

ナノセンサデバイスを活用した 道路管理手法について

田中 雄三¹・西山 哲²

¹近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 (〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)

²京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) .

本論文は岩盤斜面の挙動を高精度に計測し、さらに当計測データをリアルタイムに無線で配信するセンサデバイスを活用することで、効率的かつ効果的な管理手法の構築を実現した成果をまとめたものである。岩盤斜面に設置したセンサデバイスは、植生の影響を受けることなく対象物の傾斜挙動を遠隔に配信する機能を有しており、事務所管内の岩盤崩落・崩壊現場において当センサデバイスによるモニタリングの有用性を実証した事例を紹介する。

キーワード MEMSセンサ, センサネットワーク, リアルタイム計測, 道路斜面

1. はじめに

紀南河川国道事務所管内の道路斜面の多くが、複雑かつ脆弱な地盤で構成されており、また台風や地震といった天災も多く発生する地域でもあるため、道路防災に要する人的・経済的な負担が多大なものになっている。その一方で、高度成長期に建設した対策工の老朽化も懸念されており、本事務所においても限られた財源と管理体制をより一層効率的かつ効果的に運用する道路の管理手法が求められている。また道路沿いの斜面の大半は地形上あるいは経済的な問題によって、抜本的な対策工を早期に実施することが困難な状況でもある。このような背景から、危険箇所の抽出と現状を把握するためのモニタリング網を普及させることは、災害を未然に防ぐだけでなく、合理的な対策の優先順位あるいはその時期を決定するために必要な要素である。しかしながら、特に岩盤斜面を対象としたモニタリング技術には次のような課題が伴うため、有効な計測システムの構築がこれまで築けない状態である。

- ・危険な箇所が広範囲にわたっており計測機器を多数設置する必要があるが、計測機器が高価である。
- ・計測機器が設置できたとしても、広範囲を計測の対象にしているため、その維持管理に要するコストが多大なものになる。
- ・各地区ごとに崩壊形態が異なっているが、どのような崩壊形態であっても対応できる高精度の計測を実現する機器がない。
- ・前兆となる現象が現れてから崩壊に至るまでの時間が短いために、変位あるいは変状に関するデータをリア

ルタイムに出力する技術が要求される。

- ・計測システム自体が風雨や雷などの災害に対して頑強でなければならない。

これまで実施された道路防災総点検を見直した事例においても、岩盤崩壊・崩落に関しては、点検で判断された内容と異なる形態および規模での災害が発生していること、あるいは対策工が施されていた箇所でも新たに災害が発生していることが報告されており、岩盤斜面のモニタリング手法の困難さを物語っている。

本研究はこれらの背景を鑑み、安全かつ安心な道路を提供できるマネジメントの基本的な要素技術であるモニタリング手法、特に落石を含めた岩盤斜面の崩壊・崩落の危険性を定量的に把握するモニタリング手法の開発に取り組み、本事務所管内の広範囲にわたる岩盤崩壊・崩落危険箇所にも普及させる試みを続けてきた。その中でもMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と称される各種センサと計測データを無線で配信する機能を一体化したセンサデバイスを活用した管理手法を完成させたので、ここにその成果の一部を報告する。本研究の特徴は、電子産業またはIT関連産業の最先端の技術を導入することにより、前記のモニタリング手法がもつ課題を克服する新たな技術を構築したことである。この土木分野から見て異分野である電子・通信分野の技術と、官学がこれまで培ってきた管理技術のノウハウを融合させる開発体制を発足させ、そこから効率的かつ効果的な道路管理技術を産み出すことができた¹⁾。ここで報告する紀南河川国道事務所管内における新しい道路防災(減災・避災)技術の事例が、同様の課題をかかえる他の地域において、今後の道路管理手法への参考になれば幸いである。

2. ナノセンサデバイスの開発

本研究のモニタリングシステムは、計測対象物上の挙動を高精度に捉えるナノセンサデバイスと、そのセンサデバイスで計測した対象物の挙動をリアルタイムに事務所に伝送する無線ネットワークにより構成される。

