

地盤の異方性

2. 土と岩盤の構造異方性

小 田 匡 寛 (おだ まさのぶ)
 埼玉大学教授 工学部建設工学科

風 間 秀 彦 (かざま ひでひこ)
 埼玉大学 工学部建設工学科

2.1 はじめに

土や岩盤の力学は、従来、材料が水理・力学的に等方であることを前提にして組み立てられてきた。その扱いに慣れた我々には、等方が正常で、異方は何らかの異常であるかのごとく感じられる。

しかし、最近の20年間の土と岩盤の研究^{1)~26)}は、この等方の前提が土や岩盤の実体に合った理想化であるというよりも、むしろ、力学的な解析を容易にするための便宜的な仮定に過ぎない、と要約できるのではあるまいか。数値解析法の飛躍的な発展を考えれば、異方性など材料本来の性質への関心が高まり、より高い精度の力学パラメーターが実務で要求されるようになることも、当然な成り行きといえよう。

力学に関心のある技術者の立場からすれば、土・岩盤の水理・力学的、あるいは熱的な異方性さえ分かれば事足りるであろう。事実、本講座の残りの大部分は、それらの記述に当てられるはずである。しかし、これら力学的異方性は、含まれる土粒子が特定の方向に卓越して配列するなど、材料の構成要素（例えば、土粒子、空隙、亀裂）の幾何的異方性（構造異方性）と深くかかわっている。本章では、幾何的側面から見た土・岩盤の異方性について、例を挙げながら解説することにする。今後、構造とは、材料の構成要素の空間的・幾何学的配列をいい、構造異方性とは、これらの構成要素の特定方向への卓越配列による異方性を意味するものとする。

2.2 異方性の構造的分類

図-2.1, 2.2は、土と岩盤に現れる異方性を分類し、それら模式図、力学的異方性との関係および関係する文献を示している。図中の◎印は、実務レベルでも異方性を具体的に考慮して設計すべきことを、また○印は、技術的判断に異方性を加味するこ

とが望ましく、少なくとも、研究レベルでは異方性を無視してはならないことを意味するものとする。

◎から×まで、重要性は落ち、×は無視してよいことを示す。また?印は、現段階では実験結果が不足しているために、判断を保留することを示す。図の作成に当たって、本講座執筆全員が検討に加わっているものの、最終的な責任は本章執筆者にある。

以下、土と岩盤に分けて異方性のタイプを順を追って説明する。

	模 式 図	主 な 主 質	力学的異方性			文 献
			透 水	変 形	強 度	
S-1 構成要素の卓越配列による異方性	 S-1-1 土粒子の配列	細 粒 土	○	△	○	Morgenstern, et al. ¹⁾ McConnachie ²⁾ 風間, 他 ³⁾
	 S-1-2 ベッドの配列	細 粒 土	○	△	○	Lafeber, ⁴⁾ Arthur, et al. ⁵⁾ Oda, et al. ⁶⁾ Miura, et al. ⁷⁾
	 S-1-3 空隙の配列	細 粒 土	○	△	?	Sleeman ⁹⁾ Brewer ¹⁰⁾ 阿久津 ¹¹⁾
S-2 粒子間接点の卓越配列による異方性	 S-2	主 に 粗 粒 土	×	○	△	Kallstenius, et al. ¹²⁾ Oda ¹³⁾ Mullis, et al. ¹⁴⁾
S-3 互層による異方性	 S-3	細 粒 土 と 粗 粒 土 の 互 層	◎	○	◎	Milligan, et al. ¹⁵⁾ Oda, ¹⁶⁾

図-2.1 土の構造異方性

◎:極めて重要, ○:重要, △:重要でない, ×:無視できる, ?:不明

講 座

	模 式 図	岩 種	力学的異方性			文 献
			透水	変形	強度	
R-1 弱面の卓越配列による異方性	片理 	広域変成岩	○	○	◎	Donath ¹⁷⁾ Attewell, et al. ¹⁸⁾
	R-1-1 片理の配列					
	へき開 		△	△	○	
R-1-2 へき開の配列						
R-1-3 節理の配列		すべての岩種	◎	◎	◎	Gaziev, et al. ²⁰⁾ Thorpe, et al. ²²⁾ Rouleau, et al. ²³⁾ Thill, et al. ²¹⁾ Hayashi ¹⁹⁾ 佐野, 他 ²⁴⁾ Oda ²⁵⁾
R-2 互層による異方性		堆積岩・一部の火山岩	◎	◎	◎	Mutschler, et al. ²⁶⁾
R-3 結晶軸の卓越配列による異方性	結晶軸 	変成岩・一部の火成岩	×	△	×	

