

3-1 地盤災害はなぜ起きる？

人が生活している場で生じるもの

1 宇宙や深海に行ける今日でもマンツルの物質を手にしていない人類

私たちは地球の中を見たことはありません。地球の中心から地表までの距離は約 6400km ありますが、人は地表から 50m ほど利用しているにすぎません。地球の中心から地表までを 100m 走にたとえると、50m の距離は 1mm にも達しません。人類は、地球の表面の薄皮の上で生活しており、その地表を覆っているのが地盤なのです。今日では、宇宙開発や深海探査のニュースが頻繁に報道されますが、そんな時代でも、人類は未だに地球の大半を構成するマンツルの物質をこの手に取って見たことはないのです。

2 自然と共生する

大地は人々の生活の場所であり、人間も自然の一部です。自然は、大地から人間に恵みを与えますが、時として災害をもたらします。日常は穏やかな風景を映しだしている山も、時として地震災害・火山災害・水害などを起こします。地盤に関連するという意味で、これらは地盤災害の一部と言えます。しかし、人が生

穏やかな山の風景も時として災害をもたらす



写真1 世界谷地から栗駒山を望む



写真2 2008年岩手宮城内陸地震で発生した巨大地滑り

活していない場でこのようなことが発生しても「地盤災害」とは言いません。それは人に害を及ぼさない「自然現象」であって、災害ではないからです。災害が人間と自然のかかわりの中で発生するので、災害は人間側にも原因の一端があります。その原因は、長い年月をかけて生じる



図1 土石流の危険区域や

軟弱地盤の土地利用は地盤災害の遠因

大地の動きや数千年に1度というような頻度で起こる自然現象と人間の一生の時間スケールが違うため、それら現象をよく理解しないまま、地盤災害に脆弱な場所を土地利用するために生じます。私たちの生活は自然と共生の場で成り立っているのです。

3 高度に土地利用された現代の都市と地盤災害

現代の都市には、密度の濃い社会インフラが集積しています。都市のほとんどは沿岸部の低地に位置し、地盤災害を受ける可能性が高いことを強く認識すべきです。テクノロジーである程度の減災はできるかもしれませんが、想定を超える災害があることも認識すべきです。

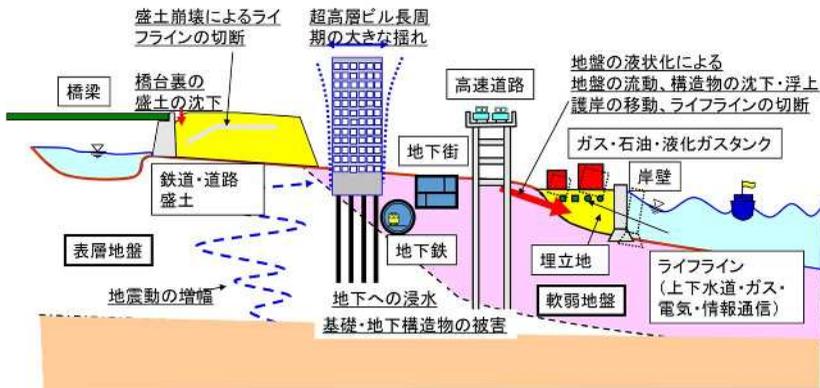


図2 低地の軟弱地盤に立地する都市の社会インフラは地盤災害に脆弱

3-2 いろいろな地すべり

1 地すべりとは

地すべり等災害防止法では、「地すべり」とは、「土地の一部が地下水等に起因してすべる現象又はこれに伴って移動する現象」と定義しています。

土砂災害防止法令の解説では「地すべりの特徴としては、その移動土塊の規模が斜面崩壊に比較して大きく、緩斜面でも発生し、その典型的なものの移動は緩慢で、断続的あるいは継続的であり、誘因としては長雨や融雪が関係することが多い」と地すべりの特徴を表現しています。

図に代表的な地すべりの形状と地すべりの各部の名称を示します。

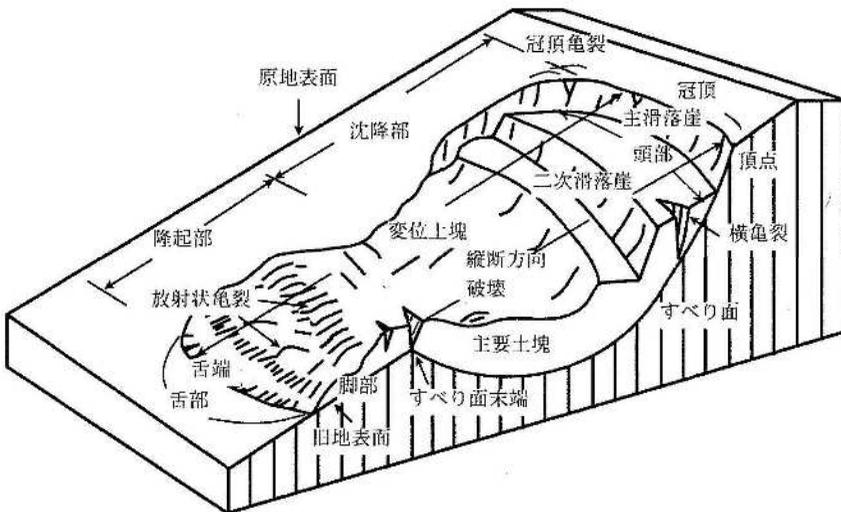


図1 地すべりの名称 (A.K.Turner et.al.,1996)

