

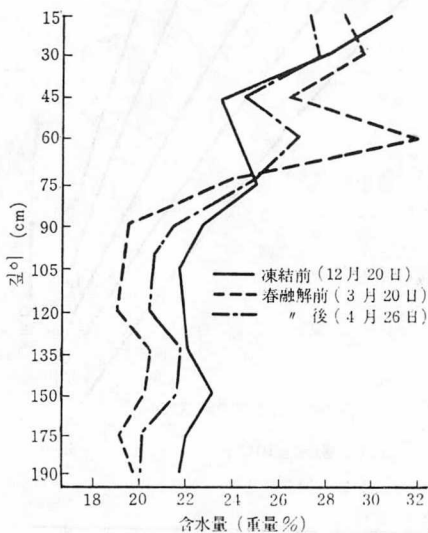
〈外国文献抄録紹介〉

埋設管 保護를 위한 凍結深度 計算式

이 글은 日本水道協會發行 水道協會雜誌 79. 8. 月号(第539号)에 실린 것을 翻譯하여 掲載하는 것이며 原文 題目은 다음과 같다.

Arieh Cohen, et al.; "Predicting Frost Depth; Predicting Underground Pipelines" Jour. AWWA, Vol. 71, No. 2, P.113~116(1979. 2.)

地表面과 凍結侵入 深度와의 사이에 存在하는 土壤에 관하여는 土壤의 凍結·融解에 의하여 圧力이 增減한다. Kenneth와 Chester는 55年前에 冬季에 있어서 地面의 隆起는 土壤中の 얼음의 結晶이 成長함으로서 일어나며 成長하는데 必要한 水分은 凍結面보다 下部의 土壤中の 水分으로 부터 供給된다고 發表한바 있다.



〈그림-1〉 암스텔담市 粘土中の 含水量 分布

또 Sanger는 土壤이 水分을 吸收하는 힘을 가지고 있어서 土壤은 微細하면 할수록 乾燥하면 할수록 吸引力이 커진다고 說明하고 있다.

그림-1은 얼음이 土壤의 表面層에 나타나면 土壤의 含水量이 減少하는 것을 나타내고 있다.

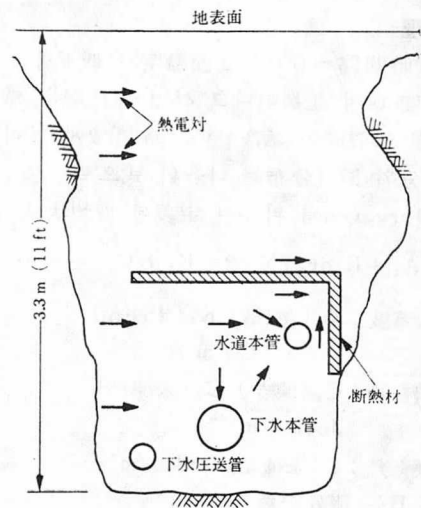
土壤은 凍結함으로 인하여 두가지 作用을 나타낸다. 첫째는 地面을 數인치씩 밀어 올리는 힘, 卽 形成된 얼음層에 알맞는 힘이다. 둘째는 地下埋設物에 관하여 보다 重要한 것으로서 凍結線보다 위에 埋設된 水道本管에 대한 応力을 들 수 있다.

埋設管에 대한 凍結에 따른 応力문제를 解決하기 위하여 美国 몬타리오州의 環境庁은 Keewatin의 管路에 대한 応力을 土壤의 깊이와 溫度에 關係해서 調査하였다.

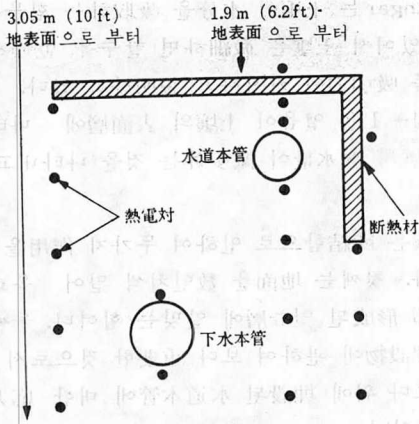
이 原稿에서는 土壤의 溫度分布와 凍結深度와의 關係에 限定하여 記述한다.

1. Keewatin 調査計劃

Keewatin은 北緯 50도에 位置하며 冬季의 氣溫은 零下 35도에 達한다. 州政府는 管路를 15km에 걸쳐서 布設하고, 깊이를 3m로 하여 土壤의 溫度와 管에 대한 応力을 調査하기 위하여 試驗場을 設置하였다. 여기에 PVC管 (150mm φ × 42ml)을 깊이 2m로 모래로서 埋設하였다.



