

# 土構造物モニタリング技術の高度化による広域災害抑制への 活用技術に関する研究

地盤工学会九州支部研究委員会 研究代表者 廣岡明彦  
九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学系

概要：今年度の研究委員会では、国土交通省が平成 25 年 10 月から平成 29 年まで実施した「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」と、新技術情報提供システム（NETIS[ネティス]）に登録されている情報を踏まえ、「個々の土構造物・斜面の維持管理」へ活用する手法の開発並びに、「広域災害抑制」への活用技術の検討提案を行った

## 1. 前年度までの検討内容

本研究委員会では、法面のモニタリング技術等により収集されたリアルタイム情報を「個々の土構造物・斜面の維持管理」へ活用する手法の開発並びに、複数構造物のモニタリング情報と地盤情報データベースとの地域的統合による「広域災害抑制」への活用技術を提案することを最終目的としている。前年度までの研究では、現在ある法面モニタリングや地盤情報データベースの最先端技術について研究委員会で調査検討等を加え、以下のようにまとめた。

降雨時の法面崩壊を予測するということは、「何時」、「何処で」、「どの様な（規模）」を事前に予測するということである。このためには、先ず斜面がどのような地盤材料で構成されているか、すなわち、事前に地盤調査と土質試験が実施され、それに基づく地盤モデルの構築が必要であり、かつ、豪雨により時々刻々と変化する法面の状態を計測によって把握する必要がある。その上で、法面の安定度を定量的にリアルタイムで評価する技術が必要である。これには、数値力学モデルの構築とそれに基づく不飽和浸透解析と斜面安定解析が欠かせない。また、安定度の定量的評価技術も室内土質試験結果との比較による妥当性評価が数値力学モデルの精度を上げるためには必要であり、室内土槽試験や現地斜面計測との比較による検証を不飽和浸透解析や斜面安定解析に対して実施することが必要である。

以上が可能となっはじめて、個々の土構造物・斜面のメンテナンス技術の高度化を図ることができ、複数構造物の法面モニタリング情報と地形情報やボーリングデータを含む地盤情報データベースとを地理情報システム

を援用して地域的統合をすることによって「広域災害抑制」に活用する手法に到達するものと考えられる。

## 2. 今年度の検討事項

今年度は、前年度に収集した法面モニタリングや地盤情報データベースの最先端技術に加え、国土交通省が平成 25 年 10 月から平成 29 年まで実施した「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」と、新技術情報提供システム（NETIS[ネティス]）に登録されている情報を踏まえ、「個々の土構造物・斜面の維持管理」へ活用する手法の開発並びに、「広域災害抑制」への活用技術の検討提案を行った。

## 3. 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会の研究事例

### 3.1 目的

平成 25 年 10 月に設置された「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会」は、社会インフラの維持管理にセンサ等を活用してインフラの状況を客観的に把握するモニタリング技術について、産学官が連携しながら、現場実証を通じてその有効性を評価・分析すること等により技術開発等を推進するために、調査・検討を行うものであった。

委員会では上記の取組を効率的、効果的に進めるため、以下について専門的見地から助言を行っている。

- ・ モニタリング技術の活用促進に向けた検討の方向性
- ・ モニタリング技術の現場実証に向けたニーズとシーズのマッチング
- ・ 得られたデータと社会インフラの損傷・

