

京都大学工学部 正員 工博 松尾新一郎

同上 正員 工修 河野伊一郎

1. まえがき 地下水規制, 地下水開発を目的とした地中ダム化の構想についてはすでに報告しているが^(1,2), ダム化地帯付近の地下水流, 地下水位の分布などについては不明確な点も多い。これらを実験的に研究するため 細管網モデルを開発して, 定常, 非定常の問題を解析している。今回はそのうち定常流についての実験的研究を報告する。

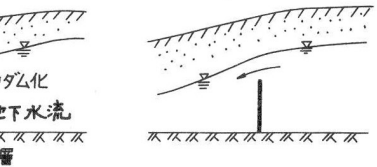
2. 地中ダム化の形態について 地中ダム化とは地下水流が存在する帯水層中に不透水性の壁を造って地下水を貯留し, また地下水流の方向を規制することであり, 地下水開発の促進, 地下水位や地下水湧出量の調節を目的としている。自由地下水帯中の地中ダム化の形態としては, 図-1に示すように大きく分けて(a)と(b)の2種が考えられる。人工的に地中ダム化を行なう場合には施工の面から(注入工法, 矢板工法等)(a)の形態が多く, また自然地盤が地中ダム化の構造になっている場合には(b)の形態も存在する。

一方, 被圧地下水帯中の地中ダム化については自由水面(Phreatic surface)が存在しないので数学的手法等(等角写像, 数値解析)を用いて地下水流や地下水位の分布を知ることも可能であり³⁾, 貯留係数が決まれば非定常流としての問題も少ない。そこで(a)の場合について実験的検討を行なった。

3. 細管網モデルについて 地下水流の実験的研究のモデルとしては, (1)砂モデル, (2)電気相似モデル, (3)Hele-Shaw モデル (4)その他 がある。これら従来のモデルの欠点としては, (1)のモデルでは毛細管現象の影響を取り除くこと, または相似率で考察することが困難である。(2)については自由水面を決定するのが不便であり, 特に非定常流の問題を取り扱うことは不可能である。(3)については2次元流に限られ, また平行板の向げきの様な整作が難しい, などである。

これに対して今回開発した細管網モデルは, 細管を網目状に接続し, このネットの中に水流または粘性流を生じさせ, 水位の分布, 流量, あるいはそれらの変化を測定して, 相似則を用いて解析しようとするものである。写真-1は2次元流の細管網モデルの1例である。この細管網モデルは製作が容易であるばかりでなくつぎのような数多くの長所を有している。

1) 粘性流体の粘性を変えることにより あるいは細管の径を変えることにより透水係数の変化に相当する解析が可能である。



(a) 人工的な地中ダム化 (b) 自然の地中ダム化
図-1 自由地下水帯中の地中ダム化の形態

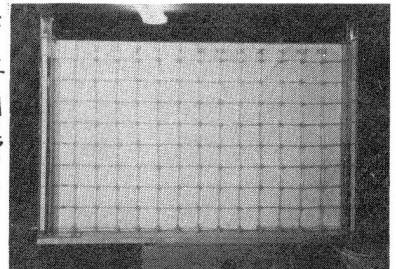


写真-1 細管網モデル(2次元)

- 参考文献 1) 松尾, 河野: 地中ダム化と水収支について, 才21回土木学会年次講演会 (1966.5)
2) 松尾: タイ国における地下水開発の構想, 東南アジア研究 3-2 (1965.9)
3) 松尾, 河野: 地中ダム化による地下水規制, 昭39土木学会関西支部年次講演会 (1964.11)

2) 細管網の径を、部分的にあるいは縦方向と横方向とで変えることにより heterogeneous, unisotropic の状態を容易に創ることができる。また網目の間かくを調節してもよい。さらには 3) 非定常流としての解析が可能であり、変動の伝搬速度も任意に調節できる。4) 自由水面を毛細管現象を除外して考察できる。5) 3次元地下水流の実験も細管網を立体的に組むことによって可能である。6) 境界条件の設置が簡単である。7) 流体を着色して肉眼や写真観測などが可能となり、全体の挙動を把握しやすい。一方、欠点としては網目があらい場合には差分的な結果を得ることになる。しかし要求する精度によって網目の間かくを小さくすることにより、誤差を減少せしめることができる。

