

# 화강풍화토의 동적 거동

Dynamic Behavior of Decomposed Granite Soils

이 중 규\*

Lee, Chong-Kyu

---

## Abstract

Recently, problems related to vibrations of decomposed granite soils have acquired increasing attention in Korea because those soils cover approximately one third of the country.

Both resonant column and cyclic triaxial test were performed to investigate deformation characteristics of unsaturated and cement-mixed decomposed granite soils in Suwon region.

The important soil parameters in this respect are the shear moduli, dynamic moduli of elasticity and damping ratios.

The dynamic parameters are influenced by variables such as strain amplitude, ratio of loading cycles, and degree of saturations, etc.

Test results and data have shown that the optimum degree of saturation to the maximum shear modulus due to a capillary menisci effect was about 17~18 % at low strain amplitude and 10~15 % at intermediate strain amplitude.

This paper suggests the range of threshold strain and mean shear modulus of decomposed granite soils in Suwon region. It also proposed the empirical relationship between the dynamic parameters for cement-mixed and non-mixed decomposed granite soils.

## 요 지

최근 우리나라도 내진설계의 필요성에 따라 지진시 등의 고변형률로부터 정밀기계기초에 미치는 미소변형률 진동까지 기초지반의 동적거동에 관한 연구가 점증하고 있는 실정이다.

한편, 화강풍화토는 국내에 가장 널리 분포되어 있는 대표적인 흙으로써 지반진동문제 해결에 필요한 지반계수 등의 동적거동 파악이 시급한 형편이나 이에 관한 연구는 극히 한정되어 있다.

본 연구는 수원지방의 화강풍화토에 대하여 간극비, 포화도가 다른 공시체를 제작하여 구속압력 및 반복응력비를 변화시켜 공진주시험과 반복삼축시험을 실시하여 불포화 화강풍화토의 동적거동을 고찰하였고 지반보강을 위하여 흔히 사용되는 흙-시멘트 혼합토에 대하여도 시멘트 혼합비와 간극비를 달리한 공시체에 대하여 같은 조건하에 동적거동을 구명하기 위한 두가지 같은 실험을

---

\* 정희원, 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

수행하였다.

연구결과 불포화 화강풍화토의 전단탄성계수는 표면장력에 지배되며 최적포화도는 간극비에 따라 공진주 시험인 경우 약 17%~18%, 반복삼축시험인 경우 약 10%~15%로 나타났다. 또한, 수원지역의 화강풍화토에 대한 한계 변형률 범위와 평균전단탄성계수도 추정할 수 있었다.

한편, 일련의 공진주시험과 반복삼축시험의 결과를 토대로 하여 화강풍화토의 시멘트 혼합량에 따른 최대전단탄성계수 추정식을 비교적 조밀한 경우와 비교적 느슨한 경우로 나누어 제안하였다.

Keywords : Decomposed Granite Soil, Shear Modulus, Dynamic Young's Modulus, Damping Ratio, Cement-mixed Granite Soil.

## 1. 서 론

화강풍화토는 국내 널리 분포되어 있는 대표적인 흙으로써 토목기술자가 공사시 가장 많이 당면하게 되는 흙이다. 당연히 최근에 전단 특성, 지지력 및 침하특성에 관한 많은 연구가 수행되어 큰 성과를 이룩하였으나 주로 정적하중하의 거동에 집중되어 왔다(박, 1998).

최근 한반도에서도 내진설계 필요성의 증대에 따라 동적거동에 관하여 많은 연구 결과가 발표되었으나 화강풍화토에 관한 연구는 오히려 미미한 실정에 있다.

동하중에 의한 지반진동의 문제를 해결하기 위하여 필요한 지반 계수로서는 동적변형계수(탄성계수, 전단탄성계수), 포아송비, 감쇠비 및 액상화 관련 계수가 있으며 이러한 요소는 전단변형률, 유효평균주응력, 간극비, 재하반복 횟수 및 포화도 등에 영향을 받는다.

한편, 구조물의 안전한 설계를 위하여 지반 보강에 관한 여러공법들이 연구되어 왔고 그 중에서도 흙-시멘트 혼합토는 오래 전부터 적용되어 왔으나 주로 정적하중 하의 거동분석에 중점을 두었다. 지반에 시멘트를 혼합할 경우 단위중량이 증가되므로 강도의 증가는 쉽게 예측할 수 있고 도로의 기층에 적용하였을 경우 흡수율이 저하됨으로써 흙에 안정성을 주며 따라서 동해도 경감시킬 수 있다. 따라서 이 경우의 지반계수에 대한 거동파악 역시 필수적이라 볼 수 있다.

