

화강풍화토의 동결-융해 후의 동적 거동

Dynamic Behavior of Weathered Granite Soils after Freezing-thawing

윤 여 원*¹ Yoon, Yeo-Won

김 세 은*² Kim, Se-Eun

강 병 희*¹ Kang, Byung-Hee

강 대 성*³ Kang, Dae-Sung

Abstract

In order to investigate the dynamic behavior of weathered granite soils before and after freezing-thawing, cyclic triaxial tests were conducted for the specimens not only with the variation of silt contents within 20% but with plasticity index within 20%. As the results, the dynamic shear modulus of weathered granite soils decreased with increasing silt contents. However, the change in damping ratio was negligible. The influence of freezing-thawing on shear modulus and damping ratio was minimal for the granite soils with variation of silt contents. For the case of the weathered soils with variation of plasticity index, the shear modulus increased with plasticity index within 20%, while the modulus decreased remarkably after freezing-thawing.

요 지

화강풍화토의 동결-융해 전후의 동적 거동을 구명하기 위하여 반복삼축압축시험을 수행하였다. 화강풍화토의 실트 함유량 20%이내에서 동결-융해를 받지 않은 공시체와 동결-융해를 받은 공시체를 구속압력을 변화시켜 동적 물성치인 전단탄성계수와 감쇠비의 변화 특성을 고찰하였다. 또한 점성토의 함유량을 각각 다르게 하여 소성지수의 변화에 따른 동결-융해 후의 동적 거동의 변화를 고찰하였다. 연구결과, 화강풍화토의 실트함유량이 증가할수록 전단탄성계수는 감소하였다. 그러나 동일한 밀도, 구속압력의 조건에서 동결-융해를 받은 화강풍화토의 전단탄성계수는 실트 함유량에 관계없이 전단탄성계수에 큰 차이가 없었다. 점토를 함유한 소성지수 20이내의 화강풍화토의 전단탄성계수는 소성지수가 클수록 증가하였으며 동결-융해를 받게되면 전단탄성계수의 감소가 뚜렷하게 나타났다.

Keywords : Cyclic triaxial test, Damping ratio, Freezing-thawing, Shear modulus, Weathered soils

1. 서 론

우리나라와 같이 동결과 융해 현상이 교차되는 동토 대에서는 지하구조물 설치를 위한 연약지반의 동결, LNG, LPG와 같은 저온 액체를 저장하기 위한 지하 탱크 주변 지반의 동결 등 인공적인 동결, 포장노면의 동결, 기계기초 등의 동결-융해로 인한 흙의 강도 특성

변화, 철도나 도로의 노상토의 동결-융해의 반복으로 인한 분니, 산지 사면의 붕괴 등 동결 융해와 관련된 문제를 대처하기 위한 기술이 필요하게 된다.

동결-융해에 의한 흙 강도의 감소는 얼음층 아래로부터의 수분 공급에 기인한다고만 생각되어져 왔으나 동결-융해에 의한 흙 강도의 감소는 얼음층 아래로부터 수분의 공급이 전혀 없는 폐합시스템(closed-system)에

*1 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Inha Univ., yoonyw@inha.ac.kr)

*2 정회원, 도담엔지니어링 (Member, Do Dam Engrg.)

*3 정회원, 인하대학교 대학원 (Member, Graduate School, Inha Univ.)

서도 발생할 수 있다(Aoyama와 Fukuda, 1990). 한편 지반공학과 관련된 설계 및 시공에 있어서 지진하중, 건설진동, 파랑과 같은 반복하중, 지하구조물 굴착을 위한 발파진동, 말뚝항타와 같은 충격하중으로 인한 지반의 동적거동에 대한 사항이 중요시되고 있다.

본 연구에서는 구조물 기초 지반 혹은 도로 노상토로 사용되는 화강풍화토의 동결-융해후의 동적 거동을 파악하기 위하여 반복삼축압축 시험기를 이용하여 시험하였다. 즉 화강풍화토의 실트질 세립토 함유량 또는 점토 함유량에 따라서 동결-융해를 받지 않은 공시체와 동결-융해를 받은 공시체에 대하여 구속압력 및 반복응력비를 변화시켜 동적 물성치인 동적전단탄성계수와 감쇠비의 변화특성을 고찰하였다.

2. 문헌 고찰

2.1 개요

화강풍화토의 물리적 성질로서 큰 특징 중의 하나는 물에 접촉하면 안정성이 저하되어 함수비가 많아짐에 따라 전단강도 등이 급격히 떨어지는 경향을 보인다는 것이다. 또한 화강풍화토는 외력에 의한 파쇄성이 매우 높으며 그 정도에 따라서 지반공학적인 성질이 매우 다르게 나타난다. 대부분의 화강풍화토는 통일분류법에 의하면 SM, SC 등에 속하고 역학적 거동은 사질토나 모래와 점토의 중간적 성격을 띠고 있다. 화강풍화토에 대한 물리적 성질, 토립자의 파쇄성, 강도 및 변형 특성, 투수성 등에 관한 연구는 그 동안 여러 연구자들(김상규와 이은수, 1996; 권오순, 1998; 이종규, 1999; Aoyama, 1986; 기타)에 의하여 연구된 바 있으며 본 연구에서는 풍화토를 세립토 함유량을 기준으로 거동을 고찰하였으며, 아래에는 동결 융해후의 흙의 성질 및 동적거동 특성에 대해 간략히 기술하였다.

