

지반환경 변화에 따른 화강토의 동적특성

Dynamic Characteristics of Decomposed Granite Soils by Changing Geoenvironment

이진수¹, 이강일^{2*}, 김경진³

Jin-Soo Lee¹, Kang-Il Lee^{2*}, Kyung-Jin Kim³

¹Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongshin University, 252, Daeho-dong, Naju, Jeonnam, 520-714, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

³Non-member, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

ABSTRACT

Decomposed granite soil is likely to lose its strength when exposed to air or water. Such a geomaterial is weathered by wetting-drying or freezing-melting. In this study, resonant column tests were conducted to figure out the dynamic characteristics of granite soil that has affected by environmental changes like weathering condition. The results show that wetting-drying weathering condition is the most affective parameter on the dynamic characteristics of granite soil. In the meantime, artificial weathering conditions such as freezing-melting has less affection at first and getting increase as the process repeats constantly.

요 지

화강토는 우리나라에서 널리 분포하는 흙으로써 공기에 노출되거나 물과 접촉하면 강도특성이 쉽게 변화하는 흙으로 건설기술자가 가장 많이 당면하고 있는 지반재료이다. 특히, 이러한 재료는 계절적 환경변화를 거치게 되면서 토류구조물의 주 구성요소인 배면지반은 습윤-건조, 동결-융해 및 자연 또는 인공적인 풍화과정을 거치게 된다. 따라서 본 연구는 이러한 지반환경 변화 후 화강토의 동적거동 특성에 미치는 지반환경 및 풍화조건이 무엇인지를 공진주 실험을 통해 연구하였다. 본 연구결과 화강토의 동적특성에 가장 큰 영향 미치고 있는 지반환경 조건은 습윤-건조 풍화조건이며, 다음으로 인공풍화 조건이 초기에는 큰 영향을 미치다가 동결-융해 사이클 횟수가 증가할수록 동결-융해 조건이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Keywords : Freezing-melting, Wetting-drying, Artificial weathering, Decomposed granite soils

1. 서 론

화강토는 겉보기에 고결상태에 있고, 단단해 보이지만 충격이나 기타의 교란작용을 받으면 쉽게 입자가 파쇄되어 구조적으로 불안한 상태를 보인다. 도로건설, 택지조성 등 여러 가지 토목공사에 쓰이는 화강토의 위와 같은 성질은 사면의 안정, 제체 및 뒷채움 재료로서의 활용성, 기초

지반의 침하 등 여러 측면에서 그 중요성이 인식되고 있으며 더불어 지반 내에서 수분이 존재할 경우 입자파쇄의 활성화를 촉진시키고, 그 결과 압축성의 증가와 전단강도의 저하를 일으키는 요인이 되기도 한다.

토류구조물(geo-structure)은 사용연한 동안 계절적 환경변화를 거치게 되며 따라서 토류구조물의 주 구성요소인 배면 지반 또한 습윤-건조(wetting-drying), 동결-융해(freezing-thawing) 등 역학외적인 계절적 환경 변화과정을 거치게 된다. 최근 이슈가 되고 있는 지구 온난화 및 기후변화는 이러한 계절적 환경변화를 증가시키고 있는 추세라고 할 수 있어 토류구조물 또한 계절적 지반환경변

Received 18 Jan. 2014, Revised 13 Mar. 2014, Accepted 18 Mar. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. I. Lee)

화에 대응할 수 있도록 설계·시공·유지관리 기술이 필요하다(Yoo, 2011b).

Eigenbrod(1996)는 캐나다 퀘벡 지역에서의 비 포장된 고속도로 제방의 융해침하 등 동토지역에 토류구조물을 건설할 시 지반의 동결-융해에 대한 평가에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Liu et al.(2006)은 동결-융해 작용으로 인한 흙의 공학적 특성은 동결-융해 반복횟수, 다짐도, 함수비의 정도에 따라 달라지는 미세입자구조에 관한 연구를 수행하였다. 국내에서는 최근에 Lee et al.(1999), Kim et al.(2007), Yoon et al.(2003)이 화강풍화토를 대상으로 동결-융해시 화강풍화토의 특성의 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다. 특히 Kim et al.(2007)는 기후변화로 인한 동결-융해가 화강풍화토의 강도저하에 미치는 영향을 심도 있게 다루었으며, Yoo et al.(2011a, b)은 동결-융해 반복작용 및 습윤-건조 반복작용으로 인한 화강풍화토의 압축강도 특성에 미치는 영향을 연구하였고, 이 밖에 Lee et al.(2012)은 석분의 적절한 활용방안을 찾기 위하여 동적인 특성을 지배하는 지반재료를 국한하여 건설재료의 활용 가능성을 연구하였으며, Lee et al.(2013)는 인공풍화기법을 통해서 풍화도 변화에 따른 화강토의 파쇄특성 연구를 수행한 바 있다.

이러한 관점에서 본 연구는 화강토를 대상으로 상기에서 서술한 계절적인 지반환경 변화작용을 받고 있는 동결-융해, 습윤-건조 작용 및 인위적 또는 자연적 풍화작용을 받는 지반조건에 대하여 실험실에서 각 조건별 공시체를 제작하고 공진주 실험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 화강풍화토는 포천지역의 풍화토사면에서 교란된 시료를 채취하였다. 공시체 성형은 표준다짐을 실시하여 최적함수비와 최대건조 밀도 95%의 조건으로 과소다짐법을 이용하여 공시체를 제작하였다. 이렇게 제작한 공시체는 동결-융해 조건, 습윤-건조 조건 및 인공풍화조건에 대하여 각 공시체 시료에 대하여 공진주 실험을 실시하였다. 각 시료별 구속압 조건은 20kPa, 40kPa, 80kPa, 160kPa, 320kPa로 변화를 주었으며 실험결과에 대하여 전단탄성계수 및 감쇠비 관계를 분석하였고 그 실험 결과로부터 화강토의 동적특성에 가장 큰 영향을 미치는 지반환경 요소가 무엇인지를 분석·고찰 하였다.

2. 지반환경 조건별 흙의 특성 및 동적 영향인자

2.1 동결-융해 후의 흙의 성질

온도가 낮아짐에 따라 토체내의 간극수의 화학적 포텐

셜이 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 형성은 동결 강도, 물의 상태, 흙의 성질 등에 영향을 받는다. 이러한 요소들은 흙에서 얼음 형성위치, 얼음 입자의 크기, 모양, 분포 등을 조절한다(Yoon et al., 2003).

얼음 결정이 간극내에서 성장함에 따라 간극이 팽창하게 되고 흙의 부피가 변한다. 이것은 조직 내의 결합을 파괴하거나 압축할 것이다. 심지어 원래 흙의 구조를 변화시키고 그 때문에 결합이 형성되었다면 새로운 입자가 생성될 것이다. 이러한 흙의 구조의 변화는 동결-융해 사이클이 약 4~5회 정도 지난 후 안정화되는 경향을 보인다. 동결-융해 후의 집합체의 크기는 초기의 흙의 구조, 함수비, 동결속도, 동결 온도 등 여러 가지 요소들에 의해 변화된다. Fig. 1은 동결-융해가 흙의 거동에 미치는 영향을 그림으로 나타낸 것이다.

