

# 盛土材の凍結が補強材に与える影響を 把握するための試験装置の開発

劉爽<sup>1</sup>・川口貴之<sup>2</sup>・川尻峻三<sup>3</sup>・中村大<sup>3</sup>・小笠原明信<sup>1</sup>

現在の設計指針や各種マニュアルには、凍上対策として壁面の背後に凍上抑制層や断熱材を設置することが明記されているが、これ以前に構築された補強土壁も存在する。このような補強土壁に関して、維持管理の中で変状の危険性を把握するためには、周辺土の凍上が補強材に与える影響について詳細に検討することが重要である。そこで本研究では、補強材に作用する鉛直応力や補強材周辺の凍結領域をコントロールできる試験装置を新たに開発し、これを用いた幾つかの実験を行った。その結果、補強材に作用する鉛直応力や盛土材の凍上性や凍結領域によって、補強材に生じるひずみの大きさや分布に変化が生じることが分かった。

キーワード：補強土壁，補強材，凍上

## 1. はじめに

補強土壁の壁面は垂直もしくは垂直に近い場合、積雪による断熱が期待しにくく、寒冷地では壁面側から寒気が侵入しやすい状況にある。このため、盛土材が凍結すると、盛土材の凍上性によっては、壁面や補強材との連結部に大きな凍上力が作用する<sup>1)</sup>。

写真-1 は帯鋼補強材を用いた補強土壁の壁面が脱落した被害例であり<sup>2)</sup>、この原因は盛土材の凍上によると考えられている。他にも、ジオテキスタイルを補強材とした補強土壁が凍上によって変状した事例も報告されている<sup>3)</sup>。このようなこともあり、例えば、2009年に発刊された道路土工要綱<sup>4)</sup>や2013年に発刊されたジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル<sup>5),6)</sup>などでは、壁面の背後に凍上性が低い砕石等を用いた凍上抑制層や断熱材を設置することが記載されるようになったが、既存の補強土壁の中には、これ以前に構築されたものも存在する。よって、このような補強土壁を維持管理する中で、凍上による変状の危険性を事前に察知するためには、凍上による変状メカニズムについて詳細に把握しておく必要があることは言うまでもない。

盛土材が凍結した際、凍上によって補強材に引張力や伸びが生じることについては、既に幾つかの研究結果で報告されている<sup>7),8)</sup>。しかし、補強材に作用する鉛直応力や補強材周辺の凍結領域、盛土材の凍上性や凍結速度など、補強材の周辺にある土の凍上に伴って補強材に生じるひずみやその分布に影響を及ぼす因子について、詳細に検討した例は極めて少ない。このため、先述した被害例においても、連結部が損傷や破断した時期や、壁面が損傷や脱落し



写真-1 凍上現象による補強土壁の被害例<sup>2)</sup>  
(a: 壁面パネル脱落の様子, b: 連結部の損傷)

