

# 화강풍화토의 동적 물성치와 침하특성에 대한 연구

Dynamic Properties and Settlement Characteristics of Korea  
Weathered Granite Soils

박 종 관\*1  
Park, Jong-Kwan  
김 영 옥\*2  
Kim, Young-Uk  
이 인 모\*3  
Lee, In-Mo

---

---

## Abstract

Weathered granite soil is the most representative as a surface soil in Korea. In this paper, the dynamic properties and settlement characteristics of Korea granite soil are studied through the dynamic triaxial compression tests. The dynamic characteristics are very important on the analysis of the foundations under dynamic loading such as machine vibration and earthquake. Soil samples having different grain sizes were prepared at the relative densities between 80% and 90% and tested to measure shear moduli and damping ratios at each level of shear strain. The measured shear moduli of weathered granite soils showed large variations according to the grain sizes, confining pressures, relative densities and shear strains. Sandy weathered granite had a little larger dynamic properties than the average values of the sand studied by Seed and Idriss. For the well compacted granite soils, little residual settlements occurred due to dynamic loading.

## 요 지

화강풍화토는 한국에서 대부분을 차지하고 있는 대표적인 토질이다. 본 연구는 화강풍화토의 동역학적 특성치와 침하특성을 실험적으로 연구함으로써 화강풍화토에 기초를 둔 구조물의 동역학적 해석에 기여하고자 한다. 입도가 서로 다른 두종류의 화강풍화토를 상대밀도 80~90% 범위의 공시체를 성형하여 진동 삼축압축시험을 실시하였다. 시험을 통하여 전단탄성계수와 감쇠계수를 시료의 상대밀도와 구속응력을 달리하여 구하고 이를 전단 변형률의 크기에 따라 표시하였다. 대표적인 결과로서, 전단탄성계수는 화강풍화토를 구성하는 입도 분포에 따라 구속응력,

---

\*1 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 부교수

\*2 고려대학교 대학원 토목공학과 석사과정 졸업

\*3 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

시료의 상대밀도 및 전단변형률과 관련하여 큰 변화를 나타내었다. 모래성분이 많은 화강풍화토의 동적특성치는 Seed와 Idriss에 의하여 정리된 모래의 값 보다 다소 큰 값이 측정되었다. 또한 잘다져진 화강풍화토에 대하여 진동하중에 의한 잔류침하는 거의 일어나지 않았다.

## 1. 서 론

동적 반복하중을 받는 기계기초의 설계에는 회전기계, 기초 구조물과 함께 지반의 동역학적 특성이 필히 고려되어야 한다.<sup>(2), (3), (6), (11)</sup> 지금까지 기계기초로 가장 많이 사용하고 있는 것은 말뚝기초 등이 있으나 경제성을 고려한 직접기초에 대한 관심도 대단히 높다. 화강풍화토는 한국의 대부분을 차지하고 있는 지반으로, 기계기초의 설계와 관련하여 화강풍화토의 동역학적 특성 및 침하에 대한 연구는 필수적이다.

지반의 동역학적 특성을 나타내는 계수로서 전단탄성계수와 감쇠계수등이 있다. 이러한 계수들은 지반의 변형률에 따라 크게 다르게 나타난다. 일반적으로 회전기계기초의 설계시 대단히 작은 변형률을 기준으로하고 있으며 이러한 작은 변형률에 알맞는 지반의 동역학적인 계수를 측정하기 위하여 많은 실내실험 및 현장실험등이 연구 되어왔으며 그 대표적인 것으로 Seed 및 Idriss등의 연구지표 등이 있다.<sup>(8)</sup> 그러나 화강풍화토의 경우는 풍화정도에 따라 입도분포가 다양하여 동역학적 특성에 대한 기존의 연구된 자료를 적용하는 기준이 없으며 또한 반복 하중에 의하여 잔류 침하가 발생할 가능성도 있다. 따라서 본연구에서는 입도가 다른 화강풍화토에 대하여 진동 삼축압축시험을 실시하여, 첫째 동역학적인 측정치인 전단탄성계수 및 감쇠계수를 측정하고 기존에 연구된 자료와 비교하며 둘째로 반복하중에 따른 침하특성에 대하여 연구 하고자 한다.

