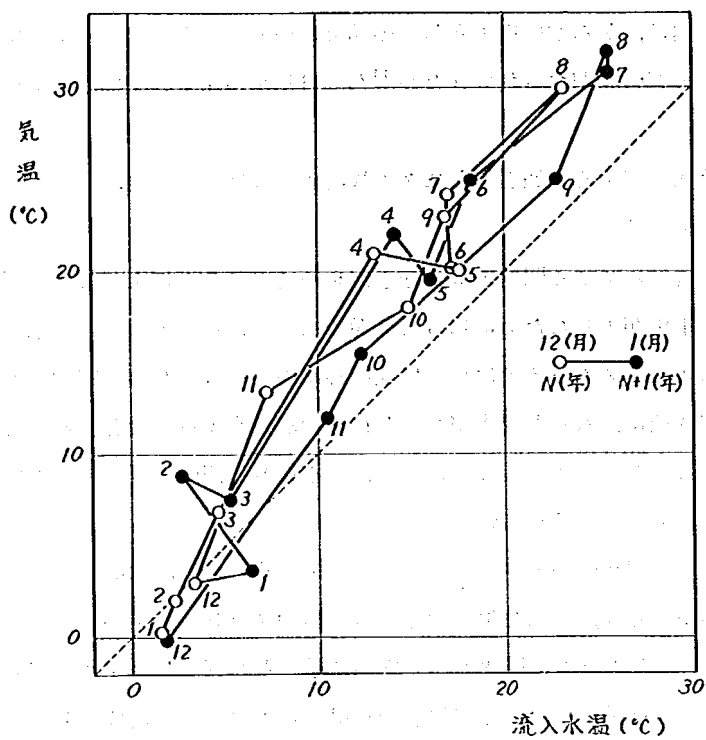


図-3 気温と流入水温の変化

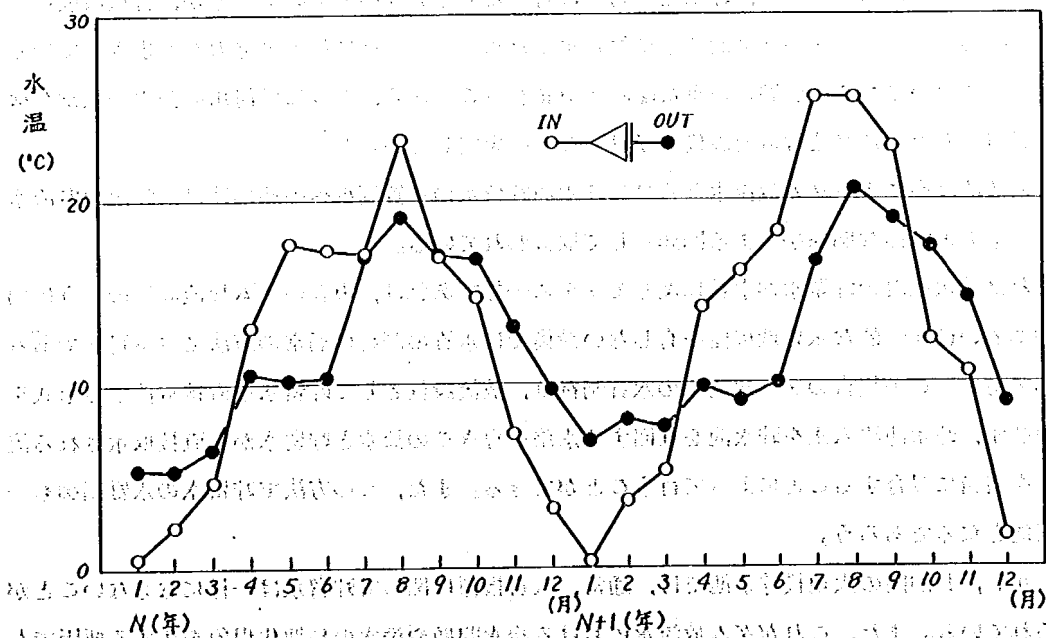


図-4 流入水温と放流水温の年変化

この水温に関する問題は、かんがい用水としての効果に係る問題として古くより関心がもたれ、過去においても十分な調査研究がなされてきたが¹¹⁾、自然環境保全の立場から最近再び注目されている事項でもある。

この水温すなわち冷水に関する問題とともにダム放流水の濁度、貯水池貯留水の富栄養化ともなう問題も注目されている。

ダムからの放流水の濁度に関する問題とは、貯水池を築造することによってダム下流の流水の濁度が従前より高まる事例が生じたために起った問題であって、現象としては洪水時の濁水を貯水池に貯留することによってダム下流では長期に連続した現象となるための問題である。

これは、洪水時に貯水池に流入した濁水が微細な粒子の濁質を多量に含有する場合には、濁質は貯水池内で沈降することなく滞留することになり、洪水後も長期間に亘って徐々にダム下流に流出するために生じるものと考えられている。

これらの問題とともに、現在問題とされる貯水池の富栄養化とは、貯水池内に流入した窒素やリンなどの栄養塩類が蓄積され、これを栄養源とする動植物プランクトンが異常に増殖し結果として水色の変化や臭気の発生とともに貯水池の生態系に重大な影響を及ぼす問題でもある。

濁水の長期化や貯留水の富栄養化は、都市用水の利用上重大な影響を及ぼす要素であり決して新しい問題ではないが¹²⁾、水温の問題と同様にさらに広義の環境保全の立場から最近大きくとりあげられている問題である。

貯水池におけるこれらの水質の変化は河川流水を平滑化するために一時的に貯留（停留）させた結果生ずる副作用であって、貯水池の効能に対する宿命的性格のものであるが、自然環境に及ぼす無限の影響を考えかつ社会的要請に対処するためにこの制御に最大の努力が要求されている。

構造令においてもこの問題に慎重な配慮が望まれることから、ダムには河川の流水の正常な機能を維持するために必要な放流設備を設けることを規定している¹³⁾。

ダム放流設備によるダム放流水ならびに貯水池貯留水の水質制御への適応性は、貯水池内流水の流動形態と密接な関係を有する問題として取扱われている。

これは貯水池内の貯留水が水質に関して完全に一様であれば、現在のダム放流設備のように物理的あるいは化学的な水処理機能を有しない設備では水質の制御は通常の方法では不可能であるからである。この場合のダム放流水の水質制御は、放流設備として貯留水を直接放流する形式を採用せず、貯水池流入水を貯水池を迂回する水路に導きこの流水と貯留水から直接取水される流水とを適当に混合することによって行うことができる。また、この方法で貯留水の水質制御も一部可能となるであろう。

しかし、わが国の大規模貯水池では、通常、水質指標に関して貯留水は一様にならないことが知られている。また、これがダム放流水における冷水問題や濁水の長期化現象を生ずる要因でもある。

わが国では、日射量が季節変化し、気温の年間変化が規則的であって、前述の図-3に示すように河川流水の水温もこれに追従した変化を示し水温は春から夏季にかけて上昇し、秋から冬季にかけて低下する。また、水の物性として、水温が4℃以上の領域では水の密度は水温の上昇にしたがい減少するので、季節変化により生じた水温の異なる流水を混合させることなく貯留して行けば、貯留水には水温差により生じた密度差に起因する浮力が相互に作用するため、表層には水温が高く深くなるにしたがって水温が低下する水温分布が形成されることになる。

これは、流入のない湖沼等の停留水域において気温の季節変化のみによってさらに明瞭にみられる現象でもある。ただ、ダム貯水池においては貯水容量に比べて流入流出の占める割合が大きいため、貯留水が入れ換えることも考えられこの程度によって現象の強さが左右されることが容易に想像できるであろう。

貯留水に密度差を生じさせる要素には、水温以外にも水中に含まれる物質の濃度も関係する。しかし、貯水池で水質上最も問題となる濁水の場合でも、濁質の比重を2.65として10°~20°の水温では濁度約250 ppmが水温1℃に相当することになり極度の高濁水である場合を除き通常は水温が支配的となる。¹⁴⁾

このようにダム貯水池には水温分布が形成されるための境界条件を有しているが、貯水池内において流水が混合されることなく安定した分布を形成するためには流出量に対して貯水池の貯留量の占める比重が十分大きく流入ならびに流出に関して池内の密度分布が破壊されないことならびに貯留に関して外的条件すなわち主として水表面における日射ならびに気温の条件が密度分布の形成維持の条件を満たすことが必要になる。

貯留に関する外部の条件としては、貯水池底面と水表面とが対象となるが、貯水池底面と貯留水との間には顕著な熱量の移動が生ずることは考えにくいことから、貯水池水表面における熱量の授受のみが検討の対象となる。この場合、貯水池水表面の貯留水が熱量を受け水温を上昇させる方向に働くときには池内の水温分布をさらに安定化させ、この逆に熱量を放出し、水温を下降させる方向に働くときには池内の水温分布を弱める結果となることが想像できる。

図-5は貯水池水表面上の気温と水表面の水温との関係を描いたものである。この関係では、気温の日変化ならびにそれに追従する水表面の水温変化が含まれるため観測時刻の影響が大きく熱量授受の平均的挙動が明確でない。そこで、日射の平均的挙動を表わす指標としては貯水池に流入する水温を選び、貯水池側の指標としては水表面下10mの表層内部の水温を選んで両者の関係を図示してみた。図-6はこの関係を表わしたものである。この関係図においては受熱と放熱の区分がかなり明瞭になり、図示される貯水池では、水表面下10mの断面は4~8月が受熱側に9~3月が放熱側に区分されることがわかる。

わが国のダム貯水池は、通常このような過程をたどり、受熱期と放熱期とが交互に繰り返すのが通例となっている。

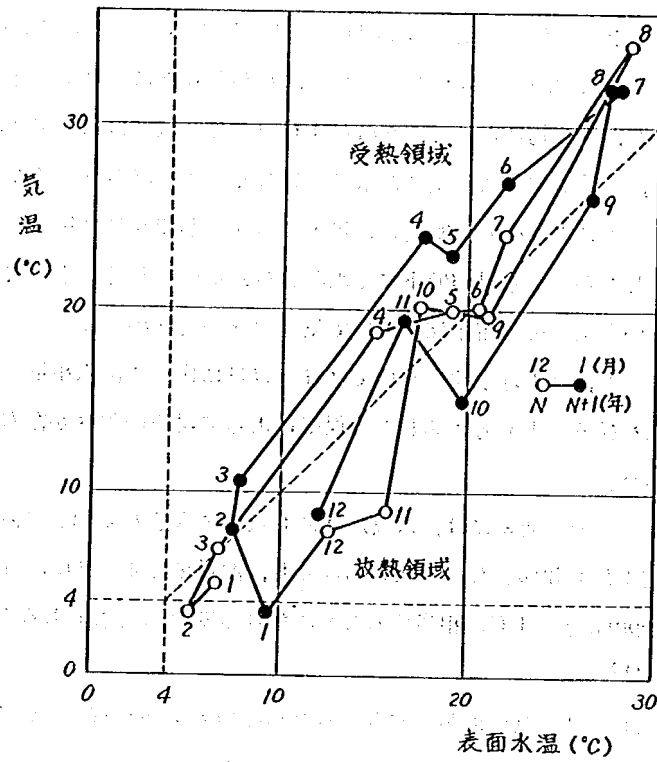


図-5 気温と表面水温の関係 ($\alpha(N) = 2.16$ $\alpha(N+1) = 1.30$)

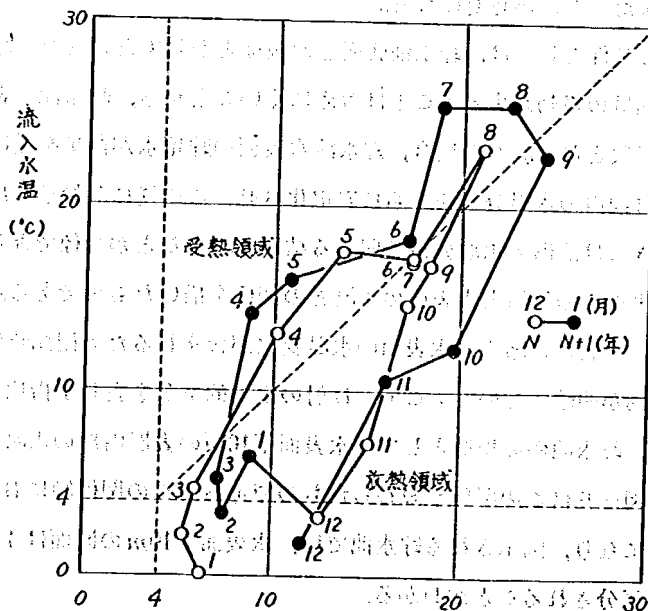


図-6 流入水温と水面下10mの水温の関係 ($\alpha(N)$, $\alpha(N+1)$ は図-5 と同じ) 無放

貯水池内の流水が混合される程度を表わす指標としては、一般に貯水池内流水の入れ換りの度合（回転率）を利用することが多い。¹⁵⁾ 貯水池内流水の回転率とは貯水池流入量と貯水池の容量の比で表わされ、流入量として年間総流入量を対象とする次の α を用いる場合には、

$$\alpha = \text{年間総流入量} (\Sigma Q_T) / \text{総貯水容量} (V_T)$$

α の値が30以上では、混合現象が卓越し、 α の値が10以下では流水がほとんど混合されないことがダム貯水池の実態調査より明らかにされている。また、 α の値が10～30の領域では、この中間的な混合の度合を示すものとされている。一般に $\alpha \geq 30$ の貯水池は混合型貯水池と呼ばれ、 $\alpha \leq 10$ は成層型、 $10 < \alpha < 30$ は中間貯水池と呼ばれる。¹⁶⁾

図-7はこの成層型貯水池の鉛直方向水温分布の月別変化を図示したものである。この図より明らかなように成層型貯水池では、水温分布は受熱期前期より水表面から徐々に形成され受熱期後期には最も水温勾配の大きい水温分布を示すようになる。

放熱期に入ると水温分布は水表面から徐々に破壊され一様化し、放熱期後期にはほとんど一般的な水温分布となることがわかる。また、最も安定した水温分布を示すのは、受熱期後期から放熱期前期にかけての期間となる。

受熱期中期から放熱期前期までの成層型貯水池では鉛直方向に安定した水温分布が形成されるから、貯水池流入水はその水温に応じてある高さに混合されることなく層状に貯留されることになる。したがって、水温を媒介とする選択放流を行うことによって、水量とともにその層に含ま

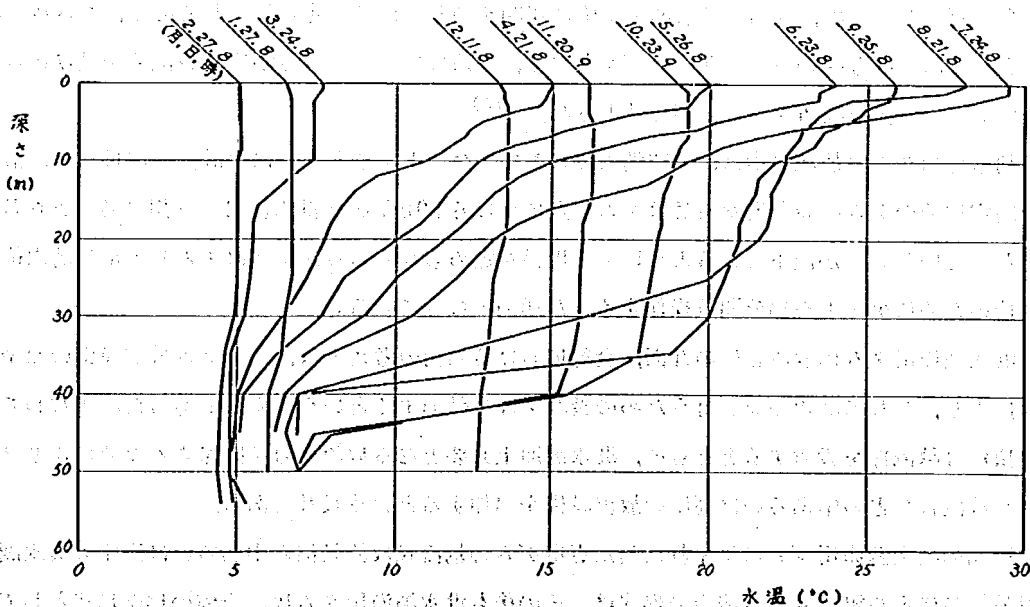


図-7 貯水池水深方向水温分布 ($\alpha = 4.79$)

れる水質指標さえも制御することが可能となる。また、同時に貯水池内の水温分布の形状を任意に操作することも可能となる。

したがって、受熱期中期から放熱期前期にかけての成層型貯水池においてダム放流設備に水質制御も含めて行わせるためには、取水層を任意に操作できる機能を具備させることが必要になる。また、任意に操作することが不可能であってもその設置される高さが、その状態において表層、中層あるいは底層のいずれに属するかによって水質制御をある程度行うことが可能となる。構造令で義務づけられる流水の正常な機能を維持するための放流設備として、成層型貯水池ではこの対策が有効であり、ダム放流設備の結式、規模の選定問題に新たに加わった要素である。

