

貯水池における凝集性懸濁物質の挙動について

TRANSPORTATION AND SEDIMENTATION OF COHESIVE
SUSPENDED MATERIALS IN RESERVOIR

東北大学 正 員 岩崎敏夫 ○三王英寿

東北工業大学 正 員 阿部至雄

東北大学 学生員 大杉 勉

1. ま え が き

ダム貯水池は一般に濁度、水温、生物などの河川水質に大きな影響を与えるものであるが、とくに流域内に鉱山があるとその坑道排水中に含まれる有害物質が池内に流入することが多く、これらの運搬沈殿などに対する貯水池の機能特性を明らかにする必要がある。北上川本川に築造された四十四田ダムにおける濁度問題には、貯水池に流入する2次支川水源域に存在する旧硫黄鉱山からの強酸性廃水の中和処理に伴う硫酸カルシウムや水酸化鉄成分および水酸化第2鉄と共沈する砒素の再浮上・流下という環境上重要な問題が含まれているので、ダムの有する河川災害の防災機能上、濁度物質の挙動の解明は極めて緊要である。このため著者らは以前より調査研究を行っており、昨年度は全般的な水質および濁度物質の流送状況の概要を明らかにし、とくに懸濁物質の凝集性の影響の大きいことを指摘した。さらに今年度は調査および実験を継続し、池内流況、懸濁物質および堆積物質の特性などに関するより詳細なデータを得たうえで凝集性の顕著な懸濁物質の流下に関する計算を試みたのでここに報告する次第である。

2. 四十四田ダム貯水池における調査結果

当貯水池においては上記のように凝集性のある懸濁物質が常時大量に流入し、池内の水理条件に応じて沈降堆積あるいは再浮上流下する。このような懸濁物の挙動を解析するためにはまず貯水池内の流動特性を知る必要があり、安芸²などによる流動形態の指標 α （年間総流入量 / 貯水池総容量）について過去数年間の流量データによって調べると $\alpha = 20 \sim 30$ となりほぼ混合型に属するが、水温分布のデータによると6月～9月にはかなり顕著な成層のみられる場合があり、10月～5月には完全に混合型となっている。ダムサイトでは発電用の中間取水を行っており、6月の制限水位移行期および7月～9月の制限水位期で大規模出水のない時には水面付近に1次躍層、下層部に2次躍層を生じ

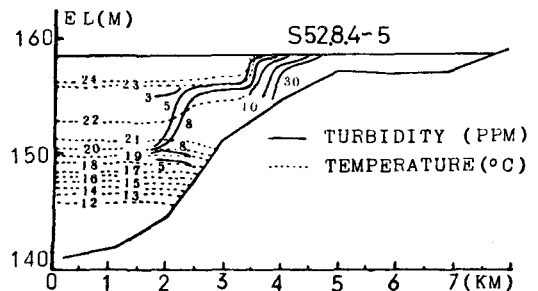


図-1 貯水池内水温・濁度分布

後者は取水口の下方であるため池底の水は停滞する。このような躍層の規模は小さく、 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の小規模出水で容易に破壊される。しかし、後述するように制限水位移行期においてはとくに濁度物質の動きの激しいことを考慮すると、池内成層の影響も無視できないと思われる。今年度の調査は、上のような意味で年間を通じて最も流動形態が複雑でありかつ實際上重要な制限水位移行時～制限水位時を中心に行なったものである。

図-1は制限水位時（成層期）における貯水池内の水温分布および濁度分布の実測例である。同図中の横軸にはダムサイトを原点として上流に向う距離がとられている。3.5 KM地点には流入水の潜

