

討 議

第十九卷第七號 昭和八年七月

沈降速度の理論及實驗

(第十八卷第十號所載)

會員 工學博士 神原信一郎

工學博士鶴見一之君の著述に係る標記の問題は水力電氣事業に裨益することが甚だ大きい。水路中の沈砂及排砂に關する理論は今日まで曖昧模糊として居た。筆者は其理論の確立せらるゝことを望むや久しいものであつた。此時に當り著者の本論發表を見たのは吾人當業者に取つて正に旱天の雲霓である。

本篇の理論方面の討議は實務者たる筆者には困難であり不適任であるから、専ら實驗報告中直接發電水路沈砂池に應用せらるべき方面に就て討議を試みる。そして序年ら排砂池論に觸れさせて頂きたい。此外下記の諸篇に付き引證又は討議を爲すことも許され度い。

本誌第十卷第二號所載中山博士著： 自成水路内の砂の運動に關する模型實驗報告

同第十四卷第六號所載中山博士著： 河床を轉動又は跳動する砂礫の量に關する一考察

同第十五卷第二號所載鶴見博士著： 砂礫の運動

同第十八卷第十二號所載石井瀛一郎氏著： 螺旋形排砂池模型實驗報告

昭和四年萬國工業會議に提出の筆者自著： 日本に於ける發電水路工事に就て

題記鶴見氏報告中最も有益なる資料は「流水中に於ける砂粒の沈降する速度の實驗」である。其説明に曰く

或水路に於て規則正しく殆んど並行したる流をなす場合、若し此水に砂の如き沈澱物が混ぜられたる時には水と共に砂が水平方向に送らるゝと同時に自重によりて沈降するが故に、一粒の砂の徑路は拋物線形曲線を描きて遂に水底に達するを見る。此際の沈降速度と靜水中に於ける沈降速度とは、若しも理想的に水が水平速度のみを有し、上下左右の流速を有せざるときには相等しきものたるべきなり。然れども如何なる規則正しき水流にありても水平流速のみに非ざるが故に、此二つの場合の沈降速度は近似的の値を有すべきものなるが、如何程まで一致するやを小なる矩形槽内にて實驗せり。實驗に用ひたる砂は發電用水路中の沈砂池より採集せるものなり云々。

沈砂池又は排砂池の設計に對して本實驗中最も有效なるは、流水中にて沈澱せる砂を其流過距離の長短に應じて拾ひ上げ更に之を靜水中にて沈降せしめ、兩場合の沈降速度を對比せしめた點である。夫等の結果を表示せるものが第一表と第二十九圖並に第二表と第三十圖である。即ち前者は流水中後者は靜水中に於ける砂の垂直沈降速度である。但し本實驗に於ける水樋中の水の流速の表示が無いから此結果を實用に供するには不便がある。著者より其追加報告を得ば幸甚に思ふ。水路若くは沈砂池に於て流水中に渦流を生ぜずして均齊の水平沿軸流のみを生ずる限界流速といふものがあるかないか、假令あつても之を一概に決定することは難からうが實用問題を考究するには之若くは之に類するものが大切である。換言すれば水平沿軸流の亂るゝ程度と沈降速度の遲延との關係の如きものが大切である。之に就ても著者の意見を承り度いと思ふ。

本實驗の範圍に於ては流水中と靜水中とに於て砂の沈降速度に大なる差違無きことを示されたが、之が先づ吾人の腦底に有益なる根本觀念を注入するものである。今假りに普通沈砂池中に本實驗に用ひた砂と同質同大の砂が流入したと、水の流速 $V=1$ m/sec. 沈降深度 $d=1.5$ m. とすれば第一表の數字により砂の水底に沈む間に下

流に流るゝ距離は

$l = \gamma d/v = 1 \times 1.5/0.1346 = 11.14 \text{ m.}$	砂粒の平均直径	1.42 mm.
" $= 1 \times 1.5/0.0669 = 22.42 \text{ m.}$	"	0.51 mm.
" $= 1 \times 1.5/0.0331 = 45.32 \text{ m.}$	"	0.24 mm.