しかし、この対策が有効になるのは、受熱期中期から放熱期前期にかけての成層型貯水池に限定され、放熱期後期から受熱期にかけての成層型貯水池や混合型貯水池では効果がない。この場合、混合型貯水池では、貯留水の回転が早いのが特徴であるからダム貯水池に起因する水質問題は生じにくく環境保全上問題は少ないが、成層型貯水池ではダム貯水池の影響が継続することとなるので前述の貯水池内水質が一様な場合に考えられる対策を含め、適当な対応策の開発が必要になっている。

3. ダム管理の経験より形式、規模の選定に対して新たな問題が提起されていること。

洪水調節用ダムの放流設備の原型は、洪水調節用ダム築造以前にすでに多くの高ダムの実績のあった利水専用ダム、とくに発電専用ダムの放流設備であった。

発電専用ダムでは、性格上貯水池の水位は年間を通してほぼ一定に保たれるので、ダム放流設備としては水深方向の設計条件はほとんどなく、堤頂にできるかぎり幅広く越流部を設け比較的浅いゲートを多数設置する形式が標準とされた。¹⁷⁾

利水専用ダムの放流設備は、常時満水位においてゲートを全開すれば設計洪水流量（注、構造令制定以前のダムの設計洪水流量はダム地点における100年確率洪水流量を採用することが基準となっていた。）が流下できるようにその規模が定められており、常時は主として常時満水位の維持のためにゲートを部分開放操作するのが通例となっている。

洪水調節用ダムの放流設備の計画、設計における当初の考え方は、このダム放流設備の原型を前提とし、これに洪水調節を行うための設計条件を付加するという考え方であった。すなわち、堤頂には越流部を設置するとともに、洪水調節上必要となる放流能力を確保するためにオリフィスや放流管などの中あるいは高圧の放流設備を追加するという設計である。

初期の洪水調節用ダムに生まれた利水専用ダムの越流式放流設備と中あるいは高圧の洪水調節用放流設備とを組合せる放流設備形式は、その後も洪水調節用ダム放流設備の標準形式として採用されているが、その間には越流式放流設備を基本とし、洪水調節用放流設備を追加するという考え方から洪水調節用放流設備を主あるいは常用とし、越流式を非常用とする考え方によって

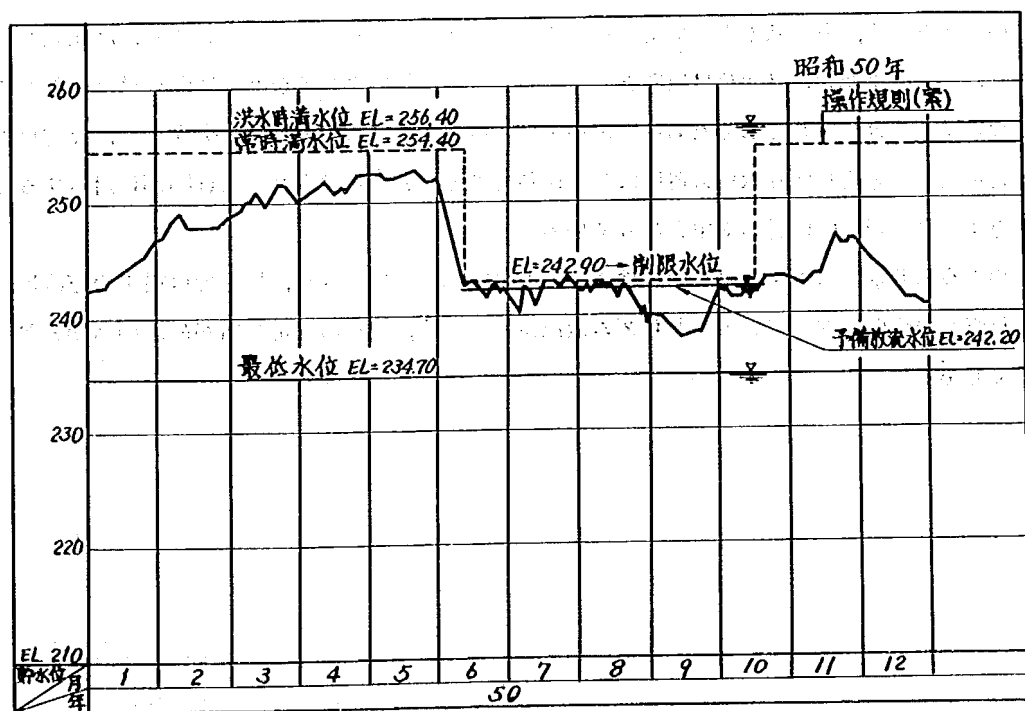
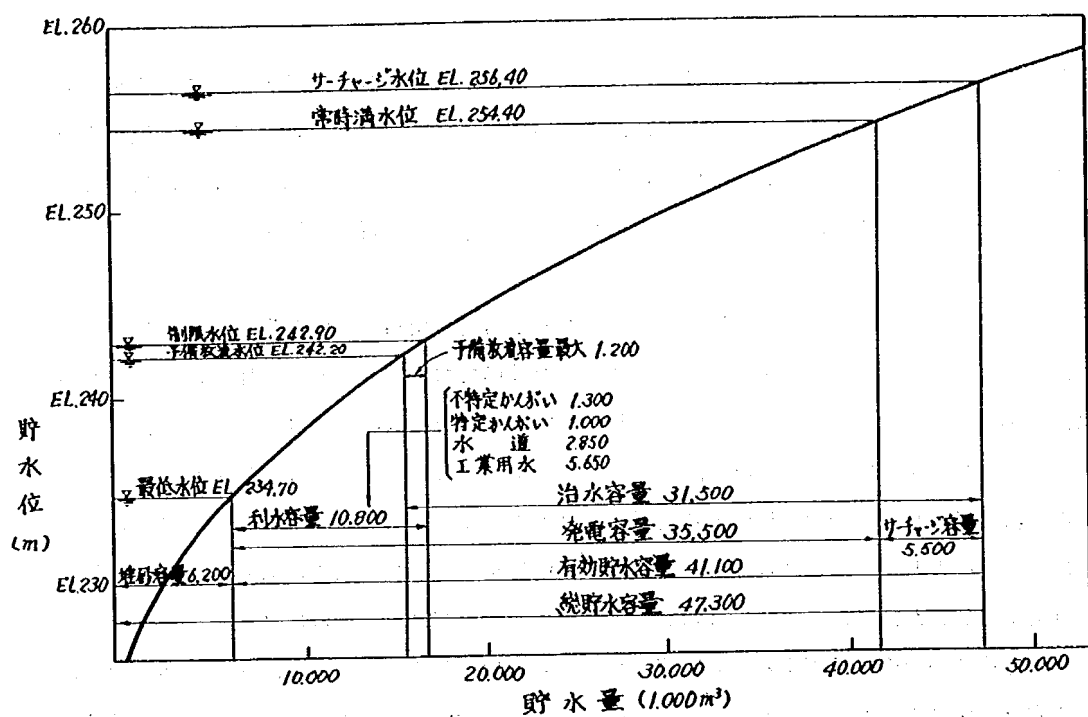


図-8 多目的ダム貯水池の事例

きている。

また、この間には、ゲート等の放流設備の技術に著しい進展があり、大形ゲートや高圧ゲートがかなり自由に採用できるようになったため、放流設備は経済的に有利な設計である大規模集約化あるいは高圧大型化が極度に進んだ状況にある。計画、設計における常用、非常用に対する見方はダム管理にまで波及し、高圧大型放流設備を常用とし、大規模越流式放流設備を非常用とする場合も少なくない。

このような放流設備の構成は、当然のことではあるが常時の使用上問題を生ずることになる。これはいずれの場合においても小流量の放流に適した設備でない点である。高圧放流設備においては、微小開度の放流はゲートの機構上好ましくないし、大規模放流設備は小流量の制御に適した設備といえないからである。これは、たとえば放流量の制御に例をとれば、放流量の設定誤差はその放流設備の全放流能力に比例すると考えられることから、対象とする流量が小さくなればなるほど誤差をとまうことになり、常時かなりの精度を要求される放流に対しては問題を生ずるわけである。また、最近のように自動制御により放流量を制御する場合には、ソフトとハードの要求する精度の相違に起因するさらに深刻な問題も提起されている。また、ダム堤体の流水に対する安全を保障するための設備として大規模越流式放流設備とくに大型ゲートの洪水時における操作性の問題も指摘されている。

このような指摘を踏まえて、最近では常時と洪水時のバランスを欠いた大は小を兼ねるとする設計の考え方から、小を基本として積み重ねてゆく考え方に変わりつつある。また、洪水調節用ダムでは、非洪水期間には水位は原則として常時満水位に維持されるが洪水期間には洪水調節に必要な容量を空容量としておくために水位を下げ待機する制限水位方式の例が多く、発電専用ダムとの対比で考えれば貯水池の運用は二重構造であることも認識され、水質問題に対処するための方策も含め新しい検討の対象となっている。

このように洪水調節用ダムの管理経験より多くの問題点が指摘され、最近では従来の方法に対して見直しの時期になっていることもダム放流設備の形式、規模の選定問題が最近の話題となる一因でもある。

3. ダム放流設備に要求される機能

ダム放流設備に要求される機能は、大別して次の3つに分類できる。すなわち、

1. ダム貯水池築造後の河道の機能を維持するための機能
2. ダム堤体の安全を保障するための保護装置としての機能
3. ダム貯水池の貯留水あるいは貯留機能を適正に運用するために必要となる機能

である。

ダム貯水池築造後の河道の機能を維持するための機能とは、構造令において設置が義務づけられる河川の流水の正常な機能が維持できるように設備が構成され、ダムからの放流は常にこの条件を満たすように行われることが必要になる。また、このためには、貯水池に貯留される流水に対しても適切な制御が必要になる。

なお、ここで規定される河川の流水の正常な機能とは、ダム貯水池築造前の河道が有していた機能のことであり、現在、ダム放流設備の計画、設計においては、水量と水質に着目した取扱いがなされている。したがって、具体的には、前述の貯水池内流水の流動形態に関する特性を活用し、これを人為的に調節しうる設備の構成を考えることが要点となる。

ダム堤体の安全を保障するための保護装置としての機能とは、構造令において設置が義務づけられる洪水吐きの機能¹⁸⁾とフィルダムに義務づけられる貯水位低下用放流設備の機能¹⁹⁾のことである。

洪水吐きの機能とは、ダム設計洪水流量以下の流水を設計洪水位以下の水位において安全に流下させることができる機能のことであり、その構造はダムの堤体、基礎地盤および貯水池に支障を及ぼさない構造とすることが条件とされる。なお、ここで流下させることができる機能としては設計水位における放流能力としてダム設計洪水流量をこえる放流能力が確保されるだけでは不十分であり、ゲート等の調節構造物を有する放流設備を採用する場合には、これらのゲートが的確に操作され、ダム設計洪水流量を放流することができる状態が常に円滑に確保されることが必要とされる。

貯水池水位低下用放流設備はとくにフィルダムに対して設置が義務づけられる機能であり、堤体の点検、補修等のために必要となる機能と説明される。

フィルダムでは堤体からの漏水は、常に堤体材料の流出を招く恐れがあり、過大な漏水の発生は堤体の破壊につながる危険を有している。このため、フィルダムの設計、施工では、この漏水防止のために十分な対策がなされかつ、入念な施工がなされるが不測の事態として異常な漏水が生じた場合には貯水池の水位を低下させることが堤体の安全性を増し、かつ、漏水箇所からの流出を緩和し、被害を最小限にとどめることになるので、できるだけ低い標高に貯水位を低下させることができる放流設備を設置することがダム堤体の保護装置として必要とされる。とくに、表面しゃ水壁型フィルダムでは、堤体の沈下等のためにしゃ水壁にクラックを生じることがあるので、この機能を

有する放流設備を設けて補修可能な体制を準備しておくことが必要とされている。

貯水位低下用放流設備として必要とする機能は、貯水池の規模、流域の特性等を考慮して決定すべき事項とされているが、一般には、常時満水位から貯水池運用計画上の最低水位までを表面しゃ水壁型フィルダムでは約4日間程度で、その他の型式のフィルダムでは7～10日間程度で水位を低下できる機能が標準とされている。²⁰⁾

貯水池の貯留水あるいは貯留機能を適正に運用するために必要となる機能とは、ダム貯水池を使用計画にしたがって適正に管理するために必要となる機能のことであり、具体的にはダム貯水池の維持、管理を定めた操作規則に示される放流が確実に実施できる機能に要約される。

ダム貯水池の操作規則とは、(1)洪水期、かんがい期等の別を考慮して定める各期間における最高および最低の水位ならびに貯留および放流の方法、(2)多目的ダム本体および操作に必要な機械器具等の点検および整備、多目的ダムを操作するために必要な気象および水象の観測ならびに放流の際にとるべき措置に関する事項、(3)その他多目的ダムの操作に関し必要な事項、について規定したものである。²¹⁾

この操作規則は、ダム貯水池ごとに定められるので、これを一括して説明することは多くの例外をとめない適当ではないが、この標準的な様式を定めた標準操作規則により、その概要を知ることができる。

標準操作規則は、洪水調節、かんがい、水道用水、工業用水および発電を目的とする多目的ダムを対象とし、洪水調節容量の確保は、サーチャージ、制限水位および予備放流を併用する場合を想定して作成されている。

なお、この標準操作規則の対象とする事例は多目的ダムのなかでも最も複雑かつ高度な利用がなされる場合であって、一般の多目的ダムでは、これらすべてが適用されるわけではない。

標準操作規則には、貯留された流水を放流することができる場合ならびにその時の放流量に関する規定があり、それぞれ次のように定められている。

(1)〔場合〕水位がサーチャージ水位をこえるとき、〔量〕流入量に相当する量

これは、サーチャージ水位をこえる流水の人為的な貯留を防止するための規定である。サーチャージ水位は、構造令により「ダムの新築、または改築に関する計画において洪水時にダムによ

りて一時的に貯留することにした流水の最高の水位でダムの越流部の直上流部におけるもの」²²⁾

と定義され、貯水池使用計画においては洪水時に計画的に調節放流することができる水位の最高

限度とされる。したがって、サーチャージ水位をこえる水位の上昇はサーチャージ水位における

操作規則上許される最大放流量(以下、ここではこの流量を放流可能流量と呼ぶ)をこえる貯水

池流入量によって自然に不可抗力として行われたものでなければならない。また、放流可能流量をこえない場合には少なくともサーチャージ水位を維持するための放流が要求されることがになる。

ダムからの放流量を流入量に相当する量としているのはこの趣旨である。

(2)〔場合〕水位が常時満水位をこえるとき、〔量〕流入量に相当する量

これは、常時満水位をこえる流水の貯留に制限を加えるための規定である。常時満水位は、構造令により「ダムの新築または改築に関する計画において非洪水時にダムによって貯留することとした流水の最高の水位でダムの非越流部の直上流部におけるもの」²³⁾と定義される。洪水期間と非洪水期間の区分あるこの標準操作規則の事例では、とくに貯留が認められる場合を除き、常時満水位は非洪水期間において流水を貯留することができる水位の最高限度であり、放流は常時満水位をこえる水位の上昇を防止するために行われる。このため、ダムからの放流量は流入量に相当する量となる。

(3)〔場合〕非洪水期間から洪水期間に移るに際し、水位を制限水位に低下させるとき、〔量〕規則に定める流量、

これは、水位を制限水位に低下させるときの放流に関する規定である。制限水位とは、洪水期間においてとくに貯留が認められる場合を除き流水を貯留することができる水位の最高限度であり、非洪水期間における貯留の上限である常時満水位での貯水容量から洪水調節のために洪水期間を通して空容量として確保しておく必要のある容量を差し引いて定められた水位である。この規定のように水位を低下させるときには貯水池流入量以上に放流することが必要になるが、このときの放流量の最大限度が規則に示される。なお、この最大限度としては一般に河道災害を生じない流量とされる。

(4)〔場合〕洪水期間において水位が制限水位をこえるとき、〔量〕流入量に相当する量

これは、洪水期間において制限水位をこえる流水の貯留に制限を加えるための規定である。洪水期間における制限水位は、非洪水期間における常時満水位と同一の性格を有する水位であるから、とくに貯留が認められる場合を除き、この水位をこえないように維持することが必要になる。ダムからの放流量を流入量に相当する量としているのはこの趣旨である。

(5)〔場合〕予備放流を行うとき、〔量〕規則に定められる流量

これは、洪水が予想されるときに予備放流に関する規定である。気象台、その他の情報により洪水が予想されるときには、ダム管理は洪水警戒体制に入り、洪水の規模を予測し、洪水調節計画をたて予備放流水位を定めることになる。定められた予備放流水位がその時の水位をこえているときには、予備放流を行い水位を低下させることが必要になる。予備放流は規則に定める流量を最大限度として行う。この場合、規則に定める流量は前述(3)の河道災害を生じない流量とされるが、この程度の流量の放流では時間を要しすぎる場合で特にやむを得ないと認められるときには、一般災害を生じない流量まで放流できるとされている。なお、現在の運用では、気象情報をもとに洪水波形を推定し予備放流水位を定めることには、技術的に無理な面が多いため、洪水ごとに予備放流水位を決定せず別に規定される予備放流水位の最低限度を一率に採用するのが通例

