比抵抗係数による土の毛細管性状の調査

(Study of the Capillary Characteristics of the Soil Based on the Resistivity Factor)

藤 井 衛* (Mamoru Fujii)

キーワード：室内実験／浸透／砂／電気／粘性土／
粒径
IGC： D3／D4

1. ま え が き

土の物理的性質を調査する方法の中で、現在最も信頼できるのは現地で実際にサンプリングを行い、室内実験からその試料の性質を調査する方法であるが、規模、費用、労力の点、更に砂層であればサンプリングの段階で試料が乱されてしまう等の欠点が生じてしまう。しかし、自然地盤において各土層の電気的性質から直接物理的性質を知ることができれば、これらの欠点をなくすることができる。以上の観点から、本研究では土の電気伝導性を土質調査法に利用することを試みた。

従来、石油鉱業の分野では地層の水分飽和率（飽和度）、孔隙率（間隙率1を100%とす）を知ることを目的に、土の電気的性質に関する研究が盛んになされてきた^{1)~4)}。この分野では、土の電気的性質を比抵抗係数という言葉で表し、地層の孔隙率や密度と密接な関係を有するものとして扱ってきたが、浅川^{5),6)}は理論的に間隙率と毛細管わい曲度によって決定されるものであることを明らかにした。しかし、比抵抗係数から求められる毛細管わい曲度は、土粒子の平均粒径の大きさによって、毛細管の平均半径の度合を示す場合と毛細管自体の曲がりを示す場合がある。したがって、間隙率と毛細管わい曲度との関係は極めて複雑なものとなり、これら両者の測定方法についてはまだ明らかにされていない。また、比抵抗係数自体、間隙水の濃度（電導率）によって変化することが予想され、比抵抗係数のもつ意味についても十分に分かってはいない。そこで本報では、各種の室内実験を通して、比抵抗係数に及ぼす間隙水濃度の影響について考察を行い、各種濃度における比抵抗係数のもつ意味を明らかにするとともに、各種の土の間隙率と毛細管わい曲度との関係、ならびに石油鉱業の分野で

従来から使用されている比抵抗係数による間隙率の算定式に対する適用性について検討を行い、比抵抗係数から間隙率および毛細管わい曲度を測定する方法について提案を行った。また、平均流速と毛細管内の流速との関係から毛細管特性を考慮した有効間隙率について見解を述べ、その妥当性について実験的に検証を行った。

2. 土の比抵抗係数について

土の電気抵抗値 $R(\Omega)$ は、次式のように表される。

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (1)$$

ρ は土の比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$) であり、 L は試料長さ (cm)、 A は試料断面積 (cm^2) である。 A/L は器定数⁷⁾ K_0 と呼ばれ、測定容器の幾何学的な寸法のみによってきまる定数である。土のような毛細管組織構造をもつものであれば、器定数は A_0 を毛細管断面積、 l を毛細管長さとするとき、 A_0 に対する l の比 ($K = A_0/l$) で表すことができる。ここで間隙率を n とすると $A_0 = nA$ 、毛細管わい曲度を α とすると $l = \alpha L$ ⁵⁾ で表される。 K に対する K_0 の比は毛細管組織恒数 C_k と呼ばれ⁶⁾、次式のように毛細管の組織のみの函数で表すことができる。

$$C_k = \frac{K}{K_0} = \frac{n}{\alpha} \quad (2)$$

土の電導率 $\lambda (\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1})$ は次式のような関係として表すことができる⁸⁾。

$$\lambda = \{\lambda_0 + (\lambda_s - \lambda_0)\} K \quad (3)$$

λ_0 は液のイオン電導率 ($\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1}$) であり、 λ_s は毛細管電導率 ($\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1}$)、 $(\lambda_s - \lambda_0)$ は表面電導量 ($\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1}$) である。ただし、この(3)式の K には、供試体の長さの条件が入ってくる。毛細管の性状を量的に比較するには、無次元化して表すほうが妥当であると考えられることから(3)式の K を C_k におきかえ、土の比抵抗 ρ に対する間隙水の比抵抗 ρ_0 の比、すなわち比抵抗係数 F で表せば(4)式のようになる。

$$F = \rho/\rho_0 = \left\{ C_k \left(1 + \frac{\lambda_s - \lambda_0}{\lambda_0} \right) \right\}^{-1} \quad (4)$$

ここで λ_s と λ_0 がほぼ等しいとするなら、(4)式から C_k は次のように表すことができる。

* 東海大学工学部建築学科 講師 (渋谷区富ヶ谷 2-28-4)