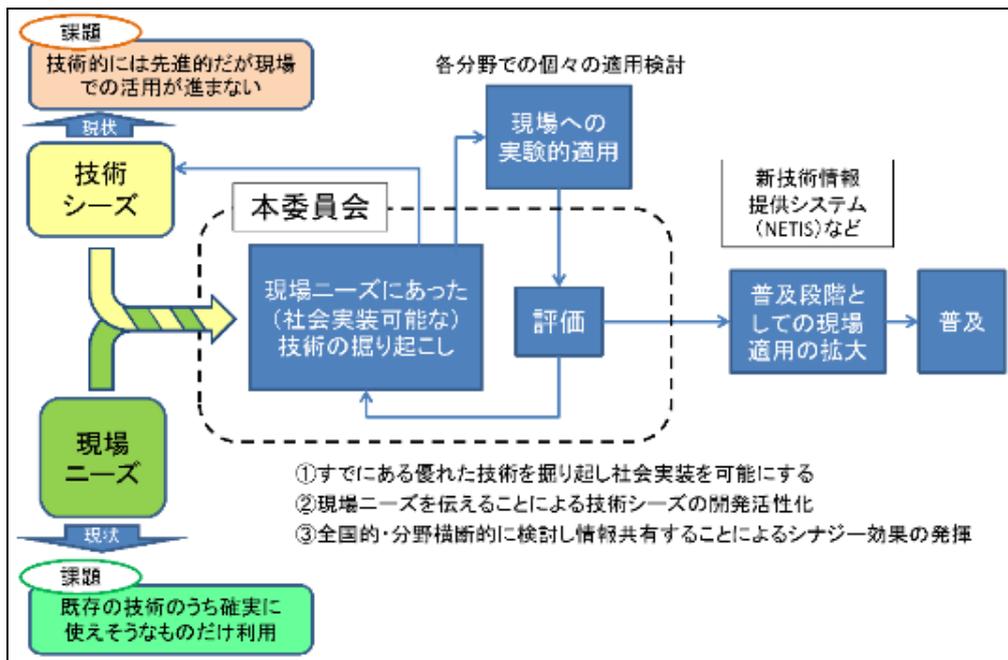


図 1. 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会の位置づけ

劣化等の関係

- その他、モニタリング技術の活用に必要な事項

### 3.2 モニタリング技術の現状と課題

社会インフラにおけるモニタリング技術の活用に向けた取組として収集した 31 事例を、

(1) 計測形態（固定型または移動型）、(2) 計測対象（構造物自体の監視または外力（使用状態）の監視）、(3) 計測技術の特徴ごとに分類し、事例から浮かび上がってくる技術的課題を以下のように整理している。