となっている。

ここで規定されるダム管理における洪水とは、貯水池への流入量が指定された量をこえる場合の流水のことであり、流水として指定される量は、下流の河川改修の状況を考慮して定められるが、一般には一般災害の発生しない（最大の）流量が規定される。

(6) 〔場合〕洪水調節を行うとき、〔量〕規則に定める量

これは、洪水調節を行うときの放流に関する規定である。貯水池への流入量が洪水として指定される量をこえる場合には、個々のダム貯水池に定められた洪水調節方式にしたがい放流量を求め、洪水調節を行う。洪水調節方式には、常に一定流量を放流する一定量放流方式、洪水上昇期には流入量のうち指定された量をこえる流水を一定の率に応じて貯留し、洪水ピーク後はその洪水における最大放流量を継続して放流する一定率一定量放流方式あるいは、洪水時にゲート開度を一定に保つ定開度放流方式、自然調節（孔あき）方式などが主として採用されている。

なお、洪水調節方式については、気象、水象その他の状況により特に必要と認められる場合においては、定められた洪水調節方式によらないことができることがただし書きされるのが通例である。

(7) 〔場合〕洪水調節等の後における水位の低下を行うとき、〔量〕下流に支障を与えない程度の流量

これは、洪水調節を行った後あるいは後述の洪水に達しない流水の調節を行った後で水位が制限水位（洪水期間）もしくは常時満水位（非洪水期間）をこえているときは、すみやかに放流して水位を低下させることが必要になる。このときの放流は実際には、河川の流量を人為的に増加させることとなるので、気象の状況、下流の出水の状況に十分注意して災害を発生させたり助長することのない範囲で下流に支障を与えない程度の流量を限度として行うこととしている。

(8) 〔場合〕洪水に達しない流水の調節を行うとき、〔量〕流入量に相当する量

これは、洪水に達しない流水の調節を行うときの放流に関する規定である。ダム貯水池は洪水に達しない流水に対しても、ダム下流で問題が生ずる場合にはダムにおいて調節することができる。ただし、この流水の調節は計画上期待されたものではなく、ダムの副次的効果の範囲にあるため、貯水容量の使用についてはどくに慎重に行うこととしている。また、この意味からダムの放流量は流入量に相当する量が対応することとなる。

(9) 〔場合〕かんがい用水の補給のための放流を行うとき、〔量〕基準となる地点において定めた用水量を確保するに必要な流量

これは、かんがい期間におけるかんがい用水の補給のための放流を行うときの規定である。定められたかんがい期間においてかんがい用水補給のため必要があると認められる場合においては、あらかじめ定められたかんがい用水量を基準となる地点において確保できるよう必要な流量をダムから放流することとしている。

これは、水道用水および工業用水の補給のための放流を行うときの規定である。かんがい用水と水道、工業用水とを区別しているのはかんがい用水に関してはかんがい期間が設定されるのに対して、水道、工業用水では年間を通じて必要となる点が異なるからである。水道用水および工業用水の補給のために必要があると認められる場合においては、あらかじめ定められた用水量を基準となる地点において確保できるよう必要な流量をダムから放流することとしている。

(ii) 〔場合〕ゲートの点検または整備を行うため特に必要のあるとき、〔量〕規則に定めらるる量

(12) 〔場合〕その他やむを得ない理由により放流を行うとき、〔量〕規則に定める量

標準操作規則には、ダム貯水池の貯留された流水を放流できる場合として、この12項目を規定しているが、ここに示される放流の最大限度はいずれもこの事例では発電所の使用水量も含む値であるため、同時に発電所が運転される場合には、ここに示される量から発電所の使用水量を控除した量がダム放流設備から実際に放流する量となる。

— 73 —

4. ダム放流設備の形式・規模の選定

筆者らの考える重ね方式の設備計画におけるダム放流設備の原型モデルは図-9に示すような構成である。

この設備構成の模式図は、設計洪水水位以下の貯水池の総貯水容量を水深方向に N 等分し、分割された各層にそれぞれ単位断面積を有する基本ユニットの放流設備を前節に述べたダム放流設備に要求される機能のうち放流量に関する機能のみを満たすように設置した状態を示している。

ここで、 N の値としては、貯水池が成層化した場合の最小単位の放流量に対する流動厚が各層の厚みより大きくなるように分割することを想定している。また、単位断面積を有する基本ユニットの放流設備としては、最小単位の放流を行う最小規模の放流設備を想定しており、実施設計において選定される最小規模の放流設備がこれに該当するものと考えてよい。

この設備構成ではダム放流設備の総放流能力はダム設計洪水流量の N 倍に達するので経済的に優れた設備構成とはいえないが、放流能力のみに関しては設計条件を十分満たす設備構成であり、かつ、貯水池が成層化したときにも放流する位置の選択が自由にできることから、放流能力のみに限定すれば理想的な設備構成の1つでもある。ここで述べる積み重ね方式の設備計画では、この設備構成を原点とし、放流設備の設置する高さの選択ならびに基本ユニットの結合による規模の選定を行い最終的な設備構成を導くことになる。

まず、この設備構成より、ダム設計洪水流量の放流に関して不必要な設備を削除することを考えてみる。この場合、設備の余裕として必要となる設備については別途考えることにすれば、図-10のように削除できる。

すなわち、サーチャージ水位以下の放流に関しては、計画をこえる異常に大きい洪水流量を人為的なゲート操作によりゲートから放流することは現状の技術水準では社会的制約条件も課せられるため困難であり、ダム管理上対応できる流量には限度がある。したがって、このダム管理上対応できる流量（前述の放流可能流量）以上に設備を設置しても有効に作動させることが困難であるから、これらの設備は削除できる。また、サーチャージ水位以上に関しては、サーチャージ水位以下で放流可能流量の放流が確実に行えることを前提とすれば、このための放流に必要となる設備は重複することになり、設けなくともよいことになる。

なお、サーチャージ水位における放流可能流量は、ダム貯水池の流域面積の大小ならびにゲートの構造等によって決定すべき性格の量である。流域面積が小さい場合には、洪水の上昇が急激であり、ゲート等の操作に必要となる時間が確保できない恐れがあるため、放流可能流量をできるかぎり小さく設定しておくことが望ましいとされている。

河川砂防技術基準では、²⁴⁾ 流域面積が 20km^2 程度以下では、洪水の到達時間が1時間程度以下になることを考慮して、放流可能流量としては、洪水調節計画において想定される最大の放流量

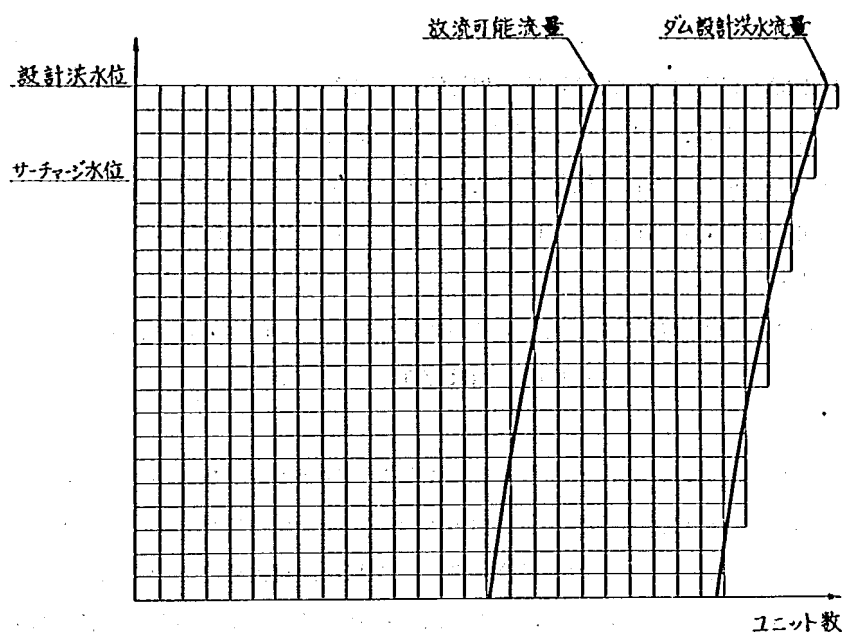


図-9 ダム放流設備原型モデル

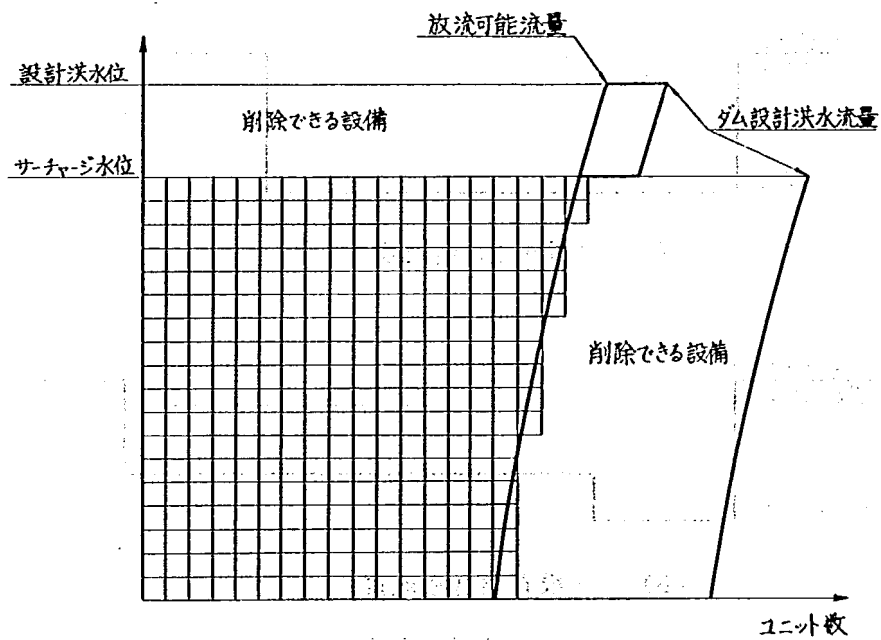


図-10 ダム放流設備原型モデル-2

(計画最大放流量)程度としている。また、洪水調節容量の相当雨量(貯水容量/流域面積を mm 単位に換算した値)が $50mm$ 程度以下の調節容量の相対的にみて著しく小さい貯水池についても同様な措置を講ずることが望ましいとしている。²⁶⁾ ゲートの構造に関しては、サーチャージ水位におけるゲートの深さならびにゲート部分開放時の流れの形式が関係し、深い引上げ式ゲートは浅い越流式ゲートと比べて操作に対する困難さが倍加すると考えられ、放流可能流量を小さく設定すべきであることが指摘されている。²⁶⁾

サーチャージ水位と設計洪水位の間の設置する高さについては、貯水池有効容量にさらに余裕を確保する考えを除けば高さを選択する積極的理由は存在しないので、これを1つにまとめることができる。

この場合、放流設備の形式は、人為的操作を必要としない放流形式すなわち、自由越流堤構造となるのが通例であるが洪水の伝播特性を考え自由越流堤の標高を全長に亘って同一とせず、図-11のように部分的に標高を変える設計を行う場合もある。これは、自由越流堤の堤頂が非常に長くかつ湛水面積の小さい貯水池では、越流量の増加が急激に行われることになるため放流可能流量が小さい場合には、洪水波形が著しくシャープになり、ダム下流河川の水位を急激に上昇させる恐れがあるからである。

つぎにサーチャージ水位以下、流量的には放流可能流量以下の放流設備の設置について設置する高さの撰択を考えてみる。この場合には、貯水池内流水の流動形態の予測が必要になる。流動形態

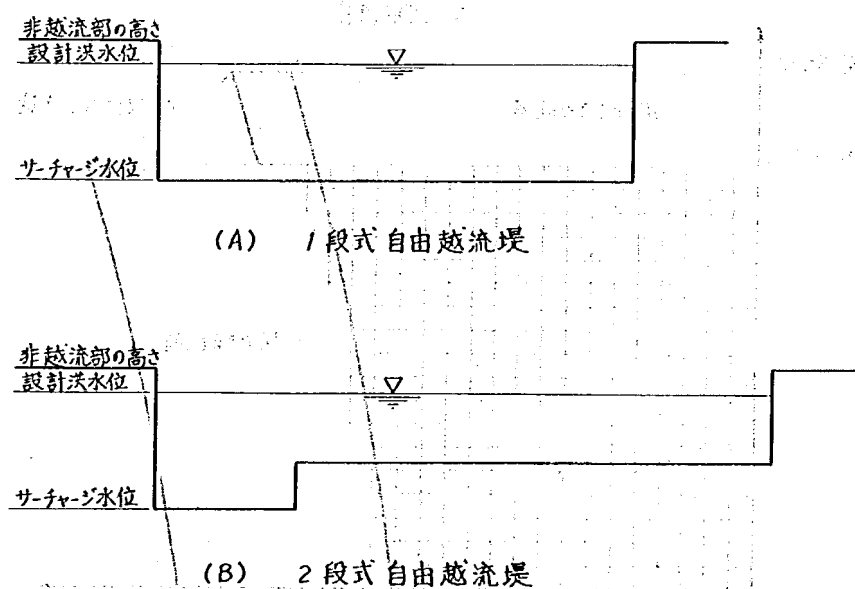


図-11 自由越流堤

の推定は、概略的には前述の回転率等の指標を利用することが可能であり、さらに、詳細な検討は数値シミュレーションの方法によっても行うことができる。²⁷⁾

推定の結果は、通常は混合型になり中間型もしくは成層型になることが極めて稀な貯水池とそれ以外の貯水池に大別して取扱う。

通常混合型が主体となる貯水池では、貯水池内の流水は境界面に接する部分を除きほぼ一様と考えられることから、設備の設置高さの選定では表面、中層および底面の3層に区分して取扱うことが可能となる。これは表面、中層および底面の貯留水は水質的にはいずれも同一と考えてよいが、表面では流下浮遊物の存在が底面では放流にともない底質の混入がそれぞれ異なった要素として加わることが考えられるからである。放流設備として表面放流設備がなく常時中層放流設備のみを使用して放流する場合には、貯水池内の流下浮遊物の蓄積に対する処理対策を考えることが必要になり、常時底面放流設備を使用して放流すれば、貯水池内底質の混入による濁水の発生が懸念される。

したがって、混合型が主体となる貯水池の放流設備は表面、中層あるいは底面の区別によりその設置の必要性を検討することになる。

これに対して、通常は中間型もしくは成層型となることが多い前述の区分におけるそれ以外の貯水池では、水質要素は水深方向に変化するから混合型における中層を表層、中層および底層に細分して取扱うことが必要になる。この場合、各層の水温成層に対する位置付けは、ここでは表層は表水層に中層は変水層（変温層）に、底層は深水層に対応するものと考えことにする。なお、放流量が小さいときには、流動層の厚みは非常に薄くなるから水深方向の水質要素が著るしく表層および中層についてはさらに細分して取扱う必要がある。

中間型もしくは成層型貯水池では、この水深方向の水質要素の変化を河川流水の正常な機能の維持のために効果的に利用することであり、設備の設置高さの選択に対してとくに入念な配慮が必要になる理由である。

安芸らの研究に²⁸⁾ よれば、発電用大規模貯水池における洪水後の濁水軽減対策として、

- (1) 平常時において安定した水温成層の形成および維持をはかること。
- (2) 洪水による水温成層の変形ないしは破壊を極力防止すること。

の2点が指摘され、(1)のためには貯水池中間標高および表層に2段の取水口を設け、中間標高の取水口を常時の主取水設備とすること。(2)のためには貯水池中間標高にある程度の洪水放流設備を設け洪水の表層からの放流を極力避けることが提唱されている。

安芸らの研究の成果が洪水時の貯留量の変化が著るしい洪水調節用貯水池にそのまま適用できるかどうか疑問が残るが、少なくとも平常時の放流に関しては参考とすべき意見であろう。

中間型もしくは成層型の貯水池ではこれらの知見を生かし、かつ選択の自由度が残るように設備の構成を選定することが主眼となる。ダム放流設備の放流能力は前節の事例に示されるように特定の水位に対して必要となるので、サ

ーチャージ水位以下の水位，放流可能流量以下の放流量の範囲においてダム放流設備に要求される放流機能を水位と関係づけてまとめれば，図-12のようになる。図-12Aは，常時満水位の維持〔2〕，制限水位の維持〔4〕，洪水に達しない流水の調節〔8〕，用水等の補給〔9，10〕およびゲートの点検，整備その他やむを得ない理由による水位の低下〔11，12〕を行うときのように洪水に関係しない主として平常時の放流のためにダム放流設備に要求される放流機能を水位と関係づけて示したものであり，図-12Bはサーチャージ水位の維持〔1〕，予備放流〔5〕，洪水調節〔6〕および洪水調節後の水位の低下〔7〕を行うときのように洪水に関係する放流のために要求される放流機能を示したものである。〔 〕内の数値はいずれも前節の事例における番号を示している。

