

凍結融解に因る地盤・構造物の連成挙動に関する研究

北海道大学大学院工学院 学生会員 ○高橋 佳佑
 北海道大学大学院工学院 学生会員 白石 映人
 北海道大学大学院工学院 学生会員 工藤 史登
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 鄭 好
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 蟹江 俊仁

1. はじめに

近年、地盤の凍上を伴う土木技術の利用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域の開発も俄かに活気を帯びてきた。そのため、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。

凍結凍上解析は、熱伝導解析、力学的解析、高志の式による凍上量の算出の3段階に大別される。我々は熱伝導解析に熱量管理に優れ、凍上解析の重要なファクターである要素温度を直接算出可能な混合ハイブリッドFEM(以下、MHF)を用いることで、凍上解析の精度向上を図ることが出来た。

本研究では、アラスカ州フェアバンクスを例に、実際に凍土地帯に盛土を建設した際、地盤と構造物間の相互作用が及ぼす影響を考察していく。

2. 解析目的

寒冷地の開発の際に考慮しなければならない問題の一つに、盛土建設に起因する凍土融解がある。凍土は活動層と呼ばれる凍結融解を繰り返す層と、凍結し続けている凍土で構成される。盛土を建設すると、凍土融解により活動層が拡大し、凍土が融解する。凍土が融解すると、地盤沈下などの問題が発生する。そうした事態を防ぐために、凍土地帯に盛土を建設する際には、ベンチレーションを埋設することで、活動層の拡大を防いでいる。ベンチレーションを埋設する目的は、外気を取り込むことにより、凍土融解を防ぐことである。本解析では、実際にベンチレーションの埋設による凍土融解の抑制効果を、解析から明らかにしていくことを目的とする。



図1：盛土に埋設されたベンチレーション

3. 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、凍土地帯に盛土をした際の地盤と構造物間の挙動を解析する。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。

(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。

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

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) 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、初期温度を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(鋼, 空気)
E[N/m ²]	2.8 × 10 ⁸	1.26 × 10 ⁸	2.05 × 10 ¹¹
ν	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
ξ ₀	0.05	0	0
U ₀ [m/s]	4.431 × 10 ⁻⁷	0	0
σ ₀ [N/m ²]	4563	0	0
α[×10 ⁻⁶]	0	0	10.6

解析モデルとして、地盤の厚さを20m、断熱効果のあるモス層を厚さ0.25mと想定し、地盤内の初期温度分布を解析した。解析開始から、5~6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、地盤の厚さの妥当であると判断した。

4. 解析概要

本解析では、厚さ20mの地盤上に盛土を建設した際の地盤挙動について解析を行う。図2a~図3bの通り、盛土の寸法は、高さ2m、幅3m、勾配を1:1.5で設定した。また、図3a、図3bに示すように、この盛土に直径0.5mのベンチレーションを埋設することによる凍土融解の抑制効果について考察していく。また、凍土地帯にはモス層が存在し、モス層は高い断熱効果を有する。そのため、モス層の有無によって、融解の深度も変化すると考えられる。以上から、モス層の有無による未凍結部の分布変化も考察していく。

キーワード：凍土、モス層、ベンチレーション、フェアバンクス、MHF

連絡先〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学院 TEL011-706-6177

5. 解析結果

解析開始後、180日後と360日後の融解深の分布図を図4~7に示す。左側がベンチレーション無し、右側がベンチレーション有りの解析結果である。図中の赤線は融解深の位置を表している。

(1) モス層が存在しないモデル

モス層が存在しない場合の解析結果を図4, 5に示す。図4より、解析開始から180日後に、融解深が最大となり、融解は地表面側から派生していく。これは、盛土を建設したことにより、気温変化を受ける面が地表面よりも高くなったことによると考えられる。また、融解の最大深度はベンチレーションの有無によらないが、ベンチレーションを埋設したモデルでは、180日後には地盤の凍結が進行している。図5より、解析開始から360日後には、ベンチレーションが無い場合、不凍域が生じている。不凍域が生じると、地盤中の融解水が排水されないため、盛土上に荷重が加わった際に、地盤内の間隙水圧が上昇し、有効応力が小さくなるために、盛土のすべり破壊などが予想される。それに対して、ベンチレーションを埋設したモデルでは、盛土も含め地盤内が完全に凍結している。

