

地域と歩む防災研究センター



Research Center for Strategic Assistance in the Prevention of Floods, Earthquakes and Regional Hazards

S
A
F
E
R
&
D

Report

2024.3 Vol.4

地域と歩む防災研究センター



ご挨拶

北見工業大学
地域と歩む防災研究センター/SAFER
センター長 高橋 清



2024年は年始から能登半島地震、日航機の羽田空港での事故と、大きな災害や事故が続きました。特に能登半島地震は、積雪寒冷地域が厳冬期において、地震、津波、火災と複合災害による被災となりました。さらに、少子・高齢化、半島地形に起因する脆弱なインフラ、そこに点在する集落と、まさに日本が抱える課題が集積した地域での災害と言えるのではないのでしょうか。被災された方々には、一日も早く安心・安全な地域に戻りますよう心よりお祈りいたします。

今回の災害における被災状況の全体像について、現時点では全てが明らかとはなっていません。しかし、これまでの現地からの報道等からも、特に冬期における避難や避難所の対応について、多くの課題が明らかになっています。同じく積雪寒冷地に住む私たちとしては、今回の災害をしっかり受けとめ、次の災害に向けて一層の備えが必要であると、改めて感じた次第です。

本研究センターは「防災」、「寒冷地」というキーワードで、学内の防災関連研究のリソースを一元化し、地域にその研究成果を還元したい、との目的で2019年に設立した研究センターです。今回の能登半島での災害から得られた課題や教訓を、今後の研究をとおして、地域の皆様と共有できればと考えております。

今年度も研究成果を皆様と共有するため、「SAFER R&D Report Vol.4」を発刊する運びとなりました。ご高覧頂ければ幸いです (カラー版はSAFER webページ <https://kit-safer.com/publication/> に掲載予定です)。

今後とも関係の皆様からの変わらぬご指導とご助言を賜りますよう、お願い申し上げます。

2024年3月

【表紙の写真】

被災時における抗土圧構造物の新たな健全性評価手法の確立に向けた実大実験の様子 撮影者：川口 貴之

目次

地域協働防災研究部門

- ◆ダクトヒータの温風流れの数値シミュレーション
林田 和宏・稲葉 一輝 2
- ◆むかわ町における既存構造物の地震動被害を考慮した津波避難に関する検討
齊藤 剛彦 4
- ◆巨大地震発生を想定した北海道東部地域における生乳輸送への影響
高橋 清 6

インフラ耐災技術研究部門

- ◆レーザスキャナー搭載のUAV用いた河川堤防点検に関する検討
白井 秀和・渡邊 康玄・西山 了 8
- ◆海底の上昇プロセスが津波規模に与える影響に関しての簡易な評価方法
白井 秀和 10
- ◆アイスジャムによる水深上昇の推定手法の開発
吉川 泰弘 12
- ◆被災時における抗土圧構造物の新たな健全性評価手法と修復技術に関する検討
中村 大・川口 貴之・三枝 昌弘 14
- ◆路床の凍上性に着目した首都ウランバートル市内における道路の質的向上に向けたプロジェクト
中村 大・片岡 沙都紀・渡邊 達也 16
- ◆ジオセルを用いた路盤補強工法の寒冷地への適用
中村 大・渡邊 達也・川口 貴之 18
- ◆太陽光発電施設の凍上被害発生メカニズムの解明とそれに基づいた凍上対策の提案
中村 大・門田 峰典 20
- ◆スパイラル杭の引抜抵抗に与える凍結融解履歴の影響
中村 大・門田 峰典 22
- ◆融雪水の浸透によって斜面の極表層で発生した土砂流動の観察
中村 大・川口 貴之 24
- ◆凍結融解履歴が植生工の侵食防止効果に与える影響の解明
中村 大・川口 貴之 26
- ◆レーザースキャナーによる実構造物の3次元点群データ取得
門田 峰典・宮森 保紀 28
- ◆横断歩道橋における階段部の耐荷性能の把握
門田 峰典 30
- ◆寒中における補修施工の効率性向上に資する耐寒補修材料の開発
崔 希燮・井上 真澄 32

突発災害調査研究部門

- ◆厳冬期に季節外れの暖気が流入した時に現れた特徴的な雪面 (2024年2月)
白川 龍生 34

ダクトヒータの温風流れの数値シミュレーション



Highlights

- ダクトヒータのビニールダクト内を流れる温風の数値シミュレーションを行いました。
- 計算結果は実験値とよく一致しており、数値シミュレーションを活用することで、ダクトヒータの効率的な温風送気方法の提案が期待できます。

令和6年能登半島地震は真冬の1月に発生したことから、避難所では暖房器具の使用が必要な環境となりました。しかし、広い避難所を温めるのに十分な暖房器具を用意できたところは少なく、寒さから体調を崩す人が少なくなかったようです。地震による被害の場合は電力網が寸断される場合が多く、避難所では電気を使用する暖房器具は使用できなくなります。また、電気を使用しない石油ストーブは有効な暖房器具ですが、燃焼排ガスが室内に直接排気されるので、避難所屋内の換気に注意を払う必要があります。

避難所で使用される暖房器具の一つに「ダクトヒータ」があります。ダクトヒータはヒータ本体にビニールダクトを取り付けることで、ヒータ本体で発生する温風を離れた場所へ送気する暖房器具です。ダクトヒータを屋外に設置すれば燃焼ガスは屋外に排気されるので、避難所の空気環境の汚染が比較的少ない暖房器具と言えます。しかし、ヒータ本体と暖房箇所の距離が離れると温風が避難所に届くまでに温度低下してしまうので、貴重な熱エネルギーを無駄にしてしまうことになります。

ダクトヒータの燃料には灯油が使用されますが、能登半島地震のように道路網が寸断されてしまうと外部からの燃料供給が途絶えてしまいます。そのため、ダクトヒータの発生する熱エネルギーを無駄なく使用し、燃料消費量を抑制することが重要になります。そこで本研究では、ダクトヒータの効率的な運用方法について検討することを目的とし、ビニールダクト内を流れる温風の温度と風速の変化を数値計算で求めることを試みました。

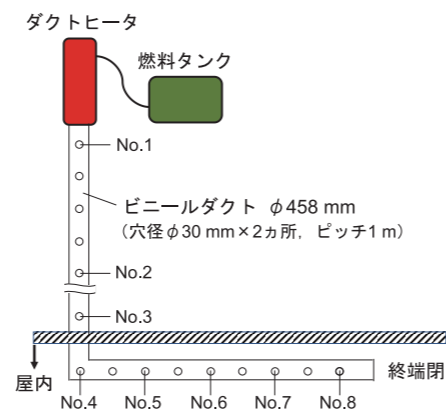


図1：ダクトヒータ配置図



図2：ダクトヒータとビニールダクト

図1は2023年12月に実施された、北見市の冬季避難所開設運営訓練で使用されたダクトヒータの配置図です。ダクトヒータ（静岡製機、HG CJII）は避難所屋外に設置されており、避難所の扉の一つを断熱材で塞ぎ、断熱材に穴を開けてビニールダクトを屋内に導入しています（図2参照）。ビニールダクトには1m間隔でφ30mmの穴が二か所空いており、この穴から温風が吹き出ることによって室内を温めます。

図1のNo.1～8の8カ所でビニールダクト中心部を流れる温風の温度と風速を測定した結果を図3に示します。ダクトヒータを出てすぐの温風温度は約66℃ですが、屋内に入る段階で約53℃に低下しており、温度が低下した分の熱エネルギーを大気中に捨てていることになります。

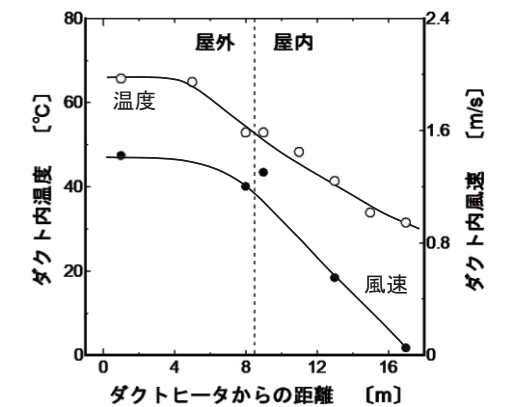


図3：ダクト内温風の温度と風速

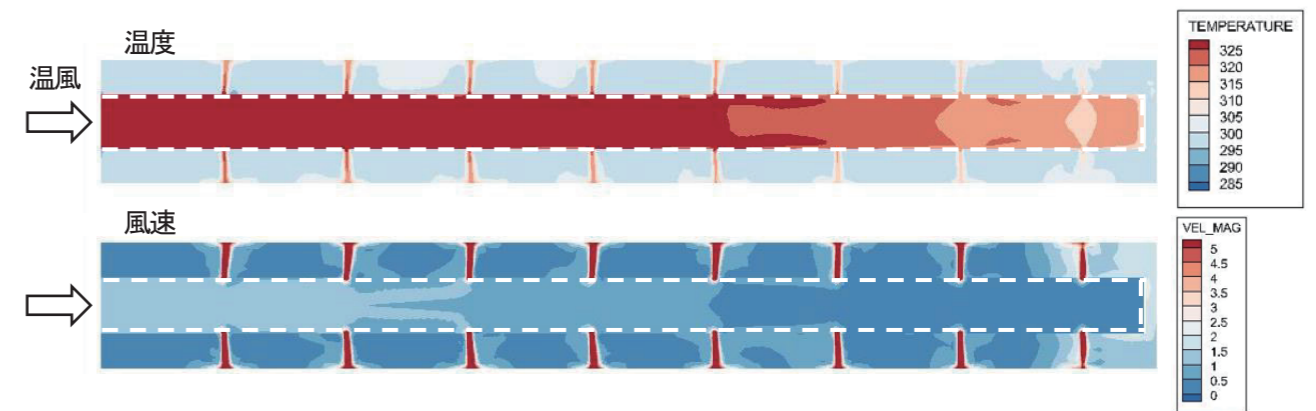


図4：ダクト内温風の温度と風速のシュミレーション結果

屋内のビニールダクト内を流れる温風について、熱流体解析CFDソフトによる数値シミュレーションを行った結果を図4に示します。図中の白い点線がビニールダクトを表しており、温風は左から右側に向かって流れています。ビニールダクトの右側終端部は閉じているため、ダクト内の温風はφ30mmの穴から室内に吹き出ており、ダクト上下に見える赤い筋が穴から噴出する温風を表しています。

図4のダクト中心部の温度と風速について、実験値と比較した結果を図5に示します。温度、風速共に実験値とよく一致しており、数値計算でダクト内流れを表現できていることが確認できます。今後は本研究で構築した数値シミュレーションの手法を用いて、ダクトヒータの効率的な温風送気方法について検討していきたいと考えています。

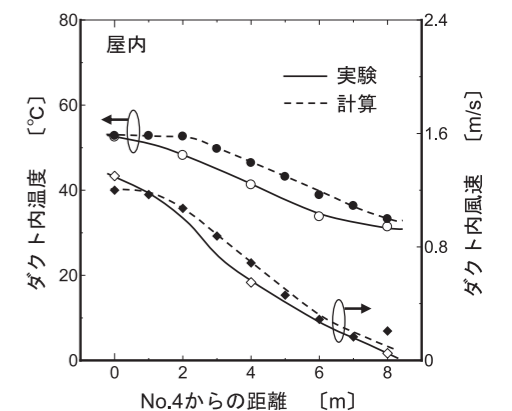


図5：実験値と計算値の比較

むかわ町における既存構造物の地震動被害を考慮した津波避難に関する検討



准教授
齊藤 剛彦

Highlights

- むかわ町を対象に地震の揺れによる建物被害が津波避難に与える影響を検討しました。
- 市街地中心部の建物が津波避難に活用できないと影響が大きいです。避難場所に指定されていない建物も活用することで津波避難可能性を大幅に改善できることがわかりました。

本研究グループでは北海道の胆振地方に位置するむかわ町を対象に津波避難に関して研究しています。むかわ町で津波の危険性がある市街地は高台がないため高い建物に一時避難することが重要ですが、津波は強い揺れの後に襲ってくるため、揺れによって建物が津波避難に活用できないことが起こるかもしれません。そこで、現地で地盤の常時微動観測を行い、地震の揺れに対する地盤の揺れやすさを調べるとともに、一部の避難可能構造物が揺れによって被害を受け津波避難に活用できない場合に津波避難可能性に与える影響を検討しました。

現地で常時微動観測を実施した場所を図1に示します。調査結果や住民の生活への影響を最小限にするために公園で実施しました。図2に結果の例としてある測定地点のH/Vスペクトル比（水平方向の微動と鉛直方向の微動の比）を示します。1Hz付近にピークがみられます。このようにして



図1：常時微動測定箇所

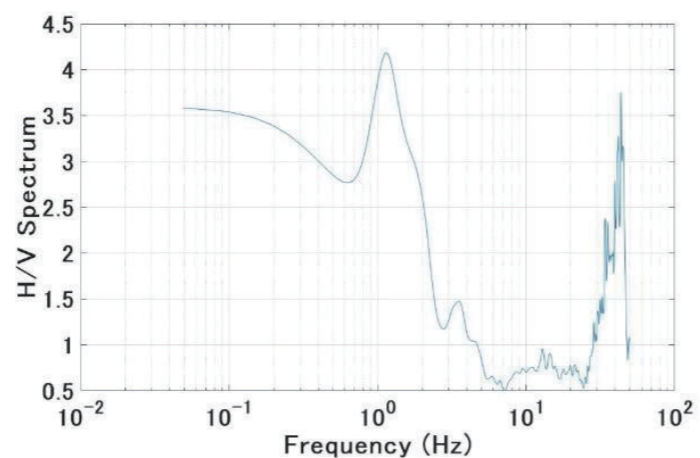


図2：常時微動測定結果の例
ピークの横軸の値が卓越振動数

地盤の特性を調査した結果、調査範囲ではあまり違いがなかったため表層地盤の影響による地震動の違いはないことがわかりました。

続いて、地震の揺れによって津波避難に活用する建物が被害を受けたときの影響を検討します。ここでは津波避難に活用する高い建物のうち、ある1棟が揺れによって被害を受けて津波避難に活用できなくなった場合の避難可能範囲をすべての構造物について算出し、地図上で避難可能範囲としてカバーされる地域の減少割合から津波避難可能性に与える影響を検討します。

