

# 우리나라 凍結土의 土群別 分析과 凍結深度에 관한 研究

## A Study on the Analysis of Freezing Soil by Frost Groups and Frost Depth in Korea

鄭 鐵 浩\*  
Chung, Chul - Ho

---

---

### Abstract

This paper statistically analyses the freezing soil by frost group and frost depth in Korea with data from soil testing in the Korea National Housing Corporation, the climate data provided by the Central Weather Office and the data on the frost depth from the National Construction Laboratory Institute. In this paper, freezing variable are analysed such as percentage finer than 0.02mm by weight, plasticity index, freezing index, water contents of soil and frost depth etc.,.

The result of the analysis is as follows.

- 1) The frost depth of Korea depends on the properties of soil rather than the characteristic of area.
- 2) The distribution map of design freezing index in 57 cities is drawn up with the maximum freezing index, during past 14 years, calculated by the average of the air temperature observed four times(03:00, 09:00, 15:00, 21:00) a day.
- 3) By correcting the OLS line estimated from the relationship between freezing index and frost depth, a method of utilizing the line with the upper confidence limit of 99.9% in t-distribution as predicted maximum frost depth is newly introduced.

### 要 旨

本論文은 住宅公社의 室內土質試驗資料, 國立中央氣象臺의 氣象資料 및 國立建設試驗所의 凍結深度 實測資料를 이용하여 우리나라 凍結土의 土群 및 凍結深度를 統計的으로 分析한 것이다. 이 論文에서 分析한 凍結變數는 0.02mm 보다 가는 粒徑의 比率, 塑性指數, 凍結指數, 흙의 含水比, 그리고 凍結實測深度 等이다.

研究分析한 結果, 우리나라 全域의 凍結深度는 地域 보다 흙에 따라 發生하는 差가 매우 큼을 確因하였으며, 1日 4回 觀測한 日平均氣溫으로 구한 平均 14年間의 最大凍結指數를 산정하여 우리나라 57個 都市의 設計凍結指數 分布圖를 작성 제시하였다. 凍結指數와 凍結深度와의 關係에서 산정된 平均直線式을 補正한 t-分布의 99.9% 信賴上限線을 豫想最大凍結深度로 실용화 할

---

\* 正會員, 大韓住宅公社 研究開發室 課長

수 있는 새로운 技法을 提案하였다.

## 1. 序 論

우리나라의 凍結深度에 관한 研究는 1967年 國立建設試驗所<sup>1)</sup>에서 發表한 凍結指數線圖 이외에 安·白<sup>2)</sup>은 水原農業氣象觀測所에서 實施한 凍結深度 實測值를 利用하여 土質別 凍結깊이를 凍結指數에 대한 一次函數로 나타내었다. 또한 道路調查團<sup>3)</sup>에서 92個 地域의 氣象資料를 利用한 設計凍結指數線圖의 發表等 많은 研究가 있었으며, 최근에는 國立建設試驗所<sup>4)</sup>에서 10個年(1980~1989) 計劃으로 全國에 걸쳐 豫想 凍結深度를 實測하여 凍結活動層을 確認하는 研究가 이루어지고 있다. 그리고 1988年 共<sup>5)</sup>은 凍結深度를 算定하기 위하여 凍結指數 이외에 흙의 乾燥單位重量과 含水比를 고려한 經驗式을 提案한 바 있다.

既存의 凍結理論式 으로는 Neumann 理論<sup>14)</sup>, Stefan 理論<sup>14)</sup>, 修正 Berggren 理論<sup>15)</sup> 등이 있으며, 經驗的 方法으로는 砂質土를 대상으로 한 美國工兵團<sup>20)</sup>의 凍結指數를 基準으로하여 凍結深度를 決定하는 方法 및 寺田<sup>10)</sup>와 Lapkin<sup>2)</sup>의 公式, Russia의 標準式<sup>20)</sup>에 의한 方法 등이 있다.

本 研究는 앞으로 建設될 諸般 土木, 建築構造物의 基礎設計에 適用될 豫想 最大凍結深度의 實用化를 目的으로 信賴上 限線을 提案하고자 한다. 우선 本 論文에서는 過去 13年間(1974~1986) 住宅公社<sup>6)</sup>에서 實施한 全國 住宅團地의 地盤을 대상으로 地盤分析 및 아터버그 限界試驗 結果를 基準으로 凍結敏感性別로 土質을 分類하고, 美國工兵團<sup>16)</sup>이 제정한 基準과 比較한다. 또한 凍結指數가 同一한 地域에서도 흙에 따라 동결깊이가 相異함을 지적한 Brown<sup>11)</sup>의 理論을 確認하기 위하여 統計的 方法으로 地域과 土質間에 동결깊이의 差가 있는가를 分散分析 한다. 凍結指數를 算定하기 위하여 1960年代 부터 全國 57個 都市의 國立中央氣象臺<sup>5)</sup>의 氣象資料를 수집하여 各 都市別 凍結指數를 구한다. 各

都市別로 구한 凍結指數 및 國立建設試驗所<sup>1~4)</sup>에서 發表한 凍結深度 實測值와 含水比와의 關係에서 土質別 平均直線式과 回歸平面式을 算定한다.

## 2. 凍結理論式의 考察

凍結深度를 算定할 수 있는 理論的 方法으로는 Neumann<sup>14)</sup>理論, Stefan<sup>14)</sup>理論, 修正 Berggren 理論<sup>15)</sup>과 吸入力理論 등이 있다. Neumann<sup>14)</sup>은 흙중에 존재하는 水分을 静止狀態로 보고 흙을 均質性, 等方性 및 半無限體로 가정하여 地盤의 凍結領域과 非凍結領域을 고려하여 凍結深度 問題를 數學的인 方法으로 解析하였다. 反面에 Stefan<sup>14)</sup>은 地盤內의 凍結領域만을 고려하여 凍結深度 (Z)를 凍結土의 熱傳導率  $K_1$  [ $B/(ft) \cdot (hr) \cdot (F)$ ], 間隙率  $n$ (飽和狀態에서 含水比와 同一하게 취급), 融解潛熱  $Q_L$  ( $B/lb$ ), 물의 密度  $\rho_1$  ( $lb/ft^3$ ), 凍結溫度  $T_f$  ( $32^\circ F$ ), 道路 및 地表面의 溫度,  $T_s$  ( $^\circ F$ ), 凍結期間  $t$ (hr)의 함수로 式 (1)과 같이 표시하였다.

$$Z = \sqrt{\frac{2K_1}{n \cdot Q_L \cdot \rho_1}} \cdot (T_f - T_s) \cdot t \quad (1)$$

이 理論式은 凍結土 및 非凍結土의 體積當熱量이 무시되어 있기 때문에 주어진 條件이 同一한 條件하에서 Neumann 理論으로 計算된 凍結深度보다 10% 程度 큰것으로 나타나고 있다. 標準 Neumann 理論을 응용하여 Aldrich와 Payneter에 의하여 제안된 修正 Berggren 理論<sup>15)</sup>은 氣象條件과 흙의 性質에 따른 補正係數와 融解變數와의 關係를 알고 있을때 동결심도 (Z)를 算定할 수 있으며 다음과 같이 표시되어 있다.

