

つた同様な実験における 121%などと比較して、おおむね妥当であろう。

なお完全に合成すれば、理論抵抗モーメントの理論値は 4.2t-m スラブを絶縁すれば 2.4t-m となる。

8. 結 論

一般に橋梁構造に多く用いられているスラブ止めによつて、鋼格子桁とスラブを結合した構造模型に対して、載荷試験を行い、応力、タワミを実測した。実測値は、合成構造と考えた場合と非合成と考えた場合の中間値をとることが明らかになつたので、不完全合成桁構造の理論を適用し、実測値を理論値に近づけることができた。

また5本の主桁のうちの第2, 4の中間桁に同時に載荷した場合の耐荷力も完全合成桁との中間にくることを明らかにし、この耐荷力を、適当に設けた仮定によつて、理論値と比較し、ほぼ一致することを知り得た。

なおこの研究においては、スラブ止めのズレの研究、スラブ止め桁の実験的研究を必要とするにかかわ

らず、これを省略したために、格子桁の応力、タワミの状態の研究に不十分なところが多く、解析的にも、上のようにはか行えなかつた。これらについては、別途実験を行い、改めて論じたいと思う。

参考文献その他

- 1) この鋼格子桁とスラブとの結合を種々変えた場合、すなわち、合成格子桁、スラブ止め格子桁、スラブ絶縁格子桁の実験および合成桁並列構造（合成格子桁で横桁を欠ぐ）の実験を行つた。これに報告するのは、そのうちの一部である。すべての実験の概報は、成岡・伊藤・大村：“格子桁の実験的研究”(1955)を参照されたい。
- 2) F. Leonhardt : Vereinfachte Trägerrost-berechnung, Stuttgart 1950 による。
- 3) 上記 1) の報告には、すべての載荷状態の実測値を書いてある。
- 4) N.M. Newmark : C.P. Siess and I.M. Viest, Proc. S.E.S.A. Vol. 9 (1951), No. 1, p. 75.

註：なお本文中完全合成格子桁あるいはスラブ絶縁格子桁と称するのは、この“格子桁の実験的研究”に述べられている合成あるいはスラブ絶縁の場合を示すものである。

砂層による溶解性物質の除去について

—水中放射性物質除去に関連して—

正員	工学博士	岩	井	重	久*
正員		合	田		健**
准員		神	山	桂	一***
准員		井	上	頼	輝****

ON THE REMOVAL OF THE DISSOLVED SUBSTANCES BY SAND LAYER.

(JSCE Dec. 1955)

Dr. Eng. Shigehisa Iwai, C.E. Member, Takeshi Gōda, C.E. Member,
Kōichi Kōyama, C.E. Assoc. Member, Yoriteru Inoue, C.E. Assoc. Member

Synopsis As the radioactive contamination of public water and the disposal of radioactive wastes are very important problems, the purifying ability of present water treatment plants must be examined for this wastes. In this paper, the behavior of uniform sand layer removing dissolved substances was analysed physico-chemically, and was verified by experiments with model sand filter, using CoCl_2 and $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, in solution. Furthermore, the method to apply the above theory to the removal of radiologically decaying matter was discussed.

緒 言 公共水の放射能汚染や、放射性廃液の処理は当面の重要問題であり、在来の浄水設備の能力は新しい視野から再検討される必要がある。たとえば濾過についていえば、従来のような物理的の抑留の現象解析

だけでなく、各種電解質、コロイドに対する吸着阻止能力についてくわしく知らねばならない。上述の目的にそい、本研究は砂層における溶液濾過の機構を物理化学的に考察したもので、Co, Sr の塩溶液による実験的検証も行つたが、機械的な阻止能や、生化学的な酸化殺菌の機能とならぶ、濾層の主要浄化機能の一

* 京都大学教授 ** 同助教授
*** 同 助手 **** 同大学院学生

つを解明しようとしたものである。

1. 概説

雨水、工場廃水、原子炉、研究所排水に含まれる放射性物質は、貯留、蒸発、イオン交換、金属粉置換、凝集沈澱等の方法で、ある程度安全化することができるが、飲料に供する場合はほとんど必ず砂濾過に依存するのであるから、砂層による除去効果には強い関心もたれる。しかるにこれらの水中放射性物質には、いわゆる核分裂生成物と、そうでないものを含めて、溶解性のものがかなり含まれている。

