

土壌のマイクロおよびマクロ的挙動における粒度分布の影響：すべり面の空間的変動性の指標としてのフラクタル次元

国際委員
加地広美

1. はじめに

地すべりのすべり面の位置をより正確に判定するための研究は、日本でもこれまでに多く行われてきた(木下ほか 2013¹⁾、脇坂ほか 2012²⁾、川村ほか 2004³⁾など)。現在もすべり面の位置に頭を悩ませている技術者は非常に多いと思う。今回紹介する論文では、すべり面に含まれる土粒子の粒度分布のフラクタル次元がすべり面の空間的変動性の指標となり得る可能性について言及している。本論文で紹介されている手法の有効性については「今後さらなる研究が必要である」と結論付けられており、今すぐに実務で活用できる手法ではないが、すべり面の空間的変化の数値化を試みた点は非常に面白いと感じた。原文はIAEG会誌 2018年2月号に掲載されている。

2. 紹介論文の概要

中国三峡ダム(Three Gorges Reservoir)の黄土坡(Huangtupo)地すべりの野外調査で、すべり面に含まれる土粒子の粒度分布のフラクタル次元解析を行った。その結果、土粒子の粒度分布のフラクタル次元が地すべりのすべり主方向、下方に向かうにしたがって、増加する傾向があることが示された(Jiang et al. 2015⁴⁾; Tang et al. 2015⁵⁾)。そこで、本研究では地すべりブロック内のいくつかの地点、つまり、フラクタル次元の異なる地点から採取した試料を用いて、室内試験を行い、微細構造の観察および土粒子の物性評価を行った。微細構造観察は SEM(走査型電子顕微鏡)を用いて、物性評価は圧密非排水三軸試験を用いて行った。

その結果、すべり面に含まれる土粒子の粒度分布のフラクタル次元が微細構造、応力-ひずみ曲線、およびせん断強度と密接に関係することが示された。これらの結果は、既往研究の結果とも調和的であった。このことから、土粒子の粒度分布のフラクタル次元が、すべり面の空間的変動性の指標として活用できる可能性が示された。

キーワード：粒度分布， フラクタル次元， 微細構造， マイクロメカニズム物性， せん断強度， 空間的変動性， すべり面。

3. Introduction

地すべりは一般的にすべり面を伴う。すべり面の微細構造、地質・土質強度および土粒子の粒度分布といった特性は、地すべりブロック内の位置によって異なる。そのため、これらの特性を解明することは、地すべりの範囲を特定する際に、非常に重要となる。

これまでに、地すべりブロックの大きさを特定することを目的とした地質調査は一般的に行われているが、すべり面を構成する物質の物性評価に関する研究はあまり行われていない(Wen and Aydin 2003⁶⁾; Wen et al. 2007⁷⁾; Li and Aydin 2013⁸⁾; Li et al. 2013⁹⁾; Nian et al. 2013¹⁰⁾; Zou et al. 2013¹¹⁾; Jiang et al. 2015¹²⁾; Tang et al. 2015a¹³⁾)。一方で、すべり面に含まれる土粒子の粒度分布が空間的変動性を持つこと、すべり面の形成過程において、土粒子が細粒化することが、既往研究(Jiang et al. 2015⁴⁾; Tang et al. 2015⁵⁾)から分かっている。

地盤工学分野においては長年、フラクタル理論が、土粒子の粒度分布の指標の1つとして用いられてきた(Turcotte 1986¹⁴⁾; Tyler and Wheatcraft 1992¹⁵⁾; Perrier et al. 1999¹⁶⁾)。近年は、個数粒度モデルへの適用(Mandelbrot 1983¹⁷⁾; Turcotte 1986¹⁴⁾)だけでなく集合体粒度モデル(Tyler and Wheatcraft 1992¹⁸⁾)にも適応されている。Millan et al. (2003)¹⁹⁾は、土粒子の含有量とフラクタル次元との間には正の相関があり、フラクタル次元が増加することに伴い間隙/屈曲度が増加することを発見した。また、すべり面に含まれる土粒子の含有量は冠頂から舌端に向かって増加することから(HIGH 2002²⁰⁾; CUG 2015²¹⁾)、すべり面に含まれる土粒子の粒度分布のフラクタル次元がすべり面の変動指標として有効であると仮定し、中国三峡ダムの黄土坡地すべり地から採

取したボーリングコア試料を用いて、すべり面の微細構造と物性評価を行い、これらとフラクタル次元の関連性を明らかにした。さらに、本研究で得られた結果は、既往の研究結果(Jiang et al. 2015⁴); Tang et al.2015⁵)とも調和的であった。

