

# GPS 自動計測サービスを利用した地すべり計測とトンネル施工への適用

渡 辺 修 二・野 田 雅 夫・武 智 国 加

建設中の高速道路トンネルの坑口付近には地すべり地形が認められ、トンネル土被りは最大でも 2.5D 程度と小さく、掘削に伴う地すべり変位の発生が懸念されていた。地すべりの活動や地山の緩みによる地表面沈下を監視するため、トンネル CL 上及び主要な横断方向に GPS センサーを設置し自動計測を実施した。上半切羽が土被り 1D 未満の区間に達した時点で地すべり変位が計測されたことから、上半掘削から地山への影響の少ない導坑掘削へ変更して貫通させ、地山への影響や地すべり活動を最小限に抑えることができた。

キーワード：トンネル，地すべり，坑口，地表面沈下，GPS，自動計測

## 1. はじめに

国土の大部分を占める山間部において、新しい道路の建設に際しては、地すべり地や急傾斜地を避けることはほとんど不可能であり、何らかの対策を施しながら建設されている。これらの建設にあたっては、斜面の安定対策に万全を期すとともに、対策工の効果確認や施工の安全性確保などのために、高精度な計測技術が必要とされている。また、供用開始後の維持管理においても、斜面の安定性評価や対策工の健全性評価、保守等の目的で高精度計測のニーズは多い。

本稿では、GPS 自動計測システムの概要を述べた後、地すべり区域内におけるトンネル工事において GPS 自動計測により施工時の安全確保及び施工方法変更に応用された例を紹介する。

## 2. GPS 自動変位計測システムの概要

GPS 自動計測システム<sup>1)</sup>の概念図及び計測手順を図—1 に示す。

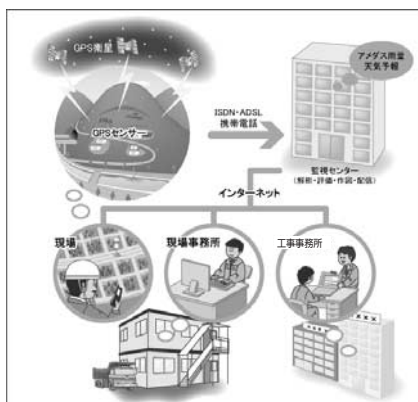
GPS は人工衛星を用いた測位システムで、測量やカーナビゲーションなどに広く利用されている。しかし、従来測量用途で使用されていた GPS 機器は高価で解析処理が煩雑なこと、計測精度が地盤計測で必要とされる mm 単位に達しないことから、建設施工における計測にはほとんど利用されていない。そこで、本システムでは次のような改善を行った。

### (1) 小型軽量・安価な新型 GPS 計測機器

本システムでは、土木計測用に新規開発された小型軽量で安価な GPS 計測機器を使用することで、計測コストの低減を実現した。GPS 計測機器の構成を図—2 に示す。

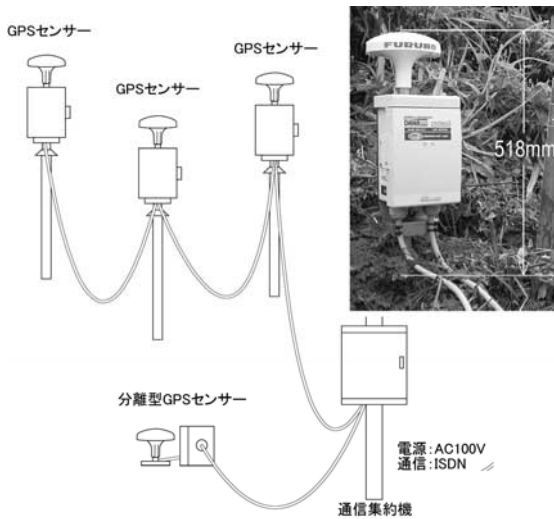
計測点及び基準点に設置した GPS センサーを専用ケーブルで数珠つなぎに接続し、計測データを通信集約機に送る。通信集約機では計測データを蓄積し、インターネットを介して監視センター（図—1）に送信する。

