

GPSによるトンネル坑口斜面の3次元変位連続計測 - 上空障害物の影響低減法の適用 -

生田 圭介^{1*}・平川 隼敏¹・清水 則一¹・松田 博朗²・筒井 隆規³

¹山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²飛鳥建設株式会社 技術研究部 (〒270-0222千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

³飛鳥建設株式会社 西日本土木支社 (〒732-0824 広島県広島市南区的場町1-7-10)

*E-mail: ikeda@lock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネル建設工事において、特に坑口付近は掘削の影響が大きく、工事の安全性確保などを目的とした動態観測が有効である。GPSは自動連続的に3次元変位が計測可能であり、安全監視手法として有用である。しかしながら、トンネル坑口においては、電波の受信障害となる植生が存在する場合も多く、計測精度の低下により、GPSの坑口付近の安全監視への適用には課題があった。

本課題を解決する方法として、上空障害物による電波受信環境が悪い現場におけるGPS変位計測に関して、その影響を軽減させる手法の適用が考えられる。本報告では、トンネル坑口上部斜面におけるGPS変位計測結果に上空障害物の影響軽減手法を適用した事例を示す。

Key Words : GPS, displacement measurement, tunnel entrance, slope stability, improvements of accuracy

1. はじめに

山岳トンネル建設工事において、特に坑口付近は掘削の影響が大きく、崩壊につながるような大きな変形が生じる場合もある。工事の安全性確保や対策工の選定・効果の確認には、動態観測による計測管理は有効である。

一方、GPS (Global Positioning System) は多点同時に3次元変位の連続自動計測が可能であり、動態観測手法として有効である¹⁾。今後、さらにその有効性を高めるために、GPS固有の誤差要因に対して対処し、より高精度化を行うことが望ましい。

GPS変位計測の誤差要因としては、図-1に示すように、a) 上空障害物による電波の乱れ、b) 気象影響による電波遅延、c) マルチパス、による3つの主要な要因がある²⁾。

GPS変位計測においては、GPS衛星からの電波を受信するため、上空の視界が開けていて、かつ周囲に電波を反射するような構造物がないことが望ましい。

しかし、トンネル坑口においては、電波の受信において障害となる植生が存在する場合も多く、計測精度が低下することから、GPS変位計測技術を坑口付近の動態観測に適用することには課題があった。

著者の一人は、上空障害物による電波受信環境が悪い現場におけるGPS変位計測において、その影響を軽減させ計測精度を向上させる手法を検討した³⁾。そして、その手法をトンネル坑口斜面の試験計測結果に適用し、その有効性を確認した⁴⁾。

本研究では、GPS変位計測システムをトンネル坑口上

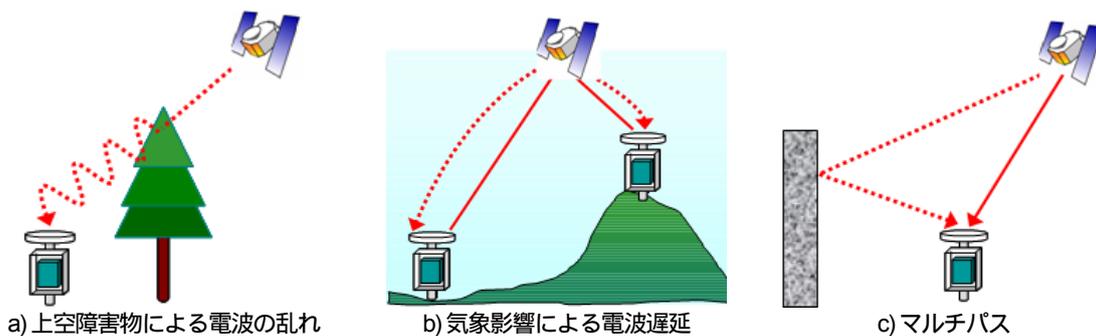


図-1 GPS変位計測の誤差要因

部斜面の計測管理に本格的に適用し、さらに、上空障害物の影響低減法を適用し、この方法の実用性について検討している。本報告では、その結果の一部を紹介する。

2. 上空障害物の影響低減手法の概要

GPSによる変位計測は、天候の影響を受けにくい、計測点間の視通を要さないなど、従来の計測機器にない特長を有しているものの、計測点上空に障害物がある場合、変位計測精度が低下するといった地盤変位計測への適用において大きな課題が存在する。