図-2.2 岩・岩盤の構造異方性
記号は図-2.1に同じ

2.3 土の場合

2.3.1 構成要素の卓越配列による異方性 (S-1)

土の基本となる構成要素を、土粒子、土粒子の集合体であるペッド、間隙とすれば¹⁰⁾、それらの配列による異方性は、S-1-1、S-1-2、S-1-3の三つに分けられる。

1) 土粒子の卓越配列による異方性 (S-1-1)

粘土は板状の粘土鉱物を主要成分とし、また砂も楕円体に近い形状の粒子からなっている¹⁸⁾。このように球状とは掛け離れた粒子が、重力や水の流れの影響を受けながら堆積すれば、等方とは異なる構造が形成されると予想される。事実、河床に堆積した砂の例(図-2.3)が示すように、砂粒子の長軸はほぼ水平に配列し、構造異方性が明らかである。しかし、より注意深く計測すると、卓越方向は厳密には水平と言えず、水平と10°~30°で上流側に傾斜して

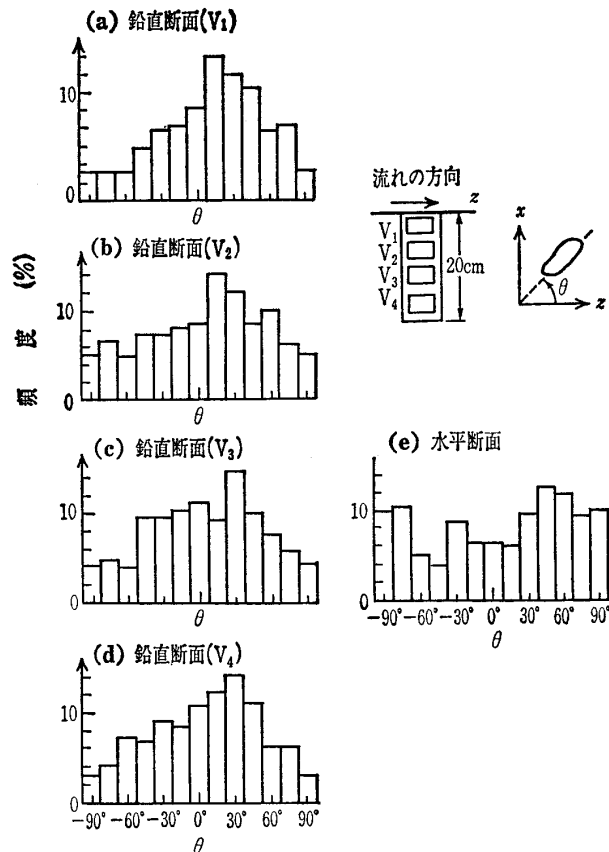


図-2.3 乱さない河川砂の構造異方性
不攪乱砂の鉛直断面の粒子配列を、河川の流れの方向(z)と粒子長軸となす角(θ)の頻度図として示す。

堆積している。すなわち、粒子の卓越配列による異方性は、重力のみならず、水の流れにも影響を受けることが分かる。

粒子が細粒でコロイドの性質を帯びれば、重力に代わって、粒子の帯電による静電気力が支配的な力となる。静電気力には方向性がなく、したがって、堆積構造は最初等方的に近い構造を取ると考えてよい(綿毛構造)。しかし、堆積が進み、土がある深さに埋没すれば、土の重量による圧密を受ける。この圧密による重力方向の変形は、板状の粘土粒子を水平方向に回転させる効果を持っている。口絵写真-24は、12.8 kgf/cm²で標準圧密したカオリン粘土の鉛直断面を走査型電子顕微鏡で見たものであるが、水平(圧密方向に垂直)に整然と並んだ粒子がよく示されている³⁾。実地盤の粘土にも類似の土粒子配列が多数報告されている^{27)~29)}ことから考えれば、S-1-1タイプの異方性は細粒土に一般的な堆積構造とみてよかろう。粗粒土の場合、粒子の長軸の卓越方向とせん断方向との角度によって、発揮される内