センサー部は軽量で設置作業も比較的容易な構造となっており、可動部がないためメンテナンス性に優れ、耐久性があることから長期間の計測にも適している。



- ① GPS センサーでは、GPS 衛星からのデータを 30 秒に 1 回受信する。
- ② GPS 受信データ 1 時間分を 1 ファイルにまとめ、通信回線により監視センターへ転送する。
- ③ 監視センターで GPS 基線解析を行い三次元座標差を算出した後、時系列統計解析処理（トレンドモデル）により真の変位値と誤差成分に分離し mm 単位の変位検出を行う。
- ④ 計算処理後、変位量を監視センターの監視技術者が確認する。
- ⑤ インターネットを介して、計測結果が配信される（図—5 参照）。
- ⑥ 施工者、管理者は、パソコンや携帯電話からインターネットを利用して、GPS 計測結果を閲覧できる。

図—1 GPS 自動計測システムの概要



図一2 GPS計測機器の構成図

## (2) インターネット配信と監視センター方式

本システムでは、通信回線にインターネットを利用している。計測現場で取得したデータは、料金固定で安価なフレッツISDN・ADSLなどの通信回線やインターネットを利用して監視センターに送られる。

監視センターでは、全国各地の計測現場の計測データを一括して解析処理するため、従来、現場毎に必要なであった解析システム（電子計算機と解析ソフトウェア）は不要で、解析コストが低減されるうえ、計測結果は時系列変位図や計測値一覧表、ベクトル変位図、構造物計測の際の傾斜角表示など、計測現場・対象毎に異なるさまざまな様式の表示が可能である(図一3)。

これら計測結果の確認は、インターネットに接続できるパソコンや携帯電話があれば、24時間いつでもどこでも可能である。そのため、すべての施工・管理関係者がリアルタイムに情報を共有することができるうえ、例えば日報や月次報告など煩雑な報告作業を低減できるなど、利便性が向上している。また、計測目的やデータの必要精度に応じて計測・解析頻度を変えることにより、より安価な計測・監視システムを提供することが可能である。

なお、監視センターでは地盤変位を24時間常時モニタリングしており、変位量が警戒基準値を超えた場合には監視技術者が確認のうえ、関係者に通報する。あわせて、GPS機器の状態も監視しているため、万一の障害時の対応も迅速に可能である。

