

RTK-GPSを用いた 地盤大変状の計測と精度の検証

堀宗朗¹・小国健二²・望月一浩³・菅野高弘⁴

¹正会員 Ph.D. 東京大学地震研究所 (〒113-0033 東京都文京区弥生1-1-1)
E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 Ph.D. 東京大学地震研究所 (〒113-0033 東京都文京区弥生1-1-1)
E-mail: oguni@eri.u-tokyo.ac.jp

³東洋大学工学部環境建設学科 (〒350-0815 埼玉県川越市鯨井2100)

⁴正会員 工学博士 港湾空港技術研究所 (〒160-0004 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: sugano@cc.phri.go.jp

本報告は、RTK-GPSを用いた大規模な地盤変状の計測の可能性を検討したものである。これは、地震時の液状化時等に発生しうる広範囲な地盤の大変状に対し、リアルタイム性と十分な計測精度を確保して計測する手法の候補である。人工的に引き起こされた液状化による地盤変状を10台のGPS受信機を用いて計測し、トータルステーションや画像解析による計測結果の比較によって計測精度を評価した。堅牢性には大きな問題はなく、残留変位を測る静的計測精度や、変状中の変位を測る動的計測精度も、地盤大変状の検知には十分であった。検討結果はRTK-GPSを用いた地盤大変状の計測の実用性を示すものである。

Key Words: ground deformation, real-time measurement for earthquake disaster, RTK-GPS, image analysis

1. 背景

巨大地震の液状化や大規模な山崩れによって大規模な地盤変状が発生する場合、周囲の構造物に甚大な被害を引き起こす可能性がある。地盤変状の検知は重要な課題であり、検知の目安として1[m]程度の地盤変位を10[cm]程度の精度で計測することが考えられる。また、迅速な対応を図るためにはリアルタイムの検知が望まれる。しかし、対象となる地盤が広い場合、精度を確保しリアルタイムで検知することは容易ではない。

液状化に起因する地盤変状では、変状がゆっくりと起こるため、通常の加速度計や速度計を用いた計測には馴染まない。これは基線補正を施して加速度や速度を時間積分して変位を求めることは勿論、大きな変位を起こす比較的低い周波数の加速度や速度を高い精度で計測することが難しいためである。広い地盤に対し計測精度とリアルタイム性を確保して地盤の大変状を検知する方法として、本報告は

RTK-GPS (Real-Time Kinematics Global Positioning System)を用いた計測¹⁾を取り上げた。RTK-GPSは、相対測位²⁾の一つであり、複数のGPS受信機の位置の差をリアルタイムで測る方法である(図-1)。受信機一つを用いた単独測位に比べ高い精度が期待できる。解析法によって計測精度は異なるため単純な比較は難しいが、RTK-GPSと単独測位の計測精度の

