

9. 地すべり移動量調査

(基準書 第2章、2.3(8)関連)

9.1 調査の目的

地すべり移動量調査の把握すべき事項とその目的を示すと図-2.9.1のようになる。

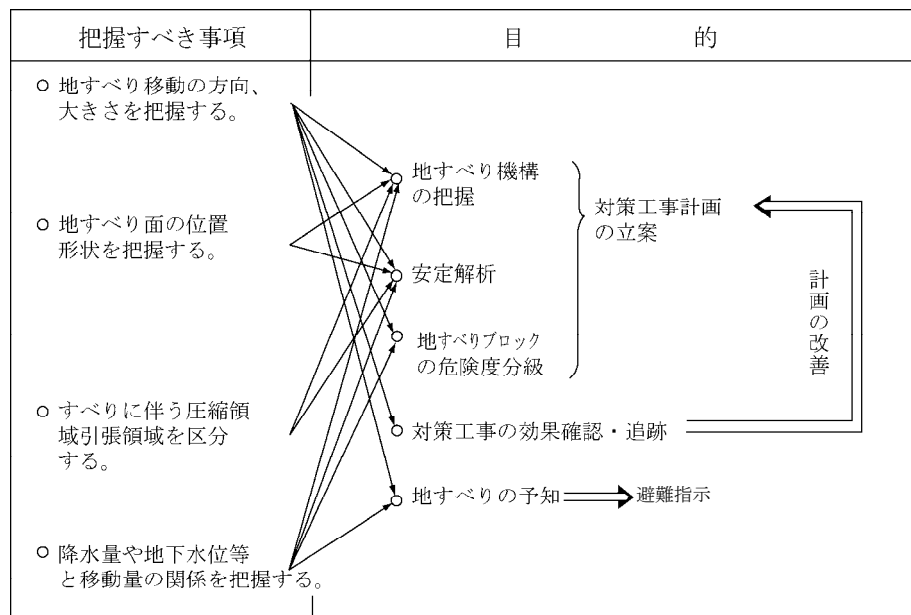


図-2.9.1 地すべり移動量調査の目的

調査を行うに当たっては、地すべりの移動状況を把握するために、地表部における移動量の測定（地表移動量調査）と地中における移動量の測定（地中移動量調査）を併せて実施する。両調査ともにその調査手法には各種のものがあり、それぞれ長所、短所を有している。主たる調査目的、移動速度の大小、地域地点の特性に応じて、適切な調査手法を選択する必要がある。

また、地すべり移動量調査は、地すべり活動の把握に大きく寄与するものであるから、降雨の多い時期、積雪期、融雪期等、地すべり変動が特に顕在化する時期の観測が不可欠である。なお、対策工施工後の観測時期・期間については、技術書「Ⅲ計画設計編、11. 概成」を参照する。

現在、移動量調査に用いられている主な調査手法についてその特徴を表-2.9.1に示す。これらのほかにも各種の手法が考案されているので、長所・短所・経済性等について検討した上で用いる。また、いずれの調査手法を用いるに当たっても、移動速度や変位の累積傾向に留意し、測定間隔を定める。

なお、地すべりの運動形式と鉛直断面における移動量分布のタイプの関連を図-2.9.2に示す。地塊型の地すべりでは、一般にすべり面が明確であるが、粘稠型の地すべりではすべり面が不明確であったり、すべり面が確認できない場合も多い。崩壊型の地すべりは表層部が破碎される（したがって設置計器が破壊される）点に特徴がある。また、すべり面は1枚とは限らず複数のすべり面が

認められる場合も多いので注意を要する。

地すべりの運動型式*1は、以下のとおりである。

- ① 地塊型地すべり：地すべりブロックが幾つかの土塊に分かれ、各々の土塊がそれぞれ自由に運動し、水平運動の割に垂直運動の著しいもの。地形変化は比較的少ない。
- ② 崩壊型地すべり：移動とともに地表面が粉碎され、崩落後は多くはその位置に留まって静止し、時を経て再び移動するもの。
- ③ 粘稠型地すべり：最も普通の地すべりで塑性の大きい移動層が基岩の形状にしたがって移動し、粘性運動的に移動するもの。継続的かつ緩慢な動きを呈する。
- ④ 流動型地すべり：移動層内の含水量が高い泥の流動で、多くの場合突発的に生じ谷に沿って流下するもの。

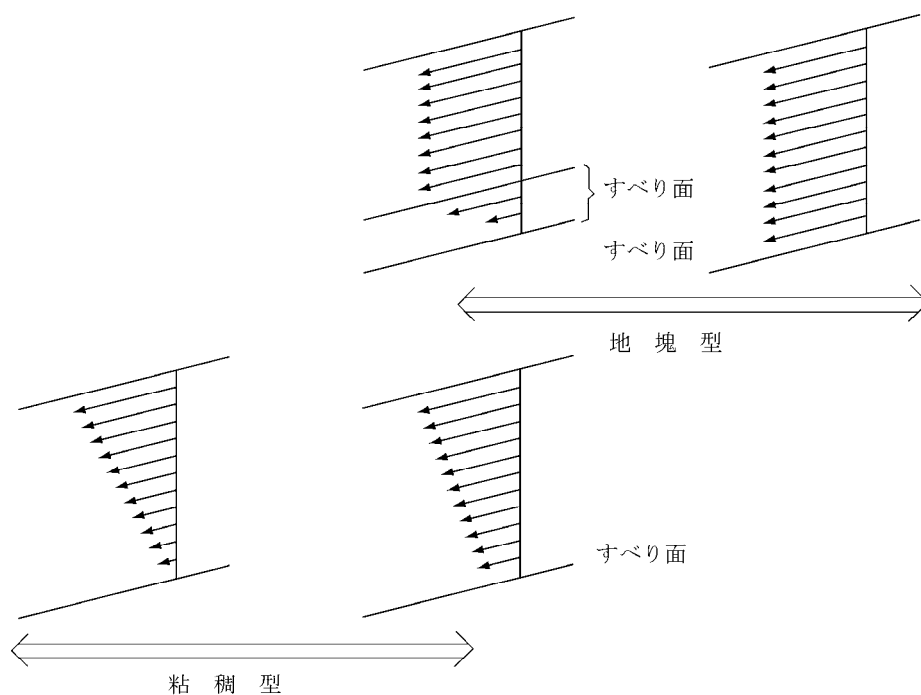
表-2.9.1 主な地すべり移動量調査の特徴

項目	手法	移動速度				最終予測変位			実施区分	施設・観測			備考
		1 m/日	10 cm/日	1 cm/日	1 mm/日	10 m	1 m	10 cm		施設 位置の 自由度	施設 設置費	観測 経費	
地表移動	空中写真判読	←-----→				←-----→			特殊条件下で実施	—	—	○	通常施設設置は不要
	レーザ測量 (地形判読、差分 解析)	観測頻度による ←-----→				←-----→			必要に応じ実施	—	—	—	通常施設設置は不要 技術発展途上である ため、評価は記載し ていない
	移動杭による観測	←-----→				←-----→			通常実施	○	◎	△	
	伸縮計による観測	←-----→				←-----→			通常実施	×	◎	○	地塊型・崩壊型は警 報用、緊急用にも適
	地表面傾斜計によ る観測	移動量そのもの は測定用でさな い ←-----→				←-----→			必要に応じ実施	△	○	○	移動量そのものの測 定用ではなく、微小 変動のチェック用に 用いる
	GNSSによる観測	←-----→				←-----→			必要に応じ実施	△	△	△	
	干渉SARによる 観測	観測頻度による ←-----→				←-----→			必要に応じ実施	—	—	—	通常施設設置は不要 技術発展途上である ため、評価は記載し ていない
地中移動	すべり面測定管	←-----→				←-----→			通常実施	○	△	◎	すべり面位置の測定 移動量そのものは測 定できない
	パイプひずみ計	←-----→				←-----→			通常実施	○	△	○	地塊型・崩壊型では 変動予知等のための 小変位測定用
	鉛直方向伸縮計	←-----→				←-----→			通常実施	○	×	○	多段型のものが望ま しい
	孔内傾斜計	←-----→				←-----→			通常実施	○	×	×	せん断に対しては弱 く、センサーが挿入 不能となる

◎ 特に適する又は特にすぐれる又は安い ○ 適する又はすぐれる又はやや安い

△ 可能又は普通又はやや高価 × 不適又は劣る又は高価

*1 高野秀夫：地すべりと防止工法、地球出版、pp. 6～7、1960



ここでは、地塊型（上段）と粘稠型（下段）の例を示す。地塊型の左図は、すべり面が厚さを有してすべり層となっていることを表しており、その場合は粘稠型に近い変位形態となることを示している。

図-2.9.2 鉛直断面における移動量分布

9.2 調査方法の選定

調査方法の選定区分を、表-2.9.2に示す。

表-2.9.2 調査方法の選定区分

選定区分	調査方法	対応する 他基準	明らかにされる情報・数 値の概要	特長
通常実施	移動杭 《変位杭》	JGS 1711	地表の地すべり移動量	移動量が大きい場合や変動範囲を明確に したい場合に有効
	伸縮計	JGS 1725	地表の地すべり移動量	警報器を設置する必要がある場合は特に 有効 耐用年数は数年程度
	すべり面測定管		地中（ボーリング孔内） のすべり面の位置の推定	パイプひずみ計や孔内傾斜計の計測範囲 を超過するような大きい変動の場合に有 効
	パイプひずみ計 《地中ひずみ計》	JGS 1731	地中（ボーリング孔内） のすべり面の位置の推定	変動深度が複数想定される場合は特に有 効 耐用年数は1～3年
	鉛直方向伸縮計		地中の移動量 地中（ボーリング孔内） のすべり面の位置の推定 (多段式)	移動量が大きく、すべり面深度が確定し ている場合に有効 耐用年数は数年程度 多段式はすべり面深度も推定可能
	孔内傾斜計	JGS 3722	地中（ボーリング孔内） のすべり面の位置の推 定、移動方向、移動量	すべり面の移動量を定量的に計測する場 合に有効 変動量が小さい場合は観測可能期間も長 い センサーの耐用年数は約5年 無線方式の設置型センサーなら5～15年 の耐用年数がある 挿入型は、変動深度が複数想定される場 合は、変動が小さい間は全深度の測定が 可能であるが、変動の進行とともに変動 が大きい区間以深の測定が不能となるこ とに留意
必要に応じ 実施	地表面傾斜計	JGS 1721	地表面の微小な傾斜変動	地すべり頭部のすべり面形状が円弧を呈 し、地すべり変動が軽微な場合に特に有 効耐用年数は10年程度
	レーザ測量（差分 解析）		地表の地すべり移動量	広範囲な移動量・移動方向計測に有効 動態観測用の観測点が無くても計測可能
	干渉SAR		地表の地すべり移動量	広範囲な移動量・移動方向計測に有効 動態観測用の観測点が無くても計測可能
	GNSS計測		地表の地すべり移動量	広範囲な移動量・移動方向計測や積雪地 帯の移動量計測に有効
特殊条件下で 実施	空中写真判読		地表の地すべり移動量	広範囲で移動量大きい場合に有効

注) 表中でJGSとしたものは「地盤工学会基準」であり、「地盤調査の方法と解説」(2013)(地盤工学会編)を参照する。また、《 》内は地盤工学会基準(JGS)での名称を表す。

なお、表-2.9.2の手法以外に光ファイバーによるひずみ計測があり、センサー上のひずみ量とその空間的な分布を連続的に繰返し計測できる特長を持つ。センサー長は理論的には20kmまで延長が可能で、大深度すべり面のひずみ計測や同一センサーによる複数地点の同時測定が可能である*1。

計器観測の手法には、自動観測、半自動観測、手動観測がある。各々の手法の特徴を以下に示す。

- 自動観測 : 主に、緊急性が高くリアルタイムで変動状況を把握する必要がある場合、積雪地域等で観測作業が困難な時期がある場合、観測箇所が危険な場合、観測範囲が広範囲な場合等に採用される。
- 半自動観測 : 主に、積雪地域等で自動観測までの必要性はないが、連続データの取得が必要な場合等に採用される。定期的に観測者が現場へ行くため、観測箇所以外の変状を把握できる場合がある。
- 手動観測 : 自動観測や半自動観測と比較すると、連続データが取得できない計器が多く、観測頻度の設定に注意を要する。変動の有無確認等ができる最低限の観測である。自動・半自動観測データのキャリブレーションを目的とした補足的な観測として用いられることもある。定期的に観測者が現場に行くため、観測箇所以外の変状を把握できる場合がある。

地すべりの規模や変動速度の違いを考慮した、観測方法の選択については、「地すべり監視体制構築の手引き」（農林水産省）に表-2.9.3の参考表が示されている。

*1 黒田ら（2003）：連続分布型計測システムによる野外地下計測技術、農業土木学会誌71. 1、pp. 31～34

表-2.9.3 規模及び危険度による地すべりの観測方式（案）

			地すべり規模			
			巨大	大	中	小
			幅1000m以上	幅300～1000m	幅100～300m	幅100m未満
危険度 (重要度評価を含む)	特大	変動A以上	直轄地すべり対策事業 全自動方式			都道府県営地すべり対策事業 全自動方式 (小規模な警報システム等) ～ 半自動方式
	大	変動B	全自動方式 ～ 半自動方式		半自動方式	
	中	変動C	半自動方式		手動方式	
	小	変動C未満	手動方式 ～ 測量による広域的観測		手動方式 ～ 簡易計測 事業概成後の地すべり監視	

注) 簡易計測とは、亀裂や段差等の変動状況を、丁張や観測鉋を設置して定期的に計測することである。地すべり発生の初期段階における応急調査手法としても重要である。

注) 表中の「変動C未満」は、地すべり滑動の可能性のある変動が認められない場合を示し、表-2.9.5、表-2.9.6、表-2.9.10の「変動なし」と「変動D」を含む。

