

土の構造とメカニクス—ミクロからマクロへ—

2. 土の微視的構造を探るための実験的研究 (その3)

小田 匡 寛 (おだ まさのぶ)

埼玉大学教授 工学部建設工学科地圏システム講座

2.2 電子顕微鏡による土の微視的構造の可視化

2.2.2 土の微視的構造—顕微鏡で土の何が見えるか— (1) はじめに

土を拡大して見れば、その性質を理解する上で重要な何かが見えてくるに違いない。これが顕微鏡を前にした我々の素直な期待である。しかし漠然と拡大しても、何かはいつも期待どおりに見えるわけではない。目的のあいまいな観察者には、しばしば何も見えないか、あるいは実際には見えていても、見る眼を持たないかのどちらかである。また見る対象によっては、顕微鏡以外の機器、例えばポロシメーター、X線、MRI (Magnetic Resonance Imaging)の方が優れている場合もあろう。また拡大するにしても、最大倍率 10^3 の光学顕微鏡で十分なのか、あるいは 10^5 倍まで拡大できる電子顕微鏡が必要なのか、その判断によっても実験方法は大きく違ってくる。いずれにしても、土の何を見たいかを明確にしておくことが、この種の観察を成功させるための重要な前提である。

顕微鏡観察は、普通、土の構造を直接見るために行われる。しかし土の構造といっても、必ずしも明確な定義が定着しているわけではない。土の構造を「分析的・定量的には定義できない土のある種の性質」の意味に使う場合がある。“低位の構造”、“高位の構造”などの用語法は、その例である。土の経てきた多様な歴史を考えると、やむを得ないことかもしれない。また構造に相当する英語訳には“fabric”, “structure”, “texture”等があ

り、さらに紛らわしい。土の構造を、ここでは便宜上、構成要素である土粒子の鉱物・形態学的性質と、粒子集合が作る空間的、幾何学的特徴の総体と定義し、表—2.2の要素(構造要素)によって具体的に記述されるものとする。

本節のねらいの一つは、土の構造と力学との接点を明らかにすることにある。そのためには、表—2.2の構造要素は少なくとも一般的に定義され、また必要ならば、実験などによって実測できるものでなければならない。この必要に応えるために、近年、ステレオロジーの手法を使って土の構造をテンソルとして定量化する研究が始まっている⁵⁷⁾。また一方、現代的な分析機器が導入され、土の構造に関する知識も飛躍的に増大している⁵⁸⁾。本節では、顕微鏡で土の何が見えるかを最近の成果を踏まえて解説し、構造と力学の接点を探ってみることとする。

(2) 砂の土粒子構造—せん断帯の構造—

① 砂の構造解析の方法

(a) 粒子の卓越配列

砂は、普通球状粒子の集まりとして理想化される。しかし実際には板状や棒状の粒子を含んでいて、むしろ楕円体の形をした粒子から成ると考えておいたほうが実際に近い。このような楕円体の形状をした粒子は、重力や水の流れの影響を受けて、その長軸・短軸を特定の方向に向けて堆積する。この粒子の卓越配列が作る構造異方性は、砂の変形・強度の方向依存性(異方性)に強い影響を及ぼすことから、70年代の前半頃から土の研究者

表—2.2 土の構造要素 (光学・電子顕微鏡観察による)

