令和４年度（公社）日本地すべり学会
関東支部シンポジウム

地すべり技術の現状と課題

令和４年５月

１．名称：公益社団法人日本地すべり学会関東支部令和４年度シンポジウム

２．テーマ：地すべり技術の現状と課題

３．期日：令和４年５月11日（水）13:00～16:10（開場 12:30）

４．場所：日比谷図書文化館（地下１階）大ホール（東京都）
　　東京都千代田区、日比谷公園内

５．次第

(1)開会の辞　13:00

(2)シンポジウム

講演　１　13:05～13:45
因果関係が判然としない地すべりから考える今後の研究課題
松浦　純生（京都大学 名誉教授）

講演　２　13:45～14:25
地すべりの予知と防災マネジメント ダム関連の変動を例に―5W2H
小俣新重郎
（日本工営(株) 顧問・技師長）

講演　３　14:25～15:05
地下水計測の課題
上野　将司
（応用地質(株) 社友）

休憩　15:05～15:15

総合討論(コディネータ：櫻井正明)　15:15～16:05

(3)閉会の辞　16:10

目次

因果関係が判然としない地すべりから考える今後の研究課題 ····· 4
（松浦　純生、京都大学 名誉教授）

地すべりの予知と防災マネジメント ダム関連の変動を例に―5W2H ····· 14
（小俣新重郎、日本工営(株) 顧問・技師長）

地下水計測の課題 ····· 27
（上野　将司、応用地質(株) 社友）

講師略歴

松浦　純生（まつうら　すみお）

1984 年　農林水産省林業試験場（現森林総合研究所）防災部入所
2010 年　京都大学防災研究所地盤災害研究部門
2021 年　同　定年退職

小俣　新重郎（こまた　しんじゅうろう）

1972 年　日本工営株式会社入社　技術調査部
2009 年　京都大学　博士号取得
2020 年　日本工営株式会社　国土基盤整備事業本部，技師長（現在）

上野　将司（うえの　しょうじ）

1969 年　応用地質株式会社入社
1995 年　同本社斜面防災部長
2016 年　顧問
2017 年　社友

公益社団法人
日本地すべり学会
The Japan Landslide Society

令和4(2022)年5月11日(水)

日本地すべり学会関東支部シンポジウム
「地すべり技術の現状と課題」
(於:日比谷図書文化館)

因果関係が判然としない
地すべりから考える今後の研究課題

松浦純生
(前京都大学防災研究所)

本日の内容

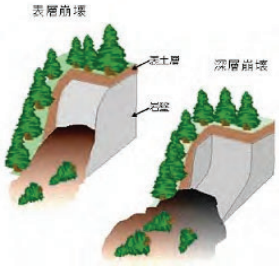
1. はじめに
2. 融雪期に発生した地すべりの概要
3. 融雪水量予測の高精度化
4. 雪崩デブリや崖錐などによる載荷
5. 後背斜面からの地下水流入
6. 各種要因による現状安全率の低下

■用語の定義について(問題提起)

■一般的な表層崩壊と深層崩壊の定義

	表層崩壊	深層崩壊
現象	斜面基盤層の上部に堆積した、もしくは基盤層が風化して形成された表土層が、基岩との境界で崩壊する現象	一般的に、斜面基盤層の内部に形成された弱面を境界として崩壊する現象
地質条件	特定の基盤地質との関係は少なく、どのような地質条件でも発生する	付加体や火山体周辺地域など地質条件との関係が深い

◆風化残積土:岩石がそのままの位置で風化し堆積
◆運(堆)積土:
　水積土:水によって運搬され堆積したもの
　　河成土:河川の流水によって運搬・堆積
　　海成土:海流等によって運搬・堆積
　　湖成土:湖などで堆積したもの
　風積土:レスと呼ばれ日本の山地に広く分布
　崩積土:重力によるもの。崩壊や地すべりなどにより堆積
◆火山性土:降下火山砕屑物である軽石、スコリアなどを含む



(https://www.mlit.go.jp/)

■用語の定義について

- しかし、従来の定義に当てはまらない事例も散見される。
- 一般的に基盤地質に影響を受けないとされてきたが、実際は基盤地質に大きな影響を受けると考えられる。

豪雨によって発生した深さ約5mの「表層崩壊」
(福岡県朝倉市黒川地区)

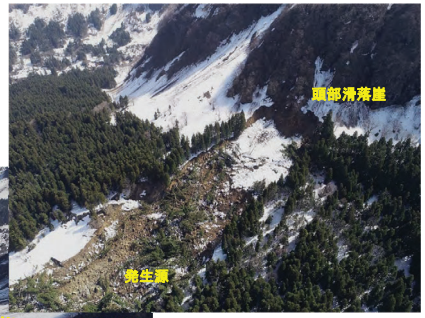
豪雨によって風化岩盤表層部で発生したいわゆる「表層崩壊」
(北海道礼文町元地地区)

九州北部豪雨災害(平29(2017)年)では、多数の崩壊が発生したが、深成岩類である花崗閃緑岩地帯では、風化残積土が深部まで発達したため、5m以上の深さを持つ「表層崩壊」が発生した。これらの崩壊面は、マサ土とサプロライトのそれぞれの層内と境界部分、サプロライトと基岩の境界部分などで発生。

平成26(2014)年8月の豪雨により、礼文島では周氷河堆積物地帯で多数の崩壊が発生した。一方、桃岩で「表層崩壊」が起こった。桃岩は新第三紀中新世にデイサイトマグマが貫入してできた巨大な岩塊。風化した岩盤の表層部で深さ50～100cmの崩壊が発生した。

■多雪地帯における地すべりの発生

令和3(2021)年3月3日22～23時頃に、新潟県糸魚川市来海沢地区で地すべりが発生し、住家など6棟が全半壊などの被害を受けた。



地すべりの発生源や流送域には多量の積雪が残存していたため、融雪が最も有力な誘因と考えられる。

加えて移動体が著しく流動化し、約1.1 kmにわたって流下したことも多量の融雪水が供給されたことを示唆する。

このため、融雪が地すべりの発生にどのように関与したか検討した。

■多雪地帯における地すべりの発生

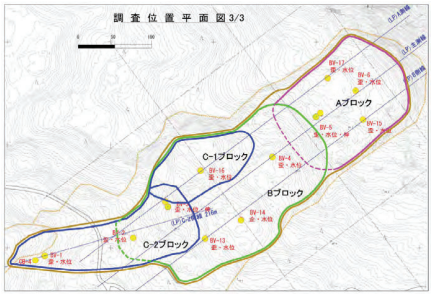
来海沢地すべりは、船浦山(標高772m)の北西斜面中腹部の遷緩点付近の標高約530mを頭部として、長さ約330m、幅約120m、最大すべり面深さ約15mの規模(新潟県地すべり対策研究会、2021)で発生した。その後の機構調査では、過去の地すべりが拡大したことなどが判明し、さらに規模が大きくなった。

地すべりブロックはA、B、Cの大きく3つに分けることができ、2011年と2013年に崩壊したCブロックは再拡大した部分も含めて2つのブロックからなるとされる。

地すべりが発生した箇所の基盤地質は、砂岩・泥岩を主体とする新第三紀の根知層で、後背斜面は海底火山の噴出物である安山岩～玄武岩質の比較的硬質な海川層からなり、いわゆるキャップロック構造を呈している。

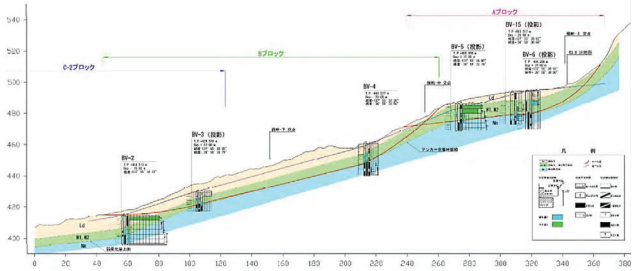
ただし、発生源には過去の崩壊や地すべりなどによる崩積土が厚く堆積している。

すべり面は新第三紀の根知層の強風化泥岩層中に形成されたと考えられている。



(新潟県糸魚川地域振興局森林施設課)

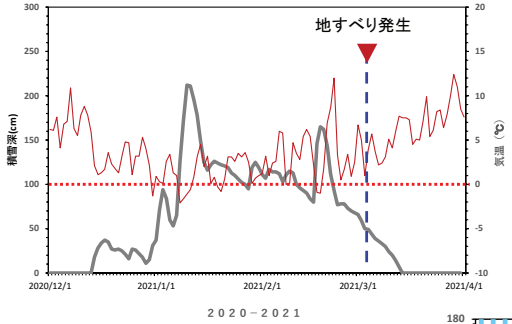
地すべり平面図とブロック区分



(新潟県糸魚川地域振興局森林施設課)

地すべり縦断面図と地質区分

■積雪環境と融雪水量の推定



2021(令和3)年寒候期における積雪深と気温の変化
(気象庁アメダス能生観測所)

2020年12月と翌年の1月初旬に多量の降雪を記録。

最大積雪深は212cmで、2021年1月10日に記録した。

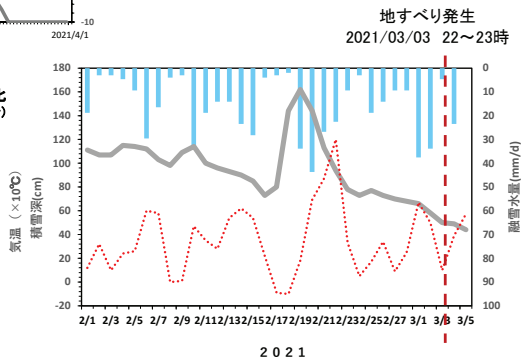
その後、2月中旬までは、例年よりも少ない降雪量。

しかし、2月18日に新たな降雪により165cmの積雪深を観測。

気象庁アメダス能生の積雪深のデータをもとに、積算暖度法(融雪係数法)によって融雪水量を算出。

しかし、例年と比較してやや多い程度で、多量の雪が解けたとは言いがたい。

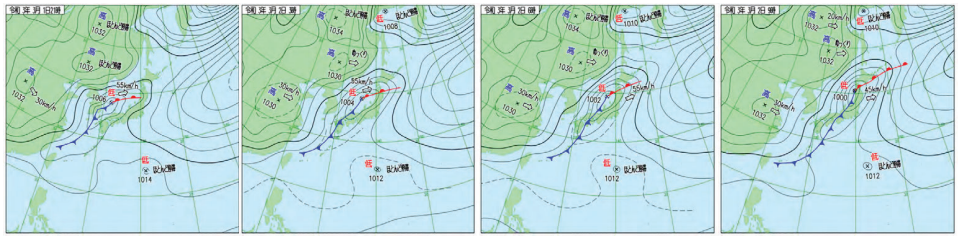
地すべりの発生を合理的に説明することはできなかった。



地すべり発生前の積雪深の変化と積算暖度法による融雪水量の推定

■メソスケールの擾乱による強風

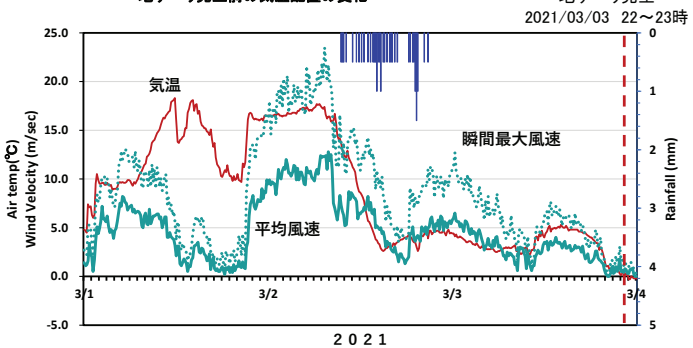
(気象庁)



地すべり発生前の気圧配置の変化

地すべり発生前の天候を調査したところ、3月1日の22時頃から翌日の午前中にかけて、気温が急上昇するとともに南からの強い風が吹いていた。

とくに、3月2日の07:30にはアメダス糸魚川観測所で最大瞬間風速23.5ms⁻¹を記録している。その時の気温は17.4 ℃であった。



地すべり発生前の気象状況
(気象庁アメダス糸魚川観測所)

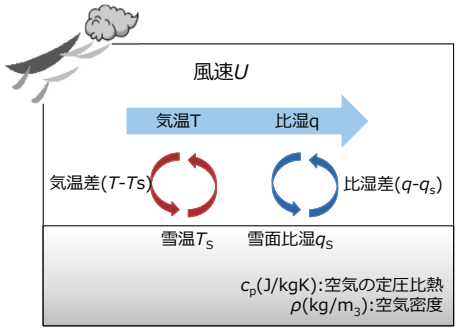
■積雪層における熱収支

強風時に融雪量を過小評価
→顕熱・潜熱フラックスの過小評価が原因？

熱収支式：積雪層が受け取るエネルギー　を全て書き下す:物理学的手法

$$Q(\mathrm{W/m^2}) = Q_L + Q_R + \boldsymbol{Q_H} + \boldsymbol{Q_E} + Q_r + Q_G + Q_O$$

融雪熱量　長波放射　短波放射　顕熱　潜熱　雨量　地中熱　積雪層内の伝導熱



・鉛直分布から決定、雪面や地物の状態により変動
・z_0 は森林植生に影響を受ける(近藤,2000)

バルク法

$$Q_H = c_p \rho C_H U(T-T_S)$$

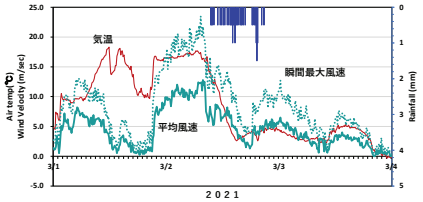
$$Q_E = l \rho C_E U(q-q_S)$$

顕熱バルク係数C_H、潜熱バルク係数C_E

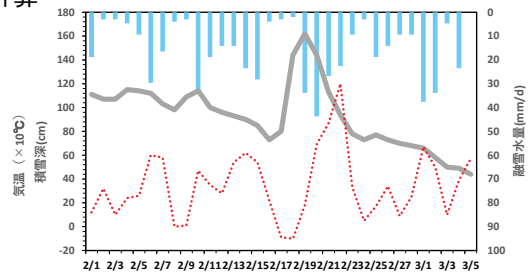
$$C_H = \frac{k^2}{\ln\frac{z}{z_0}\ln\frac{z}{z_T}}, \quad C_E = \frac{k^2}{\ln\frac{z}{z_0}\ln\frac{z}{z_q}}$$

C_p:定圧比熱、l:気化熱、ρ:空気の密度
k(=0.4):カルマン定数, z(m):測定高度
z_0, z_T, z_q(m):風速、気温、比湿の粗度長

■バルク係数を変えた融雪水量の再計算



地すべり発生前の気象状況
（気象庁アメダス糸魚川観測所）



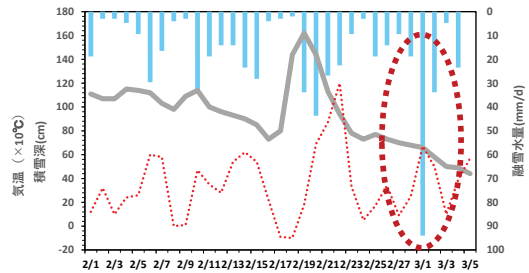
地すべり発生前の積雪深の変化と積算暖度法による融雪水量の推定

これまでの研究により、山間地で強風が吹いた場合、バルク係数が2～2.5倍になることが報告されている。

今回は、夜間に強風が吹いたので短波放射量を考慮しなくても良い。

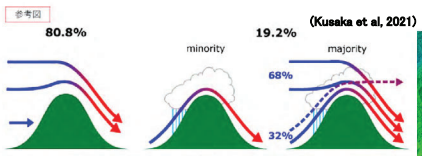
したがって、顕熱・潜熱フラックスのバルク係数を修正して、融雪水量を推定。

しかし、それでも日雨量に換算して100mm未満となった。地すべりの誘因として、なおも融雪水量が不足していると思われる。



バルク係数を変えて融雪水量を再計算した結果

■風向・風速と地形的特徴

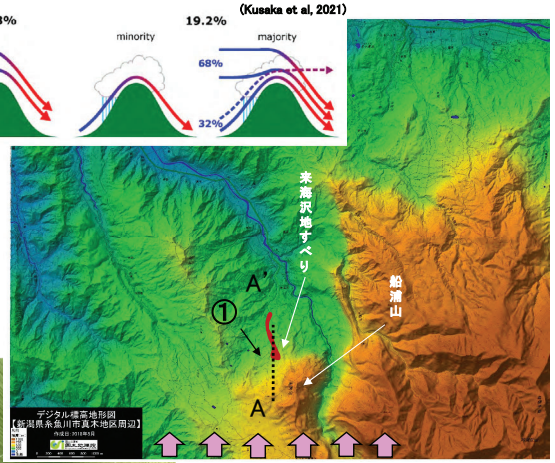


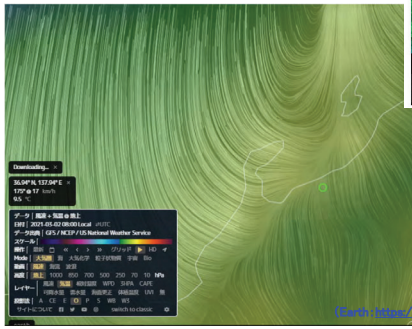
(Kusaka et al, 2021)

強風時の接地境界層の風向や風速をみると、南からの強風が糸魚川を中心として吹いていた。

来海沢は船浦山(772m)の北面に位置し、激しい大気の乱流が発生していたと推定される。

最新の研究によると、フェーン現象の80%以上は力学メカニズムで発生しており、これまでの通説であった熱力学メカニズムは20%以下(Kusaka et al, 2021)。





(Earth, https://earth.nullschool.net/jp/)

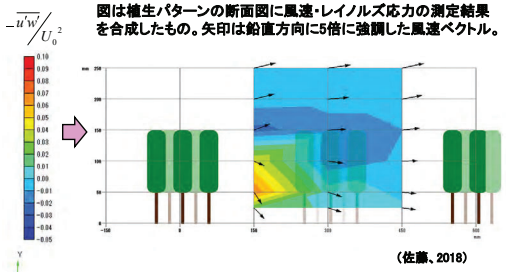
発災前の姫川流域付近における風環境

■森林植生の影響

地すべりの発生源は樹高約12～17mの針葉樹（スギの人工林）が成立していた。

地すべり発生斜面は船浦山(標高772m)の風下側にあることから、吹走してきた強風が林縁部に到達し、樹冠によって補足され、さらに強度の大きい乱流が発生した可能性がある。

図は植生パターンの断面図に風速・レイノルズ応力の測定結果を合成したもの。矢印は鉛直方向に5倍に強調した風速ベクトル。



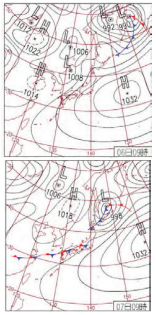
（佐藤、2018）

強風時における森林群がレイノルズ応力分布に及ぼす影響

林縁から侵入した風は、樹冠で補足され林内に入った風と合流し、強度の大きい下向きのフラックスとなって雪面との熱交換を活発に行った可能性が考えられる。

地すべり発生源付近の植生

■局地的な擾乱による地すべりの発生事例（2017/04/07）

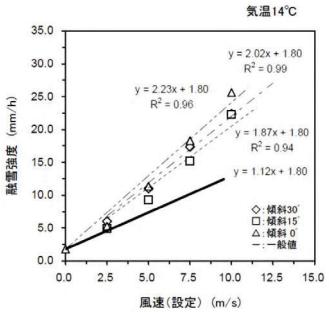


（気象庁）

気圧の谷の接近にともない、2017年4月6日の18時頃から強風が吹き始め、平均で6 ms^{-1}、最大13 ms^{-1}に達する東南風が、翌7日の6時過ぎまで観測された。

強風現象により、24時間雨量に換算して最大125mmの地表面到達水量を観測したが、そのうち約半分は6～7日かけての夜間に発生。

多量の融雪によって風向きと反対斜面で数カ所の小規模な地すべりが発生した。



（萩村ほか、2014）

各傾斜における融雪強度の関係

強風時の主たる風向と地すべりの発生位置

融雪期に発生した小規模な地すべり

■地すべり頭部付近における雪崩デブリの堆積

後背斜面となる船浦山北斜面には多数のアバランチシュートが認められた。このため、頻繁に雪崩が発生していたと考えられる。

地すべり頭部には多量のデブリが深さ3～4mで堆積していた。一般に融雪期の積雪密度は400～500kgm^{-3}に達するが、デブリはさらに密度高くなる。

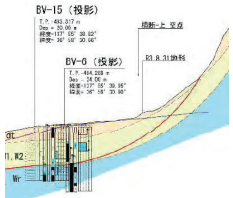
したがって、発災当時には15～25 kNm^{-2}の積雪荷重が載荷されていたと推察される。