• この論文に対するディスカッションは昭和57年1月1日までに投稿ください。

表-1 自然土の物理的各種諸元

試料 No.	含水比 w (%)	湿潤単位 体積重量 γ_t (gf/cm ³)	乾燥単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	比 重 G_s	間 隙 比 e	粒 度 分 布					透水係数 k ($\times 10^{-2}$ cm/s)
						最大粒径 $D_{\max}$ (mm)	10%粒径 D_{10} (mm)	50%粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	74 μ m以下 (%)	
1	26.6	2.037	1.609	2.69	0.672	0.42	0.12	0.15	1.33	0	1.36
2	25.9	1.938	1.539	2.62	1.701	0.42	0.13	0.18	1.46	0	1.69
3	19.0	2.124	1.785	2.65	0.486	4.76	0.14	0.50	5.00	2.7	0.78
4	18.5	2.096	1.769	2.63	0.488	4.76	0.14	0.43	4.30	0.7	0.91
5	15.2	2.114	1.835	2.66	0.449	19.1	0.33	0.85	3.33	0	3.14
6	29.0	1.961	1.520	2.61	0.718	0.42	0.12	0.18	1.58	0.9	1.18
7	24.2	1.961	1.579	2.65	0.678	0.84	0.14	0.28	1.93	0	1.62
8	7.9	1.931	1.790	2.71	0.513	9.52	0.40	1.50	4.50	0	3.60
9	23.4	2.004	1.624	2.63	0.618	0.84	0.12	0.27	2.42	0	1.55
10	20.0	2.040	1.700	2.67	0.570	2.00	0.32	0.45	1.63	0	2.70
11	18.1	2.155	1.825	2.65	0.451	2.00	0.30	0.42	1.67	0	2.20
12	23.1	2.058	1.672	2.63	0.572	2.00	0.21	0.42	2.29	0	1.92
13	21.9	2.081	1.707	2.63	0.541	2.00	0.16	0.40	2.88	0	1.41
14	22.7	2.090	1.703	2.63	0.543	2.00	0.15	0.36	2.80	0	1.77
15	22.5	2.081	1.699	2.63	0.548	2.00	0.16	0.33	2.38	0	1.71
16	16.7	2.084	1.786	2.65	0.484	9.52	0.30	0.90	3.67	0	2.97
17	16.1	2.129	1.834	2.65	0.435	9.52	0.18	0.80	4.90	0	2.86
18	17.4	2.168	1.847	2.65	0.435	9.52	0.19	0.80	5.26	0	1.90
19	17.5	2.130	1.813	2.65	0.462	9.52	0.16	0.68	5.56	0	0.92
20	17.6	2.091	1.778	2.63	0.479	9.52	0.14	0.67	6.71	0	0.75
21	28.5	1.841	1.433	2.63	0.835	2.00	0.12	0.23	2.08	0.8	1.15
22	22.9	2.099	1.708	2.77	0.621	4.76	0.11	0.20	2.09	0.9	0.87
23	25.8	2.071	1.646	2.80	0.701	0.84	0.20	0.26	1.35	0	4.73
24	26.7	1.969	1.554	2.63	0.692	0.42	0.12	0.20	1.83	0	1.22
25	26.9	1.992	1.570	2.66	0.695	0.42	0.13	0.16	1.31	0	1.31
26	35.5	1.988	1.467	2.63	0.792	0.42	0.11	0.17	1.50	0.9	0.40
27	28.6	1.979	1.539	2.65	0.721	9.52	0.005	0.20	54.0	30.0	—
28	29.8	1.969	1.517	2.65	0.748	9.52	0.005	0.20	54.0	30.0	—
29	26.4	1.983	1.569	2.65	0.689	2.00	0.003	0.19	76.7	26.0	—
30	27.3	1.994	1.566	2.65	0.692	2.00	0.003	0.19	76.7	26.0	—
31	28.5	1.986	1.546	2.65	0.715	2.00	0.003	0.19	76.7	26.0	—
32	29.8	2.015	1.552	2.65	0.709	2.00	0.003	0.19	76.7	26.0	—
33	52.5	1.599	1.049	2.32	1.212	0.84	0.0003	0.022	106.7	86.0	—
34	55.7	1.623	1.042	2.32	1.227	0.84	0.0003	0.022	106.7	86.0	—
35	55.9	1.653	1.060	2.32	1.188	0.84	0.0003	0.022	106.7	86.0	—
36	60.2	1.642	1.025	2.32	1.262	0.84	0.0003	0.17	106.7	86.0	—
37	31.8	1.839	1.395	2.56	0.835	4.76	0.004	0.17	45.0	23.0	—
38	32.6	1.850	1.395	2.56	0.835	4.76	0.004	0.17	45.0	23.0	—
39	33.8	1.847	1.380	2.56	0.855	4.76	0.004	0.17	45.0	23.0	—
40	34.0	1.911	1.426	2.56	0.795	4.76	0.004	0.17	45.0	23.0	—
41	66.2	1.618	0.974	2.59	1.793	0.42	0.00042	0.015	57.1	80.0	—
42	72.0	1.586	0.922	2.59	1.809	0.42	0.00042	0.015	57.1	80.0	—
43	51.5	1.758	1.160	2.71	1.337	2.00	0.0042	0.20	57.1	22.0	—
44	52.6	1.718	1.126	2.61	1.320	0.42	0.0006	0.01	33.3	84.0	—
45	34.2	1.869	1.393	2.64	0.894	19.1	0.0008	0.07	162.5	53.0	—
46	39.5	1.861	1.334	2.64	0.980	19.1	0.0008	0.07	162.5	53.0	—
47	77.0	1.430	0.808	2.04	1.525	0.0074	—	—	—	100	—
48	90.0	1.371	0.722	2.04	1.825	0.0074	—	—	—	100	—