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48KnF}{L}} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 氣象條件과 現場 흙에 대한 補正係數이며,  $n$ 는 表面修正係數로서 表面凍結指數를 空氣凍結指數로 나눈 값을 말한다.  $F$ 는 凍結指數 ( $^\circ F$ -day),  $K$ 는 熱傳導率이며  $L$ 은 融解潛

Table 1. Tables of frost group and data from analysis

Organiza- tion	Frost group U.S.C.S Division	F 1			F 2								F 3				F 4									
		GW	GP	소 계	GM	GC	GP- GM	SW	SP	SM	SW- SM	SP- SM	소 계	SM	SC	CL	CH	소 계	SM	ML	CL	MH	CH	ML- CL	OL- OH	소 계
국립건설 시험소	측정수	23	7	30	0	0	0	3	2	215	27	0	247	90	50	77	1	218	15	21	14	1	0	4	0	55
	분포율(%)	4.18	1.27	5.45	0	0	0	0.55	0.36	39.09	4.91	0	44.91	16.36	9.09	14.0	0.18	39.63	2.73	3.82	2.55	0.18	0	0.73	0	10.01
주택공사	측정수	14	10	24	31	22	8	83	89	342	19	17	611	208	95	326	31	660	33	313	68	28	7	17	7	473
	분포율(%)	0.79	0.56	1.35	1.76	1.24	0.45	4.69	5.04	19.34	1.08	0.96	34.56	11.76	5.37	18.45	1.75	37.33	1.87	17.71	3.86	1.58	0.39	0.96	0.39	26.76

熱이다. 吸入力理論에 의하면, 地盤内の 凍結境界線을 따라 형성되는 아이스렌즈는 地下水의 상승에 기인하며, 吸着層과 동일한 土層에 있는 水分의 얇은 水膜과 접하므로 일어난다.<sup>14)</sup> Beskow's, Ducker's, Rückli<sup>20)</sup> 등은 土中水의 상승에 의한 아이스렌즈 擴張過程의 문제를 透水係數의 函數로서 吸入力을 決定하였다.

### 3. 凍結土群의 分析

#### 3.1 凍結敏感性別 土質分類

우리나라에 分布하는 凍結土群의 기준을 設定하기 위하여 本 論文에서 사용한 分析資料는 國立建設試驗所<sup>1-4)</sup>에서 6年間(1980~1985) 全國의 도로변을 중심으로 實測한 550個所의 凍結深度 調査資料와 住宅公社<sup>6)</sup>에서 우리나라 國土全般에 걸쳐 176個 住宅團地를 造成하면서 地表面下 0.5~2.0m 깊이에서 實施한 1,768個 所의 室內土質試驗 資料이다.

上記의 調査位置의 土質을 分析 및 아터버그 限界 등의 土質試驗資料에 의거하여 凍結土群別로 分類하고 測定數 및 分布率을 整理하면 表1 및 그림1과 같다.

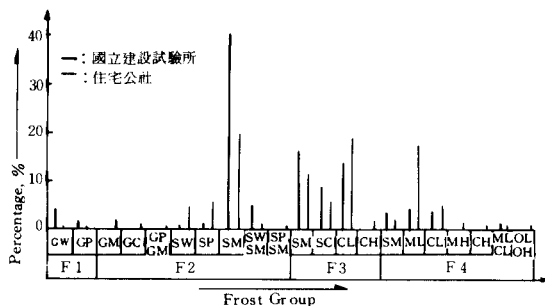


Fig 1 Distribution graph of soil by frost groups

表1 및 그림1에서 보는 바와 같이, 國立建設試驗所에서 測定한 結果에 의하면, 美國工兵團에서 분류한 凍結敏感性에 따른 土群 F1, F2, F3 및 F4群에 속하는 우리나라 흙중 전체의 約3% 이상인 흙은 F1群의 GW, F2群의 SM 및 SW-SM, F3群의 SM, SC 및 CL, F4群의 SM, ML 및 CL의 9종류로 判定될 수 있다. 한편, 住宅公社에서 測定한 結果와 比較하면, F3群과 F4群에 대하여는 國立建設試驗所와 同一한 傾向을 보이고 있으나 F1群과 F2群에 대하여는 F2群의 SM만 일치하고 있다.

일반적으로 凍結敏感性 土質은 粘土 및 실트 이하의 微粒子로 粘着性을 포함하고 있는 粒徑 0.02mm 이하의 粒子를 3% 이상 含有한 配合이 좋은 흙을 기준으로 하여 분류한다. 또한 地下水面이 2m 이하에 있으면 地下水로부터 흙중에 존재하는 水分의 상승으로 인하여 凍結境界線에서 조성되는 아이스렌즈의 擴張이 곤란하다.<sup>17, 19)</sup>

本 論文에서는 앞으로의 凍結設計를 目的으로 美國工兵團<sup>6)</sup>에서 凍結可能한 흙을 4가지 土群으로 분류하여 凍上에 예민한 정도의 순서로 작성한 基準과 土群別 우리나라 도로변에 分布하고 있는 흙을 比較하여 表2에 整理하였는데, 보는 바와같이 土群 사이에 약간의 工學的인 性質의 差가 있음을 알 수 있다.

