

清 華 大 學

第一次科学討論会报告集

1956·4

第七分册 土木、建筑工程类

清華大学科学研究工作委员会編

机械工業出版社出版

親愛的讀者：

当您讀完這本書後，請盡量地指出本書內容、設計和校對上的錯誤和缺點，以及對我社有關出版工作的意見和要求，以幫助我們改進工作。來信請寄北京東交民巷二十七號本社收（將信封左上角剪開，註明郵資總付字樣，不必貼郵票），並請詳告您的通訊地址和工作職務，以便經常聯系。

機械工業出版社

NO. 1285

1956年12月第一版

1956年12月第一版第一次印刷

787×1092¹/₁₆ 字數 229 千字 印張 10¹/₂ 0.001— 4,500 冊

機械工業出版社（北京東交民巷 27 號）出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號

定價(10) 1.60 元

清 華 大 学
第一次科学討論会报告集

第七分册 土木、建筑工程类

清華大学科学研究工作委员会編



机械工業出版社

1 9 5 6

目 錄

水中懸浮物的沉淀問題	李頌琛 (3)
环路平差和結点平差的电学仪器	儲鍾瑞 (19)
極限設計及有关的結構計算問題	楊式德 (23)
随時間以任意規律变化的荷重引起的強迫振动	古國紀 (32)
平面桿件体系的机动分析	龍馭球 (39)
北京市机制粘土磚外觀質量标准和标号的研究	胡多聞、江作昭、刘元鶴、邵一麟、刘新民 (43)
單層工業建筑中的大型砌塊	蔡君馥 (72)
建筑事業工業化的問題	鍾 森 (84)
預应力梁的計算理輪	籍孝廣 (89)
予应力鋼筋混凝土的研究和应用	施士昇 (116)
予应力鋼筋混凝土結構的施工方法	盧 謙 (120)
关于高标号混凝土的若干問題	胡多聞 (134)
裝配式鋼筋混凝土結構及配件工厂發展之道路及其合理生產工藝过程選擇	周志剛 (141)
混凝土散热板	彥啓森 (161)

水中懸浮物的沉淀問題

1. 沉淀問題在給水排水工作中的重要性

現在我國正在大規模地進行社會主義經濟建設，在各種工業企業建設項目中，以及在各重點工業城市建設工作中，給水排水是必不可少的先行的設備。在給排水工程設計工作里，普遍的存在着關於水中懸浮物的沉淀問題。由於沉淀方法是淨水工作和污水處理工作最常採用的工藝過程，沉淀設備在給排水基本建設投資方面，佔相當大的比重，例如給水沉淀設備造價約給水處理設備總建造費的三分之一，故沉淀問題相當重要。如河水水源泥沙的沉淀問題，工業循環水中懸浮物沉淀問題，污水處理工作中沉沙池，初次沉淀池和第二次沉淀池等設計問題，在我國還缺乏實際經驗。尤其沉淀問題，每具有地方不同特點，例如長江水和黃河水源沉淀問題有其特徵，即同一河流在不同地點，不同時間也有所不同。華北的河流如黃河、永定河，河水含泥砂量特別大（要比長江多許多倍），泥砂顆粒往往很細，不易沉淀，故當採用這些河水作為城市或工業給水的水源時，就需要建造很大的沉淀池，問題很重要而且複雜。

由於現代科學技術的發展，對於水中懸浮物沉淀問題有可能採用先進的方法比較準確的來計算沉淀池的尺寸，減少由於一些未知因素而採用過大的容量。這樣就可以大大的節約投資。為了降低造價，首先就要減少沉淀池非生產性的多餘的容積，增加池的生產效率。因此採用更精確的，更切合實際的設計方法，顯得十分重要。當然在結構方面如何經濟合理，節省材料也要重視。

蘇聯的學者們對於水中懸浮物的沉淀問題，曾經做過了不少的科學研究工作，取得了好些新的成就。我們首先要學習這些先進方法，找出正確方向，結合本國實際情況和具體問題，來進行科學研究的工作。例如蘇聯莫爾加索夫碩士（А. М. Мордясов）曾在清華大學作過一次關於平流沉淀池的計算方法的科學報告，他是以太污水沉淀池實驗結果為根據，他建議還可以在給水沉淀池方面作進一步研究。其他國家學者對於沉淀池的研究文獻，也可以參考研究，如曾被廣泛應用的英國學者 Stokes 的沉淀理論，美國的 Thomas R. Camp 對於沉淀和沉淀池設計的論文都值得參考。

各地水廠和污水處理廠在實際生產工作中，也已積累了一些資料和經驗，充分利用這些實際材料，是很有幫助的，在進行科學研究工作中，和給排水水廠及有關的研究機關合作進行，尤其有很大的實際意義，尤其不能完全在實驗室得到解決的像沉淀池這類問題，更為必要。

