

철도노반재료의 동상팽창압 및 물리적 특성 평가

Frost Heaving Pressure and Physical Characteristics of the Railway Roadbed Materials

신은철¹ · 박정준² · 김종인²

Eun-Chul Shin · Jeong-Jun Park · Jong-In Kim

Abstract

The frost heaving pressure can be a problem for weakening of the railway roadbed material. This study was initiated to investigate the soils frost heaving pressure and physical characteristics(Liquid limit, permeability, SEM analysis) resulting from freezing and freezing-thawing cycle process. Therefore, upon freezing a saturated soil in a closed-system from the top, a considerable pressure was developed. Weathered granite soils, sandy soil were used in the laboratory freezing test which sometimes subjected to thermal gradients under closed-systems. The frost heaving pressure arising within the soil samples and the temperature of the samples inside were monitored with elapsed time. The degree of saturation versus heaving pressure curve is also presented for weathered granite soil and the maximum pressure is closely related to this curve. Based on the laboratory test results, fine-grained soils with strong attractive forces between soil grains and water molecules, and additional water is attracted into the pores leading to further volume changes and ice segregation.

Keywords : Closed System(폐쇄형), Degree of Saturation(포화도), Frost Heaving Pressure(동상팽창압), Railway Roadbed Materials(철도노반재료)

1. 서론

최근 국내외적으로 남북한 철도망 복원과 아시아 육상 교통 인프라 개발계획 등 남북한철도망 연결이 현실화되었고, 동토지역에 해당되는 러시아·중국·일본 등 관련 국가들과 다양한 접촉을 통하여 동북아시아의 역내 철도망 구축 및 활성화에 대한 인식이 고조되고 있는 실정이다.

특히 흙노반의 경우는 사용년수의 경과에 따라 도상자갈의 마모에 의한 세립분 발생, 동결기 동결융해에 의한 노반 팽창현상 등의 노반 연약화 현상이 많이 발생되고 있다. 즉, 동결융해에 의한 노반의 지지력 감소는 도상의 관입을 촉진시키는 악순환이 계속되어 도상자갈에 의한 뒹뒹작용으로 노반분리가 발생되고, 궤도 파괴 등으로 이어져 열차 주행에 지장을 초래할 뿐만아니라 열차의 안전운행에 위

협을 가하게 된다. 따라서, 지반동결과 관련된 지반공학적 특성들을 분석하여 향후 철도관련 사업 수행 시 기초자료로의 활용을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 철도노반재료로 사용되어지고 있는 화강 풍화토와 보조도상재료인 모래질 흙에 대하여 토질 및 기초공학적 기본 성질을 제시하였다. 기존에 제시된 동상과 관련된 실험을 통하여 단일방향으로 흙이 동결 될 때 함수비에 지배되는 결과와 더불어 시간과 온도변화에 대한 동상팽창압을 연관시켜 본 실험을 수행하였다. 또한, 동결 및 융해에 따른 흙의 역학적 거동으로 발생하는 물리적 특성 변화를 규명하여 철도노반재료로 사용시 예상되는 문제점을 실험적으로 분석하였다.

2. 동결토의 동상압과 물리적 특성 변화

동결이 진행 될 수 있도록 충분한 온도로 동결을 시키고, 얼음렌즈가 성장할 수 있도록 수분을 계속 공급하면 얼음

1 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수
2 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 대학원, 박사과정수료

결정의 성장에 의한 동결로 인한 압력이 증가된다. Hoekstra et al.(1965)은 동상민감성 기준 평가에서 흙의 간극 크기에 따른 동상 특성을 제시하였고, 간극 크기의 특성은 투수계수와 모관력과 같은 흙의 특성과 관련이 있다고 발표하였다[1].

