様式第 11 別紙 2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

(1) 課 題 名:斜面対策施設の凍上被害に対する新たなモニタリングシステムの 開発

(2) 研 究 期 間: 平成 29-30 年度

(3) 交付申請者名:小野 丘 (北海学園大学・教授)

(4) 研 究 代 表 者 名:小野 丘 (北海学園大学·教授)

(5) 共同研究者名: 王寺 秀介 (中央開発株式会社・副センター長)

福原 誠 (中央開発株式会社・部長) 山口 弘志 (中央開発株式会社・センター長)

藤谷 久 (中央開発株式会社・事業部長) 阿部 哲男 (中央開発株式会社・支店長)

(6) 補助金交付総額:18,005,000円

(7) 技術研究開発の目的

社会資本整備の維持管理の観点から、これまでに整備された斜面・法面において、長寿命化やメンテナンスフリー化が強く求められており、特に寒冷地では斜面を不安定化させる要因の一つである「凍上・凍結融解」により斜面対策施設に深刻な被害が多発しており積極的な取り組みが求められている。しかし、現状において要領や指針に「凍上」を考慮した調査・設計・維持の項目はほとんど盛り込まれておらず、技術的な対応が極めて遅れている。

凍上量を自動計測するためには削孔内に不動点を設けて変位計を設置する必要があり、 凍上力を計測するためには特殊なロードセルの設置を必要とするなど手間と費用を要す る。

そこで、本研究では、地すべり抑止を目的とするグランドアンカー工や法面崩壊を防止するための法枠工等の斜面対策施設の凍上被害に対して、メンテナンスの省力化と施設の長寿化を目的に、安価で簡易な新たなモニタリングシステムを開発し、合わせてそのメカニズムの解明を行うものである。

研究の目標は、斜面対策施設の凍上被害に対して安価で簡易な新たなモニタリングシステムを開発することで、凍上被害のメカニズムの解明と斜面対策施設のメンテナンスの省力化を可能にし、斜面対策施設の凍上被害対策の設計手法及びメンテナンスの管理指標を確立するものである。

具体的には、

- 1) 既存の変位計・ロードセルに代わる新たなモニタリング手法を開発する。具体的には、高精度の小型加速度計を用いて法枠の微小な傾斜角の変化を計測することで、 法枠の変位を mm 単位で計測する。
- 2) 計測機器の費用は、10万円程度(従来変位計・ロードセルの1/5)を目指す。
- 3) 計測機器の設置時間は、1台当り30分程度(従来変位計・ロードセルの1/10) を 目指す
- 4)無線通信機器を装備することで、データを回収する手間をなくし、乾電池で1年間

以上稼働するシステムを構築する。また、多数に設置し、同時に計測可能なモニタリングシステムを目指す。

上記機能を装備することにより、同時に多数の設置と計測が可能となる。これにより斜面対策施設の長寿命化に向けたメンテナンスの低コスト化・省力化のための広域で継続的な計測及び凍上被害のメカニズムの解明を目指す。