在進行介紹和討論蘇聯及英美學者們對沉淀問題的科學研究工作之前，首先分析一下關於

水中懸浮物沉淀問題的內容。

2. 對於水中懸浮物沉淀問題的分析

在給排水工作中，沉淀的目的在使水中所含懸浮物沉淀下來，減少水的渾濁度到要求的程度。沉淀工作可分為靜水沉淀和動水沉淀。靜水沉淀水系在靜止狀態，懸浮物向下沉降，故從水力学上來說，靜水沉淀系屬單向流動。動水沉淀水在沉淀池中連續的在水平方向流動，同時懸浮物向下沉降。故平流沉淀池系屬連續双向流動：水平運動為紊流，沉降運動一般為層流。為了減少沉淀池中的橫流現象，要求進水口配水均勻，池不要太寬。在豎流沉淀池中，水自下向上流動，懸浮物則向下沉降，故基本上作豎向運動。在豎流沉淀池中，除了沉淀作用外，懸浮物的凝聚作用和对水的隔濾作用特別顯著。本文主要是討論双向流動的平流沉淀池的作用。

水中懸浮物在平流沉淀池中的沉淀作用，要從二方面來研究：(a) 懸浮物本身的性質，和(b) 沉淀池的水力性質。

a) 懸浮物的性質 懸浮物的性質基本上可分為离散顆粒和凝聚體二種類型，离散顆粒為無機物性質的粗粒泥砂，如 Stokes 公式中範圍所指的直徑小於 0.1 公厘的泥砂無機物體，可視為离散顆粒。在實驗時對於离散顆粒可根據粒度分析結果用人工來配制水樣。凝聚體系賴水中的混凝劑(自然含有或人工投入)的凝聚作用包圍吸附水中的微粒物和膠體物而形成絮狀的顆粒較粗的懸浮體。凝聚體的顆粒由微粒到 1 公厘以上。在實驗工作中對於凝聚體由於含有性質變化的膠體物和有機物，不易配制水樣以採用原水實驗最為理想。

离散顆粒的沉淀和凝聚體的沉淀性質不同。离散顆粒沉降系個別顆粒單獨沉降。凝聚體沉降系邊沉降邊凝聚，顆粒逐漸變大沉降速度因而增加，故凝聚體的沉降速度不是均勻的而是變化的。

在天然河水中含有泥砂，粘土，間或含有腐植物和其他有機物等。泥砂顆粒過細時，其自然沉降速度很慢。例如：顆粒直徑為 0.005 公厘的砂子，其沉降速度按 Stokes 公式計算約為 0.017 公厘/秒。就是說每沉降一公尺深度需 16 小時。我國黃河、永定河河水就會有許多這樣細的泥砂。水中懸浮物的膠體不能自然沉淀，須賴凝聚體的凝聚作用才能沉淀。

在第一次、第二次沉淀池污水的懸浮物含有蛋白質、油脂、纖維質氣體，還有細菌和微生物及分解了的有機物，形成膠體。由於凝聚體的凝聚作用，其密度雖低，但不難沉淀。但有些污水如含有染料的化工厂紡織厂污水，及含有血球的屠宰場污水，則非經處理不易沉淀。

6) 沉淀池的水力性質 實際平流沉淀池的水力性質須考慮以下幾個項目：

1) 由於紊流而產生的對懸浮物沉降的阻礙作用，即由於紊流而產生的水流垂直向上分速(或稱懸浮分速)對懸浮物沉降的影響。

2) 在懸浮物沉降過程中發生的凝聚作用在紊流狀態下，懸浮物双向運動的速度都有差別，有的快，有的慢，因而發生碰撞而促進了凝聚作用，凝聚作用也依懸浮物的性質而異，對沉淀有幫助。

3) 紊流对池底淤积的冲刷作用; 進水中懸浮物分佈的均匀程度 (和進出口配水設備有关); 水温差別的影响; 滯流区 (死水区) 的影响以及橫流風浪的影响等。

以上这些項目有些对沉淀起阻碍作用, 有些則起帮助作用。

關於水中懸浮物沉淀的實驗工作, 如能比較全面的反应了懸浮物的性質和沉淀池的水力性質, 其結果自然比較可靠。但由於对實驗的要求不同, 或由於条件的限制, 實驗工作有靜水實驗和動水實驗之別。靜水實驗主要是表明懸浮物的性質。動水實驗又有模型實驗和实际生產的沉淀池實驗之別。模型實驗系运用相似規律來表現沉淀池某些水力性質, 但如系几何相似的模型, 由於深度过小往往不易表現凝聚作用和懸浮分速的影响。为了研究一些外在因素如配水設備, 水温差異等对沉淀作用的影响, 模型實驗还是便利的。但是为了不易配水样的例如污水的實驗工作, 或者为了驗證已作过的實驗的結果也可以在实际生產規模的沉淀池進行實驗工作。

各种合格的實驗工作, 都能在一定的条件下說明一些問題, 表現一些規律, 故都有它本身的价值。問題在当採用这些實驗結果时, 必須考慮到實驗时所假設的条件是否符合於实际情况? 还有哪些因素沒有考慮進去? 例如: 沉淀指标系靜水實驗結果, 利用这个指标來設計沉淀池, 一定还要考慮到沉淀池的水力性質。又如拟作为給水水源的永定河水沉淀實驗工作, 由於泥沙很細, 沉降很慢, 当然要求較長的沉淀池, 但在沉淀过程中凝聚作用的影响很值得注意, 不应忽視。所以为了找到这类河水的沉淀規律, 建議从多方面來進行實驗工作, 如水質分析工作, 沉淀指标實驗工作, 沉淀模型實驗工作, 甚至沉淀池建造完成以后最好还要在实际生產工作中進行驗證工作。