積雪荷重に加え、下位の根知層の境界付近には山体が侵食され崩壊した崖錐が形成されていた。

崖錐が、一義的な頭部載荷＋融雪水などの貯留層になったとともに、雪崩のデブリが加わり、現状安全率が低下した可能性がある。

アバランチシュートが発達した地すべり頭部の後背斜面

消雪後に出現した崖錐の断面



（新潟県糸魚川地域振興局森林施設課）

冠頭部付近の地質横断面図

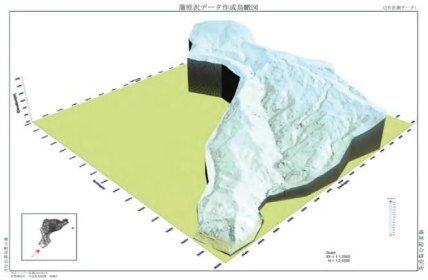
地すべり頭部に厚く堆積したデブリ

■積雪分布荷重の偏在

積雪は削剥と再堆積を繰り返すため（再移動）、積雪層厚の分布は常に変化し、とくに山地斜面では大きく偏在する。

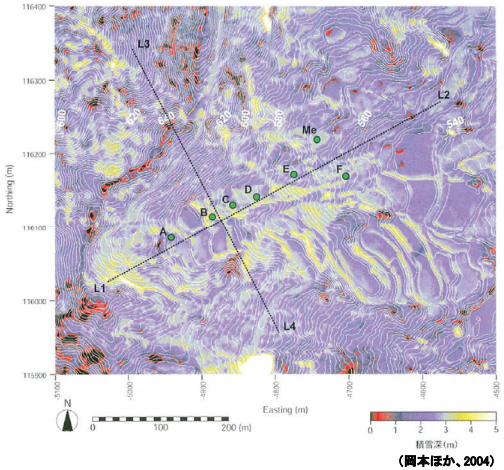
頭部陥没帯に堆積すれば頭部載荷に、末端部に厚く堆積すれば、押さえ盛土としての効果を発揮。

一般に緩斜面に堆積を繰り返すため、押さえ盛土としての効果が大きいと推定される。



（森林総合研究所、2004）

地すべり多発流域における積雪深の分布



（岡本ほか、2004）

航空レーザ測量を用いた地すべり地での積雪深分布

しかし、末端が侵食され、頭部に遷緩点や陥没帯をもつ地すべりでは頭部載荷となる。

また、貫入岩体周辺やキャップロック構造によって差別侵食を受けた箇所ではデブリが堆積しやすいので、頭部載荷となる可能性が大きい。

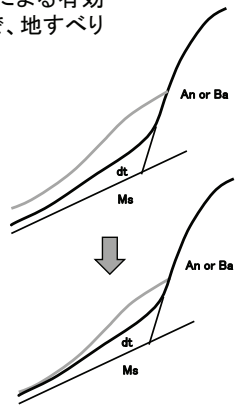
■積雪荷重のマイナス効果

積雪荷重は斜面地盤内部の間隙水圧を上昇させる可能性がある。積雪は堆積を繰り返し、数十日をかけて徐々に荷重を増やすので緩速載荷となる。

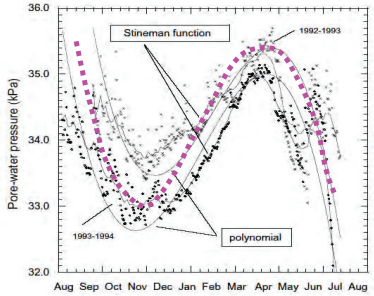
地すべり地のように、難透水性の粘土が豊富なところでは排水が追いつかず、過剰間隙水圧が発生する場合がある。しかし、過剰間隙水圧が発生しても、大部分の場合は、積雪荷重による有効応力の増分の方が大きいので、地すべりが不安定になることは少ない。

融雪が進行すると、地形条件や植生条件によっては、積雪荷重の偏在化が大きくなることがある。

また、雪線が上がることにより、下部斜面に位置する積雪層のせん断抵抗力が徐々に低下するか消失するため、積雪荷重による斜面の不安定化が進む可能性がある。

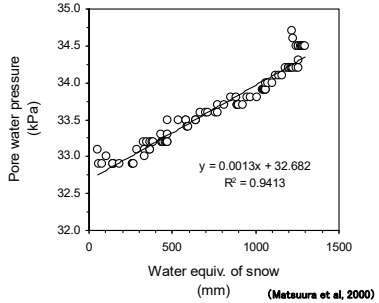


融雪にともなう積雪荷重の偏在化



（Matsuura et al, 2000）

多雪地帯の地すべり地における間隙水圧の長期変動

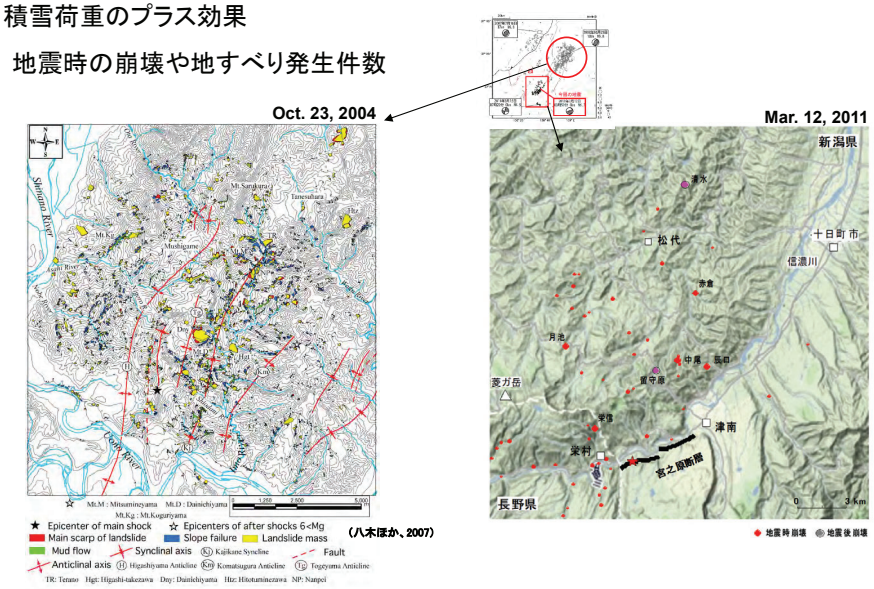


（Matsuura et al, 2000）

積雪堆積期における積雪水量と間隙水圧の関係

■積雪荷重のプラス効果

地震時の崩壊や地すべり発生件数



（八木ほか、2007）

地震によって発生した地すべり・崩壊の分布

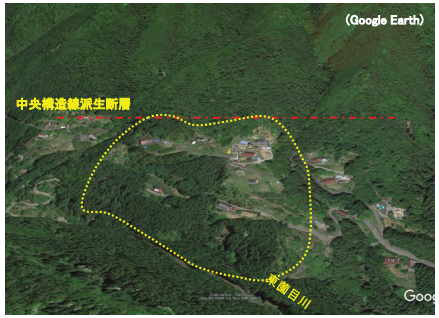
Distribution of sediment-related disasters during the Earthquakes.

（左：2004年中越地震Chūetsu earthquake、右：2011年長野県北部地震Nagano-ken Hokubu Earthquake）

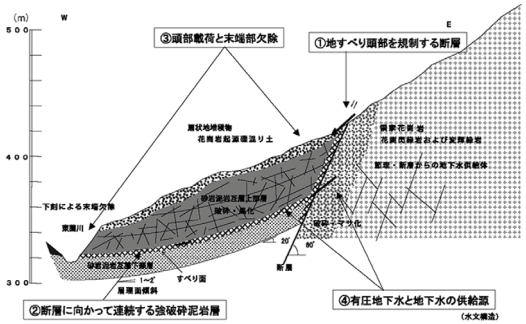
■扇状地堆積物による載荷

大畑地すべりは愛知県内の東薗目（ひがしそのめ）川の左岸に位置する、面積が約100haに及ぶ大規模な地すべりである。

地すべり冠頭部は中央構造線の派生断層となっており、福島県いわき市の成沢地すべりや新潟県上越市安塚区の袖牧地すべりなどと同様な構造をしている。



後背斜面からの土砂が載荷された大規模地すべり
（愛知県北設楽郡東栄町大畑地区）



（一(社)斜面防災対策技術協会）

大畑地すべりの模式縦断面図

大畑地すべりの後背斜面は節理が発達した領家花崗岩となっており、風化侵食された扇状地堆積物が、破砕され風化が進行した新第三紀の砂岩・泥岩層を覆っている。

後背斜面は地下水の供給源となるとともに、断層帯には有圧地下水が賦存する。さらに扇状地堆積物が亀裂が発達した基岩への深部浸透を促すとともに、頭部載荷となって地すべりを誘発したと考えられている。

■側方滑落崖の崩壊による載荷

新潟県中越地震（平成16（2004）年10月23日）によって多数の崩壊や地すべりが発生した。

最も特徴的なことは、それまで地震によって再移動しないと言われてきた再滑動型の地すべりが数多く移動したことである。

半蔵金地区でも、幅約180m、長さ350～400mの地すべりが発生した。下方に変位した道路等から、地すべりの移動量は約35mに達したと推定される。

移動によって頭部に非対称の滑落崖が形成された。地すべりの左岸側の側方滑落崖は最大で比高が約10mであったのに対し、右岸側は最大で30～40mの側方滑落崖が形成される。

（撮影：落合博貴博士）

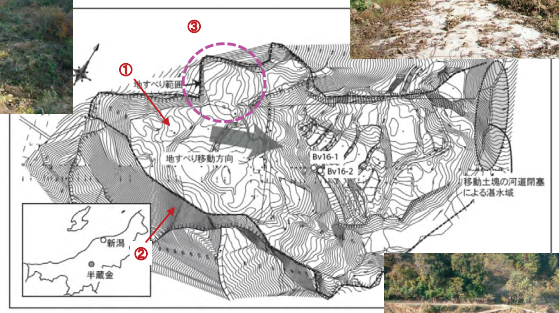
再滑動した半蔵金地すべりの航空写真
（新潟県長岡市半蔵金入道沢地区）

地すべり移動の主要なベクトルは、主測線よりもやや北よりの北東方向であったと推定。移動体の中部付近からは移動幅が広くなるとともに、上流側の移動体は東進しているものの、下流側の移動体は東北方向から、末端部分は北北東方向にやや北向きに移動方向を変化させ流下した。

■側方滑落崖の崩壊による載荷

① 頭部滑落崖付近からみた崩壊した土砂の載荷状況

③ 左岸側で見られた主測線と直交する回転型のせり上がり現象



半蔵金地すべりの平面図

上部移動体の棚田が左岸側に若干乗り上げた形跡があったことなどから、地震によって崩壊した右岸側の旧滑落崖が崩壊して地すべり頭部に載荷され、地すべり本体が再滑動した可能性がある。

ただし、地すべりが移動した後に載荷された可能性や、移動と載荷が交互に行われた可能性も否定できない。

② 右岸側側方崖上部から見た地すべり上部ブロック

■側方滑落崖の崩壊による載荷

（2016/10/01）

（2021/08/05）

（撮影：柴崎達也博士）

汀線接続斜面における地すべりの左岸側壁の崩壊

（2016/10/01）

崩壊した層間褶曲構造部と下部斜面に発達した崖錐

北海道東部は固結度の弱い白亜紀の泥岩やシルト岩が卓越する。また、スランプ構造など海底地すべりの痕跡も著しく多い。

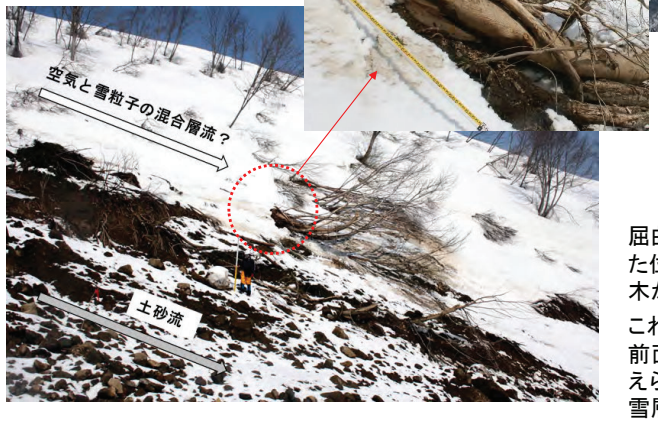
滑落崖ではスレーキングや凍結・融解による侵食が盛んで、土砂生産量が非常に多い。

このため、流れ盤構造の地すべりでは崩積土が側方に載荷され、地すべりが再滑動することもある。

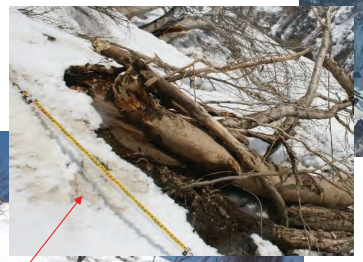
なお、秋田自動車道建設の際には、切り取り斜面に出現した女川層や山内層の乱雑構造部分が多数崩壊した。

■崩壊土砂による積雪層への急速載荷

長野県北部地震によって新潟県の辰ノ口地区では崩壊が発生し、深い積雪層に崩落した。その結果、空気と雪粒子の混合層流が発生している。同様な現象は、ヨーロッパアルプスでも発生した（Barla et al, 2000）。



土砂流下によって発生した雪煙によって倒伏した樹木群



（アジア航測）

長野県北部地震によって発生した崩壊
（新潟県十日町市松之山区辰ノ口地区）

屈曲部分の外側では土砂が通過した位置よりも約20m高い部分まで灌木が倒伏する現象が見られた。

これは雪煙（ゆきけむり）及びその前面に発生する雪崩風が原因と考えられ、崩壊土砂が早い速度で積雪層に突入したことを示す。

■来海沢地すべり付近の地質構造

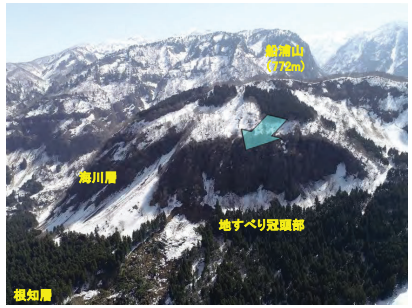
来海沢地すべりは船浦山（772m）の北西斜面の標高410～530m付近で発生した。

周辺地域には新第三紀層の泥岩を主体とした根知層が広く分布しているが、その上位には安山岩～玄武岩質からなる溶岩・火砕岩が不整合に堆積している。

両者は強度が異なるので、両者の境界付近は斜面傾斜の変換点となっており、上部斜面は急峻な岩盤斜面となり、特異な地形を呈している。

傾斜変換点付近には、上位斜面から生産された崩積土が厚く堆積している。

地すべりは新第三紀層で発生したが、頭部滑落崖は崖錐となっており、複数の湧水ポイントが確認された。



キャプロック構造の船浦山と地すべり冠頭部

頭部滑落崖の湧水ポイント

地すべり冠頭部付近の崖錐と後背斜面の状況

■キャップロック（状）構造地帯での水文環境

（長崎県森林整備室）

キャップロック構造地帯での地すべり
（長崎県松浦市今福町石倉地区）

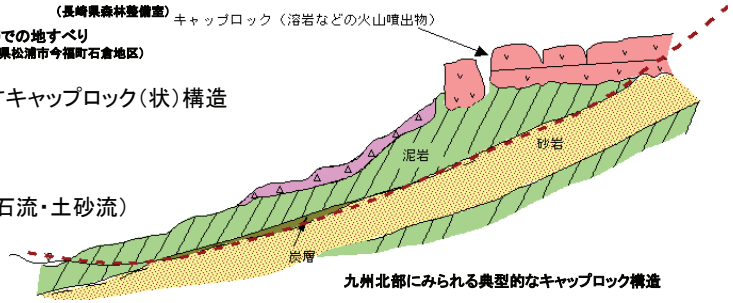
キャップロック構造は、それ自体が斜面変動を引き起こすものではない。

しかし、下位に比較的軟弱な地質があり、上位に土石流堆積物や溶岩が堆積すると、上部の地層が降雨や融雪水を保持し、いわゆる貯水タンクの役割を果たす。

このため、上位および下位が連動し、あるいはそれぞれ単独で斜面変動を起こすことがあるため、留意すべき地質構造となる。

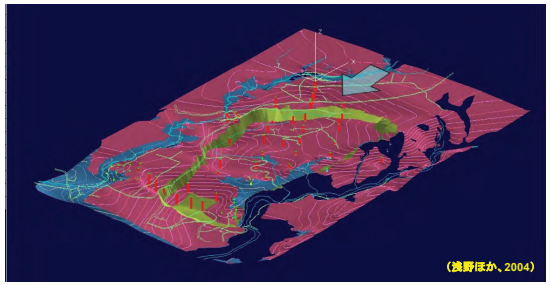
斜面変動を引き起こすキャップロック（状）構造

- 溶岩
- 火山砕屑物
- 崖錐
- 扇状地堆積物（土石流・土砂流）



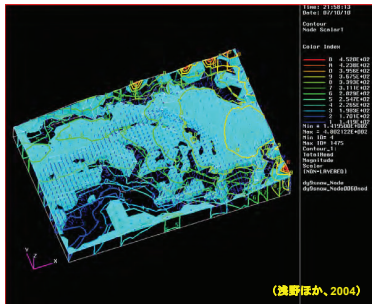
九州北部にみられる典型的なキャップロック構造

■火砕流堆積物地帯での大規模地すべり



大規模地すべりの三次元モデル化

厚くシラスが堆積した地域における大規模地すべり
（山形県大蔵村銅山川地区）



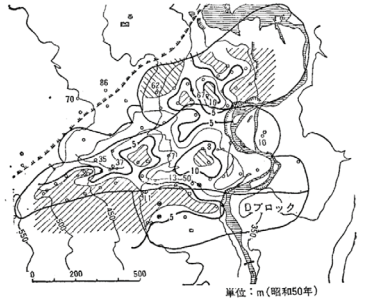
飽和・不飽和浸透流解析による地下水のフラックス

銅山川地すべりは、新第三紀層の上に約1万年前の肘折火砕流堆積物（シラス、熔結凝灰岩等）が厚く堆積する月山の山麓に位置し、平成８（1996）年５月の融雪期に、再滑動した。

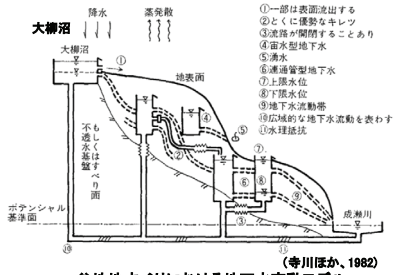
この原因として、シラス堆積物からなる後背台地から融雪水が多量に流入し、地すべり地内の地下水位が上昇したためと考えられている。

ボーリング調査や数値計算などにより、シラスが堆積する以前に新第三紀層に存在した埋没谷の形状や、地下水の流入経路・賦存状況などが明らかとなった。

■大規模地すべり地形の下部斜面



地下水位変動幅の分布
（寺川ほか、1982）



（寺川ほか、1982）
谷地地すべりにおける地下水変動モデル

谷地地すべりの本体ブロックと後背斜面

秋田県の南東部に位置する谷地地すべりは、長さ約1,200mで幅約950mに及ぶ大規模な地すべりである。斜面の末端には成瀬川が流れているが、すべり面の一部は成瀬川の対岸まで達しており、隆起地形も見られる。

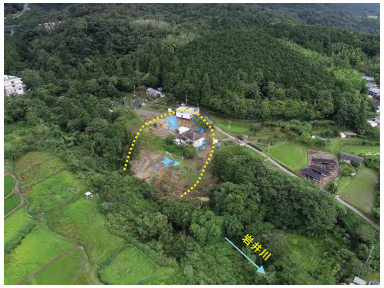
後背斜面は大川目山（おおかわめやま）から続く古い地すべり地形を呈し、大柳沼と上沼（うわぬま）の二つの湖沼がある。これらが、地すべりを誘発する地下水の供給源となっていると考えられている。

■後背斜面からの地下水の流入による地すべりの事例

結晶片岩地帯における地すべり
（徳島県三好市東祖谷（ひがしいや）平谷地区）

旧地すべり地形の還急点付近での地すべり
（岩手県北上市和賀町オボカ沢地区）

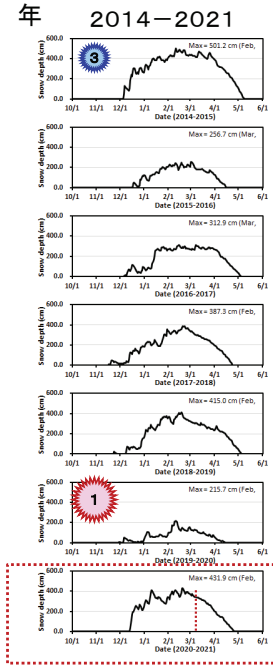
地震で再滑動した旧地すべり地形末端における地すべり
（岩手県奥州市胆沢尿前（しとまえ）沢地区）

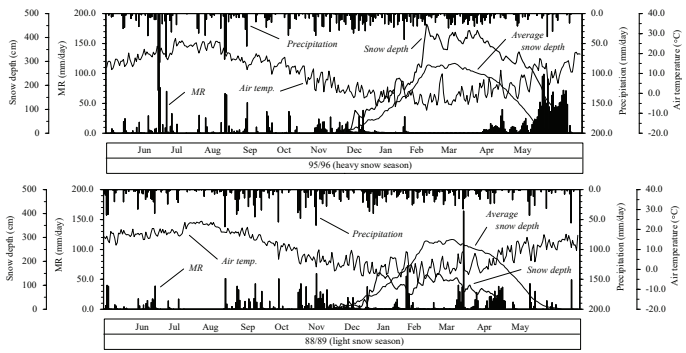


大阪層群での地すべり
（奈良市鹿野園（ろくやおん）地区）

■地すべり発生の前年(2019-20年寒候期)は記録的な少雪

年　2014－2021





（Matsuura et al, 2013）

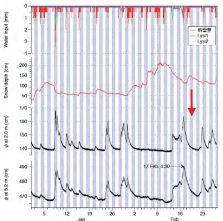
寒冬多雪年と暖冬少雪年における地表面到達水量（MR）
Variation of MR in a heavy and light snow season

多雪年には主に融雪期間に地表面到達水量が観測される。一方少雪年には積雪期間を通して地表面に融雪水や雨水が供給される傾向がある。最寒期の１、２月でも積雪底面から融雪水などが流出する。

