

京都大学工業教員養成所 正員 久保田敬一

京都大学工業教員養成所 正員 佐藤忠信

1. まえがき 土の透水に関する研究は古くから行なわれており、飽和している土の透水については、これまでも数多くの研究がある。しかし、いわゆる地下水の流れの場合は別として、普通の土の構造、たとえばアースダムなどの土質構造中には多くの空気が含まれており、不安定な不飽和多孔質物体を作っている。したがってこのような土の中を流れる水の挙動は地下水の場合と相違するものと考えなければならぬ。Lambe¹⁾, Bjerrum²⁾, Miller³⁾, Blackmore⁴⁾, Mitchell⁵⁾ などはこのような観点から、突き固めた粘性土について透水試験を行ない、その工学的特性を明らかにしようと試みている。筆者らはわが国に多くみられる風化花崗岩の真砂土を対象として、その透水性からその工学的特性を研究⁶⁾しているが、今回はその研究のうち、突き固めた雲母性真砂土を対象とし、次の3点について実験的研究を行なったのでこれらについて述べたいと思う。それは、(1)土粒子の吸水性が透水係数におよぼす影響、(2)突き固めによって発生する間ゲキ空気圧の大きさ、および、(3)水温の変化が透水係数におよぼす影響である。

2. 実験試料ならびに実験方法 実験に用いた試料は図-1に示す粒度分布をもち、その物理定数は表-1に示すとおりである。実験装置の概略はすでに報告したが、従来は供試体から流出する水量だけが測定できなかった。今回は突き固め土の間ゲキ空気圧を測定するため、流出、流入水量ともに測定できるように、流入側にも体積変化測定装置を取付けた。飽和度は供試体に back pressure を与えることによって増加させた。その増加の割合は 1 kg/cm^2 back pressure を作用させた後、6時間放置し、それぞれの段階で透水係数を測定した。図-2は back pressure を作用させた後、経過した時間と飽和度の増分との関係を示したものである。図によれば、back pressure を作用させた後3~4時間で、飽和度の変化がなくなるから、供試体中の空気と水の圧力が平衡を保つには、放置時間を6時間程度にすれば十分であることがわかる(供試体の飽和度が低い場合には問題がある)。なお供試体は高さ5cm 内径3.8cm のアクリライト製モールドに2層に突き固めて作ったものである。また突き固め回数は25回である。

3. 間ゲキ空気圧 突き固めた土の間ゲキ空気圧を求めるには、供試体内部の独立気泡中の空気圧を測定しなければならないから、簡単に求めることはできない。⁷⁾ しか

表-1

LL	PL	PI	SL	G
37.0	36.0	1.0	32.64	276

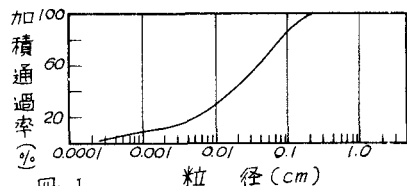


図-1 粒 径 (cm)

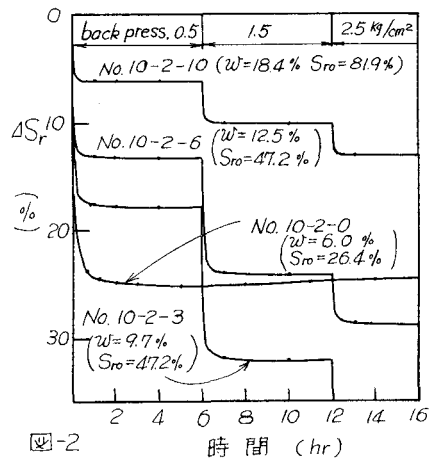


図-2

し、体積を一定にして含水量の増加を許す条件で、間ゲキ水压をゆだけ増加させたとき、不飽和土における飽和度の増分は、式(1)になるから、back pressure を与えたとき供試体に流入する水の量を測定することができれば、 ΔS_r が求まり、逆に式(1)を用いて p を計算することができる。

$$\Delta S_r = \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{c-p}} \left\{ \frac{1 - S_{r0}}{p} \right\} \Delta p \quad (1)$$

S_{r0} : 初期飽和度
 ΔS_r : 飽和度の増分
 α : $945.8 \times 10^{-7} \text{ mmHg}$
 p : $p_0 + \Delta p$
 Δp : 作用させた back pressure の値
 p_0 : 初期間ゲキ空気圧
 C : ヘリーの定数