본 논문은 국내 화강풍화토에 대하여 공진주 시험과 반복삼축시험을 수행하여 저변형률과 중간변형률하에서 시료의 간극비, 구속압력 및 응력비가 화강풍화토의 동적거동에 미치는 영향을 비교·검토하고 전단변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 거동을 파악하는데 있다. 또한, 불포화 흙의 전단거동은 포화도에 따른 표면장력에 지배될 것이므로 각각의 포화도에 대한 전단탄성계수와 감쇠비를 건조시료인 경우의 값으로 정규화시켜 화강풍화토의 동적거동을 구명하는데 그 목적을 두었다. 한편, 화강풍화토-시멘트 혼합토에 있어서는 시멘트 혼합량, 간극비, 구속압 및 반복응력비등을 고려하여 최대전단탄성계수를 구하고 이를 시멘트를 혼합하지 않은 경우의 값으로 정규화 하여 시멘트 혼합비율에 따른 최대전단탄성계수의 추정식을 비교적 조밀한 경우와 느슨한 경우로 구분하여 제안하였다.

## 2. 실험기기 및 실험방법

### 2.1 실험기기

#### 2.1.1 공진주 시험기

본 실험에 사용된 공진주 시험기는 일단고정-타단자유단인 Stokoe식 시험기로 시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀력(torsional excitation)을 가하고 공진주파수와 진동의 크기를 측정하여 전단파속

도, 전단탄성계수 및 전단변형률을 구하는 것이며 적용할 수 있는 전단변형률 범위는  $10^{-5}\% \sim 10^{-1}\%$ 이다(그림 1).

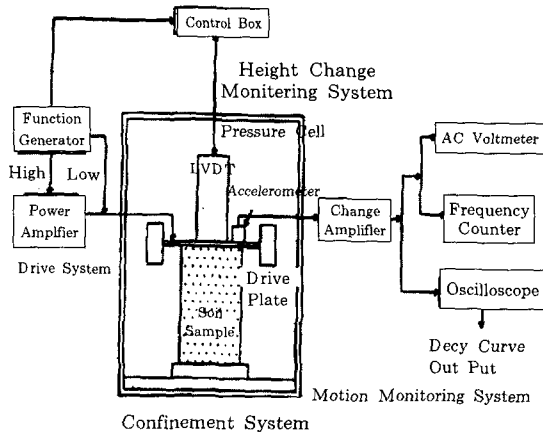


그림 1. 공진주 시험기 상호 계통도

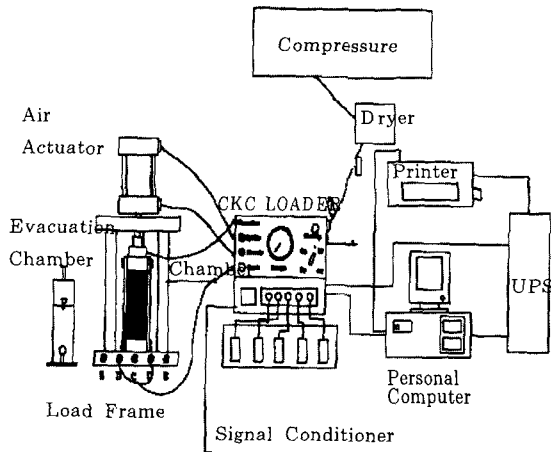


그림 2. 반복 삼축 시험기 구성도

### 2.1.2 반복삼축 시험기

본 연구에 사용한 반복삼축시험기는 Chan등(1988)이 개발한 자동화 삼축시험기(automated triaxial testing system)이다. 본 시험기의 재하장치로는 oil-actuator와 air-

actuator 모두를 사용할수 있으나 본 연구에서는  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$  범위의 변형률에서 동적거동을 실험하기 위하여 피스톤과 actuator사이의 마찰이 적고 빠르게 반복하중을 가할수 있는 air-actuator를 사용하였다(그림 2).