4. 細管網モデルの理論的考察 細管中の流れが層流の場合には Poiseuille の法則により式(1)が成立する。
$$v_{av} = (\gamma_f r^2 / 8\mu) \times i \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 v_{av} : 細管内の平均流速、 γ_f : 流体の単位体積重量、 r : 細管の半径、 μ : 粘性係数、 i : 水頭勾配、である。式(1)は Darcy の法則として知られる地下水流における関係式と同型である。いま図-2 に示すように細管網の横方向の間かく、細管の半径をそれぞれ Δl , r , また縦方向の間かくと細管の半径をそれぞれ $\Delta l'$, r' とすると、2次元流モデルの横方向の透水係数 k_h (水頭勾配が1のとき単位中、単位厚さ当りに流れる流量と考える。) 縦方向の透水係数 k_v はそれぞれ式(2)の各式であらわされる。

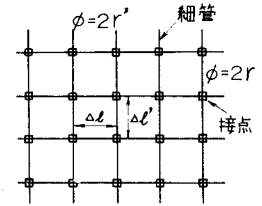


図-2 細管網

$$k_h = \gamma_f r^2 / 8\mu \Delta l' \quad k_v = \gamma_f r'^2 / 8\mu \Delta l \quad \text{----- (2)}$$

また有効空けき率 β については式(3)となる。
$$\beta = \pi r'^2 / \Delta l \quad \text{----- (3)}$$

よって非定常流の変動の伝搬に影響する (k/β) は式(4)となる。ただし、 $r = r'$ $\Delta l = \Delta l'$ 、

$$(k/\beta) = \gamma_f / 8\mu \pi \quad \text{----- (4)}$$

5. 本実験に用いた細管網モデル モデルの全容は写真-1 に示す。細管は内径 3mm のビニールパイプを用い、接点にはアクリル樹脂の小立方体に四方から孔をあけこれにビニールパイプを差し込み接着した。網目の間かくは 10cm の正方形とし、高さ 90cm、長さ 140cm の 2次元モデルである。地中ダム化の構造としては図-3 の X 印の位置において、パイプを栓塞して流れを止めた。なお、(高さ):(長さ)の比を 9:14 にした理由としては、地中ダム化地床より、透水路厚さの 1.5 倍以上離れたところでは Dupuit-Forchheimer の仮説が近似的に満足されるようになり準 1 次元流として取り扱うことができることみなしている。したがってその領域では計算による解析が可能である。

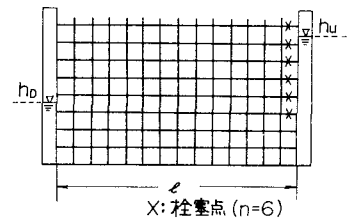


図-3 細管網モデルと地中ダム化

6. 本実験に用いた粘性流体 用いた粘性流体は CMC の 1% 溶液である。図-4 に示すような変水位の実験装置を用いて細管中を流れる粘性流の性状を調べてみた。流れの関係式が Darcy の式と同型になるためには式(5)が成立しなければならない。(変水位透水試験)

$$C = (2.3 A l / 2 \pi a) \log (h_0 - H) / (h_t - H) \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 $C = \gamma / a l$, $h_u + h_0 = 2H$ $A = \pi R^2$, $a = \pi r^2$

q : 単位時間当りの細管中の流量, h_0 : $t=0$ における h_u , h_t : 時間 t における h_u ,
 t と $(h_t - H)/(h_0 - H)$ の関係を半対数紙に描くと図-5 のようである。図-5 がわずかに下に
 凸となっているのは CMC
 溶液が厳密には Newton 粘
 性ではなく Pseudo plast-
 ic 粘性であるためである。
 しかしその差は近似的に零
 であるとみなし図-5 を直 図-4 透水試験装置
 線で近似した。また接点の影響も無視しうる程度に小
 さいことがわかる。また C と k との関係については
 $k = C\alpha/\Delta l$ である。実験中に用いた CMC 1%
 溶液は $C \approx 13 \text{ cm/sec}$, したがって同モデルの透水係数 $k = 9.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と同値である。