図-1に本研究で用いるナノセンサデバイスを示す。約65×50mm、高さ約35mmのパッケージにMEMSと称される0.1度の分解能をもつ傾斜センサと温度センサおよび湿度センサが組み込まれた基板、データを配信する無線モジュールと無線アンテナ、さらには電源であるリチウム乾電池2本が内蔵されている。このセンサデバイスによって計測された傾斜データは、温度および湿度の値とともに無線によって遠隔に設置した基地局に伝送され、さらに当基地局から電子メールにて事務所に計測データが配信される。

図-2は、このナノセンサデバイスを用いたモニタリングシステムの実用例を示す。岩盤斜面にセンサデバイスを設置すると、そのセンサが斜面の挙動を検知し、さらに無線によって斜面の状態を事務所に配信する。センサは小型で有線部分がないことから、任意の箇所に多数個設置でき、また台風や地震時の断線によって計測が不能になる事態や落雷および誘雷による機器の損傷の心配も無い。このセンサデバイスからの計測データを収集して事務所に転送するのが基地局の役割であり、設置したセンサデバイスの計測データを1台の基地局にて収集して事務所に配信する。事務所では岩盤の挙動がすぐに分かるように、図-3に示すような岩盤が動いた方向と大きさを表す画面をパソコンに表示させている。基地局の電源は太陽電池であり、モニタリングシステム全体としても有線の部分がなく、またナノセンサデバイスを含め機器のコストも安価であることから設置機器の設計が自由にできる。紀南河川国道事務所では、事務所管内の橋杭岩と称される岩盤の挙動監視に本モニタリングシステムを適用した。この現場は崩壊の危険性があるために対策工の実施も検討されていたが、当対策工が完成するまでの約1年間にわたって監視を行う必要がある一方で、天然記念物に指定されている地区でもあり、景勝を維持するために伸縮計や従来の傾斜計などの計測機器の設置が困難な個所であった。そこで、景観を損なわない小型で有線が無いナノセンサデバイスを活用した結果、次のような利点のある計測システムであることが実証された²⁾。

- ・15分間隔で計測しても、ナノセンサデバイスの電池を約3年間交換する必要が無く、受信機も太陽電池で駆動するので計測システム全体のメンテナンスが不要であった。
- ・0.1度の分解能で3方向の傾斜角を計測できるので、微小な岩盤の挙動を3次元的に捉えることが可能であり、崩壊危険性をリアルタイムで把握することができた。

・基地局をナノセンサデバイスから100mの遠隔に設置することができ、機器の配置の設計が容易であった。

このように岩盤斜面を対象とした従来の計測手法の課題であった「高精度の計測機器を多数設置することが出来ない」あるいは「機器の設置後のメンテナンスの労力が多大である」などの欠点を克服するモニタリング手法を実現させることが可能となった。

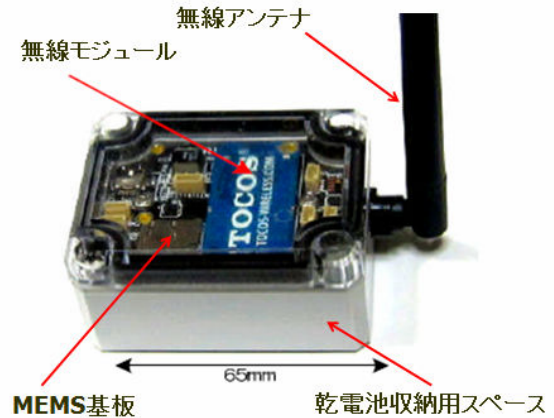


図-1 ナノセンサデバイスの概念



図-2 無線センサデバイスの活用例



図-3 橋杭岩モニタリングシステムの実用例

3. 計測システムの高度化技術

前章において岩盤斜面モニタリングにおける本研究の適用例を示したが、さらに広範囲の管理対象区域へ展開することを狙い、次の特性をもつシステムへと高度化することを試みた³⁾。