(2) モス層が存在するモデル

モス層が存在する場合の解析結果を図6, 7に示す。図6より、解析開始から180日後には、融解深が最大となり、モス層の断熱効果を受けない盛土側から融解が派生していくことが分かる。次に、活動層の位置を比較してみると、ベンチレーションがある場合、活動層の最大深度が地表面に近くなっている。この結果から、ベンチレーションによって、活動層の拡大が抑制されていると言える。また、図7から、解析開始から360日後における結果は、(1)と同様の結果が得られた。

6. まとめ

解析結果から、モス層の有無で比較すると、モス層が存在する場合、融解の最大深度が地表面に近くなっている。これは、モス層の断熱効果により、地表面からの融解を防ぎながら、地盤内に蓄えた冷熱によって、活動層の拡大に抵抗していると考えられる。また、ベンチレーションの有無による凍土融解の抑制効果は、モス層が存在する場合に大きな効果を示している。加えて、ベンチレーションによって、不凍域の生成を防止する効果もあることが分かった。

以上から、凍土地帯における盛土建設の際には、ベンチレーションの埋設が、凍土融解の抑制と不凍域生成の防止に大きく貢献していることが分かる。そのため、凍土地帯に構造物を建設する際には、ベンチレーションによる凍土融解の防止が、地盤・構造物間の安定性を確保するために有効な手段であると考えられる。

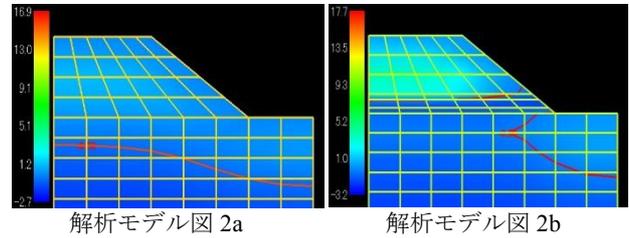
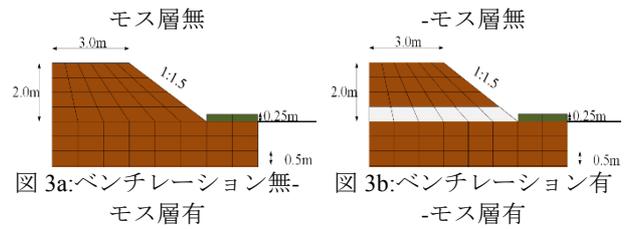
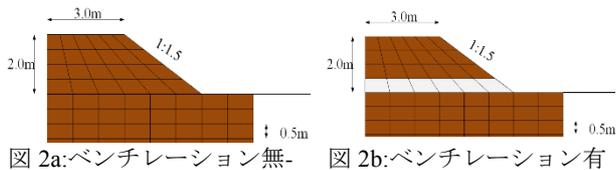


図4：解析開始180日後(モス層無し)

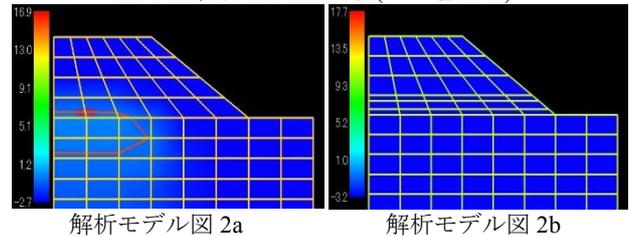


図5：解析開始360日後(モス層無し)

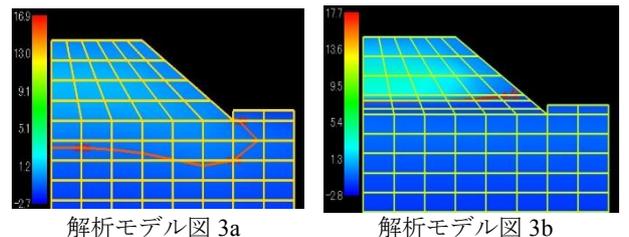


図6：解析開始180日後(モス層有り)

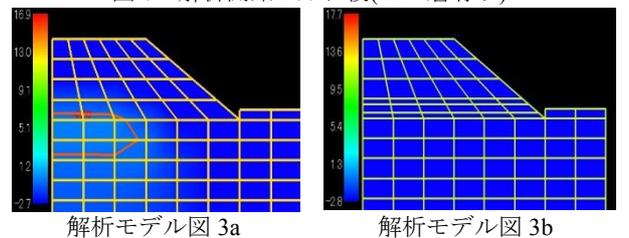


図7：解析開始360日後(モス層有り)

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
- 2) Akito Ueda, Yuto Ishida, Shunji Kanie : Effect of Elemental Shape and Modeling of Mixed Hybrid FEM on Numerical Solution, The 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Vol.95, 2014