

実験室における模型堤防の 含水比測定実験

13 3/3



昭和 40 年 3 月

建設省土木研究所土質研究室

目 次

第一章 理論的考察	1
§ 1. この章の目的	1
§ 2. 不飽土中水の一次元的流れ	2
§ 3. 二次元流の方程式	6
§ 4. 電子計算機による解法	9
§ 5. 以上の考察の問題点	45
第二章 昭和 37 年度に行なわれた実験	47
§ 1. この章の目的	47
§ 2. 現状堤体による実験	47
§ 3. 実物大模型による実験	57
第三章 室内模型実験	62
§ 1. 序 説	62
§ 2. 実験装置と方法	62
§ 3. 実験結果とその考察	68
あ と が き	99
参 考 文 献	101

は し が き

昭和 36 年 6 月 27 日前後に、豪雨が中部地方を襲い、木曾川・長良川・揖斐川・牧田川など多くの河川の堤防が各所で崩壊した。

被災地を踏査した結果、この崩壊が河川の水位上昇によるものではなく、雨水が直接堤体に浸み込んだためであると考えられる個所が多かった。そして、この雨水の浸透を防ぐために、天端・小段などに防水覆工を設置することが考えられた。

土木研究所土質研究室は、昭和 39 年度に、木曾川上流工事々務所の委託により、雨水がどのようにして堤防内部に浸み込んでいくか、また、防水覆工の効果はどうであるか、という二つの疑問を解くため、室内実験を行なつて調べ、理論的な考察を行なつた。

これより先、昭和 37 年 8 月から昭和 38 年 3 月にかけて、木曾川上流工事々務所は日本建設コンサルタントに委託し、現実の堤防を使つた場合、また、実物大の模型堤防を使つた場合の二通りについて、上記の目的から実験を行なつた。

この報告書は、前者の室内模型実験ならびに理論的考察を述べ、それに、後者の概要を付随し、それらの結果の比較検討を行なつたものである。

第一章 理論的考察

§1 この章の目的

はしがきでも述べたように、この報告書の目的は、どのようにして雨水が堤防の中へ浸み込んでいくか、また、防水覆工の効果はどのようなものであるか、という二つの疑問を解決するための道を探るためのものである。そして、雨水が堤体に浸み込んでいく過程、ならびに原因を数学的に追求することは、この解決への有力な道であると思われる。

しかし、土構造物において、このような理論で現実の現象を説明する場合、最大のがんになつてゐるのは、土の性質を定量的に表わすいろいろな物理常数が、非常に不安定であるということである。これは、土塊自体が非常に不均質異方性であるということと、それらの常数を精度よく測定するのが非常に困難であるということの二つによる。

例えば、浸透問題において最つとも重要な物理常数である透水係数について考えてみよう。まず前者について考えると、普通、粘土質土、シルト質土、砂質土などの土塊が、不規則に構造物を構成している。そして、それらの透水係数の値は桁で違つている。また、それらの土塊も普通いろいろな傾斜の層をなしており、その層に平行な方向と垂直な方向ではやはり透水係数が桁で違つている。次に後者について考えると、透水係数は同じ土に対しても、間げき率はもちろん、土粒子の配置構造に大きく影響される。したがつて、実験室で透水係数を測定するときは、試料採取のときや試験器へ設置するときの膨脹、収縮かく乱により、土塊内の土の透水係数とは違つたものを測定していることになる。さらに、土を完全に飽和することは非常に難しく、飽和透水係数を求めているつもりで実際は不飽和土の透水係数を測定していることが多い。

以上のように土の物理常数は当てにならないから、それらを基礎とした理論式はまったく価値がないということになるが、そうではないと思う。経験や勘だけでなく、できるだけ科学的な判断に基づくことにより技術の進歩があるのではないだろうか。そのためには、土塊の性質をよく表現し、土塊の不均質を考慮した理論を発展させるとともに、その物理常数の精密な測定法を見い出していくことが大事である。

以上の観点から、この章を読んでいただきたい。なお、この章は主として、
R. E. Collins 著 Flow of Fluids Through Porous Materials¹⁾

を参考にしたことをつけ加えておく。

§ 2 不飽和土中水の一元的流れ

堤体内の水の動きは二次元と考えられるが、その前に一次元的な流れについて、簡単に考えてみよう。

不飽和土をつめた断面積 A の細い管の管軸が水平方向と角 α をなすとき、土が均質と考えれば、その管内の水の動きは Darcy の法則より

$$q = -K \cdot k A \left[\sin \alpha - \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] \quad (11)$$

である。ここで K は飽和土の透水係数、 k は不飽和土の透水係数の飽和土の透水係数に対する割合で、比透水係数といわれるもので、Irmay によれば

$$k = \frac{(S - S_0)^3}{(1 - S_0)^3} \quad (12)$$

で表わされる。 S_0 は connate-water saturation である。 h_c は毛管水頭で、その対数が、普通、 pF と呼ばれるもので、やはり飽和度の関数で表わされる。 S と h_c の関係は、土中へ水が浸み込む場合と、土中から水が排除される場合とに対して少し違つたものであるので、その場合に適つた関係が用いられなければならない。

連続の式は、次のようになる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -nA \frac{\partial S}{\partial t} \quad (13)$$

上式中、 n は間げき率、 t は時間である。

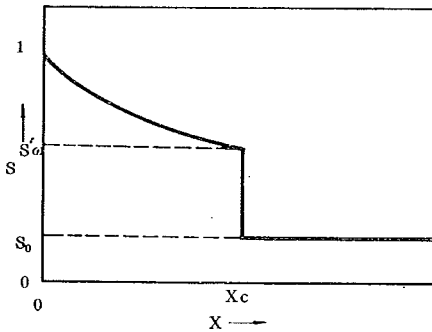
(11) 式、(13) 式を合わせると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \left[\sin \alpha - \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] \right) = \frac{n}{K} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (14)$$

となる。この式が、この場合の基礎方程式である。

(14) 式を解析的に解くのは不可能であるが、初期飽和度 S_0 の土中へ水が浸み込んでいく場合を、Buckley と Levee が 1942 年に近似的に解いた結果によると、土中の飽和度は連続的な分布にならず、図(11)のように、ある点 x_c で S'_w から S_0 へ不連続に連続する。この点 x_c が水の浸入

図 1 — 1



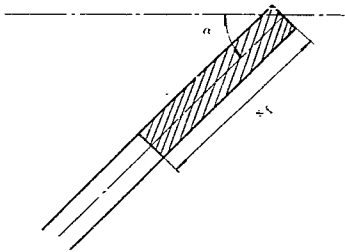
してくる入口から出口の方へ移動していくという分布になった。このことは Sheldon, Zondek, Cardwell も 1952 年に shock formation の観点から証明しており、また一般に、実験からも観測される。

この不連続な点 x_c は浸潤前線と呼ばれるが、簡単のために、 $x \leq x_c$ の部分、すなわち x_c と

浸水口の間の部分は完全に飽和しており、 $x > x_c$ の部分、すなわち x_c と排水口の間の部分は飽和度が初期飽和度であると考えて、不飽和土中の水の動きを解くことができる。このようにして解く方法を moving boundary method と呼ぶ。

前記の問題を moving boundary method で解いてみる。管の上部から水が浸入していくと考えると、図 (1.2) のように、 x_f までは水が飽和してい

図 1 — 2



るから、その飽和している部分での Darcy の式ならびに連続の式は、

$$v = -K \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (i)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (ii)$$

となる。ただし ϕ は流れの Potential である。すなわち、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \quad (iii)$$

である。水の侵入口を基準点とすると、境界条件は、

$$x = 0 : \phi = 0$$

$$x = x_f : \phi = -x_f \sin \alpha - h_c \quad (iv)$$

となり、(iii)を(iv)の下で積分すると、

$$\phi = - \frac{x_f \sin \alpha + h_c}{x_f} x \quad (V)$$

すなわち、

$$v = K \frac{x_f \sin \alpha + h_c}{x_f} \quad (VI)$$

である。一方、浸潤前線における水の保存則を考えると、

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{v}{n} \quad (VII)$$

でなければならない。故に、

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{K}{n} \cdot \frac{x_f \sin \alpha + h_c}{x_f} \quad (15)$$

である。この $\frac{dx_f}{dt}$ が浸潤速度になる。Leverett によれば、毛管水頭 h_c は $\sqrt{\frac{K}{n}}$ に逆比例するそうである。この関係を (15) 式に入れると、

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{K}{n} \sin \alpha + \sqrt{\frac{K}{n}} \cdot \frac{J_0}{x_f} \quad (16)$$

となる。 J_0 はいかなる土に対しても一定な常数である。(16)式をみると、 $\frac{K}{n}$ が小さいほど $\frac{dx_f}{dt}$ が小さいことがわかる。一般に n の値はどのような土に対してもほぼ 0.5 に近い一定の値であるから、このことは、透水係数が小さいほど浸潤速度が小さいということをいつている。つまり、透水係数の小さい土で堤防を作れば水が浸み込み難いということである。

さらに、Cozeney によれば、同一種類の土に対しては、 K は $\frac{n^3}{(1-n)^2}$ に比例するそうである。故に、

$$\frac{K}{n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} K_0 = \left(\frac{1}{n}-1\right)^2 \cdot \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} K_0 \quad (17)$$

となる。 K_0 は間げき率 n_0 のときの透水係数である。そして、

$$n = \frac{G_s r_w - r_d}{G_s r_w} \quad (18)$$

G_s : 土粒子比重

r_w : 水の単位体積重量 1 g/cc

であるので、(16)式、(17)式、(18)式から、乾燥密度 r_d が小なるほど

n が大になり、したがって浸潤速度が大になる。すなわち、堤防を作るときよく締め固めをしておけば水は浸み込み難い。

(15)式を積分すると、

$$\alpha \approx 0: \quad t = \frac{n}{K} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \left\{ x_f + \frac{hc}{\sin \alpha} \ln \left| \frac{hc}{x_f \sin \alpha + hc} \right| \right\} \quad (19)$$

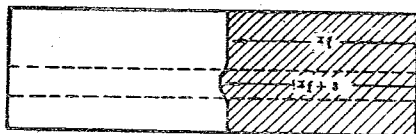
$$\alpha = 0: \quad t = \frac{n}{2Khc} x_f^2$$

となり、浸潤前線の位置 x_f と時間との関係がわかる。すなわち、このような問題も moving boundary method によれば (19) 式のように簡単に解くことができる。

以上今まで述べたことは、全て、土が均質で透水係数 K や間げき率 n が何処でも同じ値であると仮定しての話である。

それでは、一部分不均質な場合はどうであろうか。その最つとも簡単な例として、ある部分が密度が大きく、透水係数がそこだけ大きかつたため、図 (13)

図 1-3



のように、浸潤前線の一部分が ε だけ多く進んだとしよう。その場合の式は (15) 式より

$$\frac{d(x_f + \varepsilon)}{dt} = \frac{K}{n} \cdot \frac{(x_f + \varepsilon) \sin \alpha + hc}{x_f + \varepsilon} \quad (I)$$

となり、 $\varepsilon \ll x_f$ だから

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = - \frac{K}{n} \frac{hc}{x_f^2} \varepsilon \quad (II)$$

積分して、

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{K}{n} \frac{hc}{x_f^2} t} \quad (1.10)$$

となる。これは、ちよつとした土の不均質な部分があつて ε_0 だけ浸潤前線が凸になつても、時間とともにその凸な部分が消えていくことを示す。

このように、土の不均質のため浸潤前線が不安定に凹凸になる現象を viscous fingering という。(1.10) 式は、非常にわずかの部分だけ不均

質で、その部分を浸潤前線が通り過ぎてしまえばあとは均質と仮定して解いたが、実際の土の断面は非常に不均質であり、そのような場合に対しては、この viscous fingering の現象も非常に大規模に生じてくる。

§ 3 二次元流の方程式

一次元流の場合は、浸潤前線が流れに垂直な平面であるので、簡単に解くことができた。しかし、二次元流の場合は、それは曲線になり、しかも、その曲線の形が時々刻々変化していくので、moving boundary method で解くことは不可能である。だから、二次元流の場合は (1.4) 式を拡張した基礎方程式を地道に解いていくより方法がない。

土が等方性で均質であると考え、不飽和流の基礎方程式は (1.4) 式と同様に次ようになる。

$$\nabla \{ k(j - \nabla h_c) \} = \frac{n}{K} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1.11)$$

(1.11) 式は、水平方向に x 軸、鉛直方向に y 軸を採つたものであり、 x 軸方向の単位 vector を i 、 y 軸方向の単位 vector を j としたものである。なお ∇ は Hamilton の記号で、

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} \quad (1.12)$$

である。

(1.11) 式を開くと、

$$\begin{aligned} \frac{dk}{dS} \frac{\partial S}{\partial y} - \frac{d}{dS} \left(k \frac{dh_c}{dS} \right) \left\{ \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ - k \frac{dh_c}{dS} \left\{ \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right\} = \frac{n}{K} \frac{\partial S}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.13)$$

となる。上式中出てくる $k \frac{dh_c}{dS}$ は拡散係数と呼ばれるもので、普通記号 D を使い、Gardner によれば、

$$k \frac{dh_c}{dS} \equiv D = D_0 e^{\beta(S-S_0)} \quad (1.14)$$

なる函数で表わされる。ここで β は土によつて決まる常数で、 $S = S_0$ のとき D が D_0 であるとする。

地盤を形成している土は、一般に層をなしており、鉛直方向の透水係数に比べて水平方向の透水係数の値が数十倍、数百倍も大きいことが多い。このような場合の基礎方程式は (1.11) 式と同様にして、

$$\begin{aligned} K_1 i \frac{\partial}{\partial x} \{k(i \sin \alpha - \nabla h_c)\} + K_2 j \frac{\partial}{\partial y} \{k(j \cos \alpha - \nabla h_c)\} \\ = n \frac{\partial S}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.15)$$

となる。上式中、 α は地層と水平方向とのなす角で、 K_1 は地層と平行な方向の透水係数、 K_2 は地層と垂直な方向の透水係数である。(1.15) 式で注意すべきことは、このような K_1, K_2 は常に最大と最小の値を与える方向の透水係数、すなわち、主軸方向の透水係数を用いなければならないということである。

堤防などの土は、地盤などのような極端な異方性ではないが、どうしても不均質であり、前節で述べたような viscous fingering の現象が起こってくる。このような不均質を考慮した式は、やはり (1.15) 式と同様にして、次のようになる。

$$\nabla \{k \cdot \kappa (j - \nabla h_c)\} = \frac{n \cdot \nu}{K} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1.16)$$

上式中、 κ, ν は、それぞれ透水係数、間げき率の場所による変動値の、基準値 K, n に対する割合で、堤防断面内の透水係数分布、間げき率分布が観測されれば、 x, y の既知関数として表わされる。そして、 K が $\frac{n^3}{(1-n)^2}$ に比例することと、(1.8) 式とから、乾燥密度 r_d の分布がわかりさえすれば、 κ, ν の x, y に対する値は既知のものになる。

最後に、模型実験を行なう場合の相似律について考えてみよう。

h_c と S との関係は土によつて違い、実験によつて求められるものであるが、Leverett は 1941 年に

$$J = \frac{hc}{\tau} \sqrt{\frac{\mu r_w K}{n}} \quad (1.17)$$

という無次元数があり、いかなる土に対しても、飽和度 S の同一の函数になることを見つけた。ただし、 τ は表面張力、 μ は粘性係数、 r_w は水の単位体積重量である。この J を Leverett の J 関数と呼ぶ。

模型堤防の縮尺が水平方向も鉛直方向も同じで、実物をそのまま縮めたもの

であると仮定する。各変数を無次元化するために、

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{x}{L} \\ \bar{y} &= \frac{y}{L} \\ \bar{h}_c &= \frac{h_c}{\tau} \sqrt{\frac{\mu \tau_w K}{n}} \\ \bar{t} &= \frac{q t}{n L} \end{aligned} \right\} \quad (118)$$

とおく。ただし、 L は堤巾、堤高など、堤防の大きさを示めす基準長、 q は堤防表面からの単位面積当りの浸透流量である。(118)式を(116)式に代入すると、

$$\frac{K}{q} \nabla \{ k \kappa (j - \frac{\tau}{\sqrt{\mu \tau_w}} \cdot \frac{1}{L} \sqrt{\frac{n}{K}} \nabla \bar{h}_c) \} = \nu \frac{\partial S}{\partial t} \quad (119)$$

となる。この場合の Hamilton の記号は、

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial \bar{x}} + j \frac{\partial}{\partial \bar{y}}$$

である。(119)式中、 $\sqrt{\frac{\tau}{\mu \tau_w}}$ は液体として水を使用すれば一定であるし、 $\bar{h}_c$ は(117)式の J 関数に他ならないから、常に、 $\bar{t}$ に関係せず同一の関数である。

また、 k も S のみの関数で土の種類に関係しない。そして、模型と実物において、堤防の形状ばかりでなく、その断面内の密度分布も幾何学的に相似であれば、 κ 、 ν は実物の (x, y) の関数に対して、模型の $(\bar{x}, \bar{y})$ の同型の関数になる。

以上のように幾何学的に相似にしたとき $\frac{K}{q}$ 、 $\frac{1}{L} \sqrt{\frac{n}{K}}$ を模型と実物に対して同一の値にすれば、(119)式は模型に対しても実物に対してもまったく同一になり、同一の物理現象を生ずる。

以上を要約すると、模型を実物堤防と断面形状、密度分布において幾何学的にまったく相似にし、

$$\frac{K_1}{q_1} = \frac{K_2}{q_2} \quad (120)$$

$$\frac{1}{L_1} \sqrt{\frac{n_1}{k_1}} = \frac{1}{L_2} \sqrt{\frac{n_2}{k_2}} \quad (121)$$

サフィクス 1 は模型

サフィクス 2 は実物

の両式が成り立つような K_1, n_1 を持つ土を使用し、浸透流量を q_1 にしたとき、模型の浸透流は実物のそれとまったく相似であるといえる。ここで、時間について考えると、無次元量 τ が同一の値を示めすのだから、

$$t_1 = \frac{n_1 L_1 q_2}{n_2 L_2 q_1} t_2 \quad (122)$$

となる。すなわち、模型についての時間は実物の時間に比べて、 $\frac{n_2 L_2 q_1}{n_1 L_1 q_2}$ 倍早く進むということになる。

以上の推論において、浸透流量 q を使用したが、これのはつきりした値はよくわかっていない。Horton は降雨開始後 t 時間後の滲透能 f が

$$f = f_e + (f_0 - f_e) e^{-kt} \quad (123)$$

f_0 : 降雨開始直後の滲透能

f_e : 最終の浸透能

k : 土その他によつて決まる常数

で表わされ、降雨量が f より小さいときは、降雨量がすべて浸透流量になり、 f より大なるときは f が浸透流量になるとした。また、平田徳太郎博士や吉田重助氏は実験事実から、降雨量 N (mm) と浸透水量 I (mm) との間には

$$I = a(N - N_0) \quad (124)$$

なる関係があるとした。 a, N_0 は土その他によつて決まる常数である。以上より、 q は土によつて違うが、だいたい単位時間当たりの降雨量に比例することがわかる。

§ 4 電子計算機による解法

(1.11) 式を数学的に解くことは不可能である。そこで、電子計算機を使つて数値積分を行なつてみた。

もし、 k や $D \equiv k \frac{dh}{ds}$ の関数型がはつきりとわかつておれば、(1.11) 式よりも (1.13) 式の方が数値積分を行なうに当たつて、精度よく計算できる。しか

し、(1.2)式や(1.14)式で k 、 D が与えられるといつても、これらの式は半実験的な式であつて非常に不安定であり、それらの微分は更に不安定なものである。

そこで、(1.11)式を直接、次のように階差方程式に変えて数値計算を行なうことにした。

$$\begin{aligned} S(x, y, t + \Delta t) = & S(x, y, t) + \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \frac{K}{n} \{ [-hc(x + 2\Delta x, y, t) \\ & + hc(x, y, t)] k(x + \Delta x, y, t) - [-hc(x, y, t) \\ & + hc(x - 2\Delta x, y, t)] k(x - \Delta x, y, t) \} \\ & + \frac{\Delta t}{(2\Delta y)^2} \frac{K}{n} \{ [2\Delta y - hc(x, y + 2\Delta y, t) \\ & + hc(x, y, t)] k(x, y + \Delta y, t) - [2\Delta y \\ & - hc(x, y, t) + hc(x, y - 2\Delta y, t)] k(x, y - \Delta y, t) \} \quad (1.25) \end{aligned}$$

ところで、 $hc(x + \Delta x)$ 、 $hc(x - \Delta x)$ を Taylor 展開すると、

$$hc(x + \Delta x) = hc(x) + \Delta x \frac{\partial hc}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 hc}{\partial x^2} + \frac{(\Delta x)^3}{6} \frac{\partial^3 hc}{\partial x^3} + \dots \quad (i)$$

$$hc(x - \Delta x) = hc(x) - \Delta x \frac{\partial hc}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 hc}{\partial x^2} - \frac{(\Delta x)^3}{6} \frac{\partial^3 hc}{\partial x^3} + \dots \quad (ii)$$

であるので、

$$\frac{\partial hc}{\partial x} = \frac{hc(x + \Delta x) - hc(x - \Delta x)}{2\Delta x} - \frac{1}{6} (\Delta x)^2 \frac{\partial^3 hc}{\partial x^3} - \dots \quad (iii)$$

となる。同様にして、 $F = k \frac{\partial hc}{\partial x}$ についても、

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F(x + \Delta x) - F(x - \Delta x)}{2\Delta x} - \frac{1}{6} (\Delta x)^2 \frac{\partial^3 hc}{\partial x^3} \dots \quad (iv)$$

