

琵琶湖周辺の地下水位維持調査について（続）

—大規模クリーク実験について—

赤井浩一・宇野尚雄

AN IN-SITU TEST FOR MAINTAINING THE GROUND-WATER LEVEL SURROUNDING THE LAKE BIWA

—Large-scale recharge canal test—

By *Koichi* AKAI and *Takao* UNO

Synopsis

From a series of geological and hydraulic investigations on the groundwater problems in the inland region around the Lake Biwa, the authors ever assumed the water-table depression in the inland accompanied with the variation in the water level of the lake which may be expected as low as 3 m. The results were about 3—5 km from the shore in the eastern side of the lake, while as far as about 2 km in the western side.

The present report treats the mechanism of formation of the water-curtain which appears on the seepage from a canal when it encounters with the natural underground flow at the upstream part of the canal. The phenomena are proved by seepage experiments using sand model in the laboratory and also by in-situ tests performed at a shore of the Lake Biwa. Thus it is concluded that such a mean using recharge canal with suitable scale can be adaptable to maintain the ground-water level surrounding the lake.

1. 序

琵琶湖総合開発計画は、湖の水位変動の幅を拡大して湖岸の治水と淀川下流部の利水をはかることを立案の主旨としており、数年来おもに建設省によって種々の調査が実施されてきている。著者らは財団法人防災研究協会へ委託された研究調査を担当して、おもに地下水に関する諸問題を扱ってきた。

元来、ある地域における地下水の様相がその地域の地盤構成に大いに支配されることはいうまでもないので、まず最初に琵琶湖周辺の地層についてかなり詳細な調査を必要とし、とくに地下水の流通を支配する諸性質について明確な資料を得ることに努めた。これに関する調査の方法としては、（1）現地踏査および現地調査により地質構造と地下水の特性の把握に努め、（2）地質構造調査によって湖周辺の代表的な地区のボーリング、電気探査、水圧試験等の調査資料をもとに湖周辺各地の滞水層を中心として調査結果をまとめ、（3）地下水位変動調査としてはボーリング孔、家庭井戸などを利用して現地における地下水位観測を実施するとともに、入手しうる湖周辺地下水位観測資料を利用して湖水位と地下水位の関係を求めることにより、（2）の資料をもとに湖水位低下ともなう地下水位低下の程度とその影響範囲の推定を行なった。

これらの諸調査の結果、もとより湖水位変動ともなう周辺地下水位の低下は、各地区での地下水流の性状や地層条件とも関連してかなりの相違がみられるが、計画最大湖面低下 3 m を想定した場合、湖東では平均して湖岸から 3~5 km 付近までの範囲が影響を受けること、また湖西ではその影響はせいぜい湖岸か

から D_i の高さに水路を作り、水路から流量 $Q_c = q_c b$ を注入する。水路水位は下流貯水位面から H_w の高さで平衡して、水路からの浸透水により水路近傍の自由水面の上昇量 h が生じる。この上昇量は上流側の水理境界条件に影響されるが、実験としては上流側水位 h_0' を一定に保つ場合（定水位伏流水実験）と流量 Q_0 を一定に保つ場合（定流量伏流水実験）の2種類について実施した。

3. 室内浸透実験の結果と考察^{2),3),4)}

3.1 ウォーターカーテンの形成

流量 q_0 の地下水流（伏流水）のある滞水層へ、ある地点で水路から流量 q_c を注ぐときの流れ系（Fig. 1 参照）では、両者の境界 M_0F は上流自由水面と接続する一つの流線である。この境界を横切る流れはなく、両者はあたかも一種の水膜で境されているように見える。この意味でこの境界はウォーターカーテン（water curtain）とよばれる。

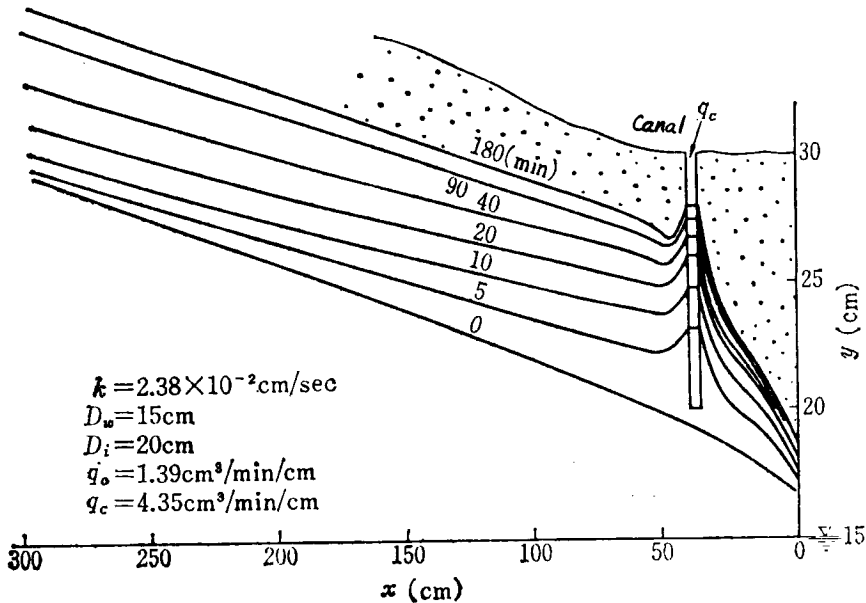


Fig. 2 Rise of ground-water level due to seepage from canal.

