

土 木 研 究 所 資 料

第 1 3 2 号

矢 作 川 電 気 模 型 実 験 報 告

(そ の 1)

昭 和 4 1 年 1 月

建 設 省 土 木 研 究 所

ま え が き

矢作川の漏水は古くからの問題であり、出水のたびに堤内地へ砂のボーリングを起こしていた。堤体地盤にかなりの厚さの透水層があつて、これを通して漏水が起きていることはボーリング調査その他によってわかつていたが、透水層が厚いため効果的な対策工法を見出すことは困難であつた。

漏水に対して堤体を安全に保つため以前よりいろいろな工法が試験的に適用され、検討が続けられていたが、あまり効果的な対策が見つからなかった。最近も対策工法として、裏小段、裏石張が施工されたが、本年秋の台風による出水で、地盤から堤内地へ砂が吹き上げたばかりでなく、これらの一部の破壊さえ生じた。

そこで、より一層効果的な対策をたてるため、豊橋工事事務所と土木研究所とで協議を行なつたが、その結果、土木研究所土質研究室では、対策工法としてリリーフ・ウェルを施工した場合について、電気模型実験を行なうことになった。この報告書はその実験結果を述べたものである。

目 次

第1章 電気相似模型実験の理論と方法	1
§ 1 電気相似模型実験の原理	1
§ 2 模型の境界条件	3
§ 3 等ポテンシャル線の測定法	5
§ 4 浸潤線の決定法	5
§ 5 浸透流量の測定法	6
第2章 堤防および基礎の土質断面決定	8
§ 1 土質断面の決定	8
§ 2 透水係数の決定	11
第3章 リリーフウェルによる漏水対策	19
§ 1 効果についての電気模型実験結果	19
§ 2 リリーフウェルの設計	36
§ 3 フィルターの選択	49
第4章 井戸の設計計算	50
§ 1 貫入量の決定	50
§ 2 井戸間隔の決定	51
§ 3 井戸の構造	57

第1章 電気相似模型実験の理論と方法

透水性媒質中の水の流れは、境界条件のもとに Laplace 方程式を解くことによって解明される。しかし、この方程式は、境界条件がごく簡単な場合にしか解くことができず、実際には近似的な数値計算によるか、あるいは実験的な方法によって解かれるにすぎない。

実験的な方法には、浸透水の流れに関する Darcy の法則と電導体中の電気の流れに関する Ohm の法則が数値的に相似であることを利用した電気相似模型実験の方法がある。

以下では、電気相似模型実験を実施するにさいして、Darcy の法則と Ohm の法則とが数学的に相似であることを述べ相似実験の方法が可能なことを述べる。ついで実験の原理を明らかにし、堤体の浸潤線、浸透流量、ポテンシャル線の測定法とその根拠を示す。

§1 電気相似模型実験の原理

浸透流の問題を一般的に取り扱うための基本方程式を誘導する。図-1に示すような等方等質性の透水性堤体において巾 dx 、厚さ dy 、高さ dz なる直方体を考える。ここで流れが二次元的で、水が非圧縮性であると仮定すると、この要素の中に流入する水の速度の x 、 z 方向の成分はそれぞれ V_x 、 V_z であり、流出する水の速度の成分

はそれぞれ $V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx$ 、 $V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz$ となる。したがって単位時間内にこの要素の中に流入する水量は、 $V_x dz dy + V_z dx dy$ であり、流出する水量は $(V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx) dz dy + (V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz) dx dy$ となる。連続の条件によって

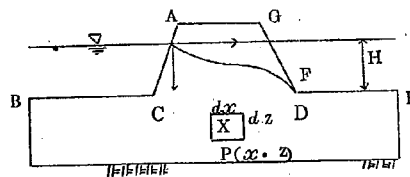


図-1

この要素の中に流入流出する水量は等しいから

$$V_x dz dy + V_y dx dy = \left(V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx \right) dz dy + \left(V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz \right) dx dy$$

となる。これから

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1-1)$$

なる連続の方程式が得られる。

一方 Darcy の法則によれば

$$\left. \begin{aligned} V_x &= -k \frac{\partial h}{\partial x} \\ V_z &= -k \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

であるから、ここに $\varphi = kh$ なる速度ポテンシャルという量を導入すれば、

$$\left. \begin{aligned} V_x &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ V_z &= -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

となり、これを (1-1) の連続の方程式に代入すると、

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1-4)$$

が得られる。これは Laplace 方程式で、浸透流に関する基本方程式である。

いま、単位断面をとって考えると、浸透流に関する Darcy の式、電流に関する Ohm の法則は一般にそれぞれ

$$Q = -k \frac{dh}{ds} \quad (1-5)$$

$$I = -\sigma_0 \frac{dE}{ds} \quad (1-6)$$

ここに、 Q ; 浸透流量 I ; 電 流

k ; 透水係数 σ_0 ; 電 導 率

$\frac{dh}{ds}$; 動水勾配 $\frac{dE}{ds}$; 電圧勾配

で表わされる。これらの両式は全く同形であるから、Ohm の法則も Darcy の

法則と同様にして Laplace 方程式を満足することが証明される。したがって、透水性媒質中の水の流れも電導体中の電気の流れもいずれもポテンシャル流であり、浸透流の問題は、水の流れを電導体中の電気の流れに置き換えて、模型的に解明することができる。これが電気相似模型実験の原理である。

図-1において、水頭 h の基準を堤内地基面(D, E)にとり、 x, z の座標の原点を堤体の流入面と水面の交点にとり、堤体中の任意の一点(x, z)における浸透水の圧力を p 、全水頭を H 、水の密度を γ_w とすると、点(x, y)における水頭は

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + (H - z) \quad (1-7)$$

であるから、

$$\phi = kh = k \left\{ \frac{p}{\gamma_w} + (H - z) \right\} \quad (1-8)$$

となる。したがって、Laplace方程式を電気相似模型を用いて解くためには電氣的に次のような境界条件を与えればよい。

すなわち、

$$\text{流入面 } AGB \quad \frac{p}{\gamma_w} = z \quad \therefore \phi = kH = \phi_A \quad (1-9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{浸潤線 } AF \\ \text{浸出面 } FD \end{array} \right\} \frac{p}{\gamma_w} = 0 \quad \therefore \phi = k(H - z) \quad (1-10)$$

$$\text{流出面 } DE \quad \frac{p}{\gamma_w} = 0 \quad \therefore \phi = 0 \quad (\because z = H) \quad (1-11)$$

電気相似模型実験においては、水の浸透流における重力の場に相当する場をもたないから、(1-10)の条件は重要である。すなわち、この条件にしたがってあらかじめ浸潤線の形を決定し、その上の部分を切りとっておかねばならない。こうしておくとき、はじめて模型と実物との間に完全な相似が成り立つ。

§ 2 模型の境界条件

模型の尺度に限度があるので、これを補正するため浸透水が地表面に浸出する問題を解く。

図-2のような不透水層と半透水層に囲まれた透水層内の浸透流が、少しづつ地面に浸出するものとする。

単位巾を考え、堤内に浸出する水量を Q とすると、図-2を参照して

$$Q = k_1 \frac{dh}{dx} \cdot D \quad (1-12)$$

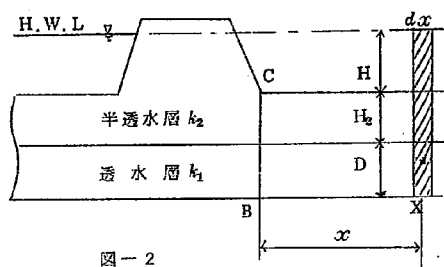


図-2

堤内表土より浸出する水量を q とすると

$$q = -\frac{dQ}{dx} = \frac{k_2}{H_2} h \quad (1-13)$$

(1-12) と (1-13) 式により

$$\frac{dh}{dx} - \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{1}{DH_2} \cdot h = 0$$

ここで $n^2 = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{1}{DH_2}$ とおけば

$$\frac{dh}{dx} - n^2 h = 0 \quad (1-14)$$

となる。(1-14) 式を解くと、 $h = c_1 e^{-nx} + c_2 e^{nx}$ となる。ここで $x \rightarrow \infty$ のとき $h = 0$ であるから、 $c_2 = 0$ である。故に $h = c_1 e^{-nx}$ となる。B点の水頭を h_0 とすれば $x = 0$ において $h = h_0$ 、故に

$$h = h_0 e^{-nx} \quad (1-15)$$

が得られる。これによって明らかなごとく、透水層が無限に続いている場合の透水層内の圧力分布は指数関数によって表わされる。したがってB点から x だけへだたった点をXとすれば、BX間の浸出量は

$$Q_x = \frac{k_1}{H_2} \int_0^x h_0 e^{-nx} dx = \frac{k_1}{H_2} \cdot \frac{h_0}{n} (1 - e^{-nx}) \quad (1-16)$$

ここにおいて $x \rightarrow \infty$ とすれば

$$Q_\infty = \frac{k_1}{H_2} \cdot \frac{h_0}{n}$$

となり、 h_0 を与えるとき、B点以下の全浸出量が求められる。これを用いて
(1-16)式を書き換えると、

$$Q_{\infty} = Q_{\infty} (1 - e^{-hx}) \quad (1-17) \quad \text{となる。}$$

§ 3 等ポテンシャル線の測定法

電導体中の電気の等ポテンシャル線を測定するためにWheatstone 電橋の原理を応用する。

図-3において、一般にA、C 2点の電位は異なるから電流 I_g が流れて検流計 G は揺れる。しかし、いずれかの抵抗を適当に調節すれば、検流計の偏れを零にすることができる。

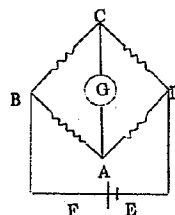


図-3

いま図中のB-C-Dの回路を電位差抵抗器でとり、B-A-Dの回路を電気相似模型とすれば、電位差抵抗器のC点と電位の等しい点Aを、探針によって模型上に求めることができる。このようにして電位差抵抗器に所定のポテンシャルを与えれば、模型上に所定の等ポテンシャル線をえがくことができる。

§ 4 浸潤線の決定法

浸潤線の形を実験的に決めるには、Wyckoff と Reed の研究した方法による。この方法は図-4に示すように、電導膜で堤体の模型を作り、流入面と流出面に金属の電極をはりつけ、両極間に電圧 E_0 を加える。裏のり面GDには、浸潤線が現われるかも知れないので、そのさい浸出点において保持する位置のエネルギーに相当するだけの電位をあらかじめ加えておくため、裏のり面において $\varphi = k(H - z)$ を満たすような電極をはりつける。