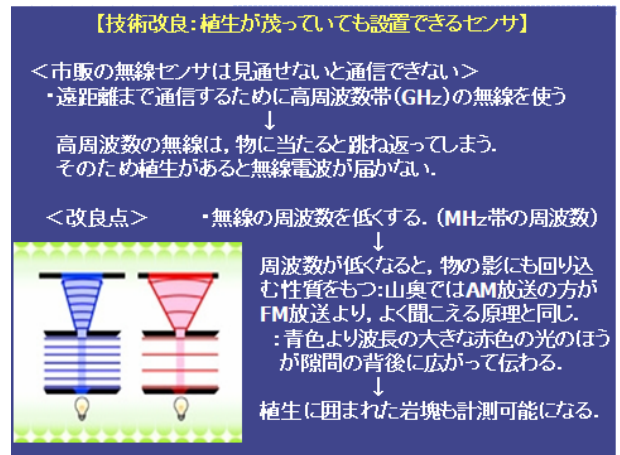
- ・センサデバイスと計測データを収集する基地局間の距離は100mが限度であった。これを300m以上遠隔にまで計測データを無線で送受信できる性能に高度化することで、システムの設計の自由度をさらに向上させる。
- ・無線を利用して計測データを伝送する計測システムは他にも実用化されているが、いずれも植生が繁茂する現場に設置した場合は、電波が伝送されず使用できなくなる。これを改善し、植生の影響を受けることなく計測データを無線で配信できるセンサデバイスにする。
- ・傾斜角を計測するセンサは高精度であるために、MEMSにおける各部品が持っている温度や湿度に対する特性の影響を受けてしまう。すなわち、温度の変化に伴う各種部品の熱膨張の影響をセンサが捉えてしまい、対象物は動いていないのに微小な動きを示したように見えるデータを配信してしまうことがあり、真の岩盤の動きだけを管理者に配信させる必要がある。

以上の技術は、本事務所における計測対象の多くが植生の多い区域あるいは小型とは言ってもセンサデバイスからのデータを無線で受信する基地局の設置が困難な箇所が多いため、本手法を普及させるために必要となる。しかしながら、これまでの無線技術では次の問題があるため、既に他の現場などで実用化されている技術を導入することでは対処できないことも明らかであった。

- ・市販されている無線機器に使用されている無線の周波数は2.4GHz帯を使用したものである。この周波数は、無線電波の直進性が大きく現れるため、センサデバイスの周囲に植生が茂っていると、無線は遮断される。
- ・上記の課題を克服するために、無線電波の中継器を設置することで100mより遠い基地局に計測データを伝送する技術も試みられているが、この場合は中継器を含めて常に各機器が動作している状態にしておく必要があり、電池の消耗が激しくなるためメンテナンスフリーの状態を長期間保持することができない。
- ・高精度で対象物の挙動を計測するためには、センサの感度を向上させれば良いが、これは同時に各種のノイズに対する感度も向上させることになる。したがって、温度や湿度の影響を抑えるには、感度の低いセンサを用いるのが良いという矛盾が発生する。