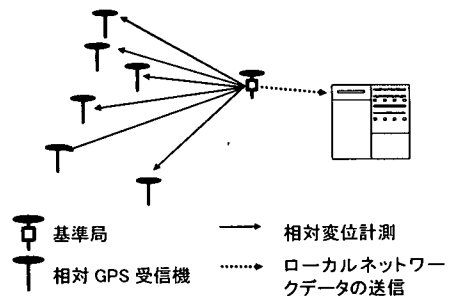


図-1 RTK-GPSを用いた地盤変状計測の概念図

表-1 RTK-GPS の計測精度

	RTK-GPS	単独測位
計測精度[cm]	10^{-1-0}	10^{1-2}

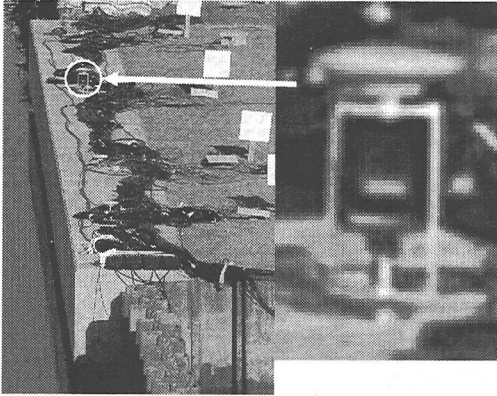


図-2 受信機とその設置状況

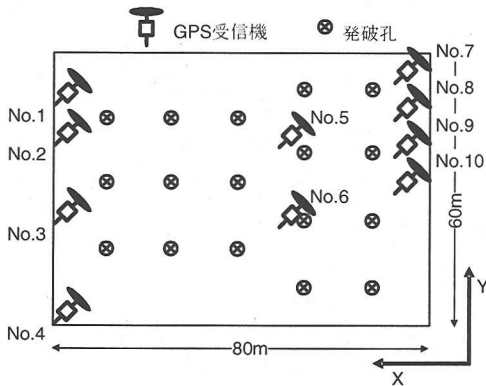


図-3 実験ヤードと RTK-GPS 受信機設置位置

目安を表-1にまとめる。

RTK-GPSを用いた計測は精度とリアルタイム性の点で支障はない。また、GPS受信機は小型化が進み、衛星からのデータ受信とデータ解析を分けた計測システムも作られており、広い地盤の計測には都合が良い。また、RTK-GPSは既に大型構造物の動的変形計測に適用されており、10Hzのサンプリングで長大橋や高層ビルのような長周期構造物の揺れを計測した例がある(文献³⁾の参考文献リスト参照)。しかし、地盤構造ではダム⁴⁾の連続計測⁴⁾はあるものの、地震時の地盤変状をGPSで計測した例はない。特に、大変状を引き起こす激しい揺れの中で、正しく計測できるか否かは不明である。

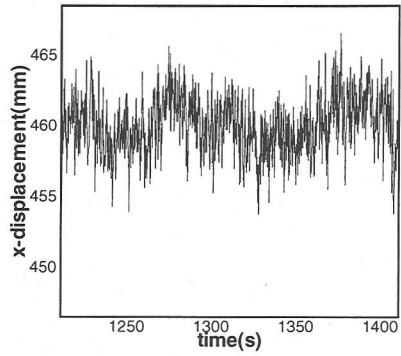


図-4 RTK-GPSの計測例

以上を背景とし、RTK-GPSを用いた地盤大変状の計測の可能性を探る目的で、地盤変状の大型実験において実際に計測を行った。本報告はその結果をまとめたものである。

2. 実験方法

独立行政法人港湾空港技術研究所は、2001年11月13日に十勝港第四埠頭埋立地において「港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関する実物大実験」^{5),6)}を行った。地中に埋設したエマルジョン爆発発破の振動によって大規模な液状化を発生させ、4800[m²]の実験ヤードの地盤変状を計測した。

設置されたGPS受信機は矢板岸壁東部コンクリートの上に3台(No. 1~3)、ヤード内のコンテナに6台(No. 5~10)、基準局1台(No. 4)の計10台である。なお、基準局の動きは無視できる。図-2に受信機と設置状況を、図-3に実験ヤードの概要を示す。受信機はコンクリートに治具によって打ちつけた。受信機の機能は、10x10x10[cm]程度の小型の機器(ライカ製)である。位置は水平2成分、鉛直1成分のベクトルとして計測される。解析法によるが、静的な計測では位置を決定する精度は水平方向で1[cm]を切り、鉛直方向では1[cm]前後である。リアルタイム計測の例として図-4にNo. 3受信機のx方向位置の時系列データを示す。これは変状終了後で、リアルタイム計測ではプラスマイナス0.5[cm]の変動がみとれる。

RTK-GPSの地盤変状計測に関して具体的な検討事項は以下の3点である。

- 1) 堅牢性：GPS受信機が正しく機能するか否か
 - 2) 静的精度：地盤変状発生前後での位置計測精度
 - 3) 動的精度：地盤変状発生中の位置計測精度
- 静的精度の検証にはトータルステーション(TS)を利

