

凍結된 흙의 強度에 關한 實驗的 研究

The Strength of Frozen Soil

朱 麻 西
Chuh, Ma Suh

ABSTRACT

If the temperature of free water drops below the freezing point the water turns into ice and its volume increases. Analyzing of the results in test, it is hoped that these is broadly used in engineering plan.

The compressive strength of frozen soils depends on several factors including the degree of saturation, the angle of internal friction of the soil and the unconfined compressive strength of the ice.

The creep strength depends on factors including creep ratio, time, strain and temperature.

For a linear decreases in temperature, strength predicts an exponential increasing. The relationships between dry unit weight and compressive strength, water content and freezing with compacted soil samples, have been analyzed to understand the strength of frozen soil.

Therefore, it is thankful that the results of analsis shall find useful application as a framework for generalizing experimental information as well as a basis for solving various frozen soil mechanics problems.

要 旨

溫度가 내려감으로 흙속의 물과 土粒子는 物理的인 변화를 함으로서 力學的인 性質을 달리하게 되는데 이러한 性質을 實驗 分析하여 넓은 意味의 工學的인 面에 利用된은 바람직한 일이다.

土木 分野에서 문제시되고 있는 凍結된 흙의 壓縮 強度는 일음의 一般의인 強度와 飽和度및 內部마찰각에 依存되며 Creep 強度는 Creep 比, 時間, 變形率, 溫度에 관련됨을 論하였다.

溫도의 변화로 말미암아 強度는 線型的인 증가를 나타내고 있음에 粘土를 다져서 凍結 시킴으로서, 乾燥 單位 重量과 壓縮強度, 含水量과 凍結量等의 關係를 實驗하여 分析하였다.

그러므로 凍結된 흙의 強度에 關한 諸性質을 實驗的으로 調査 규정하여 土質工學의 特別한 문제에 있어서 基本的인 해결을 하는데 도움이 되리라 생각 된다.

I. 序 論

흙은 공극에 含有하고 있는 물이 凍結作用을 하면

膨脹하여 부풀어 오른다. 즉 흙에 凍結 含有하고 있는 개개의 얼음이 成長하여 凍結한 흙이 外部水源을 받아 氷結이 形成된 구멍으로 빨아들인다. 이와같은 현상으로 된 흙은 여러 工學的인 性質을 달리한다.

그 중에서는 凍結된 흙에 外部荷重을 받게 되는 경우 強度에 關한 論理的인 근거를 밝히고 나아가 實驗的인 分析을 통하여 그 性質을 파악하려고 한다.

凍結된 흙이나 非凍結된 흙은 보통 集中荷重下에서 剪斷에 依해 파괴되는데 (10) 그 強度는 여러 要因들, 즉 흙의 形狀 (Soil Type), 粒子크기 分布, 密度, 均一性, 물과 얼음의 量, 溫度, 수직응력, 變形比에 依存된다.

Tsytoovich (1966), Vialov (1965), Goughnour 와 Andersland (1968)의 實驗에 依하면 凍結된 흙의 剪斷 強度는 時間에 따라 變함을 보여주었다(11). 한편 凍結된 흙의 Creep 強度에 關해서는 Vialov (1959, 1962, 1963)가 理論을 전개하였으며 Mitchell (1968)은 靜力學의 方法에 依해 論하였으며, BranKo Ladanyi(1971)은 工學的인 理論을 說明하였다.

Andersland 와 Akili (1967)은 熱的인 活性도는 凍結된 粘土의 Creep 強度에 관련된다고 하였으며 (6)(12) (14), 특히 飽和된 凍結 Silt나 모래에 있어 Creep 實驗으로 부터 長期間 強度는 一軸 壓縮強度의 약 20%

적과 다음을 지적하였다.

그러므로凍結된 흙의 強度를 壓縮強度와 Creep 強度로 구별하여 이에 관한 理論을 풀이하여 論하려 하며, 溫度가 Creep 比와 強度에 미치는 영향에 對하여 설명하려 한다.

