

図-1 山形県の地質図 (吉田三郎著: 山形の地質をめぐって, 築地書館, 1984. 裏表紙から)

気 体
水
有 機 物
土 粒 子

図-2 有機質土の相構成

機質土と異なり, モデル化した相構成を図示すると図-2⁴⁾ のようになる。すなわち不飽和状態の無機質土の相構成は土粒子と水および空気 の3相からなるのに対して, 有機質土では土粒子, 有機物, 水, 気体の4相からなる。そして 高有機質土においては土の実質部分に占める有機物の割合が大きくなるため力学的挙動が無機質土に比べて複雑になる。このような高有機質土の基本的パラメーターは山口ら⁴⁾ が示している。

高有機質土の諸性質を検討する場合には, 多量に含まれる有機物が高有機質土の土性に影響を及ぼしていることを考慮すれば, 有機物含有量をパラメーターとして土性の検討を行うべきものと考えられる。しかし, 有機物含有量の測定そのものが不慣れな場合には大変な作業であることを考慮して, ここでは有機物含有量をパラメーターとした表示法を採らないことにした。すなわち, 例えば含水比と湿潤単位体積重量の関係を検討する場合, 有機物含有量をパラメーターとして両者の関係を検討するのが一般的な方法であるが, 有機物含有量を考慮しないで両者の関係を検討しようとするものである。また比重についても, 例えば土粒子部分の $G_s=2.70$ と有機物部分の $G_s=1.50$ に分離して考えるのではなく, 両者が混在した一つの高有機質土としての比重 $G_s=2.20$ を採ることにした。

湿平地部の土層構成は, 最上層の高有機質土層の層厚が2~3mと庄内平野の場合より薄く, その下位の有機質混り粘性土層はほぼ同じ層厚の2~3mである。また山形平野においても谷地部では高有機質土層が7~8mの層厚を有している。このような堆積状態にある地盤の14箇所から固定ピストン型サンプラーを用いて採取した高有機質土の不攪乱試料を検討の対象とした。なお, これらの試料はすべて地下水位以深で採取したものであるが, 試験時の飽和度は $S_r=95\sim99\%$, 平均値は98%であった。

これらの高有機質土試料について, 物理的性質を知るために比重, 湿潤単位体積重量, 含水比, 間隙比, 強熱減量法による有機物含有量の測定を, 力学的性質を知るためにオedometerによる圧密試験と一軸圧縮試験を行った。また庄内平野産の不攪乱高有機質土を圧密容器において載荷圧密した試料について, 変水位透水試験を実施して間隙比と透水係数の関係を調べた。さらに, 一軸圧縮試験の供試体を採取した地盤において, せん断強さに関して原位置試験の値と室内試験の値とを比較する目的で, ポータブルコーン貫入試験とオランダ式二重管コーン貫入試験を実施した。

4. 高有機質土の基本的性質とその取扱い

高有機質土は強熱減量試験結果からも分かるように, 無

定そのものが不慣れな場合には大変な作業であることを考慮して, ここでは有機物含有量をパラメーターとした表示法を採らないことにした。すなわち, 例えば含水比と湿潤単位体積重量の関係を検討する場合, 有機物含有量をパラメーターとして両者の関係を検討するのが一般的な方法であるが, 有機物含有量を考慮しないで両者の関係を検討しようとするものである。また比重についても, 例えば土粒子部分の $G_s=2.70$ と有機物部分の $G_s=1.50$ に分離して考えるのではなく, 両者が混在した一つの高有機質土としての比重 $G_s=2.20$ を採ることにした。

5. 高有機質土における土性間の相関性

5.1 強熱減量値と高有機質土の比重

庄内平野の高有機質土について強熱減量値を求めた結果の全体的傾向は, 深さ2~3mでは20~65%で平均37%, 深さ3~4mでは22~56%で平均40%, 深さ4~5mでは32~34%で平均33%, 深さ5~6mでは16~21%で平均18%であり, 深度が大きくなると相対的に強熱減量値が減少している。