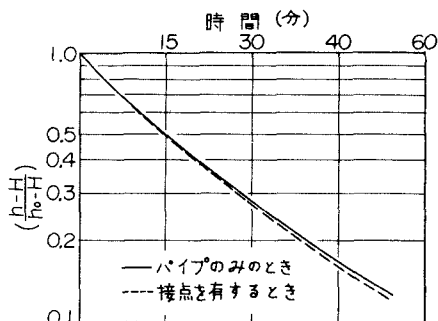
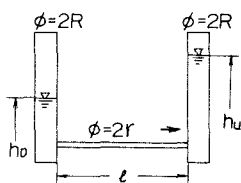


図-5 細管の透水性の試験結果

7. 実験結果 (1) 水面形について 図-6 は地中ダム化の無い場合の 2 例 ($h_u = 85 \text{ cm}$,

$h_0 = 25 \text{ cm}$ と 45 cm) および 地中ダ
 ム化 $n=8$ (図-3 参照: 9 本の細管のう
 ち 8 本に栓塞をする。) の場合の 1 例 (h_u
 $= 85 \text{ cm}$, $h_0 = 25 \text{ cm}$) を示している。
 実線は自由水面の形をあらわし、破線は底
 面の圧力分布を示している。フローネッ
 トを描いてみると明らかなるように地中ダ
 ム化の有る場合には、上流では底面の圧力
 の方が自由水面の水位より大きく、下流では
 その逆になる。 図-7 は地中ダム化の深
 さを種々に変化させた場合の 1 例 ($h_u = 85 \text{ cm}$, $h_0 = 25 \text{ cm}$) で n をパラメータとして 地中ダム
 化より下流側の自由水面形を示している。また図-8 は 地中ダム化より上流側の水面形を示してい
 る。

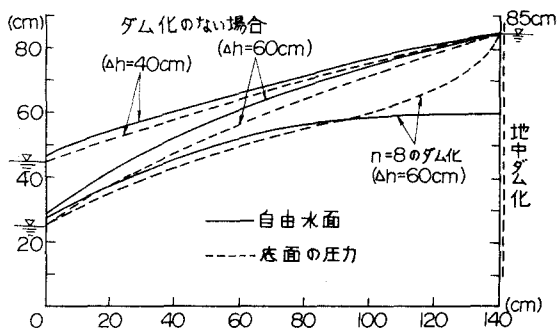


図-6 細管網モデルによる実験結果の例

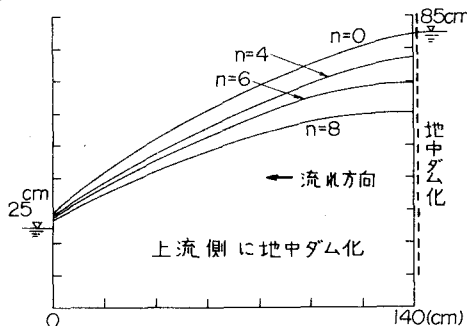


図-7 ダム化より下流側の自由水面形

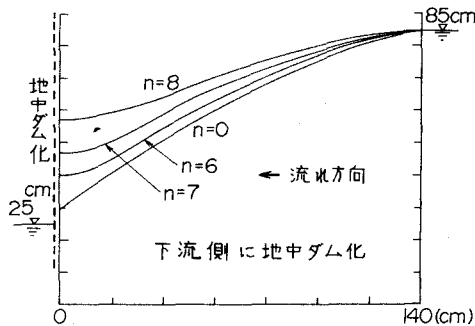


図-8 上流側の自由水面形

(2) 流量について 地中ダム化の深さ (n) と地下水流量との関係の 1 例 ($h_u = 85 \text{ cm}$: 一定) を

n をパラメータとして図示したものが図-9, 図-10である。図-9は地中ダム化より下流側を対象とし, 図-10は上流側を対象としている。ただし, $\Delta h = h_u - h_0$