となる。ところで、

$$\begin{aligned} F(x + \Delta x) &= k(x + \Delta x) \frac{\partial hc(x + \Delta x)}{\partial x} \\ &= \frac{hc(x + 2\Delta x) - hc(x)}{2\Delta x} k(x + \Delta x) \\ &\quad - \frac{1}{6} (\Delta x)^2 \frac{\partial^3 hc(x + \Delta x)}{\partial x^3} k(x + \Delta x) - \dots \quad (v) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F(x-\Delta x) &= k(x-\Delta x) \frac{\partial hc(x-\Delta x)}{\partial x} \\
 &= \frac{hc(x) - hc(x-2\Delta x)}{2\Delta x} k(x-\Delta x) \\
 &\quad - \frac{1}{6} (\Delta x)^2 \frac{\partial^3 hc(x-\Delta x)}{\partial x^3} k(x-\Delta x) \dots\dots\dots (VI)
 \end{aligned}$$

であるので、

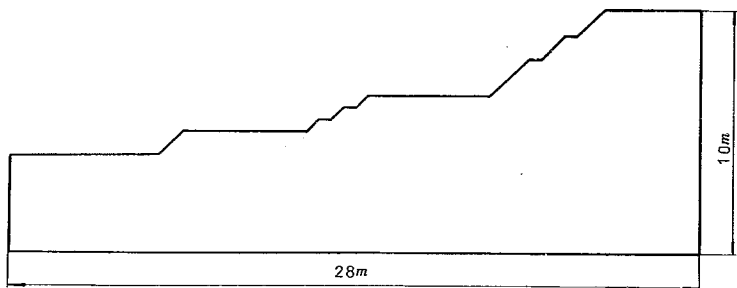
$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial hc}{\partial x} \right) &\equiv \frac{\partial F}{\partial x} \\
 &= \frac{\{hc(x+2\Delta x) - hc(x)\} k(x+\Delta x) - \{hc(x) - hc(x-2\Delta x)\} k(x-\Delta x)}{(2\Delta x)^2} \\
 &\quad - \frac{1}{12} \Delta x \left\{ \frac{\partial^3 hc(x+\Delta x)}{\partial x^3} k(x+\Delta x) - \frac{\partial^3 hc(x-\Delta x)}{\partial x^3} k(x-\Delta x) \right\} \\
 &\quad \dots\dots\dots (1.26)
 \end{aligned}$$

となる。

(1.11) 式、(1.25) 式と (1.26) 式を比較すると、(1.25) 式は、 $\Delta x, \Delta y$ の 1 乗以下を微小と考えて省略したものであることがわかる。すなわち、(1.25) 式は $\Delta x, \Delta y$ の order の誤差を含むということである。

計算は、次章で述べる現状堤体断面を簡素化した図 (1.4) のような断面につ

図 1-4



いて、堤体表面では常に完全に飽和しており、堤体内部の土の初期飽和度は一様に 80% で、堤体底面、側面では面に垂直な方向の流れがないとして行ないその断面内部において土は均質等方性であるとした。土の物理常数としては、透水係数 K を $4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} = 0.0144 \text{ m/hr}$ 、間げき率 n を 0.55 とし、毛管水頭 h_c と S との関係は、

$$h_c = -4651 S^3 + 69839 S^2 - 43542 S + 20667 \text{ (m)} \quad (1.27)$$

とし、比透水係数 k と S との関係は (1.2) 式において、

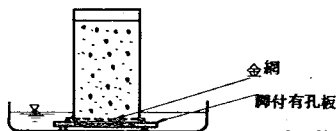
$S_0 = 0$ として、

$$k = S^3 \quad (1.28)$$

とした。

(1.27) 式の根拠は次のようである。測定によつて、 $K = 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、 $n = 0.55$ であることがわかつた乾燥砂を、図 (1.5) のように、底に 0.074 mm の金網を張つた中空円筒につめて、底が常に水に接するようにして一晚放置し

図 1-5



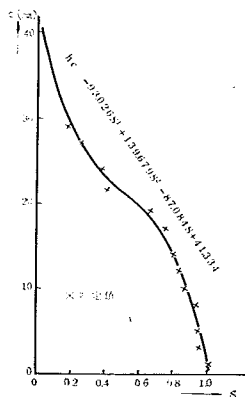
浸潤前線の動きが認められなくなつてから、その柱のいろんな高さ h_c における飽和度 S を測定した。これをプロットしたのが図 (1.6) であつて、明らかに、この h_c と S との関係が、そのまま、この砂の毛管水頭 h_c と飽和度 S との関係

である。この関係を、 h_c が S の 3 次関数であると仮定し、最小二乗法で整理したところ、

$$h_c = -93026 S^3 + 139679 S^2 - 87084 S + 41334 \text{ (cm)} \quad (1.29)$$

となつた。(1.29) 式の関係は図 (1.6) の曲線のように表わされ、ほぼ観測値を代表していることがわかる。ところで、(1.17) 式より、同じ飽和度に対して、 h_c は $\sqrt{\frac{K}{n}}$ に逆比例する。だから、 $n = 0.55$ 、 $k = 4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の土の h_c は、 $n = 0.55$ 、 $K = 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の土の h_c の 5 倍、すなわち (1.27) 式になる。

以上のように、(1.27) 式は (1.17) 式の Leverett の J 関数の仮定がそのまま完全に成り立つものとして求めたものである。しかし、Leverett の J 関数の仮定が本当に成り立つものかどうかはわからない。したがつて、この



ような hc の求め
 方は危険であり、
 やはり、違つた土
 に対しては、(S 、
 hc)の関数型は違
 つたものになると
 考えて、それぞれ
 に対して、 hc を
 測定すべきである。
 hc を測定する方
 法はいろいろある
 が、当土木研究所

には、それらの測定装置がなく、また測定する時間的余裕もなかつたので、簡
 便法として以上のような方法を探つた。

(1.2.5) 式に $K = 0.0144$, $n = 0.55$ と (1.2.7) 式、(1.2.8) 式を代入し、数
 值的に $\Delta y = \Delta x$ とすると、

$$\begin{aligned}
 \overline{S(x, y, t + \Delta t)} &= \overline{S(x, y, t)} \\
 &+ 0.114 \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \{ (\overline{S(x+2\Delta x, y, t)} - \overline{S(x, y, t)}) \\
 &- 1.604 (\overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^2 - \overline{S(x, y, t)}^2) \\
 &+ 1.068 (\overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^3 - \overline{S(x, y, t)}^3) \} \overline{S(x+\Delta x, y, t)}^3 \\
 &- \{ (\overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x-2\Delta x, y, t)}) \\
 &- 1.604 (\overline{S(x, y, t)}^2 - \overline{S(x-2\Delta x, y, t)}^2) \\
 &+ 1.068 (\overline{S(x, y, t)}^3 - \overline{S(x-2\Delta x, y, t)}^3) \} \overline{S(x-\Delta x, y, t)}^3 \\
 &+ \{ (\overline{S(x, y+2\Delta y, t)} - \overline{S(x, y, t)})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -1.604 \left(\overline{S(x, y+2\Delta y, t)}^2 - \overline{S(x, y, t)}^2 \right) \\
& + 1.068 \left(\overline{S(x, y+2\Delta y, t)}^3 - \overline{S(x, y, t)}^3 \right) \\
& + \frac{2\Delta y}{4.3542} \left\{ \overline{S(x, y+\Delta y, t)}^3 \right. \\
& - \left. \left(\overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x, y-2\Delta y, t)} \right) \right. \\
& - 1.604 \left(\overline{S(x, y, t)}^2 - \overline{S(x, y-2\Delta y, t)}^2 \right) \\
& + 1.068 \left(\overline{S(x, y, t)}^3 - \overline{S(x, y-2\Delta y, t)}^3 \right) \\
& \left. + \frac{2\Delta y}{4.3542} \left\{ \overline{S(x, y-\Delta y, t)}^3 \right\} \right] \quad (130)
\end{aligned}$$

となる。

ここで誤差の伝播について考えてみる。真の飽和度の値を S とし、誤差を ϵ とする。そして、(126) 式の右边第二項以下のような $\Delta x, \Delta y$ の項を微小と考えて無視すると、(130) 式より

$$\begin{aligned}
\overline{\epsilon(x, y, t+\Delta t)} &= \overline{S+\epsilon(x, y, t+\Delta t)} - \overline{S(x, y, t+\Delta t)} \\
&= \left[\overline{S+\epsilon(x, y, t)} \right. \\
&+ 0.114 \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \left\{ \left(\overline{S+\epsilon(x+2\Delta x, y, t)} - \overline{S+\epsilon(x, y, t)} \right) \right. \\
&- 1.604 \left(\overline{S+\epsilon(x+2\Delta x, y, t)}^2 - \overline{S+\epsilon(x, y, t)}^2 \right) \\
&+ 1.068 \left(\overline{S+\epsilon(x+2\Delta x, y, t)}^3 \right. \\
&- \left. \overline{S+\epsilon(x, y, t)}^3 \right) \left. \right\} \overline{S+\epsilon(x+\Delta x, y, t)}^3 \\
&- \left(\overline{S+\epsilon(x, y, t)} - \overline{S+\epsilon(x-2\Delta x, y, t)} \right) \\
&- 1.604 \left(\overline{S+\epsilon(x, y, t)}^2 - \overline{S+\epsilon(x-2\Delta x, y, t)}^2 \right) \\
&+ 1.068 \left(\overline{S+\epsilon(x, y, t)}^3 - \overline{S+\epsilon(x-2\Delta x, y, t)}^3 \right) \left. \right\} \overline{S+\epsilon(x-\Delta x, y, t)}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \{ (\overline{S + \varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)} - \overline{S + \varepsilon(x, y, t)}) \\
& - 1.604 (\overline{S + \varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)}^2 - \overline{S + \varepsilon(x, y, t)}^2) \\
& + 1.068 (\overline{S + \varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)}^3 - \overline{S + \varepsilon(x, y, t)}^3) \\
& + \frac{2\Delta y}{4.3542} \{ \overline{S + \varepsilon(x, y + \Delta y, t)}^3 \\
& - \{ (\overline{S + \varepsilon(x, y, t)} - \overline{S + \varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)}) \\
& - 1.604 (\overline{S + \varepsilon(x, y, t)}^2 - \overline{S + \varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)}^2) \\
& + 1.068 (\overline{S + \varepsilon(x, y, t)}^3 - \overline{S + \varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)}^3) \\
& + \frac{2\Delta y}{4.3542} \} \overline{S + \varepsilon(x, y - \Delta y, t)}^3 \}] \\
& - \{ \overline{S(x, y, t)} \\
& + 0.114 \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} [(\overline{S(x + 2\Delta x, y, t)} - \overline{S(x, y, t)}) \\
& - 1.604 (\overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^2 - \overline{S(x, y, t)}^2) \\
& + 1.068 (\overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^3 - \overline{S(x, y, t)}^3) \} \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \\
& - \{ (\overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}) \\
& - 1.604 (\overline{S(x, y, t)}^2 - \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}^2) \\
& + 1.068 (\overline{S(x, y, t)}^3 - \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}^3) \} \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 \\
& + \{ (\overline{S(x, y + 2\Delta y, t)} - \overline{S(x, y, t)}) \\
& - 1.604 (\overline{S(x, y + 2\Delta y, t)}^2 - \overline{S(x, y, t)}^2) \\
& + 1.068 (\overline{S(x, y + 2\Delta y, t)}^3 - \overline{S(x, y, t)}^3) \\
& + \frac{2\Delta y}{4.3542} \} \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \{ \overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)} \} \\
& - 1.604 \{ \overline{S(x, y, t)}^2 - \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)}^2 \} \\
& + 1.068 \{ \overline{S(x, y, t)}^3 - \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)}^3 \} \\
& + \frac{2\Delta y}{4.3542} \{ \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \} \} \quad (1)
\end{aligned}$$

となる。ε の二次以上の高次の項を微少と考慮して無視すると、(1)式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
\overline{\varepsilon(x, y, t + \Delta t)} &= \overline{\varepsilon(x, y, t)} \\
& + 0.114 \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \{ \{ 3 \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^2 \cdot \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)} \\
& - \overline{S(x, y, t)} \} \cdot \overline{\varepsilon(x + \Delta x, y, t)} \\
& + \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \cdot \{ \overline{\varepsilon(x + 2\Delta x, y, t)} - \overline{\varepsilon(x, y, t)} \} \} \\
& - 1.604 \{ 2 \{ \overline{\varepsilon(x + 2\Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)} \\
& - \overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)} \} \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \\
& + 3 \cdot \overline{\varepsilon(x + \Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^2 \cdot \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^2 \\
& - \overline{S(x, y, t)}^2 \} \} \\
& + 1.068 \{ 3 \cdot \{ \overline{\varepsilon(x + 2\Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^2 \\
& - \overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)}^2 \} \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \\
& + 3 \cdot \overline{\varepsilon(x + \Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^2 \cdot \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^3 \\
& - \overline{S(x, y, t)}^3 \} \} \\
& - \{ 3 \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^2 \cdot \overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)} \} \cdot \overline{\varepsilon(x - \Delta x, y, t)} \\
& + \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 \cdot \{ \overline{\varepsilon(x, y, t)} - \overline{\varepsilon(x - 2\Delta x, y, t)} \} \}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 1604 \{ 2 \left(\overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)} \right. \\
& - \overline{\varepsilon(x - 2\Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)} \left. \right) \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 \\
& + 3 \overline{\varepsilon(x - \Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^2 \left(\overline{S(x, y, t)}^2 \right. \\
& - \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}^2 \left. \right) \} \\
& - 1068 \{ 3 \left(\overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)}^2 \right. \\
& - \overline{\varepsilon(x - 2\Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}^2 \left. \right) \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 \\
& + 3 \overline{\varepsilon(x - \Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^2 \left(\overline{S(x, y, t)}^3 \right. \\
& - \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}^3 \left. \right) \} \\
& + \{ 3 \cdot \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^2 \cdot \left(\overline{S(x, y + 2\Delta y, t)} - \overline{S(x, y, t)} \right) \cdot \overline{\varepsilon(x, y + \Delta y, t)} \\
& + \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 \left(\overline{\varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)} - \overline{\varepsilon(x, y, t)} \right) \} \\
& - 1604 \{ 2 \left(\overline{\varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y + 2\Delta y, t)} \right. \\
& - \overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)} \left. \right) \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 \\
& + 3 \cdot \overline{\varepsilon(x, y + \Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^2 \cdot \left(\overline{S(x, y + 2\Delta y, t)}^2 \right. \\
& - \overline{S(x, y, t)}^2 \left. \right) \} \\
& + 1068 \{ 3 \cdot \left(\overline{\varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y + 2\Delta y, t)}^2 \right. \\
& - \overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)}^2 \left. \right) \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 \\
& + 3 \overline{\varepsilon(x, y + \Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^2 \left(\overline{S(x, y + 2\Delta y, t)}^3 \right. \\
& - \overline{S(x, y, t)}^3 \left. \right) + 3 \cdot \frac{2\Delta y}{43542} \cdot \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^2 \cdot \overline{\varepsilon(x, y + \Delta y, t)} \\
& - \{ 3 \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^2 \left(\overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)} \right) \cdot \overline{\varepsilon(x, y - \Delta y, t)} \\
& + \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \left(\overline{\varepsilon(x, y, t)} - \overline{\varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)} \right) \} \\
& + 1604 \{ 2 \cdot \left(\overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \overline{\varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)} \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \\
& + 3 \cdot \overline{\varepsilon(x, y - \Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^2 (\overline{S(x, y, t)}^2 - \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)}^2) \\
& - 1068 \{ 3 (\overline{\varepsilon(x, y, t)} \cdot \overline{S(x, y, t)}^2 \\
& - \overline{\varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)}^2) \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \\
& + 3 \cdot \overline{\varepsilon(x, y - \Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^2 (\overline{S(x, y, t)}^3 \\
& - \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)}^3) \} - 3 \cdot \frac{2\Delta y}{43542} \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^2 \cdot \overline{\varepsilon(x, y - \Delta y, t)} \\
= & \overline{\varepsilon(x, y, t)} \\
& + 0114 \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^3} [\{ \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \\
& - 322 \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \\
& + 321 \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^2 \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 \} \overline{\varepsilon(x + 2\Delta x, y, t)} \\
& + \{ \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 - 322 \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)} \cdot \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 \\
& + 321 \overline{S(x - 2\Delta x, y, t)}^2 \cdot \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 \} \overline{\varepsilon(x - 2\Delta x, y, t)} \\
& + \{ \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 - 322 \cdot \overline{S(x, y + 2\Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 \\
& + 321 \overline{S(x, y + 2\Delta y, t)}^2 \cdot \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 \} \overline{\varepsilon(x, y + 2\Delta y, t)} \\
& + \{ \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 - 322 \cdot \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)} \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \\
& + 321 \overline{S(x, y - 2\Delta y, t)}^2 \cdot \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \} \overline{\varepsilon(x, y - 2\Delta y, t)} \\
& - \{ \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^3 + \overline{S(x - \Delta x, y, t)}^3 + \overline{S(x, y + \Delta y, t)}^3 \\
& + \overline{S(x, y - \Delta y, t)}^3 \} \{ 1 - 322 \cdot \overline{S(x, y, t)} \\
& + 321 \cdot \overline{S(x, y, t)}^2 \} \overline{\varepsilon(x, y, t)} \\
& + 3 \cdot \overline{S(x + \Delta x, y, t)}^2 \cdot \{ (\overline{S(x + 2\Delta x, y, t)} - \overline{S(x, y, t)}) \\
& + \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^2 + 107 \overline{S(x + 2\Delta x, y, t)}^3 \} \cdot \overline{\varepsilon(x + \Delta x, y, t)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -3 \cdot \overline{S(x-\Delta x, y, t)}^2 \cdot \{ \overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x-2\Delta x, y, t)} \} \\
& + \overline{S(x, y, t)}^2 + 1.07 \cdot \overline{S(x, y, t)}^3 \} \cdot \overline{\varepsilon(x-\Delta x, y, t)} \\
& + [3 \cdot \overline{S(x, y+\Delta y, t)}^2 \{ \overline{S(x, y+2\Delta y, t)} - \overline{S(x, y, t)} \} \\
& + \overline{S(x, y+2\Delta y, t)}^2 + 1.07 \overline{S(x, y+2\Delta y, t)}^3 \} \\
& + \frac{6\Delta y}{43542}] \cdot \overline{\varepsilon(x, y+\Delta y, t)} \\
& - [3 \cdot \overline{S(x, y-\Delta y, t)}^2 \{ \overline{S(x, y, t)} - \overline{S(x, y-2\Delta y, t)} \} \\
& + \overline{S(x, y, t)}^2 + 1.07 \cdot \overline{S(x, y, t)}^3 \} \\
& + \frac{6\Delta y}{43542}] \cdot \overline{\varepsilon(x, y-\Delta y, t)}] \quad (ii)
\end{aligned}$$

ところで、数値的に次のようにAを置くと、

$$\begin{aligned}
A \equiv & \overline{S(x+\Delta x, y, t)}^3 \{ 1 - 322 \cdot \overline{S(x+2\Delta x, y, t)} \\
& + 321 \cdot \overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^2 \} \\
= & \overline{S(x+\Delta x, y, t)}^3 \{ 321 \{ \overline{S(x+2\Delta x, y, t)} - 0.5 \}^2 \\
& + 0.1975 \} \quad (iii)
\end{aligned}$$

において

$$\begin{aligned}
0 & < \overline{S(x+\Delta x, y, t)}^3 \leq 1 \\
0.1975 & < 321 \{ \overline{S(x+2\Delta x, y, t)} - 0.5 \}^2 + 0.1975 \leq 1 \quad (iv)
\end{aligned}$$

であるので

$$0 < A \leq 1 \quad (v)$$

となる。また、数値的に次のようにBを置くと、

$$\begin{aligned}
B \equiv & 3 \cdot \overline{S(x+\Delta x, y, t)}^2 \{ \{ \overline{S(x+2\Delta x, y, t)} - \overline{S(x, y, t)} \} \\
& + \overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^2 + 1.07 \cdot \overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^3 \} \quad (vi)
\end{aligned}$$

においては、初期飽和度が30%ということから、

$$\left. \begin{aligned}
 0 < \overline{S(x+\Delta x, y, t)}^2 &\leq 1 \\
 0 < \overline{S(x+2\Delta x, y, t) - S(x, y, t)} &\leq 0.7 \\
 0 < \overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^2 &\leq 1 \\
 0 < \overline{S(x+2\Delta x, y, t)}^3 &\leq 1
 \end{aligned} \right\} \quad (vii)$$

であるので、

$$0 < B \leq 831 \quad (viii)$$

となる。M式、(viii)式を(ii)式に代入すると、

$$\begin{aligned}
 \varepsilon(x, y, t+\Delta t) &= \varepsilon(x, y, t) \\
 &+ 0.114 \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \{ A \cdot \{ \overline{\varepsilon(x+2\Delta x, y, t)} + \overline{\varepsilon(x-2\Delta x, y, t)} \\
 &+ \overline{\varepsilon(x, y+2\Delta y, t)} + \overline{\varepsilon(x, y-2\Delta y, t)} - 4 \cdot \overline{\varepsilon(x, y, t)} \} \\
 &+ B \{ \overline{\varepsilon(x+\Delta x, y, t)} - \overline{\varepsilon(x-\Delta x, y, t)} \} \\
 &+ (B + \frac{6\Delta y}{43542}) \{ \overline{\varepsilon(x, y+\Delta y, t)} - \overline{\varepsilon(x, y-\Delta y, t)} \} \} \\
 &\leq \{ 1 - 0.114 \cdot \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \cdot 4 \} \overline{\varepsilon(x, y, t)} \\
 &+ 0.114 \cdot \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \{ \{ \overline{\varepsilon(x+2\Delta x, y, t)} + \overline{\varepsilon(x-2\Delta x, y, t)} \\
 &+ \overline{\varepsilon(x, y+2\Delta y, t)} + \overline{\varepsilon(x, y-2\Delta y, t)} \} \\
 &+ 831 \{ \overline{\varepsilon(x+\Delta x, y, t)} - \overline{\varepsilon(x-\Delta x, y, t)} \} \\
 &+ (831 + \frac{6\Delta y}{43542}) \{ \overline{\varepsilon(x, y+\Delta y, t)} - \overline{\varepsilon(x, y-\Delta y, t)} \} \} \quad (ix)
 \end{aligned}$$

