

地盤工学と都市防災

東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科 教授 菊池 喜昭

1. はじめに

地球上の構造物はすべて、地盤に支えられて成り立っています。しかし、このことは地球に空気があることと同じように当たり前のことなので、あまりピンとこないかもしれません。地盤工学という学問は、土が構造物を支えるという観点から見る学問ですが、その基本的な原理は土質力学に基づいています。土質力学の観点から土を見ると、土は、土粒子（固体）と水（液体）と空気（気体）の混合体であるということになります。土粒子というのは、皆さんがいわゆる土とイメージしている土の本体部分で、石、砂、粘土などからなっています。これらはすべて、粒の集まりです。このため、土の本体部分である固体部分を土粒子と呼びます。ここでは、土と言ったら土粒子のことではなく、土粒子と水と空気の混合されたものを指します。

地面から土を取り出して、円柱状（供試体）にしてそれに力を加えると、土は変形するとともに体積変化をします。

土の供試体にせん断力を加えると、せん断変形するとともに体積変化をします。また、土はある一定以上のせん断応力には抵抗できず破壊します。土がどの程度のせん断力で破壊するかは、破壊する面に作用する鉛直応力の影響を受けます。これを式で表すと、

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

となります。ここで、 τ ：土が破壊するときのせん断応力、 c ：破壊する面に作用している鉛直応力に依存しないせん断抵抗（粘着力という）、 σ ：破壊する面に作用している鉛直応力、 ϕ ：せん断抵抗角（土粒子同士のかみ合わせや摩擦で決まります）。

ところで、土がせん断力を受けるときの抵抗は土粒子間の摩擦とかみ合わせによるものなので、実際に土粒子同士を押し合っている力が重要です。仮に土が水を含んでいて水圧がかかっていた場合（イメージとしては、海の底にある土の場合）には、土粒子同士が本当に押し合っている力としては、面に作用する鉛直応力として、全鉛直応力 σ から水圧 u を差し引いた鉛直応力を考える必要があります。このことは、海底面の土は σ

として大きな水圧を受けていますが、この水圧が土のせん断抵抗には寄与するはずがないということから分かると思います。後者の鉛直応力は有効応力と呼ばれるもので σ' と書かれて、 $\sigma' = \sigma - u$ と表すことができます。この時、 u のことを間隙水圧といいます。結果として (1) 式は

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

とあらわされ、このように表現すると、多くの土で $c' = 0$ 、 $\phi' = 25 \sim 45^\circ$ となります。 $\tan \phi'$ は固体の力学で言うところの摩擦係数になり、 $\phi' = 31^\circ$ が摩擦係数 0.6 に相当します。

また、土の供試体が横方向に変形しないようにして（硬い容器に入れて）上から力を加えると体積変化（体積収縮）を起こします。その後、上から加えた力を除去すると、少しだけ高さが元に戻ろうとしますが、完全には元には戻らなくなります。これは、土粒子が粒状体で、その配列が摩擦に支配されているために起こる現象です。粘土を多く含む土は、地面の中ではほとんどの場合空気を含んでおらず、そのような土で作った供試体が体積収縮するときには供試体から水（間隙水）が出ます。粘土を多く含む土では、間隙水が流れ出す速度が遅いため、荷重をかけてもすぐには体積収縮せず、時間をかけて体積変化が生じます。このような現象を土の圧縮現象といいます。特に圧縮するのに時間がかかる現象を圧密と呼びます。

2. 斜面災害

日本は山国であるため、いたるところに斜面があり、大雨が降ったり、地震があったりすると、それが崩壊して災害を引き起こすことが多々あります。また、道路や宅地を造成する際には、土を盛って平らな面を利用することがしばしば行われます。この時、平らな面の脇には自然に斜面が形成され、注意しないとこの斜面も大雨や地震の時に崩壊することになります。これらのような斜面崩壊の課題は、我が国における地盤災害の最たるものになっています。

