

樹脂製受圧板を用いた地山補強土工の凍上対策に関する検討

山 岸 昂 平

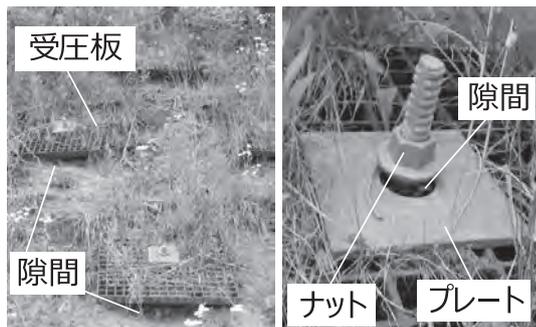
地山補強土工はプレストレスを与えない補強材を斜面内に配置し、地山との相互作用によって切土斜面や自然斜面の補強を図る代表的な工法であり、一般にのり面工と併用される。北海道のような積雪寒冷地では主にのり面工に作用する凍上力が原因となった地山補強土工の被害事例が報告されており、中にはその健全性が損なわれていることが懸念されるものも存在する。そこで本研究では、比較的剛性の小さい樹脂製の独立受圧板を使用した地山補強土工を試験施工し、断熱材や連続繊維補強土工と併用することによって、地山補強土工の凍上被害を軽減する方法について詳細に検討した。

キーワード：地山補強土工、凍上、受圧板、断熱材、連続繊維補強土

1. はじめに

地山補強土工はプレストレスを与えない補強材を斜面内に配置し、地山との相互作用によって切土斜面や自然斜面の補強を図る工法であり、日本では鉄筋のように細長比が大きく、曲げ剛性の小さい補強材を用いたネイリングが主流となっている¹⁾。一般に、地山補強土工はのり面工と併用され、のり面工には連続的な吹付のり枠等が採用されることが多いが、形状や材質が異なる数多くの独立受圧板も開発されている。

写真一1は北海道内で撮影されたのり面工として独立受圧板が採用された地山補強土工の一例である。固定するプレートとナットが大きく離れ、受圧板と地山との間に多くの隙間も見られることから、凍上力によって補強材が引き抜けた可能性がある。北海道内では同様な事例が他にも報告されており²⁾、中には地山補強土工としての健全性が損なわれているものも少なからず存在すると考えられる。



写真一1 独立受圧板が採用された地山補強土工の一例

このような背景もあり、筆者らは変形によって補強材に作用する凍上力の緩和が期待される樹脂製の独立受圧板を基本とした地山補強土工を、2015年11月に北見工業大学敷地内の平地部分に試験施工し、地盤の凍結融解に伴う補強材や受圧板の挙動を比較検討した³⁾。この屋外実験の結果、剛性の低いプラスチック製の受圧板を用いることで、受圧板や補強材に作用する凍上力を軽減できることが分かった。また、地盤の凍結に伴う受圧板の損傷や補強材の引抜けを防ぐためには、凍結深を抑制する断熱対策が効果的であると分かった。その他、この実験結果の詳細については参考文献3)を参照されたい。

