

各種センサ技術を活用した土構造物管理の高度化

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平 17～平 20
担当チーム：施工技術チーム
研究担当者：小橋 秀俊、宇田川 義夫、
堤 祥一、澤松 俊寿

【要旨】

土構造物の施工管理、維持管理において、災害の危険性の高い箇所、土構造物としての重要性の高い箇所に、監視カメラ、変位計等の設置によるモニタリングが行われている。しかしながら、設置の伴う労力やセンサーの価格、センサーの管理の手間等の問題より、必要箇所に対してモニタリングが充分でないことが問題となっている。これらの問題点を解決するには、①安価②設置の手間がかからない③長期計測が可能④リアルタイム計測が可能⑤高精度が求められるものと考えている。しかしながら、当チームにて調査した結果、全ての要件を満足できるセンサーは見当たらなかった。そのため、要求される性能に応じたセンサーの使い分けが重要であるとの認識に立ち、①～③の条件を満足する IC タグと④、⑤の条件を満足できる 3D 地中変位計に注目し、基礎実験を実施して、それぞれのセンサー性能把握と適用性の検討を行った。

キーワード： 土構造物 維持管理 IC タグ 3D 地中変位計

1. はじめに

土構造物の施工管理、維持管理において、災害の危険性の高い箇所、土構造物としての重要性の高い箇所に、監視カメラ、変位計等の設置によるモニタリングが行われている。しかしながら、設置に伴う労力やセンサーの価格、センサーの維持管理の手間等の問題より、必要箇所に対してモニタリングが充分でないことが問題となっている。

これらの問題点を解決するには、①安価②設置の手間がかからない③長期計測が可能④リアルタイム計測が可能⑤高精度が求められるものと考えている。しかしながら、当チームにて調査した結果、全ての要件を満足できるセンサーは見当たらなかった。そのため、要求される性能に応じたセンサーの使い分けが重要であるとの認識に立ち、①～③の条件を満足する IC タグと④、⑤の条件を満足できる 3D 地中変位計に注目し、基礎実験により、それぞれのセンサー性能把握と適用性の検討を行った。

2. 安価で長期計測に適したセンサーに関する検討

2. 1 IC タグについて

近年、モニタリング機能のワイヤレス化、低コスト化に寄与すると期待される技術として、IC タグが挙げられる。IC タグとは、メモリ機能と無線通信機能を内蔵したタグであり、受送信機を用いて、非接

触にて、データの書き込み、呼び出しを行うことができる。そのため、物品管理や、入場者管理などの流通分野において、実用化に向けた研究が進められており、軽量でかつ価格も安価である。現状の IC タグは大きく 2 つに分類することができ、1 つは IC タグ自身に電池を搭載したアクティブ型、もう 1 つは、タグは電池を持たず、外部からの起電力を基に発電を行うパッシブ型である。(図 1) 2 つの型にはそれぞれに長所と短所を有しており、アクティブ型は通信距離が長いものの、大型で高コスト、電池切れなどの短所があり、パッシブ型は、寿命は半永久的であるが、電力量が小さいため通信距離が短いといった特長がある。

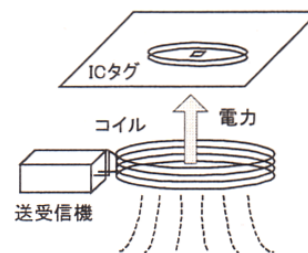


図 1 IC タグ（パッシブ型）の概念

2. 2 IC タグの基礎実験

(1) 地中埋設型 IC タグの特性

コストが安く、設置が安易で、長期計測が可能な IC タグの中で、土構造物の維持管理に使用できる可能性の高い IC タグの調査を実施した。結果、地中埋設が可能なパッシブ型の IC タグ（㈱フジテコム製）に注目し、基礎実験を実施した。

地中での IC タグ利用における最大の問題点として、水による通信距離の減衰が挙げられる。IC タグの通信周波数を表 1 に示す。周波数により、交信距離や指向性、通信速度、ノイズ、電波障害の特性が大きく異なる。

