

우리나라의 凍結深度에 관한 研究

A Study on the Depth of Frost Penetration in Korea

洪 元 杓*
Hong, Won Pyo
金 明 煥**
Kim, Myung Hwan

Abstract

Korea has the ground which freezes in winter and melts in warmer seasons by turns. Therefore, in designing civil-structures or buildings on such ground, the depth of seasonal frost penetratio must be considered.

In this paper, approximate contours of the maximum depth of frost penetration in Korea is presented. It was found that the maximum depth of frost penetration did not have the linear relationship to square root of the freezing index. In order to establish more reliable method to estimate the maximum depth of frost penetration, a new empirical equation is introduced. In the presented equation, the dry unit weight and water content of soil are considered in addition to the freezing index. And the equation is compared with other previous equations used so far.

要 旨

우리나라의 地盤은 겨울에는 凍結하고 온난한 계절에는 融解하는 季節的 凍結地盤이다. 이러한 季節的 凍結地盤에서는 凍結과 融解 상태의 순환과정을 반복하게 되므로 土木建築構造物을 築造할 때는 凍結의 영향을 받는 깊이를 알아 두어야만 한다. 본 論文에서는 우리나라 全國의 最大凍結深度 分布圖가 작성 提示되며 最大凍結深度를 추정할 수 있는 새로운 방법이 모색된다. 本 研究의 結果, 最大凍結深度는 凍結指數의 平方근과 線形 관계에 있지 않음이 밝혀졌다. 이러한 凍結深度와 凍結指數의 平方근 사이의 非線形性을 보완하고 보다 현실에 근접한 凍結深度 算定을 위하여 새로운 經驗式이 提案된다. 이 식에는 凍結指數 이외에 흙의 건조단위중량 및 함수 비가 고려되어진다. 또한 이 식은 지금까지 사용되어 오고 있는 既存式과 比較 검토된다.

1. 序 論

우리나라와 같이 4 계절이 뚜렷한 지역에서는

地盤이 凍結融解의 영향을 받을 수 있으므로 道路, 空港 및 建築物을 축조하거나 각종 地下埋設物을 설치할 때 여러가지 地盤工學的 문제가 발생하기 쉽다. 따라서 設計단계에서 地盤의 凍結깊이에 대한 충분한 考慮는 물론이고⁽⁵⁾ 凍結

* 正會員·中央大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

** 正會員·前 中央大學校 大學院生

地盤에 대한 物理的 力學的 및 工學的 特性을 파악하여 둘 필요가 있다^(1,2).

地盤의 凍結깊이는 주로 흙의 종류, 함수비 및 凍結深度와 期間에 의존한다. 따라서 이들 요소를 정확하게 고려함에 의하여서만 올바른 凍結깊이를 구할 수 있을 것이다. 그러나, 이들 요소를 모두 고려하는 것이 대단히 어려운 작업이므로 이들 중 일부 요소만 고려하거나 혹은 이들 요소를 간접적 방법으로 고려하는 등의 간략화 작업이 많이 이루어져 오고 있다. 지금까지 凍結深度를 산정하기 위하여 여러가지 식이 提案 사용되고 있다. 이들 식은 크게 熱傳導理論에 의거하여 제안된 식^(3,4,14)과 경험식^(6,7,9)의 두가지로 구분된다. 경험식은 熱傳導理論보다 간편하여 널리 사용되고 있다. 그러나 대부분의 경험식은 凍結深度를 凍結指數의 평방근과 연결하여 제안되고 있으므로 凍結에 필요한 溫度와 시간만을 고려하게 된다. 그러나, 흙의 熱傳導特性은 흙의 密度와 含水比에 따라 변화하므로 이들 요소는 무시할 수는 없을 것이다. Brown⁽⁸⁾도 동일한 凍結指數의 지역에서도 흙에 따라 凍結깊이가 다를 것을 지적하였으며 Slusarchak & Watcon⁽¹⁵⁾은 熱傳導率이 흙의 單位重量과 선형적 관계에 있음을 제시한 바도 있다.

