초기함수비, 비표면적, 풍건 및 동결·융해작용이 흙의 액성한계에 미치는 영향

Influence of Initial Water Content, Specific Surface, Air Drying and Freezing-thawing Action on the Liquid Limit of Soils

류 능 환*
Ryu, Neung Hwan

Summary

The purpose of The work described in this paper is to clear up the initial moisture content, specific surface, air drying and freezing-thawing process on liquid limit of clayey soils distributed widely at estuary of three main rivers in the west coast.

To this end, a series of tests were conducted on clayey soils samples with natural state and treated state.

From the test results, the liquid limit was decreased with decrement of initial moisture content, air drying process, and freezing-thawing cycles and increased with increment of specific surface.

The specific surface which influenced on the liquid limit is over $25m^2/g$, and their relationships are well formulated.

Air drying process is expected to improve the engineering properties of the soils such the pro-water properties were changed to anti-water proper-ties through lowering of water holding as resulted to incline from A-7-5 to A-5 on the soil classificaction plastic chart.

The freezing-thawing process decreased 20% of liquid limit, especially under the first cycle of the behavious, as a result of above mentioned reasons, phase change of soil-water system brought the decrement of specific surface and affected to the liquid limit.

* 강원대학교 농업생명과학대학

키워드 : 한계초기함수비, 비표면적, 액성한계, 동결·융해, Kaolinite,Aggregation, 유동단위, leaching action, pF

I. 서 론

흙의 컨시스텐시라는 특성은 어느 일정한 외적 조건하에서 발현되는 성질로 함수비가 어느 상한값 이상으로 되면 유동에 대한 저항성을 잃어버리고 액성으로 되며 이와 역으로 어느 하한값 이하로 되면 흙은 수축과 동시에 소성, 반고체 및 고체상태로 되므로 일면 흙 고유의 성질로 볼 수도 있다.

이와 같이 함수비에 따른 상변화의 한계 함수비 값에서 구한 제반 지수는 흙의 역학적 성질의 추정, 공학적 분류 및 동상성의 판정에 중요한 지표로 된다.

특히, 이들 중에서 액성한계는 단위 면적당의 결합력의 크기를 규정하는 것으로 반죽한 상태의 土·水系가 외력에 대하여 일정한 유동저항을 발휘하는데 필요한 최소한의 수분 상태를 표시하는 것으로 주로 토립자간의 접촉 및 마찰에 의하여 발휘되며, 보통 액성한계 상태의 흙은 20~30kg/cm^{2}의 전단강도를 나타낸다.

흙은 물리적, 환경적 요인에 의하여 계속적인 단립화 세립화과정을 거치면서 자체적으로 점토광물을 생성하여 고유의 액성한계에 영향을 받을 뿐만 아니라 특히, 동상 및 동결·융해작용에 의하여 흡수 팽창에 따른 안전성의 저하, 점착성의 감소 등으로 압축강도와 전단강도가 현저하게 감소되기 때문에 토질구조물의 축조재료나 기초지반으로 사용되었을 때, 전단파괴의 원인이 된다.[13,14,15,18,20]

따라서 우리의 주변에서 지표면의 유실 및 건조에 따른 풍식현상을 흔히 볼 수 있고, 이와 같은 흙이 건설공사와 관련된 모든 구조물의 구조체와 기초 및 토질 구조물의 기반으로 이용되었을 때 예상을 초월한 내적 및 외적 요인에 의한 지반의 전단파괴 현상이 발생되기 때문에 이에 대한 대책이 항상 문제로 제기되고 있다.

이와 같은 사실들은 이미 심각한 문제로 제기되었고 이에 대한 새로운 대책의 개발이 꾸준히 계속되어 왔으나 우리나라에서는 이에 관한 단편적인 연구가 있을 뿐 체계적이고 지속적인 연계 연구가 이루워 지지않고 있다.

이와 같은 점에 착안하여 금회의 연구에서는 흙의 물리적 화학적 공학 성질에 중대한 영향을 끼치는 액성한계의 초기함수비, 비표면적, 풍건 및 동결융해작용의 의존성을 구명하여 부정확한 전단저항의 추정으로 야기되는 설계와 시공에 대한 제반 문제점을 시정하고 지반의 안정처리 및 건설재료로서의 적부에 대한 기술적 자료를 제시하는데 그 기본목표를 두고 있다.