これらの図において，流量 Q_i および W_i （ $i = 1, 2, \dots, 7$ ）はそれぞれ次のような値である。

Q_1 ：用水補給等を行うための放流量〔9，10〕

Q_2 ：水位の低下を行うための放流量〔3，5，7，11，12〕

Q_3 ：水位の維持を行うための放流量〔2，4，8，(5)〕

Q_4 ：各種の洪水波形を計画された洪水調節方式により洪水調節を行ったとき得られる貯水位—放流曲線をすべて包絡する曲線における放流量（ W_4 の関係）〔6〕

Q_5 ：洪水調節計画で放流することとした最大の流量〔6〕

Q_6 ：サーチャージ水位における放流可能流量〔1〕

Q_7 ：ダム設計洪水流量

W_1 ：最低水位

W_2 ：予備放流水位の最低限度

W_3 ：制限水位

W_4 ：前述包絡曲線の水位（ Q_4 の関数）

W_5 ：常時満水位

W_6 ：サーチャージ水位

W_7 ：設計洪水水位

なお，ここでは， Q_3 は洪水調節開始流量に一致するものと仮定している。また，構造令で設備が義務づけられるフィルダムの貯水位低下のための放流設備の機能は Q_2 に含めて考えることにするが，平常時の水位の低下を行うための放流量 Q_2 とフィルダムの貯水位低下のための放流量に著しい差がある場合は特殊な配慮が必要になるのでここでは一般的な事例のみを考えることにし，そのような事例についてはふれないことにする。

これらの図に示される設計条件は，発電が貯水池の目的に含まれる場合であっても運転停止の状態を想定して放流設備の計画，設計を行うのが原則であるので，発電所の使用水量は0として示したものであるから貯水池の目的として発電が含まれない場合についてもそのまま適用できる。また，これ以下の議論はいずれも発電の有無に関係なく論じており，発電の存在によって結果が大きく異

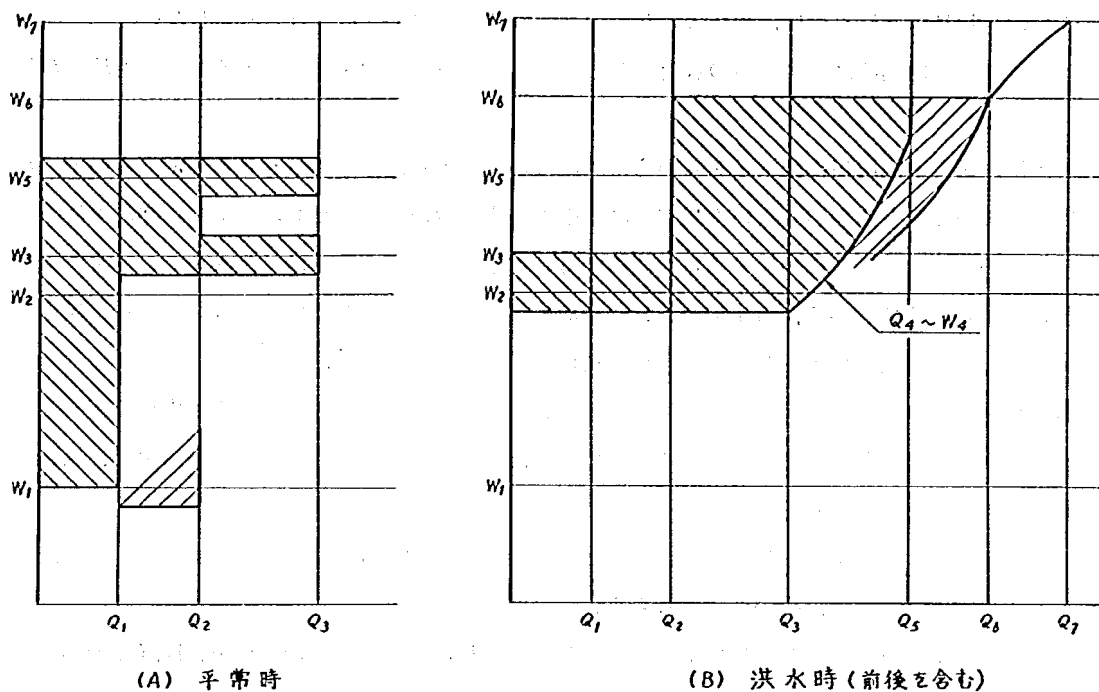


図-12 水位～放流量設計条件

なる場合にはそれぞれの場合について示すこととする。

図-12に示す水位～放流量関係の設計条件を満たし、かつ、流水の正常な機能の維持を可能とするダムの放流設備についてさらに具体的に考えてみる。

この場合、貯水池の流動形態を区分して取扱うことが必要となるが、ここでは前述のように貯水池を(1)、通常は混合型であり、中間もしくは成層型となることが極めて稀な貯水池と(2)、それ以外の貯水池に大別し、(1)は混合型、(2)は成層型と流動形態を特徴づけて取扱うことにする。

1. 混合型貯水池のダム放流設備

混合型貯水池ではすでに示したように流水を表面、中層および底面の3層に区分できる。この区分における中層は、単に中間層のことであり、成層型との対応では表層(表水層)がこれに該当する。混合型貯水池では変水層や深水層は存在しない。なお、混合型貯水池でも水深方向に水温変化が存在することが知られているが、設計上の取扱いでは全層を単一の様な層と假定できる。

(1) 混合型貯水池のダム放流設備は水質に関しては次の放流の条件と考えることができる。

- (1) 図-12Aにおける用水等の補給ならびに平常時の水位の低下は中層の放流により行う。
- (2) 図-12Aにおける水位の維持は、自由越流を含む放流により行う。
- (3) 図-12Bに示す洪水に係る放流は、底面からの放流ならびに自由越流により行う。

(4) 図-12Bにおける点検、補修等のための水位の低下においては水質を考慮しない。

ここに、自由越流は表面からの放流のことであり、流下浮遊物を対象とするため自由越流が条件となる。

(1)は、ダム下流河川の流水をダムからの放流によって人為的に増加させることになるので、水質面において最も問題の少ないと想定される中層からの放流を考えたものである。(2)の水位の維持においては、流入量に相当する量を放流することとなるので、貯水池に流入をそのままダム下流に流下させる趣旨から、自由越流を含む放流により行うこととしている。(3)の洪水時に係る放流に関しては、洪水による貯水池の浄化を積極的に考えることとし、底面からの放流によって濁質の排出を図り、かつ、自由越流を併用することによって、流下浮遊物が貯水池内に滞留するのを防止することとしている。また、(4)については、極めて稀に行われる放流であるので、水質よりも放流機能を優先させる趣旨である。

水質に関するこのような放流条件を満たし、かつ、図-12の放流機能を満たす混合型貯水池のダム放流設備としては、次の構成が考えられる。

- (1) 設備A：サーチャージ水位以上に設置される自由越流堤構造の放流設備で、B、C、DおよびFと合わせて設計洪水水位においてダム設計洪水流量が放流できる設備とされる。
- (2) 設備B：サーチャージ水位付近に設置され、サーチャージ水位の維持ならびに洪水後の水位の低下に使用する放流設備でC、DおよびFと合わせてサーチャージ水位において放流可能流量が放流できる設備とされる。なお、ゲートの一部には、越流式ゲートを設置して自由越流が可能な構造とされる。
- (3) 設備C：常時満水位付近に設置され、常時満水位の維持に使用する放流設備であるが、平常時および洪水後の水位の低下に利用できるよう配慮した設備とされる。放流能力としては平常満水位において水位の低下を行うための放流量程度を放流できる設備とされ、その一部はゲートを全開してもしくは越流式ゲートを設置して自由越流が可能となる構造とされる。
- (4) 設備D：制限水位付近に設置され主として制限水位の維持に使用する放流設備であるが、平常時および洪水後の水位の低下に利用できる設備とされる。放流能力としては制限水位において水位の低下を行うための放流量程度を放流できる設備とされ、設備Cと同様な構造とされる。
- (5) 設備E：最低水位付近に設置され、主として用水等の補給のために使用する放流設備であるが平常時の水位の低下にも利用できる設備とされる。放流能力としては最低水位において用水等の補給を行うための放流量が放流できる設備とされ、入口にはスクリーンを設け、長期間に亘る連続放流時にも適切な流量制御が可能となるよう出口にはバルブを設置した設備とされる。

(6) 設備F：入口標高はE以下とし、洪水に係る放流のために使用する放流設備であり、予備放流水位の最低限度とサーチャージ水位の間で洪水調節方式にしたがう放流が可能な濁水の放流に適した設備とされる。

(7) 設備G：入口標高はF以下とし、点検補修等のための水位の低下に使用する放流設備であり、小規模で堅牢かつ耐久性に豊む設備とされる。

混合型貯水池のダム放流設備はこのようなA～Gの7種の放流設備で構成するのを基本とするが、B、CおよびDについては、それぞれの放流条件ならびに放流機能が満たされ、かつ、その規模が一致する場合には、兼用の設備とすることができる。

2. 成層型貯水池のダム放流設備

成層型貯水池では、すでに示したように流水を表面、表層、中層、底層および底面の5層に区分できる。この区分における表層、中層および底層はそれぞれ、表水層、変水層（変温層）および深水層に対応させて考えているからダム貯水池のように流出入の影響が顕著な場合には放流設備の使い方によってその位置が変化することになる。したがって、成層型貯水池では、水質制御上最も適当な成層状態を想定し、この状態が放流設備の常時の使用の結果として得られるように設備の構成を考えることが必要になる。この場合、混合型貯水池で問題とされた事項はそのまま成層型にも適用できるが、成層型貯水池では成層の状態がさらに強い影響力を有するので、これを優先させて考えることが必要である。

洪水調節用の成層型貯水池でどのような状態を目標とすべきかについては、多くの意見があり、今後さらに調査研究すべき課題となっているが、現在までの意見の多くは水温成層を常に安定した状態に維持することに集約される。このためには、洪水時の放流によっても安定した水温成層の形成維持が可能となるような配慮が必要であり、洪水調節用貯水池では、常時の放流によって変水層の位置を徐々に下げ、洪水調節用放流設備の下側に安定した2次躍層をできるだけ早く形成することに帰着する。したがって、常時の放流においても正常な機能を維持し、かつ、できるだけ早くこの状態が形成されるように設備の構成ならびに運用を考えなければならない。

なお、常時において正常な機能を維持するためには、放流はすべて表層から行うことが必要になるが、その放流が必要となる時期における表層の位置、発達の状態を考えて放流設備の位置を考えることも重要である。

成層型貯水池のダム放流設備の放流の条件は原則的には前述(1)～(4)の混合型に対する条件と一致するが成層型ではこれに貯水池内流水の層の調整、制御の条件が追加されることになる。なお、混合型の放流の条件を成層型に適用する場合には水質に関する条件では中層を表層に底面を躍層面に読み替えればよい。このような放流の条件を満たし、かつ、図-12に示す放流設備としては次のような構成が考

られる。

- (1) 設備A：混合型における設備Aと同一の放流設備であり、B、C、D、EおよびFと合わせて設計洪水水位においてダム設計洪水流量が放流できる設備とされる。
- (2) 設備B：サーチャージ水位付近に設置され、大規模洪水時におけるサーチャージ水位の維持に使用する放流設備であり、C、D、EおよびFと合わせてサーチャージ水位において放流可能流量が放流できる混合型の設備Bと同一の構造の設備とされる。
- (3) 設備C：常時満水位付近に設置され主として常時満水位の維持ならびに常時満水位から制限水位への水位の低下に使用する放流設備であり、常時満水位において水位の低下を行うための放流量程度が放流できる混合型の設備Cと同一の構造の設備とされる。
- (4) 設備D：制限水位付近に設置され主として常時満水位から制限水位への水位の低下に使用する放流設備であり、制限水位において水位の低下を行うための放流量程度が放流できる混合型の設備Dと同一の構造の設備とされる。
- (5) 設備E：制限水位と最低水位の間に設置され制限水位の維持ならびに小規模洪水の洪水調節に使用する放流設備であり、予備放流水位の最低限度において水位の維持を行うための放流量程度が放流できる設備とされる。
- (6) 設備F：最低水位以下に設置され常時満水位から最低水位の間で用水等の補給のため使用する放流設備であり、最低水位において用水等の補給を行うための放流量が確保できる設備とされる。設備の基本構成は混合型における設備Eと同様な構成とするとともに入口には選択取水設備を設けて任意の深さの流水を取水できる構造とされる。

(図-13)

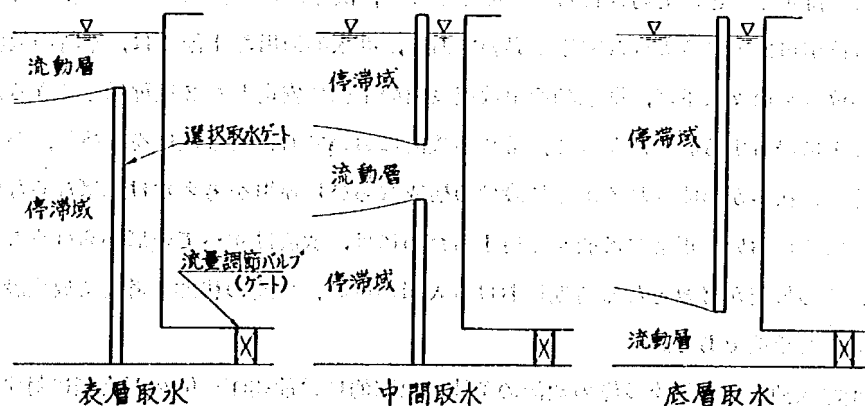


図-13 選択取水設備の機能

- (7) 設備G：入口標高はE以下に設け水温成層が破壊されるような大規模洪水時の洪水調節のために使用する放流設備であり、B、C、DおよびEと合わせて洪水調節方式にしたが

う放流が可能となる設備とされる。

- (8) 設備H：入口標高はFおよびG以下に設け点検、補修等のための水位の低下に使用する放流設備であり、混合型における設備Gと同一の構造とされる。

成層型貯水池のダム放流設備は、このようなA～Hの8種の設備で構成するのが基本と考えられる。また、混合型貯水池のダム放流設備の場合と同様に単一の設備で複数の機能が兼用できる場合にはこれらをまとめることができる。ただし、成層型貯水池では表層の位置が季節ならびに設備の運用によって変わるから、混合型の場合よりさらに詳細な検討が要求される。

形式、規模を最終的に決定するためには、構造物の設計問題としての検討を初めとして計画、設計に対する満足度、実用性および操作性などを知るための放流操作シミュレーションによる検討まで、さらに多くの検討を必要とするが、これらについてはまた、別の機会に論ずることにする。

5. あとがき

ここでは、ダム放流設備の形式、規模の選定における最近の話題とそれらに対する筆者らの取扱いをまとめている。

ダム放流設備の形式、規模の選定問題は最も基本となる問題であるとともに実際には多くの要素が複雑に絡み合った総合的かつ、高度な応用問題であるため、これを理路整然と説明することは非常に困難であるが、ここでは放流設備における最近の問題を具体的に説明することによって、これらが今後の形式、規模の選定においてどのように処理されて行くかをできるだけ平易かつ実務的に説明したつもりである。

なお、ここで述べた考えのなかには、大胆な推論に基づく取扱いもかなり含まれており、このような形で発表することには時期尚早の感も多分にあるが、最近のように河川流水に対して社会の関心が高まるなかで、土木研究所が依頼を受けて実施している多目的ダムの放流設備がその計画、設計において何を考えどのように処理しているかを紹介することは十分に意義のあることだと思われ、あえて取りまとめを試みたものである。

ここで提起される問題の多くは現在土木研究所の研究課題として採択され鋭意研究が進められていることを蛇足ながら付け加えておく。また、ここに述べた取扱いはあくまでも筆者らの独自の考えに基づくものであり、建設省として標準化されたものではない。

