

불포화 이암풍화토의 동적거동

Dynamic Behavior of Unsaturated Decomposed Mudstone Soil

배중선¹⁾, Joong-Seon Bae, 이주상²⁾, Ju-Sang Lee, 김주철³⁾, Joo-Cheol Kim, 이종규⁴⁾, Chong-Kyu Lee

¹⁾ 시지이엔씨(주) 토질부, C.G. E & C Co., Ltd.

²⁾ 단국대학교 토목공학과 공학석사, M.E., Dept. of Civil Engineering, Dankook Univ.

³⁾ 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook Univ.

⁴⁾ 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook Univ.

SYNOPSIS : The interest in the dynamic properties of soils has increased strongly because of earthquake, heavy traffic, and foundations undergo high amplitude of vibrations. Most of soils in Korean peninsula are composed of granite soils, especially the decomposed mudstone soils are widely spread in Pohang areas, Kyong-buk province. Therefore, it is very important to investigate the dynamic properties of these types of soils. The most important soil parameters under dynamic loadings are shear modulus and material dampings. Furthermore, few definitive data exist that can evaluate the behavior of unsaturated decomposed mudstone soils under dynamic loading conditions. The investigations described in this paper is designed to identify the shear modulus and damping ratio due to a surface tension for the unsaturated decomposed mudstone soils under low and high strain amplitude. For this purpose, the resonant column test and the cyclic triaxial test were performed. Test results and data have shown that the optimum degree of saturation under low and strain amplitude is 32 ~ 37% which is higher than that of decomposed granite due to the amount of fine particles as well as the type and proportion of chief rock-forming minerals.

Key words : decomposed mudstone soils, dynamic loadings, shear modulus, damping ratio, low and high strain amplitude, resonant column test, cyclic triaxial test, optimum degree of saturation

1. 서론

우리 나라 전역에 걸쳐 널리 분포되어 있는 풍화토는 모암의 생성과정이나 풍화정도에 따라 그 특성이 다르며, 특히 경남·북 지역중 포항지역에 분포하고 있는 풍화토는 이암풍화토로써 중부지방에 주종을 이루고 있는 화강풍화토와는 생성 기원이 다른 퇴적암이 풍화되어 이루어진 흙으로 화강풍화토와 비슷한 거동을 나타내고 설계 및 시공에 상당한 문제를 발생시키고 있어 이에 대한 연구가 있었으나 동적 거동에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 지반의 동적 거동 해석은 지진이나 폭파와 같은 고변형률($\gamma > 10^{-1}\%$)의 범위에서부터 차량진동, 기계진동 및 말뚝타설 등의 저변형률($\gamma < 10^{-3}\%$)의 범위까지 연구의 대상이 되고 있으며, 본 연구는 위와 같은 사실에 기초를 두고 포항지역 이암풍화토에 대한 동적 거동을 구명하기 위하여 저변형률에서부터 고변형률까지의 동적시험을 실시하였다. 불포화 이암풍화토의 동적 거동은 흙 입자사이에 작용하는 표면장력의 영향을 고려하여 각각의 포화도에 대한 전단탄성계수와 감쇠비를 구하여 그 거동을 파악하였으며, 이러한 일련의 시험을 수행하여 불포화 이암풍화토의 동적 특성을 지배하는 요소 중 가장 중요한 정수인 전단탄성계수와 감쇠비가 포화도, 간극비, 구속압 및 전단 변형률의 변화에 어떤 영향을 받는지를 분석하였다. 아울러, 기 수행된 중부지방 화강풍화토의 동적 거동 연구결과와도 비교·검토하므로써 불포화 풍화토의 동적 거동을 파악하였다.

2. 실험

2.1 사용 시료

본 연구에 사용된 원시료는 경상북도 포항시 양덕동 토지구획정리사업 현장에서 채취한 이암풍화토이다. 물성 시험의 결과는 표 1.에 있으며, 그림 1.은 본 연구에 사용된 시료의 입도 분석 결과이다. 체가름시험 결과 이암풍화토와 화강풍화토의 #200번체 통과량은 각각 52.7%와 4.6%로써 이암풍화토가 상대적으로 세립분을 다량 함유하고 있으며, 공학적 분류상 동일 분류법에 의하면 이암풍화토는 MH에 속하고, 화강풍화토는 SW에 해당된다. 본 연구에 사용된 시료의 구성성분을 고찰하기 위해 XRD 분석시험을 실시하여 그림 2.와 같은 결과를 얻었으며, 이암풍화토를 구성하고 있는 조암 광물의 성분을 파악하였다. 주 성분은 석영, 장석 그리고 점토성분인 kaolinite, illite 등으로 구성되어 있는 것으로 나타났으며, 이는 기존에 발표된 이암의 구성성분과 일치하는 것으로 나타났다(이, 1996).