여기에 本 論文에서는 國立建設試驗所에서 實施 발표한 우리나라의 凍結深度 實測值⁽¹⁰⁻¹³⁾를 각종 凍結深度 算定式에 의한 算定値와 비교 검토하여 본후 凍結指數, 흙의 乾燥單位重量 및 含水比를 고려한 새로운 凍結深度算定式을 확립 제안하고자 한다. 결국 本 研究는 보다 合理的인 凍結深度 算定式을 提案함으로써 凍結地盤에 관련된 제반 土木, 建築設計時에 편리를 도모하고자 함을 目的으로 한다.

2. 既存研究

凍結深度를 산정할 수 있는 방법으로 지금까지 사용되고 있는 방법은 크게 둘로 분류할 수 있다. 하나는, Neumann 理論, Stefan 理論 및 修正 Berggren 理論과 같은 熱傳導理論에 의거한 방법^(3,4)과 寺田⁽⁹⁾, Cohem & Fielding⁽⁶⁾, Argue & Denyes⁽⁷⁾ 등이 제안한 경험식에 의한 방법이다. 즉, Stefan 은 凍結深度를 산정하는 데

있어서, 地表面에서 凍結線까지의 溫度變化가 선형이고 凍結線 아래의 溫度는 一定하다는 가정을 두어 凍結深度를 凍結指數 $F(^{\circ}\text{F}\cdot\text{day})$, 熱傳導率 $K_f(\text{Btu/hr/ft}^{\circ}\text{F})$ 및 融解潛熱 $L(\text{Btu/ft}^3)$ 의 함수로 식 (1)과 같이 표시하였다^(3,14).

$$Z = \sqrt{\frac{48 \cdot K_f \cdot F}{L}} \quad (\text{ft}) \quad (1)$$

여기서 熱傳導率은 含水比와 乾燥密度로부터 구하도록 제시하였다. 그러나, Stefan 式은 凍結土 및 非凍結土의 體積當熱量이 무시되어 있기 때문에 실제의 凍結深度보다 過多算定의 경향이 있다. 여기에 Berggren 은 지중의 溫度變化에 擴散方程式(diffusion equation)을 이용함으로써 보다 나은 凍結深度 산정식을 다음과 같이 얻을 수 있었다^(2,14).

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48 \cdot K_e \cdot F}{L}} \quad (\text{ft}) \quad (2)$$

여기서 K_e 는 平均熱傳導係數이며 흙의 含水比와 乾燥密度로부터 구하도록 되어 있다.

한편, 寺田⁽⁹⁾, Argue & Denyes⁽⁷⁾, Cohen & Fielding⁽⁶⁾은 凍結深度의 現場 實測値의 분석으로부터 경험식을 提案하였다. 이들 경험식은 대부분 凍結深度, 凍結指數 $F(^{\circ}\text{C}\cdot\text{day})$ 의 平方根에 비례하는 형태의 식으로 다음과 같이 표시되어 있다.

$$Z = C \sqrt{F} (\text{cm}) \quad (3)$$

여기서 C 는 凍結係數이며 제안자에 따라 표 1과 같이 다르게 표시되고 있다.

즉 寺田은 溫暖한 지역과 寒冷한 지역으로 구분하여 제안하였으며 또한, 寒冷한 지역에 대하

표 1. 凍結深度 算定式의 凍結係數

凍結深度算定式	凍結係數 C	비 고
寺田 式 ⁽⁹⁾	2.94	溫暖地域
	4.0	} 寒冷地域
	3.7	
Argue & Denyes 式 ⁽⁷⁾	4.3	除雪하지 않은 地域
Cohem & Fielding 式 ⁽⁶⁾	7.4	地表面이 노출된 地域
	4.6	30cm 눈이 덮힌 地域
國立建設試驗所式 ⁽¹³⁾	5.5	} 道路邊
	5.0	

여는 凍結指數를 300 을 기준으로 하여 구분 提案하였다.