また庄内平野の高有機質土50試料について比重を測定した結果は, $G_s=1.59\sim2.55$ であり, その平均値は2.20, 標準偏差は $\sigma_{n-1}=0.212$ であった。

ここで, 前出の山口らにより岩見沢泥炭を対象として作

成された「試料の比重と有機物含有量との関係図」⁵⁾を用いて、庄内平野の高等有機質土の場合について強熱減量値すなわち有機物含有量から比重を推定すると、強熱減量値が40, 37, 33, 18%のときに対応する比重は約2.12, 2.16, 2.19, 2.42, 平均2.22と求められる。この比重の推定値は上記の実測値と近似しており、この結果から庄内平野の高等有機質土の有機物含有量と比重の関係は、岩見沢泥炭の場合に類似していることが推測される。

5.2 物理的および力学的性質に関する相関性

自然状態における高等有機質土について、土質試験から得られた各土性のうちから2種類ずつを取り出し、それらの相関性を検討した結果を、相関係数および相関比で表すと表一1のとおりになる。

ここで、相関係数は2変量が線形関係すなわち直線回帰の相関関係を示す場合に、その回帰直線を基準として分散を考える場合の係数であり、また相関比は2変量の相関関係が直線回帰でなく、回帰直線の代わりにある回帰曲線を基準として分散を考えることができる曲線回帰のときの、相関係数と全く同じ主旨の係数である。そして相関係数は2変量相互間が対称であるが、一般的には相関比は2変量相互間が非対称である。したがって、2変量をx, yと置くと、yのxに対する相関比とxのyに対する相関比とは等しくないのが一般である。さらに、回帰直線に対する分散は回帰曲線に対する分散よりも一般的に大であるため、相関係数よりも相関比の方が大となる性質がある。

以上に述べた2変量に関する線形関係と非線形関係の特性から、算術方眼紙上に図示した関係から得られる係数は相関係数であり、片対数方眼紙および両対数方眼紙上に図示した関係から得られる係数は相関比となる。また相関係数あるいは相関比の+-の記号は、+が正の相関、-が負の相関を表している。

表一1において「自然含水比 w_n と空隙比 e 」および「空隙比 e と圧縮指数 C_c 」の関係は図-3と図-4に示すようになり、その相関係数は $r=0.959, 0.904$ であるから、それぞれの土性間に「強い相関」があることが分かる。これらの回帰式を下記に示す。

$$e=0.0277 w_n - 0.777 \dots\dots\dots(1)$$

$$C_c=0.518 e - 0.244 \dots\dots\dots(2)$$

高等有機質土の自然含水比と空隙比の関係については、双曲線回帰式で表されるとする研究成果^{6),7)}があるが、この場合は相関比が $\eta=0.928$ と表一1の他の関係よりも小さくなるので、ここでは線形式を採用した。

高等有機質土の空隙比と圧縮指数の関係については、庄内平野の高等有機質土について得られた結果と同様に線形関係で示す⁸⁾研究者が多いが、その回帰式を指数関係で示す⁹⁾例もある。この二つの考え方については、表一1の結果からも分かるように、測定範囲内であれば、いずれの回帰式を採用しても大差ないものと判断される。なお線形回帰式の場合の空隙比に関する係数については $0.5^{10)}, 0.5446^{11)}, (0.45 \sim 0.75)^{12)}$ という測定結果がある。

「自然含水比と湿潤単位体積重量 γ_t 」, 「自然含水比と圧縮指数」および「湿潤単位体積重量と空隙比」の関係については、これら各々の関係に対して、それぞれ相関係数は $r=-0.751, +0.765, -0.754$, また指数曲線に対する相関比は $\eta=-0.797, +0.800, -0.784$ であり、相関係数に対する相関比と相関係数の差の比 $(\eta-r)/r$ が百分率で4~5%であり、両係数値が近似しているため、前述の

