

RTD-GPSを用いた自動観測システムの 地すべりへの適用例

RTD-GPS AUTO-MONITORING SYSTEM CASE FOR THE LAND SLIDE

・楠 覚¹・池邊 浩司²・内山 雅之³・森 俊行⁴

Satoru KUSUNOKI, Hiroshi IKEBE, Masayuki UCHIYAMA, Toshiyuki MORI

¹株式会社パスコ 九州事業部技術部 (E-mail:satoru_kusunoki@pasco.co.jp)

²株式会社パスコ 九州事業部技術部国土基盤課 (E-mail:hiroshi_ikebe@pasco.co.jp)

³ジオサーフ株式会社 (E-mail:masayuki_uchiyama@geosurf.net)

⁴ジオサーフ株式会社 (E-mail:toshiyuki_mori@geosurf.net)

Key Words: RTD-GPS, Epoch by Epoch, Land Sliding Dam-Reservoir

1. はじめに

2008年5月25日午後4時21分に発生した中国の四川大地震は、5月末段階で死者6万数千人、負傷者は36万人弱となる大震災となっている。¹⁾

また、この大地震に伴い発生した大規模山腹崩壊による天然ダム湖の形成は、諸報道によれば約40箇所へのぼり、下流側都市域への甚大な二次災害の恐れを強くしている。²⁾

顧みて、環太平洋縁部にあり、地質構造が極めて複雑で、地形も比較的急峻なために山岳域に多くのダムを持つ日本においても、この様な大規模地震が発生した場合には、扇状地などに形成された都市部に対して同様な大規模災害の危険性を常に有していると言える。

本報告は、四国三波川帯にある貯水ダム域における地すべり活動を常時モニタリングする事を目的としたRTD-GPSによる地すべり自動観測システムの適用例について述べる。

2. 三波川帯貯水ダム域における地すべり概要

日本におけるダムは、電力、飲料水、工業用水、農業用水、さらに豪雨時における河川の洪水調節機能など様々な役割を担って築堤されている。しかし、狭隘な日本列島においては、平野部は経済活動や生活空間として優先的に利用されるため、ダムサイトは中山間地域や急峻な山岳奥地など貯水効率は良いものの、地形・地質条件的には厳しい地域に築堤されているケースが多い。今回、RTD-GPSによる地すべり自動観測システムを適用した貯水ダムも、一

級河川最上流域にあり、洪水調節機能や大都市へ水資源安定供給を行っている。その貯水域は三波川結晶片岩帯に属し、脆弱な変成岩類や断層破碎帯などが広く分布している日本有数の地すべり多発地帯である。このため、ダム管理者は貯水池域にある数十の地すべり危険箇所に対し孔内水位計、地盤伸縮計、あるいは多段式孔内傾斜計などによる地すべり自動観測システムを構築し、その挙動を常に監視することにより、貯水池の安全性の向上に努めている。

ここで、一般的な貯水池における地すべり現象について整理すると、概ね以下ようになる。³⁾

- (1) 地すべり土塊の一部が水没し、土塊に新たな浮力が働くことで発生する地すべり
- (2) 貯水位の急激な上下降により、貯水池周辺の地山内の残留間隙水圧が上昇し発生する地すべり
- (3) 地すべり土塊が貯水により水没し、土塊内の地下水水位が全体的に上昇することで発生する地すべり
- (4) 地すべり末端域が受ける貯水面付近の浸食や崩壊作用により、地すべりの受働土圧が低下して発生する地すべり

このように、ダム貯水域の地すべりでは主に貯水位変化に伴った地山内における地下水水位の上下動が地すべりを活発化させると言える。

3. 貯水池地すべり自動観測システムの課題

地すべり観測システムを構成する機器としては、調査ボーリング孔を用いた孔内水位計、孔内傾斜計、地中変位計などや、地すべり活動による地表変位を観測する地盤伸縮計や地盤傾斜計などが代表的な

ものとして挙げられる。これらの観測機器は地すべり専門技術者が行う地形・地質調査や地すべり踏査により地すべりブロックの特性、特徴、構造などが判定されてから、その状況に応じ計画・配置されるものである（写真-1）。