## 2.2 시료 및 실험 방법

### 2.2.1 시료 및 공시체 준비

시료는 경기도 수원지역에서 채취한 화강풍화토이며 비중이 2.65인 비소성 흙으로 체가름 시험결과 200번체 통과량은 4.6%로 통일분류 법상 SW 이다. 불포화 화강풍화토에 대한 시험 공시체 제작은 공진주 시험인 경우 직경 6.35cm, 높이 12.7cm, 반복삼축시험은 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였으며 정적다짐을 실시하였다. 또한, 화강풍화토-시멘트 혼합토는 공기건조된 화강풍화토에 시멘트를 혼합한 후 자연함수비 7% 정도의 물을 가해 잘 비벼서 PVC관 몰드에 밀도를 균일하게 하기 위해 5층으로 나눠 다진 다음 밀폐하여 항온실에서 7일간 양생하였다.

### 2.2.2 실험방법

포화도, 간극비, 구속압등이 화강풍화토의 동적거동에 미치는 영향을 구명하기 위하여 공진주시험인 경우, 세경우의 간극비(0.5, 0.6, 0.7)에 대하여 포화도를 0%부터 80%사이의 8가지로 공시체를 제작하였으며 각 경우에 대하여 구속압을  $0.5\text{kg/cm}^2$ ,  $1.0\text{kg/cm}^2$  및  $2.0\text{kg/cm}^2$ 로 증가시키면서 비틀력을 가하여 실험하였다. 또한, 반복삼축시험시의 공시체는 간극비를 0.6, 포화도를 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%로 달리하여 공시체를 제작한후 유효구속압을  $0.5\text{kg/cm}^2$  으로 일정하게 하고 반복응력비를 세경우(0.3, 0.4, 0.5)로 설정하여 실험을 수행하였다. 이때 포화도 80%를 상한 값으로 한 이유는 이보다 높은 포화도인 경우 공시체 성형이 어려웠기 때문이다.

화강풍화토-시멘트의 혼합비율에 따른 동적

계수의 거동을 고찰하기 위하여는 시멘트 혼합비를 0%, 1%, 2%, 4%, 6% 및 7%로 하고 각각의 시료에 대하여 간극비는 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 및 0.8로 달리하여 공시체를 제작하였다. 실험에서 시멘트 혼합비를 7%로 제한한 이유는 7%보다 많으면 현장 적용에 경제성이 없는 것으로 판단되었으며 또한, 7%이하 일때 건조수축의 영향이 매우 작았기 때문이었다. 한편, 공진주 시험시에는 시멘트를 혼합하지 않은 경우와 마찬가지로 구속압(등방구속압)을 0.5, 1.0, 및 2.0kg/cm<sup>2</sup>로 증가시키면서 수행하였고, 반복삼축시험은 구속압을 0.5kg/cm<sup>2</sup>으로 1시간씩 압밀시킨후 각각의 시료에 대하여 반복응력비를 0.7로 일정하게 하고 하중을 100회씩 반

복 재하하므로써 동적거동을 비교·검토하고자 하였다.

### 3. 불포화 화강풍화토의 동적거동분석

#### 3.1 포화도에 따른 동적 거동

불포화토의 포화도에 따른 전단거동은 간극중의 표면장력에 의한 모관성에 지배될 것이므로 간극비 및 구속응력 또는 반복응력비를 세 경우로 달리하였을때 포화도가 동적거동에 미치는 영향을 공진주시험 및 반복삼축시험의 결과로 비교·검토하기 위하여 포화도와 최대 전단탄성계수 및 정규화 전단탄성계수에 대하여 고찰하면 다음과 같다.

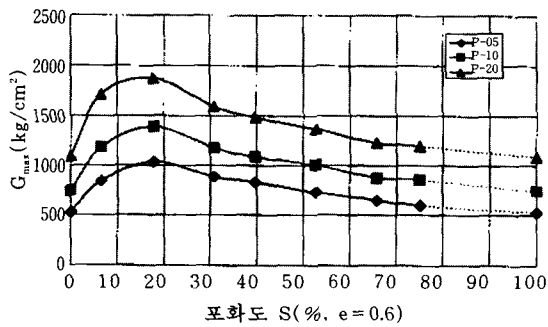


그림 3. 포화도와 전단탄성계수의 관계(공진주 시험)

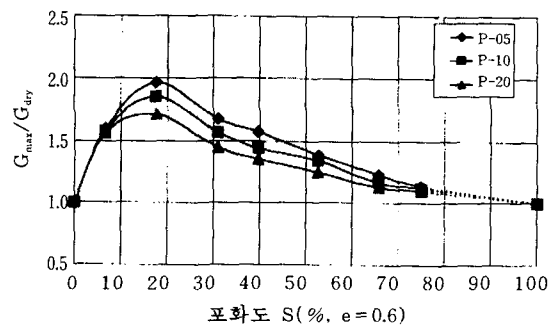


그림 4. 포화도와 구속압에 따른 정규화 전단탄성계수의 변화(공진주시험)