$$C_k \div 1/F \quad (5)$$

したがって、(2)式と(5)式から次式が成り立つ。

$$F = \alpha/n \quad (6)$$

すなわち、(6)式の F は土の電気的性質から毛细管の性状を量的に表せることを意味している。

3. 実 験

3.1 試料および測定液

本研究で使用した試料は、関東近辺で採取した自然土

48種および神奈川県茅ヶ崎、江ノ島、藤沢の海砂と相模川下流の川砂を適当な重量配合率で混合した粒度調整土25種である。自然土48種の試料については、試料室に3層に分けて詰め、650gの錘を各層につき、突固め面より30cmの高さから自由落下させる締固め方法を用いた。礫を除く粒度調整土23種については、それぞれの試料について2種類の締固め方法を用いた。すなわち、完全乾燥した砂を一定の高さ(10cm)から測定液中に流し込んだ状態を $e_{\max}$ とし、測定液で10回水締め

表-2 粒度調整土の物理的各種諸元

試料 No.	締固め の状態	含水比 w (%)	湿潤単位 体積重量 γ_t (gf/cm ³)	乾燥単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	比重 G_s	間隙比 e	粒 度 分 布				透水係数 k ($\times 10^{-2}$ cm/s)
							最大粒径 $D_{\max}$ (mm)	10%粒径 D_{10} (mm)	50%粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_e	
1	$e_{\max}$ $e_{\min}$	26.6 26.1	2.474 2.546	1.799 1.872	2.60	0.495 0.437	2.00	0.95	1.30	1.47	26.1
2	$e_{\max}$ $e_{\min}$	27.9 28.1	2.256 2.367	1.764 1.848	2.77	0.570 0.499	0.84	0.48	0.58	1.25	12.0
3	$e_{\max}$ $e_{\min}$	31.4 30.8	2.171 2.349	1.652 1.796	2.73	0.653 0.520	0.42	0.28	0.32	0.21	6.24
4	$e_{\max}$ $e_{\min}$	33.0 35.2	1.979 2.027	1.488 1.499	2.71	0.822 0.808	0.25	0.12	0.16	1.42	1.28
5	$e_{\max}$ $e_{\min}$	31.0 31.3	2.144 2.279	1.637 1.736	2.76	0.686 0.590	0.42	0.17	0.27	1.76	1.33
6	$e_{\max}$ $e_{\min}$	30.7 31.0	1.933 2.040	1.479 1.557	2.78	0.880 0.786	0.42	0.12	0.18	1.67	3.89
7	$e_{\max}$ $e_{\min}$	30.8 30.9	2.006 2.122	1.534 1.621	2.80	0.825 0.727	0.42	0.13	0.20	1.77	3.94
8	$e_{\max}$ $e_{\min}$	32.7 32.1	2.012 2.155	1.516 1.631	2.86	0.887 0.754	0.42	0.12	0.17	1.58	3.49
9	$e_{\max}$ $e_{\min}$	29.0 28.4	2.092 2.162	1.622 1.684	2.82	0.739 0.675	0.42	0.16	0.26	1.75	3.22
10	$e_{\max}$ $e_{\min}$	25.6 27.1	2.165 2.227	1.724 1.752	2.78	0.613 0.587	0.84	0.15	0.27	1.93	1.83
11	$e_{\max}$ $e_{\min}$	29.5 27.9	2.112 2.204	1.631 1.723	2.77	0.698 0.608	0.84	0.15	0.27	1.93	2.51
12	$e_{\max}$ $e_{\min}$	27.2 26.1	2.082 2.332	1.637 1.771	2.79	0.704 0.575	0.84	0.16	0.29	1.94	2.35