Table 2. Frost Design Soil Classification

Frost group.	U. S. C. S		Percentage finer than 0.02mm by weight
	U.S.Corps of Engineers	Korea	
F1	GW, GP GP-GM GW-GM	GW, GP	3-10
F2	GM, GW-GM GP-GM	GM, GC GP-GM	10-20
	SW, SP, SM SW-SM, SP-SM	SW, SP, SM SW-SM SP-SM	3-15
F3	GM, GC	-	20이상
	SC, SM	SC, SM	15이상
	CL, CH (PI > 12)	CL, CH (PI > 12)	-
F4	SM	SM	15이상
	CL, CH (PI < 12)	CL, CH (PI < 12)	-
	ML ML-CL	ML, ML-CL, MH	-
	MH	OL-OH	-

Table 3. Frost data by area and frost group

Area	Frost Group	F1	F2	F3	F4	Total
		강원	9	70	33	21
서울	2	55	61	67	185	
인천	0	30	40	35	105	
경기	1	178	158	97	434	
충북	0	36	24	5	65	
충남	0	47	60	35	142	
전북	0	34	46	21	101	
전남	0	47	41	35	129	
대구	0	19	72	61	152	
경북	2	31	31	38	102	
부산	0	35	38	29	102	
경남	4	29	46	27	106	
제주	0	0	10	2	12	
합계		24	611	660	473	1,768

3.2 地域別凍結土群別分析

앞에서 이미 說明한 바와 같이 흙에 따라 동결 깊이가 다름을 지적한 Brown의 理論<sup>10)</sup>을 確認하기 위하여 住宅公社<sup>6)</sup>에서 實施한 우리나라 住宅團地의 地盤을 대상으로 1,768個所의 地盤分析 및 아터버그 限界試驗 結果를 기준으로 凍結 敏感性에 의한 土質을 分類하고, 凍結深度가 地域과 흙의 性質에 따라 發生하는 差를 알아내 고자 한다. 分析方法은 먼저, 凍結土群에 따라 特別市 및 直轄市를 포함하여 全國을 13個 地域으로 區分하여 表3과 같이 二元配置表를 작성하고 地域과 凍結土群間의 聯關關係를 解明하기 위해 分散分析 처리 하였다.<sup>8)</sup> 表3의 資料에 대해 分散分析한 結果는 表4와 같다.

Table 4. Tables of variance analysis by area and frost group

Factor	Squariance	Degree of freedom	Unbiased variance	Variance ratio	Value of F-Distribution
지역별	29,343	12	2,445	5.35	$F_{36}^{12}(0.05)=2.03$
토군별	19,367	3	6,456	14.13	$F_{36}^3(0.01)=4.38$
잔차	16,458	36	457	—	—
전	65,168	51	1,278	—	—

Table 5. Freezing index in Korea area

Urban	Freezing index (°C-day)		Urban	Freezing index (°C-day)	
	4 FI	2 FI		4 FI	2 FI
속초	210.80	204.90	남원	276.40	252.45
대관령	940.10	956.75	삼척	205.90	156.95
춘천	567.75	542.65	강화	497.80	615.05
강릉	191.25	170.25	보은	485.70	507.85
서울	399.75	383.45	아산	434.20	403.40
인천	373.40	362.20	유성	350.20	361.25
수원	479.45	471.95	부여	361.10	352.25
서산	298.90	275.65	영주	442.90	457.90
울진	134.00	105.05	문경	296.00	280.70
청주	417.25	404.35	선산	301.70	292.20
대전	346.80	307.90	영천	258.40	238.95
안동	341.50	316.50	거제	88.30	81.85
포항	140.20	126.85	남해	83.60	86.70
군산	238.00	211.70	인제	641.20	616.05
대구	200.10	190.40	이천	553.30	552.20
전주	241.75	211.25	경주	190.00	200.80
울산	189.75	182.55	나주	242.00	231.40
광주	189.20	182.55	안성	425.70	388.25
부산	80.05	71.20	김해	111.40	105.65
충무	44.15	37.90	삼천포	89.80	81.70
목포	101.10	80.00	상주	266.50	248.40
여수	92.35	81.05	홍성	362.40	369.15
제주	4.80	6.35	순천	131.00	111.15
서귀포	7.60	6.45	김천	258.60	238.75
진주	155.10	142.60	장성	267.30	262.50
제천	658.30	653.70	당진	359.90	354.60
충주	603.80	587.40	논산	329.60	303.30
이리	274.30	258.65	청송	398.80	397.90
정읍	243.90	245.55			

以上の二元配置法으로 地盤의 凍結에 대하여 分散分析한 結果를 要約 整理해 보면 다음과 같다. 먼저, 地域別 分散比는  $F_r=5.35 > F_{36}^{12}$  (0.05) = 2.03 이므로 危險率 5%를 기준으로 하여 凍結의 影響을 檢討할때 地域間에는 凍結深度가 多少의 差異가 發生한다고 볼 수 있다. 그리고, 凍結土群別 分散比는  $F_c=14.13 > F_{36}^3$  (0.01) = 4.38 이므로 危險率 1%를 기준으로 하여 凍結의 影響을 檢討할때 凍結土群間에는 凍結深度가 흙의 性質에 따라 크게 差異가 發生한다고 볼 수 있다. 따라서, 우리나라 全域으로 볼때 凍結深度는 地域에 따라 發生하는 差 보다 흙에 따라 發生하는 差가 크다고 判定할 수 있다.

#### 4. 우리나라의 凍結指數

##### 4.1 設計凍結指數의 算定

各種 構造物의 동결깊이를 決定하는데 사용되는 凍結指數를 設計凍結指數라고 하며, 이것은 構造物에 따라 30年間의 氣象資料에서 最大의 값을 취하거나 혹은 30年間의 資料중 最大의 값 3個值를 平均하여 사용한다. 또한 30年間의 氣象資料가 없으면 最近 10年間의 最大凍結指數를 設計凍結指數로 한다.<sup>16,18)</sup> 國立中央氣象臺<sup>5)</sup>에서 발간한 全國 57個 都市의 最大 25年, 最小 7年, 平均 14年間(1960~1984)의 氣象月報를 수집 電算統計處理하여 1日 4回(03:00, 09:00, 15:00, 21:00) 觀測한 日平均氣溫(4FI)과 1日 最大 및 最小 平均氣溫(2FI)에 의한 凍結指數를 各 年度別로 算定하면 表 5와 같다. 이 表에서 알 수 있는 바와 같이 各 都市에 따라 最大凍結指數를 比較해 본 結果는 大關령(956.75), 강화(615.05), 보은(507.85), 유성(361.25), 영주(457.90), 남해(86.70) 및 경주(200.80)의 7個 都市 이외에는 前者가 큰 값을 갖는 것으로 分析 되었다.