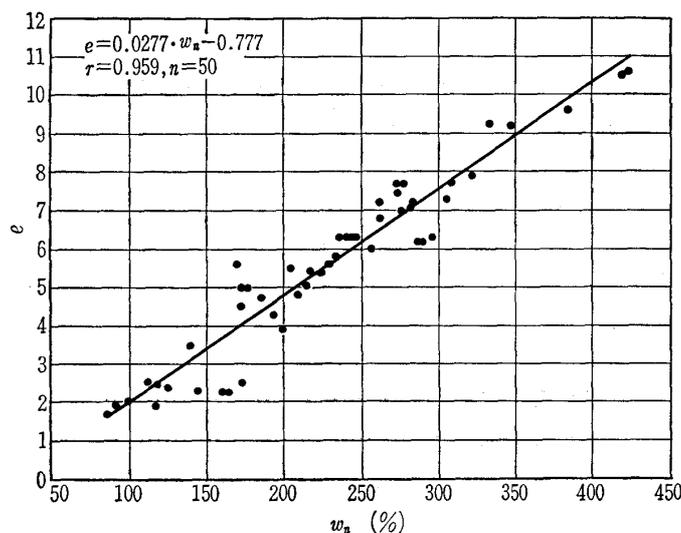


図-3 自然含水比 w_n と空隙比 e の関係

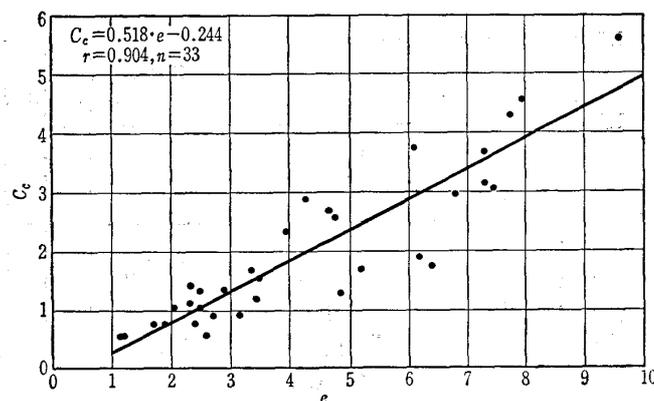


図-4 空隙比 e と圧縮指数 C_c の関係

表一1 自然状態の2種類の土性と相関係数と相関比

関係付けた2種類の土性	試料の個数	相関係数 (r)		
		算術	片対数	両対数
自然含水比と湿潤単位体積重量	82	-0.751	-0.795	-0.797
自然含水比と空隙比	50	+0.959	+0.941	+0.944
自然含水比と圧縮指数	38	+0.765	+0.733	+0.800
自然含水比と一軸圧縮強さ	94	-0.288	-0.269	-0.277
湿潤単位体積重量と空隙比	50	-0.754	-0.762	-0.784
湿潤単位体積重量と圧縮指数	33	-0.554	-0.559	-0.638
湿潤単位体積重量と一軸圧縮強さ	29	+0.094	+0.097	+0.123
乾燥単位体積重量と圧縮指数	33	-0.665	-0.710	-0.779
乾燥単位体積重量と一軸圧縮強さ	29	+0.218	+0.248	+0.261
空隙比と圧縮指数	33	+0.904	+0.849	+0.902
空隙比と一軸圧縮強さ	87	-0.634	-0.661	-0.660

「一般的には相関係数よりも相関比の方が大となる」という性質を考慮すると、これらの関係は直線回帰でよいように想像される。しかし測定値の分布状態は両対数方眼紙の場合に最も相関性が高いと見られるので、図-5、図-6、図-7に示すように指数曲線回帰と判断する。上記の関係図から、これらの2変量間には「やや強い相関」があることが分かる。これらの回帰式は下記ようになる。

$$\gamma_t = 3.171 w_n^{-0.183} \dots\dots\dots(3)$$

$$C_c = 0.00137 w_n^{1.408} \dots\dots\dots(4)$$

$$e = 9.791 \gamma_t^{-4.150} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、自然含水比と圧縮指数の関係については、間隙比と圧縮指数の関係の場合と同様に、線形回帰式で表す研究者¹³⁾と指数関数形の回帰式で表す研究者¹⁴⁾および双曲線回帰式で表す研究者¹⁵⁾とがある。この場合も表-1の試験結果からはいずれの回帰式を採用しても大差ないように考えられるが、庄内平野の高有機質土については先に述べた理由により式(4)とした。

