

無線センサネットワークによる 土砂災害監視システムの開発

上出定幸¹・小泉圭吾^{2*}・尾上一馬³・藤田行茂⁴

¹西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 道路技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町5-26)

²大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³西日本高速道路株式会社 関西支社 福知山高速道路事務所 (〒620-0853 京都府福知山市長田野町3-5-1)

⁴応用計測工業株式会社 特機部 (〒564-0063 大阪府吹田市江坂町2丁目12-6)

*E-mail: koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

自然災害による被害が毎年各地で報告されており、構造物の防災、安全管理について新たな管理手法が望まれている。本研究では十分な監視が行えていないのり面、緊急的に監視が必要なのり面を対象とした崩壊検知システムの開発について検討を行った。センサはMEMSによる加速度センサを傾斜センサとして利用し、その精度を検証した。通信装置は、2.4GHz帯のメッシュ型ネットワークを利用し、通信の安定性に関する検証実験を行った。その結果、崩壊検知が対象であれば、大量生産型のセンサチップでも応用は可能であることが確認された。また、堅剛なネットワークを構築するためには、障害物を考慮した通信距離、およびセンサの配置工夫が必要であることが確認された。

Key Words :sensor network, wireless monitoring, slope failure, accelerometer, MEMS

1. はじめに

地震、集中豪雨などの自然災害による被害が毎年各地で報告されており、各種構造物の防災、安全管理について新たな管理手法が望まれている¹⁾²⁾。また、供用開始から数十年経過した土木構造物の維持管理手法の確立はここ数年の大きな課題であり、多くの構造物の劣化状況をいち早く検知する構造物健全度診断システムの開発を進めるとともに、頻発する地震や集中豪雨から構造物の被害をいち早く予測あるいは検知するための災害監視システムの開発が急務となっている³⁾⁴⁾⁵⁾。

本稿では土木構造物の中でも、緊急時のライフラインとして重要な役割を果たす高速道路に着目し、特に山間部を通る高速道路沿い土木構造物（例えば、のり面）を対象とする。安心・安全な道路交通網を維持するためには、日常点検において構造物の健全度を診断し、緊急時には災害を常に監視できる体制をとる必要がある。その理由は大きく分けて2つある。ひとつの理由は、道路交通網の遮断期間を最小限に食い止めることである。高速道路が通行止めになるような災害を想定した場合、国道が寸断され、鉄道が不通の状態に陥っている可能性が考えられる。従って、高速道路は災害時の復旧作業や物資輸送のためのライフラインとして、一刻も早く通行止め

を解除する必要がある。もうひとつの理由は高速道路沿いの災害を未然に防ぐという目的である。現在、西日本高速道路（株）では100%の安全・安心を目指すという目標を立てて維持管理業務を強化する方向性を打ち出している。高速道路で発生する土工関連の災害としては、斜面表層崩壊、地すべり、落石、土石流、地震時の盛土崩壊、豪雨時の切盛境界の崩壊などがあるが、近年の異常気象を考慮すると、これらに対する監視体制の強化がより一層重要になってきていることがわかる。従って、管理者は点検結果をのり面台帳などにまとめ、要対策・要監視箇所に優先順位を付けることにより、効率的に対策が行える体制を築き上げてきた。しかし、いざ対策をするとなると優先順位が最上位の構造物（以下、のり面とする。）は別として、上位にある全てののり面に対して多額の予算を投じて対策工を行うことは現状では難しく、そのうちの幾つかは現場に計測機器を設置することで、常時監視が行える体制をとり、それ以外ののり面については定期的に点検を行い、変状が無いかどうかの確認をするというのが一般的である。このように一概にのり面の監視といっても、優先度に応じてその対処方法は異なり、対象となるのり面の状態や優先順位が高くても対象数が多い場合は、計測装置などを用いた十分な監視が行えないという問題を抱えている。また降雨が集中す