2.2 동결-융해 후의 흙의 성질

(1) 흙 입자의 구조적인 변화

온도가 낮아짐에 따라 토체내의 간극수의 화학적 포텐셜이 얼음과 같아질 때 간극수는 얼기 시작한다. 얼음의 화학적 포텐셜이 물보다 낮기 때문에 온도가 어느 점 아래로 떨어졌을 때 물이 얼음으로 상변화(phase transformation)하기 시작한다. 이러한 경우 얼음의 형성

은 동결 강도, 물의 상태, 흙의 성질 등에 영향을 받는다. 이러한 요소들은 흙에서 얼음 형성 위치, 얼음 입자의 크기, 모양, 분포 등을 조절한다.

동결온도가 더욱 저하되고 상의 변화가 진행될 때 얼지 않은 물의 화학적 포텐셜은 서서히 감소한다. 낮은 포텐셜의 간극수는 심지어 매우 낮은 온도에서도 얼지 않고 흙 입자 근처에서 액체 상태로 존재한다. 얼지 않은 얇은 막의 존재는 동결시 간극수의 움직임에 매우 중요한 역할을 한다. 얼음 입자의 생성은 간극 전체에 걸쳐 일정하지 않으며 흙의 구조에 크게 영향을 준다.

얼음이 간극내에서 자유롭게 커질 수 없을 때 얼음의 압력은 발생하고 얼음의 화학적 포텐셜도 증가한다. 이러한 압력은 입자 또는 fabric 단위로부터의 반작용에 의해 발생한다. 화학적 포텐셜의 증가는 흙의 구조적인 변화에 의해 결정된다. 화학적 포텐셜이 증가하면 변형은 일반적으로 소성적이기 때문에 흙의 구조는 융해 후 완전히 회복될 수 없다.

얼음 결정이 간극내에서 성장함에 따라 간극이 팽창하게 되고 흙의 부피가 변한다. 이것은 fabric 내의 결합을 파괴하거나 압축할 것이다. 심지어 원래 흙의 구조를 변화시키고 그 때문에 결합이 형성되었다면 새로운 입자가 생성될 것이다. 이러한 흙의 구조의 변화는 동결-

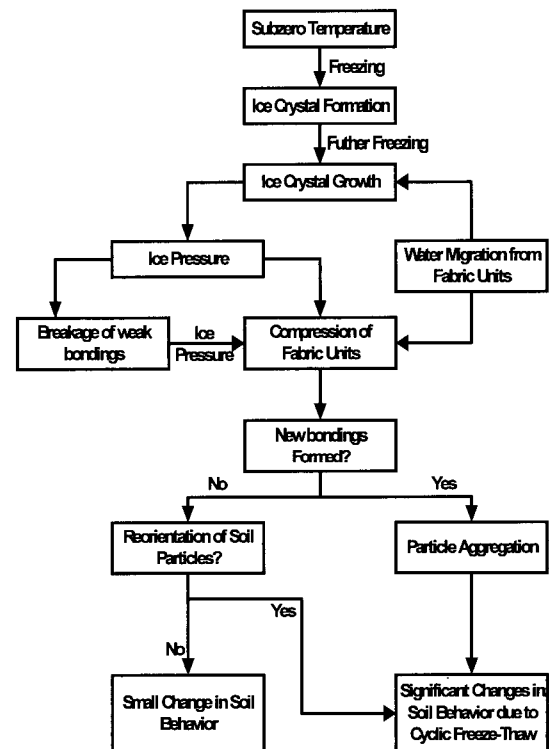


Fig. 1. Influence of freezing mechanism on soil behavior (Yong et al., 1985)

용해 사이클이 약 4-5회 정도 지난 후 안정화되는 경향을 보인다(Vliet-Lanoe와 Dupas, 1991). 동결-용해 후의 집합체의 크기는 초기의 흙의 구조, 함수비, 동결속도, 동결 온도 등 여러 가지 요소들에 의해 변화된다. Fig. 1은 동결-용해가 흙의 거동에 미치는 영향을 그림으로 나타낸 것이다.

(2) 투수성과 압밀 특성

동결-용해를 받은 점토는 균열로 인해 투수성이 증가된다. Nagasawa와 Umeda(1985)는 동결-용해로 인한 투수성의 증가는 액성한계와 관련이 있다는 사실을 밝힌 바 있으며, 각각의 시료의 간극의 차이를 상쇄하기 위해서 보정계수 간극비 변화에 따른 보정계수를 제안하였다. 즉, 액성한계가 낮은 흙의 경우 동결-용해 작용에 의해 투수계수가 증가되고 액성한계가 큰 흙은 오히려 감소한다.

Chamberlain(1980)은 Ellsworth 점토를 압밀시키는 동안 몇 차례의 동결-용해 과정을 거쳤을 때 간극비와 투수계수의 변화를 고찰하였으며 압밀응력에 의해 간극비가 감소하는데도 불구하고 수평, 연직의 투수계수는 오히려 크게 증가함을 보였다. 간극비가 감소함에도 투수계수가 증가하는 원인은 동결시 수축 균열이 형성되기 때문이다. 이러한 투수계수의 증가는 첫번째 동결-용해 과정에서 크게 변화한다. 압밀계수 C_v 는 투수계수 k 와 관련이 있으므로 동결-용해로 인한 압밀계수의 증가를 예상할 수 있다. Fig. 2에서는 정규압밀 점토와 동결-용해 후 압밀된 점토의 경우 유효응력에 따른 압밀계수의 변화를 보여주며 동결-용해 후 압밀 점토의 압밀계수가 크게 증가한다(Chamberlain과 Blouin, 1978). 또한 동결-용해로 인해 선형압밀응력도 높아질 수 있다고 한다(Chamberlain, 1980).