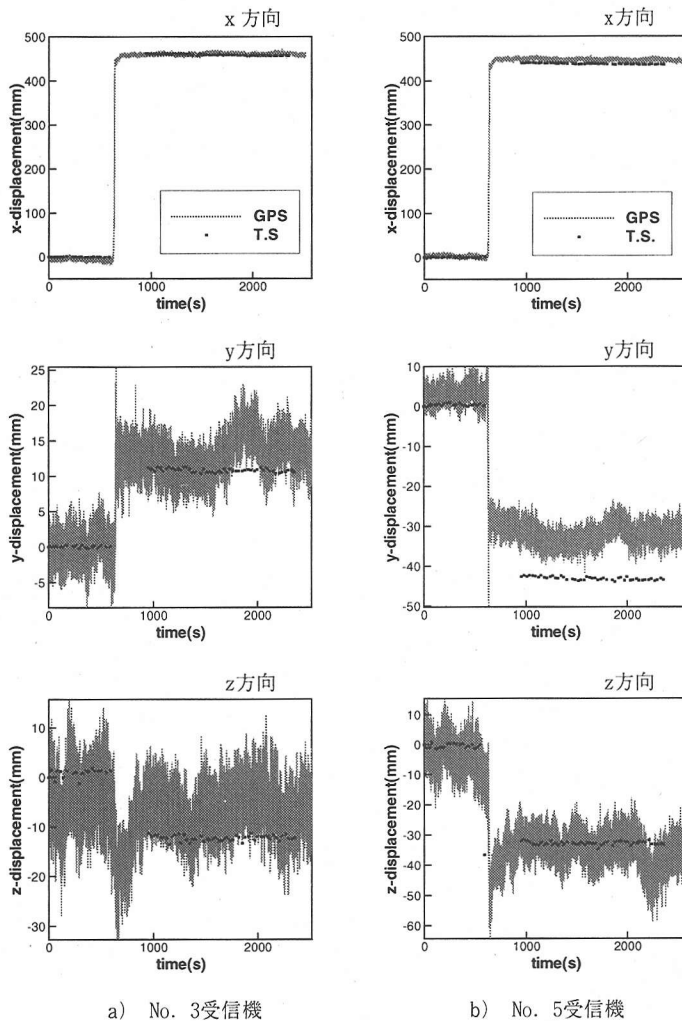


図-5 RTK-GPSとTSの比較：3方向ベクトル成分

用した。地盤変状のない地点にTSを設置し、レーザを用いて3台の受信機(No. 3, 5, 9)を自動追尾させ位置を計測する。サンプリング間隔は数秒であるが、計測精度は数ミリメートルと考えられる。動的精度の検証には画像解析を用いた。実験ヤード内のビデオ撮影台より、受信機1台(No. 3)を撮影し、画像解析によって位置を求める。1秒間に30枚の8000x600ピクセルの画像が撮影され、1ピクセルは約0.5cmに対応する。

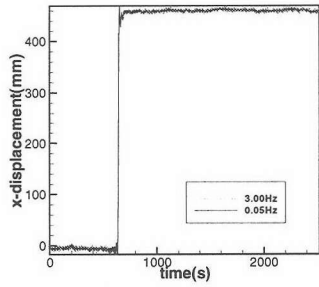
3. 計測結果と検討内容

発破による激しい振動や衝撃が加わったにもかかわらず、実験ヤードに設置された9台のGPS受信機の

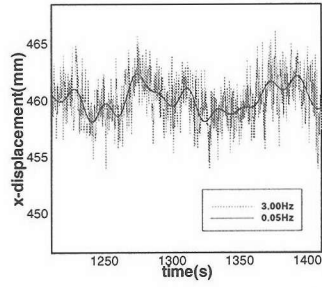
内1台を除き、支障なく計測が行われた。

計測不能の原因は、受信機が損傷を受けたことではなく、配電が不良となったためである。受信機の堅牢性は問題がないことが確認されたものの、電源等には十分な配慮が必要である。堅牢性を高めるためには、本研究で採用したように、衛星データの送受信のみを行う複数のGPS受信機を設置し、データを送信させ、そのデータを受信して位置決定をする解析サーバを設置する、という形式が有効であろう。TSのサンプリングは数秒間隔であり、変状発生中のレーザ追尾に失敗したため、発破前後の受信機の位置を比較する。受信機No. 3とNo. 5に対するTSとRTK-GPSの計測結果を図-5に示す。この図は位置ベクトルの3成分を表示している。