동결 융해에 따른 액성한계 변화에 대하여 Aoyama et al.(1985), Yong et al.(1975) 등은 동결·융해 후의 높은 소성의 점도는 입자 집합체의 변화로 인해서 액성한계 값이 감소하고, Matagami 점토의 동결융해 반복 회수와 액성한계의 관계를 보여주었다. 액성한계는 초기 약 80%에서 동결융해 반복 회수가 증가함에 따라 급격히 감소하여 4번 정도 반복 후 약 30%정도 감소된다고 발표하였다[2, 3]. 즉, 흙이 동결되는 점 아래에서 노출되었을 때 얼음은 간극 사이의 자유수내에서 형성되기 시작하여 동결 과정이 계속되면 얼음 입자는 커지게 되며, 동결융해 반복회수가 약 4~5회 정도 지난 후 안정화되는 경향을 보인다. 또한, Konrad (1989)는 동결도에 접근해 있는 동결전선에서의 온도구배와 수분공급비를 빙정 분리 작용(segregation potential)으로 정의하였고, 동결융해 반복으로 인하여 빙정 분리가 감소하게 되며, 특히 동결융해 반복회수 1회에서 투수계수는 가장 큰 변화를 보인다고 제시하였다[4]. Chamberlain and Gow (1979)은 몇 차례의 동결융해 과정을 반복하여 간극비와 투수계수의 변화를 실험한 결과, 압밀응력에 의해 간극비가 감소하는데도 불구하고 수평, 연직의 투수계수는 오히려 동결시 수축 균열이 형성되기 때문에 크게 증가한다는 사실을 밝혔다[5].

흙입자의 구조적 변화는 간극의 부피와 집합체 내부의 간극 또는 집합체간의 간극 분포에 의해 결정된다. 집합체 내부의 간극과 집합체간의 간극의 상태는 동결 단계 초기의 얼음 입자가 높은 포텐셜 간극내에서 생성되어 동결 속도에 의해 얼음입자는 더 커지거나 패드 내부로 들어오게 되며 이것은 패드의 이동, 분할, 균열을 발생시키고 초기의 흙 구조는 변한다.

3. 실험 방법

3.1 시료의 공학적 특성

본 연구에서는 철도노반재료로 사용되어지고 있는 화강 풍화토와 모래질 흙에 대하여 동상팽창압과 물리적 특성에 대한 실험을 실시하였다. 사용된 공시체는 각각의 포화도에 따라 실시하였고, 시간과 온도에 대한 동상팽창압은 완전포화조건으로 수행하였다. 다음의 Table 1은 각각의 시료에 대한 공학적 특성을 나타낸 것이다.

Table 1. Physical properties of soil

공학적 특성	실험 결과	
	화강풍화토	모래질 흙
자연 함수비, ω_n (%)	16.5	17.2
비중, G_s	2.66	2.65
LL(%) / PI	31.9 / NP	- / NP
$\gamma_{d\ max}$ (t/m^3)	1.89	1.95
ω_{opt} (%)	12.4	11.1
투수계수, k (cm/sec)	2.0×10^{-6}	2.1×10^{-4}
No. 200체 통과량(%)	31.3	7.8
USCS	SM	SP

3.2 실험 장치

Fig. 1에 나타낸 동결융해 실험장치는 직경100mm, 높이 130mm인 몰드를 사용하였고, 동결상자 내부에는 Teflon으로 도포하여 몰드와 스티로폼이 일체되도록 하였다. 공시체는 동결시 수분공급이 없고, 융해시 비배수조건인 폐합시스템의 상태로 동결시켰다. 동상시험이 완료되었을 때는 공시체를 동상실험 상자에서 꺼내어 동결된 상태와 동결융해후의 함수비 변화를 확인하였다. 몰드 저면에는 다공판을 설치하고, 'O' 링으로 방수처리 하였다. 또한, 몰드의 상부에는 알루미늄 디스크를 제작하여 시료에서 작용되는 압력을 로드셀로 전달되도록 하고, 동시에 시료를 구속시킬 수 있도록 하였다. 그리고, 몰드 내부에는 그리스(grease)를 발라서 마찰력을 최소화시켰고, 냉각기를 통해 단일 방향으로의 동결을 진행시키면서 로드셀로 측정되어진 압력은 연결된 자동수집장치로 나타내었다. 동결상자 내부의 온도는 내부에 설치되어 있는 온도센서(thermometer)와 성형시료의 상