(3) 강도

흙의 비배수 전단강도는 동결-용해 후 증가되거나 또는 감소한다. 용해 후 초기에는 전단강도가 약화되나 용해로 인한 압밀이 완료된 후 과압밀 효과로 인해 강도가 증가되는 경향이 있다. 반면에 점토는 시간효과(aging)에 의해 의사선형압밀응력(quasi-preconsolidation pressure)이 증가되나, 동결-용해에 의해 잃게 된다. 또한 교결효과는 동결-용해에 의해서 감소되거나 완전히 잃게 된다. 높은 소성의 화산재 점토는 동결-용해후 점착력은 감소하나 전단저항각의 변화는 거의 없었다(Aoyama와 Fukuda,

1990). Yong 등(1985)은 개방시스템(open system)과 폐합시스템(closed system)에서 양생일수에 따른 비배수 전단강도의 증가를 동결-용해 반복횟수 별로 나타내었다. 여기서 폐합시스템은 공시체가 자유수의 공급없이 동결된 후 비배수 상태에서 용해되는 상황을 나타내고, 개방시스템은 동결시 물의 출입을 허락하지 않고 배수 상태에서 용해되는 상황을 말한다. 이들의 실험 결과에 의하면 폐합시스템 및 개방시스템에 관계없이 동결-용해 첫번째 cycle에 전단강도가 현저히 감소하며, 동결-용해 과정을 거친 흙의 경우에는 강도 회복률은 거의 무시할 정도이다.

(4) 액성한계와 흡수성

동결-용해 후의 높은 소성의 점토는 입자 집합체의 변화로 인해서 액성한계 값이 감소한다(Aoyama 등, 1985; Yong 등, 1985; Vahaaho, 1988). Yong 등(1985)에 의한 Matagami 점토의 동결-용해 반복 횟수에 따른 액성한계는 초기 약 80%에서 동결-용해 반복 횟수가 증가함에 따라 급격히 감소하여 4번 정도 반복 후 약 30%정도 감소하는 것으로 나타났다.

2.3 흙의 동적 특성

(1) 응력-변형 거동

일반적으로 동적 하중을 받는 흙의 응력-변형률 관계는 Fig. 2에서와 같은 거동을 보이며, 전단탄성계수(G)는 전단 변형이 증가하면서 점차 감소하다가 일정한 값으로 수렴한다. 탄성과 비탄성거동의 한계라 할 수 있는 한계변형률 이하에서는 전단탄성계수 및 감쇠비가 전단변형률에 관계없이 일정한 값을 갖게 되며 이때의 전단탄성계수와 감쇠비를 각각 최대 전단탄성계수(G_{max}), 최소 감쇠비(D_{min})라 하며 이 두 값에 의해서 지반의 동적 성질을 나타낸다.

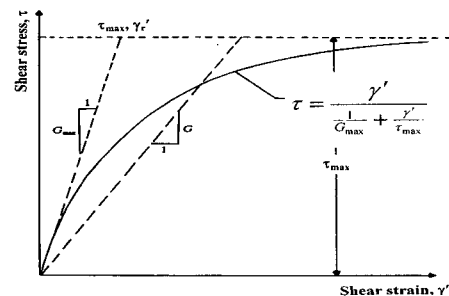


Fig. 2. Nature of variation of shear modulus with strain

또한 구속압력이 증가함에 따라 전단탄성계수가 증가하는 경향이 있다. 이것은 구속압력이 증가하면 재료의 탄성영역이 증가함을 의미한다. 감쇠특성은 구속압력이 증가함에 따라 감소하는 경향이 있는데 이는 구속압력의 증가로 인해서 전단파가 전달되지 않는 물과 공기가 줄어들어 대신 밀도가 증가하여 전단파의 전달이 훨씬 용이해지기 때문이다.

(2) 흙의 동적 거동에 영향을 미치는 요소

흙의 응력-변형률 관계는 흙의 종류, 지반의 조건에 따라서 수많은 인자들이 동적 거동 특성에 영향을 미친다. Vucetic과 Dobry(1991)는 전단변형률과 G/G_{max} 와 전단변형률, 감쇠비가 소성지수 값에 따라서 변화한다고 밝히고 있다. 이들은 0.0001%~0.001% 정도의 매우 작은 전단변형률 범위에서는 명확치 않지만 비교적 큰 변형률에서는 소성지수가 증가함에 따라서 전단탄성계수의 값이 증가하고 감쇠비는 감소하는 경향을 나타냄을 밝힌 바 있다.

(3) 전단탄성계수 및 감쇠비

동적전단시험을 통한 전단탄성계수와 감쇠비는 이상화된 응력-변형률의 관계곡선으로부터 구한다. 전단응력과 전단 변형으로 표시되는 응력이력곡선(hysteresis loop)의 곡선기울기는 전단탄성계수가 되며 응력이력곡선 안의 면적은 시료가 변형함으로써 흡수되는 에너지를 의미하고 이로부터 감쇠비를 구한다. 대단히 작은 변형률에서는 흙은 탄성체와 같은 거동을 나타내므로 에너지의 손실이 거의 없으며 전단탄성계수도 최대값인 G_{max} 가 된다. 변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수는 작아지고 감쇠비는 커지게 된다. 반복삼축압축 시험에서는 전단시험과는 달리 응력이력곡선이 축차응력 및 변형으로 표시되므로 탄성계수(E)를 구하고 이로부터

간접적으로 전단탄성계수를 구한다.

