

グラウンドアンカーの凍上対策に関するフィールド実験

Field Experiment on Ground Anchor Frost Heaving Measures

土木研究所寒地土木研究所

同 上

同 上

日特建設株式会社

同 上

日本基礎技術株式会社

○正 員

正 員

正 員

正 員

正 員

山木正彦 (Masahiko Yamaki)

林 宏親 (Hirochika Hayashi)

佐藤厚子 (Atsuko Sato)

池田 淳 (Jun Ikeda)

飯塚孝之 (Takayuki Iiduka)

中村 剛 (Tsuyoshi Nakamura)

1. はじめに

北海道のような寒冷地における切土のり面は、冬期間の凍上現象やその後の融解、春先の融雪水の影響を受けて崩壊する事例が多々確認される¹⁾。写真-1は凍上により損傷したグラウンドアンカー（以降 GA）頭部の様子である。凍上により隆起した切土のり面が受圧構造物を押し上げ、引張材が塑性域まで変状した結果である。

筆者らは、実態を把握するために北海道各地で施工された GA の冬期の荷重を測定し、①GA の受圧構造物に作用する荷重は冬期間に増加し、春期には低下する、②その荷重増減は毎年繰り返される、という調査結果を得ている²⁾。また、寒地土木研究所が所有する苫小牧施工試験フィールドにおいて、凍上に関する GA の試験施工を行った結果、③GA の諸元により GA に作用する凍上力は変わり、自由長を長くする、定着荷重を小さくする、受圧面積を小さくすることで GA に作用する凍上力を抑制することができる³⁾、④GA 直下への冷気の侵入が抑制されると GA に作用する凍上力も抑制される⁴⁾、といったことが示された。

凍上対策の基本は、凍上の 3 要素⁵⁾といわれる「温度」、「水分」、「土質」のうち、どれか 1 つ以上の要素を凍上が生じない条件にすることである。本報は、これら 3 要素のうち温度に着目し、断熱による GA の凍上対策に関する試験施工結果を紹介するものである。具体的には、先述の苫小牧施工試験フィールドにおいて、種々の断熱対策を施した GA を設置し、冬期における荷重や地中温度の推移を計測している。その他、凍上によるアンカーの破断を観測するために、同フィールドにおいて実施したアンカー破断試験結果の一部を報告する。

2. 調査方法

2.1 地盤条件

ここでは、GA を施工している苫小牧施工試験フィールドの試験地盤条件を記す（表-1、図-1 参照）。

当該地盤は凍上に関する試験フィールドとして造成されたもので、表層 90cm が強い凍上性が認められる火山灰質粘性土で置換され、その締固め度は 99.8%である。また、当該土質を使用し、別途実施した室内コーン指数試験（自然含水比で締固め度 96.9%の条件下）の結果、コーン指数は 667kN/m²であった。なお 90cm 以深は、石炭灰、軽石混じり火山灰、泥炭・腐植混じり土、火山灰



写真-1 凍上によるグラウンドアンカー（GA）頭部の損傷

表-1 試験地盤（凍上性材料）の基本特性

地盤材料の工学的分類		SFG
自然含水比 w_n (%)		48.7
締固め特性	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.125
	最適含水比 w_{opt} (%)	42.9
凍上性	凍上速度 U_h (mm/h) (締固め度 $D_c=94.6\%$)	0.78
トラフィカビリティ	コーン指数 q_c (kN/m ²) (締固め度 $D_c=96.9\%$)	667