## 2. 화강풍화토의 동적특성

### 2.1. 진동삼축을 통한 동적특성치의 결정

본 연구에 사용된 진동삼축압축 시험기는 일본의 마루이(Marui) 회사에서 제작되어 국립 건설연구소에 설치되어 있다. 이 진동삼축시험기는 수직응력을 전기유압의 servo-hydraulic 방식으로, 축압은 공기 또는 물을 통하여 servo 방식으로 부하한다. 동력과 변형은 servo control에 부착된 제어기를 통하여 진폭과 주기가 정하여지면 자동적으로 측정되어 컴퓨터에 저장, 계산 기록된다. 진동삼축압축 시험기는 원래 모래의 액상화 현상을 규명하기 위하여 이용되었지만 토질의 탄성계수, 전단탄성계수 및 감쇠계수도 구할 수 있도록 고안되어 있다.<sup>(9), (11)</sup>

진동삼축시험에서는 그림 1과 같은 응력의 상태가 요구된다. 즉, 시험시 처음에 시료는 등방향의 응력  $\sigma_3$ 를 받게된다. 그러면 시료의 파괴면  $45 \pm \phi/2$ 에서 그림 1(a)와 같은 응력 상태가 된다. 그리고 연직응력이  $\sigma_3 \pm \sigma_d/2$ 가 되도록 반복하중을 가하는 동시에 축압은  $\sigma_3 \pm \sigma_d/2$ 가 되도록 한다. 이러한 응력의 상태는 파괴면에서 수직응력의 변화가 없이 전단응력이 반복하여 발생하는 상태가 유지된다. 그러나 편의상 실제의 실험에서는 시료를 완전히 포화 시킨후 등방향응력  $\sigma_3$ 는 고정 시키고 연직응력이  $\sigma_3 \pm \sigma_d$ 가 되도록 반복하중을 가한다. 이는 포화된 시료의 경우 간극수압계수  $B \approx 1$  이므로 비배수 상태에서는 반복구속하중이 시료에 유효응력증가를 유발시키지 못하고 간극수압만 증가시킨다. 때문에 위와같은 반복하중을 가하여도 유효응력상태에는 영향을 미

치지 않는다. 이런 경우 간극수압의 차이  $\pm \frac{\sigma_d}{2}$  만큼의 크기를 결과에서 계산하여 주면 이상적인 실험조건의 경우를 만족시킨다.

Desired Stress Condition      Mohr Diagram

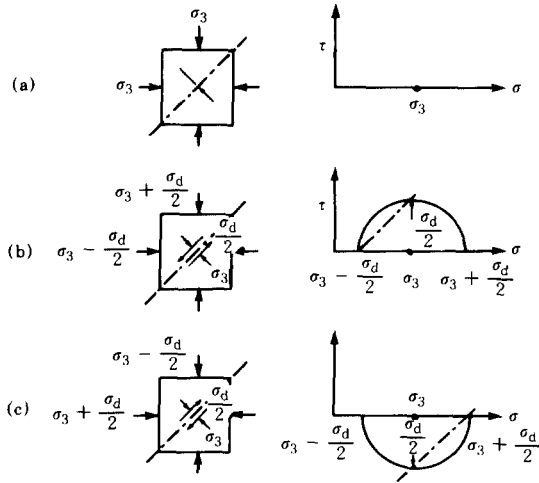


그림 1. 진동삼축압축상태의 응력상태

반복하중의 진동수는 삼축압축시험시에는 1에서 2Hz 사이로 하고 있다. 실제로는 진동하중의 모양(shape)에 따라 동적 강도가 다소 차이를 보이기도 하지만, 일반적으로 토질의 동적특성은 하중의 주기가 1/6Hz와 4Hz 사이에서 주기에 거의 영향을 받지 않는다고 알려져 있기 때문에 보통 1Hz 정도에서 실험이 행하여지고 있다. 진동삼축시험을 통하여 얻어지는 hysteric loop는 그림 2와 같이 나타난다.

이때 곡선의 기울기는 탄성계수 E로 표시되며 전단탄성계수 G는 다음 식(1)로 부터 구할 수 있다.

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

여기서  $\nu$  는 포아손비 이다. 한편 hysteric loop의 면적은 소성변형에 의한 에너지 손실을 나타내며 이로부터 감쇠계수는 다음과 같이 식(2)로 부터 구할 수 있다.

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{(\text{Hysteric loop의 면적})}{(\text{삼각형 OAB의 면적})} \quad (2)$$

특히 진동삼축압축시험시 시료의 성형에 주의하여야 하는데 시료가 균질하지 못하면 일관된 결과를 얻기 어렵다.

