

浸透水流の電氣的相似実験法に関する研究 (第1報)

福住隆二
西林清茂

概 要

土木工事においては、何らかの形で土中水の処理に関する問題に遭遇する機会が多い。ダム堤防などの直接止水を目的とする場合はもちろん各種の地下構造物を施工する際に、土中浸透水に対する処置が十分であるか否かは工事のポイントであり、その死命を制することにもなりかねない。筆者らはこれらの問題の重要性を考え、それを正確に解決する方法として具体的な工事に電氣的相似模型実験法を導入し、その適用性の研究を進めてきた。ここでは幾つかの研究実験例のうち、石川島播磨重工業K. K. 20万トンドックの揚水対策に関するものについて報告する。

1. まえがき

透水性土層が厚く堆積している場所に締切工や地下構造物を施工する場合、施工区域内に流入する浸透流や構造物に作用する浸透水圧に関する問題が生ずる。これを解決する方法としては、現在主に Flow-Net による解析法が使用されている。Flow-Net 作成の方法として、(i)図式的解法、(ii)解析的方法、(iii)模型実験法による方法がある。(i)、(ii)はいずれも透水層が Darcy の法則を満足する均一地盤であるとし、流れの機構には Laplace の法則が成立するものと仮定して、図解あるいは Relaxation Method や等角写像法などの数学的解法によって二次元的に解くものである。これらの方法は一般にきわめて広く用いられているが、複雑な成層状態および流れの機構を有する実際の地盤に対しては必ずしも正確な結論を導き得ない。これに対し(iii)には水理学的模型による場合のほか、ある媒質を使用して模型を作り電氣的相似法や光弾性相似法などを適用する方法がある。このうち電氣的相似法には、Teledeltos-paper による方法と媒質として寒天を使用した

方法とが主に採用されている。現在までにすでに上記のそれぞれについて幾つかの模型実験がなされているが、過去の実験例はすべて地盤すなわち媒質を均一と仮定した二次元的なものであった。また光弾性法や T. P. 法は方法論的に三次元拡張が困難であり、寒天を媒質とした電氣的相似法が唯一の三次元的解析法といえることができる。

最近筆者らは、複雑な成層状態の透水性地盤上に建造されるドック渠底への湧水問題解決のために寒天による電氣的相似法の適用を試みた。構造物および周辺地盤を3次元的な模型で再現した大型実験はきわめて類例の少ないものであり、実施上種々な問題点に遭遇したが、きわめて満足し得る結果を導くことができた。

本論文では、この実験法とその内容について概説し、あわせて従来の方法による計算値などとの比較検討結果についてもふれることとする。

2. 本実験法の基本的な考え方

まず寒天を使用した電氣的相似実験法の基本原理を一般論的に述べる。

この実験法は浸透水流に対する Darcy の法則と電気に対する Ohm の法則との相似性を応用したものである。まず実際の地盤の形態を導電性物質すなわち寒天材料によって模型的に作成するわけであるが、この際浸透性の異なる各地層を、相似的に電気伝導度の異なる寒天材料に置換するのである。寒天の電気伝導度はその中に溶解する食塩濃度を変えることによって変化させる。地盤内の浸透水流と寒天内の電気の流れの相似性から水量と電流量、水頭ポテンシャルと電位ポテンシャルが対応するので、水と電気の相似律、水および電気の実物と模型の相似律から、実際地盤の浸透水

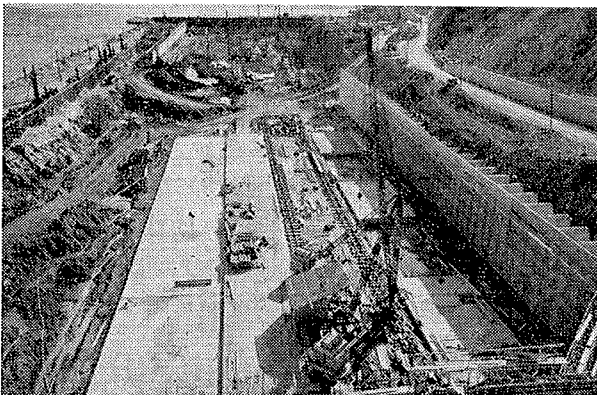


図-1

流量 q_p は(1)式で表わされる。

$$q_p = \alpha^2 \cdot \frac{k_p}{\chi_m} \cdot \frac{h_m}{v_m} \cdot I_m \dots \dots \dots (1)$$