	観察対象	構造要素	備考 (参考文献: 例)
粒子の鉱物・形態学的特徴 (粒子の大きさに分割して観察できる性質)	粒 子	粒度 鉱物組成 結晶度 粒子形状 粒子表面組織	Brewer (1964) ⁴⁴⁾ 柳沢 (1993) ⁴⁵⁾ Mitchell (1976) ⁴⁶⁾
	粒 子	配位数 粒子の配向性 粒子接平面の配向性	Field (1963) ⁴⁷⁾ Lafeber (1956) ⁴⁸⁾ , Oda (1972) ⁴⁹⁾ Field (1963) ⁴⁷⁾ , Oda (1972) ⁴⁹⁾
土粒子の集合が作る空間的、幾何学的特徴 (粒子の大きさに分割しては観察できない性質)	粒子間	粒子間縫合度 粒子間結合物質 粒子間縫合度 (セメンテーション)	Taylor (1950) ⁵⁰⁾ , Kahn (1956) ⁵¹⁾ Mitchell (1976) ⁴⁶⁾ 陶野 (1975) ⁵²⁾
	空 隙	間隙率、間隙比 空隙の寸法・形状と配向性	Windisch and Souli (1970) ⁵³⁾ Ingles et al. (1971) ⁵⁴⁾
	粒子、空隙の空間的変化 (例: せん断帯)	粒子の配向性、粒子接平面の配向性などの空間的変化 間隙 (間隙比) の空間的変化	Morgenstern et al. (1967) ⁵⁵⁾ Oda, M. and Kazama, H. (1998) ⁵⁶⁾

によって精力的に研究されて来た^{49),59)}。

砂粒子の卓越配列を調べるには X 線を利用する方法もあるが、ここでは接着剤で固定した砂を任意の断面で切断し、その切断面上で粒子の見かけの長軸方向を測る方法について説明しよう。今、切断面上で粒子の見かけの長軸方向を単位ベクトル m で表し、その単位ベクトルが基準軸となす角を θ とする。ランダムに選んだ M 個の粒子で θ を測り、その頻度分布から次の諸量を計算する⁶⁰⁾。

$$\tan 2\bar{\theta} = \frac{\sum \sin 2\theta}{\sum \cos 2\theta} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta = \frac{100}{M} \sqrt{(\sum \cos 2\theta)^2 + (\sum \sin 2\theta)^2} \quad (\%) \dots\dots\dots (2)$$

ここで記号 Σ は、ランダムに選んだ M 個の総和を意味している。 $\bar{\theta}$ は vector mean direction と呼ばれる見かけの長軸の卓越方向を示し、また Δ は vector magnitude と呼ばれる配列強度の指標である。頻度分布が一樣であれば、 $\Delta = 0\%$ であり、一方完全な定方向配列であれば、 $\Delta = 100\%$ となる。さらに Δ は、卓越配列の統計的な有意性の検定に使われるだけでなく⁶⁰⁾、本講座の別の章⁶¹⁾で述べられるとおり、ファブリックテンソルの不変量とも密接に関係していて、物理的に明確な意味を持つ構造指標である。

(b) 隣接粒子との関係

砂粒子は、それぞれ隣接粒子群によって取巻かれている。隣接粒子群との関係は、一つの構造要素として重要な位置を占め、i) 接点数 (配位数) と ii) 接点での接平面の方向とによっておおむね表される⁴⁹⁾。接点数の実測例は、礫粒径での報告⁴⁷⁾を除けば、全く無い。しかし、ガラスビーズや鉛の散弾を使った実測例は多く、その結果から、平均的な接点数は間隙比とよい相関関係にあることが分かっている。一方接平面の方向は、その法線方向の単位ベクトル n によって表すことができる。実際の砂で n の方向を定めるには、特殊な装置 (ユニバーサルステージ付きの顕微鏡) を必要とするが、実測された例がある^{47),49)}。多数の粒子からなる砂は無数の単位ベクトルの集合と見なせるので、 n を含む微小な立体角 $d\Omega$ の中に入る単位ベクトルの割合を、 $E(n)d\Omega$ と書くことにする。この時、 $E(n)$ はベクトル n の密度関数であって、接点における接平面の方向性に依存している。密度関数 $E(n)$ は、砂の力学特性を理解する上で極めて重要である。特に、塑性変形に伴う $E(n)$ の変化は、ダイレイタンスや異方塑性硬化など、砂の基本的性質を理解する上で欠くことのできない基礎知識となっている⁵⁸⁾。

(c) 間隙の大きさ・形とその配列

以上の解説からも明らかなおと、砂の構造異方性は少なくとも二つのタイプが識別できる。すなわち、i) 粒子の長軸方向 m の卓越配列によるものと、ii) 法線ベクトル n の卓越配列によるものとの二つである。たとえ砂が球粒子から構成されていても、後者の構造異方性は存在しうること注意到しよう。

