

凍結 및 凍結-融解作用을 받는 粘性土의 強度와 그의 變形舉動

Experimental Studies of Characteristics of Strength and Deformation Behaviour of Frozen and Cyclic Frozen-thawed Clayey Soils

柳 能 桓* · 柳 瑩 善** · 柳 然 澤**
Ryu, Neung Hwan · Ryu, Young Son · Ryu, Yeon Taek

Summary

Some experiments were carried out to investigate the effects of freezing and thawing on the strength and strain characteristics of alluvial silty clay under the different temperatures, loading and moisture conditions. The results were as follows :

1. The soil used was proved to be consisted of silty clay with honey-combed structure, and showed higher dilatancy, frost activity and lower stability in natural state.
2. Soil treated with freezing and thawing cycles showed lower compressive strength compared with the non treated. The strength decreased with increment of freezing and thawing cycles. It's shapes of stress-strain curves were flat and did not formulate a peak while the peak strength of higher moisture content soil decreased with the increment of moisture content. It's decrement ratio was most distinctly shown at the first one cycle of freezing and thawing.
3. The cohesion decreased due to freezing and thawing cycles but internal friction angle was not changed.
4. The liquid limit decreased with increment of freezing and thawing cycles, and became almost constant after three cycles of freezing and thawing.
5. The strength under simple loading at failure mode was appeared to be higher compared with the cyclic loading after freezing and thawing but initial moisture content effect was not

* 江原大學校 農科大學

** 忠北大學校 大學院

** 農漁村振興公社

키워드 : 蜂巢 構造, 吸着水膜, 季節凍土帶, 塑性破壞, 脆性破壞, thixotropy, dilatancy, ice lense, rhythmic ice banding.

observed.

6. Ice lense was not observed within 50% of ice content ratio but observed over 100%. The higher the ice content ratio, the higher the peak strength. As a matter of fact, it seems that an optimum ice content ratio exists for plastic mode and the least compressive strength.

I. 緒 論

冬季와 非冬季가 交叉하는 地域에서는 凍結 및 凍上作用에 의하여, 地盤이 膨脹 및 龜裂이 발생하고 또 解水과 더불어 融解되는 소위 季節凍土帶에서는 凍結-融解作用이 反復됨에 따라서 흙의 性質에 여러가지 影響을 미친다. 即 冬季에는 凍結되었다가, 融解期에는 過飽和狀態로 되어 盛土 및 切土 斜面이나, 基礎地盤의 強度가 低下되어 崩壞 및 沈下를 誘發하는 事例가 많아서 各種構造物의 施工 및 維持管理에 여러가지 問題가 발생된다.

最近에 脚光을 받고 있는 都市土木의 凍結工法, 液化가스의 貯藏工法, 各種道路工事의 凍上破壞防止對策工法에서 凍土地帶의 天然資源開發에 이르기까지 地盤의 凍結-融解問題는 새로운 과제를 이룰것이며 특히 한-소和解를 契機로 하여 시베리아 地方의 資源開發에 깊은 關心을 가지고 있는 우리의 情形에서는 本研究의 意義는 더욱 크다고 할 수 있다. 即 石油送油管의 埋設時에 約 70°C를 維持해야 하는 高溫의 管路로 인한 周邊凍結地盤이 融解沈下하여 pipe line 系統에 被害가 發生되는 일이 많다.

또한 農業工學上의 觀點에서 볼 때 地盤의 凍結融解로 土壤侵蝕, 農用道路·水路의 流失이나 各種 水利施設物의 決潰等 農作業 및 利用管理에 여러가지 問題點이 發生하고 있으나, 우리나라에서는 이에 關한 研究가 體系的으로 이루어진 바 거의 없으나, 外國에서는 本分野에 상당한 關心을 가지고 研究가 進行되어 왔다. 日本에서는 1957년에 眞井¹⁶⁾에 의한 凍結土의 強度에 關한 研究가 있고, 그 이후에는 高志⁸⁾