2.2 습윤-건조 반복작용에 따른 응력-변형을 관계

Fig. 2는 습윤-건조 작용 이전의 경우($N_{WD}=0$)와 4회의 습윤-건조 사이클이 작용한 경우($N_{WD}=4$)에 대한 평면변형률 압축실험 결과를 보여주고 있다. 먼저 축차응력-압축

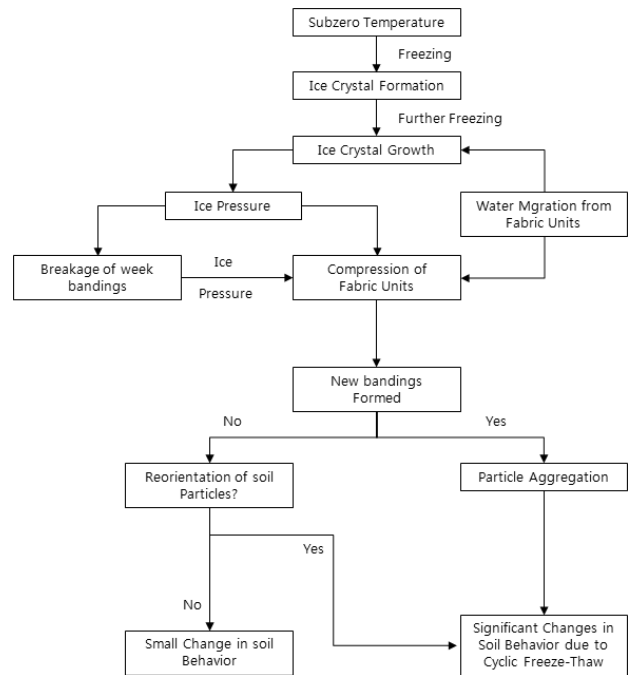


Fig. 1. Influence of freezing-melting mechanism on soil behavior (Yong et al., 1985)

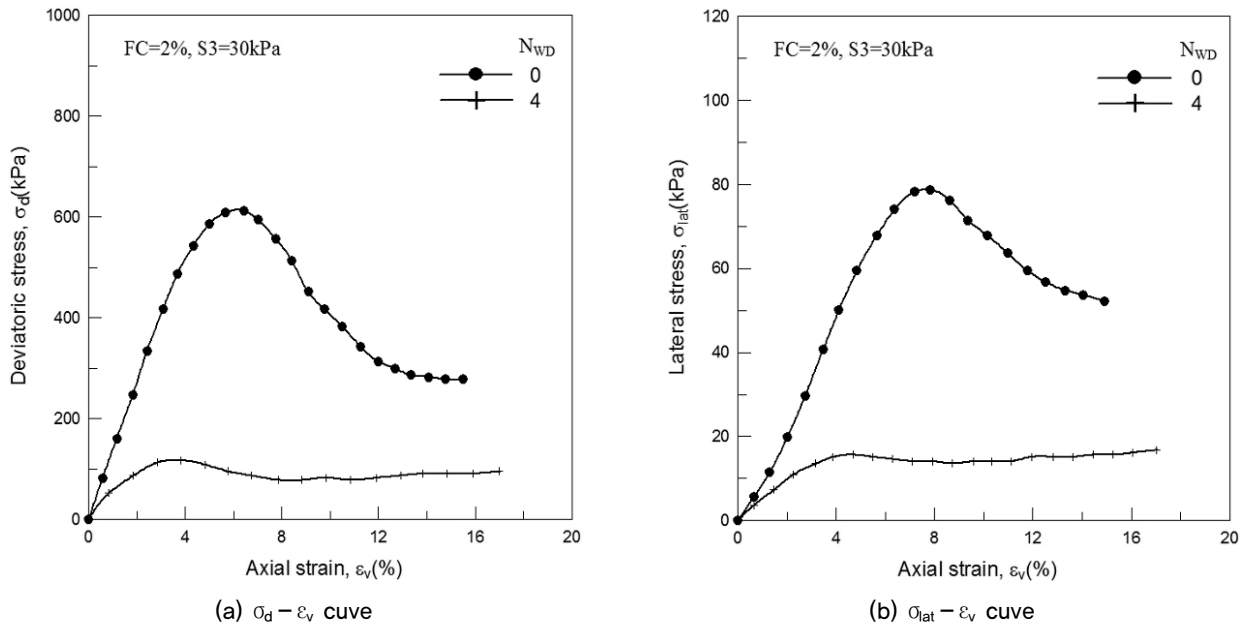


Fig. 2. Characteristics of stress-strain by wetting-drying (Yoo, 2011b)

변형률($\sigma_d - \epsilon_v$) 관계를 보여주고 있는 Fig. 2(a)에서는 습윤-건조 반복작용에 따라 $\sigma_d - \epsilon_v$ 의 기울기가 급격히 감소하고 아울러 최대축차응력($\sigma_{d,ult}$) 또한 현저히 저하하는 것으로 검토되었는데 이러한 경향은 $\sigma_{lat} - \epsilon_v$ 곡선을 보여주고 있는 Fig. 2(b)에서도 잘 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 습윤-건조 반복작용이 흙의 응력-변형률-강도 특성에 지대한 영향을 미칠 수 있음을 의미하는 것으로서 옹벽 시공 후 뒤채움 흙이 겪게 되는 습윤-건조 과정은 결국 뒤채움 흙의 역학적 특성을 감소시킬 수 있음을 의미한다고 하겠다.

2.3 흙의 동적 물성치의 영향인자

지반은 전단변형률이 커짐에 따라 전단탄성계수가 감소하는 비선형 거동을 보이며, 전단탄성계수는 변형률 크기에 무관한 선형영역과 탄성계수가 변형률 증가에 따라 감소하는 비선형영역으로 구분된다. 이 두 영역을 구분하는 변형률 크기를 선형한계변형률(threshold strain)이라 한다. 일반적으로 지반재료의 선형한계변형률은 0.0001 ~ 0.01% 범위에 존재한다.

한계변형률(0.001%)이하의 저변형률에서는 전단변형률에 관계없이 전단탄성계수와 감쇠비가 일정한 변형 특성을 보인다. 둘 다 선형관계를 가지고 있으며, 전단탄성계수는 최대가 되고 감쇠비는 최소가 된다. 한계변형률이 상의 고변형률에서는 변형률이 증가함에 따라 전단탄성계

수는 감소하고, 감쇠비는 증가하는 거동을 보인다.

Hardin et al.(1972)은 흙의 전단탄성계수와 감쇠비에 영향을 미치는 인자들에 대해 연구하여 세 가지 범주로 구분하였다. 세 가지 범주로는 매우 중요, 약간중요, 상대적으로 덜 중요하다. 매우 중요한 인자들로는 변형률 진폭, 유효 평균 주응력, 간극비, 재하 사이클, 포화도 등이 있으며 Hardin et al.(1968)의 연구 결과에 따르면, 전단탄성계수와 그에 영향을 미치는 인자들 사이의 함수관계에 대해 식 (1)과 같은 결론을 제시하였다.

$$G = f(\sigma'_0, e, H, S_r, \tau_0, C_g, A_p, F, T, O, K_t) \quad (1)$$

여기서,

σ'_0 =평균 유효 구속압, e =간극비, H =주변응력 진동이력, S_r =포화도, τ_0 =전단응력, C_g =입자의 특성, A_p =진동의 폭, F =진동수, T =시간과 하중증가분의 이차효과, O =흙의 구조, K_t =동결을 포함한 온도

3. 공진주 시험의 원리

공진주 시험(Resonant Column Test)은 0.0005% ~ 0.5%의 전단변형률 범위에서 지반의 동적물성치 특성을 규명하기 위해 사용되어 왔다. 동일한 시험기에서 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험이 실시되어 전단변형률의 변화에 따라 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)의 변