また、自動観測システムによる地すべりの計測事例として、庄内あさひ地区（山形県）の事例を紹介する。

【事例】庄内あさひ地区（山形県）

平成21年2～6月に斜面長700m×斜面幅400m×すべり面深度30mの範囲で地すべりが活発に活動し、民家5戸6世帯が避難する事態となった。

そのため当地区では、観測困難な融雪時期でもリアルタイムで地すべり変動を監視できるよう、自動観測システムを導入した(図-2.9.3)。その主な特長は以下のとおりである。

9.3 調査内容

9.3.1 空中写真計測

(1) 適用

原則として極めて大規模かつ継続的な動きのある地すべりで、他の調査方法では移動実態を把握することが困難な場合に用いる。

(2) 調査の概要

移動量調査における空中写真判読は、定期的に空中写真を撮影し、その写真から複数の基準点座標を読み取り、移動量を測定するものである。

空中写真は定量的な調査だけでなく、地表状況を把握する定性的な調査としても利用できる。空中写真は、樹林帯を除けば微地形の判読が可能であり、撮影時点における地表の状況を静止画像として記録するため、地表の経年変化を捉えることができる。そのため新旧の崩壊状況の把握や、地すべり発生機構の推定に寄与することができる。古い空中写真が入手できる場合は、これを積極的に利用する。

(3) 調査手法

撮影は、調査期間中にわたって、同じ機器・同じ高度・同じ主点で行うことが望ましい。

空中写真判読では、設置された対空標識の移動量を、不動点に設置した基準点をもとに計算する。対空標識は50m間隔の格子状に配置することが望ましい。

(4) 留意事項

- ① 写真測量の精度は、撮影高度による誤差と、図化機を標定する際に作られたステレオモデルの正確さ、画像の鮮明さが影響する。撮影高度による誤差は一般に高度の縮尺1/5,000程度であり、撮影縮尺1/4,000、高度600mで撮影した場合の誤差は±12cmとなる。また、最良の条件で撮影された写真でも、縮尺1/4,000の立体モデルの絶対精度は、±60mm程度である。

したがって、観測間隔の累積で移動量が6cm以下の地すべりでは、本調査方法は不向きである。表-2.9.4に空中写真測量における許容誤差を示す。

表-2.9.4 空中写真測量における許容誤差^{*1}

図化縮尺	撮影縮尺	撮影高度 (m)	許容誤差 (cm)	
			平面位置	標高点
1/500	1/4,000	600	25	25
1/1,000	1/7,000	1,050	70	33

- ② 解析では、測点移動軌跡図を作成し、地すべりの移動量・移動方向・移動速度を算出する。
- ③ 移動量のデータだけでなく、植生や地形の変化も記録される（植生はカラー写真が必要）。
- ④ 毎回撮影機を飛ばさなければならぬため、経費が高くつく。
- ⑤ 写真は天候に左右されるため、撮影時期を選ぶ必要がある。

*1 高速道路調査会（1987）：地すべり危険地における動態観測施工に関する研究（その2）報告書（日本道路公団委託）、pp. 40～48

9.3.2 レーザ測量（差分解析）

(1) 適用

本調査は、空中写真判読では把握が困難な地すべり地形や、災害後の被害調査、移動量調査及び概成後の地表変状箇所の抽出に適用可能である。

(2) 調査の概要

レーザ計測（Laser Profiler）データ（以下「LPデータ」という。）をもとに作成する等高線図、陰影図、傾斜区分図等の重ね合わせを行うことで「明瞭な地すべり」のほか、空中写真や縮尺1/25,000～1/10,000の地形図では正確に把握することが困難である樹木が繁茂する森林部の「不明瞭な地すべり」を把握できる。特にUAVレーザ測量は、従来型の航空レーザ測量や地上測量に比べ、高密度・高精度で面的な地形データを取得することができるため、30cm程度の段差等を捉えられる可能性があり、地すべり地形の見落としを減少させることが期待される。図-2.9.4に空中写真（オルソフォト図）と陰影図の事例を示す。複数時期のLPデータの差分解析を行うことで、高さ方向の変化を把握可能であり、崩壊発生箇所や隆起・陥没箇所等の地形の変化が把握できる。

(3) 調査手法

- ① LPデータより数値標高モデル（DEM）を作成し、DEMを用いて等高線図、傾斜区分図、陰影図、断面図等を作成する。
- ② 等高線図や傾斜区分図を重ね合わせたLP地形量図を作成する。
- ③ LP地形量図から遷急線、遷緩線、凹地等の微地形を判読し、地すべりブロック区分を行う。
- ④ 複数時期のLPデータがある場合は、GIS（地理情報システム）上で差分解析を行い、高さ方向の変化を把握する。

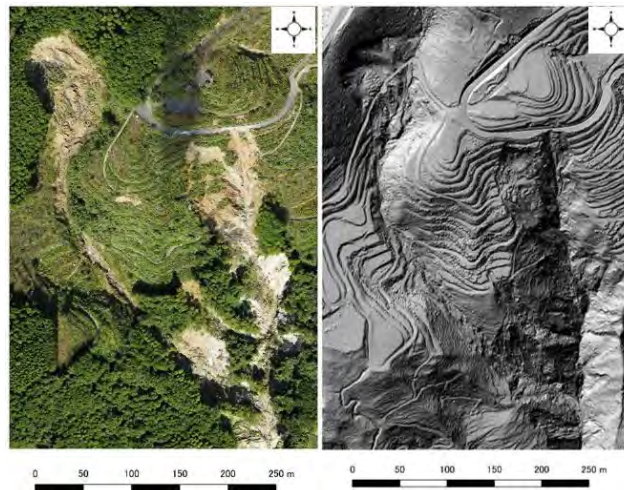


図-2.9.4 UAV測量によるオルソフォト図（左）と陰影図（右）の例

※オルソフォト：空中写真から高低差による歪みを除き、正射変換したもの

(4) 留意事項

- ① LPデータが誤差を保有するため、差分解析で算出した標高差は、実際の変状の大きさとは必ずしも一致しない。
- ② 地形データの精度は、取得できるLPデータの密度に影響を受ける。レーザ計測範囲における植生の繁茂状況によって、LPデータの点群密度が左右されるため、植生の影響が少ない落葉期に計測を実施することが望ましい。

- ③ 落葉期の計測でも草本類の影響は避けられないため、植生が密な箇所のLPデータは、高さ方向の誤差に留意が必要である。

9.3.3 移動杭による観測

(1) 適用

移動杭による移動量調査は、原則として測量に伴う誤差以上に移動が予想される地すべりについて適用される。調査方法は、地盤工学会基準の「変位杭を用いた地表面変位測定方法」(JGS 1711)として定められている。

(2) 調査の概要

移動杭調査は、地すべりブロック内に杭を設置し、測量によって杭の水平・垂直移動量を求め、地すべり移動状況を把握するために実施するものである。

(3) 調査手法の区分

測量方法には、見通し線法と三角測量法がある。

見通し線法は、地すべりブロックの両岸の不動地に基準点を設け、両岸を見通す直線から直角方向への杭の変位を測定する手法である（図-2.9.5）。

三角測量法は、不動地に基準点を設け、三角測量により地すべりブロック内の杭の水平・垂直移動量を測定する。見通しが悪い場合や、地すべりの移動方向が不明瞭な場合に利用する。

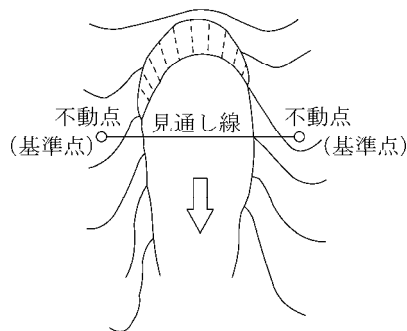


図-2.9.5 見通し線法の杭の配置

(4) 測定機器

測定機器は、測距儀・測角儀を使用するが、最近は光波距離計を使用することが一般的になっている。また、GNSSによる計測も一般化されつつある（技術書「Ⅱ調査編、9.3.6 GNSSによる観測」を参照する。）。

(5) 観測回数

観測回数は、移動速度の速い地すべりでは月2回以上、遅い地すべりでは年2回以上を目安とする。また、梅雨・融雪・台風等により移動量が大きくなることが予想される場合は、その期間の測定回数を増やし、気象因子と移動量の関係を把握する。

(6) 留意事項

- ① 移動量の少ない（計測精度の誤差範囲内）地すべりでは、本調査法は不向きである。100～500m離れた位置からの測定誤差は±3mm程度である。
- ② 基準点が不動地であることを確認する。地盤傾斜計を基準点の傍に設置し、観察する方法もある。

- ③ 杭の根元はコンクリートで固定することが望ましい。
- ④ 特に光波距離計を使用する際は、温度・気圧の気象補正を行う。
- ⑤ 測定に時間と労力がかかる。
- ⑥ 観測時の気象条件に左右されやすい。
- ⑦ 高い精度が要求される。なお、測定精度は用いる測量機器による。
- ⑧ 積雪地域では杭を直接計測できない場合があるので、GNSS等の計測も考慮する。

9.3.4 伸縮計による観測

(1) 適用

伸縮計は、日移動量が数mm以上の地すべりに適用される。潜在的な地すべり活動を検出することは困難である。調査方法は、地盤工学会基準の「伸縮計を用いた地表面移動量測定方法」(JGS 1725)として定められている。

(2) 調査の概要

伸縮計による調査は、ワイヤー（インバー線）で連結された2地点間の移動量を連続的に測定し、地すべり移動量を測定するものである（図-2.9.6）。

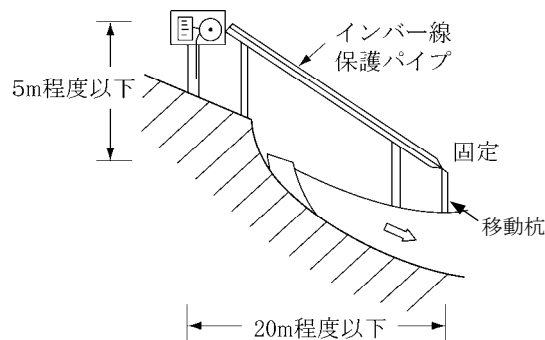


図-2.9.6 伸縮計による観測

(3) 計器の設置

計器の配置は、インバー線の方角を地すべりの移動方向と平行にし、一端は杭によって固定し、他端には記録計を設置する。インバー線の両端は、亀裂や滑落崖をまたぐように設置する。なお、縦断方向に複数の地すべりが連続する場合や、安定解析と関連して地すべりブロックの圧縮・引張領域を検討する必要がある場合は、図-2.9.7のように測線に沿って連続的に配置する。

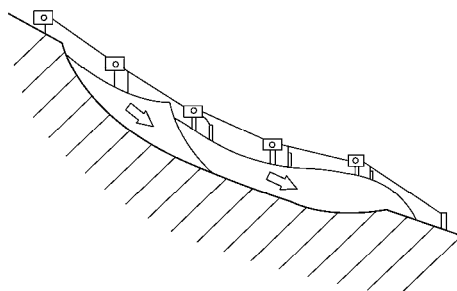


図-2.9.7 伸縮計による観測の配置例

(4) 使用機器

一般に使用されている伸縮計の精度は0.1～0.2mmである。インバー線の伸縮量を電気信号に変え、デジタルデータとして記憶媒体に記録させたり、データをリアルタイムに定められたサーバーに伝送したりできる伸縮計も開発され、自動観測機器として使用されている。また、緊急用にも用いられ、警報機付きの伸縮計もある。住民の避難に活用する場合は、民家等の付近に連動したサイレン、回転灯等を設置し、警報作動の変位条件を2～4mm/hとすることが多いようである。警戒避難の基準値については、技術書「Ⅲ計画設計編、10.1(4) 警戒避難体制の構築等」を参照する。

(5) 測定間隔

観測は自記記録で、記録紙には1日・1週間・1か月巻きがある。緊急の場合は1日巻きを用い、その他は1週間又は1か月巻きを用いる。自動観測の場合は、測定間隔を設定し記憶媒体の容量に応じて機器の点検・データの交換を行う。

(6) 留意事項

- ① インバー線は動植物の接触や風の影響を受けないように、塩化ビニール管等の保護管で保護する。
- ② インバー線の長さは20m程度以下、2点間の高低差は5m程度以下を目安とする。
- ③ 測定できる移動量の限界は、伸縮計内のドラムに接続されたワイヤー長であるため、事前に確認が必要である。
- ④ 固定杭は、乾湿・積雪・凍上の影響や動植物の影響を受けないように設置する。
- ⑤ 地すべり移動方向と異なった方向に設置すると、正確な移動量が測定できない。
- ⑥ 急傾斜（45°以上）の斜面では設置が困難である。
- ⑦ インバー線の保護管が直射日光に当たる場合、保護管内の温度変化により、インバー線が熱膨張・熱収縮を受ける場合がある。
- ⑧ 観測値の解釈として、地すべり変動状況を4種に区分した判定基準を、参考として表-2.9.5に示す。

表-2.9.5 地盤伸縮変動種別一覧^{*1}

変動種別	日変位量 (mm)	累積 変位量 (mm/月)	一定方向 への 累積傾向	変動形態 引張り・圧縮 断続	総合判定	
					変動 判定	活動性ほか
変動A	1以上	10以上	顕著	引張り	確定	活発に運動中 表層・深層すべり
変動B	0.1～1.0	2～10	やや顕著	引張り及び 断続変動	準確定	緩慢に運動中・ 粘質土・崩積土すべり
変動C	0.02～ 0.1	0.5～2	ややあり	引張り 及び圧縮	潜在	継続観測必要
変動D	0.1以上	なし (断続変動)	なし	規則性 なし	異常	局所的な地盤変動・ その他

*1 藤原明敏：地すべり調査と解析 改訂版、理工図書株式会社、p.95（1994）

9.3.5 地表面傾斜計による観測

(1) 適用

地表面傾斜計は、主として地すべりブロックの回転運動に伴う、微小な傾斜変動の把握を目的として設置する。円弧すべりでは傾動運動が生じるため効果的であるが、平面的なすべり面をもつ地すべりでは有効性が低い。調査方法は、地盤工学会基準の「水管式地盤傾斜計を用いた傾斜変動量測定方法」(JGS 1721) として定められている。