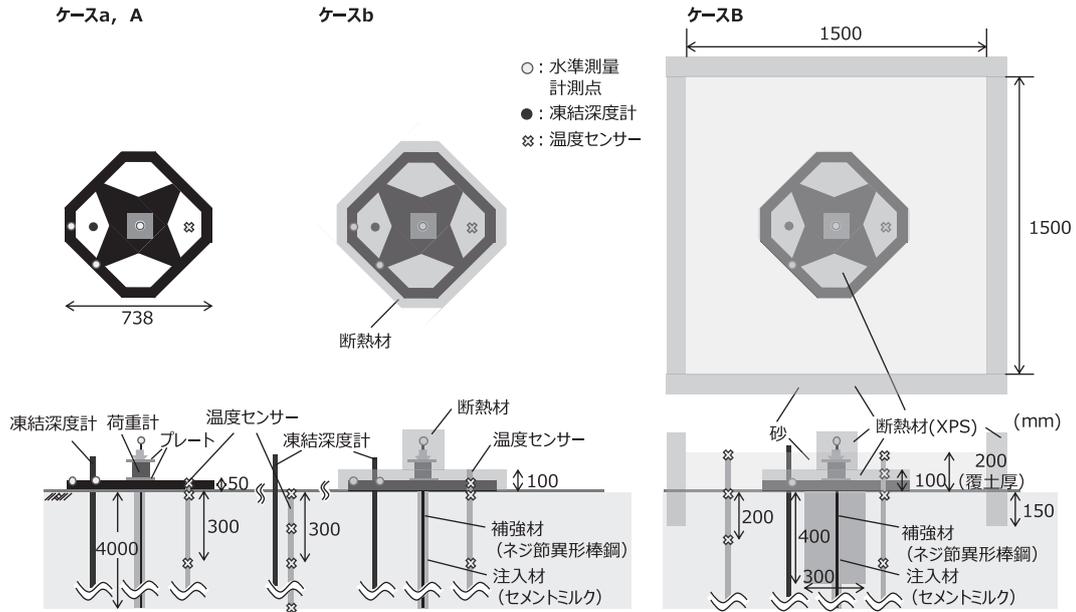
そこで本研究では、まず発泡ウレタンによる断熱対策のみを施した樹脂性の独立受圧板を用いた地山補強土工を施工し、断熱対策の効果検証を行った。その上で、連続繊維補強土工との併用を前提とし、断熱による凍上対策を施した樹脂製の独立受圧板を用いた屋外実験を行った。

本報告ではこれらの試験方法や試験結果について示すとともに、本試験の計測結果に基づいた二次元熱伝導解析による寒冷環境に応じた最適な断熱材の設置範囲や厚さの検討と、これらの結果を踏まえて新たに実施している屋外実験についても報告する。

2. 断熱効果を検証するための屋外実験

(1) 対策効果の検証を目的とした試験の概要

図一1は北見工業大学敷地内の平地部分に施工し



図一 断熱材ならびに断熱材と連続繊維補強土を想定した覆土とを併用した試験施工の概略図⁴⁾

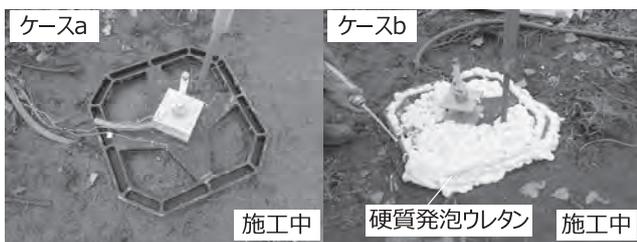
た、断熱材ならびに断熱材と連続繊維補強土を想定した覆土とを併用した凍上対策の効果検証を目的とした試験の概略図である。試験は2016年11月～2017年6月、2017年11月～2018年6月の2期間で行っており、前者の期間では断熱対策のみによる効果検証を目的とした2ケース（ケースa, b）、後者の期間では先の結果を踏まえて、断熱材と覆土を併用した対策効果の検証を目的とした2ケースの試験（ケースA, B）を行った。

写真一2は2016年11月～2017年6月の期間に実施した試験における施工時の様子を示したものである。ケースaは凍上力の緩和を期待して比較的剛性の小さいポリプロピレン製の独立受圧板を用いており、その上に金属製のプレートとセンターホール型の荷重計を設置して補強材と連結している。ケースbは断熱対策として一液式硬質発泡ウレタンを厚さが5cm程度となるよう受圧板周辺に吹き付けた。また、いずれのケースにおいても、補強材はネジ節異形棒鋼（D19）であり、直径5cm、深さ4mで削孔し、注入材（セメントミルク）を入れた後に補強材を挿入して一体化した。