このようにしておいて、Wheatstone電橋を応用した装置でポテンシャルを測り、電導膜上の堤体部の上縁が浸潤線の条件すなわち $\varphi = k(H - z)$ を満足するように少しずつ切り取りながら修正し、正しい解に近づける。

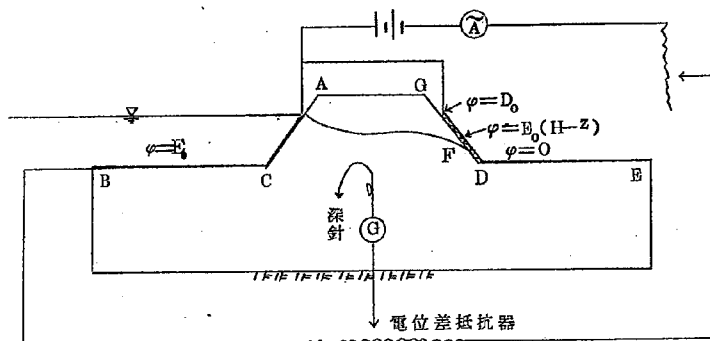


図 - 4

§ 5 浸透流量の測定法

浸潤線の形を決定したのち、上下両電極間に流れる電流 I を測定する。浸透流量を計算で求めるには次のようにする。

電導膜の伝導度を σ_0 ($\frac{1}{cm}$) とすれば Ohm の法則によって、

$$I_0 = \sigma_0 \left(\frac{A}{l} \right) \cdot E \quad (1-18)$$

ここに、 I ; 電 流 (amp)

A ; 断面積 (cm^2)

l ; 流線の長さ (cm)

E ; 電 圧 (Volt)

が得られる。一方 Darcy の法則から

$$Q = k \left(\frac{A}{l} \right) \cdot H \quad (1-19)$$

ここに、 Q ; 浸透流量 (cm^3/sec)

H ; 全 水 頭 (cm)

k ; 透水係数 (cm/sec)

が得られる。両方の式の添字 m 、 p はそれぞれ模型、原型を示す。模型および原型は横断面において幾何学的に相似とし、その縮尺を $1/n$ とすれば (た

だし奥行きを単位とする。))

$$\left(\frac{A}{l}\right)_p = \frac{A_p}{l_p} = \frac{2A_m}{n l_m} = \frac{A_m}{l_m} = \left(-\frac{A}{l}\right)_m \quad (1-20)$$

であるから、(1-18)と(1-19)の両式を辺々割り算を行なえば、

$$\frac{I}{Q} = \frac{g_0}{k} \cdot \frac{\left(\frac{A}{l}\right)_m \cdot E}{\left(\frac{A}{l}\right)_p \cdot H} = \frac{g_0}{k} \cdot \frac{E}{H} \quad (1-21)$$

故に

$$Q = I \cdot \frac{k H}{g_0 E} \quad (1-22)$$

が得られる。右辺はいずれも実験条件あるいは実験の結果から既知であるから、計算によってQを求めることができる。

なお、井戸の単位揚水量当たりの損失水頭は(1-21)式と同様に導くと、

$$\Delta H = \frac{g_0}{k} R \quad (1-23)$$

となる。ただしRは模型の井戸につけた抵抗であり、 ΔH は求めるべき単位揚水量当たりの損失水頭である。

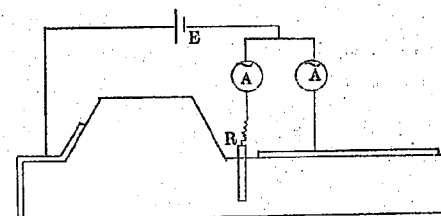


図-5

第2章 堤防および基礎の土質断面決定

§ 1 土質断面の決定

矢作川木戸地先におけるボーリングの結果は図-6、図-7のようである。

これらの断面は複雑すぎるので、図-8のようなものに簡素化して行なった。すなわち、地表面下3mまでは半透水層のA層があり、その下に厚さ9mの透水層のB層があつて、それから下は不透水層になっているという断面である。

以下図-8の断面で考察を行なう。

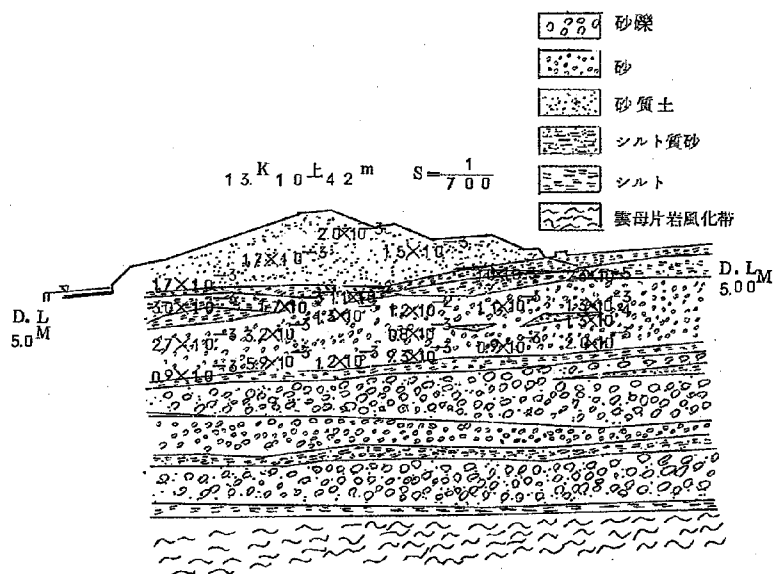


図-6

木戸地先堤防調査横断面図 $S = \frac{1}{500}$

上流断面 13.6 K + 60 m

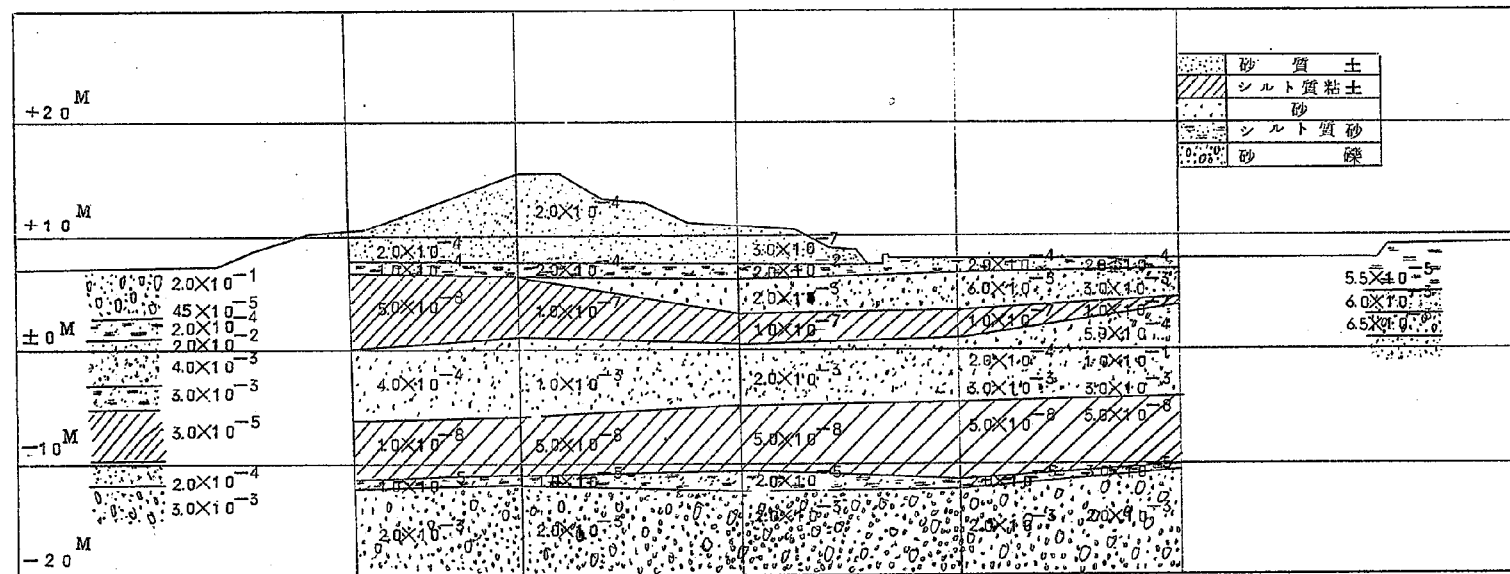


図 - 7

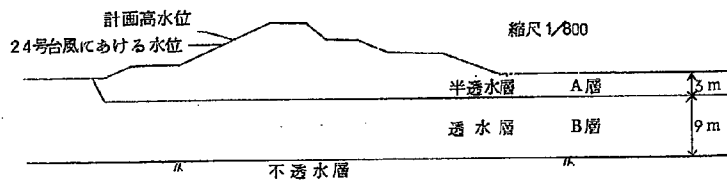


図-8

§ 2 透水係数の決定

それぞれの層の透水係数として揚水試験から求めた値が図-6、図-7に書き込んであるが、ばらつきが大きい。

ところで、40年9月の24号台風による出水において、それぞれの層に打ち込んだ管によって、それらの水圧を測定できたので、A層、B層の透水係数の割合をいろいろ変えた場合について電気模型実験を行ない、実験結果と水圧測定値との比較を行なった。

実験結果は図-9、図-10、図-11のようになった。図に書き込んである浸透流量はB層の透水係数を 10^{-2} cm/sec としたときの値である。

実験結果と水圧測定値との比較は図-12に示す通りである。水圧管のストレーナなどがつまって、真の値より小さい測定値を得ることがあっても、真の値より大きい測定値を得ることはないということを考えると、図-12から $k_A : k_B = 1 : 150$ のときがもっとも實際を代表していると思われる。それ故、 $k_A : k_B = 1 : 150$ として考察を行なう。これは $k_B = 10^{-2} \text{ cm/sec}$ とすれば、 $k_A = 6.67 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ となる。

$k_A = 6.67 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、 $k_B = 10^{-2} \text{ cm/sec}$ のときの計画高水位に対する浸透状況についての実験結果は図-13のようである。

以下の実験は土木研究所で行なったのであるが、これと平行して豊橋工事事務所においても、地盤構造の解析が行なわれた。この調査の結果はA層、B層の厚さは土木研究所の推定の3m、9mとほとんど一致しているが、A層の河側への延長距離が違っている。この延長距離の推定は、水圧測定値をもとにし、それからフローネットを描くことによって、逆算したものである。この調査により、A層が河側に45mまで張り出しているという結果になった。こうなると、水圧線は図-13の点線のようになる。図-7を見ると、河底から4mの深さの所に約2m厚さのシルト層があり、この点からいっても、豊橋工事事務所において求められた地盤構造模型は現実をよく代表していると思われる。

