

FROST による凍上量の予測について

摂南大学 正会員 伊藤 謙
フジタ道路 藤本弘樹
北海学園大学 正会員 小野 丘

1 はじめに

わが国では道路等の凍上対策では凍上性と判定される材料の全てを非凍上性材料に置換えることが主流である。このような工法は合理的とは言えず、経済的な凍上対策のためには凍上性の定量的な評価が必要である。ところで、米国では 1993 年に凍上予測モデル FROST が公開されていが、わが国での適用も期待される。この報告では室内試験と現場試験の数値計算結果を示し、その可能性を検討する。

2 FROST の概要

FROST は既存の他のモデルと比較して、凍上の駆動力が定義されていないこと、計算に必要なパラメータを凍上試験から求める必要がない等の特徴がある。FROST では水分移動については次式に示される不飽和水分移動式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t} [K_H \partial h / \partial x] = \frac{\partial q_u}{\partial t} + \frac{r_i}{r_w} \frac{\partial q_i}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial t} = \frac{\partial q_u}{\partial h_p} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

ここで全水頭 h は間隙水圧 $h_p = u / \gamma_w$ と位置水頭 $h_e = -x$ の和である。透水係数 K_H は未凍土では間隙水圧の関数である。 θ_u が体積含水率で θ_i が体積含水率である。 ρ_i 、 ρ_w はそれぞれ氷と水の密度である。なお、右辺第 2 項は凍土中のみで有効である。 θ_u と K_H は次に示す Gardner の関数から計算される。

$$q_u = \frac{q_0}{A_w |h_p|^a + 1} \quad (3)$$

$$K_H = \frac{k_s}{A_k |h_p|^b + 1} \quad (4)$$

ここで a と A_w 、 A_k と b は実験定数であり、凍上量に直接影響を与える。また、 k_s が飽和透水係数、 θ_0 は間隙率である。式 1 は融解と凍結の両方に適用されるので、凍土の透水係数は未凍土の透水係数を低減したものとなる。次に熱移動は次のように示される。

$$\frac{\partial}{\partial x} [K_T \partial T / \partial x] - v C_w \frac{\partial T}{\partial x} = C_m \frac{\partial T}{\partial t} - L \frac{r_i}{r_w} \frac{\partial q_i}{\partial t} \quad (5)$$

$$v = -K_H \frac{\partial h}{\partial x} \quad (6)$$

ここで体積熱容量 C_m と熱伝導率 K_T は De Vries の式から求められる。そして凍上量は次式で計算される。

$$q_s = q_i - (q_0 - q_n) \quad (7)$$

3 室内凍上試験の数値計算

室内凍上試験において片面温度降下試験（R 試験）と両端面温度一定試験（S 試験）の凍上量を計算する。図 1 には R 試験において温端側温度 T_w を $+0.5$ とし、冷端側温度 T_c を $5 \sim 0.025$ / h の降下速度で -5 まで冷却した時の凍上量の経時変化を示す。 T_c の降下速度が小

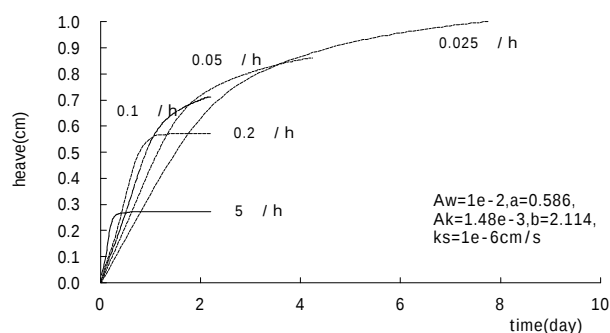


図 1 R 試験における T_c 降下速度と凍上量

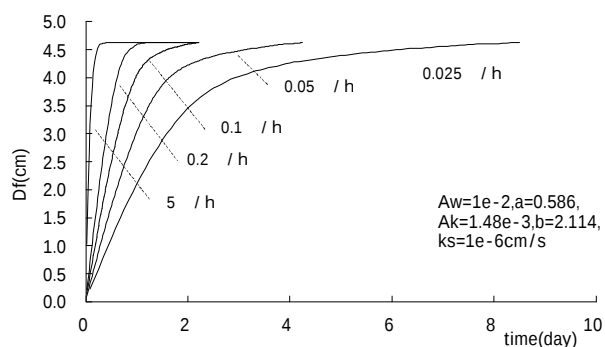


図 2 R 試験における T_c 降下速度と凍結面の進行

凍上、数値解析、凍上予測、盛土、路床

〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8 摂南大学工学部 072-839-9701

さいほど初期の凍上速度は小さいが最終凍上量は大きい。図2にはR試験での凍結面位置の経時変化を示す。凍結面の進行は試験の初期には一定速度であるが、急速に最終位置に達することが分かる。例えば T_c 降下速度が $0.1 \text{ }^\circ\text{C/h}$ の場合は50時間一定速度で凍結面が進行するのではなく、25時間程度で90%近くまで凍結面の進行が完了している。次に図3にはS試験の T_c の違いによる凍上量の経時変化を比較する。この計算では $T_w=+0.5$ 一定として、 T_c を試験開始1時間で所定の温度に降下させ、その後55時間一定を保った。 T_c が高温であるほど、初期の凍上速度は小さいが、最終凍上量は大きくなった。図4にはS試験での凍結面位置の経時変化を示す。 T_c が高温であるほど凍結面の進行が遅い。R試験でもS試験でも凍結面の進行の遅いほど最終凍上量は大きい。最後にR試験での荷重の影響を図5に示す。この計算では上載荷重の影響はそれほど大きくなかった。これは入力定数によるものか、あるいはFROSTにおいてアイスレンズが発生する時の分離抵抗力のような概念を使っていないことに起因する可能性もある。