3. 苏联在給排水方面對於水中懸浮物沉淀問題的研究工作

据文献記載, 在十九世紀末俄國才开始進行流体懸浮物沉淀理論和實驗的研究工作。在初期計算理論系基於水在靜止状态中沉淀的假定下進行實驗。后來才逐漸發展为沉淀池中液体运动和懸浮物沉淀动力学方面的研究。

在給排水方面沉淀池計算可归納为下列四种方法:

1) 第一个方法 可称为沉淀池中水平和垂直速度和水池的長度、深度成直線比例的方法, 这是过去計算沉淀池最常採用的方法, 可用下列公式來表明:

$$L = \frac{vH}{u},$$

$$B = \frac{Q}{vH},$$

式中 L = 沉淀池的長度, 公尺,

H = 沉淀池的深度, 公尺,

u = 沉降速度, 公尺/秒,

v = 沉淀池內水平流速, 公尺/秒,

Q = 流量, 立方公尺/秒,

B = 沉淀池寬度, 公尺。

这个方法系基於下列三个假定条件:

a) 在沉淀池橫断面上各水質点的流动速度一样。

6) 懸浮物顆粒在沉降过程中以等速沉降。

B) 流动水体中的懸浮物沉降速度和在靜止的水体中一样。

这三条假定条件在实际工作中是全部不能成立的。沉淀池中的水流速度和顆粒的沉降速度,随时在变化。特別在污水中除了無机懸浮物外,还含有膠体有机物。这些膠体有机物在内外力的作用下,能互相吸附粘在一起,因此增加了沉降速度。因为水多半在紊流状态中,故下沉着的物体,也受到了紊流垂直向上分速的影响,而第一个方法沒有考慮到这些影响。

根据上述直線比例公式,可改寫成沉淀池的流量負荷公式:

$$\text{由} \quad L = \frac{vH}{u}, \quad \text{及} \quad Q = BHv,$$

$$\text{得} \quad L = \frac{Q}{Bu}, \quad \text{設} \quad F = LB,$$

$$\text{則} \quad F = \frac{Q}{u} = \frac{Q}{q}$$

$$\text{或} \quad u = \frac{Q}{F},$$

式中 F = 沉淀池的水平面積, 平方公尺,

Q = 总的流量負荷, 立方公尺/时,

q = 每平方公尺沉淀池面積的流量負荷立方公尺/时, u = 沉降速度, 公尺/时,

式中 u 又可了解为沉淀池單位水平面積的溢流量。

沉淀池的單位流量負荷常常利用对沉淀池实际工作观察得出的数据來求定,但是沉淀池的工作依許多因素而異,如結構物的構造,它的形狀和尺寸,進水和出水口的設備,和沉淀的水質等,因此研究某一沉淀池得出的單位流量負荷 q (或 u) 的数据,不一定適用於另一沉淀池。

由以上公式,当知道了懸浮物最小沉降速度 μ 时,也可以求出沉淀池的面積,因此也可称为最小沉降速度法。

2) 第二个方法 这个方法考慮到水的紊流情况,和懸浮物沉淀受到水流垂直向上分速的影响,進一步採用了所謂懸浮速度的定律,这个方法可用下式來表明:

$$L = \frac{vH}{u-w} \quad (a)$$

$$\text{或} \quad L = \alpha_1 \frac{vH}{u}, \quad (6)$$

式中 w = 水的垂直向上分速,

α_1 = 校正系数。

A. И. Жуков 提出 α_1 应按 w 值來計算,即

$$\alpha_1 = \frac{u}{u-w}.$$

这样(a)和(6)式實質上是一样的。又 A. Шакинч 曾建議 $\alpha_1 = 1.5 \sim 2$ 之間,但这种建議数值沒有充分的根据。

为了求定懸浮分速 w 的数值,苏联 M. A. Великанов 和 С. Ф. Савельев 等曾对平流沉淀池的

紊流运动进行了理論的和实验的科学研究工作,得出了下列計算懸浮速度的公式[⊙]

$$W_{cp} = 4 \frac{nv_{cp}}{H^{0.2}}, \quad (\text{B})$$

式中 W_{cp} = 平均懸浮分速, 公厘/秒, n = 粗糙系数 (例如混凝土池可用 $n=0.018$),
 v_{cp} = 平均水平流速, 公厘/秒, H = 池中水流的深度, 公尺。

在設計平流沉淀池时, 如果没有进行專門实验工作, 建議可採用 П. И. Пискунов 算得的 W_{cp} 数值[⊙] 即当 $H=3\sim 5$ 公尺, $u=0.7\sim 0.5$ 公厘/秒。

$$W_{cp} = \frac{v_{cp}}{26} \sim \frac{v_{cp}}{29}。$$

本文附件(二)所介绍的“放射式沉淀池的計算”一文中根据实验結果, 当池深在 2 公尺以内时, 懸浮分速 W 值也採用等於 $\frac{v_{cp}}{26}$ 。放射式沉淀池在給排水沉淀工作中, 应用甚廣, 故这种計算方法, 有实用的价值。