部摩擦角が最大で15%程度違ってくる³⁰⁾。一方、細粒土の場合、S-1-1タイプの構造異方性は、透水係数の異方性に重要な影響を及ぼすものの³¹⁾、有効応力で整理した摩擦角には目立つ影響を及ぼさないとされている^{32)~34)}。このような違いは次のように説明されている。粗粒土の場合、初期の堆積構造は変形後も残るため、強度異方性の原因となりうる³⁵⁾。一方、細粒土の場合、変形に伴って粒子の回転が容易に起こり、その結果、初期の構造異方性は完全に消し去られる³⁵⁾。そのために、初期の構造がどのようなものであっても、摩擦角への影響は小さいと考えられる。

2) ペッドの卓越配列による異方性 (S-1-2)

コロイド状の粒子の堆積では、水中を浮遊する間に、静電気力の働きでペッドとなることが知られている^{10), 36)}。S-1-2は、ペッドの配列による異方性の可能性を示唆しているが、S-1-1と区別できるか、あるいは区別すべきかどうかは、今のところデータが無く不明である。

3) 空隙の伸びによる異方性 (S-1-3)

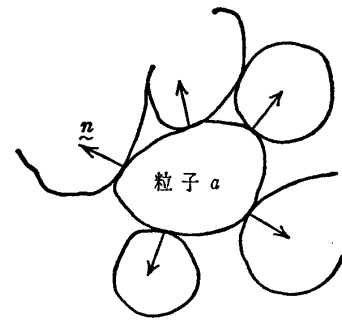
空隙が土の一つの構成要素であることを思えば、S-1-3の異方性は当然存在してよい。ここでは、一つの例を挙げておく。

土によっては、時に亀裂状の土構造が観察される。関東ロームでは、鉛直亀裂が発達して、亀裂帯と呼ばれる層を形成することが知られている^{11), 37)}(口絵写真—25)。この亀裂状の構造が細長く連続した空隙ではないにしても、口絵写真—25の例はS-1-3と見なせるタイプの異方性と考えてよい。

今のところ実験等による検証は無いが、亀裂に沿う水の流れやすさから考えて、口絵写真—25の亀裂帯が鉛直方向に大きな透水係数をもっても不思議はない。

2.3.2 粒子接点方向の卓越配列による異方性 (S-2)

図—2.4は、粒子aが他の粒子によって囲まれている様子を模式的に描いたものである。粒子aが周囲の粒子によってどのようにその動きを拘束されているかを知るには、①粒子を取り巻く粒子数(拘束接点数)、②接点の方向 n (接点での接平面に立てた単位の法線ベクトル)の二つを記述すればおおよそ見当がつく¹³⁾。拘束接点数を多数の粒子で平均を



図—2.4 粒子の拘束
接点数と接点での接平面への単位法線ベクトル n

とり、その平均値を配位数と呼ぶ。充填密度の増加で当然配位数は大きくなり、粒子aの動きは、周りの粒子によって強く拘束されるようになる。一方、接点の向き n は、拘束条件の違いを具体的に表している。また、多くの粒子の集合を考える場合、この拘束条件は、 n の確率分布で測られるが、等方分布からの偏りは、構造異方性に外ならない。

一例を挙げよう。重力の影響の下で堆積した砂の場合、 n の分布は偏っていて、鉛直方向に高い密度で集まっている¹³⁾。この種の異方性は、一般の常識に反し、球粒子の集まりにも生じうる。事実、Kallstenius (カルステニウス) ら¹²⁾は、完全球の集合体に構造異方性が存在することを初めて確認した。もちろん、粒子形状の偏平な砂を重力下で堆積させれば、球状の砂と比較して、 n はより高い密度で鉛直方向に集中する傾向が知られている¹³⁾。土(特に砂)が外力を受けて変形すると、接点方向 n は最大主応力軸方向の向きに回転し、その結果、新しい方向に集中した異方性が形成される³⁸⁾。このように新たに作られる異方性を、Casagrande (キャサグランデ) ら³⁹⁾は、重力の効果による固有異方性と区別して、誘導異方性と呼んだ。既に明らかなように、土の構造の観点からすれば、誘導異方性を固有異方性と区別する特別な理由はない。

接点の方向 n は、先に述べたとおり、最大主応力軸方向に集中し、いわゆる誘導異方性を作る。この誘導異方性は、最大主応力方向に効果的に力を伝達する『柱』の形成に伴って現れるらしい(図—2.5)³⁹⁾。柱と柱の間には、柱と平行して空隙が伸び、S-1-3タイプの異方性が付随している。図—2.5の異方性は、柱の伸びる方向からの圧縮には十分な耐力を発揮するものの、それ以外の方向からの圧縮には極め

