GPSを用いた大規模地すべり斜面の長期自動変位観測

中里 裕臣*・井上 敬資**・紺野 道昭*・伊藤 吾一***・佐藤 透***

要 旨

GPSを用いた大規模地すべり斜面の自動変位観測システムとその長期観測結果を紹介する。活動的な地すべりの対策工施工までの動態監視から、対策工施工後の効果判定までの長期にわたる長寿命な観測手法として、GPS観測システムが取り上げられたが、対象ブロックが北向き斜面であったことから、まず手動観測による適用性評価を行った。また、変位観測に対するGPS干渉測位の特性を実験により把握した。GPS観測システムは、不動地の基準点1箇所と地すべり地内の移動点5箇所で構成され、2003年10月より連続観測を開始した。各観測点では太陽電池を電源とし、オンライン観測には、当初は各観測点からの携帯電話回線を利用したが、後に野外用無線LAN回線により現地でデータを集約し、インターネット回線を通じて基線解析PCに送る方式とした。本システムにより2004年豪雨時の大きな変位や、その後の排水トンネルを主とする対策工の進展に伴う変位の沈静化を把握することができた。また、上下成分には基準点と移動点の標高差に応じた年周変動が認められ、気象データを用いた対流圏遅延補正の有効性が示された。

Key words : GPS, 変位観測 displacement monitoring, 地すべり landslide, 対流圏遅延補正 tropospheric delay correction

1. はじめに

地すべりなどの斜面災害に対する防災・減災を図る上で、斜面変状の早期検知は速やかな警戒・避難を促し、変位状況の把握は機構解明、対策工の検討・効果判定につながるため、変位観測は重要である。地すべり分野においても多くの地中・地表変位観測手法¹⁾などが開発・適用されており、1990年代よりGNSS (Global Navigation Satellite System) 干渉測位技術を応用した地表変位観測手法が適用され始めた²⁾など。この手法では、cm～mmオーダーの精度で測位点の3次元座標が得られるGNSS干渉測位を、定期的もしくは連続的に繰り返し、観測点の変位量を求める。

本報文では、GNSSのうちGPS (Global Positioning System) を用いて高知県の大規模地すべり地において2003年10月より運用を開始した地すべり変位観測システムと観測結果を紹介し、現地適用上の留意点について報告する。

2. 調査地概要

農林水産省直轄地すべり対策事業高瀬地区では、高知県吾川郡仁淀川町の仁淀川右岸に位置する高瀬本村地すべり防止区域 (1998年指定, 2000, 2003年追加指定, 71.9ha) における地すべりの沈静化による農地・農業用施設および住宅等の生活基盤と下流域の被害防止を目的に2004年度より対策事業が実施されている。

高瀬地区は、付加帯である秩父帯に位置し、地区中央を南北に横断する名野川スラストにより構造的上位の中津山ユニットと下位の仁淀川ユニットに分けられる。前者は黒色頁岩を主体とし、石灰岩、チャート、緑色岩を礫として含むメランジェ相を示し、後者は緑色岩および黒色頁岩を主体とするメランジェ相からなる³⁾。

高瀬地区の地すべりブロックはA～Dの4ブロックに大きく区分され、A, B, Dブロックは上記の基岩からなる北向きの流れ盤斜面に分布し (図-1), CブロックはBブロックの西側に分布する。これらのうち最大のDブロックは斜面長850m, 幅420m, 最大深度80mに及び (図-1), 1999年7月の豪雨 (連続雨量2,192mm) ではブロック全体に大きな変状を生じた。その後も数cm/年の地中変位が観測され、地中変位観測では将来的に観測孔の孔曲がりや観測孔の破断により観測不能となるおそれがあるため、観測変位量に上限がないGPSによる地表変位観測システムの導入が検討された。

* 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
 National Agriculture and Food Research Organization (会員)
 E-mail : h_nakazato@affrc.go.jp

** 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
 National Agriculture and Food Research Organization

*** 農林水産省 Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

図-1 調査位置図

地形図は国土院の電子地形図を利用

3. GPS観測システム

3.1 北向き斜面における試行観測

本地区でのGPSによる変位観測システム導入に当たっては、監視対象ブロックが北向き斜面であり、GPS衛星が飛来する南天の視界が遮られることから、まず測位精度を確保できるかが課題となった。これに対し、Dブロックの主測線に近く、比較的上空視界の開けた3点 (TH1'~3') について、1周波型GPS受信器 (古野電気(株)製MG21およびTrimble社製4600LS) を用いた移動杭測量を試行した。基準点は各観測点から基線長843~1,198mの範囲にある不動地上の建物屋上とし、2002年4月を初期値として2003年7月にかけて、ほぼ2ヶ月毎に試験観測を行った。1回あたりの観測は15秒エポック、セッション長4時間以上とし、基線解析にはTrimble社製GPSurveyを用いた。その結果、受信器の基線長に対する公称水平誤差±6mmを超える累積的な水平地表変位を把握できた (図-2)。このため、観測毎の受信器設置誤差を考慮する必要が無く、誤差幅未