4. フラクタル次元の概要

土粒子の微細構造やマイクロメカニズムは土粒子の粒度分布、堆積履歴、鉍物含有量など、様々な要素の影響を受けるが、これらの中で、土粒子の粒度分布は最も簡単に分析できる要素である。本研究では、土粒子の粒度分布のフラクタル次元と微細構造および物性評価の関連性について調査した。

土粒子とフラクタル次元の関係は式(a)で表すことができることから、下記(1)~(3)の手順で土粒子の粒度分布のフラクタル次元を求めた。

$$M_R/M_T=(R/R_{max})^{3-Fd} \quad \text{式(a)}$$

- M_T : 試料の全質量
- M_R : 試料のうち粒度 R 以下の全質量
- R : 粒度
- R_{max} : 試料中の最大粒度
- Fd : フラクタル次元

- (1) 粒度毎の $\log(M_R/M_T)$ および $\log(R/R_{max})$ を算出する。
- (2) (1) で得られた $\log(M_R/M_T)$ および $\log(R/R_{max})$ から回帰直線を求める。
- (3) フラクタル次元を式(b)により求める。

$$Fd = 3 - m \quad \text{式(b)}$$

(m : 回帰直線の傾き)。

※回帰直線は座標の原点を通過する。

5. 黄土坡地すべり

黄土坡地すべりは中国三峡ダムで最も大きな地すべりであり、湖北省巴東県に位置する。地質は中期三畳紀の巴東層(Badong Formation)であり、泥岩、泥質シルト岩および泥質石灰岩からなる。地すべりの舌端部の標高は海拔60~90mであり、冠頂部で600mとなっている。地すべりブロックの範囲は1.35km²であり、移動土塊量は、6,920万m³である(Tang et al. 2015a¹³)。図1に示すように、黄土坡地すべりは4つの小ブロックから成る。#1ブロックおよび#2ブロックが#3ブロックおよび#4ブロックとより不安定であることから(Tang et

al. 2015a¹³)、本研究では#1ブロックと#2ブロックから採取したボーリングコアサンプルを用いた。

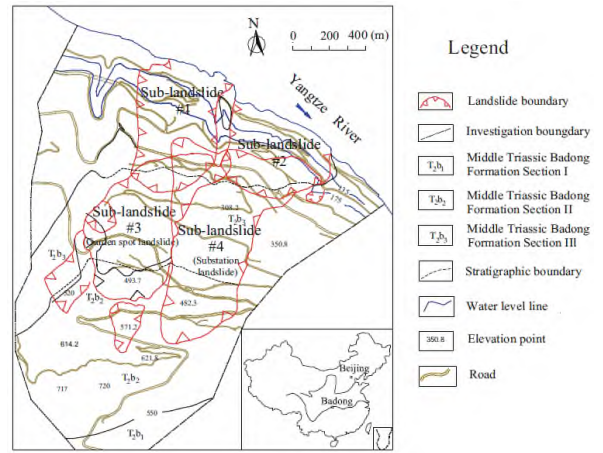


図1 黄土坡地すべりの地質図

6. すべり帯におけるフラクタル次元の空間的変動性

本調査では、HIGH(2002)²⁰で使用したボーリングコアと同じコアから試料を採取した。試料採取地点および粒度分布を図2に示す。また、図3に試料採取位置の断面図を示す。試料は、礫混じりのシルト質粘土であり、色は褐色で、粘着性が高い。

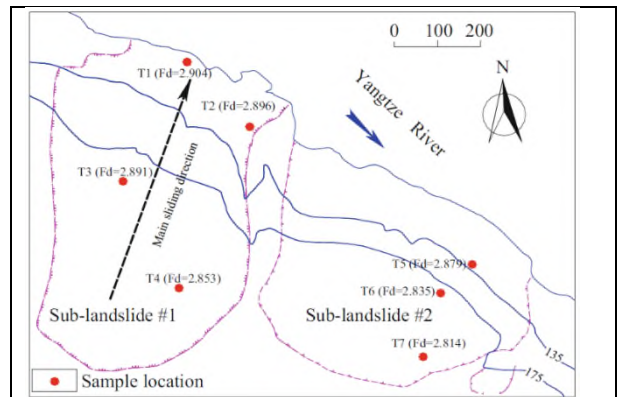


図2 試料採取地点および試料から求められたフラクタル次元

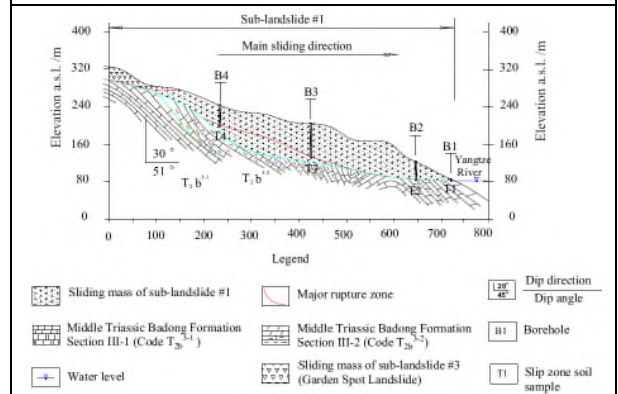


図3 試料採取位置(断面図)