そのためGPS計測では、障害物の存在する環境下での計測を避けるために、上空視界が良好な位置を選んで計測する、あるいは、障害物となる樹木を伐採する、など障害物を除去する方法で対処されてきた。

著者の一人は上空障害物の影響を受けたGPS衛星からの電波を、基線解析（人工衛星からのデータを用いて計

測点の座標を求める解析のこと）において用いないことで、障害物による変位計測精度への影響を低減する手法を提案した³⁾。

実際には、計測点に設置したセンサー上空の写真を取り、障害物のある範囲を指定し（図-2参照）、その背後にある人工衛星からの電波を用いないようにする。この一連の処理をマスク処理と呼んでいる。

この処理によって、質のよい電波だけを用いて解析することができ、障害物の影響を除去して、精度の劣化が低減される。

3. 現場への適用

(1) 現場概要

山口県内のトンネル工事において、GPS変位計測システムを坑口上部斜面の計測管理手法として適用した。計測点（GPSセンサー）は坑口上部の斜面に3点、坑口付近の法面肩部に1点設置した。基準点は掘削の影響がおよばないように、坑口から100m程度離れた上空視界の良好な位置に設置した。図-3に計測領域全体の平面図を、また、図-4にセンサーの設置状況を示す。さらに、図-5は、基準点および計測点の上空写真である。

坑口斜面の上部は、用地境界の関係で植生に覆われ、計測点1から3のいずれも上空に木々による障害物が見られる。特に計測点1は、上空の50%程度植生に覆われており、受信状況が悪いことが予測される。