となる。すなわち、誤差が伝播しないためには、

$$\left. \begin{aligned}
 | 1 - 0.114 \cdot \frac{4\Delta t}{(2\Delta x)^2} | &< 1 \\
 | 0.114 \cdot \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} | &< 1 \\
 | 0.114 \cdot \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \cdot 831 | &< 1
 \end{aligned} \right\} \quad (x)$$

$$\left| 0.114 \cdot \frac{\Delta t}{(2\Delta x)^2} \left(831 + \frac{6\Delta y}{4.3542} \right) \right| < 1$$

の4式が成立するように、 Δt 、 $\Delta x = \Delta y$ を組み合わせればよい。(130)式は次のようになる。

$$\Delta t < \frac{3509}{831 + 1378\Delta y} (\Delta x)^2 \quad (131)$$

つまり、(131)式のように $\Delta x = \Delta y$ 、 Δt を定めれば、誤差が伝播していかないということになる。

この計算においては、

$$\left. \begin{aligned} \Delta x = \Delta y &= 0.5 \\ \Delta t &= 0.9 \end{aligned} \right\} \quad (132)$$

とした。(132)式は、明らかに(131)式を満足している。

(132)式を(130)式に代入し、

$$\left. \begin{aligned} S(x, y, t + \Delta t) &\equiv ST(x, y) \\ S(x, y, t) &\equiv S(x, y) \\ (x + 2\Delta x, y) &= (x + 2, y) \\ (x + \Delta x, y) &= (x + 1, y) \end{aligned} \right\} \quad (133)$$

と、書き直すと、

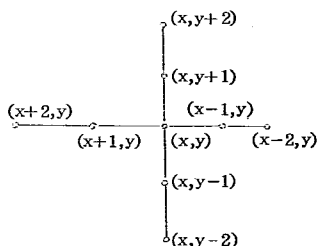
$$\begin{aligned} ST(x, y) &= S(x, y) + 0.1026 \{ \{ \overline{S(x+2, y)} - \overline{S(x, y)} \} \\ &\quad - 1.604 \{ \overline{S(x+2, y)}^2 - \overline{S(x, y)}^2 \} \\ &\quad + 1.068 \{ \overline{S(x+2, y)}^3 - \overline{S(x, y)}^3 \} \} \overline{S(x+1, y)}^3 \\ &\quad - \{ \{ \overline{S(x, y)} - \overline{S(x-2, y)} \} \\ &\quad - 1.604 \{ \overline{S(x, y)}^2 - \overline{S(x-2, y)}^2 \} \\ &\quad + 1.068 \{ \overline{S(x, y)}^3 - \overline{S(x-2, y)}^3 \} \} \overline{S(x-1, y)}^3 \\ &\quad + \{ \{ \overline{S(x, y+2)} - \overline{S(x, y)} \} \\ &\quad - 1.604 \{ \overline{S(x, y+2)}^2 - \overline{S(x, y)}^2 \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 1068 \left(\overline{S(x, y+2)}^3 - \overline{S(x, y)}^3 \right) \\
& + 022966 \left\{ \overline{S(x, y+1)}^3 \right. \\
& - \left. \left(\overline{S(x, y)} - \overline{S(x, y-2)} \right) \right. \\
& - 1604 \left(\overline{S(x, y)}^2 - \overline{S(x, y-2)}^2 \right) \\
& + 1068 \left(\overline{S(x, y)}^3 - \overline{S(x, y-2)}^3 \right) \\
& \left. + 022966 \left\{ \overline{S(x, y-1)}^3 \right\} \right\} \quad (1.34)
\end{aligned}$$

となる。(1.34)式が電子計算機にける基本式である。

(1.34)式を見ると、点 (x, y) の Δt 時間後の飽和度 $ST(x, y)$ の値は

図(1-7)



図(1.7)のように、 (x, y) 、 $(x+2, y)$ 、 $(x+1, y)$ 、 $(x-1, y)$ 、 $(x-2, y)$ 、 $(x, y+2)$ 、 $(x, y+1)$ 、 $(x, y-1)$ 、 $(x, y-2)$ の9点の飽和度から計算するようになっている。故に、堤体表面から $2\Delta y$ 以上離れた点の Δt 時間後の飽和度は(1.34)式から計算できる。しかし、堤体表面から Δy 離れた点の

Δt 時間後の飽和度は(1.34)式から計算できない。そこで、この値を、堤体表面の値100%と堤体表面から $2\Delta y$ 離れた点の飽和度との平均値であると仮定した。すなわち、この点では、

$$ST(x, y) = \frac{10 + ST(x, y-1)}{2} \quad (1.35)$$

であるとした。

次に、面に垂直な流れがないという。側面、底面における境界条件について考えてみよう。今、考えている面が y 軸に垂直だとすると、この面に垂直な流れが0ということは、 y 軸方向の流れが0ということだから、

$$v_j = -Kk[j \cdot \nabla h_c] \cdot j = 0$$

$$\therefore \frac{\partial h_c}{\partial y} = 1 \quad (1)$$

一方、Taylor 展開から、

$$\frac{\partial hc}{\partial y} = \frac{hc(y+\Delta y) - hc(y-\Delta y)}{2\Delta y} = \frac{1}{6}(\Delta y)^2 \frac{\partial^3 hc}{\partial y^3} - \dots \quad (ii)$$

であり、 Δy の 2 次以上の高次の項を微小と考えると無視すると、(i)、(iii) の両式から、

$$hc(y+\Delta y) - hc(y-\Delta y) = 2\Delta y \quad (iii)$$

となり、(127) 式を (iii) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} & \{-46513 \cdot \overline{S(y+\Delta y)}^3 + 69839 \cdot \overline{S(y+\Delta y)}^2 - 43542 \cdot \overline{S(y+\Delta y)}\} \\ & - \{-46513 \cdot \overline{S(y-\Delta y)}^3 + 69839 \cdot \overline{S(y-\Delta y)}^2 - 43542 \cdot \overline{S(y-\Delta y)}\} = 2 \cdot \Delta y \quad (iv) \end{aligned}$$

となる。(iv) 式から、 $S(y-\Delta y)$ のある値から $S(y+\Delta y)$ が計算でき、その逆もできる。しかし、この式は 3 次式で非常に計算がめんどうになる。そこで Δy を微小と考えると無視すると、(iv) 式が成り立つためには、

$$S(y+\Delta y) = S(y-\Delta y) \quad (136)$$

であればよい。ところで、境界面上の値 $ST(x, y)$ を計算するには、 $S(y+2\Delta y)$ 、 $S(y-2\Delta y)$ の値も必要である。これらも、(136) 式と同様にして

$$S(y+2\Delta y) = S(y-2\Delta y) \quad (137)$$

となる。考えている面が x 軸に垂直な場合は、(iv) 式において、

$$2\Delta y = 0 \quad (V)$$

と置いたものになり、 Δx の項を無視することもなく、

$$\left. \begin{aligned} S(x+\Delta x) &= S(x-\Delta x) \\ S(x+2\Delta x) &= S(x-2\Delta x) \end{aligned} \right\} \quad (138)$$

が成り立つ。

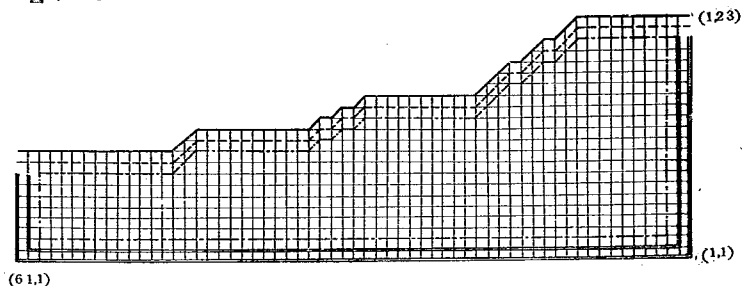
以上で、この計算を電子計算機にける全ての準備が整ったわけである。

防水覆工を施さない場合の境界条件は図(18)で、flow chart は図(19)のようである。

防水覆工を天頂、第一小段、第二小段に施した場合の境界条件は図(110)で、flow chart は図(111)のようである。

以上の計算を IBM 7090 にかけた。計算機用語は Fortran IV で、program は図(112)のようである。なお、この program は日本 IBM 株式会社の宮崎進夫氏に製作していただいた。この program で、防水覆工を施

図 1 — 8



こさない場合と施こした場合の両方が計算できるようにし、inpnt data で、その境界条件を変えられるようにしたそうである。

計算結果は図 (113) a, ~ f, のようである。計算使用時間は9分であつた。図 (113) a, ~ f, に等高線を描くと、図 (114) a, ~ f, のようになる。

上から雨が浸み込んでいくのだから、常識的に考えても、下に行くに従つて飽和度はだんだん減少していくはずであるが、この計算結果をみると、ところどころ、上の方の値が下の値よりも小さいところがある。これは、この計算を行なうに当つて、(126)式や(136)式で $\Delta x, \Delta y$ を無視したり、(135)式を仮定したりしたことによる誤差によるものと思われる。したがつて、 Δx をもつと小さく採れば、このような不自然な値が出てくるのは防げるであろう。この計算結果が何%の誤差を含むかということは、今までの推論では解らない。そして、そのことがこの推論の最大の弱点であるが、図 (114) a ~ f の結果からどの地点がだいたいどれくらいの飽和度になるかということをつかめると思ふ。

図 1 — 10

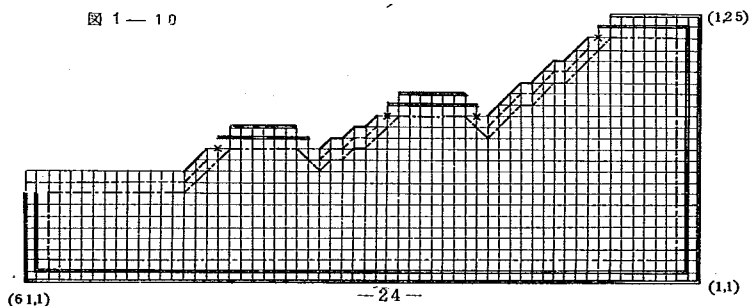


図 1 - 9

Case I

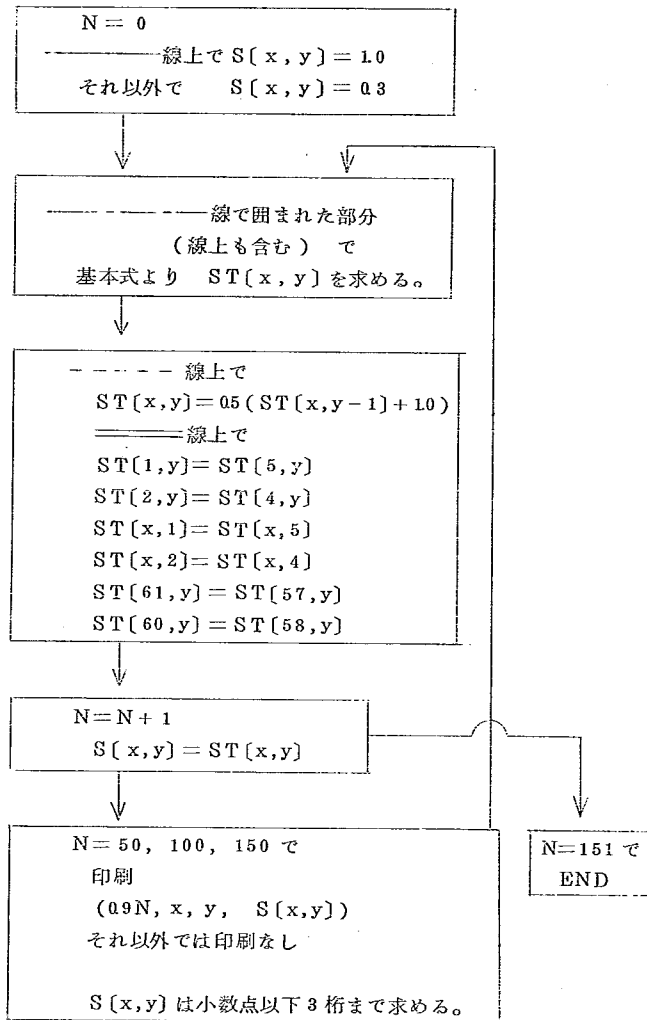
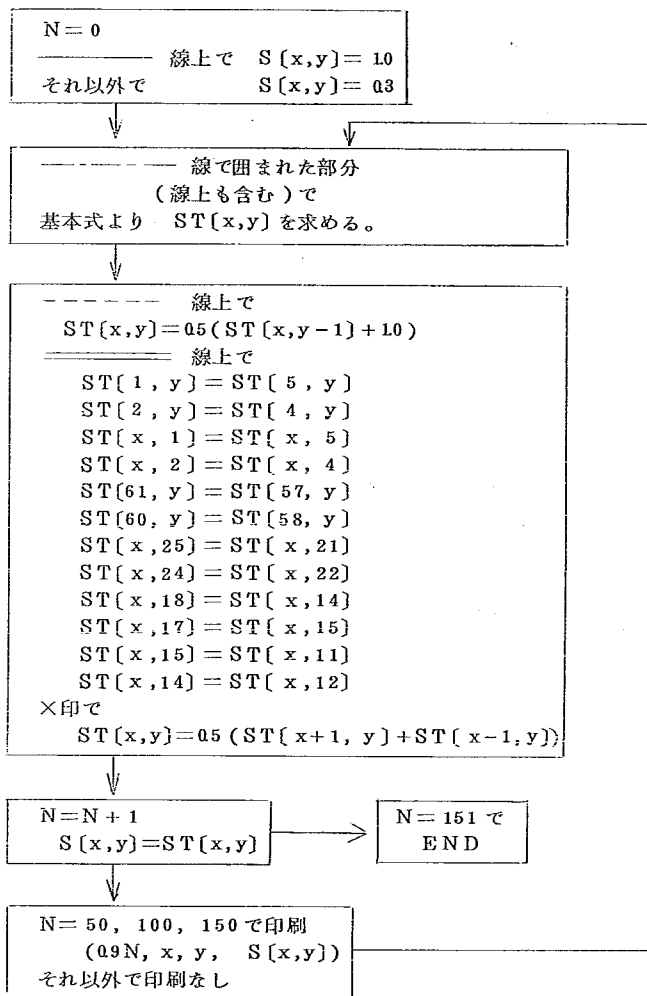


図 1-11

Case II



$S\{x,y\}$ は小数点以下 3 桁まで求める。

KAKUSA		06/24/64		06110	
EXTERNAL FORMULA NUMBER		SOURCE STATEMENT		INTERNAL FORMULA NUMBER(S)	
				PAGE 1	
DIMENSION S(61,25),ST(61,25),MAX(61)					
1 READ (5,10) NCASE,(MAX(I),I=1,61)				DIF01250	
10 FORMAT(3I2)				DIF01300	
DO 100 I=1,61				DIF01350	
N=MAX(I)				DIF01400	
DO 100 J=1,N				DIF01450	
100 ST(I,J)=0.5				DIF01500	
IF(NCASE=1) 110,110,130				DIF01550	
110 DO 120 I=1,61				DIF01600	
N=MAX(I)				DIF01650	
ST(I,N)=1.0				DIF01700	
120 ST(I,N)=1.0				DIF01750	
GO TO 200				DIF01800	
130 DO 140 I=1,20				DIF01850	
N=MAX(I)				DIF01900	
ST(I,N)=1.0				DIF01950	
140 ST(I,N)=1.0				DIF02000	
DO 150 I=30,35				DIF02050	
N=MAX(I)				DIF02100	
ST(I,N)=1.0				DIF02150	
DO 160 I=45,51				DIF02200	
N=MAX(I)				DIF02250	
ST(I,N)=1.0				DIF02300	
200 DO 300 K=1,150				DIF02350	
DO 300 I=3,59				DIF02400	
N=MAX(I)				DIF02450	
DO 300 J=3,N				DIF02500	
ST(I,J)=S(I,J)+10.6*(S(I+2,J)-S(I,J))-1.60*(S(I+2,J)+2-				DIF02550	
S(I,J)+2)+1.068*(S(I+2,J)+3-S(I,J)+3)+S(I+1,J)+3				DIF02600	
-((S(I,J)+3-S(I+2,J)+3)+S(I+2,J)+3-S(I,J)+3)+S(I+1,J)+3				DIF02650	
S(I,J)+3-S(I+2,J)+3)+S(I+2,J)+3-S(I,J)+3				DIF02700	
+((S(I,J)+3-S(I,J))-1.60*(S(I,J)+2-S(I,J)+2)+1.068*				DIF02750	
(S(I,J)+3-S(I,J)+3)+0.22968*(S(I,J)+3)				DIF02800	
-((S(I,J)+3-S(I,J)+3)-1.60*(S(I,J)+2-S(I,J)+2)+1.068*				DIF02850	
(S(I,J)+3-S(I,J)+3)+0.22968*(S(I,J)+3)				DIF02900	
300 CONTINUE				DIF02950	
DO 310 I=3,59				DIF03000	
ST(I,I)=ST(I,I)				DIF03050	
310 ST(I,I)=ST(I,I)				DIF03100	
N=MAX(I)				DIF03150	
DO 320 J=3,N				DIF03200	
ST(I,J)=ST(I,J)				DIF03250	
320 ST(I,J)=ST(I,J)				DIF03300	
DO 330 J=3,N				DIF03350	
ST(I,J)=ST(I,J)				DIF03400	
330 ST(I,J)=ST(I,J)				DIF03450	
C				DIF03500	
IF(NCASE=1) 340,340,360				DIF03550	
340 DO 350 I=1,61				DIF03600	
N=MAX(I)				DIF03650	
350 ST(I,N)=0.5*(ST(I,N)+1.0)				DIF03700	

KAKUSA		06/26/26	06111
EXTERNAL FORMULA NUMBER		SOURCE STATEMENT	INTERNAL FORMULA NUMBER(S)
			PAGE 2
GO TO 400		DIF02750	,91
360 DO 370 I=3,10		DIF02800	,92
ST(I,1)=ST(I,2)		DIF02850	,93
370 ST(I,24)=ST(I,2)		DIF03000	,94
DO 380 I=21,29		DIF03050	,95
ST(I,1)=ST(I,14)		DIF04000	,96
380 ST(I,7)=ST(I,1)		DIF04050	,97
DO 390 I=36,46		DIF04100	,98
ST(I,7)=ST(I,1)		DIF04150	,99
390 ST(I,4)=ST(I,1)		DIF04200	,100
DO 392 I=11,20		DIF04250	,101
N=MAX(I)		DIF04300	,102
391 ST(I,N)=0.5*(ST(I,N-1)+0.1		DIF04350	,103
DO 392 I=20,15		DIF04400	,104
N=MAX(I)		DIF04450	,105
392 ST(I,N)=0.5*(ST(I,N-1)+0.1		DIF04500	,106
DO 392 I=45,40		DIF04550	,107
N=MAX(I)		DIF04600	,108
393 ST(I,N)=0.5*(ST(I,N-1)+0.1		DIF04650	,109
ST(I,2)=ST(I,2)+ST(I,23)+ST(I,23)		DIF04700	,110
ST(I,1)=0.5*(ST(I,2)+ST(I,23)+ST(I,23))		DIF04750	,111
ST(I,23)=0.5*(ST(I,2)+ST(I,23)+ST(I,23))		DIF04800	,112
ST(I,2)=0.5*(ST(I,2)+ST(I,23)+ST(I,23))		DIF04850	,113
ST(I,23)=0.5*(ST(I,2)+ST(I,23)+ST(I,23))		DIF04900	,114
400 DO 410 I=3,61		DIF04950	,115
N=MAX(I)		DIF05000	,116
DO 410 I=3,61		DIF05050	,117
ST(I,2)=ST(I,2)+ST(I,23)+ST(I,23)		DIF05100	,118
IF(MOD(I,50)) 5,1,421,500		DIF05150	,119
420 THCSH=0.9*FLNAT(K)		DIF05200	,120
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05250	,121
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05300	,122
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05350	,123
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05400	,124
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05450	,125
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05500	,126
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05550	,127
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05600	,128
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05650	,129
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05700	,130
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05750	,131
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05800	,132
ST(I,1)=ST(I,1)		DIF05850	,133
ST(I,2)=ST(I,2)		DIF05900	,134
440 WRITE (A,20) THCSH		DIF05950	,135
20 FORMAT(1ML,10X,F5.0)		DIF06000	,136
WRITE (A,30) (I,1,15)		DIF06050	,137
30 FORMAT(10X,2X,1F10)		DIF06100	,138
DO 400 I=1,61		DIF06150	,139
IF(I-20) 470,40,450		DIF06200	,140
450 IF(I-40) 47,46,47		DIF06250	,141
460 WRITE (A,20) THCSH		DIF06300	,142
WRITE (A,30) (J,3,1,5)		DIF06350	,143
470 IF(I-5) 400,40,40		DIF06400	,144
IF(I-5) 400,40,40		DIF06450	,145
IF(I-5) 400,40,40		DIF06500	,146