II. 재료 및 방법

1. 재 료

본 시험에 시용된 시료는 앞으로 예상되는 대규모 공업단지 및 농업개발예정지인 한강(H-Sample), 삽교천(S-Sample) 및 영산강(Y-Sample) 하구지역일대에서 채취한 점토(CL)로써 이들 시료에 대한 물리적 성질 및 SEM에 의한 구조분석은 Table-1과 같다.

Table-1. Physical properies of soils used in the test

item	specific gravity	consistency (%)			moisture content (%)	USCS classification	cohession (kg/cm^2)
		LL	PL	PI			
H-Sample	2.71	40.8	24.3	16.5	43	CL	0.27
S-Sample	2.70	39.8	25.0	14.8	48	CL	0.28
Y-Sample	2.69	38.9	24.7	14.2	20	CL	0.26

2. 시험 방법

시료는 현장에서 채취한 상태와 실내에서 공기건조한 후, 필요함수비로 조정하여 각 시험에 시용하였으며, 우선 2mm체 통과분에 대

하여, #400, #200 및 #200~2mm사이의 입자군을 구분하고, 필요함수비로 조정하여 액성한계와 초기함수비와의 관계 시험을 실시하였고, 흙의 비표면적은 입도분석 시험에서 Zunker의 유효입경개념을 도입하여 환산하여 구하고,[9,10] 비표면적의 범위를 구하기 위해 산업용 Bentonite와 Kaolinite를 일정비율로 혼합하여 시료를 조제하였다.

동결·융해과정은 20°~0~-20°를 1cycle로 하고 이를 수회 반복하여 요인별 액성한계의 변화상태를 조사 측정하였다.

Ⅲ. 결과 및 과찰

각 하천의 하구 지역의 대표적 지점에서 채취한 시료의 시험에서 자연함수비는 액성한계보다 약간 높은 45%내외이며, #200통과량이 40% 이상이고 CFE는 약 20% 정도이며 동상성도 비교적 높은 편에 속하며 압축성과 팽창성이 매우 높고, 취기와 흙갈색의 CL에 속하는 흙이다.

X-ray회절 및 SEM분석에서 대체로 붕소구조로 구조단위는 Mg-Octahedron으로, clay activity도 높고 연성이 낮은 흙으로 판단되었고, 주요광물인 Si, Al 및 Mg 등 다량의 광물을 함유하고 있으며 유기물함량은 3% 정도의 높은 편에 속하고 양이온 교환량은 11meq/100g 이상의 높은 편에 속했다.

1. 초기함수비가 액성한계에 미치는 영향

Fig. 1은 액성한계와 초기함수비와의 관계를 표시한 것으로 초기함수비가 감소됨에 따라서 액성한계도 감소되었고, 초기함수비가 대략 55% 이상으로 되면 액성한계는 거의 일정하게 되는 소위 한계초기함수비(limited initial moisture content)에 도달되며 이 함수비를 경계로하여 액성한계의 양상이 크게 달라졌다.

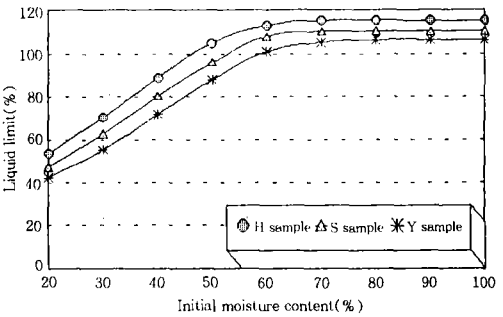


Fig. 1. Relationship between liquid limit and initial moisture content

한계함수비 이하에서는 흙의 건조에 의하여 액성한계를 지배하는 제반 인자가 쉽게 변화되나 그 이상으로 되면 인자의 변화가 잘 일어나지 않으므로 액성한계가 일정하게 됨을 알 수 있다. 즉 액성한계 상태의 함수비에서 유동저항은 토립자 상호작용에 의하여 유발되고 이 상호작용을 지배하는 인자는 주로 도립자의 비표면적이며 본 한계함수비 이상에서는 토립자 표면적이 변화되지 않으므로 일정한 유동저항을 발현하는데 요하는 함수비는 변화되지 않고 일정하다.[3,10,20]