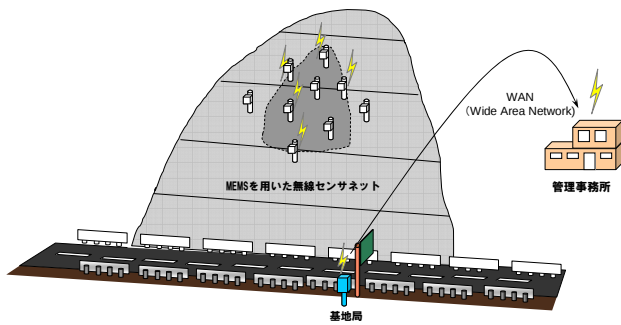


図-1 土砂災害監視システム

る梅雨、台風期など、一時的あるいは緊急的にモニタリングを行いたい場合にコストをかけずに迅速に監視体制が築けることも重要な課題である。そこで、本研究では優先順位が高いものの十分な監視が行えないのり面、緊急的に監視が必要となったのり面を対象とした崩壊検知システムの開発について検討を行った。本稿ではシステムの概要に加え、無線通信装置の通信性能評価と、加速度センサの精度検証を行ったので、その結果について報告する。

2. システムの概要

降雨、地震などによるのり面の崩壊を未然に防ぐためには、雨量計、伸縮計、傾斜計、サクシオン計など複数のセンサを併用した計測が必要となる。従って、通信装置をローコスト化したとしても、センサを含めたシステム全体の構築にコストがかかる。加えて、広い斜面において、どの場所にセンサを設置するかという議論についても、明確な解が示されているわけではない。更に、監視を行う場合において、災害の兆候を見極め、適切な閾値を設定することも重要な課題である。このように、土砂災害を未然に防ぐためには、コスト面と技術面の両面において、解決しなければならない問題は少なくない。これに対し、筆者らは通信装置を小型無線化し、再利用を可能にすることで、システム全体のコストを下げ、それと同時に設置位置の判別、閾値の設定などの検討を進めている段階である。

一方、視点を変えて、崩壊が発生したことをいち早く検知できる無線式計測システムを開発する場合、Zigbeeなどの小型無線通信装置にMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)を応用した大量生産型センサチップを搭載すれば、価格面において、より汎用性の高い計測システムの開発が可能となる。また、使用する計測装置の単価を下げることで複数のセンサをのり面に設置することが可能となり、その結果、対象のり面における崩壊検知の精度向上が図れる。開発するシステムの特長として、無線式小型装置のため、複数ののり面に手軽に設置

できること、更には、取り外して再利用が可能であることが挙げられる。

3. システムの開発

斜面崩壊を検知するためには、あらかじめ崩壊危険箇所が特定できる場合を除き、対象のり面に対して、崩壊の危険性がある複数の箇所に計測装置を設置する必要がある。また、設置に際しては、時間を要さず、ローコストでシステムを構築できることが望まれる。そこで本研究では、ユビキタス技術の1つであり、ここ数年で通信システムの向上が進んでいるセンサネットワークを用いた崩壊検知システムの開発に取り組んだ。センサネットワークとはセンサ技術と無線ネットワーク技術を連携させて、複数のセンサをネットワークに接続し、センサ群のまとまりとして、特定あるいは複数の目的に対して必要な機能を提供することをいう⁹⁾。無線ネットワーク技術には、その通信距離に応じて、WAN, MAN, LAN, PAN などがあるが、のり面を対象とする本研究では、通信距離が100m以下で電力消費量が小さい無線PAN (Personal Area Network)を用いることとした。現在、無線PANとしてはBluetooth, UWB, Zigbeeなどの無線方式があるが、ここではZigbee方式による、メッシュ型ネットワークを採用した。メッシュ型ネットワークとは、ワイヤレス通信機能を持つ機器同士が相互に通信を行うことによって、アクセスポイントやサービスエリアとは無関係に広がっていくネットワークのことをいう。この特長は、センサ間の通信距離が制限距離を超えない限りは、どのような配置を行っても、データは受信機までたどり着くことができる。また、通信距離は短いものの、低消費で高速な通信が利用できるほか、通信経路が複数確保できるために障害に強いことが挙げられる。本研究では、図-1に示すように、のり面に設置するセンサノードがお互いに中継器の役割を果たすことによってネットワークを構築し、基地局を介してデータが任意の管理事務所にて閲覧可能なシステムを構築する。通信装置は、研究開発用キットとして入手が可能なCrossbow社製MPR2600を採用した。センサボードについては現在開発中であり、本稿では、加速度センサを搭載する同社製MTS400を使用した。図-2にセンサノードの外形図を示す。本装置は屋外使用としてIP65の防塵防水規格を有し、結露対策としては耐水性和通気性に対応したフィルタを備えることとした。また、電源として単二型一次電池2本を用い、消費電流を極力低減するために、豪雨、台風時以外はインターネットを介して間欠運転に設定することが可能である。一方、基地局はAC100V電源を必要とすることから、電源供給が可能な地点に基地局を設