このような土粒子の異方的な配列は、当然ながら、それらを取巻く空隙の形にも影響するはずである。砂の塑性変形によって、接平面の法線ベクトル n は圧縮方向へ集中するが、それと平行して、圧縮方向に伸びる「柱」状の粒子構造が形成される。最近の研究⁶²⁾によると、「柱」状構造の形成に伴って、空隙も圧縮方向に連結し、巨視的に見れば、柱と平行に伸ばされた形を取っているらしい。すなわち、iii) 伸びた空隙による異方性が加えられねばならない。この伸びた空隙は、それと直交する圧縮で容易に潰れるが、もし非排水の繰返し条件下でこれが起これば、大きな過剰間隙水圧の発生の原因となると考えられる。

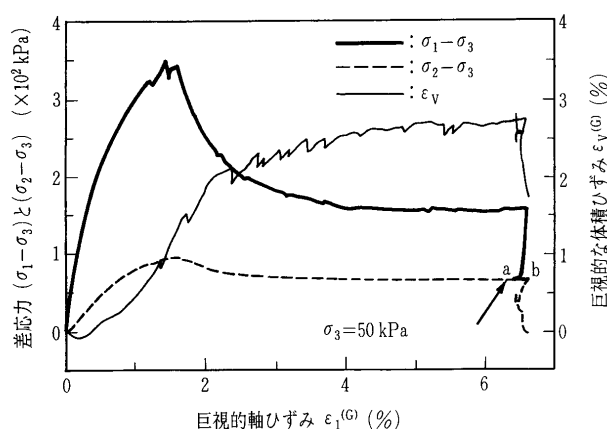
間隙比は、砂の変形・強度を左右する基本的な物理量として、現在でも不動の地位を占めている。この観点から、間隙比の空間分布に大きな関心が寄せられている。間隙比の空間分布を明らかにするには、X 線 CT スキャンの方法が有力であって、事実、せん断帯形成を解明する有力な実験手法として広く利用されている⁶³⁾。しかし、X 線 CT スキャンといえども万能ではなく、間隙の大きさや形を三次元で見るには、MRI の利用⁶⁴⁾など新たな観察方法の導入が不可欠である。

② せん断帯の構造

土構造物の安定は、せん断帯上の力の極限釣合いを基本として解析される。このこともあって、せん断帯の形成過程やその力学的解釈は、土の力学に関心を持つ我々には特別の意味を持っている。さらに近年、パイファクション理論の登場により、せん断帯形成を扱う理論の骨格が明らかにされ、新たな展開を見せていることは周知のとおりである⁶⁵⁾。ここでは、土の力学との接点に留意しながら、光学顕微鏡を通してせん断帯の何が見えるかを示してみよう。

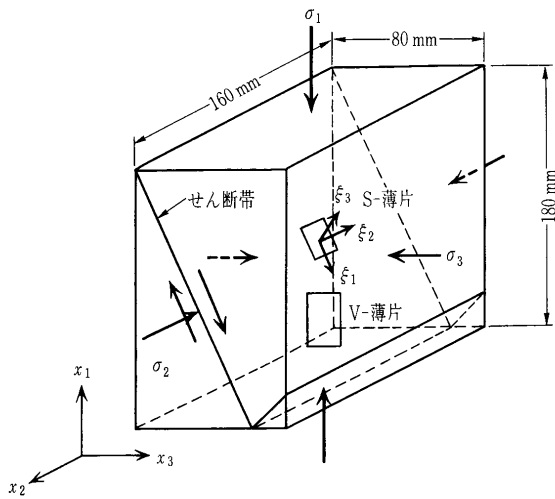
(a) 平面ひずみ実験⁵⁶⁾

豊浦砂、相馬砂、ティチノ砂を空中落下法で堆積させ、供試体 (160 mm × 180 mm × 80 mm) を作る。この供



図—2.24 豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験結果

(既定の軸ひずみを与えた後、軸荷重を a 点まで除荷する。その状態を維持しつつ、供試体内の水を接着剤で置換する。ひずみや応力の変化をモニターし、接着剤の置換やその後の固結に伴う乱れを最小限に抑えている。)