표 1. 시료에 대한 물성시험결과

비중	자연함수비(%)	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수(%)
2.635	21.3	53.5	30.6	22.9

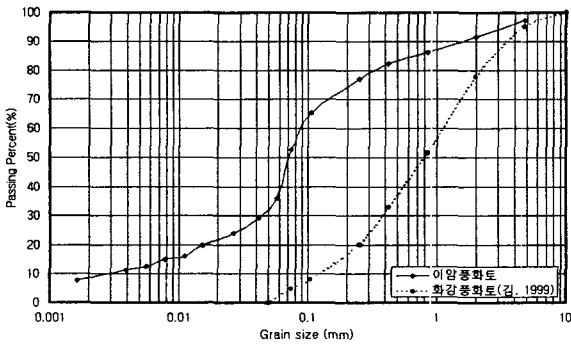


그림 1. 이암풍화토의 입도 분석 결과

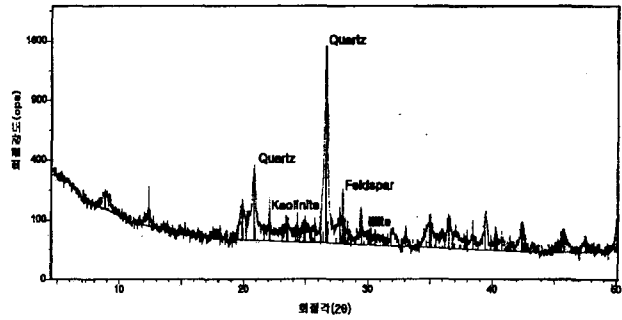


그림 2. X-Ray 회절분석 결과

표 2. 공진주 시험 조건

구속압 (kg/cm ²)	간극비	포화도(%)
0.5	1.0	0~70
1.0	1.1	0~60
2.0	1.2	0~60

표 3. 반복 삼축 시험 조건

포화도 (%)	구속압 (kg/cm ²)	축차응력 (kg/cm ²)	반복응력비 (SR = $\sigma_d / 2\sigma'_0$)	하중반복횟수 (회)
5~70	2.0	0.8	0.2	3~100
		1.2	0.3	3~100
		1.6	0.4	3~100

2.2 실험 장치

저변형률하에서 사용한 시험기는 Stokoe식 공진주 시험기로 일단고정 - 타단자유 형식의 기기이다. 기본 원리는 원통형의 공시체 상부에 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진 주파수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하

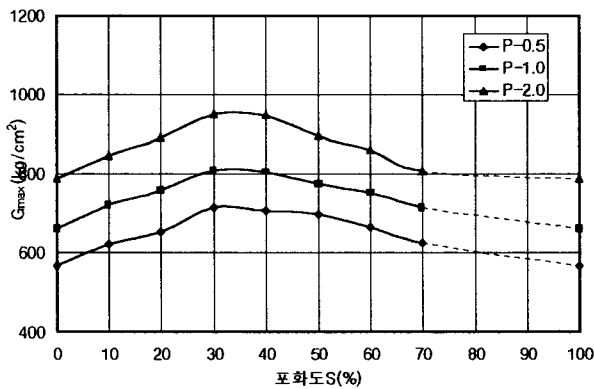
여 전단파속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구하는 것이다. 고변형률하에서는 자동화 삼축 시험기를 이용하여 반복하중을 주었다. 표 2.와 표 3.은 공진주 및 자동화 삼축 시험 조건을 나타내고 있다.

