

二次元熱伝導解析によるセメント改良地盤の低温域の予測

土木研究所	寒地土木研究所	正会員	○梶取	真一
同	上	正会員	西本	聡
同	上	正会員	林	宏親
同	上	正会員	橋本	聖

1. 研究の背景

寒冷地の冬期において、軟弱地盤に対してセメントを用いた固化処理を行うと、寒気の影響によって改良地盤地表面部が固化されず、強度発現に問題が生じることが報告された¹⁾。当研究所での過去の研究では、セメント改良地盤（以下、改良地盤とする）は養生温度が5℃以上確保されれば、強度発現が期待できる²⁾との知見がある。したがって、改良地盤の低温域（以下、地盤の温度が5℃以下となる域とする）の深度を推定することができれば、現場ごとに異なる寒さに応じて、適切な対策を講じることができる。そこで、本研究は二次元熱伝導解析（以下、熱伝導解析とする）を用いて、改良地盤の低温域の予測を行った。

2. 冬期にトレンチャー式攪拌工法を用いた試験施工の概要

北海道内でも寒さの厳しい釧路郡釧路町において、平成22年2月2日から6日までトレンチャー式攪拌工法の試験施工を行った。試験施工では、寒気の影響による改良地盤の低温域の進行を調べることを目的として、熱電対による温度計測を行った。また、熱伝導解析に必要な熱物性値の一つである改良地盤の熱伝導率について、これまで明らかにされていないため、迅速熱伝導率計（測定方式：熱線法）を用いて実測値を計測した。

試験施工を行った箇所の積算寒度³⁾は、約80℃・daysであった。試験施工箇所の過去の凍結指数は、600℃・daysを越えるような厳しい寒さが度々計測されている。

3. 二次元熱伝導解析の概要

3. 1 解析モデルと解析条件について

本研究は、試験施工で実施した改良地盤の温度分布を再現することを目的に、熱伝導解析（TEMP/W）を実施した。熱伝導解析に用いたモデルは、流体の相変化に際しに生じる潜熱の定式化を行っている。解析ステップは、初期条件として、任意の節点に地盤の温度を与え、地盤内の温度が定常状態になるまで解析を行う。その後、境界条件として、任意の節点に与えた地盤の温度に基づいて熱伝導解析を行う。任意の凍結指数での地盤の温度を出力でき、地盤内の温度状態を再現することができる。本解析に用いた支配方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \left(c + L_w \cdot V \right) \frac{\partial V_u}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}$$

T : 温度 (℃) k_x : x 方向の熱伝導率 (J/sec・m・℃) k_y : y 方向の熱伝導率 (J/sec・m・℃)

Q : 適用した境界熱流束 (W/m³) c : 体積熱容量 (J/m³・K) L_w : 水の潜熱 (J/m³)

V : 体積含水率 (%) V_u : 未凍結の体積含水率 (0 ≤ V_u ≤ 1) (%) t : 時間 (s)

本解析で与えた地盤の熱物性値の一覧を表-1に示す。改良地盤の熱伝導率 λ は実測値を用い、礫質粗砂の熱伝導率 λ は Kersten の実験式⁴⁾を用いた。体積熱容量 c には伊福部による算定式⁵⁾を用い、土の未凍結時の体積含水率 V_u と土の単位体積当たりの凍結潜熱 L は、乾燥密度 ρ_d (g/cm³) と含水比 w (%) を用いて、次式から求めた。 $V_u = \rho_d \cdot w$ 、 $L = 3.35 \cdot w \cdot \rho_d$

初期条件は図-1に、境界条件は図-2に示すように地盤の温度を与え、熱伝導解析を行った。

キーワード： 寒冷地、二次元熱伝導解析、セメント改良地盤、低温域

連絡先：〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34 Tel：011-841-1709 Fax：011-841-7333

表－１ セメント改良地盤と素地盤の各材料の熱物性値の一覧

		湿潤密度	含水比	乾燥密度	熱伝導率 【実測値】	凍結潜熱	体積熱容量 【伊福部】	体積含水率
		$\rho_t(\text{g/cm}^3)$	$w(\%)$	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	$\lambda(\text{J/sec}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C})$	$L(\text{J/m}^3)$	$c(\text{J/m}^3\cdot\text{K})$	$V(\%)$
セメント改良土	未凍土	1.649	44.6	1.141	0.95	1.70×10^{-8}	2.94×10^{-6}	50.8
	凍土	-	-	-	0.60	1.70×10^{-8}	1.88×10^{-6}	-
礫質粗砂	未凍土	2.095	15.8	1.810	2.41	9.55×10^{-8}	2.48×10^{-6}	28.5
	凍土	-	-	-	3.05	9.55×10^{-8}	1.88×10^{-6}	-