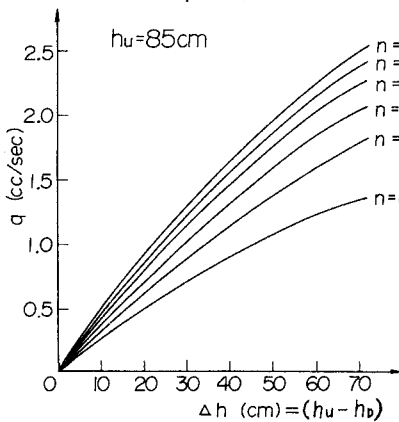


図-9 下流側の流量関係図

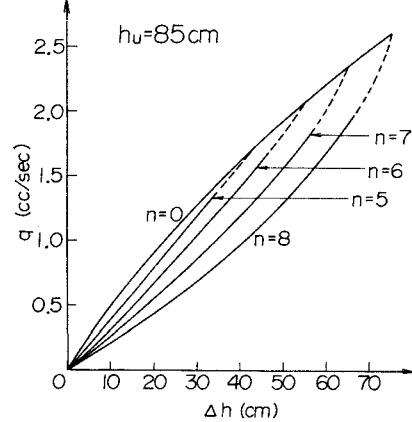


図-10 上流側における流量関係図

8. 考察 以上に示した実験結果はいずれも, 地中ダム化の上流または下流のどちらか一方が地表水の場合であると考えねばならない。(地中ダム化より上流側を対象としている場合にはダム化地床より下流は地表水であり, またその逆もいえる。)しかし実際には多くの場合図-1に示すように, 地中ダム化地床より上流, 下流共に地下水である。そこで本実験結果から近似的につぎのような順序で上流, 下流共に地下水である場合の地下水位, 流量などを決定することができる。

① 地中ダム化より上流側の実験から h_{u1} , h_{D1} , q_1 を求める。(添字 1 は上流側の実験, 添字 2 は下流側の実験) ② つぎに地中ダム化より下流側の実験から, h_{D1} に等しい h_{u2} を有し, かつ q_1 に等しい q_2 になるように h_{D2} を決める。③ h_{u1} , $h_{D1} (=h_{u2})$, h_{D2} を用いて上流側, 下流側の水面形などを求め, そのときの地下水流量は $q_1 (=q_2)$ である。以上の操作は地中ダム化直下の透水床(図-11の破線部)の等ポテンシャル線は近似的に鉛直方向であると仮定している。この仮定による影響は非常に小さいと推定される。図-11は以上の 1 計算例を示している。なお, Dupuit-Forchheimer の仮説が成立すると考える地中ダム化地床より離れたところでは, 自由水面等は計算によって解析的に求めることができる。⁴⁾

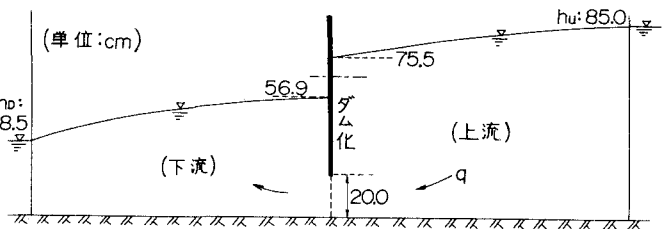


図-11 自由地下水帯中の地中ダム化解析結果の例

9. 結語 地下水流に対して細管網モデルを開発し, 理論的および実験的にその妥当性を示した。さらにこのモデルを用いて地中ダム化付近の地下水位, 地下水流について実験, 考察してその一部を例示した。細管網モデルは多くの利点を有し, 地中ダム化に阻う一般浸透流の実験的研究に有力な手段となる。地中ダム化の実験結果は, これを用いて現地の地下水調査に基き適当な地中ダム化の規模(長さ)を決定する場合の基礎資料となるものと考ええる。

参考文献 4) 松尾, 河野: 潮水面などの変化に起因する自由地下水の水位変動の解析に関する研究, 土木学会論文集 NO.139 (1967)