図3はこのような方法で求めた p と突き固め含水比の関係を示したものである。図から明らかなように p は最適含水比 (w_{opt}) より乾燥側では大気圧よりわずかに低く、 w_{opt} より湿潤側では含水比が増すにしたがって増加するが、その増加の割合は小さい。なお間ゲキ空気圧が大気圧より大きくなるのは、 w_{opt} よりわずかに大きい含水比で突き固められた場合である。

4. 水温 不飽和土では温度の変化によって、供試体に存在する空気の膨張、収縮ならびに空気の溶解、放散などが起こる。このため水温の変化が透水係数におよぼす影響は、飽和度の低い供試体ほど著しいと考えられる。

Mitchell によれば、不飽和土の透水係数は $k = C \cdot \frac{S_r^3}{\mu}$ と表わすことができるから、不飽和土における水温の補正は次のように表わすことができる。

$$k_{15} = \frac{\mu_t}{\mu_{15}} \cdot \frac{S_{r15}^3}{S_{rt}^3} \cdot k_t = \frac{\mu_t}{\mu_{15}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta S_r}{S_{r15}}\right)^3} \cdot k_t = \beta k_t \quad (2)$$

$$\Delta S_r = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{c-p}} \left\{ \frac{\Delta T}{T_{15}} (1 - S_{r15}) + \frac{C_t - C_{15}}{(C_{15} - p)(C_t - p)} \cdot S_{r15} \cdot \alpha \right\} \quad (3)$$

ここに、 S_{r15} , S_{rt} : 水温 15°C , $t^\circ\text{C}$ における飽和度; μ_{15} , μ_t : 15°C , $t^\circ\text{C}$ における水の粘性; C_t , C_{15} : 水温 $t^\circ\text{C}$, 15°C におけるヘリーの定数; T_{15} : 288°C ; ΔT : 水温の増分; 他は式(1)に示したものと同一符号である。図4は S_{r15} をパラメーターとして β の関係を図示したものである。図から明らかなように、 S_{r15} が 90% 以上になると、水温の変化が透水係数におよぼす β 影響は粘性の変化によるものが支配的で、飽和度の変化による影響は非常に小さくなる。

図5、図6は back pressure 0.5 kg/cm^2 と 8.0 kg/cm^2 における透水係数と水温の関係を示したものである。図中の実線は $k = \frac{\mu_t}{\mu_{15}}$ の関係を表わしている。図6は $S_{r15} = 65.7\%$ におけるもので、破線は上から求められる理論曲線を表わしている。また図5をみ

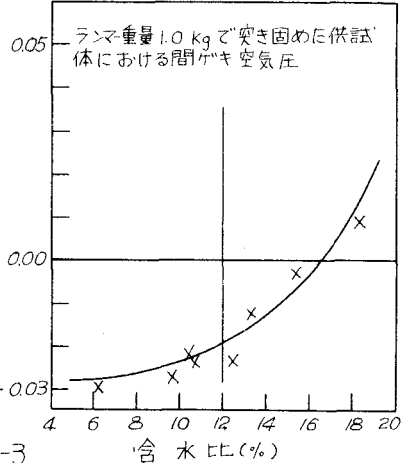


図-3

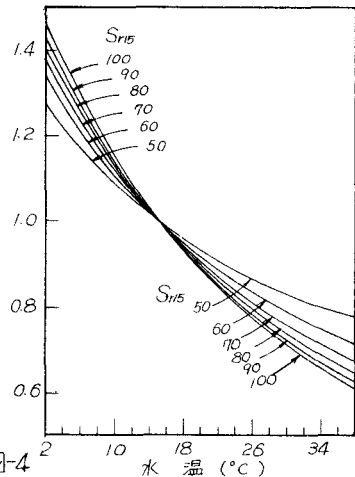
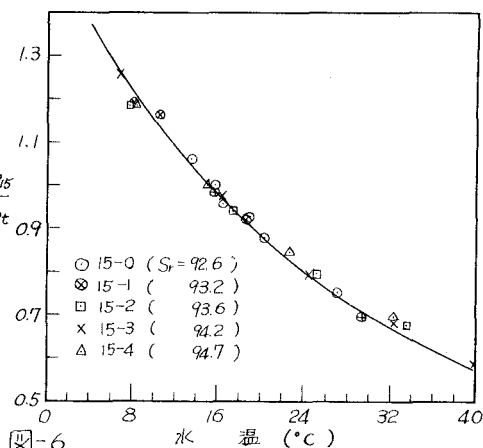
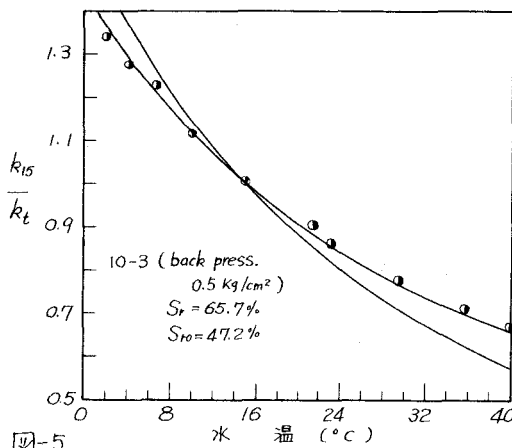