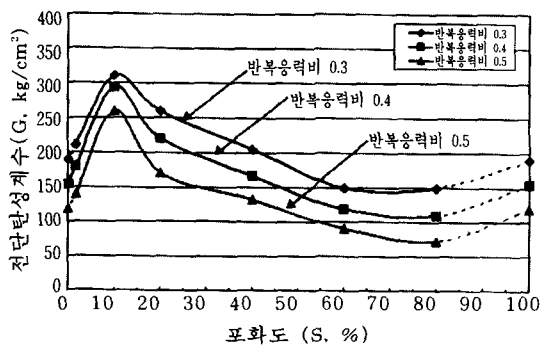


그림 5. 포화도와 전단탄성계수의 관계(반복삼축시험)

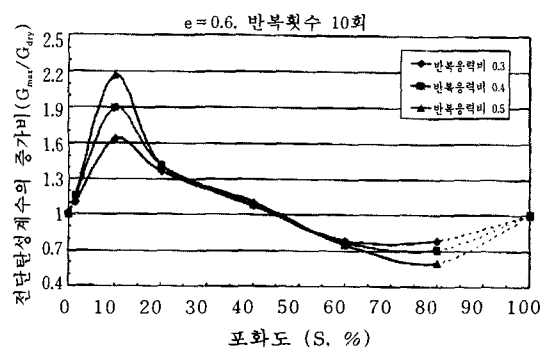


그림 6. 포화도와 반복응력비에 따른 정규화 전단탄성계수의 변화(반복삼축시험)

그림 3은 공진주 시험기를 이용하여 간극비를 일정하게 하고 포화도를 8가지로 변화시킨 경우의 전단탄성계수 변화를, 그림 4는 구속압에 따른 정규화 전단탄성계수 증가비를 나타낸 것이다. 그림 5와 그림 6은 공진주 시험시와 동일한 조건으로 제작한 공시체에 대하여 반복 응력비를 달리했을때의 반복삼축시험 결과이다. 실험 결과를 보면 최대전단탄성계수에 대한 포화도를 최적포화도(optimum degree of saturation)라 한다면 공진주 시험결과는 17%~18%로 나타났고 반복삼축시험에서는 약 10%~15%정도에서 나타났다. 이러한 결과는 Wu(1983), Wu et al(1984)의 실트질 흙에서 최적포화도 약 17%의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

이 결과를 보면 불포화 흙에 있어서는 표면장력에 따른 메니스커스 현상으로 흡구조에 부가적인 유효구속압력을 발생시켜 흡입자간 응력발생에 일시적 영향을 미치며 흙의 전단탄성계수를 증가시킨다. 따라서, 불포화 상태에서 측정된 전단탄성계수값을 완전포화 또는 완전 건조상태와 동일하게 적용한다면 과대하게 추정하는 결과가 될 수 있다. 한편, 실험에 있어 완전포화된 경우는 공시체 제작 및 공시체를 시험기에 설치하기가 어려워 포화상태에서의 전단탄성계수값은 표면장력의 영향이 없다고 생각되는 건조상태에서의 값을 사용하였다. 또

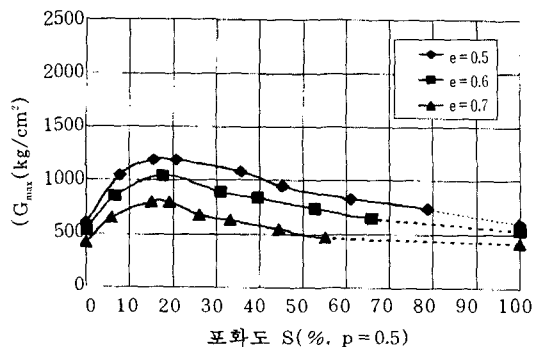


그림 7. 포화도와 간극비에 따른 전단탄성계수의 거동

한, 반복삼축시험에서는 전단탄성계수와 전단 변형률을 직접 구할 수 없어 실험에서 얻어진 동적변형률과 동탄성계수에 포와송비를 가정하여 식(3.1)를 이용하여 구하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_a \times 2(1+\nu)} \quad (3.1)$$

여기서,

G: 전단탄성계수(kg/cm<sup>2</sup>)

E: 동탄성계수(kg/cm<sup>2</sup>)

$\tau$ : 전단응력(kg/cm<sup>2</sup>)

$\gamma$ : 전단변형률

$\epsilon_a$ : 동적축변형률

$\nu$ : 포와송의 비

### 3.2 간극비에 따른 동적거동

간극비가 화강풍화토의 동적거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 간극비를 세가지로 달리하고 포화도를 8가지로 변화시키며 공진주 시험을 수행한 후 그 결과를 비교·검토하였다.

