

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630215

研究課題名(和文)地盤中の水の挙動の調査を格段に進展できるワイヤレスマルチセンサの開発への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to development of wireless multi-sensor which make remarkable progress of pore water behavior of ground

研究代表者

風間 基樹(kazama, Motoki)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：20261597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：間隙水中の差圧や流量、土の動き等を地盤中で計測する技術が求められている。本研究では使用形態の異なる3つのセンサを試作しその性能試験を実施した。1)長期の沈下や変形のような準静的な動きのある地盤中で使用するマルチセンサ(水圧、3軸ジャイロ)、2)比較的移動距離が長く、急激な動的な動きのある地盤中で3成分加速度・3軸ジャイロにより、剛体運動を計測しデータを実験の後に回収するタイプ、3)室内大型振動台実験用として、間隙水圧・加速度3成分・3軸ジャイロを持つタイプ：比較的短距離の水中地中部から無線でトリガー信号をかけて内部メモリにデータを蓄積した後に、震動実験後にデータを伝送回収するタイプである。

研究成果の概要(英文)：Monitoring technology of differential water pressure, motion of soil particle, etc. are required recently. In this research program, the following three kinds of prototype multi-wireless sensors were made and their performances were studied. 1) the multi-sensor composed of water pressure and 3-axis gyro which is used in the relatively slow ground motion such as long-term settlement and deformation, 2) the sensor composed of 3-axis accelerometer and gyro which records relatively long moving distance with relatively high velocity as a rigid body, 3) For laboratory vibration test, the sensor composed of 3-axis accelerometer, 3-axis gyro and pore water pressure meter which installed in the model ground. The data recorded in a memory is transferred by wireless contact after model vibration test.

研究分野：地盤工学

キーワード：マルチセンサ ワイヤレス 地盤モニタリング 間隙水 差圧 土の動き 土中水の動き

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震の際に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故の収束事業の中の重要課題の一つに汚染地下水の制御がある。これが大きな技術的問題になっている背景には、そもそも地盤中の水の挙動のモニタリングが難しいことが挙げられる。従来技術としての地下水の流況調査は、数点のボーリング孔を観測井として、水圧を計測することが基本であるが、限られた情報であることや複雑な地盤構造・水理境界条件を持った実地盤では、面的あるいは立体的な水の挙動の把握には十分でない断片的な情報しか与えてくれない。一方、古くからの地盤工学の問題である圧密現象やポスト液状化現象(液状化後の間隙水の移動によってもたらされる現象)は水の移動現象がその核心にある。

これらの現象を、サイトごとに異なる原地盤構造、水理境界条件の下で詳細に調査するためには、地盤中の多点で同時に、水圧の勾配(差圧)、流量をモニタリングできる調査手法の開発が不可欠である。加えて、地盤は地震や地すべり、土石流などの現象によって、大きく移動変形することもある。本研究で開発を目指したワイヤレスマルチセンサシステムは、これらの諸現象を詳細に分析できるような強力なツールを開発しようとするものである。

2. 研究の目的

地盤工学の関連する工学的問題のうち、地下水の動きはもとより、粘性土の圧密沈下や粘性土の湿潤膨張による軟化現象、液状化後の浸透流動破壊現象等の理解には、間隙水の移動や地盤自身の移動変形の把握が欠かせない。水の移動は場所的な水圧差によって生じるが、間隙水の差圧や流量を地盤中で直接的に計測するセンシング技術は今のところ無いと言ってよい。さらに、本研究では、ワイヤレスでこれを実現することに挑戦するが、地盤中(水中)に埋めて放置し、モニターするタイプのものは、今のところ、実用的に使われていない。ワイヤレスマルチセンサシステムは、有線のシステムでは出来ない大変形大移動を伴う現象や多点同時モニタリングを容易にし、地盤中の水の挙動の調査技術が格段に進むことが期待できる。図1は、ここで目指すシステムのイメージ図である。

