

粘土の微視構造のフラクタル次元解析

芝浦工業大学 (正)足立 格一郎 (学)〇宮永 慎也(現 茨城県庁)
(学)山口 宏志 木田 潤 後藤 晋一郎

1.はじめに

粘土の微視構造は、従来ブラックボックス的な存在であった。しかし、技術の進歩による電子顕微鏡の出現により直接構造を見ることができるようになり次第にその中身が明らかにされつつある。そこで、本研究では、「不攪乱試料」、「高温再構成試料」、「室温再構成試料」の3試料を用いて、**表面形状測定顕微鏡**を使用し、粘土の微視構造を力学的性質と対比させ、定量的に把握することを試みた。

2. 試料と試験について

用いた試料は、東京都江東区若洲から採取した有楽町層下部層粘土($w_L=95.2\%$ 、 $w_p=40.9\%$ 、 $I_p=54.3$ 、 $\rho_s=2.680\text{ g/cm}^3$ 、 $p_c=280\text{ kPa}$)である。以下、この不攪乱試料をN試料と呼ぶ。

①**再構成試料の作製**:N試料の $425\text{ }\mu\text{m}$ ふるい通過分を $1.5w_L$ の含水状態に調整した後、両面排水一次元圧密装置を用いて 280 kPa にて圧密再構成を行なう。室温再構成試料(R試料、温度環境 24°C)、高温再構成試料(H試料、温度環境 75°C)の二種類の再構成試料を作成した。載荷は、R試料については $10\rightarrow 30\rightarrow 70\rightarrow 140\rightarrow 280\text{ kPa}$ 、H試料については、 $20\rightarrow 40\rightarrow 70\rightarrow 140\rightarrow 280\text{ kPa}$ で行なった。圧密時間は各段階24時間とし、最終段階については、作製された試料の均一性を考慮し、3tの約1.7倍の時間が経過するまで圧密した。

②**圧密試験**:粘土の微視構造と力学的性質との関係を考察するため、圧密試験を行なった。圧密試験用の供試体は、構造の異方性を考慮するため、堆積面に対して水平な供試体(Hサンプル)、鉛直な供試体(Vサンプル)を取り出し、試験を行なった。なお、試験は、それぞれの試料について3個づつ(R試料については2個づつ)行なった。

3. 試験結果

圧密試験から得られた $e\sim\log p$ 曲線を図1に示す。個々の曲線は、それぞれの試験結果の平均を示している(注:3試料の結果に大きな差異はない)。3試料それぞれにおいてHサンプルとVサンプルの $e\sim\log p$ 曲線は、過圧密領域ではほぼ同様な挙動を示しているが、圧密降伏応力を示す付近では挙動が異なっている。これは、構造の異方性が影響しているものと考えられる。その差異は、N試料、H試料、R試料の順ではっきりと表れてくる。正規圧密領域において

も、同様にN試料はほぼ同一の挙動を示しているのに対し、R試料は大きく異なっている。また、3試料を比べてみると、R試料に比べ、H試料の方がN試料の挙動に類似しているといえる。