諸賢の御批判、御意見を載ければ幸いである。

参 考 文 献

1. 藤本 洪水調節ダムの放流設備における基本的考慮 土木技術資料 10巻9号 昭和43年9月
2. 石井 フィルタイプダムの安全性を支配する洪水吐の設計対象流量の再検討 土木技術資料 11巻6号 昭和44年6月
3. 花籠 実績比流量によるダム設計洪水流量のチェック 土木技術資料 12巻4号 昭和45年4月
4. 花籠 フィルダムの異常洪水流量設計のための資料 土木技術資料 15巻7号 昭和48年7月
5. 藤本 洪水吐の設計における基本的な考え方—異常洪水流量と設計洪水流量 土木技術資料 15巻7号 昭和48年7月
6. 河川管理施設等構造令研究会編：解説，河川管理施設等構造令 日本河川協会 昭和53年
7. 水工水理研究資料 Ⅱ22 ダム水工研究室部内資料
8. 建設省河川局 建設省河川砂防技術基準(案)計画編 日本河川協会 昭和54年 P 148
9. 構造令 第4条 第5項(構造の原則)
10. 前述(6) P 31～32
11. たとえば河川水温調査会，雑誌 「水温の研究」
12. たとえば石原，木間編 応用水理学中Ⅱ 丸善 昭和33年 P 343～345
13. 構造令 第14条(放流設備)
14. 直村，安芸 一ツ瀬ダム貯水池の濁水現象とその対策 国際大ダム会議第12回大会日本提出論文集(1976) P 163
15. 安芸 既設貯水池の濁水現象 第16回発電水力講習会テキスト 昭和49年
16. 国土開発技術研究センター ダム放流設備資料調査報告書 昭和54年3月
17. 日本大ダム会議 ダム設計基準 昭和32年
18. 構造令 第7条(洪水吐き)
19. 構造令施行規則 第10条第6項(フィルダムの安定性及び堤体材料)
20. 前述(6) P 46～47
21. 丸本 多目的ダムの管理 ダム管理研修テキスト(1) 全国建設研修センター (昭和51年度)
22. 構造令 第2条 (用語の定義)
23. 前述22
24. 前述(8) P 156
25. 前述24
26. 建設省河川局 建設省河川砂防技術基準(案)設計編(未定稿)
27. たとえば岩佐，松尾，遠藤 ダム貯水池の水温予測 京大防災研究所年報 第15号B

100 99 98

— 86 —

地下水涵養技術と地下貯水池

河川部長 土屋 昭彦

大都市への人口集中や下水道の普及に伴って、地域的な水資源の逼迫は年を追う毎にその度合を強めている。

しかもダム建設は、水没地域住民の反対が強く、新たな貯水池建設はかなり困難な情勢にある。

このため、下水処理水の再利用や節水などの施策とともに最近注目を浴びているのが地下貯水構想である。地下水は古来から良質な水資源として広く利用されており、現在でもわが国の水資源のなかに占める割合は18%とかなり高い。しかし高度経済成長の波とともに拡大した工業開発は十分な水資源開発を伴わず、手軽で安価な地下水に頼ったため、いたる所で地盤沈下を生じ、その防止のため地下水の過剰揚水に対して厳しい規制が行なわれた結果、近年ようやく地盤沈下の進行が鈍って来たところである。

このような観点から、地下水の新たな開発利用は極めて困難のように見えるが、扇状地の砂礫の堆積層を利用してこれを地下貯水池として用いれば、地上のダム貯水池と同様に新たな水資源開発が可能となる。この場合、如何に大量の地表水を迅速に地下に涵養するかが地下貯水池実現のポイントになる。

建設省では、総合技術開発プロジェクトの一環として昭和51年より“地下涵養技術の開発”を実施しており、地下水涵養技術、地下貯水池の適用条件に関する検討や運用技術、取水技術、止水技術などについて研究を行ってきたが、その成果をもとに昭和55年度には長崎県野母崎において総合実験を実施しその実用性を確かめる予定である。

今回はそれらの成果のなかから、地下貯水池開発上重要な位置を占める人工涵養技術を中心に紹介することとする。

[illegible]

2. 日本における地下水涵養

地下水人工涵養の歴史は比較的新らしく、諸外国においてもヨーロッパや米国で人工涵養を始めたのは 1800 年代に入ってからのものである。当初の人工涵養の目的は、地表水の水質が飲用に適さないために、これを一度地層を通してその浄化作用を利用することに置かれていた。1900 年代に入ると、その浄化機能に加えて水需要の変動に対処するための地下貯水機能を期待して涵養が行なわれている。

表-1 国内における人工涵養の歴史

年	場 所	注入井深度 (m)	注入井口径 (mm)	注入井 静水位 (-m)	帯水層	透水係数 (cm/sec)	注入水量 (m^3/min)	注入水源
1951	兵庫県尼崎	71	500	—	砂・礫	3.0×10^{-3}	0.37	表流水
1956	大阪・ 製薬工場	150	150	—			1.9	空調水
1957	滋賀・ 繊維工場	180	300	自噴	砂・礫		1.6	空調水
1958	東京・ 放送局	90	300	43	砂・礫		0.7	空調水
1960~69	新潟・ ガス田	150 1040	200	20~40	砂・礫	$14 \sim 57 \times 10^{-2}$	1	表流水
1960~65	東京・ 化学工場	100 220	250	47	砂・礫	6.5×10^{-2}	0.5~0.8	空調水
1960	東京・品川	60	300	14	砂		0.01	空調水
1960 61	徳島・ 繊維工場	46	350	25	砂・礫		0.4~1.0	表流水
1962~69	直江津・ 鉄鋼工場	132	250	17	砂・礫	3.1×10^{-2}	0.3	空調水
1962~63	佐賀白石	165 70	150~100	3~5	シルト・ 砂・礫	$15 \sim 25 \times 10^{-3}$	0.5~0.2	表流水
1963~64	山形市 馬見ヶ崎	60	200	2~3	扇状地 堆積物	4×10^{-1}	0.02	農業用水
1965~68	千葉市・ ガス田	1410	127	55	細・中 粒砂岩	1.8×10^{-2}	1.5	地下水
1966	京都府神足	88	200	4	砂・礫	2×10^{-3} $\sim 5 \times 10^{-2}$	0.38	
1967	福井県三国	42 65	200	20	砂・礫	1×10^{-3}	0.16	地下水
1967~71	埼玉県・ 妻沼研究地	200	300~400	7	砂・礫	8.8×10^{-2}	1.4	地下水
1970	敦賀市・ 紡績工場	90	300	5	扇状地 堆積物		2.1	空調水
1970	東京武蔵野 団地	7~10	600~800	7~10	礫		0.1	上水
1970	静岡県三保	45	200	5	砂・礫	2.5×10^{-1}	0.1	
1971	金沢市・ 紡績工場	80	300	145	扇状地 堆積物		1	空調水
1972~	新潟県 上越市	285	450~300	—		6.2×10^{-2}	1.1	表流水
1972~	神奈川県 秦野市	85	300	—	砂・礫	3.4×10^{-2}	0.65	水道水
1973~	神奈川県 平塚市	80	300	—		1.1×10^{-1}	1	地下水
1973~	山形県 山形市	90	300	—		2.1×10^{-3}	0.7	表流水
1974~76	大阪市 鶴見区	51	300	—	砂・礫	$1 \sim 5 \times 10^{-2}$	0.5	水道水

3. 地下水涵養の方法

表流水を地下の帯水層に入れる方法には、大別して3つの方法がある。すなわち帯水層に直接注入する井戸により涵養する方法を注入法、地表面から浸透させ徐々に帯水層に涵養する浸透法および地下水位を揚水等により強制的に低下させて、地表からの浸透速度を早やめる誘発法である。

注入井による方法は井戸と井戸へ給水するパイプやポンプがあれば可能であり場所をとらない利点があるが、目づまりが発生しやすくその対策に問題がある。また一本の井戸で注入できる水量も限られるので大量の涵養を行う場合には広域的に多数の注入井を必要とする。

浸透法には各種の方法がありそれらの特徴をあげれば表-2のようである。

表-2 浸透法の特徴

	方 法	特 徴
浸 透 法	水 水 法	洪水時のみ行う。広大で平坦な土地が必要。
	浸 透 池 法	最もよく用いられ、目詰りの解消も容易である。
	水 田 法	かんがい期のみならず非かんがい期の利用も可能、効果大きい。
	溝渠法（水路）	池のかわりに水路（溝渠）を用いるものである。
	抗 井 法	井戸法ににているが、いわば空井戸である。除抗の場合もある。
	河 床 法	河床を用いるものである。日本では利用度は少ない。
	地 下 埋 管 法	新しい技術であるが、今後の検討をまたねばならぬが日本的で有望。

3.1 注入井における目づまり現象

すでに述べたように、我が国における地下水の人工涵養の実施や実験例ではその殆んどが井戸法によっている。これらのうちで現在もなお注入を継続しているのは、新潟県上越、神奈川県泰野市と平塚市、山形県山形市の4例のみである。この他の井戸は一時的な実験を目的にしたものもあるものの注入井の目づまりの進行によって注入不可能になったものが多いと考えられる。

地下水は元来雨水等が長時間かけて浸透したものでありその過程において浸透水に含まれていた懸濁物は地層により浄化されている。注入井では、この過程を省略して直接帯水層に地表水を注入するため、ストレーナーに面した帯水層の間隙が塞がれ透水性が減少するわけである。

注入井の目づまりとして考えられているのは

- 1) 注入水中の懸濁物質
- 2) 帯水層内の化学反応
- 3) 注入井や帯水層での微生物の増殖

- 4) 気 泡
- 5) 土粒子の移動
- 6) 酸化鉄の発生

等であるが、このうちその影響の大きいのは、注入水中の懸濁物質の量と微生物の増殖であり共に注入水の水質が支配的であることを意味する。また、ストレーナーやケーシングが鉄製のため、水中の溶存酸素による酸化鉄が発生し、これがストレーナー周辺での目づまりの原因として大きい。

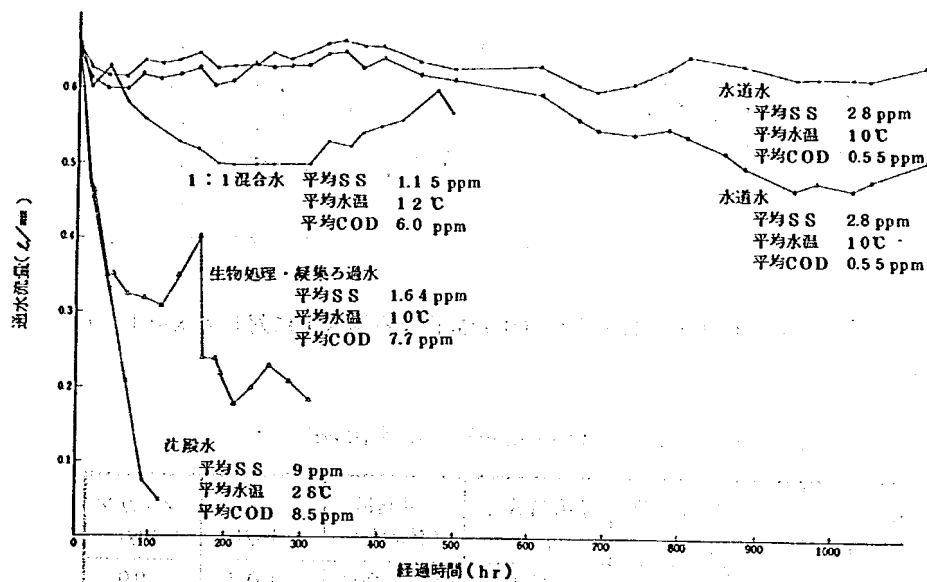


図-1 実験水の違いによる流量の変化

図-1は土木研究所で実施した注入水中の懸濁物質濃度の変化による目づまりの違いをみるための実験結果の1例である。実験に用いた水は隅田川河水を自然沈殿させたもの、生物酸化処理水にPAC凝集ろ過を行ったもの、生物酸化、PAC凝集ろ過水に水道水を1:1の割合で混合したもの、さらに水道水のみの4種である。

SS濃度の低いほど目づまりは小さくなっている。

微生物の増殖による目づまりは注入水中に栄養塩類や溶解性有機物、有機性濁物質が含まれている場合に、ストレーナー周辺の環境条件が整えば発生するものと考えられる。図-2は、注入水の水温を変化させて注入流量をみたものである。浸透量の減少で目づまりの程度が判断されるが、注入水温が高いと微生物の増殖が速く、従って約300時間程で目づまりが発生した。

注入水に含まれる溶解鉄や溶解マンガンが酸化され、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 Fe_2O_3 、 Mn_2O_3 等として析出し注入井周辺に蓄積され目づまりが発生する。室内実験において浸透槽の砂層の中に抑留された蓄積物を分析した結果を表-3に示すが、蓄積は殆んど表層に集中するので表層10cmの蓄積量で比較

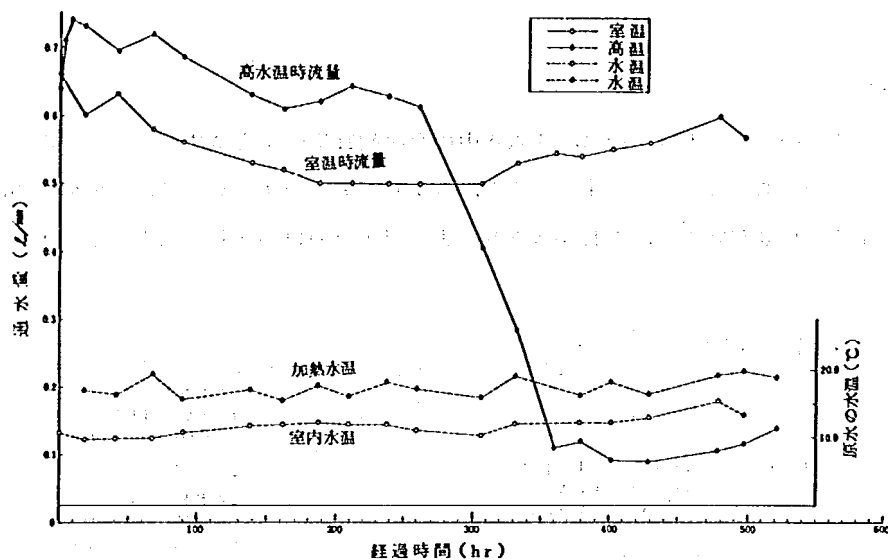


図-2 水温の差異による流量の変化 (生物酸化砂ろ過水1に対して水道水1)

表3-1 凝集ろ過水の場合の蓄積物質 (表層10cm)

塩素注入率 (PPm)	流入SS負荷 (g)	蓄積SS量 (g)	灼熱減量 (g)(%)	鉄 (mg)	マンガン (mg)
0	8.7	2.31	0.67 (29)	107	29
1	6.3	2.95	1.62 (55)	84	28
5	3.2	1.75	0.68 (39)	81	22.6

表3-2 混合水の場合の蓄積物質 (表層10cm)

Cl ₂ 注入率 (PPm)	流入SS負荷量 (g)	蓄積SS量 (g)	灼熱減量 (g)(%)	Fe (mg)	Mn (mg)
0	17.6	1.56	0.24 (15.4)	89.3	2.5
1	12.7	2.0	0.37 (18.5)	172	12.1
5	15.2	2.16	0.43 (19.9)	188	12.0

表3-3 水道水の場合の蓄積物質 (表層10cm)

Cl ₂ 注入率 (PPm)	流入SS負荷量 (g)	蓄積SS量 (g)	灼熱減量 (g)(%)	Fe (mg)	Mn (mg)
0	20.0	0.99	0.10 (10.1)	96.2	2.3
1	18.8	1.09	0.09 (8.3)	252	9.6

してある。

鉄やマンガンは塩素によって酸化され不溶性となるもので、塩素注入量が増えると蓄積量が増加することが予想される。表-3ではこのことが示されており鉄、マンガンとともに塩素量が増えると蓄積量が多くなる傾向を示す。なお、実験対象水の平均水質は表4の如くである。

ストレーナーの鉄の腐食や溶解の影響を直接みるために円筒実験槽のグラベルパッキングの上にストレーナーを置いた実験を行ったところ図-3に示すような流量変動を示し、明らかにストレーナーの腐食による影響が認められた。

表-4 実験対象水の平均水質

項目 対象水	水 温 (℃)	平均SS (ppm)	COD (ppm)	cl ₂ 消費量 (ppm)	cl ₂ 添加量 (ppm)	残留塩素 (ppm)
水 道 水	10 (7~14)	0.55	2.8	0	0	—
					0	—
					1	0.28 (0.20)
1:1混合水	12 (10~15)	1.15	6.0	0.7	0	—
					0	—
					1	0.07 (0.04)
					5	3.5 (2.46)
生物処理+ 凝集ろ過水	10 (5~14)	1.64	7.7	1.8	0	—
					1	0.05 (0.0)
					3	0.13 (0.06)
					5	0.9 (0.58)

注) 残留塩素の()内は遊離塩素である。

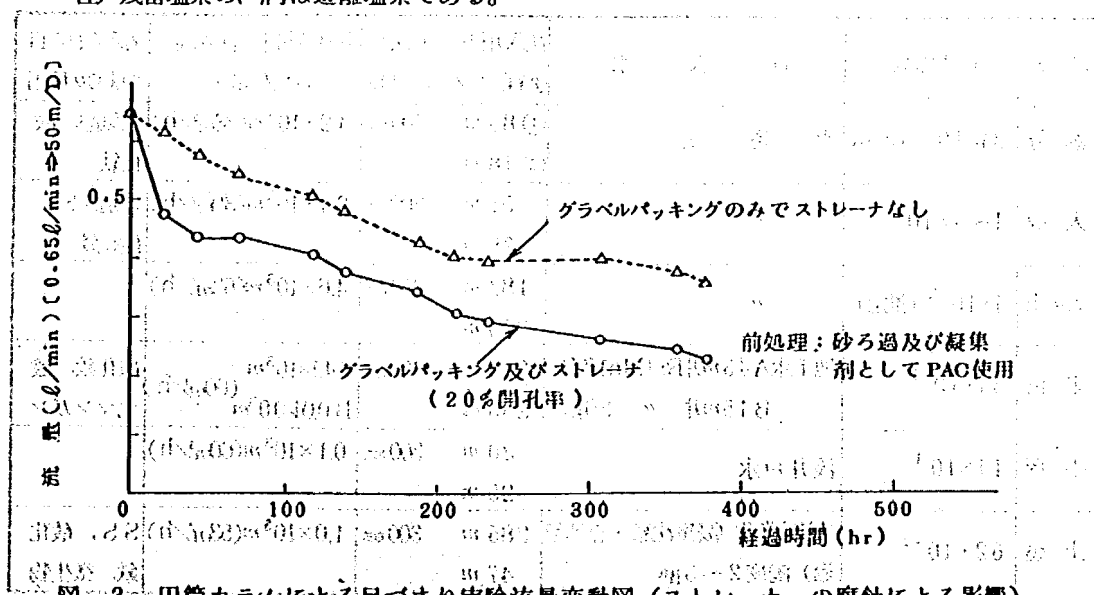


図-3 円筒カラムによる目づまり実験流量変動図 (ストレーナーの腐蝕による影響)