置し、のり面まではセンサノードを中継することにより、ネットワークを構築する。また基地局から任意の管理事務所までの通信は、WAN(Wide Area network)等の長距離無線通信を利用する。

4. 無線通信実験

(1) 通信距離試験

本節では、センサネットワークに用いる無線通信装置(MPR2600)の性能を実験により検証する。検証にはデシベル値を評価指標として用いる。デシベル値とは受信で生じる電力 1mW を 0dB (デシベル) と定義することで、親機が子機から受信する電力を評価するのに用いられる値のことで、無次元値である。デシベル値の算出式を式1に示す。

$$Y = 10 \log_{10}(X / 1mW) \quad (1)$$

X は受信機の受信電力 (mW) , Y はデシベル値 (dBm) として表され、工学では一般的に、デシベル値に絶対基準値を定め、絶対単位として用いる。式1では、受信で生じる電力 1mW を 0dB と定義しているが、このときの単位は dBm (ディービーエム) を用いるのが通例である。また、デシベル値は一般的に RSSI 値 (Receiving Signal Strength Intensity : 電界強度) とも呼ばれていることから、本稿においても以降デシベル値を RSSI 値と記す。RSSI 値はセンサノードの設置間隔および地表面からの高さに影響される。本論で使用する通信装置の場合、経験的に RSSI 値が -85dBm 付近までは通信が安定していることが確認されている。ここでは屋外実験により RSSI 値とセンサノード間の通信距離の関係を求めるとともに、のり面にセンサノードを設置した際の電波環境についても確認を行った。

実験は大阪大学構内の平地にて実施した。基地局を設け、受信機、パソコンおよび RSSI 値の計測機を設置する。次に、センサノードの設置高さを 0 cm , 50cm の2パターンに設定し、各設置高さでセンサノードを基地局から遠ざけていき、各地点で RSSI 値を計測する。計測が終了したら、設置高さを変更し、同様の計測を行う。この結果を基に、各設置高さにおいて、RSSI 値が -85dBm を示したときの距離を閾値として設定する。RSSI 値は同地点でも多少の上下が生じるため、3 秒の計測間隔で 3 分間記録し、平均値をその地点の代表値として用いることとした。実験結果を図-3、図-4 に示す。これより、RSSI 値 -85dBm に対応する距離は設置高さが 0cm のときおよそ 22m、設置高さが 50cm のときおよそ 47m であると判断できる。

