II-160　漏水と井戸損失を考慮した2層帯水層システムからの揚水による地下水の定常流動について

東海大学　正員　市川　勉
九州東海大学　正員　星田　義治

1. まえがき．　著者らは，近年，2層帯水層システムからの井戸を用いた揚水による地下水の流動について発表を行なってきた[1,2]．しかし，これらの中では，初期の総水頭が上下両帯水層で等しいとしているため，実際には，合わない面を持っている．本報告では，上下両帯水層の初期水頭が異なる場合について，実験・解析を行なったので報告する．

2. 式の展開　　2層帯水層システムは，(1)不圧－被圧システム（上層が不圧帯水層で下層が被圧帯水層の場合），(2)被圧－被圧システム（上下両層とも被圧帯水層の場合）の2つのシステムに要約される．これらのシステムの一般図及び各諸元を図－1，図－2に示す．図－1，2において，Q_0は揚水量，Q_{su}, Q_{sc}, Q_{sI}, Q_{sII}は各帯水層から井戸へのしみ出し量，k_u, k_c, k_I, k_{II}は各帯水層の透水係数，k_aは漏水層の透水係数，r_wは井戸の半径，h_{wu}, h_{wc}, h_{wI}, h_{wII}は各帯水層の井戸内の水位，水頭，D, D_I, D_{II}は各被圧帯水層の層厚，H_u, H_c, H_I, H_{II}は各帯水層の揚水前の水位，水頭，Rは涵養半径，Q_{ru}, Q_{rc}, Q_{rI}, Q_{rII}は井戸の中心から半径rの円筒を通過する流量，h_u, h_c, h_I, h_{II}は井戸の中心からrの地点の各帯水層における水位，水頭，h_{su}, h_{sc}, h_{sI}, h_{sII}は各帯水層の井戸枠の外側の水位，水頭，D_aは漏水層の層厚，H_aは下部被圧帯水層と漏水層の層厚の和，Q_{ra}は漏水層を単位幅当りを鉛直方向に通過する流量である．本報告では，井戸内の水位が上下両帯水層の揚水前の水位より低下して定常状態となる場合を対象とし，次の仮定を用いる．i)上下両帯水層とも均質等方で，不圧帯水層の流れは準一様流であり，ダルシーの法則が成り立つ．ii)井戸は,下部帯水層底部まで完全に貫入しており，揚水量は一定で，井戸に設けられる取水孔は連続的に一様に分布している．iii)上下両帯水層にはさまれている漏水層内の流れは鉛直一次元で，漏水層内からのしぼり出し現象はない．以上の各々の仮定を用いると，以下の各式が誘導される．不圧－被圧システムについては，井戸における連続の式　$Q_0=Q_{su}+Q_{sc}$　(1)　井戸枠の抵抗を考慮した運動方程式　$Q_{su}=2\pi r_w K_u(h_{su}-h_{wu})^{1/2}(2h_{su}+h_{wu})/3$　(2)

$Q_{sc}=2\pi r_w K_c D(h_{sc}-h_{wc})^{1/2}$　(3)　漏水を考慮した帯水層内の流動方程式

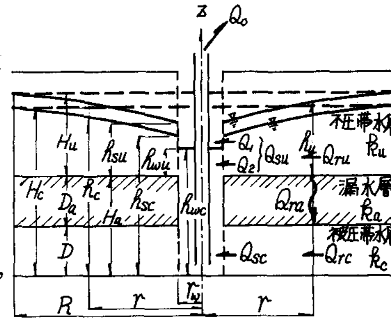
$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r h_u \frac{dh_u}{dr}\right)=\frac{k_a}{k_u}\frac{h_u+H_a-h_c}{D_a} \qquad (4)$$

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dh_c}{dr}\right)=-\frac{k_a}{k_c D}\frac{h_u+H_a-h_c}{D_a} \qquad (5)$$

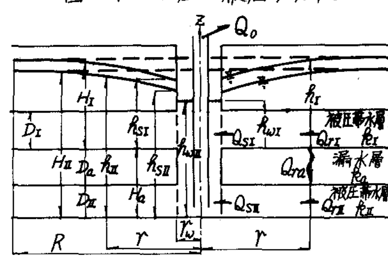
境界条件は，

$$\left.\begin{array}{l} r=r_w\ ;\ Q_0=Q_{su}+Q_{sc}=const.\ ,\ Q_{su}=2\pi r_w K_u(h_{su}-h_{wu})^{1/2}(2h_{su}+h_{wu})/3 \\ \qquad\quad Q_{sc}=2\pi r_w K_c(h_{sc}-h_{wc})^{1/2} \\ r=R\ ;\ h_u=H_u\ ,\ \ h_c=H_c \end{array}\right\} \quad (6)$$