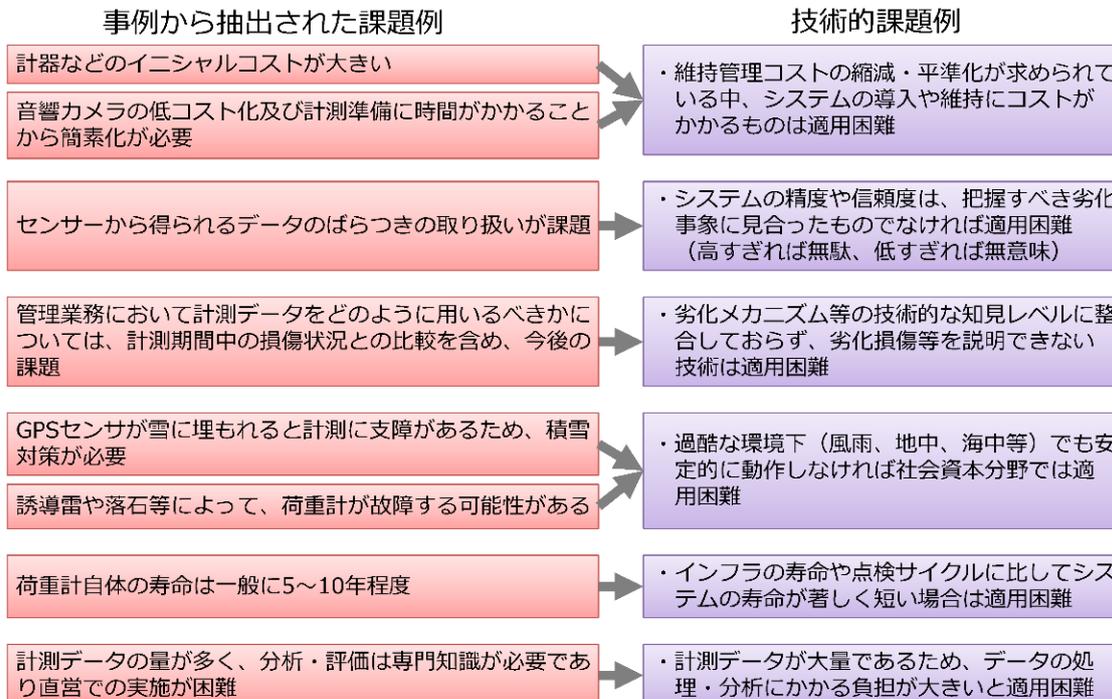


図 2. モニタリングの技術的課題

表 1. 計測技術の特徴による分類

(3) 計測技術					
計測手段	物理センサ			光学センサ	
計測内容	変位	音・振動	その他 (電気等)	形状	その他 (熱・光等)
<b>コンクリート</b> 【事例数】14/31	崖壁・護岸 1-1 橋脚 1-2, 1-3 橋梁 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 1-8 共同溝 1-9 埋設構造物	崖壁・護岸 1-10 下水道 1-11 埋設構造物	橋脚 1-12	トンネル 1-13	トンネル 1-14
<b>鋼</b> 【事例数】7/31	橋梁 2-1, 2-2, 2-3, 2-4	橋梁 2-5	橋脚 2-6		橋梁 2-7
<b>土</b> 【事例数】6/31	斜面 3-1, 3-2, 3-3, 3-4			斜面/地盤 3-5, 3-6	
<b>その他</b> 【事例数】4/31	その他 4-1, 4-2			その他 4-3, 4-4	
<p>1-1. 崖壁ブロックの流出・崩壊による河川護岸監視            1-2. 橋脚上部工建設時のひびきモニタリング            1-3. 滑土面移動の崖壁移動によるひびきモニタリング            1-4. 光ファイバによるひびき監視            1-5. 土質コンクリート層の厚み変化による変位監視            1-6. 橋脚・橋梁を有したコンクリート構造物の振動モニタリング            1-7. 橋脚モニタリングシステムの共同作業            1-8. 地震発生によるひびきモニタリングによる損傷調査のモニタリング            1-9. 公共共同溝の光ファイバによる変位監視            1-10. 排水溝におけるひびきモニタリングのモニタリング            1-11. 広域カメラや画像処理技術による下水道管のモニタリング</p> <p>1-12. 橋脚上部工の自立モニタリング            1-13. 走行時計測車による走行した橋脚体による変位監視            1-14. 橋脚による地震発生時の</p> <p>2-1. 東京湾臨海道路の橋梁監視システム            2-2. 本四連絡橋の動向監視システム            2-3. 橋脚監視システムを用いた橋脚の健全性モニタリング            2-4. 地震発生直後のセンサによる状況監視            2-5. 新橋大橋の耐震対策工効果把握のための振動監視            2-6. 震災発生した橋梁監視システムの自立状況把握            2-7. ひびき監視シートによる橋脚部ひびき監視</p> <p>3-1. 光ファイバセンサを活用した道路斜土モニタリング            3-2. 傾斜・ひびきセンサによる道路斜面モニタリングシステム            3-3. 傾斜・ひびきセンサによる道路斜面モニタリングシステム            3-4. 傾斜・ひびきセンサによる道路斜面モニタリングシステム            3-5. デジタル画像計測による斜面モニタリングシステム            3-6. 傾斜・ひびきセンサによる道路斜面モニタリングシステム</p> <p>4-1. GPSを用いた地盤の変位監視による健全性監視            4-2. 傾斜・ひびきセンサによる道路斜面モニタリングシステム            4-3. カメラ・センサを併用した斜面による道路斜面モニタリングシステム            4-4. 傾斜・ひびきセンサによる道路斜面モニタリングシステム</p>					

