

モデルを用いた粘土の微視構造に関するフラクタル解析の評価

芝浦工業大学 (学)○児玉 潤 (正)足立 格一郎

(学)古山 貴義 (学)後藤 晋一郎 (学)沼倉 貴雄

1. 研究目的

粘土の微視構造が、圧密やせん断といった粘土の力学挙動に深い関連のあることが様々な研究者によって指摘されてきている。近年、電子顕微鏡の発達により粘土の微視構造が徐々に解明されているもの、そのほとんどが視覚的な把握にとどまっているため、観察者によって評価が異なってくる。したがって、そのような主観的要素を極力排除し、粘土の微視構造をより客観的に評価するためには、様々な定量化手法によって数値化し比較・検討を可能にする必要があると思われる。

そこで前回¹⁾、粘土の微視構造断面を超深度形状測定顕微鏡を用いてをデータ化し、それらを S_m 値およびフラクタル次元の2つの定量化手法を用いることによって定量化を行った。その結果、粘土の微視構造と力学的挙動との間に関連性があることを或る程度指摘できたものと思われる。とくにフラクタル次元による定量化がより粘土の微視構造を厳密に数値化できると判断したが、その値が示す性質についてやや不明確な箇所があると考えられた。そこで今回、それらを明確に判断するために配向構造などを想定した様々な人工モデルを作成し、顕微鏡で測定したデータを用いてフラクタル解析を行うことで、フラクタル値が示す意味について検討した。

2. 研究方法

今回モデルに用いた試料は以下の2種類である。やすり：超精密仕上げ用のフィルムシートで主にプラスチックや金型の研磨に用いられる。最小で $0.3\mu\text{m}$ ほどの粗さを持つものもある。今回は粗さ $0.3, 0.5, 1, 3, 9, 15\mu\text{m}$ の6種類を用いている（ここで粗さとはフィルムシート表面の研磨粒子の大きさである）。付箋紙・カミソリ刃：配向構造を想定して、厚さの薄いものを何枚か重ねたものの表面と側面とを顕微鏡で測定した。すなわち、表面が微視的にできる限り平らでかつ側面が凹凸しているものを作成した。付箋紙およびカミソリ刃（刃の部分）の厚さはともに 0.1mm である。これらの試料を超深度形

状測定顕微鏡で測定

し、そのデータを用いてフラクタル解析を行った。測定時の顕微鏡のレンズ倍率および x, y 方向（平面方向）、 z 方向（高さ方向）の測定間隔（pitch）などの条件は表1のとおりである。測定倍率は10、

20、50、100倍の4種で、その際の x, y 方向の測定間隔は約 $1.5, 0.7, 0.3, 0.15\mu\text{m}$ になる。測定時の倍率については、できるだけ倍率の高いものを選択しているが、高倍率では断面形状が明確でなくなるものもあるため、倍率を下けているものもある。顕微鏡による測定は1試料につき2箇所の断面を測定し、さらにその2断面の任意の4箇所で行った（計8個）。結果はそれらを平均した値を示している。その他の測定方法およびフラクタル次元解析の詳細については、別途文献1)等を参照されたい。

3. 解析結果・考察

図1にやすりの目の粗さとフラクタル次元値との関係を示す。この図からわかるように、目の粗さが大きくなるにしたがって、必ずしも直線的ではないがフラクタル次元の値もほぼ大きくなっていく。やすりの目の粗さはシート表面の研磨粒子の大きさを表しており、そのことから考えると、やすり表面の凹凸が小さくなり、表面が平らになるほどフラクタル次元値も小さくなっていくことが伺える。また、粗さが小さくなるほど研磨粒子間の間隔、すなわち平らな部分が多くなるため、フラクタル値も減少するものと考えられる。以上のことから、フラクタル次元値は、断面形状の凹凸が少ない、すなわち flat な部分が多くなるほど小さくなるという特徴があるもの

表1 顕微鏡の測定条件

	倍率	pitch(μm)	
	(倍)	x,y	z
やすり $0.3\mu\text{m}$	100	0.15	0.02
やすり $0.5\mu\text{m}$	100	0.15	0.02
やすり $1\mu\text{m}$	100	0.15	0.02
やすり $3\mu\text{m}$	100	0.15	0.02
やすり $9\mu\text{m}$	100	0.15	0.02
やすり $15\mu\text{m}$	100	0.15	0.02
ふせん側面	10	1.5	1
ふせん表面	10	1.5	1
カミソリ側面	20	0.7	0.1
カミソリ表面	100	0.15	0.02

キーワード：粘土、微視構造、フラクタル、定量化、電子顕微鏡

連絡先：〒108-8548 東京都港区 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 03-3476-3166

と思われる。

次にカミソリ刃と付箋紙について考える。ここでは断面形状の一例としてカミソリ刃の表面と何枚か重ねた状態での側面の断面形状を3D表示したものを示している(図2,図3)。これらを用いてフラクタル解析を行った結果が図4である。カミソリ刃, 付箋紙とも, 表面よりも凹凸の大きい側面のフラクタル次元値が大きくなっているが, その差はカミソリ刃のほうが圧倒的に大きい。表面のみで比べた場合, カミソリ刃はステンレス製であり材質が均一で平坦なため, フラクタル値は平面であることを示す $2 (= 2 \text{次元})$ に限りなく近くなる。一方で付箋紙は繊維質であることから見た目よりも表面がざらついているため, フラクタル値が大きな値を示したものであると思われる。同様に側面で比べた場合, カミソリ刃は凹凸が鋭いのに対して, 付箋紙の凹凸は変化が緩やかであり, 全体としてなだらかな断面になっている。したがって, カミソリ刃より平坦に近いと思われる付箋紙の側面のフラクタル値が小さくなったものと思われる。このようにどちらとも配向構造に近いものであるが, その形状によってフラクタル値が大きく異なることがわかる。このように, フラクタル次元の値は平坦な部分の割合と, 凹凸の形状という2つの要素に左右されていることが伺える。