13	$e_{\max}$ $e_{\min}$	29.0 28.9	2.029 2.172	1.573 1.685	2.78	0.767 0.650	0.84	0.13	0.24	2.00	2.54
14	$e_{\max}$ $e_{\min}$	28.4 28.5	2.069 2.188	1.611 1.703	2.73	0.695 0.603	0.84	0.16	0.28	2.00	1.95
15	$e_{\max}$ $e_{\min}$	25.6 26.4	2.096 2.216	1.669 1.753	2.74	0.642 0.563	2.00	0.14	0.27	2.29	1.60
16	$e_{\max}$ $e_{\min}$	24.9 25.2	2.157 2.214	1.727 1.768	2.74	0.587 0.550	2.00	0.13	0.28	2.62	1.57
17	$e_{\max}$ $e_{\min}$	24.3 24.7	1.994 2.252	1.604 1.806	2.77	0.727 0.534	2.00	0.18	0.34	2.33	2.91
18	$e_{\max}$ $e_{\min}$	22.0 22.8	1.934 2.101	1.585 1.711	2.86	0.805 0.672	2.00	0.14	0.24	2.00	2.17
19	$e_{\max}$ $e_{\min}$	24.9 24.7	1.995 2.081	1.565 1.669	2.80	0.789 0.678	2.00	0.13	0.21	2.15	2.23
20	$e_{\max}$ $e_{\min}$	30.2 30.6	2.074 2.165	1.593 1.658	2.62	0.645 0.580	0.42	0.13	0.15	1.46	2.12
21	$e_{\max}$ $e_{\min}$	35.4 34.3	1.948 2.088	1.439 1.555	2.68	0.862 0.724	0.42	0.12	0.14	1.50	2.10
22	$e_{\max}$ $e_{\min}$	39.8 38.6	1.631 1.906	1.167 1.375	2.64	1.262 0.919	0.42	0.11	0.13	1.55	1.92
23	$e_{\max}$ $e_{\min}$	42.9 41.3	1.615 1.910	1.130 1.352	2.59	1.193 0.916	0.42	0.10	0.12	1.60	1.80
24	$e_{\max}$	7.0	2.052	1.918	2.76	0.439	9.52	5.60	6.30	1.14	—
25	$e_{\max}$	17.2	2.166	1.848	2.80	0.515	4.76	2.40	3.31	1.39	—

した状態を $e_{\min}$ とした。礫については $e_{\max}$ の状態となる締固め方法のみを採用した。これら自然土と粒度調整土の物理的各種諸元を各々表-1, 表-2 に示す。比抵抗係数に及ぼす間隙水濃度の影響を調査するとき、試料としては標準砂を使用し、測定液としては KCl (濃度 200~200 000 ppm) を使用している。また、間隙率と毛細管わい曲度との関係を調査するとき、測定液としては表

面電導量が十分無視できる 0.1N KCl を使用し、浸透速度の測定にはトレーサー液として 0.3N KCl を使用している。

3.2 実験装置と実験方法

図-1 に示す電気抵抗測定装置は、比抵抗係数に及ぼす間隙水濃度の影響ならびに間隙率と毛細管わい曲度との関係を調査するために使用したものである。この装置

図-1 電気抵抗測定装置

図-2 浸透速度測定装置

は測定槽と電気回路から構成されている。測定槽はアクリル製であり、試料室の寸法は $50 \times 45 \times 95$ mm である。電極には有孔炭素板を使用している。なお、試料の散出を防ぐため極板の外側に酢酸ビニルスポンジ(100番)をあてがっている。試料および測定液の電気抵抗値は図-1の電気回路に示されるようなコールラウッシュブリッジ ($0.005 \sim 50\,000\,\Omega$) を使用して測定した。