9/34

2020-21年寒候期は平年よりも約20%多い積雪量

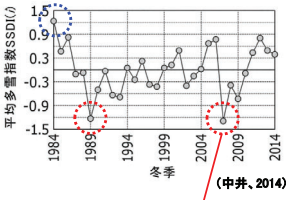
■暖冬少雪年には最寒期でも地すべりが発生



（大澤、2020）
花立地すべり発生前の間隙水圧等の変化
（新潟県上越市安塚区伏野地区）

暖冬少雪年の特徴
◆降水量そのものが少ない
◆固体降水が少なく液体降水が多い

積雪層の発達が貧弱で、頻繁に融雪を繰り返す。
降雪の代わりに降雨が多い。
↓
積雪層内に保持できず、最寒期でも積雪層底面から地表面に流下

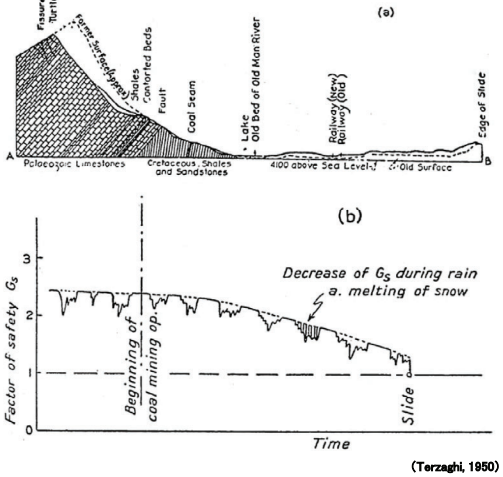


（中井、2014）
過去31寒候期における多雪指数の変化

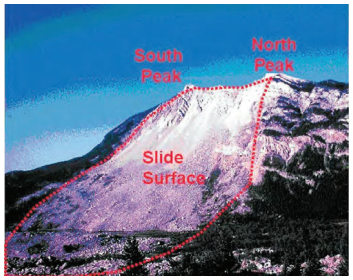
（新潟県妙高砂防事務所）
暖冬少雪年の最寒期に発生した地すべり
（新潟県妙高市花立地区）

（中部森林管理局）
暖冬少雪年に発生した地すべり
（長野県小谷村小谷温泉地区）

■現状安全率の低下



（Terzaghi, 1950）
フランク地すべり発生後の地質断面図(a)と
発生に至るまでの現状安全率の低下に関する概念図(b)



（Theune et al, 2005）
フランク地すべり（April 29, 1903）
（カナダ・アルバータ州フランク地区）

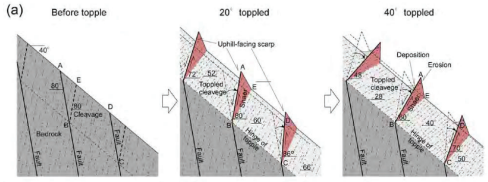
カナダ・アルバータ州のタートル山の東斜面で大規模な地すべりが発生し、フランク集落に大きな被害を与えた。

直接の原因は明らかになっていないが、テルツァーギ(1950)によると、浸透水などによって風化が進行していたことに加え、斜面下部での採炭が全体的な安全率の低下を加速したと指摘している。

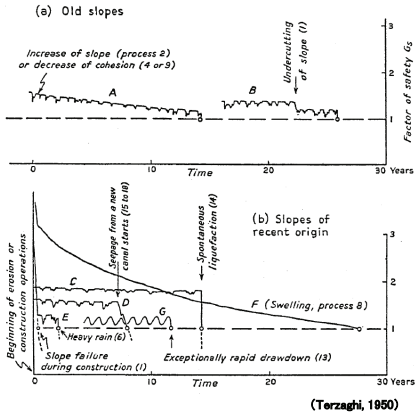
すなわち採炭によって上位の頁岩、さらに石灰岩でクリープが進行し、せん断強度が低下したと考えられている。

■地質体形成後の安全率低下の要因

- 地質構造（断層、節理、層理など）
- 地下水文環境（水文地質的流域界、地下水の浸透、貯留、排出、灌漑など）
- 地形特性（斜面形状、斜面規模など）
- 地形変化（河川の縦横侵食、海食、土地改変など）
- 材料特性（せん断抵抗角、粘着力、脆性、塑性など）
- 応力履歴（地震、降雨、融雪などの外力）
- 内部風化（地下水浸透、熱水変質、植生など）



（Yokoyama, 2020）
高角度断層を伴う頁岩斜面での上向き小崖の形成過程



（Terzaghi, 1950）
各種斜面における安全率の低下と地すべりの発生

■内部風化による強度低下

平成30 (2018)年4月11日に、大分県中津市耶馬溪町で、幅約160m、長さ約220m、最大深度約35mで崩壊土砂量約13万m³の地すべりが発生した。

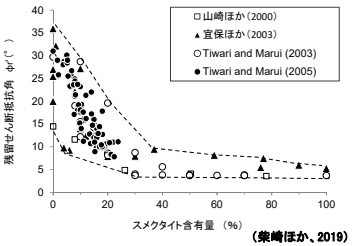
基盤地質は熱水変質を受けた凝灰角礫岩で、それを火砕流堆積物である溶結凝灰岩が覆っている。

地すべり発生前の2週間の雨量は合計6mmで、3月の降水量も179mmと、平年にくらべて24%多い程度で、地震も観測されなかった。したがって、何が本地すべり発生の原因になったのかは良く分からない。

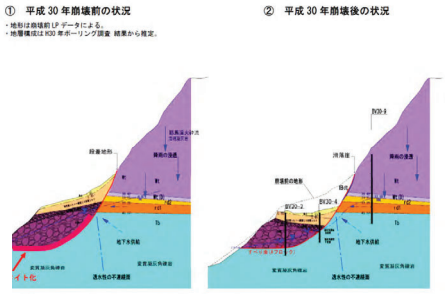
本地すべりは、過去に崩壊した溶結凝灰岩などが変質した凝灰角礫岩の上位に崖錐として堆積していた。さらに、後背斜面から恒常的に地下水が供給され、多量の地下水が賦存しやすい環境だった。

このため、不整合面に弱層となり得るスメクタイトが長い年月をかけて生成され、含有率が増加したことにより、残留せん断強度が徐々に低下していたと考えられる。

（大分大学復興デザイン教育研究センター）
顕著な先行降雨がない気象条件で発生した地すべり
（大分県中津市耶馬渓町金吉地区）

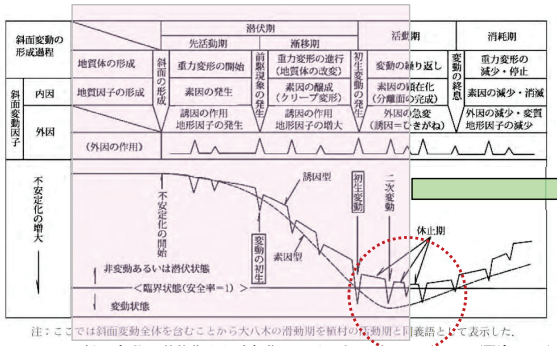


（柴崎ほか、2019）
スメクタイト含有率と残留せん断抵抗角との関係



（大分県北部振興局）
崩壊前後の地形断面図

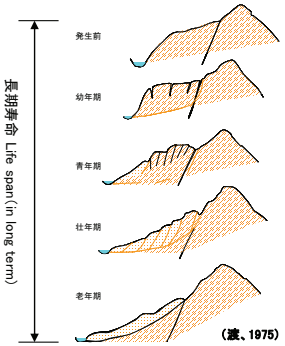
■現状安全率の低下



斜面変動の潜伏期から消耗期に至る過程

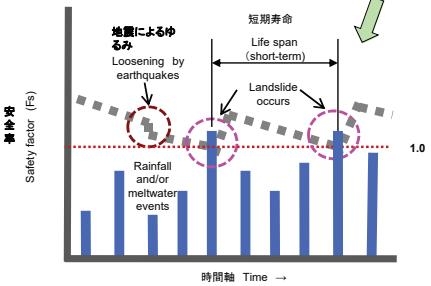
（野崎、2011）

＊稲垣(2007)も同様な考察を実施



（渡、1975）

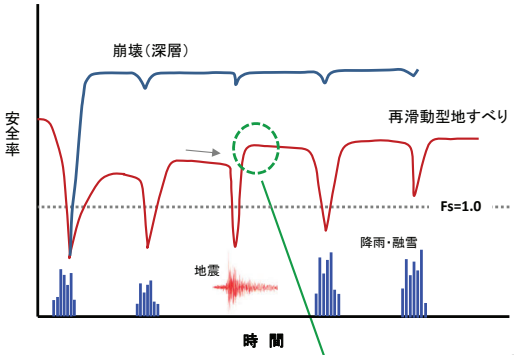
地すべりの地形発達史的な分類



再滑動型地すべりの活動概念図

山体から分離した地すべり移動体は、最終的には安定した状態となるが、その間に停止と再滑動を繰り返すことが多い。

■再滑動パターン



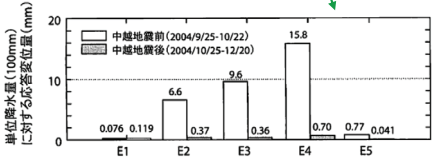
初生変動後における安全率の変化に関する概念図

斜面変動のうち、一般に深層崩壊などは移動体が発生源の外に堆積することによって安定する。

一方、地すべり（崩壊性地すべり、地すべり性崩壊）は、移動体が発生源の中にとどまり、再滑動を繰り返す傾向がある。

再滑動のトリガーには降雨や融雪、地震などがあるが、休止期にはさまざまな要因によって安全率が低下する。

一方で、移動距離や移動体の形状、さらに外的要因によって安全率が上昇する可能性もある。



（岡本ほか、2006）

中越地震前後における単位降雨量に対する平均応答変位量の比較

地震外力を受け微少に変位したにもかかわらず、その後、降雨や融雪に対する応答が小さくなる場合がある。

この理由として、地震によって地下水文環境が変化した可能性がある。さらに、すべり面強度が震動によってある程度、強度回復した可能性も考えられる。

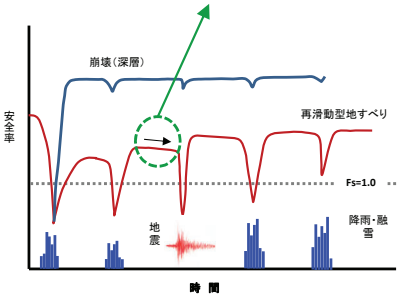
中越地震後の冬は多雪年だったものの、融雪期の地すべり発生件数は予想より少なかった。

■地形変化（侵食）による安全率の低下

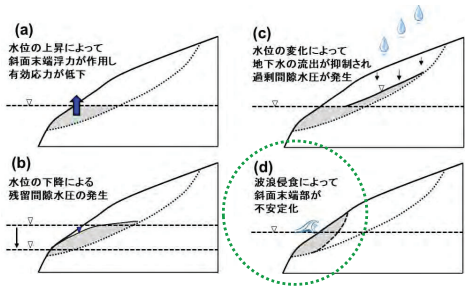
中生代白亜紀の泥岩・シルト岩・砂岩の互層。
整然層は約16～21°の流れ盤斜面で、すべり面は層理面に規制され直線的。
地すべりの末端は汀線にあり、波浪などによる侵食を受け不安定な状態。
過去に繰り返し、大きな地すべり変位を起こしている。

- 応力履歴
  （地震、降雨、融雪などの外力）
- 内部風化
- **地形変化（侵食など）**

波食によって定期的に再滑動を繰り返した地すべり
（北海道厚岸郡浜中町後静地区）



再滑動後における現状安全率の低下要因

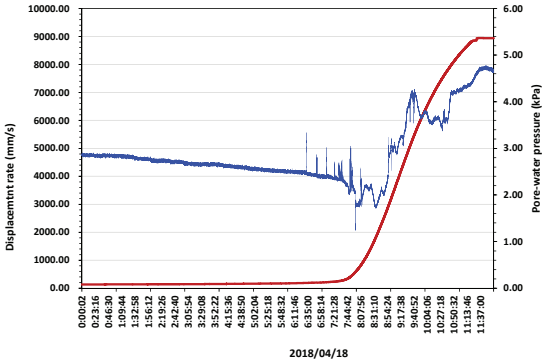


汀線接続斜面における斜面の不安定化要因

■地形変化（侵食）による安全率の低下

地すべり移動中の連続写真

- 2018年4月18日に大きな変位が発生
- 4月15日以来、降雨はなし
- 海面状態は安定
- 累積変位量は9～10 m



地すべり変位量と間隙水圧の関係

本日のまとめ

一見、単純そうに見える地すべりでも、詳しく調査し解析すると、意外と複雑な要因が絡み、未解明な部分が多いことに気づく。今回は、融雪期に発生した地すべりを題材に、その背景にあるさまざまな素因および誘因についての疑問点を抽出し、今後、取り組むべき研究課題を考えてみた。

■融雪水量予測の高精度化

強風時に融雪が急速に進むことは、意外に知られていない。地形や植生によって融雪水量は大きく変化する。強風は夜間に吹くことが多いので、警戒避難が遅れることもある。したがって、強風など極端気象現象時の研究が必要。

■雪崩デブリや崖錐などによる載荷

貫入岩体やキャップロック構造体の遷緩点では、土砂と同様に雪崩デブリが堆積し頭部載荷となることもある。積雪は様々な性質を持つことに加え、堆積と融雪を繰り返すなど状態が大きく変化。しかし、その効果は未解明な点が多い。

■後背斜面からの地下水流入

地内の鉛直浸透だけで地すべりが発生することは少ない。地下水文的流域界を明らかにしつつ、雨水や融雪水の浸透と流動経路、さらに貯留・流出プロセスなどを明らかにする調査・研究が求められる。

■各種要因による現状安全率の低下

斜面の安全率は様々な要因によって低下する。現状の安全率によってトリガーとなる降雨や融雪、地震などの外力は大きく変化する。したがって、安全率の低減プロセスと現状安全率を正確に推定するための研究が必要。

ご静聴、ありがとうございました

謝　辞

なお、本資料の作成にあたっては、新潟県糸魚川地域振興局農林振興部森林施設課から、来海沢地すべりの調査資料を提供いただきました。記して感謝申し上げます。

令和4年度 地すべり学会関東支部シンポジウム
「地すべり技術の現状と課題」

地すべりの予知と防災マネジメント

ダム関連の変動を例に―5W2H

日本工営株式会社
小俣新重郎

令和4年5月11日

本日の話題

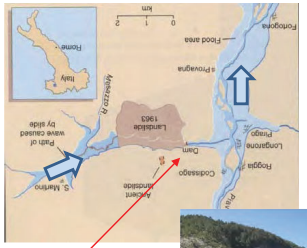
1. バイオント(Vijont)ダムトック山の湛水地すべり
2. ダム関連地すべりの歴史
3. 地すべりの定義
4. 地すべりの予知と防災マネジメント

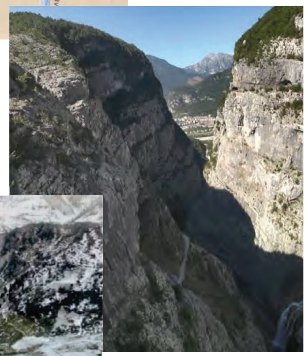
5～9.　理学的検討：Why, Where, What, When, Whom

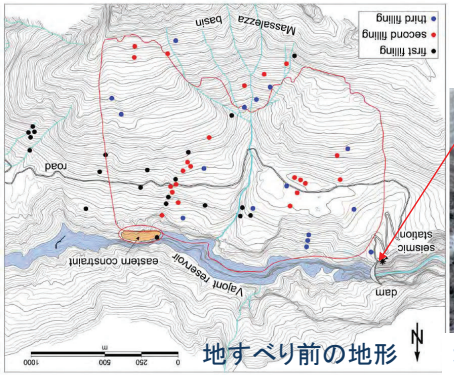
10～11. 工学的評価：How, How much

12. 地すべり予知における課題

1. バイオントVajont ダムのトック山地すべり(1960-1963)

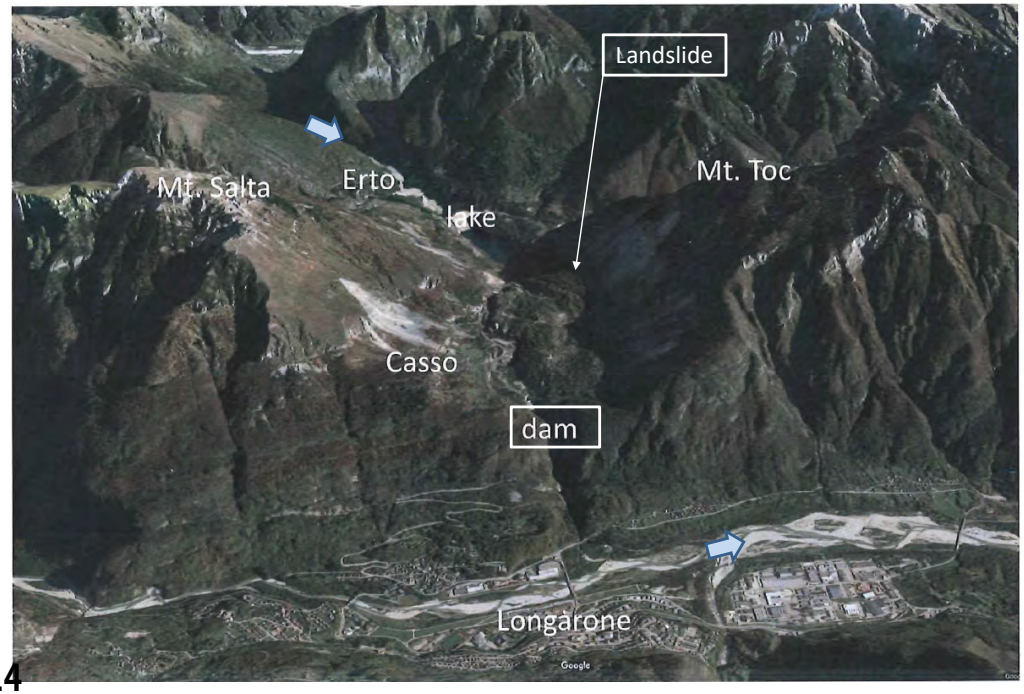






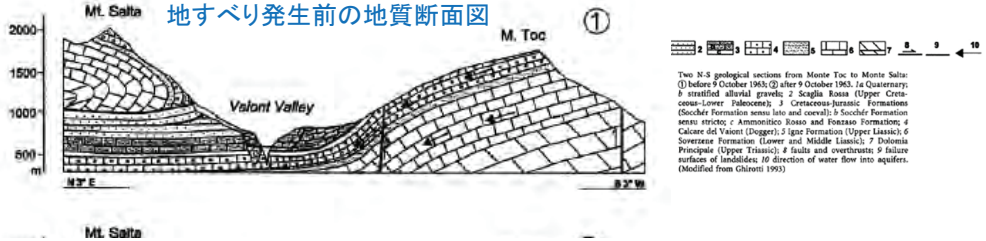
ダムから下流を望む

Location (after Landslide)

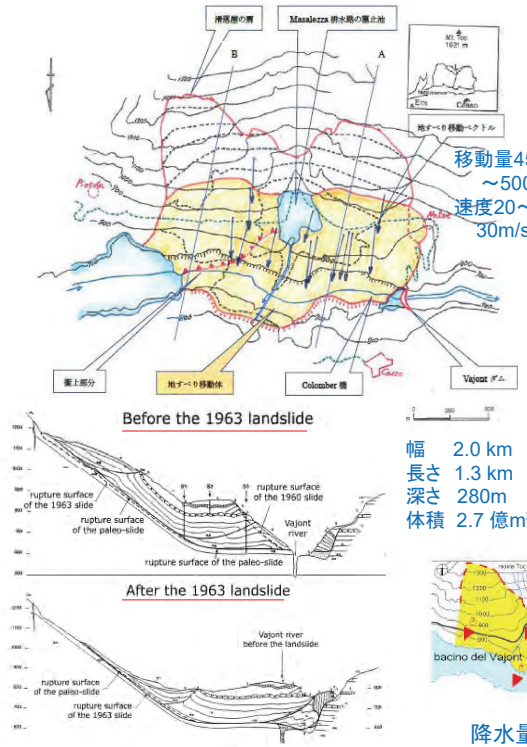


LongaroneからVajontダムを望む（2019）

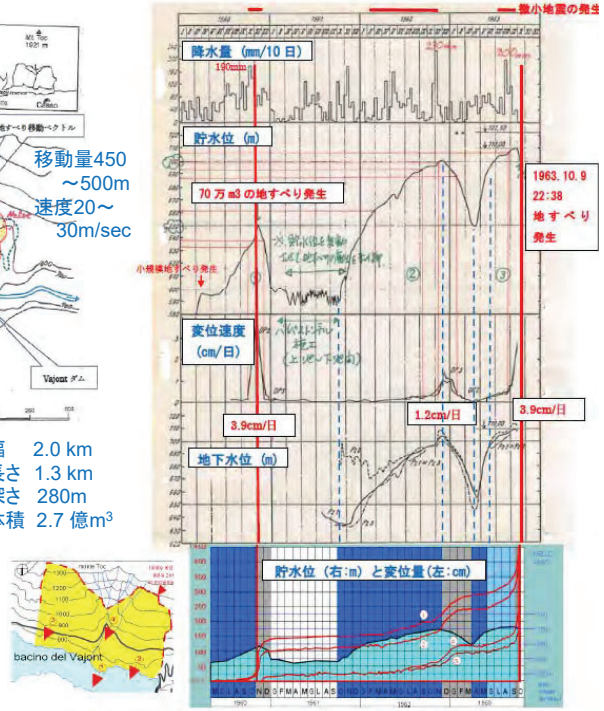
地すべり発生前の地質断面図



Two N-S geological sections from Monte Toc to Monte Salta: (1) before 9 October 1963; (2) after 9 October 1963. 1a Quaternary; b stratified alluvial gravels; 2 Scaglia Rossa (Upper Cretaceous–Lower Paleocene); 3 Cretaceous-Jurassic Formations (Socchè Formation sensu lato and coeval); 3a Socchè Formation sensu stricto; c Ammonitico Rosso and Fonzaso Formation; d Calcare del Vaiont (Dogger); 5 Igne Formation (Upper Liassic); 6 Soverzene Formation (Lower and Middle Liassic); 7 Dolomia Principale (Upper Triassic); 8 faults and overthrusts; 9 failure surfaces of landslides; 10 direction of water flow into aquifers. (Modified from Ghirotti 1993)



幅　2.0 km
長さ　1.3 km
深さ　280m
体積　2.7 億m³



降水量，貯水位，地すべり変位速度と地下水位の変化

崩落前(1960.11)の斜面上方の亀裂と末端崩壊

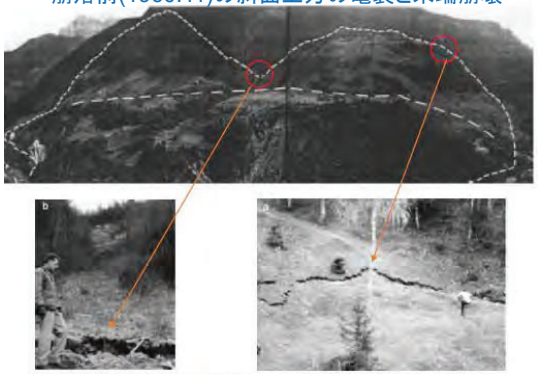
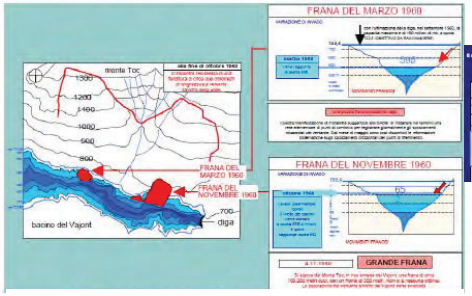
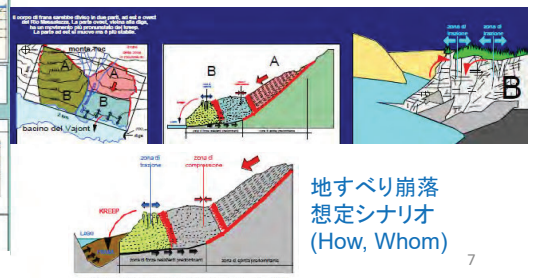


図.8：1960 年 10 月に発生した M 字状の亀裂（Semenza, E., 2002）：1960 年 11 月 9 日に撮影された写真.