3.2 目づまりの防止と回復

目づまりが発生すると、注入量の減少や注入井水位の上昇があらわれるもので、目づまりの程度を示す指標として次式で示す比注入量が用いられる。

$$\text{比注入量} = \frac{\text{注入量 (m}^3/\text{sec)}}{\text{注入井内水位上昇量 (m)}} \quad (1)$$

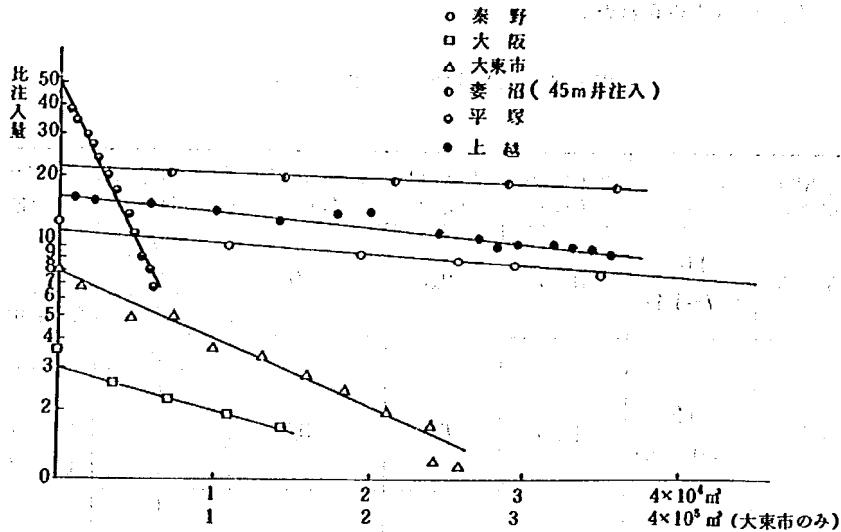


図-4 注入に伴う比注入量の減少

表-5 既往涵養実験における目づまり調査

地名	透水係数	注 入 水	注入井構造 ①深度 ②径 ③ストレーナ長	比注入量半減注入高 (注入量)	考えられる目づまりの原因
泰 野	$3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$	水 道 水	① 85 m ③ 300 mm ② 18 m	$4.2 \times 10^3 \text{ m} (38 \text{ m}^3/\text{h})$	空気泡 酸化鉄
大 阪	$1 \sim 5 \times 10^{-2}$	"	51 m 300 mm 75 m	$2.4 \times 10^3 \text{ m} (30 \text{ m}^3/\text{h})$	水道SS 酸化鉄
大東市	1×10^{-2} (推定)	"	182 m 250 mm 375 m	$4.6 \times 10^3 \text{ m} (63 \text{ m}^3/\text{h})$	
妻 沼	3.1×10^{-2}	地下水A 45m井 Fe+Mn 178ppm B 15m井 " 80ppm	200 m 400 mm 295 m	A $4.1 \times 10^3 \text{ m} (60 \text{ m}^3/\text{h})$ B $0.04 \times 10^3 \text{ m}$	酸化鉄 酸化マンガン
平 塚	1.1×10^{-1}	浅井戸水	80 m 300 mm 25 m	$0.1 \times 10^3 \text{ m} (60 \text{ m}^3/\text{h})$	
上 越	6.2×10^{-2}	表流水浄化 (凝集沈殿・急速濾過) 濁度 2~3ppm	285 m 300 mm 47 m	$1.0 \times 10^3 \text{ m} (53 \text{ m}^3/\text{h})$	SS, 酸化鉄 微生物

わが国における現地注入井での、累加入量の増加に伴う比注入量の減少を図-4に示す。殆んどの井戸でこの値は指数関数的に減少している。表-5にはこれらの井戸での注入水の種類や井戸の構造、注入量などを示している。大東市の減少勾配がもっとも緩く比注入量半減注入高（注入開始時の比注入量 $\times 0.5$ /ストレーナー面積）の値も6地点中最大値を示している。泰野、大阪、大東市は原水として水道水を用いておりやはり目づまりの発生が遅いことを裏付けている。これに対し最も勾配のきついのは平塚で、注入水は浅井戸水であるが水質が不明なのでその原因は確定できない。上越の場合は表流水を処理して用いており濁度が2~3 μm 程度あり、再揚水によって回復している所から目づまりの原因としては懸濁物質と推定される。妻沼の場合には地下水を注入しておりそれに含まれる鉄、マンガンが酸化されて蓄積が進行するものと推定される。これは再揚水中に酸化鉄、酸化マンガンが含まれること、および含有量の多い原水のときに目づまりが早いなどが見られるからである。

注入に伴う目づまりの発生を抑えるためには注入水の水質を良くすることが必要であり、懸濁物のみならず溶解性有機物や栄養塩類の除去などの三次処理まで必要となり、経済的な負担が困難となる場合が多い。そこである程度の目づまりは許容し、蓄積された物質を除去することが有利となる。このために一般に再揚水を行ってストレーナー周辺の目づまり物質を揚水中にとり込んで除去する方法がとられる。

再揚水の方法には連続揚水、断続揚水、あるいは短い注入をはさむ交互揚水などがあり、揚水流量や1回の連続揚水量ももっとも効果のある最適値を見出さねばならない。図-5、図-6に平塚および大阪の注入井における再揚水による目づまり回復の実例を示す。平塚の場合は揚水量が注入

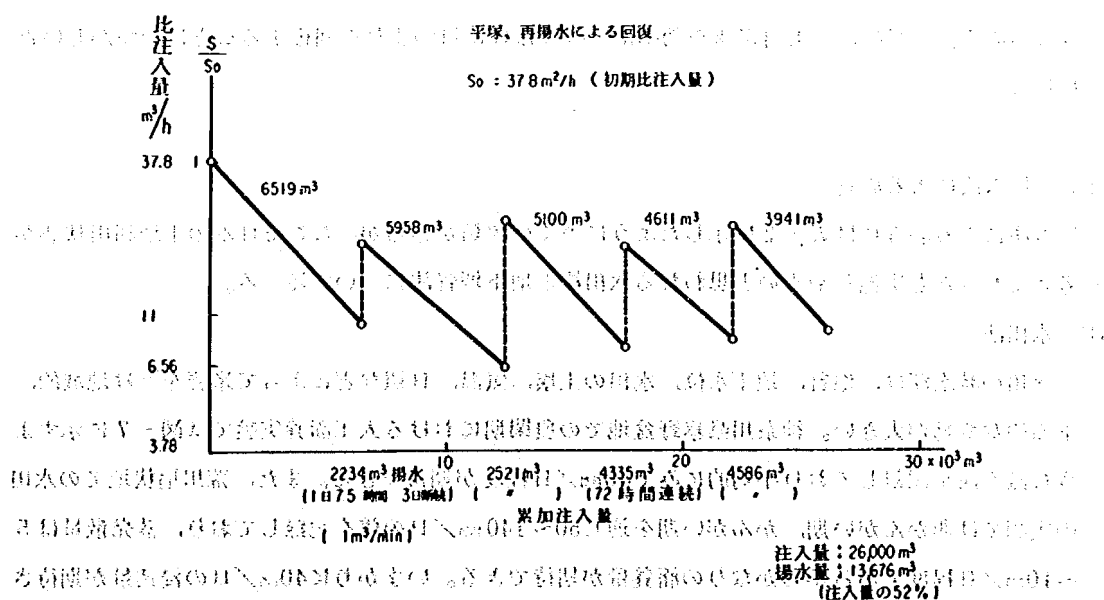


図-5 再揚水による比注入量の回復

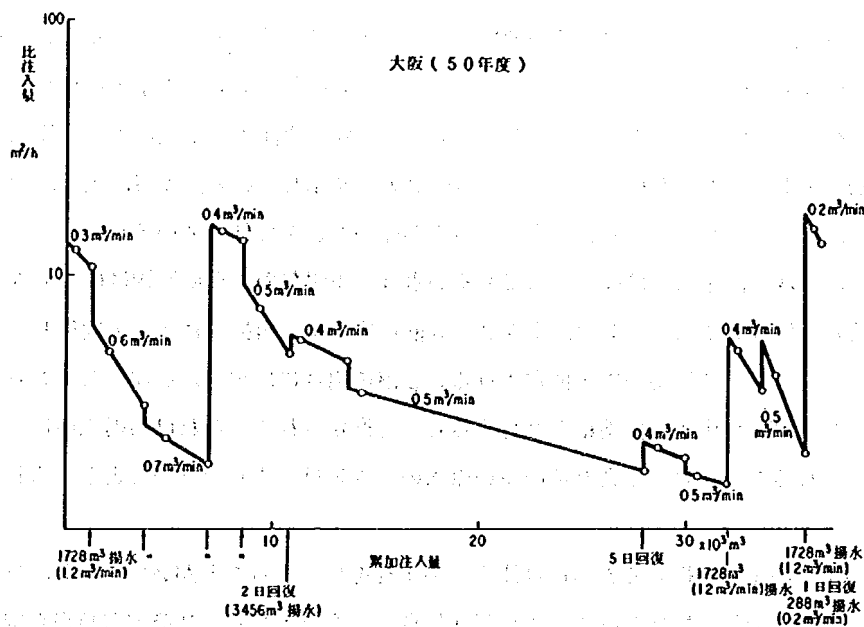


図-6 再揚水による比注入量の回復

量の52%に達しておりあまり効率のよい注入とは云い難い。これに対し上越の場合には再揚水が非常に効率的に働いており昭和48年から始まった注入において数える程しか揚水を行っていないにもかかわらず目づまりの発生がそれ程顕著ではない。このことは目づまりの原因が違っているのかも知れないがただ上越の場合は注入量約60m³/h に対して150 m³/h と約25倍の揚水を行っている点に特徴がある。いずれにせよ再揚水を効率よく行う以外に目づまりを回復することはむづかしいと思われる。

3.3 抔水法による涵養

拡水法による涵養には表-2に示したように多くの種類があるが、ここで日本の土地利用状態から考えてもっとも実施しやすいと思われる水田法と地下埋管法について述べる。

(1) 水田法

水田の減水深は、地質、地下水位、水田の土壌、気温、日照などによって影響をうけ地域的、季節的な変動が大きい。神奈川県秦野盆地での農閑期における人工涵養実験では図-7に示すような減水深を記録しており平均的にみて40mm/日程度が期待できる。また、荒川扇状地での水田の実測では非かんがい期、かんがい期を通じ50~140mm/日の値を記録しており、蒸発散量は5~10mm/日程度であるからかなりの涵養量が期待できる。いまかりに40mm/日の浸透量が期待さ

れるとすれば 100ha の面積では
 $0.46 \text{ m}^3/\text{sec}$ の涵養能力があるこ
 とになる。

わが国のように土地の開発利
 用が進み、新たに浸透池などを
 設ける余地の少ない点を考慮す
 れば、水田を利用した地下水涵養
 は有望な方法と云えるが、しか
 し水田の裏作として麦や野菜な
 どの栽培が行なわれたり、機械
 作業のために水を落すなど農業
 活動を阻害する面もあり、実際の適用に当っては検討すべき問題が多く残されている。

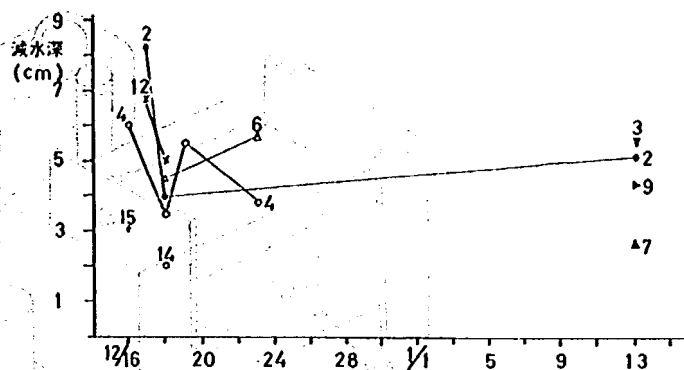


図-7 農業用水量と水田の減水深の変化
 1~16尊仏松における各水田の位
 置とその減水深の変化

(2) 地下埋管法

地下埋管による方法の概略を図-8に示す。地下埋管には穴あき管や継目をあけた管を用い、注入された水は下方の砂利を通して下の受け皿にたまる。この水は土壌の毛管作用によって上昇し側方に拡散して下方に浸透し地下水となる。

この方法の特徴は、地表面の土地
 利用にかかわらず利用できること
 と、好氣的条件で有機物の分解が行
 なわれるために目づまりが発生しに
 くいという点である。

この方法による涵養の実用性を確
 かめる意味で土木研究所では小規模
 な室内実験を行った。装置の概要を
 図-9に示す。図中bは移動可能な

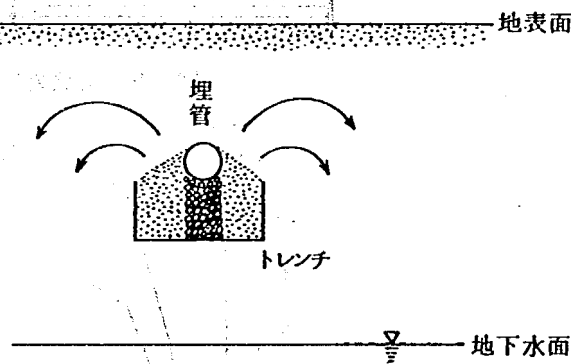


図-8 地下埋管による人工涵養の概要

側壁で1つの埋管の支配区間を変化させ、また連通管間を通じて上部から涵養された水を一定水位で外部に取り出す。土層としては豊浦の標準砂（透水係数 $K = 1.01 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ ）を用いた。

実験結果を図-10に示す。涵養高は1日当りの涵養量を単位面積に換算したものである。地下水位が低い程また埋管密度を大きくする程涵養量の増加する傾向を示し、実物の1/5~1/7程度の模型でありながら100~600mm/日の涵養量を示した。実際の場合には土壌の種類も多く、涵養水による目づまりの発生やその回復方法など解明すべき問題点も多い。荒川扇状地で実施した試験では10m×10m程度の広さに地下50cm径の埋管によって行なわれたが、1日700~900mmの涵養が可能であった。