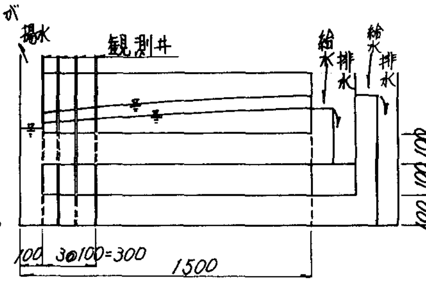
となる．被圧－被圧システムについては，同様に，井戸における連



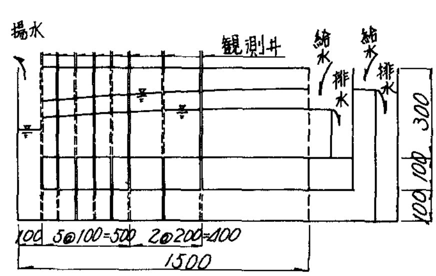
図－1　不圧－被圧システム



図－2　被圧－被圧システム



図－3　被圧－被圧モデル



図－4　不圧－被圧モデル

続の式　$Q_o = Q_{sI} + Q_{sII}$　(7)　井戸枠の抵抗を考慮した運動方程式

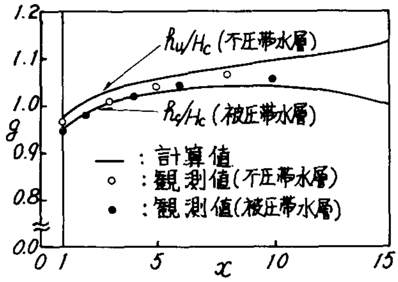
$Q_{sI} = 2\pi r_w K_I D_I (h_{sI} - h_{wI})^{1/2}$　(8)　$Q_{sII} = 2\pi r_w K_{II} D_{II} (h_{sII} - h_{wII})^{1/2}$　(9)　漏水を考慮した帯水層内の流動方程式と境界条件

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dh_I}{dr}\right) = \frac{k_a}{k_I D_I}\frac{h_I + H_a - h_{II}}{D_a} \qquad (10)$$

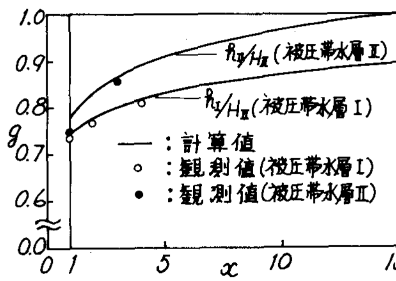
$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dh_{II}}{dr}\right) = -\frac{k_a}{k_{II} D_{II}}\frac{h_I + H_a - h_{II}}{D_a} \qquad (11)$$

$$\left.\begin{array}{l} r = r_w\ ;\ \ Q_o = Q_{sI} + Q_{sII} = const.,\ \ Q_{sI} = 2\pi r_w K_I D_I (h_{sI} - h_{wI})^{1/2} \\ \qquad\qquad Q_{sII} = 2\pi r_w K_{II} D_{II} (h_{sII} - h_{wII})^{1/2} \\ r = R\ ;\ \ h_I = H_I,\ \ h_{II} = H_{II} \end{array}\right\} \qquad (12)$$

となる．上の各式を以下の式を用いて無次元化する．$A_u = r_w^2/H_u D_a$，$B_c = r_w^2/D D_a$，$g_{ac} = H_a/H_c$，$g_{au} = H_a/H_u$，$g_D = H_u/D$，$g_c = h_c/H_c$，$g_u = h_u/H_u$，$g_{su} = h_{su}/H_u$，$g_{sc} = h_{sc}/H_c$，$g_{wu} = h_{wu}/H_u$，$g_{wc} = h_{wc}/H_c$，$g_{uc} = H_u/H_c$，$k_{au} = k_a/k_u$，$k_{ac} = k_a/k_c$，$R_m = R/r_w$，$x = r/r_w$，$Z_o = Q_o/2\pi k_c D H_c$，$Z_u = Q r_u/2\pi k_u H_u^2$，$Z_c = Q r_c/2\pi k_c D H_c$，$Z_{sc} = Q_{sc}/2\pi k_c D H_c$，$Z_{su} = Q_{su}/2\pi k_u H_u^2$，$\alpha_c = r_w K_c/k_c\sqrt{H_c}$，$\alpha_u = r_w K_u/k_u\sqrt{H_u}$，（以上，不圧－被圧システム）$A_I = r_w^2/D_I D_a$，$B_{II} = r_w^2/D_{II} D_a$，$D_o = D_I/D_{II}$，$g = H_I/H_{II}$，$g_{aII} = H_a/H_{II}$，$g_I = h_I/H_I$，$g_{II} = h_{II}/H_{II}$，$g_{sI} = h_{sI}/H_I$，$g_{sII} = h_{sII}/H_{II}$，$g_{wI} = h_{wI}/H_I$，$g_{wII} = h_{wII}/H_{II}$，$k_{aI} = k_a/k_I$，$k_{aII} = k_a/k_{II}$，$Z_o = Q_o/2\pi k_{II} D_{II} H_{II}$，$Z_I = Q r_I/2\pi k_I D_I H_I$，$Z_{II} = Q r_{II}/2\pi k_{II} D_{II} H_{II}$，$Z_{sI} = Q_{sI}/2\pi k_I D_I H_I$，$Z_{sII} = Q_{sII}/2\pi k_{II} D_{II} H_{II}$，$\alpha_I = r_w K_I/k_I\sqrt{H_I}$，$\alpha_{II} = r_w K_{II}/k_{II}\sqrt{H_{II}}$（以上，被圧－被圧システム）．ここに，$K_u, K_c, K_I, K_{II}$は井戸枠の抵抗係数である．以上の各式を用いると(4)～(6)，(10)～(12)の各式は，以下のようになる．