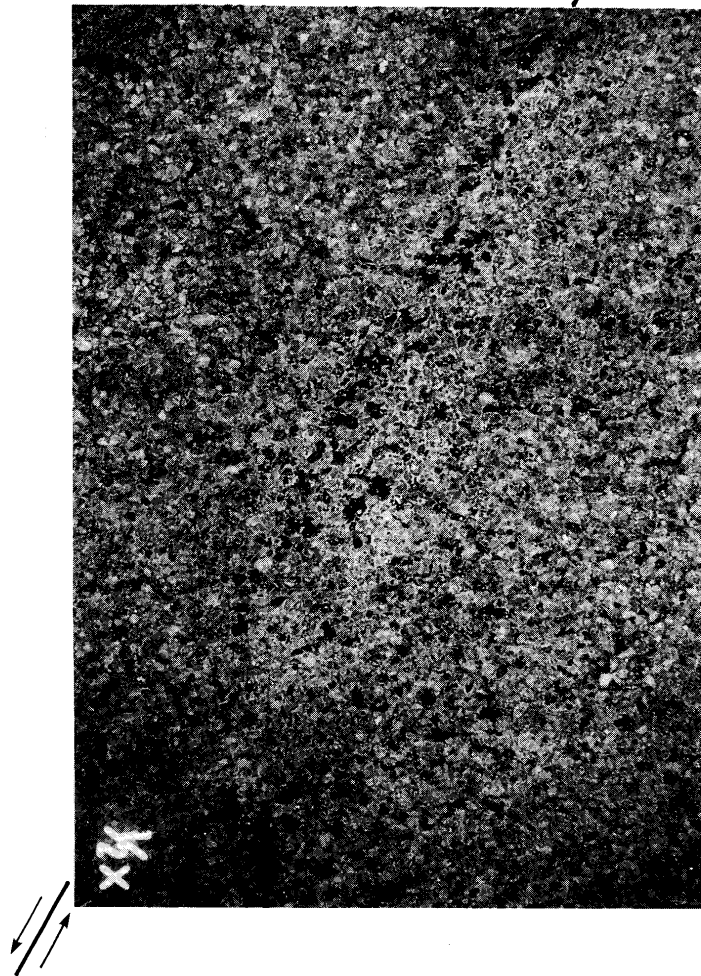
図—2.25 固結供試体の薄片製作と座標軸の選択

(観察断面は、せん断帯に直行するV-断面と、せん断帯に含まれるS-断面の二つである。なお、座標軸は次のように選ばれた。 x_1 = 最大主応力軸方向； x_2 = ひずみを拘束する方向で、中間主応力方向と一致； x_3 = 最小主応力方向。)

試体を用いて標準的な排水の平面ひずみ試験を行い、ピーク強度付近から残留状態までの種々のひずみ履歴を砂に与える(図—2.24)。所定のひずみに達すれば、軸荷重の約半分を除荷した後(図—2.24のa点)、その状態を保ちつつ、供試体内の水を接着剤で置換する。接着剤が固まるのを待ってせん断帯に直交するV断面とせん断帯を含むS断面で切断し、各切断面に平行な薄片を作る(図—2.25)。光学顕微鏡により薄片を観察することによって、せん断帯の土粒子構造が調べられた。