含水量과 密度의 변화에 따르는凍結된 흙에 있어서 強度의 特性을 溫度와 계속時間을 고려하여 實驗的으로 分析하여 그 結果를 검토 하고저 한다.

II. 凍結된 흙의 強度

1. 壓縮強度

飽和된 粗粒土가 凍結되므로 받는 要因은 주로 粒子 크기와 相對密度이다. 粘土의 凍結은 주로 Atterberg 限界와 相對的인 반죽질기에 依存한다.

흙이 凍結될 溫度에 이르게 되면 흙속의 공극사이 에 있는 自由水는 土粒子와 서로 연결되는 곳에서 언다. 그러므로 흙의 強度는 점점 증가하게 된다.

凍結된 흙의 一軸 壓縮強度 q_u' 는 얼음의 一軸 壓縮強度 q_i 와 포화도 S 와 흙의 內部 마찰각에 依存된다(10).

또 얼음의 一軸 壓縮強度 q_i 는 얼음의 溫度, 얼음의 構造와 荷重 상태에 따라 좌우된다. 보통 강얼음의 一軸 壓縮強度는 -22°C 에서 21.0 kg/cm^2 이나 -16°C 에서는 62.0 kg/cm^2 로 증가된다고 한다(Darcy 1940).

또한 學者들에 의하여 壓縮 強度는 荷重狀態가 증가함에 따라 점점 감소한다고 보고되었다.

예로서 내분당 20 kg/cm^2 에서 50 kg/cm^2 로 荷重을 증가시키면 q_i 는 60 kg/cm^2 에서 24 kg/cm^2 로 감소함을 보여 주었다(Muller 1947).

凍結된 흙은 粘着性을 주로 얼음의 粘着性的 依存되기 때문에 응력상태에서의 변화상태는 순수한 얼음의 변화상태임이 틀림없다고 할 수 있다. 그러므로 얼음의 內部 마찰각은 영이 되므로 얼음의 粘着力 C 는 $q_i/2$ 가 됨을 알 수 있다.

만약 흙의 飽和도가 100% 보다 적을 때, 흙속의 含水量의 凍結은 砂石과 같은 特性을 나타낸다.

다시 말하면 만약 포화된 흙이 凍結되면 물은 얼음 조각으로 되고 土粒子에 의해 굳게 된다. 이러한 흙의 強度 q_u' 는

$$q_u' = q_i \cdot \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad [1]$$

여기서 ϕ : 흙의 內部마찰각

[1] 式은 대리석과 같은 結晶體의 岩石의 壓縮強度와 거의 同一하다고 한다(10).

2. Creep 強度

Creep 強度란 荷重을 長時間 받고있는 어떤 材料가 一定한 時間이 지나면 나타나는 塑性變形인 파괴가 일어나거나 일어나려는 不安定한 應力상태를 말한다. 凍結된 粒粒土에서는 內部 마찰각 ϕ 와 粘着力 C 는 靜的인 Creep 比와 溫度에 영향을 주는바, ϕ 는 독립변수로서 C 는 Creep 比의 함수로서 溫度에 依存된다(11).

Creep 引張實驗에서는 Creep 強度란 實제적인 파괴가 바로 일어날 때의 應力을 意味하나 Creep 壓縮實驗에서는 파괴가 일어나려는 不安定한 應力상태 (높은 溫度에 있는 금속이나, 凍結된 흙과 같은 延性材料)을 意味한다(1).

一般的으로 Creep 強度 σ_f 는 파괴까지의 時間 t_f , 물면의 상태에서 Creep 比 $\epsilon^{(c)}$, 파괴시의 變形率 ϵ_f , 溫度 T 등의 크기와 連관되고 있다.