3. 실험 결과 및 분석

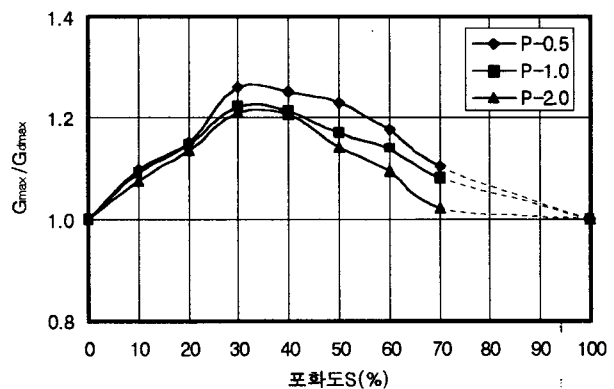
3.1 저변형률하에서의 동적 거동

3.1.1 포화도에 따른 동적 거동

최대전단탄성계수(G_{max})는 한계변형률 이하에서의 값을 말한다. 이 경우 최대전단탄성계수에 대한 포화도를 최적포화도(optimum degree of saturation, $S_{r(opt)}$)라 한다(Wu, 1984). 그림 3.에서와 같이 결과를 분석하면 불포화도는 포화도의 변화에 따른 표면장력의 영향을 받기 때문에 완전건조나 완전포화된 흙의 전단탄성계수에 대한 거동과는 상당한 차이를 보인다. 흙 구조에 부가적인 유효구속압력을 발생시키는 모세관현상은 흙입자간 응력 발생에 영향을 미치며 이것은 흙의 전단탄성계수를 증가시킨다. 이러한 결과는 포화도가 저진폭 전단탄성계수에 영향을 미친다는 Wu et al(1983, 1984)의 결과와 잘 일치하며 최적포화도에서 표면장력의 영향이 가장 크다고 볼 수 있다. 따라서 표면장력의 영향은 전단파속도를 상당히 증가시키기 때문에 불포화 상태에서 측정된 전단탄성계수 값을 완전포화 또는 완전건조 상태에서 얻은 전단탄성계수 값과 동일하게 취급한다면 토목구조물 설계시 문제점이 발생할 수 있는 것으로 판단된다. G_{max}/G_{dmax} 으로 정규화 시킨 경우 그 증가비는 구속압이 증가할수록 오히려 감소하는 거동을 보여 준다. 이 결과는 Wu(1983), Qian, Gray와 Woods(1993)등이 주장한 심도가 얇은 지반에서 전단탄성계수에 대한 표면장력 효과가 심도가 깊은 지반에서의 전단탄성계수에 대한 표면장력 효과보다 더 크다는 사실과 잘 일치한다. 즉, 표면장력 효과로 인하여 증가하는 유효응력은 구속압이 큰 깊은 깊이에서보다는 낮은 구속압을 가지는 지표면에 가까운 지반일수록 비례적으로 커지는 것으로 볼 수 있다.



(a) 전단탄성계수



(b) 정규화전단탄성계수

그림 3. 포화도와 구속압에 따른 최대전단탄성계수의 거동간극비 ($e = 1.0$)

그림 4.에서와 같이 감쇠비의 변화는 시료의 포화도에 관계없이 구속압이 증가할수록 최소감쇠비가 감소함을 알 수 있었다. 또한 각각의 구속압에서 포화도에 따른 시험을 수행했을 때 간극비에 따라 포화도가 약 32%~37%에서 최소감쇠비가 나타났다. 간극비가 커짐에 따라서 감쇠비의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 흙사이에 존재하는 간극이 커짐에 따라서 감쇠비도

커진다는 기존의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 정규화 감쇠비는 구속압이 감소할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이는 정규화 전단탄성계수 증가비의 결과와 마찬가지로 모세관 메니스커스 현상에 의한 표면장력의 영향인 것으로 판단된다.

