

復水工法の設計法に関する研究

(A Study on Method of Designing for Recharge Method)

太田 正彦* (Masahiko Ohta)

キーワード：浸透／地下水／土中水／排水 (IGC :
E7/K1)

1. ま え が き

従来、都市部において地下水位低下工事を実施する場合、井戸枯れや地盤沈下などの地下水位低下に伴う建設公害の発生が大きな制約となっていたが、最近これらの建設公害に対処するものとして復水工法が有望視されてきている。

しかし、本工法の設計に関しては、井戸の揚水公式における揚水量と地下水位低下の関係を逆にして利用するなどの便宜的な方法が一部で試みられているものの、いかなる土質および水理条件下に、どの位置にどれだけの量を復水すればよいかなど工法設計の基本的方向づけがいまだ明確でなく、現場における施工も確たる根拠もいまま試行的に行われているのが実情である。

著者は復水工法の高い有用性にかんがみその設計法の確立を研究中である。ところで、復水現象と類似の浸透現象を扱った研究としては、地下水かん養の観点において水路から地盤への浸透を扱った宇野の研究¹⁾、井戸からの注水による淡塩界面の挙動に関する松尾・上田の研究²⁾などがある。

また、近年、有限要素法等の数値計算法の発達に伴いこのような複雑な流れ系の解析も比較的容易に取り扱えるようになってきたが、境界条件設定等の複雑さも相まって実用化を進めるうえでは依然問題が多い。

そこで、著者はこれを実験研究を通じて確立するものとし、しかも実用性の高いものとする観点から、設計段階のみならず施工過程における観測修正にも容易に取り込みやすい形で地下水挙動を表現し得る近似計算法の確立を目指すこととした。

本論文は、給水源と揚水点の中間点のある地点の水位を原地下水位 H_1 と給水しないで単純揚水した場合の地下水位 H_{r0} の中間水位 H_r に維持するためにはどのような復水方法があるかを実験研究から得られた水位と流量の関係を用いて検討したものであり、その場合の自由

地下水面形を求めるための近似計算法としては、本文に述べるようなものが考えられる。

2. 実験概要

2.1 復水モデルの設定

復水を伴う揚水現象を自由地下水帯における2次元定常浸透問題としてとらえ、以下に示すような復水機構の異なる2つの水理モデルを設定した。

- 1) トレンチ状の掘削溝から静水圧で復水する機構を有するモデル (トレンチ型復水モデル-モデル1)
- 2) 地中の1点から放射状に加圧注水して復水する機構を有するモデル (地中集中型復水モデル-モデル2)

これらの2つのモデルを模式的に示せば図-1のとおりである。

モデル1による実験は主として復水位置 L_r 、復水装置の貫入深さ D_r 、復水位置における維持水位 H_r などの復水条件と自由地下水面形状、揚水量 Q_d ならびに復水量 Q_r との相互関係を把握し、復水時浸透現象の特徴を解明するために行ったものであり、モデル2による実験は主として復水機構の相違による影響を調べることを目的として行ったものである。また、復水を伴わない揚水 (単純揚水) 実験も上記の両モデルを利用して適宜実施した。なお、両モデルとも揚水は完全貫入の重力井戸からの揚水をモデル化した機構によった。

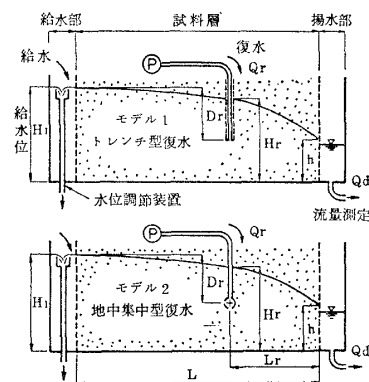


図-1 復水モデル

2.2 実験装置および試料

復水を伴う揚水実験は2次元砂模型によるものとし、

* 新日本開発工業株式会社 技術部 (東京都渋谷区渋谷3丁目)
(1980.12.22 原稿受付・討議期限 1983.1.1)

以下に示す実験装置を作成した。

実験装置は長さ 3.0m, 幅 0.6m, 高さ 1.0m の前面ガラス張りの鋼製水槽で, 背面および底面にはピエゾメーターが 10cm ピッチで格子状に設置されている。水槽内部には鋼製フレームにステンレスメッシュを張り付けた仕切板を水槽の給水端および揚水端に取り付け, 充てん試料を任意の長さにセットできるようにしている。

復水装置はトレンチ型復水方式と地中集中型復水方式の 2通りの典型的な復水機構を再現できるようにし, 前者に対しては厚さ 4cm の鋼製フレームの両面に #100 ステンレスメッシュを張り付けたトレンチ状復水装置を, 後者に対しては外径 4cm の塩ビ多孔パイプにステンレスメッシュを張り付けた横置き型の復水装置を作成した。いずれも水槽全幅にわたって復水が行われるよう, 水槽幅と同じ 60cm の幅および長さとなっている。

実験に用いた試料は相模川水系の川砂で, その物理的性質は比重 (G_s)=2.64, 最大粒径 (D_{max})=2.0mm, 10% 粒径 (D_{10})=0.35mm, 均等係数 (U_c)=2.09, 充てん試料の乾燥密度 $r_d=1.51\sim 1.60\text{t/m}^3$, 充てん試料の透水係数 $K=1.73\times 10^{-1}\text{cm/s}$ である。写真-1 は実験水槽の全景を, 写真-2 は水槽背面のピエゾメーター設置状況を示したものである。