(2) 調査の概要

すべり面に沿って地すべりブロックが移動するとき、地表面には伸縮運動のほかに傾動運動も生じる。地表面傾斜計による調査は、この傾動運動を高感度の傾斜計で観測し、地すべりの移動状況を判定する。

(3) 機器の種類

手動観測では、図-2.9.8に示す気泡管を利用した気泡管式傾斜計を用いることが最も一般的である。気泡管式以外にはサーボ式加速度計、差動トランス式、ひずみゲージ式、図-2.9.9に示すMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による重力加速度センサーの傾斜計がある。これらは、傾斜変動を振子を通して電気信号に換える仕組みの電気式センサーとなっていて、自動観測や半自動観測で使用される。

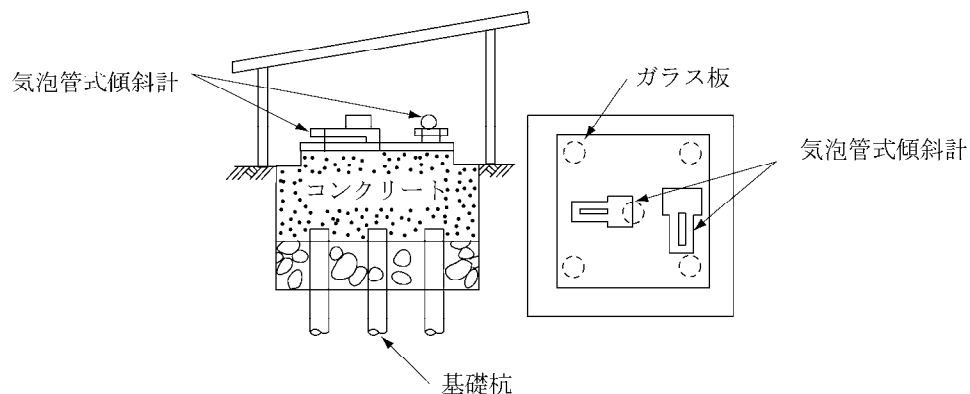


図-2.9.8 地表面傾斜計の設置

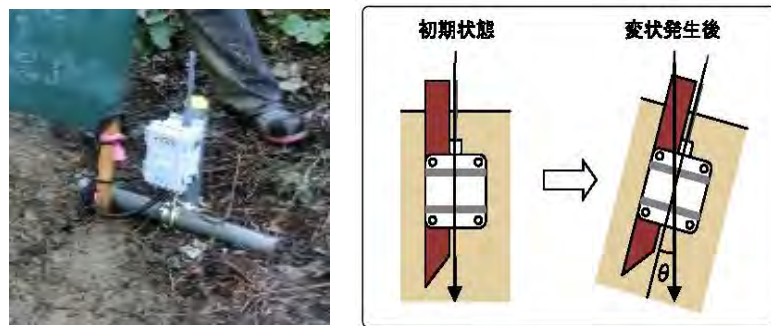


図-2.9.9 MEMS技術による重力加速度センサーを用いた地表面傾斜計の設置例

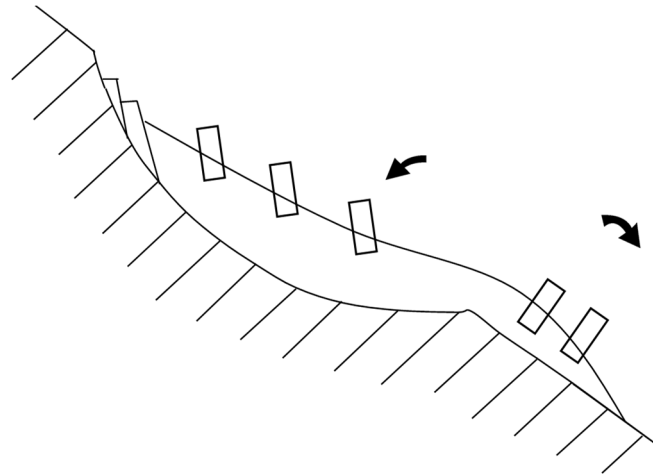


図-2.9.10 傾き方向の概念図

(4) 機器の設置

コンクリート基礎の上に2台の気泡管式傾斜計を南北方向と東西方向に機器を設置し、これを1組として観測を行う。(図-2.9.8)

地表面傾斜計は感度が高いことから、地すべり地域周辺の安定性を評価する目的で、以下の場所で開催される。

- ① 地すべり変状が認められる場所だけではなく、地すべり地形を示す場所で、地すべり活動の兆候を把握することが可能である。地表面の傾く方向によって、地すべりブロック上の上～中部にあるのか、末端部にあるのかを推定できる場合もある(図-2.9.10)。
- ② 地すべりの疑いのあるところで、土工やダムによる湛水等が斜面に不安定化要因を与えた場合に、地すべり活動の活発化を監視する。
- ③ 活動中の地すべり近傍(頭部滑落崖の上、側方亀裂の外側等)で、地すべりの拡大を監視する。
- ④ 地すべりブロック外に設置し、バックグラウンド値(地すべりに伴わない地殻レベルでの傾斜変動)として利用する。

(5) 観測間隔

観測頻度は、地すべり活動の状況に応じて毎日～年数回が一般的である。観測期間は原則として1か月以上とし、長いほうが望ましい。

(6) 留意事項

- ① 局所的な変動が発生しやすい以下の地点では、地表面傾斜計の設置を避けることが望ましい。(2次的小崩壊が懸念される場所・表層の安定していない崩壊地・急傾斜地・亀裂やガリの近傍・大きい樹木の近傍・強い振動源の近傍等)
- ② 観測結果は地すべり傾動以外のノイズも含まれているため、解析では観測結果を用いて整理した累積傾斜変動量方向図、累積傾斜変動図を基に、傾斜の累積性を評価する。(図-2.9.11)
- ③ 地すべり活動が活発な場所では、早い時期に傾斜変動が測定限界を超える可能性がある。
- ④ 移動土塊の中央部に設置した場合、土塊が現地形と平行に移動すると、傾斜変動として検出されにくい。
- ⑤ 自動観測に使用する機器は、気温による影響を受けやすいため、設置時に注意が必要であ

る。

- ⑥ 感度が高いために、地すべり以外の要因（気温変化・地球潮汐）でも微小な変動が生じることがある。このため、機器の設置に当たっては、地中に埋設する手法も有効である。
- ⑦ 移動量は測定できない。
- ⑧ 傾斜変動している土塊の範囲は特定できない。ただし、単独のセンサーでは特定できないが多数配置することで特定できる場合がある。
- ⑨ 気泡管式の機器では、観測時の目盛の読取りに個人差がでる場合がある。
- ⑩ 観測値の解釈として、地すべり変動状況を4種に区分した判定基準を、参考として表-2.9.6に示す。

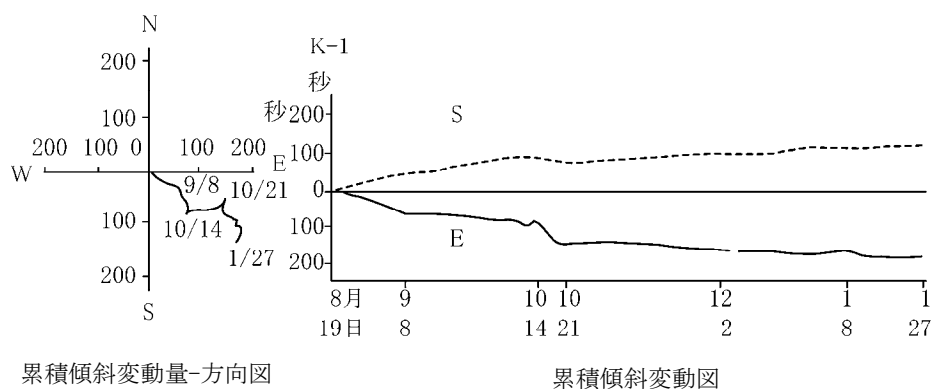


図-2.9.11 地表面傾斜計測定例

表-2.9.6 傾斜変動種別一覧^{*1}

変動種別	日平均変動量(秒)	累積変動値(秒/月)	傾斜量の集積傾向有無	傾斜運動方向と地形との相関性	総合判定	
					変動判定	活動性ほか
変動A	5以上	100以上	顕著	あり	確定	活発に運動中
変動B	1～5	20～100	やや顕著	あり	準確定	緩慢に運動中
変動C	1以下	20以下	ややあり	あり	潜在	継続観測必要
変動D	3以上	なし (断続変動)	ややあり	なし	異常	局所的な地盤変動・その他

*1 藤原明敏：地すべり調査と解析 改訂版、理工図書株式会社、p.91（1994）

9.3.6 GNSSによる観測

(1) 適用

全地球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System：以下「GNSS」という。）観測は、受信機で受信した複数の測位衛星からの信号を解析し、測定対象の位置を特定する測量手法である。従来の測量に比べて、測点間の見通しの必要がなく、離れた不動点からの計測でも容易に高い精度を確保しうる特性があることから、地すべり地の面積が広く地すべり範囲が特定できない地すべり、移動杭等、従来の移動量観測が適用しにくい地すべり等に適用される。

GNSS観測では、地すべりブロックの地表面における三次元の移動方向と移動量を測定し、地すべりの活動状況を把握することができる。

ただし、GNSS観測には、特有の測定誤差及び天空の見通しや測定時刻により精度が左右される等、他の計測方法にはない留意すべき点があり、これらを理解した上で本調査を適用する必要がある。

(2) 測位方式の区分

GNSSを利用した測位方式には、表-2.9.7に示す種類がある。地すべりの移動量を調査する場合、要求される精度は1 cm以下である。したがって、測定方法は精度の高い相対測位方式を用いることが普通である。その中でも特に精度が高く、地すべり調査への適用が多い測位方式は、干渉測位の中でもスタティック測位である。

表-2.9.7 GNSSを利用した測位方式*1、*2

測 位 方 式			利用する測位用信号	測位精度 (1 σ)	地すべり地への 適用事例
単独測位 (Point Positioning)			C/Aコード (L1帯)	2～10m	
			C/Aコード・Pコード (L1帯・L2帯)	約16m	
相対 測位	ディファレンシャルGPS測位		C/Aコード (L1帯)	2～3m	
			C/Aコード・Pコード (L1帯・L2帯)	1m	
	干渉 測位	スタティック測位 (静的干渉測位)	L1帯・L2帯 (C/Aコード・Pコード・搬送 波位相)	～1cm	山形県大蔵 ^{*3} 高知県高瀬 ^{*4} 長野県倉並 ^{*5} 、白牧 ^{*6} 新潟県板倉 ^{*7} 、沖見 ^{*8} 徳島県善徳 ^{*9} 高知県八畝 ^{*10} 、怒田 ^{*11}
		ラピッドスタティック測位 (高速静止干渉測位)	L1帯・L2帯 (C/Aコード・Pコード・搬送 波位相)	数cm	
		キネマティック測位 (動的干渉測位)	L1帯・L2帯 (C/Aコード・Pコード・搬送 波位相)	数cm	
		実時間キネマティック測位 (リアルタイムキネマティック： RTK)	L1帯・L2帯 (C/Aコード・Pコード・搬送 波位相)	数cm	新潟県沖見 ^{*11} 高知県怒田 ^{*11}

※) 干渉測位の測位精度はスタティック測位が最も高いが、いずれの測位方式でも基線長が長くなるほど測位誤差が拡大する。

- *1 (公社) 物理探査学会：物理探査ハンドブック増補改訂版、pp. 1016～1028、(2016) (一部変更)
- *2 佐田 (1999)：GPS基礎講座⑥ディファレンシャル測位、測量49. 12、pp. 32～34
- *3 椎名ら (2000)：1 周波数型GPS計測センサーによる地すべり連続観測の試み (その2)、第39回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 151～154
- *4 中里ら (2018)：GPSを用いた大規模地すべり斜面の長期自動変位観測、応用地質、58、pp. 402～407
- *5 荒井ら (1997)：GPSを用いた連続変位量観測による地すべり移動特性について 長野県倉並地すべりの例、第36回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 365～368
- *6 田辺ら (1999)：GPS測量・地盤伸縮計・地盤傾斜計による移動特性について 長野県白牧地すべりを例として、第38回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 171～174
- *7 有澤ら (1998)：巨大地すべりにおけるGPS測量の効果と課題、第37回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 289～292
- *8 植野ら (1993)：GPS測量による地すべり移動特性の把握、第32回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 249～252
- *9 福岡ら (1992)：人工衛星測量 (GPS) の地すべり移動観測への適応 Static法とPseudo-Kinematic法の比較、第31回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 203～206
- *10 江崎ら (1994)：GPSによる地すべり変位計測について、第33回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 179～182
- *11 福岡ら (2001)：短時間RTK-GPS測量を用いた地すべり監視法の開発、第40回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 541～544

測位衛星の内、GPS衛星からの民生用信号はL1帯、L2帯、L5帯の3種類の周波数で送信されているが、地すべりの移動量測定で主に用いられているのは、L1帯とL2帯である。干渉測位の解析では、L1帯のみ使用する場合（1周波数）とL1帯及びL2帯の両者を使用する場合（2周波数）の2種類がある。2周波数の場合は、電離層の影響による誤差を補正できるため、長距離の基線長でも誤差が小さくてすむ利点があるが、2周波数を受信できる受信機の方がコストは高くなる。一般的には、解析基線長が数km以内の場合には、1周波数の利用で十分であり、それより基線長が長い場合は、2周波数の利用が望ましい。

スタティック測位方式による地すべり観測の際、GNSSデータをサンプリングする周期（通常数秒～数十秒）と1回の測位のためのサンプルの収集時間（通常1～数時間）を設定する必要がある。これらの諸元の選択は、文献による地すべり調査での検討事例を参考にするとよい。