##### 4.2 設計凍結指數 分布圖

우리나라와 같이 4계절이 뚜렷하고 氣候變化가 심한 溫帶地方에서는 地盤이 凍結 및 融解의 影響을 받을 수 있으므로 安全率을 고려하여

1日 4回 觀測한 日平均氣溫으로 구한 平均 14年間의 最大凍結指數를 設計凍結指數로 하고, 동일한 凍結指數를 가지는 都市를 연결함으로써 全國 設計凍結指數 分布圖<sup>16)</sup>를 그림 2와 같이 작성하였다. 그리고, 1974年 道路調査團<sup>7)</sup>에서 가장 많은 氣象資料를 利用하여 算定한 設計凍結指數와 比較해보면 東草, 瑞山, 儒城, 安東, 尙州, 群山, 裡里, 井邑, 羅州, 金海의 10個 地域 이외에는 本 研究의 設計凍結指數가 最小 0.30℃-day, 最大 157.30℃-day 程度의 큰 값을 갖는다.

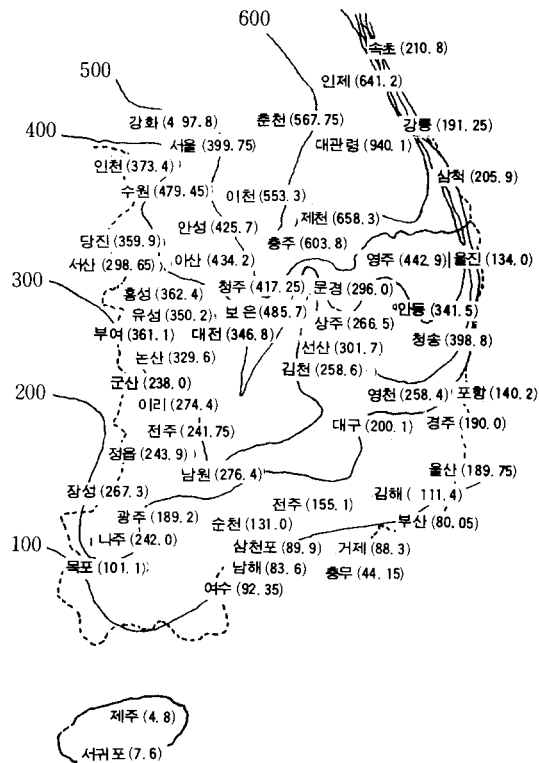


Fig. 2 Distribution map of design freezing index value in Korea

#### 5. 凍結變數間의 相關性 分析

##### 5.1 凍結指數와 凍結深度와의 關係

3章에서의 分散分析結果에 의하여 우리나라 全域의 凍結은 地域的인 特性 보다 土質의 性質에 따라 發生하는 差가 클것임을 알 수 있다. 따라서 國立建設試驗所<sup>1~4)</sup>에서 1980年부터

1985년까지 6年間に 걸쳐 實施한 550個所の凍結深度 實測值 가운데 土群別 全國에 分布하고 있는 約 3% 이상의 흙은 F1群의 GW(23個), F2群의 SM(215個) 및 SW-SM(27個), F3群의 SM(90個), SC(50個) 및 CL(77個), F4群의 SM(15個), ML(21個) 및 CL(14個)等으로 調査되었다. 이를 흙의 種類別로 1日 4回 觀測한 日平均氣溫(4FI)으로 求한 凍結指數와 凍結實測深度와의 關係를 조사하면 그림 3~그림 11과 같다. 이들 關係로 電算處理하여 回路分析을 실시하면 다음과 같은 平均直線式을 얻을 수 있으며 그림 3~그림 11 중 點線으로 表示되어 있다.

- F 1(GW) :  $Z = -22.28 + 0.14 F$   
( $r=0.61, \alpha=0.00$ ) (3)
- F 2(SM) :  $Z = 5.44 + 0.07 F$ ( $r=$   
 $0.58, \alpha=0.00$ ) (4)
- F 2(SW-SM) :  $Z = 14.18 + 0.07 F$ ( $r=$   
 $0.58, \alpha=0.00$ ) (5)
- F 3(SM) :  $Z = -5.47 + 0.10 F$   
( $r=0.47, \alpha=0.00$ ) (6)
- F 3(SC) :  $Z = -5.55 + 0.13 F$   
( $r=0.32, \alpha=0.00$ ) (7)
- F 3(CL) :  $Z = 6.16 + 0.05 F$ ( $r=$   
 $0.41, \alpha=0.00$ ) (8)
- F 4(SM) :  $Z = 4.49 + 0.10 F$ ( $r=$   
 $0.37, \alpha=0.01$ ) (9)
- F 4(ML) :  $Z = 24.7 + 0.06 F$ ( $r=$   
 $0.04, \alpha=0.20$ ) (10)
- F 4(CL) :  $Z = 10.59 + 0.06 F$ ( $r=$   
 $0.51, \alpha=0.00$ ) (11)

여기서 Z는 凍結深度, F는 1日 4回 觀測한 日平均氣溫으로 求한 凍結指數, r은 相關係數,  $\alpha$ 는 有意性 이다. 이 關係式들은 相關係數 ( $r = 0.32 \sim 0.61$ )가 적어 有效의 程度가 낮을 뿐만 아니라 分散性이 매우 큰 값을 갖으므로 實施設計에서는 適用할 수 없다. 그러나, 그림 3~11의 平均直線式에서 나타난 바와 같이 凍結指數의 增加에 따라 凍結深度도 增加하므로 陽의 相關 ( $0 \leq 0.32 \sim 0.61 \leq 1$ )이 成立함을 確認할 수 있다.<sup>8, 12, 18, 20</sup>)