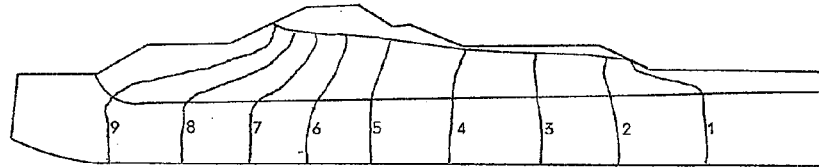
しかし、河側に延びた半透水層のブラケットは地盤漏水を防ぐ役割を果たしており、このようなブラケットがないという仮定は安全側の仮定になり、以下に述べる実験はブラケットがないという仮定のもとに行なったので、その結果は安全側の値を示すことになる。

$k_1 : k_2 = 50 : 1$ 水位 5.5m (24号台風による出水)

浸透流量 $35.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$

$k_1 = 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}$

$k_2 = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$



$k_1 : k_2 = 100 : 1$

水位 5.5m (24号台風による出水)

浸透流量 $14.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$

($k_1 = 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}$)

($k_2 = 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$)

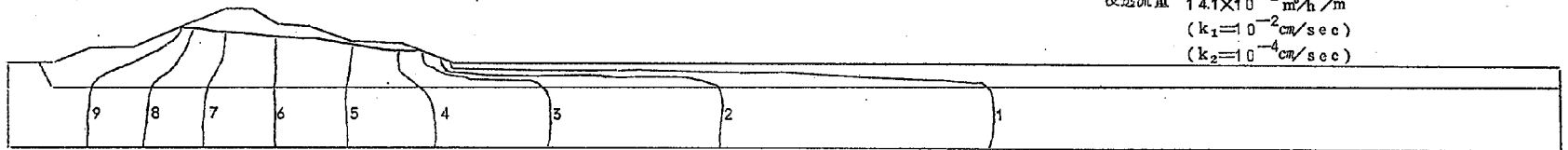


図 - 9

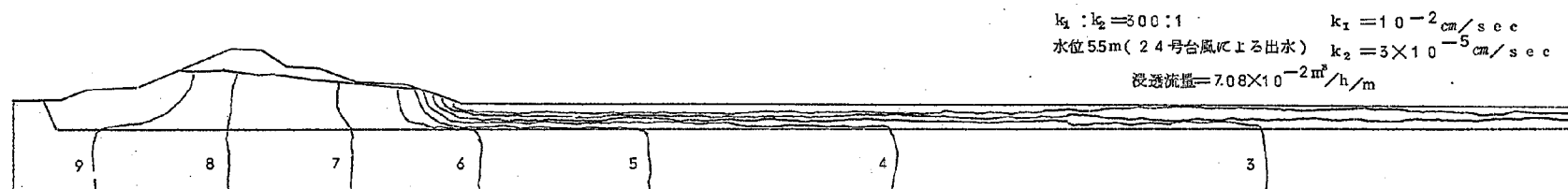
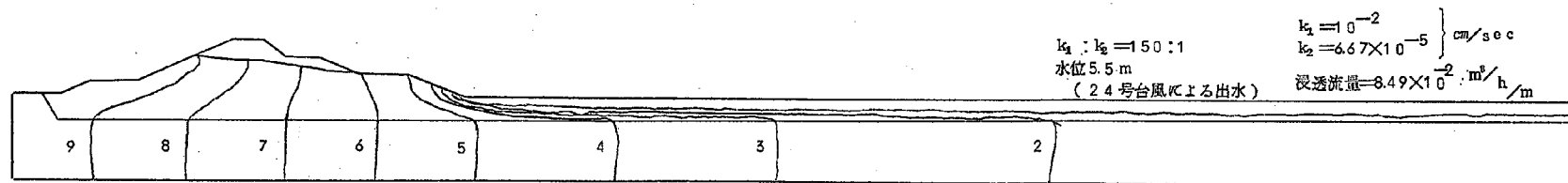


図-10

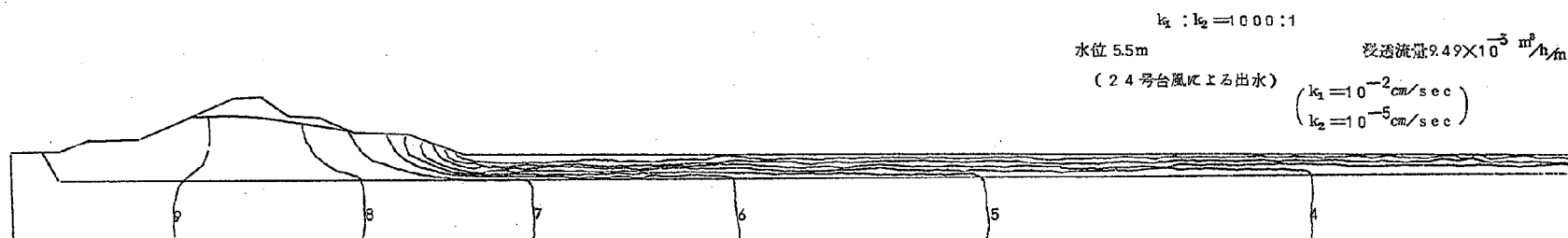


図-11

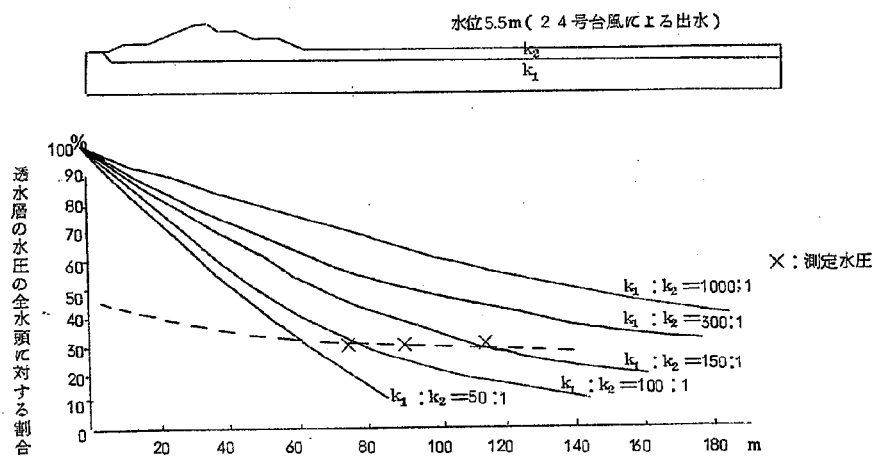


図-12

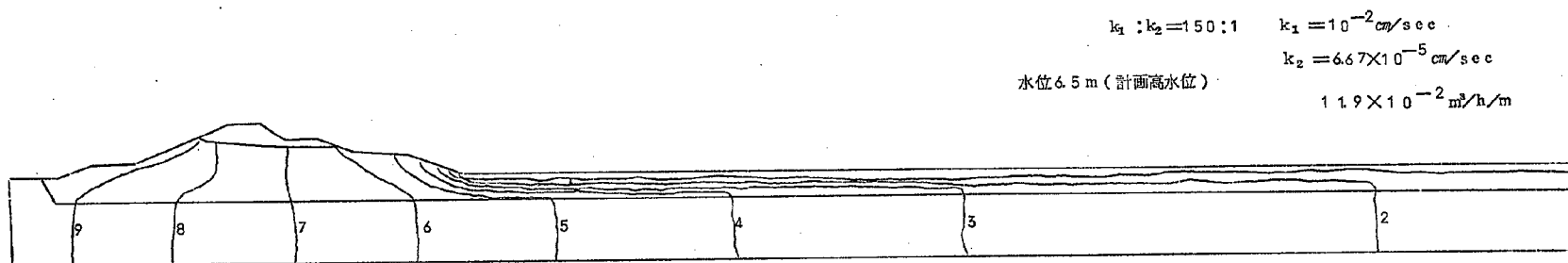


図-13

第3章 リリーフウェルによる漏水対策

§1 効果についての電気模型実験結果

ウェルの深さと損失水頭の量をいろいろ変えた場合に対する実験結果は、図-14、図-15、図-16、図-17、図-18、図-19に示すようになり、これらをそれぞれの貫入量についてまとめたものが図-20、図-21、図-22である。

この実験は現象を平面的にしか見ることができないので、井戸が紙面に直角な方向に無限に続いていると仮定している。だから、この実験結果を見るに当たって、損失水頭としては、井戸自体の損失水頭だけでなく、井戸がある間隔をもって掘られているということも考慮に入れなければならない。

井戸の損失水頭に関する資料はあまりないが、ミシシッピ川におけるリリーフウェルの設計においては8インチ径の木枠井戸に対して図-28のようなデータを使用している。

なを、MiddlebrookとJervisは立体的電気模型実験からリリーフウェル貫入量、損失水頭に関して次のような結論を出している。

イ. スクリーンの長さは、他の要素よりもウェルの効果に影響する。

ロ. スクリーンの貫入量が透水層の25%以下に短くなると、浸透量は急激に減じ、ウェル間の中央の水頭は上昇する。すなわち、ウェルの効果は減少する。

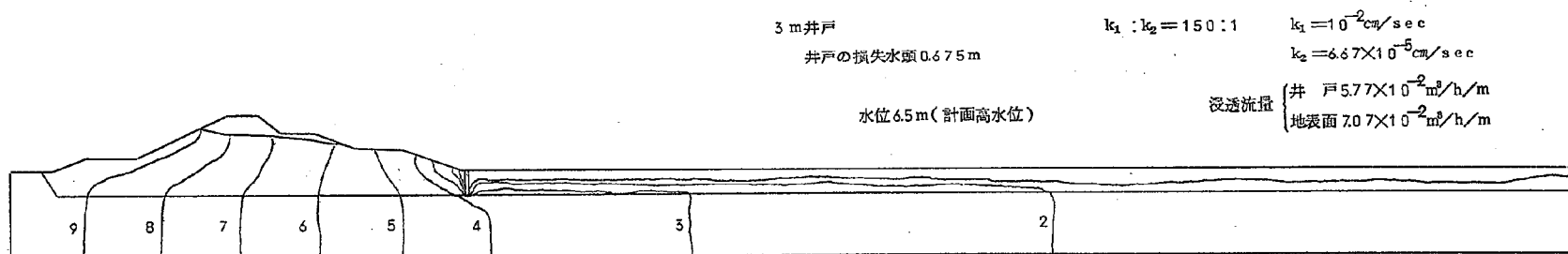
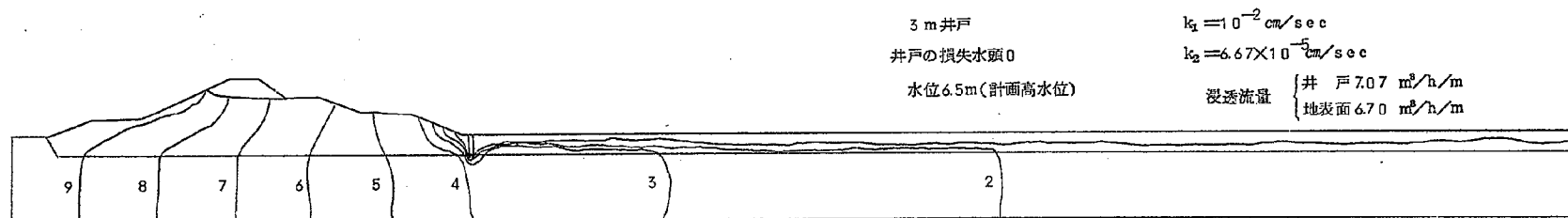


