

## 珪藻土の力学的特性に及ぼす粒子破碎の影響

Influence of Particle Breakage on Mechanical Properties of Diatom Earth

立石 義孝 (たていし よしたか)

大分県立日田林工高等学校教諭 土木科主任

鬼塚 克忠 (おにつか かつただ)

佐賀大学教授 理工学部都市工学科

根上 武仁 (ねがみ たけひと)

佐賀大学助手 理工学部都市工学科

## 1. はじめに

珪藻類が多く棲息しているのは近海や大陸棚付近であるが、山間部や残雪の下からも微細植物群が発見されている。この微細植物群と呼ばれる単細胞の植物性プランクトン中の一つが珪藻類である。海底や湖底に長年月にわたって沈殿堆積した微細植物群中の有機物が次第に腐食して消失した後に、珪藻遺骸の粒子が集積して地層の一部を形成したものが珪藻土と呼ばれている。

この珪藻土について著者らは、粒子破碎を生じやすいまさ土やしらす、珪藻遺骸を多く含む沖積粘土である有明粘土と比較して、物理・化学的性質および力学的性質などについて既に報告している<sup>1)~3)</sup>。

最近、珪藻遺骸を含んだ地盤の特性がクローズアップされ研究が行われている。例えば、我が国の海成粘土において、塑性指数  $I_p$  が大きな土には珪藻遺骸が多量に含まれており、この珪藻遺骸が土のコンシステンシー特性を考える上で重要な要因になっている<sup>4), 5)</sup>。また、大阪湾の洪積粘土中に存在する珪藻遺骸の含有量が多いと圧縮指数  $C_c$  が大きな値を示し、粘土の圧縮性を大きく支配していることなどの報告がなされている<sup>6)</sup>。

本報告では、珪藻（淡水性）遺骸などの珪酸  $\text{SiO}_2$  の含有量が約 90% の珪藻土を走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて微視的な土構造の直接観察を行うとともに、等方圧密非排水三軸圧縮（CIU）試験後の供試体について水銀圧入型細孔分布測定装置による間隙分布測定を行った。

既に報告している珪藻土の力学的性質<sup>3)</sup>と今回得られた知見に基づき、粒子破碎（本文においては以降、珪藻遺骸からなる粒子の破碎を単に「粒子破碎」という）の状況が力学的特性に及ぼす影響について検討した。その結果、珪藻土の脆性的な破壊現象は粒子破碎が大きく寄与していることなどを明らかにした。

## 2. 珪藻土の物理・化学的性質

今回用いた試料は大分県玖珠地方に産出する珪藻土で、約 200 万年前後の鮮新世の後期から更新世前期の淡水性の珪藻が沈積した湖成堆積土である（口絵写真—4）。

これまでの著者らの研究結果により珪藻土の物理的性質は有明粘土に、化学組成はしらすに類似していること

を明らかにした<sup>1)</sup>。

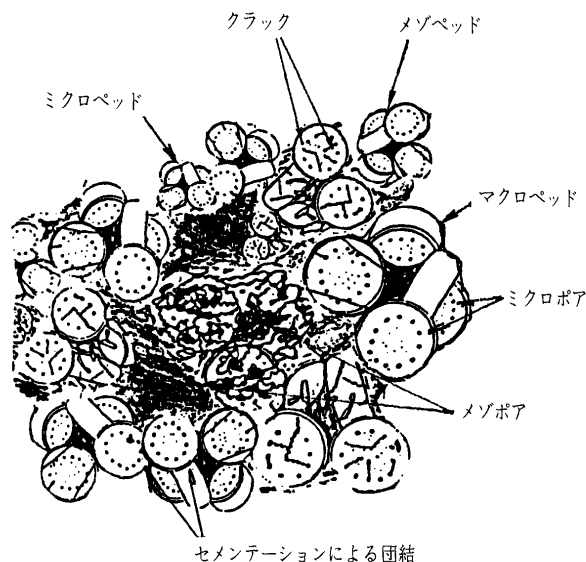
また、液性・塑性限界ともに NP であったが、フォールコーン法を用いた場合の液性限界値が  $w_L = 127 \sim 155\%$  という報告<sup>7)</sup>もある。