<sup>1</sup>地盤工学会員，北見工業大学 大学院 工学研究科 寒冷地・環境・エネルギー工学専攻（〒090-8507 北見市公園町165番地）

<sup>2</sup>IGS個人会員，北見工業大学 工学部 社会環境系 教授（同上）

<sup>3</sup>IGS特別会員，北見工業大学 工学部 社会環境系 准教授（同上）

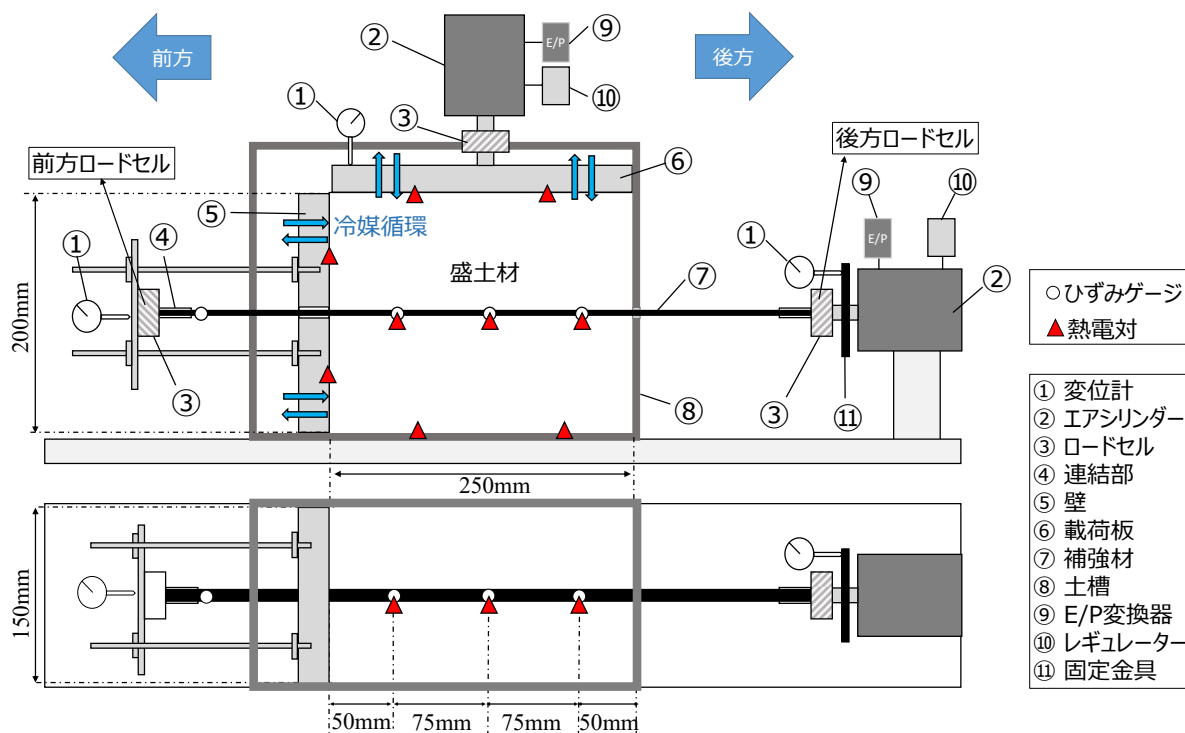


図-1 開発した試験装置の概略図

やすい位置など、維持管理上で重要となる基本的な事項についても不明な点が多い。

そこで本研究では、補強材に作用する鉛直応力や補強材周辺の凍結領域をコントロールすることが可能な模型試験装置を新たに開発した。本文では、この装置の詳細について説明するとともに、これを用いた幾つかの実験結果について報告する。また、これらの結果から、周辺の盛土材が凍上することで補強材に生じるひずみの大きさやその分布に影響を及ぼす要因について検討した。

## 2. 開発した模型試験装置の詳細

図-1 は本研究で開発した試験装置に関する概略図である。土槽には凍上等によって水平方向に移動可能な金属壁があり、冷媒を循環させて壁の温度をコントロールできる。また、金属壁の前方には補強材との連結部が取り付けられたロードセル（以下、前方ロードセル）が固定されており、連結した補強材は壁中央と土槽背面に設けたスリットを通して土槽後方にあるエアシリンダー式の載荷装置とも連結する仕組みとなっている。本来であれば、壁と補強材との連結部は実際と同様に盛土内にあるのが望ましいが、壁裏にある盛土材の凍結によって補強材に作用する凍上力を把握する目的で、盛土材の外で前方ロードセルと補強材とを連結させている。なお、土槽の後方にある載荷装置にもロードセル（以下、後方ロードセル）が接続されており、変位の固定や空圧による引張力の制御が可能である。鉛直荷重もロードセルが接続されたエアシリンダー式の載荷装

置によって制御することができ、載荷板を介して模型盛土へ伝達される。なお、この載荷板には、単なる剛な金属板と冷媒の循環が可能な金属板の二種類を用意した。これについても、盛土材の上面に均等な鉛直応力が作用するように、柔な載荷板であることが望ましいが、上面の温度制御を優先するために金属製としており、今後改善策について検討したいと考えている。

試験時の計測項目については、3つのロードセルによる荷重の他に、ひずみゲージによる引張ひずみ、土槽内の複数箇所配置した熱電対による温度、壁や載荷板、土槽後方にある載荷装置の変位とした。計測については、PCと接続したデータロガーを用いて行っている。また、PCに接続されたDAボードからエアシリンダーに接続したE/P変換器に電圧を供給することで、鉛直荷重と土槽後方からの引張力を制御できる仕組みになっており、ロードセルの計測値に基づくフィードバック制御も可能である。また、壁や載荷板の温度はプログラム可能な低温恒温水槽から冷媒を循環させることで制御した。

写真-2 は模型土槽の全景や装置の一部を示したものである。試験装置全体は+5°Cにコントロールされた恒温室に設置している。土槽の側面は透明アクリル製であり、断熱目的で設置している断熱材を取り外すことで、側面からの観察も可能である（写真-2a）。写真-2bは補強材を設置した様子を示したものであり、補強材上の3箇所ではひずみゲージを設置していることが分かる。それぞれの箇所では補強材の両面にひずみゲージを貼り付けており、計測値を平均することで曲げひずみを除去した。また、同じ位置には熱電対も配置して温度も計測した。さ