ここに、サフックス p は実物を、 m は模型に対するもので

- α ; 模型の実物に対する寸法縮尺
- k ; 地層の透水係数
- h ; 水圧 (ただし $h_m = \frac{h_p}{\alpha}$)
- χ ; 電気比伝導度
- v ; 電圧
- I ; 電流

したがって模型実験で電流と電圧を測定することによって(1)式から実際の浸透流量を求めることができる。また地盤内の任意の点の浸透流ポテンシャルを知るためには、模型内のその位置に点極板を設置して電圧を測定すればよい。

3. 実際の地盤と模型地盤

3.1. 実際の地盤状態

模型実験を行なうにあたって、まず第一に重要なことは、土質調査によって実験の対象地区となる実際の地盤の成層分布状態や各地層の土質状態を明らかにしておくことである。

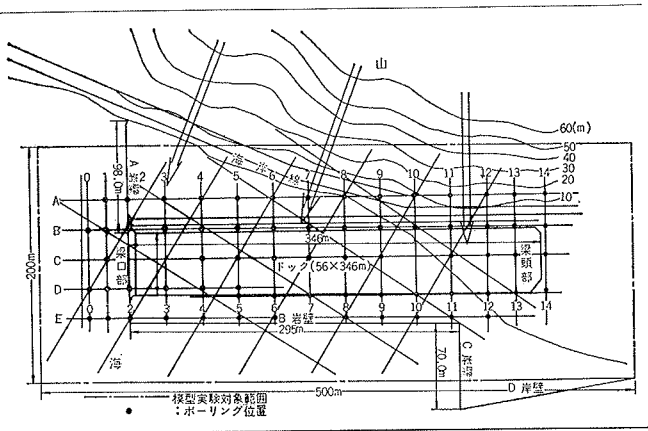


図-2 ドック付近概要図

さて、実際のドックの建設予定位置は図-2に示すごとくである。地表面は山から海へ向かって勾配をなしているが、ドック本体はその傾斜の方向とある角度をなして渠口を海に向けている。当地域の土質調査によると、海底地盤内の各層も上記と平行して沖に向かって勾配をなしており、その様相は相当複雑である。図-2に示す位置において、ドックに対する土質縦横断面図ならびに山の稜線に沿った方向とそれに直交する方向の土質断面図を作成し、各地層の分布、位置づけを検討した結果、つぎのような特性が明らかとなった。

(イ)代表的地盤構成は以下のとおりである。

- (i) 海底表層部分はほとんど不透水性のシルト質粘土によっておおわれている。
- (ii) 以下基盤まで砂レキ、砂、シルト、粘土の互層が複雑に透水層を形成する。
- (iii) (ii) に介在して層厚 2~10m の透水性大なるレキ層が3層に分かれて不規則に分布する。
- (iv) 基盤は風化岩および砂レキ状風化岩で構成されている。

湧水の対象となるのは上記(ii)と(iii)で前者を便宜上シルト混り砂層、後者をレキ層と称することにする。

(ロ)各地層は図-2の4-4ラインから渠口側の範囲ではほぼ山の等高線分布にしたがって、海側へ下降傾斜を示し、4-4ラインから渠頭側の範囲では山側からドックセンターライン付近まで等高線分布にしたがいその後は傾斜をゆるめながら沖へと下降している。

(ハ)(ii)および(iii)の層厚はいずれもドック左舷側より右舷側が厚く、またドック渠頭部より渠口を中心とした部分の方が厚い。(iii)のレキ層は渠口部分付近で各層相互に連結し、層厚が10m以上にもなっている。

(ニ)(i)は図-2のように渠口を中心とした海側に広く分布し、その層厚も海側ほど厚くなる。この粘土層の分布は模型実験の浸透水流入面決定の際に重要となる。

今回の実験のために、上記の各層の透水性をより正確に測定した。すなわち(iii)については第1レキ層を対象として現場揚水試験を実施し、 $k=3.1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ を得、(ii)については採取試料に対する物理試験および透水試験から $k=3.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ を得た。また表層粘土(i)に対しては圧密試験結果より $5 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ を得、事実上不透水性と判断した。

3.2. 模型実験のための地盤

以上のように実際の地盤状態を明確にしたのち、模型の規模や実験技術上の諸問題を考慮して、透水係数を中心に模型実験のための地層をつぎのように設定した。

(イ)不透水層—(i)の粘土層と(iv)の基盤層は上記の試験調査の結果から不透水層と決める。前述のようにこれら両層はいずれも傾斜状態にあるので、工事中ドック部分の掘削が行なわれると図-3に示すように粘土層は渠口側のみ残存し、渠頭側には岩盤が現われることになる。したがって渠内への流入面はドック中央部を海岸線に沿って横切る帯状地区に限定されることになる。