表 2. 把握すべき事象の例と既存のモニタリング事例における測定項目

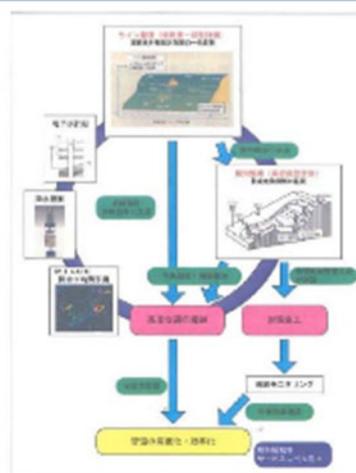
③ 土構造・地盤	
把握すべき事象の例	既存のモニタリング事例における測定項目
法面・小段のき裂、沈下、陥没、はらみだし、塵埃、土砂の堆積、法崩れ、寺勾配化、侵食等	
地表水や地下水の流出	
空洞	熱赤外面像
洗掘、侵食	位置変位
地表移動、クラック開口、地盤傾斜	位置変位、傾斜
地中ひずみ、地中移動、間隙水圧、地下水位、緊張力	水位、緊張力
浮石、転石	
法面・小段の不陸	
目地の開き、き裂、破損等	
根固工、水制工の変状	
遮水シートの露出や破断	
雨水排水上の問題箇所（小段の逆勾配や局所的に低い箇所）、排水施設の機能異常	
樹木の進入、拡大、植物の育成異常	
張芝のはがれ等、堤防植生、表土の状態	

番号	3-1	構造物の材料	斜面構造物	計測手段	物理センサ	計測内容	変位
名称	光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリング						
適用施設	国道49号、国道52号等			施設分類	斜面		
背景・目的	日常的に監視を行う必要のある道路斜面は膨大な数にのぼり、これら斜面を効率的かつ効果的に監視する技術に対する現場のニーズは大きい。このため、光ファイバセンサを活用した道路のり面・斜面の監視・計測に関して、崩壊を効率的に検知するためのセンサの設置・施工法や計測技術等の開発、実斜面フィールド試験による検証、管理基準値等の監視計測システムの運用方法の確立などを目的とした研究を行い、道路斜面防災管理の高度化に資する。						
概要	斜面崩壊形態の予測手法及び光ファイバセンサの要求性能の検討、光ファイバセンサによる道路のり面・斜面の監視・計測技術の開発、実斜面フィールド試験による上記の検証、監視・計測システム運用方法の構築を行う。						

### モニタリング技術活用イメージ

#### ○斜面管理におけるモニタリングの役割

- ① 日常点検、定期点検の補完：安定度評価  
 初期異常の発見（道路パトロールによる目視）  
 長期的な変状の進行の確認  
 可能であれば対策工
- ② 災害時の人的被害の回避（対策工が困難な場合）  
 災害に至るような短期的な変状・異常の確認



成果・残された課題  
 光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入により、効率的な斜面管理を実現（成果を「光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル」としてとりまとめ）。

番号	3-2	構造物の材料	斜面構造物	計測手段	物理センサ	計測内容	変位
名称	傾斜・ひずみセンサによる道路施設モニタリングシステム						
適用施設	北関東道の法面（3現場）			施設分類	斜面		
背景・目的	道路施設のヘルスマニタリングや、資産管理・トレーサビリティに資するため、道路の補修や書録にucodeを付与したICチップを取り付けた。道路施設を監視するセンサと送受信装置（SRDデータロガ）との組み合わせによって、そのデータを道路巡回する走行車両によっていつでも取り出せるようになるシステム。						
概要	センサと送受信装置を組み合わせ、道路の点検に必要なデータを高速走行中（80km/h）の巨画内や遠方から計測データを取得する。また、過去の点検記録や仕様図・写真等の情報を形跡端末で閲覧することができる。センサや送受信装置にはICタグが組み込まれており、ICタグに付与されているucodeにより情報識別が可能である。						

### モニタリング技術活用イメージ



成果・残された課題  
 ●センサを換えることにより、多様な分野に技術を適用することが可能である。東日本大震災後に放射線測定器を使用した放射線測定を行った適用実績がある。  
 ●高速走行で計測が可能のため、交通規制をかける必要がない。

