

黒ぼくの圧密およびせん断特性における 腐植含有の効果

清水 正喜*・有本 弘孝*・藤野 準一**

(1982年6月17日受理)

Effects of Humus Matters on The Consolidation and Shear Characteristics of an Andosol

by

Masayoshi SHIMIZU*, Hirotaka ARIMOTO* and Jun'ichi FUJINO**

(Received June 17, 1983)

For the purpose to examine the mechanical role of humus matters included in an Andosol (Kuroboku), various physical and mechanical tests were performed for the natural sample and the sample treated with H_2O_2 .

Discussions for results are made based on the concept of aggregate composed of humus matters and inorganic minerals.

1. 序 論

我が国の全面積に対する黒ぼくの割合は、16.4%にも達すると算定されている¹⁾。その多くが火山灰起源の有機質土であり、その有機物質の大部分は、腐植である。一般に、火山灰土の粘土部分では、結晶質の粘土鉱物の他に、アロフェンを主体とした非晶質成分が多量に含まれていて、多量の腐植の集積は、アロフェンと無関係でないとされている。

腐植は、「生物遺体が地中動物によって分解、さらに重縮合を受け、同時に酸化酵素の働きで酸化作用を受けて、暗色の高分子のコロイド状物質となったもので、現在のところ有機化学上どのグループにも属さない土に特

有な有機物である、とされている²⁾。腐植物質のうち、アルカリに可溶の部分は、さらにフルボ酸と腐植酸に分画され、前者はpH 1以下の酸に可溶、後者は腐植酸として沈殿する。また、アルカリ抽出剤に不溶の物質はヒューミン（または腐植酸）と呼ばれ、土中の無機物質と強固に結びついている³⁾。

腐植の土中での存在形態は、次の5つに分けられる⁴⁾：

- 1) 遊離または殆んど遊離状態；
- 2) アルカリおよびアルカリ土類金属のカチオンと結合した腐植物質塩類の形態；
- 3) 腐植物質塩類とAlやFeの加水酸化物との混合ゲルの形態；
- 4) 腐植—無機化合物の錯化合物の形態；
- 5) 腐植—無機吸着化合物（粘土鉱物と結合）の形態。

* 海洋土木工学科 Department of Ocean Civil Engineering

** (株)大本組 Ohmoto Gumi Co., Ltd.

上記5)の形態は、土に特有の団粒構造をつくり、内部の小間隙と大きい比表面積のために、特有の水分保持特性を発揮する。たとえば、竹中⁹⁾は、有機物含有量の異なる土についてpF～含水比特性の比較を行って、有機物含有量の多い土で見られるpF 1.7付近の脱水のピークが、団粒間の粗間隙の水の脱水に由来するとして、有機質土の水分保持特性における団粒構造の重要性を指摘している。

腐植が土の化学性に及ぼす影響は、腐植含有量とCECやリン酸吸収量との関係⁹⁾が調べられ、いづれも腐植含有量の増大とともに増加する傾向がある。

このような水分保持特性や化学性に関しては多くの研究が見られ、黒ぼくのような腐植土は、農耕地利用の観点からみれば有利な条件にある場合が多い。

一方、腐植土の物理特性や力学性に関する研究は十分と言えない。それは、黒ぼくの占める面積は大きい、その堆積深さが比較的浅い、したがって量的に少ないので、ピートなどの高有機質土が量的に多いのに比べ、大規模土木工事の対象となる機会が少なかったからと言えよう。ところが、近年、大規模な農地整備事業や高速道路建設等により、黒ぼくのような低有機質土が土工の対象となる機会が多くなりつつある²⁾。

竹中ら⁹⁾は、有機物含有量と土の物理的性質の関係を調べ、有機物含有量が増えれば土の比重は減少し、液性限界・塑性限界は増加することを見出した。また、前田ら¹⁰⁾は、火山灰および非火山灰質有機質土を対象として、過酸化水素水処理により腐植を除去すれば、原試料に比べ比重が増大し、液性限界が減少すること、さらに、その変化量は初期腐植含有量が多いほど大きいと指摘している。佐藤ら¹¹⁾は、粒径による分画を行い、さらに各分画に対して比重による分画を行って、20 μ m以下のどの粒径分画においても、有機物含有量は比重が小さいほど多いことを見出している。このことは、シルト径の粒子にもかなりの有機物質(腐植)が結合していることを示唆している。

有機質土の力学性質は、泥炭などの高有機質土や関東ロームについてその特性がかなり明らかにされている¹²⁾が、黒ぼくについては未だ十分と言えない。

松尾ら¹³⁾は、海底堆積ヘドロに対して、化学的・物理的性質を明らかにしたうえで、その力学特性と腐植含有量

の関係を調べた。有機物含有量が多いほど凝集粒径が大きくなること、二次圧密速度は大きくなるが、圧密係数は小さくなること、せん断特性として、変形量は大きい強度が増加するという結果が示された。山内ら¹⁴⁾は、黒泥の繊維分を取り除いて抽出した有機物をカオリンに添加し、有機物含有の効果を調べた。その結果、有機物含有量が多くなると、圧縮指数や二次圧密速度は増大するが、圧密係数は反対に減少する；圧密による非排水強度増加率が有機物含有率が大きいほど大きい等の知見を得た。これらの結果を有機物質のセメンテーション効果と関連づけて考察している。上記の研究はいづれも、結晶性の粘土鉱物と分解度の低い有機物質の複合体に関するものであり、黒ぼくのような火山灰質土の組成と異なると推察される。しかし、その力学性質に及ぼす有機物含有量の影響は、黒ぼくの特性と比較する上で有益であろう。

本研究は、鳥取県内で採取された大山火山灰起源の黒ぼくを対象として、過酸化水素水処理を施し腐植を除去した試料を作製し、物理的性質と力学性質に及ぼす腐植の影響を明らかにすることを目的としている。物理的性質として、比重、液性・塑性限界、粒度を、また力学性質に関しては、一次元圧密特性と、三軸試験による非排水せん断変形特性ならびに排水クリープ特性をとり上げ、それぞれについて、腐植を除去した土もとの試料の比較検討を行う。

2. 試料

2.1 原試料

原試料土は、鳥取県東伯郡において採取された黒ぼくである*1。原試料は空気乾燥状態で420 μ mふるいを通し、礫および砂分を取り除いて実験に供した。以下、本論文においては、この粒度調整した試料を黒ぼく(Non-Treated)と呼び、後述の過酸化水素処理を施して腐植を除去した試料を処理土(Treated)と呼ぶ。

2.2 腐植除去の方法

黒ぼくに過酸化水素処理(H₂O₂処理)を施し、腐植を除去した。処理方法の手順を記す。

①黒ぼく100gfに対し、6% H₂O₂500mlを加え、攪はんしながら加熱する。H₂O₂の分解により生じる発泡を確かめ十分反応させる。

*1 鳥取県地方の黒ぼくは、表土層を形成し、大山上部火山灰に属する。大山上部火山灰は、洪積世末期の大山火山活動に由来し、C¹⁴年代で17200年とされている¹⁵⁾。

②順次 200, 100, 100, 100 ml ずつ加え、各段階で攪はん・加熱する。各段階における溶液の温度は、70~95°C、反応時間は 110 分、終了後の溶液の量は 800 ml を目安とした。

③以上の H_2O_2 処理後、室温まで自熱冷却させ、ろ紙を用いて自然ろ過し、蒸留水による水洗・ろ過を 5 回行う。

④空気乾燥後、ろ紙から土を取る。ろ紙に付着した土は、コロイド分の損失を防ぐため蒸留水でバットに流し、水分を蒸発させる。

⑤乳ばちで固結した部分を軽くときほぐし、420 μ m を通過するようにする。

Photo 1 に黒ぼくと処理土を示す。 H_2O_2 処理により、

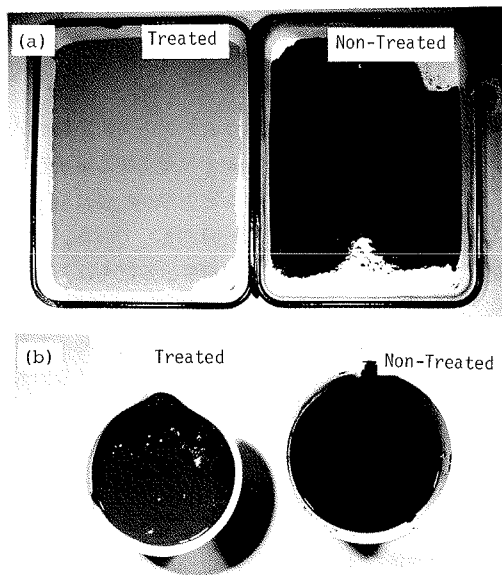


Photo 1 Comparison of the color between Treated Sample and Non-Treated Sample : (a) Powdered ; (b) Remoulded with water.

黒ぼくの黒色が消え、黄土色を呈することがわかる。この色は、鉄の酸化物に由来する¹¹⁾

2. 3 H_2O_2 処理方法の検討

上述の H_2O_2 処理方法が適当かどうか、すなわち、腐植除去の効果の有無、 H_2O_2 の量、煮沸・ろ過をすることの影響について検討した。

(1) 腐植除去の効果

Photo 1 に示したように、 H_2O_2 処理により黒色味は消えたので、少くとも腐植は分解・溶出したと考えられる。実際、黒ぼくと処理土に対して同条件で重クロム酸法により有機物含有量を測定した結果、Table 1 に示すように黒ぼくで 15.5%、処理土で 1.25% となり、大部分の有機物が除去されたといえる。

Table 1 Physical properties of samples.