2 地すべりの分類

地すべりの分類については、①地すべりの分布地帯を地質特性で分

類したもの、②地すべりの平面形で分類したもの、③すべり面形状で分類したもの、④地すべりの地質構成と地すべりの平面形やすべり面形状に一定の関係があるとして区分したものと等があります。

ここでは、④の分類について詳しく示します。④では、初生的な地すべりから終末期の地すべりまでを、次のタイプに分類しています(図)。

【岩盤型地すべり】

過去に地すべりの発生したことの無い、地すべり地形を呈していない斜面で発生するもので、その多くは新鮮な岩盤よりなります。発生すると移動速度は大きく、突発的です。地すべり土塊は一体となって運動し、頭部に明瞭な滑落崖または帯状の陥没を生じます。地形的には凸型斜面、尾根地形に多く発生します。

すべり面は平面状で、頭部では 70° ~ 90° に直立しているため椅子形。すべり面の深さは深い場合が多く、100m に及ぶものもあります。地すべりの原因として記録的な長雨や強雨や地震が引き金となるものや、近年では大規模土工などの人為的誘因によるものも発生しています。

【風化岩型地すべり】

先述の岩盤型地すべりがその後の降雨や融雪水の浸透により風化が促進され、地すべりが再発することになります。地すべり土塊は強風化岩であるため褐色系に変色していることが多く、すべり面を境にして明瞭に色が変わっていることが多いので、すべり面の分布を推定することが出来ます。末端部や側面部、陥没帯では巨礫混じり土砂となっている場所もあります。地形的には初生の岩盤地すべりの時にできた滑落崖と頭部の台地状地形から、地形図から風化岩地すべりを判読することができます。

すべり面は末端部では平面状であるが頭部付近では弧状と直線の複合した形になっています。すべり層の厚さは20~30m 位が一般的です。

【崩積土型地すべり】

最も一般的な地すべりで、土塊は主として礫混じりの土砂によって

地盤災害をもたらすもの

構成されています。風化岩地すべりがさらに漸移したものであり、地すべり地全体がいくつかの段階状斜面に分かれます。上部は巨礫混じり土砂や風化岩盤の形態をとりますが、末端に至るほど細粒化して礫混じり土砂や粘土状を呈します。

すべり面は弧状を呈し、すべり層の厚さは10~20m位が一般的です。地表の乱れが顕著で、池や沼、湿地、凹地等が各所で見られるようになり、地形図からも地すべり地として容易に判読できます。

地すべり滑動は長雨や融雪等の影響を受け、傾向として5~10年に1回位の割で断続的に発生します。

【粘性土型地すべり】

崩積土土塊がさらに細分化すると、地すべり土塊の大部分が礫混じりの粘土で形成されるようになります。

ブロック化がますます進行して多数の小さな運動ブロックに分割され、相互に関連しあいながら複雑な運動を起こし、滑動は継続的になります。地表地形はほとんど一様な緩勾配の斜面となります。

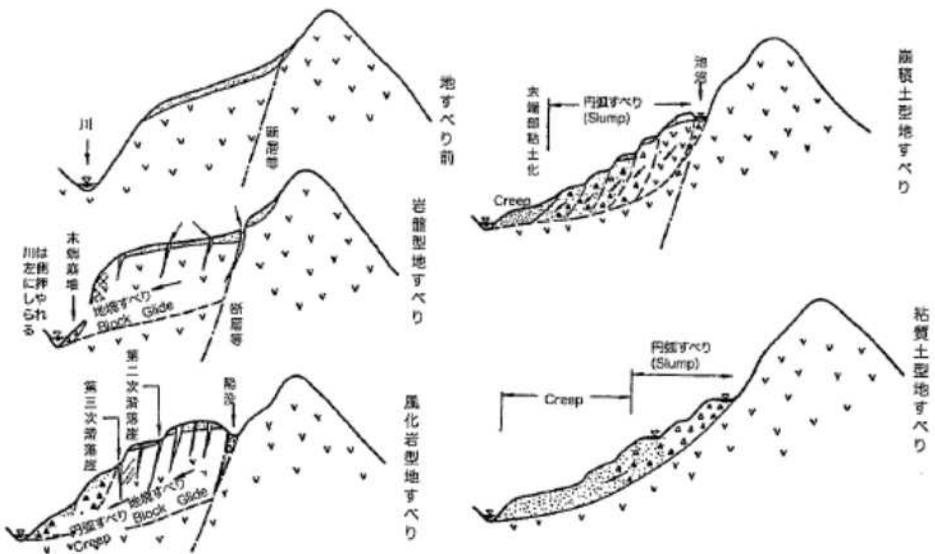
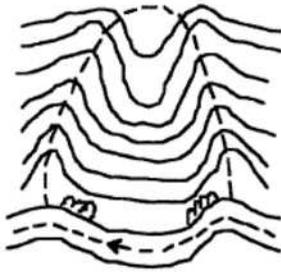
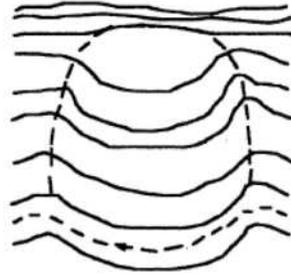