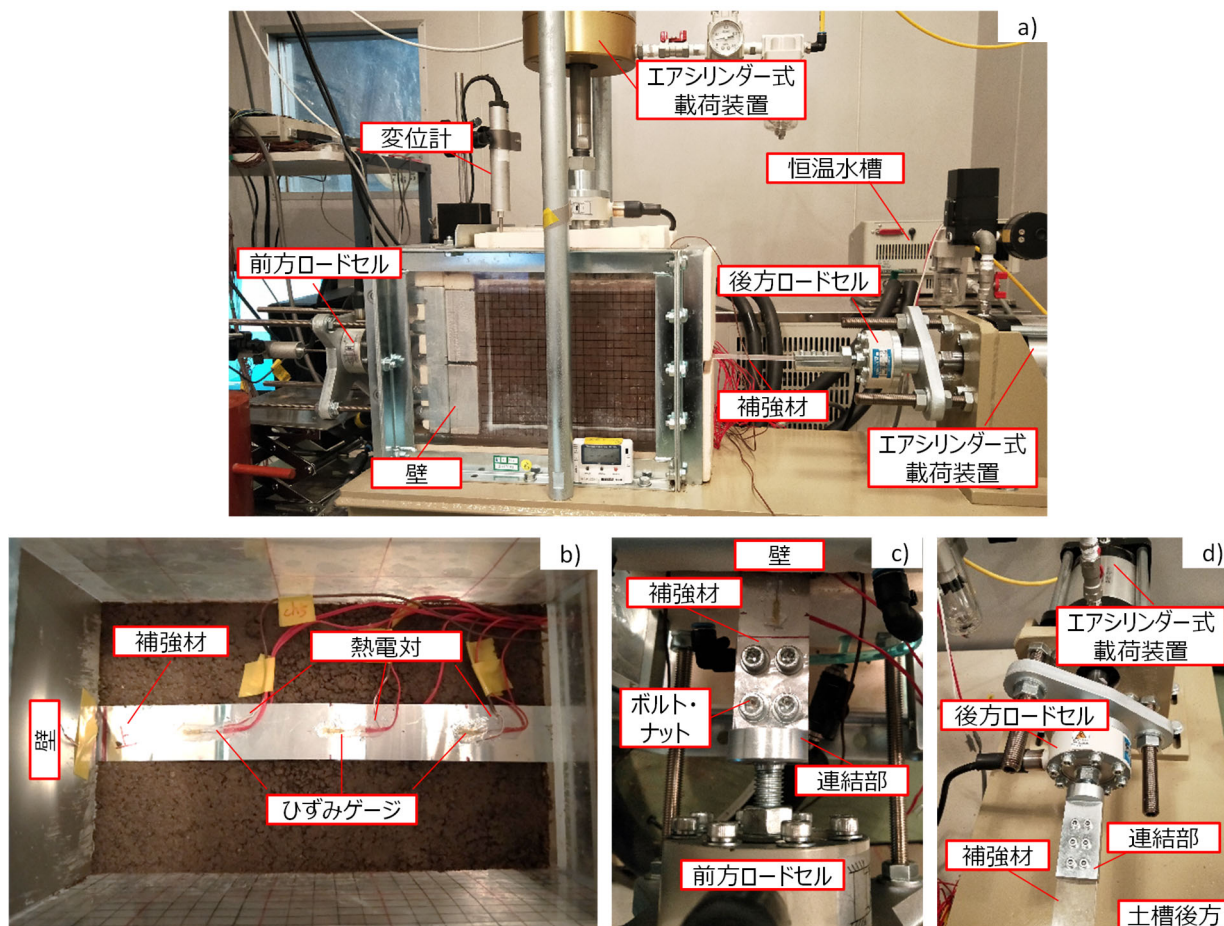


写真-2 模型土槽の詳細 (a: 試験装置の全体図, b: 土槽内に設置した補強材, c: 壁前方の連結部周辺, d: 土槽後方の連結部周辺)

らに、写真-2c)は前方ロードセルと補強材との連結部周辺を示したものであるが、連結部と壁の間にある補強材にもひずみゲージを設置している。写真-2d)は後方ロードセルと補強材との連結部周辺を示したものである。補強材の連結はボルトでの締め付けで行っており、連結強度を大きくするために前方ロードセルとの連結よりもボルトの本数を多くしている。

### 3. 試験方法・条件

以下に、先述した模型試験装置を用いた試験の手順についてまとめる。はじめに、壁が動かないように固定した上で、土槽の内面に摩擦除去のためにグリースを十分に塗布した後、所定の含水比に調整した土を壁高の半分に達するまで、後述する所定の密度となるように2層に分けて締固めた。次に、補強材を連結部に固定し、盛土材の上に敷設した後、土槽後方にある載荷装置を使ってわずかな初期張力を与えた。そして、壁高に達するまで補強材の下と同様に2層に分けて締固め、上端面を平滑になるよう整形した。なお、この間に所定の位置に熱電対を配置しながら盛土材の締固めをしており、これらのケーブルは壁および土槽背面中央にあるスリットから

土槽外に出してデータロガーと接続した。鉛直荷重については、載荷板を設置して計測を開始した後に、10 kN/m<sup>2</sup>に相当する荷重を作用させてから壁の固定を解除し、所定の鉛直応力に相当するまで、段階的に鉛直荷重を増加させた。そして、壁に循環させる冷媒の温度を+5℃にした上で、1日程度養生した。盛土材全体の温度が概ね+5℃になったことを確認した後、壁や載荷板に所定の温度履歴になるようプログラムした恒温水槽から冷媒を循環させた。

表-1は本研究で実施した全6ケースの試験条件をまとめたものである。試験には3種類の補強材を用いており、厚さ0.2 mm (ケース1)、0.3 mm (ケース2)のアルミシートと、厚さ1.0 mm (ケース3~6)のPETシートを切断したものを使用した。なお、いずれの補強材も幅は30mmとした。鉛直応力は、25 kN/m<sup>2</sup> (ケース4)と、50 kN/m<sup>2</sup> (ケース1~3, 5, 6)の二種類とし、冷却方法もケース5以外は壁のみを冷却し、ケース5では壁と盛土材上面にある載荷板の両方を冷却した。ケース5以外の冷却方法については、循環過程での温度上昇も考慮して、-7℃のサーマルショック後、-3℃から時間0.1℃の割合で水槽内の冷媒温度を低下させた。一方、ケース5については、同様なサーマルショックを与えた後、いずれも-3℃から時間0.05℃の割合で水槽内の冷媒温度を低下させた。なお、実施した全ての試

表-1 実験条件のまとめ

	補強材	盛土材	鉛直応力 (kN/m <sup>2</sup> )	冷却面
ケース1	アルミ 0.2mm	砂質土	50	壁
ケース2	アルミ 0.3mm	砂質土	50	壁
ケース3	PET 1mm	砂質土	50	壁
ケース4	PET 1mm	砂質土	25	壁
ケース5	PET 1mm	砂質土	50	壁と載荷板
ケース6	PET 1mm	砕石	50	壁