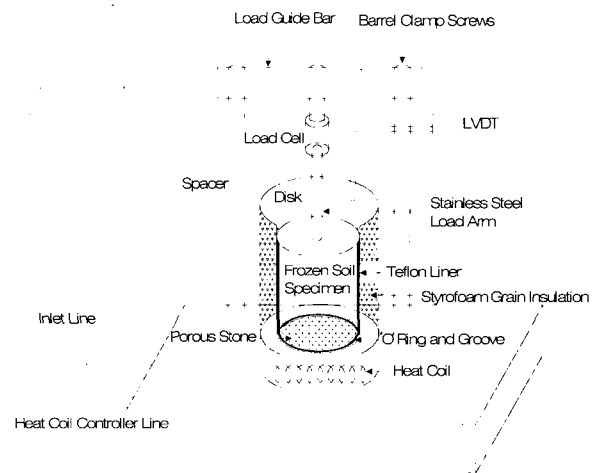


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus

부, 중앙부, 하부로 나누어 설치된 온도센서장치(thermocouple)로 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 시간과 온도 변화에 따른 동상팽창압의 변화

본 연구에서는 Table 2에 제시된 바와 같이 초기설정온도를 각각 -5°C , -10°C , -15°C , -19°C 상태에서 단계적으로 온도를 강하하였다. 각각의 초기 설정온도에서 일정시간이 지나면 동상압이 발현되기 시작하고, 이후 그 해당온도에서 동상압이 증가되다가 일정한 값을 유지할 때 -0.5°C 씩 온도를 강하시켜 가면서 연속적으로 지속시간에 따른 팽창압의 변화를 측정하였다. 그러나, 초기설정온도를 -19°C 상태에서 단계적으로 -0.5°C 씩 강하하였을 경우, 최종온도가 -24°C 가 되면, 동상압은 증가하지 않고 수렴하는 결과를 나타내었다.

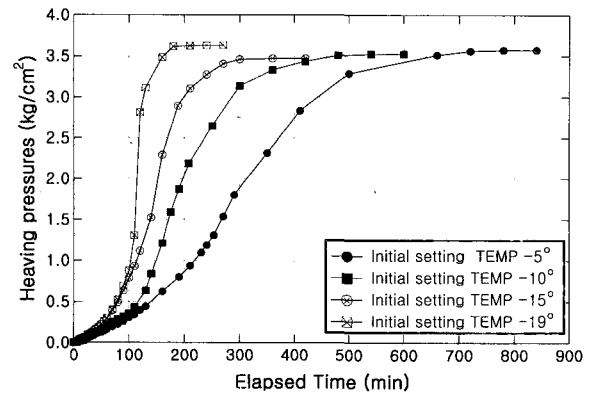
Fig. 2를 보면, 세립분을 많이 함유한 흙일수록 동상이 발현되기까지의 시간과 동상 지속시간이 더 크게 나타나고 있고, 단계별 온도강하에 따른 최대 동상팽창압은 화강풍화토의 경우 3.574kg/cm^2 , 모래질 흙은 0.363kg/cm^2 으로서 세립분을 많이 함유하여 부동수분이 많은 흙일수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다. 또한, 초기 설정온도가 각각 영하 5°C 와 영하 19°C 일 때를 그대로 유지하면서 실험한 결과, 각각의 온도에서 최대팽창압은 큰 차이를 나타내고 있었다[6]. 이 결과는 동결토 안에 잠재되어 있는 부동수분량의 영향으로서 Yong et al.(1975)이 제안한 작은 비표면적을 갖고 있는 조립토는 물분자에 대하여 별다른 영향은 없으므로, 동상팽창압은 상대적으로 작은 값을 나타낸다는 사실과 일치한다[3].