한편, 본 한계함수비보다 낮은 초기함수비 영역에서는 초기함수비가 감소됨에 따라서 흙의 형태적 질적 변화가 유발되여 친수성(親水性)이 소수성(疎水性)으로 변화되고 보수성(保水性)의 저하로 土·水系관계의 구조적 변화가 발생하여 토립자의 團粒化현상이 촉진되고, 토립자의 비표면적이 감소되며, 또 구속수의 비가역적 탈수현상으로 유동저항이 감소되어 액성한계도 점차 감소된다. 특히 함수비가 10% 이하로 되면 사질토와 같은 양상을 띄며 다시반죽하여도 흙은 소성을 상실하는 경향을 보였다.

따라서, 한계초기함수비는 액성한계를 지배하는 주요한 지표임을 알 수 있다.

Fig. 2는 입도조성(粒度組成-Gradation)에

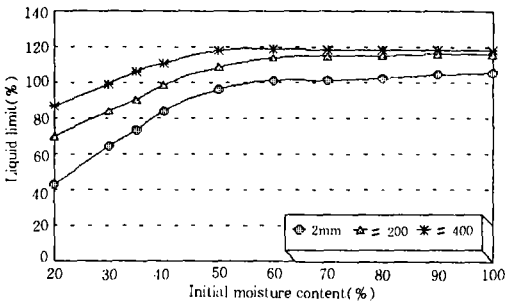


Fig. 2. Relationship between liquid limit and initial moisture content as a function of gradation

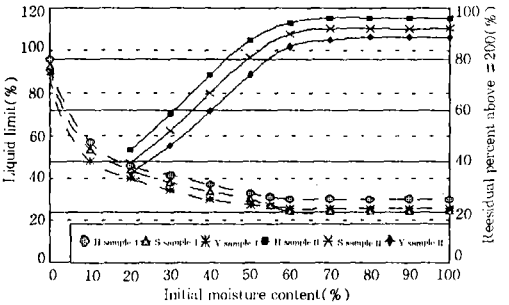


Fig. 3. Relationship between liquid limit, residual percent above #200and initial moisture content for each sample

따른 초기함수비와 액성한계와의 관계를 표시한 것으로 세립으로 갈수록 액성한계가 증가되는 경향을 보였고, 또 한계초기함수비는 이와는 상반되게 조립으로 갈수록 증가되었다.

이는 입도조성이 세립화 될수록 흙의 비표면적이 크게 되고 공극이 작아지기 때문에 수막의 결합에 의한 토립자간의 흡착력이 비교적 크게 되어, 점착저항이 증가되고 또한 미소한 충돌 때문에 입자의 상대적 이동이 예민하게 반응하므로 액성한계는 증가되고, 따라서 한계초기함수비는 감소된다.

이와 같은 사실은 초음파 처리[10]에서도 나타난 바와 같이 토립자가 형태적 변화를 일으켜서 세립화가 촉진되어 비표면적이 증가되기 때문에 액성한계가 증가되었다. 또 한계초기함수비인 40~60% 정도에서 거의 일정하며 이와 같은 경향은 입도조성이 조립일수록 비표면적이 작고 민감하게 반응하고 있다.

Fig. 3은 각 시료의 초기함수비에 대한 액성한계와 #200체 잔유율과의 관계를 표시한 것으로 한계초기함수비 보다 높은 수분 영역에서 액성한계는 일정하게 나타났으나 초기함수비가 50% 이하로 되면 액성한계는 감소하고 특히 #200체 잔유율은 급격히 증가되는 상반되는 현상을 보였다.

즉 액성한계의 저하는 토립자 비표면적의 감소에 따른 흙의 형태적인 변화로서 건조과정에서 토립자의 단립화로 입자의 유동단위(流動單位)가 조립화되고 한계초기함수비 보다 낮은 수분 영역에서 발생된 유동단위의 조립화는 흙의 반죽에 의해서도 쉽게 파괴되지 않고 진행되고 있음을 알 수 있었다.