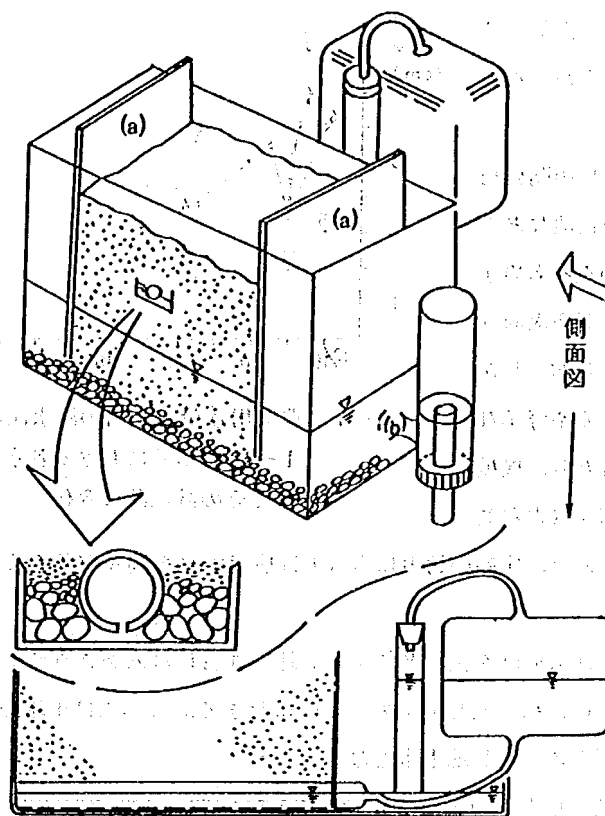


図-9 実験装置の概略図

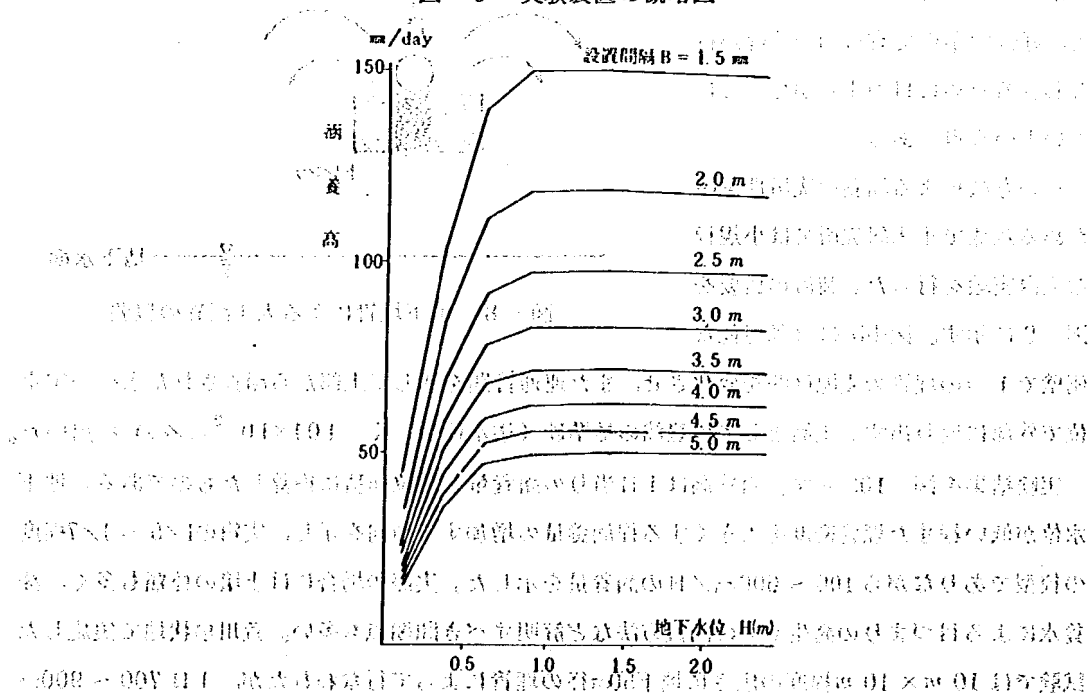


図-10 計算結果

4. 帯水層の水収支

地下帯水層を対象とする水収支を考える場合には次のような要素が支配的である。

- 1) 降雨量
- 2) 地表水の流入及び流出量
- 3) 地下水位
- 4) 対象区域への地下水流入量及び流出量
- 5) 蒸発散量
- 6) 地下水取水量
- 7) 地下水取水

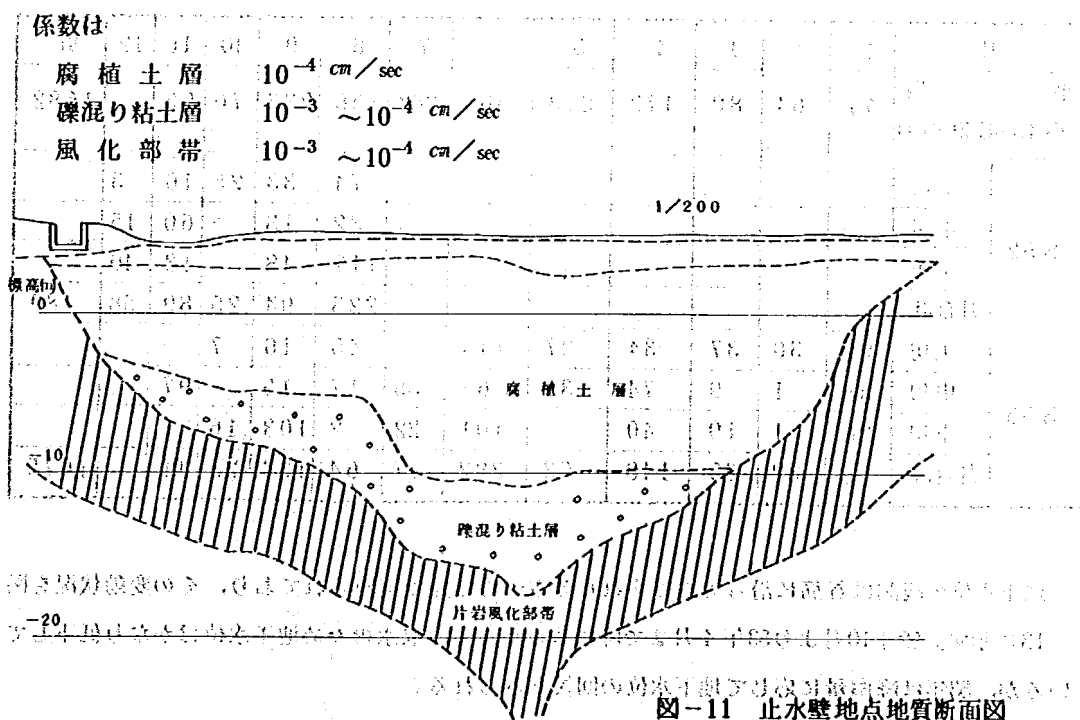
以上の各項目について調査をし水収支計算を行えば、地下帯水層での水収支が把握でき、水資源開発としての地下貯水池の可能性などが検討可能となる。以下に長崎県野母崎での調査例を紹介しよう。

4.1 野母崎の地下水調査

(1) 対象地域の水文地質

この地域は長崎県樺島の南西部にある細長い埋没地形をした堆積層の谷口部で、集水面積は約 0.6km^2 である。その海岸に近い谷の地質断面と縦断を図-11、図-12に示す。

地層は地表から表層、腐植土層、礫混り粘土層と基岩である片岩類とから成る。各地層の透水



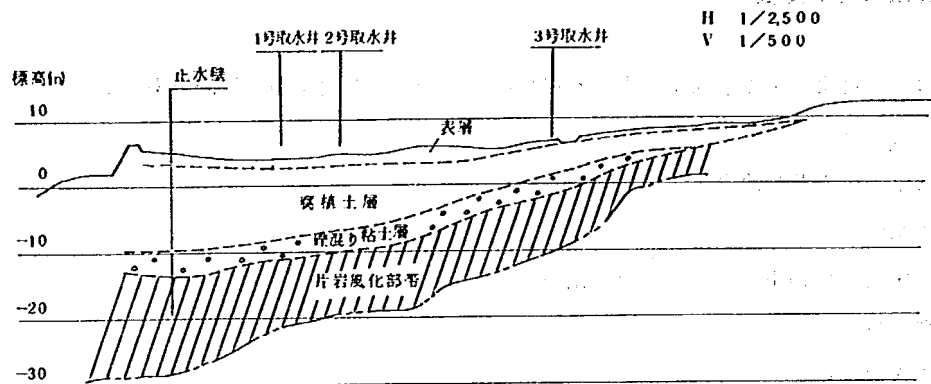


図-12 地質縦断面図

程度である。主な帯水層は礫混り粘土層と片岩の風化部帯である。止水と海水侵入の防止のため、海岸近くにグラウトによる止水壁が設けられている。

(2) 降雨量と地下水位

域内で観測された降雨量（3地点の平均値）を表-6に示す。53年は渇水年であって昭和45年から49年までの島での観測記録に比べると約60%である。

表-6 降雨量比較

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
平均 (S45~S49平均)	77	64	80	172	213	305	248	156	236	76	55		1,682
S52	上旬							74	33	25	16	3	
	中旬							32	13	-	60	15	
	下旬							117	48	-	13	40	
	月合計							223	94	25	89	58	489
S53	上旬	22	30	37	34	27	114	-	45	16	7	-	
	中旬	38	1	9	74	36	67	55	17	15	-	97	
	下旬	26	1	19	40	-	101	22	2	103	16	4	
	月合計	86	32	65	148	63	282	77	64	134	23	101	1,075

地下水位の観測は谷筋に沿って設けられた3本の観測井で実施されており、その変動状況を図-13に示す。52年10月より53年4月まで降雨量が少なく、取水のため地下水位はかなり低下しているが、53年は降雨量に応じて地下水位の回復がみられる。

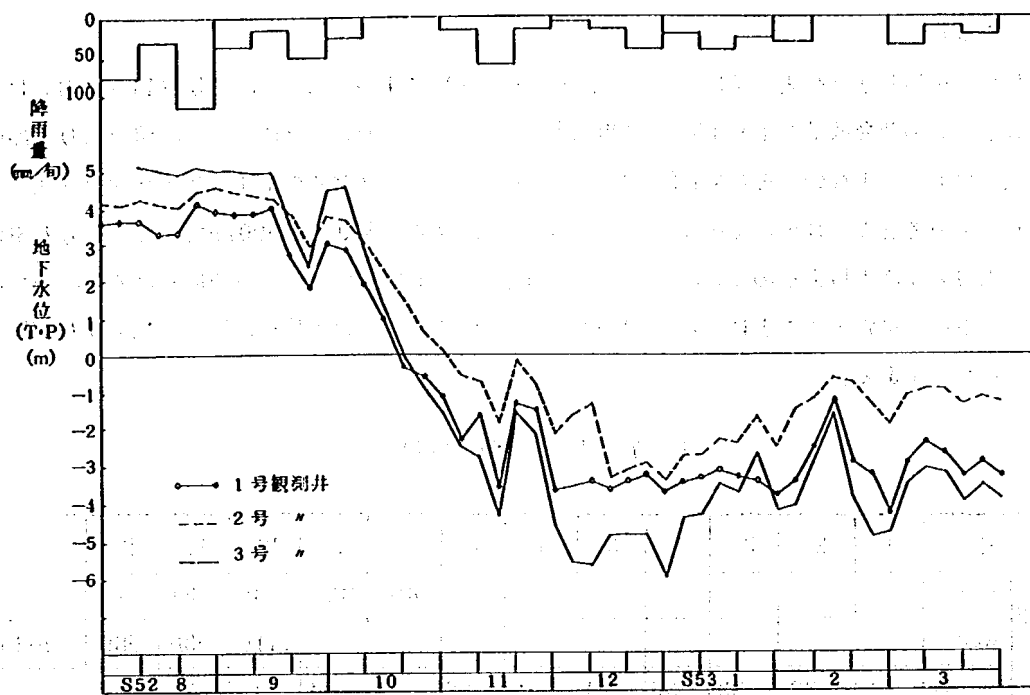


図-13 地下水位変動図 (その1)

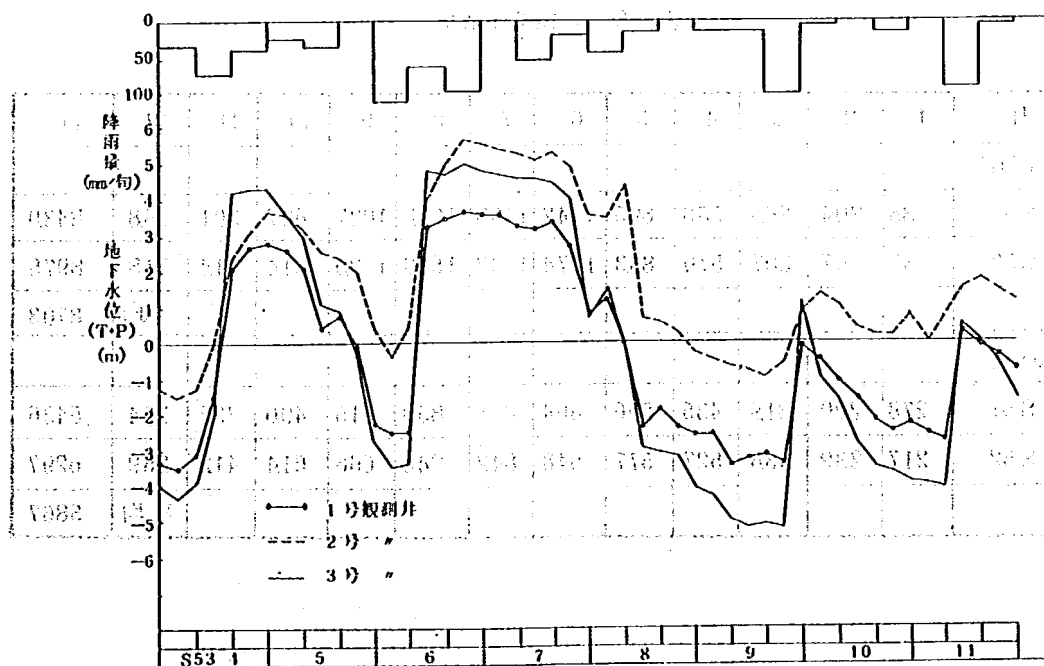


図-13 地下水位変動図 (その2)

(3) 蒸発散量

現地での観測結果を表-7に示す。夏期(5~9月)は4~5mm/日、冬期(11~3月)は2~3mm/日の蒸発散量を示し年間約1300mmとなっている。これはパンによる観測値であり実際の蒸発量はずっと少ない。そこで長崎の気象データを用いて、ソンスウェイト法とペンマン法より計算してみると表-8の如くになった。年間可能蒸発散量は870mmと590mmである。一方九州地方における年降雨損失量の調査によれば約600mmとなっているので、野母崎における年間蒸発散量も600mmと推定することにする。年間600mmを月別に実測記録の分布に従って配分すれば図-14の如くである。

表-7 蒸 発 量 (野母崎)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
S52	mm/日							(48)	(42)	36	31	19	
	mm/月									1116	930	589	2635
S53	mm/日	20	22	33	36	41	39	52	49	44	35	30	
	mm/月	620	616	1023	1080	1271	1170	1612	1519	1320	1085	900	12216

表-8 可能蒸発散量

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
ソンスウェイト法													
S51	88	204	266	566	895	1142	1458	1628	1027	697	301	158	8430
S52	37	57	307	570	853	1174	1732	1569	1230	814	414	218	8975
												平均	8703
ペンマン法													
S51	278	229	319	435	506	464	655	859	615	490	232	254	5436
S52	217	239	438	527	577	548	842	948	666	614	412	269	6297
												平均	5867

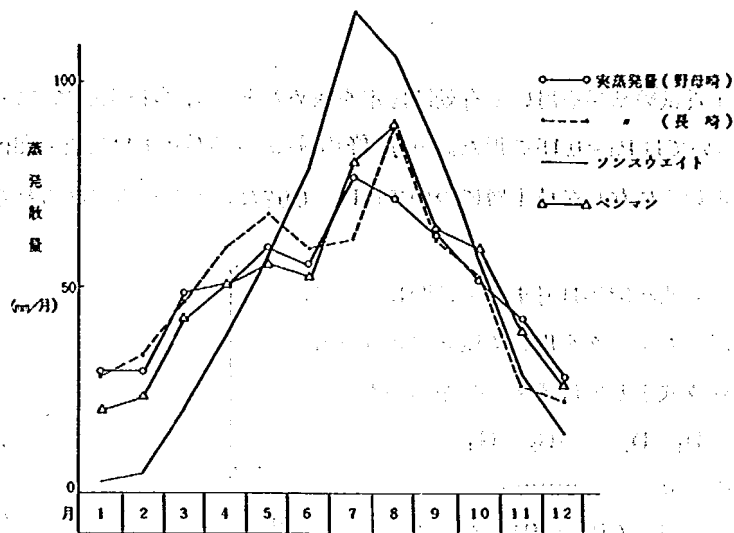
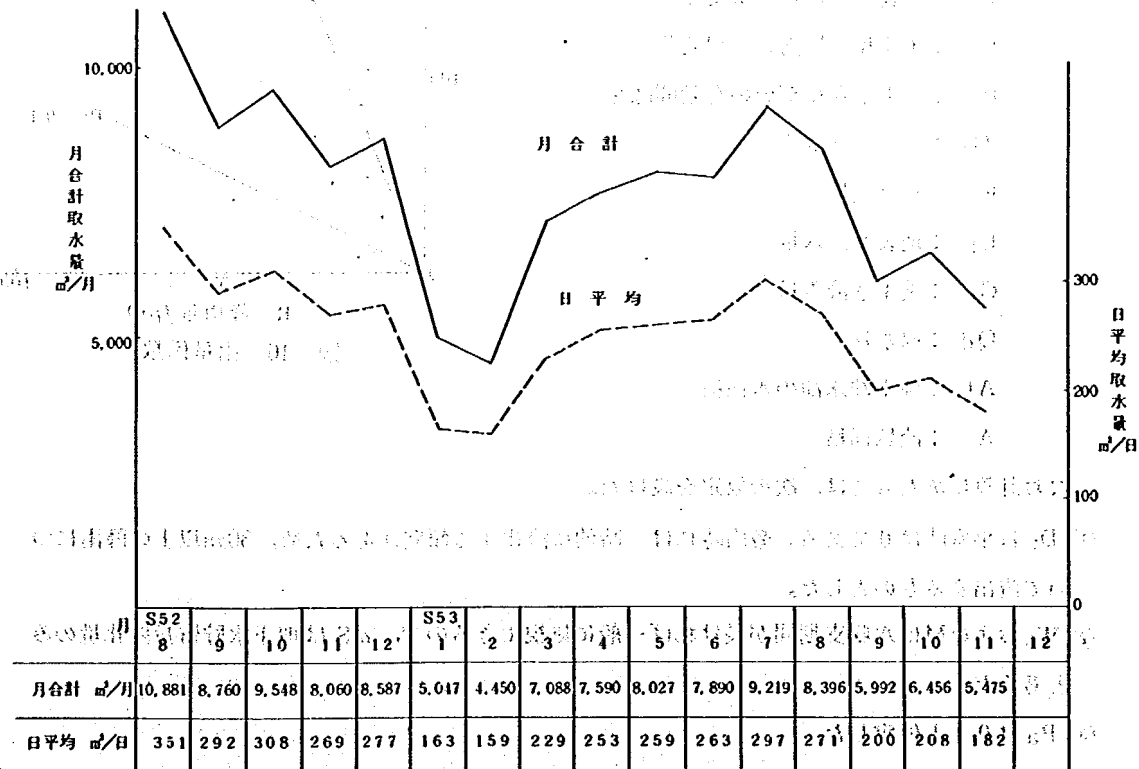