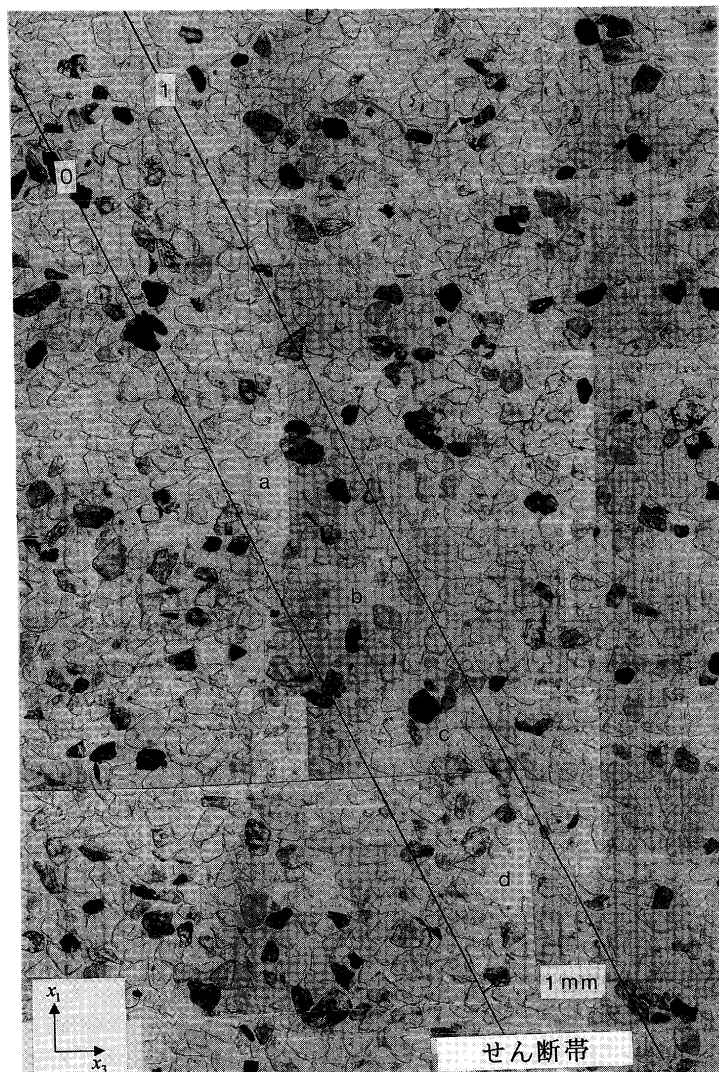
(b) 観察結果

裸眼で切断面を観察しても、せん断帯の存在に容易に気づかされる。比較的大きな気泡が、せん断帯に沿って帯状に並んで見えるためである(図—2.26)。気泡のできる理由は、空隙の大きさがせん断帯の内と外で不連続に変化している、接着剤が均一に浸透しないためであると考えられる。大きな空隙の存在は、顕微鏡下での観察でも容易に確認できる(図—2.27)。また土構造の解析結果によると、空隙比はその砂の最大空隙比に近いものであることが分かっている⁵⁶⁾。同様な事実は、X線



図—2.26 Ticino 砂のV-断面観察

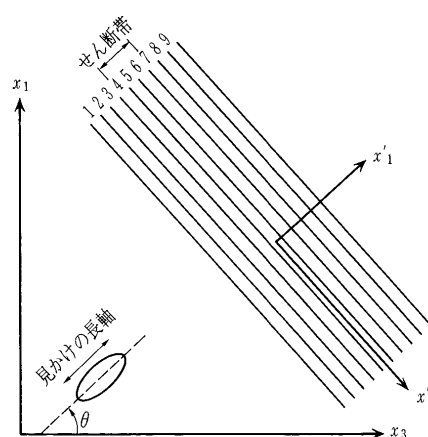
(着色した水平な層のずれから分かるように、右上から左下に走るせん断帯が見られる。せん断帯に沿って、黒い空隙が並んでいる。なお着色した水平層は、およそ50 mmの間隔で置かれている。)



図—2.27 豊浦砂のせん断帯の顕微鏡写真
(図中の0-線は、せん断帯の中心線を、また、1-線は
上限線をそれぞれ示す。両線の距離はおおよそ1mm
である。aからd点に大きな空隙が見える。)

