

1. はじめに ～土質力学・地盤工学とは～

私達は地面の上で生活している。地面は、私達の様々な生活基盤(家、学校、道路、鉄道、堤防など)を支えている。正確に言えば、地面とは深さ方向に広がっている「地盤」の表面であり、いろいろな構造物を支えているのは「地盤」である。

例えば、新しいビルを建てようとする場合、その場所の地盤が十分「強く」ないと建物はズブズブと沈んでしまう。だから、事前に地盤の強さを測り、もしも表層部分の強さが十分でなければ、もっと深いところにある強い地盤まで杭を打つなど、作り方を工夫しなければならない。

このように、私達の生活の安全を確保するために必要な、地盤に関する知識を体系化した学問を「**地盤工学(Geotechnical Engineering)**」と呼び、それに必要な力学を「**土質力学(Soil mechanics)**」と呼ぶ。

地盤工学の歴史は、人類が自らの住居を造りはじめた頃までさかのぼることができる。洪水を防いだり、農地に水を引いたり、橋や道路、鉄道を造ったりと、人間が住み良い環境を作っていく過程で、地盤工学は、はじめは経験的に、近代になってからは科学的・力学的に調べられてきた。例えば、地面に建物を建てたとき、その下の地盤のそれぞれの場所に、どのくらいの力がかかるのか、という問題は、実はとても難しい数学と力学を必要とする。現在の様々な構造物の設計基準(構造物を安全に作るためのルール)は、そのような知識・技術の積み重ねの上に作られている。

ただ、高度に技術の発達した現代においても、地盤工学の予測精度は、車や建物自体の強さの予測精度に比べて大きく劣っており、毎年のように豪雨による斜面災害や地震による道路の崩壊などが発生している。道路などは壊れたら直せばよい、という考え方もあるが、どこが壊れるかを予測できなければ、重要度に応じた効率的な建設計画を立てること

はできない。

地盤工学の予測精度が上がらない最も大きな原因は、「**地盤が空間的に不均質である**」ことによる。地盤は鉄やコンクリートなどの人工材料と異なり、**自然の材料**であり、その強さは場所によって、また深さ方向にも大きく異なる。それに加えて、地盤は土や岩などと水、空気が混ざった材料であり、粘土と砂で性質が大きく異なったり、大雨によって土中の水分量が増加すると強さが低下するなど、複雑な振る舞いをする。そのために、「構造物を作ったときに本当に安全か」「この斜面はどのくらいの雨で崩れるか」といった問いに、高い精度で答えることができない。

このような地盤材料の不均質さゆえ、ある場所で建設工事が行われるときには、必ず「**地盤調査**」が行われる。それも、地表面だけの調査では不十分で、穴を掘って(ボーリングと呼ばれる)、深さごとの地盤の強さを調査しなければならない。ただ、ボーリング調査には時間と費用がかかり、得られる情報も限られることから、地盤の材料の性質とその強さを完全に調査することは難しい。



図-1.1.1 ニューヨークのマンハッタン地区 ここに超高層ビルが早くから建てられたのは、地盤が強固な岩盤だったため。東京でも新宿などの山の手は地盤がよいが、上野などの下町は地盤が弱いため最近になるまで超高層ビルは建てられなかった。

そこで、地盤調査は、その場所の**地形や地質**といった情報とセットで判断することが必要となる。つまり、その場所の地盤の成り立ち(どのようにしてできたか)がわかっているならば、限られた地盤調査の結果から、材料の種類やその分布、強さなどをより正確に予測することができる。例えば、地盤はいくつもの層(地層)からできているが、それぞれの地層は、それができた年代や材料の構成が異なっている。ただ、同じ地層であれば、その部分の性質は似通っていることが予想される。また、平野部の傾斜のゆるい河川脇の地盤は、比較的最近堆積した柔らかい地盤である、などの地形の類似性を利用することもできる。このような情報を地盤調査の結果と合わせて考えることによって、地盤調査の結果を補い、より精度の高い評価を行うことができる。

以上のことから、本編では土質力学の概要をまず説明し、その後、地盤工学で用いられる地盤調査法の考え方、そして地形・地質情報の概要と、その活用の仕方について、簡単に解説することにする。