浮游物質に対する機械的阻止については、砂層をフルイ群と考えた岩崎博士の阻止確率理論¹⁾や、筆者の理論²⁾などがあり、これらの理論や幾多の実測が示すところでは、汚泥の抑留状態は砂面から砂底にかけ近似的に指数曲線で示される。こうして砂粒間に抑留される汚泥は、逐次有効空隙を減じ、それとともに濾過水頭が急上昇して負圧を生じ、閉塞に至るわけであるが、しかし濾過が進むにつれて浮游物阻止能は一般にきわめて高くなる。一方、溶解性物質に対しては事情は大いに異なり、物理化学的な考え方をすれば、定まった電荷を有する電解質、コロイドが充てん層を通過するに際し、これを機械的に阻止することはあまり期待できず、もつばら充てん層内に存在する逆電荷との結合吸着、あるいはイオン交換が主要な阻止能と考えられる。

従つて、原水中に含まれる溶解性物質を吸着しうる capacity は一定で、極端な場合それが saturate されてしまうと、もはや充てん層には化学的な阻止能はなくなるわけであるが、実際には吸着にともなつて脱着がおこるから、見かけ上阻止能はほとんどなくても、ある程度の吸着、脱着は常に行われているわけである。ところで、砂層による溶解性物質の阻止は、砂粒への付着、あるいは砂粒間に介在している土粒子、抑留物質や膠状被覆の有する anion, cation によるものと考えられ、おそらくこの阻止能は、物理的阻止の場合と異なり、砂の粒度や、履歴(被覆状態)によつてかなり相異なるものと思われる。

2. にのべる理論的解析では、濾過膜の発達していない単純な砂層を考え、吸着に関する Langmuir の仮定³⁾を応用し、吸着式と濃度に関する連続の式とから濾水中の溶解物濃度を算出する式を出した。水中放射能は主として放射性同位元素によるものであり、それらが同種の非活性元素とほとんど同じ化学的性質を有することから、得られた結果に自己減衰による補正を施せば、水中放射能の除去率計算に適用できるわけである。しかし、今回はさしあたり放射性同位元素を用

いる代りに、非放射性的の Co, および Sr 塩溶液を用い、室内に設置した模型緩速濾槽を用いて透水実験を行った。その方法および結果は 3. に詳述するが、理論計算の結果と比較してみても大体満足といえる。

Co や Sr を用いた理由は、放射性同位元素の中で Co⁶⁰ が産業上、研究上に多量使用される可能性があり、しかもしばしば塩溶液の形で用いられること、また、Sr がいわゆる fission product の重要な構成成分であること (Sr⁹⁰, Sr⁹⁰) などによる。

2. 理論

前述のごとく、原水中の溶解性物質に対する砂層の阻止能は、その物理化学的な吸着能に支配される、との観点から論を進めると、まず砂層中を流下する原水中の溶存物質の濃度の時間的、位置的变化について次のように考察が進められる。

すなわち、厚さ h の一様な砂層を、溶存物質を含む原水が一定濾速 v で通過する場合、単位体積の水中に含まれる吸着可能物質の質量を M 、また単位体積の砂に吸着された吸着可能物質質量を S とすれば、砂面から任意の深さにおける厚さ dz の薄砂層について考えると、

$$\phi \frac{\partial M}{\partial t} + v \frac{\partial M}{\partial z} = - \frac{\partial S}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

(ϕ は空隙率)