珪藻土中における珪藻の主な種類はキクロテラ、ステファノディスクなどであり、口絵写真—5 に示すように珪藻遺骸のほとんどが円盤状のもので、その大きさは直径  $5 \sim 120 \mu\text{m}$  である。これらの珪藻遺骸の粒子は珪酸質の超微細多孔物質であるため、珪藻を含む地盤の物理的性質や力学的性質に影響を及ぼしている。

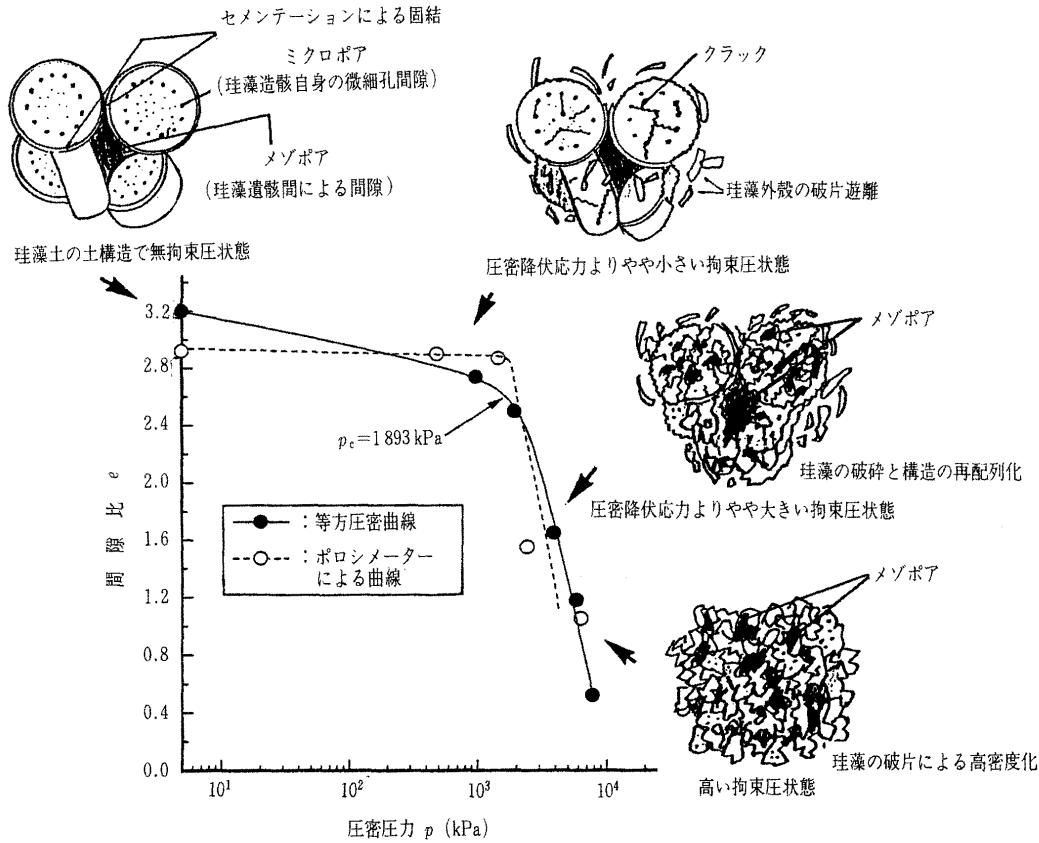
## 3. 珪藻土の土構造

珪藻土は口絵写真—5 に示すように、ほとんどが珪藻遺骸の粒子から構成されていることが分かる。これらの珪藻遺骸の各粒子が相互に接触し、その接触部分がセメンテーションにより固結が発達し、かつ年代効果も合い重なって圧密降伏応力が大きいと考えられる。

著者らのこれまでに得られた研究成果から図—1 に示すような珪藻土の構造モデル<sup>3)</sup>を提案している。粘土において提案されている土構造<sup>8)</sup>と同様にベッドとポアを用いて表現できる。珪藻土の微細な土構造も珪藻遺骸が