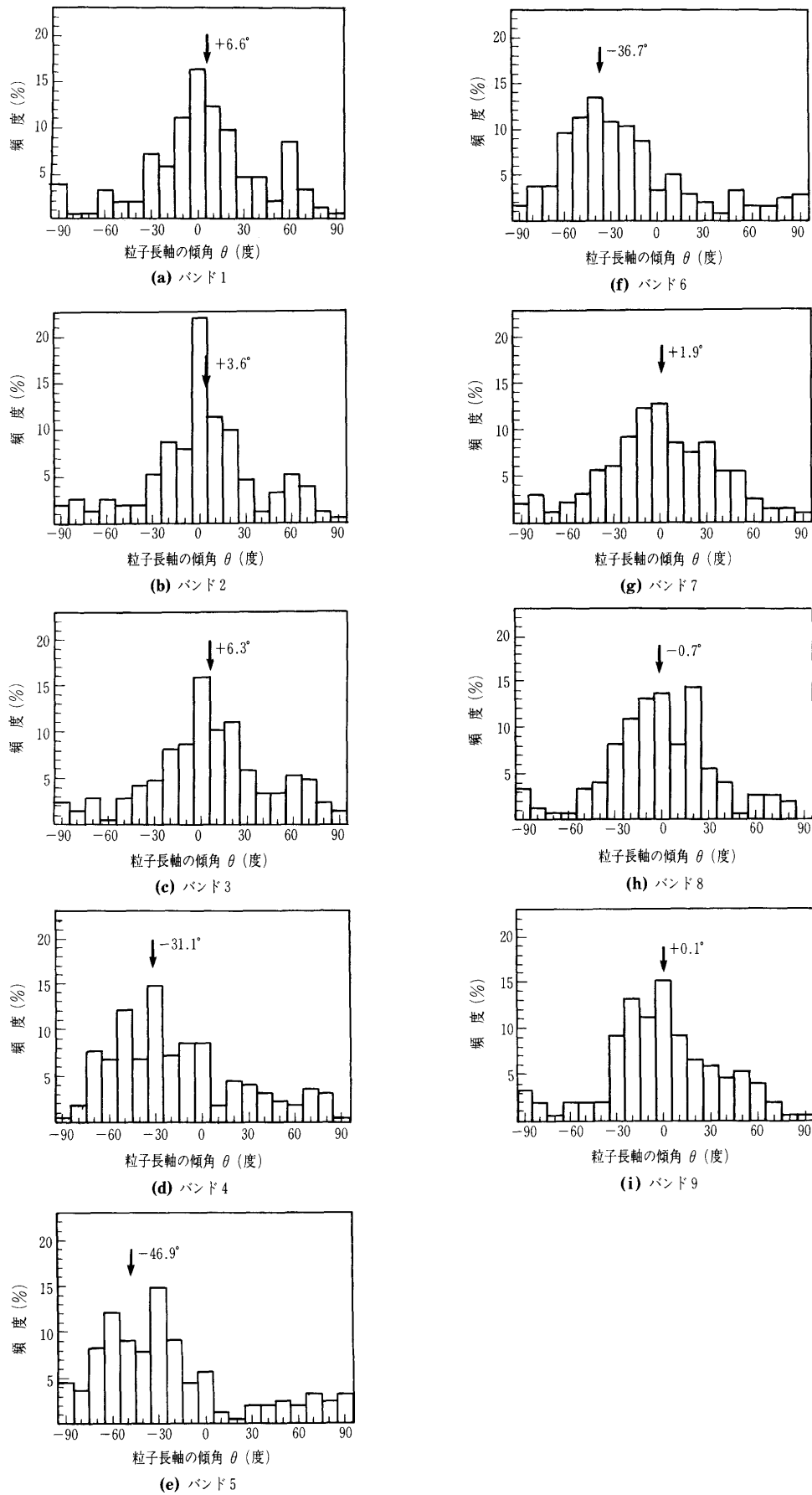
CT⁶³)や局所的なひずみ計測⁶⁶)でも認められていて、せん断帯の間隙比がせん断帯の外と比べて著しく大きくなることは、よく知られた実験事実である。しかし顕微鏡下では、さらに粒子径と比較しても大きな径の空隙の存在が確認できる点に注意しよう(図—2.27のa, b, c点など)。すなわち、せん断帯の膨張は大きな空隙の生成と共に起こり、最終的には、生成と消滅が拮抗する(体積ひずみ一定の)残留状態に移行すると考えられる。このような大きな空隙の生成と消滅を伴う変化は、個別要素法による数値シミュレーションによっても再現されている⁶⁷)。