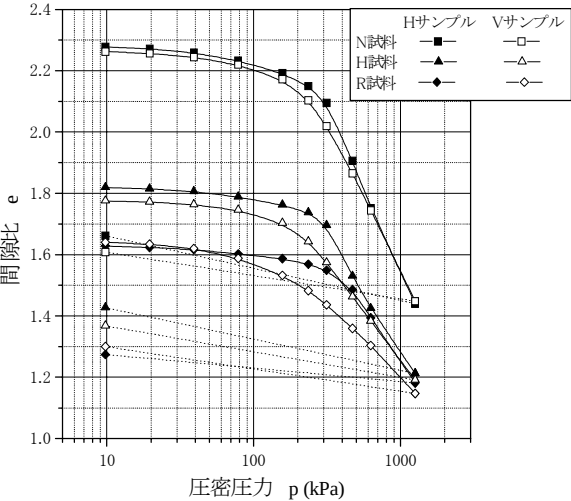


図1 $e\sim\log p$ 曲線

4. 粘土の微視構造の測定

粘土の微視構造を測定するために、今回、キーエンス社製の「表面形状測定顕微鏡」を用いた。この顕微鏡を用いることによって、写真が得られるとともに観測面の高さデータを得ることができ、そのデータを元に表面形状の定量的な把握を行なう。データを得られる測定分解能は、x、y方向が約 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 、z方向は $0.01\text{ }\mu\text{m}$ である。観測面については、各試料の水平断面、鉛直断面に対して測定を行なう。観測する試料は、空気乾燥(含水比約10%程度)させ、ナイフで端部に切れ目を入れた後、人工的に割ることとした。

定量的な表面形状把握の手法であるが、得られた高さデータからフラクタル次元解析¹⁾を行なう。面を扱う場合のフラクタル次元は(1)式で表すことができる。

$$S(\eta^2)=S_0\cdot(\eta^2)^{-(D/2-1)}\cdots(1)$$

ここで、 $S(\eta^2)$ はメッシュ間隔 η で測定した場合の測定面積、 S_0 は定数、そしてDは求めるフラクタル次元である。(1)式を変形すると、(2)式が得られる。

$$\log S(\eta^2)=\log S_0-(D/2-1)\log \eta^2\cdots(2)$$

この式に従って、メッシュ間隔 η を何段階かに変え(メッシュ間隔は最大192から最小3まで(図2))、そのときの面

キーワード：粘土の微視構造、顕微鏡観察、フラクタル次元解析、圧密、再構成試料
連絡先：〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14 芝浦工業大学土木工学科地盤工学研究室
TEL 03-5476-3048 FAX 03-5476-3166

積 $S(\eta^2)$ を測れば、 $\log \eta^2$ と $\log S(\eta^2)$ との間に線形関係が認められ(図3)、その勾配 k によりフラクタル次元 D が求まる。この次元が大きいと表面の凹凸が複雑な構造になっていることを示し、その複雑さを定量的に評価できる(図4)。各試料、各断面についてそれぞれ20ヶのフラクタル次元を求め、平均した値を図5、6、7に示す。図5は自然状態における各試料のフラクタル次元を示したものである。これをみると、N試料は、両断面における次元は、他の2試料に比べ大きく、両断面とも近い値を示している。これは、構造が等方的であり、自然粘土の一般的な堆積構造である綿毛構造であることを示している。この等方的な骨格構造が、圧密試験において他の2試料に比べ、H、Vサンプルにおいて大きな差異が表れなかった理由だと考えられる。H試料とR試料について見てみると、水平断面では、互いに近い次元を示しているが、鉛直断面では大きな差がある。H試料の方が大きく、その値はN試料に近いものとなっている。つまり、H試料は鉛直断面に対し、N試料と同じような骨格構造をもつ。逆にR試料は、両断面ともN試料と大きく異なる次元を有していることが分かる。つまり、R試料は水平断面の次元が低いことから、配向的な構造を有していることが分かる。これらのことから、H試料はN試料とR試料の中間的な構造を有しているといえる。図6はHサンプルに対し圧密試験を行ない、試験後の試料のフラクタル次元を示したものである。3試料それぞれにおいて、鉛直断面の次元が水平断面よりも高くなっている。圧密を行なうことにより、初期構造が破壊され、配向的な構造に粘土粒子が移動していることがその理由である。図7はVサンプルに対し圧密試験を行ない、試験後の試料のフラクタル次元を示したものである。Hサンプルと同様に、圧密後の鉛直断面の次元が水平断面よりも高くなっており、圧密されて主応力面に配向的な構造に変っていることが分かる。Vサンプルは構造異方性が顕著に作用し、複雑な挙動を示していることが分かる。

5. まとめ

以上の圧密試験結果、フラクタル次元解析結果から次のようなことが分かった。

①N試料においては、圧密試験結果から異方性は多少認められるものの、フラクタル次元解析結果から水平、鉛直方向では構造に大きな差はない。②再構成試料であるH、R試料については、構造の異方性がN試料よりも大きく、特にR試料は大きな構造異方性を有している。それに対し、H試料は、N、R試料の中間的な構造を有している。③フラクタル次元解析を行なうことにより、各試料の骨格構造の異方性、およびその特徴を定量的に把握することができた。