特に、地すべりの活動度が大きく、また保全対象の重要度が高いと判断される地すべりに対しては、これらの観測機器を自動化し、常時変位をモニタリングし、当該地すべり特性を踏まえた各観測機器の「管理基準値」を検討・設定することで、活動傾向に応じた警戒避難体制を円滑にとれるシステムとして構築されている（図-1）。

ここで、上述のような地すべり自動観測システムの現状も踏まえつつ、ダム貯水域における地すべり自動観測システムを構築しようとする際の課題をまとめると下記のようになる。

- (1) 貯水域は、ダムサイト上流の広い範囲に及ぶため、その兩岸の地形・地質特性も異なっており、そこに伏在する各地すべりの特性も各々で異なる。その結果、監視局側では各地すべりに対する自動観測システムを複数構築する必要に迫られる事がある。
- (2) 貯水池地すべりの誘因として、湛水による地山内の地下水の急激な上下変動が挙げられるが、ダムサイト直上流域と貯水池の中・上流域などでは、地すべりブロックが湛水による影響を受ける度合いも異なってくる。このため、地すべり活動度に関する評価を十分に行った上で、自動観測システムを構築しておく必要がある。
- (3) 貯水池域の多くは、都市域に比較して交通・通信・電力などの社会基盤整備が悪い傾向が認められる。このため、構築しようとする地すべり自動観測システムは社会基盤が未整備な環境下でも比較的lowコストで構築でき、且つメンテナンスも少なく常時稼働する事が求められる。
- (4) ダムには通常の貯水機能のほか河川流量や洪水調節機能を求められるものがあり、特に後者の場合には豪雨時などにおいて、比較的短期間に人為的に貯水位の上下動調節が行われる。このため、地すべり自動観測システムには地すべり活動を判定できる高い精度での観測データを取得する機能と貯水位の緊急調節操作時においては、観測データを貯水位の変化と併せてリアルタイムで得られることが望ましい。

上述の様な貯水域における地すべり自動観測システムの諸課題を踏まえつつ、以下にRTD-GPSを用いた地すべり自動観測システム（以下、本観測システムと言う）の構築について述べる。



写真-1 地すべり自動観測システム動態観測機器として地すべりブロック頭部に設置された地盤伸縮計

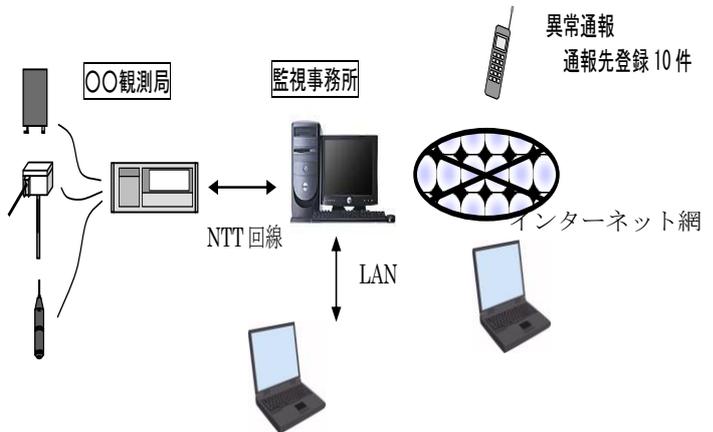


図-1 地すべり自動観測システムの警戒避難への活用例

4. RTD-GPS 地すべり自動観測システムの構築

今回の貯水ダムでは貯水域にある地すべり危険箇所に対し、随時調査や機構解析が行なわれており、優先度評価をしつつ対策事業が展開されている。これと同時に「要監視対象」と判断された複数の地すべりブロックに対しては、孔内水位計や地中変位計、並びに地盤伸縮計などを自動観測システム化して、NTT 通信回線を用いて監視局側で常時監視を行っている。

本観測システムは、常時は地すべり活動を水平方向（X,Y）の変位として捉え、且つ貯水位の急変動時においては、湛水面付近にあたる地すべりブロック末端域におけるリアルタイムの水平変位として捉えることを基本仕様としている。また、さらに貯水域兩岸の各地すべりブロック挙動を、湛水面の上下変動とも合わせつつモニタリングすることによって、貯水池域全体での地山の変動（水平変位）として、より「面的な」観点として捉えることも補助的な機能として位置づけている。