(ロ)透水層—(ii)のシルト混り砂層と(iii)のレキ層を透水層と考える。これらは層厚も不均一でかつ互層をな

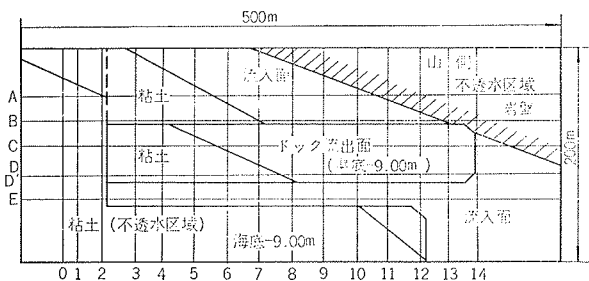


図-3 浸透水流入域および流出域

しているのできわめて再現がむずかしいが、できるだけ相似性を考慮し、模型の地層は厚さおよび傾斜の異なる計20ヶの平面で形成することにした。

3.3. 模型地盤のための寒天材料とその性質

前節で決定した模型用地盤を寒天材料によって造るすわけであるが、そのためには予備的に寒天の伝導特性を確認する実験を行なっておくことが必要である。さらに実際地盤の透水係数と対応する寒天の伝導度、いいかえれば寒天に混入する食塩濃度の決定が必要である。

3.3.1. 寒天材料の比伝導度と混入食塩濃度との関係
まず上記の関係を見出すために非電導性物質であるアクリル板で図-4のような装置を作成して実験を行なった。寒天中の濃度を種々変化させて電圧 v 、および電流 i を測定する。比伝導度 χ は断面積 s (cm²)、長さ l (cm) とすれば、食塩混入寒天の比伝導度 χ は(2)式であらわされる。

$$\alpha = \frac{l}{s} \cdot \frac{1}{r} \dots\dots\dots (2)$$

ここに r ; 電気抵抗 ($r = \frac{v}{i}$)

測定結果を図-5に示す。両者の関係は放物線的に変化し、混入食塩濃度が0から10%の範囲では比伝導度はおおよそ直線的に変化するが、食塩濃度20%以上になると比伝導度の増加がにぶる。

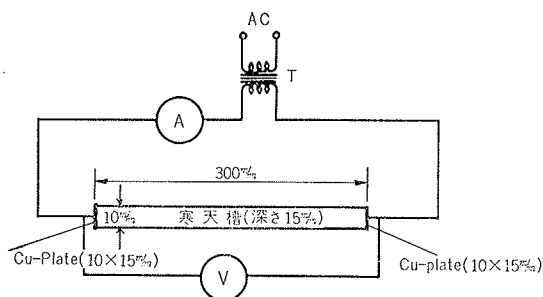


図-4 比電導度測定装置

3.3.2. 寒天材料の比伝導度と温度との関係 同一装置を用いて、上記の関係を測定した結果が図-6で

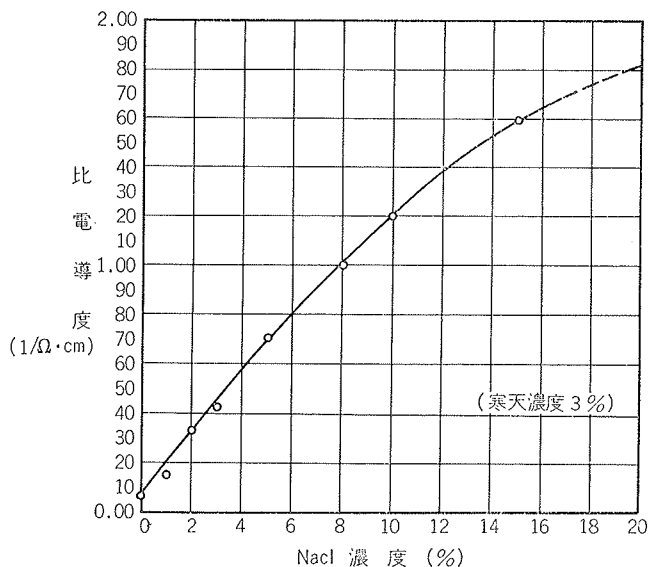


図-5 食塩濃度と電導度の関係

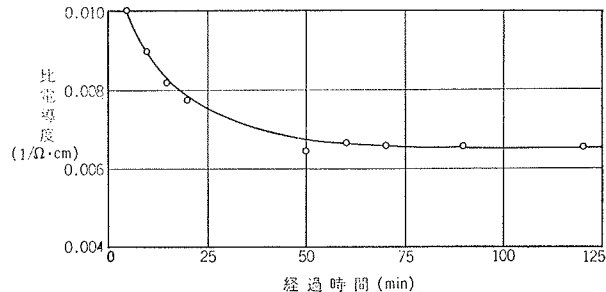


図-6 比電導度の経時的変化(温度と比伝導度の関係)