RTK-GPSの計測には高い周波数のノイズが含まれ

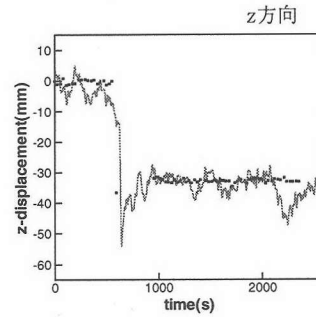
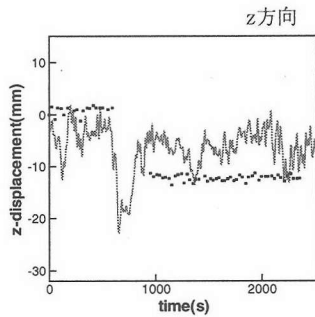
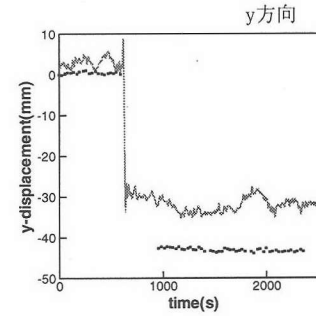
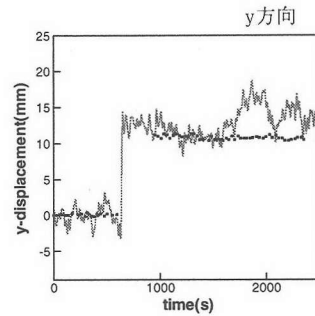
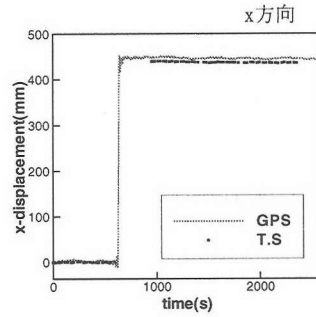
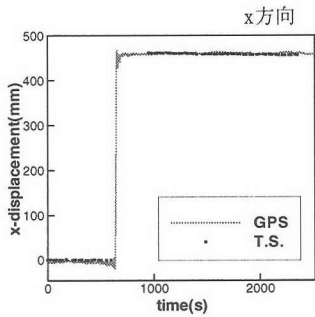


a) 全計測データ



b) 変状後の計測データ

図-6 ローパスフィルタによる高周波成分除去の結果



a) No. 3受信機

b) No. 5受信機

図-7 RTK-GPSとTSの比較(高周波成分除去): 3方向ベクトル成分

ていることがわかる。これは大気・気象条件等が原因である。そこで3.00と0.05[Hz]のローパスフィルタをかけてノイズを除去することを試みた。データ

のサンプリングが10[Hz]であることから、この周波数は約3データと200データの平均に対応し、少ないデータ数と多いデータ数の平均を代表する。1例と

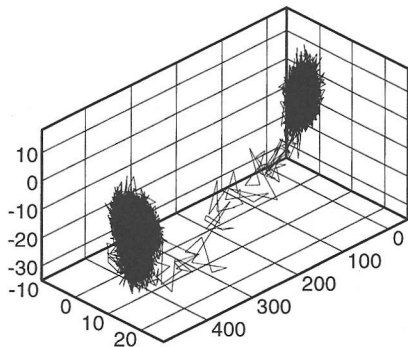
表-2 RTK-GPSの誤差:TSを基準置

a) No. 3 受信機

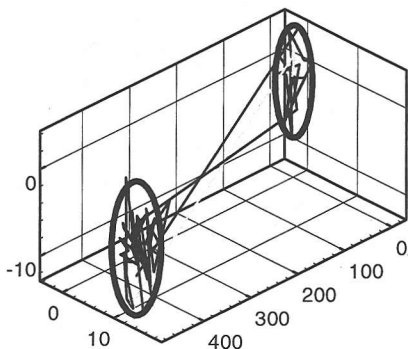
	x[cm]	y[cm]	z[cm]
平均	-0.23	0.01	8.75
最大値	1.06	0.68	9.72
標準偏差	0.41	0.23	0.56