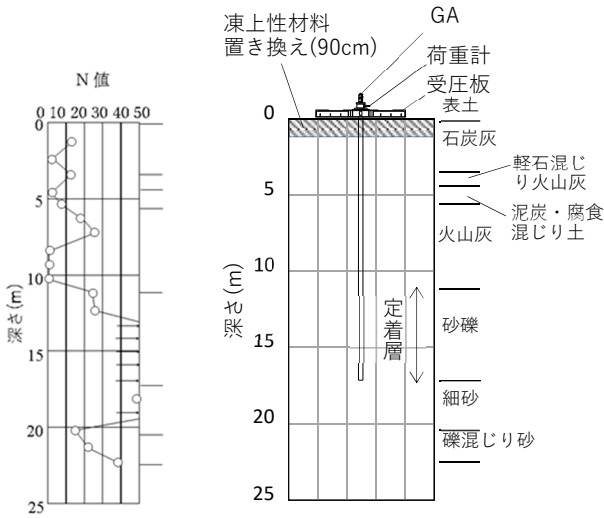


図-1 試験地盤

表-2 グラウンドアンカー (GA) の諸元等

GA	アンカー仕様	降伏引張力 (kN)	極限引張力 (kN)	定着荷重 (kN)	見かけ自由長 (m)	定着長 (m)	受圧面積 (m ²)	凍上抑制対策		備考
								受圧板下面	受圧板上面	
1	PC鋼より線 φ15.2×1	222	261	220	7.00	10.00	3.13			破断試験用
2				70	14.00	4.00	5.37	植生マット(≒受圧面積)	植生マット(≒受圧面積)	凍上抑制効果検証
3		608	714	220	18.85	6.00	5.37	XPS(厚さ5cm)(≒受圧面積)		
4	多重PC鋼より線7本より φ9.5×7						2.47	FFU(厚さ6cm)(≒受圧面積+α)		
5							5.37	FFU(厚さ6cm)(≒受圧面積)		
6					18.71					無対策

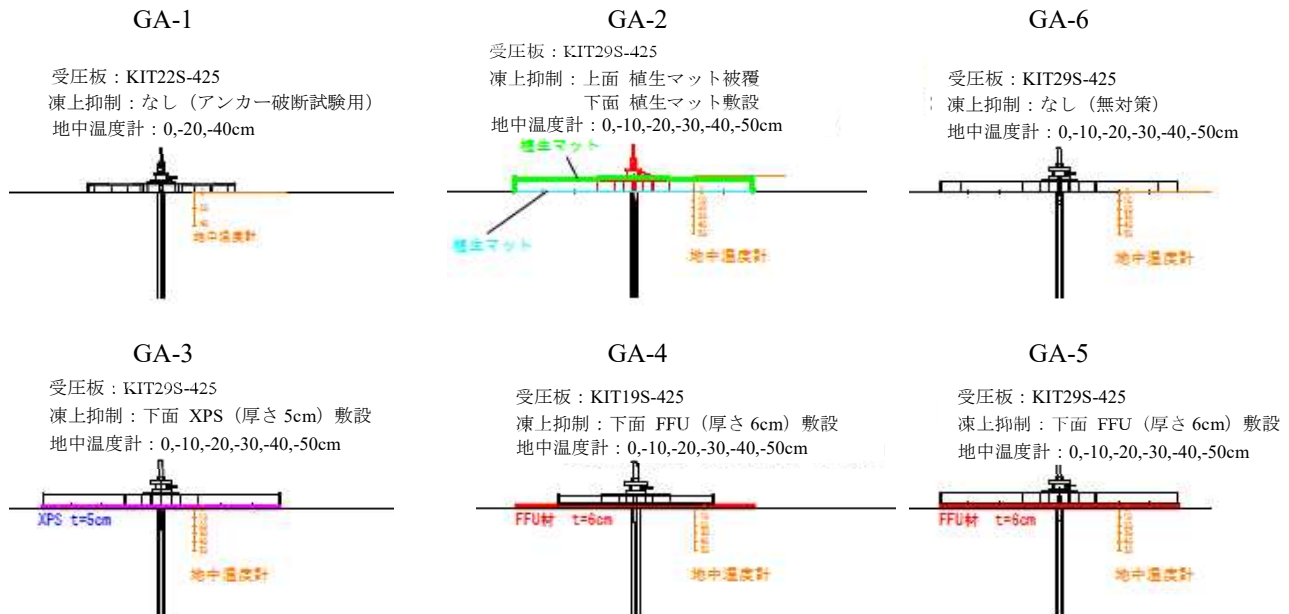


図-2 各種グラウンドアンカー (GA) の諸条件

と比較的軟らかい土質が続き、12m 以深は比較的硬い土質となっている。

この水平に造成した試験地盤に各種 GA を鉛直方向に施工し、荷重および地中温度計測を行った。

2.2 グラウンドアンカー (GA) の設置条件と計測方法

本調査では GA に作用する凍上力を抑制する手法を検討するために、受圧板に各種断熱対策を施した上で、GA に作用する荷重を計測しその効果を比較した。また、凍上により GA が損傷した (と思われる) 事例は数多くあるものの、実際に凍上によりアンカーが破断する様相を観測した事例はないため、凍上による GA の破断を目的としたケースを試みた。