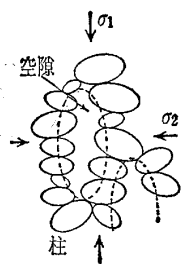
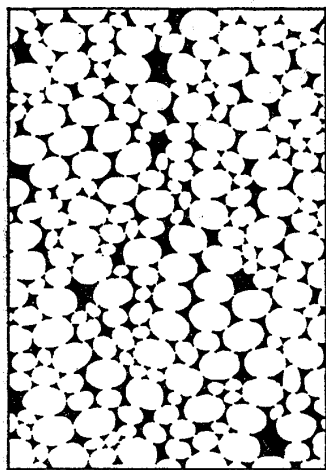


図-2.5 柱の形成と単位法線ベクトル n の集中による異方性³⁸⁾

て脆弱で、大きな塑性変形とともに柱は容易に崩壊する。したがって、①主応力が回転する場合や、②不規則な動的な荷重を受ける場合などには、接点の方向による誘導異方性 (S-2) には特に注意が肝要である。

2.3.3 互層による異方性 (S-3)

互層による異方性の典型は、氷縞粘土に見られる¹⁵⁾。すなわち、1年の寒暖の変化により、やや粗粒で有機物の多い暗色の下部と、より細粒で白色の上部とが1組で氷河周辺の湖に堆積し、数mmから数cmの層をなしている。このような層が幾層にも重なって、美しい氷縞粘土が作られる。この例は、氷河湖にのみ見られるやや特殊な土と言えるが、これほどの規則性と美しさには欠けるものの、類似の層構造は普通の沖積層にもしばしば見受けられる (口絵写真-26)。

全体として砂層と判断される場合にも、土層断面は決して一様ではなく、薄い粘土層が断続的 (あるいは連続して) に挟み込まれていることも決して珍しいことではない。このような場合、中には異方性として扱うよりも不均質としての扱いが的をえることもあるだろうが、いずれにしても、変形・強度や透水にも大きな異方性が予想されるので、十分な配慮が必要である。特に、薄い粘土層のすべり破壊が土層全体を不安定にすることも、境界条件によっては十分起こり得よう。

2.4 岩石・岩盤の場合

2.4.1 弱面の卓越配列による異方性

岩石・岩盤に含まれる弱面と言えば、層理、片理、へき開、節理、断層、亀裂を少なくとも挙げなければならない。これらの地質学的な成因について、詳しくは他の成書⁴⁰⁾に譲るとして、ここでは、本論に必要な範囲でその都度説明する。これらの弱面は、目に見え、かつ実際に調査も可能である。したがって、その異方性の把握は、土の場合に比べてはるかに容易である。

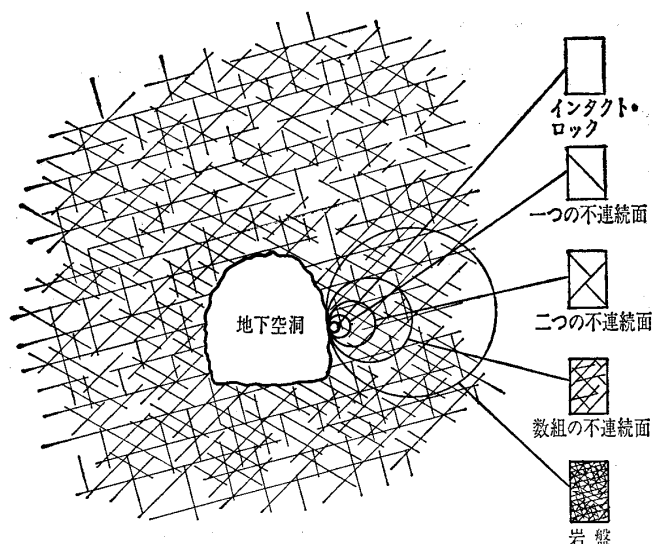
1) 片理、へき開の卓越配列による異方性 (R-1-1, R-1-2)