なお、観測局は上述の基本仕様を受け、保全対象の重要度が高く、最高貯水位付近の地すべりブロック主測線末端域に配置した。また、GPS による観測

精度を上げるため、観測局に加えて貯水池域外の山頂部と管理事務所屋上の2カ所に固定局（不動点）を配置した。図-2に配置イメージを示す。

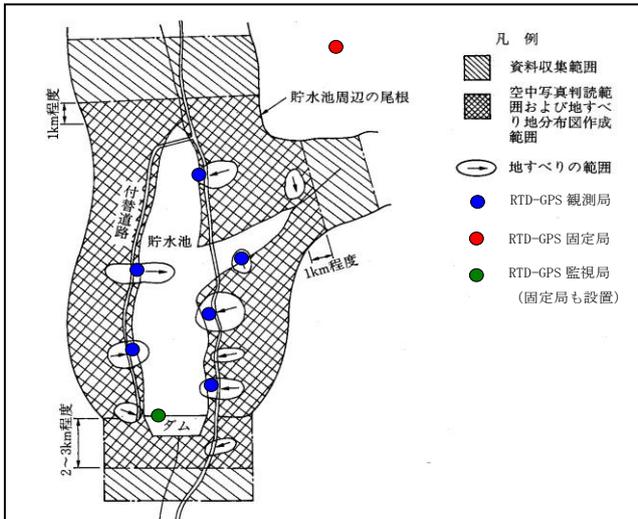


図-2 ダム貯水池域における GPS 観測局、固定局配置のイメージ³⁾を一部改変

(1) GPS の測位タイプについて

GPS は今日では様々な分野で活用されており、受信機も1周波型の安価なものから、2周波型の精密測量に供する高価なものまで、様々な機種が市場に出ている。また、解析ソフトウェアについても同様である。本観測システムでは、

- ①貯水池域両岸は、急峻な地形が湛水域にまで迫っており、GPS 衛星の捕捉環境が厳しい。すなわち、常時より悪い観測環境下にあっても可能な限り精度の良い観測データを取得できる必要がある。
- ②貯水池域の中～上流域には、集落が形成されており、NTT インターネット通信回線や電力線が両岸幹線沿いに整備がされているため、比較的大量の情報通信が可能である。
- ③貯水池域両岸の地すべりは、何れも複数の地すべりブロックが集合しつつ滑動する大規模なものを主体としているため、常時には高精度(mm 精度)での観測データが求められる。
- ④貯水位の緊急変動時には、リアルタイムでの GPS 観測情報を基に、地すべりブロック末端域の地表挙動を既設の地すべり観測機器と併せて監視し、地すべり活動度の評価を行う必要がある。また中・長期的な観点では、貯水位の上下変動と地すべり末端域の地すべり活動との相関性について、蓄積された GPS 観測データを再解析・検証していく必要がある。

を基本仕様と考え、測位方式については RTD-GPS(リアルタイムダイナミクス-GPS)を採用

し、設置する機器は2周波型精密測量用機器を採用することとした。

ここで、GPS 測位において高い観測精度が求められる場合には、静的干渉測位法であるスタティック測位法が、また他の位置補正情報などが比較的容易に得られる様な環境においては、RTK-GPS(リアルタイム-キネマティック)測位法が、一般的によく用いられているが、前者は mm 単位での高い精度が得られる代わりに約1時間のGPS観測データの蓄積が不可欠であり、リアルタイム性に欠け、また後者ではリアルタイム性があるものの、観測データ初期化に一定の時間を要する他、フィルタリングにより「生」の観測データとしては得られないといった特性を有している。しかし、本観測システムに採用した RTD-GPS 測位法では、1エポック毎に基線解析処理を行うため(Epoch-by-EpochTM)、観測環境があまり良くない場合でも、リアルタイムに観測情報を得ることができる。³⁾