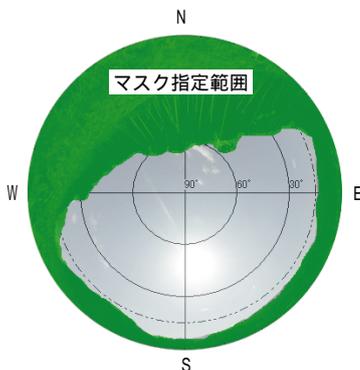


図-2 上空写真とマスク処理の例

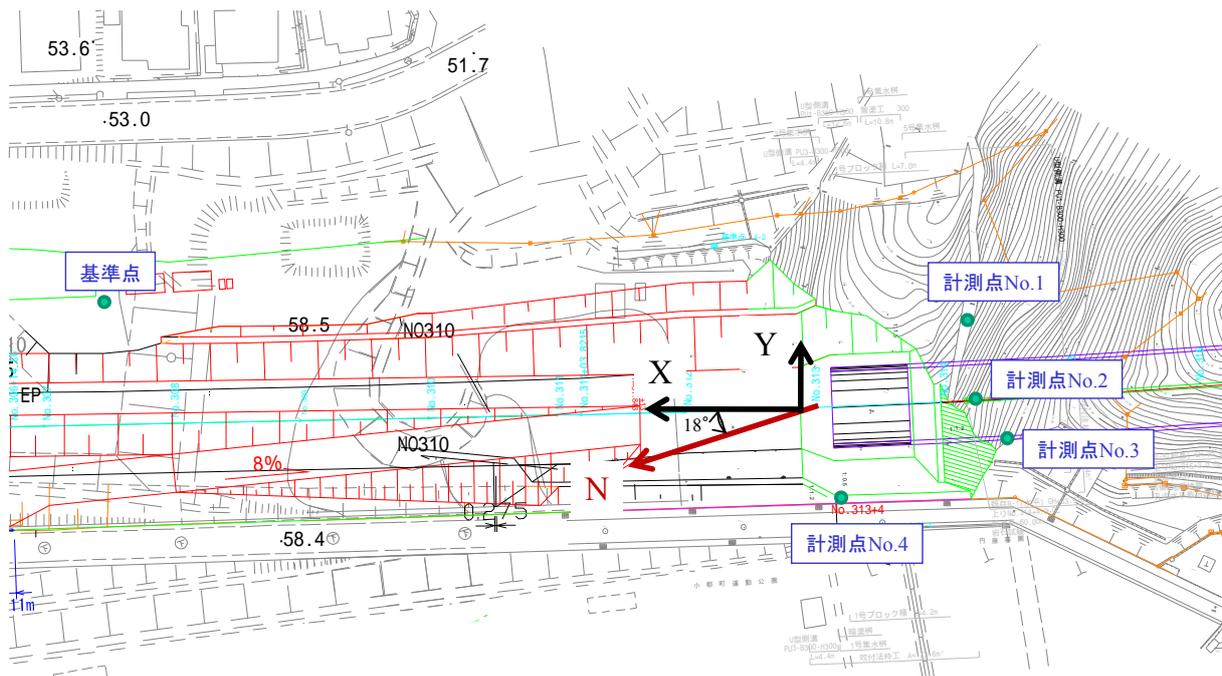


図-3 計測点配置



図-4 計測点設置状況

なお、データ取得間隔（エポック）は30秒であり、1時間にわたる受信データを用いた相対測位法（スタティック解析）により1時間間隔で変位を計測する。計測は自動連続的に実施され、計測結果はリアルタイムに得られる。

(2) 適用効果に関する検討

図-6に計測が開始されてから1ヶ月の、計測点3における計測結果を示す。図中、横軸は計測時刻、縦軸はそれぞれの方向の変位量を示す。X軸はトンネル進行方向、Y軸はこれに直行する方向で、H軸は鉛直方向上向きを示す（図-3参照）。また、印は本計測システムによる計測値、実線はその計測値のトレンドモデルによる平滑処理結果を示す。GPS変位計測結果に適用すれば、トレンドモデルの平滑化により高精度で計測結果を得られることが示されている⁵⁾。

図-6の計測結果に対して、図-5 c) の上空障害物に対してマスク処理した結果を図-7に示す。

図-6 および図-7 から、X 軸、Y 軸および H 軸方向の計測結果のばらつきは、マスク処理によって小さくなり、標準偏差は X 軸では 6.0mm が 2.3mm に、Y 軸では 3.0mm が 1.2mm に、H 軸が 8.2mm が 3.4mm となり、計測精度が改善されていることが分かる（表-1 参照）。

表-1 には、上空視界に障害物がほとんどない計測点 4 の変位計測結果の標準偏差が示されている。マスク処理によって、計測点 3 の標準偏差は、1/2 以下になり、障害物のない位置での計測精度とそん色ないまでに改善されている。