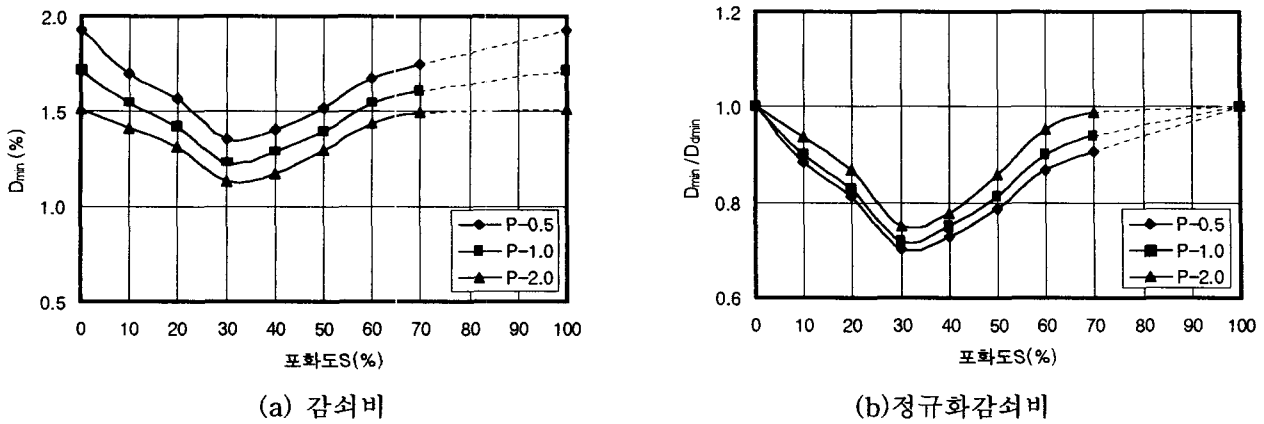


그림 4. 포화도와 구속압에 따른 감쇠비의 거동 (간극비 $e = 1.0$)

3.1.2 간극비에 따른 동적 거동

간극비와 구속압에 따른 최대전단탄성계수의 거동을 나타낸 그림 5.는 같은 포화도를 가지는 흩에서의 간극비가 증가하면 전단탄성계수는 감소하고 또한, 동일한 간극비를 가지는 경우에 구속압이 증가하면 최대전단탄성계수도 증가하는 경향을 보였다.

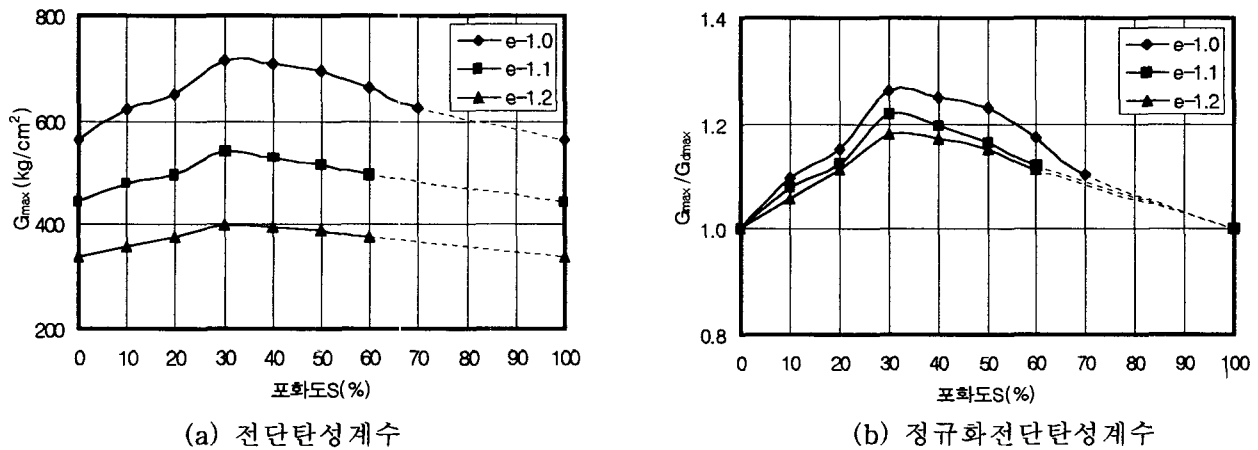


그림 5. 포화도와 간극비에 따른 전단탄성계수의 거동 (구속압 = 0.5 kg/cm^2)

3.1.3 이암풍화토와 화강풍화토의 동적 거동 비교 · 분석

재료의 특성 및 실험 조건의 차이로 인하여 정량적인 비교는 되지 못하지만, 포화도에 따른 화강풍화토(김, 1999)의 동적 거동과 비교하기 위하여 정성적인 방법으로 두 시료간의 특성을 그림 6.(a)와 같이 나타내었다. 화강풍화토의 구속압은 $0.5, 1.0, 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 간극비는 $0.5, 0.6, 0.7$ 일 때의 정규화 전단탄성계수증가비와 비교 · 검토하였다. 정규화 전단탄성계수증가비 비교에서 화강풍화토가 이암풍화토