崩落前(1960.11)の70万m3の末端崩壊

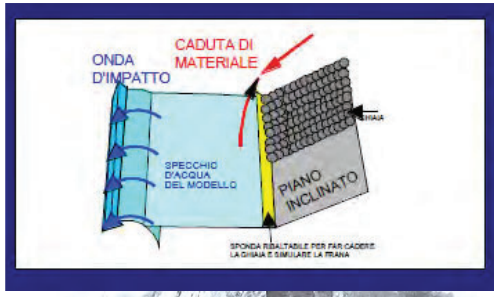


崩落前(1960.3, 11)の末端崩壊と貯水位



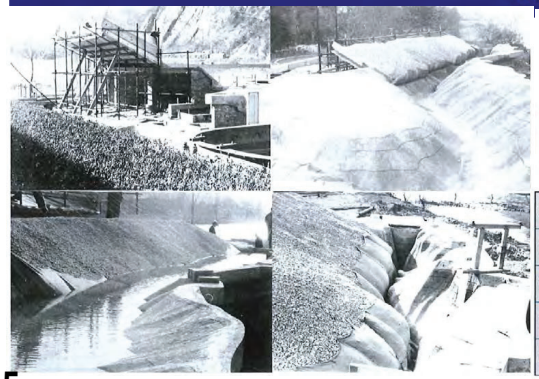
地すべり崩落
想定シナリオ
(How, Whom)

t地すべり崩落想定シナリオ
(How, Whom)



Il modello viene realizzato:
- con un piano inclinato prima di legno e poi di muratura
- con una massa di sabbia e poi di ghiaia, simulante la frana
- con vari tempi di caduta variabili da 1 a 10 minuti

Gli esperimenti hanno luogo nel corso del 1961-62.



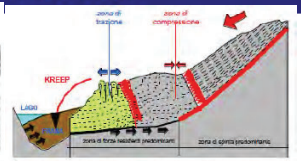


図.12：災害前の地すべり安定化への変動予測モデル（Sopra, L., 2002）

Quantity	Model	Real world
Fall time	60-90 s	15-30 s
Wave height	27.5 m	210 m
Peak discharge	30.000 m³/s	400.000 m³/s
Flood volume	hundred thousands m³	25 million m³

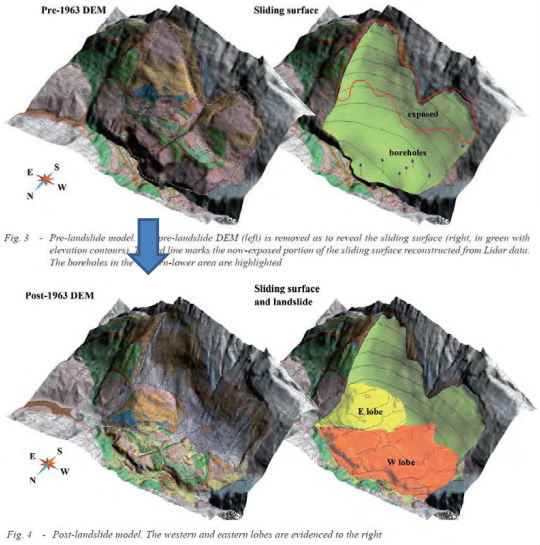
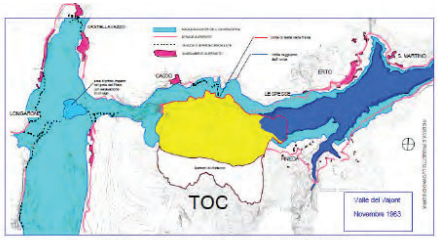
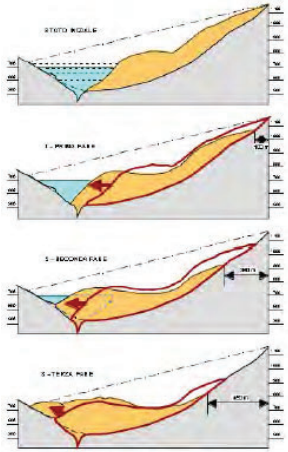


Fig. 3 - Pre-landslide model. Pre-landslide DEM (left) is removed as to reveal the sliding surface (right, in green with elevation contours). The red line marks the non-exposed portion of the sliding surface reconstructed from Lidar data. The boreholes in the [illegible]-lower area are highlighted

Fig. 4 - Post-landslide model. The western and eastern lobes are evidenced to the right



1963年10月9日の地すべりとその洪水被害範囲

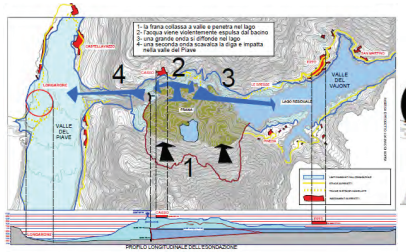


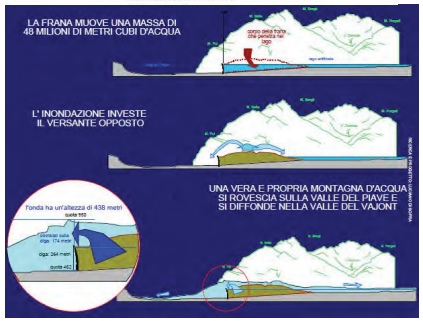
地すべり移動プロセスの推定

地すべり発生前後のDEMによる3D地質図および地形画像とすべり面の形状

(Bistacchi, A., Massironi, M., Superchi, L., Zorzi, L., Francese, R., Giorgi, M., Chistolini, F. & Genevois, R., 2013)

地すべり(1963.10.9)による洪水の伝播

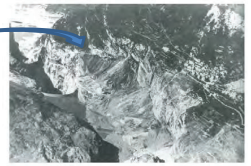




土砂はダム天端より245m上の対岸に乗り上げた.

3千万m³の洪水が ダム天端を右岸250～左岸150mで越流

地すべり災害(1963.10.9)の犠牲者の分布
(Sopra, L., 2002)



地すべり発生後(1963.10.9)
対岸（右岸）の洪水被害
(Semenza, E., 2002)

b. 被災前の Longarone 集落

c. 被災後の Longarone 集落

下流のLongaroneなどの地すべり災害の犠牲者 2,125名
(Sopra, L., 2002) (How much)

1971年の裁判：最終判決
「地すべりと洪水は一体であり，地すべりが悪化することによって洪水が生じた．これに対する事前警報がなく大量殺人なった」
地すべり，洪水の予見性，大量殺人のすべてを認めた

(Why)

1961年7月の間隙水圧計設置後の貯水位，降水量，地下水位の相関から，地すべり地質モデルを基に浸透流逆解析.

シェアゾーンの透水係数が5×10^{-2} cm/secと高く，貯水位の上昇に地下水位が追随し，これに降雨に伴うToc山からの地下水流入で地下水位の堰上げが生じ，地すべりが不安定化.

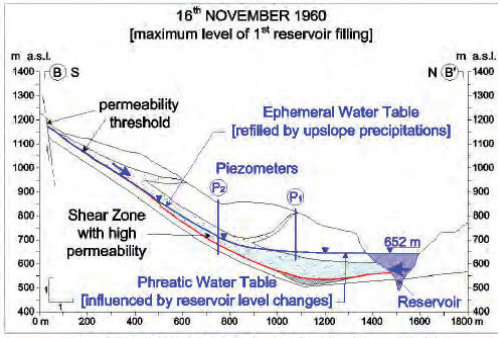


図.33：1963年10月9日地すべり発生前の貯水位と地下水位の推定(Paronuzzi,2011b)

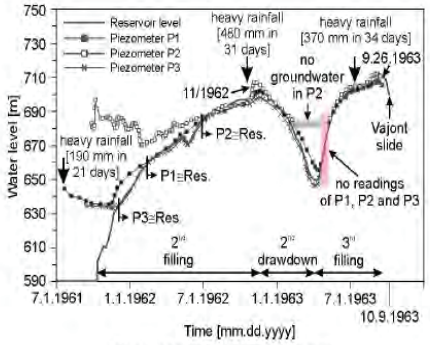


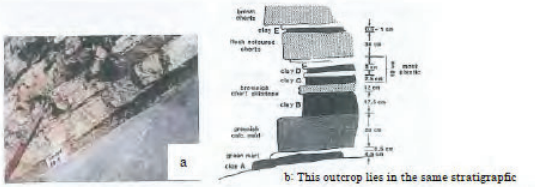
図.32：貯水位と地下水位の変動図(Paronuzzi,2011b)

Paronuzzi, P. and Bolla, A. (2011a): A new interpretation of the geotechnical context of the Vayont rockslide. *Proceeding of the Second World Landslide Forum－3-7 October 2011, Rome*

Paronuzzi, P., Rigo, E., and Bolla, A. (2011b): A coupled seepage-stability model to analyze the Vajont reservoir influence. *Proceeding of the Second World Landslide Forum－3-7 October 2011, Rome*

地すべり面上部の破砕状況の露頭
(Paronuzzi.P and Bolla. A., 2015a)

図.27：すべり面上部の破砕状況の露頭（Paronuzzi, P. and Bolla, A., 2015a)

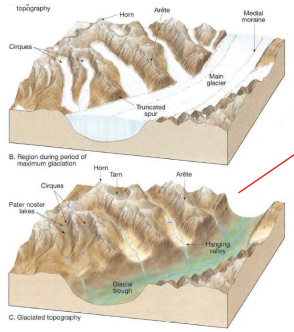


地すべり面の露頭
(Hendron and Patton, 1985)

a)Clay interbeds outcropping on the sliding surface; b)sketch of the Fonzaso Fm. Outcropping southwest of Casso

ダムサイト右岸の黒色チャートを含む微晶質石灰岩（上部ジュラ系）；すべり面相当層.

時系列的推定



前史の
地すべり発生

1963年の
地すべり発生

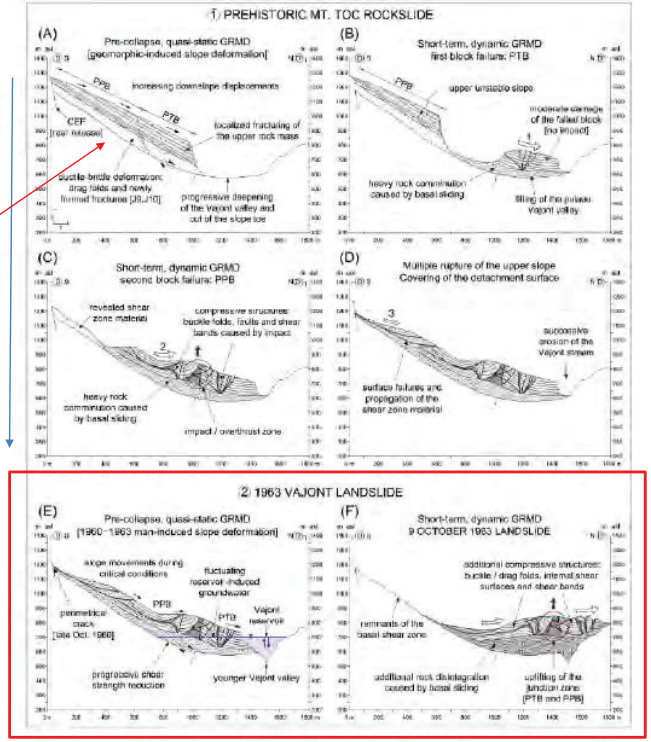
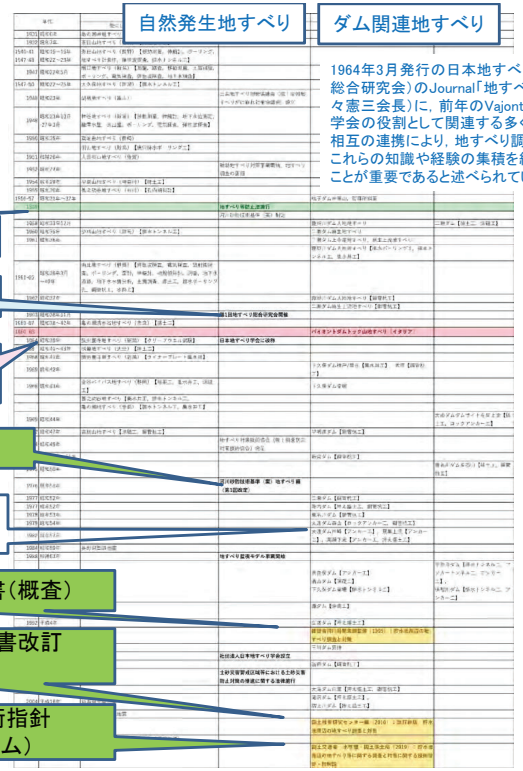


図.34：前史の Vajont 地すべり発生から 1963 年地すべり発生までの時系列的推定（Paronuzzi, P. and Bolla, A., 2015a）

2. ダム関連 地すべりの歴史



1964年3月発行の日本地すべり学会（当時は地すべり総合研究会）のJournal「地すべり」創刊号の巻頭言（佐々憲三会長）に，前年のVajont ダムの大惨事に鑑み，学会の役割として関連する多くの分野や事業における相互の連携により，地すべり調査，研究，対策の成果，これらの知識や経験の集積を総合的に交流，結集することが重要であると述べられています．

1958:地すべり等防止法

1963:地すべり学会設立

1963:Vajont ダム
Toc 山地すべり

1976:河川砂防技術基準（案）

1982:大渡ダム
試験湛水で地すべり

1995:貯水池地すべり技術書（概査）

2010:貯水池地すべり技術書改訂
（安全率，残留率）

2019:貯水池地すべり技術指針
（再開発ダム，流水型ダム）

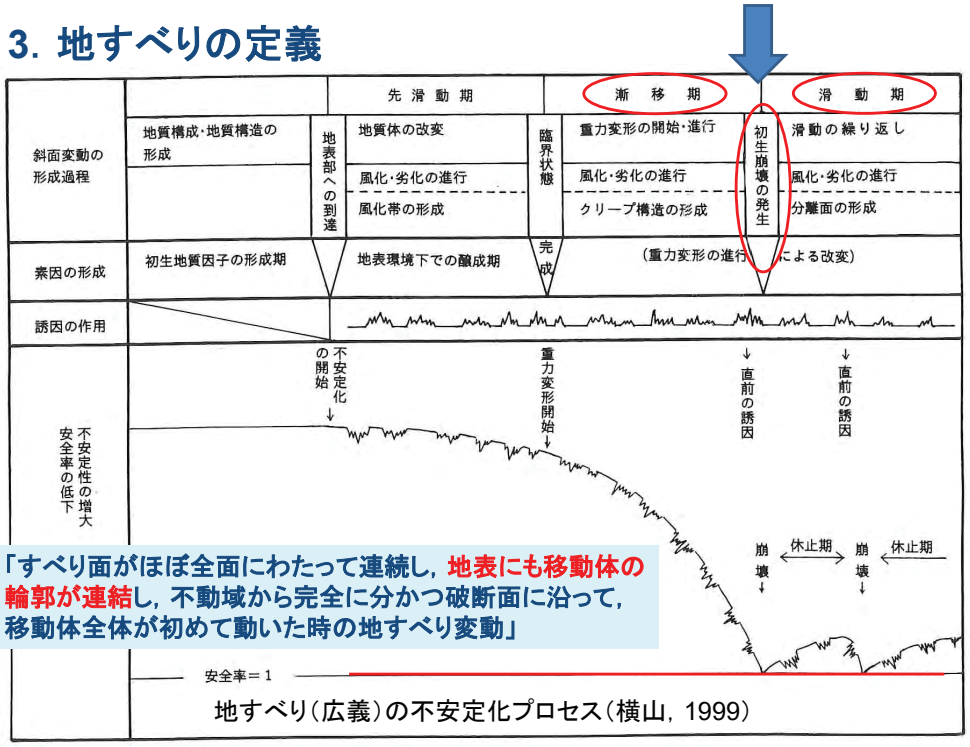
1956-1962:
湛水後の地すべり発生と対策

1969-1979:
湛水前の地すべり予知と対策

1984-1995:
貯水池地すべり技術指針の検討

1996-2010:
貯水池地すべり実績による検討

3. 地すべりの定義



「すべり面がほぼ全面にわたって連続し，地表にも移動体の輪郭が連結し，不動域から完全に分かつ破断面に沿って，移動体全体が初めて動いた時の地すべり変動」

地すべり（広義）の不安定化プロセス（横山，1999）

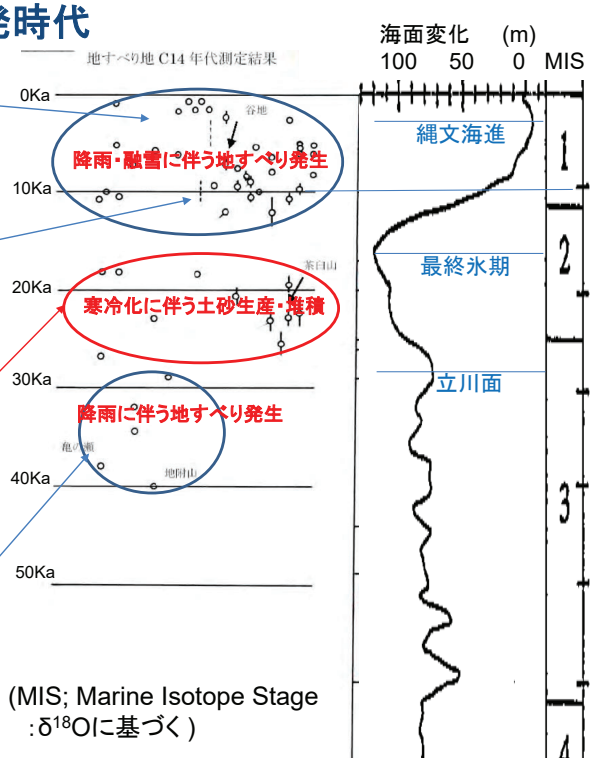
侵食と地すべりの多発時代

●1万年以降現在までの間氷期MIS1の地すべりは，融雪，降雨による．

●後期更新世の地すべり発生は，最終氷期MIS2末期に河川流量が増加することに伴い，斜面末端の侵食が進み，不安定化したことが原因．
最新の遷急線の形成

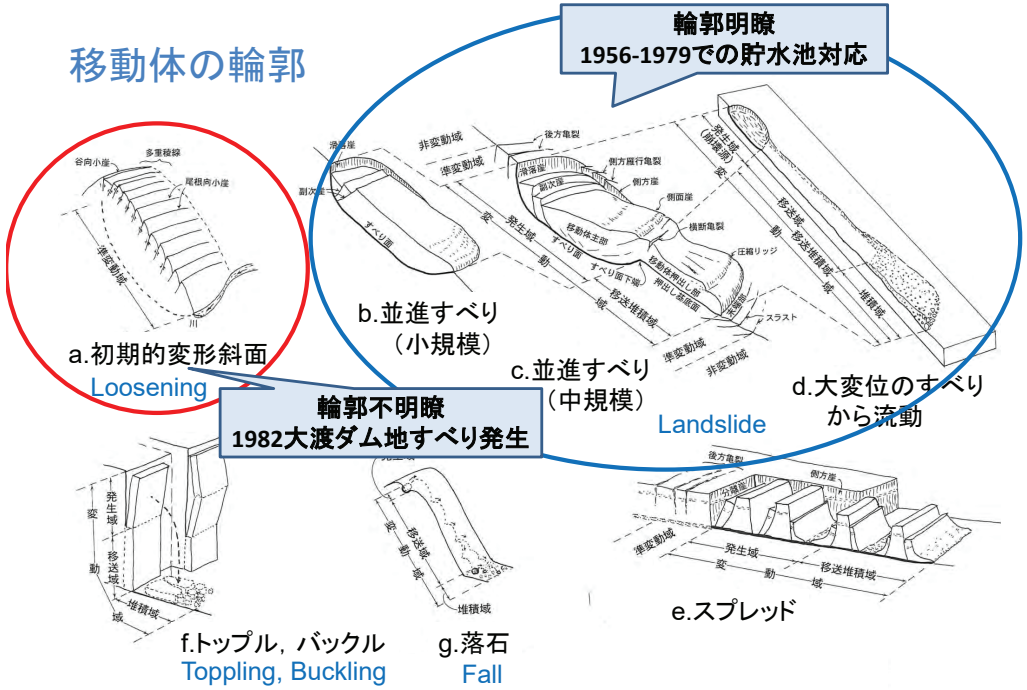
●氷期には周氷河環境で，河川の上中流部で寒冷化に伴う土砂生産・河谷での堆積が進む．