	Non-Treated	Treated
Organic Matter Content (%)	15.5	1.25
Specific Gravity G _s	2.53	2.72
Specific Gravity of Organic Matter	1.79	—
Liquid Limit L.L. (%)	65.2	48.5
Plastic Limit P.L. (%)	49.1	32.7
Plasticity Index P.I.	16.1	15.8

(2) 6% H_2O_2 の量の検討

6% H_2O_2 の総量および分割数と各分割毎の H_2O_2 の量は、経験的に判断した。

(3) ろ過の影響

a. 分解した腐植以外の物質がろ過によって流出する可能性が考えられる。そのため、ろ過による重量減が、除去された腐植の重量と腐植以外の物質の流出分の和であると考え、黒ぼくの乾燥重量（処理前の含水比と全重量より計算）とろ過後の試料の炉乾燥重量との差（ろ過による重量減）を黒ぼくの腐植含有量と比較した。ろ過による重量減の平均は 16.1% となり、腐植含有量 15.5% より、約 0.6% 多い。すなわち、重量比で約 0.6% の腐植以外の物質がろ過により流出したと推定される。流出した物質は、処理前から黒ぼくに含まれている微細粒分（コロイド分）や H_2O_2 により酸化した金属イオンが流出したためであろう。しかし、これらの量は微量であるため、本研究においてはこの影響を無視した。

b. H_2O_2 処理後のろ過の必要性について検討した。 H_2O_2 処理（手順①②）を施した後、溶液をろ過させずに炉乾燥させたときの重量減を黒ぼくの腐植含有量と比較した。その結果、ろ過しない場合の重量減の平均は 7.0% となり、腐植含有量（15.5%）よりかなり少ない。このことは、 H_2O_2 処理を施してもろ過しなければ、腐植の分解物のうち約 8% が溶液中に残存することを意味する。腐植の分解物による影響を入れないため、やはりろ過すべきであると思われる。

(3) 加熱の影響

加熱・攪はんという物理的作用による影響を調べた。

H₂O₂溶液のかわりに、蒸留水だけを用いて手順①②の加熱・攪はんを行い、ろ過したところ0.37%の重量減となった。これは、腐植の親水性と加熱・攪はんの物理的作用とにより、遊離した形態で存在していた腐植物質の流出の可能性および、処理前から存在するコロイド分の流出のためと考えられる。

(4) その他の問題点

黒ぼくに含まれた無機物のうち、Al₂O₃やFe₂O₃などの金属酸化物が、酸により多少溶出する可能性がある。一方、単体の無機物イオンは、H₂O₂の添加により、H⁺と置換して溶出する可能性もあるが、ろ過による腐植以外の重量減が1%未満という前述(2)の結果を考慮すると、これは無視できると考えられる。

3. 試料の物理的性質

黒ぼくおよび処理土の各々について、比重、液性・塑性限界、粒度分析を行った。それらの物理的性質における腐植含有の影響について考察する。

3.1 比重

(1) 方法

JISA-1202-1970 に準じて比重試験を行った。測定数は黒ぼく10、処理土7であり、それぞれ、平均値との差が0.03よりも大きい測定値は除外し、再び平均値をとって比重とした。

(2) 結果と考察

Table 1 に結果を示す。有機質土の比重は、有機物含有量が多くなると小さくなると言われている^{9),10),11)}が、実際黒ぼくの比重は処理土のそれに比べて小さいことがわかる。これは、有機物（腐植）自体の比重が無機物のそれに比べて小さいためである。Table 1 の結果から、腐植自身の比重を推定してみる。黒ぼくと処理土の有機物含有率（重量%）の差をΔC₀とすると(1)式が成立する。

$$\frac{\Delta C_0}{100} = \frac{G_T - G_N}{G_S - G_p} \cdot \frac{G_o \cdot G_s}{G_T \cdot G_N} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、G_N：黒ぼくの比重；G_T：処理土の比重；G_S：無機物の比重；G_O：有機物の比重。

ここで、G_T≒G_S、すなわち、処理土には有機物を含まないと仮定すれば、G_Oは次式で与えられる。

$$G_o = \frac{\Delta G_o \cdot G_T \cdot G_N}{100 G_T + (\Delta C_o - 100) \cdot G_N} \dots\dots\dots(2)$$

G_T, G_N, ΔC₀に Table 1 の結果を代入して、G_O=1.79 を

得る。この値は、竹中ら⁹⁾によってまとめられたG_Oの範囲1.3~1.8に入っていて、妥当なものといえる。

さて、竹中ら⁹⁾による本邦の火山灰土および非火山灰土の黒ぼくの腐植含有率と比重の関係に、Table 1 の結果をプロットすると Fig. 1 のようになる。また、前田ら¹⁰⁾による研究結果に、Table 1 の結果をプロットすると Fig. 2(a), (b), (c)が得られる。結局、本研究で用いた試料の比

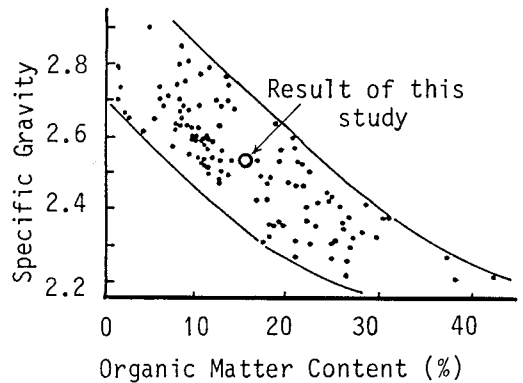
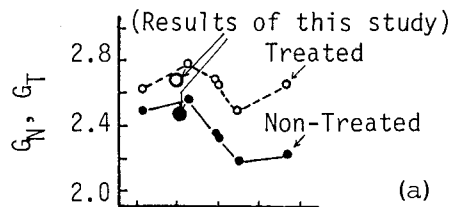
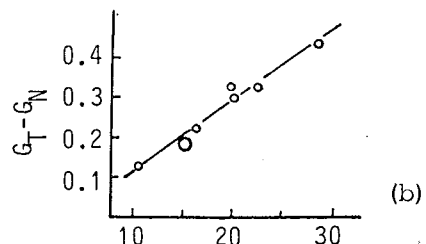


Fig. 1 Relationship between specific gravity and organic matter content for various organic soils.



(a) Specific gravity (G_N, G_T) vs. organic matter content (C_o)



(b) Differences in specific gravity between treated sample and non-treated sample

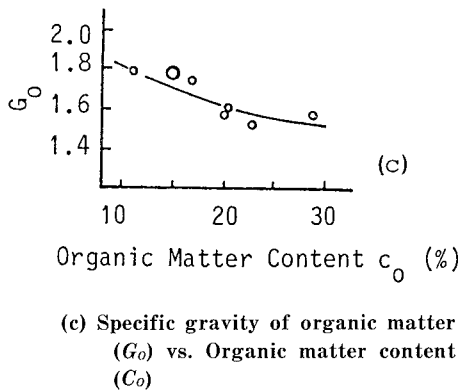


Fig. 2 Comparison of specific gravity between samples treated with H_2O_2 and non-treated samples ;

重は、本邦黒ぼくの平均的な値であるといえる。

3. 2 粒度特性

(1) 粒度試験の目的

通常、黒ぼくのような有機質土の粒度は、含まれた有機物を分解処理 (H_2O_2 処理) した後に測定される。したがって、得られる結果は、黒ぼくの無機物質 (ケイ酸塩鉱物) の粒度である。一般に、土の粒度特性はその力学的性質と関係が深いので、黒ぼくの力学的性質を考察するためには、有機・無機複合体としての粒度、すなわち団粒の大きさを知ることが重要である。ここでは、無機物質の粒度は処理土の粒度分析から、有機・無機複合体として黒ぼくの粒度は、有機物の分解処理を行わないで黒ぼくの粒度を測定することによりそれぞれ調べた。

(2) 黒ぼくの沈降特性

一般に、土粒子の溶液中での凝集には2つのパターンが考えられる。すなわち、有機物などに起因する安定な団粒構造の形態をとる凝集と、溶液中の電解質によって生じる綿毛化現象である。¹³⁾ 後者の最終沈降体積は大きくなるので、綿毛化現象を防ぐための分散剤の適否は、沈降体積を比較すればよい。

黒ぼくに適した分散剤の種類と濃度を決定するために、分散剤として NaOH および HCl を選び、それぞれの濃度およびスラリー濃度を変化させて沈降実験を行った (Photo2)。スラリー濃度は、1 g/6 ml から 1 g/24 ml の範囲で4通りに変えたが、スラリー濃度による影響は明瞭でなかったため、それらの平均値で議論する。

Fig. 3 に沈降体積 (同一規格の試験管を使用している

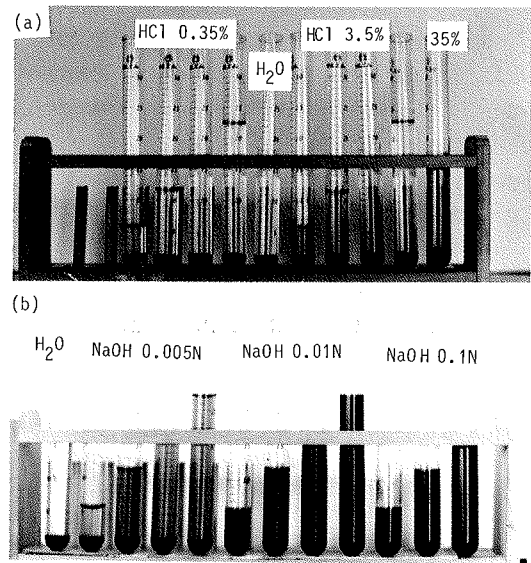


Photo 2 Sedimentation test of Non-Treated sample ;