보다 월등히 크게 나타나는 것은 간극비가 작을수록 그 효과가 크다는 기존의 연구결과(Wu 1984, Woods at al 1993)와도 잘 일치하는 부분이다. 화강풍화토는 최적포화도가 약 17% ~ 20%에 나타나며, 이암풍화토는 최적포화도가 약 32 ~ 37%에 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 여러 가지 조건과 구성 성분 차이의 영향도 고려해야겠지만, 화강풍화토가 #200체 통과량이 4.6%로써 세립분 함유량이 낮으며, 이암풍화토가 다량의 점토질 세립분(#200체 통과량 52.7%)을 함유하고 있는 것을 고려해 볼 때 세립분의 영향으로 인한 최적포화도의 차이라고 할 수 있다. 이것은 Qian & Woods(1993)의 세립분함유량이 증가할수록 최적포화도가 증가한다는 연구결과를 뒷받침할 수 있다. 포화도에 따른 이암풍화토와 화강풍화토에 대한 정규화 감쇠비거동을 그림 6.(b)에 나타내었다. 화강풍화토의 간극비 형성이 이암풍화토에 비하면 상당히 조밀한 면에서 정규화 감쇠비의 효과가 크다는 것을 알 수 있었으며, 최적 포화도 역시 전단탄성계수를 정규화시켰을 때와 같이 각각 나타났다.