●間氷期には温暖化に伴い，河川の流量が増加し，河川の上中流部で急速に下刻が進み，遷急線や段丘が形成される．



(MIS; Marine Isotope Stage
:δ^{18}Oに基づく)

移動体の輪郭



運動用識別における空間構成領域と主な変形構造（大八木，2004）

4. 地すべりの予知と防災マネジメント

斜面変動サイクルの概念と地すべりの予知（5W2H）

湛水で何が起きるか想定できるか，予防保全の対応

斜面変動サイクルにおける調査・計測

①/⑤: Where?浸食地形・変動地形の抽出

← 航空レーザ測量LP図(DEMの活用)，現地詳細踏査，AHP解析

②/⑥: Why? 発生誘因の評価

← 長期 / 時間の経過（斜面のゆるみ），地形発達史

短期 / 河川浸食，掘削，降雨，地震，盛土，湛水

③: When? 変位の進行/ 安定度の評価

← 斜面の変位率，計測（変位の加速），岩盤強度特性

④: What? 範囲，規模，内部変形，すべり面の把握

← 高品質ボーリング（破砕度区分），孔内傾斜計

⑦: Whom/How? 地すべりの発生形態，被害予測

← 履歴調査，機構検討，湛水等の影響評価，数値解析

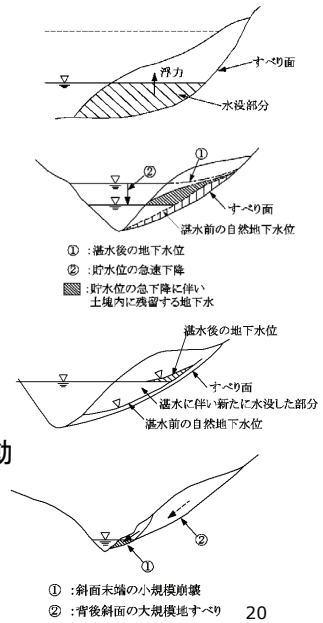
⑧: How much? 被害額評価，対策（工法，優先順位，計測など）検討

← 防災マネジメント．地下水，地盤，GIS解析，リスク

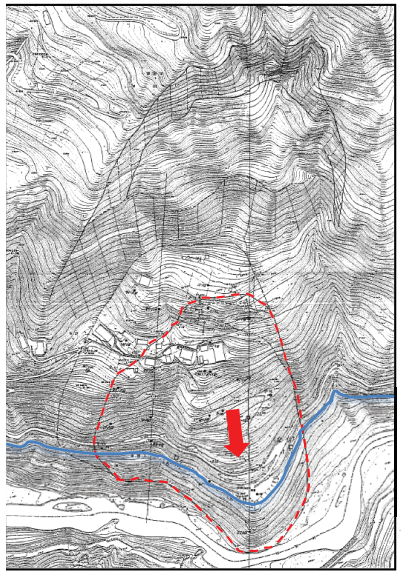
5. Why？/ 湛水地すべりはどうして起きるのか？

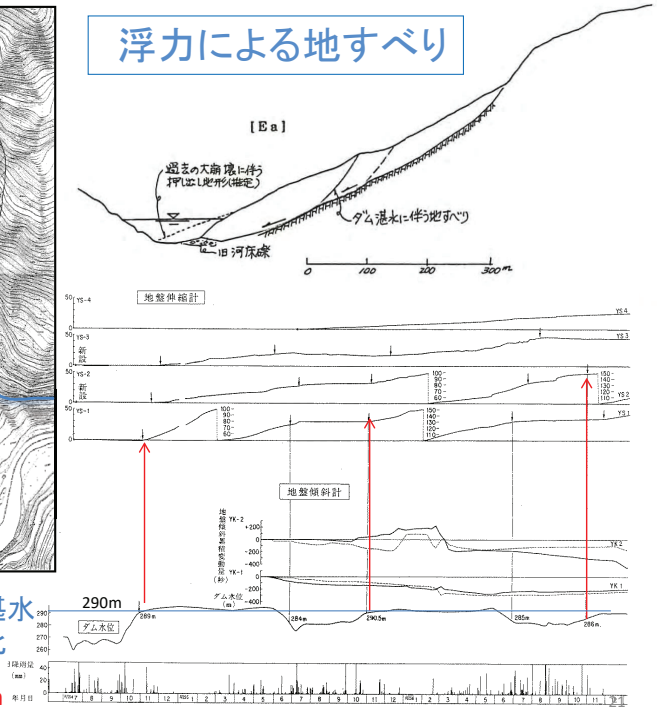
貯水池周辺地すべり等の発生の誘因と対応

- 浮力の発生
  - 地すべりブロックの水没による間隙水圧の増加
    - → 基準水面法（安定計算）
- 残留間隙水圧
  - 貯水位の急速な下降による残留間隙水圧の発生
    - → 残留間隙水圧の残留率（安定計算）
- 地下水位の堰上げ
  - 水没による地すべりブロック内の地下水位の上昇
    - → 湛水面上位の地下水排除工（対策工）
- 末端崩壊
  - 水際斜面の浸食・崩壊（末端部の崩壊）に伴う受動部分の押え荷重の減少
    - → のり面保護工（対策工）



浮力による地すべり

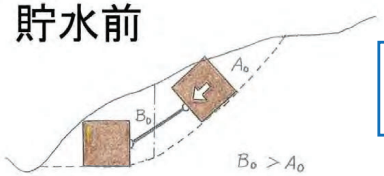




●一定の貯水位以上に湛水すると地すべりが活発化

長さ 300m，幅 280m，深さ 60m

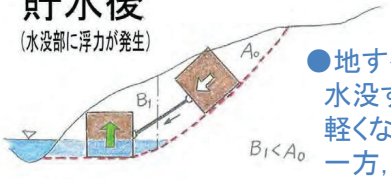
1）貯水前



ダム湛水の浮力による地すべりの発生機構

2）貯水後

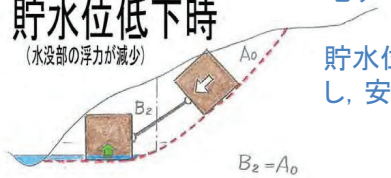
（水没部に浮力が発生）



●地すべり末端の受働域B_0は水没することで，浮力を受けて軽くなるB_1.
一方，地すべり頭部の主働域A_0は貯水前と同じ力でB_1を押すため，地すべりが活発化する.

3）貯水位低下時

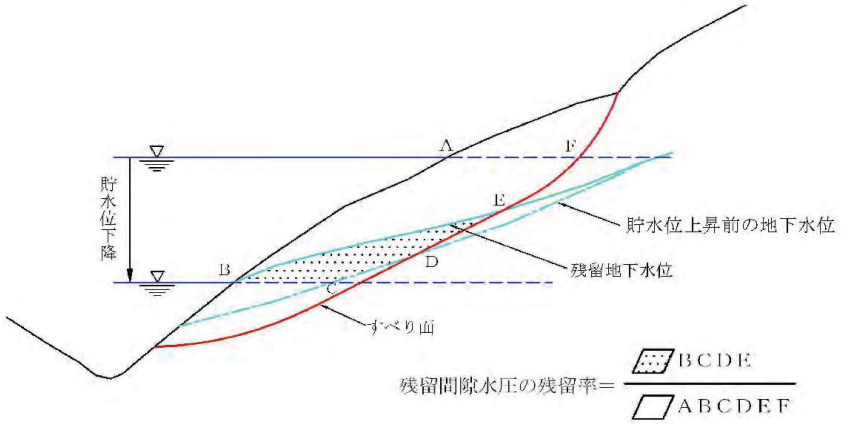
（水没部の浮力が減少）



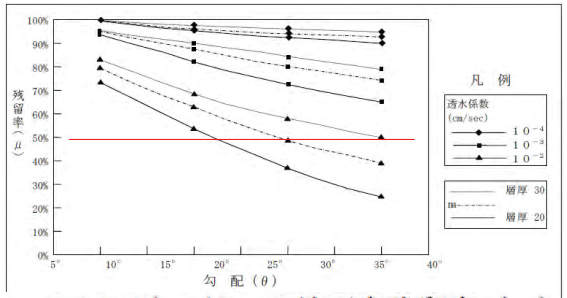
貯水位を下げるB_2と，浮力が減少し，安定化する.

残留間隙水圧による地すべり

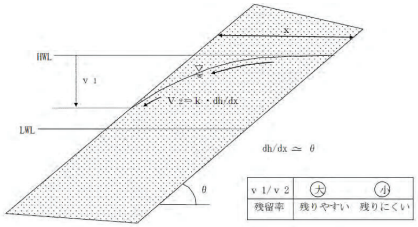
地すべりにおける残留間隙水圧の残留率の算定

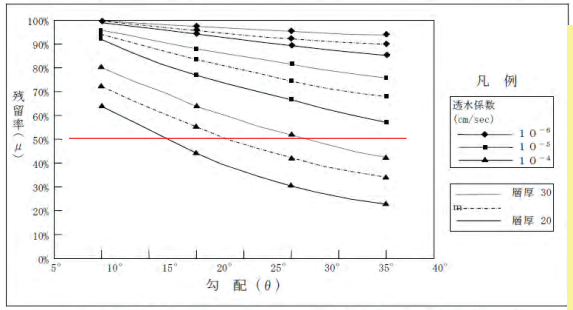


残留間隙水圧の残留率



v ＝7.8×10¹ m/day の地下水残留率（μ）





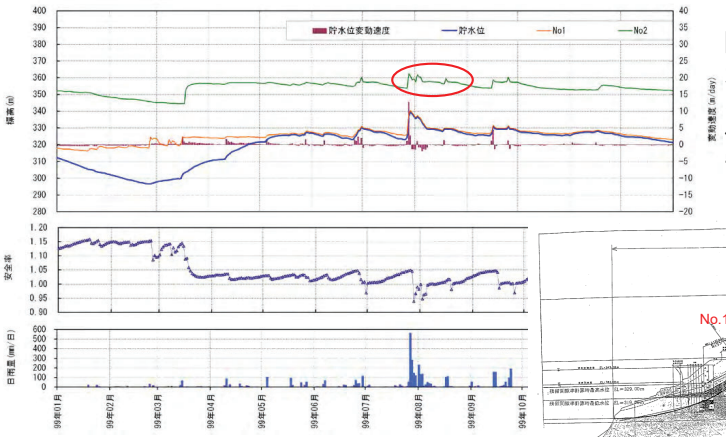
v ＝5.0×10⁻¹ m/day の地下水残留率（μ）

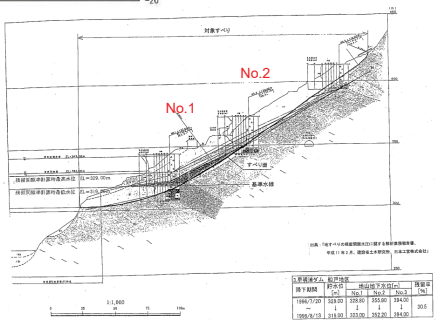
地下水残留率が小さくなる条件とは
①斜面勾配（Θ）が急
②透水係数（k）が高い
③すべり層厚（d）が薄い
④低下速度（V）が遅い

降雨の影響が大きい地すべり

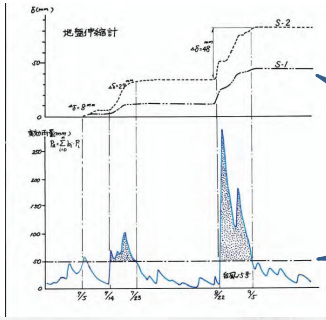
斜面下部が水浸し，滲出点が湛水面以上となる．

降雨に伴い地下水位が堰上げられ、しばらくの期間，高い水位が維持されるため、安定性が低下する。





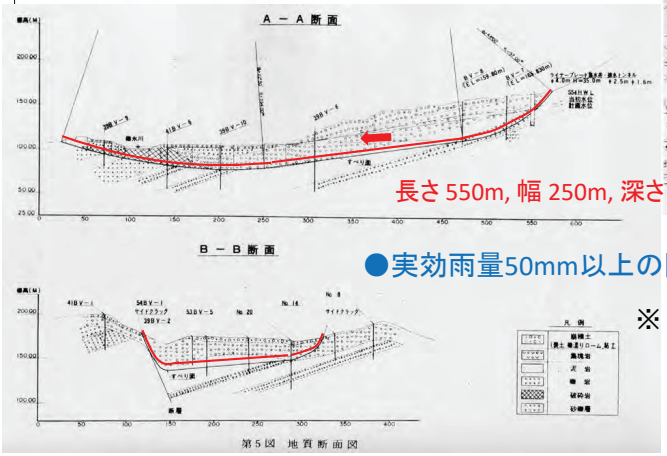
このような特殊な要因が重なる場合は、安易に30%を適用することができない。

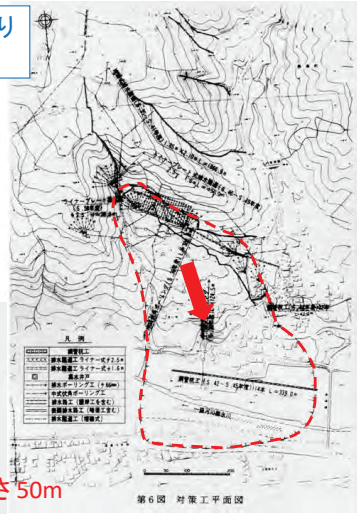


降雨で変動した地すべり
（少林山地すべり）

伸縮計の変位

実効雨量50mm





長さ 550m, 幅 250m, 深さ 50m

●実効雨量50mm以上の降雨で地すべりが活発化

※ 実効雨量＝$\Sigma\alpha^{i}\cdot P_{i}$
α:低減係数
P:日雨量
i:経過日数（0～n日前）

6. Where？/ どこで地すべりは起きるのか

ゆるみ/変動地形の特徴

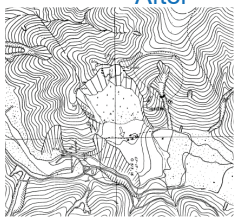
尾根部の緩斜面は侵食を受けていない氷期からの平坦面．
この周囲に河川侵食に伴う遷急線（崖の肩）が分布する

①線状凹地，小崖（二重山稜や多重山稜），山腹緩斜面，段差地形などの変動地形．

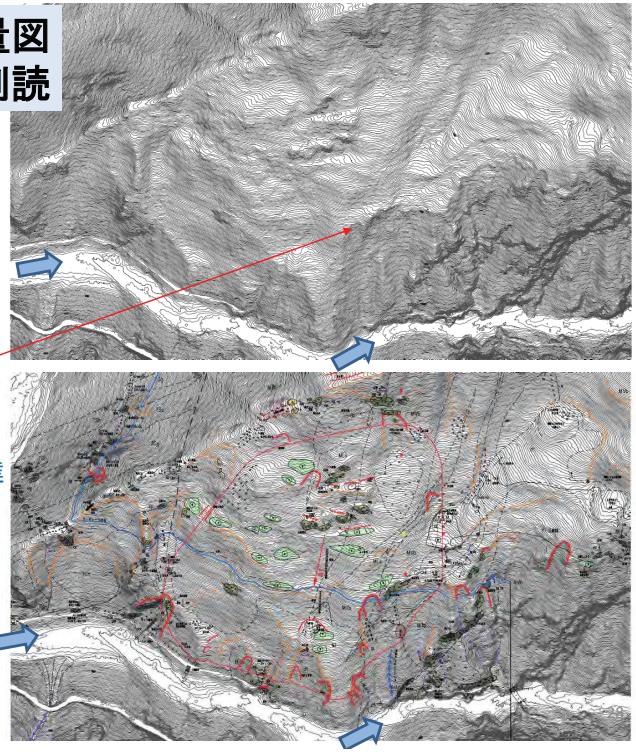
②河床近くの遷急線が明瞭で，背後に遷緩線を持つ緩斜面の存在．
これより上方に遷急線や段差地形が存在するとより変形が進行．← 攻撃斜面に多い．

③AHP法による予測

After



レーザー航空測量図による地形判読

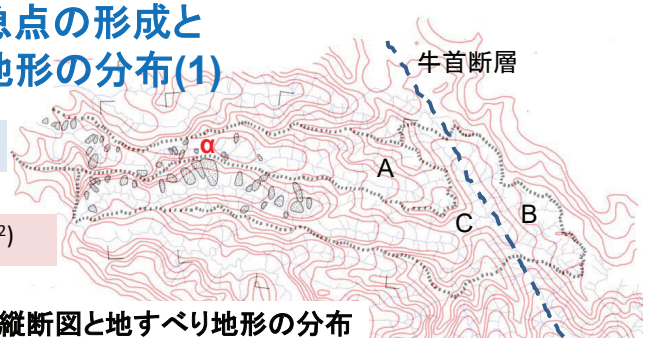


遷急線

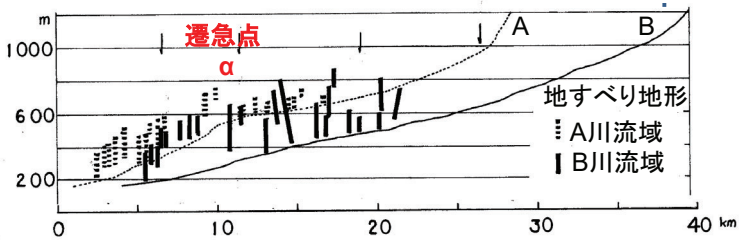
攻撃斜面での遷急線の発達
背後の緩斜面に注意

→変動微地形の発達

河川侵食による遷急点の形成と地すべり地形の分布(1)

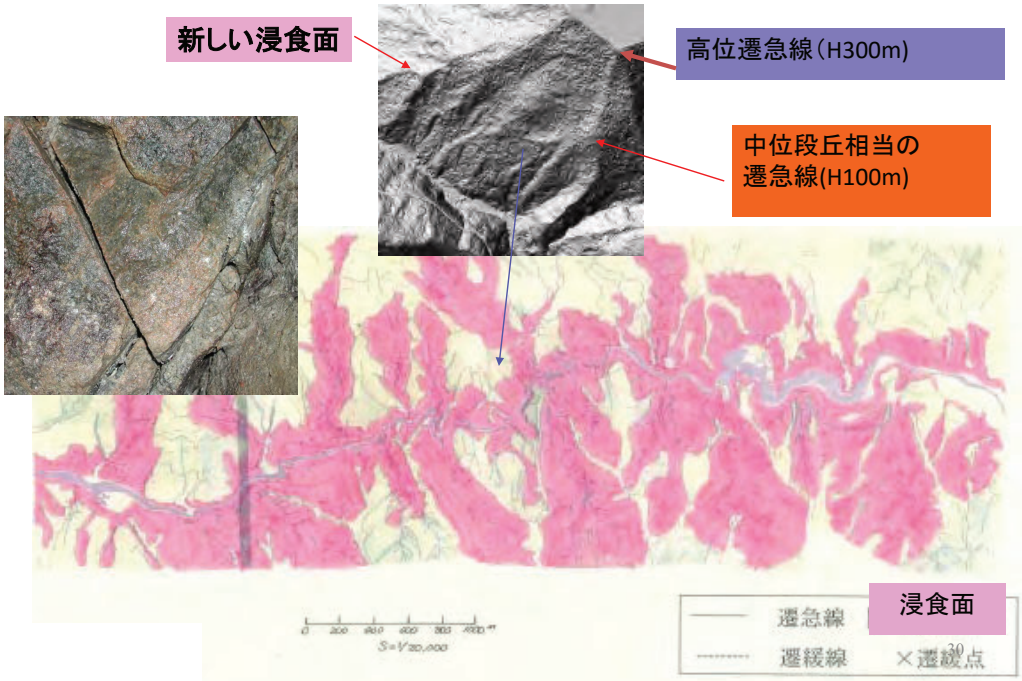


平行する河川の河床縦断図と地すべり地形の分布



2km程度の間隔で平行して流れる河川，A，BはB川が牛首断層流域を河川争奪する前では，ほぼ同じ流域面積であった．C地点でB川が上流域42km²を河川争奪後，B川は流量が増加することに伴い，浸食が進み，ゆるみ地形や地すべり地形が発達した．一方，A川流域は谷中平地が発達し堆積が進み，遷急点αの後退が遅い．