図—1 珪藻遺骸からなる珪藻土の構造



図一2 ポロシメーターによる間隙比と等方圧密曲線および粒子破碎状況

沈殿集積して、マクロ、メゾおよびマイクロベッドを形成し、間隙部はマイクロとメゾから構成されている。このようなベッドがさらに集合し、セメンテーションにより珪藻土の骨格構造が形成される。

4. 粒子破碎による構造の変化と力学特性

4.1 等方圧密曲線と水銀圧入法による間隙比の関係

図一2は珪藻土の等方圧密曲線である。圧密降伏応力  $p_c$  前後の圧密圧力で圧密した供試体について、水銀圧入法による間隙分布測定から得られた結果も併せて示している。セメンテーションによって骨格構造が発達しているため、降伏点前の過圧密域では圧縮性は小さい。

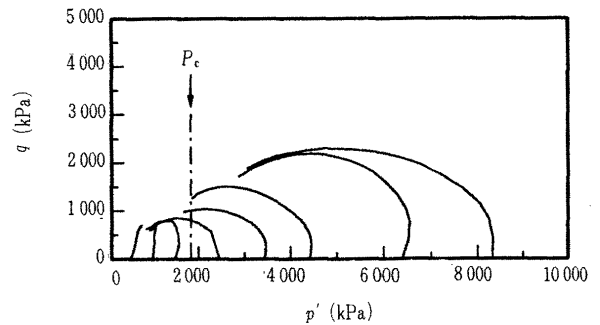
降伏点を超えた正規圧密域で粒子破碎が生じ、骨格構造が変化し、圧縮性は非常に大きくなっている。

水銀圧入法の結果から求めた圧密曲線は、圧密降伏応力を超えると大きな沈下を生じ、等方圧密曲線と同様の傾向を示すことから、両者には高い相関性があることがわかる。また、これらの関係と後述のSEM観察結果から、各圧密圧力の段階における珪藻遺骸の破碎模式図をも併せて提示している。

4.2 CIU 試験後の間隙分布と粒子破碎状態

CIU 試験から得られた有効応力経路を図一3に示す。過圧密域では直線的に立ち上がり、正規圧密域においては左側に大きく弧を描くことから、正規圧密域での間隙

水圧の上昇が異常に大きいことがわかる。これは、拘束圧力が圧密降伏応力を超えると、粒子破碎が急激に生じて、土構造が大きく変化するためであると考えられる。



図一3 珪藻土の有効応力経路

力学的特性に大きく影響を及ぼすと考えられる粒子破碎の状況を調べるために、乱さない状態の珪藻土を過圧密域および正規圧密域の拘束圧  $\sigma_3$  で圧密した試料について、間隙分布測定とSEMによる土構造の直接的観察を実施した。軟岩状である珪藻土は、炉乾燥による収縮がほとんど見られない。乱さない試料を炉乾燥したものと凍結乾燥した試料の水銀注入量が、ほぼ同じであったことから<sup>3)</sup>、間隙分布測定とSEM観察には炉乾燥した