之に依れば徑 0.24 mm. の砂でも 45.32 m. 流下すれば沈澱する。沈澱砂堆積の爲、流速が 2 倍になつても沈降深度が半減せらるゝから流過距離は同一である筈だが渦流の爲、沈降速度が 1/2 になつたとしても約 50 間の流過距離で沈澱を完了することになる。

發電用水車は其落差及使用水量の大小に依つて同大の砂粒でも其摩擦程度が異なるから一概には論ぜられない。フランス・タービンに於て runner と casing との間隙間は普通 1 mm. 位であるから、低落差ならば本實驗以下の細砂は餘り問題にならない。落差が増すに随つて砂より受くる水車の磨損を忌むこと甚しくなるから沈砂池の流速を減ずるか沈砂の流下距離を大にするか又は其兩方を按配するか必要になつて来る。而して泥土は固結體を爲さない限り差支へ無い。泥土の沈澱に拘泥するが爲、却つて最も忌避すべき砂礫の排除が出来ない實例は決して珍しくない。

仍で筆者は沈砂池問題に就き大に世の注意を喚起せなければならぬと思ふことがある。夫は外でも無い。發電水路殊に我國の如き急流より引水する水路に於ては土砂の沈澱よりも砂礫の排除の方が大切なことである。更に之を要約して標語とすれば「沈澱よりも排除」である。之を實情より察するに水路下流部又は水槽にまで土砂の流下するものゝあるのは決して水路内を浮遊して齧らざるゝものでは無い。沈澱は取入口附近又は沈砂池内に於て早く行はるゝが其排除宜しきを得ない爲、沈澱した儘水底を轉動して遂に水槽に到達するのである。早き頃の建設に係る東京電燈會社駒橋發電所の水路に於ては沈砂池らしい沈砂池を有つて居らない。而も輕き富士の燒砂が水路内に於て能く沈澱し轉動する。之は著者の實驗範圍を少しく超越するかも知れぬが大體著者の卓説に依つて當さに其然るべきことが明瞭となつた。筆者は 20 餘年前より同水路によつて著者の説の如き流水中の沈澱事實を示唆せられて居つたが之を學術的に闡明する機會を得なかつたものである。之を想へば著者に對する感謝の念が一入である。

凡そ沈砂池の容量は有限である。若しも沈砂池が單に沈澱だけを眼目とするならば 1 回の洪水を經過せない中に沈澱池が沈澱土砂を以て充滿することも起り得る。然るときは沈澱流速なるものゝ限度維持が不能になり土砂は遠慮なく沈砂池を通り越して下流水路に流入する。故に之を避けんが爲には沈砂池は有限の容量を以て成るべく無限の能力を有せしむる必要がある。夫には土砂沈澱中絶えずが排除を圖らねばならぬ。そこで沈澱土砂を攪亂せずに池底を轉動せしめ漸次之を導きて土砂排除口近くに送ることが喫緊事となる。所が砂の轉動は洗水量の多い方に向ひ其量の少ない砂吐水門には向つて呉れぬ、砂吐水門に向ふ取勾配などは殆ど無影響である。茲に於て排砂法と水の通路及使用法とが密接の關係を生ずることになる。

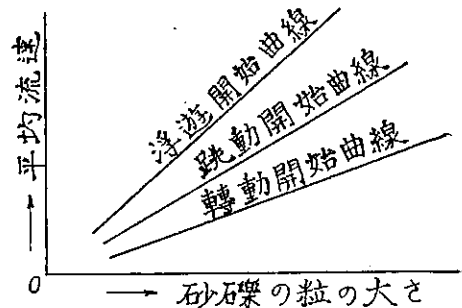
此砂の轉動に關しては本誌第十卷第二號所載中山博士著「自成水路内の砂の運動に關する模型實驗報告」を参照することが最も捷徑で且つ確實である。其實験に用ひた砂の大きさは 4 種類であつて大は 6.0 耗目の篩を通り小は 0.26 耗目に止るものである。砂が動き始むる限界水底速度と水路の平均速度との關係を求め、限界速度を其平均速度にて代表せしめて、得たる結果を表に收めて居る。第一表乃至第四表が夫である。流水の徑深 (hydraulic radius) によつて限界速度も異なるが、此實驗に於ては粗砂に於て毎秒 1.47~0.9 尺、細砂に於て毎秒 0.796~0.395 尺が限界平均速度となつて居る。故に此實驗に依れば此種の沈澱砂を總べて轉動せしむるには毎秒 1.47 尺以上の