(3) 機器の設置

受信装置は、図-2.9.13のように受信機・データ収録機及び電源から構成される。干渉測位は、図-2.9.12のように受信装置を不動地点（移動点）と移動土塊（不動点）の両方に設置する。受信装置の配置は、地すべりブロック全域の移動方向・移動量が把握できるように配置すること（たとえば格子状）が望ましい。しかし、実際には受信装置の設置箇所が上空に障害物のない場所に限られるため、配置に制約を受ける場合もある。

受信装置は十分な精度を持つものを利用する。また、観測精度維持のため、アンテナを安定して保持することが必要で、架台の設置に特に配慮する。

受信装置は、一般の測量器と同様の使い方のできる「多機能測量器型」といえるものの、また、単純な測位機能に特化した「計測センサー型」といえるものがある。観測が、数日～年数回といった間隔であれば、「多機能測量器型」を持ち回ることができる。一方で、連続的（連日、連続時間）で長期間の観測が必要な場合は、「計測センサー型」の受信装置を観測地点に常設することが行われる。「計測センサー型」の受信装置は持ち回りに有利な一体型の小型のものも市販されており、地すべり観測専用には使いやすい。

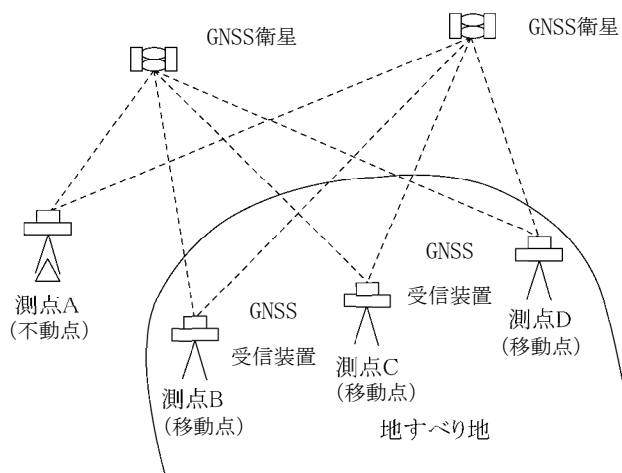


図-2.9.12 GNSSの概要*1



図-2.9.13 GNSS受信装置の設置状況の例

*1 （公社）物理探査学会：物理探査ハンドブック増補改訂版、p. 1026（2016）に加筆

(4) 観測の初期設定

GNSSによる測位精度は、天空上の衛星配置と見通しに左右され、その時点での誤差程度の指標として精度低下率等の数値が実用的に使用されている。多くの解析ソフトでは観測日時、観測地点の緯度・経度及び遮蔽物の方向・高さを入力すると精度低下率を算出することができ、それをもとに、誤差の小さい時間帯を選んで観測スケジュールを設定するのが一般的である。

なお、測位衛星の軌道周期は地球の自転周期と一致しないため、連続観測等では、毎日の観測時間をずらして衛星の配置条件をそろえる場合もある。

(5) 測定時間及び測定間隔

1回の測定時間は、スタティック測位の場合では、高い精度を確保するために、最低1時間程度が普通であり、さらに精度の安定性を求めて数時間～24時間を採用する場合もある。他の干渉測位方式の場合は、測定に必要な時間は短くでき、いちばん短い実時間キネマティック（リアルタイムキネマティック）の場合は数十秒程度で済む。

測定の間隔は、毎日（又は連続）から年数回程度の場合まで自由度が大きく、地すべりの移動速度及び保全対象の重要度に応じて適切に設定する。ただし、GNSSによる測位精度には確率的なばらつき誤差に加えて、季節や気象状況等の外部要因的誤差が避けられないため、短期間内の測定結果では、公称精度を超える大きな誤差が含まれていることがある。こうした大きい誤差を実移動と見誤ることを防ぎ、比較的小さな地すべり移動を明らかにするためには、測定の回数がある程度多くすることが必要である。GNSS受信機を常設した連続（連日）観測はコストがかかるものの、多くのデータで観測精度を高めるには最もよい方法である。

(6) 測定データの回収

観測地点に常設し、タイマー動作等による自動観測データ回収は、以下に示すような方法がある。データの回収は、地すべりの活動状況とそれによる被害発生リスクの程度を踏まえ、回収方法や頻度等について、現地に適合した方法で安全かつ効率的に行う。

ア．観測員が各観測点に赴き、データを回収する方法

適用：データ数が少なく、受信機の内部メモリ又はデータ収録ユニットで十分な観測期間を確保でき、観測員が観測点まで回収に行ける場合。

方法：観測員が各観測点に行き、内部メモリやデータ収録ユニット内のデータをパソコンやメモリカードで回収する。

イ．特定小電力無線を利用し、現地の近くでデータを回収する方法

適用：各観測点と、観測員が安全に到達可能な地点、あるいは現地の監視所（無人を含む）が特定小電力無線の到達範囲（見通し1 km程度）にある場合。

方法：各観測点に特定小電力無線機とアンテナを設置し、データを送信できるように設定しておく。観測員や監視所では、無線によって各観測点のデータを集める。

ウ．特定小電力無線や電話回線（携帯電話を含む）等を利用し、現地に行かずにデータを回収する方法（オンライン）

適用：観測点と監視所が離れており、観測点に簡単に近づけない場合。また、リモート監視が必要な場合。

方法：各観測点に電話回線を接続若しくは特定小電力無線機を介し中継点等に電話回線を接続する。この方法ではどこからでも必要なときにデータを取得することができる。

(7) 解析方法

解析は、コンピュータ上でGNSS解析ソフトウェアを用いて、基本的には基準点（不動点）と移動点を結ぶ基線解析を行う。

解析の結果得られた解析値は、一定の幅をもった誤差と、値の大きく異なる異常値が含まれた状態で求められる。このデータから、地すべりによる移動以外の要因を除去し、誤差が最小となるように統計処理等を行うことが望ましい。

解析値のばらつきを処理する方法には、一定範囲を超えて値が突出した場合には削除し、通常誤差は平均値を出す（たとえば平均値が1日25mmを超えてずれた場合は参考値扱い）という方法や、トレンドモデルを利用して平滑化処理を行う方法、最小二乗法による方法、人工神経回路網（NN）を利用する方法等があり、地すべり状況に応じた方法を用いる必要がある。

(8) 留意事項

ア. 機器設置・測定時の留意点

- ① 人工衛星からの信号を安定して受信するために、受信装置の上空の障害物に注意する。
上空の開けている割合は大きいほどよいが、北半球では衛星の現れない領域が北天にあり、北側の障害物の影響は比較的受けにくい。
- ② 積雪による受信機器の破損や上空遮蔽に注意する。積雪地域では、アンテナは支柱等を用いて測定地の最大積雪深よりも高い位置に設置し、雪が積もりにくい構造の保護カバーを設置する。また、支柱は、頑丈かつ揺れの少ない構造とするとともに雪囲いや二重管も有効である^{*1}。
- ③ 受信機器の維持管理に当たっては、地表変動や積雪等による傾動や移動の影響を補正するため、定期的に受信機器のセンタリングを行う必要がある。特に支柱を用いて受信機器を設置した場合、支柱が高いほど傾動の影響が大きいため注意が必要である。
- ④ 有線で受信機と記録機や電源等を接続する場合は、雷サージ対策を行う。また、人・動物による切断事故を防止するために、ケーブルの地中埋設等を行う場合は、地すべり活動に伴う断線の可能性について留意する。
- ⑤ 基準点は、局所的な地盤変動の影響を受けない地すべり地外の不動地を選定し、十分に置き換えられた基礎の上に設置する。
- ⑥ 一般に電波は、大気中の水蒸気の影響を受けやすく、GNSS搬送波も例外ではない。特に水蒸気量の多い夏季等は測定誤差が大きくなるという報告もある。また、標高差の大きい2点間の測位では誤差が大きくなるとされ、測位点間の標高差を小さくすることが望ましいとの指摘^{*2}もある。

イ. 解析時の留意点

公称精度は、機器によって異なるが、干渉測位の場合は、水平方向が約5～10mm+基線長の1～2ppm（1ppm=1/1,000,000）、垂直方向が約10～20mm+基線長の1～2ppmといわれている。実際の調査例での精度は、必ずしも公称精度と一致しないものの、それに近い場合が多い。表-2.9.8に各種調査例において報告されている精度を示す。ただし、これらの精度値は、統計的なもの（ときどき発生する異常値等を除いたもの）であることに注意する必要がある。

*1 中里ら(2013)多雪地域におけるGPS移動量観測用二重管式支柱の提案と適用, 農工研技報, 214, p.1～7

*2 中里ら(2008): GPSによる地すべり移動量観測における留意点, 日本地すべり学会誌, 44.6, pp.55～61

ウ. 長所

- ① 人的な測定誤差がない。
- ② 測点間の見通しが悪くても天空が開けていれば、測定可能である。
- ③ 測点間の距離に制約が少なく、数kmまでは大きな精度低下はない。
- ④ 地すべりの移動速度を問わず、移動方向が不明なブロックでも使用可能である。
- ⑤ 測定可能な最大の移動量に制限がない。
- ⑥ 自動計測が可能で、活動中の地すべりのモニタリングも可能である。

表-2.9.8 調査事例における精度

例	水平方向の精度	垂直方向の精度	基線長
山形県滝の沢地すべり ^{*1}	30mm	40mm	約5,000m
長野県倉並地すべり ^{*2}	10mm	15mm	80～200m
新潟県板倉地すべり	最大4mm 95%信頼円の半径8mm	最大6mm	2,000～5,000m
新潟県沖見地すべり ^{*3}	光波に対し19～99mm	1.1～176mm	1,000～1,500m
長野県白牧地すべり ^{*4}	5～27mm	—	9,000m

エ. 短所

- ① 垂直方向の移動は水平方向に対してやや精度が劣る。
- ② 解析データのばらつきを処理する必要がある。

オ. 地すべり移動量調査への適用上の留意点

- ① 解析値には統計的なばらつき誤差、偶発的な大きな誤差、季節変動的な誤差が含まれるため、特に観測回数が少ない場合や観測期間が短い場合、地すべりが実際に移動しているかどうかの判定には注意を要する。
- ② 表-2.9.9に各種移動量調査との比較を示す。
GNSS観測は、観測労力の省力化と移動量の連続観測が可能な特性を有している。

*1 椎名ら（1999）：GPS計測センサーによる地すべり連続観測の試み、第38回日本地すべり学会講演要旨、pp. 179～182

*2 荒井ら（1997）：GPSを用いた連続変位観測による地すべり移動特性について—長野県倉並地すべりの例—、第36回日本地すべり学会講演要旨、pp. 365～368

*3 植野ら（1993）：GPS測量による地すべり移動特性の把握、第32回日本地すべり学会講演要旨、pp. 249～252

*4 田辺ら（1999）：GPS測量・地盤伸縮計・地盤傾斜計による移動特性—長野県白牧地すべりを例として—、第38回日本地すべり学会講演要旨、pp. 171～174

表-2.9.9 GNSS観測と他の移動量調査

調査名	測定精度	測定可能な最大移動量	観測の労力	観測頻度
GNSS観測	5～30mm	遮蔽物がなければ限界無	◎	連続～年数回
空中写真	60mm～	遮蔽物がなければ限界無	△	月1～年1回
移動杭 (測量による移動 量測定の場合)	3～5mm	遮蔽物がなければ限界無	△	月数回～年数回
伸縮計	0.2mm	数十cm (インバー線余長)	○	毎日・週1回・月1回
すべり面測定管 (すべり面深度)	100mm程度	～10cm (ワイヤーが動く間)	○	毎日
鉛直方向伸縮計	数mm	10m程度 (ワイヤー余長)	○	毎日～月数回
孔内傾斜計	数mm (0.1～40秒)	～15cm	△	毎日～月数回

◎：優れている ○：普通 △：やや劣る

9.3.7 干渉SARによる観測

(1) 適用

本調査は、広域において同時多発的に発生した地すべり災害調査や、定常的な地すべり監視に適用できる。

(2) 調査の概要

人工衛星等に搭載した合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar：以下「SAR」という。) からマイクロ波を地表面に照射し、その反射波の後方散乱強度及び位相を取得する仕組みを用いる。二時期のSAR画像の反射波を干渉させ、位相差を色調の変化で表現することで、地表の変位を数cm単位で解析するものである (図-2.9.14)。日本のSAR衛星としては令和2年時点で、だいち2号に搭載されたPALSAR-2が運用されており、地域にもよるが4回/年程度の通常観測が行われている。

干渉SARは、地上に動態観測用の観測地点がない地域でも一度の観測で数十km～数百kmの範囲の地表変動を検知できる可能性がある。SARは、太陽の反射光を利用する受動型センサーではないため昼夜問わず観測が可能である。また、雲や雨等の大気中にある粒子の大きさよりも長い波長のマイクロ波を照射するため被雲等の影響を受けにくい特徴を持つ。