伏流水の流量 q_0 と水路からの流量 q_c の大小関係により上述の境界は移動し、両者の勢力の平衡でその最終位置が決まる。Fig. 2 において当初の単位奥行あたり $q_0 = 1.39 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{cm}$ の流量による水面形が最下部の線であり、これが Fig. 1 の当初の地下水面 $A'E$ に対応している。流量 $q_c = 4.35 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{cm}$ を水路から浸透させると、自由水面は時間的に上昇を始める。この図の場合には、浸透開始後約3時間でほぼ定常状態となる。このときの水の流動を色素の動きから観察すると、Fig. 3 (a) のようにウォーターカーテンの拡大が認められ、これを境として上流からの水流と水路からの浸透流とが分離されることがわかる。すなわち、上流からの伏流水中に流した色素はウォーターカーテンで境される限界線の下にもぐり、この部分で速度が大きくなることを見出された。なお平衡状態における流線網は Fig. 3 (b) のようである。

結局、伏流のある場合の水路への注水による地下水水位の上昇は、水路からの浸透水がウォーターカーテンを作り、これが止水板の役割を果たして上流からの水をせき上げるという機構によっている。そして、水路への注水量 q_c の大小によるウォーターカーテンの勢力圏に大小のあることが確かめられ、またこの限界線

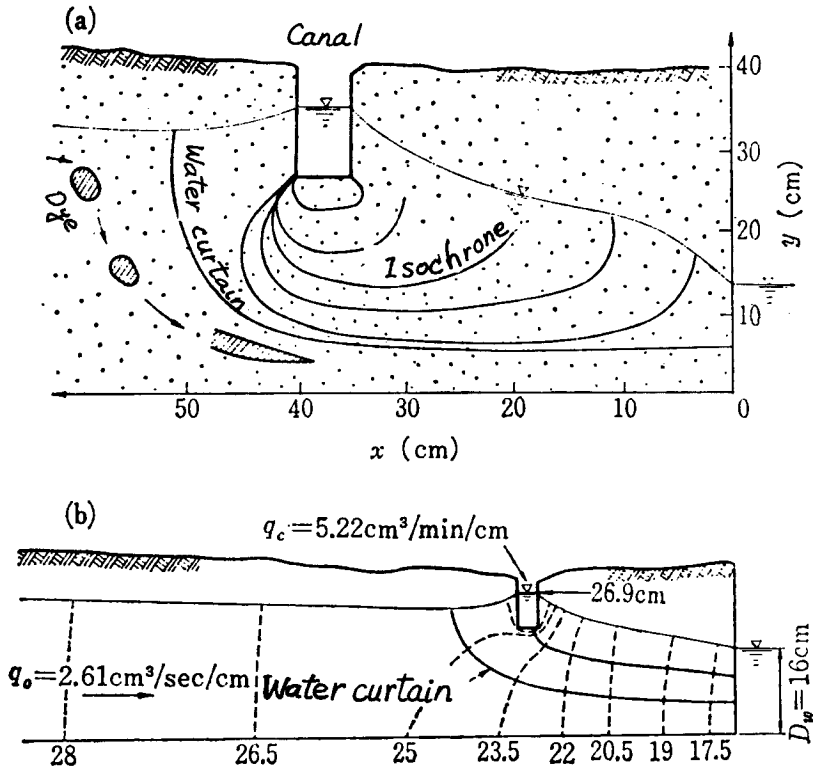


Fig. 3 Growth process of water-curtain and flow net in the steady state.

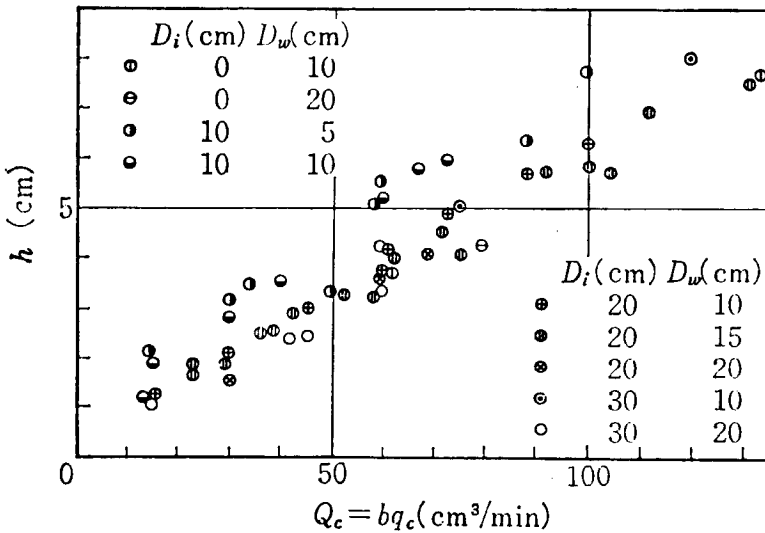


Fig. 4 Correlation between the rise of ground-water level and the discharge into canal.

