不動産コンサルティングの地学 一都市と斜面の物語—(3)

釜井 俊孝

京都大学防災研究所教授

地質と地盤

「物件」の地下

地質と地盤は、ともに「物件」の地下のことです。 しかし、この一字の違いには、地質学(科学)と地盤 工学(工学)という二つの学問世界の歴史と特徴が色 濃く反映されているのです。言うまでもなく、地質学 は、惑星地球の成り立ちと仕組みを研究する自然科学 です。西欧では、博物学、自然史(natural history) の一部で、自然認識のための伝統的な学問でした。そ の特徴は、人間の一生を遥かに越えた長い時間軸で考 えることと、問題を局所的でなく、広域的多面的な視 点でとらえる点にあります。

一方、地盤工学は、もともとは土質工学(≒土質力学)と呼ばれていました。土木工学、建築学、農業工学の一部として、構造物の基礎や材料としての土のふるまいを研究する分野です。その特徴は、工学の常として、とりあえず10年ぐらいのスパンで物を考える点と問題の単純化と一般化です。つまり、同じ地面の下を見るのにも、その全てを受け取るか、分析的(還元主義的)に見るかの違いがあるというわけです。

土質力学は、20世紀初めにオーストリア出身のテルツァーギ(Terzaghi)とその協力者達によって体系化されました。その効果は絶大で、それまで魑魅魍魎の類だった土の合理的な(一応、理屈の通る)取り扱いが可能になりました。土質力学では、地盤を力学(計算)の対象とするため、土を土粒子(剛体)と空隙(水+空気)からなる物質と定義します。しかし、テルツァーギは、こうした極端な一般化には限界があることをよく理解していました。そのため、終始現場の周到な観察を強調していたのです。彼自身は、地質学から出発していたため、地下が著しく不均質・不均一であることをよく知っていたからと言われています。高名な弟子であったカサグランデ(Casagrande)によると、1920年代の終わり頃、既に、テルツァーギは、

[かまい・としたか] 1979年筑波大学卒業(地球科学専攻)。1986年日本大学大学院修了(地盤工学専攻)。民間地質調査会社、通産省工業技術院地質調査所、日本大学理工学部土木工学科助手・専任講師・助教授、京都大学防災研究所助教授などを経て現職。博士(工学)。主な著書に、『宅地崩壊―なぜ都市で土砂災害が起こるのか』(NHK出版、2019年)、『宅地の防災学―都市と斜面の近現代』(京都大学学術出版会、2020年)など。

「土質力学の最悪の敵は、土質力学の基になる考え方を否定しようとしている人たちではない。最悪の害悪は、純粋な理論家が土質力学を見つけ出したときに生じるであろう。彼らが努力すればするほど、土質力学の真の目的を根本から危うくしてしまうであろう」と言っていたそうです。

1948年、テルツァーギは最初の体系的な教科書を出版し、それ以後、彼の土質力学は世界中に広まりました。以後、70年以上経って、土質力学は地盤工学になり、精緻な構成則(理論)を使った有限要素法(FEM)などの道具によって、地盤の複雑な変形や破壊の問題も議論できるようにもなりました。しかし、その陰でテルツァーギが心配していたような地質と地盤の乖離は、ますます大きくなりました。物件の地下は、依然として我々を惑わし続けているのです。

地質「捜査」法

地質と地盤の隙間を埋めるには、詳細な地質調査が 欠かせません。地質調査と言えば、ボーリングと思われるかも知れませんが、それは最終手段です。地質調査は、事件捜査と似ています。多くの状況証拠を積み上げ、物証も得たうえで、真相に迫る作業なのです。したがって、最初は、現場を丹念に歩いて、証拠を拾い上げることから始めます。実は、最終的に地質調査の質を左右するのは、この地表踏査の成果(特に地質図)と言えます。それは、これによって、その後の物理探査やボーリングの計画(場所)が左右されるからです。最初にボタンを掛け違えるとうまくいかないのは、地質調査も同じです。

地表踏査の結果に応じて、物理探査やボーリングな ど、より詳細な調査をするかどうかを判断します。物 理探査は、地震による地盤の揺れ方や地下に電気を流 したときの抵抗値、局地的な地磁気や重力の異常など、 物理量を測って地下構造を知ろうとする試みです。通 常は、測線を設定し、その下の状況を探ります。多くの手法がありますが、宅地の調査では、高精度表面波探査法と言われる、地震波の一種を使った探査法がよく用いられます。