番号	3-3	構造物の材料	斜面構造物	計測手段	物理センサ	計測内容	変位
名称	既設アンカーの荷重計による緊張力監視						
適用施設	国交省やNEXCOが管理する道路法面			施設分類	斜面		
背景・目的	グラウンドアンカー供用期間中の緊張力を継続的に計測し、斜面の健全性評価ならびにグラウンドアンカーの維持管理技術を向上させることを目的に導入した。						
概要	地すべり対策や斜面对策として施工されたグラウンドアンカーに対して、特殊な治具を用いてセンターホール型の荷重計を設置して緊張力を計測する技術。データ出力は、無線通信により遠隔から取得できる専用システムを構築するか、既存の自動計測システムに接続するなど現場条件に合わせて選択。						

### モニタリング技術活用イメージ



- 成果・残された課題
- 供用中の既設アンカーに後から荷重計を設置し、それを交換することが可能である。
  - 誘導雷や落石等によって、荷重計が故障する可能性がある（荷重計自体の寿命は一般に5～10年程度）。
  - 荷重データを用いて斜面全体の健全性を評価する段階には至っていない。

番号	3-4	構造物の材料	斜面構造物	計測手段	物理センサ	計測内容	変位
名称	GPSセンサによる法面の位置ずれ把握						
適用施設	国交省・地方公共団体・NEXCOが管理する道路法面			施設分類	斜面		
背景・目的	地すべり計測の分野において、多くのGPS計測事例が報告されているが、計測精度の向上や計測に係るコストの軽減が課題となっていた。これらの課題を解決するため、斜面計測専用GPSセンサーの開発および時系列統計手法による誤差処理を実施することで、mm単位の高精度GPS計測技術を開発した。						
概要	法面の斜面上に複数設置したGPSセンサーを、GPS衛星が計測する複数点間の位置情報から、法面等のずれを監視センターで常時観測し、危険度予測を行う。斜面の情報は気象情報と併せて監視センターから配信され、利用者はPCや携帯端末等で最新の斜面状況を確認する。						

### モニタリング技術活用イメージ



- 成果・残された課題
- 地盤計測用に開発された小型・軽量のセンサーとデータを最新の解析手法で分析する監視センターとの組合せで、高精度（最高2mm程度）の計測が可能。
  - GPSセンサーが雪に埋められると計測に支障があるため、積雪対策が必要。

番号	3-5	構造物の材料	斜面構造物	計測手段	光学センサ	計測内容	形状
名称	デジタル画像計測による斜面モニタリングシステム						
適用施設	和歌山県中辺町の道路法面			施設分類	斜面		
背景・目的	道路法面の劣化を防ぐためには、適切な維持管理、補修・補強を実施して、道路法面の健全度を評価することが重要である。岩盤変位などの定点計測に関して、労力や設備などの観点から、簡便な計測が実施可能な技術を開発した。						
概要	道路法面の維持管理をより効率的・安価と柔軟性・操作性・表現性・簡易性に優れた技術として、多数のデジタル画像を用いて高精度に計測点の座標を計測するデジタル画像計測技術を活用し、斜面の変位計測を実施した。様々な方向から対象物の写真を撮り、その画像情報から対象物の寸法形状を把握する技術である。						

### モニタリング技術活用イメージ

Camera Location: (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>) → 3m  
 Camera Orientation: (α, β, γ) → 3m  
 Camera coordinates: (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) → 3m  
 Object point's 3D Coordinates: (X, Y, Z) → 3m  
 Covered image 2D coordinates on CCD plane → 2m  
 Number of unknown: 3m + 3m + 3m + 3m = 12m  
 Number of equation: 2m × n  
 Observation equation → Solve normal equation by method of least squares

計測イメージ

成果・残された課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>1/10万の精度での計測が可能。</li> <li>計測時に二等等の設備設置が不要なため、常用系構造物での計測の際、交通規制を行う必要がない。</li> </ul>
-----------	---