まず、指定緊急避難場所のみを活用して、調査範囲の中央部に位置する建物が活用できない場合を図3に示します。周辺に他の指定緊急避難場所がないため、中央部分の人口の多い地域が避難可能範囲外となってしまいます。一方で、指定緊急避難場所以外の高い建物もすべて津波避難に活用して、図3と同じ建物が活用できない場合を図4に示します。この場合は周辺にある建物を避難に活用できるため、避難可能範囲外となる地域が狭くなっています。

このように、1棟の被害によって空白域が大きい状況をつくらないようにするためには複数の避難場所に避難できるように整備されていることが望ましく、津波避難タワーのように新しく構造物を増やすことも選択肢のひとつではありますが、既存の構造物を一時避難場所として活用することができれば津波避難可能性を大幅に改善できることがわかりました。

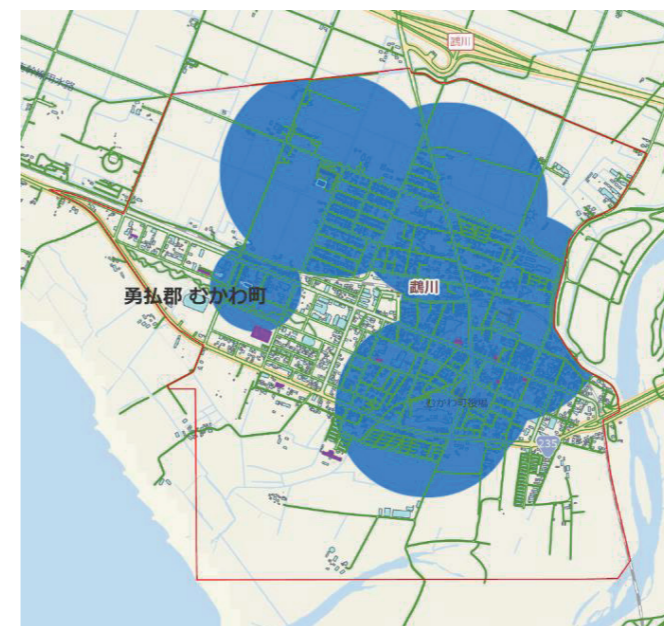


図3：構造物1棟を活用しない場合の避難可能範囲
(指定緊急避難所のみを活用)

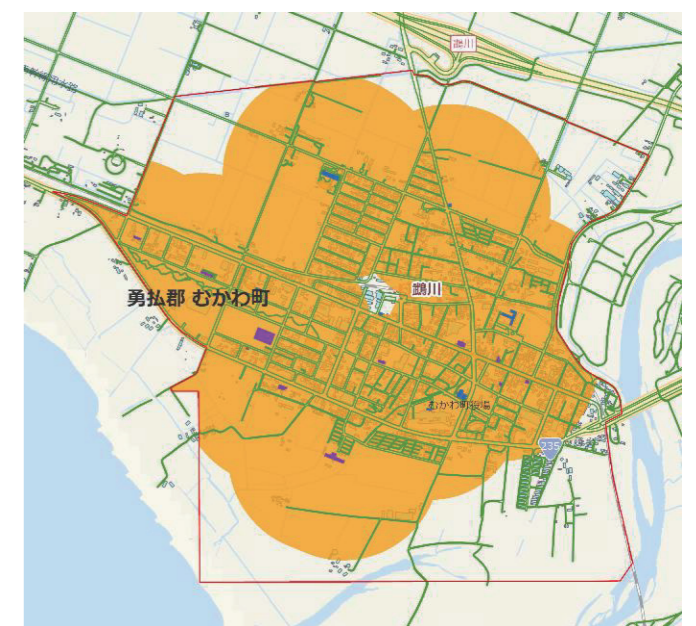


図4：図3と同じ構造物1棟を活用しない場合の避難可能範囲
(全て避難可能構造物を活用)

巨大地震発生を想定した北海道東部地域における生乳輸送への影響



センター長・教授
高橋 清

Highlights

- 北海道東部地域が巨大地震により物流関連インフラが被害を受けた場合の影響について、本州へ集荷する生乳を例に分析を行いました。
- 今回算出の輸送費用の増加に加え、生乳の廃棄等の損失や道路被災による更なる経路変更等を考えると、物流インフラの強靱化は北海道の最重要課題です。

我が国の国土は、気象、地形、地質等が極めて厳しい状況下にあり、地震、津波、風水害等の自然災害が多発しています。特に北海道では、令和5年に日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震・津波の発生による被害想定が公開され、その甚大な被害が大いに懸念されているところです。中でも被害が想定されている十勝地域や根釧地域を含む北海道東部地域は、日本の食料供給基地でもあります。これら地域において生産された生乳は、全国シェアで約34%を占めており、本州へは釧路港より出荷されています。そこで被災により物流インフラである港湾や道路が寸断されると、道外への生乳の供給に大きな影響が生じてしまうことは明らかです。そのため、災害時にも物流インフラ機能を継続させる、さらに早期に復旧させるという物流インフラの強靱化は重要な課題となります。そこで本研究では、北海道東部地域において巨大地震により物流インフラが被害を受けた場合の影響について、本州へ集荷する生乳を例に分析を行いました。

北海道東部地域で集乳された生乳は一般的な行程として、乳業工場に一時貯乳され、タンクローリー車で釧路港に輸送し、道外へ移出されています。生乳の道外移出には釧路港のほか、苫小牧港、小樽港が用いられており、被災により釧路港発の移出ルートが機能を失った場合、苫小牧港発や小樽港発の移出ルートに代替されることが想定されます。そこで本分析では、千島海溝沿いの巨大地震・津波で釧路港が被災し運用できなくなったことを想定し、十勝地域と根釧地域に位置する13の主要乳業工場(図1)から苫小牧港または小樽港に生乳が輸送され



図1：道東主要乳業工場配置図

る際の輸送経路や輸送時間を算出、その結果を用いて釧路港の運用停止に対する影響について分析を行いました。分析方法はArcGIS Proによるネットワーク解析を用い、輸送経路や輸送時間を算出しました。その結果、「雪印メグミルクなかしべつ工場」では、通常使用している釧路港までの輸送時間は117分ですが、被災時、釧路港から苫小牧港へ変更された際の輸送時間は353分と算出され、236分増加という結果が得られました。算出した輸送時間と輸送時間の増加による各工場の影響度を散布図(図2)に示します。十勝地域に立地する工場の輸送時間とその増加率は小さい傾向となりますが、根釧地域は輸送時間も増加率も大きい傾向となっています。工場の中には増加率が1700%を超える工場も存在します。さらに、輸送時間の分析結果と各種ヒアリング調査より、主な10か所の工場から「ほくれん丸」に輸送されるタンクローリー車の台数を用いて、1日に掛かる各工場から港への輸送費用の算出を行いました(図3)。各工場から釧路港までの輸送に要する1日の総輸送費用は421万円と試算されます。苫小牧港へ変更した際の総輸送費用は1,305万円と推計され、884万円増加する結果となりました。また、小樽港への変更による総輸送費用は1,441万円となり、1,020万円の増加費用が発生することが明らかとなりました。以上より、生乳を破棄せず移出し続けた場合、釧路港からの移出が10日間停止すると、約1億円の輸送費用の増加が想定されます。

本研究では、巨大地震の発生を想定し物流インフラの運用停止における影響を、北海道東部地域を対象とした生乳輸送を例に分析を行いました。今回は輸送時間と輸送費用を例に港湾被災の影響を分析しましたが、生乳の廃棄等の損失も考慮する必要があります。また、道路の被災状況によっては、さらなる輸送費用の増加も考えられ、物流インフラの強靱化は、北海道の重要な課題であることに間違いありません。

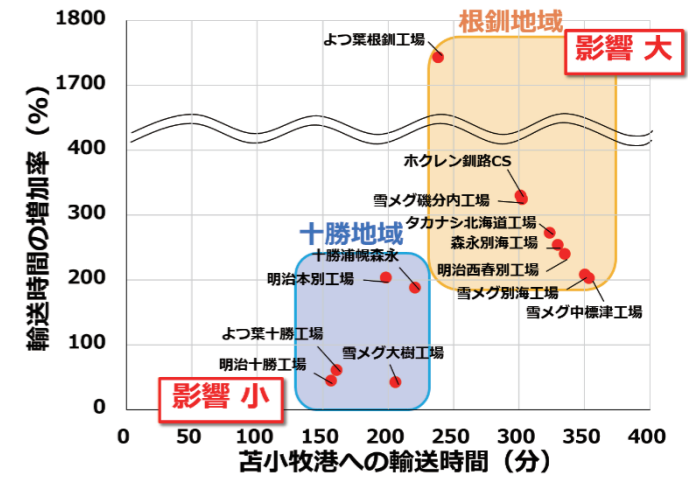


図2：輸送時間と輸送時間の増加率

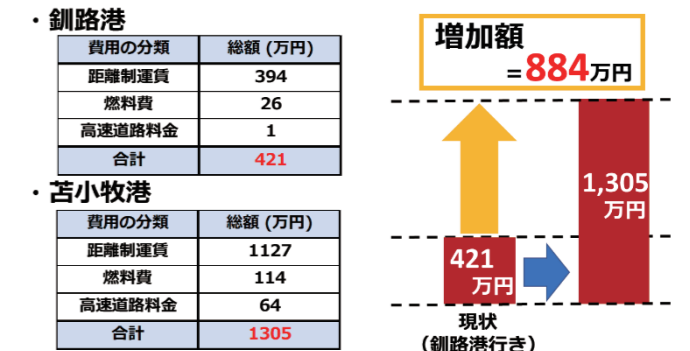


図3：輸送費用の分類と増加額

レーザースキャナー搭載の UAV用いた河川堤防点検に関する検討



部門長・准教授
白井 秀和



アドバイザー・教授
渡邊 康玄



学生
西山 了

Highlights

- レーザースキャナーを搭載したUAVを用いて実河川の堤防を測量しました。
- 堤防の3次元データより把握し、堤防の変状を網羅的に確認することが可能となりました。

河川洪水に対して、堤防の機能を果たすためには、陥没やはらみだし等の堤防の変状を把握しておく必要があります。そのため、河川管理の一環として、定期的な堤防点検が行われています。堤防点検は、図1のように、実際に現地に出向いて、一つ一つの変状を調べていくことになります。しかし、広大な領域を網羅するためには、人的リソースが多くかかり、費用も莫大となるため、効率的な点検手法の確立が求められています。このことから、我々は、河川の堤防点検へのUAVの適用性について検討しており、堤防点検における課題を解決することを目指しています。



図1：堤防点検の様子



図2：用いたドローン

本研究では、レーザースキャナーを搭載したUAVを用いて、どの程度の堤防変状を把握することができるかについて検討を行いました。対象とする河川は、勝川水系下頃辺川としており、図2に示すようなレーザースキャナー搭載のUAVを用いて、実際の河川堤防を測量しました。また、UAVで測量したデータと現地での実際の測量データとを比較するために、現地での堤防点検も併せて行いました(図3)。

図4は、UAVのレーザースキャナーで測量して得られた3次元データです。この図に示す通り、河川を網羅的に測量できていることがわかります。また、この3次元データから、ある区間の横断面図を抜き出したものを図5に示しています。この図に示すように、堤防の天端や法面、高水敷等の形状が良くとらえられていることがわかります。



図3：堤防点検によって確認された変状
(左：法面のはらみだし、中：天端の不陸、右：高水敷と法面の陥没)

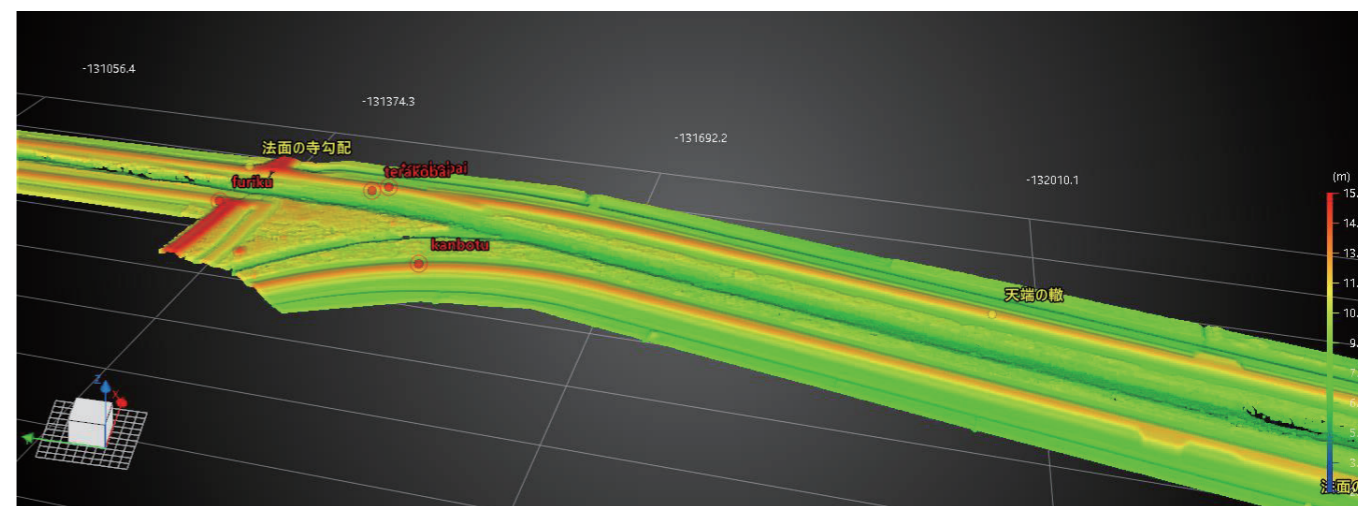


図4：レーザースキャナーで得られた河川の3次元データ



図5：3次元データから得られた河川の横断面図

このように得られた横断面図を現地点検で確認できた変状と照らし合わせたところ、高水敷や堤防の陥没、不陸、寺勾配、はらみだし、堤脚水路の閉塞といった変状項目について、植物の有無にかかわらず、高い照合率で確認できることがわかりました。