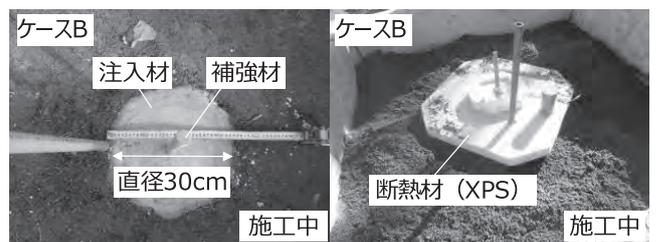
写真一3は2017年11月～2018年6月の期間に実施した試験における施工時の様子を示したものである。ケースAについては先述のケースaで使用した補強材に同質の受圧板を新たに設置し、構造も先述したケースaと同じとしている。ケースBについては、予め補強材周辺を直径が約30cmとなるよう深さ40cmまで掘削し、注入材（セメントミルク）を入れて先述のケースbで使用した補強材と一体化させている。これについては、2015年11月に実施した、注入材の影響を把握した試験ケースの結果³⁾を踏まえて、受圧板直下での最大凍結深程度までは注入材の直径を大きくすることで、これに伴う付着力が増大して受圧板の変形が抑制されるかどうかを検証するために行っている。そして、開口部と上部に厚さ5cmの断熱材（XPS）を設置した受圧板を補強材と連結した後、原地盤の地表面からの覆土厚が20cmとなるよう、補強材周辺150cm角の範囲に砂質土を投入した。