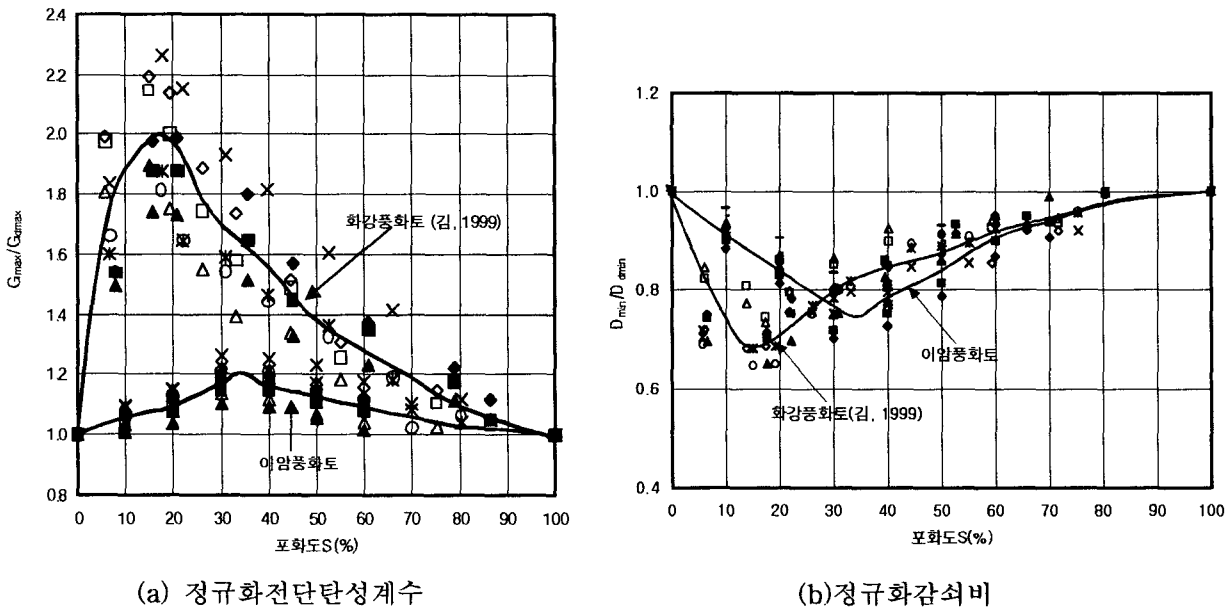


그림 6. 화강풍화토와의 동적 거동 비교

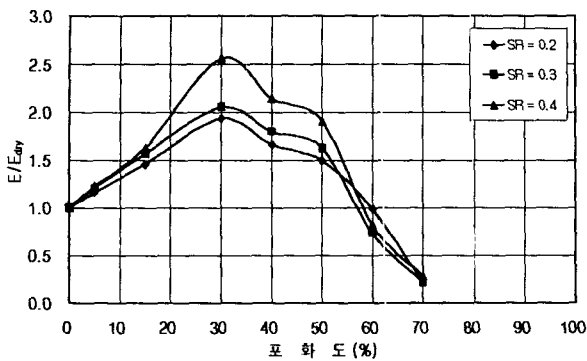
3.2 고변형률하에서의 동적거동

고변형을 범위에서 이암풍화토의 포화도와 동탄성계수 및 감쇠비의 관계를 고찰하기 위하여, 본 연구에서는 포화도를 5%, 15%, 30%, 40%, 50%, 60%, 및 70%로 간극비는 1.2로 일정하게 공시체를 제작하여 유효구속응력 2.0 kg/cm^2 로 24시간씩 구속시킨 후 각각의 시료에 대해 반복 응력비를 0.2, 0.3, 0.4로 변화시키고, 하중을 100회씩 반복 재하하여 동적 거동 특성을 비교·검토하였다.

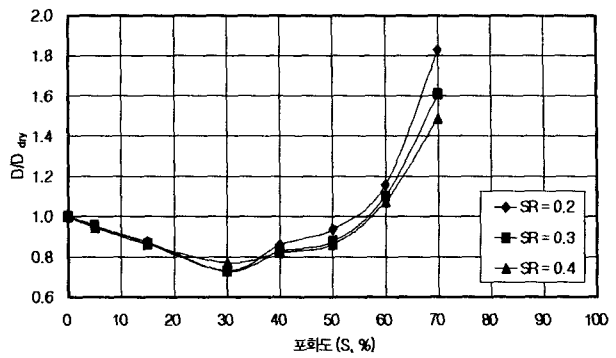
3.2.1 포화도와 동적 계수의 관계

포화도에 따른 정규화 동탄성계수증가비의 변화거동을 반복 하중횟수 3회, 10회, 30회, 100회로 변화시켜 고찰한 결과 거의 비슷한 경향으로 나타났다. 그림 7.은 반복 하중횟수 30회시의 반복 응력비에 따른 포화도와 정규화 동탄성계수증가비의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 최적포화도는 약 30~33%로 나타났으며, 이때의 동탄성계수의 증가비(E_{opt}/E_{dry})는 약 1.9~2.6배임을 알 수 있다. 그림 7.은 하중 반복횟수 30회시의 포화도와 정규화 감쇠비의 관계를 분석한 결과이다. 최적포화도(30~33%)에서 감쇠비의 감소비(D_{opt}/D_{dry})는 약 0.73~0.77배로 나타났다. 따라서 포화도의 변화와 함

게 변하는 표면장력은 동탄성계수를 상당히 증가시키고 감쇠비를 감소시키기 때문에 불포화상태에서 측정된 동적계수값을 완전건조상태에서 얻은 동적계수 값과 동일하게 취급한다면 과대하게 추정하는 결과로 볼 수 있다고 판단된다.



(a) 정규화동탄성계수

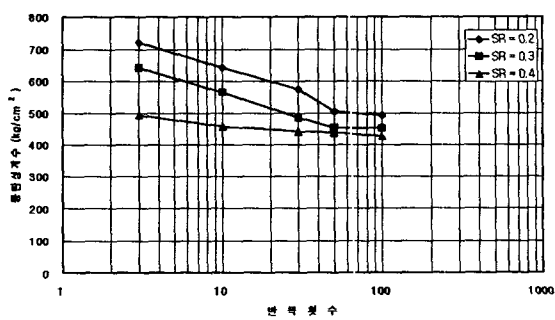


(b) 정규화감쇠비

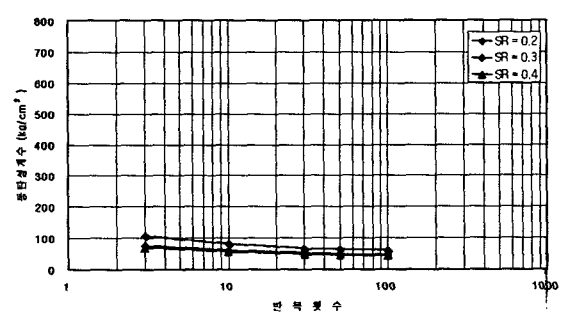
그림 7. 포화도와 정규화 동탄성계수, 감쇠비의 관계 (반복횟수 30회)