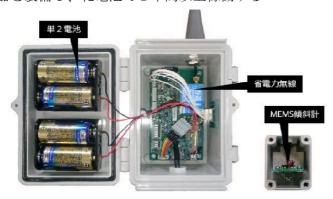
(8) 技術研究開発の内容と成果

「計測機器の設計・製作」「室内試験による計測機器の検証」「現場実証試験による計測機器の検証」「メンテナンス管理指標の検討」を実施し、概ねよい成果が得られた。

1) 計測機器の設計・製作

「計測機器の設計・製作」では、以下の条件を満たす機器を製作した。

- ・計測機器の費用は10万円程度
- ・計測機器の設置時間は1台当り30分程度
- ・無線通信機器を装備し、乾電池で1年間以上稼働する



	項目	仕様
モジュール	筐体	サイズ : 幅 4.9cm×奥行 5.5cm×岛 5.9cm(突出部除く) 防水機能 : JIS 防水保護等級 4 (X4) 適合 適切温度 : -10℃~+80℃
	2軸傾斜計※	分解能 : 0.02° 検知角度: 30°~+30°
送信モジュール	筐体	サイズ : 幅 10.0em×奥行 8.5em×高 15.8em(アンテナ・突出部除く) 防水機能:JIS 防水保護等級 4(X4)適合 適切温度:-10℃~+80℃
	3軸傾斜計*	分解能 : 0.04° 検知角度: -90°~+90°
	無線通信	アンテナカバー高 : 18.0cm 無線適合規格 : ARIB STD-T67 適合 送受信周波数 : 429.250~429.7375MHz 転送距離 : 無障害時約 600m (1200m 実績有)
	電源	アルカリ単2 乾電池 4 本(6~12 ヶ月)
連結ケーブル		φ5mm 長さ2.5m

※威太郎の計測分解能であり、計測結度は、現地の気象条件・設置環境等により異なる。

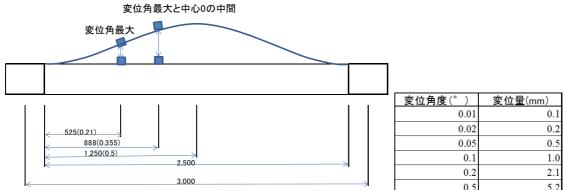
図-1 製作した傾斜計センサーの仕様

また、計測機器の仕様検討として、以下の検討を実施した。

①斜面対策施設の変状を捉えるために必要な傾斜角の精度

斜面対策施設は両端がアンカーで固定されているため、両端固定梁の等分布荷重として、たわみ角 θ の最大値を変位角として、鉛直方向の変位量との関係を算出した。

その結果、アンカーから 60cm 離れた地点に傾斜センターを設置した場合、1 mm以上の変位を捉えるためには、0.1 度以上の精度が必要であることがわかった。



0.01	0.1
0.02	0.2
0.05	0.5
0.1	1.0
0.2	2.1
0.5	5.2

図-2 変位量と変位角度の関係

②低温状態でも高精度で安定した計測が可能なセンサーの選定

凍上被害が発生する地域は最低気温が-10℃以下になることが想定される。そのよう な過酷な状況の中で、高精度で安定した計測が可能なセンサーであることを確認する必 要がある。

本研究では、凍上現象を模擬試験できる室内試験装置と現場実証試験を通じて確認し、 気温-20℃の過酷な状況の中で、製作した傾斜センサーが外気温の変動に影響をほとん ど受けずに安定した計測が可能であることを確認した。このことは、計測データによる 管理をする上で有利な特性であると言える。

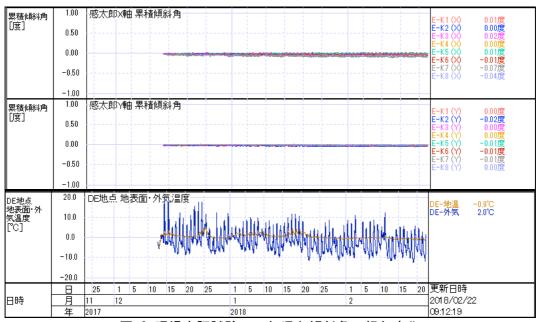


図-3 現場実証試験での気温と傾斜角の経年変化

③斜面対策施設への最適な設置方法(設置位置、大きさ、設置機具)

①の検討結果より斜面対策施設の法枠の変状は、アンカー中心部から 50~60cm 離れた 箇所に集中することが想定されるため、アンカー中心部から上下左右 50~60cm 離れた場 所に設置することとした。