が $\phi = q_c$ なる流線であることも理解できる。

3.2 地下水位上昇量 h と水路への注水量 q_c の関係

伏流水と水路からの浸透水からなる流れ系を解析するにあたって、前述した地下水位の上昇機構を基礎にして考えを進めるならば、まず第一に水路への注水量 q_c がウォーターカーテンの勢力を決め、この勢力によって上昇量に大小の変化が生ずるのであるから、 h と q_c との間に何らかの関係があるに違いない。定流量伏流水実験においてこの両者の関係をプロットしたものが Fig. 4 である。この図より、両者の間にはある幅をもった直線関係が存在することが認められる。この図の各点は種々の下流端境界水位 D_w 、水路底高 D_i および伏流水の流量 q_0 について行なった実験結果を含んでいるが、 h におよぼす影響因子としては他のものよりはるかに q_c の影響が大きいことが示されている。

3.3 地下水位上昇量 h と伏流水の流量 q_0 の関係

Fig. 1 において、水路水位と下流端水位の差 H_w はほぼ $(q_c + q_0)$ に比例すると考えられるので、 h/H_w を $q_c/(q_c + q_0)$ に対してプロットした結果が Fig. 5 に示されている。これはさきの Fig. 4 よりも相関のよい直線関係であって、これより

$$\frac{h}{H_w} = 0.8 \times \frac{q_c}{q_c + q_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

なる関係が成立することが知られる。

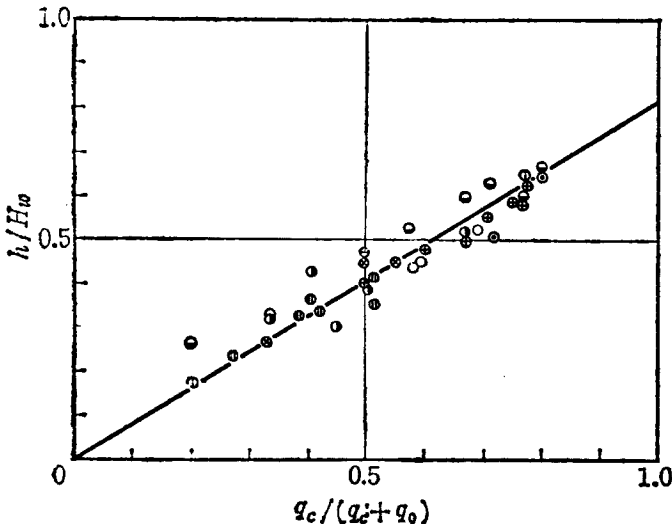


Fig. 5 Correlation between the rise of ground-water level and the discharge of ground-water.

なお地下水位上昇量 h におよぼすその他の因子として、水路水深 H_c または水路底の標高 D_i や水路の形状などが考えられ、これらについても実験的に検討したが、ウォーターカーテンの形成にはさきの水路への注水量 q_c と伏流水の流量 q_0 が最も支配的な影響をもつことが判明した。

4. クリーク工法の琵琶湖周辺地域への適用性の検討

水路への注水によって周辺地下水面を上昇せしめようとする従来の研究では、地下水面が水平であるという条件のもとに水路浸透が解かれているのに対して、今回の実験では伏流水を考え、地下水面があるこう配をもつという条件で考察を行なっている。伏流水を考えると水位の上昇機構は地下水面が水平な場合と異なる

ってくる。すなわち地下水面が水平であれば、水位上昇は水路への注入水によってのみ期待されるために、地盤の透水性から注入量には限界があり、その限界注入量をもってしても水路からの距離が大となると水位上昇量はいちじるしく減少する。しかしながら伏流水を考えた場合には、地下水位の上昇は水路からの注入水によって直接的にもたらされるのではなく、この注入水が新たな水理条件を構成し、水位上昇はあくまでも伏流水に期待される。

このようないわゆるクリーク工法の実際現地への適用性の検討にあたって把握しておかねばならない事項を列記すると次のようになる。

- (1) 現在の地下水位と湖面低下時の地下水位および回復すべき地下水位。
- (2) 地下水流の平面的もしくは立体的な動き。
- (3) 地盤の均質性などの地層条件。
- (4) 地盤の透水係数と有効間げき率。
- (5) 現存する地表の水路構造物の配置と密度などの水理条件。
- (6) 気象条件など。

一昨年の報告の Table 1¹⁾ に掲げた琵琶湖岸各地区での滞水層定数を用い、水路幅 $B=5\text{ m}$ 、湖面から水路水面までの高さ $H_w=3\text{ m}$ 、水路より湖岸までの距離 $l=300\text{ m}$ として

$$Q = \frac{kHK}{K'} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 K および K' はいずれも第1種完全楕円積分⁵⁾

を用いて各地区で算出した浸透流量を求めると Table 1 のようになり、これが上記の寸法の水路からの浸透可能な流量である (Fig. 6 参照)。

一方、前述の室内実験の結果をもとにして、低下した地下水位を回復上昇させるために必要な浸透流量を各地区で算出すると Table 2 のようである⁶⁾。この表の数値から地域的なクリーク工法の適用の可能性を調べてみると、湖東の中主地区 (日野川・野洲川流域) や姉川地区では他の地区に比べて水路へ注入すべき

Table 1 Discharge which can be poured into ground from canal.

Region	Site	Coefficient of permeability k (cm/sec)	Rate of discharge Q	
			t/min/km	t/h/m
The Yasu and Hino	Maki	1.40×10^{-2}	11.0	0.66
The Echi	Yanagawa	5.53×10^{-2}	43.6	2.61
The Inukami	Hassaka	2.92×10^{-2}	23.0	1.38
The Ane	Yagihama	1.74×10^{-2}	13.7	0.83
The Ishida	Nukigawa	4.00×10^{-2}	31.5	1.89
The Ado	Warazono	3.60×10^{-1}	284	17.0

Table 2 Discharge from canal necessary to maintain the ground-water level.

