

ワイヤレスセンサ端末を内蔵した斜面災害監視杭の開発

A Development of the pile for monitoring slope disaster by using wireless sensor node

岡田謙吾¹・小林正典²・佐藤隆秀³

Kengo Okada, Masanori Kobayashi, and Takahide Sato

抄録：梅雨期や台風時の豪雨、地震時に発生する土石流や落石、異常出水などを、河川の河床、左右岸、堤防などの河川流域に本杭を打設することで、その発生を検知し、遠方へ通報するシステムである。従来の計測装置を補完し、多点に設置することでより迅速・確実に発生を検知、地域住民や工事関係者などへ通報、災害を未然に防ぐためのシステムである。

Abstract: The Pile equipped with wireless sensor node detects the occurrence and imparts information to a far place, for instance, mud flow, falling rock, and abnormal flood generated at downpour earthquake of rainy season and typhoon, by placing to the riverbed and the river valley in a right and left shore and the embankment, etc. This system supplements an existing measurement device, and set up a multipoint and more quickly, reliably detect the occurrence, informs the local populace and the person related to construction etc. and obviate a disaster.

キーワード：土石流、落石、杭、防災

Keyword: sensor node, avalanche of sand and stone, falling rock, pile, disaster prevention

表-1 現状の計測システムの特徴と課題

タイプ	名称	概念図	検知方法	特長と課題・問題点
接触式	ワイヤレスセンサ		流路断面内にワイヤを張り、その断端を検知することによって土石流の発生を検知する。土石流の水位についてはワイヤを上下複数に張ることによって計測することが可能。	●設置が比較的に容易で最も広く用いられている。 ●検知の確実性は比較的高い。 ●植物や落石など誤作動がある。 ●一度敷設すると人為的変更を要するため、土石流の連続検知は出来ない。
	光センサ		ワイヤの代わりに可視光または赤外光を使用し、光線の断端を検知することによって土石流を検知する。土石流の水位についてはセンサを上下複数に設置することで大まかに計測可能。	●検知の確実性はやや低い。 ●濁水・濁泥・濁砂・濁石等による誤作動あり。 ●検知の遅延は比較的高い。 ●植物や落石など誤作動がある。 ●一度敷設すると人為的変更を要するため、土石流の連続検知は出来ない。
非接触式	音響センサ		音響検出マイクにより20-5000Hzまでの音域を検出し土石流の発生を検知する(地中を伝わる音を捉えるため、外部音の影響は避けにくい)。流路断面の傾斜によって土石流検知の精度が異なる。	●火山の爆発、自動車等の音響の区別は可能。事前のレベル設定が必要。 ●事前のレベル設定によっては、火山爆発や自動車等からの音響を拾って誤作動を起こす可能性あり。 ●土石流の連続検知が可能。
	振動センサ		土石流の流下時に発生する地震動を捉える振動センサを用いて、土石流を検知する。周囲の振動の強弱によって土石流検知の精度が異なる。	●火山の爆発、自動車等の音響の区別は可能。事前のレベル設定が必要。 ●事前のレベル設定によっては、火山爆発や自動車等からの音響を拾って誤作動を起こす可能性あり。 ●土石流の連続検知が可能。
	超音波水位計		超音波水位計により、パルス状の超音波を送受信し、その往復時間から土石流の水深を計測する。超音波の速度は温度によって変化するため、計測と同時に温度を測定し、速度の補正を行う。	●河川の水位計測では実績があるが、土石流の検知装置として使用する場合には検知の遅延・誤作動の発生が懸念される。 ●河川の水位計測では実績があるが、土石流の検知装置として使用する場合には検知の遅延・誤作動の発生が懸念される。

1. はじめに

土砂災害防止法では、全国における土砂災害警戒区域のうち土石流 35,420 か所、急傾斜 54,000 か所以上が指定され、実際に、毎年多くの被害が発生している。

対策として、種々の斜面変位や土石流の発生検知システムが導入され、効果が確認されている。しかしながら、広い範囲を面的に把握し、簡便にかつ安価に設置・運用されているとは言い難い状況である。

本システムは、振動センサ・無線通信モジュール・電源を具備したセンサ端末を内蔵したプラスチック杭を複数、河川横断、河川縦断方向にわたって河川流域内に敷設し、異常出水や土石流などを動的な異常を検知する斜面防災システムである。複数の計測点（杭）からの情報（ID、発生時間）を収集・中継装置に無線で送信し、流域住民、工事従事者などに通報・警告する機能を有するシステムである。