Argue & Denyes⁽⁹⁾는 도로의 포장상태 및 지표면 除雲상태 등으로 구분하여 경험식을 제안하였다. 그밖에 Cohen & Fielding⁽⁶⁾은 凍結의 피해를 받지 않고 pipe line 을 설치하기 위한 설계깊이를 설정하기 위하여 경험식을 제안하였다. 우리나라에서도 國立建設試驗所에서 1984 년에 5개년간의 凍結深度 조사 결과에 의거하여 凍結指數를 400 을 기준으로 구분하여 凍結深度算定式을 提案한 바 있다⁽¹³⁾.

3. 凍結深度 조사자료

우리나라에 적합한 凍結深度算定式을 확립할 것을 目的으로 國立建設試驗所에서는 1980 년부터 10 개년 계획으로 전국의 도로변을 中心으로 凍結深度를 매년 측정하여 오고 있다⁽¹⁰⁻¹³⁾. 1985 년 초에 1980 년부터 1984 년까지의 전반기 5 년 간에 걸쳐 실시한 616 개에의 實測結果에 대한 조사분석을 한 바 있다⁽¹³⁾. 本 研究에서는 이들 조사자료를 이용하여 연구를 수행하였다.

4. 우리나라의 凍結深度

4.1 凍結深度 分布圖

5 개년간 전국적으로 각 지방에서 측정한 최대 동결심도를 이용하여 동일한 凍結深度를 가지는 지역을 연결하므로써 全國凍結深度 分布圖를 작성하여 보면 그림 1 과 같다. 이 그림으로부터 우리나라의 最大凍結深度의 概略的인 분포상황을 한눈에 볼 수 있다. 우리나라에서 凍結深度가 가장 깊게 나타난 곳은 강원도 인제로 나타났다. 즉 凍結深度는 전라남도에서 20cm 로 가장 낮고 강원도 지방을 향하여 동결심도가 점차 증가되어 인제부근에서 130cm 이상에 이르고 있음을 알 수 있다.

4.2 凍結深度와 凍結係數의 關係

국립건설시험소에서 5개년간 실시한 616 개의 實測值 중 Stefan 式과 Berggren 式을 적용할 수 있도록 데이터가 충분히 주어진 실측치는 약 100 개였다. 이들 데이터에 대하여 Stefan⁽⁹⁾식 및 Berggren⁽⁹⁾식을 이용하여 동결심도를 산정하고 그 산정값을 凍結指數의 平方根과의 관계