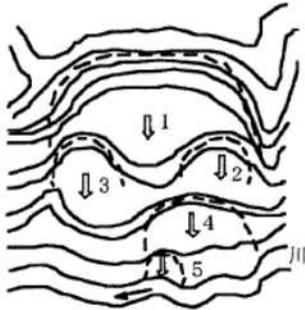
図2 地すべりの型分類と縦断模式図 (渡、1976)



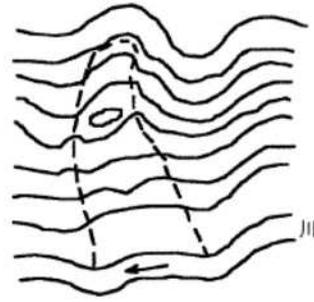
岩盤型地すべり(凸状尾根型地形,渡,1986)



風化岩型地すべり(凸状台地型地形,渡,1986)



崩積土型地すべり(多丘状台地型地形,渡,1986)



粘質土型地すべり(凹状緩斜面地形,渡,1986)

図3 地すべりの型分類と微地形 (渡、1986)

引用文献

- ・地すべり等災害防止法
- ・土砂災害防止法令の解説
- ・Turner, A.K. and Schuster, R.L., 1996: Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report/Transportation Research Board, National Research Council ; 247, pp.36-75
- ・渡 正亮, 山田剛二, 小橋澄治, 1975: 地すべり斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, p.170
- ・渡 正亮, 1986: 斜面災害の機構と対策, 山海堂, p.170

3-3 地すべりと地下水

1 地すべりの誘因としての地下水

地すべり発生の誘因は、集中豪雨（台風を含む）と長雨、融雪、地震等の自然要因、一方、切土や盛土、斜面の一部水没等の人為的要因があります。特に長期間の降雨や、融雪による地下への浸透、すなわち地下水の増加が最も大きな影響を与えます。

地下水が地すべりに与える影響としては、

- ・ 地すべり土塊の飽和による重量の増加
- ・ 含水量の変化などによって強度の低減が大きい地盤特性
- ・ 浸透、溶解や水和作用などによる物理化学的風化作用
- ・ 間隙や亀裂内の含水比あるいは圧力による粒子間圧力の低減

等が考えられます。

2 地下水位と地すべり変動量

図1は、間隙水圧変動(地下水位換算)と地すべり地表移動量との関係を調べたものです(檜垣ら、1991)。間隙水圧の上昇と地すべり移動量とは密接な関係が有ります。伸縮計の日移動量の最大値は概ね1~3日ずれることもあると報告されていますが、地すべり移動量は降雨による間隙水圧の上昇によって生じていると言えます。

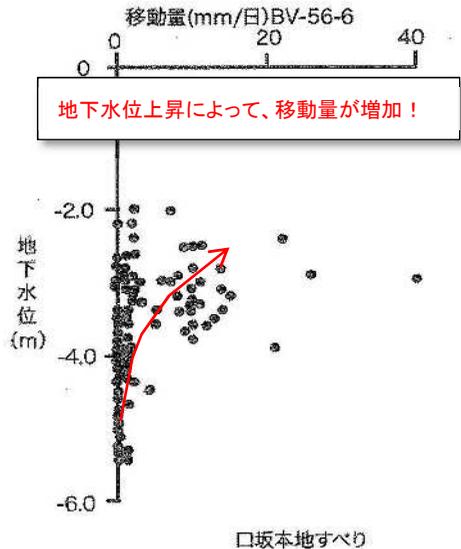


図1 間隙水圧(換算水位)と地すべり移動量の関係(檜垣ら、1991)

3 地すべり対策工としての地下水対策

地下水を対象とした地すべり対策工は、降雨・融雪水を地下に浸透させない「表面排水工」(水路工、暗渠工等)と直接地下水を排水する「地下水排除工」に区分されます。

更に「地下水排除工」は、浅い地下水を排除する地表からの「横ボーリング工」と深い地下水を排除する「集水井」からの「集水ボーリング工」と大規模な地すべり地で実施される「排水トンネル」があります。