表-2、図-2 に各 GA の諸元と対策手法の一覧およびその設置状況を示す。いずれの GA も鋼製の独立型受圧板である。GA-1 は凍上によるアンカーの破断を観測するためのケースで、初期定着荷重を降伏引張力程度まで上げ、凍上を抑制するような工夫は施していない。GA-2～GA-5 は植生マットや XPS (押出法ポリスチレンフォーム)、FFU (強化プラスチック発泡体) を受圧板の下面もしくは上面に設置し、各々の凍上抑制効果を把握するケースである。ここで、XPS は建築や土木において使用される一般的な断熱材の一つで、FFU は過年度調査⁴⁾によりその断熱効果が確認された独立型受圧板の一種である。なおここで使用した XPS の厚さは 5cm、FFU の厚さは 6cm で、面積は同じ (240cm×240cm) である。

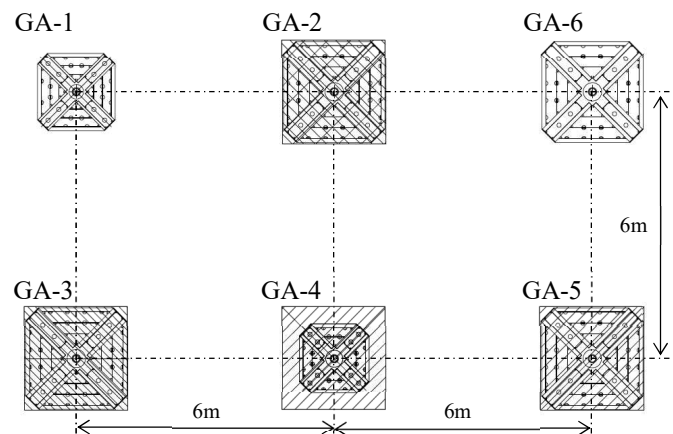


図-3 グラウンドアンカー (GA) 設置平面図

その他 GA-6 は GA-2～GA-5 と比較するための無対策のケースとなっている。

なお各 GA は互いに干渉しないように、アンカー頭部間距離で 6m の間隔をもって設置している (図-3)。

GA に作用する凍上力は、受圧板と支圧板の間に設置した荷重計により計測している。また受圧板直下 (アンカー頭部から水平に 30cm の距離) において、地表面から深さ 50cm まで 10cm 間隔 (地表面を含む) で地中温度の計測を行い、各種断熱対策の効果を把握している。なお荷重と温度は 1 時間毎に自動計測を行っている。

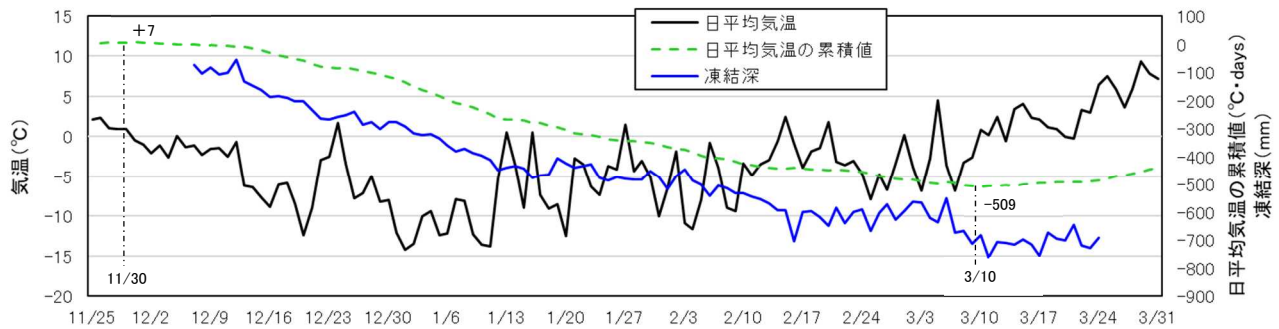


図-4 原位置の気象条件等 (2020年11月～2021年3月)

その他、GA-1 に関しては、アンカー破断時の様子を視覚的に捉えるために、別途動画の撮影を行っている。

2.3 原位置気象条件

原位置における日平均気温 (°C) と日平均気温の累積値 (°C・days) および試験地盤の凍結深 (mm) を図-4 に示す (図の作成上の都合からここでは凍結深を mm で表示する)。

日平均気温は、2020/11/25～12/1 および 2021/3/25～3/31 のデータは直近の道路テレメータデータを使用し、それ以外は原位置で計測した1時間毎の気温データから算出している。原位置の気温は、高さ約 1.5m の位置で百葉箱内に格納した熱電対で計測している。

凍結深は、試験地盤内において後述する間隔で深さ 100cm まで埋設した熱電対により1時間毎に地中温度を計測し、その日平均温度を基に、温度勾配から 0°C の位置を推定し得ている。そのため厳密な意味では凍結深を表しているわけではないことに留意されたい。熱電対は地表面を含め深さ 50cm までは 10cm 毎に設置し、それより深は 100cm の深さに設置している (地表面から深さ方向をマイナスとし 0、-10、-20、-30、-40、-50、-100cm の位置)。なお凍結深は、3 月中旬以降地表から浅い位置では 0°C 以上を記録しているが、最も深い 0°C 線的位置として示している。