図-14

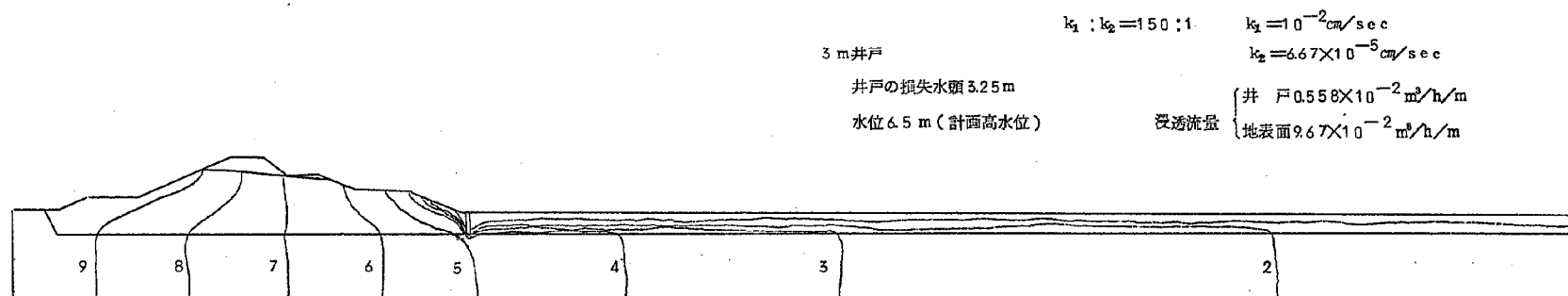
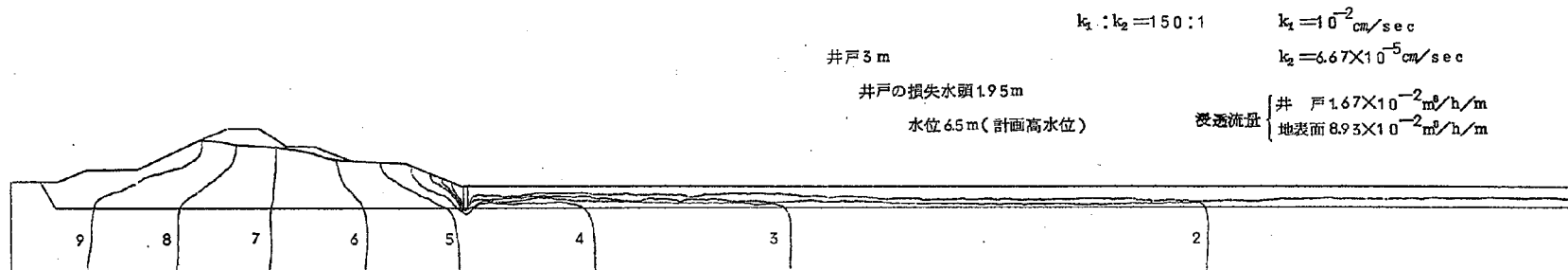


図 - 1 5

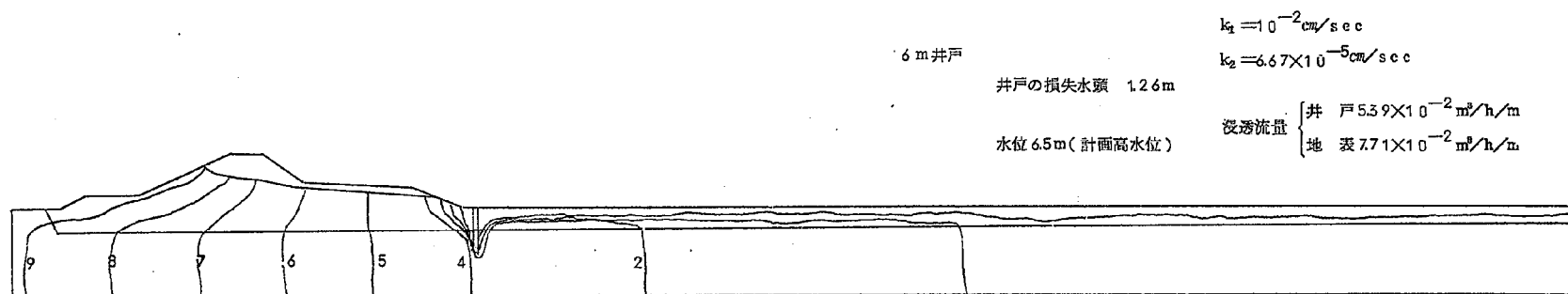
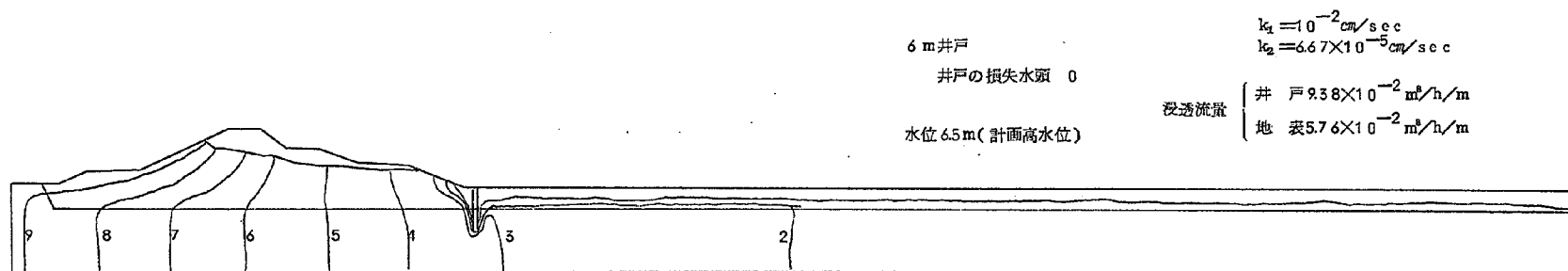


図-16

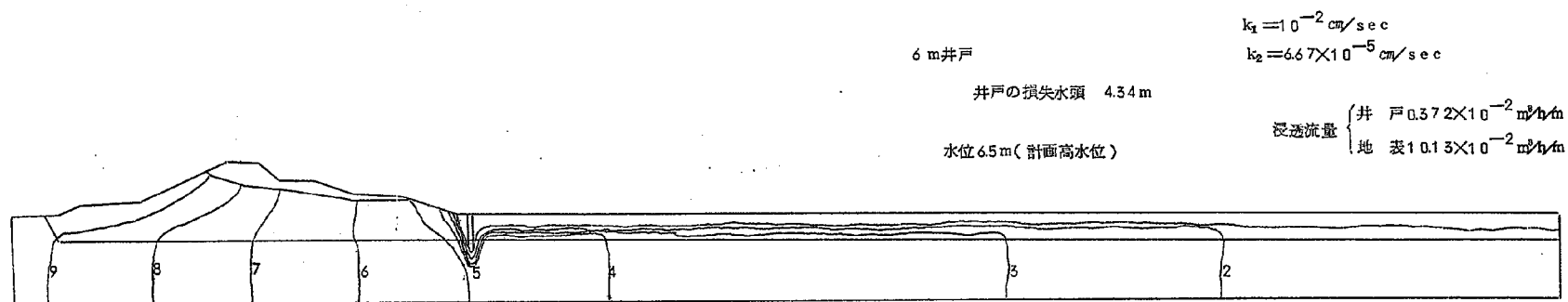
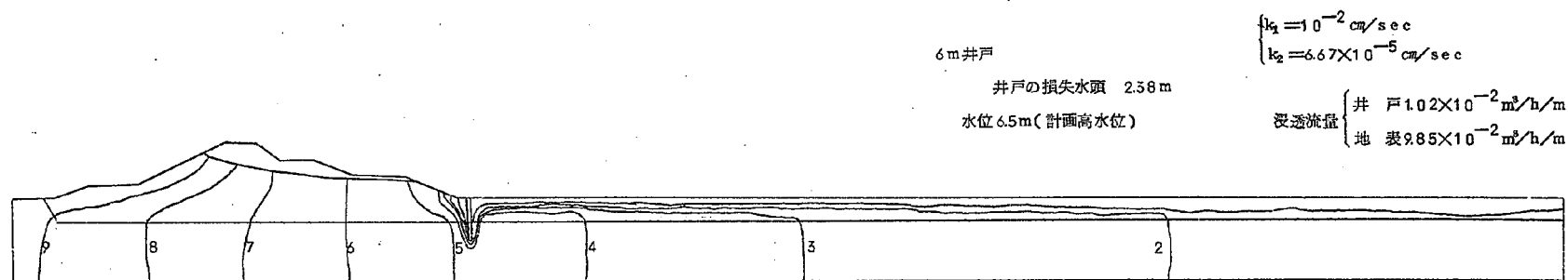
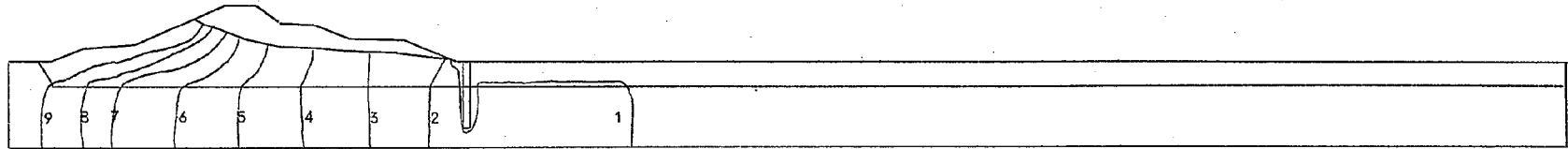