(2) 試験結果の比較と対策効果の検証

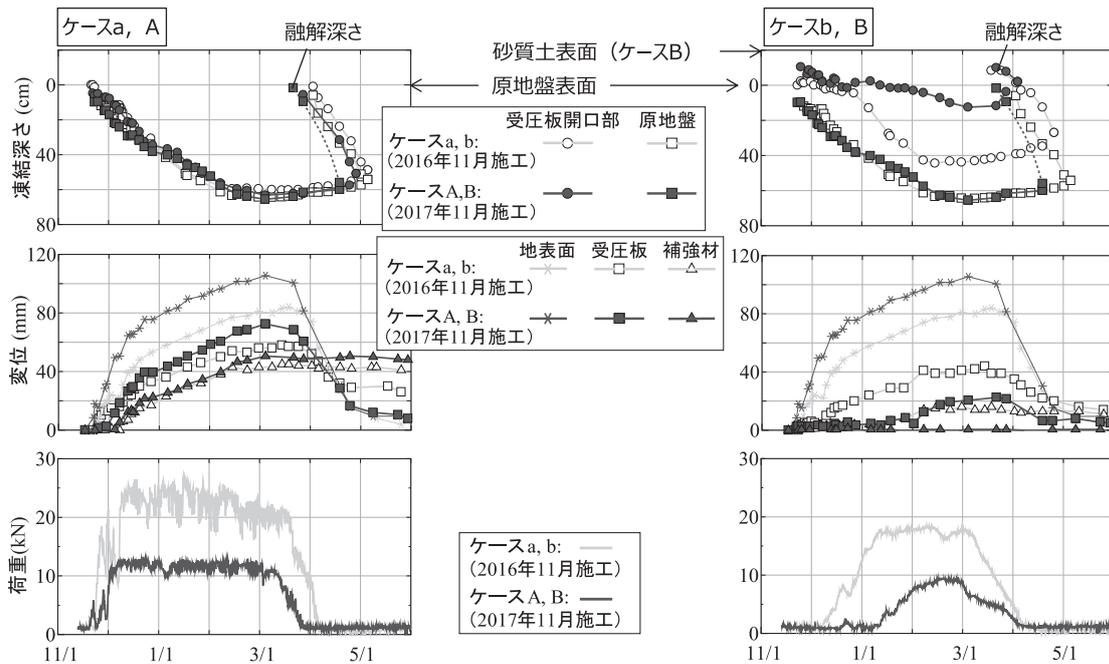
図一2はそれぞれの期間における2ケースの試験結果を比較したものである。



写真一2 2016年11月～2017年6月に行った施工の様子⁴⁾



写真一3 2017年11月～2018年6月に行った施工の様子⁴⁾



図一 断熱材ならびに断熱材と連続繊維補強土を想定した覆土とを併用した試験施工の計測結果⁴⁾

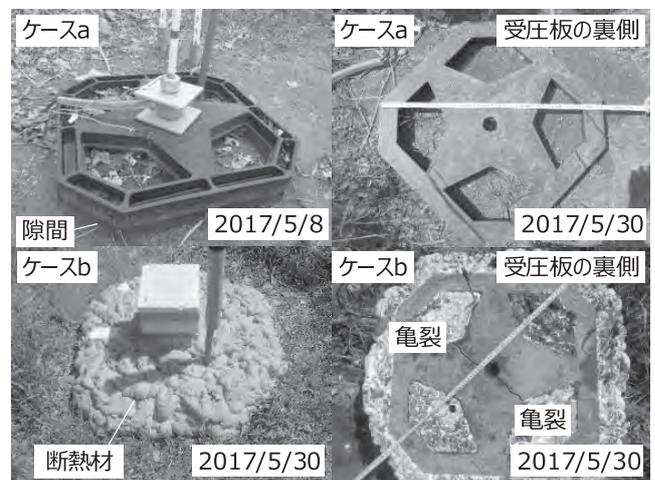
2016年11月～2017年6月の期間に行ったケース a, b の試験結果 (中抜き記号) に着目すると、いずれのケースにおいても荷重がほぼ0となった融解後の補強材は凍結前よりも高い位置にあり、結果的に補強材が抜け上がったことが分かる。

未対策のケース a については、11月中旬から凍結深さが増加しており、これとともに荷重が急増し、受圧板端部の変形も始まっていることが分かる。また、補強材は12月初旬から引き抜け始めており、そこから荷重の増加も緩慢になっている。また、融解後には受圧板が部分的に地表面から浮いているが、受圧板の損傷は確認されなかった。

断熱対策を行ったケース b では、ケース a に比べて凍結深さの進行は抑制されているが、12月初旬からわずかに地表面 (原地盤) 以深となり、これに伴って荷重の増加や受圧板端部の変形が生じ始めていることが分かる。一方、補強材については1月中旬まで引き抜け変位はほとんど確認できず、受圧板に作用した最大荷重もケース a に比べて小さいことを考えると、引き抜けや作用する凍上力の軽減に対して断熱対策が効果的であることが分かる。しかしながら、端部の変位に比べて補強材の引き抜け量が小さいことで、これらの変位差はケース a に比べて大きくなっている。これについては、受圧板周辺にのみ断熱材が設置されていることで、補強材周辺と端部で凍結深さが大きく異なっているためだと考えられ、受圧板端部の直下では図一 2 に示す計測結果よりも早い段階で大きな凍結深さになっていたと推察される。

写真一 4 は計測終了後 (2017年5月) に撮影したケース a, b の受圧板であり、上述の内容を裏付けるように、ケース b の受圧板の裏側には先述した変位差による曲げ変形が原因だと考えられる亀裂が確認された。また、先述したようにケース a の受圧板は損傷していないことが分かる。

次に、図一 2 中における 2017年11月～2018年6月の期間に行ったケース A, B の試験結果 (中塗り記号) に着目すると、前年と凍結指数が大きく変わらなかったこともあり、地表面 (原地盤) の凍結深さは前年とほぼ同様に推移しているが、凍上変位については近隣の積雪や除雪頻度の違いによって多少異なっている。未対策のケース A については、補強材、受圧板端部の変位は同時期のケース a と同程度であるにも関