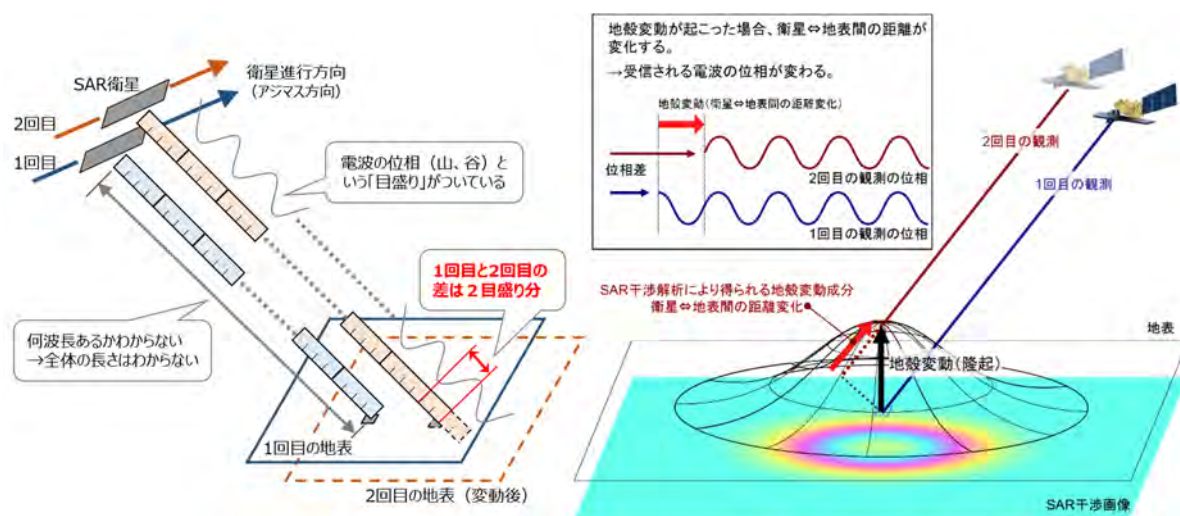


図-2.9.14 衛星SARを利用した干渉SAR解析の原理^{*1}

(3) 調査手法

SAR干渉画像の作成手法を以下に示す。

- ① 二時期のSAR画像の位置合わせを行う
- ② 位置合わせを行った二時期の画像を用いて干渉SAR処理を行い、SAR干渉画像を作成する。
- ③ 衛星の軌道情報をもとに軌道縞を除去し、DEMを用いて地形縞を除去する。
- ④ 位相ノイズを除去し、変動縞を強調するために、位相強調フィルタによる処理を行う。
- ⑤ 衛星軌道の誤差や電離層・水蒸気に起因する誤差を除去するため、大域誤差除去フィルタによる処理を行う。

- ⑥ 位相（ $0 \sim 360^\circ$ ）を変動量の絶対値に変換するアンラップ処理を行う。

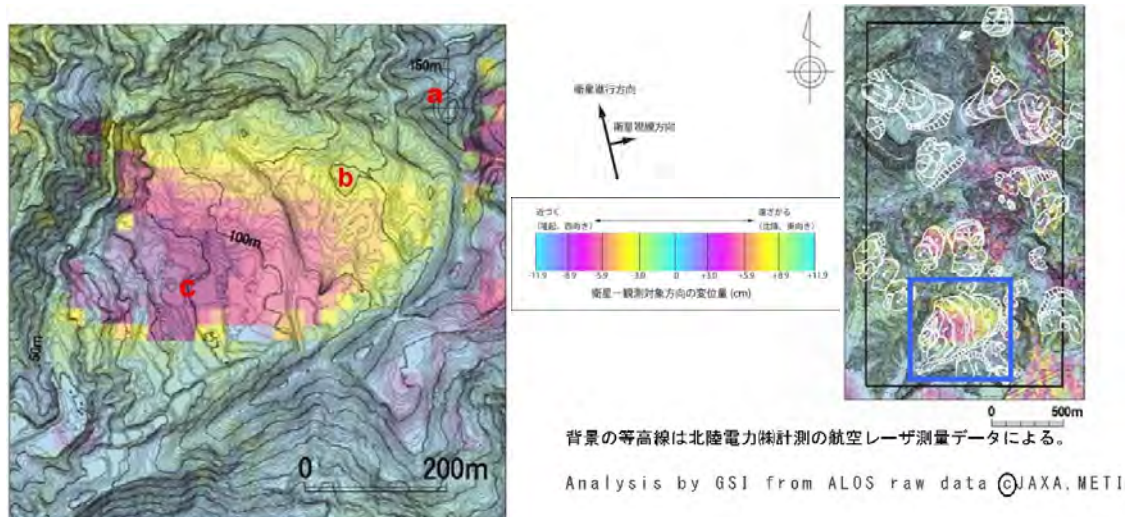
- ⑦ SAR干渉画像をオルソ画像に変換する。

SAR干渉画像を用いた目視判読手法を以下に示す。

- ① SAR画像の不可視範囲や干渉性が低い領域を除いて、判読範囲の絞り込みを行う。
- ② 位相差が周囲と異なる箇所を変動縞として検出する。
- ③ 光学画像等を用いて、検出された変動縞が人工物や地形改変に起因するものでなく、地すべり変動により生じた変動縞であることを確認する。

SAR干渉画像の判読を行う際には、対象とする領域の周辺で、変動が発生していないことが現地状況又は観測結果等から確認されている地点との相対変動量を読み取る。図-2.9.15を例にすると、馬蹄形地形の頭部滑落崖背後に位置する地点a（画像の色から変動量の絶対値は約0 cmと読み取れる）を無変動域の起点とすると、a→b→cに応じて色変化はカラーチャートの0 cmを基準として左の方へ水色→黄緑→黄色→ピンク→紫となっているので、衛星視線方向に約9 cm近づく方向（隆起あるいは西向きの変動）の変動を示している。地すべりブロック全体が隆起することは考えられないことから、この場合は西向き変動を捉えていると判断できる。

^{*1} 国土地理院ホームページ「干渉SARの原理」、[https:// www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html](https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html)

図-2.9.15 SAR干渉画像の例^{*1}

(4) 留意事項

- ① 干渉SARは、二時期のSAR画像の位相差によるセンサーと地表面の距離の変化を求めることができるが、地表位置の絶対値は取得できない。
- ② 干渉SARを実施するためには、同一条件で取得された二時期のSAR画像が必要である。
- ③ SARの特性と地形との幾何学的な関係により生じる不可視範囲が生じる場合がある。センサーと対象斜面の位置関係が解析精度に影響を及ぼすため、衛星の観測条件（オフナディア角^{*2}）及びDEMを参考として、あらかじめ不可視領域をシミュレートする等の対応が必要である。
- ④ 干渉SARは、積雪や植生による影響を大きく受けるため、解析時期の選定に留意が必要である。
- ⑤ 干渉SARで変位が認められても、それが必ずしも地すべり性の変位には限定されないことから、現地調査により地すべり活動について確認が必要である。

9.3.8 すべり面測定管

(1) 適用

すべり面測定管による測定は、大きく変動した地すべりにおいて、安価で簡便にすべり面の位置を把握する場合に実施する。

(2) 調査の概要

図-2.9.16のようにボーリング保孔管孔内に、保孔管の内径に近い外径の測定管を上昇用・下降用の2本用意する。上昇用は孔底から孔口に、下降用は孔口から孔底に向けてそれぞれ測定管を移動させ、保孔管のせん断、屈曲により、途中で引っかかって止まった深度がすべり面付近であると判断する。

パイプひずみ計・孔内傾斜計では測定できない移動量の大きな地すべりに適している。

*1 国土地理院（2009）：平成19年能登半島地震の地表変動に関するSAR干渉画像判読カード、国土地理院技術資料 H・1-No.9、<https://www.gsi.go.jp/common/000146001.pdf>（一部加筆）

*2 オフナディア角：衛星の鉛直直下と衛星のレーダー照射方向のなす角度

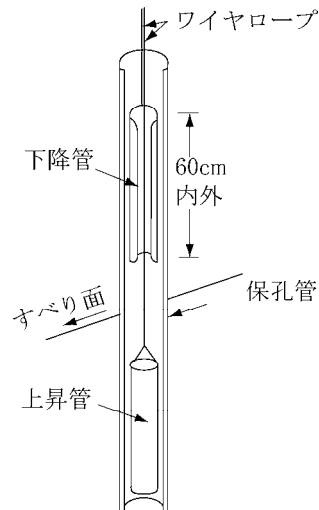


図-2.9.16 すべり面測定管の構造

(3) 調査手法

測定には長さ60cm内外の塩化ビニール管や鉄管を用いる。設置位置は地すべりブロックの中央付近を原則とする。観測間隔は設置直後から観測し、原則として毎日測定する。

(4) 留意事項

- ① 深度が深い場合、設置時のボーリング保孔管の曲がりに注意する。
- ② 移動速度の小さい地すべりでは、すべり面が検出されない。
- ③ 粘稠型地すべりでは崩積土内部の塑性変形で保孔管がたわみ、測定できなくなることがある。
- ④ すべり面が複数ある場合には判断がつかなくなる。
- ⑤ 地すべりの移動量・移動方向はわからない。

9.3.9 パイプひずみ計

(1) 適用

パイプひずみ計による調査は、すべり面の深度と移動状況を把握する場合に実施する。調査方法は、地盤工学会基準の「地中ひずみ計を用いた地すべり滑動測定方法」(JGS 1731)として定められている。

(2) 調査の概要

パイプひずみ計の原理は、地すべり移動時の変位により、ボーリング孔内に挿入した塩化ビニール管に発生したひずみを、塩化ビニール管に貼付したストレインゲージで測定するものである。高感度であるため、すべり面付近の微小な変動も検出できる。パイプひずみ計の構造は、図-2.9.17に示すようにボーリング孔の孔径よりひと回り小さい硬質塩化ビニール管に直交2方向又は一方方向のペーパーストレインゲージを1m程度の間隔で1方向2枚添付し、ゲージとリード線を接続したものである(図-2.9.18)。

測定は、静ひずみ測定器を用いて深度別のひずみ量を計測する。

(3) 調査手法

測定に使用する機器は、実用測定範囲が約10,000マイクロストレイン(μ strain)程度のものを

使用する。また、塩化ビニール管に貼付するゲージの間隔は通常0.5～1mとする。

測定は、地すべりの移動速度に応じて実施し、毎日～週1回程度の間隔で行う。現在は、自動記録計によって測定間隔を1分～数日に設定し、自動的に記憶媒体に記録させる機器が利用されている。降雨・融雪と地すべり滑動の関係を把握するための、毎日の計測が可能になっている。

パイプひずみ計の測定結果は、図-2.9.19のようにひずみ柱状図で各深度のひずみ量測定値を測定日ごとにプロットし、下段のグラフで各深度のひずみ量の累積をプロットしたグラフで整理することが一般的である。図-2.9.19では、累積性のひずみが測定されている深度20m付近がすべり面と判定される。

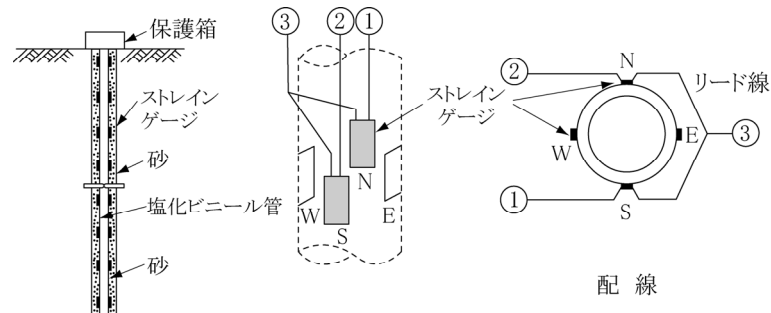


図-2.9.17 パイプひずみ計の概念図

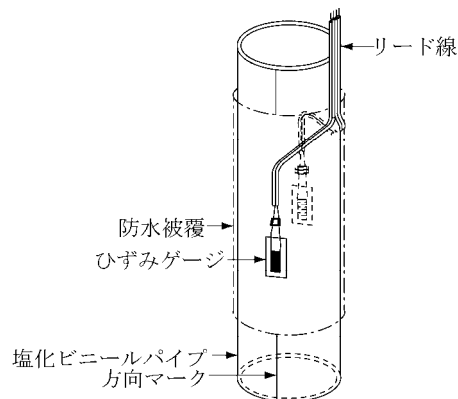


図-2.9.18 パイプひずみ計の構造

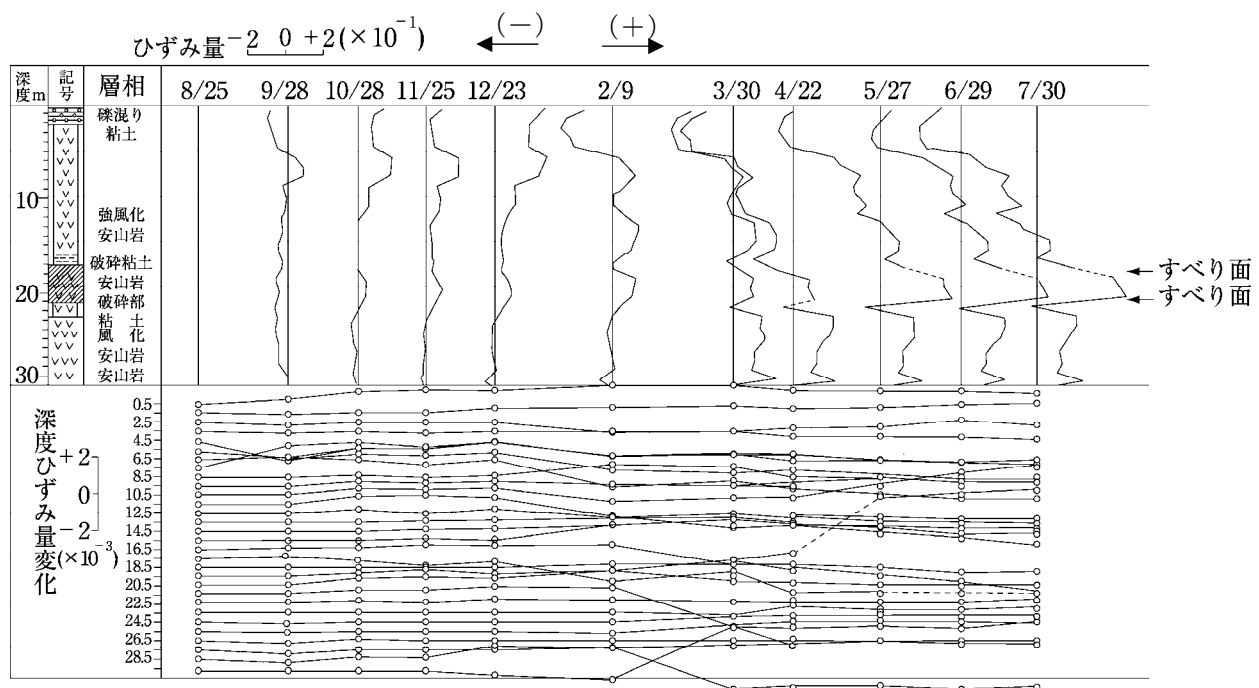


図-2.9.19 パイプひずみ計測定例（北河内地区（石川県））

(4) 留意事項

- ① パイプひずみ計は、基岩中に十分根入れするようにボーリング孔を掘削する（目安は3～5m程度）。特に岩盤すべりが発生している場所では、少なくとも1孔は岩盤内を10m以上掘削してパイプひずみ計を設置することが望ましい。
- ② 設置時は、リード線の断線に注意する。特にケーシング管を引抜く作業では、リード線を厳重に保護する必要がある。
- ③ パイプひずみ計の下端は孔底から少し浮かし、自重でたわまないようにしながら埋戻す。
- ④ 砂詰めが不十分であると、正確な深度でひずみが発生しないことが多いため、必ず水締めを行う。最も確実な方法は、塩化ビニール管と孔壁の間をグラウトで充填することである。なお、グラウト充填した場合、同じ観測孔で水位観測はできない。
- ⑤ 測定は、パイプひずみ計と充填砂がよくなじんだ後（目安は1週間以上）に開始する。
- ⑥ ゲージ間隔1mでボーリング深度が30mをこえる場合、リード線がボーリング孔に入りにくくなるため、掘削孔径を広げる等の処置を必要とする。
- ⑦ すべり方向が特定できていない場合、2方向のストレインゲージを用いて観測を行う。
- ⑧ 移動量を直接測定することができない。なお、ひずみ測定値からたわみ量を算出した例もある（参考式①）が、あくまでも一つの傾向をつかむ上での参考に留める。