2. 土質力学の概要

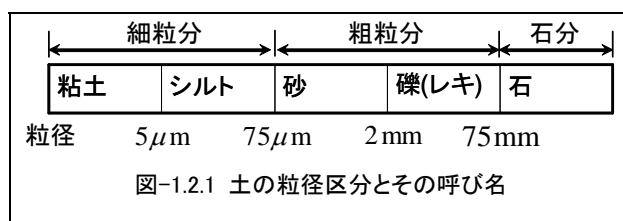
2-1. 土質材料

土質力学は、地盤の元となっている材料を分類することから始まる。地盤の表層の多くは、土粒子が互いに固結していない状態で存在しており、それを「土」と呼ぶ。そのような土粒子が長い時間をかけて固結すると堆積岩となり、それが広く連続していると「岩盤」と呼ばれるようになるが、地盤の強さ、という工学上の問題を考える時には、多くの場合、未固結の「土」が対象となる¹。

土の分類は、そこに含まれる土粒子の大きさが基本となる(図-1.2.1を参照)。一般には0.075mmを境に**粗粒分**と**細粒分**に分ける。これは

(1)粒子が0.075mmより小さくなると、粒子と粒子の間に働く付着力²が無視できなくなり、土がバラバラになりにくくなる。

(2)粒子が小さくなると、水を通しにくくなるということから、土の性質が大きく変わるからである。いわゆる「粘土」は固まりで、「砂」はさらさらであるが、これが細粒分の多い土と粗粒分の多い土の違いと考えればよい。なお、**粒径75mm以上の粒子を石分として区別するのは、主にふるい力学試験装置の大きさの制約による。**



2-2. 水の通しやすさ(透水性)

土粒子が小さいと、土粒子と土粒子のすき間も小さく、水も通りにくい。これは細いチューブほど、チューブの壁と水との摩擦で水が通りにくくなるのと同じ事である。また、土がゆるづめか密づめかによっても、通りやすさが変わる。

水が通りにくいと、見かけの粘着力(粘り気)が現れる。粘土が塊(かたまり)となって安定に見えるのは、粘土の中の水が動きにくく、表面から空気が入っていかないからである。粘土の塊を水中に長時間放っておくと、徐々に粒子が分散していき、塊でなくなる。この分散状態に至るまでに必要な時間が、水の通りやすさ(透水性)を大雑把に表す。砂は適度に水を加えると塊になるが、これは水が粒子と粒子の接触点にくっついて、表面張力を発揮するからである(液架橋付着力)。このような砂の団子を水に浸

¹ あるいは、風化して亀裂の多く入った岩盤が対象となる場合もある。

² 付着力の原因は、ファンデルワールス力や静電気力、あるいは部分的に水分が存在することによる液架橋付着力などがある。

すと、あっという間に分散してしまう。

土木工事で地面を掘るときにも、同じような現象が現れる。砂地盤を掘り進めると、ある角度以上では穴の壁は崩れてしまうが、粘土地盤の場合には、穴の壁は崩れず、垂直に掘り進むことができる。ただ、それを長期間放置しておくとかやがて崩れてしまう。このような問題を長期安定問題と呼ぶ。

砂地盤では、粘土地盤に比べると、水を通しやすいが、地震などの短時間の現象では、やはり数 m の地盤中を水が抜けるのに時間がかかるため、いわゆる「液状化現象」が発生する(図-1.2.2を参照)。

ダムや河川堤防の建設、あるいはトンネルの掘削工事などでは、浸透破壊現象も問題となる。これは、地盤中を水が流れるときに水から地盤が受ける力によって、地盤が水と共に吹き出してきて、ダムや堤防が壊れる現象である。

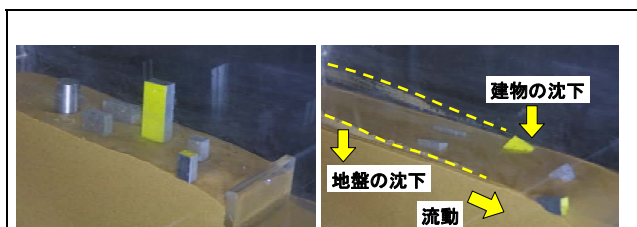


図-1.2.2 上 液状化は実験室で簡単に再現することができる。水中で緩く堆積させた地盤模型の表面に建物模型を置き、振動を加えると、地盤が液状化して建物がズブズブ沈む。海岸線沿いで堤防が地震で破壊されていると、広い地域で、土砂が海側に流動する。
下 液状化で傾いた建物