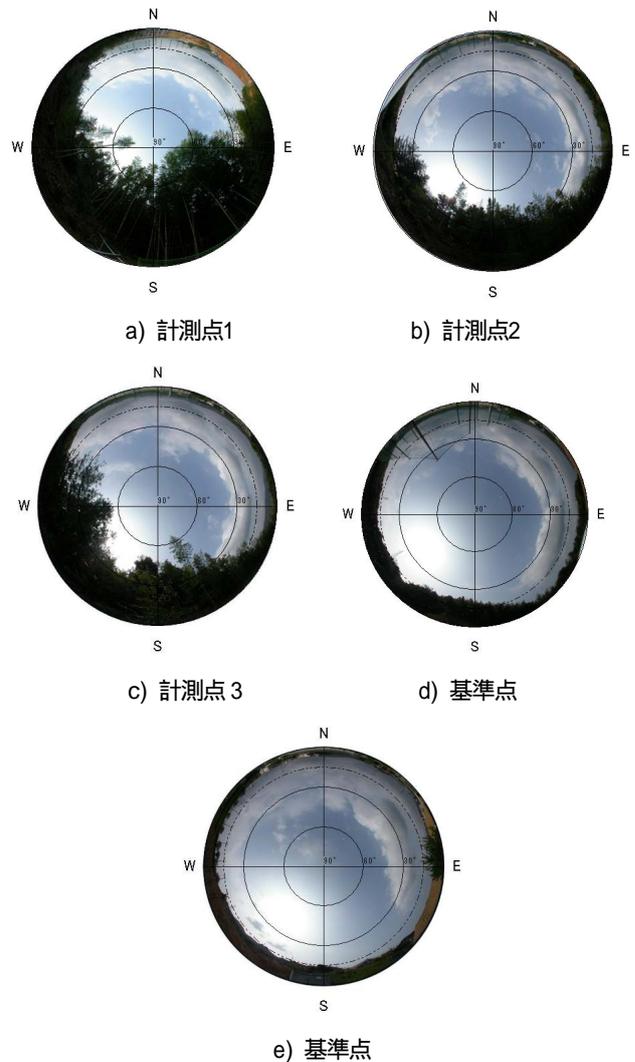


図-5 計測点・基準点の上空障害物の状況

表-1 影響低減手法有無の標準偏差

方向	計測点3 (上空視界が悪い)		計測点4 (上空視界が良い)
	処理なし	処理あり	処理なし
X軸	6.0mm	2.3mm	1.2mm
Y軸	3.0mm	1.2mm	1.1mm
H軸	8.2mm	3.4mm	2.3mm

4. 坑口貫通時の挙動

3章で述べたと上空障害物のマスク処理法を適用して、トンネルが貫通するまでの変位を計測する。

図-8 に、トンネルが坑口で貫通する前後の計測点 2 の 3次元変位計測結果と切羽位置を示す。図中横軸は年月日、縦軸は X, Y, H 軸方向（図-3 参照）の変位、および切羽距離である。上半は 2008 年 9 月 23 日、下半は 2008 年 9 月 30 日に貫通している。なお、この変位はマ

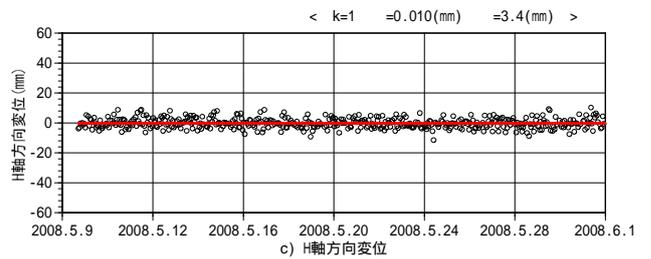
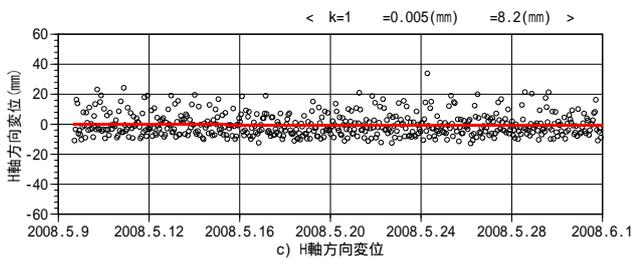
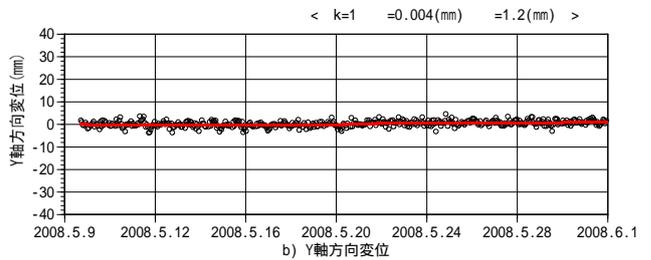
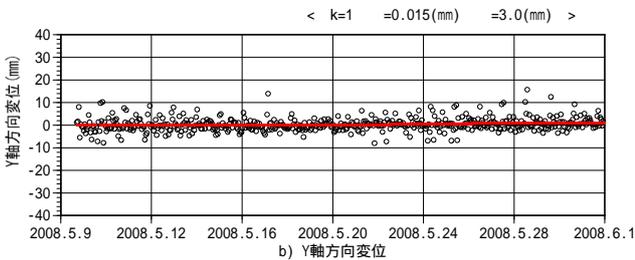
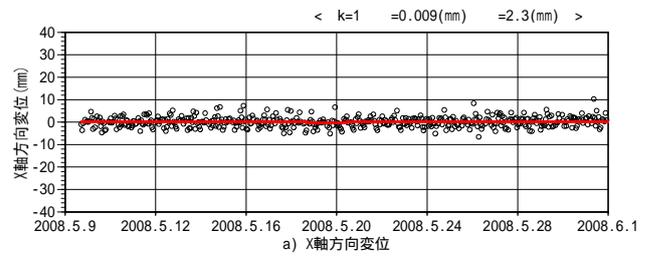
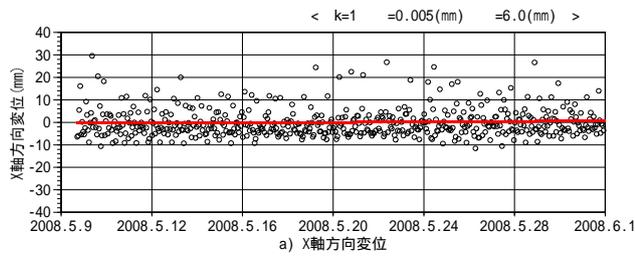