図-3にGPSの測位概念図を、図-4にRTD-GPSの自動観測システムのイメージ図を、また表-1に代表的なGPS測位法の得失等整理表を示す。

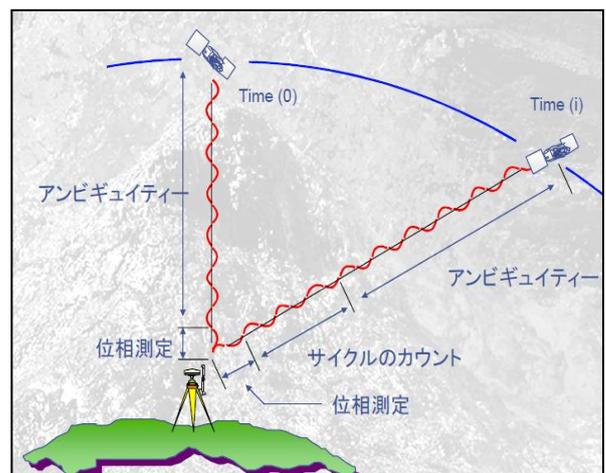


図-3 GPS の測位概念図⁹⁾

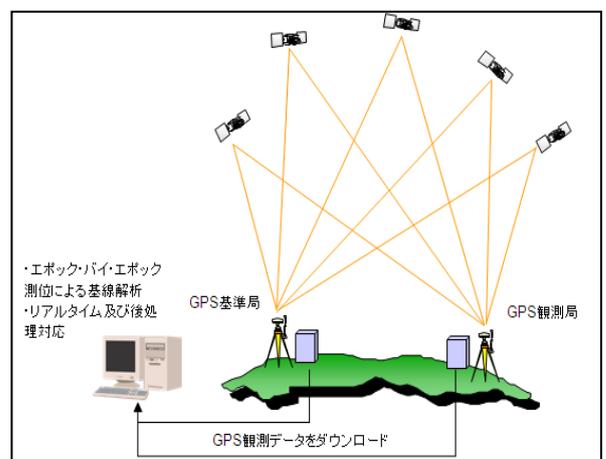
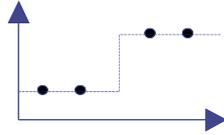
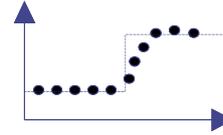
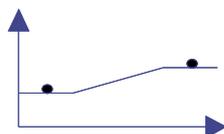
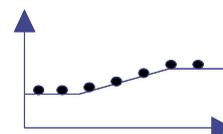
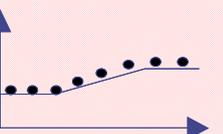


図-4 RTD-GPS の自動観測システムのイメージ図⁹⁾

表-1 代表的な GPS 測位法の得失整理表

(6), 7), 9)を参考に作成

項目	スタティック	RTK	RTD (Epoch-by-Epoch™)
解(座標値)取得までの待機時間	1時間~数時間	数10秒~数分 (初期化時間)	データ受信後瞬時 (1エポックのデータのみで決定)
リアルタイム性	×(後処理)	○	◎
精度(水平)	5mm+0.5ppm程度	1cm+2ppm程度	1cm+0.2ppm程度(1エポック) 2mm+0.2ppm程度(24時間)
基線解析	長時間の観測データから基線解析 (平均的な解)	フィルタリングを元にした基線解析 (予測的な解)	エポック毎に独立した基線解析
観測条件	・後処理解析限定 ・観測中の観測点の移動は許されない(固定点に限定される)	・リアルタイム観測が可能 ・2周波受信機のみ対応(高価) ・突発的、予測できない挙動の検知は困難	・突発的、予測できない挙動検知が可能 ・観測点は固定点・移動点ともに区別なく利用可能
突発的変動に対して (解析結果のイメージ)	 事前・事後の変動量しか分かりません。	 フィルターで加工されてしまいます。	 正確に把握できます。
ゆっくり変動に対して (解析結果のイメージ)	 事前・事後の変動量しか分かりません。	 フィルターの影響も小さいため追従できません。	 正確に把握できます。
GPS受信機の価格比較	○	×	◎

(2) GPS 観測局における支柱構造について

GPS 観測は図-3～図-4に示す様に、複数のGPS衛星からの電波を解析し、地上の自身の位置を知る測位法であるため、必然的に上空視界の確保が大きな設置上の制約条件となる。このため、一般的には径40mm程度のポールを数m立ち上げ、その頂部にGPSアンテナを搭載し、支線を展張してアンカーで固定する方法がとられる。この方式では短期間の観測ならば、求められる観測精度から見ても許容ができる構造といえる。しかし、常時は限りなく「ゆっくり」滑動する地すべりの水平変位を数mm単位で捉えつつ、ダム緊急放流時にはその観測精度よりもむしろ、地山変位が累積していく傾向も含めリアルタイム監視を続ける必要が求められる様な場合においては、支柱の「たわみ」や「風による揺れ」による測定誤差は無視できない問題となる。