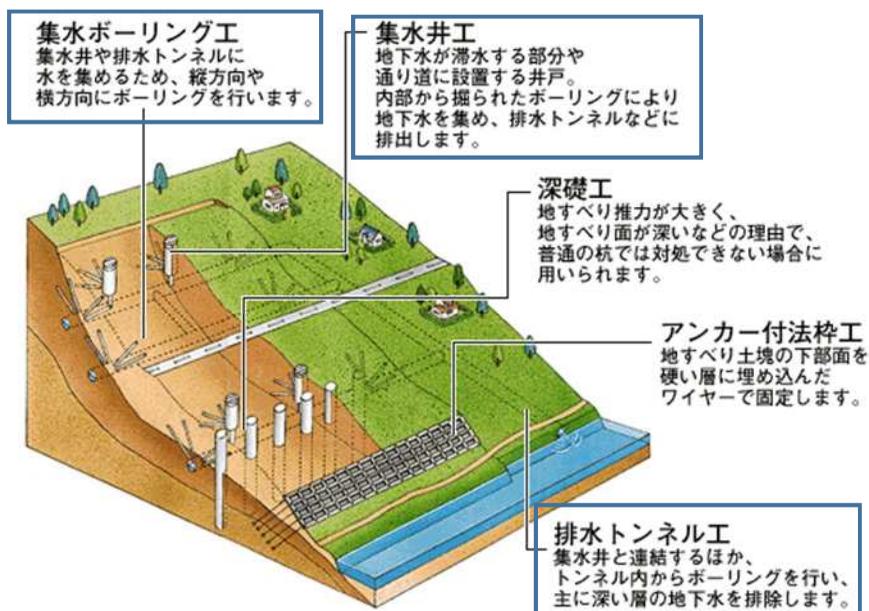


図2 地すべり対策工の例

引用文献

- ・吉松弘行, 地すべり防止技術研修テキスト, 4. 地すべり機構解析 p.10-11, p-20
- ・檜垣大助, 丸山清輝, 吉田克美, 吉松弘行, 1991: 地すべり地における間隙水圧変動の観測, 地すべり, vol.28, No.4, pp.9-16
- ・国土交通省関東地方整備局 HP

3-4 土砂崩れはなぜおきる？

地すべりや土砂崩れは、土砂災害と呼ばれ、この他に土石流などもその仲間に含まれます。誰も住んでいない山の中でこれらの現象が発生しても問題はありませんが、山が多くて面積の限られた日本の中では、どうしても家や道路の周りでも土砂災害のリスクが高くなっていることがあります。国内では平均して1年間に1000件程度発生しています。土砂災害の誘因のほとんどは地震と雨です。2018年の7月に発生した西日本豪雨と9月に発生した北海道胆振東部地震では、いずれも多く土砂災害が発生し、2018年は例年の3倍以上の土砂災害が発生しました。

雨については、6～9月が要注意です。この時期には、梅雨や台風によって大雨が発生しやすいからです。雨による土砂災害の発生メカニズムには、土の強さが水分量によって変化する性質が関係しています。砂場や砂浜で山をつくって遊んだことがある人が多いと思います。高い山を作りたい場合、水が少なくても多すぎても駄目で、程よい水分量のときに一番高い山を作ることができます。図1がそのイメージ図です。土が一番強くなるための適切な水分量があります。その条件では、土の粒が最もがっちりとお互いを支え合います。逆に一番弱くなるのは水分量の多いべちゃべちゃの状態です。このために大雨の際には土砂災害が発生しやすくなります。

地震については、地震自体がいつ発生するのかわからないため、要注意な時期というのではありませんが、日本という地震大国に住んでいる以上、常に注意しておく必要があります。地震の際には、地震の大きな力によって斜面が揺すられることになるため、土砂災害が発生しますが、斜面の角度が急であることの他に、地質や地層構造の向きなども関係します。地層構造の向きの簡単な例としては、図2に示す受け盤と流れ盤があります。一つの同じ山でも、斜面の表面の向き（崩れる方向）に対して地層の向きが同じ方向なのか違う方向なのかで崩れやすさが異なります。崩れる向きと地層の方向が同じ流れ盤の場合は要注意です。

ここまで、土砂災害が発生する理由について説明してきましたが、土砂災害が発生してしまえば逃げることは非常に難しくなります。特に、地震は突然やってきますので、事前に逃げることは難しいのですが、それでもそのリスクを事前に知っておくことで、防災意識の向上などにつながり、やがてそれが自分や家族の命を災害から守ることにつながります。各地域で用意されているハザードマップ等で土砂災害のリスクは簡単に確認することができます。

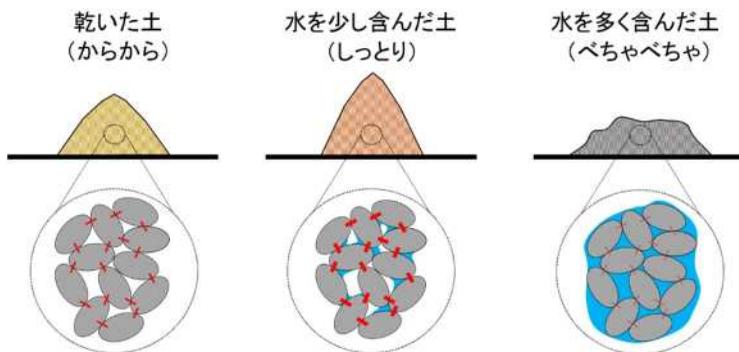


図1 土の強さと水分量の関係

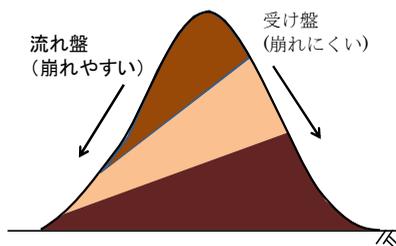


図2 受け盤と流れ盤

3-5 雪崩はいつどこで起きる？

1 雪崩の発生要因について

雪崩の主な発生要因として、斜面勾配 θ 、雪質や積雪層の沈降現象、及び地熱融雪等が挙げられています。また戦後70年ほど前に国内に導入され、雪崩対策として活用してきた「スイス方式」も時代の流れと共に、細部について確認が必要な時代になってきています。