등의 凍土의 各種強度影響因子에 關한 研究를 한 바 있으며, 生賴¹⁵⁾ 등은 凍土에 대한 壓縮強度의 溫度, 歪速度 및 供試體치수의 依存性을 研究한 바 있고, 岡本⁹⁾ 등은 凍結 壁體의 耐壓強度測定을 위한 實驗을 한바 있고, 青山³⁾는 Naga 地方의 道路工事에서 地盤의 凍結-融解로 인한 支持力의 變化를 測定한 바 있다. 소련에서는 永久凍土 地域의 自然凍土를 對象으로 한 研究가 많고, Vialov²²⁾ 로 代表되는 크리프現象을 主로 한 研究가 많이 있다. 또 美國이나, 유럽, 캐나다 등의 低溫地帶를 가진 나라에서도 凍土의 力學的 研究^{4,5,7,12,17,23)}는 歷史도 오래고 그의 研究結果가 많으며, 大部分의 地方에서 凍結工法 設計時에 Tsytoich²¹⁾의 理論을 利用하는 例가 많다. 또 最近에는 自然凍土의 力學的 研究보다는 凍結工法의 需要增加에 따라서, LNG 地下貯藏탱크의 建設等 人工凍土의 力學的 特性의 解明이 活發하게 遂行되고 있다.

今回の 研究에서는 西南海岸의 沖積粘土에 對한 基本性質을 파악하고, 이들 試料에 對하여 凍結 및 凍結-融解反復作用과 內的 및 外的 條件에 따른 各種強度特性과 그의 變形舉動을 究明코져한다.

II. 材料 및 方法

本研究에 使用된 試料는 統一分類法으로 CL-ML에 屬하고 比重이 2.66, 粘着力이 2.3kg/cm², 内部摩擦角은 10°, 透水係數는 6.4×10^{-6} cm/sec, 액성한계는 40% CME가 20%이고 收縮限界가 $21 - 1.1\sqrt{LL - \frac{LL^2}{800}}$ 보다 작은 값으로 비교적 凍上性이 높은 실트質系의 粘土에 해당

된다. 凍結 및 凍結-融解는 컨트롤 챔버(Control chamber)를 사용하고 $-20^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$ 까지 5段階로 自動調節되도록 프로그램을 作成하여 人力시키고 含水比는 28%, 32%, 38%로 調節하여, 載荷方法, 凍結-融解反復 및 析出氷晶의 有無에 따른 變形 및 強度特性을 調査하였다.

또 흙의 性分과 構造의 特性을 究明하기 爲하여 X-ray power diffractor와 SEM 分析을 實施하였고, 주로 Al, Mg, Li, O, Fe, Ca, Na, K등의 鍍物質이 主從을 이루며, Photo-1과 같이 構造의 으로는 蜂巢構造(honey-combed structure)로써 초기 空隙比가 1.15인 압축성과 팽창성이 높고, 活性이 크며 安定性이 낮은 흙으로 判明되었다.



Photo-1. Soil structure by SEM analysis

III. 實驗結果 및 考察

人工的으로 凍結 및 凍結-融解된 흙의 強度와 變形特性을 正確하게 把握하기 爲해서는, 現場條件과 同一하게 試驗條件을 부여해야하나, 原位置에서의 複雜한 條件들을 모두 充足시키기는 곤란하다. 即 氣候條件등 可能한 한 實際로 破壞를 이끄는 狀態에 接한다든가 또는 最惡의 狀態에서 實驗을 實施함이 一般的 接近 方法이며, 이들의 結果를 實際設計에 反映하면 技術的 으로는 安全則에 屬하게 된다. 含水比가 變化되지 않는 閉鎖系에서도 凍結-融解를 받은

흙은 그의 物理的 力學的性質이 變化됨에 着眼하여 몇가지 實驗을 實施하였다.