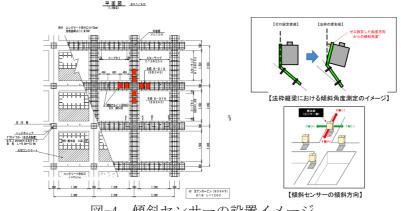


図-4 傾斜センサーの設置イメージ

また、傾斜センサーが積雪の影響を受けることが想定されたため、プラスチック製のボ ックスで保護することとした。現地での設置例を以下に示す。

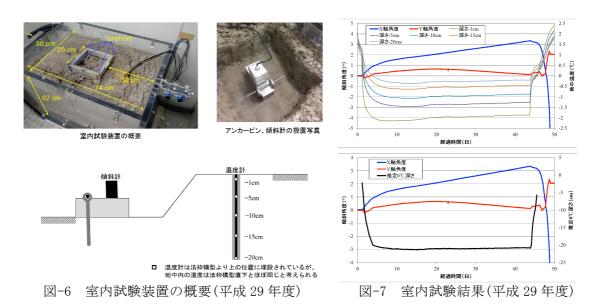


図-5 傾斜センサーの保護実施例

2) 室内試験による計測機器の検証

平成29年度は、凍上現象を再現できる室内試験装置に粘土とシルトを1:1で混合した 凍上性の高い試料を作成し、中央に法枠を模擬したステンレス製の棒をアンカーピンで固 定し、その上に傾斜センサーを設置した。また、地中温度を計測するために地表から 1 cm、5 cm、10 cm、15cm、20 cmの場所に温度計を設置した。なお、土槽の蓋に低温ブライ ン (約-20℃) を循環させることで、凍上現象を発生させている。

図-7 に実験結果を示す。冷却を開始して2日程度で地中の温度が0度を下回り、それ と同時に凍上現象が起こり始めた。0℃深さが深くなるに従い傾斜角度が増加し、冷却を 停止すると融解して法枠が鉛直方向に変位した。平成29年度の実験では、零下状態で計 測機器が正常に稼働すること、法枠の変状を傾斜計で捉えることができることを確認でき た。



平成30年度は平成29年度の成果を受けて、より実物に近い環境を作成した。 具体的には、中央に法枠を模擬したモルタル製の板をアンカーピンで固定し、図-8のように荷重計と傾斜計を設置した。また、地中温度を計測するために地表から1cm、5cm、10cm、15cm、20cmの深さに温度計を設置した。計測項目として、傾斜角、地中温度に加え、気温と土圧(アンカー緊張力)、カメラを追加し、傾斜角とアンカーにかかる緊張力の関係を整理した。

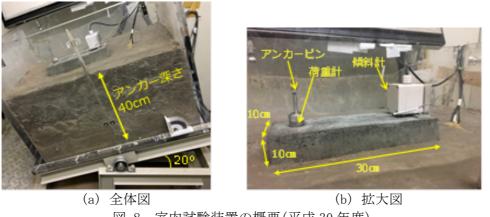


図-8 室内試験装置の概要(平成30年度)

図-9 に計測結果を示す。冷却を開始して1日程度で地中の温度が0℃を下回り、それと同時に凍上が起こり始めている。0℃深さが深くなるに従い傾斜角度とアンカー荷重が増加していることがわかる。

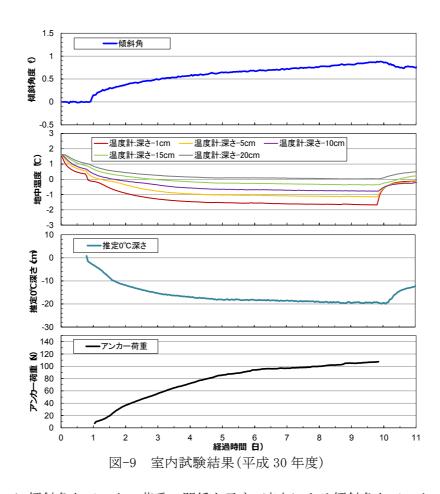


図-10 に傾斜角とアンカー荷重の関係を示す。凍上による傾斜角とアンカーに作用する荷重の関係は概ね線形関係にあることがわかった。

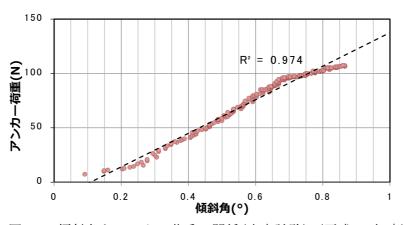


図-10 傾斜角とアンカー荷重の関係(室内試験)(平成30年度)