ある。すなわち濃度3%の寒天の比伝導度を高温から室温(一定)にまで降下するあいだ経時的に測定した。その結果、一定時間経過後は一定値を示すことがわかった。

3.3.3. 比伝導度と寒天濃度との関係 また混入食塩濃度を一定量に保ち、寒天濃度を各種に変化させたときの比伝導度を測定した。その結果比伝導度は寒天濃度にほとんど関係せず、特に濃度2%以上では一定であることがわかった。

以上の予備実験で寒天材料の伝導特性が明らかとなったので、模型地盤に使用する寒天の品質を以下のよ

透 水 層	透水係数k (cm/sec)	比電導度 χ (1/Ω·cm)	寒天中の食塩濃度%
レキ層	3.1×10^{-2}	0.63	4.9
シルト混り砂層	3.0×10^{-4}	0.0063	0

表-1 寒天中の食塩濃度

うに決定した。3.1.項に述べたように(ii)および(iii)の地層の透水係数は大幅に異なり、その相対比は約100:1であることから図-5より両者の寒天を表-1のごとく決定した。

4. 実験装置と実験方法

4.1. 実験槽とドック模型

電気計測実験であるため、実験装置は電極板などの測定装置を除いてすべて非電導性物質を使用する。

実験槽は長さ250cm×幅100cm×深さ50cmの木製とし、底板および内壁はすべて絶縁剤を塗布して非電導性、水密性を保つようにした。実験槽の中にはドックを中心として500m×200mの範囲の地盤を1/200の縮尺でおさめることができる。ドック本体および附属物、岸壁矢板、止水矢板などの構造物の1/200縮尺模型には塩化ビニール材を使用し、これを接着剤で取り付けた。

4.2. 極板およびポテンシャル測定用点極板

浸透水流入面、流出面には厚さ0.5m/mの銅板を設置して電極板とした。銅板にまだ液状の寒天を羽毛であらかじめ塗布しておいて、銅板と寒天との接触をよくして取り付けした。また浸透流分布を測定するため点極板を使用した。これはφ5m/mの銅線の先端に10m/m×10m/mの銅板を溶接したもので銅線は先端部を除いて絶縁のためエナメルを塗布してある。点極板は5cmピッチの格子状に設置した。

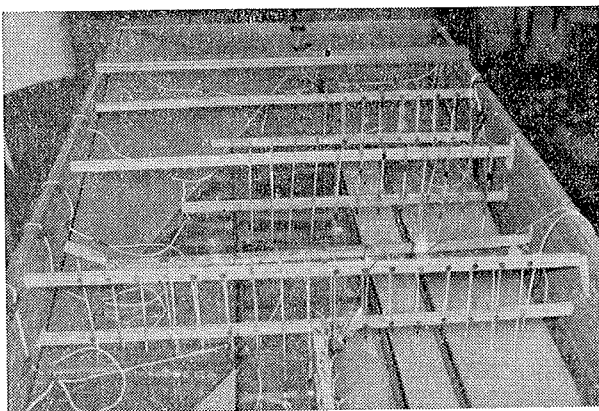


図-7 極板およびポテンシャル測定用極板設置図

4.3. 寒天材料の打込

実験槽内に構造物模型および極板を設置したのち、寒天による模型地盤の作成を行なう。作業にあたっては複雑に変化する地層を所定の厚さ、傾斜、範囲とするために、実験槽の4コーナーにジャッキを取付け、地層の傾斜面が水平になるように実験槽を傾たむけた状態にし、型枠で範囲を定めて寒天を流しこんだ。作業は下層から上層へと進め、流しこんだ寒天が固結して室温に近くなるまで放置したのち、つぎの層を作る

ことにした。このように寒天地盤を作成した場合、新旧両寒天間の接触抵抗の影響、食塩濃度の異なる寒天境界に生ずる溶解問題があるが、前者についてはまったく影響のないことが確かめられている。また後者の点に関してはこれを完全に防ぐことは不可能であるが、旧寒天表面につぎの材料をまぜうすく流し、それを短時間に固結させてから、残りの所定量を流しこめばこれを防止することができる。渠口付近に存在する層厚10mにおよぶレキ層は部分的にあるので全寒天地盤を作成したのち、その部分だけを切り取り、寒天を流しこむ方法をとった。