図-2 移動杭測量試行結果

満の微小変位も統計処理により変位傾向の検出が期待される固定観測点による連続観測を2003年10月に開始した。

3.2 連続観測システム

GPS観測点は、Dブロックの試行観測点3点の近傍 (TH1~3) と斜面下方にTH4を加え、BブロックにTH5を配置し、基準点は試行観測と同じ建物の屋上に配置した (図-1)。各観測点の基線長は703~1,122mの範囲にある。GPS受信器は1周波型の古野電気(株)製MG21であり、各観測点では、支柱上に整準台を介して受信器を置き、地表に設置した標点に致心する地表標点型⁴⁾として、地すべり活動により支柱が傾動してもそれによって生じる見かけ変位を補正できる構造とした (図-3)。

本システムではGPSデータ受信から古野電気(株)製CapwinAutoによる基線解析を経て変位情報の図化まで自動実行される (図-4)。当初は、各観測点の通信制御ユニットに蓄積したGPSデータファイルを農研機構の基線解析

図-3 観測点外観

(a) : MOVA回線時 (TH3), (b) : 無線LAN回線時 (TH2)

図-4 観測システムブロック図

PCが携帯電話（MOVA）回線を通じて直接回収していた（図-4（a））。しかし、MOVA回線サービス終了がアナウンスされたことと、基準点と各観測点で視通がとれたことから、観測の安定化と低コスト化もかねて、2007年11月以降は、ビル間通信アンテナを利用した無線LAN回線（基準点のみ有線LAN）により基準点の建物に設置した現場観測用PCにデータを集約し、インターネットを通じて農林水産省のFTPサーバを経由してデータを転送し、基線解析を行うシステムとした（図-4（b））。基線解析結果はFTPサーバを経由して、高瀬地区の防災システム⁵⁾に反映し、事業所との情報共有を図った。

電源は、全観測点で太陽電池とした。当初の観測仕様は12時間毎に4時間観測とデータ伝送を行うこととし、電源は24W12Vの太陽電池と12V17Ah鉛シールバッテリーの組み合わせとした。その後、無線LAN化の際に6時間×4セッションの24時間連続観測として2回/日のデータ伝送としたため、太陽電池を40W、バッテリーを24Ahに容量を増やした。

3.3 移動速度と基線解析セッション長の検討

干渉測位は静止点に正確な座標を与える技術であり、活動中の地すべりに適用する場合にどの程度の移動速度まで適用可能なかを明らかにしておく必要がある。また、測位誤差低減のためにセッション長を大きくすることが有効である⁴⁾が、移動速度によっては基線解析の失敗や正確な移動量が把握できない場合が想定される。このため、測位精度が高く上記の影響が大きいと考えられる水平成分について移動速度とセッション長を変えた場合の測位実験を行った。

実験にはMG21受信器を用い、農研機構構内において上空視界に障害物のない基線長約390mの南北方向の基線を設定し、基準点に対し複数の観測点を東西に配置した。観測点では三脚と整準台の間に強制変位微動装置（図-5）を置き、同時に観測しながら受信器毎に異なる変位速度（0

図-5 強制変位実験状況

～60mm/h）で北に35～40mmの水平変位を与えた。

基線解析には古野電気(株)製CapwinAutoを用い、それぞれの観測点において1時間ごとに作成した1時間、3時間、6時間セッションのデータファイルを解析し、基線解析結果から南北成分の水平変位量を求めた。

図-6（a）は移動速度0の固定参照点の測位結果で、1時間、3時間、6時間セッションの標準偏差はそれぞれ0.7mm、0.5mm、0.6mmで試験中は安定した観測が行われていた

図-6 移動速度とセッション長による変位観測結果

と判断できる。図-6 (b~h) は移動速度毎にセッション長の違いによる基線解析結果と実変位量を比較したものである。解析結果はセッション中央の時刻にプロットした。

図-6 (b~h) を概観すると、移動速度4 mm/hまでは1時間セッションでばらつきがみられるものの、どのセッション長でも移動の開始・終了時期が把握できる。これに対し、移動速度12~60 mm/hでは1時間セッションで移動の開始・終了時期が把握できる一方、3時間、6時間セッションでは変位の開始・終了時期が不明瞭になる。なお、すべての解析で基線解析の失敗はなかった。