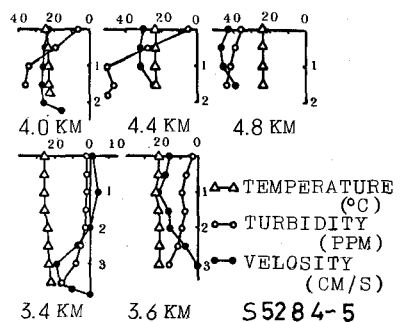


図-2 水温・濁度・流速

り込み (plunging) があり成層型の貯水池となっているが、その上流側は普通の河道に近い流況である。 plunging point 上流側の河道区間流心部における水温、濁度、流速の鉛直分布状況を図-2に示した。

plunging pt.をはさむ3.4 KMおよび3.6 KM地点における横断面内の流速、水温、濁度の実測例が図-3、図-4である。図-3より断面流量を求めると3.6 KM地点で15.3 m³/s (貯水池流入量15.7 m³/sにはほぼ一致)、3.4 KM地点で19.2 m³/sであり、これより plungingに伴う連行量は3.9 m³/s、連行係数は0.25となる。また、流入水温21.2℃と表層水温24.7℃から連行後の水温を算定すると21.9℃となり、実測値22.0℃とはほぼ一致した。

plunging pt.の位置は、池内表層水と流入水との密度差 $\Delta\rho$ 、単位幅流量 q 、水深などによって決まると考えられる。図-5は今年度の実測値および石橋ら³によるデータを用いて plunging pt.の水深 H_p と単位幅流量 q との関係をプロットしたものである。密度差 $\Delta\rho$ の影響は明らかでないが、 q についてはほぼ $H_p = 9 \times q^{2/3}$ なる関係がみられ、板倉・岸⁴による実験の傾向 ($H_p \sim q^{2/3}$) と一致している。

3.4 KM地点における中間流動層内の水温範囲は21℃～24℃であった。この値が下流側中間流動層内の水温範囲であると考えると、水平離床部である2 KM地点の流動層厚は約5.1 mとなる。また河道幅 $B = 125\text{ m}$ 、流量 $Q = 19.2\text{ m}^3/\text{s}$ を用いると、次式の表現による内部フルード数 F_i は約0.17となる。

$$F_i = (1+r) Q_i / \left\{ B D^2 \sqrt{g \epsilon / d} \right\} \dots\dots\dots (2-1)$$

Q_i : 流入量, r : 連行係数, B : 水深 d の深さの川幅

D : 流動層厚, ϵ : 密度こう配

当貯水池においては洪水調節のために6月1日より1カ月間に、貯水位

を満水位 (170 m) から制限水位 (159 m) まで徐々に低下させている。懸濁物質の沈降は、このような水位変化に応じた背水限界によって著るしく影響される。すなわち、背水限界より上流は流速が大で濁水の混合が著るしく、下流では急に流速が落ちて懸濁物質は沈降し始め濁度分布の変化を伴いながら水面付近は清澄化する。かくて満水位期には8～10 KM地点、制限水位期には3～4 KM地点に顕著な沈降領域を生ずる。このような沈降領域においては、中和生成物の凝集性によって流速の低下とともに懸濁物フロクの成長が著るしく、沈降速度を大ならしめている。調査にあたっては、なるべくフロク