ゆるみに伴う変動地形の特徴：攻撃斜面

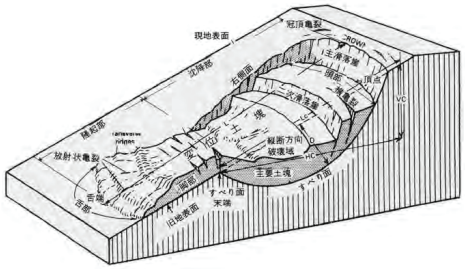


7．What ?/ どのような範囲，規模の地すべりか

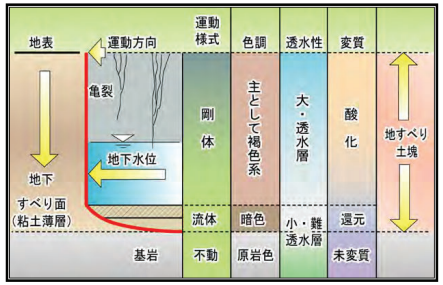
- ブロック範囲の決定
  - 隣接するブロック間の因果関係
  - ブロック内での地形の分化
- すべり面形状の決定
  - ボーリングコアの破砕度区分
  - すべり面勾配の変化に注意
- ゆるみに伴う地質状態の変化

変形が進むとトップリングや座屈が生じゆるんだ岩体になる過程で密度が小さく，透水性が大きくなる．

①透水性が基礎岩盤とゆるみ岩体とで急変
②自然地下水位がゆるみ岩体の下限付近に低下．
③弾性波速度値がゆるみ岩体では概2km/s以下と小さくなる．



地すべり地形の模式図（Varnes，1978）

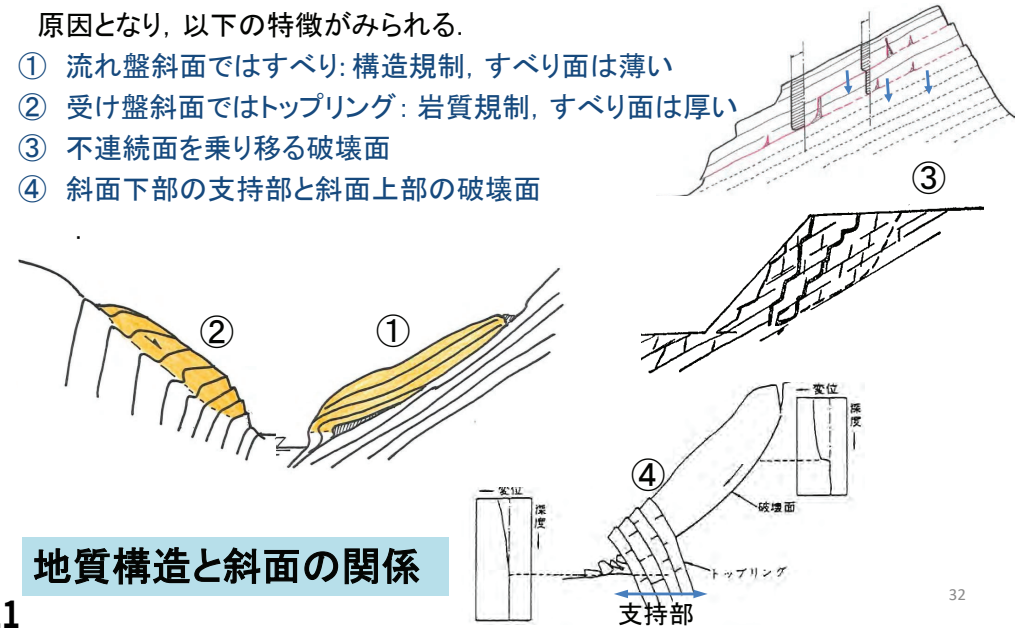


地すべり移動地塊の概念図（渡，1986）

ゆるみ/地すべりに伴う岩盤斜面の変形構造

岩盤斜面の変形は，不連続面沿いのすべり破壊や岩体の曲げ破壊が原因となり，以下の特徴がみられる．

① 流れ盤斜面ではすべり: 構造規制，すべり面は薄い
② 受け盤斜面ではトップリング：岩質規制，すべり面は厚い
③ 不連続面を乗り移る破壊面
④ 斜面下部の支持部と斜面上部の破壊面



地質構造と斜面の関係

岩盤斜面の地すべり初期の発生例

流れ盤斜面(1)
（付加体：砂岩，泥質岩）

遷移期

付加体の流れ盤構造の砂岩ブロック下面に形成されつつあるすべり面

写真 5.1　福水地すべりの斜め空中写真

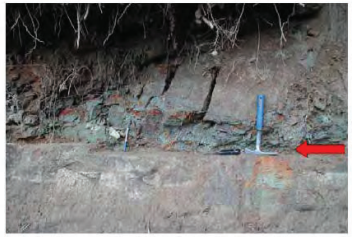


写真 5.2　福水地すべりのすべり面と移動体

流れ盤斜面(2)
（新第三紀層砂岩，シルト岩）

活動期

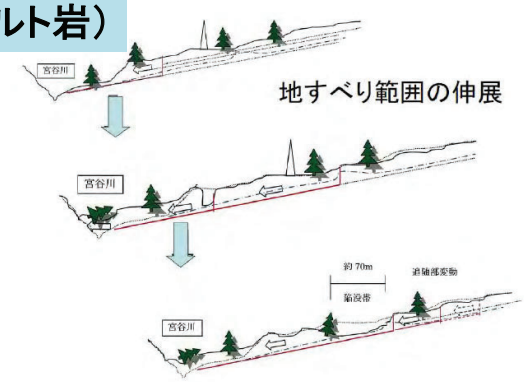
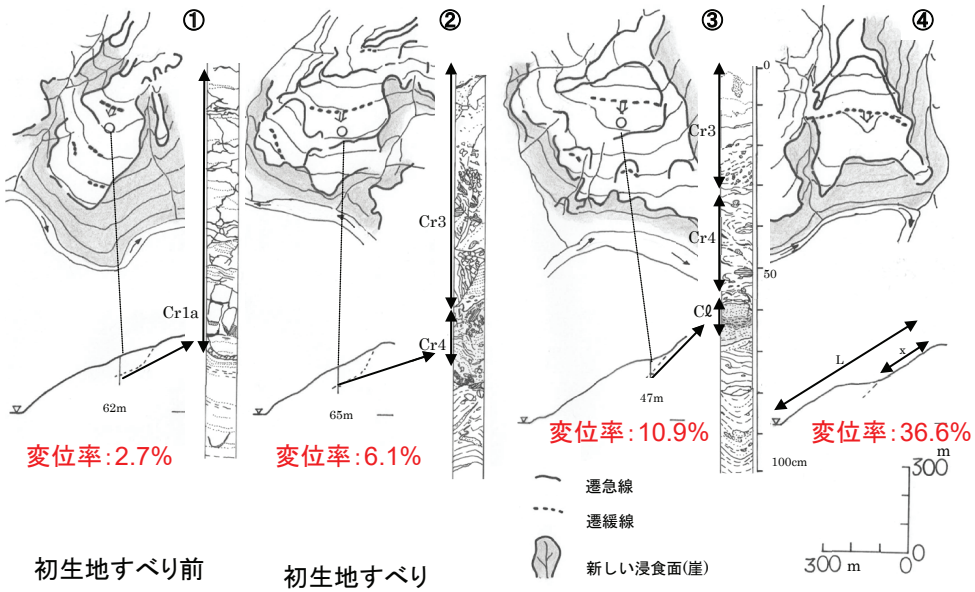
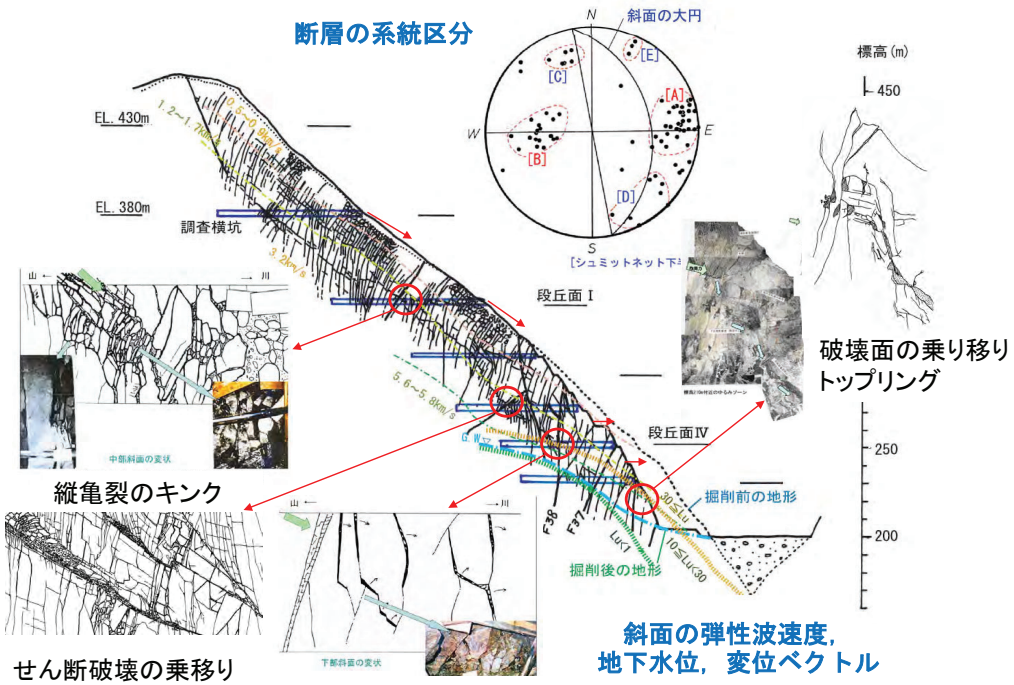


図 5.2　流れ盤福水地すべりの移動形態

河川浸食崖と斜面の変形の進行





受け盤斜面での岩盤変形の発生例（末端の抵抗部で斜面全体を支持）

8. When?: 湛水地すべりはいつ起きるのか，安全率は？

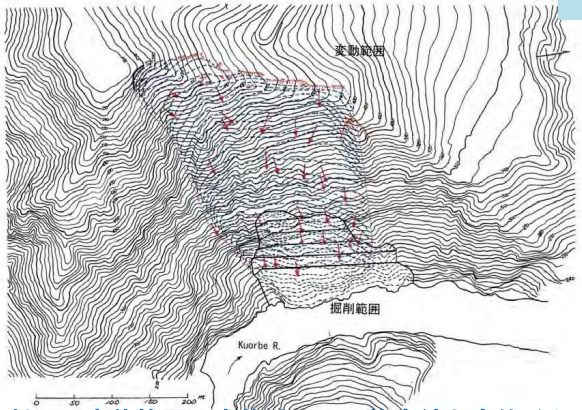
1）計測結果から現状の安全率 Fs_0 を推定

- 基本方針
  - 変動中の地すべり　Fs0　＜　1.00
  - 変動が見られず安定した地すべり　Fs0　≧　1.00
- 貯水池周辺地すべり等の場合の設定例

地すべり等の変状	計測調査による変動種別	湛水前の安全率の目安
1）現在変動中、主亀裂・末端亀裂発生	変動A：活発に変動中	Fs_0=0.95
	変動B：緩慢に変動中	Fs_0=0.98
2）地表における変動の徴候(亀裂の発生等)は認められない	変動C：変動量は非常に小さい	Fs_0=1.00
3）変動の徴候は認められない	変動D	Fs_0=1.05

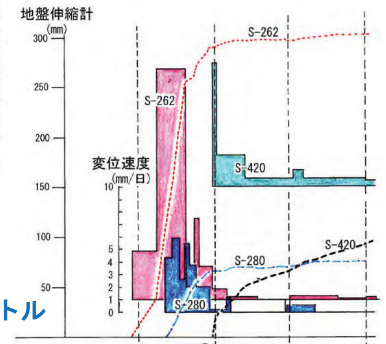
2）二次クリープ，三次クリープから破壊までの時間を予測

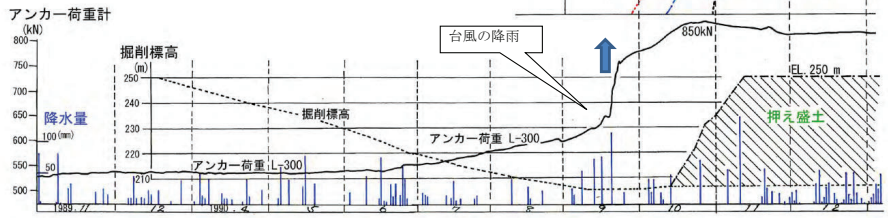
受け盤斜面（花崗岩類）



B斜面　変状範囲，変状域下面の等高線と変位ベクトル

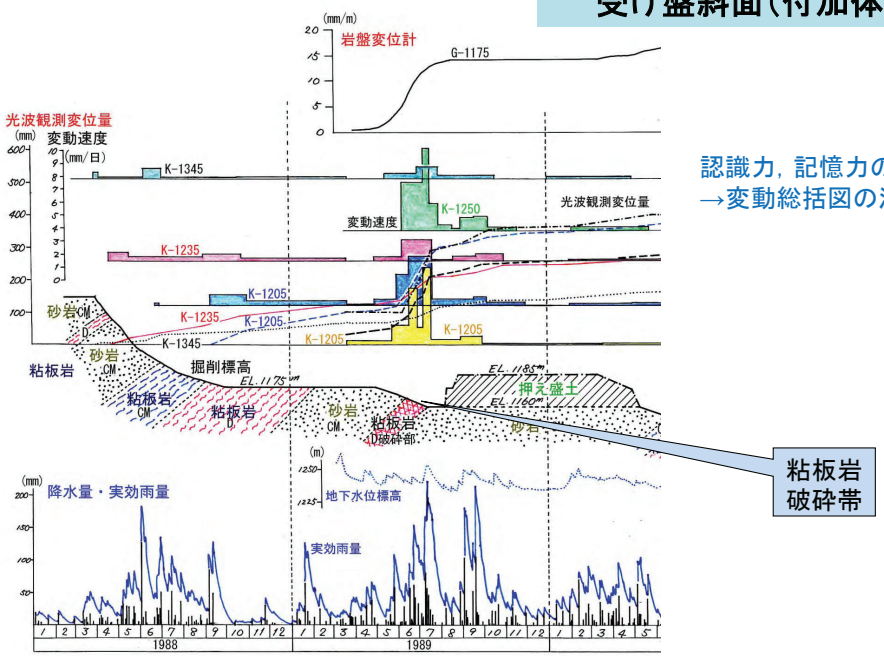
遷移期





斜面の掘削とアンカー荷重および光波計測グラフ

受け盤斜面（付加体）



認識力，記憶力の限界
→変動総括図の活用

粘板岩
破砕帯

斜面の掘削の進捗と計測グラフ

9. Whom:　湛水地すべりの保全対象は？

表 2.2 湛水に伴う地すべり等の精査の必要性の目安

保全対象 ＼ 地すべり等の規模		超大	大	中	小
ダム施設	堤体，管理所，通信施設，取水設備，放流設備，発電設備等	I	I	I	I
貯水池周辺の施設	家屋，国道，主要地方道，迂回路のない地方道，橋梁，トンネル，鉄道等	I	I	I	I
	迂回路のある地方道，公園等	I	I	II	II
	林道，管理用道路，係船設備，流木処理施設，貯砂ダム等	I	II	II	II
その他の貯水池周辺斜面		II	II	II	III

I：精査を実施する。
II：必要に応じて精査を実施する。
III：原則として精査を実施しない。

表 2.1 地すべり等の規模の区分の目安

地すべり等の規模	区分の目安
小	3 万m³未満
中	3 万m³以上　40 万m³未満
大	40 万m³以上　200 万m³未満
超大	200 万m³以上

土砂到達範囲の予測

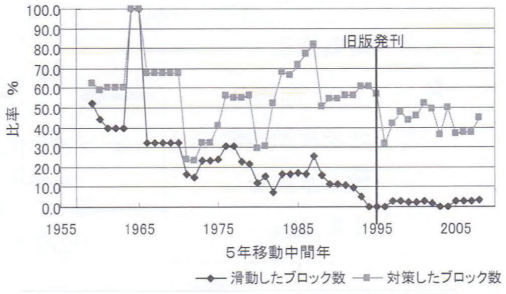
土砂災害警戒区域：
地すべり下端から
地すべり移動体の
長さ分.最大250m
の範囲

（土砂災害基礎機調査）

国土交通省　水管理・国土保全局（2019）：
貯水池周辺の地すべり等に関する調査と
対策に関する技術指針・同解説

10. How?: 湛水地すべりはどのように起きるのか？

湛水地すべりの対策件数と発生件数の経年変化

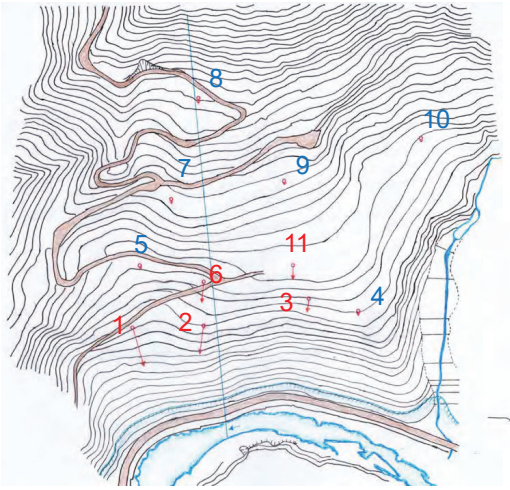


湛水地すべりの発生形態（現象）に関する要因

- すべり面の末端位置
- 分化した地すべり移動体の変動の順序
- 発生後の変動形態，移動速度，到達距離
  （地質構造，すべり面のダクテリィティ，含水状態，規模）
- 段波の発生
  （移動体の貯水面からの位置，規模，崩落速度）

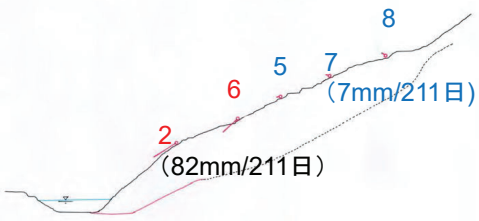
事例A: 湛水地すべり

2003年5月



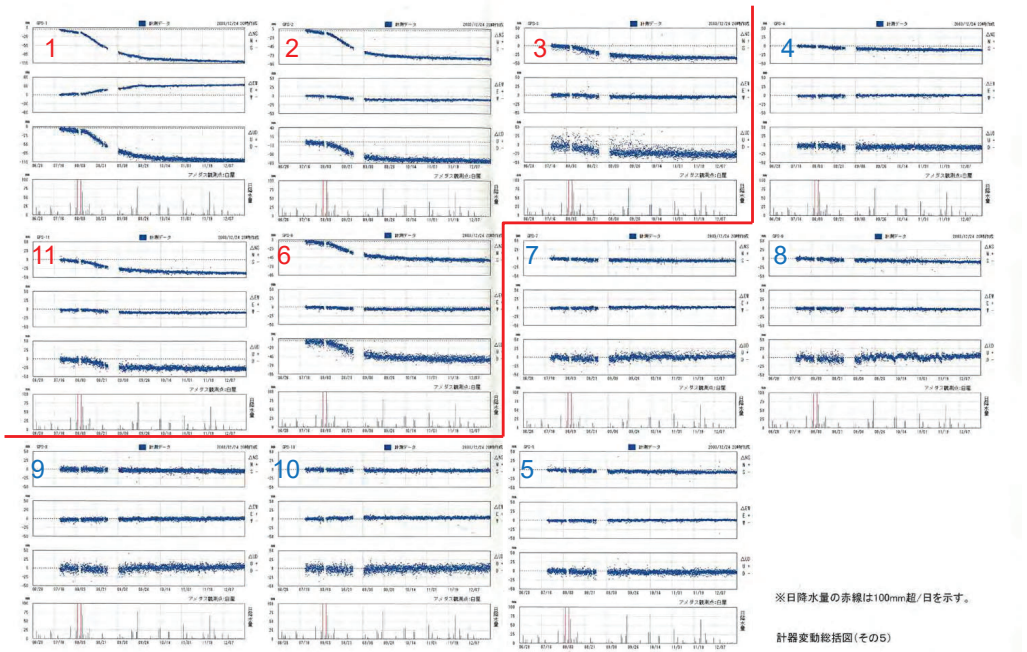
平面変位ベクトル

GNSS 計測による変動範囲（What）の特定

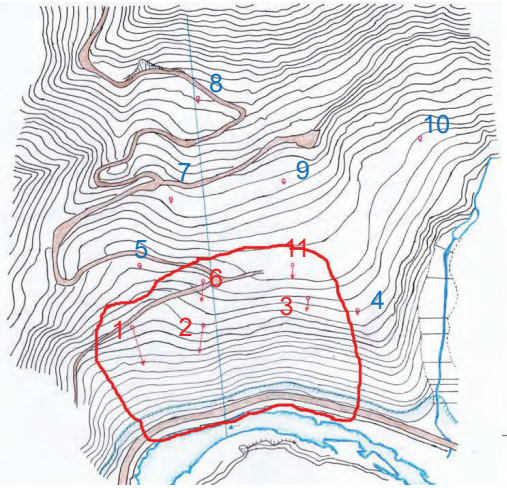


断面変位ベクトル

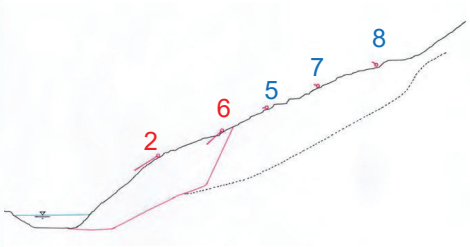
国土交通省近畿地方整備局：大滝ダム白屋地区亀裂現象対策検討委員会・第4回委員会資料，2003，
http://www.kkr.mlit.go.jp/kinokawa/dam/otaki/iinkai/d/d_4.htm(参照2021.11)を基に作成



http://www.kkr.mlit.go.jp/kinokawa/dam/otaki/iinkai/d/d_4.htm



GNSS 計測による変動範囲
（What）の特定



平面変位ベクトルから
地すべり範囲の推定

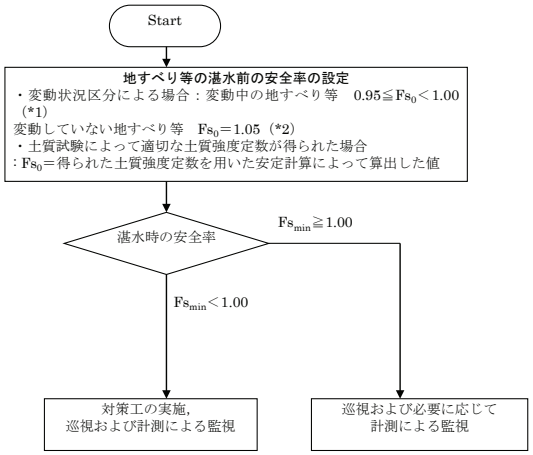
断面変位ベクトルから
すべり面形状の推定

国土交通省近畿地方整備局：大滝ダム白屋地区亀裂現象対策検討委員会・第4回委員会資料，2003，
http://www.kkr.mlit.go.jp/kinokawa/dam/otaki/iinkai/d/d_4.htm(参照2021.11)を基に作成