これらの結果から、0.5 mm/h~60 mm/hの移動速度では、1~6時間セッションの基線解析が可能でセッション中の平均的な座標が得られ、4 mm/h程度までは3時間、6時間セッションでも移動開始・終了を把握できることを確認した。

3.4 対流圏遅延補正

高瀬地区のGPS変位観測結果については、鉛直成分に基準点と観測点の標高差に応じた振幅を持つ年周期的な変化が見られることが明らかにされている^{4),6)}。この変化は、基準点と観測点の標高差により受信器上空の水蒸気量が異なり、GPS電波の遅延が生じる対流圏遅延によるものとされる。増成・清水⁷⁾は、その補正方法として基線解析における大気モデルにModified Hopfieldモデル⁸⁾を用い、観測地近傍の気象観測所の気温と相対湿度を用いてWET項のみを考慮する気象補正法を提案した。そして中里ほか⁴⁾は、高瀬地区の2004年から2006年のデータについて、この気象補正法を適用し、補正効果は鉛直成分にのみ現れ、現地観測気象データと約40 km離れた高知地方気象台の気象データで同等の補正結果が得られることを明らかにした。この

図-7 水平変位ベクトル図

ため、本稿では2003年10月~2016年12月までの基線解析において、高知地方気象台の気象データを用いた気象補正を行った。

4. 観測結果

図-7には2003年10月から2017年6月までの各観測点におけるセッション毎水平変位点(+)と、2003年10月~2016年10月と2017年6月30日の約1年毎の水平変位点(●)を示した。各地点では概ね斜面方向である北北東への変位を示しDブロックではTH1で最大の163mmを示す。Dブロックでは2006年までの変位が大きくその後減速傾向が認められるが、Bブロックでは一定速度の変位傾向が認められる。

図-8には各観測点における水平、鉛直変位の経時変化を示す。水平成分では、2004年9~10月の豪雨(連続雨量1,614 mm)の際にDブロックの各点で大きな変位が認められ、TH4以外の点ではそれ以降も累積変位が認められる。しかしDブロックでは排水トンネルの集水ボーリング施工が開始された2007年以降累積変位は鈍化傾向となり、特に2014年7~8月の豪雨(連続雨量1,920 mm)に対して変位を生

図-8 水平および鉛直変位経時変化図

じておらず、対策工の効果と考えられる。TH2近傍のD01B-04孔（図-1）における埋設型傾斜センサー（深度80～81m）による累積地中変位量もTH2における地表変位と同様の経過を示す（図-8）。BブロックのTH5では降雨との対応が不明瞭な定速的な変位が見られる。

鉛直成分は各点ともに斜面下方への移動に伴い沈下傾向を示すとともに、TH1、2、3では夏季の沈下、TH4では夏季の僅かな隆起傾向が見られ、TH5では他点のような年周変化を示さない。基準点に対する標高差はTH1：51m、TH2：152m、TH3：202m、TH4：-49m、TH5：-4mであり、年周変化の振幅と位相が基準点と観測点の標高差に対応することが確認できる。

図-9では鉛直成分について気象補正の有無を比較した。

図-9 鉛直成分気象補正結果の比較

矢印部の変位は植生の影響と推定

Modified Hopfield大気モデルのWET項に高知地方気象台における気温と相対湿度の毎時データを入力した気象補正により、各点の年周変化が良好に除去される結果が得られた。

TH1とTH5では気象補正後も鉛直成分の変化が認められる（図-9の矢印部）。これは、受信器周辺の植生を伐採することでばらつきが解消したことから、植生繁茂による視界の制限が誤差要因になっていると考えている。樹冠を透過するGPS信号を用いた林間地におけるGPS変位観測システム⁹⁾も開発されているが、特定の方向に集中する植生はマルチパスなどの原因となり測位精度を下げると思われる。対応策としては、現地においては周辺整備が重要で、基線解析では障害部分のマスク処理¹⁰⁾が有効と考えられる。

13年余に渡る運用において、一時的な欠測が生じたが、システム各部に交換を要するような大きな故障は生じなかった。2007年11月の各点の欠測は無線LANシステムへの切替に伴うもので、2010年10月のTH1の欠測は無線LANアンテナ間の植生繁茂によるデータ不達によるもので、2016年3～5月の全点の欠測は基準点受信器の電源接触不良によるものであった。なお、システムの長期運用において、MG21受信器についてGPS衛星の週番号が1,024週目（19.6年）でリセットされ日付が誤認識されるロールオーバーが生じたが、基線解析にメーカー提供の日付変換プログラムを組み込み、運用を継続することができた。