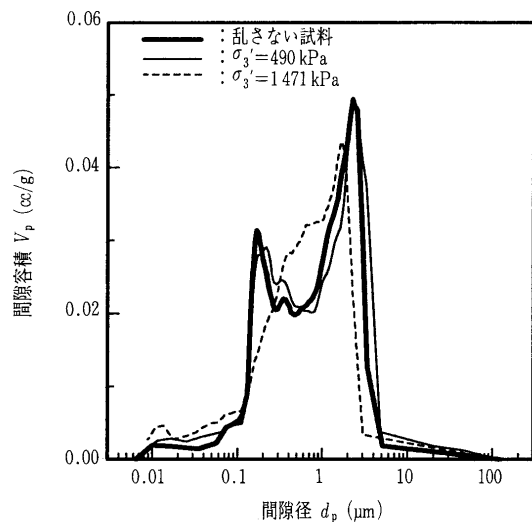


図-4 拘束圧が過圧密域の間隙分布曲線

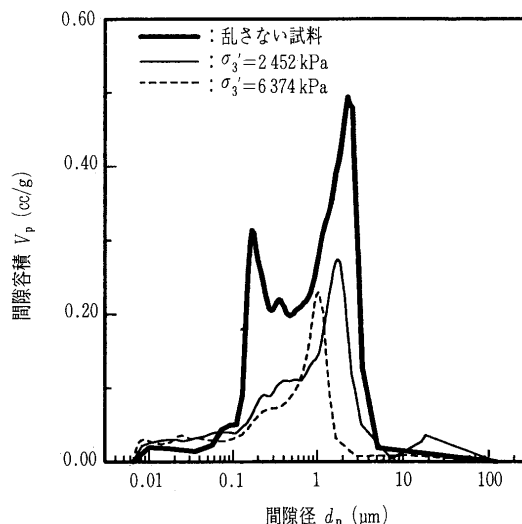


図-5 拘束圧が正規圧密域の間隙分布曲線

試料を用いた。

口絵写真-5は、拘束圧 0 kPa における珪藻土の SEM 写真である。口絵写真-6は  $\sigma_3 = 490$  kPa のケースであるが、両ケースともに円盤状の微細多孔質珪藻遺骸が原形を保ったまま数多く存在していることがわかる。このときの間隙分布特性を図-4に示す。間隙径  $d_p$  が  $0.2\mu\text{m}$  と  $3\mu\text{m}$  付近の 2 箇所の間隙容積値の鋭いピークが現れており、間隙分布状況はほぼ同じであることがわかる。口絵写真-7の  $\sigma_3 = 1471$  kPa のケースでは、珪藻遺骸はほぼ円盤形状を保っているが、外郭が外れたものが多少確認できる。

また、図-4より間隙径  $d_p = 0.2\mu\text{m}$  付近での鋭いピークがなくなり、 $1\mu\text{m}$  付近の間隙径が増加していることがわかる。これは過圧密域においても、顕著ではないが粒子破碎が生じていることを示唆するものと考えられる。

圧密降伏応力  $p_c$  点を越えた拘束圧  $\sigma_3 = 2452$  kPa のケースを口絵写真-8に示す。これより、原形を保った珪藻遺骸が減少し、外れた外郭も細分化して全体的に粒子破碎による密度化が進行していることがわかる。口絵写真-9はさらに拘束圧が大きい  $\sigma_3 = 6374$  kPa のケースを示したものであるが、粒子破碎が進行して完全な円盤状の珪藻遺骸はほとんど見られず、より高密度化していることがわかる。

図-5はこれらの間隙分布特性を示したものである。 $d_p = 0.2\mu\text{m}$  付近に存在したピークがなくなり、 $1\mu\text{m}$  付近に一箇所のみ鋭いピークが現れていることがわかる。

また、図-4および図-5から、拘束圧力の増加に伴い、間隙容積ピーク値が減少していることがわかる。

#### 4.3 拘束圧力の増加による間隙の変化

図-6は拘束圧力の増加に伴うマクロポア、メゾポア、ミクロポア、サブミクロポアの分布状況の変化を示したものである。圧密圧力の増加に伴い、ミクロポアに相当する大きさの間隙が増加傾向を示すことが分かる。また、ミクロポアが圧縮され、より小さな間隙であるサブミクロポアが徐々に増えている。拘束圧が  $2452$  kPa と

$6374$  kPa のケースでマクロポアの大きさに相当する間隙が見られるのは、供試体作製時に生じたクラックが原因であると考えられる。拘束圧  $\sigma_3$  が大きくなると高密度化が進行し、等方圧密終了後の試料は非常に硬い状態であった。このため、水銀圧入型ポロシメーター用の供試体を整形する際に、クラックが生じやすくなっていたためと考えられる。

