

(株)大林組・技術研究所

正会員 斎藤 二郎

〃

〃 〇 李 相一

〃

〃 菊地 敏男

まえがき

飽和した土要素に対する土中水の力学的影響の中、静的作用としては、浮力の分だけ有効拘束圧を減少させるものとして計算される。ところで動的作用として、土中を移動する水が土粒子にどれだけの力を及ぼすかは調べる必要がある。例えば、水中盛土の振動試験¹⁾に於て、模型盛土内の土要素に発生する過剰間隙水圧の量が、最大の有効拘束圧の59%の段階で液状化が生じている。従って、盛土内の各要素に発生した過剰間隙水圧が不均一な為、これに原因する下から上への浸透水が土粒子に作用する圧力が、有効拘束圧を事実上かなり減少させているものと推定される。また、この現象に起因する例としてボーリング現象がある。本報告は、透水係数と浸透水力の関係を求め、これが成立する限界を調べ、これらが土要素の間隙比、水温、透水距離ならびに流速により如何に変化するかを試験的に検証したものである。

透水係数と浸透水力の関係

土粒子中を流れる層流が土粒子に及ぼす粘性力は、 $F_u = B\mu gL$ ————— (1) と表わされる。これを体積 AL で除して、単位体積当りの浸透水力は、 $f_u = B\mu v = B\mu \bar{v}/n$ ————— (2) また、鉛直方向の力のつり合いを考えることにより、 $\bar{v}/n = -1/\mu B \times (i + \gamma_w g)$ ————— (3) であり、これから Darcy 則の q と B の間には、 $Bq = n/\mu \cdot \gamma_w$ ————— (4) の関係がある²⁾。(2)(3)より $f_u = \gamma_w \bar{v}/q$ ————— (5) これに Darcy 則 $\bar{v} = qi$ ————— (6) を代入すると、 $f_u = \gamma_w i$ ————— (7) である。従って、 i はいしは $\bar{v}$ と q 、はいしは B と $\bar{v}$ と n が求まれば (2)(5)(7) より浸透水力が求まることになる。

流速が大きくなると、その二次の項が関与して、 $f_u = -(\gamma_w \bar{v}/q + R_F \bar{v}^2/n)$ ————— (8) となる³⁾。かように速度の二次項が関与するのは、水流が層流から乱流に変化する為と見なされ、この限界レイノルズ数 $Re = \gamma_w \bar{v} D_{50}/\mu n = 1 \sim 10$ であり、この遷移が急激ではなく連続的であるのは、空隙の大きさが供試体内で不均一である為とされている。(ここで、 F_u : 浸透水力、 B : 比例定数、 μ : 水の粘性係数、 q : 真平均流量、 L : 透水距離、 A : 断面積、 f_u : 単位体積の浸透水力、 v : 真平均流速、 $\bar{v}$: 見かけの平均流速、 n : 間隙率、 i : 動水勾配、 γ_w : 水密度、 R_F : 比例定数、 Re : 限界レイノルズ数、 D_{50} : 平均径)

試料ならびに試験方法

試料は豊浦標準砂を用いた。この真比重 $G_s = 2.66$ 、粒度分布は図-1に示す通りで、平均径 $D_{50} = 0.175 \text{ mm}$ 、均等係数 $U_c = 1.4$ である。均等な砂と言える。試験方法は透水試験(変水位)を行ない、供試体の上部と下部に間隙水圧計をヒキつけたものである。図-2に試験装置の概略図を示す。流水時は静止時より間隙水圧が減少するが、上部水圧計(1)のこの量と下部(2)のそれとの差を Δp_{1-2} とすると、 $\Delta p_{1-2} = F_u \div A = B\mu vL$ である。従って、 $f_u = B\mu v = \Delta p_{1-2}/L$ の関係にある。