2. 現状の計測システム

土石流を例として、現状のシステムを整理すると、土石流災害の軽減のためには、土石流の発生や規模等を早期に把握する必要がある。従来の検知方法は、接触型と非接触型に大別される。

接触型は、流路断面内にワイヤを水平に張り土石流が発生するとワイヤが断線してこれを検知する。土石流の水位については、ワイヤを上下に複数本張ること

により、発生を検知することが可能である。

非接触型としては、上記ワイヤの代わりに光線を使用する光センサ、土石流の発生音をマイクで検知する音響センサ、土石流の流下時に発生する地震動を捉える振動センサ、或いは土石流に向けて超音波を発生すると共に、その反射波を受信して、その往復時間から水位を計測する超音波水位計などがある。

検知方法の特徴と課題を表-1 に取りまとめた。

3. 要求機能と用途

(1) 要求機能

現状の検知システムの特徴・課題を踏まえ、本システムの開発に当たっての基本的な要求機能として以下

1：非会員 株式会社リプロ 常務取締役

(〒701-0213 岡山市中畦1186, Tel :086-298-2281, E-mail : info@ripro.co.jp)

2：非会員 株式会社リプロ 製造部 工務係

3：非会員 株式会社テスコム (〒192-0073 東京都八王子市寺町 29-8, Tel :042-658-7066, E-mail : sato@tescom-net.com)

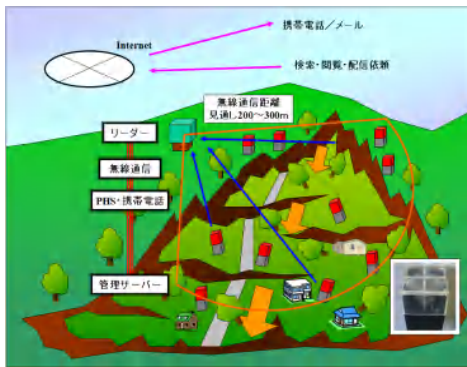


図-1 設置のイメージ

をあげた。

- ・落石や土石流など発生を短時間にしかも確実にセンシングできること
- ・小型軽量で杭に内蔵できる端末であること
- ・安全にしかも短時間で設置ができる
- ・電源・通信線を必要とせず、ワイヤレスでデータ通信が可能なこと
- ・複数個所の同時計測が可能なこと
- ・長期間の連続稼働が可能なこと

(2) 用途

本システムの利用場面は、災害監視はもちろんのこと構造物管理、施工管理まで、リアルタイムに安全・安心を目的とした幅広い用途が期待される。

a) 地すべり・土石流検知

地すべり地域に杭を設置し、リアルタイムな変状監視を実現する。杭の本数や計測頻度を変更することで現地状況に即した監視を行う。

b) 道路やダム近傍の斜面管理

長大のり面や不安定性要因を有するのり面に設置し、リアルタイムの変状監視を行う。

c) 切土・盛土施工

切土・盛土施工の進捗に応じて杭を増設・移設でき、リアルタイムに変状監視し施工時の安全性を確保する。

d) 近接施工（鉄道）

軌道盛土や高架橋・鉄橋等にセンサ部を設置し、近接施工に伴う軌道変位の監視や軌道沿いの斜面の監視に適用する。

4. システムの概要

(1) 主な機能

今回、要求機能を踏まえCPU、重力加速度センサ、電源、特定小電力通信モジュールを一体化した小型センサ端末（写真-1）を開発し、標準的な測量用プラスチック杭に内蔵した衝撃検知杭を開発した（写真-2）。次に主な特徴と機能を挙げる。

- 杭を打込むだけで設置できる。
- 複数設置することで、誤検知が少なくできる。
- 重力加速度センサにより杭に接触や衝突する水流・土石・流木を検知する。（図-1）
- 同時に、杭のIDを遠隔に（200~300m）設置した通信収集・中継装置に送信する。
- 破壊・破損しない限り、何度でも使用できる。

- 杭の配置、検知範囲（数）により定常状態との差を判別する。
- 検知範囲・検知杭の本数から、土石流や落石、出水の判定、規模を推定する。
- 複数の河川縦断方向の検知情報から、土石流の速度を推定する。
- 正常動作確認のため、定時発報する機能を有する。
- 遠隔地の管理者や住民、施工業者に状況を通報する。
- 無線ICタグの検知情報（ID、時間）を収集・中継装置を介して、遠隔地に送信、携帯電話やPHSを用い通報・警告する。
- 従来の計測法に比べ費用を低減できる。