これらの課題に対して、本研究では新たなセンサデバイスの開発に取り組み、本管理区域内のあらゆる個所に適用できる新しいモニタリングシステムを完成させた。

- ・図-4のように無線電波は波の性質をもち、周波数の低い電波は物体の背後に回り込む特性が大きい。無線電



波の周波数を2.4GHz 帯からMHzの周波数帯のものに変更する。

図-4 植生繁茂箇所でも使用できる技術の説明

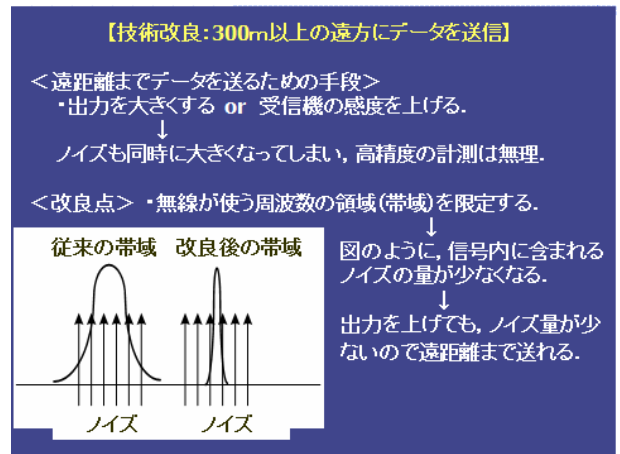


図-5 より遠方にデータ配信するナローバンド技術の説明

波のこの性質を利用して、植生が茂っていても、その背後に電波が回り込むことで無線の伝送が妨害されない工夫をする。具体的には無線の周波数帯をGHz帯よりも低い周波数のMHz帯とした。

- ・ナローバンドという無線技術を導入することにより、より遠方までノイズの少ない無線電波を送信させることを可能にする。このナローバンドは、図-5に示すように無線電波がもつ広がり(帯域幅)を狭くする技術であり、電波が拾ってしまうノイズを少なくする効果がある。したがって、従来は無線電波の出力を大きくするとノイズの大きさも同時に大きくなってしまいう欠点があったが、この手法では、より遠方まで無線電波が届くような大きな出力で発信しても、ノイズを拾う心配がない。これにより300m以上の遠方にまで無線電波を配信させることを可能にする。また中継器を設置することなく、各機器の省電化を改善した結果、10分間隔の計測でも5年間は電池交換が不要なメンテナ

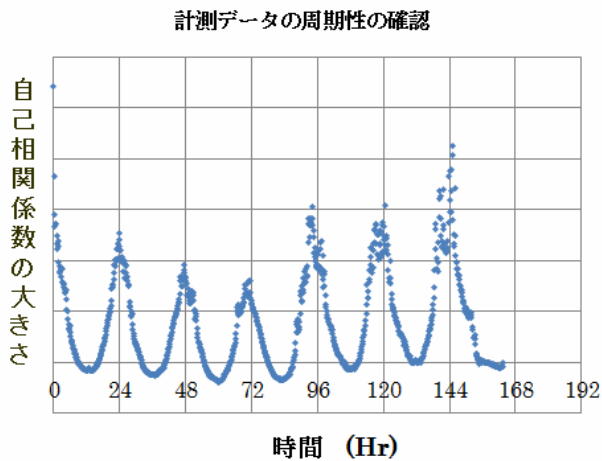


図-6 計測データの周期性を示す解析結果



図-7 開発した無線センサデバイスの特性

ンスフリーの特性を発揮することができる仕様とした。

- ・図-6は前章で示した現場における計測データを詳細に分析した結果であり、計測データの周期性を自己相関係数の大きさという指標で整理したものである。自己相関係数は、何時間ごとに計測データが大きくなるのかを表しており、明瞭に24時間ごとに計測データが大きくなったり小さくなったりする傾向があることを示している。これは気温の1日の変化と同じであり、温度変化による各種部品の熱膨張の影響が出現した結果である。そこでセンサデバイスの熱膨張係数等を室内実験にて評価し、計測データの変化から温度変化の影響を取り除くフィルターを開発し、対象物の変状に基づく実際の挙動だけを計測データとして取り出すことに成功した。

これら一連の技術開発によって、本事務所管内の広範囲の個所に本モニタリングシステムを適用することを可能にした。図-7に、本事務所管内での普及を目的に開発したセンサデバイスの特性をまとめて示す。さらに本システムの特徴を活かす現場として、国道42号沿いの急崖斜面における高角度の割れ目が発達した岩塊挙動のモニ