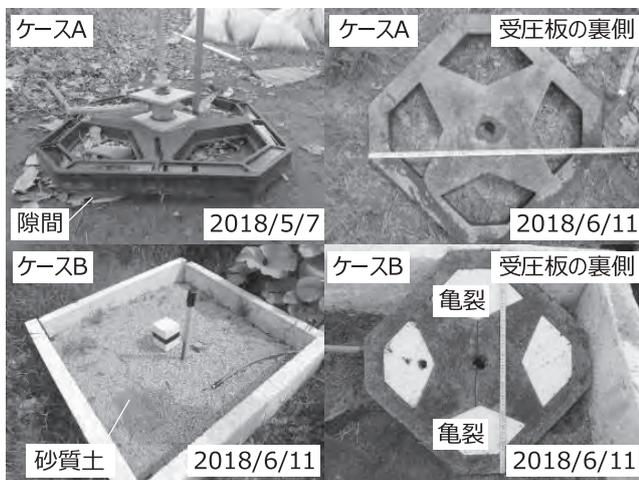


写真一 4 計測終了後ケース a, b の受圧板⁴⁾

ならず、受圧板に作用している荷重は明らかにケース Aの方が小さい。これは前年の試験（ケース a）で凍上力によって補強材が引き抜けたことで、注入材と周辺土との付着力が低減し、小さな凍上力でも補強材の引き抜けが生じやすくなっていることを意味していると考えられ、引き抜き抵抗力が低下していることが懸念される。また、前年と同様に融解後に受圧板が部分的に地表面から浮いているが、受圧板の損傷は確認されなかった。

一方、ケース Bについては、ケース Aに比べて凍結深さの進行は抑制されているが、1月中旬からわずかに地表面で深くなり、これに伴って荷重の増加や受圧板端部の変形が生じていることが分かる。ただし、補強材について変位は全く生じておらず、断熱材と覆土の併用は補強材の引き抜けに対して効果的であったと考えられる。

写真—5は計測終了後(2018年6月)に撮影したケース A, Bの受圧板である。前年に行った試験施工と同様に、受圧板端部の直下では図—2に示す計測結果よりも大きな凍結深さになっていたと考えられる。また、結果的に補強材と受圧板の変位差が20mm程度になっていることもあり、ケース Bの受圧板の裏側には補強材の引き抜き量と受圧板端部の変位差による曲げ変形が原因だと考えられる亀裂が確認された。先述したように、ケース Bでは凍上変位を抑制する効果を期待して深さ40cmまで注入材径を大きくしたが、結果的に受圧板が損傷したことを考えると、抑制効果はそれほど大きくないと理解できる。よって、以上の結果を踏まえると、凍上による受圧板の損傷を抑制するためには、受圧板端部直下の凍結深さを限りなく0に近くすることが最も重要であると考えられる。



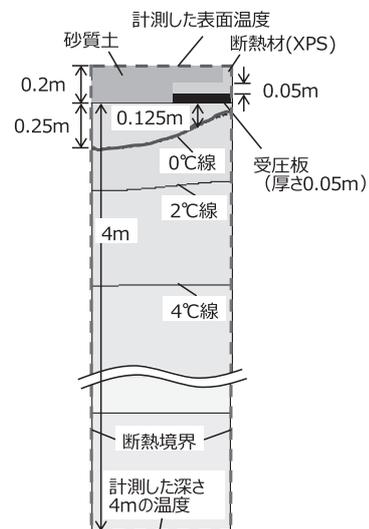
写真—5 計測終了後ケース A, Bの受圧板⁴⁾

3. 寒冷環境に応じた凍上対策

(1) 二次元熱伝導解析モデルの作成

施工場所の寒冷環境に応じて、受圧板端部直下の凍結深さが0になるような断熱材の厚さや覆土厚を決定するため、2017年11月～2018年6月の期間にケース Bで計測された結果を基にして、二次元熱伝導解析モデルを構築した。