Fig. 3은 동상팽창압에 대한 기존에 보고된 결과와 본 연구에서 수행한 실험결과를 비교한 것으로서 Hoekstra et al.(1965)이 제안한 시료의 하부를 구속시킨 상태에서 상부에서 하부로 동결을 진행시킨 결과, 본 연구에서 수행된 화

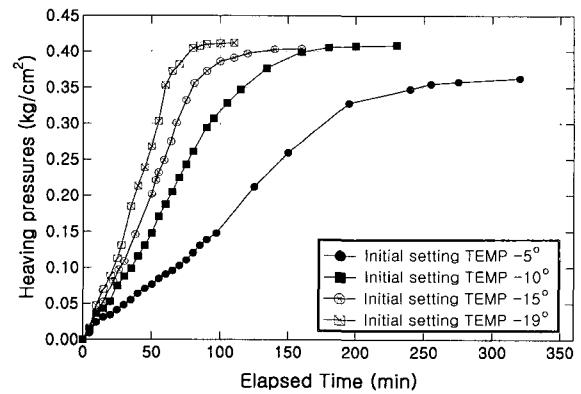
강풍화토와 미국의 CRREL 실트, Richfield 실트와 차이가 크지 않아 기존 연구된 결과 값의 범위로 나타났다.

4.2 포화도에 따른 동상팽창압의 변화

포화도에 따른 동상팽창압의 변화를 알아보기 위하여 포화도가 100%, 90%, 80%, 그리고 60%인 화강풍화토를 영하



(a) Weathered granite soil



(b) Sandy soil

Fig. 2. Variation of frost heaving pressure with elapsed time and phase down temperature

Table 2. Variation of frost heaving pressures of soil with elapsed time

토사 종류	설정온도($^{\circ}\text{C}$)	동상팽창압 발현시점 까지의 시간(min)	동상지속시간 (min)	최대동상팽창압 (kg/cm^2)
화강풍화토	$-5 \rightarrow -10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	400	780	3.574
	$-10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	180	540	3.526
	$-15 \rightarrow -19$	130	320	3.471
	-19	70	230	3.624
모래질 흙	$-5 \rightarrow -10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	70	320	0.363
	$-10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	50	200	0.408
	$-15 \rightarrow -19$	45	140	0.403
	-19	40	110	0.412

19°C로 설정하여 단계적으로 온도를 변화시켜 동상실험을 측정하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 포화도가 최적함수비 상태보다 클 경우에 영하의 온도 지속시간이 길고 온도가 낮을수록 동상팽창압은 증가하며, 포화도가 증가할수록 동상팽창압은 더 크게 증가하고 있다.

최적함수비 상태의 포화도를 나타내는 함수비 이하에서는 동상팽창압의 변화는 나타나지 않았다. 이는 낮은 포화도에 대한 조건일 경우, 간극안에서 얼음의 크기는 주위 토립자에 변위를 일으킬 만큼은 충분하지 않고 토립자의 용적수축으로 부간극수압이 증가함에 따라 동결토체의 체적감소를 일으키기 때문에 사료된다. 또한, 포화도 90%와 100%일 때의 동상팽창압의 증가율은 49%정도 증가된 것을 알 수 있다. 이는 안정된 동결전선이 형성되어 빙정 분리(ice segregation) 현상이 발생하게 되어 팽창압력으로 인한 거대한 얼음렌즈가 형성된 것으로 판단된다.