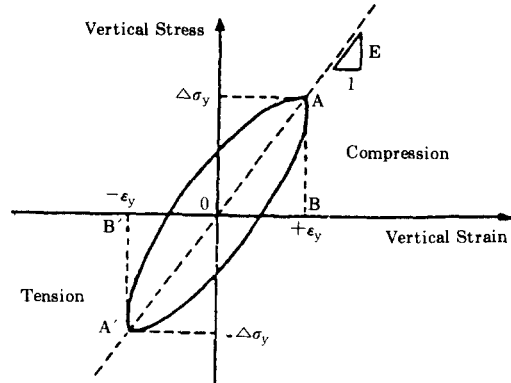


그림 2. 진동삼축압축시험의 응력-변형률 곡선

## 2.2. 시료의 특성

화강풍화토의 전단계수와 감쇠계수를 구하기 위해서 입도에 따라 3종류의 시료를 선택하여 진동삼축시험을 실시 하였다. 화강풍화토 A는 모래와 실트로 구성 되어 있고, 통일분류에 의하면 SC 이고, 화강풍화토 B와 화강풍화토 C는 주로 모래로 구성되어 있으며 통일분류에 의하면 SP로 나타났다. 세 풍화토의 입도분포 곡선은 그림 3과 같으며 토성과 다짐에 의한 결과는 표 1과 같다. 화강풍화토의 밀도에 따른 전단탄성계수 및 감쇠계수를 구하기 위하여 각각 다른 밀도로 4종류의 공시체(시료직경 5cm, 높이 10cm)를 제작하여 실험 하였다. 이에 따른 재료의 특성은 표 2과 같다.

## 2.3 시험결과

본 시험에서는 각각의 시료에 유효 구속응력 0.5kg/cm<sup>2</sup>, 1.0kg/cm<sup>2</sup>과 2.0kg/cm<sup>2</sup>을 가하여 압밀시키고 비배수 상태에서 strain

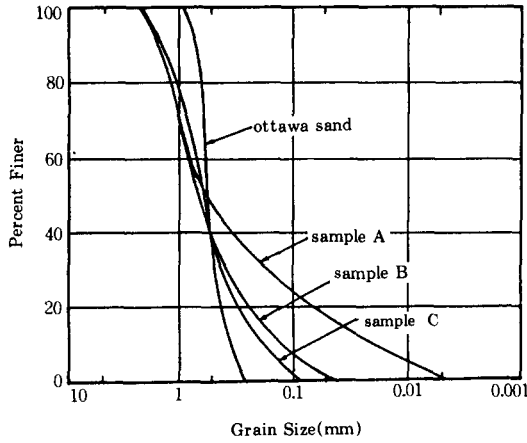


그림 3. 화강풍화토의 입도분포 곡선

표 1 화강풍화토의 토성

토성 \ 시료	화강풍화 토 A	화강풍화 토 B	화강풍화 토 C
USCS	SC	SP	SP
비 중	2.67	2.68	2.66
액성한계(%)	30.50	NP	NP
소성한계(%)	19.50	NP	NP
최대전조밀도( $g/cm^3$ )	2.20	2.09	2.10
최소전조밀도( $g/cm^3$ )	1.05	1.12	1.15

표 2 시료의 밀도

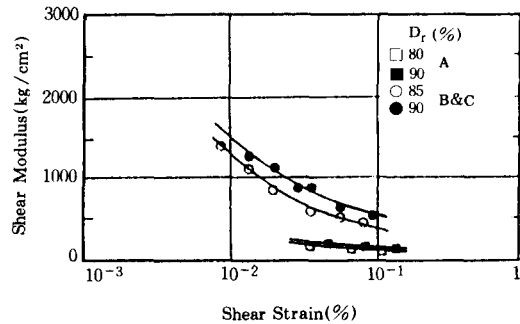
토성 \ 시료	화강풍화토A		화강풍화토B		화강풍화토C	
	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2
다짐함수비(%)	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
습윤단위중량( $g/cm^3$ )	2.02	2.18	2.07	2.10	2.07	2.10
건조단위중량( $g/cm^3$ )	1.80	1.95	1.85	1.95	1.85	1.95
간 크 비	0.49	0.37	0.43	0.36	0.43	0.36
상대밀도(%)	80.0	88.5	83.7	90.4	85.0	91.7

control로 반복하중을 부가하였다. 여기서 반복하중의 주기는 1Hz로 하고 반복회수는 20회로 하였다. 실제로 시험을 통하여 얻어지는 값은 탄성계수이므로 전단계수를 얻기 위해서는