片理とへき開は、広域変成岩に普通に見られる岩石構造である。(注: 広域変成岩は、厚い堆積物や既存の岩石が地下深所で造山作用に伴う高温・高圧の変形運動を受けて再結晶し、片状構造をもつようになった岩石のことである。この岩石は、花崗岩とともに、日本列島の重要な基盤岩類である。) 高温・高圧下の変成作用で元の組織を失い、代わってこの変成岩に特有の面構造 (片理、へき開) が作られる。片理面は、絹雲母などの再結晶鉱物が定方向に配列してできるもので、特に雲母が並ぶ場合が重要である (口絵写真-27)。すなわち、雲母は、粘土鉱物と同じように、結合度の著しく劣る結晶面をもっている。そのため、この結晶面が片理面に平行に配列すると、面は亀裂のごとく振る舞う。片理面は、広い範囲で一樣な方向を向き、岩体に著しい異方性を与えている^{17), 18)}。

広域変成岩には、しばしば片理に直交するへき開がみられる (図-2.2) (その成因には様々な説があり、専門家の間でも今なお議論が続いている)。へき開には、単純な亀裂状のものから、片理のように、雲母が平行に配列しているものまで様々であるが、その一樣な方向性から、広域変成岩の異方性の支配要因の一つとなっている。

2) 亀裂・節理・断層の卓越配列による異方性 (R-1-3)

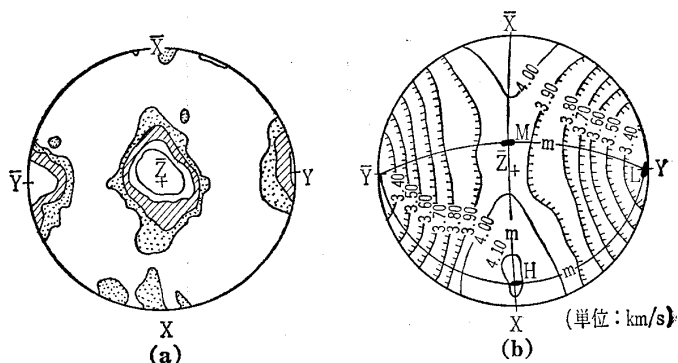
先に述べた片理やへき開が変成岩に限られたのに対し、亀裂、節理、断層は岩種を問わずごく一般的に現れる。収縮亀裂、引張り亀裂、せん断破壊、応力緩和など、面の形成にも極めて多様な成因が考えられている。そのため、弱面の寸法や配列は規則性



図—2.6 岩盤の寸法効果と節理⁴²⁾

に欠け、工学的な取扱いにも一層の工夫が求められる(口絵写真—28)。例えば大きさをみると、電子顕微鏡でしか細部を見ることのできないマイクロ・クラック⁴¹⁾から、長さ数100 kmの巨大断層までが含まれている。この事実の持つ深刻さは、岩盤中に掘削された地下空洞の例(図—2.6)⁴²⁾の中に明らかである。すなわち、目を岩盤壁面に十分近づければ、均質・等方で堅牢な岩石(インタクト・ロック)が見えるはずである。しかし、そんな岩石中にもマイクロ・クラックが複雑な模様となって入っていることを忘れてはならない。視野を広げると、数本の節理が目止まるであろう。さらに遠くから全体を眺めれば、完全にブロックに分割されたいわゆる岩盤が見え、場合によっては、規模の大きい断層さえ視野に入るかもしれない。すなわち、岩盤は、視野の大きさに全く違って見える。見えるだけに止まらず、水理・力学的な物性値も供試体の寸法に依存して大きく変化する(寸法効果)。

亀裂や節理の配列に規則性がないことは既に述べた。それゆえ、規則性に欠ける幾何学的特徴を必要な精度で、かつ、一般性を失わず記述することが先ず求められる。土は、しばしば鉛直(重力)方向に対称軸を持っている(固有異方性の大部分はこの範疇に入る)。では、規則性に欠けるR-1-3の異方性は、どんな対称性を持つであろうか。この問題は、幾何学的特徴をテンソルで表現することによって容易に解決できるが^{43), 44)}、講座の5章で詳しく論じられる予定であるから、本章ではもう一つの基本的課



図—2.7 ステレオ投影によるバーレー花崗岩の異方性²¹⁾

- (a)バーレー花崗岩における単位法線ベクトルの異方的な分布。
(b)同じ岩石の弾性波速度の方向依存性。

ステレオ投影は、三次元空間における任意の方向(例えば、単位法線ベクトル n など)を二次元平面に投影して表すときに用いられる。図のX, Y, Zは、基準座標軸の投影であり、等値線は、与えられた方向への n の集中程度を示す。(b)の弾性波がマイクロクラックの分布とよく対応している。詳しくは文献⁴⁰⁾を参照のこと。