这个方法比第一方法完善了一些, 但为了应用这个公式, 必須知道我們計算要阻留的顆粒的水力沉降值 u , 含着顆粒物的污水(例如煤气厂的生产污水)通过仔細的实验工作, 不难把 u 找出。但是对于生活污水(特别是含有生产廢水的生活污水), 要用实验方法来求出 u 值非常困难, 直到現在还没有可靠的基於实验方法得出的这种数值來計算沉淀池尺寸。

3) 第三个方法 这个方法可以叫做 М. А. Великанов 法, 系基於一般計算方面常用的所謂或然定律。Великанов 認為顆粒以速度 u 沉降, 但同时受了彈性的懸游速度的上举力, 使其減去一个垂直速度 c 。但 c 值随时在变, 沒有規律性的特点。所以顆粒从入口开始沉降直到池底的距离有極大的差異, 要确定顆粒运动軌跡將失其意义, 因为顆粒只能沿着無窮数可能的軌跡中的一个來运动。因此这个方法根据或然定律只求定顆粒的起点和終点的位置。就是說: 有怎样的可能性使顆粒在不超过給予的長度 l 内沉降到池底?

这个方法可用下列計算沉淀池長度的公式來表明[⊙]:

$$L = \alpha_1 \frac{vH}{u},$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{\lambda}{2.73} \sqrt{\frac{L}{H}} + 1 \right),$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{2.73} \sqrt{\frac{L}{H}} + 1 \right) \frac{vH}{u}, \quad (\text{a})$$

$$L^2 - \frac{\lambda^2 v^2 H L}{7.45 u^2} - \frac{v^2 H^2}{u^2} = 0,$$

$$\frac{\lambda^2 v^2 H}{7.45 u^2} = m, \quad \frac{v^2 H^2}{u^2} = c,$$

$$L^2 - mL - c = 0,$$

即
以
得

⊙ 見 П. И. Пискунов: “Горизонтальные водопроводные отстойники”, 1953, 20~24 頁。

⊙ 見 П. И. Пискунов: “Горизонтальные водопроводные отстойники”, 1953, 60 頁。

⊙ В. А. Клячко, А. А. Кастальский: “Очистка воды для промышленного водоснабжения”, 1950, 103~109 頁。

$$L = \frac{m}{2} + \sqrt{\frac{m^2}{4} + c} \quad (6)$$

λ 值可由下表查出:

φ	0.62	0.8	0.87	0.9	0.98
λ	0.2	0.6	0.8	0.9	1.5

表中 $\varphi = \frac{\delta_1 - \delta_0}{\delta_1}$, δ_1 = 進水中含懸浮物, 毫克/公升。 δ_0 = 出水中含懸浮物, 毫克/公升。

4) 沉淀指标 在上述三个方法中, 都必须知道懸浮物的沉降速度 u 。为了求定 u 的数值, 可採用沉淀指标的方法。这个方法是 Кастальский 首先提出的。这个方法本身不是一个独立的方法, 不过它可以和上述第(二)和第(三)方法結合起來用。本文附件(二)“放射式沉淀池的計算”也採用沉淀指标的方法。

沉淀指标公式如下:

$$S = \frac{A}{B},$$

式中 A = 当 u_0 等於 1.2 公厘/秒, 懸浮物除去的%, B = 当 u_0 等於 0.2 公厘/秒, 懸浮物除去的%。

这个指标系根据靜水实验得出的直線关系公式, 要求該範圍內任何除去%, 其相应的 u_0 都可求出。

求这个指标时, 若採用真的水样來做靜水实验, 当比按照顆粒分析級配配制水样方法求得的 u_0 更准确一些。在混凝沉淀方面廣泛採用沉淀指标的方法。

以上簡單的介紹了苏联在平流沉淀池方面科学研究工作的一些線索。主要的是考慮到平流沉淀池的二向流动情况, 求得懸浮物沉降速度 u 和懸浮分速 w , 据以求定沉淀池必需的長度。此外尚有 Масленичкова 的理論計算法^①, 和 Зрелов 的靜水沉淀速度基本公式的研究^②。

4. 苏联莫尔加索夫对沉淀問題的研究工作

苏联对給排水沉淀問題的科学研究工作是沿着二个方向進行: 一个是从理論方面進行研究工作, 另一个是从实验方面來進行研究工作, 这二个方向互有联系, 並不矛盾。

莫尔加索夫的研究工作是在其他学者們作过的研究的理論基礎上結合着实验工作來進行研究, 現在在我國給排水实际建設工作中, 从許多方面向学术机关提出了沉淀問題, 急待解决。莫氏在 1952 年發表了一篇^③論文“排水結構沉淀池中液体运动的一些特点”。这个論文虽不能即認為代表了苏联对沉淀問題的科学研究方向, 但是我觉得莫尔加索夫的研究方法和經驗很值得我們参考。

① С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Н. А. Масленичкова “Вспомогательные устройства очистных канализационных станций”, 1955, 第 34~42 頁。

② Труды гидравлической лаборатории, 1955, “Обобщенная формула скорости осаждения частиц в спокойной жидкости” А. П. Зрелов.