また、本システムでは将来展望として、GPS観測データを別途蓄積しつつ、スタティック後処理解析を行うことが期待された事から、これらの誤差を可能な限り排除することが望まれたため、本観測システムでは、特に写真-2に示す様な基礎コンクリート上に約4mの段付き鋼管製の取付支柱をボルトで固定しGPSアンテナを搭載する形式とした。これによってGPS取付支柱の頂部での「たわみ」予想量は、風速60m/sを与えた場合でも約34.0mmから約2.5mm程度に押さえられ、上記のGPS観測以外の要因による誤差を排除できた(図-6)。



写真-2 GPS 観測局の全景

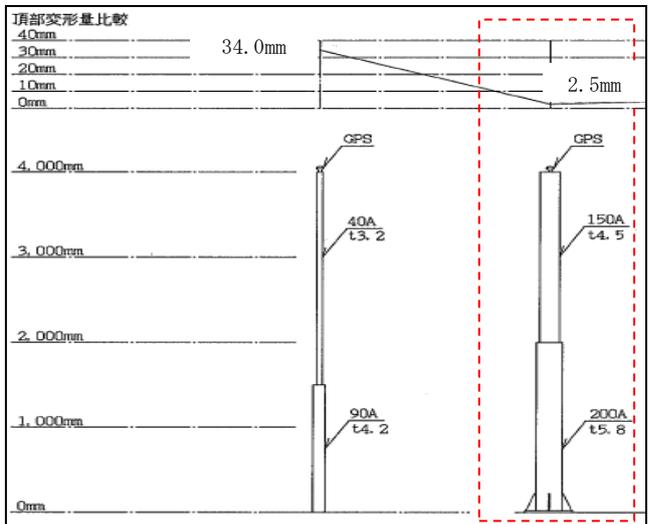


図-6 GPS アンテナ取付支柱頂部の揺れ幅の検討資料

(3) GPS 観測局・固定局と監視局間との通信について

本観測システムは、設計当初は他の既設地すべり自動観測システムとのシステム上での統合も視野に入れて検討されたが、各観測データのサンプリングタイムの違いやデータ通信量の違い、さらに通信手段の違いなどから、スタンドアロンタイプの観測システムとして構築した。また、各観測局、固定局と監視局間では高密度でのデータ通信環境が整っていた事が判明したため、観測データの通信は固定 IP アドレスを局毎に取得し、NTT インターネット回線（フレッツ ISDN 回線）を使用してリアルタイムにて情報通信を行った。

図-7 に本観測システムのシステムネットワーク概要図を示す。なお、監視局に常時集積された各観測局・固定局の GPS データは、システムサーバーに全て蓄積し、将来的にスタティック測位による後処理解析用の基礎データとして活用できるように、データ保全機能を追加した。

(4) GPS 監視局の表示イメージについて

GPS 監視局では、既存地すべり観測システムの表示面で比較ができるように、パソコンの表示モニターは既設システムと共用させ、キーボードファンクションキーを切替えることで、共に監視できる様にした。また、観測データは水平変位の成分 (X, Y)、垂直変位成分 (Z) として表示して、且つ GPS 衛星の捕捉状態も瞬時に確認できる形とし、表示モードでは各観測局における地すべり挙動の累積傾向を把握できる形とした。