図－5　初期水位の異なる不圧－被圧システムにおける水位曲線（漏水あり）



図－6　初期水頭の異なる被圧－被圧システムにおける水頭曲線（漏水なし）．

$$\frac{dg_u}{dx} = \frac{Z_u}{x g_u},\quad \frac{dZ_u}{dx} = x A_u k_{au}(g_u + g_{au} - g_c/g_{uc}) \qquad (13)$$

$$\frac{dg_c}{dx} = \frac{Z_c}{x},\quad \frac{dZ_c}{dx} = -x B_c k_{ac}(g_u g_{uc} + g_{ac} - g_c) \qquad (14)$$

$$\left.\begin{array}{l} x = 1\ ;\ \ Z_o = (k_{ac}/k_{au}) g_{uc} g_D Z_{su} + Z_{sc} = const.,\ \ Z_{su} = \alpha_u (g_{su} - g_{wu})^{1/2}(2g_{su} + g_{wu})/3,\ \ Z_{sc} = \alpha_c (g_{sc} - g_{wc})^{1/2} \\ x = R_m\ ;\ \ g_u = 1,\ \ g_c = 1 \end{array}\right\} \qquad (15)$$

$$\frac{dg_I}{dx} = \frac{Z_I}{x},\quad \frac{dZ_I}{dx} = x A_I k_{aI}(g_I + g_{aI} - g_{II}/g) \qquad (16) \qquad \frac{dg_{II}}{dx} = \frac{Z_{II}}{x},\quad \frac{dZ_{II}}{dx} = -x B_{II} k_{aII}(g_I g + g_{aII} - g_{II}) \qquad (17)$$

$$\left.\begin{array}{l} x = 1\ ;\ \ Z_o = (k_{aII}/k_{aI}) g D_o Z_{sI} + Z_{sII} = const.,\ \ Z_{sI} = \alpha_I (g_{sI} - g_{wI})^{1/2},\ \ Z_{sII} = \alpha_{II}(g_{sII} - g_{wII})^{1/2} \\ x = R_m\ ;\ \ g_I = 1,\ \ g_{II} = 1 \end{array}\right\} \qquad (18)$$

3. 実験および考察　実験は，図－2，3に示すような1/24扇形水槽を用いて行なった．上下両帯水層には，均等係数1.49，10％粒径0.43mmの砂を，漏水層には，豊浦産標準砂を用いた．観測諸量は，揚水量，井戸枠内外の水位，水頭，帯水層内各位置の水位，水頭である．給水は，涵養側へ流量計を通して一定供給し，各帯水層への注入量は，排水量と供給量の差に等しいとした．解析は，帯水層の諸元及び観測値として揚水量Q_o，井戸内の水位，水頭$h_{wu}, h_{wc}, h_{wI}, h_{wII}$を与え，漏水層の透水係数$k_a$，上部帯水層の透水係数$k_u, k_I$，および各帯水層からのしみ出し量$Z_{su}, Z_{sc}, Z_{sI}, Z_{sII}$を仮定する．次に，井戸枠の無次元抵抗係数$\alpha$と無次元しみ出し量の関係[3]より$\alpha_u, \alpha_c, \alpha_I, \alpha_{II}$を推定し，不圧－被圧システムでは，(13)，(14)を(15)の条件で，被圧－被圧システムでは，(16)，(17)を(18)の条件で数値計算し，この数値計算で得られる無次元しみ出し量と仮定した値とほぼ一致するまでくり返し計算する．その結果が図－5，6である．図を見ると，帯水層内の任意位置の水位・水頭は，ほぼ評価されているようである．この方法によると，各帯水層からのしみ出し量および透水係数，各帯水層の井戸損失を定量的に把握できる．しかし，図－5，6で下部帯水層の井戸枠外側の水頭が少しずれている．これは，$\alpha - Z$の関係を実験式で与えているため，今後実験を重ねる必要があろう．

参考文献

1) 市川・星田・石丸，"漏水を考慮した2つの被圧帯水層からの揚水による水頭低下の数値解析"，第35回年講，1980年．　2) 市川・星田"漏水のある2つの被圧帯水層からの揚水による地下水の定常流動について"第36回年講，1981．　3) 星田・市川"揚水における井戸ロスの評価に関する考察"土木学会論文報告集，第313号，1981．