

反復荷重, 溫度變化 및 初期條件이 冲積粘土의 構造變化와 力學的 特性에 미치는 影響

Influence of Repeated Loading, Alternation of Temperature and Initial Condition on the Change of Structural and Mechanical Characteristics of Alluvial Clayey Soil

柳 能 桓* · 柳 瑩 善** · 최 중 대*** · 金 基 星****
Ryu, Neung Hwan · Ryu, Young Sun · Choi, Joong Dae · Kim, Ki Sung

Summary

To estimate soil behavior and structural characteristics under the conditions of cyclic loading, freezing & thawing and initial state, several testing was performed and obtained following results.

1. After repeated freezing and thawing processes, original soil structure was destroyed and changed to globular structure from honeycomb or tube in its structure types. Also above processes resulted increasing the soil compression strain while decreasing the failure stress in stress-strain relationship and reached the soil structure into the mode of brittle fracture. Under cyclic loading conditions, soil cluster which was originally dispersed structure colloided with each other, separated, and finally the soil failed due to the effect of overcompaction.

2. Through the stabilization processes separated by four steps, the structure of soil skeleton was changed to quite different globular type. The degree of compressibility of soil was decreased in the normally consolidated zone, while the strength against external load increased due to soil particle stabilization.

3. Soil stress-strain characteristics were largely influenced by repeated up and down processes of temperature. The maximum deformation was obtained in the case of temperature

* 江原大學校 農科大學

** 忠北大學校 大學院

*** University of Maryland, U. S. A.

**** 日本 北海道 大學

키워드: Cluster 구조, 構造係數, 脆性破壞, 彈性復
元量, 疎水性, 氷晶, Aggregation, 綿毛構
造, 環結合, 「土-水」, 降伏應力

between 0~10°C by the reason of particle cluster reformation.

4. Soil compressibility was largely influenced by the optimum moisture content. Under freezing process, swelling could be found and its magnitude was proportional to the density of soil.

5. Density of soil was decreased as increasing the number or repeated freezing and thawing processes and the largest decreasing rate was found at the first turning point from freezing to thawing cycle.

I. 緒 論

흙은 다른 土木材料와는 달리 內的 및 外的 영향인자가 매우 복잡하며, 그의 構造變化와 역학적 특성은 주로 온도변화, 초기상태 및 응력이력에 영향을 받는다. 특히 우리나라와 같이 冬季와 非冬季가 交叉되는 지역에서는 동결·융해작용이 반복됨에 따라서 地盤의 팽창 및 균열이 발생되고, 나아가서는 과포화상태를 유발하며 사면활동이나 기초지반의 침하를 일으키는 사례가 많아서 각종 토질구조물의 시공 및 관리에 여러가지 문제가 발생된다.

또 地層을 구성하고 있는 土壤의 구조변화에 영향을 미치는 含有水分, 밀도 등의 初期條件 및 재하상태는 각각 독립적이거나 또는 복합적으로 작용하여 그의 기구는 매우 복잡하다. 흙의 역학적 성질을 좌우하는 구조변화는 주로 透水性, 전단응력 및 變形舉動에 따라서 민감하게 반응하고, 強度變化는 흙속에서의 수분분포, 체적변화 및 상대밀도에 따라서 다르게 나타나며 이들 인자에 의한 剪斷強度의 감소는 예컨대 路面鋪裝의 지지력감소, 盛土斜面의 安定性을 감소시키므로 초기상태의 영향도 무시될 수 없는 요인중의 하나이다. 뿐만아니라 지금까지 反復荷重에 대한 문제는 대부분이 砂質土에 대하여 이루어졌으나 粘性土에 대한 반복하중도 매우 중요한 문제이므로 해안구조물, 대규모 발전소의 건설 및 내진설계에 대한 관심이 고조됨에 따라서, 반복하중이나 순간재하를 받는

흙의 應力-變形關係 특성도 重要な 연구의 대상으로 부각되고 있다.^{5, 11, 22)}

예컨대 교통하중에 의한 반복재하 및 載荷에 의한 粒狀層과 그 하부지반의 비탄성적인 변형의 차이로 인한 불균형을 시정하기 위해서는 기초지반 재료의 비탄성적 변형특성을 구명하여 표면파괴의 기구를 예측할 필요가 있다.²⁷⁾

따라서 本研究에서는 온도변화에 따른 지반의 凍結·融解, 지반의 초기상태 및 反復荷重이 점성토지반의 응력-변형거동과 이에 수반되는 흙의 구조변화특성을 구명하기 위한 연구의 일환으로 급회에는 지반의 동결·융해와 초기조건 및 반복재하에 따른 흙의 응력변형거동과 그의 구조적특성을 정성 및 정량적으로 분석하여 각종 구조물에 대한 안정성을 정확하게 진단하고 나아가서는 불안정요인들을 예측하여 시공중이거나 시공후에 발생할 자연의 재해를 예방하기 위한 기초재료를 제공하기 위하여 각종 시험조건에 따라 室內試驗을 실시하여 얻은 결과의 一部를 發表코져 한다.