1. 凍結-融解 Cycle 回數가 흙의 強度 및 變形特性에 미치는 影響

比較를 爲하여 非凍結土와 凍結-融解를 反復시킨 試料를 取하였고, 試驗을 爲해서, 調製된 試料의 最大乾燥密度는 $1.46\text{g}/\text{cm}^3$ 이었고 最適含水比는 32%로써, 乾燥側과 濕潤側을 各各 28%, 37% 되도록 調製한 후에 一定期間 養生하여, 1, 3, 5, 7주기(cycle)의 凍結-融解를 反復시켜 應力-變形測定 試驗을 實施하였다. Fig. 1에서, 凍結-融解를 받았던 흙은 非凍結土에 比하여 그의 壓縮強度가 低下되고 應力-變形曲線의 形狀이 平坦하게되는 傾向을 나타내고 있다. 이는 凍結時에 形成된, 氷晶이, 土粒子에 2重層으로 둘러쌓여 있는 吸着水膜을 끌어당겨서, 氷晶을 점점 더 크게 발달시키므로 土粒子間의 電氣포텐셜이 低下되고, 이에 따라서 氷晶分離作用에 의한 粒子間의 空隙의 增大로 結合력이 弱화되기 때문이다. 또 凍結-融解土는 壓縮時에 剪斷現狀이 뚜렷하게 나타나며, 氷晶

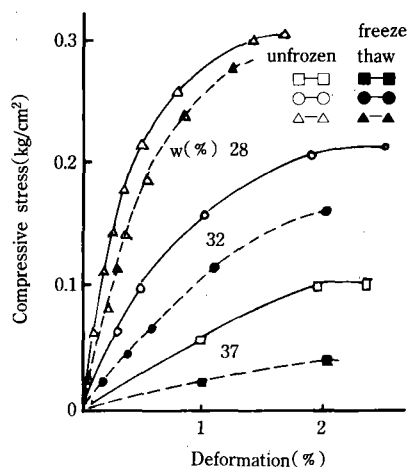


Fig. 1. Relationship between compressive stress and deformation with moisture content

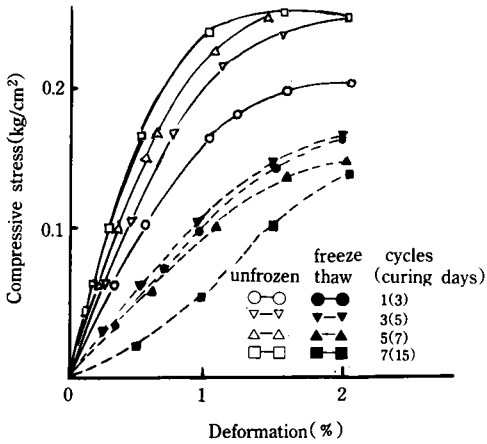


Fig. 2. Relationship between compressive stress and deformation with freeze thaw cycles

分離에 의한 土粒子間의 相對的 變位가 일어나서 粒子사이에 間隙이 增大되고 이로 因하여 微細 龜裂이 漸次發達되어, 脆性破壞를 일으키고, 이에 反하여, 不凍結土는 塑性破壞現狀으로 되는 傾向을 보였다.

또 含水比와 凍結-融解反復回數가 클수록 強度低下가 크게 나타났고 (Fig. 2), 不凍結土에서는 着生期間이 길어질수록 含水比의 分布狀態가 良好하고 空隙中에 부압의 減少로 粒子間의 結合力이 回復되는 소위 식스토로피(Thixotropy)現狀을 나타내었다.

Fig. 3은 含水比에 따른 압축강도와 동결-융해 반복회수와 의 關係를 表示한 것으로 凍結-融解土는 1회의 동결-융해 反復試驗에서 強度低下가 가장 크게 나타났고, 그 이후에는 동결-융해反復回數에 따라서 徐徐이 減少되는 傾向을 보였으며, 低含水比의 試料에서는 強度變化가 크게 발생되지 않았다.