그림 7은 구속압을 0.5kg/cm<sup>2</sup> 으로 일정하게 하였을때 간극비와 포화도의 변화에 따른 전단탄성계수 값의 분포상태를 나타낸 것으로 간극비가 증가할수록 전단탄성계수는 감소하는 당연한 경향을 나타내었고, 최적포화도는 간극비가 0.5, 0.6, 0.7로 증가할 때 각각 17.1%,

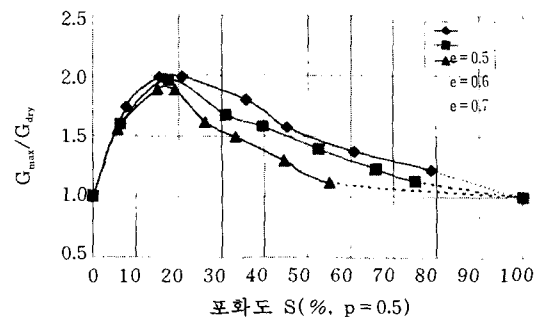


그림 8. 포화도와 간극비에 따른 정규화 전단탄성계수 증가비의 거동

17.6% 및 18%로 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나 그 영향은 미소한 것으로 나타났다.

또한, 간극비가 표면장력에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 그림 8과 같이 전단탄성계수를 정규화 하였으며 이 결과 정규화 전단탄성계수 증가비는 간극비가 작을수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

### 3.3 구속압 및 반복응력비에 따른 동적거동

#### 3.3.1 구속압에 따른 최대전단탄성계수와 감쇠비 거동

그림 9는 간극비를 일정하게 하고 포화도를 8가지로 변화시킨 공시체에 대하여 구속압을 0.5kg/cm<sup>2</sup>, 1.0kg/cm<sup>2</sup> 및 2.0kg/cm<sup>2</sup>으로 증가시킨 경우 공진주 시험에서의 최대전단탄성계수

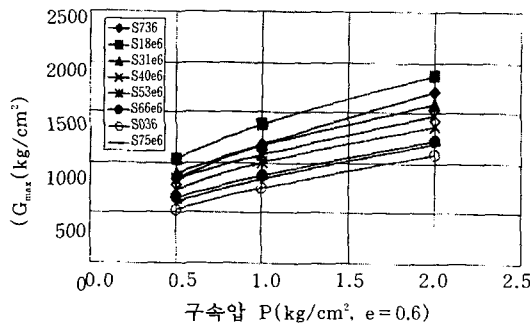


그림 9. 구속압에 따른 각시료의 최대 전단탄성계수의 거동

#### 3.3.2 반복응력비와 전단탄성계수의 관계

그림 11은 반복삼축시험에서 간극비는 일정하게 하고 포화도를 각각 달리한 공시체에 대하여 반복응력비를 0.3, 0.4, 0.5로 증가시킨 경우 전단탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과를 고찰하면 포화도의 변화에 상관없이 반복응력비가 증가함에 따라 전단변형률은 증가되고 전단탄성계수는 감소하는 경향을 나타내는데 이와 같은 현상은 반복응력비가 증가하면서 공시체의 탄성영역이 감소하고 그 결과 전단변형률이 크게 발생하는 것으로 판단된다.

의 변화를 나타낸 것이고 그림 10은 최소감쇠비의 변화를 나타낸 것이다.

이 결과에서 알 수 있듯이, 포화도의 변화에 관계없이 구속압이 증가함에 따라 최대전단탄성계수는 증가하고, 최소감쇠비는 감소함을 알 수 있으며 이러한 경향은 포화도를 고려하지 않은 경우의 Hardin & Richart(1963), Hardin & Drnevich(1972), 김(1997) 및 이(1998)등의 기존 연구결과와 일치함을 알 수 있다.

한편, 간극비와 포화도에 약간의 차이가 있으나 본 연구에 사용된 시험시료들의 한계변형률은 약 5×10<sup>-3</sup>% 부근에서 나타났고, 구속압이 증가함에 따라 2×10<sup>-3</sup>%~5×10<sup>-3</sup>% 범위에서 한계변형률이 변화하는 것을 알 수 있었다.