図-2に示す実験装置は、浸透速度の測定に用いたものである。装置本体はトレーサー液注入槽、試料室、トレーサー液排水口の3部から構成されている。材料はいずれもアクリル製である。試料室の寸法は直径100mm、長さ120mmである。水頭差は180mmで一定としている。電気回路は単巻摺動変圧器、電圧計(max 15V)、電流計(max 150mA)から構成されており、電極にはステンレスメッシュ(0.105mm)を使用している。電源には50Hz、100Vの交流を採用している。トレーサー液の浸透速度は次式から求めた。

$$v_s = \frac{L}{t} \quad (7)$$

v_s は浸透速度 (cm/s)、 L は電極間距離 (cm) であり、この場合試料長さに一致する。 t はトレーサー液が、電極間距離を浸透するまでの経過時間 (s) である。すなわち、この経過時間をとらえるために、トレーサー液注入

図-3 電流の経時変化曲線

と同時に供試体に一定電圧 (3V) をかけ、生ずる電流の経時変化を測定した。経過時間は、両電極間内に生ずる電流の変化が一定値になるまでの時間とした。この電流の経時変化曲線を図-3に示す。透水係数 k は、JISS 型定水位透水試験装置によって測定した。

なお、以上の実験に際しては、すべて 15°C の条件下で行った。

4. 実験結果と考察

4.1 比抵抗係数に及ぼす間隙水濃度の影響

図-4は間隙水 (KCl) の濃度 C (200~100 000 ppm) に対する標準砂の電導率 λ およびその表面電導量 ($\lambda_s - \lambda_0$)、比抵抗係数 F の変化を示したものであり、表-3は土の

図-4 間隙水 (KCl) 濃度 C に対する標準砂の電導率 λ 、表面電導量 ($\lambda_s - \lambda_0$) および比抵抗係数 F の変化表-3 標準砂の電導率 λ と毛細管電導率 λ_s および間隙水の電導率 λ_0

標準砂の電導率 λ mho-cm ⁻¹	毛細管電導率 λ_s mho-cm ⁻¹	間隙水の電導率 λ_0 mho-cm ⁻¹
1.98×10^{-4}	5.88×10^{-4}	4.52×10^{-4}
$3.25 \times "$	$9.64 \times "$	$7.40 \times "$
$4.28 \times "$	$12.7 \times "$	$9.91 \times "$
$4.89 \times "$	$14.5 \times "$	$12.4 \times "$
$5.26 \times "$	$15.6 \times "$	$14.3 \times "$
$9.07 \times "$	$26.9 \times "$	$26.3 \times "$
$17.5 \times "$	$51.9 \times "$	$51.5 \times "$
$21.7 \times "$	$64.3 \times "$	$64.1 \times "$
$30.4 \times "$	$90.2 \times "$	$90.1 \times "$
$38.9 \times "$	$95.4 \times "$	$95.4 \times "$
$69.9 \times "$	$135.5 \times "$	$135.5 \times "$
$86.4 \times "$	$187.2 \times "$	$167.2 \times "$
$155.3 \times "$	$247.5 \times "$	$247.5 \times "$
$161.0 \times "$	$257.7 \times "$	$257.7 \times "$
$172.1 \times "$	$274.0 \times "$	$274.0 \times "$

図-5 間隙水濃度が 200 000 ppm の土の比抵抗係数 F と間隙率の逆数 $1/n$ との関係

電導率 λ と毛細管電導率 λ_s および液の電導率 λ_o の測定結果を示したものである。

表面電導量が増大する範囲では $F \approx 1/C_k$ となり測定液のイオン電導率 λ_o に対する $(\lambda_s - \lambda_o)$ の割合が $F-C$ の曲線形状に反映される。200~600 ppm まで F の値にほとんど変化がみられないのは、標準砂の場合 $(\lambda_s - \lambda_o)/\lambda_o$ の値が 0.30~0.28 とほぼ一定値を示す結果による。

600~8 000 ppm 間でも、 F は一定値を示す。これは、 λ_s が λ_o にほぼ等しくなったためである。すなわち、600~8 000 ppm の範囲において (6) 式の関係が成り立つ。

しかし 8 000 ppm 以後、 F は次第に減少してゆく傾向を示す。間隙水の濃度が 200 000 ppm になると、図-5 から明らかなように土の種類 (表-1 に示す試料のうち飽和度 100% のもの 38 種) に関係なく、毛細管わい曲度はほぼ 0.9 となる一定値を示す。すなわち、8 000 ppm 以後の α には λ_o の影響が入り、もはや比抵抗係数は毛細管組織恒数を表すものではなくなる。