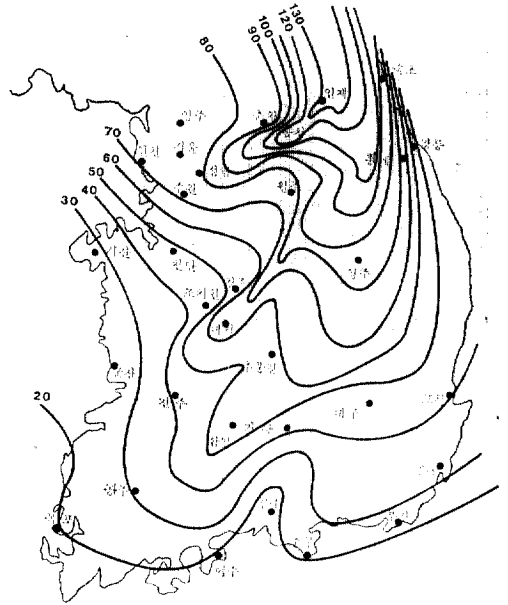


그림 1. 全國凍結深度分布圖

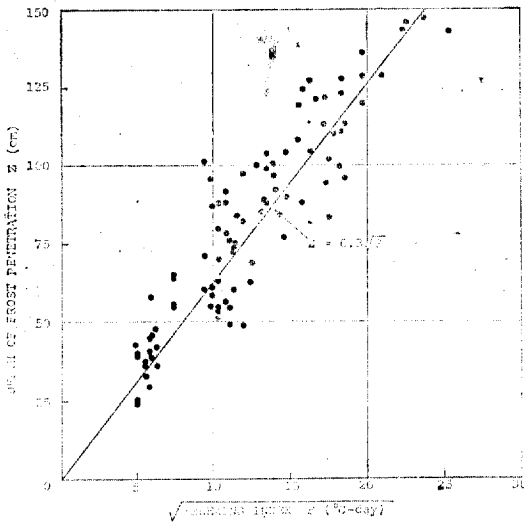
로 도시하여 보면 그림 2(a) 및 (b)와 같다.

이들 그림으로부터 이론식에 의거하여 산정된 凍結深度 Z 는 凍結指數 $F(^{\circ}\text{C}\cdot\text{day})$ 의 평방근과 거의 선형적 관계를 보여주고 있음을 알 수가 있다. 이들 분포를 통상 사용하는 식 (3)의 형태로 근사시켜 보면 그림 중에 실선으로 표시된 바와 같이 凍結指數 C 가 Stefan 식의 경우 6.3 이고 Berggren 식의 경우 4.1로 생각할 수 있다. 따라서 本 研究에서는 Stefan 식과 Berggren 식에 의한 산정치를 간편하게 취급하기 위하여 6.3 및 4.1의 凍結係數를 사용한 식 (4)와 (5)를 사용하도록 한다.

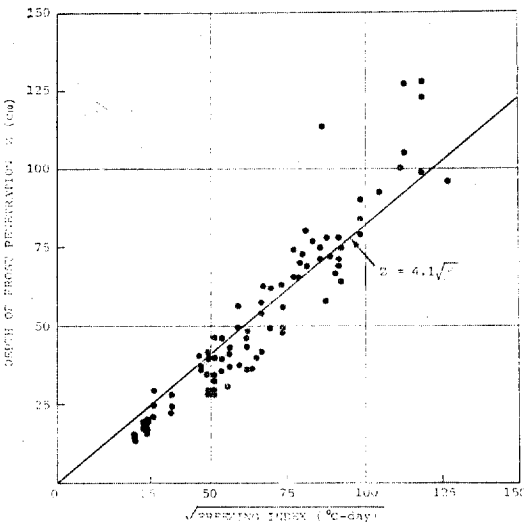
$$\text{Stefan 式 ; } Z = 6.3 \sqrt{F} (\text{cm}) \quad (4)$$

$$\text{Berggren 式 ; } Z = 4.1 \sqrt{F} (\text{cm}) \quad (5)$$

한편, 그림 3 은 국립건설시험소에서 측정한 凍結深度의 全 데이터를 凍結指數의 平方根과 관련지어 표시한 그림이며, 이 그림 중에는 표 1 에 정리된 4 가지의 既存凍結深度算定式에 앞서 설명한 식 (4) 및 (5)를 포함한 6 가지 凍結深度算定式에 의한 직선도 함께 표시하고 있



(a) Stefan 式에 의한 凍結深度



(b) Berggren 式에 의한 凍結深度

그림 2. 算定式에 의한 凍結深度

다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 비교적 동결계수가 낮은 경우의 凍結深度 實測値는 동결계수 C 가 높은 Cohen & Fielding 式이나 Stefan 式의 값에 접근하는 반면 凍結指數가 높은 경우는 凍結係數 C 가 낮은 Argue 과 Denyes 式, Berggren 式 및 寺田式에 접근하고 있다. 한편, 國立建設試驗所式은 중간정도의 비교적 양호한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서,