番号	3-6	構造物の材料	土	計測手段	マイクロ波センサ	計測内容	形状
名称	干涉SAR解析による地盤変動監視						
適用施設	全国			施設分類	地盤（地盤変動、地滑り等）		
背景・目的	近年、干渉SAR時系列解析と呼ばれる手法が急速に発展し、これによる国土の地盤変動監視が検討されつつある。本手法を活用できれば、地上での機器の設置や観測を行うことなく、水準測量やGNSS測量に匹敵する計測精度で地盤変動を面的に把握でき、人工構造物の変動監視にも効果を発揮できると期待される。						
概要	本手法は多数のSAR画像を用いて、地表の散乱状態の時間変化や衛星軌道の位置変化等による干渉性の劣化に伴うノイズを、SARデータ特有の性質を利用しながら低減処理することにより、mm精度での面的な地盤変動計測を達成し、さらにその時間変化を追跡できる手法である。						

### モニタリング技術活用イメージ

干渉SARによる変動監視(事業として実施中)

地盤沈下

地盤沈下の検出

地震・火山

地震による地盤変位

地すべり

地すべり監視支援

将来的に解析技術の発展・応用により  
 広範囲をより高精度で把握

人工構造物の変動監視に  
 応用可能

成果・残された課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>将来的な継続実施には衛星の安定的運用が必要。</li> <li>今後、解析技術の発展、応用により、より広範囲をより高精度で把握出来る可能性。</li> <li>将来的に人工構造物の変動をmmオーダーで監視することに応用できると期待される。</li> </ul>
-----------	---

#### 4. 新技術情報提供システム(NETIS)

斜面変位や構造物の維持管理を目的としたモニタリングについて、現在、NETISに登録されている技術を集約した。

3Dレーザースキャナーやデジタルフォトセオドライトによる測量技術、構造物に作用

している応力を直接計測することや斜面上に無線センサを内蔵した杭を設置し計測する物理的な技術が登録され、一部の技術は3章で示したモニタリング技術と重複する。

表4. NETISに登録されているモニタリング技術

NETIS登録番号	技術名称	ジャンル	技術概要
HR-000010	多点計測型変位計	計測・測量	地盤や構造物の変位計測に使用する多点計測型変位計である。1台で計測範囲(標準10m)の多数点(最大20点)の位置(1方向)を同時に計測するものである。複数台を設置することでより広範囲の多点計測を効率的に行うことができる。多点計測の場合、従来型(1点計測型)を多数台設置するより効率的かつ経済的である。
HR-060028	3次元レーザースキャナーによる空間計測工法	計測・測量	地形や構造物の測量について、離れた場所より3次元レーザースキャナーで空間形状を計測して3次元点群座標データを取得し、PCに取り込んで地形データとして表現する。その計測データについて路線縦横断測量や構造物計測などの各業務形態に応じた加工をPC上で行う。
HR-120007	斜面のひずみ監視システム	計測・測量	崩壊の危険性のある斜面、法面にセンサーを埋設設置し、地盤浅層のひずみを計測監視し、斜面の不安定化による変動が起きた場合に警報を発するシステム。簡易に設置撤去が可能で設置作業工程の短縮、施工性の向上、コスト縮減効果が期待できる。
SK-070022	デジタルフォトセオドライトを用いた三次元測量技術	計測・測量	災害現場等において、デジタルフォトセオドライトを用いたデジタル写真撮影により三次元測量を行い地形図、縦横断図を迅速に作成するシステムです。計測対象又は計測対象周辺に基準点やターゲットを設置する必要がなく、非接触で高精度(100mの撮影距離で誤差約1cm)の三次元測量が迅速にでき
TH-100021	3Dレーザースキャナーによる現況地形確認システム	計測・測量	地上型3Dレーザースキャナーの特性を活かし、計画・計測・点群処理・三角網生成・縦横断図作成までを一連とした作業を、弊社が独自に策定した作業規程にて規格を統一し、土工事や舗装工事で要求される起工時の現況確認及び施工後の出来形確認をサポートするシステムです。
SK-100011	Licos	計測・測量, 計画・設計, 情報通信, 情報共有	アンカーに作用している緊張力を、リアルタイムで荷重-変位曲線で確認しながらリフトオフ試験を実施する計測装置。タッチパネル型のパソコンを用いて、アンカーの荷重および変位のデータをを細かく取得することにより、正確なリフトオフ荷重を知ることが可能。
CG-050015	のり面情報化システム	計測・測量, 情報通信, 情報共有	モルタル吹付のり面の劣化状況(表面剥離、クラック、内部空洞化等)を3次元レーザースキャナ・熱赤外線映像法・地中レーダー等で計測・調査し、計画・設計・維持管理に必要な情報をデータベース化と健全度を評価する技術である。
KT-100012	簡易斜面変位監視システム	補修・修復(その他(斜面・法面)), 計測・測量, その他(施工管理, 安全管理)	本技術は、無線センサを内蔵した杭を斜面や構造物に設置し、傾きを計測することで斜面の動きを遠隔・リアルタイムに監視する技術である。従来は、地盤傾斜計やGPSを用いているが、本技術により、電源・配線が不要で設置が容易となるとともに、設置後の現場立入りが不要となり、安全性の向上、コストの縮減が可能となる。
CB-100038	斜面崩壊センサ	補修・修復(その他(斜面・法面)), 計測・測量, その他(施工管理・安全管理)	本技術は、無線センサを内蔵した杭を崩壊が予想される斜面に設置し、斜面の動きをリアルタイムに検知するもので、従来は地盤傾斜計などで対応していた。本技術の活用により、多点の設置・監視が容易となり安全性・施工性の向上、コスト縮減が期待できる。センサの設定変更で、落石検知、浸水検知などへの利用も可能である。