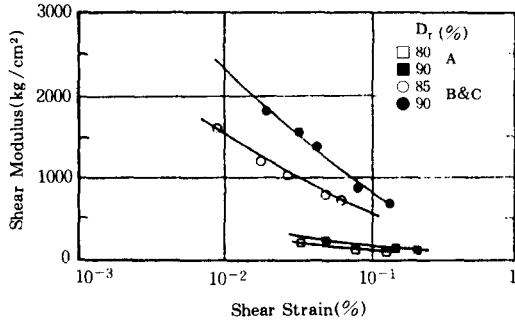
포아슨비의 값이 필요하다. 많은 탄성과 시험에 의하면 풍화암은 약 0.4정도의 포아슨비의 값을 가지고 있다. 또한 Hara등<sup>(5)</sup>의 결과에 의하면 진동주기와 관계없이 전단변형률 0.01%와 1%사이에서 매우 단단한 점토는 0.43 연약한 점토는 0.48의 포아슨비를 가지고 있다. 그리고 Ohsaki와 Iwasaki<sup>(7)</sup>실험 결과에 의하면 사질토의 평균 포아슨비는 0.45 정도이고 전단계수의 크기에 따라서 0.4와 0.5사이에서 큰 산포로 나타났다. 본 연구에서는 화강풍화토의 포아슨비를 위의 시험결과를 토대로 한 평균값 0.45로 정하고 전단계수를 구하였다.

그림 4는 화강풍화토의 전단탄성계수를 전단변형률에 따라 나타낸 것이다. 실제로 시료 B와 C는 거의 비슷한 입도분포, 토성 및 상대밀도를 가지고 있으므로 같은 시료로 간주하였다. 즉 화강토 B-1과 C-1을 묶어 상대밀도 85%로, 그리고 화강토 B-2와 C-2를 상대밀도 90%로 나타내었다. 화강토의 A의 경우는 A-1를 상대밀도 80%로, 그리고 A-2를 상대밀도 90%로 표시하였다. 본 진동삼축시험에서는 전단변형률 0.01% 이하에서 전단탄성계수를 얻기는 곤란하였고, 주로 전단변형률 0.01~0.2% 사이에서 얻어진 값을 나타낸 것이다.

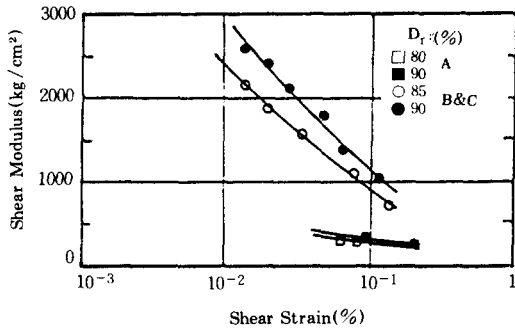
두 종류의 화강토는 입자분포에 따라 크게 다른 전단탄성계수값의 변화를 나타내고 있다. 화강토 A는 0.06mm이하의 세립자 성분이



(a) 구속응력  $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



(b) 구속응력  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$



(c) 구속응력  $\sigma_3 = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

그림 4. 구속응력과 상대밀도에 따른 화강풍화토의 전단탄성계수

20% 정도 포함되어 있는 점성사질토(SC)로 전단변형률 0.04~0.2%에서 비교적 작은 전단탄성계수 값인 100~300kg/cm<sup>2</sup>을 얻었다. 같은 구속응력에서 시료의 밀도에 따른 전단탄성계수의 변화가 적으며 같은 밀도에서 구속응력에 따른 전단계수의 차이도 대단히 작았다. 이러한 현상들은 일반적으로 점성토에서 많이 나타나고 있다. 이 반면에 화강토 B와 C는 모래성분을 주로 하고 있는 사질토(SP)로 전단변형률 0.01~0.2%에서 비교적 큰 전단탄성계수 값인 500~3000kg/cm<sup>2</sup>을 얻었고, 구속응력과 시료의 밀도에 따른 전단계수의 변화도 크다.