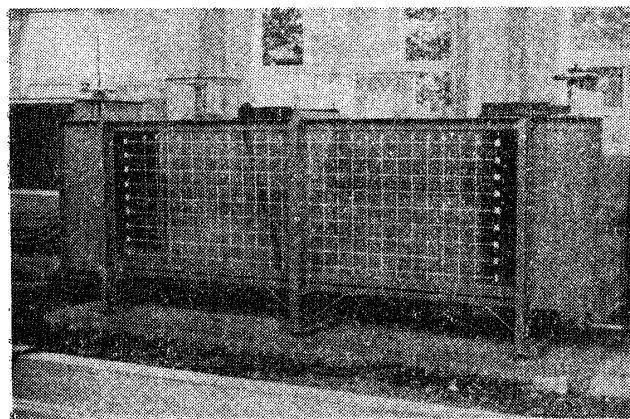


写真-1 実験水槽全景

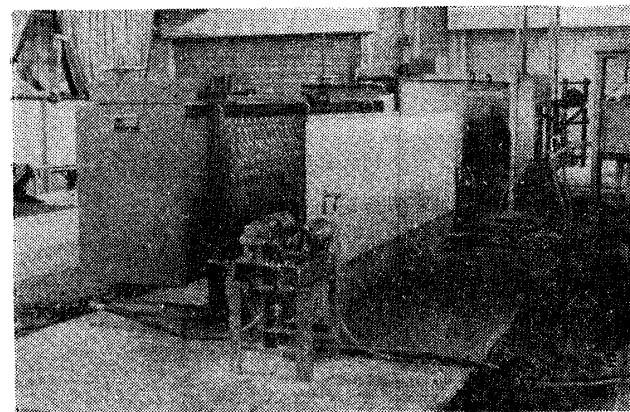


写真-2 ピエゾメーター設置状況

2.3 実験方法

図-1 に示した両復水モデルについて, 砂層長 L , 揚水部端からの復水位置 L_r , 復水装置の原地下水水位からの貫入深さ D_r , 復水位置での維持水位 H_r , 浸出点水位 h を表-1 のとおりに変化させて実験を実施した。

表-1 実験条件

諸元	復水機構	
	モデル 1 (トレンチ型復水)	モデル 2 (地中集中型復水)
砂層長 L cm	216	216
復水位置 L_r cm	43 63 83 103	63
復水装置貫入深さ D_r cm	17.5, 35.0, 52.5, 70.0	17.5, 35.0
給水位 H_1 cm	70	70
復水位 H_r cm	70 65 60 55 45	70 55
浸出点水位 h cm	52.5, 35.0, 26.0, 17.5	52.5, 35.0, 26.0

実験は砂層長および復水装置を所定の位置に設定したのち揚水と同時に復水を行い, 復水が不飽和状態で行われないようにした。復水位置での維持水位 H_r , 浸出点水位 h が所定の水位に落ち着き, かつ揚・復水量の変化が極めて微少になって定常状態に達したとみなせる時点において水面形状, ピエゾメーターヘッド, 揚水量 Q_d , 復水量 Q_r , 給水源から復水位置に向かう流量 Q_s ($Q_s=Q_d-Q_r$) などを測定した。なお, 水面形の把握は, 直径 3mm ほどの鋼棒にて試料の毛管上昇域をつきくずして, 自由水面を露出させ, その位置をガラス面で視認する方法によるものとし, これを補足するものとしてピエゾメーターのポテンシャル値をもとに作成したフローネットから間接的に求める方法を採用した。

3. 実験結果と考察

3.1 復水時水面形および流線網の特徴

復水時の自由水面は, 復水装置が浅く貫入された一部の実験ケースを除き, 復水装置の上下流において上に凸の形状を示すのが特徴である。

水面形は復水装置より下流部分では, 復水位置での維持水位 H_r と浸出点水位 h を結ぶ上に凸の放物線形となる。一方, 復水装置より上流部分では給水位 H_1 と復水位置での維持水位 H_r を結ぶ上に凸の直線に近い極めて緩やかな放物線形となる。

一方, 復水装置が浅く貫入された実験ケースでは上記のような水面形とはならず, 復水位置付近において下に凸の形状を示すケースがあった。この場合の水面形は地表の水路から地中への定常浸透時においてみられる, 給水源からの水平距離の増加に対して指数関数的に低下する水面形によく似た形状である。ただし, 下に凸の水面形が現れる部分は復水位置近傍に限られるので, 水面形全体としてみれば, 他の場合と同様に上に凸の水面形状を示しているとみなすことができる。

図-2 および図-3 はそれぞれモデル 1, モデル 2 につ

いて上記のパターンを示す復水時の自由水面形と流線網の一例を示したものである。

流線網の状況は、上に凸の水面形が現れる場合は、モデル1、モデル2とも、復水装置からの浸透流と上流から復水装置の下端を通り抜けて下流に至る浸透流の2層流に近い状況が発生している。これに対し下に凸の水面形が現れる場合は2層流の状態が更に顕著になって、復水位置より上流側の等ポテンシャル線が自由水面付近で水平に近い形で折れ曲がる。そして、復水装置からの注水は上流から下流に至る伏流水の上に重なる状態で浸透し、このため復水の作用による上流からの流れを抑制する効果は上に凸の水面形が現れる場合に比べて小さくなっている。このように復水時の水面形には復水条件によって全面的に上に凸の水面形が現れる場合と、部分的に下に凸の部分のある水面形が現れる場合の2種類のパターンがある。

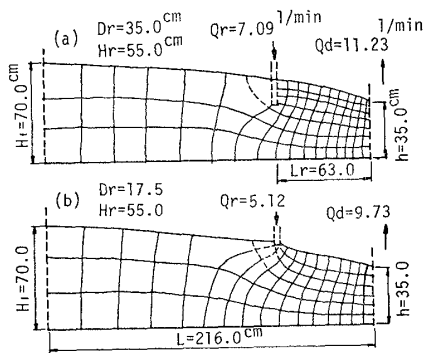


図-2 復水時の水面形と流線網 (モデル1)

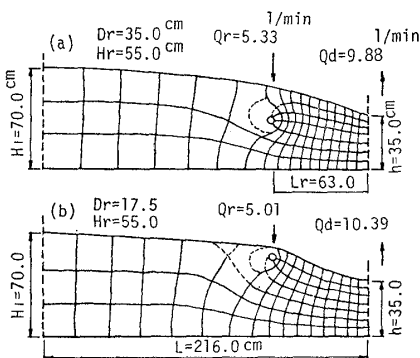


図-3 復水時の水面形と流線網 (モデル2)

3.2 復水条件と水面形形成の関係

水面形と復水条件の関係を調べてみると、復水装置の貫入深さ D_r が前述の2種類のパターンの水面形形成に深くかかわっていることが分かった。図-4は $L_r=63$ cm, $H_r=55$ cm, $h=35$ cm で行われたトレンチ型復水実験において、 D_r の変化に応じて水面形状およびポテンシャル分布が変化していく様子を示したものである。