3.2.2 하중 반복횟수와 동탄성계수의 관계

하중 반복횟수와 동탄성계수의 관계를 포화도 5%, 15%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%로 달리하여 고찰한 결과, 포화도가 증가할수록 하중 반복횟수의 영향이 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 8.은 포화도 30%와 포화도 70%에서의 반복 응력비에 따른 하중반복횟수와 동탄성계수의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 30%와 70%의 포화도에 따른 동탄성계수의 거동을 보면 하중 반복횟수의 증가에 따라 동탄성계수 감소가 포화도 70%에서는 거의 나타나지 않는다. 이는 이암풍화토가 반복하중을 받으면 강성이 약해짐에 따라 시료가 탄성영역을 벗어남으로써 동탄성계수가 감소되는데 포화도가 증가할수록 표면장력이 약해짐으로 시료강성이 약해져 초기 하중재하시부터 탄성영역을 벗어나 소성영역에 있으므로 동탄성계수의 변화가 작은 것으로 판단된다.



(a) 포화도 30%



(b) 포화도 70%

그림 8. 반복하중횟수와 동탄성계수의 관계

3.2.3 전단변형률 범위에 따른 동적 계수의 관계

본 연구에서는 전단변형률범위에 따른 불포화 이암풍화토의 동적 계수의 변화를 구명하기 위하여 각

실험기기의 특성과 실험 변형률 범위에 맞도록 저변형률에서는 공진주시험기를 사용하였으며 고변형률 범위에서는 반복 삼축시험기를 사용하였다. 공진주시험기의 경우 전단파속도에 의한 전단탄성계수와 전단변형률을 얻을 수 있으나 반복삼축의 경우는 동탄성계수와 축변형률을 얻었다. 따라서 Hara(1973)가 진동주기와 관련없이 전단변형률 0.01~1%에서는 포아슨비가 연약한 점토에서는 0.48, 그리고 단단한 점토는 0.43를 제안 한 것을 이용하여 본 연구에서는 포아슨비를 0.45로 전단탄성계수와 전단변형률을 얻고 그 결과를 종합한 후 비교·분석하였다. 간극비가 1.2이고, 포화도가 0~70%사이인 공시체에 대하여 구속압을 2.0kg/cm^2 로 가하였을 때, 전단변형률에 따라서 반복삼축시험과 공진주시험을 수행하여 각각의 시험결과로부터 얻은 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비의 증가곡선은 각각 그림 9와 같다. 전단 변형률 $3.0 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-1}\%$ 구간은 본 시험에서 수행된 반복삼축시험과 공진주 시험의 조건의 결과로는 얻을 수 없었다. 본 시험에서 이암풍화토의 모든 포화도에 대한 전단변형률의 범위는 $10^{-4}\% \sim 5\%$ 이었으며, 전단탄성계수의 범위는 $550\text{kg/cm}^2 \sim 20\text{kg/cm}^2$, 감쇠비의 범위는 2~40%로 나타났다. 또한 위 결과로부터 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 증가 곡선은 포화도에 관계없이 같은 거동을 나타낸다는 사실을 밝혀 낼 수 있었다