또 초기 함수비가 10% 이하로 되면 #200체 잔유율이 급격히 증가된다. 이는 건조에 의하여 조립화된 토립자가 입자간의 결합력이 반죽에 의해서도 파괴되지 않고 오히려 더욱 강화되어 흙의 소성을 상실하기 때문이라고 판단된다. H-시료가 여타 시료보다 크게 나타난 것은 유기물 함량 및 부식의 정도가 크기 때문에 유동단위의 비표면적이 크게 되어 초기함수비가 증가되기 때문이라고 판단되며 이와 같은 사실은 액성한계에도 영향을 미친다 의하여 부식질을 제거함으로써 액성한계는 크게 감소되고 뿐만 아니라 한계초기함수비도 감소되어 결국 부식이 토립자 비표면적을 현저하게 증가시키는 작용을 하고 있음을 알 수 있다.

2. 비표면적이 액성한계에 미치는 영향

Fig. 4는 점토의 함량과 비표면적과의 관계를 표시한 것으로상관관계를 나타내는 직선의 기울기는 점토광물의 종류와 함량에 의하여

결정되며 Kaolinite에서는 Bentonite보다 약간 크게 되었으며 각 시료 모두 비슷한 경향을 나타냈다. 또 점토의 함량은 C=0.53[SS]+17.4의 관계가 성립되었으며 Kaolinite나 Bentonite를 함유치 않았을 때 보다 비표면적이 매우 크게 나타났으며 이 값은 흙의 물리적 성질에 충분히 영향을 미칠 수 있는 수준에 달하고 있었다.

Fig. 5는 Bentonite와 Kaolinite계 점토를 여러 가지 혼합비로 조제하여 액성한계와 비표면적과의 관계를 구한 결과 액성한계 LL=7.2[SS]+72.4의 직선관계가 성립되었으며 본 시험결과에서 알 수 있듯이 Kaolinite계와 Bentonite계 두 종류의 점토를 혼합하여 구한 액성한계와 비표면적과는 매우 높은 상관성이 인정되었으며 특히 Kaolinite계 점토는 비표면이 비교적 낮은 편에 속하고, 일반적 경향보다는 크게 벗어나고 있다.

Fig. 6은 수막두께와 비표면적과의 관계를 표시한 것으로 비표면적이 클수록 액성한계는 직선상으로 증가하고 수막두께는 대략 20~80A^0 사이에 있고 쌍곡선 양상으로 감소됨을 알 수 있다.

뿐만 아니라 일반적으로 세립토에서는 흙에 외력이 가해지면 이때의 전단 저항력은 점착력에 의한 저항력이 크게 되고, 내부 마찰각에 의한 저항력은 감소되며 따라서 수막두께는 점차 작아지게 된다.