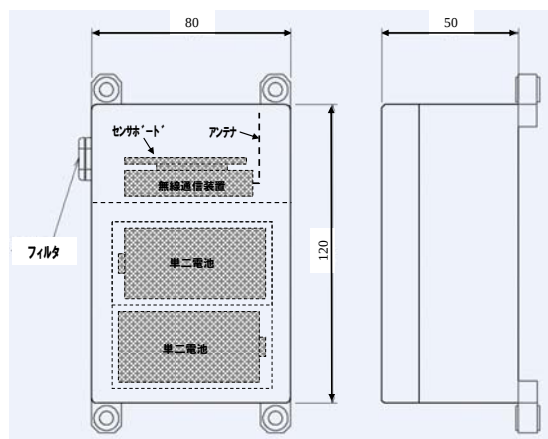


図-2 センサノード

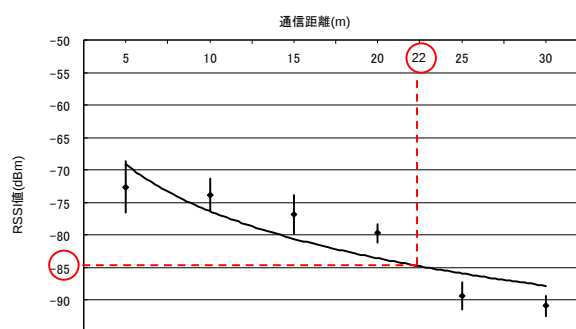


図-3 実験結果(設置高さ 0cm)

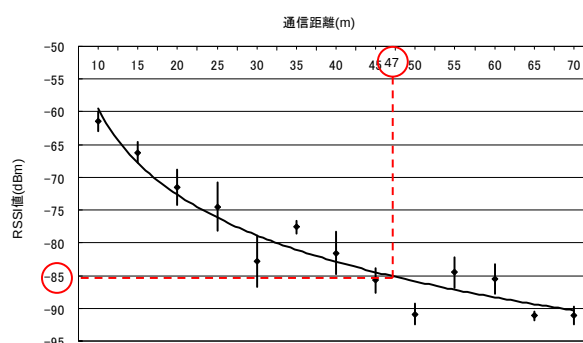


図-4 実験結果(設置高さ 50cm)

(2) のり面での通信ネットワーク試験

次に、のり面においてセンサネットワークを構築し、通信状況の確認を行った。図-5 に実験の概要を示す。まず 16m 間隔でセンサノードを配置し、10 秒に 1 回の間隔で計測を行い、通信経路がどのように構築されるかを確認した。また、各地点におけるセンサノードの RSSI 値を一定時間測定し、構築された通信経路を評価する。なお、設置高さは 50cm とした。

図-6 に実験中に確認された通信経路の一例を示す。無線センサの起動直後は頻繁に経路の変更を繰り返していたが、数分後には(a)の状態に落ち着いた。まれに経路変更しつつもしばらくの間は (a)のネットワークを構築したままであったが、1 時間ほど経たときに(b)の状態に

移行し、その後実験を終えるまで(b)のネットワークを保っていた。表-1 に各地点において計測されたセンサノードの RSSI 値を示す。表より、通信が安定しているとされる-85dBm を下回る経路はあるものの、通信が不通になったり、ネットワークが不安定になることはなかった。この結果、本実験で設置したノード間距離であれば、ロバスト性の高いネットワークが構築できているものと考えられる。センサノードの設置高さが 50cm の場合、RSSI 値が-85dBm となる通信距離はおおよそ 47m であると算出された。しかし、平地の実験と異なり、のり面上での通信実験結果においては、通信距離が 47m 以下でも RSSI 値が-85dBm を下回っている地点が複数確認された。この原因として、2.4GHz 帯の指向性の問題により、GW、1 番のすぐ手前の擁壁が障害物となり、上部 4、5、6 との通信に影響を与えたものと考えられる。また、4 番の地点において、6 番からの電波強度が-85.2dBm であったことは、6-4 番経路の RSSI 値が-83.2dBm であることを考えると、誤差の範疇であると推測できる。一方、3-4 番と 4-3 番のデータのように、同じ経路であっても RSSI 値が大きく異なる事例も確認されており、今後はこれらの問題に対しても検証実験を行う必要がある。