Fig. 4, Fig. 5는 凍結-融解反復에 따른 粘着力과 内部摩擦角과의 關係를 나타낸 것으로 粘着力의 減少는 1 cycle의 凍結-融解에서 가장 크게 나타났고 그 이후에는 cycle數가 增加되어 도 거의 一定하게 나타났다. 이와 같은 事實은

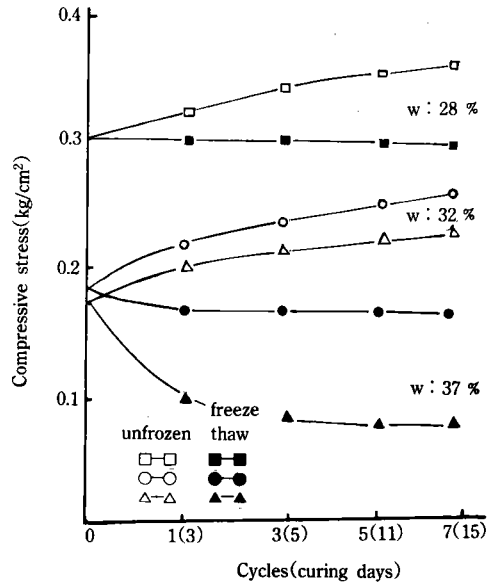


Fig. 3. Relationship between compressive stress and freeze-thaw cycles with moisture content.

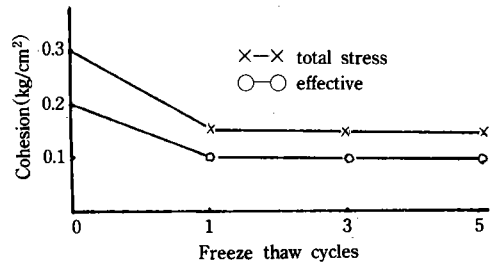


Fig. 4. Relationship between cohesion and freeze-thaw cycles.

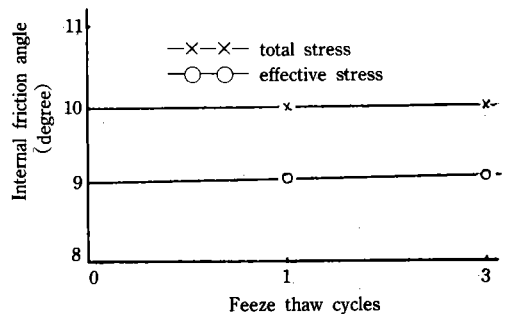


Fig. 5. Relationship between internal friction angle and freeze-thaw cycles

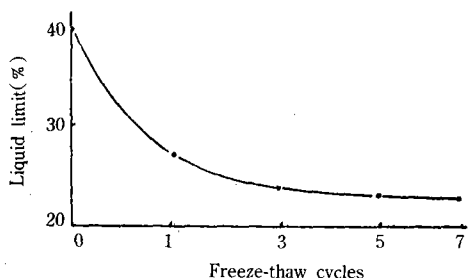


Fig. 6. Relationship between liquid limit and freeze-thaw cycles

前述한 Fig. 3과도 밀접한 關係가 있다. 또 内部마찰각에는 거의 變化가 일어나지 않았다. 凍結-融解土의 強度 低下는 析出水晶과 水晶의 成長에 의한 흙의 構造變化에 그 主要原因이 있고, 構造變化는 주로 微小龜裂의 發生에 의한다.

Fig. 6은 液性限界와 凍結-融解反復回數와의 關係를 表示한 것으로, 初期의 3回以內的 反復에서 液性限界가 크게 變化되었다. 이는 凍結-融解反復初期段階에서는 土粒子自身은 물론 흙속에 内存되어있는 自然狀態의 固有한 애그리게이트 그룹(Aggregate group)과의 結合력이 一時的으로 減少되기 때문이며, 계속하여 凍結-融解作用이 反復되면 土粒子 自體의 애그리게이션 現象으로 因하여 液性限界는 더이상 變化되지 않는다고 생각된다.

2. 反復載荷가 強度 및 變形에 미치는 影響

흙이 凍結中에는 非排水狀態로 되어 質의 間隙水壓이 발생되나 融解되면 過剩間隙水 때문에 間隙水壓이 增加되고, 有效應力은 減少되며 이 때 排水作用이 일어난다면, 過剩間隙水壓은 減少되어 흙은 再壓密되므로 原來의 有效應力으로 되돌아가나 間隙比는 變化된다. 이와같은 일련의 結果는 非排水反復荷重을 받을 때와 같은 效果¹⁸⁾가 나타나며 非排水土에 荷重이 反復해서 作用하면 흙의 다짐效果가 나타나서 土粒子 自體에는 有效應力의 增加를 가져온다. 이와같은