図 - 1 7

水位 6.5 m (計画高水位)

9 m 井戸 井戸の損失水頭 0 浸透流量 $\begin{cases} \text{井戸} & 18.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} \\ \text{地表} & 3.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} \end{cases}$



$k_1 = 10^{-2} \text{ cm/sec}$

$k_2 = 6.67 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$

水位 6.5 m (計画高水位)

9 m 井戸 井戸の損失水頭 1.58 m 浸透流量 $\begin{cases} \text{井戸} & 8.11 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} \\ \text{地表} & 7.49 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} \end{cases}$

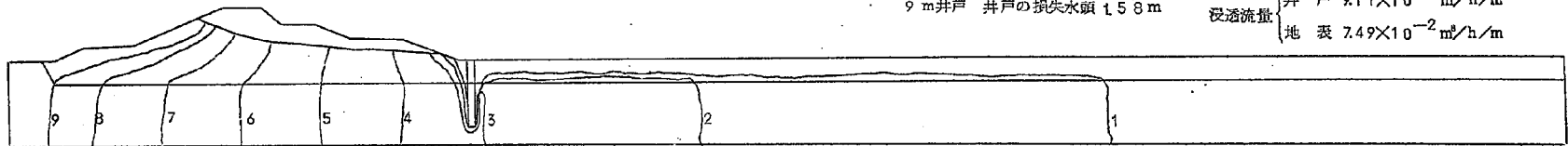


図-18

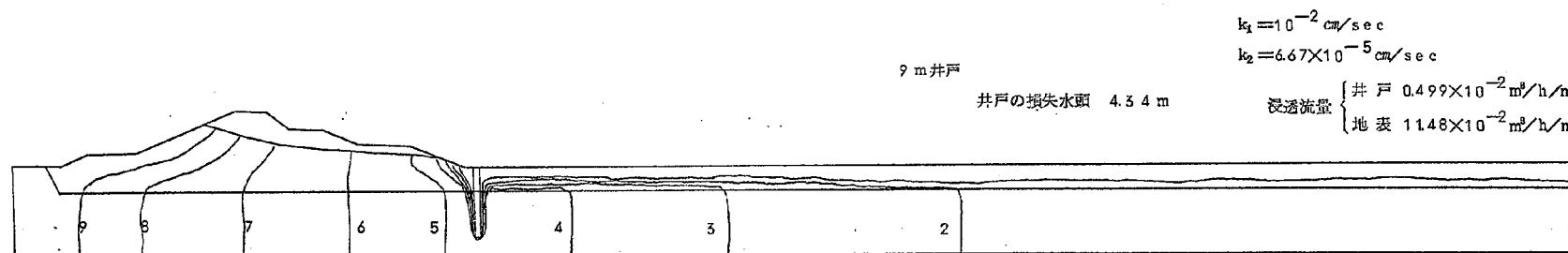
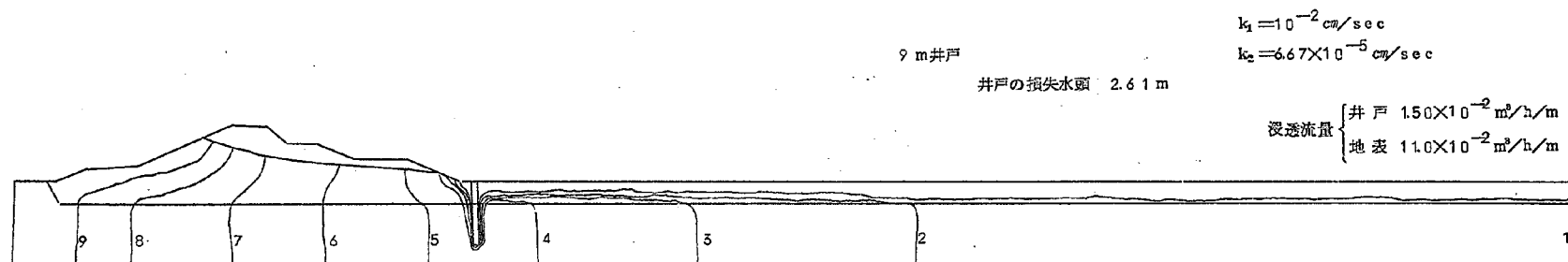
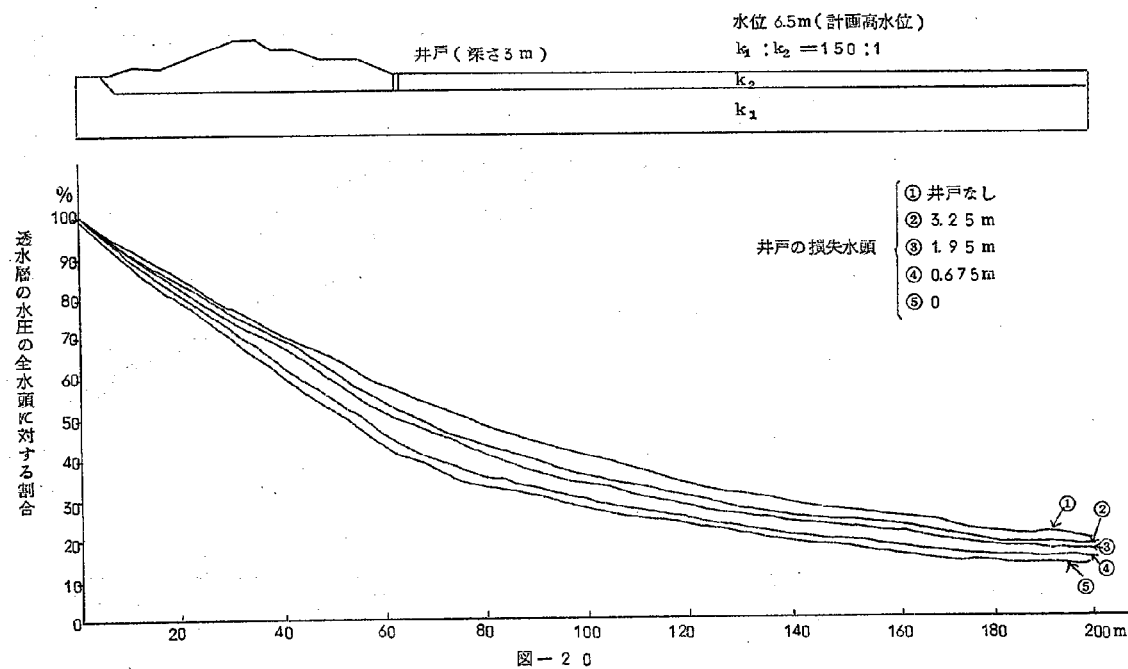


図 - 19



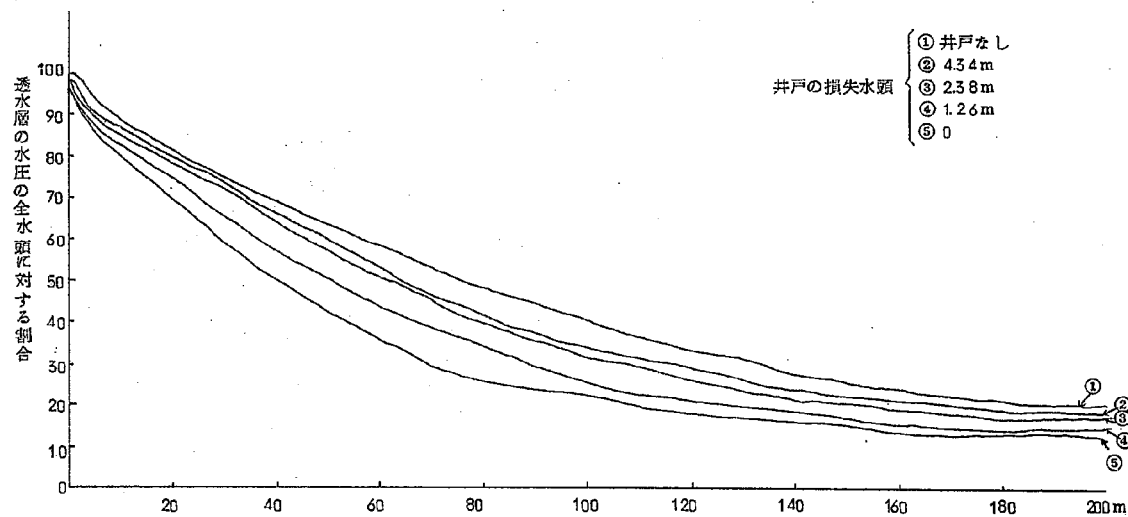
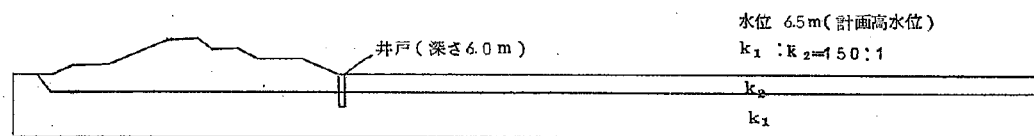


図 - 2 1

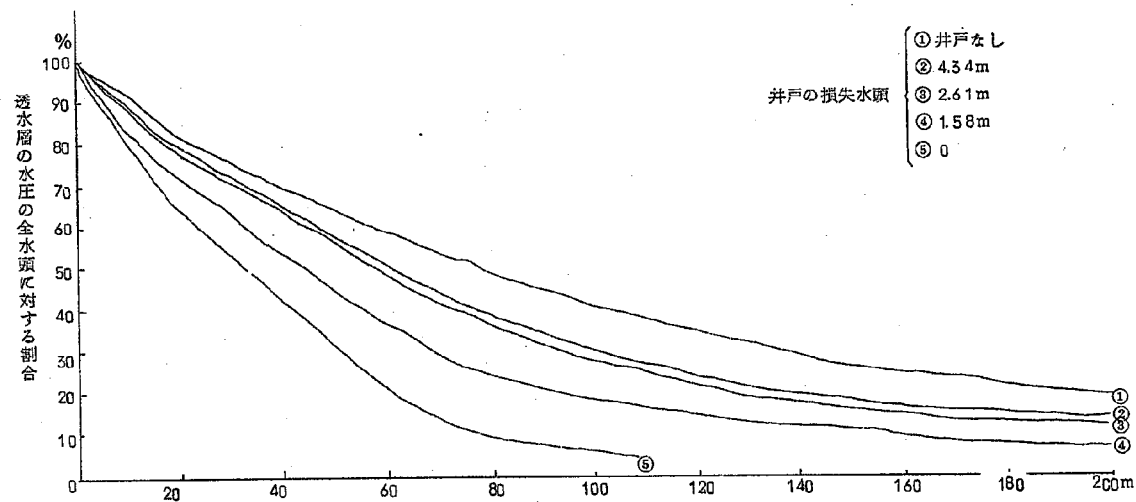
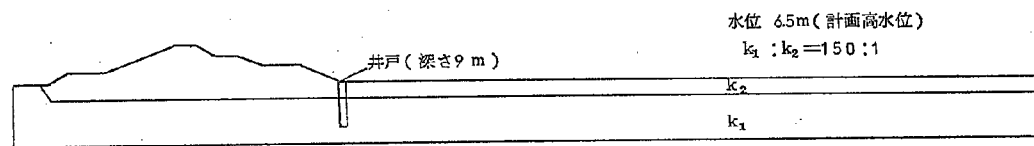