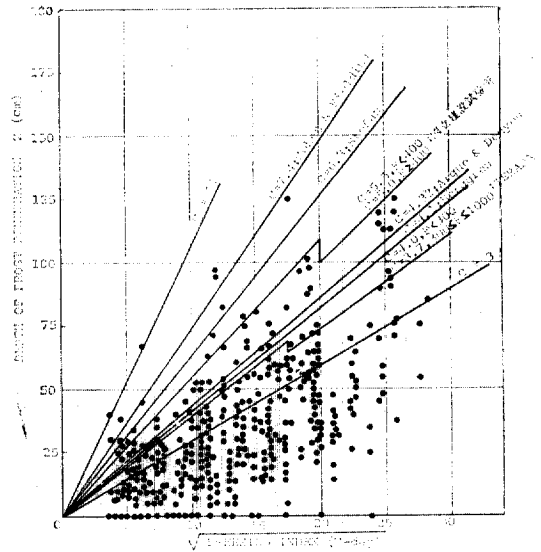


그림 3. 凍結深度實測値와 既存算定式의 比較

凍結深度 實測値에 맞는 동결계수를 살펴보면 3~11 사이의 범위에 분포됨을 알 수 있다. 즉, 측정된 凍結指數의 최소최대범위를 생각하여 凍結指數가 800(°C-day) 정도로 높은 경우의 凍結係數는 3 정도로 낮은 반면 凍結指數가 15 (°C-day) 정도로 낮은 경우의 凍結係數는 11 정도까지 되고 있다.

그림 3의 實測値를 잘 관찰하여 보면 알 수 있는 바와 같이 凍結深度는 凍結指數의 平方根과 선형적 관계가 있다고 하기보다는 非線形的 관계를 나타내고 있다고 함이 타당하다. 따라서 앞에서 설명한 여러 동결심도 산정식들과 같이 凍結深度를 凍結指數만의 평방근에 선형적 관계로 표시한 식들은 실제의 凍結深度를 잘 산정하고 있다고 하기에는 부족한 감이 든다. 이와같은 사실을 보완하기 위해 國立建設試驗所式과 寺田式에서는 凍結指數의 값이 커짐에 따라 凍結係數를 적게 조정하고 있다.