보통 一定한 應力 Creep 實驗으로 부터 Creep 파괴 變形율은

$$\epsilon_f = \epsilon^{(c)} + t_f \cdot \dot{\epsilon}^{(c)} \quad [2]$$

여기서 $\epsilon^{(c)}$: 순간적인 變形율

$\dot{\epsilon}^{(c)}$: Creep 變形율

t_f : 파괴까지의 時間

$$\text{다시 } t_f = \frac{\epsilon_f - \epsilon^{(c)}}{\dot{\epsilon}^{(c)}} \quad [3]$$

로 나타내며 分子를 常數로 表示하면

$$t_f = C / \dot{\epsilon}^{(c)} \quad [4]$$

Creep에서 파괴에 이르는 시간은 不變의 상태에서 Creep 比에 逆比例하지만 더욱 큰 Creep 間격에서는 [4] 式의 分子는 一定하지 않고 Creep 比, 變形率, 溫度의 함수로 表示할 수 있다.

$$t_f = F(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) / \dot{\epsilon} \quad [5]$$

로 된다. 여기서 $\dot{\epsilon}$: Creep 比

T : 시간

ϵ : 變形율

Garofalo (1965)의 Creep 學說에 依하면 [3] 式은 一定하지 않고 應力에 關連되는 순간적인 塑性變形率 $\epsilon^{(ip)}$ 의 함수이다. 즉 [3] 式은

$$t_f = (\epsilon_f - \epsilon^{(ip)}) / \dot{\epsilon}^{(c)} \quad [6]$$

$$\text{여기서 } \epsilon^{(ip)} = \epsilon_k \left[\frac{\sigma}{\sigma_k(T)} \right]^{k(c)}$$

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = \dot{\epsilon}_c \left[\frac{\sigma}{\sigma_c(T)} \right]^{n(T)}$$

ϵ_k : 應力變形率式의 임의變形率

σ_k : 순간적인 應力變形率式의 표준應力

k : 應力-一變形率式의 指數

n : Creep 式的指數

σ_c : Creep 式的 표준應力

$\dot{\epsilon}_c$: Creep 式的 임의變形率

$\epsilon^{(t)}$ 와 $\dot{\epsilon}$ 式을 [6] 式에 代入하면 다음과 같다.

$$t_f = \frac{\epsilon_k - \epsilon_k(\sigma/\sigma_k)^k}{\dot{\epsilon}(\sigma/\sigma_c)^n} \quad [7]$$

長時間이 지난뒤 순간적인 변형율은 무시하게 되므로

$$t_f = \epsilon_f / \dot{\epsilon}_c (\sigma/\sigma_c)^n \quad [8]$$

로 간단히 表示할 수 있다.

[8] 式은 [4] 式과 거의 同一하다.

한편 $\dot{\epsilon}_f = \epsilon_f / t_f$ 와 (여기서 ϵ_f : 임의의 Creep 파괴변형율) [8] 式으로 부터 오랜 시간과 一定한 溫度 T 가 지난후, Creep 強度는

$$\sigma_f = \sigma_c(T) (\dot{\epsilon}_f / \dot{\epsilon}_c)^{1/n} \quad [9]$$

로 나타낸다.

Vialov (1962)는 $T = -5^\circ\text{C}$, $\epsilon_f = 0.12$ ($\sigma > 20\text{kg/cm}^2$ 범위에서 파괴변형율)로서 Creep 強度式을 전개하였다.

$$\sigma_f = 11.07(10^8 \dot{\epsilon}_f)^{0.121} \quad [10]$$

여기서 $\dot{\epsilon}_f = 0.12/t_f$

t_f 의 단위는 초이다.

그러므로 그림 1은 [7]과 [10] 式을 Plotting 한 曲線과 실험된 모래로움의 측정치의 곡선을 비교한 것이다(1).