(a) in HCl solutions
(b) in NaOH solutions

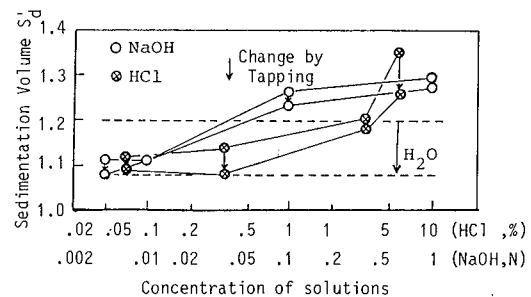


Fig. 3 Relationships between sedimentation height (S'_d) and concentration of solutions

ので試験管底から沈積面までの高さで表わしている) S'_d と分散剤濃度の関係を示した。図中、タッピングによる変化とは、試験管壁を軽くたたいたときの沈降体積の変化である。NaOH, HCl とともに、濃度が増せば沈降体積が大きくなり、綿毛化現象が顕著になる。また、両分散剤ともに、使用した範囲で濃度がうすいほど分散性が良いという結果になっている。参考までに、分散剤を入れない場合 (H_2O) の沈降体積も示したが、タッピング後の沈降体積は HCl や NaOH と変わらないが、タッピングによ

る変化が非常に大きいことがわかる。つまり、分散剤を用いなければ、HClやNaOHの高濃度時ほどではないにしても、かなり綿毛凝集がおこっている。しかしその凝集は簡単に崩れる弱いものであるといえる。

以上の結果より、H₂O₂前処理を施さない黒ぼくの分散性は、NaOHやHClいづれも濃度が小さいほどよいと言えよう。

(3) 処理土の粒度

火山灰性有機質土の分散剤は、粘土鉱物とくにアロアエンの含有量と風化の程度に依存して変えるべきであるといわれている⁹⁾。そこで処理土に対する分散効果は実際に粒度分析を行って調べた。Fig. 4は、分散剤としてNaOH(0.005 N)とHCl(0.35%)を用いたときの処理土の粒度分布である。この図から、処理土に対しては、NaOHが分散剤として適していると判断した。

(4) 粒度特性に及ぼす腐植の効果

上記(2)、(3)の検討結果に基づいて、処理土と黒ぼくに

ついて、NaOH(0.005 N)を分散剤として用いた場合の粒度分布を比較した(Fig. 5)。黒ぼくの曲線は右側にあつて、腐植を含有することによる団粒の形成が明らかである。両試料の粒度から、三角座標による分類を行うと、処理土はローム～粘土ロームであるのに対し、黒ぼくは砂質ロームと判定された。

尚、序論でも触れたように、黒ぼくは、NaOHによりその有機成分のうちフルボ酸と腐植酸が溶出するが、粒度分析で使用したNaOHの濃度は小さいので、その影響を無視している。これは、Photo 2において、濃度が小さい場合、溶液の色が透明に近いことから頷ける。

3. 3 液性限界・塑性限界

(1) 方法

黒ぼくおよび処理土について、JISA 1205～6 1970 に準じて液性・塑性限界を求めた。

(2) 結果と考察

結果をTable 1に示した。L.LもP.Lも黒ぼくの方が大きい。P.Iは黒ぼくの方が大きい、あまり差は無い。

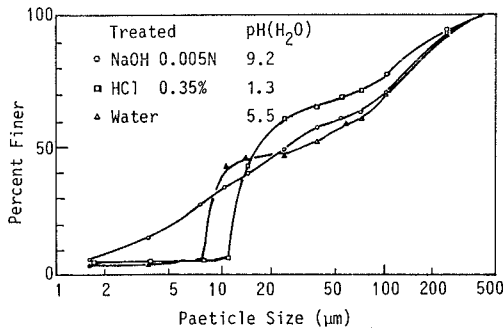


Fig. 4 Grain size distribution of Treated Sample

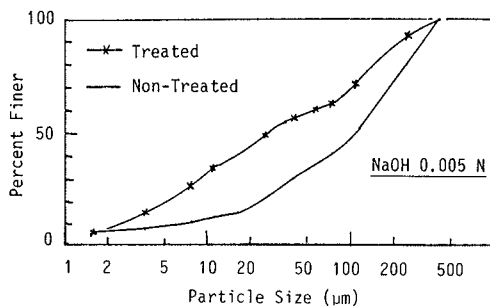


Fig. 5 Comparison of grain size distribution between Treated Sample and Non-Treated Sample

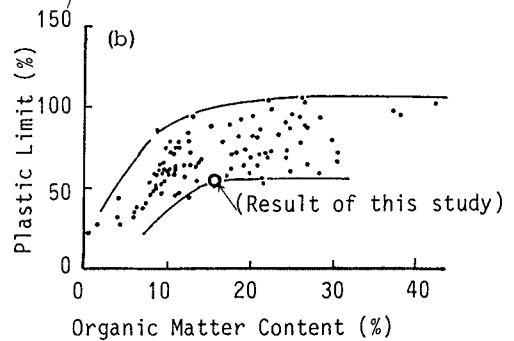
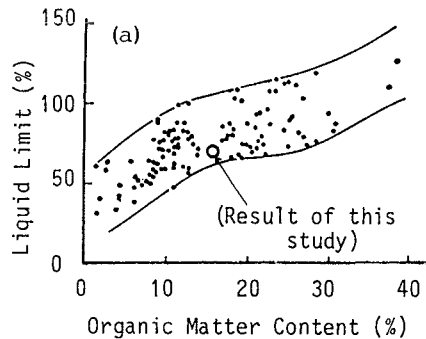


Fig. 6 (a) Liquid Limit (L.L.) vs. organic matter content
(b) Plastic Limit (P.L.) vs. organic matter content

この結果を、竹中ら⁹⁾によって報告された L.L, P.L と有機物含有量との関係にプロットすると Fig. 6 (a), (b) のようになる。同図より本研究で用いた試料の L.L, P.L 値は、我国の黒ぼくの平均的なものといえる。L.L, P.L とともに、黒ぼくの方が大きいことは、腐植による団粒構造が発達しているため、団粒内の微細間隙（ミクロポア）内に保持される水分が多いからと解釈できよう。換言すれば、液性限界や塑性限界を求める際のねり返しによっては、そのような団粒が壊れないことを意味していると思われる。

4. 力学試験の方法

2. で述べた方法により準備した黒ぼくおよび処理土に対して、一次元圧密試験、三軸圧縮試験を行った。

4. 1 一次元圧密試験

Table 2 に一次元圧密試験の条件と初期含水比を一括して示した。

Table 2 List of oedometer tests.

Test Type	Initial Height (cm)	Initial Water Content (%)	
		Non-Treated	Treated
(1)	2	89.0 (2.48*)	71.2(2.44)
		79.3 (1.88)	63.3(1.94)
		69.0 (1.24)	54.0(1.47)
(1)	6	78.2 (1.81)	—
	9	78.2 (1.81)	—
(2)	2	98.7 (3.08)	79.9(2.99)
	2	69.1 (1.24)	—

(1) One-Day Loading Tests: $\Delta p/p=1$; $\Delta t=1440$ min.

(2) Long-Term Loading Tests: $\Delta p/p=1$; $\Delta t \geq 20000$ min.

* Liquidity Index

(1) 初期含水比

圧密、圧縮特性は、試料の初期含水比により変化すると考えられるので、Table 2 に示すように、3通りの初期含水比 w_0 を選んだ。黒ぼくは、含水比が約 70% 以下では練り返しが十分出来ず、一方、処理土は、含水比が 80% 以上では液体状になり圧密できない。このような理由から、黒ぼくと処理土で w_0 は同じになっていないが、3通りの w_0 に対応する液性指数が等しくなるように、処理土の含水比を決定した。ただ、黒ぼくの最小の液性指数 (1.24) に対応する含水比では、練り返しが出来なかったため、約 1.5 とせざるを得なかった。

(2) 試験方法

圧密容器は、内径 6.0 cm の円筒形であり、試料高さが変えられるようになっている。載荷は、荷重増加率 $\Delta p/p=1$ で標準圧密試験の方法に準じた。各荷重段階における載荷時間は、1440 分のもの（1日載荷試験）と 20000 分以上のもの（長期圧密試験）の 2通りである。1日載荷試験では、初期試料高さ H_0 を Table 2 に示す 3通りで行った。

4. 2 三軸圧縮試験

(1) 供試体の作製

圧密試験同様、黒ぼくと処理土で液性指数がほぼ等しくなるように含水比を調整して練り返し、一次元圧密容器で予備圧密 ($p=39.2$ kPa) した後、三軸試験用供試体（直径約 3.6 cm, 高さ約 8 cm）に成形した。練り返し時の含水比は黒ぼくで 80% ($L=1.9$), 処理土で 63% ($L=1.9$), 三軸試験開始時の含水比 w_0 は、後述の試験法とともに一括して Table 3 に示す。

Table 3 List of triaxial tests.