せん断帯のもう一つの大きな特徴として、活発な粒子回転がせん断変形を支えている点を挙げねばならない。 x_1x_3 -断面上のせん断帯近傍をその境界線に平行に九つのバンドに分割し、バンド毎に粒子の見かけの長軸方向が基準軸(最小主応力軸 x_3)となす角 θ を測る(図—2.28)。その結果を、豊浦砂を例として、 θ の頻度分布図として図—2.29に示した。さらに図—2.30は、式(1)で定義する見かけの長軸の卓越方向 $\bar{\theta}$ をバンド数に対し

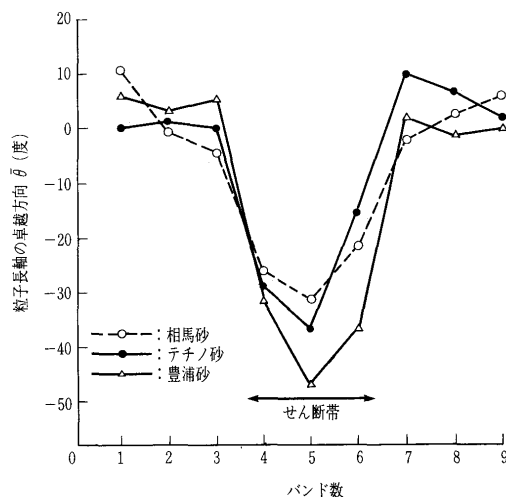


図—2.28 せん断帯近傍の带状バンド分割(1~9)と粒子長軸の傾角 θ (バンド4~6の3本は、せん断帯中に含まれる。)

てプロットして、粒子長軸の卓越方向がせん断帯の中央部に向かって大きく回転している様子を捉えている。もちろん、この卓越方向の変化が直ちに粒子回転を意味するものではないが、しかし粒子回転無しには、図—



図—2.29 バンド 1~9 の長軸方向の頻度分布
(図中の矢印は、式(1)で定義する $\bar{\theta}$ であり、卓越方向を示す。)



図—2.30 バンド1～9における $\bar{\theta}$ の変化

2.30の結果を説明できないことは明らかである。

以上の観察は、我々に次のことを教えている。その第1は、粒子回転がせん断変形に果たす役割の大きさである。砂のせん断は、粒子間すべりを基調とするNewlandとAllely (1957)のせん断モデル⁶⁸⁾で普通説明される。しかしせん断帯での観察結果は、粒子回転がせん断ひずみの主役であって、粒子間すべりはむしろ脇役に過ぎないことを強く示唆している。この視点に立てば、例えば、ダイレイタンスーの意味は再検討されなければならない、また少なくとも、せん断帯の力学的解釈はNewlandとAllelyのモデルのそれとは大きく異なるはずである。

第2に注目すべき点は、せん断帯の狭い領域に正から負に変わる粒子の回転勾配が存在することである(図—2.30)。この回転勾配は、せん断帯の形成に偶応力が深くかかわっている可能性を示唆している。せん断帯中に大きな間隙ができる事実は、あるいは偶応力のような特殊な応力条件の結果として説明できるかもしれない。例えば、Mühlhausら(1987)⁶⁹⁾は、せん断帯の幅を偶応力の存在を考慮した理論によって説明している。また岩下ら(2000)⁶⁷⁾は、個別要素法による数値実験において、小さいながら偶応力の存在を検証した。これらの研究に言及する余裕はないが、しかし、顕微鏡観察の結果が連続体の力学理論の最先端と密接につながっていることを示す格好の例である。