図-14 蒸 発 散 量

(4) 取 水 量

この帯水層から樺島の水道用水として取水をしており、その取水状況は図-15に示す如くである。日取水量として150～300 m^3 /日であり、やはり夏期に増える傾向にある。



注) S52.8～1.2の期間については、配水量デラタである。水多量採取地を示す。水多量採取地を示す。

図-15) 月合計取水量

(5) 有効間隙率

ボーリングの土質試験結果を用いて有効間隙率を求めたところ、腐植土層については $P_a=0.02$ 、礫混り粘土層については $P_a=0.15$ を得た。一方、降雨量と地下水位の上昇量との関係から P_a を求めてみると図-16の如くになり腐植土層については $P_a=0.02$ などがうらづけられる。

(6) 水収支計算

昭和52年8月から昭和53年11月までの期間について、水収支調査で検討したデータを用いて概略の水収支計算を行った。水収支式としては式(2)、(3)を用いた。

$$R - E - (D_1 - D_2) - (G_2 - G_1) -$$

$$\Delta S - Q_d = 0 \quad \dots\dots (2)$$

$$\Delta S = W_s + M + (P_a / \Delta H) A_t / A \quad \dots\dots (3)$$

ここで R : 降雨量

D_2 : 地表水流出量

G_2 : 地下水流出量

ΔS : 貯留量変化量

W_s : 地表における水量変化

M : 不飽和土層内の土湿変化

P_a : 地下水変化部分の有効間隙率

ΔH : 地下水位変化

E : 蒸発散量

D_1 : 地表水流入量

G_1 : 地下水流入量

Q_d : 取水量

A_t : 地下貯水池の水面積

A : 流域面積

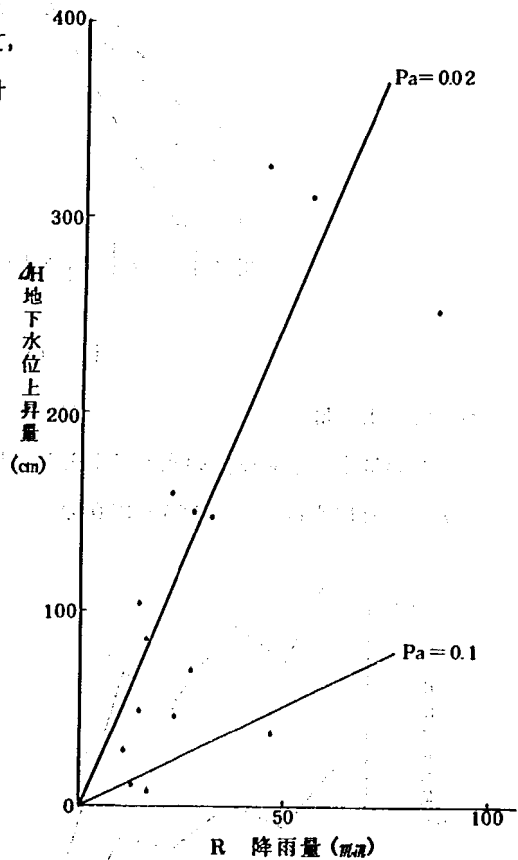


図-16 雨量係数

なお計算にあたっては、次の仮定を設けた。

- ① D_2 は平常時は 0 である。豪雨時には一時的に流出する傾向があるため、30mm以上の降雨について流出するものとした。
- ② W_s および M は水収支期間が長ければ一般に無視できるので、 ΔS は地下水貯留量変化量のみと考えた。
- ③ P_a は 0.1 と仮定した。

以上に基づいた水収支計算結果を表-9、その総量を図-17に示す。

この表における“差”とは、地下水としての流去量 (G_2) や土湿変化量に当るが、地表水の流出量

表-9 水収支表

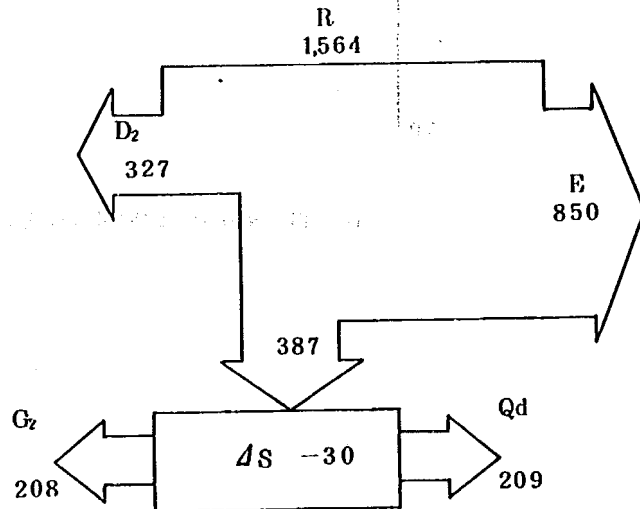
(単位: mm)

月 項目	S52 8	9	10	11	12	S53 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	計
R	223	94	25	89	58	86	32	65	148	63	282	77	64	134	23	101	1,564
D ₂	108	-	-	26	-	-	-	-	2	1	101	-	-	57	-	32	327
E	89	64	59	39	26	20	23	42	50	55	52	80	89	64	59	39	850
Q _d	19	15	16	14	15	9	8	12	13	14	14	16	14	10	11	9	209
△S	0	-3	-27	-13	-2	4	-3	4	37	-33	36	-18	-22	20	-20	10	-30
差	7	18	-23	23	19	53	4	7	46	26	79	-1	-17	-17	-27	11	208

(G₂)や土湿変化量に当るが、
地表水の流出量(D₂)もそれ程
正確に把握されている訳ではな
いので、この差とD₂とを合わ
せた530 mmが今後さらに施設を
改善することによって利用可能
となり得る量である。

また、大雨などの降雨量の大き
い一時的な雨は、地上での流
出量や蒸発散量を引けばほぼ地
下水の涵養量となり、貯留量変
化量(△S)に近い値を示す筈で
ある。この関係を月単位で調べ
たのが図-18であり、若し上の
関係が正しいとすれば45°の直

線で表わされる筈であるが、この図では△Sの方が小さくなっている。この計算には多くの仮定
があり、特に帯水層の構造が複雑なためにまだ十分把握されていないことが収支計算に大きく影
響していると思われる。



注) G₂には誤差を含む
水収支期間 S52.8~S53.11

図-17 水収支総量図

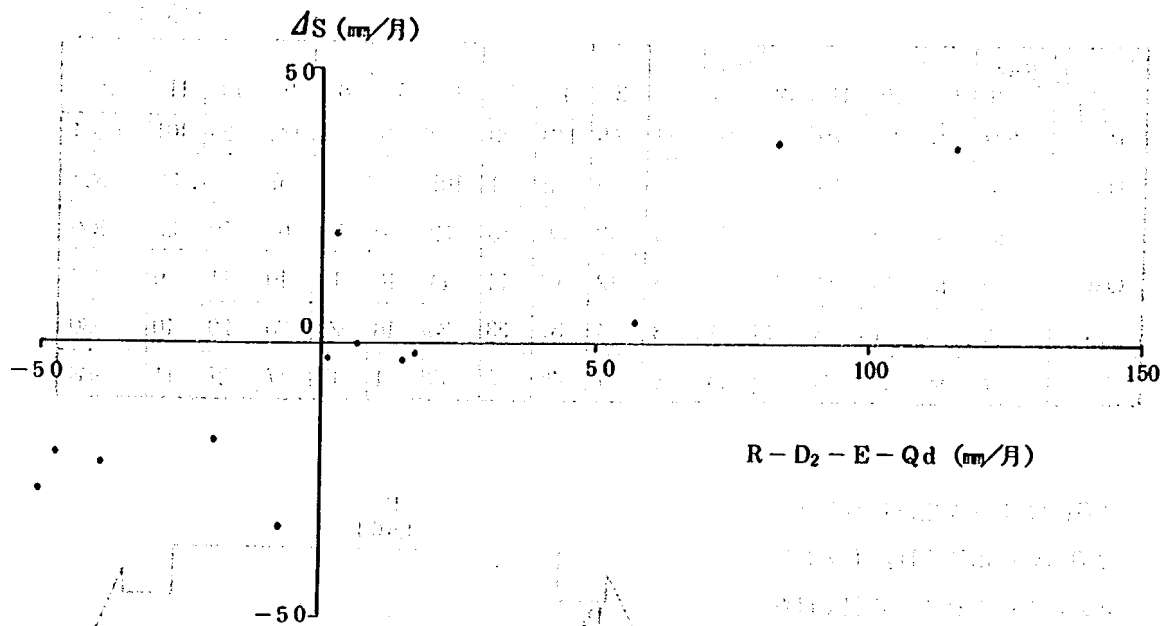


図-18 涵養量と貯留量変化との相関



貯留量変化(ΔS)の算出
 $\Delta S = P - E - Q_d$ (mm/month)
 涵養量(ΔS)の算出

貯留量変化(ΔS)の算出は、降水量(P)と蒸発量(E)の差から算出される。涵養量(ΔS)は、貯留量変化(ΔS)と流出量(Qd)の差から算出される。この図は、12ヶ月間のデータを示している。降水量(P)は、1月から12月まで増加している。蒸発量(E)は、1月から12月まで増加している。貯留量変化(ΔS)は、1月から12月まで増加している。涵養量(ΔS)は、1月から12月まで増加している。

5. 地下貯水池の利用

1994年，中国第一家民营证券公司——浙江证券有限责任公司成立，注册资本1000万元，其中70%由民间募集。浙江证券有限责任公司成立后，在浙江全省范围内开展证券业务，成为浙江省第一家民营证券公司。

地下貯水池も地上の貯水池と同様いろいろな利用の仕方が考えられるが、地上のそれと異なる大きな特徴は、貯水池への大量の水の出し入れができないことと、涵養水の水質がある程度良好なことが必要であり、そのために更に涵養水量に制限をうけることになる。しかし、その代りに地上ダムと違って地表を他の目的に利用しながら地下帯水層が利用でき、わが国のように土地利用の進んだ社会はもっとも効率的な方法であると云える浅井戸による不圧地下水の利用は、地盤沈下の発生も小さく、地表の農業活動や人々の生活に対する影響についても、最近の調査研究によって比較的小さいことが確かめられてきた。

5.1 地上ダムとの連結使用

地下貯水池はそれ単独でも十分利用できるが、地上ダムと連結的に使用することによりもっとも有効な利用ができる。

ダムによる水資源開発が進むにつれ流況はより平滑化され、新規利水の充足には豊水を利用することとなり、同じ利水量を生み出すための貯水容量は次第に増加している。このため大都市を控えた水系においては、渇水に備えて貯水池の増設に余念がないが、それでもその充足率は甚だ心細い状態にある。この場合、地下貯水池を利用して地上ダムに貯留された水を移し換えて貯水することにより、地上ダムの貯水量をそっくり代替させることができるわけであり、欠点とならない。

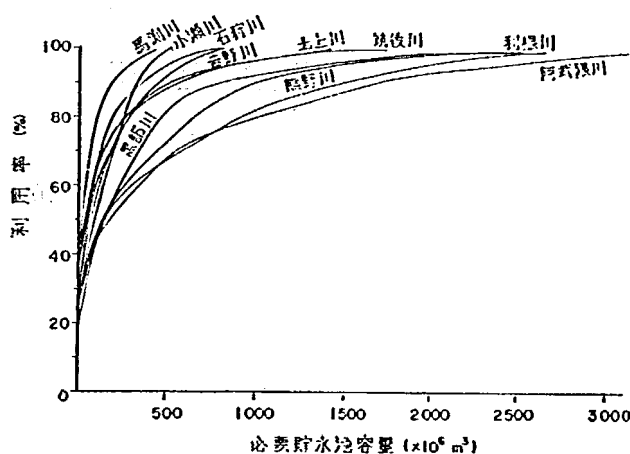


図-19 (出典：前掲中沢の論文に同じ)

っくり代替させることができるわけであり、地下貯水池への涵養量、取水量の小さいことは殆んど欠点とならない。

5.2 河川水との連結使用

現在の利水計画は1/10 の確率の渇水を対象としているがこれまでの水文資料の観測期間はまだ
余り長くないので計画を上廻る渇水が発生する可能性が高い。例えば50年分の資料から1/10 確率
の利水 V (m^3) を仮想真値としたときに20年分の資料から推定すれば $0.6V \sim 1.4V$ の値となりかなり
バラツクことになる。

このように短い資料からの推計は大きな誤差を含むことをまぬかれず、溺水発生の頻度は計画値(1/10)よりも多くなることが予想される。

このような危険性の高い渇水に対し地下貯水池との連結により渇水補給を行い、その代り平常時の河川水に余裕のある場合には地下水の使用をやめ渇水に備えるわけである。これを模式的に示せば図-20の如くであり、河川水との連結使用により新規の利用水を生み出したり、渇水時の安全度を高めることができる。

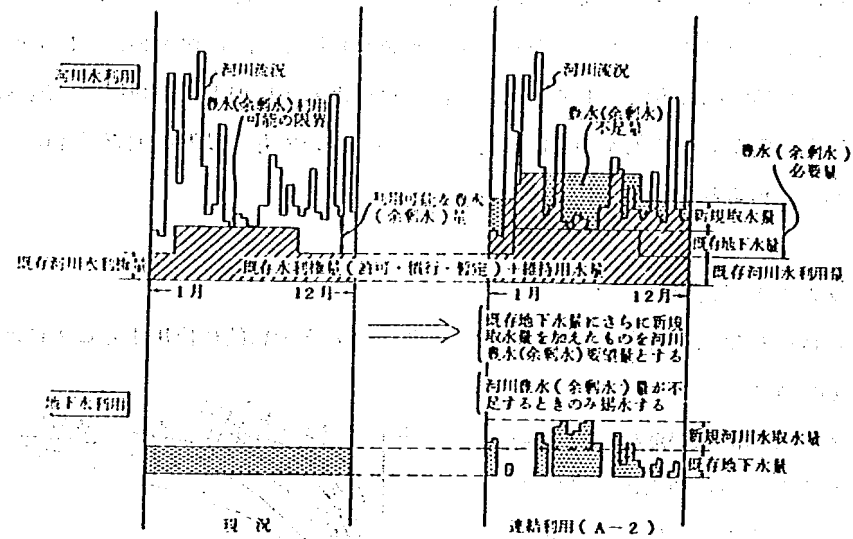


図-20

参 考 文 献

- 1) 地下貯水池による水資源開発：石崎勝義 北川 明，土木技術資料 19 - 9 昭 52. 9
- 2) 注入井による注入機構に関する考察：北川 明，土木技術資料 19 - 9 昭 52. 9
- 3) 地下水のシミュレーション：北川 明，土木技術資料 19 - 9 昭 52. 9
- 4) 還元を考慮した地下水の利用：遠藤真一，土木技術資料 19 - 9 昭 52. 9
- 5) 水資源計画における地下水利用のあり方：石崎勝義，土木技術資料 21 - 9 昭 54. 9
- 6) 平地部地下水の水収支：佐合純造，北川 明，山田利雄，土木技術資料 21 - 4 昭 54. 4
- 7) 河川水と地下水：石崎勝義，建設月報，昭 52. 10
- 8) 地下水の有効利用の方策：石崎勝義，建設月報，昭 53. 7
- 9) 注入井による地下水涵養：石崎勝義，北川 明，土木学会第 23 回水理講演会，昭 54. 2
- 10) 山本荘毅，地下水の涵養について
そのⅠ，用水と廃水 Vol No 8, (1960).
そのⅡ， " Vol No 9, (1960).
そのⅢ， " Vol No 10, (1960).
- 11) 山本荘毅，地下水の人工涵養，施工技術，第 9 巻，第 7 号，(1976).
- 12) 村下敏夫，地下水人工涵養の技術上の諸問題，施工技術，第 9 巻，第 7 号，(1976).
その 1， 地下水と井戸ポンプ 昭和 47 年 9 月，
その 2 - 1 " 昭和 48 年 6 月，
その 2 - 2 " 昭和 48 年 8 月，
その 2 - 3 " 昭和 48 年 9 月，