4.4. 測定

以上のようにして寒天地盤を作成したのち、銅極板の設置および回路の配線を行なった。図-8はその一例である。電源A、C100Voltを変圧器で1~4Voltに降下させ、電流計および電圧計(バルボルメーター)の読み、および透水層各位置の電位ポテンシャルを測定した。

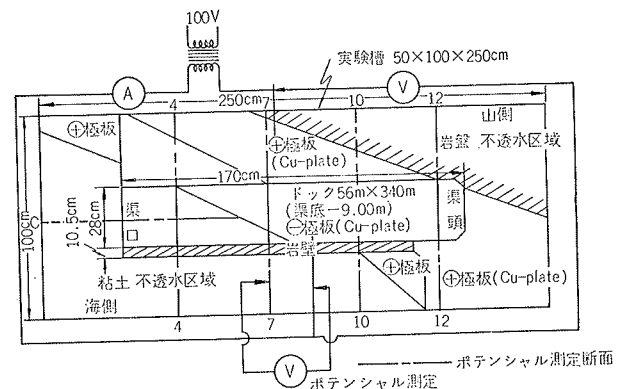


図-8 模型実験配線図

5. 実験条件

実験条件は以下に述べる2つの観点から決定した。

5.1. 止水条件

現場の施工対策の決定のために各種の止水形式をとった場合の流入機構を比較確認する目的で、つぎの3ケースを考えて実施した。

- (i) 特別な止水工法を行わず現状地盤のままの場合。
- (ii) 第1レキ層上端まで鋼矢板による止水壁を造成した場合。
- (iii) 第1レキ層を鋼矢板で完全止水した場合。

5.2. 浸透水流出入域の仮定条件

ドック渠底へ流入する浸透水流の水源は海底表層部が透水性地盤である領域のほかに実験対象地区と非対象地区との鉛直境界断面も考慮する必要がある。すなわち、ドック周辺の広い領域を考えた場合、海底表層部が粘土などにおおわれていてもその不透水層下に存

在する透水層は遠方で海底にあらわれ、海水が流れこんでいると考えるのが一般的である。そこで模型実験の場合、透水層が実験槽側壁に接触する境界面も流入面とした。ただし実際にはこの流入面のポテンシャルは地表流入面と同一ではなく、境界面にいたるまでにポテンシャル損失を受けて低下しているはずである。実験では全流入面を同一ポテンシャル面と決定した。ただしその決定を相殺する意味で山側の境界面のみは除外した。

以上の観点からつぎの3つのケースについて実施した。

- (イ) 表面流入域および側面流入域を合せ考えた場合
- (ロ) 表面流入域あるいは側面流入域いずれか一方のみを考えた場合。
- (ハ) 安全をとって、不透水性と見なし得る表層粘土層もシルト混り砂層と同一透水係数をもつものと仮定し、全表面および側面を流入域とした場合。

以上5.1, 5.2に示した各種ケースを組み合わせて表一2に示す9種類の場合について実験を実施した。

止水条件	浸透流入領域条件
止水工法適用せず	表面流入域+側面流入域
	表面流入域
	側面流入域
第一レキ層下端まで完全止水	表面流入域+側面流入域
	表面流入域
第一レキ層上端まで止水	表面流入域+側面流入域
	表面流入域
海底粘土層も透水層とした場合(第一レキ層下端まで完全止水)	

表一2 実験種類

6. 実験結果とその考察

6.1. 浸透流量の測定

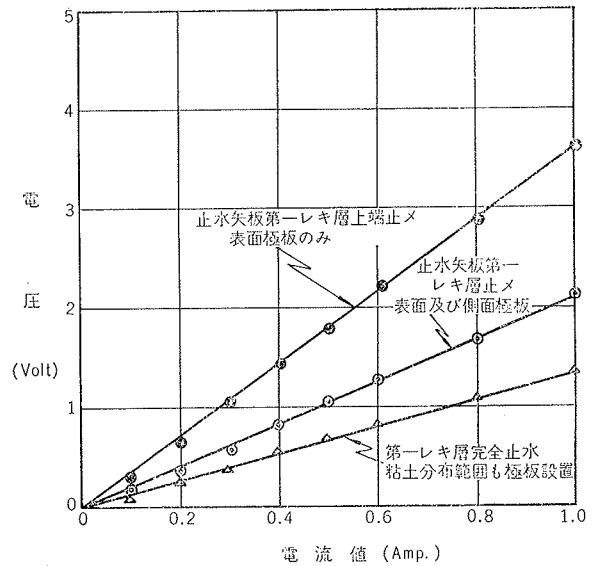
今回の実験の主要な目的は現場の施工方針を決定するための渠内への流入水量の正確な予測にある。本節では実験によって得られた浸透流量に関してその概略を述べる。