7. 分析試料の作成および分析の実施

圧密非排水三軸試験では粒径が 2.0mm 以上の粒子は分析できないため、2.0mm 以上の粒子は排除した。分析試料は空気乾燥させたのち、中国の土壌試験方法 CNS-GB / T50123-1999 に従い、0.075 以下、0.075-0.25、0.25-0.5、0.5-1、1-2mm に分類したのち、フラクタル次元が 2.60、2.70、2.80、および 2.88 となる試料を作成した。

これら 4 試料の土壌試料の乾燥密度および含水率は 1.84g/cm^3 および 17.0% である。三軸試験実施のための試料作成手順および方法は ASTM (D698 2007) に従った。一方、SEM 観察のための試料作成手順は Cui and Jia (2013)²²⁾ に、分析方法は JEOL(1985)²³⁾ に従った。

8. ミクロパラメータに対するフラクタル次元の影響

各試料の空隙率、総細孔面積、全細孔周長、細孔数、平均細孔面積、および細孔の平均公称半径を SEM 観察により解析した。その結果、総空隙面積および平均空隙面積とフラクタル次元の間には負の相関があり、総空隙長、総空隙数および空隙の平均半径とフラクタル次元の間には正の相関がみられた。これらのことから、フラクタル次元が土壌の圧縮状況を示す指標となり得ると言える。

9. マクロパラメータに対するフラクタル次元の影響

圧密非排水三軸試験を行い、地盤の応力-ひずみ曲線およびせん断強度を調べた。

全試料で応力-歪み曲線は非線形となり、特定の方向に対して、土壌の軸差応力が増加した。さらに、軸差応力はフラクタル次元に比例して増加した。封圧が増加すると、フラクタル次元との相関はさらに高くなった。

10. せん断強度に対するフラクタル次元

せん断強度は、フラクタル次元に比例して増加する。これは、フラクタル次元の増加に比例し、微粒子の含有量が増加する (Havaee et al. 2015²⁴⁾) ためであり、表面積が増加することで、粒子間結合力が増加する (Baumgartl and Horn 1991²⁵⁾; Horn and Fleige 2003²⁶⁾) ためである。一方で、フラクタル次

元と内部摩擦角との相関性は、フラクタル次元と粘着力との相関性ほどは高くはならなかった。

11. 野外調査結果と室内試験結果の比較

試料の粘着力および内部摩擦角を求めるために、直接せん断試験 (HIGH2002²¹⁾) を行った。その結果、すべり面のせん断強度は地すべりブロックの下方に向かって増加することが分かった。また、土粒子の粒度分布のフラクタル次元も地すべりブロックの下方に向かって増加することから、土粒子の粒度分布のフラクタル次元がすべり面の空間的変動性の指標として適用できることを示している。さらに、この室内試験の結果は既往研究結果とも調和的であった。

以上のことから、土粒子の粒度分布のフラクタル次元がすべり面の空間的変動性の指標として使用することができると言える。さらに、土粒子の粒度分布のフラクタル次元は簡便な方法で決定することができるため、実用的である。

12. 議論

すべり面に含まれる土粒子の粒度分布のフラクタル次元が、空間的変動性と相関があることが本研究で明らかになった。このことから、土粒子の粒度分布のフラクタル次元が、地すべり変動の指標として用いることができることが示された。しかし、本研究で用いたデータ数は限られている上に、使用した試料は粒径 0.075mm~2.0mm のみである。従って、本研究は予察的なものであり、今後、更なる検証が必要である。

13. 終わりに

地すべり調査の実務において、他者にその正確性を伝えることは非常に難しい。そのために、数値化、3D 化など様々な手法が開発されている。しかしながら、これらの手法は時間もコストもかかるため、すべての調査で用いることができないのが現状であろう。今回紹介した研究分野は始まったばかりであり、活用の可能性については、今後の更なる議論が必要であるが、筆者は新しい視点からの研究が行われていることに、感銘を受けた。一方で、簡易的手法の中にも地質条件が含まれることにより、手法の精度が高まるように感じた。