$$y = \frac{x^2 \varepsilon}{2r} \dots\dots (参考式①*1)$$

ε : ひずみ

r : パイプの半径

y : たわみ

x : 区間の長さ

参考式①を用い、すべり面から対象ゲージまでの各計測区間のひずみ量（水平変位）を累加する。

- ⑨ ストレインゲージは水密性だが、埋設後数年で絶縁不良となることがある。
- ⑩ 地すべりの移動量が小さいと、孔壁とひずみ計の間で外力が吸収されてしまい、変化が現れない。
- ⑪ 地すべりの移動量が大きいと、リード線が断線し測定不能となる。
- ⑫ 地下水によって充填砂が流出すると、パイプが自重で曲がりゲージにひずみが現れることがある。
- ⑬ 観測値の解釈として、地すべり変動状況を4種に区分した判定基準を参考として表-2.9.10に示す。

表-2.9.10 変動種別一覧表*2

変動種別	日変動絶対値 (μ)	累積変動絶対値 (μ /月)	変動形態		すべり面存在の 地形・地質的 可能性	総 合 判 定	
			累積傾向	変動状態		すべり面種別	活 動 性 他
変動A	100以上	5,000以上	顕著	累積変動	あり	確定	顕著に活動している岩盤～崩積土すべり
変動B	100以上	1,000以上	やや顕著	累積変動	あり	準確定	緩慢に活動しているクリープ型地すべり
変動C	100以下	100以上	ややあり	累積・断続 擾乱・回帰	あり	潜在	すべり面存在の断定不可、継続観測必要
変動D	100以上	1,000以上 (短期間)	なし	断続・擾乱 回帰	なし	異常	すべり面なし 地すべり以外の要因

*1 早川ら（1997）：パイプひずみ計による水平移動量の推定（1）、第36回地すべり学会研究発表講演集、pp. 353～356

*2 藤原明敏：地すべり調査と解析 改訂版、理工図書株式会社、pp. 87（1994）

9.3.10 鉛直方向伸縮計

(1) 適用

鉛直方向伸縮計は、ボーリング孔を利用してすべり面を貫通させたワイヤーを設置し、ワイヤーの伸縮を測定することで地すべり移動量を測定するもので、孔内傾斜計やパイプひずみ計では測定不能となるような移動量の大きい地すべりのうち、移動速度が10～30cm/日以下の地すべりに適用する。

(2) 調査の概要

図-2.9.20に示すように、不動層まで掘り抜いたボーリング孔で、孔底にアンカーをとりワイヤーを地表まで延長する。図-2.9.21は多段式の伸縮計で、ワイヤーのついた塩化ビニール管を1mごとに積み重ね、それぞれをアンカーとして、各深度のワイヤーの伸縮量を測定するものである。地すべりが滑動していると、図右側の移動観測中のように引張られるワイヤーと変化のないワイヤーが現れ、すべり面深度と伸縮量が判明する。

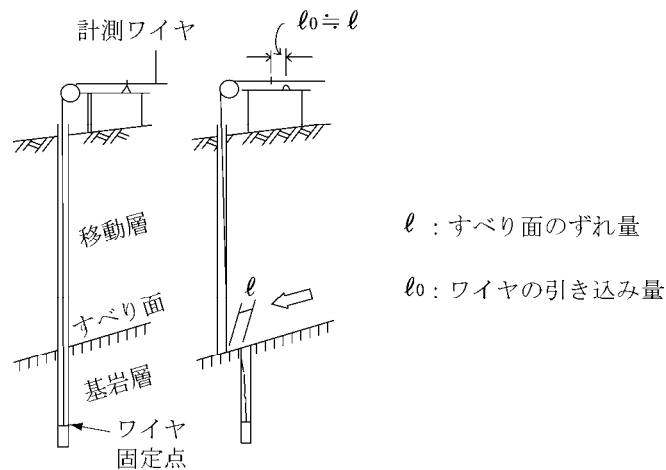


図-2.9.20 地中伸縮計

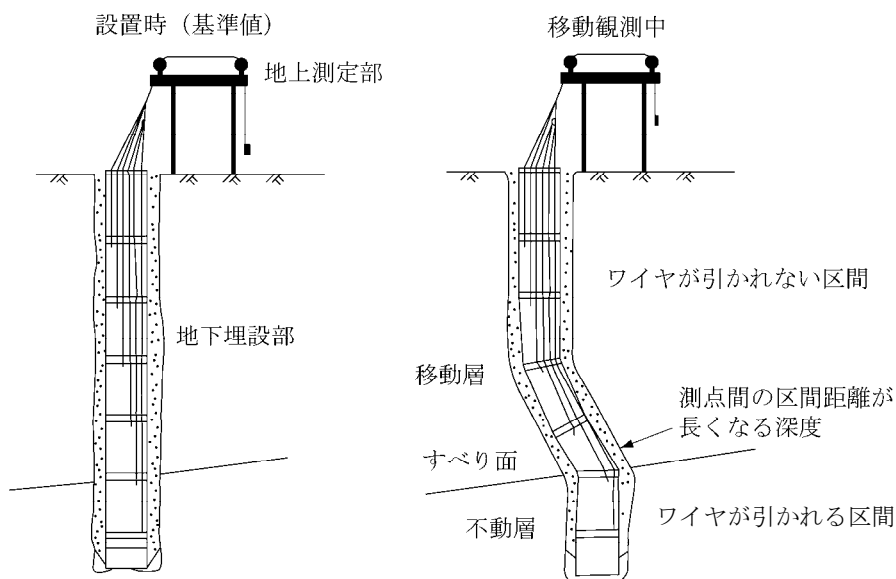


図-2.9.21 多段式伸縮計

(3) 調査手法

観測に当たって原則として多段式伸縮計を用いる。また、伸縮量はmm単位まで読取れるものとする。なお、移動量が大きいために測定不能となったパイプひずみ計や水位観測孔に、ワイヤーを設置してグラウト充填することで、単線式の伸縮計として使用することもできる。移動量が大きく、観測ができなくなることが想定される孔内傾斜計観測孔等には、事前にワイヤーを付けることも検討する。

機器は原則として地すべりブロックの中央部に設置する。

観測間隔はその移動速度に応じて、毎日～月1回の観測を行う。現在は自記記録計によって測定間隔を任意に設定し、観測データをデジタルデータとして自動的に記憶媒体に記録させる機器も利用されている。

図-2.9.22は複数の深度に鉛直方向伸縮計を設置した例である。GL-27.5mでは累積移動量にほとんど変化が無く、GL-41.5m及びGL-71.5mでは同様の累積移動量変化を示す。このことから、活動的なすべり面がGL-27.5m～-41.5mに存在すると判定される。

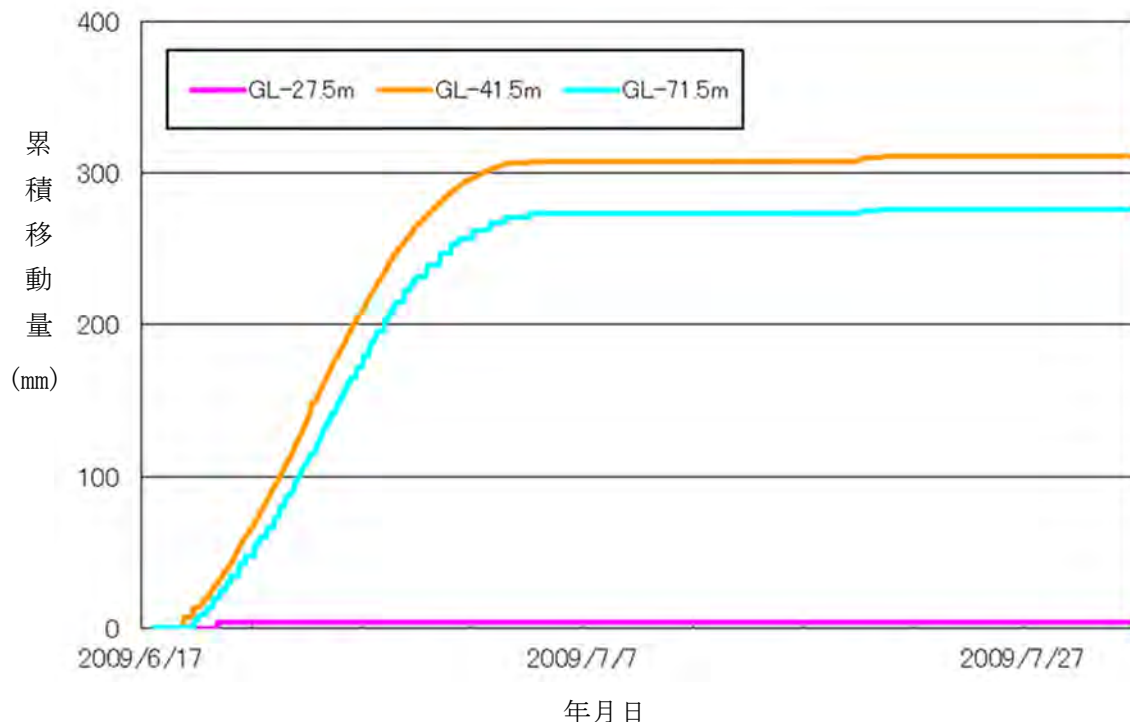


図-2.9.22 鉛直方向伸縮計測定例（庄内あさひ地区（山形県））

(4) 留意事項

- ① ワイヤーの地上端は移動量を想定し、十分な余裕（通常10m）をとっておく。
- ② 多段式の場合、孔壁と塩化ビニール管の間を十分に砂若しくはグラウトで充填する。
- ③ 多段式の場合、ワイヤー数が多くなるため、深度を間違えないようにする。
- ④ 設置深度は40mまでが目安である。
- ⑤ パイプひずみ計や孔内傾斜計で測定不能となる、移動量大きい地すべりの移動量が求められる。
- ⑥ 多段式であれば、移動量のほかにすべり面深度（複数でも可）や地すべりブロック内部の動

きも把握することができる。

- ⑦ 耐用年数が長く、地表にワイヤーの余長を長く取っていれば数年は測定可能である。
- ⑧ 微小な変位は、ワイヤーの伸びや摩擦のため、測定が困難である。
- ⑨ 急激な変動の場合、ワイヤーが断線する可能性がある。
- ⑩ 単線式の場合、塩化ビニール管の内径分、ワイヤーが自由な状態であるため、設置直後には動きを検知しない初期無感帯がある。
- ⑪ 単線式は、観測初期に圧縮変動が計測される場合がある。特にすべり面勾配が大きく、かつすべり面付近のクリープ層が厚い場合は圧縮変位が大きく、引張変動に転ずるまでの期間が長くなる傾向にある。
- ⑫ 地表の緩み等により、地上測定部に沈下、傾動、水平移動等の変動が生じた場合は、正しい測定ができない。
- ⑬ 同一孔で水位観測はできない。

9.3.11 孔内傾斜計

(1) 適用

孔内傾斜計による調査は、地中に埋設したケーシングの傾斜角を測定することで、すべり面の位置及び移動方向と移動量を把握する場合に用いる。調査方法は、地盤工学会基準の「孔内傾斜計による地中変位測定方法」(JGS 3722)として定められている。

(2) 調査の概要

孔内傾斜計は、地中に埋設したケーシングの各深度における傾斜を測定し、傾斜角から地すべり移動量と、すべり面深度を把握する機器である。

さらに、2方向の合成変位（ベクトル）により、地すべりの移動方向も推定できる。

機器の設置は、すべり面を貫いたボーリング孔に専用のケーシングを挿入し、ケーシングが地盤と一体化するよう孔壁とケーシングの隙間をセメントミルクで充填する（図-2.9.23）。測定方法は、専用ケーシングの直交する2方向の傾斜を一定深度ごとにプローブ又はセンサーで測定する。解析では、孔底を不動点としたときの各深度のケーシング移動量を示し、傾斜角の著しい深度をすべり面と判定する（図-2.9.24）。