06112

KAMUSA		06/24/64	PAGE 2	
EXTERNAL FORMULA NUMBER	SOURCE STATEMENT	INTERNAL FORMULA NUMBER(S)		
400 WRITE (6,4,1) (1,(57(1,3),J*,1))		DIF06050	,133	,134 ,135 ,136 ,137 ,138
40 FORMAT(1H0,4X,1',',X,12F6.3)		DIF06050		
GO TO 400		DIF06050	,139	
401 WRITE (6,4,1) (1,(57(1,3),J*,1,5))		DIF06050	,140 ,141 ,142 ,143 ,144 ,145	
50 WRITE (7,5,1) (57(1,3),J*,10YN)		DIF06050	,146 ,147 ,148 ,149 ,150	
50 FORMAT(1H ,7X,5F6.3)		DIF06050		
400 CONTINUE		DIF06050	,151 ,152	
500 CONTINUE		DIF06050	,153 ,154	
20 TO 1		DIF06050	,155	
END		DIF06050	,156	

图 1-13(a)

CASE. I (45 h)

防水覆工無し

[illegible]

图 1-13(b)

C A S E. I (90 h)

防水覆工無し

[illegible]

☒ 1 - 13(c)

CASE. I (135 h)

防水覆工無し

[illegible]

图 1-13(d)

C A S E. II (45 h)

防水覆工有り

[illegible]

图 1—13(e)

C A S E. II (90h)

防水覆工有り

[illegible]

☒ 1 — 13(f)

C A S E. II (135h)

防水覆工有り

[illegible]

图 1 - 14 (a)

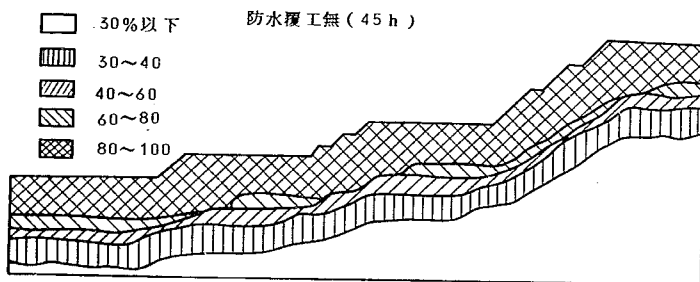


图 1 - 14 (b)

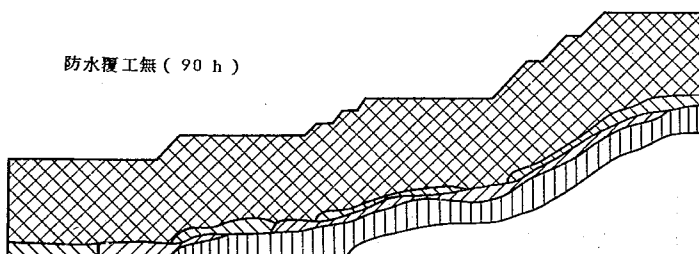


图 1 - 14 (c)

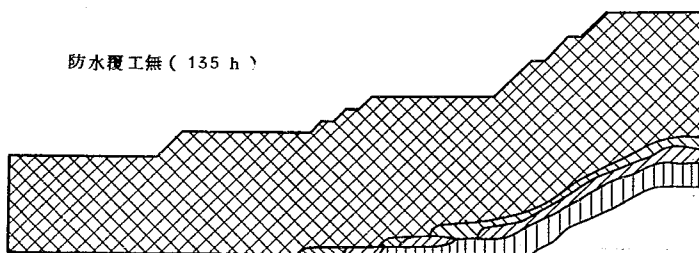


图 1 - 14 (d)

防水覆工有 (45h)

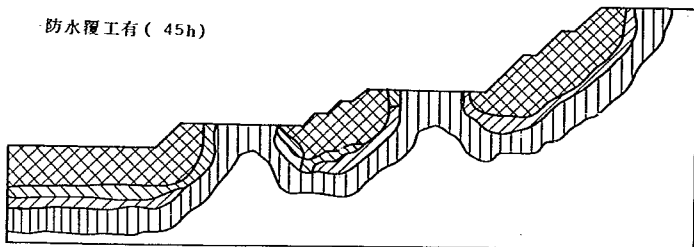


图 1 - 14 (e)

防水覆工有 (90h)

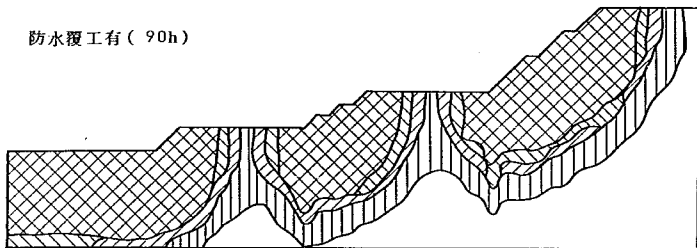
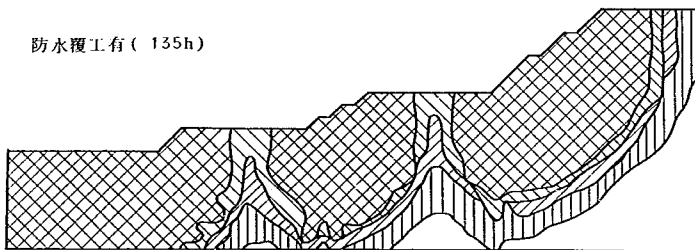


图 1 - 14 (f)

防水覆工有 (135h)



§ 5 以上の考察の問題点

以上のように考察してきたが、その問題となる点について述べておこう。

まず、基本式、(14)式、(111)式について考えよう。この式は、土間げき内の空気の圧力が外部の空気の圧力と同じであると考えている。しかし、実際は、浸み込んでくる水に圧迫されて一気圧よりは大きくなるはずであり、そのため、水の浸み込みを撥ね返そうとする。さらに、堤体への浸透の場合は、間げき内の空気の逃げ道は堤体表面しかないので、水の動きと空気の動きは逆方向になる。この逆向きの空気の流れの抵抗によつて、水の動きはいくぶん弱められる。以上のように、堤体内の空気の影響は水の動きを妨げようとし、その影響を無視した(14)式、(111)式の解は実際より大きな値、つまり安全側の値を持つものと思われる。

次に、比透水係数の式、(12)式について考えよう。この式は、土間げき内の気泡が水に対し、土粒子とまったく同一の影響を持つものとして、Cozenyの式と同じ考えに立つて導き出したものである。しかし、気泡はその表面にまったく摩擦を持たないから、気泡表面の水は土粒子表面の水のように静止していき、ある流速をもっている。したがつて、実際の比透水係数は(12)式で求めたものより大きいはずである。

上のCozenyの考えと違つて、透水係数が、土の間げき分布に影響されると考えて、透水係数を表わす式を導き出す一連の研究が米国の鉱山学者のグループによつて行なわれた。彼等によれば、土が空気を含むときは、その大きな間げきから空気でお占められていくのであるから、比透水係数はその部分の間げきがなくなつたとして、計算すればよいとしている。

我が国における比透水係数の研究としては、京都大学教授、松尾新一郎博士、森本裕士氏（現在、建設省勤務）、松井正州氏（現在、鹿島建設KK勤務）による砂に対する実験的研究がある。松尾氏らは、透水円筒につめた飽和砂に、水とともに細かい気泡を流して不飽和状態を作り出し、実験を行なつた。その結果、比透水係数は飽和度 S の指数関数として表わされ、かつ、飽和度の三つの領域に対してそれぞれ違つた式になるとしている。

以上のように、比透水係数に対してはいろいろな考え方があり、数多くの式があるが、(12)式がもつとも簡単な式であるので、これを採用した。しかし現在の段階では、これは次に述べる毛管水頭と同様、それぞれの土に対して測

定を行なつて求めるのがもつとも妥当であると思われる。しかし、この測定は非常に難しいので、なかなか正しい値が得られないと思われる。

最後に、この考察にたびたび出てくる Leverett の J 関数 (117) 式について考えよう。Donald W. Taylor は、その著書 *Foundamentals of soil mechanics*⁵⁾ の中に Capillarity の章を設けて、毛管水伝導についての考察をいろいろ行なっている。彼は、毛管水伝導を moving boundary method によつて扱つており、毛管水頭 h_c が常数であるとしているが、その最後の節で、透水係数 K と毛管水頭 h_c の関係について次式を与えている。

$$K = \frac{\tau_s^2}{2 \mu r_w} \frac{n}{B h_c^3} \quad (139)$$

この式中 B は土によつて変つてくる常数で、だいたい 20~300 である。この式を変形すると、

$$\sqrt{\frac{1}{2B}} = \frac{h_c}{\tau_s} \sqrt{\frac{K \mu r_w}{n}} \quad (140)$$

となり、(117) 式とまづたく同一の形になる。なお以上の式に数値を代入すると、

$$\frac{0.7}{\sqrt{K}} < h_c < \frac{2.4}{\sqrt{K}} \quad (141)$$

となつた。以上より、この Taylor の考察と Leverett の J 関数の考えとは原理的によい一致を見ることがわかる。

しかし、 S と h_c の関係がどうなるかということについてはこれだけではわからない。やはり、 S と h_c の関係は、それぞれの土に対して測定を行なわなければならないだろう。この測定方法は、先に述べた比透水係数と違つて、いろいろな方法が考案されており、比較的簡単に行なえる。

以上のように、この考察にはいろいろな疑問点が含まれており、それらを解決するためには、さらに詳細な研究が必要であろう。

第二章 昭和 37 年度に行なわれた実験

§ 1 この章の目的

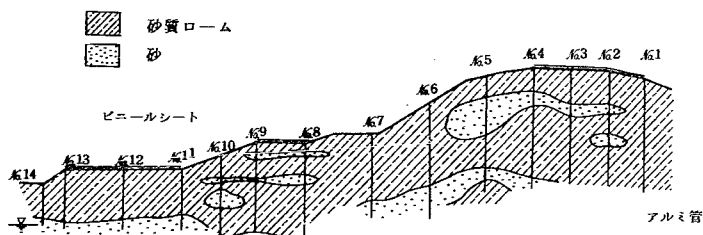
はしがきて述べたように、この報告書は、雨水がどのように堤防内に浸み込んでいくか、防水覆工の効果はどうかという二つの問題を解くために行なつた実験と考察を報告するものである。昭和 37 年度に行なわれた実験は、土木研究所土質研究室への委託外のものであるが、同じ目的から行なわれた実験として、その概要を載せて、我々の実験や考察と比較検討することは、上記の二つの疑問に対する解決への道であろうと思われる。

この章に述べることは、日本建設コンサルタント K K が昭和 38 年 3 月、8 月、10 月にそれぞれ出した報告書²⁾を参照したものであるから、詳しくは、それらの報告書を見ていただきたい。

§ 2 現状堤体による実験

昭和 37 年に、岐阜市茶屋新田地先の長良川左岸で、現状堤防裏側を使用して、人工降雨による実験が行なわれた。

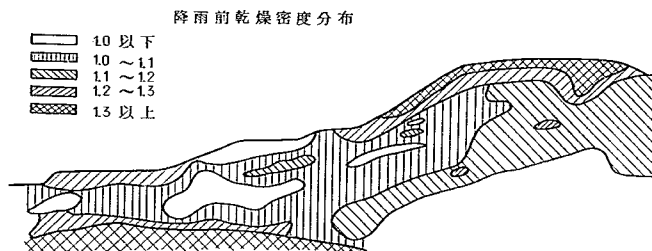
図 2 - 1



その堤防の形状、ならびにオーガーボーリングによつて求めた土質分布は図(2.1)のようである。含水量、密度分布測定は図(2.1)のように、アルミニウム管を埋設し、放射線測定機により行なわれた。

なお、この測定は土木研究所化学研究室によつて行なわれたものである。降雨装置は農業用散水装置が使用され、降雨強度を 20 mm/hr にしたが、測定時間として、降雨時間 3 時間毎に 2 時間半の休みを採つた。放射線密度計による

図 2 - 2



測定の結果、この堤防の密度分布は図(22)のようであつた。なお、防水覆工を施した場合、その防水覆工は、農業用ビニールシートを天頂、第一小段、第二小段に図(21)のように敷いた。

以上のようにして行なつた実験の結果は図(23) a, ~ j, のようであつた。この図は、降雨開始後ある時間の含水比分布で表わされている。

図 2 - 3 (a)

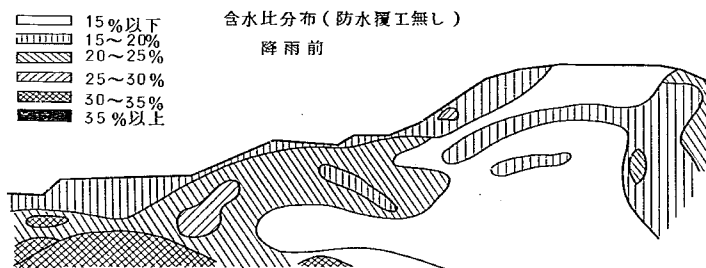


図 2 - 3 (d)

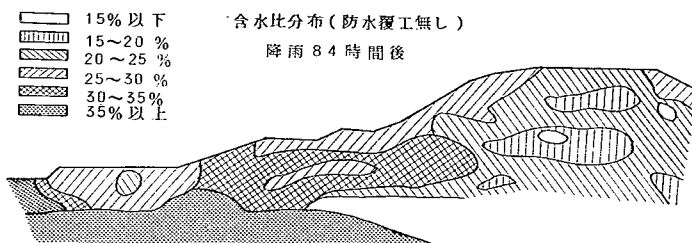


図 2 - 3 (c)

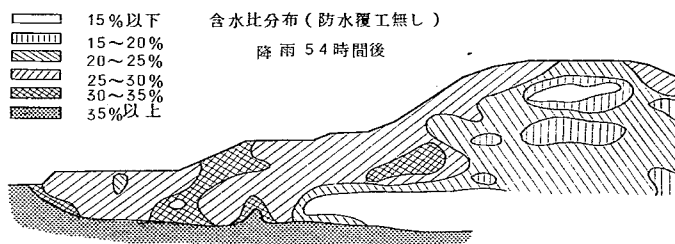


図 2 - 3 (b)

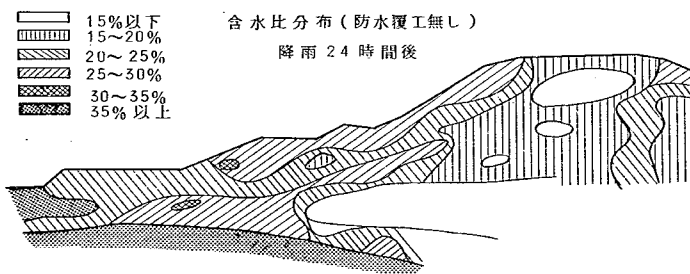


図 2 - 3 (e)

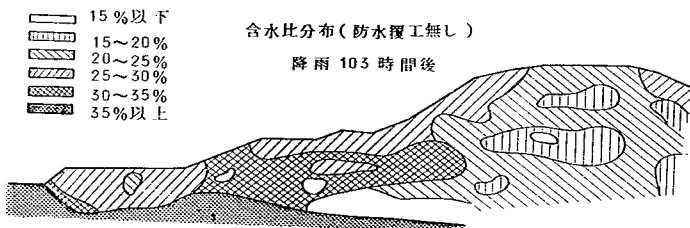


図 2 - 3 (f)

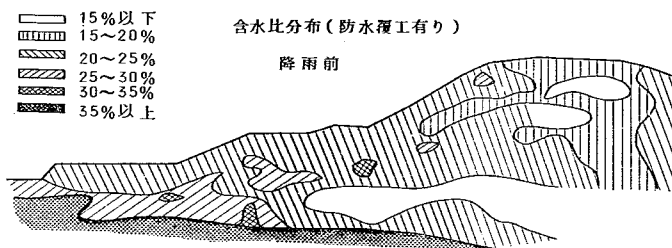


図 2 - 3 (g)

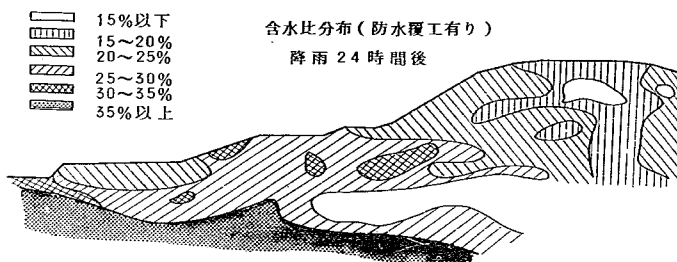


図 2-3 (h)

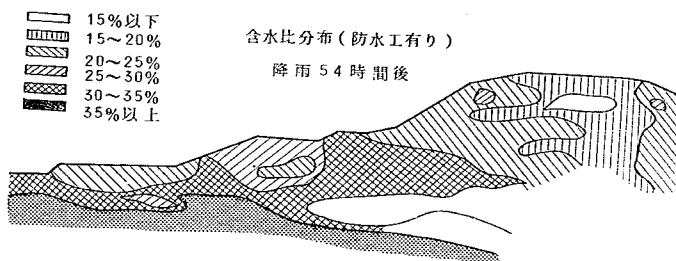


図 2-3 (i)

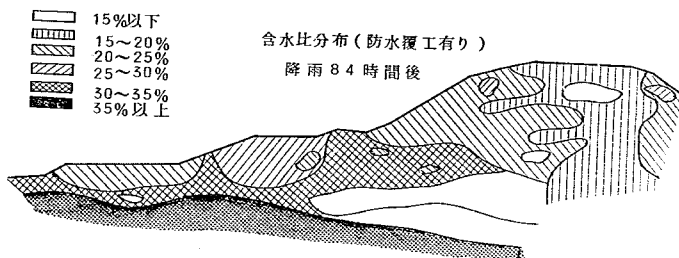
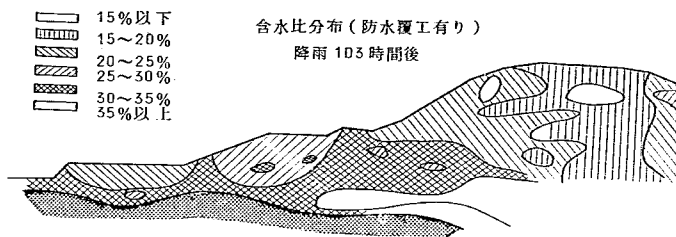


図 2-3 (j)



報告書の密度分布図、含水比分布図をもとにして、飽和度分布図を作つてみた。その図が(24)a,~j,である。この計算においては、土粒子比重 $G_s=2687$ とし、各点の密度、含水比は分布図の範囲の中間点にした。例えば 20~25% の所は 22.5%とした。そのため実際の飽和度とはだいぶん違つているかも知れない。

この図(24) a,~ j,と、前章の図(1.14) a,~ f,とを比較して見ていただきたい

図 2-4 (a)

飽和度分布 降雨前
防水覆工有

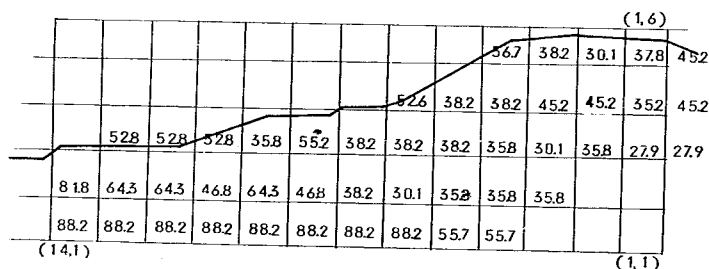
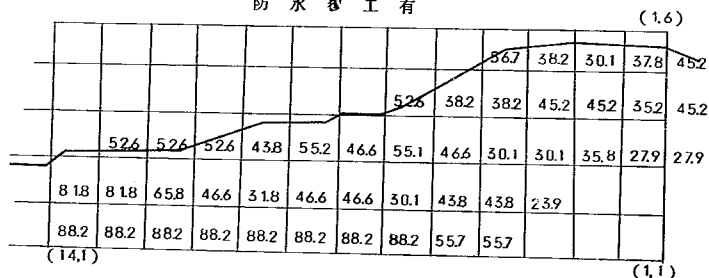
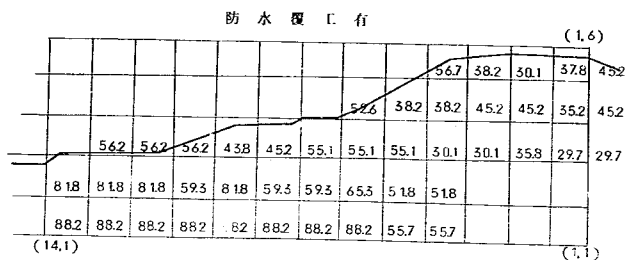


図 2-4 (b)

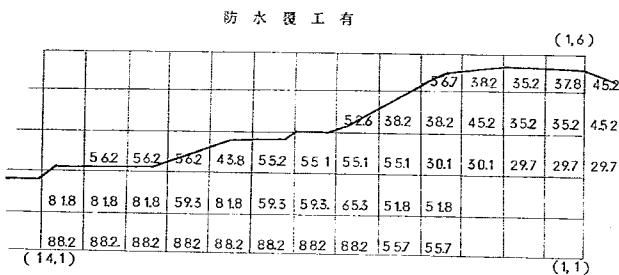
飽和度分布 降雨 24 時間後
防水覆工有



飽和度分布 降 雨 5 4 時 間 後



飽和度分布 降雨 84 時間後



飽和度分布 降雨 103 時間後

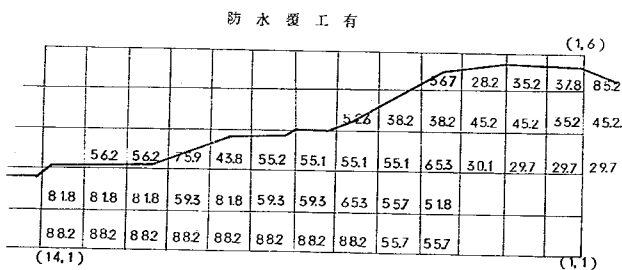


圖 2-4 (f)