復水装置が水槽底板まで完全に貫入された場合 ((a) 図) は、単純揚水時において上流側から徐々に前傾して

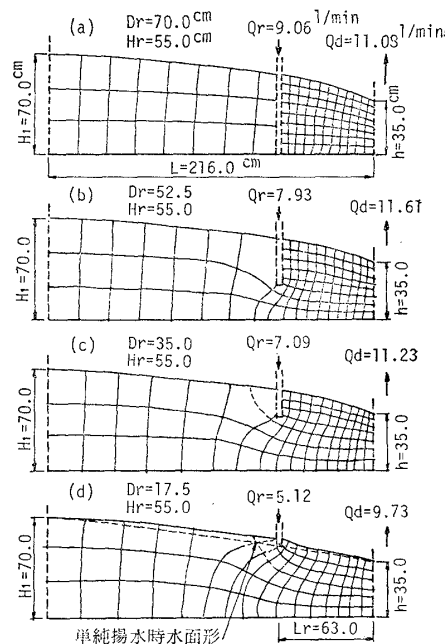


図-4 D_r の変化と水面形のパターン

くる等ポテンシャル線が復水装置の位置で一たん鉛直に戻され、復水装置の位置を新たな給水源とする単純揚水現象に近い状況が発生し、水面形は復水位置の上、下流において上に凸の形状を呈する。

復水装置が砂層の途中まで部分貫入された場合 ((b), (c) 図) は復水装置下部で等ポテンシャル線が更に大きく前傾し、復水装置からの注水による浸透流と上流から復水装置の下部をくぐり抜けて下流に至る浸透流の2層流に近い状況が発生するが、傾斜した等ポテンシャル線の上部は復水装置からの注水によりほぼ鉛直に保たれるため、自由水面は全体としては上下流側とも (a) 図と類似の形状を示す。

復水装置の貫入深さが更に浅くなって図中破線で示した単純揚水時の水面位置よりも上方で復水が行われる場合 ((d) 図) になると、復水装置近傍の等ポテンシャル線は水平に近い形で折れ曲がって2層流状態が更に顕著になるとともに、自由水面付近では下方へ向かう鉛直流が生じることにより復水位置近傍で下に凸の水面形状が現れる。このような下に凸の水面形が形成される過程は他の実験ケースでも見られ、この点は宇野の研究¹⁾でも指摘されているところである。

また、実験データの補完を目的として実験時と同一のモデルについて有限要素解析を試みた。

復水時のように揚水側において動水勾配の急な領域が現れる2次元定常浸透流の有限要素解析においては、揚水側境界面において発生する浸出点の決定が解析上重要なポイントとなる。

ここでは Neumann & Witherspoon³⁾ が提案している揚水側境界面上の流出流量を考慮した解析法を採用し

した状態では上流側からの給水量 Q_s はストップし、あたかも復水位置を給水源とし、砂層長 L なる単純揚水が行われているかのような状況が発生する。なお、図-8中の H_r と Q_r , Q_d の関係に対する D_r の影響は実験の範囲では図-7 に示したほどには明確でなかった。

3.4 復水機構の相違による影響

復水時の水面形は復水機構の相違に関係なく同様の発生パターンを示し、形状的にも大差は認められなかった。ただし、細かく観察すると地中集中型復水の場合の水面形状はトレンチ型復水の場合のように復水装置の位置で不連続に折れ曲がるものではなく、滑らかな連続したものであった。これは両復水機構による砂層中のポテンシャル分布と流線の現れ方に相違があるためと思われる。砂層中のポテンシャル分布はトレンチ型復水においては、図-2 に示すように浸透層の途中から復水位置を新たな給水源とする浸透現象が付加される状態となるのに対し、地中集中型復水においては、図-3 に示すように復水装置近傍の等ポテンシャル線は復水装置をとり囲むように大きく傾斜し、等ポテンシャル線に直交する流線は復水装置の周りで放射状となった。

揚水量、および復水量への影響については図-8 中に示したモデル 2 による実験結果のとおり、揚水量は復水機構の相違による影響をほとんど受けていないが復水量については影響を受けていることが分かる。トレンチ型復水の場合は、図-8 に示したごとく、 Q_r はゼロから出発して H_r/H_1 の増大とともに直線的に増大し、 $H_r/H_1=1$ において Q_d に一致する傾向を示すが、地中集中型復水の場合は H_r/H_1 の増大に伴って直線的な増大傾向を示すものの、その勾配はトレンチ型復水の場合に比べて緩やかであり、 $H_r/H_1=1$ において $Q_r=Q_d$ とならない。すなわち、地中集中型復水の場合はトレンチ型復水の場合と異なり、 $H_r/H_1=1$ に至っても依然として上流側からの流量 Q_s の供給がある。

以上から判断すると地中集中型復水の場合の地下水の流れは給水源と揚水点を結ぶ一定の流れがあってこの上に H_r を維持するために必要な Q_r が重なるといふ 2 層流状態であるとみなすことができる。両復水機構による Q_r の差は最大約 30% となっている。

4. 復水工法の設計法に対する提言

復水現象の解析法として実験結果の項で試みた有限要素法などの数値解析法は、極めて単純化し理想化された条件のもとでは図-6 に示したようにある程度の精度で解析が可能であり、工法設計上有力な方法の一つではあろう。しかしながら、単純化された模型実験においてさえ 2 層流などの複雑な流況を呈する復水現象は、地盤条件も地下水条件も千差万別の現実の地盤においては更に

複雑となり、上記のような解析法では対処が極めて困難になることが予想される。

およそ、地盤のように不確定要素の多い問題の設計にあたってはその設計法は調査や施工と精度上の整合性がとれていること、ならびに不確定要素に基づく設計誤差を実施段階において容易に観測修正できることが肝要である。このような観点から、著者は取扱いが複雑な割には問題が多く現実と合わないことの多い従来の解析法によらず、実験や現場データをもとにした観測修正が容易に行える簡易設計法を考えてみた。

復水工法を設計する場合、復水装置の上、下流における水面形と Q_r , Q_d などの復水に伴う流量を求めなければならぬ。ところで、水面形については、復水装置の上、下流で共に単純揚水時の水面形に似た水面形が現れることから単純揚水時の水面形の重ね合わせによって表現してよさそうであり、また、流量については単純揚水時および復水時の水面形と揚水量との間にみられる規則性を利用して計算することができそうである。

そこで、本研究では復水工法の設計法として単純揚水時の水面形および水面形と流量の関係をできるだけ単純な数式で近似表現し、復水時の水面形や Q_r , Q_d などの流量はすべて単純揚水時の水面形や流量を表す数式の係数の変化、重ね合わせによって求められるような方式を検討した。