表 1 IC タグの通信周波数の特性

周波数	長波帯 ~135kHz	短波帯 13.56MHz	UHF帯 860~960MHz	マイクロ波帯 2.45GHz
通信方式	電磁誘導方式		マイクロ波方式	
最大通信距離	60cm程度	70cm程度	数m	1.5m程度
水分の影響	◎	○	×	×
金属の影響	◎	○	×	×
ノイズの影響	×	○	◎	◎

◎、○ …影響が小さい × …影響が大きい

今回使用した埋設管の管理用 IC タグの仕様は、長波帯（125 kHz）であり、計測用のバギーに接続した PDA より ID 等の情報を読み取ることができ、タグの内部にはイントレットとよばれる薄いフィルムとアンテナが内蔵され、合成樹脂で完全に防水被覆されており、周辺金属による影響が生じにくい構造となっている。（図 2）

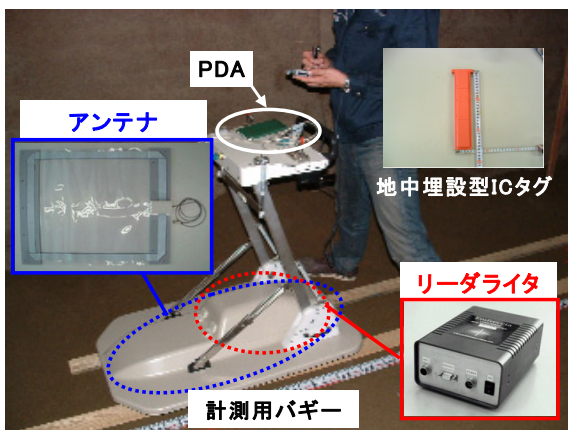


図 2 地中埋設型 IC タグ

(2) 実験概要

実験は、鉄筋コンクリート製の土槽（縦 4.0m × 幅 3.5m × 深さ 4.0m）内に、計測用バギーの進行方向を基準に、設置向きを変化させた 3 つの IC タグを設置し、川砂（自然含水比 6.9~8.4%）を 1 層 25cm で埋戻しながら、計測を行うことで、通信範囲の把握を

行った。図 3 に IC タグの配置を示す。

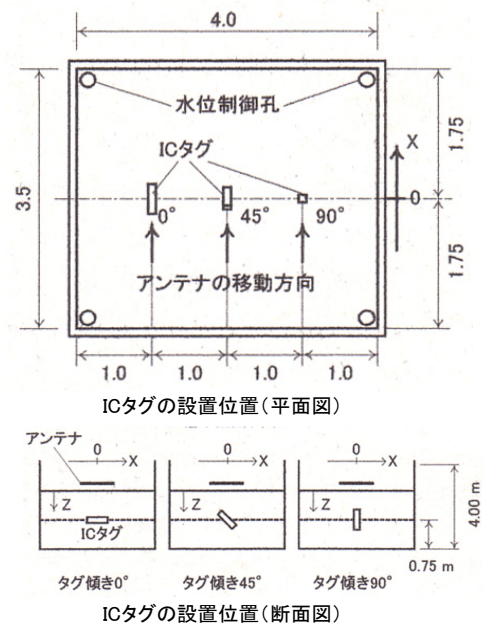


図 3 IC タグの配置

(3) 実験結果

実験により得られた、PDA で IC タグを認識できる範囲を図 4 に示す。これより、地中埋設型 IC タグは電波に指向性を有しており、IC タグの向きにより認識できる範囲が異なること。IC タグの真上に、極端に通信範囲が狭くなる”ヌル点”が存在することが分かった。そこで、次に地下水位を上昇させ、水分が通信距離に与える影響の把握（図 5）を行ったが、自然含水比の地盤と同じ結果となった。