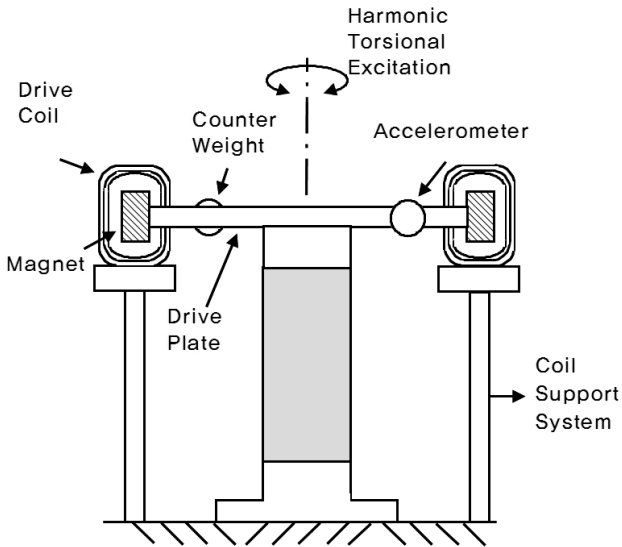


Fig. 3. Schematic diagram of resonant column test apparatus (Kim et al., 2004)

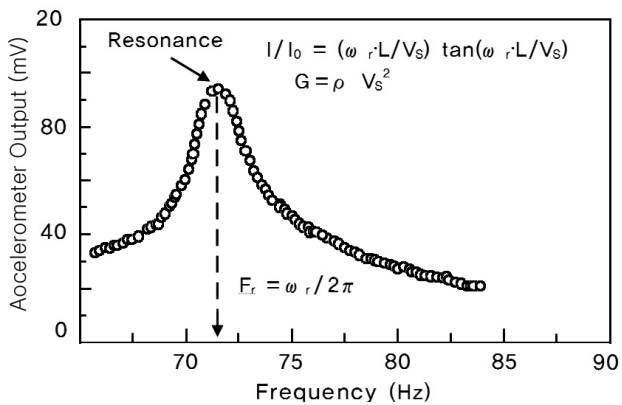


Fig. 4. Example of frequency response curve obtained from resonant column test (Kim et al., 2004)

화를 구할 수 있다. 본 연구에 사용된 공진주실험기는 Fig. 3과 같이 Stokoe식 실험기로서 경계조건으로는 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 가진시스템(drive system)을 시험시편의 상부와 연결하여 기반재료에 비틀력을 재하하고 비틀력에 의한 공시체의 거동은 가진판에 부착된 가속도계(accelerometer)를 이용하여 측정한다.

공진주 시험의 기본원리는 원통형의 시편에 진동수를 바꿔가면서 비틀을 가하여 Fig. 4에서와 같이 1차 모드의 공진주파수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구하는 동적인 시험방법으로 다음과 같은 방법으로 그 결과를 얻는다.

탄성과전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주 시험의 지배방정식은 식 (2)과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega l}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega l}{V_s}\right) \quad (2)$$

여기서, I = 시편의 질량관성 모멘트
 I_0 = 가진시스템의 질량관성 모멘트
 ω = 시편-가진시스템의 고유 진동수
 l = 시편의 길이
 V_s = 전단파 속도

식 (2)에 의해 전단파속도(V_s)가 구해지면 전단탄성계수(G)를 식 (3)로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

여기서, ρ = 시료밀도

전단변형률은 시료 안에서 반지름을 따라 변하고, 시료의 중심축으로부터의 거리의 함수로 표현되기 때문에 대표 값으로 등가전단변형률을 구하게 되며 등가전단변형률의 식 (4)와 같다.

$$\gamma = \gamma_{eq} \cdot \theta_{max} / l \quad (4)$$

Chen and Stokoe(1979)의 연구에 따르면 공진주시험에서 γ_{eq} 값이 0.82에서 0.79로 변한다고 밝혀졌다. 최대 전단 변형률이 10⁻³%이하인 경우 0.82이고, 0.1%인 경우 0.79라고 밝혔다. 본 연구에서는 γ_{eq} 를 0.82로 사용하였다.

공진주시험에서 감쇠비(D)는 자유진동 감쇠곡선(free vibration decay curve)을 이용하는 방법을 적용하여 결정하였으며 감쇠비를 산정하는 이론식은 식 (5)과 같다.

$$\delta = \ln \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (5)$$

여기서, θ_n, θ_{n+1} : 두 개의 잇따른 진폭
 D : 감쇠비

4. 시료준비 및 실험방법

4.1 시료준비

모형실험에 사용된 흙 재료는 우리나라 전역에 가장 넓게 분포하고 있을 뿐만 아니라 가장 이용도가 많은 흙인 화강토를 사용하였다. 이 재료는 건설현장에서 쉽게 접하는 흙으로서 풍화의 진행 정도에 따라서 흙 입자내의 간극이 잘 발달되어 있어 하중을 받으면 큰 변형이 발생되며 변형량은 간극비에 크게 의존하는 특징을 가지고 있다. 시료는 입자가 매우 조립인 경기도 포천지역에서 채취를 하였으며, 공학적 특성은 Table 1 및 Fig. 5과 같이 통일분류상 SM에 해당하며, No. 200번체 통과량이 17.2%이다. 또한 Fig. 6과 같이 다짐실험에서 얻은 최적함수비가 12.63%이고 최대건조밀도는 18.57kN/m³인 재료에 해당한다.

4.2 실험조건

본 연구는 화강토가 지반환경조건 즉, 동결-융해, 습윤-건조 및 자연풍화와 같은 반복조건에 놓여있을 경우 각 조건별 화강토의 동적 특성을 파악하는 것이 주목적이다. 따라서 이와 같은 조건을 재현하기 위해 Table 2와 같은 실험조건을 나누었으며 동결-융해시킨 시료를 A그룹, 습윤-건조시킨 시료를 B그룹, 인공풍화시킨 시료를 C그룹으로 분류하였다.

4.3 실험방법

동결-융해, 습윤-건조, 인공풍화 조건별 실험방법을 요약하면 Table 3과 같으며 상세한 설명은 다음과 같다.

Table 1. Physical property of weathered granite soil

Sample Location	Compaction Test		Atterberg Limit		#200 Passing (%)	G _s	Li (Ignition Loss)	USCS
	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C (%)	Liquid (%)	Plastic (%)				
Pocheon	18,57	12,63	N.P		17,2	2,67	2,80	SM

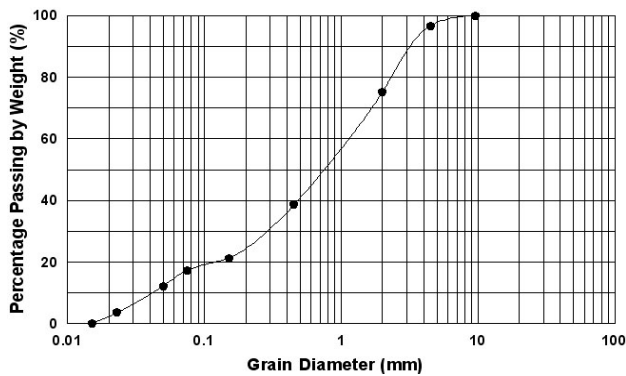


Fig. 5. Grain size distribution of weathered granite soil

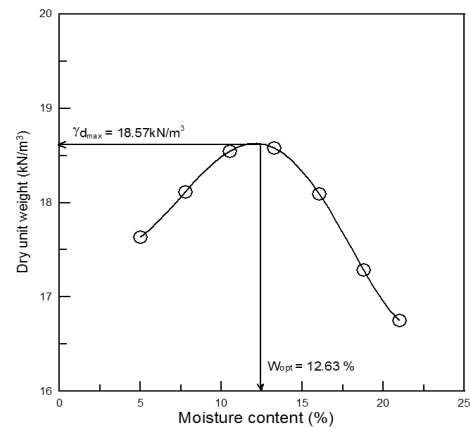


Fig. 6. Compaction test of weathered granite soil

Table 2. Experimental condition

Freezing-Thawing (A-Group)		Wetting-Drying (B-Group)		Artificial Weathering (C-Group)	
Cycle No.	Symbol	Cycle No.	Symbol	Cycle Day	Symbol
0	A-1	0	B-1	0	C-1
1	A-2	1	B-2	10	C-2
3	A-3	3	B-3	30	C-3
7	A-4	7	B-4	60	C-4
10	A-5	10	B-5	100	C-5