図-8 センサデバイス設置例

タリングに適用した事例を次章にて報告する。

4. 岩盤崩落モニタリング実施例

(1) 設置状況の概要

図-8に、岩塊に設置したセンサデバイスの状況を示す。計測対象は流れ盤である急崖斜面であり、国道42号が真下に走っており、また周辺は波浪による侵食が進行しているために凹地が形成されており、自重によって岩塊が崩落しやすく、その際には通行車両への多大な影響も懸念される現場である。このような背景を基にして、地質調査から転石や浮石から成るために崩落の危険性が高いと判断された10個の岩塊に開発したセンサデバイスを設置して、3方向の傾斜角の変化から当該岩塊の挙動をリアルタイムで監視することを試みた。またセンサデバイスによって、温度（分解能0.01℃）、湿度（0.03%RH）の状況も同時にモニタリングし、前述のセンサ信号から気温および湿度の影響を除去するフィルターをプログラミング化し、真の岩塊の挙動を把握する工夫も導入した。

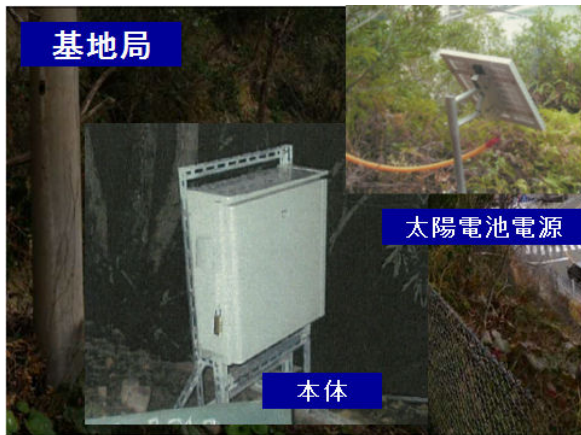


図-9 基地局の設置例

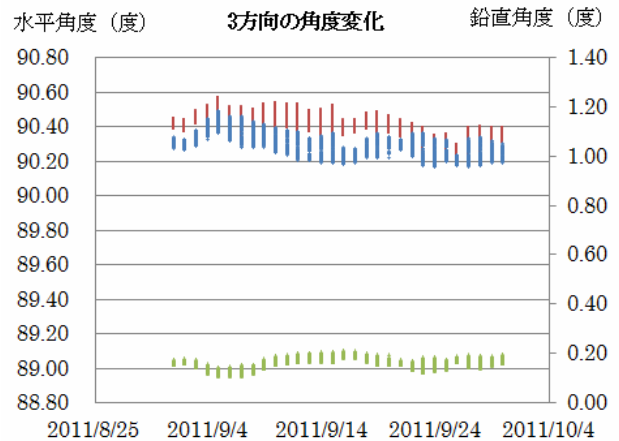
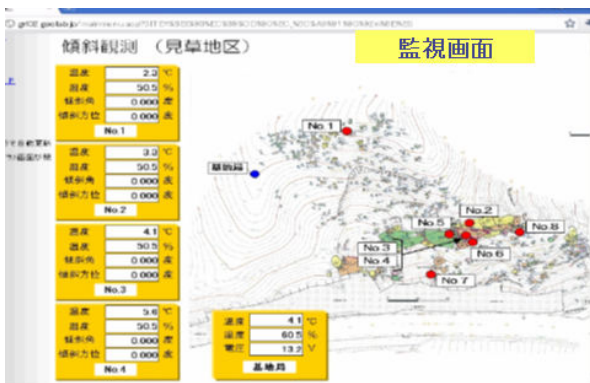


図-11 岩塊の挙動観測結果



パソコン画面上での計測データの監視画面例

図-10 パソコン上での監視画面例

また、図-8の赤枠で示したようにセンサデバイスを設置したが、モニタリング終了後に回収できるように治具を介して固定している。

モニタリングは10分間隔で行い、各センサデバイスから300m以内に設置された基地局に傾斜角の計測結果を送信する。図-9のように基地局本体と電源の太陽電池部は切り離され、電源だけを見通しの良い箇所に設置することで植生があっても電源の供給は可能である。基地局から計測値をFOMA網を利用して事務所のパソコンのWeb上に計測データを表示する。Web画面は1時間間隔で更新され、いつでも、どこでも手持ちのパソコン画面上で設置箇所の岩塊の状態を監視することができる。図-10は現場の状態を監視する画面の例である。