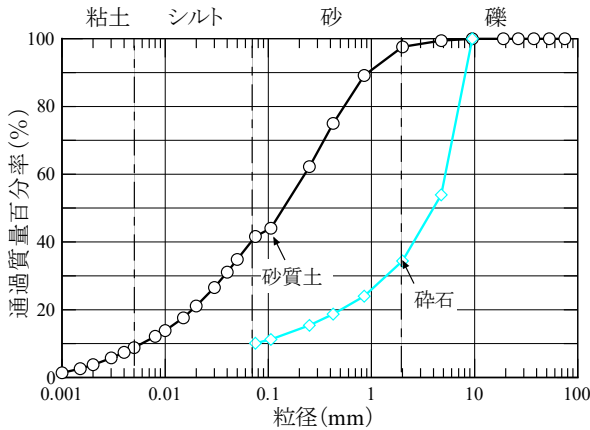


図-2 盛土材の粒径加積曲線

験において、土槽後方の載荷装置は補強材を接続した時点で固定し、試験中は壁のみが変位する条件とした。また、補強材に貼り付けたひずみゲージの位置も全て同じとし、壁裏から 50, 125, 200 mm の位置と、壁前方の連結部近傍にも貼り付けた（写真-2b, c) 参照）。

図-2 は使用した二種類の盛土材の粒径加積曲線を示したものである。ケース 6 以外については、北見工業大学の敷地内から掘削された主に風化火山灰で構成される砂質土（最適含水比 26 %）を含水比 30 % に調整し、締固め度 95 % になるよう締固めた。この盛土材の凍上試験から得られた凍上速度は 0.31 mm/hr であり、凍上性は高いと判定される<sup>9)</sup>。一方、ケース 6 については 9.5 mm ふるいを通過させたクラッシュラン（含水比 2 %）とし、締固め度 90 % になるよう締固めた。なお、クラッシュランの凍上性は十分に低いことを確認している<sup>10)</sup>。

#### 4. 試験結果と考察

図-3 は 3 種類の補強材を用いた引張試験結果である。試験は模型試験装置の土槽内に盛土材を入れず、補強材だけを連結部に固定して実施した。図-3a) は載荷装置で計測した全体の引張変位と引張力の関係、図-3b) は補強材に設置したひずみゲージで計測した引張ひずみと引張力を補強材の初期断面積で除した引張応力の関係を示している。なお、補強材の張力は、土槽後方にあるエアシリンダーに対して段階的に空気圧を上昇させることで与えた。アルミ製の補強材については、途中から延性的な挙動を示し、厚

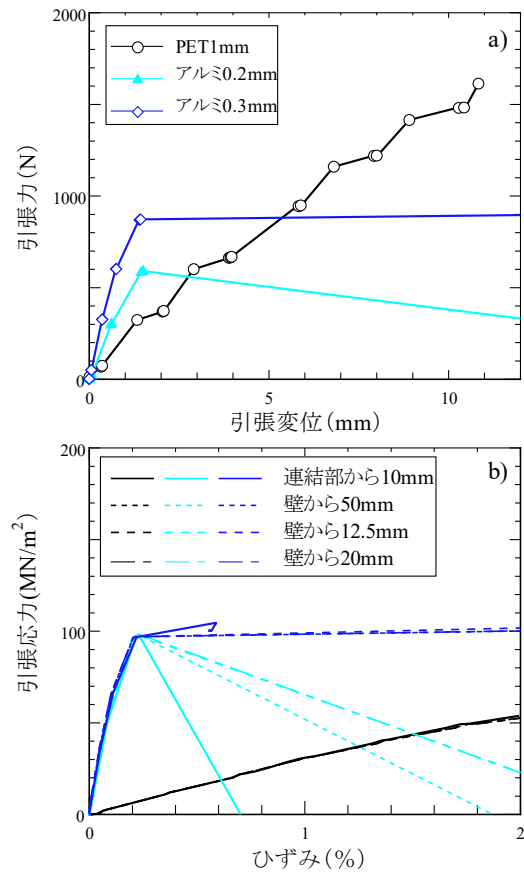


図-3 補強材の引張試験結果 (a : 引張力～引張変位関係, b : 引張応力～ひずみ関係)

さ 0.2 mm の補強材については最終的に破断に至った。また、PET 製の補強材については、図中に示す最大引張力に達した時点で急激に破断した。補強材の厚み大きいこともあり、図-3a) に示した結果から引張力の最大値はアルミ製よりも PET 製の補強材の方が大きいことが分かる。次に、図-3b) には補強材の複数箇所で計測したひずみを示しているが、PET 製では破断に至る全ての範囲、アルミ製の補強材では延性的な挙動を示すまでの範囲では、計測位置によらず均等なひずみが生じていることが分かる。

図-4 はケース 1～3 における試験開始からの各計測値の推移を比較したものである。図中には 2 箇所で計測した引張力、壁面の変位、補強材上の 4 箇所で計測したひずみを示しているが、試験開始時を 0 としているため、凍結開始時点で所定の鉛直応力を与えた際に生じた引張力や壁面の変位、補強材のひずみが生じている。なお、補強材のひずみの一部で断線によると思われる計測データの欠損が生じている。また、図中にはひずみゲージを設置した補強材上の土中温度と、それから計算した壁面からの凍結深さも示している。厳密には異なるが、凍結深さは 0 °C の位置とし、温度が正負となった隣接した 2 箇所の温度から比例配分で 0 °C となる位置を計算した。計測した温度はいずれの試験も同様であり、高い再現性で土槽内に凍結履歴を与えていることが確認できる。また、アルミ製の補強材を用いたケース 1, 2 では、PET 製の補強材を用いたケース 3 に比べ