図中には本期間における日平均気温の累積値の最大値と最小値およびその日付を記している。これらより本期間における凍結指数は 516°C・days 程度となる。苫小牧市の 10 年確率凍結指数は 370°C・days、20 年確率凍結指数は 410°C・days 程度である⁹⁾ことから、本期間の気温は比較的低めであったといえる。

なお、本調査範囲は適宜除雪を行い、積雪深は常時 10cm 以下の状態を維持している。

3. 調査結果

3.1 各種断熱効果

図-5 はアンカー破断試験用の GA-1 を除いた各 GA の受圧板直下で測定 (2.2 参照) した地中温度から算出した原位置における凍結深の推移である。凍結深は 2.3 で記した手法で得ている。なおここでは熱電対の最深度は -50cm であるため、その深さが 0°C 以下になっていた場合、凍結深は -50cm として図化している。なお GA-3 については、明らかに異常と思われるデータは削除し使用している。

この図より、無対策の GA-6 は急激に凍結深が地中に

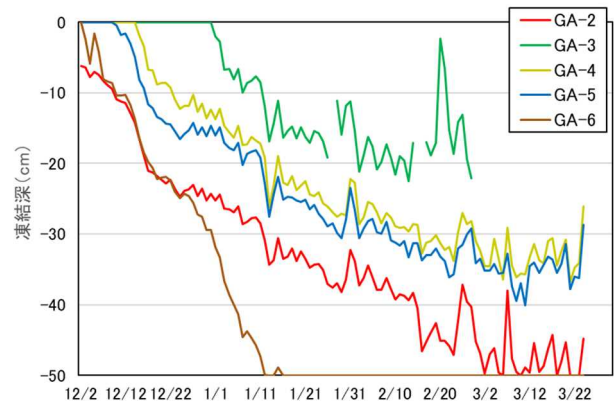


図-5 各グラウンドアンカー (GA) 直下の凍結深の推移

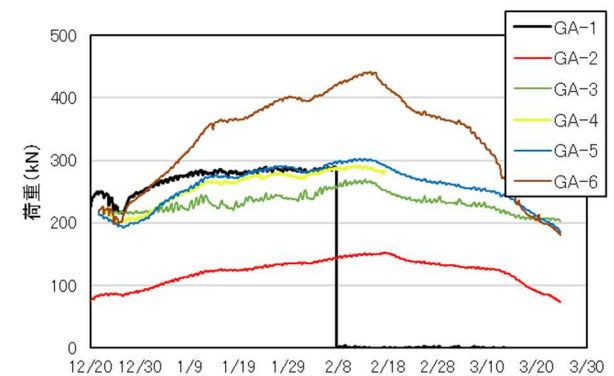


図-6 各グラウンドアンカー (GA) の荷重推移

侵入し、1 月上旬には -50cm に到達している。次いで植生マットを敷設・被覆したケース、FFU を敷設したケース、XPS を敷設したケースの順に凍結深が大きくなり、凍結深で並べると $GA-3 < GA-4 < GA-5 < GA-2 < GA-6$ といった結果が得られた。GA-2 は無対策と比較し凍結深の進行が緩やかであるものの、日平均気温の累積値が最小に向かう 3 月上旬 (図-4 参照) には凍結深が -50cm に到達している。GA-4 と GA-5 は同じサイズ、厚さの FFU を使用しているが若干 GA-5 の方が凍結速度が速いようである。その差は、熱伝導率が高い鋼製受圧板のサイズが影響した可能性が考えられるが、概ね一致していると思われる。また、GA-3 と GA-5 の比較から、FFU と比較し XPS の断熱性能の高さが伺える。しかし、XPS は日光の影響による変質等耐久性の面で課題があるため、今後 XPS を GA の凍上抑制対策として使用する場合を想定し、さらなる検討を進める。