以上のように、レーザースキャナー搭載のUAVを用いることで、堤防形状を網羅的に把握し、その変状を把握することが確認できました。ただし、今回は3次元データを目視によって確認していたことから、人による判断の違いや、見落としをする可能性もある。このことから、今後は、3次元データの蓄積によって経年的な変化を差分して変状を把握したり、AIによる効率化も図っていきたいと考えています。

海底の上昇プロセスが津波規模に与える影響 に関する簡易な評価方法



部門長・准教授
白井 秀和

Highlights

- 津波規模の簡易な評価方法するために、海底の上昇による津波波形と流速分布の近似解を導出
- 海底が上昇するプロセスにおいて、その加速度が津波規模に大きく寄与することなど簡単に把握

我が国では、10年に1回程度のペースで地震に伴う津波が襲来しており、北海道においても、平成5年（1993年）においての北海道南西沖地震により、津波による甚大な被害を受けています。今後の津波対策を講じていく上では、想定する津波の規模と、それに対してどこまで浸水被害があるかについて、数値シミュレーション技術等を用いて、把握しておく必要があります。

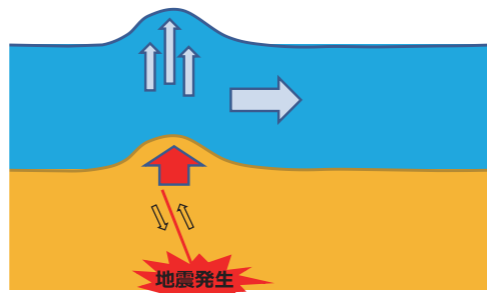


図1：対象とする現象

しかし、数値シミュレーションでは、その詳細な条件の設定や莫大な計算時間を要することになります。このことから、高精度でなくとも、簡単に津波の特性を簡易に評価できる方法があると、様々な条件を想定した検討を早急に行うことができ、便利です。

津波は、主に地震発生時の海底の変動することで発生するのですが、本研究では、この津波の発生プロセスに焦点を当て、津波の規模が津波の発生プロセスによってどのように変わるかを評価できる簡易方法について検討しました。そのような簡易な評価方法を確立するために、海底の上昇による津波波形と流速分布の近似解を導出しました。具体的には、図1に示すように海底面が隆起することでの水面の波形と流速の分布がどのようになるかがわかる近似解の導出を行いました。導出した解は次式に示す通り、一見複雑で難しそうですが、エクセルなどで簡単にその波形や流速を示すことができます。

$$\delta_{h*} = \frac{\alpha n!}{\lambda^n} \exp(-x_*^2) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda^2}{3}\right)^i \sum_{j=i}^{\infty} \left[\frac{j!}{(j-i)! i!} \frac{(\lambda t_*)^{2j-2i+n+2}}{(2j-2i+n+2)!} H_{2j+2} \right] + \frac{1}{2} \frac{\alpha n!}{\lambda^{n-2}} \exp(-x_*^2) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda^2}{3}\right)^i \sum_{j=i}^{\infty} \left[\frac{j!}{(j-i)! i!} \frac{(\lambda t_*)^{2j-2i+n}}{(2j-2i+n)!} H_{2j+2} \right]$$

$$\delta_{u*} = \frac{\alpha n!}{\lambda^n} \exp(-x_*^2) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda^2}{3}\right)^i \sum_{j=i}^{\infty} \left[\frac{j!}{(j-i)! i!} \frac{(\lambda t_*)^{2j-2i+n+1}}{(2j-2i+n+1)!} H_{2j+1} \right] + \frac{1}{2} \frac{\alpha n!}{\lambda^{n-2}} \exp(-x_*^2) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda^2}{3}\right)^i \sum_{j=i}^{\infty} \left[\frac{j!}{(j-i)! i!} \frac{(\lambda t_*)^{2j-2i+n-1}}{(2j-2i+n-1)!} H_{2j+1} \right]$$

ここに、 δ_{h*} ：無次元化した水面の変動量、 δ_{u*} ：無次元化した流速の変動量、 t_* ：無次元化した時間、 x_* ：無次元化した空間座標、 H ：エルミート行列です。これらの解は、海底面 z_{b*} が $z_{b*} = \alpha t_*^n \exp(-x_*^2)$ で上昇することを想定したもので、海底が時間に関して n 乗で隆起したものを想定しています。そのため、 n が大きくなるほど急加速度的に海底が隆起することになります。

この導出した解について、図2に示すように、4ケースの海底の隆起のプロセスを想定した波形と流速を示すことで、海底上昇プロセスがどのような影響を与えるかについて検討してみました。図3がその近似解から得られる水面形と流速分布を示したものです。この図に示すように、 n が大きく、海底面が上昇するまでの時間が短いものになることが分かります。つまり、海底面上昇速度及び加速度が大きくなるほど津波の規模が大きくなるがこの結果から示されました。以上のように、導出した近似解によって、計算時間をかけずに簡単に津波の規模を評価することができました。

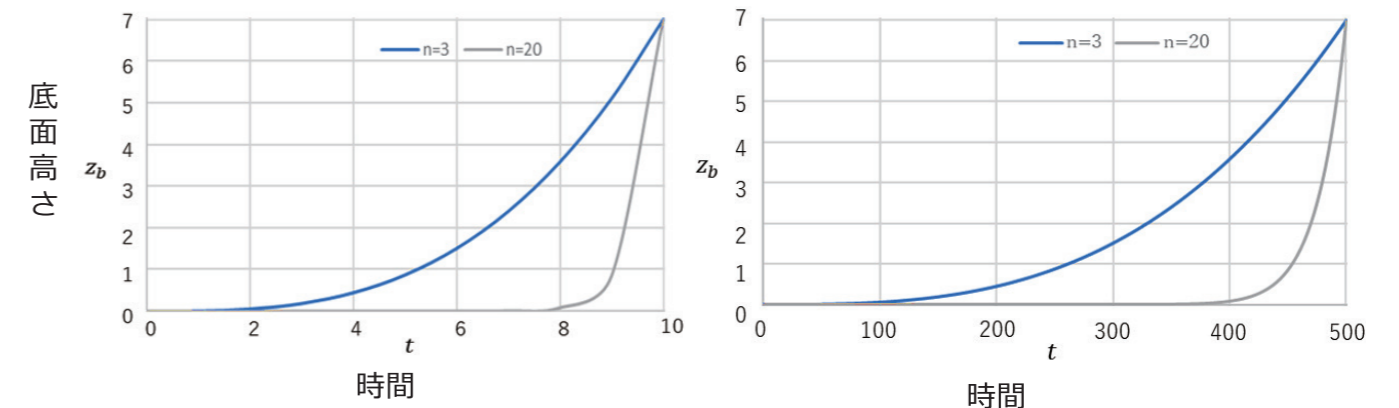


図2：想定した海底の上昇パターン(左：10sで7m隆起、右：500sで7m隆起)

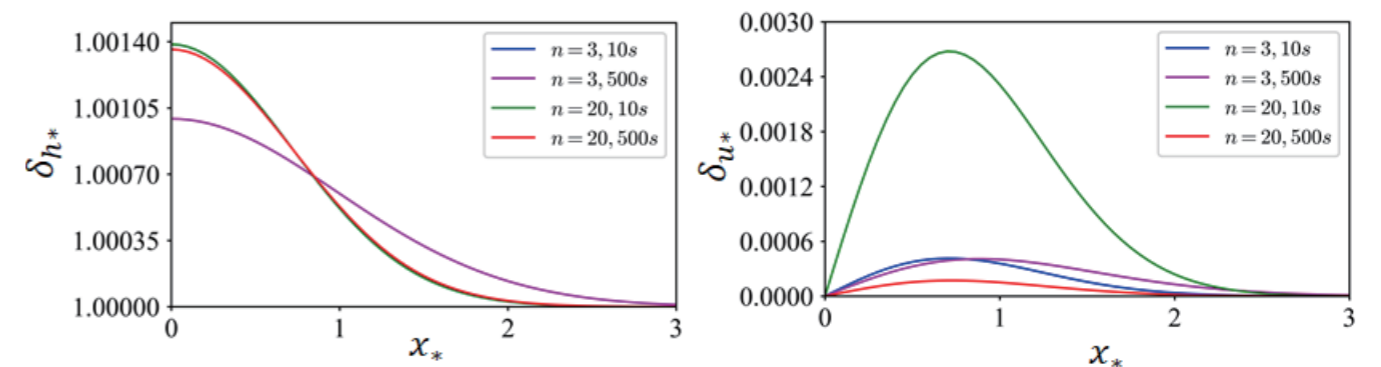


図3：近似解から得られる水面波形(左)と流速分布(右)

アイスジャムによる水深上昇の推定手法の開発



准教授
吉川 泰弘

Highlights

- アイスジャム現象の解明ために、二通りの水理実験を実施しました。
- 入力値が6つとなるアイスジャムによる水深上昇の推定手法を開発しました。

本研究の目的は、実務での活用を考慮したアイスジャムによる水深上昇の推定手法を開発することです。アイスジャムとは、寒冷地河川において、流れる河水が河道内に堆積し、水の流れを閉塞させる現象で、河川の水深を急激に上昇させます。本研究では、アイスジャムによる水深上昇の現象を明らかにするために、氷の大きさや厚さ、氷塊の空隙率に着目した二通りの水理実験を実施しました。

● アイスジャムを想定した水理実験

水理実験では、氷の大きさや厚さが異なる模型氷を用いた「氷径分布に着目した実験」と、「氷塊の空隙率に着目した「多孔板を用いた実験」の二通りの実験を実施しました。両実験では、水路長14.5m、水路幅0.3m、水路高さ0.4m、水路勾配1/8300の水路を用いました。実験設備の制約のため対象とする実河川は想定出来ませんが、2018年3月に北海道上川郡美瑛町を流れる辺別川で発生したアイスジャムの現地観測データを基に、縮尺1/100として氷のサイズを設定しています。図1に氷径分布に着目した実験の水路を示し、図2にアイスジャムを強制的に発生させる金網の設置状況を示します。図3には多孔板を用いた実験の概要図を示し、写真1と2に、空隙率毎に、実験に用いた多孔板の拡大図を示します。

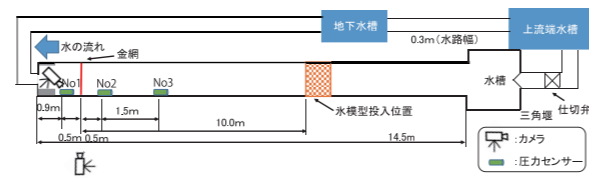


図1：氷径分布に着目した実験の水路（平面図）

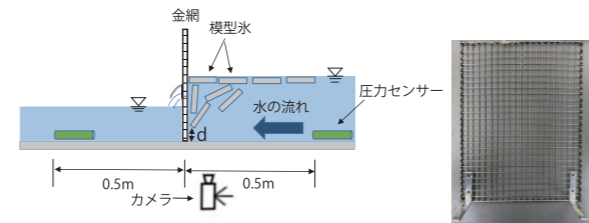


図2：金網設置（左：水路側面図、右：0.3m×0.4mの金網）

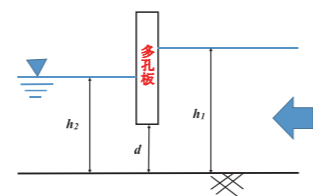


図3：多孔板を用いた実験



写真1 空隙率 40% 写真2 空隙率 20%

氷径分布に着目した水理実験により、アイスジャムによる水深上昇は、氷の鉛直下方向への潜り込み、これに伴う通水面積の減少が要因であることが分かりました。本研究では、氷の鉛直下方向への潜り込みにより、氷が堆積して氷塊が厚くなり氷塊内の空隙率が小さくなり、また氷塊の堆積により水が流れる氷塊下の開口高さが狭くなると仮説を設けました。このため、二つ目の実験では、氷塊の空隙率と開口高さを考慮するために、アイスジャムを簡素化して多孔板で再現しました。

本研究の二通りの水理実験により、アイスジャムによる水深上昇の要因は、氷の鉛直下方向への潜り込みと、これに伴う通水面積の減少が推定されました。この現象を流水が流れる開口の高さと氷塊の空隙率で表現し、アイスジャムによる水深上昇の実験データを得ました。次に、実験データに基づき、開口高さや空隙を考慮したレイノルズ数と抵抗係数の関係、抵抗係数と水深上昇の関係を明らかにしました。それぞれ図4と5に示します。

さらに本検討結果を基に、アイスジャムによる水深上昇の推定手法の開発を行いました。本推定手法による水深比の推定値は、平均絶対誤差0.026の精度で実験値を推定しました。結果を図6に示します。一方で、上昇水深を推定する上で、実測値が得られていないアイスジャム発生時の開口高さdと氷塊の空隙λの重要性が明らかとなりました。これらの値の実測値または推定値を得ることが望まれます。

● まとめ

本実験結果より、アイスジャムによる水深上昇の要因は、氷の鉛直下方向への潜り込みと、これに伴う通水面積の減少が推定されました。この現象を流水が流れる開口の高さと氷塊の空隙率で表現した実験を実施して実験データを得ました。本実験データを基に、流量、川幅、アイスジャム発生前の水深、水の動粘性係数、開口高さ、氷塊の空隙の6つの入力値から、アイスジャムによる水深上昇の推定手法を開発しました。本推定手法による水深比の推定値は、精度高く実験値を推定しました。