3. 풍건작용이 액성한계에 미치는 영향

Fig. 7은 시료의 상태에 따른 액성한계와 소성지수와의 관계를 표시한 것으로 액성한계

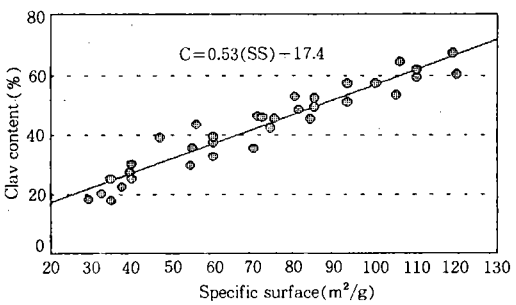


Fig. 4. Effect of clay content on specific surface of clayey soils

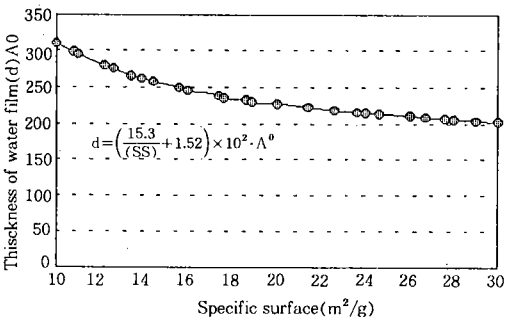


Fig. 6. Relationship between thickness of water film and specific surface

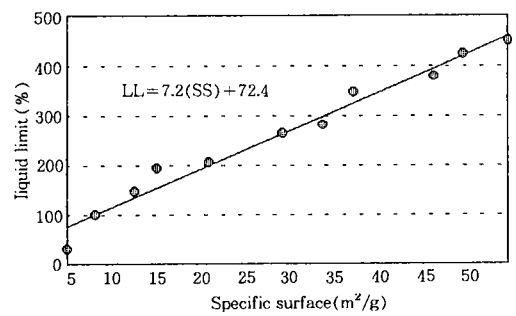


Fig. 5. Relationship between liquid limit and specific surface

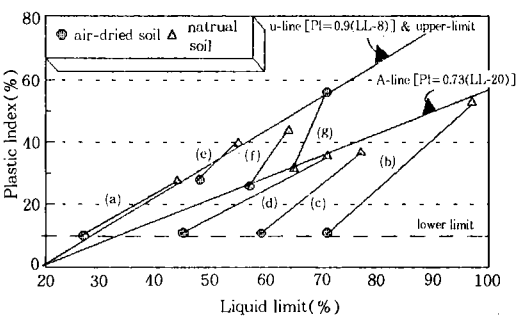


Fig. 7. Relationship between consistency of natrual and air dried soil

및 소성지수의 측정치는 자연상태의 시료보다 풍건시료는 월등히 감소되는 경향을 보였다. 또 액성한계에 대한 소성지수의 극대치는 U-line내에 분포되고 있으며 극소치는 10% 이상의 범위에 분포하고 있다.

Fig. 8, 9 및 10은 물과 흙의 결합강도에

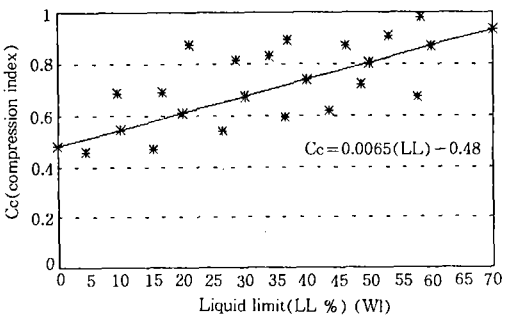


Fig. 8. Relationship between compression index and liquid limit

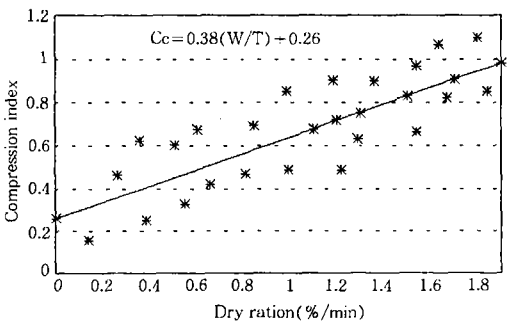


Fig. 9. Relationship between compression index and dry ratio

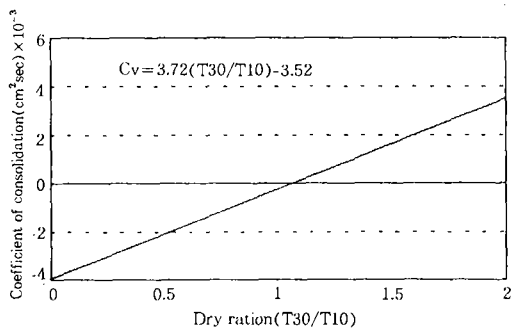


Fig. 10. Relationship between coefficieent of consolidation and dry ratio

비례한다고 가정한 건조비와 압축지수, 액성한계와의 상관성을 표시한 것으로 액성한계와 압축지수는 $Cc=0.0065*(LL)+0.48$이고 또 압축지수와 건조비 사이에는 $Cc=0.38*(W/T)+0.26$으로 압축지수 액성한계 및 압축지 건조비와의 사이에는 매우 높은 상관성을 보였으며 압밀계수와 건조 시간과의 사이에는 $Cv=3.72*(T_{30}/T_{10})-3.52$의 관계가 성립었다.

4. 동결·융해작용이 액성한계에 미치는 영향

Fig. 11은 액성한계와 동결·융해 반복 회수와의 관계를 표시한 것으로 각 시료 공히 첫 번째의 동결·융해에서 액성한계가 가장 크게 감소되고 반복회수 4회에서 최소값을 나타내며 4회 이상으로 계속되면 서서히 감소하여 8회 이상에서는 거의 변화되지 않고 동결 조건에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단되었으며, 대체적으로 동결·융해 반복 작용으로 액성한계가 20% 정도 감소 되었으며 각 시료 공히 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 12-(a)는 분산제를 사용하지 않은 경우이며 동결·융해 반복 회수가 첫 4회에서 2 μm 이하의 입자 함유율이 최소로 되었다. 이는 Fig. 11의 결과와도 일치하는 것이며 원래 상태보다 약 15% 정도 감소되었고 8회 이상의 동결·융해 반복 시험에서는 Aggregation