II. 材料 및 方法

1. 使用材料

本 試驗에 사용된 시료는 시흥군 수암면 성곡리일대의 지표하 40cm심도에서 採取한 시료로서, 圓錐型 貫入試驗을 실시하고, 이들 시료에 대한 각종 시험을 실시한 결과 軟弱地層은 해성점토로서 壓縮性이 크고 콘저항 및 現場支

Table-1. Properties of soil

Mechanical Analysis (%)			Consistency(%)			USC	Specific gravity	Natural state of moisture content (%)	Wet unit weight (tf/m ³)	Triaxial test(UU)	
Sand	Silt	Clay	LL	PL	PI					C	Φ
2.3	70.6	27.1	27.6	18.6	9.0	CL	2.65	25.7	1.790	0.24	11

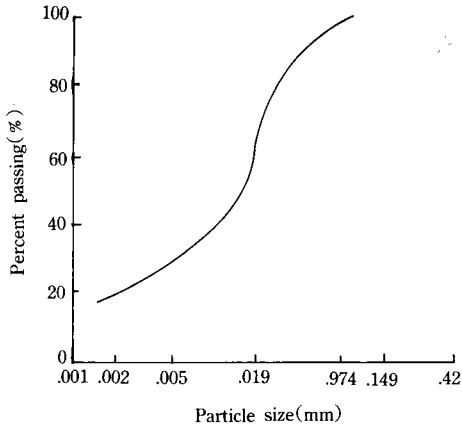


Fig. 1. Grain size distribution curve

持力이 낮으며 土質은 CL에 속하였다. 15개소에서 채취한 시료의 시험결과에서 대표적인 시료의 立度曲線과 그의 土質特性은 Fig. 1 및 Table-1과 같다.

2. 試驗方法

不攪亂狀態로 採取한 시료를 원형 그대로 運搬, 保管하여 소정의 시편(공시체)을 만들고, 일부는 실온에서 공기건조시켜서 동량의 증류수를 가하여 충분히 혼합한 후 진공펌프에 의하여 脫氣시키고, 壓密試驗機에서 항복응력으로 예압밀시킨 후에 이들 시료를 제어실(control chamber)에서 凍結·융해처리를 하였다.

凍結·融解는 20~ 0~ -5~ -15~ -20℃를 1주기(cycle)로 하여 反復實施하였으며, 또 동결중에 水分量을 일정하게 하기 위해서 閉鎖系를 사용하고, 載荷중의 영향을 조사하기 위해서 試料와 載荷條件을 非凍結 단순하중

(UF-ML), 비동결 反復荷重(UF-RL), 凍結 單純荷重(F-ML), 동결 反復荷重(F-RL)의 4가지 종류로 처리하고 기타 初期條件의 변화에 따른 특성, 일반 물성 및 역학적특성과 구조성을 관찰하기 위해서 光學顯微鏡에 의한 構造攝影(scanning electron micrograph)과 X-선 회절(X-ray diffractor) 分析을 실시하였다.

III. 試驗結果 및 考察

4계절의 氣候變化를 가져오는 自然循環現像은 흙의 구조와 조직 및 強度에 여러가지 영향을 미친다. 특히 凍結·融解는 融解壓密現象을 설명하는데 이미 사용된바 있고^{1,29)}, 이의 연장선상에서 금희의 연구에서는 凍結·融解, 荷重條件 및 試料의 初期條件의 차이에서 일어나는 強度變化와 變形特性을 究明하기 위해서 비배수 3축압축, 압밀 및 기타시험을 실시하여 비교분석하였다.

1. 凍結·融解와 載荷條件에 따른 舉動分析

土中에서 간극수의 분포는 凍結·前後가 매우 다르며, 이 수분이동과 氷象의 생성, 성장의 과정을 통하여 흙의 상태는 크게 변화된다. 즉 첫째로 土粒子배열, 단립 등의 구조상의 변화가 일어나고⁴⁾, 둘째로 간극수자체의 상태변화를 일으키며³¹⁾, 이는 열에너지 관점에서 보면 간극수의 자유화를 뜻하며 모식적으로는 『土·水』系 동결 → 『土·氷』系 융해 → 『土·水』系로 표시할 수 있다.²⁸⁾ 즉, 동결·융해 전후에서의 흙의

상태변화에 의하여 흙의 강도와 변형舉動은 크게 다르게 나타날 것으로 추측되며, 이들의 영향에 관하여 관찰하였다.

Fig. 2는 F-M시료와 UF-M시료의 應力과 변형率과의 관계를 표시한 것으로 凍結土는 非凍結土보다 변형이 크게 되었고 최소 應力인 0.5kgf/cm²에서는 양자가 큰 차이를 나타내지 않았으며, 初期接線係數도 非凍結土의 경우가 급하게 되었으며, 應力-變形曲線은 2~5% 이상 이 되면 거의 평행한 상태로 되며 10% 내외에 도달할때 까지 서서히 강도증가를 나타내고 있었다. 흙이 동결되면 동결전선에 따라 여러곳에서 氷核이 동시에 형성되고 이때 氷核사이에서는 土粒子가 클러스터(cluster)를 형성하고^{31, 32}, 클러스터 주변의 水分이 氷晶을 형성하는 쪽으로 끌려 나와서 클러스터 사이에는 有效應力이 증가되고 이와 같은 일련의 脫水現象에 의하여 압축이 촉진되고 또 融解가 시작되면 클러스터는 용해수를 재차 흡수하여 원래의 흙보다 과압밀상태로 된다. 따라서 새로이 형성된 클러스터는 용해시에 부압을 받게되므로 膨脹構造로 되어 非凍結土보다 낮은 압력에서도 破壞가 쉽게 일어난다.