以上の現象より、以後比抵抗係数から間隙率と毛細管わい曲度の解析を行う際には、間隙水として 0.1 N KCl (7 500 ppm) を用いることにする。

4.2 間隙率 n と毛細管わい曲度 α との関係

図-6 は表-1 に示す試料のうち粘性土 24 種および表-2 に示す試料 25 種について、毛細管わい曲度 α と平均粒径 D_{50} (ふるい通過質量百分率 50% に相当する粒径) との関係を表したものであり、図-7 は表-1 および表-2 に示す試料 63 種について、間隙率 n と D_{50} との関係を表したものである。図-6 によれば、 D_{50} が 0.46 mm 以上の砂、礫の α は D_{50} とともに増大する傾向を示す。この現象はすでに文献⁵⁾から明らかなように、 α は毛細管の曲がり度を示すものではなく、各粒子間の毛細管の平均半径の割合を表しているためである。この図-6 の α と D_{50} との関係および図-7 の n が D_{50} の関数となる関係から、 D_{50} が 0.46 mm 以上の砂、礫については D_{50} が

図-6 毛細管わい曲度 α と平均粒径 D_{50} との関係

図-7 間隙率 n と平均粒径 D_{50} との関係

大きいほど、比抵抗係数の値が大きくなる。

逆に D_{50} が 0.15~0.45 mm の範囲の砂では D_{50} が小さいほど、すなわち n の値が大きい砂ほど α は大きくなる。したがって、この範囲の砂の α は毛細管自体の曲がりを意味し、締固め効果により n が減少するとその分 α を増大させる結果をもたらす。また、この現象から D_{50} が小さい砂ほど比抵抗係数の値が大きくなる。以上から、 D_{50} が 0.15~0.45 mm の砂における n と α ならびに D_{50} との関係は、図-8 のように整理することができる。

しかし、図-6 から明らかなように D_{50} が 0.14 mm 以下の砂およびシルト、粘性土の α は D_{50} の関数にはならず、ほぼ一定値を示す。この現象は測定容器に流し込ん

図-8 D_{50} が 0.15~0.45 mm の砂における毛細管わい曲度 α と間隙率 n との関係

だ土粒子が互いに接触位置で引き止められ、単粒構造にならなかったことによるものと考えられる。すなわち、濃度 200 000 ppm の $\alpha=0.9$ は液の電導性によって決まる定数であったのに対し、このときの $\alpha=1.4$ は毛細管組織構造の形態によって決まる定数と言える。図-9 は表-1 に示す試料のうちシルト、粘性土ならびに表-2 に示す試料のうち D_{50} が 0.14 mm 以下の砂について、比抵抗係数 F と $1/n$ の関係に 1.2, 1.4, 1.6 の α の値を対応させた結果を示したものである。この図によれば、 $\alpha=1.4$ で両者の関係はよく一致する。したがって、その実験式は (8) 式のようになり、 D_{50} が 0.14 mm 以下の土では、比抵抗係数から直接 n が求まることになる。

$$F=1.4/n \quad (8)$$

4.3 比抵抗係数の算定式に対する適用性の検討

Archie^{9),10)}は孔隙率 10~40% で海水で飽和された砂岩では、実験的に次の関係があることを明らかにした。

$$F=\frac{a}{\phi^m}$$

ここで F は比抵抗係数、 a は係数である。 m は充てん指数¹¹⁾と呼ばれ、地層の固結の度合に関する指数である。 ϕ は有効孔隙係数(間隙率)である。Humble Oil 社は次式を提案している。

$$F=\frac{0.62}{\phi^{2.05}}$$

実用上、この近似式として次式を使用しても、それほど大きな誤差にはならないと言われている。

$$F=\frac{1}{\phi^2}$$

Humble の式およびその近似式は、毛細管わい曲度の影響が包含された実験式である¹²⁾。しかし、毛細管わい曲度は平均粒径の大きさによって全く異なった特性を有するものであり、この両式から求められた間隙率の計算値と実測値との間にはかなりの誤差が生ずるものと予想される。

図-10 は Humble の式およびその近似式による F と n

図-9 D_{50} が 0.14 mm 以下の土の比抵抗係数 F と間隙率の逆数 $1/n$ との関係

図-10 Humble の式およびその近似式による比抵抗係数 F と間隙率 n との関係

との関係を表したものである。実線が Humble の式、破線がその近似式を表している。図中にプロットされたデータは表-1 に示す粘性土 24 種および表-2 に示す試料 25 種について得られた F と n の実測値である。図-10 から明らかなように、Humble の式によれば算定された n が実測値の n より小さく現れるのに対し、その近似式によれば逆に大きく現れる特徴がある。すなわち、この両式はあらゆる種類の土および岩の間隙率を大局的にとらえることを目的につくり出されたものであり、その適用範囲は極めて広いものであることがうかがわれる。ただし、この両式によれば n と α との関係は逆比例となる性状を示し、4.2 項で述べた D_{50} が 0.46 mm 以上の砂、礫の n と α との関係に等しくなる。図-10 においても分かるように、これらの土は Humble の式による結果とほぼ一致する。したがって、 D_{50} が 0.46 mm 以上の砂、礫については Humble の式の適用性を認めることができる。