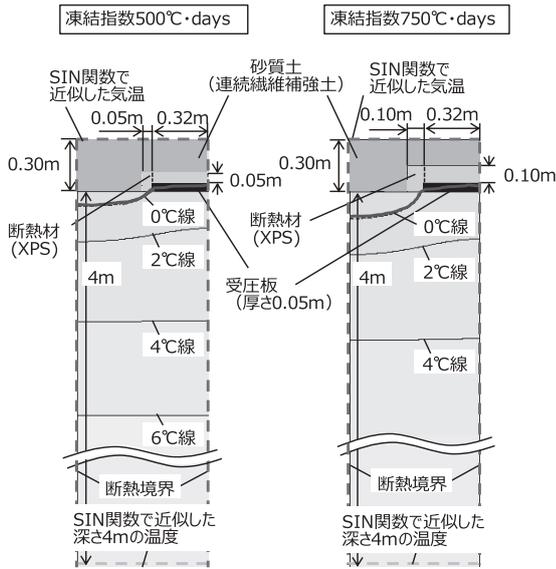
図—3は構築したモデルを用いた解析結果であり、0℃線の位置が砂層の表面から最も深くなった時期を示している。断熱材や受圧板の熱物性値は過去の研究成果を参考にし⁵⁾、砂や原地盤は基本的に乾燥密度と含水比から算出可能なKersten⁶⁾と伊福部⁷⁾による提案式に従ったが、受圧板直下における実測の凍結深さ(0.125m)やその推移が解析結果とできるだけ近似するように、砂質土と原地盤の熱物性値を調整した。解析モデルの寸法は幅0.75m(左右対称のため実際の半分)、深さ4mとし、側面は断熱境界、地表面は実測の温度、深さ4mにも近傍で計測した実測の温度を入力した。また、解析モデル内の受圧板寸法は実際に使用したものと等しく、幅0.32m(左右対称のため実際の半分)、厚さ0.05mである。さらに、補強材周辺は十分に断熱されていることも考慮し、モルタルや鉄筋といった要素は作成していない。



図—3 構築した二次元熱伝導解析モデル⁴⁾

(2) 寒冷環境に応じた断熱材厚と覆土厚の検討

図—4は先述した解析モデルを用いて、所定の凍結指数(500, 750℃・days)となるような表面温度を与えた時の、断熱材と覆土の厚さを検討した結果を示したものである。解析モデルに与えた表面温度は北海道北見市の過去40年間における日平均気温をSIN関



図一4 凍結指数に応じた断熱材厚と覆土厚の検討⁴⁾

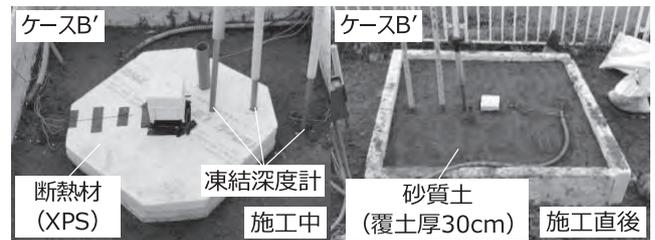
数で近似し、所定の凍結指数 (500, 750 °C · days) となるよう、切片のみを変化させた SIN 関数から計算された日平均気温とし、深さ 4m には先述した実測の地中温度を近似した SIN 関数から計算された温度を与えている。また、初期温度分布 (定常解析) が解析結果に与える影響を小さくする目的で、10 年間分の温度変化 (非定常解析) を与えた上で比較検討している。

結果的に、凍結指数 500 °C · days であれば、受圧板周辺に設置する断熱材の厚さを 0.05 m、750 °C · days であれば、断熱材の厚さを 0.1 m とし、覆土厚を大きくすることで受圧板端部直下の凍結を抑制できることが分かった。