토질의 동적전단계수와 감쇠계수는 구속응력, 전단변형률 및 간극비 (또는 상대밀도) 등에 따라 정량화에 중점을 둔 연구가 진행 되어

왔다. (7), (8), (10) 그림 5(a)는 점성토에서 적용되는 전단탄성계수와 간극비 및 평균응력에 따른 관계를 화강토 A에 적용하여 나타낸 것으로 이를 식으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G = C \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5} \quad (3)$$

여기서 C는 전단변형률  $\gamma$ 에 따른 함수이고, e는 간극비,  $\sigma'_m$ 는 유효평균응력으로 주응력으로 표시하면  $(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ 이며, 그리고 G와  $\sigma'_m$ 의 단위는 kg/cm<sup>2</sup>이다. 점성토 A에 대하여 C는 식(4)와 같다.

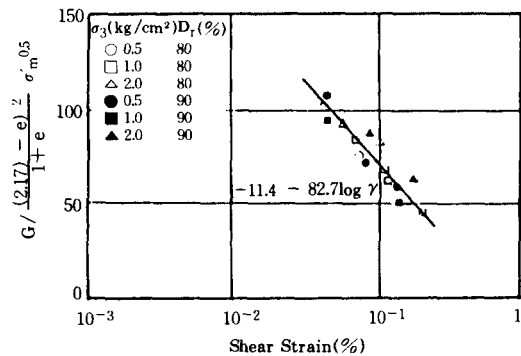
$$C = -11.4 - 82.7 \log \gamma \quad (4)$$

일반적으로 사질토의 경우 전단탄성계수는 전단변형률 10<sup>-4</sup>%에서의 정의된 최대 전단탄성계수의 함수로 나타내고 있다. 그러나, 본 시험결과 전단변형률 10<sup>-4</sup>%을 얻기가 불가능하므로 전단변형률 10<sup>-2</sup>%를 기준으로 최대 전단탄성계수를 정의하고 화강토 B와 C에 대한 전단탄성계수값을 간극비 및 유효평균응력에 따라 정량화 하였다. 실험에서 얻어진 화강토 B와 C에 대하여 전단변형률 10<sup>-2</sup>% 때의 최대 전단탄성계수값을 정의하면 식 (5)와 같다.

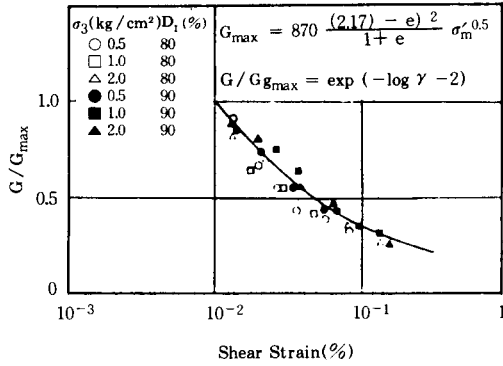
$$G_{\max}(\text{at } \gamma = 10^{-2}\%) = 870 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5} \text{ (in kg/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

그림 5(b)에 화강토 B와 C에 대한 전단탄성계수비  $G/G_{\max}$ 를 나타낸 것이며 이를 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$G/G_{\max} = \exp(-\log \gamma - 2) \quad (6)$$



(a) 화강풍화토 A



(b) 화강풍화토 B와 C

그림 5. 전단변형률에 따른 화강풍화토의 전단탄성계수

또 다른 모래의 전단탄성계수를 나타내는 식이 Seed와 Idriss에 의해서 다음과 같이 정의되었다.

$$G = 1000 K_2 (\sigma'_m)^{0.5} \quad (\text{in psf}) \quad (7)$$

$$= 22.1 K_2 (\sigma'_m)^{0.5} \quad (\text{in kg/cm}^2),$$

여기서  $K_2$ 는 상수로써 strain amplitude 및 간극비 (또는 상대밀도)에 영향을 받으며  $\sigma'_m$ 은 유효 평균응력이다. 그림 6은 화강풍화토의 전단상수  $K_2$ 를 나타낸 것으로 화강풍화토 A는 상대밀도에 따라  $K_2$ 의 변화가 적으며 화강풍화토 B와 C는  $K_2$ 의 변화가 상당히 크다. Seed와 Idriss에 의하여 표시된 일반적인 모래의 전단상수와 비교하면 화강풍화토 B, C는 전단변형률에 따른 변화가 더 크게 나타나고 있다. 대단히 조밀한 화강풍토화와의 현장 cross hole test 결과에서  $G_{max}$  ( $\gamma = 10^{-4}\%$ 에서)는  $4670\text{kg/cm}^2$  (깊이 5m-14m)를 얻었다.<sup>(1)</sup> 만일 5m-14m의 깊이에서  $\sigma'_m$ 을  $2.0\text{kg/cm}^2$ 로 가정하면  $K_2$ 는 식 (7)으로 부터 149가 된다. 또한 Seed 등<sup>(10)</sup>에 의해 행해진 현장 실험 결과 모래섞인 자갈의 경우  $K_{max}$ 는 122와 188 사이의 값을 가지고 있다. 따라서 그림 6는 잘 다져진 화강풍화토의 전단탄성계수의 범위를 잘 나타내어 주고 있다.