〈그림-2〉 州政府의 試驗溝에 있어서의 熱電對의 位置



〈그림-3〉 다우케미칼사의 試驗溝에 있어서의 熱電對의 位置

応力은 스트랜·게이지로 温度와 熱電對를 測定하였다.

温度는 1976年10月末頃부터 1977年 4月 中旬까지 隔日로 記錄하였다. 이 試驗場에는 3月 中旬까지 30cm의 눈이 덮혀 있었다.

또 하나의 試驗場은 캐나다의 다우·케미칼社에 의하여 布設되었으며 未鋪裝道路 밑에 埋設되어 있는 管路가 選定되었다. 여기는 温度를 測定하는데 使用되었다.

그림 2, 3은 各 試驗場에 있어서의 熱電對의 位置를 나타낸 것이다.

2. 理 論

어떤 時間($\theta=0$)에 表面温度가 低下하고 半凍結温度 t_s 에 維持된다고 하면 凍結層은 表面 $X=0$ 를 形成하기 始作한다. 時間 θ 에 있어서 凍結部分의 温度分布는 다음의 式으로 表示된다. (Berggren에 의하여 定義된 理想狀態)

$$t = A_1 + B_1 \operatorname{erf} (X / 2 \cdot K_1 \theta / C_1) \dots \dots \dots (1)$$

熱傳導度: K_1 (凍結) K_2 (未凍結)
 $W/m^2 (^\circ C / m)$

熱容量: C_1 (凍結) C_2 (未凍結)
 $Joules/m^3 ^\circ C$

融解熱: L (未凍結) $Joules/m^3$

A와 B는 積分定數

$$A = A_1 = t_s; B = B_1 = (t_f - t_s) / \operatorname{erf}(\beta)$$

t_f : 凍結溫度

成長係數 β 는 아래의 2個의 無次元 變數에 依存한다.

$$\left[\left(\sqrt{K_2 C_2 / K_1 C_1} \right) (t_v - t_f) / (t_f - t_s) \right] \text{ 및 } [L / C_1 (t_f - t_s)]$$

그림 4는 아래와 같이 假定한 경우에 (1)式에 의한 理論的 土壤温度分布를 나타낸 것이다.

$$K_1 = 1.17 W/m^2 (^\circ C / m)$$

$$K_2 = 0.83 W/m^2 (^\circ C / m)$$

$$C_1 = 1.48 \times 10^6 \text{ Joules}/m^3 ^\circ C$$

$$C_2 = 1.95 \times 10^6 \text{ Joules}/m^3 ^\circ C$$

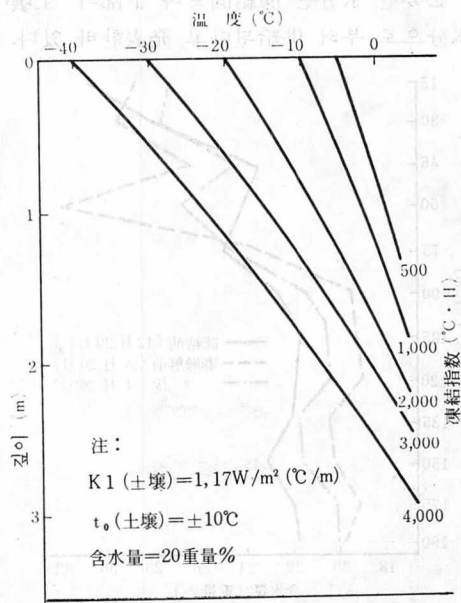
$$L = 67 \times 10^6 \text{ Joules}/m^3$$

凍結層의 두께 X 는 凍結이 일어나고 있는 時間의 平方根에 比例하는 것을 알 수 있다.

$$X = 2\beta \sqrt{K_1 \theta / C_1} \dots \dots \dots (2)$$

以上과 같이 β 는 土壤의 温度, 熱傳導度 및 熱容量에 依存한다.

Kersten의 土壤의 데이터 및 Neumann의 方程式에 대한 Aldrich의 修正項을 使用하였고, Brown은 여러가지 土壤에 관하여 凍結指數와 凍結深度와의 關係를 提示하였다. 그 結果 未鋪裝 道路下에 있어서 凍結深度를 推定한 美国陸軍의 設計曲線의 勾配를 Brown이 提示한 曲線의 勾配에 一致하도록 變更하여야 할 것으로 밝혀졌다.



〈그림-4〉 Berggren의 理想狀態

3. 結果 및 考察

凍結指教 (F)는 時間(θ) 또는 半凍結溫度의 期間에 比例함으로 (2) 式을 다음과 같이 바꾸면

$$X = \text{係數} \sqrt{F}$$

凍結指數 (θ-°C)에 대한 凍結深度(m)에 데이터의 回歸分析을 適用하면, 이들 데이터에 대한 좀더 적절한 統計의 모델은 다음과 같이 나타난다는 것이 判明되었다.