5. 新算定法의 提案

5.1 凍結深度와 F/τ_{aw} 의 關係

이상에서 알 수 있는 바와 같이, 凍結深度를 算定할 때에는 凍結指數와 같은 외적 기후조건

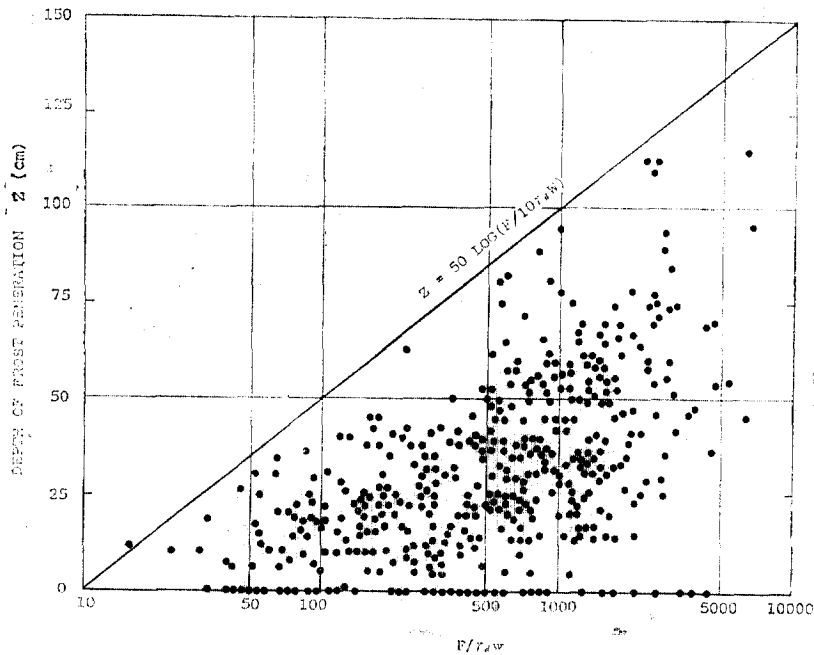


그림 4. 凍結深對와 $F/\gamma_d w$ 의 關係

외에도 內的인 흙의 工學的 性質을 고려하여야만 精確한 凍結深度를 구할 수가 있을 것이다. 土質工學에 있어서 흙의 工學的 基本성질로는 흙의 밀도를 나타내는 흙의 乾燥單位重量 γ_d 와 含水比 w 를 들 수 있을 것이다. Stefan 理論과 Berggren 理論에 의하면 凍結深度는 融解潛熱의 逆數에 의존하고 있음을 알 수 있다. 이 融解潛熱은 흙의 乾燥單位重量과 含水比에 의하여 算定되므로 결국 凍結深度는 F, γ_d 및 w 의 함수임을 알 수 있을 것이다. 따라서, 凍結深度의 全 實測值를 $F/\gamma_d w$ 와 관련지어 이들의 關係를 반대수 용지에 정리하여 보면 그림 4와 같다. 여기서 含水比는 지표면에서 10cm 깊이의 값을 사용하였으며 乾燥單位重量의 測定位置는 별도로 정한 바 없이 제시되어 있어 보고서의 값을 그대로 사용하였다.

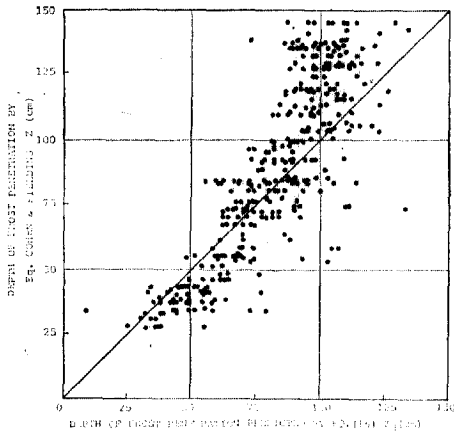
이 그림에 의하면 凍結深度의 最大值는 반대수 지상에서 $F/\gamma_d w$ 와 함께 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 最大凍結深度는 그림 중의 직선으로 표시할 수 있으며 이 직선은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = 50 \log_{10} \left(\frac{F}{107 \gamma_d \cdot w} \right) \quad (6)$$

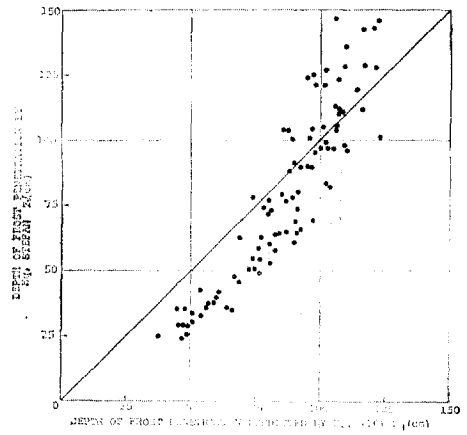
이 식 사용시의 단위는 동결심도는 cm. 동결 지수는 °C-day 건조단위중량은 g/cm^3 함수비는 %를 기준으로 하여 사용한다. 식 (6)의 값은 平均凍結深度를 나타내는 식과는 차이를 보일 것이나 파이프배선의 설계 및 각종 土木, 建築構造物 設計時 安全을 위하여 필요한 豫想最大凍結深度의 算定을 위하여 提示될 수 있다고 생각된다.