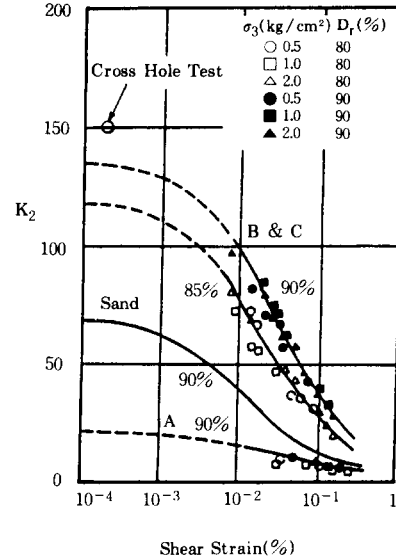
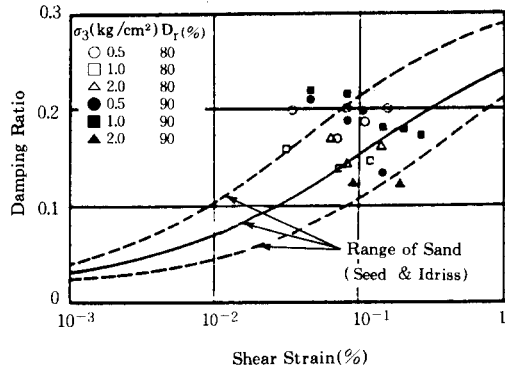


그림 6. 전단변형률에 따른 전단상수  $K_2$ 의 변화

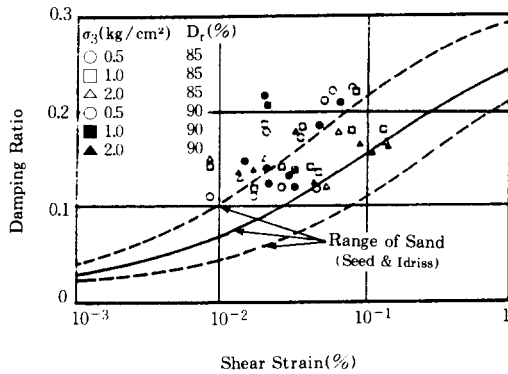
그림 7은 화강풍화토의 감쇠계수(damping ratio)를 나타내고 있다. 화강토 A는 감쇠계수가 12%와 21.5% 사이에 분포하고 있으며 평균값은 16.1%이다. 화강토 B와 C는 화강토 A에 비해 분포의 정도가 작으며 10%와 15% 사이의 감쇠계수를 가지고 있으며 평균값은 12.7%이다. 일반적으로 감쇠계수 역시 전단변형률의 함수로 나타내고 있으나 본 시험결과인 그림 7에 따르면 감쇠계수를 구체적인 전단변형률의 함수로 나타내기는 어렵지만, 전체적인 감쇠계수 값은 대체적으로 전단변형률이 클수록 계수가 큰 경향을 보이고 있다. Seed와 Idriss에 의하여 정리된 모래의 감쇠계수와 비교하면 화강풍화토의 감쇠계수는 넓게 분포되어 있지만 화강토 B와 C의 경우 모래의 윗쪽 경계에 놓여 있음을 알 수 있다.

### 3. 화강풍화토의 잔류침하에 대한 예측

진동하중을 받는 기초의 잔류침하에 대해서는 그 예측방법이 일반화되어 있지는 않지만



(a) 화강풍화토 A



(b) 화강풍화토 B 와 C

그림 7. 전달변형률에 따른 감쇠계수의 변화

진동시험을 통하여 알 수 있다. 그림 8은 진동하중을 받는 기초의 침하에 대한 현상을 나타낸 것이다. 기초 지반의 침하에 대한 결정인자로서 여러 결정인자를 종합적으로 포함하고 있는 전달에너지(transmitted energy)가 있다. 이 전달에너지,  $E_{TR}$ 는 기초구조물과 지반의 특성을 나타내는 인자로서 다음식 (8)과 같이 간단히 쓸 수 있다.(4)

$$E_{TR} = W A_z \quad (8)$$

여기서  $W$ 는 기초의 무게이며,  $A_z$ 는 지반의 침하에 대한 진폭이다.