その他、凍結深のピークは、確認できる GA-4 と GA-

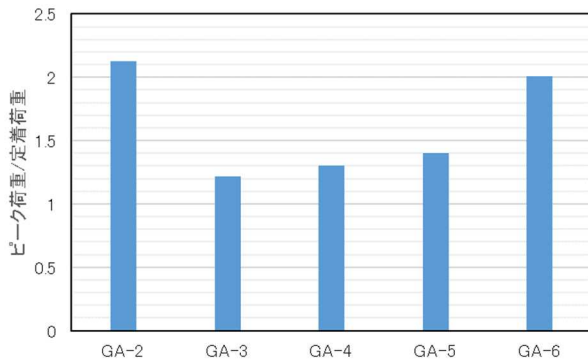


図-7 各グラウンドアンカー（GA）の定着荷重に対するピーク荷重の比

5の結果からではあるが、日平均気温の累積値の最低値を示した3/10付近であった。

3.2 荷重の推移

各GAにおける荷重の毎時推移を図-6に示す。GA-4は2/17以降取得データが乱れていたため、そのデータを削除している。図より、定着後一時的に荷重が低下するGAもあるが、いずれのGAも時間の経過に伴い荷重が増加し、受圧板に凍上力が作用していることがわかる。

アンカー破断試験用のGA-1は、2/7の12時に荷重が消失していることから、11時と12時の間に破断していることが図から確認できる。撮影した破断時の映像等については後述する。GA-1とGA-6はともに無対策ではあるが、その荷重の上昇程度は大きく異なっている。これは、GA-1は降伏引張力程度で定着しているため、凍上力が作用してもアンカーが降伏し、荷重の上昇として現れなかったためと思われる。

凍上抑制対策を行ったGA-2～GA-5は、いずれもGA-6（無対策）と比較し、その荷重が抑制されているように見受けられる。その荷重ピークの発現時期に着目すると、いずれも2月中旬であり、日平均気温の累積値が最低となる時期よりも早い。これは過年度の調査結果と同傾向である⁴⁾。

図-7に、各GAの増加荷重（作用した凍上力）を比較するために定着荷重に対する各GAのピーク荷重の比を整理した。無対策のGA-6は凍上により荷重が2倍程度に増加しており、GA-2も同程度増加していることがわかる。GA-2は他のGAと比較し定着荷重が小さいため、結果としてピーク荷重も抑制された³⁾ものの、今回の調査では植生マットによる明確な凍上抑制効果は確認されなかったといえる。その他、GA-3、4、5はGA-6と比較し、凍上力が7～8割程度低減されたことが確認され、作用した凍上力の大きさはGA-3<GA-4<GA-5の順となっている。これは先述した凍結深の順と一致しており、条件が近い場合は、凍結深と凍上力はユニークな関係があるといえる。

その他、受圧面積を小さくすることで凍上力は抑制される³⁾が、今回、受圧面積の小さいGA-4と大きいGA-5で凍上力が同程度であった。互いに接地するFFUの面積は同じであることを考えると、別途検討は必要だが、FFUと鋼製受圧板を組み合わせる場合はFFUの面積を受圧面積として扱い得ることを示唆している。



写真-2 凍上によるグラウンドアンカー破断の瞬間（GA-1）

3.3 凍上によるアンカー破断試験

凍上によるGAの破断の様相を把握するために、定着荷重を降伏引張力程度まで上げ、テンドンの飛び出し防止を施した上で冬期間連続的に動画撮影を行った（本報ではGA-1に該当）。

3.2で触れたが、GA-1に設置した荷重計の値から2/7の11時台に破断していることが明らかであったため、その時間帯の動画を確認したところ、支圧板が瞬間的に浮き上がる様子が捉えられていた（写真-2）。紙面の都合上、詳細は別途整理したいが、アンカーを確認したところ、アンカー頭部の定着くさびの位置で、アンカー（テンドン）が破断している状況であった。今回定着荷重を降伏引張力付近まで上げた特殊な条件下ではあるが、GAが凍上により破断に至り得ることが確認された。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会北海道支部 凍上対策工の調査・設計法に関する研究委員会：斜面の凍上対策の調査・設計マニュアル（案）、2016.
- 2) 佐藤厚子、畠山乃、野上敦、安達隆征：グラウンドアンカー工および地山補強土工に作用する凍上力の測定例、地盤工学会北海道支部技術報告集、No.59、pp.177-184、2019.
- 3) 山木正彦、佐藤厚子、畠山乃、池田淳、飯塚孝之、中村剛：寒冷地におけるグラウンドアンカーの荷重挙動、令和元年度 土木学会北海道支部 論文報告集、第76号、C-01、2020.
- 4) 山木正彦、佐藤厚子、畠山乃、池田淳、飯塚孝之、中村剛：グラウンドアンカーの凍上対策に関する試験施工、令和2年度 土木学会全国大会第75回年次学術講演会講演概要集、III-304、2020.
- 5) 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～、pp.3-7、2009.
- 6) 社団法人日本道路協会：道路土工要綱、pp.377-387、2009.