4.4 間隙率 n と毛細管わい曲度 α の測定方法

既に 4.2 項において、 D_{50} が 0.15~0.45 mm の砂では n と α との関係は図-8 のように整理することができ、 D_{50} が 0.14 mm 以下の土について F と n との関係は (8) 式のように表すことができると述べた。以上の関係に D_{50} が 0.46 mm 以上の砂、礫については Humble の式に適用性を認めることができるという結果を考慮すると、あらゆる種類の土について F と n との関係は図-11 のように整理することができる。ここで図-11をもとに、 n または α の求め方について以下に述べる。

D_{50} が 0.46 mm 以上の砂、礫であれば縦軸の F と図中の実線で表された曲線 (Humble の式) との交点を求め、それを垂直に下ろした横軸での位置が求めようとするそ

図-11 比抵抗係数 F と間隙率 n および毛細管わい曲度 α との関係

の土の n となる。 D_{50} が 0.14 mm 以下の土であれば、同様に破線で表された曲線（本研究で得られた実験式）より n が求まる。 D_{50} が 0.15～0.45 mm の砂であれば、 F と D_{50} を表す直線との交点から n と α が同時に求まる。また各々の D_{50} における n の最大値、最小値は図より既に定められているから、これらの値と図より求めた n の値により相対密度を算定することも可能となる。

以上のように、土の比抵抗係数 F と D_{50} が分かれば、この図により n と α ならびに締固め効果を知ることができる。ただし、この図は室内実験による結果に基づいて作成したものであり、今後自然地盤において適用できるものにするためには、更に詳細な検討を重ねてゆく必要があると思われる。

4.5 有効間隙率と毛細管特性

土供試体の毛細管長さを αL (cm) とし、浸透に要す時間を t (s) とすると、毛細管内の流速 v_c は、下式により求めることができる。

$$v_c = \frac{\alpha L}{t} \quad (9)$$

したがって、毛細管内の流速 v_c と浸透速度 v_s との間には $v_c/v_s = \alpha$ なる関係がある。また、ダルシーの平均流速 v と浸透速度 v_s との間には、 $v/v_s = n$ の関係があるから、 v と v_c との間には (10) 式の関係が成り立つ。

$$\frac{v}{v_c} = \frac{n}{\alpha} \quad (10)$$

なお、 v に対する v_c の比を有効間隙率と定義すると、(10) 式より有効間隙率は n/α で表され、比抵抗係数の逆数に等しいことになる。直毛管を形成する土、あるいは α が毛細管の曲がり方を意味しない土については $v/v_c = n$ となる。表-4 は表-2 に示す試料のうち α が毛細管の曲がり方を意味する平均粒径 0.15～0.45 mm の範囲にある試料、18種について v_c の計算結果を示したものであり、図-12 は v/v_c と n/α の比較を行ったものである。図-12 によると、この両者はよく一致しており (10) 式の妥当

表-4 毛細管内の流速 v_c

試料 No.	試料長さ L (cm)	経過時間 t (s)	毛細管わい曲度 α	毛細管内の流速 v_c (cm/s)
3	10.0	55	1.93	0.351
4	10.0	155	2.20	0.142
5	6.0	50	1.78	0.214
6	5.0	50	2.22	0.222
7	10.0	90	1.41	0.157
8	10.0	100	1.61	0.161
9	10.0	70	1.75	0.250
10	9.0	100	1.75	0.158
11	10.0	90	1.43	0.159
12	10.0	90	1.67	0.186
13	10.0	100	1.74	1.174
14	10.0	130	2.00	0.154
15	10.0	140	2.02	0.144
16	10.0	150	1.84	0.123
17	10.0	80	1.87	0.234
18	10.0	110	2.04	0.186
19	10.0	40	1.83	0.458
20	10.0	190	1.58	0.083