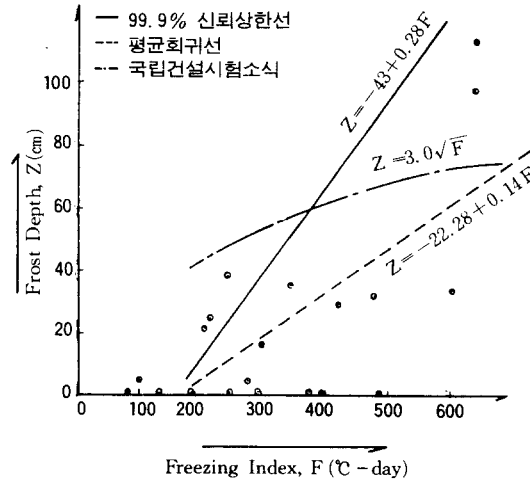


Fig 3 Relationship between frost depth and freezing index of F1(GW)

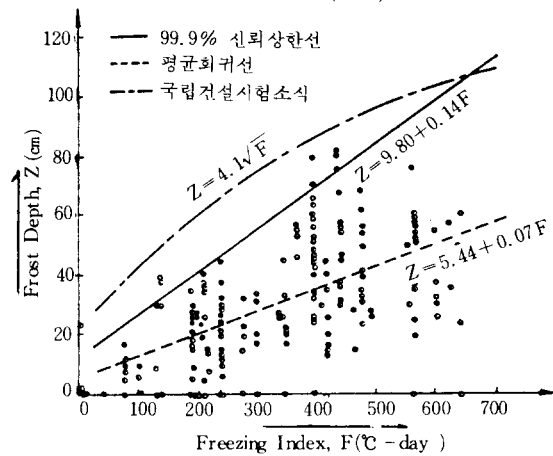


Fig 4 Relationship between frost depth and freezing index of F2(SM)

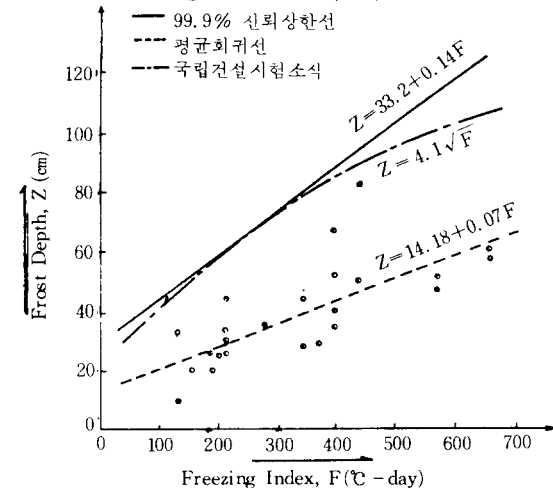


Fig 5 Relationship between frost depth and freezing index of F2(SW-SM)

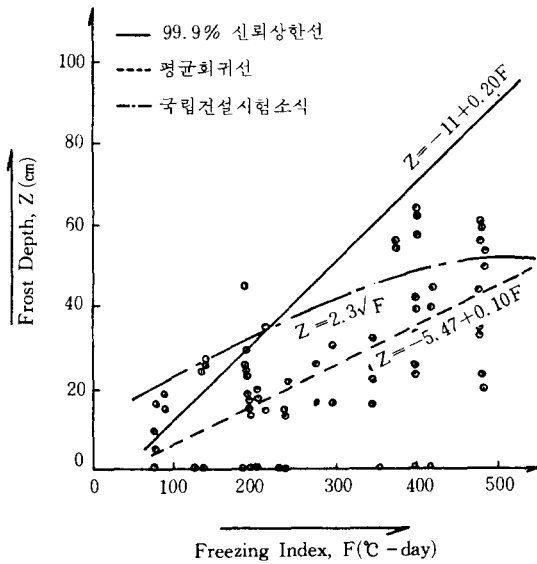


Fig. 6 Relationship between frost depth and freezing index of F3(SM)

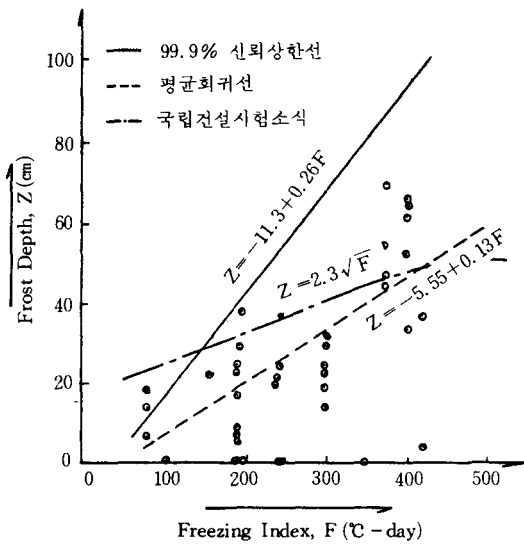


Fig. 7 Relationship between frost depth and freezing index of F3(SC)

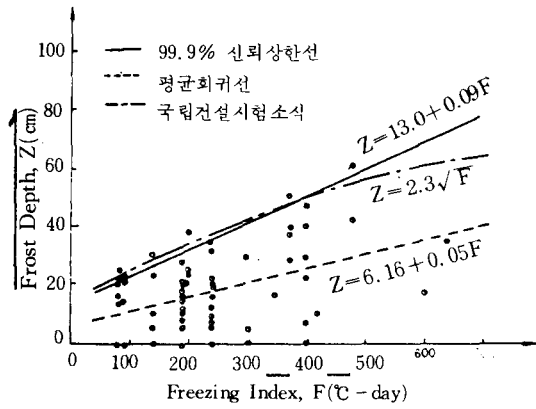


Fig. 8 Relationship between frost depth and freezing index of F3(CL)

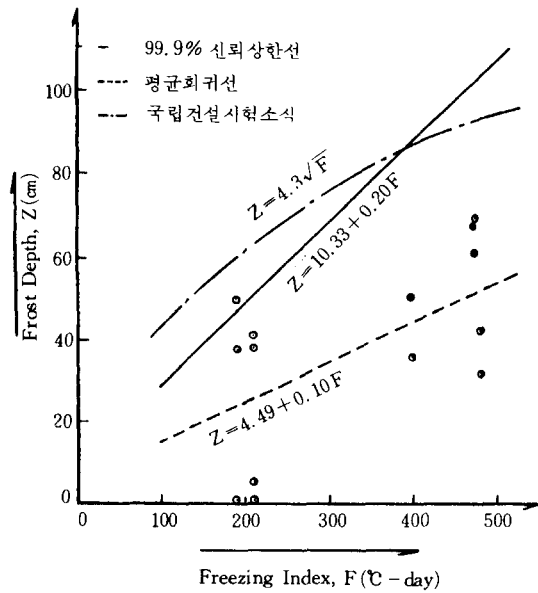


Fig. 9 Relationship between frost depth and freezing index of F4(SM)