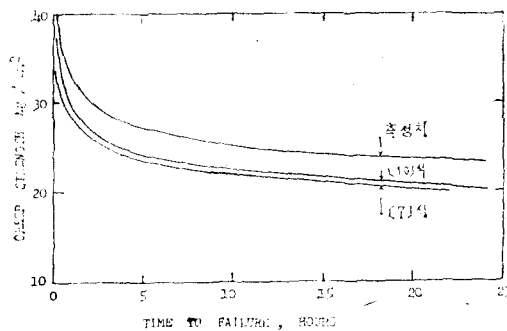


그림 1. 強度와 파괴時間과의 관계

3. 強度와 Creep比에 있어서 溫度의 영향

非凍結된 흙에서 溫度가 Creep 比에 미치는 영향에 관해서는 Mitchell 等 여러 學者에 의해 說明되었으며,凍結된 흙에서는 溫度의 영향을 Andersland 와 Akili (1967), Akili (1970) 그리고 Andersland 와 Alnouri (1970)에 의해 발표되었다.

다른 要素는 一定하고 가정하면, Creep 比에 미치는

溫度의 영향에 관해서 Andersland 와 Alnouri (1970)과 다음과 같이 전개 하였다.

$$\dot{\epsilon}^{(C)} = A \exp(-L/T) \quad [11]$$

여기서 A : 媒介變數

$$L = U/R \quad [12]$$

여기서 U : 活性 에너지

R : 氣體 常數

변하는 溫度에 對하여서 [11] 式에서 A 와 L 의 값은 절대온도의 逆에 對하여 測定된 Creep 를 자신대수치에 Plotting 하므로 얻을 수 있다. 또한 높은 溫度와 낮은 應力 범위에서는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}^{(C)} = \dot{\epsilon}_c(\sigma/\sigma_{CT})^n = A \exp(-L/T) \quad [13]$$

여기서 σ_{CT} : 溫度 T 에 있어 σ_c

A 를 제거하기 위하여 $T = 273^\circ\text{K}$ 때 $\sigma_{CT} = \sigma_{CO}$ 로 하면 (여기서 σ_{CO} : 0°C 때 σ_c)

$$\dot{\epsilon}^{(C)} = \dot{\epsilon}_c(\sigma/\sigma_{CT})^n = A \exp(-L/273) \quad [14]$$

[13] 式을 [14] 式으로 나누면

$$\left(\frac{\sigma_{CT}}{\sigma_{CO}}\right)^{-n} = \frac{\exp(-L/T)}{\exp(-L/273)} \quad [15]$$

[15] 式은

$$\sigma_{CT} = \sigma_{CO} \cdot \exp\left\{\frac{L(273-T)}{273nT}\right\} \equiv \sigma_{CO} f_1(T) \quad [16]$$

[13] 式에 [16] 式을 代入하면

$$\dot{\epsilon}^{(C)} = \dot{\epsilon}_c \left(\frac{\sigma}{\sigma_{CO}}\right)^n \cdot \exp\left\{-\frac{L(273-T)}{273T}\right\} \quad [17]$$

[17] 式에서 $\dot{\epsilon}_c \left(\frac{\sigma}{\sigma_{CO}}\right)^n$ 은 熔融點에 가까운 溫度에서

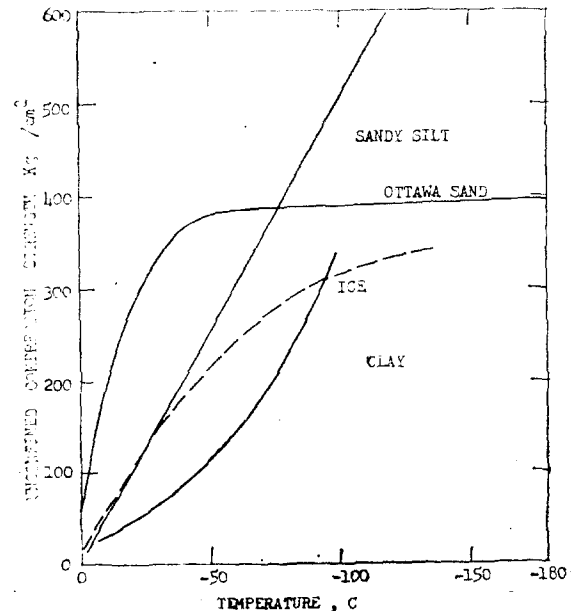


그림 2. 強度에 對한 溫度의 영향

Creep 비를 나타내고 있다.