Region	Site	k (m/h)	Q (t/h/m)
The Yasu and Hino	Ayame	0.54	0.04
The Echi	Yanagawa	2.00	0.20
The Inukami	Hassaka	1.06	0.13
The Ane	Yagihama	0.63	0.04
The Ado	Warazono	12.9	0.62

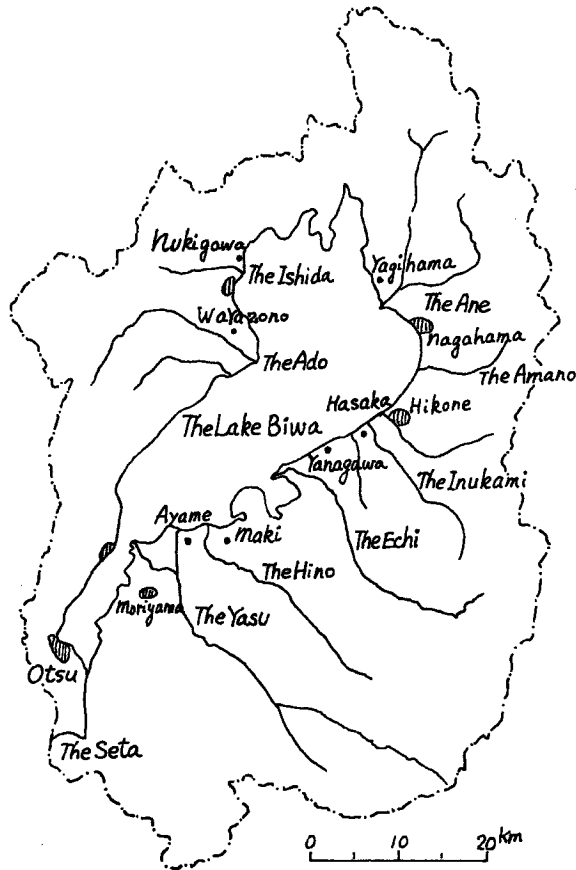


Fig. 6 Plan around the Lake Biwa.

流量はきわめて少なくてもよいことがわかる。これに反して湖西の安曇川地区では、ここでも Table 2 の必要浸透流量が Table 1 の浸透可能流量より少なく出ているが、比較的多量の注入流量が必要であって、クリーク工法による地下水位の維持は経済的にみて困難ではないかと推論される。

5. 大規模クリーク実験

5.1 実験の概要

琵琶湖沿岸でのクリーク工法採択の可能性は、上述の室内浸透実験と Table 1, 2 の結果から一応見当がつけられたが、実際の現地地盤に対して果たして水路への注水による浸透が可能であるかどうか大いに关心的问题である。昨年度の地下水位維持調査においては、現地表土層の透水性の測定と、井戸注水における注水量と地下水位上昇量の関係を把握するために、滋賀県野洲郡中主町菖蒲（日野川流域）の湖岸から約 50 m 内陸寄りの地点を試験地として、単一の注水井を利用した小規模な現地注水実験を実施した。そして注水井半径の大小による注水量と水位上昇量の関係、注水井からの浸透機構とその水路浸透への変換について論じ、大規模なクリーク実験への予備的検討を行なった。²⁾

そこで本年度は同じ地点において行なわれた現地クリーク実験の結果を検討してみよう。この実験は昭和 42 年 12 月から 43 年 3 月までの期間に建設省琵琶湖工事事務所によって実施されたものである。

5.2 実験地の地質および透水性

ボーリング結果よりみると、実験地の地質は地表 (T.P. 85.7 m~85.8 m) より約 5 m が均質な砂層、それ以下は粘土層となり、自然地下水面は地表から 1 m 未満にある (動水こう配 4/1000~5/1000)。この砂層はさらに上下 2 層に区分でき、T.P. 83 m より上部はれき混り粗砂、下部は細砂および中砂からなる。したがって透水性は上部ほど良好である。また砂層は上流側に向かうにつれて厚さを増す傾向にあり、さらに砂の粒径もやや粗くなっている。粘土層は主としてシルト質粘土からなり、この層の中にレンズ状に分布する砂層が認められる。

概して湖岸線に平行な方向では地層の連続性は良好であるが、これに垂直な方向では不連続な地層が多いようである。地盤の透水性については一昨年の調査によりこの地点で $k=1.5 \times 10^{-2}$ cm/sec の透水係数が算出されていたが、今回改めて揚水試験を行なったところ平均 $k=2.7 \times 10^{-2}$ cm/sec の値を得た。