4.1 単純揚水時の水面形の近似的表現

単純揚水時の水面形を表す式形としては、水面への接線勾配の変化が給水源からの距離にほぼ比例している点に着目し、実験現象の表現によく使用される関数形である乗べき級数の中から給水源を座標軸とする下記の 2 次式を選定した。(図-9 参照)

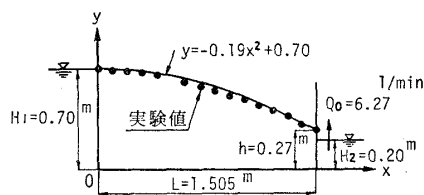


図-9 近似表現した水面形と実験値の比較

$$y = -\frac{a_0}{H_1} x^2 + H_1 \quad (1)$$

x : 給水源からの水平距離

y : x 点における水位

H_1 : 給水源の水位

L : 浸透長

a_0 : x^2 の係数 図-9 にて $a_0 = \frac{H_1(H_1 - h)}{L^2}$

本式は x^2 の係数 a_0 を流量の函数としてとらえることによって、不確定要素の多い透水係数の存在を必要とせずに流量と水面形の関係を求めることができるので合理的であると考えられる。

なお、水面形を表す式形としては、Dupuit-Forchheimer 式に代表されるダルシー則に基づく従来の理論計算式も考えられるが、式形が複雑で式の重ね合わせに不便であるとともに、復水時のように水面勾配の大きい浸透現象に対しては現実との遊離が大きくなるので不都合であり、採用しがたい。

図-9 は (1) 式により近似表現した水面形と実験値とを比較したものの一例であるが、両者は図示のようにすべての実験ケースにおいておおむねよく一致しており相関指数もほぼ $\rho=0.95$ 以上と高い値を示している。

4.2 復水時の水面形の近似的表現

単純揚水時と同じ近似表現法を復水位置より上流側(以後上流側と称する)の水面形に適用する。上流側水面形は図-10 において L' ($L'=L-L_r$) なる砂層長で水位が H_1 から H_r まで降下するので (1) 式の要領で表現すると下記のとおりとなる。(図-10 参照)

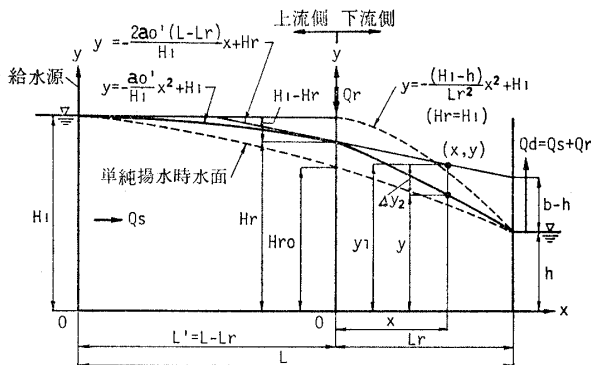


図-10 復水時水面形の近似式の座標軸

$$y = -\frac{a_0'}{H_1} x^2 + H_1 \quad (2)$$

ここに a_0' : 上流側水面形を表す (2) 式の x^2 の係数

$x=L-L_r$ で $y=H_r$ とおくと

$$a_0' = \frac{H_1(H_1 - H_r)}{(L - L_r)^2} = \frac{H_1^2(1 - H_r/H_1)}{(L - L_r)^2} \quad (3)$$

次に復水位置より下流側(以後下流側と称する)の水面形の近似表現を行う。実験結果によれば下流側水面形は $Q_r=0$ のとき最も下位にあり、当然ながら砂層長 L で ΔH ($\Delta H=H_1-h$) だけ水位降下する単純揚水時の水面形と一致する。この時の復水位置での水位を H_{r0} とすると、 H_r が $H_{r0} < H_r < H_1$ にある時は水面は復水位置において水平と一定の入射角をなして下流側へ流入し、おおむね上に凸の形状を呈しながら揚水側水位に到達す

る。 $H_r=H_1$ では水面形は復水位置を新たな給水源とし、砂層長 L_r で H_1-h だけ水位降下する単純揚水時のそれに近い形状となる。

以上を踏まえ、 $H_{r0} < H_r \leq H_1$ における下流側水面形を下記のとおりに設定する。(図-10 参照)

入射角は Q_s によってつけられる始動動水勾配ともいべきものであり、水面形は上記入射角を有する直線の下方に砂層長 L_r で $b-h$ (ただし b は上記直線の揚水位置における y 座標) だけ水位降下する水面形を重ね合わせた形状に近い。そこで、上記直線の入射角すなわち勾配を (2) 式の $x=L-L_r$ における一次導関数 dy/dx とおき、復水位置を座標軸とし、点 $(0, H_r)$ を通る勾配 dy/dx なる直線(上流側水面形への接線)を引く。直線式は次のとおりとなる。

$$y = \frac{-2a_0'(L-L_r)}{H_1} x + H_r \quad (4)$$

一方、 L_r 間で $b-h$ だけ水位降下する 2 次式は、

$$\Delta y_2 = \frac{-a_0''}{H_r} x^2 \quad (5)$$

$$b-h = \frac{-2a_0'(L-L_r)L_r}{H_1} + H_r - h$$

(5) 式に $x=L_r$, $y=b-h$ を代入すると

$$a_0'' = \frac{H_r}{L_r} \left\{ \frac{-2a_0'(L-L_r)L_r}{H_1} + H_r - h \right\} \quad (6)$$

よって、下流側水面形は次式により近似的に表現される。

$$\begin{aligned} y &= y_1 - \Delta y_2 \\ &= H_r - \frac{2a_0'(L-L_r)}{H_1} x - \frac{1}{L_r^2} \left\{ \frac{-2a_0'(L-L_r)L_r}{H_1} + H_r - h \right\} x^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$H_r=H_1$ の場合は (7) 式にて勾配=0, $H_r=H_1$ とおいて求める。

$$y = -\frac{(H_r-h)}{L_r^2} x^2 + H_r = -\frac{(H_1-h)}{L_r^2} x^2 + H_1 \quad (8)$$

(8) 式にて $a_0'' = \frac{H_1(H_1-h)}{L_r^2}$ とおくと (8) 式は

$$y = -\frac{a_0''}{H_1} x^2 + H_1 \quad (8')$$

これは復水位置を給水源とし、 L_r 間で H_1-h だけ水位降下する単純揚水時の水面形の近似式であり (1) 式と一致する。

図-11 は (2) 式および (7) 式により近似計算した水面形と実験値とを比較したものの一例である。相関指数はほぼ $\rho=0.95$ 以上を示しておりかなりよい一致がみられる。