③ Мордасов А. М. “О некоторых особенностях движения жидкости в отстойниках канализационных сооружений.” 1952。

莫氏的研究工作系按下列四个步骤来进行：1) 总结苏联学者对于沉淀问题的研究工作；2) 进行沉淀实验工作；3) 根据实验结果进行理论分析工作；4) 求定沉淀公式的系数及其实际运用。本文只摘要的介绍其内容，借以了解其进行研究方法的概况。

1) 总结苏联学者对沉淀问题的研究工作 莫氏通过对苏联学者所提出的沉淀池计算方法的分析研究工作把它们分为四种类型：

- a) 水中悬浮物沉降运动轨迹沿着直线进行。系根据或然定律的假设。
- б) 水中悬浮物沉降运动轨迹沿着抛物线进行。系根据水动力学计算作出。
- в) 水中悬浮物沉降运动轨迹沿着任意曲线进行。系根据模型定律得出。
- г) 悬浮物沉降轨迹系在沉淀池中以均匀的平行线进行。系根据用图解法求定数据的假设下作出。

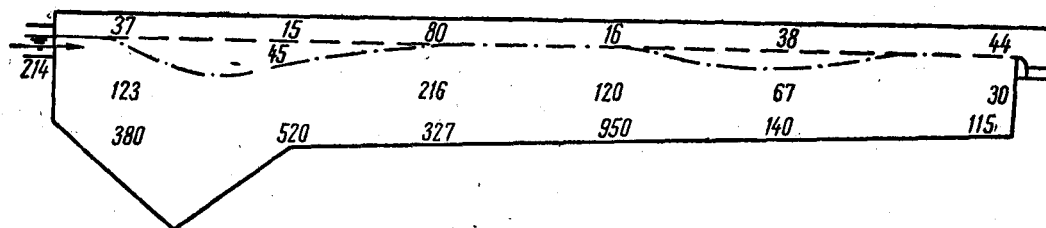
这些不同研究结果的存在，正说明了现在对于水中悬浮物的沉淀问题研究工作还是不够的。这些结果都是根据正确的观察和悬浮物运动规律得出的，但也是局限于某一种运动阶段和假定唯一的可能性得出的。莫氏在 Жыков 等已作过的研究基础上，通过了实验方法说明了计算浓度悬浮物在沉淀池中作波状形运动这个现象，并据以求出计算公式和实验系数。

2) 沉淀实验工作 含有大量有机物和胶体物的水体，不能用配水样的方法来间接的进行沉淀实验。因此莫氏采用了三种实际生产的沉淀池来直接进行实验：

- a) 平流式沉砂池长 9 公尺，进行砂的沉淀实验。
- б) 平流式第一沉淀池，长 19 公尺，进行污水有机物体运动实验。
- в) 放射式方形平流第二沉淀池每边 12 公尺，进行活性污泥的沉淀实验。

为了研究进出口配水设备对沉淀效果的影响，则另採用模型实验的方法。模型直径和深度各为 5 公尺。

实验工作的进行主要是在实验过程中，在各池采取五个以上的断面（包括进出口）每断面三个以上不同高程，取出水样，化验其所含悬浮物的浓度，由此得到了计算浓度悬浮物在池中运动的轨迹。



第一沉淀池污水悬浮物浓度分布图(数字系悬浮物毫克/公升)。

通过了这个实验，得出了悬浮物在池中运动轨迹的明显的现象有三个特点：

- a) 计算浓度悬浮物在沉淀池中的运动轨迹作波状形。
- б) 波状形曲线的振幅，由进口至出口逐渐减小。
- в) 波峰数目随时间流量和进出口悬浮物浓度差而定。

根据这些现象便可作为进行理论分析推演公式的根据。

3) 根据实验结果进行理论分析工作 由水的动力学方法进行理论分析, 推演出表示这种波状曲线的公式。

作用于沉淀池中单位体积水内悬浮物的力包括(先从垂直方向来考虑):

向下力: 悬浮物本身重量 $= \delta_1$ (单位体积水中悬浮物的重量)。

向上力: 浮力 $= \delta_0 + ph$ (由于水的密度各处不同, p 为下沉一公尺水的浮力, δ_0 是单位体积出水中悬浮物的重量) 弹力(水的弹力) $= kh$ 。阻力(由速度引起的) $= \mu w$, (μ 是单位摩阻力, w 是悬浮物垂直分速)。

作用于单位体积水中悬浮物的合力:

$$\Sigma y = \delta_1 - (\delta_0 + ph + kh + \mu w)。$$

由

$$F = M\ddot{h},$$

$$\Sigma y = \frac{\delta_1}{g} \frac{d^2 h}{dt^2},$$

$$w = \frac{dh}{dt},$$

得

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \delta_1 - (\delta_0 + ph + kh + \mu w)。$$

解方程式得:

$$h = \frac{\delta_1 - \delta_0}{p + k} + e^{-\alpha t} (c_1 \cos \beta t + c_2 \sin \beta t)。$$

解出 c_1 和 c_2 值并令:

$$\frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = \cos \varphi, \quad \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = \sin \varphi,$$

代入得: $h = \frac{\delta_1 - \delta_0}{p + k} - \frac{(\delta_1 - \delta_0) \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{(p + k) \beta} e^{-\alpha t} (\cos \varphi \cos \beta t + \sin \varphi \sin \beta t)。$