移動の絶対量は小さいが継続的に滑動している地すべりには、パイプひずみ計より耐用年数が長く有効である。

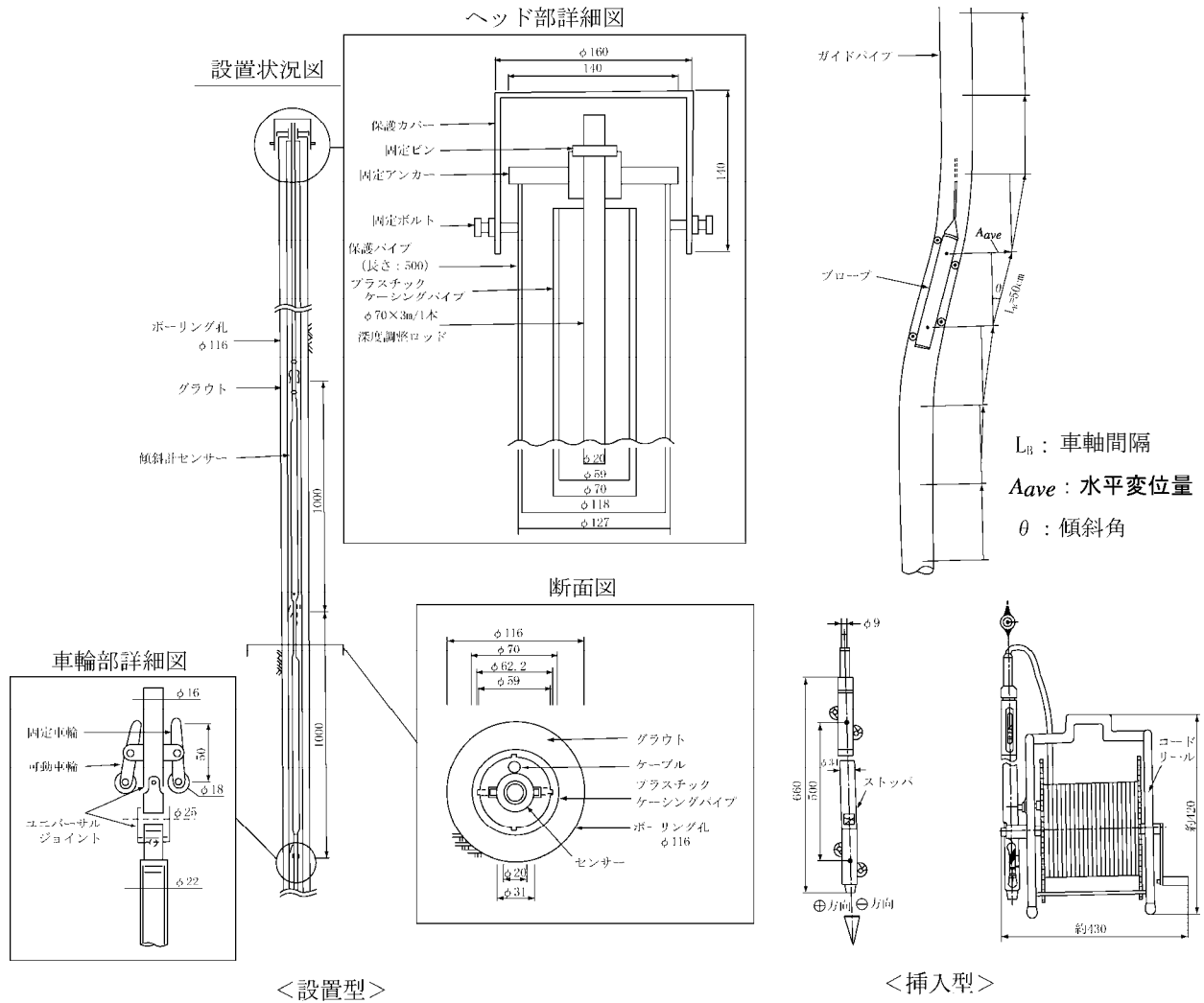


図-2.9.23 孔内傾斜計*1の構造

*1 (社) 斜面防災対策技術協会：地すべり観測便覧、p. 153, 158, 159 (2012)

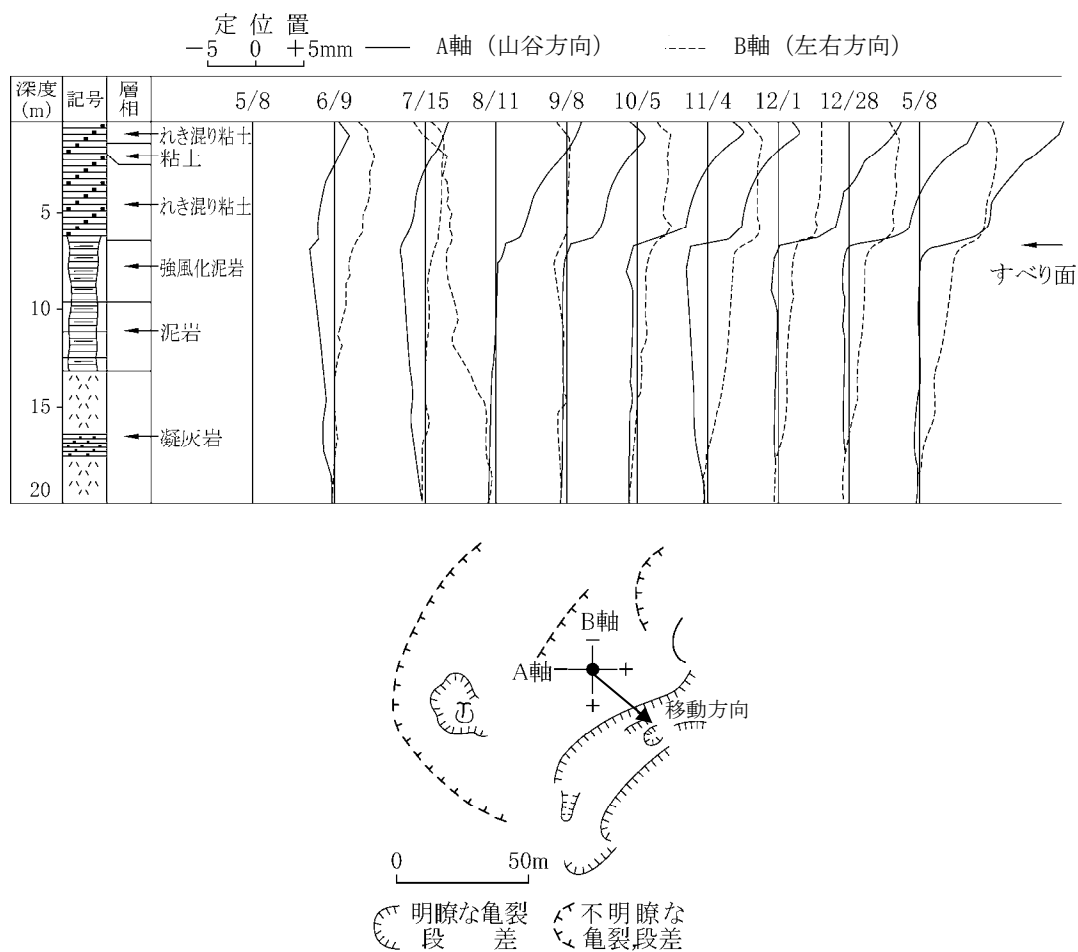


図-2.9.24 孔内傾斜計測定例（折戸南地区（石川県））

(3) 調査手法

孔内傾斜計は、ケーシングの傾斜を測定する方法の違いから、設置型と挿入型の2種類に分けられる。

設置型は、ガイド管に傾斜センサーを固定し、ケーブルによって地表の測定器と結んで傾斜を測定するものである。傾斜度を電気信号に変えるのには、ひずみゲージ式、差動トランス式等いくつかの方法がある。

挿入型は、地中に埋設したケーシングの中にプローブを挿入し、所定の深度ごとに測定する。設置型・挿入型の違いを表-2.9.11に示す。

精度は、設置型の場合で測定範囲 $2 \sim 30^\circ$ 、感度 $8 \sim 40$ 秒、非直線性 $0.5 \sim 1\%FS^{*1}$ が一般的である。挿入型の場合、測定範囲 $5 \sim 30^\circ$ 、感度 $4 \sim 40$ 秒、非直線性 $0.05 \sim 1\%FS$ が一般的である。

なお、近年土木研究所において、従来型に比べより大きな変位計測が可能な、大変位対応型孔内傾斜計（挿入型）が開発されている^{*2}。

*1 FS:フルスケール

*2 高木ら（2020）：大変位対応型孔内傾斜計～新たな孔内傾斜計の開発～、日本地すべり学会研究発表講演集、pp. 68～69

表-2.9.11 設置型と挿入型の違い

項 目	設置型	挿入型
長所	毎回同じ位置（深度）で測定できる。 自動観測に対応している。	全深度の測定が可能である。 可搬式なので、1台のプローブで 何箇所も測定できる。
短所	1孔に多数の傾斜計を設置すると不経済なため、ある程度すべり面を予測して設置深度を決める必要がある。設置深度以外にすべり面があった場合、把握できない。孔曲がりが著しいと、センサー回収不能となる。	観測にかかる労働力 プローブ長が約50cmあるため、地すべりの変位が5～10cmに達すると、プローブが挿入できなくなる。
経済性	複数のセンサーを1孔に設置すると割高になる。	プローブは高価だが、数年は使用可能である。
主な用途	自動観測システムの一環として使用する。 すべり面深度がほぼ判明している地すべりに対して使用する。	移動量の大きくないほとんどの地すべりに対して使用する。

孔内傾斜計の設置位置は地すべりブロックの中央付近を原則とする。また、孔内傾斜計は通常、深度50cmごとに測定を行う。

挿入型の観測間隔は、その地すべり移動速度に応じて、数日に1回～月1回程度の観測を行う。

(4) 留意事項

- ① 挿入型孔内傾斜計の測定深度は、専用ケーシングの挿入と確実にグラウトできることを考慮すると、通常深度50m程度以下が一般的である。ただし深度150mまで設置した例もある。
- ② 孔径は通常86mm以上の掘削孔径が必要となる。
- ③ 観測は、孔壁とケーシング間のグラウトが固定されてから実施する。設置後1週間程度が目安である。
- ④ 測定結果は、孔底の変位量を0とみなし孔底から孔口への累積変位を示すグラフに整理する（図-2.9.24）。
- ⑤ すべり面が複数あっても傾斜が小さければ判定が可能である。
- ⑥ 孔壁とケーシングの間は通常、グラウト充填することが多く、水位観測孔としての兼用には向いていない。
- ⑦ 測定機器がやや高価である。
- ⑧ 移動量が大きくなると、測定不可能になる。
- ⑨ 地下水の水質によってはアルミケーシングの腐食を生じるため、ステンレスケーシング等が必要となる場合がある。
- ⑩ 観測孔の設置方法や観測手法の詳細については、「(独) 土木研究所ほか：地すべり地における挿入式孔内傾斜計計測マニュアル（2010）」を参照する。

(5) 地表移動量と地中移動量の比較事例

地表変位量と地中変位量は相違が認められ、一般的には地中移動量の方が小さいことに留意が必要である。以下に、庄内あさひ地区（山形県）における比較事例を示す（図-2.9.25）。

平成24年5月24日～平成28年5月16日の4年間の地表及び地中変動の対比の結果、地表変動は、南南西方向への移動が多くなっているものの、移動方向にばらつきが見られるが、地中移動は、南南西方向への移動傾向が明瞭であったことと、移動量は地表変動の方が大きい傾向にあることが報告されている。

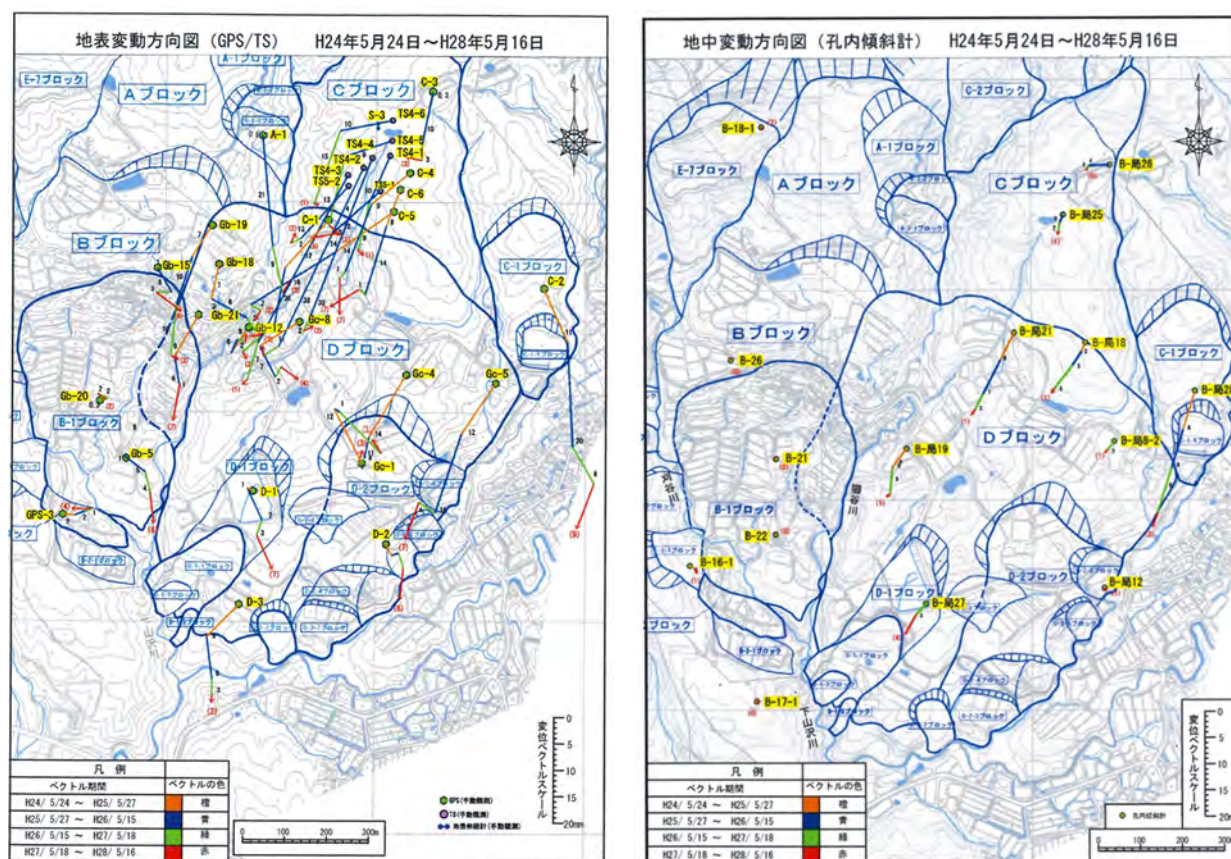


図-2.9.25 地表変動量と地中変動量の比較事例

10. 周辺環境調査

(基準書 第2章、2.3(9)関連)