図-22

§ 2 リリーフウェルの設計

リリーフウェルの河川からの距離，貫入量が決まったら，その間隔，径などを決めるわけであるが，それらについてどのような場合にでも設計できるという万全の方法はない。しかし，それぞれの特殊な場合について，2，3の方法があるので，それらを述べる。

① Muskat の方法

完全な不透水層の下に透水層に100%貫入されたリリーフウェルの列に対し，Muskatは理論的に次式を導いた。

(Muskat: Flow of homogeneous fluids through porous media)

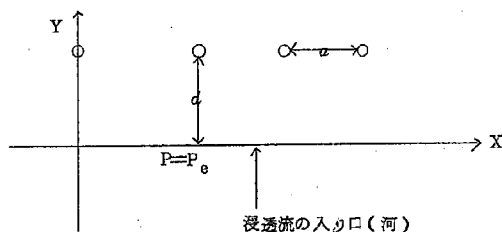


図-23

図-23のように，有限個の井戸の場合の圧力分布は

$$P(x, y) = -\frac{1}{4\pi k} \sum_{m=0}^{n-1} \theta_m \log \left[\frac{(x-ma)^2 + (y-d)^2}{(x-ma)^2 + (y+d)^2} \right] + P_e \quad (2-1)$$

ただし， n は井戸の数， a は井戸の間隔， d は河と井戸との距離， P_e は浸透流の入口の水圧， k は透水係数， θ_m はそれぞれの井戸の揚水流量である。

揚水量 Q_m は浸透流の入り口，つまり河の水圧と井戸の水圧との差を ΔP ，井戸の半径を r_w とすれば，

$n = 1$ ならば

$$Q_0 = \frac{2\pi k \Delta P}{\log 2d/r_w} \quad (2-2)$$

$n = 2$ ならば

$$Q_0 = Q_1 = \frac{2\pi k \Delta P}{\left\{ \log \frac{2d}{r_w} + \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{4d^2}{a^2} \right) \right\}} \quad (2-3)$$

$n = 3$ ならば

$$\left. \begin{aligned} Q_0 = Q_2 &= \frac{4\pi k \Delta P \log \left[\beta^2 / \left(1 + \frac{4d^2}{a^2} \right) \right]}{\left\{ (\log \beta^2) \left[\log \beta^2 \left(1 + \frac{d^2}{a^2} \right) \right] - 2 \left[\log \left(1 + \frac{4d^2}{a^2} \right) \right]^2 \right\}} \\ \frac{Q_1}{Q_0} &= 1 - \frac{\log \left[\left(1 + \frac{4d^2}{a^2} \right) / \left(1 + \frac{d^2}{a^2} \right) \right]}{\log \left[\beta^2 / \left(1 + \frac{4d^2}{a^2} \right) \right]} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

ただし

$$\beta = \frac{2d}{r_w}$$

となる。

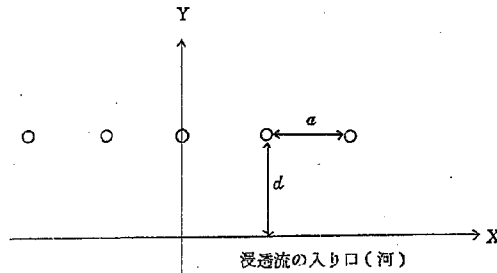


図-24

図-24のように井戸が無限度の場合の圧力分布は

$$\begin{aligned}
 P(x, y) &= P_e \\
 &+ \frac{Q}{4\pi k} \log \frac{\cosh 2\pi(y-d)/a - \cos 2\pi x/a}{\cosh 2\pi(y+d)/a - \cos 2\pi x/a} \quad (2-5)
 \end{aligned}$$

であり、一つの井戸についての揚水量 Q は

$$Q = \frac{2\pi k \Delta P}{\log(a^2 / 2\pi r_w)} \quad (2-6)$$

である。

② Middlebrooks と Jervis の方法

Middlebrooks と Jervis は立体的電気模型実験により、完全な不透水層の下に透水層に貫入された無限個のリリーフウェルの列に対する解を導いた。(T. A. Middlebrooks and William H. Jervis Relief wells for dams and levees, A. S. C. E. Transact-

ions V.112, 1947)。

解は図-25にまとめられている。ただし、 a は井戸の間隔、 s は井戸と浸透流の入り口(河)との距離、 d は透水層の厚さ、 r_e は井戸の半径、 h は河と井戸との水位差、 P は井戸と井戸との中間における圧力水頭である。

この図から井戸の揚水量 Q と井戸と井戸との中間における水圧は次のようにして計算する。

まず、図-25(a)により、 a/r_e からextra lengthを求め、

$$Q = \frac{k h a d}{s + (\text{extra length})} \quad (2-7)$$

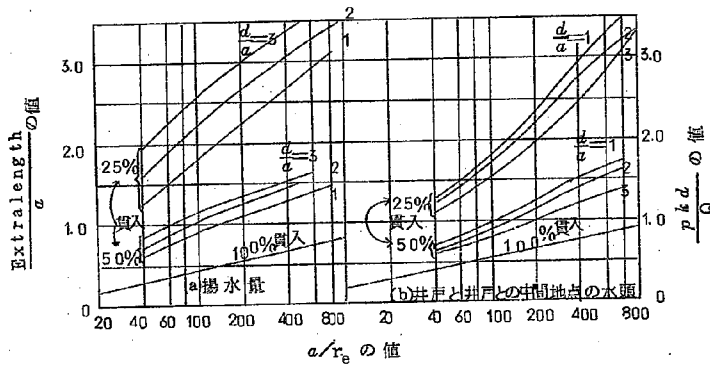


図-25

より、揚水量 Q を求める。次に、この求めた Q と図-25(b)から圧力水頭 P を求める。

③ ミシシッピー河の方法

ミシシッピー河のリリーフウェル設計においては、電気模型実験なら

びに永年の経験から次のような方法を採用している (W. J. Turnbull & C. I. Mansur: Design of underseepage control measures for dams and levees, J. of Soil Mech. and Found. Div. P. of A. S. C. E. 1952 October)。

この方法は井戸の損失水頭や、井戸が有限個であることも考慮に入れた方法で、非常に現実的であるが、ただ井戸が8インチ径の木枠のものであると考えているので、他の井戸に対しては若干補正すべきである。

この方法は図-26, 図-27, 図-28, 図-29を使い、次のようにして行なう。

- イ. $h_a = i_e Z_e$ から h_a を計算する。
- ロ. $H_{av} = h_a$ と仮定し、式(6)から ΔM を計算する。
- ハ. 井戸間隔 a を仮定し、式(7)から Q_w を計算する。
- ニ. 図-28により、上の Q_w と W/D に対し H_w を計算する。
- ホ. 式(3)から h_{av} を計算する。
- ヘ. 式(8)に上の h_{av} の値と ΔM を代入し、 a のいろいろな値に対して θ_{av} を求める。
- ト. ヘ. において用いた a の値とそれに対応する a/r_w と D/a の値に対し、図-27から θ_{av} を求める。
- チ. 井戸間隔に対する第一近似値はヘにおいて求めた θ_{av} とトにおいて求めた θ_{av} が等しくなるような a である。
- リ. 井戸間隔の第一近似値とそれに対応する a/r_w , D/a に対して図-27から θ_m を求める。
- ヌ. もし、 $\theta_{av} > \theta_m$ ならば、ヘにおいて仮定した最初の井戸間隔の代りに井戸間隔の第一近似値を用いてヘからリまでの手順を繰り返して、井戸間隔の第二近似値を決める。
- ル. $H_m = h_a$ と仮定し、ロで得られた ΔM と、チで得られた井戸間隔の第一近似値を用いて式(7)から Q_w を計算する。

ヲ．ルで得られた Q_w と W/d から図-28により H_w を計算する。

ワ．ヲで得られた H_w を使って式(5)から h_m を計算する。

カ．ワで得られた h_m と、チで得られた θ_{av} 、リで得られた θ_m を使って式(4)から h_{av} を計算する。

コ．上の h_{av} と H_w の値から式(9)より H_{av} を計算する。

ク．コで得られた H_{av} を用いて式(6)から ΔM を計算する。

ケ．式(9)に上の h_m と ΔM を代入し、いろいろな a の値に対する θ_m を求める。

コ．ケにおいて用いられた a の値とそれに対応する a/r_w 、 D/a の値に対し、図-27から θ_m を求める。

ツ．ケから得られた θ_m とコから得られた θ_m が等しくなるような a の値が井戸間隔の第二近似値である。

ネ．井戸間隔の第二近似値とそれに対応する a/r_w と D/a を用いて、図-27から θ_{av} を求める。

ナ．ルにおいては仮定されたもとの井戸間隔の代りに第二近似値を用いカにおいては、チで得られた θ_{av} と、リで得られた θ_m の代りに、ツで得られた θ_m とネで得られた θ_{av} の値を用いて、ルからネの手順を繰り返すことにより井戸間隔の第三近似値を決定する。二つの続けさまの手順においてあまり違わない a の値が得られるまで、この手順を繰り返すべきである。普通、設計を目的とする場合、第三近似値で充分正確である。