2-3. 粘土の圧密

粘土鉱物同士は、表面の原子配列が規則的であるため、特別な電気化学的な斥力が作用している。そのため、粘土地盤は間隙の量が砂地盤に比べて大きいことが多い。そのような地盤上に構造物を作ると、その構造物の重みで粘土地盤は圧縮する。しかし、前節で説明したように粘土の中を水が移動するには時間がかかるため、この圧縮は数年ないしは数十年という長い時間をかけてゆっくりと進行する。これを粘土の「圧密現象」と呼ぶ。埋め立て地の造成などで発生するほか、地下水の汲み上げによっても「圧密」による地盤沈下が発生する。これは汲み上げによって地下水位が下がり、地下水面から上に出てしまった地盤の重みのうち、それまで浮力によって支えられてきた分までを下の地盤が受け持たなければならなくなるためである。

河川や海底で堆積した粘土の上に、別の新しい地層が堆積した場合、または上述のように地下水が低下した場合、その粘土地盤は圧密される。その後、侵食によって上の地層が削られたり、地下水位が上昇した場合には、粘土地盤に加わっていた力が解放され、地盤は逆に膨張する。しかし、この膨張量は、圧密量に比べて小さく、地盤は元の状態には戻らな

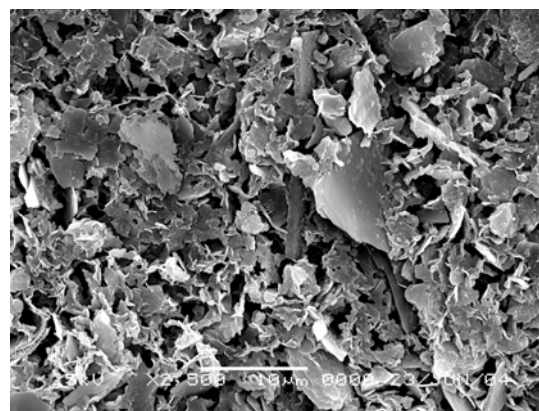


図-1.2.3 粘土の電子顕微鏡写真。薄い板状の結晶が複雑に入り組んでいるのがわかる。

い。これは、図-1.2.3 のような複雑な粘土粒子の堆積構造が圧密によって変化し、それが元に戻らないからである。その粘土を再度圧密させると、以前圧密された時の最大荷重までは粘土はほとんど圧縮せず、それ以降に急に大きく収縮する。つまり、自然の粘土地盤を取り出して、圧密させる実験をすれば、その粘土地盤が過去に受けた最大の荷重を知ることができる。

このように、以前大きな圧密を受けており、その時の荷重までは大きな圧縮が生じない粘土を「**過圧密粘土**」、そうでなく現在受けている荷重がこれまで受けた最大荷重であるような粘土を「**正規圧密粘土**」と呼んで区別する。これは、その地盤に構造物を建設したときの沈下具合が異なるからである。

2-4. 土の強さ

前節の圧密現象では、圧縮と共に土は密に詰まってくるのでどんどん硬くなり、長い時間かかるものの、

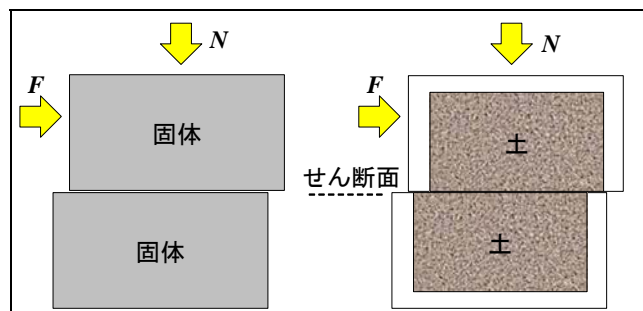


図-1.2.4 固体同士を拘束力 N で押しつけた状態で横に滑らせようとするとき、滑り出す時の力 F は N に比例する。これはいわゆる摩擦の問題で、比例定数 μ は静止摩擦係数と呼ばれる ($F=\mu N$)。

砂を容器につめて同様の実験を行った場合にも、 F と N の比例関係は観測される。地盤工学では $F=N \tan\phi$ と書き、 ϕ を砂のせん断抵抗角または内部摩擦角と呼ぶ。つまり、上記の μ が $\tan\phi$ に対応している。