ボーリングは、地下を実際に掘削し、コアと呼ばれる直径数cmの試料を採取したり、様々な測定を行って地質を確認する調査です。正しく行われれば確実な手法ですが、費用と時間と手間が掛かるのが難点です。しかも、カバーする領域から見ると、地表踏査が面、物理探査が線の情報を提供するのに対し、ボーリングからは点の情報しか得られません。ボーリングとは、本来、調査の仮説を実証するため、キーポイントの場所で行うものなのです。いささか逆説的ですが、ボーリングを実施する前から、結果がほぼわかっているのが、理想的な地質調査と言えます。何も考えずに、わずかなボーリングだけで地質を判断するのは、深刻な問題を打ち漏らす可能性があるので、避けた方が無難です。

日本陥没

小松左京氏のSF小説『日本沈没』(1973年)は、オイルショックに揺れる不安な世相を背景にベストセラーとなりました。もちろん、この話はフィクションです。しかし、現実の世界では、造成地における地表の陥没が、結構頻繁に起きています。これらの陥没は、谷埋め盛土の地下で空洞化が徐々に進行していたからだと言われています。そして、その空洞化は、地下水の流れによって土の一部が強制的に移動させられたことで発生したとみられています。この現象を「地下浸食」や「洗堀」と呼んでいます。

地表に穴が開くような陥没は、地下浸食の極端な場合です。しかし、目立たない形で小さな地下浸食が起きている場合もあります。つまり、地下水位の上昇は土砂を押し流す力が増えることに繋がるので、水位の高い状態が長く続くと土砂の粒のうち、細粒のものから流れ去り、空隙が増えて盛土がスカスカになるのです。これも地下侵食の一種で、言わば、谷埋め盛土が経年劣化、老朽化したわけです。こうした地下侵食が起きている盛土では、時間が経てば経つほど、盛土の内部はスカスカになっていきます。こうなるかどうかは、排水システムの経年劣化に依存するので、ダメな盛土の数は、時間とともに増える宿命にあると言えます。

この状態があと数百年続くとどうなるでしょうか? 答えは多摩丘陵にあります。多摩の小さな谷の谷頭に は、多くの陥没孔が存在し、山菜採りの人が落ちたりします。斜面は穴だらけなのです。原因は、地下水系中のパイプネットワークの存在にあると言われています。つまり空洞が発達しながら地表に達すると、陥没が起きるというわけです。このメカニズムは、谷埋め盛土の陥没と同じです。つまり、地表陥没は地下水の不飽和帯での一般的な現象と言えます。現在みられるような斜面の地形は、こうしたプロセスを数百年から数万年も繰り返して作られた形です。人工の盛土を作るということは、こうした自然の物理の中に、われわれの宅地も参加させるということに他なりません。

偏る地下水(自然のパイプネットワーク)

1960年代後半以降の多摩ニュータウンの開発もあって、斜面研究の舞台も大都市郊外の丘陵地に移っていきました。中でも、丘陵地の斜面で行われた詳細な水文観測は大きな成果を挙げました。古典的な地下水学では、地下水は帯水層と呼ばれる水を均質に含む地層の中に存在し、地下水位以下の部分を整然と流れていると考えます。確かに、低地の不圧地下水や深い所に溜まっている被圧地下水はそういう仮定が成り立ちます。

しかし、多くの研究者の努力の結果、丘陵地の斜面 浅層を流れる地下水は、ソイル・パイプ(以下、パイプ)や「水みち」と呼ばれる自然にできた排水孔を通って地表に噴出する場合が多いことがわかりました (写真1)。一度「水みち」ができると、地下水はその通路を主に通るようになります。農家の井戸は、こうした「水みち」を上手く掘りあてているのです。そして、井戸を日常的に利用していると、水が強制的に集まるようになってきます。つまり、パイプや「水みち」は自己組織的に発展するらしいこともわかりました。

一方、災害の発生においても、パイプが果たす役割

写真1



房総半島北部の切土斜面に出現した「水みち」。不飽和帯の地下水は、地 質構造の影響を受けながら、このように不均質に流れている。

は絶大です。豪雨などでパイプの処理能力を上回るほどの大量の地下水が供給された場合や土砂が少し崩れてパイプの出口が塞がれてしまうと、パイプネットワーク内の圧力が急激に高まります。その圧力が高まると、パイプ出口の土を一気に吹き飛ばすわけです。吹き飛ばされた土砂は、多量の水とともに周りの土砂を巻き込んで量を増やします。丘陵地の斜面崩壊は、多くの場合こうして始まります。災害後、斜面から水が噴き出している状況をニュースなどで見る機会が多いのはこのためです。