5.3 実験施設

実験施設の規模ならびに数量はつぎのとおりである (Fig. 7 参照)。

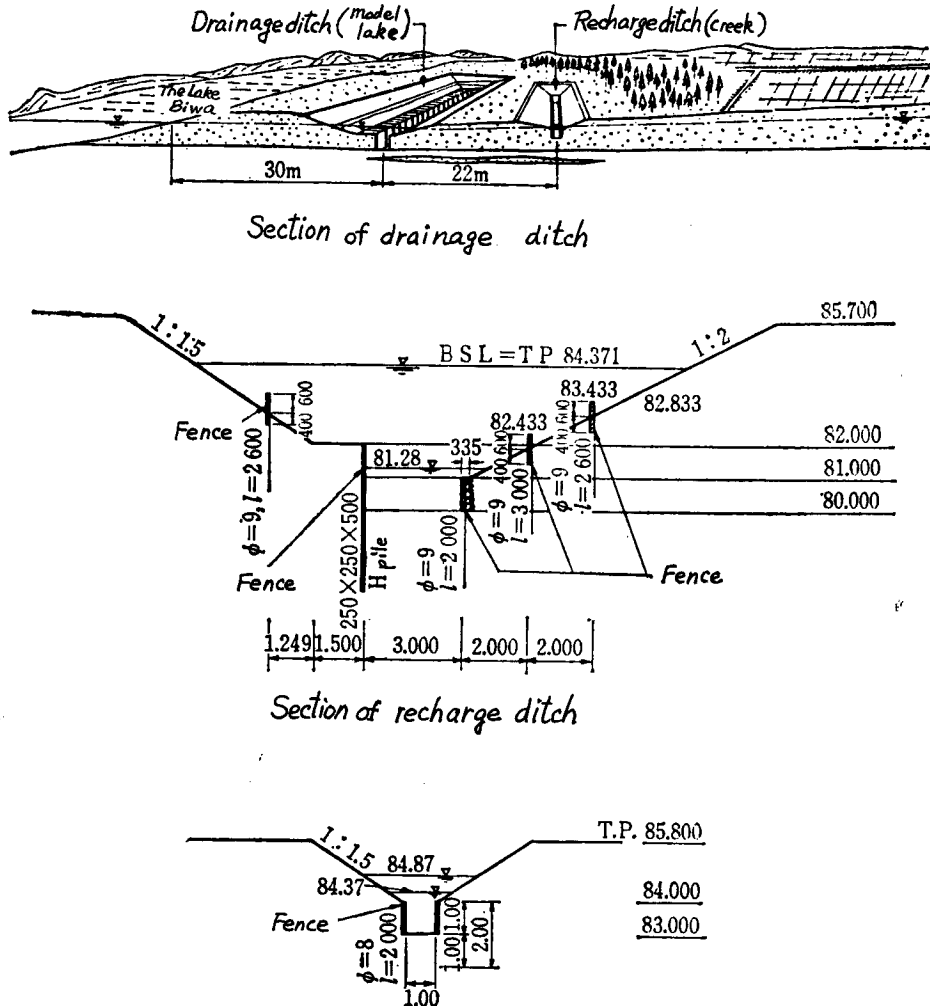


Fig. 7 The site institution.

- (1) 排水溝（仮想琵琶湖）
底幅 3m×延長 100m×深さ 6m
のりこう配湖岸側 1:1.5, 内陸側 1:2
- (2) 注水溝（クリーク）
底幅 1m×延長 50m×深さ 3m
のりこう配 1:1.5
- (3) 排水・注水施設
排水ポンプ 6"×4台, 注水ポンプ 6"×2台
流量計（フロート式 RH 型流量計）6台
- (4) 水位観測井

注水溝の近傍 116ヶ所において地下水位の同時観測が行なわれたが、いずれも測定深度の水圧をできるだけ高感度で測定しうるように 1.5" 径の管の先端部だけにストレーナーが設置されている。水位計としては電動随伴式の浮子を用い、デジタル変換器を通じてタイプライターにより変動水位が印字された。その測定系統は Fig. 8 に示されているが、全観測孔の水位を自動測定するのに約 3～4 分しか要しなかった。

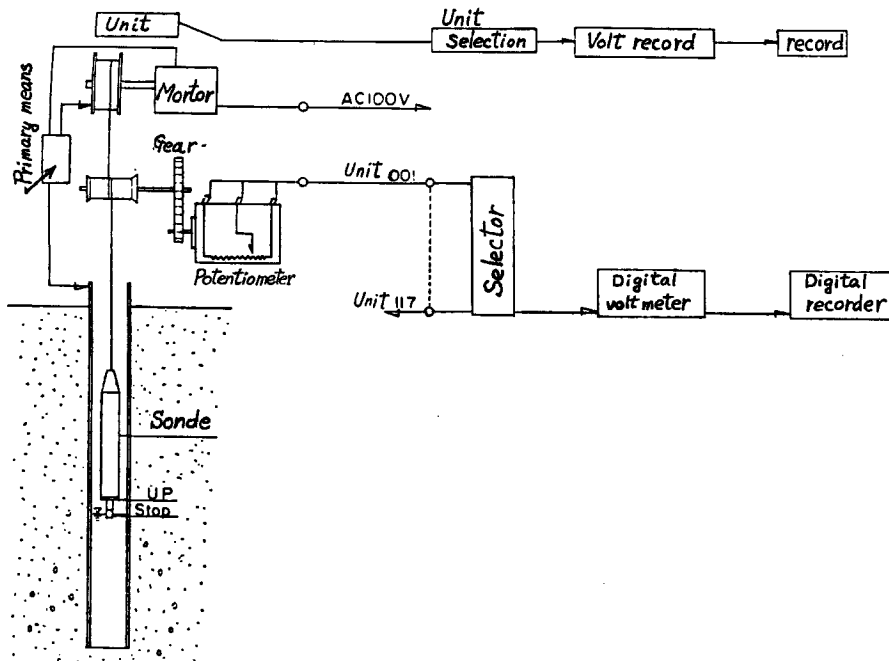


Fig. 8 Measuring system of ground-water level.