浸透流量は前掲の(1)式によって算出することができるが、ここで k_p と χ_m との間係は図一5より、

$$\frac{k_p}{\chi_m} = 0.0477 \left(\frac{\text{cm}^2 \cdot \text{ohm}}{\text{sec}} \right)$$

また、 $\alpha = 200$, $h_m = 5 \text{ cm}$ であるから、これらを(1)式に代入することにより浸透流量 q_p は(2)式で与えられる

$$q_p = 9540 \times \frac{I_m}{V_m} (\text{cm}^2/\text{sec}) \dots \dots \dots (2)$$



図一9 電圧一電流の測定値

表一2に示した各実験について電流を0.1~1.0Ampまで変化させてそれぞれの電圧を測定した。その結果を例えば図一9に示すようにグラフ化し、両者間に直線性が成立することを確かめた上、 i/v の値を求めて(2)式から全浸透流量 q_p を求めた。これを一括して表一3に示す。表一3から主要な結果を列記すると以下のようになる。

止水条件	極板設置条件	i/v	$Q \text{ m}^3/\text{hour}$	対比 (%)	実験 No.
止水工法なし	表面⊕極板+側面⊕極板	0.588	20.2	100	1
	表面⊕極板	0.396	13.6	67.3	2
第一レキ層完全止水 (鋼矢板使用)	側面⊕極板	0.385	13.2	65.3	3
	表面⊕極板+側面⊕極板	0.403	13.8	68.3	4
第一レキ層上端までの止水 (鋼矢板使用)	表面⊕極板	0.249	8.5	42.1	5
	側面⊕極板	0.311	10.7	53.0	6
第一レキ層完全止水	表面⊕極板+側面⊕極板	0.470	16.1	79.6	7
	表面⊕極板	0.275	9.4	46.5	8
第一レキ層完全止水	全表面⊕極板+側面⊕極板	0.730	25.0	123.6	9

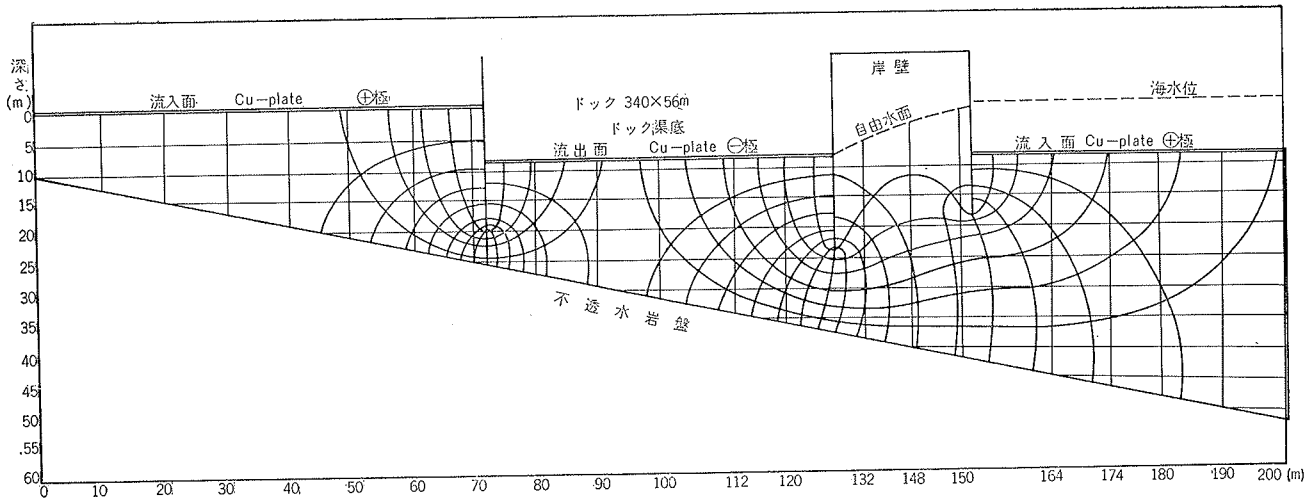
(注) 対比の基準は実験No.1を100%とした場合。

表一3 浸透水流量の算定結果

(イ) なんら特別な止水対策を行わない場合の浸透流量は $20.2 \text{ m}^3/\text{hour}$ である。

(ロ) 上記(イ)の場合の浸透流量 $20.2 \text{ m}^3/\text{hour}$ を100%とすると、第1レキ層上端まで止水したときは79.6% ($16.1 \text{ m}^3/\text{hour}$)にとどまるが、第1レキ層を完全に止水したときは、68.3% ($13.8 \text{ m}^3/\text{hour}$) となり流量は効果的に低減する。