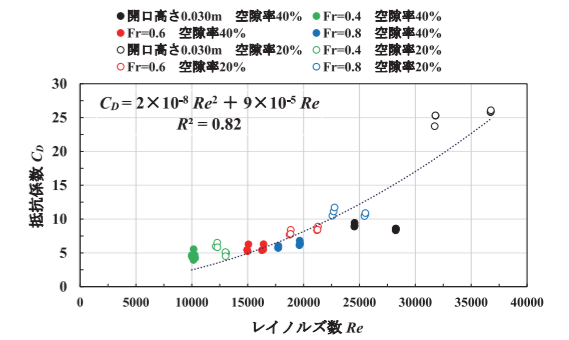


図4：多孔板を対象としたレイノルズ数と抵抗係数

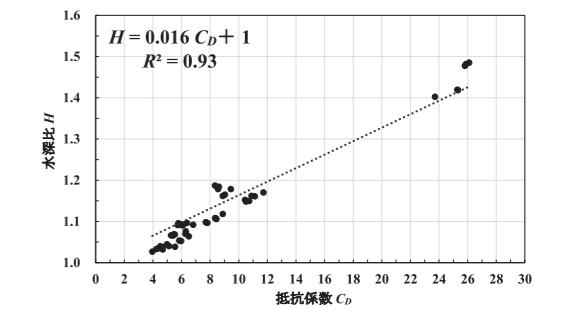


図5：抵抗係数と水深比（上昇水深÷初期水深）

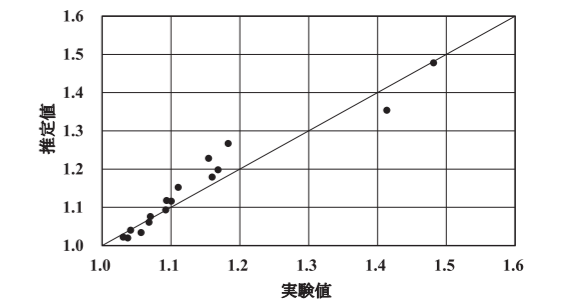


図6：水深比における実験値と推定値

被災時における抗土圧構造物の 新たな健全性評価手法と 修復技術に関する検討



Highlights

- 斜壁が多く、面状の補強材を用いるジオテキスタイル補強土壁でも、壁表側から補強材の引抜き抵抗力を計測する手法を開発しました。
- 実大試験により、施工中や竣工後に引抜き抵抗力の計測・比較を行いました。

図1に示すように、補強土壁とは、垂直もしくは垂直に近い壁面工と補強材から構成され、壁面工に作用する土圧と盛土内に敷設した補強材の引抜き抵抗力との釣合いによって安定を保つ土留め構造物です。従来の重力式のコンクリート擁壁に比べて経済性や施工性に優れるだけでなく、高い耐震性も有しており、特に用地・地形の制約を受ける箇所では有効な工法です。しかし、壁面を支える補強材は盛土材の性質に大きく左右されるため、不適な盛土材が部分的にでも使用されてしまうと、所定の引抜き抵抗力が発揮されず、壁面のはらみ出しといった変状が生じることがあります。そのため、施工時の品質管理がとても重要な地盤構造物であると言えます。また、竣工後に地震や豪雨などで被災した際にも変状することがありますが、補強材は壁面材の裏側で連結されているため、その時点での補強材がどの程度の抵抗力を発揮しているのかが分からず、健全性の評価や維持管理が難しいという側面も持ち合わせています。

このような背景から、この研究では補強材を壁表側で連結するような構造的な変更を加えることで、上記の問題を網羅的に解決することを目指しています。その中でも、タイバーと呼ばれる棒鋼とアンカープレートと呼ばれる支圧板を補強材としているアンカー補強土壁については、このような構造変更が比較的容易であるため、既に社会実装可能な段階にまで研究が進んでいます。しかし、壁面が垂直でないことが多く（斜壁）、ジオグリッド等の面状補強材を用いるジオテキスタイル補強土壁では、この問題の解決は容易ではありません。そこで本年度は、幾つの工夫を施すことで、ジオテキスタイル補強土壁でも壁表側から補強材の引抜きを可能とすることに取り組みました。

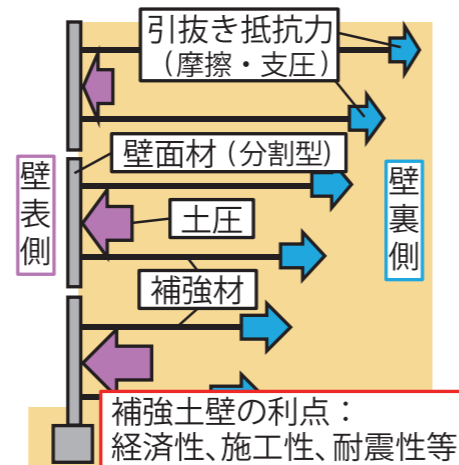


図1：補強土壁の仕組み

写真1は補強材のジオグリッドの敷設状況と竣工後の全景です。盛土材には意図的に良質な砂質土と、盛土材としては適さない粘性土の2種類を用いました。壁面材は直径6mmの鉄線で構成され、幅2mで5分勾配の鋼製枠と呼ばれるタイプのものを使用し、地表面から0.5m掘り下げた基礎地盤に、各盛土材で幅4m（2枚）、高さ4.3m（高さ0.5m×8枚（段）+0.3mの盛土）の補強土壁を構築し、地表面以深は根入れしました。

写真2は壁表側から補強材の引抜き抵抗力を計測するために設置した引抜き試験用ロッドと、これを水平方向に引き抜くために鋼製枠の背後に設置したL型擁壁の様子です。引抜き試験用ロッドは、両端にM18のネジ切り加工した直径20mmの丸鋼の片側に、幅0.2mのジオグリッド片を挟むことができる2枚の縞鋼板からなる連結部を固定したものです。補強土壁は想定すべり線の奥に敷設されているため、すべり線までは摩擦の少ない丸鋼としていますが、丸鋼や連結部にも摩擦はあるため、ジオグリッド片を連結しない引抜き試験用ロッドも設置し、これらの引抜き抵抗力の差によって、補強材の引抜き抵抗力を評価することにしました。

写真3は壁表側から引き抜く際の様子です。先述の方法によって評価したジオグリッド片の引抜き抵抗力には、盛土材による違いが明確に表れることを確認でき、この手法によって施工中における品質管理や竣工後に維持管理に十分に適用可能であることが明らかとなりました。

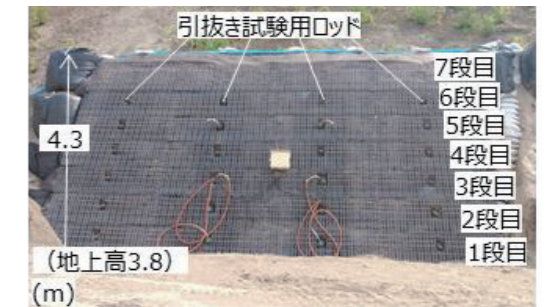
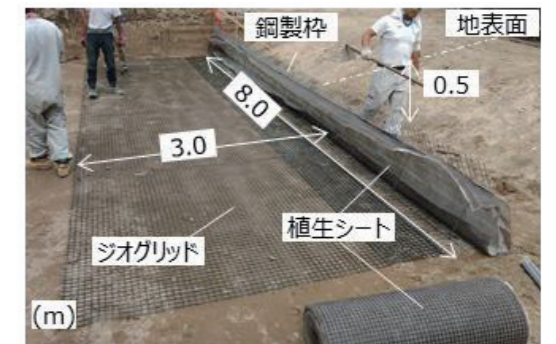


写真1：ジオテキスタイル補強土壁

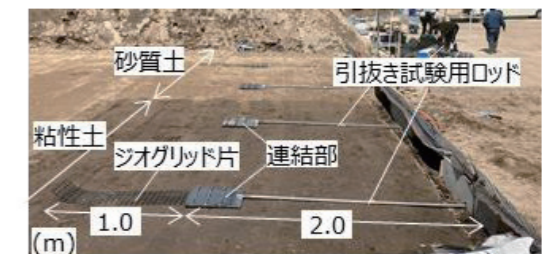


写真2：引抜き試験用ロッド

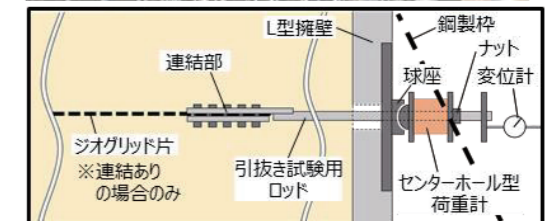


写真3：壁表側からの引抜き

路床の凍上性に着目した 首都ウランバートル市内における 道路の質的向上に向けたプロジェクト

Highlights

- モンゴル国の技術者に対して、凍上現象に関する講義を実施しました。
- 本事業で供与した凍上試験装置を用いて、現地で凍上試験を実施しました。試験結果から、モンゴル国においても凍上現象が発生しうることが確認できました。



教授 中村 大 助教 片岡 沙都紀 准教授 渡邊 達也

モンゴル国ウランバートル市の生活道路の改善を目指して実施している「モンゴル国 路床の凍上性に着目した首都ウランバートル市内における道路の質的向上に向けたプロジェクト」が2年目に突入しました。

本事業は北見国際技術協力推進会議（北見市）の提案を受け、2020年度に独立行政法人 国際協力機構（JICA）の「草の根協力事業（地域活性化型）」として採択されたもので、2022年8月から開始いたしました。

モンゴルでは冬期の平均最低気温がマイナス20度を下回り、舗装路下の土が凍結するため、道路に凹凸や亀裂が発生します（図1）。しかしながら、地盤の凍結・凍上に関する専門家が少なく、生活道路が荒れたままになっています。本事業は、モンゴルの首都ウランバートルで、舗装路下の土の凍上メカニズムを科学的に検証しながら、道路建設に携わる現地の技術者に凍上現象に関する知識と対応策を普及させることを目的としています。

2023年9月上旬には、中村教授や北見国際技術協力推進会議の担当者、北見市都市建設部土木課の技術者らが現地入りし、現地の技術者に対して、凍上現象に関する講義や寒冷地の道路建設に関する講義を実施しました（図2）。また、カウンターパートであるウランバートル市道路開発局（UBRDD）とモンゴル地理学・地生態学研究所（IGG）のそれぞれの実験室において、本プロジェク



図1：被害の一例



図2：凍上に関する講義の様子

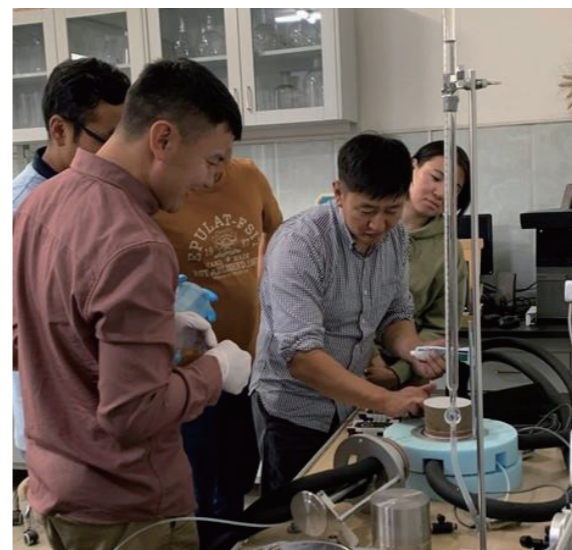


図3：凍上試験の実技講習の様子

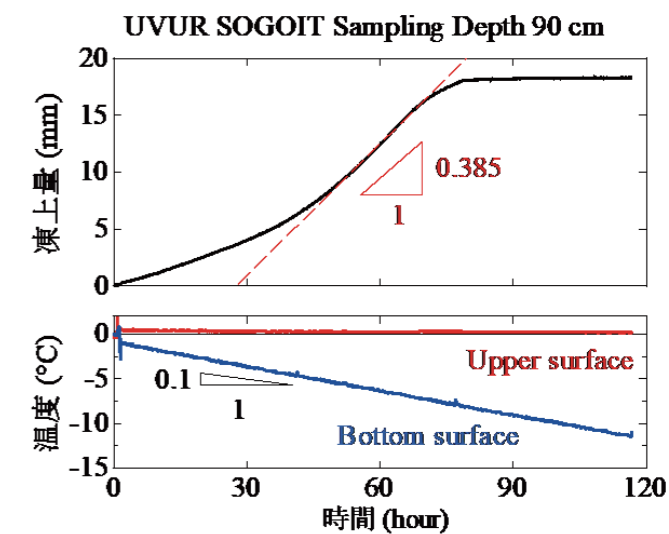


図4：凍上試験結果の一例

トで供与した凍上試験の実技講習も実施いたしました（図3）。

図4はウランバートル市内で採取された路床土の凍上試験結果の一例で、図5は凍上試験後の供試体の様子です。本事業で実施した凍上試験により、モンゴル国においても凍上現象が発生しうることが確認できました。今後は現地の技術者が凍上試験を実施し、その結果を取りまとめてウランバートル市内の凍上危険度マップを作成していきます。

2023年11月下旬から12月上旬にかけては日本で研修を実施し、本事業のカウンターパートであるウランバートル市道路開発局（UBRDD）とモンゴル地理学・地生態学研究所（IGG）からそれぞれ2名の研修員と現地調整員が来北しました。本学では、凍上現象に関する講義のほか、永久凍土の融解がインフラに与える影響、道路舗装の点検と維持管理に関する講義などを行いました（図6）。また、北見市内の道路建設現場を視察し、札幌市の国立研究開発法人 寒地土木研究所の施設見学も行いました。



図5：凍上試験後の供試体の様子



図6：本学での研修の様子

ジオセルを用いた 路盤補強工法の 寒冷地への適用



Highlights

- 未凍結時にはジオセルの効果によって、路盤の支持力が大きく改善することを確認しました。
- 凍結融解後も、改善された支持力が維持されていることを確認しました。

北海道のような積雪寒冷地では、路床土の凍上により路面に亀裂や凹凸が発生します。モンゴル国のような極寒地域では問題はさらに深刻で、永久凍土の融解による沈下と地盤の再凍結による凍上が、道路に甚大な被害をもたらしています。

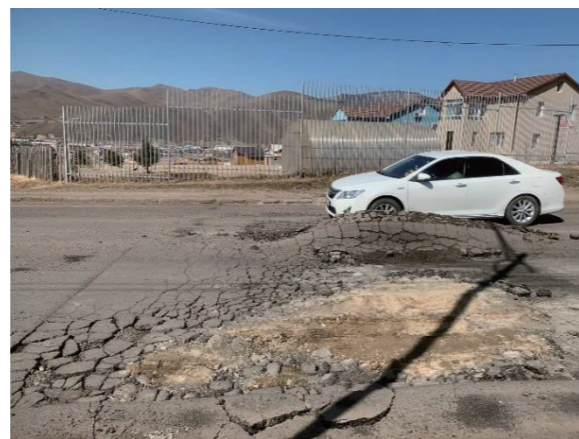


図1：道路の被害状況の一例

図1はウランバートル市内で春期に発生した道路の被害状況の一例です。路面に多数の亀裂が発生して舗装が剥がれ、路盤の支持力不足で大きな轍が発生していることが確認できます。モンゴル国ではこのような道路の被害が春先に散見されており、交通の大きな妨げとなっています。この道路を開削して調査したところ、路床土は粘性土で高い凍上性を有していることがわかりました。また、路盤の厚さは僅か0.3mで、路床には凍上対策は施されていませんでした。一般的に日本では凍上対策として、最大凍結深さの70%まで、非凍上性土に置き換える置換工法が採用されています。しかし、日本に比べて最大凍結深さが大きいモンゴル国では、置換工法の適用は経済的に困難だと考えられます。そこで本研究では、ジオセルを用いて路盤を補強することにより、道路の被害軽減と長寿命化を試みました。