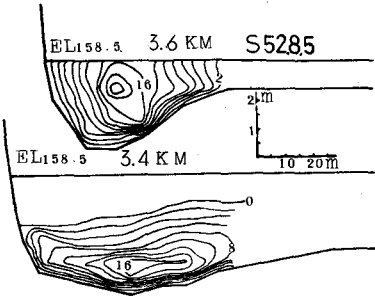


図-3 plunging pt 付近流速

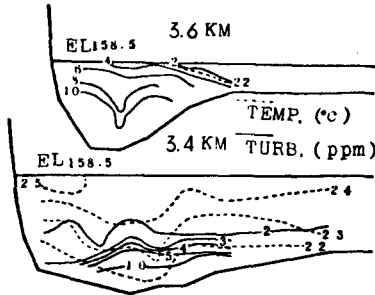


図-4 水温・濁度分布

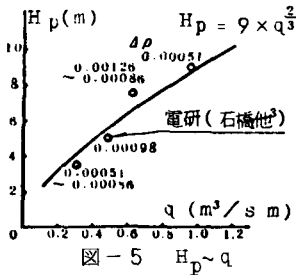


図-5 $H_p \sim q$

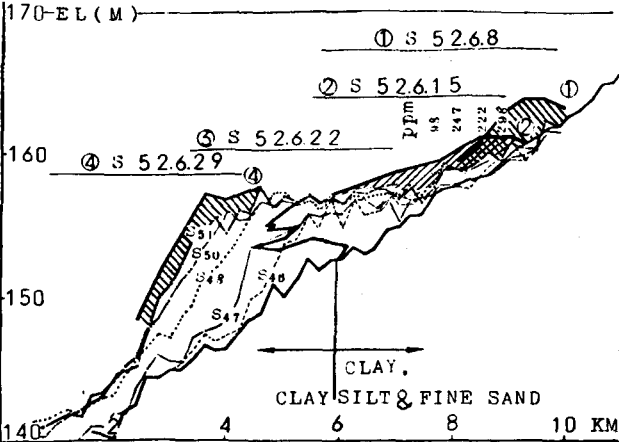


図-6 池底の堆積状況と濁度物質の移動

懸濁物フロクの成長が著るしく、沈降速度を大ならしめている。調査にあたっては、なるべくフロク

クを破壊しない採水器を試作して、接写撮影によって各地点のフロック粒子の大きさを測定した。

図-6は、ダム建設後の池底縦断形状の経年変化、ボーリングによる土質分析結果（建設省資料）に加えて、今年度の制限水位移行期に行なった堆積状況の変化と濁度分布の実測値を示したものである。堆積底面は重錘（レッド）、堆積表面は北原式採水器を利用した測深によって、流動性のある堆積層の厚さを船上より測定した。同図より、満水位期には貯水池上流部（8～10KM地点）にかなり大量の濁度物質が沈降堆積（水酸化第2鉄を多量含有した泥液）しており、これが制限水位移行期の水位低下に伴う掃流力増加によって再浮上・流送・沈殿をくり返して下流に輸送されると推測される。また、同図中に数字で示されたように、この時期の濁度は非常に大きくなっている。このようにして沈降性濁度物質の大部分は年間を通じて結局制限水位期の沈降領域に堆積し、これが大規模な堆積デルタの発達・前進を促進していることが池底縦断形状の経年変化より明らかである。

3. 懸濁物フロックの特性

前述のように当貯水池上流域河川においては強酸性水の中和处理に伴って生ずる $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 CaSO_4 などが大量に供給されており、また一部未反応の $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ も流水中に含有されている。したがって、上流域河道には疎水性コロイドの凝集による懸濁粒子が高濃度で存在する。このような凝集性物質は、電気的に中性化したのちその粘着力と河川乱流との関連のもとに数個の基本粒子が結合して微小フロックを生じ、さらに微小フロック同志の結合によって粒径を増すと考えられる。また、粒径の成長に応じて沈降速度が大となるため、このようなフロックの変化について明らかにすることは懸濁物濃度分布の算定にあたって非常に重要である。

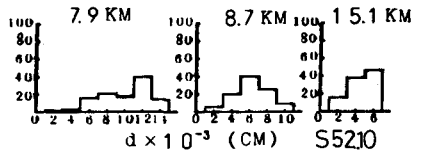


図-7 懸濁物粒度の変化

上流河道部（15 KM地点）より貯水池に移行する区間の各点における懸濁物粒度分布を重量百分率で表わすと図-7のようになり、流下につれてフロックが成長している様子がわかる。このようにして河道および池内の各地点で得たデータより平均粒径 $\bar{d}$ と平均流速 U_m の関係を示したものが、図-8である。これより流速の低下とともに一意的にフロック径が増す傾向がみられ、 $\bar{d} = \alpha U_m^{-\beta}$ （ $\alpha, \beta = \text{const.}$ ）で表わすことができる。さらに、このことは河道および池内（比較的上流側）では凝集およびフロック化のための条件は十分に満たされており、実際上フロック粒度を決定する要素が流れによる破壊作用力であることを示すと思われる。