しかし、残念ながら、現在の工学(地盤力学)では、こうしたパイプの効果(偏在する地下水)を斜面安定計算(再現計算)に取り入れることができません。このことは、計算結果と現実との間で食い違いが起きる原因の一つとなっています。

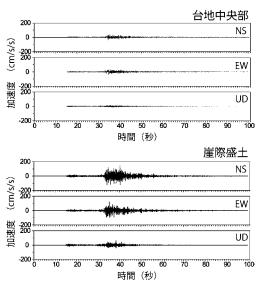
斜面はどう揺れるか

斜面が地震によって強く揺れると、二つのことが同時に進行します。一つは、単純に地震力(≒加速度)によって斜面の地層が引き剥がされる作用です。もう一つは、強い揺れによって地下水の圧力(間隙水圧)が増加し、強度(≒抵抗力≒土粒子のかみ合わせ)が低下する作用です。つまり、滑らそうとする力の増加に加えて、せん断抵抗の減少というダブルパンチによって、耐えられなくなった部分が崩れると考えられます。

一般に物質は、その硬さと形(構造)によって揺れ やすい周期(固有周期)が決まっています。地震の周 期と物質の固有周期が一致すると、共鳴によって揺れ が大きくなるのです。斜面も同様ですが、その揺れ方 はまず形に支配されます。例えば、山の地形で言えば、 あらゆる周波数帯で山の頂上が最もよく揺れます(増 幅されます)。様々な方向からやって来る波が、頂上 に集中するからです。肩の部分も基本的には同じよう によく揺れます。次にわが国において、自然斜面の固 有周期は、1秒以下であり、だいたい0.2~0.5秒(2 ~5Hz) 程度の場合が多いという事情が災害の有無を 左右します。つまり、この辺の周期が卓越する地震は、 内陸直下地震に多いので、2004年中越地震や2008年 岩手宮城地震、2016年熊本地震、2018年胆振東部地 震では、多くの地すべり・斜面崩壊が発生しました。 もちろん、この時には間隙水圧も急上昇していたはず です。

一方、盛土の揺れ方は、少し特殊です。それを一言 でいえば、「普通は地山よりもよく揺れる。しかし、

図 1



2014年5月5日に観測された横浜市の地震動。崖際に張り付いた盛土(急傾斜地対策済み)上の地震動は、台地中央部に比べて約3倍も大きく揺れた。

異常な揺れ方をする盛土もある」ということです。ど ういう風に異常なのかは、盛土の材質や地震の周期に よって異なります。例えば、柔らかい泥で作られた盛 土では、直下地震の際の地震動は地山に比べてむしろ 小さくなります。あまりに柔らかすぎて、地山の地震 の揺れについていくことができないからです。しかし、 遠い地震ではこれとは逆に、地山の揺れよりも最大震 幅は大きくなります。海溝地震のようにゆっくり揺れ る場合は、むしろ周期が合ってくるからです。また、 ゴミや廃材等を含む盛土の場合は、上下動が水平動よ りも大きい、普通とはかけ離れた揺れ方をすることが あります。また、台地の縁辺部に貼り付けられた崖っ ぷちの盛土でも、異常な揺れを記録することがありま す。この場合、最大加速度は、台地中央の地山に比べ て3倍以上も大きくなるのです(図1)。震度にすると、 1以上の違いに相当し、最も危険な盛土のケースと言 えます。

安定計算の魅力と限界

斜面が安定かどうかを検討する場合、通常は代表的と思われる断面(二次元)で「安定計算」を行います。この計算は、二次元極限(限界)平衡法に基づくのが、通常のプロセスです。つまり、まず最初に、斜面をいくつかの領域(スライス)に区分し、分割されたスライスにおける力の釣り合いから、せん断力とせん断抵抗力を算出します。次にこうした各スライスでの力を合計し、合計せん断力と合計せん断抵抗力の比を安全率として定義するというわけです。スライスに働く力の中で、特にスライス間力(スライス同士が及ぼし合