図4には先に行った粘性土の微視構造断面をフラクタル次元で解析した時の値の範囲も合わせて示している(ここで, 堆積面に対して平行な断面を水平断面, 直角な断面を鉛直断面としている)¹⁾。これによれば, 粘土の微視構造のフラクタル値は付箋紙表面のやや下のほうに位置している。粘土の場合, 水平断面と鉛直断面とのフラクタル値の差は高温再構成試料が最も大きいものの, それでも今回行ったモデルのそれと比べるとそれほど大きな差ではないことがわかる。とくにカミソリ刃のように表面と側面の形状が著しく異なる場合でなければ, フラクタル値もそれほど極端に異なることはないことがわかった。しかし, 粘土のみで微視構造を比較した場合に, それらのフラクタル値の差がこれまで概念的に理解していた粘土の微視構造の特性をある程度反映しているとも考えられるので判断が微妙なところではあるものの, 今後さらに検討を深めることにより, より具体的・定量的な評価の可能性を探究したい。

参考文献

- 1) 足立格一郎他：粘土の微視構造のフラクタル次元解析, 土木学会第56回年次学術講演概要集, -A165, pp.330-331, 2001

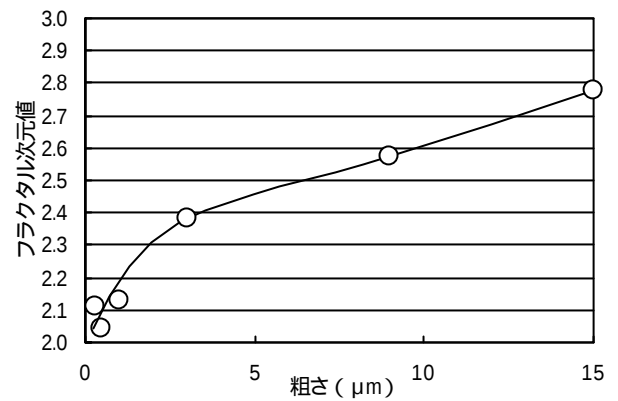


図1 やすりの粗さとフラクタル次元値の関係

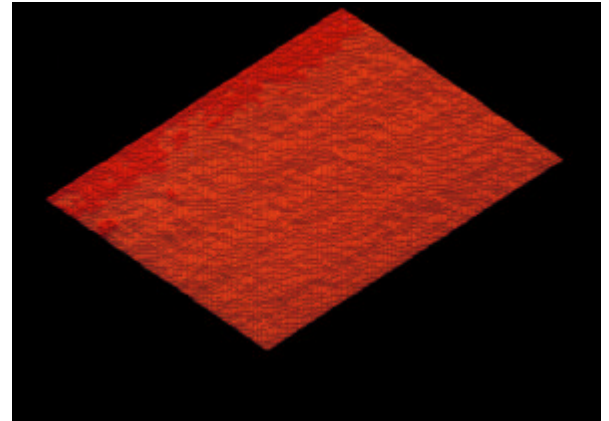


図2 カミソリ表面の3D断面図

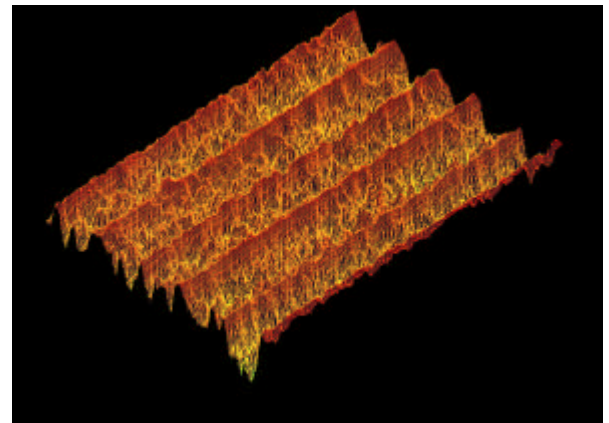


図3 カミソリ側面の3D断面図

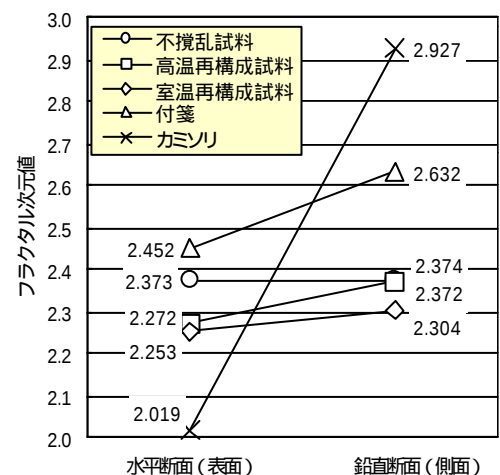


図4 各試料のフラクタル次元値