飽和度分布 降雨前

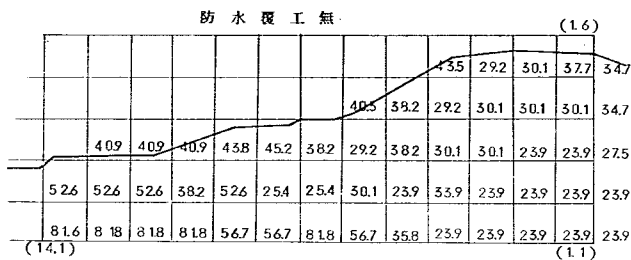


圖 2-4 (g)

飽和度分布 降雨 24 時間後

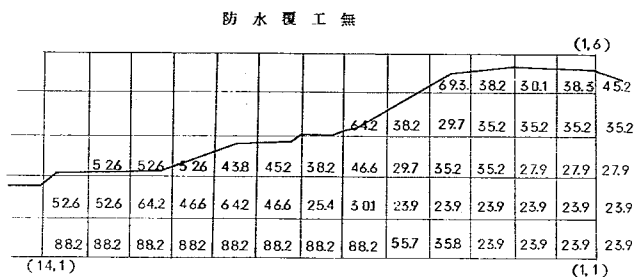


圖 2-4 (h)

飽和度分布 降雨 54 時間後

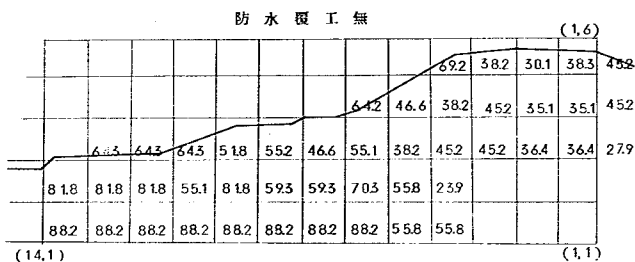


図 2-4 (j)

飽和度分布 降雨 103 時間後
防水電気無

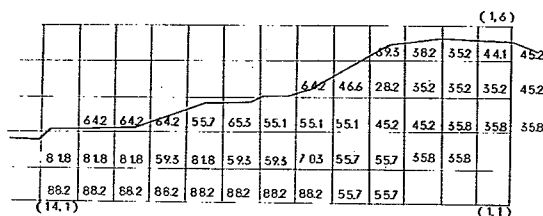
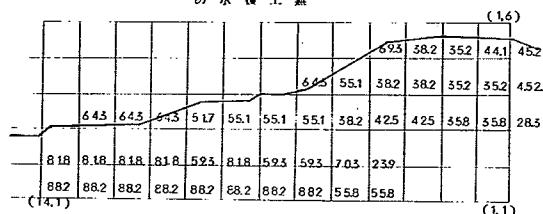


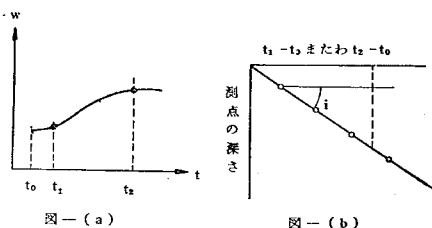
図 2-4 (i)

飽和度分布 降雨 84 時間後
防水電気無



い。この二つが非常に違ったものになったが、これは、密度の不均質によつて viscous fingering の現象が大規模に生じたことによるものと思われる。さらに、図 (24) a~j を見ると、表面の近くが飽和しているところか、45 分ぐらいしかない。しかし、表面が常に飽和しているためには、下へ逃げていく分だけの水が、常に、与えられなければならない。一度飽和状態になり、毛管水頭が 0 になって、開けき水に重力のみが作用する場合でも、透水係数 $4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の土に対しては、水は常に $4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} = 1.44 \text{ mm/hr}$ の速さで下方へ動いている。だから、これを補給するためには、雨水が完全に土中へ浸み込んでいくとしても、常に、 1.44 mm/hr 以上の雨が降っていないといけない。ところが、前に述べたように、この実験では、3 時間は 20 mm/hr で降らしても、2 時間半降らしていない時がある。表面の飽和度が非常に小さい原因は、この辺にあるのではないだろうか。

図 2-5



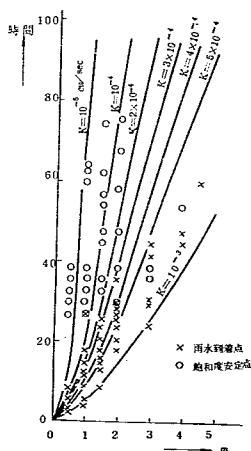
図一 (a)

図一 (b)

$t_2 - t_0$ と深さとの関係の測定値が書いてあったので、それを図 (2.6) にまとめてプロットした。そこで、

図 2-6

現状求提



$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 90^\circ \\ n &= 0.55 \\ hc &= 25 \sqrt{\frac{1}{K}} \text{ cm} \end{aligned} \right\} (21)$$

として K をいろいろ変えて、(1.9) 式の曲線を図 (2.6) に描いてみた。

(21) 式の根拠は、 $K=10^{-2} \text{ cm/sec}$, $n=0.55$ の砂の hc が (1.29) 式に従がい、 hc が Leverett の J 関数の仮定に従うとし、初期飽和度が 30% としたことによる。(21) 式を (1.41) 式と比較すると、だいたいよい一致を見、(21) 式が妥当であることがわかる。図 (2.6) から $K=4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ がこの堤防の材料土の平均透水係数ではないかと

推定される。前章の電子計算機の解法において、 $K=4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ としたのは、この根拠による。

§ 3 実物大模型による実験

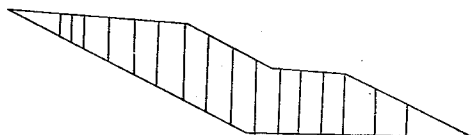
この実験は、堤体内の含水比分布の時間的变化ばかりでなく、土圧計、間げき水圧計などにより、土圧、間げき水圧を測定し、測定杭とトランシットにより、堤体の歪を測定したが、ここでは、この報告書に関係のある含水比分布の測定についてだけ述べる。

実験場所は前節の現状堤体による実験と同じ場所で、現状堤防の裏のり面に図(27)のように腹付けした。材料土は砂質ロームで、それを19層に分けてブルドーザーで転圧した。

降雨装置は農業用散水装置を使用し、降雨開始から98時間内は3時間降雨して観測時間を採ることを繰り返し、98時間以後は6時間降雨して観測時間

を採った。降雨中の降雨強度は56 mm/hrだが、観測時間も含んだ平均降雨強度は28 mm/hrであつた。密度分布、含水比分布の測定は、図

図 2-7



(27)のようにアルミニウム管を埋設し、その中へ放射線密度計、放射線水分計をそう入して行なつた。放射線密度計による測定結果、密度分布は図(28)のようであつた。この場合は、防水覆工を施した場合は行なわず、防水覆工を施さない場合についてのみ行なつた。

以上のようにして測定した結果、その含水比分布は図(29) a₇~e₇のようになつた。

前節の図(24)に相当するものが、図(210) a₇~e₇である。図(210) a~eについても、図(24)と同じことがいえ、その理由も、まったく同様のものと思われる。

また、前節の図(26)に相当するものが、図(211)である。この図からも $K = 4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の線が、ちょうど平均的であるように見える。すなわち模型堤防の材料土の透水係数も $K = 4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ のようである。

图 2 — 8

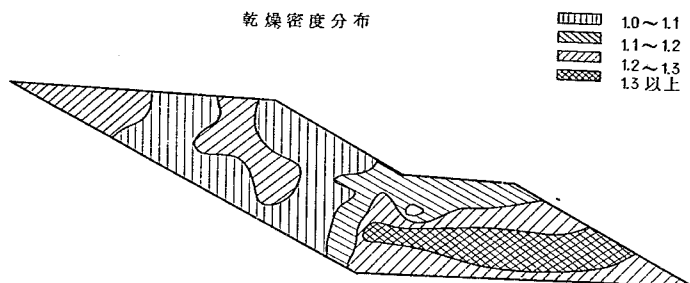


图 2 — 9 (a)

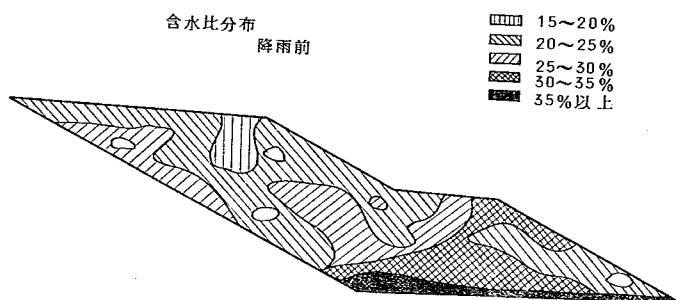


图 2 — 9 (b)

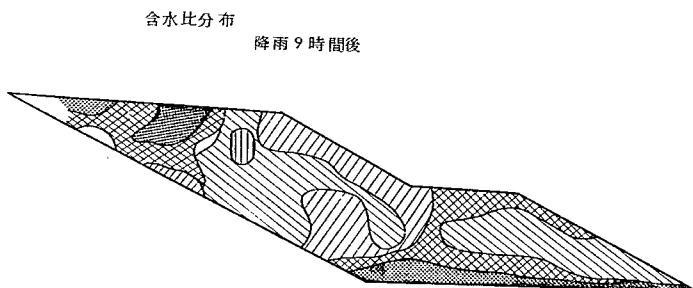


圖 2—9 (c)

含水比分布

降雨 30 時間後

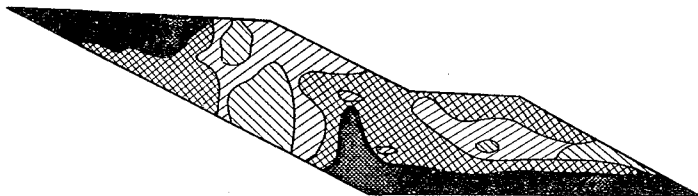


圖 2—9 (d)

含水比分布

降雨 60 時間後

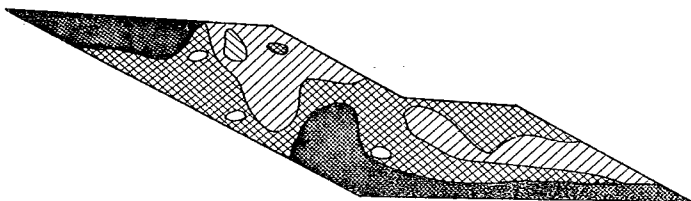


圖 2—9 (e)

含水比分布

降雨 84 時間後

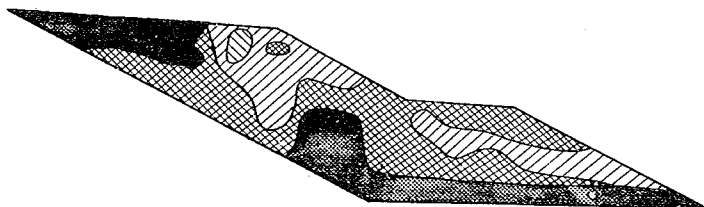


圖 2—10 (a)

飽和度分布

降雨前

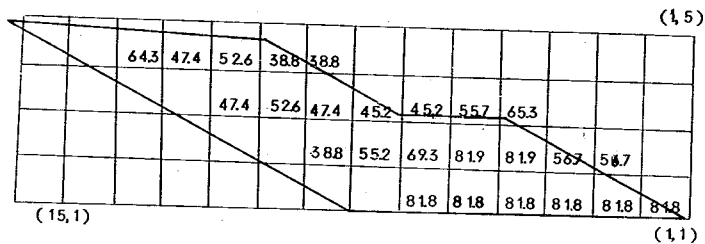


圖 2—10 (b)

飽和度分布

降雨 9 時間後

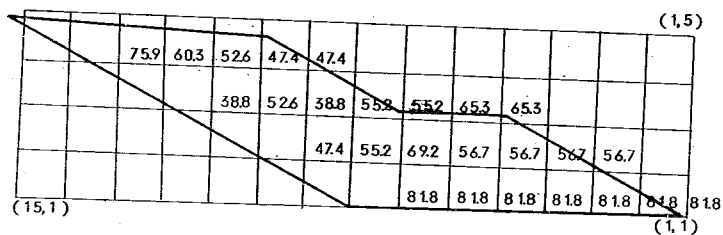


圖 2—10 (c)

飽和度分布

降雨 30 時間後

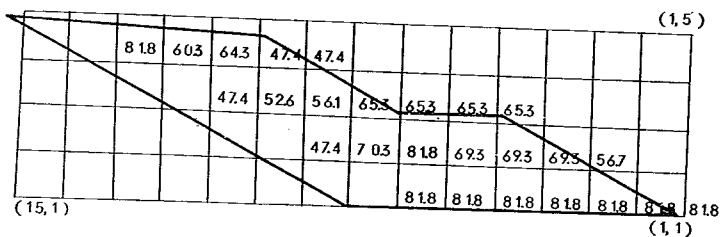


圖 2-10 (d)

飽和度分布

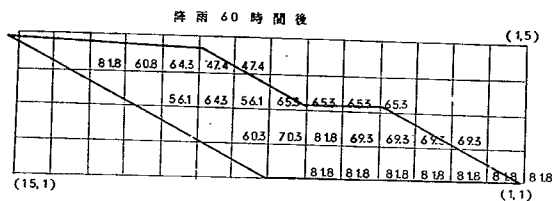


圖 2-10 (e)

飽和度分布

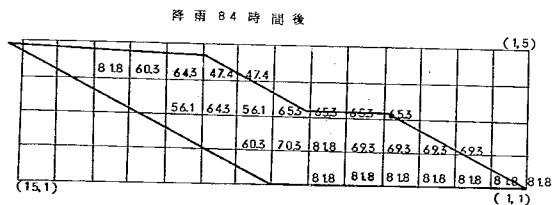
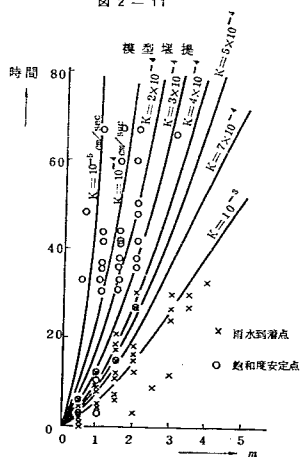


圖 2-11



才三章 室内模型実験

§ 1 序 説

昭和 38 年度に、前章で述べたような現場実験が行なわれたが、その結果は非常に雑然としていて、水が浸み込んでいく傾向をよくつかむことができない。そこで、土木研究所土質研究室では、木曾川上流工事々務所の委託により、10 分の 1 の模型堤防を使つて室内実験を行なうことになった。しかし、その結果からも傾向をつかむことは非常に困難であり、あらためて土質実験の困難性を認識させられた。

この章は、その実験について述べたものである。

§ 2 実験装置と方法

この実験においても、堤体内の水の動きは二次元であり、堤体中心線に対しその動きが対称であると考えた。

実験装置は、木曾川上流工事々務所の依頼により、三友機械 K K が製作したもので、図 (31) a, b のようである。厚さ 15 cm のアルミニウム板で最大高さ 1 m、長さ 3 m、巾 20 cm の上開き箱を作り、その両側面が第二章の現状堤体の 10 分の 1 の大きさの形になつており、その中に土を詰めることによつて模型堤防ができるわけである。その箱を載せた車輪つきの台が、ブレーキつきモーターにより、レールの上を走り、それによつて模型堤防を水平方向に自由に移動させれる。含水比の計測はアイソトープによつて行ない、模型堤防をはさんで、線源とガイガー・カウンターが設置され、同じくブレーキつきモーターで、その二つの中心を結ぶ線が常に堤防断面に垂直になるように、同時に鉛直方向に上下できるようになつている。このようにして、堤防断面のどの点でも、自由にその含水比を測定できるようになつている。

上述のような模型堤防の上に人工雨を降らすわけであるが、降雨装置は東京試機 K K によつて製作されたもので、図 (32) a, b のようである。雨滴が大きいと雨滴による土壌浸蝕が生ずるので、ノズルから水と一緒に圧縮空気を送り出し、水滴を細かくさせた。降雨量測定は、テーパーつきガラス管の中に浮子を入れた微小流量測定装置で、全ノズルに送る流量を測定して算出した。なお、降雨量は 1 ~ 10 mm/hr の間を調節できるようにした。

図 3-1 (a)

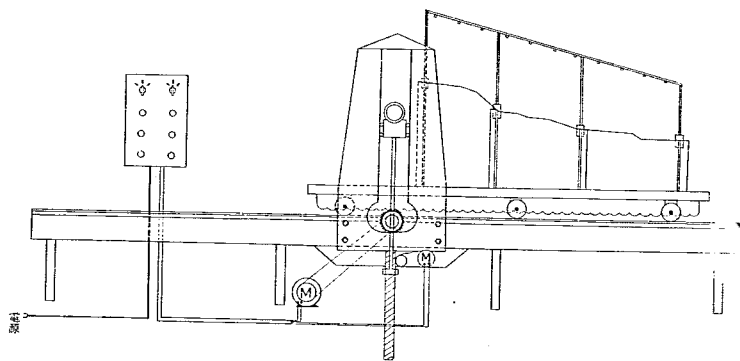


図 3-1 (b)

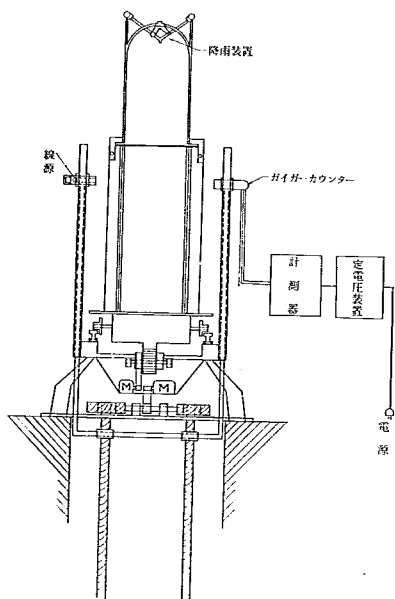


図 3-2 (a) (ノズル及びノズル取付要領)

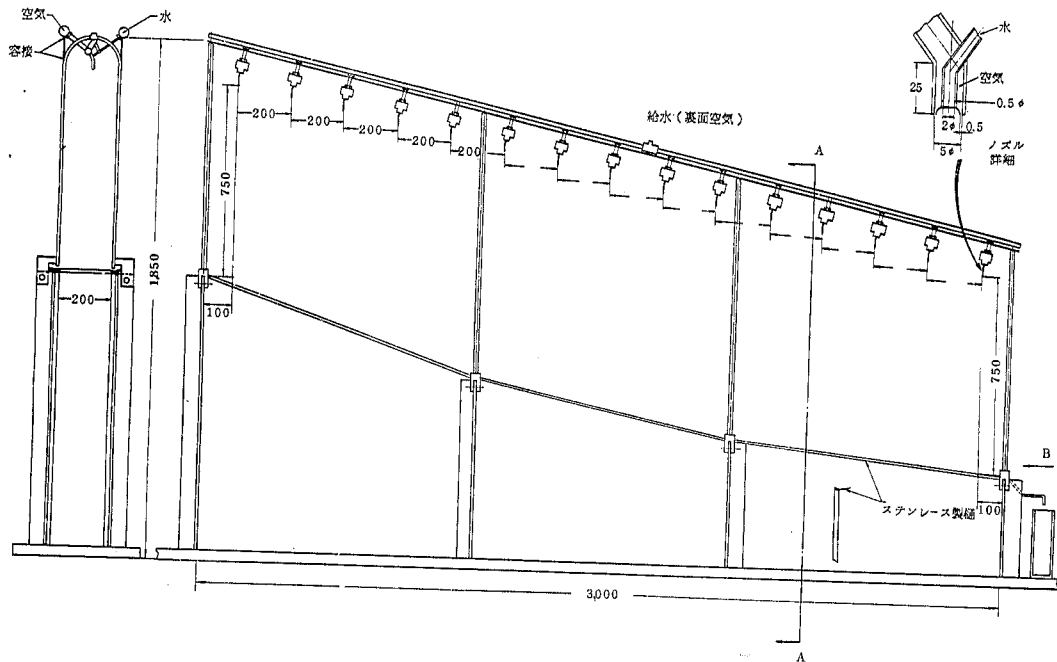
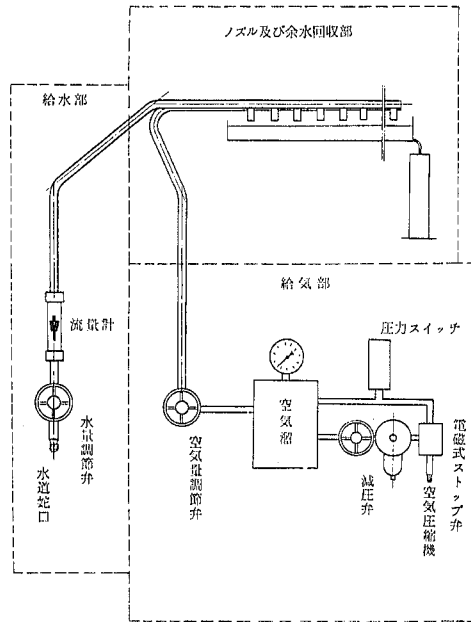
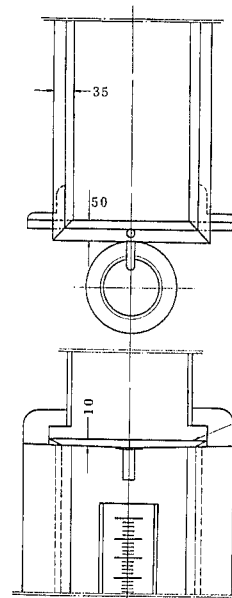