1-1 平地における積雪層の沈降現象

斜面の積雪層は常時、圧密や地熱融雪等により流下し動いており、このような現象が大規模な雪崩の主な要因となっています。図1は北海道地方の平地で12月より翌年3月までの期間に積雪深を観測し、連続断面図を構成した資料です。この図面より下記内容が確認されます。

(1) 降雪時の柔らかい雪質層は急速に締固まり薄層になります。

図2は図1の積雪表面を一部抜取り拡大した図面です。この図より1日で $h \div 50\text{cm}$ 程に降り積もった降雪深が10日間程で $h \div 5\text{cm}$ 程

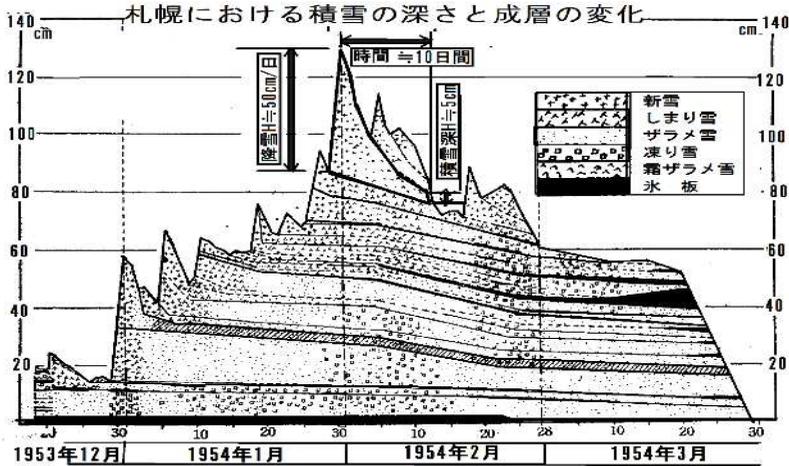


図1 北海道の平地における冬期間の積雪層の沈降現象

(1/10程)に急速に沈降している現象の現象が確認されています。この様な現象が表層雪崩の主要因と判明]

(2)更に、積雪層底面は地熱融雪雪等により3日間で $h \div 1\text{cm}$ 程の速度で積雪層全体が沈降している現象を確認しています。[この様な現象が全層雪崩の主要因と判明]

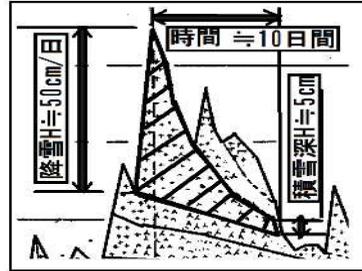


図2 図1上部の拡大図

1-2 斜面積雪層の「流下速度」と「雪崩発生」

山間部の斜面に積雪層が形成されると、平地では見られない現象が発生します。図3は斜面勾配 $\theta \div 45^\circ$ 、斜面長 $L \div 10\text{m}$ 、積雪深 $H \div 3\text{m}$ における積雪層断面観測により積雪表面と底面の流下速度を観測した資料です。この観測資料

により斜面上下で $L① \div 1\text{cm}/\text{日}$ 、 $L② \div 4\text{cm}/\text{日}$ が確認され、その速度は気温の上昇や降雨等により影響を受けていることが判明しました。また流下速度は下部($L① < L②$)上部($L1 < L2$)となっています。更に積雪層の流下速度は底面より表面が速く、矢印の様に谷側に移動し沈降していることが判明しています。

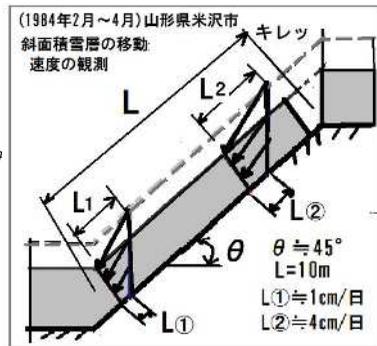


図3 斜面積雪層の流下速度

この様な中で、雪崩の発生予測資料として図4の様な「斜面積雪層の流下速度と雪崩の発生危険度」を表した参考資料があります。この資料を参考に図5の様な全層雪崩が発生した直前の積雪層底面の滑り

グライド速度	発生時間	危険度
1cm/分 (60cm/時)	10分間	危険
1cm/時	10時間	注意
1cm/日		安全

速度は60cm/時程であったものと推測されます。またこの様な現象が判明した今後の全層雪崩対策としては、図5③の様に下層斜面の積雪層の流下速度が、上部斜面に累積し増幅することのない様に、周囲

図4 グライド速度と雪崩発生の危険度

地盤災害をもたらすもの
の予防柵の配置(千鳥配列)とは異なった配置(直線配列)で、予防柵の間隔 $L \div 25\text{m}$ 程に四列配置し計画しています。(柵高 $H \div 50\text{cm}$ で十分)