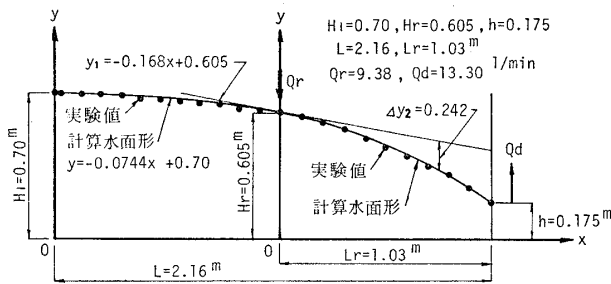
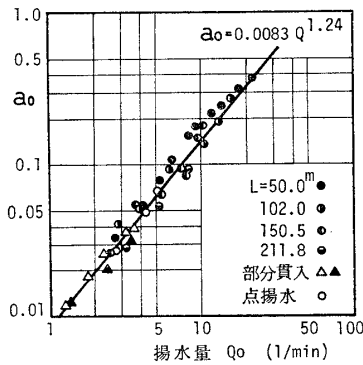


図-11 近似した復水時水面形と実験値の比較

4.3 近似表現した水面形と流量の関係

前述した近似表現法によって復水時の水面形はすべて揚復水に関する幾何学的条件から決まる係数 a_0' および a_0'' により簡単に精度よく計算できる。ところで、単純揚水時の水面形の a_0 と揚水量 Q_0 との間には図-12 に示すように両対数紙上で明確な直線関係がみられる。図中、「部分貫入」は揚水側の端部スクリーンが砂層の途中まで貫入した状態で揚水を行ったもので、「点揚水」はウェルポイントのように地中の1点から揚水を行ったものである。

図-12 単純揚水 $a_0 \sim Q_0$ 関係

a_0 と Q_0 の関係は揚水の幾何学的条件や揚水機構の相違の影響を全く受けないとはいえないが、近似的にはこれらの影響を無視しほぼ一定であるとみなしても実用上さしつかえないと考えられる。そこで両者の関係をべき関数に置き換えると次のとおりとなる。

$$a_0 = A \cdot Q_0^B \quad \text{または} \quad Q_0 = \left(\frac{a_0}{A} \right)^{1/B} \quad (9)$$

ここに a_0 : (1) 式における x^2 の係数

Q_0 : 単純揚水時の揚水量 (l/min)

A : 係数 実験値では $A \doteq 0.083$

B : 係数 実験値では $B \doteq 1.24$

上記の関係が復水時の水面形の a_0' および a_0'' にも適用できれば、復水工法を設計するには復水の幾何学的条件と単純揚水時の $a_0 \sim Q_0$ 関係のみを知らればよく、その設計手順は非常に簡便なものとなる。そこで、実験結果をもとに a_0' , a_0'' と Q_s , Q_r , Q_d の関係を検討してみ

た。

図-13は Q_s の実験値と、実験と同じ幾何学的条件を(3)式に代入して a_0' を求めこの a_0' 値を(9)式の a_0 に置き換えて求めた Q_s の計算値とを比較したものである。図中、モデル1の a_0' はトレンチ型復水装置の幅の影響を考慮し次式で求めたものを使用している。

$$a_0' = \frac{H_1(H_1 - H_r)}{(L - L_r - w/2)^2} \quad (3')$$

ここに w : 復水装置(トレンチ)の幅

Q_s の計算値は実験値の上下20~30%の範囲におさまっており、実験誤差を考慮するとよく一致しているといえる。なお、図示のとおり、復水装置の貫入深さが浅いケースでは実験値のほうが計算値より大きくなる傾向が若干みられるが、これらは3.2に述べたように D_r の影響が現れたものと考えられる。

次に Q_r と a_0'' との関係を検討する。ここで、便宜的に、下流側水面形を表す(7)式における y_1 は Q_s の支配を受け、 Δy_2 は Q_r の支配を受けるものとして分離して考え、 Q_r は Δy_2 の x^2 の係数 a_0'' との関係のみで決まるものとする。図-14は Q_r の実験値と、(6)式に実験と同じ幾何学的条件を代入して求めた a_0'' から計算した Q_r 値とを比較したものである。 a_0'' から Q_r を計算するには基本的には Q_s の場合と同様、単純揚水時の $a_0 \sim Q_0$ 関係である(9)式を用いている。ただ、 Q_r の場合は給水位 H_r での単純揚水時の流量でなければならないので、給水位 H_1 の単純揚水時についての計算式である(9)式によって計算した Q を相似則に基づき修正したものを Q_r としている。 Q と Q_r との関係については問題を簡単にするため水の粘性を無視し、透水現象を慣性力と重力とだけによって支配されるものとしフルード相似則を適用した。

また、 Q_r はそのままでは砂層幅も相似則に基づき縮小されるので単純揚水時と同じ幅をもたせるための補正を考慮した。すなわち、

$$\frac{Q_r}{Q} = \left(\frac{H_r}{H_1} \right)^{5/2} \times \left(\frac{H_r}{H_1} \right) = \left(\frac{H_r}{H_1} \right)^{3/2}$$

$$\therefore Q_r = Q \times \left(\frac{H_r}{H_1} \right)^{3/2} \quad (10)$$

なお、図中、モデル1の a_0'' はトレンチ型復水装置の幅の影響を考慮し、次式で求めたものを使用している。

$$a_0'' = \frac{H_r}{(L_r - w/2)^2} \left\{ \frac{-2a_0'(L - L_r - w/2)}{H_1} + H_r - h \right\} \quad (6')$$

$$\text{ここに} \quad a_0' = \frac{H_1(H_1 - H_r)}{(L - L_r - w/2)^2}$$

図-14によると Q_r の計算値と実験値との関係は Q_s の場合よりも若干ばらつくものかなりよい相関性が見

られ、計算値は実験値の上下 30~40% の範囲内におさまっている。 Q_r についても Q_s 同様 D_r の影響がみられるがその影響は高々 30% 程度にとどまっている。

図-15 は Q_d の実験値と計算値 (Q_s と Q_r の計算値の和) を比較したものである。 Q_d の計算値は実験値の上下 20~30% 以内におさまっておりよく一致している。 Q_r では多少目立った D_r の影響も Q_r ではほとんど目立たない。