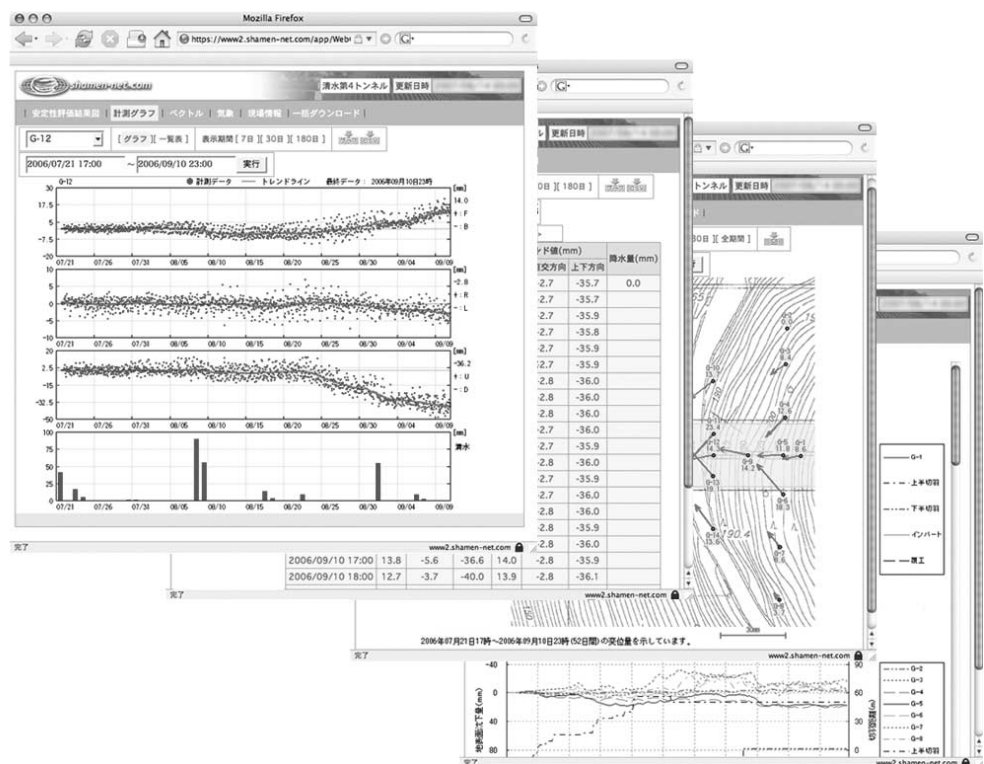
## (3) トレンドモデルによる誤差処理

本システムでは、GPS計測値の誤差処理に清水らが提案するトレンドモデルを導入した<sup>2), 3)</sup>。この方法は、トレンドモデルと呼ばれる確率構造を持った時系列統計解析モデル<sup>4)</sup>を用いて、ノイズを含むGPS計測値から真の変位挙動を推定するものである。図一3の実点は誤差処理前のGPS計測値で、実線がトレンドモデルによる誤差処理後の値である。本システムでは、トレンドモデルによる誤差処理を行うことで、mm単位の変位計測（水平方向で±1mm程度、鉛直方向で±1.5～2mm程度）を実現している。

## 3. 地すべり区域におけるトンネル施工現場での計測

### (1) 第二東名高速道路の概要

第二東名高速道路は混雑が著しい現東名高速道路との適切な交通分担機能を持ち、神奈川県海老名市（圏央道海老名南JCT）～愛知県豊田市（東名高速道路



図一3 計測結果配信画面例（左から、変位グラフ、計測結果一覧表、変位ベクトル図、地表沈下図）

豊田JCT)間の総延長約250kmで中日本高速道路(株)が建設中の路線である。そのうち、清水工事事務所では静岡市葵区平山～清水区灰原間15.5kmの建設を進めている。清水第四トンネルは静岡市清水区伊佐布～葵区平山間に位置する延長2.1kmのトンネルである(図—4)。



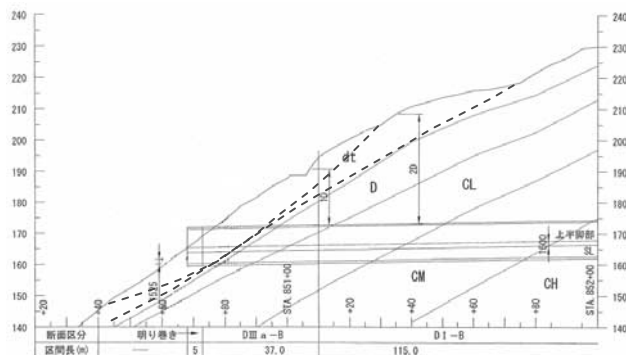
図—4 清水第四トンネルの位置

## (2) 地すべりの概要

当該地は静岡市葵区平山に位置し、地質構成は、南北の帯状に新第三紀の静岡層群の砂岩や砂岩泥岩互層を主体とし、断層やリニアメントが見られる地質構造となっている。当該地周辺にはいくつか地すべり地形が存在しており、終点側坑口付近には層厚が最大20m程度の崩積土層が分布し、斜面勾配が約30°程度の地すべり地形を呈している。

## (3) GPS計測の概要

清水第四トンネル建設工事では、起点側坑口から片押しで掘削され、終点側に分布する地すべり土塊内を通過し末端部に坑口が形成される計画となっており、トンネル掘削による地山の緩みに起因する地すべりの活動が懸念された(図—5)。そこで、掘削による緩みに伴う地表面沈下を計測するとともに、地すべり活動による変位を監視するため、GPS自動計測システム



図—5 トンネル坑口と地すべりブロック

ムを利用することとし、以下に述べるGPS計測点配置とした。

GPSセンサーの設置に当たっては、上空視通確保などの理由から通常1～2m程度の支柱を用いて設置するが、当該地では地すべりの活動によって支柱に傾きが生じることも予想され、計測誤差の要因ともなることから、のり尻部など上空視通の確保が困難な一部箇所を除き、無支柱(センサ高約0.5m)で設置した。

計測頻度は、1時間に1回24時間連続の自動計測・配信を実施した。

(a) トンネル縦断方向の地表面沈下計測(G-1, 5, 9, 12, 18, 22, 23, 26)