が得られる。(1) 式は溶存物質に関する連続式ともいふべきものである。一方、Langmuir によれば、吸着の起る機会は、吸着されうる溶質分子が吸着相の表面にごく近接した際に生ずるから、単位時間中の吸着量は、相の吸着可能な表面積と、流入水中の被吸着物質の濃度との積に比例する。いま、吸着がおこる前の、砂層単位体積あたりの吸着可能面積を ϕ 、そのうち、すでに種々の被吸着物質によつて占拠されている割合を θ とすれば、単位面積、厚さ dz の薄砂層の有する吸着可能面積は、 $\phi dz(1-\theta)$ で、溶質が単位時間にこの薄砂層に吸着される割合は、 $p_1 \phi M v(1-\theta) dz$ となる。ここに p_1 は吸着に関する一つの係数で、時間 (t)、場所 (z) によつて変動することが予想されるが、いまかりにこれを一定としておく。

一方脱着作用は、砂層の吸着面積が占拠されている割合 $\phi dz \theta$ に比例して起ると考えられるから、上と同様、脱着に関する比例係数の p_2 を用いて、単位時間中の脱着量が $p_2 \phi M v \theta dz$ であらわされ、両者の和が吸着量の実質的な増加であると見ると、

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \phi M v \{ p_1 (1-\theta) - p_2 \theta \} \dots\dots\dots (2)$$

と書ける。吸着がある程度進むと、吸着と脱着の両作

用が平衡を保つ。このときの θ を θ_e , S を S_e とすれば,

$$\theta = \theta_e S / S_e \dots\dots\dots (3)$$

なる関係を仮定できよう。そして、平衡状態では $\partial S / \partial t = 0$ であるから、(2) 式から

$$\theta_e = p_1 / (p_1 + p_2)$$

が求まり、結局 (2) 式は

$$\frac{\partial S}{\partial t} = KM \left(1 - \frac{S}{S_e} \right), \quad K = p_1 \phi v \dots\dots\dots (4)$$

と書ける。(4) は吸着式であつて、(1) と連立で S , および M が求められることになる。

(1), (4) を原水中の溶質濃度が一定な場合について解いてみよう。この場合、境界条件としては

$$M(0, t) = M_0 = \text{const.} \dots\dots\dots (5)_1$$

$$S(z, z \phi / v) = 0, \quad \text{ただし } 0 \leq z \leq z \phi / v \dots\dots (5)_2$$

をとるのが至当と思われる。後者は、 $t=0$ において砂面から濃度 M_0 の原水が侵入し始め、砂層内任意深さにおける S は原水の先端が到達する直前まで 0 であることにもとづく。

(1) と (4) の連立方程式は、直接には解きにくいので、

$$z = v \zeta, \quad t = \tau + \phi \zeta$$

なる変換を施せば、演算子はそれぞれ

$$\partial / \partial \zeta = v \cdot \partial / \partial z + \phi \cdot \partial / \partial t, \quad \partial / \partial \tau = \partial / \partial t$$

だから、(1), (4) 式は次のごとくなる。

$$\frac{\partial M}{\partial \zeta} = - \frac{\partial S}{\partial \tau} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = KM \left(1 - \frac{S}{S_e} \right) \dots\dots\dots (7)$$

条件 (5)₁, (5)₂ はそれぞれ

$$M(0, \tau) = M_0 \dots\dots\dots (8)_1$$

$$S(v \zeta, 0) = 0, \quad 0 \leq v \zeta \leq h \dots\dots\dots (8)_2$$

となる。そうするとまず、(6), (7) から簡単に

$$\frac{S}{S_e} = 1 + \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial \zeta} \log_e M \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} (\log_e M) = - \frac{K}{S_e} \frac{\partial M}{\partial \zeta} \dots\dots\dots (10)$$

が求まり、(10) 式を ζ につき積分し整理の結果

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\log_e M) = \frac{K}{S_e} (M_0 - M) \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。さらにこの (11) を変形して部分積分すると、任意函数 $\psi_1(\zeta)$ を含む次のような解が得られる。

$$M(\zeta, \tau) = \frac{M_0 \exp[M_0 K \tau / S_e]}{\psi_1(\zeta) + \exp[M_0 K \tau / S_e]} \dots\dots\dots (12)$$

ここで (8)₁ から

$$\psi_1(0) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

であることがわかる。さて (12) を (9) に入れ

$$\frac{S}{S_e} = \left\{ 1 - \frac{1}{K} \frac{\psi_1'(\zeta)}{\psi_1(\zeta) + \exp[M_0 K \tau / S_e]} \right\} \dots\dots (14)$$