11. How much?: 湛水地すべりの対策は？

貯水池地すべりにおける対策工の必要性の評価

- 「地すべり等の規模」と「保全対象物への影響」を再確認



性能設計：

許容変位量，
許容変位速度

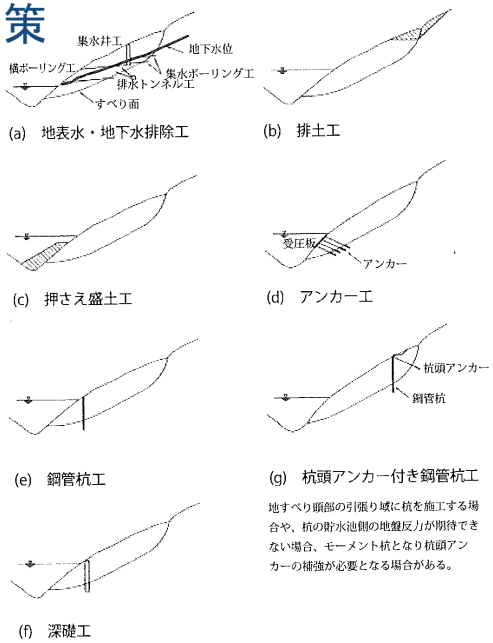
対策工施工　あるいは　管理/ 保全手法

湛水に伴う地すべり対策

貯水池周辺の地すべり

対策工計画の留意点

- 地すべりは不均質・不連続性に富んだ複雑な自然現象
→
- 地質・地下水・運動量などの全容を正確に把握し，定量的に扱うことが困難
→
- 対策工計画は十分な調査・解析に基づき行う．
- 地すべりの発生・運動機構を熟慮し，工種工法を検討し，計算結果のみにとらわれない．
- 機構が複雑な場合は余裕のある規模（範囲，すべり面形状，最大必要抑止力）で計画する．



12. 地すべりの予知における課題

1）Where/ 地形発達史の検討：繰り返し変動する地すべりはわかりやすい．過去の変形量が小さい地すべり/ゆるみ地形の抽出
流れ盤は滑落崖や末端にしか変状が出ない．
受け盤は全体が押されて圧縮し斜面が緩む．
2）When/ 的確な計測による安全率の判定
せん断帯が薄ければ少しのひずみでも破壊歪を超えるのですべる．
斜面長が長いと土層も厚く，圧縮部分が厚いので変形量が相当ないと壊れない．
→ すべり面での歪量がどのように地表に現れてくるか
最小の量がどの程度かで安定度を評価できるのでは？
3）What/ 調査ボーリングの打ち止め長さは河床標高より深く．
4) How/ 道具はある．注意深い踏査とコア観察，計測グラフの判読で機構を検討する
5）Whom, How much/ 湛水で変動した地すべり対策から湛水前の予知へ，さらに再開発ダムや流水型ダムでの湛水の影響評価
6）Why/ すべり面の破砕度区分とすべり面強度の推定,水浸に伴う強度低下
7）防災マネジメントはWhen, How, How muchの視点で速やかに．
性能設計，限界設計：許容応力度法や弾性範囲での杭の設計から変形を許容する対策へ→人的被害を起こさない．構造物が壊れないところまで変形を許して，動いたときに補修したり補強する可能性の検討
8）現地踏査，経験，情報の重要性，基準やマニュアルに頼らない．

参考文献

1) 藤田　崇 (1982): 地すべりー山地災害の地質学，共立出版，126p.
2) 大八木規夫・横山俊治(1996)：斜面災害と地質学―「地すべり構造論の展開」，原郁夫先生退官記念論文集“テクトニクスと変成作用”，創文，pp.335-343.
3) 横山裕典(2018): 地球46億年 気候大変動，ブルーバックスB-2074, 講談社, 334p.
4) 太田陽子・小池一之・鎮西清隆・野上道夫・町田 洋・松田時彦(2010): 日本列島の地形学，東京大学出版会，204p.
5) 小俣新重郎(2015): 遷急線分布による岩盤斜面の初生地すべり発生場の推定と変動に先立つ現象，応用地質，Vol.56,No.5,pp.230-238.
6) 目代邦康・千木良雅弘・玉利吉章（2002）:大井川上流赤崩における山体の短期変形について，地形，Vol.23 No.3, pp.468-469.
7) 小俣新重郎（2002）:秩父地方における長柱状石灰岩体の平面すべりとその対策，地すべり，Vol.39,No.1,pp104-110.
8) 北陸地方建設局黒部工事事務所(1999)：宇奈月ダム左岸斜面技術報告，276p.
9) 稲垣秀輝・小坂英輝・大久保拓郎（2007）：四国，中央構造線沿いの地すべりの発生と安定化，地すべり，Vol.44,No.4,pp37-43.
10) 脇坂安彦・上妻睦男・綿谷博之・豊口佳之（2012）：地すべり移動体を特徴づける破砕岩―四万十帯の地すべりを例として―，応用地質，Vol.52,No.6,pp.231-247.
11) E.Hoek, J.Bray(1977)：Rock Slope Engineering Revised second edition：小野寺徹，吉中龍之進訳(1979)：フック，ブレイ岩盤斜面工学，朝倉書店，pp43-47, pp240-242.
12) 八木浩司・桧垣大助ほか(2004)：2002年4月に発生した白神山地・向白神岳北西部の岩盤斜面崩壊とその前兆としてのザギング地形，日本地すべり学会誌，Vol.40，No.6, pp.57-61.
13) Zischinskey (1965): On the deformation of high slopes. International Congress on Rock Mech. Lisbon, 2, pp.178-185.
14) 松岡憲知(1985)：赤石山脈主稜線部における線状凹地の分布と岩石物性，地理学評論，58，pp.411-427.
15) 植村　武（1982）:地すべりの理学ー地すべりをどう観るか，アーバンクボタ，No.20,pp.52-55.
16) Chigira, M.(1992): Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep, Eng. Geol. Vol.32, pp.157-184.
17) Radbruch-Hall(1978)：Gravitational Creep of Rock Masses on Slopes, Rockslides and Avalanches.1,Elsevier,pp.607-657.
18) 八木浩司(1996)：地すべりの前兆現象としての二重山稜・多重山稜・小崖地形と変動様式，中村三郎編著“地すべり研究の発展と未来”，大明堂，pp1-25.
19) 岩松　暉・下川悦郎(1986)：変状岩のクリープ性大規模崩壊，地質学論集，No.28,pp.67-76.
20) Yokoyama and Hada(1989):Gravitational creep folds in the Izumi mountains, South-west Japan, *Jour. Japan Landslide Soc.*,vol.26, no.3, pp.10-18.
21) 千木良雅弘(1985)：結晶片岩の岩盤クリープ（その2），応用地質，Vol.26,No.2,pp.67-79.
22) 横山俊治(1999)：斜面変動と地質，斜面地質学―その研究動向と今後の展望―第2章，日本応用地質学会，pp.15-59.
23) 鵜沢貴文・稲垣秀輝・小坂英輝(2012)：山梨県北部，風化花崗岩における初生地すべりの変位率と内部構造，応用地質，Vol.53, No.1, pp.2-11.
24) 横山俊治(1995)：和泉山地の和泉層群の斜面変動：岩盤クリープ構造解析による崩壊「場所」の予測に向けて，地質学雑誌，102-2, pp.134-147.
25) Riemer and Locher(1988)：Deep seated mass movement in metamorphic rocks of the Ecuadorian Andes, Landslides Glissments de Terrain, Balkema, vol.1，pp.307-310.
26) 国土交通省近畿地方整備局(2003)：大滝ダム白屋地区亀裂現象対策検討委員会・第4回委員会資料，http://www.kkr.mlit.go.jp/kinokawa/dam/otaki/iinkai/d/d_4.htm（参照 2021.11）

27)地すべり対策技術協会・全国地すべりがけ崩れ対策協議会・日本工営株式会社（1989）：谷口敏雄先生　遺稿集　地すべりの道を拓く，p.291.
28)全国治水砂防協会（2009）：地すべり対策　半世紀の道程，p.254.
29)武居有恒（1980）：地すべり・崩壊・土石流―予測と対策，鹿島出版，p.334.
30)山田剛二・渡正亮・小橋澄治（1971）：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，山海堂，p.580.
31)渡正亮・小橋澄治（1987）：地すべり・斜面崩壊の予知と対策，山海堂，p.260.
32)申 潤植（1989）：地すべり工学－理論と実践－，山海堂，p.1002..
33)申 潤植（1995）：地すべり工学－最新のトピックス－，山海堂，p.663.
34)日本応用地質学会編（2000)：山地の地形工学，古今書院，p.213..
35）大八木則夫(2007)：地すべり地形の判読法，近未来社，p.316..
36)古谷尊彦（1996）：ランドスライド―地すべり災害の諸相，古今書院，p.213..
37)波多野誠一（1974）：崩壊性地形（その1，その2），土と基礎，Vol.22,no.9,pp.77-84;Vol22,no.11,pp.85-93..
38)日本地すべり学会（2021）：斜面防災危険度評価ガイドブック―斜面と地すべりの読み解き方―，朝倉書店，p.125..
39)　日本地すべり学会（2004）：地すべり―地形地質的認識と用語―，p.318.
40).土質工学会 編（1988）：岩盤挙動の予測と実態，土質基礎工学ライブラリー33，p.382.
41)建設省河川局開発課監修（1995）：貯水池周辺の地すべり調査と対策，山海堂，p.174.
42)国土技術研究センター編（2010）：改訂新版　貯水池周辺の地すべり調査と対策，古今書院，p.277.
43)国土交通省　水管理・国土保全局（2019）：貯水池周辺の地すべり等に関する調査と対策に関する技術指針・同解説
44)千木良雅弘（2013）：深層崩壊，近未来社，p.231.

日本地すべり学会関東支部シンポジウム
「地すべり技術の現状と課題」

地下水計測の課題

2022年5月11日

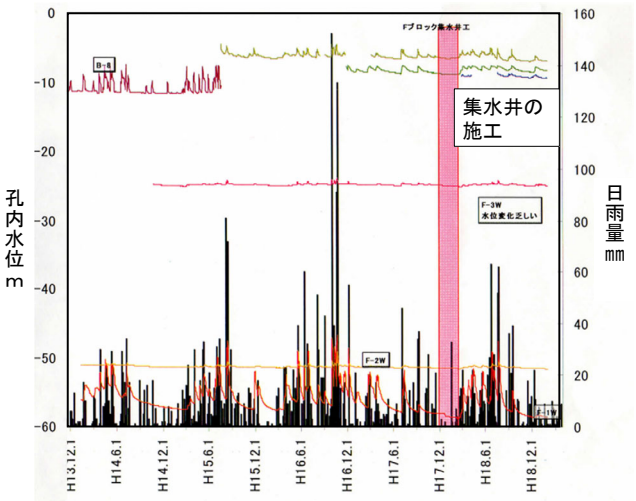
応用地質㈱社友　上野将司

地すべりを対象とした地下水調査・計測の方法と目的

赤枠内を話題提供

- 孔内水位・間隙水圧計測：水位・間隙水圧変化
- 地下水検層：帯水層
- 微流速測定（検層）：帯水層、透水係数

- 土壌水分測定：サクション変化
- 物理探査（比抵抗、地温）：帯水層、地下水流動経路
- 揚水試験、透水試験：透水係数
- 地下水追跡調査：地下水流動経路、流動層
- 水質調査（ヘキサダイヤグラムなど）：地下水の区分