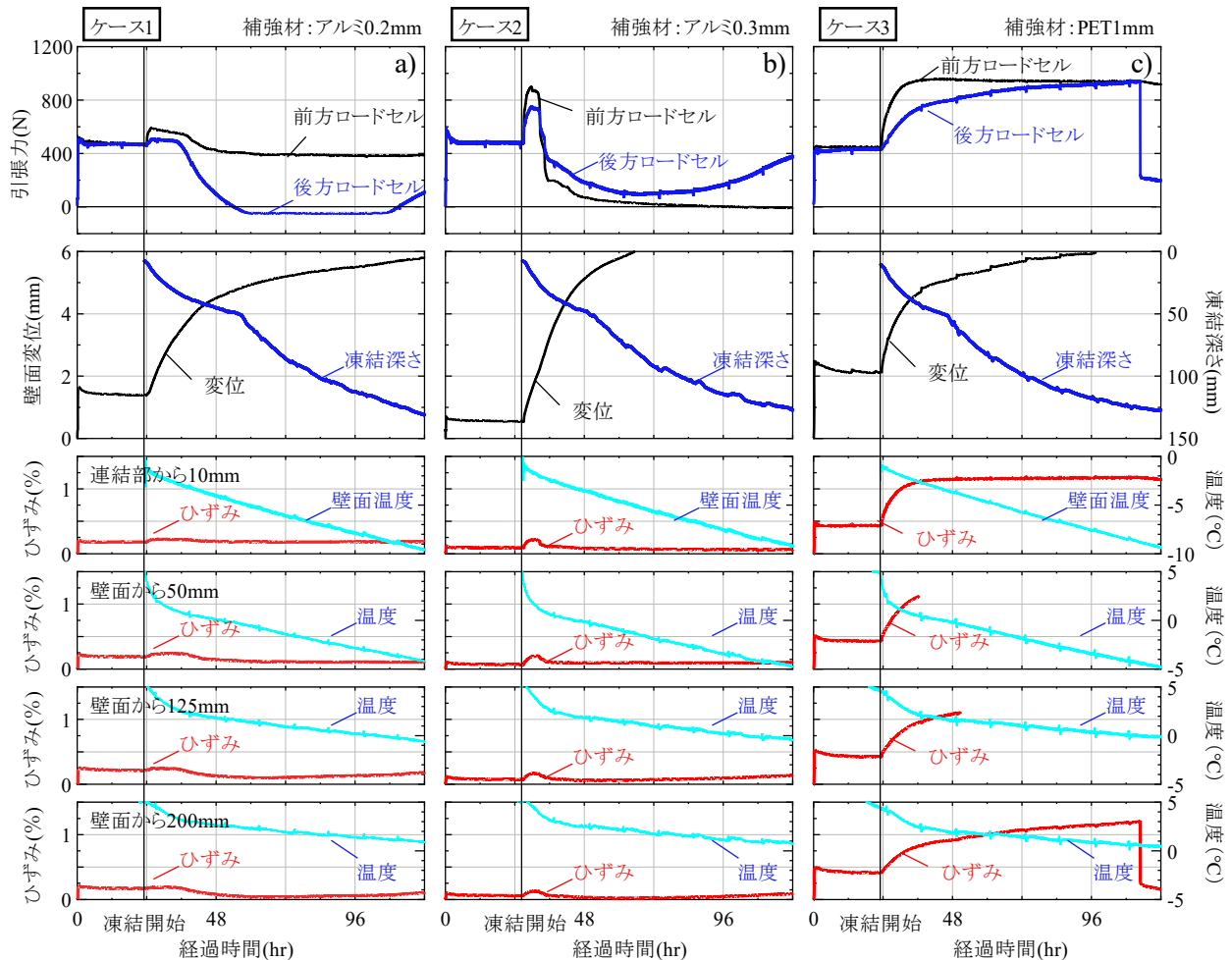


図-4 試験開始からの各計測値の推移 (a: ケース 1, b: ケース 2, c: ケース 3)

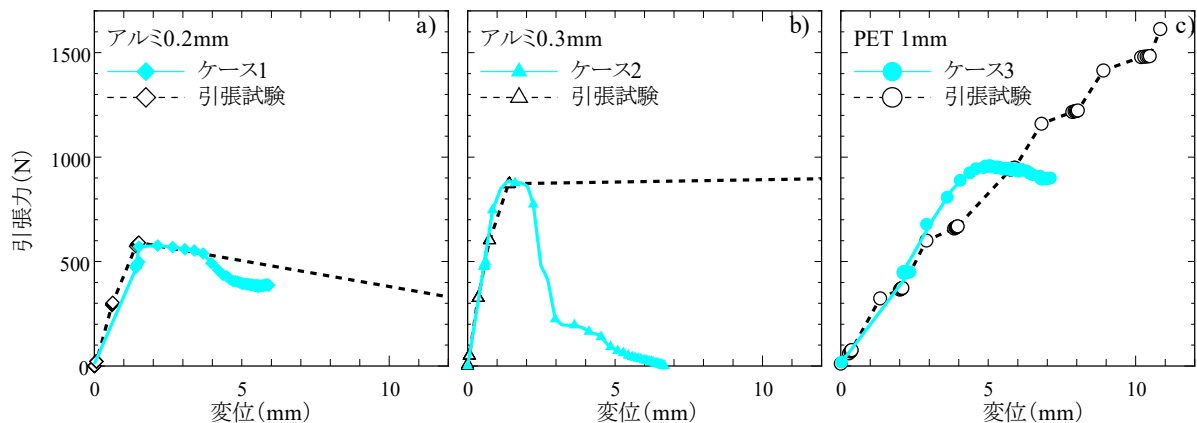


図-5 ケース 1~3 における引張力~壁面変位関係と補強材のみで実施した引張試験結果との比較 (a: ケース 1, b: ケース 2, c: ケース 3)

て、凍結開始から早い段階で引張力やひずみが減少に転じていることが分かる。これは図-3 に示したように、アルミ製の補強材が延性的な変形を示す引張力はPET製の補強材が破断に至る引張力に比べて十分に小さいためと考えられる。