図-6 計測結果（処理なし）

図-7 計測結果（マスク処理あり）

スク処理を適用して得られたもので、2008年9月1日を基準としている。

切羽が計測点2を含む断面に近づくにつれて、計測点2（地表面）はH軸方向負、すなわち、沈下が単調に進行する。一方、X軸方向変位は最初はやや増加が見られるが、切羽が近づくで減少し始める。これはトンネル切羽方向に変位が増加していることを意味する。切羽が計測点2を含む断面を通過すると、沈下は単調に進行するが、切羽方向に向かう変位は反転し（X軸方向変位が負から正になる）、変位は坑口斜面方向へと向かう。Y軸方向変位は、正側に増加するが、これは地表面の傾斜の影響を受けてのことと思われる。

図-8において切羽位置の進行にあわせて4つの期間（図の記号1~4）を設定し、その期間ごとに変位ベクトルの増分をトンネル縦断面図および平面図内に記載して図-9に示す。計測点1および計測点3の変位ベクトルもあわせて示している。このように、切羽進行に伴うトンネル坑口斜面の変位を、絶対値だけでなく3次元的な挙動を詳細に得ることができる。

トンネル直上の計測点2および計測点3においては、当該断面を切羽が通過後は、斜面下向きに向かって変位しているが、経時的変化を見ると（図-8参照）変位は収束しており、坑口斜面は安定したことが確認される。また、計測点1はトンネル掘削箇所から離れている