一連의 舉動을 調查하기 위해서 單純載荷, 反復載荷 및 凍結-融解反復反復荷重으로 區分하였고, 이들 荷重과 變形과의 關係를 Fig. 7에 表示하였다. 本 그림에서는 各各의 荷重의 反復은 나타내지 않고 대신에 主應力差의 水準에서 一連의 反復荷重이 適用된 回數를 막대 그래프로 表示하였다. 實際로 反復荷重과 單純荷重下에서 非排水剪斷強度는 비슷하였으나 破壞時의 變形量은 反復荷重에서 훨씬 크게 나타났고, 初期含水比의 影響은 거의 나타나지 않았다. Fig. 8에서 같이 凍結-融解反復反復荷重을 받았던 試料의 破壞荷重은 單純 荷重을 받았던 것보다

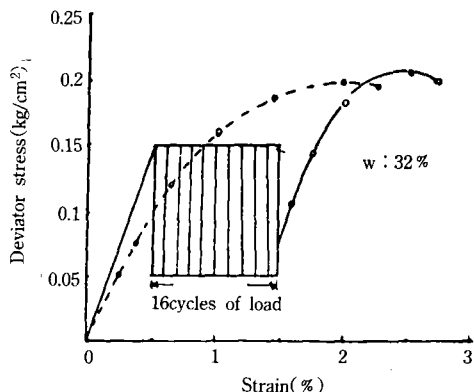


Fig. 7. Relationship between monotonous and repeated load and strain on unfrozen soils

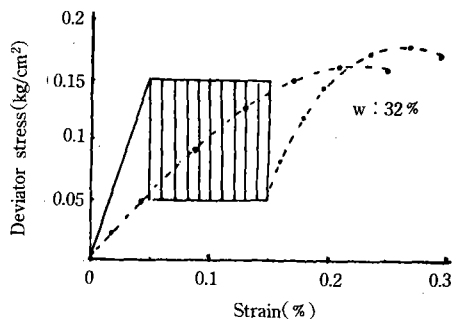


Fig. 8. Results from monotonous and repeated load and strain on freeze-thaw soils

크게 나타났다. 이는 反復荷重이 作用함에 따라서 초기에는 흙이 점점다져져서 加해진 拘束壓力에 해당되는 정도의 空隙水壓이 발생되므로 初期液狀化 現象을 일으켜 實際로 壓縮量은 增加되며, 反復荷重이 계속되면 흙은 dilatancy 現象을 일으켜, 陽의 空隙水壓이 減少되고 큰 變形을 남겨놓은 채 眞의 空隙水壓狀態로 되어 適用荷重에 抵抗할 수 있는 充分한 強度增加를 誘發시킨다.

3. 含水比가 흙의 強度에 미치는 影響

공시체는 직경 5cm, 높이 10cm의 크기로 하였고, 컨트를 챔버내에서 析出氷晶이 充分히 발달되도록 하기위해서 시료의 上端部分은 영하로 유지시키고 하단부는 스티로폼(Systro-foam) 재로 단열시켜서 氷晶發達을 유도하였다. 이때 含水比 50% 이하에서는 析出氷晶이 관찰되지 않았으나 100% 이상에서는 리듬믹 아이스 밴딩(Rhythmic ice banding) 현상이 나타났다. Fig. 9는 含水比에 따른 應力-變形關係 曲線을 表示한 것으로 含水比가 높을 수록 peak 強度는 높고, 그 값은 變形量이 3% 内外에서 형성되고 있다. 또 大體의으로 5% 이상으로 되면 強度變化는 거의 일어나지 않으며 含水比 200% 内外에서 強度와 變形量 모두 急激한 變化를 나

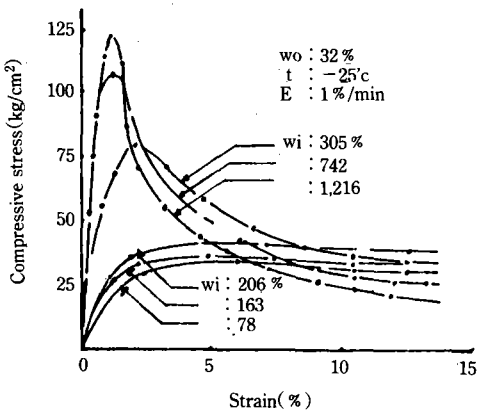


Fig. 9. Relationship between compressive stress and strain with ice content ratio

타내고 있다. 또 이들 값은 初期含水比나 溫度 依存성은 나타나지 않았다.