図-4



ると、実験データがすべて k_{15}/μ_{15} 曲線によくのっていることがわかり、これから S_{r15} が 90% 以上であれば、水温による補正を行なう場合には水の粘性の変化だけを考慮すればよいことがわかる。

5. back pressure を作用させた後の経過時間と透水係数の関係.

重母などの吸水性の粒子を多量に含む土では、その層状構造間に水分子を吸着するが、供試体の体積を一定にして飽和度を増加させると、水に接する土粒子面積が大きくなり、土粒子自身が膨潤し、見かけ上間ゲキが減少した結果を示す。これは図2からも推察できることで、back pressure を加えると間ゲキ空気の圧縮ならびに溶解のため飽和度は増加し、3~4時間経過するとほぼ一定値を示す。その後は徐々に飽和度の減少がつづく、これは土粒子の中へ吸着された水の量と土粒子の膨張量との差にもとづいている。したがってこの飽和度の減少量が間ゲキの減少量を表わしているのではないことに注意しなければならぬ。以上の現象が、透水係数にどのような影響をおよぼすかを考察したのが図7である。透水係数の測定は back pressure を加えてから6時間経過してから行なっているの

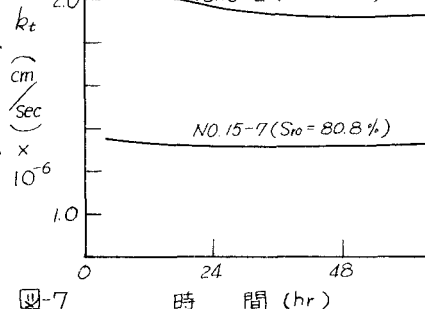


図-7

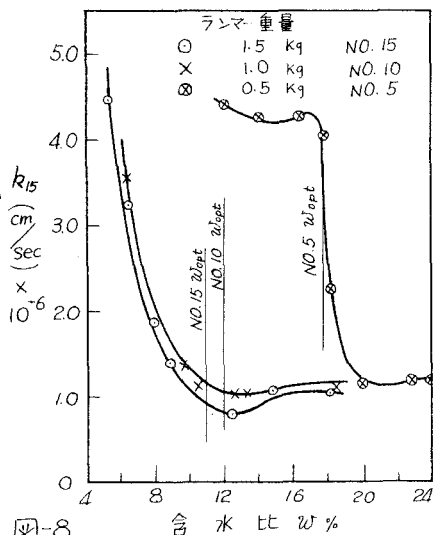


図-8

した。初期飽和度が大きい (w_{opt} より大きい含水比) 供試体では上に述べた影響があまり顕著でない
ので、放置時間は6時間とした。

6. 透水係数と突き固め含水比との関係。以上、不飽和土の透水性を測定する場合問題になる2、
3の点について述べたが、この結果を用いて、突き固めた土の透水性と突き固め含水比の関係を示し
たのが図8である。図から次の事項が明らかに結論づけられる。すなわち、(1)透水係数は最適含水比
より少し大きいところで最小値を示し、(2)突き固め仕事量の小さい供試体では最適含水比より小さい
含水比で極小値をもつ。なお図中の実験データはすべて飽和度が98%以上のところで求めたもの
である。