土被りが2D(D=17.8m)以下の範囲でトンネルセンター上に5～20mピッチで8点配置し、切羽の進行に伴う地表面沈下計測(トンネルA計測)を行うとともに、3次元の計測結果より、地すべり活動に起因する変位を把握するものとした。

(b) トンネル横断方向の変位監視(G-5, G-12, G-18, G-26 各測点のトンネル軸直交方向)

トンネル掘削による影響範囲(底盤から45°の領域)について、地表面沈下計測(トンネルB計測)を行う。トンネル軸と直交方向へ配置することにより、地すべり変位の平面的な範囲を把握できるものとした。

(c) 上り線坑口のり面への影響監視(G-15, 21, 24)

当該トンネル北方に3D離れて上り線トンネルが竣工しており、トンネル掘削により上り線坑口のり面への影響が懸念されることから、のり肩部に計測点を配置し、影響を監視するものとした。

(d) 基準点

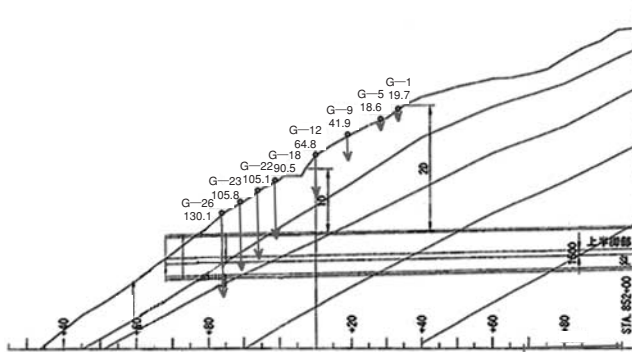
基準点はほぼ不動で、地すべりや工事の影響範囲外かつ上空視通の確保できる場所が求められる。当該地においては、トンネルから北方に60m離れ、掘削による影響範囲外となる林道脇地点に配置した。

## (4) 管理基準値の設定

管理基準値の設定にあたっては、地すべり地であることを考慮し、地表面沈下計測における基準値に加え、地すべりに対する管理基準値を参考とした。しかし、当該地では地すべりよりも変状速度の速い斜面崩壊に近いタイプの変状発生が予想されるため、上り線トンネル施工時に坑口斜面で実施した計測結果を加味し、表—1のように設定した。

表一 1 動態観測管理基準値

安全管理体制区分	注意体制	要注意体制	嚴重警戒体制
トンネル軸方向変位速度	3.5 [mm/5日] 以上	1.5 [mm/1日] 以上	15 [mm/1日] 以上
対応・対策工	地表面点検 作業員への注意強化	施工一時停止 地表面詳細調査 斜面下方への変位挙動の 累積傾向を調査、把握	施工停止 一時退避 立入禁止措置 坑外対策工(押え盛土工)



図一 6 トンネル CL 上の地表面沈下量 (12月20日インバート終了時)

#### 4. GPS 計測結果と施工上の対応

トンネルセンターライン上の各計測点における地表面沈下図を示す(図一6)。土被りが薄いほど地表面沈下量は大きくなっており、インバート工終了時に最大値はG-26で130 mmとなった。

トンネル掘削と地表面変位について以下にまとめる。

##### (1) 地表面沈下と切羽進行

トンネル切羽進行と地表面沈下には切羽が近づくにつれ沈下量が増加し、明瞭な相関が見られる。また、平面的に見ると、切羽に向かう変位が認められ、切羽の進行とともに水平変位方向が切羽を追うように変化する状況を明瞭に計測している(図一7)。

##### (2) すべり方向変位と切羽進行

トンネル軸と斜面の最大傾斜方向(地すべりの変位方向)が一致しているため、切羽の進行とともに地表面の変位が全てすべり方向変位となった。土被りが0.5Dを下回る区間に上半切羽が接近した時点で、管理基準値の要注意基準(1.5 mm/1日)を超過する変位が計測されたため、施工方法を変更し、トンネル掘削工事を進めた。次項に詳細を述べる。