Fig. 10은 一軸壓縮強度와 含水比와의 關係를 表示한 것으로 析出氷晶을 包含한 凍土와 包含되지 않은 凍土의 強度는 큰 차이가 나타나지 않았고, 역시 含水量에 따라서 強度가 增加되는 傾向을 보였으나 析出氷晶의 發達이 되지않는 50% 이하의 含水比에서는 오히려 強度가 減少되는 傾向을 나타냈다. 따라서 Fig. 9와 Fig. 10에서 관찰된 바와같이 析出氷晶을 포함하고 있는 흙은 塑性破壞를 나타내는 最適의 含水比가 存在하며 析出氷晶을 包含하지 않고 있는 50% 이하의 含水比에서는 壓縮強度를 最少로 하는 含水比가 存在함을 알 수 있다.

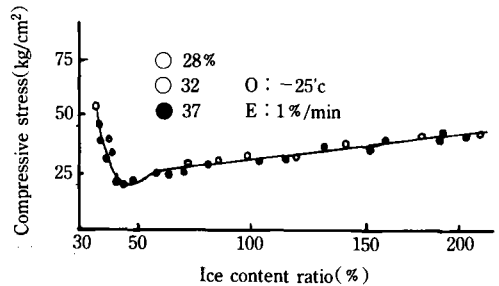


Fig. 10. Relationship between compressive stress and ice content ratio

IV. 結 論

凍結 및 凍結-融解反復作用이 沖積粘土의 強度와 變形舉動에 미치는 影響을 究明하기 위하여 몇가지 溫度條件과 載荷條件 및 水分條件을 附與하여 實驗한 結果 다음과 같다.

1. 공시된 흙은 凍上성이 매우 높은 실트質 粘土로써 自然狀態에서 蜂巢構造를 나타내며 팽창성과 압축성이 높고 活性이 크고 安定성이 낮은 것으로 판단되었다.

2. 凍結-融解土는 非凍結土에 比하여 그의 壓縮強度가 낮고 凍結-融解反復回數에 따라서 減少하며, 應力-變形曲線은 平坦하여 피크 強

도가 나타나지 않았으며 습수비가 높을수록 낮았고 그의 低下率은 最初1回の 凍結-融解反復에서 가장 뚜렷하게 나타났다.

3. 凍結-融解反復作用으로 흙의 粘着力은 減少되나 내부마찰각은 變化하지 않는다.

4. 液性限界는 凍結-融解反復作用에 따라서 減少되나 3회이상 反復되면 土粒子 自體의 애그리게이션현상으로 인하여 거의 一定하게 되었다.

5. 破壞時의 強度는 單純荷重보다, 凍結-融解反復荷重에서 크게 나타났고 初期含水量의 영향은 나타나지 않았다.

6. 析出氷晶은 50% 이하의 습수비에서는 나타나지 않았고 100% 이상에서 비로서 나타났으며 습수비가 높을수록 피크 強度가 크게 나타났으며, 塑性破壞와 最小의 壓縮強度를 나타내는 最適의 습수비가 存在한다.

本研究은 '90-'91年度 教育部學述振興財團의 研究費支援에 의하여 遂行되었음.