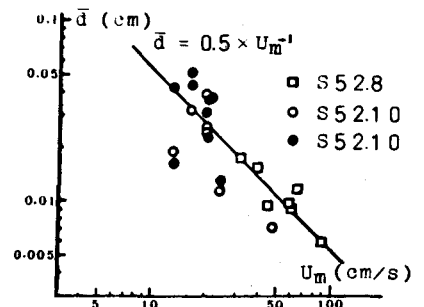


図-8 $\bar{d} \sim U_m$

上のように成長条件が十分に満たされている場合のフロックの最大径 $d_{\max}$ は、フロックの結合によって破壊に抵抗する力 F_r と外部からの破壊力 F_b との相対関係によって決まる。まず、抵抗力 F_r についてはフロックの構造が明らかでないため各種の考え方があがるが、ここでは一応、粒径による含水比の変化—有効断面積の変化—結合強度の変化を考慮して丹保⁵が導いた次の関係を用いる。

$$F_r = d^{\frac{2}{3}-n} \cdot \tau_0, \quad \rho_f - \rho_w = a(d/l)^{-n} \dots \dots (3-1)$$

τ_0 : 基本フロックの剪断強度, ρ_w : 水の密度

ρ_f : 粒径 d のフロックの密度, $a = \text{const.}$

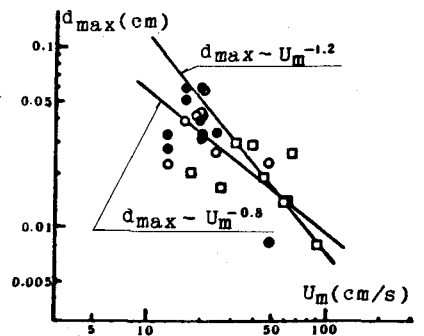


図-9 $d_{\max} \sim U_m$

つぎに、破壊力 F_b については、主としてフロック径のスケールの乱れ渦に伴う変動流速が破壊をも

たらずと考へて、次のような関係が求められている^{5,6}

$$\left. \begin{aligned} F_b &\sim \epsilon^{\frac{2}{3}} \cdot d^{\frac{8}{3}} & (d > \lambda) \\ F_b &\sim \epsilon d^4 & (d < \lambda) \end{aligned} \right\} \dots \dots (3-2) \quad \begin{aligned} \epsilon &: \text{有効エネルギー消費率} \\ \lambda &: \text{乱れのマイクロスケール} \end{aligned}$$

ここで、式(3-2)中のエネルギー消費率 ϵ が単位体積当りの流水のもつ平均運動エネルギー($\frac{1}{2} \rho U^2$)に比例すると考えると、 $F_r = F_b$ より最大フロック径 d_{max} と平均流速 U_m との関係が次のように表わされる。

$$d_{max} \sim \tau_0^{\frac{3}{2(1+n)}} \cdot U_m^{-\frac{2}{1+n}} \quad (d > \lambda), \quad d_{max} \sim \tau_0^{\frac{3}{2(1+n)}} \cdot U_m^{-\frac{3}{3+n}} \quad (d < \lambda) \quad \dots \dots (3-3)$$

図-9は実測による d_{max} と U_m との関係をプロットしたものであり、あわせて式(3-3)の関係(実測データより推算した $n = 0.67$ を使用)が示してあるが、 $d > \lambda$ の場合の傾向が実測値と比較的よく一致している。剪断強度はフロックの組成や構造によって変化すると考えるべきであるが、供給される懸濁物質の組成が同一であるとし、その基本フロックの剪断強度 τ を一定とすると、この例のように $d_{max} = \alpha U_m^{\frac{1}{n}}$ の関係がかなり普遍的に成立するものと思われる。さらに、このことを平均粒径に拡張して考えると図-8に示したような関係があり、以下の濁度分布の計算にはこれを用いる。

4. 濁度物質の堆積とその再浮上特性に関する実験

満水位期において貯水池に流入する凝集性懸濁物質の大部分は、制限水位時の沈降領域にある大規模デルタ頂部よりもかなり上流の区間に沈殿堆積する。また、この堆積物は、制限水位移行時などに流れの洗掘作用によって再浮上し、図-6中に示されたように高濃度で流下する。したがって、濁度物質の堆積および再浮上特性を知ることは池内の濁度分布を計算する上で重要である。このため、現地試料を用いて次のような実験を行なった。