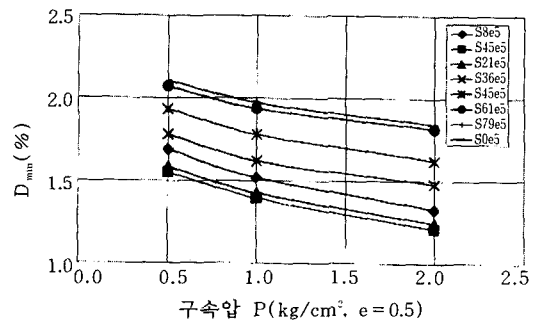


그림 10. 구속압에 따른 각 시료의 최소 감쇠비 거동

### 3.4 포화도에 따른 전단탄성계수의 감소곡선

그림 12는 간극비가 0.6, 포화도가 0%~80%사이인 공시체에 대하여 구속압을 0.5kg/cm<sup>2</sup>으로 가하였을 경우 반복삼축시험과 공진주시험을 수행하여 얻은 각각의 결과로부터 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 나타낸 것이다.

본 연구에 사용한 화강풍화토의 포화도에 따른 전단변형률의 범위는 10<sup>-4</sup>%~3×10<sup>-3</sup>%이고 전단탄성계수 감소곡선의 상한선은 최적포

화도( $S_{opt}$ )에서 발생되었으며 이때의 전단탄성계수는  $75 \sim 1020 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위였다. 또한, 전단탄성계수 감소곡선의 하한선은 건조상태인 경우( $S_{dry}$ )에 발생되었으며 이 경우의 전단탄성계수는  $75 \sim 520 \text{ kg/cm}^2$  범위로 나타났다.

한편, 전단탄성계수 감소곡선의 평균은 그림 12의 파선( $S_{ave}$ )으로 나타내었는데 이때의 전단탄성계수는  $75 \sim 750 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위였으며 본

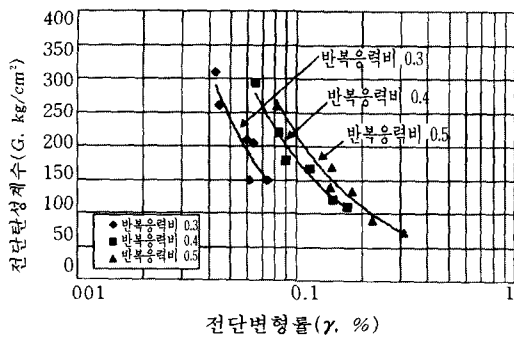


그림 11. 전단변형률에 따른 반복응력비와 전단탄성계수의 관계

#### 4. 화강풍화토-시멘트 혼합토의 동적거동 분석

시멘트 혼합 화강풍화토의 시멘트 혼합량에 따른 동적 거동 특성을 고찰하기 위하여 시멘트 혼합량을 0%~7%(6가지)로 변화시키고 간극비는 0.4~0.8 사이의 5가지로 달리하여 공시체를 제작한 후 공진주 시험과 반복삼축 시험을 수행하여 얻은 동적계수값을 구하였다.

이 결과를 이용하여 시멘트 혼합 비율에 따른 동적계수를 추정하기 위하여 혼합하지 않은 경우의 동적계수로 정규화 시켰는데 비교적 조밀한 경우와 비교적 느슨한 경우로 구분하여 나타내었다. 그림 13과 그림 14에서 실선은 실험결과의 최적화 곡선으로 공진주 시험에서는 비교적 느슨한 경우(그림 13(a))의 평

연구에서 사용한 화강풍화토의 변형률 범위 ( $10^{-4}\% \sim 3 \times 10^{-1}\%$ )에 따른 전단탄성계수는  $75 \sim 1020 \text{ kg/cm}^2$ 로 제안할 수 있다. 물론, 제안된 전단탄성계수의 범위는 간극비가 0.6인 경우이나 3.2에서 언급한 바와 같이 최적포화도시의 전단탄성계수는 간극비의 영향이 미소한 결과로 나타났으므로 전단탄성계수의 범위로 추정하여도 큰 무리는 없을 것으로 생각된다.