斜面が不安定になるかどうかは、崩壊しようとする

面に作用するせん断力とせん断抵抗力のバランスによって決まります。斜面が崩壊するときの崩壊形態は様々ですが、表面付近だけが崩壊するというモードがしばしば生じます。

【図1】はその時の状況をイメージしたもので、図のように斜面の表面から一定の深さのところから崩壊するような破壊形態を直線すべり破壊とい

います。斜面が崩壊するときの力学現象の基本はここに示す通りで、その安定性を考える考え方のエッセンスもここに示した通りになります。つまり、【図1】に示すように破壊する部分の一部の土の力のつり合いを考え、考えている部分の土の下面にあるすべり面での土のせん断抵抗とその面に土自身の重さにより作用するせん断力を比較して、せん断抵抗のほうが大きければ斜面は安定しますが、小さければ斜面の安定は保たれなくなり、斜面崩壊が生じます。

【図1】では斜面の傾斜角度を α とし、地表面に平行なすべり面（深さが H ）と地下水面（ $(1-\beta)H$ ）があるとして、斜面の幅 b の部分に作用している力を考えています。ここでは、 b の部分の斜面上側と下側から作用している力を省略していますが、無限に長い斜面を考えるとこれらはキャンセルするため、考える必要がありません。この時、すべり面の力の釣り合いについて考えてみると、この部分の土が滑ろうとする滑り面上のせん断力は

$$S = W \sin \alpha = ((1-\beta)\gamma_t + \beta\gamma_{sat})bH \sin \alpha$$

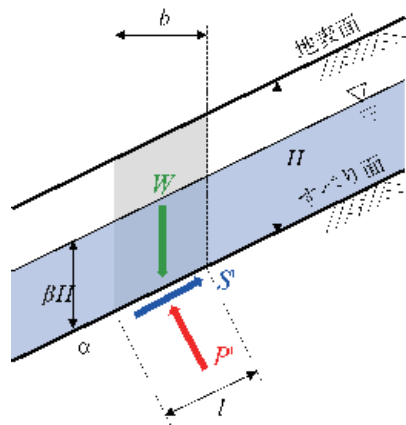
となります。一方で、土のせん断抵抗力は

$$KS' = W' \cos \alpha \tan \phi' \\ = ((1-\beta)\gamma_t + \beta\gamma')bH \cos \alpha \tan \phi'$$

で表されます。SとS'の大小関係がどうなっているかが問題ですが、地盤工学ではこれらの比（ $=S'/S$ ）を取って、安全率と呼んでいます。この時の、斜面の安全率は

$$F = \frac{S'}{S} = \frac{((1-\beta)\gamma_t + \beta\gamma') \tan \phi'}{((1-\beta)\gamma_t + \beta\gamma_{sat}) \tan \alpha}$$

となります。ここで、 γ_{sat} 、 γ_t 、 γ' はそれぞれ、土の飽和、湿潤、水中単位体積重量で、 $\gamma_{sat} > \gamma_t > \gamma'$ となっています。また、 βH はすべり面からの地下水位までの長さです。この式で、 $\beta=0$ のとき、つまり、斜面中に地下水位がない時は、Fが1になるのは、斜



【図1】斜面の安定計算の説明図



【図2】斜面の安定性を高める擁壁の例

面勾配 α が土のせん断抵抗角である ϕ' に等しい時であり、斜面の地下水位が地表面にある時には、 $\tan \alpha = (\gamma'/\gamma_{sat}) \tan \phi'$ という関係を満たさなくてはならないことになり、 $(\gamma'/\gamma_{sat}) < 1$ であるので、斜面勾配 α が土のせん断抵抗角である ϕ' よりも小さくしなければ安定しないということになります。さらに、 α が固定されている場合（つまり今ある斜面の場合）には地下水位が高くなるほど（ β が大きくなるほど）、安全率が小さくなり、斜面がどんどんと危険になっていくことがわかります。

【図1】は雨が降ったときに斜面が崩壊の危険性が高まることを示した図ですが、地震の時には、地震力が土の塊に作用することで崩壊する面に作用するせん断力を大きくするように働くことが起きるため、やはり斜面が不安定になることが起こります。

斜面崩壊を防ぐには、これまでの説明からも分かるように、斜面の勾配を緩くすることが効果的ですが、斜面の勾配を緩くするということは、斜面の水平距離を長くすることにつながり、結果的に人が使える土地の面積を狭めることとなります。それを避けるために、斜面に安定性の高い擁壁（普通に言う壁、【図2】）を作る方法があります。これは擁壁を作ることによって斜面内にすべり面を作らせないようにする方法といえます。