5.4 実験方法と実験結果

クリーク実験は排水溝の水位を自然水位から 3m 低下させた場合、付近地盤にどのような地下水位変動が生ずるか、また注水溝から注水した場合どのような水位変動があるかを調べることを目的としている。実験はつぎの 3 種類について行なわれた。

実験（1）

排水溝水位：自然水位から 3m 低下させる。

注水溝水位：注水しない。

cm/3 時間とする。

排水および注水の流量はスリース・バルブにより調節を行ない、フロート式の流量計で流量を測定した。各実験開始後地下水水位は時間とともに変化してやがては平衡水位に近づくが、このような非定常状態を一例として実験（2）について示すと Fig. 9 のようである。この図には比較のために実験（1）と（3）における平衡水位も記入されているが、注水溝への注水の効果が内陸側でかなり顕著に現われていることが明

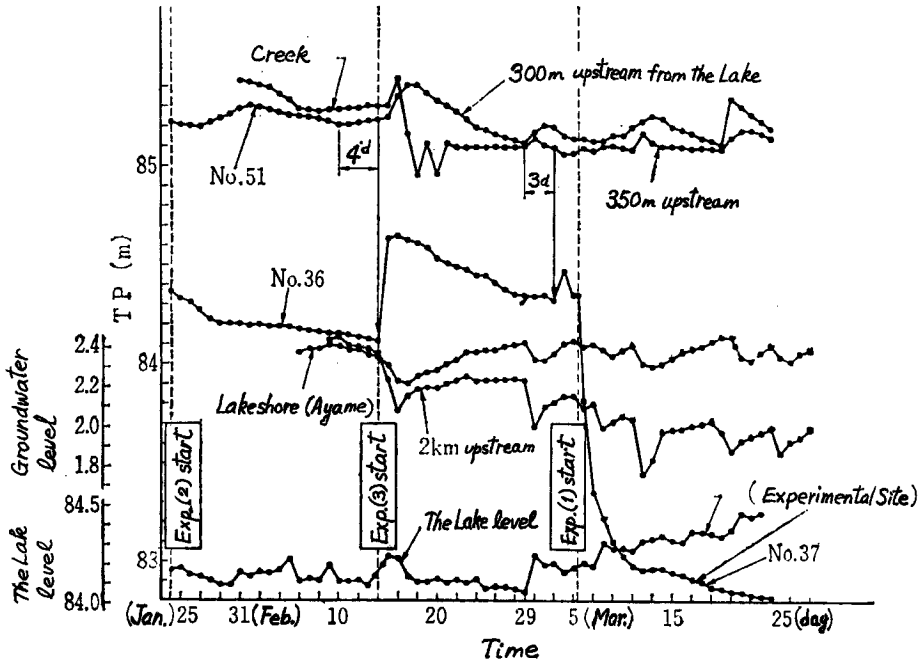


Fig. 10 Behaviors of ground-water level during the in-situ test (2).

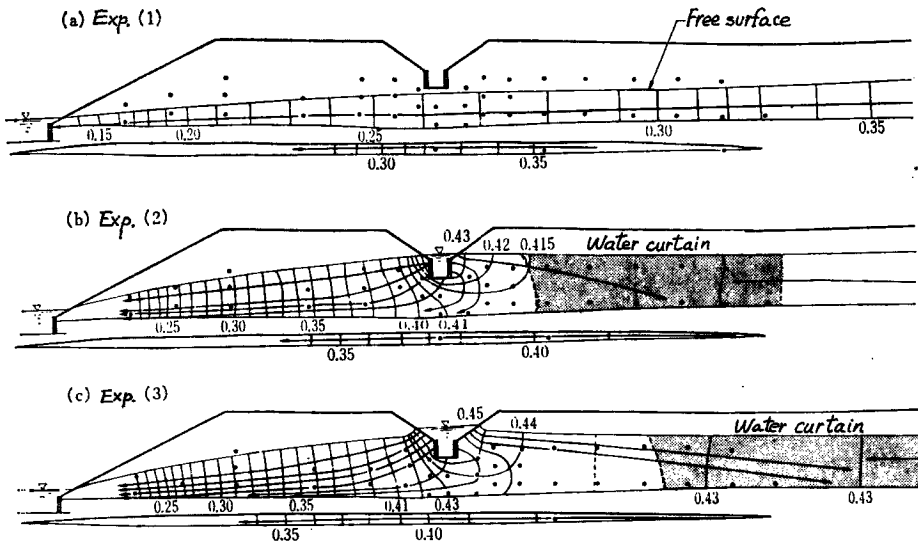


Fig. 11 Flow net in the steady state during the in-situ test.

らかである。この図を水位—時間曲線として表現し、さらに実験期間中の周辺地下水位の変動を調べた結果が Fig. 10 に示されている。また各実験段階において、ほぼ平衡状態となった水位につき中央断面で流線網を作成したものが Fig. 11 である。

この図に描かれた流線網によりウォーターカーテンの形成状況を調べよう。各観測井の記録より実験(2)について平面的な流線網を作成したのが Fig. 12 であって、内陸側の最低地下水位を示す点から約 10 m 上

