

自然冷熱による凍結促進が地盤の熱形態に与える影響

Effect of Freezing Promotion due to Natural Cooling on Thermal regime of Foundation

北海道大学工学部工学院
北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員
学生員
会員

安井丈造(Takezo Yasui)
白石瑛人(Akito Shiraiishi)
鄭好(Hao Zheng)

1. はじめに

近年、凍土を伴う土木技術が更なる広がりを見せている。人口の増加やそれに伴うエネルギー需要の増加から、凍土地帯を含む寒冷地開発も俄かに活気を帯びてきた。そのため、凍土、凍上現象を考慮した地盤・構造物間の相互作用予測の解析精度の向上がより一層重要性を増してきたと言える。

寒冷地の開発の際に考慮しなければならない問題の 1 つに、盛土建設に起因する凍土融解がある。凍土は凍結融解を繰り返す活動層と、凍結し続けている永久凍土層で構成される。盛土を建設する際、元々地表面に植生する断熱効果をもつモス層を除すことで、凍土融解が進行することで活動層が拡大を招いてしまう。活動層の拡大は地盤沈下などを引き起こし、地盤及び地盤上の建設物に力学的影響を与えてしまう。対策として寒冷地では、盛土建設の際の活動層の拡大を防ぐためにベンチレーションを埋設する。ベンチレーションは、冬季に外気を取り込み循環させることにより、自然冷熱で凍結を促進させる効果があると知られている。

本研究では、寒冷地に盛土を建設する場合を想定し、建設による地盤への影響及び、自然冷熱による凍結促進によってもたらされる地盤の熱力学的安定性を解析から明らかにしていくことを目的とした。

2. 解析条件の設定

本解析では、アラスカ州フェアバンクスを例に、寒冷地に盛土を建設した際の地盤の温度挙動を解析する。その際に、考慮しなければならない条件として、境界条件と初期条件の設定について以下に述べる。

2.1 境界条件設定

境界条件として、地表面温度を設定する。一般に、一年間の気温変化は sin 曲線で近似することができる。

$$T(t) = a \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + b\right) + c \tag{1}$$

t: 時間[Day] a, b, c: パラメータ

本研究では、実際にフェアバンクスで観測された気温を基に、式(1)において最小二乗法を用いることで、気温変化を近似式で導出した。

2.2 初期温度分布設定

解析にあたり、地盤の初期温度分布について考慮する必要がある。通常、地盤内の温度分布は、

深度に伴い勾配があり、一様であることはない。そこで、初期温度年平均気温合わせて一様に設定したモデルで数年間解析し、定常状態に収束した温度分布を初期の地盤内温度分布として採用する。物性値は、フェアバンクスの土質であるシルトを想定し、下記の通り設定した。

表-1: 物性値

物性値名	シルト層	モス層	埋設パイプ
E[N/m ²]	2.8×10 ⁸	1.26×10 ⁸	2.05×10 ¹¹
v	0.2	0.3	0.33
ρ[kg/m ³]	1930	30	1.251
c[J/kg・K]	1005	4500	1005
λ[J/(s・m・K)]	1	0.02	0.0241
w	0.5	0	0

解析モデルは、地盤の深さを 20m、断熱効果のあるモス層を厚さ 0.25m と想定し、初期温度分布を解析したところ、解析開始から 5 年後には温度分布が収束しているため、この時の温度を初期温度分布として採用する。加えて、深度 20m で温度勾配が 0 に漸近していることから、20m 以降の深度における熱の流出入がないため、地盤の厚さは妥当であると判断した。

3. 盛土厚さによる影響評価

モス層が植生している地盤のモデルとそのモス層を取り除き盛土を建設することを想定し、モス層がある場合の地盤温度分布とモス層の代わりに盛土をした場合の地盤の温度分布を比較する。これは、モス層がある場合と等価に近い温度分布をもたらす盛土厚さを検討することを目的としている。今回盛土厚さとして 1.5m, 2.0m, 3.0m の 3 パターンを用意した。実際に工事が行われる夏季の中でも 1 年間の気温が最高に達する 7 月を解析の起点とし、建設する盛土の初期温度は解析の起点の外気の気温と同じにしている。つまり、盛土が持つ熱が地盤に温度侵食し、地盤の融解が促進される状態を想定している。解析における物性値は表-1 に表記しているものを使用している。はじめに、モス層がある場合の 1 年間の地盤温度分布を図-2 に示す。また、今回は影響を大きく受ける地表面付近の結果に焦点を当てて考える。そのためグラフも地表面から 5m までの結果をプロットした。グラフより 0.25m 程度融解していることがわかる。これを基準に各盛土厚さのグラフを比較する。