粘土の場合には、拘束圧を 0 にしても、滑り抵抗が発生する。これは粘土粒子間の付着力に起因する物理的抵抗や、水の通りにくさに起因する見かけの抵抗によるもので、粘着力 c と呼ぶ。上記の摩擦の式と合わせて $F=c+N \tan\phi$ となる。

最終的には沈下は止まる。一方、構造物を作ったとき、短時間に下の地盤が「滑って」破壊に至る場合がある。これは斜面が降雨時に一気に滑り落ちるのと同じ現象で「滑り破壊」あるいは「せん断破壊」と呼ばれる。この特徴は、地盤中に「せん断面」が発生し、その面を境に、上にある土塊が移動するものである。土塊を動かす駆動力は、新たに建設した構造物の自重であつたり、斜面なら土塊の重さそのものであつたりする。

砂地盤に形成されるせん断面では、いわゆる「**摩擦の法則**」が成り立っており、滑りに必要な力は、せん断面に垂直な方向に土塊を押しつける力(拘束圧)に比例する。この比例係数(摩擦係数)を、 \tan の角度で表して、せん断抵抗角あるいは内部摩擦角と呼ぶ(図-1.2.4 参照)。大雑把に言えば、その砂で作った模型地盤を傾けていき、地盤が滑り出す角度(安息角と呼ぶ)が、このせん断抵抗角に相当する。砂粒子が角張っているほど、また地盤が密につまっているほどせん断抵抗角は大きくなる。

粘土地盤の場合、水が十分抜けられるほどゆっくりと構造物を建設すればほとんど砂地盤と変わらない振る舞いをする(ただしせん断抵抗角は砂地盤に比べて小さい)が、実際にはそのような建設工事は不可能である。短時間で上からの荷重が増加した場合、水が抜けられないことから、荷重は水圧によって受け持たれる。一方、滑りを発生させようとする力(せん断力)に対して水が抵抗できる摩擦力は、土の抵抗力に比べて格段に小さい。そのため、結局、土が受ける拘束圧は変化せず、せん断力のみが大きくなる。これにより、建設直後がもっとも滑りやすくなり、時間が経過し、水が抜けるほど安定になる。このような問題を短期安定問題と呼ぶ。

2-5. 地盤の破壊

前節のような滑り破壊は、滑り面が地盤の中を貫通

して発生する。それがどこを通るかの計算はそれほど簡単ではない。仮想的な滑り面の位置はいろいろと設定できるが、その位置によって、その滑りが発生するときの抵抗が変わる。そして実際は、その抵抗が最も小さいような滑り面の位置で破壊が発生することになる。もっとも簡単な解析方法は、滑り面を円弧と仮定して、上の滑る土塊を短冊状に分割してそれぞれの底面に作用する垂直力とせん断力の和が限界値に達している、という仮定から計算す

る方法であり、分割法と呼ばれる。2次元の場合には、コンピュータがなかった時代から図解で計算されていた。現在は、コンピュータを用いてもっと複雑な計算から地盤の破壊の限界値を求めることも可能となっている(図-1.2.5 参照)。

3. 地盤調査の概要

地盤を構成する材料(粘土、砂、礫)の種類や、間隙の量、またその結果としての地盤の透水性、圧縮性、せん断強度などの情報は、さまざまな構造物を作る際に必要となるものである。ただ、前述のように地盤材料は自然の材料であり、場所や深さによって性質が大きく異なる。従って、建設工事が行われる際には、その場所の地盤の性質を調べる地盤調査が必ず行われる。

広域に地盤の物性の「変化」を調べ、地層構造や断層面などを推定する際には、反射法探査など、穴を掘らない物理探査法が用いられることもあるが、構造物を作るための地盤調査では、たいていの場合、地盤に穴を掘り(ボーリング)、試料を採取したり(サンプリング)、貫入抵抗により地盤の強さを計測することが行われる。我が国で最も広く行われている調査法は標準貫入試験(JIS A 1219)と呼ばれるもので、直径6~13cm程度の穴を掘りながら、1m程度の深さごとに、所定のサイズのサンプラー(金属の円筒。後で試料を採取できるように2つ割りのピースからできている)をハンマー(質量63.5kg±0.5kg)の落下衝撃によって貫入していく試験である。そこで得られるN値という数値は、サンプラーを30cm貫入させるのに必要な落下回数である。