図-12 v/v_c と n/α の比較

性を認めることができる。

5. 結 言

本論文で得られた結論を箇条書きにまとめる。

- (1) 比抵抗係数は同じ毛細管構造をもつ土であっても、間隙水濃度によってかなり異なった値を示す。
 - (2) 平均粒径が 0.15～0.45 mm の砂では、毛細管わい曲度と間隙率、平均粒径の関係は図-8 のように整理することができる。
 - (3) 平均粒径が 0.14 mm 以下の土について、比抵抗係数と間隙率との関係は (8) 式のように表すことができる。
 - (4) 平均粒径が 0.46 mm 以上の砂、礫については Humble の式に適用性を認めることができる。
 - (5) (2)(3)(4) で述べたことをまとめると、あらゆる種類の土について比抵抗係数と間隙率との関係は図-11 のように整理することができる。
 - (6) 浸透距離を毛細管わい曲度と試料長さの積で表せば、有効間隙率は n/α で表すことができる。
- 以上のことを自然地盤で実証するためには、今後検討

すべき事項がかなり現れてくるものと思われるが、本研究により土質調査法として、土の電気伝導性の利用方法については一応のまとまりをつけることができたものと思える。

謝 辞

この研究を行うにあたり、東海大学吉成元伸教授に多方面にわたる御教授をあおぎ、ここに厚く御礼申し上げる次第であります。

また、実験およびデータ処理に協力していただいた増田隆氏（長谷川工務店）、竹内章悟氏（紅梅組）に厚く感謝いたします。

記 号 説 明

A, A_v = 試料断面積, 毛細管断面積
 a = Archie の式中の係数
 C = 濃度 (ppm)
 C_k = 毛細管組織恒数
 $D_{\max}, D_{10}, D_{50}$ = 最大粒径, 10% 粒径, 50% 粒径
 $e_{\max}, e_{\min}$ = 最大間隙比, 最小間隙比
 F = 比抵抗係数
 G_s = 土粒子の比重
 K, K_o = 土の器定数, 測定容器の器定数
 k = 透水係数
 L = 試料長さ
 l = 毛細管長さ
 m = 充てん指数
 N = 規定濃度
 n = 間隙率
 Q = 単位時間あたりの透水量
 R = 電気抵抗値
 t = 浸透に要した時間
 U_e = 均等係数
 v = 平均流速
 v_c = 毛細管内の流速
 v_s = 浸透速度
 w = 含水比

α = 毛細管わい曲度

γ_d = 乾燥単位体積重量

γ_t = 湿潤単位体積重量

λ, λ_s = 土の電導率, 間隙水の電導率, 毛細管電導率

ρ, ρ_o = 土の比抵抗, 間隙水の比抵抗

ϕ = 有効孔隙係数

参 考 文 献

- 1) 伊藤寿恒 (1976): 電気検層の基礎, 「試錐孔を利用する物理探査法 (物理検層の基礎と応用) 講習会テキスト」, 物理探査技術協会, pp. 125~136.
- 2) 伊藤寿恒 (1973): 物理検層による油層解析 (その1), 「物理探査」, pp. 37~44.
- 3) 遠藤源助 (1976): 物理検層全般について, 「試錐孔を利用する物理探査法 (物理検層の基礎と応用) 講習会テキスト」, 物理探査技術協会, pp. 1~25.
- 4) 岡田 正 (1952): 油層状態の電気比抵抗による研究, 「石油技術協会」, 第7巻第5号, pp. 30~39.
- 5) 浅川美利 (1956): 土の毛管系とその特性に関する実験的研究, 「日本大学工学研究所彙報」, pp. 19~23.
- 6) 浅川美利 (1958): 界面電気的性質からみた土の毛細管機構について, 「土木学会論文集」, 第54号, pp. 48~55.
- 7) 吉沢四郎・渡辺信淳 (1977): 「電気化学 I」, 共立全書, pp. 23~25.
- 8) 森 麟 (1952): 土の電気伝導について, 「土木学会誌」, Vol. 37, No. 11, pp. 13~17.
- 9) Archie, G. E. (1942): "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics," AIME, Vol. 146, pp. 54-62.
- 10) Archie, G. E. (1947): "Electrical resistivity an aid in core analysis interpretation bulletin of the American Association of Petroleum Geologists," AIME, Vol. 31, No. 2, pp. 350-366.
- 11) 藤原忠一 (1977): 土木調査における電気検層の現状と問題点, 「土木物探研究会資料集」, 物理探査技術協会, pp. 125~134.
- 12) 青木 豊他 (1979): 「物理探査用語辞典」, 物理探査技術協会, pp. 224~225.

(原稿受付, 1980. 2. 21)