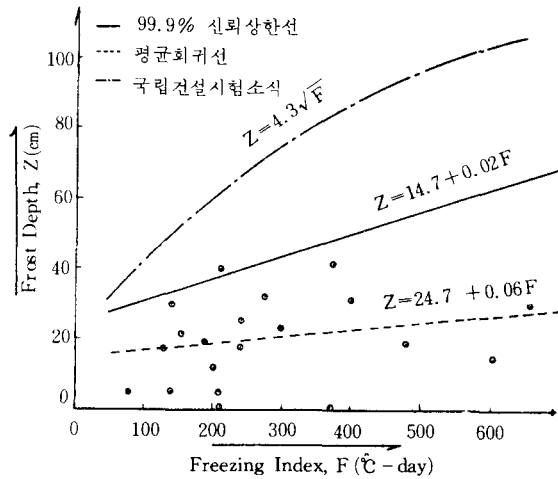


Fig. 10 Relationship between frost depth and freezing index of F4(ML)

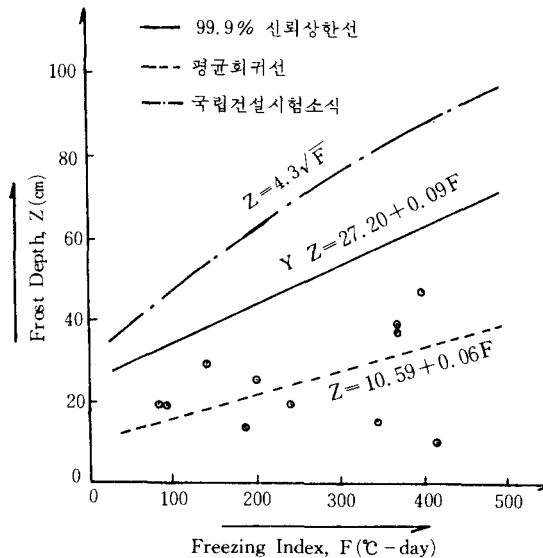


Fig. 11 Relationship between frost depth and freezing index of F4(CL)

## 5.2 凍結指數, 凍結深度와 含水比와의 關係

凍結指數(F)와 實測凍結深度(Z)와의 關係는 一次函數的인 相關性이 인정되었으나 有效의 程度가 낮은 缺陷이 있음을 지적하였다. Stefan<sup>4)</sup>과 Berggren<sup>15)</sup>의 凍結深度 算定式에 의하면 熱傳導率 및 平均熱傳導係數는 흙의 含水比와 乾燥密度로부터 구하도록 되어있다. 이들의 理論에 따라 흙의 含水比는 동결깊이에 多少 影響을 미칠 것임을 豫測하고, 國立建設試驗所에서 凍結深度 實測調査時에 地表로부터 10cm 깊이 마다 測定한 含水比(W)를 추가로 電算入力 시켰다. 이들 3變量(Z, F, W)의 關係를 重回 歸分析으로 식(12)~(17)의 回歸平面式을 얻었으나 이 식에서 보는 바와 같이 含水比가 凍結深度에 미치는 影響은 미소하다.

$$F 2(SM) : Z = 5.75 + 0.07 F - 0.01 W (\gamma = 0.58) \quad (12)$$

$$F 2(SW - SM) : Z = 13.54 + 0.07 F + 0.04 W (\gamma = 0.58) \quad (13)$$

$$F 3(SM) : Z = -5.47 + 0.10 F + 0.00 W (\gamma = 0.69) \quad (14)$$

$$F 3(SC) : Z = -19.68 + 0.14 F + 0.46 W (\gamma = 0.59) \quad (15)$$

$$F 3(CL) : Z = 4.47 + 0.05 F + 0.06 W (\gamma = 0.42) \quad (16)$$

$$F 4(CL) : Z = 10.59 + 0.06 F - 0.02 W (\gamma = 0.51) \quad (17)$$

## 5.3 平均式에 대한 信賴上限線의 提案

Jumikis, A.R은 1955年 발간한 그의 著書<sup>14)</sup>에서 地盤의 동결깊이에 影響을 주는 凍結變數의 諸要素를 土質의 工學的 性質(흙의 密度, 含水比, 間隙率, 間隙比), 흙의 熱的特性(融解潛熱, 熱傳導率, 比熱, 熱擴散率), 氣象條件(路面의 被覆狀態에 따른 地表面의 溫度, 地盤內의 初期 溫度, 凍結溫度 및 期間), 地下水位의 깊이 및 흙중 水分의 永點分離作用 等이라고 기술한 바 있다. 이러한 凍結變數의 諸般要素를 모두 고려하고 凍結深度를 결정하여 實用화 하기에는 많은 問題점을 內包하고 있다. 따라서, 本 論文

에서는 그림 3~11의 點線으로 나타낸 凍結指數와 凍結深度와의 相關圖上의 點의 集合을 代表하는 平均直線式을 補正한 t-分布의 99.9% 信賴上限線을 最大凍結深度로 提案코자 한다. <sup>13)</sup> 이 信賴上限線은 다음의 식으로 표시할 수 있으며 그림 3~그림 11에서 實線으로 표시되어 있다.

$$F1(GW) : Z = -43 + 0.28 F \quad (18)$$

$$F2(SM) : Z = 9.80 + 0.14 F \quad (19)$$

$$F2(SW-SM) : Z = 33.2 + 0.14 F \quad (20)$$

$$F3(SM) : Z = -11 + 0.20 F \quad (21)$$

$$F3(SC) : Z = -11.3 + 0.26 F \quad (22)$$

$$F3(CL) : Z = 13.0 + 0.09 F \quad (23)$$

$$F4(SM) : Z = 10.33 + 0.20 F \quad (24)$$

$$F4(ML) : Z = 14.7 + 0.02 F \quad (25)$$

$$F4(CL) : Z = 27.20 + 0.09 F \quad (26)$$

이 實線은 흙에 따라 各種 構造物의 特性과 安全을 고려하여 豫想最大凍結深度로 실용화할 수 있는 새로운 技法으로 提案될 수 있다고 思慮된다.