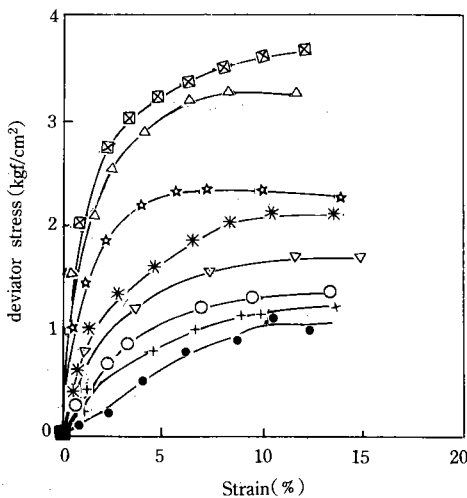


Fig. 2. Average stress-strain curves

Fig. 3은 비동결토에 대하여 破壞荷重의 50%를 가하여 압축시킨 후 다시 75%의 壓力으로 200주기를 反復載荷한 후에 破壞荷重을 가하였다. 이때 0~2.5% 사이에서는 일반적인 경향과 비슷한 모양을 띄고 있으나, 2.5% 이상으로 되면 200주기 반복하중에 의하여 매우 큰 변형이 발생되었으며, 反復載荷 후에 파괴시킨, 즉 應力-變形 曲線도 매우 큰 값으로 급변하고 있다. 이때 대부분이 脆性破壞現象을 나타내고 있으며, 이와 같이 반복하중은 土粒子의 다짐 효과를 나타내고, 粒子構造를 安定狀態의 조직으로 만들어 강도와 강성을 증가시키는 주요 원인이 된다.

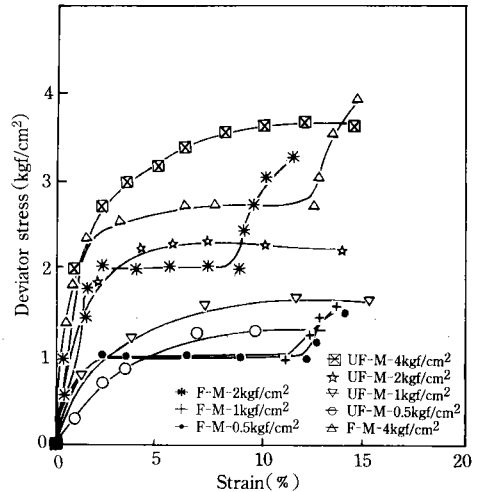


Fig. 3. Stress-strain responses for unfrozen soils under the repeated and monotonic loading conditions

Fig. 4는 반복하중을 받는 凍結·融解土의 應力-變形曲線으로서 단순하중이 작용하면 이들 클러스터 구조는 변형중에도 그대로 남아서 보다 안정구조를 형성하나, 반복하중을 받은 시료는 다짐의 효과를 과다하게 받을 뿐만 아니라 土粒子構造가 부정형이거나 어떤 클러스터형으로 발달되고 또 이들 클러스터 구조는

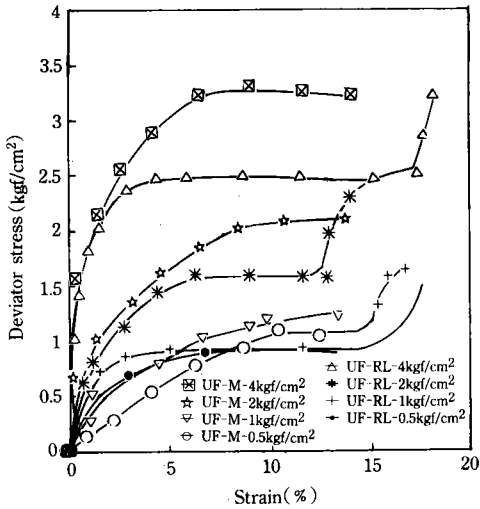


Fig. 4. Stress-strain response for frozen soils under the repeated and monotonic loading conditions

서로 衝突을 일으키며 이때 공극수압의 증가로 클러스터내의 압력이 증가되어 토립자가 분리 및 崩壞되고, 따라서 土粒子構造는 랜덤(Random: 비정형 입상) 배열성을 띄게하여 강도를 상실하게 된다.²⁰⁾ 따라서 단순하중의 경우 강도가 크게 나타났다.

흙이 凍結되면 흙의 구조는 정향배열을 分散構造로 되며 이들 구조성을 표시하기 위하여 Fig. 5와 같이 흙의 상태에 따른 체적압축계수와 재하중과의 관계를 플로트(plot)한 결과 綿毛構造인 非凍結土(UF)의 경우가 凍結土(F)보다 體積壓縮性은 작고 先行荷重(P_y)을 초월하면 m_v -log p 곡선은 흙의 초기구조에 관계없이 어느 한점에 수렴하는 경향을 보였다. 또 단순하중보다 반복하중을 가한 시료의 편이 체적압축계수가 훨씬 작게 나타났다.