탄성계수(E)는 다음 식을 이용하여 구한다.

$$E = \frac{2\sigma_d}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad (1)$$

여기서, σ_d : 축차응력,

ϵ_1, ϵ_2 : 연직 변형률

전단탄성계수(G)는 탄성계수와 포아송비를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

또한 축 변형률(ϵ)은 다음 식에 의하여 전단변형률(γ)로 변환된다.

$$\gamma = \epsilon(1+\nu) \quad (3)$$

응력이력곡선의 곡선의 면적은 소성변형에 의한 에너지 손실을 나타내며 이로부터 감쇠비는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_T} \quad (4)$$

여기서, A_L : loop의 면적,

A_T : 삼각형의 면적

Lambe과 Whitman(1969)에 의하면 포아송비는 대부분의 토목 프로젝트에서 전단탄성계수의 결과 예측에 있어서 비교적 영향을 적게 미친다고 한다. 사질토의 포아송비는 전단탄성계수에 따라서 대략 0.4와 0.5사이에 분포하고 있다(Ohsaki와 Iwasaki, 1973). 본 연구에서는 0.4와 0.5의 중간값인 0.45를 포아송비로 정하여 전단탄성계수를 구하였다.

3. 실험

3.1 시료

본 실험에서 사용한 시료는 인천지역에서 채취된 노상토용 화강풍화토를 사용하였다. No.4체를 모두 통과하는 화강풍화토를 공기 중에 건조시킨 후 멩쳐진 흙덩이들을 고무망치로 분리하고 표준체(#10, #20, #40, #60, #100, #200)를 사용하여 입자 크기별로 각각 분류

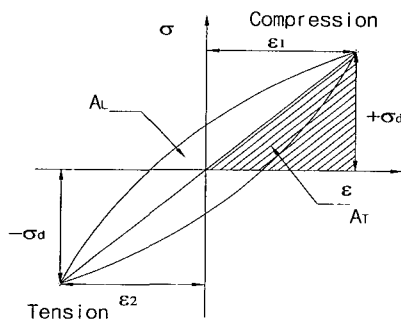
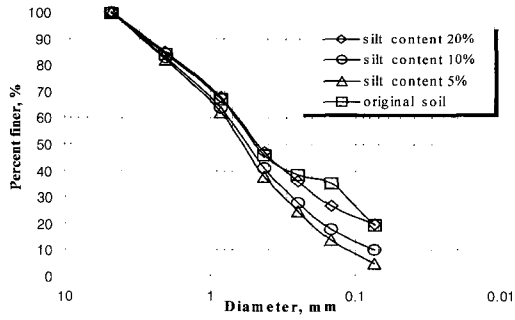
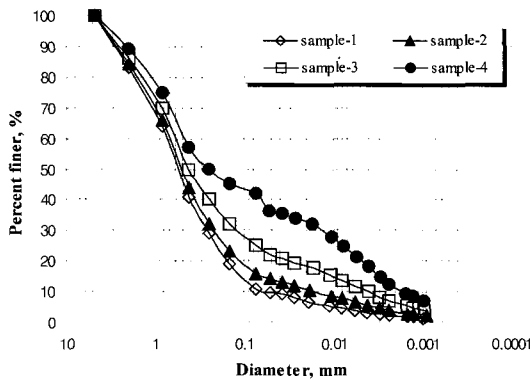


Fig. 3. Definition of damping ratio from idealized hysteresis loop



(a) Granite soil with silt contents



(b) Granite soil mixed with fine contents

Fig. 4. Grain size distribution

Table 1. Physical properties of soils

(a) Weathered Granite soils	
Specific gravity (Gs)	2.71
Plasticity index (PI)	N.P
Maximum dry density(t/m^3)	1.98
Optimum moisture content(%)	11.1
USCS	SM
(b) Clayey soil	
Liquid limit (%)	65
Plastic limit (%)	29
Plasticity index (PI)	36
Specific gravity (Gs)	2.74
Clay content ($<2\mu m$)(%)	28
USCS	CH

Table 2. Plasticity index of weathered soils mixed with clay

Sample classification \ Atterberg limits	Liquid limit(%)	Plastic limit(%)	Plasticity index(PI)
Sample-1	N.P	N.P	N.P
Sample-2	26.5	19.0	7.5
Sample-3	30.5	18.8	11.7
Sample-4	37.7	18.6	19.1

하였다. 각각의 공시체에 실트 함유량을 다르게 하여 실험하기 위해 No.200체의 통과백분율 5%, 10%, 20%로 각각 구분하여 입도분포를 인위적으로 조정하였다. 사용된 시료의 입도분포곡선은 Fig. 4(a)와 같으며 물리적 성질은 Table 1과 같다. 또한 점토가 혼입된 화강 풍화토를 모사하여 소성이 있는 흙의 동결-융해 후 동적 거동의 변화를 알아보기 위하여 점성토(Table 2)를 인위적으로 화강풍화토와 혼합하여 소성을 가진 흙을 만들었다. 각각의 공시체에 점토를 일정분량 혼합하여 소성지수가 다른 시료를 준비하였다. 사용된 시료 중 화강풍화토와 혼합에 사용된 점성토의 물리적 성질은 각각 Table 1에 나타내었으며 입도분포곡선은 Fig. 4(b)와 같다. 점토 혼합 시료의 소성지수는 Table 2와 같다.

3.2 시험기기

본 연구에서 사용된 반복삼축시험기는 Geocomp사에서 제작한 것으로 시료에 축하중을 가하거나 축변위를 일어나게 하는 LoadTrac, 시료의 간극수압과 구속압을 제어하는 FlowTrac, 시험에 필요한 자료의 입력과 각종 장치를 제어하여 시험을 수행하는 역할 및 시험 결과를 저장하는 PC와 Sensor, 압력 조절 장치로 구성된다. 또한, 본 시험기는 시료의 포화과정, 압밀과정 및 정적인 전단시험과 함께 반복전단시험을 PC에서 제어하여 입력된 과정에 따라 자동으로 수행하도록 되어있다.