図 3 - 2 (b)

系 統 図

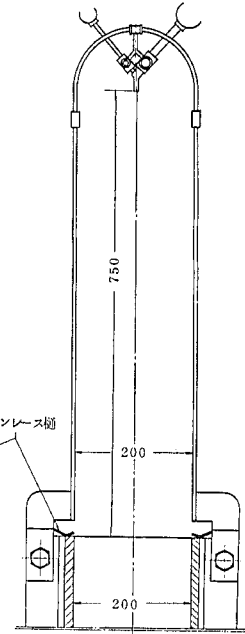


第1図-B



第一図 B 矢 視

第1図-C



第一図 断面A-A 矢 視

線源ならびにガイガー・カウンターは土木研究所化学研究室所有のものを借用した。線源は 10 mm キューリーのカドミウム同位元素である。また、ガイガー・カウンターの入力電力を一定電圧にするために、土木研究所構造研究室所有の定電圧装置を借用した。なお、同位元素の取り扱い、また含水比測定方法などを土木研究所化学研究室の蒔田実氏に指導していただいた。

第一章 3 節に、このような浸透における相似律に対する考察を述べたが、この実験を行なうに当たり、相似率の問題をどうするかで非常に迷った。というのは、現場実験の状態を、(1.20) 式、(1.21) 式を使つて、この模型堤防に再現しようとする、いろいろな支障が生じてくる。

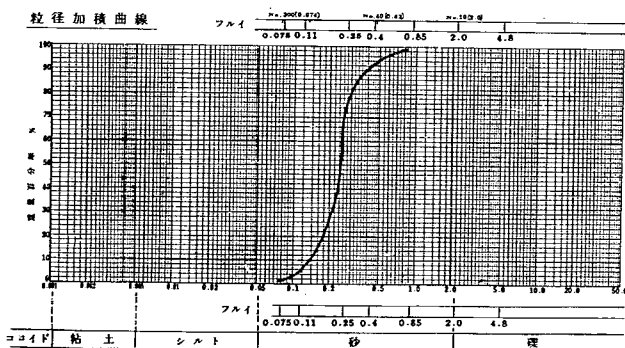
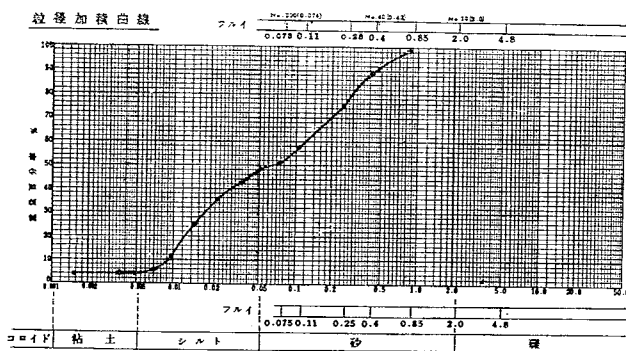
第一に、密度分布の問題である。現状堤体における密度分布とまったく同一の密度分布を作ろうとしても、それは不可能である。

つぎに降雨量と時間の問題である。密度分布の問題がなんとか処理できたとしても、(1.20) 式、(1.21) 式によつて相似律を計算すると、間げき率 n はどのような土に対してもだいたい 0.5 で同一と考えてよいから、10 分の 1 の模型においては、実物の場合に比べて、透水係数 K も、堤防表面からの単位面積当りの浸透流量 q も、ともに 100 倍にする必要がある。そして、そのとき、(1.22) 式より、模型の時間は実物の場合に比べて 1000 倍の速さで進む。第二章で述べた現状堤防を実物と考えると、透水係数 $4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ に対して、模型堤防は $4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の透水係数を持つ土を使用すればよいから、このことだけに限しては可能である。ところで、第一章 3 節の最後の部分で述べたように浸透流量 q は、ほぼ降雨量に比例するから、浸透流量を 100 倍にするということは、降雨量を 100 倍にすることにつながる。そこで、降雨量を 100 倍にすると、実物には 20 mm/hr の雨を降らせたわけであるから、 2000 mm/hr の雨が必要なわけで、これだけの雨を、法面が侵蝕させられないように降らすのは、どう考えても不可能である。

さらに、時間について考えると、3 時間毎に 2 時間半の休みということは、模型においては、108 秒毎に 9 秒の休みということで、とうてい計測不可能である。時間間隔を実物と一致させず、計測時間の都合からみると、アイソトープ計測に 2 分、測定点の定準に 30 秒、すなわち 1 点につき 2 分半かかるとすると、24 点では 1 時間要する。これを実物に直すと、1000 時間すなわち 41.7 日ということになる。すなわち、最初に計測する点と最後に計測する点では

417日の時間差が生じているということになる。ガイガー・カウンターは水分をきらいから、計測中は雨を降らすことができない。1時間降雨を止めておくから、その前には少なくとも1時間以上は雨を降らさなければならぬと考え、実物では、417日雨が降つて、417日雨が止み、次に417日雨が降る、ということを経り返すことになる。

以上のように、相似律で、現状堤防における状態を、そのまま模型堤防に再現することは不可能であるので、関東ロームと川砂の二種類の土を使用し、それを気乾燥し、238mmフルイでふるい分けした。密度はできるだけ均質にして、突き固めた。なお、室内透水試験の結果、関東ロームの透水係数は $5 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 川砂のそれは $1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ であつた。また、粒度分布は関



東ロームについては図(33)、川砂は図(34)のようであつた。実験は、防水覆工を施こさない場合を関東ロームで2回、川砂で1回、防水覆工を施こした場合もそれぞれ同じ回数行なつた。

関東ロームと川砂を採用した理由は、関東ロームが実物の堤防の土より細かく、透水係数が小さいので、それだけ、水の動きが鈍く、計測時間中の水分の移動が少ないだろうということと、川砂の場合は、浸透流量は非常に小さいが透水係数の面だけからいうと、相似律による計算値とほぼよく似た値を持つている土であるということによる。

降雨量は、降雨装置最大能力の8 mm/hr で行なつた。

実験は、日本建設コンサルタントKKに委託した。

§ 3 実験結果とその考察

実験は、日本建設コンサルタントKKの中神昌彦氏、田貝博氏、山田幸箭氏、上久保靖雄氏に行なつていただいたもので、その結果を以下に述べる。

模型堤体の作成においては、まき出し厚さは、砂の場合は1層65 cm とし5 cm になるまで木板(13 cm×12 cm×4 cm)で締め固めた。関東ロームの場合は、密度を決めておき、体積と重量を計算しながら木板で締め固めた。堤体作成中の密度、含水比は図(35)のようである。

実験中の含水比測定点は、図(36)のような24点を選んだ。これだけでは浸水傾向をつかむには、ちよつと少なすぎるようであるが、前述したように24点でも1時間かかり、これ以上に測定点をふやすと、始めの点と終りの点では、その時間差が非常に大きくなり、かえつて誤差を大きくすると思つたので、24点にした。含水比の測定は、降雨前後において行なつたもので、関東ロームの場合は降雨を1時間作用させて約2時間かけて測定し、これを2回くり返し、また、砂の場合は降雨30分間作用させて約1時間かけて測定し、これを4回くり返した。

実験結果は図(37) a₁~p₁のようである。これを図(36)に書き込むと図(38) a₁~p₁のようになった。

この結果を見てまず驚かされるのは、降雨を行なつたのに、かえつて飽和度が小さくなっている場所がところどころあるということである。しかし、これはカウント数の測定における誤差としか考えることができない。

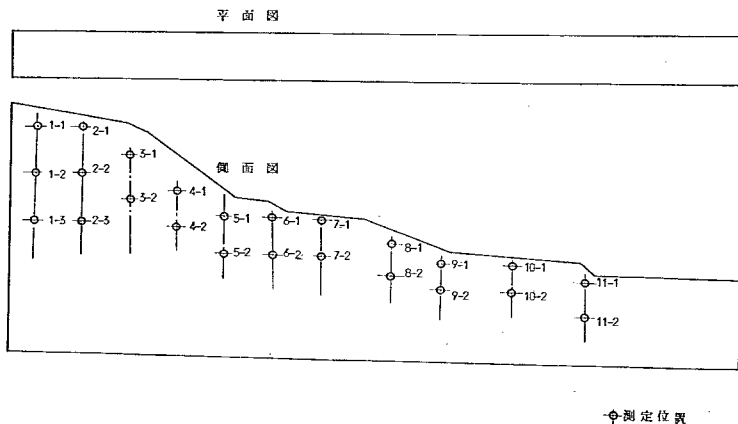
図 3-5

・各層別の重量および降雨前の密度、含水比

(単位: kg)

	実験 1 ローム	実験 2 ローム	実験 3 砂	実験 4 ローム	実験 5 ローム	実験 6 砂	備 考
1層	297375	29860	40	27089	2940	41	実験-4より 小段天端にビ ニールシート かぶせての測 定 ※()の γ_d を使用した。
2 "	"	"	43	"	"	"	
3 "	"	"	"	"	"	"	
4 "	"	"	"	"	"	"	
5 "	"	"	"	"	"	"	
6 "	"	"	"	"	"	"	
7 "	"	"	"	"	"	"	
8 "	"	"	348	"	"	40	
9 "	23693	23240	300	2180	2450	37	
10 "	17550	19290	2750	1803	2066	2835	
11 "	9750	14840	2364	1623	1620	20	
12 "	88870	14440	21641	144	1370	1972	
13 "	80925	14440	1916	110	1230	1880	
14 "	73125	910	14929	850	893	1495	
15 "	67275	8210	1050	760	850	1170	
16 "	6240	6429	100	680	8015	103	
17 "	5850	6078	905	580	7544	95	
18 "	51675	6078	698	520	650	82	
19 "	4680	5242	6226	450	560	64	
20 "		3659	8660	280	480	50	
21 "		0401	3010	120	120	275	
計	341850	370327	519096	340572	373649	519670	

・含水比	666	674	346	477	674	356
降 w (%)	(737)	(767)	(400)	(536)	(740)	(409)
雨						
・密度 γ_t	1066	1155	1615	10618	1165	162
前 (kg/m ³)	(06398)	(0691)	(1550)	(0719)	(0696)	(1556)※
γ_d	06136	0654	1560	0692	0670	1560



つぎに気づくことは、関東ロームにおいて降雨前の飽和度、含水比が非常に大きいということである。含水比でみると50~75%である。こんなに大きな含水比を持っているのだから、さだめしへとへとしていただろうと思われるが実際は、色もきれいな黄色で、非常にさらさらした感じだった。このような現象に対して、中央大学教授、久野悟郎博士のつぎのような研究³⁾がある。

関東ロームの突き固め試験において、自然含水比の試料を乾かし、いろいろな含水比をつくつて、それぞれの含水比から突き固め試験を始めると、それぞれの初期含水比に対し、試験結果が図(39)のように違つたものになる。

図 3-7 (a)

実験-1 (1時間後) 関東ローム 防水葺工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当り の増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨1時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$\frac{1.34 \cdot \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	114979	109159	1.053	0.030	784	6629	公式 $A=A_0 e^{-9 dx}$ • $\gamma \alpha = 0.64$ g/cm^3 • 真比重 2.621 • 含水比 73.7% • 間ゲキ比 $e=3.10$ • 飽和度 (降雨前) $Sr=62.31$ • 降雨残水量 2089cc
1-2	116838	125442	-1.074	-0.0415	673	5690	
1-3	126347	140846	-1.115	-0.0473	661	5589	
2-1	97040	95641	1.015	0.008	749	6333	
2-2	113213	124002	-1.095	-0.0394	519	4388	
2-3	136010	136356	-1.003	-0.013	735	6214	
3-1	110620	112526	-1.017	-0.073	725	6130	
3-2	123014	110445	1.114	0.063	835	7060	
4-1	105843	113374	-1.071	-0.0298	691	5842	
4-2	125237	122855	1.020	0.012	755	6383	
5-1	116194	118681	-1.021	-0.009	724	6121	
5-2	128907	135381	-1.050	-0.0212	705	5961	
6-1	112406	102868	1.093	0.052	817	6908	
6-2	124672	131337	-1.053	-0.0224	702	5935	
7-1	126451	121919	1.037	0.021	771	6519	
7-2	123334	125405	-1.016	-0.0069	727	6147	
8-1	131609	109615	1.201	0.107	904	9643	
8-2	139370	137071	1.017	0.010	734	6375	
9-1	136926	122136	1.121	0.066	841	7111	
9-2	129568	129756	-1.001	-0.0004	736	6223	
10-1	145588	119658	1.217	0.114	915	7736	
10-2	142159	128790	1.104	0.058	828	7001	
11-1	160480	119786	1.340	0.170	1000	8455	
11-2	125186	131979	-1.054	-0.0228	702	5935	

図 3-7 (b)

実験-1 (2時間後) 関東ローマ 防水覆工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当り の増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨2時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$\frac{1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	114979	100424	1.135	0.0788	860	72.71	°降雨残水量 1998000
1-2	116888	120726	-1.033	-0.0141	715	60.45	
1-3	126347	139862	-1.107	-0.0441	665	56.22	
2-1	97040	104603	-1.078	-0.0326	687	58.08	
2-2	113213	121540	-1.074	-0.031	690	58.34	
2-3	136010	133021	1.022	0.0127	758	64.09	
3-1	110620	89504	1.236	0.1233	930	78.63	
3-2	123014	131487	-1.069	-0.029	693	58.59	
4-1	105843	108806	-1.028	-0.012	719	60.79	
4-2	125287	121596	1.030	0.0172	765	64.68	
5-1	116194	101407	1.146	0.0793	862	72.88	
5-2	128907	134632	-1.044	-0.0187	708	59.86	
6-1	112406	82863	1.357	0.1777	1015	85.82	
6-2	124672	65072	1.9159	0.3784	1328	112.28	
7-1	126451	97322	1.2993	0.1524	975	82.43	
7-2	123384	126609	-1.026	-0.0111	721	60.96	
8-1	131609	95364	1.3801	0.1875	1030	87.08	
8-2	139370	123104	1.1322	0.0723	850	71.87	
9-1	136906	104417	1.3111	0.1576	1000	84.55	
9-2	129568	102334	1.2661	0.1373	952	80.49	
10-1	145588	114758	1.2687	0.1385	955	80.74	
10-2	142159	112091	1.2682	0.1383	954	80.66	
11-1	160480	114093	1.4066	0.1985	1050	88.78	
11-2	125186	97781	1.2803	0.1438	964	81.50	

図 3-7 (c)

実験-2 (1時間後) 関東ローム 防水防工無

測定 位置	1 (カント数) 降雨前 (A ₀)	2 (カント数) 降雨1時 間後 (A)	3 $\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	4 1cm ³ 当り の増加水量 $\frac{134 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}{A (2)}$	5 降雨後の 含水比	6 飽和度 Sr %	備 考
1-1	116722	115347	1.0119	0.0069	778	7283	・降雨残水量 12620cc
1-2	136033	133971	1.0154	0.0089	780	7301	
1-3	141905	138799	1.0224	0.0129	786	7358	
2-1	112626	114456	-1.0162	-0.00935	754	7056	
2-2	124037	125038	-1.0080	-0.0046	747	6992	
2-3	136322	135970	1.0026	0.0015	768	7189	
3-1	108575	105279	1.0313	0.0179	793	7423	
3-2	154591	154689	-1.0006	-0.00035	752	7039	
4-1	126612	126610	1.000	0.000	767	7180	
4-2	116343	114918	1.0124	0.00717	778	7283	
5-1	144515	127378	1.1345	0.07343	874	8481	
5-2	119974	119286	1.0058	0.00377	773	7236	
6-1	133801	113455	1.1793	1.09597	906	8481	
6-2	129258	116274	1.1117	0.06163	858	8031	
7-1	128994	110462	1.1678	0.09028	895	8378	
7-2	128854	124547	1.0346	0.01979	796	7451	
8-1	143973	123897	1.1620	0.08738	893	8359	
8-2	130655	129280	1.0106	0.00614	775	7255	
9-1	131272	110344	1.1897	0.10118	913	8546	
9-2	133913	132121	1.0136	0.00787	779	7292	
10-1	145791	144125	1.0116	0.00688	777	7273	
10-2	134341	137808	-1.0258	-0.0148	734	6871	
11-1	148780	135836	1.0953	0.05302	844	7300	
11-2	142586	135649	1.0511	0.02900	810	7582	

図 3-7 (d)

実験-2 (2時間後) 関東ローム 防水覆工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨1時 間後 (A)	A ₀ (1) A (2)	134 log A ₀ (1) A (2)	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	116722	129495	-11094	-00604	678	6347	• $r\alpha=0.69$ • 真比重 2621 ◦ 含水比 767% ◦ 間デキ比 e=2.80 ◦ 飽和度 (降雨前) Sr=77.80 ◦ 降雨残水量 1304.0CC
1-2	136033	117242	11603	008652	893	8359	
1-3	141925	142857	-10067	-000590	745	6974	
2-1	112626	113513	-10079	-000453	747	6995	
2-2	124037	125759	-10139	-000804	742	6946	
2-3	136322	139346	-10222	-001277	735	6880	
3-1	108575	89815	12089	011040	926	8668	
3-2	154591	145103	10654	008686	821	7685	
4-1	126612	117102	10812	004544	832	7738	
4-2	116343	118492	-10135	-001067	751	7030	
5-1	144515	116738	12379	018420	947	8865	
5-2	119974	123312	-10278	-001591	744	6964	
6-1	133801	105613	12669	013767	960	8936	
6-2	129258	129466	-10016	-000092	765	7161	
7-1	128994	99622	12948	015035	984	9211	
7-2	128854	129196	-10027	-000157	766	7170	
8-1	143973	110806	12993	015237	988	9248	
8-2	130655	115454	11317	007200	857	8022	
9-1	131272	98671	13304	016613	1007	9426	
9-2	133913	103988	12878	014720	981	9183	
10-1	145791	116145	12552	013227	959	8977	
10-2	134341	135452	-10083	-000481	759	7105	
11-1	148780	121674	12228	011706	937	8771	
11-2	142586	116016	12290	012000	940	8799	

図 3-7 (e)

実験-3 (0.5時間後) 砂 防水復工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨0.5時 間後 (A)	A ₀ (1) A (2)	$1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	37871	37992	-10031	-00018	387	1379	公式 $A = A_0 e^{-9dx}$ ° $\gamma_d = 1.55$ ° 真比重 2.744 ° 含水比 4.0% ° 間ギャ比 $e = 0.77$ ° 飽和度 (降雨前) $Sr = 14.25$ ° 降雨残水量 793cc
1-2	37878	36752	10306	001754	513	1828	
1-3	37403	37644	-10064	-000871	376	1340	
2-1	35781	34811	10279	001601	503	1790	
2-2	36187	36740	-10152	-000878	343	1222	
2-3	39399	40028	-10158	-000913	341	1215	
3-1	28638	27525	10404	002305	549	1956	
3-2	40733	40983	-10061	-000354	373	1329	
4-1	37316	37657	-10091	-000527	366	1304	
4-2	33269	33384	-10035	-000204	386	1376	
5-1	35739	32496	10998	005536	767	2733	
5-2	30286	30016	10100	000579	439	1564	
6-1	30204	28338	10658	003709	644	2295	
6-2	29479	30104	-10212	-001221	321	1144	
7-1	36108	33710	10711	003997	658	2345	
7-2	30556	30186	10123	000712	446	1589	
8-1	35041	33170	10564	003193	611	2177	
8-2	31833	32122	-10091	-000527	366	1304	
9-1	32789	25146	13039	015442	1203	4287	
9-2	27114	26036	10414	002362	546	1946	
10-1	36341	33350	10897	005000	710	2520	
10-2	33362	33710	-10104	-000602	368	1311	
11-1	34900	33371	-10995	-005521	044	157	
11-2	36526	37771	-10341	-001951	274	976	

図 3-7 (f)

実験-3 (1.0時間後) 砂 防水覆工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当 b の増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨1.0時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$\frac{1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 S _r %	
1-1	37871	37832	1.0010	0.00058	4.04	14.40	・降雨残水量 830cc
1-2	37878	36937	1.0255	0.01466	4.95	17.64	
1-3	37403	37759	-1.0095	-0.00551	3.64	12.97	
2-1	35781	35175	1.0172	0.00993	4.64	16.54	
2-2	36187	37054	-1.0240	-0.01380	3.11	11.08	
2-3	39399	39171	1.0058	0.00336	4.22	15.04	
3-1	28638	25726	1.1132	0.06240	8.02	28.58	
3-2	40733	40377	1.0088	0.00511	4.34	15.47	
4-1	37316	36269	1.0289	0.01658	5.07	18.07	
4-2	33269	34133	-1.0256	-0.01471	3.07	10.94	
5-1	35739	31925	1.1195	0.06569	8.24	29.36	
5-2	30286	31014	-1.024	-0.01380	3.1	11.05	
6-1	30204	27611	1.0939	0.05223	7.38	26.300	
6-2	29479	27139	1.0862	0.04812	7.20	25.66	
7-1	36108	33093	1.0911	0.05073	7.27	25.91	
7-2	30556	26075	1.1719	0.09231	9.95	35.46	
8-1	35041	31590	1.1092	0.06031	7.89	28.12	
8-2	31833	31253	1.0186	0.01072	4.69	16.71	
9-1	32789	25342	1.2939	0.14995	13.68	48.75	
9-2	27114	24463	1.1084	0.05990	7.25	25.83	
10-1	36341	31917	1.1386	0.07554	8.87	31.61	
10-2	33362	33461	-1.003	-0.00174	3.89	13.86	
11-1	34900	30674	1.1378	0.07513	8.85	31.54	
11-2	36526	30229	1.2083	0.11011	11.10	39.56	