となるが、(8)₂ を用いると、

$$1 - \psi_1'(v \zeta) / K \{ \psi_1(v \zeta) + 1 \} = 0$$

となり、 $\psi_1(v \zeta)$ は次のように求まる。

$$\psi_1(v \zeta) = c \exp[Kv \zeta] - 1, \quad c \text{ は任意常数}$$

(13) からすぐに $c=1$ であることがわかるから、

$$\psi_1(\zeta) = e^{Kv \zeta} - 1 \dots\dots\dots (15)$$

で、結局 S および M はそれぞれ次のように表わせる。

$$\begin{aligned} \frac{S}{S_e} &= 1 - \frac{\exp[K \zeta]}{\exp[K \zeta] - 1 + \exp[M_0 K \tau / S_e]} \\ &= 1 - \frac{1}{1 - \exp[-Kz/v] + \exp} \\ &\quad \times \frac{1}{[M_0 K(t - \phi z/v) / S_e - Kz/v]} \dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{M}{M_0} &= \frac{\exp[M_0 K \tau / S_e]}{\exp[K \zeta] - 1 + \exp[M_0 K \tau / S_e]} \\ &= \frac{1}{1 + \{ \exp[Kz/v] - 1 \} / \exp[M_0 K(t - \phi z/v) / S_e]} \dots\dots (17) \end{aligned}$$

時刻 $t=0$ から溶質の砂層侵入が始まる場合、 S 及び M の時間的、位置的变化が上式から求まるわけであるが、溶質が 2 種以上混在する場合には、吸着における相互の干渉があるから、一般に上の理論式は直接適用できない。溶質が単一である場合につき、 K に適当な値を与えて上式を計算してみると、たとえば M は、ある時刻まで逐次増加して、それからはほぼ原水濃度に近い値で平衡状態になる。ここにおいて砂層の実質上の阻止能はなくなるわけである。だから、われわれにとつて、時刻 $t=0$ からここに達するまでの非定常期間が重要なのであつて、浮游物濾過における濾過持続時間と似た意義を有する。

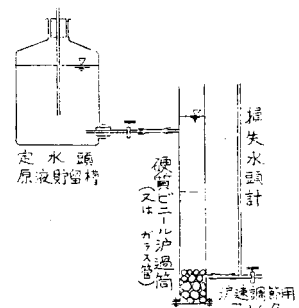
3. 実験との比較

上に述べた理論の意義、実用性を験するため、できるだけ理論の想定に近い条件で実験を行つた。

実験装置は 図

図-1 実験装置

1 に示すような長さ 2 m, 内径 10 cm の硬質ビニール管、および長さ 1.3 m, 内径 4.8 cm の中空ガラス管を濾過筒として用い、これに定水頭原液貯留槽および損失水頭計を付



属せしめた。濾速は両装置とも手動の調整コックで一定に保つ。濾層は、底部に敷厚 10 cm の砂利、粗砂をつめ、その上に京都市松ヶ崎浄水場使用の緩速濾過砂 (u.c.=2.13, e.s.=0.32 mm) を、気泡の混入、層化を警戒しつつ充てんした。原液は、非放射性的の Co および Sr の塩溶液を一定量の蒸留水に溶かしたもので、濾過実験に際しては、この原液ならびにその濾液につき刻々定量分析を行つた。その定量は次のべる方法による⁴⁾。

(1) コバルト 試料を 1.5 ppm 以下の適当な濃度に希釈し、その 100 ml をとり、これに 5 ml のサケ酸アンモンを緩衝液として加え、0.5% ニトロソ R-塩 2 ml による赤色反応を、光電比色計を用いて比色定量した。

(2) ストロンチウム 試料 50 ml を白磁皿にとり、アンモニア水と塩化アンモニウムの緩衝液 5 ml を加えて、pH を 10 以上に保ちつつ EBT を指示薬として、MgCl₂ を含む EDTA 液で定量した。なお、本定量法では、硬度 (Ca, Mg) を含めた値が得られるので、推定される硬度を実験値からさしひいた。