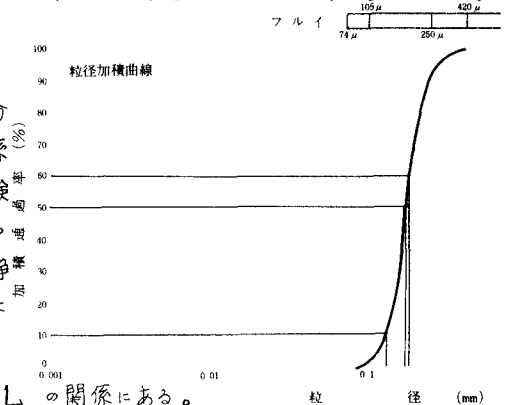


図-1、試料の粒径加積曲線

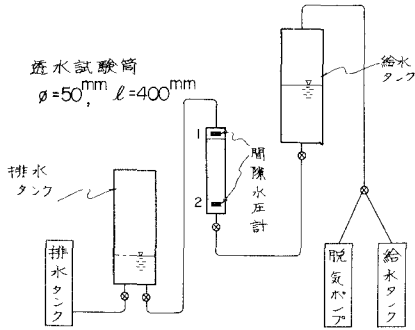


図-2, 試験装置の概略図

給水タンクの水ならびに試料は脱気ポンプにより十分に脱気する。Loose な供試体は水管中に脱気水を満たし、試料を沈澱させたものであり、Medium Dense な供試体はこれに振動を加えて締め固めたものである。

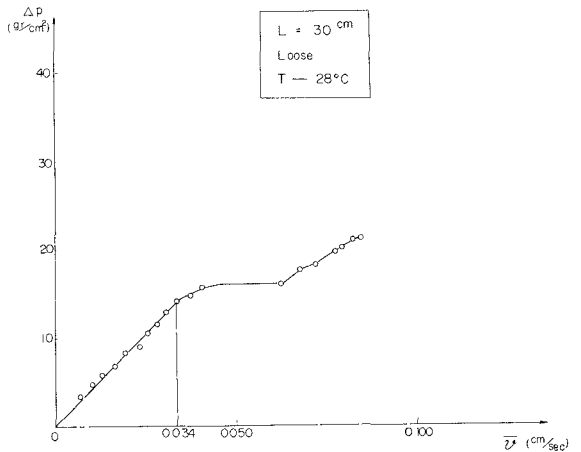


図-3, $\Delta p \sim \bar{v}$

試験結果の検討

図-3 に示すのは、透水距離 30 cm 、Loose 供試体で水温 28°C の流速 $\bar{v}$ と上下間隙水圧の差 Δp の代表的例である。 $\bar{v} = 0$ のときは $\Delta p = 0$ であり、両者の関係は $\bar{v}$ が小さい範囲では比例的であるが、この例では $\bar{v} = 0.034\text{ cm/sec}$ 以上になると比例関係が崩れて、 Δp の増加は止まっている。この原因は、 $\bar{v}$ の小さい範囲では水流が層流状態で流れているが、 $\bar{v}$ が増加すると供試体の一部で乱流域が生じる為と思われる。これ以上に速度を増すと、乱流域が供試体全域に広がり、為に Δp の増加が生じない、一種の遷移状態を呈している。さらに流速を増すと、全域で新たな粒子配列が生じて、再び $\bar{v} \sim \Delta p$ の比例関係が生じるようである。

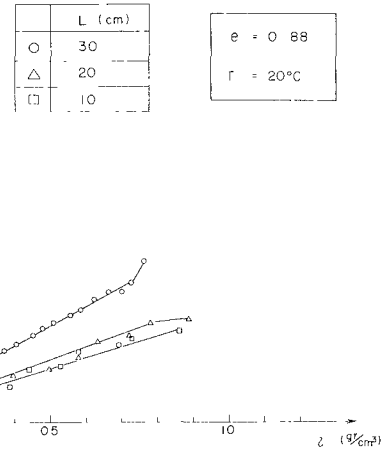


図-4, $\bar{v} \sim i$

図-3 の Δp を透水距離 L で除した $\Delta p/L$ は所謂動水勾配 i である。 i と $\bar{v}$ の関係も、間隙比 $e = 0.88$ 、水温 $T = 20^\circ\text{C}$ の例で、 $L = 30\text{ cm}$ 、 20 cm 、 10 cm の各々につきプロットしたものが図-4 である。この結果、透水距離が長いほど、同一の i に対して流速が大きくなっている。両者の勾配が透水係数 k であるが、透水距離 L が長いほど k が大きいという結果になっている。この原因は、透水距離が長いほど水流が供試体の長手方向に一樣であるが、短いとそうでもない為と思われる。