(ハ) 第1レキ層を完全に止水しても、海底表層粘土を透水層と考えた場合には流量は $25 \text{ m}^3/\text{hour}$ となる。しかし表面流入領域が2倍以上になり流出面が約1.3倍に増加したにもかかわらず浸透量の増加はあまり顕著ではない。



図一10 浸透流分布図(図解法)

(二)浸透流入域を表面流入域のみ、あるいは側面流入域のみに分けて行なった場合には両者間に大きな差は認められない。また両者の値を合計した流量と両方の領域を同時に考えて求めた流量とを比較すると前者の値が大である。この違いは浸透流の流路断面積の相対的差にもとづくものと思われる。

次に例えば図一10に示すような図解法による流量計算結果との比較について述べる。

図解法の場合の基本的な考え方は次のごとくである
すなわち、(a)ドック渠底への浸透流は止水矢板先端を回って流入する場合を断面的に考え、(b)第1レキ層を伏流して流入する場合を平面的に考えて、おのおのの流量を別々の Flow-Net から求め、その合計を全浸透流量とした。(a)の場合の流量はドック側壁断面を12ブロックに分解し、それぞれの代表的 Flow-Net を作成して(3)式によって求める。

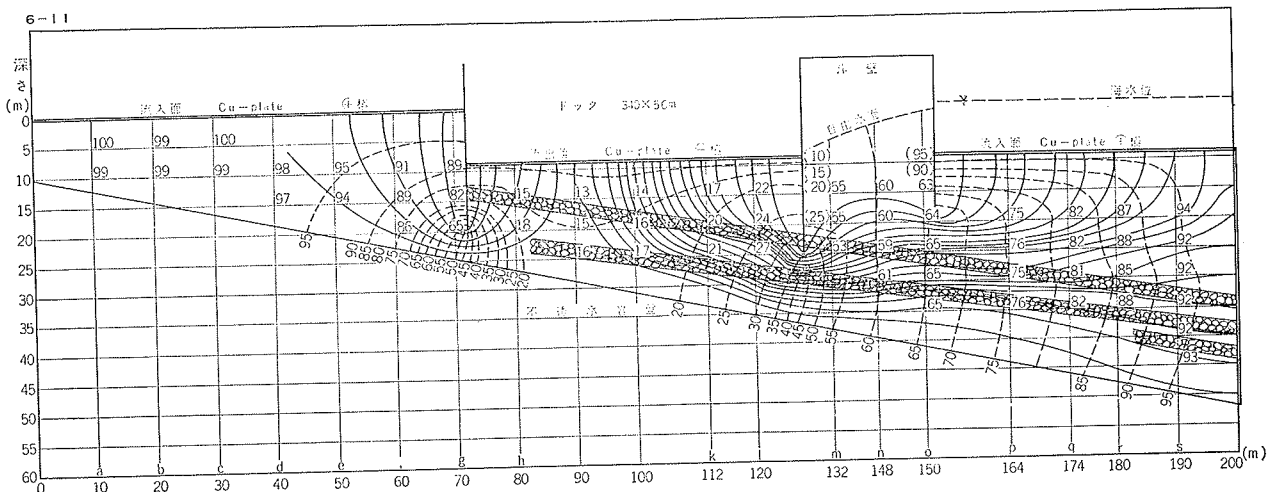
$$q = k \cdot h \cdot \frac{N_t}{N_d} \dots \dots \dots (3)$$

その結果(a)の場合の合計流量は58m³/hourであった。一方(b)の場合はドック中央部分の渠底下に流入するものとして求めると9.9m³/hourとなる。したがって全浸透流量は 67.9m³/hour である。

本実験による流量が 25m³/hour であるのに対し、図解法による算定結果は3倍に近い値となっている。この誤差の原因は二次元的算出法と三次元的算出法との違いにあり、本実験のように複雑な成層状態の地盤の浸透流分布は均一地盤のそれと根本的に異なっていることによる。

6.2. 浸透流線の形状

今回の実験の様に複雑な構成の地盤を対象とした場合には均一地盤の場合に比べて浸透流分布状態に極めて大きな相違が生ずる。図一10は図解法によって求めた Flow-Net である。この場合は地盤を均一と仮定す