2 斜面積雪層の「流下速度」と「全層雪崩」

図5は2011年2月27日に、国道112号、山形県西川町付近で斜面勾配 $\theta \div 40 \sim 45^\circ$ 斜面長 $L \div 200\text{m}$ ほどの現場で大規模な雪崩が発生し国道が埋没した現場資料です。図5①は雪崩発生2週間前ほどの資料で、図5②は雪崩発生1日後、及び図5③は雪崩予防柵を設置した1年後の資料です。全層雪崩が発生する前の図5①から見て、斜面上部にキレツ等の発生が確認できない状況で有りました。しかし雪崩が発生する3日前に気温が上昇し平均気温 $+1,2^\circ$ ・最高気温 $+11,8^\circ$ であったことが判明した。積雪深 $H \div 3\text{m} \sim 4\text{m}$ 底面における地盤面では、図3の様に、地熱融雪等により積雪層全体が流下し、斜面長 $L \div 200\text{m}$ の上部斜面の積雪層底面の滑り速度が累積して $60\text{cm}/\text{時程}$ の異常な速さで流下していたものと推測されました。この様な現象により、上部斜面積雪層の 100m 区間程が崩落したものと推測されます。



図5 斜面勾配 $\theta \div 40 \sim 45^\circ$ 斜面長 $L \div 200\text{m}$ の大規模な雪崩

3 表層雪崩の発生要因

積雪層の安定勾配は図6①②の様に、斜面勾配 $\theta \div 45^\circ$ に降積もった降雪は、時間が経過すると徐々に変形、雪面勾配 $\theta \div 30^\circ$ 程になります。また図6①の様に雪崩予防柵が高い場合には、柵下に大きな空洞部が形成され不安定な雪崩対策となります。これまでの「スイス方式」では柵高が高いほど安全性が増大すると考えてきか、逆に柵工背後が空洞化して「巻きだれ」が発生し不安定になります。なお図6②の様に柵高が低い場合には空洞部が小さく、経済的で安定した階段状が形

成されます。同様に国内の屋根雪対策は古来より図7③(屋根勾配 $\theta \approx 55^\circ$)の様に、柵高の小さい横材(昔は径15cm程の丸太)を使用し今日に至っています。また下段の屋根勾配は $\theta \approx 15^\circ$ (勾配 $\theta < 30^\circ$)であり、雪面勾配と同勾配となり安定しており雪面に階段工は形成されません。

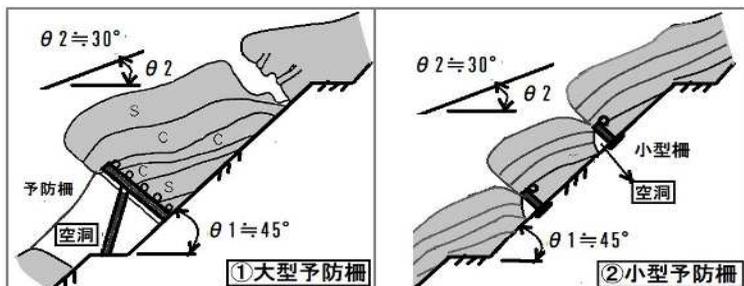


図6 積雪層の安定勾配 $\theta_2 \approx 30^\circ$ (柵高により空洞が左右される)



図7 日本古来の屋根雪止め工法(柵高が小さくとも安定)

4 まとめ

斜面の雪崩は全層雪崩と表層雪崩に大別されます。全層雪崩は斜面勾配 θ や地盤面の不陸(凹凸状況等)により大きく左右されますが、表層雪崩発生は降雪時の雪質や斜面勾配($\theta > 30^\circ$)に左右されています。このようなことから、スキーや冬山登山等においても表層雪崩の安定勾配 $\theta < 30^\circ$ 、及び全層雪崩は気温の上昇等に大きく左右されていることに留意し、長大斜面では特に安全管理に努める必要があります。

参考文献 日本雪工学会誌 (2018-10) pp.201~211.

3-6 宅地造成地の地盤被害の誘因と素因

台地や丘陵地を切盛りして平坦地に造成した宅地造成地では、主に盛土したところで豪雨や大地震時に被害を受ける事例が近年多くなっています。

1 豪雨や大地震による被害例



写真1 豪雨による被害例



写真2 地震による被害例

2 宅地造成地の地盤被害の誘因

宅地造成地の地盤に被害を及ぼす誘因としては、地震と豪雨の大きく2つが挙げられます。

地震では、震度6弱程度以上の地震動で宅地造成地にまとまった被害が発生する事例が多く見られます。図1は、2016年熊本地震における益城町（KIK-net 益城）で観測された地震動ですが、益城町では震度6弱以上の揺れが28時間で5回発生し