3) 現場実証試験による計測機器の検証

「現場実証試験による計測機器の検証」では、現場実証試験サイトの選定、計測機器の 設置、モニタリング、計測結果の整理を実施した。

現場実証試験サイトの選定では、以下の条件を満たすサイトを選定した。なお、現場実証試験サイトの選定条件を以下に示す。

- ・北海道内で特に凍上被害が多い「低温・少雪」の地域を選定
- ・凍上が発生しやすい条件の地盤を選定。土質はシルトやシルト分を多く含む土で、法 面の背後地盤に水を貯め込みやすい(水の供給がある)地形
- ・新設工事の施設が望ましいが、既設対策施設を選定する場合は、荷重計で計測してい る施設を選定

結果的には、産官学テーマ推進委員会の委員の協力もあって、下記3サイトを選定した。

①夕張サイト (NEXCO 東日本)

日高山脈の西側に広がる夕張山地に位置する道東自動車道(上り線)に面する法面である。法面勾配は 1:1.2、法面対策工はグラウンドアンカー工+法枠工(2m×2m) が施工されている。

②白糠サイト(北海道庁)

太平洋に接する白糠丘陵に位置する JR 根室本線及び国道 38 号に近接する法面である。 法面勾配は 1:1.0、法面対策工はグラウンドアンカー工+法枠工(2m×2m)が施工されている。

③占冠サイト (NEXCO 東日本)

日高山脈内に広がる占冠盆地の山麓斜面であり、山地地形⇒丘陵性段丘地形⇒河川沿いの沖積低地と並ぶ地形の内の丘陵性段丘地形であり、当該駐車場はそこを切土造成したものである。法面勾配は1:1.5、法面対策工はグラウンドアンカーエ+コンクリート受圧板工(2m×2m)が施工されている。

新生代新第三紀、同古第三紀、中世代の頁岩・泥岩は、切土等で地表近くに露出すると、 乾湿繰返によるスレーキングを生じやすく、細片化し、土砂状に変化していく。さらに、 汽水〜海成の泥岩は、堆積時の塩水を内包しているため、スレーキングの程度は非海成よ りも著しいと言われている。従って、3サイトの切土法面を構成する地質の表層部は、切 土掘削以降の乾湿繰返しでスレーキングによる細片化〜土砂化を生じていると考えられ る。

細片化~土砂化が進行した切土法面では、雨水の地盤内への浸透が促進されるので、冬季の凍上現象を発生させる可能性は十分あると考えられる。

斜面対策施設の法枠変状を捉える場所を検討するために、荷重計が設置されているアンカー中心部から上下左右 40、80cm 離れた位置に計 8 箇所の傾斜センサーを設置した。また、傾斜センサーが積雪の影響を受けることが想定されたため、プラスチック製のボックスで保護することとした(図-11 参照)。

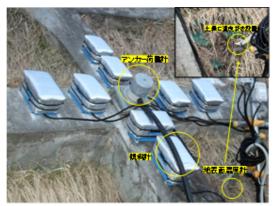


図-11 現場実証試験の設置例(白糠サイト E 地点)

図-12 に夕張サイトの A 地点の計測結果を示す。4 月中旬頃に一部の傾斜センサーで動きが見られた。これは、融雪による地表面の強度低下の可能性が考えられる。また、北海道胆振東部地震(平成30年9月6日3時7分59秒)により、傾斜センサーが一瞬反応した。その後は、傾斜角の累積的な動きもないため、法枠が地震の被害を受けていないことが確認できた。