## 6. 既存關係式과의 比較

1985年 國立建設試驗所<sup>14)</sup>에서는 全國 45個 地區를 선정하여 180個所의 凍結深度를 實測하고, 이를 土群別로 분류하여 凍結指數와 凍結深度와의 關係에서 다음의 相關式을 提案한 바 있다.

$$F-1群 : Z = 3.0\sqrt{F} \quad (27)$$

$$F-2群 : Z = 4.1\sqrt{F} \quad (28)$$

$$F-3群 : Z = 2.3\sqrt{F} \quad (29)$$

$$F-4群 : Z = 4.3\sqrt{F} \quad (30)$$

이 相關式들을 本 論文에서 土群에 따라 土質別로 提案한 식(3)~(11)의 平均直線式의 99.9% 信賴上限線인 식(18)~(26)과 比較檢討한다.

그림 3~11 중 曲線으로 표시된 일점쇄선은 國立建設試驗所에서 산정한 凍結深度線을 나타내고 있다.

F1群중 GW로 분류되는 흙은 그림 3에서 보는 바와 같이 凍結指數가 約 200°C-day 程度에서 凍結作用이 시작되는 것으로 分析되어 자갈섞인 흙은 잘 凍結되지않음을 알 수 있다. 그림 3 및 6~8에 보인 바와 같이 F1群과 F3群(SM, SC, CL)은 凍結指數가 낮은 경우에는 國立建設試驗所에서 제안한 식(27), (29)가 合理的인 것으로 나타났다. 反面에, 凍結指數가 約 200°C-day 이상 정도로 높은 地方에서는 本 研究에서 제안한 식(18) 및 (21)~(23)이 보다 合理的임을 確認할 수 있다.

F2群(SM, SW-SM)은 國立建設試驗所에서 發表한 식(28)이 本 研究에서 信賴上限線으로 구한 식(20) 및 (21)보다 凍結深度가 多少 큰 값을 갖는 것으로 分析되었다.

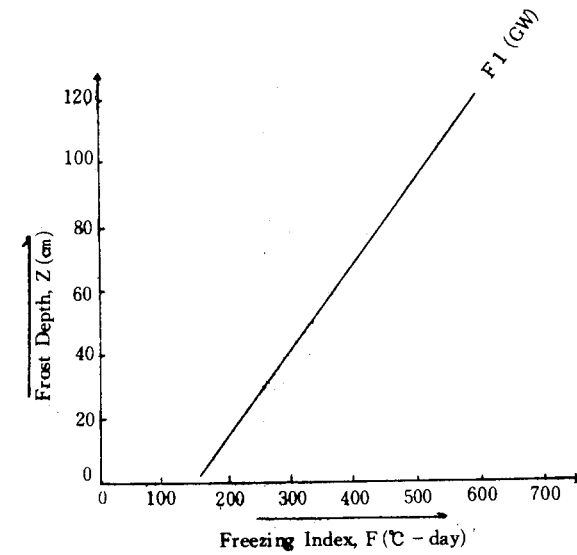
F4群(SM, ML, CL)은 本 研究에서 제안한 식(24)~(26)을 豫想最大凍結深度로 사용할 경우 國立建設試驗所에서 發表한 식(30) 보다 경제적인 設計를 할 수 있음을 確認하였다.

Table 6. Range of application on the line with the upper confidence limit of 99.9%

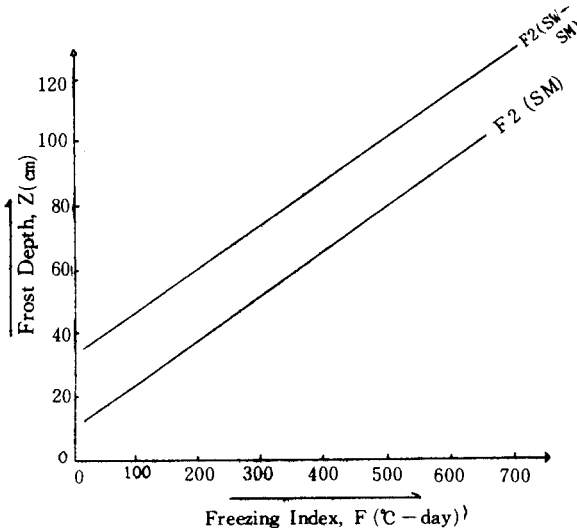
Frost group	U.S.C.S	Averaging formula	Upper confidence limit of 99.9%	Range of application
F1	GW	$Z = -22.28 + 0.14 F$	$Z = -43 + 0.28 F$	$F1 < 650$
F2	SM	$Z = 5.44 + 0.07 F$	$Z = 9.80 + 0.14 F$	$F1 < 650$
	SW-SM	$Z = 14.18 + 0.07 F$	$Z = 33.2 + 0.14 F$	$F1 < 700$
F3	SM	$Z = -5.47 + 0.10 F$	$Z = -11 + 0.20 F$	$F1 < 500$
	SC	$Z = -5.55 + 0.13 F$	$Z = -11.3 + 0.26 F$	$F1 < 450$
	CL	$Z = 6.16 + 0.05 F$	$Z = 13.0 + 0.09 F$	$F1 < 600$
F4	SM	$Z = 4.49 + 0.10 F$	$Z = 10.33 + 0.20 F$	$F1 < 500$
	ML	$Z = 24.7 + 0.06 F$	$Z = 14.7 + 0.02 F$	$F1 < 500$
	CL	$Z = 10.59 + 0.06 F$	$Z = 27.20 + 0.09 F$	$F1 < 450$

以上과 같이 土群別 우리나라 國土全般에 分布하는 約 3% 이상의 9種類의 흙에 대하여 相關分析으로 구한 平均式의 99.9% 信賴上線에 관한 各種 構造物의 設計 埋設深度의 適用範圍를 凍結指數의 制約條件에 따라 要約 整理하여 보면 表 6과 같다.