このようにして得られた井戸間隔は無限個の井戸に対してであるが有限個の井戸に対しては図-29によって補正を行なう。

- h : 有効全水頭
- H : 全水頭
- h_a : 不透水層下の許容圧力水頭
- H_w : 井戸の全損失水頭
- H_m : 井戸と井戸との中間の不透水層下の圧力水頭
- H_{av} : 井戸の面における水頭
- h_{av} : 井戸の面における平均水頭から H_w を引いたもの
- h_m : 井戸と井戸との中間の不透水層下の圧力水頭から H_w を引いたもの
- θ_{av} : 平均湯圧力係数
- θ_m : 中間点の湯圧力係数
- ΔM : 井戸の線に向った浸透勾配
- a : 井戸間隔
- r_w : 井戸の有効半径
- W : 井戸スクリンの有効長
- D : 透水層の有効厚さ
- Q_w : 井戸 1 本の揚水量

$$h = H - H_w \left(\frac{S + x_2}{x_2} \right) \quad (1)$$

$$h_{av} = \frac{h \vartheta_{av}}{\frac{s}{a} + \left(\frac{s + x^3}{x^3} \right) \vartheta_{av}} \quad (2)$$

$$H\alpha_v = H_w + h \cdot \alpha_v \quad (3)$$

$$h_m = h_{av} \frac{v_m}{\theta \dot{a} v} = \frac{h v_m}{\frac{s}{a} + (\frac{s+x_3}{x_3}) v_{av}} \quad (4)$$

$$H_m = H_W + h_m \quad (5)$$

$$\Delta M = \frac{H-H_{av}}{S} - \frac{H_{av}}{x_3} \quad (6)$$

$$Q_w = \frac{h k_f D}{\frac{s}{a} + \left(\frac{s+x_3}{x_3}\right) \theta_{av}} = a \Delta M k_f D \quad (7)$$

$$h_{\alpha\beta} = a \Delta M^{\theta}{}_{\alpha\beta} \quad (8)$$

$$h_m = \alpha \Delta M \theta_m \quad (9)$$

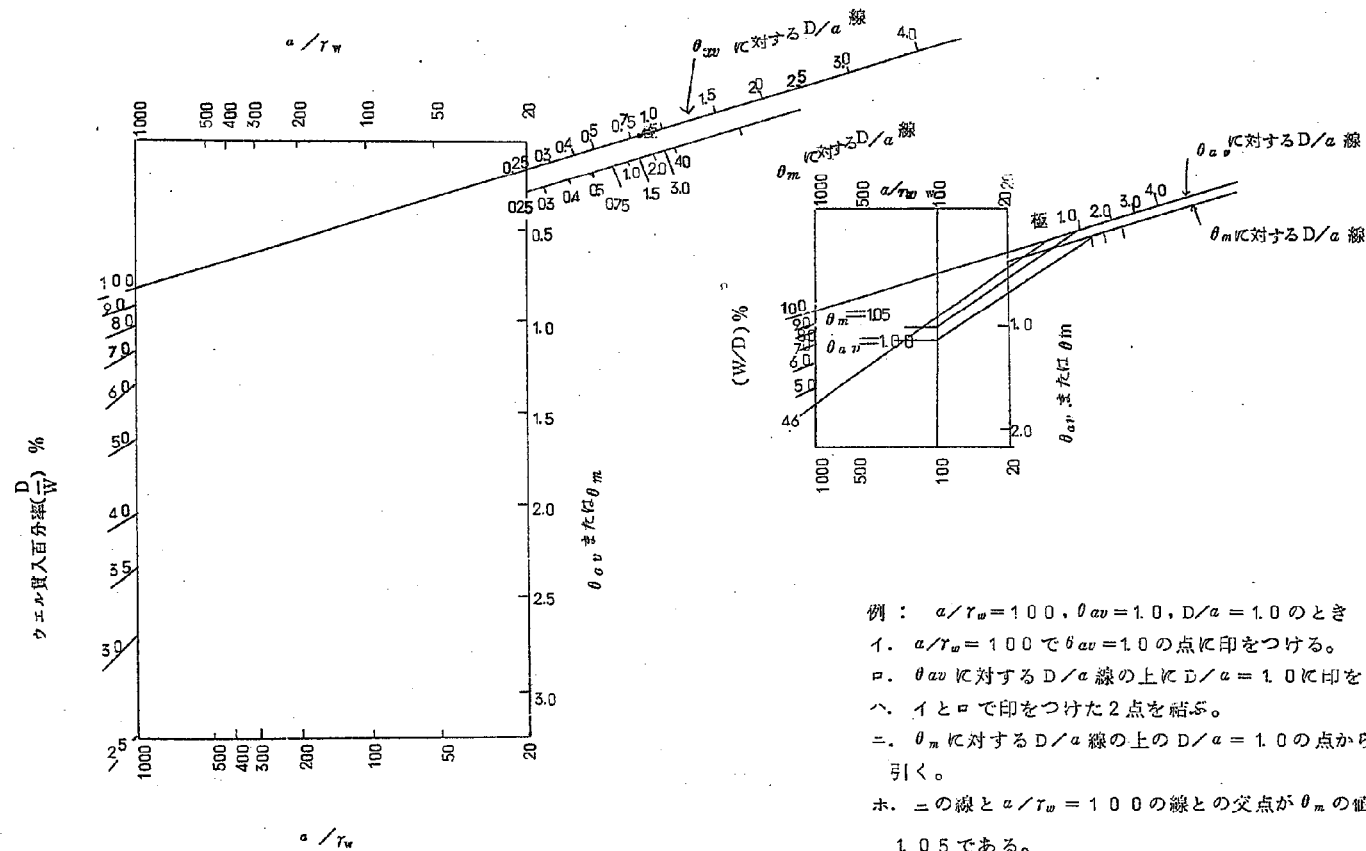


図 27

例: $a/r_w = 100$, $\theta_{av} = 1.0$, $D/a = 1.0$ のとき

- イ. $a/r_w = 100$ で $\theta_{av} = 1.0$ の点に印をつける。
- ロ. θ_{av} に対する D/a 線の上に $D/a = 1.0$ に印をつける。
- ハ. イとロで印をつけた2点を結ぶ。
- ニ. θ_m に対する D/a 線の上の $D/a = 1.0$ の点からハの線に平行に線を引く。
- ホ. ニの線と $a/r_w = 100$ の線との交点が θ_m の値であり、それは $\theta_m = 1.05$ である。
- ヘ. 極からハの線に平行に線を引く。
- ト. ヘの線が $a/r_w = 1.000$ と交わる点がウェル貫入百分率であり、この場合は 4.6% である。

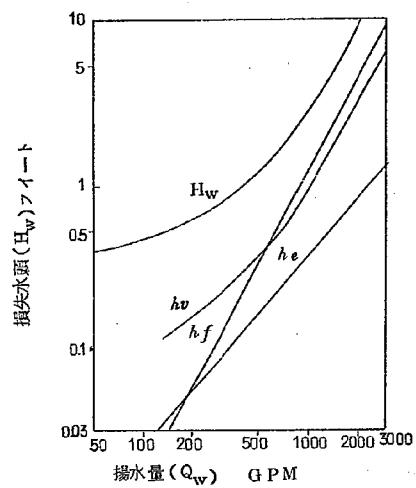


図 - 28

仮定： ライザー長さ30フィート
スクリーン長さ60フィート

記号

$$H_w = h_0 + h_f + h_v + 0.33 \text{ ft}$$

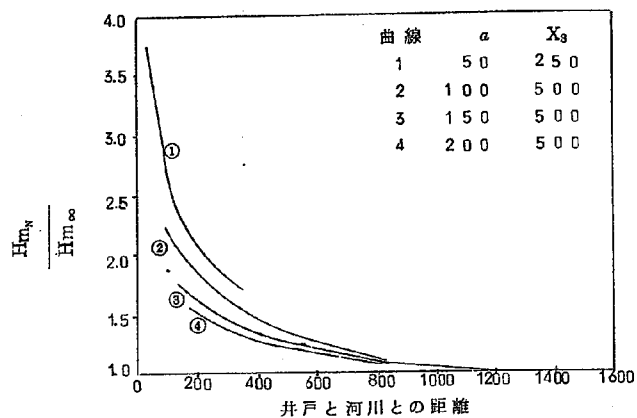
H_w : 全損失水頭

h_0 : フィルターとスクリーンにおける損失水頭

h_f : ライザーとスクリーンにそう摩擦損失

h_v : 速度損失水頭

図 - 28



仮定：

図-29

- (1) 透水層における井戸の貫入率100%
- (2) 上層の半透水層は堤内に無限にのびている。
- (3) 井戸有効半径 1.0 フィート

記号

$H_{m\infty}$: 井戸が無限個のときの井戸と井戸との中間の水頭

H_{mN} : 井戸が有限個のときの井戸と井戸との中間の水頭

a : 井戸間隔

X_3 : 透水層の水圧が0になる点と井戸との距離

§ 3 フィルター材の選択

フィルター材の選択は井戸の損失水頭をできるだけ小さくするというのと、井戸近辺堤体の侵食を防ぐということの2点から非常に重要なことである。

以下に、2、3の文献からフィルター材の選択の基準についての考察を抜き取り、それを述べる。

① Terzaghi と Peck の方法

Terzaghi と Peck は経験からフィルター材の基準として次のようなことを述べている (Terzaghi & Peck; 小野, 星埜, 加藤, 三木共訳; テルツァギ・ベック土質学基礎編)。

経験によると、ある材料の15%の粒径 D_{15} が、フィルターに接触している土の最も粗い層の D_{15} の少なくとも4倍以上の大きさであり、また隣接する土の最も細かい層の85%の粒径 D_{85} の4倍より大きくないときには、フィルターとしての本質的な必要条件を満たす材料である。

② ミシシッピー河の方法

前節③の文献には、ミシシッピー河のリリーフウェルの設計におけるフィルター材の基準として次式を述べている。

井戸のスクリーンからフィルター材が流れ出ないためには

$$\frac{(\text{Min})D_{85}\text{Filter}}{\text{Slot width}} \geq 1.2 \quad \text{または} \quad \frac{(\text{Min})D_{85}\text{Filter}}{\text{Hole diam}} \geq 1.0 \quad (2-8)$$

また、堤体土がフィルター内に入り込まないため、フィルターの損失水頭をできるだけ小さくするために

$$\frac{(\text{Max})D_{15}\text{Filter}}{(\text{Min})D_{85}\text{Sand}} \leq 5.0 \quad \text{かつ} \quad \frac{(\text{Min})D_{15}\text{Filter}}{(\text{Max})D_{15}\text{Sand}} \geq 4 \quad (2-9)$$

の条件を満たすべきである。

第4節 井戸の設計計算

§1 貫入量の決定

井戸より堤内側でクイックサンド現象が生じないような最小の深さの貫入量を求める。

クイックサンド現象が起らないようにするためには、半透水層の直下の水圧 h が

$$h < \frac{G-1}{1+e} d$$

であればよい。

ボーリング資料によると、A層の土はだいたい土粒子比重 $G=2.56$ 、間隙比 $e=1.07$ であるから、上式にこれらの値と $d=3\text{ m}$ を代入すると $h < 2.26\text{ m}$ となり、これは計画高水位 6.5 m の 34% に当る。

図-20, 21, 22を見ると、井戸より右側において貫入量 3 m では 34% より大きい、貫入量 6 m では小さくなっている。すなわち 6 m の貫入量で充分であるということである。