題である寸法効果に言及することにする。

今、深成岩で最もありふれた岩石である花崗岩を取り上げて考えてみよう。この岩石は、外見上、一様で等方的に見えるが、マイクロ・クラックの法線単位ベクトル n の方向分布を調べると、ある規則的な偏りが認められる。図—2.7²¹⁾には、バーレー花崗岩での n の分布をステレオ投影で示しているが、分布は明らかに一様ではなく、局所的な集中が認められる。この集中は岩石の構造異方性に外ならない。岩石試験によれば、この構造異方性は、変形・強度などの力学異方性の原因とされている。一例として、図には弾性波の変化が等値線として示されているが、マイクロ・クラックの分布との類似性に注意したい。

さらに興味深い点は、マイクロ・クラックの法線ベクトルが巨視的なクラックである節理の方向分布とよく対応するという事実である^{21), 24)}。すなわち、マイクロ・クラックと節理の形成には、共通するメカニズムが作用しているように思える。

Mandelbrat(マンデルブロ)によるフラクタル^{45), 46)}は、無秩序に見える図形の中に隠された規則性(複雑さの中に隠された自己相似性)を発見するための

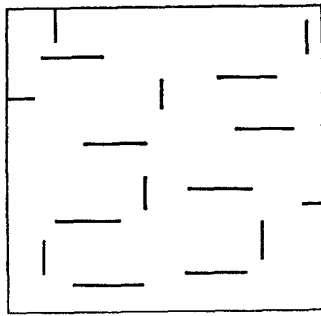


図-2.8 フラクタルの自己相似

数学的方法として、多方面での応用が図られている。

今、顕微鏡を使って描かれたマイクロ・クラックのスケッチと、野外での節理のスケッチとを比較してみよう。2枚のスケッチが、基本的に同じ図-2.8のように描かれたとしよう。もちろん、図の横幅や描かれているクラックの大きさには大きな違いがある。それにもかかわらず、図形全体の幾何模様の性質は、基本的に同じだということである。このように、図の縮尺によって図形の性質がいかほども変わらないとき、2枚のスケッチは、自己相似な図形ということができる。海岸線や断層線にも同じような自己相似が知られていて、この相似性は自然の形に共通する性質かもしれない。最近の研究の主張のとおり、割れ目の幾何模様がフラクタルであるとすれば、先に述べたマイクロ・クラックと節理の幾何学的類似性も一種のフラクタル図形として理解できる。自己相似とすれば、構造異方性も図形の縮尺に依存しない。すなわち、小さい供試体の異方性は、岩盤の異方性と少なくとも定性的には一致するというのである。

都合のよい話ではあるが、寸法効果の問題がすべてフラクタルで解決するわけではない。例えば、図-2.8の横幅が1mmか100mかによって、材料の力学定数の絶対値は、全く異なると考えねばならない。この問題こそ岩盤力学の永遠のテーマであり、新たな角度から問い直さねばならない。

2.4.2 互層による異方性 (R-2)

堆積岩が互層をなして異方性となるのは、原理的には土のそれと同じである。ただ堆積岩の場合、層間の脆弱化が異方性を引き起こすのに一役かっている点が、土の互層と若干異なる。層間が一種の亀裂と見なされれば、R-3の異方性は、R-1 (特に、R-1-1, R-1-2) のそれと同じとしてよい。

2.4.3 結晶軸の卓越配列による異方性 (R-3)

一部の例外を除いて、岩石中の鉱物自身異方性を帯びていて、結晶軸とのなす角度によって、熱伝導率や弾性定数の値が異なっている⁴⁷⁾。したがって、たとえ外見上は等方的に見えたとしても、結晶軸が特定の方向に揃っていれば、岩石は全体として異方性を帯びる。変成岩や一部の火成岩にこの種の異方性が知られていて、地殻深部を対象とする地球物理の分野では、少なからず研究されている。

2.5 ま と め

本章では、土と岩盤の構造異方性とそれと関連する話題を取り上げて解説した。まとめると、土や岩盤はその生い立ちから異方性となることを運命づけられているといえなくもない。しかし、このことは、異方性を直ちに解析に取り込まねばならないことを意味しない。異方性の導入は、力学パラメーターの数をいたずらに増やすこととなり、現場計測の現状を考えれば、必ずしも解析精度の向上につながらない場合も多いと思われる。そのこと以上に、等方性の仮定から得られた解が、実務の問題処理に大きなトラブルも無く使われている。このことは、等方か異方かの問題が決して軽々しく判断されるべきでないことを示唆している。