Test Type	σ'_c (kpa)	Water Content after Consolidation (%)	
		Non-Treated	Treated
CD	p -const.	66.3, 67.4	48.5
	σ'_r -const.	64.6	46.6
	$q=0$	66.5	51.0
C \bar{U}	σ'_r -const.	100	67.7
		200	66.2, 66.0
		300	64.3

(2) 排水三軸圧縮試験 (CD)

Fig. 7 に有効応力径路を示す。すなわち、平均有効応

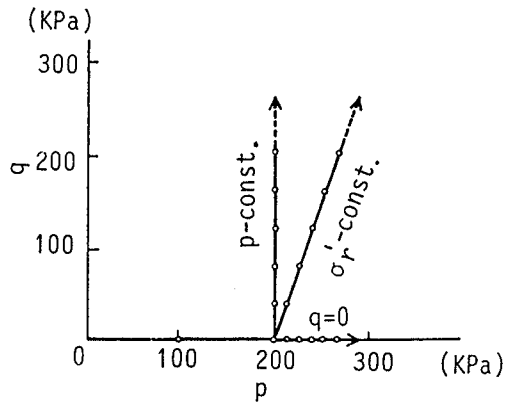


Fig. 7 Stress paths for CD tests.

力 $p = \sigma_c$ まで等方圧密した後、平均有効応力一定で破壊するまで $q (= \sigma_a - \sigma_r)$ を増加させるもの (p 一定)；側圧 σ_r 一定で破壊するまで p, q ともに増加させるもの (σ_r 一定)；および等方的に p だけ増加させるもの ($q = 0$) の3通りである。Fig. 7 に○で示した点が各荷重段階を表わす。 p 一定試験と σ_r 一定試験は、 q の増分が等しくなるように、また、 σ_r 一定試験と $q = 0$ 試験は p の増分が等しくなるように各荷重段階を定めた。各荷重段階における載荷時間は、1440分とした。

(3) 非排水三軸圧縮試験 (CŪ)

所定の圧密圧力 $p = \sigma_c$ まで等方圧密、その後ひずみ制御による側圧一定の非排水三軸圧縮試験を行った。軸ひずみ速度は、供試体高さ 8cm の場合に $2.6 \times 10^{-3}\%$ /分である。圧密圧力 σ_c において、バックプレッシャー $\sigma_b = 100$ kPa を作用させた。

5. 一次元圧密試験の結果と考察

5.1 圧縮特性

Fig. 8 に1日載荷試験の初期試料高 $H_0 = 2$ cm の場合

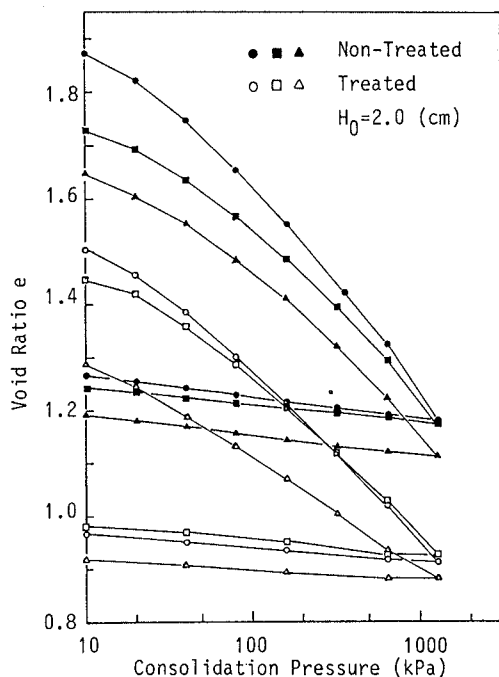


Fig. 8 e - $\log p$ curves of one-day loading oedometer tests.

の $e - \log p$ (e : 間隙比； p : 圧密圧力) 関係を示す。処理土の初期含水比が黒ぼくに比べて小さいので処理土の方が全体として e が小さい。黒ぼく、処理土とも、どの w_0 に対しても処女圧縮曲線は直線的でなく、 p の増加に対してその勾配は大きくなっているようだ。この曲線性、すなわち圧縮指数の圧密圧力依存性を調べるため、各荷重段階における圧縮指数 C_c' を次式により評価した。

$$C_c' = (e_{i+1} - e_i) / \log (p_{i+1} / p_i) \dots\dots\dots(3)$$

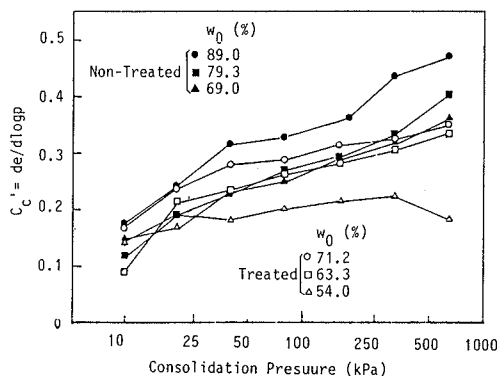


Fig. 9 Compression index vs. consolidation stress.

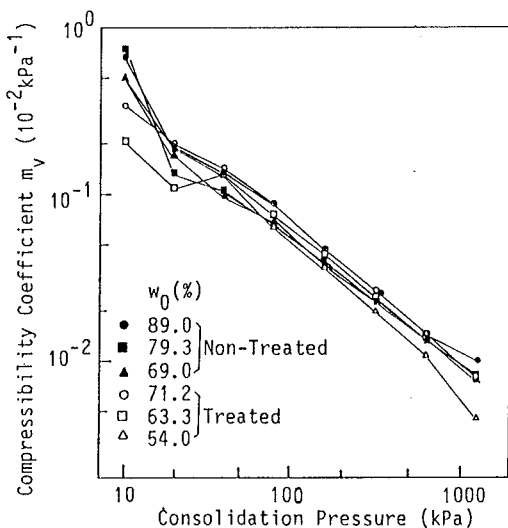


Fig. 10 Compressibility Coefficient vs. Consolidation pressure.

ここに、 e_i , p_i は、第*i*番目の载荷段階に対応する間隙比と圧密圧力である。

Fig. 9に C_c' と p の関係を示す。 p が小さい間は、 C_c' は w_0 に拘らずほぼ一定の値(たとえば、 $p=25$ kPa 付近で $C_c'=0.15\sim 0.25$)をとるが、 p が大きくなると、黒ぼく、処理土ともに w_0 が大きいほど C_c' が大きくなっている。また、以上の傾向は、腐植の有無に拘らず見られている。

初期含水比 w_0 の影響を考慮できる体積圧縮指数 m_v ($= -de / \{(1+e) dp\}$) で圧縮性を評価すると Fig. 10 が得られる。同図において、 $p \leq 20$ kPaの部分を除いて、 m_v は黒ぼく、処理土の別や、 w_0 の大小に拘らず p とほぼ一義的な関係にあることがわかる。換言すれば、 m_v で圧縮性を評価すれば腐植含有の効果は、圧縮性に現れてこない、ということが明らかである。

5. 2 圧密特性

(1) 黒ぼくに対する圧密理論の適甲性

Fig. 11 (a), (b)に、 $H_0 = 2$ cmの場合の黒ぼくと処理土

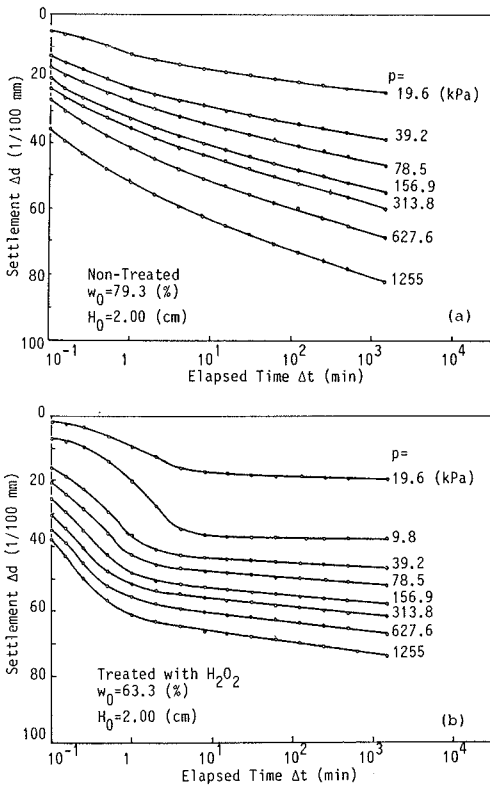


Fig. 11 Consolidation curves ; (a) for Non-Treated sample ; (b) for Treated Sample

の沈下量～時間曲線の一例を示す。処理土には、所謂一次圧密と二次圧密の境界が見られるのに対し、黒ぼくではそれが見られない。黒ぼくの沈下曲線は、時間の対数に対して、下に凸あるいは直線形状を示している。

他の初期含水比の場合にも、全く同じ傾向が見られている。これらの結果に、 \sqrt{t} 法、曲線定規法および $\log\sim\log$ 法を適用して、Terzaghi理論による圧密諸係数を求めようと試みたが、黒ぼくの場合は求められなかった。

Fig. 12は、黒ぼくの $H_0 = 9$ cmの場合の沈下量～時間曲線である。 $H_0 = 2$ cmの場合 (Fig. 11 (a))に見られなかった上に凸の部分が見れ、所謂一次圧密と二次圧密の境界が存在するようだ。実際、図中で破線で示すような、Terzaghiの圧密理論とのフィッティングが可能である。図は省略するが、 $H_0 = 6$ cmの場合にも同様のフィッティングが可能であった。したがって、 $H_0 = 6$ cmおよび 9 cmの場合には、曲線定規法による圧密係数等の値を算定できる。