3. 2 二次元熱伝導解析の結果

定常解析後の改良地盤の温度分布を図－１に示す。定常解析は、セメント水和反応による発熱に伴い、改良地盤内の温度がある程度上昇しきった状態を再現したものである。

寒冷地においては、地表面が常に寒気にさらされ、地表面から地盤内の温度は徐々に低下する。それをシミュレートしたものが、非定常解析の結果である。試験施工とほぼ同じ寒気 ($F=80^\circ\text{C}\cdot\text{days}$) を作用させた解析結果を図－２、３に示す。図－２より、改良地盤地表面から徐々に温度が低下し、改良地盤内に低温域が進行していることが確認できる。図－３は、試験施工での実測値と解析値の温度を深度方向に整理した。図－３内の▲は、試験施工で得られた実測値を表しており、熱伝導解析によりほぼ再現することができた。

そこで、より寒さの厳しい施工条件を想定して、熱伝導解析によって凍結指数の大きさに応じた改良地盤の低温域の推定を行った。図－３に $F=200, 400, 600^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ の時の深度方向の温度分布を整理した。その結果、 $F=600^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ のような厳しい気象条件では、低温域が 1m 以上にも達することが推定される。このような条件下での施工では、低温域の進行を抑制し、改良地盤の品質を確保する対策が必要となる。

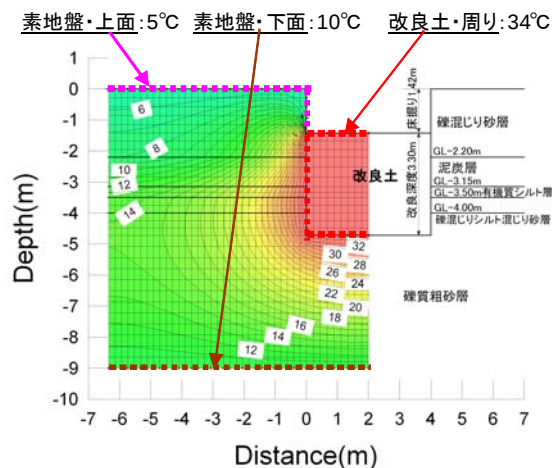
4. まとめ

本研究は、二次元熱伝導解析により、試験施工で得られた改良地盤の温度分布の再現を行い、実際の温度分布を再現することができた。そこで、より寒さの厳しい条件での施工を想定し、凍結指数に応じた低温域を推定することができた。

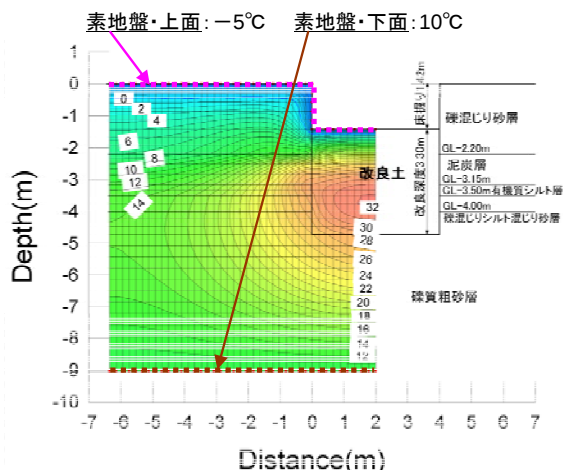
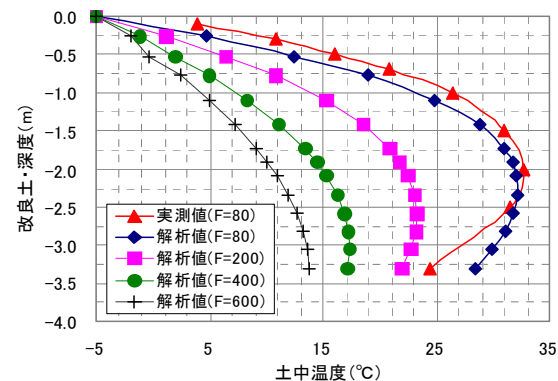
【参考文献】

- 1) 橋本聖、西本聡、林宏親：トレンチャー式攪拌工法で施工された改良地盤に関する評価、(社)地盤工学会北海道支部技術報告集第 47 号 pp.85-90、2007.2
- 2) 城戸優一郎、西本聡、林宏親、橋本聖：セメント改良した泥炭における養生温度が改良強度へ与える影響、(社)地盤工学会北海道支部技術報告集第 48 号 pp.35-40、2008.2
- 3) (社)地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学、p.40、2009.12
- 4) M.S.Kersten：Thermal properties of Soils, University of

Minesota, Institute of Technology, Engineering Experiment Station, Bulletin, No.28、1949 5) 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、P.19、1962.3



図－１ 定常解析の結果と初期条件

図－２ 解析結果 ($F=80^\circ\text{C}\cdot\text{days}$) と境界条件

図－３ 凍結指数ごとの温度分布予測