## 5. 「i-Construction」導入における技術

国土交通省は、建設現場の生産性向上を目指し、建設工事における測量、設計・施工計画、施工、検査の一連の工程において3次元データなどを活用する「i-Construction」導入を表明している。

株式会社トプコンでは、自社の光学技術をベースに、最先端のGPS技術、レーザー技術、画像解析技術を融合し、道路の維持・補修、河川・ダム・堤防計測、災害や事故調査、遺跡や歴史的建築物の補修・デジタルデータ化など様々な用途に活用可能なソリューションを提供しており、自社でi-Construction技術講習会も実施されている。2019年8月3日の技術講習会に廣岡・甲木が参加し、地上型レーザースキャナーを用いた測量やUASによる空撮測量の技術を視察し、更に空撮画像を空から・地上から・移動する車輻からと様々な角度から取得した高精度・高密度な3次元データと画像解析技術とその活用方法を体験した。これらの技術は構造物の維持・管理・メンテナンスの効率化にも活用が注目される内容であった。

## 6. モニタリング技術開発における問題点のまとめ

本委員会メンバーによる法面モニタリングの事例報告、社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会の研究事例、新技術情報提供システム（NETIS）登録技術をみると、物理的なモニタリング技術は多種開発されているが、

そのリアルタイム情報を生かしたメンテナンス技術の高度化や地域全体を見据えた効率的なメンテナンスの実現には至っていないことがわかった。

国土交通省の検討委員会では、物理的なモニタリングがオーバースペックなセンサを採用した結果、高価な技術となっていることや、モニタリングのデータの分析・解析技術が進んでいないこと、災害抑制に必要な管理基準値を設定するための評価方法を検討する必要があることが指摘されている。

また、本委員会ではモニタリング対象箇所や周辺地域の地形情報やボーリングデータを含む地盤情報の分析も重要と考えている。特に九州支部ではボーリングや土質試験データを集約した地盤情報データベースを構築し販売しており、これらをインフラ整備に有効活用することを目指している。

今後、これまで開発されてきたモニタリング技術とデータの解析技術、及び地盤情報データベースとを地理情報システムを援用して地域的統合をすることによって「広域災害抑制」に活用する手法の研究を進めていきたい。

## 7. 謝辞

本研究委員会の活動は、九州建設技術管理協会「建設技術研究開発助成」により多大なサポートを受けた。ここに謝意を表する。