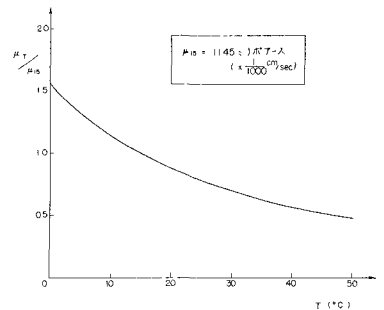


図-5, $\mu_T \sim T$

図-5 に示すのは、粘性係数 μ の温度 T による変化である。温度が高くなると粘性が減ってくるが、浸透水力 $f_u \sim \mu$ の間には比例関係がある為、その分だけ f_u も減少することを意味する。また、 f_u と k の間に(5)式の関係がある為、 k も温度によりかなり変化することを示している。即ち、(4)式に於るように、 k と μ は反比例の関係にある。

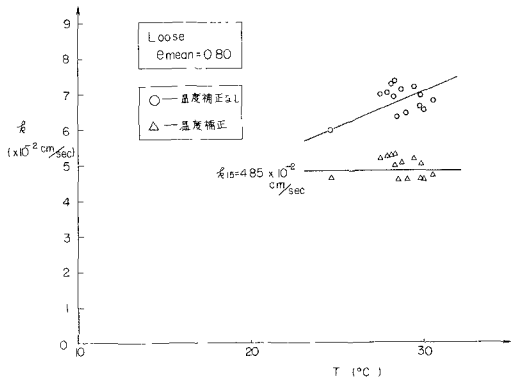


図-6.1, $f \sim T$ (Loose)

図-6.1 に示すのは, Loose 供試体の $f \sim T$ の関係である。即ち, 温度が大きくなると f も増加する傾向である。この f を $f \propto 1/\mu$ の関係により, 図-5 から $T = 15^\circ\text{C}$ に補正したのも同図に示してあるが, 補正により f が一定となることは, (1)(4)式が層流の範囲で成立していることを意味し, 浸透水力ならびに透水係数の原因が, ひとえに土粒子と水との粘性のみに起因しているものと見なされる。

図-6.2 に示すのは, Dense 供試体での同様の結果である。 f_{15} の値は, 当然ながら Dense の方が小さい。

図-7.1 に示すのは, $L = 30\text{ cm}$ の供試体に対する $e \sim f_{15}$ の関係である。

$$f = C D_{50}^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \times \frac{e^3}{1+e} \quad (9)$$

の実験式が示されているが, グラフの形から判断して, 近似的にこれが成立しているようである。図-7.2 に示すのは, $L = 10\text{ cm}$ の供試体に対する同様の関係である。両者の曲線を比較すると, 同一の e に対して, $L = 30\text{ cm}$ の方が f_{15} が大きいことは明瞭である。これは既述の原因によるものと思われる。

図-8 に示すのは, (9) 式の関係を用いて, 横軸に $f_{15}/C D_{50}^2$ ($= \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e}$), 縦軸に $B \mu_{15}$ を示す。このグラフは, 間隙比, 温度が既知の場合に, 浸透水力 $f_u = B \mu \bar{v}/n$ を求めるものである。

図-9 に示すのは, 図-3 に於て, $\bar{v} \sim \Delta p$ の比例関係が失せる時点での $\bar{v} = \bar{v}^*$ と, そのときのレイノルズ数 $Re = \gamma_w \bar{v}^* D_{50}/\mu_n$ (10) の関係を示したものである。図示の如く, 乱流状態になる限界レイノルズ数は, 供試体が短いほど小さい。

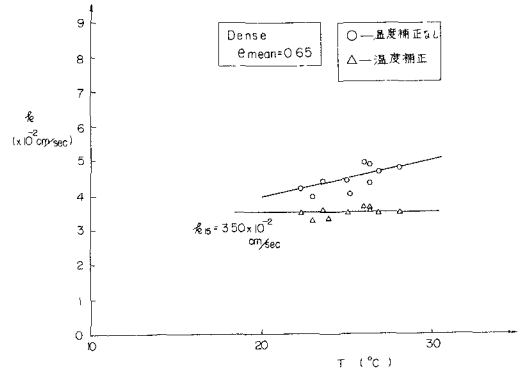


図-6.2, $f \sim T$ (Dense)