なお自然含水比と圧縮指数の関係について線形回帰式を提案している報告における比例定数は、0.0086¹⁶⁾および(0.0075~0.011)≒0.01¹⁷⁾であり、表-1の線形回帰の場合の回帰式の定数0.019よりも小さな値になっている。

次に「湿潤単位体積重量と圧縮指数」、「乾燥単位体積重量 γ_a と圧縮指数」および「間隙比と一軸圧縮強さ q_u 」の関係は、 $r = -0.554, -0.665, -0.634$ と $\eta = -0.638, -0.779, -0.661$ であり、これらの $(\eta-r)/r$ の百分率は「間隙比と一軸圧縮強さ」の場合の4%を別にすると、15%と17%であり、これらは明らかに指数曲線回帰と判断される。これらの関係図を図-8、図-9、図-10に示す。これらの関係図から、「乾燥単位体積重量と圧縮指数」には「やや強い相関」があるが、他の関係には「弱い相関」があるものと判断される。これらの回帰式を下記に示す。

$$C_c = 5.209 \gamma_t^{-4.348} \dots\dots\dots(6)$$

$$C_c = 0.566 \gamma_a^{-1.568} \dots\dots\dots(7)$$

$$q_u = -0.445 \log e + 0.572 \dots\dots\dots(8)$$

残りの「自然含水比と一軸圧縮強さ」、「湿潤単位体積重量と一軸圧縮強さ」および「乾燥単位体積重量と一軸圧縮

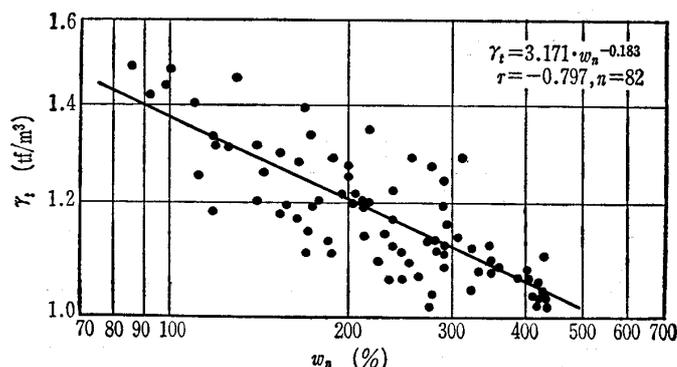


図-5 $\log w_n$ と $\log \gamma_t$ の関係

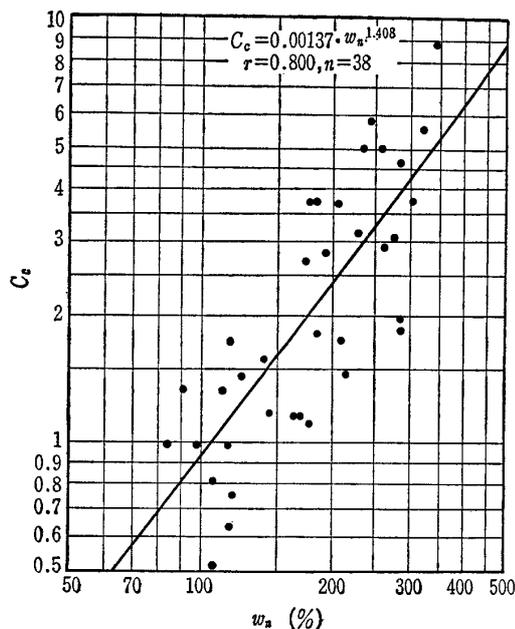


図-6 $\log w_n$ と $\log C_c$ の関係

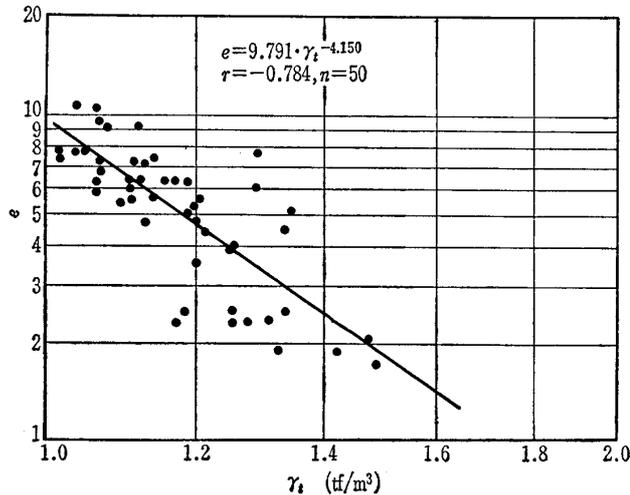


図-7 $\log \gamma_t$ と $\log e$ の関係

強さ」の関係は、 $r = -0.288, +0.094, +0.218$ と $\eta = -0.277, +0.123, +0.261$ であり、これらは図示することなく「無相関」と判断される。

5.3 圧密試料の間隙比と透水係数の相関性

高有機質土の透水係数と間隙比の関係を調べるため、庄内平野産の不攪乱高有機質土を圧密容器において荷重強度を変えた載荷圧密を行い、それら種々の大きさの圧密荷重に対する試料について変水位透水試験¹⁸⁾を実施した。

透水試験から得られた透水係数 k とその供試体について測定した間隙比 e の関係を算術方眼紙、片対数方眼紙および両対数方眼紙に図示し、相関性を検討した結果、下記の回帰式と相関係数 r あるいは相関比 η が得られた。