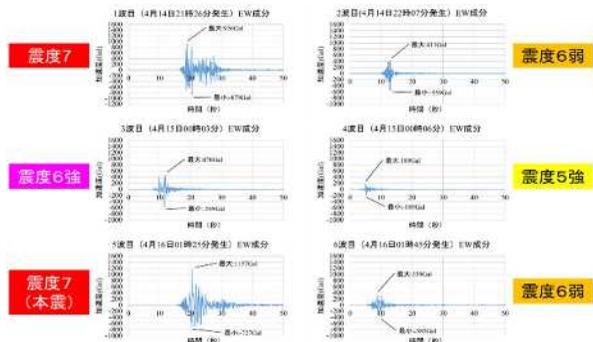


図1 益城町の観測地震動

て甚大な被害が発生しました。また、豪雨では、短時間に集中的に大量の雨が降ることで、地中の間隙水圧あるいは地下水位が上昇し、主に盛土斜面で崩壊が発生しています。

3 宅地造成地の地盤被害の素因

(1) 地下水位

地下水位が高いと、水圧による水平方向の力や地震時の慣性力等が大きくなり、盛土斜面の崩壊や擁壁の変状等の被害を受けやすくなります。また、地下水位が高いと、緩い砂質系地盤では地震時に液状化が発生しやすくなります。このほか、融雪期では、地下水位の上昇に伴い地すべりが発生しやすくなります。

(2) 盛土地盤の品質や外的要因等

緩い締固め状態の盛土では、地盤の強度（せん断抵抗力）が小さいため、豪雨や地震で斜面がすべりやすくなるほか、揺すり込みによる沈下等が発生しやすくなります。また、図2に示すような地震時の被害要因もあり

あります。このほか、亜炭層等の採掘跡地（空洞）の陥没、下水道管路の老朽化による空洞形成とそれに伴う陥没等も外的要因としてあります。



図2 地震時の被害要因

3-7 液状化はなぜおこる？

みなさんの足元にある地盤、それがどのようなもので出来ているか観察したことはあるでしょうか？我々の多くが生活している平野部では、粘土や砂といったある程度目に見える粒々の集合体（土）で形成されています。専門的には、粒々の大きさによって、小さい方から粘土、シルト、砂、礫と呼ばれます。このうち、主にシルトや砂の部分に液状化が発生することになります。但し、自然の産物ですから、それらが完全に分離して存在しているわけではなく、粘土とシルト・砂が混じっている場合、粘土～礫まで全て混じっている場合など、様々な構成で地盤が形成されているため、シルトや砂が多く含まれる地盤は粘土や礫が混じっていても液状化が発生する可能性があると考えていた方が無難です。

地震によって液状化が発生するにはある条件が揃っている必要があります。まずは地表面から比較的浅いところに地下水位があること、次に粒々の集合体が緩く（隙間が大きく）堆積していることです。そのような地盤にある程度大きな地震の揺れがやってきた場合に液状化が発生します。

緩く堆積している土は、せん断という変形を与えると、上側の図のように粒々同士が接触しながら配置を変え、粒々同士のすき間（空隙）がつぶれて沈下を生じます。但し、その過程では、常に粒々同士は接触しているので、より上方にある土の重さは粒々同士の接触力で支えられています。その一方で、空隙が水で満たされている場合、水は体積を小さくしようとする力に対しては非常に硬い（水風船は変形させることは出来ても潰すことは出来ません。空気の風船ならば両方可能です）ので、水が空隙から逃げてくれないと、上にある土の重さを水が支えることになってしまい、粒々同士の接触力が無くなります。つまり粒々が水の中で浮いた泥水の状態になってしまいます。これが液状化の正体です。

そのような泥水のような状態になってしまうと、水風船を変形させ易いと同様に、地盤の傾斜に合わせて大規模な流動を生じたり、そ

の地盤上にある構造物の沈下や地下に埋設された軽い構造物（マンホール等）の浮き上がりを生じたりします。さらに、一旦かみ合わせが外れてしまった粒々は水が逃げた後の間隙の圧縮量も大きくなるため、液状化が発生しない場合よりも大きな沈下を生じます。

なお、粘土が液状化しないのは、粘土のような小さな粒々になると、粒子が接触している部分の摩擦だけでなく、粒々同士が近くにあるだけで発揮される微視的な力があるためです。逆に粒の大きな礫が液状化しないのは、あまりに隙間が大きすぎて、水が隙間から逃げるスピードが速すぎるため水圧が上がらず、隙間が水で満たされていても常に粒々同士が力を伝えあっているからです。