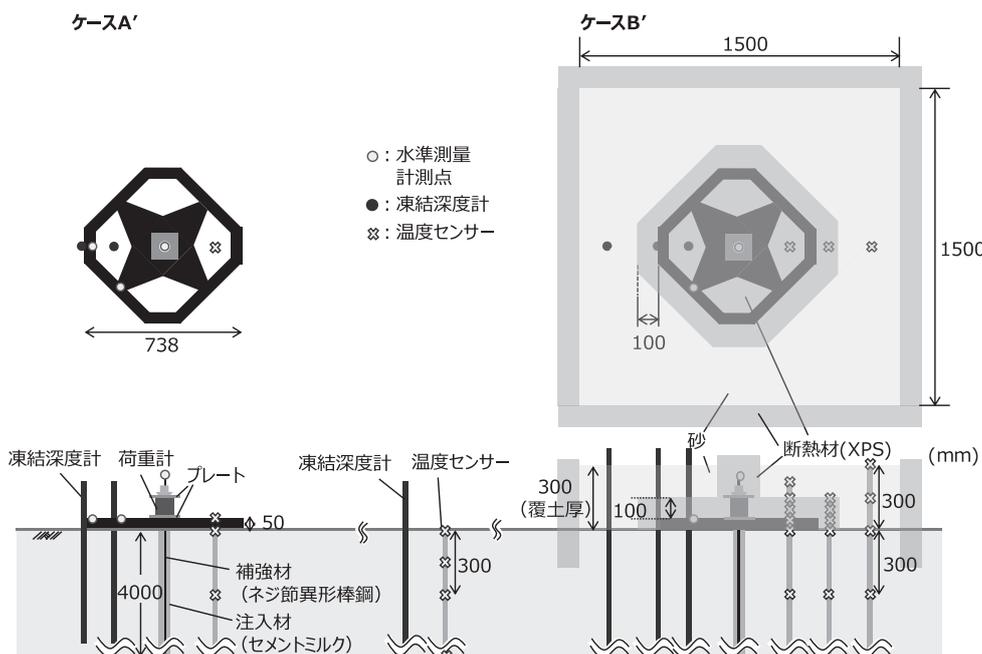
砂質土や原地盤の熱物性値や凍結指数の大きさによっては、原地盤 (地山) の全面断熱が必要となる可能性もあるが、2017 年 11 月からの凍結指数は 874 °C · days であったのに対し、実測の表面温度は日射やわずかな積雪の影響などによって 570 °C · days 相当であった。また、実際には植生基材や植生、更には積雪による断熱効果があることなどを考えると、かなり厳しい寒冷環境であっても、図一4 に示した受圧板周辺の断熱と覆土を組み合わせる方法で十分だと考えられる。

4. 熱伝導解析結果に基づいた屋外実験

先述した二次元熱伝導解析結果を踏まえて、図一5 に示すように先述のケース A, B と同じ施工場所で、断熱材厚や覆土厚を変更することによる効果検証を目的とした 2 ケース (ケース A', B') を試験施工し、2018 年 11 月から先述した試験施工と同様な計測を行った。写真一6 は 2018 年 11 月～2019 年 1 月初旬まで実施している屋外実験の様子を示したものである。ケース A' については先述のケース a, A で使用



写真一6 2018 年 11 月～2019 年 1 月初旬までの屋外実験の様子



図一5 2018 年 11 月～2019 年 1 月初旬までに行っている試験施工の概略図

した補強材に同質の受圧板を新たに設置し、構造も先述したケース a, A と同じとしている。ケース B' については、2017 年 11 月からの実測の表面温度から得られた凍結指数は 570 °C・days 相当であったことから、**図—4** に示す凍結指数 750 °C・days における断熱材厚 (0.1 m) と覆土厚 (0.05 m) の組み合わせであれば、受圧板端部直下の凍結を抑制できると判断し、受圧板上部と外側に厚さ 10 cm の断熱材 (XPS) を設置した。また、原地盤の地表面からの覆土厚が 30 cm となるよう、補強材周辺 150 cm 角の範囲に砂質土を投入した。なお、前年度に拡径した注入材は解体し、補強材周辺の注入材は直径 5 cm に統一している。