平均流速を必要とする。世間の論者の中には沈砂池内の流速は遅い程良いやうに思ふ者もあるが、夫は經濟上は勿論技術上からも過つて居る。沈澱を妨げ又は沈澱物を攪拌せない限り流速を大にして轉動を起さす方がよい。そして沈砂池の首尾とも其全容積が一樣に有效であらしむるが良い。

沈澱池中に砂利が沈澱したとき夫を轉動せしむるには砂の時よりも大なる流速を必要とするが夫が爲、沈澱した砂を跳動せしめてはいかぬ。夫をどの速さまで許してよいかは鶴見博士の砂の沈降速度の關係から翻て砂の沈降に差支へない程度迄であるが、之は水路の構造寸法等にも依るから概數はかき示されないであらう。而して多分其許容流速では砂利は轉動せないであらう。

筆者は中山博士が用ひたやうな自成一派の尙ほ大規模なるものによつて實驗を行ひ、大小種々の流速に對する大小いろいろの砂礫の轉動跳動並に浮動開始曲線を求め得たならば沈砂池問題解決に至大の便益を興ふるものと思はれる。即ち其希望する曲線圖を踏示すれば右の如きものである。

細粒物質沈澱の目的の爲に制限せられた流速では轉動せない大粒の沈澱物は制限流速以上の流速による洗流又は洗掘の方法によつて排除するより外はない。之に付ては昭和四年東京



に開かれた萬國工業會議に提出した拙著 paper No. 69「日本に於ける發電水路工事に就て」に概略を述べてあるから夫を次に抜萃する(原文と文参照の榮を得ば幸甚)。昭和三年九月中、八澤發電所水路取入口直後の沈砂池中甲沈澱池にて行つた數年間蓄積せられた砂礫の洗流試驗に於て大體次の如き結果を得た。徑6分以上15分以下の砂利は毎秒平均流速凡そ9.0尺以上で流れ、小砂利混りの砂は平均流速7.0尺以上で洗はれ、表面流速6.0尺では砂利は勿論砂までも沈澱する。之を想像するに平均流速毎秒9.0尺に於ては砂は浮動又は跳動を爲し、小砂利は跳動又は轉動を爲し、大中の砂利は轉動を爲すらしい。此沈砂池に於ける表面流速6.0尺は平均流速5.0尺弱であらうと思はるゝが、此甲沈澱池の長さが121間許りあるにより鶴見博士の説の如く砂利は勿論粗砂或は細砂の幾分までが沈澱するのであると考へらるゝ。然るに徑15分以上の砂利は夫以下の砂利と共に此沈砂池の上流取入口以下の間で沈澱するが之は或沈澱層厚以上にならぬと同水路の最大流速でも轉動せない。幸ひ此處は閉渠であるから通水に支障を起すことは無いが、人爲を加へざる限り或厚さの沈澱層は萬年砂利として残るのである。八澤水路取入口に於て砂利の跳り込む程の洪水は近年稀であるが從來叙上の様な經驗を有して居る。或他の水路では沈砂池より上流に隧道があつて其中に砂礫の沈澱が起り隧道の斷面を縮小して導水に妙からぬ困難を感じめられたといふ話もある。斯くの如き事は注意しないと起り易い。故に此豫防法として沈砂池上流部は下流部よりも水路勾配を幾分急にし且つ疏通流量にも相當の餘裕を存して此難澱に備へることが考慮せらるべきである。即ち模範設計は水路に於ける砂利砂沈澱の副作用に對してまでも注意周到であらねばならぬ。要するに水路内に於ける砂礫沈澱の能否は餘り憂ふるに足らず却つて沈澱土砂礫排除の良法撰擇に苦心が存するのである。此主要目的を人々に直感して貰ふ爲に筆者は水路内土砂處分池を稱して排砂池といふが寧ろ適切であると考へる。