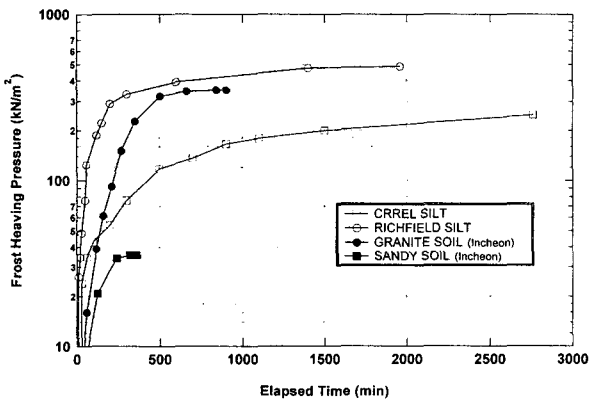


Fig. 3. Comparison of frost heaving pressure for Incheon soils vs CRREL soils

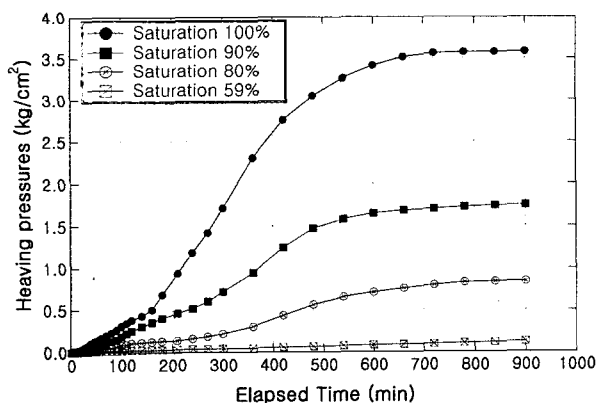


Fig. 4. Variation of frost heaving pressure as degree of saturation (Weathered granite soil)

4.3 동결융해후의 물리적 특성 변화

동결융해의 반복에 기인한 흙의 강도, 구조적인 변화 등으로 주변에서 많은 피해 사례들이 나타나고 있다. 즉, 봄철 해빙 후에 철도 사면의 붕괴 및 노반 연약화, 도로 포장면 균열의 발생, 동상작용에 의한 맨홀의 융기 등 각종 토질 구조물에 대한 역학적 성질의 변화를 초래하고 있다. 따라서, 이와 같은 현상을 실험적으로 규명하기 위하여 실내에서 흙의 동결 상태와 융해 상태를 인위적으로 반복하여 이들 결과를 상호 비교 분석하였다.

4.3.1 동결융해 후의 액성한계와 일축압축강도의 변화

Fig. 5는 화강풍화토에 대한 액성한계와 동결융해 반복회수와의 관계를 나타낸 것으로, 동결융해 반복작용으로 액성한계가 9%정도 감소된 결과를 나타내고 있다. 즉, 첫번째 동결융해에서 액성한계가 가장 크게 감소되었고, 반복회수

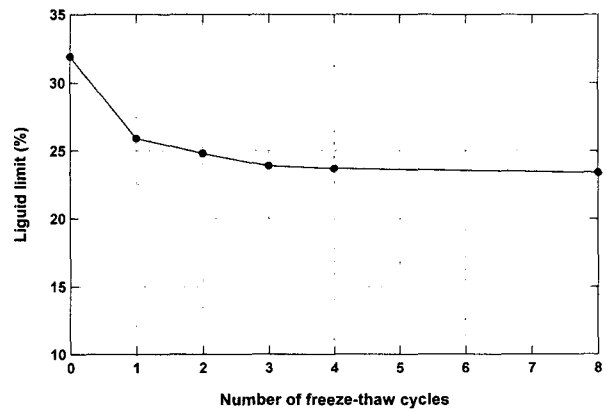


Fig. 5. Relationship between liquid limit and number of freeze-thaw cycles (Weathered granite soil)

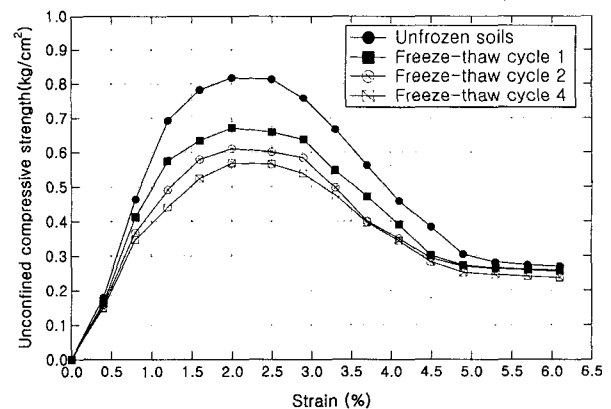


Fig. 6. Relationship between compressive strength and freeze-thaw cycles (Weathered granite soil)

가 4회 이상되면 서서히 감소하여 최종 8회 이상이 되면 거의 변화되지 않고 있다.