以上により、(9) 式の関係は復水時の水面形の a_0' および a_0'' についてもかなりの精度で適用することができるといえる。

4.4 設計手順の考え方

4.1~4.3 により復水時の水面形は単純揚水時の水面形を表す近似計算式 (2次放物線) の重ね合わせによ

て、また Q_r, Q_s, Q_d などの復水時の諸流量はその計算結果に復水条件や復水機構の影響による若干の誤差の幅を見込む必要があるものの単純揚水時の $a_0 \sim Q_0$ 関係を使って簡便に求められることが分かる。

そこで、これらの水面形および流量に関する近似計算法をもとにして復水工法の設計手順を考えてみると下記のとおりとなる。

- i) 現場の復水条件 (幾何学的条件) を設定する。
必要項目は L, L_r, H_1, H_r, h の 5 項目。
- ii) 現場における単純揚水時の $a_0 \sim Q_0$ 関係を求める。
揚水試験または試験工事等によって現場の $a_0 \sim Q_0$ 関係を求め、(9) 式の形に整理し、係数 A, B を決定する。
- iii) 復水装置の原地下水位からの貫入深さ D_r を設定する。
実験結果より D_r は復水位置における単純揚水時の低下水位 H_{r0} より深く貫入させれば、復水の目的はおおむね達せられる。
すなわち $D_r > H_1 - H_{r0}$ とする。
- iv) 水面形を計算する。

復水の幾何学的条件を (3) 式、(6) 式に代入して a_0' および a_0'' を求め、これを (2) 式および (7) 式に代入して水面形を求める。

また、トレンチ型復水機構の場合のように復水位置で水面形が不連続になり、この影響が大きい場合には復水位置の幅 w の補正を行った (3)' 式および (6)' 式によって a_0' および a_0'' を求める。

ここで復水条件より

$$m = (L - L_r) / H_1, \quad m' = L_r / H_r$$

$$n = H_r / H_1, \quad n' = (H_1 - H_r) / H_1,$$

$$n'' = (H_r - h) / H_r$$

とおけば、 a_0' および a_0'' は下記のとおりに表示される。

$$a_0' = \frac{n'}{m^2} \tag{3}''$$

$$a_0'' = \frac{1}{m'^2} \left\{ n'' - \frac{2n'm'}{m} \right\} \tag{6}''$$

- v) 流量を計算する。

Q_s : a_0' 値を (9) 式に代入して求める。

$$Q_s = C_1 \left(\frac{a_0'}{A} \right)^{1/B} \tag{11}$$

ここに C_1 : 係数 (実験では $C_1 = 0.8 \sim 1.3$)

Q_r : a_0'' 値を (10) 式に代入して求める。

$$Q_r = C_2 \cdot \left(\frac{a_0''}{A} \right)^{1/B} \cdot \left(\frac{H_r}{H_1} \right)^{3/2} \tag{12}$$

ここに C_2 : 係数 (実験では $C_2 = 0.7 \sim 1.4$)

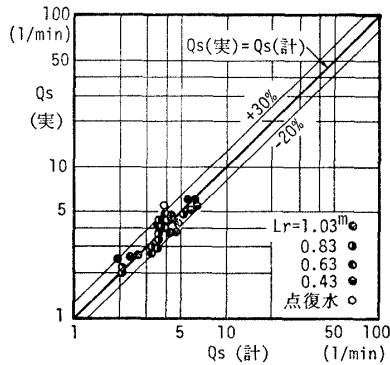


図-13 Q_s (計算値) と Q_s (実験値) の比較

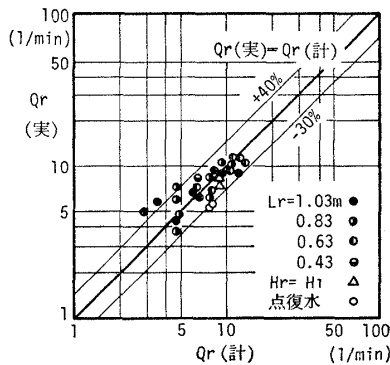


図-14 Q_r (計算値) と Q_r (実験値) の比較

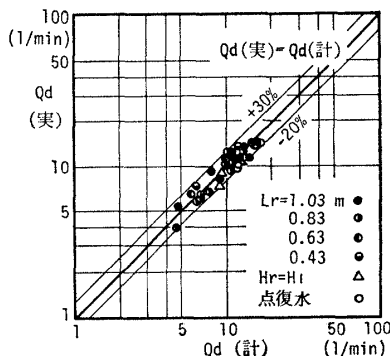


図-15 Q_d (計算値) と Q_d (実験値) の比較

$$Q_d : Q_d = Q_s + Q_r$$

$$= \left(\frac{1}{A}\right)^{1/B} \cdot \left(C_1 \cdot a_0^{1/B} + C_2 \cdot \left(\frac{H_r}{H_1}\right)^{3/2} \times a_0^{1/B} \right) \quad (13)$$

(11), (12), (13) 式はすべて両対数紙上で直線となる単純揚水時の $a_0 \sim Q_0$ 関係をそのまま使用できるので図式的に極めて簡単に計算することができる。

また、ある H_r を保つのに必要な Q_r と Q_d の概略の目安を得るだけの目的であれば、 H_r/H_1 と Q_r, Q_d の関係を直線とみなして作成した図-16 の計算図表を使用することもできる。図中、 Q_{d1} は砂層長 L で、 Q_{d2} は砂層長 L_r でそれぞれ H_1-h だけ水位降下する単純揚水時の揚水量である。

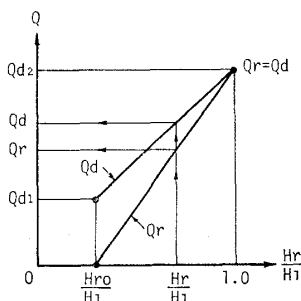


図-16 Q_d, Q_d 簡易計算図表

揚水量 Q_{d1} における横座標は単純揚水時水面形の復水位置における水位 H_{r0} (H_{r0}/H_1 で表示) である。なお、図-16 は H_r/H_1 の関係を図-8 の結果や (3), (6), (9) 式の式形などを参考にして極めて大胆に単純化したものであるから、その使用にあたっては精度に注意する必要がある。

4.5 現場データによる検討

前述した設計法の提言の適確性を現場データにより検討してみる。復水工法の現場データとして取り上げるのは水資源開発公団が千葉県佐原市利根川べりに建設した船戸揚水機場建設工事である。

本機場の建設にあたっては GL-13.0m (TP-8.2m)