図-8 ~ 図-9 に本システム監視局のモニター表示例を示す。

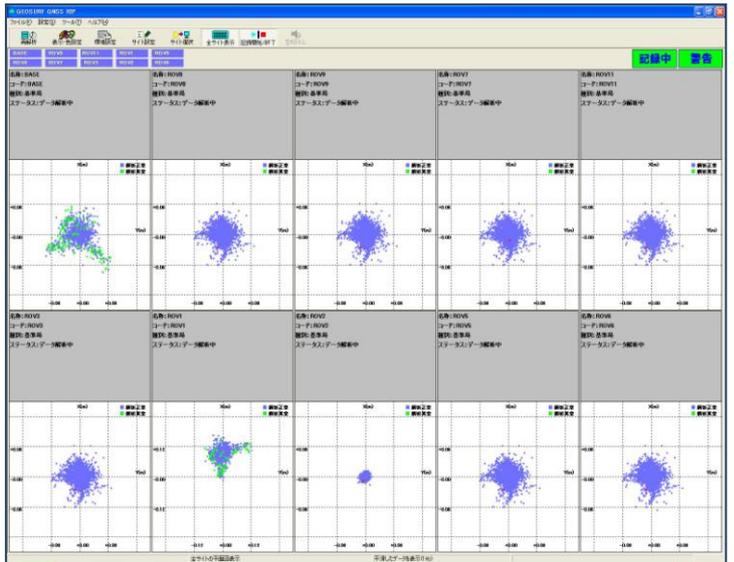


図-8 RTD-GPS 地すべり自動観測システム表示モニター

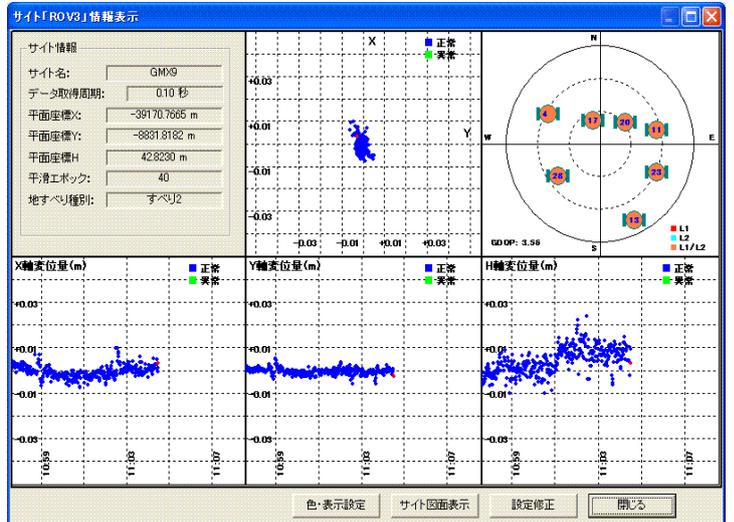


図-9 各観測局の観測モニター表示例（平滑処理後）

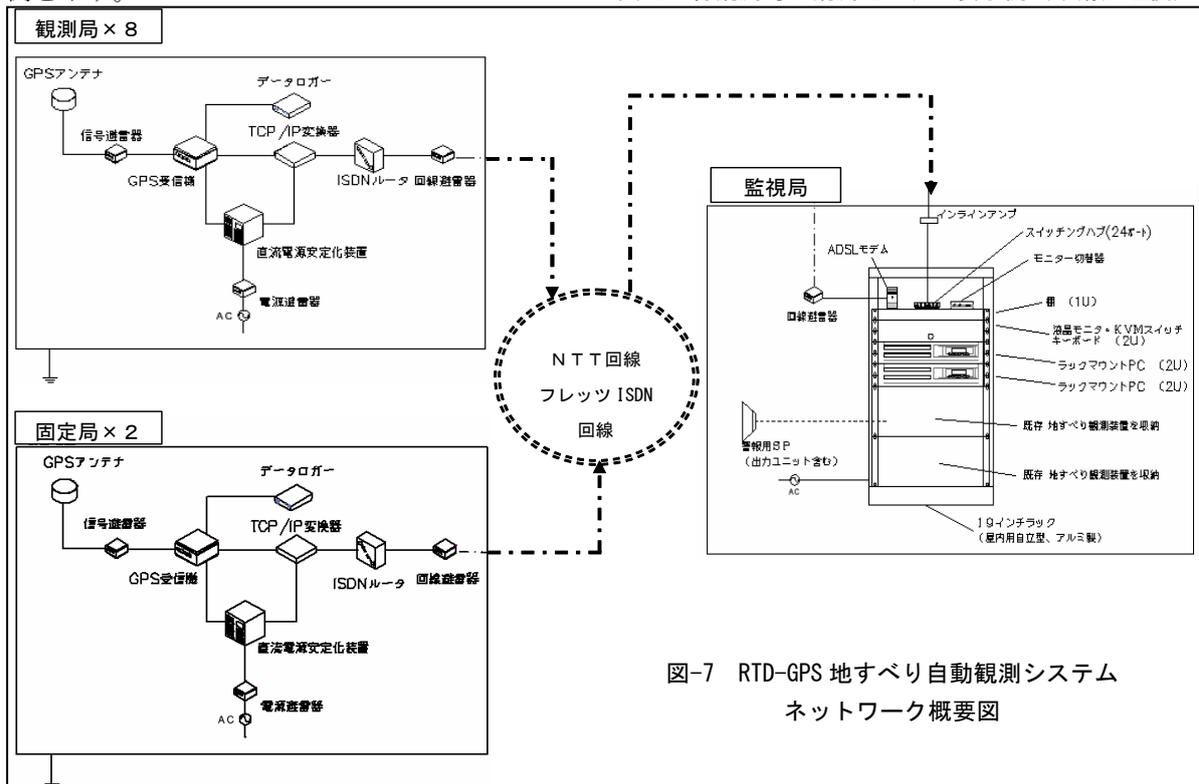


図-7 RTD-GPS 地すべり自動観測システムネットワーク概要図

5. RTD-GPS 地すべり自動観測システムの今後

本観測システムは数年前から実施設計がなされ、仕様調整を繰り返しつつ構築されたもので、これから観測システムの本格的な運用と観測データの蓄積が開始される。

RTD-GPS 測位法は、スタティック測位法における水平変位に近い高い解析精度と、同測位法では不可能なリアルタイムでの観測データ表示、並びにこれを基に監視局側にて解析・処理する機能を兼ね備えている。また、Epoch by Epoch™方式での基線解析手法を用いているため、RTK-GPS 測位法のように GPS 観測データがフィルタリングによって、機械的に二次処理をされてしまうこともなく、且つ緊急時には、地すべり挙動を「生データ」状態にて累積傾向などについて監視ができる利点がある。また、平常時には大量のGPS観測データを得られることから、これらをサーバー内に蓄積し、後処理解析ではあるがスタティック測位法による精密解析を行うことで、より高精度の観測成果も得られる。

しかしながら、本観測システムの導入が望まれる中山間地のダム貯水池域では、GPS観測局からリアルタイムに発信される観測データを常時監視局へと通信する社会基盤整備が完全に整っている訳ではなく、新たな通信インフラの整備が必要となってくる。