(2) モニタリング結果

図-11は、図-8に示す岩塊の挙動を計測したデータの経時変化である⁴⁾。横軸は計測日時を示しており、2011年9月から10月の期間中のセンサデバイスの計測データについて、水平2方向を赤および緑色で、鉛直方向を青色で示したものである。なお図では、期間中の1日の

挙動を各日ごとにまとめて示している。温度の影響を取り除くフィルターをプログラム化して導入しているものの1日の中の計測データには変動がみられ、また期間中全体でも若干周期的な変動がみられる。これはセンサデバイスを固定する治具が金属であるため、その温度変化の影響が完全には取り除かれていないことに因る。その影響を考慮しても、3軸方向の傾斜角は0.2度以内の変動であり、岩塊には危険な傾動が発生していないことが分かる。この期間中においては、9月1日から6日において台風12号が当地区に上陸したので、その影響を詳細に見たものが図-12である。図は図-11において緑色で示されている水平の1方向と青色の鉛直方向の変化である。治具の温度変化の影響による角度の変化がみられるものの、変化の大きさはいずれも0.2度以下であり、台風12号上陸の期間中でも岩塊は安定であったことを示す。

なお角度の変化と岩塊の安定の関係については、図-13に示す室内実験によりあらかじめ把握しておいた。これは原位置の岩塊の模型を傾斜台の上に乗せて当傾斜台の傾きを変化させ、岩塊模型の挙動を計測したもので、図-14はその結果である。横軸は傾斜台の角度を増加させた際の岩塊挙動の状況を示したものであり、縦軸は岩塊模型に添付した傾斜センサの値を示す。この傾斜センサは現場で用いたセンサデバイスと同じ特性をもつもので、岩塊模型は傾斜台の角度がある大きさを越えた際に回転することを示している。その際岩塊が不安定になって回転するまでは、ある大きさの角度になる必要があるが、現場で観測されたような1度以下の傾斜の変化ではない。これより本現場計測においても、数度の傾動の変化が発生した際に岩体は不安定な状態になると判断し、現場で実際に観測された0.2度以下の角度の変化では岩塊は安定な状態であると判定した。他の岩塊についても、観測期間中は同様の結果を示しており、室内実験の結果を管理基準値とした反映させることによって合理的かつ

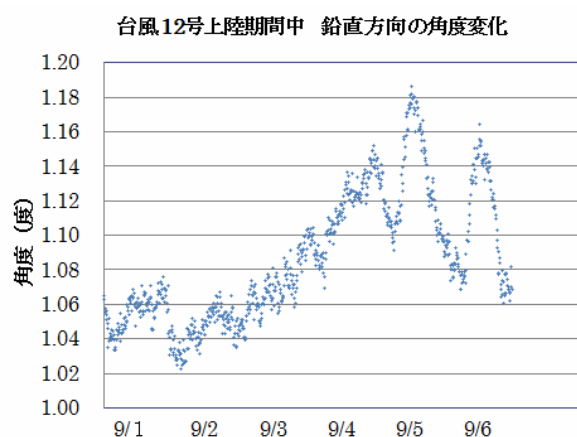
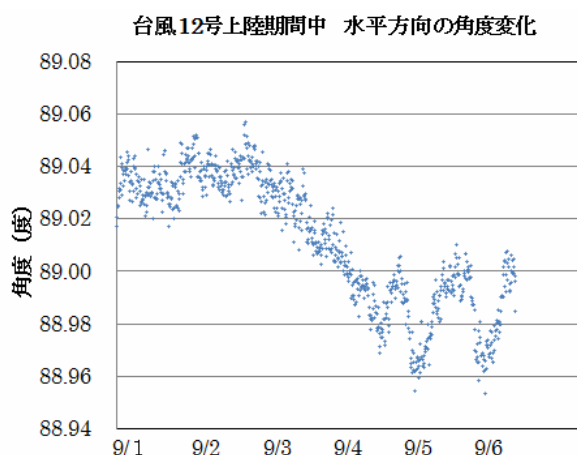