まず、池底より採取した泥液試料を使用し、初期濃度を変えて攪拌したのちアクリルパイプ内で沈殿させ、含水比の鉛直分布を測定した。パイプ内の試料は濃度に応じて一定の時間が経過すると明瞭な界面を生じて沈降し、約10日後には界面の沈下がほとんどみられなくなる。このように堆積した試料の含水比は界面付近で深さ方向に急激に減少するが、より下層部における変化はゆるやかである。図-10は攪拌後放置し12日後に測定した例であるが、初期濃度にかかわらず含水比分布はほぼ同様であった。また、同図中には別途試料をつくりベーン型試験器によって界面付近の剪断力を測定した結果が記入してあり、含水比との関係がわかる。

つぎに、上と同様の試料を用いて流れによる再浮上の実験を行なった。

長さ3m、幅10cm、深さ50cm、ガラス側壁、下流端可動越流堰の

水路を用い、実験にあたってはまず水路の上・下流端をせき止めて適当な水深をとり、一定量の試料を入れて攪拌したのち放置し、一定時間界面沈降した泥液表面が基準面に一致するようにした。流量と水深との組合せによって剪断力 τ を変化させ、界面粒子の移動限界および浮上限界の剪断力を求め、さらに流水中の濁度分布を測定した。濁度分布は、内径3mmのガラス管を用いたサイフォンによって各点より採水したのち、積分球式濁度計を用いて測定した。この結果、界面上の微粒子の移動限界として $\tau = 1 \sim 2$ dyne/cm²、浮上限界として $\tau = 2 \sim 3$ dyne/cm²が得られた。なお、この実験においては堆積時間を2~12時間の範囲で変化させたが、これは上の各限界剪断力にほとんど影響していない。さらに、単位面積・単位時間当りの再浮上量 q_s を次式によって算定し、剪断力との関係を求めた。

$$q_s = \left\{ \int_0^H U \cdot C \, dh \Big|_l - \int_0^H U \cdot C \, dh \Big|_u \right\} / L \quad \dots \dots (4-1)$$

ここに U : 流速, C : 濃度, H : 水深, L : 断面間距離, u : 上流側, l : 下流側断面

図-10に示されたように含水比分布に対応して泥液の剪断強度が変るため、洗掘の進行とともに浮上量の低下する傾向がある。このため $q_s \sim \tau$ の関係を求めることはかなり困難であるが、表層のごく移

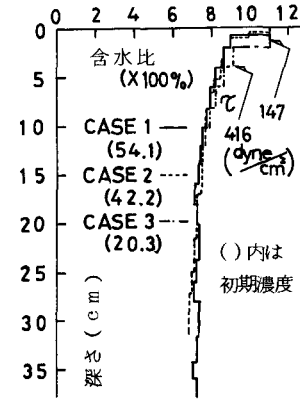


図-10 含水比分布

動し易い部分が剥離したのちの測定値より、ほぼ $q_s = 1 \times 10^{-6} (\tau - \tau_c) (g \text{ cm}^2 \text{ s})$ を得た。

5. 濁度分布の計算

濁度物質がダム下流へ流出する可能性を予測するためには、各種水理条件下におけるダムサイト付近での濁度を知ることが必要である。このため、貯水池流入端付近よりダムサイトにいたる区間の濁度分布について計算を行なった。計算にあたっては、比較的上流部で流速に関する対数分布則が適用できる区間（河道部分と呼ぶ）とその下流からダムサイトまでの区間（貯水池部分と呼ぶ）に分割し、河道部分下流端の計算結果を貯水池上流端の境界条件として接合させた。

5-1) 河道部分の濁度分布

計算対象は、強い乱れ混合によって濁度の鉛直分布がほぼ一定であるような河道上流部より懸濁物のフロック化が進み沈降が盛んとなる領域にかけての区間である。計算の基礎式として次の定常拡散方程式を用いた。なお、座標系および記号は図-11に示す通りである。

$$U \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial Z} \right) - W \frac{\partial C}{\partial Z} \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