【参考文献】1)三橋他：セメント硬化体の破面解析に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第445号，pp19～24，1993年3月。

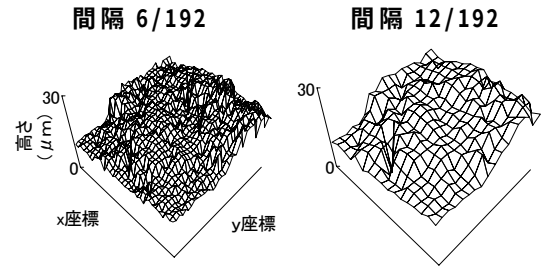


図2 各メッシュ間隔における測定断面図の例

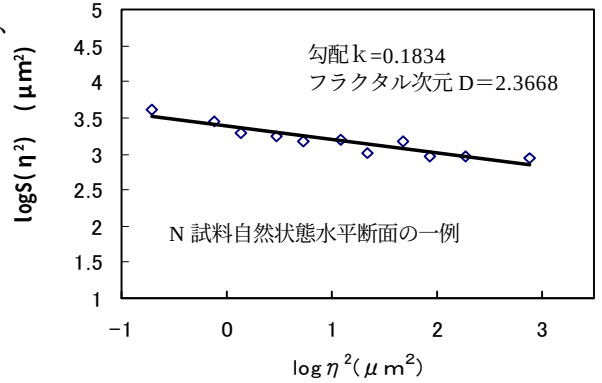


図3 η^2 と $S(\eta^2)$ の関係

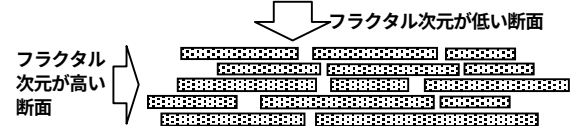


図4 フラクタル次元の概念図(配向構造の粘土)

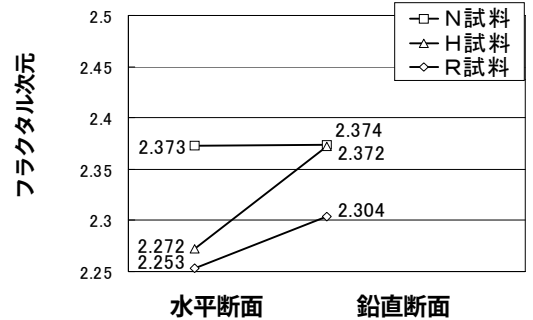


図5 自然状態での各試料のフラクタル次元

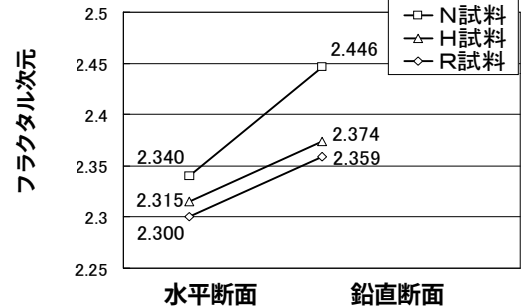


図6 Hサンプルでの各試料のフラクタル次元

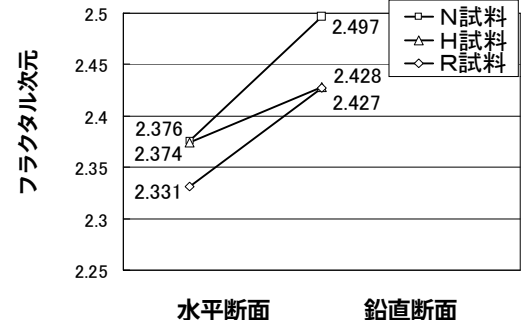


図7 Vサンプルでの各試料のフラクタル次元