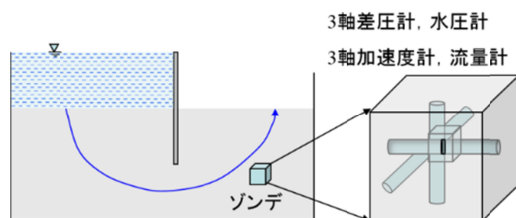


図1 開発マルチセンサとその使用イメージ図

研究期間内には、目指すセンサシステムのプロトタイプを作成し、その性能仕様、実現性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 利用する周波数帯域について

地盤中(水中)から無線によりデータを伝送するためには、地中や水中を伝わる超長波(3~30kHzの周波数帯域)~長波(30~300kHzの周波数帯域)の電波を利用する必要がある。そのため、市販の小型低廉の送信機及び受信機を様々な角度から検討した。具体的には、地中又は水中部にセンサ部を置き、埋め殺しあるいは放置した状態で使用する

ためには、センサにデータ送信部が必要であること

のために、所要時間だけ持つような電源バッテリーが必要であること

センサ部に付随する送信機器、電源部が約10cm立方程度の大きさに収まるほどに小型であること

水密性を要すること

等が要件となるが、これを実現できる超長波~長波の送信機器・電源機器は現時点では存在しないことがわかった。

そこで、センサを地中あるいは水中に放置し、埋め殺すタイプのセンサの使用については、本研究期間内の目標とせず、センサ部から地上までは有線ケーブルを利用し、地表部の送信機からのデータ伝送を行うタイプとセンサにワイヤは無いが、センシング後にデータを回収するタイプのセンサのプロトタイプを試作し、その性能試験を実施した。

(2) 試作を目指したセンサタイプ

地盤工学で問題となる地盤中でのセンサとして、以下の3つのセンサシステムのプロトタイプを作成し、その性能試験を実施した。

A-Type: 長期の沈下や変形のような準静的な動きのある地盤中で使用するマルチセンサ(水圧計、3成分差圧計、3軸ジャイロ)。この場合には、データのサンプリング間隔は数分~数時間となるもので、大きな容量のメモリーや無線伝送に関して大きな制約はない。

B-Type: 室内大型振動台実験用として、間隙水圧・加速度3成分・3軸ジャイロを持つタイプ: トリガーをかける為のモニタリングchにおいて、ある値以上の信号を検知したら、内部メモリーにデータを蓄積開始し、振動実験後にデータを伝送回収するタイプ。この場合には、データのサンプリング間隔は100Hz~200Hzとなる振動時のサンプリング間隔と1Hz~0.1Hzとなるその後のサンプリング間隔をあらかじめ、センサにプログラミングしておく必要がある。

C-Type: センサ自身が大きく移動し、急激な

動的な地盤や岩塊の運動を捉えるワイヤレスマルチセンサとして、3成分加速度・3軸ジャイロを備えたタイプ：いわゆる剛体運動を計測し、データは実験の後に回収するタイプ。

図2は、これら3つのタイプのセンサの利用形態、概要を示したものである。図3は試作するマルチセンサの基本ブロック図である。

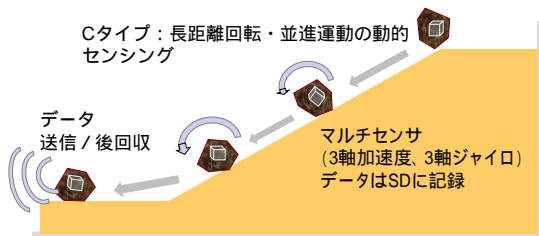
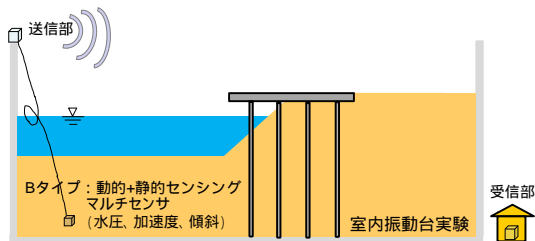
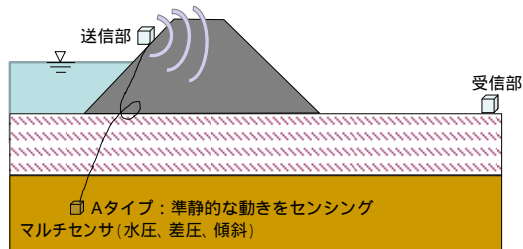