Table 3. Experimental method

	artificial weathering	freezing-melting	wetting-drying
Weathering method	Quick weathering using hydrofluoric acid	freezing by maintaining relative moisture content	wetting by raining and changing the ground water table
REPEAT TIME (DAY)	0 day	0	
	10 day	1 time	
	30 day	3 times	
	60 day	7 times	
	100 day	10 times	
specimen	specimens are prepared by under-compaction method using oven dried soils		

4.3.1 동결-융해

기후를 바탕으로 적절한 온도범위를 결정하기 위하여 포천의 10년간 기상자료를 비교하여 적절한 동결-융해의 온도를 설정하였다. 또한 응결을 유도하는 온도 유지시간을 약 3시간 정도로 설정하였을 때 충분한 동결과 융해가 발생된다는 기존 연구(Yoo, 2011b)를 바탕으로 본 연구에서는 동결-융해 온도는 -15°C와 +15°C로 설정하고 온도 유지시간을 각 24시간을 1회로 하여 0회, 1회, 3회, 7회, 10회 반복실험을 실시하였다(Fig. 7, Fig. 8 참조).

수분의 공급방법은 침수방식을 사용하지 않고 상대습도 유지에 의한 응결현상 유도방식을 사용하였는데 이는 강우나 지하수의 공급 등 특별한 상황이 아닌 빙점 이하의 온도에서 발생하는 일반적인 영향을 재현하기 위함이다. 이를 위하여 온도조정이 영하 25°C까지 가능하며 정밀도 0.1°C인 동결-융해 시험기를 이용하였다.

4.3.2 습윤-건조

습윤-건조실험은 강우시 침투로 인한 흙의 습윤대(wetting front) 이동과정 및 지하수위 변화를 고려하기 위해 습윤-건조 실험을 통하여 흙의 동적 특성을 알아보고자 하였다. 공시체는 습윤-건조시 시료의 모형유지를 위해 먼저 여과지를 두른 후 공시체 부피크기의 원통형 플라스틱으로 고정시켰으며 침수시 상부로의 토립자의 유출을 막기 위하여 여과지를 올린 후 그 여과지가 물에 뜨지 않도록 그

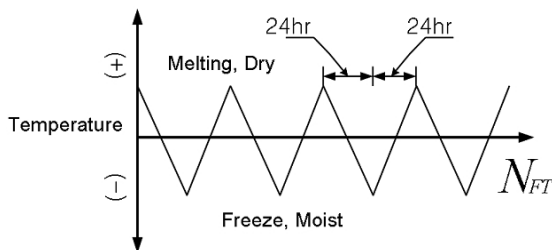


Fig. 7. Diagram of freezing-melting, wetting-drying

위에 플라스틱 판을 거치 하였다. 본 연구에서는 습윤-건조를 각 24시간을 1회로 하여 0회, 1회, 3회, 7회, 10회 반복실험을 실시하였다(Fig. 7 참조).

4.3.3 인공풍화

우리나라에서 산성비나 화학적 작용으로 인해 화강토의 풍화 조건을 재현하기 위해 인공풍화실험을 실시하였다. 포천지역에서 채취한 화강토를 인위적으로 불산용액을 이용하여 풍화를 가속화 시켜 풍화 진행기간 0일, 10일, 30일, 60일, 100일로 하여 실험하였으며, 일정한 시간마다 시료를 섞어 균일하게 풍화가 될 수 있도록 하였다. 그리고 인공풍화 일수가 끝나면 화강토 시료의 풍화정도를 풍화지표(CWI, Chemical Weathering Index)를 통해 계산하고(Lee et al., 2013), 각 풍화 일수별 공진주 실험을 실시하였다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 최대 전단탄성계수 특성

5.1.1 동결-융해시 최대 전단탄성계수

Fig. 9(a)는 포천 화강토의 동결-융해 시험조건시 사이클 횟수 증가에 따른 최대 전단탄성계수 값을 분석한 것이다. 실험결과에 의하면 동결-융해 사이클 횟수가 증가할수

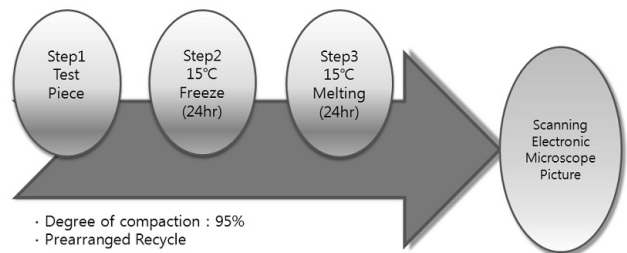
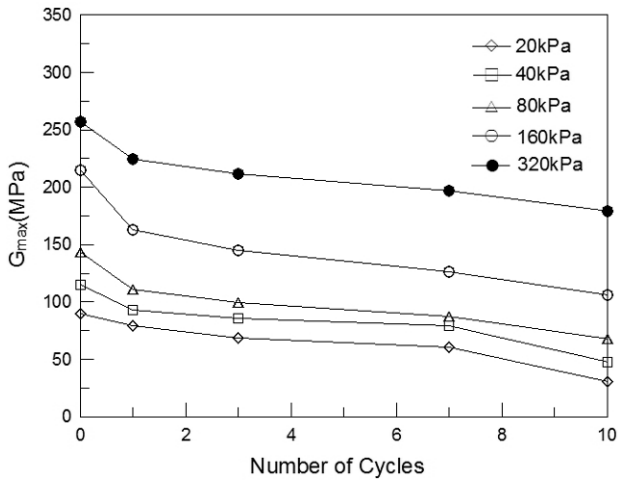
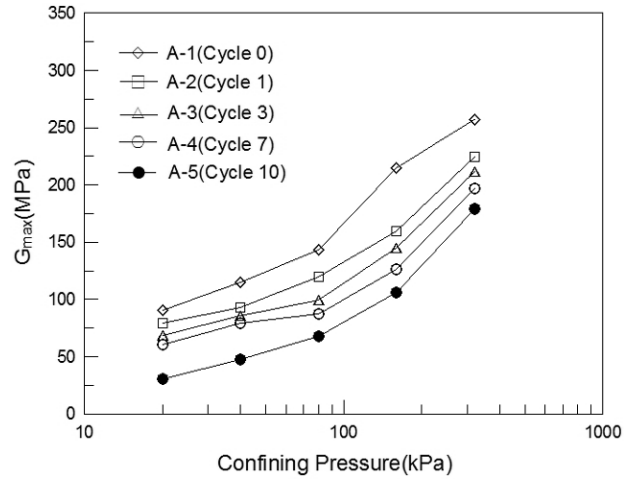


Fig. 8. Test procedure of freezing-melting



(a) Maximum shear elastic modulus by cycle time



(b) Maximum shear elastic modulus by confining pressure

Fig. 9. Maximum shear elastic modulus after freezing–melting

록 최대 전단탄성계수는 낮아지며 특히, 동결-융해 사이클 횟수가 1회일 때 최대 전단탄성계수가 가장 크게 감소하였다. 이는 동결-융해 사이클이 1회 일 때 전단탄성계수에 가장 큰 영향을 미치지만 그 이후부터는 그 영향이 더 적게 미친다는 것을 알 수 있다.