本研究では、ジオセルを用いた路盤補強工法の寒冷地への適用性を明らかにするため、実物大の模型道路（図2）を施工しました。実験は無対策のケース1、ジオセルを1層（厚さ0.15m）敷設したケース2、ジオセルを2層（厚さ0.3m）敷設したケース3の3つのケースを実施しました。各ケースの長さは4mです。幅4m、深さ1.5mまで地盤を開削した後に、2種類の土質材料を路床土として埋め戻し、ハンドガイドローラーで厚さ1.2mまで締固めました。3つのケース全てにおいて、路床土には凍上性が高い砂質土を用いました。また、ケース間は砕石（C-80）で分離しました。

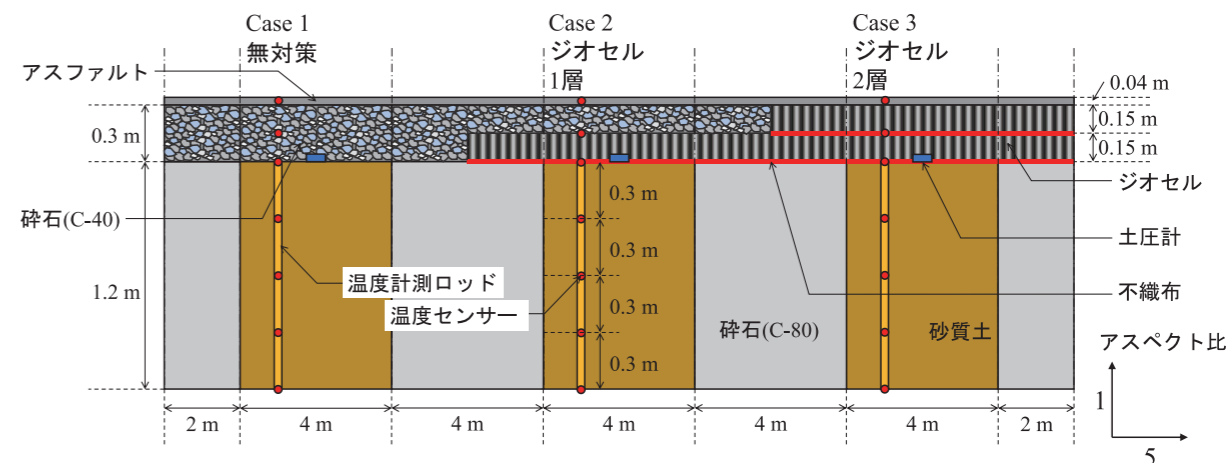


図2：実物大模型道路の模式図

図3は本研究におけるジオセルを用いた路盤補強工法の構成例（ケース3）です。高さ0.15m、展開時の長さおよび幅が約0.3mのジオセルを使用しました。まず、路床の表面に厚さ3mmの不織布を敷き、その上にジオセルを展開します。次に、ジオセルに砕石（C-40）を充填し、ハンドガイドローラーで締固めて1層目としました。この工程を繰り返し行い、2層目を構築しました。

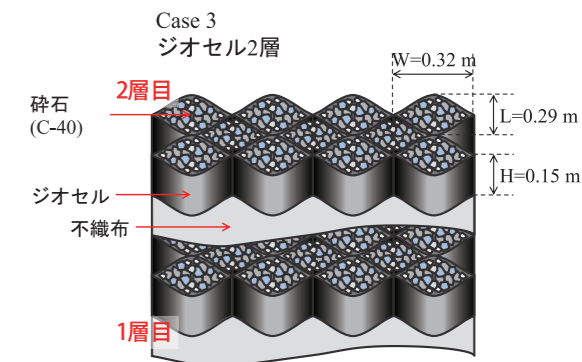


図3：ジオセルを用いた路盤補強工法の構成例

図4は平板載荷試験の結果です。未凍結状態での試験結果を比較すると、路盤をジオセルで補強したケース2、ケース3は、無対策のケース1に比べて沈下が少ないことが確認できます。また、凍結融解後と比較すると、ケース2、ケース3の沈下量は未凍結状態とほぼ同じであることが確認できます。これらの試験結果から、ジオセルの路盤補強効果が凍結融解履歴を受けても低下しないことが明らかとなり、ジオセルを用いた路盤補強工法が寒冷地にも適用可能であることがわかりました。

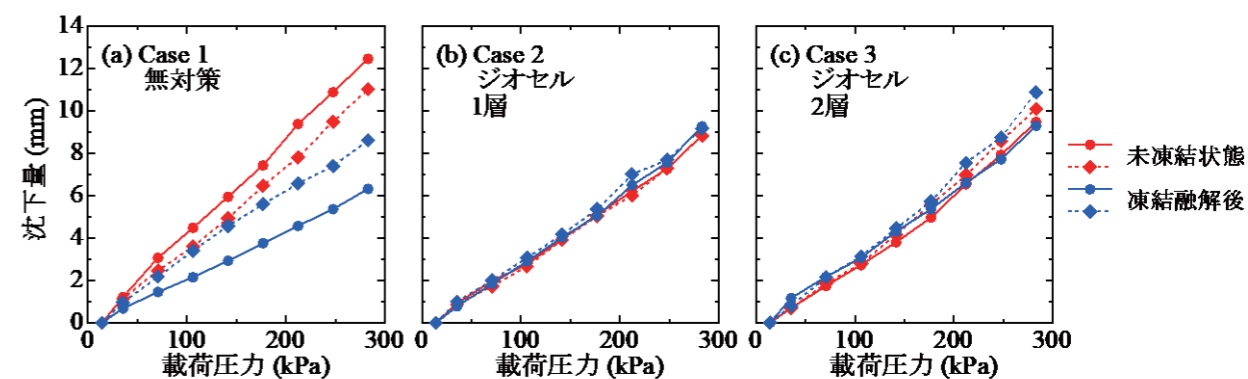


図4：平板載荷試験の結果

太陽光発電施設の凍上被害発生メカニズムの解明とそれに基づいた凍上対策の提案



教授 中村 大
助教 門田 峰典

Highlights

- 杭、基礎ともに埋設深さを深くすることで、基礎についてはフーチング幅を大きくすることで、凍上量を大きく低減できることを明らかにしました。
- 得られた成果がNEDOのガイドラインに盛り込まれました。

近年、北海道においても太陽光発電施設が積極的に建設されていますが、凍上現象による被害が散見されるようになってきました(図1)。しかしながら、2019年に公開された「地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン2019年版」には、十分な凍上対策が盛り込まれていませんでした。特に、ガイドラインで示された基礎の埋設深さでは凍上が発生



図1：凍上被害の一例

してしまう可能性が高く、杭については具体的な凍上対策が明示されていませんでした。そこで本研究では、太陽光発電施設の建設に使用されている杭と基礎について実物大模型実験を行い、その凍上挙動を明らかにすることに取り組みました。

図2は本研究で施工したスパイラル杭とH形鋼杭、独立基礎の模式図です。実験は埋設深さや、フーチングの有無、幅を変えて、全9ケース実施しました。

図3はスパイラル杭とH形鋼杭、独立基礎の凍結深さ、鉛直変位量の経時変化を示したものです。まず、杭の凍上挙動に着目すると、H形鋼杭、スパイラル杭ともに埋設深さが浅い杭 (Case 3、5) で、凍

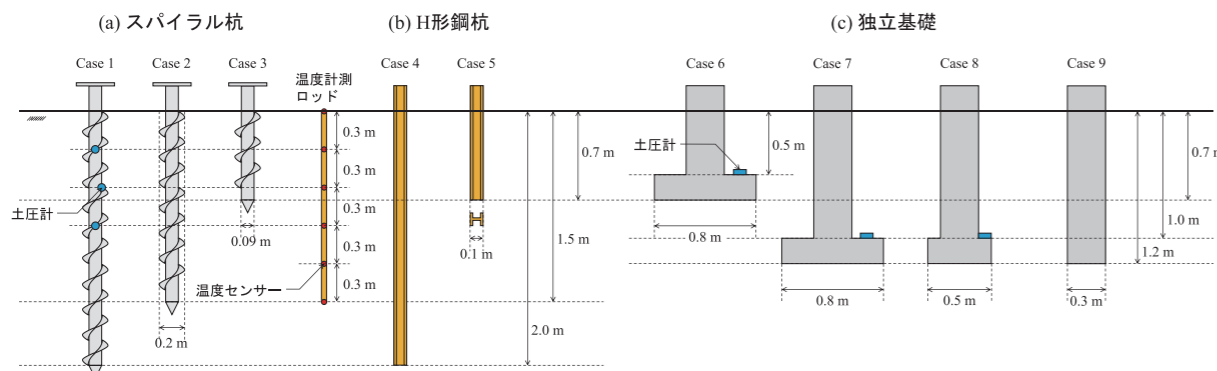


図2：本研究で施工したスパイラル杭とH形鋼杭、独立基礎の模式図

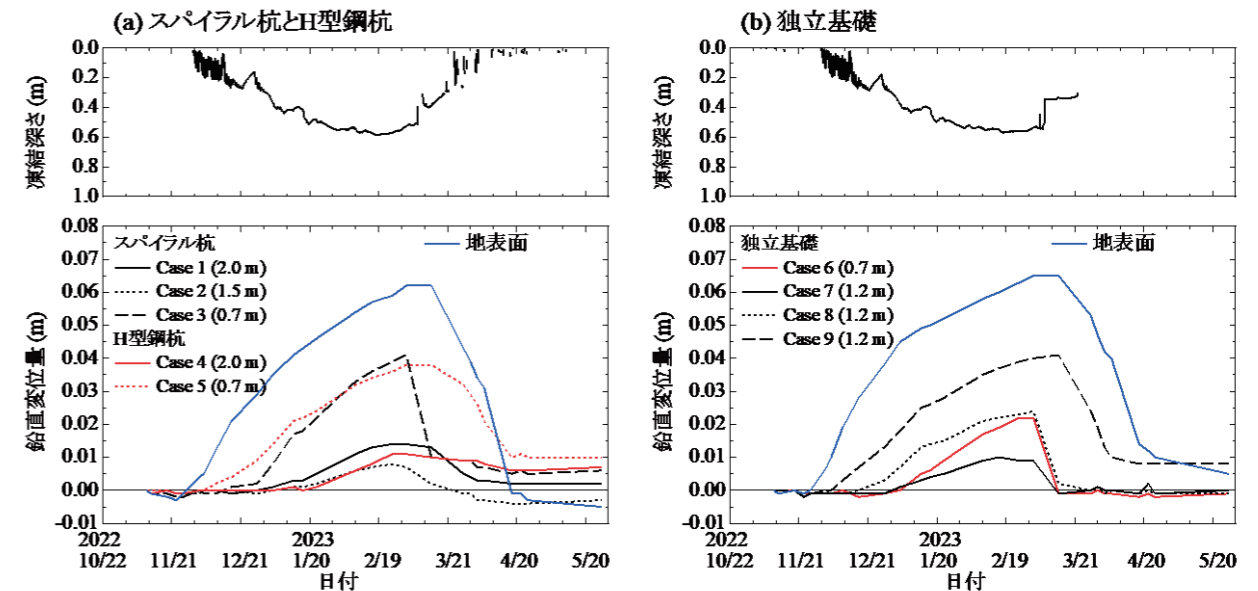


図3：スパイラル杭とH形鋼杭、独立基礎の凍結深さ、鉛直変位量の経時変化

上量が大きいことが確認できます。また、埋設深さが深い杭では、スパイラル杭 (Case 1、2) とH形鋼杭 (Case 4) ともに凍上量は小さいです。次に、独立基礎の凍上挙動に着目すると、フーチングが無いもの (Case 9) から凍上し始め、フーチング幅が小さいもの (Case 8)、幅が大きいもの (Case 7) の順に、遅れて凍上し始めていることが確認できます。また、フーチング幅が大きいものでも、凍結深さが地盤内に進行するに従って、埋設深さが浅いもの (Case 6) から先に凍上し始めていることがわかります。以上のように、本研究によって杭、基礎ともに埋設深さを深くすることで、基礎についてはフーチング幅を大きくすることで、凍上量を大きく低減できることが明らかとなりました。

図4に杭と基礎の適切な埋設方法について示します。基礎については、地表面からフーチング上面までの深さを、予測される最大凍結深さの1.2倍程度で設計すると凍上量を大きく低減することができます。

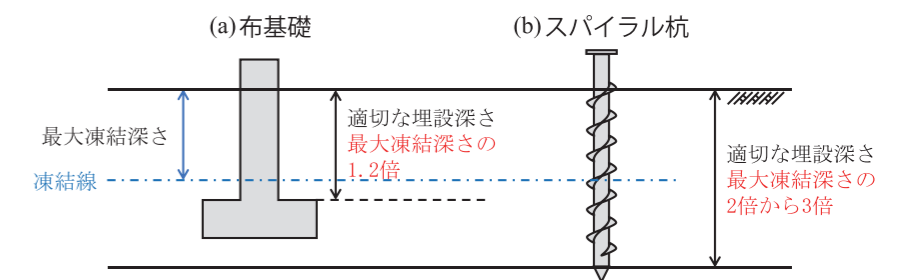


図4：杭と基礎の適切な埋設方法

また、スパイラル杭は最大凍結深さの2倍から3倍程度深く埋設することで、凍上対策として高い効果が得られます。以上の埋設方法は2023年に公開された「特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン」に盛り込まれました。