이와 같은 구조성의 변화를 정량적으로 관찰하기 위하여 Kozeny-Carman의 식에 의한 細粒土의 透水係數를 구하는 이론식을 변형시킨 점토구조계수 $K_0 \cdot S^2$ 항을 도입하여,³⁾ 압밀과정의 각 단계의 하중하에서 구조계수를 구하면 Fig. 6과 같다. 일련의 압축과정에서 $K_0 \cdot S^2$ 는

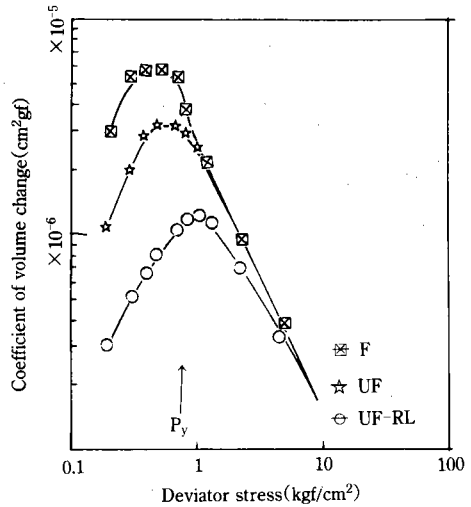


Fig. 5. Relationship between coefficient of volume change and consolidation load under freezing and thawing processes

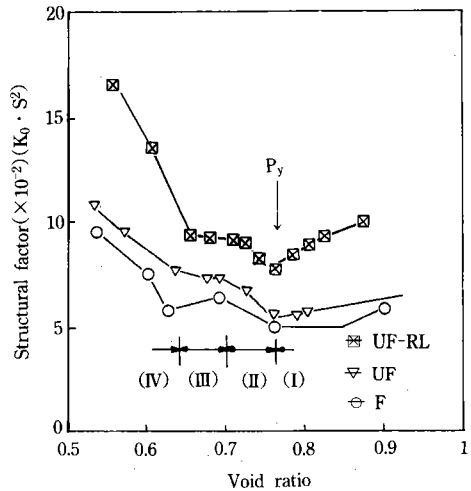


Fig. 6. A Stage of structure change during consolidations

4단계로 나누어지며 각 단계의 경향은 흙의 구조에 따라서 다르며 P_y 이하를 제 I 영역, P_y 를 초월한 직후에 일어나는 土粒子 재배열의 제 II 영역, 구조자체는 변화되지 않고 토립자간의 거리를 단축(압축)시키는 제 III 영역 및 토립자가 매우 밀접하여 계면 2중층이 상호간섭하여

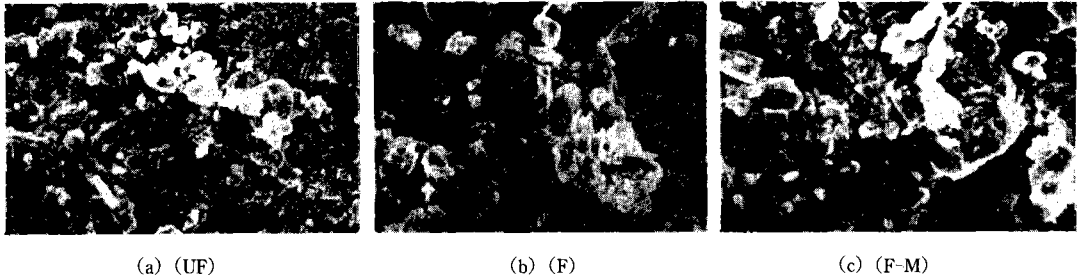


Fig. 7. Photos of clay mineral by scanning electronic micrograph

평형상태인 제IV 영역으로 구분되며 역시 反復荷重, 單純荷重, 非凍結, 동결의 순으로 구조의 안정화가 진행되었다. 이와 같이 土粒子間의 인력은 『土·水』系가 갖는 고유한 견인력, 토립자 배열성 및 입자상호간의 거리 등이 주요 인자(factor)이며, 계가 결정된 흙속에서는 점토구조자체가 결합력에 중요한 의미를 가지며 면모구조(edge-to-face)인 배열에서는 언저리(edge)와 면(face)의 거리가 매우 접근($10A^\circ$) 되어 있으므로 매우 큰 結合力을 발휘하는 환결합을 이루며, 하중이 작용되면 환결합의 구조성은 증가되나 제일 영역인 선형하중 이하에서는 『土·水』系의 상태가 一時的으로 崩壞되며 壓縮性은 증가되고 따라서 구조성이 감소되는 경향을 보였다.

Fig. 7은 非凍結, 凍結·融解 및 반복재하상태에서의 흙의 입자구조를 정성적으로 SEM에 의하여 분석한 것으로 凍結·融解에 의하여 흙의 구조는 面貌構造에서 랜덤구조로 이행되고, 層상構造로 보이지만 高倍率에서는 튜브상과 중공의 球狀組織이 관찰되고 재하중에 의하여 클러스터구조의 발달을 관찰할 수 있으며, 특히 反復荷重으로 클러스터의 衝突에 의한 粒子構造의 分離 및 崩壞로 랜덤배열성을 확인할 수 있어 이들 결과는 Fig. 5, 6의 결과와 일치되고 있다.