b) No. 5 受信機

	x[cm]	y[cm]	z[cm]
平均	0.60	0.36	0.40
最大値	0.36	0.40	0.36
標準偏差	0.36	0.40	0.48



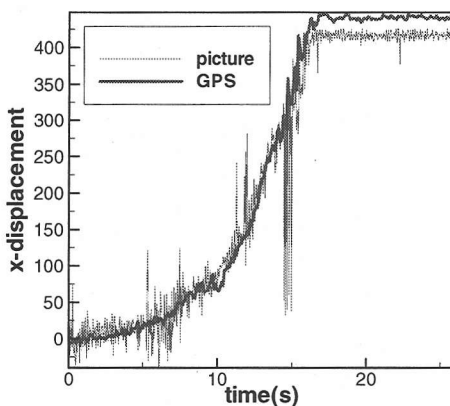
a) RTK-GPS 全データ



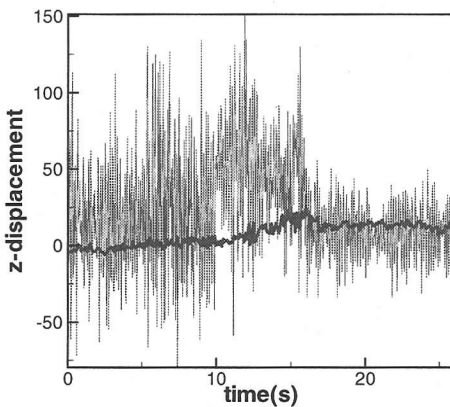
b) RTK-GPSとTSの比較

図-8 計測されたNo.3受信機の位置

してNo. 3受信機のx方向の変位成分の時系列データにローパスフィルタをかけた結果を図-6に示す。全データと図-4に対応する変状後を、各々図-6a)と



a) x方向成分

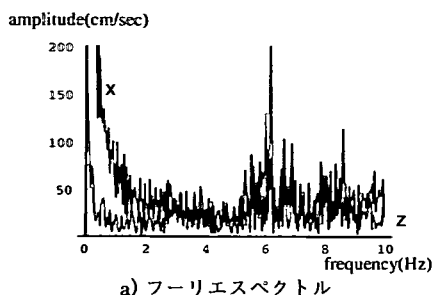


b) z方向成分

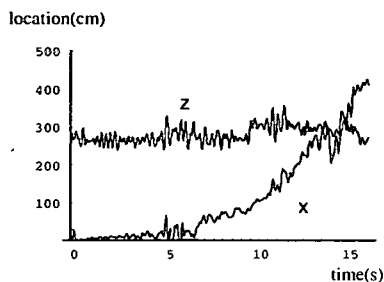
図-9 RTK-GPSと画像解析の比較

図-6b)に示す。ノイズが簡単に除去できることが分かる。図-5のRTK-GPSの計測結果に0.05[Hz]のローパスフィルタをかけたものと、TSとの比較を図-7に示す。変状前後での位置の差が明瞭にとらえられていることがわかる。

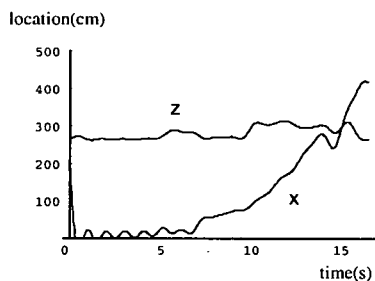
TSの計測値を真の値として、GPS位置計測の誤差を計算した。その結果を表-2に示す。表-2a)はNo. 3受信機、表-2b)はNo. 5受信機である。平均値では鉛直方向の誤差が大きい場合(No. 3受信機)があるが、標準偏差をみると1[cm]を切る精度で計測できることが分かる。これは地盤変状計測の静的精度としては十分である。静的計測精度の高さを強調するため、RTK-GPSとTSの計測結果を図-8に3次元的に表記した。図-8a)はRTK-GPSによる受信機の位置の時系列であり、図-8b)の薄い線はTS、太線はRTK-GPSの計測結果を10秒間隔でプロットしたものである。また、図-8b)ではRTK-GPSの計測誤差範囲を楕円球



a) フーリエスペクトル



b) 10Hzのハイカットフィルタをかけた時系列データ



c) 1Hzのハイカットフィルタをかけた時系列データ

図-10 画像解析の時系列データにハイカットフィルタをかけた結果

として表現している。

No. 3受信機に対し、撮影されたビデオ画像の画像解析によって水平x方向と鉛直z方向の位置の時系列データを求め、RTK-GPSの計測結果との比較を行った。結果を図-9に示す。なお、画像解析は、全ビデオ画像に対し受信機の画像パターンの重心を求めるマッチング法を用いて、30[Hz]のサンプリング間隔で受信機の位置を決定した。ビデオカメラ自体の揺れもあり、ビデオ画像の画質は悪く高度な解析には適していない。また、受信機のサイズを基準としたため絶対値には誤差がある。したがって、画像解析の位置決定の精度は低い。前述のように1ピクセルが0.5[cm]程度であるため、数ピクセルすなわち2ないし3[cm]の誤差が予想される。この精度で変状