흙의 동결융해에 따른 화강풍화토의 일축압축 특성 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 비동결토에서의 화강풍화토의 일축 압축강도는 0.817kg/cm^2 를 나타내었다.

동결융해 반복회수 1회에서는 18%의 강도가 감소하여 강도 저하의 차이는 크게 발생하였고, 동결융해가 4회 이상 되면 강도는 거의 변화가 없었다. 또한, 동결융해토가 비동결토에 비하여 파괴강도를 나타내는 부분에서 완만한 곡선을 보이고 있는데, 이는 얼음렌즈의 성장으로 인한 흙의 구조 변화와 동결 중에 성장된 얼음렌즈로 인한 흡착수막이 얇아져 입자간의 전기적 포텐셜이 저하, 빙정 분리(ice segregation) 작용으로 토립자 사이의 간극이 증대로 시료 내부에 미세한 균열의 발생으로 사료된다.

4.3.2 전자현미경 촬영을 통한 흙의 구조적 변화

본 실험은 화강풍화토에 대하여 1,000배율로 동일하게 전자현미경(SEM) 촬영을 하였다. 동결전과 동결융해 후의 시료에 대해서는 시료를 건조시킨 상태로 촬영을 실시하였다. 촬영시 사진 선택에 대한 불확실성이 있어 여러 개의 사진을 찍어 선택한 후 다음의 Fig. 7과 같이 나타내었다.

흙의 입자구조를 정성적으로 전자현미경에 의하여 분석한 결과, 동결융해 반복에 의하여 토립자 내부에서는 클러스터라는 단위구조가 형성되어 입자간 단위구조의 충돌로 인한 간극수압의 증가로 토립자간 분리 및 붕괴가 발생되어 불규칙적인 배열성이 나타난 것으로 사료된다.

4.3.3 동결융해후의 투수계수 변화

삼축시험장치에 연결하여 0.5kg/cm^2 의 배압을 가하여 시료를 포화시킨 상태에서의 투수실험 결과, 동결융해 반복회수에 따른 투수계수는 초기상태보다 반복회수가 증가할수록 커지는 경향을 나타내고 있다. Table 3에 나타난 바와 같

Table 3. Increasing of coefficient of permeability as freeze-thaw cycles

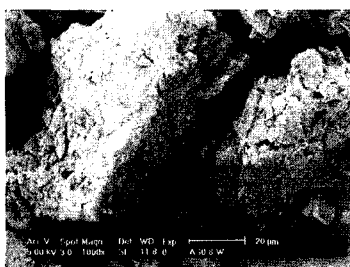
토사종류		반복회수	비동결토	1 회	3 회	5 회
		투수계수 (cm/sec)				
화강 풍화토	투수계수 (cm/sec)		2.0×10^{-6}	2.6×10^{-6}	2.4×10^{-5}	1.1×10^{-4}
	$\frac{K_{\text{cycle}}}{K_{\text{initial}}}$		1.0	1.3	11.8	54.7
모래질 흙	투수계수 (cm/sec)		2.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.0×10^{-3}	3.6×10^{-3}
	$\frac{K_{\text{cycle}}}{K_{\text{initial}}}$		1.0	1.2	4.9	17.2

이 반복회수가 5회 이후의 투수계수는 동결융해 반복실험 전 초기값에서 화강풍화토는 54.7배, 모래질 흙은 17.2배정도 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 반복실험을 계속 실시한다면 Chamberlain et al.(1979)이 제시한 바와 같이 투수계수는 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴할 것으로 사료된다[5]. 따라서, 균열에 의한 국부적인 부동침하를 초래하여 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있다.