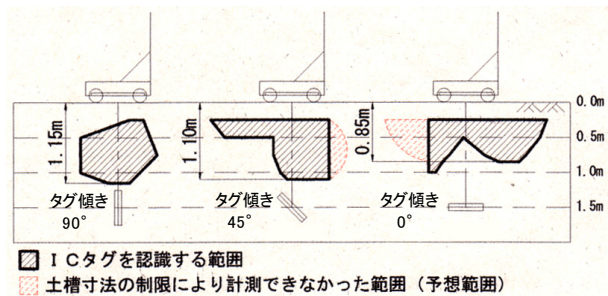


図 4 IC タグの通信可能範囲

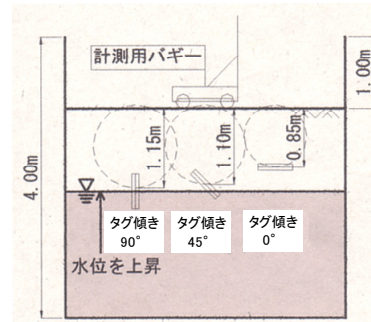


図 5 地下水位の上昇

(4) 気中・水中での計測試験

地中での実験結果より、地下水位の影響は小さいことを確認することができた。しかしながら、土に含まれる水分により、IC タグの通信距離は既に影響を受けているのではないかと観点より、気中と水中において、通信範囲の検討を行い、地中での結果と合わせる形で、比較検討を行った。結果を図 6 に、水分による通信距離の減衰結果を表 2 に示す。

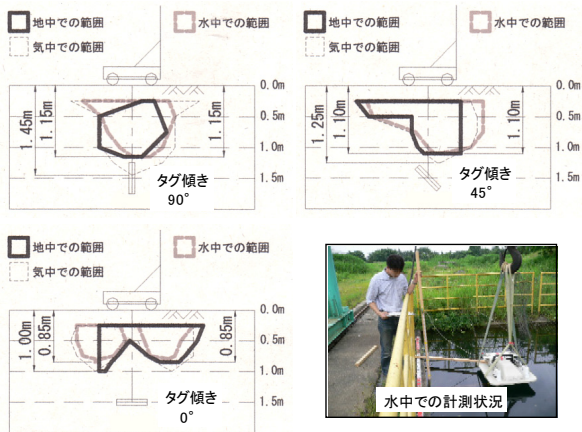


図 6 気中/水中/地中での通信範囲の比較結果

表 2 気中/水中/地中での最大通信距離

最大通信距離	傾き90°	傾き45°	傾き0°
地中*	1.15	1.1	0.85
気中*	1.45	1.25	1
水中*	1.15	1.1	0.85
地中/気中	79%	88%	85%
地中/水中	100%	100%	100%

*数値は全て(m)

結果、気中と水中との通信距離の減衰は約 80～90%程度であり、地中での通信距離は水中と殆ど同程度であることが分かった。

2.3 IC タグの土木分野での活用に関するまとめ

今回の IC タグの基礎実験の検討の結果、分かったことを下記に整理する。

- 現在市販されている地中埋設型のパッシブ型の IC タグは、埋設管がある深さが 1m 未満であれば、地中の地下水位に関係なく使用することが可能である。
- そのため、長期の管理が必要とされる土木構造物において、第三者に対して、図面をでは伝わらない情報を、正確に伝える維持管理ツールと

しての利用が最適であるものと言える。

- しかしながら現状の技術レベルでは、IC タグの情報の読み書きは可能であるが、センサーとしてのセンシング機能を期待するまでには至らないことが分かった。
- そのため、災害の危険予測や定量的な判断評価を必要とする高度な維持管理を IC タグのみに期待することはできず、従来型のセンサーや開発中の高度なセンサー類と、組み合わせて使用することが望ましい。

3. 高精度でセンサネットワークに対応したセンサーに関する検討

3.1 3D 地中変位計について

(1) 選定までの流れ

近年、電波法の規制緩和により ZigBee と呼ばれるネットワークの通信規格が日本において使用可能となり、メーカー各社より、ZigBee を利用した通信機器が発売されている。しかしながら、そのほとんどは、既存の計測センサーから入手したデータを転送するのみのタイプであり、センシング機能がないため、実験的な検討の余地がないことが分かった。