또 이들 대표적 粘土鑛物의 化學的成分을 分析하기 위해서 X-선 회절에 의하여 정량 분석한 결과, 시료의 주성분은 주로 SiO_2 , Al_2O_3 , H_2O

(+), MgO , CaO , FeO 등이 주종을 이루는 과일로필라이트계 粘土鑛物로 밝혀졌으며 壓縮性이 비교적 큰 地層임을 알 수 있었다.

2. 溫度變化에 따른 舉動分析

Fig. 8은 凍結溫도와 주응력과의 관계를 표시한 것으로 흙의 강도는 凍結溫도가 $0\sim-10^\circ C$ 사이에서 가장 크게 변화되었고, 이 강도감소는 낮은 온도에서 비교적 작게 나타났다. Aoyama¹⁾의 실험에서도 $-1\sim-8^\circ C$ 의 온도가 凍結·融解작용에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 발표된 바 있다.

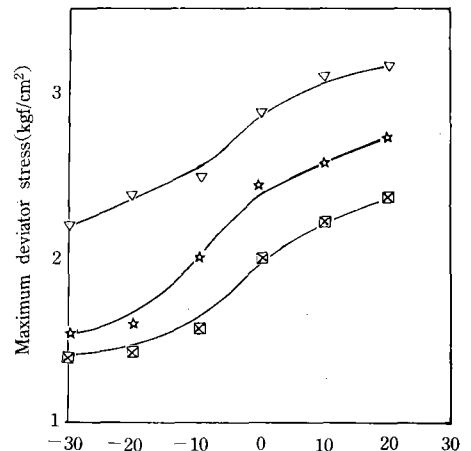


Fig. 8. Relationship between Maximum deviator stress and temperature under the different consolidation loads

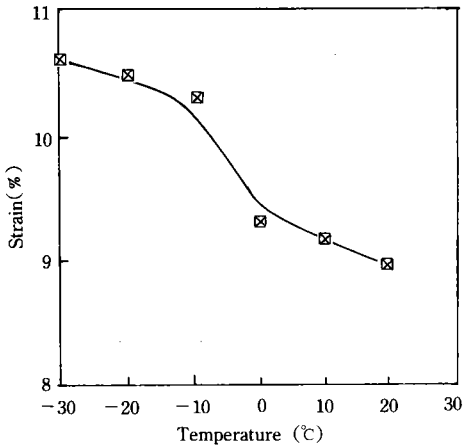


Fig. 9. Relationship between strain and temperature at the peak strength

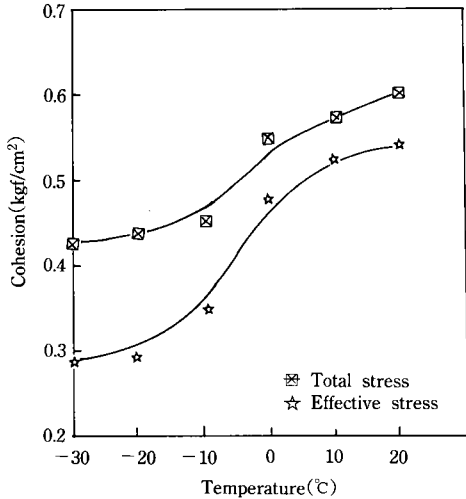


Fig. 10. Relationship between cohesion and temperature under the different stress state

Fig. 9는 凍結溫度와 최대강도에서의 變形舉動과의 관계를 표시한 것으로 변형율도 凍結溫度가 낮아짐에 따라서 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 10은 有效應力과 전응력상태에서의 점착력과 온도와의 관계를 표시한 것으로 점착력은 동결온도가 낮아짐에 따라서 감소되는 경향을 보였으며, 이상의 Fig. 8, 9, 10에서 관찰한

바와 같이 흙의 온도가 0°C이하로 내려가면 동결중에 빙정이 발달하여 토립자배열이 갑자기 변화되며 그의 변화정도는 상변환의 환경이 급격히 이루어지는 최초 結氷點을 중심으로 최대 발생되며, 7.30) 이로 인하여 흙의 團粒子(Aggregation)현상으로 클러스터로의 構造變換이 급격히 발달되고, 間隙部分이 分離되어 떨어져 나갔다가 응해후에도 원상태로 회복되지 못하기 때문에 흙의 강도는 감소되고 強度의 감소비율 및 變形率도 온도가 낮아짐에 따라서 커지게 됨을 알 수 있다.

3. 초기조건에 따른 舉動分析

주변온도가 氷點以下로 내려가면 水分의 이동과 氷晶의 生成 및 성장을 통하여 『土~水』系의 상태가 크게 변화되어 土粒子의 배열 및 團粒化현상으로 흙의 구조성이 변화되므로 收縮 및 膨脹舉動에도 영향을 미친다. Fig. 11에 의하면 凍結溫度에 따른 壓縮舉動의 차이는 명확하지는 않으나 凍結融解作用을 받아서 압축강도는 크게 감소되었고, 그 감소량은 최초의 1~2주기에서 가장 크게 나타났다.