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果として得られたものです。

スパイラル杭の引抜抵抗に与える凍結融解履歴の影響



教授 中村 大
助教 門田 峰典

Highlights

- 杭の凍上融解挙動を把握することができました。
- 杭の引抜抵抗は施工直後に小さく、凍結融解履歴を受けた春期にはさらに低下していることを明らかにしました。

近年、脱炭素化に向けた取り組みで、北海道においても太陽光発電施設が積極的に建設されています。しかしながら、冬期に凍上現象が起こりやすい寒冷少雪地域に設置された太陽光発電施設では、架台を支える杭が局所的に持ち上がる被害が発生しています。杭が凍上により持ち上がったままの場合や、元の位置に戻ったとしても十分な引抜抵抗を保持できていない場合には、強風で杭が引抜け、太陽光発電施設が倒壊する懸念があります。そこで本研究では、太陽光発電施設の架台を支える杭の凍上挙動を観察しつつ、施工直後から夏期にかけて合計3回の引抜試験を実施して、凍結融解履歴が杭の引抜抵抗に与える影響を調査しました。

図1は施工した杭を模式的に示したものです。本研究では凍上性の高い砂質土で深さ2mの地盤を造成し、羽根の有無や幅、数、埋設深さが異なる8種類の杭を各種3本ずつ、回転貫入で埋設しました。また、温度計と土壌水分センサーを埋設して、地盤の凍結深さと水分状況を観測しました。

さらに、凍上・融解変位は定期的に行う水準測量で観察しました。

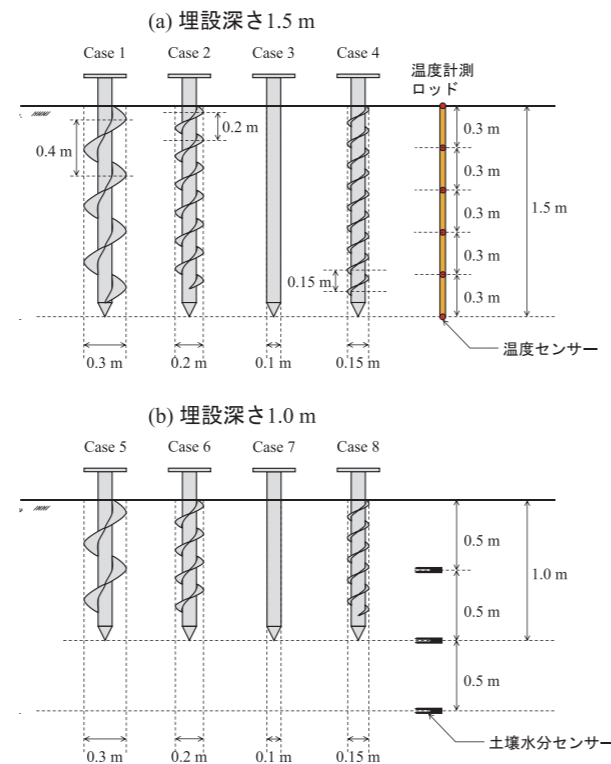


図1：杭の模式図

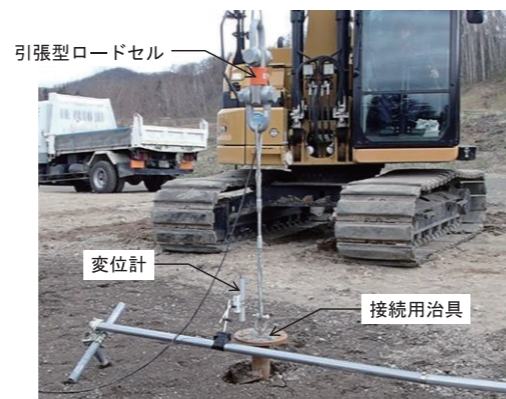


図2：引抜試験の様子

図2は引抜試験の様子です。引抜試験は施工直後の2022年11月18日と、凍結融解直後の2023年4月24日、夏期の2023年9月1日の合計3回行いました。杭の引抜きはバックホーで行い、荷重と変位を計測しました。

図3は杭周辺の凍結深さと杭の鉛直変位量の経時変化を表したものです。まず、凍結期における杭の鉛直変位量に着目すると、埋設深さが大きいものの方が、凍上量が小さいことが確認できます。次に、融解期における杭の鉛直変位量に着目すると、概ね全ての杭が沈下して元の位置に戻っているにもかかわらず、埋設深さが1.5mの羽根のない杭 (Case3) では沈下が発生せず、凍上による変位がそのまま残留していることが確認できます。

図4は引抜試験の結果です。実験結果にはばらつきがあるものの、施工直後に比べて凍結融解直後の荷重が小さく、引抜抵抗が低下していることが窺えます。ただし、Case2では荷重の減少が小さく見受けられます。このことから、羽根の幅があり、凍結深さ以上の羽根の数が多いスパイラル杭では、凍結融解履歴の影響が小さいものと考えられます。なお、夏期にはどのケースでも荷重が大きく、引抜抵抗が増大していることがわかります。

本研究により、杭の引抜抵抗は施工直後に小さく、凍結融解履歴を受けた春期にはさらに低下していることが明らかとなりました。このことから、施工直後や凍結融解直後の春期には、強風による太陽光施設の倒壊リスクが高いものと推察されます。

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果として得られたものです。

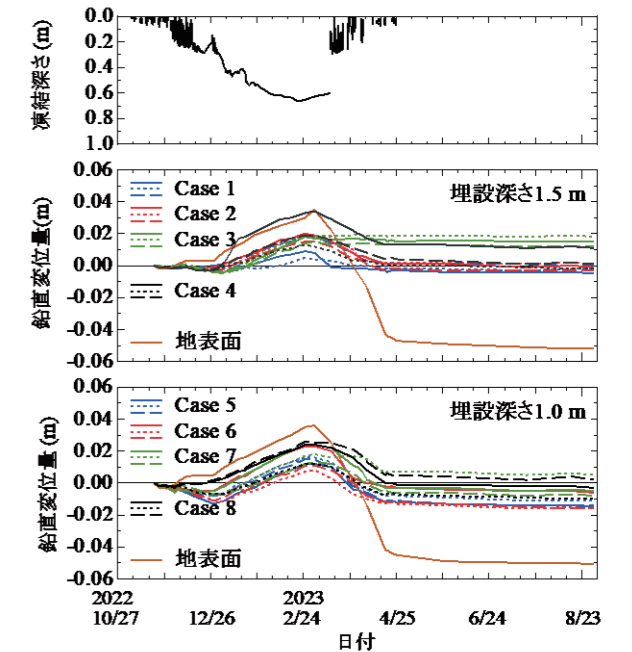


図3：凍結深さ、杭の鉛直変位量の経時変化の質量の経時変化

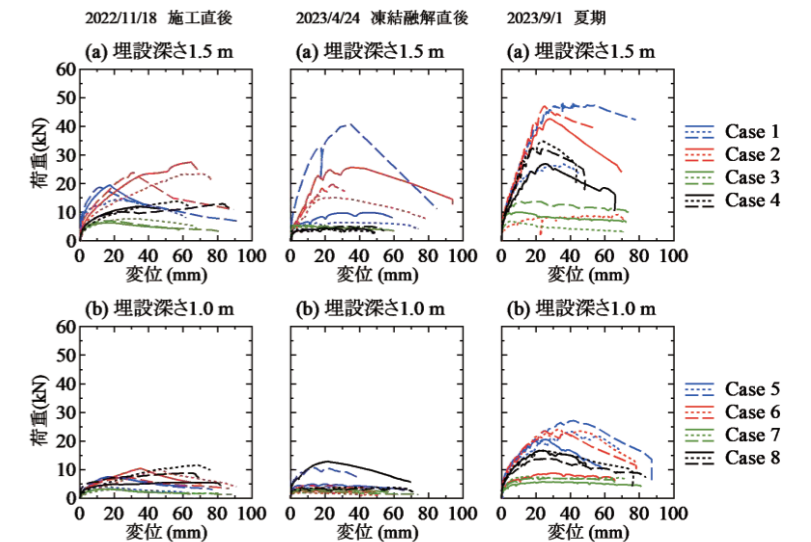


図4：引抜検査の結果

融雪水の浸透によって 斜面の極表層で発生した 土砂流動の観察



教授 中村 大 教授 川口 貴之

Highlights

- 裸地斜面では融雪水が深部へと浸透できず、極表層が飽和状態となり、また土砂が流動する様子が観察されました。
- 植生工が融雪水の浸透による斜面崩壊の対策として有効であることがわかりました。

北海道のような積雪寒冷地の斜面は、春期の融雪水で表層崩壊を起こすことが良く知られていません。しかしながら、融雪水の斜面への浸透特性に関する定量的なデータは極めて少ないです。そこで本研究では、大型土槽内に模型盛土斜面を構築し、春期における融雪水の浸透特性を明らかにすることに取り組みました。

図1は模型盛土斜面の断面図です。本研究では、植生工を施さない裸地斜面と、表面に張芝工を施した斜面（以下、張芝工）を構築しました。盛土斜面の寸法は高さ80cm、勾配1:1.5、幅80cmです。用いた土質材料は火山灰質砂質土で、乾燥密度が約1.1g/cm³（締固め度約Dc=85%）となるように締固めました。盛土斜面の構築中には土壌水分センサーを埋設しました。また、土壌センサーと同様の位置と、地表面に温度センサーも設置しています。さらに、盛土斜面全体の質量変化を計測するため、大型土槽を荷重計の上に載せました。

大型土槽の底部には硬質の排水材（厚さ5cm）を設置し、その上に不織布を敷設しました。これに

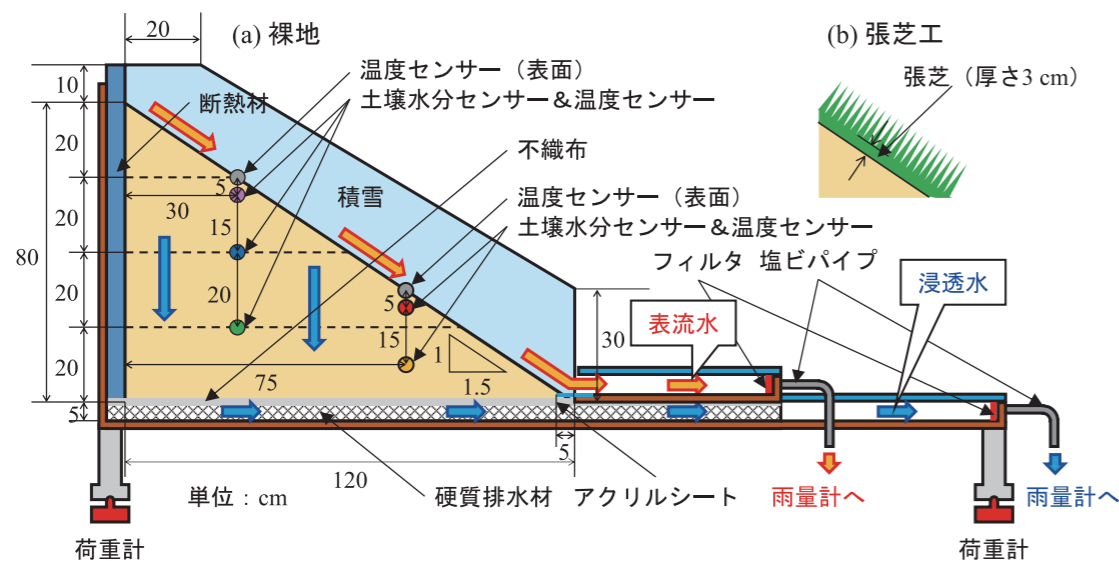


図1：模型盛土斜面の断面図

より、盛土斜面内に浸透した融雪水（以下、浸透水）を回収できる構造になっています。また、斜面表面を流下した融雪水（以下、表流水）についても、のり尻部分から別途回収できる構造となっています。回収した浸透水、表流水は転倒ます型の雨量計で計量しました。

図2は融雪期において裸地斜面で観察された土砂流動の様子です。なお、張芝工では土砂流動は発生しませんでした。図から、消雪直前の3月13日から微小な土砂流動が観察できます。また、3月15日には泥濘化したのり尻付近の土砂が流動する様子が確認できました。

図3は盛土斜面の温度、体積含水率、表流量・浸透水量、質量の経時変化を示したものです。まず、温度変化から、裸地斜面でのみ、消雪直前にのり尻とのり肩の深さ5mのセンサーで温度がプラスとなっており、斜面表層が融解していることが確認できます。次に、質量と表流量の変化から、盛土斜面の質量は10日間で約120kg減少していることが確認でき、この間に融雪水のほとんどが表流水として排出されたことがわかります。最後に、体積含水率の変化から、裸地斜面でのみ、消雪直前にのり尻の深さ5cmのセンサーで急激な水分上昇を確認することができます。この時、盛土下部は凍結しており、融雪水は深部へと浸透することができません。このため、裸地斜面では盛土の極表層が飽和状態となり、土砂流動が発生したものと考えられます。

本研究の計測結果から、植生工が融雪水の浸透による斜面崩壊の対策として有効であることがわかりました。今後も研究を継続し、植生工が有する環境にやさしい地盤災害の予防効果について明らかにしていきます。



図2：裸地斜面で観察された土砂流動の様子

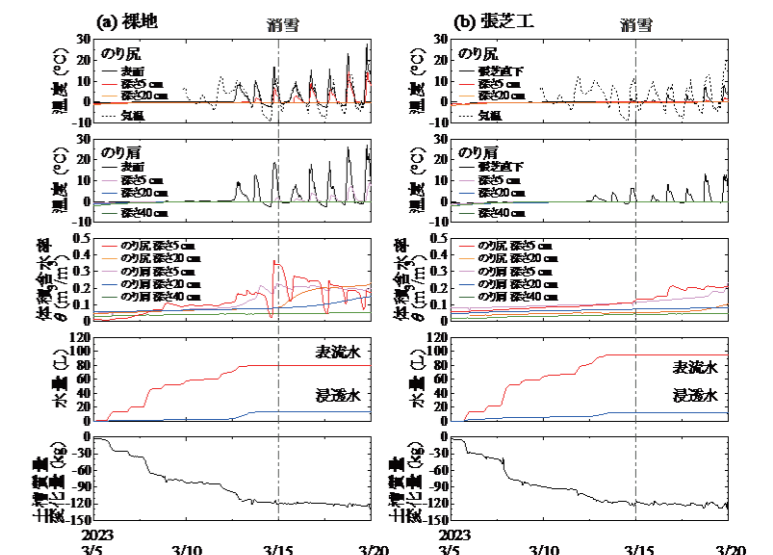


図3：盛土斜面の温度、体積含水率、表流量・浸透水量、土槽質量の経時変化

凍結融解履歴が 植生工の侵食防止効果に与える 影響の解明



教授 中村 大
教授 川口 貴之

Highlights

- 未凍結状態における植生工の侵食防止効果を確認することができました。
- しかしながら、植生工の侵食防止効果は、凍結融解履歴によって低下することも明らかになりました。