5.2 既存算定法과의 比較

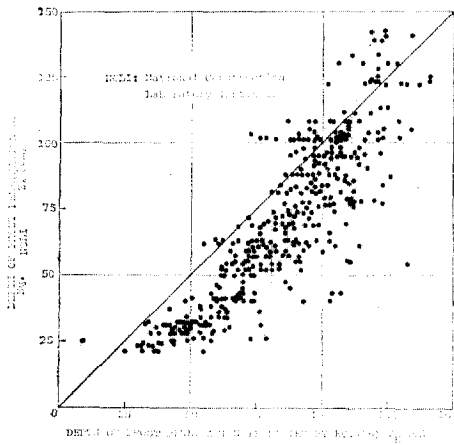
그림 5는 식 (6)으로 계산된 凍結深度 Z_H 와 앞에서 열거한 6가지 방법에 의하여 算定된 凍結深度와의 關係를 도시하여 본 것이다. 이 그림으로부터 제안식 (6)에 의하여 산정되는 凍結深度는 동결심도가 30 cm에서 80 cm 정도 사이일 때는 Cohen & Fielding 식에 의하여 산정된 凍結深度 Z_C 와 잘 일치하고, 80 cm에서 100 cm 사이에서는 Stefan 식에 의하여 산정된 凍結深度 Z_S 와 일치하며, 100 cm에서 130 cm 사이일 때는 國立建設試驗所의 算定凍結深度 Z_K 와 잘



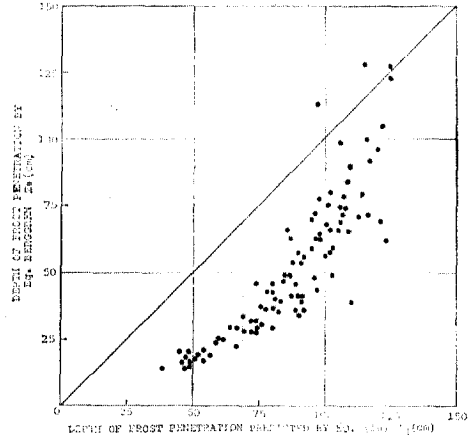
(a) Cohen & Fielding 式



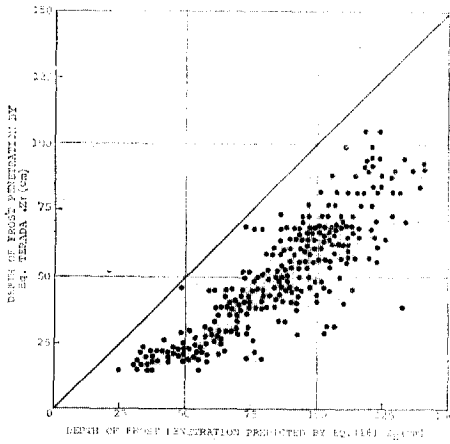
(b) Stefan 式



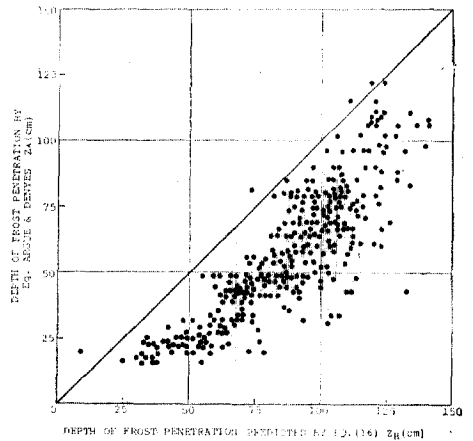
(c) 國立建設試驗所式



(d) Berggren 式



(e) 寺田 式



(f) Argue & Denyes 式

그림 5. 提案式斗 既存式斗 比較

일치한다. 또한, 동결심도가 130cm 이상이 될 때는 Berggren 式이나 寺田式 및 Argue & Denyes 式에 의한 凍結深度에 접근하여 갈 것이 예상된다.

6. 結 論

國立建設試驗所에서 實施한 우리나라 全國凍結深度의 5 個年間の 調查結果로부터 우리나라의 最大凍結深度 分布圖를 作成提示할 수 있었다. 또한 이들 凍結深度 實測值를 가지고 각종 凍結深度 算定式에 의한 算定值를 比較함으로써 最大凍結深度와 凍結指數의 平方根은 非線形關係를 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서, 凍結深度를 凍結指數의 平方根만의 함수로 표시함의 부적합성을 지적할 수 있었고 凍結指數 및 흙의 工學的 性質을 고려한 보다 合理的인 凍結深度 算定式을 제시할 수 있었다. 즉, 最大凍結深度 Z(cm)는 다음 식으로 산정함이 바람직하다.