これまでの説明から分かるように、斜面中の地下水位を上昇させないことが斜面の安定性を高めるうえで重要です。そのためには、斜面に水が浸透しないようにするか、斜面に水が浸透しても地下水位が上昇しないように排水性を高めることが大事です。【図2】の示すように、擁壁にはある間隔で塩ビ管が刺さっていますが、これは擁壁背後の地盤の地下水位が上昇しないように、排水を促進するためのものです。実際のところ、擁壁背後の地下水位が上昇すると擁壁の安定性が損なわれることとなりますので、その対策でもあり



【図3】法面補強による危険な斜面への対策

ます。

また、地盤がせん断破壊しにくくなるためには、破壊する面に作用する鉛直有効応力を大きくすることが役立ちますので、斜面の表面に板のようなものを当てて、アンカーを打設し、アンカーで斜面に垂直力をかけるといった対策【図3】もあります。

3. 地盤の圧密による沈下

東京の東部地域はゼロメートル地帯が広く広がっていることが知られています。この地域は、明治時代から第二次世界大戦のごく一時期を除いて昭和50年ころまで、沈下し続けていました。これは、地中から地下水をくみ上げ続けたことにより、地下水位が低下し、その結果、地中での鉛直方向の応力（有効応力）が増加し、地盤が体積変化したことによるものです。昭和50年代に、その原因が明らかとなったため、地下水のくみ上げを規制したところ、地下水位が回復し、現在では明治以前の元の地下水位に回復しています。その結果、地中での鉛直方向の有効応力は元のレベルまで下がりましたが、地盤の高さ（体積）が元の状態に戻ることはありません。この現象は、土の圧縮特性をよく表しています。つまり、土に大きな力を掛けると、土粒子の配列が変わって、土は体積収縮します。その



【図4】ビル周辺地盤が圧密沈下を起こし、ビルと段差ができています

後土にかける力を減らしてもそれだけでは土粒子の配列は元に戻らず、体積は縮んだままとなってしまいます。

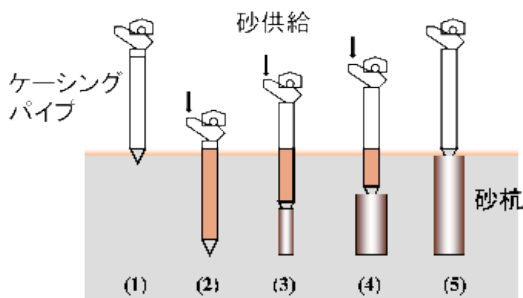
土を大きく分けると、比較的粗い土粒子で構成されている砂と比較的細かい土粒子で構成されている粘土に分類されます。一般にある力を掛けたときに砂のほうが体積収縮量が小さく、粘土のほうが体積収縮量が

大きいという特徴を持っています。このことから、地盤を埋め立てたり、盛土をしたりしたときには、下の地盤が砂地盤だったら沈下量は少なく済みますが、粘土地盤だとたくさん沈下することを覚悟しなくてはなりません。さらに、粘土は、透水性が悪いため、非常に長い時間をかけてゆっくりと沈下していき、下手をすると100年以上も沈下し続けるということが起こります。【図4】は海外の事例ですが、地盤があまりよくないところにビルを建設したところ、ビルは重いので、杭基礎で支持してあり、周辺地盤の対策を十分にしていなかったために、ビル周辺の地盤が沈下し、花壇が斜めになったことを示しています。

力を掛けると体積収縮する現象は砂でも粘土でもどのような土でもみられる現象ですが、粘土のように細かい粒子を大量に含む土では、収縮するのに時間がかかるという特性があります。土が体積収縮するには土から水が出てくる必要があります。土の中の水が動きにくいと土から水が出てくるのに時間がかかります。特に、圧縮する土の層の厚さが厚いと圧密するのにかかる時間が非常に長くなります。これは、土層の深いところから長い距離を移動しないと水が土の外に出られないということが原因していて、土層の層厚の2乗に比例して圧密に時間がかかるようになります。