$$e = 7.957 + 1321.58 k, \quad r = 0.818 \dots\dots\dots(9)$$

$$e = 24.406 + 4.645 \log k, \quad \eta = 0.901 \dots\dots\dots(10)$$

$$e = 43.828 k^{0.2128}, \quad \eta = 0.887 \dots\dots\dots(11)$$

これら3方式で求めた相関係数あるいは相関比はいずれも大きな値であり、いずれの関係においても「強い相関」

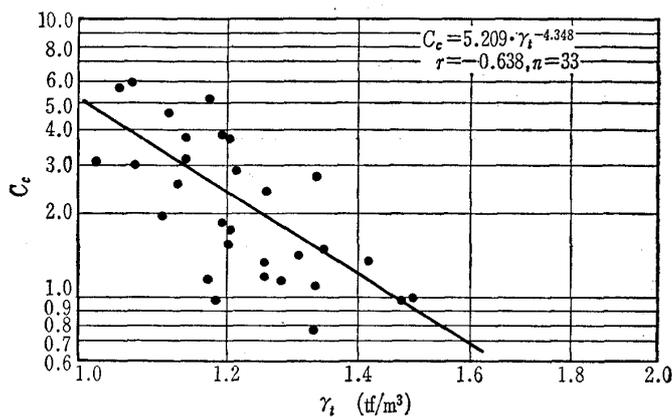


図-8 log γ_i と log C_c の関係

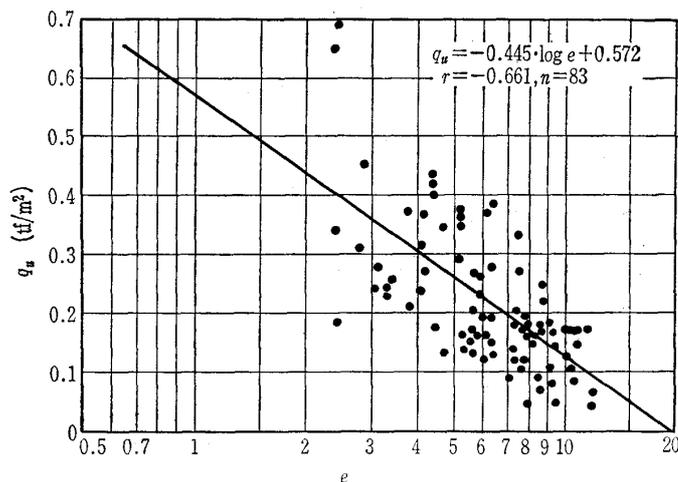


図-10 log e と q_u の関係

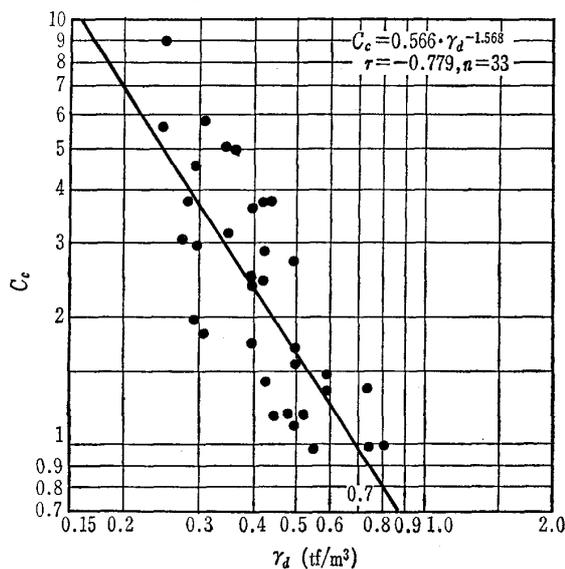


図-9 log γ_d と log C_c の関係

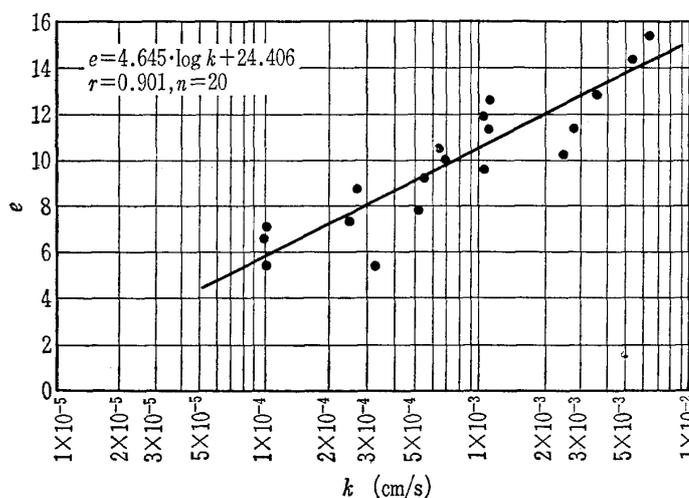


図-11 log k と e の関係

があることを示している。これらの結果から、ここでは透水係数と間隙比の間には対数曲線回帰が最も高い確率で成立するものと判断した。対数曲線回帰の場合の透水係数と間隙比の関係を図-11に示す。

一般に砂の透水係数 k は、土粒子の直径を D_s 、砂粒子の形状と集合状態から定まる係数を C 、間隙比を e 、間隙水の単位体積重量を γ_w 、間隙水の粘性係数を μ とすると

$$k = D_s \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} C \dots\dots\dots (12)$$

で表されることから、 k が $e^3/(1+e)$ にほぼ比例することが分かる。しかし、粘性土については砂と同様に式(12)が成立するかどうかは疑問であり、したがって k が e のどのような関数形と比例するか不明であるが、実験結果としては透水係数の対数值 $\log k$ と間隙比 e との間にほぼ直線関係が成立する¹⁹⁾といわれている。庄内平野の高有機質土についても式(10)に示したように $\log k$ と e との間にほぼ直線関係が成立することが確認された。

また透水係数値については、庄内平野産の高有機質土の値が $k = (0.1 \sim 7) \times 10^{-3}$ cm/s であったが、北海道の石狩

泥炭では $k = 10^{-5}$ cm/s、釧路泥炭では $k = 10^{-3}$ cm/s 程度である^{20), 21), 22), 23)}といわれていることから、庄内平野産の高有機質土は透水性としては釧路泥炭に近い性質を有するものと推定される。