(2) 構成

本システムは、センサ端末を杭に内蔵して所定の観測地点に複数設置し、センサ端末が検知する各種計測情報を200~300m離れた場所に送信し情報を取得する収集・中継装置とから構成される（図-2）。土石流など地盤に変動が生じた場合に、センサ端末が検知した振動や衝撃は数値として計測され、各設置点の情報は収集・中継装置に無線通信にて集約される。収集・中継装置が取得した情報としては、地盤変動値などを記録した計測値、時間やセンサ端末それぞれ付与されている固有の識別情報（ID番号など）、設置位置などを有する。



写真-1 内蔵センサ（右はプロタイプ）



写真-2 杭に装着した状態

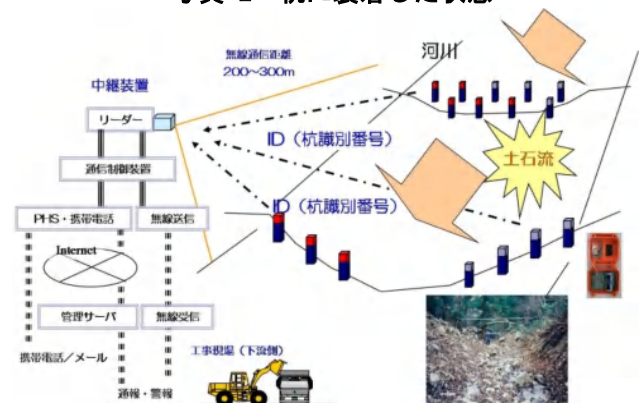


図-2 システムの構成

表-2 センサ端末および通信の仕様

項目	内容
形状	φ60mm 厚さ15mm
通信周波数	426MHz帯
通信方式	2値FSK変調方式、ノイズに強く確実な動作が可能 変調速度：4800bps
端末と受信機の構成	1システムの標準構成：送信機20台、受信機(収集装置)1台
構造	端末は防水構造(IP57・防塵、防水相当)
電源	端末はDC3.0Vリチウム電池 1個
連続稼働時間	1~2年(通信頻度、計測サンプリングによる)
重力加速度の検知レベル	4段階切替
使用温度範囲	0℃～+60℃
消費電流	端末：16mA以下(送信時) 受信装置：300mA以下(AC100V)

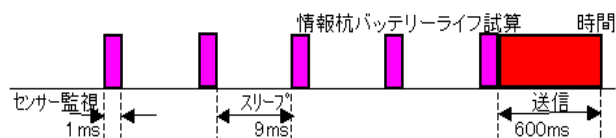


図-3 監視・送信タイミング

(3) システムの仕様

センサ端末および通信の仕様を表-2に示す。出力データは、杭（端末）のIDおよび時間である。センサ端末が検知する情報は、収集・中継装置にPCを接続し、PCに集約することも可能である。

(4) 稼働時間の算定

センサ端末による状態監視は、図-3に示すような監視状態（1ms）とスリープ（9ms）を繰り返す、所定のタイミングで収集・中継装置に向けてデータ送信を行う。バッテリーライフ（電源寿命）に関連して最も電力を消費するのがデータ送信であり、シミュレートした結果が図-4である。送信間隔が15分毎の場合が最も短く約580日間稼働となるが、60分毎から収束が始まり2時間半毎（約630日間稼働）の段階で送信をしない場合と近似する。

(5) 設置方法

設置手順は、図-5に示すように、①埋設位置の確定、②杭頭部保護キャップの準備、③保護キャップ杭頭部への装着、④かけや等での杭打込み、⑤キャップおよび保護キャップの取り外し、⑥センサ端末の装着、⑦センサ端末の位置確定、⑧キャップ装着、⑨専用ネジによるキャップ固定で行う。センサ端末破損を防ぐために③の段階では杭頭部にセンサ端末が装着されていないことを確認した上でキャップを装着し、かつキャップ保護のための保護材が装着されていること。センサ端末には検知方向があり、埋設位置に合わせた位置決めを行うこと。⑨ではセンサ端末が悪戯や盗難に会わない様に専用ネジによるキャップの装着と固定に心がけるようにする。また、現場での設置に際しては、積雪・地中では、通信距離が減衰する可能性があるため地上にセンサ部を突出させて設置する、杭が打設することができる地盤であること、杭の配置、設置方法は事前に検討すること、センサ端末からゲートウェイ装置までの距離は200m以上（通信可能距離）を確保するように設置する、などの点に留意する必要がある。