10.1 調査の目的

周辺環境調査は、地すべり防止対策を実施する上で、生態系、景観等の周辺環境（以下「周辺環境」という。表-2.10.1）に配慮する必要の有無を調査するもので、周辺環境に影響を及ぼす地すべり防止施設の計画・設計に反映させることを目的とする。

10.2 調査方法

調査は、「環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き」（食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会）等を参考に、地域の周辺環境を踏まえて行うものとする。

表-2.10.1 周辺環境の分類

分類1（大分類）	分類2（環境要素）
自 然 環 境	植物
	動物
	野外レクリエーション
	自然環境資源
	景観
生 産 環 境	地域分断
	観光資源
農 業 生 産 環 境	農作物の栽培状況
	農作業の形態
歴 史 ・ 文 化 環 境	史跡・文化財
	神社・仏閣・民俗文化

11. 調査結果の整理

(基準書 第2章、2.3関連)

調査結果は、計画及び設計・施工の各段階での利用を考慮し、相互の関連が把握しやすく、かつ、利用しやすい様式で整理する。

11.1 調査総合図の作成

調査結果をまとめて調査総合図を作成する。これは、一つの図上に各調査結果を重畳して表現することにより、各調査結果相互の関連を容易に把握しようとするもので、平面図及び断面図の2種類とする。

平面図は縮尺1/2,500～1/1,000程度の地形図を基図とし、断面図は主要な地すべりブロックの主軸を含む断面について縮尺1/500程度で作成するのが望ましい。両図に盛込むべき内容は原則として以下に示すような事項とするが、図面が煩雑になる場合は項目を整理してもよい。

(1) 平面図

- ① 調査位置
- ② 地質区分
- ③ 断層、リニエーション（線構造）、褶曲等
- ④ 地すべりブロック（移動の激しいブロックは赤色にて表示）
- ⑤ 移動量（移動方向を矢印の向き、移動速度を矢印の長さで表示）
- ⑥ 地下水流動経路
- ⑦ 湧水地点、湧水量
- ⑧ 地表水、湧水、ボーリング孔内水等の水温及び水質
- ⑨ 河川流況
- ⑩ 河川等による侵食状況
- ⑪ 重要保全物件（赤色にて表示）
- ⑫ 植生状況
- ⑬ 土地利用、水利用、農業用施設等の状況
- ⑭ 被害状況

(2) 断面図

- ① 調査位置
- ② 想定すべり面
- ③ 地質区分
- ④ ボーリング柱状図、試掘坑柱状図（併せて写真を添付することが望ましい）
- ⑤ N値、その他サウンディング結果
- ⑥ ひずみ計・孔内傾斜計観測結果
- ⑦ 地下水位（最高・最低・平均の各水位を記入）
- ⑧ 間隙水圧（地下水位に換算し、上記に準じて記入）

- ⑨ 地下水検層結果
- ⑩ 簡易揚水試験結果
- ⑪ その他物理探査結果

調査総合図を作成するに当たって、詳細な地すべりブロック区分を行った事例を図-2. 11. 1に示す。この図の通り、近年、航空機、UAV又は地上からのレーザ測量により作成された高精度のDEMデータを基に作成された平面図を活用することにより、微地形、構造物の変状等が把握しやすくなり、地すべりブロックの想定精度向上が可能となってきた。

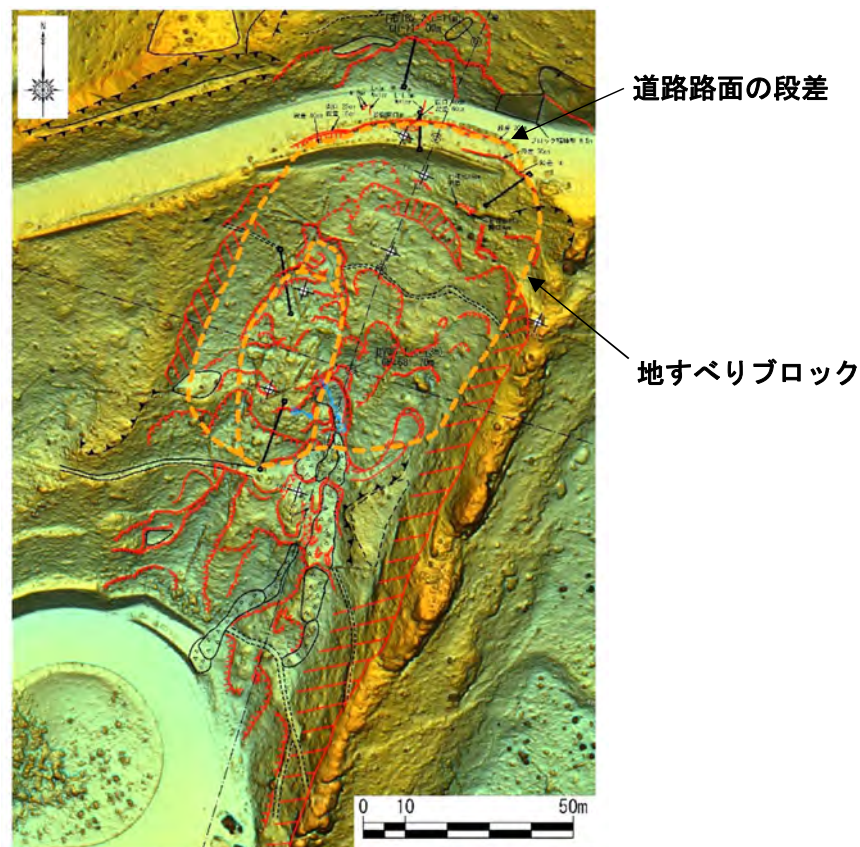


図-2. 11. 1 高精度のDEMデータによる地すべりブロック想定例（長岩地区（長野県））

また、地すべり防止対策を計画設計する上で重要となるすべり面深度（D）については、地すべり幅（W）とある程度の相関があることが知られている。

図-2. 11. 2は、昭和58年～平成2年に発生した総計265か所の地すべり対象として、地すべり幅（W）とすべり面深度（D）との比である W/D の頻度分布を示したものである。これによると W/D は5.0～6.0が多くなっており、平均値は7程度となっている。

図-2. 11. 3は、昭和44年以降の50か所の地すべりについて地質ごとの地すべり幅と深度について整理したものである。これによると、 $W/D=3.0\sim10.7$ の範囲（平均は $W/D=6.08$ ）にあり良い相関を示すが、地質区分による差は認められない結果となっている。

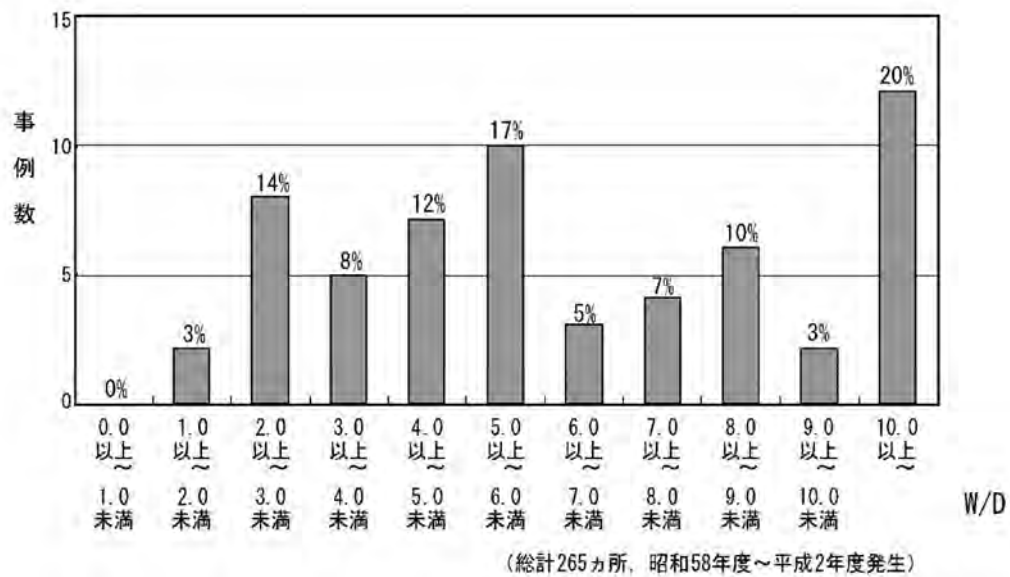


図-2.11.2 地すべり幅とすべり面深度の関係 (1) *1

注) 「10.0 以上～」の事例が一番多く見えるが、これは10.0以上の事例をまとめて一括分類しているためである。

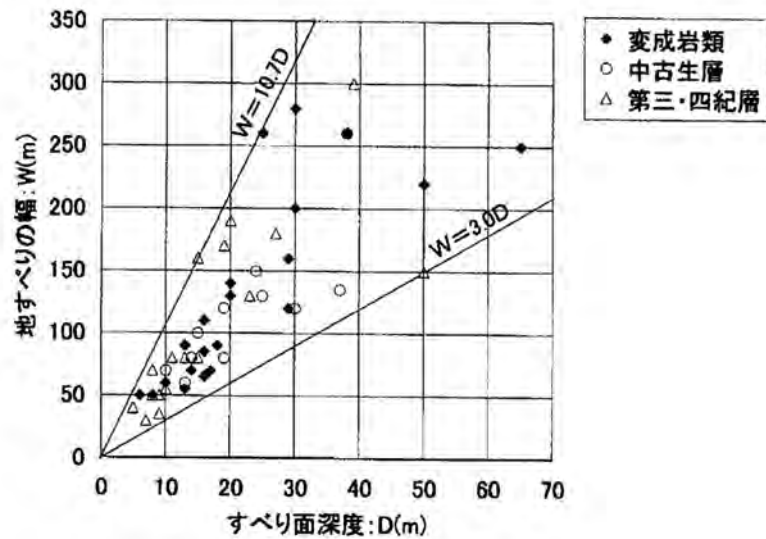


図-2.11.3 地すべり幅とすべり面深度の関係 (2) *2

*1 国土交通省砂防部, (独) 土木研究所: 地すべり防止技術指針及び同解説, p. 137 (2008)

*2 上野 (2001): 地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討, 地すべり, 38.2, p. 111

11.2 図・表等の様式

調査結果は計画、設計、施工段階における使用の便宜を考え、図、表、グラフ等としてとりまとめる。その様式については特に定めないが、各調査手法の項にある事例を参考に、見やすいものとする必要がある。

なお、グラフの場合には、調査手法ごとに別々に作成するのではなく、各調査結果を組合せて相互の関係が把握しやすいものとなるよう工夫する。図-2.11.4に調査結果を整理した例を示す。

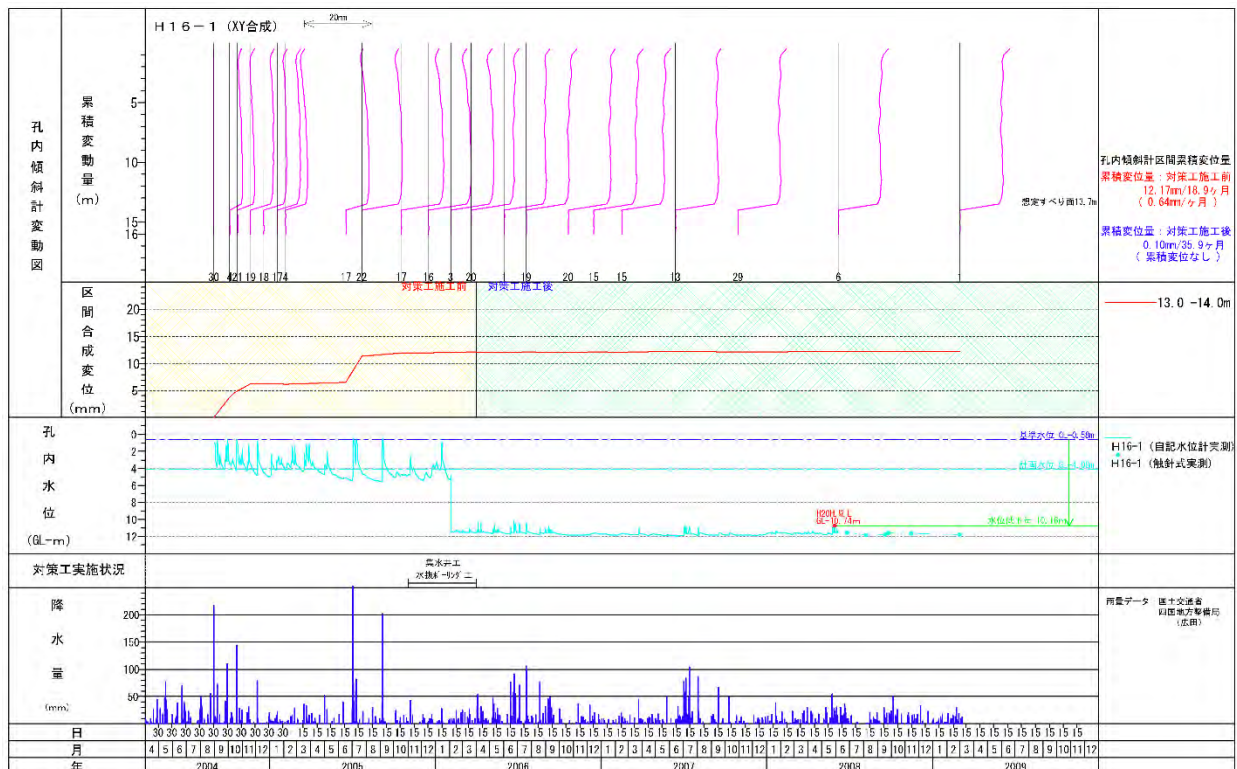


図-2.11.4 調査結果整理例