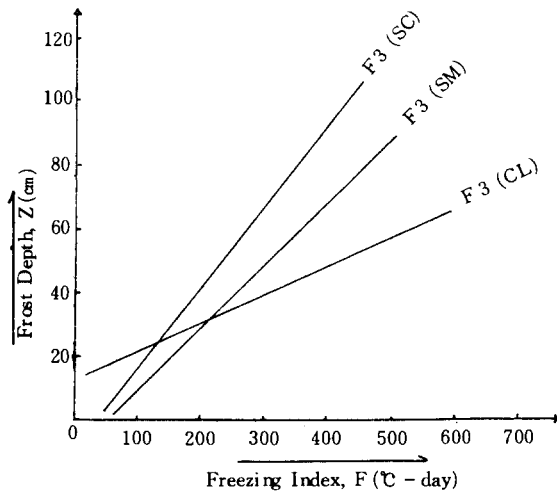
이 結果를 土群別로 圖示하여 보면 그림 12와 같다.



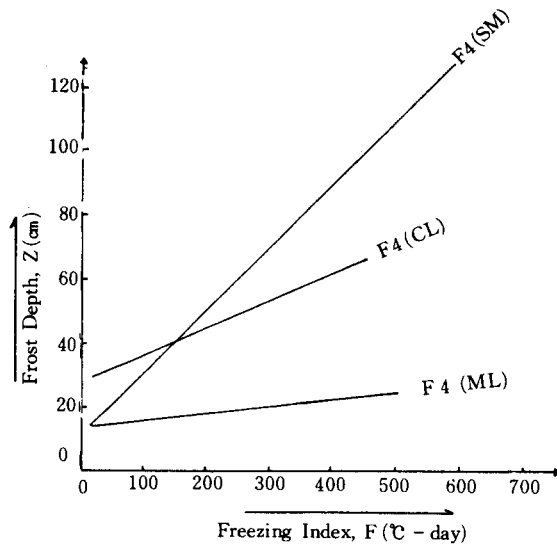
(a) F-1 Group



(b) F-2 Group



(c) F-3 Group



(d) F-4 Group

Fig. 12 The line with the upper confidence limit of 99.9% on soil by frost groups

## 7. 結 論

住宅公社에서 構造物의 埋設深度를 고려하여 우리나라 國土全般에 걸쳐 실시한 13年間の 室內土質試驗資料, 國立中央氣象臺에서 平均 14年間 觀測한 全國 57個 都市의 氣象資料, 國立建設試驗所에서 우리나라 全域을 대상으로 調査한 6年間の 凍結深度 實測資料를 統計分析

處理하여 導出한 本 論文의 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 우리나라 全域의 凍結深度는 地域에 따라 發生하는 差異 보다는 土質의 性質에 따라 發生하는 差異가 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

(2) 1日 4回 觀測한 日平均氣溫으로 算定한 凍結指數는 濟州道를 제외하고 충무에서 44.15℃-day 로 가장 낮고 忠淸北道 地方의 충주, 제천을 향하여 凍結指數가 점차 增加되어 江原道 地方의 大관령에서 940.1℃-day 程度에 이르고 있음을 確認하였다.

(3) 凍結變數間의 相關關係에서 얻은 平均直線式과 平面回歸式은 分散성이 큰 것으로 나타나 實用성이 없는 것으로 생각된다. 그러나, 凍結指數가 增加함에 따라 凍結深度도 增加함을 알 수 있었으며, 흙의 含水比가 凍結深度에 미치는 影響은 미소한 것으로 나타났다.

(4) 豫想最大凍結深度의 決定方案으로 平均直線式을 補正한 t-分布의 99.9% 信賴上限線은 凍結指數와 흙의 工學的 性質을 고려한 보다 合理的인 凍結深度의 算定技法으로 적합하게 사용될 수 있고 이 식을 사용함으로써 보다 경제적인 設計가 可能하리라 思慮된다.

#### 參 考 文 獻

1. 國立建設研究所, 우리나라 各 地方의 凍結깊이 調查報告書, NO.401, 1980.
2. 國立建設研究所, 全國凍結深度調查, NO.426, 1982.
3. 國立建設試驗所, 凍結深度 調查報告書, NO.448, 1984.
4. 國立建設試驗所, 凍結深度 調查報告書, NO.455, 1985.
5. 國立中央氣象臺, 氣象月報, 1960-1984.
6. 大韓住宅公社, 江原道外 12個 地域 原州外 73個 都市 明倫洞外 175個 團地地盤調查報告書, 1974-1986.
7. 道路局 道路調查團, 凍結指數에 關한 調查報告書, 1980.
8. 朴俊烈, 土木計劃學, 嶺南大學校出版部, 1984.
9. 安相鎭, 白榮植, 우리나라의 凍結指數와 凍結深度에 關한 研究, 大韓土木學會誌, 第18卷 第4號, 1971, pp.27-33.
10. 安相鎭, 우리나라의 凍結指數와 凍結深度에 關한 研究, 大韓土木學會誌(第2報完), 第20卷 第1號, 1972, PP. 59-71.
11. 洪元杓, 金明煥, 우리나라의 凍結深度에 關한 研究, 大韓土木學會論文集, 第8卷 第2號, 1988. pp.147-154.
12. Argue, G.H. and Denyes, B.B., : Estimating the Depth of Pavement Frost and Thaw Penetration, Transportation Research Record, 1974, pp. 18-30.
13. Harr, M.E., : Mechanics of Particulate Media A Probabilistic Approach, : McGraw-Hill Book Company, 1977, pp.380-385.
14. Jumikis, A.R., : The Frost Penetration Problem in Highway Engineering, Rutgers University Press, 1955, pp.77-93, pp. 108-113, pp.145-148.
15. Kersten, M.S., : Frost Penetration : Relationship to Air Temperatures and Other Factors, Highway Research Record Bulletin 225, 1959, pp. 63-67.
16. Linell, K.A., Hennion, F.B. and LoBacz, E.F., : Corps of Engineers' Pavement Design in Areas of Seasonal Frost, 1963, pp.77-96.
17. McGraw, R., : Frost Heaving versus Depth to Water Table, Highway Research Record, NO. 393, 1972, pp. 51-52.
18. McCormick, G., : Estimation of Design Freezing Indices, A.M. ASCE, 1971, pp.401-405.
19. Terzaghi, K. and Peck, R.B., : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1943, pp.149-151.
20. Soil Mechanics in Foundation Engineering, pp. 134-140.

(접수일자 1989. 4. 29)