まで床掘を行ってドライワークを行うこととし、地下水位を GL-14.0m まで下げることが計画された。本機場周辺の地盤は第四紀洪積世の成田層に属する比較的締まった中砂ないし細砂から構成されており、工事に先立って実施された揚水試験により確認された地盤の透水係数は $K=1.67 \times 10^{-3}$ m/min ($=2.78 \times 10^{-3}$ cm/s) であった。そのため地下水位低下工法として多段式ウェルポイント工法が用いられた。復水工法は、地下水位低下工事に伴って周辺の浅井戸に発生した井戸枯れの補償対策工事の一環として試験的に実施されたもので、図-17 はその実施要領を示したものである。

復水は機場掘削のり肩から約 50m 離れた地点に 20m 間隔に 8 本の注水井を設け、これにウェルポイントにより排除される地下水を再注水することで行われた。復水井は長さ 18m の塩化ビニール製 $\phi 100$ m/mVP 管で、先端 14m 部分にストレーナー加工を行っている。

試験は昭和47年1月9日から2月21日までの44日間にわたって行われた。試験期間中、復水が行われたのは1月10日から2月16日までの38日間である。図-18は試験期間中における地下水面の形状を示したもので、図中、復水時水面形①は第1段WP運転時に、②は第2段WP運転時に観測されたものである。図-19は試験期間中における揚水量および復水量の推移を示したものである。表-2は復水時水面形①および②に対応する復水の幾何学的条件を示したもので、表中、 r_0 は地下水の流れを軸対称流として扱うときの等価井戸半径 ($r_0 = \sqrt{A/\pi}$ A:ヘッダーラインで囲まれる面積) であり、 L_r は r_0

表-2 復水の幾何学的条件 (m)

条件	第1段 WP 運転時	第2段 WP 運転時
H_1	17.85	17.85
H_r	16.50	16.20
L	200.0	200.0
r_0	41.3	34.3
L_r	58.7	65.7
h	12.1	8.0

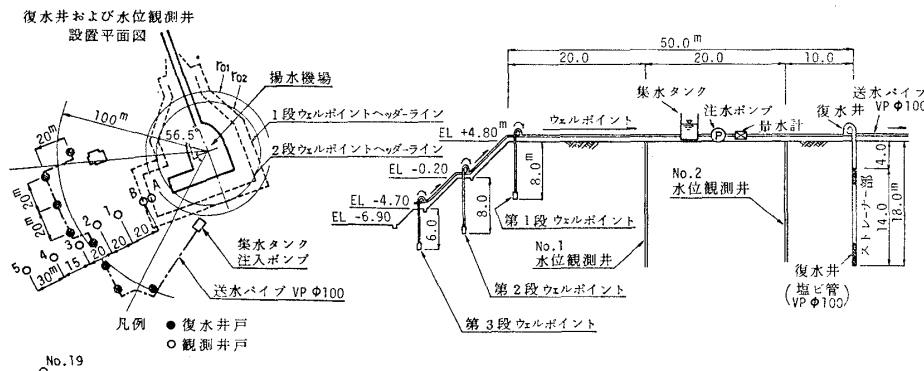


図-17 復水工法実施要領図

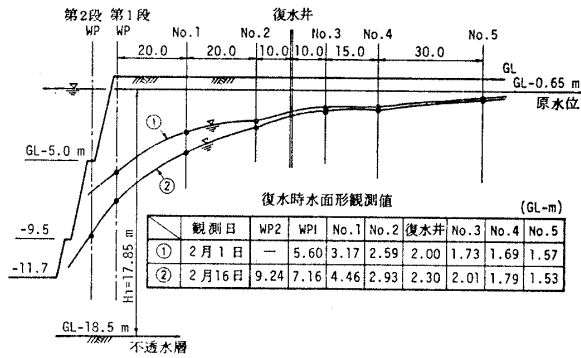


図-18 地下水位低下状況

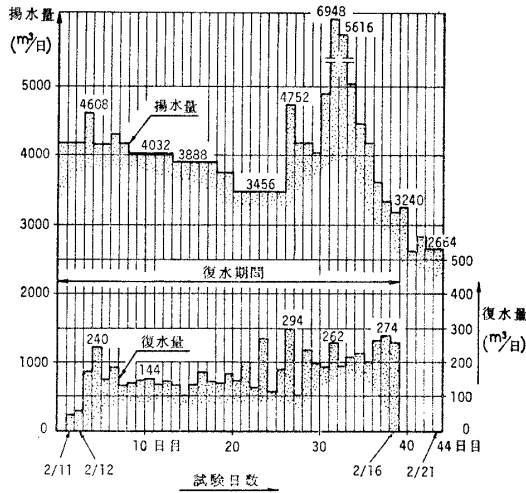


図-19 揚水量および復水量の推移

から復水井の位置までの距離である。

表-2 の復水条件をもとに提言の設計法に従って復水時水面形を計算してみるとその結果は図-20 のとおりで観測値と非常によく一致する。なお、図中に示した単純揚水時水面形は表-2 の L, H_1, h の条件で計算したものである。次に単純揚水時(2月21日)の揚水量および第2段 WP 運転時の揚、復水量ならびにこれらに対応する計算水面形とから(9)式の関係を求めると次のとおりとなる。

$$a_0 = 8.9 \times 10^{-6} \times q^{2.9}$$

ここに q : 等価井戸円周単位幅当たり流量 (l/min/m)

この関係を使って第1段 WP 運転時の復水の幾何学的条件に対応する揚水量 Q_a (計) を計算してみると Q_a (計) = 3206 m³/d となり、観測値 Q_a (実) = 3456 m³/d と非常に一致した結果 (Q_a (計)/ Q_a (実) = 0.93) が得られた。復水量は観測値が計算値の約 40% ((2) 式の C_2 値 = 0.4) となったが、これは、復水域(図-17 参照)の範囲を越えた地下水収支が生じているためであり、その結果として復水量の中に占める Q_s 量の比率が大きくなっているものと考えられる。以上により、提言した設計法は復水時水面形および揚水量についてはほぼ妥当な結果を与えるものといえる。また、復水量については実