鶴見博士の模型實驗より得たる結論と筆者が八澤發電所其他の水路より得たる經驗又は觀察とよりして排砂池設計の標準仕様を求めれば次の如きものである。其形状は成るべく眞直にして長く(敢て廣くとは云はぬ)曲折凹凸少く、徑架大にして、底面平滑なるを撰ぶべきである。此仕様の下に設計せらるゝ排砂池に於ては沈澱物皆無の場合の平均流速が小水路に於て毎秒2.0尺、大水路に於て毎秒3.0尺程度とするのが適當であらう。勿論沈澱

層が増すに随つて流速が必然的に増加する。而して沈澱物堆積後の平均流速が毎秒 4.0~5.0 尺に達する迄の間の沈澱物容積を以て排砂池の正味容積と考へるが至當である。斯様にして砂礫の沈澱と同時に砂粒の轉動も行はしめ多少なりとも絶えず砂吐水門より之を排出せしむるのである。其排出は固より不完全であるから沈澱土砂の大部分は沈澱池内に残留すべく、其排除は平常の流速で轉動せない大小の砂利と共に行ふのである。即ち by-path に依つて送水しつゝ沈澱池には相當多量の水量を分流せしめて其沈澱土砂礫の洗流を行ふのである。又調整池を有する水路では其中に餘分の水量を溜め置き或時間内取入水量の自由處分が出来るから、停電時又は小負荷時を撰んで沈砂池洗流の方法を行ふのである。洗流を毎日行へば沈砂池の容量は無限となるが毎日でなくとも洪水期中必要に應じて之を行へば事足る場合が多い。沈砂池の平常使用中の水面勾配は水路の他部と餘り違は無いが洗流の際の水面勾配は 1/100 前後の急勾配とし敷勾配も夫に相應することを要する。沈砂池径深の大を欲するは比較的緩勾配を以て大なる流速を出さしむる爲である。其緩勾配を欲するは沈砂池を長くするも土砂吐水門の位置を深くさせない爲である。以上構造上及運用上いろいろの要求を同一排砂池にて満足せしめ得ざるときは排砂池を二階段にするのである。例へば砂利處分池を上流に設け土砂處理池を其下流に接続せしむるが如きである。若又泥土をも除去する必要あるときは其沈澱池は第三階段に置くべきである。重要水路にあつては豫備をも存して二重設備にし夫等を交互に使用することが適當である。

茲に尙ほ一つ目下研究未完の問題がある。即ち沈澱砂礫洗流に用ふる流路の屈曲が洗流の效力に及す支障の程度の問題である。土砂運搬は全く水流の勢力によつて成さるゝものであるが、概念的に云へば其流路を屈曲せしむることは一旦其處で水勢力を抹消せしむることになり其土砂運搬力を阻碍する。故に土砂洗流は洗流用水が一氣に一直線上を奔流するやうにするを最上の方法とする。然るに世間には其流路を或は右に又は左に曲げ、尋で又下方に落し、後又水平に流す等幾度か屈折せしむるものがある。斯様な流路は又狭小にして數多き暗渠より成るが普通である。夫が爲徑深を小さくして洗流用水の流勢をそぐことも著しい。其勢力の損耗を防ぐ爲には洗流用水の落差を大とせなければならぬ。又随つて砂吐水路の磨損も甚しくなり、剩へ其検査や修繕が困難になつて来る。是は専門的に大觀した言説であるが、之に關し學術上根據ある理論が未だ完成せられて無い。又實察家によつて夫等の利害得失も比較考査されて無い。彼等は唯無意識に之等の様式を用ひて居るといふ現状かとも思はるゝ。併し之を遠觀するに大體缺點が多いとすれば學術的評價を待たずとも實用向には之を回避するが良策であるとも云へる。