ある地すべり地５年間の孔内水位の観測結果例

問題点
降雨時の水位変化がある観測孔
　→透水層や亀裂がある
降雨時の水位変化が無い観測孔
　→透水層や亀裂が無い

排水対策実施後の水位低下が認められない

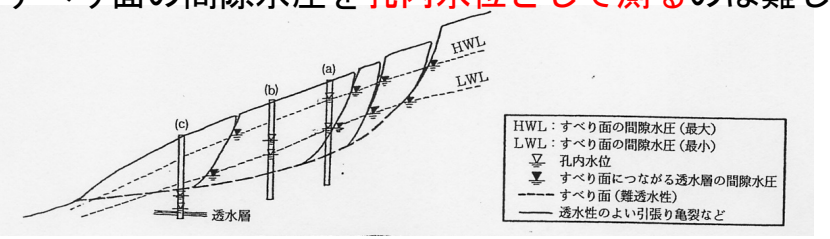
地すべり排水対策の効果判定の問題

排水対策では地下水位低下を見込む（下表）
施工後の地下水位低下を確認できればいいが・・・

工種	計画地下水位低下高
横ボーリング	3m
集水井	5m
排水トンネル	8m

問題点
→地すべり変動は停止or減速するが孔内水位低下は確認できない
　（計画安全率は未達成？、抑止対策の増加？）
→孔内水位観測位置の問題、観測孔自体の問題

すべり面の間隙水圧を孔内水位として測るのは難しい



すべり面の孔内水位観測孔の違い

（a）透水性の良い位置の観測孔（開口割れ目にあたる）
→正しい間隙水圧測定が可能

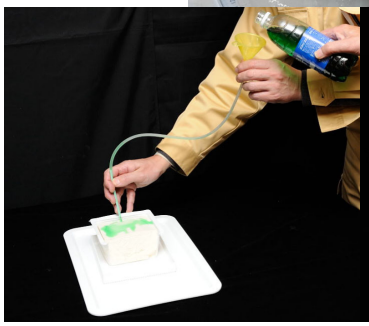
（b）難透水性のすべり面の観測孔
→間隙水圧の変化の測定は困難

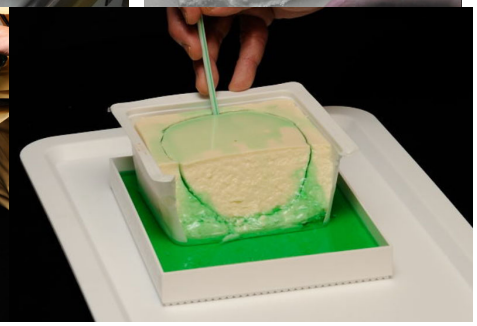
（c）すべり面下の透水層を含む観測孔
→間隙水圧の測定は困難

地すべり地の地下水、とうふ実験

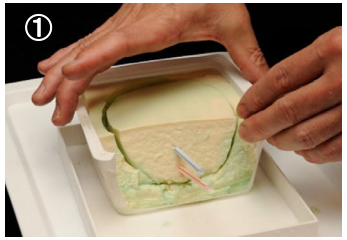
（株)藤井基礎設計事務所（藤井俊逸氏）提供

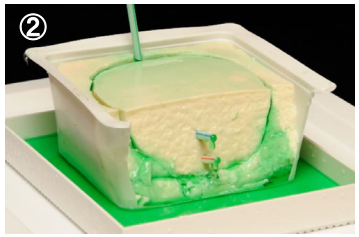
準備→
実験↓
色水の流入
と浸み出し

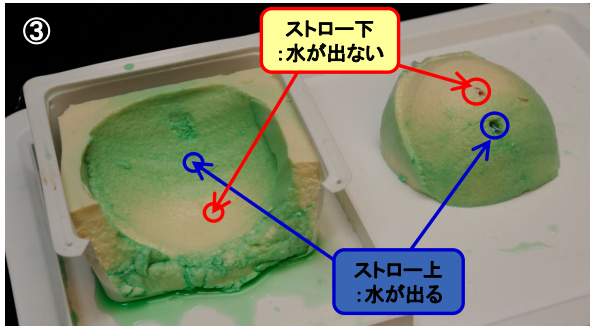




排水ボーリングの効果　すべり底面は透水性が低い







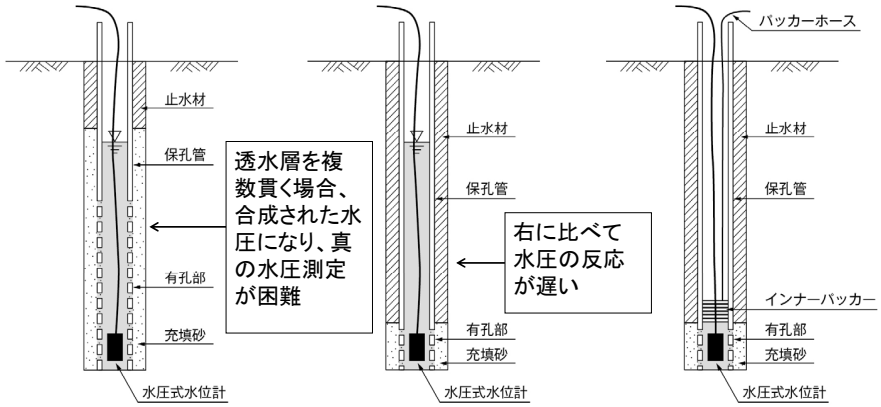
①とうふ地すべりの上下にストローを入れる。

②頭部亀裂に注水上段ストローから水が多く出る

③すべり面の内部を見る（水の痕跡）

孔内水位の観測孔の構造をどうするか？

右の構造が望ましいが・・・　水圧測定区間の設定に課題
（間隙水圧計タイプ）
左は通常の観測孔「全区間孔あき」



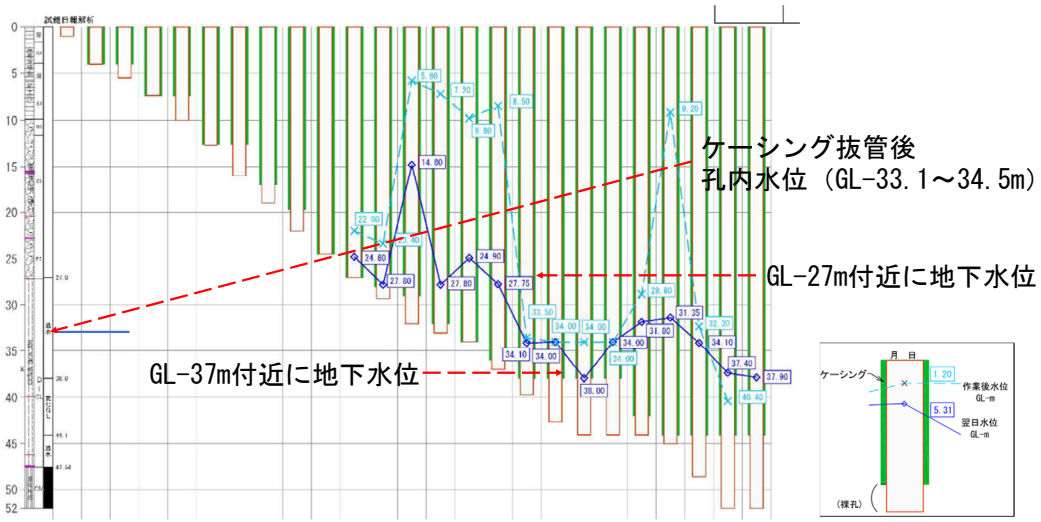
孔内水位観測は特定の透水層を対象にすることが望ましい

すべり面に作用する水圧をはかりたい
しかし、多くは全区間孔あきの観測孔
↓
特定の透水層を対象に孔内水位観測するには

望ましい方法：地下水検層、微流速測定による透水層を検出
次善の策：掘進中の孔内水位の情報から透水層を推定

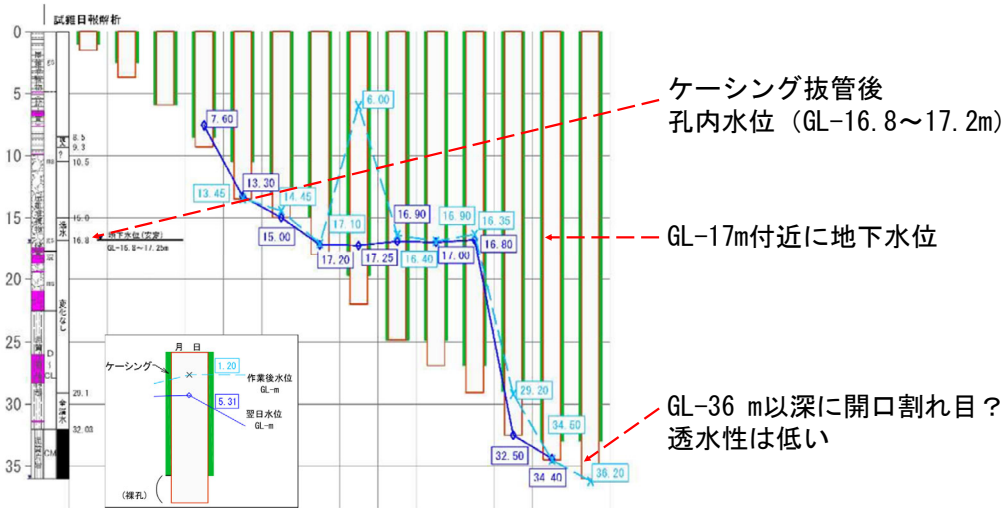
ボーリング掘進中の孔内水位変化の情報

地質：結晶片岩

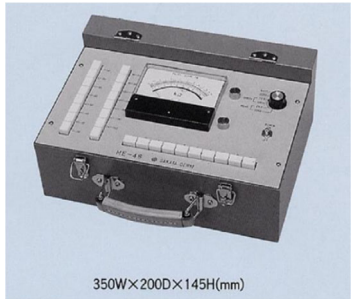


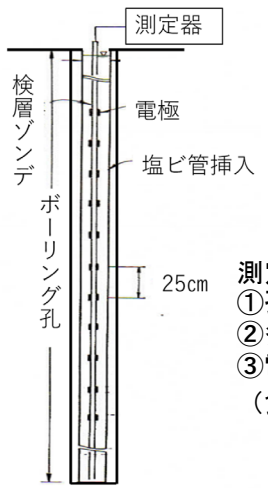
ボーリング掘進中の孔内水位変化の情報

地質：結晶片岩

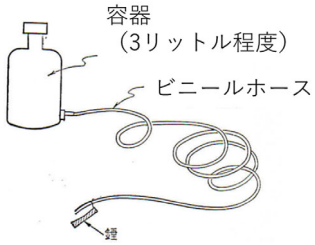


地下水検層の測定器と測定方法





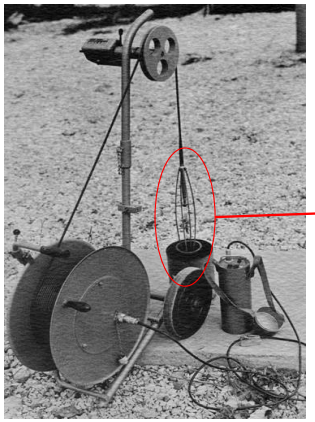
食塩水注入用器具

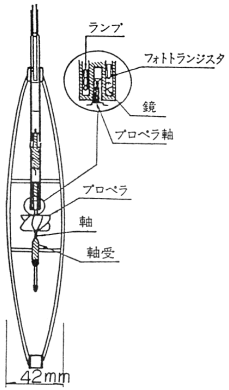


測定手順
①孔内に食塩水を注入撹拌
②多数の電極を設置
③電気抵抗の変化を数回測定
（食塩水の希釈状況の測定）

ボーリング孔内微流速計と構造

鉛直方向の孔内水の流速と流れの方向（上向き、下向き）を測定する

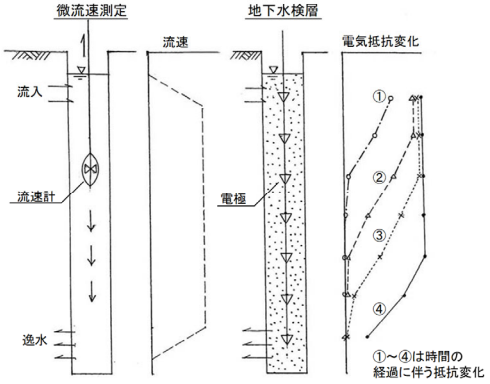




自動記録する測定器による計測
（従来の手動計測が望ましい）

孔内微流速測定と地下水検層の対比

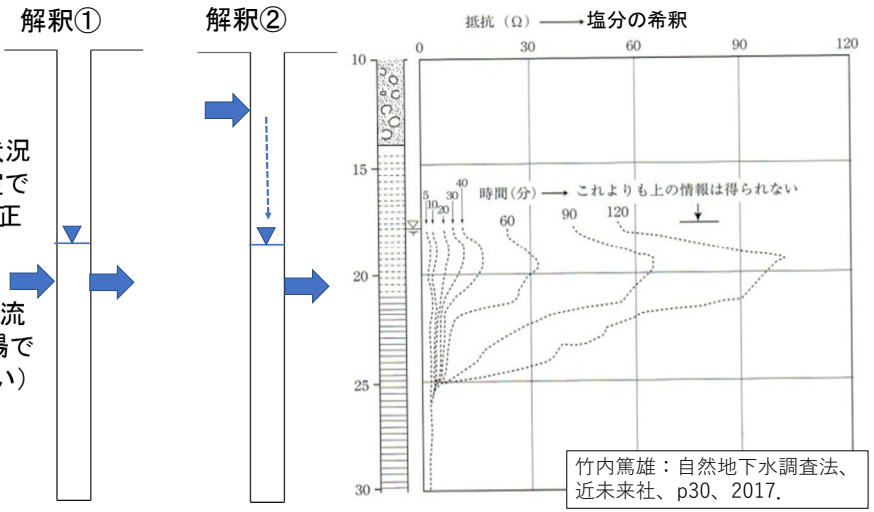
地下水検層は透水層厚の検出が困難



地下水検層の測定
孔内に食塩水を注入撹拌
↓
多数の電極を設置
↓
電気抵抗を時間をおいて数回測定
流入する地下水で孔内の塩分が希釈され電気抵抗が高くなる
電気抵抗変化から透水層を検出する

ボーリング孔が水圧の異なる透水層2層を貫いた場合の計測モデル
流速測定は透水区間が明瞭、地下水検層は透水区間が不明瞭

地下水検層の測定例　解釈が難しい例

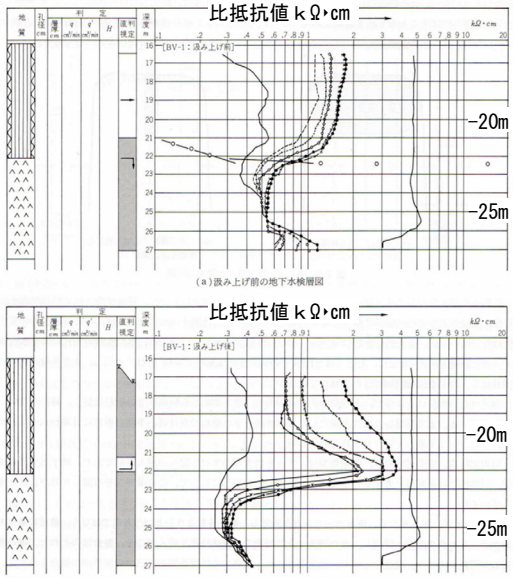


地下水流動状況
解釈①は否定できないが②が正しい

砂礫層からの流入水あり(現場でしかわからない)

竹内篤雄：自然地下水調査法、近未来社、p30、2017.

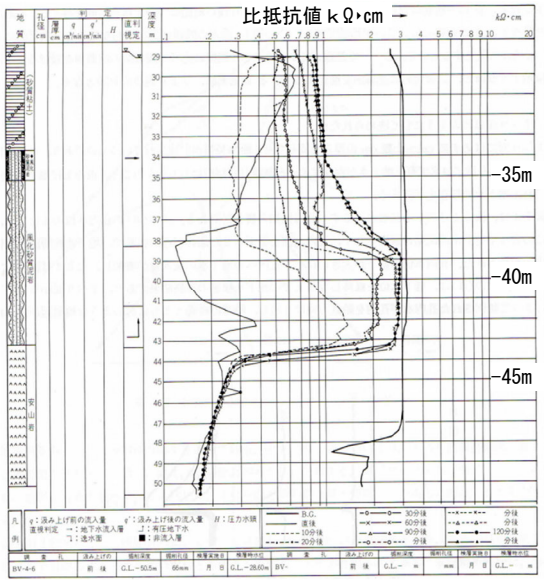
地下水検層の測定例
孔内水汲み上げ前(上)後(下)



汲み上げ前
GL-16.5m～-22mからの層流状の記録

汲み上げ後
GL-22mからの孔内への流入・上昇流が顕著に認められる

申　潤植：地すべり工学　最近のトピックス、山海堂、p174、1995.



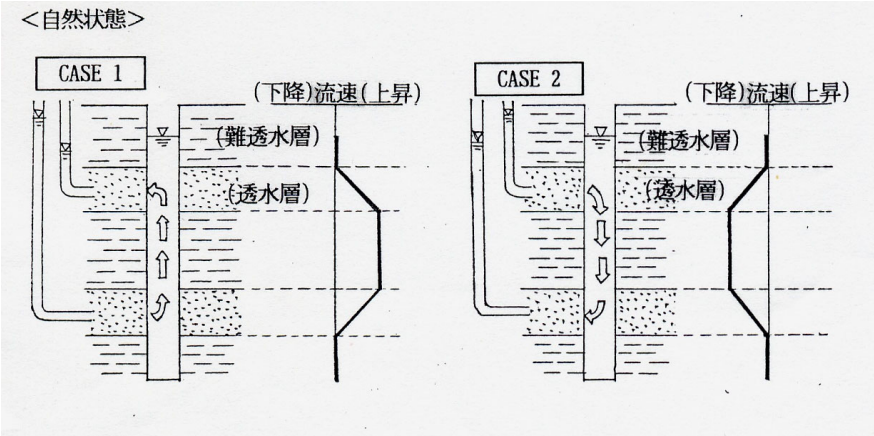
地下水検層の測定例
孔内水汲み上げ後

GL-43.5m～-39mからの孔内への流入・上昇流が認められる

申　潤植：地すべり工学　最近のトピックス、山海堂、p168、1995.

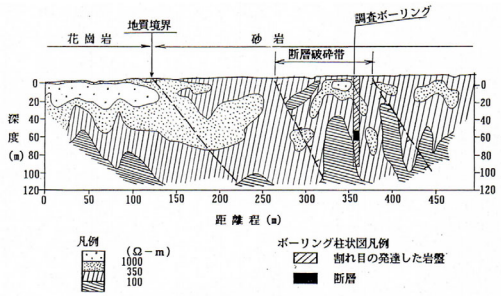
孔内微流速測定の記録の模式図

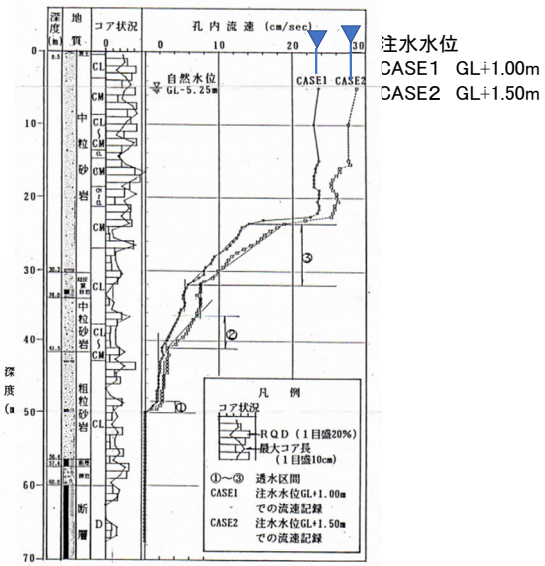
水圧に差のある複数の透水層を貫くと坑内に上下流が発生する



孔内微流速測定例
（井戸の開発調査）

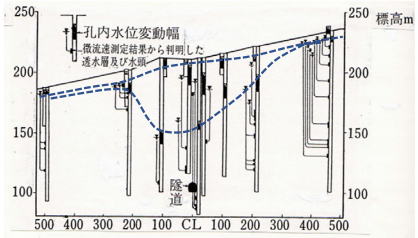
①踏査で断層等の位置・方向を調査
②電気探査で低比抵抗分布の把握
③ボーリング孔での微流速測定

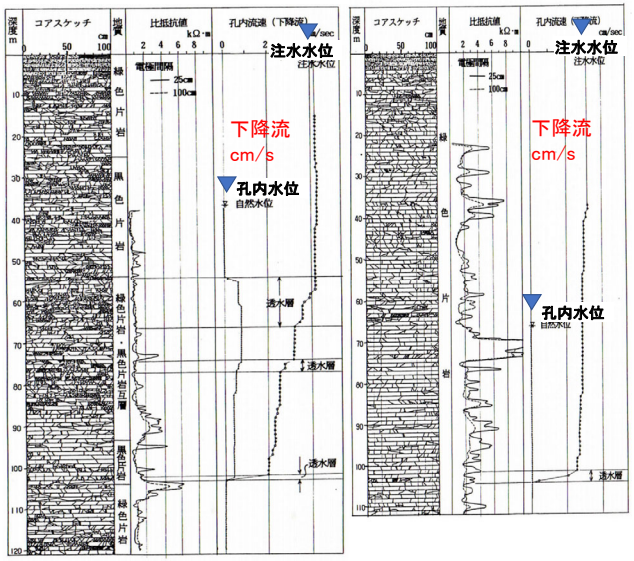




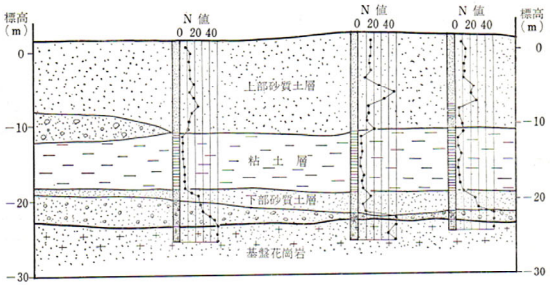
トンネル周辺の
地下水流動調査

孔内微流速測定による
透水層と水圧の調査
→トンネル湧水範囲の想定

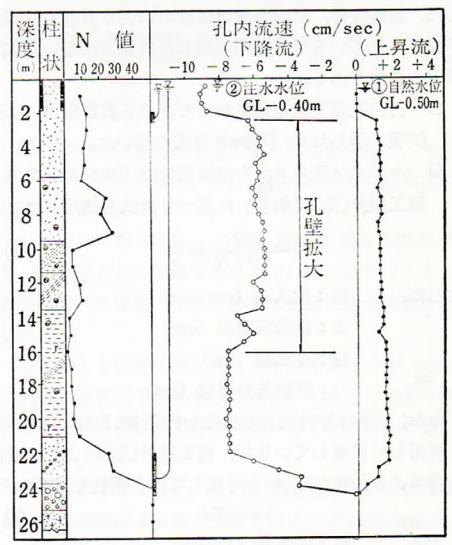




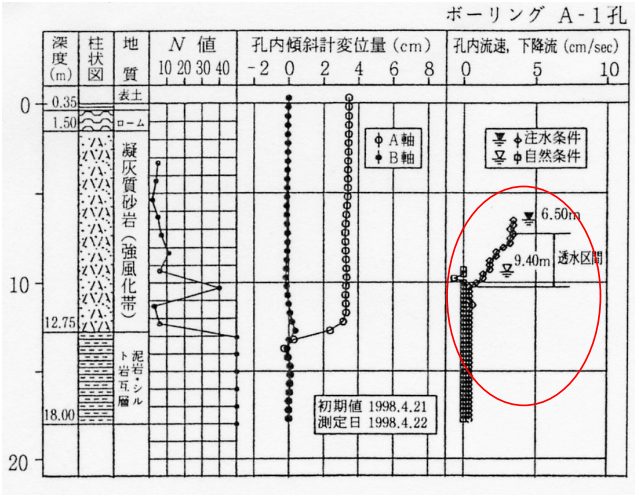
沖積層の測定例
（場所打ち杭の選定）



①基底礫層と砂質土層の帯水層が若干の被圧
②注水（定常）すると圧入される



すべり面と透水層の確認例

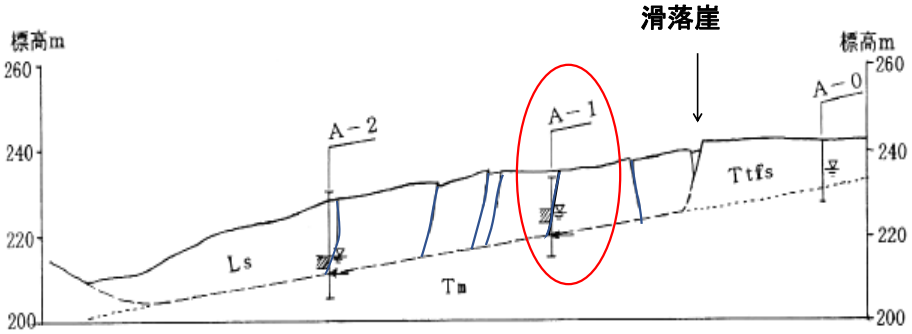


①孔内水位GL-9.40m自然条件→孔内流速なし（コップの中の水と同じ）
②孔内水位GL-6.50m注水条件→GL-10m付近まで流速が漸減（地層中に水が逃げる透水区間）

地すべり地の地下水調査例

地すべり移動層のクラックは透水性良好（A-1）

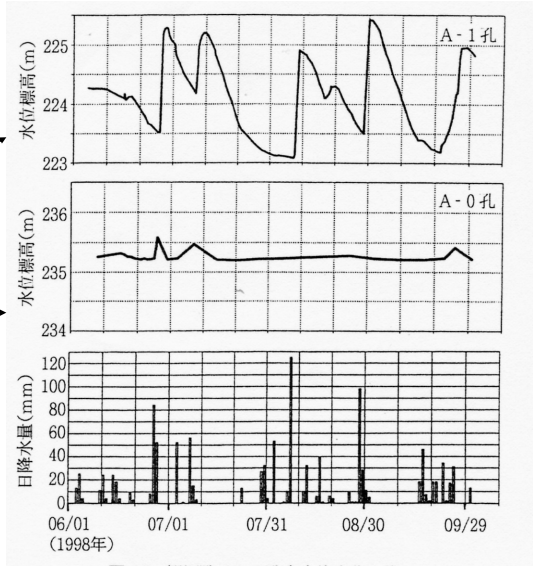
滑落崖背後の不動地盤の透水性不良（A-0）



透水層の有無による孔内水位変化の違い

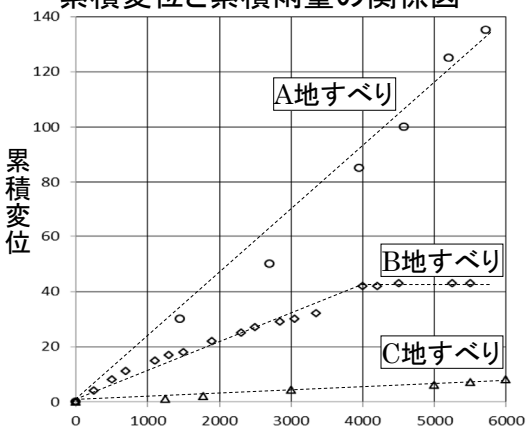
透水層あり（A-1孔）
降雨に応じた水位変化

透水層なし（A-0孔）
降雨時の水位変化なし



排水対策で地すべり変動に効果あるが孔内水位が低下しない場合の参考

累積変位と累積雨量の関係図

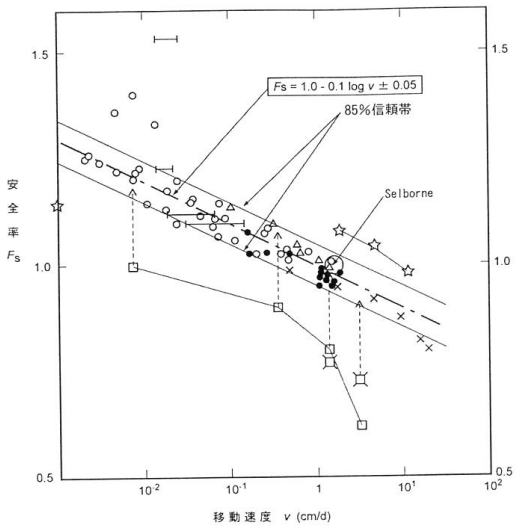


B地すべりは累積雨量4000mm時点で集水井施工

↓

前後の累積降水量と累積変位の相関関係が変化

参考　安全率と移動速度の関係（対策効果の推定）



地すべり記録（8か所）

Selborn(英),St.Barbara(伊),Salledes(仏),Smreke(チェコ),Jezerka(チェコ),Perton Dam(米),鹿児島,青森

安全率upと速度の関係

Fs：5%up→速度1/3

Fs：10%up→速度1/10

Fs：15%up→速度1/30

Fs：20%up→速度1/100

菅原紀明(2003)：クリープ性地すべり斜面の安全率と地表の移動速度、応用地質技術年報、No23

まとめ

1. 孔内水位（間隙水圧）測定の問題点
   孔内水位観測位置の問題、全区間孔あきなど観測孔の問題
2. 掘進作業・期間中の孔内水位変化に十分な注意が払われていない
3. 地下水検層・孔内微流速測定などの調査が不十分
   検層を実施せずに孔内水位測定が行われる場合がある
   検層の品質の問題（技術者が直接行うことが望ましい）
4. 地すべりは停止or減速するが孔内水位低下が確認できない場合
   対策効果を累積雨量と累積変位の関係で判定できる
   速度変化から安全率upを推定（Fs：5%up←速度1/3、Fs：10%up←速度1/10など）

Kanto branch

地すべり技術の現状と課題

令和４年５月　公益社団法人日本地すべり学会関東支部

本書に掲載された原稿は、著者から印刷物への掲載・配布、ホームページでの公開の承諾を得ております。