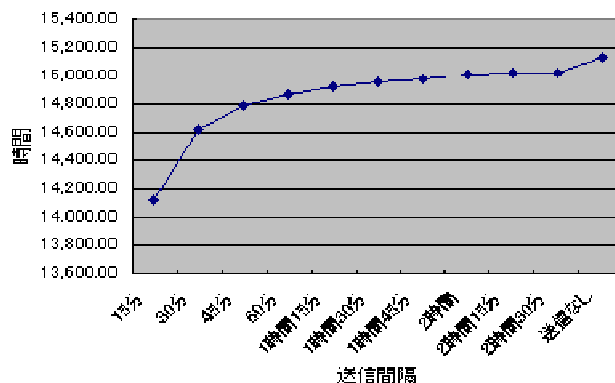


図-4 通信頻度と電源の寿命の関係（概算）

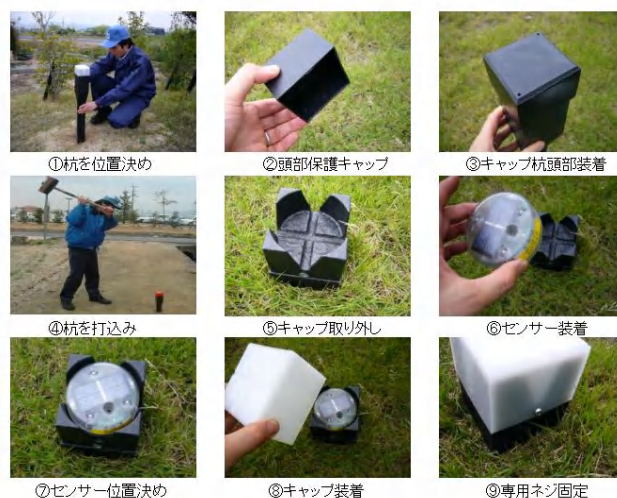


図-5 杭設置（打ちこみ）の手順

5. 検知・通信機能確認実験

(1) 通信範囲の確認試験

1) 目的：設置環境により樹木や構造物にて通信範囲を制限される可能性がありこれを確認するため通信範囲の確認試験を行った（図-6）。

2) 実験方法：

a) センサ端末を杭頭部に内蔵し、地上からの高さごとの（30 cm, 50 cm, 100 cm）、収集・中継装置（100 cm）との相対位置での通信性能を検証した。

b) 426MHz 周波数帯は拡散する特性があり、通信進路上の障害物の影響を受けにくいとされており、そこで、電波の廻り込みがどの程度あるか確認した。

3) 実験結果

a) 屋外での通信実験の結果、表-3に示すとおり、見通しでの通信距離は概ね300mの性能を示すが、設置するセンサ端末の高さが地表に近づくに従い地盤の影響を受ける傾向を確認した。これは電波の反射や吸収の影響があると考えられる。一方、周辺樹木の育成状況にも依存するが通信性能の低減を確認した。

b) 収集・中継装置を固定し、工場周辺にセンサ端末を移動させることで通信の可否を確認した。直進方向での通信は特に問題なく、建物内部での電波の伝達性

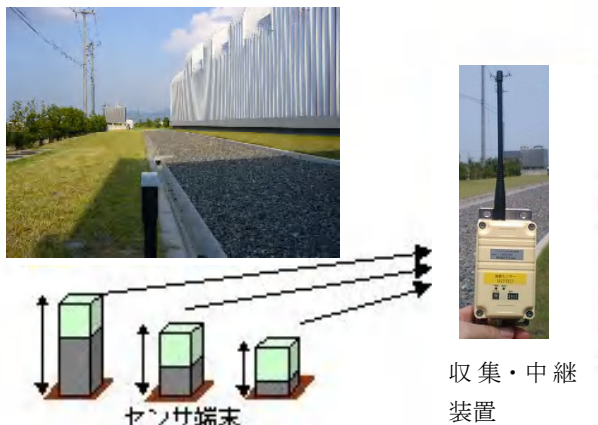


図-6 通信試験

表-3 通信試験結果

端末高さ	見通し通信距離	樹木ありの場合
30 cm	250m	230m
50 cm	290m	270m
100 cm	300m	280m

が優れ、窓枠を持つ構造物を通過して通信することを確認した。実験では工場周辺を利用したが建物の外装壁面がアルミなど反射性能の高い部材を利用している場合など一部通信出来ない結果を得た。