図—6 は計測を開始した 2018 年 11 月から 2019 年 1 月初旬までの両ケースの荷重や変位に関する計測結果を比較したものである。未対策のケース A' については、11 月下旬から凍結深さが増加しており、これとともに受圧板に作用する荷重や受圧板端部の変形も始まっていることが分かる。また、補強材の変位は先述のケース A よりも大きい、受圧板に作用する荷重はケース A' の方が小さい (**図—2** 参照)。これは先述の 2 期間に行った屋外実験 (ケース a, A) で補強材が引き抜けたため、補強材の引き抜き抵抗力が低下したためだと考えられる。一方、ケース B' は断熱

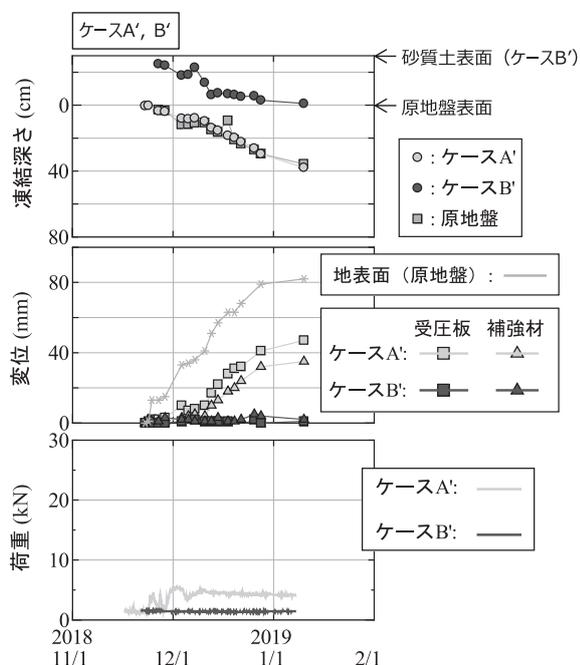
材の設置範囲や覆土厚を大きくしたこともあり、2019 年 1 月初旬まで原地盤が凍結しておらず、補強材の変位や受圧板端部の変位も生じていないことが分かる。今後の寒さによっては受圧板端部直下も凍結することが考えられるが、この際の受圧板に作用する荷重や変形、補強材の引き抜けについて詳細に検討し、二次元熱伝導解析の結果との違いも検討していきたいと考えている。

5. おわりに

これまでの屋外実験の結果から、寒冷地における地山補強土工の凍上被害を防ぐためには、凍上力の軽減を目的とした断熱対策工が有効であり、連続繊維補強土工等による受圧板周辺への覆土と断熱対策との併用が、受圧板の損傷や補強材の引き抜けに対して効果的であることが分かった。

また計測結果に基づいた二次元熱伝導解析により寒冷環境に応じた最適な断熱材厚と覆土厚の組み合わせを決定できることが分かり、経済的な地山補強土工の施工が可能になると考えている。

JICMA



図—6 2018 年 11 月～2019 年 1 月初旬までの計測結果

《参考文献》

- 1) 例えば、地盤工学会：地盤工学用語辞典、2006。
- 2) 地盤工学会北海道支部 斜面の凍上被害と対策に関する研究委員会：斜面の凍上被害と対策のガイドライン、2010。
- 3) 石垣幸整、三上登、川口貴之、中村大、川内谷勇真、川尻峻三、山下聡：リサイクルプラスチック製の独立受圧板を用いた地山補強土工の凍結融解挙動、ジオシンセティックス論文集、Vol. 31, pp. 127-134, 2016。
- 4) 山岸昂平、川口貴之、中村大、川尻峻三、石垣幸整、池田淳、三上登、山下聡：樹脂性受圧板を用いた地山補強土工に対する凍上対策方法の提案、ジオシンセティックス論文集、Vol.33, pp. 77-84, 2018。
- 5) 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学—凍上被害とその対策—、pp. 48, 2009。
- 6) M. S. Kersten : Thermal properties of Soils, University of Minnesota, Institute of Technology, Engineering Experiment Station, Bulletin No. 28, 1949.
- 7) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究、土木試験所報告、第 26 号、1962。

【筆者紹介】

山岸 昂平 (やまがし こうへい)
北見工業大学大学院 社会環境工学専攻
大学院 2 年