貫入後、サンプラーを引き上げて、円筒の中に詰まった試料を観察することで砂か粘土かなどの材料情報を得ることができる。また、サンプラー内に薄い円筒管を入れておくことで試料の乱れを防ぎ、密度を計測することも行われている。ただし、採取した試料を用いて実験室で載荷試験をしても、採取

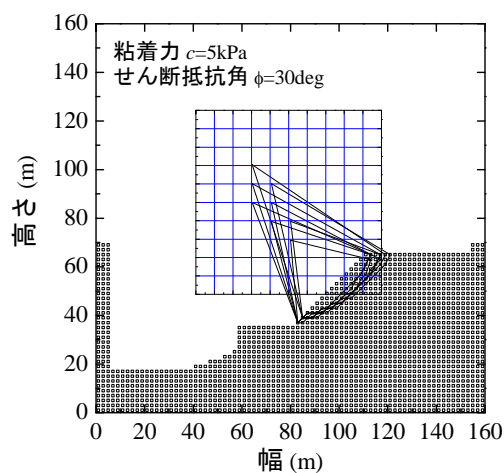


図-1.2.5 上:新潟県中越沖地震(2007)において、JR 青海川駅付近で発生した斜面崩壊事例(写真:朝日航洋(株))
下:上記の斜面の円弧滑り解析の例。様々な位置と半径の円弧を設定して地盤の滑り抵抗を計算し、より抵抗の少ない円弧に沿って滑りが発生すると考える。地盤に与える物性値は、せん断抵抗角 ϕ および、主に水の抜けにくさによって生じる見かけの粘着力 c 。 ϕ が大きく c が小さいときには、砂山のように表層で滑る。逆に c が大きいと、斜面の深いところで滑る。

時の乱れの影響が出過ぎて適切な評価はできない。そのような乱れの少ない試料を採取するには、特殊なサンプラーを必要とする。

また、実験室で採取試料の力学試験を行うことは、多くの時間と労力を必要とすることから、通常は上述の N 値から地盤のせん断強さなどを推定することが行われている。

標準貫入試験は、衝撃による貫入試験であることから、粘土地盤では地盤から水が抜ける時間のない条件(非排水条件)でのせん断強度と関係している。

一方、砂質土の場合には、深くなって上の土から押しつける力(上載圧)が大きいほど N 値は大きくなるため、N 値からせん断抵抗角を求める際には、その補正が必要となる。

更に、標準貫入試験のサンプラーは外径 51mm、内径 35mm であるため、それ以上の大きい礫を含む地盤では、先端が礫に当たって、それを破碎しながら貫入するときに非常に大きな N 値となるなど、地盤の平均的な性質を適切に表せない場合もある。

4. 地形・地質との関わり

地盤調査によって得られる情報には限りがあるため、通常は地形や地質の情報を合わせて、より精度の高い推定を行う。そもそも、地盤の性質が場所によって異なるのは、その地盤がいつ、どのようにしてできたかが、異なるからである。このような地盤の成り立ちを調べるのが地形学・地質学である。

4-1. 基盤岩の成り立ち

海洋プレートが大陸プレートに接触して沈み込む時に、海洋プレート表面の土砂がはぎ取られたものが陸側に幾層にも重なり合ってきた堆積物を**付加体**と呼ぶ。現在、我が国の基盤岩(地盤表層の軟らかい堆積層を除いた、硬い岩盤)の多くは付加体でできたものと考えられており、プレート境界に近い太平洋岸ほど新しく、日本海側ほど古い岩盤となっている。また、付加体は海洋プレートと大陸プレートに挟まれて圧縮され、絨毯が折り畳まれるように一部が隆起する。このような運動が日本列島の地層構造を複雑にしている。

4-2. 侵食・運搬・堆積作用

隆起した岩盤は、風化や浸食を受け、川の水と一緒に運搬され、河川敷や海底に堆積する。その際、小さい土粒子ほど遠くまで運ばれるので、上流側か



図-1.3.1 標準貫入試験の様子(写真左上)と用いるハンマー(右上)、2つ割りのサンプラー(中)と得られた土質試料の例(下)

ら順に、礫層、砂層、粘土層というように、同じ種類の粒子がまとまって堆積して層を作る。このような作用を**分級作用**と呼ぶ。

粘土粒子の場合には、2-3 節で述べたように、特別な電気化学的な斥力が作用するが、この斥力は、陽イオン濃度が高い海水中では小さくなるため、接近した2粒子の面と端部に引張り力が作用して、すき間の大きい構造を作る。従って、海でできた粘土(海成粘土)の地盤に構造物を作ると大きな圧密が生じる場合が多い。