3.3 시험종류 및 시험방법

(1) 공시체의 제작

공시체의 성형을 위한 다짐방법으로 AASHTO T274-82에서 규정하고 있는 정적다짐방법을 따랐으며, 이 다짐방법은 부피를 정확히 알고 있는 성형몰드(직경 70mm, 높이 140mm)를 이용하여 필요한 다짐도에 해당하는 공시체의 제작이 용이하며 공시체의 다듬기 작업과 같은 공시체 교란요인을 제거할 수 있다. 공시체는 표준다짐시험으로부터 얻은 시료의 최대 건조밀도의 95%인 $1.88 t/m^3$ 의 건조단위중량이 되도록 최적함수비로 정적 다짐하여 성형하였다. 시료의 성형은 몰드 내의 공시체가 차지하는 부분까지 시료가 압축이 되도록 압축다짐기를 이용하여 정적다짐을 하였다. 이때 공시체 직경 70mm, 높이 140mm의 전 길이에 걸쳐 균등한

다짐에너지가 가해지도록 다짐작업은 5층으로 나누어 실시한 후 유압잭으로 몰드내의 시료를 추출하였다. 시료는 실트의 함유량이 다른 경우에도 건조단위중량이 같도록 조성하여 실트함유량의 영향을 알 수 있도록 하였다.

(2) 동결-융해 시험

공시체는 동결시 아래로부터의 수분 공급이 없고, 융해시 비배수 조건인 폐합시스템(closed system)의 상태로 동결시켰다. 각각의 공시체는 함수비의 변화가 없도록 하였다. 공시체는 동결 시험기에 넣어 -18℃에서 24시간 동결시키고, 그 후 18℃에서 24시간 융해 시켰다. Yong 등(1985)의 연구에 의하면 동결-융해에 의한 강도 변화는 첫번째 사이클후 가장 현저하게 감소하고 이후의 동결-융해 사이클의 영향은 대단히 적기 때문에 동결-융해 사이클은 1회로 하였다. 동결-융해시 시료 내외의 온도변화는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다.

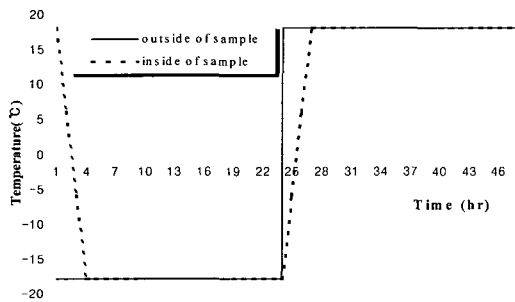


Fig. 5. Temperature variation of the inside and outside of sample during freezing-thawing

(3) 반복삼축압축 시험

제작한 공시체에 대하여 주기는 1.0 Hz, 반복하중 횟수를 20회로 동일하게 하였고, 유효구속압력(σ'_o)과 반복응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)를 달리하여 반복삼축압축 시험을 수행하였다. 여기서 반복응력비(CSR)는 다음 식과 같다.

$$CSR = \frac{\pm \Delta \sigma_d}{2 \sigma'_o} \quad (5)$$

4. 실험 결과 및 고찰

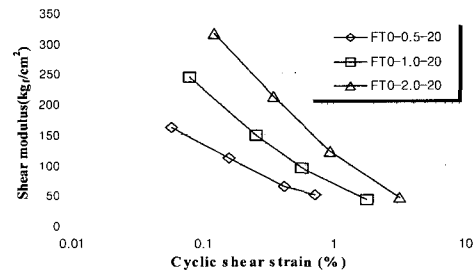
본 장에서는 동결시키지 않은 풍화토의 동적거동, 실트를 함유한 풍화토의 동결-융해후의 동적 거동, 그리고 점성토를 함유한 소성지수에 따른 풍화토의 동결-융해

후 동적 거동순으로 토론하였다. 그림에서 사용된 기호를 한 예로 설명하면 FT0-0.5-20은 동결-융해 0회, 구속압 0.5kg/cm², 실트함유량 20%을 의미한다.

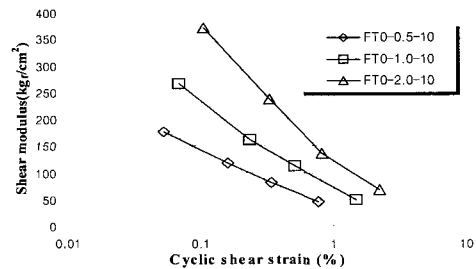
4.1 실트를 포함한 화강풍화토의 동적거동

(1) 전단탄성계수의 변화

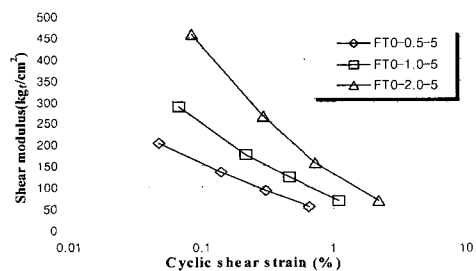
Fig. 6은 동결시키지 않은 화강풍화토에 대해서 각각의 구속압력 하에서의 반복전단변형률에 따른 전단탄성계수를 반대수지에 나타낸 것이다. 동일한 반복전단변형률일 때 구속압력이 증가하면 전단탄성계수는 증가한다. 반면에 반복전단변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수는 점차 감소하여 변형률이 1% 정도에서 수렴하는 경향을 나타낸다. Fig. 7은 동결시키지 않은 화강풍화토 공시체에 대해서 구속압력이 같은 경우 실트 함유량에 따른 전단탄성계수의 변화를 반복전단변형률의