図-5 は補強材のみの引張試験で得られた引張力と変位の関係(点線)に、ケース 1~3 で計測された載荷開始からの壁面変位と前方ロードセルで計測した引張力との関係をプロットしたものである(実線)。アルミ製の補強材を用いた 2 ケースでは、い

ずれの試験でも引張力の最大値はほぼ等しいことが分かる。しかし、PET製の補強材を用いたケース 3 では、補強材のみの引張試験で得られた最大引張力よりもかなり小さい値で引張力が減少に転じている。なお、いずれのケースでも試験終了後に補強材が破断していることを確認している。ここで、ケース 3 だけ最大引張力が異なったことについては、引張力が最大となった時点における壁面からの凍結深さがケース 1, 2 に比べて大きいことが原因だと考えている。具体的には、ケース 1, 2 では試験開始から早い



時点で引張力はピークを迎えており、そのときの凍結域は壁面から近い(図-4 参照)。これは補強材周辺の盛土材が凍結して補強材と凍着する影響や、補強材と盛土材との摩擦が与える影響が小さいためと考えられる。一方、ケース3では引張力が最大となった時点での凍結深さが大きいため、盛土材と補強材との凍着の影響や、盛土材と補強材との摩擦の影響が大きくなり、計測したロードセルの位置では引張力を正確に把握できていない可能性があると考えている。さらに、+5°C の環境下で実施した補強材のみの引張試験よりも補強材が低温であることや、引張力が長時間作用したことによるクリープの

影響によって実際に小さな引張力で破断に至った可能性もあると考えている。

写真-3はケース3における試験終了後の補強材の様子を示したものである。ケース1,2では壁から比較的近い位置で破断したのに対し、ケース3では壁から100mm程度の深さの位置で破断していた。この位置は引張力が減少に転じた時点における壁からの凍結深さ(約125mm, 図-4 参照)に近く、凍上によって補強材が破断する位置とその時点での凍結深さには関連性があることを意味している。

ここで、先述した被害例<sup>2)</sup>では、壁面材と補強材との連結部での損傷が多いと報告されている。この実験結果を踏まえると、凍結開始から凍結深さがあまり大きくない初冬～厳冬期に連結部の損傷が生じたと推察される。また、本実験結果は壁前面にロードセルを設置した実大実験の計測結果<sup>1)</sup>に対しても有用な知見になると考えている。

図-6はケース4,5における試験開始からの各計測値の推移を比較したものであり、比較のために図-4中に示したケース3の結果も再び示している。なお、これらの試験についても、凍結開始時点で所定の鉛直応力を与えた際に生じた引張力や壁面の変位、補強材のひずみが生じている。また、ここに示す補強材のひずみの一部でも、断線によると思われる計測