4 盛土高と凍上量の関係

寒冷地の道路の凍上対策での最大の関心は盛土部での置換え厚である。JHでは過去の豊富な現場試験の結果より置換え厚を低減している。そこでJHの試みをFROSTを用いて検証した。温度条件として1990年12月より1991年3月15日までの旭川ICでの舗装表面下GL-1cmとGL-200cmでの温度記録を用いた。盛土高 $H = 200 \sim 800 \text{ cm}$ とし、計算ではGL-200cmと地下水面の距離を水頭とし各々 $0 \sim -600 \text{ cm}$ を与えた。図6には温度境界条件であるGL-1cmとGL-200cmの温度変化を示す。図7に $H = 200 \sim 800 \text{ cm}$ と最大凍上量の関係を示す。 $H = 400 \text{ cm}$ 以上では極端に凍上量が小さくなる。これは現場試験の傾向と一致する。

5 まとめ

FROSTによる凍上量予測では冷却速度と冷却温度については過去の経験と計算の傾向が一致するようであるが、荷重による影響は小さかった。これは入力定数あるいはモデル自体の制約と思われる。また盛土高の影響についてはJHの現場試験と傾向がよく一致していた。最後に、現場試験結果の提供をいただいたJH北海道支社札幌技術事務所に感謝します。

[参考文献] 1)Guymon, G.L., Berg, R.L. and Hromadka, T.V., Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements, CRREL Report 93-2, 1993. 2)日本道路公団札幌建設局, 平成2年道央自動車道現場凍上試験報告書, 1991

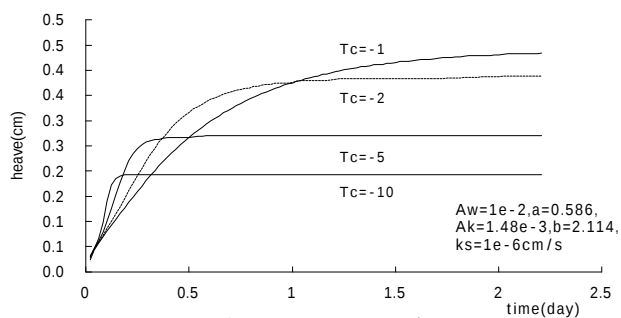


図3 S試験における T_c と凍上量

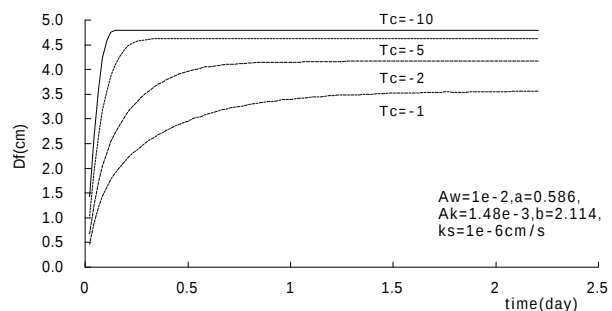


図4 S試験における T_c と凍結面の進行

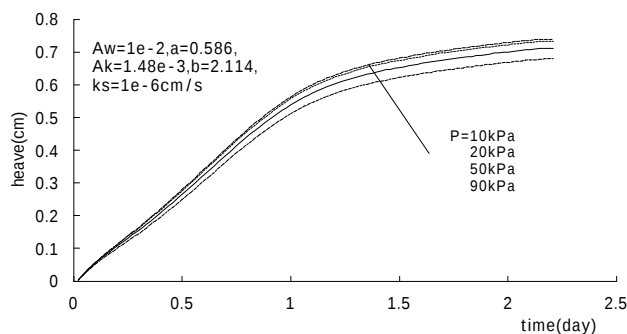


図5 R試験における上載荷重の影響

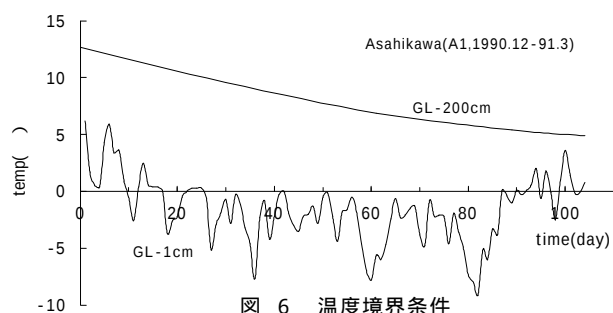


図6 温度境界条件

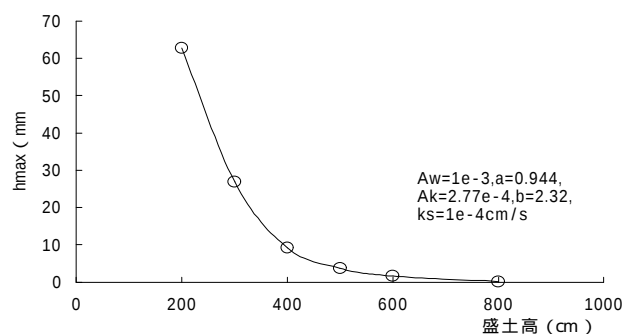


図7 盛土高と最大凍上量の関係