植生工はのり面に植物を繁茂させることで、のり面を雨水による侵食から保護する工法です。しかしながら、積雪寒冷地ではのり面表層が寒気に曝されるため、凍結融解によって植生工の侵食防止効果が低減してしまう懸念がありますが、これについて詳細に検討した事例は極めて少ないです。そこで本研究では、凍結融解履歴が植生工の侵食防止効果に与える影響を明らかにすることを試みました。

図1は植生供試体の様子です。本研究には、土を締固めて作製した土供試体に、ケンタッキーブルーグラスを播種して生育させた供試体（以下、植生供試体）を用いました。両供試体に対して、未凍結状態と凍結融解を与えた状態とで侵食試験を実施しています。凍結融解については、播種の有無にかかわらず、供試体表面にステンレス製の冷却板を設置し、これを低温恒温水槽で制御して実施しました。

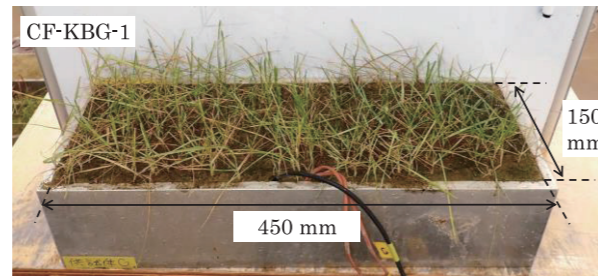


図1：植生供試体の様子

図2は本研究で用いた侵食試験装置の模式図です。図の傾斜台に供試体を容器ごと設置し、その上にタンク付の水路を据え付けます。タンクの下方は供試体表面が幅150mm、長さ430mmの範囲で露出するように開放しています。傾斜台は1:1.5の勾配（約34°）としました。流水はタンクに貯留した水を越水させることで発生させていて、流量は毎分2ℓとしました。なお、流水が供試体表面で拡散しないように、幅50mmに拡縮しています。以上の方法で土

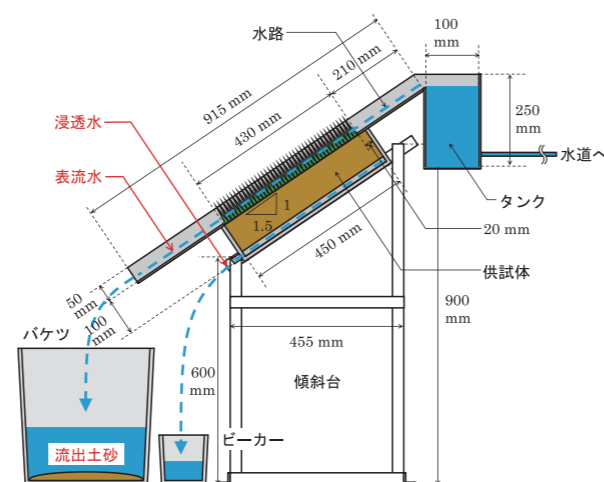


図2：侵食試験装置の模式図

供試体は30秒間、植生供試体は600秒間流水を与えた後に、SfM写真測量用の写真撮影を行いました。これを1回の侵食試験とし、1つの供試体に対して複数回繰り返し行うことで侵食痕の経時変化を観察しました。また、侵食試験中には流出土砂量の計測も行っています。

侵食痕の観察にはSfM写真測量を用いました。ここでは、SfMソフトウェア (Metashape) で侵食痕の3次元モデルの作成、DEM (数値標高モデル) の構築、点群データファイルの出力を行いました。また、点群データファイルを地図作成ソフトウェア (Surfer12) に読み込み、侵食痕のコンター図も作成しました。

図3は侵食試験後の供試体のコンター図です。凍結融解履歴を与えた植生供試体では、侵食は地表面の目視できる箇所だけでなく、根系が発達した表層部分でも発生していて、流水が茎葉と根系を残して土砂のみを流し、空洞が形成されていました。このため、ハンモック状に残されていた根系と地表面の茎葉を除去し、侵食痕を露出させてからSfM写真測量を実施しました。

図4は土供試体および植生供試体における積算流出土砂量の経時変化です。まず、土供試体に着目すると、未凍結状態および凍結融解履歴を与えた状態ともに、1回目開始直後から土砂の流出が開始していることがわかります。次に、植生供試体に着目すると未凍結状態では、10回目を終えても侵食が発生せず、流出した土砂量は極めて少ないです。これに対し、凍結融解履歴を与えた状態では、1回目開始直後から土砂の流出が開始し、2回目終了時から上流の流水が衝突する箇所において、侵食痕が観察されるようになりました。また、侵食痕は試験回数を重ねるごとに深くなっていきました。

本研究により、未凍結状態の植生の侵食防止効果を確認することができました。また、この侵食防止効果は、凍結融解履歴によって低下することも明らかになりました。

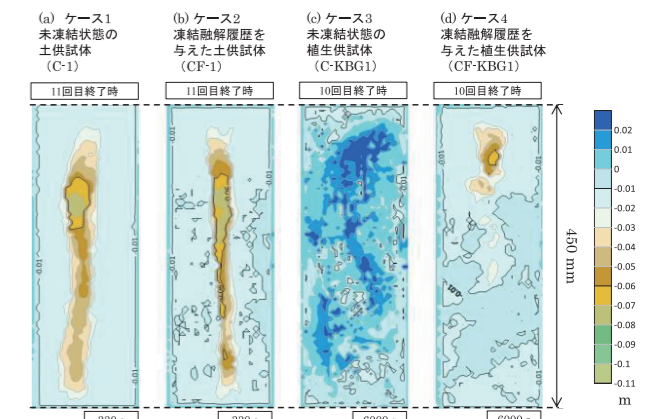


図3：侵食試験終了後の供試体のコンター図

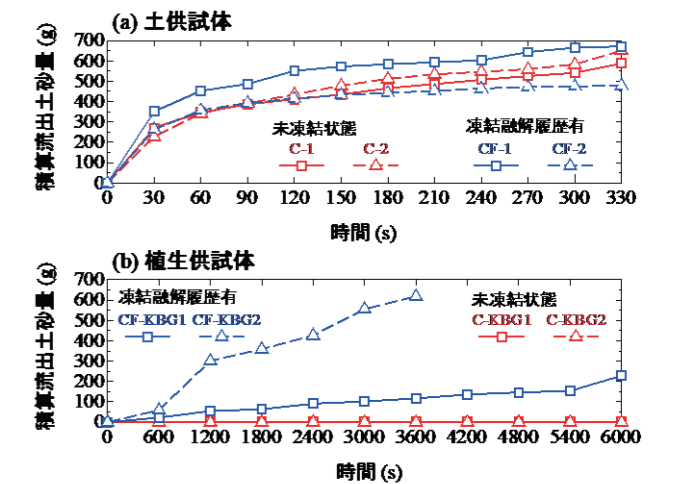


図4：積算流出土砂量の経時変化

レーザースキャナによる実建造物の 3次元点群データ取得



Highlights

- レーザースキャナを用いて、実建造物の3次元点群データを取得しました。
- これまで研究を進めてきたSfM技術との比較により、適用性を整理しました。

近年、建造物の維持管理を効率化するため、レーザースキャナ（以降、TLSと呼称）や写真測量を発展させたSfM技術による3次元点群データの取得事例が増加しております。その性質から、建造物表面に生じる変状や変形に着目した研究が多い状況にありますが、道路管理者からは、建造物の状態（変位や応力）を定量的に把握し、維持管理の高度化を図りたいというニーズが挙がっております。5年に1度の頻度で実施する定期点検は、管理者単独の予算で賄う必要があるため、広大なオホーツクに架橋される橋梁建造物に対して、効率的な維持管理を展開していく必要があると言えます。

これまで著者らは、鋼製実験供試体に対し、SfMによって得られた3次元点群モデルをFEMモデルへと変換する研究を行ってきました。その中で、SfMは写真撮影に時間を要する課題があることがわ



図1：対象建造物の3次元点群モデル(ノイズ除去後)

表1：TLSとSfMの精度比較

	TLS	SfM
桁長	2447(+17) mm	2440(+2) mm
主桁高	260(+6) mm	254(±0) mm
主桁間隔	1116(+14) mm	1130(+25) mm

かっており、今回、短時間で広範囲の点群データを取得できるTLSを用いて、3次元点群モデル取得に対する適用性を検証しました。

図1に、TLSおよびSfMによる対象建造物の3次元点群モデルを示します。なお、対象建造物は、I形の圧延型鋼を主桁に用いた旧鉄道橋としました。建造物範囲外の座標に生成される点をノイズと呼びますが、これを除去した後の鳥観図となり、どちらもきれいなモデルが生成できております。表1には精度の比較結果を示します。SfMでは、ノイズが黒色となり識別しやすいため、除去することで実構造に近い寸法を再現できております。一方、TLSではノイズの色が対象物に近い色となり、識別がしにくいため、TLSの方が寸法精度に劣る結果となりました（図2）。表2には時間の比較結果を示します。SfMでは、撮影位置のマーキングや撮影に時間を要しますが、TLSは設置架台の移動のみとなり、現場作業が早い利点を得られました。また、ノイズ除去を含めたモデル構築の必要時間も優れる結果となりました。

以上をまとめますと、処理時間はすべての項目においてTLSの方が優れる結果となりましたが、寸法精度はノイズの性質に影響を受け、SfMよりも精度が低くなることがわかりました。例えば、全体の形状把握はTLSにて短時間に実施し、寸法精度が重要となる部材交差部はSfMにて精度を出すというそれぞれの長所・短所を踏まえた使い分けを行うことで、効率的なモデリングが可能になると考えます。

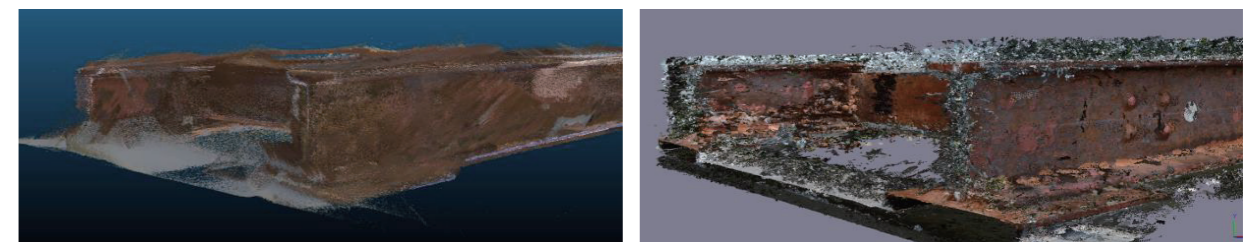


図2：部材端部のノイズの発生状況

表2：TLSとSfMの時間比較

	TLS	SfM
準備	2.4 時間	3.5 時間
撮影	3.6 時間	8.0 時間
モデル構築	3.5 時間	8.0 時間
ノイズ除去	4.5 時間	12.0 時間

横断歩道橋における階段部の耐荷性能の把握



助教
門田 峰典

Highlights

- 供試体による載荷実験を行い、健全状態における耐荷性能を把握しました。
- 次年度予定する腐食損傷状態の載荷試験に向け、FEM解析を用いて応答性能を確認しました。

横断歩道橋は、昭和40年代（1965年～1974年）をピークに建設され、現在、老朽化が進行しています。寒冷地においては、凍結融解によって舗装が早期にひび割れ、そこから内部に漏水することで、鋼部材の腐食が顕著に発生する傾向が見られます。予防保全の観点から塗装塗り替えや断面補修が行われますが、基本的に重交通路線を跨ぐため慎重に工事を進める必要があり、膨大なコストがかかっております。ちなみに、今年の夏には、大通り東9丁目歩道橋の補修が行われました。このオホーツク管内でも12橋の横断歩道橋が存在しています。維持管理に充てる予算が減少する中で、性能を踏まえた最小限の補修を行うことが望ましいですが、現状、腐食損傷と部材の耐荷性能および使用性能の関係が明らかになっていません。

そこで本年度は、階段部の床組（蹴上げ板、踏板）に着目し、供試体を用いた載荷実験によって、健全状態における基礎的な耐荷性能を把握しました。また、次年度は腐食損傷状態における耐荷性能を把握する予定であるため、実験に先駆けたFEMを行い、応答性能を把握しました。

供試体を写真1に示します。設計と同様、踏板に対して全面的に載荷を行った結果、踏板がお椀上に残留変形し、上側の蹴上げ板が面外方向に曲げ変形することがわかりました。図1には、実験および解析から得た荷重-変位関係を示しており、設計荷重に比