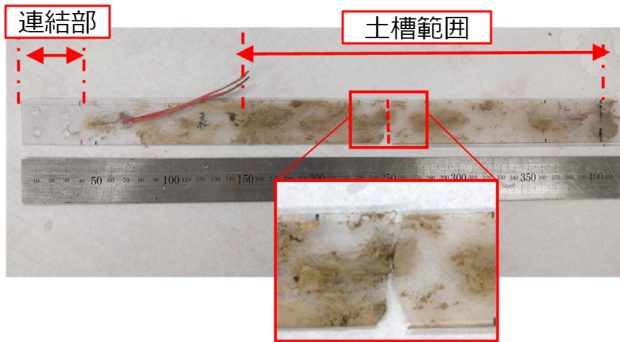


写真-3 ケース3における試験終了後の補強材

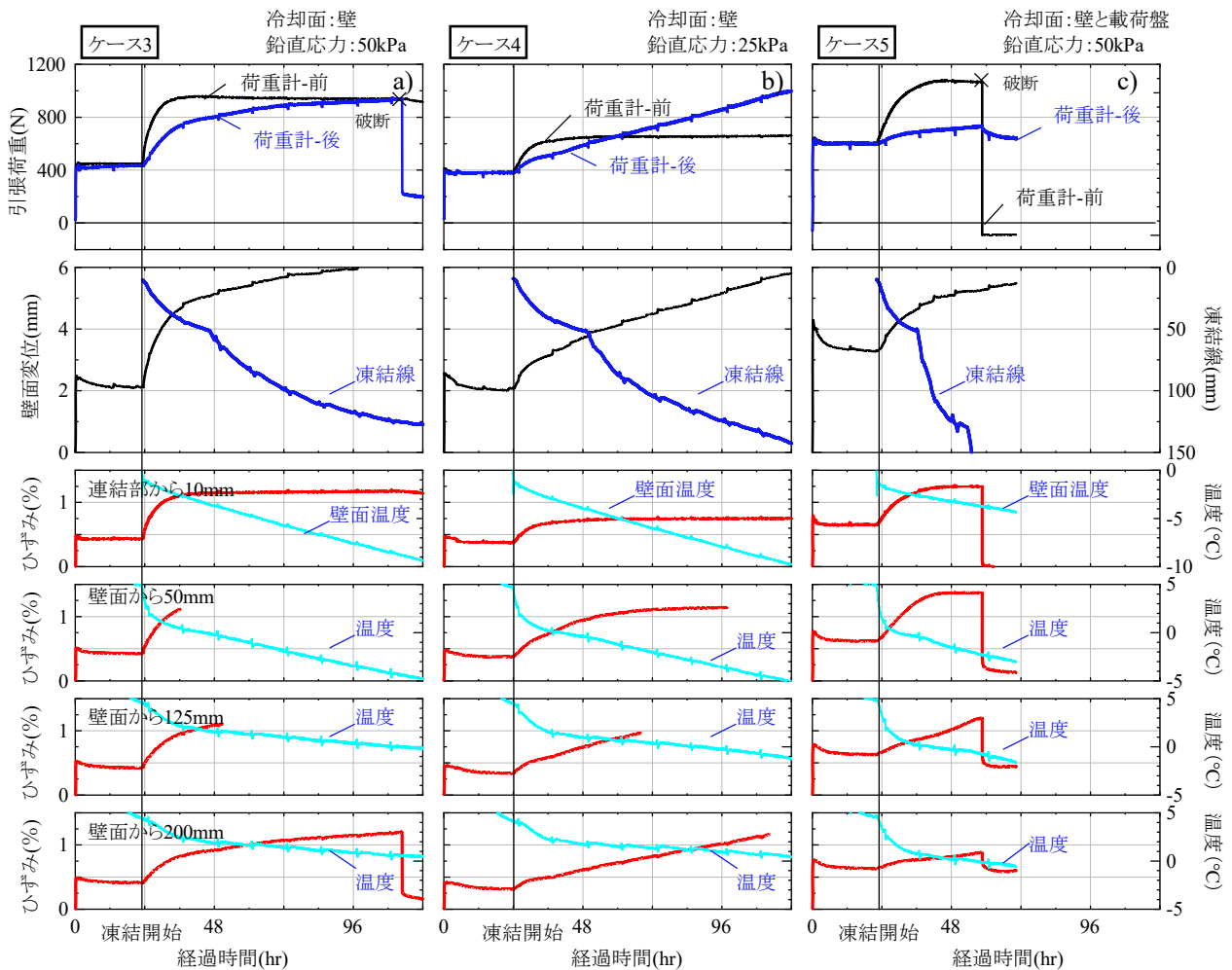


図-6 試験開始からの各計測値の推移 (a: ケース3, b: ケース4, c: ケース5)

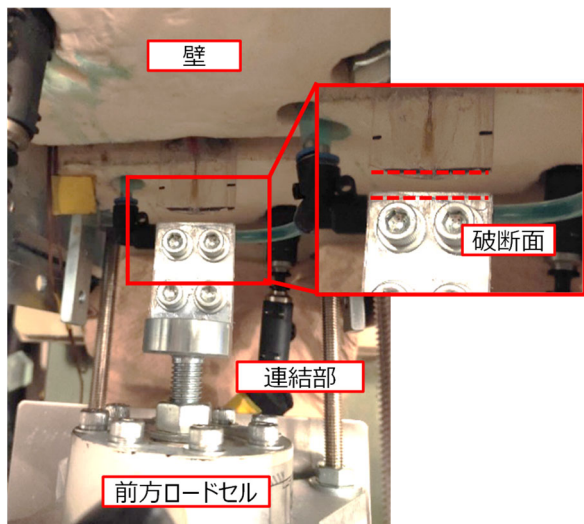


写真-4 試験終了後の補強材（ケース5）

データの欠損が生じている。

凍結開始直後におけるひずみの増加に着目すると、ケース3では壁に近いほど短時間でひずみが大きく増加しており、位置による増加量の違いはケース4に比べて顕著である。すなわち、凍上に伴って補強材に発生するひずみは鉛直応力が大きいケース3の方が壁側に集中している。この要因の一つには、鉛直応力が大きくなったことで、補強材と盛土材との摩擦が大きくなったことが挙げられる。ただし、本研究で使用した補強材はいずれも平滑であり、盛土材との摩擦は比較的小さいと考えられるため、今後は補強材の摩擦を変化させた試験も実施していきたいと考えている。

次に、ケース5は盛土材上面からも凍結させた試験であるが、ケース3よりも、壁に近いほど短時間でひずみが大きく増加する傾向が更に顕著になっており、2箇所で計測している引張力の違いも大きくなっている。これについては、ケース3と5の鉛直応力は同じであるため、ケース5では天端からの凍結に伴って凍上力が反力（凍結膨張圧）として補強材にも作用したことや、部分的に凍着したことによって、結果的にケース4に比べて補強材が強く拘束されたためと考えている。

写真-4はケース5における試験終了後の補強材の様子を示したものである。土中で破断していたケース3とは異なり（写真-3参照）、前方ロードセルに固定された連結部で破断していることが確認できる。これはケース3に比べてケース5の方が補強材に生じるひずみが壁側に集中していた先述の結果を裏付けていると考えている。

ここで、先述の被害例<sup>2)</sup>について考えると、壁上段の連結部で損傷している場合が多いと報告されている。壁の下段に接続された補強材の方が上段よりも大きな土被りが作用しているにもかかわらず、壁上段の連結部で損傷している場合が多いことについては、壁下段は一般に地熱や積雪の影響で盛土材が凍結しにくい環境にあることや、ケース5のように上段の方が天端から凍結することによって、実質的