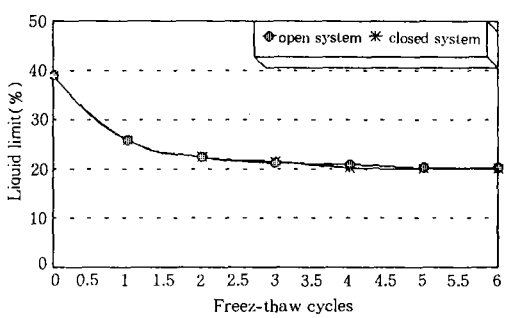


Fig. 11. Relationship between liquid limit and freeze-thaw cycles

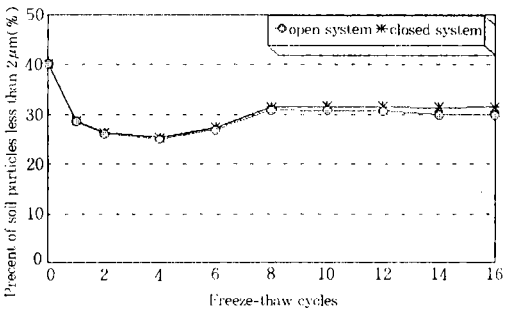
현상이 거의 나타나지 않아 양 시스템 모두 급격한 단립화 작용은 거의 나타나지 않는 것으로 판단되었다.

그러나 분산제 처리한 Fig.12-(b)에서는 동결·융해 반복 4회에서 2μm 이하의 입자군이 30% 이상 증가 되었으며 8회 이상으로 되면 양계 모두 평행선을 이루며 역시 시스템간의 차이는 크게 나타나지 않았다.

이와 같은 사실로 미루워봐서 4회의 동결·융해 전후의 토립자군의 상반된 조성 구조는 동결·융해 반복 작용에 의하여 새로히 형성된 토립자 단위의 구조적 안정성 때문이라고 할 수 있다.

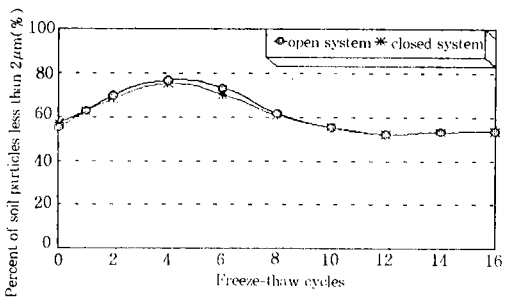
Fig. 13은 흙의 비표면적과 동결·융해 반복 회수와의 관계를 나타낸 것이다. 동결·융해 반복회수가 증가함에 따라서 비표면적은 감소되었고 즉 동결·융해 반복 작용에 의하여 Aggregation 현상이 증가 되며 8회 이상에서는 거의 일정하게 나타났다.

Fig. 14는 동결·융해 반복 치수와 점착력과 내부 마찰력과의 관계를 표시한 것으로 점착력의 감소는 첫 1회의 동결·융해 반복에서 크게 나타났고 그 후 반복 회수가 증가함에 따라서 감소하여 4회 이상에서는 거의 일정하게 되었다. 이와 같은 사실은 동결작용이 시작되면 열의 방출과 더불어 빙점이 성장을 계속하여 공극이 확장되고 체적이 변화되어 토립자 조직단위의 결합력이 약화되거나 이들 조직단위가 압축력을 받아서 흙의 구조 조직에 변화를 가져와 또 다른 형태의 새로운 구조 단위를 형성하며 이들 Aggregation 현상으로 비



(a) With dispersing agent

Fig. 12-(a). Relationship between percent of soil particles less than 2μm and freeze-thaw cycles



(b) Without dispersing agent

Fig. 12-(b). Relationship between percent of soil particles less than 2μm and freeze-thaw cycles