參 考 文 獻

1. Andersland, O. B., W. Akili, Stress effect on Creep Rates of a Frozen Clay soil, Geotec. 17, pp. 27-39, 1967.
2. 青山清道, 小川正三, 福田誠, 凍結-融解を受けた土의 性質, 土と基礎, Vol. 25, No. 7, pp. 41-46, 1977.
3. 青山清道, 凍結-融解を受けた土의 應力と變形特性, 新湯大研究書4號 pp. 111-120, 1982.
4. Benoit, G. R., Effect of Freeze-Thaw cycles on Aggregate Stability and Hydraulic Conductivity of three soil Aggregate Size, Soil Sci., Soc. Amer. Proc. 37(1), pp. 3-5, 1976.
5. Bernard, D. A., A. Mechanism for Predicting the Effect of cyclic freeze-thaw on Soil Beha-

- viour, The 2nd Int'l. Sym. on Ground Engineering NIT, pp. 258-296, 1980.
6. 小川正三, 青山清道, 福田誠, 析出氷晶을 含え凍土의 一軸壓縮強度, 第17回 土質工學研究發表會, pp. 729-732, 1982.
7. Chamberlain E. J., A. J. Gow, Effect of Freezing and Thawing on the permeability and Structure of Soils, Ground Engineering, Elsevier, pp. 73-92, 1979.
8. 高志勳, 生賴孝傳, 山本英夫, 岡本純, 均質存粘土의 一軸壓縮強度에關係 實刑的研究, 土木學會論文報告書, No. 315, pp. 83-93, 1981.
9. _____, 砂凍土의 繰返し載荷による一軸壓縮物性, 日本雪氷學會講演集, p. 141, 1981.
10. _____, 細粒土と粗粒土を混合けた凍土의 一軸壓縮物性, 第36會 土木學會年次學術講演概安書III, pp. 496-497, 1981.
11. Gardner, R., Some effect of Freezing and Thawing on the Aggregation and Permeability of Dispersed Soils, Soil Sci. 60, pp. 437-443, 1945.
12. Haynes, F. D., J. A. Karalius, Effect of temperature on the Strength of Frost silt, CRREL, Report 7703, p. 27, 1977.
13. Haynes, F. D., Strength and Deformation of frozen silt, Proc. 3rd Int'l. Conf. on Permafrost, Vol. 1, pp. 655-661, 1978.
14. 福田誠, 青山清道, 小川正三, 凍結-融解を受けた土의 強度低下, 土木學會 第33會 學術講演概安集, pp. 464-465, 1978.
15. 生賴孝傳, 高志勳, 山本英夫, 土의 凍結に伴析出氷晶의 一軸壓縮強度, 雪氷學會誌 第43卷 2號 pp. 83-96, 1981.
16. 眞井, 凍土의 強度について, 北海道大學工學部 研究報告書, No. 16, pp. 45-68, 1957.
17. Kaplar, C. W., Laboratory Determination of the Dynamic Moduli of frozen Soil and Ice, Pro. of Permafrost Int'l. Conf. pp. 293-301,

- 1963.
18. Martin, G. R., W. D., Fin and M. B. Seed, Fundamentals of Liquefaction under cyclic loading, Jour. of G. E. D. ASCE Vol. 101, GT5, pp. 423-438, 1975.
 19. _____, Rhythmic Ice Banbing in Soil, Highway Res. Board, Bull. 218, pp. 11-23, 1976.
 20. Silver, M. L., H. B. Seed, Deformation Characteristic of sand under cyclic loading, Jour. of SMFE, Division ASCE, Vol. 97, No. SM8, pp. 1081-1098, 1971.
 21. Tsyтовich, N. A., (Traslated from the Russian) Bases and Foundations of frozen Soils, HBR, special report No. 58, NAS Publication 804, p. 28, 1960.
 22. Vialov, S. S. (Traslated from the Russian) The Strength and Creeps of frozen Soils and Calculation for Ice-Soil retaining structures U. S. ATR CRREL, 1962.
 23. Wallejo, J. E., T. B. Edil, Stability of Thawing Slopes ; Field and Theoretical Investigations, 10th ICSMFE pp. 545-548, 1981.
 24. 安田, 片岡, 緒方, LNG地下 タンク周邊地盤の 低溫下による強度, 變形物性, 電力中央研究報告, No. 378011, 1978.
 25. Young, R. N., Short-Term cyclic freeze-thaw Effect on Strength properties of a sensitive clay proc, 3rd Intl. Symp. on Ground Freezing, Vol. 1, pp. 98-102, 1982.

(接受日字 : 1991. 5. 9)