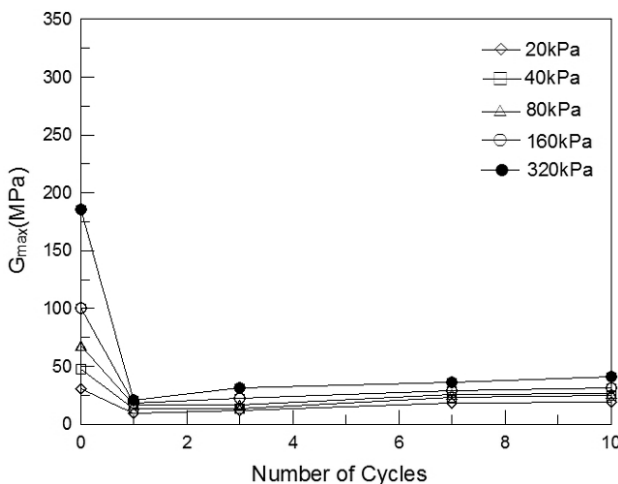
또한 Fig. 9(b)는 구속압별로 최대 전단탄성계수를 나타낸 것으로서 구속압이 증가할수록 최대 전단탄성계수가 점차적으로 커지는 경향을 볼 수 있었다. 그리고 사이클 횟수가 증가함에 따라서 최대 전단탄성계수가 점진적으로 감소하는 경향을 명확히 나타내었다.

5.1.2 습윤-건조시 최대 전단탄성계수

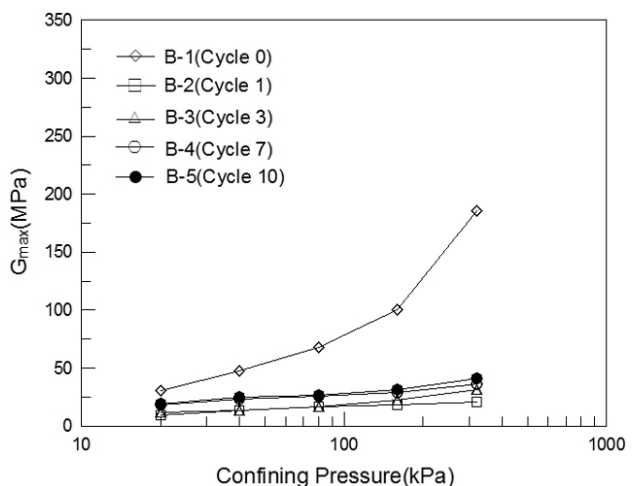
Fig. 10은 습윤-건조 시험조건시 사이클 횟수 및 구속압

에 따른 최대 전단탄성계수 값을 분석한 것이다. 그림에서와 같이 최대 전단탄성계수는 동결-융해 실험조건과는 달리 사이클 횟수가 1회 이후부터 급격하게 감소하다가 사이클 횟수가 증가함에 따라서 전단탄성계수가 약간 증가하는 경향을 보이지만 그 폭은 매우 미미하였다. 또한 구속압이 증가할수록 최대 전단탄성계수는 점점 증가하지만, 사이클 횟수가 1회 이후부터 구속압에 따른 최대 전단탄성계수의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

이러한 현상은 습윤-건조 시험조건인 경우 사이클 1회 이후 습윤 조건시 물로 인해서 화강토의 결합력이 크게 와해되었기 때문으로 판단되며 이는 화강토가 물과 결합시 가지고 있는 현저한 강도저하 현상과 일치한다고 판단된다.



(a) Maximum shear elastic modulus by cycle time



(b) Maximum shear elastic modulus by confining pressure

Fig. 10. Maximum shear elastic modulus after wetting–drying

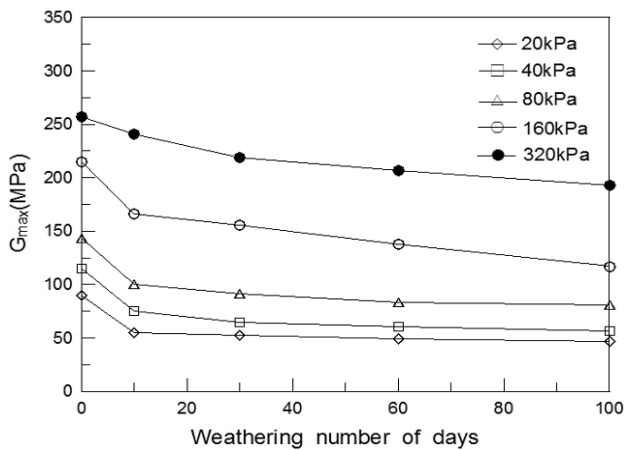
5.1.3 인공풍화시 최대 전단탄성계수

Fig. 11은 인공풍화 일수별, 구속압별로 최대 전단탄성계수의 실험결과를 분석한 것이다. 실험결과에 의하면 인공풍화가 점점 진행될수록 최대 전단탄성계수는 점진적으로 감소하는 경향을 보이며, 구속압이 낮은 경우에는 풍화일수와 관계없이 최대 전단탄성계수는 비슷하게 나타났다. 또한, 구속압이 증가함에 따라서 최대 전단탄성계수는 점점 증가하는 양상을 보였으며, 인공풍화를 처음 받은 10일에 전단탄성계수가 크게 감소하였다가 인공풍화 10일 이후에는 감소하는 폭이 구속압별로 거의 일정하게 나타났다.