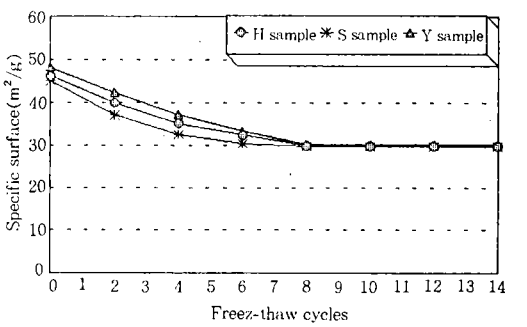


Fig. 13. Relationship between specific surface and freeze-thaw cycles

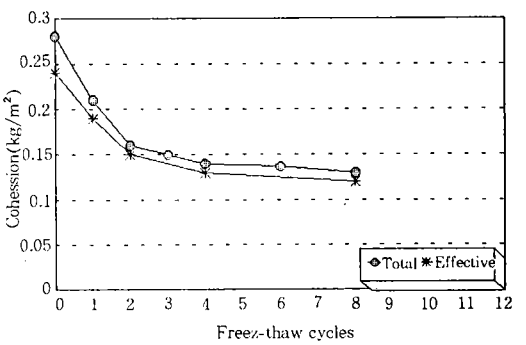


Fig. 14. Co-relationship of cohession and freeze-thew cycle

표면은 감소되고, 이때 파괴된 점성은 원상태로 회복이 불가능하다.

Ⅳ. 결 론

액성한계는 주로 토립자의 점착력 및 마찰력에 의하여 발휘되고, 흙의 성상, 분류, 압밀문제, 동상성의 판별 및 전단 특성의 추정등 광범위해서 사용되는 토질 상수나 풍화작용 및 인위적 환경 변화에 따라서 단립화, 세립화 과정을 거쳐서 자체적으로 점토 광물을 생성하여 고유의 액성한계에 막대한 변화를 가져온다.

이에 금회의 연구에서는 서해안의 주요 하구 지역에 분포하는 충적 점토를 대상으로 하여 흙의 일반 거동 특성과 질적·형태적 변화에 따른 특성을 심층 분석하여 각종 토질 구조물의 설계·시공 및 현장 유지 관리에 필요한 각종 자료를 제공 하고져 시도하였으며 이들 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 초기 함수비가 감소함에 따라서 액성한계도 감소하며 초기함수비가 10% 이하로 되면 점토는 반죽에 의하여 그의 소성을 상실하여 사질토와 유사한 양상을 나타내고, 55~65% 범위에서 액성한계가 일정하게 되는 한계초기함수비가 존재하며 이 함수비를 경계로 하여 액성한계 변화 상태가 크게 달라진다.

2. 흙의 액성한계에 영향을 미치는 비표면적은 $25m^2/g$이며 점토의 함량과 비표면적 사이에는 $C=0.53[SS]+17.4$의 관계식이 성립되고, 액성한계와 비표면적 사이에는 액성한계 $LL=7.2(SS)+72.4$의 관계식을 나타내며 수막두께 $d=\left[\frac{15.3}{(SS)}+1.52\right]\times10^2$ A°로 환산되었다.

3. 자연상태의 흙이 풍건·건조되면 친수성에서 소수성으로 변화되어 수분보지 특성이 변화되기 때문에 pF가 저하되고 따라서 액성한계가 현저히 감소된다. 특히 montmorillonite가 주광물인 loam계 점토에서는 풍건에 의하여 액성한계가 현저히 감소되었다.

4. 점토 광물의 종류에 따라서 풍건의 영향은 상이하게 나타나며 Allophane계 점토는 풍건에 의하여 A-7-5에서 A-5로 이동되는 경향을 보였고 이들 점토는 풍건에 의한 영향이 매우 커서 공학적 성질의 개선을 기대할수 있다.

5. 풍건과정에서 최대강도는 소성한계 보다 약간 낮은 함수비에서 나타났고 점토의 압축성은 건조비에 가장 큰 영향을 받으며 이때 압축지수 $Cc=0.38\times(W/T)+0.26$의 매우 높은 상관성을 보였다.

6. 동결·융해 반복 작용은 흙의 액성한계를 감소시키며 특히 첫번째 동결·융해에서 액성한계는 가장 크게 감소되며, 4회 이상 계속되면 거의 일정하게 되고 이와 같은 거동으로 액성한계는 20% 정도 감소되었다.