$U(Z)$: 主流方向の流速, $C(Z)$: 濁度,

ϵ_z : 鉛直方向の拡散係数, W : 懸濁物の沈降速度

上式を差分化し、図-11（河道部）中に示すような境界条件のもとに数値計算を行なった。ただし、底面境界条件中の k は次式のように与え、さらに流動し易い堆積物のある場合には式（5-3）のように設定した。

$$k = 1 \quad (\tau \geq \tau_c) \quad , \quad k = \tau/\tau_c \quad (\tau < \tau_c) \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

$$\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial Z} - kWC = q_s \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

上式中の q_s は堆積物の再浮上量であり、4.で述べたように流水剪断力 τ の関数として与える。また、沈降速度 W については、図-8に示した関係よりまず懸濁物フロックの平均粒径 d を求め、ついで粒径による密度変化を考慮した次式によって計算した。

$$W = 0.014 d^{0.78} / \mu \quad (cm/s) \quad \dots\dots (5-4)$$

μ : 粘性係数

拡散係数は、渦動粘性係数に比例すると仮定した次式（ $\beta = 1.2$ ）で求めた。

$$\epsilon_z(X, Z) = \beta K U_* Z (1 - Z/H) \quad \dots\dots (5-5)$$

K : Karman 常数 U_* : 底面摩擦速度

流速の鉛直分布については、河道部で粗面对数則がよく適合することが実測結果より確かめられており、これによって与えた。

制限水位移行期および満水位期の河道部に対して以上の方法によって行なった計算結果と実測値とを比較させた例を、図-12、13に示した。これらの計算結果においては、3.で述べた懸濁粒子フロック径変化の効果がかなりよく表われている。

5-2) 貯水池部の濁度分布

（5-1）と同様の基礎式を用いて、図-11に示したような成層時を対象として Plunging

pt. 付近より下流部の中間流動層内の濁度分布を計算した。

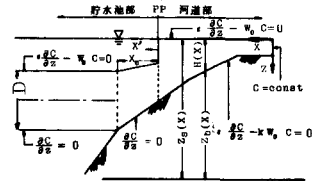


図-11

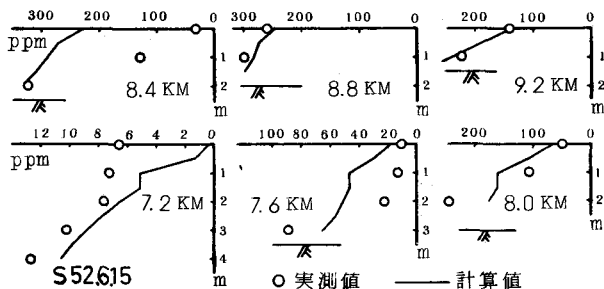


図-12 制限水位移行期の濁度分布例

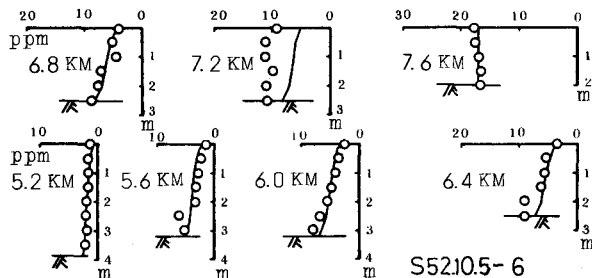


図-13 満水位期の濁度分布例

中間流動層内の流速はガウス分布とし、とくに plunging pt. から貯水池部への移行 区間においてはガウス分布からのひずみがあるため次式によって表わした。

$$U(Z) = U_{\max} \frac{X_0 + Z(X_0 - X)}{X_0} \text{EXP} \left\{ -\frac{(Z-D/2)^2}{2\sigma^2} \right\} \dots\dots (5-6) \quad D: \text{流動層厚}$$

Plungingに伴う連行係数は実測結果 $r = 0.25$ を用い、それより下流において連行される量については、芦田⁷の研究結果により、 $E = 0.0015 / R_i$ (R_i : Richardson 数)を用いて算定した。