##### (a) 上半掘削の一時中止と導坑掘削

上半切羽がSTA850 + 89.8まで達した時点で、連続する4つの計測点(G-12, 18, 22, 23)の変位速度が、

一斉に管理基準値の1.5 [mm/日](要注意体制)を超過した。このため、作業を3日間中止し経過を観察したが変位は引き続き累積傾向が見られた。これを受け、上半掘削を一時中止し、地山への影響の小さい導坑掘削に切り換え、坑口まで貫通させた。図一8にG-23におけるトンネル切羽進行と地表面沈下、すべり方向(斜面下向き)変位の関係図を示す。

##### (b) 導坑部の上半掘削

上半掘削は坑口の明かり掘削の完了を待って再開した。この際も地表面の変位は引き続き管理基準値を超過していたが(G-22, 23, 26)、万一、地すべりが発生した場合でも範囲は林道(G-18直上)より下側で発生すると予想された。このため、林道への影響はないものと判断し、工事を継続して本坑上半を貫通させた。

##### (c) 下半掘削

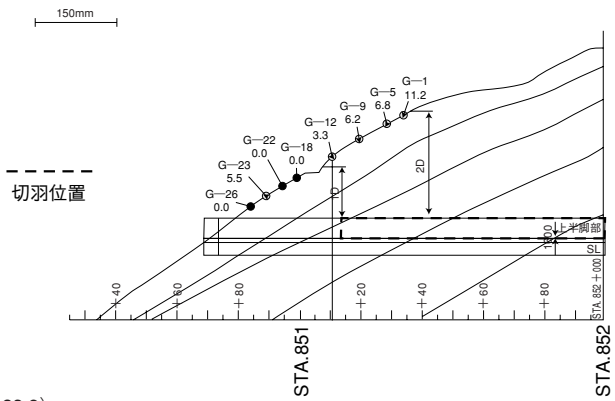
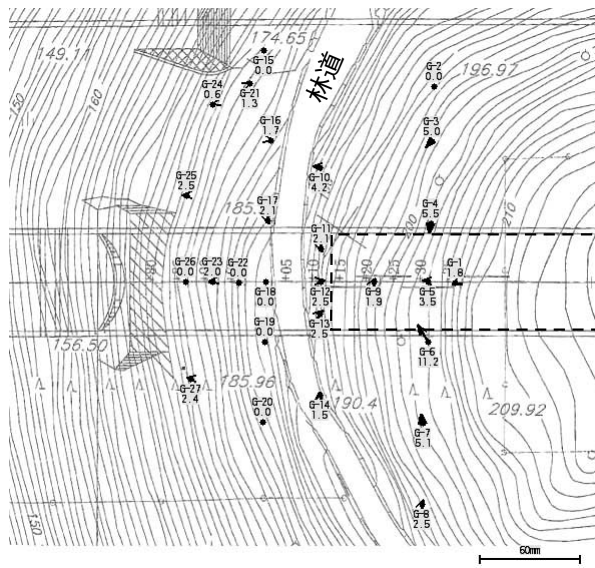
上半貫通後、下半掘削を再開した。下半掘削時の地すべりの管理基準値は特に決めていなかったが、上半部による地すべりの抑止効果を考慮し、また、計測されている変位は掘削による地山の応力再配置によるもので、上半掘削時の管理基準を超過してもすべりは発生しないと判断したため、掘削進行速度を落とし、地表面の変位や現地の変状の有無を十分監視しながら下半を貫通させた。