- 参考文献 (1) Lambe T.W. "The Permeability of Compacted Fine-Grained Soils" Special Tech. Publ. No. 163 ^{ASTM, 1954} p56~67
(2) Bjerrum L., Huder J. "Measurement of the Permeability of Compacted clays" 4th I.C.S.M.F.E. 1957 p6~8 ^{Vol. 127, 1963}
(3) Miller R. J., Low P. F. "Threshold Gradient for Water Flow in Clay Systems" Soil Sci. Soc. of America ^{p605-609}
(4) Blackmore A.V., Marshall T. J. "Water Movement Through a Swelling Material" Aust. J. Soil Res. 1965, ^{No. 3} p11~21
(5) Mitchell K. J., Hooper D. R. "Permeability of Compacted Clay" Jour. of S.M.F. Div. Pro. ASCE SMA 1965 p41~64
(6) 久保田・佐藤・林田. 「豊田性真砂土の透水性について」 昭和44年度土木学会関西支部年次学術講演会概要 p177~178
(7) Bishop A. W., Donald I.B. "The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus" ^{5th I.C.S.} M.F.E.P. 3-21
(8) Donald I.B. "Effective Stress Parameters in Unsaturated Soils" 4th Australia-New Zealand Conf. ¹⁹⁶³ p41~46

付 録 15℃を標準温度とし、 Sr_{15} をパラメーターとした ΔSr の値を次表に示す。これが15℃
の飽和度がわかっているとき、水温が Δt だけ変化すれば飽和度がどれだけ変化するかわかる。

表-2 : 水温の変化による飽和度の増分 ΔSr (%)

水温 ℃ T	Sr_{15} (%)										
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100
0	+3.57	+2.84	+2.62	+2.39	+2.17	+1.94	+1.72	+1.50	+1.27	+1.04	-
2	+3.09	+2.45	+2.26	+2.06	+1.87	+1.67	+1.48	+1.28	+1.09	+0.89	-
4	+2.61	+2.07	+1.91	+1.74	+1.58	+1.41	+1.28	+1.08	+0.91	+0.75	-
6	+2.13	+1.69	+1.55	+1.42	+1.28	+1.15	+1.01	+0.87	+0.74	+0.60	-
8	+1.66	+1.31	+1.21	+1.10	+0.99	+0.89	+0.78	+0.68	+0.57	+0.46	-
10	+1.19	+0.94	+0.86	+0.79	+0.71	+0.63	+0.56	+0.48	+0.40	+0.33	-
12	+0.71	+0.56	+0.51	+0.47	+0.42	+0.38	+0.33	+0.29	+0.24	+0.19	-
14	+0.24	+0.19	+0.17	+0.16	+0.14	+0.13	+0.11	+0.10	+0.08	+0.07	-
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	-0.24	-0.19	-0.17	-0.16	-0.14	-0.13	-0.11	-0.09	-0.08	-0.07	-0.03
18	-0.71	-0.56	-0.51	-0.47	-0.42	-0.38	-0.33	-0.28	-0.24	-0.19	-0.10
20	-1.18	-0.93	-0.86	-0.77	-0.70	-0.62	-0.54	-0.46	-0.38	-0.30	-0.15
22	-1.64	-1.31	-1.19	-1.08	-0.97	-0.86	-0.75	-0.64	-0.53	-0.42	-0.21
24	-2.11	-1.66	-1.52	-1.38	-1.24	-1.11	-0.96	-0.82	-0.68	-0.54	-0.26
26	-2.58	-2.03	-1.86	-1.69	-1.52	-1.34	-1.21	-1.00	-0.82	-0.65	-0.31
28	-3.04	-2.40	-2.19	-1.99	-1.78	-1.58	-1.38	-1.17	-0.97	-0.76	-0.35
30	-3.52	-2.84	-2.53	-2.29	-2.06	-1.82	-1.58	-1.35	-1.11	-0.88	-0.40
32	-3.99	-3.49	-2.87	-2.60	-2.33	-2.06	-1.79	-1.52	-1.25	-0.98	-0.44
34	-4.44	-3.49	-3.19	-2.89	-2.59	-2.29	-1.99	-1.69	-1.39	-1.09	-0.48
36	-4.91	-3.86	-3.52	-3.19	-2.86	-2.52	-2.19	-1.86	-1.52	-1.19	-0.52
38	-5.37	-4.22	-3.85	-3.49	-3.12	-2.79	-2.37	-2.02	-1.66	-1.29	-0.56
40	-5.84	-4.58	-4.18	-3.78	-3.39	-2.99	-2.59	-2.19	-1.79	-1.39	-0.60