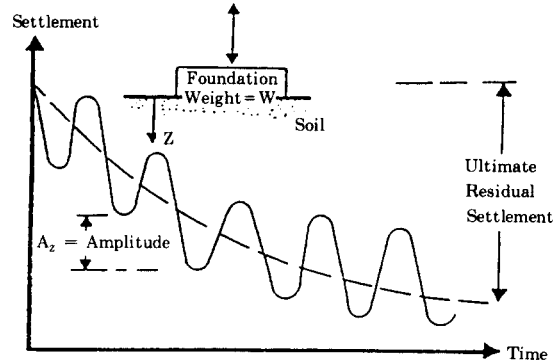


그림 8. 시간에 따른 잔류침하량

본 시험에서는 구속응력 즉 축압을 전단계수 측정 시험과 같이 0.5, 1.0과 2.0kg/cm<sup>2</sup>으로 변화시키면서 각각의 경우에 따른 동적축차응력(dynamic deviatoric stress)의 변화에 따른 잔류 침하량(residual settlement)을 측정하였다. 시료는 전단계수에서 사용한 B시료를 택하였고 그에 따른 토성 및 시험시 함수비는 표 2와 같다. 낮은 가속 조건을 만족시키기 위해 진동수를 2Hz로 하였으며 모든 시료의 침하특성을 균일화하기 위하여 시험시간 즉 시료의 동적하중(dynamic stress)을 가해주는 시간을 30분으로 정하였다.

그림 9는 전달에너지 잔류침하율의 관계를 각 구속압에 대하여 나타내고 있다. 잔류침하량을 시료의 길이로 나눈 잔류침하율은 거의 10<sup>-3</sup>~3 × 10<sup>-2</sup>% 사이에 분포하고 있으며 이는 매우 조밀하게 다져진 ( $D_r > 80\%$ ) 화강풍화토에서는 진동에 의한 잔류침하가 거의 일어나지 않음을 보여주고 있다.

그림 10은 축차응력을 구속응력으로 정량화시킨 것으로써 동적축차응력에 대한 구속응력의 비, 즉  $\sigma_d/\sigma_3$ 와 잔류침하율의 관계를 나타낸 그림이다. 다시 말해서 지중응력과 진동기계기초의 입출력거동에 따라 계산되어진  $\sigma_d$ 와  $\sigma_3$ 를 안다면 그림 10에 의해 잔류침하량을 구할 수 있다. 따라서 이로부터 두요소에 의해 일

반화 되어진 진동 반복 하중을 받는 대상 지반의 침하를 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

국내에 가장 많이 산재되어 있는 화강풍화토는 풍화정도 및 조성광물에 따라 여러 입도로 구성되어 있다. 본 연구에서는 입도가 다른 두 종류의 화강풍화토에 진동 삼축압축시험을 실시하여 토질의 동역학계수인 전단탄성계수와 감쇠계수를 구하여 기존의 모래 및 자갈섞인 모래 지반의 실험결과와 비교하였다. 이러한 동역학적 계수는 화강풍화토에 기초를 둔 진동 기계기초의 설계와 토질 및 구조물 상호작용 해석에 기본이 되는 계수이다. 또한 진동반복 하중을 받는 지반의 잔류 변형률에 대한 일반적인 형태를 알아보기 위해 진동시험을 행하여, 화강풍화토의 진동반복하중에 의한 기초지반의 침하형태를 여러 영향인자들과의 상관관계를 통하여 정립하였다. 본 시험에 사용된 시료는 공히 80% 이상의 높은 상대밀도로 다져진 것을 사용하였다. 화강풍화토의 전단계수는 토립자의 입도에 따라 상당한 차이를 보이고 있다. 즉 0.06mm 이하의 세립자 성분이 전체의 20% 되는 화강풍화토(SP)의 경우 상당히 작은 전단계수 값을 보이고, 상대밀도에 따른 전단계수의 변화도 매우 적다. 반면에 굵은 모래가 주성분인 화강풍화토(SP)의 경우는 Seed와 Idriss에 의하여 정리된 모래의 전단계수보다 훨씬 크고, 시료의 상대밀도 및 전단변형률에 따른 전단계수의 변화도 매우 크다. 화강풍화토의 감쇠계수는 본 시험결과에 의하여 모래 성분이 많은 화강풍화토가 세립자성분이 많은 화강풍화토에 비하여 약간 적으나 일반적인 모래보다 약간 큰 감쇠계수를 가지고 있다. 상대밀도가 80%이상으로 다져진 화강풍화토의 잔류변형률은 0.03% 이하로서 잔류침하가 거의 일어나지 않음을 알 수 있었다.