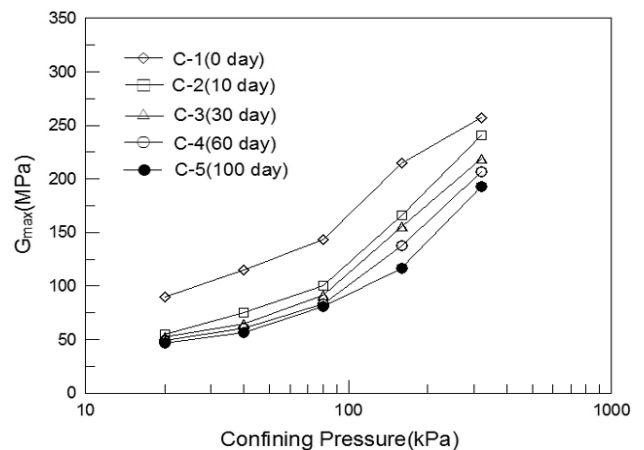
5.2 최소 감쇠비 특성

5.2.1 동결-융해시 최소 감쇠비

Fig. 12는 동결-융해시 사이클 횟수 및 구속압별로 최소

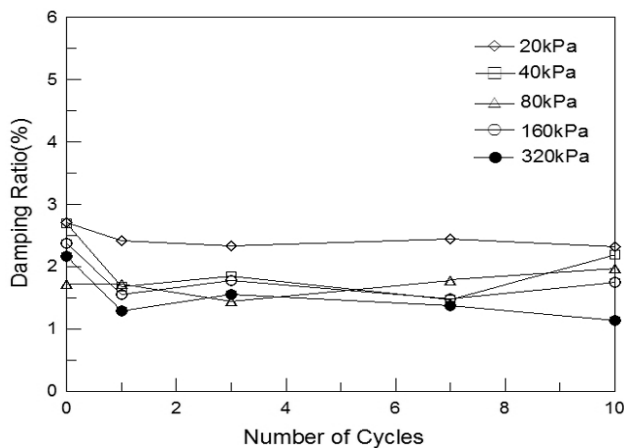


(a) Maximum shear elastic modulus by weathering days

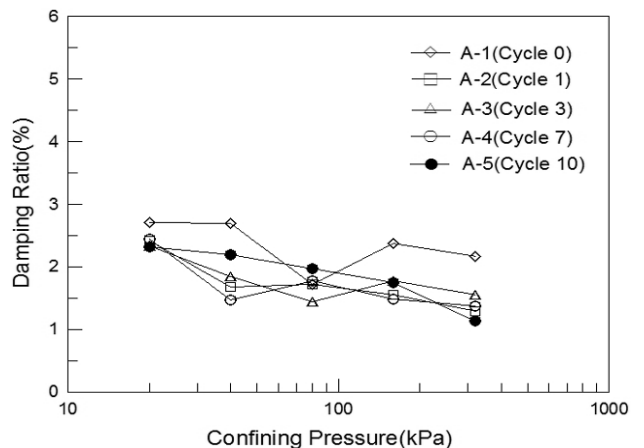


(b) Maximum shear elastic modulus by confining pressure

Fig. 11. Maximum shear elastic modulus after artificial weathering



(a) Minimum damping ratio by cycle time



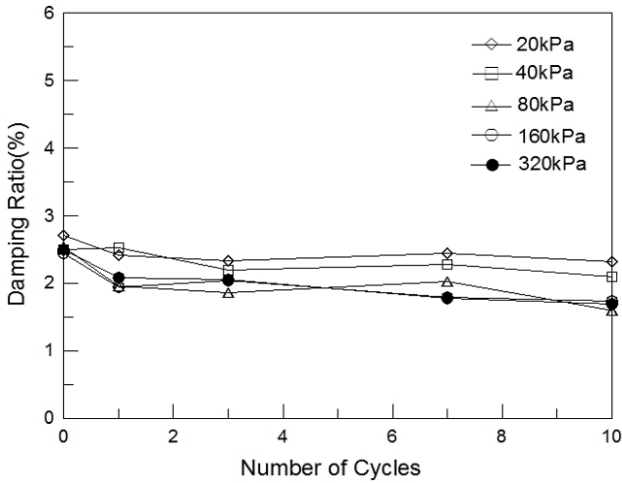
(b) Minimum damping ratio by confining pressure

Fig. 12. Minimum damping ratio after freezing-melting

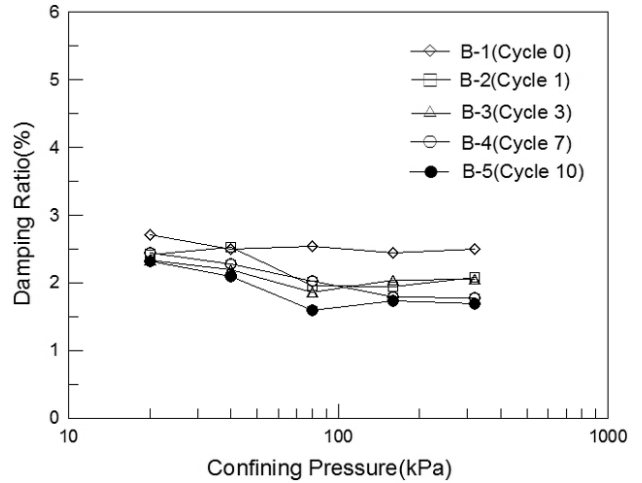
감쇠비 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과에 의하면 최소 감쇠비는 3.0~1.5범위에 있으며 사이클 횟수 및 구속압이 증가됨에 따라서 일정한 규칙이 없이 약간 감소하는 경향을 보였지만 그 차이는 미미하였다. 이런 경향으로 볼 때 동결-융해는 최소 감쇠비에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

5.2.2 습윤-건조시 최소 감쇠비

Fig. 13은 습윤-건조시 사이클 횟수 및 구속압별로 최소 감쇠비 변화특성을 나타낸 것으로 동결-융해실험 조건의 경향과 비슷하게 나타났다. 이러한 경향으로 볼 때 습윤-건조 시험조건 역시 동결-융해 조건과 마찬가지로 최소 감쇠비 특성에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.



(a) Minimum damping ratio by cycle time



(b) Minimum damping ratio by confining pressure

Fig. 13. Minimum damping ration after wetting–drying

5.2.3 인공풍화시 최소 감쇠비

Fig. 14는 인공풍화시 풍화일수 및 구속압별로 최소 감쇠비 변화특성을 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면 풍화 진행 일수 및 구속압이 증가함에 따라서 동결-융해 및 습윤-건조 시험조건과는 달리 감쇠비의 감소현상이 잘 나타났다. 이는 풍화가 진행되어 세립자가 많아짐에 따라서 감쇠비가 감소하는 것으로 보이며 이러한 경향으로 볼 때 인공풍화 시험조건은 감쇠비에 어느 정도 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

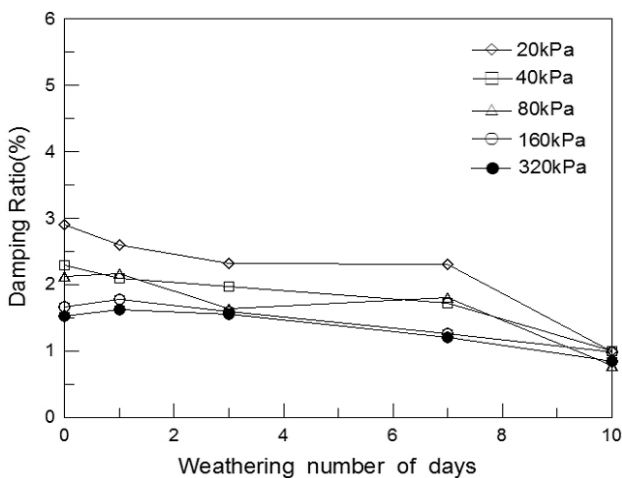
5.3 지반환경 풍화조건별 전단탄성계수 및 감쇠비 비교

5.3.1 최대 전단탄성계수 특성

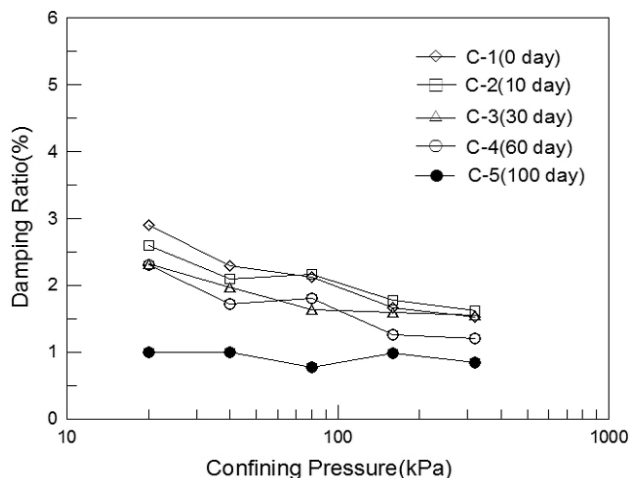
Fig. 15는 지반환경 즉, 풍화실험 조건별 최대 전단탄성

계수 특성을 함께 비교한 것이다. 실험결과에 의하면 최대 전단탄성계수에 가장 큰 영향을 미치는 지반환경 조건은 습윤-건조로 다른 두 조건과는 전혀 다르게 매우 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 앞 절에서도 언급한 바와 같이 화강토가 물과 결합시 가지고 있는 현저한 강도 저하 현상으로 판단된다. 다음으로 최대 전단탄성계수의 감소는 구속압이 100kPa까지는 동결융해 조건에 비해 인공풍화조건이 사이클 7회까지는 더 크게 영향을 미치다가 그 이후부터는 비슷하게 감소하였다. 그러나 사이클 횟수가 10회인 경우는 그 전과는 다르게 구속압의 크기와 상관 없이 인공풍화조건보다 동결융해조건이 더 큰 전단탄성계수의 감소에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이러한 경향으로 미루어 볼 때 지반환경 변화에 따른 화강토의 최대 전단탄성계수에 가장 큰 영향을 미치는 풍