図2 3つのタイプのセンサの使用イメージ

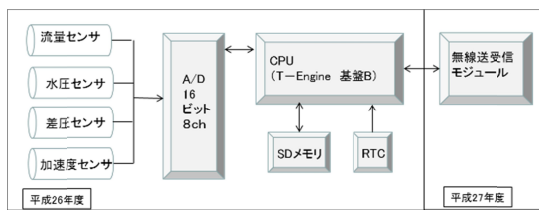


図3 試作するセンサの基本ブロック図

4. 研究成果

- (1) 流動化した土砂の動きをモニタリングするために試作したセンサ(Cタイプ)

流動化した土砂の動きを調べるためのワイヤレスマルチセンサを試作した。図4, 5は、センサのブロック図、構成図であり、写真1~3は、その概観を示したものである。ケース外寸：W101.5×D101.5×H100で、重さ：540g(電池含む：単3アルカリ乾電池6本)

である。センサ部は、水位センサ(絶対水圧)、差圧センサ(箱の両端面の水圧差)、3軸加速度+3軸ジャイロ+3軸コンパス)となっている。マイコンが内蔵しており、PCから計測部メモリーへのデータサンプリング条件をコントロールできるようになっている。

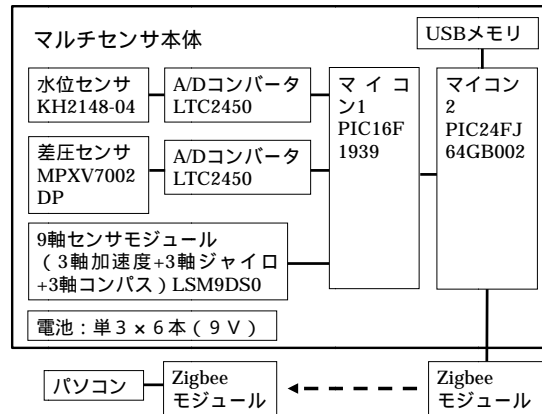


図4 ワイヤレスマルチセンサ(Cタイプ)のブロック構成図

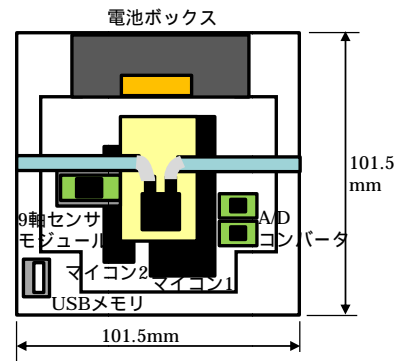


図5 ワイヤレスマルチセンサ部の構成図

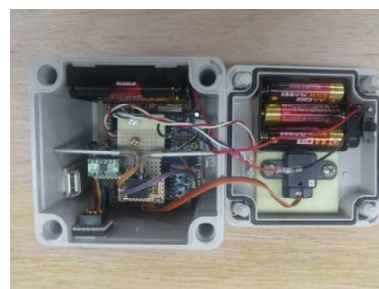


写真1 センサ概観

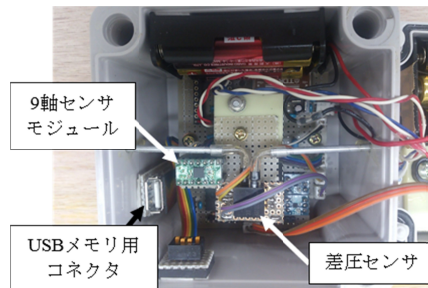


写真2 写真1左側の構成内容

性能試験では、これを図6に示すような回転式の流動土砂試験装置の土砂中に投入し、無線での回転装置稼働中のデータ回収、および実験後にSDメモリに蓄えられたデータの回収、それぞれがうまく行くかどうかを試験した。ドラム式流動試験装置に投入しての試験では、途中で乾電池が脱落するなどトラブルがあったが、それまでのデータは取得された。実際への適用では、電池の脱落対策を別途考える必要がある。また、得られた個々のセンサの記録から、センサの剛体としての動きの再現性については、別途の計算アルゴリズムにより、2次的な整理が必要であるが、その再現性については、現時点で必ずしも満足の行くものになっていないため、今後の課題として残っている。