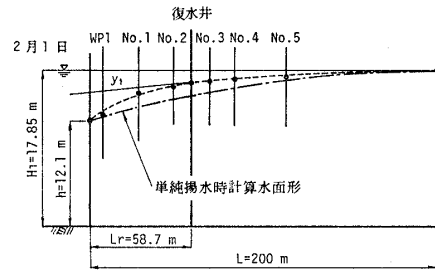
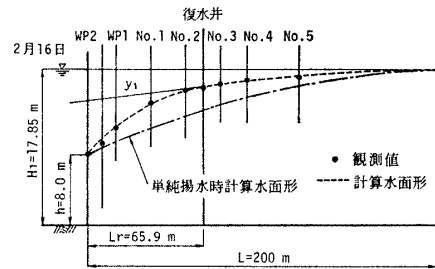


図-20 復水時水面形計算結果

際と若干くい違い結果を与える可能性があるが、設計結果は安全サイドであり、かつ観測修正によってより正しい値に近づけることも可能であるところからそれほど問題にならない。このようなことから、本設計法の適確性は十分にあると考えられる。

5. あとがき

本報告では復水工法についての実験結果を踏まえ、復水時の地下水浸透現象の特徴に関して考察を加えるとともに、復水工法の設計法に関する提言を行った。ここで提案した設計法は基本的なものであって、実際の設計に利用するには提案した計算式の定数値に関して今後数多くのデータを集積しなければならないが、現場データによる検討結果で確認されたとおり、取扱いが簡便でかつ、精度もよく、実用的な方法であると考えられる。

この研究を通じて得られた結論を要約すれば以下のとおりである。

- 1) 復水時の水面形は復水位置の上、下流において共に上に凸の放物線形をなす。
- 2) 復水時の流線網は復水装置からの注水による浸透流と上流から復水装置の下をくぐり抜けて下流に至る浸透流の2層流状態が発生するのが特徴である。復水装置の貫入深さが浅い場合や地中集中型の復水が行われる場合は2層流状態が一層顕著となる。
- 3) 復水量は復水装置の貫入深さの影響を受ける。貫入量が浅くなるにつれて復水装置の下をくぐり抜ける流量が増大し、復水量は減少する。
- 4) 復水時の揚水量および復水量はともに復水装置での維持水位 H_7 の増加に伴い増加する。増加の傾向はほぼ直線に近い。
- 5) 復水時の水面形は単純揚水時の水面形に似ている

ところから単純揚水時の水面形の重ね合わせで表現し、揚、復水量は単純揚水時の水面形と揚水量との間にみられる規則性を利用して近似的に計算することができる。

6) 単純揚水時の水面形は $y = -\frac{a_0}{H_1} x^2 + H_1$ なる 2 次式で近似的に表現しうる。また、係数 a_0 と揚水量 Q_0 との間には $a_0 = A Q_0^B$ なるべき関数的関係がある。 a_0 は L, H_1, h なる揚水の幾何学的条件から求められる。

7) 復水時の水面形は復水位置より上流側については本文中の (2) 式にて、下流側については (7) 式にて求められる。(2) 式中の係数 a_0' および (7) 式中の a_0'' は a_0 と同様、復水の幾何学的条件 (L, L_r, H_1, H_r, h) から求められる。

8) 復水時の復水量 Q_r は係数 a_0'' を、上流からの流入量 Q_s は係数 a_0' を単純揚水時の $a_0 \sim Q_0$ 関係に代入して求めることができる。揚水量 Q_d は Q_s と Q_r の和として求められる。

すなわち、

$$Q_d = \left(\frac{1}{A}\right)^{1/B} \cdot \left\{ C_1 \cdot a_0'^{1/B} + C_2 \cdot \left(\frac{H_r}{H_1}\right)^{3/2} \cdot a_0''^{1/B} \right\} \quad (13)$$

9) 上記の復水工法設計法は実験結果や現場データとよく整合し、特に水面形と揚水量の計算については良好な結果を与える。復水量については現場と若干の相違を生じる結果となったが、安全側の値を与えるものでありそれほど問題とならない。

謝 辞

本報告に述べた復水工法設計法は今後、数多くの現場での経験を積むことにより一層有用性を増すことができるものと確信する。この研究の成果が今後、復水工法が普及発展していくうえでの一助となれば幸いである。

本研究を進めるにあたっては日本大学理工学部最上武雄教授、東海大学工学部森田定市教授、稲田倍穂教授、前田慶之助教授、星田義治助教授の御指導を賜った。ま

た、実験ならびに諸解析については東海大学工学部助手本間重雄氏の多大の御協力を得た。その他、電力中央研究所駒田広也氏には復水現象の FEM 解析法についての理論的アドバイスを賜った。現場データの収集にあたっては水資源開発公団船戸揚水機場の方々にお世話になった。記して深甚なる謝意を表する次第である。

記号説明

- L = 浸透長
- L_r = 揚水位置から復水位置までの距離
- H_1 = 給水位
- H_r = 復水位置での維持水位
- h = 浸出点水位
- Q_s = 復水装置よりの上流側から流入してくる流量
- Q_r = 復水量
- Q_d = 揚水量 $Q_d = Q_s + Q_r$

参考文献

- 1) 宇野尚雄 (1968) : 地下水位が浅い地盤への水路からの定常浸透における浸透流量と自由水面形, 「土木学会論文報告集」, No.157, pp.28~41.
- 2) 松尾 哲 : 上田年比古 (1977) : 井戸からの淡水注入による 3 次元淡塩境界面の算定, 「土木学会論文報告集」, No.264, pp.53~62.
- 3) Neumann, S.P. and P.A. Witherspoon (1970) : "Finite element method of analyzing steady seepage with free surface," Water Resource Res., Vol.6, No.3, pp.889-897.
- 4) 最上武雄編著 (1977) : 「土質力学」, 土木学会監修, 土木工学叢書, 技報堂.
- 5) 松尾新一郎 (1976) : 「土中水」, 日刊工業新聞社.
- 6) 松尾新一郎・河野伊一郎 (1973) : 「地下水位 低下工法」, 鹿島出版会.
- 7) 山村和也・鈴木音彦 (1977) : 「土と水の諸問題」, 土木施工 5, 鹿島出版会.
- 8) 高木俊夫・滝沢秀明 (1972) : 船戸揚水機場掘削における地下水位低下とその対策について, 「水資源開発公団第 6 回技術研究発表会」.
- 9) 太田正彦他 (1978) : 揚水時の自由地下水面形状に及ぼす復水の影響に関する研究, 「東海大学紀要工学部」, No.2.
- 10) 太田正彦他 (1979) : 有限要素法による【復水を伴う揚水現象の解析について, 「東海大学紀要工学部」, No.2.