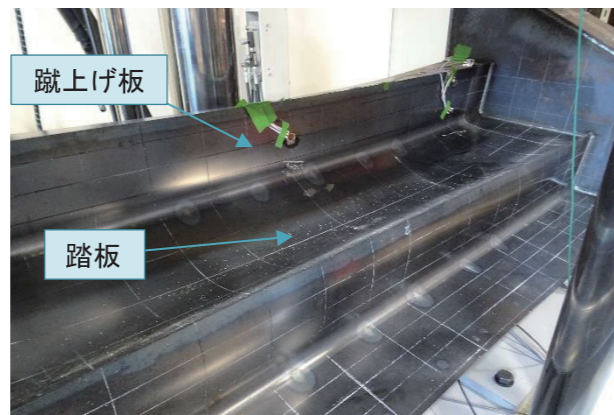


写真1：実験供試体

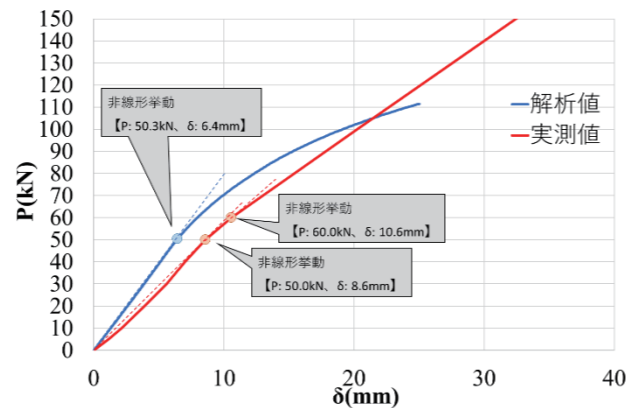


図1：荷重-変位関係

べて大きな耐力を有していることがわかります。また、両結果は、荷重が低下する時点が概ね一致することから、妥当な結果だと言えます。

次に、図2には、腐食損傷時の解析結果を示します。なお、腐食ケースは、図2 (a) に示すように、踏板の上下端、地覆近傍が80%の減肉を伴う状態としました。これは、全国の横断歩道橋の損傷傾向を調査した中で最大の腐食状態と考えられます（写真2）。当然、寒冷地にかかる横断歩道橋でも起こり得ます。図2 (b) の結果から、健全状態よりも47%の荷重低下が確認できました。一方で、設計荷重と比べると、まだ耐力に余裕があることがわかります。つまり、これだけ減肉が著しく広範囲の腐食であっても、構造的安全性の観点では、それほど早急に修繕する必要はないということが言えようかと思えます。しかし定量的な指標づくりは、部材が完全に失われる欠損状態の検討も行い、耐荷性能のみならず使用性能も踏まえた総合的な性能で判断する必要がありますので、引き続き慎重に検討を行っていきます。

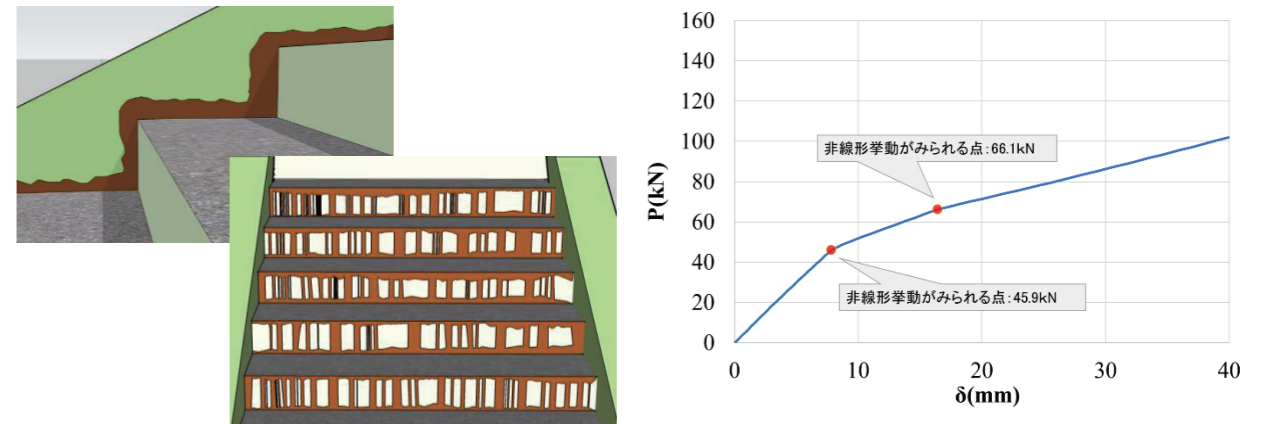


図2：腐食損傷時の解析的検討



写真2：損傷傾向の分析作業

寒中における補修施工の効率性 向上に資する耐寒補修材料の開発



Highlights

- 寒中におけるセメント系の補修材料に亜硝酸塩系である亜硝酸リチウム (LiNO_2) と亜硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) の配合比を50:50程度に併用することで流動性確保や初期強度向上が可能な補修材料の開発可能性を確認しました。

近年、コンクリート構造物の劣化に伴い補修に関心が高まっており、補修材ではポリマーセメントモルタルが付着性や母材コンクリートとの一体化に優れている観点から非常に重要な補修材料であるとされています。しかし、寒冷地の補修工において外気温が氷点下の場合には、補修材中の自由水が凍結し水和が進行せず初期凍害が発生することで期待した性能が得られなくなります。その対策として、無塩化・無アルカリ性の耐寒促進剤で主成分が亜硝酸リチウム (LiNO_2 ; LN) および亜硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$; CN) など亜硝酸塩系の耐寒促進剤が使用されています。これらを使用すると、凍結温度の効果的低下および水和反応の促進によって、積算温度の増加に伴い低温環境下でも初期強度発現が可能となります。しかし、凍結点降下作用に優れる亜硝酸リチウム (LiNO_2 ; LN) は、昨今の世界的需給バランスの悪化を背景に主原料であるリチウムの価格急騰の影響からコスト面への負荷などのデメリットがあります。

一方、亜硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$; CN) は、一般的な寒中施工において使用される耐寒剤の主成分として汎用されており、LNより原料コストが安価です。また、CNはセメントの水和反応の促進を促進させ、初期強度の増進効果に優れると多数の研究で報告されています。従って、LNとCNを併用して所要の流動性と氷点下における強度発現性が得られれば、原料コストの低減につながることができます。

そこで本研究では、セメントペーストを対象に亜硝酸リチウム (LiNO_2 ; LN) と亜硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$; CN) の添加量を変化させて使用した場合において、セメントペーストのフレッシュ性状および練上がり直後から氷点下で養生した場合の強度発現性を明らかにすることを目的で多角的な検討に取り組みました。また、本研究の検討条件として、一般に断面修復施工で使用するセメント系材料や配合を用い、耐寒促進剤は亜硝酸塩系の亜硝酸塩として亜硝酸リチウム40%水溶液(LN、密度:1.25g/cm³)と亜硝酸カルシウム30%水溶液(CN、密度:1.30g/cm³)の2種類を用い、それぞれ単独および混合使用した配合を試験対象としました。また、水セメント比は40%とし、LNおよびCNの添加量はセメント質量に対する亜硝酸塩の固形分量の割合として計算することで、その添加量は-5℃の氷点下で使用を想定して決定

し、流動性、温度履歴、強度発現性、空隙構造などの比較・評価を行いました。

その結果、図1に10℃環境下において練上がり直後から60分後まで測定したフロー値の経時変化を、図

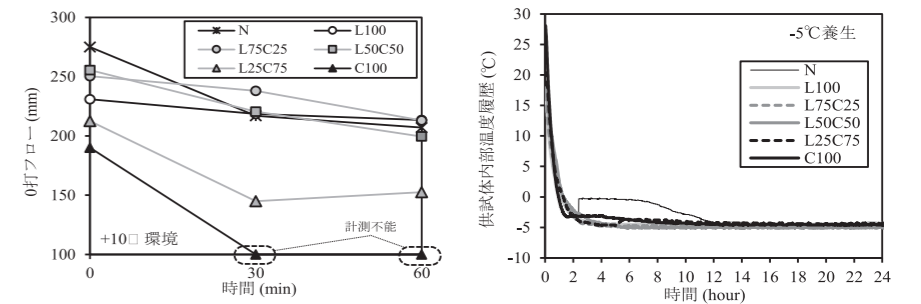


図1：ペーストフローの経時変化 図2：供試体内部温度履歴(-5℃養生)

2にフローの経時変化率を示します。まずCNを添加した場合、接水直後から急激な水和反応を示し、エトリンガイト ($\text{AFt}: 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) や亜硝酸系水和物を生成することが知られています。これらの生成過程で多量の H_2O が水和物中に取り込まれることから、セメントペースト中の水分が減少しフロー値の低下に繋がったものと推察されます。一方、LNの配合比を増加させるとフローの低下傾向が小さくなり、L100、L75C25およびL50C50の3配合では概ね同じ傾向を示しました。練上がり直後の温度とフロー値の経時変化から、同じ亜硝酸塩でもLNはCNに比べて接水直後からの水和反応速度が緩慢であり、本実験の配合条件においては、LNとCNを50:50の配合比で併用しても良好な流動性が得られることができました。

図3と図4に打込み直後から-5℃の氷点下で封緘養生した場合の圧縮強度と細孔径分布(材齢7日)の結果を示します。材齢3日のN、L25C75およびC100では、脱型直後に供試体が破損したために圧縮強度が得られませんでした。しかし、L100、L75C25およびL50C50の3配合では、-5℃の氷点下においても強度増進し、材齢28日では40N/mm²程度まで強度増進しました。

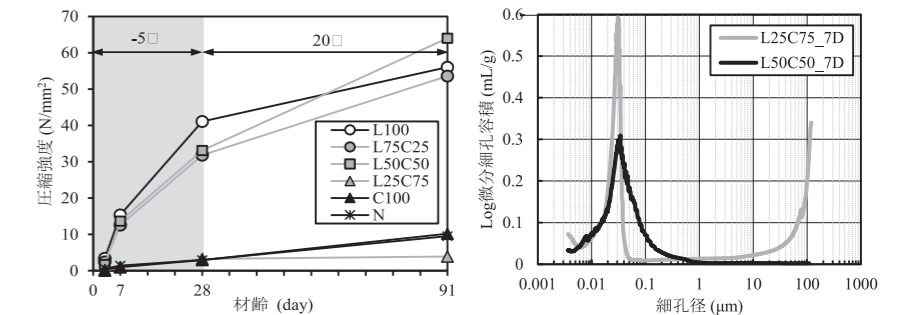


図3：圧縮強度の経時変化 図4：細孔径分布

一方、材齢28日以降の20℃での回復養生を経た材齢91日の圧縮強度に着目すると、L100、L75C25およびL50C50ではいずれも50N/mm²以上に強度が増進しており、凍結の影響を受けていないものと考えられます。材齢7日目の細孔径分布(図4)については、まずL25C75では、直径10~100μmの範囲に空隙が確認されました。多くの空隙は直径10μm以上の粗大径範囲にあると推察され、LN25C75では凍結の影響を受けていると考えられます。一方、L50C50ではLN25C75で確認されたような粗大径範囲における空隙は確認されておらず、凍結の影響は受けていないものと推察されます。

最終的に、実験の範囲においては、LNとCNを NO_2^- 量の配合比で50:50とすることでセメントペーストの流動性を保持できるとともに、練混ぜ直後から-5℃の氷点環境下で養生しても良好な強度発現性を示すことを確認しました。

厳冬期に季節外れの暖気が流入した時に現れた特徴的な雪面（2024年2月）



准教授・気象予報士
白川 龍生

Highlights

- 積雪期である2024年2月、北海道に季節外れの暖気が流入し、札幌を中心に特徴的なパターンを有する雪面が現れました。これはまだ発生メカニズムが十分に解明されていない現象で、2015年1月に北見で確認されて以来、9年ぶりの発見になります。
- 近年の温暖化に伴う雪氷環境の変化に伴い、今後これまで発生していなかった、または稀にしか発生しなかった現象が、本事例のように顕在化する可能性があります。

2024年2月13日と14日の2日間にかけて、日本付近の気圧配置はいわゆる南高北低型となり、日本の南にある高気圧から北にある低気圧に向かって暖気が流入しました。この影響で、北海道内各地では4月上旬～中旬なみの気温となり、多くの地点では2月の観測史上最高気温を記録しました（2024年2月18日現在）。札幌管区気象台における地上気象観測では、2月中旬として55年ぶりに10℃を超える10.1℃を記録しています。気温の高い状態は翌14日にも及び、北海道内各地では雪解けが進み市民生活に大きな影響が生じました。厳冬期である2月中旬、北海道内では長期積雪が存在し、日平均気温もマイナスである地域がほとんどです。この環境に季節外れの暖気が流入すると、乾雪が湿雪さらには濡れ雪に変化します。その後に気温が低下すると湿雪や濡れ雪は凍結し、硬い層が形成されることとなります。これらは従来あまり見られなかった現象で、近年の温暖化に伴う雪氷環境の変化といえます。すなわち、これまで厳冬期の北海道では発生していなかった、または稀にしか発生しなかった現象が、今後本事例のように顕在化する可能性があるといえます。筆者はこの点に着目し、X（旧Twitter）を利用して特徴的な雪面を目撃した場合は連絡が欲しい旨を呼びかけたところ、札幌市内など多くの地点のユーザーから情報提供を受けました。図1はその一例で、小判状の水



図1：札幌市内で見られた雪面の小氷塊
（2024年2月13日、フォロワー様より）

塊（直径約5cm）が雪面上で無数に分布しているのがわかります。筆者は2015年1月27日、北見工業大学敷地内での積雪観測で初めて発見し、「雪面の小氷塊」現象と名付け、学会に報告しました（図2）。以来、同様の現象が再度現れることがないか注目していましたが、今回北海道内での発生が確認されるまでの約9年間、公式に報告されることはありませんでした。

この現象の発生メカニズムはまだ未解明の点が多く残ります。図2（2015年1月、北見）の事例では発生4日前に降雪量42cmの大雪があり、当日は低気圧の北上とともに南よりの暖気が流入して日最高気温が6.0℃に達しました。その後、気温の低下により雪面は凍結しています。

雪面の小氷塊は、雪面に発生した窪みに流入した融解水が、その後の気温低下により凍結したものと考えられます。密度の高い氷塊は、周囲の雪面低下の際、相対的に高くなるため、結果として雪面上で顕在化した可能性があります。

現在、2024年2月に各地で発見された小氷塊情報を収集し分析を実施しています。このような市民参加型の研究はシチズン・サイエンスと呼ばれますが、特徴的な現象がどの地域に分布しているかを把握することはメカニズム解明に向けて重要な手がかりになります。そしてこの現象が市民生活に及ぼす影響などを考えるにあたっては、多くの方の研究参加が必要となります。

本事例を皮切りに、私たちSAFERでは地域の皆様との科学コミュニケーションを促進し、近年の環境変化のシグナルを追求していきたいと考えています。ご協力を宜しくお願いいたします。



図2：北見工業大学における雪面の小氷塊
（2015年1月27日、筆者撮影）