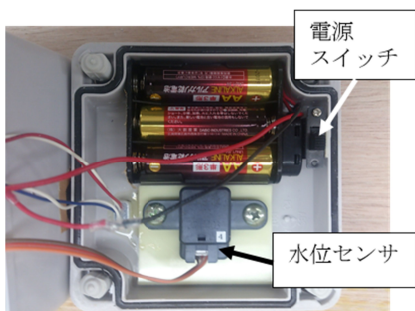


写真3 写真1右側の構成内容

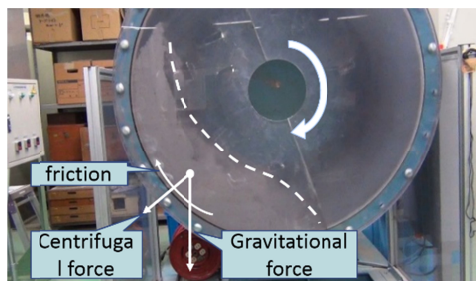


図6 回転式土砂流動試験装置を用いた性能確認試験の様子

- (2) 盛土による粘性土地盤の圧密沈下モニタリングに使った試作センサ(Aタイプセンサ)

盛土による基礎地盤粘性土地盤の過剰間隙水圧および傾斜・加速度をモニタリングするためのセンサを試作し、平成28年度に現場にて設置、モニタリング試験を実施した。センサ部および送受信部のブロック構成は図7に示すとおりである。また、図8にはその構成を示した。さらに、表1にはシステムの仕様を一覧表にして示した。

このセンサは、河川河口部における盛土による過剰間隙水圧の発生と消散、および緩やかな傾斜・沈下を計測する目的で地中に設置するものである。性能試験では、比較的浅い地盤に設置したため、過剰間隙水圧の発生と消散は感度良くモニタリングできなかった。また、冬季の温度変化のため、計測値のドリフト、不安定化が生じ、センサ自身の機種を選

定に、配慮が必要であることや地中水中部での絶縁性も確実に達成することが実用化上のポイントであることなどがわかった。

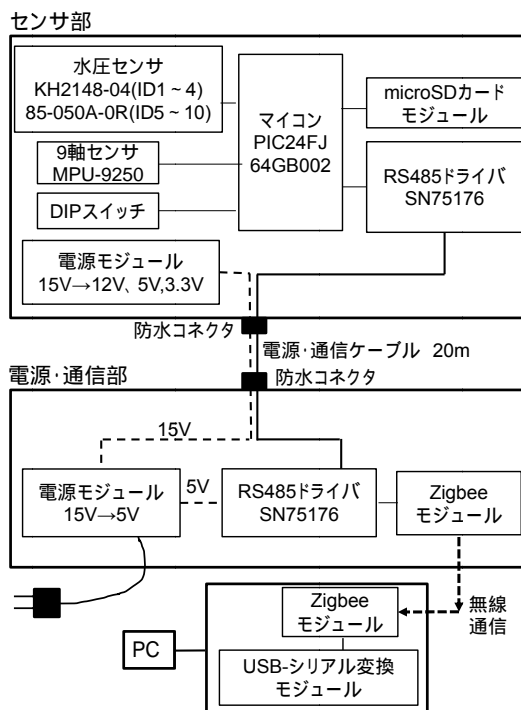


図7 ワイヤレスマルチセンサ(Aタイプ)のブロック構成図

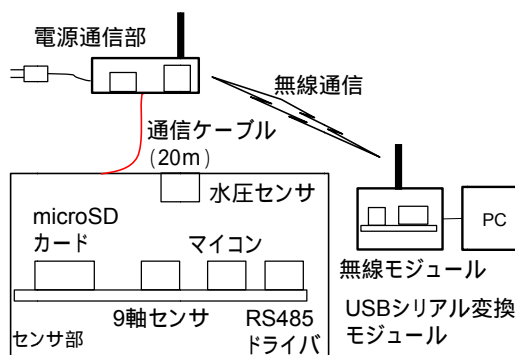


図8 ワイヤレスマルチセンサ(Aタイプ)の構成

表1 Aタイプ試作センサのシステム仕様測定部

項目	内容	測定範囲
測定項目	水圧	-49 ~ 68.6kPa
	測定器	加速度：±16g
		拳動
		コンパス：±4800μT
記録	microSDカード	
寸法	W50×D65×H45	