参考文献

- 44) Brewer, R.: Fabric and Mineral Analysis of Soils, John Wiley & Sons, Inc., 1964.
- 45) 柳沢栄司: 粒子形状, 粒状体の力学, 粒状体力学に関する国内委員会, 土質工学会, pp. 61~66, 1993.
- 46) Mitchell, J. K.: Fundamentals of Soil Behaviors, John Wiley & Sons, Inc., pp. 24~46, 1976.
- 47) Field, W. G.: Towards the statistical definition of granular mass. Proc. 4th A. and N.Z. Conf. On Soil Mech., pp. 143~148, 1963.
- 48) Lafeber, D.: Soil structure concepts, Engineering Geology, 1(4), pp. 261~290, 1966.
- 49) Oda, M.: Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, Soils and Foundations, 12(1), pp. 17~36, 1972.
- 50) Taylor, J.M.: Pore-space reduction in sandstone, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists, 34, pp. 701~716, 1950.
- 51) Kahn, J. S.: The analysis and distribution of the properties of packing in sand-size sediments, J. Geology, 64, pp. 385~395, 1956.
- 52) 陶野郁雄: 堆積物の続成作用と力学性状, 地質学雑誌, 81(9), pp. 547~558, 1975.
- 53) Windisch S. J. and Soulie, M.: Technique for study of granular materials, J. Soil Mech. Found. Divi., ASCE, 96 (SM4), pp. 111~112, 1970.
- 54) Ingles, O. G. and Lee, L. K.: The influence of initial grain shape and pore anisotropy on strength of brittle soils, Géotechnique, 21(2), pp. 143~153, 1971.
- 55) Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S.: Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear, Géotechnique, 17, pp. 309~328, 1967.
- 56) Oda, M. and Kazama, H.: Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, Géotechnique, 48(4), pp. 465~481, 1998.
- 57) Kuo, C.-Y., Frost, J. D. and Chameau, J.-L. A.: Image analysis determination of stereology based fabric tensor, Géotechnique, 48(4), pp. 515~525, 1998.
- 58) Oda, M. and Iwashita, K. (editors): Mechanics of Granular Materials, A.A. Balkema, pp. 224~318, 1999.
- 59) Arthur, J. R. F. Dunstan, T.: Inherent anisotropy in a sand, Géotechnique, 22(1), pp. 115~129, 1972.
- 60) Curray, J. R.: Analysis of two-dimensional orientation data, J. Geology, 64, pp. 117~131, 1956.
- 61) 小田匡寛: 土の構造と力学との間, 土と基礎, 2002.
- 62) Oda, M., Kawamoto, K., Suzuki, K., Fujimori, H. and Sato, M.: Microstructural interpretation on reliquefaction of saturated granular soils under cyclic loading, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(5), pp. 416~423, 2001.
- 63) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F.: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, Géotechnique, 46(3), pp. 529~546, 1996.
- 64) Nakagawa, M., Waggoner, R.A. and Fukushima, E.: Non-invasive measurement of fabric of particle packing by MRI, In Mechanics of Granular Materials (eds: Oda, M. and Iwashita, K.), Balkema, pp. 240~248, 1999.
- 65) Vardoulakis, I. and Sulem, J.: Bifurcation Analysis in Geomechanics, Blackie Academic & Professional, 1995.
- 66) Yoshida, T., Tatsuoka, F., Siddiquee, M. S. A. Kamegai, Y. and Park, C.-S.: Shear banding in sands in plane strain compression, Symp. on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, A.A. Balkema, (eds. R. Chambon, J. Desrues and I. Vardoulakis), pp. 165~179, 1994.
- 67) Iwashita, K. and Oda, M.: Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method, Powder Technology, 109, pp.192~205, 2000.
- 68) Newland, P. L. and Allely, B. H.: Volume changes in drained triaxial tests on granular materials, Géotechnique, 7, pp. 17~34, 1956.
- 69) Mühlhaus, H. B. and Vardoulakis, I.: The thickness of shear bands in granular materials, Géotechnique, 37(3), pp. 271~283, 1987.