(a) Silt content 20%

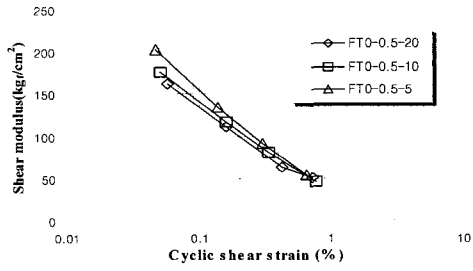


(b) Silt content 10%

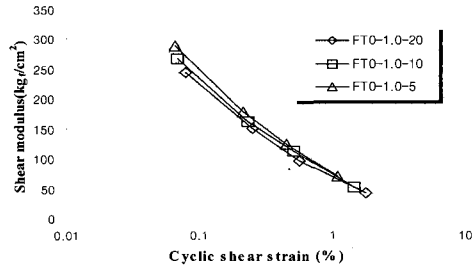


(c) Silt content 5%

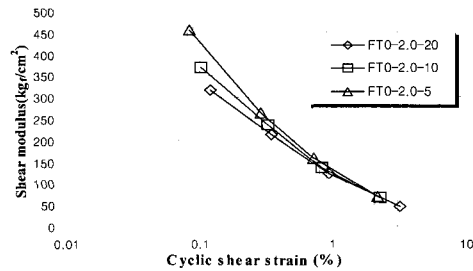
Fig. 6. Shear modulus vs cyclic shear strain before freezing for various confining pressures



(a) Confining pressure 0.5 kg/cm²



(b) Confining pressure 1.0kg/cm²



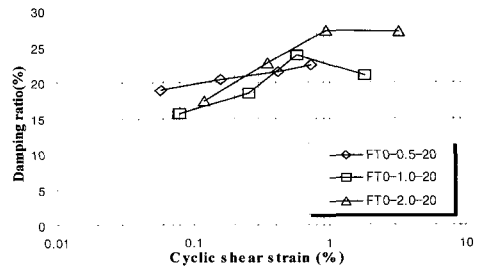
(c) Confining pressure 2.0 kg/cm²

Fig. 7. Shear modulus vs cyclic shear strain before freezing for various silt content

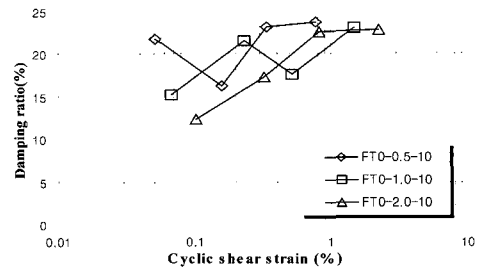
증가에 따라 나타낸 것이다. 동일한 구속압력, 동일한 반복전단변형률인 경우 실트 함유량이 많을수록 전단탄성계수의 값은 감소하는 경향을 보인다. 전단변형률 0.1%를 기준으로 비교했을 때 구속압력 0.5 kg/cm²의 경우 실트함유량이 20%인 경우의 전단탄성계수는 실트 함유량 5%인 경우보다 전단탄성계수가 약 19% 감소를 보이고 있으며 구속압력 2.0 kg/cm²의 경우에는 약 23% 감소함을 알 수 있다.

(2) 감쇠비의 변화

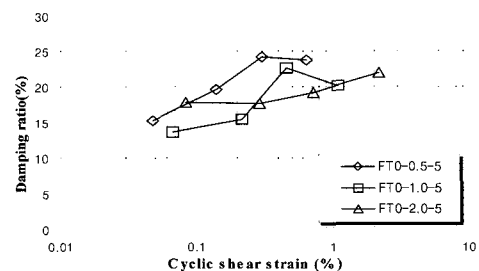
Figs. 8, 9에는 반복전단변형률에 따른 감쇠비의 변화를 나타내었다. 실트의 함유량 및 구속압력의 크기에 관계없이 감쇠비는 반복전단변형률이 증가할수록 감쇠비가 증가하는 경향을 보인다.



(a) Silt content 20%

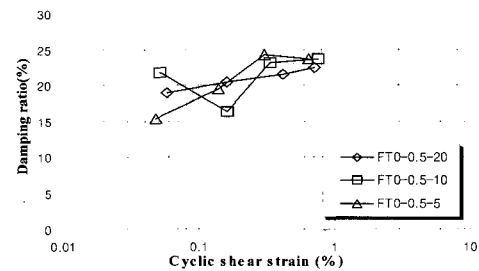


(b) Silt content 10%

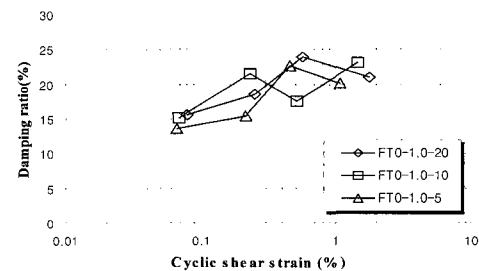


(c) Silt content 5%

Fig. 8. Damping ratio vs cyclic shear strain before freezing for various confining pressures

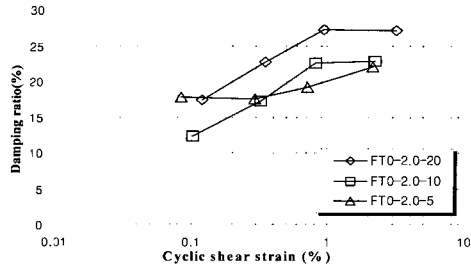


(a) Confining pressure 0.5 kg/cm²



(b) Confining pressure 1.0kg/cm²

Fig. 9. Damping ratio vs cyclic shear strain before freezing for various silt content



(c) Confining pressure 2.0 kg/cm²

Fig. 9. Damping ratio vs cyclic shear strain before freezing for various silt content (Continue)