Fig. 13は、 $H_0 = 6$ cm, 9 cmの場合に対して、曲線定規法により決定した t_{100} (実際は、圧密度 99.95%で代用)と圧密圧力の関係を示したものである。Terzaghiの圧密理論によれば、ある圧密度に対して、圧密時間は排水距離の2乗に比例する。今、圧密度 100%のときに、 $H_0 = 6$ cmの場合の圧密時間を $t_{100, H_0=6}$ と書くと、

$$t_{100, H_0=6} = (H_{H_0=6} / H_{H_0=9})^2 \cdot t_{100, H_0=9} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $H_{H_0=6}$ は、 $H_0 = 6$ cmの供試体の現在の供試体高さである。Fig. 13に、各荷重段階で、(5)式の関係

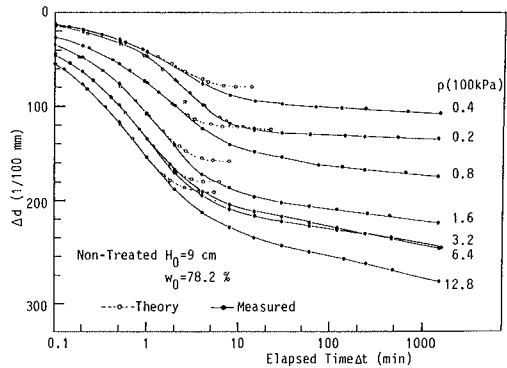


Fig. 12 Consolidation Curves from a consolidation test using a thick specimen (Non-Treated sample)

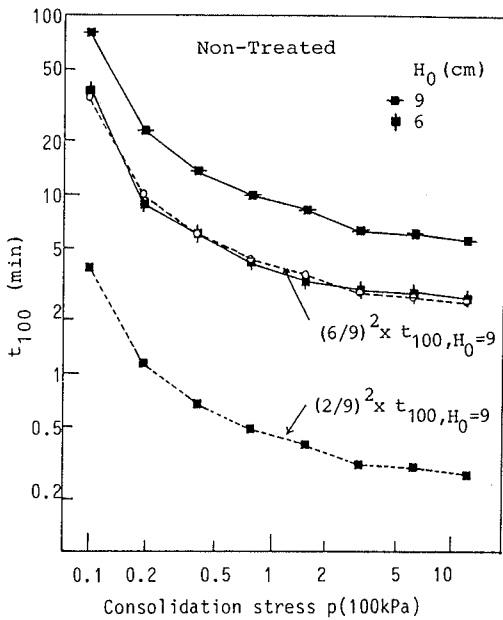


Fig. 13 Consolidation time ; measured and estimated by the theory.

$$H_{H_0=6}/H_{H_0=9} = 6/9 \dots\dots\dots(5)$$

を仮定して(4)式により求めた $t_{100, H_0=6}$ をプロットした (図中、破線で示す)。図から明らかのように、曲線定規法により求めた t_{100} と、(4)および(5)式の関係から求めた t_{100} は、よく一致している。この考え方を $H_0 = 2$ cmの場合にも適用して、 $t_{100, H_0=2}$ を(6)式から求め、Fig. 13 にプロットした。

$$t_{100, H_0=2} = (2/9)^2 \cdot t_{100, H_0=9} \dots\dots\dots(6)$$

Fig. 13 に示した $t_{100, H_0=2}$ の値を用いて、 $H_0 = 2$ cmの場合の圧密曲線 (Fig. 11 (a)に示したもの) に曲線定規をあてはめると Fig. 14 が得られた。ここで、各荷重段階で、 $d_v = 0$ としている。曲線定規と実験値はなめらかに結ばれていることがわかる。この図から、 $H_0 = 2$ cmの場合には、Terzaghi 理論に従う一次圧密部分のデータが、通常の圧密試験の測定時間 ($t \geq 6$ sec) には読みとれていないことがわかる。その傾向は、とくに圧密圧力が大きくなると顕著である。

結局、Fig. 11 (a)に示した黒ぼくの圧密曲線の特異性は、所謂一次圧密が早期に終了してしまっている事実を物語っていたのであり、それは、試料高 H_0 を大きくすること

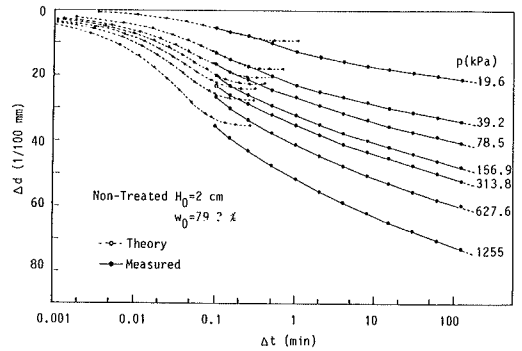


Fig. 14 Consolidation curves by a oedometer test ; comparison between theoretical and measured curves.

により解消し、Terzaghi の圧密理論の適用が可能になる、といえる。

(2) 圧密係数・一次圧密比

Fig. 15 に圧密係数と圧密圧力の関係を示した。黒ぼくの $H_0 = 9$ cm, 6 cmの場合には、実際のデータを用いて曲線定規法により決定し、 $H_0 = 2$ cmの場合には、上述の方法にしたがって求めた。一方、処理土の場合には、Fig. 11 (b)に示したように、 $H_0 = 2$ cmの場合でも、曲線定規法が適用できた。

Fig. 15 から、圧密係数 c_v は、黒ぼくも処理土も ρ が増加すると増加し、その傾向は、黒ぼくに限って言えば、

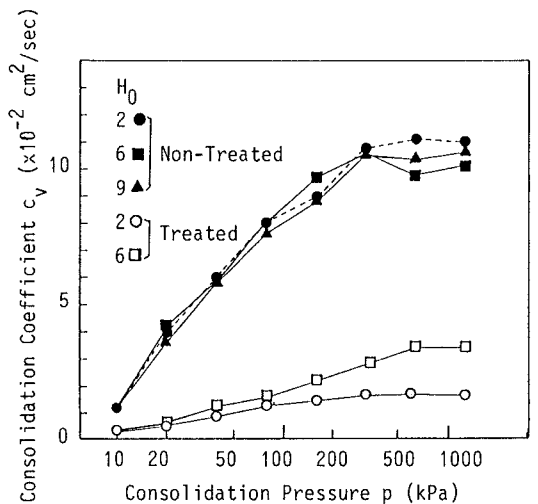


Fig. 15 Consolidation coefficient vs. consolidation pressure

試料高 H_0 に関係しないことがわかる。さらに、いづれの荷重段階においても、黒ぼくの c_{α} は処理土に比べ約7倍も大きくなっている。また、絶対値も非常に大きく、一次圧密が載荷後6秒以前に終了してしまったという事実が頷ける。

序論でも触れたように、山内ら¹⁴⁾や松尾・嘉門¹⁵⁾は、有機物含有量の増加に対し、圧密係数 c_{α} は低下するという結果を示しており、Fig. 15の結果と異なっている。両研究で用いられた有機質土は、その無機成分が結晶性の粘土鉱物を主体とするものであり、本研究のような火山灰性土と異っている点に注意する必要がある。

さて、一次圧密比を計算すると、 $H_0 = 2$ cmの場合に黒ぼくで $42 \pm 2\%$ 、処理土で $85 \pm 4\%$ であり、黒ぼくにおいて二次圧密が卓越することがわかる。また、試料高の影響は、 $H_0 = 6$ cmで $67 \pm 4\%$ 、 $H_0 = 9$ cmで $71 \pm 6\%$ となり、試料高が大きいほど一次圧密比が増加している。

5. 3 二次圧密特性

(1) 二次圧密速度

Fig. 16は、1日載荷試験における、 $\Delta t \geq 260$ 分での二次圧密速度 $c_{\alpha} (=d\epsilon/d\log \Delta t)$ と p の関係を黒ぼくと処理土と比較したものである。図から明らかなように、黒ぼくも処理土も p の増加に対して c_{α} が増加していて、その増加の割合は黒ぼくにおいて大きい。また、初期試料高 $H_0 = 2$ cmの場合に限れば、初期含水比 w_0 が大きいほど

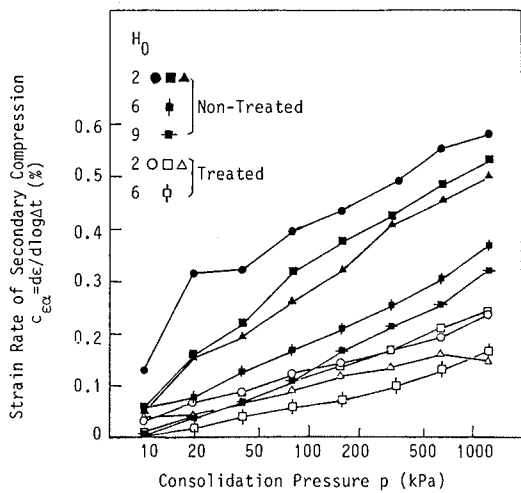


Fig. 16 Relationship between strain rate of secondary compression and consolidation pressure (Oedometer tests)

c_{α} が大きい。さらに興味深いのは、とくに黒ぼくにおいて著しいが、 H_0 が大きいほど c_{α} が小さくなっている。

(2) 長期圧密特性

Fig. 17に黒ぼく、Fig. 18に処理土の長期圧密試験結果を示す。既に、黒ぼくと処理土の圧密曲線の比較を行って、黒ぼくの圧密曲線が特異な形状を示したのは、圧密係数が大きく瞬時に一次圧密が完了するためと指摘したが、各荷重段階で長期間の圧密を行っても、その特性は変わらないといえる。ただ、長期圧密試験の場合には、処理土については、 $10 < \Delta t < 10^4$ (分) の間においてかなり良好な直線性が見られるのに対し、黒ぼくは、 $\Delta t > 10^3$ (分) においてむしろ下に凹な形状を示している。一般