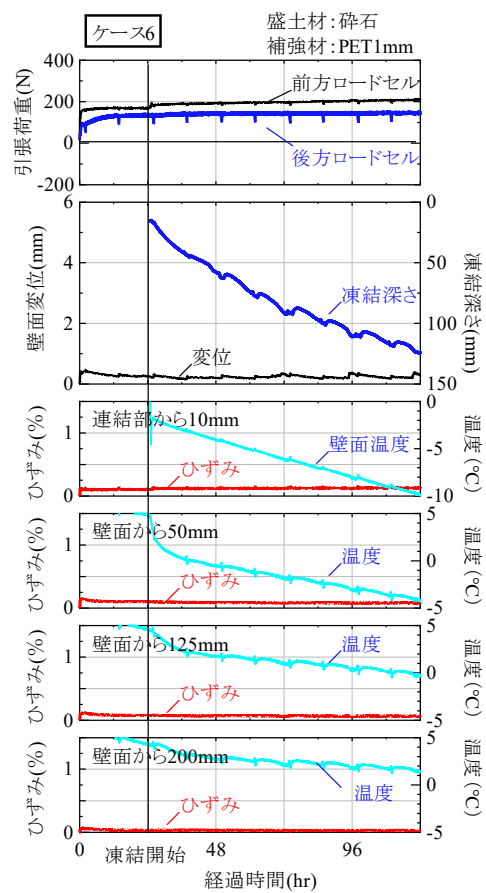


図-7 ケース6の実験結果

には上段の方が補強材の拘束力が大きくなっているためではないかと考えている。ただし、これ以外にも上段の補強材の方が下段よりも一般に長いことや、水分供給の違い、安定処理等による実質的な拘束力の違いなど、他の要因も考えられるため、今後も詳細に検討していきたいと考えている。

図-7はケース6における試験開始からの各計測値の推移を示したものである。なお、この試験についても、凍結開始時点で所定の鉛直応力を与えた際に生じた引張力や壁面の変位、補強材のひずみが生じている。ケース1~4と同様に盛土材を凍結させているが、これに伴う壁面の変位は確認できない。よって、凍上による壁面の変位が見られない場合には、補強材に生じるひずみや引張力も生じないと理解できる。ただし、凍上量は盛土材の含水比や締固め度、凍結速度によっても変化するため<sup>12)</sup>、凍上性のわずかな違いが補強材に与える影響については、今後更に詳細に検討していく必要があると考えている。

## 5. まとめ

本研究では、周辺土の凍上に伴って補強材に生じるひずみの大きさや分布に影響を及ぼす諸要因について検討可能な試験装置を新たに開発し、幾つかの条件で実験を行った。実験結果から得られた成果を以下にまとめる。

1) 材質の異なる補強材を用いた試験結果から、凍

上によって補強材が破断する位置とその時点での凍結深さには関連性があることが分かった。

- 2) 鉛直応力の増加や盛土材上面からも凍結させることによって、補強材に発生するひずみが壁側に集中することが分かった。
- 3) 盛土材の凍上性が低く、凍上による壁面の変位が見られない場合には、補強材に生じるひずみや引張力も生じないことを確認した。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり、大谷義則氏をはじめとするヒロセ補強土株式会社の皆様には多大なる協力を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会北海道支部 地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学―凍上被害とその対策―，中西出版，2009。
- 2) 橋本聖，川尻峻三，川口貴之，林憲裕，林宏親：凍上によるテールアルメ補強土壁の被災事例，平成28年度土木学会北海道支部論文報告集，Vol.73，2016。
- 3) 佐藤厚子，西本聡，竜田尚希：ジオテキスタイルによる補強土壁の凍上による変形要因の解明と対策，第55回（平成23年度）北海道開発技術研究発表会，2012。
- 4) 公益社団法人 日本道路協会：道路土工要綱（平成21年度出版），2009。
- 5) 北海道開発局：平成25年度 北海道開発局 道路設計要領第1集 道路，第7章 擁壁，2013。
- 6) 一般社団法人 土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル（第二回改訂版），2013。
- 7) 佐藤厚子，西本聡，鈴木輝之，吉田浩一，竜田尚希：ジオテキスタイルによる補強土壁の凍上対策に関する屋外土槽実験，ジオシンセティックス論文集，Vol.24，pp. 251-256，2009。
- 8) 川口貴之，中村大，川尻峻三，林豪人，原田道幸，山下聡：補強土壁内でジオセルと連結されたジオグリッドの耐凍上性評価，ジオシンセティックス論文集，Vol.30，pp. 155-162，2015。
- 9) 公益社団法人 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS0172-2009 凍上性判定のための土の凍上試験方法，2009。
- 10) 鈴木信太郎，川口貴之，中村大，川尻峻三，山下聡，内島典子：寒冷地の道路内における鉛直土圧の季節変化，土木学会論文集A2（応用力学），Vol. 71，NO. 2，pp. I 475-I 484，2015。
- 11) 小笠原明信，川尻峻三，橋本聖，川口貴之，後藤雄介，中村大，山下聡：物性が異なる盛土材料で構築下実物大帯鋼補強土壁の冬季挙動，ジオシンセティックス論文集，Vol. 33，pp. 85-90，2018。
- 12) 中村大，鈴木輝之，後藤隆司，金学三，伊藤陽司，山下聡：凍結融解による土の透水係数及び間隙比の変化，土木学会論文集C（地圏工学），Vol. 67，No.2，pp. 264-275，2011。

## DEVELOPMENT OF LABORATORY EXPERIMENT SYSTEM TO UNRAVEL THE EFFECT OF THE FREEZE OF GEOMATERIAL ON GEOSYTHEIC REINFORCEMENT

Shuang LIU, Takayuki KAWAGUCHI, Shunzo KAWAJIRI, Dai NAKAMURA and Akinobu OGASAWARA

As a measure against frost heaving of reinforced soil wall, setting an anti-freezing layer or insulation behind wall facing is recommended in design guidelines and manuals nowadays. However, the reinforced soil walls which were built before the guidelines decided, are difficult to evaluate the risk of deformation caused by frost heaving of geomaterial. In this research, a new model test system has been developed which can measure the strain on reinforcement material caused by frost heaving. As a result, it was found that the strain on reinforcement material is changed by the vertical stress on reinforcement material, the frost heaving property of geomaterial and the frozen region around the reinforcement material.

**KEYWORDS:** Reinforced Soil Wall, Reinforcement Material, Frost Heave