Co の実験では原液濃度 52 ppm、濾速 11.6 m/d；および原液濃度 96 ppm、濾速 12.3 m/d の 2 種；また Sr については、濃度 124 ppm、濾速 5.4 m/d；および濃度 231 ppm、濾速 5.0 m/d の 2 種につきそれぞれ実験を行つた。いずれの場合も、原液濃度は前者後者の比がほぼ 1 : 2 であり、得られた結果をそれぞれ 図-2, 3, 4, 5 に示す。

傾向はいずれもよく似ているが、Sr の実験によれば、抑留阻止の効果はあまり期待できないことがわか

図-2 Co 原液 52 ppm

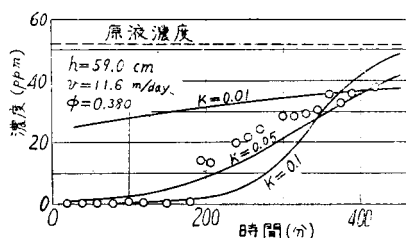


図-3 Co 原液 96 ppm

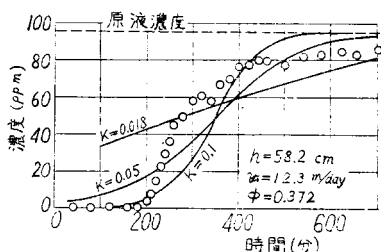


図-4 Sr 原液 124 ppm

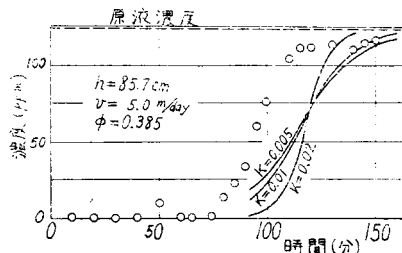
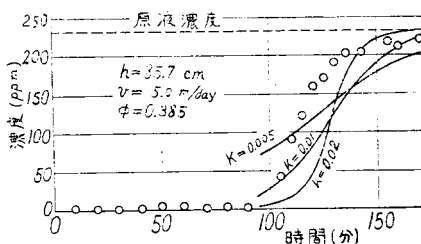


図-5 Sr 原液 231 ppm



る。なお実験値を理論と比較するために、濾速 v 、porosity ϕ 、砂層厚 h 、砂の平衡吸着量 (仮称) S_0 をそれぞれ直接、間接に実測から求め、 K に適当な値を与えて、(17)式から濾水中の溶質濃度 M を計算した。図中実線がそれであるが、実験値と比較すると、Sr についても、Co についても、ともに一応定性的な傾向は合っているようである。それぞれの実験曲線に対して、傾向のよく合致する計算曲線の K の値は、それぞれ異なるが、元来 K は砂層の粒度、履歴、濾速等によつて変るべきものであるから、それは当然である。また、このような K に対し実験、理論曲線の間には一定の時間的なずれがあるが、これは、本理論では考慮されていない拡散の影響や、あるいはまた、濾槽の径が小さいので、砂層の水平断面で浸透速度が均一でなく、周壁効果があらわれたこと等が一因と考えられる。しかしながら、これで実験値と理論値の差を定量的に説明できるわけではなく、むしろ理論計算式で K を一定と考えたことによる誤差が最も重要と思われる。図-2~5 を注意して見ると、各実験曲線は部分的には K を一定とみてよいが、全体的にはある range で変動していると見るべきである。前述のように K は砂の粒度や履歴によつて当然変化すべき性質のものだから、本理論式を用いて実験結果に対し逆に K の変動範囲を調べることも有意義で、砂層吸着の機構を把握する一つの手がかりとなるであろう。これについては今後なお多くの実験観測を行つて究明してみたいと思う。しかしながら、上記の諸検討からみて、本理論の信頼性は一応認められてよいであろう。