しかし、一方、力学理論や数値解析法の進歩のお陰で、異方性など材料本来の性質を取り入れた解析がさしたる困難もなく実行できることも、また事実である。岩盤の場合、特に力学的異方性の影響が無視できず、等方性の仮定が大変危険側の結果を出すことも、十分起こり得ると考えておかねばならない。技術者の怠慢で、事故が発生したり、過大な設計をすることは許されないことはいうまでもない。

参 考 文 献

- 1) Morgenstern, N.R. and Tchalenko, J.S.: The optical determination of preferred orientation in clays and its application to the study of microstructure in consolidated kaolin, Proc. Royal Society, Series A. Vol.300, pp.218~250, 1967.
- 2) McConnachie, I.: Fabric change in consolidated kaolin, Geotechnique, Vol.24, No.2, pp.207~222, 1974.
- 3) 風間秀彦・石井三郎・黒崎 秀: 圧密過程における粘土の構造変化, 土と基礎, Vol.29, No.3, pp.11~18, 1981.

- 4) Lafeber, D.: The graphical representation of planar pore patterns in soils, *Aust. J. Soil Res.* Vol. 3, pp. 143~164, 1965.
- 5) Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.: Inherent anisotropy in a sand, *Geotechnique*, Vol. 22, No. 1, pp. 115~128, 1972.
- 6) Oda, M. and Koishikawa, I.: Anisotropic fabric of sand, *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol. 1, pp. 235~238, 1977.
- 7) Miura, S. and Toki, S.: Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 3, pp. 69~84, 1984.
- 8) Collins, K. and McGown, A.: The form and function of microfabric features in variety of natural soils, *Geotechnique*, Vol. 24, No. 2, pp. 223~254, 1974.
- 9) Sleeman, J.R.: Cracks and peds, and their surfaces in some soils of the riverine plain, N.S. W., *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 1, pp. 91~102, 1963.
- 10) Brewer, R.: *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, John Wiley & Sons, New York, 1963.
- 11) 阿久津純: 宇都宮付近の関東ローム(火山)層, *地球科学*, No. 33, pp. 1~11, 1957.
- 12) Kallstenius, T. and Bergau, W.: Research on the texture of granular masses, *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol. 1, pp. 165~170, 1961.
- 13) Oda, M.: Initial fabric and their relations to mechanical properties of granular material, *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 1, pp. 17~36, 1972.
- 14) Mulilis, J.P., Chen, C.K. and Seed, H.B.: The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behavior of sand, *Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 75-18*, University of California, Berkeley, 1975.
- 15) Milligan, V., Soderman, L.G. and Rutka, A.: Experience with Canadian varved clays, Paper 3224, *J. Soil Mech. Found. Engrg*, ASCE, 1962.
- 16) Oda, M.: Anisotropic strength of cohesionless sands, *J. Geotech. Engrg Div.*, ASCE, Vol. 107, No. GT9, pp. 1219~1231, 1981.
- 17) Donath, F.A.: Experimental study of shear failure in anisotropic rock, *Bull. Geol. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 985~990, 1961.
- 18) Attewell, P.B. and Sandford, M.R.: Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock-1, *Experimental and mechanical interpretation*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 11, pp. 423~430, 1974.
- 19) Hayashi, M.: Strength and dilatancy of brittle jointed mass. The extreme value stochastics and anisotropic failure mechanism, *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, Vol. 1, pp. 3~12, 1966.
- 20) Gaziev, E.G. and Erlikhman, S.A.: Stresses and strains in anisotropic foundation (model study), *Symp. Soc. Internal. Mecaniquis des Rochesk*, Nancy, II-1, 1971.
- 21) Thill, R.E., Bur, T.R. and Steckley, R.C.: Velocity anisotropy in dry and saturated rock spheres and its relation to rock fabric, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 10, pp. 535~557, 1973.
- 22) Thorpe, R., Watkins, D.J., Ralph, W.E., Hsu, R. and Flexser, S.: Strength and permeability tests on ultra-large Stripa granite core, LBL-11203, ASC-31, 1980.
- 23) Rouleau, A. and Gale, J.E.: Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 6, pp. 353~367, 1985.
- 24) 佐野 修・工藤洋三・水田義明・中川浩二: 花崗岩の異方性を考慮した変形・破壊特性に関する研究, *土木学会論文集*, 第 400 号/III-10, pp. 179~188, 1988.
- 25) Oda, M.: Experimental study of the elasticity of mylonite rock with random crack, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 25, No. 2, pp. 59~69, 1988.
- 26) Mutschler, T.O. and Frohlich, B.O.: Analytical calculation of the strength behaviour of an interbedded rock mass, *Int. Soc. Rock Mech.*, Montreal, Canada, Vol. 2, pp. 1167~1171, 1987.
- 27) Odom, I.E.: Clay fabric and its relation to structural properties in Mid-continent Pennsylvanian sediments, *J. of Sedimentary Petrology*, Vol. 37, No. 2, pp. 610~623, 1967.
- 28) Matsuo, S. and Kamon, M.: Microscopic study on deformation and strength of clays, *Proc. 9th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 201~204, 1977.
- 29) 山内豊聡・林 重徳・安原一哉・風間秀彦・藤原東雄: 本邦各種粘性土の土構造と工学的性質, 多賀出版, pp. 191~198, 1985.
- 30) Tatsuoka, F., Nakayama, S., Huang, C. and Tani, K.: Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 1, pp. 35~54, 1990.
- 31) 赤木俊允・石田哲朗: 粘性土地盤に対する水平方向透水試験法, *土木学会論文集*, No. 394, pp. 123~139, 1988.
- 32) Bishop, A.W., Webb, D.L. and Lewin, P.I.: Undisturbed samples of London clay from the Ashford common shaft, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~30, 1965.
- 33) Barden, L.: Examples of clay structure and its influence on engineering behavior, *Stress Strain Behavior of Soils*, Roscoe Memorial Symp., pp. 195~205, 1971.
- 34) 鬼塚克忠・林 重徳・平田登基男・村田重之: 有明粘土の異方性について, *土質工学会論文報告集*, Vol. 16, No. 3, pp. 111~121, 1976.
- 35) Morgenstern, N.R. Thcnaad lenko, J.S.: Micro-