一般に堆積した時代が新しいほど、その地層は軟らかい。これは、年月と共に上の地層に圧縮されて密に詰まったり、粒子と粒子の間にある水から新たに結晶が析出して粒子間に充填されるなどの年代効果による。

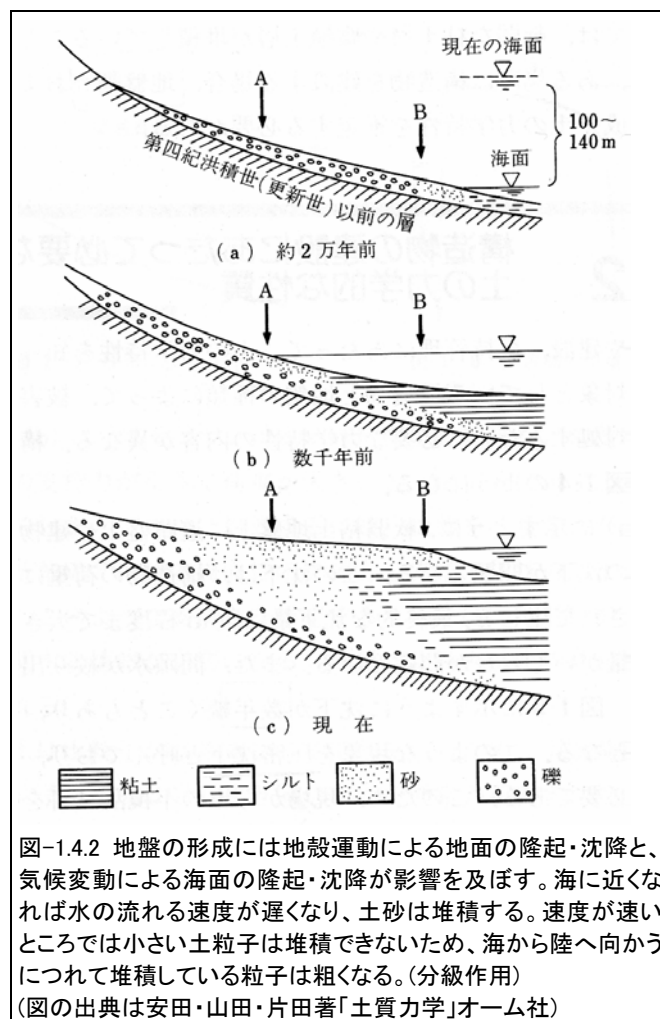
ヒト属が現れた約 180 万年前以降の地質年代を第四紀と呼ぶが、この時期に堆積した土砂は未固結のものが多く、第四紀のうち、最も最近の氷期(ウルム氷期)が終わる約 2 万年前までに堆積した地層を**洪積層**、それ以降に堆積した地層を**沖積層**と呼ぶ。沖積層は特に軟弱で、土木工事を行う際には注意が必要となる。

最終氷期である約 2 万年前には、氷河が形成され



図-1.4.1 勾配の緩やかな自然河川の周辺は、洪水時の氾濫によって堆積した軟弱地盤(氾濫源)が分布する。洪水によって河川の位置は変化するため、大きな平野を作る場合もある。

海水が減少したため、海面は現在より 100m~140m も低かったと言われている。海面が低いと海岸線が海側に移動し、陸地はより侵食傾向となる。そのようにしてそれ以前に堆積していた土砂を侵食していた時代から、徐々に気温と海面が上昇し、海岸近くの陸地であった部分が海に沈んだ。これによって全体的には堆積傾向に変わり、特に海岸線付近の低地は厚く沖積層が堆積した。海面の上昇は約 6000 年前にピークに達したが、そのころの海岸線は現在より 3~5m 高かったと言われている。これを、その時代にちなんで縄文海進と呼ぶ。その後、海水面はやや低下傾向になり、現在に至っている。従って、多くの場所では、洪積層と沖積層には大きな堆積年代の開き(**不整合**)があり、これが地盤の強さにも影



響している。

河川勾配が緩やかになる扇状地や平野部では土砂が堆積することから、現在あるいは旧河道沿いの地層は新しく、軟弱なことが多い。また、砂層が緩く堆積したところでは液状化が発生する危険性がある。