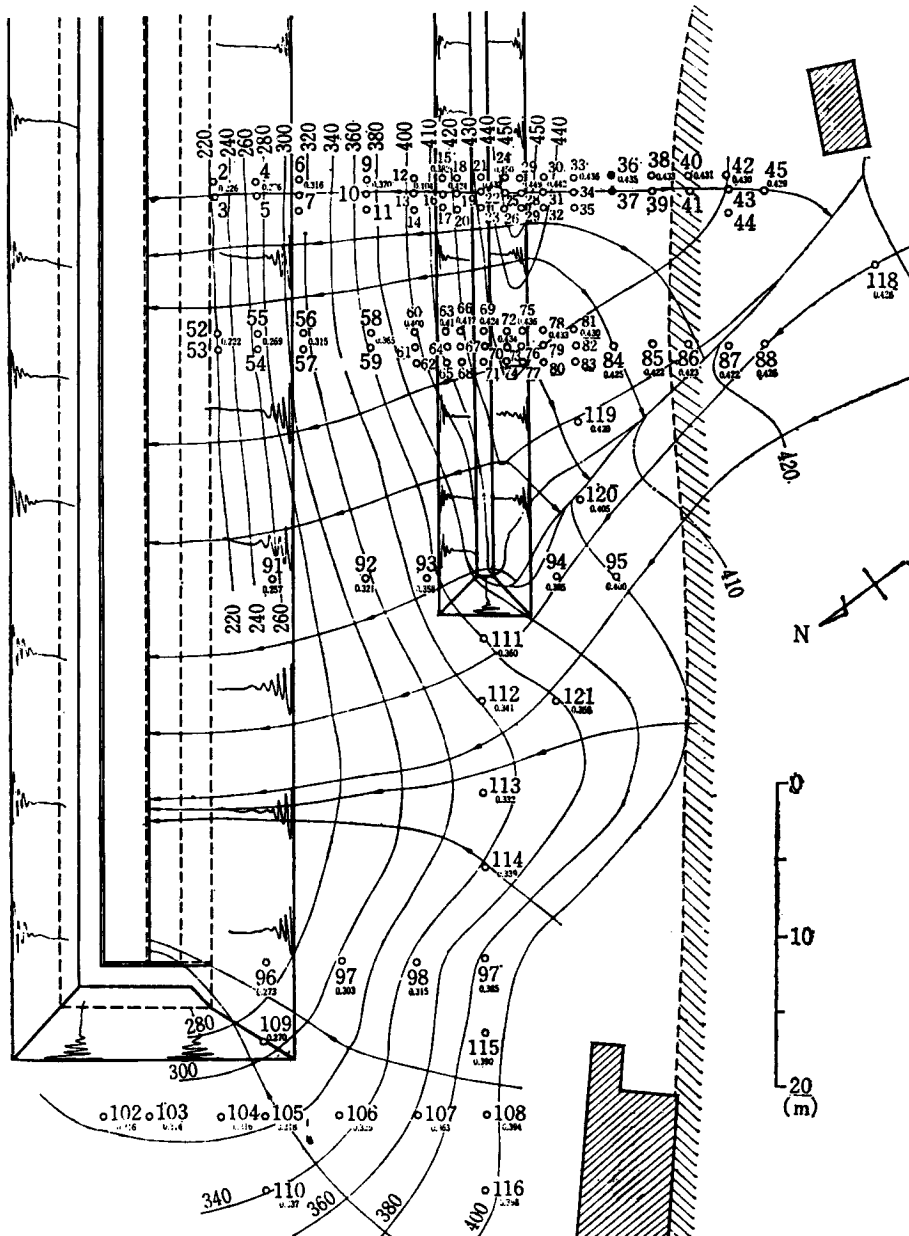


Fig. 12 Flow net in the steady state during the in-situ test (2).

流で伏流水の流線は左右に曲がり、注水溝を避けて排水溝へ流入している。またさきの Fig. 11 の断面図において、伏流水の流線は室内実験のように注水溝の下部を圧縮された断面で水が流れると考えるよりも、上述のように左右に迂回して、排水溝に向かうと考えるほうが妥当である。これは室内実験が純粋に二次元的な現象であったのに対し、現地の注水溝が有限長さであるための三次元的な効果である。しかしこのような相違があるにせよ、注入溝前面にウォーターカーテンが形成されて内陸の地下水をせき上げていることは事実であり、しかも注水溝の水位を高く保つことによって、ウォーターカーテンの勢力を増大せしめ、地下水位維持の効果を大にすることも明らかである。

一方実験中の流量について、一例として実験（2）の場合の排水溝よりの排水量と注水溝への注水量の時間的変化を Fig. 13 に示した。実験開始後3日間を経過して排水溝水位が所定の位置に到達した後は、排水量・注水量ともほとんど変化がみられない。各実験段階での排水量・注水量は平衡状態においてのとおりである。

実験（1）排水量 0.80 t/min, 注水量 0

実験（2）排水量 0.92 t/min, 注水量 0.29 t/min

実験（3）排水量 0.91 t/min, 注水量 0.31 t/min

これより排水溝の低下水位を維持させるために必要な排水量の約 1/3 の注水を注水溝に対して行なえばよいことが知られる。

なおこの現地実験において、自然地下水位の動水こう配 (4/1000~5/1000) と同程度のこう配を有する地点は排水溝より約 120 m 内陸側と推定され、排水溝からの排水による影響範囲はほぼこの程度と考えられる。また、この実験の注水溝と同じ規模のクリークを延長 1 km 設けた場合には、実験（2）と同じ注水水位のとき 0.64 t/min, 実験（3）と同じ水位のとき 0.90 t/min が必要である。さきの室内実験の結果をこの地区に適用すると、必要水量は 0.04 t/h/m であるから 1 km あたり 0.67 t/min となり、今回の実験（2）の結果と非常によく一致することが判明した。