そのため、当チームでは、ZigBee 等の通信規格が利用可能で、高精度であり、土構造物の維持管理に適用が可能な計測センサーを絞って調査を行った。

結果、「シェイプアクセラレイ」(Measurand 社(カナダ)製、日本での販売代理、(株)新川電気) (図 7) が上記のニーズを満たすセンサーとして選択し、どのような状況において利用が可能であるか、基礎実験により検討を行った。

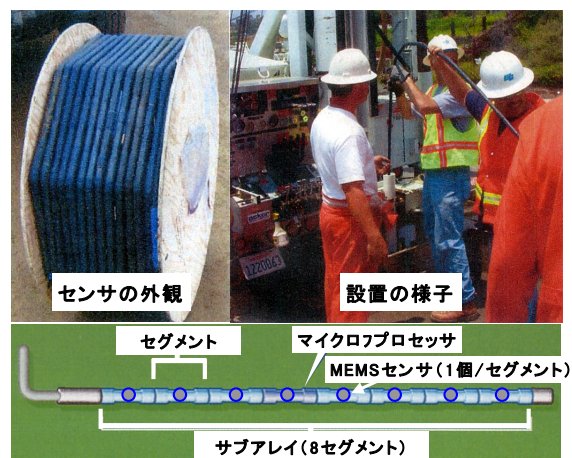


図 7 シェイプアクセラレイ (3D 変位計)

(2) 3D 地中変位計の構造と仕様

3D 変位計の構造と仕様を図 8 にまとめる。

8つのセグメントを1つのサブアレイ（1つの製品）としており（ただし、サブアレイは追加することができる）、各セグメントに埋め込まれた MEMS センサー（3軸方向の加速度計）により、それぞれのセグメントの位置関係を把握して、地中の変状を計測する構造となっている。また、市販の Zigbee 規格の通信機器と連携することもでき、各 3D 地中変位計どうしで連携したリアルタイムな計測も可能である。そのため、このセンサーが普及しているカナダ・アメリカでは、高速道路沿いの地すべり・崩壊等の危険箇所に対するモニタリングをしての使用実績がある。

しかしながら、アンカー部（センサーは無い）を不動点として、地盤の支持層まで到達させる必要がある（アンカー部が移動すると、計測原点にズレが生じるため）などの欠点を有している。

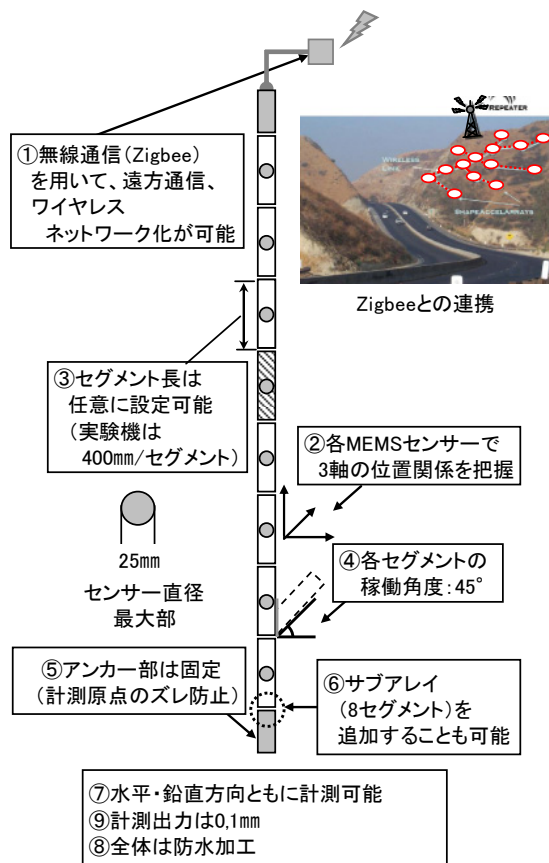


図 8 3D 変位計の構造と仕様

(3) 想定される適用範囲

3D 地中変位計の日本での適用範囲を考える場合、「施工管理でのモニタリング」、「維持管理でのモニタ

リング」、「災害予兆を感知するためのモニタリング」、「定量的な変位量評価のためのモニタリング」と言った条件があり、センサーの計測精度、ノイズ幅、計測ピッチ、寿命などのセンサーの特徴により、適切な適用範囲を見定める必要がある。(表 3)