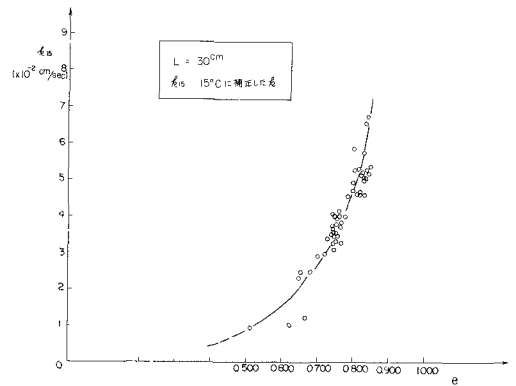


図-7.1, $f_{15} \sim e$ ($L = 30\text{ cm}$)

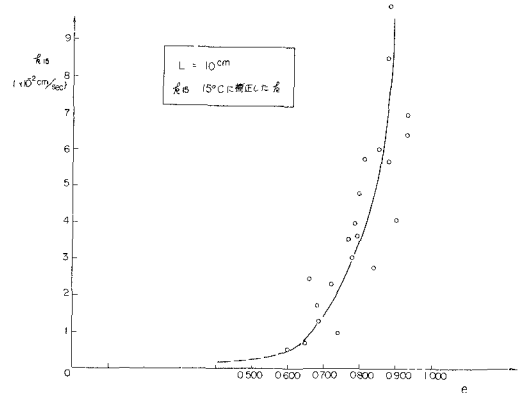


図-7.2, $f_{15} \sim e$ ($L = 10\text{ cm}$)

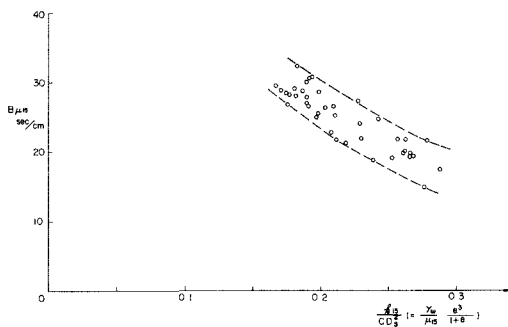


図-8, $B\mu_{15} \sim k_{15}/CD_{30}^2$

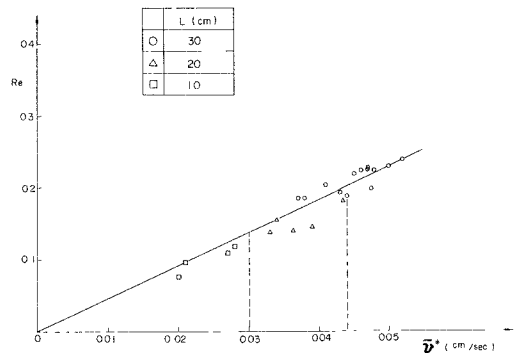


図-9, $Re \sim \bar{v}^*$

一般に限界レイノルズ数 $Re = 1 \sim 10$ とされており、それに対応する $\bar{v} = \bar{v}^* = \frac{\gamma_w D_{50}}{\mu n} (1 \sim 10)$ であるが、この試験では、それよりはるかに小さな $\bar{v}^*$ で乱流状態が生じているものと思われる。さらには $\bar{v}^*$ は const. ではなく、供試体の長さの影響も受けている。また、 $\bar{v} > \bar{v}^*$ では、 f_u が $\bar{v}$ の2次関数で表現される形ではない。即ち、 $\bar{v} > \bar{v}^*$ では f_u は停留値となり、この間に土粒子の配列が変化し、のち、再度、勾配の違う $f_u \sim \bar{v}$ の比例関係が形成されるようである。

参考文献

- 1) 斎藤, 李: 水中盛土の振動試験, 土木学会第29回年次学術講演会
- 2) R. E. Collins: *Flow of Fluids through Porous Materials*
- 3) 吉田 昭治: 浸透水力について, 土質工学会論文集 vol. 14, No. 1, Mar. 1974
- 4) P. W. Taylor: *Fundamentals of Soil Mechanics*