이상과 같이 초기함수비, 동결·융해 반복에 따른 흙의 질적·형태적 변형으로 인한 액성한계의 의존성을 구명한 결과 동결 온도에 따른 수축거동의 변화는 크게 인정 되지 않았으나 동결·융해 작용은 수축거동을 크게 감소시켜 액성한계는 감소되었으며 풍건 처리에서도 이와 같은 경향이 현저하게 나타났다. 즉, 흙이 동결·융해 작용을 받으면 토·수계의 상변화가 발생되고 토립자의 Aggregation 현상으로 소수적으로 되며 보수력의 저하로 액성한계도 감소된다. 이와 같은 계의 상태 변화는 비표면적이 감소시키므로 액성한계에 상당한 영향을 미치게 되며, 또한 공극수의 탈수 과정에서도 토립자의 행동단위와 공극수 사이의 상호작용이 저하되고 토립자를 연행 이동시키는 작용이 약화되므로 한계초기함수비도 낮아져서 액성한계도 감소하게 된다.

본 연구는 학술진흥재단의 "95자유공모과제" 연구기금에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Acyanu, K., Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing., Fourth Intl. Sym. on groudfreezing, pp. 217-222. 1985.
2. Bernard, D. A., A mechanism for predicting the effect of cyclic freeze-thaw on soil behaviour, The 2nd Intl. conf. sym. on groundfreezing., pp. 285-296, 1980.
3. Goel, R. K., One-point method of determining liquid limit, soil science, vol. 91, No. 5, pp. 100-102, 1961.
4. 福田誠, 青山淸道, 小川正三, 凍結-融解を受けた土の 強度低下, 土木學會 第33回 學術構演概要集, pp. 464-465, 1978.
5. Havukainen J., The utillgatian of compacted coal ash in earth works Ⅷ ECAMFE, Improvement of Ground, vol. 2, pp. 773-776, 1993.
6. 洪成完, 김영진, 흙의 凍土物質에 관한 실험연구, 大韓土木學會, 學術發表會 논문집 제1권 99, 425-428, 1992.
7. Johnson and Lowell, Soil temperature and ground freezing, HRB,Bulletin 71 pp. 39-40, 1953.
8. 前田降, 土の液性限界に 關する研究(Ⅰ), 農業土木學會 北海道支部 講演要指 pp. 1-4, 1971.
9. Merin R. E. and Jocobs, H. S., Surface area determination of soil byabsorption of ethylene glycol vapor, soil science, Amer. proc. No. 28, pp. 190-194, 1964.
10. 中谷三男, 比表面と 液性限界の關係 農土聯 37, pp. 61-67, 1971.
11. Nagasawa, T., Umeda, Y., Effects of the freezing-thawing process on soil structure, Fourth ISGE, pp. 219-223, 1985.
12. Nagasawa, T., Umeda, Y., Effects of the freezing-thawing process on soil structure, Fourth ISGE, pp. 219-223, 1985.
13. 류능환 外2인, Polystyrene 材를 利用한 凍土性地盤의 斷熱, 한국농공학회지 32-2, pp. 53-59, 1990.
14. 류능환 外2인, 동결 및 동결·융해작용을 받는 점토성의 강도와 그의 변형거동, 한국농공학회지 33-2, pp. 53-59, 1990.
15. 長澤微明, 凍結融解土の 2, 3の 物理的 性質について, 農土聯 vol. 74, pp. 7-11, 1978.
16. 長澤微明, 農業土木における凍害と その對策(その2), 農業土木學會誌, vol. 51, No. 3, pp. 237-244, 1983.
17. 土質工學會, 土質試驗の方法と解說, 土質工學會, pp. 81-86, 1990.
18. 綿引惠一, 土の收縮限界に影響をちする因子の檢討, 第25回 土質工學研究發表會, pp. 273-274, 1990.
19. Warkentin, B. P., Use of liguid limitin Characterizing clay soils, can.J. soil science. 52, pp. 457-464, 1972.
20. 山崎不二不, 風乾が アゾベログ限界 に及ぼす影響 14, pp. 46-48. 1965.
21. 山本英夫 外2名, 粘土含有 凍土の一軸壓軸強度, 第14回 土質工學研究發表會, pp. 168-172, 1988.
22. Young. R. N, Alternation of soils Behaviour after cyclic freezing andthawing 4th intl. sym on Ground freezing. pp. 187-178, 1985.

〈접수일자 : 1996년 8월 27일〉