今後は、観測局側でのGPS観測データの一時蓄積機能や簡易的な解析処理機能の付加などについて模索して観測データの欠測の低下を強化しつつ、監視局側ではGPS観測データを長期蓄積し他の地すべり観測機器からの観測データとも比較・検証を行うなどして、GPS観測データの「地すべり管理基準値」としての適用性、すなわち警戒避難体制における「警戒、警報」などの発令基準値として活用できる様にシステムの改善を行っていきたい。

謝辞：本報告を行うにあたり、本観測システムの構築に携わった関係各位には、現地での指導も含めて多大な技術的な指導や御鞭撻を賜った。ここに改めて深く謝意を表します。

参考文献

- 1) ヤフー-japan ニュース
<http://headlines.yahoo.co.jp,20080526>
- 2) 時事ドットコム
<http://www.jiji.com/jc,20080526>
- 3) 貯水池周辺の地すべり調査と対策 1995
旧)建設省 河川局開発課監修, (財)国土開発センター編集
- 4) 災害復旧事業における地すべり対策の手引き 2006
地すべり災害復旧技術研究会編集, (社)全国防災協会発行
- 5) 日本の地すべり—第6版—
(社)日本地すべり学会 2002
- 6) GPS 測量と基線解析の手引き—改訂版—
土屋淳, 今給黎哲郎著 (社)日本測量協会
- 7) 新・GPS 測量の基礎
土屋淳, 辻宏道著 (社)日本測量協会
- 8) 地すべり管理基準値の実態調査報告書
旧)建設省土木研究所資料第 3184 号
- 9) RTD-GPS の測位方法 2006
ジオサーフ(株)技術資料
- 10) GPS スタティック測位法・RTK 測位法を併用する地すべり自動観測技術について
H15. 近畿地整管内技術発表会

(2008. 5. 16 受付)