##### (3) トンネル周辺への影響

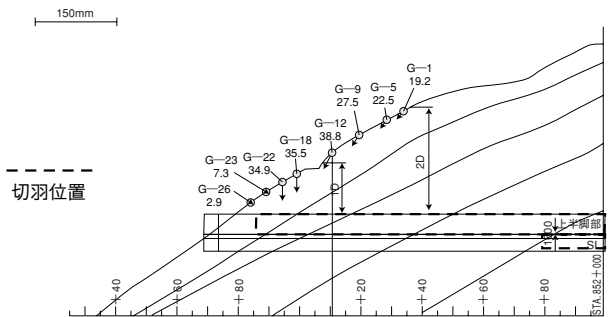
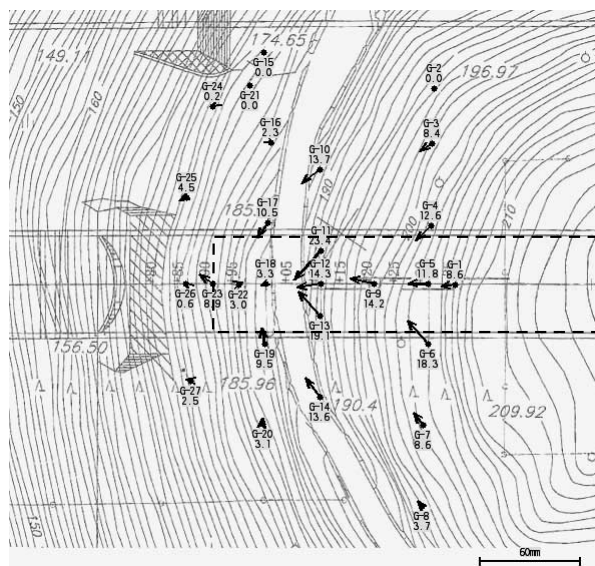
トンネル軸方向の各計測点における沈下状況をみると、離隔距離が小さいほど沈下量が大きく、周辺への影響が大きくなることが明瞭である(図一9)。上り線坑口のり面に配置した計測点では工事中10 mm未満の変位、沈下であり、ほとんど影響ないものと判断された。

#### 5. まとめ

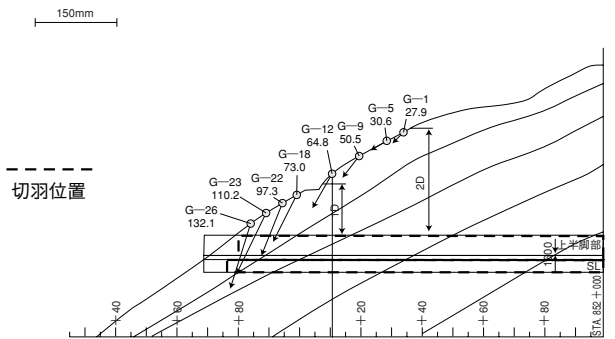
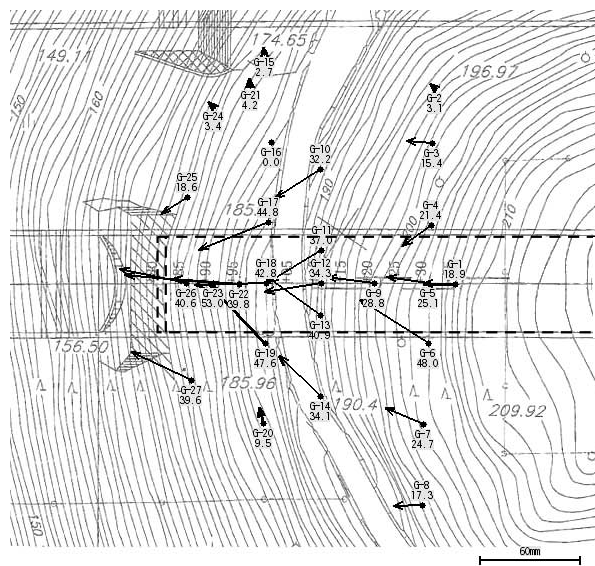
トンネル坑口の地表面計測では、トンネル掘削による周辺地盤への影響を確認するために沈下計測が行われるが、当該地のような地すべりが懸念される場合に



2006年8月10日（上半切羽：STA851+14.8，下半切羽：STA852+23.8）



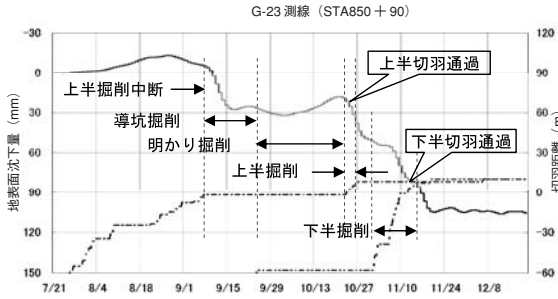
2006年9月10日（上半切羽：STA850+91.8，下半切羽：STA851+79.8）