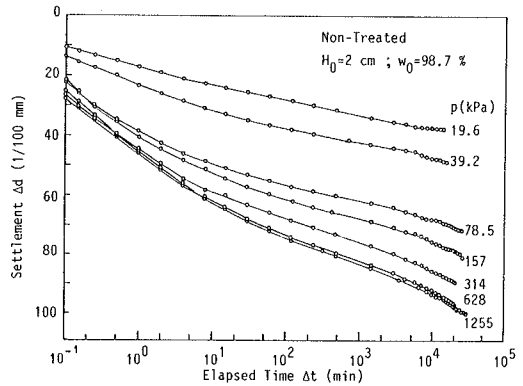


Fig. 17 Consolidation curves for Non-Treated sample by a long-term loading oedometer test

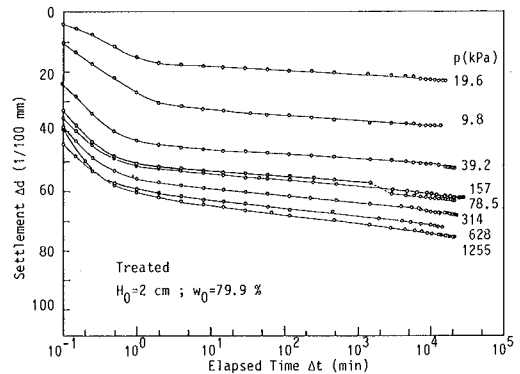


Fig. 18 Consolidation curves for Treated sample by a long-term loading oedometer test

の無機質沖積粘土の長期圧密曲線が、Fig. 18の処理土の形状と同じであるので、腐植の含有により、長期クリープが $\log \Delta t$ に対して直線にならない性質をもつと言える。

5. 4 圧密特性における腐植含有の効果

一次元圧密試験の結果について述べてきたが、黒ぼくの圧密特性として、(i)圧密係数が大きいこと；(ii)二次圧密速度が大きく、かつ試料厚が大きくなると小さくなる傾向があること；(iii)長期圧密試験において、長時間経過後 ($\Delta t \geq 10^3$ 分) 沈下は時間の対数に比例しなくなることを挙げることができる。

圧密係数が大きいという事実は、砂と粘土の圧密係数の相違からの類推として、黒ぼくは、圧密の早い時期に、砂のような粒径の大きい材料として挙動する、と考えられる。さらに、二次圧密速度が大きいことや、一次圧密比が小さいこと、および m_v が黒ぼくでも処理土でも違いがない点を考慮すると、決して砂のように単一の固体が変形単位として挙動するわけではなく、大粒径の変形単位自体が時間依存性を示しつつ変形すると考えられる。この変形単位とは、土壤化学的に明らかにされているような、腐植を接着剤とする団粒に他ならないと思われる。

二次圧密速度が、層厚に依存する現象も上記の団粒の概念を用いて推察できる。二次圧密現象は、一般にレオロジー的な変形であるとされているが、排水を伴う現象である以上、局所的な水圧の勾配が供試体内に存在する筈であり、黒ぼくのような団粒構造のものは局所的水圧勾配が団粒内部と外部にかけて生じていると考えられる。団粒自体のクリープの変形に伴う排水は、層厚が大きいほど時間がかかるものと予想される。処理土については、団粒構造が黒ぼくほど発達していないことと、仮に団粒が存在しても、それを構成する接合剤の力が弱いために、黒ぼくほど二次圧密現象が顕著でないと思われる。

長期圧密特性は、後述の三軸排水試験によるクリープ現象と関連させて考察する。

6. 三軸圧縮試験の結果と考察

6. 1 CŪ試験の結果と考察

(1) ダイレタンシー特性

Fig. 19, 20に、非排水三軸圧縮試験 (CŪ) の結果を示す。Fig. 19の有効応力径路において、せん断の初期には、黒ぼくも処理土も負のダイレタンシー傾向を示しているが、破壊に近づくにつれて黒ぼくで顕著であるが正のダイレタンシーに転じている。ダイレタンシーが正に

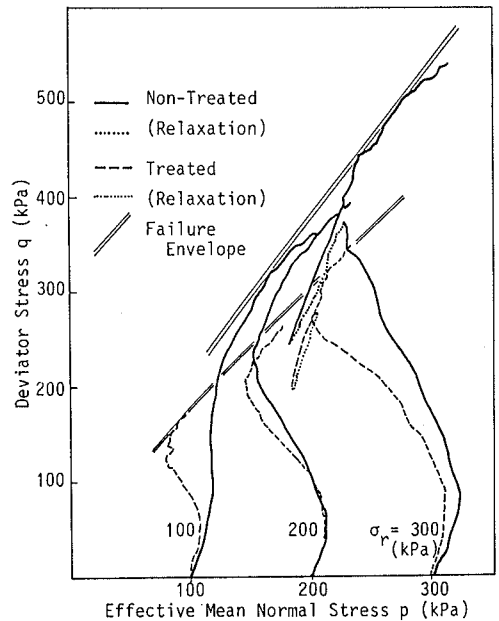


Fig. 19 Effective stress paths from CŪ tests

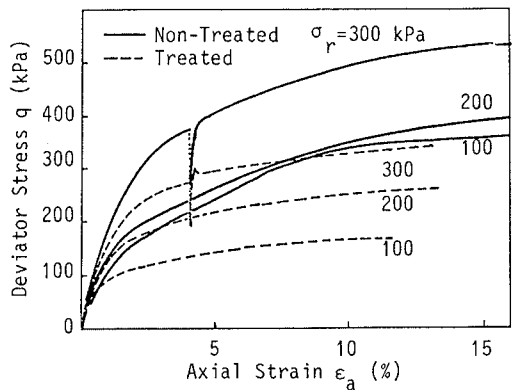


Fig. 20 Stress-strain curves from CŪ tests

転じるときの応力比は、黒ぼくも処理土もほぼ等しいが、破壊するときの応力比は、黒ぼくが大きい。

Fig. 20の応力-ひずみ曲線を見ると、黒ぼくは、強度は大きいが変形も大きい。これは Fig. 19の有効応力径路の特性と関係していて、変形の進展につれてダイレイトする性質が顕著になり、結果として破壊時の応力が高くなるものである。

一般にせん断中の間隙水圧の変化が、平均全応力 (σ_m) の変化によるもの (Δu_c) と、ダイレタンシーによるもの

(Δu_D) と考えると、前者は式(7)で表わされる。

$$\Delta u_c = B \cdot \Delta \sigma_m \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 B は間隙圧係数であり、飽和土の場合 $B \approx 1$ と考えられる。¹⁷⁾したがって、全間隙水圧変化を Δu と書くと Δu_D は、(8)式で表わされる：

$$\Delta u_D = \Delta u - \Delta u_c = \Delta u - \Delta \sigma_m \dots\dots\dots(8)$$

この Δu_D を用いて、変形とダイラタンシーの関係を表わしたのが、Fig. 21 である。

Fig. 21 から明らかなように、黒ぼくは、軸ひずみ 4% 付近で最大の負のダイラタンシーを発生したのち、以降破壊するほど、正のダイラタンシー傾向を示している。勾配 $R = |\Delta u_D| / \Delta \epsilon_a$ は、ダイラタンシーの程度を表わす指標と考えられる。図より明らかなように、 R は、黒ぼくの方が処理土より大きい。

(2) 強度特性

Fig. 19 において既に明らかにしたが、黒ぼくの強度は、処理土より大きい。因に、有効応力に関する強度定数 c' 、 ϕ' を算定してみると、黒ぼくで $\phi' = 41.0^\circ$ 、 $c' = 15.5$ kPa、一方、処理土で $\phi' = 31.8^\circ$ 、 $c' = 21.8$ kPa となった。腐植の含有により、摩擦的性質が増していると言える。

(3) 非排水応力緩和特性

$\sigma'_c = 300$ kPa の場合について、軸ひずみ $\epsilon_a = 4.077\%$ に達したとき、応力緩和を行った。緩和時間は、2880 分である。

Fig. 22 (a), (b) に結果を示す。(a)は、せん断応力の緩和と時間関係を、(b)は、その間の間隙水圧の変化を表わし

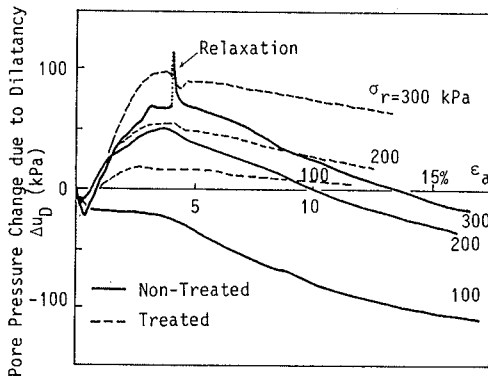


Fig. 21 Pore pressure change due to dilatancy vs. axial strain obtained from CŪ tests

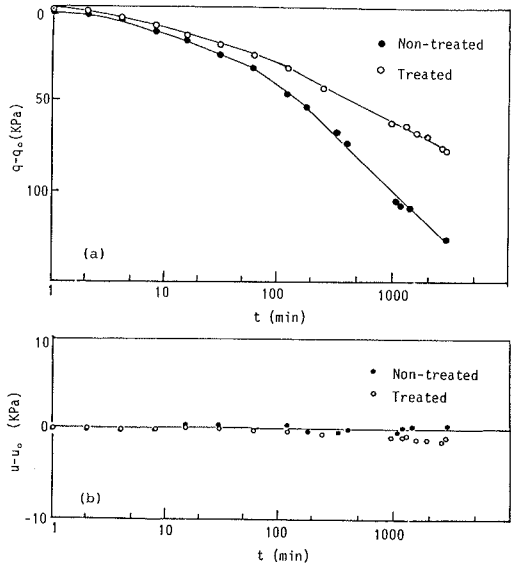


Fig. 22 Results of stress relaxation test performed during CŪ tests
(a) Decrease in shear stress vs. time
(b) Change of porepressure vs. time