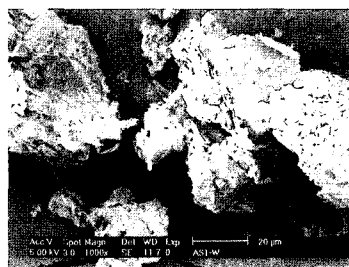
5. 결론

본 연구에서는 철도노반재료로 사용되어지고 있는 화강 풍화토와 모래질 흙에 대하여 동상팽창압 실험과 물리적 특성 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터, 시간과 온도변화, 그리고, 포화조건에 따른 동상팽창압 특성과 동결융해후의 물리적 특성에 대한 값을 도출하였다.

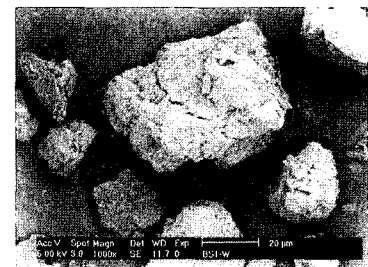
시간에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 실트질 흙이 가장 큰 값을 나타내었으며, 반면에 모래질 흙의 동상팽창압은 현저히 낮았다. 또한, 초기설정온도에 따라 큰 차이를 보이고 있는 것은 각각의 흙마다 열전도율이 다르며, 화강풍화토는 모래질 흙보다 열전도율이 작고, 세립분을 더 많이 함유하고 있어 발현시간과 동상지속시간, 동상팽창압의 차



(a) Soil particles before freezing



(b) Soil particle after freeze-thaw (1 cycle)



(c) Soil particle after freeze-thaw (4 cycle)

Fig. 7. Soil particle using SEM as freeze-thaw cycles(Weathered granite soil)

이를 보이는 것으로 사료된다.

또한, 화강풍화토에 대하여 포화도 60%, 80%, 90%, 100% 일 때, 동상팽창압 측정 결과, 포화도 90%와 100%일 때의 팽창압 증가율이 가장 크게 나타났는데, 이는 간극이 100%의 얼음으로 포화되는 단계에서 안정된 동결전선이 형성되어 빙정 분리 현상이 발생됨으로서 팽창압력으로 인한 거대한 얼음렌즈를 형성되는 과정으로 판단된다.

동결융해 반복회수에 따른 화강풍화토의 액성한계시험 결과, 첫번째의 동결융해에서 액성한계가 크게 감소되고, 반복회수 4회 이상되면 서서히 감소하여 8회 이상 되면 거의 변화되지 않고 있다. 또한, 일축압축 시험결과, 부동토에서 일축압축강도가 0.817kg/cm^2 로 나타났고, 동결융해 반복회수 1회에서 감소율이 18%로서 가장 큰 감소율을 나타내었다. 흙의 입자구조를 전자현미경에 의하여 분석한 결과, 동결융해 반복에 의하여 토립자 내부에서는 클러스터라는 단위구조가 형성되어 입자간 단위구조의 충돌로 인한 간극수압의 증가로 토립자간 분리 및 붕괴가 발생되어 불규칙적인 배열성이 나타난 것으로 사료된다. 마지막으로, 동결융해에 따른 투수계수 시험 결과, 반복회수가 5회 이후의 투수계수는 동결융해 반복실험 전 초기값에서 화강풍화토는 54.7배, 모래질 흙은 17.2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는

동결융해 반복에 따른 토립자의 분리 및 결합과 균열이 발생되어 흐름의 저항성을 감소시켜 투수성이 증가되는 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), "Frost heaving pressures", *Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176*.
2. Aoyama, K., Ogwa, 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.
3. Yong, R. N. and Warkentin, B. P.(1975), *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company, pp.383-419.
4. Konrad, J. M.(1989), "Physical Processes during Freeze-Thaw Cycles in Clayey Silts", *Cold Region Sciences Technology 16*, pp.291-303.
5. Chamberlain, E. J. and Gow, A.(1979), Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, *Engineering Geology*, Vol.13, pp.73-92.
6. 신은철, 박정준(2003), "동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구", 한국지반공학회 논문집, 제19권 2호, pp.65-74.