筆者は排砂池の設計に於て常に出来るだけ單純にして直線的なる閉渠を造ることに苦心して來た。そして其引用水中のウハ水を横の方向に溢流せしめた後、縦の方向に轉換して之を下流本水路に導き、沈澱土砂を成るべく沈砂池の縦の方向に眞直に排除するものを選び、之を縦取り排砂池と名づけて居る。此式に於て洗流用水の流速を規定の通り實現せしむる爲には排砂池尻の砂吐水門の大きさを適當にせなければならぬ。結局此水門の大きさと排砂池の横斷面積とは相關的のものとなる。故に夫等の關係（夫は横取排砂池にも起るか）を顧慮しつゝ排砂池の斷面の大小を論ずることにして居る。斯様にして排砂に就ては今迄常に優良なる成績を擧げて居る。

尙ほ水路の排砂問題に就て本誌第十四卷第六號所載中山博士著「河床を轉動又は跳動する砂礫の量に關する一考察」及第十五卷第二號所載鶴見博士著「砂礫の運動」等は河川關係のものであるが好個の參考資料になると思はるゝ。唯其後のものは理論が主にして實例の記載が乏しいから之を實地に應用するには手数を要する爲、つい其應用が閉却せられ易いやうである。同篇沈澱池の改良意見も參考にはなるが水路の土砂處理は沈澱よりも其排除が肝要である點より此改良案を觀るときはさほど推奨すべきものとも考へられぬが上水道に於ては之が有益が

と思はるゝ。

現在沈砂池排砂池の基本的形状が千態萬様であるのは畢竟するに其設計基準を規定すべき學理が確立せられてないからである。此時に當り鶴見博士の水中に於ける砂の沈降速度の理論と實驗結果の發表があつたことは水力電氣業者にとつて大なる啓蒙である。殊に筆者は縦取式排砂池の趣旨に學術的根據を提供せられたことに對して大なる敬意を表する。そこで尙ほ一步を進めて著者が沈澱物排除方法、即ち水路内に於ける土砂礫の運動原理中に就きても其屈曲の影響等を闡明せらるゝあらば業者は其惠澤に浴すること大きからうと思ふ。

最後に本誌第十八卷第十二號所載石井顯一郎氏著「螺旋形排砂池模型實驗報告」に就て一言したい。本装置に就ては著者も未だ其優越點を認めて居らないやうであるが筆者も同一感想である。結論に述べられた三特長は寧ろ特徴といふべきであつて長所とは思はれない。説明の中に横流によつて砂を水から分離せしむると云ふことが書いてある。鶴見博士を引合に出すのではないが、其學說等に照し此方法が特に砂の分離を促進するといふやうな理論は一寸發見し難い。唯沈澱砂を螺旋形の内壁に轉動に依つて集めることだけは確かであるが、夫が沈砂池としてどれ程の利益であるかは判らない。此型式の沈砂池の缺點は此中を通過する引用水の落差の損失の大きいことであると著者は云つて居るが夫は其通りである。尙ほ一つ經濟上より見る事がある。夫は沈砂池を直線に長く延せば夫だけ水路の長さが節約せらるゝ事である。然るに之を螺旋形に巻込めば其利益は失はるゝ。例へば間當り300圓の水路が30間延びたとすれば9000圓の損失になる。況して山間の河岸には沈砂池に適する低平地は狭長なる場合が多く圓く纏つた場所は少ない。物事は研究が大事であるから眞摯なる研究に依つて此型式が優良なる效能を有することが發見せらるれば幸福である。尙ほ本報告の説明に於ては砂と分離した有效引用水の流下方法が明記されてない様である。其他全體を通じて充分には判讀が出来難い點があるから、以上の批判も或は妄評かも知れない。然る場合は悪しからず諒承を乞ふ次第である。