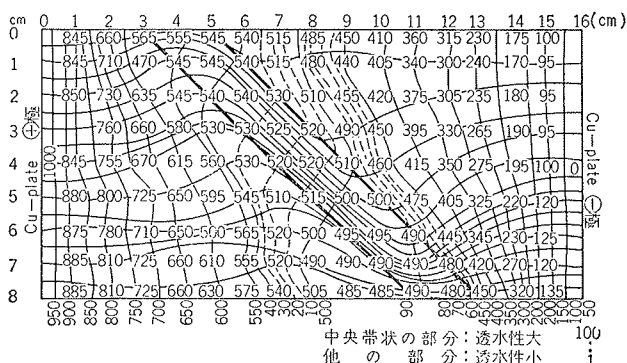
図一11 浸透流分布図(実験結果)

るので、流線を等ポテンシャル線に直交するように描けば、その分布状態が求められる。

一方、今回のような三次元的模型実験では、周囲の流入面から発した流線群はドック中央の流出面にわん曲しながら集中するので、等ポテンシャル面は複雑な曲面になる。また流線はこの曲面に直交するため、一断面内の流線分布状態を一平面上に表わすことは困難である。

図一11は今回の模型実験で得た流線分布状態の一例である。ここには流線分布が断面的に比較的直線を保っている実験No. 8 断面4—4ラインについてのものを挙げた。これによると、ドック右舷側の流線分布には透水性の良いレキ層の影響が強く働いており、流入面から等間隔に垂直方向に発した流線群は第1レキ層に近づくにつれて、この層に沿うように水平な流れとなり、その密度は急激に大となる。第1レキ層はドック渠壁下の止水矢板の存在により切断されているので、流れは第2レキ層に集中する傾向を生じて矢板の先端をくぐり抜け再び第1、第2レキ層の影響を受けながらドック中央部に流出する。このように透水性の良いレキ層の影響はきわめて大きく、表面および側面流入領域から発した浸透水は丁度暗渠のような機能をもつ2つのレキ層に集中して流れていることがわかる。またこれに対しドック左舷側では止水矢板の内側のレキ層がきわめて浅い位置に存在し、かつ外側には存在しないため、図解法で求めた図一10の場合と類似の流線分布状態を示している。

以上の流れの機構をさらに明確に解明するため、透水性の異なる複合地盤のもと単純化した形を想定し、二次元的な実験を試みた。その結果を図一12に示す。この実験によると左右の流入面付近ではそれに平行であった等ポテンシャル線が透水性の良い層に近づくにしたがって、この層と平行になるように変化し、等ポテンシャル線は流入面とこの層との距離に近い範



図一12 二種類の異なる透水層から成る地盤内浸透流分布図

囲では密に、遠いほど粗に分布する形をとる。また透水性の良い層内の等ポテンシャル線は層の方向に対して直角に横断する形をとり、その線間の距離も大きくなる。

以上の実験結果からみて、図一11の浸透流分布の特性は容易に理解できる。すなわち流入面から等間隔で発した流線群は透水性の良い地層にいたるまでの距離が近い範囲に密に偏向し、一たん透水性の良い地層に入った流線は大部分がその地層内を密に流れ流出面に近い位置まで達することとなる。

7. 結語

この実例に示したような複雑な地盤における浸透水の問題の解決はきわめて困難であるのが一般であるが、本実験法を適用することによって、実際に即した三次元的な解析が可能であることが実証できた。現在筆者等はここに述べた実例のほか、各種の水処理問題に適用して成功を納めている。例えば構造物背面にかかる浸透水圧を減少させるためのデープウェルの効果の予測、あるいはウェルポイントによる地下水低下の検討などにすでに実用された。これらの成果についてもつぎの機会に報告したいと考えている。

最後にこの研究を行なうにあたって、終始ご指導を賜った京都大学教授赤井浩一博士に深く感謝いたします。さらに模型実験を手伝っていただいた京都大学赤井研究室の方々、当所鈴木公雄職員、また資料提供などご援助をいただいた相生工専々務所小鹿所長、神津主任を始めとする職員の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 丹羽義次; 浸透水流の電氣的計測について, 土木学会誌35—7
- 2) 赤井浩一他; 淀川堤防のろう水調査 土木学会誌 48—5
- 3) Arley, G. Franklin; Characteristics of Seepage into A Double-Wall Sheetpile Cofferdam 1966
- 4) Muskat, M.; The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media
- 5) 福住, 西林; 石川島播磨ドック湧水に関する電氣的模型実験報告書 42. 10
- 6) 内藤, 鈴木; 安治川水門下部ケーソン工事のためのデープウェル設置に関する電氣的計測模型実験 42. 10