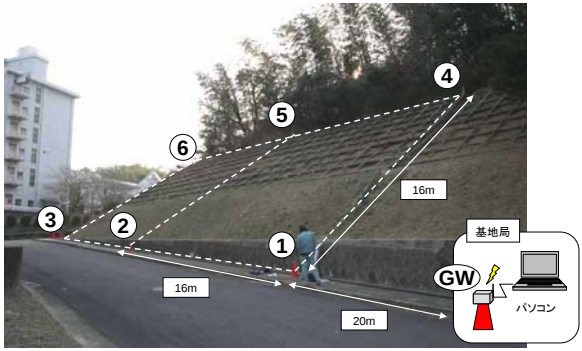


図-5 実験の概要図

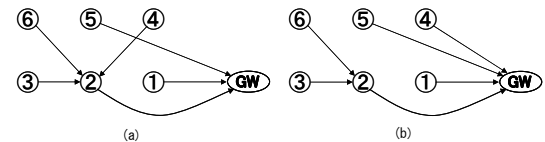


図-6 ネットワークの通信例

表-1 各地点における RSSI 値[dBm]

		発信側センサ					
		1	2	3	4	5	6
受信側センサ	GW	-81.0	-89.1	-88.4	-86.6	-89.4	-92.1
	1	-	-67.1	-80.0	-88.8	-83.4	-90.0
	2	-63.1	-	-68.2	-75.0	-84.7	-89.1
	3	-76.7	-65.9	-	-74.7	-74.7	-77.3
	4	-88.9	-81.4	-83.8	-	-74.3	-85.2
	5	-88.5	-81.2	-75.6	-74.1	-	-68.7
	6	-92.0	-89.1	-73.0	-83.2	-66.0	-

(※背景色のあるセルは値が-85以下)

5. センサの精度検証

本研究では Crossbow 社製 MTS400 に搭載されている加速度センサ(Analog Devices, ADXL202JE)を傾斜センサとして用いることとした。センサの仕様を表-2 に記す。センサは 2 軸の加速度センサを有しているが、本論で対象とするのは、のり面の斜面方向の 1 軸のみとする。使用するセンサの重力加速度と傾斜角の関係を調べるために、手動式角度計測装置（日研工作所，SRI-200）を用いて傾斜角を変化させていき、各センサ(No.1~No.3)の重力加速度の変化を計測した。本センサの精度検証結果を図-7 に示す。図より、60 度を越えた付近より精度が低下することが確認できる。一方、傾斜角が 60 度付近まではセンサごとのばらつきが小さいことがわかった。次に、気温の差による計測誤差の検証を行った。設定温度は計測室内の気温 23℃と、ヒータにより約 20℃上昇させたセンサノードの周囲温度を 42℃とし、それぞれ三回計測した平均値を図-8 に示す。この図より、この温度範囲での計測結果のばらつきは小さいことが確認された。ただし、センサの分解能が重力加速度 1g を 50 分割した程度の粗いものであることから、温度誤差自体が大きく目立つものではないという解釈が妥当である。以上の結果より、従来の土木計測に用いられている傾斜計の精度とは大きくことなるものの、センサの個体差が小さいこ

表-2 加速度センサの仕様

Sensor Type	Analog Devices ADXL202JE
Channels	X(ADC1), Y(ADC2)
Range	±2g
Sensitivity	167mV/g, ±17%
Resolution	2mg RMS
Offset	VBATTERY/2±0.4V
operating Range	3.6 to 3.0V
Interface	Analog interface

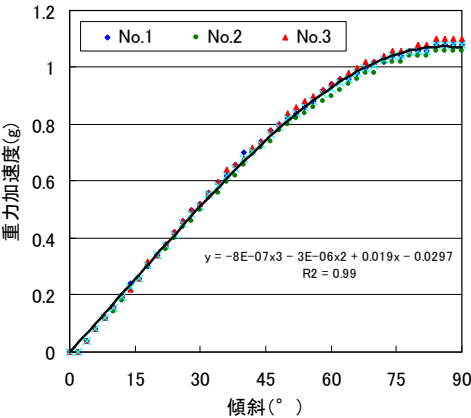


図-7 傾斜角度と重力加速度の関係

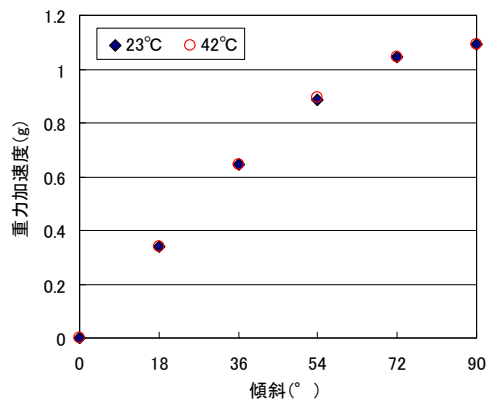


図-8 気温の違いによる変化

と、外気温の影響が少ないこと、傾斜角度が60度程度までは重力加速度と傾斜角に直線的な相関関係があることから、崩壊検知のような1°以上の傾斜変化を捉えることは可能であると考えられる。