ている。(a)図より、応力緩和量、速度ともに黒ぼくの方が大きいことがわかる。また、間隙水圧は、黒ぼくも処理土も変化が見られない。この応力緩和時の間隙水圧一定の現象は、通常、沖積の正規圧密粘土にいわれている現象であり、黒ぼくについても成り立つことは興味深い。

(4) せん断変形における腐植の役割

前節の CŪ 試験の結果のなかで、とくに黒ぼくにおいて特徴的であるのは、顕著なダイラタンシーと大きい強度を示すことである。

砂と粘土のせん断特性を比較すると、砂は、摩擦的性質に富み、高い内部摩擦角をもっている。密な砂はもとより、緩い砂でも破壊に近づくとき正のダイラタンシーを発生する。つまり、黒ぼくの特徴的な点が砂によく対応していることがわかる。黒ぼくの砂的な性質は、5. においても述べたように、腐植による団粒構造の発達に由来していると考えられる。この団粒は、本研究で用いた拘束圧の範囲ではせん断変形に伴うインターロッキングによって崩れることなく、かなり安定な構造をもっているといえよう。

6. 2 CD試験の結果と考察

(1) 応力-ひずみ特性

Fig. 23 (a), (b)は、黒ぼくの p -const. 試験における、せん断ひずみ ϵ ($= 2(\epsilon_a - \epsilon_r)/3$) および体積ひずみの時間的変化の一例を示したものである。この例の場合、破壊は $\eta (= q/p) = 1.65$ において生じている。各応力段階における最終、即ち、 $\Delta t = 1440$ (分) におけるひずみをもとにして、応力とひずみの関係について概観する。

Fig. 24 は、 p 一定および σ_r 一定の応力径路に対する応

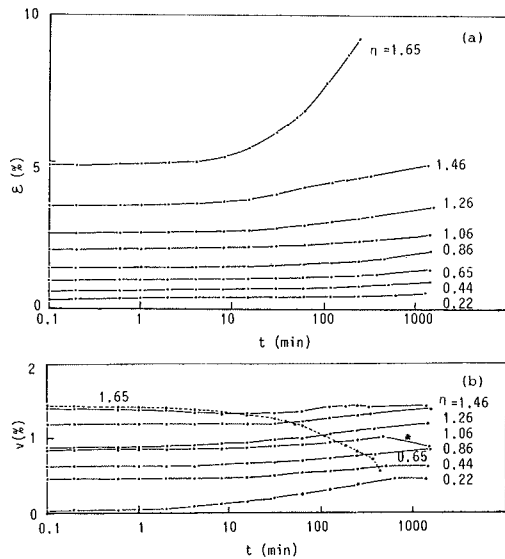


Fig. 23 Strain-time relations for a p -constant CD test ; (a) shear strain ; (b) volumetric strain.

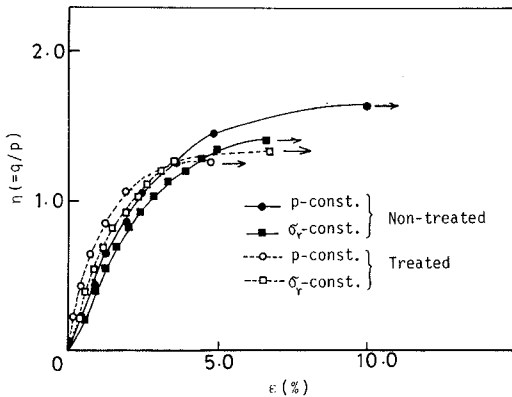


Fig. 24 Stress ratio (q/p) vs. shear strain for CD tests

力比とせん断ひずみの関係を示したものである。各応力比に対して、せん断ひずみは黒ぼくの方が処理土より大きく発生している。にもかかわらず、黒ぼくの方が高い応力比で破壊している。この特性は、CŪ試験の結果においても指摘した点である。

Fig. 25 に、 $q=0$ および σ_r -const. 試験における、平均有効応力 p と体積ひずみの関係を示す。同じ応力径路で黒ぼくと処理土を比較してみると、両者の間に大きな差が見られない。このことは、とくに $q=0$ の場合には、体積圧縮係数 m_v が黒ぼくと処理土で違いがないという、一次元圧縮特性から得られた結論と一致している。

Fig. 26 に、 p 一定試験から得られた応力比と体積ひずみ、すなわち、ダイラテンシーの関係を示した。同図より明らかなように、応力比が大きくなると黒ぼくのダイ

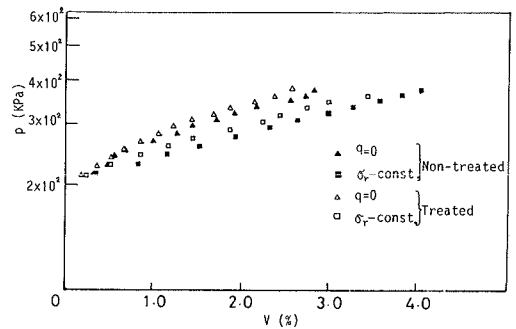


Fig. 25 Volumetric strain vs. effective mean normal stress p from CD tests

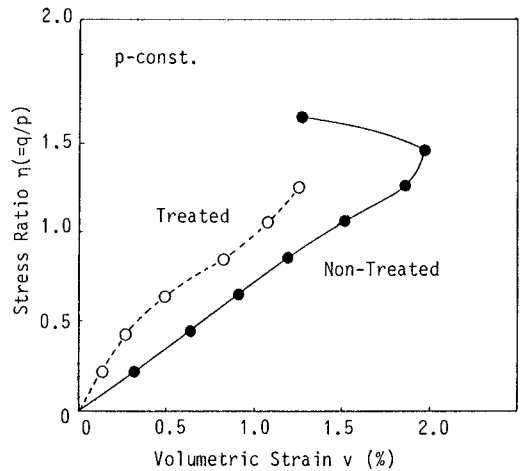


Fig. 26 Stress ratio-dilatancy curves from p -constant CD tests.

レタンスーは負から正に転じている。この点は、CU試験において明らかとなった、黒ぼくと処理土のダイレタンスー特性の違い (Fig. 21) と矛盾しない。

(2) 排水せん断クリープ特性

Fig. 27 に黒ぼくの、Fig. 28 に処理土の、 p 一定試験における軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ と時間の関係を示す。各応力比の段階で、 $\Delta t \geq 30$ 分において、良好な直線関係が見られる。この直線部分の勾配 m は、Mitchell¹⁰⁾によりクリープ速度パラメータと呼ばれているもので、土に固有の定数とされている。 m とクリープレベル q の関係を Fig. 29 に示した。応力径路の相違に拘らず、 m は黒ぼくで約1.0、処理土で0.6~0.7の一定値をとっていることがわかる。Mitchellによれば、 m の値は、0.7~1.3の範囲にあるといわれているが、黒ぼくにおいてその最下限値をとっていること、また処理土が、日本の沖積粘土の多くに対する値1.0をとっていることは興味深い点である。

(3) クリープ特性における腐植の役割

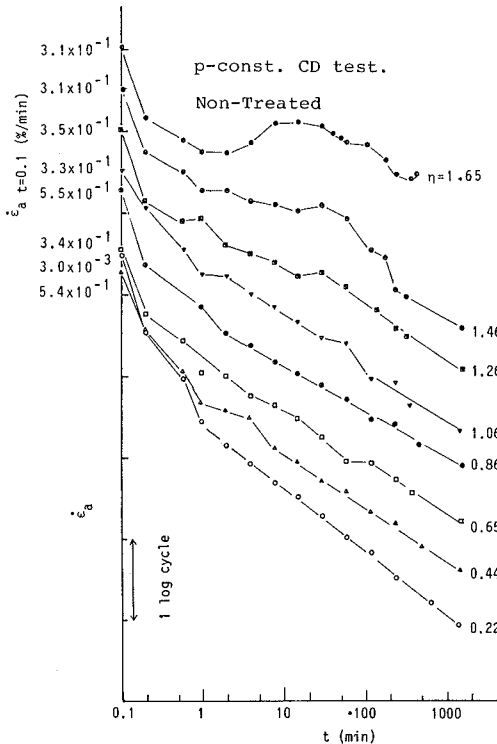


Fig. 27 log Strain rate vs. log time from a p -constant CD test for Non-Treated sample.

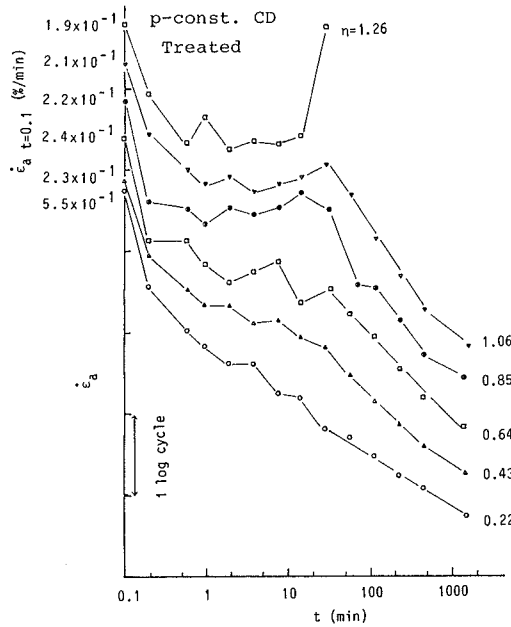


Fig. 28 log strain rate vs. log time from a p -constant CD test for Treated sample.