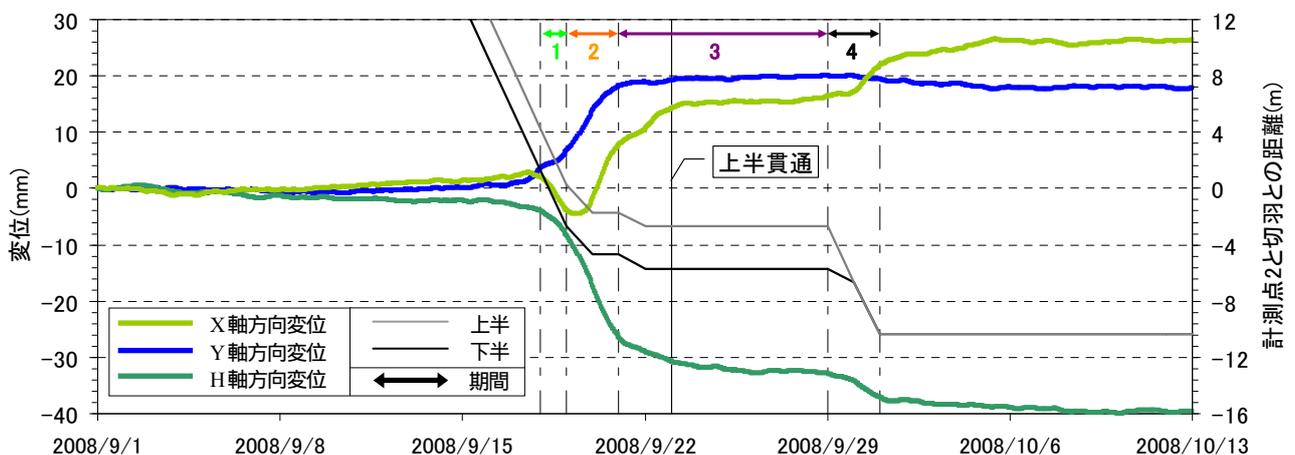
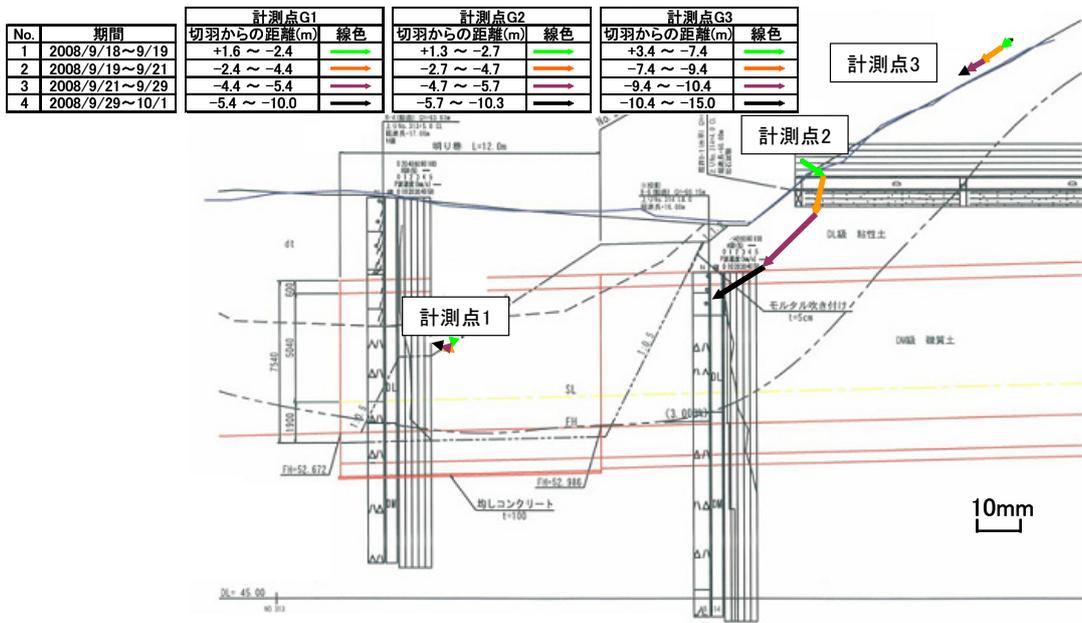
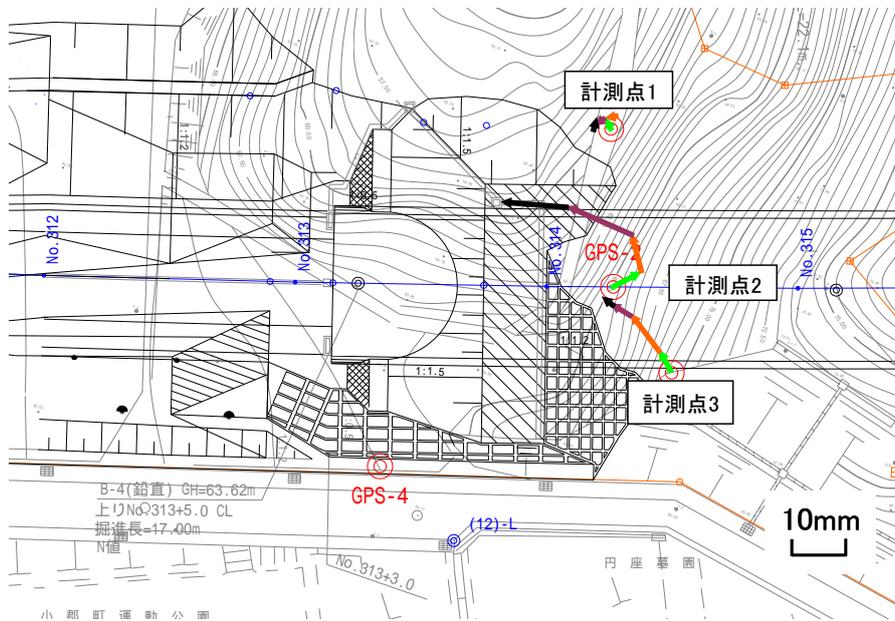