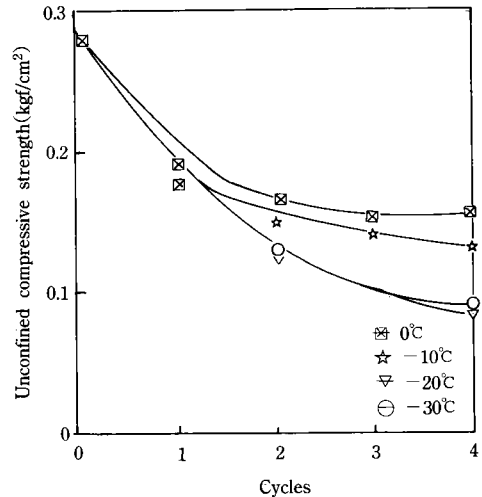


Fig. 11. Relationship between unconfined compressive strength and freeze-thaw cycles

凍結·融解作用이 반복됨에 따라서 흙은 소수적상태로 진행되어, ¹⁶⁻¹⁸⁾ 『土·水』系 중에 土粒子~間隙水間의 상호작용이 低下되고, 凍結·融解作用의 반복으로 간극수의 상변환과정에서 토립자에 중대한 영향을 미쳐서 외력에 저항하는 구조적 저항성이 감소되고, 또 간극수 자체가 변하여 외부하중이 작용할때 계외로 쉽게 이탈되어 압축강도를 저하시키고 압축량을 증대시키는 원인이 되고 있다.

Fig. 12는 함수비의 변화에 따른 압축강도의 변화變動을 표시한 것으로 강도의 감소량이 최대인 함수비가 존재(25%)하며, 이 점에서 멀리 떨어질수록 그의 영향력이 감소됨을 알 수 있었다. 이것은 低含水比에서는 빙상의 양자체가 적어서 동결전후의 계의 상태변화가 경미하기 때문이고 역으로 高含水比狀態에서는 동결시에 土粒子自體가 상호간에 位置變換作用이 과도하게 일어나지 않는데 기인된다고 생각되며, 이들 含水比의 중간정도에서 凍結作用에 의한 間隙水の 이동과 상변환 및 이에 수반되는 토양구조의 변화에 가장 현저한 25%의 함수상태에서 일축압축강도의 저하량이 최대로 됨을 알 수 있다.

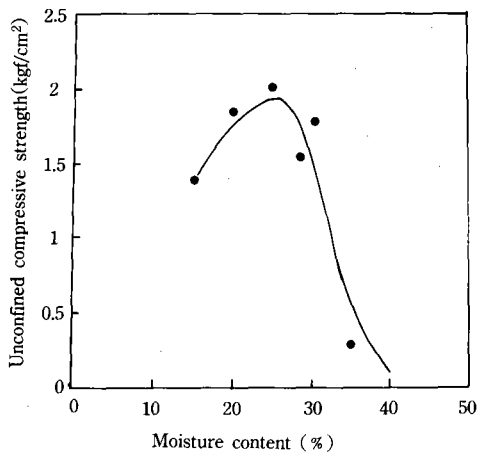


Fig. 12. Variation of unconfined compressive strength with segard to moisture content

Fig. 13은 일련의 標準壓密課程을 종료한 후에 載荷段階에서 발생된 膨脹量을 나타낸 것으로 凍結·融解土는 非 凍結土 보다 膨脹量은 작고 밀도가 클 수록 증가하고 있다. 점성토의 壓密曲線의 彈性載荷曲線은 페드(ped)자체의 膨脹에 의한 것이며, ¹⁷⁾ 이때 구조단위 자체가 소수적인 상태로 변화되어 용해후의 단위의 壓縮變形은 不凍結土에 비하여 크게 되나 膨脹量은 작게 나타난다. 이의 직접적인 인자인 氷晶은 土粒子에 대하여 水壓를 가하고 또 氷晶사이에서의 간극수의 이동을 수반하므로 빙정에 접하는 흙은 3차원 압밀을 받게되며, 따라서 간극수의 상변환과 계내이동으로 초기의 구조는 소성변형을 일으키고 구조적 구속수의 상대적 자유화를 촉진시켜서 2차압밀을 증가시키고 제하에 따른 彈性復元量도 감소하게 된다.

Fig. 14는 含水比의 변화에 따른 密度와 凍結·融解 주기와의 관계를 표시한 것으로 이들 결과에서 밀도는 凍結·融解反復에 의한 강도의 점진적 감소현상이 나타났고, 凍結溫度의 의존성은 잘 나타나 있지 않고 있다. 또 이들 低減率은 최초의 1 주기에서 가장 크게 나타났고