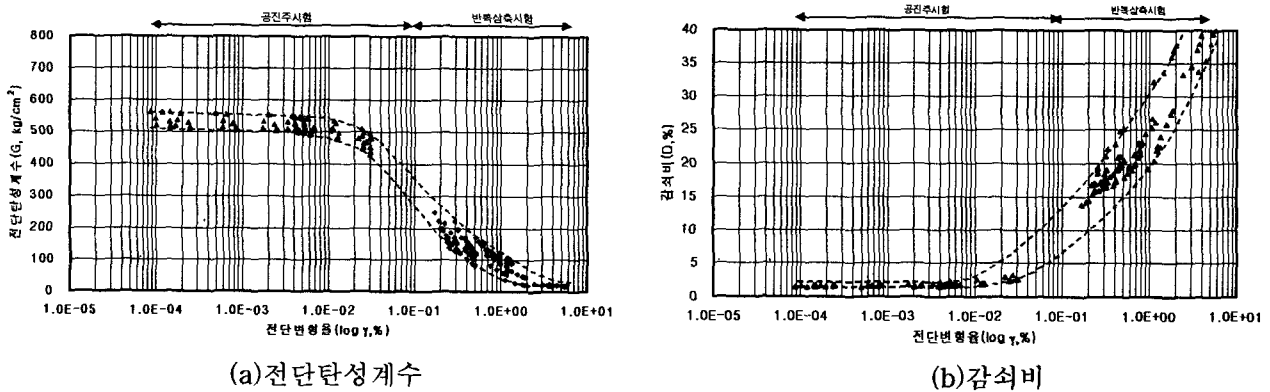


그림 9. 전단변형률에 따른 동적계수의 변화곡선

4. 결 론

포항지역에 넓게 분포하고 있는 이암 풍화토의 동적 거동을 파악하기 위해서 간극비와 구속응력 그리고 포화도를 달리하여 저변형률과 고변형률하에서의 시험을 통한 결과들을 정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전단탄성계수는 포화도가 높아짐에 따라 증가하다가 표면장력이 최대가 되는 최적포화도를 지나 감소한다. 구속압에 관계없이 간극비에 따라 최적포화도는 약 32 ~ 37%에 나타났으며, 이 결과는 화강풍화토의 최적포화도 17 ~ 19.5% 보다 상당히 큰 것으로 나타났다.
2. 구속압은 최적포화도에는 영향을 미치지 않았으며, 구속압이 증가할수록 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실제 지반상에서 심도가 깊어질수록 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소한다는 기존의 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다.
3. 포화도의 영향을 배제하기 위해서 건조상태일 때의 값으로 정규화하여 분석하면, 오히려 정규화하기 전보다 낮은 구속압일수록 모관효과는 큰 것으로 나타났으며, 이는 기존에 발표된 화강풍화토의 경우와 같은 결과를 나타내었다.
4. 이암풍화토의 탄성 영역의 최대치인 한계변형률은 약 $8 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}\%$ 범위로 나타났는데, 전단탄성계수가 크면 한계변형률도 커진다는 기존의 연구결과와 일치하였다.

5. 고변형률하 시험에 있어서 하중반복횟수가 증가할수록 동탄성계수가 감소 하지만 포화도가 최적 포화도 보다 커지면 하중반복횟수가 증가할수록 동탄성계수의 감소폭은 작게 나타나는데 이는 공시체가 초기에 탄성영역을 넘어 소성변형을 발생했기 때문으로 판단된다.
6. 포아손비가 일정하다고 가정한 경우 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 증가곡선은 포화도에 관계없이 같은 거동을 나타낸다는 사실을 밝혀낼 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김덕용(1999), "화강풍화토의 동적거동", 단국대학교 박사학위논문
2. 김동수, 권기철, 박재영, 정순용(1997), "화강풍화토의 변형특성" 지반공학회 봄학술 발표회 논문집
3. 배경태(1997), "중간전단변형률에서의 불포화 화강풍화토의 동적거동" 단국대학교 석사학위 논문
4. 김영수, 정성관, 박강우, 김병탁(1994), "이암 풍화토의 공학적 특성에 관한 실험적 연구 -포항지역의 이암풍화토를 중심으로-", 한국지반공학회 논문집, 제10권 제4호, pp.5~16.
5. 이종규(1999), "화강풍화토의 동적거동", 한국지반공학회 논문집, 제15권 제1호, pp.175~183.
6. Bo Andreasson(1979), "Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays Under Dynamic Loading Conditions", Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology.
7. Wu, S., Gray, D. H., and Richart, F. E., Jr.(1984), "Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts." J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 110(9), pp.1188~1203.
8. Xuede Qian, Donald H. Gray and Richard D. Woods(1993), "Voids and Granulometry : Effects on Shear Modulus of Unsaturated Sands", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 2
9. Clarence. K. Chan., Marshall. L. Silver(1976).,"Cyclic Triaxial Strength of Standard Test Sand". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol. 102, No. GT5.
10. Marshall L. Silver, Ted K. Park(1975), "Testing Procedure Effects on Dynamic Soil Behavior" Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT10
11. Woods, R. D et al(1993). "Void and Granulometry : Effect on Shear Modulus of Unsaturated Sands", JGTED. ASCE. Vol. 119, No. 2
12. Woods, R. D et al(1993). "Resonant Column Tests on Partially Saturated Sands", GTJODJ. Vol. 16, No. 1
13. Wu, S., Gray, D. H., and Richart, F.E., Jr.(1984). "Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts." J. Geotech. Eng. Div., ASCE. 110(9), 1188~1203.