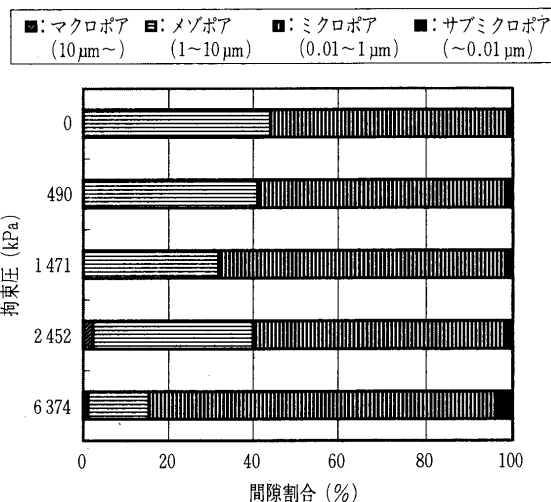


図-6 拘束圧の増加による間隙の変化

口絵写真-5~9、図-1~6を併せて考察すると、拘束圧が過圧密域の状態では、珪藻土の土構造は原形を保った珪藻遺骸の粒子によって形成されている。これに対して、拘束圧が正規圧密域になると、粒子破碎が進行して高密度化した状態となる。

このように珪藻土の力学的性質は、圧密降伏応力付近から急激に生じる粒子破碎の影響を受ける。

## 5. ま と め

CIU試験後の間隙分布測定とSEMによる土構造観察結果から、珪藻土の珪藻遺骸の粒子破碎状態を明らかにし、粒子破碎の進行に伴う微視的構造の変化と力学特性との関係について考察した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 珪藻土はセメンテーションによる骨格構造を有するため過圧密域は圧縮性が小さい。過圧密域でも粒子破碎は確認できるが、せん断強さは拘束圧の影響をあまり受けない。
- 2) 正規圧密域では粒子破碎によって圧縮性が大きくなる。また、せん断強さは破碎した珪藻遺骸の再配列により拘束圧の影響を受ける。拘束圧がさらに大きくなると、粒子破碎が進行してより高密度化し、拘束圧が増加してもせん断強さは影響を受けない。
- 3) 珪藻土の乱さない試料の間隙分布特性は、間隙径が $0.2\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ 付近の2箇所鋭いピークを示す。圧密降伏応力を超える高拘束圧になると粒子破碎が生じるため、 $1\mu\text{m}$ 付近で1箇所のみ鋭いピークを示す。
- 4) 珪藻土の脆性的な破壊現象は珪藻遺骸の粒子破碎、これに伴い珪藻遺骸の超微細多孔からの間隙水の排出などにより、セメンテーションを受けた骨格構造が破壊する。

## 参 考 文 献

- 1) 立石義孝・鬼塚克忠・落合英俊・林 重徳：大分県地方における珪藻土の工学的特性，土と基礎，Vol.42, No.5, pp.47～52, 1994.
- 2) 立石義孝・鬼塚克忠・馬淵勝美・廣澤茂：厚層基材吹付け工法による珪藻土斜面の緑化，土と基礎，Vol.44, No.6, pp.31～33, 1996.
- 3) 立石義孝・鬼塚克忠・廣澤 茂・根上武仁：珪藻土の微視的構造と力学特性，土木学会論文集，No.610/Ⅲ-45, pp.19～29, 1998.
- 4) 田中洋行・Jacques Locat：塑性指数に関する再考察，土と基礎，Vol.46, No.4, pp.9～12, 1998.
- 5) 水崎満江・辻 大輔・日野剛徳：有明粘土の土質特性におよぼす珪藻遺骸の影響，土木学会西部支部研究発表会，Ⅲ-6, pp.364～365, 1999.
- 6) 八嶋 厚・重松宏明・岡二三生・長屋淳一：上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化，土木学会論文集，No.624/Ⅲ-47, pp.217～229, 1999.
- 7) 土質工学会九州支部編：珪藻土，九州・沖縄の特殊土，九州大学出版会，pp.83～92, 1983.
- 8) 松尾新一郎・嘉門雅史：粘土構造に関する用語について，土と基礎，Vol.24, No.1, pp.59～64, 1976.

(原稿受理 2000.7.24)