6. 結言

無線センサネットワークを用いた土砂災害監視システムを構築する際の課題点として、通信の安定性、電源の確保が挙げられる。また、それと同時に搭載するセンサの精度、設置個所の選定手法、計測結果の解釈、閾値の設定などについても、十分検討を行う必要がある。

本稿では崩壊検知に対象を絞り、無線センサネットワークを用いた際の通信距離と電波強度の関係、MEMSによる大量生産型のセンサチップの精度検証について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 本研究で用いた 2.4GHz 帯の無線の場合、指向性の問題から通信間に障害物がある場合、電波強度が低下することが確認された。従って、のり面を対象にセンサノードを設置する場合は、見通しのある平地での通信性能に比べて、電波強度が低下することを考慮しなければならない。また、メッシュネットワークの特長を生かし、通信が安定する範囲内に少なくとも 2 つ以上のセンサノードを配置し、通信のロ

バスト性を考慮することも重要である。

- 2) 同じセンサ間距離であっても通信強度に差が出ることもあり、無線通信の判断の難しさも明らかとなった。対処方法としては、より通信の安定する側にセンサを配置することが必要となるが、通信装置の性能は日々進化していることを考慮すれば、必要な箇所に必要個数のセンサノードを設置するだけでロバストなネットワークを構築することが可能であると考えられる。
- 3) 崩壊検知を目的として大量生産型のセンサチップを用いる場合には、センサの分解能もさることながら、各センサの個体差、ばらつき度が小さなこと、また再現性が高いことなどが重要な項目として挙げられる。

謝辞：

本研究を進めるにあたり、大阪大学大学院の池永章祐君、土肥泰之君には学内での通信実験に協力頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 北村良介：降雨時の斜面モニタリングと崩壊予測技術の現状，土と基礎，Vol.55, No.9, pp.1-3, 2007.9.
- 2) 天野淨行，松山裕幸，足立智之：土構造物のメンテナンス，土と基礎，Vol.54, No.6, pp.59-66, 2006.
- 3) 藤田行茂，湯尻克宏，横尾裕，小泉圭吾，上出定幸：簡便型ワイヤレス現場計測手法及び実用システムの開発，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008, 2008.12.
- 4) 池川洋二郎，細谷真一：地盤環境のモニタリングの広域化とコストダウンのための無線センサネットワークの開発と検証，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演，pp.433-438, 2008.1.
- 5) 西山哲，大西有三，矢野隆夫，山本剛，西川啓一：リアルタイム岩盤斜面モニタリングネットワークシステムの研究，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演，pp.439-442, 2008.1.
- 6) 阪田史郎：ユビキタス技術センサネットワーク，P.8，オーム社，2006.

AN APPLICATION OF THE WIRELESS SENSOR NETWORK TO THE DEVELOPMENT OF A SLOPE FAILURE MONITORING SYSTEM

Sadayuki KAMIDE, Keigo KOIZUMI, Kazuma ONOUE and Yukishige FUJITA

Since natural disasters are reported in various regions, an advanced monitoring system for disaster prevention is needed. Our aim is to develop an early disaster detection system for the constructions along expressways. To develop the new monitoring system more efficiently, we use acceleration sensors which

are developed by MEMS. These sensors are used for slope deformation monitoring by combining with wireless devices which are built by mesh network. In this study, we verified the accuracy of the sensors and experimented on the stability of the wireless network system. As the results, we confirm the possibility that the acceleration sensors are useful for the disaster detection even if the resolution is low.