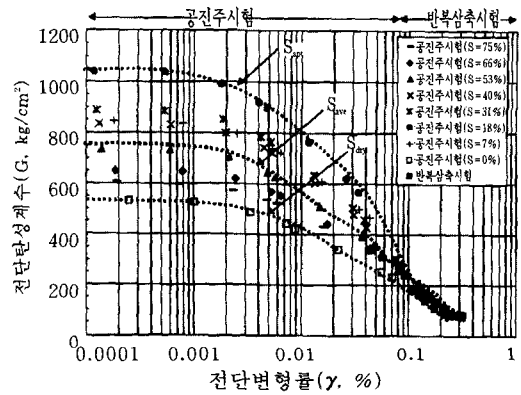


그림 12. 포화도에 따른 전단탄성계수 감소곡선

균표준편차가  $\pm 0.33$ , 비교적 조밀한 경우(그림 13(b))는 약  $\pm 0.32$ 로 반복삼축시험에서는 각각  $\pm 0.57$ ,  $\pm 0.16$ 으로 나타났으며 이를 점선으로 표시하였다.

이들 최적화 곡선에 의한 추정식은 다음과 같다(Saxena et al.1987, Dupas and Pecker, 1979).

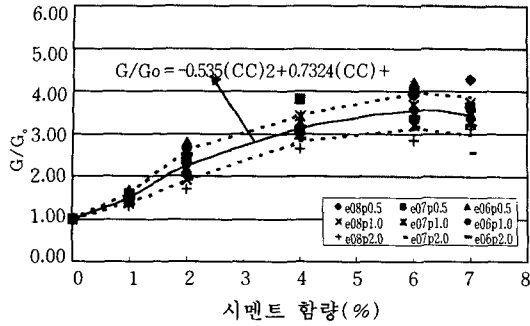
-간극비가 비교적 작은 경우( $e=0.4, 0.5$ )

$$\frac{G}{G_0} = -0.0216(CC)^2 + 0.4253(CC) + 1 \quad (4.1)$$

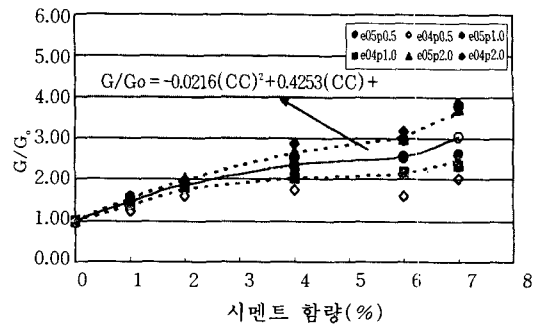
$$\frac{E}{E_0} = -0.0642(CC)^2 + 0.7758(CC) + 1 \quad (4.2)$$

-간극비가 비교적 큰 경우( $e=0.6, 0.7, 0.8$ )

$$\frac{G}{G_0} = -0.0535(CC)^2 + 0.7324(CC) + 1 \quad (4.3)$$

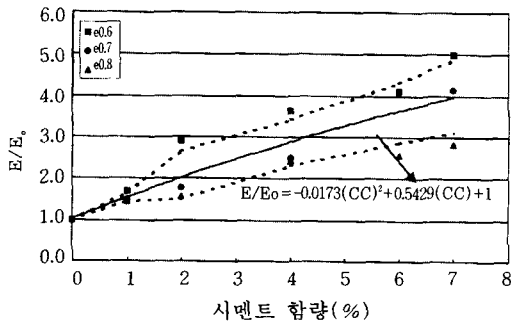


(a) 비교적 느슨한 경우(e=0.6~0.8)

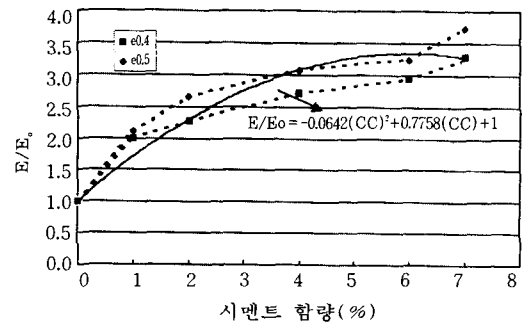


(b) 비교적 조밀한 경우(e=0.4, 0.5)

그림 13. 정규화 최대전단탄성계수의 증가비(공진주 시험)



(a) 비교적 느슨한 경우(e=0.6~0.8)



(b) 비교적 조밀한 경우(e=0.4~0.5)

그림 14. 정규화 최대전단탄성계수의 증가비(반복삼축 시험)

$$\frac{E}{E_0} = -0.0173(CC)^2 + 0.5429(CC) + 1 \quad (4.4)$$

여기서,

G:시멘트 혼합량에 따른 최대전단탄성계수 (kg/cm<sup>2</sup>)

G<sub>0</sub>:시멘트를 혼합하지 않은 경우의 최대전단탄성계수(kg/cm<sup>2</sup>)

E:시멘트 혼합량에 따른 동적탄성계수 (kg/cm<sup>2</sup>)

E<sub>0</sub>:시멘트가 혼합되지 않은 경우의 동적탄성계수(kg/cm<sup>2</sup>)

CC:시멘트 혼합량(%)

식(4.1)~식(4.4)를 이용하면 시멘트를 첨가

하지 않은 동적계수로부터 혼합율만 적용하여 혼합토의 동적계수를 쉽게 추정할 수 있을 것으로 사려된다.