14. 参考文献

- 1) 木下 篤彦・田上 弘樹・山村 充・柴崎 達也・古谷 綱崇・宮本 卓也(2013)：四国結晶片岩地すべりの高品質コアを用いたすべり面の特性評価，地すべり，Vol.50，No.4，p p. 151～159
- 2) 脇坂安彦・上妻睦男・綿谷博之・豊口佳之(2012)：地すべり移動体を特徴づける破碎岩一四万十帯の地すべりを例として－，応用地質，Vol.52，No.6，pp.231～247
- 3) 川村 喜一郎・大八木 規夫・北原 哲郎(2004)：すべり面粘土の帯磁率異方性と微細組織，地すべり，Vol.40，No.6，pp. 505～508
- 4) Jiang JW, Xiang W, Rohn J, Zeng W, Schleier M (2015) Research on water-rock (soil) interaction by dynamic tracing method for Huangtupo landslide, Three Gorges Reservoir, PR China. *Environ Earth Sci* 74(1):557-571
- 5) Tang H, Li C, Hu X, Wang L et al (2015a) Deformation response of the Huangtupo landslide to rainfall and the changing levels of the Three Gorges Reservoir. *Bull Eng Geol Environ* 74(3):933-942
- 6) Wen BP, Aydin A, Duzgoren-Aydin NS, Li YR, Chen HY, Xiao SD (2007) Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China. *Eng Geol* 93(3):82-98
- 7) Wen BP, Aydin A, Duzgoren-Aydin NS, Li YR, Chen HY, Xiao SD (2007) Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China. *Eng Geol* 93(3):82-98
- 8) Li YR, Aydin A (2013) Shear zone structures and stress fluctuations in large ring shear tests. *Eng Geol* 167:6-13
- 9) Li YR, Wen BP, Aydin A, Ju NP (2013) Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area. *Eng Geol* 154:106-115
- 10) Nian T, Feng Z, Yu P, Wu H (2013) Strength behavior of slip-zone soils of landslide subject to the change of water content. *Nat Hazards* 68(2):711-721
- 11) Zou L, Wang S, Lai X (2013) Creep model for unsaturated soils in sliding zone of Qianjiangping landslide. *J Rock Mech Geotech Eng* 5(2):162-167
- 12) Jiang JW, Xiang W, Rohn J, Zeng W, Schleier M (2015) Research on water-rock (soil) interaction by dynamic tracing method for Huangtupo landslide, Three Gorges Reservoir, PR China. *Environ Earth Sci* 74(1):557-571
- 13) Tang H, Zou Z, Xiong C et al (2015b) An evolution model of large consequent bedding rockslides, with particular reference to the Jiweishan rockslide in Southwest China. *Eng Geol* 186:17-27
- 14) Turcotte DL (1986) Fractals and fragmentation. *J Geophys Res Solid Earth* 91(B2):1921-1926
- 15) Tyler SW, Wheatcraft SW (1992) Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci Soc Am J* 56(2):362-369
- 16) Perrier E, Bird N, Rieu M (1999) Generalizing the fractal model of soil structure: the pore-solid fractal approach. *Geoderma* 88(3):137-164
- 17) Mandelbrot BB (1983) The fractal geometry of nature. Macmillan, New York
- 18) Tyler SW, Wheatcraft SW (1992) Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci Soc Am J* 56(2):362-369
- 19) Millan H, Gonzalez-Posada M, Aguilar M, Dominguez J, Cespedes L(2003) On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions. *Geoderma* 117(1):117-128
- 20) HIGH (2002) Detailed investigation report of Huangtupo landslide in Badong County, Hubei. Hubei Institute of Geological Hazard, Jingzhou
- 21) CUG (2015) Special report on formation mechanism and control of Huangtupo landslide in Badong County, Hubei. China University of Geosciences, Beijing
- 22) Cui ZD, Jia YJ (2013) Analysis of electron microscope images of soil pore structure for the study of land subsidence in centrifuge model tests of high-rise building groups. *Eng Geol* 164:107-116
- 23) JEOL (1985) JSM-35CF scanning microscope instruction manual no. IEP35CF-1. JEOL, Tokyo
- 24) Havaee S, Mosaddeghi MR, Ayoubi S (2015) In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran. *Geoderma* 237:137-148
- 25) Baumgartl T, Horn R (1991) Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil Tillage Res* 19(2):203-213
- 26) Horn R, Fleige H (2003) A method for assessing the impact of load on mechanical

stability and on physical properties of soils.
Soil Tillage Res 73:89–99