Plunging pt.の位置は、2.で述べた結果を用いて $H_p = 9 \times q^{2/3}$ より求めた。池内の中間流動層の厚さ D については式(5-7)を適用し、また plunging 開始直後の流動層厚はその下流100地点において内部フルード数 $F_{i1}' = 0.68$ であったことと河口塩水くさびからの類推より、 $F_{i1}' = 1$ として式(5-8)より決定した。

$$D = \{Q(1+r) / (B \cdot F_{i1} \sqrt{g \cdot \epsilon})\}^{1/2} \dots\dots (5-7)$$

r : 連行係数, B : 河道幅, ϵ : 密度こう配

$$D = \rho U_m^2 / (g \Delta \rho) \dots\dots (5-8)$$

U_m : 平均流速, ρ : 流入水(連行後)の密度, $\Delta \rho$: 密度差

層内の拡散係数としては、芦田⁸による次式を用いた。

$$\epsilon = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{r}{2}} \cdot U_m^2 \cdot D \dots\dots (5-9)$$

r : 抵抗係数, D : 流動層厚

懸濁物粒径の実測データより、河道部末端の沈降領域までは均一性がかなり大きいので平均粒径の表示が有効であるが、それより下流では粒度分布の影響が無視できなくなることがわかった。

したがって、沈降領域までは図-8のような関係によって算定し

た平均粒径を用い、その下流においては実測にもついた粒度分布形(ほぼ300 μ 程度の粒径を中心とした正規分布形を呈す)を用いて計算を行なっている。

以上の方法によって行なった貯水池部(plunging pt.より下流側)の計算結果を、実測値と対照させて図-14に示した。この例は図-1と同じ場合のものであり、流入濁度が比較的低い時点であったため池内での変化はあまり明瞭でないが、とくに plunging pt. 付近の濁度物質の挙動についてほぼ妥当な結果が得られているといえよう。

6. あとがき

昨年度より継続して行なってきた調査・実験のデータにもとづいて、流入懸濁物質の池内での挙動について考察し、若干の計算を試みた。その結果、なお多くの問題点を残しているが、凝集性の顕著な懸濁物の池内濃度分布に関する実用的計算のための見通しが得られた。

研究例としてとりあげた四十四田ダムにおいては、大量の濁度物質の供給があるにもかかわらず凝集性の効果のために池水は清澄化し易い傾向があり、沈殿池としての機能が增大していると考えられる。しかし、異常出水時などに対する予測はまだ十分でなく、今後の検討事項である。

最後に、本研究は文部省科学研究費(代表:名大 足立教授)の補助を受けたことを付記し、また現地調査において多大のご協力をいただいた建設省北上川ダム統合管理事務所および東北大学水理学研究室の方方に謝意を表する。東北大学 首藤伸夫教授には多くの有益な助言をいただいた。あわせてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩崎敏夫・三王英寿:貯水池における流入濁度物質の挙動について・第21回水講演文集, 1977.
- 2) 安芸周一:貯水池濁水現象, 第11回水工学研究会講義集, 1975.
- 3) 石橋他:成層型貯水池内の流れと熱収支の現地観測, 第21回水講演文集, 1977.
- 4) 飯倉忠典・岸力:貯水池密度流に関する研究, 第14回自然災害科学総合シンポジウム, 1977.
- 5) 丹保憲仁他:フロック強度に関する研究, 水達協会雑誌, 第427号, 1970.
- 6) 松尾友矩:フロックの微細機構と強度に関する研究, 土木学会論文報告集, No.229, 1974.
- 7) 芦田和男・江田通治:密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(1), 京大防災研年報, 第18号B, 1975.
- 8) 同上(2), 京大防災研年報, 第19号B, 1976.

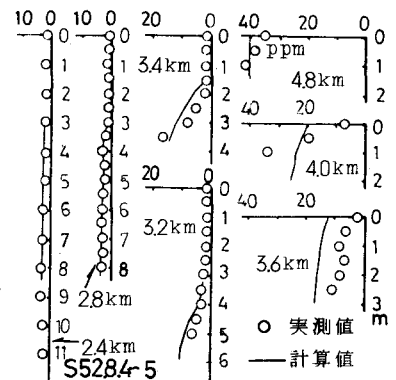


図-14 貯水池部濁度分布