5. お わ り に

GPSを用いた地すべり地表変位観測システムを紹介し、2003年10月から2017年6月までの観測結果から、豪雨時の大規模地すべりの挙動や対策工施工による地すべり変位の沈静化が把握できることを示した。GPS干渉測位は0.5～60mm/hの範囲の移動体測位に適用でき、4mm/h以下の速度では3時間、6時間セッションの基線解析でも変位状況を精度よく把握できる。また、鉛直成分では斜面監視で避けがたい基準点との標高差に応じた年周変化が生じるが、気象補正によりその影響を軽減できる。

2017年は準天頂衛星の配備も進み、GNSS測位はますますの精度向上が見込まれる。本事例がGNSSを利用する地すべり斜面監視システムの普及の一助となることを期待する。

謝辞 本研究を進めるにあたり、農林水産省中国四国農政局、仁淀川町、古野電気(株)、農林水産省筑波産学連携支援センター、農研機構農村工学研究部門の関係各位に多大なご協力をいただいた。大渡観測所の雨量データは国土交通省水文水質データベースより、高知地方気象台の気温・相対湿度データは気象庁ホームページより利用させていただいた。山形大学農学部奥山武彦教授にはGPS観測全般に

わたりご議論いただいた。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 社団法人斜面防災対策技術協会 (2012) : いつでもどこでもすぐに役立つ地すべり観測便覧 (改訂版), 502p.
- 2) 福岡 浩・佐々恭二・平原和朗・島 通保・日浦啓全 (1990) : 人工衛星測量 (GPS) による地すべり移動観測, 第29回地すべり学会研究発表講演集, pp.170-173.
- 3) 阿部栄一 (2007) : 高瀬地区における排水トンネルの地下水位低下効果について, 応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.101-102.
- 4) 中里裕臣・井上敬資・阿部栄一・高木圭介・増成友宏・武地美明 (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, Vol.44, No.6, pp.55-61.
- 5) 楠本岳志・木原大志・土佐信一・齋藤雅志 (2005) : 高瀬地すべりにおけるWebを活用した防災システムの構築, 第44回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.373-376.
- 6) 中里裕臣・奥山武彦 (2010) : 大規模破砕帯地すべりにおけるGPS移動量観測システム, 地盤工学会誌, Vol.58, No.11, pp.34-35.
- 7) 増成友宏・清水則一 (2007) : GPSによる地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討, 土木学会論文集F, Vol.63, No.4, pp.437-447.
- 8) Goad, C. C. and Goodman, L. (1974) : A modified Hopfield tropospheric refraction correction model, Paper presented at the Fall Annual Meeting American Geophysical Union, 28p.
- 9) 中里裕臣・吉迫 宏・紺野道昭・馬場俊行・増成友宏・武石朗 (2016) : 林間地におけるGPSによる地すべり地表変位観測手法の開発, 第55回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.126-127.
- 10) 増成友宏・武地美明・田村尚之・船津貴弘・清水則一 (2008) : GPS変位計測における上空障害物の影響とその低減法, 土木学会論文集F, Vol.64, No.4, pp.394-402.

(2017年 8 月22日受付, 2017年12月14日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.58, No.6 pp.402-407, 2018

Long Term Automatic Displacement Monitoring of Large Scale Landslide Using GPS

Hiroomi NAKAZATO, Keisuke INOUE, Michiaki KONNO, Goichi ITOH and Toru SATO

Abstract

The authors introduce the automatic displacement monitoring system for the large-scale landslide using GPS and the long term monitoring result. In this case, the adoption of a long-term monitoring system with GPS was examined to observe the movement of an active landslide before and after the countermeasure construction. However, because the object landslide slope was northward, the applicability evaluation by a manual observation was carried out beforehand. Moreover, the characteristic of the GPS interferometric positioning to the displacement monitoring was understood by the experiments. The GPS monitoring system was composed of the one datum point at the stable ground and the five moving points in the landslide area, and began the continuous observation in October, 2003. The power supply of each station was a solar battery. At first, the cellular phones were used for online data transfer, afterwards they were changed to the wireless LAN lines.

This system was able to clarify the large displacements by the heavy rain in 2004, and calming down of landslide activity according to the countermeasure construction. In addition, the effectiveness of the tropospheric delay correction that used meteorological data was shown to the annual change that appeared to the vertical component of the displacements.

Key words : GPS, displacement monitoring, landslide, tropospheric delay correction