[17] 式은 溫度가 直線인 감소를 함에 따라 Creep 強度의 指數型인 증가를 意味한다. Sayles (1966)의 實驗에 依하면 粘土의 경우에는 거의 같으나 실트나 모래 처럼 粗粒土의 凍結된 흙에서는 強度는 -100°C 以前에는 거의 直線 혹은 拋物線型으로 나타나나 -100°C 이후로는 모두 直線을 나타냄을 보여주었다(그림 2).

III. 實驗 및 分析

1. 試料 및 實驗設備

赤色の 粘土를 採取하여 4 체를 통과시켜 試料로 막하였다.

흙을 凍結 시킬 수 있는 冷凍機는 높이 110 cm, 폭 80 cm, 길이 75 cm 의 120 Volt, 250 kw 로서 자동제어를 갖추어 있고, 예로서 -20°C 를 長時間 一定하게 유지할 수 있다. 흙을 다져서 供試體로 만들 수 있는 다짐 장치는 Harvard 大學校의 S.Wilson 교수에 依해서 고안된 小型 다짐기이다.

2. 試驗 方法

粘土를 Harvard 小型 다짐 장치와 그 方法에 依하여 供試體를 製作함과 아울러 다음과 같이 區別하여 試驗하였다.

1) 다짐의 效果

含水量을 一定하게 하였을 때가 凍結상태에 어떤 영향을 줄 것인가의 문제를 해결하기 위하여 供試體로 만들어 冷凍機에 넣어 一定한 時間 (-25°C , 48hrs)이 경과한 후에 凍結量 및 壓縮強度를 測定하였다. 이때에 供試體에 荷重을 적재한 경우와 안한 경우를 나누어 試驗하였다.

2) 含水量이 一定할 때 時間에 따른 변화.

試料에 對하여 含水量의 변화는 없고 時間 (24, 48, 144, 168 時間)에 따라 凍結된 흙이 어느 정도의 荷重에 견딜 수 있는 與否를 검토하기 위하여, 다짐 결과 만들어진 供試體를 凍結시킨후 壓縮強度를 測定하였다.

3) 含水量의 변화에 따른 一定한 時間이 경과한 후의 상태.

含水量을 各各 변화시켜서 一定한 時間이 경과한 후의 凍結量과 그에 따르는 強度試驗을 行하였다.

3. 試驗 結果에 對한 分析

同一한 試料에 관해서 含水量이 一定할때 供試體 위에 荷重을 積載한 경우에 乾燥單位 重量과 凍結量에

對한 그림 3, 4 를 보면 最適 含水量과 最大 乾燥密度와의 曲線의 逆曲線을 나타냄을 알 수 있다.