電源・通信部

項目	内容	備考
測定 間隔	可変 (10ms、1s、10s、 60s、10min、60min)	
通信	Zigbee 通信速度 : 38,400bps、プロンプト無 チャットモード	通信ケーブ ル 20m
電源	AC アダプタ (DC15V)	測定部へ供 給

受信部

項目	内容
通信	Zigbee (電源・通信部) 通信速度 : 38,400bps、シリアル (対パソコン) 通信速度 : 9,600bps
電源	USB 給電 (DC5V)
寸法	W60 × D40 × H85

(3) 大型模型振動台実験用の動的・静的センシング用センサ (B タイプセンサ)

野外での放置使用に当たっては、電源供給や耐温度変化、絶縁対策など、耐久性・継続性に係わる問題が重要である。一方、室内での模型振動実験に使用するセンサは、電源供給は大きな問題にならないし、センサの回収も可能である。B タイプのセンサの技術的なポイントは、

振動実験時のトリガー信号をどのようにかけて、センサ間の同期を如何に確保するか

振動時のサンプリング間隔と振動後の緩慢な挙動時のサンプリング周波数の変化をどのように決めるか

取得したデータの転送はどうか

等である。

これに関しては、防災科学技術研究所等で行われる実大規模の大型振動台実験を対象として、実験担当者にヒアリングを行い、その仕様について検討した。このような実大規模の震動破壊実験では、計測項目が多岐多チャンネルに渡ること、地盤に大変位が生じる現象を対象にするため、センサのマルチ化、ワイヤレス化は実験準備作業の大きな軽減になるだけでなく、地中のワイヤリングがなくなるため、模型地盤の再現性が高くなることも期待される。

上記に示した技術的なポイントの克服のためには、以下の方策が考えられた。

震動実験のトリガ信号のみを無線でかける方式

実験時のサンプリング周波数をあらかじめプログラミングしておく方式

取得データは SD メモリに一旦記録し、実験後に掘り出し回収するか、実験後に無線でデータ転送する方式

上記に加えて、センサの同期にはマイコンの時計を利用することなどが考えられる。このうち、およびについては、更なる技術開発が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

Yasuhara, K., Kawagoe, S. and Araki, K.: Geo-disasters in Japan in the Context of Climate Change, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA* Vol. 48 No. 1, pp.1-11, March 2017 ISSN 0046-5828.

M. Kazama, T. Kawai, J. Kim, T. Morita and T. Unno, Earthquake-Induced flow-type failure in volcanic sandy soils and tentative evaluation of the fluidization properties of soils, *Volcanic Rocks and Soils*, Rotonda et al. (eds), pp.363-369, 2015. 査読有 .

[学会発表] (計 2 件)

風間基樹 株木宏明 森田年一 齊藤 修, 神澤雅典, 液状化した火山灰質砂質土や鈎さいの流動性評価の試み, 地盤工学会, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム 発表論文集, pp.13-16, 2015.7/6-7, 日本大学工学部 (福島県・郡山市) .

風間基樹・株木宏明・山崎智哉・森田年一:2014 年広島土石流災害現場の立体視画像とまさ土の流動性, 土砂流失特性評価の試み, 自然災害研究協議会研究論文集, 第 1 号, pp.27-30, 2015.3.21, 山口大学工学部 (山口県・宇部市) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

風間 基樹 (KAZAMA, Motoki)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 2 0 2 6 1 5 9 7

(2) 研究分担者

安原 一哉 (YASUHARA, Kazuya)
茨城大学・地球変動適応科学研究機関・特命研究員

研究者番号 : 2 0 0 6 9 8 2 6

鎌田 賢 (KAMADA, Masaru)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号 : 7 0 2 0 4 6 0 9

森田 年一 (MORITA, Toshikazu)
群馬工業高等専門学校・環境都市工学科・
准教授
研究者番号： 10353236