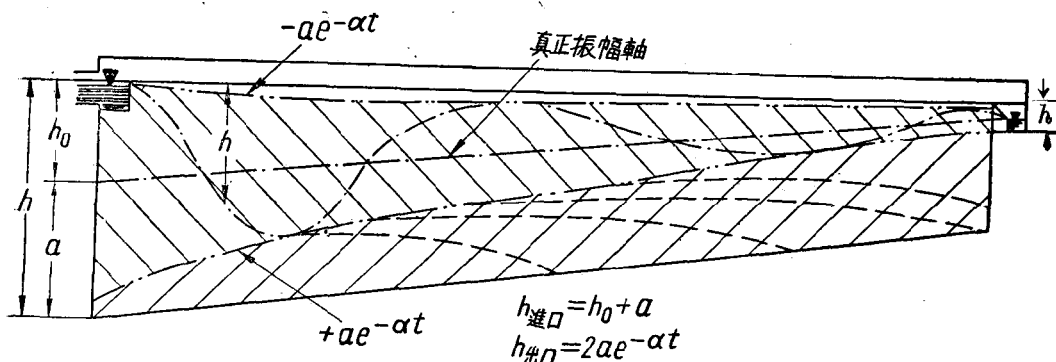
令

$$a = \frac{\delta_1 - \delta_0}{p + k} \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\beta}, \quad h_0 = \frac{\delta_1 - \delta_0}{p + k},$$

得

$$h = h_0 - ae^{-\alpha t} \cos(\varphi - \beta t)。 \quad (1)$$

这个公式代表悬浮物波状运动的方程式, 这个公式的几何形状见下图:



式中 h = 在任一時間內計算懸浮物濃度的深度, 这个数值依時間 t 而变,

$h_0 = \frac{\delta_1 - \delta_0}{p + k}$ 是振动曲線軸的深度,

a = 开始的振幅,

β = 振动頻率,

t = 週期 = $\frac{2\pi}{\beta}$,

$e^{-\alpha t}$ = 減幅系数,

φ = 初位相。

進一步考慮水平方向流动时懸浮物的运动, 依此可求出沉淀池的長度公式。

取 $2ae^{-\alpha t}$ 为水流截面, 即在 $-ae^{-\alpha t}$ 和 $+ae^{-\alpha t}$ 二線內的水流断面核, 水只在水流断面核內运动, 其余部分看作死水。

$$v = \frac{q}{2ae^{-\alpha t}} = \frac{qae^{\alpha t}}{2a},$$

由於

$$v = \frac{dL}{dt},$$

故

$$L = \int_0^{t_x} v dt \quad (t_x \text{ 为水的停留时间}),$$

$$L = \int_0^{t_x} \frac{qae^{\alpha t}}{2a} dt = \frac{q}{2a\alpha} \int_0^{t_x} e^{\alpha t} d\alpha t,$$

$$L = \frac{q}{2a\alpha} [e^{\alpha t_x} - 1], \quad (2)$$

式中 L = 沉淀池長度, q = 流量, $t_x = nT$, (n 为週期数, 一般採用 0.5, 1)。

4) 求定沉淀公式中的系数及其实际运用 公式(1)和(2)中的系数, 可根据实验数据和有关公式求得如下表:

应用这些系数, 代入公式(1)和(2), 就可以把沉淀池的長度和深度求出。由於这些系数系通过实际实验得出, 故算出池的尺寸应是相当准确。但因为这些系数須通过实验得出, 所以在缺乏实验的場合也就局限了这些公式的应用。

	沉淀池种类	$(p+k)$	$\mu = \frac{2a\delta_1}{g}$	$\cos \varphi$
1	沉砂池	0.00005	0.0000008	0.975
2	第一沉淀池	0.00014	0.00000008	0.965
3	第二沉淀池	0.0009	0.000000015	0.9975

例题 拟設計排水的沉砂池, 流量为 $Q = 0.945$ 立方公尺/秒, 進水懸浮物濃度为 253 毫克/公升, 要求阻留懸浮物 53 毫克/公升, 設池寬 B 为 6 公尺, 求池長和池深。

$$\delta_1 = 0.000253 \text{ 噸/立方公尺}$$

$$\delta_0 = 0.000200 \text{ 噸/立方公尺}$$

$$q = \frac{Q}{\beta} = \frac{0.945}{6} = 0.158 \text{ 立方公尺/秒}.$$

$$h_0 = \frac{\delta_1 - \delta_0}{p + k} = \frac{0.000053}{0.00005} = 1.06 \text{ 公尺}.$$

$$\alpha = \frac{\mu g}{2\delta_1} = \frac{0.0000008 \times 9.81}{2 \times 0.000253} = 0.0155。$$

$$\cos \varphi = 0.975 (\text{实验得出})$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi \alpha^2}{1 - \cos^2 \varphi}} = \sqrt{\frac{0.95 \times 0.00024}{1 - 0.95}} = 0.0677。$$

$$T = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{6.29}{0.0677} = 92 \text{ 秒}。$$

$$\text{池長 (由公式 2)} \quad L = \frac{g \cos \varphi}{2\alpha h_0} (e^{2T} - 1) = \frac{0.156 \times 0.975}{2 \times 0.0155 \times 1.06} [e^{0.0155 \times 92} - 1] = 14.6 \text{ 公尺}。$$

$$\text{池深} \quad h_{\text{出口}} = \frac{2h_0 e^{-\alpha T}}{\cos \varphi} = \frac{2 \times 1.06}{0.975 \times 4.35} = 0.5''。$$