図 3-7 (g)

実験-3 (1.5時間後) 砂 防水覆工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨1.5時 間後 (A)	A ₀ (1) A (2)	$1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 S _r %	
1-1	37871	37097	1.0209	0.01203	477	1700	°降雨残水量 8920cc
1-2	37878	37382	1.0133	0.00969	449	1600	
1-3	37403	38569	-1.0312	-0.01788	271	966	
2-1	35781	26065	1.3728	0.18440	1589	5663	
2-2	36187	38289	-1.0581	-0.03287	193	688	
2-3	39399	39198	1.0050	0.00291	418	1490	
3-1	28638	25818	1.1092	0.06081	787	2805	
3-2	40733	40284	1.0111	0.00642	441	1572	
4-1	37316	32531	1.1471	0.07986	748	2666	
4-2	33269	33924	-1.0197	-0.01135	332	1183	
5-1	35739	31924	1.1195	0.06569	760	2708	
5-2	30286	25442	1.1904	0.10142	1054	3756	
6-1	30204	26804	1.1268	0.06948	849	3026	
6-2	29479	29949	-1.0159	-0.00918	341	1215	
7-1	36108	32577	1.1084	0.05990	786	2801	
7-2	30556	24937	1.2253	0.11824	1162	4141	
8-1	35041	25821	1.3571	0.17770	1546	5509	
8-2	31833	28147	1.1310	0.07164	862	3072	
9-1	32789	24844	1.3198	0.16148	1440	5132	
9-2	27114	23938	1.1327	0.07251	868	3093	
10-1	36341	30668	1.1850	0.09878	1038	3699	
10-2	33362	23414	1.1741	0.09341	1003	3574	
11-1	34900	30206	1.1554	0.03406	943	3361	
11-2	36526	31512	1.1591	0.08592	953	3396	

図 3-7 (h)

実験-3 (20時間後) 砂 防水覆工無

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨20時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$\frac{1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	37871	37943	-1.0019	-0.0011	393	14.01	○降雨残水量 780cc
1-2	37878	37146	1.0197	0.01135	472	16.82	
1-3	37403	36565	1.0229	0.01317	485	17.28	
2-1	35781	36820	-1.0290	-0.01664	292	10.41	
2-2	36187	36029	1.0044	0.00256	417	14.86	
2-3	39399	38987	1.0106	0.00614	439	15.64	
3-1	28638	26045	1.0996	0.05525	767	27.33	
3-2	40733	39988	1.0186	0.01072	469	16.71	
4-1	37316	31321	1.1914	0.10192	1057	37.67	
4-2	33269	33730	-1.0139	0.00803	341	12.15	
5-1	35739	31858	1.1218	0.06689	832	29.65	
5-2	30286	24152	1.2540	0.13172	1250	37.56	
6-1	30204	26955	1.1205	0.06621	828	29.51	
6-2	29479	25349	1.1629	0.08782	967	34.46	
7-1	36108	30800	1.1723	0.09251	998	35.57	
7-2	30556	24820	1.2311	0.12099	1281	45.65	
8-1	35041	23004	1.5233	0.22493	1980	70.56	
8-2	31333	27468	1.1589	0.08583	953	33.96	
9-1	32789	29662	1.1054	0.05832	776	27.65	
9-2	27114	25153	1.0780	0.04371	683	24.34	
10-1	36341	30520	1.1907	0.10157	1054	37.56	
10-2	33362	26755	1.2469	0.12841	1227	43.73	
11-1	34900	30080	1.1602	0.08647	968	5.59	
11-2	36526	30337	1.2040	0.10804	1096	34.78	

図 3-7 (i)

実験-4 (1 時間後) 関東ローマ 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨1時 間後 (A)	A ₀ (1) A (2)	$134 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	118762	118994	-1.002	-0.00117	535	5311	$r\alpha=0.72$ °真比重 2621 °含水比 536% °間ゲキ比 e=2.64 °飽和度 (降雨前) Sr=5321 °降雨残水量 2764cc
1-2	143115	143259	-1.001	-0.00058	536	5321	
1-3	127165	128898	-1.0136	-0.00787	525	5212	
2-1	113008	113398	-1.0034	-0.00197	534	5302	
2-2	141855	141952	-1.0007	-0.0004	536	5321	
2-3	125888	125988	-1.0008	-0.00047	536	5321	
3-1	115824	118520	-1.0233	-0.00134	535	5311	
3-2	141283	142007	-1.0051	-0.00296	531	5272	
4-1	133101	129916	1.0245	0.01408	556	5520	
4-2	133233	131324	1.0149	0.00860	548	5441	
5-1	138669	122330	1.1290	0.07060	634	6294	
5-2	132308	134982	-1.0202	-0.01164	520	5163	
6-1	138499	123246	1.1238	0.06792	630	5255	
6-2	123080	123321	-1.0020	-0.001166	535	5311	
7-1	137971	123862	1.1139	0.06278	624	6195	
7-2	125314	12530	1.0001	0.00005	536	5321	
8-1	127504	116892	1.0908	0.05059	607	6026	
8-2	122517	128784	-1.0511	-0.029	496	4924	
9-1	129940	121630	1.0683	0.03844	588	5838	
9-2	129792	133548	-1.0289	-0.01524	515	5113	
10-1	173774	136795	1.2703	0.13924	730	7247	
10-2	133642	136033	-1.0179	-0.01033	523	5192	
11-1	140694	113059	1.2444	0.12725	713	7079	
11-2	133540	117998	1.1317	0.0720	637	6324	

図 3-7 (j)

実験-4 (2 時間後) 関東ローム 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨2時 間後 (A)	A ₀ (1) A (2)	$1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	118762	114701	10354	002025	564	5599	°降雨残水量 2259cc
1-2	143115	145340	-10155	-000895	524	5202	
1-3	127165	129284	-10167	-000829	525	5212	
2-1	113008	114161	-10102	-000591	528	5242	
2-2	141855	138364	10252	001459	558	5540	
2-3	125388	128853	-10235	-001352	517	5133	
3-1	115324	101105	11456	007910	647	6423	
3-2	141283	141866	-10041	-000239	534	5301	
4-1	133101	127413	10446	002539	572	5679	
4-2	133283	132610	10051	000296	540	5361	
5-1	138669	140201	-1011	-000637	528	5242	
5-2	132308	135765	-10261	-001499	516	5123	
6-1	138499	99683	13894	014792	741	7357	
6-2	123080	126975	-10316	-001810	511	5073	
7-1	137971	138730	-10055	-000319	532	5282	
7-2	125314	128210	-10231	-001329	518	5143	
8-1	127504	120682	10565	003199	533	5788	
8-2	122517	125699	-1026	-001494	515	5113	
9-1	129940	112000	11602	008643	655	6503	
9-2	129792	131611	-1114	-000809	525	5212	
10-1	173774	153514	11320	007216	647	6423	
10-2	133642	136918	-10245	-001408	516	5123	
11-1	140694	125026	11253	006870	632	6275	
11-2	133540	102790	12992	015233	743	7426	

図 3 - 7 (k)

実験-5 (1時間後) 関東ローマ 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数) 降雨前 (A ₀)	2 (カント数) 降雨1時 間後 (A)	3 $\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	4 1cm ³ 当り の増加水量 $\frac{1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}$	5 降雨後の 含水比	6 飽和度 Sr %	備 考
1-1	121264	118480	1.0235	0.01219	75.9	72.60	$\gamma_a = 0.70$ °真比重 2.621 °含水比 7.40 °間デキ比 e=2.74 °飽和度 (降雨前) Sr=7.079 °降雨残水量 1969cc
1-2	131135	136475	-1.0407	-0.02322	73.6	70.40	
1-3	125321	125360	-1.0043	-0.00249	73.7	70.50	
2-1	111245	113472	-1.020	-0.01152	72.5	69.35	
2-2	128373	129383	-1.0118	-0.00682	73.3	70.12	
2-3	120662	122008	-1.0112	-0.00649	73.2	70.02	
3-1	112158	117425	-1.047	-0.02673	70.5	67.44	
3-2	134211	137925	-1.0277	-0.01591	71.9	68.78	
4-1	134770	134562	1.0015	0.00608	74.8	71.55	
4-2	120056	124843	-1.1232	-0.06762	64.5	61.70	
5-1	133560	134512	-1.0071	-0.00411	73.5	70.31	
5-2	119342	119441	-1.0008	-0.00047	73.8	70.59	
6-1	112753	109687	1.0280	0.01607	76.2	72.89	
6-2	115076	117837	-1.024	-0.00138	73.8	70.59	
7-1	113424	113656	-1.00204	-0.001166	73.8	70.59	
7-2	106193	122656	-1.155	-0.08386	62.2	59.50	
8-1	112776	100621	1.1208	0.06637	83.4	79.78	
8-2	109365	107587	1.0165	0.00953	75.4	72.13	
9-1	128340	116300	1.1035	0.05731	82.2	78.63	
9-2	112585	113513	-1.0082	-0.004757	73.3	70.12	
10-1	153877	153859	1.0001	0.00058	74.2	70.98	
10-2	117494	119867	-1.0202	-0.01164	72.3	69.16	
11-1	149211	112194	1.3299	0.16591	97.6	93.36	
11-2	122289	100010	1.2228	0.11706	90.8	86.86	

図 3-7 (1)

実験-5 (2時間後) 関東ローマ 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当り の増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨2時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$134 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	121264	116558	10404	002305	774	7404	○降雨残水量 2363CC
1-2	131135	134594	-10264	-001517	719	6878	
1-3	125321	125155	10013	000075	742	7098	
2-1	111245	116804	-105	-002839	700	6696	
2-2	128373	124576	10305	001615	763	7299	
2-3	120662	122115	-1012	-000694	730	6982	
3-1	112158	95762	11712	009196	872	8341	
3-2	184211	136869	-10198	-001142	724	6926	
4-1	134770	129930	10373	002131	770	7366	
4-2	120056	124039	-10332	-0019	713	6820	
5-1	133560	116608	11454	007901	853	8160	
5-2	119342	118745	10050	000291	745	7126	
6-1	112753	92979	12127	011223	900	8609	
6-2	115076	112979	10186	001072	756	7232	
7-1	113424	104951	10807	004517	804	7691	
7-2	106193	121208	-11414	-009697	630	6026	
8-1	112776	92226	12228	011706	908	8686	
8-2	109365	109854	-10053	-000308	736	7040	
9-1	128340	116083	11056	005842	823	7873	
9-2	112585	111008	10142	000820	752	7193	
10-1	153377	154699	-10053	-000308	736	7040	
10-2	117494	117216	10024	000139	742	7098	
11-1	149211	109254	13657	018138	998	9547	
11-2	122289	88927	13752	018542	1000	9566	

図 3-7 (m)

実験-6 (0.5時間後) 砂 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1 cm ² 当り の増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨0.5時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	26799	27189	-1.0146	-0.00843	355	1715	$\gamma_d = 1.56$ °真比重 2744 °含水比 4.09% °間デキ比 e=0.76 °飽和度 (降雨前) Sr=1.477 °降雨残水量 1939cc
1-2	35319	34701	1.0178	0.01026	475	2044	
1-3	35326	33903	1.0420	0.02395	566	1051	
2-1	26478	27328	-1.0321	-0.01838	291	1715	
2-2	32254	31689	1.0178	0.01026	475	1293	
2-3	32338	32780	-1.0137	-0.00792	358	1495	
3-1	28900	28861	1.0014	0.00082	414	1043	
3-2	35396	36650	-1.0354	-0.01891	289	1034	
4-1	34026	34345	-1.0094	-0.0041	377	625	
4-2	30675	32625	-1.0636	-0.03589	173	1419	
5-1	29362	29496	-1.0045	-0.00261	393	1126	
5-2	30928	31817	-1.0287	-0.01513	312	1953	
6-1	32737	31598	1.0360	0.02058	541	816	
6-2	28879	30332	-1.0503	-0.0286	226	733	
7-1	29357	31025	-1.0568	-0.03215	203	2513	
7-2	33323	30853	1.0801	0.04484	696	1979	
8-1	29144	28081	1.0379	0.02165	548	1184	
8-2	31300	31898	-1.0191	-0.01101	328	2726	
9-1	37794	34367	1.0997	0.05396	755	1534	
9-2	36182	36029	1.0042	0.00244	425	1264	
10-1	39015	39636	-1.0159	-0.00913	350	1469	
10-2	36228	36337	-1.003	-0.00017	4.07	1520	
11-1	37351	37235	1.0031	0.00180	421	11.05	
11-2	38200	39266	-1.0279	-0.01601	306		

図 3-7 (n)

実験-6 (1.0時間後) 砂 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨10時 間後 (A)	$\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	$134 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	26799	27038	-1.0089	-0.00516	375	1354	降雨残水量 208400
1-2	35319	34133	1.0347	0.01985	537	1939	
1-3	35326	33432	1.0567	0.03209	616	2217	
2-1	26478	27525	-1.0895	-0.02254	265	957	
2-2	32254	33358	-1.0342	-0.01956	283	1022	
2-3	32338	32031	1.0096	0.00556	445	1607	
3-1	28900	27875	1.0368	0.02104	545	1948	
3-2	35396	36754	-1.0384	-0.02192	268	968	
4-1	34026	34633	-1.0178	-0.01026	345	1238	
4-2	30675	32436	-1.0571	-0.03232	202	729	
5-1	29362	28819	1.0188	0.01084	479	1729	
5-2	30928	32360	-1.0463	-0.02634	240	867	
6-1	32737	30812	1.0625	0.03527	635	2293	
6-2	28879	30433	-1.0538	-0.0305	213	769	
7-1	29357	31640	-1.0778	-0.0436	129	466	
7-2	33323	30348	1.0980	0.05440	768	2773	
8-1	29144	26396	1.1041	0.05763	779	2813	
8-2	31300	31010	1.0094	0.05229	945	2690	
9-1	37794	30161	1.2247	0.11796	1065	3845	
9-2	36182	34126	1.0389	0.02036	543	1961	
10-1	39015	39016	1.0000	0.000	409	1477	
10-2	36228	36835	-1.0163	-0.00836	355	1282	
11-1	37351	34878	1.0709	0.03987	665	2401	
11-2	38200	39520	-1.0345	-0.01974	233	1022	

図 3-7 (o)
実験-6 (1.5時間後) 砂 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数)	2 (カント数)	3	4 1cm ³ 当りの 増加水量	5	6	備 考
	降雨前 (A ₀)	降雨1.5時 間後 (A)	A ₀ (1) A (2)	$1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}$	降雨後の 含水比	飽和度 Sr %	
1-1	26799	27198	-10149	-000860	354	1278	・降雨残水量 2078cc
1-2	35319	34572	10216	001244	489	1766	
1-3	35326	33009	10702	003948	663	2394	
2-1	26478	26972	-10187	-001079	340	1228	
2-2	32254	33121	-10269	-001545	310	1119	
2-3	32338	32572	-100723	-000418	382	1379	
3-1	28900	25990	11120	006177	797	2878	
3-2	35396	36238	-10238	-001235	330	1191	
4-1	34026	35387	-10399	-002277	263	95	
4-2	30675	32346	-10545	-002955	220	794	
5-1	29362	28930	10149	000862	464	1675	
5-2	30928	31753	-10267	-001533	311	1123	
6-1	32737	28326	11557	008422	1012	3654	
6-2	28879	30813	-1067	-003773	167	603	
7-1	29357	30209	-10290	-001664	302	1090	
7-2	33323	30899	10784	004393	690	2491	
8-1	29144	25311	11514	008205	933	3369	
8-2	31300	31806	-10162	-000935	344	1241	
9-1	37794	30800	12271	011910	1171	4228	
9-2	36182	29983	12068	010988	1110	4008	
10-1	39015	39500	-10124	-000717	363	1311	
10-2	36228	36520	-10081	-000460	379	1368	
11-1	37351	32840	11374	007492	890	3213	
11-2	38200	39094	-10234	-001213	318	1148	

図 3-7 (p)

実験-6 (20時間後) 砂 防水覆工有

測定 位置	1 (カント数) 降雨前 (A ₀)	2 (カント数) 降雨20時 間後 (A)	3 $\frac{A_0 (1)}{A (2)}$	4 1cm ³ 当り の増加水量 $\frac{1.34 \log \frac{A_0 (1)}{A (2)}}{A (2)}$	5 降雨後の 含水比	6 飽和度 Sr %	備 考
1-1	26799	27671	-10325	-001794	320	1155	°降雨残水量 2278CC
1-2	35319	34637	10197	001185	480	1733	
1-3	35326	34525	10232	001329	498	1784	
2-1	26478	27210	-10276	-001584	308	1112	
2-2	32254	32352	-10030	-000174	398	1437	
2-3	32338	31803	10168	000970	471	1701	
3-1	28900	28140	12489	012935	1238	4470	
3-2	35396	35773	-1011	-000637	868	1329	
4-1	34026	31196	10907	005053	734	2650	
4-2	30675	32035	-10443	-002523	248	895	
5-1	29362	25557	11489	008078	925	3340	
5-2	30928	31829	-10291	-00167	302	1090	
6-1	32737	27088	12085	011022	1116	4029	
6-2	28879	30618	-10602	-003402	191	690	
7-1	29357	28918	10152	000878	466	1683	
7-2	33323	31563	10558	004037	669	2415	
8-1	29144	25145	11590	008587	960	3466	
8-2	31300	28813	10863	004817	718	2592	
9-1	37794	27097	13948	019364	1646	5943	
9-2	36182	29059	12451	012757	1227	4431	
10-1	39015	35383	11026	005684	773	2791	
10-2	36228	36940	-10196	-00113	336	1213	
11-1	37351	31543	11841	009834	1040	3755	
11-2	38200	38763	-10147	-00085	354	1278	

圖 5-8 (a)

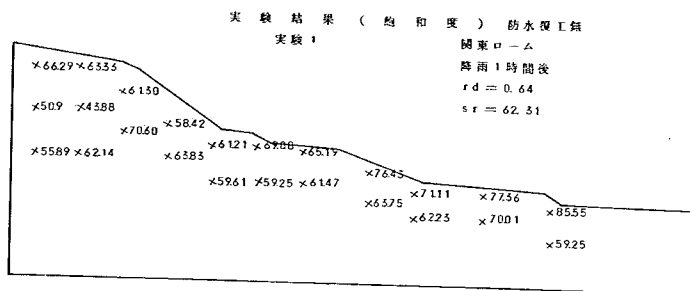


圖 5-8 (b)

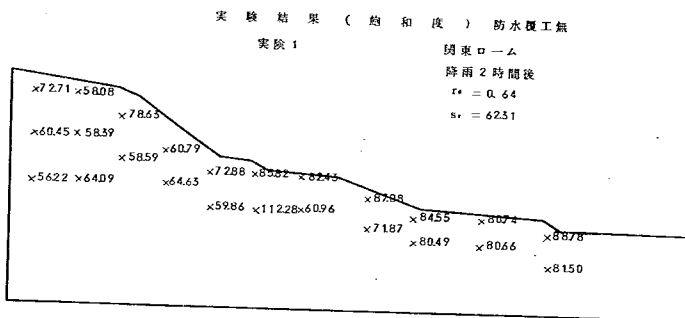


圖 5-8 (c)

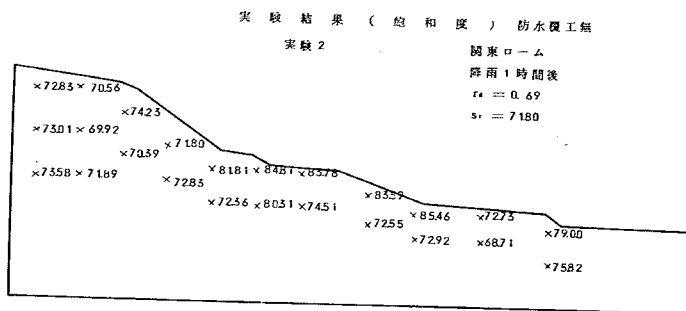


圖 3 - 8 (d)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工無

實驗 2

開塞口 - Δ

降雨 2 時間後

$r_e = 0.69$

$s_e = 7180$

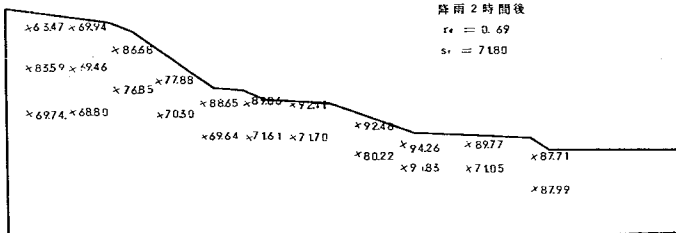


圖 3 - 8 (e)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工無

實驗 3

砂

降雨 05 時間後

$r_e = 1.55$

$s_e = 1425$

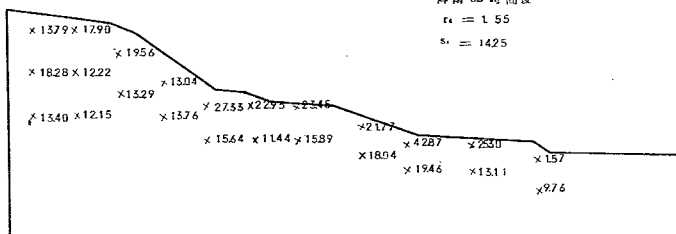


圖 3 - 8 (f)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工無

實驗 3

砂

降雨 10 時間後

$r_e = 1.55$

$s_e = 10.25$

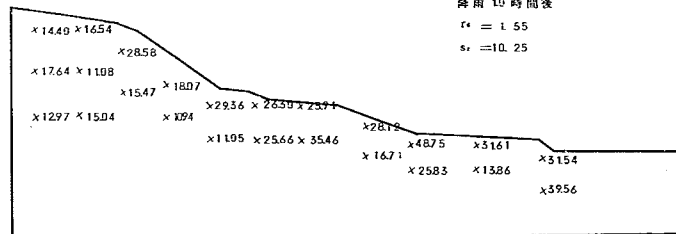


圖 3-8 (g)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工無

實驗 5

砂

降雨 15 時間後

$r_e = 1.55$

$s_r = 1425$

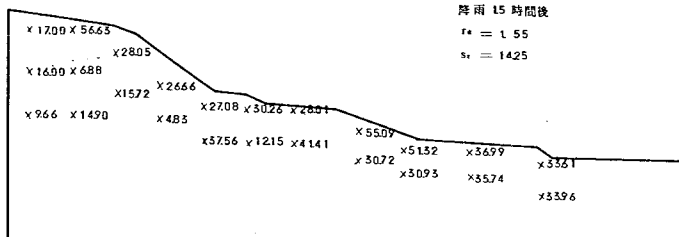


圖 3-8 (h)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工無

實驗 5

砂

降雨 20 時間後

$r_e = 1.55$

$s_r = 1425$

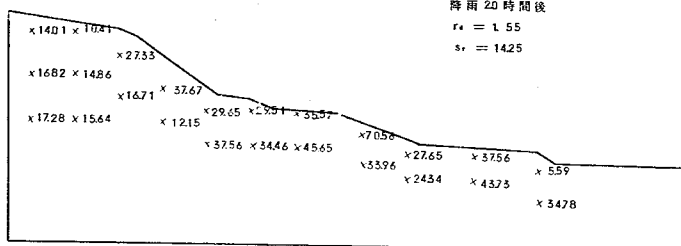


圖 3-8 (i)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工有

實驗 4

開東口—△

降雨 10 時間後

$r_e = 0.72$

$s_r = 5321$

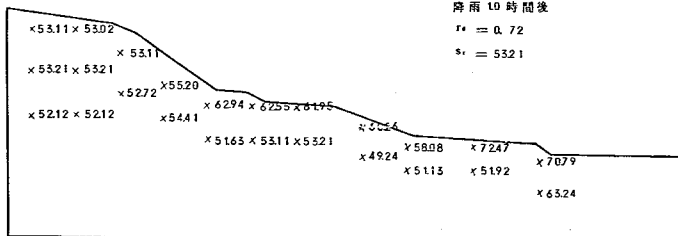


圖 5-8 (j)