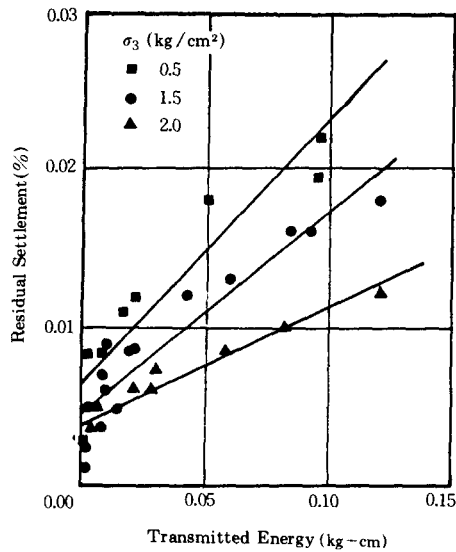


그림 9. 전달에너지에 따른 잔류침하율의 변화 (화강풍화토 B)

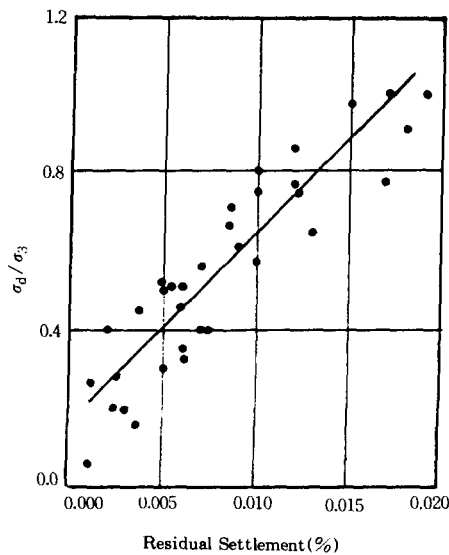


그림 10  $\lambda$ 값 ( $\sigma_d/\sigma_3$ )에 따른 잔류침하율의 변화 (화강풍화토 B)

#### 감사의 글

본 연구는 KOPEC의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 귀사에 감사를 드립니다. 또한 연구에



지원을 아끼지 않으신 김상환박사, 구기욱과장님, KEPCO의 이종립선임연구원 그리고 시험기를 사용할 수 있도록 배려해 준 건설연구소에게 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 한국전력공사, 기술연구원, (1989), "동역학적 지반 특정치의 평가 및 응용에 관한 연구"
2. Arya, S. C., O'Neill, Michael, W., and Pincus, G.(1979), "Design of Structures and Foundation for Vibrating Machinery", Gulf Publishing Company
3. D'Appolonia, E. (1970), "Dynamic Loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, SM1, pp. 47-72.
4. Das, B. M. (1983), "Fundamentals of Soil Dynamics," Elsevier Science Publishing Co., Inc.
5. Hara, A., Niwa, M., and Banno, T., (1973), "Dynamic Properties of Saturated Cohesive Soils," Annual Report, Vol. 22, Kajima Institute of Construction Tech.
6. Moore, P. J. (1985), "Analysis and Design of Foundation for Vibrations," A. A. Balkema.
7. Ohsaki, Y., and Iwasaki, R. (1973), "On Dynamic Shear Moduli and Poissons Ratio of Soil Deposits," Soils and Foundations, Vol. 13, No.4, pp. 62-73.
8. Seed, H. B., and Idriss, I. M.(1970), "Shear Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis," Earthquake Eng. Res. Con., Univ. of Cal. Berkeley, Cal., Rep. No. EERC.
9. Seed, H. B., and Lee, K. L. (1966), "Liquefaction of Saturated Sand during Cyclic Loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, SM6. pp. 105-134
10. Seed, H. B., and Wrong R. T. (1986), "Moduli and Daming Factor Analysis of Cohesionless Soils," Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 11, November, pp. 1016-1032
11. Prakash, S. (1981), "Soil Dynamics", McGraw-Hill Book Co.

(접수일자 1992. 5. 15)