沉淀池進口处的深度等於進水槽或進水管的水流深度,依水槽或水管內水流充滿情况而定。

5. Stokes 沉淀公式和 Camp 对沉淀池的研究工作

在 1851 年英國 Sir G. G. Stokes 發表了關於沉淀的所謂 Stokes 公式[●],这个公式在各國被廣泛採用。其形式如下:

$$v = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho)}{\mu} g d^2,$$

式中 v = 砂子的沉降速度,公厘/秒, ρ_1, ρ = 砂子和水的密度,
 $g = 9800$ 公厘/秒², d = 砂子的直徑,公厘,
 μ = 水的黏性。

知道了砂子的直徑和密度,就很容易把它的沉降速度求出,但是这个公式是在下列条件作出的:

- a) 砂子系在靜止的水中沉淀。
- b) 砂子系圓形顆粒,直徑小於 0.085 公厘。
- b) 雷諾滋数在 0.5~1 之間 (例如沉降速度为 1 公分/秒,水温 15°C 时, d 小於 0.05 公厘)。

这个公式表明了在一定条件下的沉淀規律,但应用它來作为一般沉淀池的計算則欠准确。本文附件(二)系对 Stokes 公式來由的一些說明以作参考,而不是 Stokes 論文原始文献的介紹。

在美國早年,对沉淀池設計,流行一种錯誤观念,認為沉淀時間是主要因素。其实对沉淀池設計,为了切合实际情况,深刻了解沉淀現象,找出沉淀規律,分析一系列因素对沉淀作用的影响是十分必要的。因此必須知道沉淀物的性質,和有关水中懸浮物在沉淀池中运动的物理現象。

在 1945 年,美國 Thomas R. Camp. 作了一篇“沉淀和沉淀池設計”論文,批判了過於重視沉淀時間的不正确的观念,對於沉淀和沉淀池的設計理論,作了很詳細的分析,可作为進一步研究

● Sir G. G. Stokes: "On the Theories of the Internal Friction of Fluid in Motion and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids" Transaction, Cambridge Philosophical Soc. Vol. VIII, 1845, p. 287.

沉淀問題的參考。Camp 的這篇論文，可視為關於沉淀池的水力學，在這篇論文里研究了沉淀的基本公式、懸浮物的性質、靜水沉淀實驗、理想的平流沉淀池、沉淀時的凝聚作用、紊流作用、池底沉淤的冲刷作用等。但關於實際生產規模和實驗的沉淀資料和數據則比較缺乏，因此在實際應用上還有一些限制。

6. 對於我國給排水沉淀問題的科學研究工作方向的看法

本文對給排水沉淀問題的報導是很不全面的。但由此也可以看到蘇聯在這個問題上的研究工作和文獻是很豐富的，而且密切地結合着生產，因此我對沉淀問題科學研究方向的想法，建議：

a) 在蘇聯先進方法（理論的和實驗的）的基礎上，對本國一些有代表性的河流給水水源或污水處理廠，從實驗方面來進行研究工作，找出一些合乎實際情況的計算方法和經驗系數，解決現在生產上的實際問題。

b) 積累總結給排水沉淀設備實際生產經驗和科學研究成果，進一步發展沉淀理論。

參 考 文 獻

1. А. М. Мордасов: "О некоторых особенностях движения жидкости в отстойниках канализационных сооружений," 1952.
2. П. И. Пискунов: "Горизонтальные водопроводные отстойники" 1953.
3. Thomas R. Camp: "Sedimentation and the Design of Settling Tanks" (A. S. C. E. 1945).

“關於水中懸浮物的沉淀問題”附件

（一）沉淀理論公式（Stokes 公式）

在 1851 年 Sir G. G. Stokes 作出了大家所熟悉的沉淀理論公式。這個公式的形式是：

$$v = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\mu} d^2. \quad (1)$$

這個公式系在下列條件下作用，所以應用時如不符合於這些條件必須加以修正。

- 1) 在靜止的水中沉淀，並以均勻速度下沉。
- 2) 懸浮物系個別的圓的砂顆粒。
- 3) 在一定的顆粒直徑和雷諾滋數限度以內，且系層流範圍 ($Re = 0.5 \sim 1$ ，相當於石英砂粒比重 $\rho_1 = 2.65$ d 小於 0.1 公厘，速度 1 公分/秒以下，水溫 10°C)。

這個公式可由牛頓對顆粒沉降阻力公式，然後引進實驗系數導演出來。

牛頓對顆粒沉降阻力公式：

$$F_D = \frac{C_D A \rho v^2}{2}, \quad (2)$$

式中 F_D = 對顆粒沉降的阻力（即液體對接觸面所生的摩擦力），

C_D = 阻力系数,

A = 在运动方向的投影面积, 对圆粒砂 $A = \frac{\pi D^2}{4}$,

v = 沉降颗粒和液体的相对速度,

ρ = 液体的密度。

这个颗粒沉降阻力公式可用因次分析方法来说明:

和阻力有关因数的函数如下:

$$F_D = k d^x v^n \rho^z \mu^p,$$

式中 k = 系数, x, n, z, p 为指数。

此式按各因素的表示单位可写成:

$$M^1 L^{-1} T^{-2} = k \cdot L^x \cdot L^n t^{-n} \cdot M^z L^{-3z} \cdot M^p L^{-p} T^{-p}.$$