う力) は具体的に求めることは困難です。そこでこれ らを省略して、計算を進めます。しかし、どの程度省 略するかは考案者の自然観を反映するため、様々な手 法が存在しています。中でも最も大胆な手法は、簡便 法(スウェーデン法)と呼ばれる計算法です。 簡便法 では、全てのスライス間力は釣り合い、打ち消し合っ ていると仮定して無視します。この手法は、大胆な仮 定を含むものの、計算が簡便であることから広く普及 していて、現在わが国の斜面安定計算は、ほとんどこ の手法によって行われています。こうした計算は、せ ん断強度、異方性、破壊の非斉時性、三次元形状の影 響など、土の破壊現象を支配する他の要因も無視する か極端に単純化しているのが実態です。そのため、順 算では正解を得られる保証が、実はありません。じゃ あ、なぜ計算するかと言うと、何かを判断するのに、 何らかの指標が必要だからです。災害にあわないため には、安定計算とはこの程度のものだと思って、結果 を妄信しない心構えが重要です。

技術基準の功罪

2020年、ニューノーマルが流行語になりました。ですが、実は、宅地造成に関する技術基準は、いつもニューノーマルです。災害のたびにいつも見直されてきたからです。災害は、たいてい、技術基準の前提を超える雨や地震によって引き起こされてきました。例えば、最近の大地震は、マークした所では起きていません。そのため、しばしば、「ノーマークの地震」といった見出しが新聞をにぎわすわけです。また、今回紹介したパイプ流という斜面水文学の成果や谷埋め盛土の異常な震動なども、研究段階ということで取り入れられていません。

そもそも、技術基準は、安全と経済のバランスをとりつつ設計を行うためのツールです。広く適用するために最大公約数的にならざるを得ず、場所の特性が強く影響する自然相手の事業では、技術基準は最低保証ぐらいの意味しかないのだという心構えが重要です。災害が起きると、「基準は守っていた」という行政側や事業者側のエクスキューズをしばしば目にします。しかし、基準を参考にしながらも、現地に適した設計を目指すのが、事業者の責務であるはずです。

ここで、ある技術者の話をしたいと思います。2011年の東日本大震災では、東北電力の女川原子力発電所も高さ13mの津波に襲われました。同時に地盤も約1m沈下したので、津波の波高は14mに相当し、東

京電力・福島第一原発と同様の原発事故が発生しても 不思議ではなかったはずです。しかし、女川原発が無 事だったのは、ひとえに標高15mの高台に位置して いたからです。わずか1mの差が明暗を分けたことに なります。

高台に位置する原発は、冷却水のポンプを整備しな ければならず、経営的には不利になります。しかし、 東北電力の副社長(技術系)だった平井弥之助は、「貞 観大津波は岩沼の千貫神社まで来た」として社内の反 対を押し切り、地盤の固い牡鹿半島の高台に女川原発 を設置させました。当時の技術基準では、そうした巨 大地震を想定しておらず、津波もせいぜい10m以下 とされていたにも関わらず、でした。一方、東京電力 は、国が定めた「技術基準」と土木学会での「検討」 を盾に企業としての努力を怠り、国土の一部を事実上 失わせるという、国難を招きました。「技術者には法 令に定める基準や指針を超えて、結果責任が問われる| が、平井の信条だったと伝えられています。一方、東 京電力の旧経営陣は、事故後の裁判においても「想定 外」を主張することに必死になっています。同じ業界 とは言え、両者の思想信条と美学は対極にあるように 見えます。

平井弥之助は、東京帝国大学工学部土木工学科を卒業し、東邦電力に就職しました。「電力の鬼」と呼ばれ、官僚統制が大嫌いだった経世済民の男、松永安左工門の会社です。松永の薫陶を受けた平井弥之助の判断の先にも、官からは独立して「民を濟おうとする」技術者倫理があったのかも知れません。

かくして、2011年の大震災は、デシジョンメーカーや専門家と呼ばれる人々の立ち位置をはっきりとあぶり出すことになりました。この時、仙台市を中心とする都市域で起きた宅地災害も、戦後の宅地開発の在り方とともに、それを実行した行政、企業、大学の専門家たちを告発しているのです。恐らく、将来の首都直下地震等では、都市計画、土木、建築などの専門家とともに、われわれ斜面の専門家の見識も問われることになるでしょう。宅地災害を防ぐために、各人がそれぞれの立場でどのような努力をしたのか、あるいは、しなかったのか、歴史の審判を仰ぎたいと思います。

[参考図書]

最上武雄 (1987):『私と土質力学』 (鹿島出版会) 187p. 釜井俊孝 (2009):「初級講座 地すべり」『地盤工学会誌』 57-9, pp. 45-51.