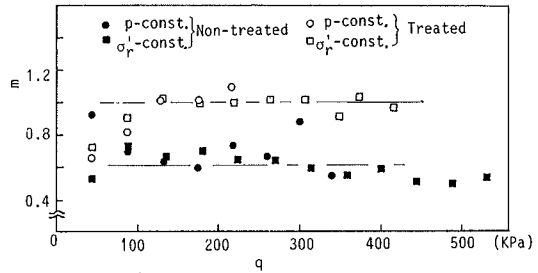


Fig. 29 Creep rate parameter m vs. creep stress level q

Mitchell は、多くの土について、次式で表わされるクリープの状態方程式が成立することを確かめている。

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp(\alpha \cdot q) (t_1/t)^m \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}$ はせん断に関するひずみ、 q はクリープ強さ、 A 、 α はともに定数である。上式は、ある基準時間 $t = t_1$ におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{t=t_1}$ の対数が、 q と比例することを表わす。Fig. 30 は、本研究で用いた黒ぼくと処理土について、このことを確かめるため p 一定および σ'_r 一定試験に対して、 $t = t_1 = 1$ (分) におけるせん断ひずみ速度の

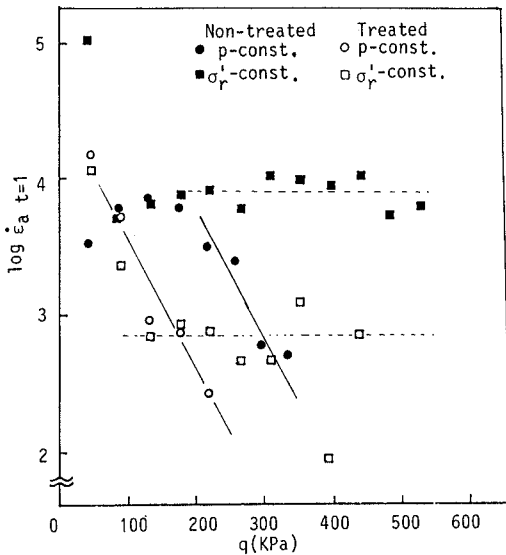


Fig. 30 Parameter A vs. creep stress level

対数とクリープレベル $q (= \sigma_a - \sigma_r)$ をプロットしたものである。ここに、 $\dot{\epsilon}_{t=1}$ は、 $\log \dot{\epsilon} \sim \log t$ 関係の直線部分を外そうとして求めた値である。図に示すように、黒ぼく、処理土ともに比較的良好な直線関係があるが、その勾配 α は、応力径路に依存していることがわかる。 σ_r 一定試験では、 $\dot{\epsilon}_{t=1}$ はクリープレベルに依らずほぼ一定値を示す。すなわち、(9)式における α がゼロに近いのに対して p 一定試験においては、 $\alpha = 100 \text{ kPa}^{-1}$ の値をとっている。要するに、応力径路が目じであれば、黒ぼくと処理土は同じ α の値をとることがわかる。

一方、 A の値は、 $q = 0$ のときの $\dot{\epsilon}_{t=1}$ で与えられ、黒ぼくで 5.6、処理土で 4.9 程度の値をとっている。

さて、(9)式は積分すると、 $m \neq 1$ の場合(10)式で、 $m = 1$ の場合(11)式でそれぞれ ϵ が表わされる。

$$\epsilon - \epsilon_0 = A \exp(\alpha \cdot q) \cdot (t/t_1)^m \cdot t / (1 - m) \dots\dots(10)$$

$$\epsilon - \epsilon_0 = A \exp(\alpha \cdot q) \cdot \ln t \dots\dots(11)$$

ここに、 ϵ_0 は $t = 1$ (単位時間) のときのひずみを表わす。 $m = 1$ のとき(11)式より、クリープにより生じたひずみは、時間の対数と線型であり、いわゆる対数型クリープを表わす。一方、 $m \neq 1$ の場合には、(10)式から、クリープによるひずみは、時間の対数に比例しないことになり、所謂指数型のクリープを表わす。

黒ぼく、処理土ともに、Mitchell の状態方程式に従うクリープ特性を示したが、クリープ速度パラメータ m だけが異なり、黒ぼくの場合 $m \neq 1$ で指数型クリープを、処理土の場合 $m = 1$ で対数型クリープとなる。結局、腐植含有の結果、 m の値が小さくなり、クリープひずみが時間の対数と線型でなくなるといえる。

5. 3 で示した長期圧密試験結果によれば、黒ぼくは長期間経過後、 $\log t$ に対して非直線的な沈下を示したが、これは、クリープ速度パラメータ m が 1 でない、ということと関係していると思われる。

7. 結 語

大山火山灰有機質土の黒ぼくを用いて、黒ぼくに含まれた腐植が、圧密特性とせん断特性に及ぼす影響について調べた。腐植の効果は、腐植を過酸化水素処理により除去した試料の力学挙動を原試料のそれと比較することにより明らかにした。得られた主な結果をまとめると以下のようなになる。

黒ぼくの一次元圧密試験の結果、

i) 黒ぼくの圧密係数は処理土の約 7 倍と大きく、一次圧密は、荷重載荷後 6 秒以内で終了する。圧密係数は、試料高さ 6 cm、9 cm の試料の挙動を利用して求めることができた。

ii) 二次圧密速度は、黒ぼくにおいて大きく、試料高さが大きい場合ほど小さくなった。

三軸非排水圧縮試験の結果、

iii) 黒ぼくは変形しやすいが強度が大きい。変形に伴って大きな正のダイレタンシーが生じた。

三軸排水試験の結果、黒ぼくのクリープ特性は、

iv) Mitchell のクリープ状態方程式に従う挙動を示し、黒ぼくと処理土で異ったのは、クリープ速度パラメータ m の値のみであった。処理土は $m = 1$ であり、黒ぼくは 0.6~0.7 の値をとった。

以上の主な結果を、腐植の存在による団粒構造に着目して、考察した。すなわち、団粒は、圧密やせん断において、その挙動を砂のようにする。一方、団粒自体のレオロジー的変形のため、顕著な二次圧密特性と指数型のクリープ挙動が現われることがわかった。

謝辞 本研究において採用した腐植除去の方法は、本学土木工学科助手藤村尚氏の教示に負うた。この場を借りて、深甚の謝意を表す。また、三軸試験機は、京都大学防研究所柴田徹教授に便宜を計っていただいた。記し

て謝意を表す。尚、本研究は、土木工学科及び海洋土木工学科スタッフの方々に様々の援助をいただいて遂行したものであり、感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 足立嗣雄 (1973) : 火山灰土壌の腐植に関する研究—腐植組成の地域的差異について—, 農業技術研究所報告, B, 第 24 号, pp.127-264
- 2) 山根一郎 (1980) : 科学, 岩波書店, Vol.50, No. 2, pp.98-103
- 3) 山根一郎他 (1978) : 図説日本の土壌, 朝倉書店, pp. 182-185
- 4) コノノワ, M.M. (1963) : 土壌有機物—その本質・性質および研究法—, 菅野一郎他訳, 農村漁村文化協会
- 5) 竹中 肇 (1973) : 火山灰に由来する有機質土の土壌工学的研究, 土と基礎, Vol.21, No. 2, pp.13-19
- 6) 弘法健三・大羽 裕 (1974) : 火山灰土壌の腐植の集積要因および腐植が土壌の諸性質におよぼす影響—本邦火山灰土壌の生成論的研究 (第 8 報)—, 日本土壌肥料学雑誌, Vol.45, No. 6, pp.293-297, 43, No. 3, pp.61-65
- 7) 山内豊聡他 (1973) : 九州の有機質土について, 土と基礎, Vol.21, No. 2, pp.37-46
- 8) 足立忠司他 (1977) : 火山灰に由来する有機質土の強度特性, 農土論集, 71 号, pp.39-43
- 9) 竹中 肇他 (1977) : 火山灰および非火山灰段丘堆積物に由来する有機質土の物理的性質, 農土論集, 第 71 号, pp. 1 - 7
- 10) 前田 隆他 (1976) : 腐植が土の物理性に及ぼす影響, 農工論集, 第 61 号, pp. 9 - 17
- 11) 佐藤 孜・山根一郎 (1972) : 有機無機複合体の比重分画法による分離—土壌の有機無機複合体の分離とその性状 (第 2 報)—, 日本土壌肥料学会誌, Vol.43, No. 3, pp.61-65
- 12) 土質工学会有機質土研究委員会 (1976-1978) : 講座「有機質土の工学的諸問題」, 土と基礎, Vol.24, No. 11~Vol.25, No. 1
- 13) 松尾新一郎・嘉門雅史 (1973) : 物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について, 土木学会論文報告集, No.209, pp.103-114
- 14) 山内豊聡他 (1977) : 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, pp.153-156
- 15) 日本土壌肥料学会編 (1980) : 山陰の土壌と農業
- 16) 土質工学会 (1969) : 土質試験法 (第 1 回改訂版)
- 17) 赤井浩一 (1966) : 土質力学, 朝倉書店
- 18) Mitchell, J, K, (1976) : Fundamentals of Soil Behavior, John Willey & Sons, Inc.