ところで図-21を見ると、 6 m 井戸でも、井戸の損失水頭が 1.26 m ぐらいに大きくなると、水圧が 34% より大きくなっている。図-16により、井戸の揚水量は $9.38 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ であり、 20 m 間隔に井戸を設けたとして、一本当たり、 $9.38 \times 10^{-2} \times 20 \text{ m}^3/\text{h} \approx 9 \text{ ガロン}/\text{min}$ となる。図-28を見ると、このときの損失水頭は $0.3 \text{ フィート} \approx 0.1\text{ m}$ であり、井戸の頂部を地表面から 50 cm 高くしたとしても、全損失水頭は 0.6 m となってほとんど問題にならない。

以上より、井戸貫入量は地表面から 6 m という結論が出てくる。

§ 2 井戸間隔の決定

井戸間隔は、前章 2 節③のミシシッピー河の方法により計算を行なった。

計算仮定として井戸貫入量 6 m (有効貫入量 3 m) とし、井戸半径が 0.2 m、0.1 m の 2 つの場合について計算した。計算の過程を以下に示す。

井戸の有効貫入量 3 m の場合の井戸間隔の計算 (井戸半径 0.2 m)

$$\Delta M = \frac{H - H_{av}}{s} - \frac{H_{av}}{x_3} = \frac{6.50 - 2.26}{66} - \frac{2.26}{176} = 0.051$$

井戸の間隔 a を 20 m と仮定する。

$$Q_w = a \Delta M \cdot k f \cdot D = 20 \times 0.051 \times 5 \times 10^{-4} \times 9 = 4.59 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec} \\ = 7.25 \text{ G/Min}$$

図-28 より H_w を求める。

$$H_w = 0.31 \text{ feet} = 0.093 \text{ m}$$

$$H_{av} = H_w + h_{av}$$

$$\therefore h_{av} = H_{av} - H_w = 2.26 - 0.093 = 2.17 \text{ m}$$

$$h_{av} = a \cdot \Delta M \cdot \theta_{av}$$

右辺の a のいろいろな値に対して θ_{av} を求める。

a	θ_{av}	a/r_w	D/a
25	1.700	125	0.360
26	1.637	130	0.350
27	1.576	135	0.330
28	1.520	140	0.320
29	1.468	145	0.310
30	1.418	150	0.300
31	1.384	155	0.290
32	1.329	160	0.280
33	1.290	165	0.273
34	1.251	170	0.265
35	1.215	175	0.257

r_w ; 井戸の半径 = 0.2 m

D ; 透水層の有効厚さ = 9 m

表 - 1

表 - 1 の a の値に対応する a/r_w と D/a の値に対し図 - 27 から θ_{av} を求めると $\theta_{av} = 1.25$

井戸間隔に対する第一近似値は表 - 1 で求めた θ_{av} と図 - 27 において求めた θ_{av} が等しくなるような a である。

この結果 $a_1 = 34$ m となる。

次に井戸間隔の第一近似値と、それに対応する a/r_w 、 D/a に対して図 - 27 から θ_m を求めると、

$$\theta_m = 1.38$$

$\theta_m > \theta_{av}$ であるから

$H_m = h_a$ と仮定する。

$$H_m = h_a = 2.26 \text{ m} \quad \Delta M = 0.051 \quad a = 34 \text{ m}$$

$$k_t = 5 \times 10^{-4}$$

$$Q_w = a \cdot \Delta M \cdot k_t \cdot D = 34 \times 0.05 \times 5 \times 10^{-4} \times 9 = 7.96 \times 10^{-3} \\ = 12.55 \text{ G/Min}$$

図-28

$$H_w = 0.32 \text{ feet} = 0.096 \text{ m}$$

$$H_m = H_w + h_m$$

$$h_m = H_m - H_w = 2.26 - 0.096 = 2.164 \text{ m}$$

$$h_m = h_{av} \frac{\theta_m}{\theta_{av}}$$

$$\therefore h_{av} = \frac{h_m \cdot \theta_{av}}{\theta_m} = \frac{2.164 \times 1.25}{1.38} = 1.964 \text{ m}$$

$$H_{av} = H_w + h_{av} = 0.096 + 1.964 = 2.06 \text{ m}$$

$$\Delta M = \frac{H - H_{av}}{s} - \frac{H_{av}}{x_3} = \frac{6.5 - 2.06}{66} - \frac{2.06}{176} = 0.0556$$

$$h_m = a \cdot \Delta M \cdot \theta_m$$

右辺の a のいろいろな値に対して θ_m を求めると

a	θ_m	a/r_w	D/a
25	1.557	125	0.360
26	1.498	130	0.346
27	1.440	135	0.333
28	1.390	140	0.320
29	1.342	145	0.310
30	1.298	150	0.300
31	1.256	155	0.290
32	1.216	160	0.281
33	1.180	165	0.273
34	1.145	170	0.265
35	1.112	175	0.257

表 - 2

表-2において用いられた a 値とそれに対応する a/r_w 、 D/a の値に対し、図-27から θ_m を求めると、

$$\theta_m = 1.342$$

表-2から得られた θ_m と図-27から求められた θ_m が等しくなるような a の値が井戸間の第三近似である。

$$\text{この結果 } a_2 = 29 \text{ m}$$

井戸間隔の第二近似値とそれに対応する a/r_w と D/a を用いて図-27から θ_{av} を求めると

$$\theta_{av} = 1.23$$

$\theta_m > \theta_{av}$ であるから

以下同様に計算を進めると、

$$H_m = h_a = 2.26 \text{ m} \quad \Delta M = 0.0556 \quad k_t = 5 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

$$a = 29 \text{ m}$$

図-28より

$$H_w = 0.315 \text{ feet} = 0.095 \text{ m}$$

$$H_m = H_w + h_m$$

$$\therefore h_m = H_m - H_w = 2.26 - 0.095 = 2.165 \text{ m}$$

$$h_{av} = h_m \frac{\theta_{av}}{\theta_m} = \frac{2.165 \times 1.23}{1.342} = 1.987 \text{ m}$$

$$H_{av} = H_w + h_{av} = 0.095 + 1.987 = 2.082 \text{ m}$$

$$\Delta M = \frac{H - H_{av}}{s} - \frac{H_{av}}{x_3} = \frac{6.5 - 2.08}{66} - \frac{2.08}{176} = 0.0552$$

$$h_m = a \cdot \Delta M \cdot \theta_m \text{ より}$$

a	θ_m	a/r_w	D/a
25	1.570	125	0.360
26	1.509	130	0.346
27	1.453	135	0.333
28	1.402	140	0.320
29	1.353	145	0.310
30	1.308	150	0.300
31	1.266	155	0.290
32	1.226	160	0.280
33	1.189	165	0.273
34	1.154	170	0.265
35	1.121	175	0.257

表-3より第3近似値を
求めると

$$a_3 = 29 \text{ m}$$

表-3

第二近似値とあまり違わない a の値が得られたので有効貫入量 3 m の場合の井戸間隔の計算値を 29 m とする。

$$\left[\begin{array}{ll} W ; & \text{井戸の有効貫入量} \quad 3 \text{ m} \\ D ; & \text{透水層の有効厚さ} \quad 9 \text{ m} \\ r_w ; & \text{井戸の半径} \quad 0.1 \text{ m} \\ k_t ; & \text{透水係数} \quad 5 \times 10^{-4} \text{ m/sec} \end{array} \right]$$

の場合の井戸間隔の計算結果

$$a = 24 \text{ m}$$

以上から井戸半径 0.2 m のときは 29 m, 井戸半径 0.1 m のときは 24 m という結論が出たが, これらの値は井戸が無限に並んでいる場合で, 有限個の場合には図-29 によって求める。

図-29 において, $a = 29 \text{ m} \approx 90 \text{ フィート}$, $a = 24 \text{ m} \approx 70 \text{ フィート}$ に対しては①の線と②の線の間ぐらいになる。井戸と河川との距離は $66 \text{ m} \approx 200 \text{ フィート}$ であるから $\frac{Hm}{Hm_0} = 2.0$ となる。

すなわち, 井戸と井戸との中間の地点における圧力は井戸が無限個であると計算した場合の 2 倍になる。だから井戸間隔を上に乗めた値の半分にすればよいということになる。

このようにして井戸間隔として, 井戸半径 0.2 m のときは 12 m, 井戸半径 0.1 m のときは 10 m という値を提案する。

§ 3 井戸の構造

井戸構造の一提案として、図-30を示した。これはミシシッピ河のリリーフウェルを手本にして画いたものである。井戸枠はポリエチレン、塩化ビニールのような腐らないものがよく、それに開ける穴並びにフィルターの役割を持つ砂利の粒径は前章3節の(2-8)式、(2-9)式によって決まる。

なお、上部には井戸への逆流を防ぐために井をとりつけ、この井などが壊されないよう、外側にブリキなどで保護枠をつける。

井戸の断面図

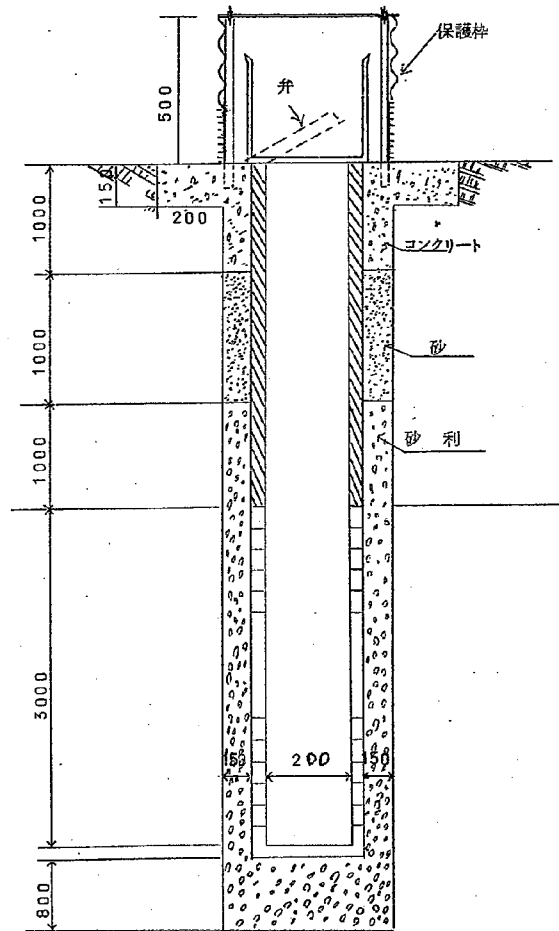


図-30