の傾向を知ることは可能である。

図から明らかなように、水平方向成分に対しては、RTK-GPSは地盤変状を追尾していることがわかる。特に変状が急速に増加する傾向もうまくとらえている。しかし、鉛直方向成分に対しては、変状の傾向が一致していない。

鉛直方向成分の不一致は、画像解析の精度が原因と考えられる。カメラの揺れによる誤差を除くため、RTK-GPSと同様にローパスフィルタをかけることとした。図-10a)に画像解析結果のフーリエスペクトル、図-10b)と図-10c)に2.0と1.0[Hz]のローパスフィルタを施した結果を示す。画像計測のサンプリングが30[Hz]であるため、これは15と30のデータの平均に対応する。原点を移動し、水平・鉛直方向の2成分を合わせて表示している。図-10c)より、鉛直方向成分も、RTK-GPSと画像解析の計測結果の傾向が一致していることがわかる。

本研究の目的とは異なるが、図9の結果は、画像解析を用いた地盤大変状の計測の可能性を示唆すると思われる。民生用のビデオ機器でも撮影・保存にデジタル化が進むことを考えると、本研究で用いたような比較的簡単な画像解析を画像データに施すことは容易である。したがって、民生用ビデオ機器を利用することで、安価で大規模な地盤変状の検知が期待できる。

4. まとめ

RTK-GPSを利用した地震時の地盤変状リアルタイム計測に対して、堅牢性と静的・動的計測精度を検証した。大きな問題はなく、実用性が十分期待できる。具体的な結論を以下に列挙する。

- 1) TSと比較しても、RTK-GPSの計測は安定しており、この点での堅牢性は高い。
- 2) RTK-GPSによる静的変位計測では、水平方向ではTSと同程度であり、1[cm]程度の計測精度が期待できる。大変状の発生有無の検知には十分な精度である。
- 3) RTK-GPSでは、10[Hz]のサンプリング間隔で計測できる動的変位に対し、静的変位よりは精度が落ちるものの、計測は可能である。

謝辞：RTK-GPSを用いた計測には(株)アカサカテックの森俊行氏の尽力をいただいた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 風間基樹, 清野純史, 加賀谷俊和, 佐々木静男: GPSを用いた地盤変状の把握とその利用, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol. 1, pp.3605-3608, 1998.
- 2) Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins J.: *GPS, Theory and Practice* (4th edition), Springer, 1992.
- 3) Celebi, M. and Sanli, A.: GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures, *Earthquake Spectra*, pp. 47-61, 2002.
- 4) Hudnut, K.W. and Behr, J.: A continuous GPS monitoring of structural deformation at Pacoima Dam, California, *Sesmol. Res. Lett.*, Vol. 69, pp. 299-308, 1998.
- 5) 例えばURL <http://www.phri.go.jp/>参照.
- 6) 小濱英司: 港湾・臨海部俊樹能の耐震性向上に関する実物大実験, 土と基礎, Vol. 50-2(529), p.40, 2002.

(2002. 1. 1受付)

APPLICATION AND ACCURACY OF RTK-GPS TO MEASURE LARGE-SCALE GROUND DEFORMATION

Muneo HORI, Kenji OGUNI, Kazuhiro MOCHIZUKI and Takahiro SUGANO

An RTK-GPS is a candidate for a method of monitoring large ground deformation which is caused by liquefaction during an earthquake or by ground sliding. This paper reports application of the RTK-GPS to measure actual ground deformation in an experiment carried out by PARI. The robustness and the accuracy of the RTK-GPS measurement are studied. It is shown that the RTK-GPS does not have serious problems for the robustness, and that the accuracy of measuring the resultant deformation and the dynamic deformation process is satisfactory. These results support the applicability of the RTK-GPS to the real-time monitoring of large ground deformation.