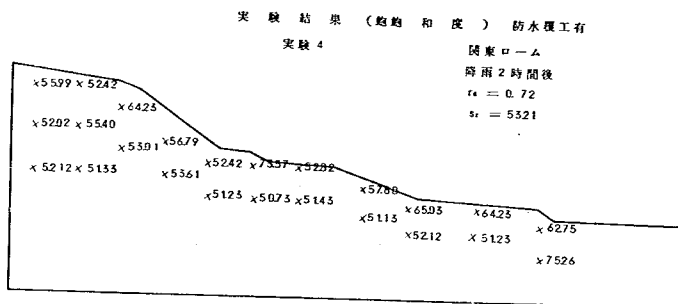


圖 5-8 (k)

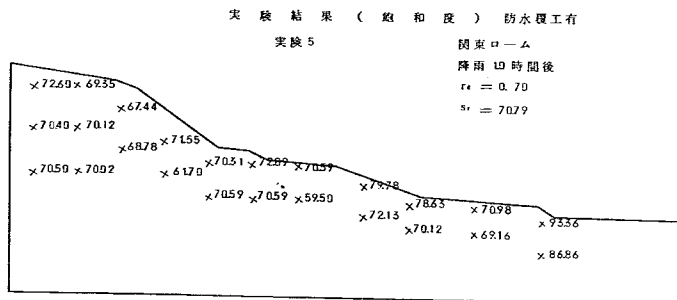


圖 5-8 (l)

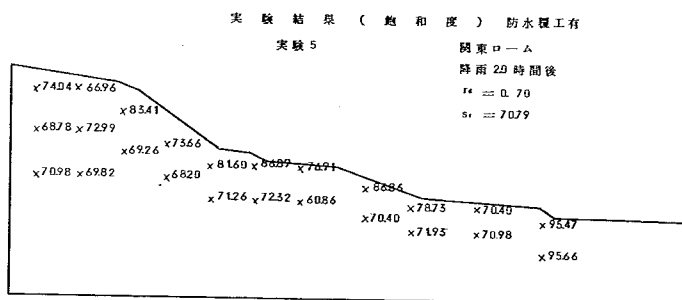


圖 3-8 (m)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工有

實驗 6

砂

降雨 05 時間後

$r_e = 1.56$

$s_r = 1477$

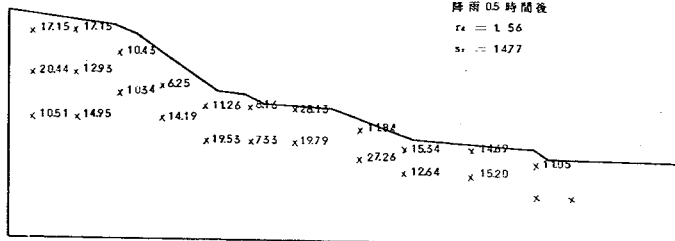


圖 3-8 (n)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工有

實驗 6

砂

降雨 10 時間後

$r_e = 1.56$

$s_r = 1477$

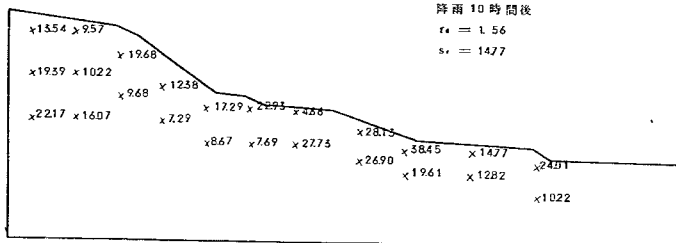


圖 3-8 (o)

實驗結果 (飽和度) 防水覆工有

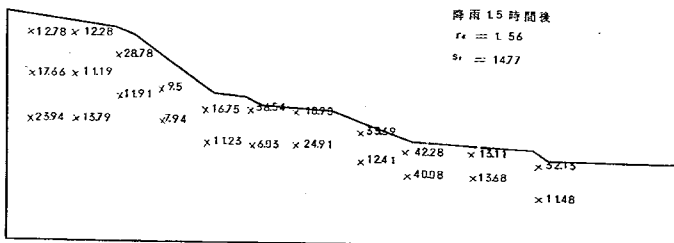
實驗 6

砂

降雨 15 時間後

$r_e = 1.56$

$s_r = 1477$



実験結果 (飽和度) 防水工有
実験 6 降雨 20 時間後

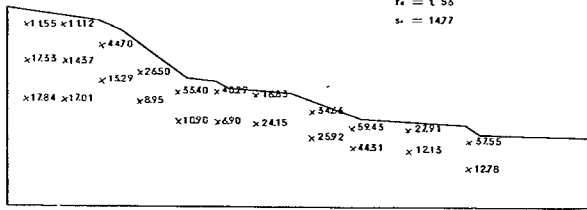
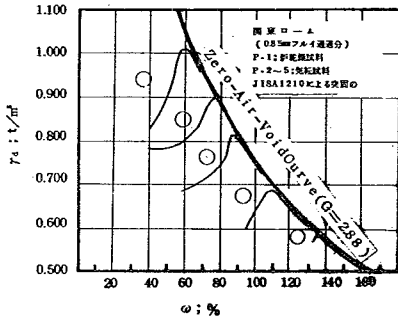


図 3 — 9



さらに、外観は一応乾いたと
いつた白みをおび始めた自然
状態の関東ロームの含水比が
90 % だつたとして、その関
東ロームを炉乾燥し、その炉
乾燥試料に水を加えて含水比
90 % にすると、泥状になつ
てしまい、自然状態の関東ロ
ームとはまったく違つた状態
になる。このような現象の原
因として、関東ロームの土中
水が自由水と拘束水に分けら
れ、拘束水は液体としての水

ではなく、土粒子を構成する固体部分の一部であると考えた。そして、自然含
水比が大きい土はそれだけ多くの拘束水を持つと考え、それぞれの初期含水比
の土に対し適当に拘束水の量を定めて、図 (39) を自由水の含水比に対する締
め固め曲線に直すと、それが 1 本の曲線で表わされるようになった。

明らかに、上に述べた久野氏の説は関東ロームの水分状態を非常によく表わ
している。(12) 式に出てくる connate water saturation S_o は、この
拘束水が土間隙中を占める割合いだと考えられる。拘束水の量が不変であるか
または不変でなくてもその量が含水比などから算出できればよいのだが、今の
ところそれはできない。この場合も、各実験に対し、その拘束水の量は、それ
ぞれ違つていであろうが、かりに、関東ロームを使用したすべての実験に対

し、拘束水が土間隙中に占める割合、すなわち connate water saturation S_o を 50 % とし、図 (38) a ~ d, i ~ l において、自由水が土間隙中に占める割合、修正飽和度とも呼ぶべきものを計算すると図 (310) a ~ h のようになる。

図 (38) e ~ h, m ~ p、図 (310) a ~ h を見ても、その傾向を読みとることは非常に困難である。しかし、大体の傾向として、図の右の方、つまり斜面の下端の飽和度が一般に大きくなっている。また、斜面が終つて小段が始まるところの飽和度が大きくなっている。これらのことは、堤防に降つた雨が全部浸み込まず、法尻の法へ流れていき、斜面が終つて水平面が始まるところで、それらが浸み込むことによると考えられる。

すなわち、斜面が終つて水平面が始まるような場所では、特に、浸透流に対する防護を嚴重に行なうべきである。この点だけからみると小段はかえつてない方がよいようであるが、降雨による堤体斜面上の流出流について考えると、流出流の流速を小さくし、その掃流力を弱める上で小段の効果が非常に大きいことがわかる。堤体斜面上の流出流による浸蝕と、この章の 2 節でちよつと述べた雨滴による浸蝕については、神戸大学教授、田中茂博士の研究があるから参照していただきたい。

なお、実験後の含水比を J I S A 1 2 0 3 の方法で測定したところ、図 (311) のようになつた。これを図 (36) に書き込むと、図 (312) a ~ d のようになり図 (312) の a と c, b と d を比較すると、小段部分の含水比に大きな違いが見られ、防水覆工の効果がよくわかる。全実験を通じて、天頂部分の含水比が初期含水比とほとんど変らないが、これはこの部分の上方の降雨装置のノズルが調子が悪く、あまり雨滴が出なかつたためである。

図 5-10 (a)

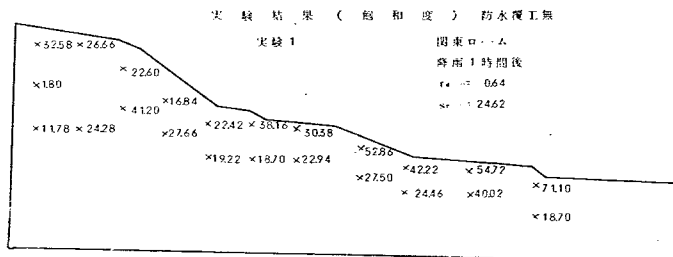


図 5-10 (b)

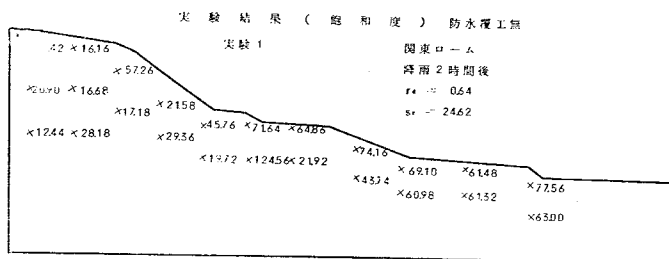


図 5-10 (c)

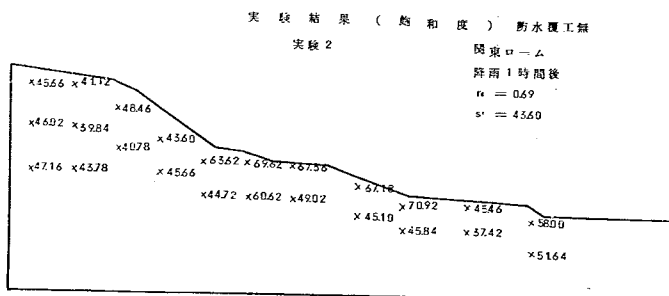


圖 3-10 (d)

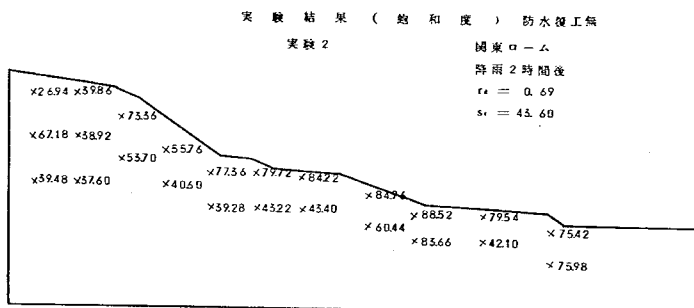


圖 3-10 (e)

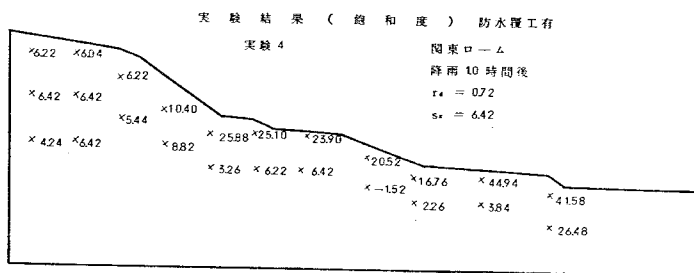


圖 3-10 (f)

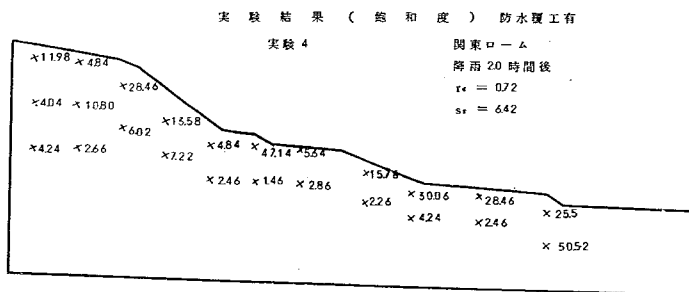


圖 3 — 10 (g)

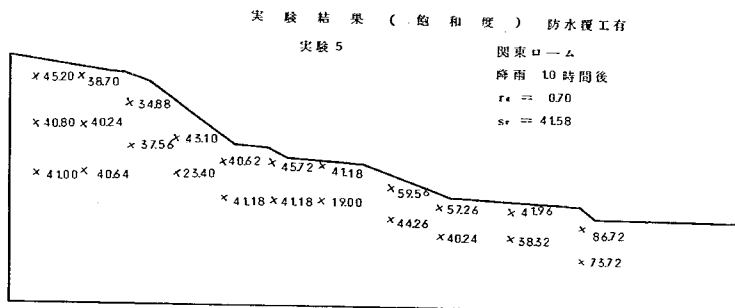


圖 3 — 10 (h)

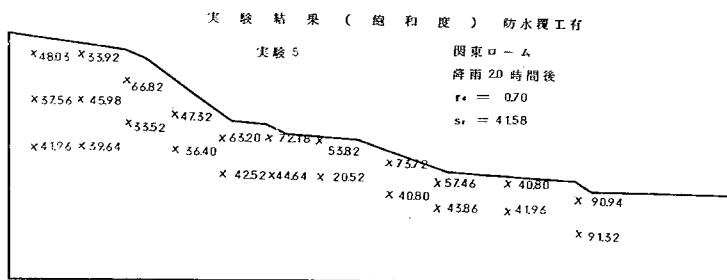


図 3-11

降雨後の含水比 (JIS A 1203による)

	実験 2	実験 3	実験 4	実験 6
1-1	755	377	759	324
2-1	757	374	760	335
3-1	1000	1020	882	914
4-1	828	1033	861	1556
5-1		1422	868	1414
6-1	1030	887	953	1290
6-2		772	744	355
7-1	1047	2163	838	519
7-2				331
8-1	1000	328	1000	878
8-2	945	1097	760	573
9-1	1038	1029	947	1203
9-2	1029	1182	782	1315
10-1	973	1307	735	341
10-2	785	1085	668	367
11-1	1003	978	958	1153
11-2	911	1198	942	1318
“注” 実験 1 は含水比測定せず 実験 5 は停電し含水比測定できず				

図 3-12 (a)

実験結果 (含水比) 防水工概

実験 2

関東ローム

降雨後

初期含水比 = 76.7%

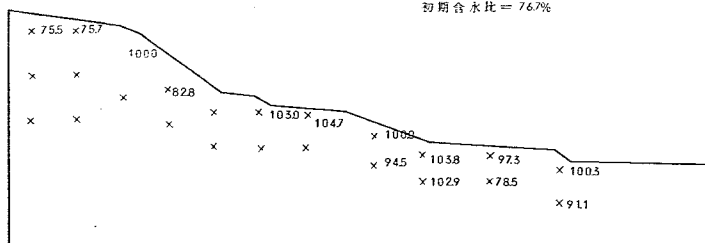


図 5 - 12 (b)

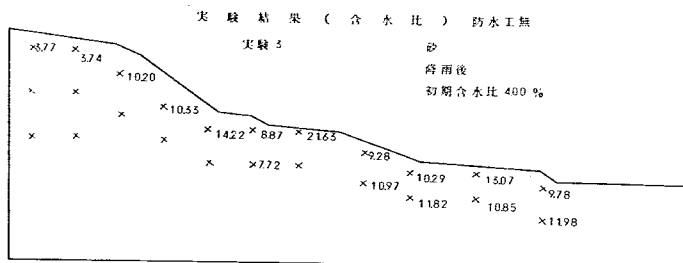


図 5 - 12 (c)

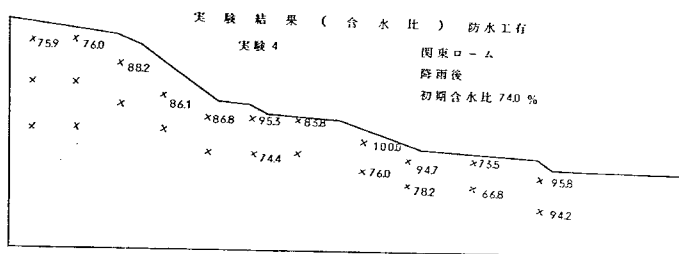
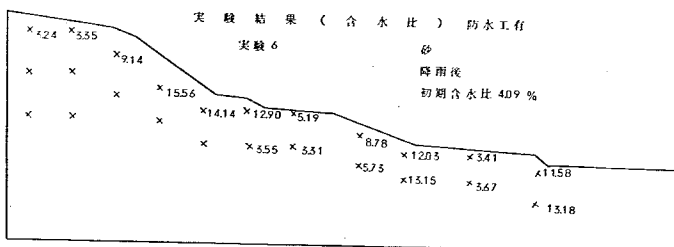


図 5 - 12 (d)



あ と が き

第三章に述べた室内実験からわかることは第三章 3 節に述べたことだけで、その浸水の傾向はよくわからない。だから、第一章、第二章、第三章ともにわからずじまいで、それらを比較検討し、相互関係を見つけることは不可能である。

しかし、一般的にこのような問題を考えると、降雨によるものだけでなく、河水による浸透流に対しても、それらによる堤防の破壊に対する防護策としては、第一に、水が浸み込んでもその強度が減少せず、また変形を起こさない土を堤体土として使用することであろう。どのような土がこの条件に近いかということは、今のところはつきりわかつておらず、これから研究すべき重要な課題であると考えられる。つぎに、水が浸み込み難いような土を使用すべきである。このことについては、第一章 2 節に述べておいた。結局、上の二つの条件をうまく満足するように堤体土を選択するのが、常識的に考えて、もつともよいと考えられる。

なお、この報告書は土木研究所土質研究室の竹下周成が担当し、同室の二馬健次郎、雨宮隆の両君に図面を描いていただいた。

おわりに当たり、日本建設コンサルタント K K、土木研究所化学研究室、日本 I B M K K、東京試験 K K などのお世話になつたみなさんに感謝する。

参 考 文 献

- 1) R. E. Collins, "Flow of Fluids through porous materials" Reinhold publishing corporation (New York) 1961年
- 2) 日本建設コンサルタントKK 「堤防破壊実験報告書」
昭和38年3月、8月、10月
- 3) 久野悟郎 「土の締め固め」 技報堂 1962年
- 4) 田中 茂 「土堰堤の水理学的研究」 (博士論文)
昭和28年
- 5) Donald W. Taylor "Fundamentals of soil mechanics" John Wiley & sons Inc. (New York)
Charles E. Tuttle Company (Tokyo) 1948年

補足 : Hazen は、砂またはシルト質土において、土の透水係数 K とその有効径 D_{10} (通過加積曲線で 10 %における粒径)との関係が、

$$K = C D_{10}^2$$

であるという実験式を出した。ここで C は比例常数で K を cm/sec , D_{10} を cm で表わしたとき、だいたい 100である。

この式から、粒径の細かい土ほど透水係数が小さいことがわかり、水が浸み込み難いようにするには、粒径の小さな土を使用すればよいことがわかる。

ところで第二章の現場実験に使用した砂質ロームの典型的な粒度曲線を補足図に示すが、これをみると、 D_{10} はだいたい $0.02\text{mm} = 2 \times 10^{-3}\text{cm}$ になっている。これを Hazen の式に代入すると、 K はほぼ $4 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$ となり、第二章2節で求めた値と一致する。