## 5. 결 론

불포화 화강풍화토의 동적거동을 파악하기 위하여 간극비와 포화도가 다른 공시체에 대하여 구속응력과 반복응력비를 변화시키고 시멘트혼합 화강풍화토의 동적거동을 고찰하기 위하여 시멘트 혼합량과 간극비를 각기 달리하여 반복삼축시험과 공진주시험을 수행하여 얻은 결과를 요약하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 불포화 화강풍화토의 전단탄성계수는 포



면장력에 지배되며 최적포화도는 구속압이나 반복응력비 및 반복횟수에 관련없이 저변형률에서는 간극비에 따라 대략 17%~18%이고 중간변형률에서는 대략 10%~15%로 나타났다.

2) 공진주시험결과 저변형률에서는 구속압이 증가하면 전단탄성계수는 증가하는 것으로 나타났으며, 반대로 구속압이 증가함에 따라 전조상태의 전단탄성계수로 정규화시킨 증가비는 감소하는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 불포화 화강풍화토에서 구속압이 작을수록 표면장력의 효과가 커짐을 알 수 있다.

3) 포화도에 따른 전단탄성계수를 전조상태의 전단탄성계수로 정규화시켜 증가비를 비교한 결과 표면장력은 간극비가 작을수록 큰 효과를 발휘함을 확인할 수 있었으며 따라서, 간극비가 작을수록 전단탄성계수 증가비는 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 변형률에 관계없이 동일한 거동을 보였다.

4) 수원지역 화강풍화토에 대하여 포화도와 간극비에 따라 다소 차이는 있으나 한계변형률은  $5 \times 10^{-3}\%$  부근이었으며 구속압의 증가에 따른 한계변형률 변화는 약  $5 \times 10^{-3}\% \sim 2 \times 10^{-3}\%$  범위에서 나타났고 평균 전단탄성계수는  $75 \sim 750 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다.

5) 시멘트 혼합 화강풍화토의 시멘트 비율에 따른 최대전단탄성계수의 증가비를 시멘트를 혼합하지 않은 시료의 최대전단탄성계수로 정규화하여 비교적 느슨한 경우와 조밀한 경우로 나누어 제안하였는 바 이는 시멘트 혼합량에 따른 최대 전단탄성계수의 추정에 실용상 유용할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 단국대학교 대학연구비 지원에 의해 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김동수, 권기철, 박재영, 정순용(1997), "화강풍화토의 변형특성", 한국지반공학회 봄학술 발표회 논문집, pp. 65~73.
2. 박병기(1998), "풍화잔적토의 지반공학적 특성", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 32~64.
3. 이종규, 배경태, 백중여, 김덕용(1998), "불포화 화강토의 동적거동", 대한토목학회 학술발표회 논문집(Ⅱ), pp. 203~206.
4. Dupas J. M., Alain Pecker(1979), "Static and Dynamic Properties of Sand-Cement", ASCE. Journal of Geotechnical Engineering Vol. 105, No. GT3, pp. 419 ~435.
5. Hardin, B. O and Drnevich, V. P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effects", JSMFED, ASCE, Vol. 98, No. SM6, pp. 603 ~623.
6. Hardin, B. O and Richart, F.E., Jr.(1963), "Elastic wave velocities in granular soils." JSMFED, ASCE, Vol. 89(1), pp. 33~65..
7. Surendra K. Saxena, Raj K. Reddy(1987), "Mechanical Behavior of Cemented Sands", Report No. II T-CE-8701, Illinois Institute of Technology
8. Woods, R. D et al. (1983), "Voids and Granulometry : Effects on Shear Modulus of Unsaturated Sands", JGTED, ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 295~314.
9. Wu, S., Gray, D.H., and Richart, F.E., Jr.(1984), "Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts." JGTED, ASCE, Vol. 110(9), pp. 1188~1203.

(접수일자 1998. 12. 1)