6. む す び

琵琶湖沿岸は洪水時の湖水位上昇により、たびたび浸水被害を受けており、これらの被害防除のため瀬田川洗ざきによる湖水位の調節、瀬田川しゅんせつ工事による洪水疎通力の増大等によりその成果が上ってきている。琵琶湖の平均水位もこれらの事業により明治以来逐次低下してきており、湖周辺の水田の利用も高度化され、さらに最近では各地区で用排水改良による乾田化にともない、農業経営の機械化がはかられている。これら湖周辺水田の利用の高度化により、最近になって洪水被害の防除が一段と要望されてきている。

一方近畿圏の整備の進展により、圏内における水資源の保全

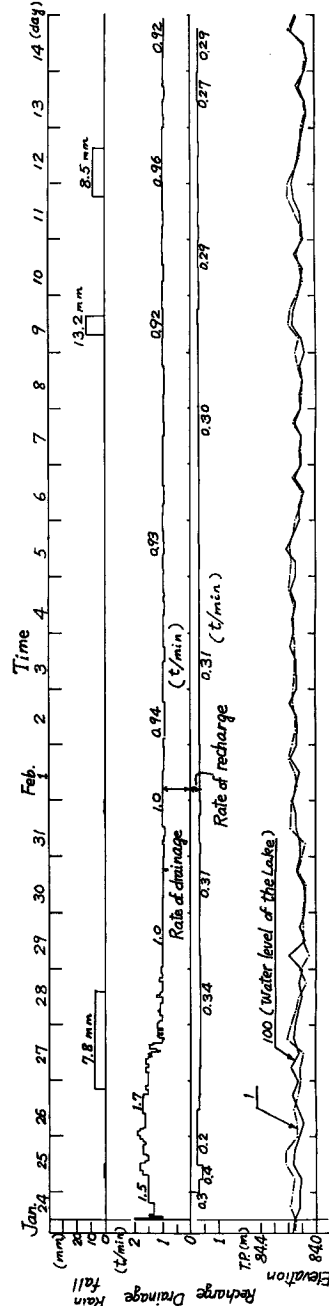


Fig. 13 Variation in rate of drainage and recharge during the in-situ test (2).

と開発に関連して、琵琶湖のもつ役割はますます大きくなってきている。その一つとして琵琶湖に貯水池としての機能をもたせようとする場合、湖水位を現在より高水位に制御しなければならなくなり、周辺湖岸地域の排水を不良にして悪影響が生ずる。そこで洪水に先立ってあらかじめ湖水位を十分低下させておき、洪水流出分を安全に貯留しようとする方策が計画された。

しかし待ちうけた洪水がない場合は、一時的にせよ湖水位低下のため周辺の地下水は若干低下する可能性が生じる。このような悪条件のもとでは、周辺の地下水利用者に重大な影響をおよぼす危険性が予想される。したがって計画にあたっては、湖水面の低下にともなって発生する諸現象を適確に予測し、その対策を立てておくことが必要である。ここでは予想される湖水面の低下を補うためのクリーク工法に関して一連の調査を行ない、地下伏流水のある場合にはウォーターカーテンによるせき上げが最も支配的な役割をすることを明らかにした。すなわち室内模型実験によって伏流水のある滞水層へ、ある地点で水路から一定流量の浸透水を注ぐときの流れ系では、両者の境界は一種の水膜のようになり、これが止水板の役割を果たして上流からの水をせき上げるという機構を究明した。そして地下水位の上昇に関係する諸因子のうち、とくに水路への注水量と伏流水の流量の効果を定量的に調べた。

このようなウォーターカーテンの形成機構が果たして現地においても実際に認められるかどうかを検討するために、琵琶湖岸の砂質地盤に対して実施された大規模なクリーク注水実験の結果を引用して論じた。それによると、現地では流れ系は三次元的となつて必ずしも室内の二次元浸透実験と一致しないが、注水溝前面にはウォーターカーテンの発生が認められ、このため伏流水のせき上げ効果がみられた。なお注入すべき水路への流量を検討したところ、室内実験の結果から推定されるものとよく一致することがわかった。

本文で概説したクリーク工法の琵琶湖周辺地域への適用性については、たとえば灌漑用水を例にとつても従来湖周辺各地域での水利用には地域的な特色がみられ、河川表流水、河川伏流水、地下水、琵琶湖からの逆水など種々の利用法がとられている現状にある。したがってここに述べたクリーク工法もこのような地域的な特色を十分考慮した上で適切な実施が望まれるゆえんである。

この一連の調査の成果は建設省琵琶湖工事事務所開発課との連繫に負うところが多い。ここに深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖周辺の地質・地下水調査について、京大防災研究所年報，第10号B，昭和42年3月，pp. 391—406.
- 2) 赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖周辺の地下水位維持調査について、京大防災研究所年報，第11号B，昭和43年3月，pp. 171—178.
- 3) 赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖周辺地下水位維持調査報告書，近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・財団法人防災研究協会，昭和42年3月，pp. 23—50.
- 4) 宇野尚雄：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，土木学会論文集，No. 157，昭和43年9月，pp. 28—40.
- 5) Polubarinova-Kochina, P. Ya.: Theory of Groundwater Movement, Princeton Univ. Press, 1962, pp. 130—133.
- 6) 赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖岸土層調査報告書，近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・財団法人防災研究協会，昭和41年3月，pp. 136—144.