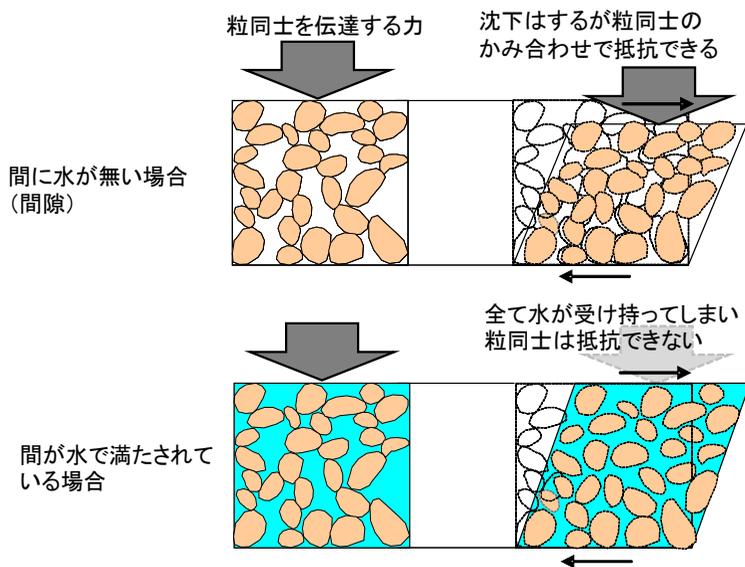


図 1 水が影響する土の変形や抵抗

3-8 軟弱地盤の沈下と安定

1 軟弱地盤とは？

土は、粒子の大きさによって4つに分類できます。土粒子の大きい順に「礫」→「砂」→「シルト」→「粘土」のように区分され、これらの土粒子と土粒子の間の隙間で地盤は構成されています。この地盤の性質は、土粒子の種類はもちろんですが、隙間に含まれる水分の量の違いにより変わってきます。乾いている時は硬いグラウンドの土が、雨が降ると軟らかく、ぬかるんでしまうのと同じことです。土粒子の種類が主に「シルト」「粘土」で構成されており、隙間に多くの水を含んでいる地盤を『軟弱地盤』と言い、ドロドロとしており、強度が弱く透水性(水の通し易さ)が悪い状態です。このような軟弱地盤上に構造物を建造しようとする際、「沈下」と「安定」の現象が問題となってきます。

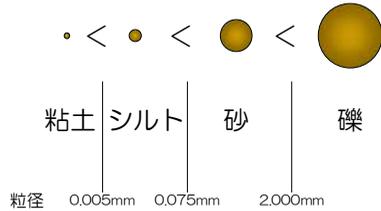


図1 土粒子の大きさによる分類

2 沈下の問題

軟弱地盤を例えると“豆腐”のようなものであり、豆腐を硬くするために水抜きを行う場合、重石をのせて時間をかける必要があります。これは、豆腐の中に含まれている水が外に染み出るのに時間がかかるためです。

軟弱地盤も同じように、盛土などの荷重が作用すると、隙間の水が絞りだされるため、地面が大きく変形してしまいます。この現象が沈下と

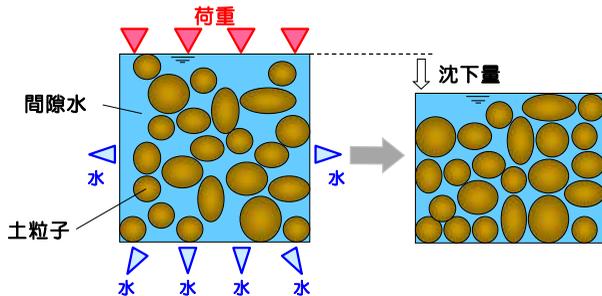


図2 沈下現象のイメージ

呼ばれる現象です。また、軟弱地盤は透水性が悪い地盤ですので、隙間の水が排出されるのが遅いため、長期間（場合によっては、数十年）にわたって沈下現象が起こってしまいます。もし、家を建てた後に地盤が沈下してしまうと、せっかくの家が傾いてしまい、大変な問題となってしまいます。

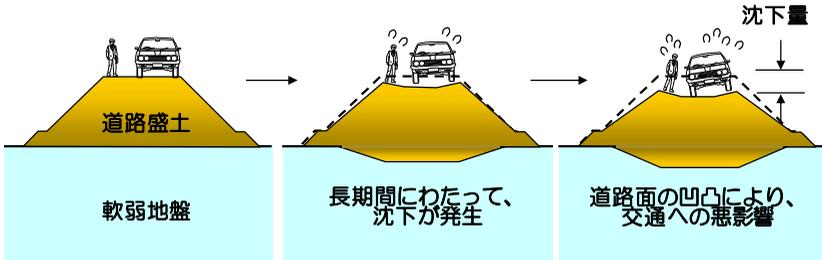


図3 長期間にわたる沈下現象

3 安定の問題

道路や鉄道路線の建設、土地造成、ダムや堤防の建設においては切土や盛土により人工的な斜面が作られます。これらの斜面は建設中や建設後において崩壊せずに安定性を保っておく必要があります。この斜面の安定性は、ある土の塊が「滑り落ちようとする力」と「滑りに抵抗しようとする力＝地盤の強さ」のバランスにより評価します。軟弱地盤では、この「滑りに抵抗しようとする力」が小さいため、容易に「滑り落ちようとする力」が上回ってしまうため、土の塊が一気に移動し大変形を起こしてしまいます。

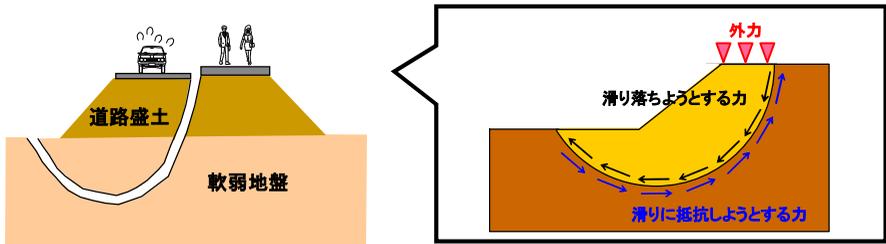


図4 斜面安定のイメージ