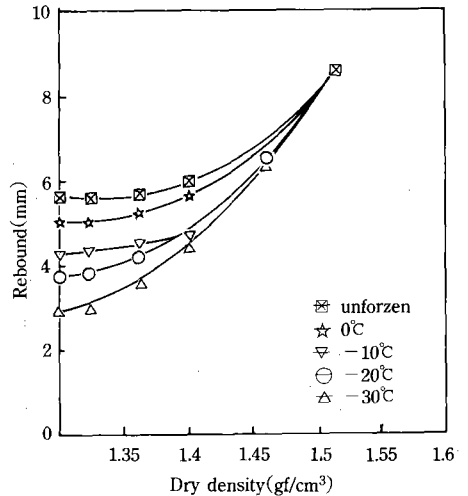


Fig. 13. Relationship between rebound and dry density with temperature

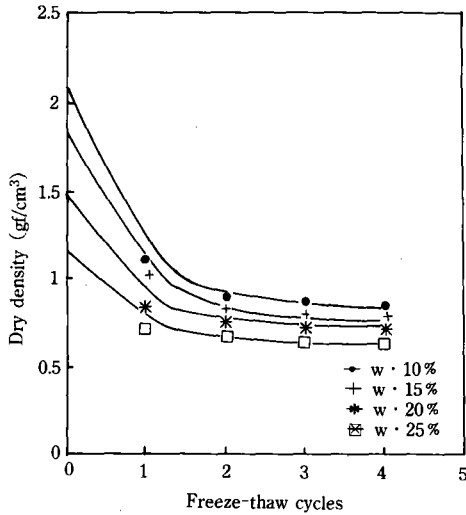


Fig. 14. Relationship between dry density and the number of freeze-thaw cycle with moisture content

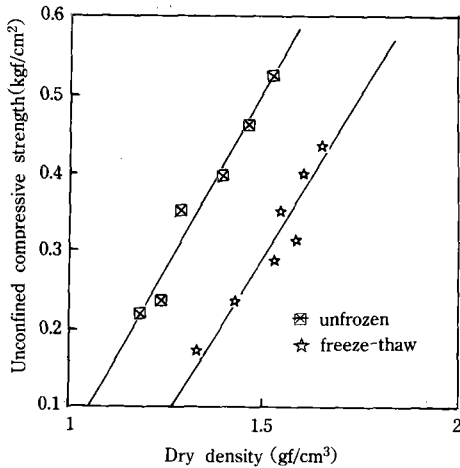


Fig. 15. Relationship between unconfined compressive strength and dry density with soil state.

주기회수가 증가될수록 遞減되는 現象을 보였 다. 이는 閉鎖系凍結이라는 제한된 조건하에 있으며, 또 최초의 동결에서 빙상의 분포, 크기, 量등이 어느 範圍內로 한정되어 있기 때문이며,²⁶⁾ 이들 결과는 실제 基礎地盤改良에 매우 중요한 참고자료가 될 수 있다.

Fig. 15는 흙의 凍結有無에 따른 일축압축강도와 밀도와의 관계를 표시한 것으로 密度의 증가에 대해서 일축압축강도(qu)는 직선적 증가를 나타냈고, 비동결의 편이 크게 나타났다. 흙의 밀도와 압축강도와와의 관계는 흙의 종류, 성상에 따라서 여러가지로 변화되어 일괄적으로 규정하기는 곤란하나, 대략 비례관계가 있고 凍結·融解에 따른 강도저하는 밀도의 증가에 따라서 어느 한계내에서는 대략 정율적으로 변화하며 Fig. 11에서 凍結溫度를 여러가지로 변화시킨 경우도 동결온도의 저하에 따라서 일축 압축강도도 서서히 저하되는 동시에 그의 저하 정도는 Fig. 15와 비슷한 경향을 나타냈다.

IV. 結 論

흙의 구조변화와 변형거동에 영향을 미치는 내적 및 외적 영향인자 중에서 동결·융해, 초기조건 및 재하조건을 달리한 일련의 실험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 凍結·融解作用은 흙의 内部組織을 攪亂하여 氷상이나 튜브상으로 된 구상조직으로 변형시켜서, 압축변형을 증가시키고, 항복응력을 감소시키며, 일반적으로 脆性破壞를 형성한다. 또 본 흙의 反復荷重을 받으면 分散構造로 된 클러스터가 과잉다짐효과로 서로 충돌하여, 分離 및 崩壞作用을 일으켜서 단순하중이 작용한 경우보다 外力에 대한 저항성이 감소된다.

2. 土粒子의 骨格構造는 先行荷重을 전후하여 4단계의 구조적 안정화과정을 거쳐서 매우 상이한 구조적을 나타내며, 정규압밀 영역에서는 土粒子 안정화현상으로 압축성이 감소되고 외력에 대한 저항성이 커진다.

3. 흙의 강도와 變形率은 溫度에 따라서 크게 변화되고, $0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 사이에서는 초기 團粒化에 의한 클러스터조직의 형성으로 그의 변화율이 가장 크게 나타났다.

4. 흙의 압축성은 함수상태에 따라서 크게

변화되며, 그의 강도를 최대화하는 함수비가 존재하며, 팽창성은凍結溫度에 따라서 좌우되고 밀도가 증가할수록 커진다.

5. 흙의 밀도는凍結·融解의 반복회수가 증가함에 따라서 감소되고, 이 감소율은 최초의 동결에서 가장 크게 나타났다.

본 연구는 91~92년도 한국과학재단의 일
반목적기초연구 지원에 의하여 수행되었음.