図-8 計測点2の計測結果と切羽との距離



a) 縦断面



b) 平面図

図-8 切羽の進行に伴う変位ベクトルの変化

こともあり、ほとんど影響がなかったことが分かる。

以上のように、本システムによって、上空に障害物が存在する場合であっても、複雑な3次元変位を精度良く連続的に計測できることが示され、計測管理に有効であることが検証された。

5. むすび

本研究では、トンネル坑口上部斜面の計測管理に、GPS変位計測システムを本格的に利用するとともに、上空障害物の影響低減法（マスク処理法）を適用し、計測

精度の向上を図った。

計測は、切羽掘削進行中も毎時間、自動連続的に実施され、トンネルが坑口部で貫通する際の坑口斜面の複雑な3次元変位が高精度に計測された。

計測結果は、トンネルおよび坑口斜面の安全管理に活用され、GPS変位計測システムおよび上空障害物のマスク処理法の有用性が検証された。

謝辞：本トンネル工事および現場計測に関わられた関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水則一：GPS による世界最高精度の三次元変位連続計測システムの開発と実用化～トンネル坑口部，長大斜面，地すべりの安全監視および情報化施工への応用～，2005 トンネル技術研究発表会論文集，pp.1-17，北海道土木技術会トンネル研究委員会，2005.1.
- 2) 増成友宏，清水則一：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, 437-447, 2007.10.
- 3) 増成友宏，武地美明，田村尚之，船津貴弘，清水則一：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, 2008.11.
- 4) 松田浩朗，筒井隆規，山本茂夫，中村賢治，平川隼敏，清水則一：トンネル坑口上部斜面における GPS 変位計測と上空障害物の影響軽減手法の適用，第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.621-626，2008.9.
- 5) 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.333-343,2002.9.

CONTINUOUS DISPLACEMENT MONITORING AT A SLOPE ABOVE A TUNNEL ENTRANCE BY USING GPS - APPLICATION OF A METHOD TO REDUCE THE INFLUENCE OF OVERHEAD OBSTACLES -

Keisuke IKEDA, Hyatoshi HIRAKAWA, Norikazu SHIMIZU,
Hiroaki MATSUDA, Takanori TSUTSUI

Displacement monitoring to observe slope stability is found effective to be adopted at the vicinity of tunnel entrance for construction safety management. GPS can measure 3-D displacement automatically and continuously and has the potential to apply such monitoring. However, overhead obstacles of the receiver cause a disturbance to the signals transmitted from the satellites and a degradation of the measurement accuracy. In this paper, a method to reduce the influence is applied to measurement results obtained at a slope above a tunnel entrance.