4. 結語

濾過膜を生成していない様な砂層が、原水中の溶質を抑留吸着する機構は、一応 2. の理論によつて説明され、非放射性 Co および Sr の塩溶液を用いた実験結果に対しては、少なくとも定性的に正しいということが証せられた。Co, Sr 以外の重要な cation, あるいは anion 溶質について、なお今後研究実験の必要があるが、未知の点が多く残されている濾過機構の解明において、本研究は一つの前進であり、さしあたり次のように水中放射性物質の除去率計算に利用する。すなわち、汚染 (contamination) の原因となる放射性同位元素は、一般にその activity I が

$$I = I_0 \exp[-0.693 t / T]$$

(I_0 は $t=0$ での放射線強度, T は当元素の半減期)であるから、濃度 M に関する上記の理論解 (17) 式において、任意時刻で $z=h$ における M を求め、これをたとえば cpm という activity の単位に直すため筆者が前述⁶⁾したような換算計算を行い、さらに経過時間 t に応じて上式により自己減衰を考慮した放射線強度を求めることができる。この換算計算は僅少な時間ですませるから、上記の理論は結局、実質的には砂層による水中放射性物質除去率の計算式であるとも

てよいのである。

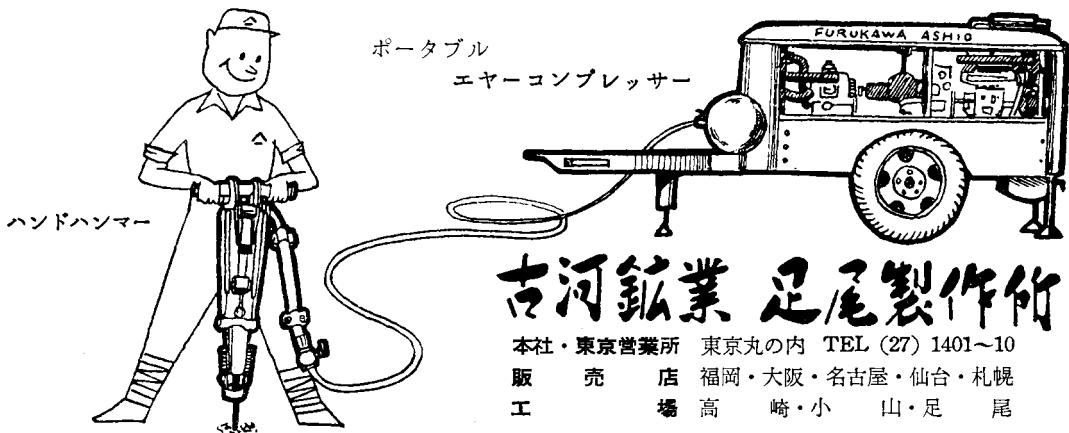
なお本文は、文部省科学研究費(昭和 29, 30 年度)厚生省原爆被害対策費(昭和 29 年度)の交付を受けて行つた研究成果の一部であつて、関係方面、ならびに化学分析に関し多大の御協力を頂いた筒井天尊氏に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岩崎富久：“濾過阻止率の計算”，土木学会誌 24 卷 8, 9 号；昭和 13 年 8, 9 月。
- 2) 合田 健：“砂濾過の水理に関する基礎的研究”，土木学会誌 37 卷 1 号，昭和 27 年 1 月。
合田 健：“砂濾過における損失水頭および圧力水頭の計算について”，土木学会誌 37 卷 3 号，昭和 27 年 3 月。
- 3) Langmuir：“The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum”，The Journal of the American Chemical Society, vol. 40, 1918, p. 1361.
- 4) Sandell：“Colorimetric Determination of Traces of Metals”，New York 1950 p. 274.
- 5) T.H. Manns, M.U. Reschovsky and A.J. Certa：“Volumetric Determination of Barium” Analytical Chemistry, vol. 24, 1952, p. 908.
- 6) 岩井重久：“放射性同位元素と土工学 [II]”，(講座)土木学会誌 40 卷 3 号，昭和 30 年 3 月，p. 34。(昭.30.7.19)

高効率!!

古河のエア・コンプレッサー ハンドハンマー



古河鋳業 足尾製作所

本社・東京営業所 東京丸の内 TEL (27) 1401~10
販売店 福岡・大阪・名古屋・仙台・札幌
工場 高崎・小山・足尾