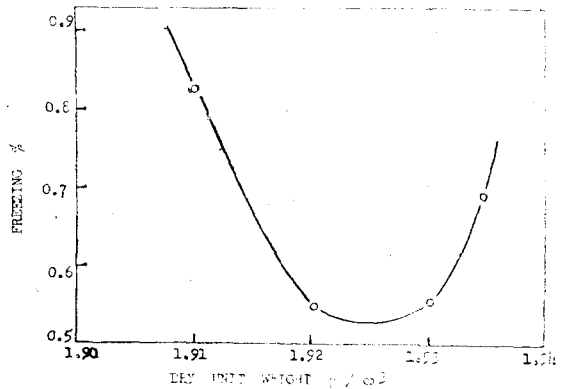


그림 3. 荷重을 적재하지 않은 상태의 凍結量

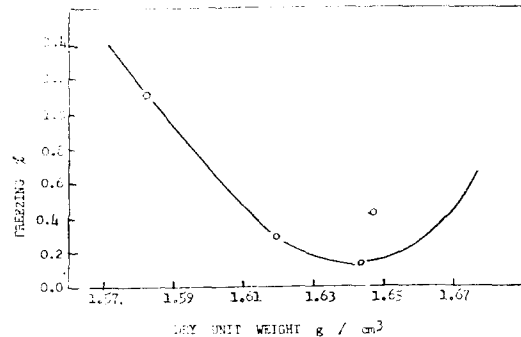


그림 4. 荷重을 적재한 상태의 凍結量

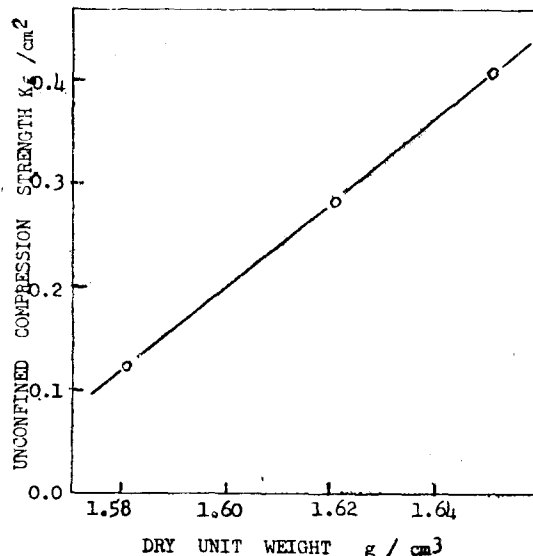


그림 5. 다짐정도에 對한 압축강도(동결후)

凍結後 乾燥單位 重量이 증가함에 따라 壓縮 強度는 거의 증가됨을 알 수 있었으나 (그림 5) 흙의 性質에 따라 정확한 結論을 내리기는 곤란한것 같았다.

含水量을 一定하게 하고 凍結 時間만 지속 시키면 壓縮 強度가 더욱 증가하여 直線의 형태를 보여 주나 어느 정도 時間이 경과 하면 거의 一定한 強度를 유지 하는것 같다. (그림 6)

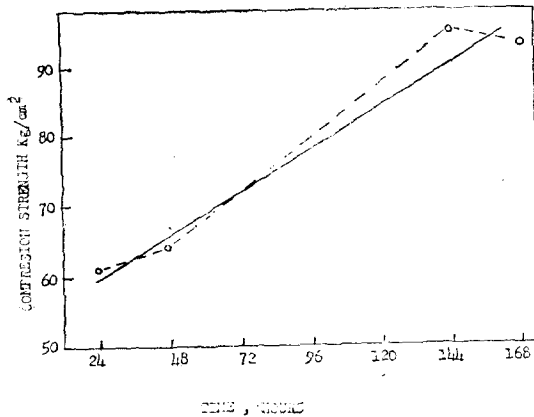


그림 6. 含水量이 一定할 때 同一 試料인 경우 (凍結後)

IV. 結 論

凍結된 흙에 있어 強度에 관한 理論과 實驗을 통해 다음과 같이 결론을 맺으려고 한다.

1. 飽和된 흙이 凍結되면 一軸壓縮強度는 $qu = qi \tan(45 + \frac{\phi}{2})$ 로 나타내며 水結 정도에 상당한 영향을 받게 된다.

2. Creep 強度는 파괴까지의 時間, Creep 比, 變形率, 溫度等의 영향을 받고 있다.

3. 溫度가 감소함에 따라 Creep 強度는 指數型인 증가를 보여 주나 그 曲線型은 흙의 종류 및 다른 要素에 따라 다르게 나타나리라 사료된다.

4. 乾燥 單位重量과 凍結量과의 관계에서는 含水量과 乾燥密度에 관한 다짐 曲線의 逆曲線을 나타냄을 알 수 있다.

5. 乾燥 單位重量이 증가함에 따라 壓縮強度가 거의 증가하고 있음을 알았으나 흙의 性質에 따라 변화가 있을 것으로 간주되어 확실한 結論을 내리기가 곤란하다.

6. 含水量이 一定할 때 凍結이 지속되는 時間에 따라 凍結된 試料의 壓縮強度도 증가되어 直線의 형태로 됨을 거의 인식할 수 있으나, 흙의 종류에 따라 다를 것으로 간주된다.