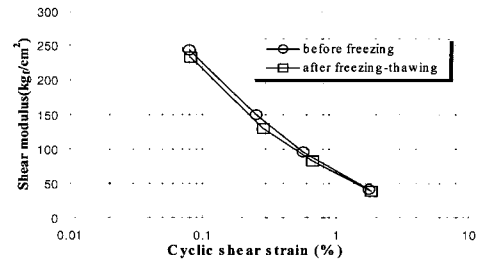
4.2 동결-융해 후의 동적 거동

실트 함유량을 달리한 공시체를 -18℃에서 외부로부터 수분공급 없이 24시간 동안 동결 시킨 후, 18℃에서 비배수 조건으로 24시간 완전히 융해시켰다. 이렇게 동결-융해시킨 공시체를 반복삼축압축 시험을 수행하였다. 여기서 제시한 전단탄성계수와 감쇠비는 첫번째 반복응력에 대한 값이며 구속압력 1.0 kg/cm²에 대한 결과이다.

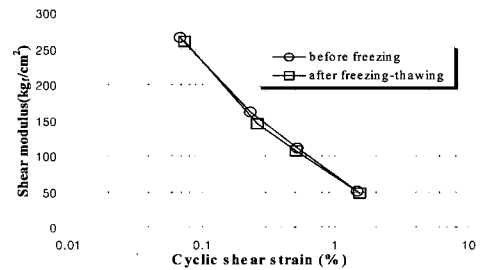
(1) 전단탄성계수의 변화

Fig. 10은 구속압력과 실트함유량이 각각 20%, 10%, 5%인 경우에 대한 동결-융해 전후의 전단탄성계수와 전단변형률의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터 실트 함유량이 20%, 10%인 경우에는 동결-융해후에도 전단탄성계수가 거의 차이가 없음을 보이고 있으며 실트 함유량이 적은 5%인 경우에는 전단변형률 0.1%를 기준으로 했을 때 약 10% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 실트함유량이 큰 경우에 차이가 적은 것은 폐합시스템의 동결시 증가한 체적이 융해시 원 상태로 완전히 회복되지 않아 간극비의 증가로 인해서 전단탄성계수가 소량 감소되어 동결-융해 영향이 정확히 반영되지 않았기 때문으로 생각된다.

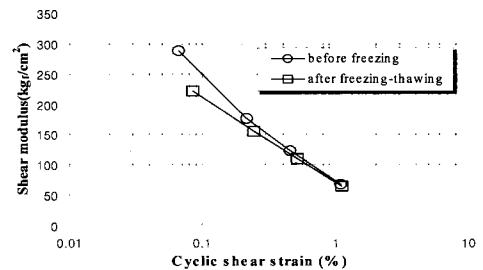
전단강도의 크기를 결정하는 전단저항각과 점착력의 동결-융해후의 변화에 대한 Ogata(1985)의 연구에 의하면 고소성점토의 경우 동결-융해 후 전단저항각은 증가하나, 점착력은 감소하였으며, Aoyama(1985)는 고소성의 화산재 점토의 경우 동결-융해 후 전단저항각은 거의 변화가 없었으나 점착력은 감소하였다고 보고한 바 있다.



(a) Silt content 20%



(b) Silt content 10%

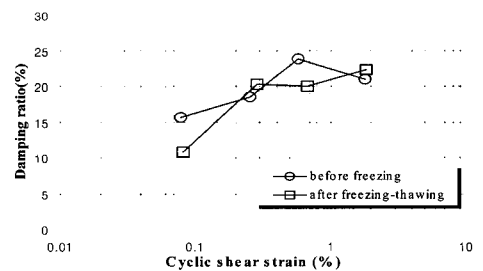


(c) Silt content 5%

Fig. 10. Shear modulus vs cyclic shear strain after freezing-thawing

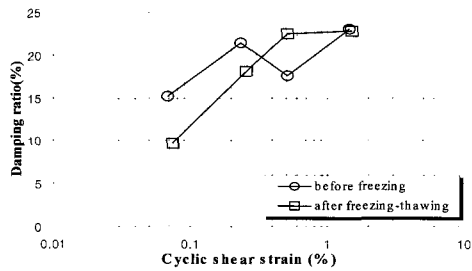
(2) 감쇠비의 변화

Fig. 11은 동결-융해 전후의 반복전단 변형률에 따른 감쇠비의 변화를 나타내었다. 동결-융해를 경험한 시료의 감쇠비는 동결-융해 이전과 마찬가지로 반복전단변형률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 동결-융해 전후의 감쇠비의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

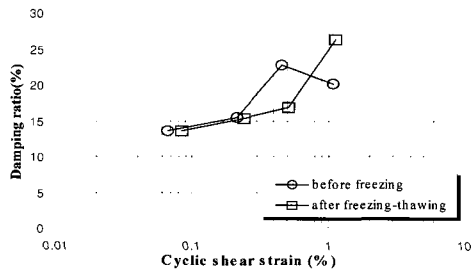


(a) Silt content 20%

Fig. 11. Damping ratio vs cyclic shear strain after freezing-thawing



(b) Silt content 10%



(c) Silt content 5%

Fig. 11. Damping ratio vs cyclic shear strain after freezing-thawing (Continue)

4.3 점토를 함유한 화강풍화토의 동결-융해 후의 동적 거동

(1) 전단탄성계수의 변화

Fig. 12는 소성지수에 따른 동결-융해 전후의 전단탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 점성토의 함유량이 많을수록 즉, 소성지수가 클수록 전단탄성계수는 동결-융해 전후 모두 크게 증가하며 동결-융해 후 전단탄성계수가 현저히 감소함을 볼 수 있다. 그림에서 점토를 소량 함유하여 비소성인 경우 약 10%의 감소를 보이며 점토를 다량 함유하여 소성지수가 19인 경우 전단탄성계수가 30% 정도 저하됨을 알 수 있다.