5.4 コーン支持力と一軸圧縮強さの相関性

高有機質土のせん断強さに関する原位置試験の値と室内試験の値との対応を検討する目的で、一軸圧縮試験の供試体を採取した地盤の6箇所においてポータブルコーン貫入試験とオランダ式二重管コーン貫入試験を実施した。

測定結果を一軸圧縮強さ q_u とポータブルコーン貫入試験によって求められるコーン支持力 q_c の関係、および一軸圧縮強さ q_u とオランダ式コーン貫入試験支持力 q_{cd} の関係として図示すると図-12、図-13のようになる。いずれも対応する2変量間の相関性は高く、その回帰式と相関係数は下記に示すとおりである。

$$q_c = 9.899 q_u + 1.004, \quad r = 0.881 \dots\dots\dots (13)$$

$$q_{cd} = 8.091 q_u + 0.813, \quad r = 0.851 \dots\dots\dots (14)$$

これらは線形関係であり、相関係数は2変量に関して対称である。したがって式の変数関係を変換することが可能

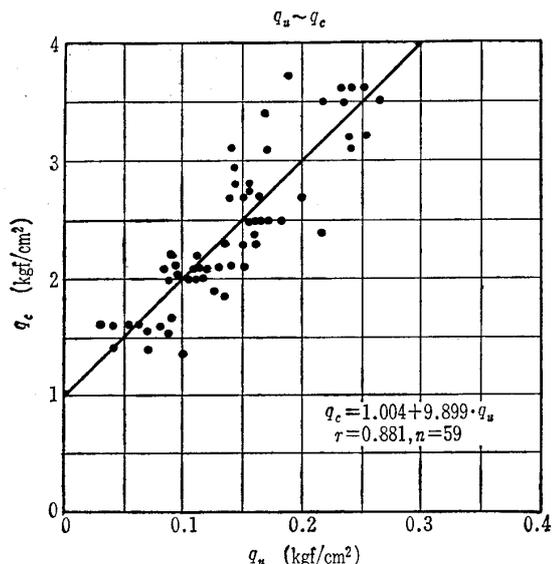


図-12 q_u と q_c の関係

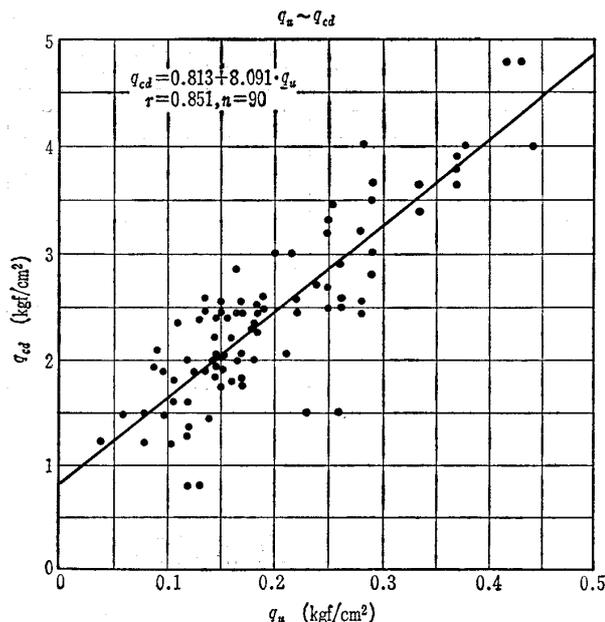


図-13 q_u と q_{cd} の関係

であるから、上式は次のように書き換えられる。

$$q_u = 0.101 q_c - 0.101 = 0.101(q_c - 1) \dots\dots\dots (15)$$

$$q_u = 0.124 q_{cd} - 0.100 \dots\dots\dots (16)$$

また、池田・室町²⁴⁾は粘性土に関して、粘着力を c として、 $q_c = 5 q_u = 10 c$ の関係があることを示したが、庄内平野の高有機質土の場合には、 $q_u = 2 c$ として、