本 論文에 依해서 凍結된 흙의 力學的인 문제를 해결하는데 조금이나마 도움이 되기를 바랄뿐이다.

끝으로 本 研究를 위하여 研究費 보조를 하여 주신 연세대학교 총장님께 감사드리며 本號를 맺는다.

참 고 문 헌

1. Branko Ladanyi,
"An Engineering Theory of Creep of Frozen soils,"
Canadian Geotechnical Journal, 9, 63. p 63-79. 1972
2. Richard, D. Walker and Harry, J. Pence,
"One Cycle Slow-Freeze Test for Evaluating Aggregate performance in frozen concrete,"
National cooperative Highway Research Program Report 65. p 1-21. 1969
3. Sanger, F. J.,
"Ground Freezing in Construction,"
A. M., ASCE Proc. vol. 94, SM 1, No. 5743, p 131-157. 1968
4. Broms, B.B. and Yao, L.Y.C.,
"Shear Strenth of a Soil after Freezing and Thawing,"
A.M., ASCE Proc. vol. 90, SM 4, No 3958, 1964
5. Gutzwiller, M.J. and Musch, F.E.,
"Freezing and Thawing Effects on Prestressed Concrete."
A.M., ASCE Proc. vol. 128, No. 3405, p 152-167, 1963
6. Kersten, M.S.,
"Thermal Propertise of Soils,"
Highway Research Board No 2. p 161-166 Washington D. C. 1952
7. Carlson, H.,
"Calculation of Depth of thaw in Frozen Ground,"
Highway Research Board No 2. p 192-223 Washipton D. C. 1952
8. Brown, W.G, Johnston, G.H. and Brown, R.J.E.,
"Comparison of Observed and Calculated Ground Temperatures with permafrost Distribution under a Northern lake."
Canadian Geotechnical Journal vol 1, No. 3. p 147-154. 1964

9. Brown, W.G.,
"Difficulties Associated with predicting Depth of Freeze or Thaw."
Canadian Geotechnical Journal, vol. 1, p 215-226. 1964
10. Casagrande, A and peck, R.B.,
"From theory to practice in soil mechanics."
John Wiley and ons. p 246-295. 1960
11. Andersland, O.B. and Alnouri, I.,
"Time dependent strength behavior of frozen soils,"
A.M. A.M. ASCE. Proc. 96. Sm 4, p 1249-1265. 1970
12. Goughnour, R.R. and Andersland, O.B.,
"Mechanical properties of a sand-ice system,"
ASCE Proc. vol. 94. Sm 4. p 923-950. 1968
13. Erik G.T. and Francis, H. Sayles.,
"In situ Creep analysis of room in frozen soil."
ACSE Proc. vol. 98. SM 9. p 899-915. 1972
14. Hwang, C.T. and Murray, D.W.,
"A Thermal Analysis for Structures on permafrost."
Canadian Geotechnical Journal vol. 9. No. 1, p 33-46. 1972

會員移動事項

會員여러분께서 다음처럼 移動事項이 있을 때에는 본인은 勿論 親知께서 即時 本會 事務局에 連絡하여 주시기 바랍니다.

接受되는데로 會員動靜欄에 紹介하여 드리겠습니다.

1. 宅이 移徙했을 때 : 住所 및 電話番號
2. 職場이 移動되었을 때 : 職場名, 職位, 所在地 및 電話番號
3. 其他 學位를 받는 境遇, 海外旅行을 하는 境遇, 特別한 事業에 參與하는 境遇 等

正會員入會要領

水文 또는 이와 關聯있는 知識이 있거나 또는 識見이 높은 분, 水文을 應用하는 事業에 從事하는 분으로서 本學會 事業越旨에 贊同하여 入會를 願하는 분은 既加入한 會員의 推薦을 받아 本學會 所定樣式에 의한 入會願을 提出하여 주시기 바랍니다.

提出處 : 韓國水文學會事務局

電話 (23) 0491~3