次に盛土厚さが 1.5m, 2.0m, 3.0m のそれぞれのモデルの地盤温度分布が収束に近づいた場合の温度を比較する。図-2, 図-3, 図-4 はそれぞれ

れ盛土厚さ 1.5m(4 年目), 盛土厚さ 2.0m(5 年目), 盛土厚さ 3.0m(10 年目)の 1 年間の温度勾配を示したグラフである。

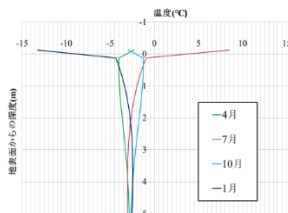


図-1: モス層の分布図

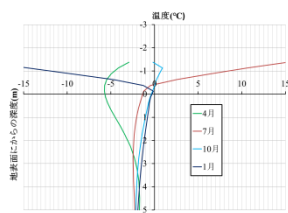


図-2: 厚さ 1.5m の分布図

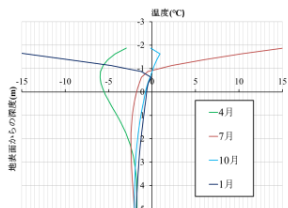


図-3: 厚さ 2.0m の分布図

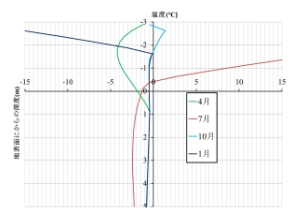


図-4: 厚さ 3.0m の分布図

盛土高さによって定常状態に近づくまでの時間が異なる。これは盛土厚さが厚いほど盛土が持っている熱量が大きいことに加え、外気温の断熱効果も大きいと考えられる。盛土厚さ 3.0m では、解析期間の 10 年間で、完全に収束はしなかった。厚さ 1.5m と 2.0m は等しい温度勾配となっている。しかし、定常状態に達するまでの時間には 1 年程度の差がある。また、厚さ 1.5m のグラフでは、図-3 より地表面付近温度が解析の際に固相限界として設定した -0.5°C を上回っており、地盤融解が起こっていることが分かる。これは盛土による断熱効果の違いによるものであると考えられる。

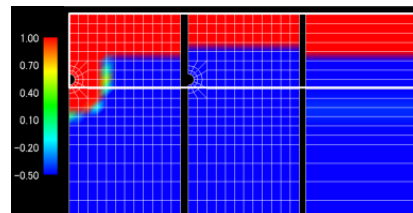
結果をまとめると、盛土が厚すぎると、盛土の持つ熱量が長い時間をかけて地盤の深部を融解していく。逆に薄すぎると、盛土の断熱効果も小さくなり、外気温による地盤融解が進行する。厚さ 1.5m の融解深はモス層とあまり差はないが、地盤の上に建設することを考え、安全側をとる盛土厚さ 2.0m を妥当な盛土高さで判断した。

4. 自然冷熱による凍結促進効果の検討

盛土厚さ 2.0m モデルはモス層モデルと等価に近い断熱効果があることが分かった。しかし、そこに至るまで地盤は凍結融解を繰り返し、力学的問題が発生の恐れがある。そこで自然冷熱による凍結促進を目的に盛土にベンチレーションを埋設したモデルを考える。ベンチレーションは直径 0.5m のモス層をはがした後、地表面に配置し、そのあとに盛土を建設する。結果を比較するため、ベンチレーションを盛土に埋設した以外の解析条件は盛土厚さの影響評価を目的とした解析と同様にしている。また、ベンチレーションは凍結促進を目的としているが、夏季にも空気を循環させて

しまうと、夏季の融解を促進してしまう。そのため夏季はベンチレーションに蓋をすることで空気の循環を防ぐ夏季断熱モデルと通年空気を循環させたモデルの 2 パターン用意した。以上の結果を比較することで、凍結促進による熱力学安定性を考察した。

図-5 は 3 年後の各モデルの地盤温度分布を可視化したものである。(a)はベンチレーションを埋設し常に空気を循環させたモデル、(b)はベンチレーションに夏季は蓋をすることで断熱をしたモデル、(c)がベンチレーションを含まないモデルである。枠で囲われた部分は建設した盛土部分を示している。



(a) (b) (c)

図-5: 3 年後の地盤温度分布

常に空気を循環させたモデルのベンチレーション付近では、夏季の熱によって融解が進行している。対して夏季に断熱をしたモデルでは、そのような融解は見られず、ベンチレーション無モデルよりも融解が抑制されていることが分かる。これは、冬季に蓄えた冷熱により地盤温度分布をより安定させているためである。以上より、ベンチレーションを用いて自然冷熱による凍結促進を行う際の夏季の断熱による効果を確認できた。

5. 結論

盛土を例に凍土地帯に建設をした際の地盤温度分布への影響を確認することが出来た。建設する構造物による熱量や断熱効果によって、永久凍土面の低下、それに伴う地盤及び建設物に対し、力学的な問題を引き起こすため、しかるべき対策が必要であると考えられる。対策の一例としてベンチレーション埋設による自然冷熱による凍結促進の影響を検討したところ、自然冷熱によって、地盤への温度浸食の抑制をし、また、冬季に蓄えた冷熱によって盛土部分の融解も抑制出来た。一般に粘性土の強度は温度の低下に伴い増加することが知られている。そのため、自然冷熱による凍結促進が地盤に熱力学的安定性を与え、地盤及び建設物の力学的安定性を高めることに繋がると考えられる。今後、地球温暖化が進行する中、凍土地帯に建設をする場合に活動層拡大の抑制の重要性は増していくことが考えられる。そのため、今後の展望としては、様々なモデルによる解析を行い、いろいろな角度からの検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) Zheng Hao, Practical Evaluation for Interactive Behavior between Structure and Two-dimensional Frost Heave, Graduate School of Engineering Hokkaido University, Master's Thesis No.EG-M92,2011