$$\text{ポータブルコーン貫入試験機} : q_c = 19.8 c \doteq 20 c \dots\dots (17)$$

$$\text{オランダ式コーン貫入機} : q_{cd} = 16.2 c \doteq 16 c \dots\dots (18)$$

の関係が、ほぼ成立するものと考えられる。なお、ここで取り上げた一軸圧縮試験結果としての破壊ひずみは、 $\epsilon_{max} = 6.7 \sim 15.0\%$ 、平均 10.1% 、標準偏差 $\sigma_{n-1} = 3.2\%$ であるが、塑性粘土の場合のように明確でなく、応力～ひずみ曲線は、この値以後もわずかに下降するがほぼ水平に近い形状を示すものである。

6. むすび

土質試験の難しい高有機質土について、無機質土と同様の手慣れた試験を行うことによって、他の多くの土性値を容易に推定することができる方法がないものかと考えた末に、上記のような試みを行った。その結果、強熱減量値が $16 \sim 65\%$ 、自然含水比が $86 \sim 435\%$ の泥炭に関して、物理的性質については土性相互にかなり高い相関性があることが分かった。しかし、せん断強さに関しては、物理的性質との間に高い相関性があるとは言えず、原位置試験を実施する以外に方法がないという結論になった。ここでは高有機質土のせん断強さを求めるための原位置試験として、コーン貫入試験を取り上げたが、今後はペーン試験について検討し、高有機質土に対する最適の原位置せん断試験法を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 土質工学会有機質土に関する試験法研究会
- 2) 農業土木学会泥炭地開発委員会
- 3) JSF T-23, JSF T-27, JSF T-28.
- 4), 5) 山口晴幸・松尾 啓・大平至徳・木暮敬二：泥炭および泥炭地盤の物理・化学および力学的特性，土と基礎，Vol. 34, No. 4, pp. 21～28, 1986.
- 6) 渡辺 進：土質基礎工学ライブラリー1，軟弱地盤の調査・設計・施工法，第1編第3章，工学的な性質，土質工学会，1966.
- 7), 15) 及川 洋・対馬雅己・東山 勇・天間則光：東北地方における泥炭の土質工学的性質，土と基礎，Vol. 37, No. 3, pp. 19～22, 1989.
- 8) 土質工学会：土質試験法，第1回改訂版，p. 494, 1969.
- 9), 14) Kogure, K. and Ohira, Y.: Statistical forecasting of compressibility of peaty ground, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 4, 1977.
- 10), 16) 前口正蔵・酒井賢一・小山田博：釧路火力発電所土質調査について，土と基礎，Vol. 13, No. 8, 1965.
- 11) 渡辺 進・井元美晴：初期間隙比から圧密沈下量を求める方法，土と基礎，Vol. 10, No. 9, 1962.
- 12), 17) NRCC: National Research Council of Canada: Muskeg Engineering Handbook, University of Toronto Press, 1969.
- 13) I.C. MacFarlane Muskeg Engineering Handbook, the Muskeg Subcommittee of the NRC, Associate Committee on Geotechnical Research, 1969.
- 18) 土質工学会：土質試験法，図5-3-15, p. 5-3-27, 1985.
- 19) 山内豊聡・安原一哉：粘性土の工学的性質に及ぼす有機物の影響，第12回土質工学研究発表会，1977.
- 20) 前田一男：釧路泥炭地における透水試験，土と基礎，Vol. 3, No. 10, 1955.
- 21) 真井耕象：石狩地域泥炭地盤の安定性について，北大工学部彙報，No. 6, 1952.
- 22) 宮川 勇：軟弱地盤と盛土，土と基礎の設計法(その3)，技報堂，1963.
- 23) 農業土木学会泥炭地開発委員会排水部会：泥炭土の試験方法について，農業土木研究，Vol. 28, No. 5, 1961.
- 24) 池田俊雄・室町忠彦：地耐力調査法，鉄道現業社，1967.

(原稿受理 1989. 4. 28)