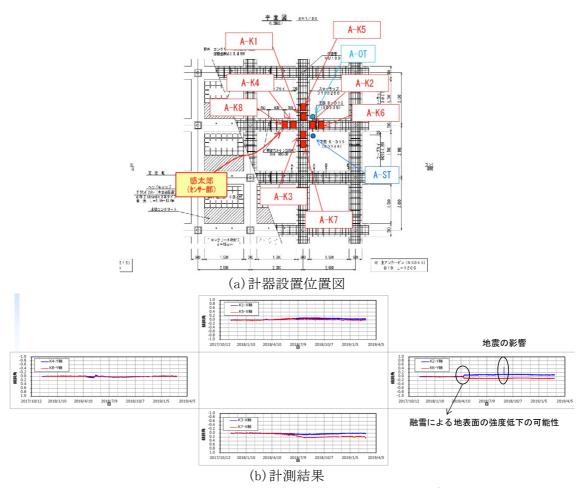


図-12 現場実証試験(夕張サイトA地点)の計測結果

図-13 に白糠サイトの E 地点の計測結果を示す。11 月中旬頃から地表面温度が徐々に下がり始め、12 月上旬で 0℃付近まで下がっている。それに伴い、傾斜角とアンカーに作用する荷重が徐々に増え始めていることがわかる。地表面温度が 0℃を下回らないのは、土嚢の下に温度計を設置したためと考えられる。アンカーに作用する荷重が徐々に増加していることから地中では凍上が起きているものと想定される。

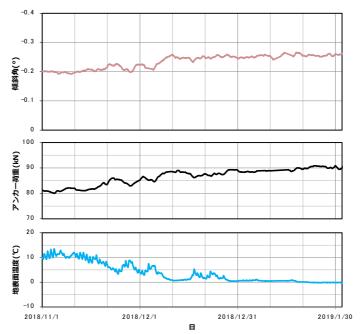


図-13 現場実証試験(白糠サイト E 地点)の計測結果

図-14 に白糠サイトの E 地点における傾斜角とアンカー荷重の関係を示す。室内凍上試験同様に傾斜角とアンカーに作用する荷重の関係は概ね線形関係にあることが分かる。

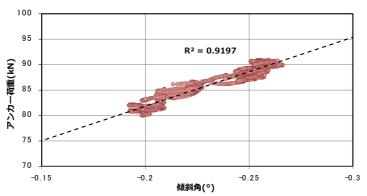


図-14 傾斜角とアンカー荷重の関係(現場試験 白糠サイト E 地点)

3) メンテナンス管理指標の検討

斜面対策施設に作用する凍上による変状(傾斜角)と緊張力の関係を整理した。

・室内試験結果および現場実証試験結果の整理

室内試験結果および現場実証試験結果を整理し、凍上による変状(傾斜角)と緊張力の関係を求めた。両者とも、ほぼ線形関係にあることがわかった(図-10、図-14 参照)。

・FEM 解析による検討

法枠の変形による傾斜角度とアンカーに作用される増加荷重の関係を把握するために、地盤解析ソフトウェア「PLAXIS」を用いて、FEM解析を実施した。図-15に解析モデルを、表-1に解析パラメータをそれぞれ示す。

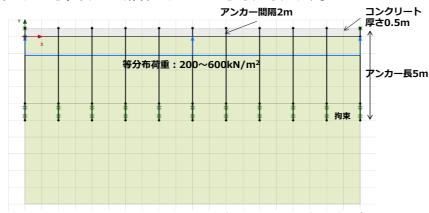


図-15 FEM 解析における解析モデル

X I MINI // /							
項目	設定値						
アンカータイプ	PC 鋼より線						
アンカー長	5m						
アンカー間隔	$2m \times 2m$						
自由長	4m						
受圧板タイプ	コンクリート法枠 (500mm×500 mm)						