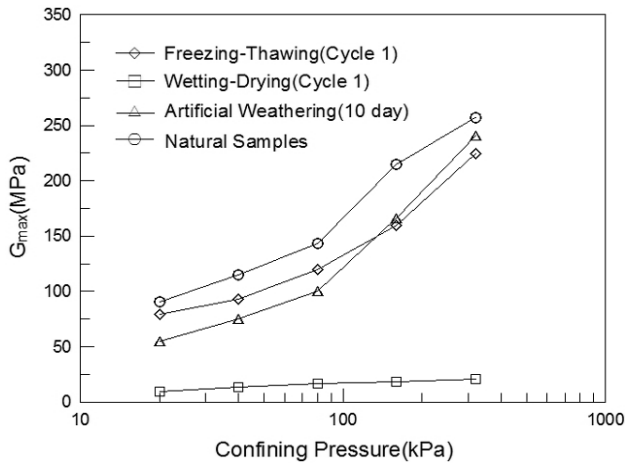


(a) Minimum damping ratio by cycle time

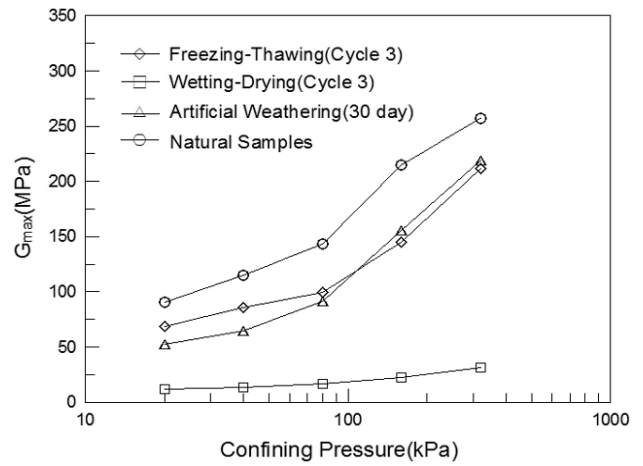


(b) Minimum damping ratio by confining pressure

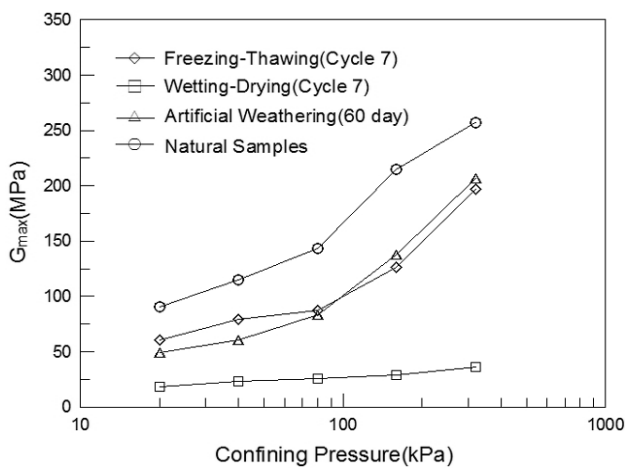
Fig. 14. Minimum damping ration after artificial weathering



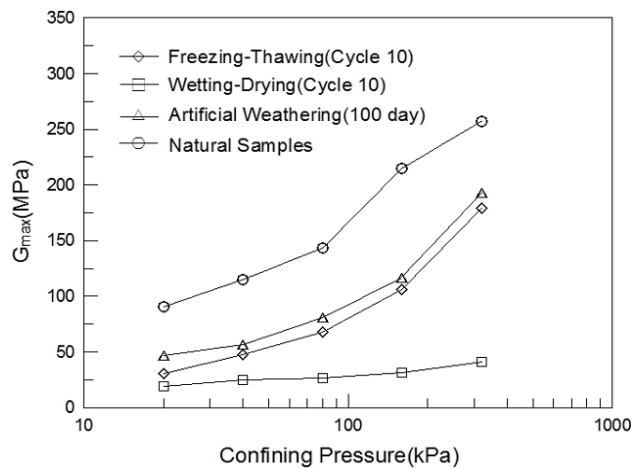
(a) one cycle



(b) three cycles



(c) seven cycles



(d) ten cycles

Fig. 15. Comparison of maximum shear elastic modulus by weathering conditions

화조건은 물에 취약한 화강토의 특성을 반영한 습윤-건조 시험조건으로 나타났으며, 다음으로 인공풍화 조건이 처음에는 큰 영향을 미치다가 동결-융해 사이클 횟수가 증가할수록 동결-융해 조건이 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

5.3.2 최소 감쇠비 특성

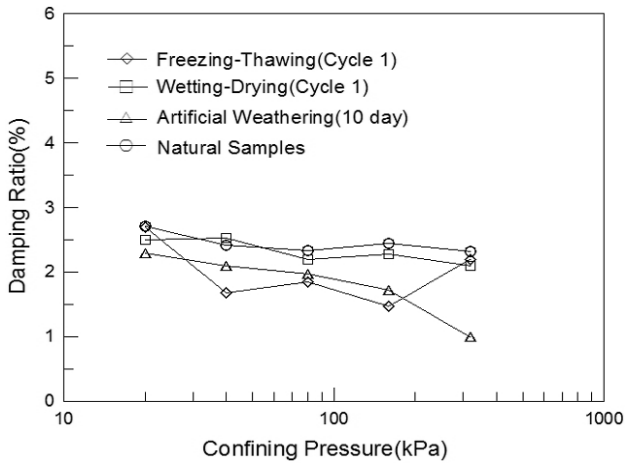
Fig. 16은 각 풍화 실험조건별 최소 감쇠비 특성을 비교 분석한 것이다. 그림에서와 같이 구속압이 증가할수록 최소 감쇠비는 전체적으로 점점 감소하는 경향을 보였다. 또한 자연상태의 시료조건에 비해 3종류의 풍화조건이 최소 감쇠비 저하에 상당한 영향을 미쳤지만, 사이클 횟수가 적은 경우에는 풍화조건인 동결-융해, 습윤-건조 및 인공풍화 각 조건에 따른 차이는 뚜렷하게 나타나지 않고 있지만 사이클 횟수가 증가할수록 인공풍화, 동결-융해, 습윤-건조