表 3 センサーに必要とされる性能

モニタリングの条件	必要とされるセンサーの性能				
	計測精度	ノイズ幅	計測ピッチ	寿命	遠距離通信
施工管理	◎		◎		
維持管理		◎		◎	◎
災害予兆の感知		◎		◎	◎
定量的な変位量評価	◎				
3D 地中計の性能	今回調査	今回調査	◎	◎	◎

特に計測の幅とノイズの程度は、どの程度の計測管理に使用が可能であるかに直結するものと考えている。そこで、ノイズ幅と計測精度を確認するための、基礎実験を実施し、3D 地中変位計の適用範囲の検証を行った。

3. 2 3D 地中変位計の基礎実験

(1) 実験の概要

実験の概要図を図 9 に示す。実験はセンサーの各性能を把握するために、「ノイズ幅の計測」、「角度を付けた可変」、「地盤を想定した変状」の 3 段階に分けて行った。

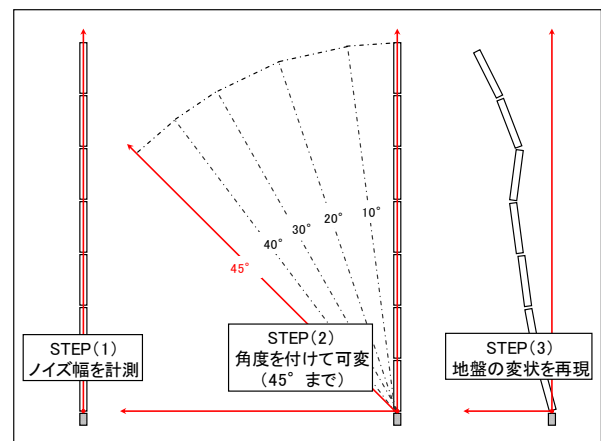


図 9 基礎実験の概要

(2) 結果の整理

i) ノイズ幅の計測

ノイズ幅の計測結果を図 10 に示す。これより、不動と仮定する計測基準点から、センサーが遠くなるに従い、ノイズ幅が大きくなる傾向が見られた。計測基準点に近いセンサーで 2mm 程、最も遠いセンサーで 5mm 程の計測ノイズを見る必要がある。また、

ノイズ幅が大きくなる原因としては、センサーの構造上、加速度計の値の積分により、変位量を算出するため、加速度計のノイズが累積されているものと考えられる。

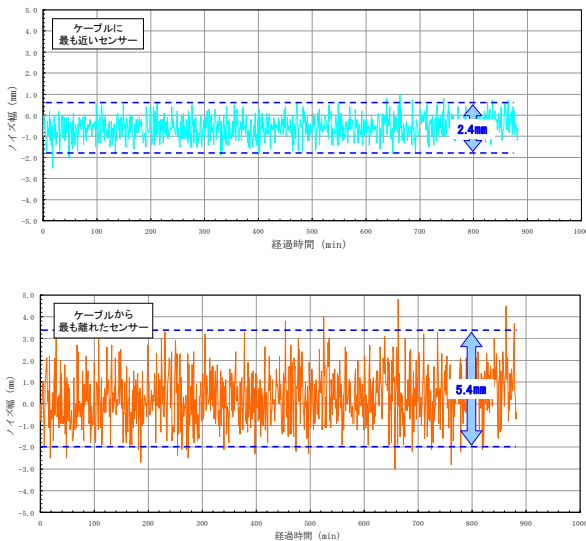


図10 3D変位計の変位量のノイズ幅

また、上図の結果は外部からの振動などを完全に排除した状態での実験結果であり、振動加速度から変位量を算出している構造上、周辺の微振動（エンジンやモーターの振動、車や人の移動による振動等）を簡単に拾ってしまい、結果、ノイズ幅が大きくなる（最大で2cm程）ことが明らかとなった。そのため、3D変位計の設置においては、周辺から影響を極力排除できる場所に設置することが望ましい。

ii) 角度を付けての可変

3D地中変位計の先端を固定し、Y軸方向について節点0を支点として10、20、30、40、45°で段階的に傾け、実測値との比較を実施した。図11に実験の様子を示す。