參 考 文 獻

1. Aoyama, K., Temperature dependences of mechanical properties of soils, 4th Int'l Sym. on Ground freezing, pp.217-222, 1985.
2. Alkire, B. D., Effect of variable-drainage freeze-thaw tests on frost-thaw shear strength, TRR 809, pp.13-18, 1982.
3. 淺川美利, 壓密におよぼす粘土構造の影響, 土木學會21次 學術發表會, pp 391-394, 1966.
4. Benoit, G. R., Effect of Freez-thaw Cycles on Aggregate Stability and Hydraulic Conductivity of Three Soil Aggregate Size, Soil Science Society Ame. Pro. Vol. 37, No. 1, pp. 3~5, 1973.
5. Ghen, L. S., An Investigation of Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesionless Soils, Pro. 2nd Int'l conf., SMFE, Vol. 5, pp. 35-43, 1948.
6. Crory, F. Z., Settlement Associated with the the Thawing of Permafrost, Pro. 2nd Int'l. conf. on Permafrost, pp. 126-129, 1973.
7. Chamberlain, E. J., Overconsolidation effects of ground freezing, Pro. of 2nd Int'l. Sym. on ground freezing, pp. 98-105, 1980.
8. 竹中, 安富六郎, PF의變化と軟化について—土の工學的性質とPF의關係(II), 農土聯 14, pp. 54-58, 1966.
9. 竹中, 安富六郎, 收縮試驗より見た 土の工學的性質, 第11回 土質工學シンポジウム pp. 63-67, 1966.
10. Finn, W. D. E., Lee, K. W., Martin, G. R., An Effective Stress Model for Liquefaction Problema, ASCE, PrePrint 2752, pp. 169-189, 1976.
11. Khuri, F. Z., Buchannan, S. J., Elastic and Plastic Properties of Soils and their Influences on the Conditions Support of Rigid Pavements, Ohio River Division Laboratories Report C.O.E., pp. 89-96, 1954.
12. 嘉門牙史, 土の構造, 土の物理學, 土壤物理研究會論, 森北出版社, pp. 85-86, 1979.
13. Hoekstra, P., Physics and Chemistry of Frozen Soils, HRB, Special report 103, pp. 78-90, 1969.
14. 福田正己, 凍結-融解による岩石の風化, 低溫科學, pp. 243-249, 1974.
15. 福田正己, 凍結の熱傳導率の測定, 低溫科學, A₃₃, pp. 259-263, 1975.
16. 長澤徹明, 梅田安治, 土の強におよぼす凍結融解土の影響-凍結融解土の特性に関する研究(II) 農土聯集 60, pp. 19-23, 1975.
17. 長澤徹明, 梅田安治, 凍結融解土の2, 3の物理的性質について(III), 農土聯集 74, pp. 7-11, 1978.
18. 長澤徹明, 梅田安治, 凍結融解土の壓縮強さ特性について(IV), 農土聯集 75, pp. 62-67, 1978.
19. 長澤徹明, 梅田安治, 凍結融解土の壓縮舉動について—凍結融解土の特性に関する研究(VI), 農土聯集 123, pp. 47-49, 1986.
20. Oda, M., The Mechanism of Fabric Changes During Compressional Deformation of Sand, Soil and foundation, JSSMFE, Vol. 12(2), pp. 1-18, 1972.

21. 梅田安治, 凍結融解土の水分特性とせん断強さ—凍結融解土の特性に関する研究 (I), 農土聯集 54, pp.6~10, 1974.
22. Osman, I. J. Ha, H. A., Pore Pressure and Strains after Repeated Loading of Saturated Clay. Canadian Geotechnique, Vol. 12, No. 265, pp. 39-47.
23. Seed, H. B. Evaluation of soil Liquefaction effects on level Ground during Earthquakes, Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, ASCE, Reprint 2752, pp. 1-104, 1976.
24. Sangrey, D. A., France, J. W., Effect of Drainage in repeated Loading of Clays, ASCE, Vol. 13, No. 7. pp. 74-82, 1977.
25. Sangrey, D. A., France, J. W., Critical State Model for Cyclic load and Pore pressure. Earthquake engineering and Soil dyna., Vol. 1, ASCE, pp. 410-425, 1978.
26. Sangrey, D. A. France, J. W., Cyclic Loading of Sands, Silts and Clays, Earthquake Engineering and Soil Dyna., ASCE, Vol. 2, pp. 836-850, 1978.
27. Stewart, H. E. Permanent Strain from Cyclic Viable-amplitude loading, ASCW, Vol. 112, No. 6, pp. 97-103, 1986.
28. Williams, P. J., Unfrozen Water Content of frozen Soil and Soil Moisture Suction, Geotechnique 14, pp. 231-246, 1964.
29. Wood, J. L., Influence of Repetitious freeze-thaw on Structure and Shear Strength of Leda Clay, Clarkson College of Technology, Ph. D. Dissertation, pp. 152, 1976.
30. Xie, Y., Wang, I., Effect of saturation level and Freeze-thaw Cycling, 4th Int'l. Sym. on Ground Freezing, pp. 197-200, 1985.
31. Young, R. N., Warkenton, B. P., Introduction to Soil Behaviour, Elsevier, pp. 411, 1966.
32. Young, R. N., Warkenton, B. P., Soil Properties and behaviour, Elsevier, pp. 79-82, 1975.