Vucetic과 Dobry(1991)는 동일한 전단변형률에 대한 전단탄성계수는 소성지수가 감소할수록 감소한다는 연

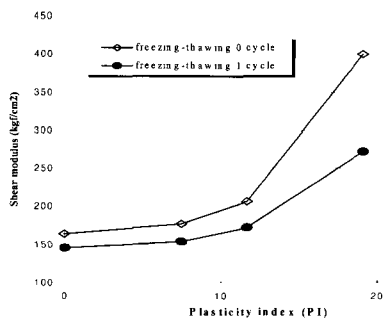


Fig. 12. Shear modulus vs plasticity index after freezing-thawing (confining pressure 1.0 kg/cm², cyclic stress ratio 0.3)

구결과를 발표한 바 있다. 한편 고소성 점토는 동결-융해를 받게 되면 입자 집합체의 구조가 변하게 되므로 액성한계, 즉 소성지수가 감소한다(Aoyama 등, 1985; Yong 등, 1985; Vahaaho, 1988).

한편 동결-융해 작용으로 인하여 흙의 전단 강도는 크게 저하되는데 주로 점착력의 감소에 의한 부분이 크다(Aoyama와 Fukuda, 1990). 그러므로 점착력이 있는 점성토를 함유한 흙의 경우 동결-융해 후 점착력의 감소로 인하여 전단탄성계수도 감소한다고 볼 수 있다.

(2) 감쇠비의 변화

Fig. 13에서 볼 수 있는 바와 같이 동결-융해 후 감쇠비는 소성지수가 클수록 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

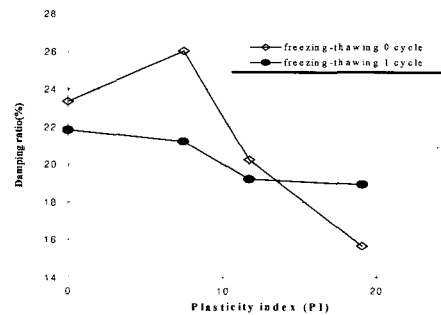


Fig. 13. Damping ratio vs plasticity index after freezing-thawing (confining pressure 1.0 kg/cm², cyclic stress ratio 0.3)

5. 결론

실트 함유량 변화와 점토를 함유한 소성지수가 다른 풍화토의 동결-융해에 따른 동적 거동 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전단변형률 0.1%를 기준으로 비교했을 때 구속압력 0.5~2.0 kg/cm²의 범위에서 실트함유량이 20%인 경우의 전단탄성계수는 실트함유량 5%인 경우보다 전단탄성계수가 약 20% 정도의 감소를 보이는 것으로 나타났다.
- (2) 감쇠비는 구속압력의 크기나 실트질 세립토의 함유량에 관계없이 반복응력비 및 반복전단변형률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.
- (3) 실트함유량에 관계없이 동결-융해를 경험함으로써 전단탄성계수의 값은 다소 감소하며 감쇠비의 변화는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

- (4) 점토를 함유하여 소성지수가 20이내인 화강풍화토의 전단탄성계수는 소성지수가 클수록 증가하며 동결-융해에 의하여 전단탄성계수가 20% 이상 감소하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 권오순(1998), "풍화토의 전단강도-변형특성에 관한 실험적연구", 박사학위논문, 서울대학교.
2. 김상규, 이은수(1996), "보강토구조물 뒤채움재로서 화강풍화토의 적용성", 한국지반공학회논문집, 제12권, 제1호, pp.63-71.
3. 이종규(1999), "화강풍화토의 동적거동", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제1호, pp.175-183.
4. Aoyama, K.(1986), 풍화잔적토의 공학적성질, 박춘식 역, 도서출판 엔지니어즈.
5. Aoyama, K. and Fukuda, M.(1990), "Stress-deformation characteristics of a soil after freezing and thawing", *Proc. of 9th Danube-European Conference on SMFE*, Budapest, pp.393-403.
6. Aoyama, K., Ogawa, S., and Fukuda, M.(1985), "Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing", *The 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp.217-222.
7. Chamberlain, E.J. and Blouin, S.E.(1978), "Densification by freezing and thawing of fine material dredged from waterways", *The 3th Int'l Conference on Permafrost, Edmonton*, pp.623-628.
8. Chamberlain, E.J.(1980), "Overconsolidation effects of ground freezing and thawing", *The 2th Int'l Symposium on Ground Freezing*, Vol.1, pp.325-337.
9. Nagasawa, Y., and Umeda, Y.(1985), "Effects of the freeze-thaw process on soil structure", *The 4th Int'l Symposium on Ground Freezing*, pp.219-224.
10. Ogata, N.(1985), "Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil", *The 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp.201-207.
11. Ohsaki, Y. and Iwasaki, R.(1973), "On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratios of Soil Deposits", *Soil and Foundations*, JSSMFE, Vol.13, No.4, pp.61-73.
12. Vahaaho, I. T.(1988), "Soil freezing and thaw consolidation results for major project in Helsinki", *The 5th International Symposium on Ground Freezing*, pp.219-223.
13. Van Vliet-Lanoe, and Dupas, A.(1991), "Development of soil fabric by freeze-thaw cycles-its effect on frost heave", *The 6th International Symposium on Ground Freezing*, pp.189-195.
14. Vucetic, M., and Dobry, R.(1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Responses", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.117, No.1, January, pp.89-117.
15. Yong, R. N., Boonsinsuk, P., and Yin, C. W. P.(1985), "Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing", *The 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp.187-195.

(접수일자 2003. 1. 27, 심사완료일 2003. 5. 15)