4. 土を災害に対して強くする

地盤が破壊するときには、主としてせん断破壊をします。これを避けるためには、地盤のせん断抵抗を大きくするか、大きなせん断力が作用しないようにすることが必要となります。これが土を災害に対して強くする方法ということになります。土を強くすることを、専門用語では、地盤改良といいます。地盤改良の主な方法は、(1)良質の土に置き換える、(2)地盤の密度を高める、(3)土を固める、(4)土を補強する、(5)あらかじめ土を圧密する、といった方法があり



【図5】砂地盤を締め固める方法



【図6】固化処理をした粘土を施工している様子

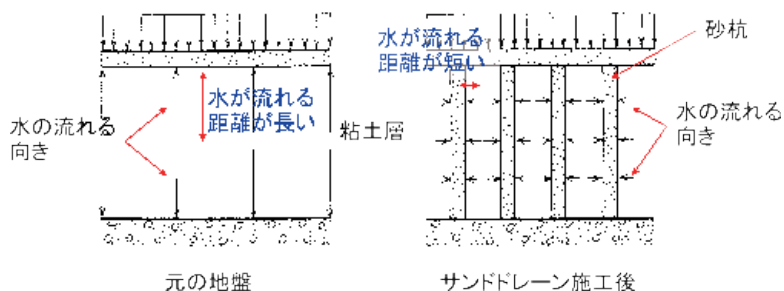
ます。

相対的にせん断強度の小さい粘土を砂に置き換える工法などが(1)に相当します。【図5】に示すように強制的に砂杭を砂地盤中に作り、土の密度を上げるものが(2)に相当し、これは主として砂地盤に対してのみ適用されます。【図6】に示している、セメントなどの固化材を土と混合する方法は(3)に相当し、このことによって土を固めることができます。これは式(2)の c' を大きくする方法といえます。一般に、地盤改良で必要となる土のせん断強度はコンクリートのせん断強度の100分の1以下ですので、コンクリートのようなものを作るのとはわけが違います。土に不織布を敷設するなどして、土に不足している引っ張り抵抗を補おうとする方法が(4)に相当します。【図7】はそのようにして作った盛土の一部を示したのですが、これを用いると、通常考えられないような急勾配の斜面を作ることが可能となります。あらかじめ地表面に大きな荷重(将来その地盤に作用すると考えられる最大荷重など)を作用させて圧密させ、先に圧密を完了させる方法が(5)に相当し、これは主として粘性土地盤で用いられます。この方法をとる時には、粘土地盤の圧密が早く終了するように、圧密促進工法(バーチカドレーン工法)が一般的に併用されます。

各種の地盤改良工法にはそれぞれ特徴があるため、どこでも同じ地盤改良工法が適用できるわけではありません。そのため、上記の原理に基づく様々な地盤改



【図7】ジオグリッドを用いて地盤を補強しているところ



【図8】サンドドレーンを施工することにより水の移動距離が短くなる

良工法があります。

例えば、自然斜面で地盤災害に強い施設を作ろうとする場合には、【図3】にも示したように、アンカーボルトを打設し(4)の原理を使うことが考えられます。盛土のような人工斜面では、(2)の土をよく締め固める、(3)のセメントを混ぜて固める、(4)の不織布等を用いて補強するなどの方法が考えられます。自然斜面との大きな違いは人工斜面はこれから人が作ろうとする斜面ですので色々工夫ができることが特徴です。圧密に対する対策では、圧密沈下量そのものを減らすことはかなりむづかしいですが、圧密を早めに終わらせるために、粘土地盤に【図8】に示すような排水用の砂の柱を構築することで見かけ上の地盤の層厚を薄くしたうえで、事前に盛土をして(5)の対策をし、その盛土を撤去した後に構造物を作れば、その後の長期にわたる大きな沈下を気にしなくてよくなります。

5. おわりに

ほとんどの地盤は自然が作ったものであり、その特性をすべて調べ上げることは基本的にできないため、ある程度は想像しながら対策をとることが必要になってきます。限られた情報の中でいかにして災害に対して社会を守っていくかが社会基盤工学における地盤技術者の責任といえます。