表-1 解析パラメータ

凍上力として、コンクリート法枠の底面に等分布荷重を 200 kN/m² から 600 kN/m² の範囲で与え、傾斜角度とアンカーに作用される荷重の関係を求めた。なお、本解析ではアンカーに設計荷重は考慮していない。たわみ角は最も大きくなるアンカー周辺の値である。凍上力 (等分布荷重)を 200kN/m² から 600 kN/m² に増加していくにつれ、たわみ角及びアンカー荷重とも線形的に増加していくことがわかる。

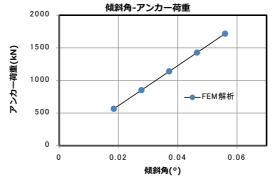


図-16 傾斜角とアンカー荷重の関係(FEM 解析)

4) まとめ

本研究の成果を以下に示す。

- ・ 法枠の変状を安価で簡易なモニタリングシステムを開発した。価格:10 万円程度、 設置時間:1台当り30分程度、無線通信装備、乾電池1年間以上稼働、多点同時観 測
- ・ 室内試験で、零下状態で計測機器が正常に稼働すること法枠の変状をモニタリング システムで捉えることができることを確認した。
- ・3地域(8地点)で現場実証試験(最大1年半)を実施した。計測機器の耐久性と、 法枠の微小な変状を捉えることができることを確認した。
- ・ 室内試験、現場実証試験、FEM 解析により傾斜角とアンカー荷重の関係を整理した。 三者とも線形関係にあることを確認した。

今後の研究課題を以下に示す。

- · 2 年間の現場実証試験では、凍上による明確な変状は捉えることができなかった。 今後も可能な範囲で観測を継続させていきたい。
- ・ 現場実証試験での計測データを蓄積していく段階で、傾斜角とアンカー荷重を再整理する。この結果を元に再度 FEM 解析を実施し、傾斜角とアンカー荷重を整理する。
- ・ 最終的には、斜面対策施設の効率的なメンテナンス (補修) を実施するための管理 指標を確立したい。

(9) 成果の刊行に関する一覧表 ※無い場合も項目は消さず「なし」と記載

刊行書籍 又は 雑誌名(巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
斜面対策施設の凍上被害に対する新たなモニタリングシステムの開発 、第73回年次学術講演会	2018. 8. 29	土木学会	小野 丘 王寺秀介 山口弘志 藤谷 久 福原 誠 阿部哲男
New Monitoring System of Anchored Slope Protections , The 18th International Conference on Cold Regions Engineering and the 8th Canadian Permafrost Conference	2019. 8. 18	Internation al Conference on Cold Regions Engineering	S. Oji T. Ono M. Fukuhara
斜面対策施設の凍上被害に対する MEMS 傾斜センサーの適用検証 、第74回年次学術講演会(投稿中)	2019. 9. 3	土木学会	小野 丘 王寺秀介 山口弘志 藤谷 久 福原 誠

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況 ※無い場合も項目は消さず「なし」と記載

知的財産権の内容	知的財産権の 種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(11) 成果の実用化*の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装 開発したモニタリングシステムは、平成29年度、30年度に実施した現地実証試験や室

内試験を通じて、凍上被害が発生する過酷な環境下でも、高精度で安定した計測ができることが実証できた。

また、北海道での調査によれば、切土法面の崩壊原因のうち、全体の40%が凍上・凍結融解によって発生されているとされ、寒冷地全体で同規模の割合で凍上被害が発生していると考えると、本研究が実現した場合の効果は大きい。さらに、地域を限定しない一般的なグラウンドアンカー工や法面保護工への利用も十分可能性があり、斜面防災に果たす役割は大きいと考えられる。

今後は、グラウンドアンカー工や法面保護工へのメンテナンス用の計測機器として実用 化を図る予定である。

(12) その他 なし。