4) 考察 : 426MHz 帯では障害物による通信の遮断を受け難い特性があるが、実験よりセンサ端末と収集・中継装置はある程度地表からの高さを確保する必要があるが、樹木、構造部などの影響も少なく通信性能を確保出来ることを確認した。

(2) 衝撃検知の確認試験

1) 目的 : センサ端末は検知した重力加速度レベルに応じて ID を返す仕組みであり、その重力加速度の検知性能を検証した。

2) 実験方法 : センサを収納した状態で水平に固定し、おもりを杭上方より自由落下させ、センサ端末の落下エネルギー（衝撃度）の反応を確認した（図-7）。

3) 実験結果 :

a) 実験の結果検知レベル毎の落下エネルギーを計測した結果を表-4 に示した。

b) 重力加速度 G と落下エネルギー ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}^2$) の関係は図-8 により表され、杭に内蔵した状態でセンサ端末が所定の検知レベルを実験においても確認することができた。

6. まとめ

本システムの開発で、無線、半導体センサを用い、小型軽量で設置が容易で、多点計測が可能なあらたな計測手法を確立できた。また、杭に内蔵することで、現場の作業を迅速かつ安全にすることができるよう改善された。

また、残された課題として、現場で通信可能範囲の

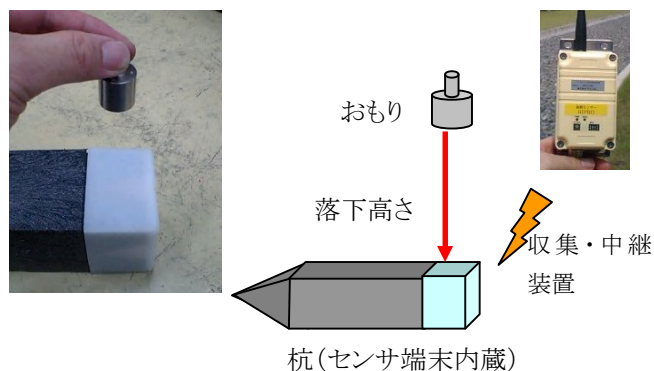
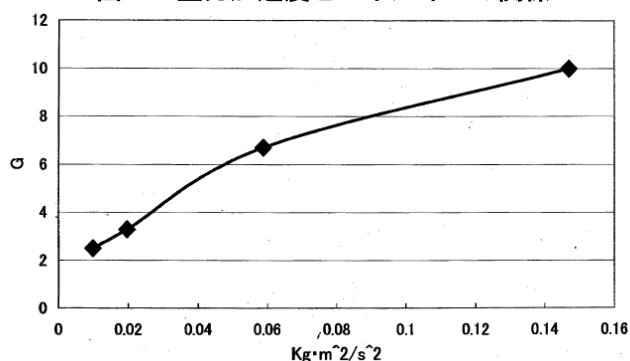


図-7 落下によるセンサ検知の確認

表-4 落下試験結果

検知レベル	おもり	落下高さ	落下エネルギー $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}^2$
2.5G	20g	5cm	0.0098
3.3G	20g	10cm	0.0196
6.7G	20g	30cm	0.0588
10G	50g	30cm	0.1470

図-8 重力加速度とエネルギーの関係



確認、杭は埋設により減衰が大きくなるため埋設方法の確認、現地の条件を考慮して杭の配置、設置方法などの検討、概ね1-2年で電池交換が必要となる、遠方への警報のための通信手段の確保が必要で、PHS、携帯電話など通信環境が整っている環境である、など導入に当たって留意すべき課題がある。

今後は、現場の実証実験を実施し、配置や埋設などの設置方法、現場での通信確認方法やデータの評価について検討を進め、小型化、低価格化を含め信頼性の向上をさらに図り、実用化システムとして導入を進めていく予定である。

さらに、現在、今回の報告のような動的な変化を監視する検知システムから、地すべりなどの静的な動きを多点で同時計測する計測杭の開発に着手している。

参考文献 :

1) 土木学会情報利用技術委員会編 : 「土木情報ガイドブック-土木技術者のための情報収集と活用-、2007年9月