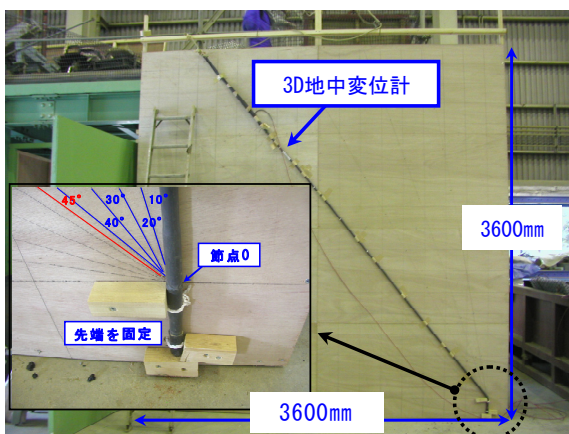


図11 角度を可変させた実験の様子

結果、を図12-13に示す。これより、言えることを下記にまとめる。

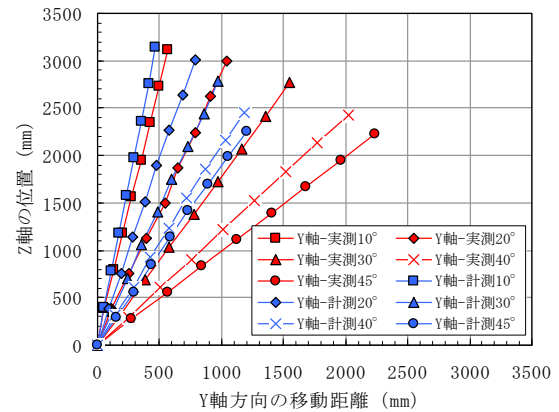


図12 Y軸方向での計測・実測値の比較結果

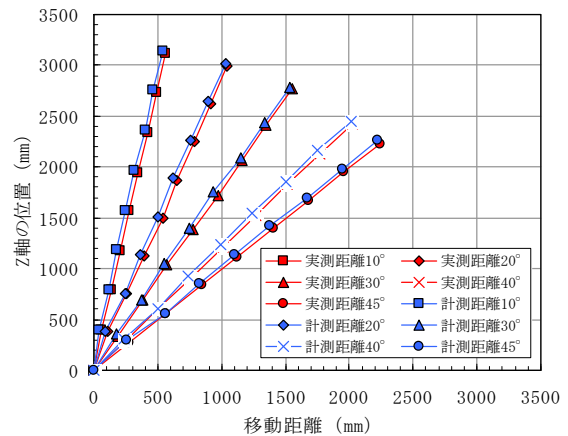


図13 移動距離での計測・実測値の比較結果

○センサーで示されているX・Y軸方向と、実際に動かす方向には、X・Y軸方向と合わせた場合でも、センサーのねじれや、人為的な要素により、大きな誤差が必ず発生することが分かった。