講座

- scopic structures in kaolin subjected to direct shear, *Geotechnique*, Vol. 17, No. 4, pp. 309~328, 1967.
- 36) 嘉門雅史・風間秀彦：微視的構造と構成式—その2 粘性土の場合—, *土と基礎*, Vol. 32, No. 4, pp. 69~74, 1984.
- 37) 高速道路調査会編：関東ロームの土工, 共立出版, pp. 24~28, 1973.
- 38) Oda, M., Nemat-Nasser, S. and Konishi, J.: Shear-induced anisotropy in granular masses, *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 3, pp. 85~97, 1985.
- 39) Casagrande, A. and Carillo, N.: Shear failure of anisotropic materials, *Proc. Boston Society of Civil Engrs.* Vol. 31, pp. 74~87, 1944.
- 40) Price, N.G. and Cosgrove, J.W.: *Analysis of Geological Structure*, Cambridge University Press, 1990.
- 41) Sprunt, E.S. and Brace, W.F.: Direct observation of microcavities in crystalline rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 11, pp. 139~150, 1974.
- 42) Hoek, E. and Brown, E.T.: *Underground Excavation in Rock*, Published by Institution of Mining and Metallurgy, England, 1982.
- 43) 金谷健一：ファブリックテンソルによる構造異方性の特徴づけと統計的検討, *土質工学会論文報告集*, Vol. 23, No. 4, pp. 171~177, 1983.
- 44) 佐武正雄：地盤と土の異方性, *土と基礎*, Vol. 32, No. 11, pp. 5~12, 1984.
- 45) Mandelbrat, B.B.: *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman & Co., San Francisco, 1977.
- 46) 高安英樹：フラクタル, 朝倉書店, 1986.
- 47) Clark, S.P. (editor): *Handbook of Physical Constants*, The Geological Society of America, Memoir 97, 1966.
- 48) Turner, F.J. and Weiss, L.E.: *Structural Analysis of Metamorphic Tectonites*, McGraw-Hill, New York, pp. 46~75, 1963.

本講座担当委員：稲垣秀輝，岡部治正，菊池喜昭
後藤 聡，中井照夫，平山英喜，平山光信，松
本吉雄の各委員