(1) Berggen의 理想狀態처럼 理論的 土壤 溫度 分布의 데이터가 주어지는 경우 (그림-4)

$$X = -0.03 + 0.04\sqrt{F}$$

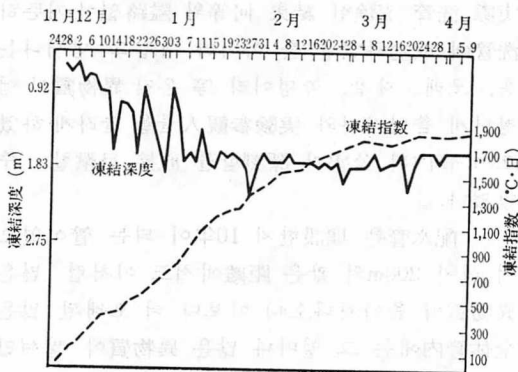
(2) 未鋪裝道路에 있어서 Shannon의 데이터의 경우

$$X = -0.02 + 0.05\sqrt{F} \quad (r^2 = 0.99)$$

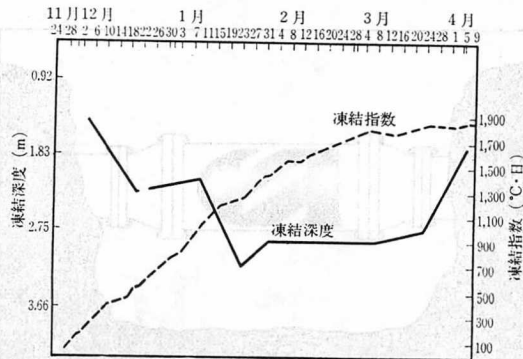
(3) 30cm의 눈이 쌓여있는 경우 Keewatin計劃의 데이터의 경우(그림-5)

$$X = 0.34 + 0.04\sqrt{F} \quad (r^2 = 0.80)$$

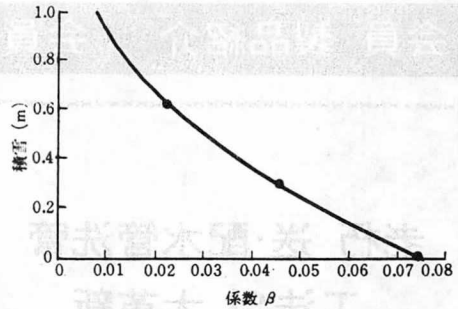
(4) 未鋪裝運路에 있어서 캐나다·다우·케미



〈그림-5〉 30cm積雪時의 凍結深度 (3個值平均)



〈그림-6〉 未鋪裝道路下의 凍結深度



〈그림-7〉 積雪과 凍結深度와의 關係

칼사의 데이터의 경우(그림-6)

$$X = 0.35 + 0.07\sqrt{F} \quad (r^2 = 0.88)$$

(5) 未鋪裝道路에 있어서 Brown에 의하여 약간 修正된 美國 陸軍의 設計曲線의 경우

$$X = -0.50 + 0.07\sqrt{F}$$

(6) 아스팔트鋪裝道路에 있어서 運輸 및 通商 省의 데이터의 경우

$$X = -0.61 + 0.07\sqrt{F}$$

그림-7은 다우·케미칼사의 試驗場 附近에서 行한 實驗데이터를 基礎로 한 積雪과 凍結深度와의 假定關係를 나타낸 것이다. 그러나 積雪로 인하여 良好한 結果를 얻은 일이 있으므로, 設計는 항상 橫雪이 없는 狀況으로 하여야 한다.

4. 結 論

理論值 및 實驗值를 分析한 結果, 設計時에 있어서의 凍結深度를 推定하는데 좋은 모델은 다음 式에서 나타나는 것을 알수 있었다.

$$X = A + B\sqrt{F}$$

그러나 $F = 0$, $X = 0$ 의 경우 이 式은 成立되지 않는다.

A를 零으로 하는 경우 데이터로부터는 未鋪裝道路에 있어서

$$X = 0.074\sqrt{F} \quad (r^2 = 0.98)$$

그러나 같은 場所이지만 積雪이 있을 경우에는

$$X = 0.046\sqrt{F} \quad (r^2 = 0.96)$$

이라는 實驗式을 얻을 수 있었다.

5. 勸 獎

管路를 布設하는 경우 凍結深度를 推定하기 위한 公式로서는 다음의 式을 勸獎한다.

$$X = 0.074\sqrt{F} \quad (\text{未鋪裝道路})$$

$$X = 0.046\sqrt{F} \quad (30\text{cm積雪})$$