(式中 F_D 系以克/公分, 秒² 为单位, μ 系以克/公分, 秒为单位)。

在这公式中同一因素的指数应相等, 即:

$$M: 1 = z + p,$$

$$L: -1 = x + n - 3z - p,$$

$$T: -2 = -n - p.$$

解这些公式得: $z = n - 1$, $p = 2 - n$, $x = n - 2$, 代入 F_D 公式内:

$$F_D = k d^{n-2} v^n \rho^{n-1} \mu^{2-n} = \frac{k v^2 \gamma^{2-n} \rho}{\eta^{2-n} d^{2-n}}$$

(式中 $\rho^{n-1} \mu^{2-n} = \frac{\mu^{2-n} \cdot \rho}{\rho^{1-n} \cdot \rho} = \frac{\mu^{2-n} \rho}{\rho^{2-n}} = v^{2-n} \rho$)。

$$\text{又} \quad Re = \frac{dv}{\nu} \quad (Re = \text{雷诺兹数}),$$

$$\text{即} \quad F_D = k \frac{v^2 \rho}{Re^{2-n}},$$

$$\therefore \quad F_D = \frac{C_D A \rho v^2}{2}.$$

悬浮物颗粒在水中所受的重力:

$$P_1 = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_1 - \rho) g, \quad \text{式中 } \frac{\pi d^3}{6} \text{ 是颗粒的体积, } \rho_1 \text{ 是颗粒的密度。}$$

水中悬浮物颗粒因重力关系 (考虑了浮力), 将以加速度沉降, 当其所受阻力达一定值时, 才以均匀速度沉降 (沉降速度指平均速度)。

$$\text{当} \quad F_D = P_1 \text{ 时,}$$

$$\text{即} \quad C_D \frac{\pi d^2}{2} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_1 - \rho) g,$$

$$\therefore \quad v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g(\rho_1 - \rho)d}{C_D \rho}}. \quad (3)$$

公式 (3) 表示水中悬浮物在一定条件下的一般沉淀规律的基本公式。Stokes 公式可以由这

个基本公式推演出来。在 Stokes 公式里, C_D 值相当於下式:

$$C_D = \frac{24}{Re}, \text{ 代入 (3) 式,}$$

$$v = \sqrt{\frac{4g(\rho_1 - \rho)d \cdot (vd)}{24\mu}},$$

$$\therefore v = \frac{1}{8} \frac{(\rho_1 - \rho)d^2 g}{\mu}$$

$$\text{或 } v = cd^2. \quad (1')$$

附圖示水中不同顆粒直徑的懸浮物的沉降速度, 这个圖可根据實驗和公式 (3) 得出。

由这个圖我們可看出沉降速度和顆粒直徑的关系和流态有关(即和 Re 有关)这个关系如下:

1) 当 $Re < 1$ 屬層流区

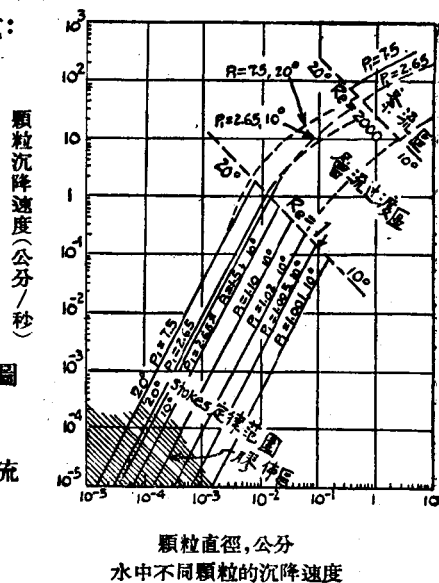
$$v = cd^2, d < 0.1 \text{ 公厘 (Stokes 公式在此范围)}$$

2) 当 Re 在 1 和 2000 之間屬过渡層流区

$$v = cd, d \text{ 在 } 0.1 \sim 1 \text{ 公厘之間。}$$

3) 当 $R > 2000$, 屬紊流区

$$v = c\sqrt{d}, d > 1 \text{ 公厘。}$$



(二) 放射式沉淀池的計算^①

(苏联 В. А. Клячко, Г. Д. Павлов)

在設計放射式沉淀池的实际工作里, 一般都沒有考慮到水由中央筒向周边运动时懸浮分速度的变化。

根据某冶金工厂放射式沉淀池在实际工作中的研究結果, 得出了計算这种沉淀池更准确的方法。

为計算便利起見, 由中央筒到周边牆的池底坡度用均匀坡度, 水由中央筒流到周边在池的断面上也是均匀分配的。

設池在周边集水槽的深度为 h , 底坡为 i , 則中央筒处的池深为:

$$H = h + Ri, \quad (1)$$

式中 R = 池的半徑。

設 Q = 須要在沉淀池中沉淀的流量, 立方公尺/秒, 那么在池子任一点水流的水平分速为:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{Q}{2\pi x(H - ix)}, \quad (2)$$

式中 x 是由沉淀池中央筒到被討論的某点的水平距离。

① 見 “Водоснабжение и санитарная техника”, 1955, 4 月。