$$Z = 50 \log_{10} \left(\frac{F}{10r_d \cdot w} \right)$$

이 식은 凍結深度와 凍結指數의 平方根 사이의 非線形性을 잘 나타내고 있으며 他 算定式과는 다음과 같은 관계가 있다. 즉, 본 提案式에 의한 凍結深度 算定値는 30~80 cm 의 凍結深度에서는 Cohen 과 Fielding 式에 의한 算定値와 일치하며 80~100 cm 의 凍結深度에서는 Stefan 式에 의한 算定値와 잘 일치한다. 또한 100~130 cm 의 凍結深度에서는 國立建設試驗所式에 의한 算定値와 잘 일치하며 130 cm 이상의 凍結深度에서는 Berggren 式, 寺田式 및 Argue & Denyes 式에 의한 算定値에 접근한다.

參 考 文 獻

1. Hans L. Jessberger; *Ground Freezing, Proc. of the First International Symposium on Ground Freezing*, Bochum, Elsevier Scientific Pub. Co. Amsterdam, 1979.
2. Frivik, P.E., Janbu, N., Saetersdal, R. and Finborud L.I.; *Ground Freezing*, Elsevier Scientific Pub. Co. Amsterdam, 1982.

3. Jumikis, A.R.; *Thermal Soil Mechanics*, Rutgers University Press, New Brunswick, 1966, pp.101~115.
4. Phukan, A.; *Frozen Ground Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1985, pp.105~114.
5. *Ibid.*, pp.139~283.
6. Cohen, A and Fielding, M.B.; "Predicting Frost Depth; Protecting Underground Pipelines", *Journal of Water Works Association*, Feb., 1979, pp.113~116.
7. Argue, G.H. and Denyes, B.B.; "Estimating the Depth of Pavement Frost and Thaw Penetrations", 1974.
8. Brown, G.W.; "Difficulties Associated with Predicting Depth of Freeze of Thaw", *Can. Geotech. Jour.* Vol. 1, 1964.
9. 安相鎭, "우리나라의 凍結指數와 凍結深度에 관한 研究"(第2報 完), *大韓土木學會誌*, 제20권 제1호, 1972, pp.52~71.
10. 國立建設研究所, "우리나라 各地方의 동결깊이 調查報告書", No. 401, 1980.
11. 國立建設研究所, "全國 凍結深度 調查", No. 426, 1982.
12. 國立建設試驗所, "全國 凍結深度 調查", No. 438, 1983.
13. 國立建設試驗所, "凍結深度 調查 報告書", No. 448, 1984.
14. Aldrich, H.R.; "Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavements", *National Research Council Highway Research Board, Bulletin* 135, 1956, pp.124~149.
15. Slusarchuk, W.A. and Watson, G.H.; "Thermal Conductivity of Some Ice-Rich Permafrost Soils", *Can. Geotech. Jour.* Vol. 12, No. 3, 1975, pp.413~424.
16. R.N. Yong, 青山清道, 中村勉; "土の凍結と永久凍土に関する諸問題", *土と基礎*, Vol. 25, No. 233, 1977, pp.1~4.
17. 木下誠一; "土の低温特性", *土と基礎*, Vol. 25, No. 233, 1977, pp.5~9.
18. 河野文弘, "地盤의 凍結と凍土", *土と基礎*, Vol. 25, No. 233, 1977, pp.11~15.
19. 久保宏, "積雪寒冷地鋪裝의 凍土對策", *土木學會誌*, Vol. 62, 1979, pp.10~16.

20. 高志勤, 生頼考博, 山本英夫; “地盤凍結工法を對象とした土の凍結膨脹”, 土と基礎, Vol. 25, No. 233, 1977, pp.25~31.
21. 松本順一郎, 大久保俊治; “土の傳熱特性に関する

實驗的 研究”, 土木學會論文報告書, No. 257, 1977, pp.53~60.

(接受: 1988. 3. 29)