○移動距離量で比較した場合は、実測値と計測値との移動量に比較的整合性を得ることができたものの、最大で20~40mmの誤差が発生することが分かった。

○これは、計測精度に換算すると約1%前後の誤差精度であり、通常センサーの誤差が2%前後であることから、移動距離で見るとは、妥当な精度であるものと考えられる。

iii) 地盤の変状での計測

続いて、各センサーに角度をつけて、弓線状、放物線状に変形させ、実測値との比較を行った。結果を図14に示す。

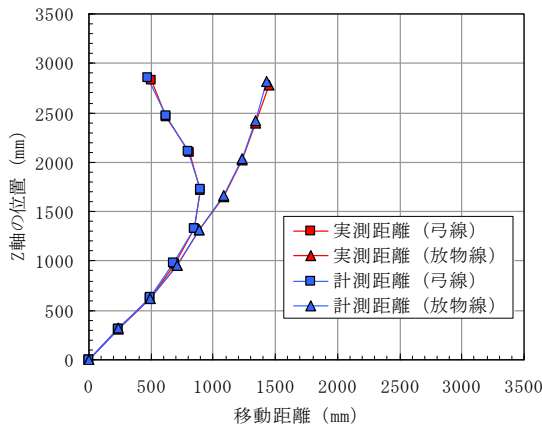


図 14 弓線・放物線状での計測・実測値の比較結果

これより、弓状・放物線状に変化させても、移動距離での比較では、角度をつけた計測と同じ精度があることを確認できた。

3. 3D 地中変位計に関する計測試験のまとめ

今回実施した 3D 地中変位計の計測実験の結果を下記に整理する。

- 常時微振動による加速度計のノイズにより、最大で 5 mm 程のノイズを有し、また、外界の振動の影響を強く受けることが分かった。そのため、極力外部からの振動を排除できる場所に設置することが望ましい。
- センサーは、3 軸方向の移動量を算出できるが、センサー上での軸方向を正確に把握できないため、移動量しか分からないことが分かった。
- 移動量で見た計測誤差は 20~40 mm 程であり、誤差率としては、2% 程度であった。
- 従って、災害の発生予兆を知るなどの微小変位の計測には適さないものと考えられる。
- 今回の 3D 変位計は、大変位も計測できるなどの利点があるため、定性的な傾向把握、例えば危険箇所での施工管理、維持管理の目安としてのモニタリングなどが適切な用途と考えられる。
- 表 4 にセンサーの評価結果を整理する。

表 4 3D 変位計の評価結果のまとめ

モニタリングの条件	評価	使用レベル
施工管理	○	管理の目安として
維持管理	○	管理の目安として
災害予兆の感知	×	精度が不十分
定性的な変位量評価	◎	最も望ましい

◎…最も望ましい ○…使用は可能
 ×…適切な使用ではない

4. 全体のまとめ

今回の研究結果を下記にまとめる。

- パッシブ型地中 IC タグを用いて基礎実験を行った。結果、有効通信範囲は 1 m 未満であり、データ通信量も少ないため、簡易情報の管理ツールとしての活用が適していることが分かった。
- ZigBee が活用可能な 3D 地中変位計の基礎実験を実施した結果、微振動により最大で 20~40mm 程度の計測誤差が発生するものの、定性的な変位量評価や目安としての施工・維持管理としての活用には適していることが分かった。
- 技術の進歩により、新しい技術によるセンサー開発が行われているものの、いずれの方法も現状の技術水準では解決困難な課題を有しており、安価で簡易、かつ高度な計測が可能となる水準まで計測技術が届いていないことが分かった。
- そのため、計測に必要なとされる全ての条件を満足できるセンサーは無く、用途に応じてセンサーを組み合わせることが望ましい。

参考文献・資料

- 1) (財) 日本建設情報総合センター：平成 16 年度 IC タグの建設分野での活用に関する研究会活動報告書 (概要版) 平成 17 年
- 2) RFID テクノロジー編集部：無線 IC タグ導入ガイド 日経 BP 社 平成 16 年
- 3) 中島伸一郎, 島崎修, 堤祥一, 大下武志：岩盤構造物モニタリングへの IC タグの適用性に関する基礎的検討 (社) 土木学会 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム 平成 20 年 1 月
- 4) 島崎修, 堤祥一, 大下武志：地中埋設用 IC タグの通信特性に関する基礎的実験 (社) 土木学会 第 62 回土木学会年次講演会 平成 19 年 9 月
- 5) T. Abdoun, L. Danisch, V. benett: Wireless Remote Monitoring of Geotechnical Systems TRB2006 Annual Meeting July 2005

UTILIZATION OF NEW INFORMATION TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF ROAD EARTH STRUCTURES

In construction management and maintenance of earth structures, the monitoring studies are conducted for the important and danger points by displacement sensor and monitoring camera and so on. However, it is impossible to cover all points which required monitoring study. As factors required to monitoring sensor, the inexpensiveness, long term and real-time monitoring and accurate sensing are picked up. We conducted the performance test of measurement accuracy for radio frequency identification (RFID) and 3D underground displacement sensor.

Key words: earth structure, maintenance, 3D underground displacement sensor
RFID