図-12 岩塊挙動の詳細な観測結果

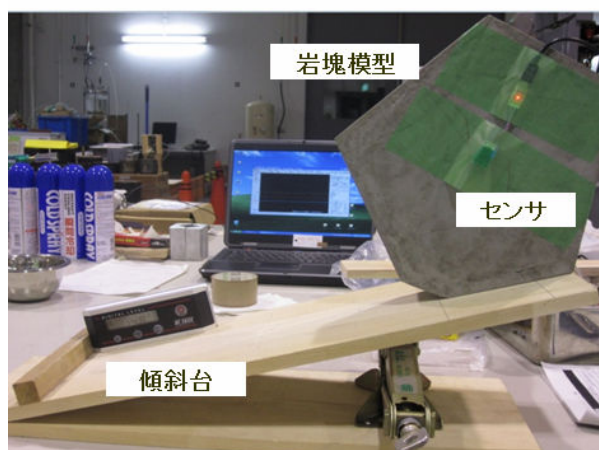


図-13 岩塊挙動の把握のための室内実験

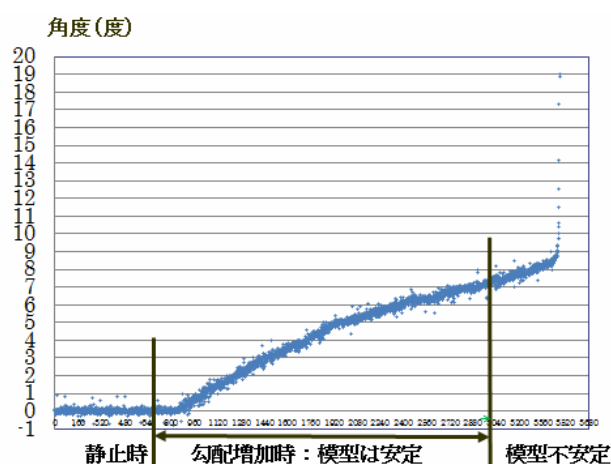


図-14 室内実験における岩塊挙動計測例

効率的な管理手法が構築できたと考える。

5. 結 論

本研究において、次の特徴をもつ計測システムを開発し、その実用性を実現場にて検証した。

- ・計測システムは設置の設計度の自由度が高く、植生の影響を受けないメンテナンスフリーにて計測ができる。
- ・計測データはどこでもパソコン画面上にリアルタイムで観測することができる。
- ・岩塊の挙動を3次元で高精度にとらえることが可能であり、計測システムは低コストの機器で構成されるため、高密度の計測網を構築することができる。

さらに岩塊を模擬した模型を用いた室内実験によって、計測データの管理基準値を把握することを試み、本計測システムによる計測データを合理的に活用する管理を実現させた。センサデバイスを設置した治具の気温の影響などを計測データから除去する手法の開発がまだ残されているが、本事務所管内の現場に広範囲に適用できる計

測システムを完成させることができたと考える。また本研究の開発が成功した背景の一つとして、官学産の連携によって課題の解決に取り組んだことも挙げられる。この連携により、官学のもつノウハウと産の知識を融合させることで短期間でのシステムの完成を実現させた。今後もこの開発体制を活用して、事務所管内の管理手法の効率化に結び付く技術開発を進める予定である。

参考文献

- 1) <http://www.kkr.mlit.go.jp/road/shintoshikenkyukai/01.html> 国土交通省近畿地方整備局 新都市社会技術融合創造研究会ホームページ
- 2) 木村直樹：道路防災モニタリングネットワークシステムの構築に関する研究，平成 21 年度近畿地方整備局研究発表会，防災・保全部門 No.7, 2009.
- 3) 西山哲，安藤佑治，山本剛：道路防災用センサネットワークの構築に関する研究，第 28 回日本道路会議論文集, 2009.
- 4) 小野武，西山哲：無線センサを活用した道路管理手法について，平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集，新技術・新工法部門 No.05, 2011.