순으로 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

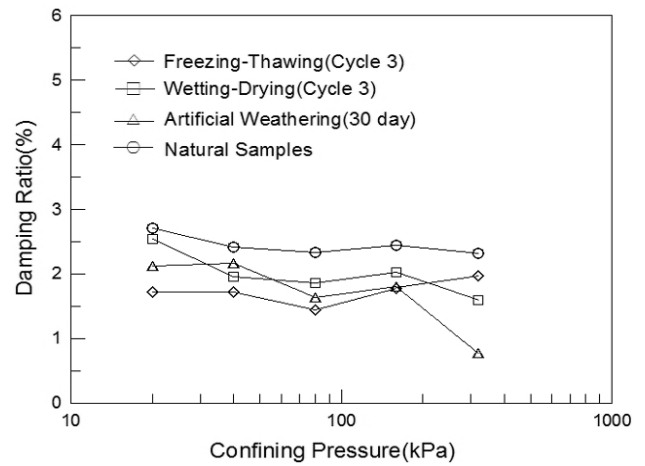
6. 결론

동결-융해, 습윤-건조, 인공풍화등과 같은 지반환경 풍화 조건변화로 인해 화강토의 동적 거동특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 다짐 실험을 통해 공시체를 제작하여 공진주 실험을 실시하였다. 그리고 실험 결과의 최대 전단탄성계수 및 최소 감쇠비 특성에 대하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

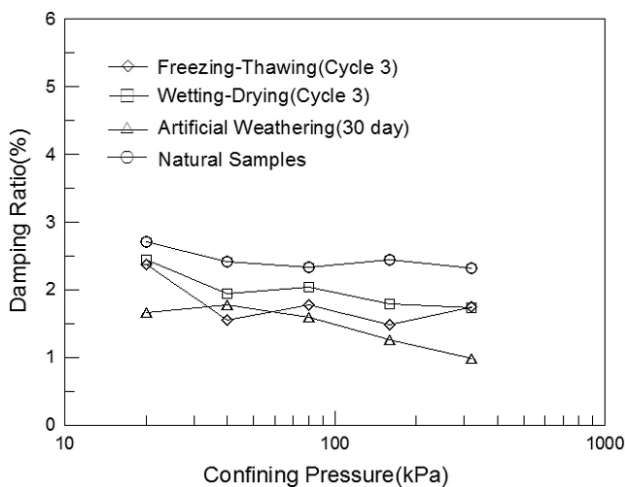
- (1) 전단탄성계수 동결-융해, 습윤-건조, 인공풍화 조건 모두 구속압이 증가할수록 증가한 반면 감쇠비는 구속압이 증가할수록 풍화조건과 상관없이 곡선의 전체적인 기울기는 점점 감소하는 경향을 보였다.



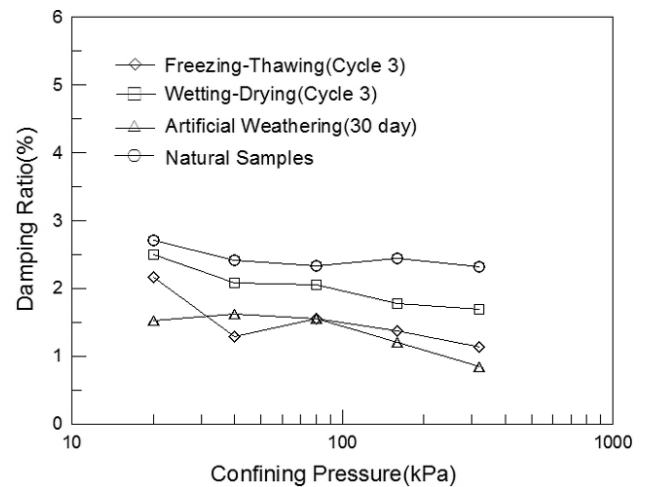
(a) one cycle



(b) three cycles



(c) seven cycles



(d) ten cycles

Fig. 16. Comparison of minimum damping ratio by weathering conditions

- (2) 최대 전단탄성계수는 풍화조건에 상관없이 풍화단계 초기에 급격한 감소를 하다가 점점 감소하는 폭이 작아지는 경향을 보였다. 그러나 습윤-건조 조건은 사이클 1회 작용을 받았을 때 다른 풍화조건에 비해 전단탄성계수가 더 급격한 감소를 보였는데 이는 화강토가 물과 접촉시 급격한 강도저하를 나타내는 특성에 기인하는 것으로 판단된다.
- (3) 최소 감쇠비는 구속압이 증가할수록 전체적으로 점점 감소하는 경향을 보였고, 자연시료보다 각 조건별 최소 감쇠비는 작은 값을 보였지만 규칙성이 없고 크게 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 경향으로 볼 때 지반환경에 따른 풍화조건은 최소 감쇠비에 미치는 영향은 크지 않고, 포화도, 간극비 등 다른 요소에 의해 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.
- (4) 지반환경 변화에 따른 화강토의 최대 전단탄성계수에

가장 큰 영향을 미친 풍화조건은 습윤-건조 조건이며, 다음으로는 인공풍화 조건이 처음에는 큰 영향을 미치다가 동결-융해 사이클 횟수가 증가할수록 동결-융해 조건이 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

Acknowledgement

“This research was supported by the Dongshin University research grants”.

References

1. Chen, A. T. F. and Stokoe, K. H., II (1979), “Interpretation of Strain Dependent Modulus and Damping from Torsional Soil Test”, Report No. USGS-GD-79-002, NTIS No. PB-298479,

- U.S. Geological Survey.
2. Eigenbrod, K. D. E. (1996), "Effect of Cyclic Freezing and Thawing on Volume Change and Permeability of Soft Fine-Grained Soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.4, pp.529-537.
 3. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clays", *JSMFED. ASCE*, Vol.94, No.SM2, March, pp.353-369.
 4. Hardin, B. O. and Drenevich, V. P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effect", *JSMFED, ASCE*, Vol.98, No.SM6.
 5. Kim, D. S., Ko, D. H. and Youn, J. U. (2004), "Dynamic Deformation Characteristics of Granite Weathered Soils using RC/TS Tests", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.5, No.1, pp.35-46.
 6. Kim, Y. S. and Jung, S. J. (2007), "A Study on the Strength Degradation of Weathered Granite Soil by Freezing and Thawing", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.6, No.3, pp.1-7.
 7. Liu, H. J. and Wang, P. X. (2006), "Stability Analysis of Loss of Stability Caused by Freeze and Melt of Earthen Side Slops of Highways", *Journal of Harbin Institute of Technology*, Vol.38, No.15, pp.764-766.
 8. Lee, C. K. and Kim, D. Y. (1999), "Dynamic Behavior of Decomposed Granite Soils with Various Fine Contents", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.19, No.III-4, pp.785-793.
 9. Lee, K. I., Kim, M. J., Kim, T. H. and Woo, J. T. (2012), "Dynamic Behavior Properties of Decomposed Granite Soil varying Content of Stone Sludge and Bentonite", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.11, No.1, pp.35-45.
 10. Lee, K. I., Young, Y. G. and Lee, J. W. (2013), "Particle Crushing Properties of Decomposed Granite Soil due to Changes in the Degree of Weathering", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.12, No.1, pp.1-10.
 11. Yong, R. N., Boonsinsuk, P. and Yin, C. W. P. (1985), "Alteration of Soil Behavior after Cyclic Freezing and Thawing", *The 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp. 187-195.
 12. Yoon, Y. W., Kim, S. E., Kang, B. H. and Kang, D. S. (2003), "Dynamic Behavior of Weathered Granite Soils after Freezing-Thawing", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.5, pp.69-78.
 13. Yoo, C. S. and Shin, B. N. (2011a), "Effect of Cyclic Freezing-Thawing on Compressive Strength of Decomposed Granite Soils", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.1, pp.19-28.
 14. Yoo, C. S. (2011b), "Effect of Cyclic Drying-Wetting on Compressive Strength of Decomposed Granite Soils", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.4, pp.19-28.