2006年11月20日（上半切羽：STA850+81.8，下半切羽：STA850+79.8）

図一七 トンネル切羽進行と地表面変位

沈下一切羽進行相関図



FB一切羽進行相関図 +:すべり方向 -:すべり反対方向

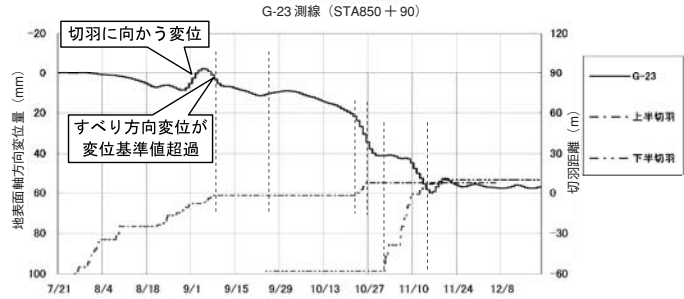
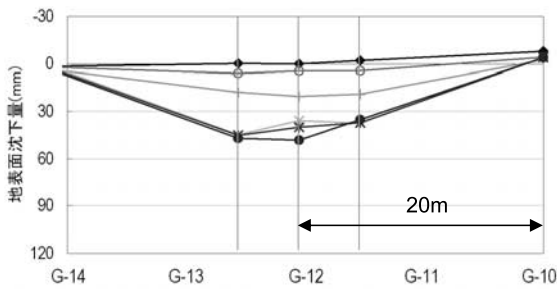


図-8 G-23における地表面変位の詳細

STA851+10



STA851+0

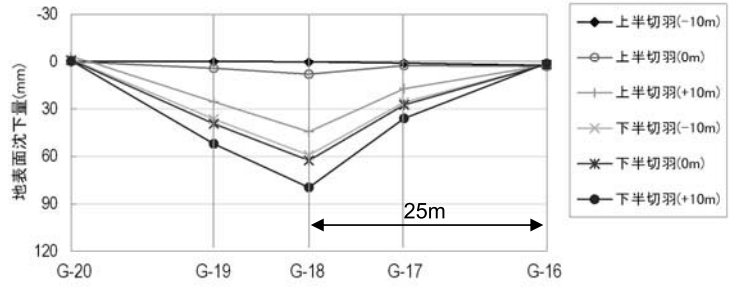


図-9 G-12, 18 測線における地表面沈下と切羽進行

は、沈下方向だけでなく地すべりの変位を計測することが必要である。3次元の計測が可能な本システムにより、その目的を達することができた。

地すべり地におけるトンネル施工でのGPS自動計測システムの適用の結果、変位を24時間連続で計測・監視し、計測結果をリアルタイムで参照できることにより、地すべりの活動状況にあわせ、工事の中断や地山への影響が小さな工法の選択など作業安全性の確保や情報化施工に本サービスが有効であることが確認された。

今後、性能設計への本格的な移行とともに、ますます高精度計測のニーズは増加するものと考えられ、多様な条件下においても安定して高精度・迅速に計測するための計測技術の向上が必要である。

これまで述べたように、GPS自動計測システムは従来の地盤計測手法と比較して、十分な計測精度と利便性、経済性を有しており、今後も建設工事と土砂災害にかかわるさまざまな場面での活用が期待される。

JCM/A

《参考文献》

- 1) 岩崎智治, 武智国加, 武石 朗, 清水則一: 道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発, 土と基礎, Vol.50, No.6 (533), pp.25 ~ 27, 2002.
- 2) 清水則一, 安立 寛, 小山修治: GPS変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究, 資源と素材, Vol.114, pp.397 ~ 402, 1998.
- 3) 松田浩朗, 安立 寛, 西村好恵, 清水則一: GPSによる斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.333 ~ 343, 2002.
- 4) 北川源二郎: FORTRAN77時系列統計解析プログラミング(第四版), 岩波書店, 1997.

【筆者紹介】



渡辺 修二 (わたなべ しゅうじ)  
中日本高速道路(株)  
横浜支社清水工事事務所  
清水西工事長



野田 雅夫 (のだ まさお)  
大林組・三井住友建設・鴻池組共同企業体  
清水第四トンネル工事事務所 課長



武智 国加 (たけち くにか)  
国際航業(株)  
事業開発本部 shamen-net 事業推進部  
技術開発グループ 課長