4-3. 火山と火山砕屑物

我が国には多くの火山がある。火山は地下のマグマが地表に噴出してできる。マグマはプレートが沈み込む場所で高い圧力・温度と水の存在によって地盤が液体状になったものと考えられている。マグマは地盤の圧力や浮力で上昇するが、地殻の硬い層に達するとそれ以上上昇できなくなり、マグマだまりを作る。更に圧力が高まって硬い層を突き破って噴出すると、マグマは急冷され、玄武岩や安山岩、流紋岩といった**火山岩**を作る。更に、噴煙と共に巻き上げられた様々な大きさの粒子(砕屑物)が、小さいものほど遠くまで運ばれて堆積する。つまり、ここでも分級作用が働く。関東地方を広く被う関東ローム(いわゆる赤土)は、東京や神奈川などの西の方は富士山や箱根の火山起源の火山灰(粘土のような細かい粒子)が堆積したもので、北関東は那須岳や赤城山からの火山灰である。火山に近いほど粒子が粗く、堆積層厚も大きい。

また、水中で堆積した火山灰は、沈降速度が小さいこと、水によって急冷されることなどから、空气中で堆積したものに比べて軟弱であることが多い。

なお、関東ロームは約2万年より前の噴火による火山灰が陸で堆積したものであり、鉄分の酸化によって赤くなっている。一方、関東ロームの上に薄く広がる黒土(いわゆる黒ボク)は、同じ関東ロームが生態(植物)の作用により表土化したものである。黒色をしているのは有機質の炭素が原因である。

一方、マグマが地下から噴き出せずに、ゆっくり

と冷えて固まると、はんれい岩や閃緑岩、花崗岩などになる。これが前述のプレート圧力によって徐々に隆起し、上にあった地層が侵食されて地表に出てくる場合もある。特に花崗岩は「御影石」とも呼ばれ、石材として用いられる。御影石の主な山地は六甲山、福島県伊達市、茨城県桜川市などである。

はんれい岩は硬く風化に強いのにに対し、花崗岩は節理からの水の侵入による粘土鉱物化や鉱物の膨張率の違いなどから風化が進みやすい。花崗岩が風化して粒状化したものをマサ土と呼ぶ。六甲山地の山麓には広くマサ土が堆積している。マサ化が進んだ斜面では崩壊や土石流が発生しやすいため、注意が必要となる。

4-4. 断層

プレートの水平方向圧力により、地殻にひずみが溜まり、それに耐えられなくなると地殻は破壊して地震が発生する。これは、プレートとプレートの境界で発生するプレート境界地震とは異なり、内陸地震と呼ばれる。1995年の兵庫県南部地震は典型的な内陸地震である。

このような地盤の破壊によって生じる地層の食い違いを断層と呼ぶ。断層は地表まで到達して、はっきりした断層面を示す場合や、表層の未固結地盤でずれが拡散して、明確に断層面が見られない場合もある。プレートの圧縮方向と日本列島の位置関係から、東北から北陸にかけては逆断層(上下のずれで、上盤側が持ち上がる断層)が多く、西日本では横ずれ断層が多いと言われている。

一度断層が形成されたところはまわりに比べて弱い面になることから、繰り返し地震を起こすことが多い。このような繰り返しによるずれの蓄積で山地ができたり、既にあった山地の尾根と谷線がおおきくずれたりしている地形もある。特に、比較的新しい地層を横切っている断層は、最近まで

動いていた活断層であり、再び地震を起こす危険性があるため、注意が必要である。

5. おわりに

以上、述べてきたように、建設工事を安全に、しかも効率的に行うためには、地盤に関わる様々な知識や技術が必要となる。そこには、高校までで学ぶ数学や物理、地学といった基礎知識から、大学以降で学ぶ、より専門的な知識、そして、いまだ研究の途中であるような高度な知識・技術も含んでいる。繰り返しになるが、地盤材料は自然の材料であり、その地盤が今そこにあるのは、過去何万年にもわたる自然の営みの結果である。これを完全に把握できるものと考え、それを自在に制御しようというのは不遜な考えであろう。自然を少しでも理解し、その中で私達が安全に暮らしていけるように知恵を絞る、すなわち「自然とともに生きる」という謙虚な考え方が重要だろう。